

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、

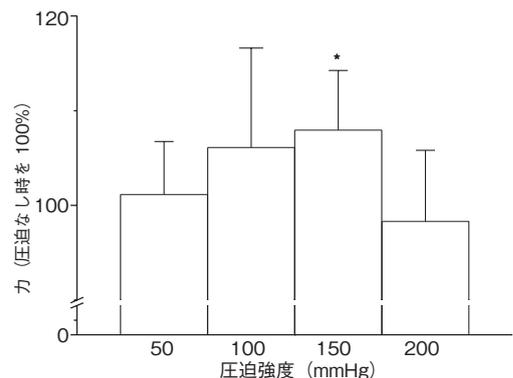


図 1 圧迫強度と 20Hz 連続刺激時の力の関係。データは圧迫なし時を 100% に換算している。
* $P < 0.05$.

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

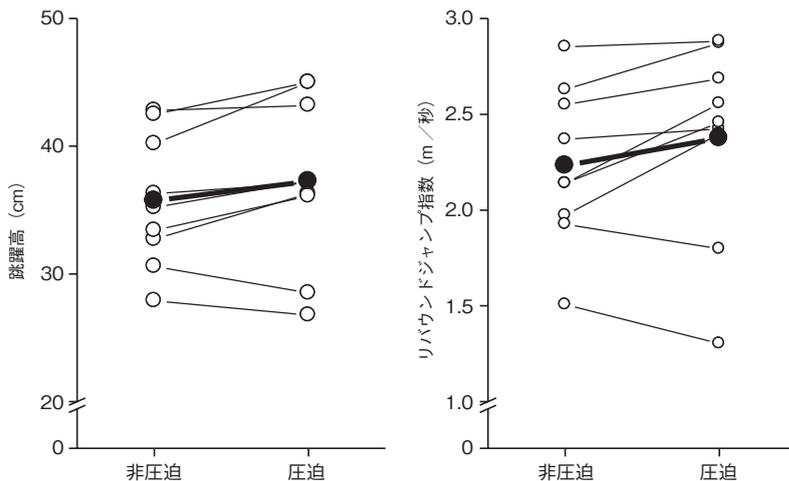


図2 圧迫の有無とリバウンドジャンプのパフォーマンスとの関係。
左：跳躍高、右：リバウンドジャンプ指数。黒丸は平均値。

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

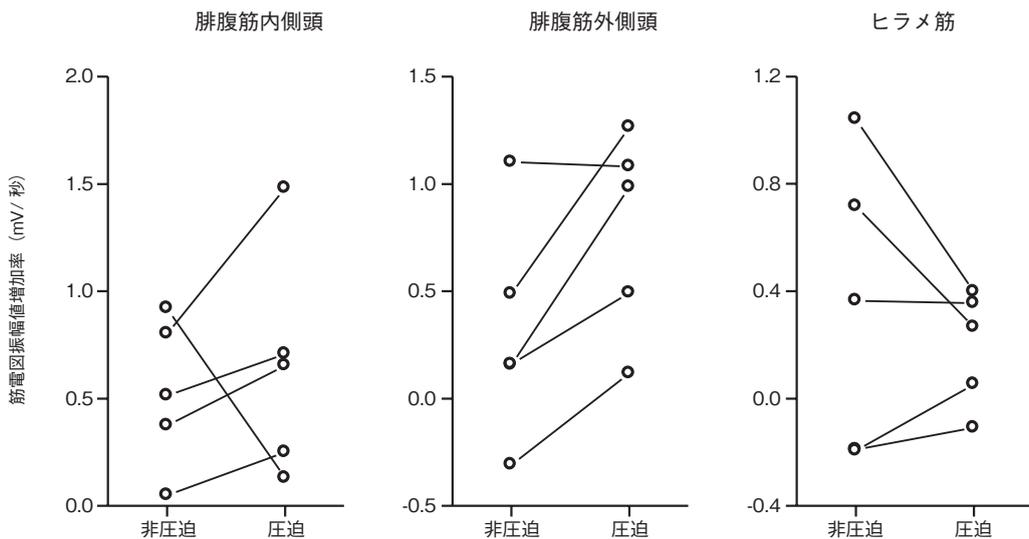


図3 圧迫の有無と間欠的な50% MVCの足関節底屈動作時の筋電図振幅値の増加率との関係
左：腓腹筋内側頭、中央：腓腹筋外側頭、右：ヒラメ筋

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）。高強度収縮時においては、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)