

半膜様筋遠位部筋硬度測定の新頼性検討 —Real-time Tissue Elastography を用いての測定—

源 裕介^{1,2}, 兎澤良輔³, 中嶋康之^{2,4,5}, 本間千裕²,
千葉 愉^{4,7}, 都丸洋平⁶, 佐粧孝久⁷

¹健康科学大学 健康科学部 リハビリテーション学科

²千葉こどもとおとなの整形外科 リハビリテーション科

³SBC 東京医療大学 健康科学部 理学療法学科

⁴植草学園大学 保健医療学部 リハビリテーション学科

⁵順天堂大学大学院 スポーツ健康科学研究科

⁶千葉こどもとおとなの整形外科 整形外科

⁷千葉大学予防医学センター

Reliability of Distal Semimembranosus Muscle Hardness Measurement

— Measurement Using Real-time Tissue Elastography —

MINAMOTO Yusuke^{1,2}, TOZAWA Ryosuke³, NAKASHIMA Kouyuki^{2,4,5},

HONMA Chihiro², CHIBA Satoshi^{4,7}, TOMARU Yohei⁶, SASHO Takahisa⁷

要 旨

【目的】半膜様筋は、変形性膝関節症の症状や内側半月板逸脱の要因であり、その硬さを評価することは臨床上重要である。半膜様筋の硬さを評価するには超音波画像診断装置のエラストグラフィー機能を用いる。その内の手法の1つに Real-time tissue elastography 法がある。これを用いた半膜様筋の筋硬度測定における新頼性の報告はまだ存在しないため、今回はその検者内新頼性の検討を行った。

【方法】測定は腹臥位で膝関節から 3 cm 上で半膜様筋の短軸像を描出し、音響カプラを使用して筋硬度の測定を実施した。

【結果】結果は、ICC (1,3) が0.92で新頼性が高いという結果になったが、偶然誤差やや大きい結果となった。

【結論】許容範囲内の誤差とも考えられるが、方法を修正してより精度の向上を図る必要があると考えられた。

キーワード：半膜様筋, 筋硬度, RTE, 新頼性

I. はじめに

半膜様筋 (Semimembranosus : 以下 SM) は、腓靭帯が関節包の一部となり、遠位の腓停止部は6つにも及ぶ¹⁾。この特徴から膝関節後内側の安定性に関与すると言われている²⁾。そのため、SMの機能不全は膝関節後内側の不安定性に繋がり、変形性膝関節症における疼痛の要因ともなっている^{3,4)}。また、SMの機能不全は内側半月板の逸脱 (Medial meniscus extrusion : 以下 MME) の要因の1つともなっており、MMEの増大は変形性膝関節症の発症リスクを高める⁵⁾と報告されている。実際にSM腓のストレッチングを行うと膝関節伸展制限の改善に加えMME減少にも繋がったと報告されており⁶⁾、SMの硬さを評価することは、MME及び変形性膝関節症の進行を抑制する上で重要な評価項目の1つと考えられる。

筋の硬さの定義としては2種類あり、組織の曲がりやすさや柔軟さを示す「Stiffness」と組織そのものの硬さを表す「Hardness」がある。Murrayら⁷⁾は、筋のHardnessは筋の伸張距離と比例していると報告しているため、以降本論文で表現する「硬さ」は「Hardness」として扱う。

実際にSMの硬さを計測するには、超音波画像診断装置 (以下エコー) のエラストグラフィの機能を用いる必要がある。エコーを用いて筋を横断面上 (短軸) で描出し、その状態でエラストグラフィを測定することは筋の硬さ (Hardness) を評価することとなる⁸⁾。この方法には2つの方法があり、1つはShear wave elastography法 (以下SWE法) と、もう一つはReal-time tissue elastography法 (以下RTE法) である。SWE法は音響放射力インパルスによって組織に振動を与え、発生した剪断波の伝搬速度分布を用いて組織弾性を算出する方法である⁹⁾。RTE法は手で組織に加圧をして、生じる歪み分布を用いて組織弾性を算出する方法である¹⁰⁾。近年はSWE法を用いたSMの硬度の計測に関して信頼性が高いことが報告されている^{11,12)}。しかしRTE法における信頼性の報告は無い。

