

目 次

巻 頭 言

スポーツ医科学研究のジレンマ

名古屋大学大学院 生命農学研究科 教授 下 村 吉 治 (1)

第 37 回委託研究報告

Macrophage Migration Inhibitory Factor による骨格筋の糖代謝調節

Macrophage Migration Inhibitory Factor Regulates

Glucose Metabolism in Skeletal Muscle

首都大学東京 藤 井 宣 晴 (3)

着圧利用のアパレル開発

—弾性靴下のユニバーサル仕様を視野に入れて—

Development of High-Pressure Apparel from The Viewpoint of

The Universal Specifications for Leg Compression Stockings

京都女子大学 諸 岡 晴 美 (10)

長時間運動時におけるコンプレッションタイツの着用が筋疲労や筋損傷・炎症反応に及ぼす影響

Influence of Wearing Compression Tights During Prolonged

Exercise on Muscle Fatigue, Muscle Damage and Inflammatory Responses

立命館大学 後 藤 一 成 (18)

電磁ゴニオメータによる肩甲骨から体幹の三次元動作解析：健常者とパラカヌー選手の比較

Three Dimensional Motion Analysis of Upper Limb and

Trunk With an Electromagnetic Tracking Device:

Comparison of a Healthy Canoe Athlete and a Para Canoe Athlete

広島大学病院 木 村 浩 彰 (27)

障害者スポーツの病態解析と機器の開発の研究

～バイオメカニクス研究を中心に～

Pathological Analysis of Adaptive Sports and Study of Device Development  
-Focused on Biomechanics-

宮崎大学 帖佐悦男 (35)

車いすスポーツアスリートの肘障害実態調査による車いすスポーツ肘障害の予防に関する研究

The Actual Condition Survey for the Prevention of Elbow  
Injury in Wheelchair Marathon Athletes (first report)

和歌山県立医科大学 中村 健 (43)

### 第 37 回助成研究報告

体温、発汗を計測可能な機能性繊維の研究

A Study of Body Temperature and Sweat Measureable Functional Fiber

東京大学大学院 竹井 裕介 (49)

超音波剪断波イメージング法によるマラソン後の筋損傷部位および程度の定量

～適切なトレーニングおよびリカバリープログラムの作成に向けて～

Evaluation of Region and Extent of Muscle Damage after Marathon  
Running by Using Ultrasound Shear-Wave Elastograph

鹿屋体育大学 平田 浩祐 (58)

運動実施のタイミングの違いが1日の血糖変動に与える影響

1日を通して行う細切れ運動は、24時間血糖コントロールに有効か？

～24時間の持続血糖モニタリングによる検証～

The Effect of Different Exercise Timing on Lowering Postprandial Glucose Elevation  
- Is Interrupting Exercise Throughout the Day Effectiveness in Glycemic Control ? -

福岡大学 畑本 陽一 (66)

水による体性感覚への刺激が立位バランス調節機能に与える効果

～水中運動の神経生理学的効果の検証～

Effect of Water Immersion of Fingertip Somatic Sensation on Quiet Bipedal Stance:  
A Basic Study for Neurophysiological Effect of Water Exercise

神戸大学大学院 木村 哲也 (74)

暑熱環境下における聴覚情報処理および高次認知機能の評価

Auditory and Cognitive Functions during Heat Stress

奈良女子大学 芝崎 学 (82)

サルコペニアの簡易評価法としての椅子片脚立ち上がりテストの妥当性検証研究

One-Leg Stand Up Test as a Simple Assessment Tool for Predicting Sarcopenia

早稲田大学 川上 諒子 (92)

肥満小児において筋肉脂肪はメタボリックシンドロームの危険因子となり得るか？

Is Intramuscular Adipose Tissue A Risk Factor of  
Metabolic Syndrome in Obese Children?

名古屋大学 秋間 広 (99)

呼吸筋トレーニングが運動パフォーマンスを向上させるメカニズムの解明

～近赤外線分光法を用いた検証～

Mechanism Underlying Performance Improvement Through Respiratory  
Muscle Training: A Near-infrared Spectroscopy-based Study

順天堂大学 北田 友治 (107)

脳活動の自己制御による運動学習の強化

ーリアルタイム機能的MRI・脳波同時計測ニューロフィードバック (NF) を用いてー

Motor Learning Enhancement by Self-control of Brain Activity  
ー Simultaneous Real-time Functional MRI/EEG Neurofeedback ー

米国立神経疾患 脳卒中研究所, 群馬大学大学院 設楽 仁 (115)

体脂肪燃焼効果を増強する衣服の開発

Development of Clothes to Promote a Body Fat Burning Effect

信州大学 三野 たまき (123)

運動による認知機能の向上は運動様式によって異なるのか？

Are Effects of Acute Exercise on Cognitive Function Different between  
Aerobic and Resistance Training?

電気通信大学 安藤 創一 (130)

なぜ多関節トレーニングは二関節筋を肥大させないのか：筋活動レベルの変化様相の観点からの検討

Possible Factors Related to Lack of Hypertrophy of the Biarticular  
Muscles Induced by Multi-joint Training:

Its Relation to Changes in Muscle Activation During the Training

芝浦工業大学 江間 諒一 (138)

電気化学センサーを用いた簡易型皮膚ガス分析装置による運動時の皮膚ガス中アセトン濃度分析の試み

Changes In Skin-Gas Acetone Concentrations Following Exercise by  
Portable Skin-Gas Acetone Analyzer Using Electrochemical Sensors

名古屋工業大学大学院 伊藤 宏 (147)

高強度のウォームアップ運動が活動筋の酸素動態に及ぼす影響

Effects of High-Intensity Warm-Up Exercise on Balance for  
Oxygen Delivery and Utilization in Exercising Muscles

神戸芸術工科大学大学院 古賀俊策 (154)

運動による脂肪組織の恒常性維持に対するオートファジーの役割

Exercise Training Regulates Adipose Tissue Homeostasis by Autophagy

名古屋市立大学大学院 奥津光晴 (161)

カーボンマイクロコイルを利用した圧迫型アンダーウェアの着用が  
腰部筋群の痛み、柔軟性、筋力に及ぼす影響

Effects of Wearing Compression Undershirts with Carbon Microcoils on Muscle Pain,  
Stiffness, Flexibility, and Strength in Lumbar Region

中部大学 堀田典生 (171)

長距離走時の効果的接地スタイルは筋と腱の力学的特性と関連する？

—ケニア選手を含むトップアスリートから一般ランナーまでを含む検討—

Is Effective Strike Pattern in Distance Running  
Related to Mechanical Properties of Muscle Tendon Systems?

-Wide Range Observation in Athletes from World Top Class to Recreational Runners -  
兵庫教育大学 小田俊明 (179)

水分補給を伴う運動負荷後の含嗽が口腔内環境に及ぼす影響

Effects of Gargling after Exercise Accompanied by  
Rehydration on Intraoral Environment

東京医科歯科大学大学院 高橋敏幸 (188)

電気刺激を用いた新しい筋力トレーニング

Novel Strength Training Using Electrical Stimulation

トロントリハビリテーション病院 政二 慶 (197)

暑熱環境下の運動時における塩味閾値の変化を指標とした熱中症予防のための基礎的・実践的研究

The Study on the Prevention of Heat Disorders Using the Salty  
Taste Sensitivity During Exercise in the Heat Environment

奈良教育大学 高木祐介 (205)

骨格筋萎縮過程における代謝物質の網羅解析および代謝特性の解明

Metabolome Analysis of Muscle Atrophy

東北大学 北嶋康雄 (213)

講 評

学術委員 西 村 太 良 (222)

学術委員 田 畑 泉 (225)

学術委員 田 島 文 博 (228)

財団ニュース

事業内容 . . . . . (231)

役員名簿 . . . . . (232)

活動報告 . . . . . (235)



## スポーツ医科学研究のジレンマ

名古屋大学大学院 生命農学研究科 教授

下 村 吉 治

昨年のラグビーワールドカップ(2015年9月～10月, イギリス)における日本代表チームの活躍が, 日本国民を大いに沸かせたことは記憶に新しい. この大会をテレビ観戦していて感じたことは, 昔と異なり日本人の体格・体力は欧米に引けを取らないほど立派になってきたことである. パワーが圧倒的にものを言うラグビーの世界で, 現在の日本人の選手にすばらしいヘッドコーチ, メンタルコーチ, 栄養サポートなどがつけば, 日本も華々しい戦績をおさめることができることが見事に証明されたからである.

日本では, 2020年の東京オリンピックを控え, 昨年にはスポーツ庁を文部科学省内に新設し, 国を挙げてスポーツを振興し, 国民の体力増強を図っている. この国の政策と関連した社会現象として, 文部科学省が毎年報告している体力・運動能力調査によれば ([http://www.mext.go.jp/b\\_menu/toukei/chousa04/tairyoku/kekka/1261311.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/chousa04/tairyoku/kekka/1261311.htm)), 中高齢者の体力は年々増強しているようである. これは超高齢社会になった日本では当然のことであり, 現在と50年前の60歳の人を比べれば, 現在の人の方が明らかに若作りであり活力に満ちている. これは超高齢社会になった結果と言えよう.

一方, 青少年の体力を見ると, 逆に現代の子供の方が昔の子供よりも劣っていることが分かる. 子供たちの体力はここ20年ほど低下傾向にあるようである. したがって, 子供たちの体力を向上することが現在のスポーツ庁の重要な課題であろう.

このような背景の現代において, スポーツ医科学研究はどのように展開すべきであろうか. スポーツ医科学の分野は極めて多義に渡っており, 運動と関連する生理学, 解剖学, 生化学, 分子生物学, 栄養学, および臨床系の分野等を含んでいる. 一般的な生物・医学系の生化学や分子生物学の分野では, 遺伝子操作により特殊な実験動物(主にマウス)を作製して, 体内の特定分子の機能を検証する方法が多く用いられている. このタイプの実験では, データは見事なものでありその分子の生理機能を明確に証明できることが多い. 当然これらの研究はインパクト・ファクターの高いビッグジャーナルに掲載されることが珍しくない. これらの研究では, かなり高額の研究費が少なくとも数年に渡って費やされた結果としてその成果を得ることができるのが一般的である.

これに対して, スポーツ医科学および体力科学における研究費は比較的低額である場合が多く, 得られる結果の多くは正常動物またはヒトの *in vivo* 研究であるために明確な結論を得られないことが多い. 当然のことながら, その研究がビッグジャーナルに掲載されることはない. もし, 運動効果を

取り扱った研究がビッグジャーナルに掲載されている場合には、運動の専門家がその研究を中心に推進したのではなく、生物・医学系の専門家が運動を取り入れて研究を遂行している場合が多い。この現象はスポーツ医科学研究のジレンマと言えるだろう。

しかしながら、スポーツ医科学および体力科学の研究者が遂行する研究では、このような背景はあるものの、そこで得られる結果は直接スポーツの世界に反映できる所見が少なくなく、この積み重ねこそがスポーツ選手の競技力のレベルアップ、強いては国民の体力向上に寄与するはずである。肝心なことは、スポーツ医科学の研究者が、基礎科学の知識に裏打ちされたしっかりした実験系を組み、再現性のある確実なデータを出して行くことが重要である。このようなデータは、どの分野に公表しても通用するはずであり、科学的価値の高い研究結果と言えよう。

石本記念デサントスポーツ科学振興財団では、2016年で38回を迎える学術研究助成・学術研究委託およびスポーツ関連団体への助成の事業を実施して頂いている。この間、財団はその活動の公益性が認定され、2011年に公益財団法人へ移行された。この財団の活動を報告するために、財団の機関誌である本誌「デサントスポーツ科学」が古く1981年に創刊され、今回で第37巻を迎えた。この財団の研究助成の方針は、「いわゆる高度にアカデミックなものというより、現実に役立たせ得る研究に焦点を置き、また明らかな疾病に対する運動療法的なものよりも、健康者もしくは半健康者の積極的な健康増進を意図するものを優先する」というものであり、スポーツ医科学の現状に極めて合致する方針を財団では古くから打ち立てられており、スポーツ医科学の将来を見据えたその先見性に感服する。この財団の研究助成は、スポーツ医科学を含むスポーツ関連分野への極めて大きな貢献であり、改めて敬意を表したい。研究助成された研究者は、この背景を十分に理解した上で研究に従事され、スポーツ（医）科学の進展に貢献して頂きたい。

# Macrophage Migration Inhibitory Factor による 骨格筋の糖代謝調節

首都大学東京 藤井 宣晴  
(共同研究者) 同 眞鍋 康子  
同 古市 泰郎

## Macrophage Migration Inhibitory Factor Regulates Glucose Metabolism in Skeletal Muscle

by

Nobuharu L Fujii, Yasuko Manabe, Yasuro Furuichi  
*Department of Health Promotion Sciences,  
Graduate School of Human Health Sciences, Tokyo Metropolitan University*

### ABSTRACT

We have found that macrophage migration inhibitory factor (MIF) is secreted from C2C12 myotubes into culture media. In order to evaluate roles of MIF on glucose metabolism in skeletal muscle, extensor digitorum longus and soleus muscles were isolated from mice and treated with recombinant MIF in in vitro muscle incubation system. MIF itself did not affect to glucose transport in both type of muscles. However, glucose transport induced by half-max dose of insulin was diminished by co-existence of MIF in the buffer of soleus muscle incubation. These results suggest that MIF is a negative regulator of insulin-induced glucose transport in skeletal muscle. These results show that MIF is a novel myokine contributing to glucose metabolism and can be a new target molecule for prevention and treatment of diabetes.

## 要 旨

本研究では、Macrophage Migration Inhibitory Factor (MIF) は骨格筋から分泌される新たなマイオカインで、骨格筋自身に作用して、インスリンによって誘発される糖の取り込みを抑制することを明らかにした。MIF は分子量が約 12kDa の低分子で、これまでは骨格筋に発現することは知られていなかったが、マウスの異なる種類の下肢骨格筋に発現することをウェスタンブロッティング法で確認した。つぎに、*in vivo* エレクトロポレーション法で、マウス下肢骨格筋にタグを付した MIF を発現させたところ、血液中にそれが検出され、骨格筋から分泌されることが示された。MIF は単独では骨格筋の糖輸送に影響を与えなかったが、インスリン刺激で生じる糖輸送を抑制した。これらの結果は、MIF が骨格筋の糖代謝調節に関わるマイオカインの 1 つであることを示すとともに、糖尿病の予防・治療の新たな標的分子となる可能性を示唆する。

## 緒 言

我々はこれまでに、骨格筋から分泌される新規ホルモン様タンパク質（総称してマイオカイン、*myo* = 筋、*kine* = 作動物質）の探索を行ってきた<sup>1, 2)</sup>。その過程で、マウス骨格筋細胞から培養液中に Macrophage Migration Inhibitory Factor (MIF) が浸出する可能性を、質量分析によって突き止めた。MIF は本来、マクロファージの遊走を止めるサイトカインとして、T 細胞で発見された因子である。したがって、生体防御機能を多様に（免疫・炎症・解毒など）調節する T 細胞由来因子 MIF が、骨格筋からも分泌されることを示した結果であった。そもそもこれまでは、骨格筋はホルモン様タンパク質等を分泌する臓器とはみなされてこなかった。しかし我々の所見は、骨格筋が内分泌器官である可能性を示す。2008 年に Miller ら

は、MIF は心臓から分泌されて自己分泌的に心臓自身に作用し、AMP キナーゼを介して心臓保護作用を発揮することを報告している<sup>3)</sup>。骨格筋では AMP キナーゼの発現量が比較的多く、糖輸送促進調節を含んだ多彩な生理機能を担っている<sup>4)</sup>。したがって、マイオカインとしての MIF は、やはりオートクライン的に骨格筋自身に作用し何らかの生理機能を調節している可能性が考えられる。そこで本研究では、骨格筋が内分泌器官として担う未知の機能の証明に挑戦した。具体的には、(1) MIF が骨格筋から分泌されるマイオカインかどうかを検証する、(2) MIF が糖代謝調節に関連する新規因子であるかどうかを検証する、の 2 つの課題に取り組んだ。

## 1. 研究方法

### 1.1 細胞培養および培養液の回収

マウス由来筋芽細胞株 C2C12 (ATCC) を、10% ウシ胎児血清と 1% Antibiotic Antimycotic (Invitrogen) を添加した DMEM 増殖培地 (Invitrogen) 3ml の入った 4well デイッシュ (Nunc) に播種し、5% CO<sub>2</sub>・37℃ でインキュベーションした。デイッシュには細胞がよく接着・分化するように BD matrigel<sup>TM</sup> マトリックス (BD Biosciences) のコートを施した。播種から 2 - 3 日後、細胞がコンフルエントになった時点で、2% 仔ウシ血清 (Invitrogen)、1% Antibiotic-Antimycotic、1% MEM 非必須アミノ酸 (Sigma) を添加した DMEM (分化培地) に培地を交換し、分化を誘導した。分化培地は毎日交換した。MIF の分泌は *microvesicle* と呼ばれる微小胞に含有された状態で行われると考えられることから、それを上清に残存させるために以下の分画を行った。細胞を培養した液を 1,000g で 5min 遠心し、一旦液を回収してからさらに 15,000g で 15min 遠心した。回収した培養液中のタンパク濃度を、後のウェスタンブロッティング用に最適な濃度にするた

めに、5kDa以上のタンパク質を透過しないフィルター Vivaspin20 (Sartorius stedim biotech) を使用し濃縮した。濃縮液の回収時にはピペットを用いて液量を測定した。

### 1. 2 マウス下肢への MIF の強制発現

HA タグで標識した MIF の cDNA を pCAGGS 発現ベクターに組み込み込んだ。これを麻酔下のマウス前頸骨筋および腓腹筋に、*in vivo* エレクトロポレーション法<sup>5)</sup>を用いて強制発現させた。4日後に再びマウスに麻酔して、腹膜を切開し、心臓から直接血液を採取した。血液は30分以上氷上に静置し、3,000gで10min遠心して、上清の血清を回収した。血液採取後、マウスの両脚の前脛骨筋および腓腹筋を回収し、lysis bufferを加えてホモジェナイズした。その後、チューブを遠心し、上清の可溶化液を回収した。全ての動物実験および遺伝子組み換え実験は首都大学東京研究倫理委員会の審査を受け承認されたうえで行った。

### 1. 3 MIF による骨格筋培養細胞の刺激

分化5日目のC2C12細胞に培養液1mlあたりそれぞれ0, 10, 100, 1000ng/mlになるようにPBSで希釈したりコンビナント MIF (R&D Systems) を全量が300 $\mu$ lになるように添加して5% CO<sub>2</sub>・37℃で2時間インキュベーションした後、Dish 1レーンごとにlysis bufferによって細胞を回収した。

### 1. 4 ウェスタンブロッティング

濃縮液中のMIFをウェスタンブロッティングで定量した。回収した上清濃縮液を同液量16% Tris-Tricine ポリアクリルアミドゲルにロードし、電気泳動した。泳動したタンパク質はPVDF膜に転写し、ブロッキング液(5%スキムミルクを添加したTBST)を用いて室温で1時間ブロッキングした。その後、ヤギ由来マウスMIF一次抗体(R&D Systems)、ウサギ由来HA-タグ一次抗体

(Clontech)、ウサギ由来マウスリン酸化Akt一次抗体(Thr308, Cell Signaling)、あるいはウサギ由来マウスリン酸化c-Jun一次抗体(Cell Signaling)を1000倍希釈して4℃で8時間インキュベーションした。二次抗体にはHorseradish Peroxidase (HP)を結合させたヤギIgG抗体(Millipore)を用い、1,000倍希釈して常温で1時間インキュベーションした。その後、Enhanced chemiluminescence (ECL) (PerkinElmer)を反応させ、暗室でフィルムにタンパク質のバンドを現像した。

### 1. 5 骨格筋組織への糖取込み量の測定

マウス下肢のヒラメ筋を摘出し、試験管内の培養液に酸素供給下で浸した。20分間の安定化後に一度培養液を新たなものに交換したうえで、無刺激、MIF刺激、インスリン刺激、あるいはMIF+インスリン刺激の4条件を設定しそれぞれ20時間インキュベーションした。その後の10分間のインキュベーションにより、ヒラメ筋への糖取込みを測定した<sup>6)</sup>。

## 2. 研究結果

代表的な培養骨格筋細胞であるC2C12細胞を筋管に分化させて培養したところ、培養時間に依存して、培養液のMIF含有量が増加することがウェスタンプロットの結果によって明らかになった(図1)。この結果は、骨格筋細胞からMIFが分泌されていることを示す。

そこで、実際に生体内でも同様に骨格筋からMIFが分泌されているかを明らかにするために、*in vivo* エレクトロポレーション法を用いてMIFをマウスの前頸骨筋および腓腹筋に強制発現させた。この方法では、外来性の遺伝子を骨格筋に高率で取り込ませ、数日内でタンパク質を発現させることができる<sup>5)</sup>。MIFはT細胞などからも分泌されることから、血液中に骨格筋由来のMIF

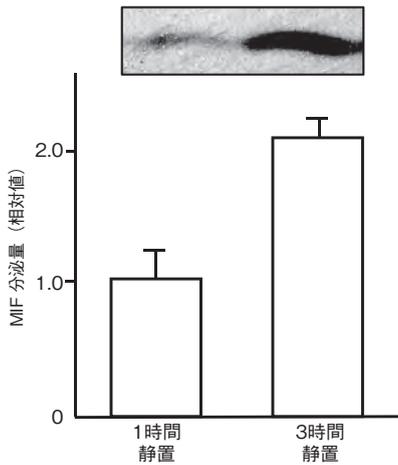
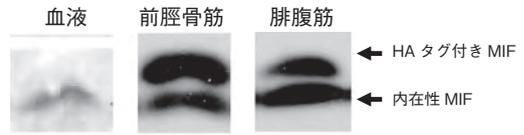


図1 C2C12細胞から培養液中に分泌されたMIF

が分泌されるかを見分けるために、HA タグで標識した MIF を発現させた。MIF 抗体を用いてタンパク質の発現状態を確認したところ (図 2)、前頸骨筋でも腓腹筋でも、HA タグ標識された MIF (図 2A の上のバンド) が内在性の MIF (図 2A の下のバンド) と同程度に発現していることが確認された。しかし血液中には内在性の MIF のみが検出され、HA タグ付加のためにやや上方にシフトしている MIF は検出できなかった (図 2A)。MIF 抗体よりも感度の高い HA 抗体でウェスタンブロッティングを行うと、HA タグ標識された MIF が血液でも確かに検出された (図 2B)。

A. MIF 抗体の結果



B. HA タグ抗体の結果

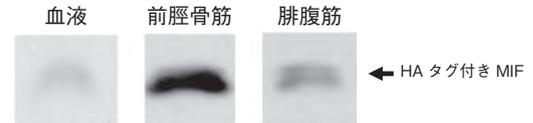


図2 内在性MIFとHA タグを付けたMIFの発現量の比較

この事は、骨格筋からは血液に MIF が分泌されてはいるが、血液中に占める大部分の MIF の由来は骨格筋以外であることを示唆している。したがって、骨格筋から分泌される MIF は、内分泌的に遠隔の臓器を標的に作用しているのではなく、自己・傍分泌的に骨格筋細胞自身かその近傍の組織に作用している可能性が示唆される。

そこで、MIF によって骨格筋の細胞内情報伝達に変化し得るかどうかを、その活性化レベルの指標となるタンパク質のリン酸化を指標にして、主な細胞内分子を精査した。その結果、MIF の添加によって Akt のリン酸化は抑制され (図 3A)、c-Jun のリン酸化は促進された (図 3B)。いずれ

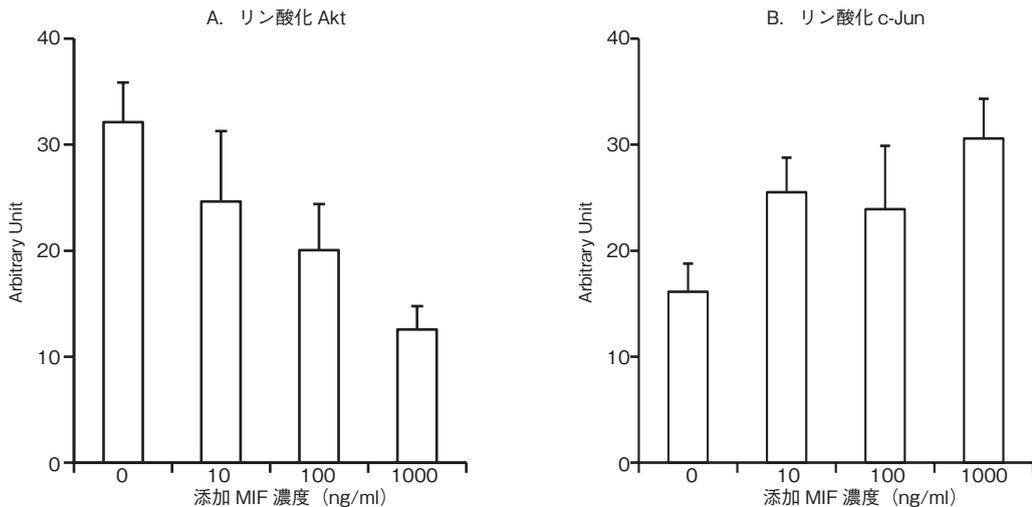


図3 MIF 刺激による C2C12 細胞の情報伝達物質の活性変化

のタンパク質もリン酸化されることで活性が上昇することから、MIFは前者を含む経路を抑制し、後者を含む経路を促進することが明らかとなった。

骨格筋は血糖値の調節に主要な臓器で、糖の約7割を使用する<sup>7)</sup>。Aktは、細胞内情報伝達経路のインスリン受容体の下流で糖取り込みを調節する鍵となる分子である。図3に示された結果は、MIFがインスリン刺激によって惹起される骨格筋の糖取り込みを抑制する可能性を示唆している。そこで我々が開発した*in vitro*糖取り込み測定法を用いて<sup>6)</sup>、マウス・ヒラメ筋への効果を検証した。その結果、MIFは単独では糖の取り込みに影響を与えないが、インスリンによって促進した糖取り込みを抑制することが明らかになった(図4)。

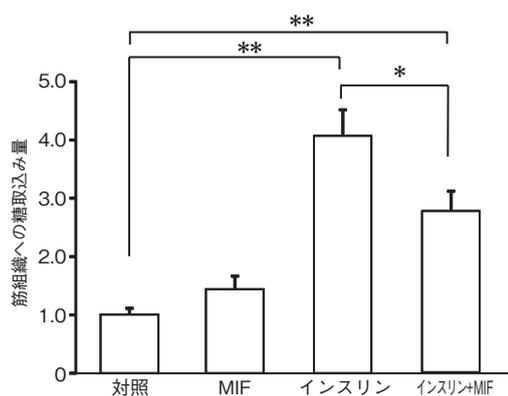


図4 骨格筋に及ぼすMIFの影響  
\* p < 0.05, \*\* p < 0.01

### 3. 考察

本研究における主な新規発見は以下の4つである。(1) MIFは骨格筋から分泌される新たなマイオカインである。(2) 骨格筋から分泌されたMIFは循環血液中にも入るがその量は少なく、自己・傍分泌的な働きを持つ。(3) 実際にMIFは骨格筋自身に作用し、Aktのリン酸化を抑制し、c-Junのリン酸化を促進する。(4) MIFはインスリンによる糖取り込みを抑制する。これらの結果を

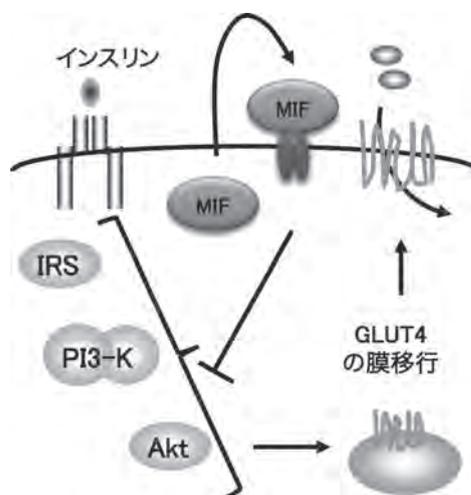


図5 骨格筋におけるMIFの新たな機能

まとめたのが図5である。すなわち、MIFはインスリンによって促進される糖の取り込みを抑制する因子であり、糖尿病の治療および薬の開発の新たな標的分子となる可能性を持つ。そもそもMIFに関してこれまで分かっている事は少なく(表1)、骨格筋における発現は知られていなかったし、もちろんそのマイオカインとしての機能も不明であった。本研究の成果はその一端を明らかにできたことである。

表1 これまでに知られていたMIFの情報

- MIFはT細胞から分泌されるサイトカインとして発見された
- 12 kDaの小さな分子
- ヒトの血中濃度は0.2-0.5 nmol/l.
- 骨格筋から分泌されることは知られていなかった

本研究の次の課題の1つは、AMPキナーゼを介した糖取り込み調節に対しても、MIFが作用を有するかどうかである。これに関してはプレリミナリーではあるが、一部示唆的な結果を得ている。筋収縮はインスリンと同様に、糖取り込みを促進させる強力な刺激であり、AMPキナーゼがその調節に関わっていると考えられている<sup>4)</sup>。MIFの遺伝子を削除したノックアウトマウスの骨格筋では、筋収縮によって生じる糖取り込みが、正常マウスのそれと比較して高い傾向を示す結果を得て

いる（データ未掲載）。これは、骨格筋が MIF を分泌しなくなったために抑制が解除され、糖の取り込みがより促進されたことを示唆している。このように、通常は骨格筋細胞の機能を抑制的に調節しているマイオカインとして、マイオスタチンが知られている。マイオスタチンは骨格筋の肥大を抑制する因子であるため、そのノックアウトマウスでは、著しい筋肥大が生じる。そのため、その受容体の抑制剤はカヘキシアやサルコペニアといった筋萎縮に伴う生理機能の低下を改善するための手法として注目を浴びている<sup>9)</sup>。したがって、MIF の糖取込み抑制効果を担っている受容体に関しても注目される場所である。残念ながら MIF の受容体については未だ不明な点が多いが、CD74 の 2 つのアイソフォーム（P31, P41）がその候補として推察されている<sup>10, 11)</sup>。今後の全容解明が待たれるところである。

MIF の分泌機構もまた今後明らかにされるのが待たれる。特に筋収縮が MIF 分泌のトリガーとなっているかどうかは興味の持たれるところである。単球において MIF は主に細胞膜上の ATP 結合カセットトランスポーター A1（ABCA1）を介して細胞外へ分泌されることが報告されている<sup>12)</sup>。また MIF は、細胞内ゴルジ装置関連タンパク質の p115 と結合し細胞外に分泌される可能性も推察されている。さらに単球やマクロファージで p115 を欠損させると MIF の分泌が減少するとの報告がある<sup>13)</sup>。したがって、骨格筋からの MIF 分泌と p115 および ABCA1 との関連についても今後検討する必要がある。

#### 4. 結 論

本研究では、MIF は骨格筋から分泌される新たなマイオカインであることを明らかにした。その機能は自己・傍分泌によって骨格筋を標的とし、インスリンによる糖取込みを抑制する。MIF の作用の抑制は、インスリン抵抗性を改善させる方

策の一つとして応用可能である。

#### 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成を賜りました石本記念デサントスポーツ科学振興財団に心から感謝いたします。

MIF に関する実験の多くを担当してくれた、当時大学院生であった宮武正太博士（現在、国立精神・神経医療研究センター神経研究所）に感謝いたします。また、MIF ノックアウトマウスを譲渡してくださった、北海道大学医学部の安田和則博士、および北海道情報大学医療情報学部の西平順博士に感謝いたします。

#### 文 献

- 1) Manabe Y., Takagi M., Nakamura-Yamada M., Goto-Inoue N., Taoka M., Isobe T., Fujii N.L., Redox proteins are constitutively secreted by skeletal muscle. *J. Physiol. Sci.*, **64** (6) :401-9 (2014)
- 2) Goto-Inoue N., Tamura K., Motai F., Ito M., Miyata K., Manabe Y., Fujii N.L., A fragmented form of annexin A1 is secreted from C2C12 myotubes by electric pulse-induced contraction., *Mol. Cell. Biochem.*, in press (2015)
- 3) Miller E.J., Li J., Leng L., McDonald C., Atsumi T., Bucala R., Young L.H., Macrophage migration inhibitory factor stimulates AMP-activated protein kinase in the ischaemic heart., *Nature.*, **451** (7178) :578-82 (2008)
- 4) Fujii N., Jessen N., Goodyear L.J., AMP-activated protein kinase and the regulation of glucose transport. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, **291** (5) :E867-77 (2006)
- 5) Fujii N., Boppart M.D., Dufresne S.D., Crowley P.F., Jozsi A.C., Sakamoto K., Yu H., Aschenbach W.G., Kim S., Miyazaki H., Rui L., White M.F., Hirshman M.F., Goodyear L.J., Overexpression or ablation of JNK in skeletal muscle has no effect on glycogen synthase activity. *Am J Physiol Cell Physiol.* **287** (1) :C200-8 (2004)
- 6) Fujii N., Hirshman M.F., Kane E.M., Ho R.C., Peter L.E., Seifert M.M., Goodyear L.J., AMP-activated protein kinase alpha2 activity is not essential for

- contraction- and hyperosmolarity-induced glucose transport in skeletal muscle. *J. Biol. Chem.*, **280**(47) :39033-41 (2005)
- 7) DeFronzo R.A., Lilly lecture 1987. The triumvirate: beta-cell, muscle, liver. A collusion responsible for NIDDM. *Diabetes.*, **37**(6) :667-87(1988)
  - 8) McPherron A.C., Lawler A.M., Lee S.J., Regulation of skeletal muscle mass in mice by a new TGF-beta superfamily member., *Nature.*, **387**(6628) :83-90 (1997)
  - 9) Zhou X., Wang J.L., Lu J., Song Y., Kwak K.S., Jiao Q., Rosenfeld R., Chen Q., Boone T., Simonet W.S., Lacey D.L., Goldberg A.L., Han H.Q., Reversal of cancer cachexia and muscle wasting by ActRIIB antagonism leads to prolonged survival., *Cell.*, **142**(4) :531-43(2010)
  - 10) Herrero L.J., Sheng K.C., Jian P., Taylor A., Her Z., Herring B.L., Chow A., Leo Y.S., Hickey M.J., Morand E.F., Ng L.F., Bucala R., Mahalingam S., Macrophage migration inhibitory factor receptor CD74 mediates alphavirus-induced arthritis and myositis in murine models of alphavirus infection., *Arthritis. Rheum.*, **65**(10) :2724-36(2013)
  - 11) Fan C., Rajasekaran D., Syed M.A., Leng L., Loria J.P., Bhandari V., Bucala R., Lolis E.J., MIF intersubunit disulfide mutant antagonist supports activation of CD74 by endogenous MIF trimer at physiologic concentrations. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.*, **110**(27) :10994-9(2013)
  - 12) Flieger O., Engling A., Bucala R., Lue H., Nickel W., Bernhagen J., Regulated secretion of macrophage migration inhibitory factor is mediated by a non-classical pathway involving an ABC transporter., *FEBS Lett.*, **551**(1-3) :78-86(2003)
  - 13) Merk M., Baugh J., Zierow S., Leng L., Pal U., Lee S.J., Ebert A.D., Mizue Y., Trent J.O., Mitchell R., Nickel W., Kavathas P.B., Bernhagen J., Bucala R., The Golgi-associated protein p115 mediates the secretion of macrophage migration inhibitory factor., *J. Immunol.*, **182**(11) :6896-906(2009)

# 着圧利用のアパレル開発 —弾性靴下のユニバーサル仕様を視野に入れて—

京都女子大学 諸岡晴美  
(共同研究者) 同 坂下理穂  
同 村崎夕緋

## Development of High-Pressure Apparel from The Viewpoint of The Universal Specifications for Leg Compression Stockings

by

Harumi Morooka, Riho Sakashita, Yuhi Murasaki  
*Kyoto Women's University*

### ABSTRACT

Leg compression stockings have been used to prevent deep vein thrombosis. On the other hand, they often decrease blood flow in the skin and increase the mental stress caused by high pressure. This study aimed to obtain fundamental data regarding universal specifications for elastic leg compression stockings. The effects of pressure applied on each part of the leg, i.e., foot, ankle, calf, and thigh; on the blood circulating system; and the autonomic nerve response were determined. The results obtained were as follows. In the sitting posture, the skin blood flow decreased with increase in the leg pressure, in accordance with the distal end of the limb. In the sitting and supine postures, the heart rate decreased greatly with increase in the pressure on the calf. This indicates that the venous return improved. When pressure was applied on the calf, the decrease in the LF/HF, that is the ratio of low frequency to high frequency of the R-R interval, was greater than that seen in the others. Therefore, we concluded that pressure on the calf is most effective in increasing venous return.

## 要 旨

本研究では、血栓予防靴下の欠点である強圧からくる皮膚血流阻害や圧ストレスを抑制するユニバーサル仕様の弾性靴下設計のための基礎的指針を得ることを目的とし、椅座位時および仰臥位時における脚各部の圧迫が血液循環系および自律神経系に及ぼす影響を検討した。その結果、椅座位では身体末梢を圧迫するほど皮膚血流量が有意に減少する傾向がみられた。心拍数では、椅座位・仰臥位ともに、下腿最大部圧迫で最も大きく減少し、深部静脈還流量の促進に効果的であることがわかった。また、交感神経の優位性の指標であるLF/HFにおいても下腿最大部で最も大きく減少し、この部分での圧迫は、比較的圧ストレスが低いことがわかった。すなわち、深部静脈還流量を促進し、かつ圧ストレスの少ない弾性靴下の圧設計において下腿最大部分の圧迫が最も有効であるが、同時に特に椅座位において皮膚血流阻害があることを考慮し、高圧迫は避けるべきであると結論付けられた。

## 緒 言

ストレス社会・高齢社会を迎え、健康で快適な生活の遂行が希求され、「人にやさしい」製品の開発が求められている。平均寿命と健康寿命との差は、何らかの介護を必要とする不健康期間であり、男女ともに約10年といわれている。この不健康期間をできるだけ短縮することが望まれる。株式会社インテージの「健康食品・サプリメント市場実態把握レポート2014年度版」<sup>1)</sup>によると、サプリメント市場は1兆5,341億円であり、健康増進、QOLの改善、疾病予防などに関する社会的ニーズが非常に高くなっている。このようなニーズから、健康促進効果を謳った繊維製品が多数上市されている。しかし一方では、繊維製品の機能が健康に及ぼす影響を明確化することは非常

に困難である。また近年、薬機法（旧薬事法）によりエビデンスが求められるようになり、理論的・実証的な裏付けに基づいたアパレル開発がますます重要になってきているのが現状である。

本研究では、着圧利用の機能性アパレルを開発するための基礎資料を得ることを目的として、研究範囲を弾性靴下のユニバーサル仕様に焦点を置き、車いすや病床・寝たきりの人の使用を考慮し、椅座位および仰臥位における着圧強度が血液循環系および自律神経系に及ぼす影響を検討した。

弾性靴下とは、強圧迫を脚部にかけることにより静脈還流やリンパ還流を促進させることを目的とした靴下であり、日常の着用においては、脚のむくみ軽減や疲労軽減効果を求めて使用されている。静水圧が存在する立位時における効果については、筆者を含む複数の研究者によって立証されている<sup>2-4)</sup>。一方、弾性靴下による末梢皮膚血流量の減少、皮膚温低下等のネガティブな報告もある<sup>5,6)</sup>。

また、医療用としては、静脈瘤やリンパ浮腫の治療、術後の血栓予防用として利用されているが、そのほとんどが外国製であり、日本人の体形に適合し効果があるか否かの立証はされていない。日本人を対象とした仰臥位時に効果的な圧強度と着圧分布に関する研究はほとんどみられないのが現状である<sup>7)</sup>。また、術後の血栓予防などの医療用を含む体力的弱者の使用の場合には連続した長時間着用が必要となり、圧ストレスの軽減が設計の重要なポイントとなると考えられる。

## 1. 実験方法

### 1.1 被験者および測定環境

成人女性8名を被験者とした。各被験者は、温度 $28 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\% \text{RH}$ の中立温域に設定した簡易型人工気象室内に入室し、十分に椅座位安静を保った後に実験に入った。なお、実験は食後2時間以上経過後とした。

## 1. 2 脚部の加圧方法

圧迫部位を右側とし、大腿部（膝蓋骨中点より15cm上方を中心に）、下腿最大部、下腿最小部、足部とした。加圧を部位別に行う方法として、血圧測定用のカフを用いる場合が多いが<sup>6,7)</sup>、加圧面積が圧強度によって変化すること、低圧レベルの設定が難しい等の理由から、本研究では、幅7.5cmの自着性伸縮包帯（ニチバン株式会社製のセラオビ）を用いて、おおよそ10hPa、20hPa、30hPaとなるように手動で段階的に加圧した。加圧に際しては、包帯下に株式会社エイエムアイ・テクノ製のエアパック接触圧センサーを貼付して、椅座位姿勢にて測定部位の前面、後面、外側、内側の4か所の値を確認しながら行った。

測定手順を以下の通りとした。まず、足部の底背屈運動を4回行い、その後160秒間椅座位を維持した後に、簡易ベッドに移動し、測定前に再度リセットのために足部の底背屈運動を4回行った後、仰臥位160秒間を維持した。これを1セットとし、4部位、加圧3段階および無加圧（コントロール）の組み合わせで、1人につき16セットの測定を行った。仰臥位時の実験では、踵下に高さ6.5cmの台を設置して下腿後面がベッドに触れないように配慮した。

なお、加圧時間を160秒と設定したことについては、先行研究<sup>6,8)</sup>および予備実験の結果から、比較的安定なデータが得られると判断されたこと、また本実験での被験者一人当たりの総実験時間が約2.5時間であり、これ以上の長時間実験では被験者負担が大きいと判断されたためである。しかし、緒言でも述べたように、車いす利用者や寝たきりの人の使用を考えた場合には、長時間加圧実験が必要と考えられるが、そのためには実験条件を絞る必要があり、本研究を基礎に今後取り組むべき課題としたい。

## 1. 3 皮膚血流量の測定

皮膚血流量にはレーザー血流計 ALF21（株式会社アドバンス製）を用い、右拇趾球にセンサーを貼付して測定した。

## 1. 4 心電図測定および解析

心電図測定には MARQ（キッセイコムテック株式会社製）を用いて行い、多用途生体解析プログラム Vital Recorder 2（キッセイコムテック株式会社製）で収録し、BIMTAS-Video（キッセイコムテック株式会社製）を用いて解析した。収録および解析にあたっては、サンプリング周波数を1.5Hz、FFTポイント数を64、窓関数をハミング、エポック間隔を15secとし、帯域設定はLFを下限0.04～上限0.15Hz、HFを下限0.15～上限0.4Hzとした。

心電図のR-R間隔から分時心拍数を算出した。また、R-R間隔を用いて周波数解析を行い、自律神経系活動の指標として交感神経と副交感神経の比であるLF/HFを算出した。

## 1. 5 主観評価方法

各加圧段階の脚各部の圧迫感と快適感をSD法による7段階評価で被験者に申告させた。なお、評価は加圧160秒終了後に行った。

本研究を実施するにあたっては、京都女子大学臨床研究審査を受けて承認を得た。被験者に対しては、研究目的、方法、実験の安全性に問題がないことを十分に説明した上、自らの自由意志で本研究に参加し、実験途中であってもいつでも中止できる旨を伝えた。また、験者は、被験者に対して十分配慮の上、実験を行った。

## 2. 結果及び考察

### 2. 1 測定結果の解析

体位を変更するたびに、前体位および経時変化をリセットするために底背屈運動を行ったことに

よる変動を排除し、実験開始 30 秒から終了 10 秒前までの 120 秒間の測定値を用いて平均値を算出した。また、生理量の測定においては、個人間・個人内変動が大きいので、各自のコントロールからの変化率を用いて検討した。

さらに、本研究においては、被験者毎に加圧レベルが多少異なったため、1 エポック 10hPa、エポック間隔 5hPa として、箱ひげ図を用いて上下ヒンジ内にある測定データを抽出して平均値を算出した。すなわち、5 - 15hPa 加圧時の測定データの上下ヒンジ内の平均値 (M) と標準誤差 (SE) を 10hPa に、10 - 20hPa 加圧時の測定データの M と SE を 15hPa のデータとして順次測定データをまとめた。平均値の差の有意差検定は、対のない t 検定を用いて行った。

## 2. 2 皮膚血流量への影響

椅座位における足部圧迫に伴う皮膚血流量の変化率  $\Delta B$  を図 1 (a) に示す。横軸は、加圧部の前後左右 4 か所における衣服圧実測値の平均値である。図より、圧力の増加とともに皮膚血流量が大きく減少し、椅座位における 35hPa 以上の加圧では約 50-60% の大幅な減少が観察された。また、コントロールと比べた場合、20hPa 以上で有意に

減少した ( $p < 0.01$ )。

これに対して、他の部位の 35hPa 以上における  $\Delta B$  は、下腿最小部圧迫で約 35%、下腿最大部圧迫で約 15%、大腿部圧迫においては皮膚血流量の減少はほとんど認められなかった。すなわち、身体末梢を圧迫するほど皮膚血流量の減少が大きくなる傾向が認められた。

一方、仰臥位では、図 1 (b) にみられるように、椅座位と比べて、全体に圧強度が低下した。これは、仰臥位では身体を支持するための筋力がほとんど必要でなくなり、筋の膨隆や筋硬度が低下したためと考えられる。図より、25hPa 以上で  $\Delta B$  が有意に減少したが、20hPa 以下では有意差がみられなかった。また、下腿最小部および大腿部でもほとんど  $\Delta B$  の減少は観察されなかった。この原因として、仰臥位において拇趾がほぼ心臓レベルにあること、筋力が抜け皮下組織が柔らかくなるため皮静脈が外圧の少ない方に逃げることなどが考えられ、椅座位よりも皮膚血流への影響が少なかったものと推察される。

しかし、下腿最大部を 20hPa 以上で圧迫したとき、 $\Delta B$  は有意に減少し、30hPa で約 30% と、椅座位時の約 15% よりもやや大きな減少が観察された。これについては、仰臥位時に下腿後面がベッ

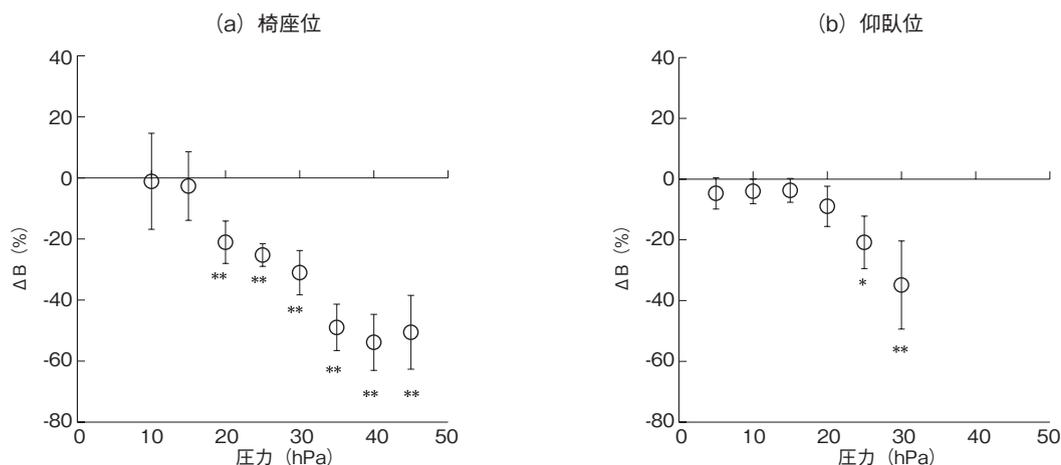


図 1 足部圧迫に伴うコントロールからの皮膚血流量の減少率  $\Delta B$

ドに触れないようにするために踵を台に乗せたことで、ふくらはぎがやや引張られたことが原因とも考えられるが、現段階において理由は不明であり、今後の課題としたい。

筆者らの従来の研究において<sup>6)</sup>、下腿最小部および下腿最大部を14cm幅のカフで、大腿部を20cm幅の血圧測定用カフ（大腿用）で圧迫した立位時の実験では、末梢皮膚血流量への影響が大腿部圧迫でもみられた。今回の実験では、自着性伸縮包帯の幅がすべての部位で7.5cmの一定幅のものをを用いたため、大腿部の面積に比して加圧面積が少なかったことが一因していると考えられるが、同時に体位の相違も大きな要因の一つと考えられる。

また、仰臥位では椅座位時より全体に圧が減少したことから、弾性靴下着用時においても同様の現象が生ずると推察され、立位>椅座位>仰臥位の順に圧力が低下することが示唆され、皮膚血流阻害の影響がやや抑制されるとも考えられる。しかし、車いす利用者や寝たきりの人など、健常者のような身体の動きや脚部の動きがない状況にあっては、皮膚血流量増加の機会が少なく、弾性靴下をはじめとする高弾性衣料の設計に当たっては、十分な配慮が必要である。

### 2.3 心拍数への影響

弾性靴下の着用目的として、静脈還流量の促進があげられる。近年、筋血流をレーザー組織血液モニターや超音波測定により直接的に測定できるようになっている<sup>7)</sup>。しかし、前者は組織脱酸素化血液量から静脈還流量を推測するものであるが、変化幅が少なく不確定な要素が大きい。後者は、直接的に深部静脈の流れを観察することができるが、測定用プローブを押し当てることにより静脈が容易につぶれるため正確な測定を得ることがかなり難しい。

そこで本研究では、瞬時心拍数から分時心拍数を算出して静脈還流量を推測する方法とした。静脈還流量が促進した場合には、一回心拍出量が増大し、結果として心拍数の低下が生ずる。すなわち、心拍数の低下は、静脈還流量の促進を示唆する。

下腿最大部圧迫時における心拍数のコントロールからの変化率  $\Delta HR$  を図2に示す。図より、椅座位、仰臥位ともに加圧強度が高くなるほど  $\Delta HR$  が有意に低下することがわかる。部位間の比較を明確にするために、20hPa以上の加圧における  $\Delta HR$  の平均値と標準誤差を図3に示す。仰臥位では足部および大腿部でも  $\Delta HR$  の低下が認められたが、椅座位では下腿最大部圧迫以外にはほ

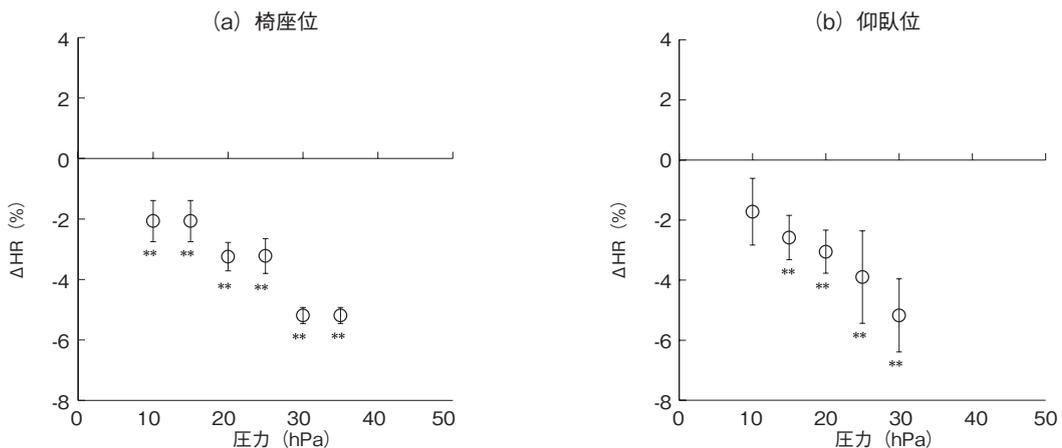


図2 下腿最大部圧迫に伴うコントロールからの心拍数の減少率  $\Delta HR$

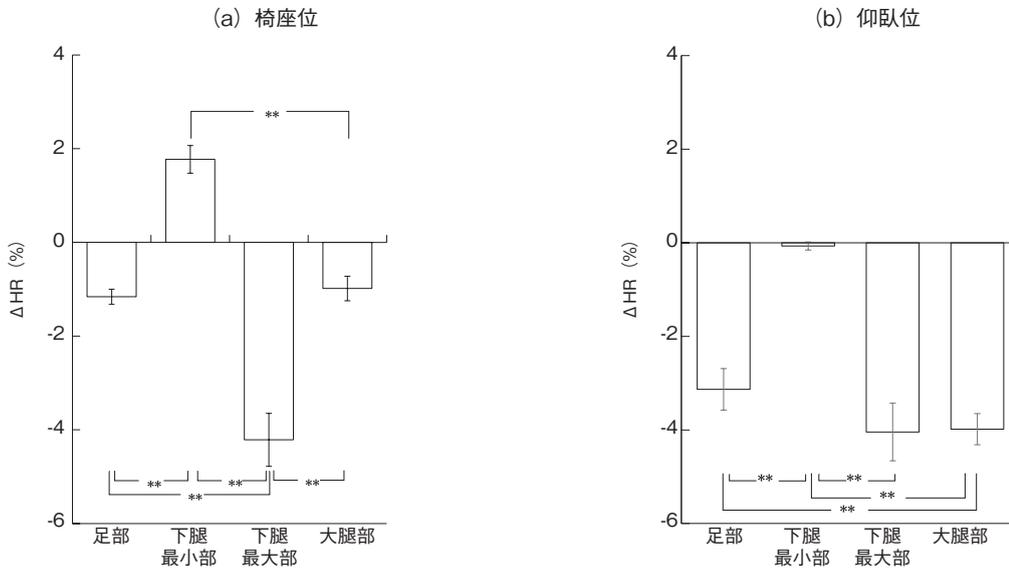


図3 20hPa以上の加圧におけるΔHRの部位間差

とんど効果はみられなかった。特に、下腿最小部圧迫では体位にかかわらず、静脈還流量促進効果が認められなかった理由として、外果・内果やアキレス腱などで囲まれ、加圧が深部静脈の圧迫にまで至らなかったためと考えられる。このような現象は、弾性靴下においても生ずると思われ、従来のような血圧測定用カフを用いての周方向に均等圧をかける実験では導かれなかった結果であろうと思われる。

本研究の範囲においては、下腿最大部圧迫にお

いて最もΔHRの低下が大きく、深部静脈還流量促進に効果的であることが示唆された。

## 2.4 自律神経活動の指標としてのLF/HFへの影響

図4は、椅座位時の下腿最小部圧迫時および下腿最大部圧迫時の結果である。椅座位時には足部を除く、下腿最小部、下腿最大部、大腿部の20hPa以上の圧迫において有意にLF/HFが低下した。しかし、仰臥位においては、低下傾向

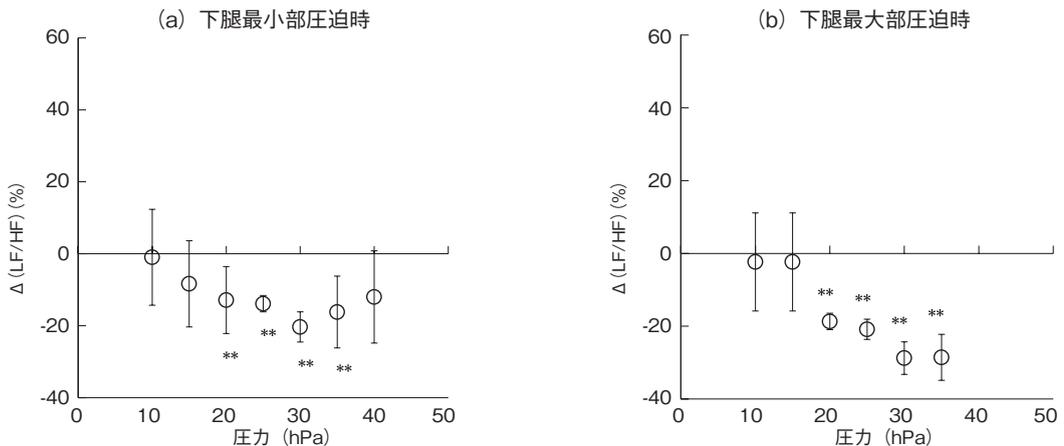


図4 圧迫に伴うコントロールからの減少率Δ(LF/HF) (椅座位について)

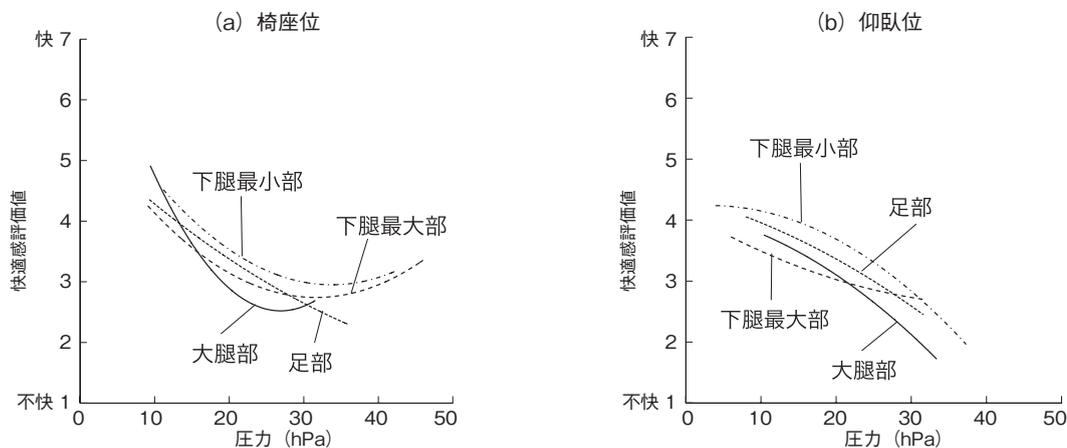


図5 圧迫に伴う快適感評価値の変化

はみられず、逆に下腿最小部圧迫では有意に増大し、他の部位圧迫においてもやや増加傾向を示した。すなわち、仰臥位における脚部圧迫はストレスを増大させることが示唆され、術後や寝たきり高齢者の弾性靴下の圧設計にあたっては、深部静脈還流量を促進しうる最小の着圧に留めることが重要と考えられる。

### 2. 5 主観評価

椅座位および仰臥位における快適性評価を図5に示す。個人の評価点数をプロットして二次曲線に回帰したものである。脚各部の圧強度の増大とともに快適性が低下している。しかし、椅座位では約 25hPa 以上で平衡になる傾向がみられるのに対して、仰臥位では急速に快適性が低下する傾向がみられる。弾性靴下のような強圧迫を想定した場合には、椅座位よりも仰臥位での快適性の低下が大きく、このことが前述の LF/HF の増加傾向に繋がったと考えられる。

なお、圧迫感においても、仰臥位では椅座位よりも圧迫感が強く、圧感受性が高いことがわかった。

### 3. 結 語

従来の弾性靴下の研究では、健常者を対象に立

位時における生体反応を検討したものが多かった。しかし、術後など体力的弱者の長時間着用や車いす利用者の使用を考慮したとき、十分な効果と同様に、いかに圧ストレスを軽減するかという視点からのアプローチが重要であると考えられる。

本研究では、着圧利用のアパレル設計を目的とし、研究の範囲をユニバーサル仕様弾性靴下として、体位（椅座位および仰臥位）、圧迫強度および圧迫部位が人体生理に及ぼす影響を明らかにした。

その結果、深部静脈還流量を促進し、かつ圧ストレスの比較的少ない弾性靴下の圧設計において下腿最大部分の圧迫が最も有効であるが、同時に特に椅座位においては皮膚血流阻害があることを考慮し、20hPa 以上の高圧迫は避けるべきであるとの結論が得られた。

なお本研究成果は、健常者の就寝用弾性靴下あるいは弾性タイツ等の設計にも寄与するものと考えられる。

今後は、本研究から得られた実験結果を踏まえた長時間加圧実験を検討し、ユニバーサル仕様の弾性靴下の圧設計に対して、具体的な設計指針を導出する考えである。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり，研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚くお礼申し上げます。

## 文 献

- 1) <http://www.intage.co.jp/topics/news/741>
- 2) 綿貫茂喜，深見浩子，衣服による身体圧迫と心機能，快適性を考えるシンポジウム報告書，**6**，7（1990）
- 3) Harumi Morooka, Hideko Kawai, Hideo Morooka, Effects of Support Pantyhose on Silhouette and Swelling of Lower limbs, 繊維製品消費科学, **36**, 389 (1995)
- 4) 平井正文, 静脈還流障害における圧迫療法 (Part 1) 弾力包帯と弾力ストッキング, 静脈学, **8**, 293(1997)
- 5) 綿貫茂喜, 三平和雄, 下肢部の局所的圧迫が皮膚温および筋電位に及ぼす影響について, *Ann. Physiol. Anthropol.*, **6**, 69(1987)
- 6) 川 秀子, 諸岡晴美, 北村潔和, 諸岡英雄, 下肢各部の局所圧迫が皮膚血流量に及ぼす影響, 繊維製品消費科学, **36**, 491(1995)
- 7) 傳法谷郁乃, 小柴朋子, 田村照子, 仰臥位における下肢の部位別圧迫が腓腹筋血流量動態に及ぼす影響, 繊維製品消費科学, **56**, 356(2015)
- 8) 鷹股 亮, 運動時の全身循環および体温調節をサポートする下肢圧迫法の開発, デサントスポーツ科学, **26**, 95(2005)

# 長時間運動時におけるコンプレッションタイツの着用が 筋疲労や筋損傷・炎症反応に及ぼす影響

立命館大学 後藤一成  
(共同研究者) 立命館大学大学院 水野沙洗  
日本学術振興会 森嶋琢真  
特別研究員

## Influence of Wearing Compression Tights During Prolonged Exercise on Muscle Fatigue, Muscle Damage and Inflammatory Responses

by

Kazushige Goto

*Faculty of Sport and Health Science, Ritsumeikan University*

Sahiro Mizuno

*Graduate School of Sport and Health Science, Ritsumeikan University*

Takuma Morishima

*Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science*

### ABSTRACT

The purpose of the present study was to determine the influence of wearing compression garments (compression tights) with different pressure intensity on muscle function, metabolite and endocrine responses, muscle damage and inflammatory responses to 120 min run at moderate intensity. Eight healthy young men conducted four trials on different days, consisting of [1] trial with wearing compression garments of heavy pressure intensity (approximately 40 hPa, High), [2] trial with wearing compression garments of moderate pressure intensity (approximately 20 hPa, Middle), [3] trial with normal sport garments (pressure intensity was set below 10 hPa, CON). Each trial was performed with randomized orders, and four weeks of rest period were provided between the trials.

Exercise consisted of 120 min of running on treadmill at 60% of maximal oxygen uptake ( $\dot{V}O_{2max}$ ). Time-courses of changes in power output for lower limb muscles (maximal jump height), heart rate, ratings of perceived exertion (RPE), metabolic and endocrine responses, muscle damage and inflammatory responses were evaluated.

Maximal jump height was decreased after 120 min of running in the High and CON trials, whereas the Middle trial showed no significant reduction of maximal jump height. Moreover, the maximal jump height immediately after the 120 min of running was significantly higher in the Middle than in the High ( $P < 0.05$ ). Average heart rate during 120 min of running was lowest in the Middle trial, with a significant difference from the value of CON trial ( $P < 0.05$ ). Although no significant difference among three trials was observed in RPE for leg muscles over 120 min of running, the RPE for respiration was significantly lower in the Middle trial than in the CON trial ( $P < 0.05$ ). A 120 min of running increased serum cortisol, myoglobin and creatine kinase concentrations, with no significant difference among three trials at any time points. In contrast, exercise-induced elevation of plasma IL-6 concentration was significantly lower in the Middle trial than in the CON trial ( $P < 0.05$ ). However, there was no significant difference in plasma IL-6 response between the High trial and CON trial. These results indicate that wearing compression garments with moderate pressure intensity (approximately 20 hPa) attenuated exercise-induced fatigue of lower limb muscles and elevation of heart rate, and inflammatory responses to prolonged (120 min) running at moderate intensity.

## 要 旨

本研究では、長時間運動時における着圧の異なるコンプレッションタイツの着用が代謝・内分泌動態、筋損傷および炎症反応、下肢筋群の筋パワーに及ぼす影響を検討することを目的とした。健康な男性8名を対象に、運動時に①強圧（約40hPa）の着圧が施されたコンプレッションタイツ（強圧条件）、②弱圧（約20hPa）の着圧が施されたコンプレッションタイツ（弱圧条件）、③着圧を施さない（10hPa以下）タイツ（コントロール条件）のいずれかを着用する測定を、それぞれ異なる日に実施した。各条件での測定では、最大酸素摂取量の60%に相当する走速度でトレッドミル上での120分間のランニングを実施した。運動前から運動終了後1時間まで経時的に、筋機能、

代謝・内分泌動態や筋損傷および炎症反応に関わる血液指標の変化を検討した。

その結果、運動直後における垂直跳び跳躍高は、弱圧条件が強圧条件に比較して有意に高値を示した（ $P < 0.05$ ）。120分間の運動中における心拍数の平均値は弱圧条件が最も低値を示し、コントロール条件との間に有意差が認められた（ $P < 0.05$ ）。また、120分間の運動に伴う血漿インターロイキン6（IL-6）濃度の上昇の程度は弱圧条件において最も小さく、コントロール条件に比較して有意に低値を示した（ $P < 0.05$ ）。

以上の結果から、120分間のランニング時における弱圧（約20hPa）を施したコンプレッションタイツの着用は、強圧（約40hPa）を施した同様のタイツまたは着圧が施されていないタイツに比較して、下肢筋群の筋疲労の軽減や心拍数の上昇

抑制, および炎症反応の抑制に有効であることが明らかとなった。

## 緒 言

近年, マラソンなどのスポーツの競技場において, コンプレッションウェア (Compression garment; CG) を着用するアスリートや一般のスポーツ愛好家を多く目にするようになってきた。CG は元来, 医療用に設計された衣服であり, 循環障害の患者に対する末梢循環の改善や静脈還流の亢進を目的に利用されてきた (Lawrence et al. 1980)<sup>1)</sup>。1990 年代以降, スポーツ科学領域における研究が盛んに行われ, 運動中の CG の着用により, 疲労の軽減や運動継続時間の延長など運動パフォーマンスの改善効果が期待されるようになった (Kemmler et al. 2009<sup>2)</sup>, Ali et al. 2011)<sup>3)</sup>

運動中における CG 着用の効果を検証した先行研究を概観すると, 「ランニング」を用いた例が多い。Kemmler et al. (2009)<sup>2)</sup> は, 同一の血中乳酸濃度下でのランニング時の最大走速度を, 下腿部のみを覆ったコンプレッションソックスを着用する条件と非着用条件で比較している。その結果, 着用条件は非着用条件と比較して, 走速度が有意に大きいことが明らかとなった。また, Bringard et al. (2005)<sup>4)</sup> は, 大腿部のみを覆ったコンプレッションタイツを着用する条件, 着圧が施されていないタイツを着用する条件, 通常のハーフパンツを着用する条件の 3 条件を設け, 15 分間のランニング (最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2max}$ ) の 80% 強度) 中のエネルギー代謝を比較した結果, コンプレッションタイツの着用条件は他の 2 条件と比較して, 運動中の酸素摂取量が有意に低い (ランニングエコノミーの改善) ことを認めている。その一方で, 運動中における CG の着用に伴い, 運動パフォーマンスの改善がみられなかった研究も存在する (Ali et al. 2007<sup>5)</sup>, Sperlich et al. 2011<sup>6)</sup>, MacRae et al. 2012)<sup>7)</sup>。例えば, Ali et al. (2007)<sup>5)</sup>

は, 10km のタイムトライアル時における CG (ソックス) 着用の効果を検討しているが, 主観的運動強度や心拍数には CG 着用に伴う変化はみられなかった。また, この研究では着圧の異なる CG 着用の条件も設けているが, 着圧の相違による影響も認められていない。しかし, これらの結果を解釈する上では, 以下の 3 点について注意が必要である。1 つ目は, 被験者間で着圧が統一された CG が用いられていない点である。これまでに実施された研究では, 被験者の着用する CG のサイズがおもに腹囲や身長をもとに決定されており, 多くの場合, 着用時の活動筋への着圧が確認されていない。そのため, 被験者間での着圧の差異が CG 着用の効果に影響を及ぼした可能性は否定できない。2 つ目は, 着圧を施す部位が限定されていた点である。ランニングでは大腿部および下腿部の筋群が動員されるにもかかわらず, 先行研究の多くは, 大腿部または下腿部のいずれの筋群に対して着圧を付加する形状のウェアを用いている。そのため, 大腿部および下腿部の筋群の双方に着圧を課した CG (タイツ) 着用の効果を改めて明らかにする必要がある。3 つ目は, CG 着用による抗疲労や運動パフォーマンスの改善効果を判定する上で, 評価の指標が限定されている点である。これまでに実施された研究の多くでは, 運動時の CG 着用の効果を酸素摂取量や心拍数, 血圧, 筋活動, 活動筋での血流や酸素動態など, おもに全身および局所における循環指標を基に評価をしてきた。一方で, 運動時における CG 着用が代謝・内分泌動態や運動に伴う筋損傷・炎症指標に及ぼす影響を詳細に検討した研究はきわめて少ない。特に, マラソンのような長時間運動では運動時に生じる筋損傷・炎症反応が下肢筋群における筋パワーの低下 (Del Coso et al. 2012)<sup>8)</sup> やレース速度の低下 (Del Coso et al. 2013)<sup>9)</sup> を誘発する。したがって, 長時間運動時における CG 着用により運動誘発性の筋損傷や炎症反応を軽減すること

ができれば、特に、運動後半におけるパフォーマンスの向上に貢献できると考えられる。しかし、これまでに実施された研究では、運動時間が60分間を超えるような長時間運動時におけるCG着用の効果は十分に検討されていない。

そこで本研究では、120分間におよぶランニング中における着圧の異なるCGの着用が、代謝・内分泌動態、筋損傷および炎症反応、下肢筋群の筋パワーに及ぼす影響を検討することを目的とした。

## 1. 方法

### 1. 1 被験者

健康で活動的な成人男性8名（平均値 ± 標準誤差，年齢：23.2 ± 0.4 歳，身長：170.5 ± 0.4 cm，体重：62.6 ± 0.7 kg，BMI：21.6 ± 0.3 kg/m<sup>2</sup>， $\dot{V}O_{2max}$ ，50.6 ± 0.7 ml/kg/min）を対象とした。被験者は実験の主旨，内容および危険性についてあらかじめ説明を受け，それらを十分に理解し，同意書に署名した上で実験に参加した。本研究は，立命館大学倫理審査委員会の承認をもとに実施された。

### 1. 2 実験デザイン

各被験者は，以下の3条件での測定をそれぞれ異なる日に実施した。なお，実施順序はランダムとして，各条件間には4週間の間隔を設けた。

#### ①強圧条件

120分間のランニング中に大腿および下腿に40hPaの着圧が施されたコンプレッションタイツを着用する条件

#### ②弱圧条件

120分間のランニング中に大腿および下腿に20hPaの着圧が施されたコンプレッションタイツを着用する条件

#### ③コントロール条件

120分間のランニング中に大腿および下腿に10hPa以下の着圧が施されたコンプレッション

タイツを着用する条件

実験期間を通して，被験者は合計6回実験室へ来室した。まず，最初の来室時には，詳細な実験に関する説明を行い，同意書への署名を得た。2回目の来室では，各条件での運動実施時における走速度を決定するために， $\dot{V}O_{2max}$ を測定した。3回目の来室では，各条件で使用するCGの着圧（大腿部，後部，下腿前部，後部）を専用の着圧センサーを用いて測定した。4～6回目の来室では，3条件の中のいずれかの条件での測定を実施した。

いずれの条件においても，被験者は前日22時以降に食事を摂取しない状態で，午前8時に実験室へ集合した。その後20分間の安静を経て採血を行った。採血後には垂直跳びの跳躍高を評価した。その後に各条件におけるCGを着用させ，5分間の安静を経て，120分間のランニングを開始した。

120分間のランニングには，トレッドミル（E95Ta，ライフ・フィットネス・ジャパン株式会社）を使用した。トレッドミルの傾斜は上り勾配7%に設定し，60% $\dot{V}O_{2max}$ に相当する走速度で実施した。事前に実施した $\dot{V}O_{2max}$ の測定では，大型のトレッドミル（Valiant，ロード社）を用いた多段階漸増負荷テストを実施した。トレッドミルの傾斜を上り勾配7%に設定し，運動開始後は4.0km/hから1～3分毎に0.6km/h～1.0km/hの範囲で速度を漸増し，酸素摂取量がプラトーまたは規定の走速度に追従できなくなるまで運動を継続した。運動中は，代謝分析測定機（AE300S，ミナト医科学株式会社）を用いて，breath by breath法により酸素摂取量を計測した。なお，得られたデータは30秒毎の平均値として示した。

### 1. 3 測定項目

120分間にわたるランニングの運動前，運動中および運動終了後に以下の項目を測定した。

#### (1) 垂直跳び跳躍高

運動前および運動開始120分経過（運動終了直

後)に、垂直跳び跳躍高をマットスイッチ (マルチジャンプテスター, 株式会社ディケイエイチ) を用いて測定した。

(2) 心拍数および主観的運動強度

120 分間の運動中, 胸部無線式ハートレートモニター (RCX3, ポラール社) を用いて心拍

数を連続的に測定した。また, 10 分毎に脚および呼吸の主観的疲労感(10段階)を評価した<sup>10)</sup>。

(3) 血液指標

運動前, 運動開始 60 分時, 運動開始 120 分時(運動終了直後), 運動終了 60 分後に前腕静脈から採血し, 血中グルコース, 乳酸, 血清遊離脂肪酸, グリセロール, コルチゾール, クレアチンキナーゼ, ミオグロビンおよび血漿インターロイキン 6 (IL-6) 濃度を測定した。

1. 4 統計解析

すべての測定値は, 平均値 ± 標準誤差 (SE) で示した。垂直跳びの跳躍高, 心拍数および主観的運動強度, 血液指標の時間経過に伴う平均値の差の検定には, 反復測定による二元配置の分散分析 (two-way ANOVA) を用い, 交互作用および主効果 (条件, 時間) の有無を検定した。ANOVA により交互作用または主効果が認められた場合には, Tukey-Kramer test により多重比較検定を行った。また, 各指標の運動前後における変化率 (相対値) や運動前半 60 分間および後半 60 分間における平均値の比較には, 反復測定による一元配置の分散分析を用いた。なお, 有意性の検定には危険率 5% 以下を採用した。

2. 結果

2. 1 垂直跳び跳躍高

図 1 には, 各条件における運動前後での垂直跳び跳躍高の変化 (運動前の値に対する相対値)

を示した。120 分間のランニングの結果, 強圧条件およびコントロール条件では垂直跳び跳躍高

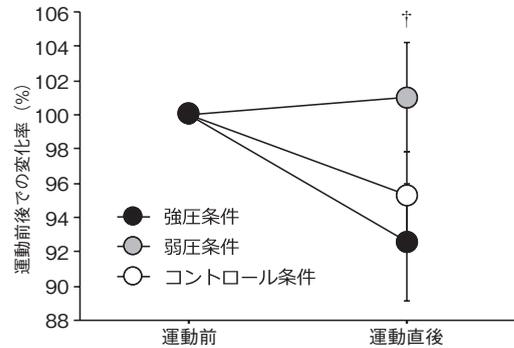


図 1 垂直跳び跳躍高の経時変化  
平均値 ± 標準誤差 † ; P < 0.05 vs. 強圧条件

は低下したが, 弱圧条件では運動後における跳躍高の低下は認められなかった。また, 運動終了直後において, 弱圧条件における跳躍高は強圧条件における跳躍高に比較して有意に高値を示した (P < 0.05)。

2. 2 心拍数および主観的運動強度

図 2 には, 各条件における運動時の心拍数を, 前半 60 分間および後半 60 分間の平均値として示した。いずれの条件においても, 120 分間のランニングに伴い心拍数は有意に上昇した (P < 0.05)。しかし, その上昇の程度は弱圧条件において小さく, 前半 60 分間および後半 60 分間のいずれに関しても, コントロール条件に比較して有意に低値を示した (P < 0.05)。

図 3 および 4 には, 各条件における脚部 (図 3) および呼吸 (図 4) の主観的運動強度を示し

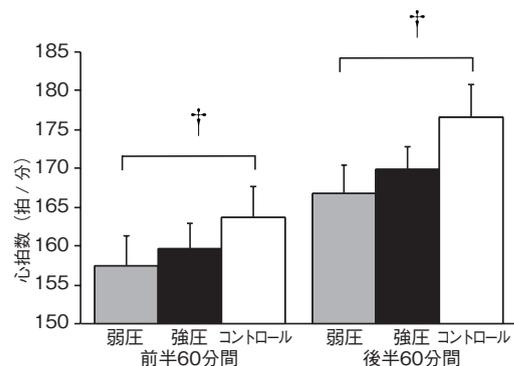


図 2 前半・後半60分間における心拍数  
平均値 ± 標準誤差 † ; P < 0.05

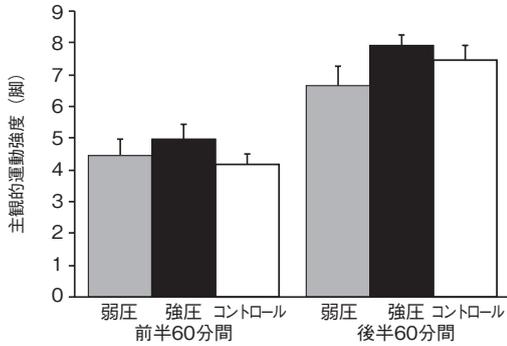


図3 前半・後半60分間における脚の主観的運動強度  
 平均値±標準誤差

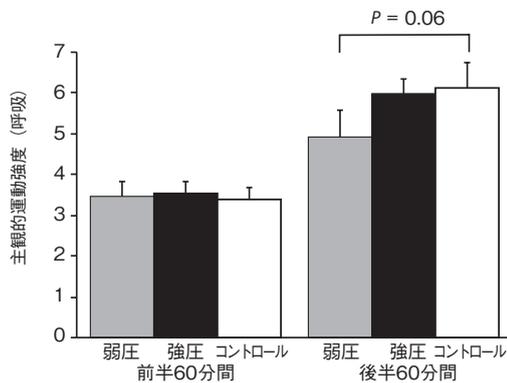


図4 前半・後半60分間における呼吸の主観的運動強度  
 平均値±標準誤差

た、脚の運動強度には、前半60分間、後半60分間のいずれにおいても条件間での有意差は認められなかった。呼吸の主観的運動強度は、前半60

分間では条件間に有意差はみられなかったが、後半60分間では弱圧条件がコントロール条件に比較して低値傾向を示した ( $P = 0.06$ )。

### 2.3 血液指標

表1には、120分間のランニングに伴う血液指標(全血、血清)の変化を示した。運動に伴い血中グルコース濃度は有意に低下したが( $P < 0.05$ )、その変化の動態に条件間で有意差は認められなかった。また、血中乳酸、血清遊離脂肪酸、グリセロール濃度は運動に伴い有意に上昇したが( $P < 0.05$ )、いずれの時点においても条件間でも有意差は認められなかった。同様に、血清コルチゾール濃度も運動に伴い大きく上昇したが、いずれの時点においても条件間での有意差は認められなかった。筋損傷の間接指標であるクレアチンキナーゼおよびミオグロビン濃度は運動に伴い有意に上昇したが( $P < 0.05$ )、いずれの時点においても条件間で有意差は認められなかった。

図5には、血漿IL-6濃度の変化を示した。運動に伴い血漿IL-6濃度は有意に上昇した。その変化の程度はコントロール条件で特に大きく、運動終了時および運動後60分の時点で他の2条件に比較して高値を示したが、条件間での有意差

表1 血液指標の経時変化

		前	60分	120分	運動後60分
グルコース (mg/dl)	強圧	94 ± 2	85 ± 4	79 ± 6 *	75 ± 4 *
	弱圧	90 ± 2	84 ± 1	79 ± 4 *	77 ± 2 *
	コントロール	90 ± 3	89 ± 3	79 ± 7 *	74 ± 4 *
乳酸 (mmol/l)	強圧	1.8 ± 0.3	2.1 ± 0.4	2.9 ± 0.4	2.0 ± 0.1
	弱圧	1.6 ± 0.2	2.0 ± 0.4	2.3 ± 0.5	2.1 ± 0.3
	コントロール	1.2 ± 0.1	1.7 ± 0.3	2.2 ± 0.3 *	2.0 ± 0.2 *
遊離脂肪酸 (mmol/l)	強圧	365 ± 64	667 ± 77 *	1477 ± 131 *	1528 ± 134 *
	弱圧	343 ± 44	547 ± 80	1283 ± 106 *	1320 ± 163 *
	コントロール	352 ± 74	803 ± 143	1352 ± 122 *	1337 ± 188 *
グリセロール (mg/dl)	強圧	3.9 ± 0.4	20.5 ± 2.8	46.6 ± 3.9	14.5 ± 2.1
	弱圧	5.0 ± 2.1	18.6 ± 2.9	42.8 ± 3.9	14.1 ± 2.3
	コントロール	4.0 ± 0.6	20.7 ± 3.2	41.4 ± 4.1	13.2 ± 1.8
コルチゾール (µg/dl)	強圧	14.2 ± 1.7	13.3 ± 2.3	30.2 ± 2.1 *	27.7 ± 2.3 *
	弱圧	13.9 ± 1.2	12.2 ± 2.6	24.5 ± 1.7 *	22.3 ± 2.4 *
	コントロール	16.8 ± 2.2	14.9 ± 2.7	40 ± 9.8	39.9 ± 9.8
クレアチンキナーゼ (U/l)	強圧	142 ± 17	170 ± 19 *	196 ± 23 *	193 ± 22 *
	弱圧	144 ± 21	172 ± 25 *	198 ± 27 *	195 ± 25 *
	コントロール	191 ± 67	225 ± 73 *	259 ± 79 *	252 ± 71 *
ミオグロビン (ng/ml)	強圧	31 ± 3	55 ± 8	72 ± 12 *	106 ± 14 *
	弱圧	32 ± 5	59 ± 11 *	82 ± 11 *	106 ± 12 *
	コントロール	36 ± 8	66 ± 18	92 ± 17 *	131 ± 23 *

平均値 ± 標準誤差 \*: $P < 0.05$  vs. 前

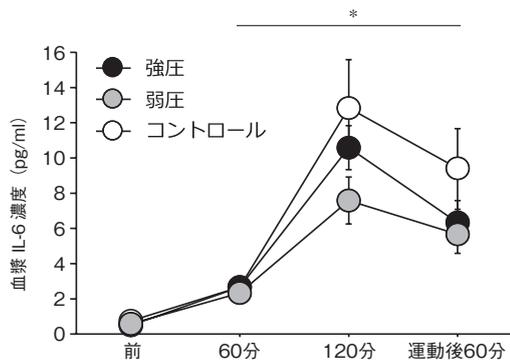


図5 血漿IL-6濃度の経時変化 (AUC)  
平均値±標準誤差 \*;  $P < 0.05$  vs. 強圧条件

には至らなかった。一方で、120分間の運動中におけるIL-6の濃度曲線下面積 (Area under curve; AUC) を算出した結果、弱圧条件が最も低値を示しコントロール条件との間に有意差が認められた ( $P < 0.05$ )。 (図6)

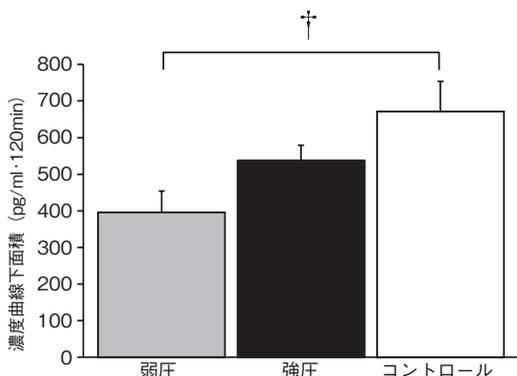


図6 運動前～運動開始120分経過時における血漿IL-6濃度 (AUC)  
平均値±標準誤差 †;  $P < 0.05$

### 3. 考察

これまでに実施された運動中におけるCG着用の効果を検討した研究では、CG着用時に活動筋に課される着圧が注視されておらず、被験者間での着圧の相違が研究間における結果の不一致を引き起こす要因の一つであると考えられる。また、既存の研究では、運動時のCG着用の効果を心拍数や主観的運動強度、エネルギー代謝 (酸素摂取量、二酸化酸素産生量)、呼吸応答 (換気量など)、筋活動や筋酸素動態などの呼吸・循環指標を用い

て評価してきた。一方で、マラソンのような長時間運動時には下肢筋群において著しい筋損傷や炎症反応が生じ、これらは下肢筋群における筋パワーの低下 (Del Coso et al. 2012)<sup>8)</sup> やレース後半における速度の低下 (Del Coso et al. 2013)<sup>9)</sup> を誘発する。したがって、長時間運動時におけるCG着用の結果、運動に伴う筋損傷や炎症反応を軽減することができれば、疲労の軽減や運動パフォーマンスの改善に大きく貢献できると予想される。これらの諸点をふまえて、本研究ではトレッドミルでの120分間のランニング時におけるCGの着用が、運動時の代謝・内分泌動態や筋損傷・炎症反応、下肢筋群における筋パワーに及ぼす影響を検討した。また、着圧の異なる2種類のCGを準備し (強圧条件、弱圧条件)、着圧の相違が各指標に及ぼす影響についても検討をした。その結果、弱圧によるCGを着用した条件 (弱圧条件) は着圧を施さない通常のウェアを着用したコントロール条件に比較して、運動中の心拍数および呼吸における主観的運動強度の上昇が有意に軽減された。また、コントロール条件および強圧条件では120分間の運動に伴い垂直跳び跳躍高が低下した一方で、弱圧条件では跳躍高の低下がみられず、運動直後における値は強圧条件に比較して有意に高値を示した。さらに、炎症反応の指標であるIL-6の増加量 (血中濃度曲線下面積により評価) は、弱圧条件がコントロール条件に比較して有意に低値を示した。これらの結果は、約20hPaの弱圧を施したコンプレッションタイツを長時間運動時に着用することで、運動に伴う疲労や筋での炎症反応が軽減されることを示すものである。

弱圧条件においては、120分間のランニングに伴う垂直跳びの跳躍高 (下肢筋群のパワー発揮の指標) の低下が強圧条件と比較して有意に抑制された。この結果は、屋外での10kmのタイムトライアル中のコンプレッションソックス着用に伴い、運動に伴う下肢筋群の筋パワーの低下が

有意に抑制された先行研究とも一致する (Ali et al. 2011)<sup>3)</sup>。この研究では、着圧の異なるコンプレッションソックス着用の影響を検討し、低い着圧 (足首: 15mmHg, 膝: 12mmHg) および中程度の着圧 (足首: 21mmHg, 膝: 18mmHg) を用いた条件は、強い着圧 (足首: 32mmHg, 膝: 23mmHg) およびコンプレッションソックス非着用 (足首: 0mmHg, 膝: 0 mmHg) 条件と比較して、10km 走に伴う垂直跳び跳躍高の低下が有意に抑制されたことを認めている。本研究の結果も踏まえると、長時間のランニング時に中程度 (15 ~ 25hPa 程度) の着圧を施した CG を着用することは、下肢筋群の筋パワーの低下の抑制に有効であると考えられる。

弱圧条件においては、運動中の心拍数の上昇がコントロール条件と比較して有意に抑制された。その一方で、10km のタイムトライアルを用いた Ali et al. (2011)<sup>3)</sup> の研究では、コンプレッションタイトの着用は心拍数に影響しなかった。また、その他の先行研究においても、同様の報告がなされている (Berry et al. 1990<sup>11)</sup>, Duffield et al. 2007)<sup>12)</sup>。本研究における結果との差異が生じた要因を考える上で、CG 着用による心拍数の変化がみられなかった一連の研究では、最大強度または最大強度付近での運動強度が用いられていた点を留意すべきである。CG の着用が運動時の心拍数を低下させる要因として、MacRae et al. (2012)<sup>7)</sup> は、活動筋からの静脈環流の亢進に起因する心臓からの 1 回拍出量の増加を指摘している。また、活動筋での筋ポンプ作用やそれに伴う静脈環流は運動強度の増加とともに亢進することから、運動時の CG 着用の静脈環流量の増加に対する相加・相乗効果は、高強度の運動では顕著に認められない可能性が高い (Bringard et al. 2006)<sup>13)</sup>。本研究の運動では、中強度の走速度 (60%  $\dot{V}O_{2max}$ ) を用いた。また、この際には上り勾配 (7%) の傾斜を使用したことから、走速度

は低速 (時速  $6.6 \pm 0.1$  km) であった。したがって、低速度でのランニングを使用したことで、活動筋の筋ポンプ作用と CG の着圧による作用が静脈環流の増加に対して相加的あるいは相乗的に作用し、運動中の心拍数の上昇が軽減されたものと推察される。また、Miyamoto and Kawakami (2014)<sup>14)</sup> は時速 4.5 km ~ 12km での合計 34.5 分のトレッドミルでのランニング前後における T2 横緩和時間を評価した結果、長内転筋、大腿二頭筋および半腱様筋におけるランニング直後の T2 横緩和時間は、強圧 (約 33hPa) を用いたショートタイツ (大腿部のみを覆ったタイツ) を着用した条件が弱圧 (約 27hPa) のタイツを着用した条件と比較して有意に高値を示すことを認めている。運動前後における T2 横緩和時間の一過性の増加は、活動筋における代謝物の蓄積 (無機リン酸や水素イオンなど) を反映する (Cheng et al. 1995)<sup>15)</sup>。したがって、30hPa を上回るような強圧を施した CG は、運動に伴う代謝物の蓄積を助長するのかもしれない。活動筋での代謝物の蓄積は心拍数や血圧の上昇などの心血管応答の亢進や筋疲労と密接に関連することから (Boushel et al. 2010)<sup>16)</sup>、本研究でみられた弱圧条件での疲労軽減効果の要因を考える上で興味深い。一方で、弱圧条件が強圧条件に比較して、疲労や運動誘発性の炎症反応の軽減に有効であった理由には不明な点も多い。この点に関しては、今後さらに詳細に検討を続けることが必要である。

本研究から得られた知見をふまえると、長時間のランニング時における弱圧 (約 20hPa) を施した CG の着用は、マラソンなど長時間の運動時における疲労の軽減やパフォーマンスの向上に有効であると期待できる。また、低速度 (時速  $6.6 \pm 0.1$  km) でのランニング時における CG 着用の有効性が確認されたことから、トップレベルの持久性スポーツ種目における競技者のみでなく、市民マラソンランナーに代表されるスポーツ愛好家に

も本研究の成果を還元できると考えられる。今後は至適な着圧を検証する実験室レベルでの基礎研究に加えて、マラソンレースなどにおける着用効果を検証する大規模な実践研究を実施することが必要であろう。

#### 4. まとめ

120分間のランニング時における弱圧（約20hPa）を施したコンプレッションタイツの着用は、強圧（約40hPa）を施した同様のタイツまたは着圧が施されていないタイツに比較して、運動に伴う下肢筋群の筋疲労の軽減や心拍数の上昇抑制、炎症反応の抑制に有効である。

#### 謝 辞

本研究を委託いただきました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に心からの御礼を申し上げます。

#### 文 献

- 1) Lawrence D., Kakkar V.V., Graduated, static, external compression of the lower limb: a physiological assessment. *Br. J. Surg.*, 67(2) :119-21(1980)
- 2) Kemmler W., Stengel von S., Köckritz C., Mayhew J., Wassermann A., Zapf J., Effect of compression stockings on running performance in men runners. *J. Strength. Cond. Res.*, 23(1) :101-5(2009)
- 3) Ali A., Creasy R.H., Edge J.A., The Effect of Graduated Compression Stockings on Running Performance. *J. Strength. Cond. Res.*, 25(5) :1385-92(2011)
- 4) Bringard A., Perrey S., Belluye N., Aerobic Energy Cost and Sensation Responses During Submaximal Running Exercise – Positive Effects of Wearing Compression Tights. *Int. J. Sports Med.*, 27(05) :373-8(2005)
- 5) Ali A., Caine M.P., Snow B.G., Graduated compression stockings: physiological and perceptual responses during and after exercise. *J. Sports Sci.*, 25(4) :413-9(2007)
- 6) Sperlich B., Haegele M., Krüger M., Schiffer T., Holmberg H-C., Mester J., Cardio-respiratory and metabolic responses to different levels of compression during submaximal exercise. *Phlebology*, 26(3) :102-6(2011)
- 7) MacRae B.A., Laing R.M., Niven B.E., Cotter J.D., Pressure and coverage effects of sporting compression garments on cardiovascular function, thermoregulatory function, and exercise performance. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 112(5) :1783-95(2012)
- 8) Del Coso J., González-Millán C., Salinero J.J. et al., Muscle damage and its relationship with muscle fatigue during a half-iron triathlon. *PLoS ONE*, 7(8) :e43280(2012)
- 9) Del Coso J., Fernández de Velasco D., Fernández D. et al., Running pace decrease during a marathon is positively related to blood markers of muscle damage. *PLoS ONE*, 8(2) :e57602(2013)
- 10) Aliverti A., kayser B., Lo Mauro A., Quaranta M., Pompilio R.L., Dellca R.L., Ora J., Biasco L., Cavalleri L., Pomidori L., Cogo A., Pellegrino R., Miseroocchi G., Respiratory and leg muscles perceived exertion during exercise at altitude. *Respir. Physiol. Neurobiol.*, 177(2) :162-8(2011)
- 11) Berry M.J., Bailey S.P., Simpkins L.S., TeWinkle J.A., The effects of elastic tights on the post-exercise response. *Can. J. Sport Sci.*, 15(4) :244-8(1990)
- 12) Duffield R., Portus M., Comparison of three types of full-body compression garments on throwing and repeat-sprint performance in cricket players. *Br. J. Sports Med.*, 41(7) :409-14(2007)
- 13) Bringard A., Denis R., Belluye N., Perrey S., Effects of compression tights on calf muscle oxygenation and venous pooling during quiet resting in supine and standing positions. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 46(4) :548-54(2006)
- 14) Miyamoto N., Kawakami Y., Effect of Pressure Intensity of Compression Short-Tight on Fatigue of Thigh Muscles. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 46(11) :2168-74(2014)
- 15) Cheng H.A., Robergs R.A., Letellier J.P., Caprihan A., Icenogle M.V., Haseler L.J., Changes in muscle proton transverse relaxation times and acidosis during exercise and recovery. *J. Appl. Physiol.*, 79(4) :1370-8(1995)
- 16) Boushel R., Muscle metaboreflex control of the circulation during exercise. *Acta. Physiol. (Oxf)*, 199(4) :367-83(2010)

# 電磁ゴニオメータによる肩甲骨から体幹の 三次元動作解析：健常者とパラカヌー選手の比較

広島大学病院	木村浩彰
(共同研究者) 同	坂光徹彦
同	笹代純平
同	平田和彦
同	三上幸夫

## Three Dimensional Motion Analysis of Upper Limb and Trunk With an Electromagnetic Tracking Device: Comparison of a Healthy Canoe Athlete and a Para Canoe Athlete

by

Hiroaki Kimura, Tetsuhiko Sakamitsu, Junpei Sasadai,  
Kazuhiko Hirata, Yukio Mikami  
*Hiroshima University Hospital*

### ABSTRACT

Motion analysis is an important tool to accurately measure motion during sports activity. Method of motion analysis so far are mainly two-dimensional, So was insufficient. The purpose of this study is to analyze the movement of the upper limbs and trunk of canoe athletes during upper limb elevation or paddling using electromagnetic goniometer (three-dimensional motion analysis equipment). This time, we compared healthy canoe athlete and para canoe athlete on upper limb and trunk movement during paddling with an electromagnetic goniometer. Healthy canoe athlete showed greater upper limb elevation movement, while para canoe athlete tend to have greater scapula motion. Canoe competition requires trunk rotation movement,

para canoe athlete with may be using more scapular motion to compensate for lack of trunk rotation of. Our findings suggest that healthy canoe athlete demonstrate greater trunk motion. Therefore, scapular flexibility and control are necessary in the para canoe athlete who is hard to convey a power by kinetic chain from the trunk like healthy canoe athlete. It was suggested that para canoe athlete receiving different training than healthy canoe athlete.

