

## 高速・超高速イメージング —歴史的発展と技術的現状—

巨瀬勝美

筑波大学理工工学系

### はじめに

MRIにおける高速イメージングと超高速イメージングの、それぞれの確定した定義はないようであるが、撮像時間が概ね1秒以下の撮像法を超高速イメージング、それ以外の通常より高速な撮像法を、高速イメージングと呼び慣わしているようである。しかし、その境界は必ずしもはっきりしたものではないので、本論では、以下、これらをまとめて、高速イメージングという言葉で一括して表現する。

高速イメージングの目的としては、検査時間の短縮、体動に影響されない撮像、そして、脳機能イメージングに代表されるような、生体における動的な現象の計測などが挙げられる。本稿では、まず、MRIにおける撮像の高速化の歴史を概観する。そして、代表的高速イメージングの手法のいくつかを紹介し、さらに、これらを統一的に理解する一つの方法を示して、現状と将来を展望してみたい。

### MRIにおける撮像の高速化の歴史

Fig. 1に、高速化という観点から見た撮像法の発展の歴史を示す。図の中央に、スピン・エコー法を中心とした方法、上段にエコー・プラ

ナー法 (EPI) を中心とした方法、そして下段に高速勾配エコー法 (FLASH) を中心とした方法を示した。

1980年代の始め、スピン・エコー法を用いた撮像法が標準的手法として確立された頃には、1断面面の撮像に、通常、数分以上を要していた。これは、良好な画像SN比とコントラストを得るためには、繰り返し時間TRを、 $T_1$  (通常1秒前後) 以上に設定し、さらに信号加算を数回以上行う必要があったためである。

この状況の下で、検査時間の短縮に大きく寄与した技術は、Crooksらによって開発された、マルチスライス・マルチエコー法であった<sup>1)</sup>。当時、この手法は、必ずしも高速イメージングの方法とは考えられなかったが、実用的な検査時間を達成する上で、本質的に重要な技術であった。

いっぽう、1枚の断面面を高速に撮像する最も古い試みは、Mansfieldにより1977年に発表されたEPIである<sup>2)</sup>。ところが、EPIは、撮像法の難解さと、ハードウェアに対する要求の厳しさから、提案されてから実用的レベルの全身画像が得られるまでに、ほぼ10年を要した。すなわち、Rzedianらは2.0Tの全身用システムにおいて、EPIの技術上の問題をほぼ解決し、1987年に、数10ms以下で撮像した体部の画像を発表した<sup>3)</sup>。ところが、皮肉なこ

とに、この技術的成功は、EPIの限界を同時に示すこととなった。すなわち、ワンショットで撮像した場合の画素数の限界 (<math>128 \times 128</math>) と、画像歪みなどの偽像である。しかしながら、EPIは、その後、当初期待された循環器領域や腹部領域ではなく、脳のfunctional MRI<sup>4)</sup> (fMRI) や拡散画像計測に新たな応用を見出した。そして、アクティブシールド型勾配コイルを始めとした勾配磁場制御技術の進展や、マルチショットEPIの採用などにより、最近、ようやく商用機にも装備されるようになってきた。この事情を、Mansfield自身は、「EPIは15年早すぎた技術」と表現し、この15年の雌伏の間に、「再発見された手法 (FLASH) を持った者がこの分野に新規参入した」と述懐している<sup>5)</sup>。

いっぽう、FLASHは、1980年代前半に、いわゆるスピン・エコー法が正統的撮像法として確立されたものの、そのままの形では高速化

には限界があったことから、それに対する逆転的発想で生まれたものであった<sup>6)</sup>。すなわち、臨床的には、 $T_2$ による画像コントラストが極めて有用であるという認識から、原型のSpin Warp法のような勾配エコーを用いたシーケンスはしばらく用いられていなかったが、HasseとFrahmらは、フリップ角を小さくして繰り返しを速くするというアイデアにより、一般的な装置における高速化への道を切り開いた。しかし、この方法に対しては、Mansfieldに代表されるような、方式としての新奇性はないという冷ややかな評価もあった<sup>5)</sup>。