SWE法が計測可能なエコーは高価で一般施設では導入が難しいが、RTE法が計測可能なエコー

はSWE法で用いる機種より安価で比較的導入しやすいという利点がある。そのためSWE法のみならずRTE法を含めて信頼性が確保されていれば、臨床場面において評価の多様性が広まると考えられる。

そこで、今回の報告の目的はSMに対してRTE法を用いた筋硬度計測を実施し、その測定方法の信頼性を検討することを目的とした。

II. 対象と方法

対象は平均31 (6.05) 歳の膝関節に外傷歴のない健康者10名20肢とした。本研究は千葉こどもとおとなの整形外科倫理委員会の承認 (承認番号: 2022-001) を得て実施した。使用機器は超音波画像診断装置 SNI BLE2 (コニカミノルタ社製) を使用し、プローブは18MHzのリニアプローブを使用した。またRTE法において硬さの指標となる Strain ratio¹²⁾ (以下SR値) を計測するために音響カプラ (SONIMAGE HS1 Acoustic Standoff・コニカミノルタ社製) を使用した。

SMのSR値の測定部位はエコーにて膝関節内側裂隙を確認し、そこからモニター上から確認した3cm上の位置で、SMに対して短軸になるようプローブを当てた (図1)。測定肢位は腹臥位で膝関節伸展位とした。

測定の際に描出されるエコー画像を示す。最も表層に描出され部分が音響カプラ (図2-①) で、

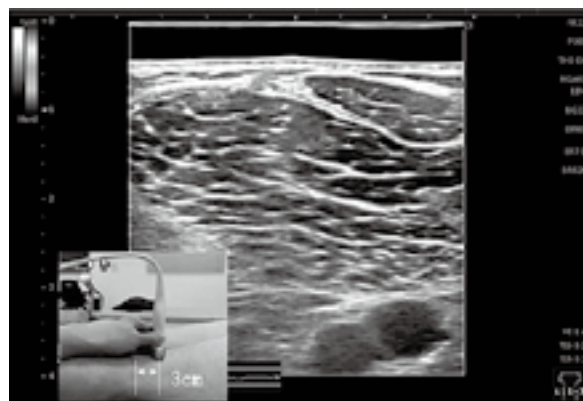


図1 Real time tissue elastography 測定の部位 (半膜様筋: SM)
プローブに音響カプラを装着し、膝関節裂隙から3cm上で、SMの短軸像を撮像する。

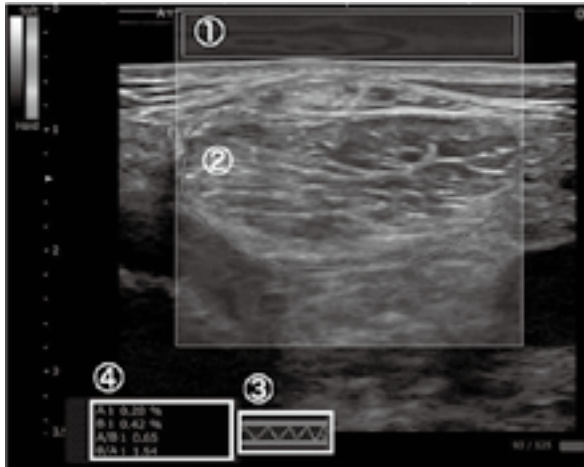


図2 Real time tissue elastography 測定におけるエコー画面

- ①音響カプラ(ゲルパッド): 関心領域 A (A1)
- ②半膜様筋: 関心領域 B (B1)
- ③圧力の指標(上下太線内の幅で波線が発生していればプローブの圧力が最適)
- ④ A1: 音響カプラの歪み値 B1: 半膜様筋の歪み値
A/B: Strain ratio 値(硬度を示す値)

