

目 次

巻 頭 言

社会の流れとデサントスポーツ科学

相愛大学人間発達学部発達栄養学科 教授

大阪市立大学 名誉教授

藤 本 繁 夫 (1)

第 36 回委託研究報告

スーツの「着心地」を数値化する計測・評価法の開発と検証

Development of Measurement and Evaluation Method for
Quantization of Suit's Clothing Comfort

信 州 大 学 西 松 豊 典 (3)

褐色脂肪組織と運動習慣との関係および褐色脂肪組織増加のための栄養介入

Effect of Habitual Exercise and Nutritional Intervention on Brown Adipose Tissue

立 命 館 大 学 浜 岡 隆 文 (13)

骨格筋に対する圧迫と運動パフォーマンスの関連性に関する統合的研究

The Effect of Compression to the Calf Muscle on Muscle Performance

鹿屋体育大学 吉 武 康 栄 (22)

第 36 回助成研究報告

歩行型腰部柔らかかダミーを用いた衣服圧測定方法の確立

The Establishment of Clothing Pressure Evaluation Method
Using the Walking Soft Dummy

地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター 菅 谷 紘 子 (30)

- アスリートの体型研究
—各種競技従事者に適合する最適なウェア作製を目指して—
Athletic Physique Research:
Towards Ideal Athletic Wear for Various Competitors
文化学園大学 佐藤 真理子 (41)
- 食事時刻がヒトの生体リズムおよびエネルギー代謝調節に与える影響
Effects of Restricted Meal Schedule on Human Circadian
Rhythm and Energy Metabolism
北海道大学 山仲 勇二郎 (50)
- 脂質による消化管ホルモン分泌作用を活用した新たな筋グリコーゲン回復法の開発
Effects of Co-administration of Carbohydrate and Fat on Insulin
Secretion and Muscle Glycogen Resynthesis after Exercise in Mice
東京大学 寺田 新 (61)
- 筋損傷を伴わない伸張性筋力トレーニング方法の確立
Establishment of an Eccentric Training Modality without Muscle Damage
鹿屋体育大学 前大 純朗 (68)
- バイオフィードバックトレーニングが脳血流分布に及ぼす影響
Distribution of Cerebral Blood Flow during Biofeedback Training
福井大学 高田 宗樹 (78)
- 低強度血流制限下での筋力トレーニングが、血管機能に及ぼす影響
—血管内皮機能と動脈硬化指標の関連—
Impact of Low Intensity Resistance Training
with Blood Flow Restriction on Vascular Function
— The Relation between Endothelial Function and Arteriosclerosis —
山梨県富士山科学研究所 堀内 雅弘 (90)
- 非運動時に血流制限を施行したレジスタンス運動の有効性の検証
Resistance Training with Blood Flow Restriction: Optimization in Women
北翔大学 沖田 孝一 (99)
- 最大無酸素性作業能力の向上に関連する分子メカニズムの解明
—骨格筋発現タンパクの網羅的解析—
Analysis of the Global Gene Expression Profile Associated with
Training-Induced Improvements in Anaerobic Capacity
立命館大学 宮本 恵里 (106)

- 消防用防護服着用時に実施する運動・バランス能力テストの有効性検討
Evaluation of the Mobility with Personal Protective Equipment
for Firefighters and the Validity of Those Test Methods
独立行政法人労働安全衛生総合研究所 ソン スヨン (115)
- 運動疲労の脳磁図研究
A Magnetoencephalography Study on Physical Fatigue
大阪市立大学大学院 田中 雅彰 (124)
- アマチュアボクシングにおいて頭部に作用する衝撃の安全・非侵襲な直接計測
Safe and Non-invasive Evaluation of The Impact Load
of Punches in Amateur Boxing
立命館大学 長野 明紀 (131)
- 走運動時におけるハムストリングスの活動特性の部位差
－肉離れ発症メカニズム解明への新たなアプローチ－
Regional Neuromuscular Activation within Human Hamstrings
Muscle during Sprint Running
－ Novel Approach for Understanding Hamstrings Injury －
中京大学 渡邊 航平 (137)
- 低酸素間欠的無呼吸が中心循環動態に与える影響
～睡眠時無呼吸症候群による心血管疾患発症機序の解明および予防法の構築～
The Effects of Intermittent Hypoxia Apnea on Central Hemodynamics
筑波大学 今井 智子 (145)
- 足関節底屈筋群の瞬発的な筋力発揮能力向上を目的とした
トレーニングが姿勢制御機構に及ぼす影響
Effect of Explosive-type Strength Training of Planter Flexors on Postural Stability
熊本大学大学院 小林 雄志 (153)
- 皮膚バリア保護的に働く弱酸性ポリエステルを利用した化繊アレルギー原因物質の解明
Investigation of Causes of Clothing Dermatitis - Absorption Test using Weak-
Acidic Polyethylene Terephthalate and PET
高知大学 弘田 量二 (161)
- 長時間運動が認知機能に及ぼす影響：脳循環動態の変化から探る
The Effect of Changes in Cerebral Blood Flow Cognitive
Function and Cerebral Blood Flow During Exercise
東洋大学 小河 繁彦 (168)

運動意欲と食リズムのクロストーク：

摂食促進ホルモン・グレリンによる自発運動量制御機構の解明

Crosstalk between Spontaneous Exercise and Eating Rhythm:

A Putative Mechanism in Relation to Ghrelin, an Eating Promotion Hormone

久留米大学 田尻 祐司 (177)

講 評

学術委員 押 田 芳 治 (187)

学術委員 井 上 真 理 (189)

財団ニュース

事業内容 (192)

役員名簿 (193)

計 報 (196)

活動報告 (197)

社会の流れとデサントスポーツ科学

相愛大学人間発達学部発達栄養学科 教授

大阪市立大学 名誉教授

藤 本 繁 夫

わが国では、2019年『ラグビーワールドカップ日本大会』に続いて、2020年には『東京オリンピック・パラリンピック』が開催されることになっています。さらに2021年には『第10回ワールドマスターズゲームズ2021』が関西エリアで開催されることが決まりました。この大会は、世界各国の30歳以上の成人・中高年の一般アスリートを対象とした“生涯スポーツのオリンピック”で、スポーツを愛する人ならば誰でも参加できる、また、元プロや五輪選手も出場可能なため、元アスリートと同じ舞台上で戦うことができることも魅力になっています。この大会は1985年にトロントで第1回目が行われ、以後オリンピックの翌年に開催されています。これまでに延べ14万人が参加しており、第10回目の記念すべき大会が日本でアジア初開催になりました。このように3年連続で日本で世界大会が開催されることになり、若者から中高齢者まで益々スポーツに関心が高まっています。

半世紀前になりますが、1964年に東京オリンピックが開催された時は、それを契機に首都高速道路ができ、国立競技場や代々木体育館ができ、新たな東京に変貌しました。今まで大阪から8時間かかって上京していたのが、新幹線の開通で日帰りの仕事も可能になりました。またカラーテレビが普及して我々の生活も社会的にも経済的にも飛躍的に変わってきたことを覚えています。スポーツに対しても、東京オリンピックを境に、“見るスポーツ”から、自らが“行うスポーツ”に変わっていききました。はだしのマラソンランナー・アベベをみて感動し、大松博文監督の“俺についてこい”の根性バレーをみて“日本”を応援しましたが、現在では日本の各地で市民マラソンが開催され、アスリートに混ざって多くの一般市民がマラソンに参加するようになりました。

以前はスポーツを支えるスポーツ科学は、スポーツ選手のための医科学、スポーツ障害の治療、競技に勝つための医科学サポートで進められていました。1975年にUCLAのK. Wasserman教授のExercise Physiologyの総説が発表され、その中のAT理論が基礎になって新しい理論に基づいたスポーツ医科学が始まりました。今までのスポーツの経験論、根性論から、エビデンスのあるスポーツ理論に基づいたトレーニングや運動指導が始められ、現在のアスリートに対するトレーニング指導から、高血圧、糖尿病、メタボリック症候群、慢性閉塞性肺疾患患者などの運動療法やリハビリテーションの基礎につながってまいりました。

この時期に一致して、1979年（昭和54年）から、石本記念デサントスポーツ科学振興財団では、
デサントスポーツ科学 Vol.36

健康の増進と体力向上およびスポーツ医科学に関する学術研究の助成事業がスタートしました。研究領域としては、健康増進や体力増強に関するスポーツ科学系と被服工学系の2分野の研究に関して、毎年、委託研究と20数件の自由課題研究に対して助成を行ってこられ、今まで計67件の委託研究と計856件の自由研究と17件の課題研究に対して助成していただきました。この間、2000年から行われた“健康日本21”では、健康寿命の延長を目指して、メタボリック症候群の予防のための身体活動と食事に関しても、デサントスポーツ科学の研究費による報告がなされてきました。

この研究助成は、申請書を作成してから数カ月で研究を終了し、1年内に報告書を完成するシステムになっており、科研費を含めた大型研究の申請のミニシア版になります。小生の大阪市立大学運動医学教室の大学院生にも、まずこの申請書の書き方から指導を行って、研究結果の報告書の作り方の指導をさせて頂きました。

現在、わが国では世界で最速の少子高齢化が進み、壮年層では腹部肥満が悪役になっているメタボリック症候群に加えて、高齢者のロコモティブシンドロームがクローズアップされてきています。また昭和20年台生まれの団塊世代の人達が定年を迎え、年金や介護問題が今後の日本の医療経済の大きな課題になってきています。さらに超高齢化に伴って、認知症に対する対策が世界的なテーマになっております。このような時代背景をもとに、ここ数年のデサント科学の研究計画書の傾向としても、スポーツと脳に関する申請書が増えてきました。高齢化社会を反映して、高齢者の介護問題に対して、運動器であるロコモティブシンドロームに対する対策と認知障害の予防にスポーツ科学がどう関与するかが大きなテーマになってきます。

もう一つの流れとして、東京オリンピック・パラリンピックではアスリートと同じように障がい者のスポーツ普及がもう一つの柱になってきます。この社会の動きに同調して、デサント科学の研究費には、平成27年度から障がい者スポーツ振興に関わる調査・研究に対する助成が新設され、公募が始まることとなります。このように時代背景を先取りしたような石本記念デサントスポーツ科学振興財団のスポーツ振興の支援に深謝いたしますとともに、今後、益々の研究推進がなされますことを期待致します。

スーツの「着心地」を数値化する 計測・評価法の開発と検証

信州大学 西松豊典
(共同研究者) 同 金井博幸

Development of Measurement and Evaluation Method for Quantization of Suit's Clothing Comfort

by

Toyonori Nishimatsu, Hiroyuki Kanai
Shinshu University

ABSTRACT

The purpose of this study was to measure and evaluate the clothing comfort of jackets with different length of arm hole and slacks with different hip shape using a sensory test, a clothing pressure measurement and EMG (electromyogram). We proposed four experimental motions to measure and evaluate the clothing comfort of jacket and slacks adequately. Healthy males evaluated the clothing comfort of five jackets and three slacks by four proposed experimental motions using the paired comparison method and their clothing pressures between their bodies and wears and EMG values were measured during those motions. As the length of arm hole was bigger, the clothing comfort of jacket became better, and the values of the clothing pressure and EMG were smaller. And they evaluated the slacks with the forming processing and the long raise length the good clothing comfort. Then the values of the clothing pressures between their bodies and slacks were smaller. These results indicate that the clothing comfort of jacket and slacks could be measured and evaluated by four experimental motions, the clothing pressure and EMG.

要 旨

本研究では、肩周り寸法が異なるスーツ上衣、臀部形状が異なるスラックスを被験者がそれぞれ着用したのち提案した試技で「着心地」評価を行うとともに、評価試技を行っているときの衣服圧や筋電図を測定し、「着心地」の計測・評価方法を提案した。その結果、上衣及びスラックスの「着心地」を適切に評価する4種類の試技を提案した。上衣の「着心地」官能検査結果より、肩周り寸法を大きくすることによって圧迫感、窮屈感、ツッパリ感、動作拘束感がなく、着心地が良いと評価された。また、水平内転運動や前方拳上運動時に測定した衣服圧の測定結果や各試技を行う際に重要な三角筋前部と大胸筋に注目して筋活動量を測定した結果より、着心地が良いと評価された部位において衣服圧や筋活動量が低くなっていることを確認した。さらに、スラックスの「着心地」官能検査結果より、片足上拳運動やしゃがみこみ運動においてクセ取り加工して股上丈が長いスラックスは「着心地」が良いと評価された。各試技における衣服圧測定結果より、着心地が良いと評価された部位において衣服圧が低くなっていることを確認した。このように、スーツ上衣やスラックスの「着心地」をそれぞれ官能評価する試技、「着心地」評価時において着衣から受ける衣服圧や試技によって生じる筋活動量を評価する方法を提案し、その有効性を確認した。

緒 言

既製背広服（スーツ）は大量生産を基本としているので、消費者の様々な体型に合わせたスーツ（上衣、下衣）を用意する必要がある。国内においては、成人男性の体型がJIS L4004で定義されているので、既製スーツは3種類の基本身体寸法（身長、胸囲、胴囲）で着用対象者を分類して、各メーカーにおいてスーツの生産が行われて

いる。

西松研究室と（株）AOKIとが共同で成人男性114名を対象として、スーツ購入時の不満や着用時にどの身体部位に窮屈感や圧迫感を感じるかについて市場調査を行った。その結果、スーツのサイズやスタイルに対する不満が約40%であること、消費者の65%が上衣で肩周り（肩部、上腕部、腕付根部）に窮屈感や圧迫感を感じていること、スラックスにおいても臀部に窮屈感や圧迫感を感じていることがわかった。そのため、従来よりスーツの着心地については数多くの研究^{1)~12)}がみられる。

本研究では、肩周り寸法（アームホール、脇巾）を変化させたスーツ上衣、あるいは臀部形状（クセ取り加工と股上丈）が異なるスラックスを着用した被験者が上衣、あるいはスラックスの「着心地」を提案した試技で評価するとともに、評価試技を行っているときの被験者と上衣（あるいはスラックス）間の衣服圧や筋電図を測定し、上衣の肩周り寸法やスラックスの臀部形状が上衣やスラックスの「着心地」に及ぼす影響を計測・評価する方法を提案し考察を行った。

1. 実験方法

1. 1 「着心地」の主観評価方法

(1) 上衣の「着心地」官能検査方法

本実験では上衣の肩周り寸法の設計要素であるアームホール、脇巾をそれぞれ変化させた5種類の上衣を用いた。試料1はJIS L4004に基づいた体型92A5の従来の上衣、試料2と4は試料1よりもアームホール寸法を約5%小さくした上衣、試料3と5は試料1よりもアームホール寸法を約5%大きくした上衣である。試料4は試料2より脇巾を約3%大きくした上衣、試料3は試料5より脇巾を約3%大きくした上衣である。

スーツ生地は織組織は2/2綾織、経・緯糸番手数はともに2/60、たて・よこ密度はそれぞれ79.1

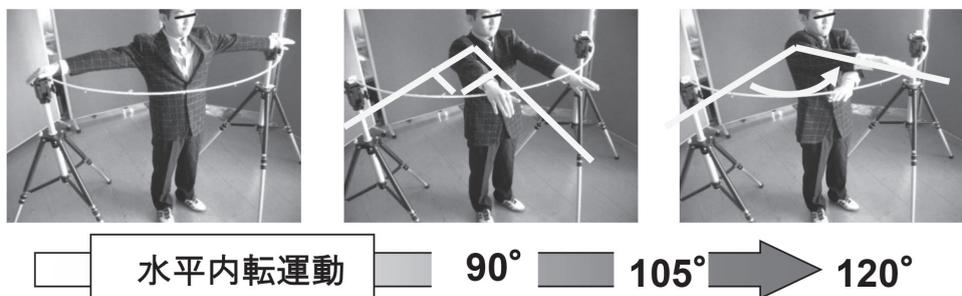


図1 (a) 水平内転運動

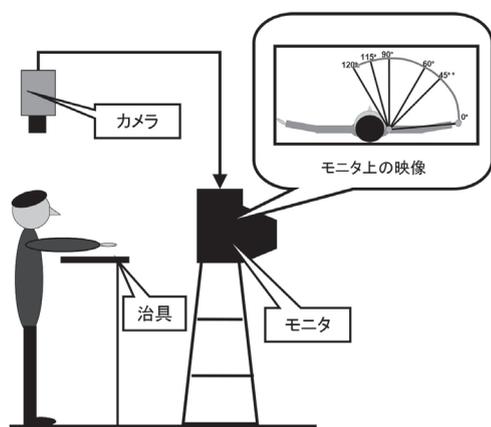


図1 (b) 水平内転角の確認方法

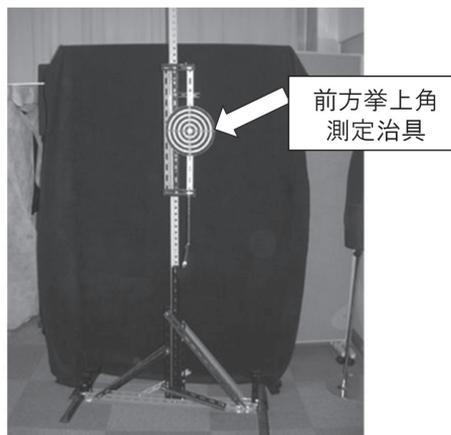


図2 (b) 前方拳上角の確認方法

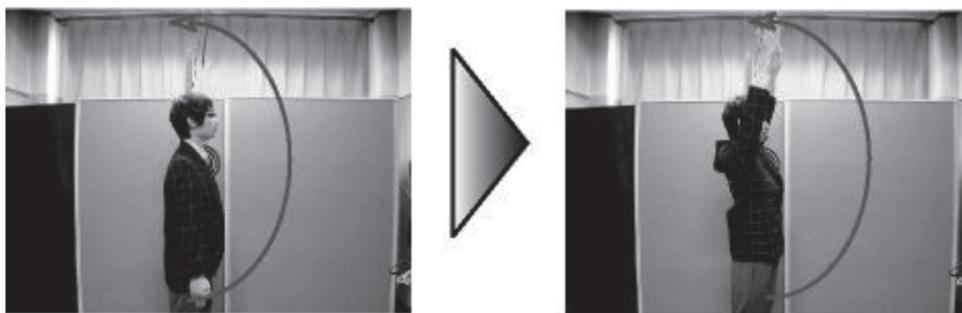


図2 (a) 前方拳上運動

本 /2.54cm, 74.6 本 /2.54cm である。

被験者は 92A5 の体型に該当する健常な 20 代男子大学生 10 名である。

上衣の着心地を評価するために、被験者は自身の体型に合ったワイシャツ、スラックスおよびベルトを着用し、単関節平面運動である水平内転運

動 (図 1 (a) ; 内転角 90, 105, 120°), 前方拳上運動 (図 2 (a) ; 拳上角 90, 180°) を行った。

なお、図 1 (b) に示すように、被験者の真上に設置されたカメラで撮影された水平内転運動は、被験者前方のスクリーン上に投影されて、水平内転角を被験者が確認できるようになってい

る。

また、前方挙上運動（図2（a））を行う際には図2（b）に示すような補助具に装着した角度計により挙上角が被験者にわかるようにした。

そして、一対比較法であるシェッフエの方法（中屋の変法）¹³⁾を用いて、提示された一対の試料について5種類の形容語「圧迫感」、「窮屈感」、「ツッパリ感」、「動作拘束感」、「着心地」を7段階尺度（非常に、かなり、やや、どちらでもない）で評価した。評価部位は、4部位（上腕部、脇下前部、脇下後部、肩甲部）である。なお、実験環境は温度23℃、湿度50% RHである。

(2) スラックスの「着心地」官能検査方法

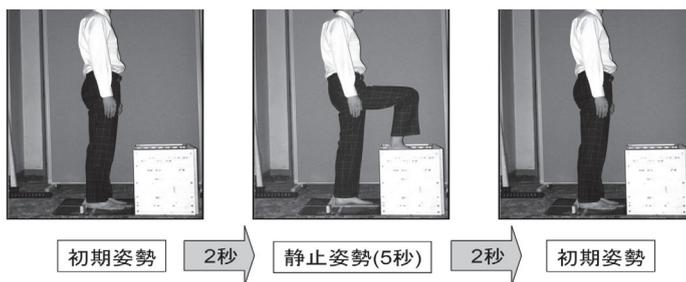
スラックスの「着心地」評価には、3種類のスラックス、従来のスラックス（A；ウエスト74cm、76cm）、試料Aにクセ取り加工（臀部箇所）に丸みや膨らみを作り出す加工）したスラックスB、クセ取り加工を施して股上丈をプラス1.5cm長くなるように設計した試料Cを用いた。ここで、

「股上丈」とはJIS L0112に定められた「スラックスなどの股止まりから上端までの直線の長さ」である。

スラックスにワイシャツの裾を入れて試技を行う際にワイシャツがずり上がる。このとき、ワイシャツにかかる張力を被験者が感じて評価に影響が出ることや、ワイシャツのずり上がりに応じて試料の着用の仕方が変化する。そこで、事前に片足上挙及びしゃがみこみ動作によって生じるワイシャツのずり上がり位置へマーカーを付け、このマーカー位置にベルトの上端を合わせた。

ヒトはスラックスの「着心地」を評価するとき、足を曲げたり、しゃがむという様々な動きをする。しかし、それらの動きを評価試技とすることは、個人差が生じて再現性のない試技となる。そこで、本研究では膝関節を90°になるまで片足挙げを行う「片足上挙運動（図3（a））」と、屈曲角度が大きくなる「しゃがみこみ運動（図3（b））」を提案し試技とした。

(a) 片足上挙運動



(b) しゃがみこみ運動

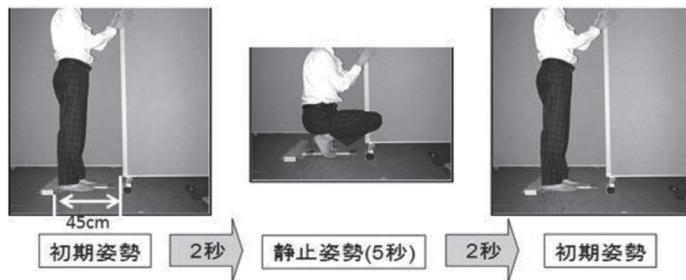


図3 スラックスの着心地を評価する試技

温度 23℃, 相対湿度 50%R.H. の環境下で 24 時間放置した試料を被験者にランダムに一对提示し着用させて, 5 部位 (膝部, 大腿部前面, 大腿部後面, 大腿部内側, 臀部) について一对比較法であるシェッフエの方法 (中屋の変法)¹³⁾ を用いて 5 種類の形容語「圧迫感」, 「窮屈感」, 「ツッパリ感」, 「動作拘束感」, 「着心地」を 7 段階尺度で評価させた。被験者は, 健常な 20 代男子大学生 5 名 (ウエストの平均値 73.9±3.5cm) である。

1. 2 人体と上衣 (スラックス) 間における衣服圧の測定

衣服を着用すると, ヒトは着衣中の各種動作によって体型が変化する。そのときに衣服が変形して, 布地のストレスが直接人体に負荷されるか, あるいはその垂直応力が人体表面を圧迫する。この拘束力は様々な形で衣服圧として人体に作用する。

上衣を着用した被験者が 2 種類 (水平内転運動, 前方挙上運動) の試技中に所定の角度で 6 秒間静止しているときの衣服圧をエアパックセンサー (直径 20mm) と接触圧測定機 (AMI3037-5S, エイエムアイ・テクノ社製) を用いて測定した。衣服圧の解析は, 運動静止後 2 秒～5 秒後の測定データについて行った。静止水平内転角は 90, 105, 120°, 測定部位は官能検査を行った同部位 (上腕部, 脇下前部, 脇下後部, 肩甲部 (図 4)) で

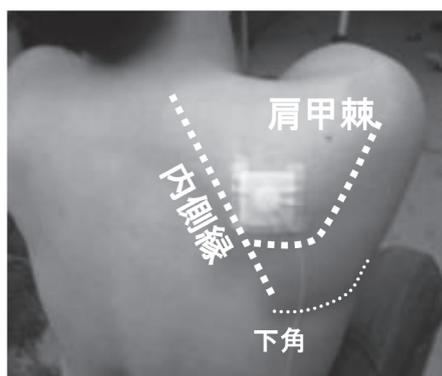


図4 肩甲部におけるエアパックセンサー貼り付け

ある。測定回数はそれぞれ 5 回, 被験者は「着心地」官能検査を行った同一の被験者 10 名である。

スラックスの「着心地」官能検査を行った同部位 (膝部 (膝蓋骨中点), 大腿部前面 4 分の 1 点 (膝蓋骨上端と大腿付根を通る大腿部中央垂線を 4 等分し膝部に最も近い箇所), 大腿部前面中点 (膝蓋骨上端と大腿付根を通る大腿部中央垂線を 4 等分した中点), 臀部) にエアパックセンサー (直径 20mm) を貼付した後, ワイシャツ, スラックス, ベルトを着用した被験者は 2 種類の試技 (片足上挙, シャガみこみ) をそれぞれ行った。

被験者は 2 秒間で試技を行ったのち, 9 秒間片足上挙, あるいはシャガみこみ姿勢を保持した。衣服圧の解析は, 衣服圧値が安定した静止姿勢 7 秒～10 秒後の衣服圧の平均値を測定値とした。測定回数はそれぞれ 5 回である。

被験者は官能検査を行った同一被験者 5 名, 実験環境は温度 23℃, 湿度 50% RH である。

1. 3 上衣の試技時における筋活動量測定

被験者が上衣を着用することによって評価動作時に上衣からの身体的拘束状態が強いと, それだけ活発な筋活動が必要となる。そこで, 試技中における衣服からの拘束状態を筋電図で定量的に計測・評価した。

被験筋は 2 種類の試技 (水平内転運動, 前方挙上運動) 時にそれぞれ上腕骨や肩甲骨を動かす 5 種類の筋 (上腕骨: 三角筋前部・三角筋中部・大胸筋, 肩甲骨: 僧帽筋・前鋸筋) とした。

これらの被験筋に表面電極を貼り付けたのち, 被験者にワイシャツと上衣を着装させて各試技時の表面筋電図を生体アンプ (MP100CE, BIOPAC Systems) を用いて測定した。このようにして, 各被験筋について測定した表面筋電図より筋活動量を算出した。

筋電図解析方法は, 試技開始から終了まで測定した筋活動量を整流化したのち積分し, 評価試技

1回毎に単位時間あたりの筋活動量 (E_1) を求めた。また、ワイシャツだけを着用して両運動をそれぞれ行い、評価試技1回毎に単位時間あたりの筋活動量 (E_0) を求めた。さらに、上衣とワイシャツ、あるいはワイシャツのみを着用時において、動作1回毎に求めたそれぞれ E_1 , E_0 5回分の平均値 $M(E_1)$, $M(E_0)$ を求めた。そして、 $M(E_1) / M(E_0)$ より正規化筋活動量を求め、基準試料1の正規化筋活動量を1.0として、他の4試料について正規化筋活動量比を求めた。

被験者は上衣について「着心地」官能検査を行った同一被験者5名、動作回数はそれぞれ5回である。

2. 実験結果及び考察

2.1 上衣の「着心地」計測・評価結果

一巡三角形の数より被験者10名の判定能力を検定した結果、全被験者に判定能力があることがわかった。

図5及び図6は、それぞれ水平内転角 105° 及び 120° 時の肩甲部における5種類の形容語「圧迫感」、「窮屈感」、「ツッパリ感」、「動作拘束感」、「着心地」について評価した結果より求めた各試料の平均嗜好度を示す。各平均嗜好度が大きいと「圧迫感、窮屈感、ツッパリ感、動作拘束感」がなく、「着心地」が良いことを示している。

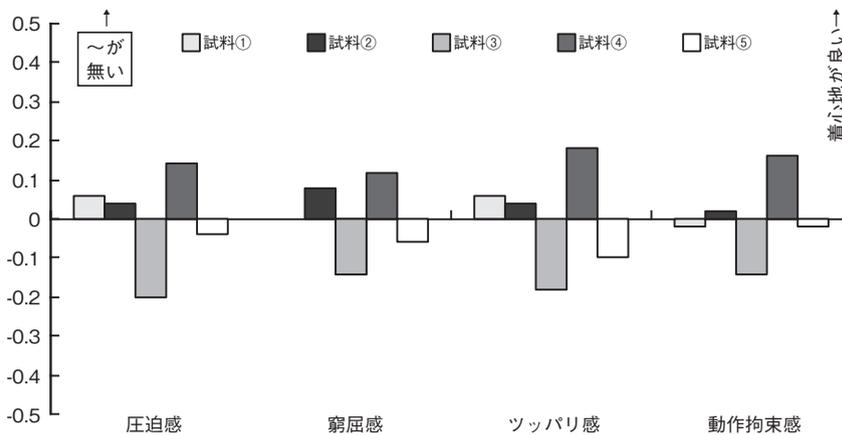


図5 水平内転角 105° 時の肩甲部における各形容語の平均嗜好度

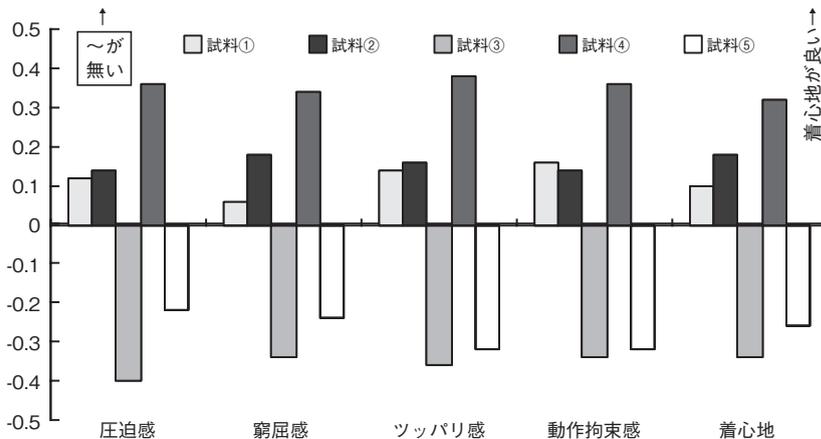


図6 水平内転角 120° 時の肩甲部における各形容語の平均嗜好度

図5及び図6より、水平内転角105°より120°のときの方が各試料の平均嗜好度間の差が大きくなっていることがわかる。そのため、着心地を評価する際の適切な内転角は120°とした。

図6より、肩甲部において基準試料1より肩周り寸法が小さい試料2と4は圧迫感、窮屈感、ツッパリ感、動作拘束感がなく着心地が良い、特に試料2より脇巾が大きい試料4は着心地がよいと評価された。

これは、試料2と4が基準試料1と比較して、肩周り寸法が小さいので袖が細くなって、水平内転運動が行いやすくなり着心地が良いと評価されたと考えられる。

一方、肩周り寸法が大きい試料3と5は圧迫感、窮屈感、ツッパリ感、動作拘束感があり着心地が悪いと評価された。

図7は、内転角120°時の試料3の肩甲部における変形状態を示す。図7より、上肢を内転させると肩甲部付近の生地ゆとりが無くなって

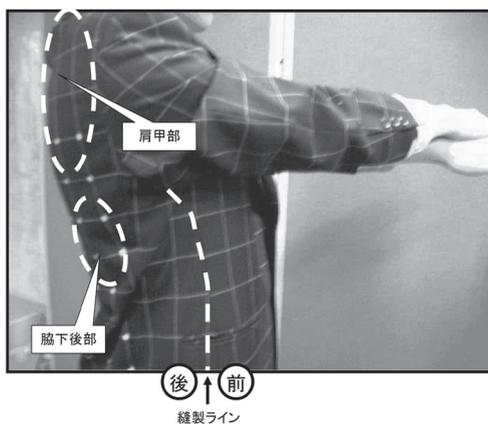


図7 肩甲部における上衣の変形

ツッパリが発生している。この生地ツッパリによって人体を圧迫する拘束力が生じて、被験者の形容語評価に影響を与えたと考えられる。

同様に、前方挙上運動(挙上角90°, 180°)において肩周り寸法が小さい試料2と4は他の3試料と比較して、上腕部・脇下前部・脇下後部・

肩甲部で圧迫感、窮屈感、ツッパリ感、動作拘束感がなく、着心地が良いと評価された。

さらに、5種類の上衣のシルエットについて10名の被験者が外観評価を行った結果、試料間に差がみられないと評価した。

次に、図8は水平内転運動開始(0°)から内転角120°まで測定した各被験者の肩甲部における衣服圧の経時変化を示す。

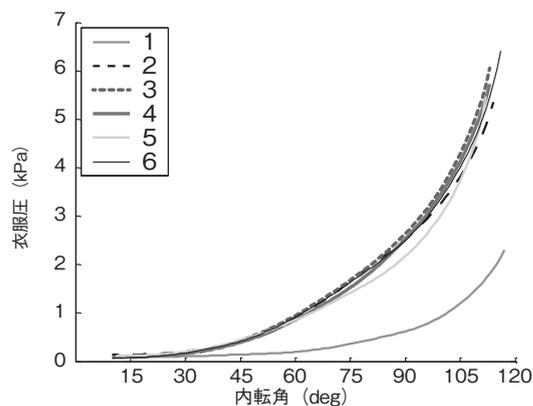


図8 肩甲部における衣服圧測定結果 (水平内転角0~120°)

図8に示すように、内転角が約60°のときから衣服圧が大きくなっていることがわかる。衣服圧測定結果より、肩周り寸法が大きい試料3と5の衣服圧は上肢の内転角が大きくなるにつれて他の試料の衣服圧と比較して大きくなる傾向がみられた。

水平内転角120°時の上腕部、脇下前部、脇下後部、肩甲部における基準試料1の衣服圧に対する各試料2~5の相対衣服圧を表1に示す。

表1に示す上腕部、脇下前部、脇下後部、肩甲部における相対衣服圧と、各試料について評価された形容語「圧迫感」、「窮屈感」、「ツッパリ感」、「動作拘束感」、「着心地」の平均嗜好度との

表1 相対衣服圧

	上腕部	脇下前部	脇下後部	肩甲部
試料1	1.00	1.00	1.00	1.00
試料2	1.00	1.06	0.88	0.98
試料3	1.12	1.09	1.00	1.04
試料4	1.01	1.10	0.83	0.97
試料5	1.11	1.10	0.96	1.06

相関関係を検討した。その結果、肩甲部で評価された「圧迫感」、「窮屈感」、「ツッパリ感」、「動作拘束感」、「着心地」は肩甲部の相対衣服圧と有意な負の相関がみられた。すなわち、肩甲部の衣服圧が大きくなると、動作拘束性が高くなり、着心地が悪くなるといえる。

また、前方挙上運動時においても、「着心地」が良いと評価された脇下前部と後部において、試料2と4の相対衣服圧は他の3試料と比較して衣服圧が低くなる傾向がみられた。

水平内転運動時において三角筋前部と大胸筋は主働筋となり、三角筋中部と僧帽筋は補助筋となる。

そこで、水平内転角 120° 時に上腕部、脇下前部、脇下後部、肩甲部において評価した形容語「圧迫感」、「窮屈感」、「ツッパリ感」、「動作拘束感」、「着心地」と三角筋前部、三角筋中部、大胸筋、僧帽筋及び前鋸筋の正規化筋活動量比との相関関係を検討した。表2は、大胸筋における正規化筋活動量比を示す。

その結果、各部位で評価された「圧迫感」、「窮屈感」、「ツッパリ感」、「動作拘束感」、「着心地」

表2 相対筋活動量比

	試料1	試料2	試料3	試料4	試料5
衣服圧比	1.00	0.96	1.07	0.99	1.20

は大胸筋の正規化筋活動量比と負の相関がみられた。すなわち、大胸筋の筋活動量が大きくなると、動作拘束性が高くなり着心地が悪くなったと考えられる。

同様に、前方挙上運動時においても肩周り寸法が小さい試料2と4は他の3試料と比較して、三角筋前部および大胸筋の正規化筋活動量比が小さくなることがわかった。この結果は、試料2と4が他の3試料より圧迫感、窮屈感、ツッパリ感、動作拘束感がなく、着心地が良いと評価されたことと一致している。

以上の結果より、両運動に重要な三角筋前部と大胸筋に注目した結果、肩周り寸法が小さい試料2と4は運動時に筋活動量が小さくなり、着用していても動きやすく着心地が良いことがわかった。

2.2 スラックスの「着心地」計測・評価結果

一巡三角形の数より被験者の判定能力を検定した結果、全被験者に判定能力があることがわかった。全被験者が3種類のスラックスについて、しゃがみこみ運動によって各形容語を評価した結果より求めた平均嗜好度を図9に示す。図9において、平均嗜好度の値がプラスのとき、被験者が「圧迫感がない」、「窮屈感がない」、「ツッパリ感がない」、

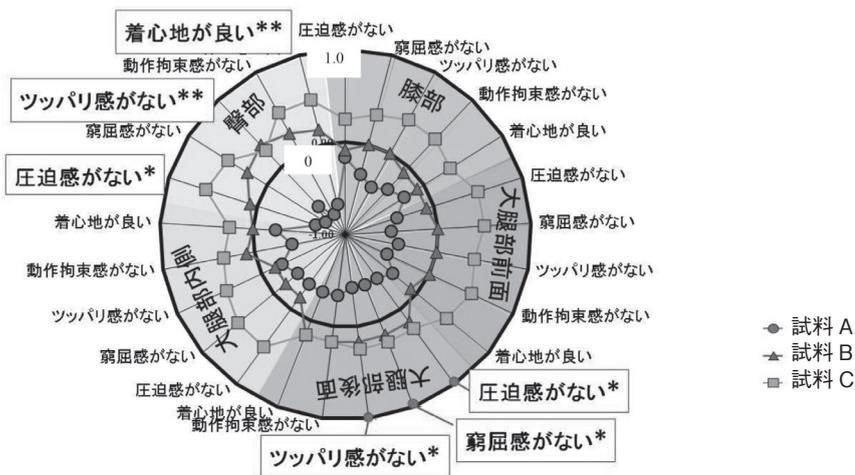


図9 シャがみこみ運動時の平均嗜好度結果

「動作拘束感がない」、「着心地が良い」と評価したことを示している。

片足上挙運動では、膝部以外の全部位においてクセ取り加工して股上丈が長い試料Cは圧迫感、窮屈感、ツッパリ感、動作拘束感がなく、着心地が良いと評価される傾向がみられた。これは、股上丈を大きくすることで、臀部にゆとりが生じて圧迫感などを感じなかったからと考えられる。

図9より、しゃがみこみ運動では臀部において試料Aは圧迫感、ツッパリ感などがあり、着心地が悪いと評価されたが、クセ取り加工を行った試料BやCは「窮屈感、ツッパリ感、動作拘束感」が向上する傾向がみられた。これは、クセ取り加工を行うことで、スラックスの臀部が人体の臀部形状に沿って、スラックス生地が人体に不自然に当たることがないからと考えられる。

また、膝部の窮屈感のように、片足上挙では試料差がみられなかった部位でも、しゃがみこみ動作では試料差がみられた。これは、膝関節の屈曲角度の大きいしゃがみこみ動作の方が試料差を判断しやすいからである。

さらに、被験者が着装している3種類のスラックスのシルエット写真（後面、側面）について20代から50代の女性21名が外観評価を行った結果、全員が試料間にシルエットに差がみられないと評価した。

しゃがみこみ動作時について、各試料の膝部・大腿部前部（4分の1点）・大腿部前部（中点）・臀部における各被験者の衣服圧測定結果を図10に示す。

図10より、しゃがみこみ動作において、大腿部前部（中点）以外の3部位で、衣服圧値の大きさが、（試料A > 試料B > 試料C）であった。この結果は、試料Cが圧迫感、窮屈感、ツッパリ感、動作拘束感がなく、着心地が良いと評価されたことと一致している。片足上挙動作の結果と比較して、膝関節の屈曲角度が大きいしゃがみこみ動作

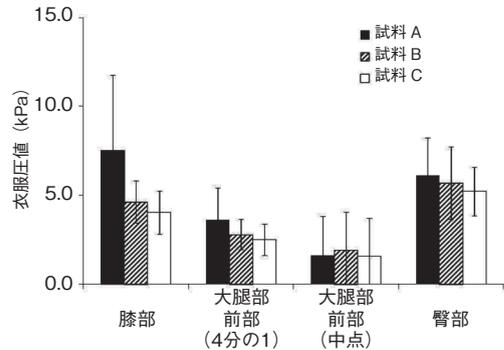


図10 しゃがみこみ動作時の衣服圧測定結果（平均）

の方が膝部で1.2～1.4倍、大腿部前部で1.5～1.7倍、臀部で2.0～2.4倍衣服圧値が大きくなり、スラックスの臀部形状の違いが衣服圧値に生じたと考えられる。

3. まとめ

本研究では、肩周り寸法を変化させた上衣、あるいは臀部形状が異なるスラックスをそれぞれ着用した被験者が提案した試技によって「着心地」評価を行うとともに、評価試技を行っているときの衣服圧や筋電図を測定した。そして、官能検査結果と衣服圧及び筋電図の測定結果との関係より「着心地」の計測・評価方法を提案し考察を行った。得られた知見を以下に示す。

(1) 上衣及びスラックスの「着心地」を適切に評価する4種類の試技を提案した。

(2) 肩周り寸法が異なる5種類のスーツ上衣の着心地について官能評価を行った。その結果、市販されている基準試料に対してアームホール、脇巾の寸法が小さい上衣は「圧迫感」、「窮屈感」、「ツッパリ感」、「動作拘束感」が低く、「着心地」が良いことがわかった。

(3) 衣服圧測定結果より、肩周り寸法（アームホール、脇巾）が小さい試料2と4は相対衣服圧が低く、肩周りが大きい試料3と5は相対衣服圧が高くなった。また、着心地官能量と肩甲部の相対衣服圧間には負の相関がみられた。

(4) 水平内転運動時の筋活動量測定結果より、肩周り寸法が小さい試料2と4は大胸筋の正規化筋活動量比が低くなる傾向がみられた、また、着心地官能量と大胸筋の正規化筋活動量比間には負の相関がみられた。前方挙上運動時の筋活動量測定結果より、試料2と4は三角筋前部と大胸筋の正規化筋活動量比が低くなり着心地が良いと評価された。このように、着心地が良い上衣を着用して試技を行っているときの筋活動量は小さくなり、着用していても動きやすいことがわかった。

(5) スラックスの「着心地」官能検査結果より、片足上挙及びしゃがみこみ運動時においてクセ取り加工して股上丈が長い試料Cは圧迫感、窮屈感、ツッパリ感、動作拘束感がなく着心地が良いと評価された。

(6) 衣服圧測定結果より、片足上挙運動時において着心地が悪いと評価された試料Aは膝部で衣服圧値が高いことがわかった。また、しゃがみこみ運動時において、大腿部前部（中点）以外の3部位で衣服圧値の大きさが（試料A > 試料B > 試料C）となり、着心地評価結果と一致していた。

(7) スーツ上衣やスラックスの「着心地」をそれぞれ官能評価する試技、「着心地」評価時において着衣から受ける衣服圧や試技によって生じる筋活動量を評価する方法を提案し、その有効性を確認した。

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、試料を提供いただきました(株)AOKIの柴田清弘氏に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 三吉満智子, 広川妙子, 繊維製品消費科学会誌, **36** (12), 758(1995)
- 2) 百田裕子, 間壁治子, 繊維製品消費科学会誌, **39**(7), 452(1998)
- 3) 西松豊典, 金井博幸, 西村俊則, 堀場利宏, 渡辺英俊, 繊維学会予稿集, **60**(2), 83(2005)
- 4) T.Nishimatsu, H.Kanai, M.Kamijoh, Y.Matsumoto, E.Toba, M.Okamura, K.Shibata, The 11th International Wool Research Conference, CD-ROM (2005)
- 5) T.Nishimatsu, H.Kanai, T.Nishimura, T.Horiba, H.Watanabe, *International Symposium on dyeing and Finishing of Textiles*, **181** (2005)
- 6) 井上智仁, 金井博幸, 西松豊典, 繊維学会予稿集 2006(感覚と計測に関するシンポジウム), **61** (2), 84(2006)
- 7) 金井博幸, 近藤聖司, 西松豊典, 松岡敏生, 柴田清弘, 人間工学会東海支部 2006年研究大会論文集, **40** (2006)
- 8) 金井博幸, 川崎順史, 西松豊典, 岡村政明, 柴田清弘, 第9回日本感性工学会大会予稿集, CD-ROM (2007)
- 9) H.Kanai, H.Tsuji, J.Kawasaki, T.Nishimatsu, M.Okamura, K.Shibata, *International Conference on Kansei Engineering and Emotion Research*, CD-ROM (2007)
- 10) H.Kanai, H.Tsuji, M.Kamijo, Y.Matsumoto, T.Nishimatsu, K.Shibata, *SENI GAKKAISHI*, **63**(6), 159(2007)
- 11) 青野圭祐, 金井博幸, 西松豊典, 柴田清弘, 繊維学会予稿集 2010, **65**, 22(2010)
- 12) 西松豊典, 金井博幸, 柴田清弘, 人間生活工学, **13**, 20(2012)
- 13) 西松豊典編著, 最新テキスタイル工学 I, **27**, 繊維社企画出版(2014)

褐色脂肪組織と運動習慣との関係および 褐色脂肪組織増加のための栄養介入

立命館大学 浜岡 隆文
(共同研究者) 同 黒澤 裕子
同 本間 俊行
同 二連木 晋輔
北海道大学 斉藤 昌之

Effect of Habitual Exercise and Nutritional Intervention on Brown Adipose Tissue

by

Takafumi Hamaoka, Yuko Kurosawa,
Toshiyuki Homma, Shinsuke Nirengi
Ritsumeikan University
Masayuki Saito
Hokkaido University

ABSTRACT

[Background] Brown adipose tissue (BAT) is a type of fat that serves as a site of non-shivering thermogenesis during cold exposure. It has been reported that higher BAT activity is related to lower whole body adiposity and accelerated glucose metabolism. Thus, BAT attracts much attention as a countermeasure to obesity and obesity-induced metabolic diseases. Muscle contractions modulates muscular environment and increases circulating myokines such as irisin and meteorin-like substance, resulting in the increase in BAT activity or browning of white adipose tissue. It is also reported that some kinds of functional food supplement increase cold-induced

thermogenesis (CIT) through upregulating uncoupling protein 1 (UCP1) in BAT deposits. [Purpose] The purpose of this study was to elucidate whether habitual exercise training was associated with increased BAT content and whether supplementation of grains of paradise (GP), a West African spice in the ginger family, increased BAT content and CIT. [Methods] We measured BAT parameters (tissue total-hemoglobin) at the supraclavicular region using near-infrared time-resolved spectroscopy in 7 collegiate healthy non-athletic individuals, 8 swimmers, and 8 triathletes. BAT content was higher in swimmers and triathletes than in healthy non-athletic individuals. The effects of GP intake (40mg/day for 4 weeks) were examined in a double-blind placebo-controlled design in 18 healthy individuals. We did not find any significant effects of GP intake on any parameters. However, individuals with the lower BAT content and blunted CIT response pre-intervention showed a greater increase in BAT content and CIT post-intervention. The results of this study indicate that habitual exercise training and adequate functional food intake, specifically for individuals with the lower BAT content and blunted CIT response, could increase BAT content and enhance thermogenesis, presumably reducing risk factors for developing life-style related diseases.

要 旨

褐色脂肪組織は、肥満および生活習慣病の予防に役立つとされている。そこで、継続的な運動習慣を有する者は褐色脂肪組織が多いか否か、脂肪燃焼作用のあるグレイノブパラダイス (GP) 投与が、褐色脂肪組織および寒冷時熱産生を増加させるか否かを評価することを目的とした。一般大学生、水泳選手およびトライアスロン選手において、鎖骨上窩における褐色脂肪組織量を近赤外時間分解分光装置を用いて測定した。その結果、継続的な運動習慣を有する者は、褐色脂肪組織量が多かった。一般大学生 18 名 (GP 群 9 名、プラセボ群 9 名) を対象として、ダブルブラインド法を用いて GP を 1 日 40mg、4 週間投与した結果、全体では褐色脂肪量に変化はなかった。しかし、介入前に褐色脂肪組織量が低く熱産生の低い者は、GP 摂取により褐色脂肪組織が増加した。以上から、継続的な運動習慣や適切な栄養機能性食

品の摂取が、褐色脂肪組織および熱産生を増加させることが示唆された。

緒 言

肥満および生活習慣病の予防には、安静時代謝を増加させることが有効である。最近、安静時非震え熱産生の増加をもたらす褐色脂肪組織がヒト成人にも存在することが、がん画像診断法の 1 つである ^{18}F -fluoro-deoxyglucose-positron emission tomography/computed tomography (FDG-PET/CT) 測定により再確認された¹⁾。褐色脂肪組織は、安静時や寒冷誘発性熱産生 (cold-induced thermogenesis, CIT)、食事誘発性熱産生を増強するばかりでなく、糖代謝やインスリン感受性を改善することも分かってきた²⁾。したがって、褐色脂肪組織での非震え熱産生は肥満対策のターゲットの一つと考えられている。

そこで、褐色脂肪組織を増やす方法があるかどうか注目されている。最近、ヒトにおいても 6

週間の寒冷負荷トレーニングにより低温感受性チャンネル (TRPA1) の活性化を介して褐色脂肪組織が増加するとの報告がある³⁾。しかし、寒冷負荷は不快感を伴い、被験者に対する負担が大きい。そこで同様のメカニズムを有し、交感神経系刺激を介したサプリメントの室温および寒冷時安静状態における代謝増加作用も検証されている^{3, 4)}。しかし、その代謝増加が褐色脂肪組織の増加によるものか否かは実証されていない。

一方、運動トレーニングはマイオカイン (irisin や meteorin 様物質) を増加させることにより、白色脂肪を褐色 (ベージュ) 化し、熱産生を増加させる可能性がある^{5, 6)}。しかし、日常的に運動を継続している対象者の褐色脂肪量に関するデータは乏しい。

上述のようにヒトの褐色脂肪組織に関する研究が少ない理由は、FDG-PET/CT による FDG 取込み測定がヒト褐色脂肪組織を評価するスタンダードな方法であるにもかかわらず、PET/CT を用いた褐色脂肪組織の検出方法が 2009 年ごろから始まったばかりであることが挙げられる。さらには、PET 装置が高価 (20 億円以上) であり、被曝を伴い、2 時間に及ぶ寒冷負荷が必要である、などの欠点はその利用を妨げてきた。

褐色脂肪組織は、白色脂肪組織に比較して、脂肪滴が多房化・小型化しており、毛細血管密度が高く、ミトコンドリアが豊富で熱産生が活発であり、ミオグロビンも含有する可能性が近年示唆されている⁷⁾。そこで、ヘモグロビンとミオグロビンの酸素化動態を非侵襲的に測定できる時間分解近赤外分光法 (NIRTRS) 装置を用いることとした⁸⁾。本装置を用いれば、組織の血液・酸素動態を定量化することが可能である。褐色脂肪組織の毛細血管密度が高いことはすなわち組織血液量 (T-Hb 濃度) の高さで、検証できると考えられる。

我々の最近の研究では、室温環境下において NIRTRS により測定した鎖骨上窩 (褐色脂肪組織

が存在する可能性のある部位) の T-Hb 濃度と褐色脂肪組織活性化の指標である寒冷負荷刺激後の FDG 取り込み量との間に良好な関連 ($r=0.73$, $p<0.01$) を認めた¹⁰⁾。つまり、鎖骨上窩の T-Hb 濃度を測定すれば、褐色脂肪組織濃度を評価できることを報告した。

以上のことから本研究では、継続的な運動習慣を有する者は褐色脂肪組織量が高いか否か、肥満軽減・予防効果のあるサプリメント投与が、CIT を増加させるか否か、さらには CIT の変化が褐色脂肪組織の変動と関連するか否かを評価することを目的とした。

1. 研究方法

1. 1 対象および介入

実験 1 において、日常的にトレーニング (週 5 回以上、1 回 2 時間以上) を行っている男性トライアスロン選手 8 名 (年齢 21 ± 2 歳, 身長 172.9 ± 5.4 cm, 体重 63.1 ± 5.4 kg, 体脂肪率 10.4 ± 2.4 %, 最高酸素摂取量 58.8 ± 3.6 mL/kg/min) と男性水泳選手 8 名 (年齢 20 ± 1 歳, 身長 172.0 ± 4.9 cm, 体重 67.4 ± 5.6 kg, 体脂肪率 13.1 ± 4.3 %, 最高酸素摂取量 55.0 ± 4.7 mL/kg/min), 並びに一般大学生 7 名 (年齢 23 ± 2 歳, 身長 171.3 ± 5.9 cm, 体重 67.8 ± 5.6 kg, 体脂肪率 12.0 ± 3.4 %, 最高酸素摂取量 49.7 ± 4.7 mL/kg/min) を対象とした (表 1)。立命館大学 BKC 生命倫理審査委員会の審査承認 (承認番号: BKC-IRB-2012-021-1) 後に、対象者に対して、口頭にて研究の目的、方法、内容、ならびに実験で起こりうる危険性を十分に説明し、研究に参加することの同意を得た。測定は褐色脂肪組織が活性化する冬季に行った。

実験 2 においては、運動習慣のない一般男性大学生 18 名に対してグレイノオブパラダイス (GP: 主成分は辛味成分 6-paradol) (カネボウ化粧品社製) を 40 mg/day, 4 週間投与する群 9 名

表 1 各群における身体特性

	一般大学生	トライアスロン選手	水泳選手
年齢 (歳)	22.9±1.9	21 ±1.9	20.1 ±0.8
身長 (cm)	171.3±5.9	172.9 ±5.4	172 ±4.9
体重 (kg)	67.8±5.6	63.1 ±5.4	67.4 ±5.6
体脂肪率 (%)	12.0±3.4	10.4 ±2.5*	13.1 ±4.3
最大酸素摂取量 (mL/kg/min)	49.7±4.7	58.8 ±3.6*	55.0 ±4.7*
T-Hb (μM)	86.6±19.5	111.0 ±24.9*	117.9 ±25.9*

(*: P<0.05; 一般大学生との比較)

(年齢 20±2 歳, 身長 169.0±4.9 cm, 体重 69.3±12.1 kg, 体脂肪率 17.1±8.6 %) とプラセボを投与するコントロール群 9 名 (年齢 20±1 歳, 身長 169.0±6.2 cm, 体重 69.1±8.7 kg, 体脂肪率 16.8±8.8 %) を設けた。

1. 2 実験 1 における測定

身長, 体重, 二重エネルギー X 線吸収測定法 (DXA: GE 横河メディカル社製) およびインピーダンス法 (Biospace 社製) を用いて体脂肪率, 体脂肪量, 除脂肪体重を測定した。NIRTRS 装置 (浜松ホトニクス社製) を用いて, 鎖骨上窩において褐色脂肪組織濃度の指標である T-Hb の測定を行った¹⁰⁾。

1. 3 実験 2 における測定

実験 1 の測定項目に加えて, 磁気共鳴画像装置 (GE ヘルスケア社製, 1.5 テスラー) を用いて腹腔内脂肪面積を介入前後で測定した。また, 介入前後において, 軽装 (T シャツ, 半ズボン) にて, 室温 19℃, 2 時間の寒冷負荷を行い³⁾, その際の酸素摂取量を呼気ガス分析装置 (AE-310s: ミナト医科学社製) を用いて測定した。寒冷安静時熱産生と室温安静時熱産生との差を寒冷誘発性熱産生 (CIT, kcal/day) と定義した。

1. 4 統計処理

データは, すべて平均値 ± 標準偏差で表した。2 群間の差の検定は t-test を用いた。GP 群およびプラセボ群の介入前後の両群間の各測定指標の比

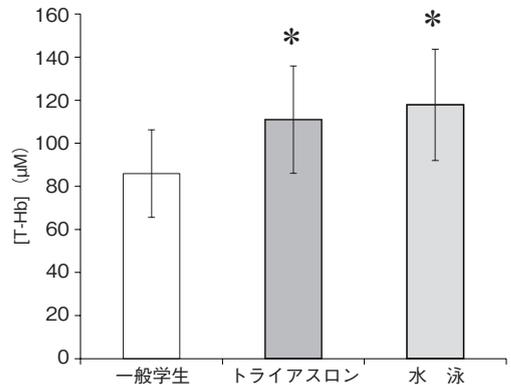


図 1 鎖骨上窩での組織総ヘモグロビン (T-Hb) 濃度の一般学生とトライアスロン選手および水泳選手との比較 (*: P<0.05; vs. 一般成人)

較は, 繰り返しのある二元配置分散分析法により検定した。各指標間の関係をピアソンの相関係数によって検討し, 単回帰により回帰直線を求めた。危険率は 5% 未満を有意水準とした。

2. 研究結果

2. 1 実験 1 の各群における T-Hb 値

一般大学生とトライアスロン選手および水泳選手の鎖骨上窩の T-Hb 値について図 1 に示す。トライアスロン選手と水泳選手の T-Hb 値は, 一般大学生に比べて有意に高い値を示した (p<0.05)。

2. 2 実験 2 の各群における介入前後の各指標の値

実験 2 において, 両群における介入前後の各指標の値を表 2 に示す。いずれの指標においても介入前後において有意差は認められなかった。

GP 群では, 介入後においてのみ, 寒冷安静時熱産生量が室温安静時熱産生量よりも有意に高い

表2 両群における介入前後の各指標の値

	GP 群		プラセボ群	
	介入前	介入後	介入前	介入後
年齢 (歳)	20.4±2.4	-	20.2±1.2	-
身長 (cm)	169.0±4.9	-	169.0±6.2	-
体重 (kg)	69.3±12.1	69.6±11.9	69.1±8.7	68.8±8.8
体脂肪率 (%)	17.1±8.6	17.4±8.6	16.8±8.8	16.5±8.6
内臓脂肪面積 (cm ²)	29.4±13.2	26.7±9.5	34.9±19.8	34.2±20.5
皮下脂肪面積 (cm ²)	112.2±70.3	116.8±75.5	109.8±75.0	111.8±69.4
安静時収縮期血圧 (mmHg)	123.6±10.5	121.1±6.7	124.3±7.4	122.9±15.7
安静時拡張期血圧 (mmHg)	69.3±6.7	67.8±6.4	67.1±7.1	68.3±11.0
安静時心拍数 (rpm)	65.1±9.3	65.1±8.8	63.0±11.0	61.7±11.4
室温安静時熱産生量 (kcal/day)	1602.4±285.8	1558.7±237.6	1705.1±192.7	1599.4±245.3
寒冷安静時熱産生量 (kcal/day)	1661.1±315.0	1704.6±215.9*	1818.6±144.8*	1762.2±258.2*
寒冷誘発性熱産生量 (kcal/day)	58.7±184.5	131.5±123.5	113.4±169.8	164.9±212.2
T-Hb (μM)	78.0±14.6	86.1±12.3	83.1±19.9	90.2±18.6

(*: P<0.05; 室温安静時熱産生量との比較)

値を示した(つまり有意な CIT 増加が確認された) (p<0.05). プラセボ群では, 介入前および介入後において, 寒冷安静時熱産生量が室温安静時熱産生量よりも有意に高かった(同じく, 有意な CIT 増加が確認された) (p<0.05).

2. 3 実験2の T-Hb と各指標との関連性

実験2において, T-Hb と各指標との関連をみると, 介入前において, T-Hb と CIT との間に有意な関連がみられた (n=18: r=0.64, p<0.05) (図2). 介入前後の変化量については, GP 投与群に

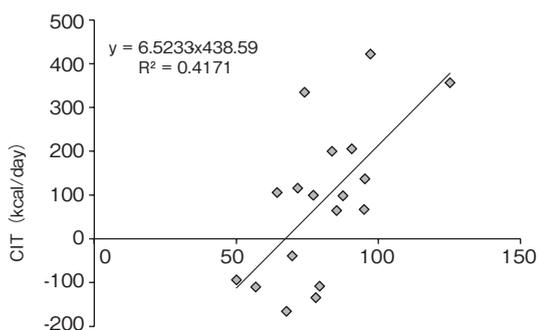


図2 介入前における鎖骨上窩での組織総ヘモグロビン量(T-Hb)と寒冷誘発性熱産生量(CIT)との有意な関連

においてのみ T-Hb 変化量と CIT 変化量との間に有意な傾向が認められた (n=9: r=0.64, p=0.05). 先行研究¹¹⁾にしたがい, T-Hb 値により褐色脂肪組織保有が顕著な被験者, 褐色脂肪組織 (+) (5

名) と褐色脂肪組織保有が明らかでない被験者, 褐色脂肪組織 (-) (4名)に分けると, 褐色脂肪組織 (+) 群と褐色脂肪組織 (-) 群の CIT 値の差において有意な傾向 (p=0.059) がみられた. また, T-Hb や CIT の介入前値が低いものほど, 介入後の T-Hb や CIT の増加量が大きく, 介入前値と増加量の間に有意な関連がみられた (T-Hb: r=0.67, p<0.05 および CIT: r=0.77, p<0.05).

2. 4 脂肪量の変化について

GP 投与群においてのみ, 介入前の内臓脂肪面積値と介入前後の内臓脂肪面積値の変化量との間に負の相関がみられた (r=0.73, p<0.05). 皮下脂肪についてはこの関係は認められなかった.

考 察

近年, いわゆる白色脂肪細胞の前駆細胞(脂肪前駆細胞)は, 環境要因などの刺激(長期の寒冷刺激や交感神経刺激)により, 誘導型褐色脂肪細胞に分化(ベージュ化)しうることが示唆されている¹²⁾. 一方, 成熟した白色脂肪細胞も褐色脂肪に変化する報告もあるが, 未だそのメカニズムは不明である¹³⁾.

運動刺激も環境要因の一つであり, 運動が誘導型褐色脂肪細胞の分化に与える影響についての研

究も進んでいる。最近、動物や細胞モデルを用いた検討ではあるが、筋活動に伴い上昇するマイオカインである *irisin* と誘導型褐色脂肪細胞との関係が注目されている。誘導型褐色脂肪細胞は、筋細胞膜に局在するタンパク質 *fibronectin type III domain containing 5* の一部である *irisin* に対しての感受性が非常に高いことが判明している⁵⁾。運動は、筋細胞内の *peroxisome proliferator-activated receptor gamma (PPAR γ)* 転写共役因子 (*PGC-1 α*) を活性化し、細胞膜タンパクである *FNDC5* を増加させる。*irisin* は *FNDC5* の一部であり、細胞外ドメインの切断により血中に放出され、白色脂肪細胞に結合する。その結果、*PGC-1 α* を介してミトコンドリアと熱産生蛋白質 (*UCP1*) の mRNA を増加させ、白色脂肪細胞を誘導型褐色脂肪細胞に変換するとされている。しかし、未だヒトにおいて、*irisin* が誘導型褐色脂肪細胞を増やすか否かは検証されていない。一方、筋力トレーニングに伴う筋肥大に関連する新規の筋内シグナルである *PGC-1 α* アイソゾームの *PGC-1 α 4¹⁴⁾* が刺激となり *meteorin* 様物質が増加することが報告されている⁶⁾。この *meteorin* 様物質が、誘導型褐色脂肪細胞に働きかけて熱産生を起こすことも分かってきた。つまり、運動刺激が安静時のミトコンドリア呼吸、エネルギー消費の増加につながる可能性が示唆されている。

本研究においては、運動習慣の異なる対象者では、鎖骨上窩における T-Hb に差があることが確認できた。ただし、一般大学生の T-Hb 値について、被験者数が限られていることから、一般化できるかどうかの問題となる。これまでの同年齢の男性の測定経験から、71 名における T-Hb の平均値 \pm 標準偏差は、 $88.6 \pm 32.0 \mu\text{M}$ であることから、今回用いた被験者は、同年齢の男性を代表する値と考えてよいと思われる。

運動習慣のある被験者の T-Hb が高い値を示したことは、長期的な運動による何らかの刺激

(*irisin* や *meteorin* 様物質が関連しているかもしれない) が誘導型褐色脂肪組織 (褐色脂肪) 量の違いをもたらすことを示唆するものである。動物モデルにおいては、1 日 90 分、週 5 回、9 週間のトレッドミル運動によって褐色脂肪組織量や *UCP1* の発現が低下するとの報告がある¹⁵⁾。一方、ふるえ熱産生を起こさないような条件にて 1 日 60 分、週 5 回、6 週間の水泳トレーニングを行うと褐色脂肪組織機能が亢進したとの報告がある¹⁶⁾。今回、トライアスロン選手も水泳選手も褐色脂肪組織値が一般大学生よりも高い結果となったが、動物モデルでの知見を参考にすると、おそらく水泳運動が有効に働いたものと考えられる。トライアスロン選手においては、冬期に屋外のランニングや自転車運動トレーニングも行っているため、寒冷刺激が褐色脂肪組織値の増加に有利に働いた可能性もある。

また、今回の結果には、筋力トレーニング的要素の影響も考えられる。水泳選手が週 2 回、1 回 1 時間程度の大筋群の筋力トレーニングを行っていたことや、トライアスロン選手の坂道での自転車トレーニングの際には、下肢に高強度の筋収縮が加わっている可能性もある。今回測定機会が得られなかったが、長距離走選手の褐色脂肪組織値の測定を行えば、どのタイプの運動が褐色脂肪組織増加に有効なのかのヒントが得られる可能性がある。もちろん、詳細な検討には、コントロールされたトレーニング実験を行うことが必須である。

今後は、水泳選手やトライアスロン選手の *irisin* や *meteorin* 様物質の血中濃度を調べて、褐色脂肪量の増加のメカニズムの一端を明らかにする必要がある。さらには、トレーニングに伴う *irisin* や *meteorin* 様物質の動態と T-Hb により評価した褐色脂肪組織量との関連についても検討する必要があると考えられる。

今回用いた GP（主成分は辛味成分 6-paradol）の効果については、動物モデルおよびヒトにおいて確認されている^{4, 17, 18}。動物モデルにおいては、GP 抽出物（10mg/kg, 30mg/kg）およびその主成分である 6-paradol（1～10mg/kg）の胃内投与により、肋間神経の交感神経活動の増加と褐色脂肪組織の熱産生が増加し、両者には量-反応関係があると報告されている¹⁷。さらには、交感神経切断により熱産生反応は消失することも確認されている。ヒトに対する急性効果を検証した研究では、褐色脂肪組織を多く有する被験者（褐色脂肪組織（+））においてのみ、GP 抽出物 40mg の投与により室温安静時熱産生が増加することを確認している⁴。さらには、ヒトに対する慢性効果を検証した研究では、4 週間の GP 抽出物 30mg 投与により、皮下脂肪および全身体脂肪量は変化しないが、内臓脂肪量の低下がみられ、室温安静時熱産生も増加することが確認されている¹⁸。

本研究では、4 週間の GP 抽出物 40 mg/day 投与では、褐色脂肪組織の指標と CIT に有意な影響はもたらさなかった。そこで、先行研究で報告されているように、褐色脂肪組織（+）と褐色脂肪組織（-）に分けて再解析を行った。その結果、介入前の褐色脂肪組織（+）群の CIT 値が褐色脂肪組織（-）群よりも高い傾向（ $p=0.059$ ）がみられた。このことは、褐色脂肪組織の保有量が高い被験者の方が寒冷負荷に対する応答性が高いことを示すものであり、先行研究の結果と一致する³。介入前において T-Hb 量と CIT との間に有意な関連がみられたこととあわせて考えると、NIRTRS により評価した T-Hb 量は、褐色脂肪組織量を評価する指標としての妥当性が高いことを示している。

また、T-Hb や CIT の介入前値が低いものほど、GP 投与後の T-Hb や CIT の増加量が有意に大きいことが確認された。このことは、介入前に褐色

脂肪量が低いものの方が、GP 投与による反応性が高いことを示すものである。したがって、もともと褐色脂肪量が低く、熱産生の低い被験者が GP を摂取すると効率よく誘発性褐色脂肪組織を増加させることができると考えられる。

プラセボ群においては、投与前と投与後において、CIT が増加したが、GP 群では、介入前においては、CIT が増加しなかった。この理由は不明であるが、GP 群の被験者の特性として、寒冷に対する反応性が悪かったことが考えられる。しかし、GP 投与後には、おそらく褐色脂肪組織量の増加に伴って寒冷に対する熱産生量が増加したものと考えられる。実際に、GP 投与に伴う T-Hb の増加量と CIT の増加量との間には有意水準には達しなかったものの相関傾向がみられた（ $n=9$: $r=0.64$, $p=0.05$ ）。今回の研究デザインとして、クロスオーバー法を採用しなかったことが、投与の効果を検出できなかった原因とも考えられる。

内臓脂肪面積および皮下脂肪面積については GP 投与の効果はみられなかった。しかし、GP 投与群においてのみ、介入前の内臓脂肪面積値と介入前後の内臓脂肪面積値の変化量との間に負の相関がみられた。一方、プラセボ群ではこの関係はみられなかったことから、先行研究¹⁸でも報告されているように、GP 投与が内臓脂肪の減少になんらかの影響を与える可能性を示唆するものである。皮下脂肪においては、この関連性はみられなかった。

NIRTRS 測定においては、皮下脂肪厚がその値に影響を与えることが知られている。しかし、今回用いた被験者の鎖骨上窩の皮下脂肪厚は薄く、一般大学生、トライアスロン選手、水泳選手において、それぞれ 0.21 cm, 0.14 cm, 0.18 cm であり一般大学生の方が、運動選手よりやや高い値であった。もしも、皮下脂肪厚で T-Hb を補正するならば、一般大学生と運動選手との差はさらに大きくなる傾向となる。したがって、今回の結果

の解釈には影響を与えないと考えられる。また、GP 投与前後の皮下脂肪厚の測定においても、GP 投与前 0.22cm、GP 投与後 0.22 cm であり、変化していなかった。したがって、今回の測定においては、皮下脂肪厚の差異の NIRTRS 測定に与える影響を考慮する必要はないと考えられる。

今回用いた NIRTRS は、褐色脂肪組織を非侵襲的に測定することが可能であり、褐色脂肪組織の増加をもたらす介入の網羅的検索もでき、肥満予防や治療対策の確立にも貢献できると考えられる。

結 論

一般大学生に比較して水泳選手およびトライアスロン選手では、鎖骨上窩における T-Hb が高いことが確認できた。このことは、長期的な運動による何らかの刺激が誘導型褐色脂肪組織量の増加をもたらすことを示唆する。

T-Hb や CIT の介入前値が低いものほど、GP 投与後の T-Hb や CIT の増加量が有意に大きいことが確認された。したがって、もともと褐色脂肪量が低く、熱産生の低い被験者が GP を摂取すると、誘発性褐色脂肪組織を増加させることができると考えられる。

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財団に深謝いたします。また、GP 抽出物を提供いただきました花王株式会社（旧株式会社カネボウ化粧品価値創成研究所）杉田淳氏に感謝いたします。

文 献

- 1) Saito M., Okamatsu-Ogura Y., Matsushita M., Watanabe K., Yoneshiro T., Nio-Kobayashi J., et al., High incidence of metabolically active brown adipose tissue in healthy adult humans: Effects of cold exposure and adiposity., *Diabetes*, 58: 1526-1531 (2009)
- 2) Lee P., Smith S., Linderman J., Courville A.B., Brychta R.J., Dieckmann W., et al., Temperature-acclimated brown adipose tissue modulates insulin sensitivity in humans., *Diabetes*, 63(11) : 3686-3698 (2014)
- 3) Yoneshiro T., Aita S., Matsushita M., Kayahara T., Kameya T., Kawai Y., et al., Recruited brown adipose tissue as an antiobesity agent in humans., *J. Clin. Invest.*, 123: 3404-3408 (2013)
- 4) Sugita J., Yoneshiro T., Hatano T., Aita S., Ikemoto T., Uchiwa H., et al., Grains of paradise (Aframomum melegueta) extract activates brown adipose tissue and increases whole-body energy expenditure in men., *Br. J. Nutr.*, 110(4) : 733-738 (2013)
- 5) Boström P., Wu J., Jedrychowski M.P., Korde A., Ye L., Lo J.C., et al., A PGC1- α -dependent myokine that drives brown-fat-like development of white fat and thermogenesis., *Nature*, 481 (7382) : 463-468 (2012)
- 6) Rao R.R., Long J.Z., White J.P., Svensson K.J., Lou J., Lokurkar I., et al., Meteorin-like is a hormone that regulates immune-adipose interactions to increase beige fat thermogenesis., *Cell*, (6) : 1279-1291 (2014)
- 7) Watanabe M., Yamamoto T., Kakuhata R., Okada N., Kajimoto K., Yamazaki N., et al., Synchronized changes in transcript levels of genes activating cold exposure-induced thermogenesis in brown adipose tissue of experimental animals., *Biochim. Biophys. Acta*, 1777 (1) : 104-112 (2008)
- 8) Hamaoka T., Katsumura T., Murase N., Nishio S., Osada T., Sako T., et al., Quantification of ischemic muscle deoxygenation by near infrared time-resolved spectroscopy., *J. Biomed. Opt.*, 5(1) : 102-105 (2000)
- 9) Beauvoit B., Chance B., Time-resolved spectroscopy of mitochondria, cells, and tissues under normal and pathological conditions., *Mol. Cell. Biochem.*, 184: 445-455 (1998)
- 10) Nirengi S., Yoneshiro T., Saiki T., Aita S., Matsushita M., Sugie H., et al., Human brown adipose tissue assessed by simple noninvasive near-infrared time-resolved spectroscopy., *Obesity* (in press)

- 11) Nirengi S., Yoneshiro T., Saiki T., Aita S., Matsushita M., Sugie H., et al., Evaluation of brown adipose tissue using near-infrared time-resolved spectroscopy., *Adv. Exp. Med. Biol.*, (in press)
- 12) Lee Y.H., Petkova A.P., Mottillo E.P., Granneman J.G., In vivo identification of bipotential adipocyte progenitors recruited by β 3-adrenoceptor activation and high-fat feeding., *Cell. Metab.*, **15**(4) : 480-491 (2012)
- 13) Barbatelli G., Murano I., Madsen L., Hao Q., Jimenez M., Kristiansen K., et al., The emergence of cold-induced brown adipocytes in mouse white fat depots is determined predominantly by white to brown adipocyte transdifferentiation., *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, **298**(6) : E1244-1253(2010)
- 14) Ruas J.L., White J.P., Rao R.R., Kleiner S., Brannan K.T., Harrison B.C., et al., A PGC-1 α isoform induced by resistance training regulates skeletal muscle hypertrophy., *cell.*, **151**(6) : 1319-31(2012)
- 15) Yamashita H., Yamamoto M., Sato Y., Izawa T., Komabayashi T., Saito D., et al., Effect of running training on uncoupling protein mRNA expression in rat brown adipose tissue., *Int. J. Biometeorol.*, **37**(1) : 61-64(1993)
- 16) Oh-ishi S., Kizaki T., Toshinai K., Haga S., Fukuda K., Nagata N., et al., Swimming training improves brown-adipose-tissue activity in young and old mice., *Mech. Ageing. Dev.*, **89**(2) :67-78(1996)
- 17) Iwami M., Mahmoud F.A., Shiina T., Hirayama H., Shima T., Sugita J., Extract of grains of paradise and its active principle 6-paradol trigger thermogenesis of brown adipose tissue in rats., *Auton. Neurosci.*, **161**(1-2) : 63-67(2011)
- 18) Sugita J., Yoneshiro T., Sugishima Y., Ikemoto T., Uchiwa H., Suzuki I., et al., Daily ingestion of grains of paradise (*Aframomum melegueta*) extract increases whole-body energy expenditure and decreases visceral fat in humans., *J. Nutr. Sci. Vitaminol.*, (Tokyo), **60**(1) : 22-27(2014)

骨格筋に対する圧迫と 運動パフォーマンスの関連性に関する統合的研究

鹿屋体育大学 吉 武 康 栄
(共同研究者) 同 宮 本 直 和
同 金 久 博 昭

The Effect of Compression to the Calf Muscle on Muscle Performance

by

Yasuhide Yoshitake, Naokazu Miyamoto, Hiroaki Kanehisa
Laboratory of Muscle Performance
Department of Sports and Life Sciences,
National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

ABSTRACT

The purpose of this study is to examine the effect of compression to the calf muscle on 1) plantar flexion force evoked by electrical stimulations involved single or repetitive stimulations (20 Hz), 2) jump performance, and 3) muscle fatigue during intermittent isometric contractions at a submaximal load. The results showed that 1) twitch force decreased by compression whereas plantar flexion force during electrical stimulations at 20 Hz with compression at 150mmHg was significantly higher compared with that without compression, 2) the jump height and rebound jump index during rebound jump with compression tended to be higher compared with that without compression, and 3) the slope of electromyographic activities with contraction repetitions at constant load with compression was higher compared with that without compression. These results indicate that ballistic muscle contractions would be improved by compression at relatively higher intensity.

