

高齢者における足関節底屈筋群の 瞬発的な力発揮能力向上を目的とした 在宅トレーニングが立位姿勢保持能力に及ぼす効果

芝浦工業大学 赤木 亮 太
(共同研究者) 芝浦工業大学大学院 江 間 諒 一

Effects of Home-based, High-speed Calf-raise Training for Improvement of Rapid Force Production of Plantar Flexors on Postural Stability in Elderly People

by

Ryota Akagi

*College of Systems Engineering and Science,
Shibaura Institute of Technology*

Ryoichi Ema

*Graduate School of Engineering and Science,
Shibaura Institute of Technology*

Research Fellow of Japan Society for the Promotion of Science

ABSTRACT

This study examined whether home-based, high-speed calf-raise training changes the rate of torque development (RTD) of the plantar flexion, balance performance and the resting muscle hardness of the gastrocnemius medialis (MG) in elderly men. Twenty-three healthy elderly men (70–79 yr) were randomly assigned to a training (n = 13; 73.9 ± 2.9 yr) or control group (n = 10; 73.2 ± 3.3 yr). The subjects in the training group performed 8 weeks (3 times per week) of home-based bilateral calf-raise training using body mass. On the other hand, the subjects in the control group were requested

to continue their normal daily activities throughout the same period. The RTD of the plantar flexion, the outer circumferential area of center of pressure (COP) displacement during single-leg standing and the resting MG hardness were measured before and after the intervention. The RTD relative to maximal strength of the plantar flexion was calculated as nRTD. In addition, the muscle volume of the plantar flexors was estimated using the muscle thickness of them and the lower leg length. No variables changed in the control group. In contrast, nRTD of the plantar flexion and the resting MG hardness increased and the outer circumferential area of COP displacement during single-leg standing decreased significantly after the intervention in the training group. Our findings indicate that the calf-raise training at home, performed without special equipment or venue, induces improvements of the rapid force generating capability of the plantar flexors and the ability of balance performance. That is, this training program is useful to maintain and/or improve the quality of life for elderly men. Furthermore, from the perspective of muscle mechanical properties, it is suggested that a stiffer muscle can contribute to the higher rapid force generating capability.

要 旨

本研究では、70代の高齢男性を対象に、素早い動作を意識した在宅でのカーフレイズトレーニングが足関節屈曲群の瞬発的な発揮能力、立位姿勢保持能力を変化させるかについて検討した。トレーニング群の被験者13名(73.9±2.9歳)は、自重によるカーフレイズトレーニングを週3回、8週間、自宅で実施した。一方、コントロール群の被験者10名(73.2±3.3歳)は、同期間、普段通りの生活を送った。8週間の前後で、足関節底屈筋群のRate of Torque Development (RTD)及び筋体積、片脚での静止立位中の足圧中心(COP)軌跡の外周面積及び腓腹筋内側頭の筋硬度を測定あるいは推定した。また、RTDについては最大随意収縮時のピークトルクで正規化した他(nRTD)を算出した。コントロール群において、いずれの変数も8週間の前後で変化がみられなかった。一方、トレーニング群では8週間のトレーニングに伴い、nRTD及び筋硬度は増加し、COP

軌跡の外周面積は減少した。これらの結果は、足関節屈曲筋群の瞬発的な発揮能力及び立位姿勢保持能力が、在宅でのカーフレイズトレーニングにより改善されることを示すものであった。このように、本研究で採用したトレーニングプログラムは、実際に高齢者のQuality of Lifeの維持・向上を果たす上で有用なものであることが明らかにされた。また、筋の機械的性質の観点から、筋の硬さが瞬発的な力発揮能力に貢献し得る可能性が示唆された。

緒 言

2015年9月時点で、65歳以上の高齢者が総人口に占める割合が26.7%、かつ、80歳以上の人口が1000万人を超えるなど、世界でも類を見ない超高齢社会に突入している日本において、加齢に伴い生じる筋力の衰え・筋機能の低下が、結果として転倒リスクの増加をもたらしている¹⁾ことは大きな問題となっている。高齢者の転倒は、骨折等の外傷を引き起こし、その後寝たきりにな

