

# 拡散型圧力波の関節可動域

## 改善効果に関する研究

### —第1報：超音波エコーを用いた評価—

Study of the improvement effect on the joint range of motion of the radial pressure wave — 1st report: evaluation using ultrasound echo —

小林佑介\*<sup>1</sup>, 佐竹勇人\*<sup>1</sup>, 杉岡辰哉\*<sup>1</sup>, 井上純爾\*<sup>2</sup>  
澳 昂佑\*<sup>3</sup>, 河口泰之\*<sup>1</sup>, 熊井 司\*<sup>4</sup>

キー・ワード：Radial pressure wave, joint range of motion, gliding property between tissues  
拡散型圧力波, 関節可動域, 組織間滑走性

〔要旨〕 本研究は、健常成人20名20脚を対象に、拡散型圧力波（以下RPW：Radial pressure wave）の関節可動域に与える効果を組織間滑走性に着目し検討した。結果、足関節背屈可動域の増加、筋形態（羽状角の増加、筋束長の延長）の有意な変化および筋膜周囲での筋硬度低下を認めた。羽状角増加、筋束長延長の筋形態変化と筋膜周囲での筋硬度低下は、筋膜周囲での組織間滑走性の向上を示す。筋膜周囲での組織間滑走性は、関節可動域に影響を与えるとされており、RPWによる組織間滑走性の向上は、関節可動域増加に貢献した可能性が考えられる。RPWによる筋膜周囲の組織間滑走性向上が関節可動域増加へ貢献している可能性が示唆された。

#### はじめに

拡散型圧力波（以下RPW：Radial pressure wave）は、除痛作用や組織修復作用があり難治性足底腱膜症やアキレス腱症などの慢性腱炎に対して、除痛や組織修復を目的に使用される<sup>1,2)</sup>。また、肉離れや痙縮などの筋肉系の異常に対しても使用されるなど、RPWの適応疾患は多岐にわたり、その効果を示す報告が多くある<sup>3,4)</sup>。そのような中で近年では、関節可動域に対するRPWの介入効果を示す報告が徐々に増加してきており、関節可動域制限に対する有効な手段として注目されつつある<sup>5,6)</sup>。その一方で、RPWの関節可動域増加効果に関する作用機序は明らかとなっておらず、適応と

なる疾患や病態などの明確化には至っていない。

我々は、臨床で創部の癒着による著明な関節可動域制限を呈した症例に対し、RPWの照射を行い関節可動域が大きく改善する事を経験した。同症例に対して、関節可動時の組織動態を超音波画像診断装置にて観察を行ったところ、創部の癒着が改善し組織間の滑走性向上が確認できた。McCombeらやPavanらは、組織間の滑走性が関節可動域に影響し滑走性の減少により関節可動域は減少すると報告している<sup>7,8)</sup>。つまり、RPWの関節可動域増加効果の要因として、組織間の滑走性に作用している可能性が考えられる。そこで本研究の目的は、健常人を対象にRPWの関節可動域に与える効果を組織間の滑走性に着目し明らかにすることとした。