## 要 旨

スポーツの現場において動作解析は重要である。今回カヌー競技カヤック種目に必要な上肢挙上動作やパドリング時の上肢・体幹の運動を、電磁ゴニオメータを用いて測定し、健常カヌー選手とパラカヌー選手を比較した。上肢挙上動作では健常カヌー選手が、パドリング動作ではパラカヌー選手が肩甲骨を大きく動かす傾向があった。回旋動作を必要とするカヌー競技において、座位保持困難な体幹機能障害を有するパラカヌー選手は、体幹の回旋は困難で、回旋動作を肩甲骨や上腕骨によって代償していると考えられる。実際に体幹に関しては健常カヌー選手の方が大きく動いている事がわかった。したがって健常カヌー選手のように体幹からの運動によって力を伝えにくいパラカヌー選手においては肩甲骨の柔軟性とコントロールが必要であり、効果的なトレーニング立案のためには健常カヌー選手とは異なった指導が必要である事が示唆された。

## 諸 言

近年、臨床医学やスポーツの現場において動作解析の必要性が高まっている。これまで動作解析の手法としてはビデオカメラなどの二次元の解析であり、動作解析としては不十分である。そこで赤外線マーカーや磁場を用いた三次元動作解析手法が開発され、上肢や下肢の動作解析は可能となった。しかし、スポーツにおいて重要な皮下に

存在し複雑な動きをする肩甲骨の動作解析は未だ困難である。上肢の運動において肩甲骨上腕関節と肩甲骨胸郭関節は協調して動いている（肩甲骨上腕リズム：Codman；1934年<sup>1)</sup>）。これまで肩甲骨の動きについては様々な研究が行われてきているが、その複雑さゆえに現在でも正確に計測できているとは言い難い。三次元、動的、非侵襲をすべて満たす測定方法では、電磁ゴニオメータで用いられる acromial method が現在のところ最も有用な測定方法であると考えられている。Konda・Yanai ら<sup>2)</sup>はこのシステムを用いてテニスにおける肩甲骨の運動を詳細に報告している。我々はYanai らの指導により、磁場を用いた電磁ゴニオメータ（POLHEMUS社製Liberty）を用いて肩甲骨の三次元動作解析に成功したが、健常者の評価に留まっており、障がい者スポーツへの応用はまだ始まったばかりである。

現在、我々はパラカヌースプリント競技の医学的サポートに従事している。パラカヌースプリント競技のカヤック種目は、2016年に開催されるリオデジャネイロパラリンピックから正式競技として採用される近年急激に成長している競技で、200mという既定された距離の直線コースにてタイムや着順を競う。本競技は現在の国際的なクラス分けの基準では障害の重い順にKL1、KL2、KL3に分けられる。中でもKL1は座位保持困難であることが特徴的所見であり、脊髄損傷など体幹機能に障害のある選手が多く、体幹や骨盤のみならず肩甲骨の運動にも破綻を来している

可能性が高い。カヤックのパドルリング動作は下肢、体幹、上肢の各関節における運動連鎖により、パドルに運動エネルギーを伝達することで達成されるとされており<sup>3)</sup>、体幹機能障害のあるKL1の選手ではそれらの運動連鎖が上手く機能していないと考えられる。今回健常カヌー選手とパラカヌー選手の上肢・体幹の運動を、特に肩甲骨に着目して分析することで、パラカヌー選手の動作の特徴を捉え、二次的な傷害を予防するとともにパフォーマンス向上のための効果的なトレーニング指導につなげられる可能性があると考えた。

本研究の目的は、カヌー競技カヤック種目に必要な上肢挙上動作やパドルリング時の肩甲骨から体幹の動作解析を電磁ゴニオメータにより行うことで、健常カヌー選手とパラカヌー選手を比較し、パラカヌーの競技特性や指導上の注意点を明らかにすることである。

## 1. 方法

### 1. 1 対象

健常カヌー選手（県代表レベル）1名

年齢：24歳，身長：173cm，体重：75kg，BMI：25.1

パラカヌー日本代表選手（国際クラス分けKL1）1名

年齢：16歳，身長：165cm，体重：48kg，BMI：17.6

なお対象に未成年者が含まれるため、対象のみならず保護者に対しても本研究の目的と内容に関して、文書ならびに口頭で説明し、文書にて同意を得て実施した。

### 1. 2 測定方法

#### 1. 2. 1 機器

電磁ゴニオメータ（POLHEMUS社製 Liberty）（図1）

磁気を利用した三次元位置計測装置で、サンプリング周波数 240Hz で計測可能である。磁気式であるため、光学式や音波式とは違い、物理的な障害物に影響されずにデータをリアルタイムで計

測できる。磁場を発生させるトランスミッター、磁場内でトランスミッターに対する位置・方位を計測するセンサー、先端の位置を特定することができるペン状のスタイラス、そしてこれらを制御するコントロールユニットによって構成された6自由度計測装置である。センサーに対する解剖学的表認点の位置とセンサーの6自由度データから、骨の3次元位置・方位を算出し骨形状モデルに平行移動、回転、スケール変換を与えてアニメーション表示する。



図1 電磁ゴニオメータ（POLHEMUS社製 Liberty）

#### 1. 2. 2 センサー貼付部位

胸骨（①）、仙骨（②）、左右肩甲骨（③④）、左右上腕骨（⑤⑥）、左右前腕（⑦⑧）の計8カ所（図2）

#### 1. 2. 3 運動学的データ解析（図2）

各セグメントの解剖学的座標系を定義するために、胸郭では、胸骨柄（SN）、剣状突起（XP）、第7頸椎棘突起（C7）、第8胸椎棘突起（T8）の4点を、骨盤では左右上前腸骨棘（RASI、LASI）、恥骨結合（PS）の3点を、左右肩甲骨においては、肩峰外側縁（AA）、肩甲骨内側縁（SP）、肩甲骨下角（IA）の各3点を、左右上腕骨では、上腕骨内側上顆（ME）、上腕骨外側上顆（LE）の各2点、左右前腕では、肘頭（OL）、尺骨茎状突起（US）、橈骨茎状突起（RS）の各3点、合計22ヶ所をスタイラスを用いてデジタイズし、



図2 センサー貼付部位および運動学的データ解析 (Kondaら<sup>2)</sup> 一部改変)

各セグメントに固定されたセンサーに対する三次元座標値として記録した。また左右肩甲上腕関節中心 (GH) は、上肢下垂位から肩甲上腕関節を中心として、上肢が小さい弧を描くような運動を行っている際の瞬時らせん軸を 30Hz で繰り返し算出し、それらの Pivot point として推定した。

Konda ら<sup>2)</sup> の方法を参考に、電磁ゴニオメータにより計測されたデータをパーソナルコンピュータに取り込み、独自に開発されたソフトウェアを用いて、デジタイズによって計測された解剖学的ランドマークの座標値から各セグメントに固定された解剖学的座標系を定義した。そして、各セグメントの解剖学的座標系から、オイラー角およびカーダン角を用いて、基準座標系に対する各セグメントの方位、各セグメント間の方位を算出した。

#### 1. 2. 4 試技 1

対象を安静座位とし、上肢下垂位から 6 秒間で挙上、最大挙上位で 3 秒間停止、その後 6 秒間で下垂するよう指示した。上肢挙上動作は開始肢位

を前腕中間位、肘伸展位、肩内転 0° とし、矢状面上で両側同時に行った。純粋な肩関節の屈曲運動となるように鏡を設置し、視覚的なフィードバックを行うこととした。数度練習させたあとに、計 5 回測定した。

試技 2: 普段抵抗を感じる程度のゴム抵抗を加えたバドリング動作を 15 パドル行わせることとした。ゴム抵抗を決めるため数度練習をしたあとに、計 3 回行わせた。なお、パラカヌー選手に関しては普段競技に使用している体幹保持装置を使用して行うこととした。

#### 1. 2. 5 計測項目

試技 1: 右肩甲骨の内旋角度・上方回旋角度・後方傾斜角度 (図 3)、右肩甲上腕関節の挙上角度とし、それぞれの変化量の平均値を分析に用いた。

試技 2: 骨盤に対する胸郭の回旋角度・側屈角度・伸展角度 (図 3)、右肩甲骨の内旋角度・上方回旋角度・後方傾斜角度、右肩甲上腕関節の挙上角度とし、右肩甲上腕関節最大挙上位から 1 パ



図3 肩甲骨・体幹の各動作

ドル中のそれぞれの変化量として 15 パドルの中間 3 回の平均値を分析に用いた。

## 2. 結果

### 2. 1 上肢前方挙上時の肩甲骨・上腕骨の運動

#### 2. 1. 1 右肩甲骨内旋角度・上方回旋角度・後方傾斜角度 (図 4)

上肢前方挙上時の肩甲骨内旋角度は健常カヌー選手で最大 36.7°, 最小 26.6°であり変化量は 10.1°, パラカヌー選手で最大 34.0°, 最小 22.8°であり, 変化量は 11.2°であった。

上方回旋角度は健常カヌー選手で最大 22.5°, 最小 -5.3°であり, 変化量は 27.8°, パラカヌー選手で最大 12.9°, 最小 -5.7°であり, 変化量は 18.6°であった。

後方傾斜角度は健常カヌー選手で最大 8.9°, 最小 -10.1°であり変化量は 19.0°, パラカヌー選手で最大 7.6°, 最小 -7.2°であり, 変化量は 14.8°であった。

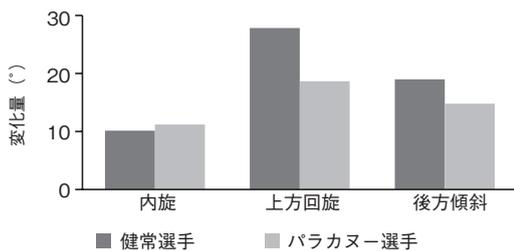


図 4 上肢前方挙上時の肩甲骨の各運動における変化量

#### 2. 1. 2 右肩甲上腕関節挙上角度 (図 5)

右上肢前方挙上時の右肩甲上腕関節挙上角度は, 健常カヌー選手で最大 -8.2°, 最小 -120.6°

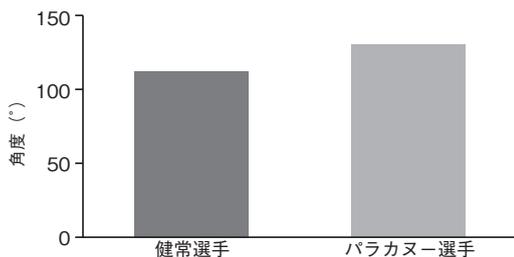


図 5 右上肢前方挙上時の右肩甲上腕関節挙上角度

で変化量は 112.4°, パラカヌー選手で最大 -1.4°, 最小 -131.6°で変化量は 130.2°であった。

### 2. 2 パドリング動作時の体幹・肩甲骨・上腕骨の運動

#### 2. 2. 1 パドリング動作時の骨盤に対する胸郭の回旋角度・側屈角度・後傾角度 (図 6)

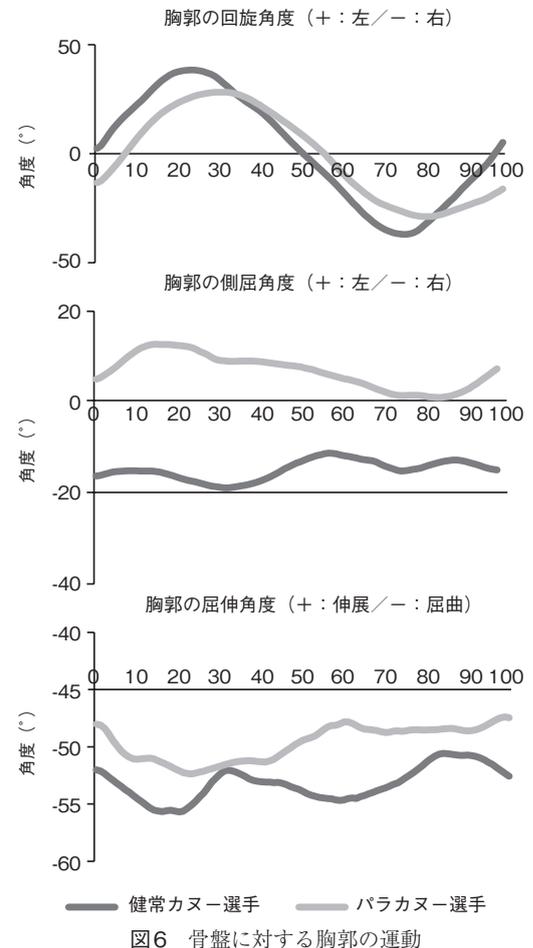


図 6 骨盤に対する胸郭の運動

パドリング動作時の骨盤に対する胸郭の回旋角度は健常カヌー選手で最大 38.4°, 最小 -36.9°で変化量は 75.3°, パラカヌー選手で最大 28.3°, 最小 -28.8°で変化量は 57.1°であった。

側屈角度は健常カヌー選手で最大 12.7°, 最小 1.0°で変化量は 11.7°, パラカヌー選手で最大 -11.4°, 最小 -19.0°で変化量は 7.6°であった。

伸展角度は健常カヌー選手で最大  $-50.6^{\circ}$ ，最小  $-55.7^{\circ}$  で変化量は  $5.1^{\circ}$ ，パラカヌー選手で最大  $-47.4^{\circ}$ ，最小  $-52.4^{\circ}$  で変化量は  $5.0^{\circ}$  であった。

### 2. 2. 2 右肩甲骨の内外旋角度・上下方回旋角度・前後方傾斜角度 (図7)

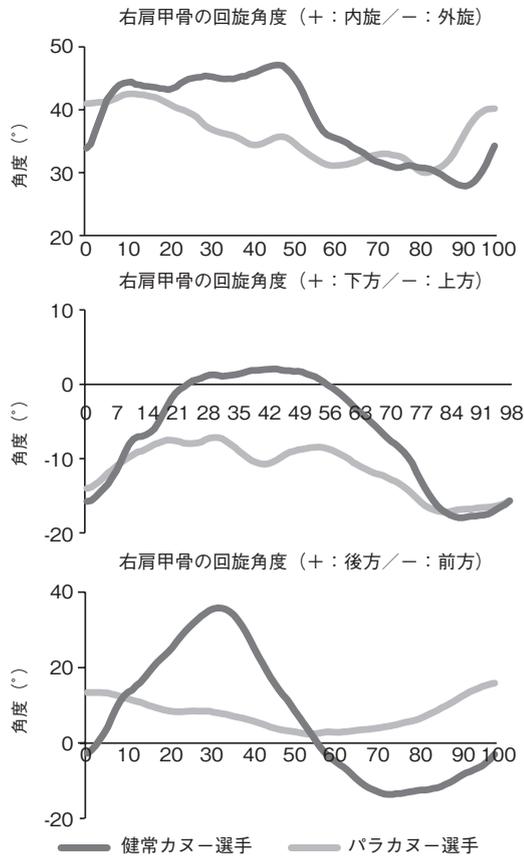


図7 右肩甲骨の運動

パドリング動作時の胸郭に対する右肩甲骨の内外旋角度は健常カヌー選手で最大  $42.5^{\circ}$ ，最小  $30.0^{\circ}$  で変化量は  $12.5^{\circ}$ ，パラカヌー選手で最大  $47.1^{\circ}$ ，最小  $27.8^{\circ}$  で変化量は  $19.3^{\circ}$  であった。

上下方回旋角度は健常カヌー選手で最大  $-7.2^{\circ}$ ，最小  $-17.2^{\circ}$  で変化量は  $10.0^{\circ}$ ，パラカヌー選手で最大  $2.0^{\circ}$ ，最小  $-18.0^{\circ}$  で変化量は  $20.0^{\circ}$  であった。

前後方傾斜角度は健常カヌー選手で最大  $15.9^{\circ}$ ，最小  $2.4^{\circ}$  で変化量は  $13.5^{\circ}$ ，パラカヌー選手で最大  $35.8^{\circ}$ ，最小  $-13.6^{\circ}$  で変化量は  $49.4^{\circ}$  であった。

### 2. 2. 3 右肩甲骨上腕関節挙上角度 (図8)

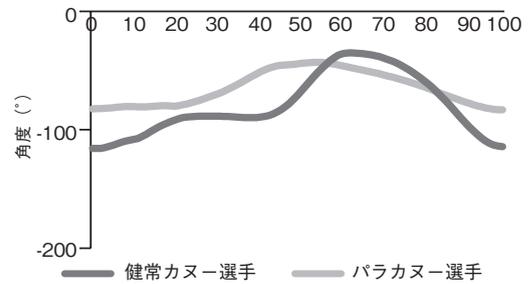


図8 右肩甲骨に対する右上腕骨の挙上・下降角度

パドリング動作時の右肩甲骨上腕関節挙上角度は健常カヌー選手で最大  $-43.0^{\circ}$ ，最小  $-83.2^{\circ}$  で変化量は  $40.2^{\circ}$ ，パラカヌー選手は最大  $-35.1^{\circ}$ ，最小  $-115.8^{\circ}$  で変化量は  $80.7^{\circ}$  であった。

## 3. 考 察

### 3. 1 上肢前方挙上時の肩甲骨・上腕骨の運動

スポーツを行う上で，上肢の挙上動作は多くの場面で求められる動きであり，元来，上肢挙上における肩甲骨運動は上方回旋が重要視されていた<sup>4,5)</sup>。しかし，近年は肩甲骨上方回旋以外の運動の重要性も明らかになっており，特に後方傾斜の重要性が報告されている<sup>6)</sup>。

本研究では，上肢挙上時の肩甲骨運動に関して，上方回旋，後方傾斜，内旋を分析に用いた。内旋は胸郭に沿った肩甲骨の外転運動を示す指標となり，上方回旋に伴う運動として重要であると考えた。健常カヌー選手とパラカヌー選手との比較において，肩甲骨ではどのパラメータも健常カヌー選手の方が大きな値となった。三次元で計測した矢状面上での挙上では肩甲骨上腕リズムは2.4:1という報告があるが<sup>7)</sup>，健常カヌー選手は4:1，パラカヌー選手は7:1となり，異なる値となった。しかし，同じ電磁ゴニオメータを用いた動的な評価で4.3:1であったとする報告もあり<sup>4)</sup>，健常カヌー選手の結果は類似したものであった。パラカヌー選手の上肢挙上動作が肩甲骨上腕関節に偏った理由としては，対象は国際クラス分けでKL1と

いう座位保持困難な障害を持つ選手であることが挙げられる。上肢挙上動作においては、肩甲骨上方回旋には僧帽筋上部と下部、および前鋸筋の収縮が必要である<sup>8)</sup>。また、内旋や後方傾斜にも前鋸筋が関与する。一方、前方傾斜には三角筋前部、上腕二頭筋が関与する。体幹機能障害の選手においては、僧帽筋下部、前鋸筋の収縮低下により上方回旋や後方傾斜が十分起こらず、挙上角度が肩甲骨上腕関節の運動に偏る結果となったと推察できる。

### 3. 2 バドリング動作時の体幹・肩甲骨・上腕骨の運動

バドリング動作について、日本トップレベルの選手は水上で重心を制御しながら体幹を回旋させるスキルを有しているという報告<sup>9)</sup>や、前方への推進力を得るための重要な要素として骨盤を含めた体幹の回旋運動を挙げている報告<sup>3)</sup>があり、体幹の回旋動作は重要である。

体幹の運動について、健常カヌー選手はパラカヌー選手に比べて、左右回旋角度および側屈角度は高い値となり、屈伸角度は同程度の値であった。座位保持困難なパラカヌー選手の体幹の運動が、健常カヌー選手と比べて少ないことは容易に想像できるが、それぞれのパラメータを時系列でみると差があった左右回旋角度と側屈角度で異なる動きをしていることがわかる。まず左右回旋角度について、我々の仮説は体幹機能障害があり、座位保持困難であれば体幹回旋は少なく肩甲骨や上腕骨による代償動作が顕著に出ると考えていた。しかし、骨盤に対する胸郭の回旋角度の変化量は健常カヌー選手が75.3°、パラカヌー選手で57.1°と18.2°、左右に9.1°ずつの差しかなかった。今回の回旋角度は骨盤に対する胸郭の角度であり、骨盤を固定していなかった健常カヌー選手は骨盤も連動して回旋しており、差としての値が低くなったと考えられる。また、図6が示す通り、

パラカヌー選手の回旋角度のpeakのタイミングが健常カヌー選手に比べて遅いことは体幹主導で回旋している健常カヌー選手と上肢の振りに伴って体幹が回旋してくるパラカヌー選手の差と考えられ、角度としては近い値であったとしても全く異なる運動であると考えられる。また、側屈角度については健常カヌー選手は左右のpeakが明らかなのに対して、パラカヌー選手のは明確ではない。パラカヌー選手はバランスが取りにくく、パドリング動作の間できるだけ正中位を保とうとする。その結果、意図的に体幹を動かしている健常カヌー選手に比べて不安定でpeakがはっきりしない軌跡を描くと考えられる。

次に肩甲骨の運動(図7)についてだが、内外旋角度、上下方回旋角度、前後方傾斜角度のいずれにおいてもパラカヌー選手が高い値となった。胸郭に対する肩甲骨の運動を評価しているため、より体幹の運動が大きい健常カヌー選手に比べて、パラカヌー選手は上肢による代償によってパフォーマンスを維持しようとしていると考えられる。しかし、健常カヌー選手においても肩甲骨の運動は行われており、体幹から上肢への運動が重要であることが示唆された。

肩甲骨に対する上腕骨の運動については、挙上角度に大きな差がみられ、それにより変化量でもパラカヌー選手が高い値となり、肩甲骨同様、体幹機能不全の代償として上腕骨を過剰に動かしていると考えられた。また、図7と図8において上腕骨最大挙上時の肩甲骨の前後方傾斜角度をみると肩甲骨が前方に傾斜している時に最大挙上していることがわかる。肩痛を訴える患者は後方傾斜が減少しているという報告<sup>10)</sup>があることなどからも傷害の予防という観点から、注意が必要であると考えられる。したがって、パラカヌー選手の内、特にKL1の選手に関しては体幹機能を代償する肩甲骨、上腕骨の可動域を十分に確保し、自由に動かせる機能と上腕骨へスムーズに力

を伝える運動性を重視したトレーニングが必要になると考える。

#### 4. まとめ

電磁ゴニオメータによる三次元動作解析装置を用いて健常カヌー選手とパラカヌー選手の体幹から肩甲骨、上腕骨の運動を測定し比較した。肩甲骨以遠に関しては上肢挙上動作では健常カヌー選手が、パドリング動作ではパラカヌー選手が大きく動く傾向にあった。体幹はパドリング動作において健常カヌー選手の方が大きく動くことがわかった。パラカヌー選手は体幹機能の代償動作として上肢帯を利用しており、傷害予防の観点からも異なる指導が必要であることが示唆された。

#### 謝 辞

本研究に助成頂いた公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究実施にあたり多大なご協力を頂いた早稲田大学科学院 矢内利政教授に厚く御礼申し上げますとともに、本研究に快く参加して下さいました被験者の皆様に深く感謝申し上げます。

#### 文 献

- 1) Codman E.A., The shoulder., Thomas Todd, Boston., pp.32-64(1934)
- 2) Konda S., Yanai T., Sakurai S., Scapular rotation to attain the peak shoulder external rotation in tennis serve. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 42: 1745-1753(2010)
- 3) 宮崎茂明., 帖佐悦男., 他., カヤック動作におけるパドリング時の骨盤動作解析., *臨床バイオメカニクス.*, 35: 297-302(2014)
- 4) McQuade K.J., Smidt G.L., Dynamic scapulohumeral rhythm: the effects of external resistance during elevation of the arm in the scapular plane., *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy.* 27(2) :125-133(1998)
- 5) Kon Y., Nishinaka N., Gamada K., Tsutsui H., Banks S.A., The influence of handheld weight on the scapulohumeral rhythm., *Journal of Shoulder and Elbow Surgery.*, 17(6) : 943-946(2008)
- 6) Kibler W.B., Sciascia A., Current concepts: scapular dyskinesis., *British Journal of Sports Medicine.*, 44(5) : 300-305(2010)
- 7) Ludewig P.M., Phadke V., Braman J.P., Hassett D.R., Cieminski C.J., LaPrade R.F., Motion of the Shoulder Complex During Multiplanar Humeral Elevation. *Journal of Bone and Joint Surgery-American.*, 91A(2) : 378-389(2009)
- 8) Bagg S.D., Forrest W.J., A biomechanical analysis of scapular rotation during arm abduction in the scapular plane., *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation.*, 67(6) : 238-245(1988)
- 9) 粕山達也., 都築和久., 塩沢寛治., カヌースプリント日本トップレベル選手と高校生選手のストローク動作の比較および傷害発生要因の検討., *スポーツ傷害.*, 19:22-23(2014)
- 10) Lukasiewicz A.C., McClure P., Michener L., Pratt N., Sennett B., Comparison of 3-dimensional scapular position and orientation between subjects with and without shoulder impingement., *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy.*, 29(10) : 574-586(1999)

# 障害者スポーツの病態解析と機器の開発の研究 —バイオメカニクス研究を中心に—

宮崎大学	帖佐悦男
(共同研究者) 同	鳥取部光司
同	田村宏樹
同	黒木洋美
同	山子剛

## **Pathological Analysis of Adaptive Sports and Study of Device Development -Focused on Biomechanics-**

by

Etsuo Chosa, Koji Totoribe, Hiroki Tamura,  
Hiromi Kuroki, Go Yamako  
*University of Miyazaki*

### ABSTRACT

As pathological analysis of adaptive sports, we focused on risk factors of injury in wheelchair tennis and studied the characteristics of trunk movement and upper limb movement during the serve motion. We also report our review of propulsion motion and seat pressure distribution in wheelchair marathon for future device development.

The subjects of wheelchair tennis were two wheelchair tennis players and one normal tennis player (Normal). One of the wheelchair tennis players had quadriplegia (Quad) and the other had paraplegia (Para). The results with trunk movement demonstrated that Quad showed right lateral bending at the maximum external rotation (MER) and had decreased flexion and left rotation at the impact (IMP) compared to Normal. Para showed left lateral bending, decreased right rotation and extension at the MER, and

had left rotation and extension at the IMP compared to Normal. In regard to upper limb movement, Quad showed increased shoulder extension and elbow flexion at the MER, and had decreased shoulder flexion, and elbow flexion at the IMP compared to Normal. Para showed decreased shoulder abduction and flexion, and increased elbow flexion at the MER, and had decreased shoulder abduction and flexion at the IMP compared to Normal. The results suggest the possibility that trunk movement affects upper limb movement, and loss of the trunk function leads to more stress on the shoulder and elbow, which may cause injury.

We also analyzed propulsion motion of wheelchair marathon athletes and measured seat pressure distribution using the system. Motion analysis of wheelchair marathon allowed individual check and helped improve the performance of athletes. We will consider the implementation of analysis methods corresponding to faster motions.

## 要 旨

障害者スポーツの病態解析として、車いすテニスの障害発生要因に着目し、サーブ動作における体幹運動と上肢運動との運動特性について研究を行った。また、機器の開発につなげるため、車いすマラソンにおける駆動フォームと座圧分布について検討したので報告する。

車いすテニスの対象は車いすテニス選手2名および一般テニス選手 (Normal) 1名とした。車いすテニス選手のうち1名は、四肢麻痺を呈する選手 (Quad) で、もう1名は対麻痺を呈する選手 (Para) であった。結果は、体幹運動について、Quadは、最大外旋 (maximum external rotation ; MER) 時右側屈を示し、インパクト (impact ; IMP) 時 Normalと比較して屈曲の減少および左回旋を示した。Paraは、MER時 Normalと比較して左側屈、右回旋の減少および伸展を示し、IMP時左回旋・伸展を示した。上肢運動について、肩関節ではQuadは、MER時 Normalと比較して肩関節伸展および肘関節屈曲の増加を示し、IMP時肩関節屈曲の減少、および肘関節屈曲を示した。Paraは、MER時 Normalと比較して肩関節外転・

屈曲の減少、肘関節屈曲の増加を示し、IMP時肩関節外転・屈曲の減少を示した。この結果から、体幹運動は上肢運動に影響を及ぼし、体幹機能低下により肩関節、肘関節へのストレスが増大し、障害を発生させる可能性があることが示唆された。また、本システムを使用して、車いすマラソン競技選手の駆動フォームの解析と圧座分布測定を行った。車いすマラソンの動作解析では、個別のチェックが可能となり、選手のより良いパフォーマンス向上に有用であった。今後は、より高速な動作に対応した解析手法を検討している。

## 緒 言

障害者スポーツにおいては、車いすに乗って行うスポーツは多く、競技力向上のサポートとしての支援は不可欠である。車いすテニスは、車いすに乗りテニスを行う競技であり、車いすを使用することや2バウンドまでの返球が認められていること以外は、一般テニスとほぼ同じルールで実施される<sup>1)</sup>。一般テニスのサーブ動作は全身運動であり、下肢、体幹、上肢の各関節における運動連鎖により、ラケットに運動エネルギーを伝達することで達成される。一方、車いすテニスのサーブ

動作では下肢，体幹機能が低下しているため，上肢優位の動作になることが推測される。

車いすテニスの障害に関する調査研究については，肘関節，手関節，肩関節の順に多く認めたというもの<sup>2)</sup>や肩甲帯を含めた肩関節，肘関節，頸部の順に多く，サーブ動作が最も多く痛みを認めたというもの<sup>3)</sup>が報告されており，サーブ動作における上肢の障害が多いことが指摘されている。サーブ動作は細分化すると，ボールが手から離れ，ラケット把持側の肩関節が最大外旋（maximum external rotation of the racquet arm；MER）するまでをコッキング相，MER からラケットとボールが当たるインパクト（racket-ball impact；IMP）までをフォワードスイング相，IMP からラケットが地面に最も近づくまでをフォロースルー相，のように分けられる<sup>4,5)</sup>。サーブ動作時に痛みを訴える位相は，MER から IMP までのフォワードスイング相，特にIMP時が多い<sup>3)</sup>。

一般テニスのサーブ動作において，IMPの強さに影響を及ぼしラケット速度を得るための重要な要素の1つに，体幹運動が挙げられる。車いすテニス選手は，原疾患により体幹機能が低下しているため骨盤後傾位で脊柱の後彎姿勢を呈することが多く，サーブ動作における体幹から上肢への的確な運動連鎖の遂行が低下している印象を受ける。したがって障害の予防，診断および治療の方法，さらに競技力の向上を検討するうえで，サーブ動作における体幹と上肢との運動の関係を分析することが重要になる。

車いすテニスのサーブ動作における運動学的研究については，肩・肘・手関節角度，肩関節モーメント，IMP時の球速や肩甲帯周囲の筋活動を

調べたものが報告されている<sup>4,5,6)</sup>。

しかし，実際の競技環境におけるサーブ動作時の体幹と上肢との運動の関係を分析した報告はない。そこで今回，車いすテニスと一般テニスのサーブ動作における体幹と上肢運動を検討の対象とし，実際の競技環境にて計測可能な慣性センサ式3次元動作分析装置を用いて運動特性を分析することを試みた。また，室内においては，本システムを使用して，車いすマラソン競技選手の駆動フォームの解析と圧座分布測定を行った。

本稿では，車いすテニスの障害発生要因として，車いすテニスのサーブ動作における体幹運動と上肢運動との関連性についての研究と車いすマラソンの駆動フォームと座圧分布について検討した結果を報告する。

## 1. 研究方法

### 1.1 車いすテニス

対象は車いすテニス選手2名および一般テニス選手1名とした。全例右利きの男性で，車いすテニス選手のうち1名は，脳性麻痺で四肢麻痺を呈する選手（Quad）であった。もう1名は脊髄梗塞で対麻痺を呈する選手（Para）であった。QuadとParaおよび一般テニス選手（Normal）の3群に分類し検討することとした。Quadは，年齢13歳，身長158cm，体重41.8kg，Paraは，年齢12歳，身長150cm，体重32.0kgであった。Normalは，年齢14歳，身長166cm，体重49.5kgであった（表1）。

対象が未成年者であるため，対象者のみならず保護者，指導者に本研究の目的と内容に関して説明し，参加に同意を得た。

表1 対象者の身体特性

対象者	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)	ラケット側	原疾患	ベルト種類	競技歴(年)
Quad	13	158	41.8	右	脳性麻痺	骨盤,足部	2
Para	12	150	32.0	右	脊髄梗塞(第12胸椎)	体幹,骨盤,大腿,足部	5
Normal	14	166	49.5	右	—	—	6

a Quad：四肢麻痺；Para：対麻痺；Normal：健常者

サーブ動作計測には慣性センサ式3次元動作分析装置(Xsens Technologies B.V.社製, MVN)<sup>7)</sup>を使用した。3次元の磁力計, 加速度計, レートジャイロが内蔵されている小型慣性センサ(Xsens Technologies B.V.社製, MTx, MTx-L)を全身(頭部, 手部, 前腕部, 上腕部, 肩甲骨部, 胸部部, 骨盤部, 大腿部, 下腿部, 足部)に17個固定した。また, 2個の送信機(Xsens Technologies B.V.社製, Xbus Master)をQuadとParaは車いすに, Normalは腰部にそれぞれ設置し, サンプリング周波数は120Hzとした。対象者の身体寸法を測定入力した後に, QuadとNormalは立位にて規定のキャリブレーションを実施した。Paraは立位保持が困難であったため, 端座位にてキャリブレーションを実施した。計測方法は実際のテニスコートにて硬式テニスボールを使用し, サーブの種類はフラットサーブとした。十分な準備運動と違和感なくサーブ動作ができるように数度練習を行わせた後, 成功した全力サーブ動作を7回計測した。

検討項目はサーブ動作時の胸椎関節(第8/9胸椎), 肩関節, 肘関節として, 胸椎側屈, 回旋, 屈曲・伸展角度, 肩関節外転・内転, 屈曲・伸展角度, 肘関節屈曲・伸展角度の大きさとした。コッキング相, フォワードスイング相における各関節角度について検討を行った。

慣性センサ式3次元動作分析装置で得られた運動学的データは, 専用の解析ソフトウェア(Xsens Technologies B.V.社製, MVN Studio3.1)を使用し, 解析した。関節の回転は近位部の人体部位に対する遠位部の人体部位の向きとした。各関節角度はZXY系のオイラー角で算出し, QuadとNormalは立位上肢・体幹・下肢の解剖学的肢位をゼロ点と決定した。Paraは端座位上肢・体幹の解剖学的肢位をゼロ点と決定した。

各関節角度は以下の基準によって定義した。胸椎関節角度は第8胸椎部と第9胸椎部, 肩関節角

度は肩甲骨部と上腕部, 肘関節角度は上腕部と前腕部とでなす角度とした。各運動方向は右側屈, 左回旋, 屈曲, 外転方向をプラスの向きとした。

各関節角度は, コッキング相はMER, フォワードスイング相はIMP時の角度を算出し, 分析の対象とする代表値には成功した全力サーブ動作を7回計測したうちの3, 4, 5回目の3回分のデータの平均値を採用した。

## 1. 2 車いすマラソン

車椅子レースの選手の競技技術向上のために, 車椅子陸上室内練習機(ローラー)(図1)上での駆動フォーム解析を, 車椅子テニスで使用した慣性センサ式3次元動作分析装置を使用し, 解析した。また, 同時に駆動時の座圧を圧電シートを用いて測定した。



図1 車椅子陸上室内練習機(ローラー)使用時の様子

## 2. 結果

### 2. 1 車椅子テニス

サーブ動作におけるMER時の関節角度(図2)は, 胸椎関節では, Normalが左側屈・右回旋・屈曲を示したのに対して, Quadは右側屈・右回旋・

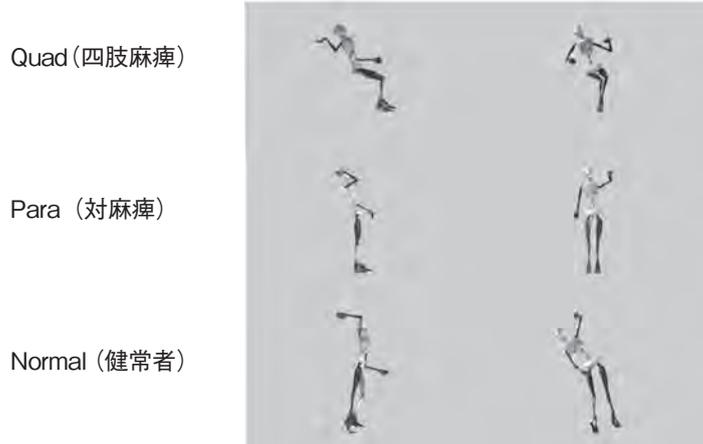


図2 MER (maximum external rotation of the racquet arm) 時の体幹, 上肢の位置

Quad と Normal は立位にて規定のキャリブレーションを実施したため, 全身の人体モデルにて描出されている。  
Para は端座位にてキャリブレーションを実施したため, 下半身を無視した上半身・体幹の人体モデルで描出されている。

表2 MER時の関節角度

対象者	第8/9胸椎関節(°)			肩関節(°)		肘関節(°)
	側屈(右;+)	回旋(左;+)	屈曲(+)	外転(+)	屈曲(+)	屈曲(+)
Quad	0.2±0.3	-3.6±1.4	1.0±0.5	69.3±5.4	-28.6±3.7	104.3±6.2
Para	-1.3±0.4	-1.6±1.3	-4.0±0.1	19.1±2.7	99.4±4.2	116.4±1.9
Normal	-6.7±0.6	-4.0±0.9	0.3±0.8	54.5±1.3	143.2±6.0	73.8±15.3

a MER: maximum external rotation of the racquet arm

b Quad:四肢麻痺; Para:対麻痺; Normal:健常者

c 平均±標準偏差

屈曲を示し, Para は左側屈・右回旋・伸展を示した。肩関節では3群とも外転を示したが, Para は Quad・Normal と比較して, 低値を示す傾向にあった。また, Para・Normal が屈曲を示したのに対して, Quad は伸展を示した。肘関節は3群

とも屈曲を示したが, Normal は Quad・Para と比較して, 低値を示す傾向にあった(表2)。

サーブ動作における IMP 時の関節角度(図3)は, 胸椎関節では, Normal が左側屈・右回旋・屈曲を示したのに対して, Quad は左側屈・左回旋・

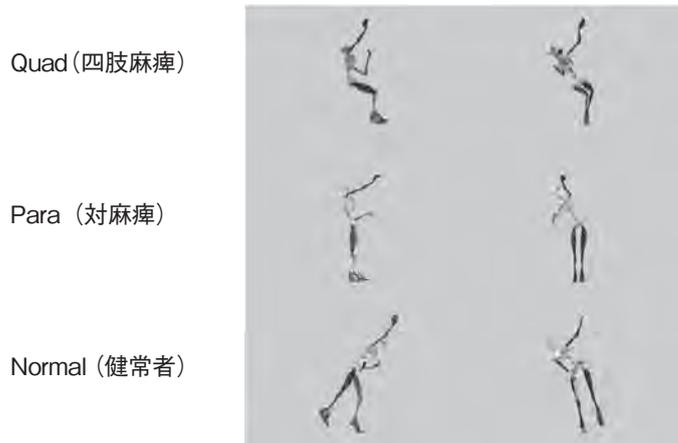


図3 IMP (racket-ball impact) 時の体幹, 上肢の位置

Quad と Normal は立位にて規定のキャリブレーションを実施したため, 全身の人体モデルにて描出されている。  
Para は端座位にてキャリブレーションを実施したため, 下半身を無視した上半身・体幹の人体モデルで描出されている。

表3 IMP時の関節角度

対象者	第8/9胸椎関節(°)			肩関節(°)		肘関節(°)
	側屈(右;+)	回旋(左;+)	屈曲(+)	外転(+)	屈曲(+)	屈曲(+)
Quad	-4.2±0.8	2.3±1.1	3.9±0.7	56.4±2.3	83.0±16.8	52.7±16.9
Para	-5.4±0.5	4.5±1.2	-1.3±0.4	18.0±6.4	106.5±10.4	-5.6±2.2
Normal	-6.7±0.9	-2.2±0.9	6.7±0.9	63.6±1.8	144.6±13.6	-1.3±6.9

a IMP : raquet-ball impact  
 b Quad:四肢麻痺; Para:対麻痺; Normal:健常者  
 c 平均±標準偏差

屈曲を示し, Para は左側屈・左回旋・伸展を示した. 肩関節では3群とも外転を示したが, Para はQuad・Normalと比較して, 低値を示す傾向にあった. また, 3群とも屈曲を示したが, Quad はPara・Normalと比較して, 低値を示す傾向にあった. 肘関節はPara・Normalが伸展を示したのに対して, Quad は屈曲を示した. (表3).

## 2. 2 車いすマラソン

図4に車いす駆動中の座圧を示す. 車椅子に座っている時に, どのような圧が座面に加わっているのかを定量的客観的に示すことで, 選手自身の座り方の工夫, 椅子の形状・材質の工夫等を検討できる情報として提供している.

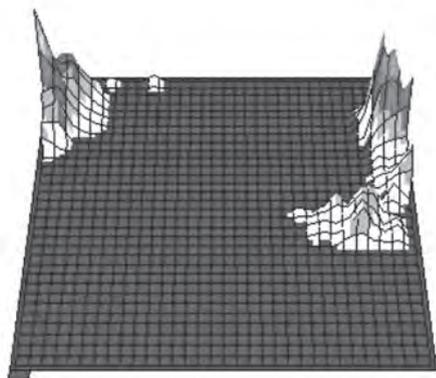


図4 圧電シートからの座圧の計測結果  
 左側面に大きな圧が加わっていることがわかる

モーションキャプチャーの計測結果において, 選手から一番要望の多かったものは, 肩関節の屈曲角度に関するものであり, 一例の肩関節の屈曲

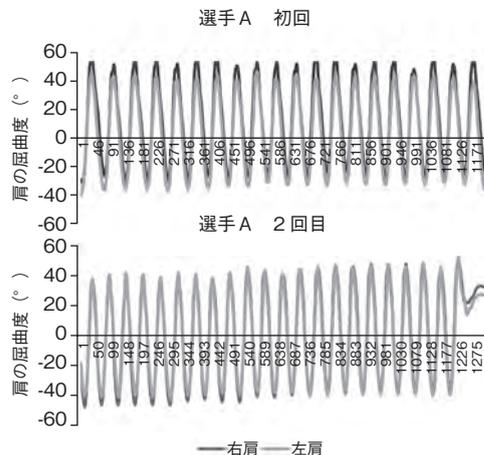


図5 モーションキャプチャーシステムで計測した値から算出した肩の屈曲度の変化の様子  
 横軸はサンプリングデータ数. 縦軸は肩の屈曲度.  
 2回目は初回から3か月後の計測結果.

角度を図5に示す. 初回は, 右肩と左肩の屈曲度のバランスが悪く, 右肩の方が大きくなっている. その点を選手自身が理解し, 2回目(3か月後)は注意しながら動作することにより, 左右のバランスは安定した. その後の選手本人の反省点として, バランスを過剰に意識しすぎたために, 肘の引き上げる高さが減少したため, 左右のバランスを維持しながら肘を引き上げる高さを増大させる必要があると自己分析を行い, 現在は, その点の改善を図りながら競技技術向上のための練習を行っている.

## 3. 考察

車いすテニスの研究においては, サーブ動作における胸椎関節, 肩関節, 肘関節に着目し, Quad と Para および Normal の3群による比較から, 車いすテニスの障害発生要因としての体幹運動と上肢運動との関連性を検討した.

体幹運動について、今回の結果では Normal は、MER 時・IMP 時とも左側屈・右回旋・屈曲を示し、MER から IMP にかけて屈曲の増加を示した。これに対して Quad は、MER 時右側屈を示し、IMP 時 Normal と比較して屈曲の減少および左回旋を示した。Para は、MER 時 Normal と比較して左側屈、右回旋の減少および伸展を示し、IMP 時左回旋・伸展を示した。

上肢運動について、肩関節では Normal は、MER 時・IMP 時とも外転・屈曲を示し、肘関節では MER 時屈曲、IMP 伸展を示した。これに対して Quad は、MER 時 Normal と比較して肩関節伸展および肘関節屈曲の増加を示し、IMP 時肩関節屈曲の減少、および肘関節屈曲を示した。Para は、MER 時 Normal と比較して肩関節外転・屈曲の減少、肘関節屈曲の増加を示し、IMP 時肩関節外転・屈曲の減少を示した。

道上<sup>8)</sup>は、Normal における右利き世界一流男性テニスプレイヤーのサーブ動作について、トスアップから IMP にかけて体幹左側屈、伸展を示し、その後 IMP に向けて屈曲を示したと述べており、体幹の左側屈運動はインパクト高獲得、屈曲運動はラケットやボールの速度獲得にそれぞれ貢献していることを報告している。

これらのことから、ラケットやボールの速度を引き出すために、Normal では MER から IMP にかけての体幹屈曲運動が起こるが、Quad と Para では原疾患により十分な屈曲運動が遂行できないため、左回旋運動によりこれを補っていると考えられる。また、インパクト高獲得のために、Normal では MER 時、体幹左側屈運動が起こるが、Quad と Para では原疾患により十分な左側屈運動が遂行できていない。そのため MER 時、Quad では肘下がり、かつ肘を後方に引いた動作、Para では肘下がり、かつ肘を前方に突き出した動作となっていると考えられる。

Cavedon ら<sup>6)</sup>は、原疾患の障害レベルの違い

により、サーブ動作の IMP 時の肩関節屈曲角度に有意差を認め、軽度より重度な障害を有するほうが屈曲角度は減少していたことを報告している。今回の結果においても、Para は Normal と比較してまた、Quad は Para と比較して、それぞれ IMP 時の肩関節屈曲の減少を示しており、同様の傾向であった。Quad の肘関節屈曲の増加はインパクト高を補うために生じたものと考えられる。

以上のことから、車いすテニスの障害発生要因として、最も肩関節、肘関節への負荷が大きいとされるフォワードスイング相にて、MER 時の体幹側屈運動減少による肘さがりや、IMP 時の肩関節屈曲運動減少による肘屈曲増加といった現象は肩関節、肘関節へのストレスを増大し、障害を発生させる可能性があることが示唆された。

車いすマラソンの動作解析においては、選手自身の肩関節屈曲度から左右のバランス及び肘の高さの改善などを選手本人が知ることで競技技術向上に繋がる情報を提示することができた。また結果を選手にフィードバックし、他の選手と比較することで選手の特徴を把握することができた。障害者車椅子レースは、選手の障害の程度によって個人差が大きく、個別にフォーム解析を行い、個別のフォームの工夫を図る必要があると考えられ、今後も継続的に駆動フォーム解析を行い、その情報をフィードバックして競技技術向上を図り、障害者車椅子レースでパラリンピック出場を目指すことができる選手の育成に繋げていきたい。本研究の limitation として、対象者が少ないことや障害者スポーツに関しての三次元動作解析の研究手法が確立していないことである。

今後は、研究開発をしている小型加速度センサを用いた運動の連動性評価法<sup>9)</sup>を導入し、より高速な動作の詳細な解析を検討している。

#### 4. 結 論

車いすテニスの動作解析では、障害発生要因として、車いすテニスのサーブ動作における体幹運動と上肢運動との関連性に着目し、実際の競技環境にて計測可能な慣性センサ式3次元動作分析装置を用いて運動特性を分析した結果、体幹運動は上肢運動に影響を及ぼし、体幹機能低下により肩関節、肘関節へのストレスが増大し、障害を発生させる可能性があることが示唆された。車いすマラソンの動作解析では、個別のチェックが可能となり、選手のより良いパフォーマンス向上に重要であると思われる。

#### 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) ITF Wheelchair Tennis Regulations(2015)
- 2) 高田正三, 身体障害者のスポーツ 車椅子スポーツにおける傷害, 関節外科, 25(10), 181-188 (2006)
- 3) 木村大輔, 岩田 晃, 川崎 純, 島雅人, 奥田 邦晴, 車いすテニス選手のスポーツ障害に関する調査, 理学療法科学, 26(5), 631-635(2011)
- 4) Reid M., Elliott B., Alderson J., Shoulder joint kinetics of the elite wheelchair tennis serve., *Br. J. Sports. Med.*, 41(11), 739-744 (2007)
- 5) 木村大輔, 岩田晃, 川崎純, 島雅人, 奥田 邦晴, 車いすテニスにおけるサーブ動作の運動学的解析, 理学療法学, 39(2), 59-66(2012)
- 6) Cavedon V., Zancanaro C., Milanese C., Kinematic analysis of the wheelchair tennis serve: Implications for classification., *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, 24(5), e381-388(2014)
- 7) Xsens Technologies B.V., MVN User Manual Revision B., (2010)
- 8) 道上静香, 世界一流男子テニス選手のファーストサービス動作のキネマティクスの分析, 彦根論叢, 399, 114-130(2014)
- 9) K. Fuji, H. Tamura, T. Maeda, K. Tanno, Development of a motion analysis system using acceleration sensors for tennis and its evaluations, *Journal of the Artificial Life and Robotics*, 16 (2), 190 - 193 (2011)

# 車いすスポーツアスリートの肘障害実態調査による 車いすスポーツ肘障害の予防に関する研究

和歌山県立医科大学	中 村 健
(共同研究者) 同	西 村 行 秀
同	荒 川 英 樹
同	尾 川 貴 洋
同	三 井 利 仁

## The Actual Condition Survey for the Prevention of Elbow Injury in Wheelchair Marathon Athletes (first report)

by

Takeshi Nakamura, Yukihide Nishimura, Hideki Arakawa,  
Takahiro Ogawa, Toshihito Mitsui  
*Wakayama Medical University*

### ABSTRACT

There are not enough reports about elbow joint injury of disabled sports. In present study, we investigated about the observations of elbow joint in wheelchair marathon athlete for the prevention of elbow joint injury. Thirty five wheelchair marathon athletes, who participated in Oita international wheelchair marathon race, were recruited for present research. Elbow pain on motion, tenderness, Tinel's sign, ulnar nerve palsy and range of motion on elbow were investigated. Five athletes had elbow pain on motion, and 15 athletes had tenderness. The tenderness parts of 14 athlete were left lateral epicondyle of humerus. Seven athletes had left Tinel's sign and 6 athletes had right Tinel's sign. Two athletes had left ulnar nerve palsy. These abnormal findings

on left side elbow were more than right side. There were no limit of range of motion on elbow. From present results, about half of wheelchair marathon athletes had some abnormal findings on elbow, and the abnormal findings had laterality (left side > right side). Moreover, the most high frequency parts of tenderness was lateral epicondyle of humerus. We assumed that these results might be the one of important new findings for the prevention of elbow joint injury.

## 要 旨

障がい者スポーツにおける肘障害の詳細な報告はほとんどない。今回、車いすマラソンアスリートの肘障害の実態を解明し、障害予防につなげることを目的とし肘検診を行った。対象は、大分国際車いすマラソン大会の参加選手 35 名（男性 34 名、女性 1 名）を対象とした。肘検診では、運動時痛の有無、圧痛の有無、尺骨神経 Tinel 徴候の有無、尺骨神経麻痺の有無、関節可動域の測定を行った。運動時痛は、35 名中 5 名に認め、圧痛は、35 名中 15 名に認めた。圧痛の部位は、左外側上顆が 15 名中 14 名であった。尺骨神経所見では、Tinel 徴候が左側 7 名、右側 6 名認め、尺骨神経麻痺を左側 2 名に認めた。疼痛・圧痛・尺骨神経所見の全てにおいて、右側に比べ左側で多くの異常所見を認めた。左右ともに明らかな可動域制限は認めなかった。今回の肘検診結果より、車いすマラソンアスリートでは、半数近くの割合で、何らかの肘関節症状があることが判明した。更に、圧痛部位としては、外側上顆部で高頻度に認め、肘症状の発症には左右差があり左側に多い可能性があることが判明した。今回の結果は、車いすマラソンアスリートの肘障害予防や指導につながる重要な知見のひとつとなると考えられる。

## 緒 言

2020 年東京オリンピック・パラリンピックも決定し、近年、健常者のスポーツのみならず障が

い者スポーツへの関心が高くなり、車いすスポーツの競技人口も増加している。車いすスポーツアスリートには、脊髄損傷者が多く含まれており、日常生活においても車いすを使用する頻度が高い。このため、車いすスポーツアスリートの上肢機能は、スポーツのみでなく日常生活上も重要である。その中でも、肘の機能は最も重要な機能の一つである。

多くのスポーツ競技において上肢の機能は非常に重要であり、健常者でさえも肘関節におけるスポーツ障害は多く発生している。一方、車いすスポーツアスリートは、日常生活でも車いすを使用しており、日常生活での車いす移乗や走行など、さまざまな日常生活において肘を酷使していることとなる。日常生活でも肘を酷使しているところにスポーツを行うということは、さらに肘を酷使することとなることは明白である。そこで、上肢機能のなかでも最も酷使される関節のひとつである肘関節の状態を把握しておくことは重要である。

健常者においては、様々な競技におけるスポーツアスリートに対する肩関節や肘関節の検診は、学生スポーツからトップアスリートまで幅広く行われており、その障害予防や指導までさまざま散見される。しかし、障がい者スポーツにおけるそれらは、ほとんど行われていないのが現状である。

車いすスポーツには、陸上競技、バスケット、テニスなど様々な競技があるが、その中でも車いすマラソンは、最も過酷なスポーツのひとつであ

る。フルマラソンでは、42.195 kmの距離を1時間半以上の時間を使い走行する。走行中は、両上肢の肩関節と肘関節の屈曲・伸展を繰り返し、この運動により車いすのハンドリムを駆動する。車いすマラソンでは、このハンドリムの駆動を長時間繰り返すことになり、肩関節や肘関節のスポーツ障害が懸念される。

本研究では、車いすマラソンアスリートの肘障害の実態を解明し、障害予防につなげることを目的とし、車いすマラソンアスリートを対象とした肘関節の検診を行った。

## 1. 研究方法

### 1.1 対象

大分国際車いすマラソン大会の参加選手35名(男性34名, 女性1名)を対象とした。平均年齢 $48.4 \pm 13.8$ 歳, 平均体重 $59.3 \pm 8.1$  kg, 平均身長 $167.3 \pm 6.3$  cmであり, 平均マラソン経験年数は $16.3 \pm 9.2$ 年であった。障害の原因疾患の内訳は、頸髄損傷5名, 胸腰髄損傷24名, 二分脊椎3名, ポリオ2名, 小児がん1名であった。

### 1.2 検診内容

大会前日に問診および診察を行った。問診では、年齢、体重、身長、利き手、疾患名、スポーツ歴、運動時痛の有無を聴取した。診察では、触診で圧痛、尺骨神経の肥厚の有無、尺骨神経の走行異常の有無、機能診として尺骨神経 Tinel 徴候、尺骨神経麻痺の有無、関節可動域(屈曲、伸展、前腕回内・回外)測定を行った。診察は、リハビリテーション科専門医により施行した。

## 2. 結果

### 2.1 問診：運動時痛

肘関節の運動時痛は、35名中5名(14%)に認められた。5名の内、左側のみが2名(6%)、右側のみが1名(3%)、両側が2名(6%)であった。(表1)

表1 運動時痛における左右別の人数と割合

部位	人数	割合 (%)
左側のみ	2	6
右側のみ	1	3
両側	2	6

### 2.2 触診：圧痛

肘関節の圧痛は、35名中15名(43%)に認められた。15名の内、左側のみが9名(26%)、右側のみが0名(0%)、両側が6名(17%)であった。(表2) 圧痛は、左外側上顆、右外側上顆、左内側上顆、左腕尺関節裂隙の4部位に認め、左外側上顆は15名中14名、右外側上顆は15名中6名、左内側上顆は15名中3名、左腕尺関節裂隙は15名中1名に認めた。(図1)

表2 圧痛における左右別の人数と割合

部位	人数	割合 (%)
左側のみ	9	26
右側のみ	0	0
両側	6	17

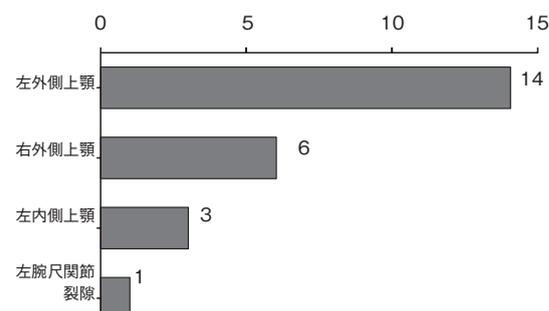


図1 圧痛の部位別人数の分布

### 2.3 触診・機能診：尺骨神経所見

尺骨神経に対する触診および機能診において、35名中12名(34%)において何らかの所見を認めた。12名の内、左側のみが6名(17%)、右側のみが3名(9%)、両側が3名(9%)であった。(表3) 尺骨神経所見の内訳は、尺骨神経の肥厚が左側1名・右側0名、尺骨神経の走行異常が左側1名・右側0名、Tinel 徴候が左側7名・右側6名、尺骨神経麻痺が左側2名、右側0名であった。(表4)

表3 尺骨神経所見における左右別の人数と割合

部位	人数	割合 (%)
左側のみ	6	17
右側のみ	3	9
両側	3	9

表4 尺骨神経所見の内訳と左右別の人数

所見	左側 (人)	右側 (人)
尺骨神経肥厚	1	0
尺骨神経走行異常	1	1
Tinel 徴候	7	6
尺骨神経麻痺	2	0

## 2. 4 問診・触診・尺骨神経所見

肘関節の運動時痛、触診による圧痛、尺骨神経所見（尺骨神経の肥厚、尺骨神経の走行異常、Tinel 徴候、尺骨神経麻痺）の何れかにおける異常所見の発生件数の左右差を比較すると、左側 30 件で右側 16 件であった（表 5）

表5 問診・触診・尺骨神経異常所見における左右別の件数

部位	件数
左側	30
右側	16

## 2. 5 機能診：関節可動域

平均関節可動域は、肘関節屈曲左側 137.2 度・右側 136.6 度、肘関節伸展左側 1.6 度・右側 1.4 度、前腕回内左側 85.7 度・右側 83.1 度、前腕回外左側 87.0 度、右側 88.0 度であり、左右ともに明らかな可動域制限は認めなかった。

## 3. 考 察

今回の車いすマラソンアスリートを対象とした肘関節の検診により、次に示すような幾つかの特徴的な傾向を認めた。1) 問診により運動時の肘関節痛を訴えたアスリートは、35 名中 5 名であったが、圧痛所見は 3 倍の 15 名に認めた。2) 尺骨神経所見において、尺骨神経麻痺は左側 2 名のみであったが、Tinel 徴候は左側 7 名、右側 6 名に

おいて認めた。3) 圧痛部位は、外側上顆部に多く認めた。4) 問診・触診・尺骨神経所見の全てにおいて、右側に比べ左側で多くの異常所見を認めた。

今回の調査において、問診により運動時の肘関節痛を訴えたアスリートは 14%であったにも関わらず、触診により肘関節部に圧痛を認めたアスリートは 43%と半数近くに及んだ。圧痛は、実際の運動時に疼痛が出現する前段階の所見である可能性があり、半数近くのアスリートにおいて肘痛を起こす要因を持っている可能性が示唆された。つまり、自覚的には肘症状がないとしても潜在的に肘障害を持っている可能性があり、車いすマラソンアスリートは日頃から触診により肘の圧痛の有無を評価しておく事は重要である。同様に、尺骨神経所見においても、尺骨神経麻痺は左側の 2 名のみであったが、Tinel 徴候は左肘で 7 名、右肘で 6 名に認めており、Tinel 徴候は尺骨神経麻痺を起こす前段階であるとも考えられる。このため、日頃から Tinel 徴候の有無も評価しておく事も重要であると思われる。

これまで、車いすスポーツアスリートにおける肘障害について調査した報告は少ないが、加藤ら<sup>1)</sup>は、車いすマラソン選手の 50 名中 16 名 (32.0%) にスポーツ障害があり、そのうち肘障害は 29 件中の 10 件であったと報告している。また、中村ら<sup>2)</sup>は、車いすマラソン選手 124 名の調査でスポーツ障害を 66%に認め、肘関節の障害は 12%であったと報告している。つまり、車いすマラソン選手では、10%程度で肘障害を起こしている可能性がある。今回の結果でも、自覚的な肘の運動時痛を認めたアスリートは 14%であったが、診察所見による異常所見を加えると約半数の車いすアスリートに何らかの異常所見を肘関節に認めている。このことから、車いすスポーツアスリートに対する肘障害の管理には、自覚症状だけでなく医療者が日頃から診察を行い、他覚所見を

チェックしておく事が重要であると考えられる。

前述のように、今回の調査では、車いすマラソンアスリートの約半数に肘の圧痛所見を認め、圧痛は外側上顆部に最も多く認めた。健常者のスポーツにおいて、外側上顆炎はテニス肘とも言われテニスプレーヤーに多く認める障害である。外側上顆には長・短撓側手根伸筋と総指伸筋が付着しているが、外側上顆炎は主に短撓側手根伸筋への負荷のかけ過ぎによる筋付着部の炎症性変化であると考えられている<sup>3)</sup>。つまり、外側上顆部の痛みは、過度な手関節背屈運動が原因となっていると考えられる。一般に車いすマラソンでは、ハンドリム駆動時において手関節を撓側へ屈曲してハンドリムをキャッチし、リリース時には手関節を尺側へ屈曲し、手関節を効かせて駆動終末期の力をハンドルに伝えている<sup>4)</sup>。車いすマラソンでは、このような手関節の動きの反復を長時間継続するため前腕の筋群へ負担も大きく、短撓側手根伸筋へ過度な負荷がかかり外側上顆部への圧痛所見として表れている可能性も考えられる。一方、中村ら<sup>2)</sup>は、以前は外側上顆炎が多かったが、駆動方法が変化し高速で回転するハンドリムに負けないように手掌を押し付けるため、内側上顆に痛みを訴える選手が増えてきていると述べている。今回の調査では、内側上顆部の圧痛を認めたのは3名のみであり、中村らの報告とは異なる結果となったが、いずれにしろ内・外側上顆部の疼痛はハンドリム駆動時の前腕筋群への過度な負荷が原因となっている事が考えられる。このため、日頃から圧痛の有無と疼痛部位をチェックし、傷害予防のため早期に異常を発見し個々の選手毎に駆動動作を評価し指導を行っていく事が重要であると考えられる。

問診・触診・尺骨神経所見の全てにおいて右側に比べ左側の方が異常所見を多く認めた事は、今回の調査から得られた大きな知見のひとつである。車いすスポーツアスリートの傷害におけ

る左右の違いについての報告はほとんどないが、Ferraraら<sup>5)</sup>による車いすスポーツアスリートの1年間の傷害の調査の報告の中で、左右の違いについて一部述べられている。この報告によると、傷害の中では上肢傷害が最も多く認め、利き手側のみで認めた者はいなく、左側のみで認めた者が最も多い割合になっていると報告している。ただし、彼らの報告の中では、この理由については言及されていない。ただ、今回の調査においても利き手でない左側に多くの異常所見を認めており、異常所見に左右差が認められた理由として利き手、非利き手の関係が影響している可能性も考えられる。また、Hurdら<sup>6)</sup>は、車いす生活者を対象に解析を行い、両上肢による車いす駆動は非対称性の活動であることを報告している。つまり、日頃の活動やトレーニングによる車いす駆動の継続自体が、肘障害の発生の左右差の原因になっている可能性もある。さらに、車いす駆動動作のみでなく、トレーニング方法や日常生活での移乗などが要因となっている可能性もあり、今後も調査を継続し、様々な要因を検討していく必要がある。

#### 4. 結 語

今回の肘障害を対象とした調査により、自覚所見と他覚所見の差、圧痛部位の差、異常所見の左右差など、幾つかの知見を得ることができた。これらの調査結果は、車いすマラソンアスリートの肘障害予防や指導につながる重要な知見のひとつとなると考えられる。しかし、今回の調査に留まることなく今後あらたな調査項目も追加しデータを蓄積し、更に車いすマラソン以外のアスリートについても調査を行う事により、車いすスポーツの肘障害の予防と適切な指導方法の確立につなげていきたいと考えている。

#### 謝 辞

本研究に対して、研究助成を賜りました公益財

団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝申し上げます。また、研究調査にご協力頂きました和歌山県立医科大学 垣田真里先生、佐々木裕介先生、木下利喜生先生、児嶋大介先生、大分中村病院 中村太郎先生に心より感謝致します。

## 文 献

- 1) 加藤朋子, 大久保衛, 土井龍雄, 大槻伸吾, 高橋明, 橋本尚, 車椅子マラソン選手のスポーツ障害とトレーニング状況について. 車椅子スポーツの研究 **9**: 30-32 (2000)
- 2) 中村英次郎, 内田研, 中村太郎, 指宿立, 障害者スポーツの外傷と障害発生: 車椅子マラソン. 臨床スポーツ医学 **20**: 1133-1137 (2003)
- 3) 新井猛, 上腕骨外側上顆炎の病態と治療法. 関節外科 **30**: 114-119 (2011)
- 4) 大川裕行, 田島文博, 駆動技術について. 車いすスポーツの研究 **6**: 31-35 (1996)
- 5) Ferrara M.S., Davis R.W., Injuries to elite wheelchair athletes. *Paraplegia*, **28**: 335-341 (1990)
- 6) Hurd W.J., Morrow M.M., Kaufman K.R., An K., Biomechanic evaluation of upper-extremity symmetry during manual wheelchair propulsion over varied terrain. *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, **89**: 1996-2002 (2008)

# 体温，発汗を計測可能な機能性繊維の研究

東京大学大学院 竹井裕介

## A Study of Body Temperature and Sweat Measureable Functional Fiber

by

Yusuke Takei

*Department of Mechano-Informatics,  
Graduate School of Information Science and Technology,  
The University of Tokyo,*

### ABSTRACT

We fabricated wearable flexible humidity sensor that can measure human sweat. Our sensor is based on Ionic-liquid-Gel-coated Fabrics and Cloths (IG-Fabric/Cloth). We use EMIMBF<sub>4</sub> as ionic liquid, which has a characteristic that it absorbs H<sub>2</sub>O and changes its impedance. For the humidity sensor substrate, we use “Bemcot TR-7F” (Asahi Kasei corp., Japan) and “Kimtowels” (NIPPON PAPER CRECIA Co., LTD, Japan) as fabric and Cotton and Polyester as cloth. Fabrication steps of ionic-liquid-gel-coated fabric and cloth are as follows. First, we prepare the mixture of ionic liquid and PolyVinylidene DiFluoride (PVDF) and Dimethylacetamide (DMAc) as ionic liquid gel solution. Then we dip the fabric and cloth into the ionic liquid gel solution for 5 minutes. After picking up, we baked the fabric on the 80°C hotplate for 30 minutes. To evaluate IG-Fabric/Cloth humidity sensor, examined the

relation between relative humidity and IG-fabric impedance change. There is linearity in humidity and resistance change. From the measurement data of sensor response speed test, the response speed  $\tau_{63}$  estimated as around 0.7 seconds. This is 10 times faster than commercial CMOS humidity sensor. This is because IG-fabric has a large surface area and high gas permeability, compare to silicon wafers. We also evaluated the flexibility of our humidity sensor and showed high flexibility of our sensor. As a demonstration, we fabricated IG-Cloth based humidity sensor on the surface of polyester T-shirt and measured sweating of the human doing exercise and cooling down. From the experiment, we observed the impedance change of IG-Cloth according to the examinee's activity. This sensor has many applications such as flu-mask-type human breath sensor that can monitor human breath, and wearable humidity sensor that can measure human sweat to decrease the risk of heat stroke.

## 要 旨

本研究では、人間の発汗を計測可能なフレキシブルな湿度センサを製作した。本センサは、感湿体として水を吸着しやすい性質をもつ EMIMBF<sub>4</sub> というイオン液体をゲル化したものを不織布および布の繊維表面にコーティングして用いる。本研究では、被コーティング素材として、ベンコット TR-7F (旭化成)、キムタオル (日本製紙クレシア)、コットン、ポリエステルを使用した。コーティング前後に SEM 観察を行ったところ、イオン液体ゲルが繊維の表面および間隙に固定されていることを確認した。イオン液体ゲルをコーティングした不織布および布のインピーダンスを計測したところ、湿度変化に対して線形に変化することが分かった。また、湿度変化に対する応答速度を評価したところ、市販の電気式湿度センサに比べて 10 倍速く応答することが分かった。これは、本センサのベースが不織布や布など表面積が大きい構造をしていることに起因していると考えられる。また、本センサの柔軟性を確認するため、曲げに対してインピーダンスがどのように変化するかを検証したところ、インピーダンス値はほぼ一

定であった。これは、本センサを曲げた際に曲げによる伸びは生じず、繊維が絡まりあう構造に吸収されてしまうためだと考えられる。製作したセンサが人間の発汗を計測できるかを確認するために、ポリエステル製の T シャツの胸部にイオン液体ゲルをコーティングし、被験者が運動時の発汗の計測を行った。その結果、運動に伴う発汗による T シャツの湿度の上昇、安静にすることにより発汗が止まり、ポリエステル素材の持つ速乾性の特徴による T シャツの湿度の低下が計測された。本センサは、人間の呼吸の計測のためのマスク型呼気センサや、熱中症のリスク低減のためのウェアラブル発汗センサなどへの応用が期待される。

## 緒 言

近年、熱中症のリスクが高まっている。厚生労働省の統計によると熱中症による死亡者数は、1993 年以前は年平均 100 人を超えることはほとんどなかったが、記録的な猛暑だった 1994 年に 579 人、その後も全体的に増加傾向にあり、2010 年には 1731 人の方が熱中症で亡くなった<sup>1)</sup>。これらの要因として、気温の上昇や、都市化によ

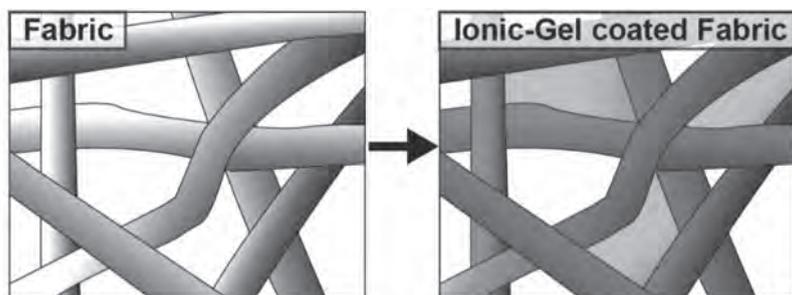


図1 イオン液体ゲルコーティング概念図

る地面や建物からの輻射熱、自動車の廃棄やエアコンの室外機からの熱などが指摘されている。

熱中症の原因の一つとして自律神経の失調がある。人は暑さにより体温が一定以上に上がった場合、自律神経のはたらきで、発汗により体温を一定に保とうとしている。しかし、自律神経の失調の場合、汗が出にくくなり熱が体内にたまってしまふことや、汗のかきすぎによる体内の水分と塩分のアンバランスなどが熱中症の様々な症状へとつながってしまう。そのため、発汗を日常的にモニタリングすることが熱中症予防の観点から重要であると考えられる。発汗を日常的にモニタリングすることを考えた場合、布のような形状で柔軟性を有するウェアラブルな湿度センサが望ましい。近年、多くの湿度センサが開発されているが、日常的に装着可能で、装着者の行動を制限しないウェアラブルな湿度センサは、まだ実現していない。そこで本研究では、湿度の変化によって電気抵抗が変わるという性質をもつイオン液体を用いた、発汗を計測可能なフレキシブルな機能性繊維の実現を目的とする。

## 1. 方法

### 1. 1 イオン液体を用いた湿度センサ

一般的な電気式湿度センサは、感湿体として多孔質のセラミックスや吸湿性の高分子膜を用いて、空気中の水分を吸収したときの電気容量、電気抵抗の変化から湿度を計測する<sup>2,3)</sup>。本研究で

は、この感湿体としてイオン液体をコーティングした不織布や布を用いることで、柔軟な感湿体を持つ湿度センサを実現する(図1)。

本研究で感湿体として用いるイオン液体は、一般的に、イオン(カチオン、アニオン)のみで存在し、導電性が高く、温湿度・電氣的・化学的安定性が高く、高い融点・沸点、粘性が比較的低い、難揮発性である(常温常圧下で真空にしても揮発しない)、という特性を持つことが知られている。さらに、近年着目されている特性として、分子構造に応じて様々な気体や水蒸気を選択吸着し電気抵抗が変化するという性質を持つ。こうした性質を利用して、近年イオン液体をガス吸湿体として用いるガスセンサの研究が進んでいる<sup>4-16)</sup>。

本研究では発汗の計測のために、水分の吸着性に優れるEMIMBF<sub>4</sub>というイオン液体を用いる。このイオン液体を不織布や布にコーティングすることでフレキシブルな湿度センサを実現する。しかし、イオン液体を繊維表面にコーティングしただけでは、例えば衣服などを想定した場合、イオン液体が皮膚に付着することが考えられる。これは、イオン液体が繊維表面から失われることによるセンサの性能の劣化や、イオン液体が皮膚に付着することによるヒトへの害などから望ましくない。そこで本研究では、イオン液体をゲル化し繊維表面に固定する。従来研究で、イオン液体とPVDFを混合、加熱することで、イオン液体がゲル化することが知られているが<sup>17,18)</sup>、この方法

を応用し、イオン液体と PVDF を混合したものを繊維に染み込ませた後、全体を加熱することで繊維のフレキシブル性を損なうことなくイオン液体を繊維表面にてゲル化する。

## 1. 2 製作方法

本節ではイオン液体を用いた湿度センサの製作工程について述べる。図 2 に工程の概要を示す。まず、イオン液体ゲルのもととなる溶液の調合を行う。イオン液体 (EMIMBF<sub>4</sub>) とポリマー剤である PVDF (ポリフッ化ビニリデン) および溶媒

として DMAc (ジメチルアセトアミド) を混合比、イオン液体 (EMIMBF<sub>4</sub>) : PVDF : DMAc = 1 : 1 : 20 で、ボールミルを用いて 1 時間攪拌する。その後、混ぜ合わせたイオン液体ゲル溶液をシャーレに注ぎ、不織布および布を 5 分間浸す。その後、溶液から引き上げた不織布および布を 80℃ のホットプレートで 30 分間バークし、イオン液体ゲル溶液をゲル化させる。これにより、不織布および布の繊維の表面にゲル化したイオン液体が固定される。図 3 にイオン液体ゲルコーティング前とコーティング後の不織布の SEM 観察画像を示す。SEM 画像を見ると、繊維の一本一本の表面にイオン液体ゲルがコーティングされていることが分かる。また、小さい間隙にはイオン液体ゲルの膜が形成されていることも分かった。しかし全体としては、繊維の織られている構造や、絡まっている構造はコーティング後も保持されており、また、通気性の良さは維持されていることが分かった。

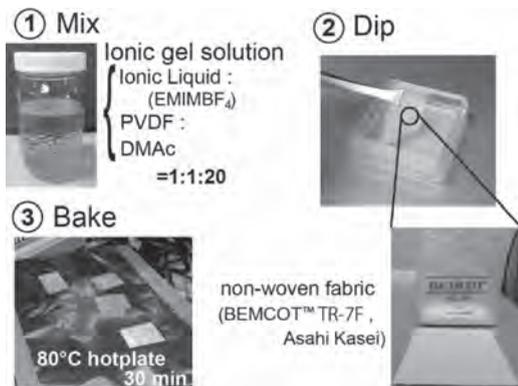


図2 イオン液体ゲルコーティング工程

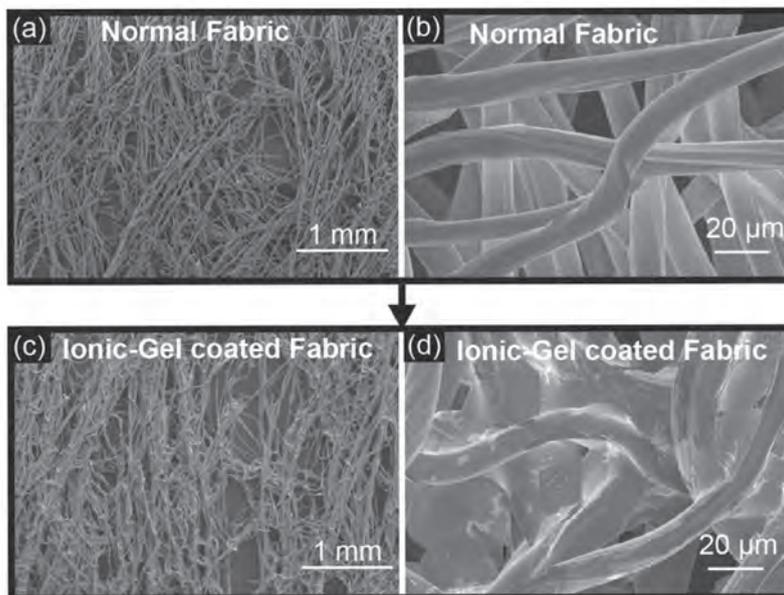


図3 イオン液体ゲルコーティング前とコーティング後の不織布のSEM観察画像

## 2. 実験および考察

### 2. 1 実験概要

本研究で製作したイオン液体ゲルでコーティングした不織布, 布 (Ionic Liquid Gel Coated Fabric/Cloth, 以下 IG-Fabric/Cloth) の特性を評価するために, (1) 湿度に対するインピーダンス変化, (2) 温度に対するインピーダンス変化, (3) 湿度への応答速度に関する実験, (4) 曲げに対する応答に関する実験を行った. また, その後, 製作した不織布, 布の有効性を示すために, マスク型呼気検出センサ, T シャツ型発汗センサを試作し, 実験を行った.

### 2. 2 IG-Fabric/Cloth の特性評価実験

本研究では, 感湿体であるイオン液体ゲルが水を吸着した際のインピーダンスをモニタリングし, そのインピーダンス値から環境場の湿度を推定する. インピーダンスの計測条件は, 周波数 1kHz, 1Vp-p である. イオン液体ゲルをコーティングした不織布に, 導電性ペーストを用いてアルミワイヤを電極として 1cm の間隔で取り付け, 2 電極間のインピーダンスを計測する.

まず, IG-Fabric/Cloth のインピーダンスが, 周囲の湿度, 温度でどのように変化するかを調べるために, 小型環境試験機 (SH-222, エスペック) を用いて温度を一定に保ちながら湿度を変化させた時と, 湿度を一定に保ちながら温度を変えた時のインピーダンスを計測した. 図 4 は, 温度が 20, 25, 30, 35, 40℃ のときの湿度を 30 から 80% RH まで変えた時のベンコット TR-7F (旭化成) 使用して製作した IG-Fabric のインピーダンスの変化率をプロットしたものである. 湿度が大きくなるにつれて線形にインピーダンスが小さくなることが分かった. また, インピーダンスの湿度に対する変化率は温度にほぼ温度によらないことが計測により分かった. 図 5 は, 湿度が 30,

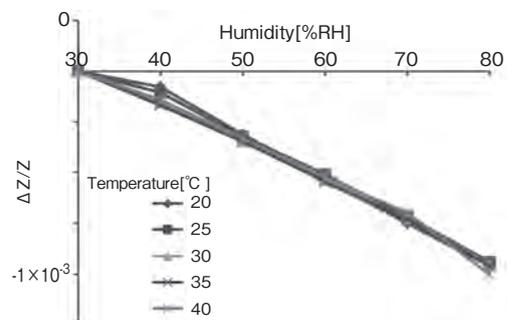


図 4 IG-FabriC (ベンコット) の湿度に対する応答

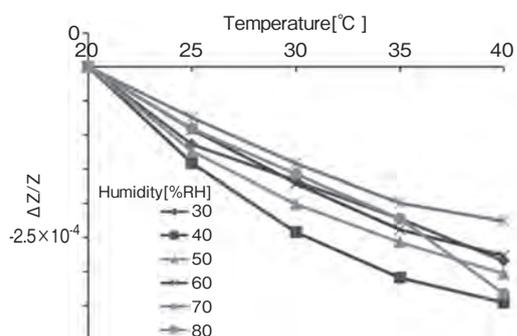


図 5 IG-FabriC (ベンコット) の温度に対する応答

40, 50, 60, 70, 80%RH のときの, 温度が 20 から 40℃ まで変化したときのインピーダンスの変化率をプロットしたものである. 温度が上がるにつれてインピーダンスが線形に低下していくことが分かった. 得られた結果より 1℃あたりのインピーダンス変化率を計算すると, 約  $-2.5 \times 10^{-5}$  となり, 1%RH あたりのインピーダンス変化率は約  $-2 \times 10^{-5}$  となることが計測により分かった. 本研究では, 人間の体温や呼吸の湿度に近い環境での計測を考えているため, 温度 30~40℃, 湿度 30~80%RH に注目して先ほどの計測結果を見ると, 図 5 では温度 30℃ から 40℃ でのインピーダンス変化率は 0.01 であるのに対し, 図 4 では相対湿度 40%RH から 80%RH でのインピーダンス変化率は 0.1 である. これは, 本研究のターゲットとする人間の体温や呼吸の湿度環境では, 湿度に対するインピーダンス変化率は, 温度に対するインピーダンス変化率よりも 10 倍大きいということであり, 温度補償を行うことで十分補正でき

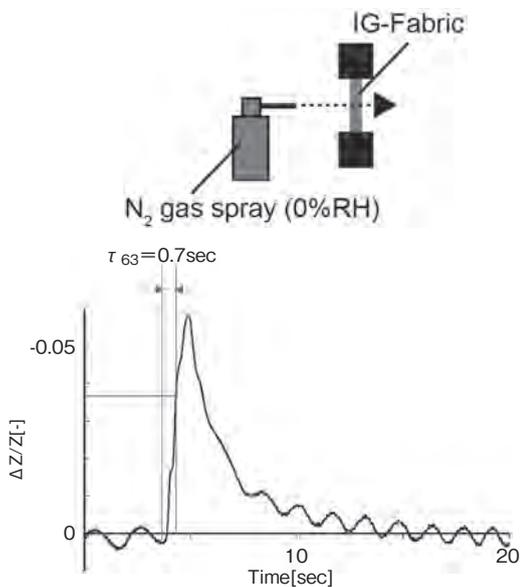


図6 IG-Fabric(ベンコット)の湿度変化に対する応答速度と考えられる。

次に応答速度に関する実験について述べる。図6上に示すようにIG-Fabric(ベンコット)の上下を治具で固定し窒素ガスを噴射した。この時の実験環境は湿度40%RH、窒素ガスの湿度は0%RH、ガスの噴射時間は0.1秒である。図6下にガス噴射時のインピーダンス変化を示す。この時の応答速度の指標である63%応答( $\tau_{63}$ )は、約0.7秒であった。これは市販のCMOS湿度センサの応答速度の約10倍速い値である<sup>19)</sup>。これは、IG-Fabricが不織布の特徴である繊維が複雑に絡み合う構造を有するため、一般的な平面型のセンサに比べて表面積が大きく、また、隙間が多い構造であるためガス透過性が高いことが要因であると考えられる。

次にIG-Fabric(ベンコット)の柔軟性の評価を行った。図7上に示すようにIG-Fabricを円柱に固定し、曲率による曲げを与えた際のインピーダンスの変化率を計測した。実験に使用した円柱の直径は、20、40、50、60、100mmである。図7下に計測結果を示す。結果として、インピーダンス値は曲率によらずほぼ一定であることが分

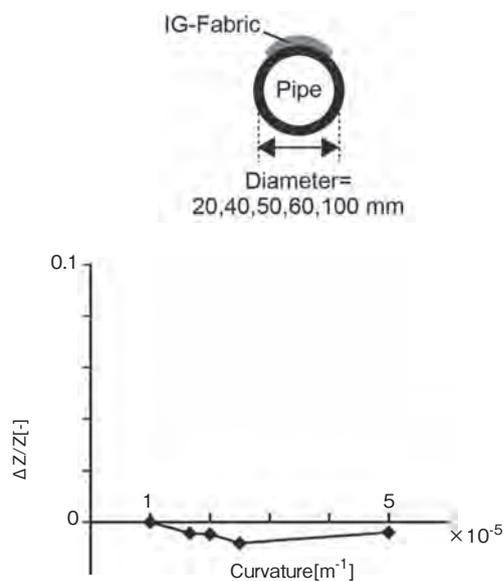


図7 IG-Fabric(ベンコット)の曲げに対する応答速度であった。これは、IG-Fabricを曲げても不織布の繊維が折り重なった構造が伸びを吸収してしまい、繊維自体が伸びないことが要因であると考えられる。

### 2. 3 IG-Fabricを用いたマスク型呼気検出センサによる呼気検出実験

IG-Fabricを用いたアプリケーションのデモンストレーションとして、市販のマスクとの組み合わせによる呼気検出を行った。市販のマスクの外側の表面にイオン液体ゲルをコーティングした不織布を貼付した(図8)。これは、安全を考慮し

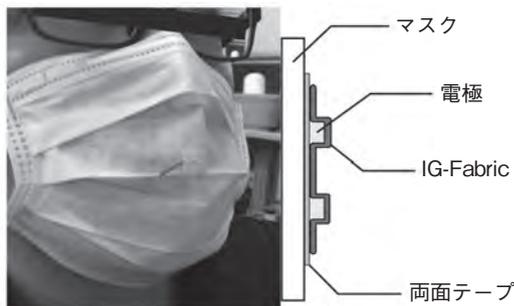


図8 マスク表面にIG-Fabricを固定した呼気検出デバイスを被験者が装着した様子

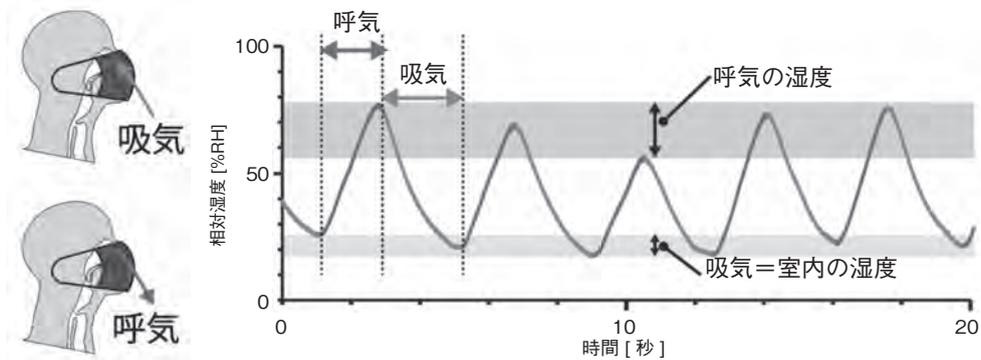


図9 IG-Fabricを用いた人間の呼吸検出結果

イオン液体ゲルが直接被験者に触れないようにするためである。マスクを装着した被験者に呼吸をしてもらった際の計測結果を図9に示す。一般的に、湿度40%RH未満の乾燥した環境では、口腔や鼻孔の粘膜が乾燥し、インフルエンザウイルスの生存率が高くなるため、外気湿度の低い冬の時期には、加湿器やマスクを装着することで口腔内の湿度を40%RH以上に保つことが推奨されている。今回の実験でも、マスクを装着した被験者の呼吸による口腔内湿度の変動が40%RH以上に保たれていることが確認された。また、IG-Fabricのインピーダンスをモニタリングすることで、呼吸のリズムが検出可能であることから、睡眠時無呼吸症候群患者の呼吸モニタリングなどへの応用が期待される。

概要図を示す。被験者には、最初、椅子に座って安静にしてもらい、その後、5分間軽い強度の運動（スクワット）をしてもらい、その後再び椅子に座って安静にもらった。図12にポリエス



図10 ポリエステル製Tシャツ胸部に形成したIG-Cloth湿度センサ



図11 IG-Cloth湿度センサの断面図

#### 2. 4 IG-Clothを用いたTシャツ型発汗センサによる発汗検出実験

最後に、布の表面に形成したイオン液体ゲル湿度センサ（IG-Cloth）が、人間の発汗を検出できるかを確認するために、ポリエステル製のTシャツの胸部にイオン液体ゲル湿度センサを形成し、エクササイズ時の発汗およびクールダウンによる汗の乾燥を計測した。図10に湿度センサを製作したTシャツを被験者が身に着けている様子と、センサ部の拡大写真、図11にセンサ部の断面の

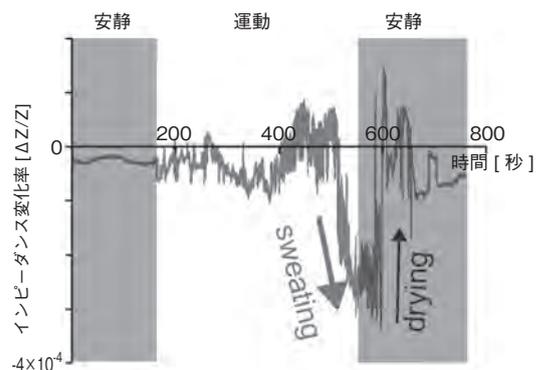


図12 IG-Cloth湿度センサを用いた発汗検出実験

テル T シャツ胸部に形成したイオン液体ゲル湿度センサの出力を示す。グラフから、運動開始後、すぐには汗は出ず、運動開始 200 秒後から汗が出てきていることが分かる。また、運動をやめた後も 1 分程度は汗が出続け、その後、汗が乾燥していくことが分かった。以上より、運動に伴う発汗による T シャツの湿度の上昇、安静にすることにより発汗が止まり、ポリエステル素材の持つ速乾性の特徴による T シャツの湿度の低下が計測により確認された。

### 3. 結 論

本研究では、不織布にイオン液体ゲルをコーティングすることで、フレキシブルな湿度センサを製作した。不織布にコーティングしたイオン液体ゲルのインピーダンスは、相対湿度 40% から 80% までの間で、線形に変化することを確認した。また、アプリケーションのひとつとして、ポリエステル製の T シャツの表面に湿度センサを形成し、運動時の発汗の様子をモニタリングを行った。本研究の、繊維にイオン液体ゲルをコーティングする技術を用いた湿度センサの作成方法により、衣服などの繊維の表面に湿度センサの形成が可能となり、発汗を計測可能な衣類の製作が可能であると考えられる。具体例として、スポーツウェアに使用することで競技者の体温や発汗から、パフォーマンスに関わる重要な情報が取得可能である。また、マスクに本研究の機能性繊維を用いることで、口腔内の温度、湿度が計測可能であり、インフルエンザウイルスの繁殖を防ぐための指標として活用することができる。このように、ウェアラブルなセンサであるという特徴を活かし、体温や発汗の計測を通じた人間の健康管理の分野への応用が期待される。

### 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成を賜りま

した公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

### 文 献

- 1) 総務省消防庁, <http://www.fdma.go.jp/>
- 2) H. Farahani, R. Wagiran, M. N. Hamidon, "Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review", *Sensors*, **14**, 7881-7939 (2014)
- 3) Z. M. Rittersma, "Recent achievements in miniaturized humidity sensors — a review of transduction techniques," *Sensors and Actuators A*, **96**, 196-210 (2002)
- 4) D. S. Silvester, "Recent advances in the use of ionic liquids for electrochemical sensing", *Analyst*, **136**, 4871-4882 (2011)
- 5) T. Welton, "Room-temperature ionic liquids. Solvents for synthesis and catalysis", *Chemical Reviews*, **99**, 2071-2084 (1999)
- 6) Z. Lei, C. Dai, B. Chen, "Gas solubility in ionic liquids", *Chemical reviews*, **114**, 1289-1326 (2014)
- 7) A. Finotello, J. E. Bara, D. Camper, R. D. Noble, "Room-temperature ionic liquids: temperature dependence of gas solubility selectivity", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **47**, 3453-3459 (2007)
- 8) M. G. Freire, L. M. N. B. F. Santos, A. M. Fernandes, J. A. P. Coutinho, I. M. Marrucho, "An overview of the mutual solubilities of water-imidazolium-based ionic liquids systems", *Fluid Phase Equilibria*, **261**, 449-454 (2007)
- 9) G. Li, Q. Zhou, X. Zhang, L. Wang, S. Zhang, J. Li, "Solubilities of ammonia in basic imidazolium ionic liquids", *Fluid Phase Equilibria*, **297**, 34-39 (2010)
- 10) A. Yokozeki, M. B. Shiflett, "Vapor-liquid equilibria of ammonia + ionic liquid mixtures", *Applied Energy*, **84**, 1258-1273 (2007)
- 11) A. Yokozeki, M. B. Shiflett, "Ammonia solubilities in room-temperature ionic liquids", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **46**, 1605-1610 (2007)
- 12) A. N. Soriano, B. T. Doma, M. H. Li, "Solubility of carbon dioxide in 1-ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate", *Journal of Chemical and Engineering Data*, **53**, 2550-2555 (2008)
- 13) Y. S. Kim, W. Y. Choi, J. H. Jang, K. P. Yoo, C.

- S. Lee, "Solubility measurement and prediction of carbon dioxide in ionic liquids", *Fluid Phase Equilibria*, **228-229**, 439-445 (2005)
- 14) Akira Inaba, Yusuke Takei, et. al., "Ammonia Gas Sensing Using a Graphene Field-Effect Transistor Gated by Ionic Liquid", *Sensors and Actuators B: Chemical*, **195**, 15-21 (2013)
- 15) Akira Inaba, Yusuke Takei et. al., "Ionic liquid-gated graphene FET array with enhanced selectivity for electronic nose", The 27th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2014), San Francisco, USA, 326-329, 26-30 January (2014)
- 16) Yusuke Takei et. al., "Ionic Liquid based CO<sub>2</sub> Gas Sensor," IUMRS-International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM 2012), C-4-I26-007, Yokohama, Japan, 23-28 September (2012)
- 17) M. Kawasaki, Y. Iwasa, "Electronics: 'cut and stick' ion gels", *Nature*, **489**, 510-511 (2012)
- 18) K. H. Lee, M. S. Kang, S. Zhang, Y. Gu, T. P. Lodge, C. D. Frisbie, "'Cut and stick' rubbery ion gels as high capacitance gate dielectrics", *Advanced Materials*, **24**, 4457-4462 (2012)
- 19) Sensirion SHT series, <http://www.sensirion.com>

**超音波剪断波イメージング法による  
マラソン後の筋損傷部位および程度の定量  
～適切なトレーニングおよびリカバリープログラムの作成に向けて～**

鹿屋体育大学 平田 浩 祐  
(共同研究者) 同 宮本 直 和

**Evaluation of Region and Extent of Muscle Damage after Marathon  
Running by Using Ultrasound Shear-Wave Elastograph**

by

Kosuke Hirata, Naokazu Miyamoto  
*National Institute of Fitness and Sports in Kanoya*

**ABSTRACT**

Muscle damage induced by marathon running has been often evaluated by changes in maximal voluntary contraction torque or blood creatine kinase activity. However, these parameters cannot characterize the region and extent of muscle damage of individual muscles. It was recently reported that individual muscle stiffness assessed by ultrasound shear-wave elastography can quantify the extent of exercise-induced muscle damage. The present study aimed to evaluate the extent of marathon running-induced muscle damage of the lower limb, by using ultrasound shear-wave elastography. Twelve college recreational runners participated in the present study. Muscle stiffness were obtained from the vastus medialis, vastus lateralis, biceps femoris, semitendinosus, semimembranosus, and medial gastrocnemius, before and 1-3 days after the marathon running. Significant increase in muscle stiffness was observed only in the medial gastrocnemius after 1 and 2 days after marathon running. These results indicate that, in recreational runners, muscle damage induced by marathon running occurred in the plantar flexor, not in the quadriceps femoris and hamstring. Moreover, it is suggested that the muscle damage of the plantar flexor was recovered 3 days after the marathon running.

