©NSCA JAPAN
Volume 27, Number 6, pages 2-12

特集 feature

超音波エラストグラフィ機能を用いた筋の硬さの評価：スポーツ現場での応用可能性

赤木 亮太, Ph.D., 芝浦工業大学システム理工学部生命科学科, NSCAジャパン編集委員
平田 浩祐, Ph.D., 芝浦工業大学大学院理工学研究科, 日本学術振興会特別研究員
中村 雅俊, Ph.D., PT, 新潟医療福祉大学理学療法学科
宮本 直和, Ph.D., 順天堂大学スポーツ健康科学部

1. はじめに

近年、超音波診断において、通常のBモード画像に組織弾性情報を付加する弾性超音波検査、すなわち超音波エラストグラフィ機能が実用化されている。その背景としては、生体組織の硬さがその病理状態と深く関連しており、組織の硬さの測定が診断において重要な意味をもつことが挙げられる。それゆえ、超音波エラストグラフィ機能は、臨床の場で、癌の検出や治療方針の検討、血栓の性状評価などで使用されている。

他方、スポーツ科学の分野においても、筋の硬さの評価に超音波エラストグラフィ機能が用いられている。アスリートはもちろんのこと、日常的にスポーツを楽しむ愛好者も、筋に張りを感じた場合、あるいは、張りを感じる前に、ストレッチングやマッサージを実施することは常識となっている。しかしながら、実際のところ、筋の硬さにはどのような意味があるのだろうか？

本稿では、超音波エラストグラフィ機能を用いて、様々なテーマを基に筋の硬さについて評価してきた筆者らが、最新の研究動向を概説することにより、当該手法による筋コンディション評価の可能性について言及したい。そして、筋の硬さについて、読者の皆様に一考いただくきっかけとなることを期待したい。

2. 超音波エラストグラフィ機能の種類

現在、様々な医療機器メーカーが組織弾性を画像化できる超音波エラストグラフィ機能を有する超音波診断装置を開発・販売している。しかしながら、画像化情報の取得方法については必ずしも統一されているわけではない。日本超音波医学会が発表した肝臓(34)および乳腺(48)における超音波エラストグラフィ診療ガイドラインの中で、超音波エラストグラフィ機能の種類について丁寧に説明されている。また、山川は、「超音波エラストグラフィの原理」と題して、手法の分類について説明している(74)。国際誌においても、World Federation of Ultrasound in Medicine and Biologyが定めたガイドラインが論文としてまとめられている(13,14,21,24,63)。本稿では、それらの内容をかいつまんで説明したい。

超音波エラストグラフィ機能では、組織の硬さを表す弾性係数の内、主にヤング率や剛性率を評価している。ただし、これらの係数は直接定量することができないため、関連する物理量を測定し、それらを用いて組織の硬さを推定することとなる。

実際に筆者らが使用経験のある超音波エラストグラフィ機能は、Strain ImagingとShear Wave Imagingの2つである。Strain Imagingでは、超音波

プローブを手で動かし、筋を皮膚の上から圧迫・弛緩することで筋の硬さを測定する。その際、軟らかい組織はひずみやすく、硬い組織はひずみにくいため、筋内にひずみ分布が生じる。単純な一次元の弾性体で考えた場合、元の長さあたりの伸縮量を意味するひずみは、応力と比例関係にあり、その際の比例定数がヤング率となる(フックの法則)。それゆえ、応力分布を一定と仮定すると、ひずみはヤング率に反比例するため、骨格筋内のひずみ分布から硬さ分布を評価することができる。一方、Shear Wave Imagingを用いて筋の硬さを評価する場合、超音波プローブを皮膚上に固定し、音響放射力インパルスによって筋を加振する。これにより、筋内をせん断波(横波)が伝搬し、硬い組織内では伝搬速度が速くなり、軟らかい組織内では伝搬速度が遅くなる。それらの特徴を用いて、筋内のせん断波伝搬速度分布が画像化される。多くの研究では、対象筋内のせん断波伝搬速度分布から、平均せん断波伝搬速度を算出し、その二乗と筋の密度(一般的には1,000 kg/m^3)の積により剛性率を算出・評価している。

赤木は、国立スポーツ科学センターに契約研究員として着任した2010年度から、筋の硬さを評価する研究に着手した。当初は、日立メディコ社の超音波診断装置(EUB-7500)を使用していた。この超音波診断装置にはStrain Imagingが搭載されており、ある画像とその1枚手前の画像を比較することで、各部位のひずみが算出され、その値を元に、関心領域内における組織の硬さがカラー表示される仕様となっていた。国内の研究者による、レジスタンスエクササイズに伴う筋の硬さの変化を検討した先行研究(53,75)では、対象筋とプローブの間に参照体を1枚挟み、参照体と対象筋のひずみの比(strain ratio)を算出して、筋の硬さを評価していた。すなわち、参照体を基準とする相対値を用いた評価となっていた。ここで、Strain Imagingの原理、そして、材料力学におけるヤング率とひずみの関係(ヤング率＝応力／ひずみ)を考慮すると、参照体と対象筋のひずみの比はそれらのヤング率の比と等しくなり、理論的には、参照体の硬さ(ヤング率)がわかれば、骨格筋の硬さ(ヤング率)を算出することができる。それらを踏まえ、赤木は、既知の硬さをもつ参照体1枚を用いて、骨格筋の硬さの定量を目指したものの、安定した数値を得ることができなかった。そこで、苦肉の策として、異なる2つの硬さをもつ参照体(OST社製, 7 kPa：横110 mm×縦60 mm×厚さ10 mm；30 kPa：横110 mm×縦60 mm×厚さ5 mm)を用いることで、対象となる物体の硬さが安定して定量できるか検討した(18)。その結果、理論的には不可解な点が残るものの、実際の硬さに近い値を安定して得ることができるようになったため、2枚の参照体を用いる方法により、足関節角度底屈30°、0°、および背屈20°の3角度で腓腹筋内側頭の筋の硬さを測定した(1,18,19)**(図1)**。これらの研究で得られた値は、磁気共鳴エラストグラフィ法を用いて腓腹筋内側頭の筋の硬さを測定した先行研究(15,66,69)で報告されている値の範囲内に収まるものであった。このようにして、EUB-7500を用いた骨格筋の硬さを測定する方法の確立に成功したものの、上述における参照体の繰り返し使用や交換のタイミングの難しさを踏まえ、赤木は徐々にShear Wave Imagingの使用に切り替えることとした。

Shear Wave Imagingを搭載した超音波診断装置を、筋の硬さの定量に適用した研究の始まりとしては、2010年に発表されたShinoharaら(64)やNordezら(54)が挙げられる。そして、これらの研究をはじめとして、Shear Wave Imagingを用いて筋の硬さを定量している研究の多くは、SuperSonic Imagine社のAixplorerを用いている。

