

## 超音波 Real-Time Tissue Elastography を用いた 筋および腱の硬さと運動パフォーマンスの関係

廣野準一\*・向井直樹\*・宮川俊平\*・有田祐二\*・鍋山隆弘\*・香田郡秀\*

### The Relationship between Physical Performance and the Muscle as well as the Tendon Hardness Measured by the Ultrasound Real-Time Tissue Elastography

HIRONO Junichi\*, MUKAI Naoki\*, MIYAKAWA Shumpei\*,  
ARITA Yuji\*, NABEYAMA Takahiro\* and KODA Kunihide\*

#### 1. 緒言

運動パフォーマンスを評価する方法としては、走行タイムや跳躍高の計測や、最大努力時の発揮筋力の機器を用いた測定のように、実際に運動を行って評価することが多い。しかし、中高齢者のような運動機能が低下した状態、幼少期などの運動実施方法の理解が難しい場合、競技スポーツ選手においても翌日の疲労等を考慮し、実際に運動を実施することなく、安全かつ簡便に運動能力を推定する指標が求められる。

筋・腱のコンディションを把握する為に、「ハリ」や「コリ」といった硬さの具合を触診により評価することがあり、「優れたスポーツ選手は筋肉が柔らかい」<sup>1)</sup>と言われるように筋・腱の硬さからパフォーマンスを推定しようという試みは、古くからなされてきた。紺野は、測定部位に体表から押し込んだ際の抵抗から組織の硬さを測定する機器を用いて、最大緊張時と弛緩時の筋硬度差と運動パフォーマンスの間に正の相関関係がある、つまり最大緊張時と弛緩時の筋硬度差が大きいほど、高い運動パフォーマンスを示すことを報告した<sup>2)</sup>。しかしこの研究は、最大努力での筋力発揮を必要とするため、本研究のねらいとは一致しない。

筋力発揮を伴わずに筋力を評価する方法としては、筋横断面積は筋力との相関が高いということがあり<sup>3)</sup>。さらにフィールドで測定可能な手段として村木らは、MRI や CT 等の機器と比較して携帯性に優れた超音波診断装置を用いて大腿前面の筋厚を計測し、体表から圧迫した際に観察される変位量から

算出する筋の硬度と合わせることで、膝伸展の等尺性筋力を推定できることを報告した<sup>4)</sup>。しかし、この研究は等尺性筋力といった静的な筋力発揮のみの検討に留まることや、筋硬度の指標を算出するために多くの手順を踏む必要があり、よりダイナミックな運動パフォーマンスとの関連や、より簡便に測定が可能な方法を検討する必要がある。

また、腱の伸張性が高いほど、反動動作が垂直跳びのパフォーマンス向上に及ぼす効果が大きいと報告されている<sup>5)</sup>。このように筋・腱は複合体として運動に関わっており、臨床では腱も筋と同様に触診での硬さ評価を行う場合もあるが、腱の硬さとパフォーマンスについて検討した先行研究は見当たらない。

近年、超音波 Real-time Tissue Elastography (RTE) という超音波診断装置を用いて筋腱の硬さを測定する技術が考案された<sup>6)</sup>。組織を圧迫すると軟らかい組織ほど大きく変形し、硬い組織はあまり変形しないという特性を利用し、超音波診断装置の探触子を利用して、超音波の進行方向に圧迫をした際に生じる変形の大きさをリアルタイムに記録、解析する。解析により得られた歪み画像を撮像範囲内の相対的な硬さとして半透明にカラー表示し、Bモード画像上に重ね合わせたものがRTEである。硬度基準物質との比較により、半定量的に硬さを測定することが示され<sup>7)</sup>、乳腺<sup>8)</sup>や肝臓<sup>9)</sup>、リンパ腺<sup>10)</sup>の領域での腫瘍の診断等に活用されている。RTEは筋・腱の硬さも計測することが可能であるが<sup>11,12)</sup>、RTEを用いて筋・腱の硬さを検討した研究は少ない。

\* 筑波大学体育系  
Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba

そこで本研究は、安全かつ簡便に運動能力を推定する手段を検討するために、RTEで測定される筋・腱の硬度と、運動パフォーマンスの関係を横断的に調査することを目的とした。

