

# 超音波エラストグラフィの特徴と骨格筋への応用

星 川 恭 賛 ・ 大 石 隆 太 ・ 村 成 幸

山形県立保健医療大学

# 超音波エラストグラフィの特徴と骨格筋への応用

星川 恭賛<sup>1)</sup>・大石 隆太<sup>2)</sup>・村 成 幸<sup>2)</sup>

## Features and Application to Skeletal Muscle with Ultrasound Elastography

Kyosuke Hoshikawa<sup>1)</sup>, Ryuta Oishi<sup>2)</sup>, Nariyuki Mura<sup>2)</sup>

### Abstract

Ultrasound elastography is a technique for measuring tissue “stiffness” non-invasively. It can be classified into two types: strain elastography and shear wave elastography. Each technique has different principles and features. In this article, we discussed the physical principles of ultrasound elastography, discussed the differences between different ultrasound techniques, and described the art and pitfalls of application of these techniques in the musculoskeletal system.

Keywords : Mental Health, Recovery, Outcome, Clinician, literature search

**Key words** : Ultrasound elastography, stiffness, Musculoskeletal system

### 【はじめに】

超音波エラストグラフィは非侵襲的に組織の硬さを計測する技術として注目されている。臨床応用では、すでに乳腺や甲状腺における腫瘍、肝臓における線維化の画像化に用いられており、局在や進行度を非侵襲的に評価できる検査技術として、その有効性が認識されている (1)。近年では、筋骨格系の病態や機能障害の客観的評価として、超音波エラストグラフィを用いて軟部組織の硬さを定量化する試みがなされており、これまで骨格筋や腱、靭帯、関節包など多岐にわたり超音波エラストグラフィにより評価された研究が報告されている (2-9)。超音波エラストグラフィの手法は、Strain elastography と Shear wave elastography の 2 つに大別される。それぞれの手法ごとに原理や特徴が異なっており、各々の特徴を十分に理解し、

目的に応じた選択のもとで使用する必要がある。本稿では超音波エラストグラフィにおける各手法の原理や特徴について述べる。また、超音波エラストグラフィを用いた骨格筋への応用における計測上のコツとピットフォールについても解説する。

### 【超音波エラストグラフィとは】

超音波エラストグラフィは、超音波を用いて組織の硬さを定量化(半定量化)し、その分布を画像化する技術である。超音波エラストグラフィは、計測する物理量(歪み、剪断波伝搬速度)と励起法の違い(手加的加圧、音響的加圧)により分類される。そのなかの 2 大手法が Strain elastography と Shear wave elastography である。Strain elastography は、対象となる組織の上から手的に加圧を行っ

1) 山形県立保健医療大学大学院保健医療学専攻理学療法学分野  
〒990-2212 山形市上柳 260  
Yamagata Prefectural University of Health Sciences  
260 Kamiyanagi, Yamagata-shi, Yamagata, 990-2212, Japan

2) 山形県立保健医療大学保健医療学部理学療法学科  
〒990-2212 山形市上柳 260  
Yamagata Prefectural University of Health Sciences  
260 Kamiyanagi, Yamagata-shi, Yamagata, 990-2212, Japan

(受付日 2022. 11. 1, 受理日 2022. 12. 6)

た前後における組織の歪み分布を計測し、周囲の軟部組織や計測用カプラに対する相対的な硬さを計測する方法である。対して、Shear wave elastography は、専用プローブによる音響的

加圧によって組織内に剪断波 (shear wave) を発生させ、対象となる組織内の伝搬速度から定量的な硬さを計測する方法である。各々の特徴、長所と短所を表 1 に示す。

表 1 Strain elastography と Shear wave elastography

	長所	短所
Strain elastography	<ul style="list-style-type: none"> <li>計測時のフレームレートが高く、リアルタイム性に優れている。</li> <li>比較的深部 (3.0~4.0 cm) の計測が可能。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>検者の手技による影響を受けやすい。</li> <li>定量的な硬さの測定ができない (半定量化は可能)。</li> </ul>
Shear wave elastography	<ul style="list-style-type: none"> <li>用手的な加圧などの手技が不要なため、信頼性の高い計測が比較的容易。</li> <li>定量的な硬さの計測が可能。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>計測時のフレームレートが低く、実際の計測が画面上に反映されるまで少し時差が生じる。</li> <li>表層組織において、圧迫による影響を受ける可能性がある。</li> <li>測定可能な部位・深度 (2.5~3.0 cm) が制限される。</li> </ul>

### 【Strain elastography (SE) とは】

SE の基本概念は、対象となる組織に生じた一軸性 (垂直方向) の歪みを定量的に画像化する技術である。対象となる組織には一定の歪みが反復して発生する必要があり、用手的な加圧が主に用いられる。用手的な手技のため完全な定量化は困難であることから、粘弾係数が決まっている音響カプラを用いた半定量化として、対象となる組織の直上に音響カプラを置き、カプラ内部の歪み値と比較した対象組織の strain ratio (対象組織の歪み値/音響カプラの歪み値) を計測することが望ましい。長所としては、計測時のフレームレート (計測動画において、1 秒あたりに表示される画像数) が 10 フレーム/秒以上であり、1 秒間に表示される画像数が多いため、リアルタイム性に優れていることが挙げられる。また、SE では 3.0 ~ 4.0 cm の深さまでは計測可能であり、これ以上の深さになるとエラスト画像において色抜けが出現しやすくなる。短所としては、用手的加圧による計測になるため、検者の手技による影響を受けやすいことが挙げられる。そのため、軟部組織の計測を行う際には、検者内・検者間信頼性をあらかじめ調査し、十分な再現性を得られる手法が確認された後に、目的の評価を開始する必要がある。

### 【Strain elastography での計測】

著者らがこれまで使用した超音波診断装置は Noblus (日立アロカメディカル株式会社) (図 1-a) であり、圧迫前後の歪みの変化を色分けしてモザイク様のエラストグラフィ画像をつくる (図 1-b)。エラストグラフィ画像上では硬い組織は青、柔らかい組織は赤で表示される。歪みは圧迫の程度により変化する相対的指標であるが、粘弾係数が決まっている音響カプラを装着して同時に歪ませることにより、音響カプラに対する対象組織の strain ratio (対象組織の歪み値/音響カプラの歪み値) を算出し、半定量的な計測が可能である。計測時には、ストレイングラフを参考に、圧迫の程度や速さを一定に周期的に圧迫を加える。SE の画像処理アルゴリズムは乳腺用であるため、弛緩/収縮と粘弾性が大きく変化する骨格筋を対象にする場合には、収縮の程度に応じて圧迫強度を調整し、計測時のエラスト画像の音響カプラ上の色表示が緑~赤色になっていることを目安とし、歪み値 (%) は 0.4 ~ 0.5 以上になることが望ましい。SE での計測結果はあくまで一軸性 (垂直方向) の歪みであるため、計測対象を B モード画像の中心にもってこることが必要である。実際の計測では、B モード画像上で対象組織の筋内腱や筋線維が鮮明に表示されていることを確認した上でエラストグラフィモードに変更する。エラストグラフィ画像における関心領域 (ROI:

Region of Interest) は音響カプラ (A 領域) および対象組織 (B 領域) に設定する. ROI 設定において, 硬い組織の上下には応力集中が起こるため, 硬すぎる組織 (骨, 筋膜, 筋内腱)の上にはアーチファクト (相対的に軟らかく表示されてしまう) が出現することを念頭におく必要がある.