要 旨

本研究においては、下腿の圧迫が筋パフォーマンスに及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、圧迫の有無が1) 電気刺激誘発の筋収縮力、2) ジャンプパフォーマンス、3) 筋疲労に及ぼす影響を明らかにすることを試みた。その結果、1) 単発刺激時の単収縮力は減少し、20Hzの連続刺激時の力は150mmHgでの圧迫時に増加、2) リバウンドジャンプパフォーマンスは、150mmHgでの圧迫時に向上、3) 150mmHgでの圧迫時には筋疲労は促進される、ことが明らかとなった。

以上より、下腿に対し比較的高強度で圧迫することは、筋疲労の軽減が見込めないため持久力の向上は期待できないが、競技時間が短く瞬発的な筋収縮が主の競技に対してポジティブな効果が期待できる可能性があると言える。

緒 言

トップアスリートに限らず一般スポーツ愛好家においても、パフォーマンス向上のために日々のトレーニングを行うことはもちろんであるが、自身もつポテンシャルを一過性に最大限に引き出すことを渴望してやまない。それを現実にする一つの手法として、スポーツメーカーは筋に対し軽度の圧迫する衣類の開発に取り組み、パフォーマンスの向上を謳った商品販売を展開している。消費者側も、圧迫衣類に対してパフォーマンス向上や疲労軽減などの効果を期待しており¹⁾、結果、市場規模は、2013年度には341億円まで成長するに至っている²⁾。

一方で、肝心のスポーツパフォーマンス向上や疲労軽減に関する科学的エビデンスは、近年研究成果が数多く発表されている。筋圧迫が筋発揮パフォーマンスにポジティブ効果をもたらすと報告された項目としては、疾走効率³⁾、筋の酸素動態⁴⁾、電気刺激誘発張力⁵⁾、筋疲労⁶⁾などが挙げ

られる。一方で、スポーツパフォーマンス向上に直接的に関与する体力項目として、「筋疲労」および「瞬発力」の向上が主であると考えられる。筋疲労やその規定因子である血流などのエネルギー代謝については、前述したように研究が進められているが^{4,6)}、瞬時的な力発揮など瞬発力の検証はほとんど行われていない。

一方、圧迫衣類を装着して運動テストを受けた対象者の多くは、圧迫衣類が何らかのパフォーマンス向上に役に立つと信じるようである^{1,7)}。したがって、このような心理が実際の運動パフォーマンスに影響を及ぼす可能性が高い。しかしながら、筋圧迫が運動パフォーマンスに及ぼす影響について検証する際、随意的な動作(筋収縮)によってそれを試みる場合は、実験設定上、どうしてもプラセボ効果の影響を除去できない。そこで、まず、圧迫衣類が筋パフォーマンスに及ぼす影響を検証する場合は、心理的影響(大脳興奮性など)を除去可能である筋や神経を電気刺激することによって外因的に筋収縮を誘発する手法が適していると考えられる。

以上のように、圧迫衣類のパフォーマンスへの影響を検証するためには、複数の因子があるという背景を考慮し、本研究では、骨格筋に対する圧迫と先に述べた運動パフォーマンスの関係について統合的研究を行うことを目的にした。その中で、本稿では、

- 1) 下肢筋における圧迫強度と電気刺激誘発筋力との関係
- 2) 下肢筋における圧迫とジャンプパフォーマンスの関係
- 3) 下肢筋における圧迫と筋疲労との関係について検討した結果を報告する。

1. 研究方法

1. 1 研究 1) 下肢筋における圧迫強度と電気刺激誘発筋力との関係

1. 1. 1 方法

前述のように、本研究では、大脳興奮レベルの要因を除去するために、電気刺激誘発筋収縮を採用し、圧迫による末梢（筋）レベルのみの効果を検証した。対象者は、健康な男子大学生 6 名であり、年齢は 22.1 ± 0.4 歳、身長は 168.3 ± 0.4 cm、体重は 63.1 ± 1.3 kg (平均値 \pm 標準偏差) であった。実験は、対象者に実験目的・趣旨を説明し、同意を得た上でを行った。

対象は右足下腿とし、等尺性の足関節底屈を課題動作とした。対象者は体幹部をベルトで固縛した腹臥位となり、右足をロードセル (LUR-A-1KSNA1) の取り付けられたフットプレートに関節角度 90 度で固定した。

電気刺激誘発筋収縮は、筋に圧迫をかけない (非圧迫条件) 場合と、機械的圧迫 (圧迫条件) をかける条件で行った。複数回測定を行うにあたって、ウォーミングアップ効果や活動後増強による一時的な力発揮の増強の影響⁸⁾ をできるだけ除去するため、最大随意筋力 (Maximum Voluntary Contraction : MVC) の 80% の収縮を数秒行わせた後、つまり、外因的に一律の活動後増強が発生している状況にしてから、電気刺激を実施した。

刺激装置 (SEN-3301, 日本光電社製) からアソレータ (DS7A, Digitimer 社製) を介して、膝窩部脛骨神経刺激を行い、筋収縮を誘発した。刺激は、パルス幅 0.2ms の矩形波とし、刺激強度は耐痛閾値下および単収縮力が最大となる電圧上とした。刺激方法は、単収縮刺激 (刺激が 1 回だけ) と 20Hz 刺激 (1 秒間に 20 回の刺激) の 2 条件とした。刺激は、単収縮刺激時は 10 回、20Hz 刺激時では 1 秒間行った。圧力は皮膚表面上に貼り付けた衣服圧センサで測定し、安静時において

50, 100, 150, 200mmHg になるよう設定した。

解析は、単収縮刺激時は、10 個の単収縮力の平均値を、20Hz 刺激時は、刺激 1 秒間のうち後半の 10 回分 (11-20 回) の刺激の力平均値を算出し、圧迫条件とコントロール条件で比較した。

単収縮力および 20Hz 刺激時の力は、圧迫強度を要因とする繰り返しのある一元配置の分散分析を行った。有意であった際は、Dunnett 法を用い、非圧迫条件との比較を行った。なお、有意水準は 5% とした。結果は、文中は平均 \pm 標準偏差、図中は平均 \pm 標準誤差で表記した。

1. 1. 2 結果

単収縮力は、非圧迫条件と比較して、平均値はすべての圧迫条件で下回り、100, 150, 200mmHg 時に有意に低かった ($P < 0.05$)。一方、20Hz 刺激時の力は、150mmHg において非圧迫条件よりも有意に高かった (図 1, $P < 0.05$)。その他の圧迫強度においては、非圧迫条件と比較して差がなかった ($P > 0.05$, 図 1)。

1. 2 研究 2) 下肢筋における圧迫とジャンプパフォーマンスの関係

1. 2. 1 方法

研究 1 の結果を基に、瞬時に爆発的な力発揮を行う場合は、150mmHg での圧迫時にパフォーマンスを向上させる可能性が示唆される。そこで、

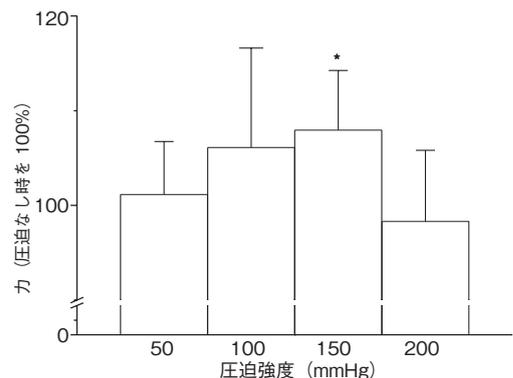


図 1 圧迫強度と 20Hz 連続刺激時の力の関係。データは圧迫なし時を 100% に換算している。
* $P < 0.05$.

研究2では、ジャンプパフォーマンス時において下肢圧迫がパフォーマンスを向上させるか検証した。

対象者は、健常若齢男性9名であり、年齢 20.9 ± 0.5 歳、身長 172.4 ± 6.3 cm、体重 68.4 ± 8.2 kg (平均値 \pm 標準偏差) であった。実験は、対象者に実験目的・趣旨を説明し、同意を得た上で行った。対象者は、フォースプレート (9287C, キスラー社製) 上にて、連続して8回のリバウンドジャンプ (RJ, 膝関節の屈曲伸展動作を伴わず、できるだけ短い接地時間での連続跳躍), および3回のカウンタームーブメントジャンプ (CMJ, 切り返しがある垂直跳び) を最大努力にて行った。ジャンプ時には、腕の振込み動作の影響を除くために、手を腰に当てた姿勢で行わせた。なお、対象者には、ウォーミングアップとして測定前にジョギングおよびストレッチを行わせ、本試技前に練習跳躍を2回ずつ行わせた。また、リバウンドジャンプにおいては、膝の屈曲伸展動作は伴わず、できる限り接地時間を短く、かつ、できる限り高く跳躍するように指示をして行わせた。各跳躍運動は、十分な休息を挟みながら圧迫時と非圧迫時でそれぞれ2回ずつ行った。フォースプレートから得られた鉛直方向の力は、16ビットのA/D変換器 (Power 1401, CED社製) を用いてサンプリング

周波数 1000 Hz でデジタル信号に変換後、パーソナルコンピュータに取り込んだ。

RJ および CMJ の跳躍高は滞空時間より算出した。リバウンドジャンプ指数は、跳躍高 (m) を接地時間 (秒) で除して算出した。RJ は、それぞれの条件時に2回ずつ試技を行い、各条件時の跳躍の中からリバウンドジャンプ指数の上位2試技の平均値を算出した。

跳躍高およびリバウンドジャンプ指数において、対応のあるt検定によって非圧迫条件と圧迫条件の比較を行った。有意水準は5%とした。結果は、文中は平均 \pm 標準偏差、図中は平均 \pm 標準誤差で表記した。

1. 2. 2 結果

CMJ の最大跳躍高は、圧迫の有無で差がなかった (圧迫なし 51.2 ± 6.1 cm, 圧迫あり 49.9 ± 6.1 cm, $P > 0.05$)。RJ の最大跳躍高は、圧迫時において非圧迫時よりも9名中7名が増加したが (平均 4.2%), 有意差は認められなかった (図2, $P = 0.075$)。リバウンドジャンプ指数では、圧迫時において非圧迫時よりも9名中7名が増加したが (平均 6.4%), 有意差は認められなかった (図2, $P = 0.094$)。圧迫時にジャンプパフォーマンスの改善が認められなかったのは、両指標において同一

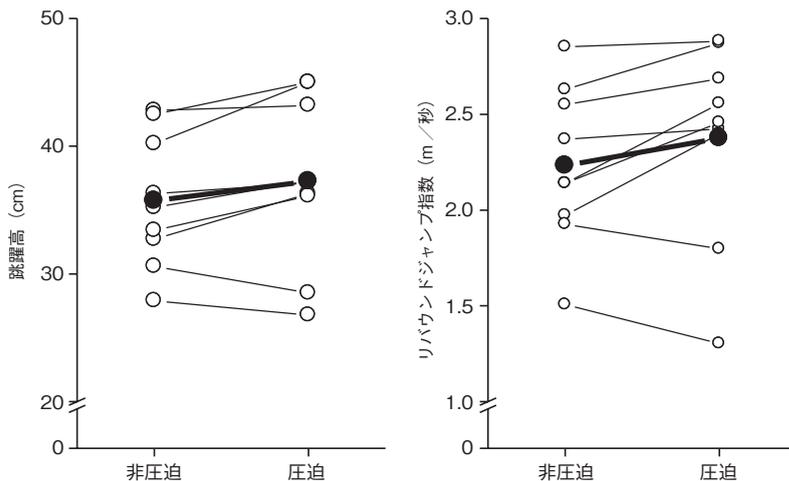


図2 圧迫の有無とリバウンドジャンプのパフォーマンスとの関係。
左：跳躍高, 右：リバウンドジャンプ指数。黒丸は平均値。

人物の2名であった。その2名のリバウンドジャンプ指数は、2.0 m/秒以下であり、元々のジャンプ能力が比較的低い対象者であった。なお、この2名を除いた場合、最大跳躍高およびリバウンドジャンプ指数は、圧迫時の方が有意に非圧迫時よりも高かった ($P < 0.05$)。

1. 3 下肢筋における圧迫と筋疲労との関係

1. 3. 1 方法

上記実験に引き続いて、150mmHgでの圧迫が、筋疲労に及ぼす影響について検証した。筋疲労は、一定強度の等尺性筋収縮を間欠的に行い、その際取得した筋電図の振幅値より評価した。

対象者は、健常若齢男性5名であり、年齢は 23.5 ± 0.6 歳、身長は 169.8 ± 0.7 cm、体重は 64.6 ± 1.9 kg (平均値 \pm 標準偏差) であった。実験は、対象者に実験目的・趣旨を説明し、同意を得た上で行った。対象は右足下腿とし、等尺性の足関節底屈を課題動作とした。対象者は、座位姿勢にて、右膝関節は伸展位、右足はロードセル (LUR-A-IKSNA1) の取り付けられたフットプレートに関節角度90度で固定した。課題動作は、等尺性の足関節底屈とし、5秒間の50% MVCの

力発揮、5秒間休息を20回繰り返す間欠的な筋収縮とした。対象者の前方のディスプレイに、目標値 (50% MVC) と実際に発揮している力をラインとして表示し、対象者は力発揮時には2つのラインができるだけ一致するよう努力した。

右足腓腹筋内側頭および外側頭、ヒラメ筋より、双極誘導にて表面筋電図 (EMG) 信号を導出した (5-1000Hz)。力 (< 100 Hz) はDCアンプ (DPM-700, 共和電業社製) によって増幅した。増幅された力および筋電図信号は、サンプリング周波数2kHzでデジタル信号に変換後、パーソナルコンピュータに取り込んだ。各力発揮5秒のうち、中央3秒間を解析区間とし、筋電図の平均振幅値 (RMS) を算出した。なお、筋疲労の度合いについては、先行研究に従って、RMSの増加率 (mV/秒) にて評価した。なお、対象者数が少ないため、本実験結果に関しては統計処理を行わなかった。

1. 3. 2 結果

時間経過とともに、RMSは増加したが、RMSの増加率は、腓腹筋内側頭および外側頭にて1名を除き圧迫条件時に大きかった (図3)。ヒラメ筋においては、個人差が大きく、一定の傾向が認

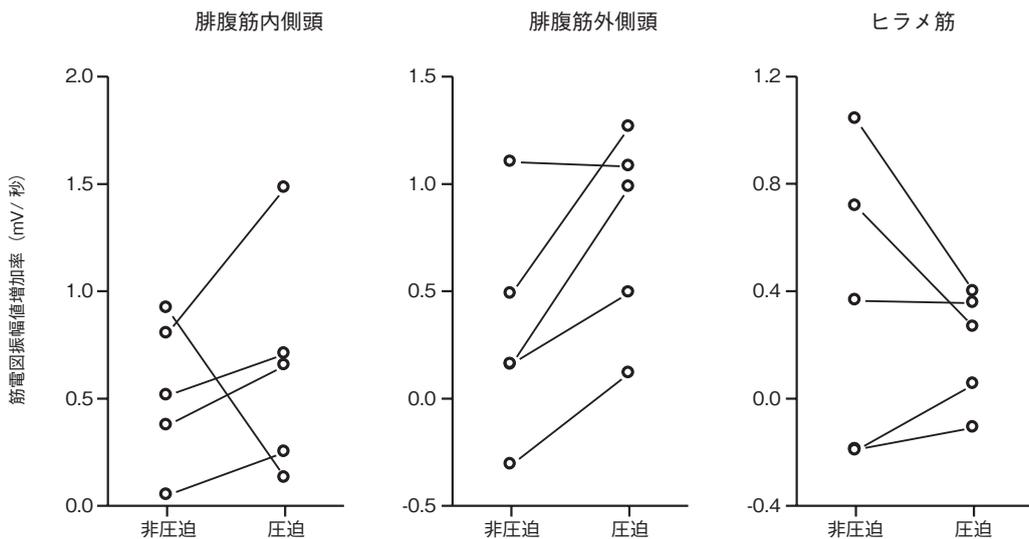


図3 圧迫の有無と間欠的な50% MVCの足関節底屈動作時の筋電図振幅値の増加率との関係
左：腓腹筋内側頭、中央：腓腹筋外側頭、右：ヒラメ筋

められなかった。

2. 考察

本研究では、

1) 20Hz の電気刺激誘発筋力は、下腿において 150mmHg の圧迫によって非圧迫よりも増大する

2) 下腿において 150mmHg での圧迫によって、非圧迫時よりもリバウンドジャンプのパフォーマンスは増加する

3) 下腿において 150mmHg の圧迫は、筋疲労を促進する

ことが明らかとなった。

2. 1 研究 1) 下肢筋における圧迫強度と電気刺激誘発筋力との関係

単収縮時（実際は 2 連発、3 連発刺激）においては、20mmHg 程度の低強度圧迫により、数%ではあるが有意に発揮筋力が増大することが報告されている⁵⁾。一方、先行研究の結果を統合すると、おおよそ 50mmHg よりも強い圧迫時には、単収縮力が低下するようである^{5,9)}。本研究においても、Brown ら⁹⁾ と同等の圧迫時を含む条件では、単収縮力は低下した。したがって、単収縮のような短時間の弱い収縮時には、約 50mmHg 以上の圧迫はネガティブに働くと言える。

単収縮力が低下する理由としては、圧迫により筋の短縮が機械的に阻害されることが挙げられる⁹⁾。一方、20Hz での連続刺激による誘発筋力は、比較的強い圧迫時に増大し、150mmHg での圧迫時には有意に増大した（図 1）。高強度収縮時には、筋内圧が増大するため¹⁰⁾、比較的高強度の圧迫であったとしても、20Hz の連続刺激による誘発収縮時には、筋の短縮が機械的に阻害されることが小さいと推察される。一方で、150mmHg の圧迫時に誘発筋力が増大した理由としては、筋収縮時に伴う筋の振動の抑制¹¹⁾などが考えられる。また、筋の収縮時には、力センサ

によって測定する力の方向以外の方向への力発揮も起こっているため¹²⁾、筋圧迫によりそれらの力成分が本来測定する方向の力に加算されたのかもしれない。今後、この点については更に検討を進めていく。

2. 2 研究 2) 下肢筋における圧迫とジャンプパフォーマンスの関係

ジャンプパフォーマンスにおいては、カウンタームーブメントジャンプ（CMJ）では圧迫の有無で差がなく、リバウンドジャンプ（RJ）においては、150mmHg での圧迫時の方が、非圧迫時よりも有意にパフォーマンスが高かった（図 2）。Doan ら¹¹⁾によると、大腿部の圧迫衣類の着用により、CMJ の跳躍高が増大することが報告されている。本研究では下腿部の圧迫を行ったため、Doan ら¹¹⁾の研究報告との比較は難しいが、本研究で圧迫により CMJ へ効果がなかったことは、CMJ のパフォーマンスへの貢献部位は大腿部が主であり、下腿部の貢献度が低いからかもしれない。一方で、RJ においては、下腿部の伸長-短縮サイクルの研究に頻繁に用いられてことから^{13,14)}、そのパフォーマンスへの貢献度は下腿部で高いと考えられる。従って、前の実験で明らかとなったように、高強度の瞬発的な力発揮（20Hz の電気刺激）のような動作や弾性エネルギーなどを用いる動作に対しては、150mmHg での圧迫はポジティブに働くと言える。

ジャンプ動作は随意的運動であるため、前述したように、圧迫に対する心理的効果の要因が含まれている可能性がある。しかし、リバウンドジャンプパフォーマンスのポジティブな効果に対し、心理的因子が主であるのなら、カウンタームーブメントジャンプで圧迫に効果が何ら生じなかった説明がつかない。したがって、本結果における心理的な要因は少ないと示唆される。一方で、依然、ポジティブ効果の詳細な生理学的メカニズムは前

の実験結果同様、不明であるため、今後更なる検討が必要である。

興味深いことに、伸長 - 短縮サイクルの遂行能力を決定するリバウンドジャンプ指数が元々低い2名に関しては、圧迫がネガティブに働いた(図2)。逆に、その2名を除いた対象者においては、全員圧迫がポジティブに働いた。つまり、筋の伸長 - 短縮サイクルの遂行能力が低い場合は、機械的な圧迫によってその遂行が阻害されてしまい、一方、阻害されない場合は、むしろ遂行をより補助する役目を果たしていると言える。したがって、ジャンプなどが主の競技においては、圧迫衣類の採用に関しては、競技者の元々の体力要素を考慮する必要があると言える。

2. 3 下肢筋における圧迫と筋疲労との関係

一定強度の筋収縮中において、収縮回数や収縮時間にともなって、補償的な筋活動量の増大により筋電図は増加し、また、その増加率が筋疲労度を反映している¹⁵⁾。そのため、本研究において筋疲労に関しては、圧迫はネガティブ効果であったと言える。本研究で用いた圧迫強度は、先行研究で疲労を軽減するとされているそれ(15-20mmHg)⁶⁾よりもかなり高い。むしろ、安静時動脈圧以上であるため、筋活動を増大させる条件下に近い¹⁶⁾。したがって、腓腹筋内側頭・外側頭にて収縮回数の増大の伴う筋電図の振幅値の増加率が高かったのは、血流制限による筋活動量の増大を惹起した結果といえる。

3. まとめ

本研究の結果、先行研究よりも比較的高強度(150mmHg)の筋圧迫は、爆発的な力発揮にはポジティブに働くことが明らかとなった。一方で、筋疲労に対してはネガティブに働くことも明らかとなった。

謝 辞

本研究の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。本研究は、高井洋平先生(鹿屋体育大学)を共同研究者として実施いたしました。

文 献

- 1) 朝比奈茂, 伊藤マモル, 山本義春, 中澤史, 泉重樹, 笠井淳, ジェイソン マ. スポーツ用弾性ストッキングの生理学的効果に関する一考察. 法政大学体育・スポーツ研究センター紀要, 30: 55-62 (2012)
- 2) 矢野経済研究所. 国内のスポーツアパレルの市場調査. スポーツアパレル市場に関する調査結果2013(2013)
- 3) 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: 373-378 (2006b)
- 4) 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: 548-554 (2006a)
- 5) 松本奈々, 宮本直和, 浦中宏典, 丸茂智彦, 谷口耕一, 川上泰雄. 大腿部への圧迫が電気刺激による誘発膝関節伸展トルクに及ぼす影響. トレーニング科学, 25: 55-60 (2013)
- 6) Miyamoto N., Hirata K., Mitsukawa N., Yanai T., Kawakami Y., Effect of pressure intensity of graduated elastic compression stocking on muscle fatigue following calf-raise exercise. *J. Electromyogra. Kinesiol.*, 21: 249-254 (2011a)
- 7) Bernhardt T., Anderson G.S., Influence of moderate prophylactic compression on sport performance. *J. Strength. Cond. Res.*, 19: 292-297 (2005)
- 8) Miyamoto N., Yanai T., Kawakami Y., Twitch potentiation induced by stimulated and voluntary isometric contractions at various torque levels in human knee extensor muscles., *Muscle Nerve.*, 43: 360-366 (2011b)
- 9) Brown T., Galea V., McComas A., Loss of twitch torque following muscle compression. *Muscle*

- Nerve.*, 20: 167-171 (1997)
- 10) Sjogaard G., Kiens B., Jorgensen K., Saltin B., Intramuscular pressure, EMG and blood flow during low-level prolonged static contraction in man., *Acta. Physiol. Scand.*, 128: 475-484 (1986)
 - 11) Doan B.K., Kwon Y.H., Newton R.U., Shim J., Popper E.M., Rogers R.A., Bolt L.R., Robertson M., Kraemer W.J., Evaluation of a lower-body compression garment., *J. Sports Sci.*, 21: 601-610 (2003)
 - 12) Thomas C.K., Ross B.H., Stein R.B., Motor-unit recruitment in human first dorsal interosseous muscle for static contractions in three different directions., *J. Neurophysiol.*, 55: 1017-1029 (1986)
 - 13) Ishikawa M., Komi P.V., Effects of different dropping intensities on fascicle and tendinous tissue behavior during stretch-shortening cycle exercise., *J. Appl. Physiol.*, (1985) 96: 848-852 (2004)
 - 14) Morio C., Chavet P., Androuet P., Foissac M., Berton E., Nicol C., Time course of neuro-mechanical changes underlying stretch-shortening cycle during intermittent exhaustive rebound exercise., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 111: 2295-2305 (2011)
 - 15) Moritani T., Yoshitake Y., The use of electromyography in applied physiology., *J. Electromyogra Kinesiol.*, 8: 363-381 (1998)
 - 16) Moritani T., Sherman W.M., Shibata M., Matsumoto T., Shinohara M., Oxygen availability and motor unit activity in humans., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 64: 552-556 (1992)

歩行型腰部柔らかダミーを用いた衣服圧測定方法の確立

地方独立行政法人東京都立
産業技術研究センター
(共同研究者) 同
菅谷 紘子
岩崎 謙次

The Establishment of Clothing Pressure Evaluation Method Using the Walking Soft Dummy

by

Hiroko Sugatani, Kenji Iwasaki
*Tokyo Metropolitan
Industrial Technology Research Institute*

ABSTRACT

Clothing pressure evaluation for product development and quality control is primarily performed by methods involving the use of hard dummies in a stationary state. However, such methods do not provide sufficient evaluations if it is assumed that people will be subject to a variety of dynamic effects while wearing the clothing. Therefore, in this study, we developed soft-waisted walking-type dummies to simulate the softness distribution of the human body and examined their potential use in a new method of clothing pressure evaluation.

Two types of long girdles were used as specimens, and the clothing pressure measurements were taken at 11 locations on the waist and leg sections, using an air pack system. Static measurements were taken to examine the stationary upright condition with the legs held together as well as with the legs spread apart, while dynamic measurements were taken with the stride and speed varied in stages for examination.

The trends in the measured values were approximately the same for the soft and hard dummies in the static measurements, although the levels of the measured values differed depending on the measurement locations. Differences in the measured values were observed between the stationary upright position with the legs spread apart and the stationary upright position with the legs held together in locations such as the groin and gluteal fold. The dynamic measurements also indicated that larger strides resulted in greater amplitude of the clothing pressure, and as the speed increased, a constant clothing pressure was applied, which reduced the fluctuation. The fact that time-series variation existed with movements, as described above, implies that it is necessary to change the stationary methods used for clothing pressure evaluation.

要 旨

製品開発や品質管理における衣服圧評価は、静止状態の硬質ダミーを用いる方法が主流である。しかし人が衣服を着用する際、様々な動的な影響を受けており、実際の着用を想定した場合に十分な評価ができていない。そこで、本研究では私たちがこれまでに開発した、人体の柔らかさ分布に相似した歩行型腰部柔らかダミーを用い、新しい衣服圧測定の可能性を検討した。

試料は、ロングガードル2種類、衣服圧測定はエアパック方式を用いることにより、腰部および脚部の11箇所を測定した。静的な測定では、立位静止時及び開脚静止時における検討を、動的な測定では、歩幅、速度を変化させ検討を行った。

静的な測定では歩行型腰部柔らかダミーと硬質ダミーとの比較で、部位により測定値のレベルは異なるが、試料間の測定値の傾向は近似していた。前後開脚静止時では、立位静止時と比較して鼠蹊部や臀溝部などの部位において、測定値に差がみられた。また、動的な測定の結果、歩幅が大きくなるにしたがって、衣服圧の振幅が大きくなった。しかし速度が速くても動的な変化にともなう一定の衣服圧がかかるため変動が抑えられ小さな変動となった。このように動作時には時系列変化

があるため、静止時と異なる考え方をする必要があり、示唆された。

緒 言

近年、脚の疲れを改善するストッキングや医療分野における脚のむくみ、血流障害を改善するためのサポートストッキングなど脚を加圧する製品が開発されている。これらの製品の衣服圧測定は、静止状態の硬質ダミーを用いる方法が主流であり、開脚した静止状態の衣服圧や動きをともなう衣服圧を測定した事例が見当たらない。しかし、着用する人体は、静止状態の様々な姿勢や動きにともなう衣服圧の動的な変化など様々な圧力を衣服から受けている。今後、快適な製品の開発や表示上の情報を正確にするために、動きをともなう衣服圧測定を行うことが期待されている。

そこで、動的な衣服圧測定という課題を解決するために、東京都立産業技術研究センターでは平成23年度～平成24年度の2年間をかけ、人体の腰部・脚部について人体の柔らかさ分布に相似した歩行型腰部柔らかダミー^{1,2)} (以下柔らかダミー)を開発し、特許を取得した³⁾。本評価装置を用いることにより、従来硬質ダミーで測定していた衣服圧測定とは異なる人体に近い衣服圧を測定することができた。具体的に言えば、柔らかダミーを

用いて静的な衣服圧測定及び動的な衣服圧測定を可能とすることができた。従来の衣服圧測定方法とは異なる柔らかさと動作を考慮した柔らかダミーを用いた衣服圧測定方法は、生活環境下における人体の快適性に寄与するとともに、腰部に関する多くのサポート製品の基礎資料となり、身に着けやすく快適な製品づくりの重要な情報を提供できると考える。

1. 実験方法

1. 1 歩行型腰部柔らかダミーと衣服圧測定装置

測定装置には、本研究センターで開発した柔らかダミーを用いた。この測定装置の形状と構造は、40代女子の腹部から膝部までを再現した人体形状ダミーで、人体と同様の骨格及び人体に近い硬さ分布にするために硬さの異なるウレタン樹脂を積層し、動作を可能とした柔らかダミーである。本測定装置の外観図を図1に示す。衣服圧の測定には、株式会社エイエムアイ・テクノ製(AMI3037-10-SW)のエアパック式衣服圧測定装置を用いた。また、使用したエアパックセンサは、標準形(直径:20mm)である。

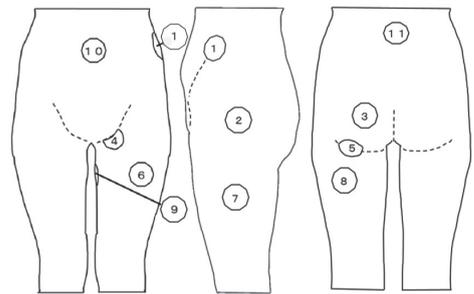
1. 2 歩行型腰部柔らかダミーの衣服圧測定部位

歩行や走行など人体が移動するために、人体の



図1 歩行型腰部柔らかダミー装置外観図

腰部は、重要な部位であり、円滑な動作を保証することが求められている。本報告の測定部位は、人体腰部の骨格及び筋肉の付き方や、ガードルなどの測定時に頻繁に用いられている衣服圧測定箇所を考慮した結果、腹部、腸骨稜、転子点等11箇所の部位とした。衣服圧測定部位を図2に示す。また、動作時においても同じ部位の衣服圧を測定した。なお、柔らかダミーの右側の部位は、センサ等が埋め込まれており、若干数値が高くなる傾向が認められたため、人体に近い衣服圧測定値を示す左側の部位とした。



①腸骨稜 ②転子点 ③臀部最突点 ④鼠蹊部 ⑤臀溝部
⑥大腿最大囲前点 ⑦大腿最大囲外側点 ⑧大腿最大囲後点
⑨大腿最大囲内側点 ⑩腹部最突点 ⑪腸骨稜囲背部中央点

図2 衣服圧測定部位の箇所及び名称

1. 3 試料

実験に用いた着用衣服として、同一メーカーで製品の種類により衣服圧が弱圧設計と強圧設計があるロングガードルを選定した。これらは、柔らかダミーの衣服圧測定部位が腹部から膝部までであり、この部分を覆う製品であることと、衣服圧の設計思想が同じである弱圧設計ロングガードル(以下、弱圧製品)と強圧設計ロングガードル(以下、強圧製品)であることが、圧力差を明確に評価できると考えたためである。試料を表1に示す。

1. 4 実験手順

1. 4. 1 立位静止時の衣服圧測定

従来用いていた硬質ダミー(株式会社七彩製, WD-40A)と柔らかダミーを用いて立位静止時に

表 1 測定に用いた試料の組成と各部の寸法

試料緒言	No.1 弱圧設計	No.2 強圧設計
組成	ナイロン 61% ポリウレタン 39% マチ部分：綿 100%	ナイロン 80% ポリウレタン 18% その他 2% マチ部分：綿 100%
天幅	285.0	250.0
ガードル丈	399.5	378.5
前丈	180.0	170.0
ヒップ幅	365.0	260.0
すそ幅	170.0	140.0
口ゴム幅	6.0	30.0

おける衣服圧を測定する。

1. 4. 2 前後開脚静止時の衣服圧測定

柔らかかダミーの特徴は脚を前後に動かすことができることであり、動作範囲内であれば任意の膝間隔で止めることができる。このため、従来の硬質ダミーでは測定できなかった前後開脚静止時の衣服圧を測定できる。実験では、柔らかかダミーの開脚の長さは膝間隔で指示をする。開脚を始動しはじめた膝間隔 120 mm は歩幅 240 mm、可動限界開脚である膝間隔 280 mm は歩幅 600 mm に相当する。この 2 水準の歩幅で、左脚を前とした状態及び左脚を後とした状態について、柔らかかダミー各部位の衣服圧を測定する。

1. 4. 3 動作時の衣服圧測定

人の行動は大きく静止時と動作時がある。これまでダミーを用いた動的な衣服圧測定は見かけられない。歩行の場合、動作状態の衣服圧は各部位で変動しており、脚の前後運動によって腰部や脚部は大きな変動となる。動作させることで柔らかかダミーは、各部位の変動や部位の相互関係を捉えることができる。膝間隔 (120 mm, 280 mm) と歩行速度 (50 歩/分, 90 歩/分) の各 2 水準の実験条件における動的な衣服圧を測定する。

2. 実験結果及び考察

2. 1 立位静止時の衣服圧測定

図 3 に硬質ダミー及び柔らかかダミーの測定結

果を示す。硬質ダミーの衣服圧は、弱圧製品で、腸骨稜位背部中央点の 0.7 hPa を除くと 7 hPa ~ 19 hPa の範囲に収まっている。これと比較して、強圧製品は、腸骨稜位背部中央点の 0.6 hPa を除くと 12 hPa ~ 23 hPa の範囲となっており、図 3 から強圧製品の方が弱圧製品よりも全体的に大きな衣服圧を示すことが分かる。腸骨稜位背部中央点の小さな値となっているが、背中の中であり、やや凹んだ部位であるために小さな値となっている。柔らかかダミーの衣服圧は、弱圧製品で、腸骨稜位背部中央点 (0.3 hPa)、腸骨稜 (31.7 hPa) を除くと 3 hPa ~ 15 hPa の範囲に収まっており、柔らかかダミーの衣服圧測定全体は硬質ダミーよりも低い値となり、衣服圧の範囲は同程度となっている。また、強圧製品は、腸骨稜位背部中央点 (0.3 hPa)、腸骨稜 (38.6 hPa) を除くと 11 hPa ~ 20 hPa の範囲に収まっている。図 4 に硬質ダミーと柔らかかダミーの強圧製品と弱圧製品の衣服圧差を示す。この図において強圧製品は、転子点 (-3.0 hPa)、腸骨稜位背部中央点 (-0.2 hPa) の 2 箇所が小さくなっている。本報告で用いた衣服圧測定装置の標準不確かさは $\pm 1 \text{ hPa}^4$ であることから、腸骨稜位背部中央点については弱圧製品と強圧製品の衣服圧差が無いと考えられる。

2. 2 前後開脚静止時の衣服圧測定

本報告では、膝間距離 120 mm に前後開脚し、左脚前及び左脚後の各部位の衣服圧測定結果を図 5 に示す。柔らかかダミーの脚を前後に開脚した場合の左脚前の左側面図、左脚後の左側面図を図 6 に示す。

左脚を前に固定し、膝間隔 120 mm の場合、各部位の衣服圧は、立位静止時と同様の傾向であるが、鼠蹊部の衣服圧に違いがみられる。弱圧製品の鼠蹊部の衣服圧は、9.6 hPa であるが、強圧製品では、19.2 hPa と高い衣服圧が掛かる。これは、左脚が前に移動すると弱圧製品の場合は生地が緩

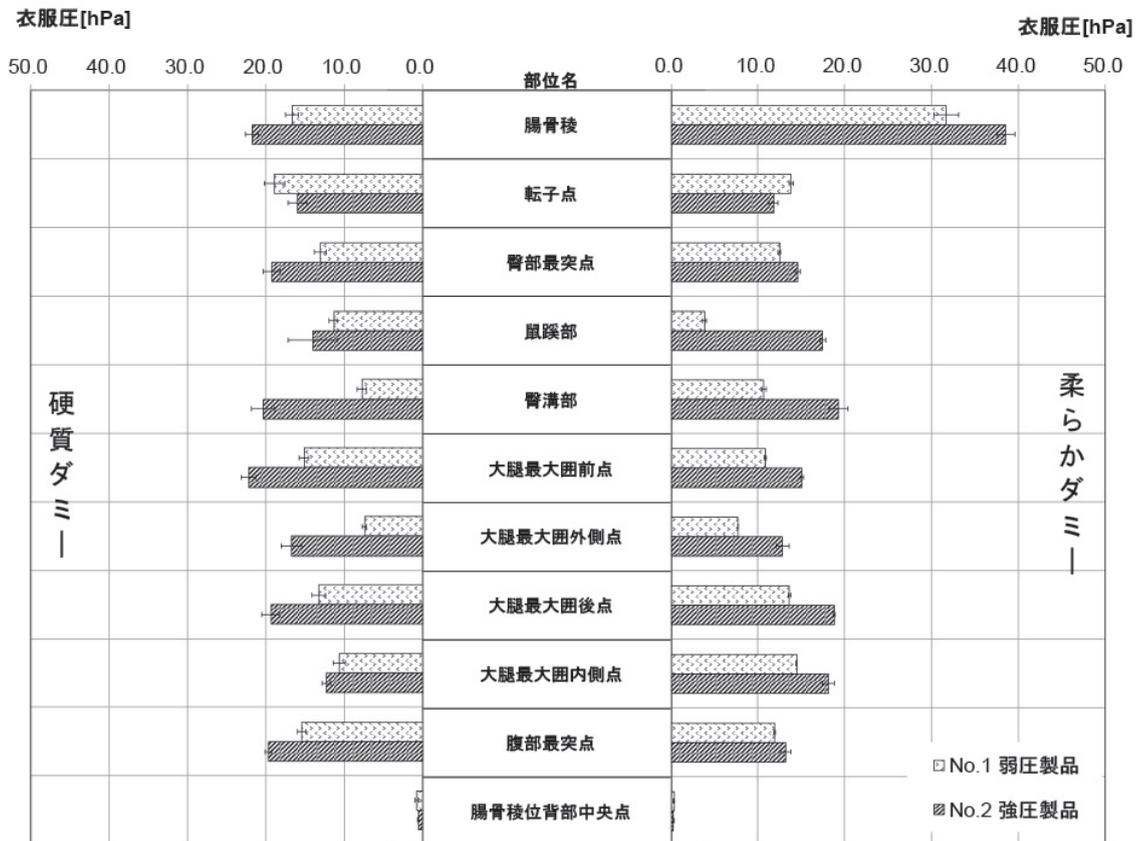


図3 硬質ダミー及び柔らかダミーによる立位静止状態の衣服圧測定結果 (N = 3)

むため低い値となるが、強圧製品では、高い衣服圧が全体的に掛かるため、鼠蹊部でも高い衣服圧が保持されることが分かる。また、大腿部の前、外、内、後の4部位の衣服圧は、弱圧製品が7 hPa ~ 15 hPa の範囲に対し、強圧製品は12hPa ~ 19hPa の範囲であり、しかし、大腿4部位の衣服圧差は弱圧製品と強圧製品がともに同じ傾向である。腰部については、ほぼ立位静止時と同じである。

この傾向は、左脚を後ろにした場合でも同じであるが、鼠蹊部は、脚の動きに大きな影響があるため、弱圧製品の場合でも鼠蹊部に1.1 hPaの衣服圧が掛かっており、強圧製品の場合の鼠蹊部の衣服圧は14.8 hPaとなっている。強圧製品と弱圧製品の鼠蹊部の衣服圧差は13.7 hPaであり、左脚を前にした場合の10.6 hPaより大きな衣服圧差と

なった。

また左脚を前にして膝間隔 280 mm の衣服圧は、全部位に大きな衣服圧が掛かるが、脚の前後の位置や弱圧製品と強圧製品の違いなどの傾向は膝間隔 120 mm の場合と大きな変化は認められなかった。このことから、衣服圧設計上の強弱を、全体的な衣服圧のレベル差として検証できることが分かった。

2. 3 動作時の衣服圧測定

柔らかダミー歩行動作時の時系列変化にともなう各部位の衣服圧変化を図7に示す。この図は、5秒間の各部位の動的な衣服圧変化のグラフである。各部位の衣服圧が時間とともに動いていることが分かる。したがって、静止時の衣服圧とは

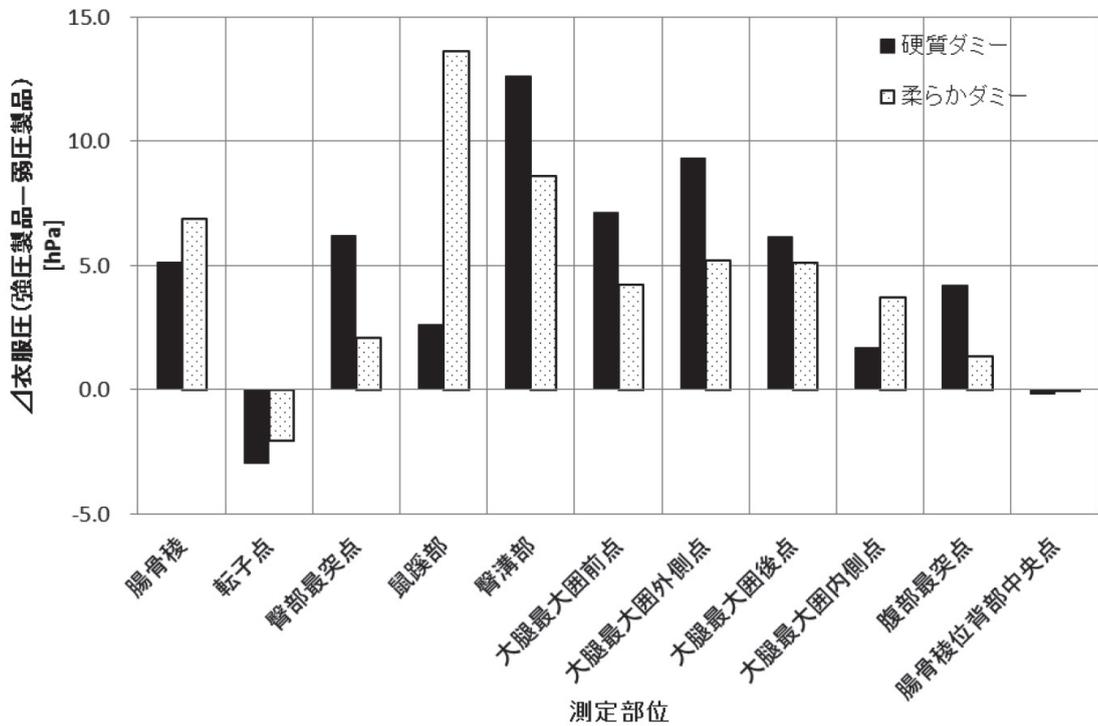


図4 硬質ダミー及び柔らかダミーによる強圧製品と弱圧製品の衣服圧差

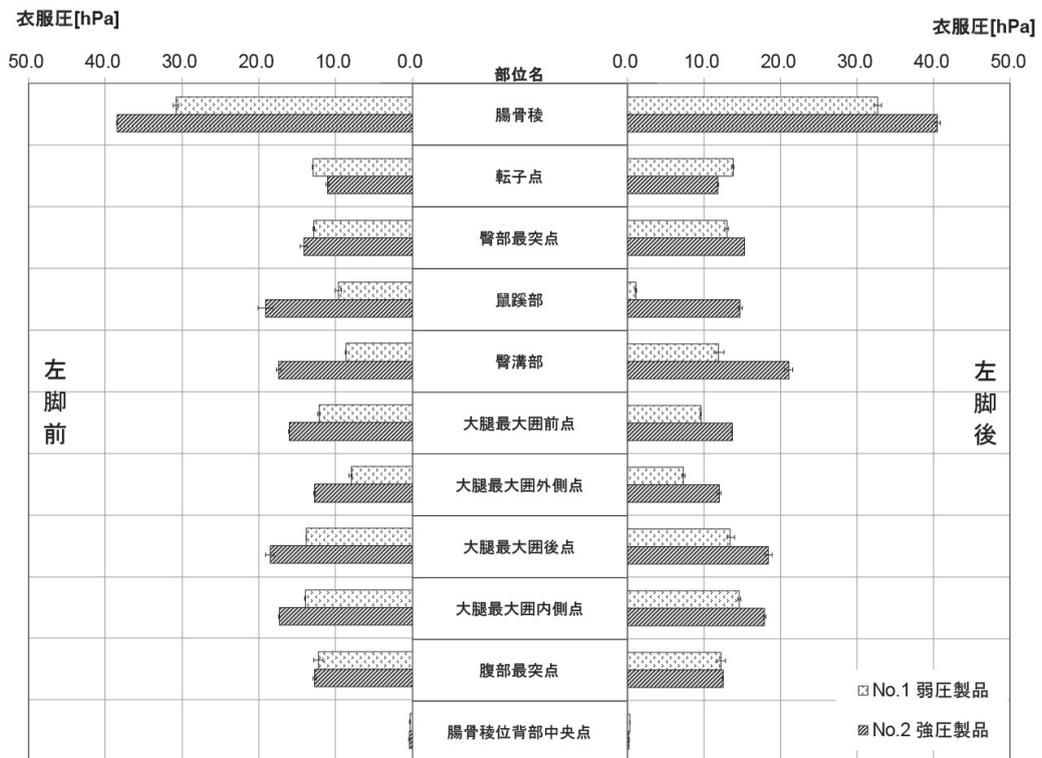


図5 膝間隔120mm、左脚前/後の衣服圧測定結果 (N = 3)

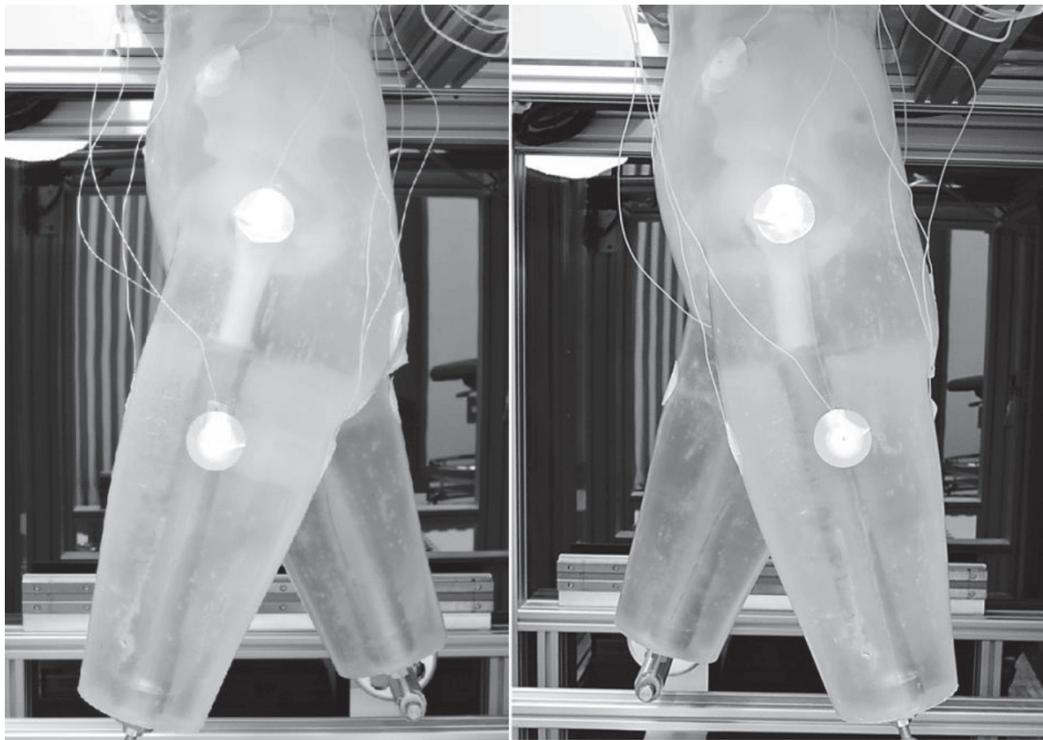


図6 柔らかダミーの開脚状況(左:左脚前,右:左脚後)

異なる衣服圧の表示方法を考案する必要がある。一般的に、波形は sin 曲線などにみられるように、振幅と周期で表わされる。そこで、各条件における3波形分をサンプリングし、最大値、平均値、最小値を算出した。図8に腰部及び脚部の平均値のグラフを示す。

定型的な前後運動を行うため滑らかな波形が周期的に出力され、歩行速度と歩幅で条件が決定できるため、出力される波形の各部位にかかる衣服圧すなわち平均値と振幅が分かれば、動的な衣服圧表示が可能となる。さらに、各部位の「最大値-平均値」と「平均値-最小値」の振幅を算出したところ、ほぼ同様な衣服圧となることが分かった。

2. 3. 1 製品の衣服圧変化にともなう衣服圧測定

柔らかダミーの条件を膝間隔 120mm、歩行速度 50 歩/分とし、弱圧製品と強圧製品の動的衣

服圧を図9に示す。転子点を除き硬質ダミー立位静止時、柔らかダミー立位静止時、柔らかダミー前後開脚時については、強圧製品の方が弱圧製品よりも各部位の衣服圧が高くなっている。しかし、動作を伴った衣服圧の場合は、弱圧製品の衣服圧と強圧製品の衣服圧を比較すると、臀部最突点で 20.7 hPa と 14.4 hPa、大腿最大前点で 21.5 hPa と 15.1 hPa などとなり、弱圧製品の衣服圧が強圧製品より高くなった。ただし、腸骨稜と鼠蹊部は、強圧製品の衣服圧が高くなっている。このように製品の構成条件によって人体に及ぼす衣服圧が変化することから、製品を開発する際は、着用時の衣服圧を吟味して製品開発する必要がある。また、衣服圧の変動幅は、臀部最突点、臀溝部、大腿最大囲前点、大腿最大囲内側点、強圧製品が大きな変化を示すが、腹部最突点、腸骨稜、転子点、大腿最大囲外側点、大腿最大囲後点は、弱圧製品が大きな変化を示した。以上のことから、製品の

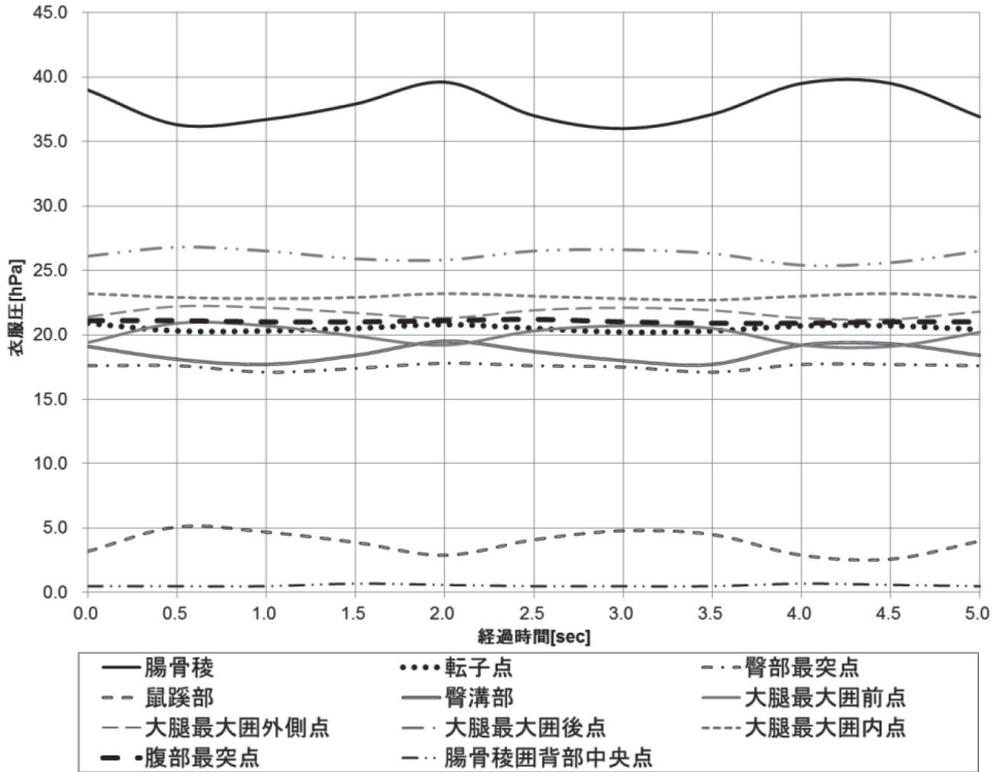


図7 歩行時の時間に伴う衣服圧の変化の一例 (5秒間)

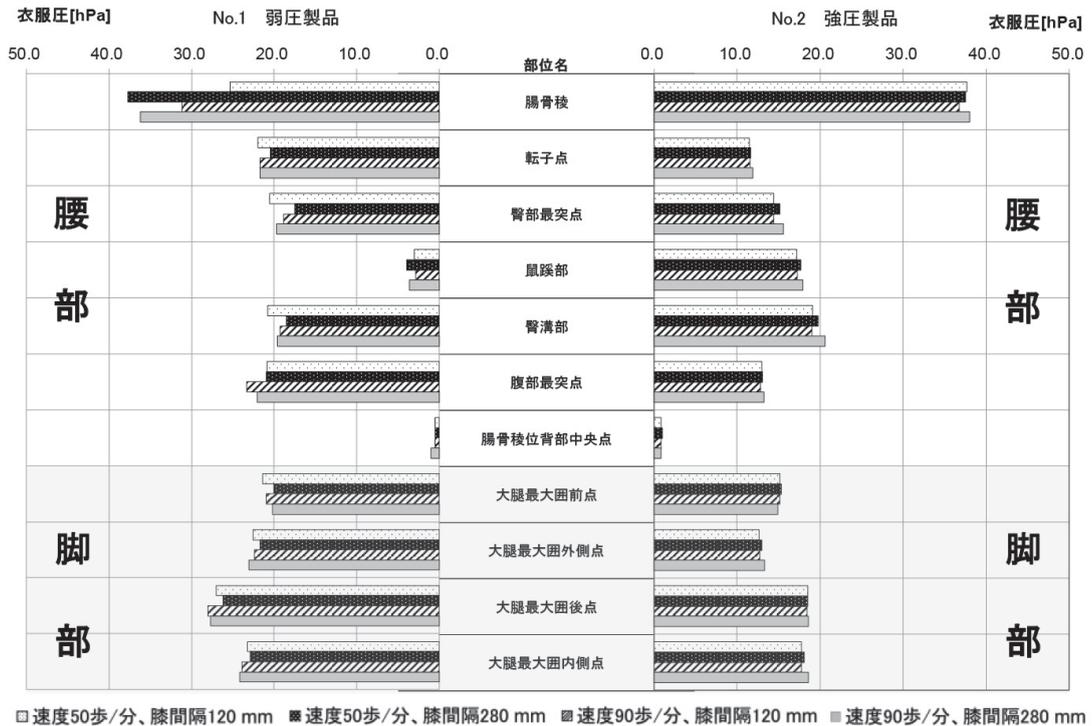


図8 動作時の腰部及び脚部の平均値 (N = 3)

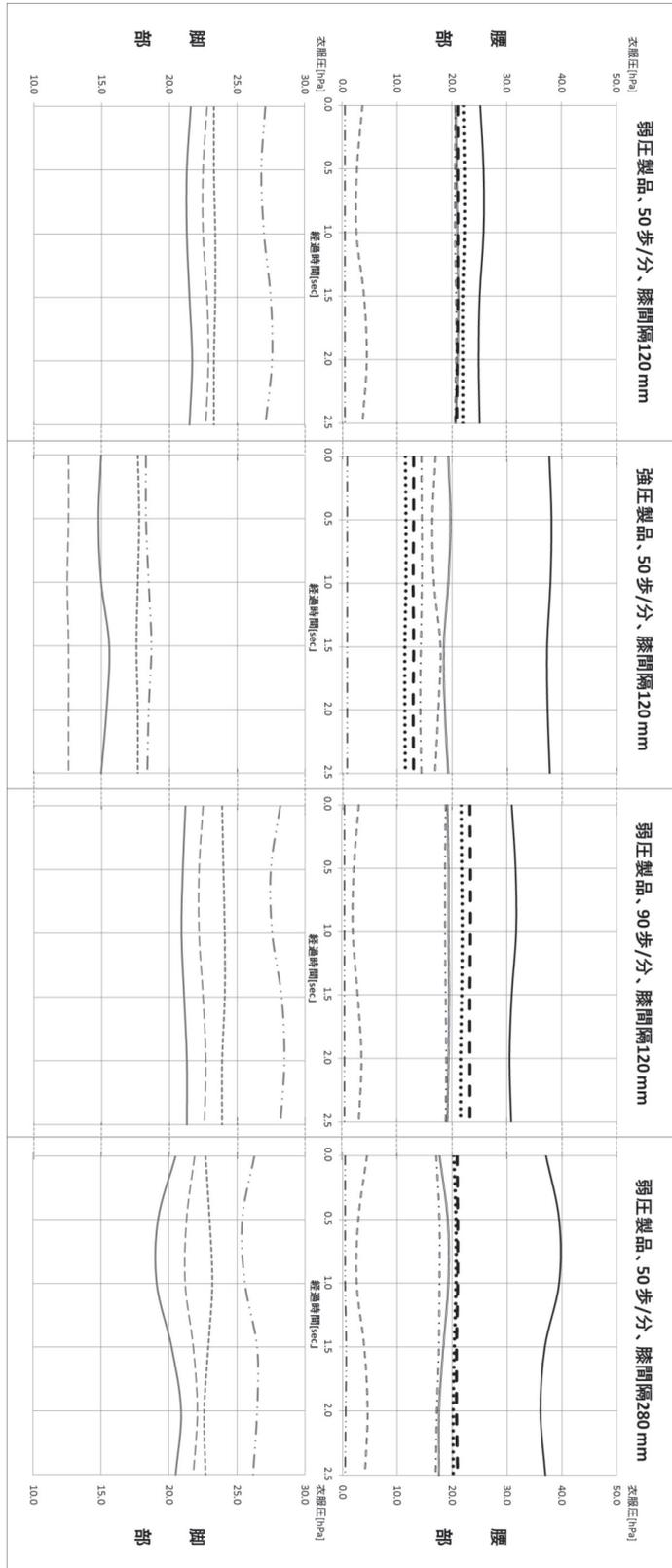


図 9 動的衣服圧結果

動的衣服圧変化は、製品を構成するパターン、生地
の伸縮性等の製品側の要因と、着用する人体の
形状、柔らかさ等と、柔らかダミーの前後動作時
の力の作用によって決定される。ガードルの一
多要因が複雑に作用する動的な力関係を製品評
価実験できるのが本装置の特徴である。

2. 3. 2 速度変化にともなう衣服圧測定

歩行速度が変化することで、腰部及び脚部の衣
服圧も変化する。弱圧製品を着用した状態で、柔
らかダミーの条件を膝間隔 120mm に固定し、歩
行速度を 50 歩/分と 90 歩/分の 2 水準として、2.5
秒間動作させた場合の腰部及び脚部の衣服圧変化
を図 9 に示す。

弱圧製品の歩行速度を 50 歩/分から 90 歩/分
に変化した場合、腰部の平均衣服圧は、腸骨稜の
5.8 hPa、腹部最突点の 2.3 hPa と上昇するが、転
子点、鼠蹊部では大きな変化は見られない。逆に、
歩行速度を速くした場合、臀部最突点の 1.8 hPa、
臀溝部の 1.6 hPa と衣服圧が下降している。脚部
においては、50 歩/分から 90 歩/分に変化した
場合、大腿最大囲後点の 0.9 hPa、大腿最大囲内
側点の 0.7 hPa と衣服圧の平均値は高くなり、大
腿最大囲前点の 0.3 hPa、大腿最大囲外側点の 0.2
hPa と低くなっている。また、衣服圧の振幅（最
大値-最小値）は、腸骨稜、腹部最突点、大腿最
大囲後点、大腿最大囲内点で、歩行速度 90 歩/
分における振幅が大きくなっている。

一般的に、同一圧力製品の場合、歩行速度が速
くなれば、平均衣服圧は高く、振幅は大きくな
ると考えられる。実際の柔らかダミーを用いた評価
実験では、腸骨稜、大腿最大囲後点、大腿最大囲
内点ではこの傾向がみられたが、転子点、臀部最
突点等の他の部位では歩行速度を速くすると衣服
圧平均値が低くなる傾向となった。このような衣
服圧変化の事実関係も柔らかダミーを用いた製品
評価実験によって明確な傾向が把握できるよう
になった。

2. 3. 3 歩幅（膝間隔）変化にともなう衣服 圧測定

歩幅が変化することで腰部及び脚部の衣服圧も
変化する。柔らかダミーの条件を歩行速度 50 歩
/分に固定し、膝間隔を 120mm と 280mm の 2 水
準変化させ、弱圧製品を着用した状態で 2.5 秒間
動作させた場合の腰部及び脚部の衣服圧変化を図
9 に示す。

歩幅の変化を大きくすると、腰部及び脚部の動
的な衣服圧変動に大きく影響する。特に、腰部の
場合、腸骨稜に対して平均値で 25.3 hPa から 37.7
hPa になり、変動幅が 0.9 hPa から 3.4 hPa となっ
ている。脚部では図 9 のように、平均値は変わ
らないが、変動幅が大きく影響する。このことか
ら、膝間隔を変化することは、鼠蹊部を除く他の
部位の衣服圧変動幅に大きな影響があると考えら
れる。

3. まとめ

柔らかダミーと 2 種の圧力設定のガードルを用
いて、腰部及び脚部の主要な部位の衣服圧を測定
した。その結果、動作することで静止時とは異な
る様々な衣服圧の変化や表示するための課題など
の知見が得られた。以下にまとめを示す。

(1) 立位静止時の硬質ダミーと柔らかダミーを
比較すると、弱圧製品や強圧製品の違いに対応す
る衣服圧を示しながら、柔らかダミーは硬質ダ
ミーより低い衣服圧を示した。柔らかダミーの腰
部では、骨格や硬い筋肉のある腸骨稜に高い衣服
圧が加わるが、他の部位は硬質ダミーと比較して、
約半分程度の衣服圧となった。

(2) 前後開脚静止時の柔らかダミーの衣服圧は、
立位静止時の各部位の衣服圧とほぼ同様な傾向で
あった。特に大きく変化する部位は鼠蹊部である。
鼠蹊部における衣服圧は、弱圧製品では膝間隔
120mm の場合、左脚前で 9.6hPa、左脚後で 1.1hPa、
膝間隔 280mm の場合、左脚前で 16.0hPa、左脚

後で 1.1hPa, 強圧製品では膝間隔 120mm の場合, 左脚前で 19.2hPa, 左脚後で 14.8hPa, 膝間隔 280mm の場合, 左脚前で 21.6hPa, 左脚後で 10.3hPa となった。

(3) 柔らかダミーの動作時の可動限界条件は, 歩行速度: 90 歩 / 分と膝間隔: 280 mm である。柔らかダミーの衣服圧は, 歩行動作の前後動による運動範囲と製品の構成条件によって, 動作時の連続した衣服圧の高低変化が発生する。この変化する衣服圧は, 衣服圧のレベルを表す平均衣服圧と衣服圧の高低変化である衣服圧の振幅によって表すことができる。

弱圧製品と強圧製品を評価したところ, 静的に測定した衣服圧では強圧製品の方が強い衣服圧が掛かっていたが, 動的な衣服圧の環境下では, 弱圧製品は弱い衣服圧が掛かり, 強圧製品は強い衣服圧が掛かるとは言えない。

このように柔らかダミーにおける衣服圧評価では, 製品の衣服圧設計の違いや柔らかダミーの動作条件を使用して衣服圧の動的な衣服圧が評価できることが分かった。

本報告では, 柔らかダミーの測定法を確立するために, その性能について静的データ及び動的データを測定した。その結果, 衣服圧を謳う製品

評価では, 着用して製品の動的評価を行うことで, 衣服設計時に狙った効果を有しているかなどの詳細なデータを取得でき, 製品設計に役立てることができる。今後, 柔らかダミーの不確定さについても検証し, 人体測定に近い衣服圧測定法を確立したいと考える。

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へ厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 菅谷絃子, 岩崎謙次: 衣服評価用の歩行動作ダミーの開発 第 1 報 柔らかダミーの開発, 東京都立産業技術研究センター研究報告, 7, pp.58-61 (2012)
- 2) 菅谷絃子, 岩崎謙次: 衣服評価用の歩行動作ダミーの開発 第 2 報 歩行動作装置の開発, 東京都立産業技術研究センター研究報告, 7, pp.62-65 (2012)
- 3) 菅谷絃子, 岩崎謙次: 「人体模型, 衣服圧測定装置および衣服圧測定方法」, 特開 2013-032601号
- 4) 菅谷絃子, 岩崎謙次, 山田巧: ストレッチ繊維製品の衣服圧測定方法の確立, 東京都立産業技術研究センター研究報告, 5, pp.136-137(2010)

アスリートの体型研究 —各種競技従事者に適合する最適なウェア作製を目指して—

文化学園大学 佐藤 真理子
(共同研究者) 同 小柴 朋子

Athletic Physique Research: Towards Ideal Athletic Wear for Various Competitors

by

Mariko Sato, Tomoko Koshiba
Bunka Gakuen University

ABSTRACT

This study measures the body shape of competitive athletes in four different sports (kendo, tennis, track and field (short-distance running) , and soccer) in order to identify their specific physical characteristics and help create better-fitting athletic wear for each group. It was found that compared to the body shape of a normal adult male, kendo, tennis, and track and field (short-distance running) athletes had large or extra-large development in the upper body. This trend was particularly pronounced in the short-distance runners, who had a difference in chest and waist measurements that was outside the standard sizing classifications created for adult males. All four types of athletes were larger than average around the base of the neck, and had a tendency towards sloped shoulders based on shoulder angle measurements. These results indicate that particular attention must be paid to the neck, shoulder, and chest area when designing their clothing. Measuring the shape of the back of the body, it was found that tennis players tended to have rounded backs, while sprinters had pronounced buttocks. All four groups have outstanding physical characteristics under the Heath-Carter method of somatotyping based on their mesoderm score. Kendo players and sprinters

have developed muscles and physical builds with no excess fat, while tennis players are muscular and carry some subcutaneous fat. Soccer players are also developed in terms of muscularity, but tend to be ectomorphic with a thin physique.

要 旨

着心地の良いスポーツウェア作製に寄与すべく、4種の競技：剣道・テニス・陸上（短距離）・サッカーに従事するアスリートの体型を計測、その特徴を抽出した。一般成人男性の体型と比較し、剣道、テニス、陸上で上半身の発達が大、特に陸上でその傾向は著しく、チェストとウエストの寸法差により設定された成人男子用衣料サイズの体型区分外であった。4競技とも、頸付け根囲は一般体型より大、肩傾斜角度からなで肩傾向が示され、ウェアデザインの際、首肩回りと胸回りへの配慮が重要と示唆された。背面形状計測では、テニスの円背傾向、陸上の出尻傾向が示された。Heath-Carter法による体型分類では、4競技とも中胚葉スコアの優れた体型の特徴を有し、剣道と陸上では筋肉・骨格が発達し体脂肪をつけ過ぎない体型、テニスでは筋骨が発達しやや皮下脂肪の厚い体型、サッカーでは筋骨は発達しているがやせて細長型体型の傾向が示された。

緒 言

スポーツウェアは、運動機能性・生理的快適性・耐久性等、一般のアパレルより高度な要求特性を有し、その実現に向け、原糸や加工段階、製品開発段階で、様々な工夫がなされている。ウェアと体型の適合性も、スポーツウェアの快適性に関わる重要な視点である。従来、アスリートの体格・体型・体構成は従事する競技により異なると指摘されてきた。しかし、それらの情報はスポーツウェアに十分活かされていないのが現状である。体型に適合しないウェアを着用してスポーツ

を行えば、スムーズなパフォーマンスが阻害され、オリンピックのような高いレベルにおいては勝敗を分ける可能性がある。あるいは市民レベルのスポーツ愛好家において、体型とウェアの不適合から、ウェアと皮膚の摩擦が特定の部位で繰り返し生じ、不快感はもちろんのこと皮膚炎等の不具合を引き起こすこともある^{1,2)}。本研究では、各種競技のアスリートの体型を計測、特徴を抽出することで、それぞれの体型・競技に即した最適なスポーツウェア製作を目指し、その基礎データ集積を行う。

1. 方 法

1. 1 被験者

被験者は、大学体育会に所属する健康な若年男子で、剣道部、テニス部、陸上部、サッカー部に所属する、各10名ずつ計40名であった。陸上部については、短距離を専門とする者に限った。アスリートの条件として、現在まで5年間以上そのスポーツを継続している者を対象とした。被験者の基本的特性を表1に示す。測定時、被験者は締め付けのない下着のみ着用とした。

1. 2 測定項目

①体型計測

①-1 一次元計測：メジャー及びマルチン計測法による、頸付け根囲・腕付け根囲・上部胸囲（CL 囲）・上腕最大囲・乳頭位胸囲（BL 囲）・胴囲（WL 囲）（水平）・腹囲（MHL 囲）・殿囲（HL 囲）・大腿最大囲・膝蓋中点囲・足首囲・手首囲・下腿最大囲・上腕屈曲囲・上腕骨顆間幅・大腿骨顆間幅とした。

①-2 二次元計測：シルエッター法による左

表1 被験者の基本的特性 (各競技10名ずつ計40名)

	剣道	テニス	陸上	サッカー
年齢 (才)	20.3±1.0	20.0±0.6	20.3±0.8	20.2±0.8
身長 (cm)	173.1±4.8	173.9±5.9	174.2±3.4	172.2±4.0
体重 (kg)	62.8±2.9	63.0±3.0	65.4±4.2	60.1±4.6
競技歴 (年)	10.7±2.7	8.2±0.4	7.8±0.8	10.2±2.0

右の肩傾斜角度とした。

①-3 三次元計測：人体の三次元立体観察とした。

②皮下脂肪厚：上腕三頭筋部，肩甲骨下角部，腸骨棘上部，下腿内側部とした。

③背面形状：胸椎後弯角，腰椎前弯角，仙骨傾斜角とした。

④重心動揺：実効値面積，中心変位（左右，前後）を検討することとした。

1. 3 測定方法

①体型計測

①-1 一次元計測：メジャー及びマルチン人体計測器を用い，熟練した同一検者が測定を行った。被験者は立位正常姿勢を基本とし，上腕屈曲囲（上腕水平，前腕垂直，上腕二頭筋を最大収縮），上腕骨顆間幅（肘を直角に曲げ，上腕水平），大腿骨顆間幅（椅坐位，膝を直角に曲げる）については，各々の計測条件を適用した³⁾。

①-2 二次元計測：被験者より5mの距離からシルエット写真撮影を行った。被験者は頭部を耳眼水平に保持，左右の踵をつけ，両足の爪先間を約30度開いた立位正常姿勢とした。正面と後面から撮影を行い，得られた写真から左右の肩傾斜角度を測定した。

①-3 三次元計測：三次元人体計測器（浜松ホトニクス株式会社）により，人体の三次元立体を得，観察した。被験者は，立位正常姿勢とした。

②皮下脂肪厚：皮脂厚計（Gpm社）により，上述した4カ所の皮脂厚を計測した。被験者は立位正常姿勢（上腕三頭筋部，肩甲骨下角部，腸骨棘上部），及び椅坐位（下腿内側部）をとり，熟

練した同一検者が測定を行った。

③背面形状：Spinal Mouse[®]（Index社）により，立位姿勢の背面形状（胸椎後弯角，腰椎前弯角，仙骨傾斜角）を測定した。被験者には足を腰幅に開いた自然な立位姿勢をとらせ，第7頸椎から第3仙椎までの脊柱傍線上に，Spinal Mouse[®]のトラッキングホイールを一定速度で移動させた。胸椎後弯角は第1胸椎から第12胸椎までの背部脊柱全体の湾曲，腰椎前弯角は第12胸椎から第1仙椎までの腰部脊柱全体の湾曲，仙骨傾斜角は仙骨によって描かれる背中表面の輪郭線が鉛直線に対して作る角度である。測定値は，正が後弯，負が前弯を表す。

④重心動揺：重心動揺解析装置 ECG-1KNSA1（共和電業株式会社）を用い，開眼で1分，立位にて測定した。

1. 4 体型分類

Heath-Carter法により下記10項目の測定結果より体型分類を行った⁴⁾。

：身長 (cm)，体重 (kg)，上腕骨顆間幅 (cm)，大腿骨顆間幅 (cm)，上腕屈曲囲 (cm)，下腿最大囲 (cm)，上腕三頭筋皮脂厚 (mm)，肩甲下皮脂厚 (mm)，腸骨棘上皮脂厚 (mm)，下腿内側皮脂厚 (mm)

以下の式に上記測定値を当てはめ，各被験者の3ソマトスコアを算出した。

$$\text{○内胚葉スコア} = -0.7182 + 0.1451X - 0.00068X^2 + 0.0000014X^3$$

ただし，X=（三頭筋皮脂厚+肩甲下皮脂厚+腸骨棘上皮脂厚）×170.18/身長

$$\text{○中胚葉スコア} = [(0.858 \times \text{上腕骨顆間幅}) +$$

$(0.61 \times \text{大腿骨顆間幅}) + 0.188 (\text{上腕屈曲囲} - \text{三頭筋皮脂厚}/10) + 0.161 (\text{下腿最大囲} - \text{下腿内側皮脂厚}/10) - 0.131 \times \text{身長} + 4.50$

- 外胚葉スコア ●身長/ $\sqrt[3]{\text{体重}} \geq 40.75$ のとき
 $= 0.732 \times (\text{身長}/\sqrt[3]{\text{体重}}) - 28.58$
- $385 < \text{身長}/\sqrt[3]{\text{体重}} < 40.75$ のとき
 $= 0.463 \times (\text{身長}/\sqrt[3]{\text{体重}}) - 17.63$
- 身長/ $\sqrt[3]{\text{体重}} \leq 38.25$ のとき
 $= 1$

これら3スコアをハイフンでつないだものが個人のソマトタイプとなる。それぞれのスコアの平均値を算出し、従事するスポーツ群の平均ソマトタイプを得た。

1. 5 統計処理

各競技のデータを比較するにあたり、一元分散分析を用いた。有意差があった際の多重比較にはFisherの最小有意差法を用いた。

1. 6 倫理的配慮

実験実施にあたっては、被験者に研究の趣旨、研究協力への任意性等を十分説明し、同意を得て実施した。尚、本研究は所属大学研究倫理委員会の承認を得て行った。

2. 結果

メジャー及びマルチン計測法による体型計測結

果(Heath-Carter法によるソマトスコア算出のための上腕屈曲囲・上腕骨顆間幅・大腿骨顆間幅を除く)を表2に示す。分散分析の結果、頸付け根囲で陸上が有意に大($p < 0.05$)、腕付け根囲でテニスが有意に大($p < 0.05$)であった。また、有意ではないものの、陸上でCL囲がきわめて大きかった。これらのデータについて、本研究における被験者と日本人の一般的体型(HQLデータ: 2004 - 2006年の20 - 24歳の男性282名⁵⁾)との比較を、モリソンの関係偏差折線により行った(図1)。体幹部においては、陸上で、頸付け根囲とCL囲が顕かに大、BL囲はやや大の傾向を示した。剣道とテニスでは、頸付け根囲とBL囲がやや大、他の項目は一般的体型に近く、サッカーでは、頸付け根囲がやや大、CL囲、BL囲、WL囲は一般的体型より小の傾向を示した。上肢においては、テニスで腕付け根囲が大、上腕最大囲と手首囲がやや大、剣道と陸上で腕付け根囲と上腕最大囲がやや大、サッカーで手首囲がやや小であった。下肢においては、大腿最大幅囲、膝蓋中点囲、下腿最大囲が、4競技ともやや大の傾向、足首囲はテニス、陸上、サッカーで大の傾向が示された。

シルエット写真から計測した左右の肩傾斜角度を図2に示す。4競技間での有意差は見られなかったが、日本人の一般的体型⁵⁾と比し、左右共に値が大きかった。剣道とテニスでは、右肩傾

表2 各競技における体型計測及び分散分析結果

	剣道	テニス	陸上	サッカー	
頸付け根囲	42.7±1.2	42.4±1.3	44.7±1.5	42.6±0.6	*(陸上>剣道, テニス, サッカー)
CL囲	91.4±5.4	90.4±1.9	94.4±2.7	88.8±3.6	NS
BL囲	88.8±2.9	88.3±3.8	89.4±4.5	85.3±3.8	NS
WL囲(水平)	71.6±2.1	73.1±2.2	71.9±2.6	70.7±1.6	NS
MHL囲	75.0±2.3	74.9±3.4	77.3±3.4	75.1±3.8	NS
HL囲	91.0±2.3	91.1±3.1	91.2±3.2	91.2±3.5	NS
腕付け根囲(右)	42.5±1.3	44.9±2.7	43.4±1.4	41.7±1.7	*(テニス>剣道, サッカー)
上腕最大囲(右)	30.1±2.1	30.0±0.7	29.9±1.8	28.9±2.4	NS
手首囲(右)	16.6±0.8	17.0±0.8	16.7±0.7	16.3±0.5	NS
大腿最大幅囲(右)	54.9±1.9	54.6±2.4	55.2±2.5	54.7±3.8	NS
膝蓋中点囲(右)	36.5±0.5	36.9±1.4	36.6±1.0	36.7±1.0	NS
下腿最大囲(右)	37.9±1.4	37.7±1.0	38.5±1.9	38.1±1.8	NS
足首囲(右)	22.6±1.4	23.4±2.0	22.9±1.4	23.2±2.2	NS

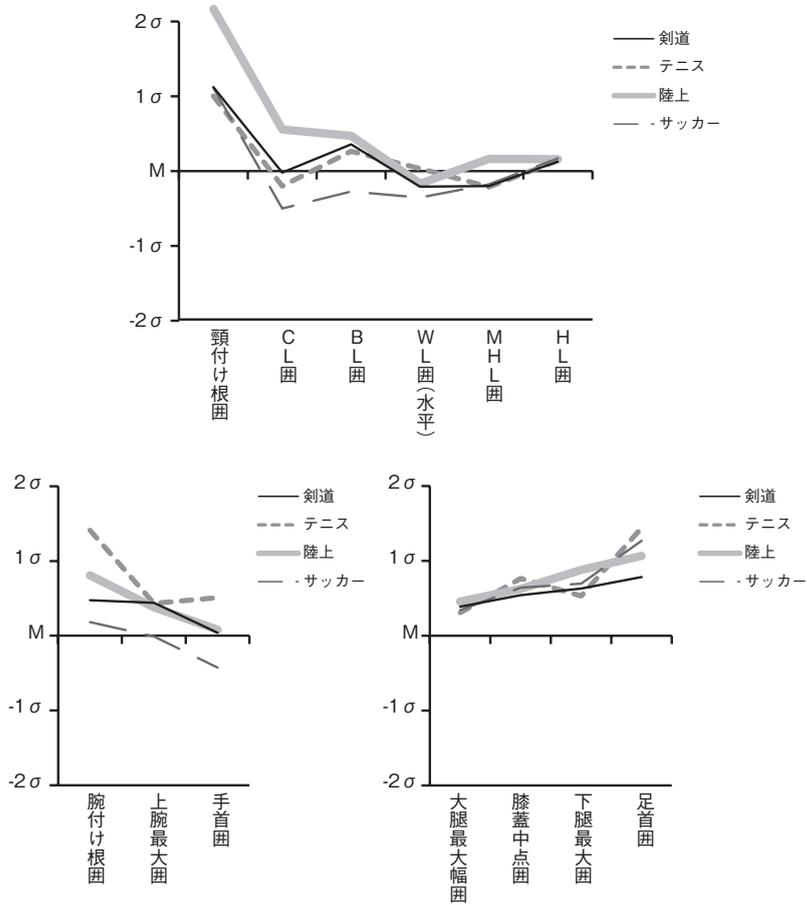


図1 モリソンの関係偏差折線による一般的体型との比較
体幹(上図), 上肢(下左図), 下肢(下右図), 基準線: HQL20-24 歳男性データ (2004-2006)

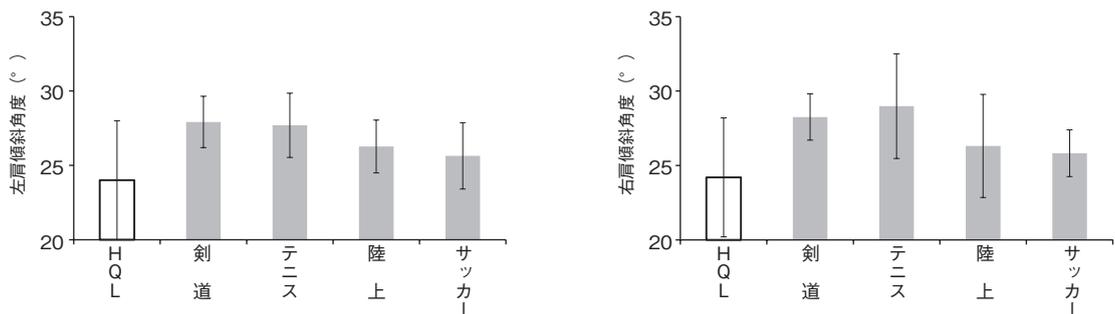


図2 左肩傾斜角度(左図)と右肩傾斜角度(右図)
HQL20-24 歳男性データ (2004-2006) との比較

斜角度のより大なる傾向が示された。

Spinal Mouse[®]による, 立位姿勢の背面形状計測結果を図3に示す。被験者全員の平均は, 胸椎後弯角 $37.81 \pm 5.69^\circ$, 腰椎前弯角 $-19.32 \pm 8.53^\circ$, 仙骨傾斜角 $10.58 \pm 3.72^\circ$ であった。胸椎後弯角

