

1. MRI

拡散強調画像がもたらす情報 — 運動による水分子の動き評価を中心に

渡邊 康晴／梅田 雅宏／河合 裕子 明治国際医療大学医療情報学
樋口 敏宏／田中 忠蔵 明治国際医療大学脳神経外科

拡散強調画像で 筋収縮をとらえる

磁気共鳴拡散強調画像法 (diffusion weighted imaging : DWI) は、水の動きを *in vivo* で計測する方法で、拡散に代表される水分子のわずかな移動を、画像上の信号変化としてとらえる。脳神経系の分野で発展を遂げ、急性期脳梗塞の検出に臨床応用されている。最近では、拡散強調 MRI を骨格筋に用いる動きが広がり、筋線維の描出などに用いられるようになった。

筋細胞の内部構造は、ミオシンを中心とした太いフィラメントと、アクチンを主体とした細いフィラメントが交互に配列し、その間隙は細胞内水で満たされている。骨格筋が収縮するとき、太いフィラメントと細いフィラメントが互いに対向して滑り込むことで、筋トルクが生じる。このとき間隙を満たす細胞内水は、フィラメントに動かされる形で移動する。拡散強調シーケンスを用いると、筋収縮に伴う水分子の動きを検出できる。筋収縮が生じた領域は、拡散強調画像上で信号強度の減少として描出される。

図1 aは、前腕の解剖学的な断面である。被検者に中指を伸展するよう指示し、安静時と運動中の前腕部をスピンエコーの拡散強調 EPI (echo planar imaging) で撮像した。等張性収縮 (図1 c) の拡散強調画像では、中指の伸展の主動作筋である指伸筋に一致した領域 (▼) の信号が著しく減少した。等張性収縮では、筋が短縮してフィラメントが互いに滑り

込み、水分子は激しく移動するため、水分子の移動に敏感な拡散強調画像で明確な信号の減少が観察できる。対照的に、安静時 (図1 b) や等尺性収縮 (図1 d) の拡散強調画像では、指伸筋の領域に信号の減少は見られない。等尺性収縮では、筋トルクが生じているものの、筋は短縮しない。フィラメントの滑り込みに乏しく、等張性収縮と比較すると水分子の動きが少ない。そのため、拡散強調画像で信号の減少は見られず、安静時と同程度の信号強度が得られる。

この現象は、電気刺激を使った筋収縮でも観察される。図2の例では、前脛骨筋の走行上に表面電極を設置し、経皮的に電気刺激を行って筋を収縮させた。電気刺激をトリガーとして MRI を同期させ、拡散強調シーケンスで撮像した。図2 aは下腿の解剖学的な断面を、図2 b～dは見かけの拡散係数 (apparent diffusion coefficient : ADC) 画像を示す。図2 bは、電気刺激 20 ms 後の ADC 画像で、前脛骨筋に局限した ADC 高値 (▲) が観察できる。骨格筋に電気刺激を与えると、およそ 10 ms 後に活動電位が得られ、活動電位とともに筋収縮が始まる。電気刺激 20 ms 後は、まさに筋収縮が生じているタイミングであり、ADC 画像の所見とよく一致する。図2 cは電気刺激 100 ms 後、図2 dは 200 ms 後の ADC 画像である。電気刺激 20 ms 後 (図2 b) と比べ、ADC 値が高い領域が徐々に減少している様子が見てとれる。図2 aで設定した関心領域の拡散強調画像の信号値を、相対的に比較したグラフを図3に示す。電気刺激

30 ms 後に筋収縮が生じた前脛骨筋の信号強度が最も低下し、その後、緩やかな回復傾向を示している。筋収縮にかかわりのないヒラメ筋では、信号の変化はなかった。

電気刺激と MRI を同期させると、繰り返し測定が可能となり、本法の応用範囲は格段に広がる。6 軸以上の拡散強調画像が必要な拡散テンソル (diffusion tensor imaging : DTI) の測定も、その 1 つである。そこで、電気刺激による筋収縮を DTI で評価し、水分子の動く速さを解析したところ、安静時に比べて、電気刺激 20 ms 後の λ_1 と λ_2 が有意に増加していた。とりわけ、 λ_1 は大きく増加し、安静時の 200 倍に達した。

動きのアーチファクトの影響

筋収縮時の拡散強調画像で信号が減少する現象について、最初に言及したのは Edelman らである¹⁾。彼らは、心臓を拡散強調シーケンスで撮像する研究に取り組み、拡散強調画像上に奇妙な信号減少が見られると報告した。心臓は絶え間なく収縮と弛緩を繰り返す。このため、心臓を拡散強調シーケンスで撮像すると、信号の減少がしばしば観察される。Edelman らは、時々見られる信号減少を不可解だとしながらも、おそらく動きのアーチファクトによるものだろうと結論づけた。このように、動きのある領域を MRI で撮像して信号減少が見られた場合、最初に考えるのが動きのアーチファクトの影響である。