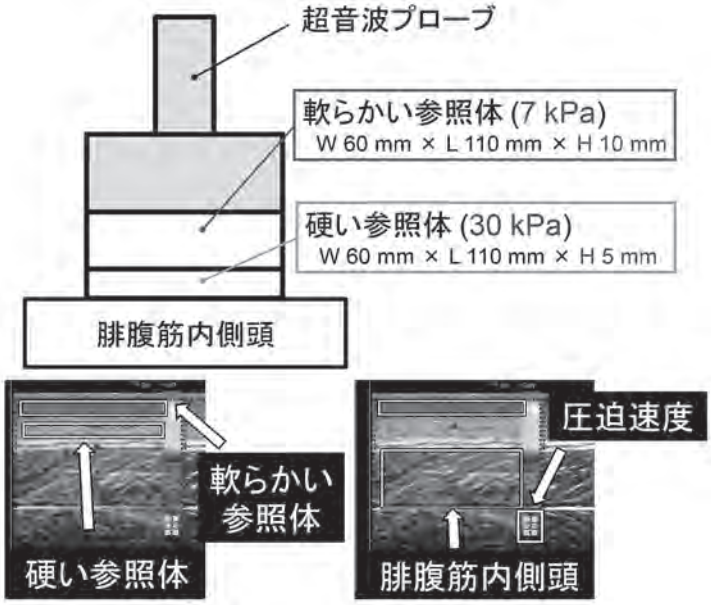

図1　Strain Imagingを用いた腓腹筋内側頭の硬さの評価

今回の筆者らはいずれも、この装置の使用経験を有する(2,3,5,7,10,30,31,33,35,42-45,49-51,60,61,70,71)。また、赤木および平田は、近年、同じくShear Wave Imagingを採用しているSiemens社のACUSON S2000/S3000を使用して研究を進めている(4,6,8,9,32)。上述の通り、筋の密度を一定としている点は問題となりうるが、どちらの装置も、筋の硬さを剛性率として絶対値で表示できることが大きな利点となっている。また、Aixplorerが筋の硬さの評価に利用され始めた当初は、上述の日立メディコ社のEUB-7500と比較して関心領域が小さく、広範囲における筋の硬さの評価が困難であったが、現在ではこの問題点も解消されている。それゆえ、近年、超音波エラストグラフィ機能を用いて筋の硬さを評価している研究の多くは、Shear Wave Imagingを用いている。本稿では、Shear Wave Imagingを用いた研究に絞って、スポーツ現場に応用可能な知見を整理したい。

3. 筋の硬さの評価

上述の通り、スポーツ現場では、筋を解す、すなわち、筋を軟らかくするためにストレッチングやマッサージを実施することが多々ある。そのため、筋の硬さに関連する研究においても、ストレッチングをテーマにした研究が多数見受けられ、筋の硬さの定量を通じて、ストレッチング効果の程度を評価したり、効果的なストレッチング方法を模索したりする試みがなされるようになった。その中には、筆者らの研究も多数含まれている。

赤木は2013年および2014年に、若年男性を対象として、ストレッチングボードによる足関節底屈筋群の静的ストレッチング(2分×3セット)を、1セッション実施した場合(2)、また、週6日×5週間(3)実施した場合における筋の硬さの変化を調査した。その結果、腓腹筋内側頭および外側頭ともに、1セッションのストレッチングでは13%程度軟らかくなり、同様の結果は、5週間継続した場合にも観察された。これらの研究は、一般的な足関節底屈筋群のストレッチングにより、腓腹筋の内側・外側を問わず、同程度伸ばされていることを示す結果となった。併せて、足関節背屈可動域が改善されたこと、また、過度なストレッチングにより筋力が低下する現象もみられなかったことから、当該静的ストレッチングは、足関節底屈筋群における損傷の予防、コンディションの向上および筋力の維持に効果的であることが示唆された。同様に、若年男性を対象として、1セッションの足関節底屈筋群のストレッチング(1分×5セット)を実施したTaniguchiら(66)の研究では、ストレッチング直後から15分後まで、腓腹筋内側頭および外側頭が軟らかい状況が続くものの、20分後には元の硬さに戻ることが報告されている。このように、筋の硬さに着目することにより、筋に対する1セッションのストレッチング効果における持続性についての議論が可能となった。足関節底屈筋群を対象としたストレッチングが、腓腹筋内側頭および外側頭に同程度の効果をもたらすことは、若年女性(51,77)や高齢女性(51)においても確認されている**(図2)**。一方、平田と宮本は、足関節底屈筋群を対象とした5分間の静的ストレッチングで、腓腹筋内側頭および外側頭、ヒラメ筋の硬さがどのように変化するか、足関節底屈50°から背屈25°まで、5°刻みで定量した(30)。その結果、上記の研究とは異なり、腓腹筋内側頭でのみ、足関節角度背屈10～25°において、ストレッチングにより筋の硬さが低下していた。以上のことから、足関節底屈筋群のストレッチングが腓腹筋外側頭にもたらす効果については、多少疑問は残されているが、その他の研究

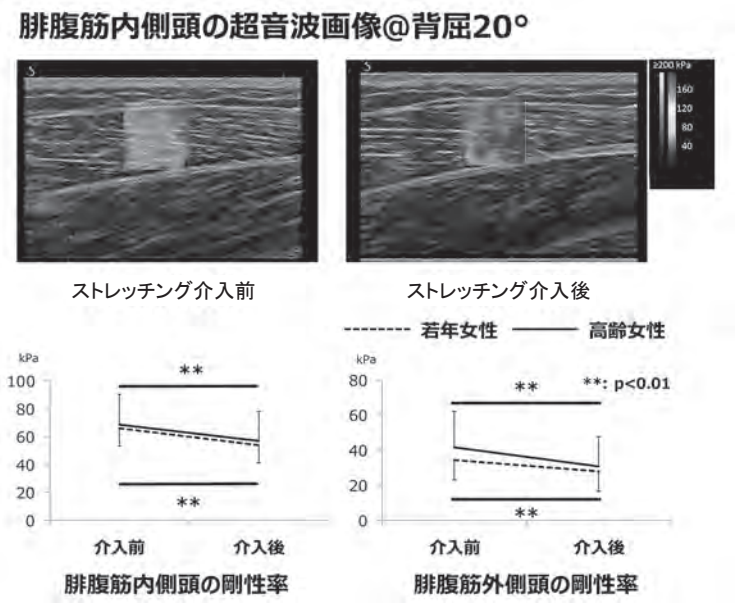

図2　若年女性と高齢女性の腓腹筋内側頭および外側頭に対する足関節底屈筋群のストレッチング効果([51]のデータから作図)

(25,31,49,56)をみても、腓腹筋内側頭がしっかりと伸ばされていることに関しては、疑いの余地はない。ただし、中村による最新の研究(61)によれば、ストレッチング時間が20秒と短い場合、筋力を維持したまま足関節背屈可動域を広げるのには効果があるものの、腓腹筋内側頭を軟らかくする効果がないことも明らかにされている。そのため、筋へのストレッチング効果という観点からは、一定以上の時間は必要であることが示唆される。