る等の Quality of Life (QOL) の低下をもたらすリスクを抱える。したがって、高齢者における転倒予防策を創出することは喫緊の課題となっている。

姿勢外乱に対してバランスを回復させるためには、瞬発的な筋力発揮能力が必要となる²⁾。また、立位姿勢の動揺を修正する上で、足関節底屈筋群の働きが重要である^{3,4)}。以上のことから、高齢者において、足関節底屈筋群の瞬発的な力発揮能力を向上させることは、立位姿勢保持能力を改善させ、ひいては、転倒防止の一助となることが期待される。高齢者を対象に、足関節底屈筋群の瞬発的な力発揮能力向上を目的とした筋力トレーニングは、申請者自身の研究⁵⁾に限定されている。この研究では、週2回の頻度で4週間、瞬発的な筋力発揮を行わせるトレーニングを採用した結果、立位姿勢保持能力の明確な改善までには至らなかった。このことは、トレーニング期間・頻度を増やすことの重要性を示唆するものである。また、今後の発展性を考えた場合には、このようなトレーニングを、高齢者が気軽に実施・継続できるよう配慮することも不可欠である。ここで、足関節底屈筋群を対象とすることを考慮すれば、具体的なトレーニングとして、特別な機器を使用しない、自重を用いたカーフレイズトレーニングが提案される。そこで本研究では、高齢者を対象にした足関節底屈筋群の瞬発的な力発揮能力向上を目的とした在宅でのカーフレイズトレーニングが、立位姿勢保持能力の改善に効果的か検討した。その際、超音波剪断波エラストグラフィを用いた申請者自身の研究⁶⁾において、筋が柔らかいことが瞬発的な力発揮能力に悪影響を及ぼす可能性を示唆していることを踏まえ、筋を材料として捉える視点（すなわち、筋硬度）を新たに加えることとした。

1. 方法

1.1 被験者

70代の高齢男性23名（年齢：73.6 ± 3.0 歳，身長：165.4 ± 6.7 cm，体重：66.7 ± 9.6 kg）を対象とし、トレーニング群13名（年齢：73.9 ± 2.9 歳，身長：164.5 ± 7.2 cm，体重：66.0 ± 10.2 kg），コントロール群10名（年齢：73.2 ± 3.3 歳，身長：166.7 ± 6.1 cm，体重：67.6 ± 9.3 kg）に振り分けた。年齢，身長，体重，いずれの項目においても，有意な群間差はみられなかった。被験者に対して，口頭と文書により本研究の目的，内容，考えられるリスクについて説明し，実験開始までに書面にて参加の同意を得た。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 実験手順

トレーニング群の被験者は，週3回の頻度で8週間，素早い動作を意識した自重によるカーフレイズトレーニングを自宅にて実施した。一方，コントロール群の被験者は，同じく8週間，本実験の測定を意識したトレーニングを行わず，運動習慣や生活習慣が変わることがないように，普段通りの生活を送った。その8週間の前後（Pre 測定及び Post 測定）において，足関節底屈筋力及び立位姿勢保持能力を測定した。また，足関節底屈筋群の筋厚及び下腿長を測定し，足関節底屈筋群の筋体積を推定した⁷⁾。筋硬度の測定は腓腹筋内側頭（MG）を対象として実施した。いずれの測定も，ボールを蹴る脚と反対の脚（軸脚）で実施した。

1.3 トレーニング内容

本研究では，素早い動作を意識した自重によるカーフレイズトレーニングを自宅で行わせた。トレーニング群の被験者は，両踵を地面に着け，直

立した状態から、できるだけ素早く両踵を上げた。そして、2秒程度で地面に両踵が着くように戻した。この1サイクルの動作を、5秒に1回のペースで連続10回行い、1セットとした。そして、セット間の休憩を2分とし、3セット実施するプログラムを1回のトレーニングとした。トレーニングの際、被験者には必ず壁や椅子に触れ、バランスを崩さないよう指示した。1回目のトレーニングはPre測定後に研究室で実施し、正しい動きを理解できているか、検者が確認した。2回目以降のトレーニングは、各被験者が自宅で行い、行なった日を記録するように指示した。