がテニスで有意に大 ($p < 0.01$), 仙骨傾斜角が陸上で有意に大 ($p < 0.01$) であった。

重心動揺測定結果を図4に示す。重心動揺の評価に際しては, 健常者のための有効な重心動揺変数として提案されている36変数のうち⁶⁾, 面

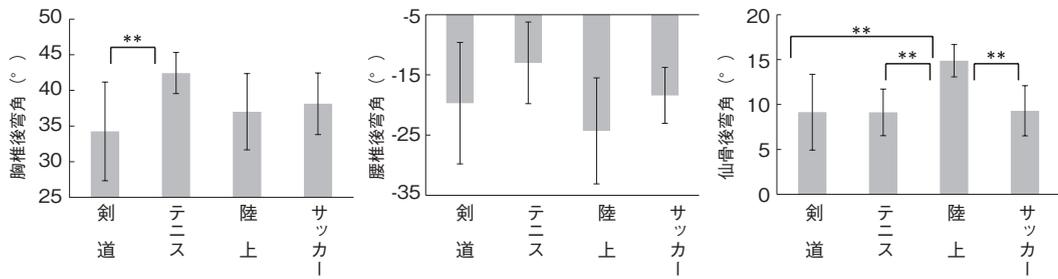


図3 Spinal Mouse[®]による背面形状計測結果
胸椎後彎角 (左図), 腰椎前彎角 (中図), 仙骨傾斜角 (右図)

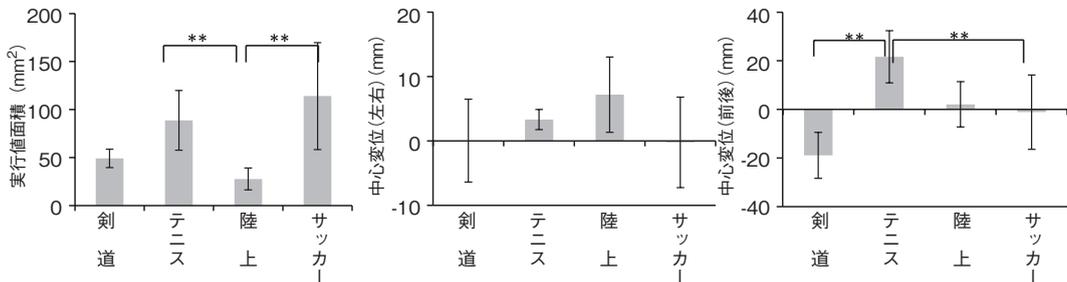


図4 重心動揺測定結果
実行値面積 (左図), 中心変位 (左右) (中図), 中心変位 (前後) (右図)

積と位置に関する変数として、実行値面積と中心変位（左右、前後）を比較した。実効値面積では、サッカー>テニス>剣道>陸上の順に値が大きくなり、陸上で有意に低値であった ($p < 0.01$)。中心変位（左右）では陸上が右偏移、中心変位（前後）ではテニスが前方、剣道が後方へ体重心位置をとっており、テニスの前方偏移で有意差を得た ($p < 0.01$)。

Heath-Carter 法によるスコア算出の結果を図5

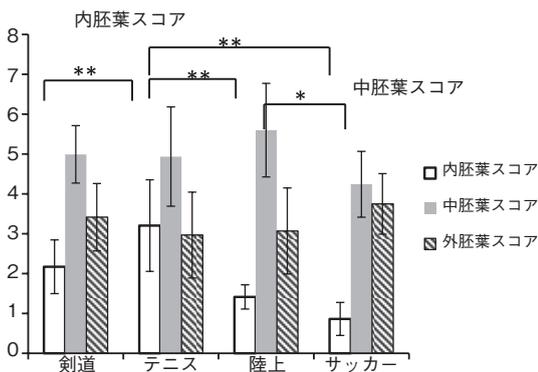


図5 Heath-Carter法によるソマトスコア算出結果

に示す。被験者全員の各スコア平均は、内胚葉 1.78 ± 1.01 、中胚葉 4.96 ± 1.01 、外胚葉 3.32 ± 0.84 で、中胚葉スコアが大なる傾向を示した。剣道における各スコアは、内胚葉スコアで1.5-3.3の範囲、中胚葉スコアで3.9-6.1の範囲、外胚葉スコアで2.3-5.1の範囲であった。テニスでは、内胚葉が1.9-4.4と、他種目と比較し最も高い範囲に分布していた。中胚葉と外胚葉はそれぞれ、3.0-6.3, 1.8-4.4であった。陸上では、中胚葉が4.4-6.7と、他種目と比較し最も高い範囲に分布し、内胚葉と外胚葉はそれぞれ、1.0-2.2, 1.8-3.9であった。サッカーでは、外胚葉が2.9-5.5と、他種目と比較し最も高く、内胚葉は0.2-1.5と最も低い範囲にあった。中胚葉は2.7-6.2であった。各スコアを検討した結果、内胚葉でテニス ($p < 0.01$)、中胚葉で陸上 ($p < 0.05$) が有意に高い値を示し、外胚葉でサッカーが高値傾向であった。

3. 考 察

アスリートの体型研究は、古くは1950年代から盛んに行われ、Sheldonの三角図型法による体型判定、オリンピック選手に関する考察、性格や体力、食生活との関連、発達や加齢に伴う変化、Heath-Carter体型分類、など多岐にわたる。その多くは、スポーツ科学の領域にあり、被服科学的観点からなされたものは少ない。そこで本研究では、アスリートの体型に適合する快適なスポーツウェア作製を最終目的とし、剣道、テニス、陸上(短距離)、サッカー、の4種の競技に従事するアスリートの体型把握を行った。

メジャー及びマルチン計測法による体型計測結果を4種の競技内で比較した結果(表2)、頸付け根囲と腕付け根囲で、有意差を得た。一般成人男性の体型との比較を行うため、HQLデータ(2004-2006年の20-24歳の男性282名)⁵⁾を基準とするモリソンの関係偏差折線による検討を行ったところ(図1)、体幹部については、陸上で上半身の発達が著しく(CL囲きわめて大、BL囲大)、剣道、テニスはやや発達(BL囲大)、サッカーは頸付け根囲を除き、一般より細身の体型(CL囲、BL囲共に小)であった。Yシャツ等の選択で重要となる頸付け根囲の値が、4競技とも一般体型より顕かに大きく、配慮の必要性が示された。ウエストサイズは4競技共、一般的体型と同等または小であり、成人男子用衣料品サイズで 사용되는体型区分(JIS L 4004)から検討すべく、ドロップ(チェストとウエストの寸法差)を算出したところ(図6)、剣道はJ体型、テニスはJY体型、サッカーはY体型に適合、陸上はJ体型より値が大きく、適合する区分がないという結果であった。近年、現在の成人男子JIS衣料サイズに対し、Largeサイズ設定を提案する報告もある⁷⁾。本結果から、スポーツウェアにおける首回り、胸回りへの配慮が重要と示唆された。特に、陸上の

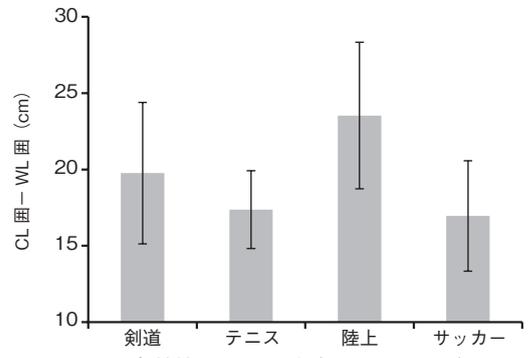


図6 各競技のドロップ (CL囲-WL囲)
注)ドロップ(cm)とJIS体型区分記号
20:J, 18:JY, 16:Y, 14:YA, 12:A, 10:AB, 8:B, 6:BB, 4:BE, 0:E

アスリートに関して、トレーニングを継続する者の優れた循環呼吸機能に伴う胸郭の発達、大胸筋等の上半身の筋の発達が、逆三角形の体幹部を形作り、一般の衣料品サイズでは不適合であることが明らかとなった。

また、上肢と下肢それぞれの周径に、トレーニングによる筋肉の発達が影響すると考え、検討した結果(図1)、上肢については、テニスの発達が大、剣道と陸上はそれに続き、サッカーは一般体型より小であった。下肢については、4競技とも正方向への偏移を示した。本研究で取り上げた剣道、テニス、陸上、サッカーに関し、下肢周径は競技に関わらず大、上肢周径は競技内容により大小有りであった。これらの特徴は、各競技に特化した衣服デザインを考える際、有用と考える。

シルエット写真から得られた肩傾斜角度では(図2)、4競技共、日本人の一般的体型⁵⁾と比し、なで肩の傾向が示され、僧帽筋の発達によると考えられる。特に、上肢を主に動かす競技である剣道とテニスで、右肩下りの傾向が示され、坂東らの報告と同様であった⁸⁾。上半身の鍛錬を多く行うアスリートのウェアにおいて、首肩回りへの配慮は重要と考えられる。

Spinal Mouse[®]を用いた、立位姿勢の背面形状計測(図3)より、本研究におけるアスリートの平均(胸椎後弯角 $37.81 \pm 5.69^\circ$ 、腰椎前弯角 $-19.32 \pm 8.53^\circ$ 、仙骨傾斜角 $10.58 \pm 3.72^\circ$)は、

先人らの報告，例えば白田と佐藤⁹⁾の青年期一般男性における値（胸椎後弯角 38.3° ，腰椎前弯角 -17.4° ，仙骨傾斜角 4.2° ），宝亀と里見¹⁰⁾の健全な男子における値（胸椎後弯角 39.8° ，腰椎前弯角 -23.7° ，仙骨傾斜角 9.9° ）と，近似していた。しかし，競技毎に観察すれば，先ず，テニスの有意な胸椎後弯角大，即ち円背傾向が認められた（図7）。坂東らも，Conformateurを用いた姿勢評価により，テニス選手の丸背傾向を報告している⁸⁾。これは，テニス競技における構え方，即ち，膝を少し曲げ，腰をかがめた構えの姿勢が影響しているものと推測される。重心動揺における中心変位（前後）で，テニスのアスリートのみ，大きく前へシフトしている特徴からも（図4），構え姿勢の身体への影響は大きいと考えられる。

また，陸上の有意な仙骨傾斜角大は，いわゆる出っ尻体型を示している（図7）。仙骨傾斜角と

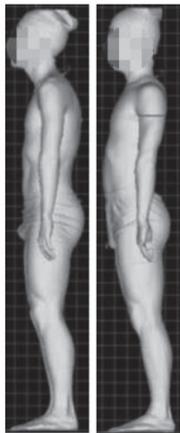


図7 テニス（左図）及び陸上（右図）に従事するアスリートの三次元計測画像例

腰椎前弯角は代償関係にあり，陸上ではどちらも絶対値大であった。脊柱の弯曲は，その大小が身体の基底面積に関わり，弯曲大ほど基底面積大，すなわち身体の安定・バランスを保持しやすいと考えられる。陸上アスリートにおける出っ尻傾向は，重心動揺における実効値面積小の結果（図4）を支持する要素と考えられる。

Heath-Carter法による体型分類では，4競技共，中胚葉スコアの優位な体型的特徴を共通に有していたが，各競技により，剣道，陸上では外胚葉性中胚葉型，テニスでは内胚葉性中胚葉型，サッカーでは中胚葉・外胚葉型，の傾向が示された（図5）。内胚葉スコアは，値が大きいほど皮下脂肪の厚い体型を，中胚葉スコアは，値が大きいほど筋肉・骨格の発達した体型を，外胚葉スコアは，値が大きいほどやせて細長型の体型を示す。本研究での被験者において，有意に中胚葉スコア大であった陸上アスリートについては，過去の短距離選手の報告と同様であり，Carter（1.7-5.2-2.8）¹¹⁾，千葉ら（2.4-6.2-3.2）¹²⁾，そして本研究被験者（1.4-5.6-3.1）と，どれも外胚葉性中胚葉型に分類された。瞬発力を短時間に発揮するための体型として，筋骨が発達し，体脂肪をつけ過ぎない体型が，競技に適していると考えられる。また，テニスに見られた，中胚葉スコアが大きく内胚葉の値もそれに準じる結果（3.2-4.9-2.8），即ち，筋骨が発達し，やや皮下脂肪の厚い体型は，坂東らの報告におけるラグビー（3.8-5.6-2.0）¹³⁾，Thorland et al. 千葉らにおける投擲選手（3.9-5.8-2.1）¹⁴⁾，（4.1-7.9-1.8）¹²⁾と同様であった。さらに，本研究におけるサッカーアスリートの値（0.9-4.2-3.8）は，Carter¹¹⁾，千葉ら¹²⁾における長距離選手（1.4-4.4-3.4），（1.9-5.2-4.0）と類似しており，サッカーの競技特性である長時間連続しての走行が，体型構築に寄与し，外胚葉型に近づいた中胚葉型になったものと考えられる。

5. 結 語

着心地の良いスポーツウェア作製に寄与する基礎データ集積を目指し，剣道・テニス・陸上（短距離）・サッカーに従事するアスリート40名の体型を計測した。一般成人男性の体型と比し，頸付け根囲大，下肢周径大，なで肩傾向が4競技に共通して見出された。上半身各部位の周径は競技に

より異なり、最も CL 囲の大きい陸上アスリートは、成人男子用衣料サイズの体型区分外であった。背面形状計測において、テニスの円背傾向、陸上の出尻傾向が示され、Heath-Carter 法による体型分類では、剣道と陸上が外胚葉性中胚葉型、テニスとサッカーが中胚葉・外胚葉型であった。今後、さらなるデータの積み重ねと解析により、競技毎のウェアデザインポイント分類につなげたい。

謝 辞

本研究に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感謝致します。被験者としてご協力頂きました皆様、計測にご協力頂きました上原幸子さん、湯本千尋さん、直井美佳さんに深謝致します。

文 献

- 1) 佐藤真理子, 田村照子, スポーツウェアのトライボロジー, トライボロジスト, **58**(1), 10-16(2013)
- 2) 佐藤真理子, 有泉知英子, 須田理恵, 剣道着における素材とデザインが衣服内気候と皮膚摩擦, パフォーマンスに及ぼす影響, デサントスポーツ科学, **33**, 75-85(2012)
- 3) 生命工学工業技術研究所編, 設計のための人体計測マニュアル, 社団法人間生活工学研究センター(1994)
- 4) Heath B.H., Carter J.E., A modified somatotype method., *Am. J. Phys. Anthropol.*, **27**(1), 57-74(1967)
- 5) 社団法人間生活工学研究センター, アパレル設計用の人体寸法データ集 2004-2006(成人男性用)(2009)
- 6) 出村慎一, 北林保, 野田政弘, 健常者のための重心動揺測定とその評価, 教育医学, **51**(3), 223-233(2006)
- 7) 土井昭子, 大塚美智子, Largeサイズ成人男子の体型特徴に基づく JISサイズへの提案, 日本女子大学紀要, **52**, 117-124(2005)
- 8) 坂東隆男, 浅見高明, 石島繁, スポーツ選手における体型と姿勢の関連について, 日本体育学会大会号, **33**, 570(1982)
- 9) 白田梨奈, 佐藤みつ子, スパイナルマウスを用いた青年期の立位姿勢の評価, 山梨大学看護学会誌, **5**(2), 13-18(2007)
- 10) 宝亀登, 里見和彦, スパイナルマウス[®]による日本人健常成人の姿勢分析, 東日本整形災害外科学会雑誌, **16**(2), 293-297(2004)
- 11) Carter J.E., The somatotypes of athletes-a review., *Hum. Biol.*, **42**(4), 535-569(1970)
- 12) 千葉正, 相良康介, 宮崎正巳, 川島一明, 井川正治, 大学陸上競技選手のソマトタイプ: 体型評価の基礎的研究, 日本体育大学紀要, **39**(2), 71-75(2010)
- 13) 坂東隆男, 浅見高明, 石島繁, スポーツ選手の体型と姿勢の特徴について: ヒース・カーター体型分類法および姿勢評定図表による評価, 日本体育学会大会号, **36**, 537(1985)
- 14) Thorland W.G., Johnson G.O., Fagot T.G., Tharp G.D., Hammer R.W., Body composition and somatotype characteristics of junior Olympic athletes., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **13**(5), 332-338(1981)

食事時刻がヒトの生体リズムおよび エネルギー代謝調節に与える影響

北海道大学 山 仲 勇二郎
(共同研究者) 同 橋 本 聡 子
同 山 田 淑 子
同 本 間 研 一

Effects of Restricted Meal Schedule on Human Circadian Rhythm and Energy Metabolism

by

Yujiro Yamanaka, Satoko Hashimoto,
Yoshiko Yamada, Ken-ichi Honma
Hokkaido University

ABSTRACT

The aim of the present study is to examine whether appearance of pre-meal anticipatory hormone peak and entrainability to daily restricted meal schedule under temporal isolation facility in adult male subjects. Ten subjects were participated in the present study. The subjects stayed in the facility for 15 days. From day 1 to day 2, 3 meals were provided at fixed time (8:00, 12:00, 18:00). Afterwards, meal was provided once a day for 8 days from day 4 to day 11 (restricted meal schedule). During this restricted meal schedule, the subjects were divided into two groups. One group took the meal at fixed time at 18:00. In another group, the time of meal was decided by the subjects themselves. As a result, the pre-meal peak was not detected in plasma melatonin, cortisol, insulin, ghrelin, and leptin in the both two groups. On the other hand, the sleep-wake cycle was entrained to the daily restricted meal schedule with a

period of 24 h, whereas circadian rhythm of plasma melatonin was significantly phase-delayed. These finding indicated that the so-called food entrainable circadian rhythm failed to appear in humans under the present conditions, but the meal schedule act as a potent zeitgeber for the sleep-wake cycle but not for the circadian pacemaker.

要 旨

本研究では、健康成人男性を対象に外界の昼夜変化や時刻情報を排除した時間隔離実験室内でヒトの生物時計機構に他のは乳類で報告されている食事時刻を予知する食事時刻依存性概日リズムが出現するか、規則的な食事スケジュールにヒトの生物時計が同調するかを検証した。実験では、健康成人男性が15日間隔離実験室に滞在し、1日1食の食事スケジュールを8日間おこなった。実験室内の光照度は200lux未満の低照度に設定した。その際、食事時刻を一定時刻に固定した群（食事固定群、5名）と被験者自身が決める群（食事自由群、5名）の2群にわけ、1日1食の食事スケジュールに対する睡眠覚醒リズム、血中ホルモンリズムの変化を調べた。その結果、食事固定群、食事自由群共に、今回調べたメラトニン、コルチゾル、インスリン、グレリン、レプチンには、食事前のホルモン濃度の上昇はみられなかった。睡眠覚醒リズムは両実験群共に実験期間中に有意な位相変化は認められず、24時間周期を示した。血中メラトニンのリズムは、1日1食の食事スケジュール後では両群共に有意に位相後退した。以上より、本実験条件ではヒトの食事時刻依存性概日リズムは発現しないこと、1日1回の食事スケジュールは睡眠覚醒リズムの同調因子として作用するが、生物時計には影響しないことが示唆された。

緒 言

ヒトの行動、体温、ホルモン分泌など生理機能

を長期間にわたり計測すると24時間を1周期とする概日リズムが観察される。概日リズムは昼夜変化のない恒常環境下でも持続する（フリーラン）がその周期は約25時間となる¹⁾。概日リズムは生体内に備わった生物時計により駆動される。生物時計は生体機能の時間的恒常性を維持する体内機構であり、周期的に変化する環境下で生理機能の最適化を図っている。ほ乳類の生物時計中枢は視床下部の視交叉上核と呼ばれる神経核に局在する。近年の生物発光技術を応用した分子生物学的研究により視交叉上核以外の肝臓や筋など全身の末梢組織にも時計遺伝子が発現し、自律振動する生物時計（末梢時計）が存在することが明らかになってきた²⁾。すなわち、ほ乳類の生物時計は中枢時計である視交叉上核と各組織に存在する末梢時計からなる階層的多振動体システムからなり、その内的調和が安定した生体リズムの表出と柔軟な環境周期への同調を保証していると考えられる。

中枢時計である視交叉上核は、外界の昼夜変化といった光情報を同調因子とするのに対し、末梢時計は食事や身体運動といった光以外の環境因子に同調する^{3,4)}。特に食事に対する末梢時計の同調機構についてはよく研究されている。マウスやラットなどの夜行性げっ歯類では、24時間いつでも餌を摂取できる条件下では活動期である暗期に摂食行動がみられる。一方、摂食可能な時刻を昼間に限定する周期的制限給餌を行うと、制限された時間帯で摂食行動をとるようになるだけでなく、1週間～10日ほどで給餌時刻の数時間前から活動量や血中コルチコステロン濃度の上昇が

みられ、従来の暗期の行動やホルモン分泌が抑制される。これらの給餌前の活動亢進は、制限給餌から元の自由に摂取できる条件に移行しても、24時間絶食などの特定の条件下で再現し、給餌前活動亢進の背後に振動機構、食事性概日振動体、が存在することが示されている。また、制限給餌に対する反応は、視交叉上核を破壊した動物でも消失しないことから視交叉上核には存在せず、食事性概日振動体は末梢時計の1つとして存在することが想定されている。

ヒトの生物時計は、外界の昼夜変化に同調し、光により調節されている⁵⁾。しかし、光以外の環境因子がヒト生物時計に作用するか否かについてはこれまで結論は出ていなかった。我々は、これまでに昼夜変化などの環境変化や時刻の手がかりから隔絶された住居型の時間隔離実験室を用いて、ヒトの生物時計が厳密な生活スケジュールや習慣的な身体運動に同調する機構（非光同調）が存在することを報告している^{6,7)}。ヒトの摂食行動は、中枢時計である視交叉上核に支配されると想定されるが、食事性概日振動体の存在についての実験的証拠は未だに得られていない。生活習慣が多様化した現代では、生物時計の支配に逆らい昼夜を問わず活動する生活を強いられる者も多く、生体リズムの乱れがエネルギー代謝調節に影響することが報告されている^{8,9)}。

本研究の目的は、他のほ乳類で認められている食事パターンに同調する食事性概日振動体の存在をヒトにおいて検証すると共に、食事パターンが睡眠覚醒リズムやエネルギー代謝調節に影響を与えるか否かを光環境や気温湿度を統制した住居型隔離実験室において明らかにすることである。

1. 研究方法

1.1 被験者

被験者は、健常成人男性10名〔年齢 23.2 ± 2.9 歳、身長 172.7 ± 4.5 cm、体重 68.7 ± 4.2 kg、Body

Mass Index (kg/m^2) 23.1 ± 1.3] である。被験者は、事前に問診票により循環器疾患、内分泌疾患、精神疾患の既往歴がなく、現在治療中の疾患がないこと、深夜アルバイトへの従事、4週間以内の時差地域への海外渡航歴がないことを確認した。また、医療機関において血液・尿生化学検査を行い、異常がないことを確認した。

本研究は、北海道大学大学院医学研究科倫理委員会の承認を得て実施された。また、実験に先立ち、全ての被験者に本研究の主旨、実験内容を詳しく説明し、実験参加に対し文書による同意を得た。

1.2 住居型隔離実験施設

実験施設は、被験者が居住する隔離実験室と隔離実験室内の照明やデータ収集をするための操作室からなる。隔離実験室は、約24㎡、天井の高さが2.3mで、実験室は居室とトイレ・シャワー室、そして外部への通路となる前室の3つの部分からなっている。窓はなく、外の光は入らない。壁、床、天井はすべて防音性の素材で覆われ、100db以下の音は遮断する。前室には冷蔵庫が置かれており、被験者の食事提供に利用する。実験室内の照明は、天井に設置された白色蛍光灯より提供さされる。室内には、ベッド、勉強机、安楽椅子、電子レンジ、冷蔵庫、CDプレーヤー、ビデオデッキが置かれている。時刻の手がかりとなる時計、ラジオ、テレビ等は置いていない。被験者は実験期間中、時計、携帯電話、パソコン等の電子機器、通信機器を実験室内へ持ち込むことはできない。

1.3 実験スケジュール

実験開始2週間前より自記式の睡眠日誌と腕時計型行動測定計 (Actiwatch-L, 米国, ミニミッター社製) を用いて被験者の実験開始までの睡眠覚醒リズムを測定した。被験者は、実験開始日の17時までには時間隔離実験室に入室し、15日間住居型隔離実験室に滞在した。実験室内でのス

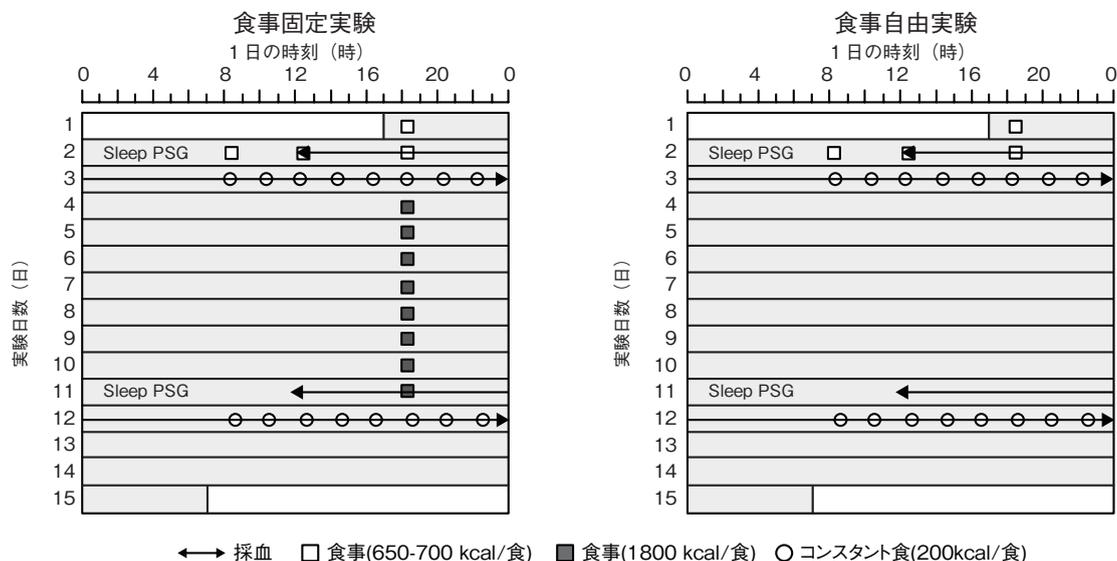


図1 隔離実験室内での実験スケジュール

スケジュールを図1に示す。実験室内の光照度は、覚醒時にはヒト生物時計の光同調の影響を排除するため被験者の目の高さで200ルクス未満の低照度、就寝時には約0ルクスとした。実験期間中、被験者の睡眠時間は制限せず、被験者自身のリズムで生活するよう指示した。ただし、昼寝は禁止とした。1回の実験に参加する被験者は、2～3名である。実験期間中の被験者同士の交流はなく、時刻のつながりからは一切隔離された。

実験1. 食事回数を1日1回とし、食事時刻を1日の一定時刻に固定した実験（以下、食事固定群）

実験1日目～2日目は、1日3回の食事を8時、12時、18時に摂取させた。1回のカロリー量は、約650～700kcalとした。実験3日目は、起床から2時間ごとに200kcalの軽食（カロリーメイト、大塚製薬、日本）を8回摂取させた。実験4日目～12日目までの8日間は、食事回数は1日1回とし、18時に約1800kcalの食事を摂取させた。食事内容は、主食（白米）、主菜・副菜（食卓便、日清医療食品、日本）、汁物、果物あるいは果汁100%ジュース、その他（ヨーグルトあるいは牛乳）

を基本とした。実験期間中、被験者は提供した食事をすべて摂取した。

実験13日目には、再び起床から2時間ごとに200kcalの軽食（カロリーメイト）を8回摂取させた。食事時刻までに被験者が起床していない場合は、食事時刻の30分前に実験者がインターホンにより起床を指示した。実験14日目～15日目は、食事時刻・回数は制限せず、約700kcalの食事を被験者自身のタイミングで摂取させた。血糖値および血中のホルモン濃度を測定するための採血は、実験2日目12時～実験4日目0時、実験12日目12時～実験14日目0時までの36時間、前腕皮静脈下にカテーテルを留置し、1時間ごとに採血を実施した。

実験2. 食事回数を1回とし、食事時刻を自由とした実験（以下、食事自由群）

実験4日目～12日目までの8日間は、食事回数は1日1回とし、被験者の希望する時刻に食事を摂取させた。その他の実験スケジュールは、実験1と同じである。

1. 4 測定項目

1. 4. 1 睡眠覚醒リズム

被験者の睡眠覚醒リズムは、実験室内のベッド下部に設置された圧センサー、ベッドランプ（就寝時にベッドランプを消すように指示した）により測定した。測定データは実験操作室のパソコンへ有線で転送され、被験者の状態をリアルタイムに観察することが可能である。また、実験期間中は非利き腕に腕時計型行動測定装置を装着して生活させ、実験終了後にデータをダウンロードし解析した。

1. 4. 2 深部体温リズム

実験期間中、被験者の直腸温を測定するため、有線サーミスタープローベ(401-J, 日本, YSI社製)を肛門より約10cm挿入し直腸温を排便およびシャワー時を除き、30秒間隔で連続測定した。

1. 4. 3 血糖値

実験2日目12時～4日目0時、実験12日目12時～14日目0時に留置カテーテルによる1時間ごとの連続採血を36時間行い、全血約2μlを血糖自己測定器（アキュチェックコンパクトプラス, 日本, ロシュ・ダイアグノスティックス社製）を用いて血糖値を測定した。

1. 4. 4 血中ホルモンリズム

採血した血液（約5ml）直ちに遠心処理（4℃, 20分, 3000rpm）し、血漿部分を分離、ホルモンアッセイまで-30℃で冷凍保存した。本研究では、メラトニン、コルチゾル、レプチンの濃度測定にはラジオイムノアッセイ法、インスリン、グレリンの濃度測定にはELISA法により行った。

1. 4. 5 体重

実験期間中、起床時および就寝前に体重を測定した。

1. 5 データ解析方法

1. 5. 1 睡眠覚醒リズム

上述のベッド圧センサーを用いて測定した睡眠

覚醒リズムから判定した就寝位相を睡眠覚醒リズムの指標とし、実験期間中の位相変化量を解析した。

1. 5. 2 血中メラトニンリズム

1時間間隔で測定した血中メラトニンリズムデータを3時間の移動平均処理を行い、既報の幾何学的方法⁷⁾を用いて、頂値位相を計算し、1回目と2回目の頂値位相の位相変化量を解析した。

1. 5. 3 食事時刻依存性概日リズム

食事固定群はスケジュールで定めた食事時刻（18時）、食事自由群は被験者自身が選択した食事時刻の3時間前からのコルチゾル濃度と通常の食事条件時の濃度を比較することにより食事時刻依存性概日リズムの存在を検証した。

1. 5. 4 インスリン濃度

食事習慣がエネルギー代謝調節に与える影響を検証するため、スケジュールで定めた食事時刻前（空腹時）、食後1時間、2時間のインスリン濃度を比較した。

1. 6 統計処理

時系列データの解析には繰り返しのある分散分析および対応のある t 検定により解析した。各ホルモンのリズム有意性は一元配置分散分析により解析した。実験群間の平均値の差は、対応のない t 検定により解析した。有意水準は、 $P<0.05$ に設定した。

2. 結果

実験期間中の睡眠覚醒リズムとメラトニンリズムピーク位相を示したアクトグラム、血中メラトニンリズム、コルチゾルの典型例を図2に示す。

2. 1 睡眠覚醒リズム

実験室内のベッド圧センサーから判定した被験者の就寝時刻位相を繰り返しのある分散分析（主

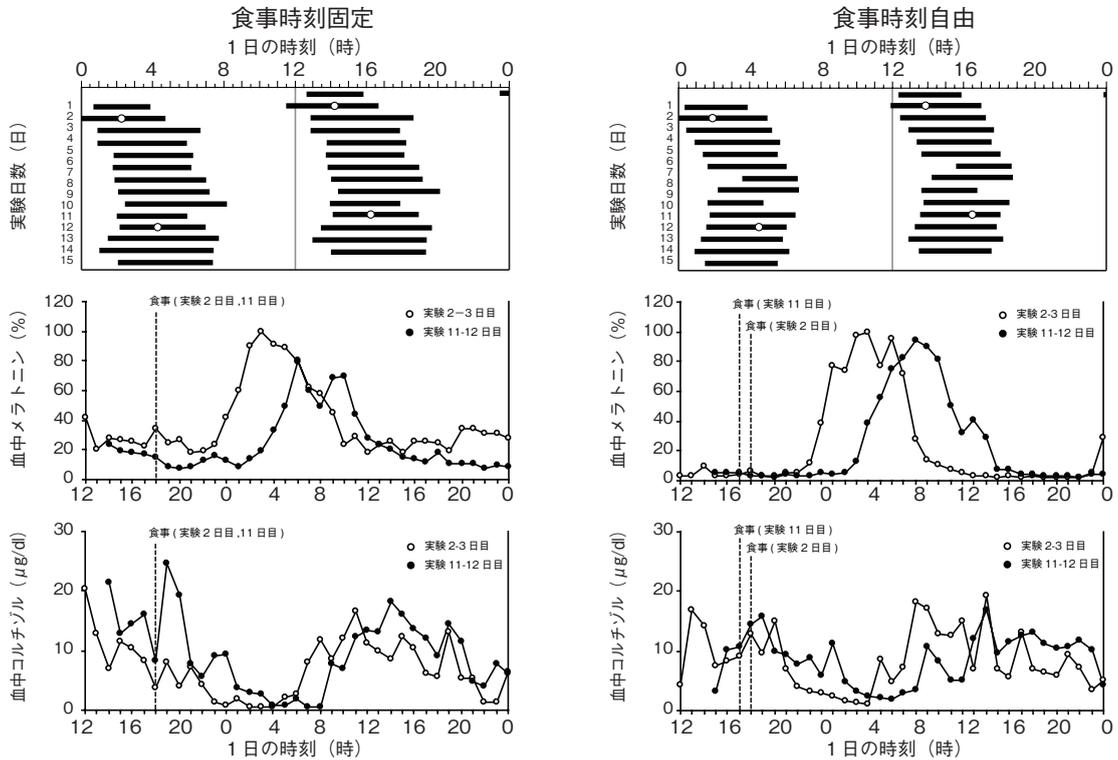


図2 実験期間中の睡眠覚醒リズム、メラトニン、コルチゾールリズムの典型例

実験期間中の睡眠覚醒リズムとメラトニンピーク位相の推移(上) 黒いバーは被験者の睡眠時間帯、白い丸はメラトニンリズムピーク位相を示す。食事時刻固定群(左)、食事時刻自由群(右)共に、1日1回の食事スケジュール期間中には睡眠覚醒リズムのフリーランが阻止されている。実験2日目と実験11日目に測定した血中メラトニン(中)、コルチゾールリズム(下)の典型例。食事時刻固定群(左)、食事時刻自由群(右)共に、1日1回の食事スケジュール後ではメラトニン(中)およびコルチゾール(下)リズムは位相後退している。また食事時刻(破線)前のコルチゾール濃度は、1日1回の食事スケジュール後においても食事前のコルチゾール濃度の上昇は認められていない。

効果：実験日数)により解析した結果、食事固定群、食事自由群共に実験期間中の就寝時刻には有意な変化は認められなかった。また、1日1回の食事を24時間周期で摂取するスケジュール期間(実験4日目から11日目)の就寝開始位相のフリーラン周期の平均値は、食事固定群では 24.0 ± 0.2 時間(平均 ± 標準偏差)、食事自由群では 24.1 ± 0.5 時間であり両群共に24.0時間とは有意な差は認められなかった。

2.2 メラトニンリズム

メラトニンリズム頂値位相の実験2日目(1日3回の食事スケジュール)から実験11日目(1日1回18時の食事スケジュールの最終日)にかけての位相変化量を比較したところ、食事固定

群では -2.4 ± 1.4 時間、食事自由群では -3.2 ± 2.3 時間であり、両群共に有意に位相後退していた($P=0.02$, $P=0.03$, 対応のある t 検定)。両群間の位相後退量には有意な差は認められなかった。位相変化量から計算したメラトニンリズムのフリーラン周期は食事固定群では 24.3 ± 0.2 時間、食事自由群では 24.4 ± 0.3 時間であり、両群共に24時間に比較して有意に長い周期を示した($P=0.02$, $P=0.03$, 1標本の t 検定)。

2.3 コルチゾールリズム

食事固定実験では、1日1回18時の食事スケジュールにより食事誘導性概日リズムが形成されるかを実験2日目での食事時刻の3時間前(15時)から食事時刻(18時)までの4時点のコルチゾ

ル濃度を基準値とし、実験11日目の同時刻でのコルチゾル濃度との差の有意性を検討した。その結果、食事3時間前から食事時刻までのコルチゾル濃度に有意な変化は認められなかった（実験2日目 vs. 実験11日目：15時 $11.9 \pm 4.1 \mu\text{g/dl}$ vs. $11.7 \pm 3.3 \mu\text{g/dl}$, 16時 $15.2 \pm 6.2 \mu\text{g}$ vs. $11.7 \pm 4.5 \mu\text{g/dl}$, 17時 $10.6 \pm 4.1 \mu\text{g}$ vs. $12.2 \pm 5.9 \mu\text{g/dl}$, 18時 $8.9 \pm 5.3 \mu\text{g/dl}$ vs. $12.0 \pm 6.2 \mu\text{g/dl}$ ）。食事自由実験では、1日1回の食事を自由に摂取させたため、各被験者の実験11日目の食事時刻の3時間前から食事時刻までにコルチゾル濃度を解析したが、食事3時間前から食事時刻までにコルチゾル濃度の有意な上昇は認められなかった（3時間前 $17.8 \pm 7.6 \mu\text{g/dl}$, 2時間前 $11.7 \pm 7.2 \mu\text{g/dl}$, 1時間前 $15.5 \pm 6.3 \mu\text{g/dl}$, 食事時刻 $8.9 \pm 4.3 \mu\text{g/dl}$ ）。

2. 4 インスリン

1日3食の食事条件（実験2日目）におけるインスリン濃度は、食後1時間後（19時）に食事前（18時）より有意に上昇し（18時 vs. 19時, $4.1 \pm 1.9\text{mU/L}$ vs. $51.3 \pm 27.3\text{mU/L}$, $P < 0.01$ 対応のある t 検定）、最高値を示したのち徐々に低下し、食後5時間後には食事前のレベルに戻った。食事固定群では、実験2日目では食後1時間後に最高値を示したが、実験11日目では食後のインスリン濃度は食後1時間後には食事前に比較し有意に上昇し（ $3.7 \pm 2.1\text{mU/L}$ vs. $83.0 \pm 34.7\text{mU/L}$, $P < 0.05$, 対応のある t 検定）、食後3時間後に最高値（ $133.2 \pm 33.3\text{mU/L}$ ）に達した。実験2日目のインスリン濃度と比較したところ、実験11日目では食後2時間後～6時間後では有意に上昇していた（ $P < 0.05$, 対応のある t 検定）。食事自由実験では、食事固定実験と同様に食後3時間後に最高値を示した（ $166.1 \pm 117.8\text{mU/L}$ ）が、食後4時間後には食事前のレベルに低下した。実験11日目の両群間のインスリン濃度には有意な差は認められなかった。実験3日目、12日目の定カロリー食（200kcal）を2時

間間隔で摂取させた際のインスリン濃度は、両日間で有意な差は認められなかった。

2. 5 レプチン

レプチンは、実験2日目では睡眠時に分泌濃度が高くなる概日リズムがみられた。食事固定群、食事自由群共に、実験11日目では実験2日目に比較してリズムの位相後退がみられた。一部の被験者では、睡眠時の濃度が低下し、リズムが平坦化していた。また、食事前ピークはみられなかった。

2. 6 グレリン

グレリンは、個人差が大きく実験2日目、実験11日目共に一部の被験者では睡眠時に濃度が高くなる概日リズムがみられた。しかし、食事固定群、食事自由群共に食事前ピークはみられなかった。

2. 7 体重

実験開始時（実験2日目）、1日1回の食事スケジュール最終日（実験10日目）、実験最終日（実験15日目）の起床時体重を比較した結果、食事固定群、食事自由群共に実験開始時に比較し食事スケジュール最終日では体重は有意に減少した（食事固定群 $-1.1 \pm 0.5\text{kg}$, 食事自由群 $-1.8 \pm 0.3\text{kg}$, $P < 0.01$, 対応のある t 検定）実験最終日においても実験開始時に比較し有意に減少していたが、食事スケジュール最終日からの有意な変化は認められなかった。

3. 考 察

3. 1 食事時刻依存性概日リズム

本研究は、ヒトを対象にフリーラン環境下で1日1回の食事スケジュールに対して食事時刻依存性概日リズム（食事前ピーク）が出現するかを厳密に管理された実験環境下で初めて検証したが、

今回測定したメラトニン、コルチゾル、インスリン、グレリン、レプチンには食事前ピークは認められなかった。

夜行性げっ歯類を対象とした実験で報告されてきた食事時刻依存性概日リズムの特性から本研究の結果を考察する。昼夜変化の存在する環境下でマウスやラット等を飼育すると、自由に摂取できる条件下では摂食行動は暗期に集中し、1日の摂食量の80%以上が暗期で摂取される¹⁰⁾。摂食行動にみられる概日リズムは、視交叉上核を破壊すると摂食リズムは消失するが、1日あたりの摂食量は変化しない¹¹⁾。つまり、摂食行動は生物時計中枢である視交叉上核に依存していると考えられる。

動物を自由摂食から食事時刻を制限する制限給餌に移行すると1週間から10日の移行期を経て、給餌時刻前に活動量が上昇する給餌前ピークが現れる。給餌前ピークの大きさは、制限給餌の長さ(摂食量)、制限給餌の時刻、給餌前の絶食期間に影響される。制限給餌の長さを4時間から12時間まで変化させた実験では、制限給餌の長さが長くなると活動の給餌前ピークが低下する¹²⁾。給餌前ピークの大きさは、動物が摂食行動を行う暗期の制限給餌に比較し、摂食行動が少ない明期の制限給餌で増加する¹³⁾。また、1時間の給餌を1日2回時間を変えて行くと、より期間が長い絶食に引き続く給餌時刻の前に給餌前ピークが形成される¹⁴⁾。給餌前ピークが活動に表現されるまでの期間は、制限給餌前に絶食期間を与えることで短縮することが報告されており、生体内のエネルギー状態の変化も給餌前ピークの出現に関わっていることが推測される。

本研究では、1日1回の食事を夕食の時間帯(18時)に固定し、約1800kcalの食事を8日間摂取させた。ヒトを対象にフリーラン環境下で食事時刻依存性概日リズムの存在を検証した研究は本研究が最初であったが、通常の生活下における予備

的実験では、食事時刻を朝か夜のどちらかに制限する食事スケジュールを2週間行い、食事時刻により体重変化に有意な差を認めただけでなく、夜の食事をとった被験者の約30%に食事前血中コルチゾル濃度の上昇が認められ、ヒトにも食事時刻依存性概日リズムが存在することが示唆された(本間、未発表データ)。今回の実験では予備実験の結果をもとに夕食の時間帯で1日1回の食事を与えたが食事前ピークは認められなかった。この結果の原因としては、食事スケジュールの期間が8日間と短期間であったため、食事前ピークが形成されなかったかもしれない。今後、食事期間をさらに延長した際に食事前ピークが形成されるかを検証する実験が必要である。

3.2 食事スケジュールによる睡眠覚醒リズムの非光同調

本研究では、食事固定群、食事自由群共に1日1回の食事スケジュール期間中の睡眠覚醒リズムは、フリーラン条件下であるにも関わらず24時間周期を示すが、生物時計に強く支配される血中メラトニンリズムは有意に位相後退し、両リズム間で位相関係が変化した。

ヒトの生物時計を調節する強力な同調因子は、他の生物と同様に環境の明暗周期(高照度光)である。しかし、ヒトの生物時計機構には他のほ乳類にはない2つの特徴があり、フリーラン条件下で睡眠覚醒リズムとメラトニンや深部体温リズムが異なる周期でフリーランする内的脱同調現象^{15,16)}、低照度環境下で厳密な生活スケジュールに睡眠覚醒リズムのみが同調し、メラトニンリズムがフリーランする睡眠覚醒リズムの部分同調である⁶⁾。内的脱同調や睡眠覚醒リズムの部分同調を説明するモデルとして、2振動体モデルが想定されている。振動体Iは高照度光を同調因子とし、体温、メラトニンリズムを制御する。振動体IIは厳密な生活スケジュールといった社会的因子(非

光因子)を同調とし、睡眠覚醒リズムを制御する。振動体Ⅰは生物時計中枢である視交叉上核に局在することが想定されるが、振動体Ⅱの局在は不明である。我々は、現在までに生活スケジュールや習慣的な身体運動がヒトのメラトニンリズム、睡眠覚醒リズムに影響する非光同調機構をもつことを明らかにしてきた。

動物を対象とした実験では、制限給餌によって出現する給餌前ピークは周期的制限給餌スケジュールを中止しても数日間持続し、消失するが絶食にすると再び出現する。さらに、視交叉上核を破壊した動物でもみられる。つまり、給餌前ピークの背後には周期的制限給餌に同調する振動機構(食事性概日振動体)が視交叉上核外に存在すると考えられる。また、給餌前ピークは制限給餌の周期により変化し、22時間~31時間の範囲でのみ出現することから、食事性概日振動体は概日系の振動機構であることが想定される^{17,18)}。恒常環境下で動物の行動リズムがフリーランする条件下での制限給餌スケジュールを行っても、行動のフリーランリズム¹⁹⁾、視交叉上核の電気活動リズム²⁰⁾、時計遺伝子発現リズム²¹⁾、視交叉上核の支配を受ける松果体メラトニンリズム²²⁾には影響しない。一方、視交叉上核外の脳部位や肝臓などの末梢組織における時計遺伝子発現リズムは制限給餌スケジュールに同調することが報告されている^{3,21)}。これらの知見をまとめると、自由摂食条件下では食事性概日振動体は視交叉上核の支配下にあるが、制限給餌により視交叉上核の支配から乖離し、制限給餌に同調した給餌前ピークが形成され则认为される。

上述の食事性概日リズムとその背後にある食事性概日振動体の特徴は、食事という非光刺激を同調因子とする点、非光因子により視交叉上核の支配から乖離し独自のリズムを形成する点でヒトの睡眠覚醒リズムを制御する振動機構と共通する部分がある。今回の食事固定実験で1日1回、24

時間の食事スケジュールに睡眠覚醒リズムの同調がみられたが、食事のどの要因が睡眠覚醒リズムの同調因子として作用したのかは不明である。我々の先行研究では、低照度の隔離実験室での運動や厳密な生活スケジュールが睡眠覚醒リズムの同調を促進するが、メラトニンリズムに対する作用が弱いことを報告した^{6,7)}。運動や厳密な生活スケジュールによる睡眠覚醒リズムの非光同調(部分同調)は、非光因子が被験者の覚醒レベルを上昇させ、交感神経系を介して睡眠覚醒リズムを制御する振動機構に作用するという仮説をたてた。本実験では、1日1回の食事では次の食事までの期間には空腹感が増加するが、空腹時には交感神経活動が増加することで貯蔵エネルギーの分解を促進し、血糖値を維持するように働くことが推測される。このような食事に伴う交感神経系の周期的な上昇が睡眠覚醒リズムの同調因子として作用したのかもしれない。

本実験では、食事固定実験だけでなく食事自由実験においても睡眠覚醒リズムは24時間周期を示し、フリーランが阻止された。過去のフリーラン実験では、1日3回の食事を被験者が選択したタイミングで摂取させた際には、睡眠覚醒リズムは約25時間の周期でフリーランすることから、1日1回の食事スケジュールが睡眠覚醒リズムに影響したと推測される。食事自由実験では、1日1回の食事時刻は、食事時刻自由実験では、平均2.7時間であり、多くの被験者が朝方に食事を摂取しており、食事固定群での起床後から食事までの時間(平均6.5時間)に比較して短縮していた。つまり、1日1回の食事を覚醒時の前半~中間に摂取する食事スケジュールにより睡眠覚醒リズムのフリーランが阻止された。しかし、特定位相での食事が睡眠覚醒リズムの同調因子として作用するか否かは食事時刻を変えた条件で、位相変化を検証する必要がある。

3. 3 エネルギー代謝調節

本実験では、実験2日目、11日目における空腹時のインスリン濃度（基礎分泌）には有意な変化が認められなかったが、食後のインスリン濃度（追加分泌）は実験2日目に比較し、11日目では有意に上昇していた。また、一定のカロリー（200kcal）を2時間間隔で摂取した際のインスリン濃度には、実験3日目と12日目の間に有意な差が認められなかった。これらの結果は、8日間の1日1回の食事がインスリンの基礎分泌、追加分泌にあたる影響は少ないと考えられる。実験11日目において、食後のインスリン濃度が実験2日目に比較し増加していたのは、1回の食事による摂取量に依存した反応であると推測される。

4. まとめ

本実験では、健康成人男性を対象に厳密にコントロールされた時間隔離実験室内で食事時刻依存性概日リズムが存在するか否かを検証した。1日1回24時間周期の食事スケジュールでは食事前ピークは出現しないことがわかった。規則正しい食事スケジュールは、メラトニンリズムには影響しないが、睡眠覚醒リズムの同調因子として作用し、フリーランを阻止する効果をもつことがわかった。現時点では当初の実験計画で目標としていた被験者数を得ることができなかった。今後、被験者数を追加して統計処理を行う予定である。

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御礼申し上げます。

文 献

- 1) Wever R.A.: The circadian system of man: Results of experiments under temporal isolation. New York: Springer, (1979)
- 2) Yamazaki S., Numano R., Abe M., Hida A.,

Takahashi R., Ueda M., Block G.D., Sakaki, Y., Menaker, M., Tei, H.: Resetting central and peripheral circadian oscillators in transgenic rats., *Science*, **288**: 682-685 (2000)

- 3) Stokkan K.A., Yamazaki S., Tei H., Sakaki Y., Menaker M.: Entrainment of the circadian clock in the liver by feeding., *Science*, **291**: 490-493 (2001)
- 4) Yamanaka Y., Honma S., Honma K.: Scheduled exposures to a novel environment with a running-wheel differentially accelerate re-entrainment of mice peripheral clocks to new light-dark cycles., *Genes. Cells.*, **13**: 497-507 (2008)
- 5) Honma K., Honma S., Wada T.: Entrainment of human circadian rhythms by artificial bright light cycles., *Experientia*, **43**: 572-574 (1987)
- 6) Hashimoto S., Nakamura K., Honma S., Honma K.: Non-photic entrainment of human rest-activity cycle independent of circadian pacemaker., *Sleep Biol. Rhythms.*, **2**: 29-36 (2004)
- 7) Yamanaka Y., Hashimoto S., Tanahashi Y., Nishide S., Honma S., Honma K.: Physical exercise accelerates reentrainment of human sleep-wake cycle but not of plasma melatonin rhythm to 8-h phase-advanced sleep schedule., *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **298**: R681-R691 (2010)
- 8) Van Cauter E., Polonsky K.S., Scheen A.J.: Roles of circadian rhythmicity and sleep in human glucose regulation., *Endocr. Rev.*, **5**: 716-738 (1997)
- 9) McHill A.W., Melanson E.L., Higgins J., Connick E., Moehlman T.M., Stothard E.R., Wright K.P.Jr.: Impact of circadian misalignment on energy metabolism during simulated nightshift work., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **111**(48) : 17302-17307 (2014)
- 10) Zucker I.: Light-dark rhythms in rat eating and drinking behavior., *Physiol. Behav.*, **6**: 115-126 (1971)
- 11) Nagai K., Nishio T., Nakagawa H., Nakamura S., Fukuda Y.: Effect of bilateral lesions of the suprachiasmatic nuclei on the circadian rhythm of food intake., *Brain Res.*, **142**: 384-389 (1978)
- 12) Stephan F.K., Becker G.: Entrainment of anticipatory activity to various durations of food access., *Physiology & Behavior*, **46**: 731-741 (1989)
- 13) Stephan F.K.: The role of period and phase in interactions between feeding- and light-entrainable

- circadian rhythms., *Physiology & Behavior.*, **36**: 151-158 (1986)
- 14) Honma K., Honma S., Hiroshige T.: Feeding associated corticosterone peak in rats under various feeding cycles., *Am. J. Physiol.*, **246**: R721-R726 (1984)
 - 15) Aschoff J.: Circadian rhythms in man., *Science.*, **148**: 1427–1432 (1965)
 - 16) Honma K., Hashimoto S., Endo T., Honma S.: Light and plasma melatonin rhythm in humans., *Biol. Signals*, **6**: 307-312 (1997)
 - 17) Boulos Z., Rosenwasser A.M., Terman M.: Feeding schedules and the circadian organization of behavior in the rat., *Behav. Brain Res.*, **1**: 39–65 (1980)
 - 18) Stephan F.K.: Limits of entrainment to periodic feeding in rats with suprachiasmatic lesions., *J. Comp. Physiol. A.*, **143**: 401-410 (1981)
 - 19) Honma K., von Goetz C., Aschoff J.: Effects of restricted daily feeding on freerunning circadian rhythms in rats., *Physiol. Behav.*, **30**: 905-913 (1983)
 - 20) Inouye S.: Restricted daily feeding does not entrain circadian rhythms of the suprachiasmatic nucleus in the rat., *Brain Research*, **232**: 194-199 (1982)
 - 21) Abe H., Honma S., Honma K.: Daily restricted feeding resets the circadian clock in the suprachiasmatic nucleus of CS mice., *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, **292**: R607–R615 (2007)
 - 22) Kalsbeek A., Barassin S., van Heerikhuizen J.J., van der Vliet J., R. M. Buijs R.M.: Restricted daytime feeding attenuates reentrainment of the circadian melatonin rhythm after an 8-h phase advance of the light-dark cycle., *J. Biol. Rhythms.*, **15**: 57-66 (2000)

脂質による消化管ホルモン分泌作用を活用した 新たな筋グリコーゲン回復法の開発

東 京 大 学 寺 田 新

Effects of Co-administration of Carbohydrate and Fat on Insulin Secretion and Muscle Glycogen Resynthesis after Exercise in Mice

by

Shin Terada

*Graduate School of Arts and Sciences,
The University of Tokyo*

ABSTRACT

For the purpose of developing a novel method to promote muscle glycogen recovery, we examined the effects of co-administration of carbohydrate and fat on insulin secretion and muscle glycogen resynthesis after exercise in C57BL/6J mice. In Experiment 1, non-exercised mice were orally administered solution containing either glucose alone (2 mg/g BW) (CHO group) or glucose plus rapeseed oil (2 mg/g BW) (CHO-FAT group). Blood sample were collected from tail vein and plasma glucose, insulin and glucose-dependent insulintropic polypeptide (GIP) levels were determined. Compared with the CHO group, the CHO-FAT group had significantly higher plasma insulin and lower glucose levels after the administration ($p < 0.05$). Furthermore, Plasma GIP concentration was significantly higher in the CHO-FAT than CHO group ($p < 0.001$) and was significantly associated with plasma insulin concentration ($p < 0.001$). In Experiment 2, mice performed an acute bout of 30-min swimming exercise and were then orally administered as in the Experiment 1. At 1 h after the administration, muscle glycogen content in hindlimb muscle was significantly higher in the CHO-FAT than CHO group. These results suggest that co-ingestion of

carbohydrate and fat stimulates insulin secretion via gut-derived GIP and promotes muscle glycogen resynthesis after exercise in mice.

要 旨

本研究では、新たな運動後の筋グリコーゲン回復法の開発を目的として、糖質と脂質の同時摂取がC57BL/6J マウスにおけるインスリン分泌および筋グリコーゲン濃度に及ぼす影響について検討した。実験1では、安静状態のマウスに対し、糖質 (2 mg/g BW, CHO 群) もしくは糖・脂質混合物 (それぞれ2mg/g BW, CHO-FAT 群) を経口投与し、血漿インスリン、グルコースおよび消化管ホルモン Glucose-dependent insulintropic polypeptide (GIP) の濃度変化を検討した。その結果、CHO 群に比べて、CHO-FAT 群では血漿インスリン濃度が有意に高い値を示し ($p<0.05$)、一方、血漿グルコース濃度は有意に低い値を示した ($p<0.05$)。また、インスリン分泌促進効果をもつ GIP の濃度は、CHO 群に比べて CHO-FAT 群において有意に高い値を示し ($p<0.001$)、さらに、血漿 GIP 濃度とインスリン濃度との間には高い正の相関関係が認められた。 ($p<0.001$)。実験2では、30分間の一過性の水泳運動を行ったマウスに対し、実験1と同様に糖質もしくは糖・脂質混合物を投与し、筋グリコーゲン回復への影響を検討した。投与1時間後における後肢骨格筋のグリコーゲン濃度は、CHO 群に比べて CHO-FAT 群において有意に高い値を示した ($p<0.05$)。以上の結果から、糖質と脂質の同時摂取は、消化管ホルモン GIP を介してインスリン分泌を促進し、運動後の筋グリコーゲン回復を高める可能性が示唆された。

緒 言

近年、市民ランナーが急増し、空前のマラソンブームとなっている。競技選手のみならず、市民

ランナーにとっても、練習後の疲れを翌日まで持ち越さないようにしたり、パフォーマンスを向上させたりするためには、練習およびレース後に疲労を速やかに取り除くことが重要となる。長時間運動による疲労の原因の一つに筋グリコーゲンの枯渇が挙げられ、筋グリコーゲンをいかに早く元の状態に戻すかが疲労回復において重要となる。

運動後の筋グリコーゲン回復に関しては、これまでに数多くの研究が行われており、運動終了後、できるだけ早い時間帯に体重1 kgあたり1~1.5 gの糖質を摂取することが推奨されている^{1,2)}。さらに、糖質だけではなくタンパク質も同時に摂取することで、糖質のみを摂取した場合に比べてインスリン分泌が増加し、運動後の筋グリコーゲン回復が早まることも報告されている³⁾。グリコーゲンの直接的な材料ではないタンパク質を摂取することによるこのような筋グリコーゲンの回復促進効果には、glucose-dependent insulintropic polypeptide (GIP) や glucagon-like peptide-1 (GLP-1) と呼ばれる消化管ホルモンが関与していると考えられている。GIPやGLP-1は、消化管に栄養素が取り込まれた際に、それぞれ小腸のK細胞およびL細胞から分泌されるホルモンであり、高血糖時において膵臓からのインスリン分泌を増強する作用を持つ⁴⁾。また、GIPやGLP-1は、脂質を摂取した際に最も多く分泌されることが報告されている⁵⁾。したがって、糖質に脂質を組み合わせた場合にインスリン分泌を最も増強することができ、筋グリコーゲン回復をさらに促進できる可能性が考えられる。しかしながら、脂質の摂取は糖代謝に好ましくない影響を及ぼすという先入観があり、糖質に加え脂質を同時に摂取した際のグリコーゲン回復動態は未だ検討されていない。そこで、本研究では、糖質と脂質の同時摂

取が運動後の筋グリコーゲン回復に及ぼす影響について検討し、新たなグリコーゲン回復法の開発に向けた基礎データを得ることを目的とした。

1. 方法

1. 1 実験動物

実験には7週齢の雄性 C57BL/6J マウス（日本クレア社）を用いた。マウスは室温 23℃、午前7時～午後7時を暗期に設定した飼育室において、1ケージに5匹ずつ飼育した。新たな飼育環境に慣れさせるために、実験までに1週間の予備飼育期間を設けた。予備飼育期間には、飼料として市販の固形飼料（CE-2、日本クレア社）と飲料として水道水を自由摂取させた。なお、本研究は、東京大学大学院総合文化研究科・教養学部実験動物委員会の承認を得て行われた。

1. 2 実験1

実験1では、まず安静状態において糖質と脂質を同時に摂取することで、インスリン分泌が促進されるか検討した。一晚（16時間）の絶食後、マウスを CHO 群と CHO-FAT 群の2群に無作為に分けた。CHO 群には、50mg/ml 濃度のグルコース溶液を体重 1g あたり 40 μ L ずつ（グルコースを体重 1g あたり 2mg）経口投与した。一方、CHO-FAT 群には、グルコースおよび脂質（キャノーラ油、日清オイリオグループ社）がともに 50mg/ml 濃度となるように調整した投与液を、CHO 群と同様に体重 1g あたり 40 μ L ずつ（グルコース、脂質ともに体重 1g あたり 2mg）経口投与した。なお、CHO-FAT 群の投与液は、大豆レシチン（和光純薬社）を 2mg/ml の割合で添加し、1分間の超音波処理（TAITEC 社製超音波発生装置）を1分間の氷上冷却を間に挟みながら5回繰り返すことで十分に乳化したものを用意した。CHO 群の投与液にも同量の大豆レシチンを添加し、良く混和したものを準備した。

投与直前および投与 10, 30, 60 分目に尾静脈から採血を行った。採血は、ヘパリン処理したキャピラリーチューブを用いて行った。遠心分離して得た血漿サンプルは、分析まで -80℃の超低温フリーザーで保存した。

1. 3 実験2

実験2では、糖質と脂質の同時摂取により運動後の筋グリコーゲン回復が促進されるか検討した。水泳運動に慣れさせるために、予備飼育期間中にすべてのマウスに対して、1日10分間の温水水泳運動を2回行わせた。本実験では、一晚（16時間）の絶食後に、すべてのマウスに対して30分間の水泳運動を行わせた。水温 35 \pm 1℃に調節した温水をプラスチック製タンクに水深 30cm になるまで注ぎ、マウスを泳がせた。水泳は5匹同時に行い、1匹あたりの水面の面積は、120cm²であった。

水泳運動終了直後に、マウスに対して実験1と同様の糖質溶液（CHO 群）もしくは糖・脂質混合溶液（CHO-FAT 群）を経口投与した。投与1時間後に麻醉下に解剖を行い、後肢骨格筋群（腓腹筋、ヒラメ筋、足底筋の複合体）を摘出し、速やかに液体窒素にて凍結した。骨格筋サンプルは分析まで -80℃の超低温フリーザーで保存した。

1. 4 分析

血漿グルコース濃度の測定には、グルコース C II テストワコー（和光純薬社）を用いた。血漿中の総 GIP 濃度およびインスリン濃度は、ELISA 法にて分析した（GIP : Rat/Mouse GIP (total) ELISA, Merck Millipore 社 ; Insulin : Mouse Insulin ELISA, Mercodia 社）。血漿グルコース、インスリンおよび GIP の濃度変化をグラフにし、曲線下面積 (Area under the curve : AUC) を求めた。

骨格筋のグリコーゲン濃度は、Lowry and Passonneau の方法⁶⁾に基づいて分析した。

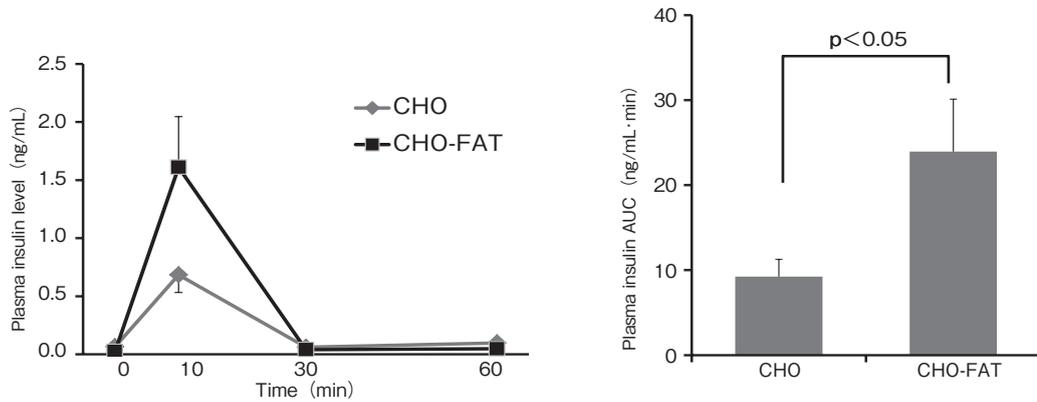


図1 糖質溶液 (CHO) もしくは糖・脂質混合溶液 (CHO-FAT) の投与がマウスの血漿インスリン濃度に及ぼす影響

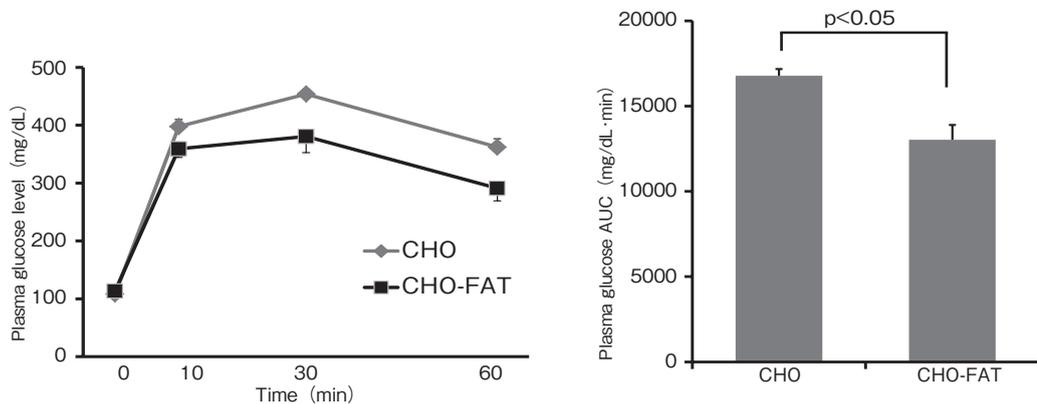


図2 糖質溶液 (CHO) もしくは糖・脂質混合溶液 (CHO-FAT) の投与がマウスの血漿グルコース濃度に及ぼす影響

1. 5 統計処理

データは全て平均値 ± 標準誤差で表した。2群間の平均値の比較には、Student の t-test を用いた。危険率5%未満をもって有意とした。

2. 結果

2. 1 実験1

糖質溶液もしくは糖・脂質混合溶液投与後の血漿インスリンおよびグルコース濃度の変化をそれぞれ図1と図2に示した。CHO-FAT群では、溶液投与10分後の血漿インスリン濃度が高値を示し、投与後0-30分目までのAUC値は、CHO群に比べてCHO-FAT群で有意に高い値を示した ($p<0.05$, 図1)。また、血漿グルコース濃度は、投与10分目以降においてCHO-FAT群でCHO

群に比べて低い値を示し、投与後0-60分目までのAUCもCHO-FAT群で有意に小さいものであった ($p<0.05$, 図2)。同じ血漿サンプルを用いて測定した血漿GIP濃度の結果を図3に示した。投与10分目以降において、CHO群に比べてCHO-FAT群で高値を示し、投与後0-60分目までのAUC値も有意に高い値であった ($p<0.001$)。

溶液投与10分目における血漿GIP濃度とインスリン濃度との関係を図4に示した。血漿GIP濃度とインスリン濃度との間には高い正の相関関係が認められた ($r=0.677$, $p<0.001$)。

2. 2 実験2

CHO-FAT群のマウスでは、運動終了1時間後(溶液投与1時間後)における後肢骨格筋のグリ

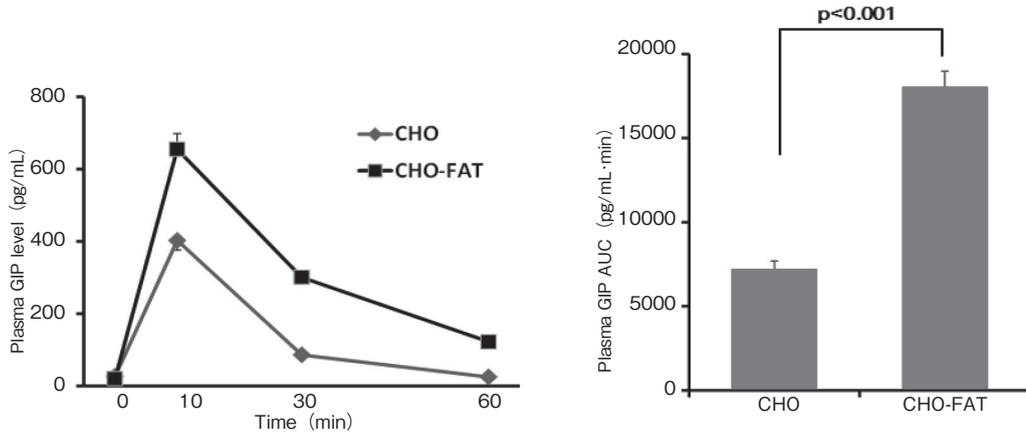


図3 糖質溶液 (CHO) もしくは糖・脂質混合溶液 (CHO-FAT) の投与がマウスの血漿GIP濃度に及ぼす影響

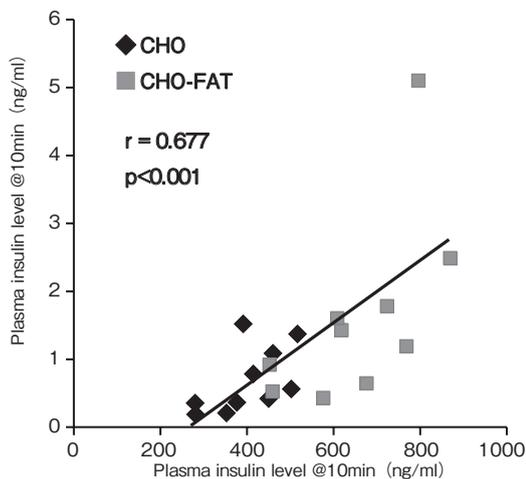


図4 投与10分後における血漿GIP濃度とインスリン濃度の関係

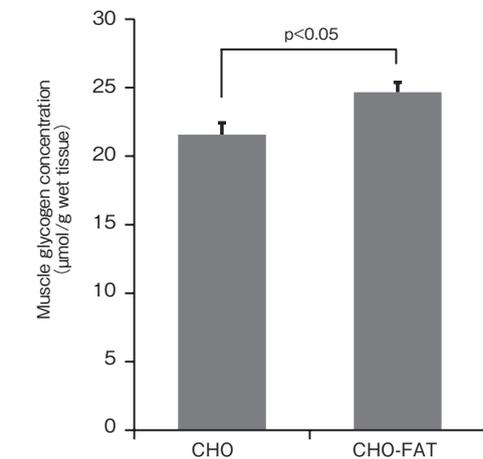


図5 運動終了1時間後におけるマウス骨格筋のグリコーゲン濃度に及ぼす糖質溶液 (CHO) もしくは糖・脂質混合溶液 (CHO-FAT) 投与の影響

コーゲン濃度が、CHO群のマウスに比べて有意に高い値を示した (図5, $p < 0.05$)。

3. 考察

本研究の主な知見は、糖質を単独で摂取した場合に比べて、糖質に加えて脂質を同時に摂取することで、1) 消化管ホルモンGIPさらにはインスリンの分泌が促進される、血糖値が低下しやすくなること、および2) 運動後の筋グリコーゲン回復が促進される、という2点である。

インスリンは、骨格筋において糖輸送体 GLUT-4 の細胞膜への移行を増やすことで血糖取

り込みを促進し、さらにグリコーゲン合成酵素を活性化させる作用をもつ⁷⁾。したがって、運動後の筋グリコーゲンの回復を促進するためには、インスリン分泌を高めることが重要となる。本研究の実験1において、CHO-FAT群では、投与10分目の時点において血漿インスリン濃度の顕著な増加が認められ、投与0-30分目までのAUC値がCHO群に比べて有意に高い値を示していた (図1)。さらにCHO群に比べてCHO-FAT群において血糖値が有意に低い値を示し、AUCも同様にCHO-FAT群で有意に小さいものであった (図2)。

これらの結果から、糖・脂質混合物を摂取することでインスリン分泌が高まり、骨格筋をはじめとする末梢のインスリン標的組織において血糖が取り込まれ、利用されていたと考えられる。

膵臓からのインスリン分泌は、血糖値の影響だけではなく、GIPやGLP-1などの消化管ホルモンの影響を強く受けることが知られている⁴⁾。GIPは小腸のK細胞から分泌される消化管ホルモンであり、それ単独ではインスリン分泌に大きな影響は及ぼさないものの、摂食後の早い時間帯の血糖上昇時にインスリン分泌を増強する効果を持つ⁴⁾。本研究において、CHO-FAT群ではGIP濃度の顕著な上昇が認められ、AUCもCHO群に比べて有意に大きいものであった(図3)。さらに投与10分後における血漿インスリン濃度とGIP濃度の間には、高い正の相関関係が認められた(図4)。したがって、CHO-FAT群において認められたインスリン分泌の促進には、消化管ホルモンGIPの分泌亢進が大きく寄与していたと考えられる。

実験1において、血漿GIP濃度が投与後30分目においても高値を示していたのにも関わらず、血漿インスリン濃度はすでに投与前の値にまで回復していた。GIPは小腸から血中に放出された直後にDipeptidyl Peptidase-4(DPP IV)と呼ばれる酵素によってN末端の一部が切断され、不活性型となる⁴⁾。活性型のGIPの血中半減期は5分程度と大変短いことが知られている。本研究では、活性型と不活性型を区別せずに血漿中に存在するGIPの総量を測定した。したがって、投与30分目においてもCHO-FAT群のGIP濃度は高値を示していたものの、その大部分はDPP IVによってすでに切断され不活性型となったものであり、インスリン分泌促進作用を失っていたと考えられる。今後の研究においては、総GIP濃度に加えて活性化型GIP濃度も合わせて測定する必要があると考えられる。

実験1の結果を踏まえ、実験2では、このようなインスリン分泌促進効果をもつ糖・脂質混合溶液を一過性の運動後に投与することで筋グリコーゲン回復が促進されるか検討した。その結果、水泳運動終了直後に糖・脂質混合溶液を投与したCHO-FAT群では、投与1時間後の筋グリコーゲン濃度が、CHO群に比べて有意に高い値を示した(図5)。以上の結果から、糖質に加えグリコーゲンの直接的な材料ではない脂質を同時に摂取することで、運動後の筋グリコーゲン回復をさらに高めることができる可能性が示唆された。

本研究においてCHO-FAT群の脂質摂取量は、体重1gあたり2mgと多いものであった。アスリートが運動直後においてこれだけ多くの脂質(体重60kgの選手の場合、120gに相当)を一度に摂取することは難しいと思われる。したがって、今後の研究においては、この脂質の摂取量をどこまで減らしても、インスリン分泌促進効果が得られるか検討する必要があるだろう。

本研究では、投与用の脂質として一般的に広く利用されているキャノーラ油(菜種油)を用いた。脂質は脂肪酸組成やその脂肪酸がグリセロール分子中にある3つの結合部位のどこに結合するかによって、消化吸收動態や生理機能が大きく異なってくる事が知られている⁸⁾。現在、脂肪酸組成およびその構造を様々に変えた脂質を用いて検討を行っており、今後の研究においてインスリン分泌さらには筋グリコーゲン回復効果を最も高める糖質と脂質の組み合わせを明らかにする予定である。

4. 結 論

糖質と脂質の同時摂取は、消化管ホルモンGIPおよびインスリンの分泌を高め、運動後の筋グリコーゲン回復を促進する可能性が示唆された。

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深く感謝いたします。また、本研究の遂行にあたり多大なご協力を賜りました東京大学大学院総合文化研究科の野中雄大氏、稲井真氏、西村脩平氏ならびに東京大学教養学部の浦島章吾氏に深く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Ivy J.L., Katz A.L., Cutler C.L., Sherman W.M., Coyle E.F., Muscle glycogen synthesis after exercise: effect of time of carbohydrate ingestion., *J. Appl. Physiol.*, **64**: 1480-1485 (1988)
- 2) Ivy J.L., Lee M.C., Brozinick J.T. Jr., Reed M.J., Muscle glycogen storage after different amounts of carbohydrate ingestion., *J. Appl. Physiol.*, **65**: 2018-2023 (1988)
- 3) Zawadzki K.M., Yaspelkis B.B. 3rd, Ivy J.L., Carbohydrate-protein complex increases the rate of muscle glycogen storage after exercise., *J. Appl. Physiol.*, **72**: 1854-1859 (1992)
- 4) Kim W., Egan J.M., The role of incretins in glucose homeostasis and diabetes treatment., *Pharmacol. Rev.*, **60**: 470-512 (2008)
- 5) Flatt P.R., Bailey C.J., Kwasowski P., Page T., Marks V., Plasma immunoreactive gastric inhibitory polypeptide in obese hyperglycaemic (ob/ob) mice., *J. Endocrinol.*, **101**: 249-256 (1984)
- 6) Lowry O.H., Passonneau J.V., A Flexible System of Enzymatic Analysis. (Academic, New York) (1972)
- 7) Fisher J.S., Nolte L.A., Kawanaka K., Han D.H., Jones T.E., Holloszy J.O., Glucose transport rate and glycogen synthase activity both limit skeletal muscle glycogen accumulation., *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, **282**: E1214-E1221 (2002)
- 8) 寺田 新, 脂肪酸の種類や油脂の構造による消化・吸収および代謝の違い, *化学と教育*, **61**: 282-285 (2013)

筋損傷を伴わない伸張性筋力トレーニング方法の確立

鹿屋体育大学 前 大 純 朗
(共同研究者) 同 山 本 正 嘉
同 金 久 博 昭

Establishment of an Eccentric Training Modality without Muscle Damage

by

Sumiaki Maeo,
Masayoshi Yamamoto, Hiroaki Kanehisa
National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

ABSTRACT

Downhill walking (DW) is a representative exercise that predominantly involves submaximal eccentric contractions of knee extensors, and has been shown to be effective in improving knee extensor strength with relatively short-term and low-training frequency. However, DW induces muscle damage when performed unaccustomedly. This study examined whether muscle damage can be avoided by gradually increasing exercise duration in DW training, and whether avoiding/experiencing muscle damage influences training-induced strength gain. Healthy young males performed treadmill DW (gradient: -28%, velocity: 5 km/h, load: 10% of body mass) 1 session/week for 4 weeks with either ramp-up (R-UP: n = 10) ; gradually increasing exercise duration from 10 to, 30, 50, and 70 min from the 1st to 4th session to avoid muscle damage, or constant (CON: n = 12) protocol; 40 min for 4 sessions to induce muscle damage at the 1st session. Total exercise duration was 160 min for both groups. Muscle damage markers were measured before and for 72 h following each session. Before and after the intervention, maximal knee extension torques in

eccentric ($-60^\circ/s$), isometric ($0^\circ/s$), and concentric ($60^\circ/s$) conditions were measured. R-UP group showed no indications of muscle damage throughout the training period while muscle damage was evident after the 1st session in CON group. Both groups significantly increased maximal knee extension torques at all angular velocities with greater gain in eccentric (R-UP: +19%, CON: +24%) than isometric (+14%, +13%) and concentric (+10%, +12%) strength without significant group-difference. The current results suggest that muscle damage can be avoided by R-UP protocol, and is not a major determinant of the training-induced strength gain.