## 2. 方法

### 2.1 対象

下腿に整形外科的な症状および痛みのない、健康な男性36名（年齢：20.5 ± 1.8歳、身長：172.0 ± 5.7cm、体重：67.7 ± 7.3kg）および、女性11名（年齢：19.8 ± 0.9歳、身長：161.3 ± 3.5cm、体重：59.9 ± 5.7kg）の計47名を対象とした。

### 2.2 実験手順

運動が筋・腱の硬度に及ぼす影響を考慮し、実験開始24時間前から日常生活に必要な歩行等を除く運動をできる限り行わないよう指示した。また、初めに超音波RTEによる硬度測定を実施し、その後各種運動パフォーマンスの測定を行った。運動パフォーマンス測定の実施順はランダムに行った。全ての測定は、走り幅跳びの際の踏切り足（支持脚）で行った。

### 2.3 測定項目

#### 1) 超音波 RTE

RTE測定には超音波診断装置（HI VISION Preirus、日立アロカメディカル）と10MHzリニア型プローブを用い、硬度基準物質（音響カップラーL65、日立アロカメディカル）を専用のアタッチメントを用いてプローブに取り付け、測定部位とプローブの間に介在させた。硬度基準物質は血液バッグやカテーテルに使われているエラストマー樹脂という材料で作成されており、超音波画像を撮像する際、画像の劣化ができるだけ小さくなるように音響特性の調整が行われている。さらに、エラストグラフィの圧迫手技で音響カップラー内に適切なひずみが

生じるような硬さに調整されている<sup>7)</sup>。

測定部位は、腓腹筋内側頭およびアキレス腱とした。腓腹筋は最大周径囲部の腓腹筋内側頭中央部、アキレス腱は踵骨隆起から近位へ3cm部を中心とした4cm幅を撮像部位とした。

測定肢位は腹臥位、膝関節伸展位置とし、足関節中間位にて固定し、下肢に力を入れないように指示した。プローブ側から測定部位に対して軽い圧迫操作をリズムカルに伝えた。圧迫の速度および強さを一定にするため、超音波画像上のグラフを参考にして調節した<sup>13)</sup>。

圧迫操作に対する組織の歪み率は、撮像領域内の相対的な硬さとしてカラー分布された。コンピューターが自動的に選出した、圧迫操作中に得られた最も鮮明な画像を用いて、歪み比（strain ratio：SR）をStrain Ratio機能にて算出した。Strain Ratio機能とは、超音波診断装置上のRTE画像で選択した2領域間の歪み比を計算する機能である。腓腹筋またはアキレス腱を対象部位（A）、硬度基準物質を基準部位（B）として関心領域を設け（図1）、基準部位を対象部位で除した値（B/A）を算出し、本研究のSRとした。RTEに表示される歪み率は撮像領域内の相対的な硬さであるため、硬度基準物質を参照体とすることで半定量的な評価が可能となる。測定は全て同一検者が行い、各部位につき3回繰り返して実施し、3回の測定の平均値を用いて分析を行った。

#### 2) 等尺性最大底屈筋力

多用途筋機能評価運動装置（BIODEX system 4、Biodex社）を用い、足関節の等尺性最大随意底屈筋力を測定した。測定肢位は、仰臥位、膝関節完全伸展位とし、足関節用のアタッチメントを用いて行った。5秒間の筋発揮中にみられた最大値から脱力時の値を減した値を等尺性筋力とした。

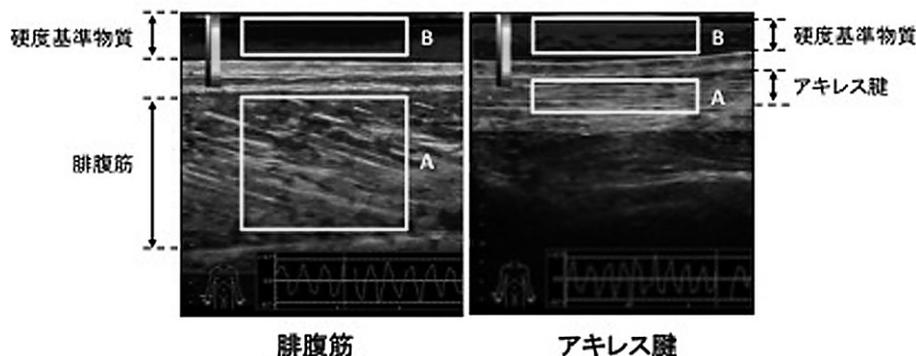


図1 関心領域の設定

### 3) Drop Jump

ダイナミックな運動遂行能力の指標として、片脚でのドロップジャンプを行った<sup>14)</sup>。本研究のドロップジャンプは、高さ10 cmの台とマットスイッチ(マルチジャンプテスト、DKH社)を用いて実施した。接地時間と跳躍時間、跳躍高を接地時間で除した値から、片脚 Drop Jump 指数 (m/s) を算出した。測定は各2回実施し、最高値を用いた。