## 要 旨

これまで、マラソンによる筋損傷の程度は、最大筋力や血中クレアチンキナーゼ活性値の変化などから評価されてきた。しかしながら、これらの方法は個別の筋の損傷を示すものではない。一方、近年、超音波剪断波エラストグラフィを用いた筋の硬度（剛性率）の測定により、個々の筋の損傷の程度を評価可能であることが報告されている。そこで本研究は、この方法を用い、マラソン後の下肢の筋の損傷の程度を定量し、筋損傷がどの部位において生じているのかを明らかにすることを目的とした。被験者は大学生市民ランナー 12 名とし、超音波剪断波エラストグラフィによる剛性率測定の対象筋は、内側広筋、外側広筋、大腿二頭筋、半腱様筋、半膜様筋および腓腹筋内側頭とし、マラソン前、マラソン終了 1～3 日後の計 4 回測定を行った。マラソン後の有意な剛性率の増加がみられたのは腓腹筋内側頭のみであり、マラソン 1 日後に最も高値を示した。その後、経時変化に伴い筋の剛性率は低下したものの、2 日後にはマラソン前に比べ有意な変化が認められたが、3 日後には有意な差は認められなかった。これらの結果から、市民ランナーがマラソンを行うことにより、足関節底屈筋に顕著な筋損傷が生じるが、3 日後には回復することが明らかとなった。また、膝関節伸展筋および膝関節屈曲筋には大きな損傷が生じないことが示唆された。

## 緒 言

近年、健康の維持・増進への関心が高まり、ランニングに注目が集まっている。実際、日本におけるランニング人口（週に 1 回以上ランニングを実施した人）は、2002 年に 211 万人であったのに比べ、2014 年には 550 万人となり、12 年間で 2.6 倍にまで膨れ上がっている<sup>1)</sup>。しかしながら、ランニングによる傷害発生率は 22~55% と報告され

ているため<sup>2)</sup>、ランニング人口の増加に伴い、傷害発生件数も多くなっていることが予想される。このため、ランニングにともなう傷害について見識を深めることは急務である。

ランニング愛好家が経験する主なランニング傷害の一つに筋損傷が挙げられる。Hill et al.<sup>3)</sup> は、ランニング愛好家 24 名を対象にした実験を行い、フルマラソン直後から数日間にわたり、最大随意筋力の低下、血中クレアチンキナーゼ活性値の増加および主観的筋痛が生じることを報告している。このように、特にマラソンレースなどの長時間にわたるランニングにおいては、筋に度重なる負荷がかかり、筋損傷が発生すると考えられている。しかしながら、筋損傷の間接的指標としてしばしば用いられる最大筋力<sup>3,4,5)</sup> や血中クレアチンキナーゼ活性値<sup>3,6,7)</sup> は、複数の筋群の損傷を間接的に評価する指標である。また、主観的筋痛<sup>3,8)</sup> は客観的な指標ではない。このため、これらの指標では、マラソンによって、どの部位（筋）に損傷が生じているのかについて明らかにすることはできない。

一方、近年、超音波剪断波エラストグラフィが開発され、簡便に生体組織の長軸方向の硬さ（伸びにくさ）を計測することが可能である。Eby et al.<sup>9)</sup> は、ブタから摘出した上腕筋を対象に、超音波剪断波エラストグラフィにより計測した剛性率と、応力-歪み関係より求めたヤング率に高い相関関係 ( $R^2 = 0.92 - 0.99$ ) があることを報告しており、超音波剪断波エラストグラフィが、筋の材質特性（硬さ）の評価法として妥当であることを示している。また、Lacourpaille et al.<sup>10)</sup> は、上腕二頭筋を対象にこの方法を用い、伸張性収縮後に剛性率が上昇することを報告しており、剛性率が筋損傷の指標となることを示唆している。このように、超音波剪断波エラストグラフィにより筋の剛性率を計測することで、筋損傷の生じている部位やその程度を評価することが可能であると考え

られる。

そこで本研究は、大学生市民ランナーを対象に、マラソンレースによる下肢筋群の損傷を超音波剪断波エラストグラフィを用いて評価し、損傷の部位および程度について検討することを目的とした。

## 1. 研究方法

### 1. 1 被験者

被験者は、陸上競技部や地域のランニングクラブに所属していない健康な大学生市民ランナー 12 名であった（男性 10 名、女性 2 名、年齢  $22.3 \pm 1.4$  歳、身長  $171.2 \pm 5.9$ cm、体重  $66.1 \pm 7.4$ kg：平均値  $\pm$  標準偏差）。また、1 日 30 分程度のランニングを週に 2 回以上、習慣的に行っている者であった。実験実施時において、下肢に傷害を有する者はいなかった。各被験者には、実験の目的、方法、注意事項、危険性に関して口頭で説明を行い、書面にて実験参加の同意を得た。なお本研究は、ヘルシンキ宣言に則り、また、鹿屋体育大学の倫理審査委員会の承認を得て実施した。

### 1. 2 マラソンレース

本研究で対象としたマラソンレースは、筑後川マラソン（2014 年 10 月）およびいぶすき菜の花マラソン（2015 年 1 月）の 2 レースであった。筑後川マラソンには、男性 5 名および女性 2 名が参加し（完走タイム：3 時間 5 分 54 秒～5 時間 4 分 52 秒）、いぶすき菜の花マラソンには男性 5 名が参加した（完走タイム：3 時間 39 分 29 秒～7 時間 45 分 16 秒）。

### 1. 3 プロトコル

マラソンレースによる筋損傷部位および程度を評価するため、マラソンレースが行われる 4 日前または 5 日前に事前測定を行った（PRE）。まず、超音波剪断波エラストグラフィを用いた筋の

剛性率の計測を行い、その後に、最大随意による等尺性収縮（MVC）トルクの計測を行った。なお、事前測定の際には、下肢に筋損傷や筋痛が生じていないことを口頭にて確認した。また、事後測定は、マラソンレースの 1～3 日後の計 3 日間にわたり計測を行った（POST 1-3）。計測の手順は PRE 測定と同様であった。

### 1. 4 筋の剛性率の測定

#### 1. 4. 1 対象筋および計測位置

筋の剛性率の測定は、右脚の内側広筋、外側広筋、大腿二頭筋、半腱様筋、半膜様筋、腓腹筋内側頭を対象とした。計測位置は、内側広筋の大腿長遠位 20% 部位、外側広筋、大腿二頭筋、半腱様筋、および半膜様筋の大腿長 50% 部位、腓腹筋内側頭の下腿長近位 30% 部位とし、測定日より計測位置が変化しないよう努めた。なお、大腿長は大転子から膝窩皺、下腿長は膝窩皺から外果までの距離とした。

#### 1. 4. 2 測定姿勢

大腿筋群を計測する際、被験者は仰臥位にて筋力計（CON-TREX MJ, PHYSIOMED, German）のベッドに固定された。右股関節は 90 度屈曲位、左股関節は解剖学的正位とした。内側広筋および外側広筋を対象とする際は右膝関節を 135 度屈曲位に、大腿二頭筋、半腱様筋、および半膜様筋を対象とする際は右膝関節を 45 度屈曲位において測定を行った。被験者の姿勢を安定させるため、被験者の腰部および左脚を筋力計のベッドに、右足首を筋力計のアタッチメントに非伸縮性のストラップを用いて固定した。足関節底屈筋の計測は腹臥位にて行った。その際、膝関節は完全伸展位、右足関節は 20 度背屈位にて筋力計のアタッチメントに非伸縮性のストラップを用いて固定した。また、臀部を筋力計のベッドに固定した。

### 1. 4. 3 超音波剪断波エラストグラフィによる測定

剛性率を評価するため、超音波剪断波エラストグラフィ (Aixplorer Ver.6; Supersonic Imagine, France) および 4-15 MHz のリニアプローブ (SL 15-4, Supersonic Imagine, France) を用いた。計測には、超音波装置の SWE モードの MSK プリセットを使用した。超音波プローブと筋束の走行のなす角度により計測値が変化するため<sup>11)</sup>、超音波プローブが各対象筋の筋束の走行に沿うようプローブ位置を調整した。また、超音波プローブと皮膚の間にジェルを十分塗布し、超音波プローブが筋を圧迫することによる計測値への影響がないよう留意した。さらに、随意的な筋活動による剛性率への変化を避けるため、被験者に完全に脱力するよう指示をした。測定は各筋につきそれぞれ 3 回行い、計測する筋の順番はランダムとした。

### 1. 4. 4 分析方法

各筋の剛性率( $\mu$ )は、下記の式により算出した。

$$\mu = \rho \cdot c^2$$

$\rho$  は筋の密度 ( $1055 \text{ kg/m}^3$ )<sup>12)</sup> を示し、 $c$  は超音波剪断波エラストグラフィにより得られた、筋組織を伝播する剪断波の速度を表している。剪断波速度の取得範囲は、超音波 B モード画像を参考に、皮下脂肪や腱膜組織を含まず、可能な限り大きな円となるようにした (直径 = 約 1.5 cm) (図 1)。各筋の剛性率は、3 回の計測の平均値として算出した。

### 1. 5 MVC トルクの計測

膝関節伸展および膝関節屈曲の MVC トルクの計測は仰臥位にて行った。右股関節および右膝関節は 90 度屈曲位、左股関節および左膝関節は解剖学的正位とした。足関節底屈 MVC トルクの計測は腹臥位にて行い、足関節角度は解剖学的正位とした。筋力計への固定法は剛性率の計測時と同様とした。また固定の際に、ダイナモメータの

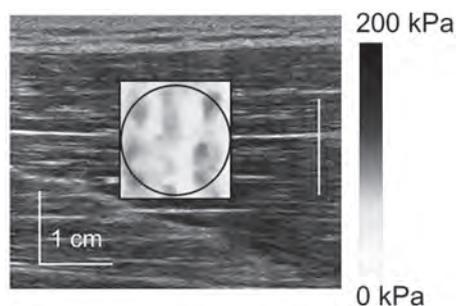


図1 超音波剪断波エラストグラフィ画像の典型例 (半腱様筋)

四角で囲んだ範囲は剪断波速度計測の関心領域を示し、丸で囲んだ範囲は分析範囲を示す。

軸と関節の軸が合っていることを確認した。各 MVC トルクの計測は 2 回行い、再現性の確認が取れなかった (2 回の計測値に 5% 以上の差異が認められた) 場合は 3 回以上の計測を行った。各 MVC トルクの統計処理には最大値を用いた。

### 1. 6 統計

結果はすべて、平均値  $\pm$  標準偏差で示した。各筋の剛性率および各 MVC トルクの経時変化を観察するため、時間 (PRE, POST 1, POST 2, POST 3) を要因とする繰り返しのある一元配置分散分析を行った。有意であった場合は、Dunnett の方法による多重比較検定を行った。有意水準は  $P < 0.05$  とした。すべての統計処理は統計ソフト (SPSS Statistics 22, IBM Japan, Japan) を用いて行った。

## 2. 研究結果

図 2 に、マラソン前後における各筋の剛性率を示した。一元配置分散分析の結果、腓腹筋内側頭および半腱様筋の剛性率の変化に有意性が認められた ( $P = 0.005$  および  $P = 0.036$ ) が、内側広筋、外側広筋、大腿二頭筋および半膜様筋の剛性率に有意な経時変化は認められなかった (それぞれ、 $P = 0.217$ ,  $P = 0.752$ ,  $P = 0.141$ ,  $P = 0.448$ )。多重比較検定の結果、腓腹筋内側頭において、PRE と

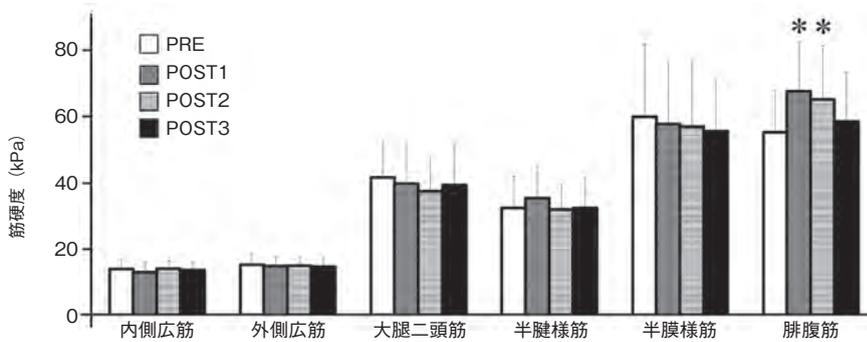


図2 マラソンレース前後における剛性率の経時変化  
\* vs. PRE (P < 0.05)

POST 1 および POST 2 との間には有意差が認められた (PRE vs. POST 1: 55.4 vs. 67.7 kPa, P = 0.005; PRE vs. POST 2: 55.4 vs. 65.3 kPa, P = 0.025) が, PRE と POST 3 における剛性率には有意な差はみられなかった (PRE vs. POST 3: 55.4 vs. 58.7 kPa, P = 0.685). 一方, 半腱様筋においては, PRE と POST における剛性率に有意差は認められなかった.

マラソン前後における膝関節伸展, 屈曲および足関節底屈 MVC トルクの変化を図 3 に示した. いずれの MVC トルクも PRE に比べ POST 1 において有意に低い値を示した. しかしながら, POST 2 および POST 3 における各 MVC トルクは, PRE のそれと有意な差が認められなかった.

### 3. 考察

本研究より, 以下の結果が得られた. 1) マラソンレースの 2 日後まで, 腓腹筋内側頭に有意な剛性率の増加がみられたが, 3 日後においてはレース前と有意な差は認められなかった. 2) 内側広筋, 外側広筋, 大腿二頭筋, 半腱様筋および半膜様筋には有意な剛性率の変化はみられなかった. 市民ランナーがマラソンを行うことにより, 足関節底屈筋に顕著な筋損傷が生じるが, 3 日後には回復することが明らかとなった. また, 膝関節伸展筋および膝関節屈曲筋には大きな損傷が生

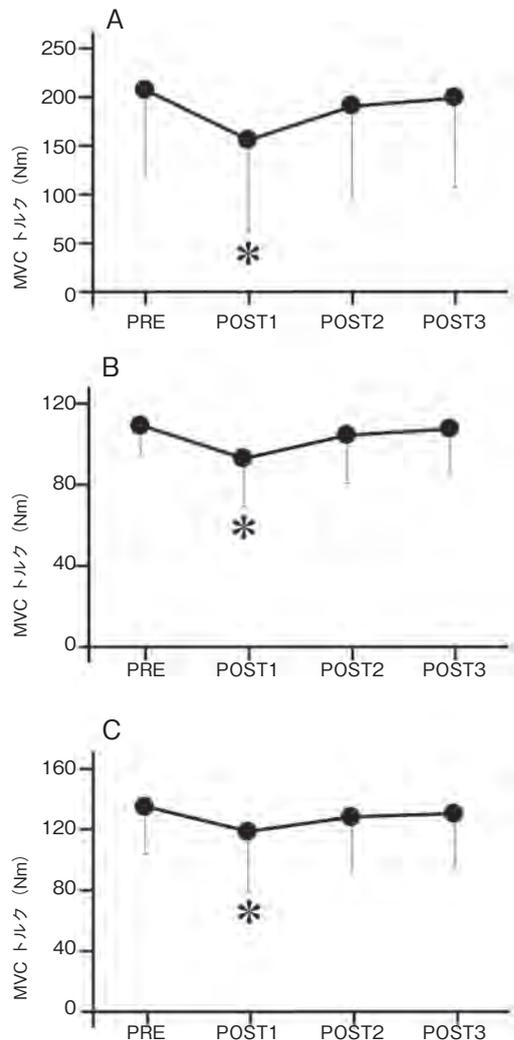


図3 マラソンレース前後における筋力の経時変化  
A: 膝関節伸展 MVC トルク, B: 膝関節屈曲 MVC トルク, C: 足関節底屈 MVC トルク. \* vs. PRE (P < 0.05)

しないことが示唆された。

本研究では、マラソンレースの2日後まで、有意な腓腹筋内側頭の剛性率の増加がみられた。Morgan and Allen<sup>13)</sup>は、伸張性収縮によって、サルコメアと共に筋鞘や筋小胞体、横行小管といった微細組織に損傷が生じ、筋内のCa<sup>2+</sup>の恒常性が崩れることを示唆している。また、Lacourpaille et al.<sup>10)</sup>は、漏出したCa<sup>2+</sup>によって、安静時におけるクロスブリッジの結合が強まり、筋が硬くなる、すなわち筋の剛性率が高くなると述べている。本研究においても、マラソンレースによって、腓腹筋が繰り返し伸張性収縮を行うことにより筋損傷が生じ、結果として剛性率が増加したと考えられる。

本研究において、足関節底屈 MVC トルクは1日後においてのみ低下し、2日後にはPREの値と有意な差は認められなかった。一方、剛性率の結果を踏まえると、腓腹筋内側頭は、2日後まで損傷していたと考えられる。この相違が生じた理由の一つとして、足関節底屈 MVC トルクにおける腓腹筋内側頭の貢献度が挙げられる。Ward et al.<sup>14)</sup>は、屍体を用いて下肢の筋形状について報告しており、腓腹筋内側頭の生理学的筋横断面積が下腿三頭筋全体のそれに占める割合は26%程度であることを示している。さらに、後脛骨筋や長腓骨筋など他の足関節底屈筋群を考慮すると、腓腹筋内側頭の損傷が足関節底屈 MVC トルクに及ぼす影響は26%よりも小さくなる。すなわち、腓腹筋内側頭の損傷は2日後まで生じていたが、他の筋の損傷はほとんど生じていなかったため、足関節底屈筋力の低下は1日後までであったと推察される。

本研究において、膝関節伸展および屈曲 MVC トルクはマラソンレースの1日後においてのみ有意な低下がみられた。本研究結果と同様に、Hill et al.<sup>3)</sup>も、マラソンレースの1日後に膝関節伸展 MVC トルクが低下することを報告している。し

かしながら、膝関節伸展筋である内側広筋および外側広筋、膝関節屈曲筋である大腿二頭筋、半腱様筋、および半膜様筋に有意な剛性率の増加はみられなかった。この相違が生じた理由として、筋力が低下する要因の違いが考えられる。すなわち、膝関節伸展および屈曲 MVC トルクの低下は、筋損傷ではなく筋痛による神経系の抑制が関わっている可能性が挙げられる<sup>15)</sup>。前述のように、筋線維に損傷が生じていれば剛性率が増加するため、マラソンレース後に大腿部の収縮要素には顕著な損傷は起きていないと考えられる。Lau et al.<sup>16)</sup>は、筋内に挿入した針によって筋の収縮要素や筋膜に電気刺激を行い、筋痛が生じている箇所の同定を試みている。その結果、筋膜は筋組織より痛みに対し敏感であることが示された。また、筋膜において、電気刺激に対する感受性により評価した筋痛の程度と、筋を圧迫することにより評価した筋痛の程度に有意な相関関係が得られたことを報告している。すなわち、痛みによる神経系の抑制は、筋の収縮要素の損傷が生じずとも起こりうると考えられる。このため、本研究によって生じた MVC トルクの低下は、筋膜の損傷による筋痛が神経系の抑制をもたらしたことに起因するのではないかと推察された。

剛性率と MVC トルクの経時変化に相違がみられる理由として、剛性率を計測する際の関節角度(筋の長さ)の影響が挙げられる。筋線維のCa<sup>2+</sup>の感受性は、伸長位において高いことが知られている<sup>17)</sup>。また、Lacourpaille et al.<sup>10)</sup>は、上腕二頭筋において、筋損傷による剛性率の増加は肘関節伸展位にて顕著であり、肘関節屈曲位においては観察されないことを報告している。すなわち、超音波剪断波エラストグラフィを用いて筋損傷を明確に評価するには、筋伸長位において剛性率を計測することが必要だと考えられる。この点を踏まえ本研究では、各剛性率の計測は軽度伸長位にて行った。以上の点から、本研究においてみられ

たマラソンレース前後の剛性率と MVC トルクの経時変化の相違は、計測時の関節角度の影響によるものではないと考えられる。

本研究の結果から、マラソンレースによる筋損傷は2日後まで顕著であることが示唆された。しかしながら、本研究にて計測した剛性率は、筋線維や筋内膜、筋周膜、筋小胞体などの微細損傷を反映していると考えられる。一方、筋外膜や腱、筋間の結合組織などに損傷が及んでいるかは検討できていない。このため、今後の課題として、筋腱複合体の全体および周囲の組織における損傷を定量化することで、マラソンレース後のトレーニング再開時期などを明確にすることが求められる。

## 結 論

本研究は、市民ランナーがマラソンレースを行うことによって生じる下肢の筋の損傷を定量し、筋損傷がどの部位において生じているのかを明らかにすることを目的とした。マラソンレース前後の剛性率を超音波剪断波エラストグラフィにより計測した結果、腓腹筋内側頭にのみ、有意な剛性率の増加が観察された。また、マラソンレースの3日後における剛性率はマラソン前のそれと有意な差が認められなかった。このことから、マラソンによる筋損傷は足関節底屈筋に顕著に生じ、3日後には回復することが明らかとなった。また、膝関節伸展筋および膝関節屈曲筋には大きな損傷が生じないことが示唆された。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

## 文 献

1) 笹川スポーツ財団「スポーツライフに関する調査

報告書」2002,2004

- 2) Kluitenberg B., van Middelkoop M., Diercks R., van der Worp H., What are the differences in injury proportions between different populations of runners? a systematic review and meta-analysis. *Sports Med.*, 45: 1143-1161 (2015)
- 3) Hill J.A., Howatson G., van Someren J.A., Walshe I., Pedlar C.R., Influence of compression garments on recovery after marathon running. *J. Strength Cond. Res.*, 28: 2228-2235 (2014)
- 4) Petersen K., Hansen C.B., Aagaard P., Madsen K., Muscle mechanical characteristics in fatigue and recovery from a marathon race in highly trained runners. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 101: 385-396 (2007)
- 5) Howatson G., McHugh M.P., Hill J.A., Brouner J., Jewell A.P., van Someren K.A., Shave R.E., Howatson S.A., Influence of tart cherry juice on indices of recovery following marathon running. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 20: 843-852 (2010)
- 6) Kyröläinen H., Pullinen T., Candau R., Avela J., Huttunen P., Komi P.V., Effects of marathon running on running economy and kinematics. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 82: 297-304 (2000)
- 7) Kobayashi Y., Takeuchi T., Hosoi T., Yoshizaki H., Loeppky J.A., Effect of a marathon run on serum lipoproteins, creatine kinase, and lactate dehydrogenase in recreational runners. *Res. Q. Exerc. Sport*, 76: 450-455 (2005)
- 8) Tojima M., Noma K., Torii S., Changes in serum creatine kinase, leg muscle tightness, and delayed onset muscle soreness after a full marathon race. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, Epub ahead of print
- 9) Eby S.F., Song P., Chen S., Chen Q., Greenleaf J.F., An K.N., Validation of shear wave elastography in skeletal muscle. *J. Biomech.*, 46: 2381-2387 (2013)
- 10) Lacourpaille L., Nordez A., Hug F., Couturier A., Dibie C., Guilhem G., Time-course effect of exercise-induced muscle damage on localized muscle mechanical properties assessed using elastography. *Acta. Physiol.*, 211: 135-146 (2014)
- 11) Gennison J.L., Deffieux T., Mace E., Montaldo G., Fink M., Tanter M., Viscoelastic and anisotropic mechanical properties of in vivo muscle tissue assessed by supersonic shear imaging. *Ultrasound Med. Biol.*, 36: 789-801 (2010)
- 12) Ward S.R., Lieber R.L., Density and hydration of fresh and fixed human skeletal muscle. *J. Biomech.*,

- 38: 2317-2320(2005)
- 13) Morgan D.L., Allen D.G., Early events in stretch-induced muscle damage. *J. Appl. Physiol.*, 87: 2007-2015(1999)
  - 14) Ward S.R., Eng C.M., Smallwood L.H., Lieber R.L., Are current measurements of lower extremity muscle architecture accurate? *Clin. Orthop. Relat. Res.*, 467: 1074-1082(2009)
  - 15) Prasartwuth O., Taylor J.L., Gandevia S.C., Maximal force, voluntary activation and muscle soreness after eccentric damage to human elbow flexor muscles. *J. Physiol.*, 15: 567: 337-348(2005)
  - 16) Lau W.Y., Blazevich A.J., Newton M.J., Wu S.S., Nosaka K., Changes in electrical pain threshold of fascia and muscle after initial and secondary bouts of elbow flexor eccentric exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 115: 959-968(2015)
  - 17) Stephenson D.G., Wendt I.R., Length dependence of changes in sarcoplasmic calcium concentration and myofibrillar calcium sensitivity in striated muscle fibres. *J. Muscle. Res. Cell. Motil.*, 5: 243-272(1984)

**運動実施のタイミングの違いが1日の血糖変動に与える影響  
1日を通して行う細切れ運動は、24時間血糖コントロールに有効か？  
- 24時間の持続血糖モニタリングによる検証 -**

福 岡 大 学 畑 本 陽 一  
(共同研究者) 同 田 中 宏 暁  
医薬基盤・健康・  
栄養研究所 山 田 陽 介  
熊本県立大学 吉 村 英 一

**The Effect of Different Exercise Timing on Lowering  
Postprandial Glucose Elevation.  
- Is Interrupting Exercise Throughout the Day Effectiveness in Glycemic Control? -**

by

Yoichi Hatamoto, Hiroaki Tanaka  
*Fukuoka University*  
Yosuke Yamada  
*National Institute of Health and Nutrition*  
Eiichi Yoshimura  
*Prefectural University of Kumamoto*

**ABSTRACT**

**Introduction:** Postprandial abnormal glucose elevation (PPGE) is one of the risk factors of cardiovascular disease (CVD) in both diabetes and nondiabetes groups. Effective control of PPGE might prevent the chronic diseases such as CVD. However, there is no consensus on optimal exercise timing to reduce PPGE. The purpose of this study was to determine the most effective timing of exercise.

**Method:** Six participants completed the 4 different exercise patterns in random order,

which were 1) no exercise, 2) pre-meal exercise (jogging), 3) post-meal exercise (jogging), 4) breaking up sitting time (3sets of 1min jog+30sec rest, every 30min, BST). Pre and post-meal exercise pattern was 20 sets of interval exercise: 1min jogging and 30 second rest at the lactate threshold intensity of running ( $62.4 \pm 12.9\% \dot{V}O_2\max$ ). Blood glucose concentration was measured continuously during each of the patterns. Heart rate (HR) was measured after the first bout of exercise in a day. Timing, order and composition of the meals was the same in each test

Result: Heart rate was significantly lower for BST than pre-and post-exercise patterns. Peak blood glucose concentration attenuated in BST after breakfast was lower compared with pre ( $p=0.072$ ) and post-exercise ( $p<0.05$ ). After lunch BST glucose concentration was lower than for post-exercise ( $p<0.05$ ). After dinner was no significant differences between patterns. Area under curves of glucose concentration during 24 hours and 2 h postprandial was not different for each pattern.

Conclusion: The results of the study suggest that BST was more effective than pre-exercise and post exercise in preventing PPGE, especially in the morning.

## 要 旨

食後の急激な血糖上昇は、糖尿病・非糖尿病患者に関わらず心血管疾患のリスク要因となる。本研究では、食前運動・食後運動・短時間の運動を頻回行う小分け運動が食後の血糖動態に及ぼす影響について24時間持続的に血糖値を測定し、食後の血糖上昇の抑制に最適な運動タイミングを明らかにすることを目的とした。

6名の対象者は、①運動なし、②食後運動（毎食摂取開始30分後に1分運動+30秒休憩×20セット）、③食前運動（毎食時前に1分運動+30秒休憩×20セット）、④小分け運動（1日を通して、1分運動+30秒休憩×3セットを30分おきに行う）、の4条件を行った。それぞれの運動方法は、トレッドミルによる乳酸閾値強度のジョギングとした。

小分け運動は、朝食において、食前・食後運動に比べ食後最高血糖値が低い値を示した（VS食前、 $p=0.072$ , VS食後、 $p<0.05$ ）。従って、食後

の血糖上昇抑制には、食前・食後運動に比べ小分けに行う運動方法が効果的である可能性が示された。

## 緒 言

食後高血糖は、糖尿病患者および非糖尿病患者において心血管疾患のリスク要因となる<sup>3,20</sup>。さらに、空腹時血糖が正常な場合であっても心血管疾患リスクや総死亡リスクが高く<sup>16</sup>、動脈硬化や認知機能の低下とも関連することが示唆されている<sup>23,26</sup>。食後の大きな血糖変動による酸化ストレスの亢進は血管内皮障害を進行させ、将来的な心血管リスクの増大につながる可能性がある<sup>4</sup>。従って、食後の血糖上昇を是正することは上記リスクの予防策になると考えられる。

骨格筋の糖取り込みは糖輸送担体であるGLUT4により行われており、運動によるAMPキナーゼ（AMPK）の活性化は、GLUT4のトランスロケーションを引き起こし、糖取り込みを促進させることで血糖値が減少すると考えられてい

る<sup>10,19)</sup>。従って、運動のタイミング次第では、食後の血糖上昇を効果的に抑制すると考えられる。

食後の一過性の運動は、食後の血糖上昇を抑制することが報告されており<sup>12,14,15,17,18,22,25,27)</sup>、運動タイミングに関するレビューにおいても、食後の血糖上昇抑制には食前運動に比べ食後運動が有効であると結論づけている<sup>9)</sup>。

AMPK は、運動中の筋収縮に伴う細胞内のエネルギー状態の低下 (CrP の減少, AMP/ATP 比の増加) により活性化され、 $\sim 50\% \dot{V}O_2\text{max}$  強度以上で引き起こされることが示唆される<sup>13)</sup>。もし上記の運動強度を用いた食前運動であれば、AMPK が活性化され GLUT4 が細胞膜上にトランスロケーションした状態で食事を摂取することから、食後の血糖上昇と同時に糖取り込みが行われ、食後の血糖上昇を抑制すると考えられる<sup>6)</sup>。また短時間の運動であっても、頻回にわたり繰り返し運動することで糖取り込みが断続的に刺激され、血糖上昇が抑制される可能性がある<sup>2,5)</sup>。しかし、これらの運動のタイミングについて直接比較した研究はほとんどなく、それぞれの抑制効果の違いについては明らかではない。食後の血糖上昇の抑制には食後運動が一般的であるが、もし食後運動と同等の運動タイミング法が明らかになれば、運動実施者の運動を行う時間の選択肢が広がり運動習慣の形成につながるかもしれない。

本研究では、運動タイミングの違いが食後の血糖動態に与える影響について 24 時間持続血糖測定装置 (Continuous Glucose Monitoring System, CGM ipro2, Medtronic MiniMe 社, 米国) を用いて調査し、最適な運動タイミングの探索として、食前運動や短時間の運動を定期的に行う方法が食後運動に比べ食後の血糖上昇抑制に有効であるかについて明らかにする。

## 1. 方法

### 1.1 対象者

本研究の対象者は健康成人男性 6 名とし、身体的特徴を表 1 に示した。これらの対象者には、本研究の目的および内容、注意点について十分なインフォームドコンセントを行った上で研究への同意を文書で得た。なお、本研究は福岡大学倫理審査委員会の承認を得て行った。

表 1 被験者の身体的特徴 (n=6)

		Mean $\pm$ SD
Age	(yr)	22.1 $\pm$ 0.4
Height	(cm)	170 $\pm$ 5
Weight	(kg)	64.198 $\pm$ 5
Body mass index	(kg/m <sup>2</sup> )	22.0 $\pm$ 0.9
Body fat	(%)	18.1 $\pm$ 3.2
HbA1c		5.3 $\pm$ 0.3
$\dot{V}O_2\text{max}$	(ml/kg/min)	49.3 $\pm$ 6
% $\dot{V}O_2\text{max}$	(%)	62.4 $\pm$ 13
Running speed at LT	(m/min)	146.0 $\pm$ 36

### 1.2 有酸素作業能力の評価

#### 1.2.1 乳酸閾値強度 (LT: Lactate threshold) および最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2\text{max}$ ) の評価

対象者はトレッドミルを用い運動動負荷試験を行った。運動負荷試験は、安静 1 分間の後、対象者の体力レベルに応じた初期走行速度から 10m/min ずつ多段階的 (1 負荷 4 分間) に増加させ、血中乳酸濃度が 4mmol/L に達するまで行った。各運動負荷の間に 1 分間の休息を行った。各運動終了 30 秒前に心拍数 (HR, Polar RS800CX) を測定し、1 分間の休息の際に Borg scale による主観的運動強度 (RPE) と耳朶から血中乳酸濃度 (LA) を測定した (ラクテート・プロ 2 アークレイ, 日本)。さらに、LA が 4mmol/L を超えた時点から 1 分間おきに傾斜を 2% ずつ増加させ、対象者が自発的に走行できなくなるまで行った。運動負荷試験中は、断続的に呼気ガスを採取し、容量 3L の容器に継続的に流入させ、Mixing Chamber 法により 12 秒ごとに呼気ガス濃度を測定した。

呼気ガス濃度の測定には生体ガス分析用 質量分析装置 (ARCO-2000, アルコシステム, 千葉, 日本) を用いた<sup>11)</sup>. LT は 5 名の目視の結果, 最大値と最小値を除いた 3 名の平均値によって評価された. 運動負荷試験は, 本実験から 3 日以上前に行った.

### 1. 3 身体組成の評価

体重は, 0.01kg 単位で電磁式電子台秤 (新光電子社, 日本) を用いて測定した. それぞれの対象者の体脂肪率 (Body fat, %Fat) は, 水中体重秤量法によって身体密度を評価し, さらに純酸素希釈法にて残気量を求めて身体密度の補正を行ったあとに推定された<sup>8)</sup>. 全ての身体組成の計測は 12 時間以上の空腹状態の早朝に行った.

### 1. 4 HbA1c の測定

対象者の HbA1c は, 指の先端から採血を行い評価した. (Cobas b 101, ロシユ・ダイアグノスティックス, 東京, 日本).

### 1. 5 試験デザイン

本研究は, 4 種類の条件を無作為な順序で行うランダム化クロスオーバー試験とした. 対象者に

は, 実験 3 日前からの運動および前日の飲酒を禁止し, 夜 9 時以降に飲水以外の飲食及びカフェインの摂取を控えるよう指示した. さらに, 実験の前日の食事は 3 食同一の物を摂取すること, 実験当日の朝は食後 10 時間以上の絶食状態で来研することを指示した.

実験プロトコルを図 1 に示した. 対象者は, ①運動なし (基本的に座位活動) ②食後運動 (毎食摂取 30 分後に 1 分運動 + 30 秒休憩 × 20 セット行う), ③食前運動 (毎食前に 1 分運動 + 30 秒休憩 × 20 セットを行ったあと 15 分後に食事), ④小分け運動 (1 日を通して, 1 分運動 + 30 秒休憩 × 3 セットを 30 分おきに行う), の 4 条件を行った. 対象者はトレッドミルを用いて LT 強度のジョギングを行い, 総運動時間は各条件とも 60 分間に設定した. 対象者には, 通常生活以外 (歯磨き, トイレ等) の活動を座位活動にするよう指示した. 各試行は 5 日間以上の間隔をあけて同一時刻および同一条件で実施した. 各条件の 1 回目の運動終了後に HR を測定した.

### 1. 6 実験当日の試験食

1 日の食事量は身体活動レベル (PAL) に 1.5 を乗算した値を算出し採用した. PFC 比はおお

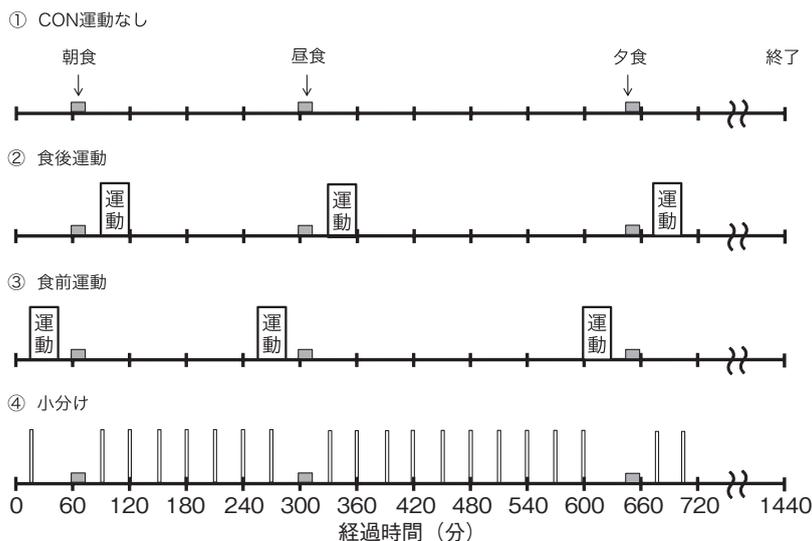


図1 実験プロトコル

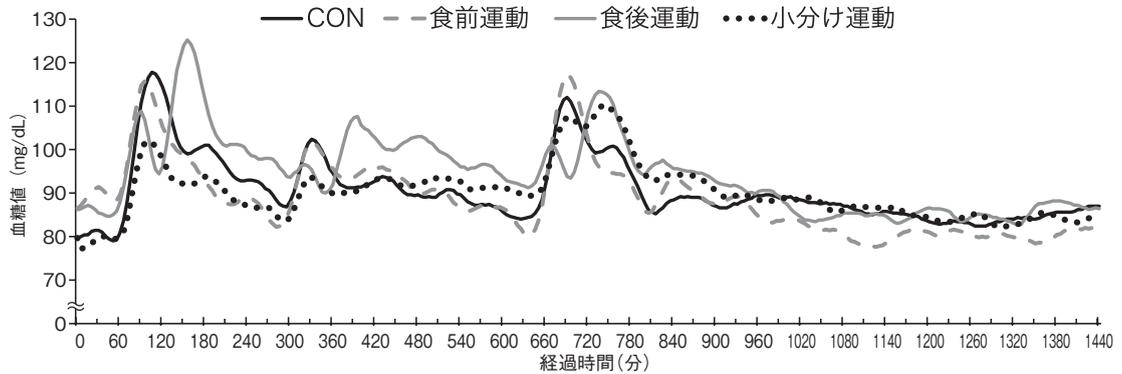


図2a 運動タイミングの違いによる血糖値の継時的変化  
(a) 24時間血糖モニタリングによる血糖値の変化

よそ 15:25:60 で構成し、毎食時の糖質摂取量（食事のエネルギー摂取量）は朝食  $112 \pm 13\text{g}$  ( $664 \pm 100\text{ kcal}$ ), 昼食  $104.5 \pm 0\text{g}$  ( $731 \pm 0\text{ kcal}$ ), 夕食  $131 \pm 14\text{g}$  ( $900 \pm 87\text{ kcal}$ ) であった。朝食, 昼食, 夕食の食事時間は規定され, 15分間で完食し, また食事の摂食順番は条件間で統一した。試験中の飲料は水のみとした。

### 1. 7 血糖測定

血糖は、持続測定装置を用いて測定した。CGMは腹部の皮下に挿入した電極で組織間質液中のグルコース濃度を継続的に測定し、自己血糖測定値により校正することで5分毎の血糖値が評価される。対象者はCGMを実験日の前日から装着し、CGM測定値の校正のため耳朶から（グルテストアプリ、アークレイ株式会社、日本）血糖自己測定を1日に4回以上行った。

### 1. 8 曲線下面積（area under the curve : AUC）算出

24時間および食後120分間のAUCは、血糖値  $0\text{mg/dL}$ を基線とし、台形法により面積を算出した。

### 1. 9 統計処理

全てのデータは、平均値 ± 標準偏差で示した。4条件の食後の最高血糖値、24時間AUC、食後120分AUC、HRは対応のある一元配置の分散分

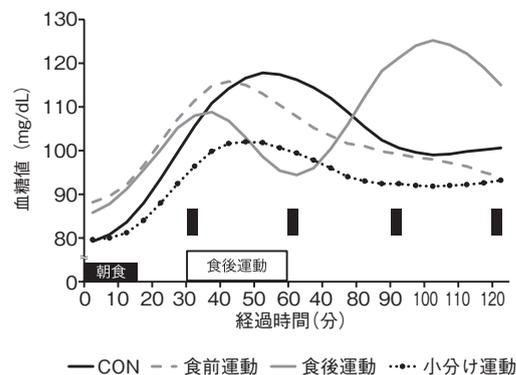


図2b 運動タイミングの違いによる血糖値の継時的変化  
(b) 朝食後2時間の血糖値の変化。グラフの値は平均値を示す (n=6)。■は小分け運動のタイミングを表す

析を行い、さらに事後検定として Bonfferoni による多重比較を用いて解析を行った (SPSS ver 20, SPSS Inc, Chicago, IL, USA)。統計的有意水準は、危険率5%未満とした。

## 2. 結果

各運動条件の1回目運動終了直後のHRに有意な差は認められなかった。図2に各条件における血糖値の継時的変化を示した。24時間および120分間の積分値は、条件間に有意な差は認められなかった (図3)。食後最高血糖値は、朝食時の小分け運動が食前・食後運動に比べ低値を示し (VS食前,  $P=0.072$ ; VS食後,  $P<0.05$ )。食前, 食後, CONの3条件間に有意差は認められなかった (図4)。

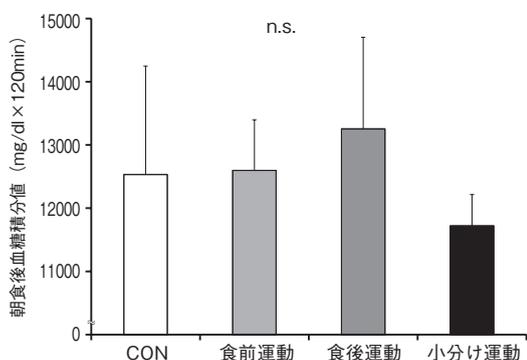


図3 朝食後2時間の血糖積分値  
全ての条件において、統計学的な有意差は認められなかった (平均±SD)

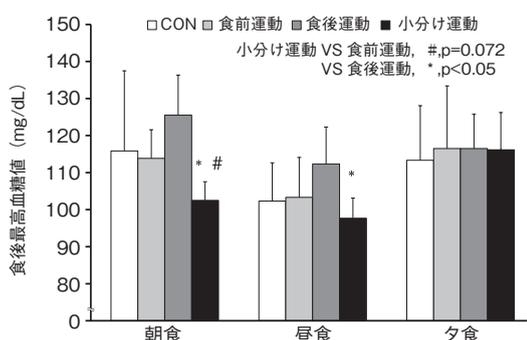


図4 運動タイミングの違いによる  
毎食後2時間以内の最高血糖値

朝食における小分け運動は、食前運動に比べ低地である傾向 (#,  $p=0.072$ )、また食後運動に比べ有意に低値を示した (\*,  $p<0.05$ )。昼食時は、小分け運動が食後運動と比較し、有意に低値を示した

### 3. 考察

本研究は、運動タイミングの違いが毎食後の血糖上昇抑制に与える影響について、24時間血糖値が測定可能なCGMを用いて検証した。本研究の結果から、特に朝食において、食前・食後運動に比べ小分け運動が食後の血糖上昇の抑制に有効である可能性が示された。

近年、短時間の運動を定期的に繰り返す運動が1日の血糖積分値の減少や食後の血糖上昇抑制などの血糖コントロールに有効であると報告されている<sup>2,5,21</sup>。肥満者<sup>5</sup>と若年健常者<sup>2</sup>( $60 \dot{V}O_2\max$  強度)では、20分おきの2分間の歩行運動が座

位活動時に比べ、朝食後血糖上昇を抑制した。本研究では、特に朝食後の小分け運動が他の運動条件に比べ、朝食後の最高血糖値が低かったことから、食後の小分け運動が血糖値の上昇を抑制することが示唆された。

本研究では、興味深いことに食後の運動中は血糖値が減少したが、運動を中断した時点から再上昇したため結果的に血糖上昇を抑制できなかった(図2a, b)。しかし、本研究で用いた短時間の小分け運動は朝食後の最高血糖値を最も抑制したことから、血糖が再び上昇する時点でさらに運動をすることで血糖の上昇を抑制できるかもしれない。つまり、食後の血糖上昇の抑制には、必ずしも食後に30分以上の持続運動を行う必要はなく、食後20-30分程度の間隔に分けて短時間の運動を繰り返すことで抑制効果がある可能性を示している。

また9時間にわたって30分おきに100秒の歩行運動( $42.8-48.4\% \dot{V}O_2\max$ )を行った際の9時間血糖積分値は、座位活動時のそれに比べ低値であった<sup>21</sup>。一方、1時間おきに8分間の運動( $40-60\% \text{HR Reserve}$ )を8時間行った8時間血糖積分値は、座位活動時と有意な差を認めなかった<sup>1</sup>。本研究でも各条件間による24時間血糖積分値に有意な差はなかった。上記の長時間の積分値による結果の不一致は、おおよそ年齢は一致していることから、日頃の生活習慣、運動の頻度や強度、または血糖値のサンプリング頻度や採血方法などの違いが考えられる。

本研究で用いた20分間の食前運動と食後運動は、食後最高血糖値と食後2時間積分値において、運動なし条件との差が認められなかった。先行研究では、食後運動に関して糖尿病患者および健常人でも食後運動が食後の血糖上昇を抑制したという報告が散見される。結果の不一致の理由として、まず本研究の対象者は若年健常者であったため、運動を行わなくともインスリン刺激による糖取り

込みにより食後の血糖上昇を抑制したと考えられる。次に、運動時間の長さが影響している可能性がある。Nygaardらは50歳前後の健常女性を対象として食後に15分間と40分間の歩行運動による食後の血糖上昇抑制効果について検証し、40分間歩行は15分歩行に比べ食後の血糖上昇を抑制したと報告している<sup>18)</sup>。またHaxhiらは食後血糖上昇の抑制には、健常者では食後に30-40分間の運動、糖尿病患者では60分以上の運動が望ましいだろうと述べている<sup>9)</sup>。食前運動に関しては、OGTT(75g経口糖負荷試験)摂取前の40分間のLT強度運動が糖負荷後の血糖上昇を抑制した<sup>24)</sup>。このように、中強度程度の一過性の運動では食前・食後の運動時間が血糖上昇抑制効果に影響することが示唆される。本研究の運動時間は20分間であったことから、食後血糖抑制効果が少なかったと考えられる。今後、運動時間と血糖上昇抑制についてさらなる検討が必要である。

本研究では特に朝食時において、小分け運動による食後の血糖上昇を抑制した。しかし、その理由については現在不明である。Dunstan<sup>5)</sup>らとBailey<sup>2)</sup>らは、前日の夕食から絶食を経て朝食時に実験を行っており、小分け運動が食後血糖上昇抑制に有効であることを報告しているが、昼食および夕食時に検証した研究はない。CGMを用いた先行研究では、特に朝食後の血糖上昇が高いことが確認できる<sup>7,27)</sup>。朝食時は、食事間隔が長いいため血中インスリン濃度が低く、また遊離脂肪酸濃度が高いことから一時的なインスリン抵抗性が起こっていると考えられる。また同様に朝食を欠食し、昼食摂取後の食後血糖が大きく上昇する現象は健常人でも糖尿病患者でも知られている。この現象は、本研究の朝食時にも起きている可能性があり、血糖上昇に対する運動効果が昼食・夕食より表れやすかったのかもしれない。

## 結 語

食後の血糖上昇抑制には、小分けに行う運動方法が食前・食後の運動に比べ効果的である可能性が示された。

## 謝 辞

本研究を実施するにあたり参加して頂いた対象者の皆様、研究の遂行に多大なご支援を頂きました福岡大学の西村紗奈様、呉屋良真様に深くお礼申し上げます。また本研究の遂行にご助成賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に心よりお礼申し上げます。

## 文 献

- 1) Altenburg T.M., Rotteveel J., Dunstan D.W., Salmon J., Chinapaw M.J., The effect of interrupting prolonged sitting time with short, hourly, moderate-intensity cycling bouts on cardiometabolic risk factors in healthy, young adults. *J. Appl. Physiol.* (1985), 115(12) :1751-1756(2013)
- 2) Bailey D.P., Locke C.D., Breaking up prolonged sitting with light-intensity walking improves postprandial glycemia, but breaking up sitting with standing does not. *J. Sci. Med. Sport.*, (2014)
- 3) Cavalot F., Petrelli A., Traversa M. et al., Postprandial blood glucose is a stronger predictor of cardiovascular events than fasting blood glucose in type 2 diabetes mellitus, particularly in women: lessons from the San Luigi Gonzaga Diabetes Study. *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 91(3) :813-819(2006)
- 4) Ceriello A., Esposito K., Piconi L. et al., Oscillating glucose is more deleterious to endothelial function and oxidative stress than mean glucose in normal and type 2 diabetic patients. *Diabetes.*, 57(5) :1349-1354(2008)
- 5) Dunstan D.W., Kingwell B.A., Larsen R. et al., Breaking up prolonged sitting reduces postprandial glucose and insulin responses. *Diabetes. Care.*, 35(5) :976-983(2012)
- 6) Francois M.E., Baldi J.C., Manning P.J. et al., 'Exercise snacks' before meals: a novel strategy to improve glycaemic control in individuals with

- insulin resistance. *Diabetologia.*, 57(7) :1437-1445 (2014)
- 7) Gillen J.B., Little J.P., Punthakee Z., Tarnopolsky M.A., Riddell M.C., Gibala M.J., Acute high-intensity interval exercise reduces the postprandial glucose response and prevalence of hyperglycaemia in patients with type 2 diabetes. *Diabetes. Obes. Metab.*, 14(6) :575-577(2012)
  - 8) Goldman R.F., Buskirk E.R., A method for underwater weighing and the determination of body density. *Techniques for measuring body composition.*, 78-89(1961)
  - 9) Haxhi J., Scotto di Palumbo A., Sacchetti M., Exercising for metabolic control: is timing important? *Ann. Nutr. Metab.*, 62(1) :14-25(2013)
  - 10) Hayashi T, Wojtaszewski JF, Goodyear LJ. Exercise regulation of glucose transport in skeletal muscle. *Am. J. Physiol.*, 273(6 Pt 1) :E1039-1051(1997)
  - 11) Hirano M, Yamada Y, Hibi M, et al. Simultaneous multiple-subject analysis of respiratory gas exchange in humans. *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine.*, 3(2) :269-279(2014)
  - 12) Høstmark A.T., Ekeland G.S., Beckstrøm A.C., Meen H.D., Postprandial light physical activity blunts the blood glucose increase. *Prev. Med.*, 42(5) :369-371(2006)
  - 13) Karlsson J., Nordesjö L.O., Jorfeldt L., Saltin B., Muscle lactate, ATP, and CP levels during exercise after physical training in man. *J. Appl. Physiol.*, 33(2) :199-203(1972)
  - 14) Larsen J.J., Dela F., Kjaer M., Galbo H., The effect of moderate exercise on postprandial glucose homeostasis in NIDDM patients. *Diabetologia.*, 40(4) :447-453(1997)
  - 15) Larsen J.J., Dela F., Madsbad S., Galbo H., The effect of intense exercise on postprandial glucose homeostasis in type II diabetic patients. *Diabetologia.*, 42(11) :1282-1292(1999)
  - 16) Nakagami T., Group D.S., Hyperglycaemia and mortality from all causes and from cardiovascular disease in five populations of Asian origin. *Diabetologia.*, 47(3) :385-394(2004)
  - 17) Nelson J.D., Poussier P., Marliss E.B., Albisser A.M., Zinman B., Metabolic response of normal man and insulin-infused diabetics to postprandial exercise. *Am. J. Physiol.*, 242(5) :E309-316(1982)
  - 18) Nygaard H., Tomten S.E., Høstmark A.T., Slow postmeal walking reduces postprandial glycemia in middle-aged women. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 34(6) :1087-1092(2009)
  - 19) O'Gorman D.J., Krook A., Exercise and the treatment of diabetes and obesity. *Endocrinol. Metab. Clin. North. Am.*, 37(4) :887-903(2008)
  - 20) O'Keefe J.H., Bell D.S., Postprandial hyperglycemia/hyperlipidemia (postprandial dysmetabolism) is a cardiovascular risk factor. *Am. J. Cardiol.*, 100(5) :899-904(2007)
  - 21) Peddie M.C., Bone J.L., Rehrer N.J., Skeaff C.M., Gray A.R., Perry T.L., Breaking prolonged sitting reduces postprandial glycemia in healthy, normal-weight adults: a randomized crossover trial. *Am. J. Clin. Nutr.*, 98(2) :358-366(2013)
  - 22) Praet S.F., Manders R.J., Lieveise A.G, et al.. Influence of acute exercise on hyperglycemia in insulin-treated type 2 diabetes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 38(12) :2037-2044(2006)
  - 23) Rizzo M.R., Marfella R., Barbieri M. et al., Relationships between daily acute glucose fluctuations and cognitive performance among aged type 2 diabetic patients. *Diabetes. Care.*, 33(10) :2169-2174(2010)
  - 24) Rynders C.A., Weltman J.Y., Jiang B. et al., Effects of exercise intensity on postprandial improvement in glucose disposal and insulin sensitivity in prediabetic adults. *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 99(1) :220-228(2014)
  - 25) Takaishi T., Imaeda K., Tanaka T., Moritani T., Hayashi T., A short bout of stair climbing-descending exercise attenuates postprandial hyperglycemia in middle-aged males with impaired glucose tolerance. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 37(1) :193-196(2012)
  - 26) Temelkova-Kurktschiev T.S., Koehler C., Henkel E., Leonhardt W., Fuecker K., Hanefeld M., Postchallenge plasma glucose and glycemic spikes are more strongly associated with atherosclerosis than fasting glucose or HbA1c level. *Diabetes. Care.*, 23(12) :1830-1834(2000)
  - 27) van Dijk J.W., Venema M., van Mechelen W., Stehouwer C.D., Hartgens F., van Loon L.J., Effect of moderate-intensity exercise versus activities of daily living on 24-hour blood glucose homeostasis in male patients with type 2 diabetes. *Diabetes. Care.*, 36(11) :3448-3453(2013)

水による体性感覚への刺激が  
立位バランス調節機能に与える効果  
～水中運動の神経生理学的効果の検証～

神戸大学大学院 木村 哲也  
(共同研究者) 京都大学大学院 神崎 素樹  
立命館大学 塩澤 成弘

**Effect of Water Immersion of Fingertip Somatic Sensation on  
Quiet Bipedal Stance:  
A Basic Study for Neurophysiological Effect of Water Exercise**

by

Tetsuya Kimura  
*Graduate School of Human Development and Environment,  
Kobe University*  
Motoki Kouzaki  
*Graduate School of Human and Environmental Studies,  
Kyoto University*  
Naruhiro Shiozawa  
*Faculty of Sport and Health Science, Ritsumeikan University*

ABSTRACT

Studies have shown that a fingertip lightly touching a stable surface reduces postural sway, by providing additional tactile feedback information to the postural control system. In the present study, we examined whether or not water immersion of a fingertip enhances the postural control system during quiet standing. Eight young and nine elderly subjects maintained quiet standing for 40s with the index fingertip in the water (water touch, WT) or on the stable surface (light touch, LT). The temperature

of water in the WT condition was 20, 30, or 40°C for young subjects and 30°C for elderly subjects. In the control condition (CON), a no touch trial, the subject quietly stood on a force platform for 40s, with their arms by their sides. In the young subjects, eight trials were conducted for each condition; while the elderly subjects completed three trials for each condition. The results showed that, in the young subjects, the mean velocities of the foot center of pressure (CoP) in the anteroposterior (AP) direction was significantly reduced in the LT and WT at individual optimal temperature, compared to that in the CON condition ( $P < 0.05$ ). On the other hand, in the elderly subjects, the power of low-frequency CoP sway (below 1Hz) in the AP direction significantly decreased at LT and WT conditions ( $P < 0.05$ ). These results indicate that WT can enhance the postural control system, as well as the LT. This promises the neurophysiological effect of water exercise on the postural control system.

## 要 旨

本研究は水中運動における水と皮膚の接触による体性感覚フィードバック情報の入力、立位バランス調節システムに与える効果について実験的に検証した。若年者8名、高齢者9名を被験者とし、床反力計上にて40秒間の静的立位課題を行った。若年者は、左手示指をピーカー内の水中(20°C, 30°C, 40°C)へ浸すWT条件と、固定点に示指で軽く触れるライトタッチ(LT)条件、何も触れないコントロール(CON)条件の5条件、高齢者はWT30°C, LT, CONの3条件で測定を実施した。その結果、若年者群ではLT条件に加え、至適温度でのWT条件において、足圧中心位置(CoP)軌跡長が、CON条件に比べて有意に減少した( $P < 0.05$ )。高齢者ではLT条件、WT条件ともにCoP揺らぎの低周波成分(1Hz以下)が有意に減少した( $P < 0.05$ )。以上より、水からの体性感覚フィードバック情報により、立位バランス制御機能が向上することが示された。本研究の結果は、水中運動の立位バランスに対する神経生理学的効果を期待させるものである。

## 緒 言

立位バランス調節機能の低下は、高齢者の転倒の生理学要因である。加齢により骨格筋量が減少する為、高齢者の転倒予防策として一般的に筋量・最大筋力等の力学的要因の改善が着目される。水中歩行などの水中運動は、関節への負担が少ない点で高齢者の運動に適しており、近年我が国においても高齢者の水中運動への参加が盛んになってきている。しかし、水の抵抗による負荷など一定のトレーニング効果は期待されるものの、水中では浮力による抗重力筋への負荷が軽減するため、抗重力筋の筋力増加による立位バランス調節機能の向上に関しては検討の余地がある。

一方、立位バランス調節機能の低下は、力学的要因のみではなく、筋の活動調節の機能低下すなわち立位バランス制御システムの神経要因にも起因することが近年指摘されている<sup>1)</sup>。また、立位時に手指先で固定点を軽く触れることで、指先触覚からのフィードバック情報により立位バランスが向上することから、体性感覚が立位バランス制御システムにおける身体動揺情報のフィードバック要素として大きく貢献することが、近年示唆さ

れている<sup>2,3,4)</sup>。さらに、物理学概念である確率共振を応用し、体性感覚器に皮膚上から微弱ノイズ刺激を印加して体性感覚機能を人工的に高めると、立位バランスが向上することが明らかとなっている<sup>5,6)</sup>。これら先行研究から、体性感覚フィードバック要素の観点からも立位バランス調節機能の改善が期待される。

以上の背景を合わせて考察し、「水中運動において、運動参加者の身体各セグメントへの水の抵抗による体性感覚からの身体動揺の検知に加え、皮膚に衝突する水分子の運動がノイズ刺激と同等に体性感覚を高め、これらから相乗的に立位バランス調節システムの体性感覚フィードバック要素が効果的に刺激される」と仮説を立てた。この仮説を検証するため、実験的に体性感覚器を水中に暴露した際の、立位バランスに対する効果とそのメカニズムを分析し、水中運動の立位バランス調節機能に対する神経生理学的効果を検討することを目的とした。若年者及び高齢者に対して測定を行うことにより、体性感覚器の水への暴露における効果に関して、若年者と高齢者の一致点と相違点を検証した。

## 1. 研究方法

### 1. 1 被験者

若年者 8 名 (20.6 (1.8) 才; 平均値 (標準偏差)), 高齢者 9 名 (68.1 (6.5) 才) を対象として測定を実施した。本研究はヘルシンキ宣言に基づき実施した。本研究の実施にあたり、神戸大学大学院人間発達環境学研究科研究倫理審査委員会の承認を事前に得た。全ての被験者は本研究の内容及び目的に関して口頭と文書で十分な説明を受けた後、インフォームドコンセントに署名を行った。

### 1. 2 実験方法

被験者は、床反力計 (N5901, Sanei) 上に両足で立ち、静的立位課題を行った。両足は平行にし

て立ち、踵間は 15cm とした。測定は全て、若年者は閉眼条件、高齢者は開眼条件とした。若年者において、水からのフィードバック情報が立位バランスを向上させることの検討、及び至適な温度条件の決定を行うために、(1) 左手示指を水中 (20℃) へ浸す (20℃ 水タッチ条件 (WT20)), (2) 左手示指を水中 (30℃) へ浸す (WT30), (3) 左手示指を水中 (40℃) へ浸す (WT40), (4) 左手示指を水に浸さずに固定点に鉛直方向に 1N 以下の力で触れる (ライトタッチ (LT) 条件; 図 1), (5) 何も触れない (コントロール (CON) 条件; 図 1), の 5 条件にて静的立位保持課題を行った。

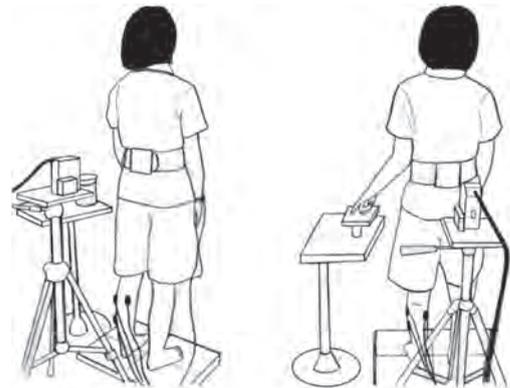


図 1 Diagram of the experimental setup for CON (left) and LT (right) conditions.

各試行は 40 秒間とし、各条件 8 試行、合計 40 試行をランダム順序で行った。水へ示指を浸す条件は、被験者の左側の腰の高さに設置したピーカーの水中に、左手の示指を入れてもらい、その際ピーカーに触れないこと、指の付け根までは水に入れないことを指示し、検者が測定中モニタリングした (図 2)。測定中の水温は温度センサ (DIGI-Meter2, Kotobuki) により記録した。一方、LT 条件においては、同じく被験者の左側の腰の高さに設置した固定板の上に左手示指で軽く触れてもらい、ロードセル (LUR-A-50NSA1, Kyowa) で測定した鉛直方向の接触力が 1N を超えないように被験者に指示し、測定中は検者がモニタリングし



図2 Diagram of the experimental setup for WT condition. The right illustration is anterior view of fingertip water immersion.

た<sup>2,3)</sup>(図1).

各試行中、床反力計より足圧中心位置 (foot center of pressure, CoP) の動揺を測定した。高解像度レーザー変位計 (LK-500, Keyence) により、腰部 (L3) の前後動揺を記録し、これを身体重心位置 (center of mass, CoM) の前後動揺と見なした。これらから、各実験条件における立位バランス調節機能の変化を測定した。さらに若年者においては、筋電図法 (SX230-1000, Biometrics) を用いて、静的二足立位時の主要な活動筋である下腿三頭筋 (外側腓腹筋 (LG), 内側腓腹筋 (MG), ヒラメ筋 (SOL)) 及び前脛骨筋 (TA) の神経活動を記録した。筋電図法は双極誘導, 20-460Hz のフィルタリング, 2.0cm の電極間距離であり、電極の直径は 1.0cm であった。各時系列データは 1kHz にてサンプリングし (Powerlab 16SP, AD Instruments), ハードディスクに保存した。実験室の室温は約 27 度, 湿度は約 50% に調節した。

一方、高齢者は若年者と同様の実験設定にて測定を行ったが、CON 条件, LT 条件, WT30 条件の 3 条件のみとし、各条件で 3 試行ずつ、計 9 試行ランダム順序で測定を行った。

### 1. 3 解析

#### 1. 3. 1 身体動揺の時間領域・周波数領域における定量化

静的二足立位時においては、前後方向の身体動揺が主であるため、本研究は前後方向の動揺のみに着目した。CoP は FIR フィルタにて 15Hz で高域遮断し、CoM は FIR フィルタにて 4Hz で高域遮断した。さらに、CoM を 2 階微分することにより、腰部にかかる加速度時系列データ (CoM<sub>ACC</sub>) を算出した (図 3)。以上より処理

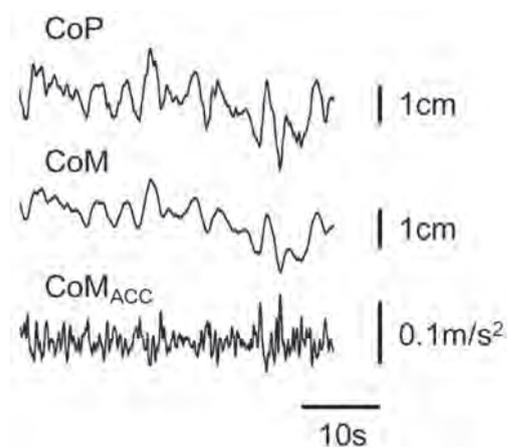


図3 Example time series of foot center of pressure (CoP), center of mass (CoM), and second derivative of CoM (CoM<sub>ACC</sub>) in a young subject.

された各 40 秒の CoP, CoM, CoM<sub>ACC</sub> 時系列データに関して、(1) 単位時間あたり軌跡長, (2) 平均振幅, (3) 最大振幅, (4) 平均 2 乗振幅値を求めた。

さらに、CoP の時系列データに関して、高速フーリエ変換 (4096 point) を行い、得られたパワースペクトル密度に関して、1Hz 以下の低周波成分のパワーの総和 (LF 成分) と 1 ~ 15Hz の高周波成分のパワーの総和 (HF 成分) を求めた<sup>5)</sup>。以上の各測定値に関して、各被験者において測定条件ごとの平均値を求めた。

### 1. 3. 2 立位バランスフィードバック制御システムの時間要素の検証

静的立位バランス制御システムは、身体動揺フィードバック情報（入力）に応じた抗重力筋活動（出力）と捉えることができる。そこで、フィードバックシステム入出力の時間要素を評価するために、若年者において CoM 動揺（入力）と下腿三頭筋活動（出力）の時空間関連性を定量化した<sup>7)</sup>。各筋から得られた40秒間の筋電図時系列データは全波整流した後、4HzのFIRフィルタにて高域遮断を行った。同様に、CoM時系列データも4Hzで高域遮断した。そして、各筋の筋電図とCoMの時空間的関連性を、両変数間の相互相関関数（Cross correlation function, CCF）から定量化した。CCFから、両時系列の時空間的関連性の指標である相互相関係数（ $R_{xy}(\tau)$ ）を求めた。2つの時系列  $x(t)$ ,  $y(t)$  間の CCF ( $C_{xy}(\tau)$ ), 及び  $R_{xy}(\tau)$  は以下の式で定義される<sup>8)</sup>。

$$C_{xy}(\tau) = \overline{x(t)y(t+\tau)}$$

$$R_{xy}(\tau) = C_{xy}(\tau) / (\sqrt{x^2} \sqrt{y^2})$$

$\tau$  は時系列間の時間ずれを示す。本研究では  $x(t)$  を CoM,  $y(t)$  を筋電図とし、 $-1000\text{ms} \leq \tau \leq 1000\text{ms}$  の間で1msの分解能でCCFを算出した。 $R_{xy}(\tau)$  は、各被験者において同一条件間ごとにアンサンブル平均した。各条件に対してアンサンブル平均された  $R_{xy}(\tau)$  に関して、 $-1000\text{ms} \leq \tau \leq 1000\text{ms}$  の範囲でピーク値 ( $R_{xy\_peak}$ ) を求め、 $R_{xy\_peak}$  を与える  $\tau$  を時間ずれ (Time shift, TS) と定義した。

### 1. 3. 3 統計

若年者群では5条件間 (CON, LT, WT20, WT30, WT40)、高齢者群では3条件間 (CON, LT, WT30) の各測定値に対し、一元配置分散分析を行った。主効果が認められた場合、CON条件を対照とした多重比較 (Dunnett法) を行った。有意水準は5%とした。尚、本文、図表における

データは平均値 (標準偏差) で示した。

## 2. 研究結果

### 2. 1 水温及び示指体積

各測定時の平均水温は、若年者において、WT20, WT30, WT40の各条件でそれぞれ20.6 (0.3) °C, 29.9 (0.3) °C, 39.9 (0.6) °Cであった。高齢者のWT30条件では、30.3 (0.8) °Cであった。また、各測定後に、被験者にビーカー内の水に示指を付け根まで浸してもらい、その時のビーカー全体の重さの変化から、各被験者の示指の体積を推定した。その結果、若年者では11.8 (3.0)  $\text{cm}^3$ 、高齢者では14.0 (3.4)  $\text{cm}^3$ であった。

### 2. 2 身体動揺の時間領域・周波数領域解析

各静的立位条件における立位バランス制御機能の変化を反映する指標として、CoP動揺、CoM動揺、CoM2階微分時系列に関し、時間領域及び周波数領域での定量化を行った。若年者の結果を表1に示す。CoPに関して、単位時間あたり軌跡長のみ主効果が認められ ( $P < 0.05$ )、CoMに関しても同じ結果を示した。さらに、CON条件との多重比較では、LT条件でCoP、CoMともに軌跡長が有意に減少し ( $P < 0.05$ )、WT20条件ではCoMについて軌跡長が減少する傾向が見られた ( $P = 0.089$ )。一方、腰部の加速度を反映するCoM2階微分時系列に関しては、全ての測定値で主効果が認められ ( $P < 0.05$ )、CON条件と比較してLT条件で有意に減少した ( $P < 0.05$ )。一方で、WT条件ではどの温度においてもCON条件との差は認められなかった。

そこで、WT条件においては、各被験者に至適温度が存在すると仮定し、CoPの単位時間あたり軌跡長に関して、各被験者において最も値が小さかった条件を各被験者の至適温度条件 (WT Optimal, WT-O) と定義し、CON条件、LT条件、WT-O条件の3条件間で、CoP軌跡長に関して分

表1 Results of the postural sway measures at each condition in young subjects. Values are group mean (S.D).

			CON	LT	WT20	WT30	WT40	ANOVA
Mean velocity	CoP	(cm/s)	0.681 (0.181)	0.597 (0.137)#	0.641 (0.152)	0.663 (0.157)	0.668 (0.179)	$P<0.05$
	CoM	(cm/s)	0.289 (0.111)	0.249 (0.074)#	0.264 (0.083)	0.274 (0.088)	0.270 (0.077)	$P<0.05$
Mean Amplitude	CoP	(cm)	0.363 (0.110)	0.323 (0.077)	0.364 (0.104)	0.363 (0.105)	0.354 (0.072)	$N.S.$
	CoM	(cm)	0.402 (0.167)	0.340 (0.097)	0.387 (0.130)	0.383 (0.143)	0.369 (0.092)	$N.S.$
	CoMAcc	(m/s <sup>2</sup> )	0.010 (0.003)	0.009 (0.002)#	0.010 (0.003)	0.010 (0.003)	0.010 (0.003)	$P<0.05$
Peak-to-peak amplitude	CoP	(cm)	2.253 (0.739)	1.929 (0.440)	2.168 (0.560)	2.227 (0.665)	2.083 (0.399)	$N.S.$
	CoM	(cm)	2.082 (0.841)	1.753 (0.528)	2.013 (0.615)	2.011 (0.722)	1.869 (0.393)	$N.S.$
	CoMAcc	(m/s <sup>2</sup> )	0.097 (0.032)	0.082 (0.022)#	0.088 (0.030)	0.094 (0.032)	0.092 (0.028)	$P<0.05$
Root mean square amplitude	CoP	(cm)	0.453 (0.143)	0.396 (0.092)	0.447 (0.125)	0.451 (0.130)	0.433 (0.084)	$N.S.$
	CoM	(cm)	0.489 (0.202)	0.410 (0.116)	0.469 (0.156)	0.467 (0.171)	0.443 (0.103)	$N.S.$
	CoMAcc	(m/s <sup>2</sup> )	0.013 (0.004)	0.012 (0.003)#	0.012 (0.003)	0.013 (0.004)	0.013 (0.003)	$P<0.05$
LF Power	CoP	(cm <sup>2</sup> /Hz)	1.393 (0.989)	1.094 (0.500)	1.276 (0.568)	1.477 (0.892)	1.260 (0.580)	$N.S.$
HF Power	CoP	(cm <sup>2</sup> /Hz)	0.032 (0.019)	0.024 (0.014)	0.030 (0.018)	0.029 (0.013)	0.033 (0.023)	$N.S.$
Rxy_peak	MG		0.269 (0.137)	0.298 (0.115)	0.257 (0.139)	0.312 (0.146)	0.329 (0.148)	$N.S.$
	SOL		0.330 (0.120)	0.283 (0.068)	0.313 (0.112)	0.320 (0.107)	0.324 (0.105)	$N.S.$
TS	MS	(ms)	-310 (120)	-275 (100)	-246 (90)	-275 (79)	-259 (89)	$N.S.$
	SOL	(ms)	-333 (123)	-357 (65)	-394 (154)	-396 (77)	-353 (70)	$N.S.$

# Significantly different from CON ( $P<0.05$ ).

表2 Results of the postural sway measures at each condition in elderly subjects. Values are group mean (S.D).

			CON	LT	WT30	ANOVA
Mean velocity	CoP	(cm/s)	0.899 (0.459)	0.732 (0.358)#	0.871 (0.502)	$P<0.05$
	CoM	(cm/s)	0.260 (0.054)	0.219 (0.062)#	0.245 (0.084)	$P<0.05$
Mean Amplitude	CoP	(cm)	0.367 (0.095)	0.292 (0.095)#	0.319 (0.091)	$P<0.05$
	CoM	(cm)	0.371 (0.101)	0.299 (0.112)#	0.322 (0.083)	$P<0.05$
	CoMAcc	(m/s <sup>2</sup> )	0.010 (0.002)	0.009 (0.002)#	0.010 (0.003)	$P<0.05$
Peak-to-peak amplitude	CoP	(cm)	2.178 (0.525)	1.724 (0.497)#	1.986 (0.516)	$P<0.05$
	CoM	(cm)	1.822 (0.410)	1.504 (0.484)#	1.694 (0.388)	$P<0.05$
	CoMAcc	(m/s <sup>2</sup> )	0.098 (0.028)	0.071 (0.020)#	0.093 (0.032)	$P<0.05$
Root mean square amplitude	CoP	(cm)	0.448 (0.111)	0.357 (0.112)#	0.393 (0.106)	$P<0.05$
	CoM	(cm)	0.451 (0.116)	0.362 (0.131)#	0.395 (0.097)	$P<0.05$
	CoMAcc	(m/s <sup>2</sup> )	0.013 (0.003)	0.011 (0.003)#	0.013 (0.004)	$P<0.05$
LF Power	CoP	(cm <sup>2</sup> /Hz)	1.641 (0.950)	0.893 (0.580)#	1.023 (0.541)#	$P<0.05$
HF Power	CoP	(cm <sup>2</sup> /Hz)	0.061 (0.052)	0.030 (0.027)#	0.048 (0.057)	$P<0.05$

# Significantly different from CON ( $P<0.05$ ).

散分析と多重比較を行った(図4)。被験者8名中、至適温度は20℃が4名、30℃が2名、40℃が2名であった。統計分析の結果、3条件間で有意な主効果が認められ ( $P<0.05$ )、CON条件と比較し、LT条件及びWT-O条件でCoP単位時間あたり軌跡長が有意に減少した ( $P<0.05$ )。これらの結果は至適温度条件において、WTによって立位バランス調節機能が向上したことを示している。

高齢者の結果を表2に示す。各指標について有意な主効果が認められた ( $P<0.05$ )。多重比較においても、全ての指標でLT条件はCON条件より有意な減少を示した ( $P<0.05$ )。一方、WT30条件において、CoP揺らぎの低周波成分(LF成分)に有意な減少が認められ ( $P<0.05$ )、CoPの平均振幅 ( $P=0.089$ )、平均2乗振幅値 ( $P=0.092$ )

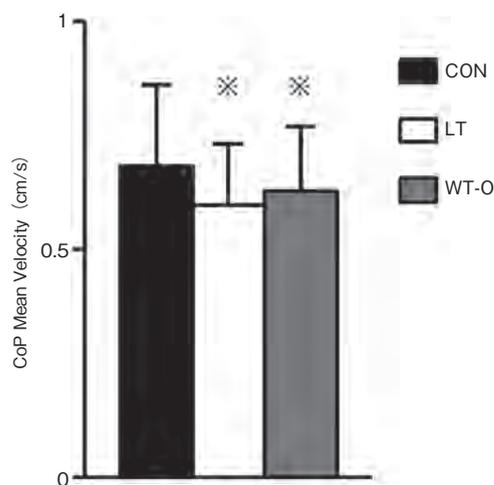


図4 Group data for mean velocity of CoP (CoP total path length/time) at the three conditions, including normal standing (CON), light touch (LT), and immersion into water at optimal temperature (WT-O). \* Significantly different from CON ( $P<0.05$ ). The results are expressed as the mean and S.D.

についてはその傾向が見られた。

### 2. 3 立位バランスフィードバック制御システムの時間要素の検証

若年者において、CoMと各筋の筋電図の相互相関解析より、 $R_{xy\_peak}$ とTSを算出した(表1)。CoMの前方への変位を正とすると、COMと全波整流後の筋電図の相互相関関数は正のピークを示す<sup>7)</sup>。しかしながら、外側腓腹筋(LG)では6名、ヒラメ筋(SOL)では1名が正のピークを示さなかったため、内側腓腹筋(MG)8名及びSOL7名に対してのみ統計解析を行った。その結果、両筋において $R_{xy\_peak}$ 及びTSに条件間で有意な差は認められなかった( $P>0.05$ )。

### 3. 考察

ヒトの二足立位姿勢において、身体重心は狭い支持基底面に対して相対的に高い位置にあり、不安定な状態と捉えることができる。このような不安定なヒトの姿勢は巧みな感覚-運動制御システムで調節されることが明らかとなっており、主に視覚、前庭感覚、体性感覚からのフィードバック情報が統合され、身体動揺に応じて骨格筋への出力が調節される<sup>9,10)</sup>。従って、これらの感覚器の加齢による機能低下は、立位フィードバック制御に大きな影響をもたらす。これまで、フィードバック情報として視覚と前庭感覚が重要視されていたが、最近になり体性感覚情報の重要な貢献が指摘されている。そこで、体性感覚情報に着目した神経生理学のアプローチによって、安全で効果的な転倒予防が可能になることが期待される。実際に、静的二足立位時に膝関節内の固有感覚に微弱な電気ノイズ刺激を印加することにより、固有感覚の感度が高まり、身体動揺が減少することが明らかになっている<sup>6)</sup>。そこで本研究は、「水中運動において、水の抵抗による体性感覚からのフィードバック情報に加え、皮膚に衝突する水分

子の運動がノイズ刺激と同等に体性感覚フィードバック機能をさらに高める」と仮説を立て、実験的に体性感覚器を水中に暴露した際の、立位バランスに対する効果を検討した。

その結果、若年者においては、水温条件に対して一貫した効果は認められなかったものの、至適温度条件を仮定することにより、水による立位バランス制御機能の向上が認められた。しかしながら、その効果はLT条件をさらに高める程度ではなかった。先行研究で、LT条件時に微弱なノイズ振動刺激を指先に印加すると、体性感覚の感度が高まることにより、立位バランス制御機能がLT条件に比べてもさらに高まることが示されている<sup>5)</sup>。従って、本研究においても水分子の運動をノイズ刺激と同等とみなし、LT条件よりもさらに身体動揺が減少すると予測していたが、結果は異なるものであった。従って、水への接触は水圧による身体動揺の検知が主に貢献し、体性感覚フィードバック機能を高めると考えられる。

一方、高齢者においてはCoP揺らぎの低周波成分が水への接触により有意に減少した。従って、高齢者に対しても、水からの体性感覚フィードバック情報の効果が認められることが明らかとなった。

また、LTの立位バランスへの効果は、接触力の鉛直成分が1N以下と小さいため力学的なバランス支持ではなく、神経生理学的要因であることが明らかにされている<sup>2,3)</sup>。同様に、本実験において示指の体積が、若年者では11.8(3.0)cm<sup>3</sup>、高齢者では14.0(3.4)cm<sup>3</sup>であり、WT条件時には示指は付け根まで水に浸ることはなかった。従って、実測は行っていないが、示指にかかる浮力は1Nを大きく下回っていたと考えられる。すなわち、本研究におけるWT条件もLT条件と同様に指先体性感覚からの身体動揺に関するフィードバック情報による、立位バランス制御機能の向上と捉えることができる。

#### 4. 結 語

本研究の結果、水から体性感覚フィードバック情報を得ることにより、立位バランス制御機能の向上が見られることが示された。本研究の結果は、水中運動における神経生理学的効果を期待させるものである。

#### 謝 辞

本研究の実施に対して助成を賜りました、公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝申し上げます。瀧千波氏（立命館大学大学院）の測定へのご協力に対して、感謝申し上げます。

#### 文 献

- 1) Kouzaki M., Masani K., Akima H., Shirasawa H., Fukuoka H., Kanehisa H., Fukunaga T., Effects of 20-day bed rest with and without strength training on postural sway during quiet standing., *Acta. Physiol.*, **189**, 279-292 (2007)
- 2) Jeka J.J., Light touch contact as a balance aid. *Phys. Ther.*, **77**, 476-487 (1997)
- 3) Kouzaki M., Masani K., Reduced postural sway during quiet standing by light touch is due to finger tactile feedback but not mechanical support. *Exp. Brain. Res.*, **188**, 153-158 (2008)
- 4) 木村哲也, 神崎素樹, 固有感覚系フィードバック情報による歩行バランス向上効果の検証～神経生理学観点による転倒予防を目指して～. *デサントスポーツ科学*, **32**, 56-63 (2011)
- 5) Kimura T., Kouzaki M., Masani K., Moritani T., Unperceivable noise to active light touch effects on fast postural sway. *Neurosci. Lett.*, **506**, 100-103 (2012)
- 6) Kimura T., Kouzaki M., Electrical noise to a knee joint stabilizes quiet bipedal stance. *Gait. Posture.*, **37**, 634-636 (2013)
- 7) Masani K., Vette A.H., Abe M.O., Nakazawa K., Popovic M.R., Smaller sway size during quiet standing is associated with longer preceding time of motor command to body sway. *Gait. Posture.*, **33**, 14-17 (2011)
- 8) 日野幹雄. *スペクトル解析*. 朝倉書店 (1977)
- 9) 木村哲也. 体性感覚を生かしたバランス調整能. *体育の科学*, **63**, 466-471 (2013)
- 10) Horak F.B., Macpherson J.M., Postural orientation and equilibrium. Rowell LB and Shepherd JT Eds., *Handbook of Physiology: Section 12: Exercise: Regulation and Integration of Multiple Systems*, pp255-292, Oxford University Press (1996)

# 暑熱環境下における聴覚情報処理および 高次認知機能の評価

奈良女子大学 芝崎 学  
(共同研究者) 同 難波 真理  
同 中田 大貴

## Auditory and Cognitive Functions during Heat Stress

by

Manabu Shibasaki, Mari Namba, Hiroki Nakata  
*Nara Women's University*

### ABSTRACT

Excessive elevation of internal body temperature causes a significant strain on either the brain function or the locomotive system. Although hyperthermia impairs psychological and working memory performances, the effect of hyperthermia on cognitive processing remains unknown. We hypothesized that a passive heat stress impaired the cognitive function when the internal temperature was excessively increased. sixteen healthy males performed an auditory oddball paradigm before and after heat stress (Pre and Post) and when esophageal temperature was increased by 0.8 °C and 2.0 °C (Mild and Severe). The reaction time and event-related potentials (ERPs) were recorded in these four sessions. As a countermeasure, subjects performed the same sessions without heat stress (i.e. normothermic condition). The reaction time was shortened while esophageal temperature was elevated relative to the Pre but did not change in the normothermic trial. However the peak latency and amplitude of N100 component did not change throughout the experiment. Although the latency of P300 component was unaffected due to heat stress, the amplitude of P300 was significantly reduced at the Severe and Post relative to at the Pre. These results suggest

## that excessive elevation of internal temperature impairs cognitive processing but not auditory processing.

### 要 旨

高体温は身体的・心理的パフォーマンスに影響すると言われているが、客観的な評価はほとんどなく、特に脳機能への影響は不明である。本研究では脳波事象関連電位を用いて、暑熱負荷時の認知機能を客観的に評価した。16名の被験者が参加し、2条件（暑熱負荷および常温負荷）で聴覚オドボールテストを暑熱負荷前、食道温が0.8℃および2.0℃上昇した時、暑熱負荷終了時に実施し、反応時間および脳波事象関連電位を測定した。すべての実験を通して脳波が正確に測定できた13名のデータを解析対象とした。反応時間は常温負荷条件では変化しなかったが、暑熱負荷条件では短縮し、同様にP300成分の潜時も短縮した。しかし、認知処理系の活動を反映するP300の振幅は高体温時に低下した。聴覚機能を反映するN100は潜時および振幅とも両条件ともに変化は見られなかった。これらの結果から、高体温は聴覚機能には影響しないが、反応実行系を促進するものの、認知処理系は低下させる可能性が示唆された。

### 緒 言

2019年にはラグビーワールドカップが、2020年には東京オリンピック・パラリンピックが日本で開催される。いずれも9月～10月、7月～8月と気温が高い時期に開催予定で、暑熱環境下でのハイパフォーマンス発揮が要求される。そのことは同時に、気温が上昇する時期にパフォーマンスを最大限に引き出すための効果的なトレーニングプログラムが必要となる。過度の体温上昇は心肺機能の負荷を増加させることから、暑熱環境に

おける運動パフォーマンスは低下する<sup>1)</sup>。実際、暑熱環境条件下での持続的な運動や作業は、快適温度環境条件下と比較すると、自覚的な負荷は高くなる<sup>2)</sup>。また、末梢性の筋疲労だけでなく、高体温に起因する中枢性疲労が自発的な力発揮や神経筋機能を低下させる<sup>3,4)</sup>。つまり、高体温そのものが運動パフォーマンスの低下の一因となっていると示唆されている。

これらの機能低下だけでなく、大脳皮質の機能低下もスポーツパフォーマンスに影響を与えている可能性がある。実際に、ラグビーの現場では暑い中での練習中、選手からは「ボーっとする」「ボールへの反応が遅れた」といったコメントがよく聞かれる。また、指導側からは比較的不注意に起因すると考えられるケガや記憶と判断が必要なサインプレー等のミスも増加しているとの意見もある。このような判断力や記憶力は、一般的には意思決定課題やワーキングメモリー課題によって評価されることが多い。先行研究では、高体温時に複雑な認知課題を課すと認知機能を低下するが、単純な認知課題ではそのような低下は見られないという報告がある<sup>5,6,7)</sup>。しかし、現在のところ、これらの理由に関する詳細な認知メカニズムについては、未だ明らかにされていない<sup>8)</sup>。さらに、これらの評価は主観的な要素も含まれており、反応自体はスキルレベルや被験者のモチベーションに左右される可能性がある。実験方法論も含め、これらの問題が解決しないことには、高体温における認知機能について客観的に明らかにすることは難しい。

客観的な生理指標として、脳波(electroencephalography: EEG)を記録し、覚醒レベルや聴覚に関する感覚情報自動処理過程は暑熱ストレスによって低下す

ることが報告されている<sup>9,10)</sup>。しかし、これらの研究では、意思決定課題やワーキングメモリー課題を被験者に課しているわけではなく、認知処理に関する脳機能については明らかにされていない。脳波の事象関連電位 (event-related potentials: ERPs) は、刺激の呈示時間を基準とし、脳波波形を加算平均することによって得られる脳電位であり、外的あるいは内的な事象に関連した認知過程評価を反映する<sup>11-14)</sup>。事象関連電位研究では、標的刺激が明示されるとカウントする計数課題、またはボタン押しをする反応課題のように、単純な課題が用いられることが一般的である。実際、睡眠不足、咀嚼、運動といった様々な実験条件で課題を行い、その電位動態の特性から認知機能が明らかにされている<sup>15-19)</sup>。しかし、これまでに暑熱ストレス中に事象関連電位を記録し、認知機能を評価した研究は報告されていない。以上の研究背景を踏まえ、本研究における我々の目的は、客観的な生理指標としての事象関連電位を記録し、認知機能が暑熱ストレスによってどのように影響を受けるのかを明らかにすることである。

## 1. 研究方法

16名の男性被験者が実験に参加した。被験者の年齢、体組成、身長は  $20.8 \pm 0.9$  歳、 $83.6 \pm 8.1$ kg、 $173.2 \pm 6.5$ cmであった。神経生理学的あるいは精神的既往歴があるものはいなかった。実験開始前に、被験者に実験のプロトコルと危険性について説明し、その後インフォームドコンセントを得た。本研究は奈良女子大学倫理委員会によって承認されている。

### 1. 1 実験手順

実験は温度調節された ( $26 \pm 1^\circ\text{C}$ ) 実験室で2つの条件 (暑熱負荷条件と常温負荷条件) を少なくとも3日あけて実施した。実験当日、被験者は実験室に到着する2時間前までには軽食を摂取す

るように指示された。実験前に実験概要を説明した後、排尿後に裸体体重を測定させた。実験室に入室後、食道温測定用の温度センサー (T型熱電対) を被験者の身長<sup>1</sup>/<sub>4</sub>の距離まで鼻腔を通して入れ、皮膚温を測定するために6箇所 (胸、腹部、背中上部、腰、大腿、下腿) にT型熱電対を貼付した。心拍数と血圧は、それぞれNEC社製心電図計 (Biomulti 1000) とコーリン社製の上腕動脈の聴診法による自動血圧計 (STBP-780) によって測定された。被験者は、アンダーウェアとショートパンツを着たまま、Med-Eng社製水循環スーツを着用した。水循環スーツは頭、顔、手首より遠位、足首より遠位を除く全身を覆った。被験者は平常体温状態を維持するために、 $33^\circ\text{C}$ の水をスーツに循環させ、半仰臥位の姿勢で約30分間、安静にした。その間、脳波電極を取り付け、被験者は聴覚オドボール課題の説明を受け、課題の練習を行った。暑熱負荷条件において、最初の事象関連電位の測定 (第1セッション) は平常体温状態で行った。次に、受動的な暑熱負荷として、水循環スーツ内に $50^\circ\text{C}$ の温水を循環させ、食道温が暑熱負荷前のベースラインから $\sim 0.8^\circ\text{C}$ と $2.0^\circ\text{C}$ 上昇した時点で、第2セッション、第3セッションを実施した。第3セッション終了後、 $25^\circ\text{C}$ の冷水を直ちにスーツへ循環させ、全身を冷却した。全身冷却開始3分後に、第4セッションの測定を行った。同じ実験手順によって、常温負荷条件も行った。 $33^\circ\text{C}$ の水をスーツに循環させ、全く同じプロトコルで測定をおこなった。常温負荷セッションに対するセッション間のインターバル時間は熱負荷状態から決定した (常温負荷条件)。

### 1. 2 聴覚オドボール課題

聴覚刺激は純音 (刺激強度 55 dB, 刺激時間 500 ms, rise/fall time 10 ms) を用い、ヘッドフォンを通して両耳に与えられた。1セッションにつき、標的刺激 (2000 Hz; 20%) 30回、標準刺激 (1000

Hz；80%) 120回をランダムに呈示した。刺激間隔は2秒とした。被験者は、標的刺激後にできるだけ早く右手の親指でボタン押しをするように指示され、また計測中は、前方の約1mにある固子点を見るように指示された。

### 1. 3 脳波記録

脳波は国際10-20法に従い、Fz, Cz, Pz, C3, C4からAg/AgCl電極を用いて両耳朶を基準電極として記録し、抵抗値を5kΩ以下とした。アース電極はFpzとした。眼球運動によるノイズを除去するために、眼電図(electrooculogram: EOG)用電極を右眼窩上端上2cmと右眼外側端2cmに配置し、双極導出した。また脳波と眼電図が100μVを試行は加算から除外した。

### 1. 4 認知処理と聴覚処理の評価

事象関連電位の研究において、P300成分(P3b成分)は刺激呈示後250-600msに記録される陽性電位で、頭頂部付近の電極で最大振幅が記録される。刺激に対する評価、判断、選択的注意、文脈更新に関係しているとされている<sup>11-13)</sup>。P300の振幅は課題に関する注意処理資源の量を反映し、潜時は刺激の弁別速度・刺激評価時間と考えられ、一般的に反応選択過程とは無関係であるとされている。またP300に加えて、P300の出現前に記録される陰性電位N100成分(N1)も解析対象とした。N100は聴覚刺激後約100msで検出され、前頭部付近の電極で最大振幅が記録される。聴覚の刺激過程に関連した神経活動を反映しているとされている。

### 1. 5 データ収集と分析

脳波は日本光電社製脳波計(Neuropack MEB-2200)を用いて記録した。事象関連電位の記録期間は、刺激前60msから刺激後540msとし、刺激が呈示されるまでの60msをベースライン区

間として設定した。バンドパスフィルターは0.1-50Hzとし、サンプリング周波数は1000Hzとした。N100とP300の最大振幅と潜時は、70-130msと250-500msでそれぞれ測定し、最大振幅はbaseline-to-peak法を用いて測定した。食道温と心拍数は、BIOPACK社製MP150を用いてサンプリング周波数20Hzで連続して測定した。血圧はオドボール課題の前後で測定した。皮膚温は横河社製DA100を用いて1秒で取得し測定された。平均皮膚温は6点の平均荷重から計算した20)。平均体温は以下のように計算した。

$$\text{平均体温} = 0.9 * \text{食道温} + 0.1 * \text{平均体温}$$

血圧以外のデータは聴覚オドボール課題の前後60秒間の平均値を算出した。常温負荷条件の際に4名の被験者で食道温を計測できなかったため、暑熱負荷に対する体温変化について、セッション(第1~4)を要因とし、一元配置分散分析によって解析した。行動指標(反応時間ならびにエラー率)については、条件(暑熱負荷vs. 常温負荷)とセッション(第1~4)を要因とし、二元配置分散分析を行った。N100とP300の最大振幅と潜時について、条件、セッション、電極位置(Fz, Cz, Pz, C3, C4)を要因とした三元配置分散分析を用いた。分散分析を行う際、要因が2以上の場合、モークリーの球面性の仮定を検討し、仮定が有意な場合にはGreenhouse-Geisserの補正を用いた。セッションに関する有意な主効果が認められた時には、post-hocテストとして、Student Newman Keuls testを用い、セッション間の特定の違いを明らかにした。統計分析はSPSS(Ver. 21)を使い、統計的な有意差は $p < 0.05$ とした。

## 2. 研究結果

全身加温中(第2~3セッション)、食道温、平均皮膚温、平均体温、心拍数は上昇し、平均血圧は変化しなかった(表1)。その後、全身冷却中(第4セッション)では平均皮膚温、平均体温、心拍

表1 暑熱および常温負荷条件時の体温と循環パラメータ

		第1	第2	第3	第4	Condition	Time	Interaction
食堂温, °C	暑熱負荷条件	36.88 ± 0.24	37.72 ± 0.23*	38.82 ± 0.21*†	38.00 ± 0.39*†‡	P<0.001	P<0.001	P<0.001
	常温負荷条件	36.64 ± 0.32	36.60 ± 0.30	36.66 ± 0.19	36.68 ± 0.20			
平均皮膚温, °C	暑熱負荷条件	33.62 ± 0.60	38.43 ± 0.31*	39.44 ± 0.24*†	35.85 ± 0.63*†‡	P<0.001	P<0.001	P<0.001
	常温負荷条件	34.22 ± 0.44	34.34 ± 0.46	34.36 ± 0.40	34.37 ± 0.40			
平均体温, °C	暑熱負荷条件	36.55 ± 0.25	37.79 ± 0.23*	38.88 ± 0.20*†	37.78 ± 0.36*†	P<0.001	P<0.001	P<0.001
	常温負荷条件	36.40 ± 0.29	36.37 ± 0.27	36.43 ± 0.19	36.45 ± 0.19			
心拍数, bpm	暑熱負荷条件	58.3 ± 8.1	88.9 ± 10.1*	114.7 ± 13.7*†	92.4 ± 10.7*†‡	P<0.001	P<0.001	P<0.001
	常温負荷条件	57.9 ± 6.2	57.6 ± 5.5	56.5 ± 5.5	56.6 ± 5.6			
平均血圧, mmHg	暑熱負荷条件	94.9 ± 9.5	96.7 ± 13.1	94.0 ± 10.1	95.4 ± 15.0	P=0.808	P=0.631	P=0.637
	常温負荷条件	92.7 ± 10.6	95.1 ± 10.0	96.3 ± 8.8	95.7 ± 11.5			

P<0.05, \*; 第1セッションと比較, †; 第2セッションと比較, ‡; 第3セッションと比較

数は減少し、皮膚温・体温は第2セッションのレベルに近い値まで回復したが、食道温は上昇したままであった。一方、常温負荷条件ではこれらの変化は実験を通して見られなかった。また、暑熱負荷条件において、第2、第3セッションの間、それぞれのオドボール課題中に食道温はわずかに上昇した（第2セッション：37.67±0.22 °Cから37.76±0.25 °C；第3セッション：38.79±0.22 °Cから38.84±0.22 °C）。

反応時間は常温負荷条件ではセッション間に差は認められなかったが、暑熱負荷条件の反応時間は、セッションの繰り返しによって異なることが示された。暑熱負荷条件における平均反応時間は、第3セッション・第4セッションの方が第1セッションよりも有意に短縮した（図1A）。また、平均反応時間は第3セッションと第4セッションにおいて、暑熱負荷条件の方が常温負荷条件より有意に短かった。エラー率に関しては、有意な主効果や交互作用は認められなかった（図1B）。

図2は全被験者の事象関連電位平均波形を示している。P300とN100成分は全ての被験者から全セッションにおいて潜時と振幅を計測した。図3Aは暑熱負荷条件の第1セッションのPz波形を基準として各セッションと比較したものである。P300の振幅は第1セッションよりも第3セッション・第4セッションの方が明瞭に低下していることを示している。しかし、常温負荷条件では平均波形にセッション間の差は見られなかった。

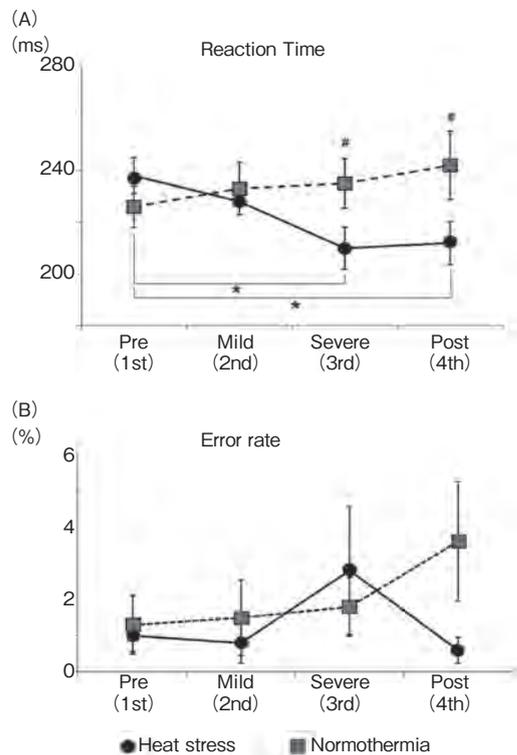


図1 反応時間(Reaction time, A)とエラー率(Error rate) 常温負荷条件(■)では反応時間はほとんど変化しなかったが、暑熱負荷条件(●)では第3および第4セッションで第1セッションよりも短縮した。しかし、エラー率に統計的な有意差は認められなかった。

P300の最大振幅に関する分散分析では、セッションや電極の主効果が認められた。また、条件×セッション×電極の有意な交互作用が認められた。下位検定として、各電極・各セッションにおいて、条件の主効果を分析すると、第3セッションのCz, Pz, C3, C4, 第4セッションのC3において、暑熱負荷条件の方が常温負荷条件よりも

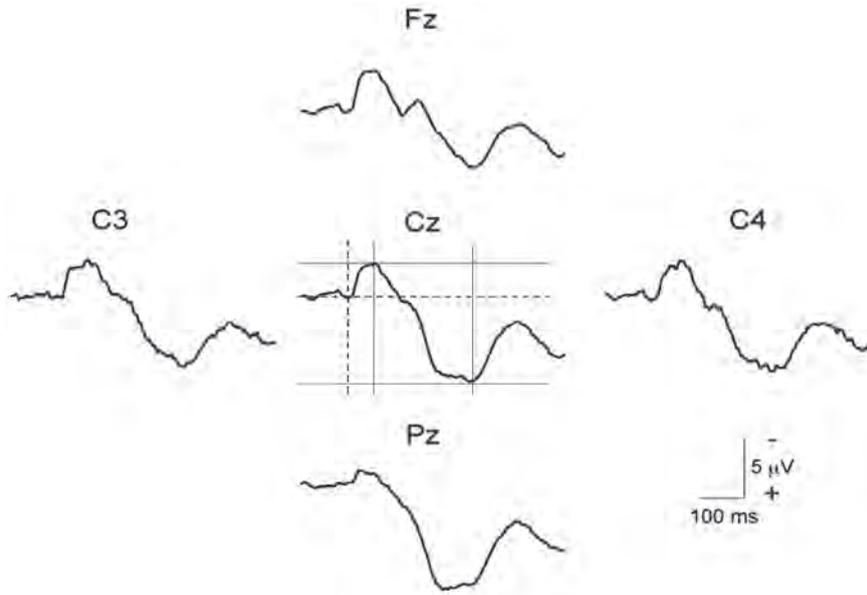


図2 全被験者の脳波事象関連電位平均波形

標的刺激時に測定した5部位 (Fz, Cz, Pz, C3, C4) の脳波の全被験者の平均波形を示す。点線で示す刺激前 60 ms の平均をベースラインとして約 100 ms および約 300 ms のピークとの差を振幅とし、刺激時からそのピークまでの時間を潜時とした。

