MR Elastography を用いた筋収縮による硬度変化の計測 ［大会長賞記録］

畑　純一[1,2]，沼野智一[2,4]，水原和行[3]，鷲尾利克[4]，
高本孝一[5]，西条寿夫[5]，本間一弘[4]，八木一夫[2]，
矢野敬一[1]

[1]東京大学医学部附属病院放射線部　[2]首都大学東京大学院人間健康科学研究科
[3]東京電機大学　[4]産業技術総合研究所　[5]富山大学医学薬学研究部

はじめに

Magnetic resonance elastography（MRE）は1995年に提唱され[1]，近年になり非常に注目を集めている撮像技術である．MRE法は伝播波における波長より組織の粘弾性定数・硬さを算出する方法である．現在では臨床例も報告されており，適応部位も肝臓[2]や乳房[3]のみでなく体幹部全域[4)~7)]となってきている．本研究では下腿部骨格筋に着目し，筋硬度を評価し，筋硬度の変化・特性を解明することを目的とした．

方　法

撮像には3.0T MRI装置（Phillips社製），MRE画像解析および表示にはMRE wave（MAYO Clinic），Image J 1.37V（National Institutes of Health）を用いた．撮像パルスシーケンスにはgradient echoを用い，条件はTR/TE : 20/3.6 ms，NEX : 3，flip angle : 20 deg，matrix : 512×512，scan time : 32 s，coil : flex coil，振動周波数：50 Hzとした．加振器の周波数は50 Hzとしgradient echoのTRと同期させた．加振は空圧式の装置を自作で作成し，下腿部を両側からむらなく加振できるよう二分岐型の振動パッドを作成し使用した．撮像対象は首都大学東京倫理委員会の承諾のもと，インフォームドコンセントにより同意を得た健常ボランティア（n＝5, age＝21.4±0.9, BMI＝20.6±2.3）とした．なお，特別な運動習慣，重篤な疾患はなかった．これらの条件で，本MREシステムにおける骨格筋MREの特性を検討した．

続いて，MREを用いた骨格筋の収縮・弛緩による硬度変化の評価を行った．下腿部骨格筋の筋運動状態は1. 膝伸展・足底屈位（Flex），2. 膝屈曲・足背屈位（Extension）とし固定した．その後，独自に作成したMRE加振機を下腿両側に固定し撮像を行った．対象骨格筋は前脛骨筋（tibilias anterior muscle : TA），ヒラメ筋（soleus muscle : SOL），内側腓腹筋（medial gastrocnemius muscle : mGA），外側腓腹筋（lateral gastrocnemius muscle : lGA）とし，ROIを選択し解析・計測した．加え，下腿部骨格筋の値を比較するために筋硬度計：FGRT−2（日本電産シンポ株式会社）を用い比較計測を行った．

キーワード　magnetic resonance elastography（MRE），skeletal muscle, stiffness, muscle contraction, pulse sequence

結　　果

本 MRE システムにおいて，下腿部骨格筋 MRE を施行し得た elastography と振動プロファイルを Fig. 1 に示す．本システムの MRE では従来の単振動機形に比べ，比較的広範囲に安定した波が伝搬していた．また，wave image の profile curve を計測してみると伝搬波は部位により波長，振幅がしっかりと変化していた．しかしながら，TA 等の伝搬源から離れた骨格筋において振動はあまり伝わらずノイズが目立つ結果となった．