しかしながら、FLASHは、その発表当初より、MRIメーカー各社から非常に好意的に評価され、さまざまな改良が行われて、色々な名前の高速勾配エコー法が発表された。このFLASHをはじめとする高速勾配エコー法は、画像コントラストや解剖学的描出能の点から、従来のスピン・エコー法に取って代わるもので

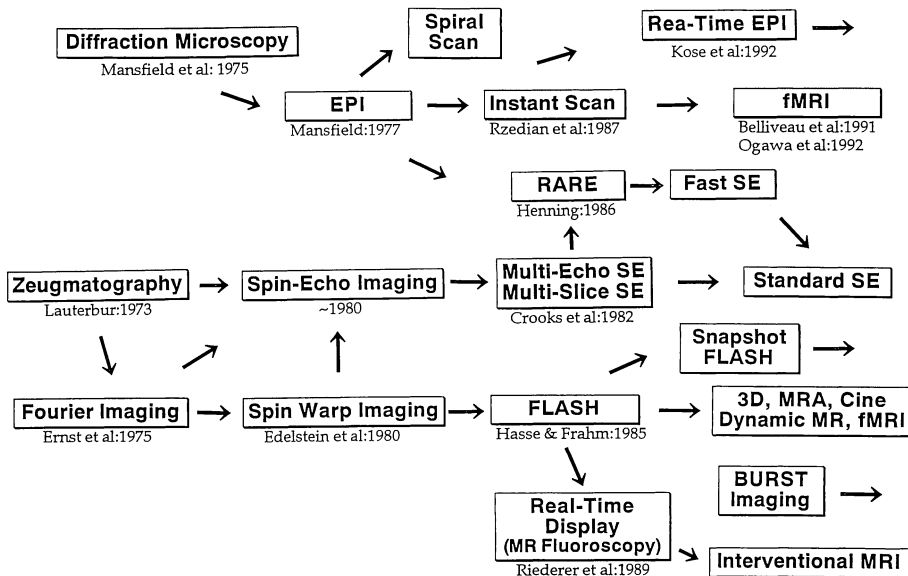


Fig. 1. A private view of the history of the rapid NMR imaging.

はないと考えられたが、スピン・エコー法では実施困難な、3D, MRA, Cine, Dynamic MR, そして fMRI などにおいては不可欠な手法となった。

FLASH の発明者の一人である Frahm は、当初、FLASH の欠点と考えられていた、パルスシーケンスを高速に繰り返すことにより、断層面内の核磁化が飽和するのに対し流入する血流が異常に強調されること、そして  $T_2^*$  の効果によって信号が失われること、の2点が、後年、MRA と fMRI へと応用されることになったことを述べ、FLASH の有用性を改めて強調している<sup>7)</sup>。

ところが FLASH は、繰り返し時間を極端に短くした場合には、緩和時間による画像コン

トラストが失われるという、臨床的応用における致命的な欠陥を持っていた。そこで、撮像シーケンスの中ではなく、その前に、プレパレーションパルスを用いて緩和時間などによるコントラストをつけておくという snapshot FLASH が提案され、EPI と RARE<sup>8)</sup> 以外の方法では、初めて1秒を切る実用的な撮像が可能となった<sup>9)</sup>。

いっぽう、伝統的スピン・エコー法においては、EPI を 180 度パルスで実現した手法である RARE が端緒となって、90 年代始め頃から高速化が行われ、いわゆる「高速スピン・エコー法」が開発された。現在、この手法は、いくつかの特別な場合を除き、伝統的スピン・エコー法を置き換えるに至っており、検査時間の

### 高速イメージングの分類

EPI系 : EPI, multishot EPI, Spiral, BURST/DUFIS, GRASE

FLASH系 : FLASH, snapshot FLASH

SE系 : RARE, GRASE, FastSE(multishot RARE)

Fig. 2. Three classes of rapid NMR imaging methods.