#### 対象および方法

対象は健常成人20名20脚とし、被検者には本研究の主旨を説明し同意を得て実施した。年齢、

\*1 阪奈中央病院スポーツ関節鏡センター

\*2 日本自転車競技連盟選手強化医科学部会

\*3 川崎医療福祉大学リハビリテーション学部理学療法学科

\*4 早稲田大学スポーツ科学学術院

身長, 体重の平均値および標準偏差は, 年齢 28.7 ± 5.4 歳, 身長 167.9 ± 8.9cm, 体重 62.0 ± 9.1Kg であった. 介入は, RPW (MASTERPULS MP100 およびインテレクト RPE モバイル) を使用し, 腓腹筋を対象に STEP1, STEP2 の手順で週 2 回, 3 週間の計 6 回照射を行った. 各 STEP における機器設定と照射部位の詳細は, STEP1 では R15 のトランスミッターを使用し, 強度 1.5bar, 頻度 10 Hz, 照射数 2000 発で腓腹筋内側頭の伸張痛部位を中心に小さく円を描くようにゆっくりとハンドピースの先端を動かしつつ照射を実施した. STEP2 では, D20s のトランスミッターを使用し, 強度, 頻度, 照射数は STEP1 と同様に設定しゆっくりとハンドピースを動かしつつ腓腹筋の筋腹全体へ照射を実施した. 測定項目は, 足関節背屈角度, 筋形態および筋硬度とし, RPW の介入前と 3 週間の介入終了後に測定を実施した. 測定方法は, 足関節背屈角度は Bennell らの方法を参考に, 脛骨粗面より 15cm 下の脛骨中央に測定器を当て, 垂直に対する下腿傾斜角の測定を行った<sup>9)</sup>. 測定肢位は, 両手を壁につき測定肢を前方へ出し踵部と母趾が一直線上に並ぶように足部を位置させ, 踵部が床面に接地した状態を維持しつつ下腿を前傾させる膝関節屈曲位での荷重位足関節最大背屈と測定肢を後方へ出し足部の条件は膝関節屈曲での測定と同様に設定した膝関節伸展位での荷重位足関節最大背屈とした. 筋形態は, 腓腹筋内側頭を対象に超音波画像診断装置 (Canon Aplio 300) を用い, 10MHz のプローブを使用し B モードにて筋腹中央の長軸像を描出した後, ImageJ を使用し測定を行った. なお筋形態の算出方法は Ando らの報告を参考にし, 羽状角は深層腱膜と筋束でなす角とし, 筋束長は目視可能な筋束の実測値と目視不可能な範囲を計算にて算出した予測値の和とした<sup>10)</sup>. 筋硬度は, 10MHz のプローブを使用し筋腹中央の長軸像を描出した後, Shear Wave Elastography にて筋膜下および筋腹中央で測定を行った. 測定肢位は, 筋形態, 筋硬度ともに腹臥位での他動背屈 10° とし, 測定中の筋活動がないことを表面筋電図にてモニタリングを行った. 測定結果は, 足関節背屈角度は 3 回測定を実施しその平均値を測定値とした. 筋形態は, 筋腹中央にて 3 回測定を行い, 一つの画像につき異なる 3 カ所で羽状角, 筋束長を計測した計 9 データの平均値を測定値とした. 筋硬度は, 筋形態と同様に 3

回測定を実施し, 1 つの画像につき筋膜下の異なる 3 点, 筋腹中央の異なる 3 点を計測した計 18 データの平均値と筋膜下のエリアのみを計測した計 9 データの平均値, 筋腹中央のエリアのみを計測した計 9 データの平均値を測定値とした. 統計学的解析法は, シャピローウィルクの検定にて正規性の検定を行った後, 正規性のある場合は対応のある t 検定, 正規性のない場合はウィルコクソンの符号付順位検定を実施し, RPW 介入前後での各測定値の比較を行った. 統計処理ソフトは R 3.4.4 を使用し, 有意水準は 5% 未満とした.

## 結 果

足関節背屈角度の平均値および標準誤差は, 膝関節屈曲位で介入前 49.8 ± 1.2°, 介入後 50.4 ± 1.4° と有意差を認めなかったが, 膝関節伸展位で介入前 43.1 ± 1.3°, 介入後 45.7 ± 1.5° と有意に増加した (P=0.02) (図 1). 羽状角の平均値および標準誤差は, 介入前 17.9 ± 0.5°, 介入後 18.9 ± 0.6° と有意に増加した (P=0.008). 筋束長の平均値および標準誤差は, 介入前 6.9 ± 0.2cm, 介入後 6.6 ± 0.2cm と有意に短縮した (P=0.0005) (図 2). 筋硬度の平均値および標準誤差は, エリア全体では介入前 4.7 ± 0.2m/s, 介入後 4.4 ± 0.1m/s, 筋膜下のエリアでは介入前 5.2 ± 0.2m/s, 介入後 4.7 ± 0.1m/s, 筋腹中央のエリアでは介入前 4.1 ± 0.1m/s, 介入後 4.0 ± 0.1m/s であり, 筋膜下のエリアでのみ有意に低下した (P=0.018) (図 3, 4).

