

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04499

研究課題名(和文)連続せん断波によるアキレス腱の弾性計測系

研究課題名(英文)Elasticity measurement system of Achilles tendon by continuous shear wave

研究代表者

山越 芳樹 (Yamakoshi, Yoshiki)

群馬大学・大学院理工学府・特任教授

研究者番号：10174640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年、生体組織の弾性率を視覚的かつ非侵襲的に評価する手法としてせん断波エラストグラフィ(SWE)が考案されたが、SWEでは超音波パルス照射タイミングの制約によりアキレス腱のような伝播速度が速いせん断波を測定することが難しい。本研究ではSWEの課題を解決するために、連続せん断波映像法(C-SWE)による新たな弾性率計測系を構築した。小型加振器を用いて微小振幅の振動を生体表面から与えた時に、生体内部を伝わるせん断波を超音波ドプラ法を基礎とする方法で映像化する。映像法の理論構築、生体模擬ファントムによる評価実験、生体実験により本方法のアキレス腱の弾性計測法としての有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体組織の弾性は有効な診断情報の1つであるが、従来法では測定法の制約からアキレス腱のような非常に硬い生体組織の映像化が難しいという課題があった。本研究では、従来法の測定値に上限があるという課題に対して、測定できる弾性値に原理的に上限がない、連続せん断波映像法と名付けた新たな方法を提案した。この方法はアキレス腱だけでなく、例えば癌組織のような非常に硬い生体組織の映像化や、筋の伸縮、緊張や姿勢の変化により筋の弾性が変化することを指標の1つとするリハビリテーション等での活用も期待できるなど社会的意義が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In recent years, shear wave elastography (SWE) has been devised as a technique for visually and noninvasively evaluating the elastic modulus of living tissue. However, it is difficult to measure a shear wave with a high propagation velocity such as Achilles' tendon due to restrictions on the timing of ultrasonic pulse irradiation. In this study, we constructed a novel elastic modulus measurement system by Continuous Shear Wave Elastography (C-SWE) in order to solve the problem of SWE. Using a small vibration exciter of frequency of around 100Hz, the shear wave is excited in the soft tissue. The shear wave propagating inside the soft tissue is visualized by a method based on the ultrasonic Doppler method. The effectiveness of the proposed method as a method for measuring the elasticity of the Achilles tendon was clarified by both experiments using a phantom simulating a soft tissue, and in vivo experiments.

研究分野：超音波による映像形成

キーワード：せん断波 粘弾性 エラストグラフィ 低周波加振 超音波映像法

1. 研究開始当初の背景

(1) 整形外科、リハビリテーション、痛み治療の分野で骨格筋の硬さを定量的に測定し、それを診断・筋機能回復・痛み改善等において客観的な指標として使いたいという要求が高まっている。生体内部の骨格筋の弾性を画像化・測定するための方法として、すでにいくつかの方法が実用化されたが、定量性、生体への安全性、高価な装置価格など課題が多い。従来の代表的な方法は、せん断波エラストグラフィ (Shear Wave Elastography :SWE) である。この方法は、超音波プローブから比較的強い超音波を生体内に収束させ、収束点付近で発生する音響放射圧により生体内に周波数 1KHz 程度のインパルス的なせん断波を発生させる。このせん断波の生体組織内の伝播を、2つの超音波音線間の伝播時間差からせん断波の伝播速度を測る Time of Flight 法で測定するものであるが、生体組織が硬くせん断波の伝播速度が速いと、この方法では測定が難しいという問題がある。

(2) 整形外科やリハビリテーション分野では腱の弾性を非侵襲的に測定したいという要求がある。腱は外部からの力で受動的に弾性が変化するが、姿勢を変えたときの腱の弾性変化の有無やその大きさから腱の機能の評価ができるという期待があるためである。しかし従来法である SWE では測定できる弾性値に上限があるために弾性の測定が難しく、また並列送受信等の超音波映像法を使い超音波映像のフレームレートを向上させた特殊な超音波診断装置を使う必要があり、フィールドでも簡便に腱の弾性を測定できる廉価な装置の実現が望まれている。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、アキレス腱などの非常に硬い生体組織の弾性の非侵襲計測を目的として、研究代表者が提案した生体組織の硬さの映像法である連続せん断波映像法 (Continuous Shear Wave Elastography : C-SWE 法) を基本的な映像化原理とする弾性の映像、計測システムを実現することが目的である。

