

FLASH : 低フリップ角の RF パルスを用いた高速 NMR 画像法

Haase A, Frahm J, Matthaei D, Haenicke W, Merboldt KD :
FLASH : Rapid NMR Imaging Using Low Flip-Angle Pulses
(Journal of Magnetic Resonance 1986 ; 67 : 258-266)

はじめに

傾斜磁場エコーを用いた高速スキャン法の基本的なものである FLASH 法は、表題の論文により 1986 年に発表されている。1986 年前後には、Hennig らの RARE 法、Oppelt らの FISP 法、Haase らの FLASH 法 (この論文)、Frahm らの snapshot FLASH 法など現在でも用いられている新しい方法が次々と提案されている。

スキャンの高速化・高画質化は常に画像法のターゲットである。この論文の要旨は、傾斜磁場エコーを用いることによって TR を短くしたことと、TR を短くすることによって起こる信号の低下とコントラストの劣化をフリップ角を低くすることによって回復できることを示したことである。このことから、TR を短くしても良好な組織コントラストを得ることが可能であることを示した。さらに、このような撮像条件によって得られる画像のコントラストを T_1 値、TR、フリップ角を用いて説明し、また局所的な磁化率異常から生ずる $T_{2\text{eff}}$ の短縮による信号減衰を傾斜磁場エコーを用いるシーケンスの特徴の一つとして挙げている。

論文の最後で、この方法の三次元ボリュームスキャンへの拡大と動画的な MR の利用について言及しているが、2001 年の現在、これら

の技術はさらに多様に発展して実用化し、既に臨床診断に用いられている。また、この論文ではスキャンの高速化の医療経済的な有効性をも指摘していることも興味深い。

論文の要約

FLASH (fast low angle shot) 画像法と呼ぶ新しい NMR imaging の方法では、例えば、 64×128 ピクセル分解能で 1 秒ほど、 256×256 で 6 秒ほどのスキャンが可能である。この方法では低いフリップ角の励起パルスを用いることにより、連続的な測定のための待ち時間を短縮することができ、映画のような撮像ができる。この方法では傾斜磁場の逆転によって生ずる傾斜磁場エコーとして FID 信号を取得するため、空間分解能を犠牲にすることなく撮像時間をおよそ $1/100$ に短縮することが可能である。さらにこの方法は、信号雑音比 (S/N) の最適な選択、市販の一般的な傾斜磁場の装置への応用、非常に低い RF 負荷などの特徴がある。 $^1\text{H-NMR}$ の FLASH 画像法を用いて、ファントム、動物、およびヒトの手を例として緩和時間による多様なコントラストを生じさせ、また動きによるアーチファクトのない画像を得ることができた。

2001 年 8 月 30 日受理

別刷請求先 〒141-8644 東京都品川区東五反田 3-20-14 高輪パークタワー シーメンス旭メディテック株式会社 滝沢 修

論文内容の詳細

Introduction

NMR 画像は撮像時間として数分間を要するため、動きに起因するアーチファクトが生じ、また高速な生理的な変化の追跡は不可能である。今まで実現しているより高速なスキャン法では、空間分解能や信号雑音比に限界があったり (Mansfield らの方法)、1T から 2T では安全性のガイドラインを超えるほどの多数の強い RF 励起パルスを印加する必要 (Hennig らの方法) がある。高磁場で適用できる最初に提案された高速撮像法である stimulated エコー法では、高速な T_1 強調画像や化学シフト選択画像を得ることができるが、信号雑音比が低いという欠点がある。

ここでは、FLASH (fast low angle shot) 画像法と呼ぶ新しい高速画像法を提案する。この方法は、(i)最適な信号雑音比、(ii)撮像時間をおよそ 1/100 に短縮すること、(iii)空間分解能が低下しない、(iv)非常に低い RF 負荷、という特徴をもつ。FLASH シーケンスは待ち時間なしに連続的に繰り返すことができるので、空間分解能・時間分解能・信号雑音比を目的に合わせて選択することにより最適化が可能である。さらに、それぞれの撮像時間を繰り返し時間として撮像をシーケンシャルに繰り返すことにより、映画のように見せることができる。

Method

NMR imaging の信号収集法には、FID 信号によるもの、スピネコーによるもの、stimulated echo によるものがある。その中で、FID による方法は RF 励起パルスを一回しか印加しないことから高速スキャン法に最適である。通常の方法とここで提案している高速スキャン法との重要な差は、RF パルスが低フリップ角であることである。低フリップ角を用いることによってスピンの飽和を防いで繰り返し時間を短くする方法は、既に NMR スペクトロスコーピーで用いられた例があるが、スペクトロスコーピー

の FID 信号は数百ミリ秒の間継続し繰り返し時間が長いため、この方法はあまり有効ではなかった。画像化の場合には傾斜磁場を印加することによって FID 信号継続時間が数ミリ秒になるため、状況が異なっている。

