

部分的な筋温の低下は 筋疲労にどのくらい影響を及ぼすか？

名古屋大学 秋間 広
(共同研究者) 名古屋市立大学 白 斯琴图雅

Effect of Proximal Region of Gastrocnemius Cooling on Muscle Fatigue

by

Hiroshi Akima

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

Bai Siqintuya

Nagoya City University

ABSTRACT

The purpose of this study was to clarify the effect of cooling of proximal region of gastrocnemius muscle on electromyographic (EMG) activities during calf-raising exercise. Eight men and women performed calf-raising exercise every two seconds for twenty-five repetitions with or without cooling. Cooling was applied for the proximal region of the gastrocnemius. During the cooling, skin temperature was measured from the proximal and distal region of the lateral gastrocnemius muscle. Surface EMG activities were recorded from the proximal and distal lateral gastrocnemius (LGpro and LGdis, respectively), proximal and distal medial gastrocnemius (MGpro and MGdis, respectively) and soleus (Sol) muscles during the calf-raising exercise. Skin temperature of LGpro, i.e. cooling region, significantly decreased; however, no change was found in LGdis after 30 min cooling. In all tested regions, EMG activities in the cooling condition were significantly higher than those in the control condition. The relative EMG activity changes in cooling condition to the control condition were significantly higher in MGpro than MGdis; however, no significant difference were found between LGpro and LGdis.

These results suggest that cooling of the proximal region of the gastrocnemius muscle induces significant changes in neuromuscular activities in cooled regions as well as non-cooled region and that these changes would be strategy to avoid fatigue during required task.

要 旨

本研究では腓腹筋近位部への部分冷却がカーフレイズ中の下腿三頭筋の筋活動に及ぼす影響について検討した。被検者は男女計8名であった。最初に特に制限を設けずに片足でのカーフレイズ運動を2秒に1回のペースで計25回行った（コントロール試行）。その後、腓腹筋近位部へ30分間の部分冷却を行った。冷却後にコントロール試行と全く同様な方法でカーフレイズ運動を行った（冷却試行）。運動中には腓腹筋外側頭の近位部（LGpro）・遠位部（LGdis）、腓腹筋内側頭の近位部（MGpro）・遠位部（MGdis）およびヒラメ筋（Sol）より表面筋電図（EMG）を記録し、予め行っておいた両脚でカーフレイズ運動時のEMGで全てのEMGデータを規格化した。コントロール試行前と部分冷却直後の足関節底屈の最大筋力（MVC）を測定した。MVCに有意な変化は認められなかった。コントロール試行と比較して冷却試行では、いずれの部位においても有意な表面筋電図の増加が認められた。コントロール試行と比較して冷却試行における表面筋電図の増加率では、MGproはMGdisより有意に高値を示し、LGproとLGdisでは有意な差は認められなかった。以上のことから、冷却部位においては筋活動の増加がみられたが、部位間の比較ではMGでは試行間に同様な傾向であったのに対して、LGでは冷却試行において非冷却部であるLGdisでも筋活動の増加がみられ、これは疲労を回避する神経筋制御機構の一つであると示唆された。

緒 言

環境条件は身体能力の発揮に影響することは古くからよく知られている。環境条件の中でも“温度”はパフォーマンスを規定する重要な因子の一つである^{8,17}。例えば、筋温の低下が筋のパフォーマンスを低下させることは、経験的にもまた学術的にも古くから様々な分野で研究対象とされてきた^{3,8,12,13,17}。

これまでの多くの研究では、対象とする筋全体の温度を変化させ、様々な筋の特性について検討されてきた^{9,10}。しかしながら、実際のスポーツ場面を考えてみると、活動筋の全体が気温に影響される場面もあるが、必ずしもそのような場面ばかりとは限らない。例えば、サッカーやラグビーでは半袖シャツや短パンを着用したり、ストッキングを着用して競技を行う場合が多く見受けられる。その際、活動筋の一部はユニフォームで覆われることによって保護され、また一部は外気に直接接触れる部分とが存在する。特に上記で挙げた競技においては、冬季に競技を行うことも多いため、ユニフォームで保護された部分と外気に直接接触れる部分では温度に差が認められる可能性も考えられる。しかしながら、このような状況下においてユニフォームによって保護されている活動筋の部分と外気に直接接触れている活動筋の部分がどのような疲労特性を示すのかについては十分に明らかにされていない。

