

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

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

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

by

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

ABSTRACT

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

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

要 旨

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

緒 言

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

因は不明である。単関節筋と二関節筋との間では、不活動に対する量的適応⁷⁾や怪我の頻度⁸⁾が異なることが報告されている。したがって、上述した要因が明らかとなれば、トレーニングやリハビリテーションの現場において、それぞれの筋群に効果的なトレーニングを選択し実施していくための基礎的な知見が得られると考えられる。

近年の研究において、低強度の運動であっても疲労困憊まで実施すれば、高強度で運動を実施したときと同程度の筋肥大が生じることが報告されている⁹⁾。その理由として、疲労により低下した筋張力を保障するために新たな運動単位が動員されて筋活動量が増加し、結果的に筋肥大に結びついた可能性が指摘されている⁹⁾。もしそうであるならば、脚伸展運動を疲労困憊まで実施したとき、単関節筋と二関節筋のいずれにおいても、疲労とともに筋活動量が増加すると予想される。しかし、スポーツ活動中に疲労困憊まで脚伸展動作を実施することが多い自転車選手やボート選手において、二関節筋に肥大応答が観察されていない^{6, 10)}ことを考慮すると、脚伸展運動時における筋活動量の変化様相は、単関節筋と二関節筋で異なる可能性がある。そこで本研究は、二関節筋の肥大応答に動作依存性が存在する要因について、運動時における筋活動様相に着目して検討することを目的とした。

1. 方法

本研究は2つの実験により構成されている。実験1では、表面筋電図 (EMG) 法を用いて、疲労困憊まで脚伸展運動を実施したときの大腿部筋群の筋活動量を計測し、その変化を検討した。実験2では、異なる運動強度で脚伸展運動を実施した前後において、磁気共鳴画像 (MR) 法により、横緩和時間 (T2) の変化を算出することを通じて筋活動量を評価した。運動により生じた代謝産物の蓄積に伴う水分の移動により、運動後に骨格

筋の T2 が一時的に増加する。この T2 の増加は、表面 EMG 法で測定した筋活動量と相関関係にあることが観察されており¹¹⁾、運動による T2 の増加は筋活動と関連すると考えられている。そのため、複数の先行研究において、運動による T2 の変化を運動時の骨格筋の活動量としてとらえた検討が行われている¹²⁻¹⁴⁾。本研究は、早稲田大学における「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得たのちに実施した。

1. 1 実験 1

1. 1. 1 被験者

健康な成人男性 12 名 (年齢 22 ± 2 歳, 身長 173 ± 5 cm, 体重 66 ± 7 kg) が実験に参加した。参加者に対して本実験の目的, 内容, 考えられるリスクについて説明し, 書面にて同意を得たのちに実施した。

1. 1. 2 実験セッティングとデータ分析

被験者は、レッグプレスマシン (Nitro S3LP, Nautilus) のベンチに座り、疲労困憊まで片足 (右足) でのレッグプレス運動 (3 秒間の短縮性収縮および伸張性収縮局面) を実施した (図 1)。運動負荷は 1 回最大拳上重量 (被験者自身の努力で 1 回だけ膝関節を完全伸展できる負荷, 1RM) の 80% の負荷とした。運動開始時における膝関節角度は 110 度 (完全伸展位を 0 度)、股関節角度



図1 本研究で実施したレッグプレス

は 130 度に統一した。

表面 EMG を、外側広筋（大腿長の近位 50% 位）、内側広筋（近位 90% 位）、大腿直筋（近位 30% 位）、大腿二頭筋長頭（近位 50% 位）、半腱様筋（近位 40% 位）および半膜様筋（近位 70% 位）から取得した（The Bagnoli-8 EMG System, DELSYS, 1×10 mm, Ag, 電極間距離 10 mm, 帯域通過フィルタ, 20–450 Hz）。大腿長は大転子から膝窩皺までの長さとした。隣接筋からのクロストークの影響を限りなく小さくするため、超音波診断装置（SSD-900, ALOKA）を用いて各筋の筋腹と筋束方向を確認し、電極貼付位置を決定した。大腿長軸方向における電極の貼付位置は、筋横断面積が相対的に大きい部位⁶⁾とした。剃毛後ヤスリで皮膚表面の角質を除去し、アルコール綿でふき取った。アース電極は左脚膝蓋骨皮膚表面上に貼付した。運動中の膝関節角度はゴニオメータ（SG150, Biometrics）を用いて取得した。EMG データおよび膝関節角度データは、A/D 変換機（PowerLab/16SP, ADInstruments）を介してサンプリング周波数 1kHz で同期させ、パーソナルコンピュータ上に記録した。