例えば、フリップ角を 15 度にすると、FID 信号は 90 度パルスの場合に比べて 25% に低下する。縦方向の磁化は、RF 励起の直後でも 96.5% が残っており、すぐに次の RF 励起を行うことが可能である。RF パルスが終了した後、スライス選択傾斜磁場と読み取り傾斜磁場を印加して、横磁化を適当に収束させて傾斜磁場エコーを発生させる。したがって、通常の場合、繰り返し時間を 1 秒から 10~20 ミリ秒と短くし、スキャン時間を短縮することができる。スピン系を定常状態にするために、最初に 20~40 回のシーケンスの繰り返しを行うと、RF 励起による縦磁化の損失が TR の間の T_1 緩和によって補償されるようになり、その状態でデータを収集する。この理論的な説明は既に 1970 年に Waugh によって説明されている。定常状態に達した後、実験は無限回繰り返すことができる。例えば、シーケンシャルな画像のシリーズを得ることによって、生体組織の生理学的な変化のプロセスを記録することができる。

Experimental Results

NMR 画像法を生体へ応用するためには、緩和時間の違いによる良好な組織コントラストをもつことが必要である。新しい高速スキャン法は緩和時間に対する特性として、スピン格子緩和時間 T_1 と実効的なスピン-スピン緩和時間 $T_{2\text{eff}}$ に依存する。

実験は、2.3T の Bruker 社製の装置によって行い、周波数選択 RF パルスの長さは 2 ms、0.5 G/cm の磁場傾斜のもとで 4 mm の厚さのスライス面内の横磁化を励起する。RF パルスの中央から傾斜磁場エコーの最大を示す時間まではおよそ 9 ms である。定常状態を実現するために、およそ 0.5 秒の間、ダミーパルスによる励起を行った上で、データ収集を行う。それ

その実験は TR が 18 ms であるので、撮像時間は、 64×128 で 1.15 秒、 128×128 で 2.3 秒である。これらの撮像時間はさらに高い磁場と高い磁場傾斜、より早いスイッチングタイム (例えば 1 ms あるいはそれ以下) を用いることによってさらに短くすることができる。

Spin-lattice relaxation time contrast

FLASH 画像法は、縦磁化の定常状態の利点を利用しており、この状態は RF パルスの繰り返し時間、フリップ角と磁気緩和時間 T_1 によって決まる。異なった T_1 値をもったファントムについてのフリップ角を変えた実験により、スピン系の飽和と信号強度の T_1 依存性がわかる。繰り返し時間を一定にしたとき、 T_1 コントラストはフリップ角のみに依存する。

FLASH 画像法において、より強い T_1 強調画像を作るために、画像化シーケンスのタイミングの中で 90 度あるいは 180 度の RF パルスを付加させることもできる。180 度パルスを用いた場合、定常状態の磁化を反転させた後の回復の状態を FLASH 画像法として得ることになる。このように、スキャン時間をスピン格子緩和時間 (1~2 秒) に近いほどまで短縮すると、一個の 180 度 RF パルスだけで画像のコントラストが変わるという新しい現象が起こることになる。ただしこの場合、位相エンコードの各フーリエラインはスピン系の平衡状態で得られているわけではなく非平衡状態が混入しているため、point spread function に影響を与え、そのために画像コントラストが変化する可能性がある。一般的に、高速スキャン法によって描出可能な T_1 コントラストは通常の NMR 画像と同じで、 T_1 値の長い組織は低信号で T_1 の短い組織は高信号になる。

Effective spin-spin relaxation time contrast

FLASH 画像のコントラストは、傾斜磁場エコーあるいは FID 信号を用いて画像を作っているため、実効的スピン-スピン緩和時間 $T_{2\text{eff}}$ に依存する。生体の組織内部に磁場の勾配が存在する場合には、 $T_{2\text{eff}}$ コントラストが構造につ

いての情報を与える方法になる可能性がある。ヒトの手の水平断の FLASH 画像でエコー時間を変えた場合、9 ms という短いエコー時間の画像では筋肉・関節・骨髄・血管と脂肪が示されるが、もっと高信号であるはずの骨髄からの脂肪の信号は、骨の不均一な構造の中で内部の磁場傾斜のためにおこる $T_{2\text{eff}}$ の短縮によって、信号はかなり減衰する。これらの効果は、エコー時間を 17 ms にすることによってより顕著になる。

Elimination of motional artifacts

生体の NMR 画像では、生体の動きによる位相エンコード傾斜磁場の方向へのアーチファクトが生ずる。FLASH イメージングは検査時間と同程度な高速な運動の場合にはそれは問題にならない。

一方において、高い時間分解能が必要でなければ FLASH 画像を平均化して信号雑音比を向上させることができる。心臓の動きのように検査時間よりも短い時間定数をもつ周期的な動きの場合は、高速な FLASH 画像を足し合わせるによって信号雑音比の良い画像が得られる。

Conclusion

二次元 FLASH 法の主な利点は、画像内に見られる動きのアーチファクトがないことである。高速な非周期的な運動の動的画像や高速な生理的な変化の動的な画像として NMR-movie とすることが可能である。FLASH 画像法はスライス選択 RF パルスを非スライス選択 RF パルスに置き換え、スライス選択傾斜磁場をほかの傾斜磁場に垂直なもう一つの位相エンコード傾斜磁場に置き換えることによって、三次元 NMR 画像法とすることができる。 $128 \times 128 \times 128$ ピクセルの 3D NMR 画像法は 4 分以内で得ることができる。