要 旨

本研究では、下り坂歩行 (DW) トレーニングにおいて、1) 運動時間を徐々に増加させることにより筋損傷を抑制できるか、および2) 筋損傷を抑制または経験することがトレーニング後における筋力増加の度合いに影響を与えるかを検証した。健康な若齢男性を対象に、運動時間漸増プロトコル (1～4回目にかけて運動時間を10, 30, 50, 70分と徐々に増加：漸増群； $n = 10$) または運動時間一定プロトコル (4回全てにおいて40分：一定群； $n = 12$) によるDWトレーニングを、週1回の頻度で4週間実施した。総運動時間は両群とも160分とした。一定群では1回目のトレーニング後に筋損傷指標が著しく変化した。それに対し、漸増群では、トレーニング期間を通して筋損傷指標に顕著な変化は観察されなかった。トレーニング後、両群において膝伸展筋群の最大筋力は増加し、その程度に群間差はなかった。本研究の結果から、漸増プロトコルを採用することにより筋損傷は抑制できること、および筋損傷を経験するか否かは、トレーニング後における筋力増加の度合いを決定する主な要因ではないことが示唆された。

緒 言

階段や坂道を下る際、あるいは動作の急激な減

速や素早い切り替えしを行う際、膝伸展筋群はブレーキを掛ける様に働く。このような「ブレーキを掛ける」動作遂行時の膝伸展筋群の活動様式は、筋が伸ばされながら力発揮する「伸張性収縮」が主となる。それゆえ、膝伸展筋群の最大筋力、特に伸張性の筋力を高めることは、日常生活活動における転倒の予防や、アスリートの運動パフォーマンスを高めるために重要である。

下り坂歩行 (downhill walking: DW) は、膝伸展筋群における伸張性運動の代表例である^{11, 21)}。近年、我々¹⁵⁾は、40分間×4回 (週1回) のDWトレーニングが膝伸展筋群の最大筋力、特に伸張性の筋力を増加させることを報告した。このことは、短期間・低頻度であったとしても、DWは膝伸展筋群の最大筋力を高めるのに効果的なトレーニング手段と成りうることを示唆するものである。しかしながら、伸張性運動では、筋が縮みながら力発揮する短縮性運動に比べ、運動後に著しい筋損傷 (筋肉痛の発生や最大筋力の低下) を引き起こすという特徴があり、我々が実施したDWトレーニングにおいても、初回の運動後には筋損傷指標の著しい変化が観察された¹⁵⁾。そのような筋損傷は、筋機能や運動パフォーマンスの低下を招き、また、筋肉痛による不快感は、トレーニングに対する継続性に負の影響をもたらすことが報告されている¹²⁾。これらのことを考慮すると、DWトレーニングにおいて、筋損傷を伴わな

い運動プログラムを確立することは重要であるといえる。

伸張性運動に伴う筋損傷の程度は、初回の運動実施後に比べ2回目の運動実施以降には大きく軽減される「繰り返し効果」が多くの研究で確認されている^{11, 21)}。この現象に基づき、伸張性トレーニングの量（強度または時間）を徐々に増加させることにより、トレーニング期間を通して筋損傷を抑制できる可能性がある。また、我々¹⁴⁾は、負担の小さい（強い筋損傷を伴わない）20分間のDWを事前に実施することにより、40分間のDW後の筋損傷を抑制できることを報告した。これらの知見に基づくと、トレーニング期間を通してDWの運動時間を徐々に漸増させることにより、筋損傷は抑制できると考えられる。

一方、筋損傷後に生じる炎症反応は、筋の再生・適応を促進するという説も存在する^{16, 19)}。そのような考えに基づき、あえて筋損傷を生じさせるような手法を用いるトレーニング愛好家もいる¹⁹⁾。しかし、Flann et al.⁶⁾は、総トレーニング量が等しい場合、筋損傷を経験する群としない群でトレーニング効果は同程度であったと報告しており、「トレーニング効果を左右するのは総トレーニング量であり、筋損傷を経験するか否かは重要な要因ではない」と結論づけている。この知見に基づくと、我々¹⁵⁾の報告したDWトレーニングの総トレーニング量(40分×4=160分)がトレーニング期間中に確保できれば、運動時間を徐々に漸増することで、筋損傷を経験せずとも筋力の増加は可能であると考えられる。

そこで本研究では、DWトレーニングにおいて、1) 運動時間を徐々に増加させることにより筋損傷を抑制できるか、および2) 筋損傷を抑制または経験することがトレーニング後における筋機能の改善の度合いに影響を与えるかを明らかにすることを目的とした。これを達成するために、総運動時間が先行研究¹⁵⁾と同じ160分となるよ

う、1～4回目のトレーニングにかけて運動時間を10, 30, 50, 70分と徐々に増加させる漸増群を設定し、トレーニング期間を通した筋損傷指標の変化、およびトレーニング前後における膝伸展筋力の変化を、我々が報告した40分×4回の一定群のそれらと比較した。上記の先行研究の知見に基づき、1) 漸増群はトレーニング期間を通して筋損傷を抑制できる、および2) 筋力に対するトレーニング効果に、漸増群と一定群で差はないと仮説を立てた。

1. 方法

1.1 被検者

健康な若年男子10名（年齢 20 ± 1 歳、身長 169.8 ± 7.1 cm、体重 64.1 ± 3.3 kg；平均値±標準偏差）が漸増群として実験に参加した。また、我々が報告した40分×4回のDWトレーニングを行った12名（21±2歳、 166.7 ± 5.1 cm、 62.7 ± 6.2 kg）のデータ¹⁵⁾を一定群として使用した。なお、一定群のデータの使用に関しては、掲載学術誌の許可を得た。全ての被検者は活動的であったが、定期的な運動プログラム(>30分/日、>2日/週)を実施している者はいなかった。各被検者には、実験の目的と内容、注意事項、および危険性などについて説明し、実験参加への同意を得た。本研究は、著者が所属する機関の倫理審査委員会の承認を得て行った。

1.2 トレーニング

被検者は、トレッドミル(Quasar Med, HP cosmos)を用いて、週1回のDWを計4回行った。傾斜は-28%、速度は5 km/h、担架重量は体重の10%とし、ストライドおよびピッチは各被検者の自由とした。漸増群は1～4回目のトレーニングにかけて運動時間を10, 30, 50, 70分と徐々に増加させ、一定群は4回全てにおいて40分の運動時間を用いた。総運動時間は両群ともに160

分であった。トレーニングは各被検者において7日間の間隔を空けて行われ、毎回、著者らの中の1名が観察した。

1. 3 トレーニング期間内における筋損傷指標の測定

以下に示す筋損傷の間接的指標を、各セッションの前、24時間後、48時間後、および72時間後において測定した。

1. 4 等尺性最大随意収縮 (MVC) 膝伸展トルク

膝関節伸展筋力測定器 (片脚用筋力測定器、竹井機器工業) を用いて、座位、股関節および膝関節角度90度 (最大伸展位 = 180度) において、右脚のMVC膝伸展トルクを測定した。その際、腰の位置をベルトで強く固定し、両腕は胸の前で交差させ、膝関節伸展以外の動作 (例: 股関節の屈曲や伸展など) を行わないように指示をした。また、力発揮は、バリストティックに (急激な速度で) 行うのではなく、5秒間かけて徐々に最大努力に到達するように行った。

測定に際して、十分なウォームアップを行い、その後、MVC課題を2回行った。1回目と2回目の最大トルクの差が10%以上あった場合は、その差が10%未満に収まるまで測定を繰り返した。試行間には最低1分間の休息を設けた。最大トルクの差が10%未満に収まった2試行の内、高い方の値を最大トルクとして採用した。

1. 5 血中クレアチンキナーゼ (CK) 活性値

筋損傷の指標とされる血中のCK活性値を測定した。卓上型生化学検査システム (Reflotron plus, Roche) およびCK試験紙 (Reflotron CK II, Roche) を用いて、指先より採取した全血 (32 μ l) からCK活性値を分析した。なお、測定機器を販売する企業が示す情報によると、血中CK

活性値の基準値 (正常範囲) は24-195 IU/Lである。

1. 6 大腿前部の筋肉痛

筋肉痛の測定実施前に、毎回、被検者には「軽く走る、膝の屈伸をする」動作を行わせ、その際の大腿前部の筋肉痛を visual analog scale (VAS) により測定した。VASは、紙面上に100mmの直線を引き、左端の「0」を「痛みはない状態」、右端の「100」を「これ以上の痛みはないくらい痛い状態」として、現在の痛みが100mmの直線上のどの位置にあるかを被検者が示した。

1. 7 トレーニング期間の前後における最大膝伸展トルクの測定

トレーニング期間の前後において、等速性筋力測定機器 (Biodex system2, Biodex Medical Systems) を用いて、右脚の最大膝伸展トルクを伸張性 (-60 deg/s)、等尺性 (0 deg/s)、および短縮性 (60 deg/s) の条件で測定した。測定姿勢は、股関節および膝関節角度90度の座位とし、上体および腰をベルトで強く固定した。膝関節の可動域は80~180度とした。等尺性トルクは膝関節角度90度で測定した。十分なウォームアップの後、伸張性、等尺性、および短縮性の各条件において、最大努力による膝伸展課題を2回ずつ行った。条件間の順序はランダムとした。また、試行間には最低1分間休息を設けた。各条件において、1回目と2回目の最大トルクの差が10%以上あった場合は、その差が10%未満に収まるまで測定を繰り返した。最大トルクの差が10%未満に収まった2試行の内、高い値を最大トルクとして採用した。なお、プレ測定は初回のトレーニングの3-7日前に、ポスト測定は最終回のトレーニングの3-7日後に実施した。

2. 統計

基本統計量は平均値 \pm 標準偏差で示した。各

トレーニングセッションにおける筋損傷指標の変化の比較には、二元配置分散分析（2群×4時間）を用いた。交互作用が認められた場合、一元配置分散分析（4時間）およびその後の検定（Dunnett's post hoc test）により各セッションにおけるプレの値からの変化の比較を、また、対応のないt-testにより各時間における群間差の比較を行った。

トレーニング前後における膝関節最大トルクの変化には、三元配置分散分析（2群×2時間×3角速度）を用いた。交互作用が認められた場合、各群で二元配置分散分析（2時間×3速度）を行い、各角速度条件におけるトレーニング前後の比較を行った。加えて、各角速度条件におけるトルクの増加率（%）に群間で差があるかを比較するために、トルクの増加率について、二元配置分散分析（2群×3角速度）を行った。統計処理には統計解析ソフトウェア（SPSS statistics 22, IBM）を用い、全ての検定において、有意水準は $P < 0.05$ とした。

3. 結果

3.1 筋損傷指標の変化

トレーニング期間内におけるMVC膝伸展トルクの変化を図1に示した。一定群では初回のトレーニング後に著しい低下がみられたが、漸増群ではトレーニング期間を通してそのような変化はなかった。また、初回の運動の24時間後、48時間後、および72時間後において有意な群間差が認められた。

トレーニング期間内における血中CK活性値の変化を図2に示した。一定群では初回のトレーニング後に著しい上昇がみられたが、漸増群ではトレーニング期間を通してそのような変化は観察されなかった。また、初回の運動の24時間後、48時間後、および72時間後において有意な群間差が認められた。

トレーニング期間内におけるVASの変化を図3に示した。漸増群では毎回のトレーニング後に

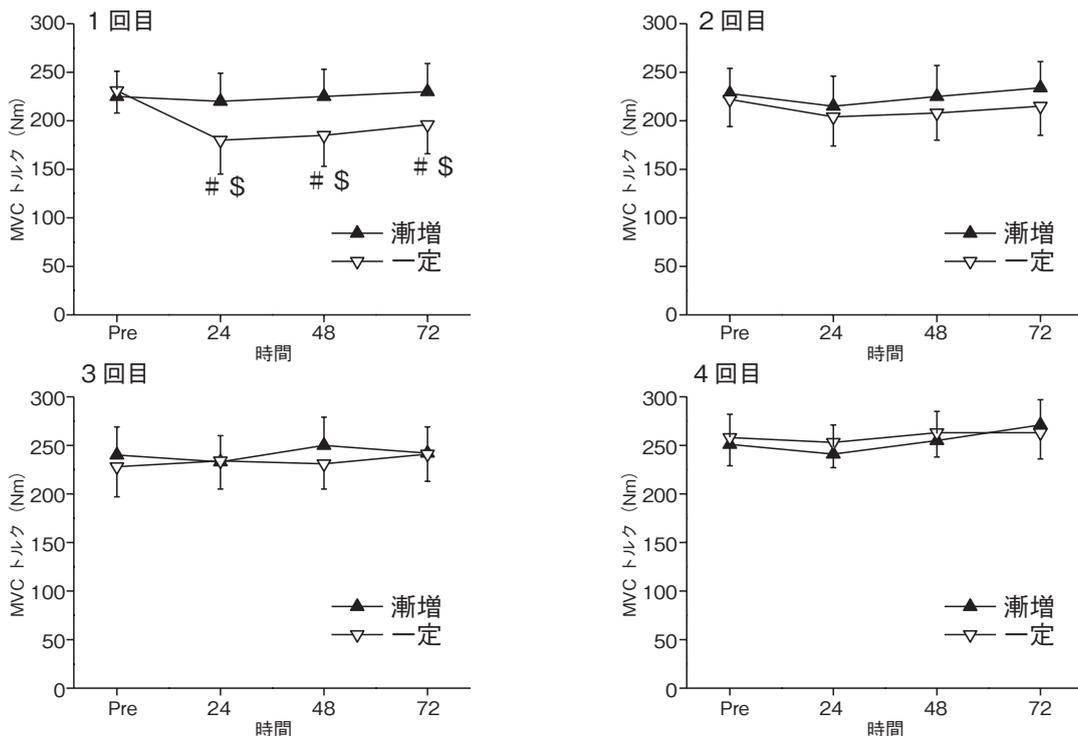


図1 トレーニング期間内におけるMVC膝伸展トルクの変化（# = vs. Pre, \$ = vs. 群）

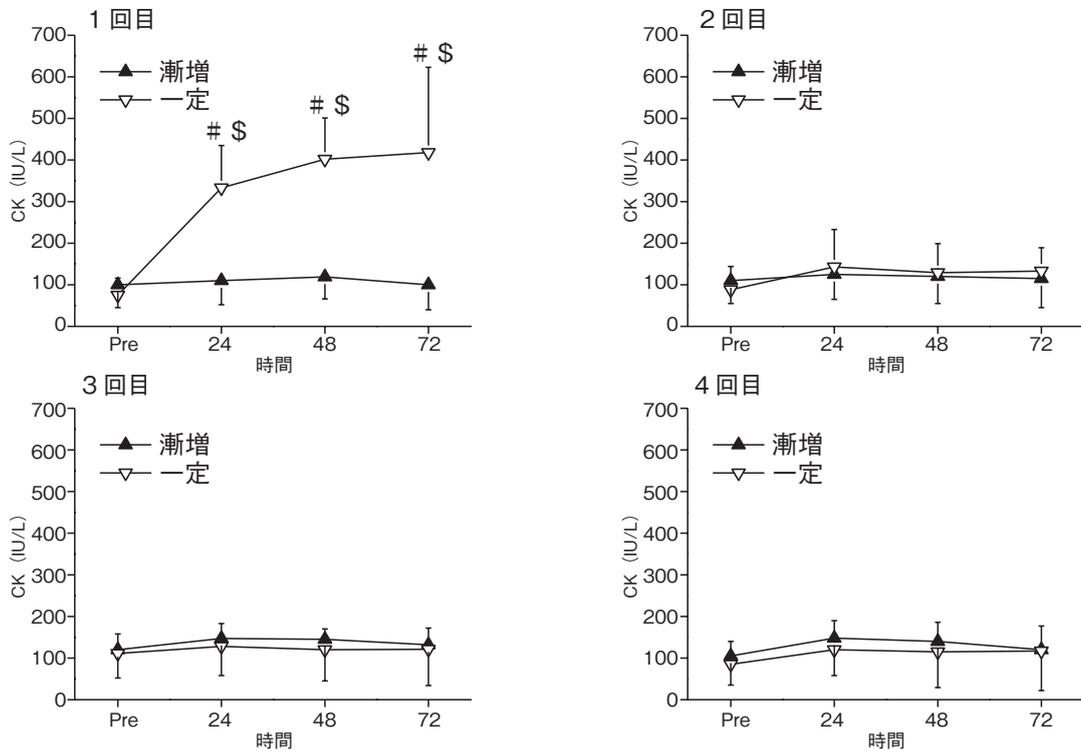


図2 トレーニング期間内における血中CKの活性値の変化 (# = vs. Pre, \$ = vs. 群)

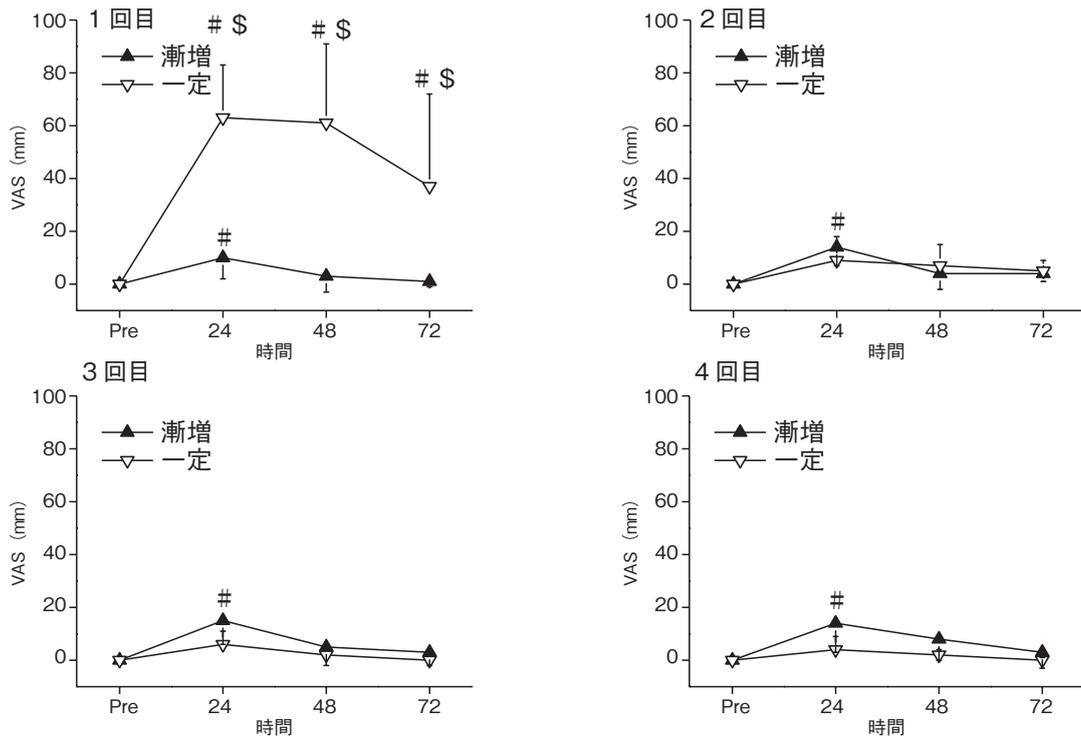


図3 トレーニング期間内におけるVASの変化 (# = vs. Pre, \$ = vs. 群)

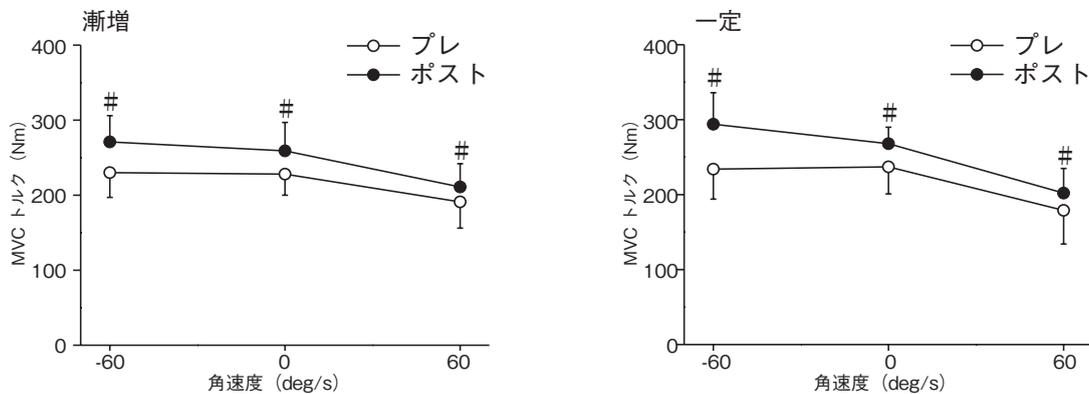


図4 トレーニング前後における最大膝伸展トルクの変化 (# = vs. Pre)

において有意な上昇がみられたが、それらはいずれも低値（ピーク：15 mm）であり、48時間以内には消失し、一定群の初回のトレーニング後に観察された値（ピーク：63 mm）に比べると有意に低かった。また、初回の運動の24時間後、48時間後、および72時間後において有意な群間差が認められた。

3. 2 プレおよびポスト測定

トレーニング前後における膝伸展トルクの変化を図4に示した。両群ともに全ての角速度条件において有意な増加がみられた。図5は両群におけるトルク増加率を収縮条件別に示したものである。二元配置分散分析の結果、収縮条件の主効果が認められ、群の主効果および交互作用は認め

られなかった。この結果は、全ての収縮条件において、トルクの増加率に群間差はなかったことを意味している。また、両群ともに、伸張性収縮条件の増加率（漸増群：+19%、一定群：+24%）が、等尺性（+14%、+13%）および短縮性（+10%、12%）条件のそれよりも大きかった。

4. 考 察

本研究の結果、1) 一定群では初回のトレーニング後に筋損傷指標に著しい変化がみられたが、漸増群ではトレーニング期間を通してそのような変化はなかった、2) トレーニング後の筋力増加率に有意な群間差はなかった。これらの結果は、本研究で立てた仮説を支持するものであり、漸増プロトコルにより筋損傷は抑制できること、ならびに筋損傷を経験するか否かは、トレーニング後の筋力増加の程度を決定する大きな要因ではないことを示唆するものである。

漸増群では、トレーニング期間を通して筋損傷指標の著しい変化はなかった。それに対し、一定群では、初回のトレーニング後において、MVC膝伸展トルクの低下（ピーク：-22%）、血中CK活性値の上昇（ピーク：418 IU/L）、ならびに強い筋肉痛の発生（VASのピーク：63 mm）がみられた。それらの変化の大きさは、事前に何らかの筋損傷対策を行わずに40～45分間のDWを行っ

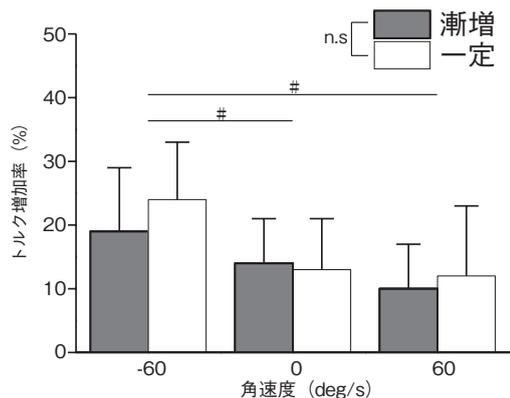


図5 トルク増加率の比較 (# = vs. 角速度条件)

た先行研究^{1,4,5,18)}において報告している値と同程度であった。したがって、一定群において観察された筋損傷の程度は、40分間のDWを初めて行った場合に生じる筋損傷の一般的な例を示していると考えられる。一方、漸増群では、4回目のトレーニングセッションにおいて70分間のDWを行った後も、筋損傷は抑制されていた。このような結果は、筋損傷を生じさせない程度の短時間の伸張性運動であったとしても、徐々にその運動時間を増加させることにより、その後に実施される長時間の伸張性運動に対して、高い筋損傷抑制効果を有するものとなることを示唆する。

DWトレーニングにより、漸増群および一定群ともに、全ての収縮条件において、膝伸展トルクの有意な増加が得られた。また、膝伸展トルクの増加率に有意な群間差はなく、両群ともに、伸張性収縮条件の増加率(漸増群:+19%, 一定群:+24%)が、等尺性(+14%, +13%)および短縮性(+10%, 12%)条件のそれよりも大きかった。この結果は、筋損傷を経験したか否かに関係なく、両群で同程度の筋力増加が得られたことを意味する。本研究と同様のアプローチを用いて、Flann et al.⁶⁾は伸張性エルゴメータを、Folland et al.⁷⁾は一般的なレジスタンストレーニング用の重量負荷機器を使用し、初回のトレーニング時に筋損傷を経験する群としない群を設定し、そのトレーニング効果を比較した。両研究とも、トレーニング効果(筋力および筋量の増加率)に群間で差はなかったと報告しており、それぞれ、「筋損傷からの回復と筋力トレーニングへの適応(筋力増加)の過程は異なるものである⁷⁾」、「トレーニングによる筋力増強効果を決定する主な要因は総トレーニング量であり、筋損傷の程度ではない⁶⁾」と示唆している。本研究の結果は、それら先行研究の知見を支持し、「トレーニングによる筋力増加は、筋損傷を経験するか否かに大きな影響を受けない」ことを示唆するものである。

本研究で観察された筋力増加率は、等速性筋力測定装置を用いて膝関節伸展筋群における短期間(4-6週間)・高強度(最大努力もしくはそれに近い努力度による力発揮)の伸張性レジスタンストレーニングを行った先行研究^{2,3,10,20)}が報告している値(伸張性:+16~34%, 等尺性:+11~30%, 短縮性:+5~13%)と同程度であった。本研究で実施されたDWの運動強度は明らかではないが、本研究と同じ運動条件でDWを実施している際の膝関節伸展筋群の筋電図を計測した結果によると、課題動作中の活動水準(MVC中の筋電図振幅値で正規化された値)は、大腿直筋および外側広筋で約30%であった¹³⁾。このことは、DWは低強度に分類できることを意味する。一方、課題動作中の歩数に関する予備実験の結果によると、トレーニング実施中の歩数は、1分間で約60~70歩であった。このような結果と4回のトレーニングによる総運動時間160分を考え合わせると、トレーニング実施中の総歩数(筋収縮の回数)は約10000歩(回)に到達する。したがって、本研究で得られた筋力増加は主に、運動中の筋活動水準ではなく筋収縮の回数の多さに起因すると推察される。

本研究の被検者は、定期的な運動プログラムは実施していないが、活動的な若齢男性であった。それゆえ、本研究で得られた結果が、他の集団でも同様に得られるかは不明である。また、本研究では、上り坂や平地での歩行トレーニングを行う群を設定していないため、今回得られた結果が「下り坂」歩行によるものであるという明確な根拠はない。しかしながら、先行研究において、DWトレーニングは、上り坂または平地歩行トレーニングと比べ、より高い筋力増強効果を有する、または少ない負担度で同程度の効果を有することが、パーキンソン病患者²²⁾を含む、高齢者を対象とした研究^{8,9,22)}により明らかとなっている。さらに、若齢女性を対象とした近年の研究では¹⁷⁾,

DW トレーニングを行った群では膝伸展筋力の有意な改善が得られたが、上り坂または平地歩行トレーニングを行った群では、そのような変化はみられなかったと報告している。これらの知見と本研究の結果を踏まえると、筋損傷を経験するか否かではなく、DW トレーニングを行うこと自体が、重要なトレーニング刺激と成りうると思われる。

5. 結 論

本研究の結果、DW トレーニングにおいて、トレーニングの進行に伴い運動時間を徐々に増加させることにより、トレーニング期間を通して筋損傷を抑制できた。また、筋損傷を抑制した漸増群と、筋損傷を経験した一定群とで、トレーニング後の筋力増加率に有意な群間差はなかった。これらの結果から、1回のトレーニングにおける運動時間を漸増するトレーニングプロトコルにより、伸張性収縮に伴う筋損傷は抑制できること、ならびに筋損傷を経験するか否かは、トレーニング後の筋力増加の程度を決定する大きな要因ではないことが示唆された。

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) Ahmadi S., Sinclair P.J., Davis G.M., Muscle oxygenation after downhill walking-induced muscle damage., *Clin. Physiol. Funct. Imaging.*, 28: 55-63 (2008)
- 2) Baroni B.M., Geremia J.M., Rodrigues R., De Azevedo Franke R., Karamanidis K., Vaz M.A., Muscle architecture adaptations to knee extensor eccentric training: rectus femoris vs. vastus lateralis., *Muscle Nerve.*, 48: 498-506 (2013)
- 3) Duncan P.W., Chandler J.M., Cavanaugh D.K., Johnson K.R., Buehler A.G., Mode and speed specificity of eccentric and concentric exercise training., *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 11: 70-75 (1989)
- 4) Eston R.G., Lemmey A.B., McHugh P., Byrne C., Walsh S.E., Effect of stride length on symptoms of exercise-induced muscle damage during a repeated bout of downhill running., *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, 10: 199-204 (2000)
- 5) Farr T., Nottle C., Nosaka K., Sacco P., The effects of therapeutic massage on delayed onset muscle soreness and muscle function following downhill walking., *J. Sci. Med. Sport.*, 5: 297-306 (2002)
- 6) Flann K.L., LaStayo P.C., McClain D.A., Hazel M., Lindstedt S.L., Muscle damage and muscle remodeling: no pain, no gain? *J. Exp. Biol.*, 214: 674-679 (2011)
- 7) Folland J.P., Chong J., Copeman E.M., Jones D.A., Acute muscle damage as a stimulus for training-induced gains in strength., *Med. Sci. Sports Exerc.*, 33: 1200-1205 (2001)
- 8) Gault M.L., Clements R.E., Willems M.E., Functional mobility of older adults after concentric and eccentric endurance exercise., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 112: 3699-3707 (2012)
- 9) Gault M.L., Willems M.E., Isometric strength and steadiness adaptations of the knee extensor muscles to level and downhill treadmill walking in older adults., *Biogerontology.*, 14: 197-208 (2013)
- 10) Hortobagyi T., Barrier J., Beard D., Braspeninx J., Koens P., Devita P., Dempsey L., Lambert J., Greater initial adaptations to submaximal muscle lengthening than maximal shortening., *J. Appl. Physiol.*, 81: 1677-1682 (1996)
- 11) Isner-Horobeti M.E., Dufour S.P., Vautravers P., Geny B., Coudeyre E., Richard R. Eccentric exercise training: modalities, applications and perspectives. *Sports Med.*, 43: 483-512 (2013)
- 12) LaStayo P., Marcus R., Dibble L., Frajacom F., Lindstedt S. Eccentric exercise in rehabilitation: safety, feasibility, and application., *J. Appl. Physiol.*, 116: 1426-1434 (2014)
- 13) Maeo S., Kanemoto W., Miyazaki K., Yamamoto M. Muscular activities during uphill and downhill treadmill walking which stimulates mountaineering with respect to changes in slope, velocity, and backpack load., *Jpn. J. Mountain Med.*, 32: 103-115

- (2012)
- 14) Maeo S., Miyazaki K., Kanehisa H., Yamamoto M. Short duration downhill walking performed beforehand attenuates muscle function loss and delayed onset muscle soreness following long duration downhill walking. *Jpn. J. Mountain Med.*, **33**: 99-107 (2013)
 - 15) Maeo S., Yamamoto M., Kanehisa H. Muscular adaptations to short-term low-frequency downhill walking training. *Int. J. Sports Med.*, **36**: 150-156 (2015)
 - 16) Paulsen G., Mikkelsen U.R., Raastad T., Peake J.M., Leucocytes, cytokines and satellite cells: what role do they play in muscle damage and regeneration following eccentric exercise? *Exerc. Immunol. Rev.*, **18**: 42-97 (2012)
 - 17) Rodio A., Fattorini L., Downhill walking to improve lower limb strength in healthy young adults., *Eur. J. Sport Sci.*, 1-7 (2014)
 - 18) Rowlands A.V., Eston R.G., Tilzey C., Effect of stride length manipulation on symptoms of exercise-induced muscle damage and the repeated bout effect., *J. Sports Sci.*, **19**: 333-340 (2001)
 - 19) Schoenfeld B.J., Does exercise-induced muscle damage play a role in skeletal muscle hypertrophy? *J. Strength Cond. Res.*, **26**: 1441-1453 (2012)
 - 20) Tomberlin J.P., Basford J.R., Schwen E.E., Orte P.A., Scott S.C., Laughman R.K., Ilstrup D.M., Comparative study of isokinetic eccentric and concentric quadriceps training., *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, **14**: 31-36 (1991)
 - 21) Vogt M., Hoppeler H.H., Eccentric exercise: mechanisms and effects when used as training regime or training adjunct., *J. Appl. Physiol.*, **116**: 1446-1454 (2014)
 - 22) Yang Y.R., Lee Y.Y., Cheng S.J., Wang R.Y., Downhill walking training in individuals with Parkinson's disease: a randomized controlled trial., *Am. J. Phys. Med. Rehabil.*, **89**: 706-714 (2010)

バイオフィードバックトレーニングが 脳血流分布に及ぼす影響

福井大学 高田 宗樹
(共同研究者) 名古屋大学 宮尾 克
青山学院大学 塩沢 友規
愛知学院大学 渡邊 智之
愛知医科大学 高田 真澄

Distribution of Cerebral Blood Flow during Biofeedback Training

by

Hiroki Takada

University of Fukui

Masaru Miyao

Nagoya University

Tomoki Shiozawa

Aoyama Gakuin University

Tomoyuki Watanabe

Aichi Gakuin University

Masumi Takada

Aichi Medical University

ABSTRACT

Near-infrared spectroscopy (NIRS) is less restrictive for examinees than other brain function imaging methods such as positron emission tomography or functional magnetic resonance imaging. In addition, fixation of the head and recumbence on a special device during measurement are unnecessary with NIRS. Biofeedback

training (BFT) elucidates the importance of mental training, and monitors and encourages the learning of psycho-physiological control necessary for muscle performance. Electromyography of examinees' rectus femoris muscles and near-infrared spectroscopy were simultaneously conducted to investigate the relationship between BFT and local cerebral blood flow. The influence of a kicking motion on brain functioning was confirmed. These findings suggest that BFT is effective in activating working memory.

要 旨

近赤外分光分析法を利用した脳機能イメージング (NIRS) は、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) や陽電子放射型断層撮像法 (PET) などの他の手法に比べて、計測中の被験者に対して低拘束かつ非侵襲的である。トレーニング等の動作が伴う場合にも計測でき、他の電気生理学的な検査事項との同時計測も可能である。一方、近年着目されているバイオフィードバックトレーニングはメンタルトレーニングの重要性を明らかにするだけでなく、被験者の筋パフォーマンスを監視して、心理生理学的制御の学習を促す。本研究では、大腿直筋の筋電図と NIRS を同時計測して、バイオフィードバックトレーニングと局所脳血流の関係を調査した。その結果、蹴り上げ動作が脳機能を変化させる可能性が示唆され、特にワーキングメモリを活性化することが期待される。

緒 言

バイオフィードバックトレーニングにおける動作や筋パフォーマンスを監視するために、筋電図はしばしば用いられる。1908年にハーバード大学で始まった Jacobson (1938) の研究では先駆的にバイオフィードバック法を利用しており、漸近的筋弛緩法という形で実を結ぶ¹⁾。これは不安をコントロールする方法として用いられており、セルフケアや健康増進を促進すると考えられている。デサントスポーツ科学 Vol. 36

る²⁾。バイオフィードバックの応用や歴史的な展望については Gatchel and Price (1979), Gaarder and Montgomery (1981), Basmajian (1989) らが詳しい^{3,4,5)}。バイオフィードバックトレーニング (BFT) は健康増進に関する手技としてだけでなく、脳機能の発達・維持に影響を及ぼすものとして期待されている^{6,7)}。BFTと脳機能の関係は、今後、注目されるであろう。報告によれば、BFTは四肢や関節の単なる随意運動ではなく、脳において高度な統合機能が関与して成立する運動であるといわれている。

歩行における股関節屈曲動作を行うための股関節屈筋群が加齢に伴い急激に減少することが最近注目されている。股関節屈筋群には大腿直筋や腹筋などが含まれ、これらが高齢者の転倒にも関係していることが指摘されている。一方、特定の筋の自己制御を促進することを目的として、被験者に筋電図信号またはその信号を処理したものを提示するバイオフィードバック技術がある。筆者らはこれを利用して、大腿直筋などの「局所運動」を行い、高齢者の転倒予防・健康増進に寄与するための技術開発を行ってきた。教師信号の提示の方法は、視覚的あるいは聴覚的に行われることが多い。

近年開発された非侵襲な脳活動を計測する技術に近赤外分光分析法を利用した脳機能イメージング (NIRS) がある。装置診断の小型化などに伴い、脳科学が急速に発達し脳の様々な動きが解

明されつつある。加えて、NIRSは、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) や陽電子放射型断層撮像法 (PET) などの他の手法に比べて、計測中の被験者に対して低拘束である^{8,9,10)}。

NIRSは血中ヘモグロビン (Hb) の濃度変化を計測する手法である。近赤外光の波長領域では生体内で吸収されることは限られており¹¹⁾、光が到達する深度が大きいことが期待される。近赤外光は頭皮上から脳組織内に拡散していき、頭皮上から約20-30 mm 深部にある大脳皮質に到達するといわれている¹²⁾。一方、大脳皮質は頭皮上から15-20mm程度の深さに位置し、神経活動と毛細血管が密集している。そのため、大脳皮質は、脳活動に伴う脳内血中ヘモグロビン濃度変化の計測に適した組織である。また、この大脳皮質は、運動、感覚、言語、認知といった脳機能と深く結びついた組織である。NIRSでは、大脳皮質を計測対象とし、頭皮上からの多チャンネル反射光計測で大脳皮質の活動を計測する。この計測法では、頭皮上に送光プローブと受光プローブを設置する。生体組織に対し透過性が高い波長である700-900nm程度の波長の近赤外光を送光プローブから照射し、大脳皮質の表面で散乱・反射した光を、受光プローブで検出する。

血液中には酸素と結合した酸化ヘモグロビン (Oxy-Hb) と、酸素と結合していない脱酸化ヘモグロビン (Deoxy-Hb) の2種類が存在し、両ヘモグロビンの吸光スペクトルは異なっている¹¹⁾。本研究ではこの性質を利用して、2波長 λ_1, λ_2 の近赤外照射光の強度と比した検出光の減衰量から、血中のOxy-Hbの濃度変化 C_o と、Deoxy-Hbの濃度変化 C_d をCW法に従って計測する。CW法はmodified Lambert-Beer (MLB)法に基づいて、Oxy-HbとDeoxy-Hbの計測開始時からの濃度変化に光路長を乗じたものを計算する^{11,13)}。一般に、生体は強い散乱体であるため、照射から検出までの光路長は計測できない。よって、得られる

計測値はHbの絶対値ではない。

NIRSによる計測では、他の計測方法と同様にneuro-vascular couplingを仮定している¹³⁾。これは脳の活動神経近傍において血管が拡張し、酸素やグルコースを多く含む動脈血 (エネルギー源) が供給され、Oxy-HbとDeoxy-Hbが変化することである¹⁴⁾。その上で、脳血流量の変化を測定することによって脳部位の活性状態を推定することができる。実際、このHb濃度の増減 C_o, C_d が脳神経活動を反映していることが示されている^{15,16)}。

近赤外分光装置を用いた脳活動計測により、低負荷「全身運動」(歩行)中における前頭前野(ワーキングメモリのルートであり、注意・認知・情動のコントロールに作用)や運動前野(運動の計画・準備に関係した脳の領域)は活性化される¹⁷⁾。実際に、歩行訓練により高齢者の認知機能が改善される報告がある¹⁸⁾。また、申請者らが行った先行研究において、特異な「局所運動」(咀嚼運動)が前頭前野の活性を亢進する可能性を見出している¹⁹⁾。

本研究では、健常高齢者と生理学的な特性が著しく異なる健常若年者を対象として、BFTが脳、特に前頭前野に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、大腿直筋筋電図とNIRSの同時計測を行い、BFTの運動タスクが局所脳血流に及ぼす影響について検討を行う。

1. 実験方法

四肢に異常が認められない7名の若年健常者(22±1歳)を対象に以下の手順にて、大腿直筋を対象としたバイオフィードバックトレーニング時の生体計測を行う。ここでは、市販の携帯型多用途生体アンプ・収録装置Polymate AP1532 (TEAC Co., 東京)に筋電図変換ボックスAP-U027 (TEAC Co., 東京)を接続し、専用のプリアンプ付き双極筋電図電極を利用することによ

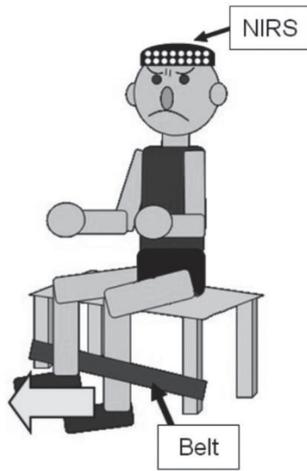


図1 大腿直近を対象としたバイオフィードバックトレーニング実験

り、表面筋電図を計測する。また、AP Monitor (NoruPro, 東京) を用い、2kHzのサンプリング周波数でPCに記録し、リアルタイムで筋活動量を被験者に提示する。尚、被験者には事前に実験の説明を充分に行い、書面にて了承を得た。本実験については、名古屋大学大学院情報科学研究科倫理委員会の承認を得ている。

- 1) 被験者を固定された4脚の椅子に深く座らせ、左右何れか利き足で下腿部下端に固定されたベルトを前方に蹴り出させる (図1)。
- 2) 大腿直筋の筋腹をやや外して、筋電図電極を数センチメートルの間隔で貼付し、数秒間の最大随意収縮動作を行わせる。この筋収縮期における表面筋電図の積分波形の平均値を算出して、最大随意収縮の a ($60 < a < 80$) % に相当する筋活動量を見積もる。
- 3) 最大随意収縮の a % に相当する筋活動量を教師信号として、被験者に提示し、40秒収縮 (うち前半20秒間は筋活動量を漸増させた。以降、過渡期と表記する。後半20秒間は筋活動量を一定にさせた。以降、筋収縮期と記す)、40秒弛緩 (うち前半20秒間は後安静期、後半20秒間は前安静期と記す) とする間欠的な合図

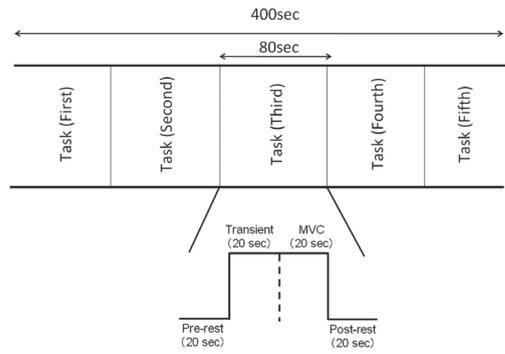


図2 実験プロトコル

を5周期行う (図2)。ここで得られる400秒間の筋電図波形について、0.1秒間を積分区間とする整流平滑化をリアルタイムで行い、この積分波形を (教師信号に重ねて) 被験者に提示する。ここでは、高域・低域遮断フィルタのカット周波数をそれぞれ1kHz、16Hzに設定し、交流除去フィルタを入れることにより、表面筋電図からノイズを除去して「センサ出力信号評価システム」により評価を行う。

- 4) 3) と同時に光脳機能イメージング装置 LABNIRS (島津製作所, 京都) を用いて、7.7Hzのサンプリング周波数で C_o および C_d を計測した。頭部ホルダを被験者の頭部に装着し、送・

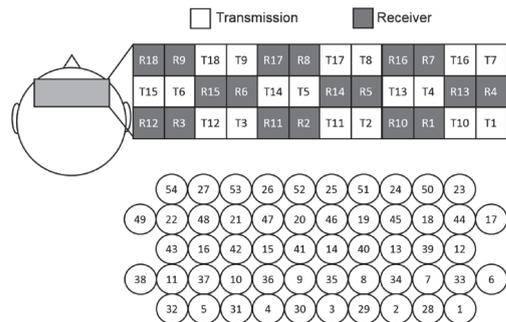


図3 照射・受光プローブの配列

受光用のプローブを図3に示すように設置した。脳血流量の濃度変化の計測は全て前頭葉を対象として、計測部位数は54であった (54

ch). 紙面の都合上, 本稿ではこのうち C_0 を解析対象とする.

被験者ごとに BFT の各周期における前安静期の C_0 の平均値, および標準偏差を用いて標準化を行った. 前安静期, 過渡期, 筋収縮期, 後安静期においてサンプリング時間ごとに加算平均をとった後, 被験者全員を通じた C_0 の平均値を算出した. 前安静期, 過渡期, 筋収縮期, 後安静期ごとに, 各チャンネルの C_0 の平均値 μ , 標準偏差 σ , およびその分布の歪度, 尖度を算出し, 分布の形自体も確認した. 各期の分布が正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ とみなせるかを χ^2 検定にて検討し, 前安静期における C_0 と筋収縮期における C_0 の母平均に差があるとみなせるかをウェルチの t 検定にて比較した. 尚, 有意水準は 0.05 とした.

2. 結果

センサ出力信号評価システムにて BFT の成績を確認した. 教師信号に対する筋パフォーマンス追従は, どの被験者についても良好であった.

前安静期, 過渡期, 筋収縮期, 後安静期ごとに, 各チャンネルの C_0 の平均値, 標準偏差, およびその分布の歪度, 尖度を算出した (表 1-4). 数値はいずれも図 3 のプローブの配列に従った. また, これらの表における負値に下線を施した. 前安静期は概ね 0 であった C_0 は, 過渡期を経て筋収縮期にはいずれの計測部位 (ch) においても, 数 [mM · cm] に増大している (表 1). ウェルチの t 検定によれば, 筋収縮期における C_0 は前安静期における C_0 と比較すると, いずれの ch においても有意に増大していた (表 5a). t 分布の自由度は 643, 有意水準 0.05 の t 境界値 (両側検定) は 1.96 であった.

次に, 前安静期, 過渡期, 筋収縮期, 後安静期ごとに脳血流量の変化に関する分布の形も確認した. 典型例を図 4 に示す. 歪度および尖度の計算結果 (表 3-4) からもうかがえるが, 安静時

には正規分布に近い分布とみなせるものの, BFT 時には平坦化された分布や多峰性となるものが散見された (図 4). 各期の平均値 μ , 標準偏差 σ を用いて (表 1-2), 各期の C_0 の分布が正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ とみなせるかを χ^2 検定にて検討したところ, 上述の所見が統計学的に裏付けられた (表 5b-5c). 筋収縮期においては全ての ch で正規分布とはみなすことができなかった (表 5c).

3. 考察

本研究では BFT の運動タスクが前頭前野の局所脳血流量の変化に及ぼす影響を検討した. いずれの ch においても, 筋収縮期における C_0 は前安静期におけるそれと比較すると, 有意に増大していた ($p < 0.05$). 蹴り上げ動作が脳機能を変化させる可能性が示唆された.

C_0 の分布の歪度および尖度については, 前安静期において 0 値付近にあり, 正規分布の性質を示しているものの, 前頭前野の非頭頂側ではこの性質はみられない (表 3a, 4a). BFT 時には負値となる ch が殆どを占め (表 3b, 3c, 4b, 4c), 正規分布の性質を示していない. 実際, 筋収縮期には平坦化された分布や多峰性となるものが散見された (図 4b). 加えて, 各期の平均値 μ , 標準偏差 σ を用いて (表 1-2), 各期の C_0 の分布が正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ とみなせるかを χ^2 検定にて検討した. 自由度を 9, 有意水準を 0.05 とすると, χ^2 境界値は 19.02 である. 前頭前野の非頭頂側では, 前安静期においても正規分布とみなすことができない ch が殆どであった (表 5b).

前述したように, NIRS による計測では neurovascular coupling を仮定している. 加えて, CW 法で用いる数理モデル (線形行列) の制約から, 以下を仮定することになる¹¹⁾.

1) Hb の変化は脳のみで生じている. 近赤外光の吸収変化を引き起こす物質は脳における Oxy-Hb と Deoxy-Hb のみである.

表1 C₀の平均値.

前安静期 (a), 過渡期 (b), 筋収縮期 (c), 後安静期 (d) における脳血流量の変化[mM・cm]を分析した.
 数値は図3のプロープの配列に従った. 負値には下線を施した.

(a)	0.11	0.18	0.09	0.09	0.06	<u>0.07</u>	0.00	<u>0.06</u>	0.08	0.08	
0.05	0.22	0.18	0.15	0.14	0.02	0.16	0.08	0.10	0.06	0.02	<u>0.07</u>
	0.28	0.23	0.28	0.16	0.26	0.26	0.23	0.15	0.12	0.12	
0.14	0.20	0.21	0.13	0.10	0.14	0.18	0.12	0.12	0.11	0.08	0.04
	0.15	0.14	0.06	0.10	0.10	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	

(b)	2.89	2.42	2.42	2.11	2.42	2.21	2.14	1.94	2.32	2.63	
2.98	2.02	2.16	1.51	2.03	2.19	1.72	1.72	1.72	1.70	1.94	2.28
	2.29	1.78	2.57	2.13	2.65	2.34	2.13	2.01	1.60	1.65	
1.93	1.64	1.43	0.95	1.28	1.17	1.26	1.20	1.05	1.44	1.07	1.35
	1.46	1.13	0.58	0.59	0.63	0.54	0.58	0.96	0.84	0.94	

(c)	6.51	6.11	6.26	5.26	6.71	5.82	6.26	4.86	6.15	7.19	
8.69	6.11	5.61	3.85	5.52	5.56	4.06	4.02	5.02	5.05	5.88	6.44
	6.08	4.68	6.80	5.43	6.05	5.05	4.72	4.57	4.26	4.31	
5.25	3.92	4.32	2.17	2.78	2.27	2.53	2.29	2.47	3.51	3.23	3.45
	3.67	2.24	1.45	1.18	1.35	0.99	1.10	1.68	1.46	1.83	

(d)	1.45	1.51	1.08	0.96	1.65	1.07	1.66	1.14	2.19	2.90	
3.12	2.57	1.80	1.47	2.13	2.06	2.37	1.88	2.62	2.72	2.93	2.77
	2.24	2.01	2.69	2.11	2.43	2.24	2.38	2.20	2.32	1.95	
1.67	1.76	1.68	0.79	0.83	0.89	1.10	0.95	1.23	1.58	1.62	1.29
	0.77	0.64	0.32	0.41	0.52	0.36	0.36	0.50	0.37	0.44	

表2 C₀の標準偏差.

前安静期 (a), 過渡期 (b), 筋収縮期 (c), 後安静期 (d) における脳血流量の変化[mM・cm]を分析した.

(a)	0.25	0.26	0.32	0.32	0.28	0.25	0.20	0.22	0.21	0.24	
0.22	0.19	0.27	0.21	0.25	0.29	0.22	0.18	0.18	0.20	0.26	0.37
	0.22	0.22	0.27	0.23	0.28	0.24	0.24	0.24	0.19	0.20	
0.19	0.22	0.18	0.21	0.23	0.19	0.21	0.21	0.20	0.21	0.18	0.23
	0.20	0.21	0.18	0.19	0.19	0.18	0.18	0.20	0.19	0.21	

(b)	0.94	0.72	0.73	0.57	0.81	0.72	0.69	0.67	0.97	1.35	
1.65	0.78	0.64	0.39	0.63	0.72	0.45	0.46	0.53	0.69	1.15	1.57
	0.78	0.50	0.73	0.60	0.72	0.57	0.44	0.48	0.45	0.62	
0.86	0.47	0.50	0.30	0.34	0.31	0.33	0.30	0.30	0.40	0.53	0.85
	0.50	0.31	0.25	0.22	0.23	0.23	0.22	0.24	0.28	0.29	

(c)	1.11	0.86	0.93	1.11	1.44	1.13	1.17	0.76	0.91	0.69	
1.23	1.31	1.18	1.00	1.31	1.21	0.95	0.81	1.36	0.98	0.78	0.44
	1.05	1.01	1.35	1.00	0.86	0.75	0.93	0.82	0.97	0.61	
0.78	0.79	1.09	0.48	0.46	0.36	0.42	0.39	0.57	0.72	0.60	0.26
	0.78	0.43	0.45	0.34	0.34	0.26	0.27	0.31	0.24	0.25	

(d)	1.61	1.43	1.60	1.54	1.86	1.71	1.56	1.21	1.43	1.55	
2.11	1.56	1.47	1.06	1.58	1.71	1.08	1.02	1.42	1.10	1.24	1.36
	1.37	1.11	1.67	1.43	1.38	1.25	1.15	1.01	1.03	0.94	
1.16	0.93	1.13	0.57	0.69	0.58	0.57	0.51	0.64	0.89	0.83	0.78
	0.96	0.62	0.47	0.37	0.40	0.30	0.32	0.45	0.36	0.47	

表3 C₀の歪度.

前安静期 (a), 過渡期 (b), 筋収縮期 (c), 後安静期 (d) における脳血流量の変化[mM・cm]を分析した.

(a)	1.32	1.02	0.44	0.28	0.58	0.86	1.08	1.04	0.81	0.27	
0.37	0.38	0.42	0.66	0.39	0.41	0.43	0.54	0.32	0.32	0.21	0.69
	0.79	0.52	0.92	0.82	0.88	0.97	0.99	1.25	0.51	0.18	
0.30	0.32	0.09	0.12	0.45	0.22	0.36	0.55	0.22	0.66	0.26	<u>0.07</u>
	0.17	0.29	<u>0.06</u>	<u>0.11</u>	0.02	<u>0.12</u>	<u>0.10</u>	0.07	0.16	0.67	
(b)	<u>0.81</u>	<u>0.32</u>	<u>0.47</u>	<u>0.58</u>	<u>0.94</u>	<u>0.83</u>	<u>0.72</u>	<u>0.70</u>	<u>0.73</u>	<u>1.16</u>	
<u>1.27</u>	<u>0.62</u>	<u>0.49</u>	<u>0.30</u>	<u>0.70</u>	<u>0.79</u>	<u>0.40</u>	<u>0.31</u>	0.07	<u>0.76</u>	<u>1.16</u>	<u>1.34</u>
	<u>0.74</u>	<u>0.33</u>	<u>0.58</u>	<u>0.57</u>	<u>0.42</u>	<u>0.34</u>	<u>0.15</u>	<u>0.57</u>	0.03	<u>1.06</u>	
<u>1.06</u>	<u>0.35</u>	<u>0.54</u>	<u>0.15</u>	<u>0.22</u>	<u>0.33</u>	0.00	0.31	<u>0.21</u>	<u>0.54</u>	<u>0.93</u>	<u>1.40</u>
	<u>0.77</u>	0.02	<u>0.17</u>	0.07	0.04	<u>0.10</u>	0.23	<u>0.08</u>	0.06	<u>0.56</u>	
(c)	<u>0.03</u>	<u>0.04</u>	0.08	0.00	0.01	0.08	<u>0.04</u>	0.20	<u>0.14</u>	<u>0.43</u>	
<u>0.36</u>	<u>0.03</u>	0.22	0.05	<u>0.07</u>	<u>0.01</u>	0.04	0.22	0.16	0.00	<u>0.60</u>	<u>1.13</u>
	<u>0.07</u>	0.01	<u>0.16</u>	<u>0.20</u>	<u>0.20</u>	0.14	0.19	0.19	0.26	<u>0.17</u>	
<u>0.25</u>	<u>0.02</u>	<u>0.06</u>	0.06	<u>0.08</u>	<u>0.02</u>	<u>0.19</u>	0.19	0.24	0.18	0.06	<u>0.45</u>
	0.06	0.05	0.08	0.20	<u>0.02</u>	0.02	0.10	0.22	0.11	0.51	
(d)	2.35	2.52	2.66	2.47	2.37	2.41	2.55	2.45	1.88	1.66	
1.48	1.72	2.20	2.16	1.74	1.47	1.73	1.86	1.58	1.75	1.19	1.00
	2.20	2.18	1.96	1.69	1.83	1.88	2.03	2.09	1.89	1.57	
2.08	1.87	2.05	1.93	1.78	1.62	2.05	2.07	1.59	1.98	1.36	0.99
	2.63	2.14	1.85	1.52	1.47	1.13	1.53	2.12	2.03	2.04	

表4 C₀の尖度.

前安静期 (a), 過渡期 (b), 筋収縮期 (c), 後安静期 (d) における脳血流量の変化[mM・cm]を分析した.

(a)	2.58	1.93	0.20	<u>0.02</u>	0.31	1.03	2.04	1.52	1.47	<u>0.45</u>		
	<u>0.27</u>	0.33	0.23	1.46	0.04	<u>0.04</u>	0.26	0.80	0.36	<u>0.11</u>	<u>0.10</u>	<u>0.39</u>
	1.37	<u>0.01</u>	1.30	1.03	0.74	1.58	1.54	2.48	0.66	<u>0.15</u>		
	0.36	0.55	<u>0.47</u>	0.33	0.25	0.31	<u>0.10</u>	0.90	<u>0.13</u>	1.45	0.26	<u>0.59</u>
	0.19	0.35	0.42	<u>0.25</u>	<u>0.06</u>	<u>0.23</u>	<u>0.05</u>	0.09	0.34	1.42		
(b)	<u>0.81</u>	<u>0.32</u>	<u>0.47</u>	<u>0.58</u>	<u>0.94</u>	<u>0.83</u>	<u>0.72</u>	<u>0.70</u>	<u>0.73</u>	<u>1.16</u>		
	<u>1.27</u>	<u>0.62</u>	<u>0.49</u>	<u>0.30</u>	<u>0.70</u>	<u>0.79</u>	<u>0.40</u>	<u>0.31</u>	0.07	<u>0.76</u>	<u>1.16</u>	<u>1.34</u>
	<u>0.74</u>	<u>0.33</u>	<u>0.58</u>	<u>0.57</u>	<u>0.42</u>	<u>0.34</u>	<u>0.15</u>	<u>0.57</u>	0.03	<u>1.06</u>		
	<u>1.06</u>	<u>0.35</u>	<u>0.54</u>	<u>0.15</u>	<u>0.22</u>	<u>0.33</u>	0.00	0.31	<u>0.21</u>	<u>0.54</u>	<u>0.93</u>	<u>1.40</u>
	<u>0.77</u>	0.02	<u>0.17</u>	0.07	0.04	<u>0.10</u>	0.23	<u>0.08</u>	0.06	<u>0.56</u>		
(c)	<u>1.29</u>	<u>0.60</u>	<u>0.33</u>	<u>1.13</u>	<u>1.05</u>	<u>1.00</u>	<u>0.73</u>	<u>0.77</u>	<u>0.82</u>	<u>0.09</u>		
	<u>1.09</u>	<u>1.20</u>	<u>1.07</u>	<u>1.20</u>	<u>1.17</u>	<u>1.35</u>	<u>1.21</u>	<u>1.05</u>	<u>1.14</u>	<u>0.89</u>	<u>0.39</u>	1.11
	<u>1.02</u>	<u>1.05</u>	<u>1.09</u>	<u>1.03</u>	<u>0.81</u>	<u>0.60</u>	<u>0.85</u>	<u>0.74</u>	<u>0.73</u>	0.01		
	<u>1.17</u>	<u>1.29</u>	<u>1.14</u>	<u>0.89</u>	<u>0.93</u>	<u>0.70</u>	<u>0.77</u>	<u>0.70</u>	<u>0.85</u>	<u>0.86</u>	<u>0.69</u>	0.47
	<u>1.17</u>	<u>1.05</u>	<u>1.00</u>	<u>0.86</u>	<u>0.95</u>	0.18	<u>0.38</u>	<u>0.53</u>	<u>0.36</u>	0.29		
(d)	5.37	6.17	6.73	5.57	5.20	5.30	6.15	5.73	3.45	2.53		
	1.73	2.81	4.46	4.32	2.48	1.38	2.13	2.87	2.01	3.12	1.32	0.53
	4.54	4.44	3.46	2.45	2.94	2.96	3.45	4.18	3.49	2.47		
	4.29	3.18	4.25	3.82	2.99	2.26	4.10	4.27	2.44	3.75	1.78	0.56
	6.88	4.49	3.65	2.79	2.27	1.96	3.08	5.14	5.19	4.61		

表5 C₀に関する統計検定量.
 ウェルチのt検定におけるt値 (a) *. 前安静期 (b) および筋収縮期 (c) における χ^2 値**.

(a)	53	55	55	58	52	56	56	53	42	35	
33	42	54	57	52	52	59	62	54	43	30	27
	47	53	55	58	58	63	71	65	57	44	
38	51	43	42	54	54	53	55	49	55	33	28
	46	50	32	31	34	30	34	54	43	47	

*筋収縮期におけるC₀は前安静期に比して増大したかをウェルチのt検定にて検討した.
 いずれのchのt値もt境界値を上回っている (a).

(b)	314	196	33	37	24	66	232	104	108	20	
13	10	16	147	16	23	24	23	12	12	12	92
	58	22	68	63	55	80	113	302	32	9	
15	11	5	15	27	9	16	54	7	156	12	13
	4	20	14	6	11	7	9	7	3	74	

(c)	103	93	110	114	145	174	84	66	67	63	
152	45	61	55	105	101	84	61	87	39	79	155
	70	70	67	75	60	81	38	61	37	31	
78	60	60	26	37	17	39	16	30	44	13	17
	85	59	36	40	34	21	9	15	6	25	

** χ^2 検定における度数分布表の階級数は、1水準あたりの観測数が351であることから、
 ステージスの公式に従い10とした。

- 2) 係数行列に存在する光路長ファクタは波長に依存しない。
- 3) MLB法における定数項(散乱による減光度)は、計測中は一定とみなせる。

特に、1) から暑熱寒冷曝露に伴う皮膚交感神経活動の変化が生じるようなタスクや、過度な運動に伴う末梢性の熱放散が急速に生じるようなタスクは、CW法だけでなく、近赤外分光法を用いる

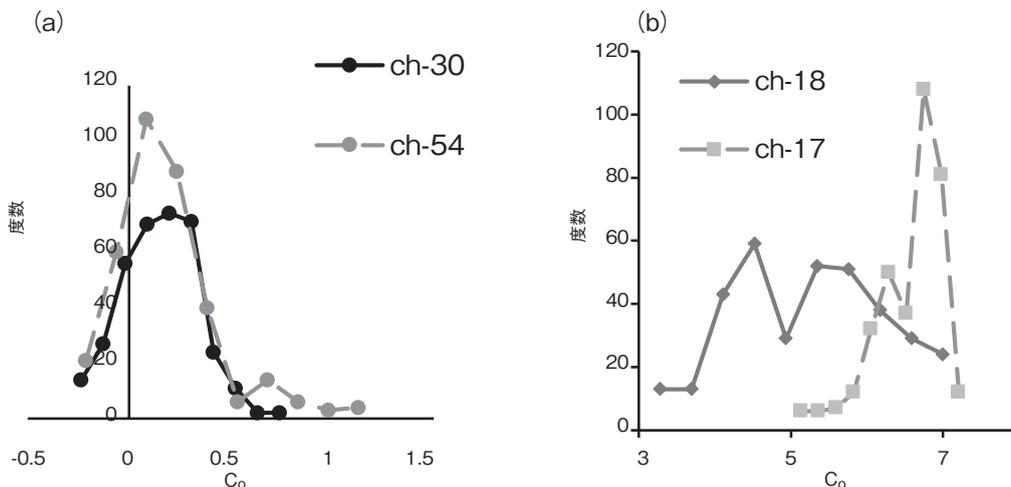


図4 C_o の分布の典型例. 前安静期 (a), 筋収縮期 (b)

計測の対象とならない。全身運動は末梢レベルでの生理的応答を惹起するのみでなく、運動野や運動前野の活動により前頭前野や視床下部を介して内因性疼痛抑制系に作用する可能性が示されており興味深い²⁰⁾、脳機能計測による検証は一般的に不向きである。他方、BFTのような制限された運動はNIRSの測定に適していると考えられる。

通常、光路長が異なると考えられる部位の計測値は原理的には比較できない。しかし、光路長に依存しない解析方法として、信号値を確率事象の実現値とみて統計量を計算し、課題に対応した賦活の有無を検定する方法が知られている²¹⁾。統計処理には一般線形モデル (GLM) を用えており、脳の賦活化があった際に、その信号はいくつかの基本関数と誤差の線形和で表されることを仮定している。本稿で明らかになったように、運動タスク時における脳血流量の変化に関する時系列からは正規分布から大きく乖離した分布が観測されており、その生成子の複雑性を慎重に議論することが期待される。

今後は、3) において計測された表面筋電図と、同時に4) において計測されたOxy-Hb, Deoxy-Hb および Total-Hb の濃度変化に関する時系列

データに対してコヒーレンス解析を行うことを予定している。

4. 結 語

本研究ではBFTの運動タスクが前頭前野の局所脳血流量の変化に及ぼす影響を検討した。筋収縮期におけるOxy-Hbの濃度変化は前安静期におけるそれと比較すると増大することが明らかになった。蹴り上げ動作が脳機能を変化させる可能性が視示唆され、特にワーキングメモリを活性化することが期待される。また、運動タスク時における脳血流量の変化に関する時系列からは正規分布から大きく乖離した分布が観測された。今後はその生成子の複雑性を多角的に議論した上で、数理モデル化を図る。

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、解析にはPrince of Songkla Universityの松浦康之博士に多大な協力を頂いた。深く感謝いたします。

文 献

- 1) Jacobson E., *Progressive Relaxation*, University of Chicago Press, Chicago (1938)
- 2) Snyder M., Lindquist R., *Complementary Alternative Therapies in Nursing* (3rd edition), Springer Publishing, New York (1998)
- 3) Gatchel R. J., Price K. P., *Critical Applications of Biofeedback*, Pergamon Press, New York (1979)
- 4) Gaarder K. R., Montgomery, P. S., *Clinical Biofeedback: A Procedural Manual for Behavioral Medicine*, Williams & Wilkins, Baltimore (1981)
- 5) Basmajian S., *An Anthology of Visual Poetry and Collage*, Sober Minute Press, Chicago (1989)
- 6) Calomeni M. R., Rocha J. A., Silva A. P., Ribeiro L. H., Marques L., Siza M. A., Silva V. F., Brain stimulation used as biofeedback training for recovery of motor functions deteriorated by stroke, *Arq. Neuropsiquiatr.*, 71 (3), 159–164 (2013)
- 7) Nanhoe-Mahabier W., Allum J. H., Pasma E. P., Overeem S., Bloem B. R., The effects of vibrotactile biofeedback training on trunk sway in Parkinson's disease patients, *Parkinsonism Relat. Disord.*, 18(9), 1017–1021 (2012)
- 8) Villringer A., Dirnagl U., Coupling of brain activity and cerebral blood flow: basis of functional neuroimaging, *Cerebrovasc. Brain Metab. Rev.*, 7, 240–276 (1995)
- 9) Villringer A., Chance B., Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function, *Trends Neurosci.*, 20, 435–442 (1997)
- 10) Okamoto M., Dan H., Sakamoto K., Takeo K., Shimizu K., Kohno S., Oda I., Isobe S., Suzuki T., Kohyama K., Dan I., Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10-20 system oriented for transcranial functional brain mapping, *NeuroImage*, 21 (1), 99–111 (2004)
- 11) 志村孚城(編著), 近赤外分光法による前頭前野計測, コロナ社, 東京(2009)
- 12) 渡辺英寿, 室田由美子, 中島千鶴, 近赤外線光トポグラフィを用いた失語症回復過程の計測, 高次脳機能研究, 25 (3), 215-223 (2005)
- 13) Zardecki A., Multiple scattering corrections to the Beer-Lambert law, *Proc. SPIE* 1983, 103-110 (1983)
- 14) 小泉英明, 活動する脳を見る – 高次脳機能の視覚化, 現代科学, 1997 (11), 27-33 (1997)
- 15) Hoshi Y., Tamura M., Detection of dynamic changes in cerebral oxygenation coupled to neural function during mental work in man, *Neurosci. Lett.*, 150, 5-8 (1993)
- 16) Kato T., Kamei A., Takashima S., Ozaki T., Human visual cortical function during photic stimulation monitoring by means of near-infrared spectroscopy, *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, 13, 516-520 (1993)
- 17) Miyai I., Tanabe H., Sase I., Eda H., Oda I., Konishi I., Tsunazawa Y., Suzuki T., Yanagida T., Kubota K., Cortical mapping of gait in human: A near-infrared spectroscopic topography study. *NeuroImage.*, 14, 1186-1192(2001)
- 18) Middleton L. E., Mitnitski A., Fallah N., Kirkland S. A., Rockwood K., Changes in cognition and mortality in relation to exercise in late life: a population based study, *PLoS One*, 3(9) : e3124 (2008)
- 19) Matsuura Y., Taniguchi T., Sugiura A., Miyao M., Takada H., Distribution of cerebral blood flow during gum-chewing, *Forma*, 27, 1-4 (2012)
- 20) Taylor A. F., Kuo F. E., Children with attention deficits concentrate better after walk in the park, *J. Attention Disorders*, 23, 36-56 (2008)
- 21) Friston K. J., Holmes A. P., Worsley K. J., Poline J. P., Frith C. D., Frackowiak R. S. J., Statistical parametric maps in functional imaging: a general linear approach, *Hum. Brain Mapp.*, 2, 189– 210 (1995)

**低強度血流制限下での筋力トレーニングが、
血管機能に及ぼす影響
—血管内皮機能と動脈硬化指標の関連—**

山梨県富士山 堀内 雅 弘
科学研究所
(共同研究者) 同 遠藤 淳 子
北 翔 大 学 沖田 孝 一

**Impact of Low Intensity Resistance Training
with Blood Flow Restriction on Vascular Function
-The Relation between Endothelial Function and Arteriosclerosis-**

by

Masahiro Horiuchi, Junko Endo
Mt. Fuji Research Institute
Koichi Okita
Hokusho University

ABSTRACT

This study investigated impact of low intensity resistance training with blood flow restriction (BFR) on vascular function. In total, 20 healthy male subjects participated in this study and they were divided into two groups, i.e., high intensity resistance training group without BFR (HIT) and low intensity resistance training with BFR group. Each group performed resistance training, i.e., double leg extension, for three days/week, and it lasted for four weeks. The training of HIT consisted of 10 reps*3sets at the intensity of 75% of maximal voluntary contraction (MVC), and that of BFR was 30 reps+15 reps*3 sets at 30%MVC. After four weeks training period, muscle strength was significantly increased in both groups ($p<0.05$, respectively) with no differences in

changing rate between groups. An indicator of arteriosclerosis assessed by cardio ankle vascular index (CAVI) was significantly improved in only BFR group ($p < 0.05$) but no changes in HIT. Ankle systolic blood pressure (aSBP) was significantly decreased improved after training period in only BFR group ($p < 0.05$), while blood pressure at arm remained unchanged in both groups. In addition, changes in aSBP was related to changes in CAVI ($r = 0.685$, $n = 20$, $p < 0.05$). Endothelial function at popliteal artery evaluated by flow mediate dilation slightly improved in BFR without no significant improvement. In addition, basal diameter and peak diameter during reactive hyperemia in BFR group were also slightly increased with no significant difference, but, it did not change in HIT training group. These results suggested that low intensity resistance training with BFR may improve vascular function, and this improvement may be partly depend on changes in aSBP.

要 旨

低強度血流制限下での筋力とレーニングが血管機能に及ぼす影響について成人男性を対象に検討した。高強度血流制限なしのトレーニング群 (HIT 群, $n = 10$) と低強度血流制限ありのトレーニング群 (BFR 群, $n = 10$) は週 3 日の頻度で、4 週間両脚伸展運動を行った。HIT 群は最大筋力の 75% 強度で 10 回 3 セットを、BFR 群は、30% 強度で、30 回 +15 回 \times 3 セット (合計 75 回) の運動をそれぞれ行い、これを 1 日のトレーニングとした。両群ともトレーニング介入により、最大筋力は有意に増大したが、群間の差はなかった。足首の収縮期血圧および動脈硬化指標の一つである心臓足首血管指数 (CAVI) は BFR 群のみ有意な改善効果が認められた。さらに、足首の収縮期血圧の変化量と CAVI の変化量の間有意な相関関係が認められた。一方、膝窩動脈で評価された血管内皮機能は、全身の動脈硬化指標の改善結果を一部支持するにとどまった。以上のことから、低強度血流制限下での筋力トレーニングは、血管機能を改善させる可能性が示唆された。さらに、動脈スティフネスの改善度は、足首の血圧の低下に

依存している可能性が示唆された。

緒 言

近年、筋力低下などから誘引される ADL の低下を防ぐために筋力トレーニングが推奨されてきている¹⁾。アメリカスポーツ医学会が提唱する筋力向上に必要な負荷強度は最大筋力の 70% 以上と、比較的高い強度が求められており¹⁾、筋・骨格系や関節系に負担がかかるため、中高年者にとっては推奨できるかどうかは疑問が残る。実際、このような高強度での筋力トレーニングは、筋や関節の損傷をもたらすことも報告されている¹⁷⁾。さらに、80% 以上の高強度での筋力トレーニングは中心動脈コンプライアンスを低下させることも報告されている¹⁰⁾。これらの報告は、このような高強度筋力トレーニングを中高年者に処方する場合は、細心の注意が必要なことを示唆している。

これに代わる筋力トレーニングとして、低強度の負荷に血流制限を加えた筋力トレーニングに関する報告がみられ、筋肥大や筋力増強につながるという報告^{18, 22)} や、さらにその効果は高強度筋力トレーニングに匹敵するという報告もみられる²²⁾。しかしながら、これまで低強度血流制限下

での筋力トレーニングや運動が血管機能に及ぼす影響については、血管機能を改善させるという報告^{5,7,8,12)}や、変化しないという報告^{2,4,9)}、さらには悪化させるという報告^{3,16)}もあり一致した見解は得られていない。この理由の一つにエビデンスの蓄積が不十分であることに加え、血管機能の評価方法や介入方法が先行研究により異なることも原因であると思われる。例えば、これまでの血管機能の評価は、血流依存性の血管拡張機能で評価している報告もあり^{3,7,8,16)}、全身や局所の動脈コンプライアンスや動脈スティフネスで評価している報告^{2,4,5,9,12)}もある。

これまで我々の知る限り、低強度血流制限下での筋力トレーニングが血管機能に及ぼす影響を局所および全身の双方から評価した研究はない。そこで本研究では、低強度血流制限下での筋力トレーニングが血管機能に及ぼす影響を活動部位での血流依存性血管拡張能と全身の動脈硬化指標の双方から評価することを目的とした。

1. 研究方法

1. 1 被験者

健康な成人男性 20 名を無作為に二群、すなわち、高強度筋力トレーニンググループ (High intensity resistance training group; HIT 群) と低強度血流制限下筋力トレーニンググループ (Low intensity resistance training with blood flow restriction group; BFR 群) に分けた。被験者の身体特性を表 1 に示した。本研究は北翔大学倫理委員会の承認を得て行われた。

1. 2 介入方法

各群とも週 3 回の頻度で、4 週間両脚伸展筋力トレーニングを行った。HIT 群は、最大筋力の 75% に相当する負荷強度で、10 回を 1 セットとして 1 日 3 セット行った (セット間 2 分休息)。BFR 群は、最大筋力の 30% に相当する負荷強度で、初めに 30 回脚伸展を行い、その後引き続いて 15 回の脚伸展を 3 セット行った (セット間 30 秒休息)。BFR 群の血流制限圧は、第 1 週目が 160mmHg であり、2 週目以降 20mmHg ずつ制限圧を増加させ、4 週目は 220mmHg の制限圧で行った。

1. 3 評価項目

トレーニング期間の前後で脚伸展最大筋力、四肢の血圧、動脈の固さを反映する心臓足首血管指数 (Cardio Ankle Vascular Index: CAVI)、および膝窩動脈での血流依存性血管拡張能 (Flow mediated dilation: FMD) を評価した。

最大筋力の測定は、各被験者の任意の負荷でウォーミングアップを 5-10 回行い、十分な休息をとった後、同様に各被験者の任意の負荷漸増率で最大筋力まで測定を行った。最大筋力の判断基準は、脚の伸展角度が 90 度から 0 度の範囲で挙上できていること、最大と判断された時点での負荷を、十分な休息の後、再び挙上できることの二条件とした。

四肢の血圧および CAVI は、動脈硬化指標測定専用機器 (VS-1000, フクダ電子, 日本) を用いて測定した。30 分の仰臥位安静の後、左右の上

表 1 被験者の身体特性, 最大筋力, および安静時の上腕血圧

	高強度トレーニング群 (HIT; n=10)	血流制限トレーニング群 (BFR; n=10)
年齢, 才	22 ± 1	22 ± 1
身長, cm	171 ± 2	172 ± 2
体重, kg	61.6 ± 1.5	61.9 ± 3.5
BMI, kg/m ²	21.1 ± 0.5	21 ± 0.4
1 RM, kg	62.6 ± 7.2	61.9 ± 8.3
上腕収縮期血圧, mmHg	114 ± 4	118 ± 5
上腕拡張期血圧, mmHg	69 ± 3	67 ± 3

BMI, body mass index; RM, repetition max.