### 【Strain elastography の計測ポイント】

※計測対象は筋を想定

\*計測前の準備 (図 2)

- ・プローブに音響カプラを装着する際は, プローブ上にエコーゼリーを薄く広げ, 気泡が入らないように注意して音響カプラを装着する (プローブと音響カプラ間に気泡が入るとエラストグラフィ計測時にアーチファクトが生じる要因となる). プローブと音響カプラ間に気泡が入った場合は, 音響カプラを指で押圧し, 気泡を内から外へ逃がすとよい.
- ・計測対象の筋は解剖学的構造を被験者の体表上でイメージする. イメージし易いようにマーカーペンなどで計測対象の部位に印をつけておくと良い.

\*計測時の B モード画面設定 (図 3)

- ・B モードの輝度設定は計測対象筋の筋線維が確認できる程度に設定する. 著者は輝度 30 に設定することを勧める (図 3-a).
- ・深度は対象筋全体が確認できる程度に設定する (図 3-b).
- ・フォーカスは対象筋の深度に合わせて設定する (図 3-c).

\*計測時のプローブ操作

- ・プローブは対象筋線維方向に対して短軸に置き, B モード画像で対象筋の全体像を確認する (筋の形態は個人差があるため, 各個人の筋の長さや厚さ, 腱・筋膜の形態を把握する必要がある).
- ・プローブ短軸画像で対象組織が画面中央にくるようにプローブを移動する.
- ・プローブ短軸画像で計測を行う場合は, プローブを 3 軸方向 (上下左右の傾斜・左右の回転) に微調整し, 対象筋の筋膜や筋内腱が明瞭に見える画面を探る (図 4).
- ・プローブ長軸画像で計測を行う場合は, プローブ短軸画像で対象筋が画面中央あることを確

認しながらプローブを筋線維方向に回転させる.

- ・プローブが筋内腱あるいは筋線維方向に対して短軸・長軸にあてると, B モード画像上に筋膜・筋内腱の輪郭が明瞭に現れ, 細かい筋線維が画面上に確認できる (図 5). プローブが正しく短軸・長軸にあたっていない場合, 明瞭な筋膜・筋内腱と細かい筋線維が画像上で確認できない. その場合はプローブを 3 軸方向に微調整し, 上記の画像が得られるポイントを探る.

・ここまでの操作が終了したらエラストグラフィモードを作動させる.

\*エラストグラフィモードでの計測 (図 6)

- ・エラストグラフィ画像上では硬い組織は青, 柔らかい組織は赤で表示される (図 6-a).
- ・ストレイングラフを参考に, 圧迫の程度や速さを一定に周期的に圧迫を加える (図 6-b). ストレイングラフ上で周期的な山なりの波を確認できることが望ましい.
- ・エラストグラフィ画面を確認し, 画面全体に色が綺麗に表示されているかを確認する (図 6-a). プローブと音響カプラ内に気泡が入っていたり (図 6-c), 対象組織の深度が深すぎたり (図 6-d), プローブの 3 軸方向のあて方にズレがあると色の写りがまばらになる (図 6-e).
- ・骨や腱によるアーチファクトが入る場合 (図 6-f,g), できるだけ骨や腱を除いた位置にプローブを移動して計測することが望ましい.
- ・プローブの圧迫強度はエラストグラフィ画面上の音響カプラの色を確認し, 青色の場合 (図 6-h) は圧迫強度を強くし, 音響カプラの色が緑~赤色になることが望ましい.

\*関心領域 (ROI: region of interest) の設定 (図 7)

- ・ROI は音響カプラ (A 領域) および対象組織 (B 領域) に設定する.
- ・硬い組織の上下には応力集中が起こるため, 硬すぎる組織 (骨, 筋膜, 筋内腱など)の上にはアーチファクト (相対的に軟らかく表示されてしまう) が出現することを念頭におく必要がある.

\*安静時の筋線維を計測する際の注意

- ・安静時における硬度の計測は筋線維の僅かな変化も計測に影響するため, 被験者に余分な力が入っていないか十分に確認してから計測

を開始する。

- ・エラストグラフィ画面で筋線維の色に青色が多く含まれる場合は、被験者に力が入っている可能性が考えられる。
- ・著者の経験上、安静時はカブラの圧迫強度は強めに加えた方が音響カブラの理想的な歪み値 (0.4 ~ 0.5 以上) が得られやすい。

\*筋収縮時の筋線維を計測する際の注意

- ・安静時から筋収縮時にかけて筋線維は内側に移動するため、筋収縮時を測定する際は、安静時にあてたプローブ位置から内側にプローブを移動する。
- ・安静時から筋収縮時にかけてプローブを内側に移動する際は、あらかじめランドマークを設定し、ランドマークが安静時から筋収縮時にかけて移動した距離分プローブを内側に移動させる (図 8)。

- ・筋収縮時の筋の働きが強い場合 (エラストグラフィ画像上で筋線維の色が青一色に染まる場合、硬度を示す strain ratio は上限の 0.01 に近づき、頭打ちになる可能性があることを念頭に置く必要がある。この場合、筋収縮時の筋線維の硬度を比較する際に差が生じない可能性がある (例: 肩関節外転における筋収縮時の棘上筋硬度)。

- ・著者の経験上、筋収縮時はカブラの圧迫強度は弱めに加えた方が音響カブラの理想的な歪み値 (0.4 ~ 0.5 以上) が得られやすい。
- ・計測画像は図 6-a のように音響カブラ上の色が緑~赤で表示されており、色が均一に表示されている画像が得られたら解析画像として採用する。図 6-c~h のような画像が表示されている場合は、不適切な画像となっている要因を考え、対処しながら再計測を試みる。

