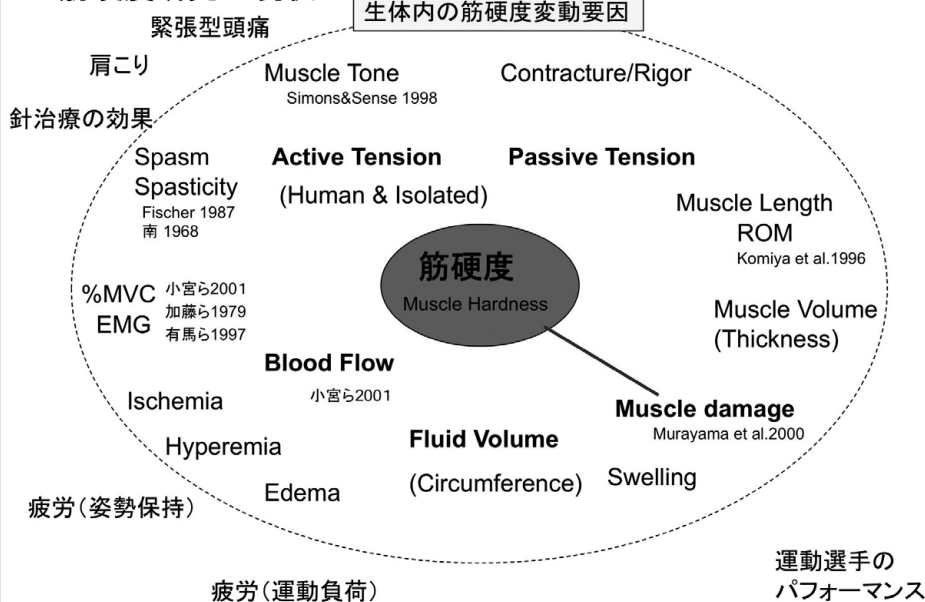


December Special

筋の硬さ

曖昧なものをはっきりさせる時代へ

筋硬度研究の現状



「筋肉が硬くなった」「筋肉がこっている」「筋肉が張っている」など、スポーツ現場や日常生活では、「筋の硬さ」がしばしば問題になる。一方で、「優れたアスリートは柔らかい筋肉をしている」という話も聞かれる。こうしたことに対して、とくに日本では「筋硬度」を測定しようと、「筋硬度計」が開発されてきたが、皮膚表面から押し込んで測定する「筋硬度」は指標としては使いにくいところが否めなかった。しかし、ここにきて、筋の硬さを測定する装置開発が進み、筋の硬さへの理解は深まりつつある。この特集では、そもそも筋の硬さとは何なのか、それぞれの測定装置は「何をみているのか」、最新の情報をまとめてみた。

- 1 筋の硬さの基礎科学 稲見崇孝 P.2
- 2 筋の硬さに関する研究小史 米津貴久、稲見崇孝、広瀬統一、福林 徹 P.4
- 3 筋硬度研究の全体および計測法、硬さを測る意義 村山光義 P.8
—— 硬さそのもの、hardness という概念について
- 4 筋音図を用いた筋機能の研究と筋の硬さ 島 典広 P.16
- 5 Ultrasound shear wave elastography による筋硬度評価 谷口圭吾 P.20
- 6 肉離れ後の組織の硬さと競技復帰 辻村 享 P.29
—— 超音波のエラストグラフィと音響カプラーを用いた外傷の評価

筋の硬さの基礎科学

稲見崇孝

早稲田大学スポーツ科学学術院
博士（体育学）

今回の特集企画案をいただいた稲見先生。オーストラリアの Edith Cowan University (ECU) で筋硬度に関する研究プロジェクトに参画され、帰国後は早稲田大学で研究を続けておられる。今回の特集全体を俯瞰あるいはその基礎となるものを語っていただいた。

オーストラリアで行った研究

——オーストラリアでの研究は？

筋硬度に関する研究プロジェクト、“Assessment of muscle stiffness (hardness) using elastography” に参画しました。とくに、このテーマに関して超音波エラストグラフィを用いて、どこまで何がみえるのかを基礎的に研究しようというものです。ECU では、基礎理論をはじめとした原理原則だけでなく、どこかの深さまで測定できるかなど、ヒトやいろいろな動物で測定を繰り返しました。簡単に言うと、ある物質のかたまりを超音波エラストグラフィで真上から評価した場合と、その物質を90度倒した状態で評価した場合とで、同じ値が出るのかなどについて、動物ではブタ、ウシ、カンガルーなどお国柄もあっていろいろな筋で検討を行いました。日本に帰ってきてからは、ブタについておさらいを兼ね、もう少し踏み込んだ実験をやってみようと考えています。

——動物でみる意味は？

この特集でも諸先生が述べておられるように、「筋の硬さ」をいろいろな手段で評価されていますが、ひと口に「硬さ」と言っ

ても「同じものを捉えている」わけではない。そこで、皮膚や脂肪をはじめとする各組織の影響がどれくらいあるかを明らかにできればと考えました。ヒトではできないことを動物で確かめていこうということです。

筋の硬さを測定するとき、多くの手技は体表からアプローチすることになります。筋硬度計で上から押し込んでも、超音波であっても、今の技術ではプローブなどの計器を体表に接触させる必要があるわけですが、目的とする筋に到達する前には図1に示すような上皮 (epidermis) や真皮 (dermis)、その下には表層の密線維性結合組織である superficial retinacula cutis fiber という家の柱の構造に近いものがあります。さらには superficial fascial membrane、deep retinacula cutis fiber (superficial が垂直なのに対し deep は斜めに走行)、deep fascial membrane など多くの組織が筋の上層に位置しています。筋 (muscle) の硬さを測定するときは、こういうものを超えてアプローチしているわけです。Anatomy trains など、全身につながる fascia の要素も加わります。すると、とくに押し込み式の筋硬度計では、筋以外の影響をかなり受けるということが考えられます。筋硬度計よりも深いところを評価できるのも超音波エラストグラフィの利点のひとつですが、それもまだ試みの段階だと思います。筋は浅層では速筋線維が比較的多く、深層では遅筋線維が比較的多いのですが、深層の遅筋線維では結合組織も多そうということがほぼ間違いないと考えられています。重力の影響や上層組織の影響も含めて、深層筋はどうしても硬



いなみ・たかゆき先生
(inami0919@gmail.com)

くなるのかもしれませんが。血流も違ってきます。すると、ここは硬くてここは柔らかいという均一でない、層構造になったものを評価することになります。そこをあるポイントのみで評価しようというのには限界があります。今は、それに対して、いろいろな問題を引き算していくことに諸先生が取り組んでおられ、影響の大きなものから検討していくという段階だと思います。

動物とヒトの共通点と相違点

——とくにスポーツの現場では、筋肉が硬い、筋肉が張る、こっている、損傷後の拘縮などが問題になることが多いけれど、そのとき筋そのものがどうなっているのか、あけてみるわけにはいけないのでよくわからないことが多い。動物でみることでわかってきたことは？

反対にヒトでも確認できたことは、筋には羽状や紡錘状などいくつかの形状があり、羽状については深部の膜に筋線維がある角度（羽状角）をもってついているわ

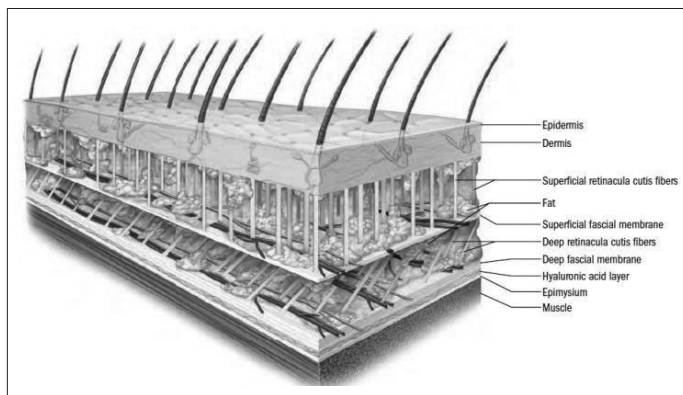


図1 (<http://true.massage-research.com/2013/06/> より。2014年11月15日アクセス)

けですが、その羽状角が硬さに影響しそうですということがわかってきています。また、紡錘状の筋を摘出して電気刺激で収縮させ、意図的に筋の硬さを変化させたときに硬さがどうなるかをみたとき、電気刺激の量が最大に対して30%だと仮定すると、そのとき硬さが30%上昇しているか。これが動物実験でできるようになり、その関係が直線的だとある程度言えることがわかっていきます。動物実験では100%まで筋を収縮させることができ、ヒトではそれが難しい。動物では100%まで直線的に上がっていくのですが、ヒトの場合は70～80%くらいまでが直線的で、それ以上ははっきりしない。それは防御作用が働くからなのか、発火による影響なのか、サルコメア長（クロスブリッジなど）の問題なのか、計測機器の限界なのか。中程度以上の筋収縮強度評価については賛否あります。

オーストラリアで盛んな理学療法での研究

——日本でも筋の硬さの研究は以前から行われてきたが、オーストラリアでもよく行われている？

オーストラリアでは理学療法士に開業権があり、フィジオセラピーの看板を掲げて開業している人も多いのですが、即時的な成果を狙う手技のひとつに徒手療法があり、筋の硬さに対するアプローチが盛んに行われるなかで、fascia などに興味をもっている人は多いです。日本と違い、

MRI や CT などの画像ではなく、また機能的な側面を考慮した評価方法以外の評価として超音波や筋硬度計が用いられるプロセスもあるようです。もちろん、その人のテクニックによって異なるようで、触診だけの人もいますし、硬くなった

筋を柔らかくするためにストレッチングやPNF、マッサージなどの手技が用いられています。

——治療効果の確認やエビデンスを得るために、筋の硬さにアプローチしている。

臨床レベルでは徒手が盛んで、評価テクニックも進んでいるように思います。オーストラリアで知り合った先生方に聞いてもそのようですし、そういう分野で日本から研修に來ている大学もあるくらいで、筋や膜へ徒手によるアプローチを行っている先生は多くいます。少し話がそれますが、膜というのは英語では fascia ですが、筋膜というのんびったりこないところがあり、筋硬度の英語も含めて少しニュアンスが異なるような気がします。

