

筋・軟部組織の滑走性から筋疲労度を判定する AI システムの構築

令和健康科学大学 中井雄貴
(共同研究者) 第一工科大学 渋谷良太
同 竹下康文

Development of a System to Estimate Muscle Fatigue Level and Provide Feedback Based on Muscle and Soft Tissue Gliding

by

Yuki Nakai

*Department of Physical Therapy, Faculty of Rehabilitation,
Reiwa Health Sciences University*

Ryota Shibusawa, Yasufumi Takeshita

*Department of Information, Artificial Intelligence and Data Science,
Daiichi Institute of Technology*

ABSTRACT

This study aimed to investigate the relationship between changes in fascial glide, ankle dorsiflexion flexibility, jump performance, and subjective fatigue (measured by the Visual Analog Scale; VAS) before and after running. Seventeen collegiate long-distance runners participated in this study. Fascial glide was evaluated by acquiring dynamic ultrasound images of the lower leg and calculating cross-correlation coefficients between the fascia and muscle layers. The differences (Δ values) of each variable before and after treadmill running were analyzed using Lasso regression. Cross-validation determined the optimal regularization parameter (α) as 0.163. Among the predictors, the standardized regression coefficient for Δ fascial glide

was the highest ($\beta = 0.271$), indicating the strongest contribution to changes in VAS scores. This result suggests that a decrease in fascial glide is closely associated with an increase in subjective fatigue. The findings provide preliminary evidence that quantifying fascial glide may serve as a useful objective indicator for fatigue assessment. This study highlights the potential importance of fascial mobility as a target for both fatigue monitoring and future AI-based prediction systems.

キーワード

滑走性係数, 主観的疲労感, Lasso回帰, 長距離走選手, 超音波エコー

Keyword

glide coefficient, subjective fatigue, lasso regression, runners, ultrasonography

要 旨

本研究では、ランニング前後の筋膜の滑走性・足関節背屈柔軟性・ジャンプ能力の変化量と、主観的疲労感（VASスコア）の変化量との関連性を検証することを目的とした。筋膜の滑走性は超音波エコーを用いて下腿の筋膜と筋の動画を撮影し、相互相関係数を算出した。参加者は大学陸上長距離選手17名であり、各指標のランニング前後の差分（ Δ ）を用いてLasso回帰分析を実施した。交差検証の結果、最適な正則化パラメータ（ α ）は0.163と決定され、 Δ 滑走性係数の標準化回帰係数が0.271と最も高く、VASの変化に対する寄与が大きいことが示された。これにより、滑走性の低下が主観的疲労感の増大に強く関与している可能性が示唆された。本研究は、疲労を客観的に捉える指標として滑走性の評価が重要な役割を担うことを示す初期的な知見を提供するものである。

緒 言

笹川スポーツ財団調査では、週2回以上、1回30分以上、運動強度「ややきつい」以上の運動・スポーツ実施者は18歳以上で推計2,100万人にの

ぼる。スポーツ障害は20 - 30%の割合で発生し、そのうち37% - 68%がオーバーユースによる¹⁾。障害予防にオーバーユースの把握は重要だが、自己評価のアンケート調査が主である。身体的問題を抱えたまま参加を続けるアスリートが多く、オーバーユース障害は過小評価されやすい²⁾。アスリートはオーバーユースにより、筋の張りや重怠さをよく訴える。筋のエネルギー不足による一過性の代謝的な問題ではなく、数日間持続する器質的な問題でありFascia異常が関与する。Fasciaは筋膜を含む線維性結合組織の総称で2018年に国際疾病分類（ICD-11）の改正で記載された。オーバーユースによる反復動作は筋や組織の炎症と修復によりFasciaの癒着を伴う。長時間運動による筋の持続的な緊張はFasciaを硬くし柔軟性低下を来す。Fasciaは皮下から深部組織まで存在し、筋膜間では滑走に関与する。Fasciaをリリースする治療が疼痛と可動域や機能改善に効果を示している³⁾。しかし、Fasciaの癒着による筋膜間の滑走性低下をオーバーユースによる筋疲労の指標とした報告はない。

