

連続講座

断層映像法の基礎 第8回
MRI画像のコントラスト

篠原 広行¹⁾
橋本 雄幸²⁾
杉本 英治³⁾

¹⁾ 東京都立保健科学大学 放射線学科
²⁾ 横浜創英短期大学 情報処理学科
³⁾ 昭和大学藤が丘病院 放射線科

はじめに

第7回に、MRIのさまざまな撮像法におけるパルスシーケンスについて説明した。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。本稿では、画像のコントラストを議論するときに欠かせない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撮像のパラメータが画像のコントラストとどのように関わっているのかを説明する。さらに、もっとも標準的なSpin Echo法、Inversion Recovery法とGradient Echo法の画像のコントラストについて述べる。

1. MR信号
2. 緩和過程
3. 画像のコントラスト

1. 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。この信号発生の模式図を図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、様々な方向を向いているので、全体としてその磁場は

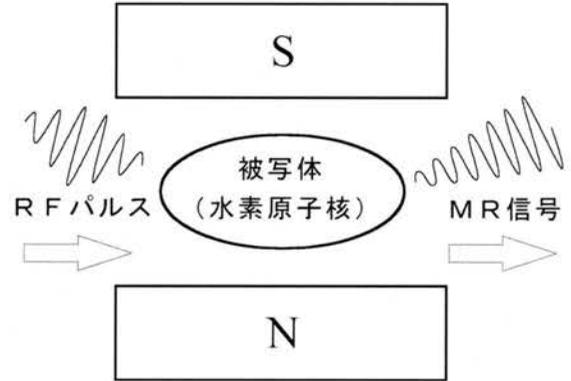


図1 MR信号発生の模式図。静磁場中に置かれた被写体にRFパルスを照射するとMR信号が放出される。

打ち消しあっている(図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3)。全体としては、歳差運動の周期に合わせて回転する一つの磁場を持っているように見える。これを巨視的磁場といい、その磁場を巨視的磁化ベクトルとして表すことができる(図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に比例し、

$$\omega = \gamma B \quad (1)$$

と表される。ここで、 γ は磁気回転比と呼ばれ、水素原子核の場合、42.58MHz/Tである。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