「筋の硬さ」研究発展の方向性

——筋の硬さの研究が今後発展する方向としては？

頭の中でははっきりした方向性があるのですが、今回いろいろな先生が述べておられる筋の緊張という点では疾患が関係してくることが多く、関係しそうなものを例にあげれば、交通事故後に処方される筋弛緩剤の評価などには密接に絡んでいく可能性を秘めているのではないかと考えます。「筋の硬さ」というのは、X線写真にも写らなくて、一般的なMRI解析法でもわからないような独立した情報であると思います。

たとえば、筋損傷後の回復過程をMRI

のT2値で評価した場合、そのタイムコースはエラストグラフィの値と必ずしも一致しません。筋の硬さを意図的に変える方法としては収縮、伸長、損傷などがありますが、このような損傷で言えば、T2の値が筋損傷後5日目あたりにピークがくるといふこれまでの事実とは異なり、エラストグラフィでは受傷2日目くらいにピークがみられます。筋の硬さを評価するということは、何を示しているのかがはっきりしてくると、MRIのT2が何をみているのかというのと同じように、筋の硬さの本質に迫っていくことになると思います。方向性としては、そういう筋の質のようなものの評価になっていくように考えています。

——今言っている「硬さ」というのは、tension、tone (tonus)、stiffness、hardnessなどが入り混じったもので、はっきりしていないところがある。

そうですね。日本語ではみんな「硬さ」になってしまい、先ほど述べたようにケースによっては適切な言葉がないように思います。言葉として整理してきていない部分があるまま現象を追いかけているという現状はあるでしょうね。本来は、「硬さ」の定義がしっかりしていて、そこから現象を追いかけて記述して、それを応用していくのが理想なのでしょうが、まだモヤモヤとしたものを多角的にみて、そこからひとつずつ引き算しているのが現状のように思います。動物実験もそうですし、エラストグラフィの経時評価もそうですが、今はそういうことをひとつずつ引き算している段階で、今回5人の先生が述べておられる段階まではきているということだと思います。でも、達成度で言えば、まだこれからの分野だと思います。

——測定装置の発達に関係するところも大きい。

押し込み式の筋硬度計でわからなかったことがエラストグラフィでわかるようになったひとつに位置情報があります。エラストグラフィの超音波画像をみると、どこの硬さを評価しているかがわかるように

なったのは大きな進歩だと思います。谷口先生が紹介されている shear wave ではプローブを動かさなくてよいので、簡便なプローブ操作が可能なメリットがあります。ただし、shear wave の特性から一度の測定で取得できる計測範囲 (ROI) をあまり広げられないという課題があり、臨床

に応用するとき、複数の部位をみようとする時間がかかります。でも、正確に測れる。辻村先生が述べておられる音響キャプラーを用いる方法は、プローブ操作のテクニックが必要になります。しかし、一度に広い範囲を相対的にみることができるといふ特徴があり、この筋のどこが損傷してい

るかをみるには大変よいものです。これらは押し込み式の筋硬度計では難しいことです。それはある意味、革命的に進んだ部分です。

—— 今後は若い人が研究分野として積極的に取り組んでよい分野。

そう信じています。

2

筋の硬さ

筋の硬さに関する研究小史

米津貴久¹⁾、稲見崇孝²⁾、
広瀬統一²⁾、福林 徹²⁾

1) 早稲田大学大学院スポーツ科学研究科
(博士課程)

2) 早稲田大学スポーツ科学学術院

筋硬度の研究を修士から始め、今年で5年目になる米津先生。早稲田大学に超音波のエラストグラフィが導入され、それを契機に筋硬度の研究を始めたという。ここでは、この特集全体のイントロダクションにあたる「筋の硬さ」に関するこれまでの研究についてまとめていただいた。

「筋の硬さ」とは

——「筋の硬さ」という概念を説明していただけますか？

まず、筋の硬さを表す言葉とその意味を整理したいと思います。筋の硬さ(硬くなること)は、一般的に「筋緊張(muscle tone)」と言われています。この筋緊張を定義すると、「筋線維の持続的な収縮」になります。さらに、筋の硬さはどの方向からの抵抗かによって、「長軸方向から伸長される際の抵抗」と「垂直圧力に対し筋に

よって提供される抵抗力」の2つに大別できます^{1,2)}。このことを踏まえると、長軸方向に伸長される際の抵抗を「筋スティッフネス」、肩こりのように触れた際の感覚で評価する筋の張りなどに代表される垂直圧力に対して筋によって提供される抵抗力を「筋硬度(muscle hardness)」と表現できると思います。

——この定義はすでにコンセンサスが得られている？

まだしっかりとしたコンセンサスは得られていません。「弾性」という言葉を使われる方もいますし、「スティッフネス」と言う方もいます。

——まだ整理はついていない段階。

はい、現状ではまだしっかりとした整理がついていません。本稿では先行研究に倣って、長軸方向の抵抗は筋のスティッフネス、触診などで評価する垂直圧力に対する評価を筋硬度と定義して話を進めたいと思います^{1,2)}。

——確かに「筋肉が硬い」というとき、関節が硬いときと、筋肉そのものが硬いときと、両方の意味で使いますね。



よねづ・たかひさ先生

文献の検索

本題である筋硬度研究の歴史をみるために、PubMed と Science Direct、メディカルオンライン、医中誌、CiNii を使って英文と和文論文を調べてみました。英文に関しては「muscle stiffness」と「muscle hardness」、和文に関しては「筋硬度」で各データベースの検索を行いました。英文・和文合わせて218本の論文を手に入れることができました。これらの論文はすべて2014年9月26日現在のものです。

スティッフネス

まず、スティッフネスに関してですが、1980年代の前半までは筋収縮特性に関連する動物実験が行われていました。その後、ヒトを対象にしたスティッフネスの研究が行われるようになり、スティッフネスの計測方法も年を経るにつれて変わっていきましました。ヒトを対象としたものでは、次のような計測方法の流れで研究が行われてきたようです。

- ①随意的に足関節の背屈を行わせた際のトルク増加量と伸長量をスティッフネスとして算出する方法³⁾。
- ②一定角度における受動トルクを算出する方法⁴⁾。これはある角度に到達するまでに要する力を表しており、受動トルクが低い場合を柔軟性が高い、反対に受動トルクが高い場合を柔軟性が低いと評価しています。
- ③受動トルクと関節角度の傾きを受動的スティッフネスとして算出する方法⁵⁾。

ただし、これらの評価は生体内の振る舞いを確認しながら評価していないという問題点がありました。この生体内の振る舞いを評価するものとして、超音波画像診断装置を用いた研究が行われるようになりました^{6,7)}。現在では超音波画像診断装置を用いた筋腱移行部の移動量と受動トルクの関係からスティッフネスを評価したものが主流になっています。

スティッフネスに関する報告は、筋硬度より数多く報告されていました。それはなぜかと考えたときに、筋の収縮やストレッチの影響、Stretch-Shortening Cycle (SSC) の影響が、筋の長軸方向の振る舞いと関連していることから、重要視されていたのではないかと思います。このような理由からスティッフネスの研究が多く行われてきた、または注目されていたのではないかという印象を受けました。

工学的な「硬度」と生体の「硬度」

次に硬度ですが、一般的には工業的な指標で、鉱物など材質の硬さを評価として使

表 1 硬さ参考

各種材質	材質	硬さ	計測方法	用途例
	発泡ポリエチレン	33-140[kPa]	25%圧縮試験	梱包緩衝材
	低反発ウレタン	30-50[N]	25%圧縮試験	マットレス
	高弾性ウレタン	95-180[N]	25%圧縮試験	マットレス
生体内	アルミニウム	30-130[Hv] (=3.06-13.26[N])	ビッカース	一円硬貨
	部位	硬さ	計測方法	
	腓腹筋内側頭	2.99-27.0[kPa]	Shear wave エラストグラフィ	
	外側広筋	3.26[kPa]		
	上腕二頭筋	3.11[kPa]		
	甲状腺	10.5-11.9[kPa]		
	肝臓	4.87-5.39[kPa]	ナノインデンテーション (押し込み) 試験法	
	大腿骨 (屍体標本)	19.1[GPa]		

われているものがあります。たとえば、2種の物質による相互の塑性変形に対する抵抗を主とする種々の機械的性質を含んだ材料の強さを便宜的に表す仕事量や、押し込んだ圧力に対する抵抗値等が工業的な計測方法としてあります。硬度は一言でまとめると、物体の変形や抵抗を計測した評価だと言えます。参考として、具体的に身の回りにあるものの硬度と、生体内の硬度を比較したものが表1です。表1の上の表が各種材質の硬さを、下の表が生体物質の硬さを一部まとめたものです。ここでは各種材質の例として、梱包緩衝材等に用いられている発泡ポリエチレンやマットレス等に用いられている柔らかい低反発ウレタンと硬い高弾性ウレタン、そして一円硬貨等に用いられている金属のアルミニウムを取り上げました。これらの数値は評価方法等によって異なりますが、算出される値はこのように表されます。生体に関して、これらの数値は腓腹筋内側頭、外側広筋、上腕二頭筋、甲状腺、肝臓はshear wave エラストグラフィ⁸⁻¹¹⁾ (P.20 参照) を、大腿骨はナノインデンテーション (押し込み) 試験法を用いて評価しています¹²⁾。

——これは数字が大きいほうが硬い。

これらの評価ではそうです。strain エラストグラフィでは評価する計算方法によって異なる場合があります。

次に硬さに関する主な単位として、Pa (パスカル) と N (ニュートン) で表記したものがあります。Pa に関しては単位面積当たりの力を表しており、N は力なので、

たとえば25%圧縮試験であれば、100mmの物体を元の厚さの25%にあたる25mm圧縮して75mmの厚さになるまでに要した力で硬度を評価することになります。どれだけの力を加えたのかというものと、それを面積当たりで均一にした評価の2パターンあるということです。

筋硬度測定機器と研究小史

次に、筋硬度に関する研究史について述べます。そのためにはまず、筋硬度の計測機器を整理しておく必要があります。計測装置の歴史として、古くは1951年に内藤が学会発表を行っており¹³⁾、1952年に紺野が論文を発表しています¹⁴⁾。両者は押し込み式筋硬度計を使用しています。