足関節底屈筋群と同様に、ハムストリングスのストレッチング効果について、筋の硬さをもって検討している研究も数多くある。宮本は平田とともに、若年男性を対象として、膝関節を伸展させてハムストリングスをストレッチングする場合と股関節を屈曲させてハムストリングスをストレッチングする場合の効果の違いを検討した(42)。両者を90秒間×5セット実施した結果、膝関節伸展によるストレッチングは、ハムストリングス各筋を軟らかくするものの、股関節屈曲によるストレッチングは、大腿二頭筋の硬さの低減には効果的ではないことが明らかにされた。この結果は、大腿二頭筋をしっかりとストレッチングしたい場合には、股関節屈曲ではなく膝関節伸展が望ましいことを示唆するものである。この膝関節伸展によるハムストリングスのストレッチングを、能動的にあるいは受動的に実施した場合、どちらがより大きなストレッチング効果を期待できるか、筋の硬さから評価した研究(52)では、能動・受動間ではストレッチング効果に違いはないものの、大腿二頭筋(長頭)と半膜様筋のほうが、半腱様筋よりもしっかり伸ばされていることが示されている。また、Umegakiら(70)は、股関節を90°屈曲させた状態から膝関節を伸展させる方法でハムストリングスをストレッチングさせた時の効果を検討した結果、ハムストリングス各筋の硬さが低減され、半膜様筋が最も軟らかくなることを報告している。股関節90°屈曲位から膝関節を伸展させ、膝関節45°屈曲位にした際、ハムストリングスの中で半膜様筋が最も伸張されていることが、ストレッチング中における筋の硬さの定量を通じて明らかにされたが、このことが上述の結果に繋がっていると推察されている。そして、Ichihashiら(33)が、股関節90°屈曲位より他動的に膝関節を伸展させる5分間のストレッチングを週3回、4週間実施したところ、Umegakiら(70)による一過性のストレッチングと同様に、ハムストリングス各筋の硬さが低減し、その度合いは半膜様筋で最も大きかった。一方、膝関節角度は一定とし、股関節角度を70°、90°および110°屈曲させた場合におけるハムストリングスのストレッチング効果を検討した研究(39)では、股関節を屈曲させるほうが、ハムストリングスにおけるすべての筋がしっかり伸ばされることを、各関節角度における筋の硬さから説明している。このように、ハムストリングスのストレッチングには、膝関節伸展・股関節屈曲の2つのアプローチがあるが、筋の硬さを通じた評価から、より効果的なストレッチング方法が模索されていることが読み取れる。これら2つのアプローチに加え、Umegakiら(71)は、ハムストリングスの内側および外側を効果的にストレッチングする方法を模索するために、対象者を仰向けで寝かせ、その後、股関節角度を90°屈曲位、膝関節角度を45°屈曲位(いずれも完全伸展位を0°)とし、その姿勢から股関節を10～30°内外旋させた。その際のハムストリングスの硬さを測定したところ、股関節を内外旋させても、ハムストリングスの内側と外側の硬さに違いはみられず、少なくとも股関節の内外旋を加えることで、ハムストリングスの内側と外側、各々を効果的に伸ばす方法をみつけることはできなかった。また、股関節屈曲を、骨盤の前後傾でコントロールする試みもなされている(50)。

上述の筋群以外では、大腿四頭筋(73)を対象としたストレッチング研究も行なわれている。この研究では、膝関節伸展位では、大腿直筋、外側広筋および内側広筋の硬さに大きな違いがみられないものの、膝関節屈曲位にいくにつれ、特に大腿直筋が硬くなり、他の2筋よりも伸ばされていることが報告されている。Ogawaら(55)は、股関節内転筋をストレッチングするために股関節を外転させた際、さらに股関節の屈曲角度を変える(90°、60°、30°、0°、－15°：完全伸展位を0°とする)ことで、そのストレッチング効果がどのように変わるのか、各関節角度における股関節内転筋の硬さを定量することにより検討した。その結果、1)長内転筋は、股関節屈曲角度にかかわらず伸ばされる、2)大内転筋の前部は、股関節屈曲角度にかかわらず伸ばされない、3)大内転筋の後部は股関節角度が90°の時に最も伸ばされ、60°および30°でも安静時と比較して伸ばされる、ということが判明した。腕の回内／回外、手首の屈曲(掌屈)／伸展(背屈)および肘関節角度の調整により、短橈側手根伸筋のストレッチング効果を検討したSeoら(62)は、肘関節を伸展させた状態で、前腕を回内し、手首を屈曲させることで、当該筋が最も硬くなり、ストレッチングされていることを報告している。

このように、いまだ効果的なスト

レッチング方法が確立されていない部位・筋はもちろんのこと、すでに効果的なストレッチング方法が確立されていると思われている筋・部位であっても、ストレッチング中の筋の硬さを定量するアプローチは、これまでの知見のアップデートあるいは裏付けに役立つことが期待される。現状では、下腿三頭筋あるいはハムストリングスを対象とした研究が圧倒的に多く、これらの筋群を対象としたストレッチングに関するエビデンスは、ますます充実していくことが予想される。

ストレッチング効果を検討する別のアプローチとして、ストレッチング耐性に着目した研究も行なわれている。宮本は平田とともに、若年男女を対象として、足関節最大背屈角度における腓腹筋内側頭および外側頭、ヒラメ筋の硬さと足関節最大背屈角度との関係を検討した(43)。その結果、若年男性では、腓腹筋内側頭のみ足関節最大背屈角度と相関関係がみられたものの、若年女性では、いずれの筋においても足関節最大背屈角度との間に相関がみられた。また、足関節背屈可動域および足関節角度背屈位における腓腹筋内側頭および外側頭の硬さには性差がみられた。これらの結果を踏まえ、当該研究では、足関節背屈の可動域に関連する筋の要因には男女差があること、また、足関節背屈可動域の性差には、下腿三頭筋の硬さが関与している可能性を示唆している。その一方で、腓腹筋内側頭の硬さは、関節スティフネスやその性差の決定要因ではない、という報告(20)も存在するため、さらなる研究の進展が待たれる。

ストレッチング同様、筋を解す方法として挙げられるマッサージについても、筋の硬さとの関連を検討した研究が存在する。ただし、ストレッチングと比べて、一定の強度で繰り返しマッサージを実施することが難しいためか、その数については限定されている。Eriksson Crommertら(23)は、3年間の施術経験を有するオーストラリアの理学療法士が、腓腹筋内側頭を対象に、2分間の軽擦、2分間の揉捏、2分間のdeep circular friction、そして1分間の軽擦、合計7分間マッサージを実施した。そのマッサージ直後、および、マッサージ終了から3分後における腓腹筋内側頭の硬さを測定したところ、マッサージ直後は軟らかくなったものの、その後3分でマッサージ前の硬さに戻ることがわかった。このように、7分間のマッサージ効果は、少なくとも筋の硬さの観点からは、ほとんど持続しないことが明らかにされた。15分間フォームローラーを用いてハムストリングスを解したMorales-Artachoら(46)の研究では、5分後におけるハムストリングスの硬さが、フォームローラー実施前と比して軟らかくなっていることが確認された。しかし、その後30分間安静にして再度測定したところ、やはりフォームローラー実施前の硬さに戻っていた。現在、中村は、フォームローラーの効果について詳細な研究を行なっている。具体的には、30秒×1セット、30秒×3セット、30秒×10セットのフォームローラー介入が腓腹筋内側頭の硬さに及ぼす影響を検討した結果、30秒×1セットでは硬さの変化は認められなかったものの、30秒×3セットおよび10セットでは軟化が確認された。このことは、ストレッチングと同様に、フォームローラーを用いたマッサージの効果を期待するためには一定時間以上の実施が不可欠であることを示唆している。また、このフォームローラーにおける長期介入効果について不明であったため、30秒×3セットのフォームローラー介入を週3回、5週間行なった結果、足関節背屈可動域は増加したものの、腓腹筋内側頭の硬さには変化がみられなかった。マッサージ同様、筋を解す効果が期待される鍼治療に関するMaherら(40)の研究では、トリガーポイントに鍼をうつことで、僧帽筋の上部が軟らかくなることが確認されている。他方、運動後に硬くなった筋に対して機械的振動を加え、回復の促進を試みたPournotら(58)の研究では、同時間安静にしていた条件と比較しても、筋の硬さが変わらなかった。この研究では、回復に十分な機械的振動を加えることができなかったからか、そもそも機械的振動が筋を軟らかくするのに効果的ではないのかは結論づけていないものの、マッサージにしてもその他の外的な圧迫にしても、筋を軟らかくする効果はあったとしても一時的なもので、長期的な効果は期待できないことがわかりつつある。スポーツ現場への応用という観点では、このようなマッサージ等に関する研究のさらなる進展が望まれる。