関心領域(以下 ROI) の A と設定した。その深層に SM が存在し、ROI の B と設定した(図 2-②)。プローブを組織に押し当てて、一定の圧力で歪ませた際(図 2-③)に音響カプラの歪み値(A1)と SM の歪み値(B1)が算出されるが、この A1 を B1 で除した値(A/B)が SR 値となる(図 2-④)。SR 値は高値であるほど硬い組織を表す。

検者は臨床経験16年でエコー使用経験5年の理学療法士1名が実施した。本測定にあたり、この測定の練習を1ヶ月間で週1回、1日1時間ほど行った。測定は同一の検者が対象者1名に対して3回連続で、1回ごとの測定の間は休憩時間を挟まずに実施した。

統計処理は、まず1～3回目の測定値(SR 値)の平均値を算出し、反復測定の差の検定を実施した。データの正規性と球面性の確認は Shapiro-Wilk の検定および Mendoza の他標本球面性検定を実施した。また今回の目的である RTE 法の信頼性の検討については、同一検者が3回連続で測定を実施する検者内信頼性を級内相関係数(Intra-class correlation coefficients: 以下 ICC)を用いて算出した。ICC は ICC (1,1) と ICC (1,3) をそれぞれ算出した。またスピアマンブラウンの公式

を用いて実際に何回の計測が必要であるかを算出した($p \geq 0.9$)。誤差の検討では Bland-Altman 分析を実施した。データは1回目の値を練習値として、2～3回目の値から系統誤差の有無を検討した。また、測定誤差の確認のために最小可検変化量の95%信頼区間(95% confidence intervals of minimal detectable change: MDC_{95})を、標準誤差を用いた計算式で算出した。統計処理は全て R4.1.3 を使用し、有意水準は5%とした。

Ⅲ. 結果

SR 値の1～3回目の平均値(標準偏差)は1.12 (0.27), 1.16 (0.34), 1.13 (0.41)であった。データは Shapiro-Wilk の検定(全ての変数 ≥ 0.05)と Mendoza の他標本球面性検定($p \geq 0.05$)の結果より正規分布と球面性が確認された。反復測定の分散分析の結果、それぞれの平均値に有意差は見られなかった($p=0.71$)。検者内信頼性の結果は、ICC (1,1) が0.81, ICC (1,3) が0.92であった。スピアマンブラウンの公式の結果では、3回の測定が必要という結果であった。Bland-Altman 分析の結果(図3)では、平均値の差が0.03で、許容限界の範囲は-0.22～0.28(図4)であった。また固定誤差は $p=0.56$ 、比例誤差は $p=0.15$ となり系統誤差は認められなかった。また測定誤差確認のための MDC_{95} は0.43であった。