## 考 察

本研究の目的は, 健常人を対象に RPW が関節可動域に与える効果を組織間滑走性に着目し明らかにすることとした. 関節可動域に対する体外衝撃波の効果に関して, Kim らはハムストリングスに対する週 3 回, 3 週間の照射により体幹の前傾可動域が増加したと報告している<sup>5)</sup>. 本研究においても筋実質部への照射を同程度の介入頻度, 期間で実施した結果, 関節可動域の増加効果を確認することができた. しかし, 膝関節の肢位の違いにより関節可動域の増加効果に差を認めた (図 1). 膝関節の肢位による効果の差について, 本研究において対象とした腓腹筋は, 2 関節筋のため膝関節屈曲位での足関節背屈では影響が少ないと報告されており<sup>11)</sup>, RPW 照射後に得られる関節可動域の増加効果が膝関節屈曲位では乏しかったと考え

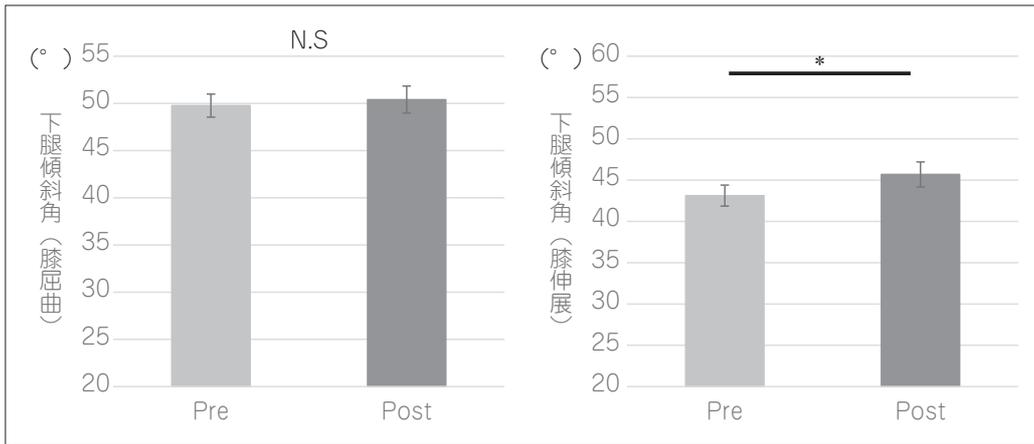


図1 足関節背屈角度

膝関節伸展位では有意差を認めなかったが、膝関節屈曲位にて有意に背屈角度が増加した。

\* :  $p < 0.05$

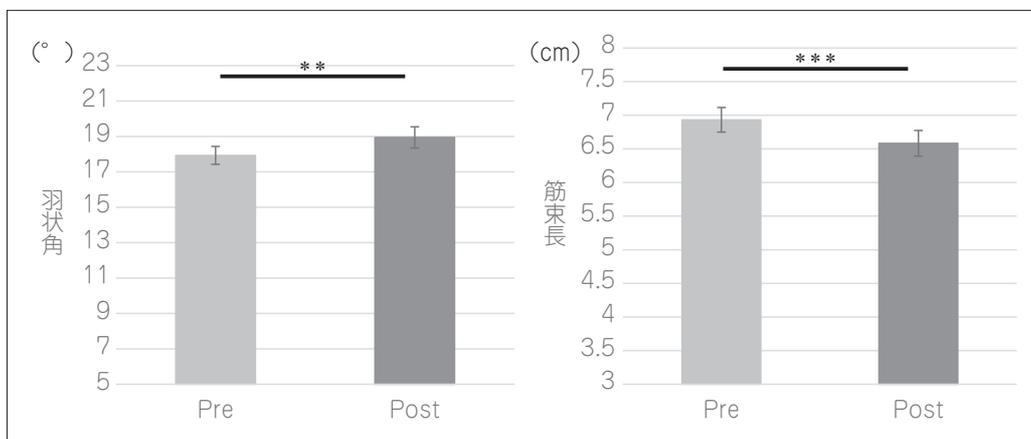


図2 筋形態評価

羽状角は有意に拡大し、筋束長は有意に短縮した。

\*\* :  $p < 0.01$ , \*\*\* :  $p < 0.001$

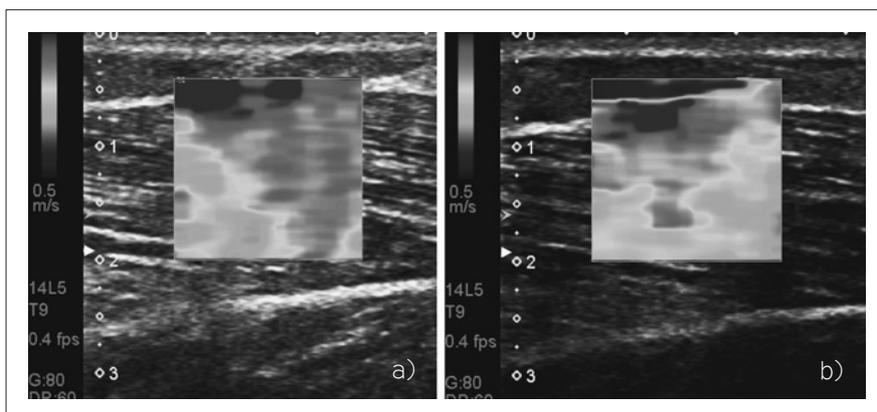


図3 Shear wave elastography による筋硬度評価

図は測定範囲の筋硬度を色付けし表している。機器により異なるが、青が柔らかいこと赤が硬いことを示す。(モノクロでは硬い方が濃く柔らかい方が薄く示される)。評価時は、計測部位の筋硬度が0.5m/sから10.0m/sの範囲で示され、速度が速くなるほど筋が硬い事を示す。

