アスリートの骨格筋スティフネス

宮本　直和
Miyamoto Naokazu

1. はじめに

多くの人が自らの経験から感じているように，骨格筋は，トレーニングやストレッチ等日常的な運動習慣，加齢，損傷や様々な疾患等によってその“硬さ”が変化する。スポーツの現場や日常生活においても「筋肉が張っている」「軟らかくて良い筋肉」等と表現されることが多い。そのため，スポーツの現場では筋の硬さが筋コンディショニングの指標として用いられることもある。

従来，筋の硬さは，体表面からの触診や押し込み式の筋硬度計によって評価されることが多かった。しかしながら，これらの評価法は，皮下脂肪やその厚さの影響を受けると共に，深部や小さな筋を評価しづらいという欠点がある。また，触診法による筋の硬さ評価は，経験に基づいた主観に大きく依存することから，客観的かつ定量的な評価が行えない欠点もある。そのため，人間生体において筋の硬さを客観的かつ定量的に評価できる方法が必要となる。

2. 超音波エラストグラフィの種類と原理

材料力学分野では，材料・媒体の硬さはヤング率や剛性率等の弾性係数として，Pa（パスカル）という単位で表される。人間の組織についても，生検等で摘出した組織について引張試験等を行うことによって弾性係数を測定することは可能であるが，侵襲的であることから，臨床以外の場では決して現実的とは言えない。そこで，生体組織の硬さ・弾性係数を画像化して評価するという試みが行われるようになり，1990 年代初頭からその方法論は“エラストグラフィ（elastography）”と呼ばれている。エラストグラフィに関する研究開発が繰り返され，現在の実用化に至っているが，その背景には，生体軟組織の硬さがその病理状態と深く関連していることがあり，組織の硬さの測定が診断において重要な意味を持つことがある。実際，現在の臨床現場においても，超音波装置を用いたエラストグラフィが用いられている。なお，エラストグラフィには MR を用いたもの（MR Elastography）もあるが，本稿では，身体運動時や様々な姿勢での計測に応用可能で，比較的簡便な方法である超音波エラストグラフィについて紹介する。

エラストグラフィにはいくつかの方式があるが，現在は大きく以下の 2 つの系統に分類できる。

① 外部から力を加えることにより組織に変形を引き起こし，相対的なひずみ（strain）を算出するストレインエラストグラフィ（strain elastography）
② 組織内を伝播する横波（せん断波 : shear wave）を発生させ，その伝播速度を測定するせん断波エラストグラフィ（shear wave elastography）