MRE を用い骨格筋収縮による硬度変化の評価を行った結果を Fig. 2 に示す．各骨格筋に

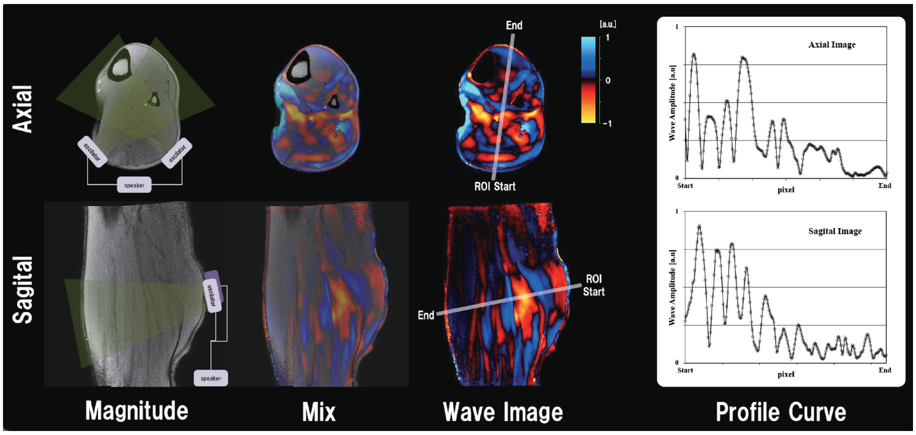

Fig. 1. Characteristic of our MRE system to the skeletal muscle. The image is from the left to magnitude image, magnitude added wave image, and wave image in order. A right graph is a profile curve of wave image. And, the upper is axial section, the lower is sagital section.

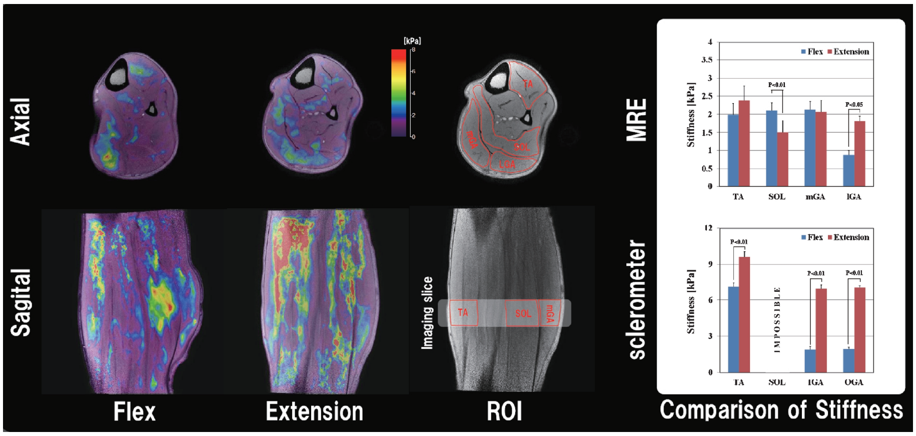

Fig. 2. The stiffness that changed by skeletal muscle contraction. Four of the left are stiffness image by MRE. The center is a method of selecting ROI. In these, the upper is axial section, and the lower is sagital section. A right graph is a measurement result of stiffness by the contraction of each skeletal muscle. In these, the upper is by MRE and the lower is by sclerometer.

2011 年 11 月 29 日受理

おいて収縮時は硬く，弛緩時は軟らかくなる傾向が得られた．特に lGA, SOL では有意差があった．筋硬度計における計測でも MRE と同様の傾向が得られた．しかしながら，硬度［kPa］そのものの計測値には差が現れた．

考　察

MRE 加振機を対象部位の双方から充て，振動を加えることにより，下腿部骨格筋への振動は広範囲となった．これにより，MRI 自体がもっている 2D イメージングという特徴を活かした広範囲の硬度計則が可能になった．従来の振動機一つでは振動の方向においては十分な振動が伝搬されるが，胁へそれるにつれ伝搬不足が目立ち，正確な硬度計測ができなくなるという欠点があった．複数の振動機を用いることで，より広範囲の計測が可能になるといえる．しかしながら，TA に関しては振動源からの距離があり脛骨も存在するために，ノイズが混じっておりいまだ振動が不十分であるといえる．