a) 介入前 b) 介入後

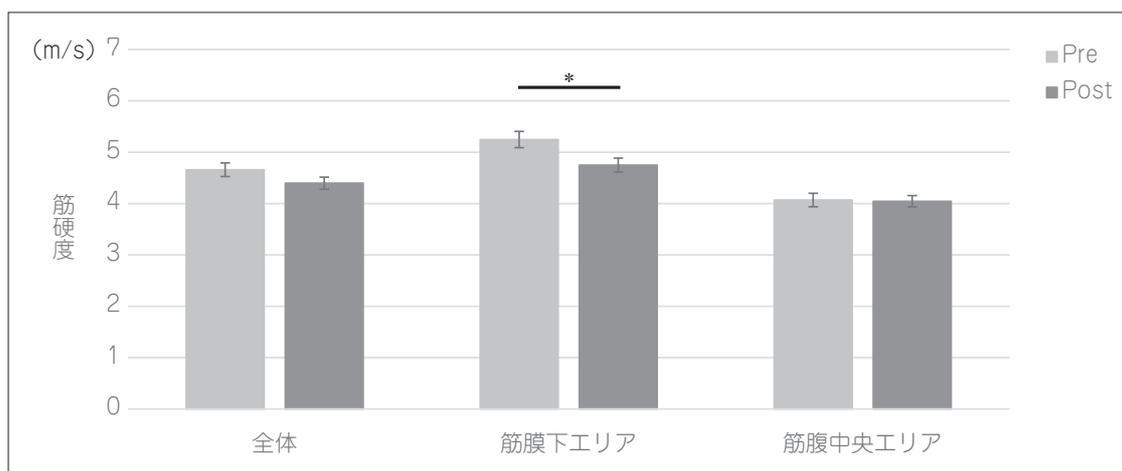


図4 筋硬度

エリア全体および筋腹中央エリアでは有意差を認めなかったが、筋膜下エリアでは優位に筋硬度が減少した。

\* :  $p < 0.05$

られる。以上より、本研究における RPW 介入による関節可動域の増加効果は問題なく得る事ができていたと考えられる。

筋形態に関する本研究の結果は、RPW の照射後に羽状角の増加と筋束長の短縮を認めた (図 2)。まず、筋形態に影響する因子として筋の伸張と収縮が関与する<sup>12)</sup>。本研究では、筋電図を用い測定時に筋収縮のないことを確認しており、筋形態に及ぼす収縮の影響はなく伸張による筋形態の変化であったと考えられる。筋の伸張による筋形態の変化は、羽状角が減少し筋束長は延長するが、筋の緊張状態や筋膜周囲での組織間滑走性の程度により羽状角減少や筋束長延長の度合いは異なる<sup>8,12)</sup>。筋が高緊張状態の場合、得られる筋形態は伸張前と比較し羽状角、筋束長の変化は小さくそれほど変化しない。それに対して組織間の滑走性が乏しい場合、筋線維に加わる伸張負荷は大きく、羽状角、筋束長の変化は大きくなる。また介入後の筋形態変化は、同程度の伸張負荷条件において筋が高緊張状態の場合と組織間の滑走性が乏しい場合では異なる。緊張軽減による筋形態の変化は、羽状角が減少し筋束長は延長するが、組織間滑走性の向上による変化は、羽状角が増加し筋束長は短縮する<sup>8,12)</sup>。これらの要因より、本研究での RPW 照射後における羽状角増加、筋束長短縮の筋形態変化は、筋膜周囲での組織間滑走性が向上したことによる変化であったと考えられる。

筋硬度に関する本研究の結果は、RPW 照射後

に筋膜下エリアでのみ筋硬度が減少し、筋腹中央エリアでは有意差を認めなかった (図 4)。過去の報告では、筋の伸張<sup>13)</sup>、筋収縮<sup>14)</sup>、運動<sup>15)</sup>などが筋硬度に影響を及ぼすことが報告されているが、本研究では先も述べたとおり測定時に筋収縮のないことを確認しており、筋収縮の影響はなかったと考えられる。また、介入方法は RPW のみであり運動課題を与えていないことから、運動による影響は考え難い。つまり、本研究では筋の伸張による筋硬度の変化であったと考えられ、本研究の測定肢位からも同様に推察できる。筋硬度と伸張との関係は、筋が伸張されるほど筋硬度は高くなり伸張負荷が減少すると筋硬度は低くなる<sup>13)</sup>。筋へかかる伸張負荷の変化は、筋形態の変化からも推察することが可能であり<sup>12,16)</sup>、本研究の結果として得られた羽状角の増加と筋束長の短縮は、伸張負荷の軽減を示すと考えられる。これらより、本研究での筋膜下エリアにおける筋硬度低下は、筋への伸張負荷が軽減したことによる変化であったと考えられる。