本研究では、一つの筋の一部分を冷却することによって筋温を変化させ、その際の筋疲労を非冷却時と比べることによって部分冷却が筋疲労に及

はす影響について検討した。筋疲労については、表面筋電図を用いて評価した。

1. 研究方法

1. 1 被検者

被検者は健康な成人男女8名であった（年齢 27.2 ± 5.8 歳，身長 172.6 ± 10.5 cm，体重 68.5 ± 4.8 kg）。被検者には実験の概要について十分に説明を行い，同意の得られた被検者のみ同意書への署名の後，実験に参加した。なお，本研究計画は名古屋大学総合保健体育科学センターのヒトを対象とする研究審査委員会の承諾を得ている。

1. 2 実験の概要

被検者は本実験の前に等尺性足底屈力の練習を行った。練習から3日後以降に本実験を行った。実験の手順は，足底屈による等尺性最大筋力（MVC）を測定した。表面筋電図を腓腹筋外側頭の近位部（LGpro）と遠位部（LGdis），腓腹筋内側頭の近位部（MGpro）と遠位部（MGdis）およびヒラメ筋（Sol）から記録した。片足でのカーフレイズ運動を2秒に1回のペースで25回行った（コントロール試行）。その後，腓腹筋の近位部をアイスパックによって30分間冷却した。冷却開始25分後にMVCの測定を再度行った。冷却直後に片足でのカーフレイズ運動をコントロール試行と同様な方法で行った。

1. 3 運動負荷

片脚でのカーフレイズ運動を運動負荷として用いた。被検者は約5cmの台の上に母指球から指先までの部分で立ち，両手は身体のバランスを保つという目的で近くの固定物に触れることを許可した。メトロノームにあわせて1秒で足関節の最大伸展位まで底屈し，1秒で背屈して最初の姿勢に戻る運動を計25回行った。運動中は足関節の角度はゴニオメーターを用いて記録し，表面筋電図

と同期させてパーソナルコンピューターに保存した。

表面筋電図の標準化を行うため，両脚でのカーフレイズ運動を行った。両脚でのカーフレイズ運動は肩幅程度に両脚を開き，片脚でのカーフレイズと全く同様に10回の運動を行った。

1. 4 部分冷却

部分冷却はビニール袋に詰めた氷を用いて，腓腹筋の近位部をターゲットとした。予め腓腹筋の筋長の中央部にマジックで印をつけ，近位部と遠位部の二つに分けた^{7, 16, 18}。先行研究^{7, 16, 18}によると腓腹筋外側頭は近位部と遠位部の2つの神経筋コンパートメントに分けられるということから，本研究ではその報告に従い，近位部と遠位部の2つの部位について検討を行うこととした。

1. 5 等尺性足底屈力

足底屈によるMVCの測定は等速性筋力測定器（Cybex II+, Lumex社製）を用いて行った。被検者は足関節の回転中心と等速性筋力測定器の回転中心が一致するように測定用の椅子に座った。足関節，膝関節，股関節の角度はそれぞれ，90度，180度，100度であった。最大下での力発揮を数回行った後に最大努力での足底屈筋力発揮を十分な休憩を挟みながら，3回行った。筋力発揮の時間はおよそ3秒間であった。最大の値をその被検者のMVCとした。

筋力のデータはA/D変換器（Powerlab 8SP, ADInstruments社製）を経由して，パーソナルコンピューターに1kHzで記録した。

1. 6 表面筋電図

表面筋電図はLGpro, LGdis, MGpro, MGdisおよびSolの5カ所から導出した。測定に用いた筋電計（Delsys社製，Bagnoli 8）は電極（Delsys社製，DE-2.1）にプリアンプ機能を有す

るもので、得られたシグナルを1000倍に増幅し、20 Hzから450 Hzのバンドパスフィルターを施し、1 kHzでA/D変換器を経由した後にパーソナルコンピュータ（iBook G4、アップルコンピュータ社製）に取り込み、その後に行う分析まで保存した。表面筋電図と同時に足関節の底屈・背屈方向の関節角度変化をとらえるためにゴニオメーターを装着し、表面筋電図と同期させA/D変換器を介して記録した。