(2) C-SWE 法は、生体表面に当てた超小型加振器で周波数 100Hz 前後で、振幅 1 mm 以下の微小な正弦振動を印加したときに、生体組織内部を伝わるせん断波を超音波ドプラ計測を基にした方法で映像化するもので、①加振振幅は非常に小さく生体への安全性が高い、②せん断波の伝播に伴うドプラ周波数変調を映像面の各ピクセルにおいて測定し、これからせん断波の位相分布を求め、位相の空間微分から解析的にせん断波の伝播速度を計測していくので、Time of Flight 法を伝播速度測定に用いる従来法に比べて伝播速度の測定値に原理的に上限がないため、アキレス腱のような非常に硬い生体組織の弾性計測に向く、③超音波映像装置に強力な超音波を送信するハードウェアが不要で、汎用の超音波診断装置でせん断波映像を得ることが出来る。このため、例えばタブレットエコーと呼ばれる小型・可搬型の超音波診断装置にも実装することができ、フィールドでの測定も可能、などの特徴がある。

3. 研究の方法

(1) せん断波映像法であるが、連続せん断波映像法を基礎とするせん断波複素振幅のフレーム間等化処理による映像再生法を考案した。この方法の概要を図 1 に示す。従来の C-SWE 法では、せん断波映像を得るための 3つの条件が必要であった。第一は、せん断波周波数が f_0 で一定で超音波映像装置のパルス繰り返し周波数と特定の間隔があること、第二は、フレームの時間間隔 Δt が一定であること、第三は、

M フレーム
後の位相が
初期フレー
ムの位相と
等しいこと
である。し
かし加振周
波数の選択
肢を広げる
ために任意

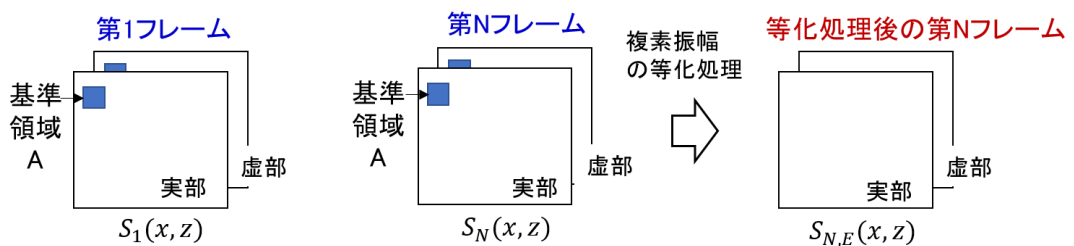
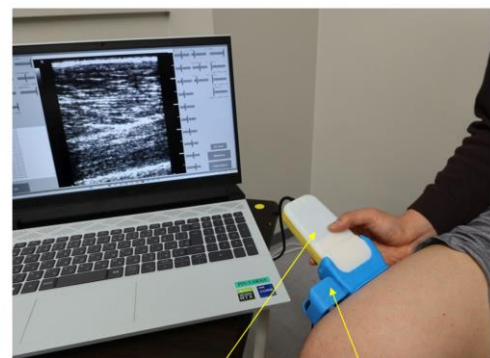


図1 せん断波複素振幅のフレーム間等化処理によるせん断波画像再生

の周波数で加振すると条件1が満たされない、超音波エコーのフレームの開始を外部のタブレット側で制御する簡便なタブレットエコーを連続せん断波映像系に使用しようとすると、条件2が満たされない、実時間に近いフレームレートで、せん断波の映像再生を行おうとすると、条件3が高速化を妨げる制約になる。ここで提案するフレーム間等化処理では、図1に示すように映像領域内に参照領域を設け、その領域内のせん断波複素振幅がフレームに依存せずに常に一定となる等化処理を複素信号処理で行うもので、このような処理を各フレームに対して行くと、すべてのフレームの複素振幅は同一になる。このためフレーム方向の移動平均化処理により、複素振幅に含まれる雑音の影響を低減できるという特徴がある。

(2) 上記のせん断波映像法を小型・可搬型のタブレット (PC) エコーに実装して計測・映像化システムを構築した。図2に写真を示す。この装置では、超音波ドプラ信号検出として、非球面ビームフォーミングによる高分解能化、せん断波映像に最適化した直交検波によるドプラ信号の精度向上を図った。一方、せん断波映像再生に関して、複素振幅等化処理によるロバストな映像再生、Wide Mode (Bモードと同じROI幅) 映像の導入による使いやすさの向上、せん断波映像再生レート：最高2画像/秒による高速映像化、スクリーンスコアによるせん断波の質の評価、速度像、せん断波伝播像の再生 (せん断波の伝播を動画像で可視化)、さらにファントム実験による評価でSWEの測定値との差：2%以下という結果を得た。