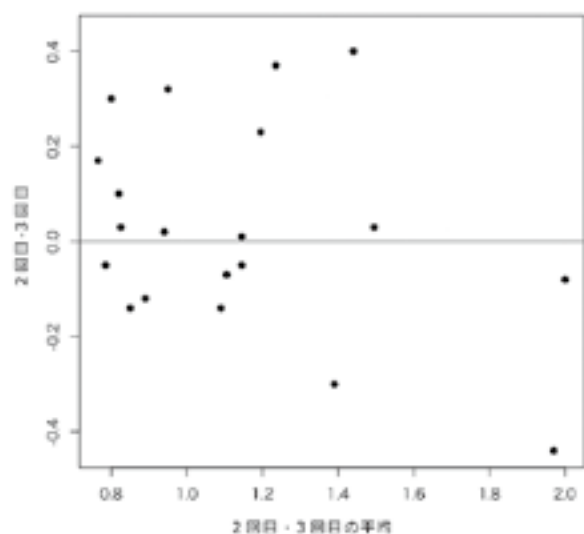


図3 Bland-Altman プロット

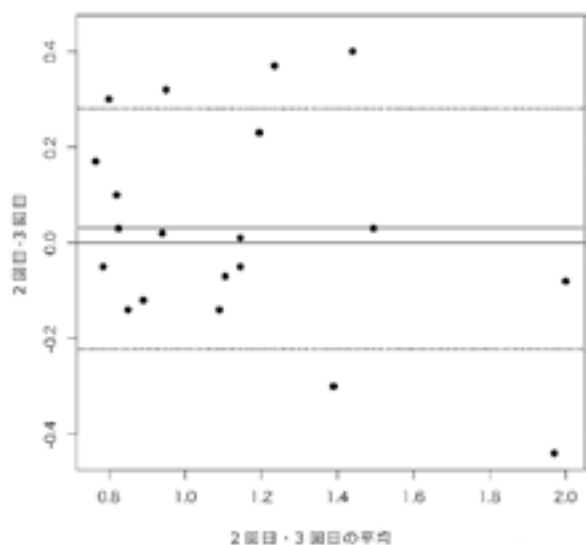


図4 許容限界 (Limit of agreement) の推定
 灰色線=0.0 黒線=平均値
 黒点線=誤差範囲 (上：上限 下：下限)

IV. 考察

まず今回算出されたSR値の反復測定分散分析では、1～3回目までの平均値に差は認められず、3回測定しても大きな変動がないことが分かった。

また、ICC (1,3) が0.92と検者内信頼性は高いという結果であった。Liら¹⁰⁾はSMの筋硬度をSWE法で測定し、ICC (1,3) が0.97であったと報告している。RTEに関する過去の報告では、今回とは異なる部位ではあるが棘下筋・小円筋のRTE法の信頼性はICC (1,3) が0.89～0.98という結果であった¹³⁾。また腓腹筋のRTE法の信頼性を検討した報告ではICC (1,3) が0.90～0.94であった¹⁴⁾。これらの報告を踏まえると、SWE法や他部位の測定と比較しても信頼性は同等と考えられた。

今回のBland-Altman分析の結果では、系統誤差は認められなかった。しかしMDC₉₅の算出では0.43という結果で測定誤差が確認され、この数値は1回目から3回目のSR値の平均値の37～39%であった。清水らの報告¹³⁾では棘下筋・小円筋のRTE法におけるMDC₉₅は0.09～0.23で平均値の13～31%であった。このことから、やや誤差は大きい信頼性は高いため許容範囲内の誤差と考えられる。

誤差の要因としては考えられることは、今回の測定方法は膝関節の1つの条件の角度でしか計測していなかったことが挙げられる。角度を複数条件下で実施していれば、よりMDCが低くなる可能性があるため、今後の検討課題になると考えられる。また測定条件も室温や湿度、ベッドの条件なども統一されていなかったため、これらも統一する必要があると考えられる。また、本研究では検者間信頼性の検討をしていないため、今後追加して検証し、さらに信頼性の精度を高めていく必要がある。

V. 結論

今回、RTE法によるSMの硬度測定の信頼性を検討した。その結果、今回の測定方法はSWEによる測定方法と同等の信頼性が得られる可能性が考えられた。そのため、今回の計測方法をSMの筋硬度測定に用いることは有用であると示唆された。しかしながら最小可検誤差がやや大きいため、さらに精度を高めるためには方法の再考が必要であると考えられた。

VI. 謝辞

本研究の実施においてご協力いただいた被験者の皆様に感謝申し上げます。また、本論文の作成にあたりご助言を賜りました千葉大学予防医学センターの佐粧孝久教授に感謝申し上げます。

