

第4章

MRI 画像のコントラスト

4

MRIの画像は撮像法によってそのコントラストが変わってくる。画像のコントラストは、被写体の各組織の緩和時間と撮像におけるパルスシーケンスに深く関わっている。本章では、画像のコントラストを議論するときには欠かせないMR現象の緩和過程を説明し、画像のコントラストがMRIの撮像に関わるパラメータによってどのように変わるのかを解説する。また、主なパルスシーケンスの画像のコントラストも説明する。

まずは、MR信号がどのように発生して計測されるのかについて緩和時間も含めて説明し、次に、MRIの撮像パラメータが画像のコントラストとどのように関わるのかを説明する。さらに、最も標準的なスピンエコー法、インバージョンリカバリー法とグラジエントエコー法の画像のコントラストについて述べる。

〔第1節〕 MR 信号

MRIでは核磁気共鳴現象を利用して信号を取得している。通常のMRI装置で計測の対象となるのは静磁場中に置かれた水素原子核である。RFパルスを照射することによって水素原子核を励起し、励起された水素原子核は電磁波を発生しながら元の状態に戻る。その際発生した電磁波を信号として取得する。この信号発生モードを図4-1に示す。

水素原子核（陽子）にはスピンの存在していて、それが小さな磁場を形成している。通常その磁場はさまざまな方向を向いているので、全体としてその磁場は打ち消し合っている（図4-2）。水素原子核を静磁場中に置くと個々のスピンは一定の方向を向き、磁場強度に比例して歳差運動（首振り運動）を始める（図4-3）。全体としては歳差運動の周期に合わせて回転する1つの磁場を持っているように見える。これを巨視的磁化といい、その磁化を巨視的磁化ベクトルとして表すことができる（図4-4）。歳差運動の周波数 ω はラーモア周波数と呼ばれ、静磁場の強度 B_0 に比例し、

$$\omega = \gamma B_0 \quad (4-1)$$

と表される。この周波数と同じ周波数の電磁波を照射すると、磁化ベクトルは照射時間に応じて回転しながら倒れていく（図4-5）。この電磁波はパルス状に照射されるのでRFパルスと呼ばれる。磁化ベクトルが90°倒れるように照射時間を調節したRFパルスを90°パルス、180°倒れるように照射時間を調節したRFパルスを180°パルスという。静磁場中の磁化ベクトルがz軸方向を向いているとしたとき、90°パルスで倒された磁化ベクトルはxy平面をラーモア周波数で回転していることになる。この倒れた磁化ベクトルの回転によりラーモア周波数と同じ周波数の電磁波が発生する。それを外側に置かれた計測用のコイルで計測する。これは棒磁石を回転させ、近くにコイルを置き電磁誘導によって発生した誘導電流を計測するのと同じ原理である（図4-6）。磁化ベクトルは電磁波を発生しながら元