タブレットエコー(PC)ベースせん断波エラストグラフィ用超音波プローブ (バッテリー駆動可) 超音波プローブ一体型小型加振器

図2 構築したタブレット (PC) エコーベースのせん断波エラストグラフィ

4. 研究成果

(1) ここで考案した映像法を汎用の超音波診断装置から得た超音波ドプラ信号に適用してアキレス腱のせん断波映像を得た例を図3に示す。上図がカラーフロー画像であり、下3図がせん断波映像例である。アキレス腱部において特徴あるせん断波伝播が映像化されていることが分かる。

(2) 図4に今回構築したタブレット(PC)ベースのせん断波エラストグラフィで得たアキレス腱のせん断波映像を従来法(SWE)の映像例と併せて示す。提案法では従来法に比べて伝播速度が高い部分としてアキレス腱が明瞭に映像化できており、伝播速度の測定値(平均値)も10m/s以上であり、硬いアキレス腱のせん断波伝播速度による弾性計測が可能であることが分かる。

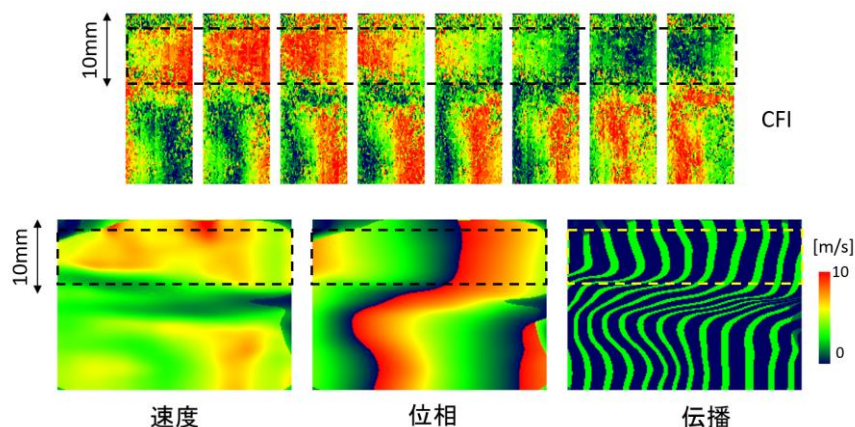


図3 構築したせん断波映像法を汎用の超音波診断装置から得た超音波ドプラ信号処理に適用して再生したせん断波映像例

(3) 本研究では、非常に硬く弾性値が高いアキレス腱等の生体組織の弾性を非侵襲的にせん断波の伝播速度から計測・映像化する連続せん断波映像法を提案した。この方法による映像装置を実現し、アキレス腱の映像を得たが、従来法では映像化が難

