

3. MRI：拡散MRIにおける統計画像解析

— Fixel-based analysis

Neuroradiology
Frontier 2024

特集

中枢神経の
画像診断最前線

鎌形 康司 / 内田 航 / 高林 海斗

順天堂大学大学院医学研究科放射線診断学講座

拡散MRI定量値の全脳統計解析には、ボクセル単位で統計を行う voxel-based analysis (VBA) が広く用いられる。VBA には tract-based spatial statistics (TBSS)¹⁾ や voxel-based morphometry (VBM)²⁾ などが利用されているが、これらの手法にも種々の限界が存在する。本稿では、VBA 拡散MRI定量値の全脳統計解析として新たに開発された fixel-based analysis (FBA)³⁾ の技術説明とその疾患応用について概説する。

Fixel-based analysis

拡散MRI定量値の全脳統計解析には、通常、TBSSやVBMなどのボクセル単位で解析を行うVBAが従来用いられてきた。しかし、VBAでは1つのボクセル内に複数方向の神経線維束が走行する場合、それぞれの方向ごとの線維束の微細構造を分離して評価することはできない。この限界を乗り越えるべく、近年、FBAという手法が提案されている³⁾。

FBAは、拡散MRIデータから得られる fibre orientation distribution (FOD) をモデルに採用することで単一ボクセル内に存在する複数方向の線維束を分離し、線維束ごとの神経構造推定を可能にする全脳白質構造評価手法である。FBAの“fixel”は、“pixel”や“voxel”と同様に「単一の格子構造」、すなわち線維束の最小の離散的な構成要素を意味し、線維配向ごとに定義される。この格子構造ごとに神経構造定量指標が推定される、と考えるとFBAがどのような定量値であるか想像に難くないであろう。この“fixel”は、FODにおける各線維配向成分の頂点を抽出することで定義されるが、基となるFODは constrained spherical deconvolution (CSD) という数学的方法論に基づいて推定される。CSDでは、各ボクセルにおける拡散信号が、FODと、そのボクセルに含まれる単一线維束に由来する信号推定値 (response function) との間

の球面畳み込みとして推定できるという仮定の下、実データから推定可能な response function をカーネルとした拡散MRI信号に対する逆畳み込みにより FOD を推定する。この FOD の推定により、1つのボクセル内に複数の白質線維束が存在したとしても、それぞれの白質線維束に対する線維特異的な解析が可能となるのである (図1 a)。

図1 b に、白質構造の経時的な変化を模したモデル図と、その変化に対応して変化が生じるとされる FBA 指標を图示した。FBA では、各 fixel に FOD に由来する定量値である fibre density (FD, 図1 b①), fibre-bundle cross-section (FC, 図1 b②), fibre density and bundle cross-section (FDC, 図1 b③) を投影し、評価可能である。FD, FC の低下は、それぞれ軸索変性や脱髄などに由来する白質線維束の微細な構造変化とその後の巨視的な萎縮に対応するとされ³⁾、白質構造の経時的な変化を評価できる可能性が期待されている。詳細は後述するが、われわれの検討でも、タウを原因タンパクに持つ大脳皮質基底核症候群 (corticobasal syndrome : CBS) と進行性核上性麻痺 (progressive supranuclear palsy : PSP) を対象に FBA を実施し、各疾患の病理研究で提案されているタウ伝播に対応する白質構造の経時的変化を報告した⁴⁾。FDC は FD と FC を乗算した指標であり、図1 b ③に示すとおり、軸索変性による線維密度の低下と脱髄による軸索径の低下の両者を伴う神経変性において高感度⁵⁾