

## 「拡散をもう一度振り返る」

～今、振り返る基礎 Motion Probing Gradient : MPG～

埼玉県済生会川口総合病院  
丸 武史

### 1. 拡散強調画像

#### 1-1 はじめに

拡散強調画像 (Diffusion Weighted Image : DWI) は、現在の MRI 検査において欠かせないシーケンスとなっている。特に、超急性期または急性期の脳梗塞診断に有用とされ、救急医療の場において MRI が必要不可欠となる要因になったシーケンスともいえる。また救急医療以外の臨床においても、腫瘍の質的診断や悪性腫瘍の全身検索などその使用は多岐に及んでいる。

さらに最近の技術の進歩により、拡散テンソル、DKI (diffusional kurtosis imaging)、QSI (q-space imaging) と発展を遂げ、その応用はとどまることを知らないシーケンスである。そのため、今一度拡散強調画像の基礎や原理を理解しておくことは非常に重要である。

#### 1-2 拡散 diffusion

拡散強調画像は、文字通り「拡散 diffusion」を強調した画像である。一般に拡散というと「濃度の分布が非平衡な状態から平衡状態に自然に変わっていく現象」を指す。ここで、拡散現象の例を図1に示す。水が入ったコップにインクを1滴たらすところを思い浮かべていただきたい。拡散とは、垂らしたインクが徐々に水に攪拌され混

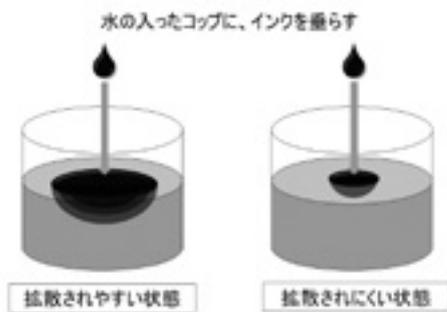


図1. 拡散現象の例

ざっていく様子である。しかし、拡散現象は全てにおいて同一ではない。早く水に溶けて混ざるものもあれば、徐々に混ざっていくもの、全く攪拌されないものなど、拡散する速度はさまざまである。実際、拡散強調画像はその「拡散する速度の差」を画像化している。

#### 1-3 人体組織の中の拡散現象

MRI において観察される拡散現象は、主に水分子の自己拡散 (ブラウン運動) である。自己拡散とは、水分子が動きやすいか動きにくいということであり、「動きやすい」=「拡散しやすい」、 「動きにくい」=「拡散しにくい」となる。人体組織において水分子の自己拡散は、粘稠度、細胞内液、細胞外液のバランス、細胞密度によって差が生じ、拡散強調画像で捉えることが可能である。

### 2. Motion Probing Gradient : MPG

#### 2-1 拡散強調画像のシーケンス

一般的な拡散強調画像のシーケンスチャートを図2に示す。ここで MPG は 180 度パルスをはさむ2つの傾斜磁場 (矢印) のことである。仮に MPG がなければ T2 強調画像になってしまう。よって拡散強調画像を得るために MPG は必須である。

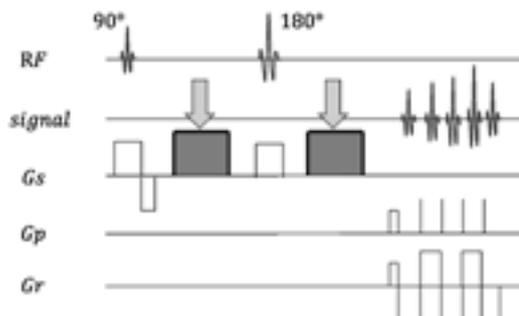


図2. DWI : SE-EPI のシーケンスチャート

一般に、傾斜磁場をかけると共鳴周波数や位相が変化するが、通常は3次元の位置情報を得るために用いられている。一方、拡散強調画像ではMPGという2つの傾斜磁場によって水分子の拡散運動を位相の変化として捉えて画像化している。

