

「MR 信号の成り立ち」

GE ヘルスケア・ジャパン株式会社
MR 営業推進部 平田 直樹

はじめに

1980年代にMRが最初の臨床への適用が行われて以来、MRに関する技術は飛躍的な進歩を遂げた。今回、MRを理解する上での基礎について3回に分けて解説させていただく。第1回は、MR信号の成り立ちについて解説する。

磁場の中のスピン

原子核はある軸を中心に回転運動を行っている。原子核は電荷を持っているので、この回転運動はスピンの軸と同じ方向の磁気モーメントを発生させる。磁気モーメントとは、N極とS極を持った1本の棒磁石と考えてよい。この磁気モーメントの強さは原子核の種類によって決まる固有の性質だが、 ^1H （プロトン）原子核は最も高い磁気モーメントを持っており、また高い構成比を持っていることから、MRイメージングの対象核種として最良の適格性を備えている。プロトン以外に臨床応用されている核種としてはリン（ ^{31}P ）があるが、その構成比はプロトンの約6%程度である。

磁気回転比

外部から加えられる磁界が存在していない場合は、それぞれの磁気モーメントは特定の方向性を持たない。しかし、外部からの磁界（ B_0 ）が作用すると、これらの磁気モーメントはこの B_0 の方向に向きをそろえる方向を示す。棒磁石が見せる挙動と同じである。ただし、個々のスピンは B_0 に対して正確に同じ方向を向いているわけではなく、 B_0 に対してある角度を保持している（図1）。磁気モーメントを持つスピンは、 B_0 中においてこの方向を軸とした歳差運動を起こさせるモーメントを生ずる。これは回転している「こま」に例えることができる。こまが重力に方向を軸として歳差運動を行うのと同じである。

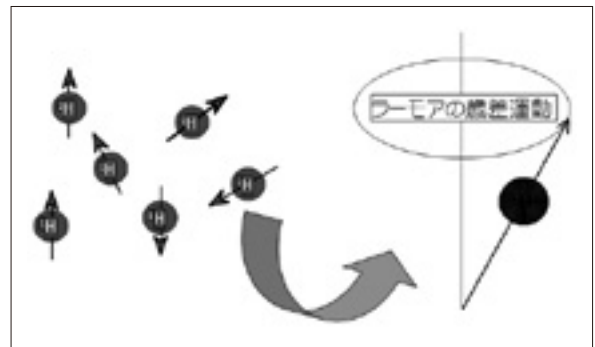


図1. 磁気モーメントと歳差運動

次に、個々のスピンのどのくらいの速度で歳差運動を行っているか考えてみる。この歳差運動は、ラーモアの式と呼ばれるシンプルな関係によって与えられている。

$$F = \gamma B_0$$

F は歳差運動の周波数、 B_0 は外部磁場の強さ、 γ は対象となる原子核のタイプにより決定する磁気モーメントの強さに関する定数である。この定数は磁気回転比と呼ばれている。

水素原子核（プロトン）の磁気回転比は次の値になる。

$$\gamma\text{H} = 4257\text{Hz} / \text{Gauss}$$

$$\begin{aligned} 1.5\text{T} (= 15,000\text{Gauss}) \text{ とすると、} \\ 4257\text{Hz} / \text{Gauss} \times 15,000 \text{ Gauss} \\ = 63,855,000 \text{ Hz} \\ = 63.855\text{MHz} \end{aligned}$$

3T の場合には同様に計算して歳差運動のラーモア周波数は 127.71MHz となる。非常に高速で歳差運動していることが分かる。

RF パルスとフリップ角

信号を検出するためには、共鳴 (resonance) の条件が成立する必要がある。「共鳴」という用語には、エネルギーの相互の吸収と放出の意味が含まれている。エネルギーの吸収はRFパルスの送信によって起こされ、エネルギーの放出は緩和過程 (後述) を通して伝播される。外部磁場 (B_0) が加わっている状態において、スピンの集団にラーモア周波数のRFパルスを照射すると、図2におけるXY平面において回転を始める。