——それでも60年以上前。ずいぶん古い。

その後も筋硬度に関する研究は行われていましたが、1960年代から1980年代の間の研究はそれほど多くありませんでした。1990年代に入ってから報告数が増加しており、堀川らが押し込み式筋硬度計の開発及びその応用に関する報告をしています^{15,16)}。英文誌でもHorikawaら¹⁾やAshinaら¹⁷⁾が押し込み式筋硬度計に関する報告をしています。筋硬度に関する研究初期では、それぞれがそれぞれのアイデアをもとに筋硬度計を製作し、筋硬度を評価しています。そのため、各論文で使った筋硬度計のタイプや値の算出に関する原理が説明されています。

近年では、押し込み式筋硬度計とは別に、超音波エラストグラフィも筋硬度の評価に

3

筋の硬さ

筋硬度研究の全体および計測法、硬さを測る意義

——硬さそのもの、hardness という概念について

村山光義

慶應義塾大学体育研究所

米津先生の研究小史のあとは、村山先生に、筋硬度研究の全体を整理していただき、計測器の概要、また筋の硬さそのものという意味での hardness という概念、およびその研究について紹介していただいた。掲載する内容の3倍くらいの量があったが、かなり要約して紹介させていただく。

筋硬度計

——先生が筋の硬さ、筋硬度に興味をもたれたのはいつ？

私は1989（平成元）年に大学を卒業したのですが、スポーツの競技場面で、「筋肉は柔らかいほうがいい」という言われ方をしていました。高校生のときに『スポーツマンのトレーニング』（実業之日本社 1982）を読んで、どうも柔らかい筋肉というのはありそうだと思っていました（図1）。そこで、大学3年のゼミからこれ

に取り組み始めました。図1の著者の紺野義雄氏は、日本体力医学会の機関誌『体力科学』の1巻（1952（昭和27）年発行）で、この頃に、「筋硬度差」による運動能力の判定法」という論文を発表されています。筋の硬度差とは、力を入れたときと、ゆるめたときの差が大きい、つまり普段は柔らかくて、力を入れたとき硬くなるほどパフォーマンスがいいというものです。筋硬度研究は、国際的には1900年初頭から取り組まれています。図1右がこの頃の筋硬度計で、紺野氏が開発したものです。3本の足があって、真ん中が押し戻される抵抗を測るというものです。しかし、このような簡便な装置で筋の硬さが測れるかと疑問視する声もかなりあったようです。（米津先生も述べておられるように、1960（昭和35）年代以降はあまり研究されなくなりました。）

——筋の上には皮膚もありますからね。

そうなんです。どうしても生体だと皮膚



むらやま・みつよし先生

や皮下組織の影響を有しつつ、その下の筋肉の硬さ、柔らかさを語るということになるのですが、マッサージなどによって筋肉まである程度変形させる刺激を加えると、人の指ではかなり感度よく筋肉が柔らかい、硬いというのを感じ取り、トレーナーらはそれを手がかりに、ほぐすとか、伸ばすとかゆるめるということを行っていま



図1

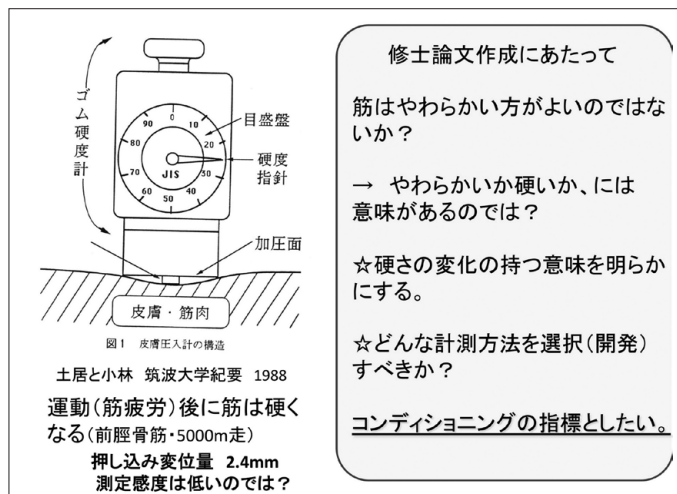


図2

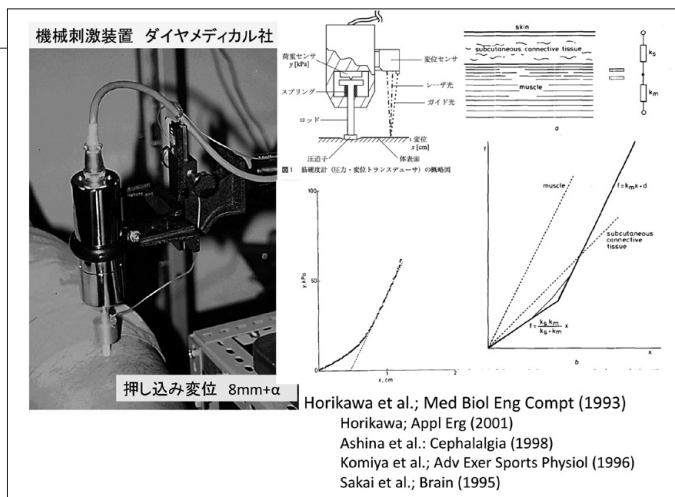


図 3

す。運動選手も筋肉が「こる」とか「張る」と言いますが、そういう現象を何とか客観的に測ろうというのが私のスタートでした。

筋硬度計とその評価 コンディショニングの指標としての 筋硬度

大学院で本格的にこのテーマに取り組みました。1988 (昭和 63) 年に、筑波大学でバイオメカニクスをやられていた小林先生と土居先生が筋硬度計を作製されました (図 2)。これはゴム硬度を測る規格品の 2.4mm の押針を円柱で延長して、生体を押しやすいく改良したもので、その変位量からダイヤルで硬度を表示するというものです。私も実際に作製法を教わり、作りました。

——原理的には先ほどの筋硬度計と同じ。

同じです。修士論文のときは、筋の硬さを見ることでコンディショニングの指標としたいというのがねらいでした。しかし、この筋硬度計では 2.4mm しか凹まないの、実際には皮膚と皮下組織の厚みがそれ以上あると、怪しいと言えば怪しい。筋が柔らかい、硬いといったことに意味があるのかということを明らかにするには、どのような計測方法がいいのか、まずはこれがかなり重要で大きな問題なのです。

——2.4mm だと短すぎると感じる。

そこで、私が最初に研究に使った機械は 8mm 押し込めるもので、さらにマニピュレーターに連結し、手で本体自体を 5mm ずつ押し込んでから 8mm 押し、

計 13mm、18mm と測定しました (図 3)。とにかく深いところまで押すのです。するとかなり上層がつぶされます。その後の筋肉の変形具合について、MRI でもみているのですが、ある程度までいくと皮下組織もつぶれ、たしかに筋も変形しています。ですから、押し込みの深さがある程度あれば筋の変形具合で筋の硬さはわかるのではないかと思います。

図 3 に示すように、Horikawa ら (1993) が皮膚と皮下組織を ks、下の筋を km とする 2 つの弾性体が並んでいるモデルとし、波形は境界付近で変曲するので、そこまですを第 1 成分とし、そこからを第 2 成分とすると、第 2 成分の傾き具合が筋の硬さを表すという工学式で評価しました。私もこの式を使うためにマニピュレーターをつけて 18mm くらいまで押して、皮下組織の厚みのある程度リジェクトして、硬さの後半の成分で硬くなる、柔らかくなるというのを測ろうということを始めたのです。

現場的な簡便計測器

紺野氏や小林・土居先生のハンディーな計測器は現場においては使いやすいものです。1990 年代に井元製作所が似たような原理の生体組織硬度計「PEK-1」といった機械を作りました (図 4 左上)。押し込み部の動きは 10mm で、副筒が 10mm まで来たときに中心が押し戻される量が評価になります。もしも完全に副筒と一緒にあれば無変形の硬い物体で、それを 100 とし 60 とか 50 といった数字で出すもので



図 4

す。単純に 10mm なので、半分の 5mm 戻っていれば数字は 50 になります。

——生体組織硬度計ということですが、実際には何を測定するために作られた?

筋の弾性です。図 2 と同じです。図 2 では最大変位が 2.4mm だったのがこちらは最大で 10mm 動く。それでも最大で 10mm ですから、だいたいヒトを測定すると皮下組織を含めて 40 ~ 60 くらいの値が出ます。つまり押し戻されている量 (戻っていく量) は 40 しかないとなると皮下組織もやはり 2 ~ 3mm、もしくは 5mm くらいあるとすると、実際にどこまで押しきれているのかはわかりません。しかし、この装置で論文も出るようになりました。私はこれでもまだあまいのではないかと思います。現場的にはこういうものがある程度使われるようになっていきます。

PEK-1 の他、MITUTOYO というノギスなどをつくっている会社が、紺野氏のと似たような三本足のものを筋硬度計として作っています (図 4 左下)。1950 年代と発想が変わっていないのがわかります。また、NEUTONE という測定器を TRY-ALL 社が作りました (図 4 右)。円柱を 14.7N で圧した際に中央の 3mm の針がどのくらい戻っているのかで数値をみます。これでも筋は変形しますが、実際に刺しているのはわずかしきありません。あとはデジタル筋肉硬度計 (図 4 中央) といって、かなり感度はいいのですが、基底面となるプレート全体が皮膚にピタッと平に当たると

4

筋の硬さ

筋音図を用いた筋機能の研究と筋の硬さ

島 典広

東海学園大学 スポーツ健康科学部
スポーツ健康学科 准教授
博士（医学）

筋音図という手法を用いて筋機能を研究されている島先生は筋の硬さという要素を導入、現在データを収集中である。そもそも筋音図とは何なのかから、今後の可能性について聞いた。筋活動を筋電図とは違う手法で別の視点から得られるデータには興味深いものがある。

筋音図とは

——筋硬度についてはいつから研究されている？

今年3月に、Edith Cowan University（オーストラリア）の野坂和則先生との共同研究で予備実験を行った際に、稲見崇孝先生がおられまして、超音波と筋音図の関係について検討しました。