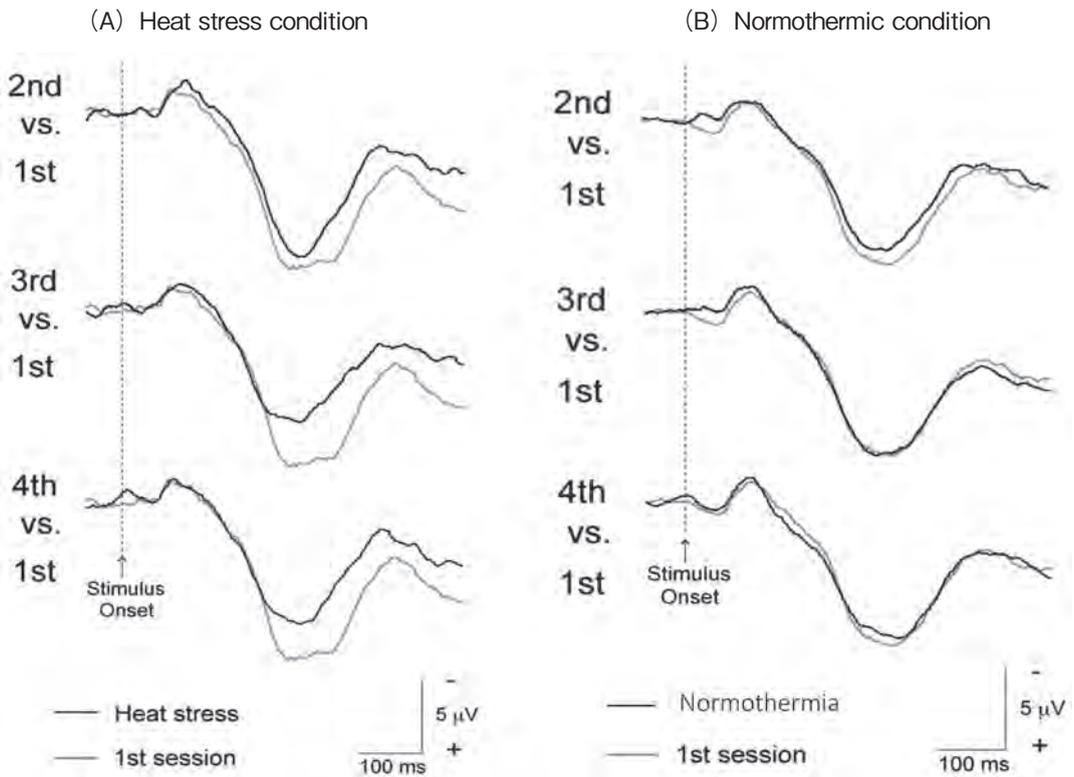


図3 暑熱負荷条件 (Heat stress condition) と常温負荷条件 (Normothermic condition) の

それぞれの第1セッションにおけるPzの波形に対する各セッションとの比較

常温負荷条件では各セッションとも第1セッションの波形とほとんどなかったが、暑熱負荷条件では第3および第4セッションで第1セッション (グレー) よりも P300 の振幅が小さくなった。

有意に P300 の振幅が低下していることが示された。第 1 セッションと第 2 セッション中の暑熱負荷条件と常温負荷条件の間には、P300 の振幅に有意な差は認められなかった。さらに各条件・各電極において、それぞれセッションに関する主効果を分析したところ、暑熱負荷条件における Cz, Pz, C3, C で有意差が認められた。常温負荷条件における有意差は、各電極全てにおいて認められなかった。電極の要因を排除したセッションの要因に関する post-hoc テストでは、P300 の振幅は第 1 セッションよりも第 3・第 4 セッションの方が有意に低下したことを示した。常温負荷条件において、電極に関する post-hoc テストでは、P300 の振幅が第 3 セッションで Cz と Pz よりも Fz の方が有意に小さく、第 4 セッションでは Pz よりも Fz の方が有意に小さいことを示した。暑熱負荷条件において、電極に関する post-hoc テストでは、第 2・第 3・第 4 セッションにおいて有意差が認められなかったが、第 1 セッションにおいては Pz より Fz と C3 の方が有意に小さかった。これらの post-hoc テストは、暑熱負荷条件と常温負荷条件の間で、P300 の電位分布が異なることを示唆している。P300 の潜時は 5 電極の平均として比較した。常温負荷条件では P300 の潜時に有意差は認められなかったが、暑熱負荷条件では第 1 セッションよりも他のセッションで明らかに短縮した。N100 の最大振幅と潜時に関する分散分析においても、電極の主効果のみが認められたが、それ以外に差は認められなかった。

### 3. 考 察

暑熱負荷時の認知機能に関する実験はいくつか報告されているが、主観的な方法による実験がほとんどであり、課題依存性にその結果は異なるようである<sup>5-8, 21)</sup>。しかし、同じ高体温状態であるにもかかわらず、ある認知処理では向上し、別の認知処理では低下するようなことがあるのだらう

か。複雑な課題になると、被験者のモチベーションやスキルが影響することが考えられるため、客観的な評価が必要である。本研究ではあえて単純課題を用いることでこの不一致の原因を検討することとした。本研究の主な成果は、認知過程の指標となる P300 の振幅は核心体温が過度に上昇した時に減少した。さらに、この振幅の減少はその後の皮膚温が低下しているが核心体温が上昇したままの間も持続した。一方、刺激の分類や評価時間の指標となる P300 の潜時は暑熱負荷条件で短縮した。脳波事象関連電位と主観的な心理学指標との関係を考察するために、いくつかのモデルが提唱されている<sup>22)</sup>。刺激が入力されると活動する刺激処理系、そこから行動に移る運動処理系または反応実行系、それらを制御や理解する組織制御系または認知処理系のように複数のシステムが脳波事象関連電位に反映される。それぞれの系が互いに影響し合うが、反応実行系と認知処理系が一致しないことも起こりうる可能性は考えられる。本研究の結果は、高体温によって反応実行系は亢進し、認知処理系が抑制されたと解釈できる。

反応時間は、パフォーマンスの指標であり、本研究では暑熱負荷の上昇とともに短縮した。P300 の潜時は反応時間と相関関係にあり<sup>23, 24)</sup>、本研究においても先行研究と同様に P300 の潜時は短縮した。最近、我々は体温の上昇が神経の伝達速度を上昇させ、体性感覚刺激に対する脳波の潜時も短縮することを報告した<sup>25)</sup>。上行性と下行性の違いはあるが、神経の伝達速度が反応時間の短縮に関与した可能性がある。反応時間の短縮はエラー率の増加を招くことがあるが<sup>23, 24)</sup>、本研究ではエラー率に統計的な差は認められなかったこと、常温負荷では反応時間にも P300 の潜時にも変化が見られなかったことから、被験者のモチベーションではなく、温度依存性の影響と考えられる。

高体温時には換気が亢進し、血中二酸化炭素分

圧が低下することによって脳血流が低下することが報告されている<sup>26,27)</sup>。本研究では脳血流を測定していないが、本研究と同様の受動的暑熱刺激によって食道温を1.2℃以上上昇させると、脳へ血液を供給する内頸動脈血流量が低下することを報告している<sup>28)</sup>。これらのことから、脳血流量の低下が認知処理系の低下に影響した可能性が示唆されるが、今後の検討が必要である。

本研究において、注目される点は暑熱負荷後の冷却時の反応である。食道温が2.0℃まで上昇した状態で認知課題を実施したのち、水循環スーツに15℃の冷水を循環させ、急速に体温を低下させた。温冷感覚は測定していないものの、被験者は口頭で、急速冷却によって快適に感じるようになったことを申告しており、被験者は温熱的な快適を感じた状態で第4セッションの試行を実施した。体温調節の研究では平均体温を体温の指標とすることから、平均皮膚温を大幅に低下させることによって、平均体温は第2セッションのマイルドな温度負荷条件と同程度まで低下させた。一方で、核心温度である食道温は暑熱負荷前よりも1℃以上高いレベルを維持させた。5部位のP300の振幅の平均(図4)と比較すると、第2セッションではP300の振幅に明らかな低下は認められていなかったが、第4セッションでは未だ暑熱負荷前よりも低値を示していた。この結果は、身体内部の温度が認知処理系に影響している可能性を暗示しているのかもしれない。

#### まとめ

高温環境下でのクラブ活動においては熱中症予防に十分注意しているが、それでも毎年クラブ活動時に熱中症が発症したことが報道等で発表されている。本研究の結果では、反応時間はむしろ体温が上昇することで短縮するため、パフォーマンスは上昇したと表面上は判断されるが、認知処理の指標であるP300の振幅は低下していることか

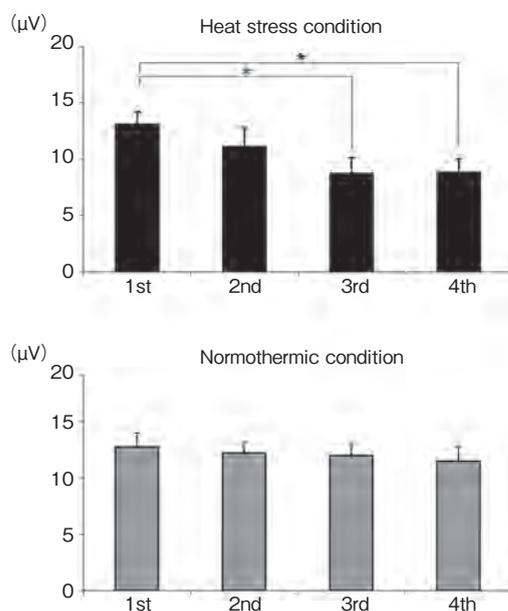


図4 5部位平均P300振幅

標的的刺激時に測定した5部位 (Fz, Cz, Pz, C3, C4) のP300を平均し、各セッションと比較した。常温負荷条件では振幅に変化は見られなかったが、暑熱負荷条件で第3および第4セッションで第1セッションで明らかに低値を示した。

ら脳活動は高体温によって明らかに低下していると考えられる。また、冷却によって皮膚温を下げたのちに実施した試行においてもP300の振幅は低下したままであった。この時の食道温はまだ平常体温よりも1.2℃高かったことから、身体内部の体温が十分に低下していないと判断され、その場合は認知機能も実質的に低下していることが示唆された。

#### 謝辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝いたします。また、被験者としてご協力いただきました天理大学ラグビー部の皆様、計測にご協力を頂きました大城岬さん、岸本陽さん、福谷綾那さん、吉岡友希さんに深く感謝いたします。

文 献

- 1) Crandall C.G., Gonzalez-Alonso J., Cardiovascular function in the heat-stressed human. *Acta. Physiol.*, **199**(4) :407-23(2010)
- 2) Rasmussen P., Nybo L., Volianitis S., Moller K., Secher N.H., Gjedde A., Cerebral oxygenation is reduced during hyperthermic exercise in humans. *Acta. Physiol.*, **199**(1) :63-70(2010)
- 3) Nybo L., Nielsen B., Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *J. Appl. Physiol.*, **91** (3) :1055-60(2001)
- 4) Periard J.D., Caillaud C., Thompson M.W., Central and peripheral fatigue during passive and exercise-induced hyperthermia. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **43** (9) :1657-65(2011)
- 5) Hancock P.A., Vasmatazidis I., Effects of heat stress on cognitive performance: the current state of knowledge. *Int. J. Hyperthermia.*, **19**(3) :355-72(2003)
- 6) Kazama A., Takatsu S., Hasegawa H., Effect of increase in body temperature on cognitive function during prolonged exercise. *Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med.*, **61** (5) :459-67(2012)
- 7) Racinais S., Gaoua N., Grantham J., Hyperthermia impairs short-term memory and peripheral motor drive transmission. *J. Physiol.*, **586**(Pt 19) :4751-62(2008)
- 8) Gaoua N., Cognitive function in hot environments: a question of methodology. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, **20** Suppl 3:60-70(2010)
- 9) Nielsen B., Hyldig T., Bidstrup F., Gonzalez-Alonso J., Christoffersen G.R., Brain activity and fatigue during prolonged exercise in the heat. *Pflugers. Archiv.*, **442**(1) :41-8(2001)
- 10) Sun G., Li L., Li M., Jiang Q., Hyperthermia impaired pre-attentive processing: an auditory MMN study. *Neurosci. Lett.*, **502**(2) :94-8(2011)
- 11) Bledowski C., Prvulovic D., Hoechstetter K. et al., Localizing P300 generators in visual target and distractor processing: a combined event-related potential and functional magnetic resonance imaging study. *J. Neurosci.*, **24**(42) :9353-60(2004)
- 12) Donchin E., Coles M.G., Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behav. Brain Sci.*, **11** (3) :357-74(1988)
- 13) Kok A., On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology.*, **38**(3) :557-77(2001)
- 14) Nakata H., Sakamoto K., Honda Y., Kakigi R., Somato-motor inhibitory processing in humans: evidence from neurophysiology and neuroimaging. *J. Physiol. Sci.*, **64** (4) :233-52(2014)
- 15) Fullagar H.H., Skorski S., Duffield R., Hammes D., Coutts A.J., Meyer T., Sleep and athletic performance: the effects of sleep loss on exercise performance, and physiological and cognitive responses to exercise. *Sports Med.*, **45**(2) :161-86(2015)
- 16) Gosselin A., De Koninck J., Campbell K.B., Total sleep deprivation and novelty processing: implications for frontal lobe functioning. *Clin. Neurophysiol.*, **116**(1) :211-22(2005)
- 17) Kamiyo K., Nishihira Y., Hatta A et al., Differential influences of exercise intensity on information processing in the central nervous system. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **92**(3) :305-11(2004)
- 18) Lambourne K., Tomporowski P., The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: a meta-regression analysis. *Brain Res.*, **1341**:12-24(2010)
- 19) Sakamoto K., Nakata H., Kakigi R., The effect of mastication on human cognitive processing: a study using event-related potentials. *Clin. Neurophysiol.*, **120**(1) :41-50(2009)
- 20) Taylor WF, Johnson JM, Kosiba WA, Kwan CM. Cutaneous vascular responses to isometric handgrip exercise. *J. Appl. Physiol.*, **66**(4) :1586-92(1989)
- 21) Hocking C., Silberstein R.B., Lau W.M., Stough C., Roberts W., Evaluation of cognitive performance in the heat by functional brain imaging and psychometric testing. *Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.*, **128**(4) :719-34(2001)
- 22) 心理学のための事象関連電位ガイドブック. 入野宏著. 北大路書房(2005)
- 23) Kutas M., McCarthy G., Donchin E., Augmenting mental chronometry: the P300 as a measure of stimulus evaluation time. *Science.*, **197**(4305) :792-5(1977)
- 24) McCarthy G., Donchin E., A metric for thought: a comparison of P300 latency and reaction time. *Science.*, **211** (4477) :77-80(1981)
- 25) Nakata H., Oshiro M., Namba M., Shibasaki M., Effects of passive heat stress on human

- somatosensory processing. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, in print (2015)
- 26) Brothers R.M., Ganio M.S., Hubing K.A., Hastings J.L., Crandall C.G., End-tidal carbon dioxide tension reflects arterial carbon dioxide tension in the heat-stressed human with and without simulated hemorrhage. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **300**: R978–83 (2011)
- 27) Fujii N., Honda Y., Hayashi K., Kondo N., Koga S., Nishiyasu T., Effects of chemoreflexes on hyperthermic hyperventilation and cerebral blood velocity in resting heated humans. *Exp. Physiol.*, **93**: 994–1001 (2008)
- 28) Ogoh S., Sato K., Okazaki K., Miyamoto T., Hirasawa A., Morimoto K., Shibasaki M., Blood flow distribution during heat stress: cerebral and systemic blood flow. *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, **33**, 1915–1920 (2013)

# サルコペニアの簡易評価法としての 椅子片脚立ち上がりテストの妥当性検証研究

早稲田大学 川上 諒子  
(共同研究者) 医薬基盤・健康・ 村上 晴香  
栄養研究所  
同 丸藤 祐子  
同 澤田 亨  
立命館大学 真田 樹義

## One-Leg Stand Up Test as a Simple Assessment Tool for Predicting Sarcopenia

by

Ryoko Kawakami

*Waseda University*

Haruka Murakami, Yuko Gando, Susumu S. Sawada

*National Institutes of Biomedical Innovation,*

*Health and Nutrition*

Kiyoshi Sanada

*Ritsumeikan University*

### ABSTRACT

**Purpose:** This study aimed to examine the relationship between one-leg stand up test results and muscle mass or strength. The possibility of using this test as a simple assessment tool for predicting sarcopenia was also evaluated. **Methods:** A total of 575 men and women aged 30–89 years participated in this study. The ability to stand up on one leg from a 40-cm-high seat was assessed. The appendicular skeletal muscle mass was measured using dual-energy X-ray absorptiometry, and the skeletal muscle index

was calculated by dividing the appendicular skeletal muscle mass by the square of the height ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Hand-grip strength and leg-extension power were also evaluated. Results: The subjects who could not stand up on one leg had significantly lower hand-grip strength and leg-extension power ( $P < 0.05$ ), and they also had a higher prevalence of low muscle mass (odds ratio: 2.79) or low muscle strength (odds ratio: 3.07). Sensitivity and specificity of one-leg stand up test (for the low muscle mass or low muscle strength) were 48–56% and 72–74%, respectively. Conclusion: Sarcopenia could be partially predicted by the suggested one-leg stand up test.

## 要 旨

【目的】椅子片脚立ち上がりテストと筋量および筋力との関連を検討することにより，サルコペニア簡易評価法としての椅子片脚立ち上がりテストの有用性を明らかにすることを目的とした。【方法】30歳から89歳の中高齢者575人を対象とした。座面の高さが40cmの椅子に座った状態から片脚で立ち上がることができるかを評価した。DXA法を用いて四肢除脂肪軟組織量を測定し，身長<sup>2</sup>で除した骨格筋指数を用いて筋量进行评估した。また，握力と脚伸展パワーの測定を行った。【結果】椅子から片脚で立ち上がることができなかった者では握力や脚伸展パワーが有意に低く ( $P < 0.05$ )，低筋量 (オッズ比: 2.79) や低筋力 (オッズ比: 3.07) に該当する者が多かった ( $P < 0.05$ )。また，低筋量と低筋力の各評価における椅子片脚立ち上がりテストの感度は48～56%，特異度は72～74%であった。【結論】椅子片脚立ち上がりテストによってサルコペニアをある程度推定できる可能性が示唆された。

## 緒 言

日本整形外科学会は2007年にロコモティブシンドローム (ロコモ) という新しい概念を提唱した<sup>1)</sup>。ロコモとは，骨や関節，筋肉などといった運動器の障害のために移動機能の低下をきたした

状態と定義されており，加齢に伴う筋量ならびに筋力の低下と定義されるサルコペニア<sup>2)</sup>もロコモの概念に含まれる。

サルコペニアは，歩行や日常生活の障害に直結するため，高齢者の自立度や生活の質の低下をもたらし，要介護のリスクを高める<sup>3,4)</sup>。その一方で，サルコペニアは筋力トレーニング等の実施によって年齢を問わず改善可能であることから，サルコペニアを早期に発見し，予防・改善の対策を行っていくことは超高齢社会を迎えた我が国において重要であると考えられる。しかしながら，臨床や健康診断などの現場において誰もが容易にサルコペニアを推定できる簡易評価法はまだ確立されていないのが現状である。

日本整形外科学会では，移動機能を評価するためのテストとして3種類のロコモ度テストを提案しており，その中の1つに下肢脚力の評価を目的とした立ち上がりテストを取り入れている<sup>5)</sup>。立ち上がりテストでは，40cmの高さの台に座った状態から片脚で立ち上がることができるかを評価し，どちらか一方でも片脚で立ち上がれない場合に移動機能の低下が始まっている状態のロコモ度1と判定される。立ち上がりテストは，40cmの台すなわち日常において一般的に使用されている椅子さえ用意することができればいつでも何処でも容易に評価を行うことができるテストである。しかしながら，我々の知る限り，これまでにこの

片脚立ち上がりテストと筋力との関連について検討した研究は、リハビリ実施中の入院患者を対象とした1件の研究のみと限られており<sup>6)</sup>、一般の中高齢者を対象とした研究はない。また、片脚立ち上がりテストと筋量との関連について検討した報告は見当たらない。

本研究では、一般中高齢者を対象として椅子を用いた片脚立ち上がりテストと筋量および筋力との関連を検討することにより、サルコペニア簡易評価法としての椅子片脚立ち上がりテストの有用性を検討することを目的とした。

## 1. 研究方法

### 1. 1 対象者

対象者は、Nutrition and Exercise Intervention Study (NEXIS) の登録者のうち、椅子片脚立ち上がりテストを実施した30歳から89歳までの中高齢者575人(男性131人、女性444人)であった。NEXISは、生活習慣病一次予防に必要な身体活動量・体力基準値策定を目的とした大規模介入研究であり、主な参加者は東京都を中心とした地域住民および企業である<sup>7,8,9)</sup>。本研究を始めるにあたり、国立研究開発法人医薬基盤・健康・栄養研究所における研究倫理審査委員会の承認を受けた(承認番号:20120711-05)。また、研究参加者には、本研究の目的や意義、危険性について事前に詳細な説明を行い、研究内容を十分に理解した上で研究参加への同意を得た。

### 1. 2 椅子片脚立ち上がりテスト

座面の高さが40cmの椅子に大腿長の50%位置が座面の端に位置するように座らせ、胸の前で腕を組んだ状態で反動を使わずに椅子から片脚で立ち上がることができるか否かを評価した。左右の脚で1回ずつ行った結果をもとに、「どちらの脚でもできる」、「どちらか一方の脚のみできる」、「どちらの脚でもできない」の3段階で評価を行った。

日本整形外科学会のロコモ度テストでは、本テストにおいてどちらか一方でも片脚で立ち上がれない者(「どちらか一方の脚のみできる」ならびに「どちらの脚でもできない」に該当した者)が移動機能の低下が始まっている状態のロコモ度1と判定される<sup>5)</sup>。

### 1. 3 形態計測および筋量の測定

身長と体重の測定を行い、body mass index (BMI;  $\text{kg}/\text{m}^2$ ) を算出した。二重エネルギーX線吸収法(QDR4500A, Hologic社製)を用いて四肢の除脂肪軟組織量を測定し、次の式を用いて筋量の指標となる骨格筋指数を算出した。骨格筋指数( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) = 四肢除脂肪軟組織量( $\text{kg}$ )/身長( $\text{m}$ )<sup>2</sup>

本研究では、日本人を対象としたSanadaら<sup>10)</sup>の先行研究に従い、骨格筋指数が男性 $6.87\text{kg}/\text{m}^2$ 以下、女性 $5.46\text{kg}/\text{m}^2$ 以下の者を低筋量者と判定した。

### 1. 4 筋力および脚伸展パワーの測定

筋力の評価には握力計(TKK5401, 竹井機器工業株式会社製)を用い、左右各2回の平均値を採用した。また本研究では、Lauretaniら<sup>11)</sup>の先行研究をもとに、握力が男性30kg未満、女性20kg未満の者を低筋力者と判定した。

脚伸展パワーは、脚伸展パワー測定装置(Anaero Press 3500, コンビ社製)を用いて5回測定を行い、最も高い値を採用した。

### 1. 5 統計解析

椅子片脚立ち上がりテストの結果別にみた筋量や筋力などの各連続変数の平均値の比較には一元配置分散分析を用い、多重比較検定にはTukey法を用いた。

椅子片脚立ち上がりテストと低筋量者(男性:  $\text{SMI} \leq 6.87\text{kg}/\text{m}^2$ , 女性:  $\text{SMI} \leq 5.46\text{kg}/\text{m}^2$ ) および低筋力者(男性: 握力 < 30kg, 女性: 握力 <

20kg) との関連について検討するため、低筋量者あるいは低筋力者 (該当 = 1, 非該当 = 0) を従属変数として投入した多変量ロジスティック回帰モデルを用いて、年齢 (連続変数)、性別 (男性・女性)、身長 (連続変数) を調整したオッズ比および 95% 信頼区間を算出した。椅子片脚立ち上がりテストには脚の長さ (身長) が影響していることが考えられるため、本研究では身長での補正を加えた。

椅子片脚立ち上がりテストによる低筋量あるいは低筋力の簡易評価の妥当性を検証するために、感度および特異度を算出した。

統計的有意水準はすべて 5% 未満とし、解析には IBM SPSS Statistics 22 (日本 IBM 社製) を用いた。

## 2. 研究結果

性年代別にみた椅子片脚立ち上がりテストの結果を表 1 に示した。椅子片脚立ち上がりテストの結果、どちらか一方でも片脚で立ち上がれなかった者 (ロコモ度 1) の割合は、29.2% (男性 22.1%, 女性 31.3%) であった。年代別にみると、30 歳代 2.9% (男性 0%, 女性 4.8%), 40 歳代 9.6% (男性 0%, 女性 13.5%), 50 歳代 15.1% (男性 3.6%, 女性 18.4%), 60 歳代 32.5% (男性 28.1%, 女性 33.3%), 70 歳代 59.1% (男性 57.9%, 女性 59.4%), 80 歳代 84.6% (男性 88.9%, 女性 82.4%) となり、特に 70 歳以上の者ではどちらか一方でも片脚で立ち上がれなかった者の割合が

多かった。

椅子片脚立ち上がりテストの結果別にみた身体的特性を表 2 に示した。椅子片脚立ち上がりテストで「どちらの脚でもできない」群では、「どちらの脚でもできる」群と比較して、年齢が高く、握力や脚伸展パワーが有意に低値であった。また、男性において「どちらの脚でもできない」群では、四肢除脂肪軟組織量や骨格筋指数が有意に低く、筋量が少なかった。

椅子片脚立ち上がりテストによる低筋量および低筋力該当者のオッズ比を表 3 に示した。年齢、性別、身長を調整後、椅子片脚立ち上がりテストで「どちらの脚でもできる」群に対する低筋量該当者のオッズ比 (95% 信頼区間) は、「どちらか一方の脚のみできる」群で 1.07 (0.37-3.05), 「どちらの脚でもできない」群で 2.79 (1.21-6.48) となり、椅子片脚立ち上がりができない者ほど低筋量に該当する者が多いという有意な関連が認められた (トレンド検定: P 値 = 0.020)。低筋力該当者においても同様の検討を行ったところ、「どちらの脚でもできる」群に対する低筋力該当者の調整オッズ比 (95% 信頼区間) は、「どちらか一方の脚のみできる」群で 1.88 (0.81-4.31), 「どちらの脚でもできない」群で 3.07 (1.37-6.88) となり、有意な関連が認められた (トレンド検定: P 値 = 0.006)。

椅子片脚立ち上がりテストによる低筋量および低筋力の簡易評価の妥当性を検証するために、感度と特異度をそれぞれ求めた。低筋量の評価にお

表 1 性年代別にみた椅子片脚立ち上がりテストの結果

						人数 (%)
	30 歳代	40 歳代	50 歳代	60 歳代	70 歳代	80 歳代
男性 (n = 131)						
どちらの脚でもできる	13 (100.0)	30 (100.0)	27 (96.4)	23 (71.9)	8 (42.1)	1 (11.1)
どちらか一方の脚のみできる	0 (0.0)	0 (0.0)	1 (3.6)	4 (12.5)	4 (21.1)	2 (22.2)
どちらの脚でもできない	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	5 (15.6)	7 (36.8)	6 (66.7)
女性 (n = 444)						
どちらの脚でもできる	20 (95.2)	64 (86.5)	80 (81.6)	110 (66.7)	28 (40.6)	3 (17.6)
どちらか一方の脚のみできる	1 (4.8)	5 (6.8)	8 (8.2)	30 (18.2)	16 (23.2)	3 (17.6)
どちらの脚でもできない	0 (0.0)	5 (6.8)	10 (10.2)	25 (15.2)	25 (36.2)	11 (64.7)

表2 椅子片脚立ち上がりテストの結果別にみた身体的特性

	全体	椅子片脚立ち上がりテスト			P 値
		どちらの脚でもできる	どちらか一方の脚のみできる	どちらの脚でもできない	
男性					
n	131	102	11	18	
年齢 (歳)	58 ± 14	53 ± 11	71 ± 11 *	76 ± 8 *	<0.001
身長 (cm)	168.8 ± 6.8	169.1 ± 7.1	165.2 ± 5.1	168.9 ± 5.8	0.198
体重 (kg)	67.3 ± 9.2	67.6 ± 9.3	65.7 ± 9.4	66.6 ± 9.3	0.774
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	23.6 ± 2.7	23.6 ± 2.5	24.1 ± 3.1	23.4 ± 3.3	0.798
除脂肪軟組織量 (kg)	23.0 ± 3.4	23.5 ± 3.5	21.7 ± 3.0	21.2 ± 2.7 *	0.011
骨格筋指数 (kg/m <sup>2</sup> )	8.06 ± 0.90	8.19 ± 0.86	7.92 ± 0.88	7.43 ± 0.90 *	0.003
握力 (kg)	38.7 ± 6.7	40.3 ± 5.9	34.6 ± 4.4 *	32.6 ± 7.2 *	<0.001
脚伸展パワー (W)	1450 ± 489	1594 ± 443	1079 ± 240 *	866 ± 240 *	<0.001
脚伸展パワー (W/kg)	21.5 ± 6.5	23.6 ± 5.7	16.4 ± 2.6 *	13.0 ± 3.1 *	<0.001
女性					
n	444	305	63	76	
年齢 (歳)	60 ± 12	57 ± 11	65 ± 9 *	68 ± 11 *	<0.001
身長 (cm)	156.0 ± 6.0	155.9 ± 5.7	155.9 ± 5.8	156.4 ± 7.3	0.851
体重 (kg)	53.9 ± 7.7	53.3 ± 6.8	54.9 ± 8.1	55.9 ± 10.3	0.059
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	22.2 ± 2.9	21.9 ± 2.6	22.6 ± 3.2	22.8 ± 3.7	0.063
除脂肪軟組織量 (kg)	15.3 ± 2.0	15.4 ± 1.9	15.3 ± 2.2	15.2 ± 2.2	0.803
骨格筋指数 (kg/m <sup>2</sup> )	6.29 ± 0.64	6.31 ± 0.60	6.30 ± 0.73	6.20 ± 0.71	0.393
握力 (kg)	24.9 ± 4.0	25.5 ± 3.9	24.4 ± 4.0	23.2 ± 3.7 *	<0.001
脚伸展パワー (W)	782 ± 232	838 ± 221	710 ± 194 *	618 ± 211 * †	<0.001
脚伸展パワー (W/kg)	14.5 ± 4.0	15.7 ± 3.8	12.9 ± 2.8 *	11.0 ± 2.8 * †	<0.001

平均値 ± 標準偏差

\* どちらの脚でもできる群との比較 (P<0.05)

† どちらか一方の脚のみできる群との比較 (P<0.05)

表3 椅子片脚立ち上がりテストにおける低筋量および低筋力該当者のオッズ比

	n	該当者数	該当者数 (対 1,000 人)	オッズ比	(95% 信頼区間)
低筋量					
どちらの脚でもできる	407	23	57	1.00	
どちらか一方の脚のみできる	74	5	68	1.07	(0.37 - 3.05)
どちらの脚でもできない	94	16	170	2.79	(1.21 - 6.48)
				トレンド検定: P 値 = 0.020	
低筋力					
どちらの脚でもできる	407	28	69	1.00	
どちらか一方の脚のみできる	74	12	162	1.88	(0.81 - 4.31)
どちらの脚でもできない	94	23	245	3.07	(1.37 - 6.88)
				トレンド検定: P 値 = 0.006	

年齢 (連続変数), 性別 (男性, 女性), 身長 (連続変数) を調整

低筋量該当者<sup>10)</sup>: 男性骨格筋指数 ≤ 6.87kg/m<sup>2</sup>, 女性骨格筋指数 ≤ 5.46kg/m<sup>2</sup>

低筋力該当者<sup>11)</sup>: 男性握力 < 30kg, 女性握力 < 20kg

ける椅子片脚立ち上がりテストの感度 (低筋量者のうち椅子片脚立ち上がりテストでどちらか一方でも片脚で立ち上がれなかった者の割合) は 47.7%, 特異度 (低筋量と判定されなかった者のうち椅子片脚立ち上がりがどちらの脚でもできた者の割合) は 72.3% となった。同様に, 低筋力の評価における感度 (低筋力者のうち椅子片脚立ち上がりテストでどちらか一方でも片脚で立ち上がれなかった者の割合) は 55.6%, 特異度 (低筋力と判定されなかった者のうち椅子片脚立ち上

がりどちらの脚でもできた者の割合) は 74.0% であった。

### 3. 考 察

本研究では, 椅子片脚立ち上がりテストと筋量および筋力との関連について検討を行い, サルコペニア簡易評価法としての有用性について検討を行った。

地域一般住民を対象とした ROAD Study では, 年代別にロコモ度テストの立ち上がりテストの結

果を示しており、片脚立ち上がりができなかった者（ロコモ度1）の割合は、40歳未満で8.5%、40歳代で13.8%、50歳代で21.3%、60歳代で32.9%、70歳代で53.5%、80歳以上で78.1%であったことを報告している<sup>12)</sup>。これらの分布は本研究の結果とおおよそ同程度であり、高齢になるほど椅子から片脚で立ち上がることができない者の割合が多くみられ、特に70歳以上の者では約半数以上の者において椅子から片脚で立ち上がることができない可能性が示唆された。

本研究の結果、椅子から片脚で立ち上がることができなかった者では、握力や脚伸展パワーが低く、低筋量や低筋力に該当する者が多いことが示唆された。これまで立ち上がりテストと筋力との関連について検討した先行研究は、我々の知る限り1件のみと限られている。村永は、リハビリ実施中の入院患者を対象に片脚立ち上がりテストとサイバックスを用いて評価した膝伸展筋力との関連について検討を行っている<sup>6)</sup>。その結果、40cmの台から片脚で立ち上がるのに必要な下肢筋力は体重の62.3%であり、この筋力は日常生活が不自由なく行うことができるレベルに相当することを報告している。また、立ち上がりテストと身体機能との関連について検討した先行研究において、片脚立ち上がりができない者では、5回の座り立ちにかかる時間が長く、歩行速度が遅いことが報告されている<sup>12)</sup>。本研究において、低筋量ならびに低筋力の簡易評価に対する椅子片脚立ち上がりテストの感度は5割程度とそれほど高くなかったものの、特異度は7割以上と比較的高かった。すなわち、低筋量あるいは低筋力と判定されなかった者のうち7割以上の者では椅子から片脚で立ち上がることができており、椅子片脚立ち上がりテストによって低筋量や低筋力と判定されない者をおおよそ7割以上の確率で推定できる可能性が示唆された。

今後は、縦断的な追跡調査を行っていくことで、

椅子片脚立ち上がりテストの結果と将来の転倒や要介護リスク等との関連について検討を行う予定である。

#### 4. 結 論

椅子片脚立ち上がりテストにおいて、椅子から片脚で立ち上がることができなかった者では握力や脚伸展パワーが低く、低筋量や低筋力に該当する者が多いことが示唆された。何処でも簡便に評価可能な椅子片脚立ち上がりテストによってサルコペニアをある程度推定できる可能性が示唆された。

#### 謝 辞

本研究に対し、助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究の遂行にあたり、Nutrition and Exercise Intervention Study (NEXIS) のコホート研究にご協力いただきました皆様、ご指導を賜りました国立研究開発法人医薬基盤・健康・栄養研究所の宮地元彦氏に深謝いたします。

#### 文 献

- 1) Nakamura K.A., "super-aged" society and the "locomotive syndrome"., *J. Orthop. Sci.*, 13: 1-2 (2008)
- 2) Cruz-Jentoft A.J., Baeyens J.P., Bauer J.M., Boirie Y., Cederholm T., Landi F., Martin F.C., Michel J.P., Rolland Y., Schneider S.M., Topinkova E., Vandewoude M., Zamboni M., European Working Group on Sarcopenia in Older People., Sarcopenia: European consensus on definition and diagnosis: Report of the European Working Group on Sarcopenia in Older People., *Age Ageing*, 39: 412-423(2010)
- 3) Janssen I., Heymsfield S.B., Ross R., Low relative skeletal muscle mass (sarcopenia) in older persons is associated with functional impairment and physical disability., *J. Am. Geriatr. Soc.*, 50: 889-896(2002)
- 4) Tanimoto Y., Watanabe M., Sun W., Tanimoto K.,

- Shishikura K., Sugiura Y., Kusabiraki T., Kono K., Association of sarcopenia with functional decline in community-dwelling elderly subjects in Japan., *Geriatr. Gerontol. Int.*, **13**: 958-963(2013)
- 5) 公益社団法人日本整形外科学会., ロコモチャレンジ! 推進協議会., ロコモパンフレット 2015年度版, [https://locomo-joa.jp/check/pdf/locomo\\_pf2015.pdf](https://locomo-joa.jp/check/pdf/locomo_pf2015.pdf)(2015)
  - 6) 村永信吾., 立ち上がり動作を用いた下肢筋力評価とその臨床応用., 昭和医会誌, **61**: 362-367(2001)
  - 7) Murakami H., Iemitsu M., Fuku N., Sanada K., Gando Y., Kawakami R., Miyachi M., The Q223R polymorphism in the leptin receptor associates with objectively measured light physical activity in free-living Japanese., *physiol. Behav.*, **129**: 199-204(2014)
  - 8) 川上諒子., 村上晴香., 宮武伸行., 澤田亨., 樋口満., 宮地元彦., 健康づくりのための身体活動基準 2013による身体活動評価とメタボリックシンドローム., 日本公衆衛生雑誌, **61**: 705-717(2014)
  - 9) Kawakami R., Murakami H., Sanada K., Tanaka N., Sawada S.S., Tabata I., Higuchi M., Miyachi M., Calf circumference as a surrogate marker of muscle mass for diagnosing sarcopenia in Japanese men and women., *Geriatr. Gerontol. Int.*, **15**: 969-976(2015)
  - 10) Sanada K., Miyachi M., Tanimoto M., Yamamoto K., Murakami H., Okumura S., Gando Y., Suzuki K., Tabata I., Higuchi M., A cross-sectional study of sarcopenia in Japanese men and women: reference values and association with cardiovascular risk factors., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **110**: 57-65(2010)
  - 11) Lauretani F., Russo C.R., Bandinelli S., Bartali B., Cavazzini C., Di Iorio A., Corsi AM., Rantanen T., Guralnik JM., Ferrucci L., Age-associated changes in skeletal muscles and their effect on mobility: an operational diagnosis of sarcopenia., *J. Appl. Physiol.*, **95**: 1851-1860(2003)
  - 12) Yoshimura N., Muraki S., Oka H., Tanaka S., Ogata T., Kawaguchi H., Akune T., Nakamura K., Association between new indices in the locomotive syndrome risk test and decline in mobility: third survey of the ROAD study., *J. Orthop. Sci.*, **20**: 896-905(2015)

# 肥満小児において筋内脂肪は メタボリックシンドロームの危険因子となり得るか？

名古屋大学 秋間 広  
(共同研究者) 三重大学 富樫 健二  
国立病院機構 貝沼 圭吾  
三重病院

## Is Intramuscular Adipose Tissue A Risk Factor of Metabolic Syndrome in Obese Children?

by

Hiroshi Akima

*Research Center of Health Physical Fitness & Sports,  
Nagoya University*

Kenji Togashi

*Faculty of Education, Mie University*

Keigo Kainuma

*National Mie Hospital*

### ABSTRACT

The purpose of this study was to clarify the possibility of intramuscular fat (IMF) could be the risk factor of metabolic syndrome in obese children. Thirty-seven obese boys and girls participated in this study (age,  $10.4 \pm 2.1$  year-old; height,  $146.2 \pm 13.4$  cm; weight,  $56.1 \pm 16.5$  kg; percentage of overweight,  $41.1 \pm 16.8\%$ ). The subjects were divided into three groups based on percentage of overweight, i.e. mild obesity group, moderate obesity group, and sever obesity group. This study was conducted a part of obesity treatment for the subjects and was approved by the institutional review board of local committees. Computed tomography (CT) images were taken at the mid-

thigh and umbilicus levels. Using the CT images, IMF index of the quadriceps femoris (QF), hamstrings (HM) and adductor (AD) muscle groups based on mean grey scale level of the interested muscle groups and visceral fat cross-sectional area (CSA) was calculated. For the mid-thigh CT image, skeletal muscle CSA and subcutaneous fat was also calculated. Plasma triglyceride, FFA, HDL-cholesterol, total-cholesterol, glucose, and HbA1c were measured from fasting blood drop. IMF index of QF, HM and AD was significantly different in all comparisons: HM was the lowest ( $1066 \pm 6$  a.u.), meaning largest IMF depot, and QF was the highest ( $1080 \pm 3$  a.u.), meaning smallest IMF depot. Stepwise multiple regression analysis revealed that none of independent variables were extracted to predict IMF index in QF. For IMF index in HM, visceral fat CSA per body weight and FFA were extracted ( $R=0.483, P < 0.05$ ). Interestingly, visceral fat CSA per body weight was the only extracted variable to predict IMF index in AD ( $R=0.531, P < 0.05$ ). These results suggest that IMF in hamstring and adductor could be a risk factor of metabolic syndrome in obese children.

## 要 旨

本研究では肥満小児における筋内脂肪がメタボリックシンドロームのリスクファクターとなり得るのかについて検討することを目的とした。被検者は国立病院機構三重病院が主催する健康教室に参加した小児 37 名で、保護者と本人の実験への参加の承認が得られた者であった。コンピューター断層装置により大腿中央部および腹部臍位置における横断像を撮影した。大腿四頭筋、ハムストリング、内転筋群の筋内脂肪については、グレースケールをもとに算出した。同時に筋断面積と皮下脂肪断面積も算出した。腹部の横断画像から内臓脂肪断面積を算出した。空腹時の血液を採取して、トリグリセリド、血漿遊離脂肪酸、総コレステロール、HDL コレステロール、グルコース、HbA1c、尿酸を分析した。筋内脂肪を従属変数に本研究で測定したパラメータを独立変数としたステップワイズ重回帰分析を行った結果、ハムストリングおよび内転筋群においては体重当たりの内臓脂肪が選択された。これらの結果から、筋内脂

肪は内臓脂肪と密接に関係する因子であり、メタボリックシンドロームの危険因子となり得ると判断した。

## 緒 言

肥満によって皮下や内臓周辺に脂肪が蓄積されることはよく知られているが、骨格筋の内部にも霜降り状に筋内脂肪が蓄積する<sup>7,10,11,23</sup>。また、加齢によっても筋内脂肪が蓄積することから、コンピューター断層法、磁気共鳴映像法および超音波断層法などを使って、筋内脂肪の評価が行われてきている<sup>2,11-13,17-19</sup>。筋内脂肪はいわゆる“霜降り肉”を想像すると理解しやすい。これまで加齢や肥満者の筋内脂肪の特性については、多くの研究で報告されてきたが、筋内脂肪が生体に及ぼす最も大きな影響としては、インスリン抵抗性が挙げられる。多くの研究において筋内脂肪が多い人はインスリン抵抗性である傾向が示されている<sup>3,5,6,9</sup>。また、他の研究において我々は<sup>2</sup>は、大腿部の筋内脂肪の割合と筋組織量との間に有意な負の相関関係が認められることを示している。

つまり、筋量が多いことは脂肪を酸化できるミトコンドリア量が多いことを意味すること、および高い身体活動量に起因した筋肥大が生じていることを示唆しており、筋内脂肪の蓄積は身体にとって様々な負の影響をもたらすことが上記の研究結果から推測される。

成人の肥満だけでなく、小児の肥満も増加してきている<sup>16, 22)</sup>。高度肥満を持つ小児が成人においても肥満である確率は高く、特に少女より少年でその確率が高いことが示されている<sup>22)</sup>。一方、子どもを対象に筋内脂肪を評価する研究の多くは、筋ジストロフィーなどの筋疾患に関するものが多く<sup>1, 14)</sup>、小児肥満の子どもにおける筋内脂肪の実態については十分に明らかになっていない。

本研究では身体の中で最も筋量を多く持つ部位の一つである大腿部に注目し、それらの筋内脂肪が血液性状、内臓脂肪、皮下脂肪量等とどのような関係にあるのかを調べることを目的とした。先行研究においては、肥満に伴い筋内脂肪内臓脂肪が並行して増加することが示されている<sup>4)</sup>ことから、筋内脂肪と内臓脂肪には密接な関係があるとする仮説を設定した。

## 1. 研究方法

### 1. 1 被検者

被検者は7歳から16歳までの子どもで、男子25名と女子12名の計37名であった。これらの被検者は児童生徒の健康診断マニュアル (<http://www.gakkohoken.jp/modules/books/index.php?fc=photo&p=82#>) が示す肥満度カテゴリーにしたがって、肥満度を基に3つの群に分類した。すなわち、肥満度20%以上30%未満の被検者を軽度肥満児群(男児7名、女児2名)、肥満度30%以上50%未満を中等度肥満児群(男児11名、女児7名)、肥満度50%以上を高度肥満児群(男児7名、女児3名)とした。本研究で用いた

被検者は、国立三重病院が行っている健康教室に参加した子どもたちのうち、本人と保護者から実験への参加の書面による承諾が得られた者であった。なお、本研究課題については、名古屋大学総合保健体育科学センターおよび国立三重病院に設置されてあるヒトを対象とする研究審査での承認を得ている。

### 1. 2 コンピューター断層画像

国立三重病院に設置されてあるコンピューター断層装置(GE 横河, High Speed DXi)を用いて、大腿部中央部および臍の位置における横断像を撮影した。得られた画像はDICOM形式で保存され、後の分析に用いた。

全ての分析はバイオメディカル分野における画像処理ソフトとして使用頻度の高いImageJ(バージョン1.46, National Institute of Health, USA)を用いた。本研究ではコンピューター断層画像の輝度を指標に筋内脂肪の割合を評価した。ただし、この評価は筋内脂肪の絶対値を示すものではないため、本研究では筋内脂肪指標とした。コンピューター断層画像では脂肪は黒く(輝度は低い)、骨格筋は灰色(輝度は中程度)、骨は白色(輝度は高い)に描写される(図1)。したがって、水分量の多い組織ほど黒く描写されることとなる。図1に示したように、筋内脂肪の評価は大腿四頭筋、

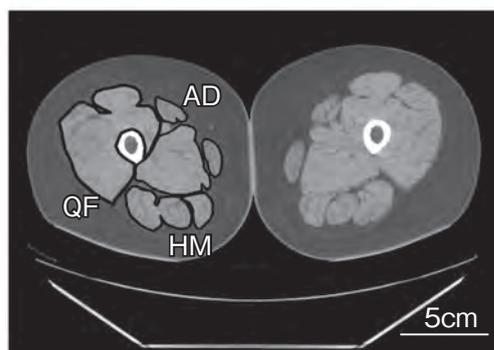


図1 Representative computed tomography image of the thigh in 10 year-old girl assigned to severe obesity group QF, quadriceps femoris; HM, hamstrings; AD, adductors Arrows represent intramuscular adipose tissue.

ハムストリング、内転筋群および大腿部筋群（大腿四頭筋、ハムストリング、内転筋群の値を平均）をパーソナルコンピュータ上でトレースした後、関心領域内に含まれる全てのピクセルの輝度を計算して、グレースケール値で表した。そのため、筋内脂肪を多く含む筋の値は高くなり、筋内脂肪が少ない筋の値は低くなる。同時に、大腿部では大腿四頭筋、ハムストリングおよび内転筋群における筋断面積を算出した。腹部横断像からは専用のソフトウェア（Fat Scan, 東日本技術研究所社製）を用いて、内臓脂肪を算出した。

### 1. 3 血液性状

被検者の肘正中皮静脈より空腹時採血を行い、グルコース、トリグリセリド、血漿遊離脂肪酸、総コレステロール、HDLコレステロール、LDLコレステロール、ヘモグロビン A1c、尿酸を測定した。なお、被検者が子どもであったことから採血を行えなかった被検者もいた。

### 1. 4 統計処理

全ての値は平均と標準偏差で示した。統計処理

には IBM SPSS Statistics（バージョン 23, IBM社製）を用いた。筋内脂肪指標の差の検定には一元配置分散分析を用いた。筋内脂肪指標がどのようなパラメータと関係しているのかを調べるため、ステップワイズ重回帰分析を行った。大腿部の筋内脂肪を従属変数にして、年齢、身長、体重、性別、内臓脂肪/体重、腹囲、肝臓 CT、尿酸、トリグリセリド、FFA、グルコース、HbA1c、筋断面積を独立変数とした。なお、独立変数の選択には、独立変数間の相関係数を求め多重共線性を十分に考慮した後に投入パラメータを決定した。有意水準は 5% 未満とした。

## 2. 研究結果

表 1 には被検者の身体特性、身体組成および血液性状について示した。中等度肥満児群および高度肥満児群は、軽度肥満児群と比較して体重、肥満度が有意に高値を示した ( $P < 0.05 \sim P < 0.001$ )。

筋断面積については、内転筋群および大腿部筋群において高度肥満児群が軽度肥満児群と比較して有意に高値を示した (ともに  $P < 0.05$ )。大腿

表 1 Physical characteristics, body composition, and blood profile of subjects

	Mild Obesity (B/G 7/2)	Moderate Obesity (B/G 11/7)	Severe Obesity (B/G 7/3)
Number of subjects	9	18	10
Age (year-old)	10.2 ± 0.8	10.7 ± 2.6	10.1 ± 1.9
Height (cm)	141.2 ± 7.7	147.9 ± 16.3	147.7 ± 11.3
Weight (kg)	43.2 ± 8.5	57.0 ± 16.9*	66.1 ± 14.4**
Percent of overweight (%)	21.1 ± 6.3	39.0 ± 5.6 †	63.0 ± 9.6 †
Quadriceps femoris CSA (cm <sup>2</sup> )	42.3 ± 5.7	53.2 ± 5.0	55.1 ± 12.2
Hamstrings CSA (cm <sup>2</sup> )	12.1 ± 2.0	16.1 ± 5.3	16.0 ± 5.3
Adductors CSA (cm <sup>2</sup> )	27.6 ± 4.9	35.7 ± 11.1	38.5 ± 9.0*
Muscle CSA of the thigh (cm <sup>2</sup> )	82.0 ± 10.5	105.0 ± 29.9	109.5 ± 26.0*
Subcutaneous fat CSA of the thigh (cm <sup>2</sup> )	98.9 ± 27.8	117.4 ± 23.4	155.1 ± 32.7 †
Subcutaneous fat CSA of the thigh/thigh CSA (%)	52.8 ± 6.9	52.5 ± 6.5	57.6 ± 4.4
Visceral fat CSA (cm <sup>2</sup> )	16.3 ± 8.4	36.8 ± 12.0 †	51.7 ± 11.1 †
Visceral fat CSA/weight (cm <sup>2</sup> /kg)	0.37 ± 0.17	0.67 ± 0.21**	0.84 ± 0.28 †
Abdominal circumference (cm)	75.6 ± 8.5	86.3 ± 8.3**	97.1 ± 7.3 †
Triglyceride (mg/dl)	76.6 ± 30.5	102.0 ± 58.1	137.4 ± 93.4
FFA (μEq/L)	570.8 ± 363.7	446.4 ± 186.5	497.2 ± 196.3
Total-cholesterol (mg/dl)	162.8 ± 35.8	168.1 ± 31.1	173.4 ± 31.8
HDL-cholesterol (mg/dl)	52.2 ± 9.4	48.3 ± 10.4	48.0 ± 10.8
Plasma glucose (mg/dl)	86.4 ± 5.6	89.2 ± 7.6	87.9 ± 7.8
HbA1c (NGSP) (%)	5.4 ± 0.1	5.3 ± 0.3	5.4 ± 0.2
Uric acid (mg/dl)	4.8 ± 1.0	6.1 ± 1.8	5.9 ± 0.81

Values are means and SD. CSA, cross-sectional area; FFA, free fat acid. \*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ , †,  $P < 0.001$  vs. Mild Obesity.

部の皮下脂肪断面積においては、高度肥満児群が軽度肥満児群と比較して有意に高値を示したが( $P < 0.001$ )、大腿部断面積に占める割合で比較すると、群間に差は見られなかった。内臓脂肪断面積、体重当たりの内臓脂肪断面積および腹囲においては、中等度肥満児群および高度肥満児群は軽度肥満児群と比較して有意に高値を示した ( $P < 0.01 \sim P < 0.001$ )。

血液性状においては、いずれのパラメータにおいても群間に有意な差は認められなかった。

図2には大腿四頭筋、ハムストリング、内転筋群および大腿部全体における筋肉脂肪指標について示した。内転筋群において、中等度肥満児群と高度肥満児群は軽度肥満児群と比較して有意に低値(筋肉脂肪の割合が多い)を示した(ともに $P < 0.05$ )。しかしながら、大腿四頭筋とハムストリングでは群間に統計的な有意差は認められなかった。また、大腿部全体で見た場合は、高度肥満児群は軽度肥満児群と比較して有意に低値(筋肉脂肪の割合が多い)を示した( $P < 0.05$ )。

表2にはステップワイズ重回帰分析の結果について示した。大腿四頭筋の筋肉脂肪指標については、選択された独立変数はなかった。ハムストリングにおいては、体重で規格化した内臓脂肪と血漿遊離脂肪酸が選択された( $R=0.693, P < 0.01$ )。内転筋群と大腿部筋群においては内臓脂肪/体重が選択された(内転筋群  $R=0.483, P < 0.05$ ; 大腿部筋群  $R=0.531, P < 0.05$ )。

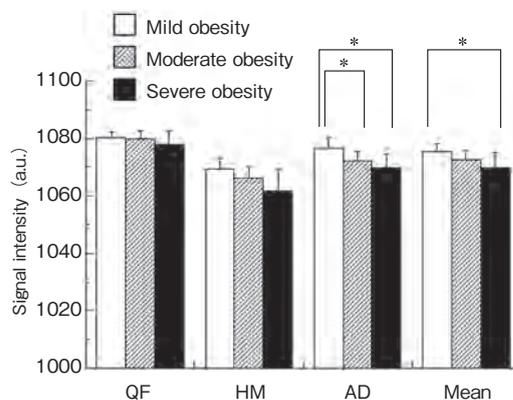


図2 Intramuscular adipose tissue index based on signal intensity of computed tomography imaging  
QF, quadriceps femoris; HM, hamstrings; AD, adductors \*,  $P < 0.05$

### 3. 考 察

本研究の目的は肥満児童の大腿部における筋肉脂肪がどのような生理・生化学パラメータと関係しているのかを明らかにすることであった。大腿部の筋肉脂肪指標を従属変数に、また測定に用いた様々なパラメータを独立変数にして、ステップワイズ重回帰分析を行ったところ、大腿四頭筋においては該当するパラメータが抽出されなかったものの、ハムストリング、内転筋群および大腿部全体の筋肉脂肪指標では共通して内臓脂肪/体重が選択された。これらのことから大腿部の非抗重力筋における筋肉脂肪は、内臓脂肪蓄積と密接に関係していることが明らかとなった。

成人では肥満、加齢や運動不足によって、骨格筋内部に“霜降り状”に筋肉脂肪が蓄積する<sup>2, 12</sup>。

表2 Stepwise multiple regression analysis as dependent variables of intramuscular fat index of quadriceps femoris, hamstring, adductors and total thigh muscles

	Selected variables	Regression coefficients	SE	Standardized regression coefficients	P	R	Adjusted R <sup>2</sup>
QF	-	-	-	-	-	-	-
HM	Visceral fat CSA/Wt	-11.06	3.076	-0.612	$P=0.002$	0.693	0.423
	FFA	-0.01	0.004	-0.373	$P=0.042$		
AD	Visceral fat CSA/Wt	-7.07	2.938	-0.483	$P=0.026$	0.483	0.193
Mean	Visceral fat CSA/Wt	-6.63	2.425	-0.531	$P=0.013$	0.531	0.245

QF, quadriceps femoris; HM, hamstrings; AD, adductor muscles; CSA, cross-sectional area; Wt, weight

13, 20). このような筋内脂肪の蓄積は、成人だけでなく児童においても当てはまるのが本研究で明らかとなった。また、筋内脂肪蓄積の程度は内転筋群では被検者の肥満の程度によって差が認められ、大腿部全体でも軽度肥満児群と高度肥満児群との間には有意な差が認められた。これらのことから、対象とする筋によって反応は異なるものの、小児において肥満の進行によって筋内脂肪の割合が相対的に増加することが示された。

筋内脂肪指標を従属変数としたステップワイズ重回帰分析では興味深い結果が認められた。大腿四頭筋では選択されたパラメータは見られず、ハムストリングと内転筋群ではともに内臓脂肪/体重が選択された。健康な非肥満の若齢者および高齢者の大腿部の筋群を対象にした研究においてステップワイズ重回帰を行った結果、大腿四頭筋の筋内脂肪を説明できる独立変数が筋組成や血液性状などいずれのパラメータも選択されなかった結果 (Akima et al. unpublished data) は、本研究結果と一致した。この原因としては、大腿四頭筋が抗重力筋であり、日常生活において体重を支えるために大きな貢献をしているため、この活動によって脂質がエネルギー源として利用され、相関関係に影響した可能性が考えられる。本研究では、これが影響して大腿四頭筋の筋内脂肪指標がいずれの独立変数も選ばれなかったのかも知れない。

一方、ハムストリングと内転筋群および大腿部全体の筋内脂肪指標では、内臓脂肪/体重が選択された。Boettcherら<sup>3)</sup>は、成人男女249名のふくらはぎの筋内脂肪量と内臓脂肪量との間には男性被検者 (n=97) および女性被検者 (n=152) それぞれにおいて、 $r=0.42$  および  $r=0.52$  の有意な相関関係が認められることを報告している。この結果は筋内脂肪量が多い被検者は内臓脂肪も多いことを示しており、本研究において筋内脂肪指標を説明する因子として内臓脂肪が抽出されたことを支持する結果と考えることができる。また、

Songら<sup>21)</sup>による2年間の縦断的研究においては、筋内脂肪の増加するパターンと内臓脂肪の増加するパターンが類似していることが報告されている。これらのことから、成人だけでなく小児においても、肥満などにより体重が増加する場合は筋内脂肪と内臓脂肪は並行して蓄積されていくことを示唆するものである。しかしながら、本研究では縦断的な検討を行っていないため、今後、そのような観点からも検討する必要があるものと考えられる。

本研究では大腿部の3つの筋群から筋内脂肪指標を算出した。本研究では統計処理は行っていないものの、高度肥満群、中等度肥満群および軽度肥満群において筋内脂肪はハムストリング、内転筋群、大腿四頭筋の順に高値を示すこととなり、このことは肥満小児では大腿部の筋群間で筋内脂肪の蓄積する程度が異なることを意味している。興味深いことに、この順序性は若齢者および高齢者において見られた筋内脂肪の蓄積の順序性と完全に一致している<sup>2)</sup>。これらのことから、大腿部の筋群において筋内脂肪が最も蓄積する部分是小児から高齢者のいずれにおいてもハムストリング、内転筋群、大腿四頭筋の順であることが明らかとなった。この理由については定かではないが、大腿四頭筋に関しては上述のように抗重力筋であるため、日常生活において活動が関係しているものと予想できる。一方、ハムストリングと内転筋群の順に筋内に脂肪が蓄積する理由も現在は不明である。例えば、2つの筋群のtype I線維に大きな違いはない<sup>8, 15)</sup> ことから、代謝能力には大きな差がないと理解できる。日常活動における筋活動量の差や筋形状の違いによる筋束間での空間のでき方の違いなどが影響しているのかもしれないが、本研究から明らかにすることはできなかった。

#### 4. まとめ

本研究は肥満小児における筋内脂肪がメタボ

リックシンドロームの危険因子となり得るかという点について検討した。肥満小児の大腿部および腹部におけるCT画像から大腿四頭筋、ハムストリング、内転筋群の筋内脂肪指標、筋断面積、皮下脂肪断面積と内臓脂肪断面積を算出した。また、血液からトリグリセリド、血漿遊離脂肪酸、総コレステロール、HDLコレステロール、グルコース、HbA1c、尿酸を算出した。大腿部の3つの筋群および大腿部全体における筋内脂肪指標を従属変数に、本研究で用いた他のパラメータを独立変数に設定してステップワイズ重回帰分析を行った。その結果、ハムストリング、内転筋群および大腿部全体では内臓脂肪が選択された。内臓脂肪の増加はメタボリックシンドローム診断の因子の一つになっていることから、ハムストリングや内転筋群の筋内脂肪はメタボリックシンドロームの危険因子となり得ることが示唆された。

## 謝 辞

本研究を実施するにあたり研究助成を頂いた公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、被検者として参加頂いた小児の皆さんとその保護者の方々に御礼申し上げます。

## 文 献

- 1) Akima H., Lott D., Senesac C., Deol J., Gemain S., Arpan I., Bendixen R., Sweeney H.L., Walter G., Vandeborne K., Relationships of thigh muscle contractile and non-contractile tissue with function, strength, and age in boys with Duchenne muscular dystrophy. *Neuromuscul Disord*, 22: 16-25(2012)
- 2) Akima H., Yoshiko A., Hioki M., Kanehira N., Shimaoka K., Koike T., Sakakibara H., Oshida Y., Skeletal muscle size is a major predictor of intramuscular fat content regardless of age. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 115: 1627-1635(2015)
- 3) Boettcher M., Machann J., Stefan N., Thamer C., Haring H-U., Claussen C.D., Fritsche A., Schick F., Intermuscular adipose tissue (IMAT) : Association with other adipose tissue compartments and insulin sensitivity. *J. Magn. Reson. Imaging.*, 29: 1340-1345 (2009)
- 4) Gallagher D., Kuznia P., Heshka S., Aibu H., Heymsfield S.B., Goodpaster B., Visse M., Harris T.B., Adipose tissue in muscle: a novel depot similar in size to visceral adipose tissue. *Am. J. Clin. Nutr.*, 81: 903-910(2005)
- 5) Goodpaster B.H., Thaete F.L., Kelley D.E., Thigh adipose tissue distribution is associated with insulin resistance in obesity and in type 2 diabetes mellitus. *Am. J. Clin. Nutr.*, 71: 885-892(2000)
- 6) Goodpaster B.H., Wolf D., Skeletal muscle lipid accumulation in obesity, insulin resistance, and type 2 diabetes. *Pediatr. Diabetes.*, 5: 219-226(2004)
- 7) Janssen I., Fortier A., Hudson R., Ross R.R., Effects of an energy-restrictive diet with or without exercise on abdominal fat, intermuscular fat, and metabolic risk factors in obese women. *Diabetes. Care.*, 25: 431-438(2002)
- 8) Johnson M.A., Polgar J., Weightman J.D., Appleton D., Data on the distribution of fiber types in thirty-six human muscles. An autopsy study. *J. Neurol. Sci.*, 18: 111-129(1973)
- 9) Lawrence J.C., Newcomer B.R., Buchthal S.D., Sirikul B., Oster R.A., Hunter G.R., Gower B.A., Relationship of intramyocellular lipid to insulin sensitivity may differ with ethnicity in healthy girls and women. *Obesity*, 19: 43-48(2011)
- 10) Lee S., Kim Y., White D.A., Kuk J.L., Arslanian S., Relationships between insulin sensitivity, skeletal muscle mass and muscle quality in obese adolescent boys. *Eur. J. Clin. Nutr.*, 66: 1366-1368(2012)
- 11) Manini T.M., Buford T.W., Lott D.J., Vandeborne K., Daniels M.J., Knaggs J.D., Patel H., Pahor M., Perri M.G., Anton S.D., Effect of dietary restriction and exercise on lower extremity tissue compartments in obese, older women: A pilot study. *J. Gerontol. A. Bio. Sci. Med. Sci.*, 69: 101-108(2013)
- 12) Marcus R.L., Addison O., Dibble L.E., Foreman K.B., Morrell G., LaStayo P., Intramuscular adipose tissue, sarcopenia, and mobility function in older individuals. *J. Aging Res.*, 2012: 1-6(2012)
- 13) Marcus R.L., Addison O., Kidde J.P., Dibble L.E., Lastayo P.C., Skeletal muscle fat infiltration: impact of age, inactivity, and exercise. *J. Nutr. Health.*

- Aging.*, 14: 362-366 (2010)
- 14) Mercuri E., Pichiecchio A., Allsop J., Messina S., Pane M., Muntoni F., Muscle MRI in inherited neuromuscular disorders: past, present, and future. *J. Magn. Reson. Imaging.*, 25: 433-440 (2007)
  - 15) Saltin B., Gollnick P.D., Skeletal muscle adaptability: significance for metabolism and performance. In: Handbook of Physiology-Skeletal muscle, edited by Peachey LD, Adrian RH and Geiger SR. Baltimore: American Physiological Society, p. 555-631 (1983)
  - 16) Samara A., Ventura E.E., Alfadda A.A., Goran M.I., Use of MRI and CT for fat imaging in children and youth: what have we learned about obesity, fat distribution and metabolic disease risk? *Obes. Rev.*, 13: 723-732 (2012)
  - 17) Sipilä S., Suominen H., Knee extension strength and walking speed in relation to quadriceps muscle composition and training in elderly women. *Clin. Physiol.*, 14: 433-442 (1994)
  - 18) Sipilä S., Suominen H., Muscle ultrasonography and computed tomography in elderly trained and untrained women. *Muscle Nerve.*, 16: 294-300 (1993)
  - 19) Sipilä S and Suominen H. Quantitative ultrasonography of muscle: detection of adaptations to training in elderly women. *Arch. Phys. Med. Rehab.*, 77: 1173-1178 (1994)
  - 20) Sipilä S., Suominen H., Ultrasound imaging of the quadriceps muscle in elderly athletes and untrained men. *Muscle Nerve.*, 14: 527-533 (1991)
  - 21) Song M.Y, Ruts E., Kim J., Janumala I., Heymsfield S., Gallagher D., Sarcopenia and increased adipose tissue infiltration of muscle in elderly African American women. *Am. J. Clin. Nutr.*, 79: 874-880 (2001)
  - 22) Togashi K., Masuda H., Rankinen T., Tanaka S., Bouchard C., Kamiya H., A 12-year follow-up of treated obese children in Japan. *Int. J. Obes.*, 26: 770-777 (2002)
  - 23) Velan S.S., Said N., Durst C., Frisbee S., Frisbee J., Raylman R.R., Thomas M.A., Rajendran V.M., Spencer R.G, Alway S.E., Distinct patterns of fat metabolism in skeletal muscle of normal-weight, overweight, and obese humans. *Am. J. Physiol. Regul.*, 295: R1060-1065 (2008)

# 呼吸筋トレーニングが運動パフォーマンスを 向上させるメカニズムの解明 ～近赤外線分光法を用いた検証～

順天堂大学 北田 友治  
(共同研究者) 同 河合 祥雄  
同 佐久間 和彦  
同 仲村 明  
同 内藤 久士

## **Mechanism Underlying Performance Improvement Through Respiratory Muscle Training: A Near-infrared Spectroscopy-based Study**

by

Tomoharu Kitada, Sachio Kawai, Kazuhiko Sakuma,  
Akira Nakamura, Hisashi Naito  
*Graduate School of Health and Sports Science,  
Juntendo University*

### ABSTRACT

Previous studies have reported that respiratory muscle training improves performance during prolonged high-intensity exercise; however, the mechanism remains unclear. With an aim to gain insights into the underlying mechanism, we simultaneously monitored respiratory and lower limb muscle oxygenation patterns using near-infrared spectroscopy (NIRS) during high-intensity cycling exercise before and after 6 weeks of inspiratory muscle training. Sixteen healthy young men were assigned to either experimental (inspiratory muscle training : IMT) or sham (SHAM) training groups and underwent inspiratory muscle training for more than 5 days per week for 6 weeks. The subjects underwent constant load test at 90%  $\dot{V}O_{2max}$  on a cycle ergometer until

exhaustion both before and after training. Oxygenation in both intercostal and vastus lateralis muscles were measured using NIRS during the test. In addition, maximal inspiratory pressure (MIP) was measured using spirometer every 2 weeks for the duration of the training. After inspiratory muscle training, MIP increased significantly in the IMT group but not in the SHAM group. Furthermore, time to the limit of exercise tolerance prolonged significantly in the IMT group but not in the SHAM group. However, no significant changes were found in oxygenation in both intercostal and vastus lateralis muscles in both the groups. These findings suggest that inspiratory muscle training improves high-intensity cycling exercise performance by factors other than enhanced oxygenation in both respiratory and lower limb muscles.

## 要 旨

これまでの研究において、呼吸筋トレーニングが長時間高強度運動のパフォーマンスを向上させることは報告されてきたが、そのメカニズムについては未だ明らかになっていない。我々は、そのメカニズムについての洞察を得るために、近赤外線分光法（NIRS）を用いて、高強度自転車運動中の呼吸筋および下肢骨格筋における酸素動態を6週間の呼吸筋トレーニング前後で同時にモニタリングした。16名の健康な若年男性が、これまでに効果が認められている負荷で実施する群（inspiratory muscle training : IMT）と効果が得られないとされる負荷で実施する群（SHAM群）のいずれかに分けられ、週5日以上、6週間に渡って呼吸筋トレーニングを実施した。被験者らは、 $90\% \dot{V}O_{2max}$  強度で疲労困憊に至るまでの自転車固定負荷テストをトレーニング前後で実施した。テスト中には、NIRSを用いて肋間筋および外側広筋における酸素動態が測定された。さらに、トレーニング期間中には、スパイロメータを用いて2週間毎に最大吸気圧（MIP）が測定された。呼吸筋トレーニング後、IMT群においてはMIPが有意に増加したが、SHAM群においては有意な増加は認められなかった。また、疲労困憊に至る

までの運動時間は、IMT群において有意に延長したが、SHAM群においては有意な延長は認められなかった。しかしながら、両群の肋間筋および外側広筋における酸素動態には、有意な変化は認められなかった。これらの知見は、呼吸筋トレーニングは呼吸筋および下肢骨格筋における酸素動態の改善よりも他の因子によって、高強度自転車運動のパフォーマンスを向上させることを示唆する。

## 諸 言

呼吸筋の疲労は、運動パフォーマンスの制限因子であると考えられている<sup>1)</sup>。このことから、呼吸筋をトレーニングすることは、特に呼吸筋が最初に制限を受けることで、運動を実施または継続することが困難となるような持久的競技者や慢性閉塞性肺疾患患者にとって重要である。現在では、設定した負荷を吸気時にかけることができる呼吸筋専用のトレーニング器具（呼吸筋トレーナー）を用いることで、通常の持久的運動では鍛えることが難しい呼吸筋のトレーニングが可能となり、近年、それによって運動パフォーマンスの向上が見られることが報告されている<sup>2)</sup>。したがって、今後はさらに呼吸筋トレーニングが普及していくことが予想される。

しかしながら、呼吸筋トレーニングが呼吸筋の

表 1 Physical characteristics of IMT and SHAM groups

Characteristics	IMT group (n = 8)	SHAM group (n = 8)	p value
Age, years	19.3 ± 1.0	19.5 ± 1.1	n.s.
Height, cm	172.5 ± 8.7	175.1 ± 5.5	n.s.
Weight, kg	64.4 ± 8.7	66.9 ± 5.9	n.s.
Lean body mass, kg	56.4 ± 7.6	59.6 ± 4.3	n.s.
Fat, %	12.4 ± 3.6	10.8 ± 3.7	n.s.
Skinfold thickness of intercostal, mm	4.3 ± 0.9	4.2 ± 1.1	n.s.
Skinfold thickness of vastus lateralis, mm	5.1 ± 1.8	4.8 ± 1.9	n.s.
$\dot{V}O_{2max}$ , mL·kg <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup>	48.8 ± 6.0	49.5 ± 5.3	n.s.
Power at 90% $\dot{V}O_{2max}$ , W	252 ± 48	257 ± 26	n.s.

Values are mean ± SD.

Abbreviation:  $\dot{V}O_{2max}$ , maximal oxygen uptake

疲労を遅延または軽減させ、運動パフォーマンスを向上させる効果があることが示唆されているものの、そのメカニズムについては、未だに不明な点が多い。呼吸筋トレーニングによって運動パフォーマンスが向上する可能性のあるメカニズムの一つとしては、呼吸筋および下肢骨格筋における酸素供給/消費連関の改善、すなわち、呼吸筋が適応することによって、呼吸筋から活動筋への血流再配分量が大きくなることが予想される<sup>3)</sup>。しかしながら、我々の知る限りでは、呼吸筋トレーニングによる呼吸筋の適応によって、呼吸筋および下肢骨格筋における酸素供給/消費連関が改善するかどうかを明らかにした研究はなく、仮説の域を出ない。

これまで、持久的トレーニングによる下肢骨格筋における酸素化レベルの改善について、近赤外線分光法 (near-infrared spectroscopy: NIRS) を用いて観察できることが報告されている<sup>4)</sup>。したがって、呼吸筋トレーニングによる呼吸筋適応時の変化についても NIRS を用いることで、明らかにできるかもしれない。そこで、本研究は NIRS を用いて、呼吸筋トレーニング前後に高強度固定負荷による自転車運動中の呼吸筋および下肢骨格筋における酸素動態をモニタリングすることで、呼吸筋の適応メカニズムを呼吸循環の側面から調べることを目的とした。

## 1. 研究方法

### 1. 1 被験者

本研究では、持久的な運動を実施していない健康な男子大学生 16 名を対象とした。なお、彼らの身体的特性を表 1 に示した。実験に先立ち、研究の目的、内容、方法および参加によって生じ得る不利益について説明を行い、彼らから口頭および書面にて同意を得た上で実験を実施した。本研究は、順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科等倫理委員会の承認を受けた (第 26-106 号)。

### 1. 2 実験デザイン

被験者らは、肺機能検査の測定に慣れるために、本実験前に研究室を訪れて練習を行った。また、予め最大酸素摂取量およびそれが得られる負荷を算出するために、最大漸増負荷テストを実施した。すべての被験者は、呼吸筋トレーナーを用いて呼吸筋トレーニングを実施した。トレーニング期間の前後には、漸増負荷テストによって予め算出した最大酸素摂取量に基づき、固定負荷テストを実施した。負荷テスト中には、NIRS を用いて、疲労困憊に至るまでの肋間筋および外側広筋における酸素動態を測定した。同時に、呼気からは、呼気ガス分析器を用いて換気量や呼吸数などの換気に関するパラメータを測定した。さらには、ボルグスケール (RPE) を用いて呼吸および下肢それぞれにおける疲労感を評価した。また、トレーニ

ング期間中には、スパイロメータを用いて肺機能および呼吸筋力を測定した。

### 1. 3 自転車負荷テスト

漸増負荷テストは、酸素摂取量と負荷の直線関係から呼吸筋トレーニングによる運動パフォーマンス評価のための固定負荷テストに用いる負荷を決定するためと、最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_{2max}$ ) を測定するために、呼吸筋トレーニングを開始する期間前に実施させた。被験者は、サドル上で3分間の安静を保ち、空漕ぎで60回転/分のペダリングを3分間行った後、1分毎に0.5kpずつ負荷を漸増させて疲労困憊に至るまで運動した。別日には、呼吸筋トレーニングによる運動パフォーマンスを評価するために、予め漸増負荷テストによって算出した酸素摂取量と負荷の直線関係をもとに、90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度に設定した固定負荷テストを実施した。被験者は、漸増負荷テストと同様にサドル上で3分間の安静を保ち、空漕ぎで60回転/分のペダリングを3分間行った後、50% $\dot{V}O_{2max}$ 強度で5分間のペダリングを行い、それに続けて90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度で疲労困憊に至るまで運動した。なお、本研究では90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度に設定した時点から疲労困憊に至るまでの運動時間 (time to the limit of exercise tolerance: Tlim) を運動パフォーマンスの指標とした。負荷テスト中、呼吸からはエアロモニタ (AE-300S, ミナト医科学, 日本) を用いて、酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$ )、二酸化炭素排出量 ( $\dot{V}CO_2$ )、分時換気量 ( $\dot{V}_E$ )、酸素換気当量 ( $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ )、一回換気量 ( $T_V$ )、呼吸数 (RR) および呼吸交換比 (R) が測定された。また、心電図計 (DS-7210, フクダ電子, 日本) を用いて、心電図 (ECG) がモニターされた。

### 1. 4 肺機能および呼吸筋力

肺機能検査は、スパイロメータ (Autospiro AS-507, ミナト医科学, 日本) を用いて、吸気筋ト

レーニングを開始する前から6週間のトレーニング期間が終わるまで2週間毎に実施し、肺活量 (vital capacity: VC)、努力性肺活量 (forced vital capacity: FVC)、一秒量 (forced expiratory volume 1-second: FEV 1.0)、一秒率 (FEV 1.0/FVC ratio: FEV 1.0%) および最大換気量 (maximal voluntary ventilation: MVV) を測定した。また、最大吸気圧 (maximal inspiratory pressure: MIP) および最大呼気圧 (maximal expiratory pressure: MEP) は、肺機能の項目と同様に2週間毎に測定され、MIPの値はその都度個々に適した吸気筋トレーニングの負荷設定のためにも用いられた。なお、これらの測定値は、3回ずつ実施したときの最大値を採用した。

### 1. 5 肋間筋および外側広筋における酸素動態

自転車固定負荷テスト中、携帯型 NIRS (Pocket NIRS Duo, ダイナセンス, 日本) を用いて、左の肋間筋および外側広筋における酸素動態を酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン (oxyHb/Mb)、脱酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン (deoxyHb/Mb) および総ヘモグロビン・ミオグロビン (totalHb/Mb) の変化量として任意の単位 (AU) で測定した。本器は、本体と2つのプローブから構成されており、プローブの送光部と受光部間の距離は3cmであった。この距離における測定範囲は、~1.5cm程度であるとされている<sup>5)</sup>。プローブは、専用の両面シールで皮膚に固定され、その上から外乱光の影響を防ぐためにゴム素材の板を貼りつける工夫を施し、さらに動作範囲および血流の制限を生じさせることなく、それらがずれないように伸縮テーピング (マルチポア, 住友3M, 日本) が貼られた。外側広筋における測定部位は、膝蓋骨上縁から大腿骨上15cm、さらにそこから外側へ3-5cmとし、肋間筋における測定部位は先行研究<sup>6,7)</sup>に従って第7肋間とした。これらの箇所は、画像診断装置 (SSD-900, 日立

アロカメディカル, 日本) を用いて, 筋腹の隆起を確認した上で決定され, 同時に皮下脂肪厚が測定された. なお, NIRS シグナルから直接得られる値は, 皮下脂肪厚の影響を受けることから, そのままでは筋酸素化レベルを被験者間で比較することができない. そのため, 我々は, Niwayama et al.<sup>8)</sup> の式を用いて彼らの皮下脂肪厚分を補正することで, 筋酸素化レベルを定量化した. 被験者は, NIRS のプローブを左の肋間筋および外側広筋に張り付けられた状態で, 仰臥位による安静を 30 分程度保った. NIRS シグナルは, 安静の間, 定常状態となるまで PC を通してモニタリングされ, このときの値を基準とした. なお, NIRS シグナルのサンプリングは, 10Hz で行った.

### 1. 6 呼吸筋トレーニング

呼吸筋トレーニングには, 圧力閾値による呼吸筋トレーナー (POWERbreathe Plus; International Ltd., UK) を用いた. 被験者は, 効果が認められている負荷 (MIP の 50% 強度) でトレーニングを実施する群 ([inspiratory muscle training : IMT]) と, 効果が得られないほどの負荷 (MIP の 15% 強度) でトレーニングを実施する群 (SHAM 群) に最大酸素摂取量のレベルを考慮した上で分けられ<sup>2)</sup>, 1 日 30 回 × 2 セット, 週に 5 日以上呼吸筋トレーニングを 6 週間続けて実施した.

## 1. 7 統計処理

すべての統計処理には, 統計解析ソフトウェア SPSS (Ver.17.0; SPSS Inc, USA) を用い, データは, 平均値 ± 標準偏差で示した. 群間におけるベースラインの値は, 対応のない t 検定を用いて比較検定した. また, 吸気筋トレーニング前後および期間中による群間の比較には, 二元配置の分散分析を用い, これらの結果に有意差が認められた場合には, Bonferroni の多重比較により検定した. なお, RPE, NIRS および換気パラメータは, 疲労困憊時において比較検定した. 有意水準は 5% 未満とした.

## 2. 研究結果

### 2. 1 肺機能および呼吸筋力の変化

吸気筋トレーニング介入による両群それぞれの肺機能および呼吸筋力を表 2 に示した. 吸気筋トレーニング介入前の肺機能および呼吸筋力における値には, 群間において有意な違いは認められなかった. また, 測定した肺機能の項目 (VC, FVC, FEV 1.0, FEV 1.0%, MVV) のうち, VC, FEV 1.0% および MVV においては, 両群とも吸気筋トレーニング介入による有意な変化は認められなかった. FVC および FEV 1.0 は, 吸気筋トレーニング介入前と比較して有意な低下が認められた. MEP は, 吸気筋トレーニング介入前と比較して, 有意な増加が認められた. さらに,

表 2 Changes in pulmonary function and respiratory muscle strength

	IMT group (n = 8)				SHAM group (n = 8)				Two-way ANOVA (p-value)		
	0wk	2wk	4wk	6wk	0wk	2wk	4wk	6wk	Time	Group	Interaction
VC, L	4.80±0.72	4.72±0.65	4.72±0.69	4.71±0.70	4.74±0.54	4.69±0.51	4.70±0.61	4.64±0.63	n.s.	n.s.	n.s.
FVC, L	4.65±0.58	4.53±0.58	4.42±0.59	4.46±0.67	4.59±0.54	4.43±0.50	4.38±0.54	4.43±0.63	<0.01	n.s.	n.s.
FEV1.0, L	4.13±0.46	4.06±0.54	4.00±0.48	3.96±0.61	4.11±0.54	3.95±0.54	3.93±0.55	3.94±0.62	<0.01	n.s.	n.s.
FEV1.0%, %	89.74±6.76	89.91±8.55	91.25±9.08	89.28±9.58	90.96±4.64	89.06±5.20	89.74±4.72	89.14±5.89	n.s.	n.s.	n.s.
MVV, L	167.8±22.4	172.3±24.8	170.2±24.2	170.2±27.3	167.9±25.2	171.1±31.5	164.4±31.8	171.6±24.0	n.s.	n.s.	n.s.
MIP, cmH <sub>2</sub> O	142.7±8.5	164.0±19.9 <sup>†</sup>	171.3±15.9 <sup>††</sup>	181.9±18.1 <sup>†††</sup>	144.2±24.1	143.4±17.6	142.7±18.4	142.0±15.7	<0.05	<0.01	<0.05
MEP, cmH <sub>2</sub> O	158.5±37.6	156.2±29.0	159.0±25.5	166.1±25.1	144.6±22.8	160.6±25.7	164.1±27.3	171.6±24.0	<0.05	n.s.	n.s.

Values are mean ± SD.

<sup>†</sup> Significant difference between IMT group and SHAM group (p < 0.05). <sup>††</sup> Significant difference between IMT group and SHAM group (p < 0.01). <sup>†††</sup> Significant difference from before training (p < 0.01) VC, vital capacity; FVC, forced vital capacity; FEV 1.0, forced expiratory volume 1-second; FEV 1.0%, FEV 1.0/FVC; MVV, maximal voluntary ventilation; MIP, maximal inspiratory pressure; MEP, maximal expiratory pressure.

MIP においては、呼吸筋トレーニング介入前と比較して、IMT 群にのみ吸気筋トレーニング介入後に有意な増加が認められた。

## 2. 2 自転車固定負荷テストにおける運動パフォーマンスの変化

吸気筋トレーニング介入前の Tlim には、群間において有意な違いは認められなかった。6 週間の吸気筋トレーニング介入後、SHAM 群においては Tlim に変化が認められなかった一方で、IMT 群において Tlim が有意に延長することが認められた (図 1)。

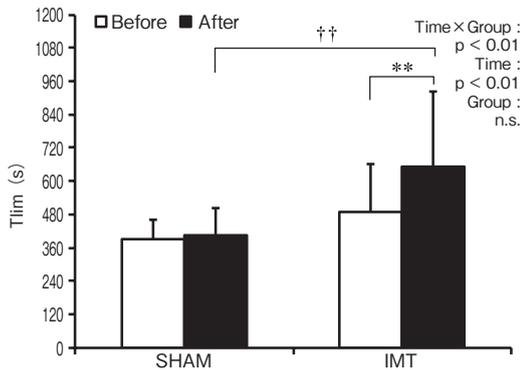


図 1 Changes in time to the limit of exercise tolerance (Tlim) before and after inspiratory muscle training.

Data are presented as the mean ± SD.

\*\*Significant difference from before the training (p < 0.01).

††Significant difference between groups after training (p < 0.01).

## 2. 3 吸気筋トレーニング前後における自転車固定負荷テスト中の各パラメータの変化

疲労困憊時の呼吸および下肢における RPE は、吸気筋トレーニング介入前で IMT 群が 19 ± 2 および 20 ± 1, SHAM 群が 19 ± 2 および 20 ± 1 であり、介入後で IMT 群が 19 ± 2 および 20 ± 0, SHAM 群が 19 ± 1 および 20 ± 1 であった。吸気筋トレーニングによる変化は、疲労困憊時点の RPE において両群ともに認められなかった。また、疲労困憊時の肋間筋および外側広筋における酸素動態 (oxyHb/Mb, deoxyHb/Mb, totalHb/Mb), それらに加えて換気パラメータ ( $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}_E$ ,  $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ ,  $T_v$ , RR, R) においても、吸気筋トレーニングによる変化は両群ともに認められなかった (表 3)。

## 3. 考察

本研究の主な知見は、90% $\dot{V}O_{2max}$  強度で固定した自転車運動による Tlim が、効果的な吸気筋トレーニングを実施した IMT 群のみで有意に延長したにもかかわらず、疲労困憊時の肋間筋および外側広筋における酸素動態には有意な変化を示さなかったことである。

これまでには、85% $\dot{V}O_{2max}$  強度以上の運動において呼吸筋疲労が生じることが示唆されてい

表 3 Changes in NIRS and pulmonary gas exchange parameters at exhaustion during constant load cycling exercise at 90% $\dot{V}O_{2max}$

	IMT group (n = 8)		SHAM group (n = 8)	
	Before (0wk)	After (6wk)	Before (0wk)	After (6wk)
$\dot{V}O_2$ , mL·kg <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup>	49.3 ± 3.3	48.7 ± 4.5	47.9 ± 6.5	49.1 ± 6.6
$\dot{V}_E$ , L	131.6 ± 23.7	131.4 ± 25.6	125.6 ± 25.3	136.0 ± 30.6
$\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ , L	41.1 ± 5.5	42.3 ± 4.6	39.3 ± 4.4	41.6 ± 8.2
Tidal volume, mL	2,108 ± 154	2,106 ± 186	2,089 ± 297	2,144 ± 396
Respiratory rate, breaths/min	62.8 ± 11.5	62.2 ± 9.5	60.1 ± 5.5	64.2 ± 11.8
Respiratory quotient	1.12 ± 0.05	1.11 ± 0.06	1.11 ± 0.07	1.14 ± 0.09
Δ oxyHb/Mb of intercostal, AU	-0.23 ± 0.12	-0.17 ± 0.10	-0.19 ± 0.06	-0.18 ± 0.08
Δ deoxyHb/Mb of intercostal, AU	0.44 ± 0.18	0.36 ± 0.15	0.30 ± 0.09	0.34 ± 0.15
Δ totalHb/Mb of intercostal, AU	0.21 ± 0.19	0.18 ± 0.14	0.11 ± 0.12	0.17 ± 0.14
Δ oxyHb/Mb of vastus lateralis, AU	-0.23 ± 0.19	-0.24 ± 0.13	-0.24 ± 0.09	-0.14 ± 0.09
Δ deoxyHb/Mb of vastus lateralis, AU	0.49 ± 0.17	0.49 ± 0.17	0.49 ± 0.11	0.46 ± 0.11
Δ totalHb/Mb of vastus lateralis, AU	0.26 ± 0.08	0.25 ± 0.10	0.25 ± 0.10	0.32 ± 0.09

Values are mean ± SD.

Abbreviation: oxyHb/Mb, oxygenated hemoglobin and myoglobin; deoxyHb/Mb, deoxygenated hemoglobin and myoglobin; total Hb/Mb, the sum of oxyHb/Mb and deoxyHb/Mb.

る<sup>1)</sup>。そこで、本研究ではまず、吸気筋トレーニングの効果を確認するために90% $\dot{V}O_{2max}$ 強度での固定負荷による自転車運動によって運動パフォーマンスを評価した。その結果、IMT群においてのみ運動パフォーマンスに有意な向上が認められた。これは、MIPの増加が示唆するように吸気筋トレーニングによって横隔膜が肥大し、呼吸筋疲労が遅延したことによる可能性が考えられる<sup>9)</sup>。呼吸筋の疲労は、筋交感神経活動 (muscle sympathetic nerve activity: MSNA) を亢進させ、それによって生じる血管収縮により、下肢への酸素供給量の低下を引き起こすことが報告されている<sup>10, 11)</sup>。また、一過性に呼吸に対して負荷抵抗を加えて運動させたとき、下肢の血流量が低下し、運動パフォーマンスが制限されることも観察されている<sup>12, 13)</sup>。実際、呼吸筋トレーニングによってMSNAが軽減したことが報告されている<sup>14)</sup>ことから、呼吸筋トレーニングが下肢骨格筋への酸素供給量を確保しやすい状態を可能にしていることが予想される。しかしながら、NIRSを用いて観察した本研究からは、運動パフォーマンスが有意に向上したにもかかわらず、外側広筋における酸素動態の有意な変化は認められなかった。また、それだけでなく、これまでに呼吸筋トレーニングによる改善が報告されている呼吸に対する各生理パラメータおよびRPE<sup>15)</sup>においても吸気筋トレーニング介入後の有意な変化は認められなかった。これらの結果は、吸気筋トレーニングによる運動パフォーマンスの向上には他の因子が大きく寄与する可能性を示唆している。Kowalchukら<sup>16)</sup>は、コントロール条件とは別に呼吸抵抗を加えた条件を設定した自転車固定負荷テストを実施させ、そのときの呼気および外側広筋における酸素動態応答を一過性にNIRSを用いてモニタリングしたが、呼吸へ負荷を加えた場合でも酸素動態に有意な変化は認められなかったことから、活動筋よりも他の部位から血流が再配分された可能性

を示唆した。呼吸筋のトレーニング適応時の応答を観察した本研究においても、それを支持する結果を得た。しかしながら、我々が用いた方法では、酸素供給/消費のバランスを測定できるものの、局所的かつ絶対的な酸素供給量および酸素消費量を測定することができないため、今後はいくつかの部位で絶対的な評価と合わせて検証することが必要であろう。

加えて、本研究成果をまとめるにあたっては、いくつかのリミテーションがあった。我々は、呼吸筋トレーニングによる運動パフォーマンスの向上が、呼吸筋および下肢骨格筋における酸素供給/消費連関の改善によって引き起こされているかどうかを明らかにするために研究を実施した。また、呼吸筋トレーニングの効果に $\dot{V}O_{2max}$ が影響する<sup>2)</sup>ことから、それが影響しないよう被験者をカウンターバランスで各群に振り分けるよう配慮した。しかしながら、 $\dot{V}O_{2max}$ が同程度でも、対象とした被験者における元々の運動パフォーマンスレベルに大きな差があった。そこで今回、本研究成果をまとめるにあたっては、運動中の生理パラメータを観察するポイントとして、疲労困憊時に狙いを定めて検討した。そのため、疲労困憊に至るまでの時点で生理応答が変化しているかどうかについては現時点では不明であり、 $T_{lim}$ が延長していることからすると、疲労困憊に至るまでの時点で変化が生じている可能性があることは言及しておくべきポイントであろう。したがって、観察するポイントを変えた分析を行う必要性がまだ残されており、これについては今後検討していく予定である。

#### 4. 結 論

呼吸筋トレーニングによる運動パフォーマンスの向上には、呼吸筋および下肢骨格筋における酸素供給/消費連関の改善よりもその他の因子が関与している可能性を示唆する。

## 謝 辞

本研究に対して助成を賜りました，公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- 1) Dempsey J.A., Romer L., Rodman J., et al., Consequences of exercise-induced respiratory muscle work. *Respir. physiol. neurobiol.*, **151** (2-3) :242-50(2006)
- 2) Illi S.K., Held U., Frank I., et al., Effect of respiratory muscle training on exercise performance in healthy individuals: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med.*, **42**(8) :707-24(2012)
- 3) McConnell A.K., Romer L.M., Respiratory muscle training in healthy humans: resolving the controversy. *Int. J. Sports Med.*, **25**(4) :284-93(2004)
- 4) Costes F., Prieur F., Feasson L., et al., Influence of training on NIRS muscle oxygen saturation during submaximal exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **33**(9) :1484-9(2001)
- 5) Chance B., Dait M.T., Zhang C., et al., Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers. *Am. J. Physiol.*, **262**(3 Pt 1) :C766-75(1992)
- 6) Vogiatzis I., Athanasopoulos D., Habazettl H., et al., Intercostal muscle blood flow limitation in athletes during maximal exercise. *J. physiol.*, **587**(Pt 14) :3665-77(2009)
- 7) Guenette J.A., Vogiatzis I., Zakyntinos S., et al., Human respiratory muscle blood flow measured by near-infrared spectroscopy and indocyanine green. *J. Appl. Physiol.*(1985), **104**(4) :1202-10(2008)
- 8) Niwayama M., Lin L., Shao J., et al., Quantitative measurement of muscle hemoglobin oxygenation using near-infrared spectroscopy with correction for the influence of a subcutaneous fat layer. *Rev. Sci. Instr.*, **71**:4571-75(2000)
- 9) Enright S.J., Unnithan V.B., Heward C., et al., Effect of high-intensity inspiratory muscle training on lung volumes, diaphragm thickness, and exercise capacity in subjects who are healthy. *Phys. Ther.*, **86**(3) :345-54(2006)
- 10) St Croix C.M., Morgan B.J., Wetter T.J., et al., Fatiguing inspiratory muscle work causes reflex sympathetic activation in humans. *J. physiol.*, **529** (Pt 2) :493-504(2000)
- 11) Sheel A.W., Derchak P.A., Morgan B.J., et al., Fatiguing inspiratory muscle work causes reflex reduction in resting leg blood flow in humans. *J. physiol.*, **537** (Pt 1) :277-89(2001)
- 12) Harms C.A., Babcock M.A., McClaran S.R., et al., Respiratory muscle work compromises leg blood flow during maximal exercise. *J. Appl. Physiol.* (1985), **82**(5) :1573-83(1997)
- 13) Harms C.A., Wetter T.J., St Croix C.M., et al., Effects of respiratory muscle work on exercise performance. *J. Appl. Physiol.*(1985), **89**(1) :131-8(2000)
- 14) Mello P.R., Guerra G.M., Borile S., et al., Inspiratory muscle training reduces sympathetic nervous activity and improves inspiratory muscle weakness and quality of life in patients with chronic heart failure: a clinical trial. *J. Cardiopulm. Rehabil. prev.*, **32**(5) :255-61(2012)
- 15) Gething A.D., Williams M., Davies B., Inspiratory resistive loading improves cycling capacity: a placebo controlled trial. *Br. J. Sports Med.*, **38**(6) :730-6(2004)
- 16) Kowalchuk J.M., Rossiter H.B., Ward S.A., et al. The effect of resistive breathing on leg muscle oxygenation using near-infrared spectroscopy during exercise in men. *Exp. Physiol.*, **87**(5) :601-11(2002)

# 脳活動の自己制御による運動学習の強化 –リアルタイム機能的MRI・脳波同時計測ニューロフィードバック (NF) を用いて–

米国国立神経疾患・  
脳卒中研究所 設 楽 仁  
群馬大学大学院

## **Motor Learning Enhancement by Self-control of Brain Activity – Simultaneous Real-time Functional MRI/EEG Neurofeedback –**

by

Hitoshi Shitara

*National Institutes of Health, National Institute of Neurological Disorders  
and Stroke, Human Motor Control Section*

*Gunma University Graduate School of Medicine, Department of Orthopaedic Surgery*

### ABSTRACT

It is unclear what brain status is appropriate for motor learning. Moreover, the brain activity should be extracted from the brain activity during preparation to reveal the appropriate brain status because the brain activity related to the motor execution contaminates the brain activity related to preparation and planning during motor learning.

The purpose of this study is to reveal the correlation between the good performance of the motor learning task and brain activity using EEG or fMRI. Nine and five right-handed healthy volunteers participated in the fMRI and EEG study, respectively. They were asked to control the cursor using a joystick with non-dominant hand and follow the random moving target. Brain activity was recorded by fMRI or EEG. There was a significant correlation between the alpha and beta power in the left visual cortex during preparation and the task performance in the fMRI. While, there was a significant

correlation between the alpha and beta power in the left inferior frontal gyrus and the alpha power in the left premotor cortex, and the task performance in the EEG result. These results showed that low activity in the left visual cortex, high activity in the left inferior frontal gyrus and the left premotor cortex cause the good performance of this visuomotor target following task.