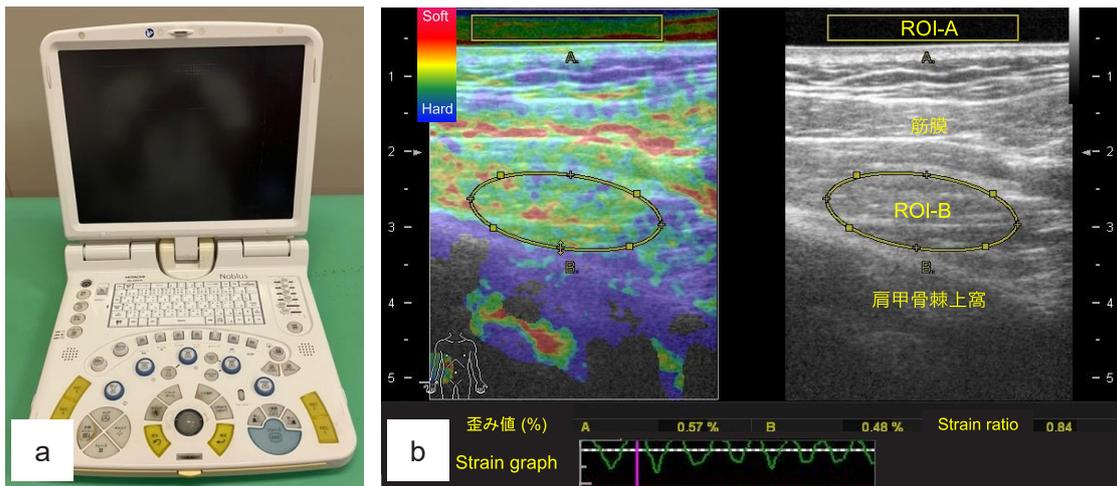


図 1 Strain elastography (SE)

a: 計測機器本体 b: 計測画像

エラストグラフィ画像上では硬い組織は青、柔らかい組織は赤で表示される。計測対象部位に関心領域 (ROI: region of interest)-B を設定し、その上方の音響カブラにも同じ幅の ROI-A を設定する。カブラの歪みに対する組織の歪みの相対値が Strain ratio(=B/A) である。

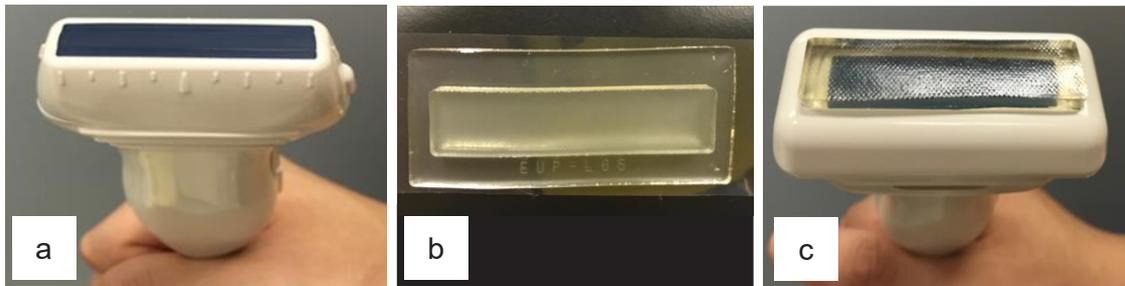
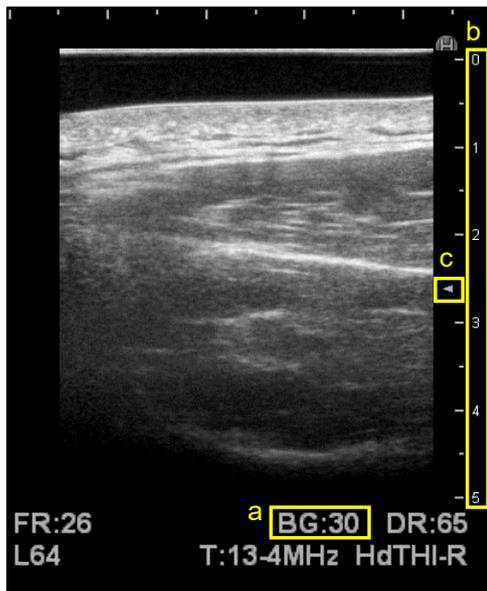


図 2 計測前の準備

a: プローブ b: 音響カブラ c: プローブに音響カブラを装着後

プローブに音響カブラを装着する際は、プローブ上にエコーゼリーを薄く広げ、気泡が入らないように注意して音響カブラを装着する (プローブと音響カブラ間に気泡が入るとエラストグラフィ計測時にアーチファクトが生じる要因となる)。



a: 輝度  
輝度設定は計測対象筋の筋線維が確認できる程度に設定する. 筆者は輝度 30 に設定することを勧める.  
b: 深度  
深度は対象筋全体が確認できる程度に設定する.  
c: フォーカス  
フォーカスは対象筋の深度に合わせて設定する.

図3 計測時のBモード画面設定

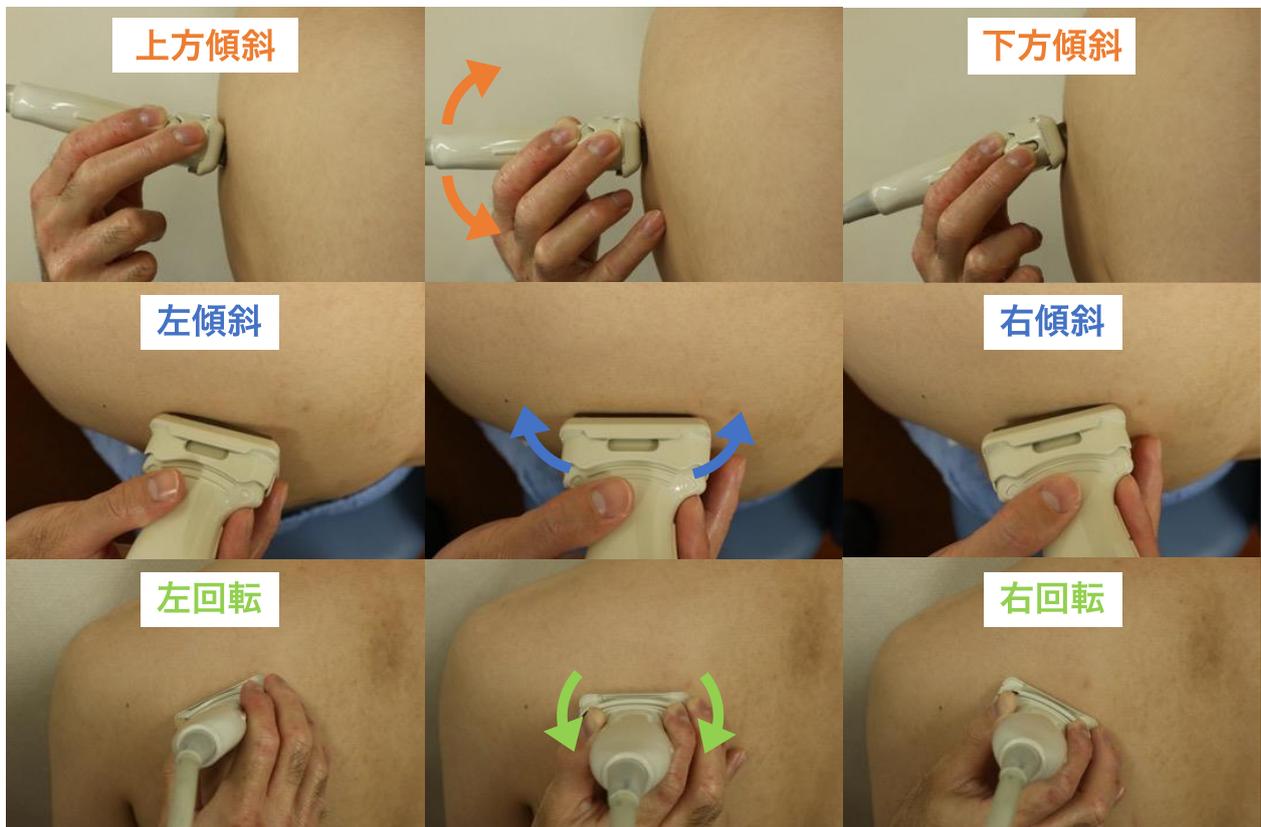


図4 プローブの3軸方向への操作

プローブの移動軸は3軸(上下・左右の傾斜, 左右の回転)あり, 各々を微調整しながら計測対象が明瞭にみえる画像を探る.