——「筋音図」というのは何？

もともとは、マイクロフォンを用い「音」をとっているのですが、音は振動で、その微細な振動を波形として表すものです。筋線維が収縮したときに側方へ拡大する、そのときの振動の波形をとっていると解釈されています。

——「筋音」と聞くと、「音」と思うが、音というより振動、バイブレーション。

はい、私は、説明するときには「バイブレーション」と言っています。

——筋電図と筋音図ではわかることは何が違う？

筋電図では、筋を介して神経的な電気信号をとっているのですが、どちらかと言うと、中枢性の要因がメインになりますが、筋音

図については、中枢性要因とは限らず、筋そのものの振動をとっているため、波形が異なってきます。

——筋電図と筋音図を比べると、筋音図のほうが筋そのものの動きをより正確に捉えているということになる？

そうですね。筋電図は、もちろん筋肉の影響もありますが、筋線維がどれくらい活動しているか、そういう運動単位や神経的要因が大きいと考えられます。

——筋音図というのはあまり聞かないのですが、昔からあった？

歴史は古く、1948年にJournal of Physiologyに筋音図を電気信号に変換して記録した研究が掲載されています。

——歴史がある手法。

歴史はあります。しかし、そこから筋電図のように発展しなかった。

——先生が、その筋音図を用いて研究しようとしたのは？

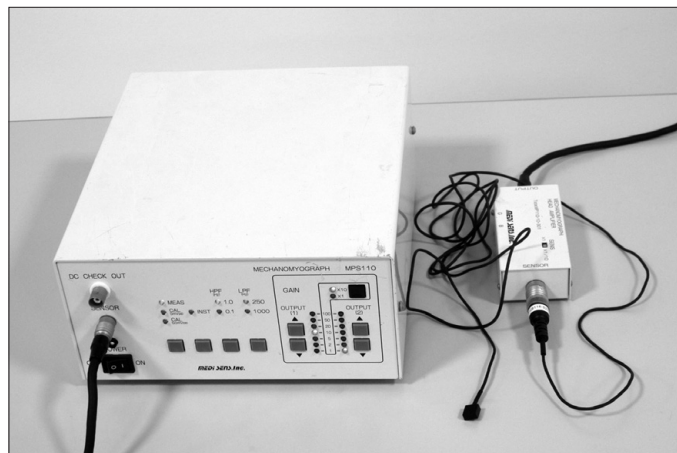
私のボスが疲労の研究で知られる矢部京之助先生で、名古屋大学の前に愛知県コロニーにいらっしゃいました。そのとき知り合ったのが三田勝己先生で現在この大学に近い理化学研究所で研究されています。その三田先生に筋音図を紹介していただきました。まだ研究者が少ないのでやってみてはどうかということでした。

筋音図にはセンサーがいくつかあるのですが、三田先生



しま・のりひろ先生

は加速度計を用いてきれいな波形を捉えるという方法を確立されました。昔は先ほど述べたようにマイクロフォンを用いていたのですが、そのあと接触型の振動センサーができ、現在は加速度計を使ってデータをとるようになっています。加速度計自体は高価なものではありませんが、アンプの中でノイズをカットし、きれいで詳細な波形になるよう工夫されています（写真参照）。



MMG装置の全体。右の黒い小さな四角が加速度計。左はアンプ

——計測装置は「筋音計」ですか？

もともとはマイクロフォンを使った「筋音計」だったのですが、現在国際的には「mechanomyogram: MMG (筋機図)」と呼ぼうということになっています(以下、MMGと表す)。非公開ミーティングでこれで呼称を統一しようということになったそうです。加速度計が音そのものをとっているわけではないので、日本語では「筋機図」と呼ぶのがよいのではないかとされています。

——測定器は「筋機図計」？

そうなります。

——先生は、MMGで筋機能の関係をみておられる。

そうです。

——そこに筋硬度という要素も入ってくる。

そうです。筋硬度という要素も入れて調べたいと考えています。

——その際の筋硬度は何で測定する？

そのノウハウを持ち合わせていなかったもので、ひとつにはオーストラリアでみんなが集まって共同研究をしようとなったときに、elastographyとプッシュメーターの関係をみていこうということになりました。そこにMMGの手法を取り入れるのが私の役割です。

——ということは、現在研究途中。

そういうことです。

これまでの研究から

——では、現在行っておられること、わかってきたことは？

筋の硬さを測るときは、超音波を使ったり、筋硬度計を用いたりしていますが測定がかなりたいへんになります。一方、MMGは比較的簡便です。写真に示すように先に黒い小さなセンサーがありますが、これを皮膚につけるだけで評価できます。

——これを皮膚表面に貼る。

そうです。両面テープで乗せるような感じです。

——その状態で運動してもらおう。

運動時の変化をみたり、運動前後の変化

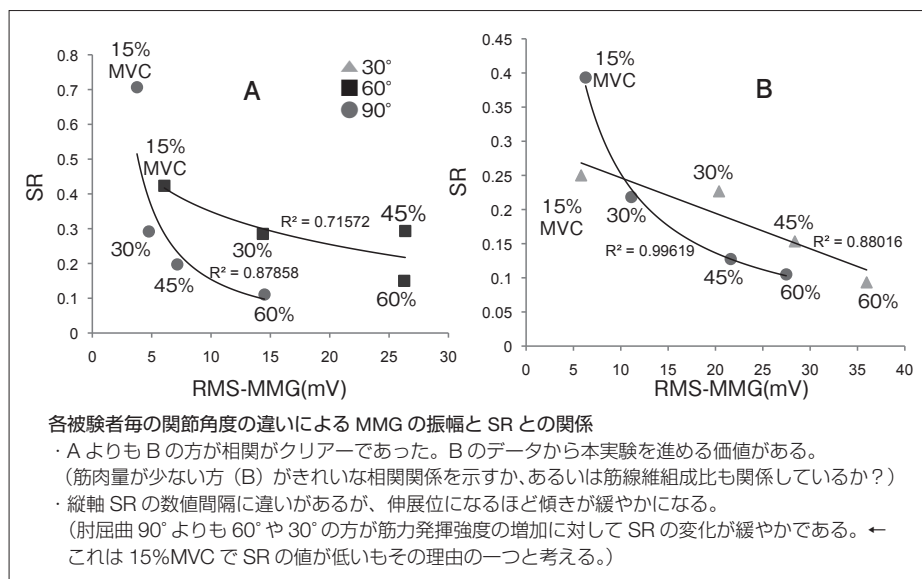


図1 Joint Angle Pilot Study (2014/3/4)

をみた研究論文はたくさん発表されています。

——安静位でも測定する？

安静位でもたとえば電気刺激すると測れます。実際には筋収縮が起こりますので、安静ではありませんが。単発の電気刺激によって意図的に筋を収縮させ評価することができます。

——MMGとでも、筋が活動しないと波形は当然出てこない。安静位でも電気刺激で他動的に収縮させると波形が得られる。

そうです。

——この皮膚につける加速度計はケーブルがついていますが、データを飛ばすこともできる？

現在はそのままアンプにつながっています。技術的に飛ばすことはできると思いますが、まだそこまでは行っていません。

——どういう状況でどういう測定を行っている？

これまでの研究で言えば、力を発揮しているときに電気刺激を入れると、まだ余力がある分が発揮されます。仮に最大筋力の30%くらいの力を発揮していて、そこに電気刺激を入れると、さらに筋が収縮します。そのときの収縮の大きさと筋音図の波形と関連性があるということがわかっていきます。一方、最大筋力の50~60%の力を

発揮しているときには電気刺激を入れてもさほど収縮力は増加しません。

——電気刺激に対して筋が反応する。

発揮している力が小さいと、電気刺激に対して大きく反応し、発揮している力が大きいとあまり反応しない。この波形の大きさと筋の収縮は関係しています。

——それはMMGで筋の何をみている？

その反応は人によって違いますよね。

違います。

——それがどうだったらどうだと言える？

筋が大きく収縮すると、MMGでの反応が大きく出て、あまり収縮しないと波形も小さくなります。そして、あまり大きくない力を発揮しているときに電気刺激を入れると、まだ余力があるので、大きな収縮が起こり、波形も大きくなります。大きな力を発揮しているときに電気刺激を入れてもさらに起こる収縮力はそう大きくないので、波形は小さくなります。つまり、このMMGの波形で筋の収縮度合いをみることで、筋が収縮したとみることができるといえます。筋の収縮の度合いで、MMGの波形の変化が違ってくるということです。力発揮、つまり筋の収縮力とMMGの波形の大きさは関係するということは論文として出しました。

5

筋の硬さ

Ultrasound shear wave elastography による筋硬度評価

谷口圭吾

札幌医科大学保健医療学部理学療法学
第二講座
理学療法士

超音波エラストグラフィの種類で、shear wave elastography がある。それを用いて筋硬度評価を行う研究をされている谷口先生に執筆していただいた。筋硬度評価について、これまでとは違った世界が開けつつある。その流れも含め、わかりやすくまとめていただいた。

硬度について

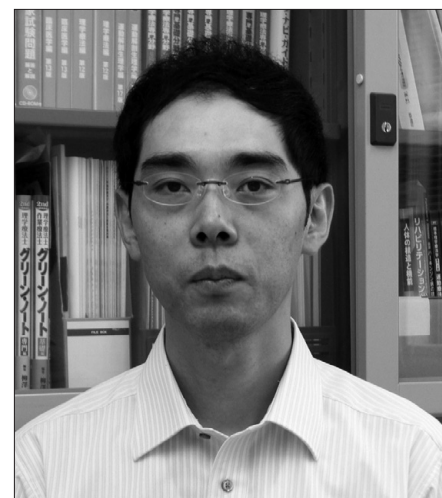
疾病や病態の診断評価には、組織のもつ形態、機能、性状に関する情報が有用であることはよく知られています。性状は、少しわかりにくい用語かもしれませんが、物体の形態・形状に対して物体の質（物性）を意味します。その代表的な指標の一つとして、今回ご紹介する硬度があります。これまでの病理学的な研究のなかで、組織の硬さは形態や機能に異常を呈する前から変