腕および左右の足首に血圧測定用のカフを巻いた。心電図を両手首より誘導し、心音図を胸部より測定した。その後、動脈硬化指標である CAVI および四肢の血圧を 5 分間の休息をはさみ、3 回測定した。

各群からそれぞれ 7 名の被験者に対して、膝窩動脈の FMD を、超音波画像診断装置により測定した。被験者は実験室に入室後 30 分以上の仰臥位安静を保った後、うつぶせの姿勢で測定を行った。測定には超音波画像診断装置 (Logic E, GEヘルスケア, 日本) を用いた。安静時の血管径および血流速度を測定した後、膝窩動脈の遠位にカフを巻き、220mmHg の圧で 5 分間駆血を行った。その後直ちにカフを解放し、解放中の最大血管径および血流速度を測定した。FMD は以下の式により算出した。

FMD (%) = (カフ解放中最大血管径 - 安静時血管径) / (安静時血管径) × 100

1. 4 データおよび統計処理

血圧および動脈硬化指標は、3 回の測定値の平均値を採用した。また、血圧については、左右の

平均値を採用した。両群の身体特性の差異は、対応のない t 検定を用いて行った。トレーニング効果の指標である最大筋力、上下肢の血圧、CAVI、および FMD は二元配置の分散分析 (群 × 介入前後) を用いて評価した。また、トレーニング前後における足首の血圧の変化量とスティフネスの変化量の関係を pearson の相関係数を用いて評価した。有意水準は危険率 5% 未満とした。

2. 結果

2. 1 身体特性

トレーニング介入前の被験者の身体特性、最大筋力および四肢の血圧値は全て両群の間に有意な差は認められなかった (表 1)。

2. 2 筋力

図 1 に両群のトレーニング前後での最大筋力の絶対量および変化率について示した。その結果、両群ともトレーニング介入により、最大筋力 (68.8 ± 9.3kg; HIT 群 vs. 69.9 ± 8.7kg; BFR 群) および変化率 (11.3 ± 2.5%; HIT 群 vs. 12.2 ± 3.4%; BFR 群)ともそれぞれ有意に増大したが (p < 0.05),

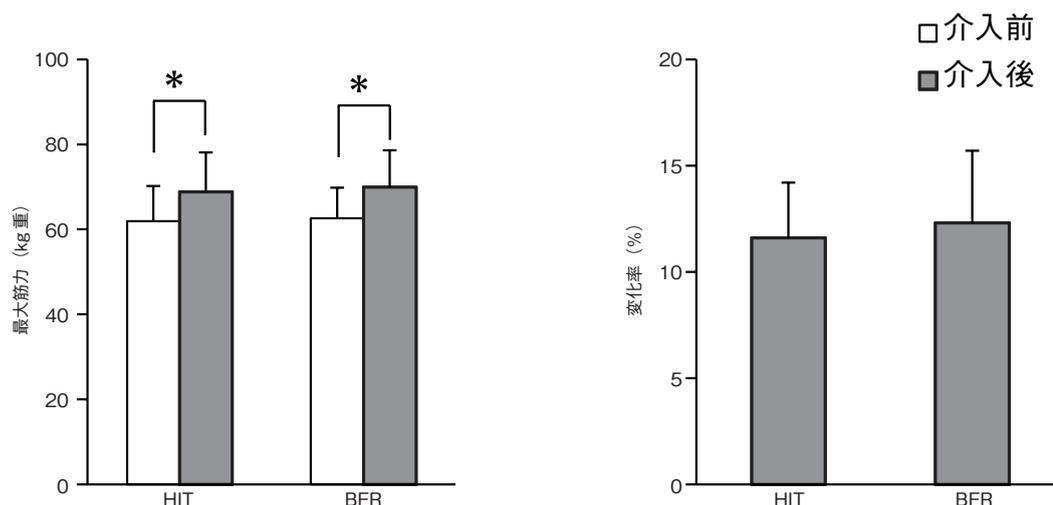


図 1 トレーニング介入前後における高強度筋力トレーニング群 (HIT) と低強度血流制限下筋力トレーニング群 (BFR) の最大筋力の変化 (左図) および変化率 (右図)
*, p < 0.05 vs. 介入前

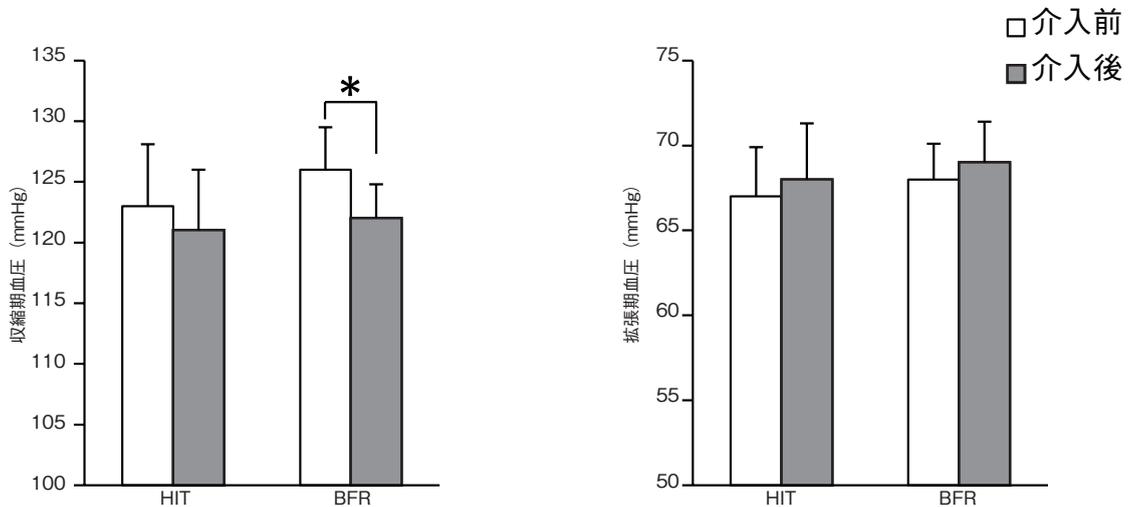


図2 トレーニング介入前後におけるHITとBFRの足首の収縮期血圧（左図）および拡張期血圧の変化（右図）
*, p<0.05 vs. 介入前

両群の間に有意な差は認められなかった。

2. 3 血圧指標

介入前の上腕の血圧は収縮期血圧および拡張期血圧とも両群の間に有意な差は認められなく（表1）、かつ介入後も有意な低下を示さなかった（ $116 \pm 4 \text{ mmHg}$; HIT群 vs. $116 \pm 5 \text{ mmHg}$; BFR群, 収縮期血圧, $68 \pm 4 \text{ mmHg}$; HIT群 vs. $69 \pm 3 \text{ mmHg}$; BFR群, 拡張期血圧）。一方、足首の血圧は、介入前の値に差は認められなかった（ $123 \pm 5 \text{ mmHg}$; HIT群 vs. $126 \pm 4 \text{ mmHg}$; BFR群, 収縮期血圧, $67 \pm 3 \text{ mmHg}$; HIT群 vs. $68 \pm 2 \text{ mmHg}$; BFR群, 拡張期血圧）。介入後にBFR群の収縮期血圧のみ有意な低下を示したが（ $121 \pm 5 \text{ mmHg}$; HIT群 vs. $122 \pm 3 \text{ mmHg}$; BFR群）、拡張期血圧については、変化は認められなかった（ $68 \pm 3 \text{ mmHg}$; HIT群 vs. $69 \pm 2 \text{ mmHg}$; BFR群, 図2）。

2. 4 血管機能

2. 4. 1 動脈硬化指標 (CAVI)

動脈硬化指標の一つであるCAVIは、BFR群のみ有意な改善効果が認められた。一方、HIT群では変化しなかった（図3）。さらに、両群を一

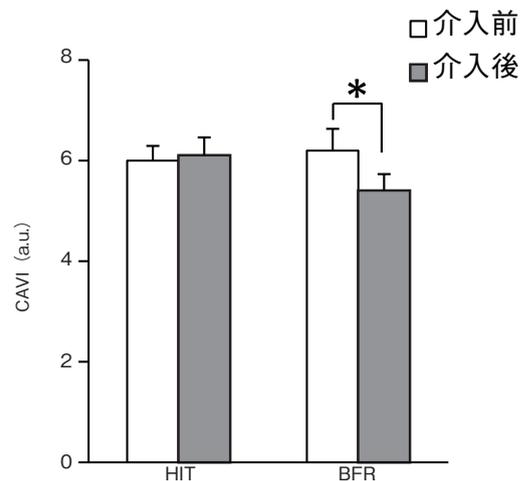


図3 トレーニング介入前後におけるHITとBFRのCAVI（心臓足首血管指数）の変化
*, p<0.05 vs. 介入前

括してみた場合、足首の収縮期血圧の変化量とCAVIの変化量の関係の間に有意な相関関係が認められ（図4）、CAVIの改善度は、足首の血圧の低下に依存している可能性が示唆された。

2. 4. 2 血管内皮機能指標 (FMD)

トレーニング介入により、BFR群の安静時血管径、カフ解放後の最大拡張時血管径およびFMDとも増加傾向を示したが（それぞれ $p < 0.1$ ）

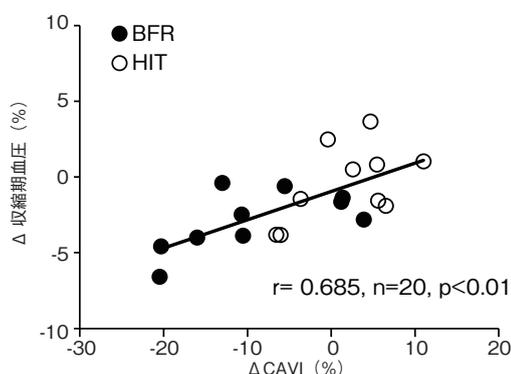


図4 トレーニング介入前後でのCAVI（心臓足首血管指数）の変化率と収縮期血圧（足首）の変化率の関係

有意な差は認められなかった。HIT群においては、各指標とも変化しなかった（表2）。

3. 考察

本研究の主要な結果は以下の通りである。1) 4週間のレジスタンストレーニングにより、筋力は有意に増大するが、この増大にトレーニング形態の違いの影響はなかった。2) 一方、血圧を含む血管機能については、BFR群のみ、有意な改善効果が認められた。3) さらに、血圧の低下とCAVIの改善は相互に関連している可能性が示唆された。

我々は、先行研究において4週間の血流制限下足底屈運動により下腿三頭筋の筋横断面積が4-5%増加し、筋力も12-13%ほど増加したことを報告している¹⁹⁾。本研究では、筋力のみしか評価していないが、両群ともほぼ同様の筋力増加が認められたことから、筋横断面積も同様に増加していたのではないかと推測される。すなわち、本研究でも用いた4週間という比較的短期間のト

レーニングであっても、筋代謝産物をトリガーとし筋力のみならず筋肥大を引き起こすには十分な介入であったと考えられる¹⁹⁾。

先行研究において、血流制限下での運動やトレーニングが血管機能に及ぼす影響について一致した見解は得られていない。例えば、一過性の血流制限下での筋力トレーニングは動脈コンプライアンスを有意に改善させることが報告されている⁵⁾。同様に、介入研究においても、3週間から10週間の血流制限下での筋力トレーニングにより動脈コンプライアンスやスティフネスが有意に改善されるという報告¹²⁾もある一方、同様の介入期間により動脈コンプライアンスやスティフネスは改善しないという報告^{2,4,9)}もある。本研究では、全身性の血管機能の指標として心臓足首血管指数を用いている。これまで、この指標を用いて血流制限下での筋力トレーニングが血管機能に及ぼす影響を評価した研究は見当たらないため、同様の条件下で比較することは困難であるが、本研究ではBFR群のみ、この指標の有意な改善が認められた。さらにこの変化率は両群を一括して見た場合ではあるが、足首の収縮期血圧低下率と有意な相関関係が認められた。これらの結果は、測定方法や測定部位は異なるもののOzakiら¹³⁾らの研究とほぼ同様であり、我々の結果を一部支持するものと考えられる。そのメカニズムは不明であるが、トレーニング介入による足首の血圧低下に伴う動脈硬化指標の改善をもたらした可能性が考えられる。実際、Ozakiら¹³⁾は、運動による急性の血圧変動と頸動脈コンプライアンスの変動との間に有意な相関関係を認めている。

血流制限下での運動では、運動中血流を制限し

表2 トレーニング介入前後の膝窩動脈における血管径および血流依存性血管拡張反応

	HIT (n=7)		BFR (n=7)	
	介入前	介入後	介入前	介入後
安静時血管径, mm	5.36 ± 0.32	5.47 ± 0.41	5.32 ± 0.38	5.69 ± 0.35
最大血管径, mm	5.62 ± 0.35	5.76 ± 0.37	5.6 ± 0.29	6.05 ± 0.34
FMD, %	5.1 ± 2	5.3 ± 2.1	5.3 ± 2.2	6.3 ± 2.4

ているため、運動終了後に反応性充血に伴う大きな血流増加見られることが報告されている¹⁴⁾。この反応性充血時の血流増大はそれ自体血管壁のずり応力を刺激し血管拡張を引き起こし、結果として血管拡張物質である一酸化窒素を増加させる¹⁵⁾。さらに、虚血運動後にこの血管拡張は最大になることも報告されている¹¹⁾。したがって、血流制限下でのトレーニングはこれらの生理応答の繰り返しを断続的に(週3回×4週間)引き起こし、結果として血流制限部位である大腿部より遠位の血管を刺激し、足首の血圧低下をもたらした可能性が考えられる。

一方、局所の血管機能の変化は、動脈ステイフネスの改善結果を全面的には支持しなかった。すなわち、膝窩動脈で評価されたFMDや安静時および最大拡張時の血管径は、BFR群で改善傾向を示したが、有意な差は認められなかった(それぞれ $p<0.1$)。これまで血流制限下での一過性の運動や介入研究によるFMDに及ぼす影響も一致した見解は得られていない。Huntら⁸⁾は4週間の血流制限下でのハンドグリップ運動により、FMDは改善しないものの、安静時の血管径が有意に太くなったことを報告している。彼らはさらにトレーニング部位を下腿三頭筋に、測定部位を膝窩動脈に変え、トレーニング期間も6週間に延長し、2週間毎に血管機能を評価している⁷⁾。その結果、FMDはトレーニング開始後2週間で有意に改善し、その後は減弱し、6週間目ではトレーニング前の値と有意な差が認められなかったことを報告している。一方、有意な差は認められなかったものの、安静時および最大拡張時の血管径は週数経過とともに太くなり、最大拡張時の血管径においてはその差は有意であったことを報告している。本研究では、被験者数が少なかったこともあり、血管径の変化もFMDの応答もトレーニング介入により有意傾向が認められたにとどまった。しかしながら、反応性充血時の血流増大は結果と

して血管拡張物質を増加させる¹⁵⁾こと、および血流制限下トレーニングによる代謝産物の増大は血管内皮細胞増殖因子の産生を促すことから²⁰⁾、詳細なメカニズムは不明であるが、血流制限下での筋力トレーニングがFMDの改善や血管径の増大などの構造的変化をもたらす可能性は否定できない。

しかしながら、急性の血流制限下歩行後¹⁶⁾や、3週間のハンドグリップ・トレーニング介入後にFMDが悪くなるという報告³⁾もされている。これらの報告^{3,16)}では、酸化ストレスの増大が原因ではないかと推測されている。しかしながら、一般に酸化ストレスの増加は、70%1RM以上の高強度トレーニングにより増加することは報告されているが⁶⁾、低強度血流制限下での筋力トレーニングにより酸化ストレスは増加しないという報告もされているため²¹⁾、先行研究で用いられた低強度血流制限歩行が酸化ストレスの増加をもたらした、FMD反応を減弱させたのかどうかは明らかではない。一方、Credeur³⁾が用いた運動負荷強度と血流制限時間は60%最大筋力で、20分間の持続的血流制限と、先行研究^{2,4,7-9)}で多く用いられてきた相対的に短い虚血時間(10~15分)や低い強度(最大筋力の20-40%)でのトレーニングとは虚血時間や負荷強度が明らかに異なっているため、酸化ストレス増大が血管機能に影響を及ぼしていた可能性はある。

4. 結 論

本研究では、低強度血流制限下での4週間の筋力トレーニングが血管機能に及ぼす影響について成人男性を対象に検討した。その結果、トレーニング介入後に両群とも有意な筋力の増加が認められた。さらに、BFR群においてのみ、足首の収縮期血圧と動脈硬化指標の有意な改善が認められ、両者の変化率の間にも有意な相関関係が認められた。一方、局所の血流依存性血管拡張反応に

ついては改善傾向が認められたもののその差は有意ではなかった。以上のことから、低強度血流制限下での筋力トレーニングは血管機能を改善させる可能性が示唆された。

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スポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、当研究に快く参加してくれた被験者の皆様に感謝いたします。

文 献

- 1) American College of Sports Medicine, Position stand: progression models in resistance training for healthy adults., *Med. Sci. Sports and Exerc.*, **41**: 687-708 (2009)
- 2) Clark B. C., Manini T. M., Hoffman R. L., et al., Relative safety of 4 weeks of blood flow-restricted resistance exercise in young, healthy adults., *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **21**: 653-662 (2011)
- 3) Credeur D. P., Hollis B. C., and Welsch M. A., Effects of handgrip training with venous restriction on brachial artery vasodilation., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **42**: 1296-1302 (2010)
- 4) Fahs C. A., Rossow L. M., Loenneke J. P. et al., Effect of different types of lower body resistance training on arterial compliance and calf blood flow., *Clin. Physiol. Func. Imaging*, **32**: 45-51 (2012)
- 5) Fahs C. A., Rossow L. M., Seo D. I., et al., Effect of different types of resistance exercise on arterial compliance and calf blood flow., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **111**: 2969-2975 (2011)
- 6) Hudson M. B., Hosick P. A., Mccauley G.O., et al., The effect of resistance exercise on humoral markers of oxidative stress., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **40**: 542-548 (2008)
- 7) Hunt J.E.A., Gaela D., Tufft G., et al., Time course of regional vascular adaptations to low load resistance training with blood flow restriction., *J. Appl. Physiol.*, **115**: 403-411 (2013)
- 8) Hunt J. E., Walton L. A., Ferguson R. A., Brachial artery modifications to blood flow-restricted handgrip training and detraining., *J. Appl. Physiol.*, **112**: 956-961 (2012)
- 9) Kim S. J., Sherk V. D., Bemben M. G., et al., Effects of short-term, low-intensity resistance training with vascular restriction on arterial compliance in untrained young men., *Int. J. KAATSU Training Res.*, **5**: 1-8 (2009)
- 10) Miyachi M., Kawano H., Sugawara J., et al., Unfavorable effects of resistance training on central arterial compliance: a randomized intervention study., *Circulation*, **110**: 2858-2863 (2004)
- 11) Naylor L. H., Weisbrod C. J., O' Driscoll G., et al., Measuring peripheral resistance and conduit arterial structure in humans using Doppler ultrasound., *J. Appl. Physiol.*, **98**: 2311-2315 (2005)
- 12) Ozaki H., Miyachi M., Nakajima T., et al., Effects of 10 weeks walk training with leg blood flow reduction on carotid arterial compliance and muscle size in the elderly adults., *Angiology*, **62**: 81-86 (2011)
- 13) Ozaki H., Yasuda T., Ogasawara R., et al., Effects of high-intensity and blood flow restricted low-intensity resistance training on carotid arterial compliance: role of blood pressure during training sessions., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **113**:167-174 (2013)
- 14) Patterson S. D., Ferguson R. A., Increase in calf post occlusive blood flow and strength following short-term resistance exercise training with blood flow restriction in young women., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **108**: 1025-1033 (2010)
- 15) Pyke K. E., Tschakovsky M. E., The relationship between shear stress and flow-mediated dilatation: implications for the assessment of endothelial function., *J. Physiol.*, **568**: 357-369 (2005)
- 16) Renzi C. P., Tanaka H., Sugawara J., Effects of leg blood flow restriction during walking on cardiovascular function., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **42**: 726-732 (2010)
- 17) Roth S.M., Martel G.F., Ivey F.M., et al., High-volume, heavy-resistance strength training and muscle damage in young and older women., *J. Appl. Physiol.*, **88**: 1112-1118 (2000)
- 18) Shinohara M., Kouzaki M., Yoshihisa T., et al., Efficacy of tourniquet ischemia for strength training with low resistance., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **77**: 189-191 (1998)
- 19) Takada S., Okita K., Suga T., et al., Low-intensity exercise can increase muscle mass and strength

- proportionally to enhanced metabolic stress under ischemic conditions., *J. Appl. Physiol.*, **113**: 199–205 (2012)
- 20) Takano H., Morita T., Iida H., et al., Hemodynamic and hormonal responses to a short-term low-intensity resistance exercise with the reduction of muscle blood flow., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **98**: 65-73 (2005)
- 21) Takarada Y., Nakamura Y., Aruga S., et al., Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion., *J. Appl. Physiol.*, **88**: 61-65 (2000)
- 22) Takarada Y., Takazawa H., Sato Y., et al., Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans., *J. Appl. Physiol.*, **88**: 2097–2106 (2000)

非運動時に血流制限を施行した レジスタンス運動の有効性の検証

北 翔 大 学 沖 田 孝 一
(共同研究者) 北海道大学大学院 高 田 真 吾
北 翔 大 学 吉 田 真
北海道教育大学 森 田 憲 輝
北 海 道 大 学 横 田 卓

Resistance Training with Blood Flow Restriction: Optimization in Women

by

Koichi Okita, Makoto Yoshida
Department of Sport Education, Hokusho University
Takada Shingo, Takashi Yokota
Cardiovascular Medicine, Hokkaido University of Medicine
Noriteru Morita
Sports Education, Hokkaido University of Education

ABSTRACT

In recent years it has been reported that increases in muscle size and strength equivalent to those with high intensity load can be achieved even with low intensity loads (20–40% of 1 RM) using blood flow restriction (BFR) together with resistance training. The resistance training with BFR generally consists of multiple sets, during which the exercise protocol is for continuous BFR during exercise and rest. However, there is also a possibility that continuous BFR will markedly increase cardiovascular stress. There are also reports showing a very high rating of perceived exertion (RPE). However, they can be mitigated by performing this exercise intermittently, such as

by releasing the BFR during the exercise period or rest period. The aim of this study was to investigate the effectiveness of intermittent BFR during low-intensity resistance exercise. Seven healthy men were recruited and performed 3 sets of low-intensity (20% of one repetition maximum, 1-RM) unilateral plantar-flexion (30 repetitions/min for 2 min) with 1-min resting interval. The exercise protocols were as follows: natural blood flow, BFR during rest periods, BFR during exercise periods, and continuous BFR during both exercise and rest periods. BFR was applied by 130% of the subject's resting blood pressure. Muscular metabolic stress, defined as phosphocreatine and intramuscular pH decrease by using ^{31}P -magnetic resonance spectroscopy. The intramuscular metabolic stress is significantly increased with continuous BFR compared with intermittent BFR in the exercise and rest periods. Intermittent BFR reduced subjects' RPE but could not raise metabolic stress to a level at which a sufficient training effect was obtained in previous intervention studies we conducted. In a comparison of the two methods of intermittent BFR, the metabolic load was equivalent with BFR in either the exercise or rest period.

要 旨

近年、血流制限の併用により、低強度負荷を用いたレジスタンス運動においても、高強度負荷を用いた場合に匹敵する効果が得られることが報告された。しかしながら、この方法は一般的に複数セットで施行され、血流制限は運動時および運動休止時（非運動時）にも継続されるため、被験者の苦痛は無視できない。血流制限を間欠的に施行することで、苦痛は軽減可能と考えられるが、有効性が低下する懸念がある。本研究では、複数セットのレジスタンス運動において間欠的に血流制限を施行する方法の有効性を磁気共鳴分光法により測定した骨格筋内代謝的負荷（筋内クレアチンリン酸および pH の低下度）により検討した。仰臥位右足関節底屈運動を 1 分間（30 回 / 分）、3 セット行い、セット間 1 分間の休息期を計 2 回とし、20% 1 RM（血流制限なし）、20% 1 RM + 休息期（非運動時）血流制限、20% 1 RM + 運動時血流制限、20% 1 RM + 継続的血流制限、の 4 つの条件で施

行し、代謝的負荷を比較した。

その結果、間欠的に血流を制限した休息期（非運動時）血流制限および運動期血流制限において、非血流制限に比較し、代謝的負荷は有意に増強していた。間欠的条件間の比較では、休息期では休息期血流制限において、運動期では運動期血流制限において、有意に代謝的負荷が上回っていたが、最終セット終了時では、有意差はなく、少なくとも同等の効果があることが示唆された。しかしながら、いずれの間欠的血流制限においても、継続的血流制限に比し、筋への負荷が十分ではなく、今後、有効なプロトコルを再検討するための研究が必要であると思われた。

緒 言

レジスタンス運動は筋力増強や筋肥大などのトレーニング効果をもたらす。この運動は主に競技者において競技能力の改善や怪我の予防として発展してきたが、近年、骨格筋の量および筋力が、ADL (activity of daily living) や QOL (quality of

life) のみならず生命予後や疾患予後に影響を与えることが疫学的に証明されたのを契機に、それらを向上させるレジスタンス運動の重要性が注目されている¹⁾。横断的には、筋力および筋量が多いほど、死亡率が低く、また運動療法においても有酸素運動にレジスタンス運動を加えることで病態や予後を改善する効果はさらに増加する²⁻⁴⁾。

しかしながら、レジスタンス運動により効率的に筋肥大や筋力増強を獲得するためには最大挙上重量 (1 RM : repetition maximum) の 65% 以上の運動強度が必要であり⁵⁾、高齢者、有疾病者および女性において施行するには、運動器損傷⁶⁾や心血管系への過負荷⁷⁾を来す危険性から臨床的に困難なことが多い⁸⁾。

近年、血流制限の併用により、最大筋力の 20 ~ 40% 程度の低強度負荷を用いたレジスタンス運動においても、高強度負荷を用いた場合に匹敵する効果が得られることが報告された。低強度負荷を用いることで、前述のリスクが減少するため、高齢者、有疾患者および女性における臨床応用が期待されている⁹⁻¹²⁾。しかしながら、一般的な血流制限併用レジスタンス運動は、複数セットで構成され、運動および休息中継続して血流制限を施行するため^{9,10)}、心血管系への負担や被験者の苦痛を無視できない¹³⁻¹⁵⁾。これらの副次的問題は、高齢者や有疾患者などで実施する際には大きなデメリットとなりうる。血流制限を運動期もしくは休止期に解除することで、苦痛は軽減可能と考えられるが、有効性が低下する懸念がある。本研究では、複数セットのレジスタンス運動において非運動時など間欠的に血流制限を施行する方法の有効性を磁気共鳴分光法による骨格筋内代謝的負荷の測定により検討した。

1. 方法

1. 1 被験者

健康男性 7 名が本研究に参加した。実験に先立

ち、全ての被験者に本研究の目的、方法、安全性等を十分に説明し、本研究への参加の同意を得た。なお本研究計画は、北翔大学倫理委員会の承認を受けている (HOKUSHO-SPOR: 201301)。

1. 2 運動条件

① 血流制限を施行しない条件 → L : low-intensity resistance exercise (20% 1 RM)

② 休息期 (非運動時) に血流制限を併用した条件 → L with interval BFR

③ 運動期に血流制限を併用した条件 → L with exercise BFR

④ 運動期 + 休息期に血流制限を併用した運動条件 → L with continuous BFR

1. 3 運動プロトコール

被験者は、全身用 MR 装置 (55 cm-bore, 1.5 tesla, Magnetom H15, Siemens, Erlangen, Germany) 内にて非磁性体で作成した運動装置を用いて、毎分 30 回、毎回 5 cm 挙上するよう仰臥位右足関節底屈運動を 1 分間 × 3 セット行い、セット間に 1 分間の休息期を 2 回とった。運動負荷には下腿三頭筋の最大挙上重量 (1 RM) に基づいた、20% 1 RM を用いた。全ての運動条件は無作為に施行し、2 条件ずつ 2 日間に分けて行った。運動を開始する前には、変化したエネルギー代謝が安静時の状態まで回復していることを毎回確認した。血流制限は、先行研究^{11,12)}に基づき右脚大腿部に装着した空気圧式カフと pneumatic rapid inflator (E-20 rapid cuff inflator, Hokanson, USA) を用いて、被験者の安静時収縮期血圧の 1.3 倍の圧で施行した。血流制限圧は pneumatic rapid inflator のデジタルディスプレイを監視し、正確に維持した。空気による制限圧は運動期開始 10 秒前にかけて、運動期終了後迅速に解放した。休息期に血流制限を併用した条件では休息期開始 10 秒前にかけて、休息期終了後迅速に解放した。主観的運動強度の指標と

した RPE は 10-point Borg scale で評価し、最も低い rating は 0.5 point とした。RPE は各運動期終了直後に聞き取った。

1RM の測定は実験で使用する装置とほぼ同様の装置を用いて、仰臥位右足関節底屈運動を行い、負荷を 5cm 挙上可能な最大強度を 1 RM とした。

1. 4 骨格筋内エネルギー代謝（代謝的負荷）の測定

被験者は、全身用 MR 装置内に設置した非磁性体で作成された運動装置において仰臥位となり、主動筋である下腿三頭筋の中央部下に 31P 励起用の表面コイル（直径 80 mm）を固定し、磁気共鳴分光法¹⁶⁾による測定を安静時および運動中 30 秒ごとに行った。得られた高エネルギーリン酸スペクトルからクレアチンリン酸および無機リン酸の曲線下面積を算出した。スペクトルの大きさは相対値であるが、クレアチンリン酸が分解していく過程で [クレアチンリン酸] と [無機リン酸] の和は理論上一定であることから、先行研究に基づいて¹⁷⁻¹⁹⁾ その和を便宜上 42.5 mM と仮定し、クレアチンリン酸量を絶対値として算出した。筋細胞内 pH は、クレアチンリン酸と無機リン酸のピークのケミカルシフトの差を用いて算出した。

筋への代謝的負荷は、クレアチンリン酸および筋細胞内 pH の低下度として評価した。我々は、単回の運動における代謝的負荷の程度が、筋肥大や筋力増加に強く関連することを証明している¹²⁾。

1. 5 統計処理

記述データは、平均 ± 標準偏差で表し、図は、平均 ± 標準誤差で表示した。ベースラインの基礎データにおける群間比較には、対応のない t 検定を用いた。運動条件間のクレアチンリン酸および筋細胞内 pH の経時的变化の比較

は、二元配置反復測定分散分析 (2-way repeated-measures ANOVA, 運動条件 × 時間) を用いて行った。運動条件間の交互作用が認められた場合は、Bonferroni の多重比較 (post-hoc) により検定した。統計学的有意水準は、 $p < 0.05$ とした。すべての検定は、ウインドウズ用統計解析ソフト Statview 5.0 (SAS Institute) を用いて行った。

2. 結果

表 1 に被験者の身体特性、運動負荷、制限圧の結果を示した。

表 1 被験者の身体特性、運動負荷、制限圧の結果

身体特性	(n=7)
年齢, 才	21.6 ± 1.6
身長, cm	174.6 ± 9.0
体重, kg	66.0 ± 6.9
BMI, kg/m ²	21.2 ± 0.9
収縮期血圧, mmHg	109.3 ± 13.5
血流制限圧, mmHg	142.0 ± 17.7
1 RM, kg	53.9 ± 4.3
20% 1 RM, kg	10.9 ± 4.31

平均 ± 標準偏差, BMI, body mass index; RM, repetition maximum

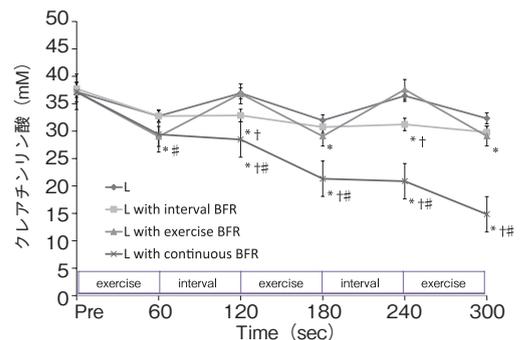


図 1 各条件におけるクレアチンリン酸の経時的变化 (平均 ± 標準誤差). $P < 0.05$, * vs. L, # vs. L with interval BFR, † vs. L with exercise BFR. L, low-intensity resistance exercise; BFR, blood flow restriction

図 1 に各条件におけるクレアチンリン酸の経時的变化を示した。安静時のクレアチンリン酸の値は 4 条件の間で同等であった。

L with interval BFR では、セット間の運動休止期である 120, 240 秒後において、L および L

with exercise BFR に比較し、有意に大きな低下が認められた。逆に L with exercise BFR では、運動期である 60 秒後に L および L with interval BFR より有意に大きな低下を認め、同じく運動期である 180 秒後と最終セット終了時である 300 秒後において L より有意に大きな低下を認めた。最終セット終了時では、L with interval BFR と L with exercise BFR における有意差は認められず、全経過におけるクレアチンリン酸低下の積分値も比較したが、有意差は認められなかった (1761.6 ± 1213.6 vs 1201.8 ± 275.3 , $p=0.25$)。L with continuous BFR においては、120 秒後から運動終了までの各点において、間欠的 2 条件に比較し、有意に大きな低下を認め、また開始からのすべての点において、L より有意に大きな低下を認めた。

図 2 に筋細胞内 pH の経時変化を示した。安静時の値は 4 条件の間で同等であったが、L with continuous BFR において、運動開始 180 秒後から最終セット終了時まで、L に比較し有意に大きな低下を示した。L を除く 3 条件の間には統計学的有意差は認められなかった。

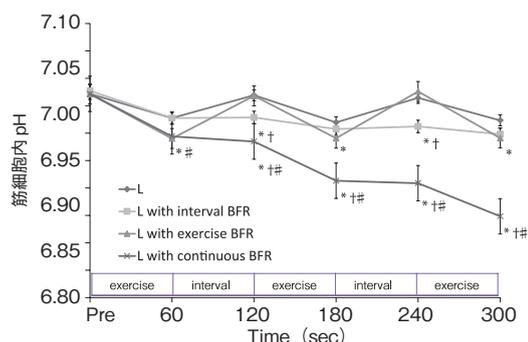


図 2 各条件における筋細胞内 pH の経時変化 平均 ± 標準誤差。P<0.05, *vs. L, L, low-intensity resistance exercise; BFR, blood flow restriction

図 3 に各条件における運動セット終了直後の RPE を示した。運動 1 セット目には各条件間に有意差はなかったが、運動 2 セット目では L with continuous BFR が L と L with interval BFR に比較し、有意に大きな値を示した。運動 3 セット目

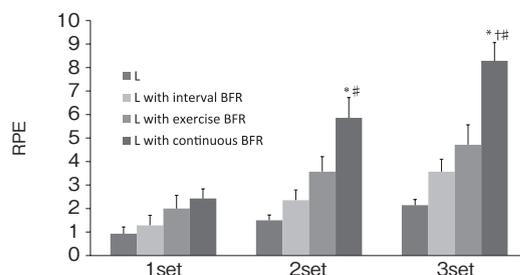


図 3 各条件における運動終了直後の RPE の平均値 平均値 ± 標準誤差。*vs. L, † vs. L with exercise BFR, # vs L with interval BFR, P<0.05。RPE, the rating of perceived exertion; L, low-intensity resistance exercise; BFR, blood flow restriction

では L with continuous BFR が他の 3 条件に比較し、有意に大きな値を示した。間欠的 2 条件の比較では、平均値が L with interval BFR で小さいものの統計学的有意差は認められなかった。

3. 考 察

血流制限を併用した複数セットレジスタンス運動において、運動期もしくは休息期における休息期（非運動時）あるいは運動期の間欠的な血流制限では、非血流制限に比較し、クレアチンリン酸低下からみた代謝的負荷は有意に増強していたが、継続的血流制限に匹敵するレベルには至っていなかった。間欠的條件の比較では、休息期では休息期血流制限条件において、運動期では運動期血流制限条件において、より高い有効性を示したが、最終セット終了時では、有意差はみられなかった。運動時の血流制限では、運動時の低酸素により代謝的負荷が強まり、休息期の血流制限解除により速やかに回復する。一方、休息時の血流制限では、運動時の代謝的負荷が血流制限による酸素供給の欠如のため回復せずに維持される。これらのことが経時変化に反映されたと考えられる。自覚的運動強度 (RPE) は、継続的血流制限と比較し、セット終盤において、間欠的血流制限で有意に軽く、また間欠的條件間では、休息期に血流制限を併用する条件の方がより低い傾向がみられた。以上のことから、間欠的血流制限では、休息期すな

わち非運動時の施行において、運動時と同等の効果があり、有用性は上回る可能性が示唆された。

しかしながら、問題点も明らかになった。レジスタンストレーニングにおいて筋肥大、筋力増加などの良好な効果を得るためには、一般的に最大筋力の65%以上の負荷が推奨されている。我々は、先行研究において、65%1RMを用いた同様の運動を施行し、代謝的負荷を測定し、クレアチンリン酸がおおよそ16mM前後に低下していることを確認している¹¹⁾。今回用いたプロトコールにおいて、そのレベルに達していたのは、継続的の血流制限のみであり、いずれの間欠的手法を用いても良好な筋肥大・筋力増加を得るための十分な代謝的負荷には達していないことも示された¹²⁾。ゆえに現場に応用するにはさらなる検討が必要である。

結 論

複数セットレジスタンス運動において、非運動時の血流制限は、運動時の血流制限と少なくとも同等の効果があることが示唆された。しかしながら、いずれの間欠の血流制限においても、継続的の血流制限に比し、筋への負荷が十分ではなく、今後、有効なプロトコールを再検討するための研究が必要であると思われる。

謝 辞

本研究は、平成26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の助成を受けて実施されたものである。

文 献

- 1) Braith R.W., Stewart K.J.: Resistance exercise training: its role in the prevention of cardiovascular disease. *Circulation*, **113**: 2642-2650 (2006)
- 2) Heitmann B.L., Frederiksen P. Thigh circumference and risk of heart disease and premature death: prospective cohort study. *BMJ*, **339**:b3292 (online, p1-8) (2009)
- 3) Newman A.B., Kupelian V., Visser M., et al.: Strength, but not muscle mass, is associated with mortality in the health, aging and body composition study cohort., *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.*, **61**:72-7 (2006)
- 4) Hülsmann M., Quittan M., Berger R., et al.: Muscle strength as a predictor of long-term survival in severe congestive heart failure., *Eur. J. Heart Fail.*, **6**:101-7 (2004)
- 5) Kraemer W.J., Ratamess N.A., Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **36**:674-688 (2004)
- 6) Roth S.M., Martel G.F., Ivey F.M., et al.: High-volume, heavy-resistance strength training and muscle damage in young and older women., *J. Appl. Physiol.*, **88**:1112-1118 (2000)
- 7) MacDougall J., Tuxen D., Sale D.G., et al.: Arterial blood pressure response to heavy resistance exercise. *J. Appl. Physiol.*, **58**: 785-790,1985)
- 8) Braith R.W., Beck D.T.: Resistance exercise: training adaptations and developing a safe exercise prescription., *Heart Fail. Rev.*, **13**:69-79 (2008)
- 9) Takarada. Y., Takazawa. H., Sato. Y., et al.: Effect of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in human. *J. Appl. Physiol.*, **88**:2097-2106 (2008)
- 10) Abe T., Yasuda T., Midorikawa T., et al.: Skeletal muscle size and circulating IGF-1 are increased after two weeks of twice daily KAATSU resistance training., *Int. J. KAATSU Training Res.*, **1**:6-12 (2008)
- 11) Suga T., Okita K., Morita N., et al.: Dose Effect on Intramuscular Metabolic Stress during Low-Intensity Resistance Exercise with Blood Flow Restriction., *J. Appl. Physiol.*, **108**:1563-1567 (2010)
- 12) Takada S., Okita K., Suga T., et al.: Low-intensity exercise can increase muscle mass and strength proportionally to enhanced metabolic stress under ischemic conditions., *J. Appl. Physiol.*, **113**:199-205 (2012)
- 13) Manini T.M., Clark, Brian C., Blood Flow Restricted Exercise and Skeletal Muscle Health. *Exercise and Sport Sciences Reviews.*, **37**:78-85 (2009)
- 14) Nakajima T., Kurano M., Takano H., Oonuma H., Morita T., Meguro K., Sato Y., Nagata T., Use and safety of KAATSU training: Results of a national survey., *Int. J. KAATSU Training Res.*, **2**:5-13 (2006)

- 15) Wernbom M., Augustsson J., Thomee R., Effects of Vascular Occlusion on Muscular Endurance in Dynamic Knee Extension Exercise At Different Submaximal Loads., *J. Strength Cond. Res.*, **20**:372-7 (2006)
- 16) Taylor D.J., Bore P.J., Styles P., et al.: Bioenergetics of intact human muscle: A ³¹P nuclear magnetic resonance study., *Mol. Biol. Med.*, **1**:77-94(1983)
- 17) Harris R.C., Hultman E., Nordesjö L.O.: Glycogen, glycolytic intermediates and high-energy phosphates determined in biopsy samples of musculus quadriceps femoris of man at rest. Methods and variance of values: *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, **33**:109-20(1974)
- 18) Kemp G.J., Radda G.K.: Quantitative interpretation of bioenergetic data from ³¹P and ¹H magnetic resonance spectroscopic studies of skeletal muscle: an analytical review., *Magn. Reson. Q.*, **10**:43-63 (1974)
- 19) Lanza I.R., Befroy D.E., Kent-Braun J.A.: Age-related changes in ATP-producing pathways in human skeletal muscle in vivo., *J. Appl. Physiol.*, **99**:1736-44(2005)

最大無酸素性作業能力の向上に関連する 分子メカニズムの解明 —骨格筋発現タンパクの網羅的解析—

立命館大学 宮本 恵里
(共同研究者) 同 家光 素行
同 佐藤 幸治
同 浜岡 隆文
同 早野 俊哉

Analysis of the Global Gene Expression Profile Associated with Training-Induced Improvements in Anaerobic Capacity

by

Eri Miyamoto, Motoyuki Iemitsu,
Koji Sato, Takafumi Hamaoka, Toshiya Hayano
Ritsumeikan University

ABSTRACT

Purpose: The purpose of the present study was to clarify gene expression profile associated with high-intensity intermittent training-induced improvements in anaerobic capacity. **Methods:** Eleven healthy young subjects (age 23 ± 3 years) completed 6-week of high-intensity intermittent training [6-7 sets of 20-s exercise at an intensity of about 170% of maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$) with 10-s rest between each bout]. Before and after the intervention, we evaluated $\dot{V}O_{2\max}$ and maximal accumulated oxygen deficit (MAOD) as an index of anaerobic capacity, gene expression profile in the vastus lateralis by using microarray analysis. **Results:** After the training, $\dot{V}O_{2\max}$ and MAOD increased significantly ($P < 0.05$). Of the 53,617 genes analyzed in the microarray analyses, 168 genes were significantly upregulated (fold change >

1.2, $P < 0.05$), while 116 genes were significantly downregulated (fold change < 0.8 , $P < 0.05$) following the training. Pathway analysis revealed that 30 pathways were significantly upregulated, and that 21 pathways were significantly downregulated (Z -score > 0 , $P < 0.01$). Conclusion: This study provides a gene expression profile related to molecular mechanisms underlying training-induced improvements in anaerobic capacity.

要 旨

【目的】本研究の目的は、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングを実施した前後で骨格筋中の遺伝子発現を網羅的に比較解析することにより、最大無酸素性エネルギー供給能の向上に関与する分子メカニズムを明らかにすることである。【方法】健常な若年男性 11 名 (23 ± 3 歳) を対象とし、6 週間の高強度・短時間・間欠的運動（最大酸素摂取量の 170% 程度の強度で 20 秒間の自転車エルゴメータ運動を 10 秒の休息を挟んで 6～7 回繰り返す運動）トレーニングを実施した。介入前後に最大酸素摂取量、最大酸素借の測定および安静時の筋生検を実施し、マイクロアレイ法を用いて骨格筋中の遺伝子発現を網羅的に解析した。【結果】トレーニング介入後に最大酸素摂取量は 9.2%、最大酸素借は 20.9% 有意に増加した ($P < 0.05$)。トレーニング介入の前後の遺伝子発現レベルを比較すると、168 個の遺伝子の発現が 1.2 倍以上有意に増加し、116 個の遺伝子の発現が 0.8 倍以下に有意に減少した ($P < 0.05$)。Pathway 解析の結果、有意に発現が増加しているシグナル伝達経路は 30 種 (Z -score > 0 , $P < 0.01$)、有意に発現が低下しているシグナル伝達経路は 21 種 (Z -score > 0 , $P < 0.01$) であった。【結論】本研究は、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングにより発現が変化し、最大無酸素性エネルギー供給能の向上に関与している可能性がある遺伝子を網羅的に明らかにした。これらの遺伝子が最大酸素借の

向上に貢献するのかを明らかにするため、今後の検討が必要である。

緒 言

運動トレーニングの実施により骨格筋は、様々な機能や形態の適応が生じる。骨格筋の適応は、実施するトレーニングの強度、量、頻度、運動様式によって異なることが知られている^{1,2)}。近年、レジスタンストレーニングや持久性トレーニングに対する骨格筋適応のメカニズムを明らかにするため、適応に関わる分子：遺伝子 (mRNA)³⁻⁵⁾ やタンパク質^{6,7)} の同定が網羅的解析により検討されている。その結果、種々のトレーニングによる骨格筋の機能・形態適応の分子メカニズムが明らかになりつつある²⁾。それぞれのトレーニング効果の分子メカニズムが明らかになれば、科学的根拠に基づくより効果的なトレーニング方法の開発に貢献できることから、レジスタンストレーニングや持久性トレーニングだけでなく、それ以外のトレーニングに関しても検討が必要であると考えられる。

現在まで、筋肥大をもたらすレジスタンストレーニングや最大酸素摂取量を向上させる持久性トレーニングにおける骨格筋適応の分子メカニズムを明らかにするため、マイクロアレイ法による網羅的な遺伝子発現の検討や 2 次元電気泳動法や液体クロマトグラフィー質量分析法 (LCMS) 法による網羅的なタンパク発現解析が報告されてきた。一方、陸上競技の 400M や 800M 走など 30

秒から3分程度で疲労困憊に至るような運動では、最大無酸素性エネルギー供給能がパフォーマンスに影響する⁸⁾が、最大無酸素性エネルギー供給能の骨格筋適応に関わる分子メカニズムはほとんど解明されていない。また、サッカーやバスケットボール等のスポーツで必要とされるスプリント走を反復する能力にも最大無酸素性エネルギー供給能に関わることから、筋力や持久性能力と同様に重要な能力であると考えられる⁹⁾。最大無酸素性エネルギー供給能とは、ATP-CP系と解糖系によるATP再合成の最大値のことであり、筋中の貯蔵ATP量やクレアチンリン酸量、解糖系の酵素活性、筋の緩衝能などにより規定されると考えられている。この最大無酸素性エネルギー供給能を向上させるトレーニングとして高強度・短時間・間欠的運動（最大酸素摂取量の170%程度の強度で20秒間の自転車エルゴメータ運動を10秒の休息を挟んで6~7回繰り返す運動）トレーニングが報告されている¹⁰⁾。高強度・短時間・間欠的運動トレーニングは、3~4分と短時間で終了する運動にもかかわらず、有酸素性エネルギー供給機構と無酸素性エネルギー供給機構の両方に最大の負荷をかけることができる運動であることが示唆されており¹¹⁾、効率的な運動トレーニングとして近年注目されている。これまでに、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングに対する骨格筋適応の分子メカニズムとして、動物研究にて、ミトコンドリアの増加に関わる転写活性化補助因子である peroxisome proliferator activated receptor γ coactivator-1 α (PPARGC1A) のタンパク発現が増加すること¹²⁾やミトコンドリア量の指標となるクエン酸合成酵素 (CS) の活性が増加すること¹³⁾、また糖代謝に関与する GLUT4 のタンパクが増加すること¹³⁾などが報告されている。しかしながら、ヒトの骨格筋において、このトレーニングがどのような分子メカニズムにより種々の適応を生じさせているのかは明らかと

なっていない。

そこで本研究は、最大無酸素性エネルギー供給能が向上することが明らかになっている高強度・短時間・間欠的運動トレーニングを実施した前後でヒトの骨格筋中の遺伝子発現を網羅的に比較解析することによって、最大無酸素性エネルギー供給能の向上に関与する分子メカニズムを明らかにすることを目的とした。

1. 研究方法

1.1 被験者

健康な若年男性11名を対象とした。被験者の身体的特性を表1に示した。被験者の中にスポーツ競技者、および慢性疾患を有する者は含まれていなかった。本研究は、立命館大学の倫理審査委員会の承諾を受け、ヘルシンキ宣言の精神に則り行われた。全ての被験者に、研究の目的および測定方法の説明をした後、実験参加の承諾を得て測定を実施した。

表1 被験者の特性

	介入前	介入後
年齢 (歳)	23 ± 3	-
身長 (cm)	173.7 ± 7.2	-
体重 (kg)	67.1 ± 7.1	67.7 ± 6.8
体脂肪率 (%)	15.0 ± 1.7	15.6 ± 2.5
全身骨格筋量 (kg)	32.4 ± 3.3	32.3 ± 3.2
右脚骨格筋量 (kg)	9.0 ± 1.0	9.0 ± 1.0
左脚骨格筋量 (kg)	9.0 ± 1.1	9.0 ± 1.0
最大酸素摂取量 (ml/kg/min)	48.2 ± 6.1	52.4 ± 4.6*

平均値 ± 標準偏差, *: P < 0.01 vs. 介入前

1.2 実験手順

被験者は、トレーニングの介入に先立ち、筋生検、身体組成の測定、および各種体力指標の測定を実施した。また、6週間のトレーニング介入終了後に、同様の項目の測定を実施した。

1.3 体組成の測定

全身の体脂肪率、全身の骨格筋量、および左脚、右脚の骨格筋量は InBody770 (バイオスペース社製) を用いて測定した。

1. 4 筋生検

筋生検は、トレーニング開始前および終了 48 時間以降の早朝安静空腹時に外側広筋に対して実施した。キシロカインを用いて外側広筋に局所麻酔を施し、皮膚に小切開を加えたのち、ニードル（バードモノプティ・マックスコア [14G×100mm]）を挿入して筋を摘出した。摘出した筋はすぐに液体窒素で凍結し、分析まで -80℃で凍結保存した。

1. 5 最大酸素摂取量の測定

最大酸素摂取量は間欠的多段階漸増負荷法により測定した。まずは、各被験者において最大下の自転車エルゴメータ運動における運動強度 (watt) と酸素摂取量 ($L \cdot \text{min}^{-1}$) の関係を明らかにするため、一定強度の運動を 10 分間、強度を変えて 5～7 回実施した。各運動強度の運動終了前 2 分間、もしくは 1 分間の呼気ガスを採取し、ダグラスバッグ法により酸素摂取量を測定し、運動強度と酸素摂取量の一次回帰直線を求めた。

次に、最大酸素摂取量を測定するため、ウォーミングアップとして最大酸素摂取量の 70～80% に相当すると考えられる強度で 2 分間の運動を行ったのち、そのまま続けて約 2～4 分間続けられる強度の運動（最大酸素摂取量の 120～130% の強度）を疲労困憊に至るまで行い、運動終了前 1～2 分間の酸素摂取量を 30 秒毎に測定した。この運動を、強度を変えて 2～3 回行い、最大下の運動強度と酸素摂取量の一次回帰直線から、最大酸素摂取量の測定で得られた酸素摂取量がレベリングオフする点を確認し、それを最大酸素摂取量 ($L \cdot \text{min}^{-1}$ あるいは体重あたり $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) とした^{8,14)}。以上の測定は数日間に分けて行われた。本研究において酸素摂取量は全てダグラスバッグ法により測定し、採取した呼気ガスは O_2 および CO_2 濃度を生体ガス分析用質量分析装置 (ARCO-2000 シリーズ, アルコシステ

デサントスポーツ科学 Vol. 36

ム社製)で分析し、呼気ガス量は乾式ガスメーター (DC-2, 株式会社品川製作所社製) で定量した。

1. 6 最大酸素借の測定

最大無酸素性エネルギー供給能の指標として最大酸素借を測定した。最大酸素摂取量の 50% の強度で 10 分間のウォーミングアップを行い、10 分間休憩したのち、2～3 分で疲労困憊にいたるような強度（最大酸素摂取量の 120～140% 程度）で運動を行った。疲労困憊の目安は、被験者がペダルの回転数を 90 回転/分に維持できなくなり、85 回転/分以下に低下した時とした。この運動中、運動開始から疲労困憊に至るまでの全呼気をダグラスバッグ法により 30 秒毎に採取し、総酸素摂取量を測定した。また、最大下強度における運動強度と酸素摂取量の一次回帰直線から、外挿法により運動時の酸素需要量を推定し、その酸素需要量に実際の運動時間をかけて、疲労困憊に至る運動の総酸素需要量を算出した。この総酸素需要量から実際の総酸素摂取量を引いて総酸素借を求め、これを最大酸素借とした^{8,15)}。

1. 7 トレーニング介入

高強度・短時間・間欠的運動トレーニングには、自転車エルゴメータ (828E:Monark 社製) を使用した。自転車エルゴメータのペダルの回転数を 90 回転/分に設定し、最大酸素摂取量の 170% 程度の強度で 20 秒間の自転車運動を 10 秒間の休息を挟んで 6～7 セットを 1 回とし¹⁰⁾、1 日 1 回、週 4 回、6 週間実施した。ペダルの回転数を 90 回転/分に保てなくなり、85 回転/分を下回った時点で運動を終了させ、8 セット目まで運動を実施できた場合に、次回から 11 watt ずつ負荷を増加させた。

1. 8 マイクロアレイ解析

マイクロアレイ解析には、Affymetrix 社製の

GeneChip[®] Human Gene 2.0 ST Array を用いた。解析に用いるトータル RNA は、凍結保存した骨格筋サンプルから RNeasy Micro Kit (QIAGEN 社製) を用いて精製した。トータル RNA の品質チェックには Agilent 2100 Bioanalyzer (Agilent 社製) を用いた。その後のサンプル調整、ハイブリダイゼーション、アレイの染色および洗浄、スキャニングは全て Affymetrix 社のプロトコルに従って実施した。

1. 9 統計解析

データは平均値 ± 標準偏差で示した。統計解析は Student's t-test を用いて行い、 $P < 0.05$ を有意とした。マイクロアレイデータの解析には、Filgen 社製の Microarray Data Analysis Tool Ver3.2 を用いた。

2. 研究結果

2. 1 トレーニング介入前後における体組成および体力指標の変化

6週間のトレーニング介入前後における被験者の特性を表 1 に示した。体重、全身の体脂肪率、全身の骨格筋量、左右の脚の骨格筋量はトレーニング介入前後において有意な変化は認められなかった ($P > 0.05$, 表 1)。一方、最大酸素摂取量はトレーニング介入前と比較して、介入後に $9.2 \pm 7.1\%$ 有意に増加していた (48.2 ± 6.1 vs. 52.4 ± 4.6 ml/kg/min, $P < 0.01$, 表 1)。さらに、最大酸素借はトレーニング介入前と比較して、介入後に $20.9 \pm 15.8\%$ 有意に増加していた (53.8 ± 10.0 vs. 64.2 ± 11.0 ml/kg, $P < 0.01$, 図 1)。

2. 2 マイクロアレイ解析

Affymetrix 社製の GeneChip[®] Human Gene 2.0 ST Array により、骨格筋サンプルにおいて合計 53,617 個の転写産物の発現が確認された。本研究のマイクロアレイによる遺伝子発現解析の信頼性

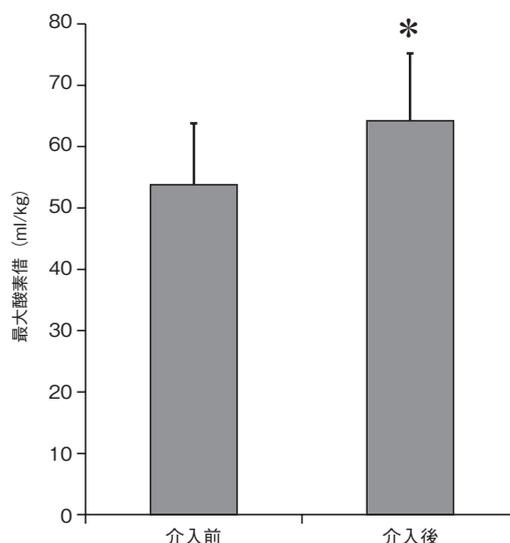


図 1 トレーニング介入前後における最大酸素借の変化
平均値 ± 標準偏差, *: $P < 0.01$ vs. 介入前

を確認するため、先行研究で高強度・短時間・間欠的運動トレーニングにより発現増加が報告されている遺伝子の発現変化を確認した結果、トレーニング介入前後で CS の発現は 9% ($P < 0.05$), GLUT4 の発現は 7% ($P = 0.37$), PPARGC1A の発現は 22% ($P < 0.01$) 増加していた。

トレーニング介入の前後の遺伝子発現レベルを比較すると、1.2 倍以上有意に発現が増加したのは 168 個であった ($P < 0.05$)。そのうち、タンパク質として翻訳される遺伝子は 108 個であった。一方、介入の前後で 0.8 倍以下に発現が減少した遺伝子は 116 個であり ($P < 0.05$)、そのうち、タンパク質として翻訳される遺伝子は 77 個であった。これらの有意に発現変動した遺伝子について、どのようなシグナル伝達経路と関連がある遺伝子が多いのかを明らかにするために Pathway 解析を実施した結果、有意に発現が増加しているシグナル伝達経路は 30 種 ($Z\text{-score} > 0$, $P < 0.01$, 表 2)、有意に発現が低下しているシグナル伝達経路は 21 種 ($Z\text{-score} > 0$, $P < 0.01$, 表 3) であった。

表2 有意に発現が増加した Pathway

Pathway Name	Changed Genes	Total Genes	Z score	P value
ECM-receptor interaction	8	84	9.772	1.77E-07
Extracellular matrix organization	8	92	9.267	3.38E-07
Collagen biosynthesis and modifying enzymes	7	64	9.894	4.65E-07
Collagen formation	7	64	9.894	4.65E-07
NCAM1 interactions	6	43	10.498	8.89E-07
Focal adhesion	10	197	7.429	1.16E-06
PI3K-Akt signaling pathway	12	325	6.53	2.23E-06
Protein digestion and absorption	7	84	8.455	2.54E-06
Gluconeogenesis	5	30	10.562	3.53E-06
Glucose metabolism	6	59	8.788	4.83E-06
NCAM signaling for neurite out-growth	6	69	8.026	1.12E-05
Amoebiasis	7	107	7.305	1.15E-05
Signaling by PDGF	8	178	6.125	3.52E-05
Glycolysis, core module involving three-carbon compounds	3	10	11.188	8.35E-05
Gluconeogenesis, oxaloacetate → fructose-6P	3	16	8.72	0.00275
Developmental Biology	10	413	4.244	0.000528
Glycolysis (Embden-Meyerhof pathway), glucose → pyruvate	3	21	7.52	0.00056
Glycolysis	3	24	6.983	0.000798
Neurophilin interactions with VEGF and VEGFR	2	5	10.61	0.000951
aspartate degradation II	2	5	10.61	0.000951
Glycolysis / Gluconeogenesis	4	61	5.53	0.000989
Axon guidance	8	320	3.906	0.001656
Signaling by VEGF	2	9	7.797	0.002446
VEGF ligand-receptor interactions	2	9	7.797	0.002446
Small cell lung cancer	4	83	4.54	0.002908
Integrin cell surface interactions	4	84	4.503	0.003031
Metabolism of carbohydrates	6	229	3.523	0.005233
Pyruvate metabolism	3	51	4.475	0.005935
Arginine and proline metabolism	3	54	4.315	0.0069
Signaling events mediated by VEGFR1 and VEGFR2	3	61	3.985	0.0095

表3 有意に発現が低下した Pathway

Pathway Name	Changed Genes	Total Genes	Z score	P value
Ethanol oxidation	3	10	13.102	3.34E-05
ethanol degradation II	2	5	12.406	0.000518
Arf6 signaling events	3	33	6.926	0.000769
EGFR interacts with phospholipase C-gamma	3	33	6.926	0.000769
PLCG1 events in ERBB2 signaling	3	34	6.811	0.000834
EGFR-dependent Endothelin signaling events	2	8	9.732	0.001099
serotonin degradation	2	8	9.732	0.001099
Fatty acid metabolism	3	42	6.04	0.00148
Valine, leucine and isoleucine degradation	3	43	5.958	0.001578
noradrenaline and adrenaline degradation	2	10	8.659	0.001602
ErbB receptor signaling network	2	13	7.535	0.002524
GRB2 events in EGFR signaling	2	14	7.242	0.002875
SHC1 events in EGFR signaling	2	15	6.978	0.003248
Glycolysis / Gluconeogenesis	3	61	4.838	0.004065
Phase 1 - Functionalization of compounds	3	65	4.651	0.004822
Signaling by constitutively active EGFR	2	19	6.134	0.004951
GRB2 events in ERBB2 signaling	2	23	5.516	0.006983
Nicotinate and nicotinamide metabolism	2	23	5.516	0.006983
EGF receptor (ErbB1) signaling pathway	2	25	5.262	0.008118
SHC1 events in ERBB2 signaling	2	25	5.262	0.008118
EGFR downregulation	2	26	5.146	0.008714

3. 考 察

本研究において、健常な若年男性において、週4回6週間の高強度・短時間・間欠的運動トレーニングを実施した結果、トレーニング介入後に最大無酸素性エネルギー供給能の指標である最大酸素借および最大酸素摂取量が有意に増加した。その増加率は、それぞれ20.9%と9.2%であり、同様のトレーニングを6週間実施した先行研究と同程度の増加率であった^{10, 16)}。また、トレーニング介入前後において外側広筋中の遺伝子発現を網羅的に解析した結果、トレーニング後に108個の遺伝子発現が1.2倍以上に有意に増加し、77個の遺伝子発現が0.8倍以下に有意に低下していた。したがって、これらの遺伝子発現の変化によってもたらされるタンパク発現の変化が、最大酸素借および最大酸素摂取量の増加に貢献している可能性が考えられる。

動物を対象とした先行研究において、高強度・短時間・間欠的運動は、骨格筋中のPPARGC1Aタンパクの発現を増加させ¹²⁾、CS活性を増大させる¹³⁾ことが報告されている。本研究のマイクロアレイ解析においても、これらの遺伝子発現レベルがトレーニング介入後に有意に増加していたことから、トレーニングにより骨格筋中のミトコンドリア量が増大し、そのことが最大酸素摂取量の向上に貢献していたと考えられる。

最大酸素借を増加させる主な要因として、乳酸産生速度の増加とそれを可能にする筋の緩衝能の向上があげられる。本研究において、トレーニング介入により1.2倍以上発現が有意に増加した転写産物のPathway解析の結果、解糖系経路の遺伝子発現が有意に増加していることが明らかとなった(表2)。遺伝子レベルでは、解糖系におけるホスホグリセリン酸キナーゼ(PKG1)、ホスホグリセリン酸ムターゼ(PGAM2)、ピルビン酸キナーゼ(PKM)のmRNAの発現が1.2倍以上有

意に増加していた。解糖系の律速酵素であるホスホフルクトキナーゼ(PFK)の発現も19.6%有意に増加しており、これらの解糖系酵素の発現増加が乳酸産生速度の増加に関与している可能性がある。また、発現が有意に増加した遺伝子の中にカルノシン合成酵素(CARNS1)が含まれていた。骨格筋中のカルノシン濃度は筋緩衝能と関連することから^{17, 18)}、カルノシン合成酵素の発現増加が筋緩衝能の向上に貢献している可能性が考えられる。

また、トレーニング介入により有意に発現が低下した遺伝子の中にはミオスタチン(MSTN)が存在した。ミオスタチンは筋肥大を抑制する作用を有することから、ミオスタチンの発現低下は筋肥大に関与する¹⁹⁾。先行研究において、骨格筋量の増加は最大酸素借の増大に貢献することが報告されている¹⁶⁾。今回InBodyの測定において脚全体の筋量変化は認められなかったが、自転車運動は主働筋が大腿四頭筋であることから²⁰⁾、今後大腿四頭筋の筋量について詳細に検討する必要がある。本研究において、高強度・短時間・間欠的運動トレーニングにより有意に発現が上昇した遺伝子108個について、先行研究における持久性トレーニング^{3, 21)}やレジスタンストレーニング⁵⁾によっても発現が上昇する遺伝子は108個中17個でありPI3K-Aktシグナル経路と関連がある遺伝子や血管新生に関わる遺伝子が含まれていた。一方、高強度・間欠的運動トレーニングにおいてのみ発現が上昇する遺伝子は108個中76個であった。これらの先行研究は、本研究とトレーニング介入の期間や対象者の年齢、遺伝子抽出の基準が異なるため更なる検討が必要であるが、本研究トレーニングにより発現が上昇した遺伝子の多くは高強度・短時間・間欠的運動トレーニングに特異的に反応し発現が変化する遺伝子である可能性が考えられる。

4. 結 論

本研究は、健常な若年男性において、6週間の高強度・短時間・間欠的運動トレーニング介入により骨格筋で発現が変化する遺伝子を網羅的に明らかにした。これらの遺伝子は最大無酸素性エネルギー供給能の向上に関与している可能性がある候補遺伝子である。これらの遺伝子が最大酸素借の向上に貢献するのかを明らかにするため、今後の検討が必要である。

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立命館大学：街勝憲氏、徐宇中氏、長谷川夏輝氏に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Coffey V.G., Hawley J.A., The molecular bases of training adaptation., *Sports Med.*, **37**: 737-763(2007)
- 2) Egan B., Zierath J.R., Exercise metabolism and the molecular regulation of skeletal muscle adaptation., *Cell. metabolism*, **17**: 162-184(2013)
- 3) Keller P., Vollaard N.B., Gustafsson T., Gallagher I.J., Sundberg C.J., Rankinen T., Britton S.L., Bouchard C., Koch L.G., Timmons JA (2011) A transcriptional map of the impact of endurance exercise training on skeletal muscle phenotype., *J. Appl. Physiol.*, **110**: 46-59(1985)
- 4) Phillips B.E., Williams J.P., Gustafsson T., Bouchard C., Rankinen T., Knudsen S., Smith K., Timmons J.A., Atherton P.J., Molecular networks of human muscle adaptation to exercise and age., *PLoS Genet.*, **9**: e1003389(2013)
- 5) Raue U., Trappe T.A., Estrem S.T., Qian H.R., Helvering L.M., Smith R.C., Trappe S.,(2012) Transcriptome signature of resistance exercise adaptations: mixed muscle and fiber type specific profiles in young and old adults., *J. Appl. Physiol.*, **112**: 1625-1636(1985)
- 6) Burniston J.G., Changes in the rat skeletal muscle proteome induced by moderate-intensity endurance exercise., *Biochim. Biophys. Acta.*, **1784**: 1077-1086 (2008)
- 7) Egan B., Dowling P., O'Connor P.L., Henry M., Meleady P., Zierath J.R., O'Gorman D.J., 2-D DIGE analysis of the mitochondrial proteome from human skeletal muscle reveals time course-dependent remodelling in response to 14 consecutive days of endurance exercise training., *Proteomics.*, **11**: 1413-1428(2011)
- 8) Medbo J.I., Tabata I., (1989) Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise., *J. Appl. Physiol.*, **67**: 1881-1886(1985)
- 9) Meckel Y., Machnai O., Eliakim A., Relationship among repeated sprint tests, aerobic fitness, and anaerobic fitness in elite adolescent soccer players. *Journal of strength and conditioning research / National Strength & Conditioning Association.*, **23**: 163-169(2009)
- 10) Tabata I., Nishimura K., Kouzaki M., Hirai Y., Ogita F., Miyachi M., Yamamoto K., Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and $\dot{V}O_{2max}$., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **28**: 1327-1330(1996)
- 11) Tabata I., Irisawa K., Kouzaki M., Nishimura K., Ogita F., Miyachi M., Metabolic profile of high intensity intermittent exercises., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **29**: 390-395(1997)
- 12) Terada S., Kawanaka K., Goto M., Shimokawa T., Tabata I., Effects of high-intensity intermittent swimming on PGC-1 α protein expression in rat skeletal muscle., *Acta physiologica Scandinavica*, **184**: 59-65(2005)
- 13) Terada S., Yokozeki T., Kawanaka K., Ogawa K., Higuchi M., Ezaki O., Tabata I.,(2001) Effects of high-intensity swimming training on GLUT-4 and glucose transport activity in rat skeletal muscle., *J. Appl. Physiol.*, **90**: 2019-2024(1985)
- 14) Taylor H.L., Buskirk E., Henschel A., Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance., *J. Appl. Physiol.* **8**: 73-80 (1955)
- 15) Medbo J.I., Mohn A.C., Tabata I., Bahr R., Vaage O. Sejersted O.M.,(1988) Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit., *J.*

- Appl. Physiol.*, **64**: 50-60(1985)
- 16) 平井 雄介, 田畑 泉., 高強度の間欠的トレーニングとウエイトトレーニングが最大酸素借と最大酸素摂取量に与える影響. *体力科学* **45**: 495-502 (1996)
 - 17) Baguet A., Everaert I., De Naeyer H., Reyngoudt H., Stegen S., Beeckman S., Achten E., Vanhee L., Volckaert A., Petrovic M., Taes Y., Derave W., Effects of sprint training combined with vegetarian or mixed diet on muscle carnosine content and buffering capacity., *Eur. J. Appl. Physiol.* **111**: 2571-2580 (2011)
 - 18) Parkhouse W.S., McKenzie D.C., Possible contribution of skeletal muscle buffers to enhanced anaerobic performance: a brief review., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **16**: 328-338(1984)
 - 19) 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**: 83-90(1997)
 - 20) Akima H., Kinugasa R., Kuno S., Recruitment of the thigh muscles during sprint cycling by muscle functional magnetic resonance imaging., *Int. J. Sports Med.*, **26**: 245-252(2005)
 - 21) Timmons J.A., knudsen S., Rankinen T., Koch L.G., Sarzynski M., Jensen T., Keller P., Scheele C., Vollaard N.B., Niesen S., Åkerström T., Macdougald O.A., Jansson E., Greenhaff P.L., Tarnopolsky M.A., van Loon L.J., Pedersen B.K., Sundberg C.J., Wahlestedt C., Britton S.L., Bouchard C., Using molecular classification to predict gains in maximal aerobic capacity following endurance training in humans., *J. Appl. Physiol.* **108**:1487-1496 (2010)

消防用防護服着用時に実施する 運動・バランス能力テストの有効性検討

独立行政法人
労働安全衛生総合研究所
(共同研究者) 九州大学大学院

ソ ン スヨン
村 木 里 志

Evaluation of the Mobility with Personal Protective Equipment for Firefighters and the Validity of Those Test Methods

by

Su-Young Son
National Institute of Occupational Safety and Health, Japan
Satoshi Muraki
Kyushu University

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the effects of PPE's weight and the harness design of SCBA on mobility of those users and to determine the validity of physical performance test, three functional balance tests, and postural balance test as a standard mobility test method when wearing the PPE. A total of 10 Japanese healthy males (not trained) performed balance tests in this study. Participants were required to wear followed five clothing conditions with different weight and designs, randomly. In CON, participants wore T-shirt and short pants. In ST, they wore PPC without SCBA. In TA and TB, they wore PPC and SCBA with old harness design (TA and TB: 13.1kg and 6.9kg of SCBA, respectively). In TC, they wore PPC and SCBA (6.9kg) with improved harness design. For the physical performance test, participants carried out the following tasks inside the experiment building, (1) Step up; (2) Side jump; (3) Crawl; (4) Object-dragging; (5) Obstacle stride. For the functional balance test, Performance time was measured for 'Wooden plank time' and 'Timed up and go' test. For the

'Functional reach' test, participants extended their right arm forward as far as possible, and the extended distance were measured. We measured COP for postural balance test and from these sway data, measurements of medial-lateral (ML) and anterior-posterior (AP) excursion, sway length, and the area of each test were available. As results, a heavy SCBA limits wearers' mobility, however, we could not determine any difference between harness systems (standard versus improved). It was possible to find significances among clothing conditions using several kinds of motions of physical performance test and functional balance test. Therefore, the test method of present study, especially physical performance and functional balance test is valid and convenient method for evaluating mobility of PPE users, and it shows more statistically different results than postural balance test.

要 旨

本研究は消防用防護服着用時の動作性評価ができる準評価テスト方法を提案するため行われた。個人防護装備の重さとのデザインが、バランス能力に及ぼす影響を検討した。また、運動能力テスト、バランス能力テスト、重心動揺測定方法の有効性を調べ、より判別力が高い方法を提案することに着目した。10名の男子大学生を被験者とし、着衣条件は以下の5条件とした：①0.5kgの運動服、②8.7kgの防護服、③防護服と13.1kg空気呼吸器、④防護服と6.9kg空気呼吸器、⑤防護服と6.9kg空気呼吸器（改善されたハーネス付き）。各条件の着衣後に運動能力とバランス能力テスト、重心動揺測定を行った結果、空気呼吸器の重さが重くなるほど着用者のバランス能力が低下する傾向が認められたが、デザインの違いによる動作性の変化は見られなかった。本研究結果で運動能力とバランス能力テストが、重心動揺測定法より有意な条件間の差異が認められたため、より有効な測定方法になることが示唆された。

緒 言

津波や地震等の自然災害や高層ビルの火災、

SARSなどの危険なウイルス、原子力発電所などの環境で働く作業者の安全を守るため、防護服着用は不可欠である。特に、消防隊員は火災現場などにおいて危険な任務を行うため、身体の安全確保のために、耐熱性、耐炎性、引裂耐性等を重視した防護服を着用しなければならない。しかし、消防隊員には、現場で迅速に働けることが要求されるにもかかわらず、消防用防護服の硬くて厚い素材、容積の大きさ、20Kg以上にもなる個人呼吸器等の隊員防護用消防装備の重さがそれを妨げ、さらに発汗による衣服摩擦力の増加により隊員の疲労増加や作業効率低下などが生じることが報告されている。また、消防用防護服は衣服圧や密閉性が高い衣服であるので着用者に温熱負荷が増大することも事実である。また、消防用防護服と共に個人装備品も装着することによって重くなる衣服重量は着用者に負荷をかけ、さらに作業者の動作性及び作業能率の低下等の身体負担をもたらすことが重大な問題になっている。『次世代防護服の開発に関する研究報告書』によると、消防隊員に「防護性・安全性」、「動作のしやすさ」、「着心地の良さ」の3項目について評価してもらった結果、消防隊員にとって消防用防護服に最も期待する性能は、「動作のしやすさ」であった¹⁾。そ

れは消防隊員の持つ使命感の強さから消防用防護服着用による不快感の軽減といった観点より、活動のしやすさを重視したものと思われる。また、消防隊員を対象とした調査研究では、消防隊員は活動中の発汗や放水によって衣服が濡れた場合や空気呼吸器と呼吸保護具の重量により、大きな動作性の低下を感じていることが報告されている²⁾。

消防活動は重いものを運ぶ動作や、はしご・階段上り動作や救助動作などの関節可動域が広い動作である。しかし、全身の関節可動域は防護服と個人装備品のフル装備装着によって13.7%が低下する³⁾。Sonらのアンケート調査によって、1282名の消防隊員の多数がフル装備装着の消防活動時に、滑りと落下などのバランスを崩した事故による傷害を経験したことが明らかになった²⁾。落下による消防隊員の傷害経験に関する他国からの調査結果も報告されている⁴⁻⁸⁾。National Fire Protection Associationによると、50%以上の消防隊員が落下と滑りによる傷害を経験した⁴⁾。防護服と個人装備品装着は着用者の身体を保護するが、その重量やデザインなどによって着用者の動作性が制限されるし、着用者の事故を誘発する可能性がある。特に、個人装備品全重量の50%以上になる個人呼吸器は消防隊員の動作性に影響を及ぼす。

しかしながら、現在発表されている消防用防護服に関する研究をみると温熱負荷や防護服性能に関する研究⁹⁻¹³⁾及び規格に比べ^{14, 15)}、防護服着用がどの程度作業者の動作性を低下し事故を誘発するかについて、具体的に記述している規格はなく研究は進んでいない。実際のところ、国際的に標準化され使用できる規格がない状態であり、個々の防護服研究グループが異なる防護服や独自のテスト評価法を使用しているため、防護服着用による動作性の相互性能比較は出来ず、再現性試験も不可能である。そのため、防護服のデザイン

や重量、被験者の体力水準、環境温度を考慮する防護服着用時の動作性標準評価ができる標準テスト方法の作成が必要であると考えられる。

本研究では、消防用防護服着用時の動作性評価ができる準評価テスト方法を提案するため、異なる防護服着用による動作性の変化を測定し、テスト方法として活用する運動・バランス能力測定の有効性を検討することを目的とした。

1. 研究方法

1.1 被験者及び着衣条件

体力トレーニングをしていない健康な一般男子10名(24.2±3.1yrs, 170.2±5.9cm, 62.2±9.5kg, 13.5±5.5 BF%)を対象とした。すべての被験者は慢性疾患がなく、スポーツ競技者は含まれていなかった。着衣条件は以下の5条件とした: ① CON - 0.5 kgの運動服, ② ST - 8.7kgの消防用防護服(作業着, ヘルメット, 手袋, 長靴が含まれている), ③ TA - 消防用防護服(②)と13.1kg空気呼吸器, ④ TB - 消防用防護服(②)と6.9kg空気呼吸器, ⑤ TC - 消防用防護服(②)と6.9kg空気呼吸器(腰と肩のストラップが回転出来るように改善されたハーネス)。被験者一人に対して一日一条件のみテストを行い、着衣条件の順番はランダムにした。

被験者には、本研究の目的、内容などを詳細に口頭と書面で説明をし、研究参加への承認を得た。本研究は、国立大学法人九州大学の倫理委員会の実験倫理審査による承認を得て行われた。

1.2 実験手順

すべての測定は、空調システムが設置されている広い面積と高さを持つ建物において、環境温度の調節が可能である居住空間実験室で行った。測定中の環境温度は32.4±2.4℃、相対湿度は73.2±6.3%であった。

動作性評価の標準評価テスト方法として、運動

能力測定とバランス能力測定を行った。運動能力測定では、以下の5つの動作を行ってもらった。各動作時の測定内容は以下に示す。

- ・踏み台昇降運動 (step up) - 45cm 高さの踏み台を 60 秒間、20 回昇降する。60 秒間の心拍数上昇を測定する
- ・しゃがんで進む (crawling) - しゃがんだ姿勢で 10m 往復時の遂行時間を測る
- ・くぐりと跨ぎ (obstacle stride) - くぐりと跨ぐ動作を 2 回ずつ行いながら 12m を往復する。その遂行時間を測る
- ・反復横とび (repetition side jump) - 20 秒間の反復横とびの遂行回数を記録する
- ・重いものを運ぶ (dragging heavy object) - 20kg のものを引き寄せながら 10m を往復する

テスト開始から終了まで、運動能力測定中に心拍数を連続でモニタリングし、テスト後各動作実施前後の心拍数の比較を行った。

バランス能力測定としては、ファンクショナルリーチ (FR : Functional Reach) テスト、Timed up and go (TUG テスト) テスト、Wooden plank time (WPT テスト) テストを行った。これらのテストは身体重心の移動を伴う動作遂行でバランス機能測定を可能にするものである。FR テストは、両足を左右に開いた直立姿勢になって測定開始にした。被験者は、片腕を肩の高さまで上げて高さを維持したまま、足も動かさずにできるだけ前へ腕を伸ばして、腕が最大に伸びた距離を測った。FR テストでは、3次元動作解析プログラムを用いて測定及び解析を行った (測定 : EVaRT 5.0.4, 解析 : KineAnalyzer)。TUG テストに関しては、スツールに座った姿勢の被験者が、スツールから立ち上がって 3m の距離を往復しスツールに座る姿勢に戻る時間を測った。WPT テストでは、被験者に 3m の狭い板上を往復してもらう時間を測定した。テスト中にバランスが崩れ、板上

から足が床に接する場合はエラーと記録し、解析時に 1 回エラーは往復時間を 1 秒増やすことにした。

また、静的なバランス能力は重心動揺測定法を用いて測定した。重心動揺測定法は、床反力計を用いて両足と片足支持時の足の側圧を測定、その重心動揺を解析するものである。被験者には床反力計の上に立ち、2m 前にあるカメラをみるように指示した。両足支持時の重心動揺テストでは閉眼と開眼時の 40 秒間測定を行い、前後方向重心動揺幅、左右幅、総軌跡長、軌跡面積を解析した。片足支持時の重心動揺テストでは、閉眼時のバランス維持時間を測定した。すべての各バランステストは 2 回ずつ行い、良い結果を選んで統計処理した。

1. 3 統計処理

本研究結果は平均値 \pm 標準偏差で表した。着衣条件間の比較のため、一元分散分析を行い、Tukey 法を用いて post hoc テストを行った。さらに、着衣条件の重量とテスト結果の関係はピアソンの相関係数によって検討した。本研究の有意水準は $p < 0.05$ とした。

2. 研究結果

2. 1 運動能力テスト結果

運動能力テストでは、空気呼吸器を装着する TA, TB, TC 条件下の動作性が低下する傾向が見られた。踏み台昇降運動とくぐりと跨ぎ動作では、TA, TB, TC 条件は CON に比べ有意な心拍数と動作遂行時間の増加を示した (表 1)。しかし、空気呼吸器を装着する TA, TB, TC 条件間には有意な差は見られなかった。

2. 2 バランス能力テスト

図 1 は FR, TUG, WPT テストの結果を示す。FR テスト実施によって、空気呼吸器まで装着す

表 1 運動能力テスト結果 (mean ± SD)

	Step up (Δ bpm)	Crawling (sec)	Obstacle stride (sec)	Side jump (sec)	Dragging (sec)
CON	17 ± 5	30 ± 9	17 ± 2	39 ± 9	44 ± 10
ST	25 ± 7	30 ± 7	20 ± 3 ^{b***}	35 ± 7	44 ± 7
TA	31 ± 10 ^{a**}	33 ± 8	25 ± 4 ^{a***}	31 ± 6	42 ± 8
TB	30 ± 9 ^{a**}	31 ± 8	22 ± 2 ^{a***}	33 ± 8	44 ± 4
TC	31 ± 10 ^{a**}	30 ± 5	22 ± 2 ^{a***}	33 ± 7	44 ± 5

a : significant difference between CON and others

b : significant difference between ST and wearing SCBA conditions (TA, TB, and TC)

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

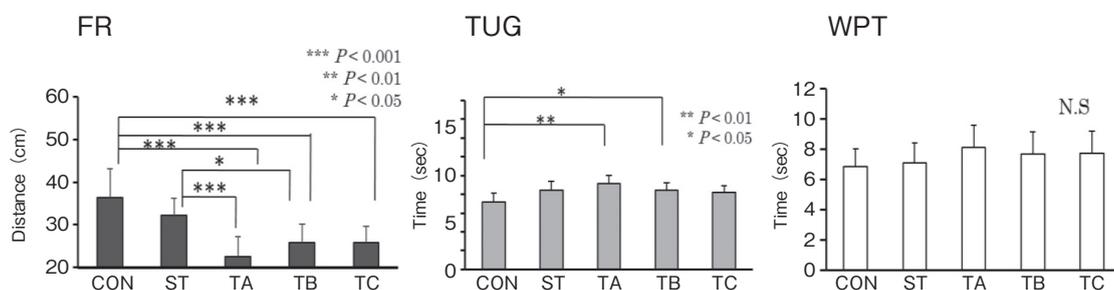


図1 FR, TUP, WPT テストの結果

るフル装備装着は、動作性を有意に低下させることが認められた。空気呼吸器装着条件のTA, TB, TCはCONより有意に低値を示した ($p < 0.001$)。なおかつ、空気呼吸器なしで防護服だけ着用するSTによりもTAとTBは有意に低値を示した (STとTA: $p < 0.001$, STとTB: $p < 0.05$)。なお、TUGテストでは、CON条件と比べ、フル装備を装着したTAとTB条件の動作遂行時間が

有意に増えることが見られた (CONとTA: $p < 0.01$, CONとTB: $p < 0.05$)。しかし、WPTテストでは、TA条件による遂行時間の増加はみられたが、条件間の有意な差は認められなかった。

さらに、バランス能力テストの結果では、各着衣条件の重量との間に有意な相関関係が認められた (図2)。FRテストにおいて、腕を伸ばせる距離は着衣条件の重量が重くなるほど減少した ($r =$

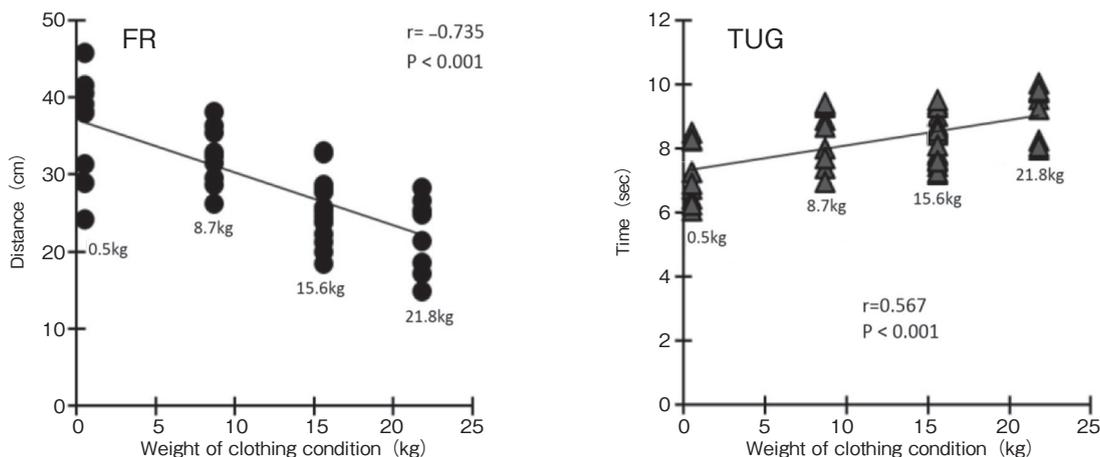


図2 着衣条件の重量とバランス能力テストの相関関係
0.5kg : CON, 8.7kg : ST, 15.6kg : TB and TC, 21.8kg : TA

表2 重心動揺測定結果 (mean ± SD)

	Sway length (cm)		Sway area (cm ²)	
	Eyes close	Eyes open	Eyes close	Eyes open
CON	25 ± 10	20.7 ± 8	2.8 ± 1.9	2.3 ± 2.2
ST	25.3 ± 8.7	19 ± 5.3	3.2 ± 2.9	2 ± 1.5
TA	29.1 ± 9.2	27.7 ± 8.5	4.9 ± 3.7	4.6 ± 3.8
TB	27 ± 7.5	20.3 ± 8.1	3.6 ± 3.5	1.8 ± 1.3
TC	26.8 ± 9.1	20.8 ± 7.3	3.3 ± 1.9	2.5 ± 2.5
	Medial-Lateral (M-L) excursion (cm)		Anterior-Posterior (A-P) excursion (cm)	
	Eyes close	Eyes open	Eyes close	Eyes open
CCON	1 ± 0.4	0.9 ± 0.5	1.9 ± 0.5	1.5 ± 0.4
ST	1 ± 0.6	0.9 ± 0.4	2.3 ± 0.4	1.7 ± 0.8
TA	1.1 ± 0.6	1.2 ± 0.6	3 ± 0.6	2.5 ± 1.1
TB	1.1 ± 0.7	1 ± 0.4	2.4 ± 0.4	1.5 ± 0.6*
TC	1 ± 0.4	1.1 ± 0.8	2.6 ± 0.8	1.7 ± 0.8*

significant difference with TA, p<0.05

-0.735, p<0.001). また, TUG テストでは, 重量が重くなるほど動作遂行時間が有意に増加することが見られた (r = 0.567, p<0.001).