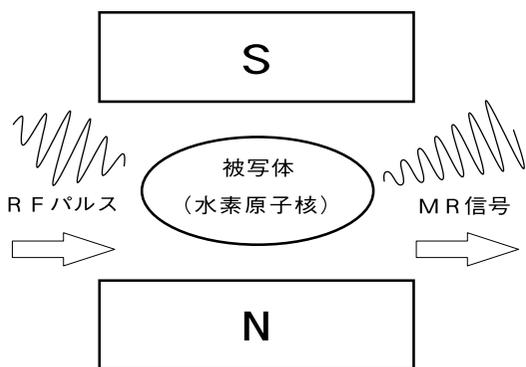


図4-1 MR 信号発生の様式図

静磁場中に置かれた被写体に RF パルスを照射すると MR 信号が放出される。

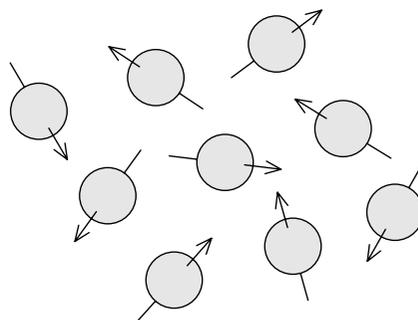


図4-2 通常のスピンの状態

さまざまな方向を向いているので全体として磁場は打ち消し合っている。

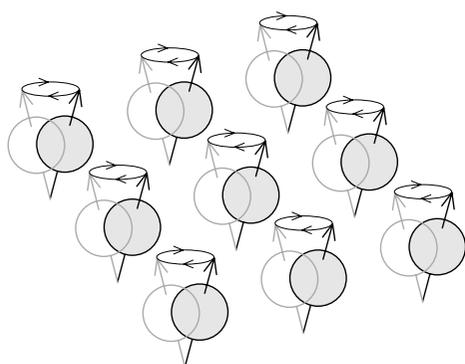


図4-3 静磁場中のスピンの状態

スピンの方向が一定になり、コマが回転するときのように歳差運動（首振り運動）をする。

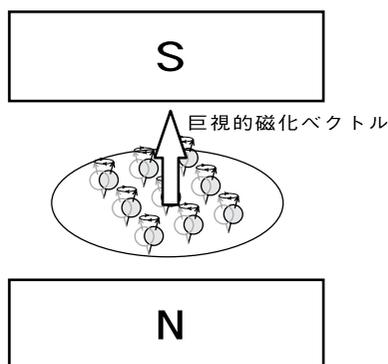


図4-4 巨視的磁化ベクトル

静磁場中のスピンは一定の方向を向いているので全体として磁場が発生する。これを巨視的磁化ベクトルとしてベクトルで表すことができる。

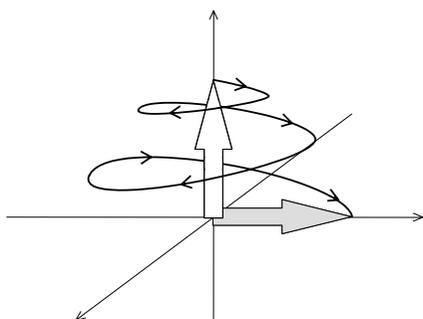


図4-5 RF パルスを照射された磁化ベクトルの振る舞い

ラーモア周波数で回転しながら磁化ベクトルが倒れていく。

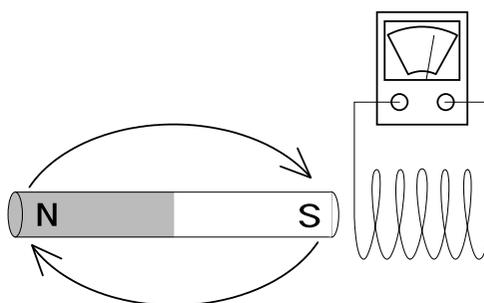


図4-6 電磁誘導による誘導電流の計測

棒磁石（磁場）を回転させると近くに置いたコイルに電流が流れる。これと同じ原理で、磁化ベクトルの回転が計測用のコイルに誘導電流を発生させる。

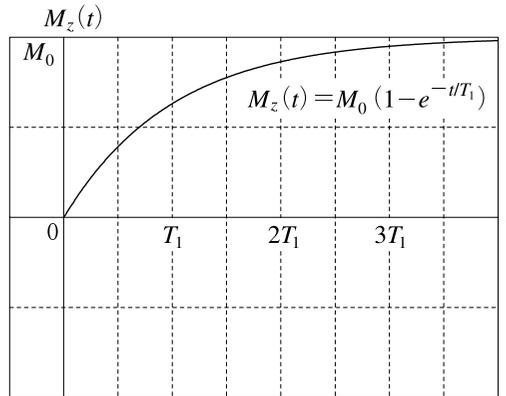


図4-7 90°パルス後の縦緩和を示す関数のグラフ
z軸方向の磁化ベクトル成分が回復していく様子
を示している。

の状態に戻っていく。磁化ベクトルが戻っていく過程を緩和と呼ぶ。緩和には縦緩和と横緩和と呼ばれる2つの緩和過程がある。この緩和過程の時定数を緩和時間と呼び、縦緩和時間を T_1 、横緩和時間を T_2 で表す。この緩和過程を次節で詳細に述べる。

以上の関係を念頭に置いて、実際のパルスシーケンスと k 空間の関係を解説する。

〔第2節〕 緩和過程

(1) 縦緩和

縦緩和はスピン - 格子緩和、熱緩和や T_1 緩和とも呼ばれる。この緩和はRFパルスの照射により励起した核スピンの、周囲の分子（格子）に熱振動としてエネルギーを放出しながら指数関数的に元の状態に戻っていく過程のことである。