ストレインエラストグラフィでは，軟らかい組織の方がひずみが大きいという性質を利用し，組織の硬さを評価している。少し詳しく説明すると，組織

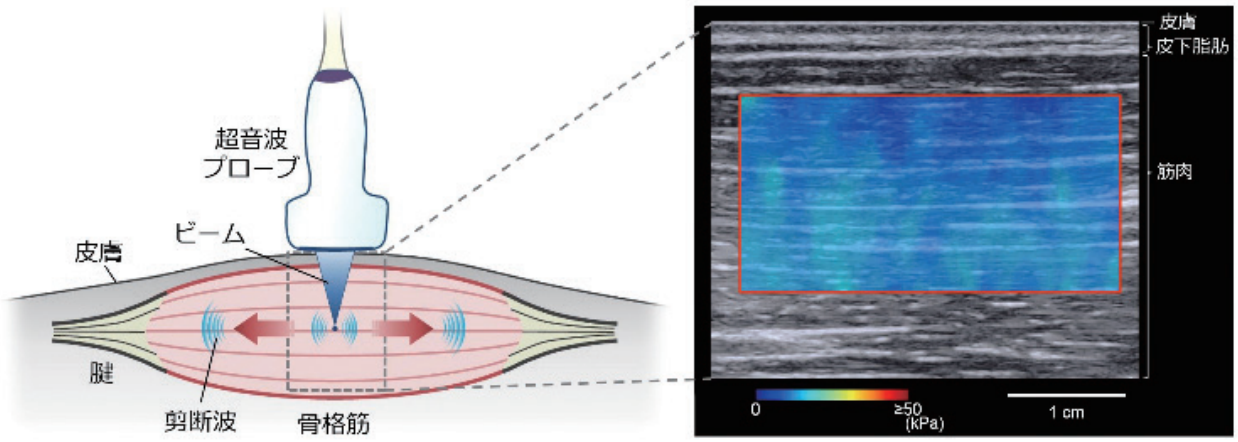

図 1　超音波せん断波エラストグラフィの測定原理概要及び測定画像典型例

を用手的に圧迫した際に軟らかい組織の方がひずみは大きくなるため，組織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，初期長に対する伸長・短縮の程度を表すひずみは，応力（stress）と比例関係にあり，その比例定数が材質特性を表すヤング率となる（フックの法則）。そのため，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，組織内のひずみ分布から硬さ分布を評価している。

一方，せん断波エラストグラフィでは，せん断波は硬い組織ほど速く伝播するという性質を利用し，組織の硬さを評価している。組織を用手圧迫振動させるストレインエラストグラフィに対し，せん断波エラストグラフィでは，組織を振動させるために超音波ビームを使用し，音響放射圧（acoustic radiation force impulse）を発生させる。ビームを照射された組織は圧迫を受け，その結果変位が生じるが，人体軟組織のような弾性組織では，この変位に対して復元力が働き元に戻ろうとすることから，横方向に伝播するせん断波が発生する（**図 1**）。物理的には厳密には正確ではないが，水面に水滴が落ちるシーンをイメージすると，せん断波発生について直感的に理解しやすい。落ちてくる水滴を生体内に照射された超音波ビームと考えると，ビームが生体内を伝搬し，組織にひずみが生じる。そのひずみが横方向に波紋として拡がっていく。この横波がせん断波である。せん断波の伝搬速度は伝搬組織の硬さに依存し，組織が硬い場合はせん断波の伝搬が速く，軟らかい場合はせん断波の伝搬が遅くなるため，せん断波の伝播速度を超音波装置によって測定することで硬さ分布を評価している。

3. スポーツ科学分野における超音波エラストグラフィを用いた研究

スポーツ科学の分野において筋の硬さ評価にまず応用されたのはストレインエラストグラフィである。どの筋の，どの部位で，どの程度，硬さが変化しているのかということをリアルタイムに客観的に観察することによって，運動による筋疲労や筋損傷等の筋コンディショニングの指標として使用されてきた。しかしながら，スポーツパフォーマンスとの関わりや肉離れ等の傷害受傷リスクを考える場合，評価すべき硬さは，筋の短軸方向の硬さ（凹みにくさ）ではなく，筋の長軸方向に対する硬さ（伸びにくさ）である。ストレインエラストグラフィはその方法論的特徴から，圧迫方向の硬さ，すなわち触診法や押し込み式筋硬度計と同じく筋の短軸方向の硬さを計測しているため，“筋の凝り”や“張り”等の評価は行えるが，筋の伸びにくさの評価はできていない。一方，せん断波エラストグラフィは，超音波ビームによる音響放射圧によって生じたせん断弾性波について，プローブ横方向の伝播速度を計測するため，プローブを超音波 B モード法と同様，筋束が観察できるように配置することによって，筋の長軸方向の硬さを評価することができるという特徴を有する（**図 1**）[1]。なお，スポーツ科学等の研究分野においては，筋の短軸方向の硬さはハードネス