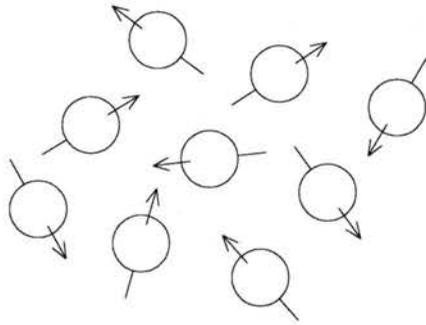


図2 通常のスピンの状態。様々な方向を向いているので、全体として磁場は打ち消しあっている。

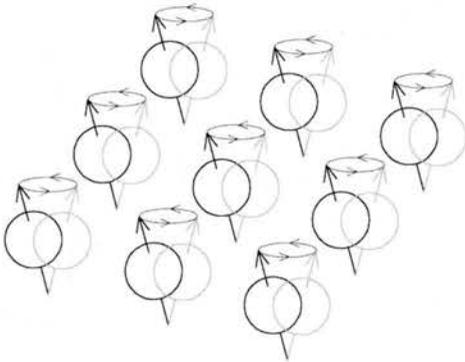


図3 静磁場中のスピンの状態。スピンの一定の方向を向き、コマが回転するときのように歳差運動（首振り運動）をする。

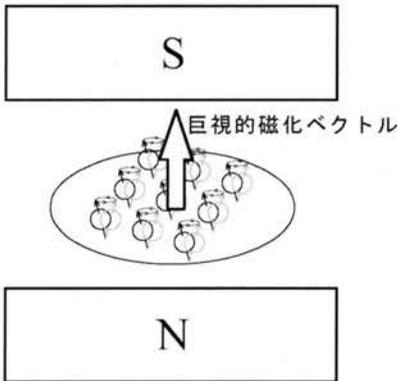


図4 静磁場中のスピンは一定の方向を向いているので、全体として磁場が発生する。これを巨視的磁化ベクトルとしてベクトルで表すことができる。

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

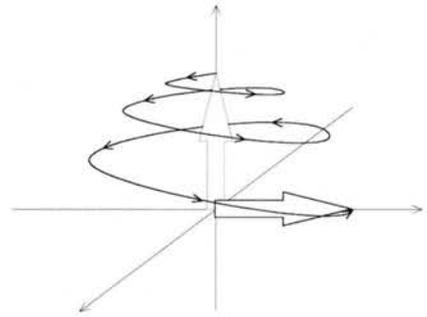


図5 RFパルスを照射された磁化ベクトルの振る舞い。ラーモア周波数で回転しながら磁化ベクトルが倒れていく。

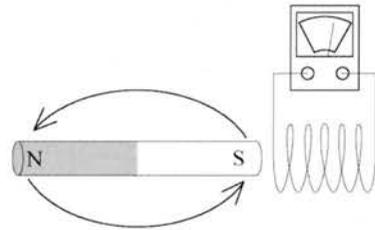


図6 電磁誘導による誘導電流の計測。棒磁石（磁場）を回転させると、近くに置いたコイルに電流が流れる。これと同じ原理で、磁化ベクトルの回転が、計測用のコイルに誘導電流を発生させる。

おき、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6)。磁化ベクトルは、電磁波を発生しながら元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。

2. 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、

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

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 のもとで指数関数的に0から M_0 に戻る。これを時間tの関数として表すと、

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

となる。この関数のグラフを図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 のもとで M_0 に戻るのを、これを時間tの関数として表すと、