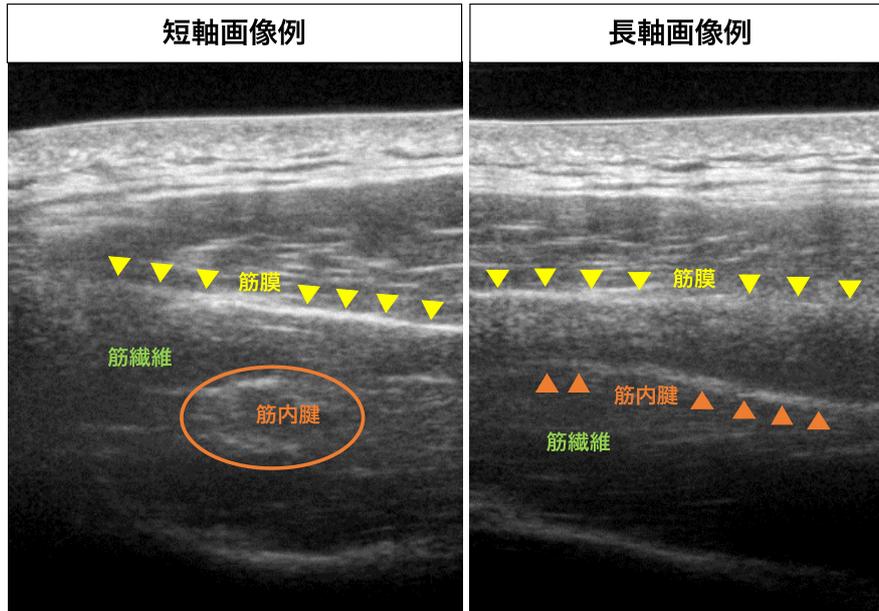


図 5 Bモード画像例

プローブが筋内腱あるいは筋線維方向に対して短軸・長軸にあてると, Bモード画像上に筋膜・筋内腱の輪郭が明瞭に現れ, 筋線維の細かい繊維(画像上の白の細かい線)が画面上に確認できる。

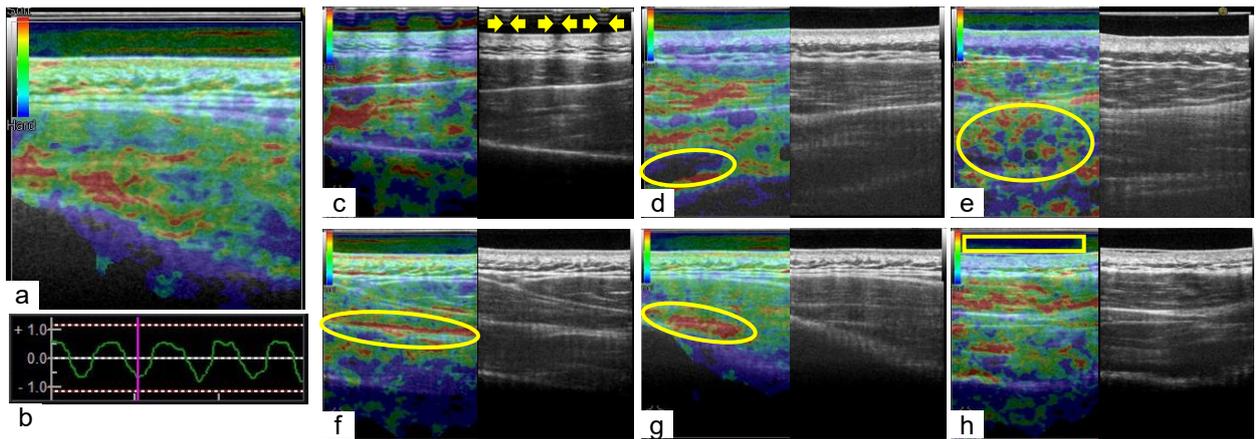


図 6 Strain elastography モード画像例

- a: Strain elastography モードの画像例. 画面全体に色が表示され, 色ムラが少ない表示になっていると綺麗な画像が表示できている.
- b: ストレイングラフ. ストレイングラフを参考に, 圧迫の程度や速さを一定に周期的に圧迫を加える.
- c: プローブと音響カプラ内に気泡が入っているため, 色の表示がまばらである画像(矢印は気泡が入っている箇所を示す).
- d: 対象組織の深度が深すぎるため, 色の表示に抜けがある画像.
- e: プローブの3軸方向のあて方にズレがあるため, 色の表示に濃淡が出ている画像.
- f: 筋内腱上部にアーチファクトが生じている画像.
- g: 骨上部にアーチファクトが生じている画像.
- h: プローブの圧迫強度が足りていない画像.

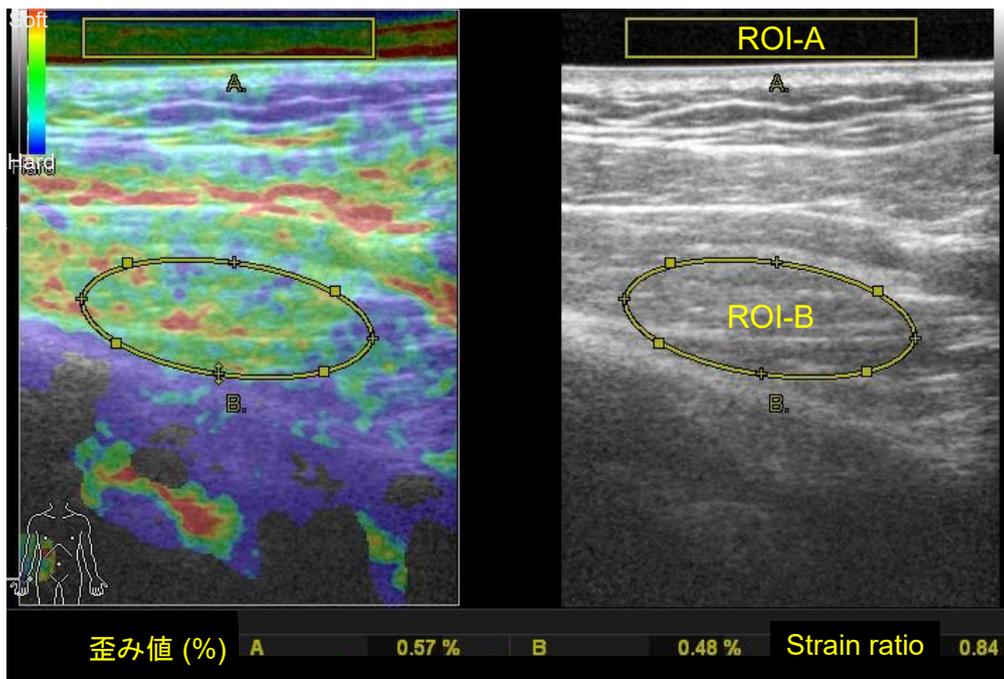
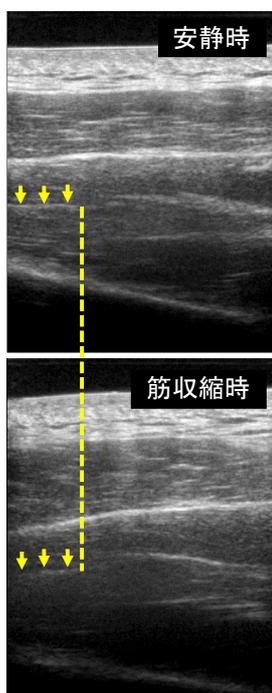