### 2.4 統計処理

すべての結果は、平均値±標準偏差で示した。腓腹筋およびアキレス腱の硬度と、等尺性筋力および片脚 Drop Jump 指数の間の相関関係の検討は、スピアマンの順位相関係数を用いた。有意水準は5%未満とした。

## 3. 結果

超音波 RTE で測定された腓腹筋およびアキレス腱の硬度と等尺性筋力および片脚 Drop Jump 指数の結果を表1に示した。

表1 測定値

		MEAN ± SD	Range
硬度	腓腹筋	0.90 ± 0.35	0.23 - 1.73
	アキレス腱	4.41 ± 1.61	1.90 - 8.65
パフォーマンス	等尺性筋力 (Nm)	115.7 ± 40.9	43.3 - 214.5
	Drop Jump (m/s)	0.62 ± 0.17	0.35 - 1.16

腓腹筋およびアキレス腱の硬度と等尺性筋力および片脚 Drop Jump 指数の関係を表2に示した。腓腹筋の硬度と片脚 Drop Jump 指数の間に、有意な正の相関関係が認められた ( $r=0.35$ ,  $P<0.05$ )。アキレス腱の硬度と等尺性筋力の間に、有意な正の相関関係が認められた ( $r=0.42$ ,  $P<0.05$ )。

表2 筋・腱の硬度と運動パフォーマンスの関係 (相関係数)

	等尺性筋力	Drop Jump
腓腹筋硬度	0.18	0.35*
アキレス腱硬度	0.42*	0.22

(\* $p<0.05$ )

## 4. 考察

本研究で硬度基準物質として用いた音響カプラーは、超音波 RTE 測定で客観的な評価を可能にするために開発された物質であるが、音響カプラーを用

いて筋・腱の客観的評価を行った報告は非常に少ない。本研究の結果は、今後音響カプラーを基準として筋・腱の硬度を測定する際の指標となり得る。

超音波 RTE で測定される筋・腱の硬度と運動パフォーマンスの間の関係を検討した結果、腓腹筋の硬度と片脚 Drop Jump 指数の間に有意な正の相関関係が認められ、その相関係数は0.35であった。これは、腓腹筋硬度とダイナミックな運動遂行能力には、「弱い正の相関がある」程度ではあるが正の相関関係があることを示し、硬い筋を有するほど、よりダイナミックな運動の遂行能力が高いことを表す。Drop Jump では、接地前に足関節周囲の筋群の予備緊張を高めておくと、接地時にかかる大きな衝撃に対応でき、腱を効率よく使える可能性が示唆されている<sup>15)</sup>。そのためには、腓腹筋の stiffness を高める必要があると言われており、本研究で行ったような、比較的短い準備時間での爆発的なパフォーマンス発揮では、予め硬い筋を有することで高い stiffness での接地を可能にし、高いパフォーマンス発揮に有利に働いた可能性が考えられる。

また、アキレス腱の硬度と等尺性筋力の間に有意な正の相関関係が認められ、その相関係数は0.42であった。このことは、アキレス腱硬度と足関節底屈筋力発揮には「中程度の正の相関」があることを示し、硬い腱を有するほどより大きい等尺性筋力発揮が可能であったことを表す。腱組織は、筋が発揮する張力を他の組織や骨に伝達する組織であり、腱自身が張力を発揮することはないが、筋の収縮により伸長し、筋が弛緩すると元の形状に戻ろうとする性質を有する<sup>16)</sup>。硬い腱を有することで、筋が発揮した力が効率よく関節に伝わり、より高い筋力発揮が可能であったと考えられる。

