

2. diffusional kurtosis imaging (DKI)

中西 淳*¹/福永 一星*^{1,2}/吉田茉莉子*¹
堀 正明*¹/青木 茂樹*¹

*1 順天堂大学医学部放射線医学講座 *2 首都大学東京人間健康科学研究科

近年、正規分布を仮定しない拡散の有用性が多く報告されており、その正常組織と病変組織の間のコントラストおよび計測値が、新たな診断情報として注目されつつある^{1)~8)}。

diffusional kurtosis imaging (DKI) は、従来の拡散テンソル (diffusion tensor imaging : DTI) とは異なる理論的背景による解析方法であり、正規分布を仮定しない拡散 (制限拡散) の評価が可能となる¹⁾。本稿では、DKIの理論、撮像・解析法、有用性、課題について述べる。

DKI とは

現在、臨床で用いられている拡散強調像 (DWI) から計算した見かけの拡散係数 (apparent diffusion coefficient : ADC) や拡散異方性 (fractional anisotropy : FA) は、拡散は正規分布 (ガウス分布) するという Einstein-Smoluchowski

の式の前提のもとで計算されている⁶⁾。

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

(ただし、 $\langle x^2 \rangle$ = 平均二乗変位、 D = 拡散係数、 t = 拡散時間)

しかし、拡散MRIの対象となる実際の生体内微細構造はきわめて複雑で、その微細構造により細胞内の水分子は細胞膜や細胞内小器官に拡散途中で衝突し、跳ね返されることが想定される。いわゆる、水分子にとって空間が制限された拡散 (制限拡散) となっている場合が多く、上記モデルによる計測に限界がある。つまり、厳密に言えば生体における水分子の拡散は、正規分布から逸脱していると言える^{1)~6)}。

DKI (kurtosisは尖度だが、統計学の尖度とは使用法が異なるので、kurtosisのままとする) は、正規分布ではない水分子の拡散状態を、正規分布からのず

れ (逸脱) を示す統計量として画像化したものである。DKIは従来の拡散画像とはまったく違う理論的背景による解析であり、脳の微細構造やその病態に対して、細胞内もしくは細胞外の水分子の状態を把握する新たな評価法となりうる可能性がある。

理 論

尖度は正規分布からの逸脱の度合いを表す統計量であり、MR信号においては以下の式によって定義される¹⁾。

$$S_{\text{exp}} = \left\{ \eta^2 + \left[S_0 \exp \left(-bD_{\text{app}} + \frac{1}{6} b^2 D_{\text{app}}^2 K_{\text{app}} \right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$K_{\text{app}} = \frac{MD^2}{D_{\text{app}}^2} \sum_{i=x,y,z} \sum_{j=x,y,z} \sum_{k=x,y,z} \sum_{l=x,y,z} n_i n_j n_k n_l W_{ijkl} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 η は Rician noise、 D_{app} は見かけの拡散係数、 K_{app} は見かけの拡散尖度係数、 MD は mean diffusivity、 $n_i n_j n_k n_l$ は方向ベクトル n の成分、 W_{ijkl} は拡散尖度の成分を示す。3つの b 値を使用した場合の拡散尖度は、簡易的に計算することができる。 b 値による信号強度減衰曲線が (1) 式で示されるとき、 b 値の上限は以下の式で定義される。

$$b \leq \frac{3}{DK} \quad \dots \dots \dots (3)$$

上式より、DKI解析で使用する b 値

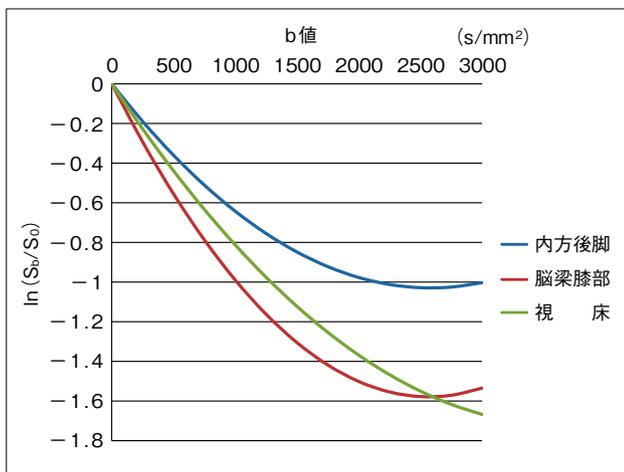


図1 各組織におけるDKI信号強度曲線 (使用 b 値 = 0~3000 s/mm^2 , 250 s/mm^2 ステップ)