図7 関心領域 (ROI: region of interest) の設定

ROIは音響カプラ (A領域) および対象組織 (B領域) に設定する。硬い組織の上下には応力集中が起こるため、硬すぎる組織 (骨, 筋膜, 筋内腱など) の上にはアーチファクト (相対的に軟らかく表示されてしまう) が出現することを念頭におく必要がある。音響カプラに対する対象組織の strain ratio (対象組織の歪み値/音響カプラの歪み値) を算出し、半定量的な計測が可能。



安静時において、輝度の高い線維をランドマークに設定する (左図では黄色矢印の線維をランドマークとする)。安静時から筋収縮時にかけて筋線維は内側に移動するため、ランドマークが安静時における画像の位置と同じになるようにプローブを内側へ移動させる。

図8 計測時のランドマークの設定

### 【Shear wave elastography (SWE) とは】

SWE の基本概念は、対象となる組織に専用プローブにより発生した剪断波を伝搬させ、その速度を画像化する技術である。SWE の利点として、剪断波速度から定量的な硬さ情報が得られることや、用手的な加圧などの手技が不要なことから、信頼性の高い計測が比較的容易な点が挙げられる。短所としては、表層に近い組織ではプローブからの組織への圧迫により、計測値が影響を受ける可能性がある。また、音響放射力を発生させるために強力な超音波を照射する必要があるため、計測可能な部位・深度 (2.5 ~ 3.0 cm) が制限される点、計測フレームレートが約 1 フレーム/秒と低い点が挙げられる。

### 【Shear wave elastography (SWE) での計測】

著者らがこれまで使用した超音波診断装置は Aixplorer (Supersonic Imagine 社) (図 9-a) であり、剪断波が組織内を伝搬する速度を画像化し、計算式  $\mu = \rho c^2$  ( $\mu$ : 剪断弾性率, kPa,  $c$ : 剪断波伝播速度, m/s,  $\rho$ : 組織密度, kg/m<sup>3</sup>) により剪断弾性率に換算できる (図 9-b)。計測時は、B モード画像を見ながらプローブを対象組織上にあて、できるだけ体表への圧迫は避けて一定の圧力となるようにしてからエラストグラフィモードに変更し、計測を開始する。骨格筋を対象とする場合、Eby ら (10) は、SWE 計測値が筋の伸張における剛性と非常に強く相関することを示し、特に筋線維走行に沿って計測することが重要であると報告している。このことから、紡錘状筋では筋線維走行に対して並行にプローブを置くことで筋線維の弾性率を計測可能である。一方、羽状筋を含む棘上筋や棘下筋、三角筋では解剖学的構造から亜区画に分けて計測する必要があると考えられる (2,3,6-8)。エラストグラフィ画像上では硬い組織は赤、柔らかい組織は青で表示される (strain elastography の逆)。剪断弾性率の計測には対象組織に ROI を設定することで算出される。ROI 設定においては、硬すぎる組織 (特に骨) 上には剪断波の乱反射によるアーチファクトが出現しやすいことを念頭におく必要がある。アーチファクトが確認された場合の対策としては、アーチファク

トが画像全体に及ぶ場合は対象組織の計測位置をアーチファクトの生じない箇所に変更する。アーチファクトが画像の一部である場合は ROI をアーチファクト箇所から外して設定する。

### 【Shear wave elastography (SWE) の計測ポイント】

※計測対象は筋を想定

\* 計測前の準備

- ・プローブにはエコーゼリーを多めに広げ、中に気泡が入らないように注意する。
- ・計測対象の筋は解剖学的構造を被験者の体表面上でイメージする。イメージし易いようにマーカーペンなどで計測対象の部位に印をつけておくと良い。

\* 計測時の B モード画面設定 (図 10)

- ・B モードの輝度設定は計測対象筋の筋線維が確認できる程度に設定する。著者は輝度 70% 程度を勧める (図 10-a)。
- ・深度は対象筋の厚みが確認できる程度に設定する (図 10-b)。
- ・フォーカスは対象筋の深度に合わせて設定する。対象の大きさに対してフォーカスの絞りの大きさを変えることも可能である (図 10-c)。

\* 計測時のプローブ操作

- ・プローブは対象筋線維方向に対して短軸に置き、B モード画像で対象筋の全体像を確認する (筋の形態は個人差があるため、各個人の筋の長さや厚さ、腱・筋膜の形態を把握する必要がある)。
- ・プローブ短軸画像で対象組織が画面中央にくるようにプローブを移動する。
- ・プローブ短軸画像で計測を行う場合は、プローブを 3 軸方向 (上下・左右の傾斜、左右の回転) に微調整し、対象筋の筋膜や筋内腱が明瞭に見える画面を探る (図 4)。
- ・プローブ長軸画像で計測を行う場合は、プローブ短軸画像で対象筋線維が画面中央あることを確認しながらプローブを筋線維方向に回転させる。
- ・プローブが筋内腱あるいは筋線維方向に対して短軸・長軸にあてると、B モード画像上に筋膜・筋内腱の輪郭が明瞭に現れ、細かい筋線維が画面上に確認できる (図 11)。プロー

ブが正しく短軸・長軸にあたっていない場合、明瞭な筋膜・筋内腱と細かい筋線維が画像上で確認できない。その場合はプローブを3軸方向に微調整し、上記の画像が得られるポイントを探る。

- ここまでの操作が終了したらエラストグラフィモードを作動させる。

\*エラストグラフィモードでの計測 (図 12)