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

となる。この関数のグラフを図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。

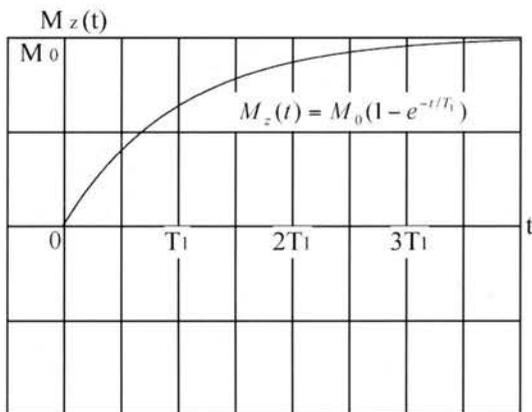


図7 90°パルス後の縦緩和を示す関数のグラフ。z軸方向の磁化ベクトル成分が回復していく様子を示している。

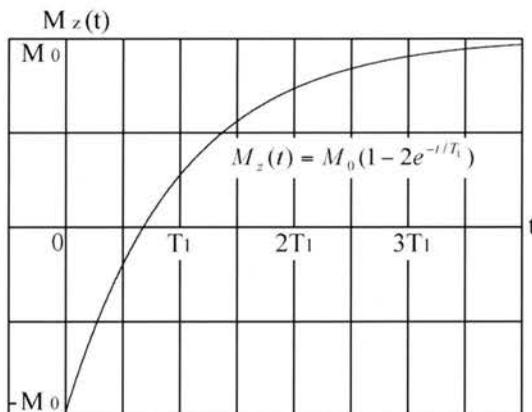


図8 180°パルス後の縦緩和を示す関数のグラフ。z軸方向の磁化ベクトルは、マイナスの位置から回復していく。

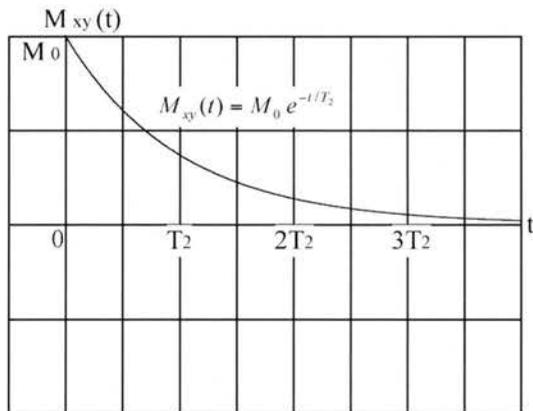


図9 横緩和を示す関数のグラフ。磁化ベクトルのxy平面での成分が減衰していく様子を示している。

(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、一様な静磁場中で、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、

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

となる。この関数のグラフを図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、もう一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、

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_{2inh}} \tag{6}$$

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。

(3)緩和過程

緩和は縦緩和と横緩和が同時に起こっている。緩和時間で比較すると、

$$T_1 > T_2 > T_2^* \tag{7}$$

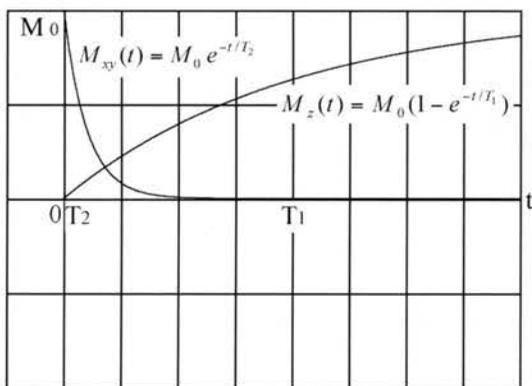


図10 緩和過程の比較。横緩和と縦緩和は同時に起こり始めるが、横緩和は速く減衰し、縦緩和はゆっくり回復する。

という関係が成り立つ。90°パルスをかけてから、それぞれの緩和がどの程度起こっているかを比較したものを図10に示す。この図を見ても分かるように、横緩和が先に起こって、その後ゆっくりと縦緩和が起こっている。これを磁化ベクトルの動きで表すと図11のようになる。磁化ベクトルは、90°パルスで倒されるとxy平面をラーモア周波数で回転しながら磁化ベクトルの大きさは小さくなり、xy平面の成分がなくなった頃に、z方向の成分が回復していく。

3. 画像のコントラスト

画像のコントラストは、 T_1 と T_2 の緩和時間とパルスシーケンスのエコー時間TEと繰り返し時間TRなどのパラメータによって決まってくる。信号の計測は、磁化ベクトルがxy平面をラーモア周波数で回転しているところを、コイルを使って行う。よって、画像のコントラストに関わるのは、xy平面での磁化ベクトルの強度である。

(1) Spin Echo法

Spin Echo法では、90°パルスをかけてから180°パルスをかけ、エコー時間TEのときに強度が最大になるエコー信号を計測する。この関係を図12に示す。繰り返しが無いとき、最大になる信号の強度Sは、エコー時間TEの間、横緩和を受けているので、(5)式より、

$$S = k\rho e^{-TE/T_2} \tag{8}$$

となる。ここで、kは比例定数で、 ρ は被写体のスピンの密度を表している。

通常の計測では、1回のエコー信号により、k空間のkx軸に沿った1本のデータしか取得できないので、位相を変えながら繰り返して信号を取得する。 T_1 緩和は、緩和時間が長いので、繰り返し時間TRによっては十分

図11(a)

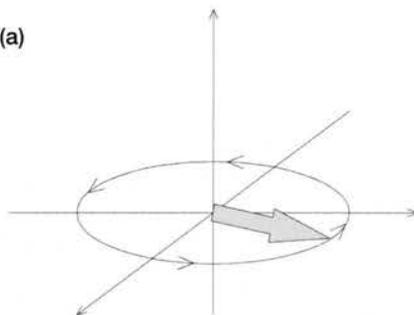


図11(b)