スポーツ障害調査の多くは「練習参加が制限される状態（時間的損失）」を障害の定義とし、その期間が長いほど重症度が高いと考えら

れてきた。これに対して、オーバーユース障害の有病率や重症度の縦断的観察を可能とする Oslo Sports Trauma Research Centre overuse injury questionnaire が開発され⁴⁾、諸外国では様々な競技で調査報告されている。これは過去1週間の疼痛レベルと練習や試合への参加やパフォーマンスに対する障害の影響についての質問票である。しかし、これは主観的な質問調査であり、過小評価されやすい問題がある。他にも筋疲労の測定方法として、運動による筋の血中乳酸濃度測定や交感神経作用による唾液アミラーゼ濃度測定がある。これらは他の要素や変動が大きく身体の特定位は不明であり、客観性に欠ける。筋電図測定もあるが手間と解析に時間がかかる。筋力や可動域測定は外的評価であり、どの生体組織が原因かわからない。

そこで本研究では、陸上長距離選手に対して、ランニング前後の客観的な筋・筋膜の動態変化が主観的な疲労感を予測する有効な指標となり得るか検証することを目的とした。

1. 研究方法

1.1 対象

対象は大学男性長距離ランナーとし、半年以内に骨折や既往、怪我が無い17名が参加した (20.1 ± 0.8歳, 170.1 ± 4.5 cm, 54.6 ± 3.9 kg)。週に5日～6日、一日平均20 km以上走行しており、陸上歴は7.7 ± 3.4年、5000 mのベストタイムは15分36秒 ± 36秒を有するランナー集団であった。研究倫理委員会の承認 (R5_006) を得て、ヘルシンキ宣言に則り研究の説明を行い口頭と書面にて全ての対象者に同意を得て実施した。

1.2 介入方法

測定を行う前にウォーミングアップとして踵上げ、スクワット、カウンタームーブメントジャンプを各10回、2セット行った。事前測定として荷

重位足関節ランジテスト (Weight-Bearing Lunge Test, WBLT)、主観的疲労感 (Visual Analog Scale, VAS)、超音波エコー、5回リバウンドジャンプによる反応筋力指数 (Reactive Strength Index, RSI) の順で測定した。乱数表によりランダムに測定する片脚を決定した。トレッドミルに慣れるために時速10km/hで1分間のランニングを実施し、その後時速10km/hから8分毎に時速2km/hずつ上げ、時速16km/hまで計32分間のランニングを行った。この設定は、対象である大学男子長距離ランナーの通常のペース走に相当し、VO₂maxの約75～85%程度に該当する運動強度であると想定し設定した。汗の清拭と水分補給のため3分間の休憩後に一連の事後測定を行った。

1.3 評価方法

1.3.1 荷重位足関節ランジテスト (Weight-Bearing Lunge Test, WBLT)

WBLTは足関節背屈可動域を評価するテストである。両手を壁に付け、計測する足側の踵が床から離れないようにし、計測する側の膝が壁に触れる位置まで近づける。母趾先端から壁までの距離を計測した⁵⁾。

1.3.2 主観的疲労感 (Visual Analog Scale, VAS)

下腿筋の疲労感を評価するためにVASを用いた⁶⁾。左端を疲労感が無い (0mm)、右端を最も疲労感がある (100mm) として、ランニング前後に参加者に下腿の疲労感を記入してもらい主観的疲労感を数値化した。

1.3.3 超音波エコー動画分析

本研究では下腿後面の動画を超音波画像診断装置 (SONIMAGE MX1 a, KONICA MINOLTA Inc.) を使用し撮像した。高感度広帯域リニアプローブ (L11-3, KONICA MINOLTA Inc.) を腓腹

筋内側等近位1/3に長軸方向に当てて固定した。サンプリング周波数は30Hzに設定した。介入中にプローブが動かないように、プローブの固定装置を設計図作成CAD (Rhino7, Robert McNeel & Associates) で描画し、3Dプリンター (Form2, Formlabs Inc.) で作成した。プローブを固定した状態でステップ台に踵を出して乗り、60bpmに設定したデジタルメトロノーム (ME-150, YAMAHA Inc.) でリズムに合わせて踵を1秒で下げて1秒で水平まで戻して1秒で上げてそのままキープする一連の動きを行った (図1)。練習後に3回測定した。本研究では、経験豊富な理学療法士1名が超音波エコーの操作と解析を行った。測定環境と方法は事前に検証した。