- エラストグラフィ画面を確認し、画面全体に色が均一に表示されているかを確認する (図 12-a)。
- 骨や腱によるアーチファクトが入る場合 (図 12-b,c), できるだけ骨や腱を除いた位置にプローブを移動して計測することが望ましい。
- 計測時はできるだけプローブによる圧迫が入らないように注意する (プローブの圧迫による表層組織のアーチファクトを避けるため) (図 12-d)。
- 対象組織の深度が深すぎる場合 (図 12-e) や、プローブの3軸方向のあて方にズレがある場合 (図 12-f), 色が抜ける部分が生じたり、色が均一に表示されないことがあることを念頭に置いておく。
- SWE モード設定 (図 13) は対象組織に応じてエラストグラフィの画像解析を最適に調節する機能であり、対象組織に合わせて設定を変更することを推奨する。設定は3種類 (Standard, Resolution, Penetration mode) あり、Standard mode は画像解析のバランスがとれている設定であり、通常はまずこの設定で対象組織を計測する。Resolution mode は浅い深度にある小さい部分を撮像するとき推奨されており、手指の筋などの深度が浅い組織を計測対象とする場合、Standard mode よりも Resolution mode に設定したほうがエラストグラフィ画像の色の表示が均一になる場合もある。Penetration mode は対象組織の深度が深い場合や広い部分を撮影するとき推奨されている。肩腱板筋などの深度が深い組織

を計測対象とする場合、Standard mode よりも Penetration mode に設定したほうがエラストグラフィ画像の色の表示が均一になる場合もある。

- Elasticity range (図 14) は対象組織の硬度の程度をみて上限を設定する。(例: 軟らかい組織は上限を低く設定すると色の変化がとらえやすい)。

\*関心領域 (ROI: region of interest) の設定 (図 15)

- 円形の ROI: region of interest を対象組織に設定すると ROI 内の硬度の平均値が自動的に算出される (単位は kPa あるいは m/s)。ROI の大きさは対象部位の大きさに応じて変更可能。
- 硬い組織の上下には応力集中が起こるため、硬すぎる組織 (骨, 筋膜, 筋内腱など) の上にはアーチファクトが出現することを念頭におく必要がある。

\*安静時の筋線維を計測する際の注意

- 安静時における硬度の計測は筋線維の僅かな変化も計測に影響するため、被験者に余分な力が入っていないかを十分に確認してから計測を開始する。(筋に力が入っていると真っ青から水色に色が変わる)。

\*筋収縮時の筋線維を計測する際の注意

- 筋収縮時を測定する際は、安静時筋線維と比較して筋収縮時の筋線維は内側に移動するため、安静時にあてたプローブ位置から内側にプローブを移動させる。
- 安静時から筋収縮時にかけてプローブを内側に移動する際は、あらかじめ筋内腱などのランドマークを設定し、ランドマークが安静時から筋収縮時にかけて移動した距離だけプローブを内側に移動させる。
- 筋収縮してからすぐの画像は色の写りが一定せず安定していないため、2, 3秒待機して色の写りが安定してからの画像を計測対象とする。

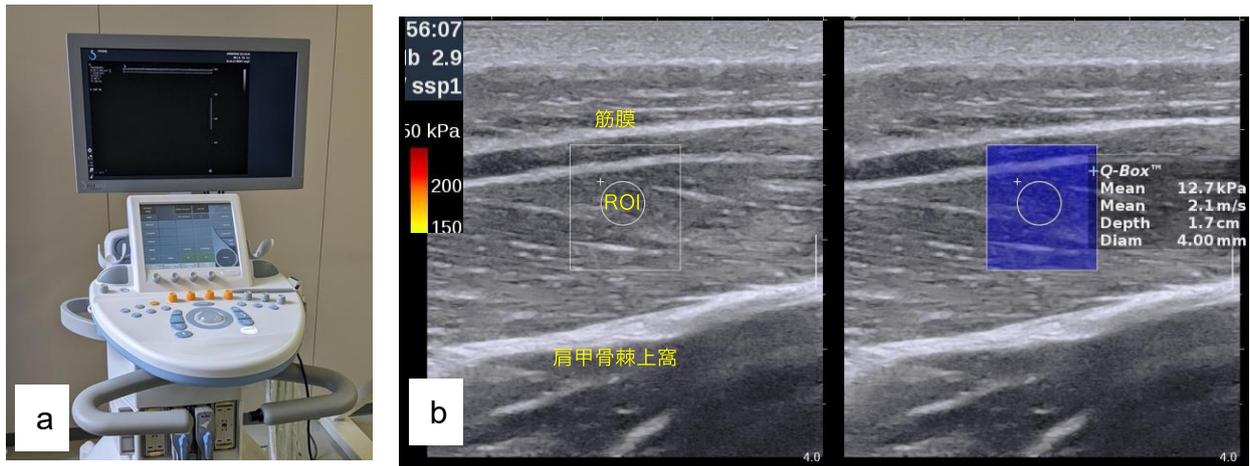
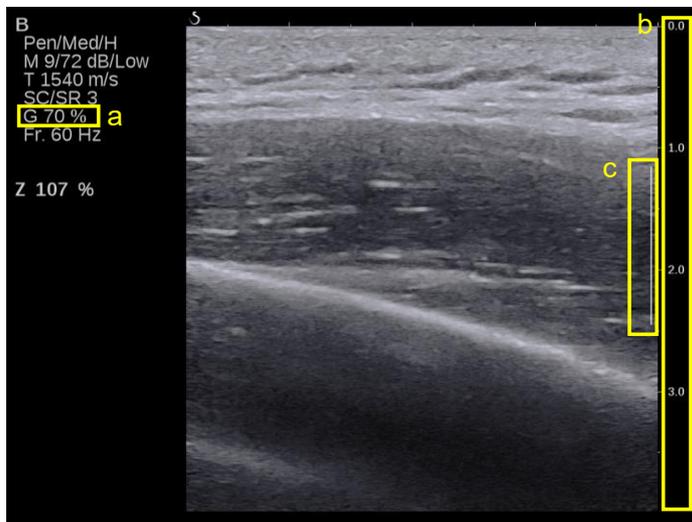


図 9 shear wave elastography (SWE)

a: 計測機器本体 b: 計測画像

エラストグラフィ画像上では硬い組織は赤, 柔らかい組織は赤色で表示される. 計測対象部位に ROI を設定すると, 剪断弾性率 (shear modulus, kPa) が自動的に算出され, 定量的な計測が可能である.



a: 輝度  
輝度設定は計測対象筋の筋線維が確認できる程度に設定する. 筆者は輝度 70% に設定することを勧める.

b: 深度  
深度は対象筋全体が確認できる程度に設定する.

c: フォーカス  
フォーカスは対象筋の深度に合わせて設定する. 対象の大きさに対してフォーカスの絞りの大きさを変えることも可能.