化をきたすことが判明しているので、硬度の評価は硬化病変を主とする肝硬変や動脈硬化症の早期診断への利用が期待されてきました。また、乳がん等の組織を調べてみると正常組織に比べて悪性のがん組織では硬度が何倍も高くなることが明らかになっています。そのような理由で、硬さの評価は臨床的な意義が大きいのですが、これまでは主に触診によって硬さの程度を把握していました。しかし、触診は定性的な評価であるために検査者の主観や技量に依存する可能性があり、さらに検査を受ける対象者に結果を示しづらい欠点もあります。

Shear wave elastography

近年、上記のような触診の限界を克服する非常に画期的な画像診断技術が誕生しました。その技術を用いた映像法の1つにタイトルの shear wave elastography があります。訳すと shear wave が剪断波で、elastography が硬度を意味する弾性の画法になりますが「エラストグラフィ」と称することが一般的になりつつあります。

この測定原理を簡単に説明しますと、超音波がもつ力（専門的には、音響放射圧という）を目的と



たにぐち・けいご先生

する関心領域に与え、その結果として生じる微細な振動からの横波（剪断波）の伝播する速度を捉えることで硬さを得ています（図1）。少しわかりにくいと思いますが、水面に落ちた水滴等によって起こる波紋をイメージいただけるとよいかもしれません。この場合、水滴が超音波の力で、水滴が水面のある1点を押すことで側方に広がってゆく波が横波ということです。この波の速度の二乗と組織密度を掛けてあげると、硬さの物理量である弾性係数（ヤング率、剪断弾性率など）が算出可能になります（図2）。この横波の速度は、1～10m/sの範囲とされていますが、この波を捉えるには従来の超音波装置にある最大

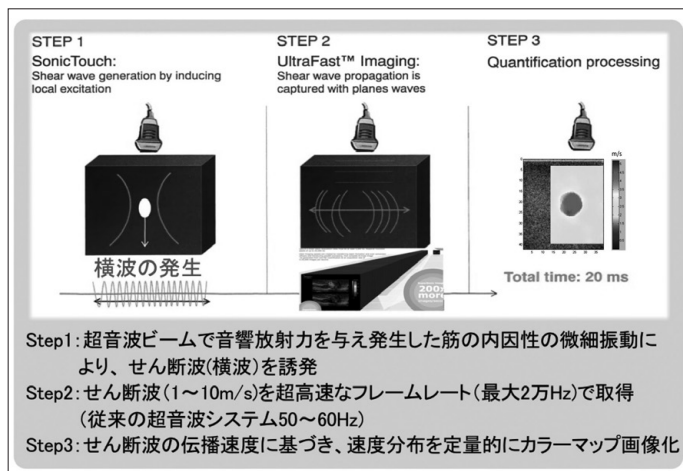


図1 Ultrasound shear-wave elastography による硬度（弾性係数）の計測過程
(P.26にカラー図掲載)

Shear modulus, μ $\mu(\text{Pa}) = \rho c^2$ 硬い媒質ほど波が速い
 c : せん断波伝播速度(m/s), ρ : 組織密度(kg/m³)
 * 生体軟部組織の密度は、1000 kg/m³ で一定。
 * 高い弾性率は、スティフネスが大きい状態を示す。

図2 剪断弾性係数（Shear modulus）の算出

120Hz 程度のフレームレートでは全く不十分で1フレームを得る間に横波が消失してしまい、1秒間に相当な数の画像を取得することが必須でありました。これを実現した上記の映像法では、驚くことに最大で1秒間に2万枚もの画像情報を得ることに成功し、超音波工学のなかで技術革新とされています。このような技術的な特徴から剪断波エラストグラフィは、超高速超音波イメージング (Ultrafast ultrasound imaging) とも言われています。また、得られる弾性係数 (G) は、ストレス (応力、 τ) がストレイン (歪み、 γ) に比例する関係を表すフックの法則 ($\tau = G\gamma$) から導かれます。数式の比例定数は弾性係数ですから、定数が大きいほど、それだけ歪みを元に戻すための応力は大きくなります。したがって、弾性係数は硬度を示す客観的な指標であることが知られています。

Shear wave elastography という新しい画像法は、1990年代の初めに研究が始められ、その技術を搭載した超音波装置は本邦に2010年頃に導入されています。私自身、その数年前から硬さをはじめとした組織の性状評価に興味をもっておりました。当時、乳腺、甲状腺を扱う医学分野では臨床的にも価値が認められつつありましたが、運動器分野での検討はほとんどなかったように記憶しています。ただ、筋をはじめとした運動器を扱う医学分野、まさにスポーツ医学やリハビリテーション医学、整形外科の領域においても実臨床の場面で触診を通じた性状の把握は頻繁に用いられています。また、私の持つ資格の理学療法士は、たとえば術後に筋の機能的な回復の度合いをみようと安静時の硬度のみではなく、対象者ご自身に力を入れていたときの筋収縮に伴う硬さの変化もしばしば触診によって把握し、関節運動に関わる筋群の個別の筋の状態に基づいて現在の病態を理解しようと試みます。筋の断面積や筋束長のような形態情報や筋力や筋活動等のような機能的な情報に関しては研究で相当の知見が蓄積されていますが、それ

に比較すると硬さのような性状 (機械的な特性) に関わる情報はまだまだ少ないと言えるかと思います。

腱組織の可塑性を解明する研究をリードされている東京大学の久保啓太郎先生 (Med Sci Sports Exer, 2007) は、筋力や神経系は30歳代までは維持され50歳代から加齢低下するのに対して、腱の硬さに関わるストレインは、30歳

代で20歳代よりもすでに低い傾向にあることを明らかにし、そのことが中年の男性にアキレス腱断裂が多く発生する要因になっていることを示唆しています。つまり、運動器でも形態・機能変化の前に性状変化は始まる可能性があり、硬さを評価することは運動器障害の効果的な予防や効率的な治療を考案するうえで大きな意義をもつと思われます。しかしながら、従来の硬度を測る方法では対象者に多くの力学負荷を課す必要があり、腱や筋の損傷後には安全性の観点から適用が難しい面がありました。それに比較して、shear wave elastography は安静時においても硬さの定量的な情報を視覚的かつ無侵襲に得られるメリットがあり、そのことが強い興味を抱いた理由でもあります。

Shear wave elastography を用いた筋硬度評価

一方、2004年に装置の実用化が始まっていた、もう一つの代表的な硬度評価法である Strain elastography (Real-time tissue elastography) は京都大学の椎名毅先生が中心に開発され、その有用性は種々の医学分野で国際的に認められていま



図3 Shear-wave elastography 機能搭載の超音波装置 (右部) による筋硬度測定のための代表画像 (左部) (P.26 にカラー図掲載)
超音波画像の下部は腓腹筋内側頭の縦断断面の超音波 B モード像で示され、上部はカラーコード表示の弾性分布を B モード像に重ね合わせた画像となる。右上のカラーコードは、kPa 単位の剪断弾性係数を示す (数値が大きいほど硬度が高い)。サークル内の筋束部の平均弾性係数を分析に用いる。

した。しかしながら、Strain elastography を用いた筋の評価は国内外で検討されていたものの、国際誌に掲載されたものをあまり目にすることができておりませんでした。そのようなこともあり、当初は興味をもった shear wave elastography を筋などの運動器に応用することの妥当性に自信がなく、その可能性を模索していました。ところが、少し悶々としていたときに1本の論文が目飛び込んできました。

その論文は、驚くことに被験者は1名ながらも、神経筋分野で評価の高い国際誌 (Muscle Nerve, 2010) に掲載されていました。著者は、ジョージア工科大学 (アトランタ、米国) の Shinohara 先生と剪断波エラストグラフィ法を開発したフランスの研究者らで、タイトルは Real-time visualization of muscle stiffness distribution with ultrasound shear wave imaging during muscle contraction というものです。筋長を変化させた状態で安静時や収縮時の筋内のステイフネス分布 (ステイフネスは硬度と同義とします) をリアルタイムに初めて観察した内容を報告しています。この論文のおかげで shear wave elastography を用い

