

9. q-space

— Diffusion現象からより多くの生体情報を引き出すために

瀧澤

修/村田 勝俊

シーメンス・ジャパン(株) イメージング&セラピー事業本部
リサーチ&コラボレーション部

拡散現象は、生体内の水について、分子レベルの水の動きと磁気共鳴(MRI)を結びつけている。MR技術の進歩によって拡散強調画像(diffusion weighted image:DWI)が安定に得られるようになり、頭部だけではなく、腹部など動きの多い臓器に対しても臨床への応用が始まっている(拡散の応用に関しては、多くの解説および成書がある。例えば、参考文献1)~4)などを参照されたい)。

磁気共鳴信号は、生体内の水の動きを調べるマイクロなプローブであり、拡散情報を解析することによって、生体のより詳細な構造の情報が得られる可能性がある。ここでは、最近の拡散情報の解析ツールであるq-spaceという考え方について、拡散現象の原理から最近の発展の意義をまとめてみたい。

分子の拡散現象と磁気共鳴

1. 拡散現象(diffusion)

植物学者であるBrownは、水の上に浮かんだ花粉のランダム運動を、生命に関係しない一般的な現象であることを見つけた。この現象の基になっているのが、拡散と呼ばれる現象である。

濃度や温度の異なる状態や物質が境界を接しているとき、「境界」という制限がなくなれば2つの物質は混じりあい、次第に均一化していく。このとき、境界を通過して移動する物質の粒子数は、その濃度差に比例する(フィックの法則)。この比例係数を拡散係数Dと呼ぶ。拡散係数Dの物質の中で、分子が時刻 $t=0$ において $x=x_0$ の位置にあったとすると、ある時刻 t での分子の移動距離の二乗の平均は、

$$\langle (x-x_0)^2 \rangle = 2Dt$$

で示される。すなわち、移動距離の二乗平均は時刻 t に比例し、その比例係数がDである。拡散係数Dは、個々の分子の移動の過程ではなく、ある時間内に平均してどのくらいの距離を移動しているか(平均移動距離)を示すものである。

実際にどのような移動が行われているかは、例えば、一次元のランダムウォークのモデルのように、分子が1回の移動の1ステップごとに、確率が $1/2$ で、距離 $+\alpha$ あるいは $-\alpha$ だけ進むとして、平

均の移動距離が計算できる。これが多数回繰り返すとすると、いわゆる二項分布になる。十分な時間の後、時間 t において、位置 x に見出す確率(probability density:P)は、

$$P(x,t) = \left(\frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \right) \exp(-x^2/4Dt)$$

とガウス型の分布になっている。

2. diffusion現象とMR

核磁気共鳴(NMR)現象が1946年に発見されて以後、磁気共鳴信号から測定対象の性質に関する詳細な情報が得られることがわかってきた。Hahn⁵⁾は、FID信号が消失した後にRFパルスを追加することによって、いったん消失した磁気共鳴信号を再び生じさせそれをエコー信号と呼んだ。FID信号消失の原因となっている磁場の不均一性について、エコー信号を用いると、磁場の不均一性によって起こる信号減衰と、不均一性の変化によって起こる信号減衰を分離できることがわかった。磁場の不均一性の時間変化の原因を、不均一磁場の中での拡散による分子の動きに起因するものと考え、Blochの方程式の中で拡散の項を加えることによって拡散の効果を表した。 $TE=2\tau$ における信号強度は、

$$M(2\tau) = M(0) \exp(-2\tau/T_2) \exp[-\gamma^2(\partial H/\partial z)^2(2/3)D\tau^3] \dots \dots \dots (1)$$

で示される。 $\partial H/\partial z$ は静磁場の勾配、Dは拡散係数である。この現象は、Carr,