4. 筋傷害との関連

アスリートにとって、練習中あるいは試合中に、筋損傷や肉離れの可能性を軽減することは非常に重要である。筋損傷や肉離れなどの筋傷害の発症機転は実に様々であり、その機序も不明な点が多い。しかしながら、身体の柔軟性は筋損傷や筋傷害と関連することが報告されており(41,72)、筋が軟らかいほど受傷リスクが低く、受傷により筋が硬くなると長年信じられている。それにもかかわらず、これらを裏付けるエビデンスはこれまで存在しておらず、近年、超音波エラストグラフィ機能が利用されるようになってから、筋

損傷や肉離れと筋の硬さとの関連性について検討する研究が実施されている。

筋力計を用いた基礎的な実験デザインで筋損傷に関する研究を進める際、当該研究分野で世界的権威のNosakaの研究グループは、伸張性運動を繰り返すことで筋損傷を引き起こし、その後数日にわたって筋損傷に関連するパラメータを測定している。筆者らが知る限り、同様のアプローチで初めて筋損傷評価にShear Wave Imagingを導入したLacourpailleら(37)は、肘関節屈曲筋群で筋損傷を起こさせた際の上腕二頭筋および上腕筋の硬さを、1時間後、2日後および21日後に測定した。その結果、これらの筋が伸ばされた状態では、1時間後には硬くなり、徐々に軟らかくはなるものの、21日経ってもまだ元の硬さには戻らないことが示された。彼らはその後の研究でも同様に、筋の硬さが筋損傷の度合いを評価可能と主張しており(28,38)、この考えを支持する研究も存在する(29)。赤木も、筋損傷の時間経過について観察してはいないものの、1セッションのレジスタンストレーニング(最大挙上重量の80%の負荷で、短縮性および伸張性の肘関節伸展運動を8回×5セット)によりもたらされる筋損傷について、上腕三頭筋の硬さから評価した(5)。その結果、レジスタンストレーニング実施直後に上腕三頭筋は硬くなり、上腕長(肩峰から上腕骨外側上顆までの長さ)の遠位部で硬い傾向がみられた。これらの結果から、赤木らは、上腕三頭筋を対象としたレジスタンストレーニングでは、特に遠位部のケガに注意を払うことで、より安全にレジスタンストレーニングを実施できるのではないかと提案している。

また、筋傷害と筋の硬さとをリンクさせた研究もいくつか実施されている。本稿の筆者らの論文に絞っても、脛骨過労性骨膜炎(Medial Tibial Stress Syndrome：MTSS)を抱える、あるいは抱えていた人の筋の硬さを調査したもの(10,60)や、遺伝要因と筋の硬さ・肉離れとの関係について検討したもの(35,44)が存在する。Akiyamaら(10)は、MTSSを抱えるスポーツ選手は、MTSSがみられない選手に比して、腓腹筋内側頭および外側頭、ヒラメ筋、長腓骨筋および前脛骨筋が硬くなっていることを報告している。一方、MTSSを抱えていたことがある大学ランナーと抱えたことがないランナーについて、下腿における種々の筋の硬さを比較したSaekiら(60)は、長趾屈筋および後脛骨筋は、MTSSを抱えた経験があるランナーのほうが硬く、その他の筋の硬さには違いがなかったことを報告している。すなわち、腓腹筋内側頭、外側頭およびヒラメ筋の硬さには違いがなかったことを意味し、この点でAkiyamaら(10)の報告と不一致がみられた。その要因のひとつとして、MTSSが現在進行形か否か、という点が挙げられる。近年、肉離れなどの傷害には遺伝要因もかかわっていることが報告されているものの、その機序については未だ不明な点が多い。それゆえ、宮本や平田らは、筋傷害に関連する遺伝子の多型が筋の硬さに影響を及ぼし、その結果、筋傷害受傷に対しても影響を及ぼしているのではないかと考え、研究に取り組んでいる。例えば、“アスリート遺伝子”とも呼ばれるαアクチニン3遺伝子の多型は、ハムストリングスの硬さに影響を及ぼし、RR型・RX型の者の筋はXX型の者の筋よりも硬い(45)。ただし、肉離れの既往歴とαアクチニン3遺伝子の多型との関連は認められてはいない。同研究グループは、エストロゲン受容体の発現にかかわる遺伝子の多型についても検討を行なっており、エストロゲン受容体遺伝子のT／C多型のCの塩基を有するアスリートでは筋傷害受傷率が低く、筋が軟らかいことを明らかにしている(35)。このように、遺伝子多型に着目した研究から、筋の硬さと筋傷害との関連についての知見が得られつつある。

肉離れのリスクを、Shear Wave Imagingによる筋の硬さから検討する研究は他にも存在する(76)。また、膝のケガをしやすいプロサッカー選手を対象とした研究(68)では、一般人と比較して、内側広筋は硬くなっていないものの、大腿直筋は硬くなっていることも確認されている。足底筋膜炎を抱える患者に関しては、足関節が解剖学的正位よりも底屈位に位置する場合、一般人よりも腓腹筋内側頭が硬くなること、足底筋膜炎の痛みの度合いと腓腹筋内側頭の硬さの間に相関関係があることが報告されている(78)。さらには、スポーツ傷害の治療や筋損傷の予防のために、スポーツ現場で頻繁に用いられているクライオセラピーの欠点について、筋の硬さから検討した研究もある。Pointら(57)は、冷却に伴い筋が硬化することを発見した。このことは、クライオセラピーを実施するタイミング次第では、逆にケガのリスクを高めていることを示唆するものであり、クライオセラピーの効果を最大化するために、ウォーミングアップとの組み合わせ方などを考慮すべきと提言している。

このように、筋傷害について筋の硬さを切り口に検討する研究は増えつつあるものの、前項のストレッチング研究と比べると、その数はまだまだ少ない。また、その性質上、後ろ向き研究

(retrospective study)で得られた知見が多く、スポーツ現場に還元できるだけの知見が揃っているとは言い難い。今後、前向き研究(prospective study)を含め、当該テーマにおける研究が進んでいくことで、スポーツ現場における対応の仕方がさらにブラッシュアップできることが期待される。

5. 筋疲労の評価

筋疲労を客観的に評価することは、容易ではない。そこで赤木は、筋の疲労度合いを定量する方法として、Shear Wave Imagingの利用を提案している。疲労している筋は十分にリラックスできず、張力が生じる(26,27)。筋の硬さを決定するモデル(22)を踏まえれば、この張力は筋の硬化を意味する。そのため、筋疲労課題前後での安静時における各筋の剛性率の変化が、協働筋各筋の疲労度合いを反映すると考え、研究を進めている。ストレッチングやマッサージの例からもわかる通り、一般的には、筋が硬いことは筋のコンディションの悪さを意味すると考えられている。それゆえ、筋の疲労度合いを筋の硬さで評価するアプローチは、主観的には理解されやすい印象を筆者らは抱いている。