以上より、腓腹筋の硬度からダイナミックな運動遂行能力が求められる Drop Jump、アキレス腱の硬度から足関節等尺性底屈筋力の推定ができる可能性が示唆された。しかし、本研究の対象者は47名に留まり、筋線維タイプに代表される組織の性質や、性別、年齢、運動習慣、生活状況等の違いがパフォーマンスに影響を及ぼした可能性も少なからず考えられる。今後は対象者数を増やすことで、より精度の高い情報を得る必要がある。また、同一対象者の筋・腱の硬さを縦断的にモニタリングし、選手内のパフォーマンスの変動と筋・腱の硬さ変化の関連性を検討することで、スポーツにおけるコンディショニングに関して、更なる有用な知見を得ることができると考える。

## 文 献

- 1) 紺野義雄 (1982): スポーツマンのトレーニング: 柔らかい筋肉をつくろう. 実業之日本社、東京.
- 2) 紺野義雄 (1952): 筋硬度に関する研究 (第一報): “筋硬度差” による運動能力の判定法. 体力科学、1(5): 180-185.
- 3) Maughan RJ, Watson JS, Weir J. (1983): Strength and cross-sectional area of human skeletal muscle. *J Physiol*, 338: 37-49.
- 4) 村木里志 (2009): 筋の厚さ (量) と硬さ (質) から筋力を推定する方法の開発. 第 24 回健康医科学研究助成論文集、126-133.
- 5) Kubo K, Kawakami Y, Fukunaga T(1999): Influence of elastic properties of tendon structures on jump performance in humans. *J Appl Physiol*, 87: 2090-2096.
- 6) Ueno E, Tohno E, Soeda S, Asaoka Y, Itoh K, Bamber JC, Blaszczyk M, Davey J, Mckinna JA. (1988): Dynamic tests in real-time breast echography. *Ultrasound Med Biol*, 14(1): 53-7.
- 7) 藤原洋子、松村 剛、村山直之、元木 満、三竹 毅 (2011): エラストグラフィ用音響カプラーの開発. *Medix*, 55: 40-44.
- 8) Itoh A, Ueno E, Tohno E, Kamma H, Takahashi H, Shiina T, Yamakawa M, Matsumura T. (2006): Breast disease: clinical application of US elastography for diagnosis. *Radiology*, 239(2): 341-50.
- 9) Friedrich-Rust M, Schwarz A, Ong M, Dries V, Schirmacher P, Herrmann E, Samaras P, Bojunga J, Bohle RM. (2009): Zeuzem S, Sarrazin C. Real-time tissue elastography versus FibroScan for non-invasive assessment of liver fibrosis in chronic liver disease. *Ultraschall Med*, 30(5): 478-84.
- 10) Săftoiu A, Vilmann P, Hassan H, Gorunescu F. (2006): Analysis of endoscopic ultrasound elastography used for characterisation and differentiation of benign and malignant lymph nodes. *Ultraschall Med*, 27(6): 535-42.
- 11) Chino K, Akagi R, Dohi M, Fukashiro S, Takahashi H(2012): Reliability and validity of quantifying absolute muscle hardness using ultrasound elastography. *PLoS One*, 7(9): e45764.
- 12) Zordo T, Lill SR, Fink C, Feuchtner GM, Jaschke W, Bellmann-Weiler R, Klauser AS. (2009): Real-time sonoelastography of lateral epicondylitis: comparison of findings between patients and healthy volunteers. *Am J Roentgenol*, 193(1):180-5.
- 13) 三竹 毅、松村 剛、脇 康治、村山直之、山本佳子. (2006): Real-time Tissue Elastography 技術の開発. 医用画像情報学会雑誌、23(2): 70-74.
- 14) 関子浩二、高松 薫 (1996): リバウンドドロップジャンプにおける着地動作の違いが踏切中のパワーに及ぼす影響 - 膝関節角度に着目して -. *体力科学*, 45(1): 209-218.
- 15) 尹 聖鎮、大山卞圭吾、岡田英孝、高松 薫 (1999): 傾斜面でのリバウンドジャンプにおける腓腹筋の stiffness がアキレス腱張力に及ぼす影響. *体育学研究*, 44(6): 510-521.
- 16) Kawakami Y, Ichinose Y, Fukunaga T(1998): Architectural and functional features of human triceps surae muscles during contraction. *J Appl Physiol*, 85(2): 398-40.