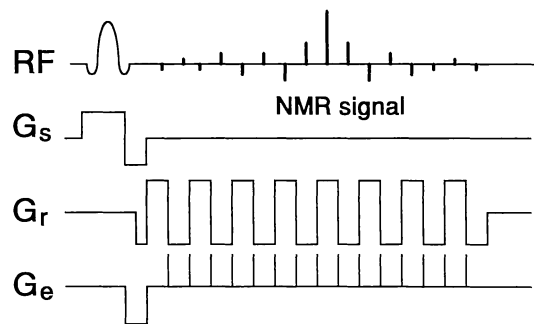


Fig. 3. Echo-planar imaging (EPI) sequence.  $G_s$ ,  $G_r$ , and  $G_e$  are gradients for slice selection, readout, and phase encode.

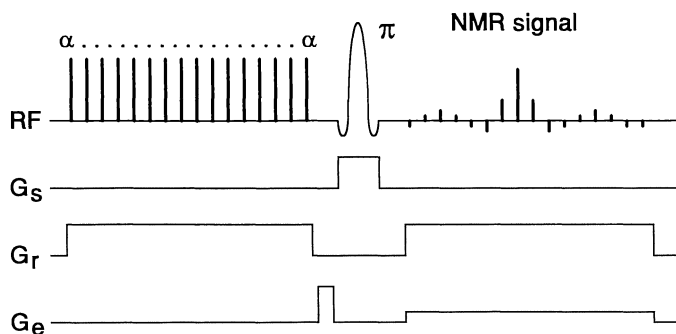


Fig. 4. BURST/DUFIS imaging sequence. DUFIS is an acronym of Dante Ultra Fast Imaging Sequence.  $G_s$ ,  $G_r$ , and  $G_e$  are gradients for slice selection, readout, and phase encode.

短縮に大いに貢献している。

最近、小さなフリップ角をもつ多数の RF 励起を用いて、EPI よりもさらに高速に撮像する手法 (BURST Imaging<sup>10)</sup> や DUFIS<sup>11)</sup> が提案されているが、臨床的レベルでこれが用いられていくかは将来の課題であろう。

### 高速イメージング法の分類と統一的理解

前節で述べたように、高速イメージング法は、歴史的にも、そして方式の上でも、大まかに、EPI 系、FLASH 系、スピン・エコー系の3つの方式に分類することができる。Fig. 2 に、その一覧を示す。そして、その中で、ワンショットで撮像可能な方法 (超高速イメージング法) である、EPI, BURST/DUFIS, snapshot FLASH, RARE, GRASE<sup>12)</sup> のパルスシーケンスを、Fig. 3 から Fig. 7 に示す。

以上に示した方式は、いずれも、非常に短い時間に、二次元の k 空間の全域をスキャンする方法である。これらを統一的に理解する方法として、 $N \times N$  画素の二次元画像を撮像するとき必要とされる励起パルス数  $N_\alpha$  と、180 度パルス数  $N_\pi$  による分類法が考えられる (Fig. 8)。この図に示されるように、これまでに提案されている (ほとんど) すべての撮像法が、 $N_\alpha \cdot N_\pi$  平面のどこかにマッピングされることがわかる。この分類法は、高速イメージ

ング法の一つの側面しか捉えていないかもしれないが、それぞれの方式の相対的関係の理解に有用であろう。とくに、EPI と通常のスピン・エコー法、そして FLASH と RARE がそれぞれ対極的位置にあることは興味深い。

以上に述べた高速イメージングの手法は、それぞれ独自の特徴を有しているが、それらの用途を大まかに示すと、Fig. 9 のようになると思われる。すなわち、EPI 系は functional な応用が中心、スピン・エコー系は anatomical な応用が中心、そして FLASH 系はその中間ということになる。ただし、FLASH は、そのパルスシーケンスの単純さから、MRA や Cine などにおいて用いられることも多く、anatomical

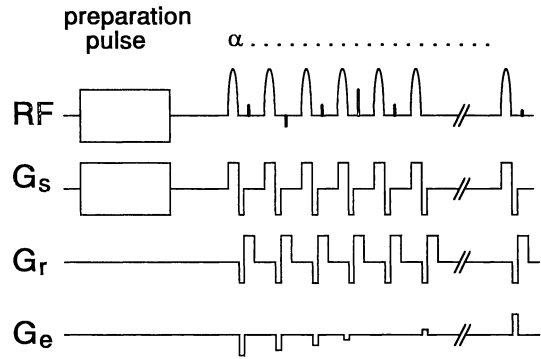


Fig. 5. Snapshot FLASH (Fast Low Angle SHot) sequence.  $G_s$ ,  $G_r$ , and  $G_e$  are gradients for slice selection, readout, and phase encode.