### 2-2 MPG が生態に及ぼす影響

先述のように MPG は2つの傾斜磁場であるが、実際は「同じ強度で極性が反対の2つの傾斜磁場」のことを指す。このような特性の傾斜磁場を双極傾斜磁場という。

この双極傾斜磁場を用いると、水分子の拡散する速度の差を位相差として捉えることができる。

① 拡散しにくい水分子を動きにくい「静止核」  
 ② 拡散しやすい水分子を動きやすい「移動核」とみなすと、図3に示すように「静止核」は動かないので、最初の傾斜磁場によって進んだ位相は2つめの傾斜磁場（同じ強度で極性が反対）によって位相が元に戻る。一方「移動核」は、移動しているがために最初の傾斜磁場と同じ影響を受けず、位相が元に戻らない。このようにして「静止核」と「移動核」とに位相差が生じる。この結果、得られる合成磁気モーメントは「静止核」で大きく（位相が元に戻っているため強い信号強度を示す）、「移動核」で小さく（位相がバラバラなので信号強度が低い）なり、コントラストとして強調される。

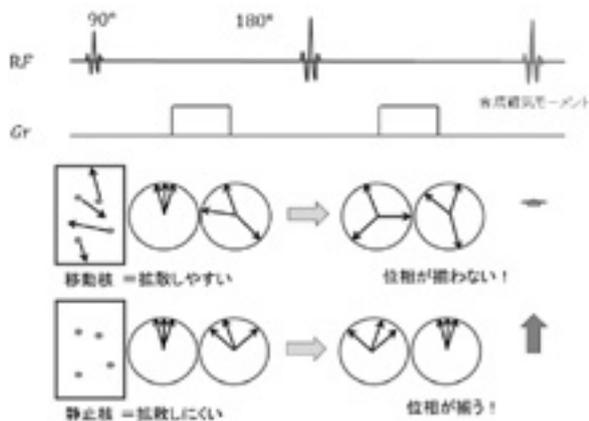


図3. MPG が生態に及ぼす影響

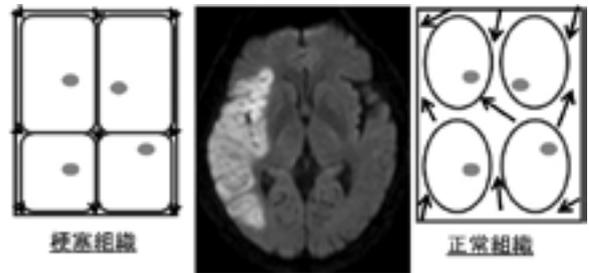


図4. 急性期脳梗塞の水分子

実際の臨床画像を図4に示した。画像は急性期脳梗塞の臨床例である。図において、正常な脳組織の水分子は自由に動けるので「移動核」とみなすことができ、信号強度は低くなる。一方、脳梗塞により細胞性浮腫が生じている水分子は動きが制限されるので「静止核」とみなすことができ、信号強度が高くなる。このようにして水分子の拡散運動を画像化することが可能となる。

ここまで MPG は、双極傾斜磁場のことであり、「移動核」と「静止核」とに位相差を生じさせ、水分子の拡散運動を画像化していることを簡単に示した。次節からは、なぜこのような現象が起きるのか、MPGの基礎や原理について記述していきたいと思う。

### 3. MPG の原理

#### 3-1 傾斜磁場

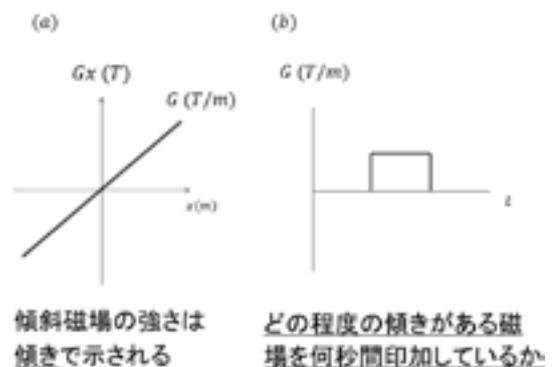


図5. 傾斜磁場

MPG は双極傾斜磁場のことであるが、まずは傾斜磁場の基礎について記述する。図5に示したように傾斜磁場とは文字通り「磁場の傾き」であ

る。図 5a のように座標（ここでは  $x$  座標）によって磁場強度（T）に傾きを持たせている。よって傾斜磁場が強いというのは「磁場の傾きが大きい」ということである。実際の MRI では、図 5b のように横軸に時間（t）、縦軸に磁場の傾きで示される。これはどの程度の傾きを持った傾斜磁場が、何秒間かかっているかということを示している。パルスシーケンスでは図 5b のように表記される。