1.4 筋力測定

トルクメータ (TD200, クボタ) を設置した特注の等尺性筋力計⁵⁾を用いて、最大随意収縮による等尺性足関節底屈トルクを測定した。被験者は、足関節角度0度、膝関節角度0度及び股関節角度80度(いずれも解剖学的正位:0度)で筋力計に着座した。被験者の各関節は、伸縮性のないストラップを用いて固定された。被験者には、十分なウォーミングアップの後、3秒間の等尺性筋力発揮をできるだけ速く、全力で行わせた。試行は3回とし、試行間には1分の休憩を設けた。これらの関節トルク信号は、A/D変換器 (PowerLab16/35, ADInstruments) を介して1000Hzでパーソナルコンピュータに記録された。

得られた関節トルクデータには、4次のバターワースフィルタを用いて、15Hzのローパスフィルタをかけた。3試行の内、関節トルクのピーク値 (MVCトルク) が最も高かった試行において、時間-トルク曲線の力の立ち上がり (onset) から200 [ms] までの傾きを算出した⁵⁾。そして、この傾きをMVCトルクで正規化した (nRTD)。onsetは、関節トルクがベースラインからMVCトルクの2.5%を超えた瞬間と定義した^{8,9)}。

1.5 立位姿勢保持能力測定

被験者は重心軌跡測定器 (T.K.K5810, 竹井機器工業) の上で、開眼状態で片脚での静止立位を行った。被験者は裸足になり、手は腰に当て、視線と同じ高さにある2 [m] 前方の目印を注視した。その際、軸脚と逆の脚は膝関節がなるべく90度になるように上げ、上げた脚が軸脚につかないようにした。上限を30秒として1人3回行った。被験者が片脚を上げた時点を測定開始とし、1) 手が腰から離れた場合、2) 両脚が付いてしまった場合、あるいは3) 軸脚がステップを踏んだことにより重心軌跡測定器を少しでも離れてしまった場合を測定終了とした。

分析項目は足圧中心 (COP) 軌跡の外周面積とし、重心軌跡測定器専用プログラムを用いて分析を行った。分析開始から5秒間はふらつきが大きい時間帯としてデータ分析からは除き、5秒から30秒の25秒間のデータを分析した¹⁰⁾。3試行の内、30秒達成した試行を分析対象とし、30秒達成した試行が複数回ある場合は、総軌跡長の最も短い試行を分析対象とした。一方、1回も30秒達成することができなかった被験者 (トレーニング群:5名, コントロール群:3名) は、分析対象から除外した。

1.6 筋体積推定

超音波画像診断装置 (ACUSON S2000, シーメンス) を用いて、下腿長 (膝窩皺から脛骨外果までの長さ) の近位30%の位置における足関節底屈筋群の筋厚を測定した。被験者は立位安静姿勢となり、スチール製のメジャーを用いて、下腿長を測定した。続いて、超音波プローブ (9L4, シーメンス) を組織表面に対して垂直になるように皮膚に当て、超音波横断画像を取得した。その際、超音波プローブには超音波用ゼリーを塗布した。また、皮膚への圧迫による筋や皮下脂肪の変形が生じないように、超音波プローブを皮膚に接

触させた。超音波横断画像において、皮下脂肪組織と筋組織との境界から、筋組織と骨組織との境界までの長さを足関節底屈筋群の筋厚とした。測定は2回実施し、2回の平均値を採用した。そして、足関節底屈筋群筋厚及び下腿長を用いて、足関節底屈筋群筋体積を推定した⁷⁾。推定式は以下の通りであった：足関節底屈筋群筋体積 [cm³] = 219.9 × 足関節底屈筋群筋厚 [cm] + 31.3 × 下腿長 [cm] - 1758.0。

1.7 筋硬度測定

エラストグラフィが搭載されている上述の超音波診断装置 (ACUSON S2000, シーメンス) を用いて、MG の安静時の筋硬度を測定した。被験者には、筋力測定時と同様の姿勢で等尺性筋力計に座らせた。下腿長近位 40%、かつ、脛骨の内側縁から腓腹筋内側頭と外側頭の境目までの長さを 100% とした際の、脛骨寄りの 40% の位置において、縦断面での MG の超音波エラストグラフィ画像を 3 枚取得した。その際、可能な限り関心領域を大きく設定した。