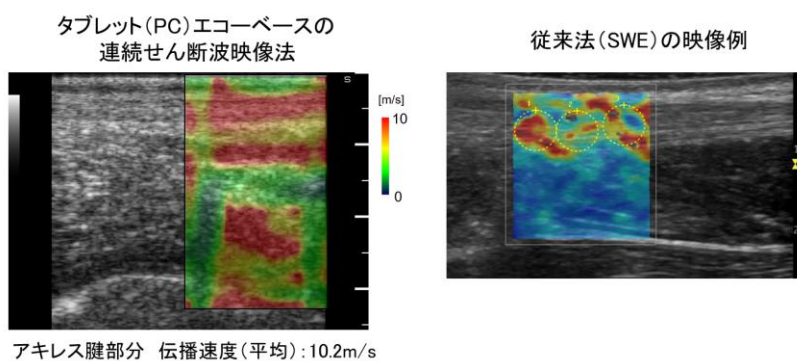


図4 タブレット(PC)エコーベースのせん断波映像再生系で得たアキレス腱のせん断波映像

しいアキレス腱のせん断波映像を得ることができた。この方法は、アキレス腱を対象として構築したが、これ以外にも非常に硬い生体組織である例えば、がん組織などにも適用できることが考えられ、今後ここで得た成果をもとに他の生体組織への適用を検討していきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kodesho, T, Taniguchi, K, Kato, T, Mizoguchi, S, Yamakoshi, Y, Watanabe, K, Fujimiya, M, Katayose, M	4. 巻 48
2. 論文標題 Relationship between shear elastic modulus and passive force of the human rectus femoris at multiple sites: a Thiel soft-embalmed cadaver study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JOURNAL OF MEDICAL ULTRASONICS	6. 最初と最後の頁 115-121
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10396-020-01076-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tsuchida Wakako, Yamakoshi Yoshiki, Matsuo Shingo, Asakawa Mayu, Sugahara Keita, Fukaya Taizan, Yamanaka Eiji, Asai Yuji, Nitta Naotaka, Ooie Toshihiko, Suzuki Shigeyuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Application of the novel estimation method by shear wave elastography using vibrator to human skeletal muscle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 22248
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-79215-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kodesho Taiki, Taniguchi Keigo, Kato Takuya, Mizoguchi Shougo, Yamakoshi Yoshiki, Watanabe Kota, Fujimiya Mineko, Katayose Masaki	4. 巻 48
2. 論文標題 Relationship between shear elastic modulus and passive force of the human rectus femoris at multiple sites: a Thiel soft-embalmed cadaver study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Medical Ultrasonics	6. 最初と最後の頁 115-121
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10396-020-01076-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 山越芳樹	4. 巻 3-4
2. 論文標題 タブレットエコーによる連続せん断波映像システム	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 超音波テクノ	6. 最初と最後の頁 76-79
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 青山春斗, 江田 廉, 山越芳樹
2. 発表標題 C-SWE 法を用いた線維組織のせん断波異方性計測
3. 学会等名 日本超音波医学会第94回学術集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山越芳樹, 安藤秀一, 川田和奏, 後藤英之
2. 発表標題 位相増幅せん断波エラストグラフィによる筋膜の高分解能映像化
3. 学会等名 日本超音波医学会第94回学術集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山越芳樹, 後藤英之, 谷川俊一郎, 神山直久
2. 発表標題 連続せん断波エラストグラフィ (C-SWE) による運動器の評価
3. 学会等名 日本超音波医学会第94回学術集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山越芳樹
2. 発表標題 連続せん断波エラストグラフィによる生体組織中を伝播するせん断波の可視化
3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安藤秀一, 伊藤拓海, 池永久典, 設楽仁, 筑田博隆, 山越芳樹
2. 発表標題 連続せん断波映像法の分解能向上のための領域分割フィルタ
3. 学会等名 日本超音波医学会第93回学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺内紳悟, 阿部竣輔, 半田晃輝, 山越芳樹
2. 発表標題 タブレットエコーを用いた連続せん断波映像システム
3. 学会等名 日本超音波医学会第93回学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小久保大輔, 堀口悠希, 山越芳樹
2. 発表標題 骨格筋をモデルとした体表加振で励起されるせん断波の伝播解析
3. 学会等名 日本超音波医学会第93回学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川智也, 太田聖人, 山越芳樹
2. 発表標題 連続せん断波映像法によるエコーガイド下刺鍼の3次元位置可視化
3. 学会等名 日本超音波医学会第93回学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池永久典, 伊藤拓海, 安藤秀一, 設楽仁, 筑田博隆, 山越芳樹
2. 発表標題 領域分割フィルタリングによる高分解能連続せん断波映像法の評価
3. 学会等名 日本超音波医学会第93回学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中愛理, 伊賀賢一, 白沢有理沙, 山越芳樹
2. 発表標題 連続せん断波映像法におけるせん断波伝播図の活用
3. 学会等名 日本超音波医学会第93回学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白沢有理沙, 伊賀賢一, 田中愛理, 山越芳樹
2. 発表標題 連続せん断波映像法の誤差要因と精度向上
3. 学会等名 日本超音波医学会第93回学術集会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 生体硬さの測定用処理プログラム	発明者 山越芳樹	権利者 国立大学法人群馬大学、フィンガルリンク株式
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-039767	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 生体硬さの測定用デバイス	発明者 山越芳樹	権利者 国立大学法人群馬大学、フィンガルリンク株式
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-039768	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 生体硬さの測定用デバイス	発明者 山越芳樹	権利者 国立大学法人群馬大学、フィンガルリンク株式
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-039766	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 体組織硬さの表示装置、表示方法	発明者 山越芳樹	権利者 群馬大学、フィンガルリンク株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-184496	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------