EMG データに関して、各レップにおける短縮性局面と伸張性局面ごとに root mean square (RMS-EMG) を算出し、それらを平均したものを各レップにおける RMS-EMG とした。いずれの筋においても、1RM 時の値で正規化した。筋活動量の時系列変化を調べるために、初期（1–3 レップの平均値）、中間（全体の 50% の回数に相当する前後 3 レップの平均値）、および最終（最後の 3 レップの平均値）の 3 つのフェーズに分けて正規化した RMS-EMG を算出した。

1. 2 実験 2

1. 2. 1 被験者

健常な成人男性 5 名（年齢 21 ± 1 歳、身長 173 ± 4 cm、体重 66 ± 9 kg）が実験に参加した。参加者

に対して本実験の目的、内容、考えられるリスクについて説明し、書面にて同意を得たのちに実施した。

1. 2. 2 実験セッティング

実験 1 と同様に、被験者はレッグプレスマシン（Nitro S3LP, Nautilus）のベンチに座り、片足（右足）でのレッグプレス運動（3 秒間の短縮性収縮および伸張性収縮局面）を実施した。運動負荷は 1RM の 40% あるいは 80% の負荷（40%1RM, 80%1RM）とした。負荷間で運動量をできる限り一致させるため、負荷 × 回数 × セット数をそろえた¹⁵⁾。すなわち、40%1RM 負荷では 16 回 × 3 セット、80%1RM 負荷では 4 回 × 6 セット（セット間休息はいずれも 90 秒）とした。2 つの運動は 1 週間の間隔をあけて別日に実施し、順序は被験者間でランダムとした。

レッグプレス運動前と直後（ 106 ± 4 秒後、各被験者において、2 条件間で時間を一致させた）において、大腿部の T2 強調 MR 画像（エコー時間：25, 50, 75, 100 ms, くり返し時間：2000 ms, マトリックス： 256×256 , 撮像野：24 cm, スライス厚：1 cm, ギャップ：1 cm）を取得した（図 2）。体液移動の影響を考慮するため、運動前の撮像は 20 分の安静仰臥位の後に実施した。大腿長の 50% 部位において外側広筋、内側広筋、中間広筋、大腿直筋、大腿二頭筋、半腱様筋および半膜様筋をトレースし、各筋の T2 を算出した。分析には、画像解析ソフト（ImageJ, National Institute of Health, Bethesda）とそのプラグインを用いた。

1. 3 統計処理

すべての測定項目は平均値 ± 標準偏差で表した。統計処理には、統計解析ソフトウェア（IBM SPSS Statistics 22, IBM）を用いた。実験 1 について、各筋の正規化した RMS-EMG におけるフェーズ（初期、中間、最終）の影響を調べるため、

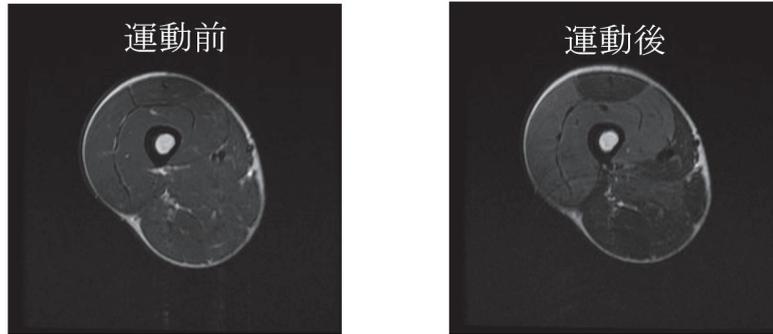


図2 レッグプレス前後における横緩和時間強調画像の典型例

一元配置の分散分析を行った。下位検定には、ボンフェローニ法を用いた。実験2について、レッグプレス運動によりT2値が変化したかどうか、およびT2の変化率に負荷間差があるかを明らかにするため、各筋においてウィルコクソンの符号付順位和検定を行った。危険率5%未満をもって統計的に有意とした。