得られた超音波エラストグラフィ画像は、パーソナルコンピュータにコピーされた。そして、画像解析ソフトウェア (MSI Analyzer version 2.0Aql, リハビリテーション科学総合研究所) を用いて関心領域内の剪断波の伝播速度 [m/s] の平均値を算出した。3 枚の超音波エラストグラフィ画像の各々において伝播速度を算出し、それらの平均値を、以下の計算式を用いて筋の剛性率に変換した。

$$G = \rho c^2 / 1000$$

(G : 剛性率 [kPa], ρ : 筋の密度 [kg/m³], c : 剪断波の伝播速度 [m/s])

その際、筋の密度は生体内で一定であると仮定し、先行研究¹¹⁾を参考に $\rho = 1084$ [kg/m³] とした。本研究では、求めた筋の剛性率を筋硬度として評価した^{6,12)}。

1.8 統計分析

全ての測定項目を平均 ± 標準偏差で表す。nRTD, COP 軌跡の外周面積, 筋硬度及び筋体積に対するトレーニング効果を検討するために、ボンフェローニ法による多重比較を用いて、1) Pre 測定時における群間差及び 2) トレーニング群・コントロール群それぞれにおける Pre—Post 測定間の差を検定した。COP 軌跡の外周面積の分析対象者は、トレーニング群で 8 名、コントロール群で 7 名であった。危険率 5% 未満をもって統計的に有意とした。

2. 結果

図 1 に nRTD, 図 2 に COP 軌跡の外周面積, 図 3 に筋硬度, 図 4 に筋体積の測定あるいは推定結果を示す。Pre 測定において、いずれの項目にも、トレーニング群とコントロール群の間に有意な差は認められなかった。nRTD, COP 軌跡の外周面積及び筋硬度に関して、コントロール群では Pre—Post 測定間に有意な差はみられなかった。一方、トレーニング群では、Post 測定において、nRTD 及び筋硬度は有意に高い値を、COP 軌跡の外周面積は有意に低い値を示した。筋体積に関しては、両群ともに、Pre—Post 測定間に有意な

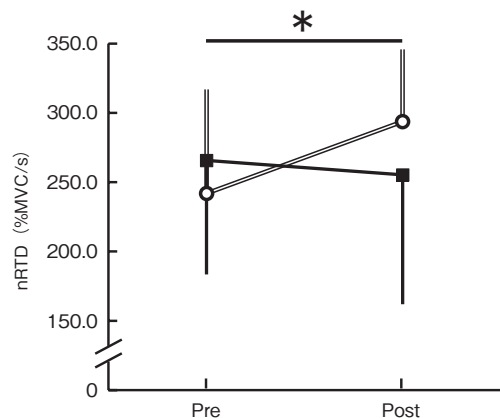


図 1 Pre 測定及び Post 測定におけるトレーニング群 (○; n = 13) 及びコントロール群 (■; n = 10) の瞬発的な筋力発揮能力 (nRTD : 時間—トルク曲線の力の立ち上がりから 200 ms までの傾きを, MVC トルクで正規化した値)
* : トレーニング群において Pre < Post (P < 0.05)

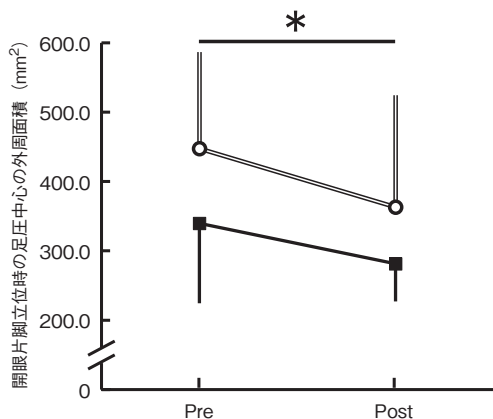


図2 Pre測定及びPost測定におけるトレーニング群(○; n=8)及びコントロール群(■; n=7)の立位姿勢保持能力
*: トレーニング群においてPre > Post (P < 0.05)