図 10 計測時の B モード画面設定

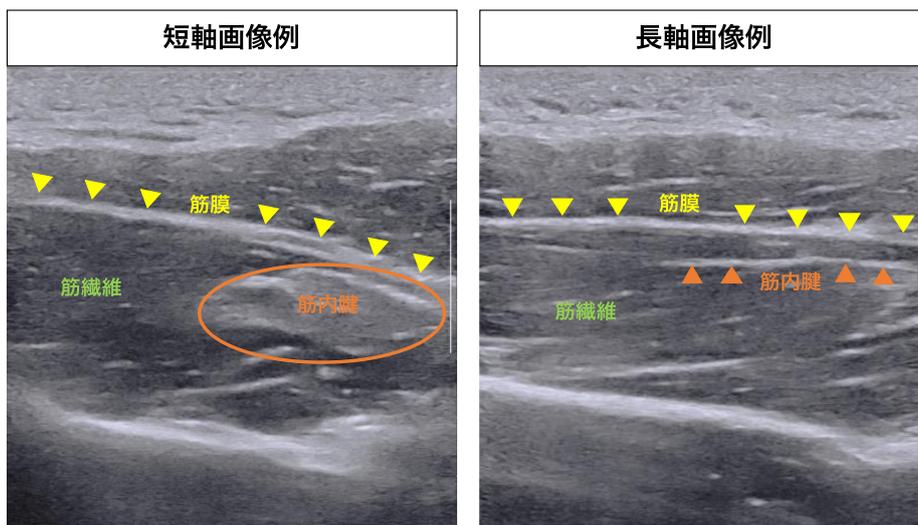


図 11 B モード画像例

プローブが筋内腱あるいは筋線維方向に対して短軸・長軸にあてると, B モード画像上に筋膜・筋内腱の輪郭が明瞭に現れ, 細かい筋線維 (画像上の白の細かい線) が画面上に確認できる.

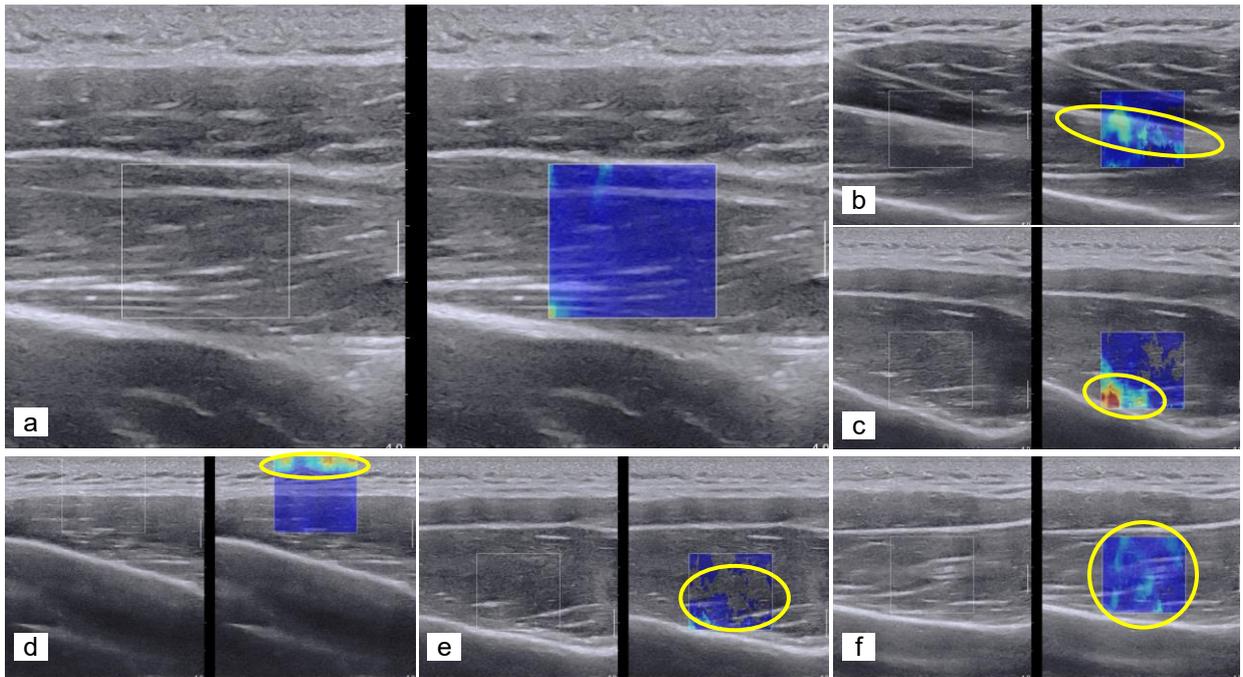


図 12 Shear wave elastography モード画像例

- a : Shear wave elastography モードの画像例。画面全体に色が表示され、色ムラが少ない表示になっていると綺麗な画像が表示できている。
- b : 筋肉腱周囲にアーチファクトが生じている画像。
- c : 骨上部にアーチファクトが生じている画像。
- d : プロープによる圧が強すぎるため表層にアーチファクトが生じている画像。
- e : 対象組織の深度が深すぎて色の表示に抜けがある画像。
- f : プロープの 3 軸方向のあて方にズレがあるため、色の表示に濃淡が出ている画像。



図 13 SWE モード設定

SWE モード設定は対象組織に応じてエラストグラフィの画像解析を最適に調節する機能である（画面黄色○箇所を設定変更可能）。

▶Standard mode：画像解析のバランスがとれている設定（通常はこの設定）。この設定は体液で構成されていることが疑われる部位から得られる誤ったエラストグラフィ信号を消すときにも役立つ。計測時はまずこのモードで計測を試みる。

▶Resolution mode：対象組織の深度が浅く、小さい部分を撮影するときにはこの設定が推奨されている。手指の筋などを計測対象とする際に最適である。

Penetration mode：対象組織の深度が深い場合や広い部分を撮影するときにはこの設定が推奨されている。腱板筋などを計測対象とする際に最適である。



図 14 Elasticity range の設定

Elasticity range は対象組織の硬度の程度をみて上限を設定する (例: 柔らかい組織は上限を低く設定すると色の変化がとらえやすい).