2. 3 重心動揺測定法

重心動揺測定の結果は表2に示している. 最も重い重量である TA 条件では他の条件と比べ重心動揺の動きが激しくなることが見られた. 重心動揺幅は TA 条件で増加することが見られた. TA 条件は TB 条件より開眼時の前後方向で広くなることが明らかになった (p<0.05). また, 本研究結果から見ると, 重心動揺は全体的に左右方向より前後方向の幅が広くなることも明らかになった. 重心動揺軌跡長と重心動揺面積も, TA 条件で増加する傾向が見られたが, 統計的有意な差は見られなかった.

3. 考察

3. 1 防護服フル装備の重量とデザインの違い

本研究では, 他の条件に比べ TA 条件下で得られた運動能力とバランス能力テスト結果が悪くなるが見られた. 運動能力テストでは, 踏み台昇降運動とくぐりと跨ぎ動作において有意な違いが認められたが, 空気呼吸器までのフル装備装着, つまり着衣量の重量が高い場合に限られた結果である. 防護服の動作性と重量・デザインに対する

先行研究の報告でも, 防護服の重量の違いにおいては運動能力テストで有意な差が見られたが, デザインの違いによる有意差は認められなかった¹⁶⁾. 防護服フル装備の重量とデザイン違いに関しては, バランスの能力テストにも類似の傾向が見られた. TUG テストでは, 被験者は重い重量の防護服を装着する場合, 3m の往復時間が長くなり, 特に TA と TB 条件で有意に時間が増加することが認められた. TA, TB 条件下では, CON に比べ動作遂行時間が 29.4% となり, 18.4% 増加した (TA: p<0.01, TB: p<0.05). しかし, フル装備装着条件間の有意な差は見られなかったため, デザイン差による動作性変化を明らかにすることはできなかった.

FR テストでは, 他のテストより有意な条件間のバランス能力差が見られた. 防護服装着条件は CON に比べ, 短い FR テスト結果を示した. TA, TB, TC 条件は CON より 37.1%, 28.2%, 27.5% の有意な動作性低下が見られた. この結果からみると, 重い重量の空気呼吸器まで装着するフル装備装着は, 着用者のバランス能力に影響を与えると考えられる.

本研究では, TA 条件が他の条件より重量が重いものであるため, すべてのテストでバランス能力が低下したことが本研究によって明らかになった. 本研究で得られたバランステスト結果を,

CON 条件を基準として相対値に計算してみると、防護服着用 (ST) によって 10%、空気呼吸器まで装着した TA、TB、TC 条件下では、28%、19%、18% 低下した。また、着衣条件の重量が重くなるほど、バランステスト結果が悪くなることも認められた (図 2)。本研究結果から、着衣条件重量が 1kg 増えることで、バランス能力は 1.3% 減ることが示唆された。

今回の実験では、重心動揺測定において有意な条件間差は認められなかった。しかし、重心動揺幅と軌跡長は、TA 条件下で他の条件より高い値を見せた。これは、重い空気呼吸器がもたらす着用者の動作性低下を意味していると考えられる。先行研究でも本研究と類似の傾向が報告されている。バックパックなどの負荷に関して研究している研究グループは、重い重量の背中負荷により着用者の動きが制限され、さらにバランス能力が低下することを報告した¹⁷⁾。また、ミリタリーバックに関する先行研究によると、18.1 kg のミリタリーバック装着は重心動揺軌跡長、幅、面積において、各々 64%、131%、229% の増加をもたらしている¹⁸⁾。また、重量とデザインが異なる多種の防護服着用によって、着用者の重心動揺が有意に変化することを証明したのも発表されている¹⁹⁾。しかし、本研究では、TB 条件と TC 条件間には有意差が見られなかったため、空気呼吸器の肩ストラップなどのデザインの違いが動作性に及ぼす影響を明らかにすることは出来なかった。かつ、防護服だけ着用した場合 (ST) は CON 条件より良いバランス能力を見せる結果も見られ、防護服より個人呼吸器の装着が着用者のバランスに影響を及ぼすことが示唆された。

3. 2 動作性標準評価テスト方法の有効性

本研究で行われた運動能力テストでは、踏み台昇降運動とくぐりと跨ぎ動作において有意差が見られた。今回使われた 5 つの運動能力テストプロ
デサントスポーツ科学 Vol. 36

トコールと同様な方法を用いて動作性評価を行った先行研究では、被験者群によって、条件間有意差が見られる有効性の差が報告されている¹⁶⁾。一般男性を被験者とした場合、踏み台昇降運動とくぐりと跨ぎ動作において有意差がみられ、本研究と同様の傾向を見せた。しかし、毎日訓練している消防隊員を対象とした場合、すべての運動項目から有意な条件間差が認められた。したがって、今後標準テスト方法として本研究のテスト方法を使う際には、体力水準が高い被験者を対象とすれば、テスト方法の有効性が高まり、より正確なテスト結果を得る可能性が示唆される。

バランス能力テストは、作業者や高齢者や傷害者などを対象とするバランステストで使われている方法である^{20,21)}。特に、FR テストは片腕方法と両腕方法があるが、両方法とも頻繁に使われている。本研究では、高齢者と障害者ではなく、防護服使用者を対象と想定し、FR テスト、TUG テスト、WPT テストによって防護服着用時の動作性を評価した。本研究では、TUG テストと FR テストにおいては条件間の有意差が見られたが、WPT テストにおいては条件間の有意差は見られなかった。FR テストの解析方法では、片腕を前方方向に伸ばす距離を測る方法と足元から腕までの距離変化を測定する方法がある。しかし、前者の方が重心動揺測定による動揺幅と有意な相関関係があるので、本研究では足元から腕までの距離変化に関しては解析しなかった²²⁾。

今回の研究では、重心動揺測定において有意な差は見られなかった。しかし、運動能力テストとバランス能力テストにおいては着衣条件の重量による有意な差が認められ、本研究で使われた運動能力テストとバランス能力テスト方法の高い有効性が示唆された。消防隊員のバランス能力に関する先行研究によると、閉眼時の重心動揺は年齢と正の相関関係である⁷⁾。本研究の重心動揺測定では、20 代の成人男性を被験者としたもので、有

意な差も認められなかった。しかし、防護服を着用し作業を行う労働者にとって、閉眼・開眼時にバランスを維持することは大いに求められることである。したがって、重心動揺測定は、標準テスト方法としては低値の有効性を現すが、防護服着用者のバランストレーニングの一つになるものと考えられる。

4. まとめ

重量が重い個人呼吸器によって、消防用防護服の動作性が低下することが本研究で明らかになり、またその動作性低下が評価できるテスト方法の提案ができた。被験者は平均的に、防護服と重い個人呼吸器をフル装着する場合 (TA) に、運動能力とバランス能力が減ることが見られた。特に、バランス能力テストである FR と TUG テストには各条件間の統計的有意差が見られた。

しかし、フル装備装着条件である TA, TB, TC 条件間においては統計的有意差がみられなかったため、空気呼吸器のストラップ形状とデザインの違いによる動作性変化は認められなかった。重心動揺テストでも重量が増える個人呼吸器によってバランス能力が低下する傾向があった。しかし、防護服だけ着用した場合 (ST) は CON 条件より良いバランス能力を見せる結果も見られ、防護服より個人呼吸器の装着が着用者のバランスに影響を及ぼすと考えられる。

本研究では3つのテスト方法を用いた結果、個人呼吸器の重量差によるバランス能力の変化を解析することが出来た。特に、運動能力とバランス能力テストでは重心動揺テストに比べて有意な条件間の差が見られたため、上記の2つのテスト方法はより簡便で有用な動作性標準テスト方法になると考えられる。

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。また被験者として参加いただいた方に深く感謝申し上げます。研究全体に関して貴重なコメントをくださった九州大学名誉教授栃原祐先生に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 次世代防火服の開発に関する研究報告書(1), 平成 16年度「消防防災科学技術研究推進制度」, 財団法人日本防災協会., 12-21(2005)
- 2) Son S.Y., Lee J.Y., Tochiara Y., Occupational stress and strain in relation to personal protective equipment of Japanese firefighters assessed by questionnaire., *Ind. Health.*, 21 (2) :214-222(2013)
- 3) Son S.Y., Xia Y., Tochiara Y., Evaluation of the effects of various clothing conditions on firefighter mobility and the validity of those measurements made., *J. Human Environ Syst.*, 13: 1524(2010)
- 4) Heinemann E., F., Shy C.M., Checkoway H., Injuries on the fire ground: risk factors for traumatic injuries among professional fire fighters., *Am. Ind. Med.*, 15(3) : 267-282(1989)
- 5) Karter M. J., Patterns of Firefighter Fireground Injuries. Quincy, MA: National Fire Protection Association.,(2009) .
- 6) Karter M.J., Molis J.L., U.S Firefighter injuries for 2010. National Fire Protection Association.,(2011)
- 7) Punakallio A., Lusa S., Luukkonen R., Functional, postural and perceived balance for predicting the work ability of firefighters., *Int. Arch. Occup. Environ Health.*, 77(7) : 482-490(2004)
- 8) Statistics Finland. Statistics for the work- related accidents among professional firefighters in Finland due to slips or falls at the same level. (1996-2001)
- 9) Williford H.N., Duey W. J., Olsen M. S., Howard R., Wang N., Relationship between fire fighting suppression tasks and physical fitness., *Ergonomics*, 42(9) : 1179-1186(1999)
- 10) Smith D.L; Petruzzello S. J. Manning, T.S. Cardiac responses to firefighting activities., *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 27(5) : 550(1995)
- 11) Smith D. L., Petruzzello S. J., Kramer J. M., Misner J. E., The effects of different thermal environments on the physiological and psychological response of firefighters to a training drill., *Ergonomics*, 40(4) : 500-510(1997)

- 12) Smith D.L., Petruzzello S.J., Selected physiological and psychological response to live-fire drills in different configurations of firefighting gear., *Ergonomics*, **41** (8) : 1141-1154 (1998)
- 13) Havenith G., Heus R. A test battery related to ergonomics of protective clothing., *Appl. Ergon.*, **35** (1) : 3-20 (2004)
- 14) ISO 11613, Protective clothing for firefighters - Laboratory test methods and performance requirements. International Organization for Standardization. (1999)
- 15) prEN 469, Protective clothing for firefighters - Performance requirements for protective clothing for firefighting, European Standards: Brussels. (2006)
- 16) Son SY., Bakri I., Muraki S., Tochiyama Y., Comparison of firefighters and non-firefighters and the test methods used regarding the effects of personal protective equipment on individual mobility., *Appl. Ergon.*, **45** (4) : 1019-1027 (2014)
- 17) Birrell S.A., Haslam R.A., The effect of load distribution within military load carriage systems on the kinetics of human gait., *Appl. Ergon.*, **41** (4) : 585-590 (2010)
- 18) Heller M.F., Challis J.H., Sharkey N.A., Changes in postural sway as a consequence of wearing a military backpack., *Gait Posture* **30**(1) : 115-117 (2009)
- 19) Kincl L.D., Bhattacharya A., Succop P.A., Clark C.S., Postural sway measurements: A potential safety monitoring technique for workers wearing personal protective equipment., *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, **17** (4) : 256-266 (2002)
- 20) Duncan P. W., Weinet D. K., Chandler J., Studenski S., Functional Reach: A New Clinical Measure of Balance., *J. Gerontol.*, **45** (6) : 192-197 (1990)
- 21) Punakallio A., Balance abilities of different-aged workers in physically demanding jobs., *J. Occup. Rehabi.*, **13** (1) : 33-43 (2003)
- 22) Kage H., Okuda M., Nakamura I., Kunitsugu I., Sugiyama S., Hobara T., Measuring Methods for functional reach test: comparison of 1-arm reach and 2-arm reach., *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, **90** (12) : 2103-2107 (2009)

運動疲労の脳磁図研究

大阪市立大学大学院 田中雅彰

A Magnetoencephalography Study on Physical Fatigue

by

Masaaki Tanaka

Department of Physiology,

Osaka City University Graduate School of Medicine

ABSTRACT

Enhanced central inhibition system caused by peripheral fatigue input and facilitation system caused by motivational input play an important role to determine the performance during physical fatigue. We tried to clarify the neural mechanism of central inhibition and facilitation systems during physical fatigue using magnetoencephalography (MEG) and a classical conditioning technique. As an experiment 1, participants underwent MEG recording during the imagery of maximum grips of the right hand guided by metronome sounds for 10 min. Thereafter, fatigue-inducing maximum handgrip trials were performed for 10 min; the metronome sounds were started 5 min after the beginning of the handgrip trials. We used metronome sounds as conditioned stimuli and maximum handgrip trials as unconditioned stimuli to cause central inhibition. The next day, MEG recording during the imagery of maximum grips of the right hand guided by metronome sounds were measured for 10 min. Levels of the fatigue sensation in the right hand and sympathetic nerve activity on the second day were significantly higher than those on the first day. In the right dorsolateral prefrontal cortex (Brodmann's area 46), the alpha-band event-related desynchronization (ERD) of the second MEG session relative to the first session

with the time window of 200 to 300 ms after the onset of handgrip cue sounds was identified. The ERD level in this brain region was positively associated with the change in subjective level of right hand fatigue after the conditioning session and was negatively associated with that of sympathetic nerve activity. As an experiment 2, participants underwent MEG recording during the imagery of maximum grips of the right hand guided by metronome sounds for 10 min. Thereafter, fatigue-inducing maximum handgrip trials were performed for 10 min; the metronome sounds were started 5 min after the beginning of the handgrip trials. The metronome sounds were used as conditioned stimuli and maximum handgrip trials as unconditioned stimuli. The next day, they were randomly assigned to two groups in a single-blinded, two-crossover fashion to undergo two types of MEG recordings, that is, for the control and motivation sessions, during the imagery of maximum grips of the right hand guided by metronome sounds for 10 min. The alpha-band ERDs of the motivation session relative to the control session within the time windows of 500 to 700 and 800 to 900 ms after the onset of handgrip cue sounds were identified in the sensorimotor areas. In addition, the alpha-band ERD within the time window of 400 to 500 ms was identified in the right dorsolateral prefrontal cortex (Brodmann's area 46). The ERD level in the right dorsolateral prefrontal cortex was positively associated with that in the sensorimotor areas within the time window of 500 to 700 ms. We demonstrated that the right dorsolateral prefrontal cortex is involved in the neural substrates of both the central inhibition and the facilitation systems during physical fatigue.

要 旨

抑制システムと促進システムは、身体的な疲労時のパフォーマンスを決定するために重要な役割を演じる。我々は、脳磁図と古典的条件付けを用いて抑制システムと促進システムの神経メカニズムを明らかにしようと試みた。実験1として、メトロノーム音に従って右手（利き手）の最大の握りのイメージを10分間実施した（メトロノーム音は、5分後に開始した）。抑制を引き起こす無条件刺激として右手の最大の握りを施行する身体的疲労負荷課題を実施した。翌日、メトロノーム音に従って右手の最大の握りのイメージを10分間実施した。その結果、右の背外側前頭前野（ブ

ロードマン46野）において、200～300ms後に事象関連脱同期が認められた。この事象関連脱同期レベルは、右手疲労の主観的なレベルと正の相関を認めた。実験2として、メトロノーム音に従って右手の最大の握りのイメージを10分間実施した（メトロノーム音は、5分後に開始した）。抑制を引き起こす無条件刺激として右手の最大の握りを施行する身体的疲労を実施した。翌日、メトロノーム音に従って右手の最大の握りのイメージを10分間、意欲ありとなしの課題を実施した。意欲なしセッションと比較して意欲ありセッションでは、右の背外側前頭前野（ブロードマン46野）において、400～500ms後に事象関連脱同期が認められた。本研究により、右の背外側前頭前野

が、身体的疲労時、抑制システムと促進システムの両方に関係することが明らかになった。

緒 言

疲労は労作による作業効率の低下と定義できる。日本人の実に4割が6ヶ月以上続く慢性疲労を自覚し、そのうち半数近い人々が、疲労が原因で従前に比し作業効率が低下したと訴えている。慢性疲労によるわが国の純粋経済損失は、国内GDPをベースとして年間1兆2千億円と計算される。一方で、疲労はこれまでは「休めば治る」と考えられていたが、生活習慣病、癌、循環器疾患、感染症、アトピー等のアレルギー疾患等、様々な病気の前兆（未病）であり、今後、医療の中核をなす予知医療において最も重要なテーマでもある。したがって、疲労のメカニズムを解明し、評価・予防・対処法を確立することの学術的・医学的・経済的・社会的意義は非常に大きいと考えられる。

慢性疲労に関しては、その神経基盤の解明が進みつつある¹⁾。一方、運動（身体的）疲労の神経メカニズムに関しては、明らかになっていることは多くない。実際、1990年代前半までは、運動疲労時のパフォーマンスの低下は、筋肉あるいは全身といった末梢組織での恒常性の破綻によって引き起こされると考えられていた。ようやく1990年代後半になって、中枢神経系が生体の恒常性を保つように運動を制御しており、運動疲労時のパフォーマンス低下は主に中枢由来の運動単位の調節（出力低下）から引き起こされると考えられるに至った²⁾。しかしながら、運動時の中枢制御機構の神経基盤についてはほとんど解明されておらず、その局在についても痛みからの類推などにより、脊髄がその候補として考えられているにとどまっており、脳の関与はないことが定説であった³⁾。

運動疲労時の制御機構を行動学的に解明するこ

とを目的に、ラマチャンドランのミラーボックスを用いた運動疲労研究を実施し、ミラーボックスを用いて疲労の認知をマスクする（疲労している手を疲労していないと錯覚させる）ことで、運動疲労による握力低下が減弱することが示された⁴⁾。さらに、運動疲労時の中枢神経系における制御機構を解明することを目的に、脳磁図を用いた運動疲労研究を実施したところ、行動学的検討の結果と一致して、ミラーボックスを用いて疲労の認知をマスクすることで、運動疲労による大脳皮質運動野における運動誘発磁場応答低下が減弱することが示された⁵⁾。これらの結果は、運動疲労時、脳において、抑制システムが存在することを科学的に証明するものであり、従来の定説を決定的に覆す画期的な知見であるとともに、運動疲労の神経基盤解明のための大きな手掛かりであると考えられた。

脳神経回路は、その恒常性および機能維持のため、通常、動作は最適変動の範囲内で制御されている。その動作が過度になると疲労状態に陥るため、活動を低下させ休息へと導く抑制性の制御機構である抑制システムが働く。一方では、その動作低下が過度になると機能低下を招くことになるため、抑制システムに対抗し活動を増加させる亢進性の制御機構である促進システムが働く。通常では、抑制システムと促進システムのバランスが保たれ、最適変動の範囲内で脳神経回路の動作が制御される。このような動作制御の下では、運動・情報処理においても最適な状態に保たれる。

運動疲労負荷をかけた時の脳活動を、脳磁図を用いて統合的に探索することにより、抑制システム、促進システム、および疲労感（後帯状回）などの、運動疲労と関係のある神経基盤が同定された⁶⁾。一方では、運動疲労の古典的条件付けが可能であることも脳磁図を用いて明らかされ、急性運動疲労から慢性疲労に至る神経機構の解明にも迫りつつある⁷⁾。

動的で相互依存的な側面を持つ運動疲労の中樞神経系制御機構に対して、時空間的關係性を有する形での統合的理解までには至っていない。したがって、本研究では、運動疲労の神経基盤を統合的に解明し、運動疲労の本態に迫る。具体的には、脳磁図と古典的条件付けを用いて、抑制システムと促進システムの神経メカニズムを明らかにしようと試みた。

1. 研究方法

本研究は、大阪市立大学医学部倫理委員会の承認を既に得ており、本研究の遂行に当たってはプライバシーに充分配慮し、実施時、医師が付き添った。

1. 1 実験 1

健康成人 12 名を対象として、メトロノーム音に従って右手（利き手）の最大の握りのイメージを 10 分間実施した（メトロノーム音は、5 分後に開始した）。実験参加者には、予告音を手掛かりに音声キューに合わせ、4 秒ごと音声キューの間（1 秒間）、右手でボールの最大把握をイメージするよう指示した。この時の脳活動を、脳磁図装置（160 チャンネル全頭型脳磁図システム（横河電機株式会社））を用いて評価した。脳磁図を用いた脳活動は、アルファ周波数帯域（8-13 Hz）の事象関連脱同期で評価した。なお、脳部位の同定は、試験後に行った MRI 検査によって実施した。抑制を引き起こす無条件刺激として、脳磁図用ベッド上に寝てもらい、右手の反復的な最大把握を音声キューに合わせ 1 秒ごとに行わせる、身体的疲労負荷課題を実施させた。翌日、メトロノーム音に従って右手の最大の握りのイメージを 10 分間実施した（メトロノーム音は、5 分後に開始した）。実験参加者には、予告音を手掛かりに音声キューに合わせ、4 秒ごと音声キューの間（1 秒間）、右手でボールの最大把握をイメージするよ

う指示した。この時の脳活動を、脳磁図装置を用いて評価した。課題前後には、主観的疲労感を、visual analogue scale (VAS) で評価した。また、課題遂行中、心電図計測を行った。心電図データは、周波数解析によって、low frequency power (LF; 0.04-0.15 Hz)、および high frequency power (HF; 0.15-0.4 Hz) を算出した。

1. 2 実験 2

健康成人 12 名を対象として、メトロノーム音に従って右手の最大の握りのイメージを 10 分間実施した（メトロノーム音は、5 分後に開始した）。実験参加者には、予告音を手掛かりに音声キューに合わせ、4 秒ごと音声キューの間（1 秒間）、右手でボールの最大把握をイメージするよう指示した。抑制を引き起こす無条件刺激として、脳磁図用ベッド上に寝てもらい、右手の反復的な最大把握を音声キューに合わせ 1 秒ごとに行わせる、身体的疲労負荷課題を実施させた。翌日、メトロノーム音に従って右手の最大の握りのイメージを 10 分間、意欲あり（金銭的報酬あり）となし（金銭的報酬なし）の実験を実施した。実験参加者には、予告音を手掛かりに音声キューに合わせ、4 秒ごと音声キューの間（1 秒間）、右手でボールの最大把握をイメージするよう指示した。この時の脳活動を、脳磁図装置を用いて評価した。脳磁図を用いた脳活動は、アルファ周波数帯域の事象関連脱同期で評価した。課題前後には、主観的疲労感および意欲を、VAS を用いて評価した。

統計は、2 条件間の比較においては対応のある t 検定、2 条件間の相関においてはピアソンの相関解析を、それぞれ、実施した。全ての P 値は両側であり、P 値が 0.05 未満のものを統計学的に有意であるものとし、0.1 未満のものを統計学的に傾向あるものとした。

2. 研究結果

ボールを握るイメージをした時のアルファ帯域の事象関連脱同期の程度を、定量化同期脱同期解析 (BEATS (横河電機)) を用いて検討した。

2. 1 実験 1

1 日目において、身体的疲労負荷後、疲労感 VAS の値は増加した。また、2 日目の評価課題実施後の疲労感 VAS の値は、1 日目の評価課題実施後の疲労感 VAS の値より高値を示した。また、2 日目の LF/HF の値は、1 日目の LF/HF の値より高値を示した。

1 日目と 2 日目を比較したアルファ周波数帯域の事象関連脱同期解析において、右の背外側前頭前野 (ブロードマン 46 野) で、200 ~ 300 ms 後に事象関連脱同期が認められた (図 1)。この事象関連脱同期レベルは、右手疲労感 VAS の値と正の相関、交感神経活動と負の相関を認めた。

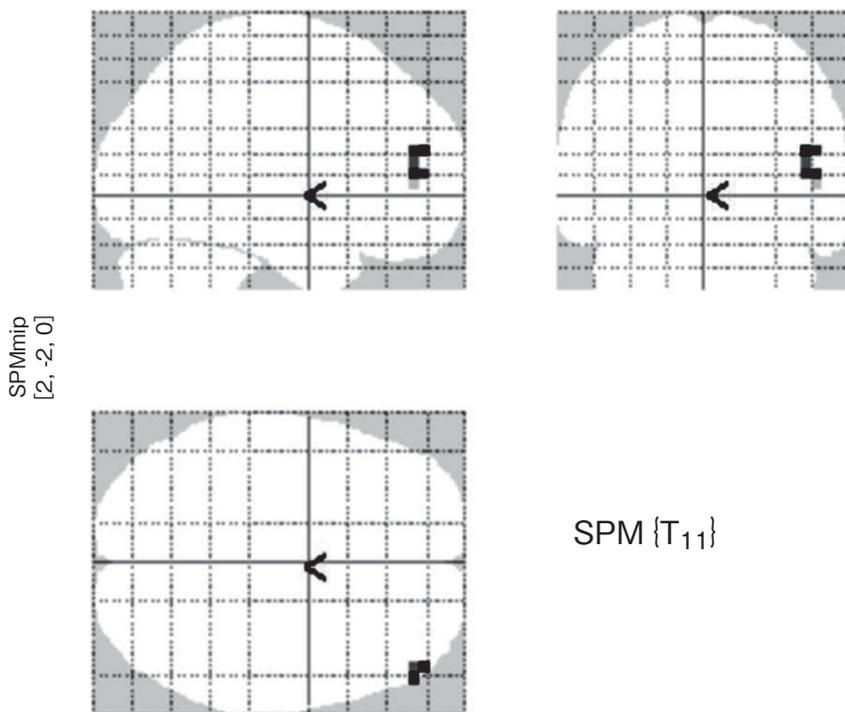


図 1 抑制システムの神経基盤

2. 2 実験 2

2 日目の評価課題実施後の疲労感 VAS の値は、1 日目の評価課題実施後の疲労感 VAS の値より高値を示した。また、2 日目の意欲 VAS において、意欲あり課題の方が意欲なし課題よりも、意欲 VAS の値は高値を示した。

意欲あり課題と意欲なし課題を比較したアルファ周波数帯域の事象関連脱同期解析において、右の背外側前頭前野 (ブロードマン 46 野) において 400 ~ 500 ms に事象関連脱同期が (図 2)、右の中心後回 (ブロードマン 3 野) において 500 ~ 600 ms に事象関連脱同期が、左の中心後回 (ブロードマン 7 野) において 500 ~ 600 ms に事象関連脱同期が、右の中心後回 (ブロードマン 3 野) において 600 ~ 700 ms に事象関連脱同期が、左の中心前回 (ブロードマン 4 野) において 800 ~ 900 ms に事象関連脱同期が認められた。右背外側前頭前野の事象関連脱同期レベルは、中心後回の事象関連脱同期レベルと正の相関を認めた。

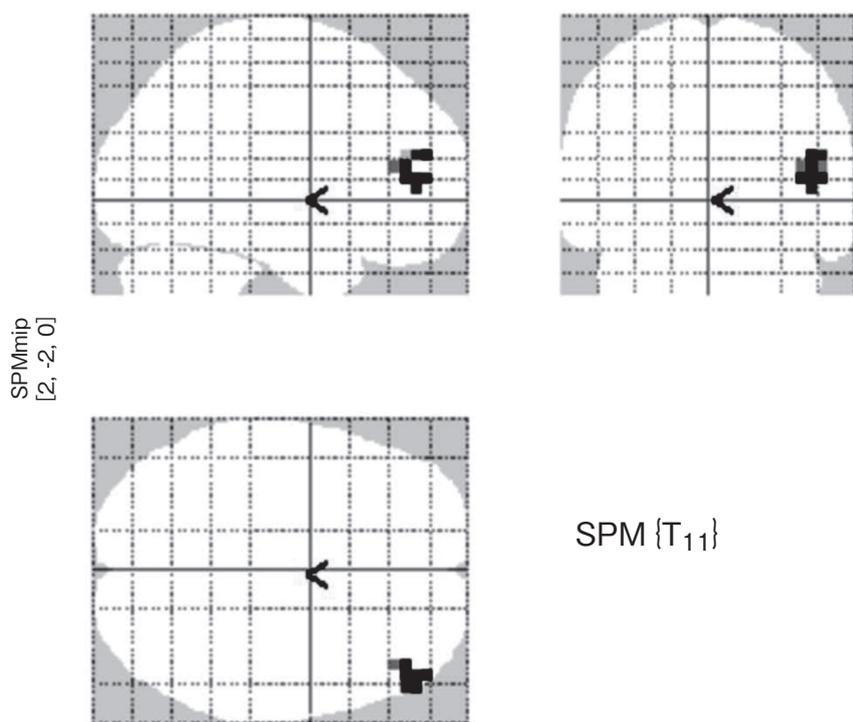


図2 促進システムの神経基盤

3. 考察

実験1および2により、右の背外側前頭前野が、身体的疲労時、抑制システムと促進システムの両方に関係していることが明らかになった。

実験1および2において、2日目の評価課題実施後の疲労感VASの値は、1日目の評価課題実施後の疲労感VASの値より高値を示した。このことは、疲労の古典的条件付けが成功したことを示唆しており、本研究結果の妥当を示している。

疲労時、さらなる疲労を避けるため、休息を促す抑制システムが発動することが知られており、Group III / IVの侵害受容器由来の神経線維を介して、脳内では、後帯状回および島皮質が、抑制系システムに関する脳部位であることが明らかになってきている⁸⁾。加えて、本研究により、前頭前野領域が抑制システムの中心となる脳部位であることが示された。

一方では、本研究により、前頭前野領域が促進

システムの中心となる脳部位の1つであることが示された。前頭前野領域への辺縁系、大脳基底角、および視床などからの意欲の入力によって、前頭前野領域が活動し、運動野からの出力増加、そして、身体的パフォーマンスの維持へと導かれるものと考えられた。

以上より、筋肉などの末梢組織および1次運動野などの脳疲労⁹⁾、後帯状回および島皮質から前頭前野領域とつながる抑制系システム、大脳辺縁系、大脳基底角、および視床から前頭前野領域とつながる促進システム、これらが、運動疲労時におけるパフォーマンスを規定する主要な因子であると考えられる(図3)。

前頭前野が、身体的疲労時、抑制システムと促進システムの両方に関係しているのは、非常に興味深く、状況に応じて、抑制システムと促進システムの活動や出力のバランスを調整しているものと考えられる。

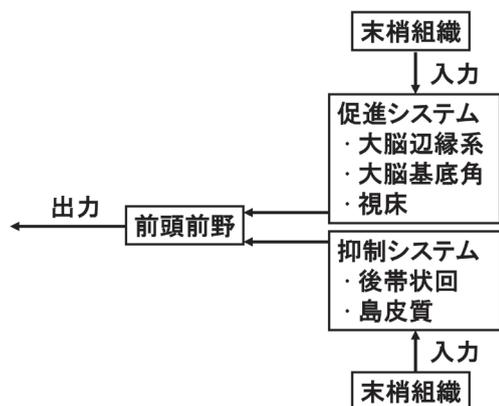


図3 運動疲労におけるパフォーマンスの制御システム

4. まとめ

本研究により、右の背外側前頭前野が、身体的疲労時、抑制システムと促進システムの両方に関係していることが明らかになり、身体的疲労時におけるパフォーマンスの調節機構の神経基盤解明につながる貴重な成果が得られた。この成果は、身体的疲労の神経メカニズムの統合的解明への大きなステップであると考えられる。

謝 辞

本研究の成果は、第36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学術研究の補助によって得られた。深く感謝いたします。

文 献

- 1) Tanaka M., Watanabe Y., A new hypothesis of chronic fatigue syndrome: Co-conditioning theory., *Med. Hypotheses.*, 75: 244-9(2010)
- 2) Noakes T.D., St. Clair Gibson A., Lambert E.V., From catastrophe to complexity: a novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans: summary and conclusions., *Br. J. Sports Med.*, 39: 120-4(2005)
- 3) Garland S.J., Garner S.H., McComas A.J., Reduced voluntary electromyographic activity after fatiguing stimulation of human muscle., *J. Physiol.*, 401: 547-56(1988)
- 4) Tsutsumi K., Tanaka M., Shigihara Y., Watanabe Y., Central regulation of physical fatigue via mirror visual feedback., *Eur. J. Sport Sci.*, 11: 171-5(2011)
- 5) Tanaka M., Shigihara Y., Watanabe Y., Central inhibition regulates motor output during physical fatigue., *Brain. Res.*, 1412: 37-43(2011)
- 6) Tanaka M., Watanabe Y., Supraspinal regulation of physical fatigue., *Neurosci. Biobehav. Rev.*, 36: 727-734(2012)
- 7) Tanaka M., Ishii A., Watanabe Y., Neural correlates of central inhibition during physical fatigue. *PLoS One*, 8: 70949(2013)
- 8) Jouanin J.C., Pérès M., Ducorps A., Renault B., A dynamic network involving M1-S1, SII-insular, medial insular, and cingulate cortices controls muscular activity during an isometric contraction reaction time task., *Hum. Brain Mapp.*, 30: 675-688(2009)
- 9) Nordstrom M.A., Gorman R.B., Laouris Y., Spielmann J.M., Stuart D.G., Does motoneuron adaptation contribute to muscle fatigue? *Muscle Nerve.*, 35: 135-158(2007)

アマチュアボクシングにおいて頭部に作用する 衝撃の安全・非侵襲な直接計測

立命館大学 長野 明紀

Safe and Non-invasive Evaluation of The Impact Load of Punches in Amateur Boxing

by

Akinori Nagano

*Faculty of Sport and Health Science
Ritsumeikan University*

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate the impact of boxing punches in a safe and non-invasive manner. We collected punching data from two experienced right-handed boxers. The motions were (1) jab, (2) one-two, (3) one-two-three and (4) one-two-hook. Thirty seconds of punching motions were collected in each case. The subject threw punches into punching mitts, which were held by an experienced boxer. Motion data were collected using an optical motion capture system. Ground reaction forces were collected in an experimental environment which has 15 force plates arrayed in a rectangle shape. Small and light-weight accelerometers were attached on the outside of the wrist of both arms. Based on the data from the motion capture system and force plates, the impulse of a punch was calculated as 10.00 ~ 19.87 kg·m/s and 7.28 N·s ~ 9.85 N·s. The measured values from the accelerometers were found to exceed $\pm 16G$. The results of this research suggest that the impacts can be reasonably assessed in activities that include strong collisions such as boxing. These findings will be sound foundations to further develop this line of research.

要 旨

本研究では、アマチュアボクシングの打撃動作の衝撃を安全・非侵襲に計測する事を目的とした。2名のボクシング経験を持つ右利きの被験者からパンチ動作中のデータを取得した。動作は(1)左ジャブ、(2)ワン・ツー、(3)ワン・ツー・スリー、(4)ワン・ツー・フックの4試技であった。それぞれの試技について30秒を計測時間とし、その間に適度な間隔で練習用ミットに対して打撃を行った。光学式モーションキャプチャーシステムを用いて250Hzで座標データを取得した。またフォースプレートが15枚長形状に敷き詰められた計測環境で、左・右脚に作用する床反力を独立に計測した。更に小型・軽量・ウェアラブルな加速度センサで加速度データを取得した。加速度センサは被験者のグローブ両手首部背側に装着した。光学式モーションキャプチャーシステムおよびフォースプレートから得られたデータに基づき、前者ではパンチ一発あたりの衝撃が10.00～19.87 kg·m/s、後者では7.28 N·s～9.85 N·s程度であるとの結果が得られた。加速度センサを用いた計測によりその衝撃は瞬間的に±16Gを上回る事も明らかとなった。本成果はボクシング等の強い衝突を含む動作においても衝撃を信頼性高く定量評価できる可能性を示すものであり、今後の研究を進展させて行く礎となる知見が得られたものと考えられる。

緒 言

アマチュアボクシングはオリンピック競技の一つであり、2012年のロンドンオリンピックにおいて日本人選手が44年ぶりにメダルを獲得したことは記憶に新しい。近年アマチュアボクシング競技における日本人選手の活躍は目覚ましく、2016年にリオデジャネイロ、2020年に東京で開催されるオリンピックにおいてもメダル獲得が期

待されている。また競技としての裾野も広く、高校の部活動等において優れた指導を受けた選手が後に大成する傾向が明らかに見て取れる。

アマチュアボクシング競技を安全に実施し、科学的・効率的トレーニングを推進するためには、ボクシング動作を正確に計測し、そのメカニズムを理解することが必要である。しかしボクシングにおいては、拳により顔面・頭部及び腹部に打撃を加えることを主要な目的としており、その動作を安全・非侵襲に計測し、メカニズムを解析することはこれまで困難であった。特に打撃が加えられた際に作用する衝撃については、これまで十分な知見が蓄積されているとは言い難い。そのため打撃が身体に及ぼす影響は定量的・科学的に理解されて来ておらず、選手や指導者の自己管理によって安全性が確保されている状態である。

ボクシングの動作を解析した先行研究は非常に限られている。Waliko et al.¹⁾はダミー人形型測定装置を用いた計測を行った。この研究では衝突実験用のダミー人形型測定装置を設置し、それに対するパンチ動作を行わせている。ボクシングにおいては静止した対象にパンチを打つ事は稀であり、この実験設定は実際の動作を適切に反映しているとは考え難い。Pedzich et al.²⁾はボクシングを含む様々な格闘技の動作中の関節発揮トルクを動作解析により計測している。これにより動作解析の手法の信頼性は確認されているが、この研究では動作に伴う衝撃の計測は為されていない。Crisco³⁾はアメリカンフットボールの際に作用する衝撃を加速度センサを用いて計算する方法を定式化した。しかしこれは1軸の加速度センサを複数用いる有線のシステムであり、着用者に対する拘束が大きいという問題がある。

本研究ではこれらの問題を解決するために、アマチュアボクシングの打撃動作の衝撃を安全・非侵襲に直接計測する事を目的とした。計測には光学式モーションキャプチャーシステム、フォース

プレート，及び小型・軽量の慣性センサを用いた。将来的にはアマチュアボクシングの練習や試合の際に発生する衝撃をリアルタイムに評価して，練習及び競技を安全に遂行する指針とすることを目指し研究を推進した。

1. 方法

1. 1 実験プロトコル

本研究は立命館大学びわこ・くさつキャンパスにおける人を対象とする研究倫理審査委員会のガイドラインに従い，承認を得て実施した。ボクシングの打撃動作に伴い発生する衝撃を計測・評価した。2名のボクシング経験を持つ被験者からパンチ動作中のデータを取得した。被験者はいずれも右利きであった。動作は(1)左ジャブ，(2)ワン・ツー（左ジャブの後速やかに右ストレートを打つ），(3)ワン・ツー・スリー（ワン・ツーの後速やかに左ストレートを打つ），(4)ワン・ツー・フック（ワン・ツーの後速やかに左フックを打つ）の4試技であった。それぞれの試技について30秒の時間を計測時間とし，その間に適度な間隔で練習用ミットに対して打撃を行った。練習用ミットは熟練者が装着しパンチを受けた。グローブはWinning社製の10オンスの練習用グローブ，ミットはWinning社製の練習用ミットであった。光学式モーションキャプチャーシステム，フォースプレート，および小型・軽量・ウェアラブルな加速度センサを用いてデータを取得した(図1)。試技のうち，安定的なパンチ動作が見られた3回の打撃動作を分析に用いた。

1. 2 光学式モーションキャプチャーシステム

MotionAnalysis社 MAC3Dシステムを用いて250Hzでデータを取得した。カメラは16台を用いた。被験者（パンチを打つ側）については頸椎部(C7)，左肩，左肘，左拳(3箇所)，右肩，右肘，右拳(4箇所)に反射マーカを貼付した。験者(パ



図1 計測用反射マーカと加速度センサの装着方法
計測用反射マーカは左拳に3個，右拳に4個両面テープを用いて装着した。加速度センサは両面テープを用いて手首外側に装着の後，ビニールテープを用いて固定した。(この図はビニールテープで固定する前の状態。)

ンチを受ける側)については頸椎部(C7)，左肩，左肘，左拳(4箇所)，右肩，右肘，右拳(5箇所)に反射マーカを貼付した。全てのマーカの位置を，全く欠損無くキャプチャーすることが出来た。前腕部において，パンチ衝突直前の速度並びに前腕部の質量の推定値(身体分節質量とグローブ・ミットの質量)からパンチの力積の大きさを評価した。

1. 3 フォースプレート

Tec 技販社製 TF-4060-Bを用いて500Hzでデータを取得した。フォースプレートが15枚長方形状に敷き詰められた実験室で，被験者・験者の左・右脚に作用する床反力を独立に計測した。計測した力の波形を試技毎に比較した。また，特に前後方向(相手方向)の成分に着目し，打撃動作1回当たりに相手方向に生み出される力積を求めた。

1. 4 加速度センサ

ATR-Promotions社製 TSND121を用いて100Hzでデータを取得した。加速度センサは被験者のグローブ両手首部背側，及びミットを持った験者の手首背側部に装着した。両面テープで取り付けした後ビニールテープで強固に固定した。計測レンジはこの市販センサで最大の $\pm 16G$ とした。この

表1 パンチの衝撃の動作解析結果

衝突直前の速度及び運動量はモーションキャプチャーで得られたデータから求めた。衝突時間は加速度センサの信号から求めた。推定平均加速度は衝突直前の運動量を衝突時間で割ることで求めた。

	試行	速度(m/s)	運動量(kg・m/s)	衝突時間(s)	推定平均加速度(G)
被験者A	左ジャブ	7.431	13.75	0.15	5.18
	ワン・ツー 左ジャブ	6.63	12.26	0.13	5.35
	ワン・ツー 右ストレート	8.724	16.14	0.14	6.36
	ワン・ツー・スリー 左ジャブ	6.213	11.49	0.13	4.88
	ワン・ツー・スリー 右ストレート	8.423	15.58	0.13	6.45
	ワン・ツー・スリー 左ストレート	6.860	12.69	0.15	4.56
	ワン・ツー・フック 左ジャブ	5.658	10.47	0.14	4.14
	ワン・ツー・フック 右ストレート	7.564	13.99	0.13	5.82
	ワン・ツー・フック 左フック	8.120	15.02	0.16	5.31
被験者B	左ジャブ	6.095	12.46	0.13	4.69
	ワン・ツー 左ジャブ	5.479	11.20	0.13	4.42
	ワン・ツー 右ストレート	8.091	16.53	0.15	5.42
	ワン・ツー・スリー 左ジャブ	5.094	10.41	0.12	4.46
	ワン・ツー・スリー 右ストレート	7.152	14.62	0.14	5.34
	ワン・ツー・スリー 左ストレート	6.753	13.8	0.14	4.81
	ワン・ツー・フック 左ジャブ	4.893	10.00	0.11	4.56
	ワン・ツー・フック 右ストレート	7.129	14.57	0.13	5.75
	ワン・ツー・フック 左フック	9.725	19.87	0.19	5.17

加速度センサでは3成分の加速度（及び3成分の角速度）を計測することが出来る。分析には加速度データのみを用いた。

2. 結果

2.1 モーションキャプチャーデータ

モーションキャプチャーデータから求めたパンチの力積を表1に示す。パンチ一発当たりの力積は被験者Aにおいては10.47～16.14kg・m/s、被験者Bにおいては10.00～19.87kg・m/sであっ

た。最も力積が大きかったのは被験者Aにおいてはワン・ツーの右ストレート、被験者Bにおいてはワン・ツー・フックの左フックであった。

2.2 床反力データ

床反力データの例を図2に示す。左脚（前脚）に作用する前後方向の成分は正・負の値を交互に示していた。これは身体を相手方向に推進する動作と、身体を手前に戻す動作を交互に繰り返していた事を示している。一方で右脚（後脚）に作用

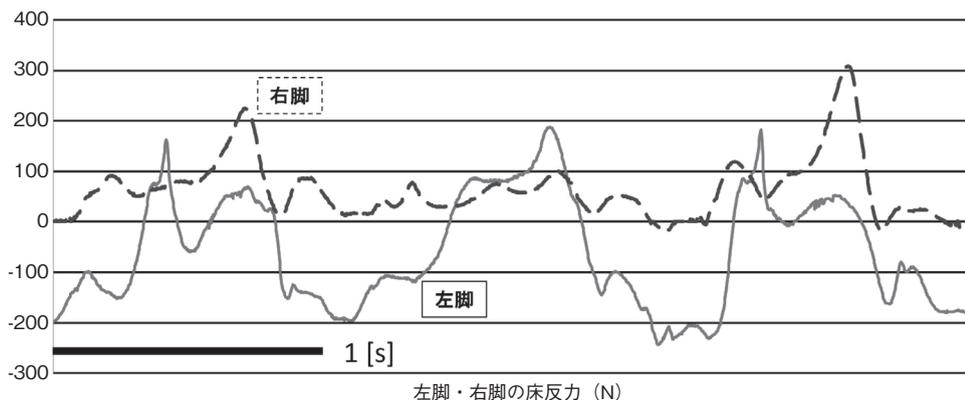


図2 床反力の相手方向（前後方向）の成分

左脚・右脚の値をそれぞれ実線と破線で示す。左ジャブを3発打った際の波形の例。左脚（前脚）に作用する前後方向の成分は正・負の値を交互に示していた。一方で右脚（後脚）に作用する床反力はほぼ正の値を示した。

表2 床反力の相手方向(前後方向)の成分を積分することで求めた力積の値
表1に示した値と同様の結果が得られた。ワン・ツー・フックについてはフック
の動作時にパンチの方向が90度変わるため、この分析からは除外した。

		左ジャブ	ワン・ツー	ワン・ツー・スリー
被験者A	力積合計(N・s)	7.28	18.77	29.56
	パンチ1発あたりの力積(N・s)	7.28	9.39	9.85
被験者B	力積合計(N・s)	8.52	18.58	26.72
	パンチ1発あたりの力積(N・s)	8.52	9.29	8.91

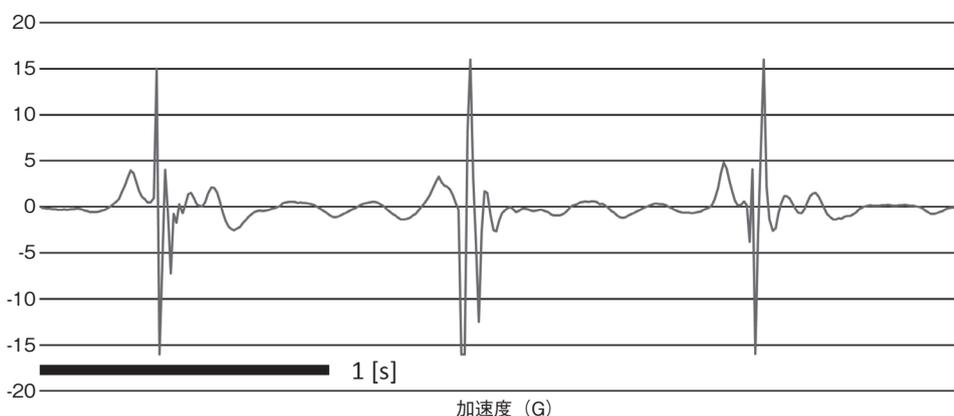


図3 手首に装着した加速度センサの計測値
左ジャブを3発打った際の、前腕の長軸方向の成分を示す。衝突の際に大きなピーク値が発生し、
加速度センサの計測レンジ(±16G)を超えていることが解る。

する床反力はほぼ正の値を示した。これは右脚が
主として身体を相手方向に推進する作用を生み出
していたことを示している。打撃動作1回あた
りに相手方向に生み出された力積を表2に示す。
この力積は、完全に一対一対応はしないものの
モーションキャプチャーで求めたパンチの運動量
と同じ範囲内の値であった。ワン・ツー・フック
ではフックに於いて90度パンチの方向が変わる
ため、床反力波形の規則性が低かったのでこの分
析は行わなかった。

2. 3 加速度データ

加速度センサのデータを図3に示す。インパ
クトの直前までの打撃動作についてはノイズの少
ない計測が出来ていた。インパクトの瞬間の加速
度はこのセンサで測れるレンジ(±16G)を超え
ており、より計測レンジの広いセンサを用いる必
ず

要が示唆された。加速度センサの値に非常に大き
なノイズが乗っている時間を衝突時間とみなし、
これを求めた。また衝突以前のパンチの速度をこ
の衝突時間で割り、衝撃に伴う平均加速度の推定
値を求めた値を表1に示す。

3. 考 察

本研究ではボクシングのパンチ動作に伴い発生
する衝撃を定量評価することを目的とした。手法
としては光学式モーションキャプチャーシステム、
フォースプレート、小型・軽量・ウェアラブルな
加速度センサを用いた。

光学式モーションキャプチャーシステムを用い
た計測・解析の結果、衝突直前に拳および前腕部
が持っている運動量が計算できた(表1)。その
値は10.00~19.87 kg・m/sであった。効果的に打
撃が当たった場合、この力積の大部分が相手に伝

わると考えられる。パンチの打ち方や選手の階級にも依存するが、ボクシングの打撃に伴う衝撃はこのレンジの近辺に分布する事が示された。

床反力のデータを解析した結果も同様の値を示した。床反力の作用として発生する相手方向の力の力積はパンチ一発当たり $7.28 \text{ N}\cdot\text{s} \sim 9.85 \text{ N}\cdot\text{s}$ に分布しており (表 2), これは前述した拳と前腕部が持つ運動量と同様の値となっている。これらの結果は、光学式モーションキャプチャーシステムを用いてもフォースプレートを用いても、打撃の際に発生する衝撃を妥当に評価出来る事を示すものである。

加速度センサを用いた計測の結果、多くの場合で計測値がこのセンサの計測限界 ($\pm 16\text{G}$) を超えてしまっており、計測不能となっていた (図 3)。パンチの当たる瞬間は拳にこれ以上の加速度が生じている事を示す結果であるので、今後は計測手法を改善する必要がある。一つの方法として考えられるのは、サンドバッグ等質量の大きな対象に打撃を加え、なおかつこの対象物に加速度センサを装着しておく方法である。この場合は対象物の質量が大きいので加速度は今回の結果よりも小さくなり、加速度センサの計測レンジ内に収まると考えられる。対象物の質量としては実際のボクシング実施時の相手の頭部や胴体の実効質量に近い値が望ましい。実効質量を正確に定めるためには実際の試合やスパーリングの場面におけるデータ収集と分析が必要である。本研究の次のステップとしてはこの方向を検討していく予定である。もう一つの方法としては、より計測限界値の大きな加速度センサを開発・使用することが考えられる。これはボクシングに限らず衝撃力の発生する多くのスポーツ動作に於いて活用できると考えられ、大きな波及効果を持つものであり、今後この方向に研究を進展させることも検討したい。

4. 結 論

本研究では光学式モーションキャプチャーシステム、フォースプレート及び加速度センサを用いてボクシングのパンチに於いて発生する衝撃を評価した。光学式モーションキャプチャーシステムおよびフォースプレートから得られたデータに基づき、前者では衝撃が $10.00 \sim 19.87 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$, 後者では $7.28 \text{ N}\cdot\text{s} \sim 9.85 \text{ N}\cdot\text{s}$ 程度であるとの結果が得られた。加速度センサを用いた計測によりその衝撃は瞬間的に $\pm 16\text{G}$ を上回る事も明らかとなった。今後研究を大きく発展させていくための方向性も明確となった。

謝 辞

本研究を助成して下さっ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感謝の意を表したい。本研究は立命館大学スポーツ健康科学部で実施した。研究に大きな貢献をして下さった立命館大学スポーツ健康科学部の樋口貴俊氏、工藤将馬氏、赤熊亮祐氏に感謝する。

文 献

- 1) Walilko, T.J., Viano, D.C., Bir, C.A., Biomechanics of the head for Olympic boxer punches to the face., *British Journal of Sports Medicine.*, **39**, 710-719 (2013)
- 2) Penzich, W., Mastalerz, A., Sadowski, J., Estimation of muscle torque in various combat sports., *Acta of Bioengineering Biomechanics.*, **14**, 107-112(2012)
- 3) Crisco, J.J., Chu, J.J., Greenwald, R.M., An algorithm for estimating acceleration magnitude and impact location using multiple nonorthogonal single-axis accelerometers., *Journal of Biomechanical Engineering.*, **126**, 849-854(2004)

走運動時におけるハムストリングスの
活動特性の部位差
—肉離れ発症メカニズム解明への新たなアプローチ—

中 京 大 学 渡 邊 航 平

**Regional Neuromuscular Activation
within Human Hamstrings Muscle during Sprint Running
-Novel Approach for Understanding Hamstrings Injury-**

by

Kohei Watanabe
*School of International Liberal Studies,
Chukyo University*

ABSTRACT

For understanding hamstrings injury, activation properties and/or functional roles of hamstrings muscle group have been investigated during sports activities. In the present study, possible regional neuromuscular activation pattern within a hamstrings muscle were tested during isometric contractions and sprint running. Surface electromyography (SEMG) was detected along the longitudinal line of the biceps femoris muscle with 20 electrodes. Ten and eight male subjects performed two different joint torques, that the biceps femoris muscle contributes, of maximal voluntary isometric contraction and sprint running, respectively. Ratio of SEMG amplitude between two joint torques were uniform among the regions. SEMG pattern during sprint running were homogeneous within the biceps femoris muscle. These results suggest that the all regions of the biceps femoris muscle uniformly contribute to joint moments and are homogeneously regulated during sprint running.

要 旨

肉離れ発症メカニズムの解明を目的に運動時におけるハムストリングス筋群の活動特性が評価されてきた。本研究では1つの筋内における活動特性の部位差に着目し、当該筋群を構成する筋の1つである大腿二頭筋を対象として、機能的役割および運動時の活動パターンの部位差を検証した。大腿二頭筋の長軸方向に20個の表面筋電図電極を貼付し、筋全体の神経筋活動を記録した。まず、男子大学生10名を対象として、大腿二頭筋が貢献する2つの関節運動を最大随意収縮で別々に行われた際の表面筋電図振幅値の比率を算出し、部位間で比較した。その結果、部位の違いによる筋電図振幅値の比率の差はなかった。また、男子学生8名を対象として、スプリント運動中の筋電図パターンを部位間で比較したが、有意な差は認められなかった。これらの結果から大腿二頭筋は筋全体が類似した機能的役割を有し、スプリント運動中にも筋全体が均一に活動していることが明らかとなった。

諸 言

ハムストリングス筋群における肉離れなどの介達損傷は、走運動、スプリント運動、ジャンプ動作、キック動作をともなうスポーツ活動時に多く発症する。フットボールプレイヤー等における発症率は7.7~30%とされ、再発率も18~34%と非常に高いことが知られている¹⁾。運動時における肉離れの発症メカニズムを解明する上で、当該筋の機能的役割や活動特性を理解する事は不可欠である。そのため、多くの先行研究で、運動学的データとともに表面筋電図が記録され、動作局面毎の筋の収縮様式や活動レベルを推測するための重要な知見として利用されてきた²⁻⁵⁾。

肉離れが発症しやすい筋として、ハムストリングス筋群以外には大腿直筋や腓腹筋といった筋が

挙げられる⁶⁾。これらの筋はいずれも2つの関節をまたぐ二関節筋と呼ばれる筋であることから、2つの関節運動が同時に生じることによる筋への過剰な機械的ストレスが肉離れの発症メカニズムの1つとして考えられている⁶⁾。近年、二関節筋の活動を評価する上で、無視できない新たな知見が公表されている。Vieiraらは腓腹筋内側頭の近位部と遠位部が顕著に異なる活動特性を示すことを報告している⁷⁻⁹⁾。また、我々は大腿直筋の近位部とそれ以外の部位が、異なる関節運動に貢献していること^{10,11)}、それにとまって歩行時に顕著に異なる活動パターンを有すること¹²⁾を明らかにしている。これらのデータは、腓腹筋や大腿直筋といった二関節筋が、1つの筋であるにもかかわらず部位によって運動時における機能的役割や活動特性が大きく異なる可能性を示している。このような近年の新たな知見を踏まえ、これまで蓄積されてきた運動時におけるハムストリングス筋群の活動パターンについても筋内における部位差という観点から検討を加える必要があると考えられる。

ハムストリングス筋群は、大腿二頭筋長頭（以下、大腿二頭筋とする）、半腱様筋、半膜様筋から構成されるが、肉離れの発生率はそれぞれ69%、18%、13%となっており、大腿二頭筋で最も多く肉離れが発症する¹⁾。本研究では、大腿二頭筋を対象とし、等尺性筋力発揮を用いて機能的役割の部位差について検討するとともに、スプリント運動時における活動パターンの部位差を検証した。単一筋内における活動特性の部位差を検証するため、上述した大腿直筋¹⁰⁻¹²⁾や腓腹筋内側頭⁷⁻⁹⁾を対象とした研究で用いられている多チャンネル表面筋電図法を利用し、筋の広範囲から表面筋電図を記録した。

1. 方法

1. 1 被験者

被験者は男子大学生 10 名 (年齢: 20.5 ± 0.7 歳, 身長: 171.4 ± 5.1 cm, 体重: 64.0 ± 5.5 kg) であった。本研究の被験者は、定期的な運動習慣はあるものの、特定の競技スポーツに従事している者は含まれていない。本研究は中京大学・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て行った (承認番号: 2014-001)。

1. 2 多チャンネル表面筋電図法

多チャンネル表面筋電図の電極貼付位置を決定するため、超音波画像診断装置 (FAZONE CB, FUJI FILM 社製) を用いて大腿二頭筋が皮下に表出する部位を同定した (図 1A)。坐骨結節と腓骨頭を結んだ線分の midpoint に電極群の中心が位置するように電極群の貼付位置を決定した (図 1B)。その際に全ての電極が、大腿二頭筋が皮下に表出する部位の上に位置することを確認した。本研究では合計 20 個の電極を筋の長軸方向に 1 列に配列した (図 1B)。電極間距離 1cm で 4 つの電極 (センサ部分: 1×5 mm) が配列されたアレイ型電

極 (ELSH004, OT Bioelectronica 社製) を 5 つ使用し、20 個の電極群を構成した。単極誘導を用いたため、個々の電極が 1 つのチャンネルとなり、計 20 チャンネルの表面筋電図信号を記録することとなる。最も近位に位置する電極を CH1 とし、もっとも遠位に位置する電極を CH20 とした。基準電極は腸骨稜に貼付した。電極貼付位置は剃毛とアルコール綿での皮脂の除去を行い、生体用両面テープを用いて電極を固定した。また、テーピング用のアンダーラップを用いて電極コードなどを固定した。表面筋電図信号は無線式筋電図記録装置 (Trentadue, OT Bioelectronica 社製) を用いて、1000Hz で記録した。記録された表面筋電図は記録用ソフトウェア (OT Biolab, OT Bioelectronica 社製) で 20-450Hz のバンドパスフィルターを施した後に解析プログラム (MATLAB 7, MathWorks GK, Tokyo, Japan) に取り込んだ。

1. 3 運動課題 1 (等尺性収縮運動)

被験者はベッドでうつ伏せとなり、股関節および膝関節を 0 度とし (脚全体が伸びた状態)、徒手抵抗に対して股関節伸展運動と膝関節屈曲運動 (大腿二頭筋が貢献する 2 つの関節運動) の最

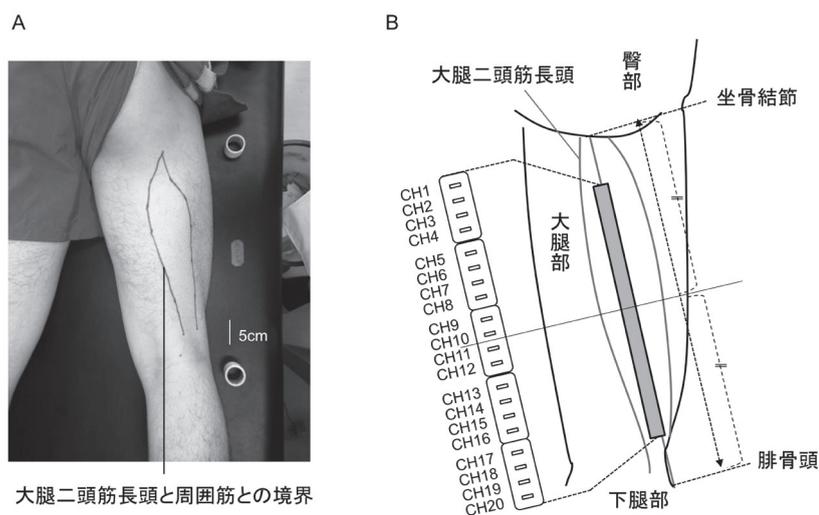


図 1 大腿二頭筋長頭の皮下表出部位 (A) および電極配列 (B)

大筋力発揮を別々に各2回行った(5秒間)。験者は被験者の関節角度が変化しない様に筋力発揮に対して徒手抵抗を加えた。その際に表面筋電図を記録し、収縮中の1秒間から Averaged rectified value (ARV) を算出した。各運動における2回のARVを平均し、股関節伸展時のARVを膝関節屈曲運動時のARVで除した値(HE/KF)を算出した

1. 4 運動課題2 (スプリント運動)

被験者は運動課題1を実施した10名の内8名であった(年齢:20.4 ± 0.7歳, 身長:171.1 ± 5.6cm, 体重:62.9 ± 5.5kg)。

被験者はオールウェザー陸上競技トラックの直線で60mの全力走行を行った。スタンディング姿勢からスタートさせ、30m地点までに最高速度に達するように指示をした。30m地点と47m地点に光電管を設置し、AD変換機(PowerLab, AD Instruments社製)にその電気信号を記録した。この17mを記録区間とし、平均速度を算出した。記録区間中は速度の変動を最小限にするために「駆け抜ける」ように教示をした。3~5本の試技を十分な休憩(5~10分)を挟んで行った。実験ではスパイクの無いランニングシューズを使用した。

足部の接地と離地のタイミングを検出するためにフットセンサ(FSE-FSL1, フォーアシスト社製)をシューズ内の足底部前面に貼付した。フットセンサからの信号は無線式記録装置(FWS-6MEML, フォーアシスト社製)を用いて記録した。フットセンサのデータからは、ピッチも算出した。筋電図、フットセンサ、光電管の信号は試技の開始時に同期信号を用いて同期した。

筋電図信号の安定している1試技を解析対象とした。接地から同じ脚の次の接地までを1歩とし、記録区間から4歩分のデータを抽出した。1歩に要する時間を100%とし、2%毎に各チャンネル

の筋電図データを加算平均し、ARVを算出した。各チャンネルのARVは1歩中の最大値によって標準化した。

1歩に要する時間を10等分し、10の局面に分けた。各局面において各チャンネルの平均ARVを算出し、筋の長軸方向のCentral locus activation (CLA)を算出した¹²⁾。CLAはARVの重心位置を意味するものであり、近位側で相対的にARVが高い場合にはCLAが近位側に位置し、筋全体のARVが相対的に均一であればCLAは筋の中央部に位置することとなる。

1. 5 統計処理

部位間でのHE/KFの変化および局面間でのCLAの変化を評価するため、Friedman検定を行った。有意水準は危険率5%未満とした。

2. 結果

2. 1 運動課題1

各チャンネルにおけるHE/KFの平均値は0.86~1.03の範囲にあった(図2)。このことは、股関

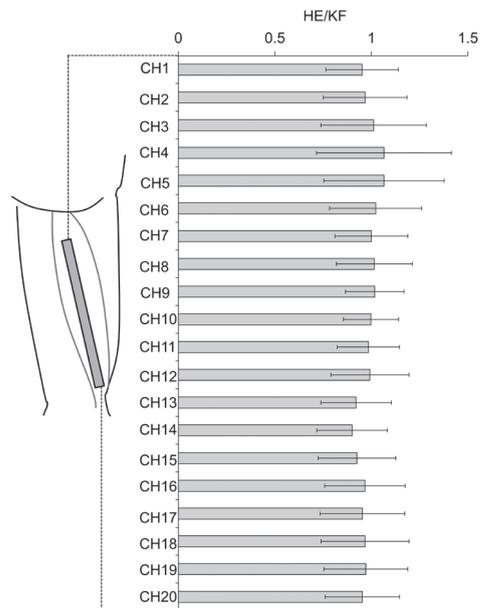


図2 大腿二頭筋長軸方向における異なる部位の筋電図振幅値(Averaged Rectified Value (ARV))の比率(股関節伸展筋力発揮時/膝関節屈曲筋力発揮時)

節伸展運動時の ARV は膝関節屈曲運動時の ARV と比較して同等もしくは低い傾向であることを意味する。Friedman 検定の結果、HE/KF は部位間で有意な差はなかった ($p>0.05$) (図 2)。

2. 2 運動課題 2

記録区間の平均速度は 27.1 ± 1.6 km/h, ピッチは 242.0 ± 12.8 回/秒, 離地タイミングは 27.1 ± 1.6 % であった。

図 3 に 1 歩中の標準化 ARV を示した。接地から離地の間 (約 0~30%) と接地の前 (80~100%) に標準化 ARV の増加が見られ, 同様のパターンが全てのチャンネルで観察された。図 4 は ARV をグレースケールに変換して示したものである。離地前後 (約 30%) および接地前の活動初期 (約 80~90%) において近位部の ARV が他の部位と比較して高い傾向が見られる。しかしながら, CLA は 1 歩中ほとんど変化せずに筋の中心に位置し続けていた。ストライド 1 歩を 10 局面に分け, 局面間で CLA を比較した結果, 局面間で有意な差はなかった ($p>0.05$) (図 5)。

3. 考察

顕著な機能的役割や活動特性の部位差が観察さ

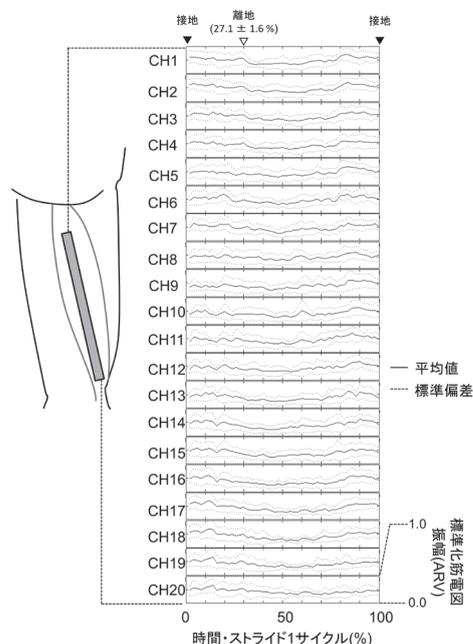


図 3 スプリント運動中の大腿二頭筋長軸方向における異なる部位の標準化筋電図振幅値 (Averaged Rectified Value (ARV))

れている大腿直筋は近位部と遠位部が異なる運動神経枝に支配されている^{13, 14)}。このことは大腿直筋の近位部と遠位部が独立して活動しうることを意味する。大腿二頭筋も, 2つもしくは3つの運動神経枝によって支配されており, 近位端か

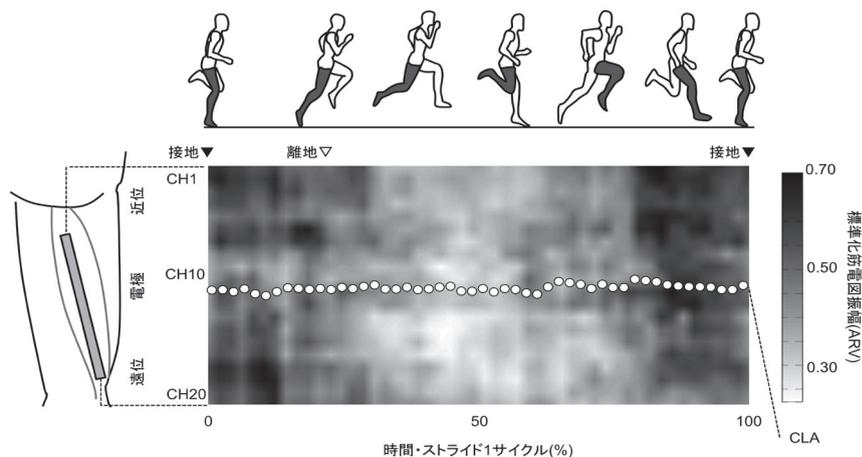


図 4 スプリント運動中の大腿二頭筋長軸方向における標準化筋電図振幅値 (Averaged Rectified Value (ARV)) グレースケールマップ。黒い部分ほど標準化筋電図振幅値が高く, 白い部分ほど標準化筋電図振幅値が低い。白い丸 (○) は Central lucus activation (CLA) を示す

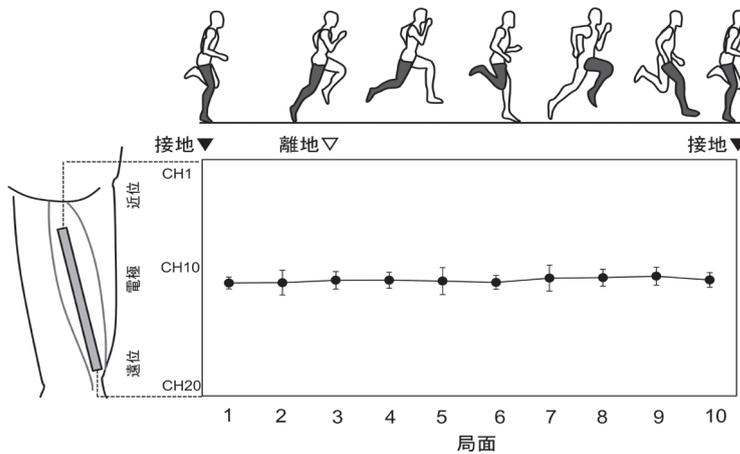


図5 スプリント運動中の大腿二頭筋長軸方向における Central locus activation (CLA)

ら24%, 46%, および49%の位置に神経筋接合部が観察されている¹⁵⁾。このことから、大腿二頭筋も、大腿直筋と同様に神経解剖学的には長軸方向において部位によって独立した機能的役割や活動特性を有する可能性が考えられた。大腿直筋では、この筋が貢献する股関節屈曲運動と膝関節伸展運動時において、それぞれ筋の近位部と遠位部に顕著に高い標準化筋電図振幅値が観察されている^{10, 16)}。このことは近位部と遠位部では機能的役割が異なる可能性を示している。ネコの大腿二頭筋は近位部が股関節伸展運動に、遠位部が膝関節屈曲運動に主に貢献することが知られている¹⁷⁾。機能的役割の部位差を評価するため、大腿直筋を用いた我々の先行研究では股関節屈曲運動時の値を膝関節屈曲運動時の値で除した値を算出した¹⁶⁾。その結果、近位部では1.2~1.4、遠位部では0.4~0.6という値が観察され、近位部がより股関節屈曲運動に、遠位部がより膝関節伸展運動時に高い活動を有することが示された¹⁶⁾。本研究でも同様に大腿二頭筋における機能的役割の部位差を評価するため、大腿二頭筋が貢献する2つの関節運動を最大努力で行かせた際の表面筋電図振幅値の比率(HE/KF)を算出した。その結果、HE/KFに部位による差異は認められなかった

(図2)。したがって、大腿二頭筋には大腿直筋で見られるような顕著な機能的役割の部位差は存在しないと推測された。

スプリント運動中におけるハムストリングス筋群の表面筋電図は多くの研究で記録されてきた²⁻⁵⁾。これらの研究では一般的に用いられる1対の電極ペアを用いて表面筋電図を記録している。近年、ハムストリングス筋群と同様に二関節筋である大腿直筋や腓腹筋内側頭において運動時における筋電図パターンに顕著な部位差が観察されており^{7-10, 12, 16)}、表面筋電図法を用いて運動時の神経筋活動を評価する上で無視できない点となってきた。例えば、大腿直筋の歩行時における筋電図パターンは研究間で異なるパターンが報告されており、どのパターンがnormalであるかが議論されてきた¹⁸⁻²⁰⁾。我々が近年発表した研究では、これらの研究で示されたいくつかのパターンが1つの筋内で観察されることを示した¹²⁾。したがって、表面筋電図法を用いた研究では対象とする筋が対象とする動作時において、どの程度の部位差を有するかを把握しておくことは重要である。本研究では肉離れ発症メカニズムを解明する上で多くの研究で記録されてきたスプリント運動中の大腿二頭筋を対象として筋電図パターンの部位差に

ついて CLA という筋電図の空間分布を評価する指標¹²⁾を用いて検証した。その結果, CLA は全局面を通して筋の中央部に位置していた(図 4, 5)。この結果は, 大腿二頭筋は筋全体がスプリント運動中に類似した筋電図パターンを有することを意味する。スプリント運動時における大腿二頭筋は全体が同じように制御されていることが示唆された。

4. まとめ

本研究では, 大腿二頭筋において機能的役割の部位差およびスプリント運動中の活動パターンの部位差が存在する可能性について, 多チャンネル表面筋電図法を用いて検討した。その結果, 大腿二頭筋が貢献する2つの関節運動(股関節伸展, 膝関節屈曲)時の筋電図振幅値の比率に顕著な部位差はなかった。また, スプリント運動中における筋電図振幅値の変化パターンにも顕著な部位差はなかった。これらの結果から, 大腿二頭筋は筋全体が同じような役割を有し, スプリント運動中にも筋全体が均一に活動していることが明らかとなった。

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) Woodley S., Mercer S., Hamstring strains - Where do they occur?. *NZ Journl of Physiotherapy.*, **32**: 22-28(2004)
- 2) Higashihara A., Ono T., Kubota J., Fukubayashi T., Differences in the electromyographic activity of the hamstring muscles during maximal eccentric knee flexion., *Eur. J. Appl. Physiol.*, **108**: 355-362(2010)
- 3) Higashihara A., Ono T., Kubota J., Okuwaki T., Fukubayashi T., Functional differences in the activity of the hamstring muscles with increasing running speed., *J. Sports Sci.*, **28**: 1085-1092(2010)
- 4) Simonsen E.B., Thomsen L., Klausen K., Activity of mono- and biarticular leg muscles during sprint running., *European journal of applied physiology and occupational physiology.*, **54**: 524-532(1985)
- 5) Montgomery W.H., Pink M., Perry J., Electromyographic analysis of hip and knee musculature during running., *Am. J. Sports Med.*, **22**: 272-278(1994)
- 6) Garrett W.E., Jr. Injuries to the muscle-tendon unit., *Instr. Course. Lect.*, **37**: 275-282(1988)
- 7) Vieira T.M., Loram I.D., Muceli S., Merletti R., Farina D., Recruitment of motor units in the medial gastrocnemius muscle during human quiet standing: is recruitment intermittent? What triggers recruitment? *J. Neurophysiol.*, **107**: 666-676(2012)
- 8) Vieira T.M., Windhorst U., Merletti R., Is the stabilization of quiet upright stance in humans driven by synchronized modulations of the activity of medial and lateral gastrocnemius muscles? *J. Appl. Physiol.*, **108**: 85-97(2010)
- 9) Vieira T.M., Loram I.D., Muceli S., Merletti R., Farina D., Postural activation of the human medial gastrocnemius muscle: are the muscle units spatially localised? *J. Physiol. (Lond)*, **589**: 431-443(2011)
- 10) Watanabe K., Kouzaki M., Moritani T., Task-dependent spatial distribution of neural activation pattern in human rectus femoris muscle., *J. Electromyogr. Kinesiol.*, **22**: 251-258(2012)
- 11) Watanabe K., Kouzaki M., Moritani T., Non-uniform surface electromyographic responses to change in joint angle within rectus femoris muscle., *Muscle Nerve.*, **50**: 794-802(2014)
- 12) Watanabe K., Kouzaki M., Moritani T., Regional neuromuscular regulation within human rectus femoris muscle during gait., *J. Biomech.*, **47**: 3502-3508(2014)
- 13) Sung D.H., Bang H.J., Motor branch block of the rectus femoris: its effectiveness in stiff-legged gait in spastic paresis., *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, **81**: 910-915(2000)
- 14) Yang D., Morris S.F., Neurovascular anatomy of the rectus femoris muscle related to functioning muscle transfer., *Plast. Reconstr. Surg.*, **104**: 102-106(1999)
- 15) Seidel P.M., Seidel G.K., Gans B.M., Dijkers M., Precise localization of the motor nerve branches to the hamstring muscles: an aid to the conduct of

- neurolytic procedures., *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, **77**: 1157-1160 (1996)
- 16) Watanabe K., Kouzaki M., Moritani T., Non-uniform surface EMG responses to change in joint angle within rectus femoris muscle., *Muscle Nerve.*, **50**: 794-802 (2014)
- 17) Pratt C.A., Chanaud C.M., Loeb G.E., Functionally complex muscles of the cat hindlimb. IV. Intramuscular distribution of movement command signals and cutaneous reflexes in broad, bifunctional thigh muscles., *Exp. Brain. Res.*, **85**: 281-299 (1991)
- 18) Annaswamy T.M., Giddings C.J., Della Croce U., Kerrigan D.C., Rectus femoris: its role in normal gait. *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, **80**: 930-934 (1999)
- 19) Barr K.M., Miller A.L., Chapin K.B., Surface electromyography does not accurately reflect rectus femoris activity during gait: impact of speed and crouch on vasti-to-rectus crosstalk., *Gait. Posture.*, **32**: 363-368 (2010)
- 20) Nene A., Byrne C., Hermens H., Is rectus femoris really a part of quadriceps? Assessment of rectus femoris function during gait in able-bodied adults., *Gait Posture.*, **20**: 1-13 (2004)

低酸素間欠的無呼吸が中心循環動態に与える影響 ～睡眠時無呼吸症候群による心血管疾患発症機序の解明および予防法の構築～

筑波大学 今井智子
(共同研究者) 独立行政法人 菅原 順
産業技術総合研究所
東洋大学 小河繁彦

The Effects of Intermittent Hypoxia Apnea on Central Hemodynamics

by

Tomoko Imai

University of Tsukuba

Jun Sugawara

Human Technology Research Institute,

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Shigehiko Ogoh

Toyo University

ABSTRACT

Sleep apnea syndrome (SAS), respiratory disorder characterized by repetitive complete or partial upper airway collapse during sleeping, is an independent cardiovascular disease (CVD) risk. However, underlying pathophysiological mechanisms are unknown. In this study, we examined the response of central hemodynamics during intermittent apnea in order to more accurately assess cardiac load. Fifteen apparently healthy men (23 ± 2 years) underwent 20 bouts of 20 seconds of voluntary end expiratory apnea (apnea phase) followed by 40 seconds of voluntary breathing (rebreathing phase). Central arterial hemodynamics was evaluated from radial arterial pressure waveforms using pulse wave analysis via general transfer

function. During every apnea-rebreathing cycle, central and peripheral arterial systolic pressure significantly increased during early rebreathing phase compared with during apnea phase and then returned toward baseline level. Furthermore, peripheral systolic pressure, and heart rate significantly increased throughout the 20 min of respiratory intervention. Rate-pressure product, an index of myocardial oxygen consumption, also elevated throughout the intervention. These results suggest that central blood pressure is increased temporarily by the rebreathing and that central arterial pressure might be raised throughout the repetitive intermittent apnea probably due to insufficient recovery duration.