筋腹中央エリアでは筋硬度の有意差がみられなかった要因として、衝撃波のエネルギー放出における特性が関与していると考えられる。衝撃波は音響インピーダンス値の異なる境界でエネルギーを放出する特性があり、大きく異なる境界ではエネルギー放出が多くなる<sup>17)</sup>。筋膜周囲組織における音響インピーダンス値は、皮膚、脂肪、筋とそれぞれ異なるが、筋膜に関する報告は我々が渉猟

した限りなかった。しかし、組織間における音響インピーダンス値の差を利用し画像を描出するエコーを参考にすると、筋膜はエコー上で高輝度に描出されるため、脂肪や筋などに比べ音響インピーダンス値が高いと考えられる<sup>18)</sup>。つまり、脂肪や筋と筋膜との間では大きな音響インピーダンス値の差があると推察でき、衝撃波のエネルギー放出の特性から筋膜周囲で多くのエネルギーが放出されると考えられる。また、RPWの特性としてエネルギー放出は体表が最も高く、体表より約2cmで大幅に減衰すると報告されている<sup>17)</sup>。これらの特性により、本研究で用いたRPWは、体表付近でのエネルギー放出が主であり、それに続く筋膜周囲でのエネルギー放出により筋内部までエネルギーが到達していなかった可能性が考えられ、筋内部の硬度変化を示さなかったと考えられる。つまり、RPWは筋膜周囲への作用が大きいと考えられ、筋膜周囲でのエネルギー放出により、筋膜へは物理的な刺激が生じたと考えられる。筋膜の粘弾性を決定する主な因子はヒアルロン酸（以下HA）であるが、HAの粘弾性は熱、pH、圧力などにより低下することが報告されており<sup>19)</sup>、RPWによる筋膜周囲への物理的な刺激は、HAを多く含む筋膜の粘弾性を低下させた可能性が考えられる。筋膜の粘弾性低下は、組織間の滑走性を向上させ関節可動域に好影響を与えると報告されていることから<sup>7,8)</sup>、本研究におけるRPWの照射による関節可動域の拡大効果の背景には、筋膜の粘弾性低下による組織間の滑走性向上が影響していた可能性が考えられる。また、先に述べた筋形態の変化からも、組織間の滑走性が向上していた可能性が考えられ、同様の背景を支持していると考えられる。