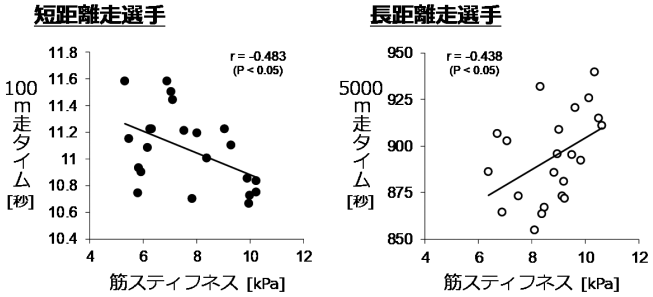

図 2　短距離走選手及び長距離走選手における筋スティフネスとパフォーマンスの関連

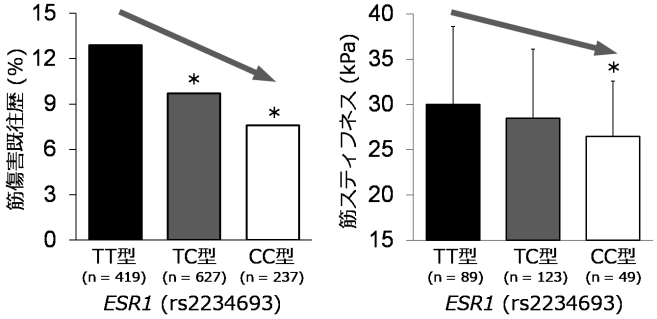

図 3　エストロゲン受容体遺伝子 T/C 多型（rs2234693）と筋傷害既往歴及び筋スティフネスの関連

(hardness), 長軸方向の硬さはスティフネス（stiffness）と区別して使用されることが多い。本稿では以後，長軸方向の硬さについて記すが，誤解や混乱を避けるために“スティフネス”という表現を用いる。

従来，筋のスティフネスは，長座体前屈や関節可動域等いわゆる柔軟性テストで間接的に評価されてきた。しかしながら，関節可動域や柔軟性テストスコアと筋スティフネスの相関関係は決して強くなく[2,3]，関節可動域や柔軟性テストでは筋スティフネスを適切に評価できないと言える。したがって，筋スティフネスを適切に評価するためには，柔軟性テスト等ではなく，超音波せん断波エラストグラフィ等を用いた評価が必要である。

1）骨格筋スティフネスと競技パフォーマンス

スポーツの現場では，優れたパフォーマンスを発揮したアスリートに対して，「“バネ”がある選手」と表現することがある。ここで表現される“バネ”とは，主にアキレス腱や膝蓋腱等腱組織が引き伸ばされて縮む動態を指すことが多いが，筋も伸び縮みをする“バネ”の役割を果たす。また，スポーツの現場では，アスリートの筋について「軟らかくて良い筋」等と表現することもある。しかしながら，実際にアスリートが高いパフォーマンスを発揮するうえで，“バネ”となる筋が軟らかい方が良いのか，硬い方が良いのかについてのエビデンスは皆無であった。そこで筆者らは，陸上短距離走選手 22 名及び長距離走選手 22 名を対象に超音波せん断波エラストグラフィを用い，筋スティフネスと競技パフォーマンスとの関係についての調査を行った[4]。筋スティフネスの測定対象は外側広筋（大腿四頭筋構成する筋の一であり，短距離走選手では速筋線維が多く，長距離走選手では遅筋線維が多いことが数多くの先行研究によって報告されている）とした。その結果，短距離走選手においては，筋スティフネスと 100 m 走タイムに有意な負の相関関係が認められ（**図 2 左**），硬い筋を有する選手の方がパフォーマンスが高い（タイムが良い）ことが明らかとなった。一方，長距離走選手においては，軟らかい筋を有する選手の方がパフォーマンスが高かった（**図 2 右**）。すなわち，アスリートが高いパフォーマンスを発揮する上で，硬い筋が適しているのか，軟らかい筋の方が適しているのかは，競技種目特性によって異なることが明らかとなった。

このようなアスリートの競技種目特異的な筋スティフネスの特徴は，日常的なトレーニング等の影響を受けると考えられる一方，筆者らは遺伝的な要因も影響を及ぼしていることを明らかにしている。例えば，運動能力に影響を及ぼす遺伝子の代表例としてαアクチニン 3（ACTN3）遺伝子があり，ACTN3 遺伝子には RR 型，RX 型，XX 型の 3 種類がある。RR 型と RX 型の人は瞬発系の能力に優れ，競技レベルの高い短距離走選手になれる可能性が高い一方，XX 型の人はトレーニングを積んでも 100 m 走で 10 秒 4～5 止まりというデータがある[5]。この“アスリート遺伝子”とも呼ばれる ACTN3 は筋スティフネスにも影響を及ぼしており，RR 型・RX 型の人の筋は XX 型の人の筋よりも硬い[6]。すなわち，RR 型・RX 型の人は，筋スティフネスが先天的に高く，スティフネスが高い筋は力伝達という面で優れているため，結果として優れた短距離走パフォーマンスを発揮できている可能性がある。