1. 7 データの分析

パーソナルコンピュータに保存された表面筋電図および足関節の角度変化のデータをChart 5.0（ADInstruments社製）を用いて分析した。データ分析は足関節変化をもとにroot mean square（RMS）を算出した。分析範囲については、立位姿勢を0とし、運動中の最大足関節伸展位を10とした場合、2から10までの部分について足関節の伸展局面および屈曲局面の往復分を分析した。

表面筋電図は両脚で10回行ったカーフレイズのRMSを平均し、このRMSに対してコントロール試行および冷却試行で得られたRMSの比として表した。また、25回行った片脚でのカーフレイズ運動は5回毎に平均して表示した。

1. 8 統計処理

全てのデータは平均と標準偏差で示した。MVCは対応のあるt検定を用い、それぞれの部位における試行間の比較は、反復測定による二元配置分散分析（試行と運動回数）を用いた。また、試行間のEMG変化率の差の検定には反復測定による一元配置分散分析を用いた。Post-hocテストが必要な時はTukeyの検定を用いた。統計処理には統計処理ソフトであるSPSS（バージョン15.0J）を用いた。有意水準は5%未満とした。

2. 研究結果

図1には冷却によるLGproとLGdisの皮膚表面温度変化について示した。LGproは冷却開始5分後から非冷却部であるLGdisと比較して有意に低下し、冷却30分後には約17度まで有意に低下した。

図2には足関節底屈最大筋力（MVC）の変化について示した。MVCには有意な変化が認められなかった。

図3にはコントロール試行および冷却試行におけるLGpro, LGdis, MGpro, MGdisおよびSolのEMGについて示した。各筋の部位毎に行った二元配置分散分析の結果、いずれの部位において