### 3-2 位相と共鳴周波数

位相と共鳴周波数（角周波数）の関係について図 6 に示す。

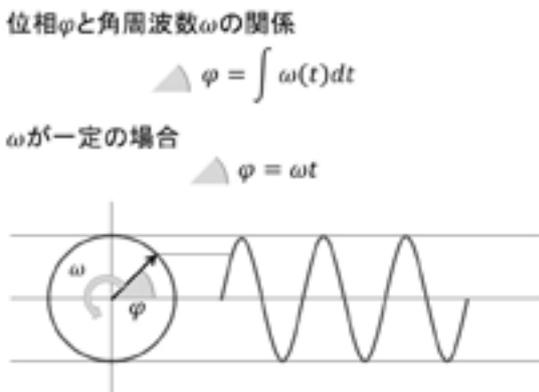


図 6. 位相と周波数

位相  $\varphi$  と共鳴周波数  $\omega$  には以下のような関係がある。

$$\varphi = \int \omega(t) dt \quad \dots \text{式①}$$

つまり、位相  $\varphi$  と共鳴周波数  $\omega$  の時間積分で示される。ここで共鳴周波数  $\omega$  が一定の場合は

$$\varphi = \omega t \quad \dots \text{式②}$$

となり、位相  $\varphi$  は共鳴周波数  $\omega$  と時間  $t$  の積という単純な式となる。これは「位相は時間  $t$  に比例する」ことを示している。

### 3-3 傾斜磁場による共鳴周波数と位相の変化

#### 3-3-1 ラーモアの式

一般に傾斜磁場が印加されると共鳴周波数や位相が変化するが、これを説明するにはラーモアの

式の理解が不可欠である。一般に、静磁場  $\beta_0$  にさらされた水素原子核はラーモアの式に従った周波数で回転する。

$$\omega_0 = \gamma \beta_0 \quad \dots \text{式③}$$

$\gamma$  は磁気回転比と呼ばれる各核種に特有な定数である。つまり原子核の周波数は磁場強度（T）に比例するということである。

#### 3-3-2 傾斜磁場と共鳴周波数および位相の関係

傾斜磁場を印加する（ここでは  $x$  座標）とラーモアの式によって共鳴周波数は以下のように変化する。

$$\omega_0 = \gamma(\beta_0 + Gx) = \gamma\beta_0 + \gamma Gx \quad \dots \text{式④}$$

傾斜磁場  $G$  の単位は（T/m）であるが、座標  $x$ (m) をかけることで  $Gx$ (T) となり、磁場強度の単位になる。式④より、傾斜磁場を印加すると共鳴周波数は  $\gamma Gx$  分だけ変化することが分かる。

次に位相の変化について考える。先述のように傾斜磁場を印加したときの共鳴周波数の変化分は

$$\omega = \gamma Gx \quad \dots \text{式⑤}$$

であった。さて、3-1 で記述したように傾斜磁場はある一定時間（ $t$ ）印加される。そのため式⑤の両辺に  $t$  を乗じると

$$\omega t = \gamma Gxt \quad \dots \text{式⑥}$$

となり式②の位相と共鳴周波数の関係より

$$\varphi = \omega t = \gamma Gxt \quad \dots \text{式⑦}$$

となる。よって傾斜磁場を印加したときの位相は  $\gamma Gxt$  分だけ変化することが分かる。

#### 3-4 双極傾斜磁場

傾斜磁場  $G$  を印加すると、共鳴周波数や位相が変化することが前節により示されたが、ここで水素原子核の傾斜磁場印加時の位相を考える。式⑦より傾斜磁場が一定とすると、位相は時間（ $t$ ）に比例することが分かる。つまり「位相の変化量は傾斜磁場の印加時間（ $\delta$ ）に単純比例する」ということである。

図 7 に示すように、任意の座標  $x$  における位相は印加時間に比例するので、時間  $\delta$  後に最大になる。ここで、続いて同じ強さで極性が反対の傾斜磁場  $-G$  を印加すると、先ほど増加した位相が減

少し、 $2\delta$ 後に最初の位相に戻ることになる。このような  $G/-G$  という組み合わせを「双極傾斜磁場」という。よって双極傾斜磁場を印加すると位相は元に戻ることが分かる。ただし、これは静止している水素原子核、つまり「静止核」の場合である。