これまで赤木は、1)全力の10%に相当する強度で一定時間力を発揮し続ける疲労課題(8)、2)全力の20%に相当する強度で疲労困憊まで力を発揮し続ける課題(9)、3)全力の40%に相当する強度で疲労困憊まで力を発揮し続ける課題、4)全力で断続的に、一定回数力を発揮し続ける課題、の4つの研究を進めてきた。そのうち、前者2つについてはすでに研究論文として発表されている。まず、1)では、足関節底屈筋群を対象に、全力の10%強度による1時間の等尺性関節トルク発揮を筋疲労課題とした。この筋疲労課題では、各筋が不随意で活動・休息を交代することにより、各協働筋の筋疲労を軽減する「活動交代」というシステムがヒト骨格筋に組み込まれている様子が観察され(36)、本研究では、その回数はヒラメ筋よりも腓腹筋内側頭で多くなった**(図3)**。また、疲労課題前後における筋の硬さは、ヒラメ筋と比較して腓腹筋内側頭で著しく増加した。このように、本研究により、筋の硬さで評価した筋疲労の度合いと活動交代の回数が対応していることが明らかにされ、これまで解明できていなかった活動交代システムの一端を掴むことができた。2)は、若年男女における疲れやすさの違いの要因を、筋の硬さを用いた筋疲労評価から探る研究となっている。膝関節伸展筋群を対象に、すべての協働筋の神経・筋活動が増加すると考えられる、全力の20%強度での等尺性関節トルクを疲労困憊まで発揮させる課題を実施した。その疲労課題前後で筋の硬さを定量した結果、女性における筋の疲労耐性が男性よりも高い要因は、外側広筋における疲労耐性の性差にあることが明らかにされた**(図4)**。一方、未発表データとなる3)および4)では、疲労課題前後で、明確に筋が硬くなるという結果を得ることができなかった。その要因について、現時点で結論づけることは難しいが、血液循環や筋温など、筋の硬さに影響を及ぼしそうな要因が、各研究間で異なる挙動を示していたことが推察される。

筋疲労をShear Wave Imagingで評価しているその他の研究に目を向けると、例えばSiracusaら(65)は、5秒間の全力での膝関節伸展筋力発揮を10回×6セット実施した際、疲労の蓄積と共に筋が軟化していくことを発見した。この結果は、上述の赤木の2つの研究(8,9)とは正反対であった。Siracusaら(65)は、疲労により筋が軟化するメカニズムについては明らかにしていないため、研究間の不一致の理由について言及することは困難であるものの、疲労課題が高強度(全力)か低強度かという点が大きな違いになっている可能性がある。その他にも、基礎的な研究(16,47)だけでなく、3～5マイル、10～13マイル、あるいは26マイル以上のレースに参加する

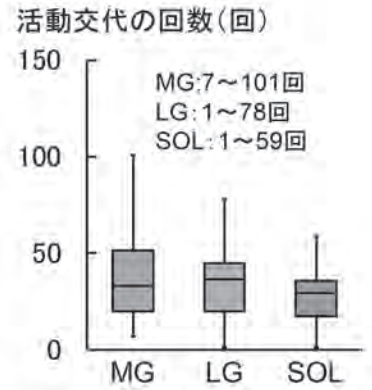

図3　全力の10%強度で1時間の等尺性足関節底屈トルク発揮中の下腿三頭筋における活動交代の回数([8]のデータから作図)

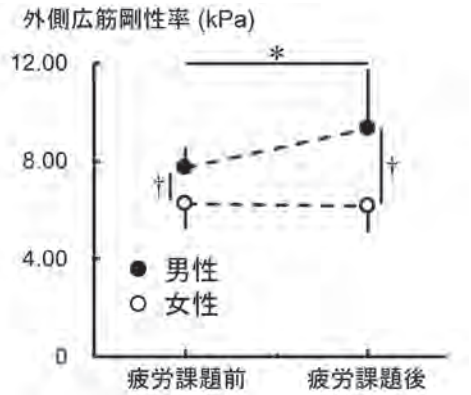

図4　全力の20%強度で等尺性膝関節伸展トルクを疲労困憊まで発揮させた前後における外側広筋の剛性率([9]のデータから作図)

陸上選手を対象とした研究(59)のような応用研究も行なわれており、Shear Wave Imagingを利用した筋疲労評価の価値については前向きに理解されている(17)。しかしながら、スポーツ現場で筋疲労の客観的指標として筋の硬さを取り入れられるか否かについては、さらなる知見の蓄積が不可欠であろう。

6. スポーツパフォーマンスとの関連

筋の硬さは、筋のコンディションを客観的に評価するためのひとつの方法として用いられている側面が強いが、実際のところ、スポーツパフォーマンスに及ぼす影響については、はっきりとわかっていない。そんな中でも、本稿の筆者である宮本と平田は、スプリンターと長距離ランナーにおける外側広筋の硬さを測定し、競技パフォーマンスとの関連性について検討している(45)。当該研究により、スプリンターは安静時の筋が硬いほど100mのタイムが速く、長距離ランナーは筋が軟らかいほど5,000mのタイムが速いことが示された**(図5)**。詳細な機序は不明ではあるが、スプリンターの硬い筋は効率的な力伝達に有利である(12)ことや、長距離ランナーの軟らかい筋は長い距離を走る上での高いエネルギー効率、すなわち無駄な抵抗なくスムースな動きが可能になることと関係しているのかもしれない。いずれにしても、適切な筋の硬さは競技特異的であり、競技パフォーマンスは筋の硬さを変化させることで向上する可能性があることを示唆するものである。一方、最大酸素摂取量や垂直跳びの記録と筋の硬さ(大腿直筋、腓腹筋内側頭および外側頭、ヒラメ筋)の間には相関関係がない(11)という報告もあり、筋の硬さとスポーツパフォーマンスとの関連性については、今後、さらなる調査が必要であろう。

7. おわりに

今回、スポーツ現場でも馴染みがあるものの、これまで客観的な評価が難しかった筋の硬さに着目して、本稿をまとめた。主に筋のコンディションに関連した研究を取り上げてきたが、スポーツパフォーマンスとの関係性を示す研究も存在する(45)。その一方で、その測定手法自体が新しいため、筋疲労評価のように、一致した見解を得られていないテーマがあるのも事実である。研究者としての筆者らの立場からは、今後研究を進展させることで、筋の硬さに関する確かな知見を獲得し、スポーツ現場への還元を果たしたい。

現状、筆者らが知る限り、Shear Wave Imagingを搭載したポータブルの超音波診断装置は存在しないため、スポーツ現場での筋の硬さの客観的評価は容易ではない。しかし、競技者自身、競技者をサポートするコーチ、スタッフの皆様方にとって、本稿が、筋の硬さがもつ意味について考えていただけるきっかけになれば幸いである。