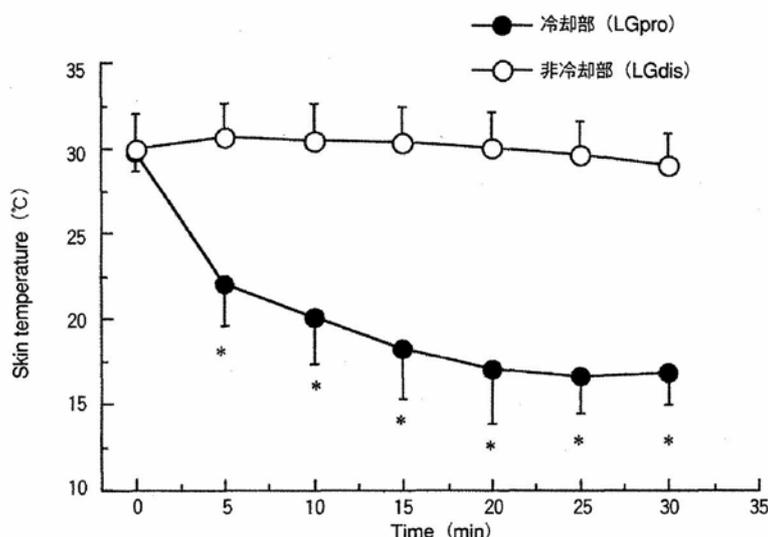


図1 腓腹筋近位部への部分冷却にともなう皮膚表面温の変化
 LGpro：腓腹筋外側頭（冷却部），LGdis：腓腹筋外側頭（非冷却部） *；p<0.05

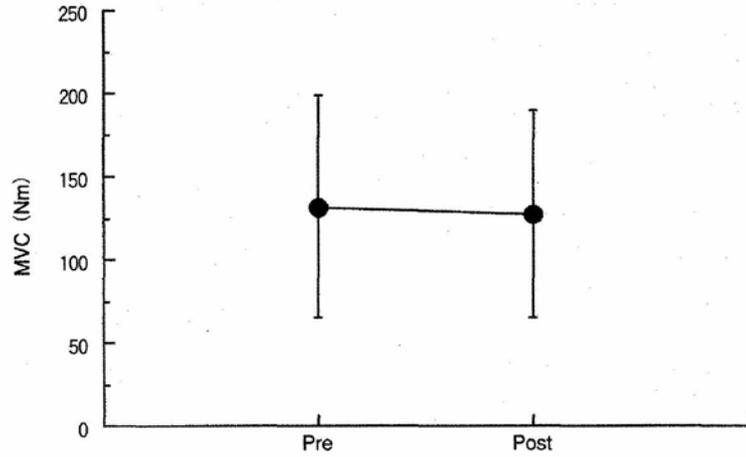


図2 足関節底屈による等尺性随意最大筋力 (MVC) の変化
Pre: カーフレイズ運動前, Post: 冷却開始25分後

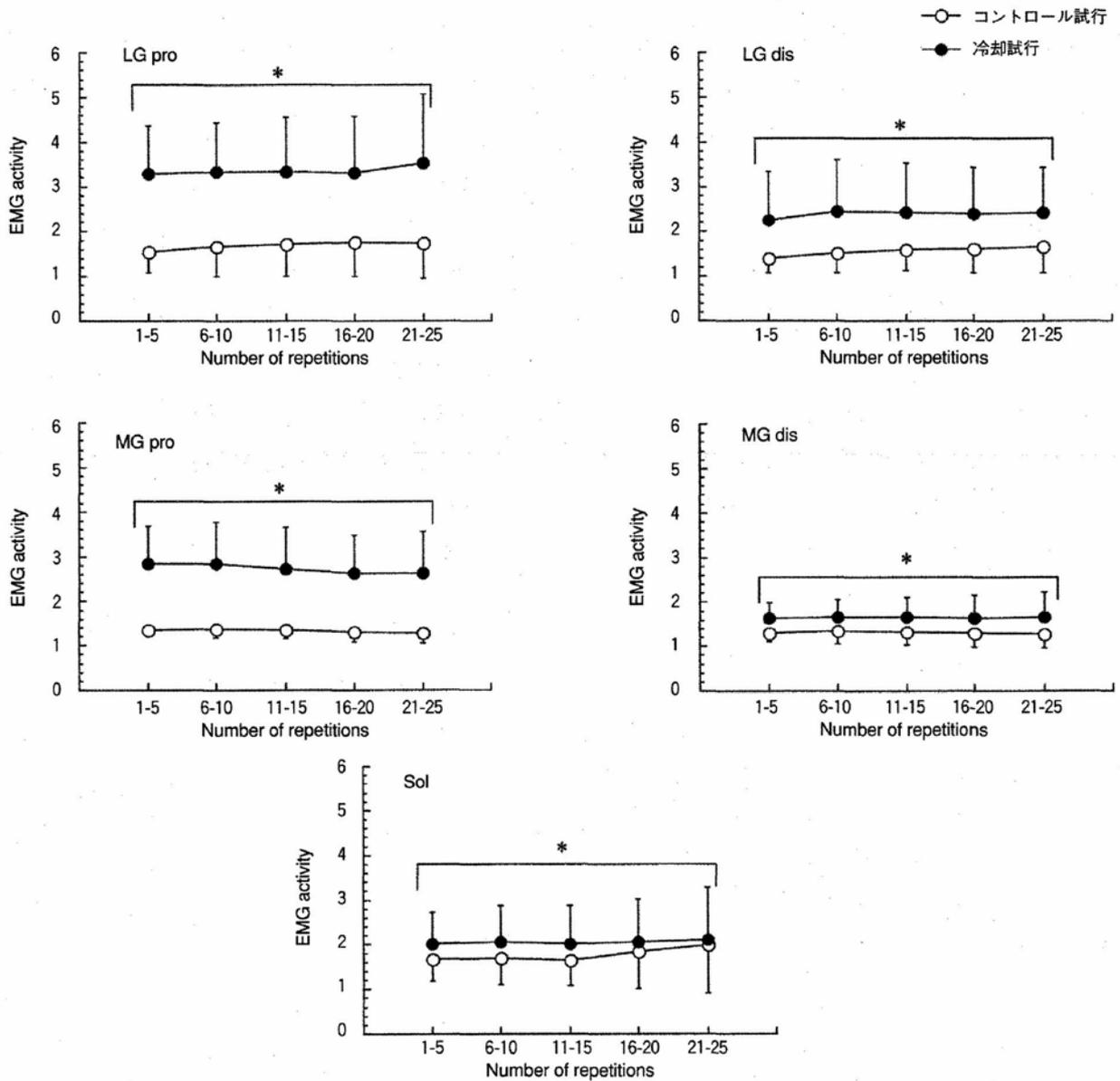


図3 コントロール試行および冷却試行での腓腹筋外側頭近位部 (LGpro)・遠位部 (LGdis), 腓腹筋内側頭近位部 (MGpro)・遠位部 (MGdis) およびヒラメ筋 (Sol) におけるカーフレイズ運動時の筋活動の経時的変化
単位: 両脚でのEMGに対する倍数で表示 *; $p < 0.05$ vs 冷却試行

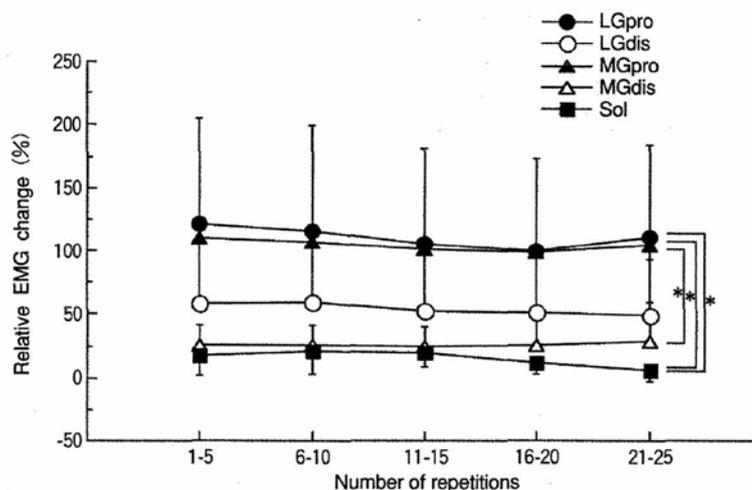


図4 腓腹筋外側頭近位部 (LGpro) ・遠位部 (LGdis), 腓腹筋内側頭近位部 (MGpro) ・遠位部 (MGdis) およびヒラメ筋 (Sol) におけるコントロール試行に対する冷却試行での筋活動の変化率 * ; $p < 0.05$

