

# 1. QSI/DKI

## —脳の微細構造の可視化・定量化と バイオマーカーの創出

錦織 瞭<sup>\*1, 2</sup> / 堀 正明<sup>\*2</sup> / 鎌形 康司<sup>\*2</sup> / 神谷 昂平<sup>\*3</sup>  
 鶴田 航平<sup>\*1, 2</sup> / 青木 茂樹<sup>\*2</sup>

\*1 首都大学東京大学院人間健康科学研究科 \*2 順天堂大学医学部放射線診断学講座 \*3 東京大学医学部放射線医学教室

MRIを用いた拡散の研究は1980年代に脳虚血などで始まり、それまでほかの画像では描出不能であった急性期脳梗塞を検出できることから、拡散強調画像 (diffusion weighted imaging : DWI) は現在では臨床に不可欠なものとなっている。その後、DWIの拡張として拡散の異方性を表現することができる拡散テンソル画像 (diffusion tensor imaging : DTI) が登場し、脳神経の構造や機能的なつながりを描出することが可能になった。これら2つの方法は、水分子の拡散が正規分布に従うということを仮定しているが、実際の生体内はその挙動が制限されており、正規分布に従わない場合が多い。そこで、正規分布を仮定しない非正規分布拡散解析が注目され、臨床応用の報告も増えている。

本稿では、非正規分布拡散解析の手法であるq-space imaging (QSI) および diffusional kurtosis imaging (DKI) の理論と臨床応用例 (使用装置：フィリップス社製「Intera Achieva 3.0T」) をまとめ、非正規分布拡散解析の展望について述べる。

### 非正規分布拡散解析 導入の背景

濃度分布が不均一な状態から均一な状態に自然に変化する現象を拡散と呼ぶ。一次元方向のみの拡散を考え、距離xの地点の時刻tでの濃度をc(x, t)とすると、濃度が異なる2つの物質の境界を通過する粒子の数N(x, t)は、

$$N(x, t) = -D \frac{\partial c}{\partial x}$$

で表される。この式は、濃度が異なる二者の境界を通過する粒子の数はその地点の濃度勾配に比例する (フィックの法則) ということを示しており、その比例定数Dを拡散係数と呼ぶ。この式から、拡散方程式

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

を導くことができる。物質の総量は一定

値の $c_0$ であり、この二階偏微分方程式の解を求めると、

$$c(x, t) = \left( \frac{c_0}{\sqrt{4\pi Dt}} \right) \exp\left( \frac{-x^2}{4Dt} \right)$$

となる。ある粒子が時刻tに距離xの地点に存在する確率P(x, t)は、これを総量 $c_0$ で除したものであり、正規分布を呈することがわかる。さらに、その分散 $\sigma^2$ は平均二乗変位に相当するので、

$$\sigma^2 = \langle x^2 \rangle = 2Dt$$

というEinstein-Smoluchowskiの式を得ることができる<sup>1)</sup>。つまり、粒子は正規分布に従い拡散し、時刻tにおける平均の変位は $2Dt$ で表される。現在広く用いられているDWIは、この理論を前提としたStejskal-Tannerモデルが使用されている。これは、粒子の拡散を遮るものがない広い空間で実現するが、実際の生体内では細胞膜のような複雑な壁構造や複数のコンパートメントが存在し<sup>2), 3)</sup>、拡散が制限される (図1)。このように組織内で異なる状態の拡散が存在する場合、それらを解析するためには複数のb値で撮像し、さまざまな速度の拡散を評価することが必要となる。そこで、QSIやDKIのような非正規分布拡散解析が用いられる。

### q-space imaging (QSI)

制限拡散をモデルを用いた解析で評価するためには、組織の複雑な構造を反

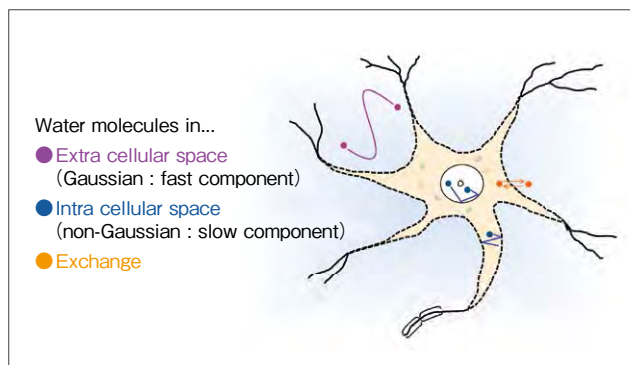


図1 神経細胞周囲の水分子の挙動

細胞外の広い空間を拡散する水分子は非制限拡散に近い挙動を示すが、細胞内の制限拡散と細胞内外の水分子の交換により、正規分布を示さないことが多い。