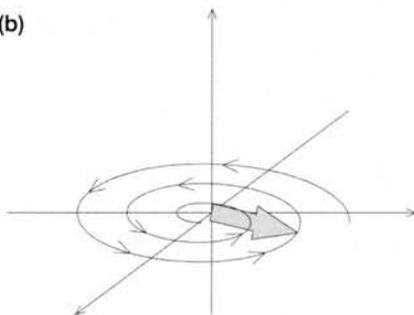


図11(c)

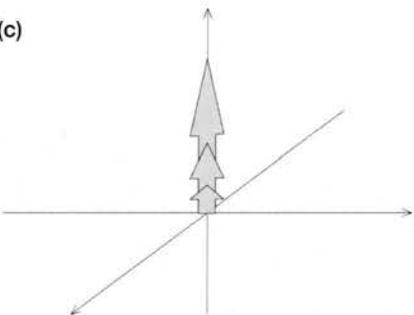


図11 緩和過程の磁化ベクトルの動き。

(a) 90°パルス直後の磁化ベクトル。xy平面上で回転している。

(b) 横緩和を強く受けている磁化ベクトル。横緩和は速く減衰するので、磁化ベクトルは回転しながらxy方向の大きさを小さくしていく。

(c) 横緩和の後に縦緩和を受けている磁化ベクトル。xy方向の成分が横緩和によりなくなってから、z方向の成分が回復する。

回復する前に次の繰り返しに入る。回復の割合は、TRの縦緩和によるので、(3)式より、

$$k\rho(1 - e^{-TR/T_1}) \tag{9}$$

となる。ここから90°パルスをかけることになるので、その直後のxy平面での強度は(9)式となる。その関係を図13に示す。その後エコー時間TEの間、横緩和を受けるので、信号強度Sは、

$$S = k\rho(1 - e^{-TR/T_1})e^{-TE/T_2} \tag{10}$$

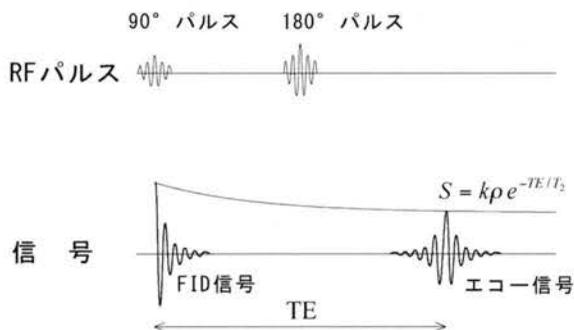


図12 Spin Echo法と緩和の関係。FID信号に対し、エコー信号はそのピークがエコー時間TEの分だけ横緩和を受けて減衰する。

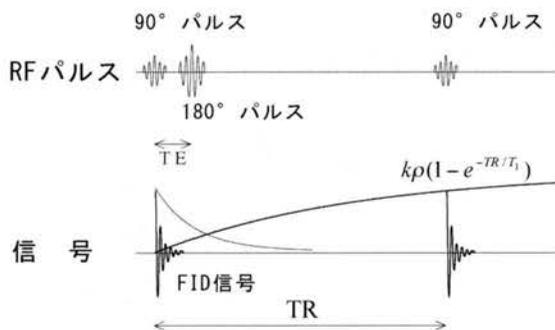


図13 繰り返しを含めたSpin Echo法と緩和の関係。FID信号のピークは、繰り返し時間TRの間回復した位置になるので、その分小さくなる。エコー信号は、そこからさらに横緩和の影響を受ける。