## 要 旨

運動学習促進のために、どのような脳活動が最適かは不明である。また、運動学習中の脳活動には運動の準備、計画以外に、実行に関わる活動が混入してしまうため、運動学習に最適な脳活動を検出するためには、運動学習直前の準備中の脳活動から、最適な活動を抽出する必要がある。本研究では、運動学習の良好な成績に相関する脳活動を機能的MRI (fMRI) および脳波 (EEG) の計測により明らかにすることを目的とした。右利き健常被験者、fMRI 実験9名およびEEG 実験5名を対象にして、ランダムに動くターゲットを非利き手で操作するカーソルで追跡する運動学習課題を行い、fMRI もしくはEEG で脳活動を計測した。fMRI の結果より、左視覚野の活動が低いこと、EEG の結果より、左下前頭回、運動前野の活動が高いことが、その後の運動成績が良いことが明らかになった。

## 1. 背 景

2020年東京オリンピック・パラリンピック開催決定によりスポーツ活動に関する注目は益々高まりつつある。競技スポーツのみならず、超高齢化社会を迎えた本邦において、スポーツは健康寿命の向上策の一つとしても重要な面を担う。

スポーツ活動を含む日常生活での運動機能の向上や維持には、一般的に適切な頻度・負荷の運動がすすめられる。しかしながら、最近の研究により、外傷や加齢に伴い、筋骨格系の低下のみなら

ず、運動の計画、実行の役割を担う中枢神経系の機能に変化していることが、明らかになってきた<sup>1-3)</sup>。そのため、運動などによる筋骨格系(末梢機能)のみへのアプローチでは、運動器全体の機能向上には不十分である。

非侵襲的に中枢神経機能を修飾し、運動機能を改善する手法として、経頭蓋磁気刺激や経頭蓋直流電気刺激などが知られている。これらの手法により、一時的な筋力の向上、運動課題の成績向上などが報告されている<sup>4,5)</sup>。これらの手法は、外的な刺激によるもので、効果持続時間が一時的である。一方、内的に中枢神経機能を修飾する方法として、脳波やリアルタイム機能的MRI (rtfMRI) を用いたニューロフィードバック法 (NF) がある。NFは被験者自身の脳活動をリアルタイムにフィードバックすることにより、被験者は、自分自身の脳活動を認識し、その活動レベルを目的とする脳活動へ自己制御できるようにするトレーニングである。習得には時間がかかるが、一度習得すると効果の持続効果が長いと言われている。NFは疼痛軽減、気分障害の改善などに応用されつつある<sup>6-9)</sup>。しかしながら、運動学習促進のために、どのような脳活動が最適かは不明のままである。また、運動学習中の脳活動には運動の準備、計画以外に、実行に関わる活動が混入してしまうため、運動学習に最適な脳活動を検出するためには、運動学習直前の準備中の脳活動から、最適な活動を抽出する必要がある。

本研究の目的は、将来NFを用いた運動学習の促進に使用するための、NFの情報源、つま

り運動学習の促進に最適な脳活動を機能的MRI (fMRI) および脳波 (EEG) の計測により明らかにすることである。

## 2. 研究方法・実験方法・調査方法

### 2. 1 対象

精神・神経疾患のない右利き健常者を対象に、fMRI 実験は9名 (男性5名, 女性4名, 平均29歳), EEG 実験は5名 (男性3名, 女性2名, 平均30歳) を対象とした。名がfMRI, 名がEEGの実験に参加した。

本研究の被験者には、米国衛生研究所神経疾患・脳卒中研究所の倫理委員会で承認を得たプロトコルを口頭および文書で十分に説明して、研究参加の同意を得ている。

### 2. 2 fMRI 撮像条件

3テスラMRI装置 (GE Healthcare, Discovery MR750) および32ch 頭部コイルを用い、T2\*-weighted multi-echo, TE = 15.5 ms, 3.5x3.5x3.5-mm<sup>3</sup> voxel の条件で全脳を撮像した。

### 2. 3 脳波

脳波信号はMRI対応の脳波計と32chキャップ (Brain Products GmbH, Gilching, Germany) を用い、フィルターを使用せず、5000Hzのサンプリング周波数で記録した。

### 2. 4 運動学習課題 (ブロックデザイン)

非利き手 (左手) にてMRI対応ジョイスティックを用い、操作するカーソルで、ランダムに動く

ターゲットを追跡する課題を行った<sup>10)</sup> (図1A)。1セッションあたり、10トライアルを含む課題を、3回繰り返した (図1B)。

### 2. 5 運動課題の評価

成績評価には各トライアルあたりのターゲットとカーソルの平均距離を用いた。つまり、平均距離が長い方が、成績が悪く、平均距離が短い方が成績が良いことを意味する。学習効果の判定では、1回目のセッションをベースラインとして、2, 3セッションの変化を検定した。検定には一元配置分散分析 (ANOVA) を用い、P<0.05を有意差ありとした。

### 2. 6 fMRI データ解析

統計画像解析パッケージであるAFNI (Cox, 1996; <http://afni.nimh.nih.gov/afni>) を用い、Linux上で解析を行った。fMRIデータは、slice acquisition timing 補正, アライメント補正, 空間的標準化,

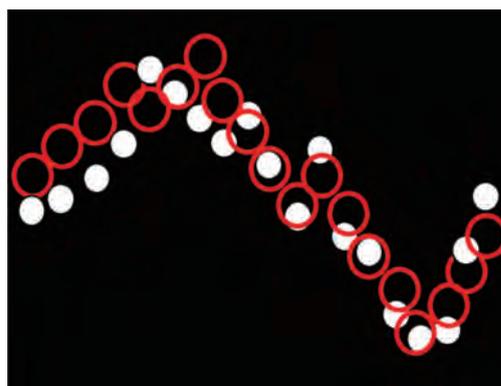


図1A 運動学習課題

ランダムに動くターゲットを非利き手の左手で操作されるカーソルで追跡する課題。赤丸：ターゲット、白丸：被験者が操作するターゲット

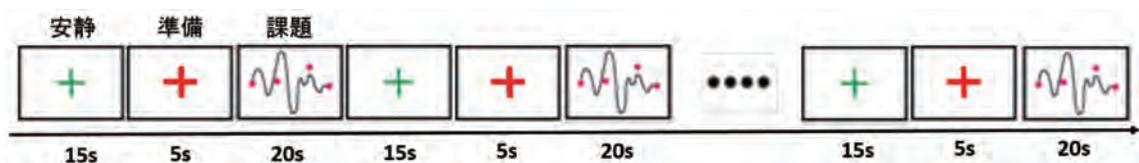


図1B ブロックデザイン

1セッションあたり、安静、準備、課題のセットを10トライアル繰り返す。緑の十字：安静、赤の十字：準備

平滑化の標準的な前処理を行った。個人レベルの解析では安静時と運動準備中の活動の差を比較した。その後、運動課題の成績と運動準備中の脳活動の相関解析を行った（各トライアルの成績と脳活動の相関）。個人解析、集団解析ともに uncorrected  $P < 0.005$  を有意差ありとした。

## 2. 7 EEG データ解析

EEG 解析ソフト Brain Vision Analyzer 2<sup>®</sup> を用い、250Hz にダウンサンプリングした後、0.5 から 50Hz のバンドパスフィルターを用いた。各運動課題直前の 5 秒間（運動学習の準備に相当する）をセグメンテーションし、整流化し、 $\theta$  (4-8Hz)、 $\alpha$  (8-12Hz)、 $\beta$  波帯 (12-40Hz) の各周波数帯で積分した。安静時の各周波数帯の積分値をベースラインとし、準備中の積分値から差分し、標準化を行った。

## 2. 8 fMRI および EEG 信号と課題成績との相関

fMRI 解析にて、運動課題の成績と運動準備中の脳活動の相関が、有意になった領域を関心領域とし、T 値を抽出し、標準化した運動成績と相関解析を行った（各セッションの成績と脳活動の相関）。また、EEG 信号は標準化した各周波数帯の積分値と標準化した運動成績と相関解析を行った（各トライアルおよび各セッションの成績と脳活動の相関）。解析には SPSS22<sup>®</sup> を用い、 $P < 0.05$  を有意差ありとした。

## 3. 結果

### 3. 1 運動学習課題

fMRI および EEG の各群において、セッション間に有意な運動学習効果を認めた（各群 ANOVA  $P < 0.00001$  (図 2A,B)。

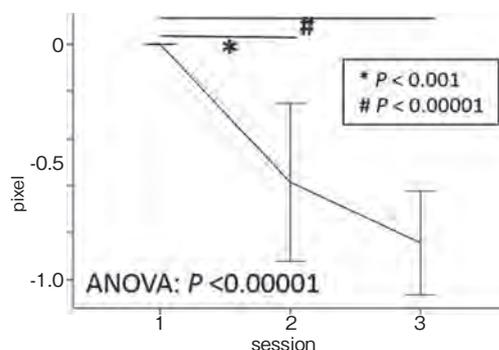


図 2A 運動学習効果 (fMRI 群)

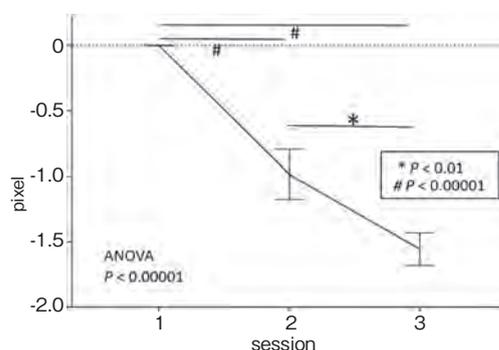


図 2B 運動学習効果 (EEG 群)

### 3. 2 運動準備中の fMRI

運動準備中の脳活動は、左小脳に負の活動を認めた。(図 3A) また、各トライアルの運動課題の成績と運動準備中の脳活動では、両側の視覚野および右小脳に有意な相関を認めた (図 3B)。

### 3. 3 fMRI 信号と課題成績の相関

左視覚野の活動と各セッションの成績の間に有意な相関を認めた (図 4)。相関係数および P 値はそれぞれ、0.466, 0.014 および 0.387, 0.046 だった。

### 3. 4 EEG 信号と課題成績の相関 (図 5)

各トライアルの運動課題の成績と運動準備中の EEG 信号は有意な相関を認めなかった。また、各セッションの運動課題の成績と運動準備中の

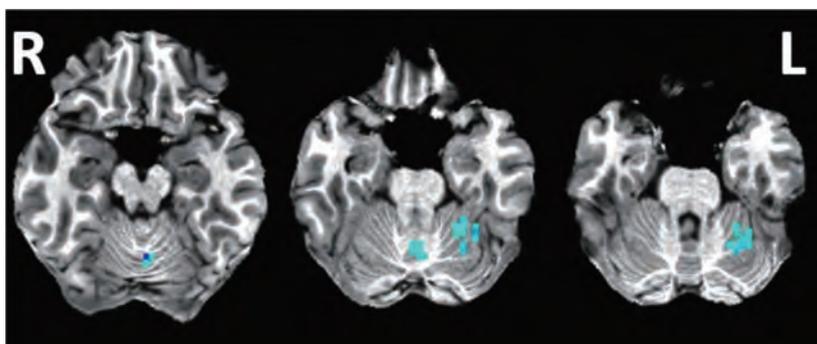


図3A 運動準備中の脳活動 (uncorrected  $P < 0.005$ )

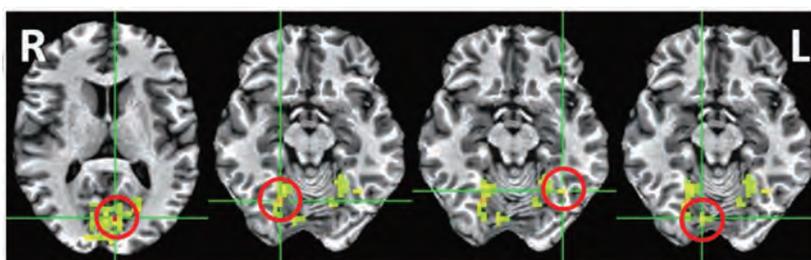


図3B 運動の成績と相関する運動準備中の脳活動 (uncorrected  $P < 0.005$ ) 各トライアルに相関する活動部位  
赤い円：脳活動のクラスター (クラスターサイズ  $> 20$  かつ uncorrected  $P < 0.005$ ) を関心領域として、T 値を抽出。

左視覚野 1

左視覚野 2

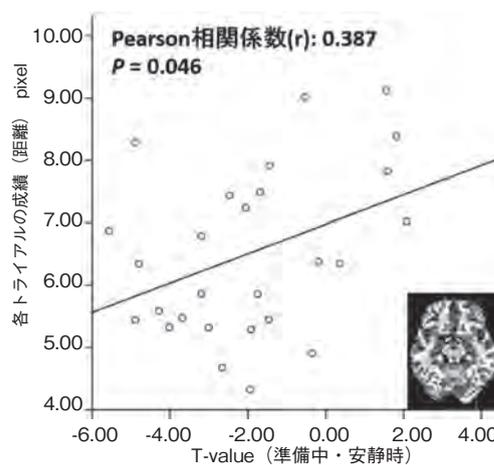
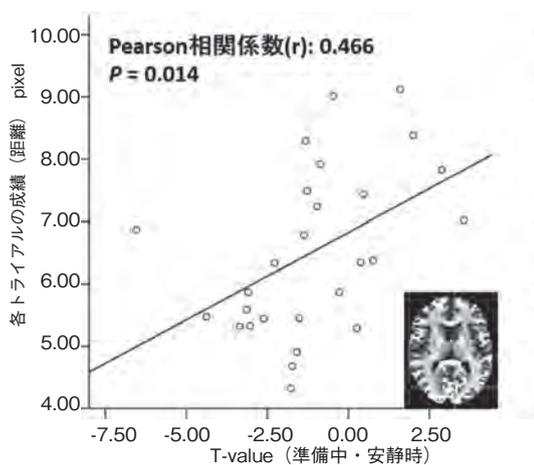


図4 運動準備中のfMRI信号と運動課題の成績 (各セッション平均の比較)

EEG 信号では、 $\alpha$  波帯で F7 (相関係数  $r = -0.662$ ,  $P = 0.01$ ), FC5 ( $r = -0.548$ ,  $P = 0.03$ ),  $\beta$  波帯で F7 (相関係数  $r = -0.535$ ,  $P = 0.04$ ) の電極において有意な相関を認めた。 $\theta$  波帯では有意な相関を認めなかった。

#### 4. 考 察

運動実行前の準備中の脳活動と、その直後に行われた運動課題の成績の相関を検討した。fMRI では、課題の成績 (ターゲットとカーソルの距

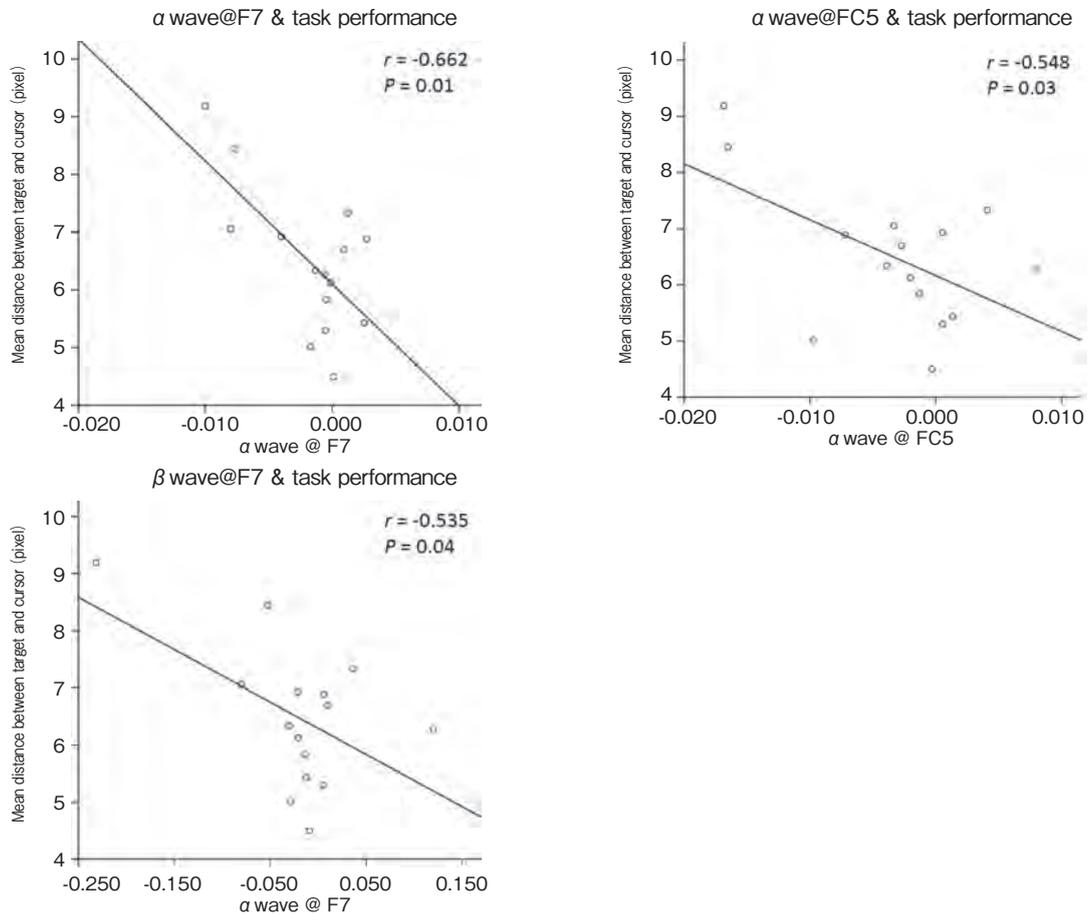


図5 運動準備中のEEG信号と運動課題の成績（各セッション平均の比較）

離)と脳活動(T値)の間に、左視覚野に正の相関、EEGでは視覚野に負の相関を認めた。つまり、fMRIの結果からは、視覚野の活動が低いほど、その後の運動学習課題の成績が良いことを意味した。EEGの結果からは、各セッションの運動課題の成績と運動準備中のEEG信号では、α波帯で左下前頭回に相当するF7、左運動前野に相当するFC5、β波帯で下前頭回に相当するF7において有意な負の相関を認めた。つまり、左下前頭回のα、β波帯の活動が高いほど、その後の運動学習課題の成績が良いことが明らかになった。

#### 4.1 運動準備中の脳活動

Nambuらは右手のシークエンスタッピング課

題を施行し、その準備中の脳活動が両側一次運動野、一次体性感覚野、運動前野、補足運動野、頭頂葉後部、視覚野、小脳に有意な活動を認めたと報告している<sup>11)</sup>。本先行研究では、あらかじめトレーニングを受けた被験者を対象とし、我々と異なるシークエンスタッピング課題を行っているため、運動準備中に、その後に行う運動の想像を行っていた可能性が示唆される。これらの活動は、先行研究の運動想像による脳活動と一致している<sup>12,13)</sup>。本研究ではあらかじめトレーニングを受けておらず、非利き手を用いての新規の運動学習であり、運動の種類もターゲット追跡課題と、全く異なるため、運動想像を行うことは難しく、サンプルサイズも少ないため、結果が異なった可能

性が示唆された。

#### 4. 2 fMRI 信号と課題成績の相関

各トライアルにおける運動成績と運動準備中の脳活動の相関では、両側の視覚野および右小脳の活動が低いほど、その後の運動学習課題の成績が良かった。また、各セッションの平均の相関では、左視覚野の活動が低いほど、その後の運動学習課題の成績が良かった。今回の結果からは、視覚野の活動が低いほど、運動学習に適していた事が示唆された。Strigaro らは経頭蓋磁気刺激を用い、視覚野と運動野の連結に関して調査し、視覚野の刺激によって、運動野の活動が抑制されたと報告しており<sup>14)</sup>、我々の視覚野の活動の低下によって、運動野の活動が高まり、運動の成績を向上させる可能性を支持した。

#### 4. 3 EEG 信号と課題成績の相関

トライアル毎の脳活動からはそれぞれの周波数帯の脳波信号の強さと運動成績の間には有意な相関を認めず、各セッションの運動課題の成績と運動準備中の EEG 信号では、 $\alpha$  波帯で左下前頭回に相当する F7、左運動前野に相当する FC5、 $\beta$  波帯で下前頭回に相当する F7 において有意な負の相関を認めた。つまり、左下前頭回の  $\alpha$ 、 $\beta$  波帯の活動が高いほど、その後の運動学習課題の成績が良いことが明らかになった。これらの領域は運動の準備<sup>15)</sup>、運動の予<sup>16)</sup>、視覚運動における注意<sup>17)</sup>に関連する領域であり、これらの活動が高いほど、運動課題の成績がよいことが示唆される。

#### 4. 4 本研究の限界

本研究は preliminary な実験にとどまっており、サンプルサイズが小さく統計学的検討が十分に行っていない。また、EEG、fMRI は同一被験者に施行されていないため、直接それぞれの結果を比

較するには限界がある。しかしながら、今後の方向性を示唆する結果が得られた。今後、サンプルサイズを増やす必要がある。

#### 5. 結 論

健常被験者を対象に、fMRI および EEG にて、運動学習課題を行う上で、最適な脳活動を調査した。

fMRI の結果より、左視覚野の活動が低いこと、EEG の結果より、左下前頭回、運動前野の活動が高いことが、その後の運動成績が良いことが明らかになった。

今後、サンプルサイズを増大し、また、EEG と fMRI の同時計測により、より信頼性の高い結果を明らかにする。

#### 謝 辞

本研究の一部は、日米科学技術協力事業「脳研究」分野共同研究派遣（代表：設楽仁）、石本記念デサントスポーツ科学振興財団研究助成（代表：設楽仁）、明治安田厚生事業団若手研究者のための健康科学研究助成（代表：設楽仁）、日本学術振興会海外特別研究員（NIH）の助成を受けたものである。

#### 文 献

- 1) Shitara H., Shimoyama D., Sasaki T., Hamano N., Ichinose T., Yamamoto A. et al., The Neural Correlates of Shoulder Apprehension: A Functional MRI Study. *PLoS one.*, 10(9) :e0137387. doi:10.1371/journal.pone.0137387 (2015)
- 2) Cunningham G., Zanchi D., Emmert K., Kopel R., D. V.D.V., Ladermann A. et al., Neural Correlates of Clinical Scores in Patients with Anterior Shoulder Apprehension. *Medicine and science in sports and exercise.*, 47(12) :2612-20. doi:10.1249/mss.0000000000000726 (2015)
- 3) Haller S., Cunningham G., Laedermann A., Hofmeister J., Van De Ville D., Lovblad K.O. et

- al., Shoulder apprehension impacts large-scale functional brain networks. *AJNR American journal of neuroradiology.*, **35**(4) :691-7. doi:10.3174/ajnr.A3738(2014)
- 4) Butefisch C.M., Khurana V., Kopylev L., Cohen L.G., Enhancing encoding of a motor memory in the primary motor cortex by cortical stimulation. *J. Neurophysiol.*, **91**(5) :2110-6(2004)
  - 5) Tanaka S., Sandrini M., Cohen L.G., Modulation of motor learning and memory formation by non-invasive cortical stimulation of the primary motor cortex. *Neuropsychol Rehabil.*, **21**(5) :650-75(2011)
  - 6) Chapin H., Bagarinao E., Mackey S., Real-time fMRI applied to pain management. *Neuroscience letters.*, **520**(2) :174-81. doi:10.1016/j.neulet.2012.02.076(2012)
  - 7) Escolano C., Navarro-Gil M., Garcia-Campayo J., Congedo M., De Ridder D., Minguez J., A controlled study on the cognitive effect of alpha neurofeedback training in patients with major depressive disorder. *Frontiers in behavioral neuroscience.*, **8**:296. doi:10.3389/fnbeh.2014.00296(2014)
  - 8) Jensen M.P., Day M.A., Miro J., Neuromodulatory treatments for chronic pain: efficacy and mechanisms. *Nature reviews Neurology.*, **10**(3) :167-78. doi:10.1038/nrneuro.2014.12(2014)
  - 9) Jensen M.P., Sherlin L.H., Askew R.L., Fregni F., Witkop G., Ghanas A. et al., Effects of non-pharmacological pain treatments on brain states. *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology.*, **124**(10) :2016-24. doi:10.1016/j.clinph.2013.04.009(2013)
  - 10) Wadden K., Brown K., Maletsky R., Boyd L.A., Correlations between brain activity and components of motor learning in middle-aged adults: an fMRI study. *Frontiers in human neuroscience.*, **7**:169. doi:10.3389/fnhum.2013.00169(2013)
  - 11) Nambu I., Hagura N., Hirose S., Wada Y., Kawato M., Naito E., Decoding sequential finger movements from preparatory activity in higher-order motor regions: a functional magnetic resonance imaging multi-voxel pattern analysis. *The European journal of neuroscience.*, doi:10.1111/ejn.13063(2015)
  - 12) Hanakawa T., Dimyan M.A., Hallett M., Motor planning, imagery, and execution in the distributed motor network: a time-course study with functional MRI. *Cerebral cortex (New York, NY : 1991)*, **18**(12) :2775-88. doi:10.1093/cercor/bhn036(2008)
  - 13) Hanakawa T., Immisch I., Toma K., Dimyan M.A., Van Gelderen P., Hallett M., Functional properties of brain areas associated with motor execution and imagery. *Journal of neurophysiology.*, **89**(2) :989-1002. doi:10.1152/jn.00132.2002(2003)
  - 14) Strigaro G., Ruge D., Chen J.C., Marshall L., Desikan M., Cantello R. et al., Interaction between visual and motor cortex: a transcranial magnetic stimulation study. *The Journal of physiology.*, **593**(10) :2365-77. doi:10.1113/jp270135(2015)
  - 15) Freund H.J., Premotor area and preparation of movement. *Revue neurologique.*, **146**(10) :543-7(1990)
  - 16) Schubotz R.I., von Cramon D.Y., Functional organization of the lateral premotor cortex: fMRI reveals different regions activated by anticipation of object properties, location and speed. *Brain research Cognitive brain research.*, **11**(1) :97-112(2001)
  - 17) Cheng K., Fujita H., Kanno I., Miura S., Tanaka K., Human cortical regions activated by wide-field visual motion: an H2(15) O PET study. *Journal of neurophysiology.*, **74**(1) :413-27(1995)

## 体脂肪燃焼効果を增強する衣服の開発

信州大学 三野 たまき  
(共同研究者) 金沢大学 森島 美佳

### Development of Clothes to Promote a Body Fat Burning Effect

by

Tamaki Mitsuno  
*Faculty of Education,  
Institute of Education, Shinshu University*

Mika Morishima  
*Faculty of Education,  
Institute of Human and Social Sciences, Kanazawa University*

#### ABSTRACT

**Aim:** Physical exercise is important for limiting fat mass and preventing obesity. During the low temperature phase of the menstrual cycle, in women, aerobic exercise before lunch is effective in helping maintain lipid consumption. This study aimed to clarify the conditions under which body fat is easily consumed during aerobic exercise, which can be easily performed. We also aimed to clarify the effect of supported pants on consumption of body fat.

**Methods:** The subjects were eight young Japanese females aged 20s who were slightly a slender to obese one (BMI: 18.7-24.5). They woke at 06:00 after 7 hours of sleep and took the prescribed diet until 07:30. They then entered a climate-controlled room (24.5°C , 50.0%). Subjects were seated for one hour while wearing a short-sleeved 100% cotton t-shirt and one of the following: 100% polyester running pants

(A), basic pants with 80D yarn (B), 80D yarn pants with a partial modification of pressure with supporting material (C), or 110D yarn pants with the same design as C (D) made from the preliminary experiment. They then engaged in aerobic exercise with loads from 40% to 65% of the maximum heart rate and a total of 30 minutes exercise. Respiratory metabolism and heart rate were measured with a bicycle ergometer. The amount of energy/adipose/carbohydrate was calculated from RQs and oxygen intake.

Results/Findings/Conclusion: Total lipid consumption of aerobic exercise was reduced 12.2–16.1 times larger than control at rest. Body fat was reduced significantly larger (1.3 times) with C compared with A as control. C and D pants, which are partial compression garments, helped to reduce body fat more efficiently than A (non-compression garment) or B (constant compression garment). And if the same exercise intensity, the heart rate was controlled, but oxygen intake increased, it then was thought adipose consumption increased. Our findings show partial compression garments may be most effective in reducing body fat.

## 要 旨

肥満は生活習慣病などの様々な病気を引き起こす要因の一つであり、体脂肪を適切に保ちながら健康的な生活を送るためには、運動習慣を身につけることが重要である。本研究では有酸素運動下においてより脂肪を燃焼させる着圧パンツの開発を目的とした。被験者は20歳代女子8名で、呼吸代謝と心拍数を人工気象室(24.5℃, RH50%)内で測定した。半袖Tシャツに、4種類のパンツ(A:ポリエステル100%の無加圧、B:80Dのナイロンとポリウレタン糸の地編みの着圧ハーフパンツ、C:Bに部分加圧、D:Cと同デザインで110Dの地糸使用)を着用させた。エアロバイクを用いて有酸素運動を30分間与え、得られた呼吸商から消費エネルギー量(kcal/min)、糖質・脂質量(g/min)を求めた。また、静止時を基準にした相対脂質消費量は、A~Dの順に、12.3倍、12.2倍、16.1倍、14.2倍となり、かつAに比べCの消費量は1.3倍有意に多くなった。

## 緒 言

肥満は生活習慣病などの様々な病気を引き起こす要因の一つであり、体脂肪を適切に保ちながら健康的な生活を送るためには、運動習慣を身につけることが重要である。誰もが無理なく実施可能な有酸素運動に着目して、これまでその実施効果について研究してきた。例えば若年成人女性の場合、時刻、月経周期、季節の位相が体脂肪燃焼に関係することがわかった。月経周期の位相では低温期の方が高温期に比べ、有意に体脂肪が燃焼した<sup>1)</sup>。一日の時刻では、朝食2時間後・昼食前・昼食2時間後・夕食前の、4時刻帯において同実験を実施したところ、昼食前の時刻帯で実施した体脂肪燃焼量は他の時刻帯で実施した結果よりも、有意に減少することがわかった<sup>2)</sup>。また、季節による影響では運動実施時刻を規定して調べたところ、脂肪消費量と被験者のBMIとの間には、有意な直線関係があった。すなわち、BMIが21.3以上の人は冬よりも夏に、これ以下の人は夏よりも冬に脂肪が燃えることがわかった<sup>3)</sup>。また、BMI23.5の、冬に脂肪が燃えにくい被験者におい

て、後述の研究計画の基本実験と同一の環境温度・湿度条件で、着衣量のみ半袖、ランニングパンツから長袖、長ズボン、毛糸の帽子、マフラー着用条件に増加させたところ、運動実施中の脂肪燃焼量には有意な差が無かった<sup>1)</sup>。このことから、人体に最も身近な被服環境を温かく変えても、体脂肪はそれ程増えないことがわかった。その後、様々な予備実験を行った結果、BMIが21.3より大きい、冬には脂肪が燃焼しにくい被験者であっても、意図的に圧分布を体部位によって変えた着圧パンツを着用させると、体脂肪燃焼効率が上がることがわかった。そこで本研究では、着圧を強化する部位の妥当性と基本編みの着圧量を変えることを通して、従来着用していたランニングパンツと比較して、脂肪燃焼効率を検討することとした。これにより、より体脂肪を燃焼しやすい着圧パンツを開発することを目的とした。

### 1. 研究方法

被験者は健康で、規則正しい生活をしている、20歳代の成人女子8名であった。彼女らの身体的特徴を表1に示す。彼女らには本学の「ヒトを対象とした研究に関する倫理委員会」の審査を得て研究を実施している（承認番号128号）旨を説明し、実験協力に関して賛同が得られた方だけに協力していただいた。

### 1. 1 基本実験

信州大学人工気象実験システムを用い、環境温度：24.5±0.3℃、相対湿度：50±0.5%、気流：8.0±0.1cm/s、照度：827±27.0lxに設定した人工気象室内に被験者を入室させ、椅座位で1時間安静に過ごさせた。被験者が実験環境に慣れた後、実験衣（半袖Tシャツ：綿100%、ランニングパンツ：ポリエステル100%）に着替えさせた。なお以下の実験着と区別するため、これをパンツA（次項で述べる図2を参照）とする。

予め被験者ごとに設定した、心拍負荷65%（140～150拍/分）を上限とした、自転車エルゴメーター（STB-1400、日本光電）を用いた運動負荷と実施時間の関係を図1に示す。

有酸素運動を4段階の負荷強度（Step1～4）とクーリングダウン（Step1'：心拍負荷40%）をそれぞれ6分間、すなわち30分間実施させた。なお運動負荷前後に、無運動負荷時のコン

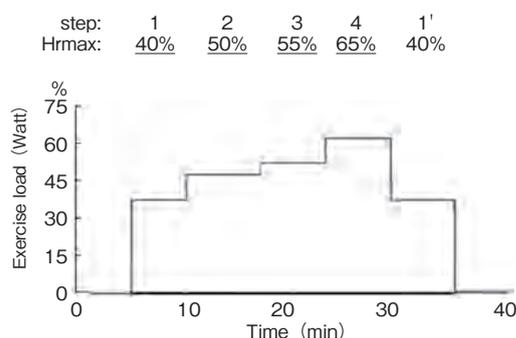


図1 Aerobic exercise loads for the subject

表1 Physical constitution of subjects

Subject	Age (Year)	Height (cm)	Weight (kg)	Girth items						Body fat (%)	BMI (kg/m <sup>2</sup> )
				Waist (cm)	Hip (cm)	Tight (cm)	Upper knee (cm)	Under knee (cm)			
①	20	1.62	64.2	76.9	101.5	57.6	41.4	34.1	32.6	24.5	
②	22	1.63	62.6	74.7	100.6	59.8	43.5	33.1	33.1	23.6	
③	22	1.52	53.5	66.9	96.7	51.4	39.9	33.7	29.8	23.2	
④	21	1.50	50.9	69.7	94.5	53.8	41.1	33	31.9	22.6	
⑤	21	1.54	52.6	69.2	95.8	52.9	41.3	33.9	28.8	22.2	
⑥	22	1.50	49.9	69.6	96.3	55.1	39.5	31.9	33.7	22.2	
⑦	21	1.62	49.3	65.2	88.4	47.2	36.6	31.6	24.2	18.8	
⑧	22	1.63	49.6	63.0	89.1	50.5	39.0	31.9	15.8	18.7	
Average	21.4	1.60	54.1	69.4	95.3	53.5	40.3	32.9	28.7	22.0	

トロールを5分間設定した。この40分間の呼吸代謝は、呼吸代謝装置（Vmax スペクトラ 29C, 日本光電, 承認 21500BZY00206000）を用いて、B×B法によって測定した。運度実施前後には、婦人電子体温計（MC-172L, オムロン, 認証 219AGBZX00041000）を用いて口腔温を、また、発汗量と不感蒸散量を算出するための着衣量と体重は、人体天秤（ザルトリウス）を用いて測定した。なお運動開始時刻を前述の、一日の内で最も脂肪の燃えやすい11時30分<sup>2)</sup>に設定した。

### 1. 2 比較実験

上記実験条件の内下衣を、以下に述べる3種類の着圧パンツに替えて着用させ、基本実験と比較検討した。なお、実験は各被験者の同一月経周期の低温期内の可能な限り近い4日間を選定した。

実験に用いたパンツを図2に示す。パンツAは前述のランニングパンツ（50D40本のマルチフィラメント糸使用、鹿の子編）である。パンツB、C、Dは着圧パンツで、パンツBは基本編地（ゴム編）の糸の太さを80Dで作成したもので、パンツCは、パンツBの口ゴムの内側から内腿と臀部を押し上げながら、両体側の腸骨稜にかけて帯状に着圧を強化したもので、パンツDはパンツCの地編み糸を110Dに変えたものであった。このように4種類の着衣条件で脂肪燃焼効率を比較した。

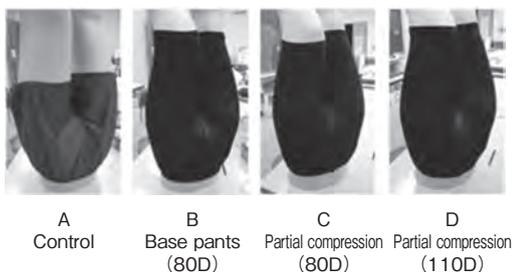


図2 Four kinds of experimental pants

### 1. 3 実験パンツの被服圧測定とその圧感覚評価

実験パンツ着用時の被服圧は、液圧平衡方式による被服圧計測システム<sup>4-7)</sup>を用いて、ウエスト・ローウエスト・ヒップ囲の12部位（前後正中線とこれより3cm体側寄りの垂線、左右の体側線・乳頭線・肩甲線との交点）と鼠蹊・大腿・口ゴム囲の4部位（前後正中線と左右の体側線との交点）の計48部位の被服圧を測定した。なお、パンツAの被服圧はほとんど発生していなかったため、圧測定を省いた。なお、圧感覚はウエスト、ローウエスト、鼠蹊、大腿、口ゴム部ヒップ、鼠蹊、大腿、口ゴム部の各6部位とその総合を、上昇法により提示された（提示順序はパンツB、C、Dとした）実験パンツ順に、比率尺度で評価させた<sup>8)</sup>。

これらの脂肪燃焼率、被服圧とその圧感覚の結果は、一元配置分散分析を用いてその有意性を確かめた後、scheffe法を用いて有意差検定した。

### 2. 研究結果

パンツAの被服圧はほとんど発生していなかったため除き、3種類の実験用着圧パンツの結果を、右半身の被服圧分布で図3に示す。図中の円グラフは圧測定部位を、黒色は被服圧を示す。どのパンツも前後正中線上よりも体側線寄りの測定部

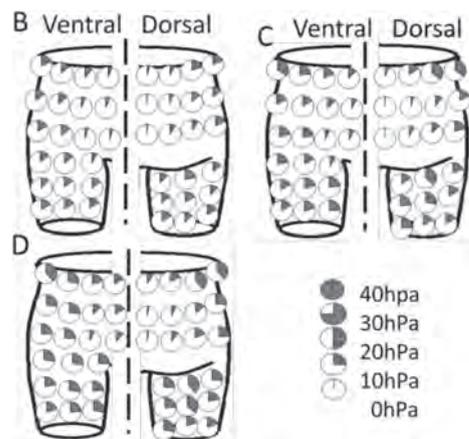


図3 Clothing pressure of three kinds of support pants From B to D show experimental pants (See 図2)

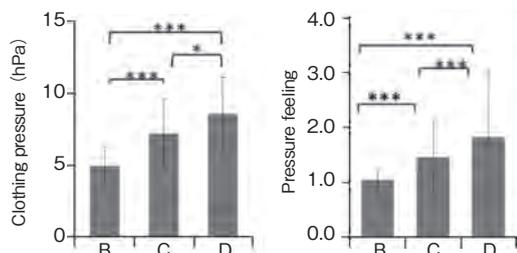


図4 Average clothing pressure and its pressure feeling  
From B to D show experimental pants (See 図2)

位の被服圧が高いことが観察された。これらの値を実験パンツごとにまとめた被服圧と、その圧感を図4に示す。左図より、実験パンツの被服圧はBが $4.9 \pm 1.3$ hPa (Mean  $\pm$  SD), Cが $7.2 \pm 2.4$ hPa, Dが $8.5 \pm 2.6$ hPaで、有意に $B < C < D$ であった。その時の圧感覚は、“ちょうど良い”時を“1”とした時の“きつい”の値は、“ $1.66 \pm 1.16$ ”, “ゆるい”の値は“ $0.44 \pm 0.34$ ”であった。パンツAは $0.57 \pm 0.22$ , Bは $1.04 \pm 0.21$ , Cは $1.46 \pm 0.69$ , Dは $1.83 \pm 1.19$ で、有意に $B < C < D$ であった。つまり、パンツAはほぼ“ゆるい”と評価され、パンツBはほぼ“ちょうど良い”, パンツCは“ややきつい”, パンツDは“きつい”と評価された。

4種類のパンツにおける各被験者のRQを図5に示す。どの被験者も各運動負荷段階によってRQが変化したので、この値を用いてツツ・シュンベルグ・ラスクの表から、運動段階ごとに脂質

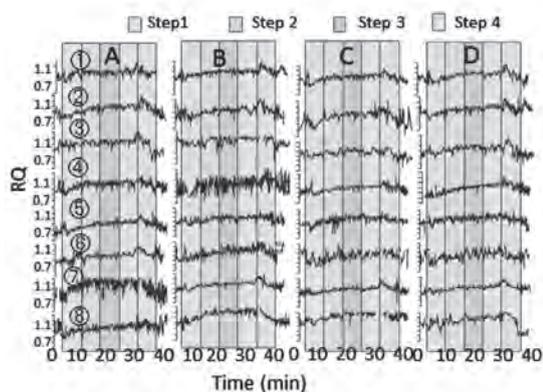


図5 RQ of four steps in aerobic exercise loads for all subjects  
From A to D show experimental pants (See 図2)

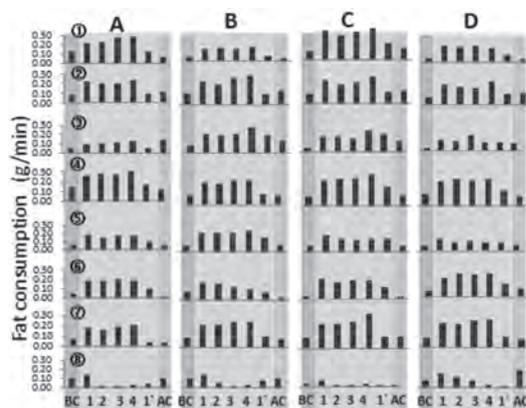


図6 Fat consumptions of four experimental pants  
From A to D show experimental pants (See 図2)

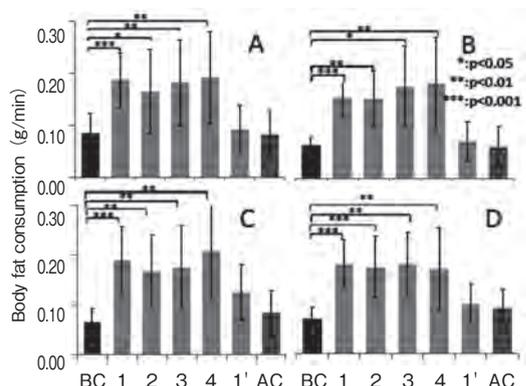


図7 Average of body fat consumption wearing experimental pants under each exercise loads  
From A to D show experimental pants (See 図2). BC (AC) : before (after) control, 1to1' show aerobic exercise loads (See 図1)

消費量を求めた結果を図6に、これをまとめた結果を図7に示す。どの実験パンツであっても運動開始前のコントロールに比べ、運動中の脂質は有意に消費された。しかし、被験者①や④のように脂質消費量の多い被験者と被験者⑧のように少ない被験者がいたので、コントロールを基準とした相対脂質消費量に換算し、実験パンツごとにまとめた(図8参照)。すると、各パンツにおいて、運動開始前のコントロールの脂質消費量を基準の100%とした時に、パンツAでは12.3倍、パンツBでは12.2倍、パンツCでは16.1倍、パンツDでは14.2倍で、かつパンツAに比べパンツC着用時の消費量は1.3倍有意に多かった( $P < 0.01$ )。

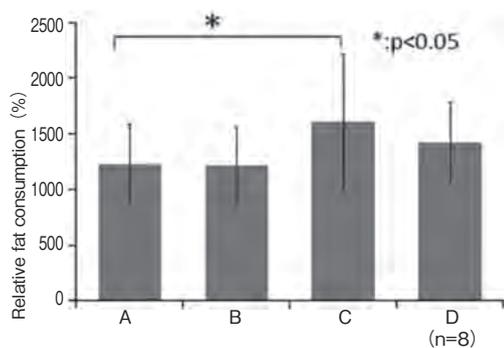


図8 Relative fat consumptions of four experimental pants  
From A to D show experimental pants (See 図2)

すなわちパンツ C を着用して有酸素運動をすることで、効率よく体脂肪が消費できることがわかった。このように、被服圧がほとんど発生していないパンツ A (ハーフパンツ) より、ややきついと評価された部分加圧したパンツ C の方が、有意に脂質消費量が増加した。

### 3. 考察

本着圧パンツは、パンツ B と C は糸の太さが 80D で、パンツ D のみ 110D であった。また、パンツ B は基本編地で全体的に着圧されているが、パンツ C と D ではこれに加えて部分的にさらに加圧されていた。また、パンツ着用時の圧感覚は有意に B<C<D で、平均被服圧も同様に、有意に B<C<D であった。このように、着圧感はパンツ B が最も良かったのであるが、脂質の消費量がコントロールより増したのはパンツ C のみであった。

これはパンツ C と D では内腿から下方の臀部を通り、両体側の骨盤にかけて、幅の広い伸縮性の高い帯を基本編み地に重ねて縫製したので、その帯が足の運動に伴って、脚の筋の走行に沿って伸び縮みし、脚の動きの助けになったと考えられる。ただし、糸が 80D (パンツ C) から 110D (パンツ D) になると、糸が太いので 80D のものよりも伸びにくくなり、被験者の動作の抑制につ

ながったと考えられる。なお、パンツ B の場合、周囲から均一な着圧が体表になされていたので、これも動きの抑制につながったと考えられる。今後、脚力のある被験者を含めて、パンツの部分加圧の強度と脚力の関係について、さらに検討する必要がある。

さて、被験者は今回 20 歳代の成人女性を対象としたが、実施する有酸素運動の負荷は心拍負荷 65% (130 拍/分) を上限とした。運動時の負荷強度は心拍数を基準にしているため、年齢を考慮した HRMAX から負荷強度を求めれば、高齢者にとっても再現しやすい運動負荷と言えるであろう (例えば 60 歳の女性ならば、最大運動負荷強度は心拍数 104 拍/分となる)。また、本研究で用いた自転車運動だけでなく、歩行やダンスなどの自分の好みの運動負荷に変えることが可能である。運動時間も 30 分間と、無理なく体を動かせる時間に設定しているため、日常生活における生活シーン (散歩や掃除) で比較的楽に再現しやすい、効果的な体脂肪を落とす運動強度や実施時刻、着用可能なサポートパンツについて提示できた。

### 4. まとめ

肥満は生活習慣病などの様々な病気を引き起こす要因の一つであり、体脂肪を適切に保ちながら健康的な生活を送るためには、運動習慣を身につけることが重要である。若年女性では有酸素運動下において、時刻、月経周期、季節の位相によって脂質消費量が変化することが知られている。そこで本研究ではこれらを統制した上で、より脂肪を燃焼させる着圧パンツの開発を目的とした。被験者は 20 歳代女子 8 名で、彼女らの月経低温期に朝食摂取 4 時間後に呼吸代謝と心拍数を、人工気象室 (24.5°C, RH50%) 内で測定した。実験着は半袖 T シャツに、4 種類の実験パンツ (A: ポリエステル 100% の無加圧、B: 80D のナイロンとポリウレタン糸の地編みの着圧のハーフパン

ツ, C: Bに部分加圧したもの, D: Cと同デザインで110Dの地糸使用したものを着用させた。エアロバイクを用いて有酸素運動を30分間与え, その前後に5分間ずつのコントロールを設定した。得られた呼吸商から消費エネルギー量 (kcal/min), 糖質・脂質量 (g/min) を求めた。また, 運動開始前コントロールの静椅座位を基準にした相対脂質消費量は, A~Dの順に, 12.3倍, 12.2倍, 16.1倍, 14.2倍となり, かつAに比べCの消費量は1.3倍有意に多くなった。このように, 無圧負荷時や80Dのニットで均一に着圧したパンツよりも, 帯で部分加圧した着圧パンツは, 脂質消費量を増やすことが検証された。

#### 謝 辞

本研究は, 第37回公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団によって研究助成された。記して感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) 長保美也・三野たまき, 有酸素運動下の呼吸代謝に影響を及ぼす諸因子, 日本家政学会第64回大会要旨集(2012)
- 2) 篠原優布子・三野たまき, 呼吸代謝に及ぼす実施時刻の影響, 日本家政学会第65回大会要旨集(2013)
- 2) Mitsuno T., Consumer consciousness of Japanese women for swelling in the lower half of the body --Utility and regard for development of support knee-high-socks--, International Banff Center, Canada(2013)
- 3) 安藤優衣, 三野たまき, 有酸素運動下の脂質消費量に影響を及ぼす諸因子-脂質消費量を増すために-, 日本繊維製品消費科学 2014年次大会, 京都工芸繊維大学
- 4) 被服圧測定に関する研究(第1報) -液圧平衡方式平衡方式による被服圧測定-, 三野たまき, 間壁治子, 百田裕子, 上田一夫, 織消誌, 32, 362-367(1991)
- 5) 被服圧測定に関する研究(第2報) -液圧平衡方式平衡方式による被服圧測定-, 三野たまき, 間壁治子, 百田裕子, 上田一夫, 織消誌, 32, 368-372(1991)
- 6) 三野たまき, 上田一夫, 被服圧の測定, 家政誌, 45, 179-188(1994)
- 7) Mitsuno, T. Ueda, K., Time Relation among Clothing Pressure Developed at Waistband, Respiratory Movement, and Girth of Abdomen -Using by Hydrostatic Pressure-balanced Method-, *Sen'I Gakkaishi*, 66, 74-81 (2010)
- 8) 三野たまき, 上田一夫, ウエストベルト圧と比率尺度による圧感覚, 家政誌, 48, 989-998(1997)

## 運動による認知機能の向上は 運動様式によって異なるのか？

電気通信大学 安藤 創一

### Are Effects of Acute Exercise on Cognitive Function Different between Aerobic and Resistance Training?

by

Soichi Ando

*The University of Electro-Communications*

#### ABSTRACT

The purpose of this study was to examine effects of acute aerobic and resistance exercise on cognitive function, plasma catecholamines (adrenaline, noradrenaline, and dopamine), serum insulin-like growth factor 1 (IGF-1), and serum cortisol. Eight participants (mean  $\pm$  SD, age =  $21.6 \pm 0.5$  yr; height =  $1.75 \pm 0.04$  m; body mass =  $72.2 \pm 5.7$  kg, peak oxygen uptake =  $53.4 \pm 6.5$  ml/kg/min) performed cognitive tasks before and after either aerobic exercise corresponding to 40% of peak oxygen uptake ( $98.8 \pm 12.4$  W) or resistance exercise with a resistance tube. We measured plasma catecholamines, serum IGF-1, serum cortisol, blood glucose and lactate concentration, and ratings of perceived exertion (RPE) before and after exercise. Cognitive task was a Go/No-Go task that requires response inhibition and selective attention. We did not observe significant improvements in cognitive function after each exercise, probably due to a low sample size. Nevertheless, we found that increases in plasma adrenaline, noradrenaline, and dopamine following both aerobic and resistance exercise. Serum IGF-1 increased after resistance exercise, while it did not change after aerobic exercise. Similarly, blood lactate concentration also increased only after resistance exercise. Serum cortisol tended to decrease after exercise. In the present study, we found no

differences in RPE before and after exercise. These findings will help to understand the effects of acute aerobic and resistance exercise on cognitive function. To understand physiological mechanisms underlying improvements in cognitive function following acute aerobic and resistance exercise, further studies are required with large sample size.

## 要 旨

本研究は、有酸素運動と抵抗性運動という異なる様式の運動がどのようにヒトの認知機能を向上させるのかについての基礎的知見を得るために、それぞれの運動の前後で、血漿カテコラミン、血清インスリン様成長因子 (IGF-1)、血清コルチゾールの濃度を測定し、認知課題のパフォーマンスの変化と比較した。本研究では、サンプルサイズが不十分だったために、それぞれの運動後に認知機能が向上するという統計的に有意な結果を得ることはできなかった。しかし、どちらの運動後にも血漿のカテコラミンが増加し、血清コルチゾール濃度が低下すること、抵抗性運動後にのみ血清 IGF-1 および血中乳酸濃度が上昇することを示した。これらの結果は、様式の異なる運動が認知機能に及ぼす影響を推察するための基礎的知見となると考えられる。今後は実験参加者を追加することで十分なエビデンスを提供することが課題であろう。

## 緒 言

認知機能とは、注意や集中力といった基本的な知的能力から、判断・計画実行などの高度な知的能力のことを指し、日常生活を営む上で重要な役割を果たしている。近年、運動が様々な疾患の予防だけでなく、認知機能の向上にも効果的であることが広く知られるようになった。運動が認知機能にもたらす有益な効果は一過性の運動でもみられるものであり、運動による認知機能の向上には、

有酸素運動が有益であるという報告が多い<sup>eg-1, 2)</sup>。そして、メタアナリシスを用いた研究によると、低強度から中強度の運動において、その効果が大きいことが示唆されている<sup>8)</sup>。これらの知見は、有酸素運動によりもたらされる生理的变化が認知機能を向上させることを示唆している。

一方、筋力トレーニングに代表される抵抗性運動が認知機能の向上をもたらすという報告もみられるようになった<sup>9)</sup>。しかし、有酸素運動と抵抗性運動によって生じる生理的变化が異なる点が多いことを考えると、同じ一過性の運動であっても認知機能を向上させる機序が、運動の違いによって異なる可能性が考えられる。しかし、異なる運動様式によって認知機能が向上される機序については明らかになっていない。

そこで本研究は、有酸素運動と抵抗性運動という異なる様式の運動がどのようにヒトの認知機能を向上させるのかについての基礎的知見を得ることを目的とした。本研究では、有酸素運動と抵抗性運動のそれぞれの運動前後で、血中のカテコラミン、インスリン様成長因子 (IGF-1)、コルチゾールの濃度を測定し、認知課題のパフォーマンスの変化と比較した。本研究から得られる成果は、運動と認知機能に関する新しい知見を提供し、運動が認知機能の向上をもたらす機序の一端を明らかにするだけでなく、様々な運動処方現場に対しても、有益な示唆を与えるものであると考えられる。

## 1. 研究方法

### 1. 1 実験参加者

実験参加者は健康な若年男性8名（平均値 ± 標準偏差, 年齢 =  $21.6 \pm 0.5$  歳, 身長 =  $1.75 \pm 0.04$  m, 体重 =  $72.2 \pm 5.7$  kg）であった。本実験は、福岡大学倫理委員会の承認を受けて行った。実験参加者には事前に測定項目や安全性に関する十分な説明を行い、書面にて実験参加の同意を得た。

### 1. 2 実験手順

本実験は3日間に分けて行った。すべての実験参加者に対して、実験1日目に自転車エルゴメーター（エアロバイク 75XLIII：コンビウエルネス社製）を用いて漸増負荷運動を行い、実験参加者が運動を継続できなくなった時点での酸素摂取量の最高値を最高酸素摂取量とした。本研究の実験参加者の最高酸素摂取量は  $53.4 \pm 6.5$  ml/kg/min であった。

実験2日目および3日目には、有酸素運動あるいは抵抗性運動のどちらか一方をランダムな順番で行った。実験2日目と3日目の間隔は少なくとも3日間とした。認知課題は運動の前後で行った。図1に実験のプロトコルを示す。それぞれの

運動様式での運動時間は30分とした。有酸素運動の運動負荷は最高酸素摂取量の40% ( $98.8 \pm 12.4$  W) であった。抵抗性運動には市販されている抵抗性運動用のゴムバンド（Spoband：YKC社製）を用いた。抵抗性運動では、実験者の指示に従って、42種類の動作を行った。42種類の動作は全身の筋肉を用いて行うものであり、本研究では、1つの動作につき10回繰り返した。

### 1. 3 測定項目

#### 1. 3. 1 認知機能

認知課題には、不必要な反応の抑制や選択的注意などが必要となる Go/No-Go 課題を用いた<sup>1)</sup>。

図2に本研究の Go/No-Go 課題の流れを示す。被

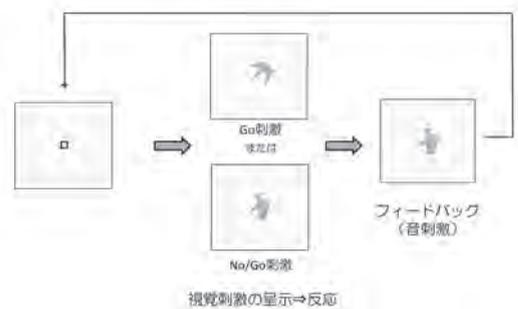


図2 認知課題の流れ

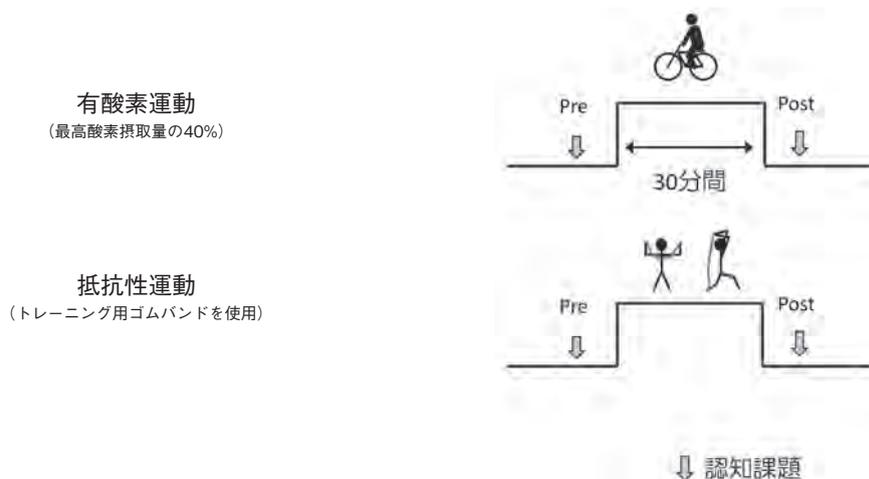


図1 実験のプロトコル

験者はコンピューターディスプレイに正対した座位状態で Go/No-Go 課題を行った。運動後の Go/No-Go 課題は、運動終了の2分後から開始した。この課題では、被験者は2種類の図形の一方に対しては、ボタンを離して反応を行い (Go 反応)、もう一方の図形に対しては反応せずにボタンを押した状態を維持した (No-Go 反応)。そして、それぞれの試行後に、音刺激により正解か不正解かについてのフィードバックを行った。正解が5回続くと図形と反応の関係性が変わり、その後も正解が続くと新しい図形の組み合わせを呈示することで、課題を継続し、試行数は合計30試行とした。(平均施行時間:  $193 \pm 27$  秒) 認知機能の評価は、反応時間と反応の正答率から行った。本研究では、正しく反応できなかった試行 (Go 刺激に対する反応なし、または No-Go 刺激に対する反応) をエラー試行とした。

### 1. 3. 2 カテコラミン, IGF-1, コルチゾール

有酸素運動と抵抗性運動のそれぞれの運動前後で正肘静脈から血液を採取し、血漿カテコロールアミン (アドレナリン, ノルアドレナリン, ドーパミン), 血清 IGF-1, 血清コルチゾールの濃度を測定した。これらの測定には、外注 (SRL 社) による臨床検査により行った。

### 1. 3. 3 血糖値, 血中乳酸濃度, 主観的運動強度 (RPE)

それぞれの運動前後で耳朶から血液を採取し、血糖値 (グルテストエース R, 三和化学研究所) と血中乳酸濃度 (ラクテート・プロ TM2, アークレイ社製) を測定した。また、主観的運動強度<sup>3)</sup> を実験参加者に回答してもらった。

### 1. 3. 4 心拍数

本研究では運動強度の指標として、心拍モニター (RS800CX: ポラール社製) を用いて運動中の平均心拍数を算出した。

## 1. 4 統計検定

統計検定には二元配置の分散分析および対応のある t-test を用いた。データはすべて平均値と標準偏差で示し、全ての検定において有意水準は5%未満に設定した。

## 2. 研究結果

### 2. 1 認知機能

図3に認知課題の結果を示す。本研究で認知機能の指標とした反応時間には、運動による影響はみられなかった ( $P = 0.22$ )。また、有酸素運動と抵抗性運動の間で差はみられなかった ( $P = 0.71$ )。正答率に関しても、運動による影響 ( $P = 0.64$ ) および運動様式による違い ( $P = 0.68$ ) はみられなかった。

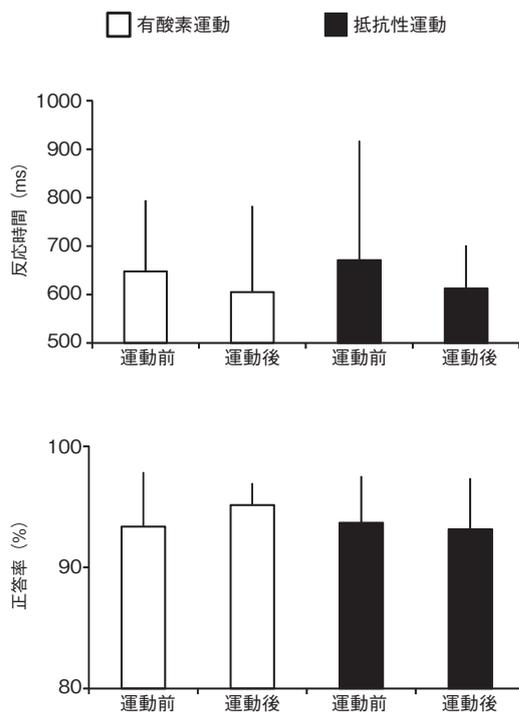


図3 運動前後での反応時間 (ms) および正答率 (%)

### 2. 2 血漿カテコラミン, 血清 IGF-1, 血清コルチゾール

図4にそれぞれの運動前後での血漿カテコラ

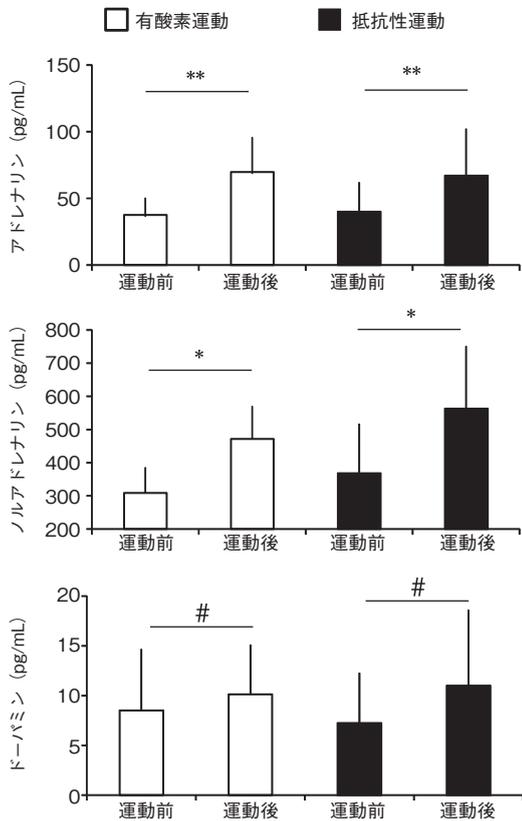


図4 運動前後での血漿アドレナリン濃度 (pg/mL), 血漿ノルアドレナリン濃度 (pg/mL), 血漿ドーパミン濃度 (pg/mL). #P<0.1, \*P<0.05, \*\*P<0.01

ミン, 血清 IGF-1, 血清コルチゾールの変化を示す。アドレナリンは運動前後で増加がみられた ( $P < 0.01$ )。しかし, 運動様式による違いはみられなかった ( $P = 0.98$ )。ノルアドレナリンは運動前後で増加がみられた ( $P < 0.05$ )。また, 抵抗性運動条件で, 有酸素運動条件より高い傾向がみられた ( $P = 0.06$ )。ドーパミンについては, 運動により増加する傾向がみられた ( $P = 0.07$ )。しかし, 運動様式による違いはみられなかった ( $P = 0.88$ )。

図5にそれぞれの運動前後での血清 IGF-1 と血清コルチゾールの変化を示す。IGF-1 は, 運動と運動様式の間有意な交互作用がみられ ( $P < 0.05$ )。抵抗性運動条件においてのみ運動後に IGF-1 の有意な増加がみられた ( $P < 0.05$ )。コル

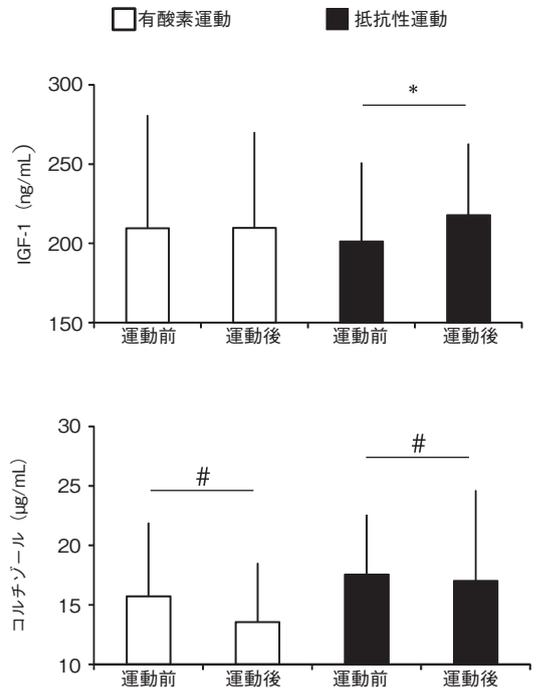


図5 運動前後での血清 IGF-1 濃度 (ng/mL) および血清コルチゾール濃度 (μg/mL) #P<0.1, \*P<0.05

チゾールは運動後に低下する傾向がみられた ( $P = 0.08$ ) が, 運動様式による違いはみられなかった ( $P = 0.12$ )。

### 2. 3 血糖値, 血中乳酸濃度, RPE, 心拍数

図6にそれぞれの運動前後での血糖値, 血中乳酸濃度, RPE の変化を示す。血糖値は運動前後で低下する傾向がみられ ( $P = 0.06$ )。抵抗性運動で高い傾向がみられた ( $P = 0.08$ )。一方, 血中乳酸濃度は, 運動と運動様式の間有意な交互作用がみられた ( $P < 0.01$ )。有酸素運動では運動前後に血中乳酸濃度に差はみられなかったが ( $P = 0.28$ )。抵抗性運動では運動後に有意に増加がみられた ( $P < 0.01$ )。RPE は運動後に増加がみられた ( $P < 0.01$ )。しかし, 運動様式による違いはみられなかった ( $P = 0.65$ )。

本研究において, 有酸素運動中の平均心拍数は  $107 \pm 17$  拍であり, 抵抗性運動中の平均心拍数は  $103 \pm 14$  拍であった。運動の様式の違いによ

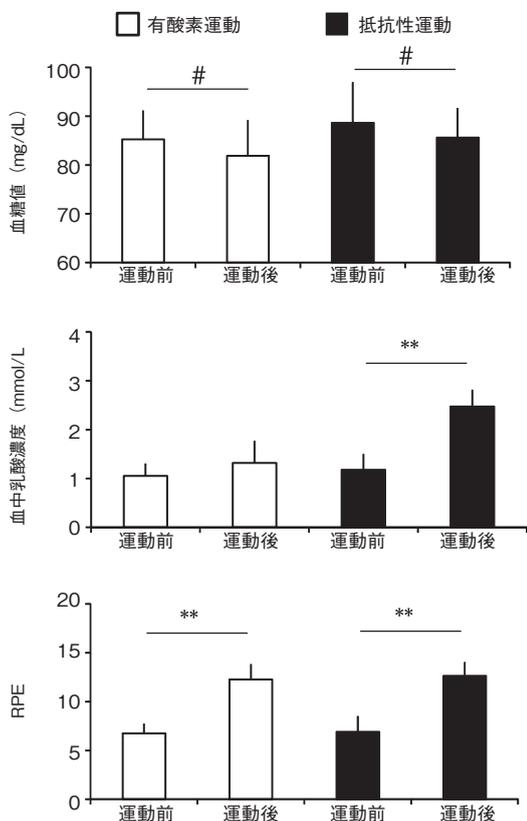


図6 運動前後での血糖値 (mg/dL), 血中乳酸濃度 (mmol/L), RPE. # $P < 0.1$ , \*\* $P < 0.01$

て平均心拍数に差はみられなかった ( $P = 0.64$ ).

### 3. 考察

本研究では、有酸素運動と抵抗性運動という異なる様式の運動前後で、ヒトの認知機能がどのように変化するののかについて検討するための基礎的知見を得ることを目的とした。しかし、本研究でみられた認知課題のパフォーマンスの変化は統計的に有意ではなかった。このことは、本研究ではどちらの運動を行っても認知機能が変化しないことを示しており、これは多くの先行研究と一致しないものである。本研究において、先行研究と異なる結果が得られた理由として、被験者数が8名と少なかったことがあげられる。しかし、結果の傾向や、これまでの運動と認知機能に関する先行

研究を考慮に入れると、十分なサンプルサイズがあれば先行研究と同様の結果が得られるのではないかと考えられる。

これまでの研究から、運動による覚醒レベルの上昇が認知機能の向上に関与していることが示唆されてきた<sup>eg.5)</sup>。覚醒レベルを上昇させる要因については、現在明らかとなっていない。しかし、運動が神経伝達物質を含む神経回路に影響を与えることから<sup>12, 15, 16, 17)</sup>、これらの変化が覚醒レベルの変化に関係していることが推察されている<sup>5, 10, 14, 15)</sup>。本研究においても有酸素運動と抵抗性運動のどちらの運動でもアドレナリン、ノルアドレナリン、ドーパミンの血漿レベルは増加する、あるいは増加する傾向がみられた。したがって、本研究でみられた運動後の血漿カテコラミンの上昇も覚醒レベルの適度な上昇に関与する可能性が考えられる。また、この結果は、有酸素運動と抵抗性運動のどちらの運動様式でも、運動により認知機能が向上するという先行研究の結果とも相容れるものであると考えられる。しかしながら、今回測定した血漿カテコラミンは静脈血から測定したものであり、どこまで脳内での濃度と関連しているのか、さらにはどこまで脳の神経活動に影響を与えているのかについては検討が必要であると考えられる。

運動様式の違いにより生理的応答の違いがみられたのは、血清 IGF-1 濃度と血中乳酸濃度である。ヒトおよび動物を用いた先行研究から、一過性の抵抗性運動や抵抗性運動トレーニング後に血清 IGF-1 が増加することが示されている<sup>4, 6, 7, 19)</sup>。そして、血清 IGF-1 の増加が認知機能の向上につながる可能性が示唆されている<sup>6, 11, 13)</sup>。したがって、本研究で抵抗性運動後に IGF-1 の増加が認知機能の向上に貢献した可能性も考えられる。本研究では抵抗性運動により血中乳酸濃度が増加した。乳酸は脳で代謝されエネルギー源として用いられることが知られている<sup>18, 20)</sup>。本研究にお

いて、抵抗性運動後においてのみ血中乳酸濃度が上昇したことから、脳でのエネルギー代謝が有酸素運動後と抵抗性運動後との間で違いがみられる可能性が考えられる。さらに近年、一過性の抵抗性運動後にみられる血清コルチゾールの低下が覚醒レベルの変化をもたらす、認知機能を向上させるということが報告された<sup>19)</sup>。本研究でも、運動後に血清コルチゾールの低下がみられたことから、血清コルチゾールと認知機能の関係については今後検討していく必要があると考えられる。

本研究において、運動後に血糖値は有意に低下し、また運動様式によっても異なる傾向がみられたが、その変化は非常に小さいものであった。したがって、本研究の結果にはほとんど影響を与えていないものと考えられる。また、本研究ではいくつかの生理的応答に違いがみられたものの、運動後のRPEは有酸素運動と抵抗性運動との間に差はなく、また運動中の平均心拍数にも差はみられなかった。このことから、運動強度の違いに大きな差はなかったものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、有酸素運動と抵抗性運動という異なる様式の運動がヒトの認知機能に及ぼす影響を明らかにするための基礎的知見を得ることを目的とした。本研究では、サンプルサイズが不十分だったために、それぞれの運動が認知機能を向上させるという結果を直接得ることはできなかったが、様式の異なる運動がもたらす生理的応答の違いを明らかにした。この結果は、異なる様式の運動がヒトの認知機能に及ぼす影響を明らかにするための有益な知見となることが期待される。今後は実験参加者を追加することで十分なエビデンスを提供することが課題であると言える。

#### 謝 辞

本研究に対して助成を賜りました財団法人石本

記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり福岡大学スポーツ科学部の檜垣靖樹氏、小見山高明氏、青柳遼氏、畑本陽一氏ならびに運動生理学研究室の皆様、電気通信大学情報理工学部の安藤健地氏、上條貴大氏、丸山響平氏から多大なご協力をいただきました。ここに記して、心より感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) Ando S., Hatamoto Y., Sudo M., Kiyonaga A., Tanaka H., Higaki Y., The effects of exercise under hypoxia on cognitive function. *PLoS One.*, 8(5) :e63630(2013)
- 2) Ando S., Kokubu M., Yamada Y., Kimura M., Does cerebral oxygenation affect cognitive function during exercise? *Eur. J. Appl. Physiol.*, 111(9) :1973-1982(2011)
- 3) Borg G., Simple rating for estimation of perceived exertion. In: Borg G (ed) *Physical Work and Effort*. Pergamon, New York(1975)
- 4) Borst S.E., De Hoyos D.V., Garzarella L. et al., Effects of resistance training on insulin-like growth factor-I and IGF binding proteins. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 33(4) :648-653(2001)
- 5) Brisswalter J., Collardeau N., Arcelin R., Effects of acute physical exercise characteristics on cognitive performance. *Sports Med.*, 32(9) :555-566(2002)
- 6) Cassilhas R.C., Lee K.S., Fernandes J. et al., Spatial memory is improved by aerobic and resistance exercise through divergent molecular mechanisms. *Neuroscience.*, 202:309-317(2012)
- 7) Cassilhas R.C., Viana V.A., Grassmann V. et al., The impact of resistance exercise on the cognitive function of the elderly. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 39(8) :1401-1407(2007)
- 8) Chang Y.K., Labban J.D., Gapin J.I., Etnier J.L., The effects of acute exercise on cognitive performance: a meta-analysis. *Brain Res.*, 1453:87-101(2012)
- 9) Chang Y.K., Tsai C.L., Huang C.C., Wang C.C., Chu I.H., Effects of acute resistance exercise on cognition in late middle-aged adults: general or specific cognitive improvement? *J. Sci. Med. Sport.*, 17(1) :51-5(2014)

- 10) Chmura J., Nazar K., Kaciuba-Uściłko H., Choice reaction time during graded exercise in relation to blood lactate and plasma catecholamine thresholds. *Int. J. Sports Med.*, **15**(4) :172-176(1994)
- 11) Cotman C.W., Berchtold N.C., Exercise: a behavioral intervention to enhance brain health and plasticity. *Trends Neurosci.*, **25**(6) :295-301(2002)
- 12) Dietrich A., Audiffren M., The reticular-activating hypofrontality (RAH) model of acute exercise. *Neurosci. Biobehav. Rev.*, **35**(6) :1305-1325(2011)
- 13) Ding Q., Vaynman S., Akhavan M., Ying Z., Gomez-Pinilla F., Insulin-like growth factor I interfaces with brain-derived neurotrophic factor-mediated synaptic plasticity to modulate aspects of exercise-induced cognitive function. *Neuroscience.*, **140**(3) :823-833(2006)
- 14) Kashiwara K., Maruyama T., Murota M., Nakahara Y., Positive effects of acute and moderate physical exercise on cognitive function. *J. Physiol. Anthropol.*, **28**:155-164(2009)
- 15) McMorris T., Sproule J., Turner A., Hale B.J., Acute, intermediate intensity exercise, and speed and accuracy in working memory tasks: a meta-analytical comparison of effects. *Physiol. Behav.*, **102**(3-4) :421-428(2011)
- 16) Meeusen R., De Meirleir K., Exercise and brain neurotransmission. *Sports Med.*, **20**(3) :160-188(1995)
- 17) Nybo L., Secher N.H., Cerebral perturbations provoked by prolonged exercise. *Prog. Neurobiol.*, **72**(4) :223-261(2004)
- 18) Quistorff B., Secher, N.H., Van Lieshout, J.J., Lactate fuels the human brain during exercise. *FASEB J.*, **22**:3443-9(2008)
- 19) Tsai C.L., Wang C.H., Pan C.Y., Chen F.C., Huang T.H., Chou F.Y., Executive function and endocrinological responses to acute resistance exercise. *Front Behav. Neurosci.*, **8**:262(2014)
- 20) van Hall G., Lactate kinetics in human tissues at rest and during exercise. *Acta. Physiol. (Oxf)*, **199**:499-508(2010)

## なぜ多関節トレーニングは二関節筋を肥大させないのか： 筋活動レベルの変化様相の観点からの検討

芝浦工業大学 江間 諒 一  
(共同研究者) 早稲田大学 稲見 崇 孝  
同 川上 泰 雄

### **Possible Factors Related to Lack of Hypertrophy of the Biarticular Muscles Induced by Multi-joint Training: Its Relation to Changes in Muscle Activation During the Training**

by

Ryoichi Ema  
*Graduate School of Engineering and Science,  
Shibaura Institute of Technology  
Takayuki Inami, Yasuo Kawakami  
Faculty of Sport Sciences, Waseda University*

#### ABSTRACT

The purpose of the present study was to examine the factors influencing previously reported exercise-dependence in muscle hypertrophy of the biarticular thigh muscles (i.e., single-joint training induces sizable hypertrophic response while multi-joint training does not), through measurement of muscle activation patterns during a multi-joint exercise. Twelve healthy men performed leg press at a load corresponding to 80% of one repetition maximum (1RM) until exhaustion. Surface electromyographic (EMG) signals were obtained from the quadriceps femoris (vastus lateralis, vastus medialis, rectus femoris) and hamstrings (biceps femoris, semitendinosus, semimembranosus), and root mean square values of the EMG signals (RMS-EMG)

during each repetition were determined (experiment 1). In the experiment 2, five healthy men conducted leg press at a 40% of 1RM (3 sets with 16 repetitions) and an 80% of 1RM (6 sets with 4 repetitions) load on separate days (separated by one week). In addition, transverse relaxation time (T2) -weighted magnetic resonance images of the thigh were obtained before and immediately after the leg press. The T2 of each muscle at mid-thigh was calculated. In the experiment 1, significant increases in the activation of the vastus lateralis and medialis were found following fatiguing leg press, whereas those of the biarticular muscles did not change except for the biceps femoris. In the experiment 2, the leg press exercise induced an increase in T2 of the monoarticular muscles, but not of the biarticular muscles. The relative increase in T2 of each muscle was similar between the two exercise intensities. These results suggest that activation patterns of the thigh muscles differ between monoarticular and biarticular muscles. These differences can explain the lack of hypertrophic response of the biarticular muscles following multi-joint training found in previous studies.

## 要 旨

本研究では、先行研究において報告されている二関節筋の量的適応におけるトレーニング動作依存性をもたらす要因について、多関節運動時の筋活動様相の観点から検討した。実験1では、12名の健常男性が疲労困憊に至るまで高強度でのレッグプレスを実施し、そのときの大腿部骨格筋の筋活動量を表面筋電図法により定量した。実験2において、磁気共鳴画像法により、低負荷と高負荷の条件下でレッグプレスを行った前後における大腿部骨格筋の横緩和時間 (T2) を算出した (N=5, 2つの条件を別日に実施)。実験1の結果、疲労とともに単関節筋である外側広筋と内側広筋の筋活動量が増加した。一方、二関節筋に関しては、大腿二頭筋を除き変化がみられなかった。実験2において、レッグプレスにより、大腿四頭筋を構成する単関節筋の T2 値が増加したものの、二関節筋の T2 値に変化がみられなかった。以上の結果は、多関節運動時の筋活動様相は、単関節筋と二関節筋の間で異なることを示唆している。

## 緒 言

二つの関節を跨いで骨に付着し、身体運動を生み出す二関節筋は、単関節筋 (一つの関節を跨ぐ) と比較して、トレーニングに対する量的適応が特異的であることが報告されている。すなわち、身体運動において重要な役割を果たす<sup>1)</sup> 大腿四頭筋を構成する二関節筋である大腿直筋は、単関節運動である膝関節伸展運動を12週間実施したことにより、顕著に筋量が増加 (肥大) した<sup>2,4)</sup>。その一方で、スクワットやペダリング運動など、膝関節と股関節を同時に伸展させる多関節運動である脚伸展運動を数週間から数ヶ月実施しても、大腿直筋に肥大が全く観察されなかった<sup>5,6)</sup>。加えて、自転車競技選手が実施した6ヶ月間の自転車トレーニングにより、半腱様筋を除く、大腿部に存在する他の二関節筋においても肥大が生じなかったことが報告されている<sup>6)</sup>。以上の知見は、単関節運動とは異なり、多関節運動は二関節筋を肥大させないことを示唆している。しかし、二関節筋の肥大応答における動作特異性をもたらす要

因は不明である。単関節筋と二関節筋との間では、不活動に対する量的適応<sup>7)</sup>や怪我の頻度<sup>8)</sup>が異なることが報告されている。したがって、上述した要因が明らかとなれば、トレーニングやリハビリテーションの現場において、それぞれの筋群に効果的なトレーニングを選択し実施していくための基礎的な知見が得られると考えられる。

近年の研究において、低強度の運動であっても疲労困憊まで実施すれば、高強度で運動を実施したときと同程度の筋肥大が生じることが報告されている<sup>9)</sup>。その理由として、疲労により低下した筋張力を保障するために新たな運動単位が動員されて筋活動量が増加し、結果的に筋肥大に結びついた可能性が指摘されている<sup>9)</sup>。もしそうであるならば、脚伸展運動を疲労困憊まで実施したとき、単関節筋と二関節筋のいずれにおいても、疲労とともに筋活動量が増加すると予想される。しかし、スポーツ活動中に疲労困憊まで脚伸展動作を実施することが多い自転車選手やボート選手において、二関節筋に肥大応答が観察されていない<sup>6, 10)</sup>ことを考慮すると、脚伸展運動時における筋活動量の変化様相は、単関節筋と二関節筋で異なる可能性がある。そこで本研究は、二関節筋の肥大応答に動作依存性が存在する要因について、運動時における筋活動様相に着目して検討することを目的とした。

## 1. 方法

本研究は2つの実験により構成されている。実験1では、表面筋電図 (EMG) 法を用いて、疲労困憊まで脚伸展運動を実施したときの大腿部筋群の筋活動量を計測し、その変化を検討した。実験2では、異なる運動強度で脚伸展運動を実施した前後において、磁気共鳴画像 (MR) 法により、横緩和時間 (T2) の変化を算出することを通じて筋活動量を評価した。運動により生じた代謝産物の蓄積に伴う水分の移動により、運動後に骨格

筋の T2 が一時的に増加する。この T2 の増加は、表面 EMG 法で測定した筋活動量と相関関係にあることが観察されており<sup>11)</sup>、運動による T2 の増加は筋活動と関連すると考えられている。そのため、複数の先行研究において、運動による T2 の変化を運動時の骨格筋の活動量としてとらえた検討が行われている<sup>12-14)</sup>。本研究は、早稲田大学における「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得たのちに実施した。

### 1. 1 実験 1

#### 1. 1. 1 被験者

健康な成人男性 12 名 (年齢  $22 \pm 2$  歳, 身長  $173 \pm 5$  cm, 体重  $66 \pm 7$  kg) が実験に参加した。参加者に対して本実験の目的, 内容, 考えられるリスクについて説明し, 書面にて同意を得たのちに実施した。

#### 1. 1. 2 実験セッティングとデータ分析

被験者は、レッグプレスマシン (Nitro S3LP, Nautilus) のベンチに座り, 疲労困憊まで片足 (右足) でのレッグプレス運動 (3 秒間の短縮性収縮および伸張性収縮局面) を実施した (図 1)。運動負荷は 1 回最大拳上重量 (被験者自身の努力で 1 回だけ膝関節を完全伸展できる負荷, 1RM) の 80% の負荷とした。運動開始時における膝関節角度は 110 度 (完全伸展位を 0 度), 股関節角度



図1 本研究で実施したレッグプレス

は 130 度に統一した。

表面 EMG を、外側広筋（大腿長の近位 50% 位）、内側広筋（近位 90% 位）、大腿直筋（近位 30% 位）、大腿二頭筋長頭（近位 50% 位）、半腱様筋（近位 40% 位）および半膜様筋（近位 70% 位）から取得した（The Bagnoli-8 EMG System, DELSYS, 1×10 mm, Ag, 電極間距離 10 mm, 帯域通過フィルタ, 20–450 Hz）。大腿長は大転子から膝窩皺までの長さとした。隣接筋からのクロストークの影響を限りなく小さくするため、超音波診断装置（SSD-900, ALOKA）を用いて各筋の筋腹と筋束方向を確認し、電極貼付位置を決定した。大腿長軸方向における電極の貼付位置は、筋横断面積が相対的に大きい部位<sup>6)</sup>とした。剃毛後ヤスリで皮膚表面の角質を除去し、アルコール綿でふき取った。アース電極は左脚膝蓋骨皮膚表面上に貼付した。運動中の膝関節角度はゴニオメータ（SG150, Biometrics）を用いて取得した。EMG データおよび膝関節角度データは、A/D 変換機（PowerLab/16SP, ADInstruments）を介してサンプリング周波数 1kHz で同期させ、パーソナルコンピュータ上に記録した。

EMG データに関して、各レップにおける短縮性局面と伸張性局面ごとに root mean square (RMS-EMG) を算出し、それらを平均したものを各レップにおける RMS-EMG とした。いずれの筋においても、1RM 時の値で正規化した。筋活動量の時系列変化を調べるために、初期（1–3 レップの平均値）、中間（全体の 50% の回数に相当する前後 3 レップの平均値）、および最終（最後の 3 レップの平均値）の 3 つのフェーズに分けて正規化した RMS-EMG を算出した。

## 1. 2 実験 2

### 1. 2. 1 被験者

健常な成人男性 5 名（年齢  $21 \pm 1$  歳、身長  $173 \pm 4$  cm、体重  $66 \pm 9$  kg）が実験に参加した。参加者

に対して本実験の目的、内容、考えられるリスクについて説明し、書面にて同意を得たのちに実施した。

### 1. 2. 2 実験セッティング

実験 1 と同様に、被験者はレッグプレスマシン（Nitro S3LP, Nautilus）のベンチに座り、片足（右足）でのレッグプレス運動（3 秒間の短縮性収縮および伸張性収縮局面）を実施した。運動負荷は 1RM の 40% あるいは 80% の負荷（40%1RM, 80%1RM）とした。負荷間で運動量をできる限り一致させるため、負荷 × 回数 × セット数をそろえた<sup>15)</sup>。すなわち、40%1RM 負荷では 16 回 × 3 セット、80%1RM 負荷では 4 回 × 6 セット（セット間休息はいずれも 90 秒）とした。2 つの運動は 1 週間の間隔をあけて別日に実施し、順序は被験者間でランダムとした。

レッグプレス運動前と直後（ $106 \pm 4$  秒後、各被験者において、2 条件間で時間を一致させた）において、大腿部の T2 強調 MR 画像（エコー時間：25, 50, 75, 100 ms, くり返し時間：2000 ms, マトリックス： $256 \times 256$ , 撮像野：24 cm, スライス厚：1 cm, ギャップ：1 cm）を取得した（図 2）。体液移動の影響を考慮するため、運動前の撮像は 20 分の安静仰臥位の後に実施した。大腿長の 50% 部位において外側広筋、内側広筋、中間広筋、大腿直筋、大腿二頭筋、半腱様筋および半膜様筋をトレースし、各筋の T2 を算出した。分析には、画像解析ソフト（ImageJ, National Institute of Health, Bethesda）とそのプラグインを用いた。

## 1. 3 統計処理

すべての測定項目は平均値 ± 標準偏差で表した。統計処理には、統計解析ソフトウェア（IBM SPSS Statistics 22, IBM）を用いた。実験 1 について、各筋の正規化した RMS-EMG におけるフェーズ（初期、中間、最終）の影響を調べるため、

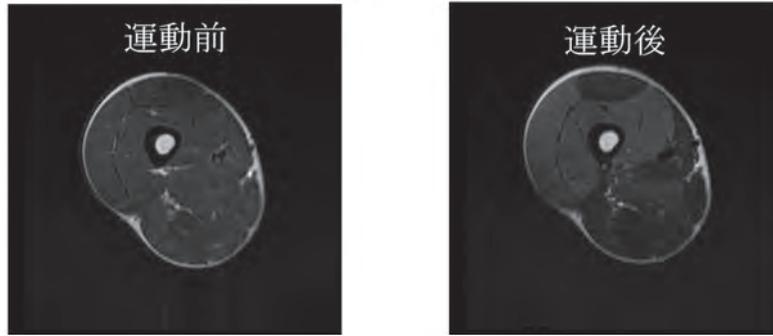


図2 レッグプレス前後における横緩和時間強調画像の典型例

一元配置の分散分析を行った。下位検定には、ボンフェローニ法を用いた。実験2について、レッグプレス運動によりT2値が変化したかどうか、およびT2の変化率に負荷間差があるかを明らかにするため、各筋においてウィルコクソンの符号付順位和検定を行った。危険率5%未満をもって統計的に有意とした。

## 2. 結果

### 2. 1 実験1

各フェーズにおける、正規化したRMS-EMGの結果を図3に示す。一元配置分散分析の結果、単関節筋である外側広筋および内側広筋において、フェーズの主効果が有意であり、疲労困憊に伴い正規化したRMS-EMGが増加した。一方、二関節筋については、大腿二頭筋のみ正規化したRMS-EMGに有意な増加がみられ、大腿直筋、半腱様筋および半膜様筋については変化が観察されなかった。

### 2. 2 実験2

レッグプレス運動前後における各筋のT2の結果を図4に示す。40%1RM条件において、単関節筋である内側広筋および中間広筋のT2が有意に増加した。外側広筋については、増加傾向にあったものの有意水準に達しなかった ( $P = 0.068$ )。一方、二関節筋である大腿直筋、大腿二頭筋、半腱様筋および半膜様筋のT2に変化はみられな

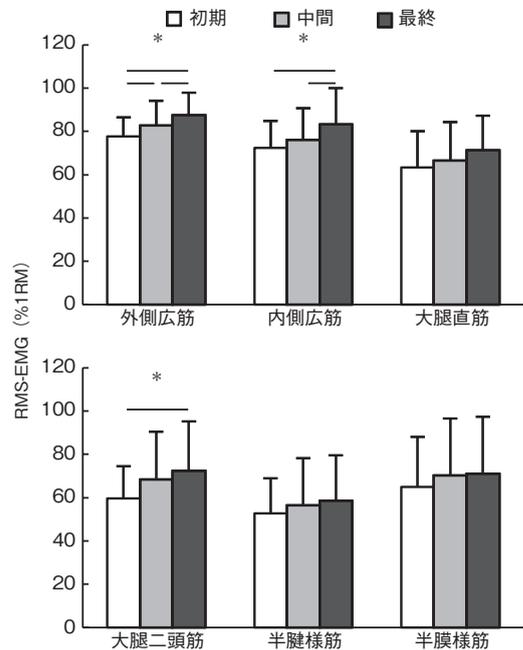


図3 疲労困憊までレッグプレスを実施したときにおけるroot mean square (RMS-EMG) RM: 最大拳上重量。\*有意なフェーズ間差 ( $P < 0.05$ )

かった。80%1RM条件について、外側広筋と中間広筋のT2が増加したが、内側広筋では有意水準に達しなかった ( $P = 0.080$ )。二関節筋については、40%1RM条件と同様に、いずれの筋のT2についても変化がみられなかった。T2の変化率に関して、いずれの筋においても有意な強度間差は観察されなかった

## 3. 考察

本研究の目的は、多関節運動を実施したときの

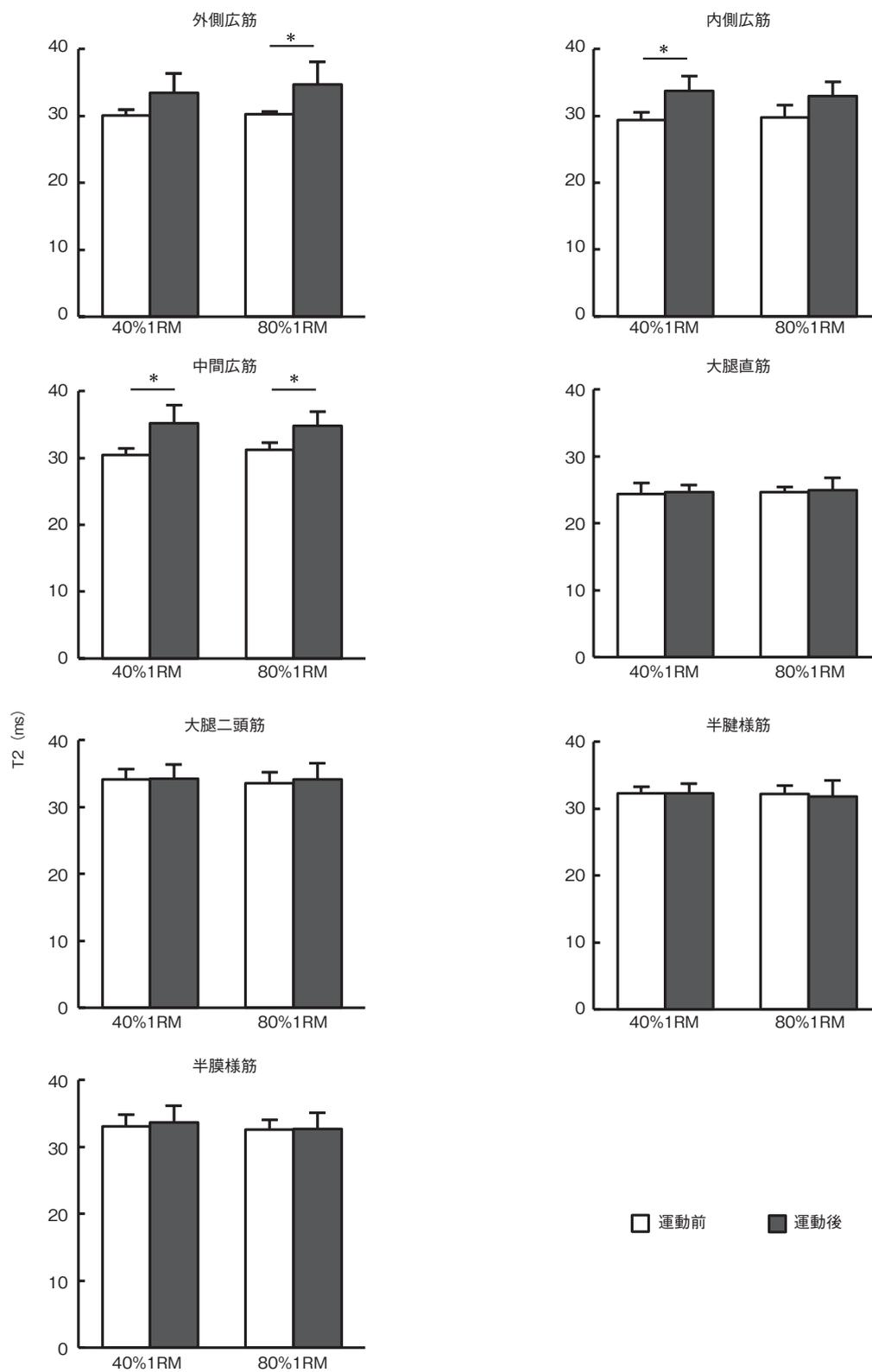


図4 レッグプレス前後における各筋横緩和時間 (T2)  
RM: 最大拳上重量. \*有意な変化 (P<0.05)

筋活動様相が単関節筋と二関節筋で異なるかどうか明らかにすることであった。本研究では、多関節運動としてレッグプレスを採用し、高強度条件下で疲労困憊まで実施する条件（実験1）と、運動量をそろえた異なる強度間（低強度と高強度）で実施する条件（実験2）を設定し、表面EMG法およびMR-T2法を用いて大腿四頭筋とハムストリングスの筋活動を定量した。本研究の結果、大腿四頭筋を構成する単関節筋は疲労困憊とともに筋活動量が増加し、またトレーニング量をそろえた場合、運動強度によらず同程度の活動量を示した。その一方で、大腿四頭筋とハムストリングスを構成する二関節筋は、実験1における大腿二頭筋を除き、疲労困憊まで高強度のレッグプレスを実施しても筋活動量に変化せず、実験2においては、運動強度によらずT2の変化がみられなかった。以上の結果は、多関節運動時の筋活動様相は、ある筋群を構成する協働筋間で同一ではなく、特に単関節筋と二関節筋の間で異なることを示唆している。筋活動量の筋間差が筋肥大の筋間差と関連したという先行研究<sup>14)</sup>をふまえると、本研究の結果は、多関節運動によって二関節筋の肥大応答がみられなかったという先行研究<sup>5,6)</sup>を説明する要因の一つとなるかもしれない。

多関節運動であるレッグプレス時の筋活動様相が単関節筋と二関節筋で異なった要因の一つとして、主動筋と拮抗筋間における相反抑制<sup>16)</sup>の影響が挙げられる。レッグプレスでは、解剖学的に主動-拮抗作用を有する大腿四頭筋とハムストリングスが同時に活動する。そのため、大腿直筋と二関節筋ハムストリングス間で相互に活動を抑制し、結果的に単関節筋とは異なった活動様相を示した可能性がある。しかし、我々が調べる限り、ヒト生体を対象として、相反抑制の影響が協働筋内で二関節筋においてのみ観察されるといった結果を説明しうるものではなく、本研究で得られた知見のメカニズムを解明するためには、さらなる研

究が必要である。

高強度で疲労困憊までレッグプレスを実施した実験1において、外側広筋と内側広筋の筋活動量が増加したが、大腿二頭筋を除き、二関節筋の筋活動量に変化はみられなかった。筋活動量の増加は、疲労に伴い低下した筋の発揮張力を補うために、新たな運動単位を動員した結果<sup>17)</sup>であると解釈できる。先行研究において、ある運動課題を実施する場合に単一筋を疲労させておくと、協働筋の筋活動量が増加したことが観察されている<sup>18)</sup>。彼らは、外側広筋を疲労させた状態で単関節運動である膝関節伸展運動を実施すると、疲労させなかった条件と比較して、内側広筋と大腿直筋の筋活動量が大きかったことを報告している。また、膝関節伸展運動を疲労困憊まで実施した先行研究<sup>19)</sup>によれば、大腿四頭筋のいずれにおいても疲労とともに筋活動量が増加したことが報告されている。このような先行研究と本研究の結果をふまえると、ある運動課題を達成するための協働筋内における活動の補償戦略は、単関節運動と多関節運動で異なると考えられる。

負荷、回数およびセット数の観点から運動量をそろえた実験2において、単関節筋である広筋群（外側広筋、内側広筋および中間広筋）のT2は、両条件間で同様の変化を示した。本研究と同様の方法で運動量を規定し、タンパク合成の運動負荷依存性を検討した先行研究<sup>15)</sup>において、60%1RMまでは負荷の増大とともにタンパク合成速度が増加したが、それ以後においては、さらなる速度の増加はみられなかった。このことを踏まえると、本研究で実施した2つの条件間（40%1RMと80%1RM）で、タンパク合成速度は後者のほうが高かった可能性がある。ただし、本研究ではキネティクスデータの測定を行っていないため、筋のした仕事が両条件間で統一されていないか不明である点に留意する必要がある。また、1セッションの膝関節伸展トレーニングによ

る大腿四頭筋の T2 変化と、その後の肥大応答との関連を検討した先行研究<sup>20)</sup>において、T2 変化の程度は肥大応答の同一筋内部位差とは対応するものの、筋間差とは対応しないことが示唆されている。このような点をふまえると、トレーニングによる T2 の変化は、トレーニングの継続によるその後の肥大応答を考える上で有益な情報となりうる可能性があるものの、少なくとも肥大応答の筋間差を考える上では、より肥大応答と直接的に関連したデータとの比較が必要になると考えられる。

#### 4. 結 論

本研究の結果、多関節運動時の筋活動様相は単関節筋と二関節筋間で同一ではないことが示唆された。単関節筋とは異なり、多関節運動時における二関節筋の筋活動は、たとえ運動強度が高強度であったとしても変化しない、あるいは十分な活動が観察されなかった。

#### 謝 辞

本研究の遂行にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) Thorpe S.K., Li Y., Crompton R.H., Alexander R.M., Stresses in human leg muscles in running and jumping determined by force plate analysis and from published magnetic resonance images., *J. Exp. Biol.*, 201: 63–70 (1998)
- 2) Housh D.J., Housh T.J., Johnson G.O., Chu W.K., Hypertrophic response to unilateral concentric isokinetic resistance training. *J. Appl. Physiol.*, 73: 65–70 (1992)
- 3) Narici M.V., Hoppeler H., Kayser B., Landoni L., Claassen H., Gavardi C., Conti M., Cerretelli P., Human quadriceps cross-sectional area, torque and neural activation during 6 months strength training. *Acta. Physiol. Scand.*, 157: 175–186 (1996)
- 4) Ema R., Wakahara T., Miyamoto N., Kanehisa H., Kawakami Y., Inhomogeneous architectural changes of the quadriceps femoris induced by resistance training. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 113: 2691–2703 (2013)
- 5) Earp J.E., Newton R.U., Cormie P., Blazevich A.J., Inhomogeneous quadriceps femoris hypertrophy in response to strength and power training. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 47: 2389–2397 (2015)
- 6) Ema R., Wakahara T., Yanaka T., Kanehisa H., Kawakami Y., Unique muscularity in cyclists' thigh and trunk: A cross-sectional and longitudinal study. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, (in press)
- 7) Belavý D.L., Miokovic T., Armbrecht G., Richardson C.A., Rittweger J., Felsenberg D., Differential atrophy of the lower-limb musculature during prolonged bed-rest. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 107: 489–499 (2009)
- 8) Speer K.P., Lohnes J., Garrett W.E. Jr., Radiographic imaging of muscle strain injury. *Am. J. Sports. Med.*, 21: 89–96 (1993)
- 9) Mitchell C.J., Churchward-Venne T.A., West D.W., Burd N.A., Breen L., Baker S.K., Phillips S.M., Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *J. Appl. Physiol.*, 113: 71–77 (2012)
- 10) Ema R., Wakahara T., Kanehisa H., Kawakami Y., Inferior muscularity of the rectus femoris to vasti in varsity oarsmen. *Int. J. Sports Med.*, 35: 293–297 (2014) .
- 11) Adams G.R., Duvoisin M.R., Dudley G.A., Magnetic resonance imaging and electromyography as indexes of muscle function. *J. Appl. Physiol.*, 73: 1578–1583 (1992)
- 12) Akima H., Takahashi H., Kuno S.Y., Masuda K., Masuda T., Shimojo H., Anno I., Itai Y., Katsuta S., Early phase adaptations of muscle use and strength to isokinetic training. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 31: 588–594 (1999)
- 13) Kinugasa R., Kawakami Y., Fukunaga T., Muscle activation and its distribution within human triceps surae muscles. *J. Appl. Physiol.*, 99: 1149–1156 (2005)
- 14) Wakahara T., Miyamoto N., Sugisaki N., Murata K., Kanehisa H., Kawakami Y., Fukunaga T., Yanai T., Association between regional differences in muscle

- activation in one session of resistance exercise and in muscle hypertrophy after resistance training. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **112**: 1569–1576 (2012)
- 15) Kumar V., Selby A., Rankin D., Patel R., Atherton P., Hildebrandt W., Williams J., Smith K., Seynnes O., Hiscock N., Rennie M.J., Age-related differences in the dose-response relationship of muscle protein synthesis to resistance exercise in young and old men. *J. Physiol.*, **587**: 211–217 (2009)
- 16) Crone C., Hultborn H., Jespersen B., Nielsen J., Reciprocal Ia inhibition between ankle flexors and extensors in man. *J. Physiol.*, **389**: 163–185 (1987)
- 17) Moritani T., Muro M., Nagata A., Intramuscular and surface electromyogram changes during muscle fatigue. *J. Appl. Physiol.*, **60**: 1179–1185 (1986)
- 18) Akima H., Foley J.M., Prior B.M., Dudley G.A., Meyer R.A., Vastus lateralis fatigue alters recruitment of musculus quadriceps femoris in humans. *J. Appl. Physiol.*, **92**: 679–684 (2002)
- 19) Akima H., Saito A., Activation of quadriceps femoris including vastus intermedius during fatiguing dynamic knee extensions. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **113**: 2829–2840 (2013)
- 20) Wakahara T., Ema R., Miyamoto N., Kawakami Y., Inter- and intra-muscular differences in training-induced hypertrophy of the quadriceps femoris: Association with muscle activation during the first training session. *Clin. Physiol. Funct. Imaging*, (in press)

# 電気化学センサーを用いた簡易型皮膚ガス分析装置による 運動時の皮膚ガス中アセトン濃度分析の試み

名古屋工業大学大学院 伊藤 宏  
(共同研究者) 同 大桑 哲男  
名古屋工業大学 津田 孝雄

## Changes In Skin-Gas Acetone Concentrations Following Exercise by Portable Skin-Gas Acetone Analyzer Using Electrochemical Sensors

by

Hiroshi Itoh, Tetsuo Ohkuwa  
*Graduate School of Engineering,  
Nagoya Institute of Technology*  
Takao Tsuda  
*Research Fellow, Nagoya Institute of Technology*

### ABSTRACT

We examined the changes in skin-gas acetone concentrations following the 60% heart rates (HR) max cycle exercise by the portable skin-gas acetone analyzer using electrochemical sensors.

