

Functional imaging of muscle fiber contraction

渡辺康晴¹, 田中忠蔵¹, 恵飛須俊彦¹, 梅田雅宏²,
染谷芳明¹, 森 勇樹¹, 福永雅喜², 青木伊知男²,
成瀬昭二³

¹明治鍼灸大学脳神経外科 ²同医療情報学 ³京都府立医科大学放射線科

はじめに

MRI で筋の運動を評価する方法として, tagging などを中心に画像化する技術が提唱されているが^{1),2)}, 筋組織の収縮状態を直接描出する *in vivo* リアルタイム画像法の報告はない.

Diffusion-weighted magnetic resonance imaging (DWI) は水分子の random motion に感受性を持ち, そのメカニズムは IVIM (intra voxel incoherent motion) であるとされる³⁾. DWI 法による筋組織の評価は, 主として組織の apparent diffusion coefficient (ADC) が用いられているが^{4)~6)}, 筋収縮中の IVIM をとらえることを目的とした報告はない.

筋収縮は, 2 種類のフィラメントが互いに対向して滑り込むことによって生じる⁷⁾. これらのフィラメントの滑り込みによって, 筋組織中の水分子に IVIM が生じていれば, DWI 法により収縮している骨格筋の情報を得ることができると予想される. また組織のゆがみが ADC を増加させることも報告されており⁸⁾, 筋収縮で生じる組織の変形によっても DWI 上の変化がとらえられる可能性がある. 本研究の目的は, DWI 法を用いて筋収縮領域を画像化することにある. この検証を実験 1 とした.

実験 1 で観測した筋組織の動きのうち, どのような動きが MRI 信号へ影響しているかを明らかにする必要がある. そこで組織の動き,

特に変位が DWI 信号強度に与える影響を検討するために実験 2 を行った.

対象と方法

実験 1: 骨格筋収縮領域の DWI 信号変化の検討

健康成人 7 名 (男性 2 名, 女性 5 名, 21~31 歳) を対象とした.

運動負荷には中指伸展運動を用いた. 15 秒間の安静状態の測定後に, 中指を 5 秒かけて伸展させ, 等張性収縮とした. その後, 伸展された中指はストッパーに押しつけられる形で固定し 15 秒間保持させ, これを等尺性収縮とした.

撮像装置は Signa LX nv/i (GE) で 3-inch surface coil を使用した. Single shot DW-EPI 法 (TR=250 ms, TE=45.3 ms, matrix size=64×64, FOV=160×160 mm, スライス厚=10 mm, 1 NEX) を使用した. 測定時間は 37 秒で, 測定領域の十分な飽和効果を得るために最初の 4 枚をダミースキャンとし, 144 枚の画像を取得した. スライス位置は肘関節外上顆から 70 mm 遠位とした. 拡散強調の軸方向は筋細胞の長軸(収縮方向)に沿うよう z 軸にかけ, b 値を 178 s/mm² とした.

関心領域には, 中指伸展で収縮する総指伸筋と, 対照として中指伸展では収縮しない橈側手

キーワード MRI, muscle contraction, diffusion, contraction imaging, functional imaging

根伸筋の2部位を設定した。

実験2：等速直線運動がDWIに及ぼす変化の
検討

Gd-DTPAと寒天、蒸留水を混ぜ合わせT₁値が300msとなるよう作成したファントムをポリ容器に封入し対象とした。

対象を台車に固定し、電気モーターで牽引した。24秒間の静止後、牽引を開始し、さらに26秒間測定を継続した。牽引方向はz軸方向とし、速度は2mm/sとした。

MRI装置は実験1と同じものを使用した。コイルは移動下においても磁場の均一性を維持するために標準ヘッドコイルを用いた。測定パルスシーケンスは、飽和効果をさけるためTR=2000msに変更した以外は実験1と同じパラメータを用い、b値に関しても実験1と同様とした。測定時間は58秒で29枚の画像を取得した。

結 果

実験1：骨格筋収縮領域のDWI信号変化の
検討

中指伸展によって収縮する総指伸筋部において、等張性収縮の画像では安静時と比較してDWI信号の著明な減少を示した。総指伸筋部のDWI信号強度は等張性収縮の開始直後から急激かつ速やかに減少し、等張性収縮中は安静時の0.6倍程度の信号強度を維持した。対照として設置された橈側手根伸筋部では、等張性収縮での信号減少は見られなかった。等張性収縮から等尺性収縮に移行すると、総指伸筋部の信号は急速に回復し安静時と同程度の信号強度を示した。また等張性収縮における減少領域は、解剖学的情報を得るため取得したfast spin echo法のT₂強調像上の総指伸筋部とよく一致していた。

実験2：等速直線運動がDWIに及ぼす変化の

検討

一定の速度で移動するファントムのDWIの信号強度は、静止時の信号強度と同程度であった。動いているファントムにおいて信号減少は観察されなかった。

考 察

等張性収縮中のDWI信号強度の減少に対する主要な機序の一つとして、筋組織内部の水分子のincoherent motionが生じた可能性が挙げられる。等張性収縮では、2種類のフィラメントが長軸方向に沿って互いに対向して滑り込む。対照的に等尺性収縮は、筋トルクは発生しているが、フィラメントの滑り込みはほとんど起こらない。等張性収縮でのみDWIの信号強度が減少したのは、フィラメント周囲の水分子が滑り込みによって様々な速度と方向の動きを与えられ、結果としてボクセル内の自由な水分子のincoherent motionが生じたと考えられる。