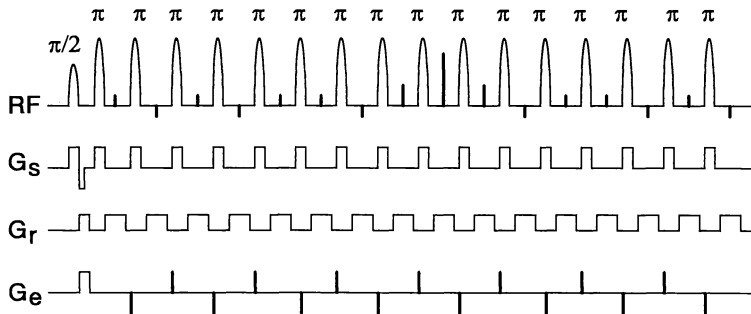


Fig. 6. RARE (Rapid Acquisition with Relaxation Enhancement) sequence.  $G_s$ ,  $G_r$ , and  $G_e$  are gradients for slice selection, readout, and phase encode.

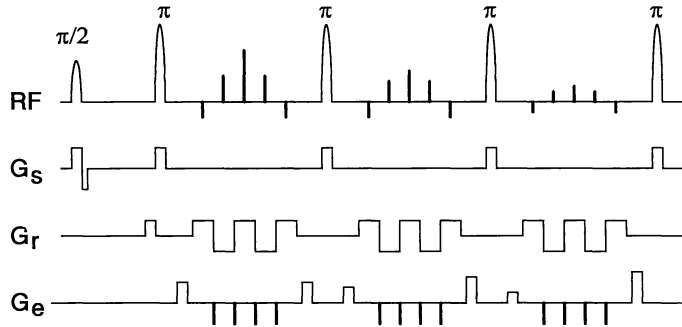


Fig. 7. GRASE (GRADient-and Spin-Echo) sequence.  $G_s$ ,  $G_r$ , and  $G_e$  are gradients for slice selection, readout, and phase encode.

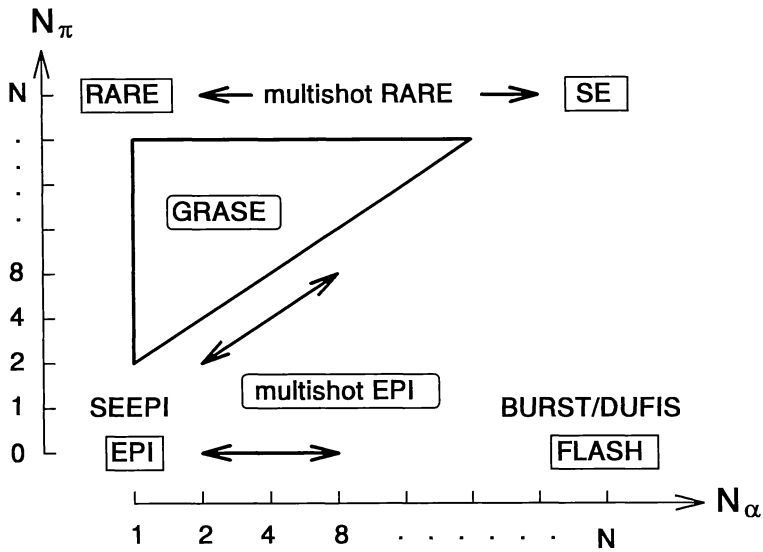


Fig. 8. A simple graphical representation of imaging methods classified with the numbers of excitation and refocus ( $180^\circ$ ) pulses.