2）骨格筋スティフネスと傷害受傷リスク

アスリートの競技パフォーマンスやキャリアを考える上で，スポーツ傷害（外傷・障害）の予防は極めて重要である。特に，肉離れ等筋に関する傷害（以下：筋傷害）は，2016年リオ五輪で起きた全スポーツ傷害の約30％を占め，近年も増加しつつある。肉離れが生じる理由として，スポーツの現場では未だ「筋肉が硬いから」と言われることが多いが，実のところそれを裏付ける直接的なエビデンスはない。一方，筋傷害受傷頻度には性差が存在し，女性において受傷率が低いことが分かっている。また，筋スティフネスは女性の方が低いことも分かっている[2]。更に，女性ホルモンの1つであるエストロゲンの働きは，男女共にその特異的な受容体（エストロゲン受容体）の遺伝子多型によって調節される。これらのことから筆者らは，エストロゲン受容体の遺伝子多型が筋スティフネスに影響を及ぼし，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，研究に取り組んだ[7]。その結果，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既往歴が低いことが示され，更にCの塩基を1つ有するごとに筋傷害リスクが3％低下することを明らかにした（**図3左**）。また，筋傷害のリスクが低いCの塩基を有する者は，筋スティフネスが低いことが明らかになった（**図3右**）。これらの結果は，エストロゲン受容体遺伝子多型のCの塩基を有する者では，筋スティフネスが低く，その結果として筋傷害受傷率が低いことを示唆している。ただし，この研究は後ろ向き研究（retrospective study）であるため，今後は，筋スティフネスと筋外傷受傷率の因果関係を明らかにすべく，前向き研究（prospective study）が必要である。

4. 今後の展望

これまで，競技レベルが高いアスリートの骨格筋の特徴については，どの筋が発達しているか等の量的特徴は盛んに検討がなされ，そこで得られた情報はトレーニングの現場等にも活かされている。一方，アスリートの筋の質的特徴については，遅筋線維と速筋線維の比率（筋線維組成）等は調べられてきたものの，硬さ等の機能的特徴についてはほとんど着目されてきていない。本稿で記した近年の研究知見は，アスリートが競技特性にマッチした筋の質に応じたトレーニングを行う必要があることを示唆しているが，どのようなトレーニングを行うと筋スティフネス等の質がどのように変化するのかについては未だ不明な点が多い。筋スティフネスには，筋内膜や筋周膜等主にコラーゲン線維によって構成される結合組織含有量等が大きく関与していると考えられる。したがって，今後，競技力向上や傷害予防を目的とした効果的なトレーニングプログラムを作成・実施する上では，例えば，筋の量を変化させることなく質のみを変化させるどのようなトレーニングが好適であるのか等について検討していく必要がある。また，筆者らは，競技力及び傷害受傷に関連する一要因としての筋スティフネスに遺伝要因が影響を及ぼすことを明らかにしてきているが，遺伝要因の一部を解明したに過ぎない。筋スティフネス等筋の質には多数の遺伝子多型が関連していると考えられるため，多角的なアプローチにより遺伝要因の全貌を明らかにする必要がある。競技力向上やスポーツ傷害，筋の質に関連する多くの遺伝要因を明らかにし，個々人の特性に合致したカスタムメイド型競技力向上・傷害予防トレーニング法の構築が必要である。

参 考 文 献

1）Miyamoto, N., *et al., PLoS One,* **10**, e0124311（2015）
2）Miyamoto, N., *et al., Sci Rep.,* **8**,8274（2018）
3）Miyamoto, N., and Hirata, K., *Int J Sports Med.,* **40**, 717-724（2019）
4）Miyamoto, N., *et al., Med Sci Sports Exerc.,* **51**, 2080-2087（2019）
5）Mikami, E., *et al., Int J Sports Med.,* **35** , 172-177（2014）
6）Miyamoto. N., *et al., Scand J Med Sci Sports.,* **28**, 1209-1214（2018）
7）Kumagai. H., *et al., Med Sci Sports Exerc.,* **51**,19-26（2019）

（順天堂大学スポーツ健康科学部）