◆

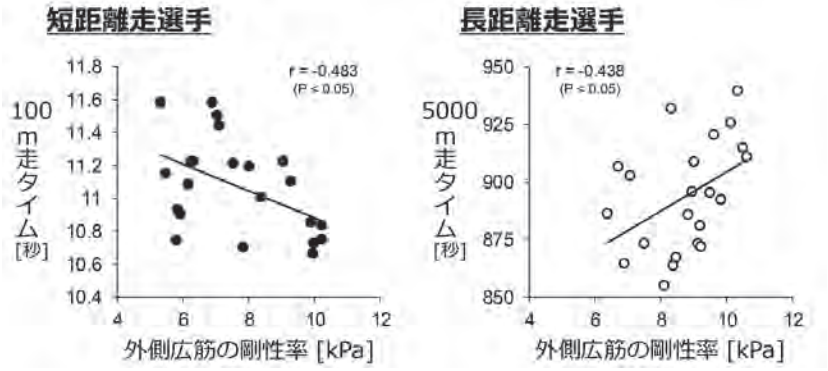

図5　短距離走選手における外側広筋剛性率と100m走タイムおよび長距離走選手における外側広筋剛性率と5,000m走タイムの関係([45]のデータから作図)

参考文献

1. Akagi R, Chino K, Dohi M, Takahashi H. Relationships between muscle size and hardness of the medial gastrocnemius at different ankle joint angles in young men. *Acta Radiol*, 53: 307–311, 2012.
2. Akagi R, Takahashi H. Acute effect of static stretching on hardness of the gastrocnemius muscle. *Med Sci Sports Exerc*, 45: 1348–1354, 2013.
3. Akagi R, Takahashi H. Effect of a 5-week static stretching program on hardness of the gastrocnemius muscle. *Scand J Med Sci Sports*, 24: 950–957, 2014.
4. Akagi R, Kusama S. Comparison Between Neck and Shoulder Stiffness Determined by Shear Wave Ultrasound Elastography and a Muscle Hardness Meter. *Ultrasound Med Biol*, 41: 2266–2271, 2015.
5. Akagi R, Tanaka J, Shikiba T, Takahashi H. Muscle hardness of the triceps brachii before and after a resistance exercise session: a shear wave ultrasound elastography study. *Acta Radiol*, 56: 1487–1493, 2015.
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. Akagi R, Shikiba T, Tanaka J, Takahashi H. A Six-Week Resistance Training Program Does Not Change Shear Modulus of the Triceps Brachii. *J Appl Biomech*, 32: 373–378, 2016.
8. Akagi R, Fukui T, Kubota M, Nakamura M, Ema R. Muscle Shear Moduli Changes and Frequency of Alternate Muscle Activity of Plantar Flexor Synergists Induced by Prolonged Low-Level Contraction. *Front*

Physiol, 8: 708, 2017.
9. Akagi R, Sato S, Yoshihara K, Ishimatsu H, Ema R. Sex difference in fatigability of knee extensor muscles during sustained low-level contractions. *Sci Rep*, 9: 16718, 2019.
10. Akiyama K, Akagi R, Hirayama K, Hirose N, Takahashi H, Fukubayshi T. Shear Modulus of the Lower Leg Muscles in Patients with Medial Tibial Stress Syndrome. *Ultrasound Med Biol*, 42: 1779–1783, 2016.
11. Akkoc O, Caliskan E, Bayramoglu Z. Effects f passive muscle stiffness measured by Shear Wave Elastography, muscle thickness, and body mass index on athletic performance in adolescent female basketball players. *Med Ultrason*, 20: 170–176, 2018.
12. Ando R, Suzuki Y. Positive relationship between passive muscle stiffness and rapid force production. *Hum Mov Sci*, 66: 285–291, 2019.
13. Barr RG, Nakashima K, Amy D, Cosgrove D, Farrokh A, Schafer F, Bamber JC, Castera L, Choi BI, Chou YH, Dietrich CF, Ding H, Ferraioli G, Filice C, Friedrich-Rust M, Hall TJ, Nightingale KR, Palmeri ML, Shiina T, Suzuki S, Sporea I, Wilson S, Kudo M. WFUMB guidelines and recommendations for clinical use of ultrasound elastography: Part 2: breast. *Ultrasound Med Biol*, 41: 1148–1160, 2015.
14. Barr RG, Cosgrove D, Brock M, Cantisani V, Correas JM, Postema AW, Salomon G, Tsutsumi M, Xu HX, Dietrich CF. WFUMB Guidelines and Recommendations on the Clinical Use of Ultrasound Elastography: Part 5. Prostate. *Ultrasound Med Biol*, 43: 27–48, 2017.
15. Basford JR, Jenkyn TR, An KN, Ehman RL, Heers G, Kaufman KR. Evaluation of healthy and diseased muscle with magnetic resonance elastography. *Arch Phys Med Rehabil*, 83: 1530–1536, 2002.
16. Bouillard K, Jubeau M, Nordez A, Hug F. Effect of vastus lateralis fatigue on load sharing between quadriceps femoris muscles during isometric knee extensions. *J Neurophysiol*, 111: 768–776, 2014.
17. Cè E, Longo S, Limonta E, Coratella G, Rampichini S, Esposito F. Peripheral fatigue: new mechanistic insights from recent technologies. *Eur J Appl Physiol*, 120: 17–39, 2020.
18. Chino K, Akagi R, Dohi M, Fukashiro S, Takahashi H. Reliability and validity of quantifying absolute muscle hardness using ultrasound elastography. *PLoS One*, 7: e45764, 2012.
19. Chino K, Akagi R, Dohi M, Takahashi H. Measurement of muscle architecture concurrently with muscle hardness using ultrasound strain elastography. *Acta Radiol*. 55: 833–839, 2014.
20. Chino K, Takahashi H. Association of Gastrocnemius Muscle Stiffness With Passive Ankle Joint Stiffness and Sex-Related Difference in the Joint Stiffness. *J Appl Biomech*, 34: 169–174, 2018.
21 Cosgrove D, Barr R, Bojunga J, Cantisani V, Chammas MC, Dighe M, Vinayak S, Xu JM, Dietrich CF. WFUMB Guidelines and Recommendations on the Clinical Use of Ultrasound Elastography: Part 4. Thyroid. *Ultrasound Med Biol*, 43: 4–26, 2017.
22. Dresner MA, Rose GH, Rossman PJ, Muthupillai R, Manduca A, Ehman RL. Magnetic resonance elastography of skeletal muscle. *J Magn Reson Imaging*, 13: 269–276, 2001.
23. Eriksson Crommert M, Lacourpaille L, Heales LJ, Tucker K, Hug F. Massage induces an immediate, albeit short-term, reduction in muscle stiffness. *Scand J Med Sci Sports*, 25: e490–e496, 2015.
24. Ferraioli G, Filice C, Castera L, Choi BI, Sporea I, Wilson SR, Cosgrove D, Dietrich CF, Amy D, Bamber JC, Barr R, Chou YH, Ding H, Farrokh A, Friedrich-Rust M, Hall TJ, Nakashima K, Nightingale KR, Palmeri ML, Schafer F, Shiina T, Suzuki S, Kudo M. WFUMB guidelines and recommendations for clinical use of ultrasound elastography: Part 3: liver. *Ultrasound Med Biol*, 41: 1161–1179, 2015.
25. Freitas SR, Andrade RJ, Larcoupaille L, Mil-homens P, Nordez A. Muscle and joint responses during and after static stretching performed at different intensities. *Eur J Appl Physiol*, 115: 1263–1272, 2015.
26. Gong B, Miki T, Seino S, Renaud JM. A K(ATP) channel deficiency affects resting tension, not contractile force, during fatigue in skeletal muscle. *Am J Physiol Cell Physiol*, 279: C1351–C1358, 2000.
27. Gong B, Legault D, Miki T, Seino S, Renaud JM. KATP channels depress force by reducing action potential amplitude in mouse EDL and soleus muscle. *Am J Physiol Cell Physiol*, 285: C1464–C1474, 2003.
28. Guilhem G, Doguet V, Hauraix H, Lacourpaille L, Jubeau M, Nordez A, Dorel S.Muscle force loss and soreness subsequent to maximal eccentric contractions depend on the amount of fascicle strain in vivo. *Acta Physiol* (Oxf), 217: 152–163, 2016.
29. Heales LJ, Badya R, Ziegenfuss B, Hug F, Coombes JS, van den Hoorn W, Tucker K, Coombes BK. Shear-wave velocity of the patellar tendon and quadriceps muscle is increased immediately after maximal eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol*, 118: 1715–1724, 2018.
30. Hirata K, Miyamoto-Mikami E, Kanehisa H, Miyamoto N. Muscle-specific acute changes in passive stiffness of human triceps surae after stretching. *Eur J Appl Physiol*, 116: 911–918, 2016.
31. Hirata K, Kanehisa H, Miyamoto N. Acute effect of static stretching on passive stiffness of the human gastrocnemius fascicle measured by ultrasound shear wave elastography. *Eur J Appl Physiol*, 117: 493–499, 2017.
32. Hirata K, Yamadera R, Akagi R. Can Static Stretching Reduce Stiffness of the Triceps Surae in Older Men? *Med Sci Sports Exerc*, 52: 673–679, 2020.
33. Ichihashi N, Umegaki H, Ikezoe T, Nakamura M, Nishishita S, Fujita K, Umehara J, Nakao S, Ibuki S. The effects of a 4-week static stretching programme on the individual muscles comprising the hamstrings. *J Sports Sci*, 34: 2155–2159, 2016.
34. 工藤正俊, 椎名毅, 森安史典, 飯島尋子, 建石良介, 矢田典久, 藤本研治, 森川浩安, 広岡昌史, 住野泰清, 熊田卓. 日本超音波医学会 超音波エラストグラフィ診療ガイドライン：肝臓. 公益社団法人日本超音波医学会, https://www.jsum.or.jp/committee/diagnostic/pdf/elast_kan_ja.pdf.
35. Kumagai H, Miyamoto-Mikami E, Hirata K, Kikuchi N, Kamiya N, Hoshikawa S, Zempo H, Naito H, Miyamoto N, Fuku N. ESR1 rs2234693 Polymorphism Is Associated with Muscle Injury and Muscle Stiffness. *Med Sci Sports Exerc*, 51: 19–26, 2019.
36. Kouzaki M, Shinohara M, Masami K, Kanehisa H, Fukunaga T. Alternate muscle activity observed between knee extensor synergists during low-level sustained contractions. *J Appl Physiol* (1985), 93: 675-684, 2002.
37. Lacourpaille L, Nordez A, Hug F, Couturier A, Dibie C, Guilhem G. Time-course effect of exercise-induced muscle damage on localized muscle mechanical