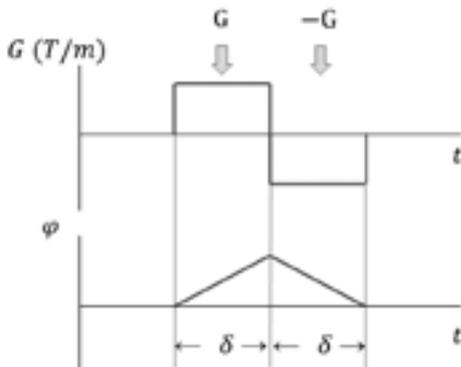


図7. 双極傾斜磁場を印加したときの位相

### 3-5 移動核の位相

移動核とは、水素原子核の座標  $x$  が時間によって変化することを示している。つまり座標  $x$  が時間  $t$  の関数  $x(t)$  になるということである。よって、式⑦は、以下ようになる。

$$\varphi = \gamma G \int x(t) dt \quad \dots \text{式⑧}$$

ここで原子核が元の座標  $x_0$  から速度  $v$  で移動したとすると、時間  $t$  後の移動核の座標は以下のようにになる。

$$x(t) = x_0 + vt \quad \dots \text{式⑨}$$

式⑨を式⑧に代入すると

$$\varphi = \gamma G \int (x_0 + vt) dt$$

となり、これを解くと

$$\varphi = \gamma G x_0 t + \gamma G \frac{1}{2} vt^2 \quad \dots \text{式⑩}$$

となる。式⑩の  $\gamma G x_0 t$  は静止核の位相と同じであるので、移動核の位相は静止核の位相よりも  $\gamma G \frac{1}{2} vt^2$  分進んでいることを示している。

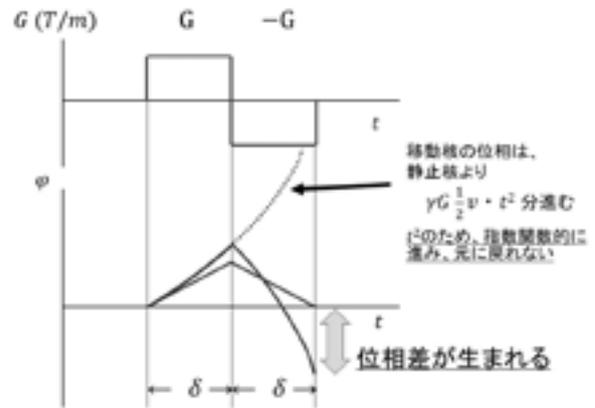


図8. 移動核の位相

双極傾斜磁場を印加したときの、移動核の位相について図8に示した。静止核の場合は印加時間に比例関係であるため、位相は最初の状態に戻ったが、移動核は  $\gamma G \frac{1}{2} vt^2$  分進んでいるため位相が元に戻らない。つまり双極傾斜磁場を印加すると「静止核」と「移動核」との間に位相差を生じさせることを示している。

さらに実際のMRIでは、双極傾斜磁場の正負のローブに間隔を設定することがある(図9)。

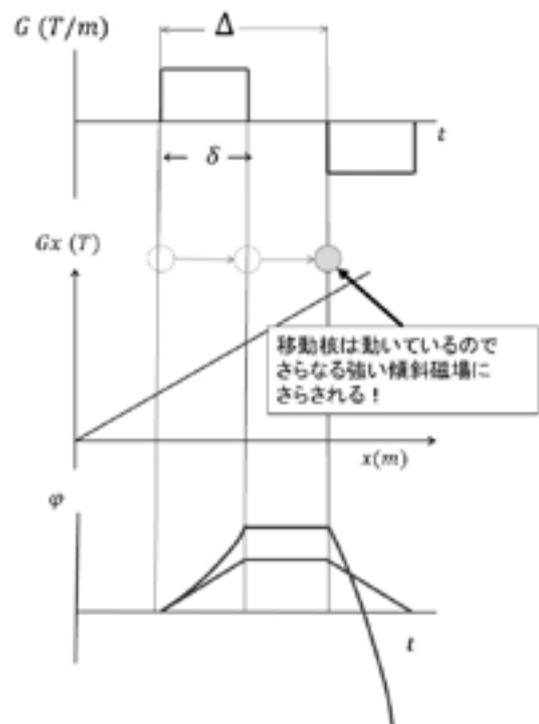


図9. 正負のローブに間隔があるときの位相

この場合にも静止核の位相は最初の状態に戻ることができるが、移動核の位相はさらに変化することになる。図9に示したように、傾斜磁場がかかっていない間隔（ここでは $\Delta$ ）にも、核は移動して次の傾斜磁場がかかったときにより高い（もしくは低い）磁場にさらされることになるからである。傾斜磁場のかかっていないローブ間隔には位相は変化しないが、次のローブから始まる位相減少曲線の角度がより急になる。つまり「傾斜磁場のかかっていない間隔も移動核の位相変化に寄与している」ということである。