要 旨

睡眠中に気道の狭窄・閉塞を繰り返す睡眠時無呼吸症候群 (SAS) は、心血管疾患 (CVD) の独立したリスク要因である。しかしながら、その病態生理の機序は明らかではない。本研究では心負荷を正確に評価するために間欠的な無呼吸中の大動脈動態の変動を検討した。

15名の健常な男性 (23±2歳) は自然呼吸の無呼吸 (無呼吸期) と40秒の普通呼吸 (回復期) を20回繰り返した。大動脈動態は一般伝達関数を用いた波形解析ソフトウェアに取り込み、橈骨動脈から大動脈圧を推定した。無呼吸期と回復期を繰り返している間、大動脈と抹消の収縮期血圧は無呼吸後の回復期に比べて有意に増加した。さらに、抹消の収縮期血圧および心拍は20分の呼吸介入を通じて有意に増加した。心筋の酸素消費の指標であるダブルプロダクトも呼吸介入を通じて有意に増加した。これら結果から、間欠的な無呼吸後の再呼吸時に血圧が一時的に上昇することが示唆された。

緒 言

睡眠時無呼吸症候群 (SAS) は、睡眠中の気道狭窄・閉塞により10秒以上の無呼吸を繰り返す睡眠呼吸障害である¹⁾。睡眠中の低酸素²⁾、中途

覚醒および胸腔内圧低下³⁾は交感神経活動の活性、炎症および低酸素ストレスが増大する。これらは血圧を上昇させ、動脈硬化および心血管疾患の発症リスクとなる⁴⁾。

一方、呼吸運動は胸郭内の圧を増減させて静脈還流に働く。間欠的な無呼吸による呼吸運動の停止・再開は静脈還流量を変化させるため、血圧の動揺を引き起こす可能性がある。近年、大動脈近位部で測定される血圧 (中心血圧) が一般的に上腕動脈で測定される血圧よりも強力な心血管疾患の予測マーカーであることが報告されている^{5,6)}が、SASが大動脈圧などの循環動態に与える影響は我々が知る限り十分に明らかでない。そこで本研究では、SASを介した心血管疾患発症機序解明に一助とすべく、「間欠的な無呼吸が著名な血圧上昇を引き起こす」という仮説を設定し検証した。

本検討ではSASの呼吸運動と類似する運動トレーニングを行っている水泳競技者を対象に加えた。ダイバーは息こらえ中にSpO₂が大幅に低下するにも関わらず、心血管疾患リスクはみられない。長く息こらえを行うダイバーやシンクロナイズドスイミングの選手では心循環動態の適応により一般健常者に比べて静脈還流量低下にともなう心拍数の低下や末梢血管抵抗の増加といった応答が強いことが報告されている^{7,8)}。しかしながら、SASとは異なり、交感神経反射および低酸素に

における化学受容器の応答は正常である⁹⁾。水中スポーツとSASには意識・無意識下の違いはあるが⁸⁾、心循環動態に障害がみられないのは「息こらえ」のリスクを何らの代償作用で防ぐ可能性が考えられる。そこで、我々が想定する「呼吸制御に伴う血圧上昇」の応答が水泳競技者では減弱しているか否かについても検証を行った。

1. 方法

1. 1 対象者

対象者は健常男性16名とし、8名は水泳競技者(水泳群)、8名は運動習慣のないもの(対照群)を対象とした。水泳群は10年以上の水泳競技歴があり、定期的に週2~3回のトレーニングを行っているものとした。すべての対象者に呼吸器及び循環器疾患はなかった。水泳群に1年未満の喫煙があったため解析から除外し、水泳群7名、対照群8名の解析をおこなった。

すべての対象者に研究の目的や潜在的な危険性を説明した上で、文書による研究参加への同意を得た。本研究は産業技術研究所人間工学実験委員会の承認を得て実施した。

1. 2 実験手順

実験に先立ち、前日の激しい運動および飲酒制限をおこなった。測定の前3時間前はカフェインを含む飲料および飲食の制限を行った。

対象者は実験室に到着後、測定機器を装着し、ベッド上で仰臥位安静後(5分以上)安静時測定(5分)および20分間の間欠的無呼吸を行った。間欠的無呼吸は呼吸停止20秒と制御呼吸40秒(15回/分)計20回(20分間)を反復した。呼吸頻度はメトロノームで15回/分に調節した。バルサルバの影響を防ぐため、無呼吸の前に自然呼吸を行った。

1. 3 主要測定項目

間欠的無呼吸中は心循環動態の指標として心電図、橈骨動脈圧、心拍数(HR)、中大脳動脈平均血流速度(MCAVmean)を測定した。中大脳動脈の血流速度はマルチ周波数超音波ドップラ血流測定装置(EZ-Dop, コンピューメディックス社)を用いて計測した。血中の動脈酸素飽和度を確認するため経皮的動脈血酸素飽和度(SpO₂)(ML320オキシメータポッド, ADInstruments社)の測定を行った。

呼吸ガス分析装置(AE-300S, ミナト医科学株式会社)にて5秒毎の呼気終末二酸化炭素(ETCO₂)の測定を行った。橈骨動脈波形はトノメトリ式非侵襲連続血圧計(Jentow, コーリンメディカル社)を使用し連続記録した。橈骨動脈圧はgeneral transfer function(一般の伝達関数)を用いた波形解析ソフトウェア(SphygmoCor CvMS, AtCor Medical社)に取り込み、大動脈圧を推定した。

同様に、Modelflow法による循環動態解析ソフトウェア(BeatScope1.1a, Finapres Medical Systems社)に取り込み、一拍毎の一回拍出量(SV)、心拍出量(CO)、総末梢血管抵抗(TPR)を算出した。すべての波形はアナログデジタル変換器(Powerlab16/30, ADInstruments社)を介してパーソナルコンピュータに取り込んだ。分析は付属ソフト(Lab Chart ver.7, ADInstruments社)にて解析を行った。

心臓の酸素消費量を示す指標、ダブルプロダクトは大動脈SBPとHRの積から求めた。

1. 4 解析方法

間欠的無呼吸5分目、10分目、15分目、20分目それぞれの時点での無呼吸期(無呼吸5秒後から15秒間)、再呼吸期(無呼吸終了後から15秒間)、通常呼吸期(無呼吸16秒前から15秒間)を15秒ごとに抽出し、無呼吸期、再呼吸期、普通呼吸

期の心循環動態の評価を行った。

1. 5 統計

全ての測定値は平均と標準偏差を示した。

対象者の年齢, 身体的特性は対応のない t 検定を用いて検討した。2 要因の比較および条件間の違いは General Linear Model の two-way repeated measures ANOVA を用いて検討を行った。多重比較検定は Newman-Keuls を使用した。統計学的有意水準は 0.05 未満とした。

2. 結果

2. 1 間欠的無呼吸における心循環動態

大動脈の収縮期血圧 (SBP) は, 無呼吸期よりも再呼吸期が有意に高値だった。また, 再呼吸期は普通呼吸期よりも有意に高値を示した。時間経過による変化は, 5 分目に対して 15 分目に有意な傾向を示した ($p=0.06$) (図 1)。抹消の SBP は

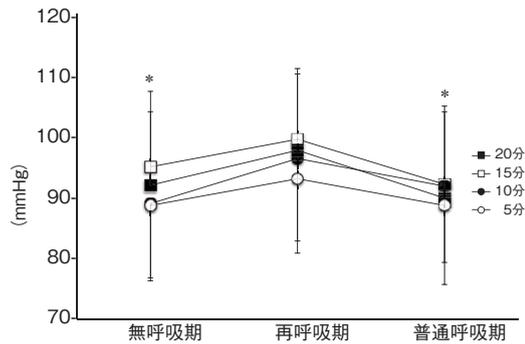


図 1 大動脈収縮期血圧の変動 (n=15)
* P<0.05, VS. 再呼吸期

無呼吸期よりも再呼吸期が有意に高値だった。また, 再呼吸期は普通呼吸期よりも有意に高値を示した。時間経過は 5 分目に対して 15 分目, 20 分目が有意に高値だった (図 2)。拡張期血圧には交互作用が認められた。無呼吸期よりも再呼吸期は有意に高値だった。また, 再呼吸期は普通呼吸期よりも有意に高値だった。時間経過では 5 分目に対し 15 分目が有意に高値だった (図 3)。抹消

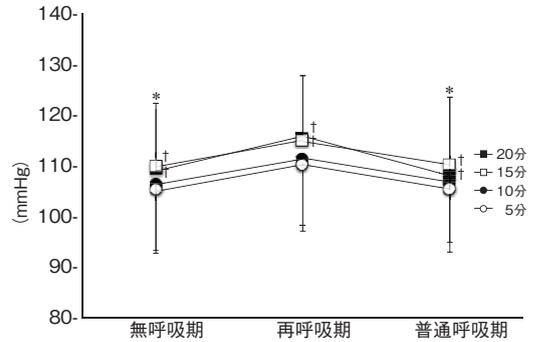


図 2 末梢収縮期血圧の変動 (n=15)
* P<0.05, VS. 再呼吸期 (各期の比較), † P<0.05, 5分 VS. 15分

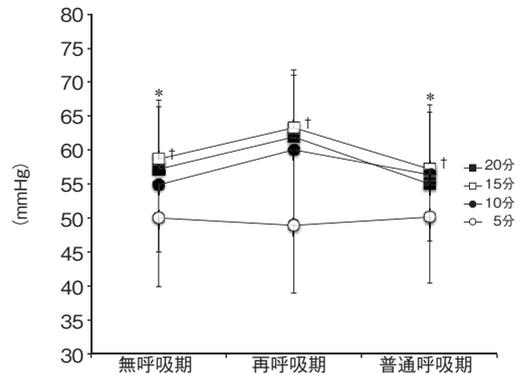


図 3 拡張期血圧の変動 (n=15)
* P<0.05, VS. 再呼吸期 (各期の比較), † P<0.05, 5分 VS. 15分

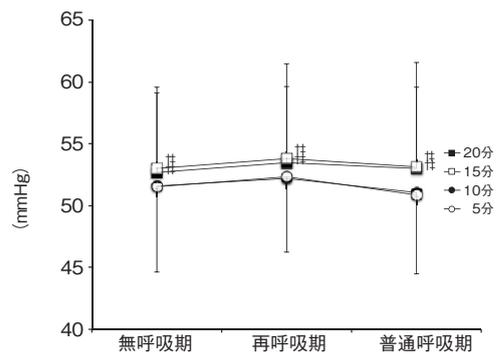


図 4 抹消の脈圧の変動 (n=15)
† P<0.05, 5分 VS. 15, 20分, ‡ P<0.05, 10分 VS. 15, 20分

の脈圧 (PP) は時間経過で有意となり, 5 分目と 10 分目は 15 分目, 20 分目に対し有意に高値だった (図 4)。大動脈 PP および平均血圧には明らかな変化は認められなかった (表 1)。HR は無呼吸期よりも再呼吸期が有意に高値だった。5 分目に

表 1 間欠的無呼吸時の心循環応答

		基礎値	無呼吸期	再呼吸期	普通呼吸期
大動脈 PP	(mmHg)	34.3 ± 6.7	35.2 ± 7.1	36.2 ± 7.4	34.9 ± 6.5
MAP	(mmHg)	68.4 ± 10.6	70.9 ± 11.1	76.7 ± 11.7	70.8 ± 11.1
SV	(ml)	87.6 ± 18.9	83.2 ± 14.3	82.9 ± 16.8	85.0 ± 15.3
MCA V _{mean}	(cm/s)	54.9 ± 12.2	54.3 ± 12.5	56.3 ± 12.2	55.5 ± 12.1
SpO ₂	(%)	96.5 ± 0.8	97.3 ± 0.7	96.8 ± 0.8	96.7 ± 0.8
ETCO ₂	(%)	5.5 ± 0.5	5.5 ± 0.6	5.2 ± 1.2	5.1 ± 0.9

mean ± SD (n = 15)

PP, pulse pressure; MAP, mean arterial pressure; SV, stroke volume; MCAV_{mean}, middle cerebral artery blood velocity
SpO₂, Oxygen saturation; ETCO₂, end tidal carbon dioxide

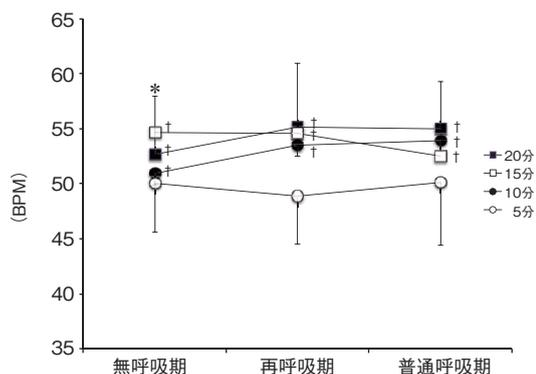


図 5 心拍数の変動 (n=15)

*P<0.05, VS.再呼吸期(各期の比較), †P<0.05, 5分VS.10, 15, 20分
対して 10 分目, 15 分目, 20 分目は有意に高値だった (図 5). ダブルプロダクトは, 無呼吸期よりも再呼吸期が有意に高値だった. 5 分目の無呼吸期に対して, 15 分目の無呼吸期で有意に高値, 5 分目の再呼吸期に対して 10 分目, 15 分目, 20 分目の再呼吸期で有意に高値だった (図 6). CO は 5 分目に対して 10 分目, 15 分目, 20 分目が有意に高値だった (図 7). TPR は再呼吸期よりも普

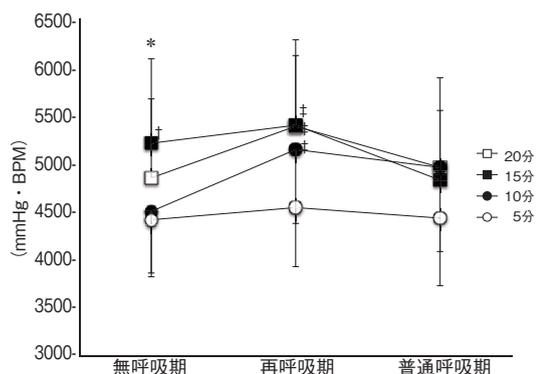


図 6 ダブルプロダクトの変動 (n=15)

*P<0.05, VS.再呼吸期(各期の比較), †P<0.05, 無呼吸期5分VS.無呼吸期15分, ‡P<0.05, 再呼吸期5分VS.再呼吸期10, 15, 20分

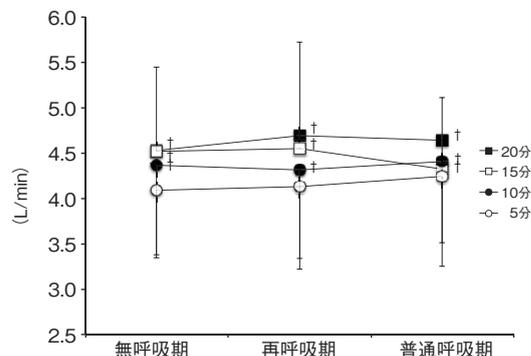


図 7 心拍量の変動 (n=15)

*P<0.05, VS.再呼吸期(各期の比較), †P<0.05, 5分VS.10, 15, 20分
普通呼吸期が有意に低値だった. 20 分目は 5 分目, 10 分目, 15 分目よりも有意に低値だった (図 8).

MCAV_{mean} は一名測定値不良のため, 計 14 名にて検討を行った. MCAV_{mean} は間欠的無呼吸中に明らかな変動は認められなかった (表 1). SV, ETCO₂ および SpO₂ に条件間の違いは認められなかった (表 1).

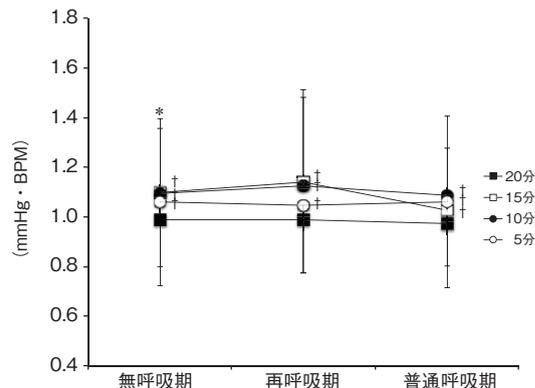


図 8 総末梢血管抵抗の変動 (n=15)

*P<0.05, VS.再呼吸期(各期の比較), †P<0.05, 20分 VS. 5, 10, 15分

2. 2 水泳群と対照群の「息こらえ」による心循環応答の比較

水泳群と対照群の身長、体重、年齢に明らかな違いは認められなかった(表2)。また、安静時の心循環動態に違いは認められなかった。

習慣的な「息こらえ」が過剰な心循環応答を緩和するか否かを確認するため、水泳群と対照群において間欠的無呼吸における心循環応答の比較検討を行った。水泳群と対照群において間欠的無呼吸中の心循環動態に明らかな違いは認められなかった(表3)。

3. 考察

3. 1 間欠的無呼吸が大動脈圧に与える影響

本研究の結果から、間欠的無呼吸の後の再呼吸時に血圧の一時的な上昇が見られた。

再呼吸時に一時的な大動脈SBP、抹消動脈SBPの上昇がみられた。無呼吸は呼吸運動を止

めるため、静脈血が貯留し、再呼吸期に急速に胸部内に静脈血が流入する。つまり静脈還流の急速な流入が血圧を上昇させたと考えられる。また、大動脈SBPは時間経過にともない有意な上昇傾向(p=0.06)、抹消ともSBP、DBPは時間経過にともない有意に高値となった。時間経過にともなう血圧上昇は1呼吸サイクル(無呼吸、再呼吸)の影響が、次の呼吸サイクルに影響した可能性が推察される。先行研究では測定前後で血圧および交感神経活動は変化しないことを報告しているが、間欠的無呼吸中の応答は検討していない¹⁰⁾。さらに、低酸素を負荷した検討では一定に負荷するよりも、間欠的に負荷をする方が交感神経は高まるとの報告がある¹¹⁾。以上から、間欠的無呼吸による一時的な血圧の上昇および繰り返しによる昇圧応答の増強は、SASによる心血管疾患発症の一因となる可能性がある。

TPRは再呼吸期に比べて無呼吸期は低下し、20分目は5分目、10分目、15分目に比べて有意な低下が認められた。時間経過によるTPRの減少は、時間経過ごとに中心静脈圧が増加することで心肺圧受容器の刺激が増加し、筋交感神経の活性が漸減された可能性がある。時間経過にともな

表2 対象者の身体的特徴および年齢

	水泳群 (n=7)	対照群 (n=8)
身長 (cm)	172±9	173±4
体重 (kg)	67±12	68±9
年齢 (歳)	22±2	24±1

mean ± SD

表3 水泳群と健常群における20分間の間欠的無呼吸時の心循環応答

		水泳群 (n=7)				対照群 (n=8)			
		基礎値	無呼吸期	再呼吸期	普通呼吸期	基礎値	無呼吸期	再呼吸期	普通呼吸期
大動脈SBP	(mmHg)	92±11.8	93±10.9	100±11.1	92±12.3	87±11.9	89±13.3	96±13.1	90±13.3
抹消動脈SBP	(mmHg)	110±12.8	110±12.0	117±12.2	110±13.1	104±8.9	105±12.0	112±11.3	106±11.8
大動脈PP	(mmHg)	35±6.4	37±5.5	37±6.3	36±5.7	33±7.2	34±8.2	36±8.4	34±7.1
抹消動脈PP	(mmHg)	55±7.3	55±7.8	55±7.0	54±8.6	50±5.4	53±18.9	52±4.6	50±5.1
DBP	(mmHg)	57±6.6	57±7.2	63±7.5	56±8.6	53±8.9	56±11.1	61±10.2	56±10.7
MAP	(mmHg)	70±12.7	72±10.2	78±12.6	72±10.8	67±9.2	70±11.9	76±11.0	70±11.4
HR	BPM	51.4±6.5	51.1±6.6	54.0±7.3	52.4±6.6	51.5±2.9	52.9±3.8	55.1±3.7	53.3±3.6
SV	(ml)	87.7±16.2	79.1±12.8	77.5±13.4	81.1±14.4	87.6±23.0	87.9±15.5	89.0±19.2	89.3±16.2
CO	(lpm)	4.5±0.9	4.0±0.8	4.2±0.8	4.3±0.9	4.3±1.1	4.3±0.9	4.6±1.1	4.6±0.8
TPR	(MU)	0.9±0.3	1.1±0.3	1.1±0.4	1.0±0.3	1.0±0.3	1.1±0.2	1.1±0.3	1.0±0.2
MCA Vmean	(cm/s)	49.9±13.4	52.4±14.0	53.6±13.5	53.8±13.5	59.1±10.2	56.2±10.8	59.0±10.5	57.1±10.8
SpO ₂	(%)	97.0±0.8	97.6±0.5	96.9±0.7	96.9±0.4	96.2±0.6	97.0±0.7	96.7±0.9	96.5±0.8
ETCO ₂	(%)	5.6±0.7	5.6±0.5	5.1±1.1	5.0±1.2	5.4±0.4	5.4±0.6	5.0±1.3	5.2±0.6

mean ± SD

SBP, systolic blood pressure; PP, pulse pressure; DBP, diastolic blood pressure; MAP, mean arterial pressure; HR, heart rate; SV, strokevolume; CO, cardiac output; TPR, total peripheral resistance; MCA Vmean, middle cerebral artery blood velocity; SpO₂, saturation oxygen; ETCO₂, end tidal carbon dioxide

う HR の増加は時間経過にともなう TPR の減少を補い HR および CO の低下を防いだ可能性がある。HR は CO と同様に時間経過により有意に高値だった。

MCAVmean には変動はみられなかった。脳には自己調節機能が存在し、一定の血圧変動がみられても血流速度を一定に保つ機能がある¹²⁾。本研究では ETCO₂ および SpO₂ に明らかな変動がないことから脳の自動調節機能は保たれていたと考えられる¹³⁾。間欠的無呼吸による大動脈圧の変動では脳の自動調節は保持されると考えられる。

3. 2 水泳選手の習慣的「息こらえ」による心循環動態

本研究で用いた間欠的無呼吸における大動脈圧には対照群と違いがみられず、トレーニング適応における大動脈圧への緩衝作用はみられなかった。

ダイバーは「息こらえ」中に SAS と同様に、交感神経の活性、および大幅な SpO₂ の低下がみられる⁸⁾。これは酸素消費を節約し、長く「息こらえ」を続けるためのダイビング反応として知られている¹⁴⁾。一方で、この反応は SAS の症状と類似するため、ダイバーおよび水中スポーツの競技者の CVD リスクについて検討されてきた^{8,9,14)}。しかしながら、これまで CVD リスクは報告されていない。そこで水泳競技者はトレーニングの適応により「呼吸制御に伴う血圧上昇」の応答が減弱する、と仮説をたて検討を行ったが、対照群と違いは認められなかった。本検討では低酸素負荷をすることが出来なかったため、代償作用はみられなかった可能性がある。代償作用を明らかにするためには低酸素負荷を用いたさらなる検討が必要である。

3. 3 研究の限界

本研究では低酸素間欠的無呼吸の影響を検討す
デサントスポーツ科学 Vol. 36

るため、低酸素負荷を検討していたが、倫理委員会にて実験の危険性が指摘され、低酸素を負荷する事ができず、当初の計画を変更せざるをえなくなった。そこで、低酸素刺激の影響を省き、間欠的無呼吸における大動脈圧の応答に着目して検討した。しかしながら、SAS では無呼吸の時間はランダムで長いため、呼吸運動停止における間欠的無呼吸の影響は大きいと推察される。また、低酸素・陰圧負荷が加わることで、相加的に血圧を高め心血管疾患発症リスクを高める可能性がある。今後は低酸素負荷と合わせた SAS の心血管疾患リスクの機序を検討する必要がある。

4. 結 論

間欠的無呼吸の後の再呼吸時に血圧が一時的に上昇することが示唆された。このような応答は、心血管疾患リスクを高める一因になりうるかもしれない。

謝 辞

本研究に対し助成を承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。さらに、研究遂行にあたり、測定協力を頂いた筑波大学 東本翼さん、被検者の皆様に深く感謝いたします。

文 献

- 1) Phillips C.L., Butlin M., Wong K.K., Avolio A.P.: Is obstructive sleep apnoea causally related to arterial stiffness? A critical review of the experimental evidence., *Sleep Med. Rev.*, 17:7-18 (2013)
- 2) Cutler M.J., Swift N.M., Keller D.M., Wasmund W.L., Smith M.L.: Hypoxia-mediated prolonged elevation of sympathetic nerve activity after periods of intermittent hypoxic apnea., *J. Appl. Physiol.*, 96:754-761 (2004)
- 3) Rossi V.A., Stradling J.R., Kohler M.: Effects of obstructive sleep apnoea on heart rhythm., *Eur.*

- Respir. J.*, 41:1439-1451 (2013)
- 4) Phillips C.L., O'Driscoll D.M.: Hypertension and obstructive sleep apnea., *Nat. Sci. Sleep*, 5:43-52 (2013)
 - 5) Roman M.J., Devereux R.B., Kizer J.R., Lee E.T., Galloway J.M., Ali T., Umans J.G., Howard B.V.: Central pressure more strongly relates to vascular disease and outcome than does brachial pressure: the Strong Heart Study., *Hypertension*, 50:197-203 (2007)
 - 6) Agabiti-Rosei E., Mancia G., O'Rourke M.F., Roman M.J., Safar M.E., Smulyan H., Wang J.G., Wilkinson I.B., Williams B., Vlachopoulos C.: Central blood pressure measurements and antihypertensive therapy: a consensus document., *Hypertension*, 50:154-160 (2007)
 - 7) Alentejano T.C., Marshall D., Bell G.J.: Breath holding with water immersion in synchronized swimmers and untrained women., *Res. Sports Med.*, 18:97-114 (2010)
 - 8) Heusser K., Dzamonja G., Tank J., Palada I., Valic Z., Bakovic D., Obad A., Ivancev V., Breskovic T., Diedrich A., Joyner M.J., Luft F.C., Jordan J., Dujic Z.: Cardiovascular regulation during apnea in elite divers., *Hypertension*, 53: 719-724 (2009)
 - 9) Breskovic T., Ivancev V., Banic I., Jordan J., Dujic Z.: Peripheral chemoreflex sensitivity and sympathetic nerve activity are normal in apnea divers during training season., *Auton. Neurosci.*, 19: 42-47 (2010)
 - 10) Leuenberger U.A., Brubaker D., Quraishi S., Hogeman C.S., Imadojemu V.A., Gray K.S.: Effects of intermittent hypoxia on sympathetic activity and blood pressure in humans., *Auton. Neurosci.*, 121:87-93 (2005)
 - 11) Xie A., Skatrud J.B., Crabtree D.C., Puleo D.S., Goodman B.M., Morgan B.J.: Neurocirculatory consequences of intermittent asphyxia in humans., *J. Appl. Physiol.*, 89:1333-1339 (2000)
 - 12) Ogoh S., Ainslie P.N.: Cerebral blood flow during exercise: mechanisms of regulation., *J. Appl. Physiol.*, 107:1370-1380 (2009)
 - 13) Seifert T., Secher N.H.: Sympathetic influence on cerebral blood flow and metabolism during exercise in humans., *Prog. Neurobiol.*, 95:406-426 (2011)
 - 14) Andersson J.P., Linér M.H., Fredsted A., Schagatay E.K.: Cardiovascular and respiratory responses to apneas with and without face immersion in exercising humans., *J. Appl. Physiol.*, 96:1005-1010 (2004)

足関節底屈筋群の瞬発的な筋力発揮能力向上を目的とした トレーニングが姿勢制御機構に及ぼす影響

熊本大学大学院 小林雄志

Effect of Explosive-type Strength Training of Planter Flexors on Postural Stability

by

Yuji Kobayashi

*Graduate School of Instructional Systems,
Kumamoto University*

ABSTRACT

This study aimed to investigate the effect of explosive-type strength training of plantar flexors on muscle strength and postural stability. Participants were 22 healthy older adults divided into two groups: the training group ($n = 12$) and the control group ($n = 10$). Participants in the training group underwent explosive-type strength training for 4 weeks (2 days per week). Training consisted of 3 sets of 10 repetitions of explosive plantar flexion lasting less than 1 s. In the pre- and post-training phases (PRE and POST, respectively), we measured plantar flexor muscle thickness using ultrasonography. We also measured the maximum voluntary torque (MVT) during maximum voluntary isometric plantar flexion and rate of torque development (RTD) during explosive isometric plantar flexion lasting less than 1 s; the duration of single-leg standing; and the Center of Pressure (CoP) sway during single-leg standing. In the training group, MVT and RTD in POST significantly increased compared with those in PRE ($p < 0.05$). However, plantar flexor muscle thickness did not change. The duration of single-leg standing in POST was significantly longer compared with that in PRE ($p < 0.05$). In addition, the area of CoP sway during single-leg standing was

significantly decreased in POST ($p < 0.05$). These findings suggest that explosive-type strength training increases MVT and RTD, which may contribute to improvement of postural stability.

要 旨

本研究では、足関節底屈筋群の瞬発的な筋力発揮能力向上を目的としたトレーニングが、筋力および姿勢制御機構に及ぼす影響について明らかにすること目的とした。健康な高齢者22名をトレーニング群12名、コントロール群10名へと群分けした後、トレーニング群に対して足関節底屈における瞬発的な筋力発揮能力の向上を目的としたトレーニングを4週間、週2回の頻度で実施した。また、トレーニング期間の前後において最大筋力測定、瞬発的筋力測定、姿勢制御能力測定および下腿後面における筋厚の測定を行った。その結果、トレーニング群ではトレーニング期間終了後、下腿後面における筋厚の変化は認められなかったものの最大筋力および瞬発的筋力の向上が認められた。姿勢制御能力については、開眼片脚立位における持続時間が増加するとともに、足圧中心動揺の外周面積および矩形面積が減少した。これらの結果より、同様のトレーニングは最大筋力および瞬発的筋力を向上させるとともに、姿勢制御能力の改善に寄与する可能性があることが示唆された。

緒 言

高齢者の転倒は骨折等の外傷を引き起こす可能性があり¹⁾、特に大腿骨頸部骨折のような重度の骨折となれば、その後寝たきりになる等のQuality of Life (QOL) の低下をもたらすことも考えられる。転倒に対する危険因子に関して、筋力の低下と転倒の関連性が高いことが示唆されているが¹⁾、筋力の中でも特に瞬発的な筋力発揮能

力は姿勢外乱に対するバランスの回復に必要であり²⁾、若年者に比べて高齢者の瞬発的な筋力発揮能力は低く²⁻⁴⁾、高齢者においては転倒経験者の瞬発的な筋力発揮能力は転倒未経験者に比べて低いとの報告もある⁵⁻⁷⁾。したがって、高齢者に対し筋力トレーニングを実施することにより瞬発的な筋力発揮能力を向上させれば、転倒のリスクを減少させられる可能性がある。また、そのようなトレーニングが転倒予防に効果があるとするれば、姿勢制御機構に何らかの影響を及ぼすものと考えられる。しかしながら、こうしたトレーニングが姿勢制御機構に及ぼす影響については不明である。

瞬発的な筋力発揮能力の向上を目的とした筋力トレーニングを実施した先行研究^{8,9)}では、比較的短期間(4週間~6週間)で最大筋力や瞬発的な筋力発揮能力の向上が認められている。しかしながら、これらの結果は膝関節伸展筋力に関するものであり、姿勢の動揺を修正する際に重要とされる足関節底屈筋力^{10,11)}に関するトレーニングについても同様の効果が認められるかについては明らかでない。

そこで本研究では、足関節底屈における瞬発的な筋力発揮能力の向上を目的とした短期トレーニングが、筋力および姿勢制御機構に及ぼす影響について明らかにすること目的とした。

1. 方 法

1. 1 対 象

健康な高齢者22名(年齢 74.1 ± 6.8 歳、身長 156.9 ± 8.2 cm、体重 55.2 ± 9.2 kg)を対象とし、トレーニング群12名(年齢 75.3 ± 8.0 歳、身長

155.4±8.2cm, 体重 52.0±8.2kg), コントロール群 10 名 (年齢 72.7±4.9 歳, 身長 158.7±8.1cm, 体重 59.1±9.3kg) へと群分けを行った. 研究の実施に際して, 対象者に対して口頭と文書により十分な説明を行い, 実験開始までに“研究参加への同意書”への署名により参加の同意を得られた個人のみを対象とした. 本研究は芝浦工業大学生命工学研究倫理審査委員会の承認を受けて実施された.

1. 2 実験の手順

トレーニング群の被検者に対して, 週 2 回の頻度で 4 週間の筋力トレーニングを実施し, トレーニング期間の前後において最大筋力測定, 瞬発的筋力測定, 姿勢制御能力測定および下腿後面における筋厚の測定を行った (Pre および Post 測定). また, コントロール群の被検者に対しても, 同様の測定を実施した後, その後の日常生活について運動習慣や生活習慣を変えないで過ごすように指示し, 4 週間後に再度同様の測定を行った.

1. 3 トレーニング内容

トレーニングはトルクメータ (TD200, Kubota) を設置した特注の等尺性筋力測定機器を用いて実施した (図 1). 姿勢については足関節角度を 0 度 (解剖学的正位), 膝関節角度を 0 度 (完全伸

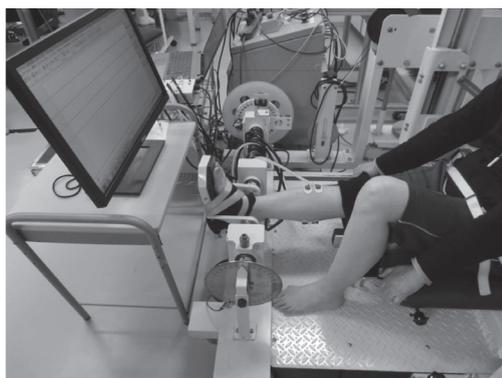


図 1 Custom-made dynamometer for the measurement of isometric plantar flexion torque

展位), 股関節角度を 90 度とした. 1 回のトレーニングについては, 1 秒以内の足関節底屈を 5 秒ごと 10 回行う運動を 1 セットとし, これを 1 分間の休息を挟んで 3 セット実施するものとした. 各試技において計測されたトルクは A/D 変換器 (PL3516, ADInstruments) を介して, サンプリング周波数 1000Hz にてパーソナルコンピュータ (PC) に取り込んだ. また, 発揮されるトルク-時間曲線を PC の画面上にリアルタイムに表示することによって視覚的にフィードバックし, 単位時間あたりの発揮トルクの立ち上がり (Rate of Torque Development: RTD) が最大になるように毎回努力させた.

1. 4 Pre および Post 測定の内容

1. 4. 1 最大筋力測定

被検者に十分なウォーミングアップを行わせたのちに, トレーニングと同様の筋力測定機器を用いて等尺性足関節底屈運動を全力で 3 秒間行わせた. 試技は 3 回実施し, その中で計測されたピーク値で最大のものを最大随意トルク (Maximal Voluntary Torque: MVT) として分析に用いた. また, 表面筋電図の測定における測定値の標準化のために, 3 秒間の全力での等尺性足関節背屈運動についても実施した.

1. 4. 2 瞬発的筋力測定

トレーニングと同様に, 1 秒以内の等尺性足関節底屈運動を RTD が最大になるように指示して 3 回行わせ, そのときに発揮されるトルクを計測した. 算出項目はトルク発揮開始から 50 ミリ秒, 100 ミリ秒, 150 ミリ秒, 200 ミリ秒経過時点での発揮トルクおよび最大 RTD (MRTD) とした. 3 回の試技のうち, MRTD が最も高い値の試技を分析に用いた.

1. 4. 3 筋活動の計測

最大筋力測定および瞬発的筋力測定の際に, 多チャンネル増幅器 (MEG-6108M, 日本光電) を

用いて下腿の各筋（腓腹筋内側頭，腓腹筋外側頭，ヒラメ筋，前脛骨筋）における表面筋電図（surface electromyography: sEMG）を計測した。計測された信号は発揮トルクと同様に A/D 変換器を介して，サンプリング周波数 1000Hz にて PC に取り込んだ。瞬発的筋力測定における腓腹筋内側頭，腓腹筋外側頭，ヒラメ筋の sEMG について，筋活動の開始を 0 秒として 0 秒から 50 ミリ秒，50 ミリ秒から 100 ミリ秒，100 ミリ秒から 150 ミリ秒，150 ミリ秒から 200 ミリ秒における実効値（Root Mean Square: RMS）を算出して等尺性足関節底屈運動における最大筋力測定時の RMS で標準化した後，3 つの筋の平均値を算出し，これらを足関節底屈運動における主働筋群の筋活動量の指標とした（EMG₀₋₅₀，EMG₅₀₋₁₀₀，EMG₁₀₀₋₁₅₀，EMG₁₅₀₋₂₀₀）。また，前脛骨筋の EMG 波形についても同様の処理にて，等尺性足関節背屈運動における最大筋力測定時の RMS で標準化した RMS を算出した。更に，主働筋群の筋活動の開始からトルク発揮の開始までの時間差（Electromechanical delay: EMD）についても算出を行った。

1. 4. 4 姿勢制御能力測定

被検者に開眼片脚での静止立位を足圧中心軌跡測定器（T.K.K.5810，竹井機器）上で行わせ，持続時間および足圧中心の軌跡（足圧中心動揺）を計測した。試技は 120 秒を上限とし，上限を超えなかった場合のみ 2 セット目を実施した。試技中の足圧中心動揺について，開始 5 秒後から 25 秒

後までの 20 秒間を分析対象とし，足圧中心動揺に関する各種パラメータ（総軌跡長，単位軌跡長，外周面積，矩形面積）を算出した。2 セット実施した場合は持続時間の長い試技における測定値を分析に用いた。なお，持続時間が 30 秒以下の被検者に関しては分析の対象外とした。

1. 4. 5 筋厚の計測

超音波画像診断装置（ACUSON S2000，SIEMENS）を用いて，下腿後面の近位 30% 位置における筋厚を計測した。計測は 2 回実施し，2 回の平均値を分析に用いた。

1. 5 統計

各測定項目について二元配置の分散分析（群 × 時間）を行い，交互作用が確認された項目については事後検定を行った。すべての検定において P<0.05 を有意水準とした。

2. 結果

2. 1 最大筋力および瞬発的筋力

最大筋力測定および瞬発的筋力測定における発揮トルクの計測結果を表 1 に示す。MVT に関して，コントロール群では Pre と Post の間に有意な差は認められなかったが，トレーニング群では Pre と比較して Post で有意に高い値を示した（P<0.05）。また，瞬発的筋力測定において，トルク発揮開始から 50 ミリ秒，100 ミリ秒経過時点での発揮トルクはトレーニング群とコントロール群ともに Pre と Post の間に有意な差は認められ

表 1 Absolute torque during explosive or maximal voluntary contraction

	Training group				Control group			
	Pre		Post		Pre		Post	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
MVT (Nm)	49.5	23.3	66.0 *	27.9	62.5	22.4	69.2	26.6
Torque at 50 ms (Nm)	5.0	2.3	5.0	2.1	4.3	2.4	3.8	1.6
Torque at 100 ms (Nm)	11.4	5.5	15.9	7.6	14.0	10.9	12.3	5.4
Torque at 150 ms (Nm)	19.2	8.8	29.3 *	13.5	25.2	18.3	24.9	12.6
Torque at 200 ms (Nm)	26.6	12.3	39.9 *	16.6	33.0	19.2	33.8	15.2
MRTD (Nm/s)	203.8	109.1	303.5 *	133.0	287.4	180.8	293.5	186.3

Pre- to posttraining differences: *P<0.05

表2 Root mean square of agonist sEMG signal and electromechanical delay during explosive isometric contraction

	Training group				Control group			
	Pre		Post		Pre		Post	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
EMG ₀₋₅₀ (%)	58.2	22.8	58.6	27.3	56.3	21.9	53.0	24.4
EMG ₅₀₋₁₀₀ (%)	92.2	34.8	103.5	27.3	97.2	38.1	93.4	51.6
EMG ₁₀₀₋₁₅₀ (%)	97.8	38.2	107.1	29.8	106.2	50.3	109.1	45.0
EMG ₁₅₀₋₂₀₀ (%)	103.6	35.7	110.7	16.2	109.0	37.6	107.0	52.6
EMD (ms)	62	26	49	22	57	19	66	21

表3 Duration and CoP sway characteristics of single-leg standing

	Training group				Control group			
	Pre		Post		Pre		Post	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Duration of single-leg standing (s)	64	47	80 *	45	58	45	64	52
Total locus length of CoP sway (mm)	432	199	412	125	361	139	374	91
Mean velocity of CoP sway (mm/s)	22	10	21	6	18	7	19	5
Total area of CoP sway (mm ²)	454	138	392 *	117	354	147	394	107
Rectangular area of CoP sway (mm ²)	822	236	641 *	196	588	227	608	140

Pre- to posttraining differences: *P<0.05

なかったが、150ミリ秒、200ミリ秒経過時点での発揮トルクおよびMRTDについてはトレーニング群において、Preと比較してPostで有意に高い値を示した (P<0.05)。

2.2 瞬発的筋力測定時の筋活動

瞬発的筋力測定における主動筋群の筋活動に関する結果を表2に示す。すべての測定項目に関して、トレーニング群とコントロール群ともにPreとPostの間に有意な差は認められなかった。また前脛骨筋の筋活動についても、トレーニング群とコントロール群ともにPreとPostの間に有意な差は認められなかった。

2.3 姿勢制御能力

姿勢制御能力測定の結果を表3に示す。片脚開眼立位の持続時間に関して、トレーニング群においてはPreと比較してPostで有意に増加したが (P<0.05)、コントロール群においてはPreとPostの間に有意な差は認められなかった。

足圧中心動揺における総軌跡長および単位軌跡長については、トレーニング群とコントロール群ともにPreとPostの間に有意な差は認められな

かった。しかしながら、外周面積および矩形面積についてはトレーニング群において、Preと比較してPostで有意に減少した (P<0.05)。

2.4 筋厚

下腿後面における筋厚について、トレーニング群 (Pre: 56.6±7.9mm, Post: 58.9±4.1mm) およびコントロール群 (Pre: 63.2±5.1mm, Post: 63.7±4.3mm) とともにPreとPostの間で有意な差は認められなかった。

3. 考察

3.1 最大筋力および瞬発的筋力の変化

本研究では足関節底屈運動における瞬発的な筋力発揮能力の向上を目的としたトレーニングを4週間、週2回実施した結果、最大筋力測定においてMVTの向上が認められた。また、瞬発的筋力測定において、トルク発揮開始から150ミリ秒、200ミリ秒経過時点での発揮トルクおよびMRTDの向上も認められた。同様のトレーニングを膝関節伸展運動にて実施した先行研究^{8,9)}でも、最大筋力や瞬発的筋力の向上が認められているが、こうしたトレーニングは足関節底屈運動に関して

も有効であることが明らかとなった。また、本研究におけるトレーニング量やトレーニング頻度は、Tillinら⁸⁾の先行研究よりも少なかったにも関わらずMVTやMRTDの向上が認められたが、本研究に用いた被検者や対象とした筋群にとっては、これらのトレーニング効果をもたらすのに十分なトレーニング量やトレーニング頻度であったものと考えられる。一方でTillinら⁸⁾の先行研究と異なり、瞬発的筋力測定において、トルク発揮開始から50ミリ秒や100ミリ秒時点における発揮トルクの向上は認められなかった。発揮トルクにおける初期と後期のRTDの適応は異なるとの報告^{12,13)}もあることから、本研究で用いたトレーニング内容は、特に発揮トルクにおける後期に効果をもたらすものであったと考えられる。

3. 2 主働筋群の筋活動への影響

瞬発的筋力の測定において、トレーニング群ではMVTやMRTDが増加したにも関わらずsEMGの各算出項目についてはトレーニング前後で変化が認められなかった。一方でトレーニング後において筋厚が増加してないことから、このMVTの増加は、筋力発揮時に動員される運動単位の増加や発火頻度の増加といったいわゆる「神経系の適応」^{14,15)}によって生じたものと推察される。すなわち、最大筋力測定時の主働筋における筋活動量はトレーニング前に比べトレーニング後で増加していた可能性が考えられるが、本研究ではこの最大筋力測定時のsEMGによって瞬発的筋力測定時のsEMGを標準化しているため、実際には瞬発的筋力測定における筋活動量もトレーニング前に比べ増加していた可能性がある。しかしながら、これらを検証するためには電気刺激時の最大M波による標準化^{8,16,17)}の実施等が必要となる。

3. 3 姿勢制御能力の変化について

トレーニング群においてはトレーニング実施後に開眼片脚立位の持続時間が増加し、足圧中心動揺に関しては総軌跡長や単位軌跡長に変化はみられなかったものの、外周面積と矩形面積の減少が認められた。これらの結果は、開眼片脚立位における足圧中心の移動の「長さ」については変化が認められないものの、その移動する「面積（範囲）」を小さくすることが可能になったものと解釈できる。また、これらの変化とともに最大筋力や瞬発的筋力も向上していることから、こうした筋力の向上が動揺を安定させるのに寄与した結果、持続時間が向上したものと推察される。

3. 4 今後の課題

本研究では筋力トレーニングのみを実施したが、転倒予防のための運動プログラムを考えた場合、バランストレーニングを組み合わせる¹⁸⁾ことが想定されるため、そうした場合の効果についても明らかにしていく必要がある。また、本研究で用いたトレーニングは短期間でその効果が期待できるものの、同様のトレーニングを6週間、週3回の頻度で実施した研究⁹⁾では、トレーニングによって向上した瞬発的筋力がその後の3週間のデイトレーニングによって減少し、トレーニング前の状態との差が認められなくなるとの報告がされていることから、筋力や姿勢制御能力に対するトレーニングの残存効果や、トレーニング効果の維持に必要なトレーニングの頻度などに関する検討も今後必要となってくるであろう。

結 論

健常な高齢者を対象に、足関節底屈における瞬発的な筋力発揮能力の向上を目的としたトレーニングを4週間、週2回の頻度で実施した。その結果、トレーニング期間終了後において最大筋力および瞬発的筋力の向上が認められた。さらに、開眼片

脚立位における持続時間が増加するとともに、足圧中心動揺の外周面積および矩形面積が減少した。これらの結果より、同様のトレーニングは最大筋力および瞬発的筋力を向上させるとともに、姿勢制御能力の改善に寄与する可能性があることが示唆された。

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。さらに、研究の遂行にあたり多大なご助力を頂いた芝浦工業大学の赤木亮太先生、上安悠太氏ならびに赤木研究室の方々に深く感謝いたします。

文 献

- 1) American Geriatrics Society, British Geriatrics Society, and American Academy of Orthopaedic Surgeons Panel on Falls Prevention, Guideline for the prevention of falls in older persons., *J. Am. Geriatr. Soc.*, **49**(5) : 664-72(2001)
- 2) Thelen D.G., Schultz A.B., Alexander N.B., Ashton-Miller J.A., Effects of age on rapid ankle torque development., *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.*, **51**(5) : M226-232(1996)
- 3) Lanza I.R., Towse T.F., Caldwell G.E., Wigmore D.M., Kent-Braun J.A., Effects of age on human muscle torque, velocity, and power in two muscle groups., *J. Appl. Physiol.*, **95**(6) : 2361-2369(2003)
- 4) Thompson B.J., Ryan E.D., Herda T.J., Costa P.B., Herda A.A., Cramer J.T., Age-related changes in the rate of muscle activation and rapid force characteristics., *AGE*, **36**(2) : 839-849(2014)
- 5) Skelton, D.A., Kennedy, J., Rutherford, O.M., Explosive power and asymmetry in leg muscle function in frequent fallers and non-fallers aged over 65., *Age Ageing*, **31**(2) : 119-125(2002)
- 6) Perry M.C., Carville S.F., Smith I.C., Rutherford O.M., Newham D.J., Strength, power output and symmetry of leg muscles: effect of age and history of falling. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **100**(5) : 553-561(2007)
- 7) Bento P.C., Pereira G., Ugrinowitsch C., Rodacki A.L., Peak torque and rate of torque development in elderly with and without fall history., *Clin. Biomech.*, **25**(5) : 450-454(2010)
- 8) Tillin N.A., Pain M.T., Folland J.P., Short-term training for explosive strength causes neural and mechanical adaptations., *Exp. Physiol.*, **97**(5) : 630-641(2012)
- 9) Kobayashi Y., Hirayama K., Matsubayashi T., Akagi R., Effect of explosive-type strength training and short-term detraining on rate of torque development during isometric knee extension., *Br. J. Sports. Med.*, **47**(17) : e4(2013)
- 10) Horak F.B., Nashner L.M., Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations., *J. Neurophysiol.*, **55**(6) : 1369-1381(1986)
- 11) Gu M.J., Schultz A.B., Shepard N.T., Alexander N.B., Postural control in young and elderly adults when stance is perturbed: dynamics., *J. Biomech.*, **29**(3) : 319-329(1996)
- 12) Andersen L.L., Andersen J.L., Zebis M.K., Aagaard P., Early and late rate of force development: differential adaptive responses to resistance training? *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, **20**(1) : e162-169(2010)
- 13) de Oliveira F.B., Rizzato G.F., Denadai B.S., Are early and late rate of force development differently influenced by fast-velocity resistance training? *Clin. Physiol. Funct. Imaging*, **33**(4) : 282-287(2013)
- 14) Folland J.P., Williams A.G., The adaptations to strength training: morphological and neurological contributions to increased strength., *Sports Med.*, **37**(2) : 145-68(2007)
- 15) Gabriel D.A., Kamen G, Frost G., Neural adaptations to resistive exercise: mechanisms and recommendations for training practices., *Sports Med.*, **36**(2) : 133-49(2006)
- 16) Geertsen S.S., Lundbye-Jensen J., Nielsen J.B.. Increased central facilitation of antagonist reciprocal inhibition at the onset of dorsiflexion following explosive strength training., *J. Appl. Physiol.*, **105**(3) : 915-922(2008)
- 17) Jenkins N.D., Buckner S.L., Cochrane K.C., Bergstrom H.C., Palmer T.B., Johnson G.O., Schmidt R.J., Housh T.J., Cramer J.T., Age-related differences in rates of torque development and rise in EMG are eliminated by normalization., *Exp.*

Gerontol., 57:18-28.

- 18) Clemson L., Fiatarone Singh M.A., Bundy A.,
Cumming R.G., Manollaras K., O'Loughlin P.,
Black D., Integration of balance and strength

training into daily life activity to reduce rate of
falls in older people (the LiFE study): randomised
parallel trial., *BMJ.*, 345:e4547 (2012)

皮膚バリア保護的に働く弱酸性ポリエステルを利用した 化繊アレルギー原因物質の解明

高知大学 弘田量二
(共同研究者) 大妻女子大学 宇梶百恵

Investigation of Causes of Clothing Dermatitis - Absorption Test using Weak-Acidic Polyethylene Terephthalate and PET

by

Ryoji Hirota
Kochi Medical School
Momoe Ukaji
Otsuma Women's University

ABSTRACT

Polyethylene terephthalate (PET) fabrics are frequently used in human clothes but are irritant in direct contact with the skin. Although sportswear made of weak-acidic PET fabrics did not induced skin eczema on irritant contact dermatitis (ICD) patient, this mechanism was not clear. We performed the patch test using both fabrics in 56 medical students from Kochi University in order to determine whether the skin condition was related to clothing. And we also demonstrated the metal absorption test of synthetic sweat using an inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). In addition we demonstrated a protein analysis of sweat from participant using a SDS polyacrylamide gel electrophoresis (PAGE). Thirteen of participants have developed contact dermatitis at the time of this study. There was positive correlation between positive participants of patch test and participants who had past history of clothing dermatitis. We applied synthetic sweat on each fabric and metals were measured. Pb, Cu, Al were strongly absorbed by both fabric, but remaining 7 metals were not

absorbed. After absorption to fabrics, proteins in sweat were separated by SDS-PAGE, but there were no difference in the gel at this time.

要 旨

本研究では、化繊を着用した際にかゆみやただれといった症状を呈する接触性皮膚炎の原因を明らかにするために、医学科学生にアンケート調査およびパッチテストを行った。また皮膚障害を起こしにくい化繊として開発した新素材繊維がかゆみを抑えるメカニズムを明らかにするために人工汗の ICP-MS による金属成分の吸収試験を行った。さらに、吸収試験後の汗に含まれる蛋白の SDS-PAGE 分析を行った。パッチテストでは 56 名中 13 名 (23.2%) で陽性と回答があり化繊による皮膚障害既往歴と有意に関連が認められた ($p=0.024$)。人工汗を作製し弱酸性ポリエステルと従来品の元素吸収の違いを ICP-MS で検討したところ、両ポリエステル共に Pb や Cu, Al の金属元素は強く吸収されることがわかった。しかしながら従来品の方が吸着性能が高かった。さらに汗の吸収試験を行い、両ポリエステルにおける蛋白吸着の違いを検討したが、両群のバンドに大きな違いは認められなかった。

緒 言

20 世紀後半から 21 世紀にかけての科学技術の進歩はめざましく、我々の着衣素材は綿やシルクといった天然素材からデザイン性、吸湿性、加工性に優れ、なおかつ大量生産に向くポリエステル繊維が主流になってきた。街行く女性達は華々しくおしゃれを楽しみ、ビジネスマンは颯爽とスーツを着こなす。スポーツ選手においては、ウェアのおかげで記録向上にもつながった。しかしながら、科学技術の進歩は負の一面をあらわしはじめ、化学繊維着用によるかゆみや赤み、さらにひ

どい場合には、ただれといった生活の質 (QOL) を下げる皮膚疾患 (いわゆる化繊アレルギー) の予防や対策に我々は向かい合わねばならなくなった。

前回報告¹⁾したように、化繊アレルギーは化学繊維着用による皮膚との摩擦や静電気による角質層の破壊 (物理的要因) の場合や、発汗後に表皮に残った蛋白質・脂質・金属が外界の影響 (酸化や細菌繁殖など) で変質し、刺激物になって起こる場合 (化学的要因) とが想定されている。通常のケースでは化学繊維着用をやめることでかゆみや赤みなどの症状は治まるが、時には、これらの刺激が我々体内の免疫システムに記憶され、次回以降の着衣によりすぐにアレルギー症状を呈することもある (接触性アレルギー)。化学繊維過敏者は、外的因子を経皮吸収しやすく花粉症の併発が起こりやすいという報告^{2,3)}もあることから、化学繊維を避けることが望ましい。特に、表皮構造が弱い弱でアレルギー感受性の高い未就学児において避けるべきである。

しかしながら、化学繊維は、幼稚園、中学高校の制服、運動部などのユニフォームにほぼ 100% 使われている素材であり、化繊アレルギー患者のみが他の生徒やメンバーとは別な素材・デザインの衣服を着用することは、周囲から奇異の目で見られる。しかも、化繊アレルギーの実態がよく知られていないことも有り理解が得られないので化学繊維を避けることは困難である。

前回のアンケートによる検討では、障害を経験した被験者 (93 名) に、その原因となる素材に関して質問したところ、羊毛 48.2%、ポリエステル 47.3%、ナイロン 30.7%、麻 16.7%、綿 7.0% (複数回答可) と実に 60% を超える学生がかゆみを

経験し、しかも25%の学生は皮膚の赤みを経験していた。さらに10%の学生は化繊が原因でかぶれも経験していた。このため、化繊アレルギーは非常に高い頻度で存在すると考えられた¹⁾。

このため著者らは、アンケート方式による化繊アレルギー既往歴調査と化繊を用いたパッチテストを実施し、物理刺激と化学刺激の両方を皮膚に伝えることができるパッチテストを行うことで、化学繊維過敏者の精密な頻度調査を行った。さらに、弱酸性ポリエステル¹⁾の化学繊維過敏者への負担が少ないメカニズムを明らかにするために元素吸着や蛋白吸着についても検討した。

1. 方法

1.1 対象

高知大学医学科に在学中の4年生111名を対象にアンケート調査およびパッチテストを行った(実施時期:平成26年10月)(回答者56名,回収率50.5%)。

1.2 アンケート調査内容

衣類の素材による皮膚障害の有無について、アンケート調査を行った。

1.3 パッチテスト

被験者にはパッチテストの素材がわからないよう全く同一の縫製を施した、帯状(幅10センチメートル)の弱酸性ポリエステル(WAP, 青色)と従来品ポリエステル(REG, 黄色)を右上腕には青色, 左上腕には黄色のポリエステルを装着してもらった。上腕の直径に合わせて帯の両端は結んで結び目が外側で、布が広がる部分が腕の内側に来るようにして、上腕部からずれないように固定した。装着は午後7時~翌朝まで実施した。もし、症状が強い場合には、試験中止までの装着時間と症状を記述することとした。本研究は、高知大学医学部倫理審査委員会の承認を経て実施した。

1.4 汗の採取

被験者からの汗の採取は被験者を25℃湿度60%に設定した人工気象室で2時間エアロバイク運動をしてもらい、プラスチック製へらで、衣服に接していない被験者の背中から汗を掻き取り、プラスチック製容器に移し(0.5~1ml)、マイナス20℃で解析まで凍結保存した。

1.5 人工汗の調整

10元素の混合溶液(Al, B, Cd, Cr, Cu, Fe, Mo, Mn, Na, Ni, Pb, Zn 各100ppm 1mol/l HNO₃溶液)をミリQ水で希釈し, 1ppm (pH5.4), 0.1ppm (pH5.4)の2種類を作製し人工汗溶液とした。

1.6 ポリエステル繊維への元素吸収試験

WAP, REGを0.02グラムに切断(約1cm角)した(対照はNo textile)。次に、人工汗または汗(対照はミリQ水)を0.1ml滴下し0分(すぐ), 10分, 30分放置した。放置後1.9mlミリQ水を加え1分攪拌ののち繊維を取り去り(No textile群は液量合わせのため0.1mlを除外した), 1.9mlサンプル溶液組成(6%硝酸・3%酢酸・1ppm Terbium)を添加した。

1.7 ICP-MS分析

サンプル溶液は、ICP-MS 7700x(アジレントテクノロジー製)のオートサンプラーにセットし、アルゴンガス, ノーガスモードにて計測した。No textileを1として、時間経過に伴う、10元素の繊維の吸収状態をグラフ化した。データは、平均値±SDで示した。

1.8 SDSポリアクリルアミド(SDS-PAGE)解析

汗を0.1ml繊維に滴下後30分放置した。次に0.1mlのミリQ水を滴下し1分間攪拌ののち溶液

を回収した (0.1 ml). 3×Loading 溶液を 0.2 ml 加え 100℃ 3分ボイル後, 5-20% SDS アクリルアミドゲル (e パジエル 5-20%, ATTO) で蛋白を分離し, バンドは銀染色 (銀染色 II キットワコー, 和光純薬) を行って可視化した.

1. 9 統計解析

統計解析には, SPSS ver.20 を用い, アンケート・パッチテスト調査の統計解析は, Fisher's exact test, マクネマー検定, ICP-MS 元素分析の解析には, multiple analysis of variance (MANOVA) を使用した. p 値 0.05 以下で有意差ありと判定した.

2. 結果

アンケート調査結果

2. 1 衣服による皮膚障害の経験の有無

衣服による皮膚障害の経験については, かゆみ 33.3%, ちくちく 45.2%, かぶれ (ただれ) 8.6%, 赤み 12.9% の被験者で経験していた (複数回答) (図 2).

2. 2 パッチテスト陽性率

56 名のパッチテストにおいて, かゆみもしくは, 発赤, ただれが生じた被験者は, 両方の繊維で症状あり 7 名 (12.5%), REG のみ症状有り 5 名 (8.9%), WAP のみ症状有り 1 名 (1.8%), 症状無し 43 名 (76.8%) であった (図 1).

2. 3 既往歴とパッチテストの関連

アンケートによる化学繊維過敏の既往歴とパッチテストの関連を検定した (表 1). 既往歴があると回答した 42 名のうちパッチテスト陽性であった被験者は 13 名 (31.0%), 一方, 既往歴無しの被験者 14 名におけるパッチテスト陽性者は 0 名で統計的に有意な差が認められた (Fisher's exact test $p=0.024$).

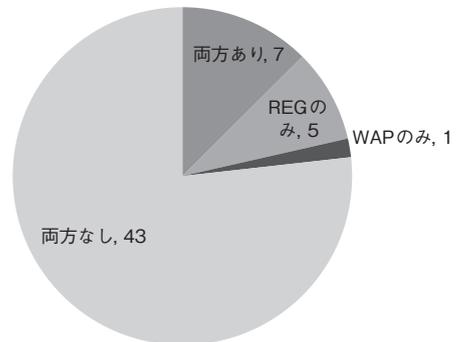


図 1 パッチテストの結果

表 1 衣服症状の既往とパッチテスト症状

	パッチテスト 症状あり	なし	合計
衣服既往あり	13	29	42
なし	0	14	14
合計	13	43	56

$p=0.02451$ (Fisher's exact test)

2. 4 REG と WAP のパッチテスト

REG 陽性者と WAP 陽性者の頻度に差があるかどうか, マクネマー検定を行った. その結果, p 値 0.2207 となり, 有意な差は認められなかった (表 2).

表 2 WAP と REG パッチテストの比較

	REG 症状あり	REG 症状なし	合計
WAP 症状あり	7	1	8
WAP 症状なし	5	43	48
合計	12	44	56

$p=0.2207$ (マクネマー検定)

2. 5 ポリエステル繊維への元素吸収条件

REG と WAP に対して, 人工汗 0.1ppm と 1ppm, 0, 10, 30 分吸収させた場合の, ポリエステル繊維から溶出された元素を ICP-MS で測定した. 大部分の元素において, 濃度 0.1ppm, 吸収時間 30 分の場合において最大の吸収が認められた. このため, 吸収率の算定はこの条件に従った. 典型例として図 2 に, Al, Cr, Cu, Pb を表した.

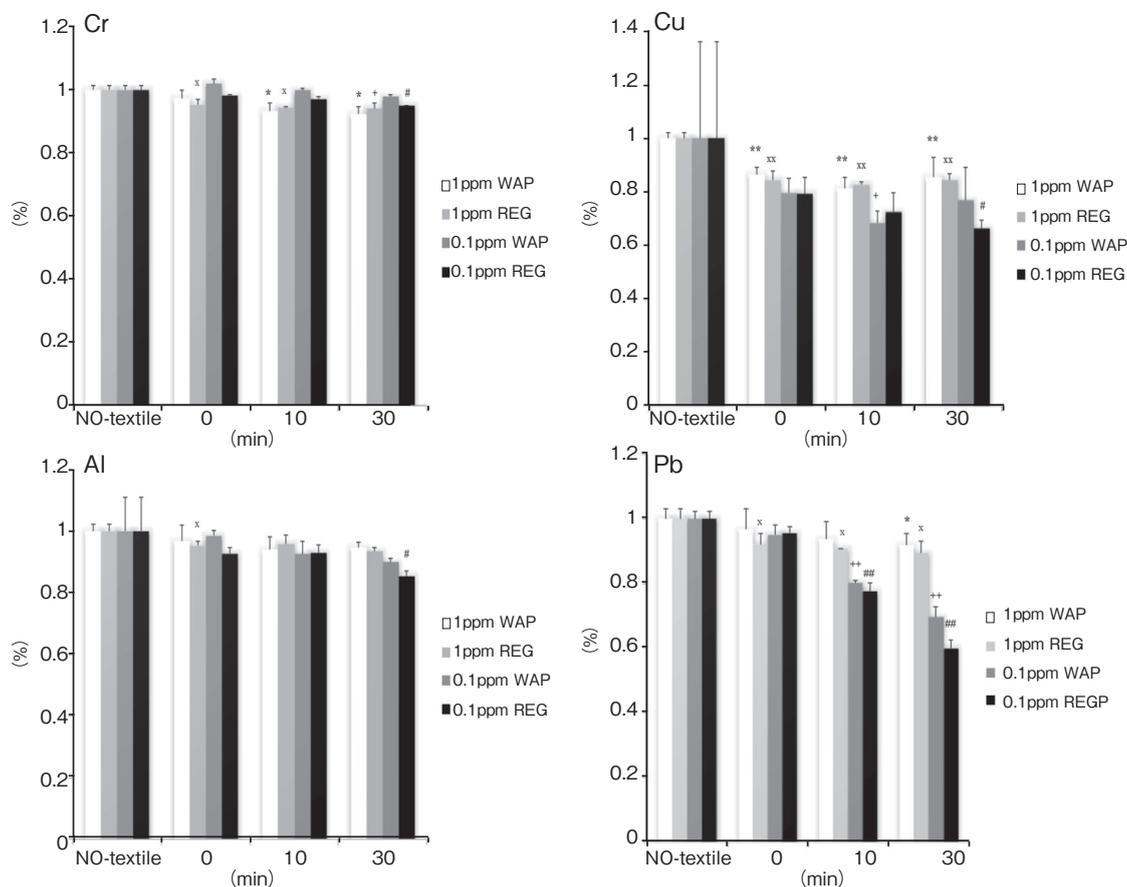


図2 WAPとREGの元素吸収率の比較
 *, x, +, # : p < 0.05, **, xx, ++, ## ; p < 0.01 vs. NO-textile

2. 6 ポリエステル繊維の元素吸収率

REGとWAPに対してAl, B, Cd, Cr, Cu, Fe, Mo, Mn, Na, Ni, Pb, Zn混合液(各0.1ppm)を30分間吸収させた後、超純水で溶出させた際の各元素のカウントを、繊維なしと比較した(表3)。吸収率は、Pb, Cr, Cuが高く、Na, Mn,

表3 ポリエステル繊維の元素吸収率

元素	吸収率 (%)	
	WAP	REG
Na	-1%	2%
Al	10%	15%
Cr	23%	5%
Mn	-25%	-19%
Fe	-9%	1%
Ni	-5%	-2%
Cu	23%	34%
Zn	6%	9%
Cd	0%	3%
Pb	30%	40%
平均	5%	9%

Feは、吸収が認められなかった。

2. 7 被験者の汗の蛋白質分析

被験者1人から3日連続で汗を採取し(Sample1, Sample2, Sample3), そのまま(生汗), WAPから溶出, REGから溶出の3群につき, SDS-PAGE電気泳動を行い, 銀染色にて蛋白のバンドを検出させた。50KDa付近にSample1 Sample2では強く染色されるバンドが認められた。しかしながら, 生汗, WAP, REGに明瞭なバンドの差は認められなかった(図3)。

3. 考察

我々は, 化学繊維による皮膚障害(化繊アレルギー)の頻度を明らかにする目的で, ポリエステ

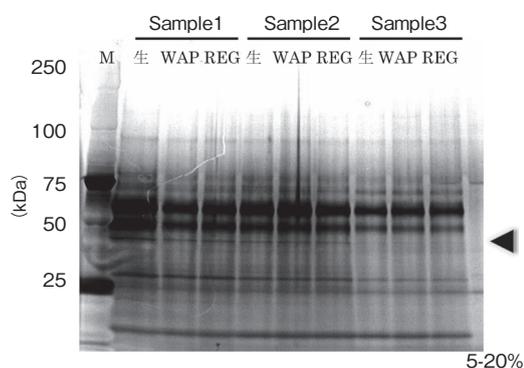


図3 被験者の汗の蛋白質分析

ル繊維によるパッチテストを行った。通常のパッチテストでは疑わしい物質を上腕の内側や背中の外見上正常な場所に48時間貼付後、紅斑、浸潤、丘疹の有無を判定する⁴⁾。しかしながら、我々のプレテストでは、この方法ではほとんど陽性者がでないことが判明している⁵⁾。我々はその理由として化繊アレルギーの発症は汗や細菌繁殖といった刺激の他に、繊維による皮膚への物理的な摩擦が必要であると考えている。従って、今回のパッチテストでは筒状に縫製したポリエステル繊維を上腕部に弛みができるようにし（つまり袖口のみ縫製し）、被験者に最長12時間装着してもらうことで実施した。その結果、23%の被験者（56名中13名）でかゆみなどの軽度な症状が認められた。また、このパッチテストの結果は、化繊アレルギーの既往歴と有意に関連性が認められた（ $p=0.0245$ ）。

Mizutani et al は、繊維表面にリンゴ酸を付加した弱酸性ポリエステルを着用することで、化繊アレルギーが劇的に改善した症例を報告している⁶⁾。今回のパッチテストでは、従来品のポリエステル（中性）と全く肌触りが同一で、摩擦皮膚との被験者からは見分けがつかない弱酸性ポリエステルを用いたが、従来品と弱酸性の間に皮膚障害の頻度に差は認められなかった。本研究のリミテーションとして、被験者数が56名と少ないことや両方で症状ありとした症例が過半数（7名

vs. 6名）を占めており、パッチテストのやり方に改良の余地があると考えられた。

さらに今回の検討では、本弱酸性ポリエステルと全くそのような加工がされていない従来品の間には、吸着元素の種類に違いがあり着用時の汗の元素を吸着し、皮膚障害を引き起こしにくくしていると仮説を立て、10種類の元素を含む溶液（人工汗）を作製し吸収試験を行った。汗と繊維の吸収時間を最適化するために最大30分両者を吸収させた。その結果、PbやCu、Alの金属元素は強く吸収されることがわかった。金属アレルギーの原因として知られているCr、Niについては、Crでは繊維への吸収が認められたものの、Niについては、吸収が認められなかった。WEPとREGの比較では、Crの場合を除いた9種類の元素においてREGの方が吸収率が高かった。しかしながら元素の吸収のしやすさが、特に金属や遷移に多いといった傾向は認められなかった。

Dai et al.⁷⁾ は、健常者の汗を表皮細胞に添加するとインターロイキン-1やインターロイキン-31、転写因子NF- κ B等が増加するので、汗の中に含まれる何らかの物質が、炎症やかゆみを促進するリスク因子であると論じている。したがって本検討ではさらに、被験者汗に含まれる何らかの蛋白質が、繊維により吸収され皮膚障害を防いだ、との仮説のもとに、被験者の汗のSDS-PAGEを実施した。同一被験者より3連日で汗を採取し、吸収試験を実施したが、生汗、WAP、REGに明瞭なバンドの差は認められず、この仮説を明らかに出来なかった。今回は健常者の汗の解析だけにとどまっている。今後の検討では、化繊過敏者の汗の検討が必要である。

4. 結論

本研究では、化繊を原因とするかゆみの原因を明らかにするために、医学科生にアンケート調査およびパッチテストを行った。23%の被験者で

パッチテスト陽性を認め、しかも化繊アレルギーと有意な関連性が認められた。また、人工汗を複製し弱酸性ポリエステルと従来品の元素吸収の違いを ICP-MS で検討したところ、両ポリエステル共に Pb や Cu, Al の金属元素では強く吸収されることがわかった。しかしながら従来品の方が吸着性能が高かった。さらに汗の吸収試験を行い、両ポリエステルにおける蛋白吸着の違いを検討したが、両群のバンドに大きな違いは認められなかった。

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。また、パッチテストやアンケート調査用紙の配布と回収に協力いただいた、高知大学医学部医学科 4 年生の皆様へ深謝いたします。研究遂行に当たりまして、様々なアドバイスを頂きました大妻女子大学 川之江豊教授、水谷千代美准教授、帝人フロンティア株式会社 堀川直幹様に深くお礼を申し上げます。

文 献

- 1) 弘田量二, 水谷千代美, 川之上豊, ポリエステル化繊を原因とする新規接触性皮膚炎診断法の開発と患者頻度の介入調査. *デサントスポーツ科学*, **34**: 65-71 (2013)
- 2) G.Ricci, A.Patrizi, F.Bellini, M.Medri, Use of Textiles in Atopic Dermatitis: Care of Atopic Dermatitis., *Curr. Probl. Dermatol.*, **33**: 127-143 (2006)
- 3) E.Dawes-Higgs, S.Freeman, Allergic Contact Dermatitis Caused by the Clothing Dye, Disperse Blue 106, an Important Contact Allergen That May Be Frequently Missed., *Australas J. Dermatol.*, **45**: 64-66 (2004)
- 4) 日本皮膚科学会接触皮膚炎診療ガイドライン委員会, 接触皮膚炎診療ガイドライン. *日皮会誌*, **119** (9) : 1757-1793 (2009)
- 5) R.Hirota, C.Mizutani, Y.Kawanoue, Prevalence of Clothing-Caused Contact Dermatitis among Japanese Female Adults., 第 12 回 KMS リサーチミーティング 2012/2/20-21 (高知市), (2013)
- 6) C.Mizutani, M.Ukaji, N.Horikawa, T.Yamamoto, K.Kajiwara, Study of Weak-Acidic Clothing Materials Developed for Skin Conditioning., *SEN'I GAKKAISHI*, **69**, 4: 73-77 (2013)
- 7) X.Dai, H.Okazaki, Y.Hanakawa, M.Murakami, M.Tohyama, Y.Shirakata, K.Sayama, Eccrine Sweat Contains Il-1alpha, Il-1beta and Il-31 and Activates Epidermal Keratinocytes as a Danger Signal., *PLoS One*, **8**: e67666 (2013)

長時間運動が認知機能に及ぼす影響 ：脳循環動態の変化から探る

東 洋 大 学 小 河 繁 彦

The Effect of Changes in Cerebral Blood Flow Cognitive Function and Cerebral Blood Flow During Exercise

by

Shigehiko Ogoh

*Department of Biomedical Engineering,
Toyo University*

ABSTRACT

Previous studies have suggested that exercise-induced changes in cerebral blood flow (CBF) may be associated with improved cognitive function. However, no studies have identified the direct effect of changes in CBF on cognitive function at rest and during exercise. In the present study, during prolonged exercise, both the speed and the accuracy of cognitive function were assessed using the Stroop color-word test. After the Stroop test at rest, the subjects began exercising on a cycling ergometer. A 5-minute warm-up period was followed by an exercise period in which the workload was increased by 0.5 kilopond every minute until a target heart rate of 140 beats/min was achieved. At the workload reaching target heart rate, the subjects continued to cycle at a constant rate for 50 min. At three time points during the exercise (10, 20, 50 min), the subjects performed a Stroop test. Despite a decrease in the mean blood flow velocity in the middle cerebral artery ($MCA V_{mean}$), the reaction time for the Stroop test gradually decreased during the prolonged exercise, while the performance accuracy was unchanged. Prolonged exercise-induced increase in CBF is unlikely to affect cognitive function during prolonged exercise. These findings suggest that cognitive

function may be due to cerebral neural activation associated with exercise rather than global cerebral circulatory condition.