VII. 文献

- 1) De Maeseneer M, Shahabpour M, Lenchik L, et al.: Distal insertions of the semimembranosus tendon: MR imaging with anatomic correlation. *Skeletal Radiol.* 43 : 781-791, 2014.
- 2) Tsutsumi M, Nimura A, Tharnmanularp S, et al.: Postero-medial capsular anatomy of the tibia for consideration of the medial meniscal support structure using a multidimensional analysis. *Sci Rep.* 13(1) : 12030, 2023.
- 3) 工藤慎太郎, 北野雅之, 相良繭子: 変形性膝関節症の評価—超音波検査を中心に—. *PTジャーナル*, 52 : 301-308, 2018.
- 4) 福田奨悟, 八木茂典, 早川雅代, 他: 変形性膝関節症において半膜様筋に圧痛を認める症例は脛骨外側偏位している. *整形リハ会誌*, 20 : 94-97, 2018.
- 5) Bini RR, Dagnese F, Rocha E, et al.: Three-dimensional ki-

- nematics of competitive and recreational cyclists across different workloads during cycling. *Eur J Sport Sci.* 16(5) : 553-559, 2016.
- 6) Yoshizuka H, Taniguchi T, Fukuta K, et al.: Decrease in medial meniscal extrusion after physical therapy to improve knee pain and range of motion in patients with knee osteoarthritis: A retrospective study. *PLoS One.* 17(11), 2022.
 - 7) Murayama M, Watanabe K, Kato R, et al.: Association of muscle hardness with muscle tension dynamics: a physiological property. *Eur J Appl Physiol.* 112(1) : 105-112, 2012.
 - 8) 宮本直和：アスリートの骨格筋ステイフネス. *Isotope News.* 769(6) : 21-24, 2020.
 - 9) 山川誠：超音波エラストグラフィの原理. *バイオメカニズム学会誌*, 40(2) : 73-78, 2016.
 - 10) Li F, Wang ZY, Zhang ZJ, et al.: In hamstring muscles of patients with knee osteoarthritis an increased ultrasound shear modulus indicates a permanently elevated muscle tonus. *Front Physiol.* 25(12) : 752455, 2022.
 - 11) Kawama R, Yanase K, Hojo T, Wakahara T.: Acute changes in passive stiffness of the individual hamstring muscles induced by resistance exercise: effects of contraction mode and range of motion. *Eur J Appl Physiol.* 122(9) : 2071-2083, 2022.
 - 12) 藤原洋子：エラストグラフィ用音響カブラーの開発. *Medix.* 55: 40-44, 2011.
 - 13) 清水康史, 渡邊奈津希, 米田貢, 他：Real-time tissue elastographyを用いた異なる水平内転角度における棘下筋・小円筋の筋硬度評価. *形態・機能*, 19(2) : 41-49, 2021.
 - 14) 廣野準一, 向井直樹, 高柳尚司, 他：一過性運動が腓腹筋およびアキレス腱の硬度に及ぼす影響—超音波 Real-time Tissue Elastography を用いた検討—. *体力科学*, 62(3) : 199-205, 2013.

Abstract

【Objective】 The semimembranosus muscle is a factor in osteoarthritis symptoms and medial meniscus deviation; therefore, assessing its hardness is clinically important. To evaluate semimembranosus muscle hardness, the elastography function of an ultrasound imaging system is used; particularly, real-time tissue elastography. Since there have been no reports on its reliability for measuring semimembranosus muscle hardness, the present study investigated its intra-assessor reliability.

【Method】 Measurements were obtained in the supine position with a short-axis image of the semimembranosus muscle 3 cm above the knee joint, and muscle hardness was measured using an acoustic coupler.

【Result】 The results showed that the ICC (1,3) was 0.92, which is highly reliable, but the chance error was slightly high.

【Conclusion】 Although the error could be considered within the acceptable range, it was necessary to modify the method to improve its accuracy.

Key words : Semimembranosus muscle, Muscle hardness, RTE, Reliability