properties assessed using elastography. *Acta Physiol* (Oxf), 211: 135–146, 2014.
38. Lacourpaille L, Nordez A, Hug F, Doguet V, Andrade R, Guilhem G. Early detection of exercise-induced muscle damage using elastography. *Eur J Appl Physiol*, 117: 2047–2056, 2017.
39. Le Sant G, Ates F, Brasseur JL, Nordez A. Elastography Study of Hamstring Behaviors during Passive Stretching. *PLoS One*, 10: e0139272, 2015.
40. Maher RM, Hayes DM, Shinohara M. Quantification of dry needling and posture effects on myofascial trigger points using ultrasound shear-wave elastography. *Arch Phys Med Rehabil*, 94: 2146-2150, 2013.
41. McHugh MP, Connolly DA, Eston RG, Kremenic IJ, Nicholas SJ, Gleim GW. The role of passive muscle stiffness in symptoms of exercise-induced muscle damage. *Am J Sports Med*, 27: 594–599, 1999.
42. Miyamoto N, Hirata K, Kanehisa H. Effects of hamstring stretching on passive muscle stiffness vary between hip flexion and knee extension maneuvers. *Scand J Med Sci Sports*, 27: 99–106, 2017.
43. Miyamoto N, Hirata K, Miyamoto-Mikami E, Yasuda O, Kanehisa H. Associations of passive muscle stiffness, muscle stretch tolerance, and muscle slack angle with range of motion: individual and sex differences. *Sci Rep*, 8: 8274, 2018.
44. Miyamoto N, Miyamoto-Mikami E, Hirata K, Kimura N, Fuku N. Association analysis of the ACTN3 R577X polymorphism with passive muscle stiffness and muscle strain injury. *Scand J Med Sci Sports*, 28: 1209–1214, 2018.
45. Miyamoto N, Hirata K, Inoue K, Hashimoto T. Muscle Stiffness of the Vastus Lateralis in Sprinters and Long-Distance Runners. *Med Sci Sports Exerc*, 51: 2080–2087, 2019.
46. Morales-Artacho AJ, Lacourpaille L, Guilhem G. Effects of warm-up on hamstring muscles stiffness: Cycling vs foam rolling. *Scand J Med Sci Sports*, 27: 1959–1969, 2017.
47. Morel B, Hug F, Nordez A, Pournot H, Besson T, Mathevon L, Lapole T. Reduced Active Muscle Stiffness after Intermittent Submaximal Isometric Contractions. *Med Sci Sports Exerc*, 51: 2603–2609, 2019.
48. 中島一毅, 椎名毅, 桜井正児, 榎戸克年, 遠藤登喜子, 角田博子, 高田悦雄, 梅本剛, 植野映. 乳房超音波エラストグラフィ 2013. 公益社団法人日本超音波医学会, https://www.jsum.or.jp/committee/diagnostic/pdf/elast_nyusen_ja.pdf.
49. Nakamura M, Ikezoe T, Kobayashi T, Umegaki H, Takeno Y, Nishishita S, Ichihashi N. Acute effects of static stretching on muscle hardness of the medial gastrocnemius muscle belly in humans: an ultrasonic shear-wave elastography study. *Ultrasound Med Biol*, 40: 1991–1997, 2014.
50. Nakamura M, Hasegawa S, Umegaki H, Nishishita S, Kobayashi T, Fujita K, Tanaka H, Ibuki S, Ichihashi N. The difference in passive tension applied to the muscles composing the hamstrings - Comparison among muscles using ultrasound shear wave elastography. *Man Ther*, 24: 1–6, 2016.
51. Nakamura M, Ikezoe T, Nishishita S, Umehara J, Kimura M, Ichihashi N. Acute effects of static stretching on the shear elastic moduli of the medial and lateral gastrocnemius muscles in young and elderly women. *Musculoskelet Sci Pract*, 32: 98–103, 2017.
52. Nakao G, Taniguchi K, Katayose M. Acute Effect of Active and Passive Static Stretching on Elastic Modulus of the Hamstrings. *Sports Med Int Open*, 2: E163–E170, 2018.
53. Niitsu M, Michizaki A, Endo A, Takei H, Yanagisawa O. Muscle hardness measurement by using ultrasound elastography: a feasibility study. *Acta Radiol*, 52: 99–105, 2011.
54. Nordez A, Hug F. Muscle shear elastic modulus measured using supersonic shear imaging is highly related to muscle activity level. *J Appl Physiol*, 108: 1389–1394, 2010.
55. Ogawa T, Saeki J, Ichihashi N. The effect of hip flexion angle on muscle elongation of the hip adductor muscles during stretching. *J Biomech*, Online ahead of print, 2020.
56. Pamboris GM, Noorkoiv M, Baltzopoulos V, Gokalp H, Marzilger R, Mohagheghi AA. Effects of an acute bout of dynamic stretching on biomechanical properties of the gastrocnemius muscle determined by shear wave elastography. *PLoS One*. 13: e0196724, 2018.
57. Point M, Guilhem G, Hug F, Nordez A, Frey A, Lacourpaille L. Cryotherapy induces an increase in muscle stiffness. *Scand J Med Sci Sports*, 28: 260–266, 2018.
58. Pournot H, Tindel J, Testa R, Mathevon L, Lapole T. The Acute Effect of Local Vibration As a Recovery Modality from Exercise-Induced Increased Muscle Stiffness. *J Sports Sci Med*, 15: 142–147, 2016.
59. Sadeghi S, Newman C, Cortes DH. Change in skeletal muscle stiffness after running competition is dependent on both running distance and recovery time: a pilot study. *PeerJ*, 6: e4469, 2018.
60. Saeki J, Nakamura M, Nakao S, Fujita K, Yanase K, Ichihashi N. Muscle stiffness of posterior lower leg in runners with a history of medial tibial stress syndrome. *Scand J Med Sci Sports*, 28: 246–251, 2018.
61. Sato S, Kiyono R, Takahashi N, Yoshida T, Takeuchi K, Nakamura M. The acute and prolonged effects of 20-s static stretching on muscle strength and shear elastic modulus. *PLoS One*, 15: e0228583, 2020.
62. Seo JB, Yoon SH, Lee JY, Kim JK, Yoo JS. What Is the Most Effective Eccentric Stretching Position in Lateral Elbow Tendinopathy? *Clin Orthop Surg*, 10: 47–54, 2018.
63. Shiina T, Nightingale KR, Palmeri ML, Hall TJ, Bamber JC, Barr RG, Castera L, Choi BI, Chou YH, Cosgrove D, Dietrich CF, Ding H, Amy D, Farrokh A, Ferraioli G, Filice C, Friedrich-Rust M, Nakashima K, Schafer F, Sporea I, Suzuki S, Wilson S, Kudo M. WFUMB guidelines and recommendations for clinical use of ultrasound elastography: Part 1: basic principles and terminology. *Ultrasound Med Biol*, 41: 1126–1147, 2015.
64. Shinohara M, Sabra K, Gennisson JL, Fink M, Tanter M. Real-time visualization of muscle stiffness distribution with ultrasound shear wave imaging during muscle contraction. *Muscle Nerve*, 42: 438–441, 2010.
65. Siracusa J, Charlot K, Malgoyre A, et al. Resting Muscle Shear Modulus Measured With Ultrasound Shear-Wave Elastography as an Alternative Tool to Assess Muscle Fatigue in Humans. *Front Physiol*, 10: 626, 2019.
66. Suga M, Matsuda T, Minato K, Oshiro O, Chihara K, Okamoto J, Takizawa O, Komori M, Takahashi T. Measurement of in-vivo local shear modulus by combining multiple phase offsets MR elastography. *Stud Health Technol Inform*, 84: 933–937, 2003.
67. Taniguchi K, Shinohara M, Nozaki S, Katayose M. Acute decrease in the stiffness of resting muscle belly due to static stretching. *Scand J Med Sci Sports*,