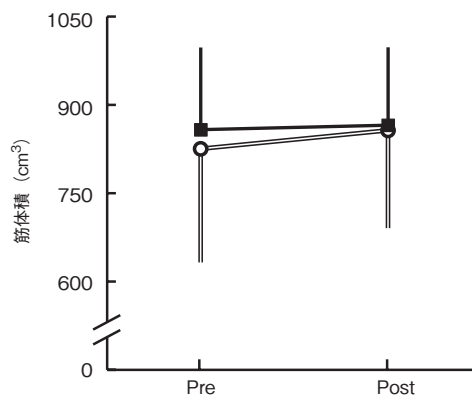


図4 Pre測定及びPost測定におけるトレーニング群(○; n=13)及びコントロール群(■; n=10)の
下腿三頭筋の推定筋体積

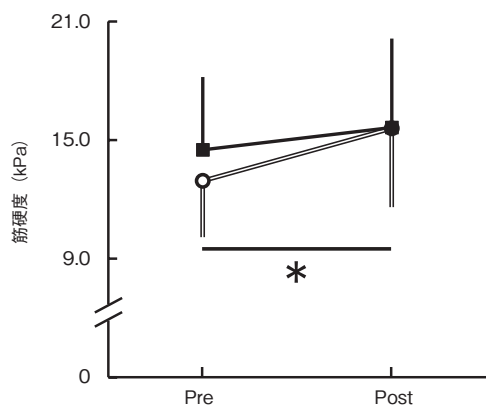


図3 Pre測定及びPost測定におけるトレーニング群(○; n=13)及びコントロール群(■; n=10)の
腓腹筋内側頭の筋硬度
*: トレーニング群においてPre < Post (P < 0.05)

差はみられなかった。

3. 考 察

本研究では、高齢者を対象にした足関節底屈筋群の瞬発的な力発揮能力向上を目的とした在宅でのカーフレイズトレーニングを週3回、8週間実施した。その結果、瞬発的な力発揮能力は狙い通り向上(図1)するとともに、MGの筋硬度の増加(図3)、立位姿勢保持能力の向上(図2)も観察された。

高齢者の足関節底屈筋群の瞬発的な力発揮能力向上を目的とした先行研究⁵⁾のトレーニングで

は、週2回の頻度で4週間、瞬発的な筋力発揮を行わせた。その結果、瞬発的な力発揮能力自体は向上したものの、立位姿勢保持能力の明確な改善までには至らなかった。本研究では、この先行研究を元に、トレーニング頻度・期間ともに増加させた結果、瞬発的な力発揮能力(図1)のみならず、立位姿勢保持能力の向上を達成することができた(図2)。本研究では、自重負荷を採用した点が先行研究⁵⁾と異なっているものの、両研究の比較から、瞬発的な筋力発揮をベースとしたトレーニングによって瞬発的な力発揮能力、立位姿勢保持能力の双方を向上させるためには、週2回の頻度及び4週間の期間では不十分だった可能性が示唆される。

安静時のMGの筋硬度は、トレーニング前後で有意に増加した(図3)。材料の機械的性質の観点から、筋腱複合体あるいは腱が硬いことが瞬発的な力発揮能力に好影響を及ぼすことは示唆されている^{13,14)}。他方、腱が硬いことよりも筋が硬いことの方が、瞬発的な力発揮能力に大きな影響を及ぼすという指摘も存在する¹⁵⁾。本研究では、腱の硬さを定量していないため、筋と腱を切り分けて考えることは難しい。しかしながら、本研究の結果は、速さを意識したトレーニングに伴い、瞬発的な力発揮を可能とするような適応が筋

に生じたことを示唆するものであり、上述の指摘¹⁵⁾を支持するものであった。

足関節底屈筋群の筋体積は、トレーニングによって有意に増加はしなかった(図4)。このことは、1) 本研究で採用したトレーニングが筋サイズ増加には効果的でないこと、及び2) 瞬発的な力発揮能力向上に筋サイズの変化は貢献していないこと、を示唆するものである。高齢者にとって、筋サイズの維持・増加もまた、重要な意味を持つ。それ故、筋サイズの維持・増加を合わせて目的とする際には、本研究とは異なるトレーニングプログラムを組み合わせることも不可欠であろう。