2. 結果

2. 1 実験1

各フェーズにおける、正規化したRMS-EMGの結果を図3に示す。一元配置分散分析の結果、単関節筋である外側広筋および内側広筋において、フェーズの主効果が有意であり、疲労困憊に伴い正規化したRMS-EMGが増加した。一方、二関節筋については、大腿二頭筋のみ正規化したRMS-EMGに有意な増加がみられ、大腿直筋、半腱様筋および半膜様筋については変化が観察されなかった。

2. 2 実験2

レッグプレス運動前後における各筋のT2の結果を図4に示す。40%1RM条件において、単関節筋である内側広筋および中間広筋のT2が有意に増加した。外側広筋については、増加傾向にあったものの有意水準に達しなかった ($P = 0.068$)。一方、二関節筋である大腿直筋、大腿二頭筋、半腱様筋および半膜様筋のT2に変化はみられな

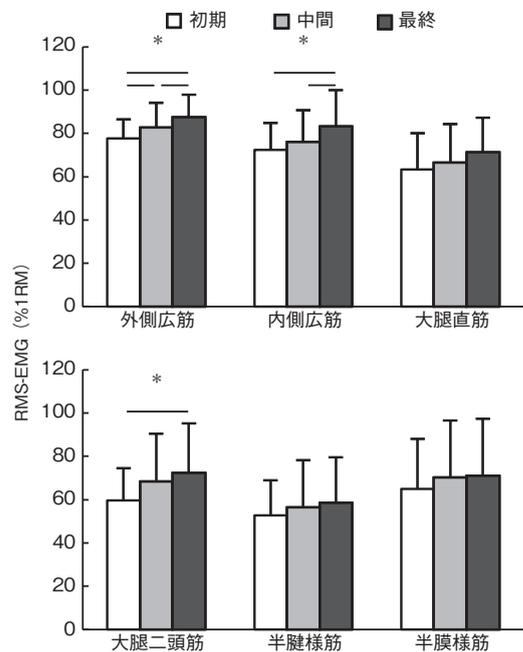


図3 疲労困憊までレッグプレスを実施したときにおけるroot mean square (RMS-EMG) RM: 最大拳上重量。*有意なフェーズ間差 ($P < 0.05$)

かった。80%1RM条件について、外側広筋と中間広筋のT2が増加したが、内側広筋では有意水準に達しなかった ($P = 0.080$)。二関節筋については、40%1RM条件と同様に、いずれの筋のT2についても変化がみられなかった。T2の変化率に関して、いずれの筋においても有意な強度間差は観察されなかった