となる。

(2) Inversion Recovery法

Inversion Recovery法では、まず180°パルスをかけ、時間TIの後に、90°パルスをかけてから180°パルスをかけて、エコー信号を計測する。この関係を図14に示す。繰り返しが無い場合、180°パルスをかけてからTIの間に縦緩和を受けるので、90°パルスをかけるときの磁化ベクトルの強度は、(4)式より、

$$S = k\rho(1 - 2e^{-TI/T_1}) \tag{11}$$

となる。この強度をもとにしてSpin Echo法で計測しているのと同じなので、信号の強度Sは、エコー時間TEでの横緩和の影響が入り、

$$S = k\rho(1 - 2e^{-TI/T_1})e^{-TE/T_2} \tag{12}$$

となる。通常は、ここに繰り返し時間TRの影響が入る。縦緩和による信号の回復は、90°パルスをかけてから起こるので、その緩和に費やす時間は(TR-TI)となる。よって、(3)式より、回復した磁化ベクトルの強度は、

$$k\rho(1 - e^{-(TR-TI)/T_1}) \tag{13}$$

となる。この磁化ベクトルに対し180°パルスをかけたとき、この時点からのz軸方向の磁化ベクトルの強度M_zを時間tの関数として表すと、

$$M_z(t) = k\rho[1 - (2e^{-(TR-TI)/T_1})e^{-t/T_1}] \tag{14}$$

となる。TIの間、縦緩和を受けるので、(14)式の時間tにTIを代入すると、90°パルスをかける時点での磁化ベクトルの強度となる。その強度は、

$$k\rho[1 - (2e^{-(TR-TI)/T_1})e^{-TI/T_1}] = k\rho(1 - 2e^{-TI/T_1} + e^{-TR/T_1}) \tag{15}$$

となる。この関係を図15に示す。最終的な信号強度Sは、エコー時間TEの影響も含めて、

$$S = k\rho(1 - 2e^{-TI/T_1} + e^{-TR/T_1})e^{-TE/T_2} \tag{16}$$

となる。

(3) Gradient Echo法

Gradient Echo法では、90°パルスをかけてから勾配磁場を反転させることによってエコー信号を発生させ、それを計測する。この関係を図16に示す。繰り返しが無いとき、最大になる信号の強度Sは、エコー時間TEの間、T₂*の横緩和を受け、

$$S = k\rho e^{-TE/T_2^*} \tag{17}$$

となる。繰り返しがあがる場合、Spin Echo法と同様に繰り返し時間TRによる縦緩和の影響が入る。その影響は、

$$k\rho(1 - e^{-TR/T_1}) \tag{18}$$

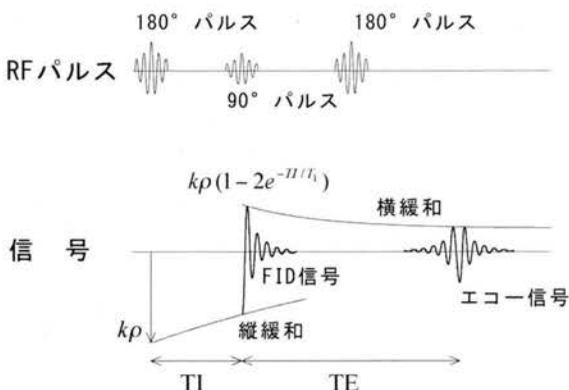


図14 Inversion Recovery法と緩和の関係。180°パルスの後、TI時間の間、縦緩和で回復し、90°パルスをかけた位置の磁化ベクトルの大きさがFID信号のピークになる。エコー信号はそこから横緩和の影響を受ける。

となり、これを考慮に入れると信号強度Sは、

$$S = k\rho (1 - e^{-TR/T_1})e^{-TE/T_2} \quad (19)$$

となる。また、Gradient Echo法では、さらに計測時間を短縮するために、90°パルスの代わりに0°から90°までの間のパルスをかけて計測することがある。この場合、磁化ベクトルは、90°まで倒されないで縦緩和が