The standard acetone gases significantly ( $r=0.992$ ,  $p<0.05$ ) related to the results of same standard gas measurements by the portable skin-gas acetone analyzer. Thus, we confirmed the reliability of acetone gas measurements by the portable skin-gas acetone analyzer.

Six healthy male students ( $22.2 \pm 1.5$  years; mean  $\pm$  SD) volunteered as the subjects, and none of them were smokers. The subjects performed 60% HRmax cycle exercise for 30 min. Skin-gas acetone concentrations of each subject were measured

from the first finger of right hand using a probe at rest, 5, 10, 15, 20, 30 min during, and 5, 10, 20 min after the exercise. HR were also measured at same point using HR monitor of the cycle ergometer.

Skin-gas acetone concentrations significantly increased 20 ( $p<0.01$ ) and 30 ( $p<0.05$ ) min during exercise compared to the resting value, then returned to the resting value after the exercise.

These results suggest that the skin-gas acetone concentrations increase following 60% HRmax cycle exercise for 30 min. Thus, the portable skin-gas acetone analyzer using in this study is reliable and useful to measure skin-gas acetone concentrations from the fingertip for only 2min.

## 要 旨

本研究は、電気化学センサーおよび半導体センサーを用いた簡易型皮膚ガス中アセトン濃度分析装置による運動前後の皮膚ガス中アセトン濃度の分析を試みようとした。標準ガスと装置の標準ガス実測値との間には有意な相関関係 ( $r=0.992$ ,  $p<0.05$ ) が認められ、各被験の安静値の変動係数が5%未満であったことから分析装置の信頼性が確かめられた。

健康な男子学生6人 ( $22.2\pm 1.5$ 歳) を対象に、自転車エルゴメーターを用いた最大心拍数 (heart rate max; HRmax) の60%の運動を30分間行わせ、運動前の安静、運動中5, 10, 15, 20, 30分、運動終了後5, 10, 20分に利き手の人差し指に取り付けた測定装置の専用プローブも用いて皮膚ガスを採集してアセトン濃度分析を行った。また、心拍数については自転車エルゴメーター付属の心拍モニターにより測定した。

皮膚ガス中アセトン濃度は、安静値に対して上昇し、運動開始後20 ( $p<0.01$ ), 30分 ( $p<0.05$ ) に有意に高い値が認められ、運動終了後には低下して安静値に回復する傾向が見られた。

以上、本研究で簡易型皮膚ガス中アセトン濃度分析装置の信頼性が確かめられた。また、その装

置を用いて60%HRmax、30分間の運動で認められた皮膚ガス中アセトン濃度の有意な上昇は、肝臓での脂肪酸酸化によるケトン体生成増大や血中 $\beta$ -ヒドロキシ酪酸濃度上昇などを反映している可能性が推察された。

## 緒 言

ケトン体とは、脂質代謝の中間代謝産物でアセト酢酸、アセトン、 $\beta$ -ヒドロキシ酪酸の総称を指す<sup>1-3)</sup>。生体内におけるケトン体生成は、主に肝臓における脂肪酸の $\beta$ 酸化によるもので、 $\beta$ -ヒドロキシ酪酸は酵素的にアセト酢酸に変換され、 $\beta$ -ケト酸であるアセト酢酸は不安定な物質のため容易に非酵素的に脱炭酸してアセトンへと変化する<sup>1,2,4)</sup>。 $\beta$ -ヒドロキシ酪酸とアセト酢酸はエネルギー源として脳、心臓、腎臓、骨格筋などの組織で利用される<sup>2,4)</sup>が、アセトンは最終代謝物であり揮発性物質のためエネルギー源としては利用されずに呼吸<sup>5,6)</sup>や皮膚ガス<sup>1,7)</sup>を介して体外へ排出される<sup>8)</sup>。このようなことから、過剰なケトン体生成状態では呼吸<sup>5,9)</sup>や皮膚ガス<sup>10,11)</sup>中アセトン濃度が上昇し、呼吸や皮膚ガス中アセトン濃度の上昇は肝臓でのケトン体生成量の増加や血中 $\beta$ -ヒドロキシ酪酸、アセト酢酸濃度の上昇を反映すると考えられている<sup>1,2,12)</sup>。

実際にグルコース代謝に支障がある糖尿病患者では、肝臓での脂肪酸酸化が亢進して代償的に大量にケトン体生成が促進されるため、呼気<sup>5,6,9)</sup>や皮膚ガス<sup>10,11)</sup>中アセトン濃度が健常者に比べて高いことが知られている。

一方、運動時には解糖系や $\beta$ 酸化により生成されたアセチル CoA は速やかにクエン酸回路により消費されるが、運動によって肝臓でも過剰なアセチル CoA が生成されると、肝臓のミトコンドリアではアセチル CoA は $\beta$ -ヒドロキシ酪酸あるいはアセト酢酸へと変換される<sup>1,2)</sup>。しかし、肝臓自体はケトン体をエネルギー源として利用出来ないため、激しい運動時には血中ケトン体( $\beta$ -ヒドロキシ酪酸)<sup>4,8)</sup>や呼気<sup>12,13)</sup>および皮膚ガス<sup>14,15)</sup>中アセトン濃度が上昇することが報告されている。

ところで上述した先行研究では、従来、呼気や皮膚ガス中アセトン濃度分析方法としてガスクロマトグラフ(gas chromatograph; GC)が主流であった<sup>11,14,15)</sup>。GCは高感度、高精度で再現性が高い分析を可能とするが、装置が大きく実験室内での設置が限定されること、装置そのものが高価であること、1サンプルの分析に要する時間が30分前後であることなどから装置を持ち運んで多くのサンプルを分析するには適さない。

そこで、本研究では電気化学センサーおよび半導体センサーを用いた携帯可能、約2分間で分析可能な開発中の簡易型皮膚ガス中アセトン濃度分析装置の信頼性を確かめようとした。また、その装置を用いて最大下の自転車運動が指先から採集された皮膚ガス中アセトン濃度変化に及ぼす影響についても分析を試みようとした。

## 1. 研究方法

### 1. 1 被験者

被験者は、非喫煙者でビタミン剤を含めた特別な薬物を服用していない健康な男子学生6名とし

た。被験者には、名古屋工業大学生命倫理審査委員会に承認された本研究の目的と実験内容を十分説明し同意を得た。被験者は全員、特別な運動習慣がなく、実験の前3日間の激しい運動、また前日の飲酒を制限し、実験当日は実験開始2時間前までに朝食を摂らせた。また、被験者には午前10時前後に室温、湿度を一定に保った実験室にて30分間、座位で安静を保たせた。表1に被験者の身体的特性を示した。

表1 被験者の身体的特性

N=6	Age (years)	Height (cm)	Mass (kg)	BMI (kg/m <sup>2</sup> )
Mean	22.2	172.6	75.6	25.3
SD	1.5	7.5	17.1	5.0

BMI: body mass index

### 1. 2 皮膚ガス採集および皮膚ガス中アセトン濃度分析方法

本研究では、電気化学センサーおよび半導体センサーを用いた簡易型皮膚ガス中アセトン濃度分析装置(ピコデバイス社製試作機)により皮膚ガス中アセトン濃度を求めた。

本装置の専用プローブを被験者の効き手人差し指、指先から第2関節まで取り付け、30秒間プローブ内を実験室内の空気を60ml/分で流して洗浄した後、20秒間プローブ内の空気を駐留させ、その後駐留させたガスを皮膚ガスサンプルとして採集し、20秒間でアセトン濃度分析を行った(図1)。

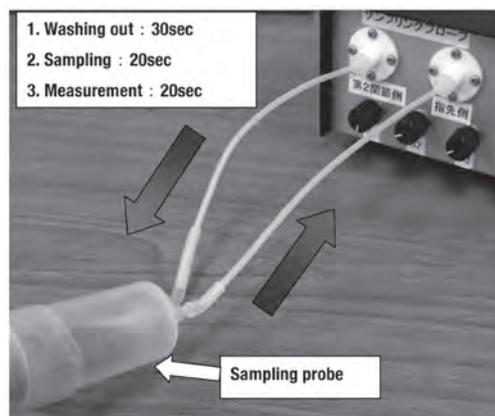


図1 皮膚ガスサンプリング概略

装置のサンプリング、分析の合間があるため、実際の分析に要する時間は2分程度であった。安静値については3回連続して測定した値の平均値を安静値とし、運動前後の値については決められた時間の60秒前から装置を稼働させてその時間の値とした。

### 1. 3 装置の信頼性

装置のサンプルバッグ内洗浄を行わないガスバッグ測定モードにより標準ガス (0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2ppm) を測定して検量線を作成し、装置のディスプレイに表示される数値が正しいか否かを検証した。さらに装置の信頼性、再現性を検討するため各被験者の安静値について、プローブ内の洗浄作業を行う測定モードにより10回連続測定して変動係数を求めた。

### 1. 4 運動負荷

被験者には、実験の1週間前に自転車エルゴメーター (エアロバイク 900U, コンビウエルネス社製) を用いて最大心拍数 (heart rate max; HRmax) の60%となる負荷を決めるために15分間のプレテストを行った。実験当日、被験者は60 watt, 70回転/分で自転車エルゴメーターによる運動を開始し、2分毎に10または20 watt ずつ負荷を漸増させて10分までに各被験者の60% HRmax となるように調節した。皮膚ガス中アセトン濃度の分析は、安静、運動開始後5, 10, 15, 20, 30分、さらに運動終了後5, 10, 20分に測定して各時間の値とした。また、心拍数は皮膚ガスと同じ時間に自転車エルゴメーター付属の心拍メモリーを用いて記録した。

### 1. 5 統計処理

全てのデータは平均値 ± 標準偏差とし、反復測定-分散分析後、Sheffé法を用いて post hoc 検定を実施し、有意水準は  $p < 0.05$  とした。

## 2. 結果

### 2. 1 分析装置の信頼性

アセトンの標準ガス (0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 ppm) を作成して分析装置の実測値による回帰直線を求めた。その結果、標準ガスと分析装置による値の間には有意な正の相関関係 ( $r=0.992$ ,  $p < 0.05$ ) が認められ、本研究の分析装置によるアセトン濃度分析結果の信頼性が確認できた (図2)。また、被験者6名の安静値についての連続測定時変動係数は各々4.9, 3.8, 2.8, 1.4, 1.5, 2.9%であった。このように被験者全員の測定値の変動係数が5%未満であったことから本装置の再現性が確認出来た。

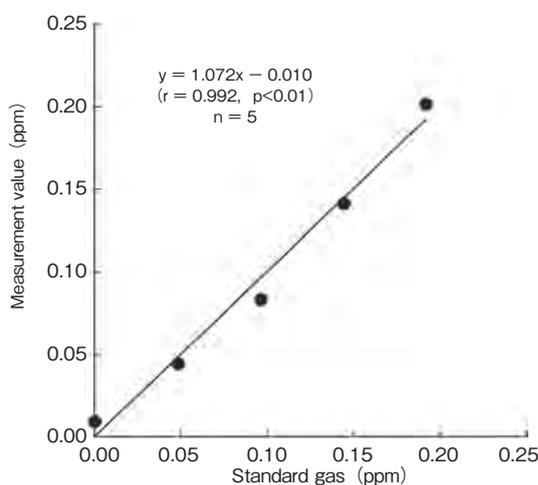


図2 アセトン標準ガスに対する簡易型測定装置の実測値

### 2. 2 運動前後の心拍数の変化

運動前後のHRの変化は図3に示した。各被験者によって運動負荷、HRの変化は異なるが、運動開始後からHRは有意 ( $p < 0.01$ ) に上昇し、10分にはどの被験者も概ね60% HRmax に達した。また、運動終了後には速やかに低下して安静値に回復する傾向が見られた。

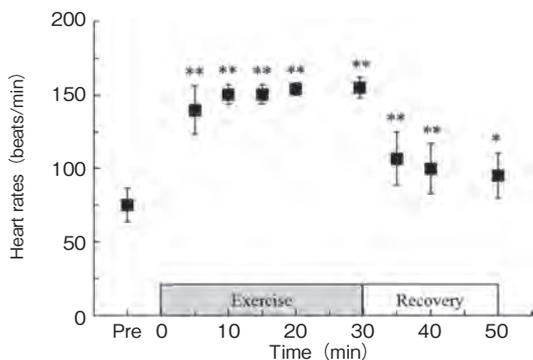


図3 運動前後の心拍数の変化

Values are Mean ± SD.

\* p<0.05, \*\* p<0.01 significantly different vs. pre.

### 2. 3 運動前後の皮膚ガス中アセトン濃度の変化

皮膚ガス中アセトン濃度は、安静値に対して運動直後から上昇し、運動開始後 20 (p<0.01) および 30 (p<0.05) 分にそれぞれ有意に高い値が認められた (図 4)。また、運動終了後の皮膚ガス中アセトン濃度は低下し、運動終了後 5, 10, 20 分のいずれにおいても安静値に対して有意な差が認められず、回復する傾向が見られた。

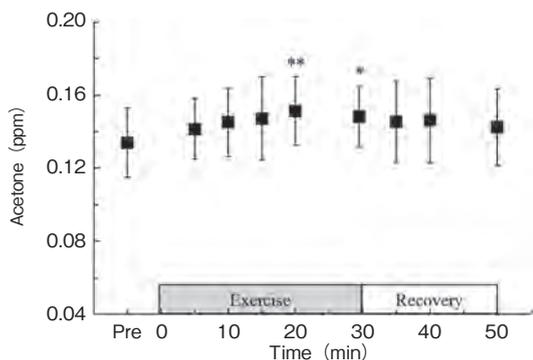


図4 運動前後の皮膚ガス中アセトン濃度変化

Values are Mean ± SD.

\* p<0.05, \*\* p<0.01 significantly different vs. pre.

### 2. 4 皮膚ガス中アセトン濃度の各被験者における最大値

図 5 に皮膚ガス中アセトン濃度、各被験者の安静値と運動後の最大値を示した。各被験者の最

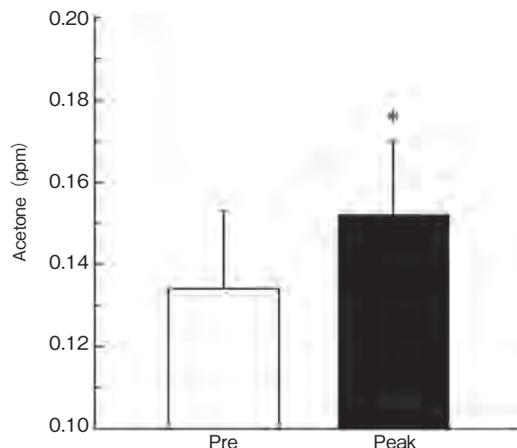


図5 各被験者の皮膚ガス中アセトン濃度安静値および運動後の最大値

Values are Mean ± SD.

\* p<0.05 significantly different vs. pre.

大値は安静値に対して約 1.2 倍の有意 (p<0.05) に高い値が認められた。

## 3. 考 察

これまでも呼気<sup>1, 5, 6, 8, 9, 12, 13)</sup> や皮膚ガス<sup>7, 11, 14, 15)</sup> 中のアセトン濃度分析は行われてきた。これらの多くは GC による分析であり、高精度で信頼性の高いものである。

一方、従来から用いられてきた GC 分析装置は装置本体が大きく持ち運びには適さないこと、また 1 サンプル分析に 30 分前後の時間を要することから簡易的で短時間の分析には適さない。そこで本研究では、電気化学センサーおよび半導体センサーを用いた携帯可能な簡易型皮膚ガス中アセトン濃度分析装置による皮膚ガス中アセトン濃度分析を試み、その信頼性、妥当性を確かめようとした。アセトン標準ガスと標準ガス実測値との間には有意 (p<0.05) な正の相関関係が認められ、各被験者の安静値の変動係数は 5% 未満であった。さらに、本研究の分析装置では 1 サンプルに対して皮膚ガスサンプリングにおける洗浄、分析時間等を合わせても約 2 分と非常に短時間であること、装置も持ち運び可能であることから携帯型

分析装置として優れていることが確かめられた。

運動により血中ケトン濃度が上昇することはよく知られている<sup>8, 12, 16-18</sup>。Balasse と Frey ら<sup>12</sup>) は最大酸素摂取量の 40-60%、120 分のトレッドミル走により血中ケトン濃度が上昇し、40% よりも 60% のトレッドミル走の方がその上昇の程度が大きかったことを報告している。運動後にヒトの呼気<sup>8, 12, 16, 17</sup>、皮膚ガス<sup>14, 15</sup> 中アセトン濃度が上昇することも報告されている。その中でも Yamai ら<sup>14</sup>) は、5 分間隔、15 分間の漸増負荷による自転車運動において、15 分後の 990kgm/分の運動強度において呼気および皮膚ガス中アセトン濃度が有意に上昇したことを報告している。皮膚ガスに関してはその他にハンドグリップ運動によってアセトン濃度が上昇したとの報告<sup>15</sup>) もあるが、本研究のような最大下の自転車運動による皮膚ガス中アセトン濃度変化に関するものは Yamai ら<sup>14</sup>) を除いて見当たらない。本研究における 60%HRmax の自転車運動後に見られた皮膚ガス中アセトン濃度上昇は Yamai ら<sup>14</sup>) の結果を支持するものである。本研究における運動後の皮膚ガス中アセトン濃度の上昇も先行研究<sup>1, 2, 12</sup>) で論じられているように、肝臓における脂肪酸酸化によるケトン体生成が亢進したこと、血中ケトン濃度が上昇したことを反映している可能性が示唆された。

一方、運動時の骨格筋におけるアセチル CoA の消費やケトン体の取り込みについては運動強度、持続時間によって異なり、血中の遊離脂肪酸 (free fatty acid: FFA) レベル、肝臓における血流や FFA の取り込みなど多くの要因が関わる<sup>12, 13</sup>) ため非常に複雑である。運動時には  $\beta$  受容体刺激が強まり脂肪酸動員が促進する<sup>18, 19</sup>) が、その脂肪酸動員は最大酸素摂取量の 25% で最も大きく、強度が高くなると減少する<sup>20</sup>)。これらのことから、運動中の脂肪酸の分解は 60% よりも低強度の運動でも十分に高まることが考えられ、本

研究のように定常状態に至る 30 分程度の運動であれば 60% に満たない強度の最大下運動でも皮膚ガス中アセトン濃度が上昇する可能性も考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、電気化学センサー及び半導体センサーを用いた簡易型皮膚ガス中アセトン濃度分析装置の信頼性が確かめられた。

本研究の分析装置により、60%HRmax、30 分間の自転車運動時における皮膚ガス中アセトン濃度は、安静値に対して運動後 20 ( $p < 0.01$ )、30 ( $p < 0.05$ ) 分にそれぞれ有意に高くなり、運動終了後には安静値に回復する傾向が認められた。これらの皮膚ガス中アセトン濃度の増減は、肝臓における脂肪酸酸化に伴うケトン体生成の増減、さらにその血中濃度変化を反映している可能性が示唆された。

以上、本研究の簡易型皮膚ガス中アセトン濃度分析装置は、コンパクトで携帯性が高く、約 2 分間という短時間での分析が可能であり、GC に替わる新しい分析装置として期待できることが確かめられた。また、運動時の脂肪酸燃焼によるダイエット指標や糖尿病の新たな診断指標として本研究の皮膚ガス中アセトン濃度分析装置利用が実用化される可能性が高まった。

#### 謝 辞

本稿を終えるにあたり、研究助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学財団に心から深謝いたします。また、本研究実施にあたり多大なご協力をいただいた田村耕佑、松浦海、吉井雄二、宇津有磯、加藤大貴、高井紗英氏の名古屋工業大学学生各諸氏に厚く御礼申し上げます。本研究は一部「知の拠点あいち」研究プロジェクトとして技術援助等をいただきましたことを深謝いたします。

文 献

- 1) Amann, A., L. Costello Bde, W. Miekisch, J. Schubert, B. Buszewski, J. Pleil, N. Ratcliffe, T. Risby: The human volatilome: volatile organic compounds (VOCs) in exhaled breath, skin emanations, urine, feces and saliva. *Journal of breath research*, **8** (3) 034001 (2014)
- 2) Laffel, L.: Ketone bodies: a review of physiology, pathophysiology and application of monitoring to diabetes. *Diabetes/metabolism research and reviews*. **15** (6) 412-26 (1999)
- 3) Mitchell, G.A., S. Kassojska-Bratinova, Y. Boukaftane, M.F. Robert, S.P. Wang, L. Ashmarina, M. Lambert, P. Lapierre, E. Potier: Medical aspects of ketone body metabolism. *Clinical and investigative medicine*, **18** (3) 193-216 (1995)
- 4) Owen, O.E., V.E. Trapp, C.L. Skutches, M.A. Mozzoli, R.D. Hoeldtke, G. Boden, G.A. Reichard, Jr.: Acetone metabolism during diabetic ketoacidosis. *Diabetes*, **31** (3) 242-8 (1982)
- 5) Musa-Veloso, K., S.S. Likhodii, S.C. Cunnane: Breath acetone is a reliable indicator of ketosis in adults consuming ketogenic meals. *The American journal of clinical nutrition*, **76** (1) 65-70 (2002)
- 6) Wang, Z. C. Wang: Is breath acetone a biomarker of diabetes? A historical review on breath acetone measurements. *Journal of breath research*, **7** (3) 037109 (2013)
- 7) Naitoh, K., Y. Inai, T. Hirabayashi, T. Tsuda: Exhalation behavior of four organic substrates and water absorbed by human skin. *Biological & pharmaceutical bulletin*, **25** (7) 867-71 (2002)
- 8) Wigaeus, E., S. Holm, I. Astrand: Exposure to acetone. Uptake and elimination in man. *Scandinavian journal of work, environment & health*, **7** (2) 84-94 (1981)
- 9) Li, W., Y. Liu, X. Lu, Y. Huang, Y. Liu, S. Cheng, Y. Duan: A cross-sectional study of breath acetone based on diabetic metabolic disorders. *Journal of breath research*, **9** (1) 016005 (2015)
- 10) Turner, C.: Potential of breath and skin analysis for monitoring blood glucose concentration in Diabetes. *Expert review of molecular diagnostics*, **11** (5) 497-503 (2011)
- 11) Yamane, N., T. Tsuda, K. Nose, A. Yamamoto, H. Ishiguro, T. Kondo: Relationship between skin acetone and blood beta-hydroxybutyrate concentrations in Diabetes. *Clinica chimica acta; international journal of clinical chemistry*, **365** (1-2) 325-9 (2006)
- 12) Balasse, E.O. F. Fery: Ketone body production and disposal: effects of fasting, diabetes, and exercise. *Diabetes/metabolism reviews*, **5** (3) 247-70 (1989)
- 13) Wahren, J., Y. Sato, J. Ostman, L. Hagenfeldt, P. Felig: Turnover and splanchnic metabolism of free fatty acids and ketones in insulin-dependent diabetics at rest and in response to exercise. *The Journal of clinical investigation*, **73** (5) 1367-76 (1984)
- 14) Yamai, K., T. Ohkuwa, H. Itoh, Y. Yamazaki, T. Tsuda: Influence of cycle exercise on acetone in expired air and skin gas. *Redox Rep.*, **14** (6) 285-9 (2009)
- 15) Mori, K., T. Funada, M. Kikuchi, T. Ohkuwa, H. Itoh, Y. Yamazaki, T. Tsuda: Influence of dynamic hand-grip exercise on acetone in gas emanating from human skin. *Redox Rep.*, **13** (3) 139-42 (2008)
- 16) Senthilmohan, S.T., D.B. Milligan, M.J. McEwan, C.G. Freeman, P.F. Wilson: Quantitative analysis of trace gases of breath during exercise using the new SIFT-MS technique. *Redox Rep.*, **5** (2-3) 151-3 (2000)
- 17) King, J. et al.: Isoprene and acetone concentration profiles during exercise on an ergometer. *Journal of breath research*, **3** (2) 027006 (2009)
- 18) Wahrenberg, H., J. Bolinder, P. Arner: Adrenergic regulation of lipolysis in human fat cells during exercise. *European journal of clinical investigation*, **21** (5) 534-41 (1991)
- 19) Arner, P., E. Kriegholm, P. Engfeldt, J. Bolinder: Adrenergic regulation of lipolysis in situ at rest and during exercise. *The Journal of clinical investigation*, **85** (3) 893-8 (1990)
- 20) Romijn, J.A., E.F. Coyle, L.S. Sidossis, A. Gastaldelli, J.F. Horowitz, E. Endert, R.R. Wolfe: Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *The American journal of physiology*, **265** (3 Pt 1) E380-91 (1993)

## 高強度のウォームアップ運動が 活動筋の酸素動態に及ぼす影響

神戸芸術工科大学大学院 古賀 俊策  
(共同研究者) 神戸大学 近藤 徳彦  
同志社大学 福岡 義之  
神戸大学 天野 達郎  
神戸芸術工科大学 奥島 大

### Effects of High-Intensity Warm-Up Exercise on Balance for Oxygen Delivery and Utilization in Exercising Muscles

by

Shunsaku Koga

*Graduate School of Kobe Design University*

Narihiko Kondo, Tasturo Amano

*School of Human Development, University of Kobe*

Yoshiyuki Fukuoka

*Faculty of Health and Sports Science,*

*Doshisha University*

Dai Okushima

*Kobe Design University, School of Design*

#### ABSTRACT

Heavy priming exercise reduces the oxygen deficit during the subsequent heavy exercise. Current theories for the etiology of the oxygen deficit following the onset of exercise include increased bulk and local blood flow and  $O_2$  delivery ( $\dot{Q}$ ) via residual

vasodilation and academia/temperature-induced rightward shift of the hemoglobin (Hb) O<sub>2</sub> dissociation curve. We used a method to quantify absolute [deoxy(Hb + Mb), HHb] of superficial- and deeper regions of the rectus femoris (RF) muscle in 6 participants during cycle exercise, using time-resolved NIRS with adipose tissue correction. HHb of the deeper RF for both the priming- and subsequent heavy exercise showed steady state responses toward the end of exercise, suggesting matching of oxygen consumption ( $\dot{V}O_2$ ) and  $\dot{Q}$  kinetics. Compared with the superficial RF, peak deoxygenation of the deep RF was not significantly different, however deoxygenation kinetics were slower (mean response time, priming exercise,  $35 \pm 11$  s vs.  $66 \pm 26$  s; subsequent exercise,  $32 \pm 8$  s vs.  $44 \pm 22$  s,  $p < 0.05$ ). These data revealed temporal and spatial disparities in muscle deoxygenation responses to exercise and suggested matching of  $\dot{V}O_2$  and  $\dot{Q}$  kinetics, thus the oxygen deficit reduced in the deeper region RF muscle, compared with the superficial RF. Further, these results suggest that deep region muscle has a greater  $\dot{Q} / \dot{V}O_2$ , which led to improve matching of  $\dot{Q}$  -to- $\dot{V}O_2$  thereby raising muscle and microvascular oxygen pressure and enhancing blood-myocyte O<sub>2</sub> flux.

## 要 旨

高強度のウォームアップ (W-up) 運動を用いると、W-up 運動後の主運動における活動筋の酸素消費量 ( $\dot{V}O_2$ ) の増加が速くなり、酸素不足が減少する。本研究では、表層筋に加えて深層筋も含めた活動筋の酸素動態を計測し、高強度のW-up 運動が活動筋の酸素動態に及ぼす影響を明らかにした。時間分解・近赤外分光装置を用いて、活動筋における脱酸素化ヘモグロビン+ミオグロビン (HHb) を計測した。大腿直筋深層部のHHbは第1運動と第2運動の開始後の約5分目において定常状態を示し、 $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ の増加速度のマッチングが生じたことが示唆された。さらに、第1運動と第2運動において大腿直筋深層部におけるHHbの時定数と平均応答時間は表層部に比べて有意に遅かった。HHbは $\dot{V}O_2/\dot{Q}$ を反映するので、表層筋に比べて遅筋線維が多く含まれ、運動中の筋温がより高い深層筋では、酸素供給が十

分になって活動筋全体の $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ のバランスが改善され、酸素不足が減少したと推測される。

## 緒 言

高強度のウォームアップ (W-up) 運動を用いると、W-up 運動後の主運動における活動筋の酸素消費量 ( $\dot{V}O_2$ ) の増加速度が速くなり (酸素不足の減少)、運動の継続時間が長くなる (古賀, 2001<sup>5)</sup>; 古賀たち, 2004<sup>6)</sup>)。このメカニズムとして、1) 活動する筋肉と血液中に乳酸が生じて酸素解離曲線の右方シフトと血管拡張が起き、筋微小循環レベルの酸素供給量 ( $\dot{Q}$ ) が増加する、2) 遅筋線維の動員増加が起こり、活動筋の毛細血管と筋細胞の酸素分圧差がより大きくなって、酸素が筋細胞に多く取り込まれる、3) さらに、筋温の上昇によって筋細胞の有酸素性代謝が促進することが挙げられる (Koga et al. 2013<sup>10)</sup>)。

運動継続時間を規定する要因の一つである活動筋の酸素不足は、筋微小循環と細胞レベルの酸

素動態 ( $\dot{V}O_2$  と  $\dot{Q}$  のバランス) の不均一性, とくに  $\dot{V}O_2$  と  $\dot{Q}$  の増加速度の mismatch によって生じる (古賀, 2012<sup>7)</sup>). 著者たちは, 高強度の W-up 運動によって, 表層筋における酸素動態の空間的・時間的な不均一性が変化することを認めただが (Fukuoka et al. 2015<sup>4)</sup>; Koga et al. 2014<sup>11)</sup>; Spencer et al. 2014<sup>15)</sup>), 深層筋 (インナーマッスル) の酸素動態については不明である. 深層筋には遅筋線維が多く含まれ, また表層筋に比べて運動中の筋温がより高いので, 高強度 W-up 運動の効果が促進されて酸素が深層筋に多く取り込まれると予想される.

従来の近赤外分光装置の計測深度は筋肉の表層部 (深さ約 1.5-2cm) に限られるので, 申請者たちはレーザー光源の出力を増加して, 深層筋 (深さ約 3-4cm) の酸素動態の絶対値計測を可能にする時間分解・近赤外分光装置 (TRS-NIRS) を開発した (毛細血管と筋肉組織を通過する近赤外光の散乱と吸収の係数を実測する) (Koga et al. 2015b<sup>13)</sup>; Okushima et al. 2015<sup>14)</sup>). 本研究の目的は, 表層筋に加えて深層筋も含めた活動筋の酸素動態を計測し, 高強度の W-up 運動が活動筋の酸素動態に及ぼす影響を明らかにすることである. 本研究によって, 有酸素性運動能力の向上と運動持続時間の延長を目指す運動処方の開発が期待され, 意義が大きい.

## 1. 研究方法

所属機関倫理委員会による審査を経て, 成人男性 7 名 (21±3 歳) に被験者を依頼した. 高強度の繰返し運動時 (W-up, 自転車運動) における活動筋の脱酸素化ヘモグロビン濃度 (HHb:  $\dot{V}O_2$  と  $\dot{Q}$  のバランスを示す) を測定した. HHb は血液量変動の影響を受けにくく,  $\dot{V}O_2/\dot{Q}$  を反映するので, 鏡像関係にある微小循環の酸素分圧 [ $PO_2$  ( $\dot{Q}/\dot{V}O_2$ )] の動的応答を推測できる (Koga et al. 2012<sup>9)</sup>, 2015a<sup>12)</sup>).

通常使用されている連続波 (CW) NIRS は, 光学係数を一定とみなし, HHb の相対変化を測定するが, 時間分解・近赤外分光装置 (TRS-NIRS) を用いれば HHb の絶対値 (振幅) を計測できる (Koga et al. 2011<sup>8)</sup>). 浜松ホトニクス製の TRS-NIRS を用いて, 大腿直筋の表層部, および深層部 (一部の被験者では中間広筋表層部を含む) の HHb を連続測定した. 大腿直筋の皮膚表面に貼り付けた近赤外分光センサーの送光部と受光部の距離を 3cm (表層部), および 6cm (深層部) とし, 測定深度はそれぞれ約 1.5cm, および 3cm と推定した.

さらに, 超音波ドップラー装置 (Yokogawa-GE Medical, Logiq400) を用いて大腿直筋表面の皮下脂肪厚を測り, HHb の値を補正した (Adami et al. 2015<sup>1)</sup>; Bowen et al. 2013<sup>2)</sup>; Koga et al. 2011<sup>8)</sup>).

$\dot{V}O_2$  の増加が  $\dot{Q}$  の増加よりも速いと HHb が増加し, 酸素不足となる. そこで, 運動時における活動筋複数部位の HHb の増加速度を測り, 酸素不足の部位を推定した.

また, 活動筋全体の酸素消費動態 ( $\dot{V}O_2$ ) を反映する肺胞レベルの  $\dot{V}O_2$  動態 (第 2 相と第 3 相) をブレスバイブレスの呼吸ガス交換測定装置 (ミナト医科学, AE-300S) で連続的に測定した.

座位姿勢において, 2 分間の安静と 4 分間の無負荷強度 (0 watt) の自転車運動を行い, その直後に 6 分間の高強度 W-up (第 1) 運動, 回復時に 6 分間の無負荷運動, そして 6 分間の高強度第 2 運動を負荷した. 高強度運動の負荷強度は, 漸増負荷 (ランプ) 自転車運動 (20watt 毎分の増加率) による事前の測定で求めた (乳酸閾値と最高酸素摂取量の約 50% に値する運動強度).

計測データの解析: 運動負荷と生理反応の応答速度の関係を非線形近似モデルによって解析した.

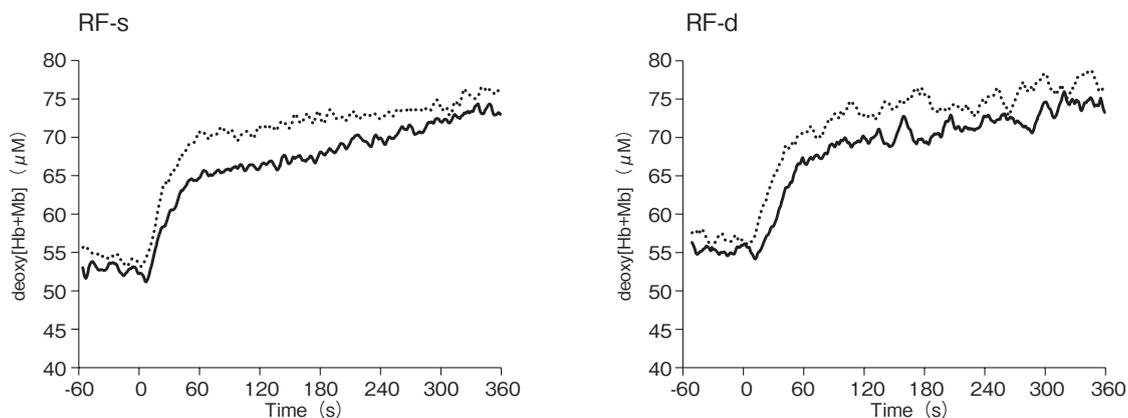


図1 高強度運動時における筋脱酸素化動態 (実線:1st bout,点線:2nd bout)

## 2. 研究結果

### 2. 1 第1運動と第2運動における比較

高強度 W-up (第1) 運動と高強度第2運動において、大腿直筋の表層部 (RF-s) と深層部 (RF-d) の脱酸素化ヘモグロビン濃度 [HHb, deoxy (Hb+Mb)] の絶対値は指数関数状に増加した (図1)。つまり、HHb は  $\dot{V}O_2/\dot{Q}$  を反映するので、第1運動と第2運動の両方において、無負荷運動から高強度運動への移行に伴って  $\dot{Q}$  は  $\dot{V}O_2$  よりも遅く増加したことが示された。高強度運動の終了時点において、大腿直筋表層部の HHb は第1運動と第2運動ともに増加を続けた。一方、大腿直筋深層部の HHb は両方の運動の最終1分間において定常状態を示した。

第2運動における大腿直筋表層部 HHb のベースライン (無負荷運動の値)、振幅 (運動終了時一ベースライン)、および運動開始時の時間遅れと時定数は第1運動に比べて、有意な差はなかった (表1)。しかし、平均応答時間は第2運動の方が短い傾向にあった。また、大腿直筋深層部の HHb でも表層筋と同様の結果が見られた。

### 2. 2 大腿直筋表層部と深層部における比較

第1運動では、大腿直筋深層部と表層部における HHb のベースライン、振幅、および運動開始

表1 高強度運動時における筋脱酸素化動態の比較

	RF-s	RF-d
1st bout		
Baseline ( $\mu M$ )	53.8 $\pm$ 4.6	55 $\pm$ 8.0
Amplitude ( $\mu M$ )	19.5 $\pm$ 16.8	20.2 $\pm$ 15.8
Time delay (s)	7.0 $\pm$ 4.6	9.0 $\pm$ 7.0
Time constant (s)	28.4 $\pm$ 8.7	56.4 $\pm$ 23.7 *
Mean response time (s)	35.4 $\pm$ 11	65.5 $\pm$ 26.4 *
2nd bout		
Baseline ( $\mu M$ )	55.5 $\pm$ 6.4	56.0 $\pm$ 6.8
Amplitude ( $\mu M$ )	21 $\pm$ 15.0	22.1 $\pm$ 18.7
Time delay (s)	5.1 $\pm$ 2.0	5.6 $\pm$ 4.7
Time constant (s)	27.2 $\pm$ 8.0	38.5 $\pm$ 18.9 *
Mean response time (s)	32.3 $\pm$ 8.1 †	44.0 $\pm$ 21.7 * †

\* , main effect for RF-s vs. RF-d, P<0.05

† , main effect for 1st vs. 2nd, P=0.06

時の時間遅れに有意な差はなかった (表1)。しかし、深層部における HHb の時定数と平均応答時間は表層部に比べて有意に遅かった (表1)。さらに、第2運動においても、大腿直筋深層部と表層部における HHb のベースライン、振幅、および運動開始時の時間遅れに有意な差はなかったが、深層部における HHb の時定数と平均応答時間は表層部に比べて有意に遅かった。

## 3. 考察

自転車運動において、活動筋毛細血管レベルの  $\dot{Q}$  は不均一に分布しているので、活動肢全体に酸素を供給する血流 (例、大腿動脈血流) と微小循環における血流の調節は異なる (Chin et al.2011

3) , Koga et al. 2014<sup>11)</sup>). また、運動中に動員される筋線維の種類によって酸素の供給と利用の割合 ( $\dot{V}O_2/\dot{Q}$ ) が異なり、活動筋の酸化代謝が不均一になることが推測される。今回の研究では、高強度 W-up (第1) 運動と高強度第2運動において、大腿直筋表層部の HHb は指数関数状に増加したので、無負荷運動から高強度運動への移行に伴って  $\dot{Q}$  は  $\dot{V}O_2$  よりも遅く増加したことが示された。この結果は Fukuoka et al. (2015<sup>4)</sup>) の結果と一致する。一方、高強度運動の終了時点において、大腿直筋表層部の HHb は第1運動と第2運動ともに増加を続けた。しかし、大腿直筋深層部の HHb は両方の運動開始後の約5分目において定常状態を示し、 $\dot{V}O_2$  と  $\dot{Q}$  の増加速度のマッチングが生じたことが示唆された。

第2運動における大腿直筋表層部 HHb のベースライン (無負荷運動の値)、振幅 (運動終了時ベースライン)、および運動開始時の時間遅れと時定数は第1運動に比べて、有意な差はなかった (表1)。しかし、平均応答時間は第2運動の方が短い傾向にあった。大腿直筋深層部の HHb でも表層筋と同様の結果が見られた。高強度のウォームアップ (W-up) 運動を用いると、W-up 運動後の主運動における活動筋の  $\dot{V}O_2$  の増加速度が速くなり、酸素不足が減少する。したがって、第2運動における大腿直筋 HHb の平均応答時間が第1運動に比べて、短い傾向にあった原因として、下記のメカニズムが考えられる。1) 活動筋と血液中に生じた乳酸によって酸素解離曲線の右方シフトと血管拡張が起き、筋微小循環レベルの酸素供給量が増加する、2) 遅筋線維の動員増加が起これ、活動筋の毛細血管と筋細胞の酸素分圧差がより大きくなって、酸素が筋細胞に多く取り込まれる、3) さらに、筋温の上昇によって筋細胞の有酸素性代謝が促進することが挙げられる (Koga et al. 2013<sup>10)</sup>)。

第1運動では、大腿直筋深層部と表層部におけ

る HHb のベースライン、振幅、および運動開始時の時間遅れに有意な差はなかった (表1)。しかし、深層部における HHb の時定数と平均応答時間は表層部に比べて有意に遅かった (表1)。さらに、第2運動においても、大腿直筋深層部と表層部における HHb のベースライン、振幅、および運動開始時の時間遅れに有意な差はなかったが、深層部における HHb の時定数と平均応答時間は表層部に比べて有意に遅かった。深層筋には遅筋線維が多く含まれ、また表層筋に比べて運動中の筋温がより高いので、高強度 W-up 運動の効果が促進されて酸素が深層筋に多く取り込まれると示唆される (Koga et al. 2015b<sup>13)</sup>)。遅筋線維がより多く動員されると、活動筋全体の  $\dot{V}O_2$  と  $\dot{Q}$  のバランス ( $\dot{V}O_2/\dot{Q}$ ) が改善されること (酸素不足の減少) が予想される。

W-up 運動によって活動筋の  $\dot{Q}$  を増加させた場合、遅筋線維の動員増加が起これ、活動筋全体の酸素不足量は減少するが、HHb の不均一性は変化しない (Fukuoka et al. 2015<sup>4)</sup>)。一方、低酸素環境においては活動筋全体の酸素不足量は増加するが、HHb の空間的分布は通常酸素環境よりも均一になる (Bowen et al. 2013<sup>2)</sup>)。このように、酸素動態の不均一性の程度と酸素不足量の関係については不明な点が多い。さらに、上記の知見は表層筋に限られるので、深層筋も含めた活動筋全体の酸素不足の分布状態が明らかになれば、活動筋全体の酸素不足の減少と運動持続時間の延長が期待される。

動物実験レベルでは、筋線維の種類によって活動筋の酸素交換の動的な応答は異なる (Koga et al. 2014<sup>11)</sup>)。筋収縮の開始直後、持久性に優れる遅筋線維では  $\dot{Q}$  の増加速度が  $\dot{V}O_2$  のそれよりも速く、酸素分圧 ( $PO_2$ ) は低下しにくい。また、応答の遅れ時間が長く、低下速度 (時定数) が遅い。一方、疲労しやすい速筋線維では  $\dot{V}O_2$  に対して  $\dot{Q}$  が不足し、 $PO_2$  がより速く低下して筋細胞への

酸素の取り込みが遅れる。したがって、ヒトにおいても、遅筋線維が多く含まれる浅層筋では、酸素供給が不十分になって酸素不足が顕著になり、 $PO_2$ が減少すると予想される。今回の研究では、第1運動と第2運動共に、大腿直筋深層部におけるHHbの時定数と平均応答時間は表層部に比べて有意に遅かった。HHbは $\dot{V}O_2/\dot{Q}$ を反映するので、遅筋線維が多く含まれる深層筋では、酸素供給が十分になって活動筋全体の $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ のバランスが改善され、酸素不足が減少したと推測される。

### 3. 1 研究成果の社会的貢献度：

1) 高強度のW-up運動と主運動時の活動筋酸素動態の関係を明らかにすれば、遅筋線維が多く含まれる深層筋の動員増加を促す有酸素性運動処方の開発につながる。とくに、活動筋全体の酸素不足の減少と運動持続時間の延長が期待され、意義が大きい。2) 高強度のW-up運動が活動筋の複数部位における酸素不足に及ぼす影響を把握することは、効果的な筋持久性運動トレーニング法の開発、つまり、筋持久能力が向上する部位の特定が可能となり、非常に意義がある。

### 4. 結 論

高強度のウォームアップ(W-up)運動を用いると、W-up運動後の主運動における活動筋の酸素消費量( $\dot{V}O_2$ )の増加が速くなり(酸素不足の減少)、運動の継続時間が長くなる。本研究では、表層筋に加えて深層筋も含めた活動筋の酸素動態を計測し、高強度のW-up運動が活動筋の酸素動態に及ぼす影響を明らかにした。時間分解・近赤外分光装置を用いて、活動筋における脱酸素化ヘモグロビン+ミオグロビン(HHb)を計測し、W-up運動が活動筋の $\dot{Q}$ と $\dot{V}O_2$ のバランスに及ぼす効果を考察した。大腿直筋深層部のHHbは第1運動と第2運動の開始後の約5分目において定

常状態が示され、 $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ の増加速度のマッチングが生じたことが示唆された。さらに、第1運動、および第2運動において大腿直筋深層部におけるHHbの時定数と平均応答時間は表層部に比べて有意に遅かった。HHbは $\dot{V}O_2/\dot{Q}$ を反映するので、表層筋に比べて遅筋線維が多く含まれ、運動中の筋温がより高い深層筋では、酸素供給が十分になって活動筋全体の $\dot{V}O_2$ と $\dot{Q}$ のバランスが改善され、酸素不足が減少したと推測される。

### 謝 辞

本研究の遂行にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚くお礼申し上げます。

### 文 献

- 1) Adami A., Koga S., Kondo N., Cannon D.T., Kowalchuk J.M., Amano T., Rossiter H.B., Changes in whole tissue heme concentration dissociates muscle deoxygenation from muscle oxygen extraction during passive head-up tilt. *J. Appl. Physiol.*, 118: 1091-1099(2015)
- 2) Bowen T.S., Rossiter H.B., Benson A.P., Amano T., Kondo N., Kowalchuk J.M., Koga S., Slowed oxygen uptake kinetics in hypoxia correlate with the transient peak and reduced spatial distribution of absolute skeletal muscle deoxygenation. *Exp. Physiol.*, 98: 1585-1596, (2013)
- 3) Chin L.M., Kowalchuk J.M., Barstow T.J., Kondo N., Amano T., Shiojiri T., Koga S., The relationship between muscle deoxygenation and activation in different muscles of the quadriceps during cycle ramp exercise. *J. Appl. Physiol.*, 111: 1259-1265 (2011)
- 4) Fukuoka Y., Poole D.C., Barstow T.J., Kondo N., Nishiwaki M., Okushima D., Koga S., Reduction of  $\dot{V}O_2$  slow component by priming exercise: novel mechanistic insights from time-resolved near-infrared spectroscopy. *Physiol. Rep.*, 3. doi: 10.14814/phy2.12432(2015)
- 5) 古賀俊策 : 酸素摂取動態. 新運動生理学下巻(宮村實晴編集), 真興交易医書出版部, 57-65(2001)

- 6) 古賀俊策, 遠藤雅子, 塩尻智之: 運動開始時の酸素摂取. 運動と呼吸(宮村實晴編集), 真興交易医書出版部, 24-32(2004)
- 7) 古賀俊策: 活動筋の酸素動態不均一性. 身体運動と呼吸・循環機能(宮村實晴編集), 真興交易医書出版部, 147-154(2012)
- 8) Koga S., Poole D.C., Fukuoka Y., Ferreira L.F., Kondo N., Ohmae E., Barstow T.J., Methodological validation of the dynamic heterogeneity of muscle deoxygenation within the quadriceps during cycle exercise. *Am. J. Physiol.: Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **301**: R534–R541 (2011)
- 9) Koga S., Kano Y., Barstow T.J., Ferreira L.F., Ohmae E., Sudo M., Poole D.C., Kinetics of muscle deoxygenation and microvascular PO<sub>2</sub> during contractions in rat: Comparison of optical spectroscopy and phosphorescence-quenching techniques. *J. Appl. Physiol.*, **112**: 26-32(2012)
- 10) Koga S., Wüst R.C.I., Walsh B., Kindig C.A., Rossiter H.B., Hogan M.C., Increasing temperature speeds intracellular PO<sub>2</sub> kinetics during contractions in single Xenopus skeletal muscle fibers. *Am. J. Physiol.: Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **304**: R59-R66(2013)
- 11) Koga S., Rossiter H.B., Heinonen I., Musch T.I., Poole D.C., Dynamic heterogeneity of exercising muscle blood flow and O<sub>2</sub> utilization. *Med. Sci. Sports Exer.*, **46**: 860-876(2014)
- 12) Koga S., Poole D.C., Kondo N., Oue A., Ohmae E., Barstow T.J., Effects of increased skin blood flow on muscle oxygenation/deoxygenation: comparison of time-resolved and continuous-wave near-infrared spectroscopy signals. *Eur J. Appl. Physiol.*, **115**: 335-343(2015a)
- 13) Koga S., Barstow T.J., Okushima D., Rossiter H.B., Kondo N., Ohmae E., Poole D.C., Validation of a high-power, time-resolved, near-infrared spectroscopy system for measurement of superficial and deep muscle deoxygenation during exercise. *J. Appl. Physiol.*, **118**: 1435-1442(2015b)
- 14) Okushima D., Poole D.C., Rossiter H.B., Barstow T.J., Kondo N., Ohmae E., Koga S., Muscle deoxygenation in the quadriceps during ramp incremental cycling: deep versus superficial heterogeneity. *J. Appl. Physiol.*, **119**: 1313-1319 (2015)
- 15) Spencer M.D., Amano T., Kondo N., Kowalchuk J.M., Koga S., Muscle O<sub>2</sub> extraction reserve during intense cycling is site-specific. *J. Appl. Physiol.*, **117**: 1199-1206(2014)

# 運動による脂肪組織の恒常性維持に対する オートファジーの役割

名古屋市立大学大学院 奥津光晴

## Exercise Training Regulates Adipose Tissue Homeostasis by Autophagy

by

Mitsuharu Okutsu  
*Graduate School of Natural Sciences,  
Nagoya City University*

### ABSTRACT

Animal studies have shown that regular exercise prevents high-fat diet-induced obese. Autophagy has been functionally linked to adipogenesis, obesity and type II diabetes. Here, we determined if regular exercise-induced autophagy activation is sufficient to mitigate high-fat diet-induced obese. Male C57BL/6J mice were randomly assigned into 4 groups: Sedentary normal chow (Sed-NC), Sedentary high-fat diet (Sed-HF), Exercise normal chow (Ex-NC) and Exercise high-fat diet (Ex-HF). Mice in exercise group were performed voluntary wheel-running exercise for 8 weeks. Mice in high-fat diet group were fed 45% high-fat diet for 8 weeks. After exercise training periods, epididymal white adipose tissue was harvested and analyzed autophagy proteins by western blot. We showed that 8 weeks regular exercise prevented high-fat diet-induced obese, inhibited adipocyte hypertrophy and improved glucose tolerance. Autophagy flux (i.e., LC3-II protein) in Sed-HF mice was greater than Ex-NC and Ex-HF mice. These results suggest that exercise training may regulate adipose tissue homeostasis by autophagy.

## 要 旨

定期的な運動は肥満を軽減し生活習慣病を予防する。オートファジーは、不要なタンパクや悪化した細胞内器官を素早く分解することで生体の恒常性を維持している。本研究では、運動による肥満の軽減とオートファジーの変動との関連を検討した。実験には C57BL/6J マウスを使用した。マウスは、安静 + 通常食摂取群、運動 + 通常食摂取群、安静 + 高脂肪食摂取群、運動 + 高脂肪食摂取群の4群に分け、運動群は8週間の運動トレーニングを行い、高脂肪食摂取群は45%の脂肪を含有する餌を摂取した。飼育期間終了後、精巣周囲脂肪を採取しオートファジータンパクの変動を評価した。その結果、高脂肪食摂取による体重の増加や脂肪細胞の肥大は運動により改善された。オートファジータンパクである LC3-II の発現は高脂肪食摂取により増加するが、運動は高脂肪食摂取による LC3-II の増加を抑制した。これらの結果は、定期的な運動によるオートファジーの抑制が脂肪組織の恒常性維持に関与する可能性を示唆している。

## 緒 言

運動不足や高脂肪食摂取による肥満は、糖尿病、高血圧や脂質異常症などの生活習慣病を発症することから、肥満の予防や軽減は健康寿命の延伸や医療費削減の観点から重要な課題である。肥満による生活習慣病の発症は、肥大した脂肪細胞の炎症性サイトカインや遊離脂肪酸の産生の増大によるインスリン抵抗性の惹起が要因であることから、肥満の軽減には肥大した脂肪細胞の効率的な排除と前駆脂肪細胞からの速やかな小型脂肪細胞への分化による脂肪組織の恒常性維持が必要不可欠である。定期的な運動は肥満を改善し生活習慣病を予防することが近年の運動介入研究や大規模疫学調査より立証されている。しかしながら、運

動が肥満の改善と脂肪組織の恒常性を維持する分子メカニズムを解明し、効果的な運動プログラムの開発やスポーツ科学への応用を試みた研究は少ない。

生体の恒常性維持には、生体の構成に必須なタンパクの合成と不要なタンパクの分解が必要である。不要なタンパクを分解するメカニズムはいくつか報告されており、オートファジーはその主要な経路の一つである<sup>1)</sup>。オートファジーは異なる役割を持つ複数のオートファジータンパクが協調的に働くことで機能する。一般的なオートファジーの機序は、LC3 と呼ばれるタンパクの増加から開始する。増加した LC3 はオートファジータンパクである Atg4 により切断され LC3-I に変換される。変換された LC3-I は Atg7 や Atg3 により隔離膜と呼ばれる器官に運搬され結合し、LC3-II に変換される。LC3-II が結合する隔離膜は Atg5 や Atg12 などにより伸長し、オートファゴソームと呼ばれる不要なタンパクを包み込んだ袋状の器官を形成する。さらに、オートファゴソームはリソソームと呼ばれるタンパク分解酵素を含んだ器官と結合し、オートファゴソーム内のタンパクを分解する。オートファジータンパクを全身で欠損したマウスは出生後の生存期間が極端に短いことや、オートファジータンパクを骨格筋特異的に欠損したマウスは野生型マウスに比べ骨格筋の量や機能が低下することから、オートファジーは生体の恒常性維持に重要である<sup>2-5)</sup>。近年、運動は骨格筋や脳などのオートファジーを変動することが報告されており、この変動が運動による身体適応と健康の獲得に重要な役割を果たすと考えられている<sup>6-10)</sup>。しかしながら、高脂肪食摂取に対する運動の肥満改善効果と脂肪細胞のオートファジーとの関連を検討した報告はない。

本研究では、高脂肪摂取による肥満の悪化、定期的な運動による肥満の改善と脂肪組織のオートファジーの変動との関連を検討し、運動による正

常な脂肪組織の構築に対するオートファジーの役割を解明することを目的とした。

## 1. 実験方法

### 1. 1 実験動物

実験には8週齢の雄性 C57BL/6J マウス（日本クレア社）を用いた。マウスは名古屋市立大学医学研究科実験動物研究教育センター（室温 23℃、湿度 50%，午前 8 時から午後 8 時までを明期）にて飼育した。購入後、飼育環境に順応させるため、実験は 1 週間の予備飼育後に開始した。全ての動物実験は、名古屋市立大学医学研究科動物実験委員会の承認を得た後に開始した。

### 1. 2 飼育条件

マウスは、体重が均等になるよう安静 + 通常食摂取群、運動 + 通常食摂取群、安静 + 高脂肪食摂取群および運動 + 高脂肪食摂取群の 4 群に分け 8 週間飼育した。運動はワイヤレス運動量測定装置（Med associate 社）を用いた自発走行運動を使用し、マウスの走行距離と走行動態を 24 時間計測した。高脂肪食は 45% の脂肪を含んだ脂肪食 (D12451, Research Diets 社) を自由摂取させた。全てのマウスの体重と摂餌量は毎週計測し、正常な走行距離、摂餌量と体重増加したマウスを実験に使用した。

### 1. 3 検体採取

解剖は運動期間最終日の一過性の運動の効果を取り除くため、8 週間の飼育期間終了 24 時間後に行った。マウスを麻酔下で頸椎脱臼し安楽死させた後、精巣周囲脂肪、腓腹筋および足底筋を採取した。採取した脂肪組織と腓腹筋は採取直後に重量を微量重量計で素早く計測した。重量測定後、脂肪組織は組織染色とウェスタンブロットに使用した。組織染色用の検体は 4% パラフォルムアルデヒド溶液に浸水後、パラフィンに包埋し脂肪細

胞の大きさの評価に使用した。ウェスタンブロット用の検体は液体窒素にて急速冷凍後、ウェスタンブロット用の溶液に懸濁しオートファジータンパクの変動の評価に使用した。足底筋は解剖直後に液体窒素にて急速冷凍後、ウェスタンブロット用の溶液に懸濁し運動により変動するタンパクの検証に使用した。

### 1. 4 グルコース負荷試験

高脂肪食摂取による耐糖能異常と運動による改善を観察するためにグルコース負荷試験を行った。6 時間の絶食後に尻尾から微量の血液を採取し血糖値測定機器（Roche 社）にてグルコース投与前の血糖値を測定した。グルコース投与前の血糖値を測定後、体重 1kg あたり 1.5mg のグルコースを腹腔注射し、投与後 15 分、30 分、60 分および 120 分に測定した。

### 1. 5 運動トレーニング効果の評価

本研究で使用した運動プログラムの適正を生化学的に立証するため、運動により変動する骨格筋のタンパクの発現を評価した。評価には足底筋を用い、タンパクの測定にはウェスタンブロットを使用した。方法は、ウェスタンブロット用の溶液に懸濁した検体のタンパク濃度を測定後、ポリアクリルアミドゲルを作成し泳動することでタンパクを分離した。タンパク濃度は Lowry 法にて測定した。ポリアクリルアミドゲルは標的とするタンパクの分子量に合わせ、8% と 15% のゲルを作成した。作成したゲルに 40 μg のタンパクをロードしタンパクが十分に分離されるまで泳動した。泳動後 PVDF メンブレンに転写し、ponceau 染色にて転写が正常に行われたことを確認した。確認後、メンブレンを 5% スキムミルクを含む PBST にてブロッキングした後、評価するタンパクを認識する一次抗体を反応させた。一次抗体は、Myosin heavy chain (MHC) IIa (SC-

71), MHCIIb (BF-F3), Peroxisome proliferator-activated receptor- $\gamma$  coactivator 1 $\alpha$  (PGC-1 $\alpha$ ) (Millipore 社) および manganese super oxide dismutase (MnSOD) (abcam 社) を使用した。また, 内因性コントロールとして  $\beta$  actin (Cell Signaling Technology 社) を使用した。一次抗体と反応後, それぞれの一次抗体に対応した horseradish peroxidase 標識の二次抗体とメンブレンを反応させ化学発光検出試薬にて発色しイメージアナライザ (ImageQuant LAS 500, GE) で観察した。

### 1. 6 組織学的評価

4% パラフォルムアルデヒド溶液に浸水した脂肪組織をパラフィンに包埋し薄切した。薄切した検体はキシレンにてパラフィンを取り除いた後, ヘマトキシリンとエオジンにて細胞核と細胞質を染色した (H&E 染色)。染色した組織は顕微鏡下で観察後に撮影し保存した。

### 1. 7 オートファジーの評価

脂肪組織のオートファジーの変動の評価にはウェスタンブロットを使用した。方法は, 運動効果の評価に記載したウェスタンブロットと同様の方法を用いた。一次抗体は, LC3 (Cell Signaling

Technology 社), Atg7 (Cell Signaling Technology 社) および p62 (Sigma 社) を使用し, 内因性コントロールとして  $\beta$  actin を使用した。

## 1. 8 統計解析

各項目の測定結果は平均値  $\pm$  標準誤差で表した。通常食群と高脂肪食摂取群の走行距離の比較は対応のない T 検定を使用し, その他の測定結果の比較は二次元配置分散分析を使用した。有意水準は  $p < 0.05$  を有意とした。

## 2. 実験結果

### 2. 1 体重, 摂餌量および自発運動走行距離

体重は, 全ての群で週齢に依存し増加したが, この増加は高脂肪食摂取群の方が通常食摂取群に比べ有意に高く, 高脂肪食摂取による体重の増加は運動により有意に抑制された (図 1A)。摂餌量は運動群の方が安静群に比べ有意に多かった (図 1B)。脂肪組織の重量は高脂肪食摂取により増加したが, この増加は運動により抑制された (図 1C)。腓腹筋の重量に違いは観察されなかった (図 1D)。自発運動は高脂肪食摂取群と通常食摂取群ともに暗期に走行し明期に休息する正常な活動状態を示しており, 走行距離は両群間に有意差はなかった (図 2A)。

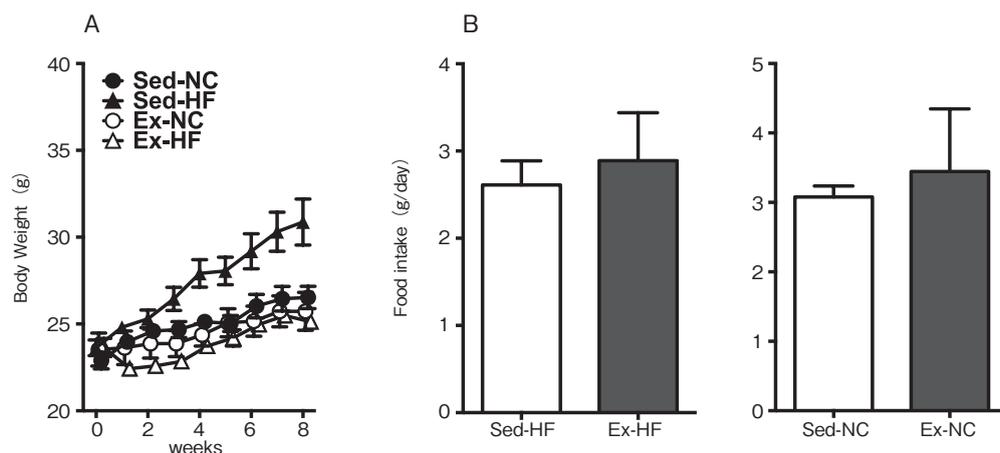


図 1A, B マウスの体重, 摂餌量, 脂肪組織重量および腓腹筋重量の比較  
Sed-NC: 安静通常食群, Sed-HF: 安静高脂肪食群, Ex-NC: 運動通常食群, Ex-HF: 運動高脂肪食群. \*\*:  $p < 0.01$ , \*\*\*:  $p < 0.001$

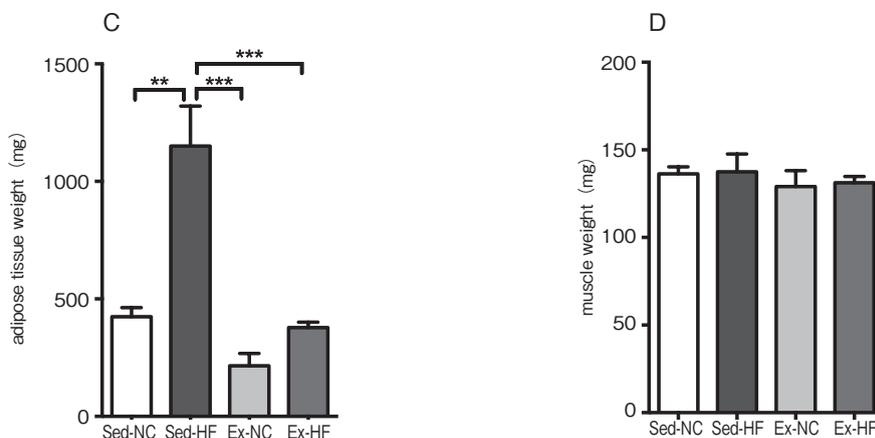


図1C, D マウスの体重, 摂餌量, 脂肪組織重量および腓腹筋重量の比較  
Sed-NC: 安静通常食群, Sed-HF: 安静高脂肪食群, Ex-NC: 運動通常食群, Ex-HF: 運動高脂肪食群. \*\*: p<0.01, \*\*\*: p<0.001

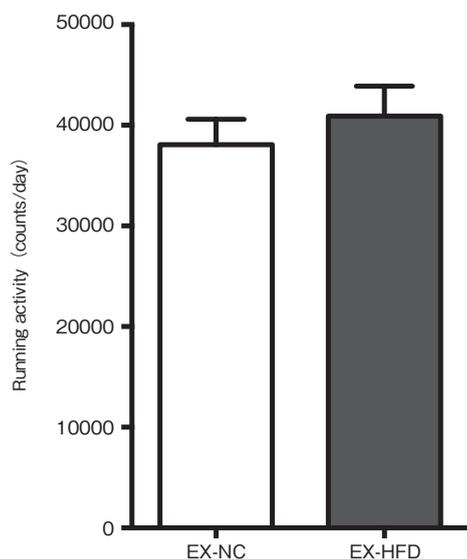


図2 マウスの走行活動の比較  
Ex-NC: 運動通常食群, Ex-HFD: 運動高脂肪食群

## 2. 2 グルコース負荷試験

高脂肪食摂取による耐糖能異常と運動による改善を観察するためにグルコース負荷試験を行った。その結果、グルコース投与はすべての群の血糖値を上昇させるが、その増加は高脂肪食摂取群が通常食摂取群よりも有意に高く、投与120分後も血糖値が高値を示した(図3A)。また運動は高脂肪食摂取による血糖値の上昇を抑制し、通常食摂取群とほぼ同様の変動を示した(図3B)。

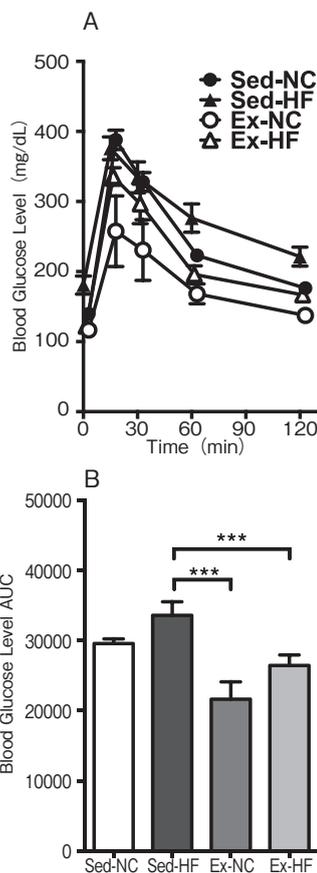


図3 グルコース負荷試験の比較  
Sed-NC: 安静通常食群, Sed-HF: 安静高脂肪食群,  
Ex-NC: 運動通常食群, Ex-HF: 運動高脂肪食群. \*\*\*: p<0.001

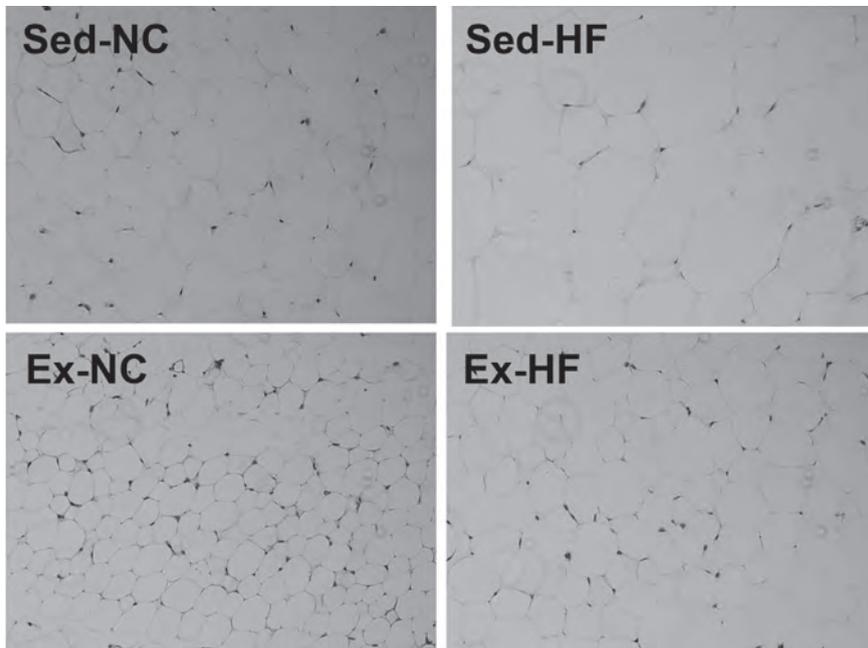


図4 脂肪細胞の大きさの比較  
Sed-NC: 安静通常食群, Sed-HF: 安静高脂肪食群, Ex-NC: 運動通常食群, Ex-HF: 運動高脂肪食群

### 2. 3 運動トレーニングの評価

本研究で使用した自発走行運動モデルが適切な運動モデルであることを確認するため、運動により変動することが知られている骨格筋のタンパクの発現を評価した。その結果、先行研究と同様、運動群の MHCIIa, PGC-1 $\alpha$  および MnSOD の発現は安静群に比べて高く、MHCIIb の発現は安静群と比べて低かった (図 4)。

### 2. 4 組織学的変化

高脂肪食摂取や運動による脂肪細胞の形態学的な変化を観察するため、脂肪細胞の大きさを評価した。その結果、高脂肪食摂取群の脂肪細胞は通常食摂取群の脂肪細胞に比べ大きく、高脂肪食摂取による脂肪細胞の肥大化は運動により改善された (図 5)。

### 2. 5 オートファジーの評価

脂肪組織のオートファジーの変動を検討するた

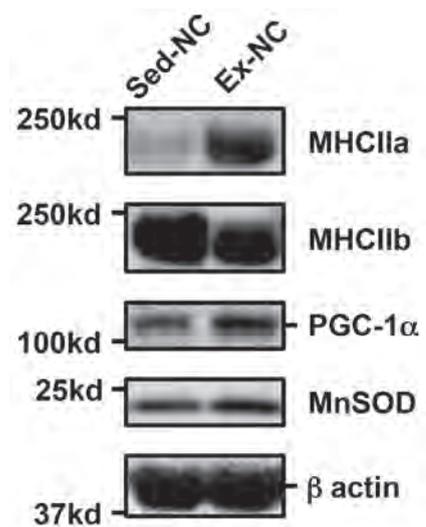


図5 自発運動による骨格筋のタンパクの発現の比較  
Sed-NC: 安静通常食群, Sed-HF: 安静高脂肪食群,  
Ex-NC: 運動通常食群, Ex-HF: 運動高脂肪食群

め、オートファジータンパクである LC3, Atg7 とオートファジーによる分解の指標となる p62 の発現をウェスタンブロットにて測定し各群で比較した。その結果、高脂肪食摂取群の LC3-II は通

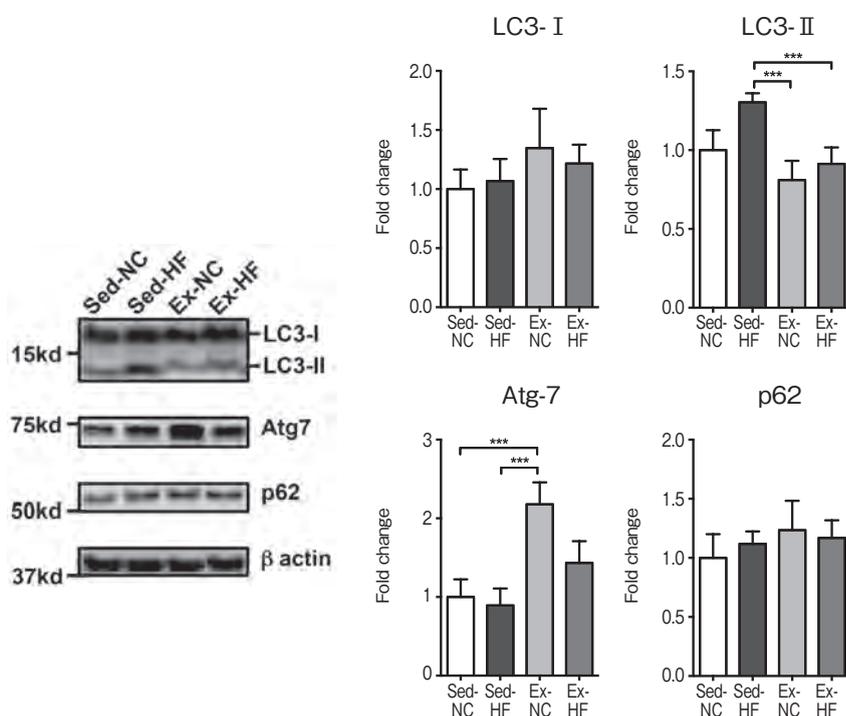


図6 自発運動による脂肪細胞のオートファジータンパクの発現の比較  
Sed-NC: 安静通常食群, Sed-HF: 安静高脂肪食群, Ex-NC: 運動通常食群, Ex-HF: 運動高脂肪食群. \*\*\*:  $p < 0.001$

常食摂取群に比べ有意に高く、この増加は運動により抑制された。Atg7は運動群が安静群に比べ有意に高かった。p62の発現は高脂肪食摂取や運動による違いが観察されなかった(図6)。

### 3. 考察

本研究では、高脂肪食摂取による肥満の悪化、定期的な運動による肥満の改善と脂肪組織のオートファジーの変動との関連を検討し、運動による正常な脂肪組織の構築に対するオートファジーの役割を解明することを目的とした。その結果、マウスの8週間の自発運動は、高脂肪食摂取によるオートファジーの促進を抑制する傾向があることを明らかにした。本研究ではオートファジータンパクの発現を遺伝的に調節したマウスは使用していないため、本研究で得られた結果の因果関係を明らかにすることはできなかった。今後、脂肪組織のオートファジーの変動が正常な脂肪組織の構

築に必要な現象か、あるいは単なる脂肪組織の改善による結果かを科学的に立証する必要がある。

運動によるオートファジーの変動に関する報告は近年増加傾向にあり、骨格筋、心臓、脳などの様々な組織のオートファジーの変動が報告されている<sup>6-10)</sup>。運動によるオートファジーの変動とその生理学的意義について分子生物学的手法を用い科学的に検証した最初の報告は、Levineらのグループが2012年発表した論文であり、運動による骨格筋のグルコース代謝の調節はBCL2を介したオートファジーが必須であることを遺伝子改変動物を用い報告している<sup>6)</sup>。また筆者らは、運動による骨格筋のオートファジーは骨格筋線維タイプにより異なることや、Atg6ヘテロマウスは定期的な運動による毛細血管密度の増加が野生型マウスよりも低く持久的運動能力も向上しないことを報告している<sup>7)</sup>。これらのことは、運動による身体適応にオートファジーの活性化が重要な役割

を果たすことを示唆している。しかしながら、運動による脂肪組織のオートファジーの変動と高脂肪食摂取による肥満の改善との関係に関する報告はされていない。今後、運動による脂肪組織のオートファジーの変動の生理学的意義について詳細に検証する必要がある。

骨格筋に着目した先行研究では、運動は骨格筋のオートファジーを促進し機能や形態を改善することが報告されている<sup>7,8)</sup>。正常な脂肪組織の構築には悪化した脂肪細胞の排除が必要なことから、骨格筋同様、運動は脂肪組織のオートファジーを促進すると推測されるが、推測とは反対に運動はオートファジーを抑制する傾向を示した。申請者らは、オートファジーを抑制する薬剤を投与すると高脂肪食摂取による肥満が軽減されることを報告している<sup>11)</sup>。また、Atg7を脂肪組織特異的に欠損したマウスは、野生型マウスと摂餌量に違いがないにもかかわらず脂肪重量が低く脂肪細胞のサイズも小さい<sup>12)</sup>。これらの結果は、正常な脂肪組織の構築にはオートファジーの促進が必須ではない可能性を示唆している。

近年、定期的な運動が脂肪組織のLC3-IIを増加しオートファジーを促進することが報告された<sup>13)</sup>。本研究では運動はLC3-IIを増加しておらず、この先行研究とは結果が異なる。この先行研究では、実験動物にラットを使用しており運動にはトレッドミルを使用した強制走行運動を用いている。本研究では実験動物にはマウスを使用し、運動にはランニングホイールを用いた自発走行運動を使用した。自発走行運動は一般的にトレッドミル運動に比べ走行距離が長く、C57BL/6Jマウスでは一晩に10km以上走行する場合がある<sup>14)</sup>。これらの結果は、動物種や運動プログラムの違いにより脂肪組織のオートファジーの変動は異なる可能性があることを示唆している。

本研究では、ホモジネイトした脂肪組織を用いオートファジーを評価した。脂肪組織は脂肪細胞

以外にも血管内皮細胞などの異なる複数の細胞により構成されており、高脂肪食摂取した脂肪組織にはマクロファージなどの免疫細胞の浸潤が多く観察される<sup>15)</sup>。したがって、本研究で観察されたオートファジーの変化は脂肪組織内の血管内皮細胞や免疫細胞の変動を反映した結果である可能性も否定できない。今後、脂肪組織から単離した脂肪細胞によるウェスタンブロットや免疫組織化学染色を用い、運動によるオートファジーの変動が脂肪組織のどこで起きたかを詳細に検討する必要がある。

オートファジーは、オートファジータンパクが協調的に機能しタンパクを分解するプロセスのことである。本研究ではLC3、Atg7やp62のタンパクの発現からオートファジーの変動を評価した。LC3-IIはオートファゴソームの数と相関があることからオートファジーの活性化を評価する指標の一つであるが、オートファジーによるタンパク分解のプロセスの活性化の評価はこれだけでは不十分である。また、p62はオートファゴソームで選択的に分解されることからオートファジーの活性化の指標として用いられるが、p62の発現は様々な刺激により変動することや、長期間の環境変化に対する検討を行う場合は適切な指標ではない可能性も報告されている<sup>16)</sup>。近年、オートファジーを正確に評価する様々な方法が確立されつつある。これらの手法を*in vivo*と*in vitro*の実験に応用し運動によるオートファジーの変動を正確に評価することが今後の課題である。

#### 4. 結 論

8週間の自発運動トレーニングによる肥満の軽減には、運動による脂肪組織のオートファジーの調節が関与する可能性が示唆された。

#### 謝 辞

本研究の遂行に対し多大な助成を賜りました

公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝申し上げます。MHCIIa および MHCIIb 抗体を供与いただきました東京大学大学院医学系研究科附属疾患生命工学センターの秋本崇之先生に深くお礼申し上げます。また研究の実施にご協力いただきました名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科の宇土泰希氏と外蘭千紘氏に心よりお礼を申し上げます。

## 文 献

- 1) 水島 昇, 吉森 保.: オートファジー 生命をささえる細胞の自己分解システム, 化学同人(2012)
- 2) Kuma A., Hatano M., Matsui M., Yamamoto A., Nakaya H., Yoshimori T., Ohsumi Y., Tokuhisa T., Mizushima N., The role of autophagy during the early neonatal starvation period. *Nature*, 432:1032-6 (2004)
- 3) Komatsu M., Waguri S., Ueno T., Iwata J., Murata S., Tanida I., Ezaki J., Mizushima N., Ohsumi Y., Uchiyama Y., Kominami E., Tanaka K., Chiba T., Impairment of starvation-induced and constitutive autophagy in Atg7-deficient mice. *J. Cell. Biol.*, 169:425-34(2005)
- 4) Sou Y.S., Waguri S., Iwata J., Ueno T., Fujimura T., Hara T., Sawada N., Yamada A., Mizushima N., Uchiyama Y., Kominami E., Tanaka K., Komatsu M., The Atg8 conjugation system is indispensable for proper development of autophagic isolation membranes in mice. *Mol. Biol. Cell.*, 19:4762-75 (2008)
- 5) Masiero E., Agatea L., Mammucari C., Blaauw B., Loro E., Komatsu M., Metzger D., Reggiani C., Schiaffino S., Sandri M., Autophagy is required to maintain muscle mass. *Cell. Metab.*, 10:507-15 (2009)
- 6) He C., Bassik M.C., Moresi V., Sun K., Wei Y., Zou Z., An Z., Loh J., Fisher J., Sun Q., Korsmeyer S., Packer M., May H.I., Hill J.A., Virgin H.W., Gilpin C., Xiao G., Bassel-Duby R., Scherer P.E., Levine B., Exercise-induced BCL2-regulated autophagy is required for muscle glucose homeostasis. *Nature*, 481:511-515(2012)
- 7) Lira V.A., Okutsu M., Zhang M., Greene N.P., Laker R.C., Breen D.S., Hoehn K.L., Yan Z., Autophagy is required for exercise training-induced skeletal muscle adaptation and improvement of physical performance. *FASEB J.*, 27:4184-93(2013)
- 8) Narendra D., Tanaka A., Suen D.F., Youle R.J., Parkin is recruited selectively to impaired mitochondria and promotes their autophagy. *J. Cell. Biol.*, 183: 795-803(2008)
- 9) He C., Sumpter R. Jr., Levine B., Exercise induces autophagy in peripheral tissues and in the brain. *Autophagy*, 8:1548-5(2012)
- 10) Ogura Y., Iemitsu M., Naito H., Kakigi R., Kakehashi C., Maeda S., Akema T., Single bout of running exercise changes LC3-II expression in rat cardiac muscle. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 414:756-60(2011)
- 11) Zhang C., He Y., Okutsu M., Ong L.C., Jin Y., Zheng L., Chow P., Yu S., Zhang M., Yan Z., Autophagy is involved in adipogenic differentiation by repressing proteasome-dependent PPAR  $\gamma$  2 degradation. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 305:E530-9(2013)
- 12) Zhang Y., Goldman S., Baerga R., Zhao Y., Komatsu M., Jin S., Adipose-specific deletion of autophagy-related gene 7 (*atg7*) in mice reveals a role in adipogenesis. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 106:19860-5(2009)
- 13) Tanaka G., Kato H.1, Izawa T.2., Endurance exercise training induces fat depot-specific differences in basal autophagic activity. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 466:512-7(2015)
- 14) Geng T., Li P., Okutsu M., Yin X., Kwek J., Zhang M., Yan Z., PGC-1 $\alpha$  plays a functional role in exercise-induced mitochondrial biogenesis and angiogenesis but not fiber-type transformation in mouse skeletal muscle. *Am. J. Physiol. Cell. Physiol.*, 298:C572-9(2010)
- 15) Kamei N., Tobe K., Suzuki R., Ohsugi M., Watanabe T., Kubota N., Ohtsuka-Kowatari N., Kumagai K., Sakamoto K., Kobayashi M., Yamauchi T., Ueki K., Oishi Y., Nishimura S., Manabe I., Hashimoto H., Ohnishi Y., Ogata H., Tokuyama K., Tsunoda M., Ide T., Murakami K., Nagai R., Kadowaki T., Overexpression of monocyte chemoattractant protein-1 in adipose tissues causes macrophage recruitment and insulin resistance. *J. Biol. Chem.*, 281:26602-14(2006)
- 16) Sahani M.H., Itakura E., Mizushima N., Expression

of the autophagy substrate SQSTM1/p62 is restored during prolonged starvation depending on

transcriptional upregulation and autophagy-derived amino acids. *Autophagy*, 10:431-41 (2014)

# カーボンマイクロコイルを利用した圧迫型アンダーウェアの着用が腰部筋群の痛み、柔軟性、筋力に及ぼす影響

中部大学 堀田典生  
(共同研究者) 同 浦井久子  
愛知淑徳大学 建部貴弘

## Effects of Wearing Compression Undershirts with Carbon Microcoils on Muscle Pain, Stiffness, Flexibility, and Strength in Lumbar Region

by

Norio Hotta, Hisako Urai  
*Chubu University*  
Takahiro Tatebe  
*Aichi Shukutoku University*

### ABSTRACT

The effects of wearing compression undershirts with carbon microcoils (CMC) on muscle pain, stiffness/hardness, flexibility, and muscular strength in the lumbar region were studied in eight male subjects complaining of general malaise in their lumbar region. Subjects were studied before (Pre), 30 min after (30 min), and 10 days after (10 d) starting to keep wearing compression undershirts with either CMC or control material (BLK) according to a randomized, double-blind, cross-over design. Two-way repeated ANOVAs were used (CMC vs BLK and Pre vs 30 min vs 10 d) with significance accepted as  $P < 0.05$  and Bonferroni post hoc tests utilized as needed. No significant trial-by-time interaction was detected in pressure pain threshold, the degree of muscle pain, flexibility or muscular strength in the lumbar region ( $P > 0.05$ ). On

the other hand, a significant interaction was observed in muscle stiffness/hardness measured by the tissue hardness meter ( $P=0.02$ ). Although no significant difference between trials was detected in each measurement point ( $P>0.05$ ), it seemed that CMC attenuated the increase in stiffness/hardness from 30 min to 10 d. These results suggest that wearing the compression undershirts with CMC did not have any significant impact on muscle pain, flexibility, or strength in the lumbar region; however it is possible that CMC inhibits muscle stiffness/hardness from developing to some extent.