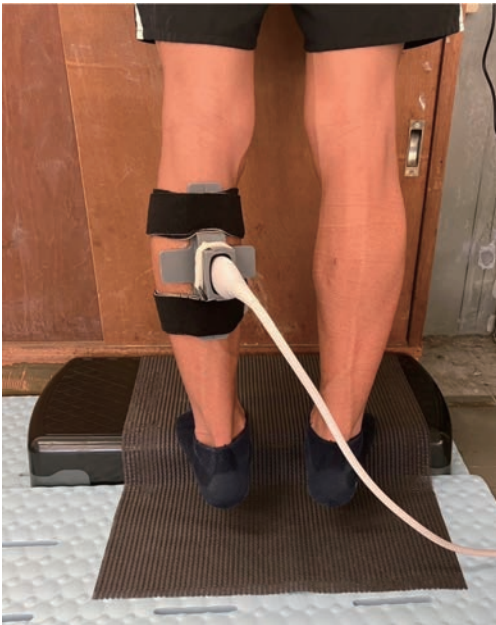


図1 プローブ固定による超音波エコー動画撮影

エコー動画解析ソフトウェア (Echolizer, GLAB Inc.) を使用して、エコー動画における筋膜と腓腹筋の動きの速度を定量化した。このソフトウェアは、Farneback法 (frame offset: 3) を使用しており、画像を重ね合わせることによってオプティカルフローを算出する⁷⁾。超音波画像を使用した組

織運動の定量化におけるEcholizerソフトウェアの妥当性および信頼性は、以前に報告されている⁸⁾。プログラム内の回帰方程式を適用した後の相対誤差は0.2%であり、優れた精度が実証されている。グリッドを使用して、関心領域 (ROI) の位置とサイズを定義した。ROIにおいて、X軸は頭側と尾側、Y軸は腹側と背側に定義した。ROIは、表在部 (筋膜組織, X軸12.45mm × Y軸0.38mm) と深在部 (腓腹筋内側頭, X軸12.45mm × Y軸0.75mm) の2つの部位に定めた。次に、各X軸 (頭尾方向) に沿った平均移動速度を算出した (図2)。筋膜と腓腹筋の動きの速度の時系列間の相互相関係数を算出し、3回の試行の平均値を採用した。相互相関係数が高い場合は、2つの組織が同様に動き、滑走が減少することを示し、相互相関係数が低い場合は、2つの組織が独立して動き、滑走が増加することを示した。これは、膝の動きにおける外側広筋と皮下組織の滑走を調査した先行研究に基づいている⁹⁾。この相互相関係数を滑走性係数と定義した。

1. 3. 4 反応筋力指数 (Reactive Strength Index, RSI)

RSIは、ジャンプの高さを接地時間で割った値で、短時間でのパワー発揮を評価するために多くのスポーツに活用されている¹⁰⁾。今回の実験では腰に手を当てた姿勢で短い接地で高く5回跳ぶよう指示した。測定には光学式分析機器 (OptojumpNext, Microgate Inc.) を使用した。RSIの数値が高いほど接地が短く高く跳べるということを意味しており、エネルギーコストを抑えて効率よく高いパフォーマンスが発揮できると示されている。5回の平均値を採用した。