回復しやすくなる。その様子を図17に示す。これにより、繰り返し時間TRを短くすることができ、最終的に計測時間を短縮することができる。90°パルスの代わりにかけるパルスをθパルスとすると信号強度Sは、

$$S = k\rho (1 - e^{-TR/T_1})e^{-TE/T_2} \sin\theta / (1 - \cos\theta e^{-TR/T_1}) \quad (20)$$

となる。ここで、0° ≤ θ ≤ 90°である。

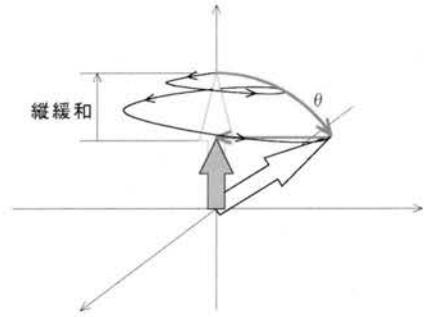
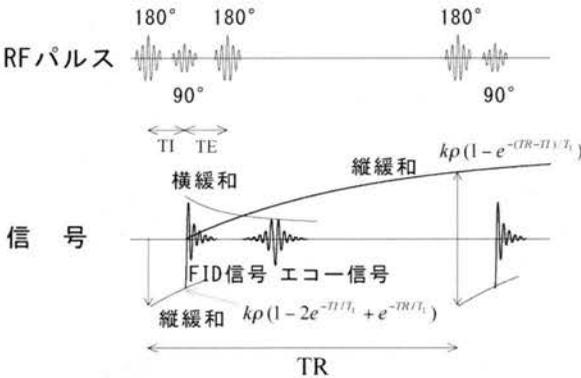


図17 90°パルスの代わりに0<θ<90°のθ°パルスをかけると、磁化ベクトルはxy平面まで倒れず、途中から緩和を受ける。緩和に要する時間は小さくなり、特に縦緩和が小さくなる分、繰り返し時間を小さくすることができる。これによって高速の撮像が可能になる。

図15 繰り返しを含めたInversion Recovery法と緩和の関係。90°パルスの後、z軸成分が0の位置から縦緩和が起こるので、TR-TI時間の間、縦緩和で回復したところから、最初の180°パルスによる縦緩和が起こり始める。

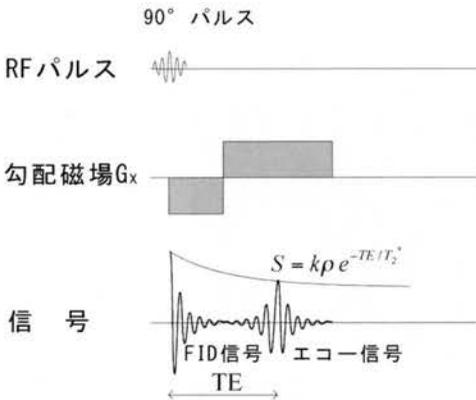


図16 Gradient Echo法と緩和の関係。勾配磁場の反転により、エコー信号を発生させる。そのピークは、FID信号のピークからエコー時間TEの間、横緩和の影響を受ける。

ダウンロードされた論文は私的利用のみが許諾されています。公衆への再配布については下記をご覧ください。

複写をご希望の方へ

断層映像研究会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター（(社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F FAX：03-3475-5619 E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。

直接、断層映像研究会へお問い合わせください

Reprographic Reproduction outside Japan

One of the following procedures is required to copy this work.

1. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has concluded a bilateral agreement with an RRO (Reproduction Rights Organisation), please apply for the license to the RRO.

Please visit the following URL for the countries and regions in which JAACC has concluded bilateral agreements.

<http://www.jaacc.org/>

2. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has no bilateral agreement, please apply for the license to JAACC.

For the license for citation, reprint, and/or translation, etc., please contact the right holder directly.

JAACC (Japan Academic Association for Copyright Clearance) is an official member RRO of the IFRRO (International Federation of Reproduction Rights Organisations).

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

Address 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

E-mail info@jaacc.jp Fax: +81-33475-5619