3. 考察

本研究の目的は、多関節運動を実施したときの

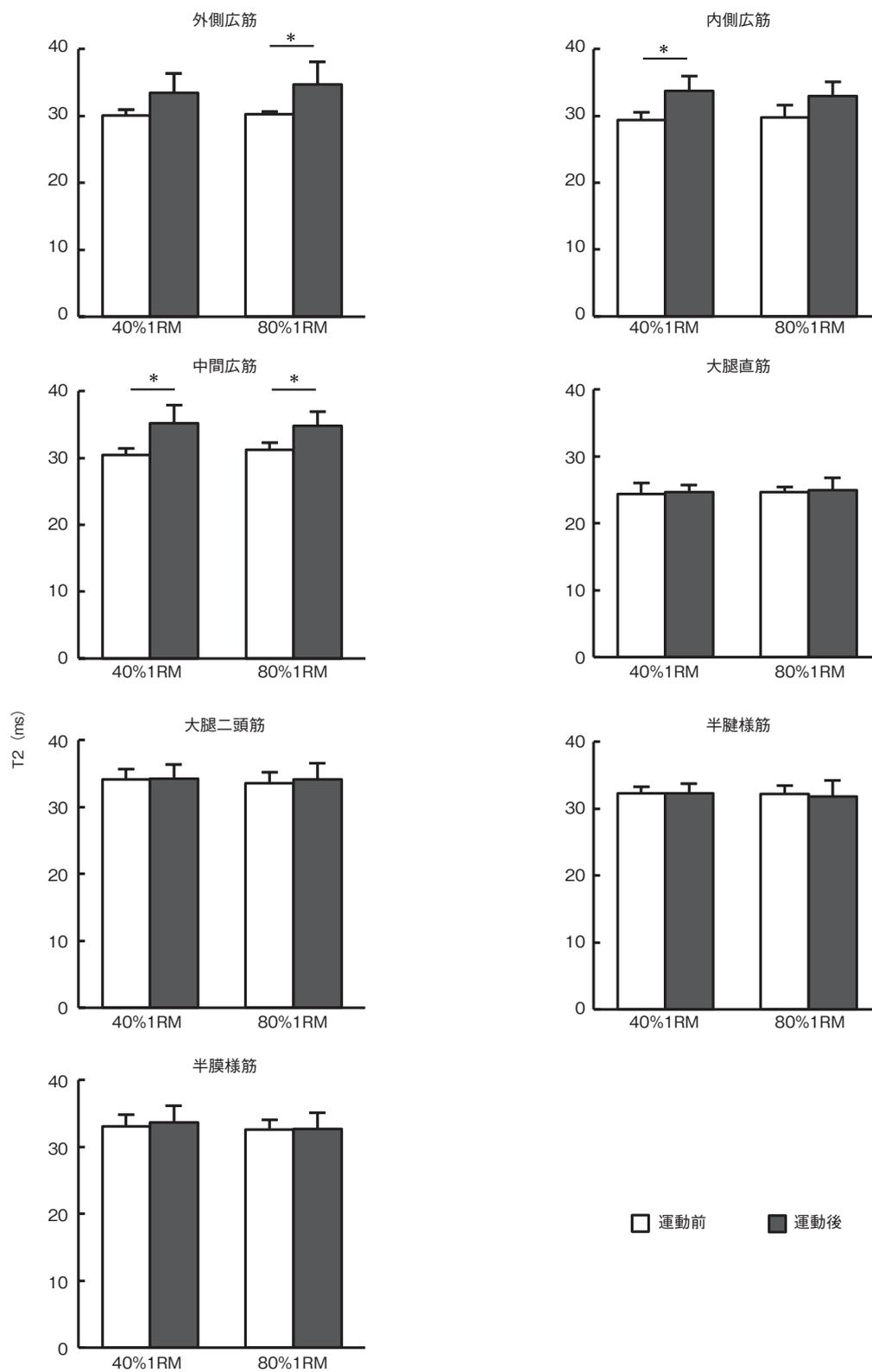


図4 レッグプレス前後における各筋横緩和時間 (T2)
RM: 最大拳上重量. *有意な変化 (P<0.05)

筋活動様相が単関節筋と二関節筋で異なるかどうか明らかにすることであった。本研究では、多関節運動としてレッグプレスを採用し、高強度条件下で疲労困憊まで実施する条件（実験1）と、運動量をそろえた異なる強度間（低強度と高強度）で実施する条件（実験2）を設定し、表面EMG法およびMR-T2法を用いて大腿四頭筋とハムストリングスの筋活動を定量した。本研究の結果、大腿四頭筋を構成する単関節筋は疲労困憊とともに筋活動量が増加し、またトレーニング量をそろえた場合、運動強度によらず同程度の活動量を示した。その一方で、大腿四頭筋とハムストリングスを構成する二関節筋は、実験1における大腿二頭筋を除き、疲労困憊まで高強度のレッグプレスを実施しても筋活動量に変化せず、実験2においては、運動強度によらずT2の変化がみられなかった。以上の結果は、多関節運動時の筋活動様相は、ある筋群を構成する協働筋間で同一ではなく、特に単関節筋と二関節筋の間で異なることを示唆している。筋活動量の筋間差が筋肥大の筋間差と関連したという先行研究¹⁴⁾をふまえると、本研究の結果は、多関節運動によって二関節筋の肥大応答がみられなかったという先行研究^{5,6)}を説明する要因の一つとなるかもしれない。