本研究の限界として、第1にコントロール群の設定ができていないことが挙げられる。RPW照射の方法として、皮膚上を滑らすように操作をすることから、摩擦などの刺激が少なからず生じていたと考えられる。また、圧力波を発生させる過程で振動が生じるため、身体へ振動刺激が加わっていた可能性も考えられる。摩擦や振動などの物理的的刺激も圧力波と同様に筋膜の粘弾性に影響を与える可能性があり<sup>19)</sup>、コントロール群を設定していないことにより、それらを除外することができていない。第2に筋膜の評価を直接実施していないことが挙げられる。本研究で考察として挙げ

ている筋膜の粘弾性低下は、筋形態の変化、筋膜下エリアでの筋硬度の低下から間接的に考えられるものであり、実際に粘弾性の変化が生じているかは断定できていない。

第3に本研究は健常人を対象に実施しており、実際に関節可動域制限のある症例で検討ができていないことが挙げられる。関節可動域制限には、筋・筋膜だけではなく、皮膚や骨、靭帯など多因子が関与しており<sup>20)</sup>、それらの状態によりRPWによる関節可動域の拡大効果を得る事ができない可能性も考えられる。今後、コントロール群を設定することや症例での検討をするなど、研究を継続し実施していく事が必要と考える。

## 結 語

本研究は、健常人を対象にRPWの関節可動域拡大効果を組織間滑走性に着目し明らかにすることを目的に実施した。結果、筋形態の有意な変化と筋膜下エリアでの有意な筋硬度低下を認めた。筋形態の変化および筋膜下エリアでの筋硬度低下は、筋膜周囲での組織間滑走性の向上を示すと考えられる。つまり、RPW照射による筋膜周囲での組織間滑走性の向上が、健常人の関節可動域拡大に好影響を与えたひとつの要因である可能性が示唆された。

## 利益相反

本論文に関連し、開示すべき利益相反はなし。

## 文 献

- 1) Li X, Zhang L, Gu S, et al. Comparative effectiveness of extracorporeal shock wave, ultrasound, low-level laser therapy, noninvasive interactive neurostimulation, and pulsed radiofrequency treatment for treating plantar fasciitis A systematic review and network meta-analysis. *Medicine (Baltimore)*. 2018; 97: e12819 doi: 10.1097/MD.00000000000012819.
- 2) Rompe JD, Furia J, Maffulli N. Eccentric loading compared with shock wave treatment for chronic insertional achilles tendinopathy. A randomized, controlled trial. *J Bone Joint Surg Am*. 2008; 90: 52-61.
- 3) Langendorf EK, Klein A, Drees P, et al. Exposure to radial extracorporeal shockwaves induces mus-