も試行による有意な変化は認められたが、運動回数および交互作用における有意な変化は認められなかった。

図4にはLGpro, LGdis, MGpro, MGdisおよびSolにおいて、コントロール試行のEMGに対する冷却試行のEMGの相対的な割合について示した。各筋の部位毎に行った二元配置分散分析の結果、筋の部位による有意差は認められたが、運動回数および交互作用による有意な変化は認められなかった。筋の部位毎の比較では、いずれの回数においてもLGproとLGdis間には有意な差は認められなかったが、MGproとMGdis間には有意な差 ($p < 0.05$) が認められた。また、LGproとMGproはSolと比較して有意に高値を示した (ともに $p < 0.01$)。

3. 考察

本研究では腓腹筋への部分冷却が、運動時の下腿三頭筋の筋活動および筋疲労に及ぼす影響について表面筋電図を用いて検討した。われわれの実験の仮説としては、腓腹筋近位部への部分冷却は、腓腹筋の非冷却部位の筋活動に変化を及ぼすと予想していた。特にその変化はLGdisにおいて顕著であろうと考えていた。腓腹筋近位部への部分冷却は同部位の相対的な筋活動を増加させ、筋疲労

を引き起こすがそれを補償する作用として腓腹筋遠位部の筋活動を増加させることが予想できた。特にLGでは神経解剖学的な知見より、近位部と遠位部では神経支配が異なっており、個別に筋活動を変化させる可能性を有していた¹⁸⁾。

