

電気刺激によって生じる筋収縮の eigen value [大会長賞記録]

渡邊康晴¹, 梅田雅宏¹, 木村啓作², 樋口敏宏³,
田中忠蔵³

¹明治国際医療大学医療情報学教室 ²同健康・予防鍼灸学教室 ³同脳神経外科学教室

はじめに

経皮的電気刺激は筋痛や関節痛に対する治療法として臨床で用いられている。電気刺激により生じる筋収縮を画像化するには、優れた変形検出能と高時間分解能が必要である。DWI (diffusion weighted imaging) 法を用いると、筋収縮で生じる変形を水分子の動きによりとらえることができる¹⁾。実際、経皮的電気刺激によって生じた筋変形が高い時間分解能で描出できたことを本学会で報告した²⁾。その結果、DWI 信号変化は電気刺激 10 ms 後より始まり、30 ms 後に最大となり、筋収縮過程における DWI 変化をとらえたと考えられた。一方、40 ms 以降では DWI 信号強度は徐々に回復し、筋収縮後の弛緩過程 (筋の伸張) をとらえたと考えられた。

Diffusion tensor imaging (DTI) を用いると水分子が動く方向と速さを評価できる。水分子が動く方向は tensor vector として、速さは eigen value として表現される。自然界での水分子の動きは 3 次元的であるため、eigen value も直交する 3 軸のスカラ成分として表現される。具体的には $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ のように表し、便宜的に最大の成分を λ_1 , 続く成分を λ_2 , 最小の成分を λ_3 として示す。Eigen value を用いると、水分子の動く速さを正確に評価できることに加え、FA (fractional anisotropy) や ADC (apparent diffusion coefficient) の算出も

可能である。

これまでの報告で、筋変形時には速い水分子の動きを伴うことが明らかになったものの、水分子の速さの正確な測定は行っていない。そこで電気刺激に同期した dynamic DTI を行い、筋収縮時と筋収縮からの回復時に生じる水分子の動きを eigen value で評価した。

対象と方法

健康成人男性 4 名の左下腿を対象とした。測定には 1.5T 臨床用 MRI 装置 (GE, Signa 1.5T LX CN/I) と 3.5 inch surface coil を使用し、single shot SE-DWI 法 (TE = 45.0 ms, TR = 4000 ms, slice thickness = 6 mm, 96 × 96 matrix, FOV = 240 × 240 mm, non average, 200 KHz receiver band width) を電気刺激に同期して撮像した。電気刺激で筋収縮が生じていると推定される電気刺激 20 ms 後と、筋収縮からの回復期に相当する 150 ms 後を測定した。b 値は 4.6 s/mm² とした (20 mT/m strength, 4 ms duration MPG (δ), 10.4 ms diffusion time (Δ)). MPG の印可軸が異なる 6 画像 ((x, y, z) = (1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1), (-0.704, -0.088, -0.704), (0.704, 0.704, 0.088), (0.088, 0.704, 0.704)) から eigen value を評価した。解剖学的情報を得るため、別途、同一断面 GRE 画像を撮像した。電極は腓腹筋内側頭上に表面電極を添付し、10 ms の矩形波刺激を

キーワード muscle contraction, eigen value, electric stimulation, DWI, DTI

行った．刺激強度は触知下で筋収縮を確認できる強度とした．関心領域は 2 部位を設定した．電気刺激で収縮した部位として刺激電極直下の腓腹筋内側頭を，電気刺激によって収縮を起こさないコントロールとして腓腹筋外側頭を設定した．

結 果

Fig. 1 に解剖学的情報を得るために取得した T₂ 画像 (a)，電気刺激 20 ms 後 (b) および 150 ms 後 (c) の λ_1 画像，電気刺激 20 ms 後 (d) と 150 ms 後 (e) の λ_2 画像を示す．T₂ 画像 (a) には表面電極を設置した部位を青い楕円で示した．刺激電極の直下にある腓腹筋内側頭の λ_1 は，電気刺激 20 ms 後に顕著に増加した (b, 矢印)．同様に λ_2 でも電気刺激 20 ms 後の腓腹筋内側頭に eigen value の増加を認めた (d, 矢印)．電気刺激 150 ms 後には λ_1, λ_2 のいずれも顕著な増加を認めなかった．

Fig. 2 は，関心領域の設定部位と二つの関心領域で得られた λ_1 のグラフを示す．電気刺激で収縮した部位として腓腹筋内側頭を設定し，

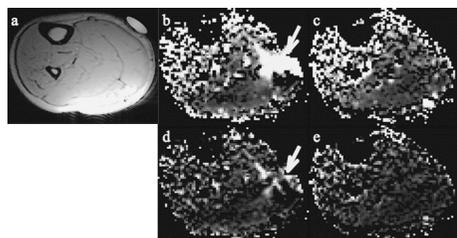


Fig. 1. Eigen value images with the electric stimulation (ES)

These images show (a) T₂ image, λ_1 images with the ES at (b) 20 ms following, (c) 150 ms, λ_2 images with the ES at (d) 20 ms, (e) 150 ms. The λ_1 and λ_2 images were calculated from DWIs, respectively. It showed a position of the stimulating electrode as a blue ellipse (a).