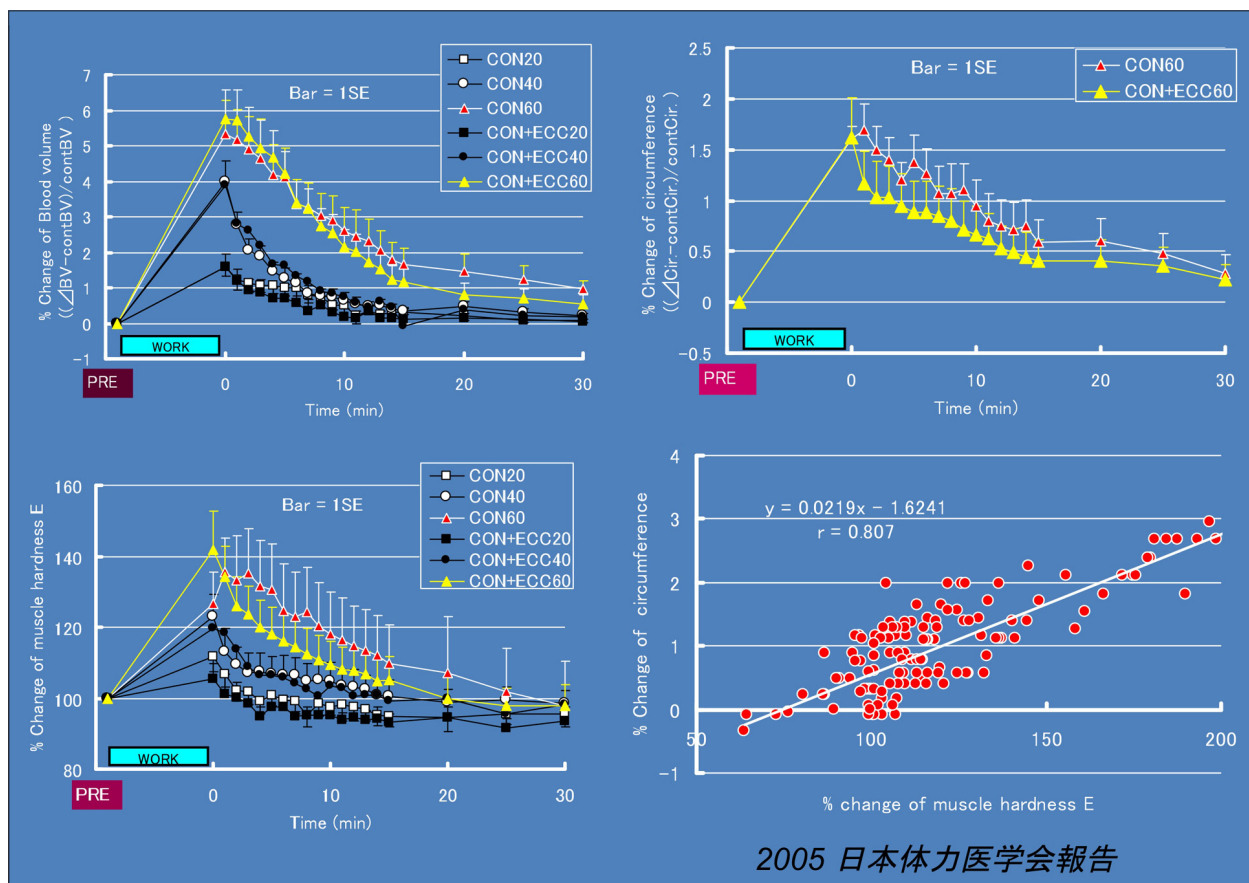


図 15

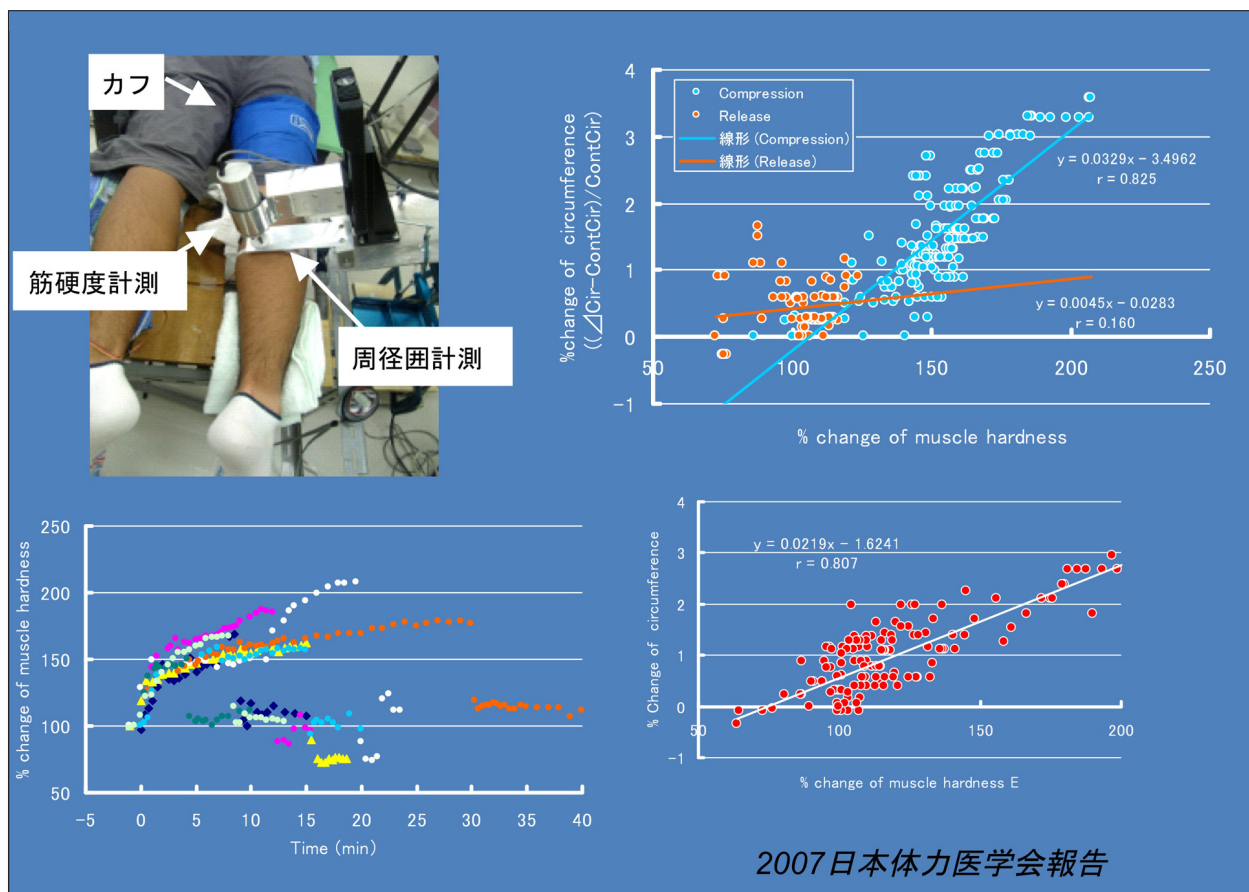


図 16

特集 5 カラー図掲載

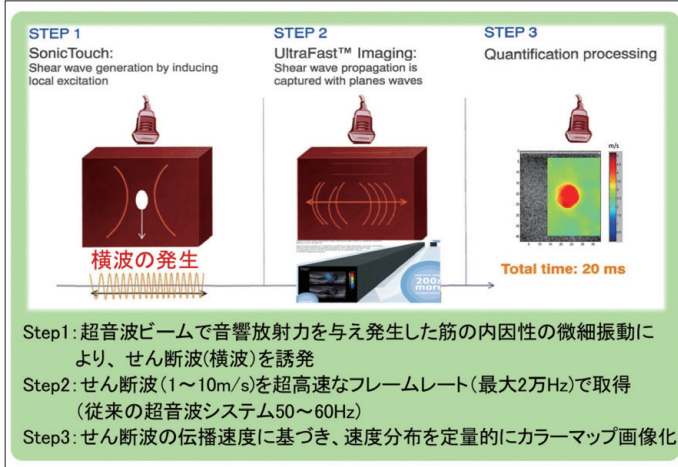
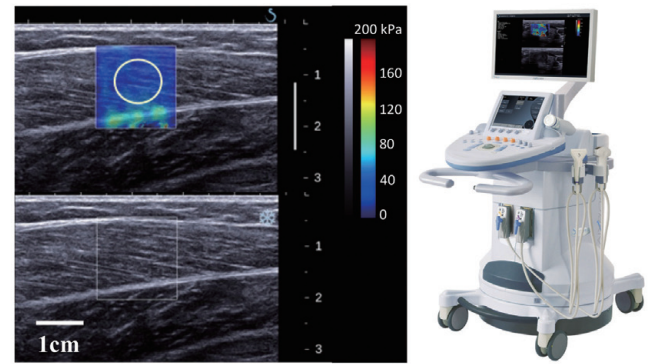


図1 Ultrasound shear-wave elastography による硬度(弾性係数)の計測過程



硬いほど赤く、軟らかいと青く表示

図3 Shear-wave elastography 機能搭載の超音波装置(右部)による筋硬度測定のための代表画像(左部)

超音波画像の下部は腓腹筋内側頭の縦断面の超音波 B モード像で示され、上部はカラーコード表示の弾性分布を B モード像に重ね合わせた画像となる。右上のカラースケールは、kPa 単位の剪断弾性係数を示す(数値が大きいほど硬度が高い)。サークル内の筋束部の平均弾性係数を分析に用いる。