## 要 旨

本研究の目的は、腰部に不定愁訴を訴える人を対象に、カーボンマイクロコイル (CMC) を貼付した圧迫型アンダーウェアの着用が、腰部筋群の痛み、緊張、柔軟性、背筋力に及ぼす影響を検討することであった。ランダムオーダークロスオーバー法と二重盲検法の下で、CMC あるいはその対照素材 (BLK) 付きの圧迫型アンダーウェアの、着用前 (Pre)、30 分後 (30 min)、10 日後 (10 d) に 8 人の被験者を測定した。繰り返しのある二要因の分散分析を使い、多重比較では必要に応じて Bonferroni 法を利用した。有意水準を 5% とした。筋の機械刺激に対する痛み閾値、痛みの程度、柔軟性、筋力においては、有意な交互作用 (試行 × 時間) は検出されなかった ( $P>0.05$ )。一方、筋硬度計にて評価した筋の緊張の程度は、有意な交互作用が確認された ( $P=0.02$ )。測定ポイント毎の比較では、試行間に有意差を確認できなかったが ( $P>0.05$ )、CMC 試行では 30 分後から 10 日後にかけての筋緊張の上昇が抑制されているようにみえた。これらの結果は、CMC 付き圧迫型アンダーウェアの着用は、腰部の筋痛、柔軟性、筋力に影響を及ぼさないが、筋緊張が高まることを抑制する可能性があることを示唆する。

## 緒 言

ヘリカル炭素繊維 (カーボンマイクロコイル、

以下 CMC) は、1990 年に日本にて開発、発表された新しい素材である<sup>1)</sup>。約 0.01 ~ 1  $\mu\text{m}$  のピッチでコイル型に巻いた炭素繊維であり、電磁波を吸収する特性などを持ち、様々な分野への応用が期待されている。また、電磁波を吸収して熱を発生する特性があることから、人の皮膚血流を促進する効果が示されている<sup>2)</sup>。加えて、慢性骨格筋痛を和らげる効果についても報告されている<sup>3)</sup>。

ところで、現代社会において、腰痛は厚生労働省が発表する有訴率において上位を占め、患者数の多い疾病の一つである<sup>4)</sup>。腰痛の原因は、筋力の低下や柔軟性の低下、腰椎の退行など多岐にわたると考えられる。X 線などの検査で確認可能な病態もあるが、腰痛症状を訴える者の中では、筋由来のものや脊椎の退行変性 (老化) を原因とするもののように画像検査で原因や症状がわかりにくいものや急性の症状が多い<sup>5,6)</sup>。これらの腰痛症状は日常生活活動 (ADL) の減少や運動不足に繋がり、QOL の低下や肥満につながる要因となり得る。競技スポーツにおいては、パフォーマンスを低下させる原因となり得る。

もしも腰部の筋の疼痛やこり、張りを軽減することができたならば、腰部の柔軟性や背筋力の回復が予想される。そこで本研究では、腰部に不定愁訴 (痛み、こりや張りなど) を訴える者を対象に、CMC を腰部に貼付した圧迫型アンダーウェアの着用により、腰部筋群のこりや張りの解除、痛みの緩和が生じるかを検討することを目的とし

た。また、筋の状態が改善された場合、柔軟性や背筋力の回復・改善に結びつくかについても検討することにした。本研究は、CMCがスポーツウェアや塗布用シールとして、スポーツ選手や運動の愛好家に貢献することが期待できるとの背景のもと実施された。

## 1. 方法

### 1. 1 被験者

被験者は腰部に不定愁訴（違和感・痛み・こり・張りなど）を訴える18歳以上の男性8名を対象とした。年齢、身長、体重はそれぞれ $19.3 \pm 0.7$ 歳、 $174.3 \pm 5.2$ cm、 $72.1 \pm 11.6$ kg（平均値 ± 標準偏差）であった。すべての被験者に本研究の目的、方法を文書および口頭で説明した後、研究に参加することの同意を得た。本研究は中部大学倫理審査委員会の承認を得て行われた。

### 1. 2 カーボンマイクロコイル (CMC)

実験に使用したCMCは、直径9.5mm、全厚1.5mmの硬質物を直径22mmのシールで直接皮膚へ貼付するタイプの物を使用した。硬質物の構造は、CMCをシリコーンゴム中に7wt%添加したCMC層、磁性粉末（パーマロイおよびマンガン亜鉛フェライト）をシリコーンゴム中にそれぞれ5wt%添加した磁性材シート層、CMC層の3層構造から成っておりCMC層が皮膚と接触している。この3層構造は、CMCが低周波の電磁波を吸収しやすくし、より“こり”の緩和効果を高めるであろうとされ考案されたものである<sup>2)</sup>。CMCのコントロールとしてシリコーンゴムのみブランク素材（以下BLK）のものを用意した。

### 1. 3 実験手順

バイアスを防ぐために、被験者も検者も実験終了までCMCかBLKのどちらを貼付したかわか

らないように二重盲検法を用いた。

本研究では、CMCおよびBLKの付いたパッチシールを圧迫型アンダーウェア（上半身用半袖タイプ：SKINS、A-200ショートスリーブトップ）の腰部の肌に直接触れる内側に9個貼付し使用した（図1）。また、クロスオーバー法を採用し、全ての被験者は、CMCを貼付した圧迫型アンダーウェアを着用する試行（CMC試行）と、BLKを貼付したアンダーウェアを着用する試行（BLK試行）を実施した。どちらの試行を先に行うかはランダムに決められ、試行間を最低10日間空けた。

設定した二試行において、圧迫型アンダーウェアの着用前（以下Pre）と着用30分後（以下

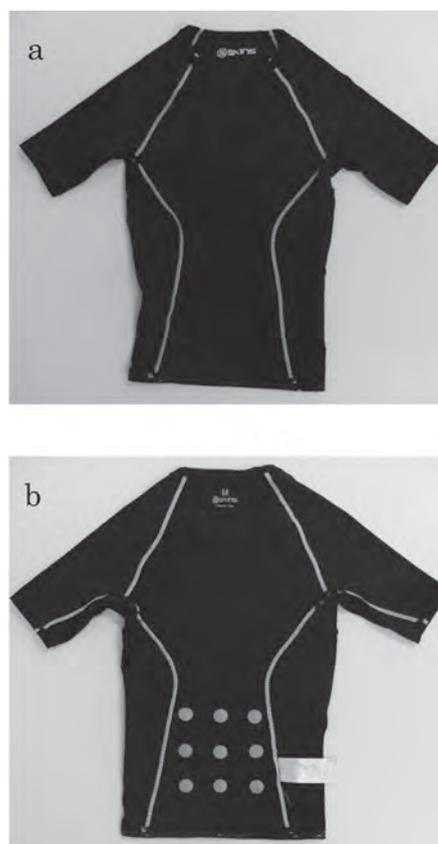


図1 圧迫型アンダーウェアの前面 (a) と背面腰部にカーボンマイクロコイル (CMC) を添付した状態 (b) 腰部の内側に等間隔に9個のCMCパッチを添付した。シャツを裏返し、肌に触れる面を写している。

30min) において、痛みの閾値、圧迫刺激による痛みの程度、筋硬度計による筋硬度測定、長座体前屈による柔軟性および背筋力計による背筋力の測定を実施し、急性効果について検討した。なお、アンダーウェアを着用した30分間は背もたれ付きの椅子に着席した姿勢をとるよう指示した。また、圧迫型アンダーウェアを1日8時間以上10日間(以下10d)着用することで慢性効果についても検討した。

## 1. 4 測定項目

### 1. 4. 1 痛みの主観的評価

被験者は自ら触診した腰部の痛みの局在を、腰部のイラストが描かれている用紙へ記入した。また、痛みの強度は視覚アナログスケール(以下VAS)を用いて評価した。被験者に触診中に感じた圧の感覚(痛み)を「0mm(全く痛みを感じない)から100mm(これまでに感じた最悪の痛み)」とした直線上にマークするように指示した。

### 1. 4. 2 痛み閾値

機械的刺激に対する痛み閾値を圧センサーにより評価した。圧の測定点は、圧迫型アンダーウェア着用前に被験者自ら触診し、最も痛いと訴える箇所を測定点とした。なお、測定点は油性ペンを用いて印をつけ、デジタルカメラ(富士フィルム FINEPIX F80 EXR)にて撮影し、10日後の測定時に確認できるように記録した。印は全ての測定後にアルコール綿を使用し拭き取った。

圧センサーには小型ロードセル(共和電業社 LURA2KNSA1)を使用した。ロードセルには頭部の直径17mm、高さ5mmのなだらかなドーム型を成しているボタンボルトを装着し、ボルト頭部を被験者の測定点へ当てることで圧を負荷した。ボルト頭部からロードセルへ伝わった圧力はストレインアンプ(共和電業社 DPM712B)によりアナログ信号に変換・増幅され、A/D変換器(ADINSTRUMENTS社 Power lab 8/30)によって

デジタル変換されパソコンへ保存された。サンプリング周波数は100Hzとし、解析にはソフトウェア Lab Chart7 (v.7.3.7)を用いて行った。

被験者には足背部をベッド端から出し、両腕は体側におき、顎をベッドにつけた伏臥位をとらせた。その後、2N/秒ずつ漸増する圧を測定点へ負荷し、被験者が痛みを感じた瞬間に握っていたスイッチで合図を出し、その時の圧を痛みの閾値とした。測定者は圧センサーを2N/秒ずつ押せるようになるまで事前に十分な練習を行った。なお、被験者は合図を出すと同時に圧負荷から解放された。10秒間の休息を挟みながら5回連続して行った。測定した5回の痛み閾値のうち、最大値と最小値を除いた3回の平均値を圧痛閾値とした。

### 1. 4. 3 一定圧負荷時の痛みの主観的評価

一定圧に対する痛みの評価は、上述の圧センサーを用いて、各被験者の測定点へ上述の圧痛閾値の1.5倍の圧を10秒間負荷して行った。30秒間のインターバルを挟み3回実施し、痛みの程度を上述のVAS上に記載した。3回の平均値を代表値とした。

### 1. 4. 4 筋硬度の測定

筋硬度の測定には、筋硬度計(TRY-ALL社 NEUTONE TDM-NA1)を使用した。測定者は筋硬度計の圧迫により、被験者に苦痛が生じないように押せるようになるまで事前に十分な練習を行った。測定時には痛みの閾値の測定と同様に伏臥位の姿勢をとらせ、上述の測定点に筋硬度計を直角に当て、ゆっくりと押しつけた。これを10秒間のインターバルをとりながら5回測定し、最大値と最小値を除いた3回の値の平均値を採用した。

### 1. 4. 5 柔軟性・筋力の測定

柔軟性の測定は、デジタル長座体前屈計(竹井機器工業株式会社 T.K.K.5412)を用いて行った。測定時はゆっくりと息を吐きながら前屈を行うよ

うに指示した。筋力の測定はデジタル背筋力計(竹井機器工業株式会社バック D) を用いて行った。測定時は反動を使わず、膝を伸展した状態で上体を起こすように指示した。どちらの測定も1分間のインターバルをとりながら2回測定し、その平均値を採用した。

### 1. 5 統計処理

値はすべて平均値 ± 標準誤差で表した。CMC と BLK の両試行における経時的変化の仕方の違いを検討するために、繰り返しのある二要因の分散分析(試行要因 [CMC, BLK, 繰り返しあり], 時間要因 [Pre, 30min, 10d, 繰り返しあり]) を用い、有意水準は5%未満とした。交互作用が認められた場合、各時間において、試行間を Bonferroni 法によって比較した。統計解析には IBM SPSS Statistics ver.22 を用いた。

## 2. 結果

### 2. 1 痛みの局在と触診による痛みの程度の主観的評価

被験者が自ら触診した腰部の痛みの場所や範

囲を腰背部のイラストが描かれている用紙へ記入した結果、CMC 試行、BLK 試行ともに Pre, 30min, 10d の間に視覚的に判断される明確な変化は認められなかった(図2)。

また、VAS で評価した痛みの程度(図3)では、CMC 試行にて Pre で  $21.6 \pm 5.5$ mm, 30min で  $21.0 \pm 5.0$  mm, 10d で  $23.1 \pm 5.7$ mm, BLK 試行では Pre で  $22.7 \pm 6.6$ mm, 30min で  $21.9 \pm 6.6$ mm, 10d で  $18.2 \pm 4.1$ mm であり、試行要因 ( $P=0.74$ ) および時間要因 ( $P=0.67$ ) による主効果は有意であるとは言えなかった。また、有意な交互作用も

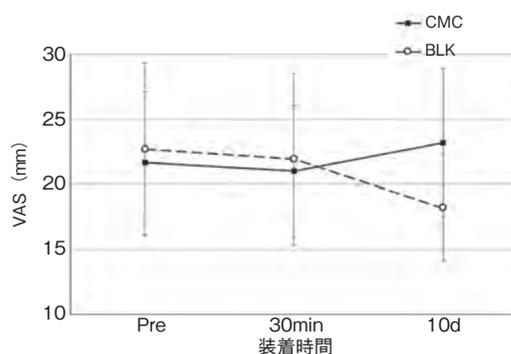


図3 触診による筋痛の着用前 (Pre), 30分後 (30min), 10日後 (10d) の変化  
視覚アナログスケール (VAS) を用いて評価した。値はCMC 試行 (■) と BLK 試行 (○) の平均値と標準誤差。

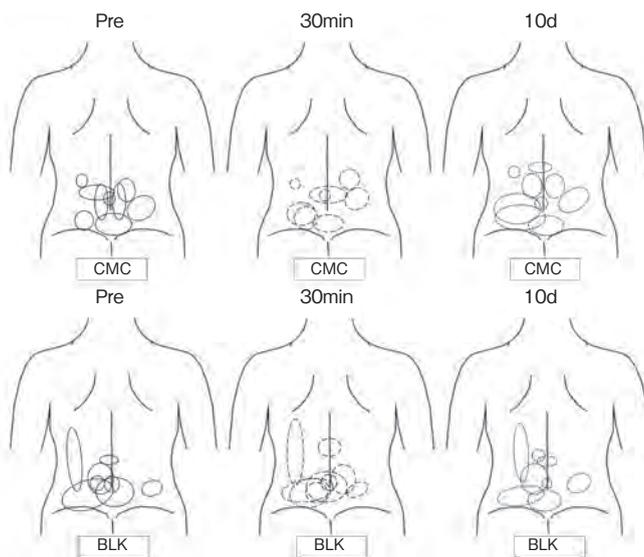


図2 痛みの主観的評価: 被験者が自ら触診した腰部の痛み(場所, 範囲)の着用前 (Pre), 30分後 (30min), 10日後 (10d) の変化  
全ての被験者の情報を重ね合わせた

認められなかった (P=0.39).

## 2. 2 痛み閾値

図4は機械刺激に対する痛みの閾値を示している。CMC 試行では Pre で  $32.1 \pm 4.8\text{N}$ , 30min で  $30.2 \pm 6.2\text{N}$ , 10d で  $30.0 \pm 7.3\text{N}$  であり, BLK 試行では Pre で  $26.0 \pm 4.9\text{N}$ , 30min で  $25.5 \pm 5.4\text{N}$ , 10d で  $29.2 \pm 7.2\text{N}$  であり, 試行要因 (P=0.51) および時間要因 (P=0.86) による主効果は有意であるとは言えなかった。また有意な交互作用も認められなかった (P=0.42)。

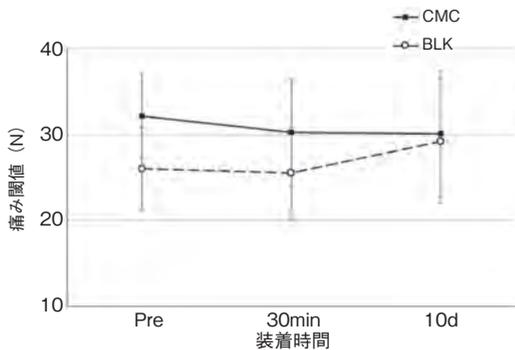


図4 圧痛閾値の着用前 (Pre), 30分後 (30min), 10日後 (10d) の変化  
値はCMC 試行 (■) とBLK 試行 (○) の平均値と標準誤差。

## 2. 3 一定圧負荷時の痛みの主観的評価

圧痛閾値の1.5倍の圧負荷による痛みの評価 (図5) では, CMC 試行では Pre で  $38.9 \pm 6.7\text{mm}$ ,

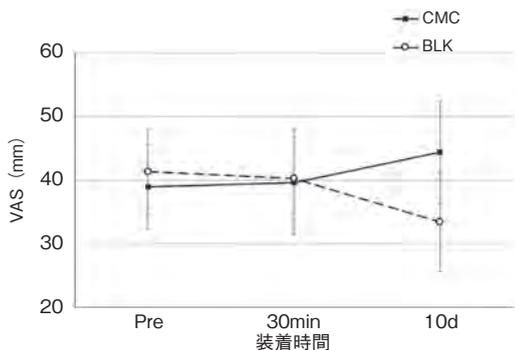


図5 一定圧負荷時の筋痛の着用前 (Pre), 30分後 (30min), 10日後 (10d) の変化  
視覚アナログスケール (VAS) を用いて評価した。値はCMC 試行 (■) とBLK 試行 (○) の平均値と標準誤差。

30min にて  $39.6 \pm 8.2\text{mm}$ , 10d にて  $44.4 \pm 8.1\text{mm}$  であった。また, BLK 試行では Pre で  $41.3 \pm 6.8\text{mm}$ , 30min にて  $40.2 \pm 6.5\text{mm}$ , 10d にて  $33.5 \pm 7.8\text{mm}$  であり, 試行要因 (P=0.20) および時間要因 (P=0.60) による主効果は有意であるとは言えなかった。また有意な交互作用も認められなかった (P=0.40)。

## 2. 4 筋の緊張の程度

筋硬度計から評価した筋緊張の程度の結果を図6に示した。CMC 試行では Pre にて  $13.5 \pm 0.9$ , 30min にて  $12.5 \pm 0.9$ , 10d にて  $12.8 \pm 1.2$ , BLK 試行では Pre で  $13.8 \pm 2.5$ , 30min で  $13.4 \pm 2.1$ , 10d にて  $16.1 \pm 1.7$  であり, 試行要因 (P=0.43) および時間要因 (P=0.38) による主効果は有意であるとは言えなかったが, 有意な交互作用が認められた (P=0.02)。しかし, 多重比較の結果, 各時間における両試行間に有意差は認められなかった (Pre : P=0.90, 30min : P=0.60, 10d : P=0.14)。

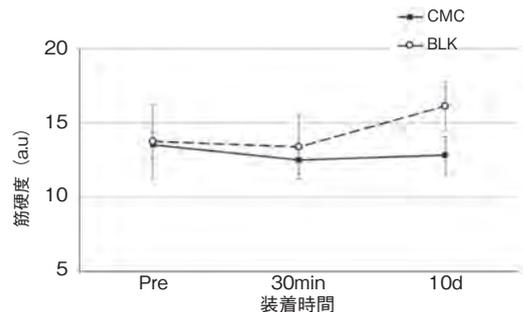


図6 筋硬度の着用前 (Pre), 30分後 (30min), 10日後 (10d) の変化  
値はCMC 試行 (■) とBLK 試行 (○) の平均値と標準誤差。

## 2. 5 柔軟性・筋力

長座体前屈による柔軟性の評価 (図7) では, CMC 試行では Pre で  $35.5 \pm 4.3\text{cm}$ , 30min で  $36.2 \pm 3.8\text{cm}$ , 10d で  $35.4 \pm 3.2\text{cm}$ , BLK 試行では Pre にて  $36.3 \pm 3.7\text{cm}$ , 30min にて  $36.8 \pm 3.3\text{cm}$ , 10d にて  $39.1 \pm 2.8\text{cm}$  であり, 試行要因 (P=0.44)

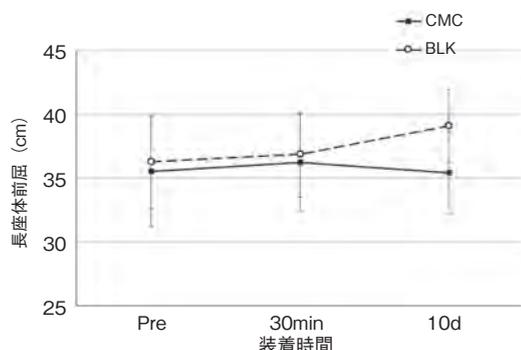


図7 長座体前屈の着用前 (Pre), 30分後 (30min), 10日後 (10d) の変化  
値はCMC 試行 (■) と BLK 試行 (○) の平均値と標準誤差。

および時間要因 (P=0.55) による主効果は有意であるとは言えなかった。また有意な交互作用も認められなかった (P=0.33)。

背筋力の評価では (図8), CMC 試行で Pre にて  $117.0 \pm 9.0\text{kg}$ , 30min にて  $110.6 \pm 7.7\text{kg}$ , 10d にて  $109.0 \pm 6.0\text{kg}$ , BLK 試行では Pre で  $108.6 \pm 6.9\text{kg}$ , 30min で  $111.9 \pm 9.0\text{kg}$ , 10d にて  $118.8 \pm 8.9\text{kg}$  であり, 試行要因 (P=0.83) および時間要因 (P=0.26) による主効果は有意であるとは言えなかった。また有意な交互作用も認められなかった (P=0.11)。

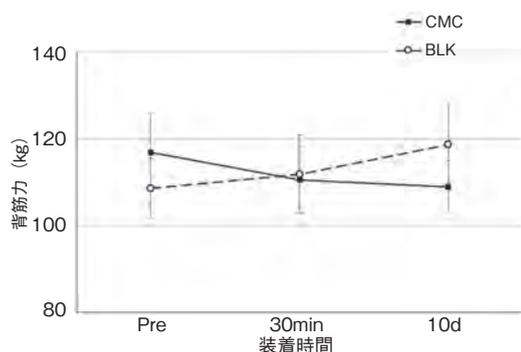


図8 背筋力の着用前 (Pre), 30分後 (30min), 10日後 (10d) の変化  
値はCMC 試行 (■) と BLK 試行 (○) の平均値と標準誤差。

### 3. 考察

本研究の目的は, CMC を貼付した圧迫型アンダーウェアの着用による腰部筋群の痛みやこり・

張りへの影響と, それに伴う柔軟性および筋力の回復について検討することであった。本研究では, 筋痛に CMC の有意な影響はなかった。これは, Tsuji ら<sup>3)</sup> の CMC により深部組織の痛みが軽減されたという結果と一致しない。Tsuji ら<sup>3)</sup> の報告によれば, CMC による深部組織の痛みの軽減効果を認める最小限の時間は, 10分から20日と幅があることが分かっている。本研究の被験者が, CMC の効果を認めるのに10日では不十分であった可能性がある。また, 先行研究<sup>3)</sup> では, CMC を直接肌に貼り付けているのに対して, 本研究ではアンダーウェアに添付した状態からの影響を観ていることや, 24時間貼り付けている環境ではないという条件の違いが関係している可能性がある。CMC 付きアンダーウェアの着用期間を延ばす研究が必要である。さらに, 研究デザインの違い (本研究では二重盲検法とクロスオーバー比較試験を採用していること) も結果の不一致に関与しているかもしれない。

私たちは, もし筋痛が軽減されれば, 背筋力や柔軟性も回復すると予想していた。筋痛の有意な軽減がなかったため, 背筋力や柔軟性の有意な変化も認められなかったと考えられた。

本研究では, 筋の張りなどの緊張度を示し得る筋硬度の変化の仕方は, 両試行間に有意な違いがみられた。CMC が筋の緊張を低下させたと言いが難しいが (図6), 筋緊張が上昇することを抑制した可能性がある。Tsuji ら<sup>3)</sup> は, CMC を貼付することで, 主観的評価による筋緊張の改善を報告しているが, 筋硬度計を用いて, CMC が筋緊張に及ぼす影響を客観的に評価したのは, 本研究が初めてであろう。

CMC は, 電磁波を吸収して熱を発する性質があり, 皮膚血流を促進する効果もあることが知られている<sup>2)</sup>。また, 私たちは, 対象とする部位は違うが, 近赤外分光法から CMC が下腿の深部組織の血流を促進することを裏付ける結果を得てい

る（浦井ら，未発表データ）。従って，CMCによる深部組織の血流促進効果が，筋緊張の上昇を抑制した理由の一つとして考えられた。本実験は夏季に実施されたが，今後CMCの発熱効果に起因する筋組織への影響を探るため，平均気温の低い時期での研究実施が期待される。

#### 4. 結 論

10日間のカーボンマイクロコイル（CMC）付きの圧迫型アンダーウェア着用では，腰部筋群の痛みの有意な緩和効果や，それに伴う柔軟性や筋力発揮の有意な改善効果は確認されなかった。しかし，筋緊張の上昇を抑制する可能性が示唆された。

#### 謝 辞

本研究を遂行するにあたり，研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

#### 利益相反

株式会社 CMC 総合研究所（代表：元島栖二先生）より，本研究で利用したカーボンマイクロコイルとその対照素材の提供，並びに金銭的なサポートを受けたことを申告します。

#### 文 献

- 1) S. Motojima, M. Kawaguchi, K. Nozaki, H. Iwanaga., Growth of regularly coiled carbon filaments by Ni catalyzed pyrolysis of acetylene, and their morphology and extension characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, **56**: 321-323(1990)
- 2) 本島栖二. 図解カーボンマイクロコイル ヘリカル炭素線維が拓く世界, 日本工業新聞社(2013)
- 3) D. H. Tsuji, R. Awade, I. P. Posso., Cutaneous application of silicone wafers containing carbon microcoils: Efficacy in relieving chronic muscle tension and pain. *J. Altern. Complement. Med.*, **21** (7) : 439-443(2015)
- 4) 白土修, 土肥徳秀, 赤居正美, 星野雄一, 藤野圭司, 岩谷力. 運動器慢性疾患に対する運動療法. 黒澤尚 編, 慢性腰痛症に対する運動療法の効果. 金原出版: 東京, pp.109-117(2009)
- 5) 赤峰卓哉, 吉田剛一郎, 高田大, 田口信教. 腰痛疾患症例の身体体力機能に与える水中運動の効果—骨密度測定・バランス能力評価を含めて—. 鹿屋体育大学学術研究紀要, 第46号, pp.1-9(2013)
- 6) 石井清一, 平澤泰介 監修. 標準整形外科学第8版, 医学書院: 東京, pp.443-466(2002)

# 長距離走時の効果的接地スタイルは筋と腱の 力学的特性と関連する？

-ケニア選手を含むトップアスリートから一般ランナーまでを含む検討-

兵庫教育大学 小田 俊明  
(共同研究者) 筑波大学 岡田 守彦  
兵庫教育大学 山本 忠志  
倉敷芸術科学大学 楠本 一樹

## Is Effective Strike Pattern in Distance Running Related to Mechanical Properties of Muscle Tendon Systems?

-Wide Range Observation in Athletes from World Top Class to Recreational Runners -

by

Toshiaki Oda, Tadashi Yamamoto  
*Hyogo University of Teacher Education*

Morihiko Okada  
*Tsukuba University*

Kazuki Kusumoto  
*Kurashiki University of Science and the Arts*

### ABSTRACT

The purpose of the present work was to compare the ankle joint passive torque and mechanical properties of muscle-tendon systems in the athletes of three groups with Forefoot, Midfoot and Rearfoot strike pattern in distance running. Also, its relation to athletic performance was investigated. From male subjects (71 in experiment 1, 23 in experiment 2) with wide range performance level from world top class to recreational runners, the ankle joint passive torque and stiffness index of both muscle and tendon were measured using B mode ultrasound apparatus. The result of inter-

group comparisons showed significant differences of performance between Rearfoot group and both Forefoot and Midfoot groups, while no significant difference was observed in ankle joint passive torque and mechanical properties of muscle and tendon. The correlation analysis revealed that athletes with high performance tend to possess high passive torque in observation of all subjects and even in that of each of Midfoot and Rearfoot groups. Additionally, athletes with high performance tend to be with high muscle stiffness index. These results suggest that high ankle joint passive torque and muscle stiffness index would influence improvement of athletic performance in distance running but the differences of effect in the variation of foot strike pattern were not clear.

## 要 旨

本研究では、長距離走において Forefoot, Midfoot, Rearfoot の接地を示す 3 群において、足関節の受動トルク、ならびに筋腱の力学的特性の比較を行い、また、それらの競技力との関係を検討した。世界大会入賞者から一般ランナーを含む男性の中長距離選手を対象とし（実験 1：71 名、実験 2：23 名）、足関節背屈時の受動トルクを計測し、また、超音波 B mode 装置により筋と腱の力学的特性を同定した。群間比較の結果、Rearfoot 群に比べ、Forefoot 群と Midfoot 群が有意に競技力が高かった。一方、足関節の受動トルク、ならびに筋腱の力学的特性には統計的な群間差はなかった。相関解析の結果、競技力の高い選手は、高い受動トルクをもつことが全体を対象とした分析、ならびに、Midfoot と Rearfoot の群内相関において示された。また、競技力が高い選手の筋 stiffness index が高いことも全体を対象とした分析において示された。つまり、高い足関節の受動トルクと筋 stiffness index は競技力の高さと関連するが、接地の仕方によるそれらの違いは明確でなかった。

## 緒 言

近年、健康志向に伴うランニングブームにより、ランナー人口が飛躍的に増大している<sup>10)</sup>。いか

なるスポーツにおいても、怪我を防ぎ、競技力を高めるためには、効率的・効果的な身体操作を身に着けることが重要であるが、長距離走における身体操作についての研究はそれほど多くは言えない。その理由のひとつとして、長距離走の競技力に影響する因子が非常に多いため、競技力への貢献度が高い呼吸循環器系<sup>13)</sup>の能力向上が第一の目標となり、走技術に関する検討が重視されることが少ないということが考えられる。

しかし、ここ数年、ケニアやメキシコのランナーの走フォームの報告・報道<sup>5,9)</sup>により、踵を接地しない足部の接地によるランニングがランニング関連障害の発生を減らす可能性が示唆されたこと<sup>5)</sup>、各スポーツメーカーよりクッションを減らした踵を接地しない裸足感覚のシューズが販売され始めたことなどと関連してか、市民ランナーを含む様々な競技力の選手において、スピードのあるトップアスリートをまねた足部前部での接地 (Forefoot)、あるいはフラット接地 (Midfoot) が注目され、実際にその接地を行う選手が増加していると感じられる。しかし、そのような接地フォームの変更が競技力向上や障害予防に効果的であるのかについては、様々な研究報告がなされているものの対象とした選手の競技レベルなど実験条件の違いにより結果が異なり (e.g. Almeida et al., 2015<sup>1)</sup>; Warr et al., 2015<sup>14)</sup>)、一致した見解は得られていない。

我々は、ここ数年のケニア選手を中心とした世界トップアスリートを含むランナーの研究を通じて、足関節の筋や腱の力学的特性と競技力との関係を明らかにしつつあり、ケニア選手や、競技力の高い選手では、足関節の受動トルクが高く、筋肉の stiffness が高いこと、ならびに腱組織の stiffness が低い傾向を示した<sup>11,12)</sup>。前述のようにケニア選手や競技力の高い選手は踵を接地しないランニングフォームをもつ傾向が強い。これらから考えるに、足部前部接地にて長距離走を走るため、あるいは Forefoot や Midfoot での接地により競技力向上と障害予防へプラスの効果を得るためには適切な筋腱の特性が求められる可能性がある。アキレス腱の力学的特性に関しては、Kubo et al.<sup>8)</sup>により、長距離選手を対象とした報告がなされており、競技力が同等レベルの選手間において、接地のパターンとアキレス腱の stiffness とには関連がないことが示されている。一方、筋の力学的特性に関する報告ならびに、競技力の幅が大きな母集団における報告は我々の知る限りない。

そこで、本研究では、有効な地面への接地スタイルと筋や腱の力学的な性質が関連するという仮説の基に、これらの関係を、さまざまな接地を示し、かつ、その接地に十分な適応を示していると考えられる陸上競技選手とランナー（ケニア選手を含むトップアスリートから一般選手まで）を対象とし検討した。

## 1. 研究方法

本研究では、以下の2つの検討を実施した。実験1) 接地パターンが、足関節の背屈受動トルク、ならびに競技力に及ぼす影響、実験2) 接地パターンが筋と腱の力学的特性、ならびに競技力に及ぼす影響。被験者によっては(特にトップアスリート)測定に確保可能な時間に制約があり、全被験者から筋と腱の力学的なデータを計測することは難しかった。そ

のため、実験1と2で被験者数が異なる。

### 1. 1 対象

世界大会入賞者から一般ランナーを含む男性の中長距離選手を対象とした。実験1には71名、実験2には23名が参加した。いずれの選手も週5回以上のトレーニングを実施していた。方法に示した群分けの結果、実験1ではForefoot群が7名、Midfoot群が30名、Rearfoot群が34名であった。また、実験2では、Forefoot群が3名、Midfoot群が10名、Rearfoot群が10名であった。両実験における3グループの身体特性を表1に示した。実験1においては、年齢、身長、体重にグループ間の統計的な有意差はなかった。実験2においては年齢(p=0.047)のみにMidfoot群とRearfoot群間に統計的有意差が観察された。

表1 被験者の特性。実験2のMidfoot群とRearfoot群間の年齢のみに統計的な有意差が観察された

実験1	Forefoot 群		Midfoot 群		Rearfoot 群	
	mean	(SD)	mean	(SD)	mean	(SD)
人数 (人)	7	-	30	-	34	-
年齢 (歳)	21.9	(7.7)	19.9	(4.9)	19.1	(4.3)
身長 (cm)	172.1	(5.9)	169.9	(6.4)	169.8	(5.9)
体重 (kg)	54.7	(3.2)	55.1	(4.8)	54.8	(10.4)

実験2	Forefoot 群		Midfoot 群		Rearfoot 群	
	mean	(SD)	mean	(SD)	mean	(SD)
人数 (人)	3	-	10	-	10	-
年齢 (歳)	21.7	(2.1)	20.7	(6.0)	17.0	(2.3)
身長 (cm)	173.4	(8.2)	172.9	(6.1)	169.4	(3.9)
体重 (kg)	53.9	(5.1)	57.5	(5.0)	54.7	(3.7)

ほとんどの選手が5000mからハーフマラソンまでを専門としたが、一部、1500m、3000m障害、マラソンの選手が含まれるため、異なる種目の競技力を標準化得点で比較するためにIAAF SCORING TABLES OF ATHLETICS 2014 revised edition (IAAF score)<sup>4)</sup>を使用した。全被験者のIAAF scoreは平均856.9±185.7点(範囲506点から1287点)であり、この平均記録は5000m換算で14分44秒に対応し、高い競技力をもつ選手が多く含まれる被験者群であった。被験者は、事前に実験の目的等についてヘルシンキ宣言に基づ

いた書面において詳細な説明を受け、実験参加へ同意した。また、この研究は学内倫理委員会の承認を受けて実施された。

## 1. 2 接地パターンの測定とグループ分け

ランニング中の接地パターンを同定するため、グラウンドにおけるランニングテスト、ならびに競技会における撮影を実施した。測定には高速度カメラ (EX-100Pro, CASIO, Japan) を用い、120Hz にて矢状面における走動作を測定した。グラウンドにおけるランニングテストでは、1500m と 5000m のレースペースにおける走動作が計測された。選手に 150m をレース中盤におけるレースペースにて走行させ、100m 地点における走動作を測定した。また、競技会における測定では、10000 m レースにおける 5000m から 6000 m の区間において上記と同様に高速度カメラを用いた矢状面走動作を計測した。

得られた画像から接地パターンを分析した。分析には画像解析ソフト Image-J (NIH, USA) を用いた。接地の区分の定義は Hasegawa et al. (2007)<sup>3)</sup> に従った。すなわち、前足部接地群 (Forefoot 群) は踵が接地するよりも前に母子球が地面に接する群、中足部接地群 (Midfoot 群) は踵と母子球とが同時に接地する群、そして、踵接地あるいは後足部接地群 (Rearfoot 群) は踵が最初に接地する群と定義された。

中長距離走行中の走速度の変化と接地パターンの変化の可能性を検証するため、被験者中の 37 人のデータを使用し、1500m と 5000m の両速度試行における接地パターンを比較したところ、接地パターンを変化させる選手はいなかった。従って、5000 m の走速度試行において観察された接地パターンをその選手の中長距離走行時の接地パターンとして採用した。

## 1. 3 足関節受動トルクと筋、腱の力学的特性の計測

### 1. 3. 1 足関節背屈に伴う受動トルクと超音波画像の計測

以下に記載する測定について、実験 1 では受動トルクの測定のみ、実験 2 では全てのものを実施した。

外果を回転中心としたトルクが記録されるように設計された足関節用トルク計測機 (VINE, Japan) を用い、足関節の受動トルクと筋ならびに腱組織の力学的特性が計測された。被験者は筋力計の座席に左膝関節最大伸展位で座位し、左足関節を筋力計のフットプレートに固定した。足関節の底屈 10 度を測定開始点とし、底背屈 0 度 (解剖学的正位)、背屈 10 度 (それぞれ 0 度、-10 度と表記) にフットプレートを固定し、その際の受動トルクを測定した。各角度においては 2 秒以上固定の状態を確保し、受動トルクを安定した状態の記録を得た。それぞれの角度で 2 回以上の計測を実施し、2 回の計測値に 10% 以上の差が観察された場合には 3 度目の計測を実施した。複数回計測した場合には、その最終測定時のデータを代表値として分析に採用した。被験者には筋をリラックスさせるように指示し、能動的なトルク発揮がないように配慮した。得られたデータは A/D コンバータ (Power Lab, AD Instruments, USA) を用い 100Hz にてコンピュータに記録した。

また、足関節の受動的な背屈を実施する際に、筋腹の伸長を計測するため、腓腹筋内側頭の筋腹中央から筋腹縦断面の超音波 B mode 画像 (Prosound C3, Hitachi-Aloka, Japan) を計測した。計測した画像は 14Hz にて超音波装置のメモリに記録された。

次に、腱組織の力学的特性同定のための計測を実施した。左膝関節最大伸展位の状態で、左足関節を底背屈 0 度にて筋力計に固定した。計測に先立ちウォーミングアップと筋力計での筋力発揮へ

の習熟のため、被験者は最大下の足関節底屈の等尺性筋力発揮を複数回行った。被験者は4秒間をかけて底屈トルクを最大筋力まで漸増させるよう指示された。この課題は最低でも2回実施され、2回の計測値に10%以上の差が観察された場合には3度目の計測を実施した。複数回計測した場合には、その最終測定時のデータを代表値として分析に採用した。また、その際に、上記の受動背屈時の測定と同様に、超音波 B mode 画像を取得し記録した。

### 1. 3. 2 筋 stiffness index の算出

画像処理ソフト ImageJ (NIH, USA) を用いて、B mode 超音波画像から、腓腹筋の筋束とその深部腱膜との交点を同定し、その点が安静から受動背屈時に示す移動を追跡し、腓腹筋の伸長量を求めた。次に、得られた受動トルクと筋腹の伸長量の関係のプロットから、底屈10度から底背屈0度まで(筋stiffness<sub>0度</sub>)と、底背屈0度から背屈10度まで(筋stiffness<sub>-10度</sub>)の、両角度間の直線回帰における傾きを算出し、筋腹が1mm伸長するのに必要なトルクとして stiffness index を定義した。

### 1. 3. 3 アキレス腱 stiffness index の算出

筋 stiffness index の算出と同様に、腓腹筋の筋束とその深部腱膜との交点を同定し、その点が安静時から筋力の発揮に伴う移動を追跡し、アキレス腱の伸長量を求めた (Kubo et al. 2014<sup>8)</sup> と同様の方法)。次に、得られた受動トルクと筋腹の伸長量の関係のプロットから、発揮トルクとアキレス腱の伸長量の関係のグラフを作成し、腱組織の長さ-力関係におけるリニアアージュン<sup>2)</sup>での直線回帰における傾きを算出し、アキレス腱が1mm伸長するのに必要なトルクとして stiffness index を定義した。

### 1. 4 統計処理

各測定項目は平均値 ± 標準偏差で示した。実験1における3群間の比較には、一元配置の分

散分析を用いて行い、有意な差位が認められた場合には Tukey 法による各群間の有意性の検定を行った。実験2においては、Forefoot 群が3名と少数のためこの群との差の検定は行わず参考値として値を示した。そして、Midfoot と Rearfoot 群との比較を対応のない t 検定 (片側) にて実施した。また、各測定項目と競技パフォーマンス (IAAF score) との相関分析を被験者全体と各群内で行った。それぞれの検定における有意水準は5%未満とした。

## 2. 結果

### 実験1:

足関節受動トルクは両角度ともに、群間において統計的な差を示さなかった (図1, 0度:  $p=0.116$ , -10度:  $p=0.148$ )。一方、IAAF score には分散に有意な差があり ( $p=0.040$ )、多重比較の結果、Forefoot 群と Rearfoot 群に差が観察され、Forefoot 群の競技力が高かった (図1,  $p=0.037$ )。また、各測定項目と IAAF score との相関分析の結果を図2に示す。被験者全体の場合、10度の試行 ( $r=0.38$ ) と -10度の試行 ( $r=0.56$ ) において共に有意な正相関を示した。群別では、Midfoot 群が -10度の試行において ( $r=0.45$ )、Rearfoot 群が 0度 ( $r=0.35$ )、-10度 ( $r=0.61$ ) の試行ともに有意だった。

### 実験2:

筋と腱の力学的特性には、いずれにおいても Frontfoot 群と Midfoot 群とに差がみられなかった (図3, 筋 stiffness<sub>0度</sub>:  $p=0.15$ , 筋 stiffness<sub>-10度</sub>:  $p=0.35$ , 腱 stiffness:  $p=0.77$ )。一方、IAAF score には有意な差が見られ ( $p=0.039$ )、Midfoot の競技力が高かった。また、各測定項目と IAAF score との相関分析の結果を図4に示す。全被験者における筋 stiffness<sub>-10度</sub>のみが統計的に有意な正相関を示した ( $r=0.61$ )。

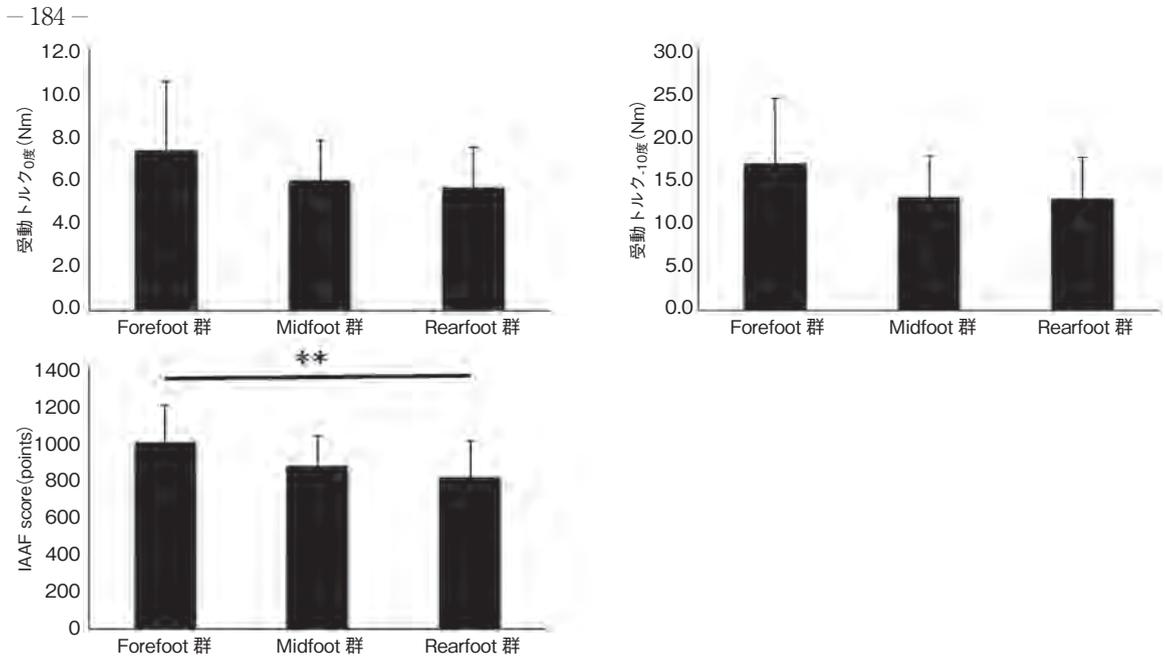


図1 実験1の結果各群の受動トルクとIAAF score  
(底背屈0度と背屈10度はそれぞれ0度, -10度と表記)

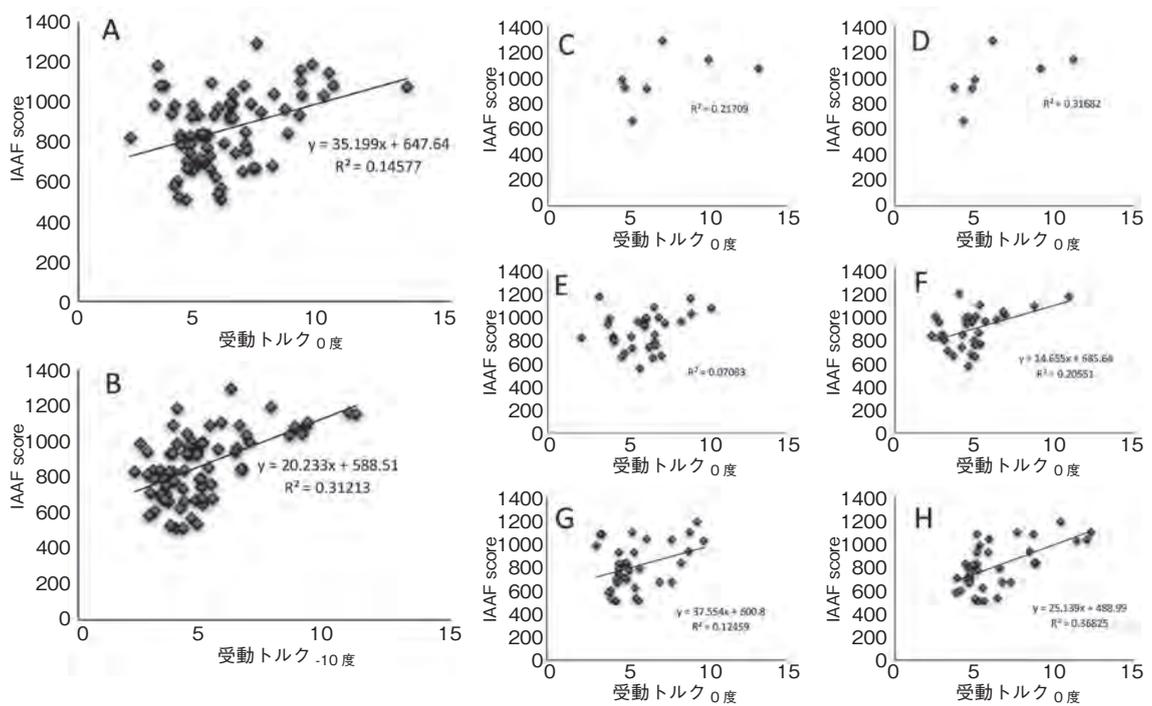


図2 実験1 受動トルク (底背屈0度と背屈10度: それぞれ0度, -10度と表記) とIAAF scoreとの相関分析  
A,B: 全被験者, C,D: Forefoot群, E,F: Midfoot群, G,H: Rearfoot群

### 3. 考察

本研究における主な結果は、接地のタイプにより群間に競技力の差はあるものの、受動トルクや

筋腱の力学的特性には統計的な有意差がないというものであった。接地スタイルと競技力との関係においては、競技力が高いとForefootやMidfootでの接地が多くなり、競技力が低いとRearfoot

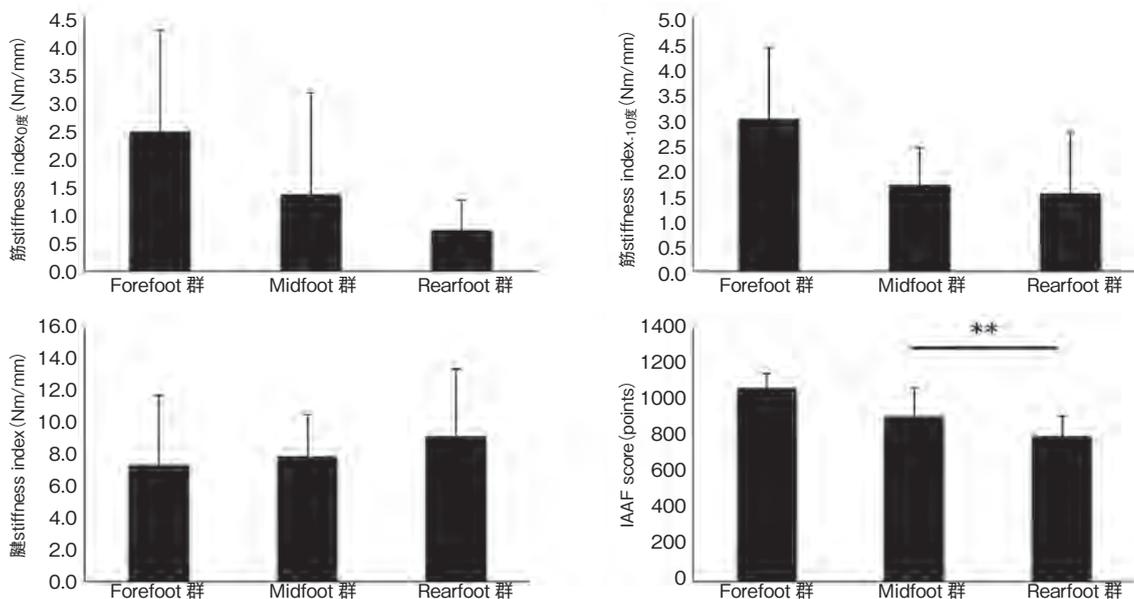


図3 実験2の結果各群の筋腱のstiffness indexとIAAF score  
(底背屈0度と背屈10度はそれぞれ0度、-10度と表記)

での接地が増える傾向があることが知られている<sup>3)</sup>。今回の結果は、それらの差異を明確に示したものであり、Forefoot 群と Rearfoot 群の IAAF score の平均値の差は 22.9% (実験 1)、Midfoot 群と Rearfoot 群との差は 14.3% (実験 2) と大きいものであった。

一方、受動トルクには群間差は認められなかった。個体差の大きさにより標準偏差が大きいため群間における統計的な有意差はないが、競技力が高い傾向を示す群 (Forefoot>Midfoot>Rearfoot) と同じ順で受動トルクの平均値が高い傾向 (実験 1) にあることは、接地と競技力との関係が全く無関係ではないこと、ただしその影響は大きくないこと (実験 1 の分散分析の結果:  $p=0.1-0.15$  の範囲) を示唆していると考えられる。この受動トルクに関する考察は筋腱の stiffness にも当てはまる。筋の stiffness index の平均値の大きさの群による順序は、競技力の大きさのものと一致した。しかし、個体差の大きさにより統計的な差は観察されなかった。一方、腱 stiffness index は群による差は平均値においても小さかった。Kubo et al. (2015)<sup>8)</sup> は競技力に差がない選手群を対象に

接地の影響を検討し腱 stiffness に群間の差がないことを報告している。今回の被験者群は群間に競技力に差がある集団であり Kubo et al. (2015)<sup>8)</sup> の研究とは被験者サンプリングが異なるが、同様に力学的特性に差がなかった。

相関分析の結果、全被験者を対象とした場合、競技力と足関節の受動トルクが有意な正相関を示した (図 2)。このことは、接地のスタイルの違いが競技力に与える影響について群間比較をした場合には統計的に差がないが、足関節の硬さと競技力とは統計的な関連があることを示唆している。特に、全被験者を対象とした場合の背屈 10 度における受動トルクと競技力の決定係数は 31% を超えるものであった。また、同様の関係が、同じ接地を示す群内相関においても示された (Midfoot 群と Rearfoot 群)。つまり、長距離走の競技力が高い選手は足関節の受動トルクが高い傾向にあり、その関係は同じ接地を示す群内においても成り立つということである。高い受動トルクを発揮できる足関節をもつことで接地からキック時に必要な能動的な足関節底屈トルクを減らすことができるなど長距離走の競技力向上に有利な

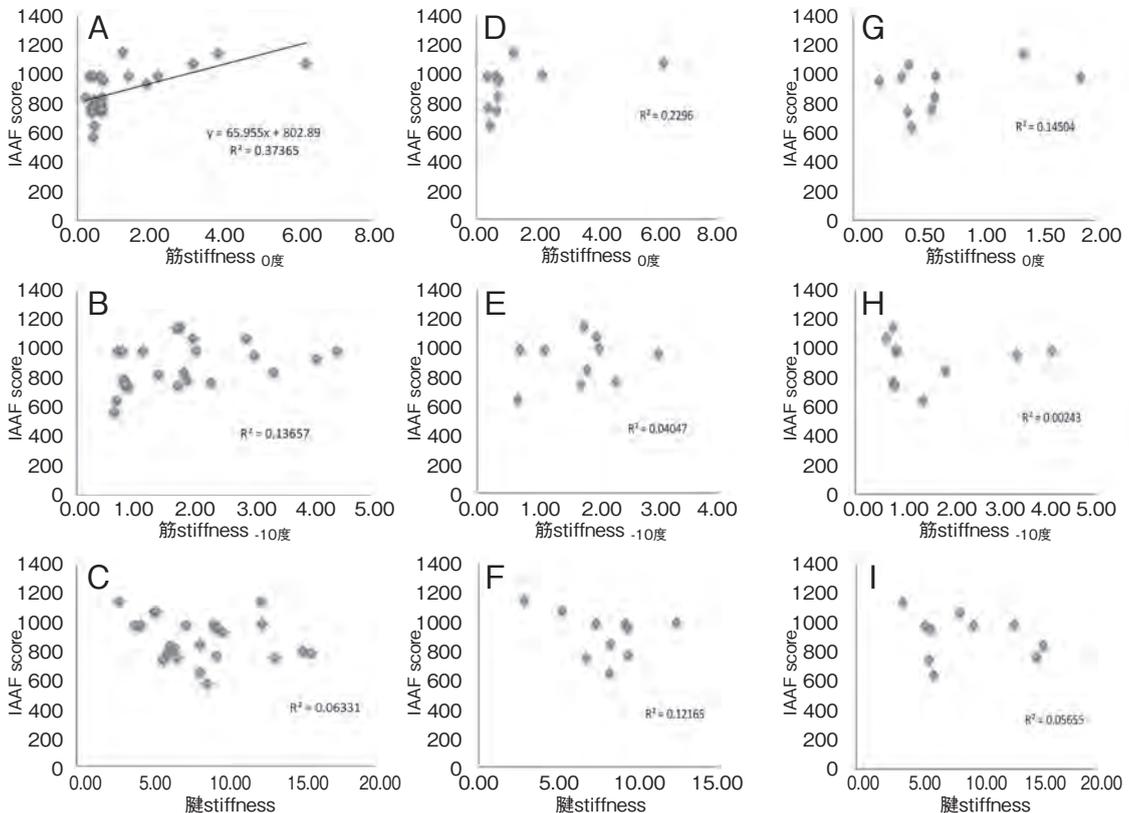


図4 実験1筋腱のstiffness indexとIAAF scoreとの相関分析

A,B,C: 全被験者, D,E,F: Midfoot 群, G,H,I: Rearfoot 群 (底背屈0度と背屈10度はそれぞれ0度, -10度と表記)

効果を力学的観点より予想することは可能であるが、図2のプロットの拡がりが見出すように個体差は非常に大きく、足関節受動トルクが競技力へ及ぼす影響については縦断的な研究や介入研究による今後の調査が必要であろう。

また、筋と腱の stiffness index に関しては、全被験者を対象として分析した底背屈0度における筋 stiffness index のみが正相関を示した。筋 stiffness が高いと、足関節の受動トルクが高くなることが考えられるため、これらの結果の対応は妥当なものとする。一方、実験1に比べ被験者数が少ない実験2では統計検出力が実験1よりも低く、その他の統計的関連を見いだすことはできなかった。

実験2で示された群による被験者の年齢の差は、ジュニア選手において Rearfoot 接地の選手が多いことを示している。Rearfoot 群は他に比べ

て競技力が低い傾向にあったが、これは、短距離走に見られるように走速度が速いと踵を接地するフォームでは短い接地時間で足関節を經由した大きな力積を発揮することが難しくなることと関連しているのかもしれない。実際、競技力の高くないレクリエーションランナーの85%以上は Rearfoot 接地を示す<sup>6)</sup>。今回の被験者は世界大会入賞者から一般ランナーまでを含む広い競技レベルの選手であった。しかし、結果的に、得られたデータは高い競技レベルの競技者が含まれる比率が高かった。その意味では、サンプリングに偏りがあることは否めず、今回の結果から一般ランナーについて議論するのは難しいと考える。

これまでに、接地スタイルによってランニングフォームと地面反力<sup>1)</sup>が異なることは知られている。また、足部の足弓に蓄えられる弾性エネルギーの量<sup>7)</sup>が接地スタイルによって異なる可能

性もある。これらが筋や腱の力学的な特性と関連することも考えられるため、これらの相互作用も含めた今後の検討が必要であろう。

#### 4. まとめ

本研究では、長距離走において有効な地面への接地スタイルと筋や腱の力学的な性質が関連するという仮説の基、Forefoot, Midfoot, Rearfootの接地を示す3群において、足関節の受動トルク、ならびに筋腱の力学的特性の比較を行い、また、それらの競技力との関係を検討した。群間比較の結果、統計的な有意差が競技力においては見られたものの、足関節の受動トルク、ならびに筋腱の力学的特性には統計的な差はなかった。相関解析の結果、競技力の高い選手は、高い受動トルクをもつことが全体を対象とした分析、ならびに、MidfootとRearfootの群内相関において示された。また、競技力が高い選手の筋 stiffness indexが高いことも全体を対象とした分析において示された。つまり、高い足関節の受動トルクと筋 stiffness indexは競技力の高さに関連するが、接地の仕方によるそれらの違いは明確でなかった。

#### 謝 辞

本研究は、平成27年度公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団より助成を受け実施された。ここに厚く御礼申し上げます。また、実験遂行に多大なるご協力をいただいた大阪体育大学石川昌紀様、久野峻幸様、佐野加奈絵様、国正陽子様、兵庫教育大学松岡太嗣様にこの場を借りて深く御礼申し上げます。

#### 文 献

- Almeida J.M.O., Davis I.S., Lopes A.D., Biomechanical Differences of Foot-Strike Patterns During Running: A Systematic Review With Meta-analysis. *Orthop. Sports Phys. Ther.*, (Epub 2015 Aug 24) (2015)
- Butler D.L., Grood E.S., Noyes F.R., Zernicke R.F., Biomechanics of ligaments and tendons. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 6: 125-181 (1978)
- Hasegawa H., Yamauchi T., Kraemer W.J., Foot strike patterns of runners at the 15-km point during an elite-level half marathon. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21: 888-893 (2007)
- IAAF SCORING TABLES OF ATHLETICS 2014 revised edition, (2014)
- Lieberman D.E., Venkadesan M., Werbel W.A., Daoud A.I., D'Andrea S., Davis, I.S., Pitsiladis Y. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature*, 46: 531-535 (2010)
- Kasmer M.E., Liu X.C., Roberts K.G., Valadao, J.M., Foot-strike pattern and performance in a marathon. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8: 286-292 (2013)
- Ker R.F., Bennet M.B., Bibby S.R., Kester R.C., Alexander R.M., The spring in the arch of the human foot. *Nature*, 325: 147-149 (1987)
- Kubo K., Miyakawa D., Tanaka S., Shimoju S., Tsunoda S., Relationship between Achilles tendon properties and foot strike patterns in long-distance runners. *Journal of Sports Sciences*, 33(7) : 665-9 (2015)
- マクドゥーガル クリストファー, BORN TO RUN 走るために生まれた~ウルトラランナー VS人類最強の“走る民族”, 日本放送出版協会, (2010)
- 笹川スポーツ財団, スポーツライフに関する調査報告書(1998~2014) (2014)
- T. Oda, Y. Toyoda, T. Hisano, Y. Akihara, Y. Kunimasa, K. Sano, K. Kusumoto, C. Nicol, P.V. Komi, M. Ishikawa., Mechanical properties of triceps surae muscle-tendon unit in Kenyan and Japanese distance runners. 1st Asia Pacific Conference on Coaching Science, (2014)
- T. Oda, Y. Toyoda, T. Hisano, K. Kusumoto, Y. Kunimasa, K. Sano, M. Ishikawa. Faster distance runners have more compliant Achilles tendon. 17th annual Congress of the European College of Sport Science. (2013)
- 山地 啓司 最大酸素摂取量の科学, 杏林書院, (2001)
- Warr B.J., Fellin R.E., Sauer S.G., Goss D.L., Frykman P.N., Seay J.F., Characterization of Foot-Strike Patterns: Lack of an Association With Injuries or Performance in Soldiers. *Mil. Med.*, 180(7) :330-4 (2015)

## 水分補給を伴う運動負荷後の含嗽が 口腔内環境に及ぼす影響

東京医科歯科大学大学院 高橋 敏 幸  
(共同研究者) 同 池川 麻 衣  
同 上野 俊 明

### Effects of Gargling after Exercise Accompanied by Rehydration on Intraoral Environment

by

Toshiyuki Takahashi, Mai Ikegawa, Toshiaki Ueno  
*Department of Sports Medicine/Dentistry,  
Graduate School of Medical and Dental Sciences,  
Tokyo Medical and Dental University*

#### ABSTRACT

Researchers have reported that athletes have more dental caries than ordinary people. Though exercise-induced dry mouth, rehydration with large consumption of sports drink and food, and poor brushing of teeth are mentioned as causes for the higher risk of dental caries in athletes, the details remain unclear. The aim of this study was to investigate the influences of rehydration on salivary flow, pH and buffering capacity during ergometer exercise in healthy volunteer participants. Ten healthy volunteers (5 males and 5 females, Ave.22.4 yr old) performed bicycle ergometer exercise at 80% of the maximal heart rate for 30-min in the 4 conditions: 1) only a sports drink for rehydration, (Aquarius, Coca-Cola & Co., Ltd., Tokyo, Japan) 2) sports drink for rehydration and gargling immediately after exercise, 3) sports drink diluted two times for rehydration, (diluted with mineral water; Evian, Danone Waters of Japan

Co., Ltd., Tokyo, Japan) and 4) sports drink diluted two times for rehydration and gargling immediately after exercise. Participants consumed 150ml at one time, and received hydration four times in all. Paraffin-stimulated whole saliva samples were collected before, and right (0min), 30min and 60min after exercise to measure the salivary flow rate, pH and buffering capacity. The salivary flow was almost constant throughout the experiment. The salivary pH decreased after exercise in condition 1. The salivary buffering capacity decreased significantly after the exercise in conditions 1 and 2. Regarding the salivary flow, pH and buffering capacity, there were no significant differences between before and after exercise in conditions 3 and 4. From these results, it was suggested that adequate gargling immediately after taking a sports drink for rehydration in association with sports and exercise was effective in oral health.

## 要 旨

アスリートの平均う蝕指数は一般人に比べて高いことが既に報告されている。運動に伴う口渇、スポーツドリンクの過剰摂取、間食や補食の常態化、肉体疲労によるブラッシングの怠慢などがう蝕のリスクを引き起こすと考えられているが、その詳細は未だ不明である。そこで本研究は、運動中の水分補給が唾液分泌量、唾液 pH、唾液緩衝能に与える影響について明らかにすることを目的とした。健康なスポーツ愛好家 10 名（男性 5 名、女性 5 名、平均年齢 22.4 歳）に対し、運動負荷試験を自転車エルゴメータにより実施した。運動は最高脈拍 80% の有酸素運動を 30 分とし、水分補給源と運動直後の含嗽については、(1) スポーツドリンク摂取、含嗽なし、(2) スポーツドリンク摂取、含嗽あり、(3) スポーツドリンク（ミネラルウォーターにて 2 倍希釈）摂取、含嗽なし、(4) スポーツドリンク（ミネラルウォーターにて 2 倍希釈）摂取、含嗽ありの 4 条件とした。水分補給量は 1 回あたり 150ml を実験中に 4 回、計 600ml 摂取させた。実験前、実験直後、30 分後、60 分後の計 4 回唾液採取を行い、唾液分泌量、唾液 pH、唾液緩衝能を測定した。いずれの条件下に

においても、唾液分泌量は実験を通してほぼ変化はなかった。条件 (1) において運動後の唾液 pH が低下した。条件 (1)、(2) においては運動後の唾液緩衝能が有意に低下した。条件 (3)、(4) においては、運動前後で唾液分泌量、唾液 pH、唾液緩衝能のいずれも有意な変化は見られなかった。以上の結果より、運動時の水分補給源と摂取後の適切な含嗽は、口腔内環境に影響を与えることが示唆された。

## 諸 言

我が国のトップアスリートの平均う蝕経験歯数は一般人に比べて多いことが既に報告されている<sup>1)</sup>。上野らによると、2004 年アテネ夏季オリンピック及び 2006 年トリノ冬季オリンピックの日本代表候補選手の歯科保健状況について、処置済みう蝕指数はそれぞれ 10.9、10.5、未処置う蝕指数はそれぞれ 2.2、1.7 であった<sup>1)</sup>。2005 年の歯科疾患実態調査では処置済みう蝕指数は 7.45、未処置う蝕指数は 1.1 であったことから、これらの数値を上回る結果であった<sup>1)</sup>。この要因として、運動・スポーツ実施に伴う口渇、肉体疲労によるブラッシングの怠慢、スポーツドリンクの過剰摂取、間食や補食の常態化などが挙げられる<sup>1-4)</sup>。とりわ

け運動・スポーツ実施の発汗により、脱水ならびに口渴感がしばしば生じるが、この口渴は唾液分泌の低下を意味し、口腔内の保湿機能の低下、口腔内の清浄作用の低下により、う蝕活動性の上昇に繋がる。実際、多くのアスリートは脱水予防、電解質バランスの変化を防ぎパフォーマンスを改善するための有効対策として、積極的に水分補給を行っているが、この水分補給は口腔内乾燥の改善、唾液分泌機能の維持にも資すると考えられる<sup>5)</sup>。一方、健常成人被験者を用いた先行研究では、高強度トレッドミル走行あるいはエアロバイク運動中にスポーツドリンクを摂取した場合、ミネラルウォーター摂取時に比べて唾液 pH、唾液緩衝能が低下し、運動または水分補給条件がカリエスリスクの変動因子となりうる可能性が示唆された<sup>5-9)</sup>。

市販スポーツドリンクには、運動によって失われたエネルギーや電解質を補給するために、ブドウ糖、ショ糖、果糖といった糖質や、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ といった電解質を体液と同等の pH・浸透圧に調整したものが混合されており、これらが脱水予防および身体疲労の回復のために重要であることも示唆されている<sup>10)</sup>。これを受けて、スポーツ愛好家やアスリートおよびその指導者が、口腔内の環境面よりも、パフォーマンスに直結する脱水や身体疲労への対策として運動時の水分補給にスポーツ飲料の摂取を積極的に行っていることも十分に考えられる。その一方で、よほど疲労困憊に陥るような運動をしない限り、比較的軽度の体内電解質バランスの失調、エネルギーの消耗であれば体内で常に行われている調節機構の働きによって速やかに正常に回復するため、健康の維持・向上を目的とした運動程度であれば運動後のスポーツドリンクは飲まないよりは飲んだほうがよいという程度に考えるべきといった見解もある<sup>10-13)</sup>。

いずれにせよ、スポーツドリンクがスポーツの

パフォーマンスに寄与することを踏まえると、スポーツドリンクを摂取しながらも口腔内の環境を改善する方法を模索したり、その後の口腔ケアに留意する必要があるといえるが、具体的な方法やエビデンスは未だ示されていない。そこで本研究では、先行研究結果をふまえて水分補給を伴う負荷運動後の含嗽が口腔内環境に与える影響について、水分補給条件を変えながら比較検討した。これにより、アスリートを含むスポーツ愛好家に対し、スポーツドリンクを摂取した後の効果的な口腔ケア方法の提案が可能となり、また口腔衛生を考える上での新しい有益な知見を得ることができると思われる。

## 1. 研究方法

### 1.1 被験者

心身に異常がなくスポーツを愛好する健常若年成人 10 名 (男性 5 名, 女性 5 名, 平均年齢 22.4 歳) で、顎口腔系に特に異常がなく、歯列欠損がない者を対象とした。なお歯科矯正治療中の者は除外した。本研究実施については、東京医科歯科大学歯学部倫理審査委員会の承認を得た (第 899 号)。全ての被験者は、研究の趣旨と内容を書面および口頭にて十分説明を受け、文書によるインフォームドコンセントを提出した上で実験に参加した。被験者の身長は 157 ~ 179cm (平均 166.0cm) 体重は 53 ~ 80kg (平均 60.3kg) であった。

### 1.2 運動負荷試験

食後 2 時間以上経過し、かつブラッシング後 1 時間以上経過した時点で、コントロール唾液を採取し運動負荷試験を開始した。

実験における運動負荷試験は、自転車エルゴメータ (エアロバイク ai : コンビウエルネス社製 東京) を用いて、約 15 分のウォーミングアップの後、目標脈拍値が最高脈拍 80% となるレベルで有酸素運動 30 分を実施した。本機器では、

耳朶につけた高感度脈拍センサーからの情報をリアルタイムにコンピュータ処理し、自動的にペダルの負荷をコントロールして設定脈拍値に応じた有酸素運動を行うことができる。各被験者には、下記4条件を1日1回ずつ行わせた。

条件①：スポーツドリンク摂取・運動後の含嗽なし

条件②：スポーツドリンク摂取・運動後の含嗽あり

条件③：スポーツドリンク(ミネラルウォーターにて2倍希釈)摂取・含嗽なし

条件④：スポーツドリンク(ミネラルウォーターにて2倍希釈)摂取・含嗽あり

水分補給は1回あたり150mlを10分おきに、運動開始前も含め計4回行った。含嗽は有酸素運動後の水分補給直後に、1回あたり30mlを口に含んだ10秒間の「ぶくぶくうがい」を3回行った。

### 1. 3 水分補給

本研究の水分補給源として、ミネラルウォーター (pH7.5:エビアン<sup>TM</sup>, ダノンウォーターズオブジャパン株式会社 東京) と市販スポーツドリンク (pH4.0:アクエリアス<sup>TM</sup>, 日本コカ・コーラ株式会社 東京) を用いた。

### 1. 4 唾液検査

本研究ではパラフィンワックス咀嚼刺激全唾液を採取した。1g重の無味無臭のパラフィンワックス片を3分30秒咀嚼させた。初期30秒間の刺激唾液は棄却し、その後の3分間の刺激唾液の全てを計量器に吐出させ、貯留した全唾液を計量した(唾液分泌量)。唾液採取は運動前(コントロール)、運動直後、運動30分後、運動60分後の計4回行った(図1)。条件②および④においては、含嗽後に採取した唾液を運動直後のものとした。

唾液pHおよび唾液緩衝能は、携帯型pHメーター(LAQUAtwin・堀場製作所製・京都、図1)



図1 LAQUAtwin・堀場製作所製

を用いて測定した。まず、pHメーターのセンサー部に採取唾液0.25ml滴下し、表示されたpH値(唾液pH)を読み取り、その後、酸負荷液(乳酸0.25ml・pH3)をセンサー上の試料唾液に滴下し20秒間混和後に表示されるpH値(唾液緩衝能)を読み取った。

### 1. 5 統計学的検定

実験で得られたデータは匿名化した後、統計処理を行った。なお、実験で採取した試料は測定後その場で破棄した。運動負荷試験前後における唾液分泌量、唾液pHおよび唾液緩衝能の変化について、一元配置分散分析とBonferroni法を用いた。有意水準は $p < 0.0125$ とした。

## 2. 研究結果

### 2. 1 唾液分泌量

運動負荷による唾液pHの変化を図2に示す。いずれの条件でも運動直後に唾液分泌量がやや減少傾向となったものの、実験を通して大きな変化はみられず、統計学的検定の結果、有意差はみられなかった。

### 2. 2 唾液pH

運動負荷による唾液分泌量の変化を図3に示す。

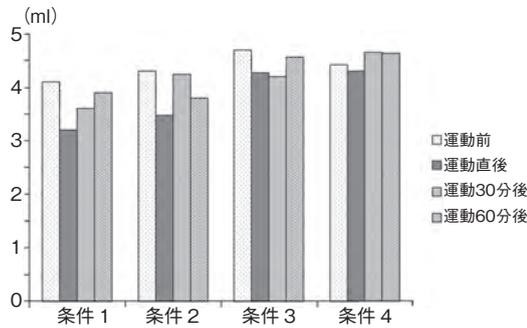


図2 運動負荷による唾液分泌量の変化

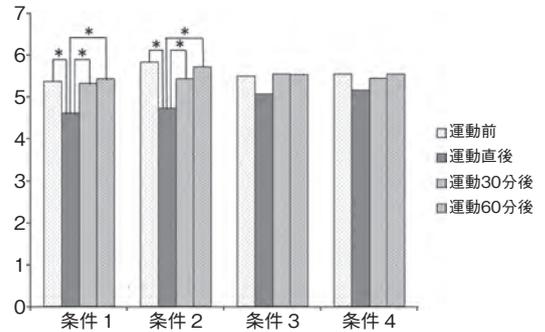


図4 運動負荷による唾液緩衝能の変化

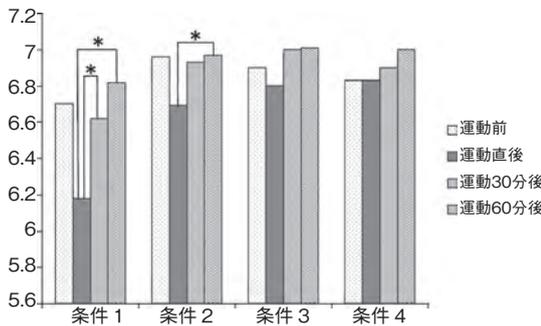


図3 運動負荷による唾液pHの変化

条件①においては、運動後の唾液 pH が大きく低下し、統計学的検定の結果、運動直後と運動30分後、運動直後と運動60分後の唾液 pH で有意差がみられた。

条件②においては、運動直後に唾液 pH は低下傾向にあり、運動直後と運動60分後の唾液 pH に有意差がみられた。条件①、②に共通して、運動前から運動直後の唾液 pH は低下し、運動直後から運動30分後、運動60分後にかけて唾液 pH が回復し、60分後にはベースラインまで達する傾向がみられた。ただし、運動後に含嗽をした条件②に関しては、運動直後の唾液 pH の低下が条件①に比べゆるやかであった。

スポーツドリンクの濃度を薄めた条件③に関しては、条件①、②に比べ運動直後の唾液 pH の低下を抑制することができ、運動30分後には唾液 pH がベースラインまで回復した。

条件④においては、実験を通して唾液 pH の変

化がほぼみられなかった。

### 2. 3 唾液緩衝能

運動負荷による唾液緩衝能の変化を図4に示す。

条件①、②では、運動直後の唾液緩衝能は低下し、運動直後から運動30分後、運動60分後にかけて徐々に唾液緩衝能の値が回復し、運動60分後にはほぼベースラインまで達する傾向がみられた。統計学的検定の結果、条件①、②ともに、運動前と運動直後、運動直後と運動30分後、運動直後と運動60分後の唾液緩衝能に有意差がみられた。

条件③、④では、運動直後の唾液緩衝能がやや低下傾向にあるものの、実験を通して唾液緩衝能の値に大きな変化はなく、有意差もみられなかった。

## 3. 考 察

### 3. 1 運動負荷に伴う唾液分泌量の変化

一般に刺激唾液の平均分泌量は1.6ml/分と言われているが、今回の実験においては全測定時でこれを下回る値となった<sup>14)</sup>。

運動時の体温上昇は発汗することで調節されており、運動負荷に伴う発汗によって水分、電解質は失われ、運動時のエネルギー源としてタンパク質は消費される<sup>15)</sup>。また、電解質は活動筋にも

関与する。運動負荷中や運動負荷前後に水分補給を行わなかった場合、この電解質やタンパク質の減少によって浸透圧が生じ、血漿中の水分は血管壁（毛細血管）を通り組織間や細胞内へと移動し、結果として脱水症状を引き起こす<sup>15)</sup>。また電解質の不足により筋代謝が阻害され、パフォーマンスの低下を招くと考えられる<sup>16)</sup>。

唾液成分の99%以上は水分であるが、唾液の生成には血液（血漿成分）が必要となる。それには唾液腺に流れる血液量および供給されるエネルギーや酸素が大きく影響するが、運動時には血漿量が減少するため、運動時の唾液の生成の抑制にもつながると考えられる。血漿量の減少は活動筋への水分移動によるが、そのメカニズムとして、活動筋での血管拡張にともなって毛細血管内圧が高まり水分の濾過が促進されること、また活動筋内に乳酸などの代謝物質濃度が上昇し、細胞内外の浸透圧勾配によって、水分が細胞内に流入することが考えられる<sup>15)</sup>。したがって、運動負荷時に水分補給を行うことで、脱水やパフォーマンスの低下を防止するとともに、唾液生成低下の抑制、結果として唾液分泌量の低下の抑制が可能となる<sup>16-18)</sup>。

本研究においては、全ての条件において水分補給を行っており、実験の前後で唾液分泌量に大きな変化はみられなかった。一般に、運動中の水分補給量は10～15分おきに100～200mlが適切とされている<sup>19)</sup>。そこで本研究においては水分補給量と補給のタイミングを統一するために10分おきに150ml、計600mlと設定した。また、過去の研究では、水分補給を被験者の任意とした場合、ミネラルウォーターよりもスポーツドリンクは、補給量が多い傾向になったとの報告もある<sup>6)</sup>。これは、スポーツドリンクが飲みやすい味に調整されていることが理由として挙げられるが、補給量が多くなることによって唾液pHや唾液緩衝能に、より影響を与える可能性も否定できない。ま

た、夏季においては熱中症予防として十分な水分補給が必要であり、運動中のみならず運動前、運動後に適量の水分補給を行うことの重要性を認識すべきであるとの見解も多いことから、今回の実験においても運動の前後で水分補給を行わせた<sup>9, 20, 21)</sup>。このように運動負荷時の水分補給量を全被験者で統一したことで、飲料の種類による比較が可能になると考えられる。

したがって、運動時に適切な水分補給を行うことで唾液分泌機能の低下を抑制することができ、その結果、う蝕や酸蝕症などの発生・進行リスクをコントロールできると考えられる。

### 3. 2 水分補給条件による唾液pHと唾液緩衝能の変化

唾液のpHおよび唾液緩衝能は主に血液中の重炭酸イオンの働きによって調節されている<sup>16, 17)</sup>。刺激唾液では安静時よりも重炭酸イオンが多く分泌されるため、緩衝作用が十分に働く。そのため本研究では、唾液採取用無味無臭ガムを用いて刺激唾液を採取し、刺激唾液のpHと緩衝能について検討した。また、唾液分泌量と唾液pHには相関があるとされている<sup>22)</sup>。重炭酸イオン濃度は唾液分泌速度に強く依存して変化するため、唾液分泌速度が増すと重炭酸イオン濃度も増し、唾液pHは上昇する<sup>23)</sup>。水分補給を行わずに運動した場合に、唾液pHがやや下がる傾向にあることは先行研究結果からも明らかになっているが、これは運動負荷により乳酸が蓄積して酸性に傾いた血液をアルカリ性に調整するために血液中の重炭酸イオンが利用され、唾液分泌に利用される重炭酸イオンが減少したことに関連した唾液pHの低下であると考えられる。

緩衝能とは、一定の試料に対し一定量の酸またはアルカリを加えた時にpHの値がどのように変化するかを測定することで定量的に評価を行う。う蝕発生という観点では、唾液の酸に対する緩衝

能を測定するため、一定量の唾液に一定量の酸を滴下したときの pH の変動を測定すればよいことになる<sup>24)</sup>。このような唾液緩衝能の測定は、研究室レベルでは半世紀以上前から pH 色素や pH メーター、あるいは酸溶液を染み込ませた pH 試験紙（緩衝能ストリップス）を用いた測定例が報告されているが、呈色で判定を行うものでは呈色の境界領域で使用者が判定に迷ったり、唾液の性状や滴下の仕方によっても呈色が変わってしまうため適切な評価ができなくなることもあった<sup>24)</sup>。本研究で用いた LAQUAtwin は、チェアサイドでの使用を想定し、緩衝能の評価をより簡便に実現できる機器であり、測定した緩衝能の値が 5.8 以上を示す場合には「高い」、4.8 以上 5.8 未満の場合には「中程度」、4.8 未満の場合は「低い」といった評価基準をとっているが、緩衝能には個人差や年齢差もみられる<sup>24)</sup>。

運動実施と唾液緩衝能との関連性に関して、先行研究<sup>5-9)</sup>により、男女どちらの被験者群でも、血中乳酸蓄積開始点 (OBLA) 相当の高強度トレッドミル走運動実施に伴い、唾液緩衝能が有意に低下することから、運動実施に伴う蝕進行リスクが高まる可能性が示唆されている。

多くのスポーツドリンクにはクエン酸などの酸が含まれており、飲料の pH はおおよそ 3~4 に調整されている。今回の研究で我々が用いた飲料の pH は 4 であった。先述の通り、pH の低い飲料を継続的に摂取しながら運動を行った場合、運動前後の唾液 pH や唾液緩衝能に影響を及ぼすということは既に明らかになっているが、今回の実験において、条件①で運動直後と運動 30 分後、運動直後と運動 60 分後の唾液 pH に有意差がみられたことは先行研究の結果を追認するものである。

一方、条件③については実験の前後で唾液 pH および唾液緩衝能の大きな変動はなく、運動直後の唾液 pH および唾液緩衝能の低下は僅かであっ

た。これらの結果から、運動中に摂取するスポーツドリンクを希釈することは、口腔内の酸性度を弱め、唾液の緩衝作用が働きやすい環境を作り出す可能性が示唆された。

### 3. 3 水分補給後の含嗽に伴う唾液 pH と唾液緩衝能の変化

条件①において、運動直後と運動 30 分後、運動直後と運動 60 分後の唾液 pH に有意差がみられ、さらに、運動前と運動直後、運動直後と運動 30 分後、運動直後と運動 60 分後の唾液緩衝能にも有意差がみられた。これは、運動時にスポーツドリンクのような pH の低い飲料を摂取すると、口腔内の pH が低下するだけでなく緩衝作用も低下することにより、pH がベースラインに回復するのに時間を要することを表している。しかし、条件①に比べ②、条件③に比べ④の唾液 pH の低下が緩やかであった。

つまり、含嗽を行うことは、スポーツドリンクを摂取したことで酸性に傾いた口腔内をベースラインに回復させる補助的な役割を担っていると考えられる。また、スポーツドリンクを希釈した条件④においても、実験を通して唾液緩衝能の大きな変化はなく、有意差もみられなかった。したがって、水分補給後の含嗽は、口腔内の酸性度を弱め、唾液の緩衝作用が働きやすい環境を作り出すことを可能にすると考えられる。

本研究において、使用した水分補給源は、ミネラルウォーターのエビアンとスポーツドリンクのアクエリアスのみであったが、その他スポーツドリンクの種類やスポーツドリンクの異なる希釈濃度による、唾液 pH および唾液緩衝能の低下およびベースラインへの回復の速度・程度の検討により、水分補給源に関するより明確な選択基準を明らかにしていくことも今後の課題の一つになると思われる。

### 3. 4 競技者のためのスポーツ飲料摂取後の効果的な口腔ケア方法

スポーツドリンクを継続的に摂取しながら運動することにより、運動後の唾液分泌量には影響がないものの、唾液 pH および唾液緩衝能は低下し、運動前のベースラインに回復するまでに 60 分程度またはそれ以上の時間がかかるため、口腔内のう蝕・酸蝕症の発生・進行リスクのコントロールは難しく、そのような状況下でどのようなアプローチで口腔ケアを行っていくべきかということはこれまでの課題であった。しかし本研究結果から、運動時にスポーツドリンクを摂取する場合は 2 倍程度に希釈したものとし、更に運動後には含嗽を行うことで、唾液 pH および唾液緩衝能のベースラインへの回復を早めることが期待できることが示唆された。

運動時に失われる水分や電解質、栄養分の補給は生理的にもパフォーマンスの低下の防止のためにも欠かせない。スポーツを行う者やその指導者等に対して、スポーツドリンクを摂取することのメリット・デメリットを認識してもらい、運動・競技後に含嗽を励行させる、加えて食後のブラッシングなどのオーラルケアを取り入れていくよう、歯科医師や歯科衛生士が指導を行っていくことが重要である。

### 結 論

水分補給を伴う運動負荷後の含嗽が口腔内環境に与える影響について、水分補給条件を変えながら比較検討した。成人のスポーツ愛好家を対象に運動前、運動直後、運動後 30 分、運動後 60 分の刺激唾液を採取し、運動後の含嗽の有無により唾液分泌量、唾液 pH、唾液緩衝能にどのような影響を与えるのかを測定した結果、以下の結論を得た。

1. 運動負荷時の適切な水分補給は、唾液分泌量の低下を抑制した。運動負荷時に行う水分補給の

条件を全被験者で統一したことで、同量の水分であればミネラルウォーターとスポーツドリンクとの間に唾液分泌量に与える影響に差が生じないことが明らかとなった。

2. 運動負荷時のスポーツドリンク摂取は、唾液 pH および唾液緩衝能を低下させ、ベースラインへの回復に運動後から 60 分以上を要した。

3. 運動負荷時に 2 倍希釈したスポーツドリンクを摂取することにより、唾液 pH および唾液緩衝能の低下が緩やかになり、ベースラインへの回復は運動後から 30 分程度であった。

4. 運動負荷時にスポーツドリンクを摂取した後に、適切な含嗽を行うことは、唾液 pH および唾液緩衝能の低下を抑制し、ベースラインへの回復を早めることが明らかとなった。

### 謝 辞

本研究に対し助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

### 文 献

- 1) 上野俊明, 豊島由佳子, 他: 04年アテネ・06年トリノオリンピック日本代表候補選手の歯科保健状況について, 第 18回日本臨床スポーツ医学会学術集会, 大分, 2007年 11月 3・4日
- 2) 隅田陽介, 山中拓人, 他: 大学・社会人ラグビー選手の歯科保健とマウスガード使用状況. スポーツ歯誌 5: 30-36(2002)
- 3) Bryant S., McLaughlin K. et al.: Elite athletes and oral health. *Int. J. Sports Med.*, 32:720-724(2011)
- 4) Sirimaharaj V., Brearley. et al.: Acidic diet and dental erosion among athletes. *Aus. Dent. J.*, 47(3):228-236(2002)
- 5) 上野俊明, 中野真帆, 他: 競技者のデンタルコンディショニングに関する研究-適切な水分補給によるカリエスコントローラー-. 日本オリンピック委員会/日本コカ・コーラ スポーツ科学基金(アクエリアス基金) 2008年度研究報告書, p78-84, 2009年 5月

- 6) Tanabe M., Takahashi T. et al.: Effects of rehydration and food consumption on salivary flow, pH and buffering capacity in young adult volunteers during ergometer exercise, *J. Int. Soc. Sports Nutr.*, 10:49(2013)
- 7) Nakano S., Yamanaka T. et al.: Effect of exercise on salivary flow rate and buffering capacity in healthy female and male volunteers, *Int. J. Sports Dent.*, 2: 25-32(2009)
- 8) Nakano S., Yamanaka T. et al.: Changes in salivary flow rate and buffering capacity after treadmill exercise of varied intensity and duration, *Int. J. Sports Dent.*, 3:37-45(2010)
- 9) 上野俊明, 山本(中野) 真帆, 他: 運動負荷に伴う唾液分泌機能低下現象に対する水分補給の効果. *スポーツ歯学* 15: 53-60(2012)
- 10) 中野昭一, 寺尾保: 運動・スポーツと栄養 水と栄養補給の諸問題, *東海大学スポーツ医科学雑誌* 3:12-29(1991)
- 11) 高橋良輔, 宮川達, 他: 陸上競技選手のスポーツ飲料に対する意識調査, *体力科学* (0039-906X) 58巻 6号 Page911(2009.12)
- 12) 山本典子, 深川優子, 他: スポーツ選手, スポーツジム定期利用者のスポーツ飲料水に対する意識調査アンケート, *日本歯科衛生学会雑誌*(1884-5193) 4巻 1号 Page240(2009.08)
- 13) 宮川達, 高橋良輔, 他: 低中強度および高強度の運動習慣者におけるスポーツドリンクに対する意識の比較, *体力科学*(0039-906X) 58巻 6号 Page848(2009.12)
- 14) Heintze U., Birkhed D. et al.: Secretion rate and buffer effect of resting and stimulated whole saliva as a function of age and sex. *Swed. Dent. J.*, 7:227-238(1983)
- 15) 井出吉信, 山田好秋, 他: 最新歯科衛生士教本 歯・口腔の構造と機能—口腔解剖学・口腔組織発生学・口腔生理学, 第1版, p136-142, 医歯薬出版株式会社(2011)
- 16) Peter G.S., Robert W. et al.: Comparative effects of selected non-caffeinated rehydration sports drinks on short-term performance following moderate dehydration. *J. Int. Soc. Sports Nutr.*, 7:28(2010)
- 17) Jeff S.C.: Sports drinks and dental. *Am. J. Dent.*, 18 (2) :101-104(2005)
- 18) Sawka M.N., Burke L.M. et al.: American College of Sports Medicine. Position stand on exercise and fluid replacement. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 39:377-390(2007)
- 19) Fox E.L., Bowers R.W. et al.: *The Physiological Basis of Physical Education and Athletics*. 4th ed. W.C. Brown Publishers, Dubuque, p.470(1989)
- 20) 和久貴洋, 相澤勝治, 他: 熱中症. 小出清一, 福林 徹, 河野一郎(編), *スポーツ指導者のためのスポーツ医学*(改訂第 2版), p153-157, 南江堂, 東京(2009)
- 21) 川原 貴, 森本武利, 他: スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック. 日本体育発行, 2012年 10月 22日. <http://www.japan-sports.or.jp/medicine/tabid/523/Default.aspx>
- 22) 廣瀬弥奈, 福田敦史, 他: チェックバフによる唾液緩衝能検査の変動値および唾液分泌量, 唾液 pH, 緩衝能, リン酸イオン濃度, タンパク濃度の相互関係について, *口腔衛生学会雑誌* 56(3) :220-227(2006)
- 23) 鈴木昭, 南真紀, 他: 唾液の分泌速度, pH, 緩衝能とカルシウム濃度, 無機リン濃度の個人内変動, *小児歯科学雑誌* 42(3) :365-374, 356(2004)
- 24) 野村聡: 唾液緩衝能測定装置 チェックバフ, *Readout*, 29(2004)

# 電気刺激を用いた新しい筋力トレーニング

ト ロ ン ト 政 二 慶  
リハビリテーション病院

## Novel Strength Training Using Electrical Stimulation

by

Kei Masani

*Rehabilitation Engineering Laboratory,  
Toronto Rehabilitation Institute – University Health Network  
Rehabilitation Engineering Laboratory,  
Institute of Biomaterials and Biomedical Engineering,  
University of Toronto*

### ABSTRACT

Muscle fatigue is a major limiting factor in the use of functional electrical stimulation (FES) for strength training. FES induces rapid muscle fatigue because muscle fibres have to be activated at unnaturally high frequencies to generate functional contractions. To overcome this weakness, we have proposed a unique method called Spatially Distributed Sequential Stimulation (SDSS), and tested its advantage in isometric contractions for major leg muscles. The purpose of this project was to test if SDSS was capable of reducing fatigue for isokinetic knee extension. Eleven healthy volunteers participated. Intermittent stimulation (0.3-s on : 0.7-s off; 120-s total) was delivered to the knee-extensors using the conventional method (Single-Electrode-Stimulation; SES) (1 active electrode; 40 Hz) and SDSS (4 active electrodes, each stimulated at 10 Hz; composite 40 Hz stimulation) in separate trials, to generate isometric ( $0^\circ/s$ ) and isokinetic ( $180^\circ/s$ ) torque. Measures of fatigability included fatigue index (FI, average

peak torque of last 10 contractions  $\div$  average peak torque of initial 10 contractions) and torque peak mean (TPM, average peak torque of all 120 contractions  $\div$  average peak torque of initial 10 contractions). FIs were significantly higher for SDSS than SES during isometric (SES =  $0.616 \pm 0.092$ ; SDSS =  $0.761 \pm 0.165$ ;  $p = 0.002$ ) and isokinetic (SES =  $0.645 \pm 0.147$ ; SDSS =  $0.800 \pm 0.175$ ;  $p = 0.002$ ) contractions. TPM values were significantly higher for SDSS than SES during isometric (SES =  $0.781 \pm 0.068$ ; SDSS =  $0.846 \pm 0.108$ ;  $p = 0.022$ ) and isokinetic (SES =  $0.788 \pm 0.103$ ; SDSS =  $0.883 \pm 0.075$ ;  $p = 0.014$ ) contractions. We have reproduced previous findings that SDSS reduces fatigability of isometric contractions compared to similar sized contractions generated by SES. Further, we have extended these findings to isokinetic conditions. The present findings are important for facilitating the utility of FES for use in strength training.