本研究の結果、いずれの筋の部位においても冷却によるEMGの有意な増加が認められた。冷却部位 (LGproおよびMGpro) におけるEMGの有意な増加は、冷却が筋の活動を変化させることを示した先行研究と一致していた¹¹⁾。一方、非冷却部 (LGdis, MGdisおよびSol) においても、コントロール試行と比較して冷却試行において、有意なEMGの増加が認められた。本研究で用いた課題は、片足での体重負荷によるカーフレイズを25回行うものであった。体重負荷は一定であるので、筋活動の変化は相対的負荷の変化を反映しているものと考えられる。つまり、本研究では冷却によって筋温の低下が生じ、その結果、筋活動を増加しなければカーフレイズを行うことができなかった。一方、非冷却部においても有意な筋活動の増加が認められたことは、部分冷却による筋の部分的な適応であると考えられる。コントロール試行に対する冷却試行の筋活動の増加率を調べた結果、興味深い結果が得られた。冷却試行のLGではLGproとLGdisの間にコントロール試行

と比較して有意な差が認められなかったが、MGでは冷却部のMGproが非冷却部のMGdisより高値を示した。すなわち、MGdisではLGdisと異なり冷却試行において筋活動の増加抑制が生じていたことを示している。この結果はわれわれが当初予想したものとは逆であった。われわれの仮説は先に述べたように、MGではMGproとMGdisでは有意な差が認められずに、LGでLGproとLGdis間に有意な差が認められるであろうと予想していた。では、なぜこのような結果が認められたのかを考えてみたい。

骨格筋磁気共鳴映像法を用いたわれわれの先行研究において、片足カーフレイズ運動中のMGはLGと比較して有意に筋活動が高いことを示した²⁾。MGとLGは共に足関節の底屈に関与する筋であり、機能としては非常に類似している。しかしながら、MGはLGよりも筋量が大きい^{1, 6)}。このような違いが関係しているのか、MGはLGと比較して筋活動が高かった。そのような背景を考えると、MGはコントロール試行においてすでにかなり高い筋活動を示しており、一方、LGにおいては比較的余裕を持った筋活動レベルであった可能性が考えられる。したがって、部分冷却を行った冷却試行では、冷却した部位であるLGproおよびMGproに有意な筋活動の増加を示し、冷却による筋活動の増加は筋疲労をより誘発する可能性が高いため、他の部分の筋活動を変化させた。その変化した部分が比較的筋活動の少ないLGdisであった。つまり、すでに高い筋活動をしている部分の筋活動を増加させるより、比較的筋活動レベルの低い部分の筋活動を増加させた方が、タスクを遂行する上で筋疲労をより軽減できると神経系が判断したのだと考えることができる。

次に筋の部位別の疲労特性を考える上で重要な生理学的背景について考えてみる。一般的に、一つの骨格筋は一つの単位として機能するが、筋によっては一つの筋をいくつかの機能単位（コン

パートメント）に分けられることが神経解剖学的所見から明らかになっている¹⁸⁾。これらの筋の部分を神経筋コンパートメントと呼ぶ。それぞれの神経筋コンパートメントは、異なる α 運動神経による神経支配を受けているため、運動時には比較的独立した筋活動を示すと先行研究において報告されている^{4, 5, 15)}。ヒトの筋で神経筋コンパートメントが報告されているものとしては、腓腹筋外側頭、前脛骨筋、上腕二頭筋などが挙げられる^{14, 16, 18)}。本研究で対象としたLGでは、近位部と遠位部の2つの神経筋コンパートメントに分けられることが先行研究で示されている¹⁸⁾。本研究ではその2つの神経筋コンパートメントをターゲットに実験を行ったわけであるが、図4で示したようにLGdisとMGdisの変化率に有意な差が認められなかったことから、腓腹筋への部分冷却は非冷却部位の筋活動を特異的に変化させるには至らなかった。しかしながら、LGproとLGdisの増加率に有意な差が認められなかったことから、LGdisの部分は疲労を補償するために筋活動を増加させたことを示唆しており、これが神経筋コンパートメントの影響である可能性は高いと考えている。

4. まとめ

本研究では腓腹筋近位部への部分冷却が、カーフレイズ運動中の腓腹筋の冷却部位（LGproとMGpro）および非冷却部位（LGdis, MGdisおよびSol）の筋活動に及ぼす影響について検討した。いずれの部位においても試行（コントロール試行と冷却試行）による有意な変化は認められたが、運動回数および交互作用による有意な変化は認められなかった。また、コントロール試行に対する冷却試行の変化率での比較において、筋の部位による有意差は認められたが、運動回数および交互作用による有意な変化は認められなかった。特に筋の部位毎の比較では、LGproとLGdis間には有