要 旨

先行研究では、運動による脳血流量の変化が認知機能に影響することが示唆されている。しかしながら、直接これらの影響について報告した研究は安静時においてもみられない。本研究では、長時間運動時の脳血流量の減少が、認知機能に及ぼす影響について調査した。認知機能はストループ試験により評価した。安静時にストループ試験を行った後、被験者は自転車エルゴメータでサイクリング運動を開始した。5分のウォームアップの後、漸増的に負荷を増加させ(0.5kpm)、目標心拍数(140bpm)に到達させた。その後、一定負荷強度(到達負荷強度)で50分間サイクリング運動を継続し、10、20、50分目にストループ試験を行った。運動中の脳血流量は、運動開始10分後をピークに、経時的に徐々に減少した。この時、ストループ試験の誤答数に有意差は観察されなかったが、反応時間は減少し、認知機能が亢進することが示された。運動中の認知機能は脳血流量減少により低下するよりむしろ改善していた。これらの結果は、運動中、認知機能は脳血流の変化に影響を受けず、むしろ運動による脳神経活動の変化に影響する可能性を示唆している。

緒 言

加齢により脳血流量が減少することが報告されている^{1,3)}。さらに、これら加齢に伴う脳血流量減少は認知機能の低下に関与すると考えられている³⁾。また Marshall et al.²⁰⁾ は、循環系疾患において一時的に脳血流を制限すると、止血を開放するまで認知機能が低下することを報告している。これらの先行研究では、認知機能が脳循環の

変化により影響を受けることを示唆している。日常な身体活動が加齢による脳血流の減少を抑制することが報告されており¹⁾、これらの報告をまとめると日常の身体活動量を増加させることが、加齢に伴う脳循環系疾患発症のリスクを軽減させると考えられる。

中等度から軽度の動的運動中、脳代謝の亢進に伴い、内頸動脈血流量^{14,33)}及び中大脳動脈血流速度(MCA V_{mean})は増加することが知られている^{26-29,31)}。これらの増加は、脳神経活動に関連した脳代謝亢進において重要である^{16,26-28)}。さらに、適度な運動により認知機能が亢進することが報告されており、この反応は脳血流増加への依存が考えられる^{4,18,21)}。一方、長時間運動は、過換気による低炭酸により脳血流を徐々に低下させ、安静時レベルまで到達する³⁰⁾。脳血流の低下と同様、この様な長時間運動では、運動による認知機能亢進が消失することが報告されている¹²⁾。これらの先行研究から、運動による一時的な脳血流量の変化が直接的に認知機能に影響を及ぼす可能性が考えられる。しかしながら、長時間運動中の脳血流量変化と認知機能との関連性を示した報告は見られない。我々は、長時間運動による脳血流量の減少が認知機能を低下させると仮説を立て、この仮説を検証するため長時間運動中の脳血流量及び認知機能を経時的に測定した。

1. 研究方法

1.1 被検者

7名の若年男性(平均 ± 標準偏差; 年齢 20.4 ± 0.6 歳, 身長 169.9 ± 1.5 cm, 体重 66.2 ± 2.2 kg)が本研究に被験者として参加した。またすべての被験者は循環系疾患を有さない健常者とした。実

験前に被験者は、実験の目的、測定項目、リスク等の説明をすべて受け、倫理委員会（早稲田大学：IRB No. 2013-114）で承認されヘルシキ宣誓を満たした書類のすべての内容を理解し、実験参加に関する同意の署名を行った。また各被験者は、実験計画により1時間の長時間自転車運動を行うことが要求されるため、高強度運動を日常に行っている（週5日）。実験前、各被験者は、測定機器、認知機能測定や実験計画に慣れる為の簡単な実験トレーニングを行った。さらに、実験24時間前から、激しい運動と飲酒、さらに12時間前のカフェインの摂取を禁止した。

1. 2 実験計画

実験当日、各被験者は自転車エルゴメーター（PowerMaxV III, Konami co. Ltd.）を用いて無酸素性作業閾値以下の強度で長時間運動を行い、その時の認知機能をストロープ試験（Stroop color-word test）により測定した。図1に実験プロトコルを示す。実験の前日までに、被験者は、ストロープ試験のスコアが安定するように十分に試験になれるよう練習を行った。更に、当日は実験前に学習効果をなくすためにストロープ試験を素早く15回繰り返して行った。すべての測定装置装着後、安静時の測定の為、被験者は自転車エルゴ

メーターに座った状態で10分の安静をとった。その後、座位姿勢を維持して認知機能の測定を行った。測定後、被験者は0.9kpの強度で5分間のサイクリング運動でウォームアップを行い、心拍数が140bpmになるまで毎分0.5kp強度を増加してサイクリング運動を継続した。我々の仮説を確かめるため、被験者は、その後50分の長時間サイクリング運動を行い、長時間運動終了前は、過換気により脳血流量が減少することを確認した。各被験者の運動強度は、心拍数が140bpmになった時点以降一定とした。認知機能の測定は、運動開始直後、10分、20分、50分目にストロープ試験により行った。すべての実験は、22～24℃の一定の室温下とした。

1. 3 認知機能測定

認知機能はストロープ試験（Stroop color word test）を用いて、反応時間及び誤答数を評価した³⁶⁾。ストロープ課題は、課題を遂行する際の注意や行動を適切に制御する能力を測定する方法として広く利用され、実行機能の評価をすることができる。ストロープ試験は、雑音のない環境で行われ、被験者が気が紛れない快適な状態で行えるよう配慮した。ストロープ試験では、異なる色と漢字で表現されたランダムに出現する文字表示に

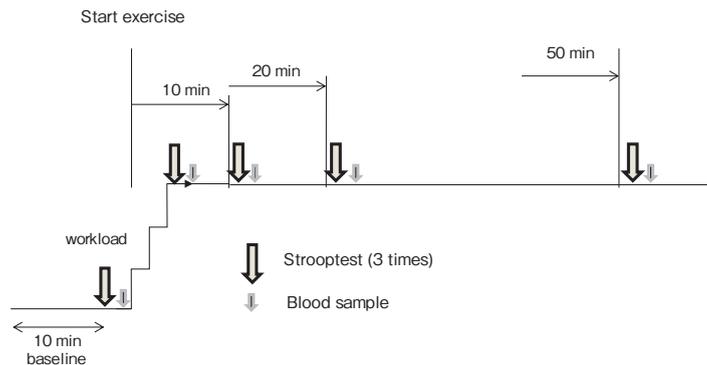


図1 実験プロトコル

10分間の安静後、ストロープテストを3回行う。被験者は0.9kpの強度で5分間自転車運動のウォームアップを行い、心拍数が140bpmになるまで毎分0.5kp強度を増加していく。被験者は、心拍数が140bpmになった時点で運動強度は一定とする。ストロープテストの測定は、運動開始直後、10分、20分、50分目に行う。

対し、文字の意味に反応する条件課題（不一致条件-文字）を用いた。例えば、青インクで「黄」と書かれていた場合、被験者はできるだけ早く「黄」を入力する。一回のストループ試験で24文字あり、各測定時間で3回行いその平均値を分析する。その反応時間と正答率から、認知機能の早さ及び正確性を評価した。

1. 4 測定項目

実験中、心拍数を心電図（ECG）から連続測定を行った。2MHzのドップラープローブ（経頭蓋ドップラー計測装置；Multidop T; DWL, Sippligen, Germany）を左側頭部にドップラー用ジェル（EcoGel 200, Eco-Med Pharmaceutical Inc., Ontario, Canada）と特性ヘッドバンドにより固定し、脳血流量の指標として中大脳動脈血流速度を連続測定した。また換気量（ \dot{V}_E ）及び呼気終末二酸化炭素濃度（ $P_{ET}CO_2$ ）は、フェースマスクに繋がった呼気ガス分析装置（AE-310S, Minato medical science co., Osaka, Japan）により測定した。末梢血液は、ストループ試験後、指先よりフィンガチップで採取し、血中グルコース（Medisafe Fit, TERUMO, Tokyo, Japan）及び乳酸濃度（Lactate ProTM2, Arkray, Kyoto, Japan）を測定した。

1. 5 データ解析

連続測定されたデータは、1kHzでデジタルデータとしてパーソナルコンピュータに取り込んだ（PowerLab, ADInstruments, Milford, MA）。中大脳動脈平均血流速度（ $MCA V_{mean}$ ）は、各拍出波形の積分値から算出した^{30,31}。

1. 6 統計処理

統計処理はSigmaStat 3.5 software（Systat Software Inc., Calif, U.S.）を用いた。各運動時間の生理的指標および認知課題結果を対応のある一元配置分散分析を行った。有意差が認められた場

合にはStudent's Newman-Keul検定を用いて多重比較を行った。有意水準は、5%以下とした。また各データは、平均値 ± 標準偏差で表した。

2. 研究結果

2. 1 長時間運動に対する生理指標の反応

運動開始直後、心拍数、 \dot{V}_E 及び $P_{ET}CO_2$ は安静時と比較して有意に増加した（図2）。長時間運動中、心拍数は、運動時間に伴い増加するが、 \dot{V}_E の高い値は維持されるが変化は見られない。逆に、 $P_{ET}CO_2$ は徐々に低下していき、50分時には安静時レベルまで低下している。

2. 2 長時間運動中のグルコース及び乳酸血中濃度

血中グルコース濃度は、運動開始10分後に低

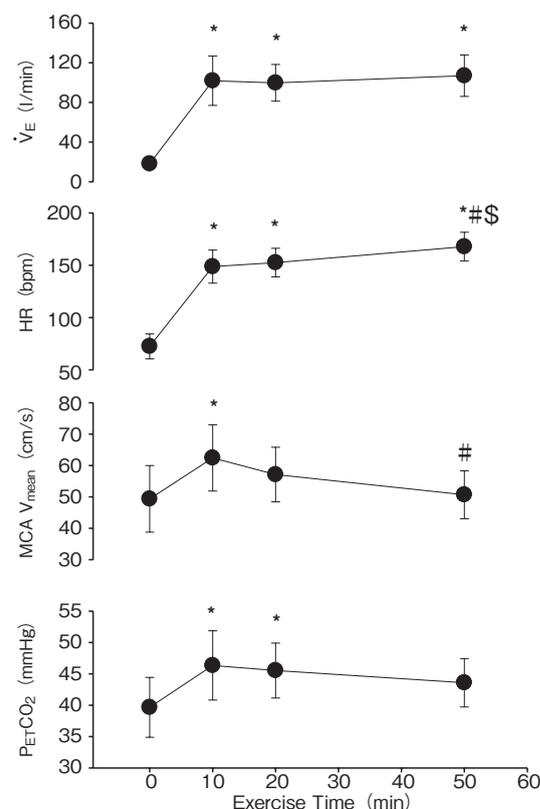


図2 安静時及び運動中の換気量（ \dot{V}_E ）、心拍数（HR）、中大脳動脈血流速度（ $MCA V_{mean}$ ）及び呼気終末二酸化炭素濃度（ $P_{ET}CO_2$ ）の経時的変化

* P<0.05 vs. Rest, #P<0.05 vs. 10th min, \$P<0.05 vs. 20th min

表 1 安静時及び運動中の血中グルコース、乳酸濃度

	rest	immediate	10min	20min	50min
Blood glucose level, mg/dL	101.1±3.8	88.1±3.7	82.6±6.4*	84.3±4.4*	81.4±5.4**
Blood lactate, mmol/L	1.3±0.2	3.0±0.6*	4.3±1.1*	3.7±0.8*	3.2±0.9

* P<0.05, **P<0.01 vs. Rest

下し、運動中この低値を維持する(表1)。逆に、血中乳酸値は、20分目まで増加し、運動中この高値を維持した。

2. 3 運動中の脳血流量と認知機能

運動直後、MCA V_{mean} は有意に増加するが、その後運動時間に伴い徐々に減少する(図2)。MCA V_{mean} が低下しているにも関わらず、ストローク試験の反応時間は、運動時間に伴い低下した(図3)。一方、正答率は、長時間運動中変化は見られなかった。

3. 考 察

本研究の主な知見は、長時間運動中、脳血流量は減少するにもかかわらず、認知機能が亢進ことである。これらの知見から運動中の認知機能の改善は、脳血流量の変化よりむしろ運動に伴う脳神経活動の変化が関連している可能性が示唆され

た。

本研究は、初めて安静時運動中の脳血流の変化と認知機能の関連性について調査を行った。先行研究では、加齢に伴う安静時脳血流量と認知機能の低下との関連性が報告されている³⁾。さらに、Marshall et al.²⁰⁾ は、循環系疾患患者の脳血流を制限した時、認知機能が一時的に低下し、制限を開放すると認知機能が回復することを報告した。これらの先行研究は認知機能の変化が脳血流量の変化に依存する可能性を示唆している。しかしながら、脳血流を変化させ直接的にその変化を検討した報告は見られない。Lucas et al.¹⁸⁾ は、脳血流と認知機能の測定を同時に、短時間運動時に測定した。そして、彼らは、特に安静時において脳血流量と認知機能に有意な関連性があることを証明した。一方、彼らは、脳血流量と認知機能が運動することにより関連性が消失することを示した。

我々の知見はこれらの結果を支持するものであった。しかしながら、彼らは脳血流量と認知機能の関連性は個人差による脳血流量の反応の差異から検討しているため、この研究では脳血流量の変化を独立変数として認知機能との関連性を分析しているとは言えない。したがって、これら先行研究の結果は、他の生理的要因が関与している可能性は否定できない。本研究では、一定強度の運動であるが、長時間運動に伴いMCA V_{mean} が過換気による低炭酸に伴い減少し、逆に認知機能は亢進した。これらの結果は、明らかに運動中の脳血流の変化が認知機能に影響しないことを示している。

認知機能が脳血流量の変化に関連するという概念は、脳血流量の変容が脳への酸素供給に反映することに基づいている。実際、低酸素環境下では

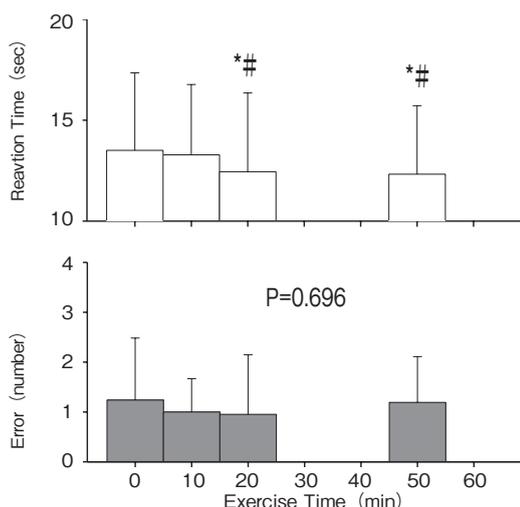


図3 安静時運動中の認知機能
: 反応時間 (Reaction time) と正答率 (Error)

* P<0.05 vs. Rest, #P<0.05 vs. 10th min

脳機能を低下させていることが報告されている¹⁵⁾。本研究では、長時間運動による脳血流量が減少する一方、認知機能が亢進している。先行研究では、高強度の運動において、脳の神経活動や代謝が亢進するが、乳酸、グルコース濃度及び酸素の動静脈較差の増加が脳血流の低下を補償することを明らかにしている¹⁶⁾。さらに、常压低酸素環境では、運動中脳酸化動態が低下しているにもかかわらず、認知機能は低下しない²⁾。これらの報告は、脳血流の変化が必ずしも脳代謝を反映するわけではないことを示唆している。少なくとも、本研究の結果は、脳血流量は減少しているが運動を行うための脳代謝は十分に維持されていることを示している。さらに、脳神経活動及び脳代謝の亢進が脳血流量の増加と関連しないことを示唆する²³⁾。

我々の研究に加え、適度な運動により認知機能の亢進が報告されている^{6,37)}。これらの報告から認知機能の変化は運動強度に関連するかもしれないことが考えられる。低・中強度の運動では、認知機能を改善し、一方高強度運動では改善しない。実際、Tomporowski et al.³⁷⁾は、異なる運動様式、運動強度などで急性運動後の認知機能が異なることを報告した。彼らは高強度運動で脳血流量は増加しないため、認知機能が脳血流量の変化に関連するかもしれないことを指摘している。

では、なぜ運動により認知機能は亢進するのだろうか？脳の神経構造は、脳の有限な資源のために競合することが考慮されるべきである²²⁾。Endo et al.¹⁰⁾は、中等度の動的運動で前頭前野の神経活動の増加により認知機能が増加することを報告している。これらの先行研究では、運動後5-15分後に認知機能を評価している。しかしながら、作業後脳神経活動は素早く安静状態に回復する。つまり、数分の遅れでも運動による脳神経活動を低下させるのに十分である⁹⁾。また運動後の認知機能測定にはおそらく他の生理的要因が影

響している可能性が高い。実際、Vasques et al.³⁹⁾は運動後と運動中の認知機能の差異を報告した。したがって、これらの先行研究では、直接的な運動の認知機能への影響を明らかにすることはできない。

運動による脳神経活動の変化は、ドーパミン、ノルアドレナリン、セロトニンや副腎皮質刺激ホルモン (ACTH) などの神経伝達物質に関連しており²⁵⁾、これらが認知機能に影響していると考えられる⁵⁾。また、急性運動では、脳由来栄養因子 (BDNF) のレベルを増加させる¹³⁾。高いBDNFレベルは、神経発生、神経可塑性や学習、記憶などを向上させる⁷⁾。さらに、運動は、神経活動のためのエネルギー産生が必要となる。したがって、認知機能に有効な代謝要素が維持されなければならない。Newman et al.²⁴⁾は、乳酸の投与により記憶力が向上することを明らかにし、短時間の記憶能力には乳酸の代謝が関連することを示唆した。血中乳酸は、酸素を伴い脳で取り込まれ脳でのエネルギー物質として利用される。血中グルコースが消費された場合、血中乳酸値が増加し、脳代謝へ貢献する³⁸⁾。しかしながら、運動による乳酸産生がどの程度運動中の認知機能に影響するか明らかでない。一方、高地環境では脳への酸素供給が制限され、認知機能が低下することが報告されており⁴⁰⁾、これらはいくつかの神経物質の変容に関連していることが報告されている³²⁾。したがって、運動による認知機能の変化は、おそらく脳代謝と脳神経活動の変化のバランスによって決まると考えられる。運動により亢進した認知活動が長時間の運動 (3時間) で消失するが¹²⁾、これは中枢性疲労に関連しているかもしれない。幾つかの研究は運動中の認知機能が低下、また維持することを示している。しかしながら、運動中の認知機能を変化させるそのメカニズムは未だ不明である。

運動中の認知相互作用 (複数課題) は複雑であ

ることが知られている。本研究では、反応時間が長時間運動により短縮し、認知機能の改善が示された。更に、正答率は運動中変化しなかった(図3)。幾つかの先行研究^{2, 4, 21, 39)}において運動中の認知機能が評価されている。McMorris et al.²¹⁾は、中等度の運動では、反応時間に効果が見られたが、正答率や記憶能力に影響しないことを報告した。Briswalter et al.⁴⁾は、運動中、アドレナリンが増加するまでの強度において意志決定能力が亢進することが示された。彼らは、運動による脳機能の亢進は、栄養因子に依存し、体力レベルなどの要因により変化しないことを指摘した。

これらの先行研究は、我々の結果と一致するものであった。しかしながら、急性運動による効果は未だ議論の余地がある。逆に、Dietrich and Sparling⁹⁾は、前頭葉に関連する複雑課題では、機能低下することを示した。彼らは、脳が、神経制御と生体機能(血圧、体温調節など)の維持を優先しているため、前頭葉領域に関連する認知機能は、急性運動中に損なわれていることを示唆している。これらの結果は我々の結果とは一致しない。

認知機能を測定する方法も重要である^{11, 17)}。急性の中強度運動では、認知機能の幾つかの特性に異なる影響を与える⁸⁾。Davranche and McMorris⁸⁾は幾つかの認知機能が低下するが(e.g., selective inhibition, response inhibition)、他の項目(e.g., top-down cognition control, reaction time)は変化しないか逆に亢進したことを報告している。本研究では、反応時間及び正答率をストループ試験により評価した³⁶⁾。ストループ試験は、実行機能に依存して認知能力を調査するためのよく知られたパラダイムである。特に、刺激と応答に関わる意思決定の作業中の有意な応答の抑制や特別な情報に選択的に注視している¹⁹⁾。ストループ課題は、簡易でありまた積極的に覚醒に

よって影響されるのに十分であるが、増加難易度を持つテスト、例えば、Paced Auditory Additional Task, Peabody Picture Vocabulary Test, the Brief Kaufman Intelligence Test and the Wisconsin Card Sorting Task などとは異なることが考えられる⁹⁾。つまり、難易度の高い課題では、認知機能の指標を低下させることも考えられ、さらなる検討が必要である。

本研究の幾つかの限界点を考える必要がある。本研究では、実験プロトコルにおいて1時間のサイクリング運動が必要であり、そのため被験者の体力レベルは高いことが必要不可欠である。したがって、体力レベルや運動行動能力の高さが結果に影響した可能性は否定できない。また脳血流量の測定に、経頭蓋ドップラー計測装置を用いている。測定値は血流ではなく血流速度であり、中大脳動脈径が変化する場合、血流量変化がなくても影響する。しかしながら、中大脳動脈血管径は、生理刺激により変化しないことが確かめられており^{34, 35)}、運動中においても脳血流の指標として用いられている。

4. 結 論

本研究では、長時間運動において、脳血流量が時間経過に伴い減少するにもかかわらず、認知機能が亢進することが明らかになった。したがって、運動に伴う脳血流の変化が認知機能に影響しないことが示された。認知機能の低下は、脳神経活動の変化に関連するかもしれないが明らかでない。

謝 辞

本研究に対して助成をうけ賜った(公財)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。また早稲田大学広瀬統一氏、立命館大学橋本健志、塚本敏人の両氏、本研究室の平澤愛女氏、の多大なる貢献によって本研究を遂行できたことを心より感謝申し上げます。

文献

- 1) Ainslie P.N., Cotter J.D., George K.P., Lucas S., Murrell C., Shave R., Thomas K.N., Williams M.J., Atkinson G., Elevation in cerebral blood flow velocity with aerobic fitness throughout healthy human ageing., *J. Physiol.*, **586**: 4005-4010(2008)
- 2) Ando S., Hatamoto Y., Sudo M., Kiyonaga A., Tanaka H., Higaki Y., The effects of exercise under hypoxia on cognitive function., *PLoS One.*, **8**: e63630(2013)
- 3) Bertsch K., Hagemann D., Hermes M., Walter C., Khan R., Naumann E., Resting cerebral blood flow, attention, and aging., *Brain Res.*, **1267**: 77-88(2009)
- 4) Brisswalter J., Collardeau M., Rene A., Effects of acute physical exercise characteristics on cognitive performance., *Sports Med.*, **32**: 555-566(2002)
- 5) Chmura J., Nazar K., Kaciuba-Uscilko H., Choice reaction time during graded exercise in relation to blood lactate and plasma catecholamine thresholds., *Int. J. Sports Med.*, **15**: 172-176(1994)
- 6) Colcombe S., Kramer A.F., Fitness effects on the cognitive function of older adults: a meta-analytic study., *Psychol. Sci.*, **14**: 125-130(2003)
- 7) Cotman C.W., Berchtold N.C., Christie L.A., Exercise builds brain health: key roles of growth factor cascades and inflammation., *Trends Neurosci.*, **30**: 464-472(2007)
- 8) Davranche K., McMorris T., Specific effects of acute moderate exercise on cognitive control., *Brain Cogn.*, **69**: 565-570(2009)
- 9) Dietrich A., Sparling P.B., Endurance exercise selectively impairs prefrontal-dependent cognition., *Brain Cogn.*, **55**: 516-524(2004)
- 10) Endo K., Matsukawa K., Liang N., Nakatsuka C., Tsuchimochi H., Okamura H., Hamaoka T., Dynamic exercise improves cognitive function in association with increased prefrontal oxygenation., *The Journal of Physiological Sciences : JPS* **63**: 287-298(2013)
- 11) Etnier J.L., Chang Y.K., The effect of physical activity on executive function: a brief commentary on definitions, measurement issues, and the current state of the literature., *J. Sport Exerc. Psychol.*, **31**: 469-483(2009)
- 12) Grego F., Vallier J.M., Collardeau M., Rousseu C., Cremieux J., Brisswalter J., Influence of exercise duration and hydration status on cognitive function during prolonged cycling exercise., *Int. J. Sports Med.*, **26**: 27-33(2005)
- 13) Gustafsson G., Lira C.M., Johansson J., Wisen A., Wohlfart B., Ekman R., Westrin A., The acute response of plasma brain-derived neurotrophic factor as a result of exercise in major depressive disorder., *Psychiatry Res.*, **169**: 244-248(2009)
- 14) Hellstrom G., Fischer-Colbrie W., Wahlgren N.G., Jogestrand T., Carotid artery blood flow and middle cerebral artery blood flow velocity during physical exercise., *J. Appl. Physiol.(1985)* **81**: 413-418(1996)
- 15) Hornbein T.F., The high-altitude brain., *J. Exp. Biol.*, **204**: 3129-3132(2001)
- 16) Ide K., Secher N.H., Cerebral blood flow and metabolism during exercise., *Prog. Neurobiol.*, **61**: 397-414(2000)
- 17) Lambourne K., Tomporowski P., The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: a meta-regression analysis., *Brain Res.*, **1341**: 12-24(2010)
- 18) Lucas S.J., Ainslie P.N., Murrell C.J., Thomas K.N., Franz E.A., Cotter J.D., Effect of age on exercise-induced alterations in cognitive executive function: relationship to cerebral perfusion., *Exp. Gerontol.*, **47**: 541-551(2012)
- 19) MacLeod C.M., Half a century of research on the Stroop effect: an integrative review., *Psychol. Bull.*, **109**: 163-203(1991)
- 20) Marshall R.S., Lazar R.M., Pile-Spellman J., Young W.L., Duong D.H., Joshi S., Ostapkovich N., Recovery of brain function during induced cerebral hypoperfusion., *Brain.*, **124**: 1208-1217(2001)
- 21) 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**: 421-428(2011)
- 22) Miller E.K., Cohen J.D., An integrative theory of prefrontal cortex function., *Annual review of neuroscience.*, **24**: 167-202(2001)
- 23) Miyazawa T., Horiuchi M., Ichikawa D., Sato K., Tanaka N., Bailey D.M., Ogoh S., Kinetics of exercise-induced neural activation; interpretive dilemma of altered cerebral perfusion., *Exp. Physiol.*, **97**: 219-227(2012)
- 24) Newman L.A., Korol D.L., Gold P.E., Lactate

- produced by glycogenolysis in astrocytes regulates memory processing., *PLoS One.*, **6**: e28427 (2011)
- 25) Nybo L., Secher N.H., Cerebral perturbations provoked by prolonged exercise., *Prog. Neurobiol.*, **72**: 223-261 (2004)
 - 26) Ogoh S., Autonomic control of cerebral circulation: exercise., *Med. Sci. Sports Exerc.*, **40**: 2046-2054 (2008)
 - 27) Ogoh S., Ainslie P.N., Cerebral blood flow during exercise: mechanisms of regulation., *J. Appl. Physiol.*, (1985) **107**: 1370-1380 (2009)
 - 28) Ogoh S., Ainslie P.N., Regulatory mechanisms of cerebral blood flow during exercise: new concepts., *Exerc. Sport Sci. Rev.*, **37**: 123-129 (2009)
 - 29) Ogoh S., Brothers R.M., Barnes Q., Eubank W.L., Hawkins M.N., Purkayastha S., A O.Y., Raven P.B., The effect of changes in cardiac output on middle cerebral artery mean blood velocity at rest and during exercise., *J. Physiol.*, **569**: 697-704 (2005)
 - 30) Ogoh S., Dalsgaard M.K., Yoshiga C.C., Dawson E.A., Keller D.M., Raven P.B., Secher N.H., Dynamic cerebral autoregulation during exhaustive exercise in humans., *Am J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, **288**: H1461-1467 (2005)
 - 31) Ogoh S., Fadel P.J., Zhang R., Selmer C., Jans O., Secher N.H., Raven P.B., Middle cerebral artery flow velocity and pulse pressure during dynamic exercise in humans., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, **288**: H1526-1531 (2005)
 - 32) Raichle M.E., Hornbein T.F., The high altitude brain. In: High Altitude: An Exploration of Human Adaptation, edited by Hornbein TF, and Schoene RB. New York: Marcel Dekker (2001, p. 377-423)
 - 33) Sato K., Ogoh S., Hirasawa A., Oue A., Sadamoto T., The distribution of blood flow in the carotid and vertebral arteries during dynamic exercise in humans., *J. Physiol.*, **589**: 2847-2856 (2011)
 - 34) Schreiber S.J., Gottschalk S., Weih M., Villringer A., Valdeza J.M., Assessment of blood flow velocity and diameter of the middle cerebral artery during the acetazolamide provocation test by use of transcranial Doppler sonography and MR imaging., *AJNR Am. J. Neuroradiol.*, **21**: 1207-1211 (2000)
 - 35) Serrador J.M., Picot P.A., Rutt B.K., Shoemaker J.K., Bondar R.L., MRI measures of middle cerebral artery diameter in conscious humans during simulated orthostasis., *Stroke.*, **31**: 1672-1678 (2000)
 - 36) Stroop J.R., Studies of interference in serial verbal reactions., *Journal of Experimental Psychology*, **18**: 643-662 (1935)
 - 37) Tomporowski P.D., Effects of acute bouts of exercise on cognition., *Acta Psychol (Amst)* **112**: 297-324 (2003)
 - 38) van Hall G., Stromstad M., Rasmussen P., Jans O., Zaar M., Gam C., Quistorff B., Secher N.H., Nielsen H.B., Blood lactate is an important energy source for the human brain., *J. Cereb. Blood Flow Metab.*, **29**: 1121-1129 (2009)
 - 39) Vasques P.E., Moraes H., Silveira H., Deslandes A.C., Laks J., Acute exercise improves cognition in the depressed elderly: the effect of dual-tasks., *Clinics (Sao Paulo)* **66**: 1553-1557 (2011)
 - 40) Virues-Ortega J., Garrido E., Javierre C., Kloezeman K.C., Human behaviour and development under high-altitude conditions., *Dev. Sci.*, **9**: 400-410 (2006)

**運動意欲と食リズムのクロストーク：
摂食促進ホルモン・グレリンによる自発運動量制御機構の解明**

久留米大学 田尻 祐司
(共同研究者) 同 御船 弘治
同 満園 良一
同 児島 将康

**Crosstalk between Spontaneous Exercise and Eating Rhythm:
A Putative Mechanism in Relation to Ghrelin, an Eating Promotion Hormone**

by

Yuji Tajiri

*Division of Endocrinology and Metabolism,
Kurume University School of Medicine*

Hiroharu Mifune

*Institute of Animal Experimentation,
Kurume University School of Medicine*

Ryoichi Mitsuzono

Institute of Health and Sports Science, Kurume University

Masayasu Kojima

*Department of Molecular Genetics, Institute of Life Sciences,
Kurume University*

ABSTRACT

Beneficial effects of exercise on the prevention and treatment of life-style related disease are well known, affecting physiologically active molecules such as ghrelin. Because long-term effects of exercise on ghrelin dynamics are to be elucidated in

relation to the formation of obesity, we investigated effects of spontaneous exercise on these parameters in high-fat diet (HFD) induced obese rats.

Male Sprague Dawley rats at 4 weeks-old were fed either control diet (CD; 10 kcal% fat) or HFD (60 kcal% fat) for 12 weeks. They were further subdivided into 4 groups according to the performance of spontaneous exercise (in the chamber equipped with running-wheel for 3 days, biweekly) or not. In results, CD without exercise (CD-S), CD with exercise (CD-Ex), HFD without exercise (HFD-Ex) and HFD-with exercise (HFD-Ex) were compared at 16 week-old.

Although body weight and visceral fat were significantly higher in HFD-S than CD-S, the induction of spontaneous exercise to HFD rats restored these parameters equivalent to the level of CD-Ex. Abnormal rhythms of activity and feeding were observed in HFD-S, which had been normalized by spontaneous exercise. Furthermore, spontaneous exercise restored plasma and stomach ghrelin concentrations and ghrelin production which had been significantly reduced in HFD-S.

It is shown that spontaneous exercise has an effect to suppress the formation of HFD-induced obesity, normalizing activity and feeding rhythms and restoring ghrelin synthesis.

要 旨

運動療法は生活習慣病の予防や治療において有効であり、末梢性の様々な生理活性物質に影響を及ぼすと言われている。その一つである摂食促進ホルモン・グレリンの分泌が運動前後において変化することが報告されているが、長期の運動習慣導入後のグレリン動態および肥満との関連については不明な点も多い。そこで今回、高脂肪食負荷後の肥満モデルラットにおけるグレリン動態や肥満形成に及ぼす自発運動の効果を検討した。SD ラットを用い、4 週齢時から 12 週間高脂肪食 (HFD; 60 kcal% fat) を給与した肥満モデルラットとコントロール食 (CD; 10 kcal% fat) を同期間給与した正常ラット各々に 6 週齢時から隔週 3 日間の回転かご付エネルギー代謝測定用チャンバー内にて飼育した自発運動群 (HFD-Ex, CD-Ex)、通常ケージ内で飼育した非運動群 (HFD-S,

CD-S) の 4 群を作成し、グレリン動態、体重増加、エネルギー代謝等を比較した。HFD-S 群は CD-S 群に比べて 16 週齢の時点で有意の体重や内臓脂肪量の増加を認めたが、自発運動の導入により HFD-Ex 群におけるこれらの指標は CD-Ex 群と同等のレベルまで減少した。HFD-S 群では活動リズムや摂食リズムの異常が認められたが、自発運動の導入後はこのリズム異常はほぼ正常化した。HFD-S 群では血漿や胃のグレリン濃度の有意な低下を認めたが、自発運動の導入により血漿グレリン濃度やグレリン産生能が回復した。自発運動習慣は高脂肪食下の肥満におけるグレリン分泌異常を是正し、活動リズムや食リズム異常を正常化し、同時に肥満を抑制することが示された。

緒 言

定期的な運動習慣は生活習慣病の予防や治療において有効である。肥満はインスリン抵抗性を

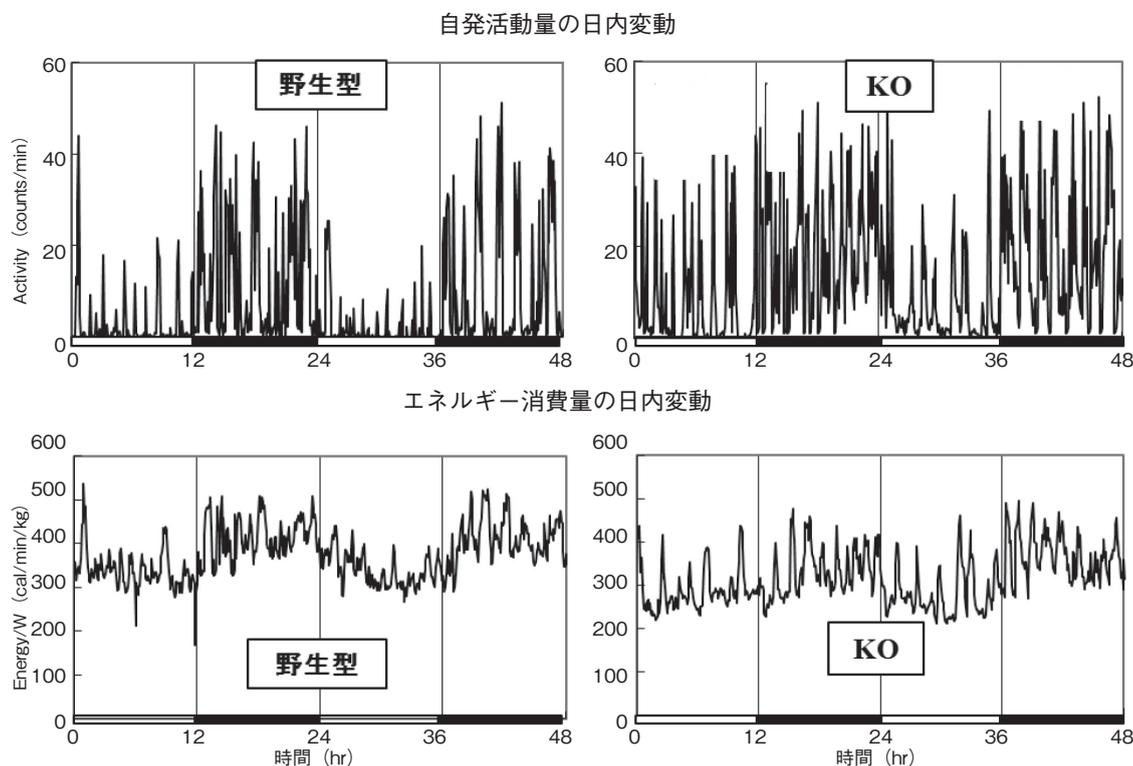


図1 野生型およびグレリン・ノックアウトマウスの自発活動量，エネルギー消費量の日内変動

惹起し、糖尿病、高血圧など多くの生活習慣病の原因となる。肥満者には“食行動のずれとくせ”すなわち食リズム異常がしばしば認められる¹⁾。この特徴的な食行動のずれは“むちゃ喰い障害 (binge eating)”と表現され、肥満治療を困難なものとしている大きな原因である。一方、肥満者に定期的な運動指導を取り入れる事によりその後自主的に運動を継続できるケースに時々遭遇するが、この動機付けに関わる要素に関する研究はほぼ皆無である。

グレリンは、1999年に児島ら²⁾によりラットおよびヒトの胃から発見された28個のアミノ酸からなるペプチドであり、その生理活性として強力な成長ホルモン (GH) 分泌促進作用を有するだけでなく、摂食促進作用、脂肪蓄積など代謝系に対する様々な作用がみられる。我々はグレリン・ノックアウト (GKO) マウスでは体温や血圧・心拍数の日内リズムに異常が認められ、交感・副

交感神経日内リズムの恒常性が破綻していることを報告している [平成 19 ~ 21, 22 ~ 24 年度基盤研究 (C), 課題番号 19590840, 22500361]。さらにこの GKO マウスにおいては野生型 (WT) に比べて、明期の自発活動量が増加しエネルギー消費量の日内リズムに乱れが生じている事を見出した (図 1)。従って、自発活動量や体内エネルギー代謝の日内リズムの恒常性に摂食促進ホルモンのグレリンが関与している可能性が考えられる。

本研究はグレリンの摂食・代謝リズムや自発運動量を制御するメカニズムおよび両者のクロストークにおけるグレリンの役割を明らかにすることを目的とする。

1. 方法

1.1 実験動物・プロトコール

本研究は、「久留米大学における動物実験に関する指針」に従って計画を策定し実施した。実験

動物はSD系雄性ラット3週齢（日本クレア）を用いた。飼育条件は室温約24℃、12時間の明暗サイクル（7:00点灯、19:00消灯）とし、一般飼育ケージにて飼育した。7日間の予備飼育後、4週齢の時点でラットを5匹ずつ4群に群分けし、16週齢までの12週間以下の条件で飼育した。

① CD-S 群：コントロール食（10 kcal% fat, D12450B, EPS 益新）にて飼育。

② CD-Ex 群：コントロール食にて飼育。6週齢時から隔週、回転かご付エネルギー代謝測定用チャンバー（小動物用エネルギー代謝測定システム、アルコシステム、図2）に移して3日間自発運動を行わせた。



図2 回転かご付き自発運動・エネルギー代謝測定用飼育チャンバー

③ HFD-S 群：高脂肪食（60 kcal% fat, D12492, EPS 益新）にて飼育。

④ HFD-Ex 群：高脂肪食にて飼育。CD-E x 群と同様に6週齢時から隔週3日間自発運動を行わせた。

1. 2 測定方法

体重は毎週測定し、明期および暗期それぞれの期間における摂餌量は8, 12, 16週後に測定した。2週間ごとに上記エネルギー代謝測定システムに

より、各群の活動リズムおよびエネルギー代謝を測定した。16週齢の時点で、実験動物用マイクロX線CT装置（R_mCT2, リガク）により体組成を測定し、その後イソフルラン吸入麻酔下にて大動脈穿刺により採血後、血漿、胃組織のサンプルを採取した。グレリン動態は既報³⁾に従い以下に示す方法で解析した。

①免疫染色：active ghrelin（N末）抗体を用い胃組織内のグレリン陽性細胞の検出（ABC法）

②血漿・胃組織中グレリン測定：active ghrelin（N末）をradioimmunoassayにて測定

③胃内グレリン産生能測定：胃底部組織内のGhrelin mRNA, ghrelin O-acyltransferase（GOAT）mRNAをRT-PCR法にて測定

1. 3 統計解析

JMP Pro version 11（SAS Institute）を用いて解析した。2群間の比較はStudent's t-testにより、4群間の比較はOne-way ANOVA with Tukey's HSD testにより検定した。危険率5%未満を有意とした。

2. 結果

2. 1 自発運動による体重と体脂肪の変化

図3に示す通り、いずれの群においても週齢とともに体重は増加傾向を示した。HFD-S群は16週齢において最も体重が重かったが、CD群においてもS群はEx群に比べて体重増加が著明であった。興味深い事に、HFDにおいても自発運動導入により、16週齢の時点ではCD-E x群とほぼ同等の体重を示した。同様の傾向は16週齢の内臓脂肪にも認められ、運動群はCD, HFDとともに各々の非運動群と比較して有意の低下を認めた。一方、皮下脂肪に関しては自発運動による有意の効果は認めなかった。

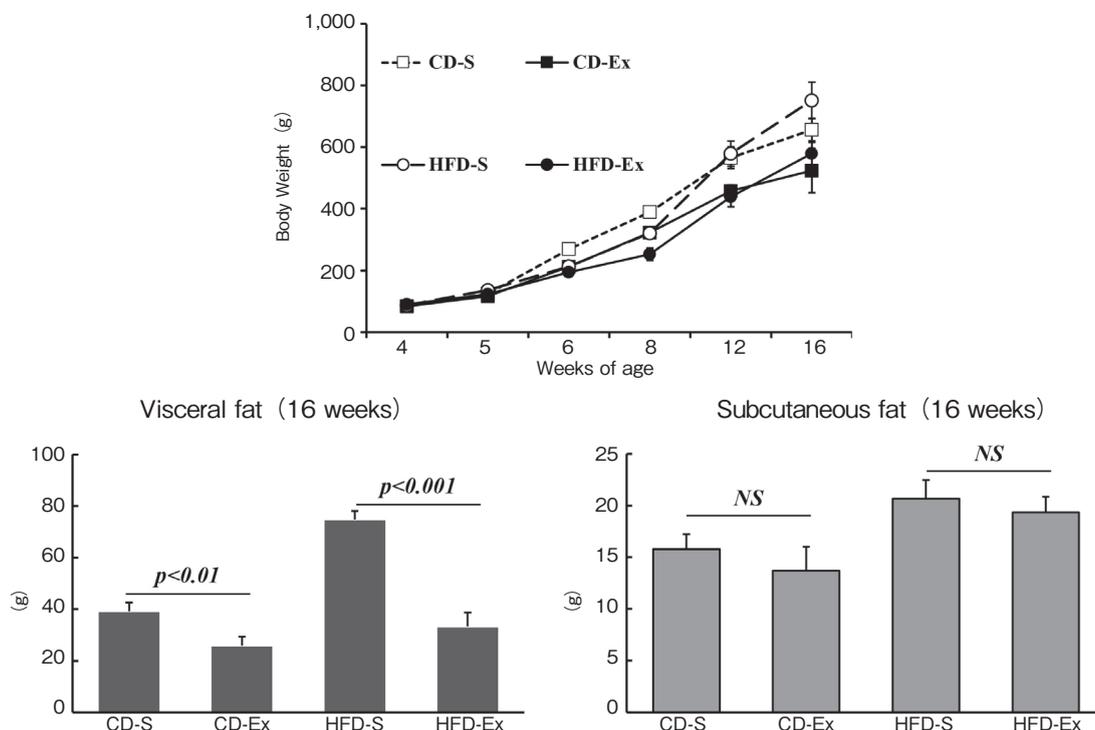


図3 体重と体脂肪の変化

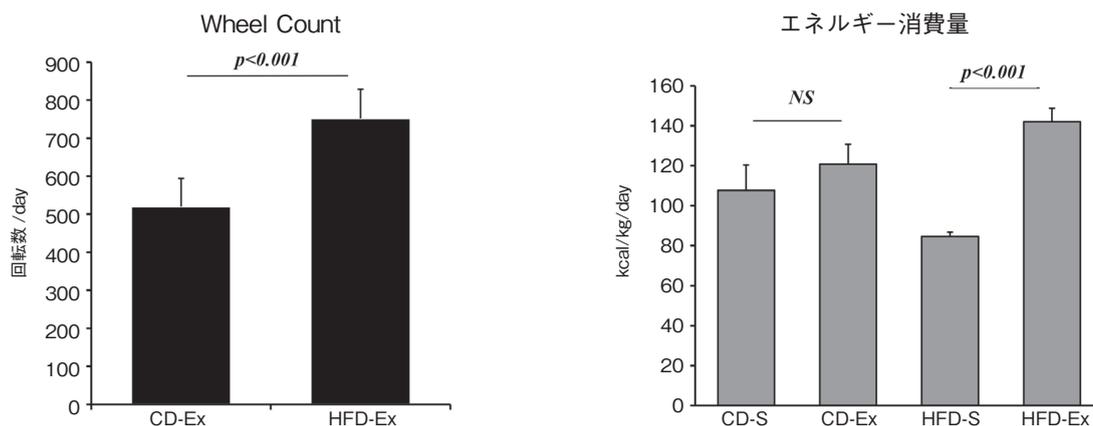


図4 16週齢における自発運動量（回転かご）とエネルギー消費量の変化

2. 2 自発活動量とエネルギー消費量の変化

運動群における回転かごの回転数は、HFD群がCD群に比較して有意に多かった。呼気ガス分析による一日のエネルギー消費量は、HFD群において自発運動により有意の増加を認めた(図4)。

2. 3 自発活動量の日内変動と摂餌パターンの変化

図5に示す通り、ラットはおもに暗期に著明な活動量の増加を示し、明期の活動量は極めて少ない(CD-S)。HFD-Sにおいては通常認められない明期の活動量の増加を認め、活動リズムの異

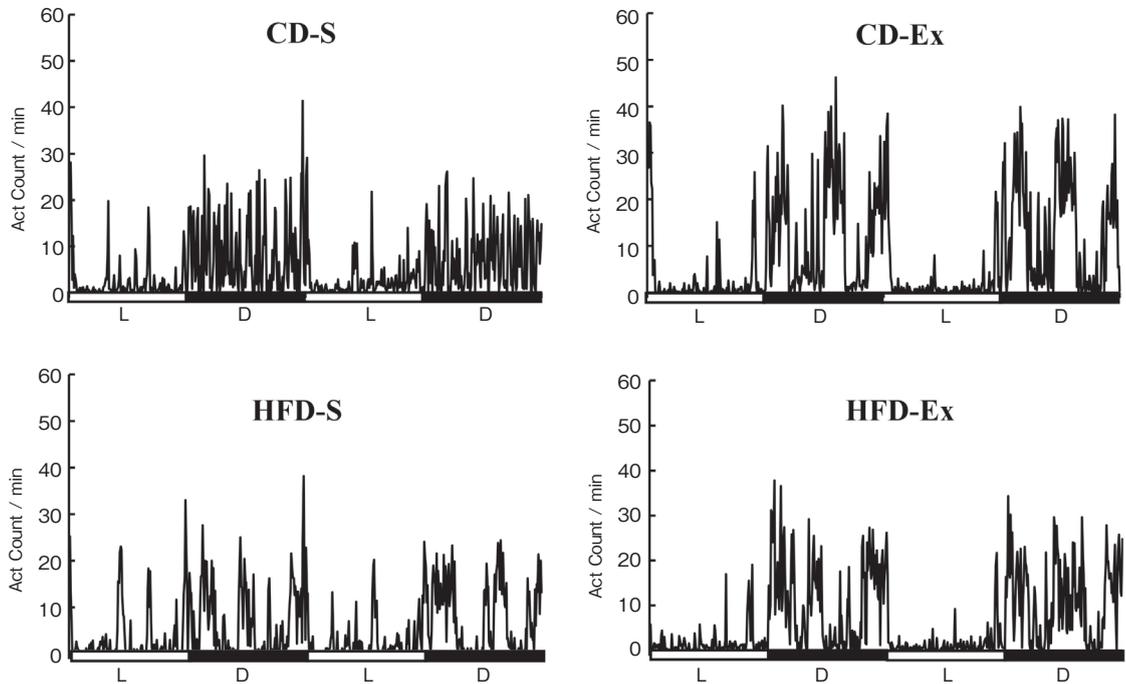


図5 16週齢における自発活動量の日内変動. L: 明期. D: 暗期

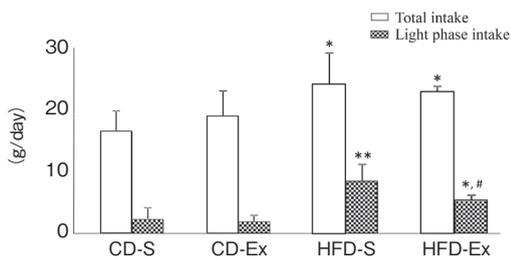


図6 16週齢における摂餌量およびパターンの変化
*P<0.05 vs CD-S. **P<0.001 vs CD-S. #P<0.05 vs HFD-S

常が示唆される。しかしながら、自発運動の導入により、このリズム異常はほぼ完全に正常化した (HFD-Ex)。

このリズム異常は摂餌パターンにも同様に認められ、HFD-S 群においては一日の総摂餌量のみならず明期の摂餌量の割合が著明に増加しているが、自発運動の導入により部分的にはあるがその増加が抑制された (図 6)。

2. 4 自発運動によるグレリン動態の変化

胃の免疫染色の結果、グレリン陽性細胞の数は

自発運動導入により CD においても著明に増加を認めた。HFD によりグレリン陽性細胞は減少するものの、自発運動の導入により部分的に減少に歯止めがかかっていた (図 7)。

血漿および胃内活性型グレリン濃度も、免疫染色の結果とほぼ一致していた。この傾向はグレリンおよび GOAT mRNA の結果ともほぼ一致していた (図 8)。

3. 考 察

今回の研究により以下の結果が得られた。① 2 週間の内の 3 日間の自発運動の導入により HFD による体重や内臓脂肪量の増加を有意に抑制する事が可能であった。② HFD 群では自発活動量が CD 群に比べて多く、エネルギー消費量も著明な増加を認めた。③ HFD 群では、活動や食事のリズム異常を来しており、自発運動の導入によりこれらの異常が改善した。④ HFD 群ではグレリン産生が低下しているが、自発運動の導入により

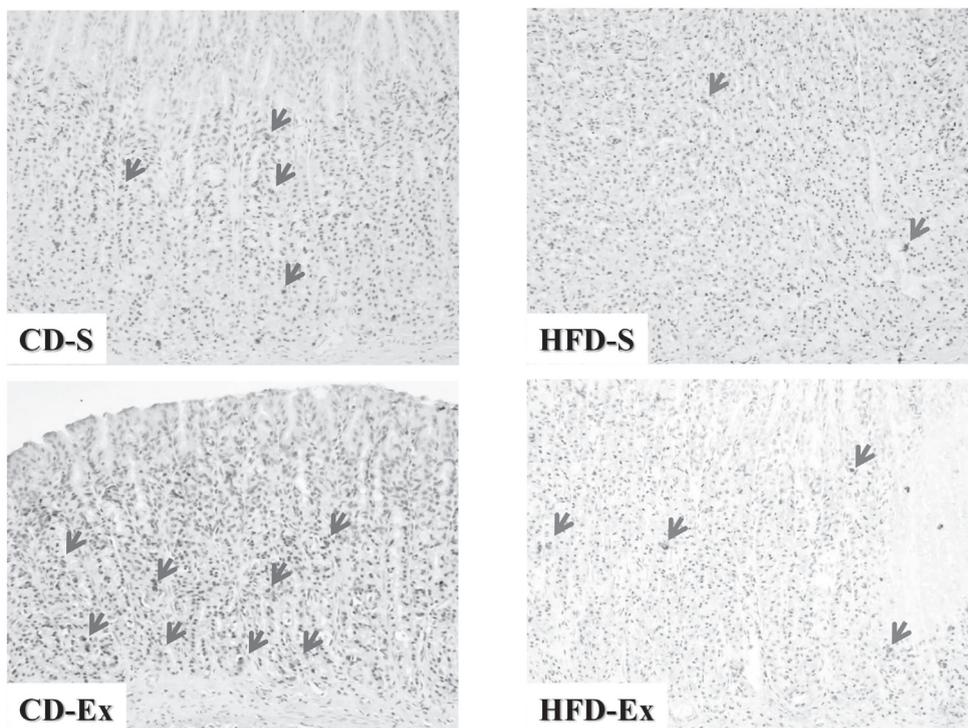


図7 16週齢における胃底部におけるグレリン陽性細胞の変化 (矢印)

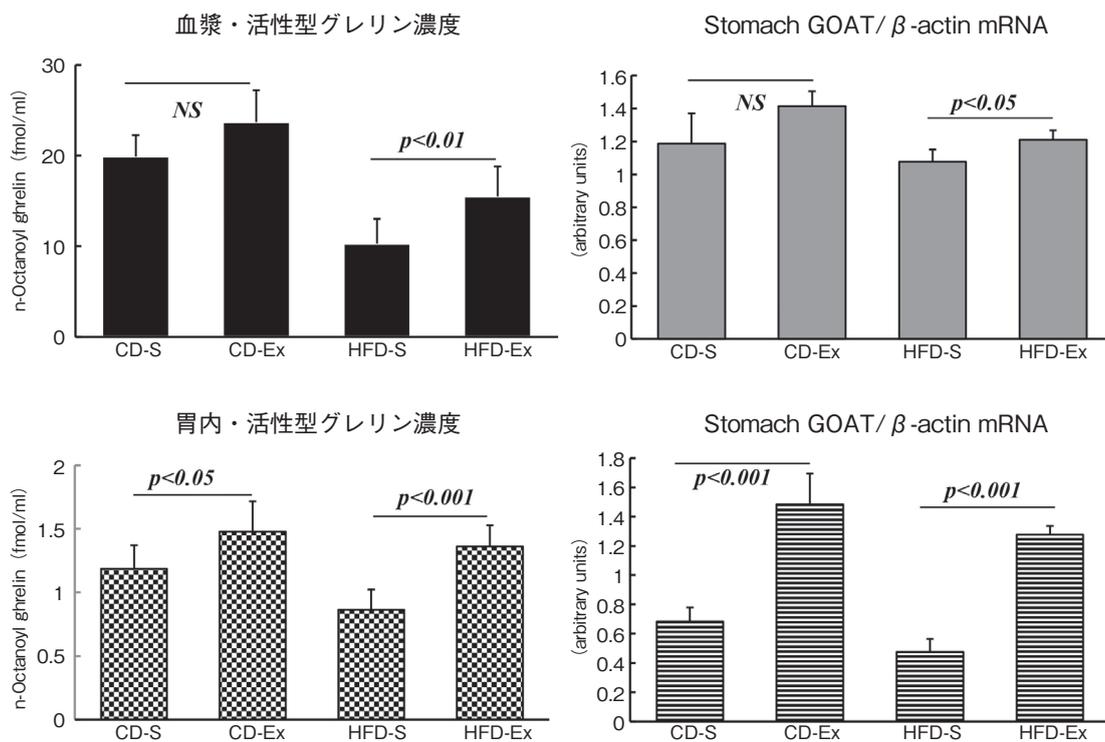


図8 16週齢におけるグレリン動態の変化

CD群とほぼ同じレベルまで改善した。

HFD群に運動を導入した場合、CDの運動群に比べて運動量やエネルギー消費量が著明に多く、内臓脂肪量も大きく減少した。すなわち、HFD群において運動意欲がより大きく増加した可能性が考えられる。我々のGKOマウスにおける研究の結果、本KOマウスでは探索行動（行動意欲）がWTマウスに比べ劣る事を集団行動解析装置による実験にて見出しており、グレリンと運動意欲との関連⁴⁾が示唆される。HFD-Exにおいてグレリン産生能の著明な増加が認められた事実は、間接的にはあるが、HFD-Ex群における運動量増加におけるグレリンの関与に合致する結果である。

HFD群では通常は認められない明期における活動の増加や摂餌量の増加を認めており、食リズムを始めとする生活リズムの乱れを示唆する所見であると考え。この現象はヒトの肥満における夜間摂食などの食リズム異常、いわゆる“むちゃ喰い障害 (binge eating)¹⁾”に近似した状態であり、肥満者の食リズム異常と運動の関連を研究するために非常に適したモデルであるといえる。興味深い事に、2週間に3日間の運動習慣の導入により、肥満状態でみられた生活リズムの乱れは完全に消失し、明期の摂餌行動もほぼ認めなくなった。従って、HFD-Ex群において認められた体重や内臓脂肪減少の理由として、運動による単なるエネルギー消費量の増加以外に、上記の運動意欲増加と合わせて生活リズムの是正が大きく関与した可能性が考えられる。

HFD肥満において血漿・胃内グレリン濃度およびグレリン産生能 (GOAT mRNA) は低下しており、自発運動によりこれらの指標は回復した。肥満時や高脂肪食負荷時にグレリンの機能が低下し⁵⁾、そのようなエネルギー代謝異常時にグレリンの摂食促進作用が抑制されているにも関わらず過食などの食行動異常が認められるメカニズム

に関してはいまだ不明の点も多い。最近我々は、GKOマウスでは明期の自発活動量が増加しエネルギー消費量の日内リズムに乱れが生じている事を見出しており (図1)、今回の結果と合わせて肥満時のグレリン分泌異常が自発運動導入により是正され、その結果として運動意欲の向上や摂餌パターンの正常化を介して肥満の是正につながったと考える。しかしながら、運動によるグレリン正常化の機序や関連する moleculeなどは今回の研究では明らかにされておらず、今後の詳細な実験の結果が待たれる。

Preliminary dataではあるが、肥満者を対象としActiHR4® (CamNtech社製)を用いて自律神経活動を評価した研究の結果、夜間睡眠中の副交感神経活動の上昇を認めない例が約半数存在し、肥満者における自律神経活動リズムの乱れが示唆された。今後これらの対象患者において、グレリンと自律神経活動のリズムの関連を詳細に調査するとともに、運動習慣の導入によるグレリンや自律神経活動リズムの変化を観察し、肥満の改善への関与を評価する予定である。

4. 結 論

肥満の形成には総エネルギー摂取量のみならず食リズムの是正が重要である。本研究の結果より、定期的な運動習慣が肥満者に多く認められる生活リズムの異常を是正し、同時に肥満を是正する可能性が考えられた。今後メタボリックシンドロームなどにおける生活習慣指導において、単なる食事・運動の内容に対する指導以外に時間栄養学的観点から新しい指導概念 (食事のタイミングや規則性、運動の時間帯への配慮など)を導入する事により、一層効果的な介入が可能となる事が期待される。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、多大な研究助成を

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。

文 献

- 1) Marcus M.D., Wildes J.E., Disordered eating in obese individuals., *Curr. Opin. Psychiatry.*, **27**: 443-447(2014)
- 2) Kojima M., Hosoda H., Date Y., Nakazato M., Matsuo H., Kangawa K., Ghrelin is a growth-hormone-releasing acylated peptide from stomach., *Nature.*, **402**: 656-60(1999)
- 3) Mifune H., Nishi Y., Tajiri Y., Masuyama T., Hosoda H., Kangawa K., Kojima M., Increased production of active ghrelin is relevant to hyperphagia in nonobese spontaneously diabetic Torii rats., *Metabolism.*, **61**:491-495(2012)
- 4) Menzies J.R., Skibicka K.P., Leng G., Dickson S.L., Ghrelin, Reward and Motivation., *Endocr. Dev.*, **25**:101-111(2013)
- 5) Briggs D.I., Enriori P.J., Lemus M.B., Cowley M.A., Andrews Z.B., Diet-Induced Obesity Causes Ghrelin Resistance in Arcuate NPY/AgRP Neurons., *Endocrinology.*, **151**: 4745-4755(2010)

講 評

学 術 委 員

委員長	佐藤祐造	愛知みずほ大学 大学院 人間科学研究科 特任教授
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	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長 教授
委員	田村照子	文化学園大学 大学院 生活環境学研究科長 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	お茶の水女子大学 名誉教授
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
名古屋大学総合保健体育科学センター 押 田 芳 治

身体不活動（運動不足）が寿命に大きく影響することは、よく知られている。WHO 関連の調査によれば、喫煙が直接原因とされる死亡者総数は世界中で 500 万人余りとされ、運動不足に起因する死亡者総数もほぼ同数であると報告されている（Lancet, 2012）。したがって、運動不足は生活習慣病の発症・進展のみならず、一部ガンとの因果関係も指摘され、「sedentary death syndrome」とも呼ばれるに至っている。このような状況下で、デサントスポーツ科学振興財団が 30 数年前から「体力医学系分野」に研究助成を続けてこられ、その先見の明に驚きとともに敬服する次第である。

さて、今回の第 36 回の研究助成金公募に対して、応募研究課題数は 143 件あり、学術委員会で厳正に審査した結果、「体力医学系分野」から 16 件（うち 2 件は委託研究）が選出された。以下にその講評を述べる。発表された論文を大別すると、4 つの分野に集約されよう。1. 「内分泌・代謝系」：立命館大学浜岡氏らの委託研究「褐色脂肪組織と運動習慣および褐色脂肪組織増加のための栄養介入」について、体重増大抑制の観点から褐色脂肪組織の増加、機能活性化が注目されている。実際、寒冷暴露や運動により褐色脂肪から FGF21、骨格筋から irisin が分泌され、白色脂肪に働きかけ、褐色細胞と同様に脂肪の燃焼効果をもたらす。褐色細胞も増やすと報告されている（Cell Metab 2014）。浜岡氏らは既報の追試に留まらず、サプリメントの一つであるグレインオブパ

ラダイス（GP）の摂取が褐色脂肪量や熱産生能の増大を招くという特筆すべき成績を提示したと言えよう。今後の肥満研究の寄与が望まれる。また、北海道大学山仲氏の摂食時刻とホルモン変動・エネルギー代謝の関連性、東京大学寺田氏のインクレチンと筋グリコーゲンの関係、久留米大学田尻氏らの摂食促進ペプチドであるグレリンと摂食行動など運動量増加との関わりに関してもホットな話題を提供したと思われる。

2. 「トレーニング効果」：超高齢社会に向けて、転倒防止など筋力維持・増強の観点からの研究が待たれる。鹿屋体育大学吉武氏らの筋力発揮におよぼす筋圧迫効果、北翔大学沖田氏らの血流制限とレジスタンス運動効果発現との関係性、熊本大学小林氏の姿勢制御能力改善を目指した足関節底屈筋トレーニング効果、の 3 つの研究成果は一層の発展を期待したい。次に、山梨県富士山科学研究所堀内氏らの筋力トレーニングによる血流制限下での血管内皮機能、睡眠時無呼吸症候群（SAS）と心血管系疾患発症との関わりが指摘されてから久しい。その機序解明のために行われた、筑波大学今井氏らの低酸素間欠的無呼吸での循環動態の把握は必要となろう。一方、種々の条件下におかれると生体適応の一環として相応の遺伝子発現がみられる。最近ではエピゲノミックス（広義）とも呼ばれている。立命館大学宮本氏らは最大無酸素性作業能力に関わる骨格筋タンパク分子の遺伝子発現を網羅的に解析した。当然いくつかのタンパク遺伝子発現が増強されることは容易に推察さ

れる。今後はいかなるタンパク遺伝子が特異的に発現されるか、研究の進展が待たれる。

3. 「スポーツ外傷」：スポーツによる筋損傷や肉離れ防止の観点から鹿屋体育大学前大氏らと中京大学渡邊氏の研究が選出された。アマチュア、プロに限らず、スポーツ事故では最も多いとされ、さらなる成果を望みたい。また、ボクシングによる頭部外傷も決して少なくない。同じように、アメフトやラグビーなどに認められる頭頸部損傷も周知の事実である。今年のENDO.2015 (USA) で発表された一つに、これらのスポーツ競技参加で下垂体機能不全に陥った例が少なからず存在すると警鐘された。成長ホルモンなどの分泌不全のため倦怠感や無関心などの様々な身体症状が出現し、米国では社会問題となっているという。その顕著な例として米国プロアメフト協会の元選手への補償問題はあまりにも有名である。そこで、立命館大学長野氏のボクシングによる頭部衝撃に関する研究には興味深いものがある。

4. 「スポーツ脳研究」：先述のごとく、寿命の延伸と少子化とが相まって、我が国は超高齢社会へ邁進している。当然ながら、いかに健康寿命を延ばすかが重要な課題である。特に、高齢者の認知機能低下（いわゆる認知症）の対策が喫緊となっ

ている。これまで、有酸素運動の継続が高齢者の認知機能の低下防止や改善に有効であることは、相当数報告されている。しかしながら、その機序は明らかにされていない。東洋大学小河氏は認知機能と運動中の脳循環との関係から究明しようとしたが、一層の成績を期待したい。福井大学高田氏らのバイオフィードバックトレーニングによる脳血流分布への影響調査や大阪市立大学田中氏の脳磁図研究も認知機能改善機序解明の一助になりうるとも思われ、一層の進捗が期待されよう。

大別しても4つの大分野で成り立っており、専門外の分野では理解するには甚だ困難な面もある。しかし、時間をかけて熟読すれば、現在の体力医学研究全般の趨勢が分かり、特にこれから体力医学研究を始めようとする者にとって、今後の研究テーマを考える上で大きな指針となりうると思われる。是非、若手研究者には熟読されることをお勧めしたい。

以上、体力医学関係、委託研究2件を含め、16件の研究成果報告に対するの総括、講評である。あくまでも私個人レベルの解釈から記したもので、筆者らの意図する研究内容やその方向性を指していないとすれば、文責はすべて私にあり、どうかお許し願いたい。

入選研究者成果報告書講評

学 術 委 員
神戸大学大学院 教授 井 上 真 理

第36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・工学関係分野の5件の研究課題について以下に講評を行う。

「スーツの「着心地」を数値化する計測・評価法の開発と検証」(西松豊典ら)は、人の感覚として得られるスーツの着心地の評価方法とその数値化のための計測項目と方法を明らかにするための研究である。スーツ上衣は肩周り寸法(アームホール、脇巾)を変化させた5種類を試料として、厳密に角度を指定して水平内転運動と前方拳上運動を行い、上腕部・脇下前部・後部・肩甲部について圧迫感・窮屈感・ツッパリ感・動作拘束感・着心地の官能検査を行い、その部位の衣服圧を測定してさらに、三角筋前部・三角筋中部・大胸筋・僧帽筋・前鋸筋の筋活動量測定を行っている。スラックスに関しては、臀部形状(クセ取り加工・股上丈)を変化させた3種類を試料として、時間を指定した片足上挙運動としゃがみこみ運動を行い、膝部・大腿部前面・後面・内側・臀部についてスーツ上衣と同様の官能検査とその部位の衣服圧測定を行った。これらの測定結果から、官能評価結果と衣服圧、または筋活動量との間に相関関係を見出した。厳密な官能評価の方法とその評価を裏付ける衣服圧および筋活動量の評価方法を提案し、その有効性を確認している。被服構成学、被服衛生学の総合的な視点から感覚評価を、客観的に評価する方法を明らかにしており、今後さらに応用範囲を広げることのできる研究である。

「歩行型腰部柔らかダミーを用いた衣服圧測定

方法の確立」(菅谷紘子ら)は、締め付け強さの異なる2種類のロングガードルを試料として、エアバック方式による衣服圧測定方法により、人体の柔らかさの分布に相似した柔らかダミーと硬質素材のダミーを用いた立位および開脚静止時の衣服圧を比較するとともに、柔らかダミーを用いて歩幅・速度の異なる歩行時を想定した動的な衣服圧の時系列変化を調べた研究である。柔らかダミーと硬質ダミーでは部位により測定値のレベルが異なるが、試料間の測定値の傾向は近似していること、動的な測定により、歩幅が大きく、速度が速くなるほど一定の衣服圧が常にかかることになり、変動が小さくなるという知見が得られた。人体での衣服圧測定が不安定なため、これまでの多くの衣服圧研究において、モデル化したダミー上での衣服圧測定がなされてきているが、人体上での衣服圧に対応するデータを得ることが困難な状況で、柔らかダミーの開発は画期的なものである。今後、人体と柔らかダミーを用いた衣服圧測定の比較も行い、柔らかダミーでの測定法の確立に関する更なる研究が望まれる。

「アスリートの体型研究 - 各種競技従事者に適合する最適なウェア作製を目指して -」(佐藤真理子ら)は、競技によるアスリートの体型の特徴を明らかにし、その特徴に対応したウェア作製を目指して、剣道・テニス・陸上(短距離)・サッカーに従事するアスリート各10名の体型を計測した研究である。メジャーおよびマルチン人体計測器を用いた次元計測、シルエット写真によ

る二次元計測，三次元人体計測器による立位正常姿勢の三次元計測および皮下脂肪厚，背面形状，重心動揺の計測を行い，Heath-Carter法により三頭筋・肩甲下・腸骨棘上の各皮脂厚と身長より算出する内胚葉スコア，上腕骨顆間隔・大腿骨顆間隔・上腕屈曲囲・三頭筋皮脂厚・下腿最大囲・下腿内側皮脂厚より算出する中胚葉スコア，身長・体重より算出する外胚葉スコアを求めて体型分類を行った。これらのデータを日本人の一般体型（HQLデータ）と比較することで，各競技のアスリートの特徴を捉えている。一般体型との比較では，頸付け根囲の値が4競技とも顕著に大きく，肩傾斜角度からなで肩傾向が，背面形状計測ではテニスの円背傾向，陸上の出っ尻傾向が示された。Heath-Carter法では，4競技とも中胚葉スコアの優位な体系的特徴をもつ一方で，各競技による傾向を明らかにしている。競技別のアスリートのウェアデザインに主眼を置いた基礎資料を得ることができ，製品設計への研究につなげられることが示唆された。

「消防用防護服着用時に実施する運動・バランス能力テストの有効性検討」（ソン スヨンら）は，10名の男子大学生を被験者として，重量の異なる衣服および空気呼吸器とデザインが異なる空気呼吸器の組み合わせによる5条件で，運動能力とバランス能力テスト，重心動揺測定を行い，防護装備の重量とデザインがバランス能力に及ぼす影響について検討した研究である。運動能力テストでは，踏み台昇降運動，くぐりと跨ぎ動作で空気呼吸器を装着することが動作性を低下させることを明らかにした。いずれのテストにおいてもデザインによる差は見られなかったが，バランス能力テストで着衣条件の重量との間に優位な相関関係が認められた。これらのことから，運動能力テストとバランス能力テスト法が簡便で有用な動作性標準テスト方法になることを示唆している。消防用防護服もその評価テスト方法も，国際的に標準

化された規格がなく，標準化されていないとのこと。この研究は，消防用防護服着用時の動作性評価方法の確立のために重要なものであり，被験者の選定や防護服の条件設定など課題は多いが，今後さらに研究が進むことを期待する。

「皮膚バリア保護的に働く弱酸性ポリエステルを利用した化繊アレルギー原因物質の解明」（弘田量二ら）は，化学繊維を着用した際の接触性皮膚炎の原因を明らかにすることを目的として，化繊アレルギー既往歴を調査するアンケートおよび化学繊維過敏者の精密な頻度調査のためのパッチテストを行った研究である。さらに，皮膚障害を起こしにくいとされる弱酸性ポリエステルの化学繊維として開発された繊維の，負担を少なくするメカニズムを明らかにすることを目的として，ポリエステルへの元素吸着，蛋白吸着について検討している。56名のうち23%の被験者でパッチテストの陽性を認め，化繊アレルギーの既往歴との有意な関連性が認められた。しかし，陽性者の弱酸性ポリエステルと従来のポリエステルのパッチテストによる有意差は認められなかった。人工汗を作成し，弱酸性ポリエステルと従来品の元素吸収の違いを検討した結果は，両試料にPbやCu，Alの金属元素が強く吸収されることが明らかになり，また蛋白吸着に関しても，両試料に大きな差異が見られなかったと報告している。筆者らも述べているように，両試料に反応ありとした被験者が多かったことから，母集団としての被験者数やパッチテストの方法，化繊過敏者の汗の検討など，検討課題は多い。しかし，高齢者や乳幼児のみならず幅広い年代で皮膚障害に悩まされるケースが増えているだけに，是非とも解決が望まれる課題であり，更なる研究の進展に期待したい。

以上，今回の被服・工学関係の分野は，アパレルの着心地という感覚の客観評価方法の確立，動きやすさや着用快適感にかかわる衣服圧のモデル化のためのダミーによる測定方法の基礎研究，競

技によるアスリートの体型に応じたウェア設計のための基礎データの蓄積，消防用防護服の動作性能の測定方法の確立，および化繊アレルギーによる皮膚障害を解明するための基礎研究という内容であった。大きく分類すると，被服を設計するにあたっての機能性評価が3件，材料評価が1件，ウェア設計に必要な体型データに関する研究が1

件であった。いずれも，目的に応じて健康で心地よい生活を送るための基礎および応用研究として重要な内容である。このような被服・工学関係分野の研究に対し，研究助成を継続して下さっているデサントスポーツ科学振興財団に感謝の意を表したい。

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 大学院 人間科学研究科 特任教授
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	石 本 雅 敏	株式会社デサント 代表取締役社長
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 発達栄養科 教授
評 議 員	星 田 勲	株式会社デサント 顧問

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

訃 報

辻 阪 新 二 氏 逝 去

平成 26 年 5 月 13 日 辻阪新二氏（株式会社デサント 元中央研究所長）が逝去されました。

辻阪氏は財団設立当初より平成 7 年 6 月まで学術委員をつとめられました

謹んで哀悼の意を表します。

活 動 報 告

- (1) 定時理事会（決議の省略）
月 日：平成 26 年 5 月 20 日（火）
議 題：① 平成 25 年度事業報告書承認の件
② 平成 25 年度決算報告書承認の件
③ 株主権行使の件
④ 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. 35 発行
平成 26 年 6 月

- (3) 平成 26 年度総会および助成金目録贈呈式
日 時：平成 26 年 6 月 6 日（金）
11：30～12：00 評議員会・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：① 平成 25 年度事業報告書承認の件
② 平成 25 年度決算報告書承認の件

- (4) 第 36 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 26 年 7 月 25 日

- (5) 第 37 回自由課題学術研究公募開始
平成 26 年 9 月 1 日

- (6) 書面理事会（決議の省略）
月 日：平成 26 年 10 月 15 日（水）
議 題：① 臨時書面評議員会招集承認の件
② 事務局長選任の件

- (7) 書面評議員会（決議の省略）
月 日：平成 26 年 10 月 29 日（水）
議 題：① 定款一部改正承認の件
② 議事録作成者及び議事録署名者に係わる職務を行う者を選任する件
- (8) 第 37 回自由課題学術研究公募締切
平成 26 年 11 月 7 日
- (9) 第 37 回自由課題学術研究公募申請書審査
平成 26 年 11 月 7 日～平成 27 年 2 月 27 日
- (10) 第 36 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 26 年 11 月 19 日
- (11) 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 26 年 12 月 25 日
- (12) 平成 27 年度学術委員会
日 時：平成 27 年 2 月 27 日（金）12：45～13：40
場 所：株式会社 デサント 東京オフィス
議 題：① 第 37 回自由課題学術研究公募審査の件
② 学術研究委託選定の件
③ その他
- (13) 定時理事会
日 時：平成 27 年 2 月 27 日（金）14：00～14：30
場 所：株式会社 デサント 東京オフィス及び大阪オフィス〈WEB 会議〉
議 題：① 平成 27 年度事業計画承認の件
② 平成 27 年度収支予算承認の件
③ 規程の追加及び改正承認の件

以 上

— 編 集 後 記 —

機関誌「デサントスポーツ科学」第36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。

2020年東京オリンピック・パラリンピック競技大会開催を控え、あらためてスポーツに寄せる関心は高まりを見せています。

このような環境の下、「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・援助し、併せてスポーツの振興発展を目的とする団体を助成し、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とする。」当財団は、この期待に応えるべく事業活動を積極的に行っていくことが重要であると考えています。

平成27年度からは、「障がい者スポーツ」に注目し、障がい者のスポーツ振興に関わる調査・研究への助成を実施します。障がい者が積極的にスポーツに参加し、「すべての人々に、スポーツを遊ぶ楽しさを」を実感していただければと微力ながら応援します。

昭和56年発刊を初版として第36回を迎えた機関誌「デサントスポーツ科学」に掲載した学術研究は、累計で940件となります。今年度これらの研究論文をデータ化し、保存及び公開の利便性を図ります。

私は、平成23年9月公益財団法人への移行とその後の当財団の安定運営に尽力された野村哲郎氏から昨年10月にバトンを受けました。当財団の更なる発展のために努めて参る所存でございます。今後とも今まで以上のご指導、ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

事務局長 藤 田 恒 夫

「デサントスポーツ科学」第36巻 DESCENTE SPORTS SCIENCE Vol. 36

(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27年6月5日
June 5, 2015
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
「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