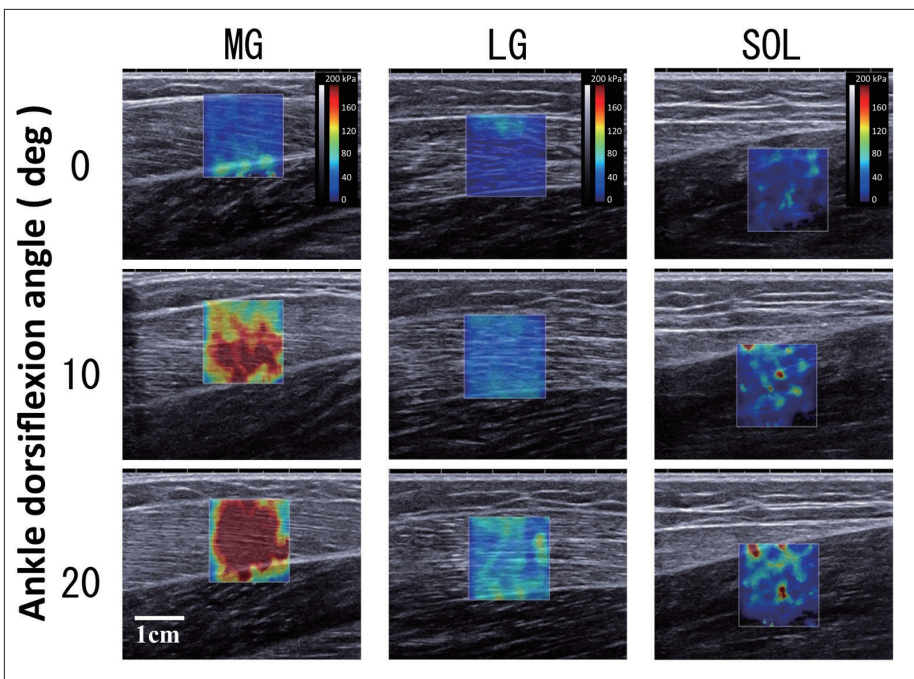


図5 ストレッチング時における下腿三頭筋の弾性分布画像
MG: 腓腹筋内側頭; LG: 腓腹筋外側頭; SOL: ヒラメ筋

特集 6 のカラー図掲載

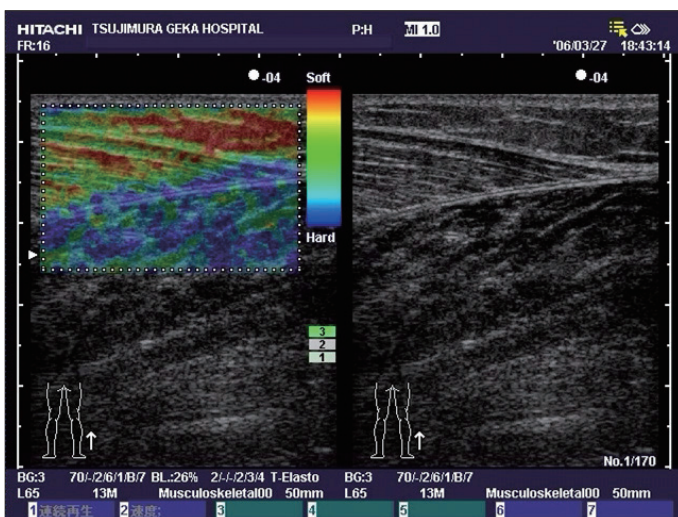


図2 Elastography Image of normal gastrocnemius muscle

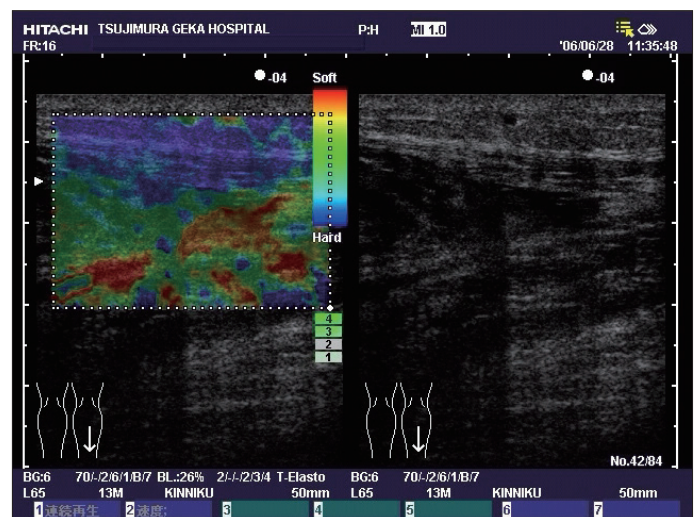


図3 Elastography Image of Case 1 at first examination
a: Elastography Image b: Reference B-mode Image

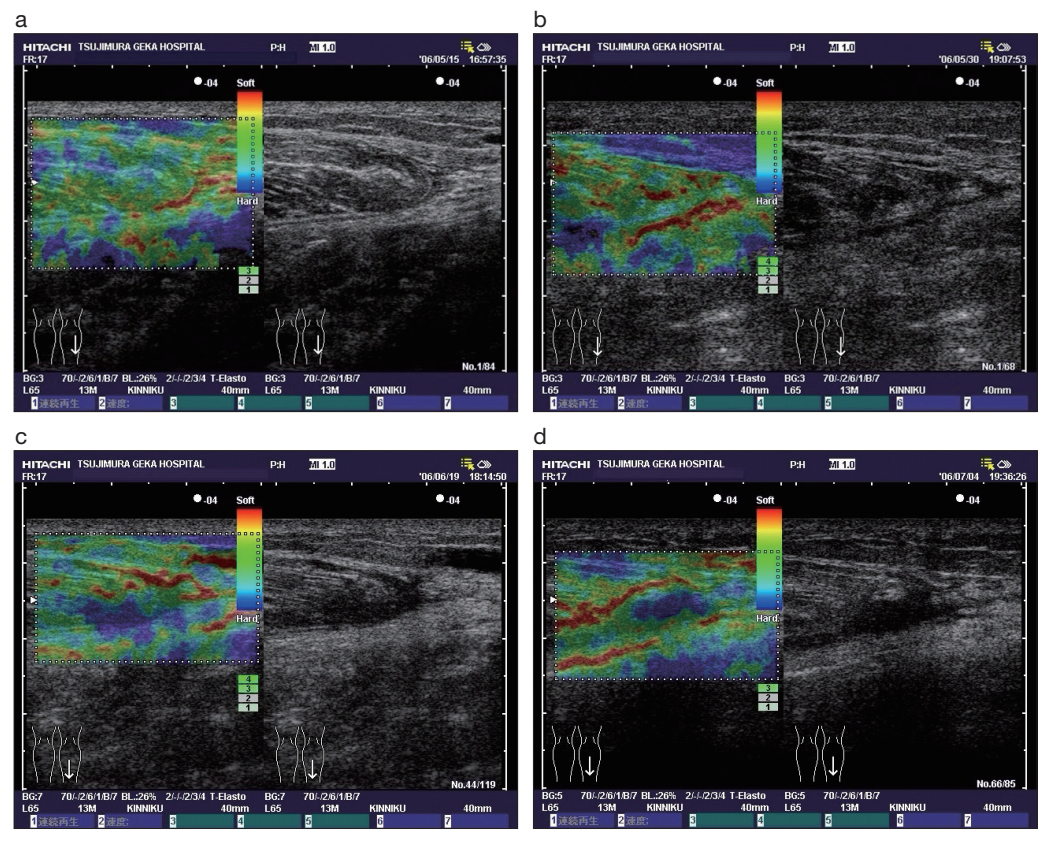


図 4 Elastography Image of Case 2

a: first examination b: 2 weeks after c: 5 weeks after d: 8 weeks after

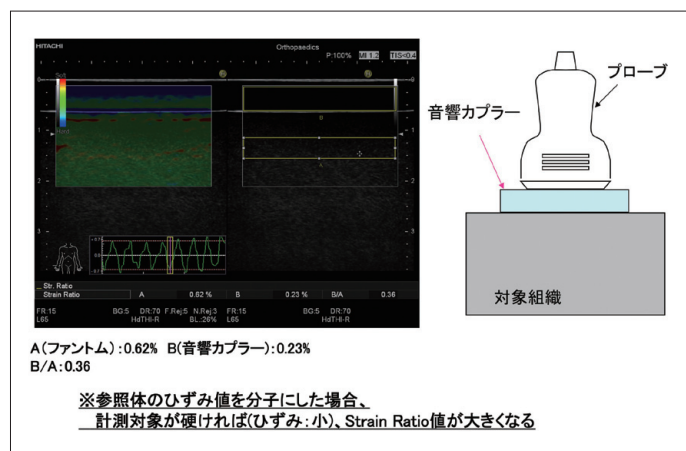


図 6 音響カプラーを用いた Strain Ratio の計測例

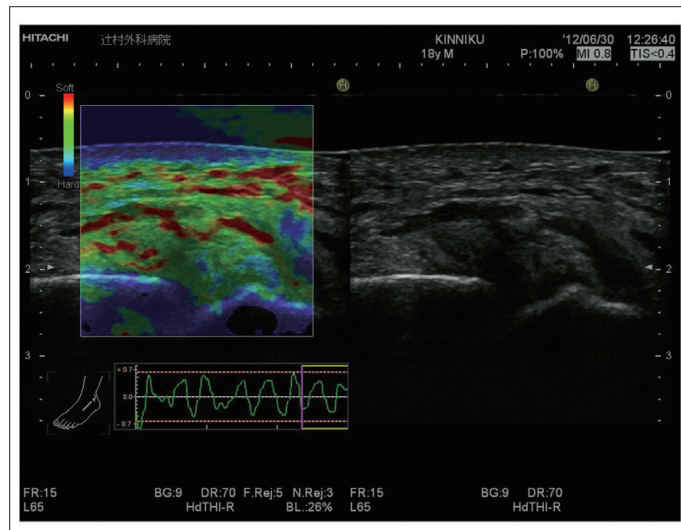


図 8 足関節捻挫の症例 (エラストグラフィ)

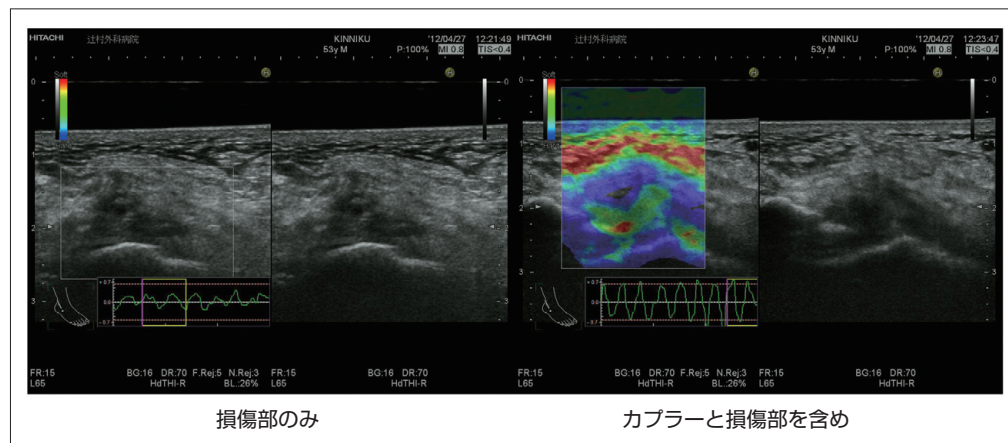


図 9 ROI の取り方の違い

エラストグラフィは、相対表示であるため、ROI の取り方が狭いと損傷部のひずみは大きく (赤く) なる。ROI の取り方が広いと、皮下の出血部、浮腫の部分 (ひずみ大) に引っ張られ、損傷部のひずみは小さく (緑～青) なる。1) カプラーを含めた相対評価と 2) カプラーとの比較 (半定量) により、客観的な評価が可能となるのではないかと考えられる

6

筋の硬さ

肉離れ後の組織の硬さと競技復帰 ——超音波のエラストグラフィと音響カプラーを用いた外傷の評価

辻村 享

医療法人明和会 辻村外科病院理事長

超音波を用いてスポーツ外傷をみてこられた辻村先生は、エラストグラフィ、音響カプラーという組織の硬さをみる機能を活用、治癒過程と競技復帰の目安として用いられている。従来のBモードだけではわからなかった情報ももたらすものかわかって興味深い。

23年前から始めた運動器超音波

——診断、治療で超音波を用いられている。

運動器疾患を超音波でみるということをはじめたのが、1991年くらいです。もともと私の専門は整形外科ではなく腫瘍外科です。当院の近くに藤田保健衛生大学病院があり、その腫瘍外科で研修していたのですが、そのなかでも内分泌外科といって甲状腺、乳腺について学んできました。