もう一つの可能性は組織の変形(ゆがみ)である。ゆがみがDWIの信号強度を低下させることは既に報告されている⁸⁾。等張性収縮では、筋組織の短縮を伴うため収縮中は常に変形する。対照的に等張性収縮ではフィラメントの滑り込みが起こらないため、筋組織が短縮することはなく、ほとんど変形しない。したがって等張性収縮でのみDWIの信号強度が減少した可能性がある。

実験2の結果においてDWIの信号強度は静止時と同程度であった。一定速度で牽引された物体ではすべての水分子が等しく同方向に移動するcoherentな動きであるため、DWIの信号強度は減少しなかったものと考えられた。また、実験1の結果においても、DWIの信号強度に対し変形を伴わない平行移動の影響はほとんどなかったことが強く示唆された。

結 語

DW-EPI 法を用いて単一筋の等張性収縮の描出に成功した。等張性収縮において収縮した骨格筋組織の DWI 信号強度は著明に減少した。対照的に等尺性収縮では安静時と同程度であった。今回の DWI の信号減少のメカニズムは motion artifact によるものではなく、主としてフィラメントの滑り込みによる水分子の IVIM の増大や筋組織の変形によるものと考えられた。

文 献

- 1) Zerhouni EA, Parish DM, Rogers WJ, Yang A, Shapiro EP : Human heart : tagging with MR imaging - a method for noninvasive assessment of myocardial motion. *Radiology* 1988 ; 169 : 59-63
- 2) Wedeen VJ : Magnetic resonance imaging of myocardial kinematics : technique to detect, localize, and quantify the strain rates of the active human myocardium. *Magn Reson Med* 1992 ; 27 : 52-67
- 3) Turner R, Le Bihan D. Diffusion MR imaging ; echo-planar techniques. In : Le Bihan D, ed. *Diffusion and Perfusion Magnetic Resonance Imaging ; Applications to Functional MRI*. New York, USA : Raven Press, 1995 ; 50-55
- 4) Morvan D : *In vivo* measurement of diffusion and pseudo-diffusion in skeletal muscle at rest and after exercise. *Magn Reson Imaging* 1995 ; 13 : 193-199
- 5) Hsu EW, Muzikant AL, Matulevicius SA, Penland RC, Henriquez CS : Magnetic resonance myocardial fiber-orientation mapping with direct histological correlation. *Am J Physiol* 1998 ; 274 : H1627-1634
- 6) Wedeen VJ, Reese TG, Napadow VJ, Gilbert RJ : Demonstration of primary and secondary muscle fiber architecture of the bovine tongue by diffusion tensor magnetic resonance imaging. *Biophys J* 2001 ; 80 : 1024-1028
- 7) Oplatka A : The role of water in the mechanism of muscular contraction. *FEBS Lett* 1994 ; 355 : 1-3
- 8) Reese TG, Wedeen VJ, Weisskoff RM : Measuring diffusion in the presence of material strain. *J Magn Reson B* 1996 ; 112 : 253-258

Functional Imaging of Muscle Fiber Contraction

Yasuharu WATANABE¹, Chuzo TANAKA¹, Toshihiko EBISU¹,
Masahiro UMEDA², Yoshiaki SOMEYA¹, Yuuki MORI¹,
Masaki FUKUNAGA², Ichio AOKI², Shoji NARUSE³

*Department of ¹Neurosurgery and ²Medical Informatics, Meiji University of Oriental Medicine
Hiyoshi, Funai, Kyoto 629-0392*

³Department of Radiology, Kyoto Prefectural University of Medicine

This study tested the hypothesis that single muscle contraction can be visualized using diffusion-weighted magnetic resonance imaging (DWI). Muscular contraction is caused by the sliding of actin and myosin filaments into each other. This sliding may cause movement in the water molecules surrounding these filaments. DWI is sensitive to the random motion of these water molecules and may detect skeletal muscle contraction by detecting the intravoxel incoherent motion of the water molecules in the muscle. DWI is also sensitive to material strain resulting from tissue deformation. Since skeletal muscle tissues cause material strain during isotonic contraction, DWI may be able to visualize isotonic contraction.

Seven healthy volunteers were examined in the study. A single-shot dynamic DW-EPI was performed. After resting, the middle finger was extended slowly. This is regarded as isotonic contraction. Subsequently, extension of the middle finger was maintained. This is regarded as isometric contraction. The signal intensity of DWI in the muscle was specifically and drastically decreased only during isotonic muscle contraction. In contrast, the signal intensity in the muscle during isometric contraction was close to that at rest. The temporal reduction in DWI intensity during isotonic muscle contraction may be caused by incoherent movement of the water molecules within the muscle tissue associated with tissue deformation.