筋収縮に対し，硬度の変化がみられた．lGA, SOL では有意な差があり，筋収縮により硬度の変化が十分にあるといえる．収縮による筋硬度の変化は単純にアクチン・ミオシン分子の滑り込みによる筋原線維の堅牢化を大きく反映していると推察できる．TA に関し，傾向は現れたが有意差が得られなかった原因は振動の伝搬不足からくる硬度解析のばらつきが挙げられる．もしくは振動は伝播しているが，パルスシーケンス構造による位相検出量の不足が挙げられる．当パルスシーケンスでは通常 MRE に用いられる motion sensitized gradient を印加していないため簡便ではあるが，位相検出能にかけているといえる．このため，MRE における振動デバイスの改良，パルスシーケンスの開発が今後の大きな課題と言える．

結　語

MRE 法は深部筋の計測を可能とした．これにより，従来の筋硬度計では測り得なかった深部筋の評価が可能となる．MRE 法では生体断面の硬度を表層から深部とイメージングすることができ，MRI で取得可能な物性値の一つとして今後大きな期待が寄せられる．

文　献

1）Muthupillai RD, Lomas J, Rossman PJ, et al.: Magnetic-resonance elastography by direct visualization of propagating acoustic strain waves. Science 1995 ; 269 : 1854–1857

2）Rouviere O, Yin M, Dresner MA, et al.: MR elastography of the liver : preliminary results. Radiology 2006; 240 : 440–448

3）Sinkus R, Siegmann K, Xydeas T, et al.: MR elastography of breast lesions : understanding the solid/liquid duality can improve the specificity of contrast-enhanced MR mammography. Magn Reson Med 2007 ; 58 : 1135–1144

4）McCracken PJ, Manduca A, Felmlee J, et al.: Mechanical transient-based magnetic resonance elastography. Magn Reson Med 2005 ; 53 : 628–639

5）Romano AJ, Abraham PB, Rossman PJ, et al.: Determination and analysis of guided wave propagation using magnetic resonance elastography. Magn Reson Med 2005 ; 54 : 893–900

6）Heers G, Jenkyn T, Dresner MA, et al.: Measurement of muscle activity with magnetic resonance elastography. Clinical Biomechanics 2003 ; 18 : 537–542

7）Goss BC, McGee KP, Ehman EC, et al.: Magnetic resonance elastography of the lung : technical feasibility. Magn Reson Med 2006 ; 56 : 1060–1066

MR Elastography Analysis of Stiffness Change Induced by Muscle Contraction [President Award Proceedings]

Junichi HATA[1,2], Tomokazu NUMANO[2,4], Kazuyuki MIZUHARA[3],
Toshikatsu WASHIO[4], Koichi TAKAMOTO[5], Toshio SAIJYO[5],
Kazuhiro HOMMA[4], Kazuo YAGI[2], Keichi YANO[1]

[1]*Department of Radiological Technology, University of Tokyo Hospital*
7–3–1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 116–8551
[2]*Department of Radiological Science, Graduate School of Human Health Science,*
Tokyo Metropolitan University
[3]*Graduate School of Technology, University of Tokyo Denki*
[4]*Biomedical Sensing and Imaging Group, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology*
[5]*Graduate School of Medicine and Pharmaceutical Sciences for Research Environment, University of Toyama*

Magnetic resonance elastography (MRE) was originally advocated in 1995 and has been the subject of recent attention. We employed MRE to characterize the stiffness of skeletal muscle of the lower thigh and changes in that stiffness. We obtained MRE images using a gradient recalled echo pulse sequence with parameters : repetition time (TR)/echo time (TE), 20/3.6 ms ; number of excitations (NEX), 3 ; flip angle, 20° ; matrix, 512 × 512 ; scan time, 32 s ; flex coil ; and vibration frequency, 50 Hz. We made a vibration pad of 2 divergence types to excite the lower thigh from both sides evenly. When contraction and relaxation about the skeletal muscles, we enforced MRE. We drew regions of interest (ROI) on the stiffness images and measured it by using sclerometer to compare stiffness. We MRE enabled visualization of changes in the stiffness of skeletal muscles as a result of contraction and relaxation. The lateral gastrocnemius and soleus muscle demonstrated significant difference in stiffness at muscle contraction. MRE also permitted measurement of deep muscle using the muscle sclerometer. MRE allows evaluation of stiffness in a given biological section from the surface to deep tissue.