意な差は認められなかったが、MGproとMGdis間には有意な差 ($p < 0.05$) が認められた。以上の結果から、LGdisはLGproの部分冷却によって筋活動を増加させたが、MGdisでは変化が認められず、これにはLGのコンパートメントによる影響およびMGの元来の高い筋活動が関係していることが示唆された。

謝 辞

本研究を行うにあたり、研究助成を頂いた財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深謝致します。

文 献

- 1) Akima, H., Kubo K., Kanehisa H., Suzuki Y., Gunji A., and Fukunaga T., Leg-press resistance training during 20 days of 6° head-down-tilt bed rest prevents muscle deconditioning. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 82 : 30-38 (2000)
- 2) Akima, H., Ushiyama J., Kubo J., Tonosaki S., Itoh M., Kawakami Y., Fukuoka H., Kanehisa H., and Fukunaga T. Resistance training during unweighting maintains muscle size and function in human calf. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 35 : 655-662 (2003)
- 3) Bernal, D., J. M. Donley, R. E. Shadwick, and D. A. Syme. Mammal-like muscles power swimming in a cold-water shark. *Nature*. 437 : 1349-1352 (2005)
- 4) English, A. W. An electromyographic analysis of compartments in cat lateral gastrocnemius muscle during unrestrained locomotion. *J. Neurophysiol.*, 52 : 114-125 (1984)
- 5) English, A. W., S. L. Wolf, and R. L. Segal. Compartmentalization of muscles and their motor nuclei: the partitioning hypothesis. *Phys. Ther.*, 73 : 857-867 (1993)
- 6) Fukunaga, T., R. R. Roy, F. G. Shellock, J. A. Hodgson, M. K. Day, P. L. Lee, H. Kwong-Fu, and V. R. Edgerton. Physiological cross-sectional area of human leg muscles. based on magnetic resonance imaging. *J. Orthop. Res.*, 10 : 926-934 (1992)
- 7) Giordano, S. B. and R. L. Segal. Leg muscles differ in spatial activation patterns with different levels of voluntary plantarflexion activity in humans. *Cells Tissues Organs.*, 184 : 42-51 (2006)
- 8) Holewijn, M. and R. Heus. Effect of temperature on electromyogram and muscle function. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 65 : 541-545 (1992)
- 9) Petrofsky, J. S. and A. R. Kind. The influence of temperature on the amplitude and frequency components of the EMG during brief and sustained isometric contractions. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 44 : 189-200 (1980)
- 10) Petrofsky, J. S. and M. Laymon. Muscle temperature and EMG amplitude and frequency. *Aviat. Space Environ. Med.*, 76 : 1024-1030 (2005)
- 11) Rome, L. C., I.-H. Choi, G. Lutz, and A. Sosnicki. The influence of temperature on muscle function in the fast swimming scup. 1. Shortening velocity and muscle recruitment during swimming. *J. Exp. Biol.*, 163 : 259-279 (1992)
- 12) Rome, L. C., P. P. Funke, R. M. Alexander, G. Lutz, H. Aldridge, F. Scott, and M. Freadman. Why animal have different muscle fibre types. *Nature*, 335 : 824-827 (1988)
- 13) Rome, L. C., D. Swank, and D. Corda. How fish power swimming. *Science*, 261 : 340-343 (1993)
- 14) Segal, R. L. Neuromuscular compartments in the human biceps brachii muscle. *Neurosci. Lett.*, 140 : 98-102 (1992)
- 15) Segal, R. L. Use of imaging to assess normal and adaptive muscle function. *Phys. Ther.*, 87 : 704-718 (2007)
- 16) Segal, R. L. and A. W. Song. Nonuniform activity of human calf muscles during an exercise task. *Arch. Phys. Med. Rehab.*, 86 : 2013-2017 (2005)
- 17) Thornley, L. J., N. S. Maxwell, and S. S. Cheung. Local tissue temperature effects on peak torque and muscular endurance during isometric knee extension. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 90 : 588-594 (2003)
- 18) Wolf, S. L. and J. H. Kim. Morphological analysis of the human tibialis anterior and medial gastrocnemius muscles. *Acta Anatomica.*, 158 : 287-295 (1997)