- cle regeneration after muscle injury in a surgical rat model. *J Orthop Res.* 2020; 38: 1386-1397.
- 4) Wang T, Du I, Shan L, et al. A prospective case-control study of radial extracorporeal shock wave therapy for spastic plantar flexor muscles in very young children with cerebral palsy. *Medicine (Baltimore).* 2016; 95: e3649 doi: 10.1097/MD.00000000000003649.
  - 5) Kim YW, Chang WH, Kim NY, et al. Effect of extracorporeal shock wave therapy on hamstring tightness in healthy subject: A pilot study. *Yonsei Med J.* 2017; 58: 644-649.
  - 6) Liao CD, Xie GM, Tsauo JY, et al. Efficacy of extracorporeal shock wave therapy for knee tendinopathies and other soft tissue disorders: a meta-analysis of randomized controlled trials. *BMC Musculoskelet Disord.* 2018; 19: 278.
  - 7) McCombe D, Brown T, Slavin J, et al. The histochemical structure of the deep fascia and its structural response to surgery. *J Hand Surg Br.* 2001; 26: 89-97.
  - 8) Pavan PG, Stecco A, Stern R, et al. Painful connections: densification versus fibrosis of fascia. *Curr Pain Headache Rep.* 2014; 18: 441.
  - 9) Bennell KL, Talbot RC, Wajswelner H, et al. Intra-rater and inter-rater reliability of a weight-bearing lunge measure of ankle dorsiflexion. *Aust J Physiother.* 1998; 44: 175-180.
  - 10) Ando R, Taniguchi K, Saito A, et al. Validity of fascicle length estimation in the vastus lateralis and vastus intermedius using ultrasonography. *J Electromyogr Kinesiol.* 2014; 24: 214-220.
  - 11) Sant GL, Nordez A, Andrade R, et al. Stiffness mapping of lower leg muscles during passive dorsiflexion. *J Anat.* 2017; 230: 639-650.
  - 12) Fukunaga T, Ichinose Y, Ito M, et al. Determination of fascicle length and pennation in a contracting human muscle in vivo. *J Appl Physiol* (1985). 1997; 82: 354-358.
  - 13) Pamboris GM, Noorkoiv M, Baltzopoulos V, et al. Effects of an acute bout of dynamic stretching on biomechanical properties of the gastrocnemius muscle determined by shear wave elastography. *PLoS One.* 2018; 13: e0196724 doi: 10.1371/journal.pone.0196724.
  - 14) Bouillard K, Hug F, Guével A, et al. Shear elastic modulus can be used to estimate an index of individual muscle force during a submaximal isometric fatiguing contraction. *J Appl Physiol* (1985). 2012; 113: 1353-1361.
  - 15) Murayama M, Nosaka K, Yoneda T, et al. Changes in hardness of the human elbow flexor muscles after eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2000; 82: 361-367.
  - 16) Stevens DE, Smith CB, Harwood B, et al. In vivo measurement of fascicle length and pennation of the human anconeus muscle at several elbow joint angles. *J Anat.* 2014; 225: 502-509.
  - 17) Liu Y, Chen X, Guo A, et al. Quantitative assessments of mechanical responses upon radial extracorporeal shock wave therapy. *Adv Sci (Weinh).* 2017; 5: 1700797 doi: 10.1002/advs.201700797.
  - 18) 濱本和彦. 医用超音波エコー画像で「見えるモノ」と「診えるモノ」(特別講演-1). 日本計算機統計学会シンポジウム論文集. 2007; 21: 47-48.
  - 19) Stecco C, Stern R, Porzionato A, et al. Hyaluronan within fascia in the etiology of myofascial pain. *Surg Radiol Anat.* 2011; 33: 891-896.
  - 20) 沖田 実. 関節可動域制限の発生メカニズムとその治療戦略. *理学療法学.* 2014; 41: 523-530.

---

(受付：2021年2月24日, 受理：2021年8月18日)

## Study of the improvement effect on the joint range of motion of the radial pressure wave — 1st report: evaluation using ultrasound echo —

Kobayashi, Y. <sup>\*1</sup>, Satake, H. <sup>\*1</sup>, Sugioka, T. <sup>\*1</sup>, Inoue, J. <sup>\*2</sup>  
Oku, K. <sup>\*3</sup>, Kawaguchi, Y. <sup>\*1</sup>, Kumai, T. <sup>\*4</sup>

<sup>\*1</sup> Sports & Arthroscopy Center, Hanna Central Hospital, Ikoma, Nara, Japan

<sup>\*2</sup> Japan Cycling Federation

<sup>\*3</sup> Department of Rehabilitation, Kawasaki University of Medical Welfare, Kurashiki, Okayama, Japan

<sup>\*4</sup> Faculty of Sport Sciences, Waseda University, Tokorozawa, Saitama, Japan

**Key words:** Radial pressure wave, joint range of motion, gliding property between tissues

**[Abstract]** We investigated the effects of radial pressure waves (RPW) on joint range of motion in 20 healthy adults (20 legs), focusing on inter-tissue sliding. We observed an increase in ankle dorsiflexion during knee extension, significant changes in muscle morphology (increased pennation angle, extension of the fascicle length), and a decrease in muscle hardness around the fascia. The changes in muscle morphology and hardness indicate an increase in inter-tissue sliding around the fascia. These results suggest that improvement in terms of inter-tissue sliding around the fascia due to RPW may help increase the joint range of motion.