1. 4 統計解析手法

まず、各指標の事後から事前の測定値を引いた変化量を算出して、 Δ WBLT、 Δ VAS、 Δ 滑走

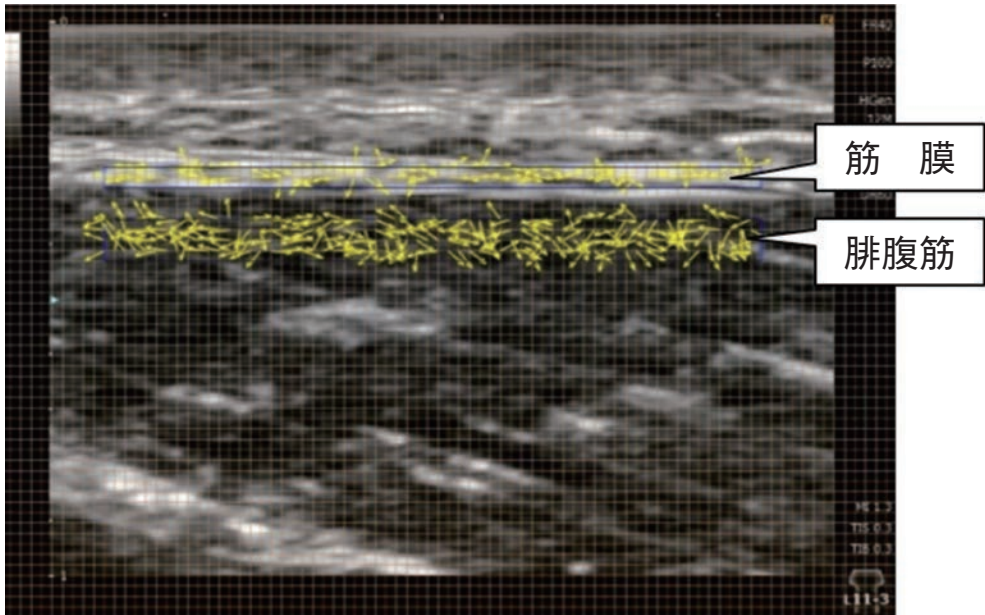


図2 超音波エコー動画解析

性係数, Δ RSIとした. 本研究では, VASに関連する身体機能指標を抽出するため, 交差検証付きのLasso回帰分析を用いて変数選択およびモデル構築を行った. Lasso回帰分析は, 変数選択と過学習抑制を同時に行える線形回帰手法である. Δ WBLT, Δ 滑走性係数, Δ RSIを説明変数, Δ VASを目的変数とし, Lasso回帰分析を実施した. 5分割交差検証によって正則化パラメータ (α) を自動選定した. また, 各変数のスケールの違いによる影響を排除し, 相対的な寄与度を評価するため, 説明変数を標準化 (z スコア変換) した上で再度Lasso回帰を行い, 標準化回帰係数 (β) を算出した. 解析にはPython (Version 3.11) およびscikit-learnライブラリ (Version 1.4.2) を使用した.

2. 結果

各指標のランニング前後の数値を表1に示す. Lasso回帰分析の結果, 交差検証によって選定された最適な正則化パラメータは $\alpha = 0.163$ であり (図3), この条件下では Δ 滑走性係数および Δ

表1 各変数のランニング前後の値

	介入前	介入後
WBLT (cm)	11.0 \pm 2.9	11.7 \pm 2.8
VAS (mm)	43.6 \pm 25.0	46.9 \pm 27.7
滑走性係数	0.616 \pm 0.133	0.630 \pm 0.119
RSI	0.522 \pm 0.088	0.495 \pm 0.091

平均値 \pm 標準偏差. WBLT; Weight-Bearing Lunge Test, VAS; Visual Analog Scale, RSI; Reactive Strength Index.

WBLTがモデルに残存した. 一方, Δ RSIは係数が0となり, モデルから除外された. また, 変数間のスケールの違いを考慮するために標準化回帰係数を求めた結果, 各変数の相対的寄与が認められた (表2).

3. 考察

本研究では, ランニング介入の前後で得られた身体機能指標の変化と主観的疲労感の変化との関連性をLasso回帰分析により検討した. その結果, 滑走性係数の変化が主観的疲労感の変化に最も寄与することが示された. Δ 滑走性係数の標準化回帰係数0.271は, 他の変数を一定とした場合, 滑走性の低下が疲労感の増加と有意に関連することを示唆している. 筋膜の構造的および分子的变化