## 要 旨

電気刺激を用いた筋力トレーニング法 (FES 筋力トレーニング法) は、最先端の筋力トレーニング法として普及始めているが、早期の筋疲労が問題である。我々は早期筋疲労を防ぎ、FES 筋力トレーニングをより効率化する新規な電気刺激法である SDSS 法を提案してきた。本研究では、等速性膝関節伸展動作において SDSS 法の効果を検証することを目的とした。若齢被験者 11 名を対象とした。SDSS 法および従来法を用いて 2 分間の反復刺激中の等尺性および等速性膝関節伸展トルクを計測した。その結果、両運動形態ともに、SDSS 法の方が従来法に比較して疲労低減効果が高いことが示された。以上より、SDSS 法はこれまで実行可能性検証のために用いられてきた等尺性運動のみならず、より臨床的な等速性運動においても有効であることを示せた。SDSS 法が FES 筋力トレーニングを効率化しうる可能性が示唆された。

## 緒 言

機能的電気刺激法 (Functional Electrical

Stimulation; FES) は、経皮的に反復した電気刺激を付与することで、筋収縮を誘発し関節に機能的運動を生じさせる方法である (Masani and Popovic 2012)<sup>1)</sup>。近年、FES を用いた筋力トレーニング法 (FES 筋力トレーニング法) が注目されている。随意努力を超える筋力発揮を行えるため、一流選手を含めたアスリートの効果的な筋力・パワーアップのためのトレーニングとして用いられている。非アスリートでは、筋力トレーニングに不慣れた高齢者において、過度な努力を必要とせずに筋量の維持増大や筋力維持向上の効果をもたらす新しい筋力トレーニングとして用いられつつある。このように、FES 筋力トレーニング法は、最先端の筋力トレーニング法としてアスリート/非アスリートを問わず普及しはじめている。

しかしながら、FES 筋力トレーニング法の大きな問題点として早期筋疲労があり、トレーニングの質・量共に妨げる大きな障害となっている。通常の筋力発揮では筋全体の筋線維が活動時刻を異にして動員されるのに対し、FES 筋力トレーニング法では筋全体ではなく電極直下の筋線維のみが一斉に賦活されることが、早期疲労の主要因である (Bergquist et al. 2011)<sup>2)</sup>。また筋全体ではな

く一部の筋線維のみで強縮を維持するためには、自然発火周波数(10-20 Hz 程度)以上の高頻度(40 Hz 程度)で刺激する必要がある、これも早期疲労をもたらす要因である(Bergquist et al. 2011)<sup>2)</sup>。

この早期筋疲労を低減するため、交互刺激法が提案されている(Nguyen et al. 2009<sup>3)</sup>; Malešević et al. 2010<sup>4)</sup>; Decker et al. 2010<sup>5)</sup>; Sayenko et al. 2014<sup>6)</sup>; Sayenko et al. 2015<sup>7)</sup>。Malešević と Popović (Malešević et al. 2010)<sup>4)</sup> は、5名の脊髄損傷患者において、大腿四頭筋各筋腹運動点(Botter et al. 2011)<sup>8)</sup>を交互に刺激することで、等尺性膝伸展運動において疲労低減効果があることを示した。Decker ら(Decker et al. 2010)<sup>5)</sup>は同様の方法を自転車駆動作において検証した。同時期に、我々のグループは交互刺激法の一種である Spatially Distributed Sequential Stimulation (SDSS) 法を提案し(Nguyen et al. 2009)、疲労低減効果を検証してきた(Nguyen et al. 2009<sup>3)</sup>; Sayenko et al. 2014<sup>6)</sup>; Sayenko et al. 2015<sup>7)</sup>。SDSS 法では、電極貼付位置は従来法(本研究では Single-Electrode-Stimulation; SES と表記する)と同じであるが、刺激電極を4分割し、分割された電極各部位を通常用いられる刺激頻度の4分の1の頻度で交互に刺激することにより、より広範囲の筋線維を比較的low頻度で交互に刺激することができる(図1)。電極位置を各筋腹上に分散させる必要がなく、Malešević と Popović や Decker らの方法に比べて、臨床応用により適した方法といえる。我々はこれまで、完全脊髄損傷患者1名の下腿三頭筋刺激を対象とした予備試験を経て(Nguyen et al. 2009)<sup>3)</sup>、健常者の下腿三頭筋刺激を対象とした等尺性足底屈運動(Sayenko et al. 2014)<sup>6)</sup>、健常者および不全・完全脊髄損傷患者を対象とした等尺性足底屈・足背屈・膝伸展・膝屈曲運動(Sayenko et al. 2015)<sup>7)</sup>において、SDSS 法が従来法と比較して30%程度、疲労を低減する効果があることを示してきた。

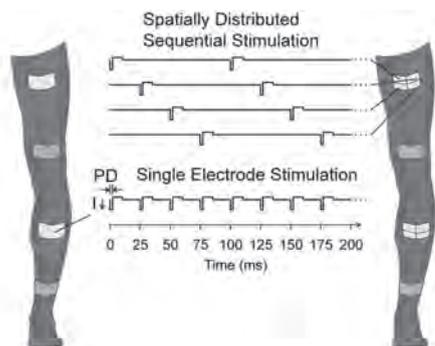


図1 SDSS法の模式図

左がわにSES法の電極配置、右側にSDSS法の電極配置を示す。両者とも同じ大きさの電極を貼付するが、SDSS法では刺激電極が4分割されている。SES法では刺激電極を40 Hzで刺激するのに対し、SDSS法では各分割4電極を10 Hzで位相を90度ずらして刺激する。これによりSDSSでは刺激電場が若干ずれて、各分割4電極下の筋線維は10 Hzで刺激されることになる。図は(Sayenko et al. 2015)より引用。

上記研究はすべて実行可能性検証を目的としていたため、不確定要素が少ない等尺性運動を用いた。等尺性運動下では、刺激電極と運動点の位置関係が一定であり、刺激電極位置を移動させるSDSS法の利点が大きいと考えられる。しかしながら、関節動作を伴うFES筋力トレーニング法では、運動点と刺激電極の位置関係が不定であり、すなわち従来の非分割電極を用いても多くの筋線維を動員できる可能性があるため、SES法と比したSDSS法の利点は明らかではない。

そこで本研究では、FES筋力トレーニング法の動作に近い等速性運動を用いて、SDSS法の効果を検証することとした。刺激対象筋群は、FES筋力トレーニング法にも頻繁に用いられる膝関節伸展筋群とした。これまでの研究結果(Nguyen et al. 2009<sup>3)</sup>; Sayenko et al. 2014<sup>6)</sup>; Sayenko et al. 2015<sup>7)</sup>と比較するため、等尺性運動も同時に測定した。

## 1. 研究方法

被検者は健常成人11名であった(男性10名、年齢 $32.4 \pm 9.7$ 歳、身長 $172 \pm 10$  cm、体重 $77.3 \pm 13.8$  kg)。本研究は当該研究所倫理委員会の承認を得て、被検者に文書による同意を得て行われた。

被検者は、実験室に2回来訪した。各来訪において、SESあるいはSDSS法のいずれかを適用した。片脚に等速性膝伸展運動を、他脚に等尺性膝関節運動を行わせた。刺激方法の順序および運動形態は、乱数表を用いて被検者間でランダムに適用した。

膝関節伸展筋力は、筋力ダイナモメータ(Biodex System 3, Biodex Medical Systems, USA)を用いて座位姿勢にて計測した。等尺性運動時は膝関節角度85度(完全伸展位を0度とする)において計測した。等速性運動時は、膝関節角度0から85度を可動範囲とし、毎秒185度の速度設定とした。筋力ダイナモメータから膝関節トルクおよび膝関節角度変位をアナログ信号出力として得て、A/D変換器(PowerLab/30 Series, ADInstruments, Colorado Springs)を用いて記録した。サンプル周波数は1000 Hzであった。

SDSS法を簡便に実現するため、我々はSDSSアダプターを開発した(図2)。現状では交互刺激法を行う場合、多数の刺激チャンネルを使用する必要がある(図2左中)。例えば分割4電極を刺激するには、90度ずつ位相をずらした4つの刺激チャンネルを使う必要があり、多数の刺激チャンネルを使うという点、また90度位相をずらす設定をするという点で、煩雑であり臨床応用

に適していない。SDSSアダプターは1つの刺激チャンネル出力を入力とし、90度ずらした4出力を自動的に行うものである(図2左下)。

電気刺激はポータブルFES装置(Compex Motion II, Compex SA, Switzerland)を用いて行った。大腿直筋近位部と大腿部遠位端にそれぞれ刺激電極と不関電極を配置した。SES法適用時は、刺激頻度40 Hzを用いた。SDSS法適用時は、ポータブルFES装置は刺激頻度40 Hzと設定し、SDSSアダプターを用いることで、分割4電極の各々は刺激頻度10 Hzにて刺激された。刺激パルス幅は両刺激方法とも250  $\mu$ sを用いた。刺激強度は被検者が耐えうる最大強度を用いた。先に行った刺激方法の初期トルクに、2回目に行った刺激方法の初期トルクを合わせることで、両者の初期トルクが同程度になるようにした。刺激時間300 ms、休息时间700 msを繰り返す、2分間の反復刺激を行った。

疲労度は、疲労指標(Fatigue Index; FI)と平均ピークトルク指標(Torque Peak Mean; TPM)を用いて定量評価した(Sayenko et al. 2015)。FIは、2分間の反復刺激初期10回のピークトルク平均値に対する終期10回のピークトルク平均値の比率として算出した。TPMは、2分間の反復刺激初期10回のピークトルク平均値に対する全

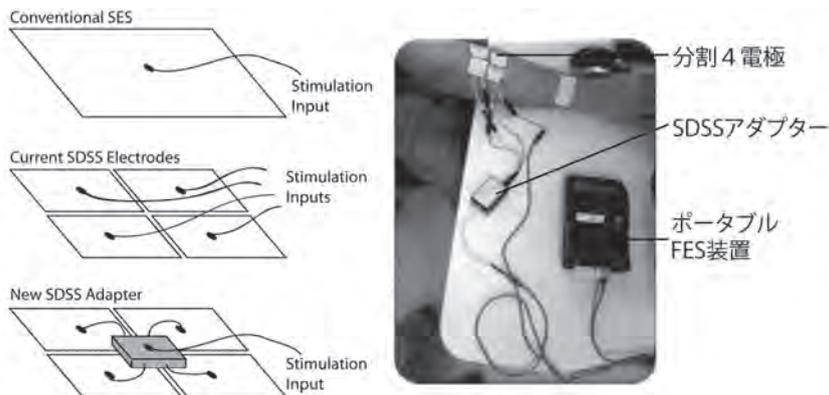


図2 SDSSアダプターの模式図(左)と写真(右)  
模式図の説明は本文参照。右は、ポータブルFES装置の1チャンネル出力がSDSSアダプターの入力となり、SDSSアダプターの出力が前腕に貼付された分割4電極に接続されている様子を示す。

120回のピークトルク平均値として算出した。FIは最終的なピークトルクの減少度、TPMは全体的なピークトルクの減少度を示す。

疲労度の各指標について、Kolmogorov-Smirnovテストにより正規性を確認した後、運動形態毎に対するt検定を用いてSDSS法とSES法の比較を行った。刺激方法間で初期ピークトルクが同等であったことを確認するため、初期10回のピークトルク平均値を対するt検定によって比較した。等尺性運動と等速性運動では初期ピークトルク値が大幅に異なるので、両者の統計的比較は公平でないと判断し行わなかった。有意水準5%で統計的有意性を判断した。

## 2. 研究結果

図3に各刺激方法、運動形態毎に、膝関節伸展トルク時系列の例を示す。一見して、SES法は右下がりにピークトルク値が減少している様子であるが、SDSS法は初期と同程度のピークトルクが最後まで維持されている様子がわかる。これらの試行のFIおよびTPMは図中に示されているが、両指標ともSDSS法の方が高かった。

図4に初期ピークトルク平均値(図4A)、FI(図4B)、TPM(図4C)のグループ平均値をそれぞれ示す。初期ピークトルク平均値には、各運

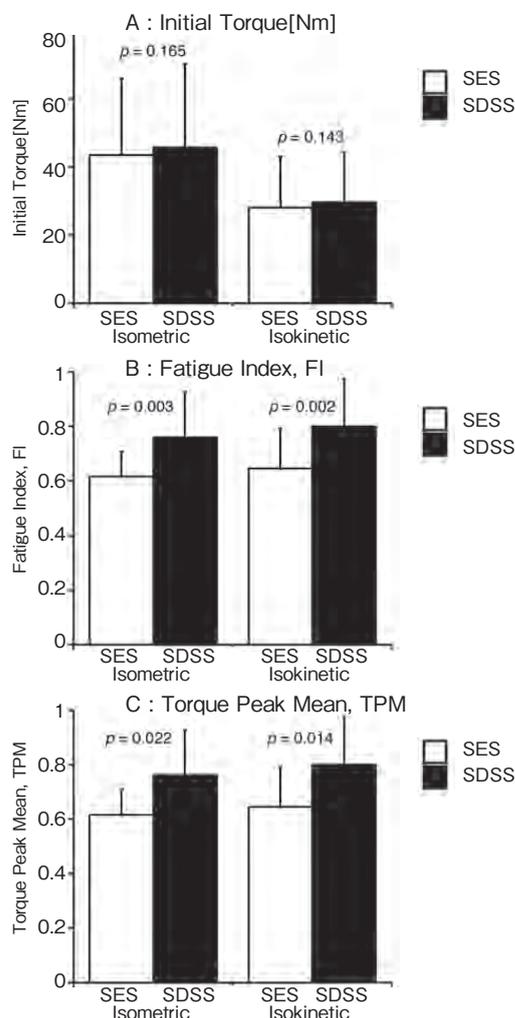


図4 初期ピークトルク値 (A)、FI (B)、TPM (C) のグループ平均値

各エラーバーは各群の標準偏差を示す。各プロット左側に等尺性、右側に等速性運動の結果を示した。図中p値は、刺激方法で比較した対するt検定結果である。

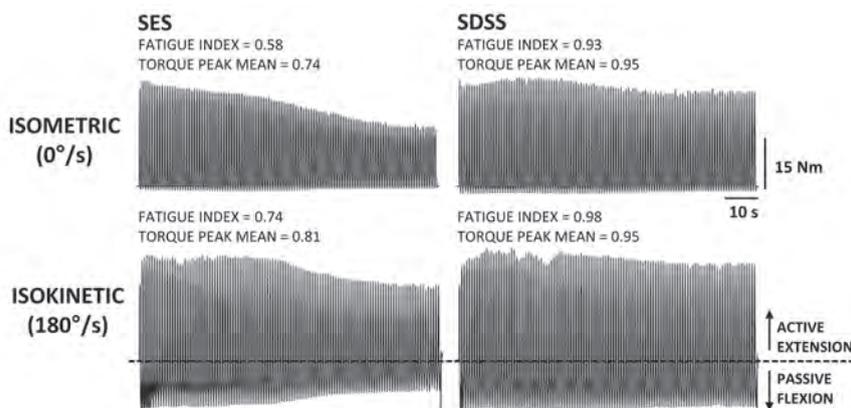


図3 膝関節伸展トルクの時系列

左列にSES法、右列にSDSS法を示す。それぞれ上は等尺性、下は等速性膝伸展運動のものである。

動形態のそれぞれにおいて刺激方法間で差がなかった（等尺性運動は  $p = 0.165$ ，等速性運動は  $p = 0.143$ ）。FI には，各運動形態それぞれにおいて刺激方法間で有意な差があり（等尺性運動は  $p = 0.003$ ，等速性運動は  $p = 0.002$ ），それぞれ SDSS 法の方が大きな値を示した。TPM についても同様の結果であり，各運動形態それぞれにおいて刺激方法間で有意な差があり（等尺性運動は  $p = 0.022$ ，等速性運動は  $p = 0.014$ ），SDSS 法の方が大きな値を示した。

### 3. 考察

等尺性および等速性膝関節伸展運動のいずれにおいても，SDSS 法の方が SES 法に比較して大きな FI および TPM 値を示した。これらの結果は，両運動形態のいずれにおいても，SDSS 法に疲労低減効果があることを示すものである。

我々は，これまで等尺性足底屈運動 (Nguyen et al. 2009<sup>3)</sup> ; Sayenko et al. 2014)<sup>6)</sup> および等尺性足底屈・背屈，等尺性膝関節伸展・屈曲運動 (Sayenko et al. 2015) において，その効果を検証してきた。本研究結果は，これまで示してきた等尺性運動のみならず，FES 筋力トレーニング動作に近い等速性運動においても SDSS 法の疲労低減効果があることを示すものである。初期ピークトルク値に違いがあるため等尺性と等速性運動の直接比較はできないが，両運動形態とも同程度，すなわち FI にして等尺性で 30.1 %，等速性で 24.5

%，および TPM にして等尺性で 13.8 %，等速性で 10.2 % の疲労低減効果があった。等速性運動では疲労低減効果が低い可能性も指摘されたが，予想に反して等速性運動でも等尺性運動と同程度の疲労低減効果があると考えられる。この効果は，単純に見積もれば，FES 筋力トレーニングの 1セッションにおいて 10～30 % 程度のトレーニング負荷増大を見込めること相当し，FES 筋力トレーニング法において実際的なトレーニング向上効果を期待させるに十分な値と考えられる。しかしながら，実際のトレーニング効果は今後の検証が必要である。

SDSS 法の疲労低減効果の機序に関しては，解明すべき点が残されている。Malešević と Popović (Malešević et al. 2010)<sup>4)</sup> や Decker ら (Decker et al. 2010)<sup>5)</sup> は，各筋腹運動点を直接刺激するので，各筋腹内筋線維が交互に動員されていることはほぼ明らかである。しかしながら，SDSS 法は臨床応用の容易さを優先して開発されたため，臨床で用いられるとおり筋群近位端一カ所に刺激電極を配置し，これを 4 分割している。各分割 4 電極がどの筋腹の筋線維を動員しているかは自明ではない。ただし下腿三頭筋では，ヒラメ筋運動点到に 4 分割した刺激電極を貼付した場合に，ヒラメ筋内で筋線維が交互に動員されている様子が観察されている (Sayenko et al. 2014)。これに基づけば，図 5 に示した概念図のように考えることができる。すなわち，筋腹に貼付した刺激電極は直下の

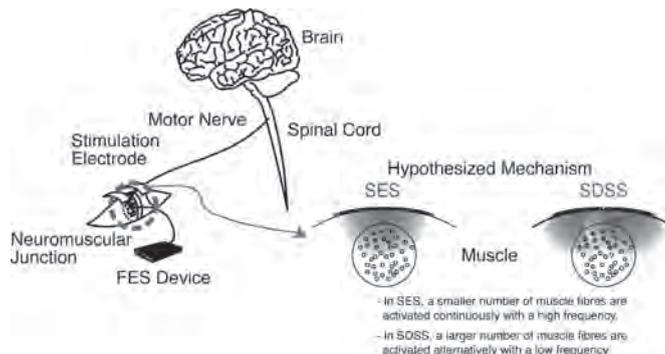


図5 SDSS法の機序の概念図。説明は本文参照

神経筋接合部を刺激すると考えられ、SDSS 法の場合には刺激電場が移動するために異なる筋線維を交互に比較的低頻度（すなわち 10 Hz）で刺激している状態である。この機序に従えば、単腹筋でも使用できる可能性が高いことが予想され、各筋運動点を直接刺激する方法に比した利点といえる。実際、足背屈運動、すなわち主として前脛骨筋単腹刺激を行った場合にも、SDSS 法の疲労低減効果が示されている (Sayenko et al. 2015)<sup>7)</sup>。大腿四頭筋適用時の機序はより複雑であり、分割 4 電極それぞれが独自の筋線維動員パターンを有し、結果的に異なる筋腹・筋線維が交互に相対的な低頻度で賦活されていると考えられる。大腿四頭筋のような多筋群を刺激する場合、各筋運動点を直接刺激する方法に比べて、異なる筋線維を確実に動員するという点で利点が少ないが、非常に簡便に適用できるため、効果が確認されれば臨床応用上の利点は大きいと考えられる。

我々は臨床応用上の利点を最優先に考え、FES の早期筋疲労低減法として SDSS 法を提案している。SDSS 法は電極貼付位置が従来法と同じであり、簡単に電極を装着できる。さらに臨床応用に適した方法とするために、SDSS アダプターを開発した。SDSS アダプターは、市販のどの刺激装置にも利用することができ、4 分割された電極さえ用意すれば、簡便に SDSS 法を臨床応用することができる。今後、予め 4 分割された電極も用意することにより、臨床で簡便に SDSS 法を使ってもらえる製品の開発につながる予定である。

#### 4. まとめ

本研究は、FES の早期筋疲労を低減させる SDSS 法を FES 筋力トレーニングに応用すべく、等速性膝関節伸展運動において効果検証を行った。その結果、SDSS 法は等速性膝関節伸展運動においても疲労低減効果があることがわかった。この結果は、SDSS 法が、これまで実行可能性検

証のために用いられてきた等尺性運動のみならず、より臨床的な FES 筋力トレーニングにおいても有効であることを示唆している。

我々は臨床応用を最優先に FES の疲労低減法を開発している。SDSS 法はその利点が大きく、SDSS アダプターと共に活用することで、容易にトレーニング現場で活用できる方法であり、FES 筋力トレーニングを効率化することで、スポーツトレーニングの発展に大きく貢献できる可能性を秘めている。

#### 謝 辞

本研究は、当研究室修士学生 Vishvek Babbar 氏の修士論文の一部として施行された。また、共同研究者である当研究室博士後研究員 Austin Bergquist 氏にも謝意を表す。本研究は、公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団研究助成金および Canadian Institutes of Health Research (OMH131582) の助成を得て行われた。

#### 文 献

- 1) Masani K., Popovic M.R., Chapt. 44; Functional Electrical Stimulation in Rehabilitation and Neurorehabilitation. In: Handbook of Medical Technology, Springer, pp 877-896 (2011)
- 2) Bergquist A.J., Clair J.M., Lagerquist O., Mang C.S., Okuma Y., Collins D.F., Neuromuscular electrical stimulation: implications of the electrically evoked sensory volley. *European Journal of Applied Physiology* 111:2409-2426 (2011)
- 3) Nguyen R., Masani K., Micera S., Morari M., Popovic M.R., Spatially distributed sequential stimulation reduces fatigue in paralyzed triceps surae muscles. *Artificial Organs* 35:1174-1180 (2011)
- 4) Malešević N.M., Popović L.Z., Schwirtlich L., Popovic D.B., Distributed low-frequency functional electrical stimulation delays muscle fatigue compared to conventional stimulation. *Muscle Nerve* 42:556-562 (2010)
- 5) Decker M.J., Griffin L., Abraham L.D., Brandt L.,

- Alternating stimulation of synergistic muscles during functional electrical stimulation cycling improves endurance in persons with spinal cord injury. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 20:1163–1169 (2010)
- 6) Sayenko D.G., Nguyen R., Popovic M.R., Masani K., Reducing muscle fatigue during transcutaneous neuromuscular electrical stimulation by spatially and sequentially distributing electrical stimulation sources. *European Journal of Applied Physiology* 114:793–804 (2014)
- 7) Sayenko D.G., Nguyen R., Hirabayashi T., Popovic M.R., Masani K., Method to reduce muscle fatigue during transcutaneous neuromuscular electrical stimulation in major knee and ankle muscle groups. *Neurorehabilitation and Neural Repair* 29:722–733 (2015)
- 8) Botter A, Oprandi G, Lanfranco F, Aliasia S., Maffioletti N.A., Minetto M.A., Atlas of the muscle motor points for the lower limb: implications for electrical stimulation procedures and electrode positioning. *European Journal of Applied Physiology* 111:2461–2471 (2011)

# 暑熱環境下の運動時における塩味閾値の変化を指標とした 熱中症予防のための基礎的・実践的研究

奈良教育大学 高木 祐介  
(共同研究者) 流通科学大学 関 和俊  
鹿屋体育大学 山本 正嘉  
流通科学大学 北村 裕美  
川崎医療福祉大学 小野寺 昇

## The Study on the Prevention of Heat Disorders Using the Salty Taste Sensitivity During Exercise in the Heat Environment

by

Yusuke Takagi

*Nara University of Education*

Kazutoshi Seki, Hiromi Kitamura

*University of Marketing and Distribution Sciences*

Masayoshi Yamamoto

*National Institute of Fitness and Sports in Kanoya*

Sho Onodera

*Kawasaki University of Medical Welfare*

### ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the availability of salty taste sensitivity during exercise for the prevention of heat disorders in the hot environment. Twelve health young males were volunteered in this study. This study was consisted of two investigations: the basic experiment (n=6) was to verify the changes of salty taste during stay at rest for 30 minutes or exercise stress for 30 minutes (exercise intensity:

50 % of predicted HRmax) in artificial weather room, and the other field investigation (n=6) was to estimate during basketball games for twice (each game: 10 minutes) under warm environment (Temperature: 26.5 °C, Relative humidity: 72.2 %). The salty taste sensitivity, body weight, sweat loss, urinary electrolyte, the degree of salty appetite were measured before and after the game. Salty taste sensitivity and body weight after the exercise were significantly lower than that of before in 25 °C, 35 °C and the field investigation ( $p<0.05$ ). There were no large changes of Na and Cl in urine in the basic experiment. However, Na and Cl in urine after the game were significantly lower than that of before in the field investigation ( $p<0.05$ ). It may be suggested that decrease of salty taste sensitivity and increase of salty appetite sensation were observed at the different timing of Na increasing in sweat and Na decreasing in urine derived from increase of sweat loss during exercise in hot environment. Measuring changes salty taste sensitivity would objectively assess the condition in balance of body fluid during exercise and may be original one of the suggestion for safe management and conditioning during exercise in hot environment.

## 要 旨

暑熱環境下の運動時における塩味の閾値変化を検討し、塩味の味覚閾値を使用した熱中症予防のための新しい指針について考案することを目的とした。対象者は、健康な若年男性 12 名とした。本研究は、室内における暑熱環境下の安静滞在時および運動時の塩味閾値の変化を検証する基礎的な実験 (n=6) と実際のスポーツ現場におけるフィールド調査 (n=6) を行った。室内実験では、気温 25°C・相対湿度 50% と気温 35°C・相対湿度 50% の環境下で 30 分間の座位安静および自転車駆動 (予測最大心拍数の 50%) を行った。フィールド調査では 1 試合 10 分間のバスケットボールの試合を 2 回行った。測定項目は、塩味閾値、体重、発汗量、尿中電解質、主観的な塩分の欲求指数 (以後、塩味欲求指数と示す) 等とし、実験および調査前後の 2 回測定した。

室内実験の 25°C 環境下の運動と 35°C 環境下の運動およびフィールド調査では、運動後の塩味閾

値および体重が運動前に比して有意に低下した ( $p<0.05$ )。フィールド調査の運動後の塩味欲求指数は顕著に高い値を示した。室内実験では、25°C 環境下の運動後の尿中 Mg・Ca が運動前に比して有意に低下したものの、塩分を示す Na や Cl の大きな変化はみられなかった。一方、フィールド調査の運動後の尿中 Na、尿中 Cl および尿中 Ca は運動前に比して有意な低値を示した ( $p<0.05$ )。フィールド調査では、室内実験よりも運動量が多く、運動強度が高いため、発汗量は顕著に増加した。フィールド調査の運動後の尿中 Na 排泄量の低下は、発汗量の増加に伴う汗中 Na 排泄量の増加による影響が考えられた。これらから、暑熱環境下の運動時における塩味閾値の低下や塩分欲求指数の増加は、汗中や尿中に排泄される Na や Cl 等の電解質指標の変化と必ずしも同じ速さで生じるものではなく、それらが観察される以前に起こる可能性が推察された。塩味閾値の変化の測定は、運動実施者が自ら体内の体液バランスの状況を客観的に把握することが可能な指標であり、暑熱環

境下の運動時の安全管理および体調管理のため有用な示唆になる可能性は高いことが本研究によって示された。

## 緒言

夏季の運動時における熱中症事故が後を絶たず、毎年問題視されている。屋外環境下の運動種目の中には、熱中症が起こった際、傷病者の救助が遅れ、致命的な事態を招く場合がある。運動現場では、指導者や大会主催者だけでなく、運動実践者も熱中症を予防するための対策や発症した際の対処法を理解しなければならない。

運動時における体温や発汗量、尿中電解質等の生理学的指標、湿球黒球温度 (WBGT: Wet Bulb Globe Temperature) のような気象条件指標の変化は、熱中症発症を予防するための手がかりになる。それらの指標変化に注目し、熱中症予防に寄与する研究がこれまでに報告されてきた<sup>1,2,3)</sup>。しかしながら、これらの研究における予防法は、体重の測定や飲料水のボトル残量の計測、発汗量の算出等、実際の運動現場では手間がかかり、運動実践者が身体のコディションを把握するためには必ずしも簡便な指標とはいえない。WBGTのような視覚的にわかりやすい指標も、運動実施者の生理学的応答の変化までは十分に評価できない。そこで我々は、自身で気づくことができ、簡便性・経済性に優れる指標として味覚変化に注目した<sup>4)</sup>。

暑熱環境下の運動時では、発汗量および運動負荷の増加に伴い血液中のナトリウムをはじめとする電解質濃度が低下する。暑熱環境下の運動時における味覚閾値の変化を検討した研究は報告されているが<sup>5,6,7)</sup>、塩味閾値の変化が暑熱ストレス依存なのか、運動ストレス依存なのか、明らかではない。

そこで本研究では、暑熱環境下の運動時における塩味の閾値変化およびその有用性を検証し、運

動時の熱中症予防のための新たな指標を用いた指針の提案を目的とした。そのために、I. 暑熱環境下における安静滞在時および運動時の塩味閾値の変化の検証に関する基礎的研究、II. 実際のスポーツ現場における基礎的研究で得られた知見の有用性を検証するための実践的研究、これら2つの研究テーマについて研究する。

## 1. 研究方法

### 1.1 室内実験：暑熱環境下における安静時および運動時の塩味閾値の変化の検証に関する基礎的研究

対象者は心疾患、腎疾患等の既往歴が無い健康な成人男性6名(年齢:  $26 \pm 4$  歳, 体重:  $66.8 \pm 10.8$  kg, 身長:  $169.5 \pm 9.0$  cm)とした。対象者には予め調査の目的、方法及び調査に伴う苦痛、危険性について十分な説明を行い、参加に対する同意を得た。本研究は、帝塚山大学研究倫理委員会の承認を得て実施した。

実験はK大学内人工気象室で行った。対象者は、①気温  $25^{\circ}\text{C}$  で30分間の座位安静(以後, Rest 25と記す)、②気温  $25^{\circ}\text{C}$  下における30分間の自転車駆動(以後, Ex. 25と記す)、③気温  $35^{\circ}\text{C}$  で30分間の座位安静(以後, Rest 35と記す)、④気温  $35^{\circ}\text{C}$  下における30分間の自転車駆動(以後, Ex. 35と記す)、以上4条件の実験に参加した。4条件の実験の相対湿度は全て50%に設定した。自転車駆動はエアロバイク(Aerobike 75XL III: Combi社製)を用いて、1分間あたり60回転の速さで行った。負荷は予測最大心拍数の50%強度とし、負荷設定はエアロバイクにプログラミングされた内容に従って実施した。測定項目は、塩味閾値、体重、脱水率、発汗量、脈拍数、尿中電解質、口渇感、主観的な塩分の欲求指数(以後、塩味欲求指数と示す)とした。塩味閾値は、全口腔法を採用し、0.05%~0.30%までの食塩水を0.05%間隔で濃度が低い順に味わわせ、塩味を感

じたところまで官能評価させた。各濃度の評価の間には、水で口を濯がせた。体重は、デジタル体重計 (THD-650: タニタ社製) を用いて評価した。脱水率は、運動前体重から運動後体重を減算した値を運動前体重で除した後、100 を乗算して求めた。発汗量は、中井ら<sup>1)</sup> の法を採用し、実験前の体重に水分摂取量を足し、その値から実験後の体重を減算した。脈拍数は触診法を採用し、外頸動脈にて計測した。測定値は15秒間計測した脈拍数に4を乗じたものを採用した。尿は紙コップで採取し、そのうち10mlを専用のスピッツ管に入れ、尿中電解質を評価するための尿検査 (Na, K, Cl: 電極法, Ca: アルセナゾⅢ法, Mg: 酵素法) を企業 (株) LSI メディエンス) に委託した。尿中電解質指標として、クレアチニン (Cr), ナトリウム (Na), クロール (Cl), カルシウム (Ca), マグネシウム (Mg) を採用し、Crによって補正された値を測定値とした。口渴感<sup>8)</sup> の法を採用し、Visual Analog Scaleにて評価した。100 mmのスケールの左端に「全く渴いていない」、右端に「とても喉が渇いている」と表記され、対象者はボールペンにて、現在の状況を線上にマークした。左端からマークされた箇所までの距離 (mm) を評価指標とした。塩味欲求指数は、左端に「まったく欲しくない」、右端に「とても欲しい」が記載される長さ100mmのVisual Analog Scaleにて評価し、口渴感同様に対象者には現在の状況を線上にマークさせた。諸測定は、実験開始前および実験終了直後に行った。

## 1. 2 フィールド調査: 実際のスポーツ現場における塩味閾値指標の有用性を検証するための実践的研究

対象者は心疾患、腎疾患等の既往歴が無い健康な成人男性6名 (年齢:  $20 \pm 1$  歳, 体重:  $72.1 \pm 10.3$  kg, 身長:  $174.3 \pm 7.4$  cm) とした。対象者には予め調査の目的、方法及び調査に伴う苦痛、危

険性について十分な説明を行い、参加に対する同意を得た。本研究は、帝塚山大学研究倫理委員会の承認を得て実施した。

調査は、2015年7月にT大学内体育館で行った。対象者は、10分間のバスケットボールの試合を2試合行った。試合間には2分間の休息時間を設けた。対象者には、市販のスポーツドリンク (100 ml 当たり Na: 40 mg, K: 8 mg, Mg: 1.2 mg 等) を提供し、休息時間中いつでも飲めることとした。測定項目は、室内実験で採用した項目の他に、水分摂取量、水分摂取率を加えた。水分摂取量は、ボトル残量を小型の計量秤 (KD-174: TANITA 社製) を使用して計測し、元の重量から減算して求めた。水分摂取率は、総水分摂取量を発汗量で除した後、100 を乗算して求めた。諸測定は、試合前および試合後に行った。当日の体育館内の WBGT は  $24.8$  °C, 室温は  $26.5$  °C, 相対湿度は  $72.2$  % だった。尚、WBGT はヒトの体感温度と関係の強い気温、相対湿度、輻射熱および気流を総合的に加味した環境温度のことである。

## 1. 3 統計処理

室内実験およびフィールド調査とも、口渴感と塩味欲求指数は中央値で示し、その他の測定項目は平均値  $\pm$  標準偏差で示した。また、実験前後および調査前後の比較は、口渴感および塩分欲求指数が Wilcoxon の符号付順位和検定、その他の測定項目は対応ありの t 検定を実施した。

## 2. 研究結果

表1に室内実験での塩味閾値、体重、発汗量、脈拍数、口渴感、塩味欲求指数、表2に同実験の尿量および尿中電解質、表3にフィールド調査の塩味閾値、体重、発汗量、脈拍数、口渴感、塩味欲求指数、表4に同調査の尿量および尿中電解質の結果を示した。

室内実験における Ex.25 と Ex.35 およびフィー

表1 室内実験：気温の違いによる安静時および運動時の生理学的指標の変化

Rest25 (25℃・30分安静)						
	体重 (kg)	発汗量 (kg)	脈拍数 (拍/分)	塩味閾値 (%)	口渴感 (mm)	塩味欲求指数 (mm)
安静前	66.8±10.8	—	63±9	0.21±0.05	51	12
安静後	66.8±10.8	0.03±0.05	65±10	0.20±0.03	58	17
Ex.25 (25℃・30分運動)						
	体重 (kg)	発汗量 (kg)	脈拍数 (拍/分)	塩味閾値 (%)	口渴感 (mm)	塩味欲求指数 (mm)
運動前	67.0±11.0 <sub>下</sub>	—	63±8 <sub>下</sub>	0.19±0.04 <sub>下</sub>	50 <sub>下</sub>	5 <sub>下</sub>
運動後	66.8±11.0 <sub>上</sub>	0.15±0.14	84±6 <sub>上</sub>	0.17±0.05 <sub>上</sub>	63 <sub>上</sub>	28 <sub>上</sub>
Rest35 (35℃・30分安静)						
	体重 (kg)	発汗量 (kg)	脈拍数 (拍/分)	塩味閾値 (%)	口渴感 (mm)	塩味欲求指数 (mm)
安静前	67.0±11.2	—	67±10	0.21±0.06	42 <sub>下</sub>	12
安静後	66.8±11.0	0.22±0.26	69±9	0.18±0.03	59 <sub>上</sub>	37
Ex.35 (35℃・30分運動)						
	体重 (kg)	発汗量 (kg)	脈拍数 (拍/分)	塩味閾値 (%)	口渴感 (mm)	塩味欲求指数 (mm)
運動前	66.9±11.0 <sub>下</sub>	—	68±7 <sub>下</sub>	0.20±0.04 <sub>下</sub>	38 <sub>下</sub>	10 <sub>下</sub>
運動後	66.6±10.8 <sub>下</sub>	0.22±0.21	85±7 <sub>上</sub>	0.15±0.03 <sub>下</sub>	62 <sub>上</sub>	32 <sub>上</sub>

体重, 脈拍数, 塩味閾値: 平均値 ± 標準偏差  
 口渴感, 塩味欲求指数: 中央値  
 ※p<0.05

表2 室内実験：気温の違いによる安静時および運動時の尿量および尿中電解質指標の変化

Rest25 (25℃・30分安静)						
	尿量 (ml)	Na/Cr	K/Cr	Cl/Cr	Mg/Cr	Ca/Cr
安静前	106.0±70.0 <sub>下</sub>	1.45±0.79	0.43±0.19	1.57±0.85	0.05±0.03	0.08±0.05
安静後	55.6±34.8 <sub>下</sub>	1.24±0.63	0.43±0.19	1.32±0.60	0.04±0.02	0.07±0.06
Ex.25 (25℃・30分運動)						
	尿量 (ml)	Na/Cr	K/Cr	Cl/Cr	Mg/Cr	Ca/Cr
運動前	94.7±43.6	1.49±1.08	0.43±0.23 <sub>下</sub>	1.59±1.03	0.04±0.02 <sub>下</sub>	0.07±0.04 <sub>下</sub>
運動後	76.2±49.1	1.36±1.01	0.55±0.25 <sub>上</sub>	1.59±1.14	0.03±0.02 <sub>上</sub>	0.04±0.03 <sub>上</sub>
Rest35 (35℃・30分安静)						
	尿量 (ml)	Na/Cr	K/Cr	Cl/Cr	Mg/Cr	Ca/Cr
安静前	153.1±136.1	1.69±1.09	0.60±0.41	1.68±1.12	0.05±0.01	0.08±0.05
安静後	62.3±23.9	1.39±0.78	0.57±0.34	1.41±0.79	0.04±0.01	0.07±0.04
Ex.35 (35℃・30分運動)						
	尿量 (ml)	Na/Cr	K/Cr	Cl/Cr	Mg/Cr	Ca/Cr
運動前	147.6±98.4 <sub>下</sub>	1.31±1.00	0.33±0.12	1.33±1.03	0.05±0.03	0.10±0.09
運動後	76.7±35.6 <sub>下</sub>	1.52±0.88	0.40±0.17	1.47±0.87	0.04±0.02	0.07±0.05

平均値 ± 標準偏差  
 ※ p<0.05

表3 フィールド調査:20分間のバスケットボール試合時における生理学的指標の変化

	体重 (kg)	発汗量 (kg)	脈拍数 (拍/分)	塩味閾値 (%)	口渴感 (mm)	塩味欲求指数 (mm)
試合前	72.1±10.3 <sub>下</sub>	-	64±3 <sub>下</sub>	0.20±0.03 <sub>下</sub>	41 <sub>下</sub>	20 <sub>下</sub>
試合後	71.8±10.0 <sub>上</sub>	0.84±0.54	165±17 <sub>上</sub>	0.13±0.03 <sub>上</sub>	77 <sub>上</sub>	71 <sub>上</sub>

体重, 発汗量, 脈拍数, 塩味閾値: 平均値 ± 標準偏差  
 口渴感, 塩味欲求指数: 中央値  
 ※p<0.05

表4 フィールド調査:20分間のバスケットボール試合時における尿量および尿中電解質指標の変化

	尿量 (ml)	Na/Cr	K/Cr	Cl/Cr	Mg/Cr	Ca/Cr
試合前	100.5±38.1 <sub>下</sub>	1.57±0.59 <sub>下</sub>	0.5±0.2	1.74±0.44 <sub>下</sub>	0.05±0.02	0.10±0.05 <sub>下</sub>
試合後	68.6±19.6 <sub>下</sub>	1.01±0.29 <sub>上</sub>	0.46±0.18	1.26±0.24 <sub>上</sub>	0.04±0.02	0.05±0.02 <sub>上</sub>

平均値 ± 標準偏差  
 ※ p<0.05

ルド調査では、運動後の塩味閾値および体重が運動前に比して有意に低下した ( $p < 0.05$ )。室内実験における脱水率は Rest 25:  $0.05 \pm 0.08\%$ , Ex. 25:  $0.23 \pm 0.22\%$ , Rest 35:  $0.30 \pm 0.35\%$ , Ex. 35:  $0.30 \pm 0.25\%$  であった。フィールド調査における水分摂取量は  $510 \pm 240$  ml, 水分摂取率は  $75.4 \pm 48.9\%$  であり、脱水率は  $0.41 \pm 0.58\%$  であった。運動強度が低い室内実験では、発汗量の顕著な増加はみられず、脱水率も大きくはなかったが、フィールド調査では発汗量は顕著に増加した。フィールド調査のバスケットボールの試合後の脈拍数は、予測最大心拍数の 80% 程度のものであった。室内実験とフィールド調査において、実験後および調査後の口渴感 (室内実験: Rest35, Ex. 25, Ex. 35) および塩分欲求指数 (室内実験: Ex. 25, Ex. 35) は運動前に比して有意な高値を示した ( $p < 0.05$ )。塩分欲求指数の増加度は、フィールド調査の方が室内実験よりも明らかに高かった。室内実験では、Ex.25 においてのみ、運動後の尿中 K の有意な増加および尿中 Mg と尿中 Ca の有意な低下がみられたが ( $p < 0.05$ )、その他の条件では有意差は認められなかった。フィールド調査の運動後の尿中 Na, 尿中 Cl および尿中 Ca は運動前に比して有意な低値を示した ( $p < 0.05$ )。

### 3. 考 察

暑熱環境下における運動時の塩味閾値の変化を検証するため、室内実験およびフィールド調査を行った。その結果、室内実験では、Ex. 25 および Ex. 35 の運動後の塩味閾値がいずれも実験前の値に比して有意な低値を示した。フィールド調査では、体育館内で試合時間 10 分間のバスケットボールの試合を 2 回実施した後の塩味閾値が試合前に比して有意な低値を示した。室内実験およびフィールド調査とも、運動後の体重が運動前の値に比して有意な低値を示した。35℃ 環境下の安静条件と運動条件では、発汗量に差はなかったもの

の、運動中の呼吸数の増加に伴う呼気からの水分損失によって運動条件にて体重の有意な低下がみられた。発汗と体重減少がみられた運動負荷を呈する条件において、塩分に対する体内欲求が増加し、塩味閾値が低下したものと考えられた。フィールド調査での WBGT および気温は決して高い値ではなかったため、さらに気温が高い状況では本研究以上の発汗量の増加、塩味閾値の低下がみられる可能性が考えられる。室内実験における安静条件では塩味閾値、体重、塩分欲求指数とも実験前後で有意差はなかったことから、暑熱環境下の運動時における塩味閾値の低下に影響を及ぼしているのは、暑熱によるストレスより運動によるストレスの方が強いことが考えられた。

塩分に対する体内欲求の増加は、発汗と発汗に伴う尿量および尿中電解質指標変化が影響を及ぼしたものと考えられた。運動時は、運動刺激に伴うレニン-アンギオテンシン-アルドステロン系亢進によって、腎での Na や水の再吸収が増し、体液貯留が起きる<sup>9)</sup>。そのため、運動後に排尿量および尿中 Na の排泄が低下し、尿細管での Na の再吸収と交換で分泌された尿中 K 排泄が増加する<sup>7)</sup>。また、発汗時には汗腺において Na や Cl 等の再吸収が行われ、体液バランスを整える生理学的応答が機能する。運動によって大量の発汗が生じた際、発汗速度の増大に伴い汗腺での Na の再吸収率は低下し、皮膚表面から汗中の Na や Cl 等の排泄量が増加する<sup>10)</sup>。これらから、本研究のフィールド調査において、試合後の尿中 Na 濃度が有意に低下したことは、運動負荷量の増加に伴う発汗量の増加による汗中 Na 排泄量増加の影響が要因として考えられた。このことが塩分に対する体内欲求を増加させ、運動後の塩味閾値を低下させたものと示唆された。一方、室内実験では、運動後の尿中 Na および Cl 等の有意な低下は認められず、25℃ 環境下の運動後においてのみ尿中 K の有意な増加、尿中 Mg および Ca の有意な

低下が認められた。35℃環境下の運動において実験前後の尿中指標に有意差がみられなかったことは、発汗量の程度が関係している可能性はあるが、主たる要因を明らかにすることはできなかった。しかしながら、実際のスポーツ現場における練習や試合のように、予測最大心拍数の50%以上の中等度あるいは高強度の運動強度を行っていた場合、本研究以上の発汗量の増加および塩味閾値の低下が考えられる。これらから、体内欲求によって生じた塩味閾値の低下は、汗中や尿中に排泄されるNaやCl等の電解質指標の変化と必ずしも同じ速さで生じるものではなく、それらが観察される以前に起こる可能性が推察された。これに関連して、運動強度が高かったフィールド調査では、塩味欲求指数は試合後の値が試合前の値に比して有意な高値を示し、運動強度が低かった室内実験では塩味欲求指数の増加や口渴感の増加の程度も低かった。塩味閾値もフィールド調査での低下の程度は室内実験よりも明らかに大きかった。本研究の結果から、主観的な塩分欲求の変化は、客観的に評価された塩味閾値の変化と同様な変化を示す可能性が考えられた。塩味欲求の増加や塩味閾値の低下の始まりを把握することは、汗によって排泄される電解質濃度の増加や尿中電解質が減少される前の段階を知れる可能性が推察され、塩味閾値や主観的な塩分欲求が発汗量増加に伴う脱水や体液バランスの悪化を知らせるシグナルになり得る可能性が示唆された。

本研究によって、暑熱環境下の運動時における塩分閾値の低下は暑熱より運動によるストレスの影響を強く受けていることが考えられた。本研究における室内実験およびフィールド調査とも、運動時間が長くなかったため、脱水率は問題視される水準に至らなかったが、現場では試合に限らず練習も含め、さらに長い時間にて運動は行われ、その分運動によるストレスを呈することになる。今後、さらに現場に近づいた状況下において、採

用した運動強度（予測最大心拍数の50%程度）以上の強度を段階的に設定し運動負荷試験を実施すること、そして、尿中の電解質濃度だけでなく汗中の電解質濃度も測定すること、以上2点を研究課題とする必要がある。これらを究明することで、塩味閾値を利用した熱中症予防のための運動指導を提案できる可能性が期待される。

#### 4. まとめ

暑熱環境下の運動時における塩味閾値の低下や塩分欲求指数の増加は、発汗量増加に伴う汗中Na等の電解質指標排泄量の増加および尿中Na等排泄量の低下よりも早い段階から生じる可能性が示唆された。その影響因子として、中等度以上の運動強度の運動によるストレスが挙げられ、暑熱ストレスが加わった場合、その生理学的応答は顕著になるものと考えられた。塩味閾値の変化の測定は、運動実施者が自ら体内の体液バランスの状況を客観的に把握することが可能な指標であり、また、測定が簡便で経済性に優れた測定指標として、暑熱環境下の運動時の安全管理および体調管理のための有用な示唆になる可能性は高いことが本研究によって明らかになった。

#### 謝 辞

本研究に対して多大な助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、実験および調査にご協力いただきました対象者の皆様、鹿屋体育大学大学院の森寿仁氏に深謝申し上げます。

#### 文 献

- 1) 中井誠一, 芳田哲也, 寄本明, 岡本直輝, 森本武利. 運動時の発汗量と水分摂取量に及ぼす環境温度(WBGT)の影響. 体力科学, 43: 283-289(1994)
- 2) 寄本明, 中井誠一, 芳田哲也, 森本武利. 屋外における暑熱下運動時の飲水行動と体温変動の関係. 体力科学, 44: 357-364(1995)

- 3) 鈴木政登, 清水桃子, 河辺典子, 町田勝彦, 木村真規, 塩田正俊彦. 暑熱環境下における持久走運動時水分摂取の影響—糖・脂質および水・電解質代謝におよぼす糖—電解質含有溶液摂取の影響—. 体力科学, **47**: 427-442(1998)
- 4) 高木祐介, 関和俊, 北村裕美: 六甲山登山時における塩味の味覚閾値の変化に関する実践的調査. 野外教育研究, **18**(1) : 33-39(2015)
- 5) 本岡佑子, 麻見直美. 暑熱下での屋外スポーツ活動が味覚閾値に及ぼす影響. 日本運動生理学雑誌, **17**(2) : 59-66(2010)
- 6) 川野因, 西村佐喜子, 小清水孝子, 古泉佳代, 高橋律子. スポーツ選手における日常的トレーニングが味覚に及ぼす影響について. シダックスリサーチ, **2**: 6-11(2002)
- 7) Horio T., Kawamura Y. Influence of physical exercise on human preferences for various taste solutions. *Chemical Senses*, **23**(4) : 417-421(1998)
- 8) Rolls B.J., Wood R.J., Rolls E.T., Lind H., Lind W., Ledingham J.G. Thirst following water deprivation in humans. *Am. J. Physiol.*, **239**: R476-R483(1980)
- 9) 鈴木政登. 運動・スポーツにおける電解質代謝. 臨床スポーツ医学, **26** 臨時増刊号 : 50-59(2009)
- 10) 山田哲雄, 村松成司, 高橋徹三. 運動時の汗および尿中ナトリウム, カリウム排泄量の一過性の変動に及ぼす運動強度の影響. 日本栄養・食糧学会誌, **46**(1) : 39-46(1993)

# 骨格筋萎縮過程における代謝物質の 網羅解析および代謝特性の解明

東 北 大 学 北 嶋 康 雄  
(共同研究者) 同 永 富 良 一

## Metabolome Analysis of Muscle Atrophy

by

Yasuo Kitajima, Ryoichi Nagatomi  
*Tohoku university*

### ABSTRACT

It is known that muscle mass is determined by the balance between protein synthesis and protein degradation. The ubiquitin-proteasome pathway is a major route of protein degradation. Recently, we reported that the muscle-specific deletion of a crucial proteasomal gene, Rpt3, in mice induced the muscle loss in mice. The purpose of present study was to clarify the metabolomic profile in skeletal muscle of muscle-specific proteasome dysfunction mice.

We crossed the Rpt3 floxed mice with a transgenic line expressing Cre recombinase under the control of a myosin light chain 1 fast promoter to generate muscle-specific Rpt3-knockout mice (KO mice). We evaluated the metabolomic profile in the skeletal muscle of control mice and KO mice by using the metabolome analysis.

The appearance of skeletal muscle of KO mice was distinct from those of control mice. The absolute weights of the tibialis anterior, gastrocnemius and soleus muscles were smaller in KO mice ( $p<0.05$ ). In the metabolome analyses of the 112 metabolites, 64 metabolites were significance in skeletal muscle of KO mice compared to control mice ( $p<0.05$ ). These results suggest that muscle-specific proteasome dysfunction may

induce metabolic disorders in the skeletal muscle. These findings will contribute to further clarify the molecular mechanisms of muscle atrophy.

## 要 旨

骨格筋量はタンパク質の合成と分解のバランスによって決定されている。最近、筆者らは主の分解系で欠かせないプロテアソームの骨格筋特異的な欠損マウスは筋萎縮を呈したことを報告した。骨格筋特異的なプロテアソーム欠損マウスは、分解系不全により、代謝異常を起こし、筋萎縮に至ったとの仮説を立てた。仮説検証のために、骨格筋特異的なプロテアソーム欠損マウスの骨格筋を対象に、メタボローム解析により、筋萎縮時の代謝データを網羅的に把握することを目的とした。

骨格筋特異的なプロテアソーム欠損マウスは、Mlc1 (myosin light chain 1) Cre とプロテアソーム必須の分子である Rpt3 floxed マウスの交配によって作出した。骨格筋特異的なプロテアソーム欠損マウスとコントロールマウスの骨格筋を対象にメタボローム解析を行った。

骨格筋特異的なプロテアソーム欠損マウスの腓腹筋、前脛骨筋、ヒラメ筋は、コントロールマウスのそれらと比較して、有意に小さい値を示した ( $p < 0.05$ )。メタボローム解析では、コントロールマウスと骨格筋特異的なプロテアソーム欠損マウスの比較により、検出できた112個のうち64個の代謝物が有意な差を示した ( $p < 0.05$ )。以上のことから、骨格筋特異的なプロテアソーム欠損マウスでは、骨格筋の代謝異常が起きている可能性が示唆された。今後は、得られた網羅データを元に個々の代謝物の検証が必要である。

## 諸 言

我が国は未体験の超高齢社会に突入している。ますます進行する高齢化社会において、サルコペ

ニア（加齢に伴う筋萎縮）に伴う運動機能低下が多くの要介護者を生み、社会問題化が加速することは必至である。これにより、高齢化に伴う筋萎縮予防は喫緊の課題であり、筋萎縮の分子機構の解明が求められている。

生体内の主要なタンパク分解系としては、ユビキチンプロテアソーム系が挙げられる<sup>1)</sup>。筋萎縮は分解系の亢進により起こると考えられる。例えば、ラットの筋萎縮モデルで発見されたE3ユビキチンライゲースのMAFbxを筋管細胞で過剰発現させると筋管細胞が萎縮する<sup>2)</sup>。プロテアソームは真核生物の細胞において細胞質および核内のいずれにも分布しており<sup>3)</sup>、ATPを必要とするエネルギー依存性のタンパク質分解である。プロテアソームは26Sプロテアソームとよばれ<sup>4)</sup>、66のサブユニットから構成される巨大な複合体である。26Sプロテアソームはプロテアーゼ活性を有する20Sプロテアソームの両端に19S調節因子(19S regulatory particle)が会合したものである。19Sの基部はRpt1-6とRpn1-2の8つのATPaseサブユニットで構成される<sup>5)</sup>。19Sプロテアソームの構成分子であるRpt3の全身欠損では胎生致死になるため<sup>6)</sup>、Rpt3分子は生存に必須の分子と考えられる。

最近、筆者らは、骨格筋におけるプロテアソームの役割を明らかにするために、骨格筋特異的なプロテアソーム欠損を起こすことのできる遺伝子欠損マウスによる研究を報告した<sup>7)</sup>。骨格筋特異的なプロテアソーム欠損マウスでは、若齢時期でのプロテアソーム活性の有意な抑制を示した。驚くことに、骨格筋は分解系の抑制により筋肥大するのではなく、むしろ筋萎縮を起こした。また、筋力減少および分解系不全による異常タンパク質の

蓄積も確認した。これらの結果により、プロテアソームによる適切なタンパク分解は、むしろ筋量維持に必須であることを報告した<sup>7)</sup>。筆者らの作出した骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスは、骨格筋におけるプロテアソームの役割を詳細に検討できる有用なツールであり、これによる検討は、将来的に筋萎縮の分子機構の解明につながると考えている。

骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスでは、筋萎縮を呈した。プロテアソームは主の分解系機構のため、不要なタンパク質を分解すると同時に新たなタンパク質を作る材料を分解物から供給しているとの側面も担っていると考えられる。つまり、骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスが筋萎縮したのは、分解系不全のため、骨格筋において代謝異常を起こしているとの仮説を立てた。これらの代謝物を網羅的に把握できれば筋萎縮分子機構の解明につながると考え、筆者らはメタボローム解析を計画した。メタボローム解析とは、アミノ酸などを含む代謝物質を網羅的に把握することができる手法である。代謝物を網羅的に把握することのできるメタボローム解析の手法を取り入れて、骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスの筋萎縮時の代謝物を網羅的に把握する。

本研究では、骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスは、骨格筋において代謝異常を起こしているとの仮説を検証する。そこで骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスを用いて、全代謝物質のメタボローム解析により、筋萎縮時の代謝データを網羅的に把握することを目的とする。これらは、筋萎縮分子機構の解明のための基礎的な情報になる。

## 1. 研究方法

本研究は、東北大学遺伝子組換え実験安全管理規程（課題名「筋特異的プロテアソーム欠損動物を用いた表現型の解析」）および国立大学法人東

北大学における動物実験等に関する規程（課題名「筋特異的プロテアソーム欠損動物を用いた表現型の解析」）に承認され遵守して行われた。

### 1. 1 実験動物

Rpt3 flox/flox (Rpt3 f/f) マウスは共同研究先の京都大学より供与された<sup>8)</sup>。Rpt3 f/f マウスとMlcl1f (myosin light chain 1 fast promoter) Cre マウス<sup>9)</sup>との交配を行い、骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスを作出した<sup>7)</sup>。すべてのマウスは、東北大学動物実験指針が遵守された環境下で、東北大学動物実験施設において、温度、湿度が通年一定に保たれた、12時間ごとの照明管理の元で、水分、栄養を十分に与えられて飼育された。本研究で作出したすべての実験動物は麻酔下で頸椎脱臼による安楽死を行い、腓腹筋、前脛骨筋、ひらめ筋のサンプルを用いて実験を行った。

### 1. 2 組織学的検討

すべての実験においてサンプリング時にマウスの腓腹筋、前脛骨筋、ひらめ筋の重量を測定した。単離した骨格筋は、可能な限り脂肪、結合組織、腱を取り除いた。その後、凍結組織包埋剤を用いて、液体窒素により冷却したイソペンタンにて凍結した。凍結した骨格筋はクライオスタットによって-20℃下で10μmの厚さにスライスし、シリコンコーティングスライドガラスに接着し、解析まで-80℃で保存した。保存切片は室温で解凍後に、4%Paraform Aldehyde (PFA) / PBS, アセトンにより固定した。その後5% goat serum/PBS で室温30分間のブロッキングを行いPBSで洗浄後、一次抗体 laminin (Sigma Aldrich, Poole, UK) と4℃で一晩インキュベートした。翌日PBSで洗浄後、一次抗体に適切な二次抗体で室温1時間インキュベートした。PBSで洗浄後、VECTASHIELD (Vector Labs, Peterborough, UK) により封入した。染色した切片は、共焦点レーザー

顕微鏡システム C2si (Nikon, 東京) と蛍光顕微鏡 (Olympus, 東京) で観察した。

### 1. 3 骨格筋からの水溶性代謝物抽出方法

マウスから採取した骨格筋に対して、内部標準物質として  $50 \mu\text{mol/L}$  のメチオニンスルホンとカンファー-10-スルホン酸 (CSA) を含むアセトニトリル  $1500 \mu\text{L}$  を添加し、冷却下にて卓上型破碎装置を用いて破碎した。組織破碎後、溶液を  $2300 \times g$  で5分間遠心分離し、分離した水層  $400 \mu\text{L}$  を限外ろ過フィルター (ヒューマン・メタボローム・テクノロジーズ株式会社) 2本に添加し、遠心ろ過によりタンパク質を除去した。ろ液を減圧乾燥し、 $25 \mu\text{L}$  超純水で再溶解した溶液で質量分析を行った。

### 1. 4 質量分析

抽出した陽イオン代謝物は溶融シリカキャピラリー (内径  $50 \mu\text{m}$ , 全長  $80\text{cm}$ ) と市販のカチオン電気泳動バッファ (ヒューマン・メタボローム・テクノロジーズ株式会社) を用いて電気泳動した。溶融シリカキャピラリーに陽イオン代謝物は  $50 \text{mbar}$ , 10秒をかけて注入した後  $27 \text{kV}$  の電圧を印加した。大気圧イオン化法-質量分析 (ESI-MS) により陽イオンを生成し、加熱したドライガスは  $5 \text{psi}$  毎分の流量に制御した。その後キャピラリー電圧として  $4 \text{kV}$  を印加した。分析部では  $m/z$   $50$ - $1000$  の範囲をスキャンして測定データとした。

一方、抽出した陰イオン代謝物は溶融シリカキャピラリー ( $50 \mu\text{M}$  内径, 全長  $80 \text{cm}$ ) と市販のアニオン電気泳動バッファ (ヒューマン・メタボローム・テクノロジーズ株式会社) を用いて電気泳動した。溶融シリカキャピラリーに陰イオン代謝物は  $50 \text{mbar}$ , 25秒をかけて注入した後  $30 \text{kV}$  の電圧印加をしつつ  $10 \text{psi}$  の圧力で押すことで電気泳動による分離とイオン源までの泳動を補助した。大気圧イオン化法-質量分析 (ESI-MS)

により陰イオンを生成し、加熱したドライガスは  $5 \text{psi}$  毎分の流量に制御した。その後キャピラリー電圧として  $3.5 \text{kV}$  を印加した。分析部では  $m/z$   $50$ - $1000$  の範囲をスキャンして測定データとした。

CE-TOFMS で得られたデータは Keio MasterHands (慶應メタボロームコンソーシアム) を用いて解析した<sup>10)</sup>。得られたピークは同位体分子種や付加イオン、既知代謝物由来のプロダクトイオンを含んでいるため、標準物質と一致したピークを抽出した後、抽出したピークの保持時間 (MT) をサンプルに混合したメチオニンスルホンと CSA の MT を用いて補正した。その後補正した MT と  $m/z$  を用いて全てのピークをアライメントした。最後にピークの面積値を陽イオン代謝物の解析にはメチオニンスルホンで、陰イオン代謝物の解析には CSA でそれぞれ補正した。得られた補正後の面積値をサンプル容量で補正した。CE-TOFMS で検出したピークに代謝物名を付与するための代謝物リストは、CE-TOFMS の標準物質混合液 (ヒューマン・メタボローム・テクノロジーズ株式会社) を用い、標準物質それぞれの  $m/z$  と MT を用いて検出したピークに代謝物名を付与した。

### 1. 5 統計処理

データはすべて平均値  $\pm$  標準偏差で表した。2群間の平均値の比較には、スチューデントの  $t$  検定を用いた。統計学的有意差は  $5\%$  未満をもって有意とした。

## 2. 結果

コントロールマウスと骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスの腓腹筋、前脛骨筋、ひらめ筋の実際の写真を図 1 に、各々の骨格筋の筋重量を図 2 に示した。腓腹筋の筋重量は、コントロールマウス ( $146.0 \pm 18.8 \text{mg}$ ) と比較して、骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスでは ( $33.6 \pm$

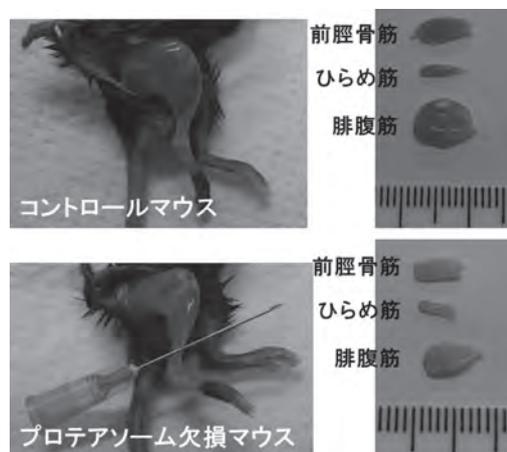


図1 骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスの骨格筋の大きさの違い

13.5mg), 有意に小さい値を示した ( $p < 0.01$ , 図2). また, 前脛骨筋の筋重量では, コントロールマウス ( $45.3 \pm 4.4\text{mg}$ ) と比較して, 骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスでは ( $12.7 \pm 9.1\text{mg}$ ), 有意に小さい値を示した ( $p < 0.01$ , 図2). さらに, ひらめ筋の筋重量は, コントロールマウス ( $8.1 \pm 0.3\text{mg}$ ) と比較して, 骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスでは ( $5.2 \pm 1.8\text{mg}$ ), 有意に小さい値を示した ( $p < 0.01$ , 図2). 骨格筋萎縮の組織学的な評価を行うため, laminin 抗体を用いて筋横断面の蛍光免疫組織化学染色を行った (図3). コントロールマウスと比較して, 骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスでは, 1つ1つの筋線維

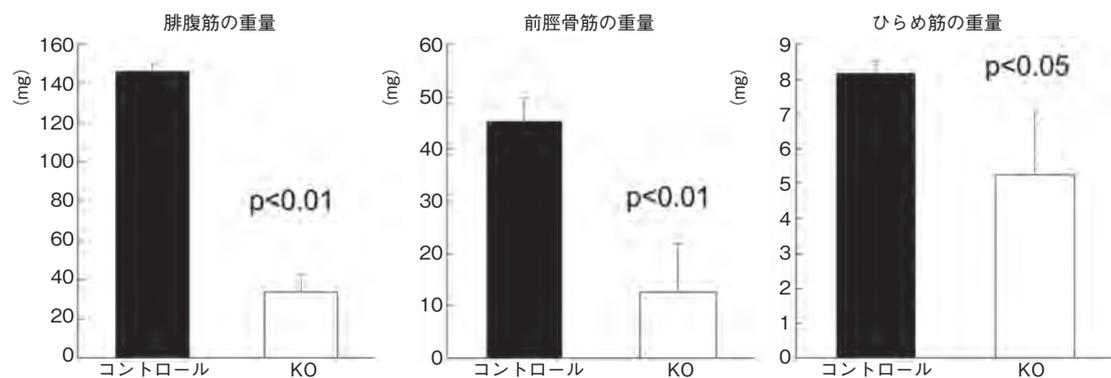


図2 コントロールマウス(コントロール)と骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウス(KO)の骨格筋の重量比較(それぞれn=4)

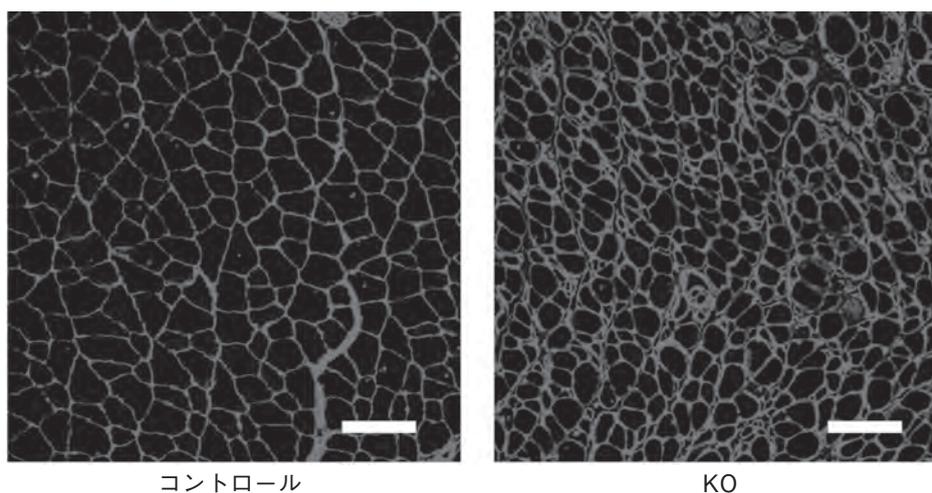


図3 コントロールマウス(コントロール)と骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウス(KO)の骨格筋の横断面を用いたlaminin抗体による免疫染色 (Bar:100  $\mu$  m)

表1 メタボローム解析による解析対象の代謝物

アニオンモード	カチオンモード
Glycolic acid	Gly
Lactic acid	Putrescine
Lactic acid_m1	beta-Ala
3-Hydroxybutyric acid	Ala
2-Hydroxybutyric acid	Ala_m1
Fumaric acid	Sarcosine
2-Oxoisovaleric acid	GABA
2-Phosphoglyceric acid	N,N-Dimethylglycine
Citric acid	Choline
Isocitric acid	Ser
Gluconic acid	Cytosine
Ribose 5-phosphate	Uracil
Glucose 6-phosphate	Creatinine
Fructose 6-phosphate	Pro
Glucose 1-phosphate	Val
6-Phosphogluconic acid	Betaine
CMP	Homoserine
UMP	Thr
cAMP	Betaine aldehyde_+H2O
Fructose 1,6-diphosphate	Cys
cGMP	Thymine
IMP	Hydroxyproline
GMP	Creatine
PRPP	Creatine_m1
dTDP	Ile
UDP	Leu
Acetyl CoA_divalent	Asn
ADP	Ornithine
CTP	Asp
ATP	Adenine
GTP	Hypoxanthine
NAD+	Anthranilic acid
NADP+	Tyramine
Succinic acid	Spermidine
Malic acid	Gln
Phosphoenolpyruvic acid	Gln_m1
Dihydroxyacetone phosphate	Lys
Glycerol 3-phosphate	Lys_m1
cis-Aconitic acid	Glu
3-Phosphoglyceric acid	Glu_m1
Sedoheptulose 7-phosphate	Met
dTMP	Guanine
AMP	His
CDP	Phe
Malonyl CoA_divalent	Arg
GDP	Arg_m1
dCTP	Citrulline
dTTP	Tyr
UTP	Spermine
dATP	Trp
Glyoxylic acid	Carnosine
Pyruvic acid	Thymidine
2-Oxoglutaric acid	Cytidine
Glyceraldehyde 3-phosphate	Uridine
Erythrose 4-phosphate	Adenosine
Ribulose 5-phosphate	Inosine
CoA_divalent	Guanosine
2-Hydroxyglutaric acid	Glutathione(GSSG)_divalent
Cysteinesulfinic acid	Glutathione(GSH)
Cysteic acid	S-Adenosylmethionine
NADH	Cysteamine
NADPH_divalent	Homocysteine
Biotin	Cys-Gly
FAD_divalent	Cystathionine
3-Indoxylsulfuric acid	Cystine
	gamma-Glu-Cys
	S-Lactoylglutathione
	S-Adenosylhomocysteine
	hmGSH

が小さかった。

メタボローム解析は、アニオンモードとカチオンモードの2つの方法で行われた。アニオンモードでは65個、カチオンモードでは69個の代謝物質の検出を行った(表1)。アニオンモードでは、骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスとコントロールマウスで有意に差がでた物質は26個であり、検出限界未満のため検出不可能であった物質が15個であった(表2)。カチオンモードでは、骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスとコントロールマウスで有意に差がでた物質は38個であり、検出限界未満のため検出不可能であった物質は7個であった(表2)。

表2 UV-visible absorption spectra of

	アニオンモード	カチオンモード
有意差あり (p < 0.05)	26	38
有意差なし	24	24
検出できず	15	7
合計	65	69

### 3. 考察

本研究は、生体内の主のタンパク分解系であるプロテアソームを骨格筋特異的に欠損させたマウスによる代謝変化を、メタボローム解析により網羅的に把握することを目的とした。これにより、筋萎縮の分子機構解明のための基礎的な情報を得ることができると考えた。メタボローム解析では、コントロールマウスと骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスの比較により、検出できた112個のうち64個の代謝物が有意な差を示した。これにより、骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスでは、骨格筋において分解系不全のため代謝異常を起しているという可能性が示唆された。

本研究では、筆者らが報告した骨格筋特異的プロテアソーム欠損マウスを用いた<sup>7)</sup>。これまでの先行研究において、Rpt3の全身欠損マウスは胎生致死になることが報告されており、全身では生

存に必須の分子であると考えられる<sup>6)</sup>。例えば、これまでにパーキンソン病患者において Rpt3 のイントロン 5 の遺伝子変異が報告されており、先行研究においてもプロテアソーム構成要素である Rpt3 が特に重要であることが示唆されていた<sup>11)</sup>。さらに近年、神経特異的な Rpt3 欠損マウスを作出した報告があり<sup>8)</sup>、これにより神経特異的な Rpt3 欠損マウスは筋萎縮性側索硬化症 (ALS) と類似した表現系を示したことが明らかになった。以上により骨格筋特異的なプロテアソーム欠損マウスの作出を試みる際に、先行研究により重要であると示唆されている Rpt3 の分子をターゲットにした骨格筋特異的な Rpt3 欠損マウスの作出によりプロテアソームの役割解明に最適だと考えた。

骨格筋特異的なプロテアソーム欠損マウスでは、速筋線維が主であるひらめ筋に比べて、速筋線維が主である腓腹筋、前脛骨筋の方が、筋萎縮がより重度であった。これは Cre マウスに依存していると考えられる。Mlc1 は特に腓腹筋、前脛骨筋といった速筋線維割合が多い骨格筋での発現が確認されている<sup>9)</sup>。そのため本研究で作出された骨格筋特異的なプロテアソーム欠損マウスは骨格筋の中でも特に速筋線維により構成されている前脛骨筋や腓腹筋での表現系が重度であったと考えられる。

本研究ではメタボローム解析により、骨格筋特異的なプロテアソーム欠損マウスとコントロールマウスの代謝物を網羅的に把握できた。これは、筋萎縮過程の代謝特性理解のための基礎的情報になる。分解系の関わる筋萎縮の分子機構の解明のために、得られた網羅データを個々に検証していくことが今後の検討課題となる。

#### 4. 結 論

本研究では、骨格筋特異的なプロテアソーム欠損マウスを用いて、全代謝物質のメタボローム解析

により、代謝データを網羅的に把握した。これにより骨格筋特異的なプロテアソーム欠損マウスの骨格筋では代謝異常が起きている可能性を示唆した。筋萎縮分子機構の解明のためには、今後は、得られた網羅データを元に個々の代謝物の検証が必要である。

#### 謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究の実施にあたり多大なご協力を頂いた東北大学医学系研究科宇留野晃先生、松山由香先生に厚く御礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) Braun T., Gautel M., Transcriptional mechanisms regulating skeletal muscle differentiation, growth and homeostasis. *Nat. Rev. Mol. Cell. Biol.*, 12(6) :349-61(2011)
- 2) Bodine S.C., Latres E., Baumhueter S., Lai V.K., Nunez L., Clarke B.A., Poueymirou W.T., Panaro F.J., Na E., Dharmarajan K. et al., Identification of ubiquitin ligases required for skeletal muscle atrophy. *Science*, 294(5547) :1704-8(2001)
- 3) Peters J.M., Franke W.W., Kleinschmidt J.A., Distinct 19 S and 20 S subcomplexes of the 26 S proteasome and their distribution in the nucleus and the cytoplasm. *J. Biol. Chem.*, 269(10) :7709-18(1994)
- 4) Arrigo A.P., Tanaka K., Goldberg A.L., Welch W.J., Identity of the 19S 'prosome' particle with the large multifunctional protease complex of mammalian cells (the proteasome). *Nature*, 331(6152) :192-4(1988)
- 5) Glickman M.H., Rubin D.M., Coux O., Wefes I., Pfeifer G., Cjeka Z., Baumeister W., Fried V.A., Finley D., A subcomplex of the proteasome regulatory particle required for ubiquitin-conjugate degradation and related to the COP9-signalosome and eIF3. *Cell*, 94(5) :615-23(1998)
- 6) Sakao Y., Kawai T., Takeuchi O., Copeland N.G., Gilbert D.J., Jenkins N.A., Takeda K., Akira S.,

- Mouse proteasomal ATPases Psmc3 and Psmc4: Genomic organization and gene targeting. *Genomics.*, **67**(1) :1-7(2000)
- 7) Kitajima Y., Tashiro Y., Suzuki N., Warita H., Kato M., Tateyama M., Ando R., Izumi R., Yamazaki M., Abe M. et al., Proteasome dysfunction induces muscle growth defects and protein aggregation. *J. Cell. Sci.*, **127**(Pt 24) :5204-17(2014)
- 8) Tashiro Y., Urushitani M., Inoue H., Koike M., Uchiyama Y., Komatsu M., Tanaka K., Yamazaki M., Abe M., Misawa H. et al., Motor neuron-specific disruption of proteasomes, but not autophagy, replicates amyotrophic lateral sclerosis. *J. Biol. Chem.*, **287**(51) :42984-94(2012)
- 9) Bothe G.W., Haspel J.A., Smith C.L., Wiener H.H., Burden S.J., Selective expression of Cre recombinase in skeletal muscle fibers. *Genesis.*, **26**(2) :165-6(2000)
- 10) Sugimoto M., Wong D.T., Hirayama A., Soga T., Tomita M., Capillary electrophoresis mass spectrometry-based saliva metabolomics identified oral, breast and pancreatic cancer-specific profiles. *Metabolomics.*, **6**(1) :78-95(2010)
- 11) Marx F.P., Soehn A.S., Berg D., Melle C., Schiesling C., Lang M., Kautzmann S., Strauss K.M., Franck T., Engelender S. et al., The proteasomal subunit S6 ATPase is a novel synphilin-1 interacting protein--implications for Parkinson's disease. *FASEB J.*, **21**(8) :1759-67(2007)

## 講 評

### 学 術 委 員

委員長	佐藤 祐造	愛知みずほ大学 学長
委員	井上 真理	神戸大学 大学院 人間発達環境学研究科 教授
委員	押田 芳治	名古屋大学 総合保健体育科学センター長 教授
委員	梶原 莞爾	信州大学 繊維学部 特任教授
委員	川原 貴	国立スポーツ科学センター長
委員	島崎 恒藏	日本女子大学 名誉教授
委員	下光 輝一	公益財団法人 健康・体力づくり事業財団 理事長 東京医科大学 名誉教授
委員	下村 吉治	名古屋大学 大学院 生命農学研究科 教授
委員	田島 文博	和歌山県立医科大学 リハビリテーション医学講座 教授
委員	田中 宏暁	福岡大学 スポーツ科学部 教授
委員	田畑 泉	立命館大学 スポーツ健康科学部 教授
委員	田村 照子	文化学園大学 名誉教授・大学院 特任教授
委員	永富 良一	東北大学 大学院 医工学研究科 教授
委員	中島 利誠	一般社団法人 日本衣料管理協会 会長
委員	西松 豊典	信州大学 繊維学部 教授
委員	西村 太良	京都工芸繊維大学 元教授
委員	平田 耕造	神戸女子大学 副学長 家政学部 教授
委員	廣田 孝子	京都光華女子大学 健康科学部 健康栄養学科 教授
委員	福永 哲夫	鹿屋体育大学 学長
委員	藤本 繁夫	相愛大学 人間発達学部 発達栄養学科 教授
委員	吉岡 利忠	弘前学院大学 学長

## 入選研究者成果報告書講評

学 術 委 員  
京都工芸繊維大学 元教授 西 村 太 良

第 37 回「デサントスポーツ科学」入選者研究成果報告のうち、被服・工学関係分は、ウエア関連研究 2 件、着用する身体関連研究 2 件、素材開発関連研究が 1 件の計 5 件で、以下に講評する。

ウエア関連研究の一件目は諸岡晴美氏らの「着圧利用のアパレル開発 - 弾性靴下のユニバーサル仕様を視野に入れて -」で、着圧利用の機能性アパレルである弾性靴下に焦点を当て、ユニバーサル仕様を考慮した実験、測定から評価している。

圧迫部位は、大腿部、下肢最大部、下肢最小部と足部の 4 カ所、加圧には加圧量に関わらず一定加圧面積である事、低加圧の設定の容易さを考慮し、自着性伸縮包帯を用いた。皮膚血流量の測定から、末端部位である足部圧迫に伴う血流の減少が他部位に比べて大きくなること、また、仰臥位に比べて椅坐位の血流量の減少が大きいことを示した。弾性靴下着用の目的の一つ、静脈還流量の指標である心拍数は、仰臥位では大腿部、下肢最大部、および、足部の圧迫で減少が観測されたが、椅坐位では下肢最大部以外では観測されなかった。自律神経活動に関しては、椅坐位においては足部を除いて圧迫がストレス減少方向に、仰臥位では逆に圧迫がストレス増大に作用している。主観的評価では、脚各部とも圧強度の増加は快適性を低下することを示し、特に仰臥位では圧の増加とともに急激な低下がみられ、自律神経活動の結果とも合致していた。

本研究はユニバーサル仕様の弾性靴下の設計を目指して、基本的なデータ測定の方法や得たデー

タの取り扱いを示している貴重な論文と考えられる。さらに必要なデータを集積し、設計の指針の提供を期待する。

ウエア関連研究の 2 件目は三野たまき氏らの「体脂肪燃焼効果を増強する衣服の開発」は、鹿子網の通常のランニングパンツをコントロールとして、3 種類の着圧パンツとしては、太さ 80D の糸を使ったゴム網のパンツ、このパンツに口ゴムの内側から内股と臀部を押し上げながら、両体側の腸骨稜にかけて帯状に着圧を強化したもの、さらに帯状に強化したパンツの糸に太い 110D を使ったものを使用し、より体脂肪を燃焼しやすい着圧パンツの開発を目的としている。

パンツの被服圧を 48 部位で測定するとともに、圧感覚をウェストなど 4 ケ囲とその総合を提示させて得ている。被服圧は、コントロールのパンツにはほとんどは発生せず、上述の順に、大きくなり、圧感覚としてはゴム網のパンツが「丁度良い」、着圧を強化したものが「ややきつい」、110D の糸使いは「きつい」と、圧測定と圧感覚の結果は定性的に同じ結果を示した。さらに、4 種類のパンツを装着し、4 段階の有酸素運動から得た被験者の RQ の変化からの脂質消費量が、ややきついと評価されたパンツがコントロールパンツの約 1.3 倍となり、他の 2 種より大きくなったことを報告している。

この研究では、被験者の身体的特徴計測、並びに、被服圧の測定が詳細にされ、信頼性ある結果を得ている。「きつい」パンツの脂質消費量が最

大にならなかったなどに対しては実験的に立証すべく研究を進めて、体脂肪燃焼効果を増強する衣服の開発を期待する。

後藤一成氏らの「長時間運動時におけるコンプレッションタイトの着用が筋疲労や筋損傷・炎症反応に及ぼす影響」は身体関連研究で、着圧が10hPa以下のコントロール、弱圧（約20hPa）、強圧（約40hPa）のタイトを用い、120分の長時間走行を荷し、走行前から終了一時間後まで経時的に、筋機能などに係わる血液指標の変化を基に検討している。

垂直跳び跳躍高は、コントロールタイトおよび強圧タイトの使用では走行実施前後で低下したが、弱圧のタイトを使用した場合はその低下が認められなかった。心拍数は走行開始以後いずれも上昇するが、その上昇の度合いが、コントロール、強圧、弱圧タイトの順に低くなる。主観的評価では、脚の運動強度には、前半60分間、後半60分間のいずれにおいても着圧間での有意差は認められていない。呼吸の主観的運動強度は後半の60分間のみ弱圧条件がコントロール条件に対して有意に低くなった。血液指標は、数多くの指標で検討しているが、炎症反応の指標である血漿IL-6濃度のみ、コントロールタイトに比し弱圧タイトが有意に小さい結果を得た。

以上から、長時間運動時において、弱圧条件のタイトがコントロールのタイトや強圧条件のタイトに比べ、疲労や運動誘発性の炎症反応の軽減に有効であったと結論している。本研究の今後には、長時間運動のための着圧タイトの設計に関わる解析を期待する。

着用する身体関連研究の2件目の堀田典生氏らの「カーボンマイクロコイルを利用した圧迫型アンダーウェアの着用が腰部筋群の痛み、柔軟性、筋力に及ぼす影響」は、3種の磁性粉末を添加した磁性材シート層を、カーボンマイクロコイルをシリコンゴム中に添加したCMC層で挟んだ硬

質物を使用して、身体機能等に及ぼす影響を検討している。

実験は、上記硬質物を貼り付けた圧迫型アンダーウェアを着用した被験者に、急性効果については、背もたれ付きの椅子に30分間着席した前後で、慢性効果については1日8時間以上10日間着用した後調査している。調査内容は痛みの主観的評価、痛み閾値、一定負荷時の痛みの主観的評価、筋硬度の測定、および、柔軟性・筋力の測定と広範囲に丁寧に行っている。

結果は全調査項目についても有意な差を得ていない。丁寧な実験計画、詳細な測定に反し、材料の選定への予備実験が不十分であったのではないかと考えられる。さらなる文献調査や材料の物性値の測定などを基にしっかりした材料選定を行うことからの研究に期待する。

素材開発関連研究である、竹井裕介氏の「体温、発汗を計測可能な機能性繊維の研究」は、人間の発汗を計測可能なウェアラブルな湿度センサーの開発で、水を吸着しやすい性質をもつイオン液体EMIMBF<sub>4</sub>とゲル化剤、溶媒を混合し布に浸み込ませたのちゲル化し、布のフレキシブル性と通気性を損なうことなく布に塗布したものである。

性能評価から、感湿ゲルを塗布した不織布上に取り付けられたに1cm間の電極のインピーダンスと湿度との線形関係を得た。その変化率は温度に依存しないことも示した。また、湿度に対するインピーダンスの変化率が、温度に対する変化率の10倍程度であることを得、温度補償可能とした。また、応答速度は、市販のCMOS湿度センサーの約10倍速い結果を得ている。また、湿度と測定インピーダンスとの関係が変形に依存しないことも示した。

応用として、不織布湿度センサーを市販のマスクに貼付し、呼気検出センサーとして、呼吸のリズムの検出が可能であることを示し、睡眠時無呼吸症候群患者への呼吸モニタリングへの可能性を

示唆している。さらに、ポリエステル製Tシャツの胸部に本センサーを形成しエクササイズ時の発汗およびクールダウンによる汗の乾燥を計測し、運動時の発汗現象のモニタリングの可能性を示した。

本研究は、当初の目的は達しており、今後、さらなる応用研究を進め、早期の実用化への展開が楽しみである。

繊維材料は、天然繊維から合成繊維、その合成

繊維が天然繊維を超える機能性を持つように改質され、種々の高機能性材料が生まれてきている。さらに、天然繊維でも、セルロースナノファイバーやクモの糸の製造などによって、その応用が始まっている。このような高機能性繊維はまずスポーツ・レジャー用品として利用されることが多く、本誌で報告されたような先進的な高機能性ウェア開発の研究が進むことを期待する。

## 入選研究者成果報告書講評

学 術 委 員  
立命館大学 スポーツ健康科学部 教授 田 畑 泉

第 37 回研究助成金交付申請には、多施設から 121 件の応募が有り、その中から厳正に選抜され、助成金を受けた 13 件の体力医学関係の報告書について講評する。研究者として歩き始めて間もない時に、本研究助成金を受け、大変、感激したことを思い出すにつけ、今回、本研究助成入選者の成果報告講評をさせていただくことを、名誉と思うと同時に、たいへんうれしく思う。

入選研究者の学問範囲は、広く小生の専門分野とは異なるものも多いので、的外れな指摘もあればお許し願いたい。

まず、トレーニングに関する研究として、北田友治氏（順天堂大学）らは、“呼吸筋トレーニングが運動パフォーマンスを向上させるメカニズムの解明～近赤外線分光法を用いた検証～”において、呼吸筋トレーニングによる高強度運動の持続時間の延長は、肋間筋及び下肢活動筋の酸素動態の改善以外の因子によることを明らかにし、今後の、呼吸筋トレーニングによる高強度運動パフォーマンス改善の研究方向を示唆したことに意義がある研究である。古賀俊策氏（神戸芸術工科大学大学院）らは“高強度のウォームアップ運動が活動筋の酸素動態に及ぼす影響”で、高強度のウォームアップ運動による深層筋の酸素化に対する影響を明らかにした。この結果は、従来報告されてきた表層筋の酸素化に加えて新規の情報であり、意義がある。江間諒一氏（芝浦工業大学）らは、“なぜ多関節トレーニングは二関節筋を肥大させないか：筋活動レベルの変化様相の観点から

の検討”において、多関節運動を用いたトレーニングにより、単関節筋で観察されるトレーニング効果（筋肥大）が二関節筋で見られない理由として、筋活動を連続して行なった場合の、筋活動が単関節筋と二関節期では異なることによることを示唆した。この結果は、今後のレジスタンストレーニング、特に多関節筋のトレーニングを考える際の有用な情報と考えられる。

次に運動に関する基礎的研究として、木村哲也（神戸大学大学院）らは“水による体性感覚への刺激が立位バランス調節機能に与える効果～水中運動の神経生理学的効果の検証”において、水に指先を浸すことにより若年者、高齢者とも立位の安定性が高まることを報告した。これらの結果は、立位姿勢制御に関する水性刺激の神経生理学的研究の発展の礎となる研究として評価される非侵襲的な機器を用いたりリアルタイム可能な独創性の高い研究であり今後の発展が望まれる。小田俊明氏（兵庫教育大学）らは“長距離走時の効果的接地スタイルは筋と腱の力学的特性と関連する？—ケニア選手を含むトップアスリートから一般ランナーまでを含む検討—”において、トップ長距離走選手に多く見られる前足部接地群（踵が接地する前に母子球が接地する）が、一般人でも競技力が高いことと、それについては筋・腱の力学的特性には関係の無いことを示した。今後は、さらに例数を増やすことにより、それらの指標との間に関係がみられる可能性があり、今後の研究が期待される。

次に生活習慣病等予防に関する研究として、秋間広（名古屋大学）らは“肥満小児において筋内脂肪はメタボリックシンドロームの危険因子となり得るか？”論文において、内臓脂肪と大腿筋の筋内脂肪指標との関係を明らかとした。その結果、成人と同様に、小児においても、筋内脂肪（いわゆる“霜降り”）がメタボリックシンドロームの危険因子である可能性があることを示しており、今後、さらなる研究が期待される。また、畑本陽一（福岡大学）らは、“運動実施のタイミングの違いが1日の血糖変動に与える影響、1日を通して行う細切れ運動は、24時間血糖コントロールに有効か？—24時間の持続血糖モニタリングによる検証”において、朝食後の細切れ運動（30分毎のLT強度の1分間×3回（運動間に30秒間の休憩を含む））は、食前および食後の運動に対して、食後血糖値最高値を抑制する効果があることを明らかにした。この結果は、日常生活を活発化させることが糖尿病の予防に有効であることを示唆する有益な情報であると考えられる。川上諒子（早稲田大学）らは“サルコペニアの簡易評価法としての椅子片脚立ち上がりテストの妥当性検証研究”において、40 cmの椅子からの片脚立ち上がりの可否でサルコペニアでない人を7割以上の確率で見分けられること明らかとした。この結果は、従来、DEXA法により判定されているサルコペニアの判定を、どこでも行える簡易な椅子立ち上がりで、高い確率で判定できることを示した実践的な研究として評価される。新しいテクノロジーやストラテジーを採用して将来の研究を拓く研究として、北島康雄氏（東北大学）らは、“骨格筋萎縮過程における代謝物質の網羅解析および代謝特性の解明”において、筋の分解系に関係するプロテアソーム欠損マウスとコントロールマウスの骨格筋の網羅的メタボローム解析を行なったところ、64個の代謝産物に差があることを明らかにし、今後、これらを一一つ解析

することにより、高齢者で問題となっている筋萎縮に関して、筋分解系の影響の機序を明らかにする道筋を示す意義がある研究である。また、奥津光晴氏（名古屋市立大学大学院）は“運動による脂肪組織の恒常性維持に対するオートファジーの役割”において、高脂肪食摂取マウスによる自発走により、脂肪組織のオートファジー機能を持つタンパク質が変動することから、オートファジー機能が脂肪組織に影響していることを明らかにした。これは運動による肥満解消効果にオートファジー機能が関与している可能性を示唆するものであり、興味深い。設楽仁氏（米国国立神経疾患・脳卒中研究所）は、“脳活動中の自己制御による運動学習の強化—リアルタイム能動的MRI・脳波同時計測ニューロフィードバック(NF)を用いて”において、右利き被験者が利き手でターゲットを追跡する試技において、左視覚野の活動が低いこと、左下前頭回、運動前野の活動が高いことが、その後の運動成績が良いことを明らかにした。

最後にユニークな研究として、伊藤宏氏（名古屋工業大学大学院）らは“電気化学センサーを用いた簡易型皮膚ガス分析装置による運動時の皮膚ガス中アセトン濃度分析の試み”において、肝臓の脂質代謝量の指標としてアセトン濃度を短時間で皮膚より測定することができる装置で安定的に正確に測定できることを示した。この結果は、今後、運動時の脂質代謝研究に大きな貢献を果たすと期待される。高橋敏幸氏（東京医科歯科大学大学院）らは、“水分補給を伴う負荷運動後の含嗽が口腔内環境に及ぼす影響”で、最大心拍数の80%の強度の自転車エルゴメータ運動前後にスポーツドリンクの摂取及びうがいの有無が唾液の成分に与える影響を観察し、スポーツドリンク摂取後にうがいをしなかった場合、他の条件に比べて唾液pH、緩衝能が低下することを明らかとした。この結果は、スポーツドリンクを飲む頻度の多いアスリートへの歯予防方策への有用なデータ

であると評価される。

我が国において、本財団のスポーツ・運動・身体活動に関して幅広い研究領域への貢献は大いに評価されている。またさらに第37回研究助成金交

付により、この分野からそれぞれ、有益な情報と今後の発展が期待できる研究成果が、得られた。講評者として、公益財団法人石本デサントスポーツ科学振興財団に感謝したい。

## 入選研究者成果報告書講評

学 術 委 員

和歌山県立医科大学 リハビリテーション医学講座 教授 田 島 文 博

周知のように、昭和36年に制定されたスポーツ振興法は平成23年にスポーツ基本法と改正された。その中で、「スポーツは、世界共通の人類の文化である」と宣言し、「スポーツを通じて幸福で豊かな生活を営むことは、全ての人々の権利」と記された。特筆すべきは、基本理念の中で、「障害者が自主的かつ積極的にスポーツを行うことができるよう、障害の種類及び程度に応じ必要な配慮をしつつ推進されなければならない」と、障害者スポーツ振興が明記されたことである。

デサントスポーツ科学振興財団は、昭和54年から「健康の増進と体力の向上及びスポーツ科学に関する調査・研究に対する援助」を一貫して事業として推進してきた。今回も運動生理学関係6件の優秀な研究に対して援助が行われた。さらに、今回は、「障がい者スポーツ」関連分野を創設し、3課題を選んで下さった。33年間障がい者スポーツの調査・研究を行ってきた我々としては、この英断に深く感謝している。もちろん、これまでもデサントスポーツ科学振興財団は、障がい者スポーツへの援助もしていたが、部門設置は障がい者スポーツ研究分野の未熟な面から考え、英断といえる。2020東京オリンピック・パラリンピックが決まった時には、多くの人が「東京オリンピック決定」と言っていた。しかし、今や全てのメディアが「東京オリンピック・パラリンピック」と表現し、パラリンピックを加える事が当然となっている。昨年の第70回日本体力医学会学術集会で、障がい者スポーツを中核に据えたプログラムを

構成し、好評を博した。このような時代の動きを「研究援助」という根幹を支える支援に着手した点は、後年、歴史的に評価されると考える。そして、その初回の講評を担当出来る幸運に感謝したい。

さて、それぞれの成果報告について、まず、運動生理学関係6件から講評させていただく。

Pedersen らが、2000年頃から骨格筋から IL-6 が分泌されていることを示し、骨格筋には内分泌機能があり、分泌される物質をマイオカインと呼ぶことを提唱している。以後、様々なマイオカインが発見されているが、「Macrophage Migration Inhibitory Factor (MIF) による骨格筋の糖代謝調節」(藤井宣晴)は、マイオカインにおける新発見を報告した。この報告書によると MIF がマイオカインの一種であり、骨格筋自身に働き、インスリンによって誘発される糖の取り込みを抑制することを明らかにした。マイオカイン研究の新たな1ページを開き、臨床応用も期待されるすばらしい研究である。また、脳由来神経栄養因子 (BDNF) がマイオカインの1つである、運動時に海馬を中心に BDNF が発現するといった研究が発表されている。近年、運動による認知機能への影響が話題になっている。「運動による認知機能の向上は運動様式によって異なるのか？」(安藤創一)は、さらに踏み込み、有酸素運動と抵抗性運動のいずれが認知機能により影響するかについて明らかにしようとした意欲的な研究である。残念ながら、本財団の研究支援決定から報告までの限られた期間の研究であったためか、有意な結

果を示す事が出来なかったが、意欲的な内容であり、充分評価されるべき内容だと考える。更なる発展を期待する。

暑熱環境下での研究も社会的貢献の大きな分野と言える。「暑熱環境下における聴覚情報処理および高次認知機能の評価」(芝崎学)では、13名の被験者に対して中枢温を変化させ、認知機能の客観的指標として知られている聴覚オドボールテストによる反応時間と脳波事象関連電位(N100とP300)を測定した。その結果、高中枢温は聴覚機能への影響を認めなかったが、反応実行系は促進、認知処理系は低下させる結果を得た。これまでの、高体温下のスポーツ活動は事故発生などを懸念する声が現場にあったが、それが、脳機能が関連している可能性を客観的評価により明らかにした画期的な報告と言える。また、「暑熱環境下の運動時における塩味閾値の変化を指標とした熱中症予防のための基礎的実践的研究」(高木祐介)においては、健常若年男子12名を対象に室内とフィールドにおける塩味の閾値変化を測定した結果、電解質喪失量に対してフィードフォワードにふるまっている傾向が示された。この知見は、塩味閾値を利用した熱中症対策が可能であり、かつ、有用である可能性を示している。実用面でも画期的な研究と言える。

運動やスポーツが生活習慣病予防と治療に効果的である事は当然のこととして、心不全、閉塞性肺疾患、そして認知症にまでその有効性が示されるようになってきた。しかし、「過負荷は筋損傷をもたらす」「むやみなトレーニングは筋損傷をもたらす」等の指摘は根強い。その大きな理由は、これまでスポーツ負荷による筋損傷をもたらす可能性についてクレアチニンキナーゼなどの血中酵素でしか検証できなかったことがあげられる。「超音波剪断波イメージング法によるマラソン後の筋損傷部位および程度の定量～適切なトレーニングおよびリカバリープログラムの作成に向けて～」

(平田浩祐)は、市民ランナーを被験者とし、超音波剪断波エラストグラフィによる個別の筋剛性率をマラソン参加前後で測定した報告である。その結果、腓腹筋内側頭だけがマラソン翌日のみで有意な剛性率上昇を示したが、測定した他の筋は剛性率上昇を認めなかった。本研究によりまたひとつ、スポーツ傷害の懸念に科学的に応える証拠が積み重なった。また、「電気刺激を用いた新しい筋力トレーニング」(政二慶)は電気刺激を用いた筋力トレーニング法を検討した研究である。今後の発展が期待される。

次に、障がい者スポーツ関連の3課題は動作解析2、スポーツ傷害1の構成であった。「電磁ゴニオメータによる肩甲骨から体幹の三次元動作解析：健常者とパラカヌー選手の比較」(木村浩彰)では、カヌー競技カヤック種目において、電磁ゴニオメータによるパドリング動作の解析結果が報告されている。同じ競技種目でも健常者とは異なる上肢の使い方が解明され、今後の競技力向上に必要な知見が明らかとなった。「障害者スポーツの病態解析と機器の開発の研究—バイオメカニクス研究を中心に—」(帖佐悦男)においては、頸髄損傷四肢麻痺選手と脊髄損傷対麻痺選手を被験者とし、主として車いすテニスサーブ動作について3次元動作解析を行った結果が報告されている。車いすテニスサーブ動作では、健常者のサーブ動作に比べ、肩と肘への負担が大きく、スポーツ傷害発生の危険性が高い可能性が示された。「車いすスポーツアスリートの肘障害実態調査による車いすスポーツ肘障害の予防に関する研究」(中村健)はこれまでほとんど検討されていなかった障がい者スポーツ傷害についての詳細な調査結果を報告している。35名の車いすマラソンアスリートを対象に肘検診を施行し、なんと約半数の選手に肘関節に異常所見を認めている。報告の中でも強調されているが、早急・確実な対策が望まれる。

これら障がい者スポーツ3報告に共通している

事は、被験者数が少なく、手法も健常者と比較することで障がい者スポーツの特質を探ろうとしていることである。したがって、研究結果の提示という意味では再現性と普遍性に課題を残す。しかし、全国の大学・研究機関に障がい者スポーツ研究部門がきわめて少なく、その研究者も絶滅危惧種並みの存在であることを考えれば、今回の研究報告はいずれも画期的で、良質であると言える。今後も、大切に育てていただきたい。

以上、いずれの研究報告も立派な内容であった。また、どの研究もデサントスポーツ科学振興財団の「健康の増進と体力の向上に関する学術の研究及びスポーツ科学に関する調査・研究を奨励・援助」の目的趣旨に合致したものであった。今後とも、健康の増進と体力の向上及びスポーツ科学の発展に貴財団に御尽力いただけるよう祈念し、講評の総括とさせていただく。

## 事業内容

わが国の体育・スポーツに関する学術研究の振興と健全なスポーツ活動の発展に資するため、次の事業を行う。

### I. 健康の増進と体力の向上およびスポーツ科学に関する調査・研究に対する援助

#### (1) 研究委託：

財団において研究課題を定め、適当と思われる関係機関等に対し研究を委託する。

#### (2) 研究助成：

体育学，健康科学，人間工学，被服科学，運動施設工学等健康の増進と体力の向上に関する学術，およびその他スポーツ振興に寄与する学術研究に関する講座をもった大学，およびこれらの分野において教育，または研究・調査活動を積極的に行っている個人，またはグループより広く課題をつのり，その調査・研究の飛躍的発展・充実が期待されるものに対し助成金を交付する。

### II. わが国スポーツの振興・発展と充実に寄与する団体に資金援助を行い，トップレベルの選手育成・強化，競技力の向上を図る。

### III. スポーツの施設，用具，衣服に関する学術的資料および関連文献の収集・保存・公開を行う。

理 事・監 事

理 事 長	石 本 和 之	株式会社デサント 常勤監査役
常務理事	佐 藤 祐 造	愛知みずほ大学 学長
理 事	梶 原 莞 爾	信州大学 繊維学部 特任教授
理 事	川 原 貴	国立スポーツ科学センター長
理 事	島 崎 恒 藏	日本女子大学 名誉教授
理 事	田 中 嘉 一	株式会社デサント 専務取締役
監 事	篠 原 祥 哲	篠原祥哲公認会計士事務所 公認会計士
監 事	高 木 茂 太 市	高木・里井法律事務所 弁護士

## 評 議 員

評 議 員	下 村 吉 治	名古屋大学 大学院 生命農学研究科 教授
評 議 員	田 中 宏 暁	福岡大学 スポーツ科学部 教授
評 議 員	永 富 良 一	東北大学 大学院 医工学研究科 教授
評 議 員	廣 田 孝 子	京都光華女子大学 健康科学部 健康栄養学科 教授
評 議 員	藤 本 繁 夫	相愛大学 人間発達学部 発達栄養学科 教授
評 議 員	石 本 雅 敏	株式会社デサント 代表取締役社長
評 議 員	辻 本 謙 一	株式会社デサント 取締役

### 特別顧問

特別顧問	猪谷千春	国際オリンピック委員会 名誉委員
特別顧問	岡野俊一郎	国際オリンピック委員会 名誉委員
特別顧問	竹田恆和	公益財団法人日本オリンピック委員会 会長
特別顧問	張富士夫	公益財団法人日本体育協会 会長

## 活 動 報 告

(1) 定時理事会（決議の省略）

月 日：平成 27 年 5 月 20 日

- 議 題：① 平成 26 年度事業報告承認の件  
② 平成 26 年度決算報告書承認の件  
③ 任期満了に伴う役員等候補者名簿承認の件  
④ 株主権の行使の件  
⑤ 定時評議員会招集承認の件

(2) 機関誌「デサントスポーツ科学」Vol. 36 発行

平成 27 年 6 月 5 日

(3) 平成 27 年度総会および助成金目録贈呈式

日 時：平成 27 年 6 月 5 日

11：30～12：00 理事会・評議員会・臨時理事会

12：00～12：30 助成金目録贈呈式

12：30～13：30 懇 親 会

場 所：株式会社デサント 東京オフィス

議 題：理事会

- ① 任期満了に伴う学術委員選任の件  
評議員会

① 平成 26 年度事業報告承認の件

② 平成 26 年度決算報告書承認の件

- ③ 任期満了に伴う理事・監事・評議員選任の件  
臨時理事会

① 代表理事（理事長）・業務執行理事（常務理事）選任の件

(4) 第 37 回学術研究委託および自由課題学術研究助成金交付

平成 27 年 7 月 24 日

(5) 公益財団法人日本オリンピック委員会ならびに公益財団法人日本体育協会、  
一般社団法人日本体力医学会への寄附金交付

平成 27 年 7 月 24 日

- (6) 第 38 回自由課題学術研究公募開始  
平成 27 年 9 月 1 日
- (7) 第 38 回自由課題学術研究公募締切  
平成 27 年 11 月 9 日
- (8) 第 38 回自由課題学術研究公募申請書審査  
平成 27 年 11 月 10 日～平成 28 年 2 月 24 日
- (9) 第 37 回学術研究委託および自由課題学術研究成果報告書提出締切  
平成 27 年 11 月 19 日
- (10) 臨時書面理事会（決議の省略）  
月 日：平成 28 年 1 月 25 日  
議 題：① 文化学園大学研究助成承認の件  
② 助成金準備資金取扱規程承認の件  
③ 平成 27 年度助成金準備資金積立て承認の件  
④ 機関紙「デサントスポーツ科学」データベース化承認の件  
⑤ 平成 28 年度研究助成金枠及び寄附金枠設定承認の件
- (11) 平成 28 年度学術委員会  
日 時：平成 28 年 2 月 24 日 12：30～13：20  
場 所：株式会社デサント 東京オフィス  
議 題：① 第 38 回自由課題学術研究公募審査の件  
② 第 38 回委託研究選定の件  
③ その他
- (12) 定時理事会  
日 時：平成 28 年 2 月 24 日 13：30～13：50  
場 所：株式会社デサント 東京オフィス及び大阪オフィス <テレビ会議>  
議 題：① 平成 28 年度事業計画書承認の件  
② 平成 28 年度収支予算書承認の件

以 上



## — 編 集 後 記 —

機関誌「デサントスポーツ科学」第37巻の発行にあたり、ご協力を賜りました学術委員の先生方に深く感謝申し上げます。

リオデジャネイロオリンピックに向けて代表選考が進む中、熊本で大地震が発生し多くの方が被災されました。亡くなられた方々にお悔み申し上げますとともに、被災された方々に心よりお見舞い申し上げます。

1995年に発生した阪神・淡路大震災から21年が経ち、熊本で4回目の大地震となりました。

東北の復興がなかなか進まない中、新たな震災が発生したことは誠に残念な事態であります。

大きな災害にみまわれても、その都度日本は復興してきました。今回も時間がかかってもきっと復興できると信じています。スポーツは被災地の人々に笑顔を、子供たちに希望を届けられるのではないのでしょうか。

健常者、障がい者を問わずに「すべての人々に、スポーツを遊ぶ楽しさ」を実感していただくため、平成27年度から「障がい者スポーツ」に関する募集枠を別枠として設定し、研究助成を強化いたしました。

当財団は「わが国のスポーツ科学の振興と健全なスポーツ活動の発展に寄与すること」を目的に、今後も活動を続けてまいる所存です。

今回の当財団の学術研究募集に際しましても、体力医学、被服・工学、障がい者スポーツなど多数の応募をいただけますよう、皆様方のご指導、ご鞭撻の程、よろしく願いいたします。

編集局 藤原 一彦

---

### 「デサントスポーツ科学」第37巻 DESCENTE SPORTS SCIENCE Vol. 37

(表紙デザイン 永井 一正)

発行人 石本 和之  
編集人 藤原 一彦  
発行日 平成28年6月3日  
June 3, 2016  
発行所 公益財団法人 石本記念デサントスポーツ科学振興財団 事務局  
PUBLISHER THE DESCENTE AND ISHIMOTO MEMORIAL FOUNDATION  
FOR THE PROMOTION OF SPORTS SCIENCE  
〒543-8921 大阪市天王寺区堂ヶ芝1丁目11番3号  
11-3, Dogashiba, 1-chome, Tennoji-ku, Osaka 543-8921, Japan  
Tel. 06-6774-0364  
<http://www.descente.co.jp/ishimoto/>  
E-mail [zaidan@descente.co.jp](mailto:zaidan@descente.co.jp)  
「デサントスポーツ科学」編集局  
〒543-8921 大阪市天王寺区堂ヶ芝1丁目11番3号  
Tel. 06-6774-0252  
製作所 株式会社 色染社  
〒541-0041 大阪市北区天神橋7丁目5番8号  
Tel. 06-6351-6915

---

ISSN 0285-5739