本研究では、高齢者が気軽に実施・継続できるよう配慮し、在宅でのカーフレイズトレーニングを採用した。そして、このトレーニングを週3回、8週間継続することにより、瞬発的な力発揮能力、立位姿勢保持能力の双方を向上させることに成功した。これらのことから、今回採用したトレーニングプログラムは、実際に高齢者のQOLの維持・向上を果たす上で非常に有用なものであると強く主張できる。今後、さらに多くの高齢者を対象として、本トレーニングプログラムを導入し、QOLの維持・向上に貢献したい。

結 論

健常な70代の高齢男性を対象に、足関節底屈筋群における瞬発的な力発揮能力の向上を目的とした、在宅でのカーフレイズトレーニングを週3回、8週間実施した。その結果、瞬発的な力発揮能力、立位姿勢保持能力ともに向上した。このように、本研究で採用したトレーニングプログラムは、実際に高齢者のQOLの維持・向上を果たす上で非常に有用なものであることが明らかにされた。また、本研究のトレーニングにより腓腹筋内側頭の筋硬度が増加した。このことは、筋の機械的性質の観点から、筋の硬さが瞬発的な力発揮能

力に貢献し得る可能性を示唆するものであった。

謝 辞

本研究に対し、助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり多大なご助力を頂いた立命館大学の小林雄志氏に深く感謝いたします。

文 献

- 1) Hopkins J.T., Brown T.N., Christensen L., Palmieri-Smith R.M., Deficits in peroneal latency and electromechanical delay in patients with functional ankle instability. *J. Orthop. Res.*, 27: 1541-1546 (2009)
- 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: M226-232 (1996)
- 3) 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: 319-329 (1996)
- 4) Ushiyama J., Masani K., Relation between postural stability and plantar flexors muscle volume in young males. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 43: 2089-2094 (2011)
- 5) Kobayashi Y., Ueyasu Y., Yamashita Y., Akagi R., Effects of 4 weeks of explosive-type strength training for the plantar flexors on the rate of torque development and postural stability in elderly individuals. *Int. J. Sports Med.*, 37: 470-475 (2016)
- 6) Akagi R., Yamashita Y., Ueyasu Y., Age-related differences in muscle shear moduli in the lower extremity. *Ultrasound Med. Biol.*, 41: 2906-2912 (2015)
- 7) Miyatani M., Kanehisa H., Ito M., Kawakami Y., Fukunaga T., The accuracy of volume estimates using ultrasound muscle thickness measurements in different muscle groups. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 91: 264-272 (2004)
- 8) Aagaard P., Simonsen E.B., Andersen J.L., Magnusson P., Dyhre-Poulsen P., Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J. Appl.*

- Physiol.* (1985), **93**: 1318–1326 (2002)
- 9) 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**: 839–849 (2014)
 - 10) Prieto T.E., Myklebust J.B., Hoffmann R.G., Lovett E.G., Myklebust B.M., Measures of postural steadiness: Differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **43**: 956–966 (1996)
 - 11) Ward S.R., Lieber R.L., Density and hydration of fresh and fixed human skeletal muscle. *J. Biomech.*, **38**: 2317–2320 (2005)
 - 12) Nordez A., Hug F., Muscle shear elastic modulus measured using supersonic shear imaging is highly related to muscle activity level. *J. Appl. Physiol.* (1985), **108**: 1389–1394 (2010)
 - 13) Bojsen-Møller J., Magnusson S.P., Rasmussen L.R., Kjaer M., Aagaard P., Muscle performance during maximal isometric and dynamic contractions is influenced by the stiffness of the tendinous structures. *J. Appl. Physiol.* (1985), **99**: 986–994 (2005)
 - 14) Costa P.B., Ryan E.D., Herda T.J., Walter A.A., Hoge K.M., Cramer J.T., Acute effects of passive stretching on the electromechanical delay and evoked twitch properties. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **108**: 301–310 (2010)
 - 15) Maffiuletti N.A., Aagaard P., Blazevich A.J., Folland J., Tillin N., Duchateau J., Rate of force development: physiological and methodological considerations. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **116**: 1091–1116 (2016)