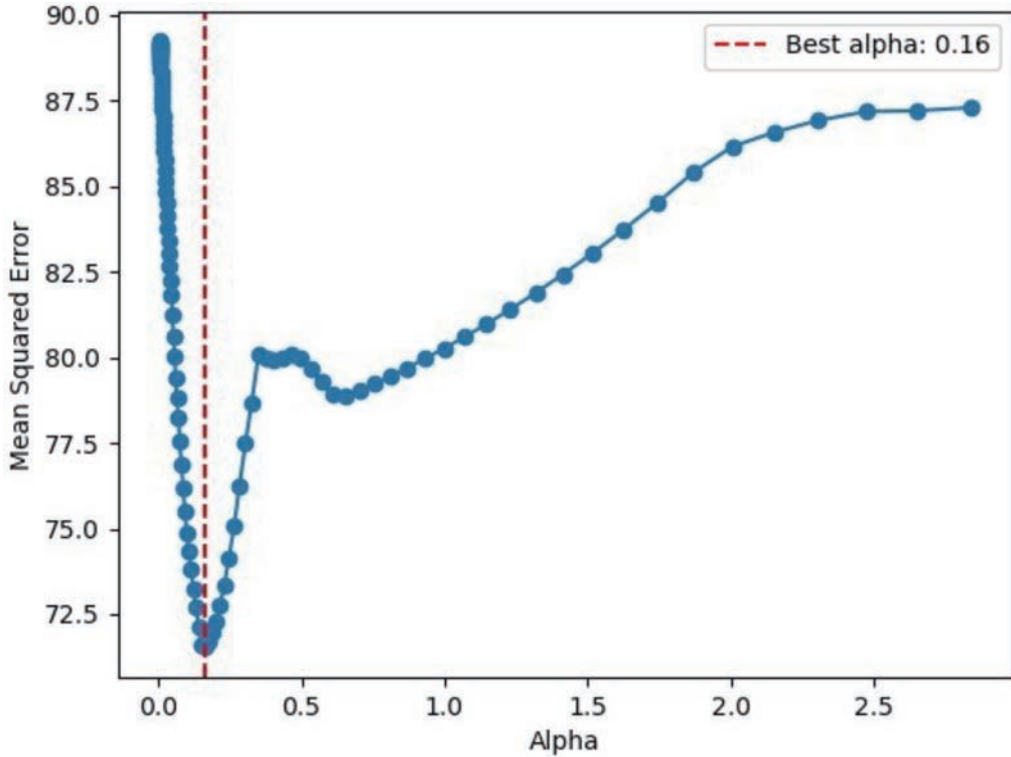


図3 アルファ値を選択するための交差検証

表2 Lasso回帰分析による各変数の回帰係数

	回帰係数 (非標準化)	標準化回帰係数 (β)
Δ 滑走性係数	19.29	0.271
Δ RSI	0.00(除外)	-0.064
Δ WBLT	-2.47	-0.038

SI; Reactive Strength Index,
WBLT; Weight-Bearing Lunge Test.

は、運動時の組織間の摩擦軽減や力伝達効率に関与すると示されている¹¹⁾。軟部組織層間の滑りを改善し、疼痛を軽減し、柔軟性を高め、機能的パフォーマンスを改善するために筋膜リリースが行われている¹²⁾。しかし、滑走性の定量的変化と主観的な筋の状態変化との関連を明確に示した報告は少ない。本研究の結果から、標準化回帰係数 ($\beta = 0.271$) を実スケールに換算した結果、滑走性係数が0.1単位増加するごとにVASスコアは約6.3 mm増加すると予測された。この換算は、「VAS変化量 = $\beta \times$ (滑走性変化量 / 介入後滑走性標準偏差) \times 介入後VAS標準偏差」に基づくもので

あり、本研究では、介入後滑走性標準偏差 = 0.119, 介入後VAS標準偏差 = 27.7 mmを用いて算出した。この結果は、滑走性の低下が主観的疲労感の悪化に臨床的に知覚可能な影響を及ぼす可能性を示唆する。したがって、運動後の疲労評価や介入効果の指標として、超音波エコーを用いた滑走性の定量的評価は有用な指標となりうると考える。

一方で、柔軟性指標の Δ WBLTおよびジャンプ能力指標の Δ RSIは、Lasso回帰による回帰係数が極めて小さい値であった。本研究対象の範囲においてはVASスコアに対する影響は限定的であると示された。これは、筋と筋膜の関係は滑走面の状態を直接評価するものであるが、WBLTやRSIは主に筋や腱そのものの可動性や反応性を反映するものである。WBLTやRSIは個人差が大きく、神経筋系の制御や筋腱の粘弾特性、反射応答、筋内代謝や炎症反応といった生化学的狀態など複数の要因が複雑に絡んでいる^{13, 14)}。よって、

WBLTやRSIが主観的疲労感に与える影響は一樣ではなく、関与が小さかった要因と考えられる。

本研究にはいくつかの限界がある。第一に、対象者数が比較的少数であり、モデルの一般化には慎重な解釈が必要である。第二に、VASスコアは主観的な指標であるため、心理的要因の影響を完全に排除することは難しい。第三に、滑走性の評価には超音波エコーによる解析を用いたが、測定誤差や手技の影響を受ける可能性も考慮する必要がある。最後に、生理学的要因を含めた検討ができていないので今後の課題である。今後は、より大規模な対象者での縦断的研究や、異なる介入手法を比較する研究が求められる。