多関節運動であるレッグプレス時の筋活動様相が単関節筋と二関節筋で異なった要因の一つとして、主動筋と拮抗筋間における相反抑制¹⁶⁾の影響が挙げられる。レッグプレスでは、解剖学的に主動-拮抗作用を有する大腿四頭筋とハムストリングスが同時に活動する。そのため、大腿直筋と二関節筋ハムストリングス間で相互に活動を抑制し、結果的に単関節筋とは異なった活動様相を示した可能性がある。しかし、我々が調べる限り、ヒト生体を対象として、相反抑制の影響が協働筋内で二関節筋においてのみ観察されるといった結果を説明しうるものではなく、本研究で得られた知見のメカニズムを解明するためには、さらなる研

究が必要である。

高強度で疲労困憊までレッグプレスを実施した実験1において、外側広筋と内側広筋の筋活動量が増加したが、大腿二頭筋を除き、二関節筋の筋活動量に変化はみられなかった。筋活動量の増加は、疲労に伴い低下した筋の発揮張力を補うために、新たな運動単位を動員した結果¹⁷⁾であると解釈できる。先行研究において、ある運動課題を実施する場合に単一筋を疲労させておくと、協働筋の筋活動量が増加したことが観察されている¹⁸⁾。彼らは、外側広筋を疲労させた状態で単関節運動である膝関節伸展運動を実施すると、疲労させなかった条件と比較して、内側広筋と大腿直筋の筋活動量が大きかったことを報告している。また、膝関節伸展運動を疲労困憊まで実施した先行研究¹⁹⁾によれば、大腿四頭筋のいずれにおいても疲労とともに筋活動量が増加したことが報告されている。このような先行研究と本研究の結果をふまえると、ある運動課題を達成するための協働筋内における活動の補償戦略は、単関節運動と多関節運動で異なると考えられる。

負荷、回数およびセット数の観点から運動量をそろえた実験2において、単関節筋である広筋群（外側広筋、内側広筋および中間広筋）のT2は、両条件間で同様の変化を示した。本研究と同様の方法で運動量を規定し、タンパク合成の運動負荷依存性を検討した先行研究¹⁵⁾において、60%1RMまでは負荷の増大とともにタンパク合成速度が増加したが、それ以後においては、さらなる速度の増加はみられなかった。このことを踏まえると、本研究で実施した2つの条件間（40%1RMと80%1RM）で、タンパク合成速度は後者のほうが高かった可能性がある。ただし、本研究ではキネティクスデータの測定を行っていないため、筋のした仕事が両条件間で統一されていないか不明である点に留意する必要がある。また、1セッションの膝関節伸展トレーニングによ

る大腿四頭筋の T2 変化と、その後の肥大応答との関連を検討した先行研究²⁰⁾において、T2 変化の程度は肥大応答の同一筋内部位差とは対応するものの、筋間差とは対応しないことが示唆されている。このような点をふまえると、トレーニングによる T2 の変化は、トレーニングの継続によるその後の肥大応答を考える上で有益な情報となりうる可能性があるものの、少なくとも肥大応答の筋間差を考える上では、より肥大応答と直接的に関連したデータとの比較が必要になると考えられる。

4. 結 論

本研究の結果、多関節運動時の筋活動様相は単関節筋と二関節筋間で同一ではないことが示唆された。単関節筋とは異なり、多関節運動時における二関節筋の筋活動は、たとえ運動強度が高強度であったとしても変化しない、あるいは十分な活動が観察されなかった。