高速な画像再構成と画像表示によって体を on-line で画像面を動かしていくことにも利用できる。高速 NMR 画像の医学的利用は、患者のみならず今日の社会の医療経済的な問題を改

善することにも利益があるであろう。

解 説

研究の背景

この論文は、高速スキャン法などの技術を多く生み出しているドイツ Göttingen の Max-Planck-Institut のグループからの論文である。この論文の共著者は J. Frahm をはじめとして現在も活発に MR の基礎技術の分野で活躍している。Dr. Haase は 2001 年 1 月の東京での第 3 回 JSMRM 国際シンポジウムにも来日しマイクロイメージングなどを中心に講演を行っている。この論文の内容となっている研究は、1985 年の SMRM で発表され、Dr. Haase の学位論文の Thesis (1987 年) の一部になっている。学位論文の方ではスペクトロスコーピックイメージング技術の一端として高速化が議論されている。

1980 年代に入ってイメージングのためのハードウェアの開発が急速に進み臨床検査装置として応用が始められた MRI 技術は、1986 年頃までに MRI 装置としてのハードウェアが一定の完成レベルに達し広い範囲の研究が一斉に開始された。これらは、先に述べた RARE 法・FISP 法・FLASH 法から snapshot FLASH・spiral scan などを生み出した、Henig のグループ・Frahm のグループ・Oppelt のグループそれに Makowski の Stanford のグループなど、現在でも新しいアイデアのソースとなっているグループである。

それらの開花の時期に、この論文のように、シーケンスデザインの工夫によって新しい手法を生み出し、その特徴を精密に解析し臨床応用に新しい領域を開く論文が多く出されている。この論文の特徴は、新しいパルスシーケンスの考え方を作り出したと同時に、適当な組織コントラストを生ずるためのパラメータを実験的に確かめた点である。

この研究のあとの発展

1985 年の SMRM での発表のあと、FLASH 法が臨床装置に最初に導入されたのは 1986 年頃からである。1985 年に市販の MR 装置で、最短の TR は 50 ms で、SE 法・IR 法が用いられていた。FLASH 法は高速スキャン法と呼ばれ、コントラストの難しさはあるもののスキャンの速さから様々な方法に応用された。

スキャン時間短縮のために、位相エンコード数を減らしたり一回の励起で多数のエコーデータを収集する方法があるが、TR を短縮する方法は最も基本的な要素である。TR を短縮したとき T_1 回復を行う時間が短くなるため生体の組織コントラストも出にくくなり、それを取り戻す方法として、FLASH 法以外にも、この論文でも言及されている IR パルスを印加してコントラストをつける方法 snapshot FLASH (turboFLASH など) も提案されている。この論文では明確にされていない傾斜磁場による xy 面内の磁化の spoiling についても最適な条件が工夫され¹⁾、さらに RF パルスの位相をシフトさせることによって spoiling する方法の研究も行われている²⁾。

FLASH 法の画像コントラストについては、この論文のあと多くの研究報告があるが、特に、Haacke らの総説で詳しく報告されている³⁾。この中では、FLASH 法と同様に、スピニング法においてもフリップ角を小さくすることによって画像コントラストを改良する方法も検討されている。

現在における価値

現在でも最も高速な実用的なスキャン法とされている EPI 法は、これ以前の 1977 年に Mansfield らによって発表され、Mansfield の 1982 年の成書にも記述されている⁴⁾が、まだ実用には程遠いものとされていた。ここで言う EPI 法では、一回の励起のあとで画像化に必要なすべてのエコー信号を連続的に集める方法とされており、RF パルスによるエコーか傾斜磁場によるエコーかには限定していない。したがって、1986 年には傾斜磁場の反転によるエ

コー信号については既知である。

したがって、この論文の新しさは、傾斜磁場エコー法とフリップ角の操作を行うことによってTRを短縮しても良好な画像コントラストを得ることができる点である。FLASH法の応用的な価値は、現在でもT₁強調の傾斜磁場エコー法として用いられていることから十分な価値をもっている。

現在の装置では、ますます高速なスイッチングが可能な強力な傾斜磁場が用いられ、TRの短縮と低フリップ角の利用は通常に用いられており、一方でSARの増加により低フリップ角の工夫は今も実用的な価値がある。

シーメンス旭メディテック㈱
滝沢 修

参考論文

- 1) Wood ML, Silver M, Runge VM : Optimization of spoiler gradient in FLASH MRI. *Magn Reson Imaging* 1987 ; 5 : 155-463
- 2) Crawley AP, Wood ML, Henkelman M : Elimination of transverse coherence in FLASH MRI. *Magn Reson Med* 1988 ; 8 : 248-260
- 3) Haacke EM, Wielpolski PA, Tkach JA : A comprehensive technical review of short TR, fast magnetic resonance imaging techniques. *Rev Magn Reson Med* 1991 ; 3 : 53-170
- 4) Mansfield P, Morris PG. *NMR Imaging in Biomedicine*. New York, USA : Academic Press, 1982