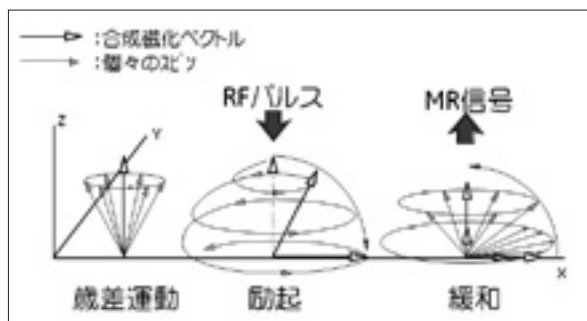


図2. 励起と緩和

このようにして、正味磁化は縦 (Z 方向) から直行面 (XY 平面) に向かって、さらに -Z 方向へと回転する。この角度はフリップ角と呼ばれ、RFパルスの持続時間と振幅に比例する。ちょうど正味磁化がXY平面まで倒れるだけの持続時間、振りを備えたRFパルスをが 90° パルスである。

緩和：平行状態への復帰

RFパルスを切ると正味磁化は元の状態に戻ろうとするが、この緩和過程には $T2^*$ 緩和、 $T2$ 緩和、 $T1$ 緩和が存在する。まずは $T2^*$ と $T2$ 緩和について説明する。

磁化の個々の成分は、わずかではあるが異なる速度で回転している。これがXY平面における「dephasing」として知られている現象である。MR信号として記録される信号は横方向の信号の総和であるため、もし dephasing が十分に行われれば信号はなくなる。この dephasing の主な原因の一つは、外部磁場 (B_0) の不均一である。異なる位置にあるスピンは正確に同一の B_0 を受けているわけではなく、従って感じている磁場の

違いによって異なる歳差運動を行っている。このように B_0 の不均一は dephasing の要因の一つではあるが、仮に B_0 が完全に均一であったとしても dephasing は起こる。原子核やそれを取り巻く電子は、それぞれ異なるスピンおよび磁気モーメントを持っているため、共鳴に関わる個々のスピンの置かれている磁場環境は、他のスピンと正確に同じ位置にはなり得ないからである。よってそれぞれのスピンが相互に作用し合うことで、ゆっくりとした dephasing が起こる。これを $T2$ 緩和、またはスピン-スピン緩和と呼ぶ (図3参照)。このスピン-スピン緩和と B_0 不均一が一緒になって観測される現象を $T2^*$ 緩和である。

ここまでXY平面 (直交平面) における緩和について述べてきたが、これとは別に、縦磁化がその平衡状態に回復する過程が存在する。仮に 90° パルスをかけたとすると、正味磁化は直交平面に倒れている。従って、縦磁化の総量は0である。RFパルス印可後における縦磁化の値の時間的変化は、0から平衡状態まで上昇することが分かっている。平衡状態の値は対象物のスピンの数や温度、磁場強度によって異なる。この現象が生じる過程は $T1$ 緩和、またはスピン-格子緩和と呼ばれている (図3参照)。

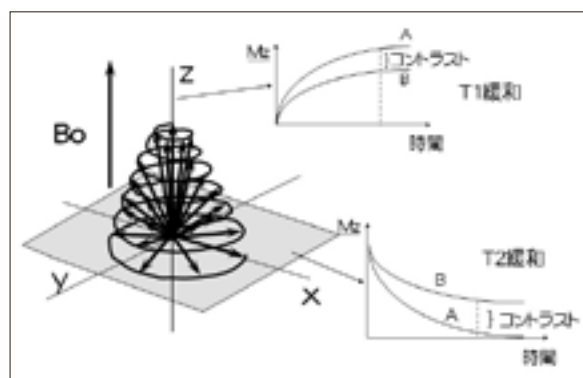


図3. $T2$ 緩和と $T1$ 緩和

$T1$ 緩和と $T2$ 緩和は別々に起こるものではなく、同時に起こるため、実際にはどちらかのコントラストをつけるタイミングで撮像が行われる (図4)。

スライス選択

MRIにおいて、必要な部分のみの画像を得るためには、信号収集領域を限定する必要がある。このためには所定のスライス中の組織のみを選択的に励起（縦磁化を横磁化にする）すればよい。これは、選んだスライス面に垂直な軸方向に傾斜磁場を与え、この方向に直線的な共鳴周波数の変化を起こすことで達せられる。狭い周波数レンジで構成されているRFパルスは、この周波数に相当する共鳴周波数を持つスピンのみを励起する。RFパルス送信後、スライス選択傾斜磁場も0に戻し、選んだスライスから発せられる信号を検出する。より薄いスライスを得たい場合には2通りの方法がある。1つはRFパルスのバンド幅を狭くする（図5）か、または傾斜磁場の勾配を増すことによってより薄いスライスを選択することができる。