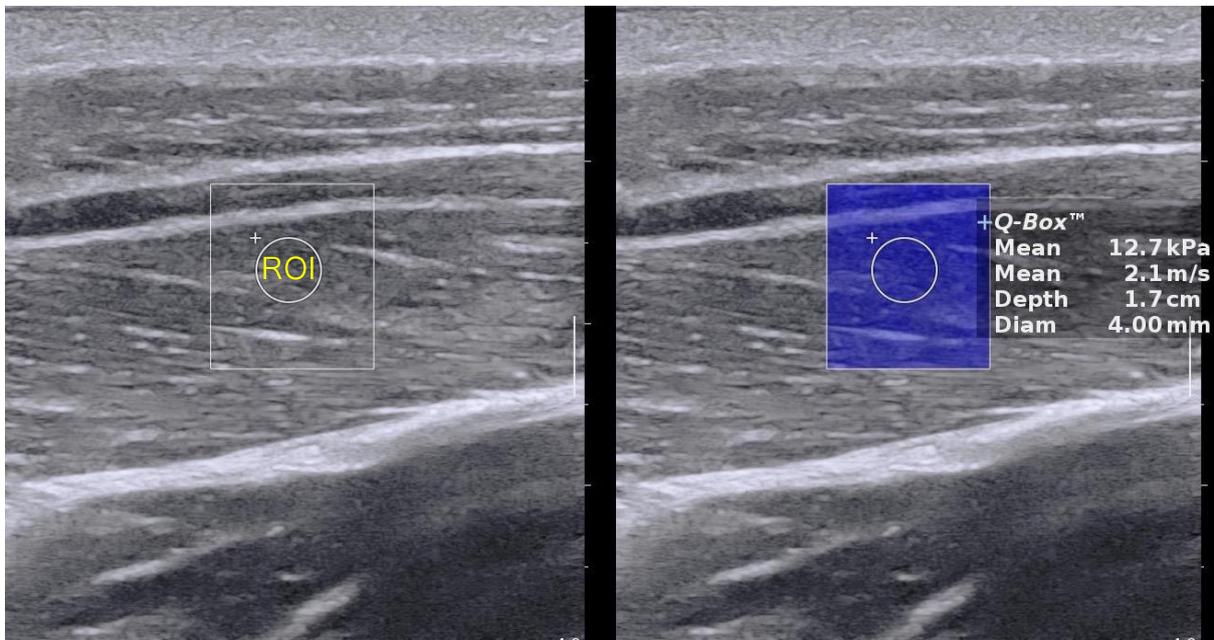


図 15 関心領域 (ROI: region of interest) の設定

円形の ROI: region of interest を対象組織に設定すると ROI 内の硬度の平均値が自動的に算出される (単位は kPa あるいは m/s). ROI の大きさは対象部位の大きさに応じて変更可能. 硬い組織の上下には応力集中が起こるため, 硬すぎる組織 (骨, 筋膜, 筋内腱など) にはアーチファクト (相対的に軟らかく表示されてしまう) が出現することを念頭におく必要がある.

## 【筋骨格系への応用】

超音波エラストグラフィの最大の利点は、腱や筋肉、靭帯などの軟部組織に対して、その力学的特性を非侵襲的に定量化（半定量化）できる点である。また、超音波エラストグラフィは2.5～3.0 cmの深さまでは計測可能であるので、表面筋電図では計測できない深部筋を非侵襲的に評価可能である。SWEでは、最大筋収縮の60%までは筋電図指標と線回帰性が証明されており（11）、筋機能評価の新たなツールとして研究が進められている。棘上筋や棘下筋などの羽状筋が、解剖学的構造の違いから亜区画（筋肉内神経分岐からも分画される）に区分される。著者らは安静時筋硬度と筋収縮時硬度の差から筋収縮機能を推定できるとして、亜区画の機能的違いを研究している。これまでの研究において、棘上筋・棘下筋ともに亜区画ごとに異なる機能を示すことを明らかにしてきた（2,3,6-8）。このことから、従来1つの筋とされてきた棘上筋・棘下筋も亜区画ごとに評価・運動介入をする必要があることが示唆された。臨床においても、骨格筋の病態の1つである脂肪変性の進行と超音波エラストグラフィによる筋硬度が相関関係にあることが証明されており（12）、臨床における筋骨格系の病態の最適な治療法の解明に向けた報告が散見されている。

## 【今後の展望】

超音波エラストグラフィは非侵襲的な評価が可能な点であり、筋骨格系の評価・治療への応用が期待できる。例として、骨格筋亜区画の機能評価、骨格筋の病態（脂肪変性・筋萎縮）の評価および予後予測の手段としての応用が期待できる。

## 【利益相反】

本研究に関連し、開示すべきCOI関係にある企業等はありません。

## 【文 献】

1. Ferraioli G, Barr RG, Farrokh A, Radzina M, Cui XW, Dong Y, et al. How to perform shear wave

- elastography. Part I. *Med Ultrason*. 2022; 24(1):95.
2. Yuri T, Kuwahara Y, Fujii H, Kiyoshige Y. Functions of the subregions of the supraspinatus muscle: Function of the SSP Subregions. *Clin Anat*. 2017; 30(3):347–51.
3. Kuwahara Y, Yuri T, Fujii H, Kiyoshige Y. Functions of the subregions of the infraspinatus during lateral rotation. *Surg Radiol Anat*. 2017; 39(12):1331–6.
4. Wada T, Itoigawa Y, Yoshida K, Kawasaki T, Maruyama Y, Kaneko K. Increased Stiffness of Rotator Cuff Tendons in Frozen Shoulder on Shear Wave Elastography. *J Ultrasound Med*. 2020; 39(1):89–97.
5. Itoigawa Y, Wada T, Kawasaki T, Morikawa D, Maruyama Y, Kaneko K. Supraspinatus Muscle and Tendon Stiffness Changes After Arthroscopic Rotator Cuff Repair: A Shear Wave Elastography Assessment. *J Orthop Res*. 2020; 38(1):219–27.
6. Hoshikawa K, Yuri T, Giambini H, Kiyoshige Y. Shoulder scaption is dependent on the behavior of the different partitions of the infraspinatus muscle. *Surg Radiol Anat*. 2021; 43(5):653–9.
7. Hoshikawa K, Yuri T, Mura N, Giambini H, Kiyoshige Y. Coordination of the Sub-Regions of the Supraspinatus and Deltoid Muscles During Shoulder Scaption: a Shear Wave Elastography Study. *Muscle Ligaments and Tendons J*. 2021; 11(03):569.
8. Yuri T, Trevino JH, Hatta T, Kiyoshige Y, Jacobs PM, Giambini H. Stiffness of the infraspinatus and the teres minor muscles during shoulder external rotation: An in-vitro and in-vivo shear wave elastography study. *Clinical Biomechanics*. 2021; 85:105328.
9. Iida N, Taniguchi K, Watanabe K, Miyamoto H, Taniguchi T, Teramoto A, et al. Effective stretching positions for the posterior shoulder capsule as determined by shear wave elastography. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2021; 30(5):1186–95.
10. Eby SF, Song P, Chen S, Chen Q, Greenleaf JF, An KN. Validation of Shear Wave Elastography in Skeletal Muscle. *J Biomech*. 2013; 46(14):2381–7.
11. Hug F, Tucker K, Gennisson JL, Tanter M, Nordez A. Elastography for Muscle Biomechanics: Toward

- the Estimation of Individual Muscle Force. Exercise and Sport Sciences Reviews. 2015; 43(3):125-33.
12. Yuri T, Mura N, Hoshikawa K, Giambini H, Fujii H, Kiyoshige Y. Influence of fat infiltration, tear size, and post-operative tendon integrity on muscle contractility of repaired supraspinatus muscle. Eur J Orthop Surg Traumatol. 2022; 32(5):837-843.

## 要 旨

超音波エラストグラフィは、超音波を用いて組織の硬度を非侵襲的に計測する技術であり、Strain elastography と Shear wave elastography の 2 つに大別される。それぞれの手法ごとに原理や特徴が異なっており、各々の特徴を十分に理解した上で使用する必要がある。本稿ではこれらの原理を説明するとともに、各手法の特徴について述べる。また、超音波エラストグラフィを用いた骨格筋への応用について計測上のコツとピットフォールを解説する。

**キーワード：**超音波エラストグラフィ, 硬度, 筋骨格