謝 辞

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

文 献

- 1) Thorpe S.K., Li Y., Crompton R.H., Alexander R.M., Stresses in human leg muscles in running and jumping determined by force plate analysis and from published magnetic resonance images., *J. Exp. Biol.*, 201: 63–70 (1998)
- 2) Housh D.J., Housh T.J., Johnson G.O., Chu W.K., Hypertrophic response to unilateral concentric isokinetic resistance training. *J. Appl. Physiol.*, 73: 65–70 (1992)
- 3) Narici M.V., Hoppeler H., Kayser B., Landoni L., Claassen H., Gavardi C., Conti M., Cerretelli P., Human quadriceps cross-sectional area, torque and neural activation during 6 months strength training. *Acta. Physiol. Scand.*, 157: 175–186 (1996)
- 4) Ema R., Wakahara T., Miyamoto N., Kanehisa H., Kawakami Y., Inhomogeneous architectural changes of the quadriceps femoris induced by resistance training. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 113: 2691–2703 (2013)
- 5) Earp J.E., Newton R.U., Cormie P., Blazevich A.J., Inhomogeneous quadriceps femoris hypertrophy in response to strength and power training. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 47: 2389–2397 (2015)
- 6) Ema R., Wakahara T., Yanaka T., Kanehisa H., Kawakami Y., Unique muscularity in cyclists' thigh and trunk: A cross-sectional and longitudinal study. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, (in press)
- 7) Belavý D.L., Miokovic T., Armbrecht G., Richardson C.A., Rittweger J., Felsenberg D., Differential atrophy of the lower-limb musculature during prolonged bed-rest. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 107: 489–499 (2009)
- 8) Speer K.P., Lohnes J., Garrett W.E. Jr., Radiographic imaging of muscle strain injury. *Am. J. Sports. Med.*, 21: 89–96 (1993)
- 9) Mitchell C.J., Churchward-Venne T.A., West D.W., Burd N.A., Breen L., Baker S.K., Phillips S.M., Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *J. Appl. Physiol.*, 113: 71–77 (2012)
- 10) Ema R., Wakahara T., Kanehisa H., Kawakami Y., Inferior muscularity of the rectus femoris to vasti in varsity oarsmen. *Int. J. Sports Med.*, 35: 293–297 (2014) .
- 11) Adams G.R., Duvoisin M.R., Dudley G.A., Magnetic resonance imaging and electromyography as indexes of muscle function. *J. Appl. Physiol.*, 73: 1578–1583 (1992)
- 12) Akima H., Takahashi H., Kuno S.Y., Masuda K., Masuda T., Shimojo H., Anno I., Itai Y., Katsuta S., Early phase adaptations of muscle use and strength to isokinetic training. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 31: 588–594 (1999)
- 13) Kinugasa R., Kawakami Y., Fukunaga T., Muscle activation and its distribution within human triceps surae muscles. *J. Appl. Physiol.*, 99: 1149–1156 (2005)
- 14) Wakahara T., Miyamoto N., Sugisaki N., Murata K., Kanehisa H., Kawakami Y., Fukunaga T., Yanai T., Association between regional differences in muscle

- activation in one session of resistance exercise and in muscle hypertrophy after resistance training. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **112**: 1569–1576 (2012)
- 15) Kumar V., Selby A., Rankin D., Patel R., Atherton P., Hildebrandt W., Williams J., Smith K., Seynnes O., Hiscock N., Rennie M.J., Age-related differences in the dose-response relationship of muscle protein synthesis to resistance exercise in young and old men. *J. Physiol.*, **587**: 211–217 (2009)
- 16) Crone C., Hultborn H., Jespersen B., Nielsen J., Reciprocal Ia inhibition between ankle flexors and extensors in man. *J. Physiol.*, **389**: 163–185 (1987)
- 17) Moritani T., Muro M., Nagata A., Intramuscular and surface electromyogram changes during muscle fatigue. *J. Appl. Physiol.*, **60**: 1179–1185 (1986)
- 18) Akima H., Foley J.M., Prior B.M., Dudley G.A., Meyer R.A., Vastus lateralis fatigue alters recruitment of musculus quadriceps femoris in humans. *J. Appl. Physiol.*, **92**: 679–684 (2002)
- 19) Akima H., Saito A., Activation of quadriceps femoris including vastus intermedius during fatiguing dynamic knee extensions. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **113**: 2829–2840 (2013)
- 20) Wakahara T., Ema R., Miyamoto N., Kawakami Y., Inter- and intra-muscular differences in training-induced hypertrophy of the quadriceps femoris: Association with muscle activation during the first training session. *Clin. Physiol. Funct. Imaging*, (in press)