静磁場中での平衡状態の磁化ベクトルの大きさを M_0 とする。磁化ベクトルは z 方向を向いているものとし、 x 成分を M_x 、 y 成分を M_y 、 z 成分を M_z とすると、それぞれ、

$$\begin{aligned} M_z &= M_0 \\ M_x &= M_y = 0 \end{aligned} \tag{4-2}$$

となる。緩和過程は磁化ベクトルがこの平衡状態に戻る過程である。

90°パルスをかけると磁化ベクトルは90°倒れるので、 z 成分はなくなり $M_z = 0$ となる。そして、 M_z は縦緩和により縦緩和時間 T_1 のもとの指数関数的に0から M_0 に戻る。これを時間 t の関数として表すと、

$$M_z(t) = M_0(1 - e^{-t/T_1}) \tag{4-3}$$

となる。この関数のグラフを図4-7に示す。

また、180°パルスをかけると磁化ベクトルは180°倒れるので、 z 成分は逆向きになり $M_z = -M_0$ となる。ここから緩和時間 T_1 のもとの M_0 に戻るの、これを時間 t の関数として表すと、

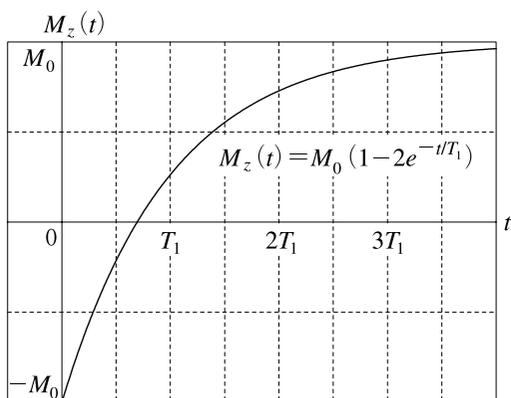


図4-8 180°パルス後の縦緩和を示す関数のグラフ

z 軸方向の磁化ベクトルはマイナスの位置から回復していく。

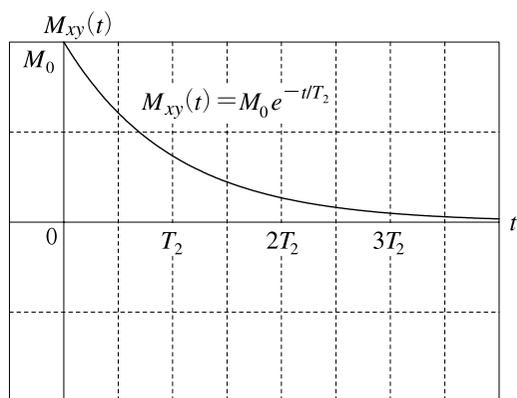


図4-9 横緩和を示す関数のグラフ

磁化ベクトルの xy 平面での成分が減衰していく様子を示している。

$$M_z(t) = M_0(1 - 2e^{-t/T_1}) \quad (4-4)$$

となる。この関数のグラフを図4-8に示す。

縦緩和時間 T_1 は人間の頭部でおよそ500ms ~ 2000msである。

(2) 横緩和

横緩和はスピン - スピン緩和、 T_2 緩和とも呼ばれる。この緩和は一樣な静磁場でRFパルスにより励起した核スピンの、局所的な磁場の違いのためにラーモア周波数にばらつきが生じ、磁化ベクトルの xy 平面上での成分が指数関数的に減少する過程のことである。

90°パルスをかけると磁化ベクトルは90°倒れ、 xy 平面上での磁化ベクトルの大きさ M_{xy} は M_0 と等しくなる。そして、 M_{xy} は横緩和により横緩和時間 T_2 のもとで指数関数的に M_0 から0に戻る。これを時間 t の関数として表すと、

$$M_{xy}(t) = M_0 e^{-t/T_2} \quad (4-5)$$

となる。この関数のグラフを図4-9に示す。

xy 平面（横方向）の緩和には2つの要因が関わっている。1つは分子の相互作用によるもので、これを純粋な T_2 緩和と呼び通常 T_2 というこの緩和時間を指す。それに対して、もう1つは局所的な磁場の不均一性などによって起こる緩和である。両者を併せた緩和を T_2^* と呼び、磁場の不均一性による緩和の緩和時間を T_{2inh} で表すと横緩和の関係は、

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_{2inh}} \quad (4-6)$$

という式で表すことができる。

横緩和時間 T_2 は人間の頭部でおよそ50ms ~ 150msである。