本研究ではサンプル数が限られていたことから、過学習のリスクを抑制しつつ有用な予測因子を特定するための手法として、Lasso回帰分析を用いた。Lasso回帰分析は、不要な変数を自動的に排除する正則化の機能を持ち、少数例における信頼性の高いモデル構築に適している。この特徴により、滑走性係数が主観的疲労感に対して寄与することが明らかとなった。今後は、より多くのサンプルを収集し交差検証の強化を行うことで、モデルの汎化性能を向上させるとともに、ランダムフォレスト回帰やニューラルネットワークなどの機械学習アルゴリズムへの発展的応用を図る予定である。本研究の成果は、将来的な疲労度を推定・可視化するAIシステムの構築に向けた基礎的知見として活用されることが期待される。

4. まとめ

本研究では、筋膜の滑走性・足関節柔軟性・ジャンプ能力の変化と、主観的疲労感の変化との関連をLasso回帰分析により検討した。その結果、標準化回帰係数の比較において、滑走性の変化は、柔軟性やジャンプ能力よりも主観的疲労感に対して大きな影響を与えていた。これにより、滑走性低下が運動後の疲労感の増大と関連しており、滑

走性の維持・改善が疲労増加を抑制する上で重要な指標となり得ることが示唆された。本研究の成果は、疲労管理を目的とした介入設計やAIシステムによる疲労度推定のための要素抽出において、滑走性の定量評価が有効であることを支持する初期的な知見となる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、貴重なご支援と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、心より深く御礼申し上げます。

文 献

- 1) DiFiori J.P., Benjamin H.J., Brenner J.S., et al.: Overuse injuries and burnout in youth sports: a position statement from the American Medical Society for Sports Medicine., *Br. J. Sports Med.*, **48**: 287-288(2014)
- 2) Clarsen B., Bahr R., Myklebust G., et al.: Improved reporting of overuse injuries and health problems in sport: an update of the Oslo Sport Trauma Research Center questionnaires., *Br. J. Sports Med.*, **54**: 390-396(2020)
- 3) Ajimsha M.S., Al-Mudahka N.R., Al-Madzhar J.A.: Effectiveness of myofascial release: systematic review of randomized controlled trials., *J. Bodyw. Mov. Ther.*, **19**: 102-112(2015)
- 4) Clarsen B., Myklebust G., Bahr R.: Development and validation of a new method for the registration of overuse injuries in sports injury epidemiology: the Oslo Sports Trauma Research Centre (OSTRC) overuse injury questionnaire., *Br. J. Sports Med.*, **47**: 495-502(2013)
- 5) Powden C.J., Hoch J.M., Hoch M.C.: Reliability and minimal detectable change of the weight-bearing lunge test: A systematic review., *Man. Ther.*, **20**: 524-532(2015)
- 6) Åström M., Thet Lwin Z.M., Teni F.S., et al.: Use of the visual analogue scale for health state valuation: a scoping review., *Qual. Life Res.*, **32**: 2719-2729(2023)
- 7) G. F.: Two-Frame Motion Estimation Based

- on Polynomial Expansion. In: *Lecture Notes in Computer Science*, 363–370 (2003)
- 8) Yamashita T. OK, Gamada K.: Validity and reliability of velocity measurements on ultrasonography using custom software with an optical-flow algorithm., *Journal of physical therapy science*, 32: 130–139 (2020)
 - 9) Kawanishi K., Kudo S., Yokoi K.: Relationship Between Gliding and Lateral Femoral Pain in Patients With Trochanteric Fracture., *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 101: 457–463 (2020)
 - 10) Morikawa M., Maeda N., Komiya M., et al.: The effect of two types of ankle orthoses on the repetitive rebound jump performance., *BMC. Sports Sci. Med. Rehabil.*, 14: 88 (2022)
 - 11) Wilke J., Schleip R., Yucesoy C.A., et al.: Not merely a protective packing organ? A review of fascia and its force transmission capacity., *J. Appl. Physiol. (1985)*, 124: 234–244 (2018)
 - 12) Beardsley C., Skarabot J.: Effects of self-myofascial release: A systematic review., *J. Bodyw. Mov. Ther.*, 19: 747–758 (2015)
 - 13) Aragón-Vargas L.F., Gross M.M.: Kinesiological Factors in Vertical Jump Performance: Differences among Individuals., *Journal of Applied Biomechanics*, 13: 24–44 (1997)
 - 14) Abellaneda S., Guissard N., Duchateau J.: The relative lengthening of the myotendinous structures in the medial gastrocnemius during passive stretching differs among individuals., *J. Appl. Physiol. (1985)*, 106: 169–177 (2009)