T₂ 画像上に灰色の四角で示した．コントロールとした腓腹筋外側頭は白色の四角で示した．電気刺激 20 ms 後の腓腹筋内側頭の λ_1 は，コントロールとした腓腹筋外側頭に比べて有意に増加した．また，電気刺激 150 ms 後の λ_1 は 20 ms 後と比較して顕著に減少した．

Fig. 3 は， λ_2 と λ_3 のグラフを示す． λ_2 は λ_1 と同様の傾向を示した．電気刺激 20 ms 後の腓腹筋内側頭は，コントロールに比べて有意に増加し，電気刺激 150 ms 後は 20 ms 後と比較して有意に減少した． λ_3 に有意な変化はみられなかった．

考 察

電気刺激後に生じる筋収縮時の eigen value と水分子の移動速度を正確に評価するため，電

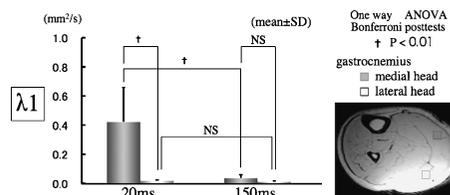


Fig. 2. λ_1 changes with the ES. Medial head of gastrocnemius muscle that indicated gray square on T₂ image was contracted by the electrical stimulation. Lateral head of gastrocnemius muscle to indicate white square was control.

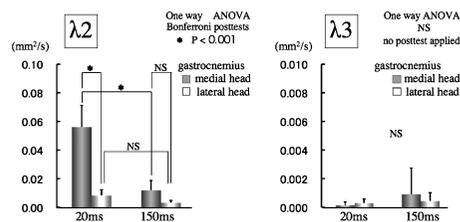


Fig. 3. λ_2 and λ_3 changes with the ES

気刺激に同期した dynamic DTI を行い、電極直下（腓腹筋内側頭）に ROI を設定した。筋収縮が生じていると考えられる電気刺激 20 ms 後では λ_1 と λ_2 が高値を示した (Figs. 2, 3)。これらの eigen value から計算される 20 ms 後の ADC は $1.59 \times 10^{-1} \text{ mm}^2/\text{s}$ 、FA は 0.92 ± 0.04 となった。ADC は安静時のおよそ 100 倍に相当し、FA は 1 に近く極めて強い異方向性を示した。電気刺激によって収縮している筋組織には強い方向性をもった極めて速い水分子の動きが生じていることが示された。

前回の報告で筋収縮後の弛緩過程（筋の伸張）をとらえたと考えられた電気刺激 150 ms 後の eigen value は、20 ms 後よりも大幅に低下した (Figs. 2, 3)。Eigen value から計算された 150 ms 後の ADC 値は $1.63 \times 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{s}$ となり、20 ms 後の ADC 値の約 10% にまで減少した。水分子の動きが電気刺激により引き起こされたことを考慮すると、150 ms 後の急激な ADC 値減少は筋の弛緩時相への移行を意味すると思われる。

筋収縮時の極めて速い水分子の動きを評価するため、b value は $4.6 \text{ s}/\text{mm}^2$ とした。この値

は通常の DTI に用いられている値よりも低く、 λ_3 のような遅い水の動きを十分に評価できない。今回の結果では λ_3 が極めて低い値を示したが、 λ_3 を過小評価している可能性があると考えられた。

結 語

電気刺激によって最も強い筋収縮が生じている時期および領域では、筋組織内に強い方向性をもった速い水の動きが生じることが示された。

文 献

- 1) 梅田雅宏, 渡邊康晴, 木村啓作, 樋口敏宏, 田中忠蔵: Body diffusion-weighted MRI imaging の理論的背景: 背景信号減少のメカニズム. 日磁医誌 2005; 25: 210-217
- 2) 渡邊康晴, 梅田雅宏, 木村啓作, 樋口敏宏, 田中忠蔵: High Temporal Imaging of Muscle Deformation by Electrical Stimulation. 日磁医誌 2008; 28 (suppl): 387

Eigen Values of Diffusion Tensor in Contracted Muscle Caused by Electrical Stimulation [Presidential Award Proceedings]

Yasuharu WATANABE¹, Masahiro UMEDA¹, Keisaku KIMURA²,
Toshihiro HIGUCHI³, Chuzo TANAKA³

¹*Medical Informatics*, ²*Health Promotion and Preventive Medicine*, ³*Neurosurgery*,
Meiji University of Integrative Medicine
6-1 Hinotani, Honoda, Nantan-shi, Kyoto 629-0392

We reported that signal intensity in diffusion-weighted echo planar imaging (DW-EPI) decreases during muscle contraction caused by percutaneous electrical stimulation (ES). Although the signal decrement of the DWI indicates the rapid movement of water molecules in response to muscle contraction using ES, the speed of water molecules during muscle contraction is uncertain. On the other hand, diffusion tensor imaging (DTI) provides information regarding the direction and speed of water movement in tissue. Therefore, we used DTI during muscle contraction to estimate the speed and direction of water molecules. Four healthy volunteers lay in supine position and underwent MR imaging of the lower extremities with single shot DW-EPI and acquisition of T_2 images for anatomical information. To estimate rapid movement during muscle contraction, we performed low-b DWI. We conducted DWI at 20 and 150 ms after ES and DTIs were calculated from DWI. We placed an electrode on the tibialis anterior muscle and set ES intensity at the minimum to produce muscle contraction. The λ_1 of the tibialis anterior muscle increased remarkably during electrically stimulated contraction; the λ_2 in the DTI also increased significantly. We observed rapid water movement with strong directionality in muscle tissue during contraction caused by electrical stimulation.