25: 32–40, 2015.
68. Taş S, Özkan Ö, Karaçoban L, Dönmez G, Çetin A, Korkusuz F. Knee muscle and tendon stiffness in professional soccer players: a shear-wave elastography study. *J Sports Med Phys Fitness*, Online ahead of print, 2019.
69. Uffmann K, Maderwald S, Ajaj W, Galban CG, Mateiescu S, Quick HH, Ladd ME. In vivo elasticity measurements of extremity skeletal muscle with MR elastography. *NMR Biomed*, 17: 181–190, 2004.
70. Umegaki H, Ikezoe T, Nakamura M, Nishishita S, Kobayashi T, Fujita K, Tanaka H, Ichihashi N. Acute effects of static stretching on the hamstrings using shear elastic modulus determined by ultrasound shear wave elastography: Differences in flexibility between hamstring muscle components. *Man Ther*, 20: 610–613, 2015.
71. Umegaki H, Ikezoe T, Nakamura M, Nishishita S, Kobayashi T, Fujita K, Tanaka H, Ichihashi N. The effect of hip rotation on shear elastic modulus of the medial and lateral hamstrings during stretching. *Man Ther*, 20: 134–137, 2015.
72. Witvrouw E, Danneels L, Asselman P, D'Have T, Cambier D. Muscle flexibility as a risk factor for developing muscle injuries in male professional soccer players. A prospective study. *Am J Sports Med*, 31: 41–46, 2003.
73. Xu J, Hug F, Fu SN. Stiffness of individual quadriceps muscle assessed using ultrasound shear wave elastography during passive stretching. *J Sport Health Sci*, 7: 245–249, 2018.
74. 山川誠. 超音波エラストグラフィの原理. *バイオメカニズム学会誌*, 40: 73–78, 2016.
75. Yanagisawa O, Niitsu M, Kurihara T, Fukubayashi T. Evaluation of human muscle hardness after dynamic exercise with ultrasound real-time tissue elastography: a feasibility study. *Clin Radiol*, 66: 815–819, 2011.
76. Yoshida K, Itoigawa Y, Maruyama Y, Saita Y, Takazawa Y, Ikeda H, Kaneko K, Sakai T, Okuwaki T. Application of shear wave elastography for the gastrocnemius medial head to tennis leg. *Clin Anat*, 30: 114–119, 2017.
77. Zhou J, Liu C, Zhang Z. Non-uniform Stiffness within Gastrocnemius-Achilles tendon Complex Observed after Static Stretching. *J Sports Sci Med*, 18: 454–461, 2019.
78. Zhou JP, Yu JF, Feng YN, Liu CL, Su P, Shen SH, Zhang ZJ. Modulation in the elastic properties of gastrocnemius muscle heads in individuals with plantar fasciitis and its relationship with pain. *Sci Rep*, 10: 2770, 2020.

著者紹介

赤木 亮太：
芝浦工業大学システム理工学部生命科学科 准教授、博士（スポーツ科学）。NSCAジャパン 編集委員。

平田 浩祐：
日本学術振興会特別研究員（芝浦工業大学システム理工学部生命科学科 赤木亮太研究室所属）、博士（体育学）。

中村 雅俊：
新潟医療福祉大学理学療法学科 講師、博士（人間健康科学）。理学療法士。

宮本 直和：
順天堂大学スポーツ健康科学部 先任准教授、博士（人間・環境学）。日本スポーツ振興センター・ハイパフォーマンススポーツセンター アドバイザー。元オリンピック強化指定選手（ウィンドサーフィン）。