一方で、私は学生時代ずっと陸上競技(中長距離、マラソン、1981年日本インカレ3000m障害出場)をやっていて、スポーツが好きで、大学を出て研修医修了3年目に藤田衛生保健大学に戻ったとき、中京大学から非常勤講師として招かれました。以来1987年から中京大学でスポーツ障害などの講義を現在まで続けてきました。藤田保健衛生大学病院(中京大学)から父の病院(現在の辻村外科病院)に戻り、診療を始めましたが、そこで父から肉離れを超音波で診ることをやってみてはどうかと言われたのです。甲状腺も乳腺でも超音波は使いますが、それを肉離れでやってみないかということです。それまでやったことはなかったのですが、やってみると肉離れの状

態がきれいにみえたので、興味をもち、学会で発表したりしてきました。超音波は運動器疾患の診断・治療に使えると思い、そこから盛んに超音波を使うようになりました。

——当時はまだ運動器の超音波はまだそんなに普及していなかった。

はい。整形外科の先生からは亜流のように思われたかもしれませんが、運動器には超音波が使えると思い、始めました。

超音波で硬さをみる

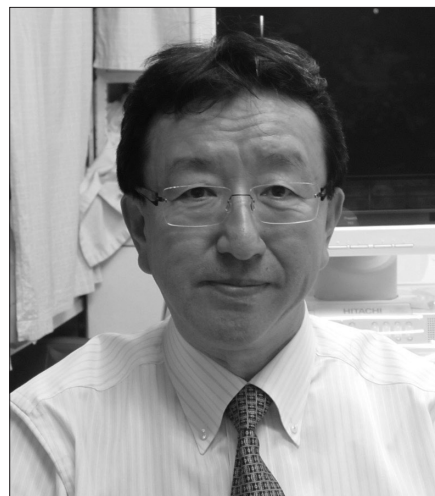
——最初は運動器疾患のうちでも肉離れから。

とくに腓腹筋の肉離れに超音波でみた例についていろいろ発表してきましたが、この5年くらいでは、肋軟骨骨折を超音波でみたものを臨床スポーツ医学会で発表しています。このように超音波は長く用いられていますが(図1)、2003年に日立メディコ(現日立アロカメディカル株式会社)がReal-time Tissue Elastography(以下エラストグラフィ)を製品化されたのですが、当初は私の領域では乳がんの診断に使えると学会などで知っていま

した。そのとき、これは運動器にも使えるだろうと考えました。

——エラストグラフィで乳がんの何をみる?

乳腺にできた腫瘍は硬くなります。筑波大学で研究が盛んですが、エラストグラフィ上真っ青(青いのは硬いことを意味する)に



つじむら・とおる先生

みえるのは「がん」が強く疑われるなどグレード化した指標を出しておられます。

——エラストグラフィ上、硬さは色でわかるようになっている(P.26参照)。

あくまで選んだ領域での相対的評価で、正常な乳腺に比較して、乳がんは硬くみえるということです。

——相対的な硬さを色で表すエラストグラフィをがん発見のために用いる。

そうです。それだけでがんは特定できず、

日立メディコ社製 HI VISION Ascendus

探触子:EUP-L65 (6-14MHz)

Application software

: Real-time Tissue Elastography



図1 当院にある超音波装置

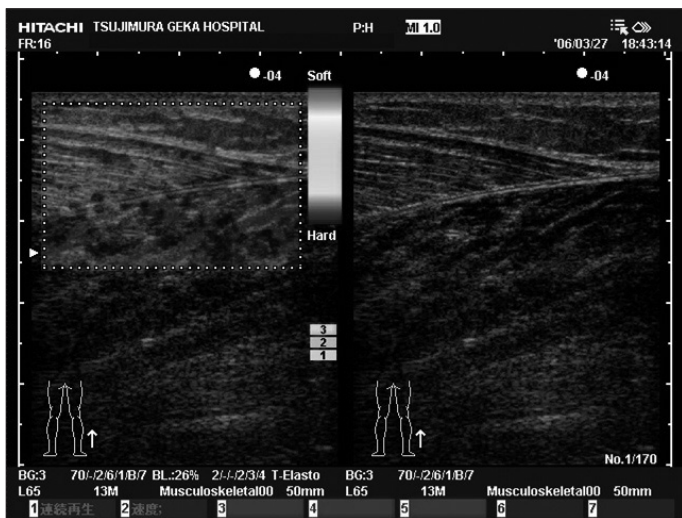


図2 Elastography Image of normal gastrocnemial muscle
(P.26 にカラー図掲載)

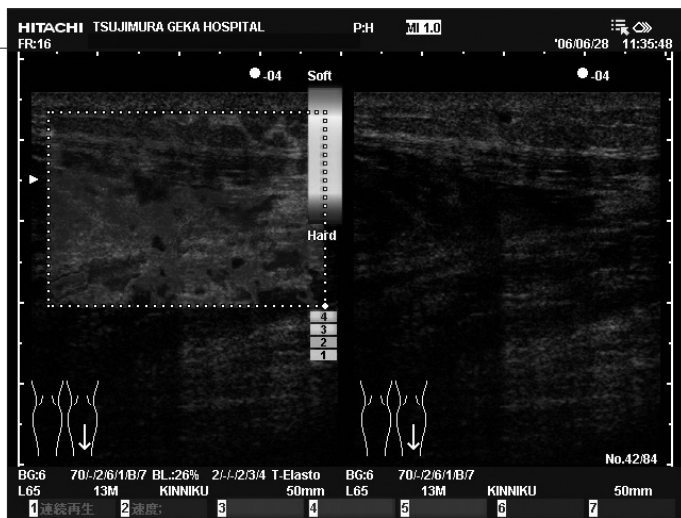


図3 Elastography Image of Case 1 at first examination
a: Elastography Image b: Reference B-mode Image
(P.26 にカラー図掲載)

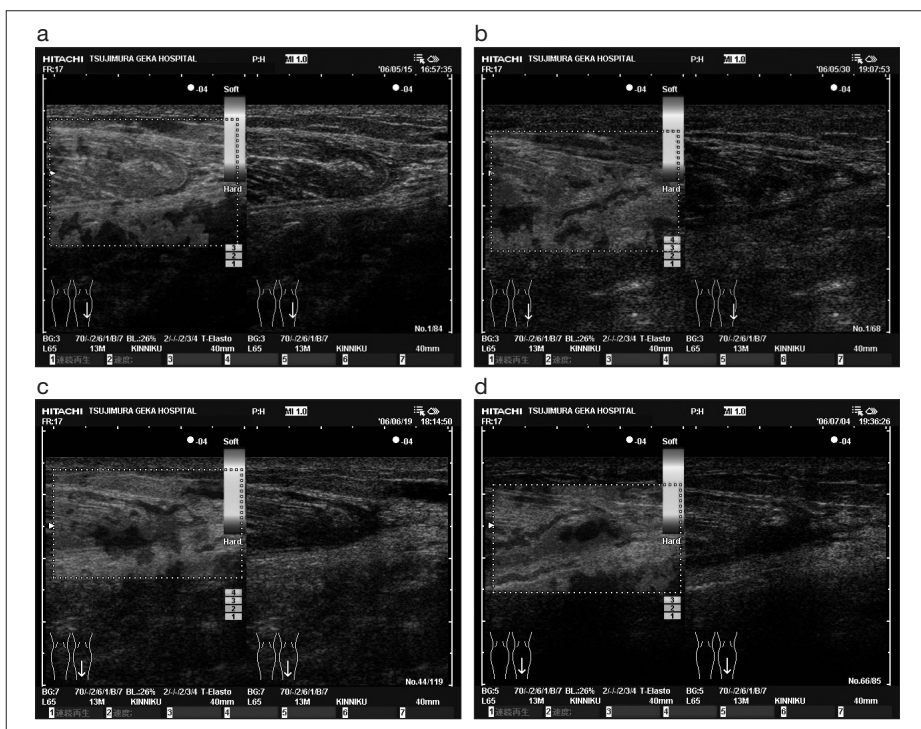


図4 Elastography Image of Case 2
a: first examination b: 2 weeks after c: 5 weeks after d: 8 weeks after
(P.27 にカラー図掲載)

さらに詳しい検査の前の段階です。このエラストグラフィを運動器に用いることを考え、実際には2006年に装置を導入しました。

——当初は、エラストグラフィがまだ世の中にないころから超音波を用いられていて、2006年からエラストグラフィも使用されるようになった。

そうです。当初はいわゆる「Bモード」(従来のモノクロの超音波画像)で診断していました。

腓腹筋の肉離れの場合

腓腹筋は超音波では、図2のように三角にとがって見えます。肉離れを起こすと、少し時間がたつと、図3のように断裂部が黒くみえてきます。図4は経時的に変化をみたものです。これについてはのちほど説明しますが、図4b、c、dにあるように、時間が経過しても断裂部は黒いまです。そこで何が起きているのかわからなかったのですが、おそらく癒着化していくとだろうとは言え、痛みがとれても変化していかない。そのとき、エラストグラフィを使っ

て断裂部がどのように変化していくかを観察しました。

すると、断裂直後は緊張がなくなりますから、赤く(柔らかい)みえます。その赤くなったところが、時間経過とともにだんだん色が変わり、2週間を過ぎると、緑に、そして青に変わっていきます(図4、P.27カラー図参照)。これは癒着化して硬くなっていくことを示していると言えます。このように、エラストグラフィで組織の硬さを経時的にみていくのは、治療経過をみるだけでなく、競技復帰の目安としても役立てることができるのではないかと推測されます。

これを2006年に発表したのですが(文献1)、そのとき言われたのが、その硬さは相対評価で、周辺組織との比較なので、絶対評価できるものはないかということでした。そこで、いろいろな比をとったり、数値化の試みをしたのですが、そうこうするうちに2009年に日立アロカから、「音量カプラー」(図5)が開発されました。これは硬さの基準となるもの(音量カプラー)をプローブと対象部位の間に介在させ、その安定して一定の硬さを有する音量カプラーによって、硬さを数値化し色別で表すというものだったわけです。これを用いて、正常な部分、断裂部はどうなるかをみていくことにしました。

——Bモードではわからない硬さの変化がエラストグラフィでわかるようになり、音響カプラーでさらにそれを数値化することが可能