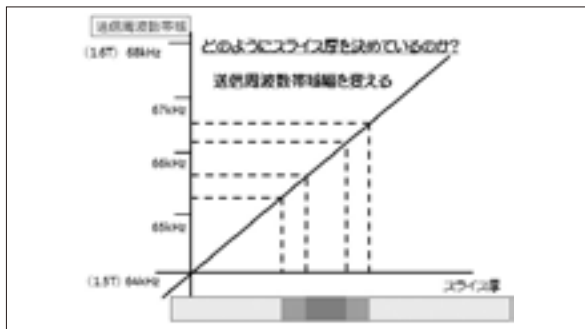


図4. RF送信バンド幅調整によるスライス選択

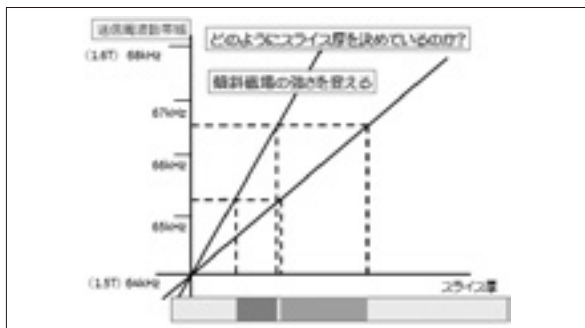


図5. 傾斜磁場勾配調整によるスライス選択

周波数エンコードと位相エンコード

次の問題は、励起スライスに対してイメージの情報付加することである。2次元である面から

面内の位置情報を得るために位相エンコード、周波数エンコードの2つの手続きが必要となる。

位相エンコードでは振幅の異なる傾斜磁場が複数回（例えば128回など）繰り返され、それぞれのデータが個別に保存される。位相エンコード傾斜磁場を経たデータは、それぞれ位相が異なった状態で保存されている。

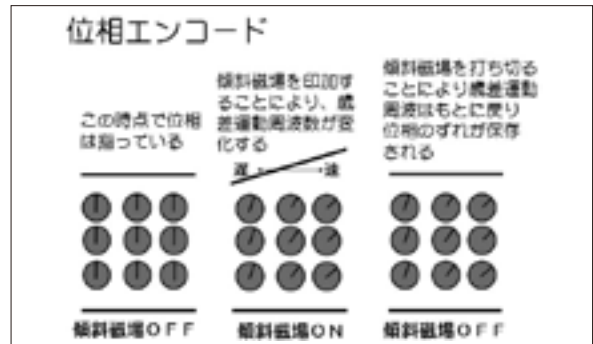


図6. 位相エンコード

これに対し、周波数エンコードでは、位相エンコードとは別の方向、位相エンコードが平面のY方向であればX方向に加えられる。周波数エンコードが加えられるタイミングはMRデータの読み出しのタイミングである。これにより読み出し時の歳差運動に差が生じ、プロトンの位置情報として利用することができる。なお、先に行った位相エンコードによる位相の違いはそのまま保持されているため、平面上のX方向、Y方向の位置情報として利用することができるのである。

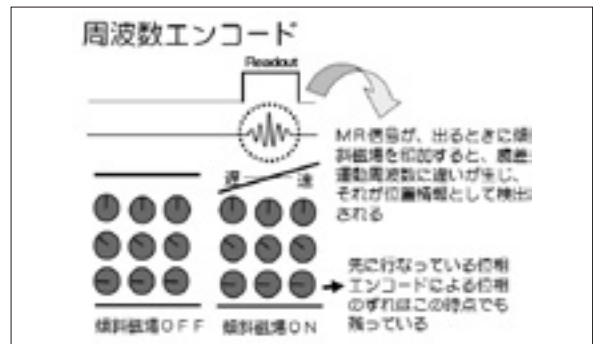


図7. 周波数エンコード

以上、MR信号の成り立ちについて述べた。次回はスピナー法について解説する。