このようにして、双極傾斜磁場を印加することにより原子核の動きを位相差として捉えることができる。そしてこのような双極傾斜磁場をMPG (Motion Probing Gradient) と呼んでいるわけである。

#### 4. 拡散をもう一度振り返る

##### 4-1 b値について

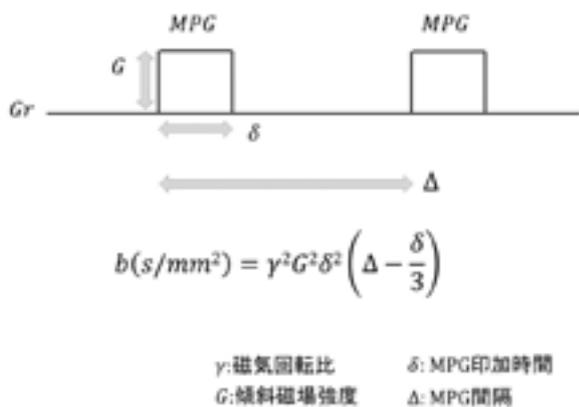


図10 b値

ここまでDWIの基礎としてMPGの原理について記述してきたが、実際に原理や基礎を知ることによって拡散強調画像について理解できることがある。その1つがb値である。b値とは拡散がどの程度強調されているかを示す値であり、大きい値になるほど拡散の強調された画像となる。b値は、実際は図にもあるように以下の式で表される。

$$b(s/mm^2) = \gamma^2 G^2 \delta^2 \left( \Delta - \frac{\delta}{3} \right)$$

$G$ は傾斜磁場強度、 $\delta$ はMPG印加時間、 $\Delta$ はMPG間隔である(図10)が、これらは全てMPGの因子である。つまり、b値はMPGの性質そのものであるといえる。例えば $\delta$ (MPG印加時間)について考えてみると、式⑩に示したように移動核と静止核の位相差は傾斜磁場の印加時間が長いほど大きいため、 $\delta$ が大きいほど拡散を強調した画像になると予想することは容易である。また $\Delta$ は3.5で示したように、傾斜磁場のかかっていない間隔も移動核の位相変化に寄与しているため、拡散の強調程度に寄与していることが予想できる。このようにMPGを理解することで、拡散強調画像についての理解をさらに深めることが可能となる。

##### 4-2 DWIからの応用・派生シーケンスについて

拡散強調画像から派生したシーケンスも、MPGの原理を知ることによって理解しやすくなる。その一つにlow b imagingが挙げられる。

Low b imagingはDWIのb値を通常よりも低く設定して、血液信号を抑制した(Black Blood)脂肪抑制T2強調画像を取得するシーケンスである。一般に頭部や対幹部において、b値は800~1500に設定されることが多いが、low b imagingでは10~50程度の小さいb値を設定する。つまり、MPGを少しだけ印加するというのである。DWIのシーケンスはMPGが設定されないとT2強調画像になってしまうが、MPGが少しだけ印加されていることにより、より動く水分子(移動核)のみに位相差を生じさせている。そのより動く水分子は、体内においては血流に当たる。よって少しのMPGを印加することにより、血流信号を抑制したT2強調画像を取得することが可能となる。このシーケンスにおいても、MPGの特性を知っていれば理解しやすいものとなる。

その他、MSDE (Motion Sensitized Driven Equilibrium) 法やDSDE (Diffusion-sensitized Driven Equilibrium) 法、PC (Phase Contrast) 法やMRE (MR Elastography) に至るまで、

MPGについて理解することで、シーケンスの理解がより容易となる。これらのシーケンスについての説明は本稿では割愛するが、MPGを理解した後、ぜひ振り返っていただきたい。

## 5. さいごに

何事においても、基礎は非常に重要である。これまでMPGについて詳細を記述してきたが、拡散強調画像を理解するには必須の基礎である。そのため、MPGの原理についての正確な理解が重要となる。今回まとめた内容に関して、理解しやすいように一部の式や文言が正確ではない表現または簡略化されたものになっているのをご容赦願いたい。詳細についてさらに興味のある読者は、後述する参考文献を参照していただければ幸いである。

本稿でまとめた内容が、これからの業務や理解の一助になれば幸いである。

## 参考文献

1. 拡散MRI  
ブラウン運動，拡散テンソルからq空間へ  
荒木力・著 秀潤社
2. MRI応用自在 第3版 監修：高原太郎  
MEDICAL VIEW