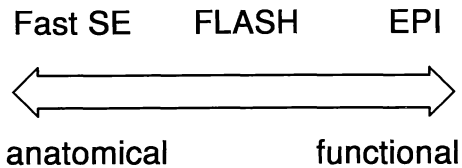


Fig. 9. A rough classification of rapid imaging applications.

calな応用から functionalな応用まで幅広く用いられる、非常に汎用性に富む方法であるとも言えよう。

これらの3つの方式は、これまでも述べてきたように、それぞれ、出発点も発展の歴史も異なっていたが、Fig. 8にも示したように、現在は、互いに影響を及ぼし合い、その境界に、新しい方法も生まれつつある。このように、最初はそれぞれ全く別の手法であったが、

限られたハードウェアと撮像条件の下で、高速化のために、互いに他の方法の特長を採り入れ、つぎつぎと新しい方法が生み出されていったというのが、近年の高速イメージングの進展の現状ではないかと思われる。

最近、EPIが実施可能な臨床機が使用され始めたが、このような装置では、これまでに提案されたすべての高速イメージングの手法を実現できるものと思われる。よって、いかなる対象(症例)に、どの高速イメージングの手法を、いかに適用していくかが、臨床応用においては、重要な要素となってくるものと思われる。

### む す び

MRIにおける撮像の高速化を歴史的に概観し、高速イメージングの手法が、3つの方法に分類されうることを述べた。そして、これまでに提案されている方法が、励起パルスの数と180度パルスの数により、互いに位置づけることができることを示した。いずれの方式でも、1秒以下での撮像が可能となっているが、それぞれ他の方式にはない特長を有しており、将来的には、多くの実験や臨床経験を経て、それぞれが新しい標準的撮像法として確立されていくであろうと思われる。なお、本稿は、第23回磁気共鳴医学会大会シンポジウム「MRI/Sの新しい展開」における発表を基にしたが、本稿を纏めるにあたり、様々な方々から貴重なご意見を頂いたので、ここに記して感謝したい。

### 文 献

1) Crooks LE, Arakawa M, Hoenninger J, et al. :

- Nuclear magnetic resonance whole-body imager operating at 3.5 KGauss. *Radiology*, 143 : 169-174, 1982.
- 2) Mansfield P : Multi-planar image formation using NMR spin echoes. *J Phys C*, 10 : L55-58, 1977.
- 3) Rzedian R, Pykett IL : Instant images of the human heart using a new whole-body MR imaging system. *AJR*, 149 : 245-250, 1987.
- 4) Kwong KK, Belliveau JW, Chesler DA, et al. : Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 89 : 5675-5679, 1992.
- 5) Mansfield P : *Encyclopedia of nuclear magnetic resonance*, Volume 1, John Wiley & Sons, 1996, pp. 478-481.
- 6) Hasse A, Frahm J, Matthaei D, et al. : FLASH imaging. Rapid NMR imaging using low flip-angle pulses. *J Magn Reson*, 67 : 258-266, 1986.
- 7) Frahm J : *Encyclopedia of nuclear magnetic resonance*, Volume 1, John Wiley & Sons, 1996, pp. 318-322.
- 8) Henning J, Nauerth A, Friedburg H : RARE imaging : a fast imaging method for clinical MR. *Magn Reson Med*, 3 : 823-833, 1986.
- 9) Hasse A : Snapshot FLASH MRI. Applications to T1, T2, and chemical-shift imaging. *Magn Reson Med*, 13 : 77-89, 1990.
- 10) Henning J : Burst imaging on a clinical whole body system. In *Book of abstract, Society of Magnetic Resonance in Medicine*, 101, 1992.
- 11) Low IJ, Wysong RE : DANTE ultrafast imaging sequence (DUFIS). *J Magn Reson*, B101 : 106-109, 1993.
- 12) Oshio K, Feinberg DA : GRASE (Gradient-and Spin-echo) imaging : a novel fast MRI technique. *Magn Reson Med*, 20 : 344, 1991.

**Fast and Ultrafast Imaging**  
**—Historical Review and Present Status—**

Katsumi KOSE

*Institute of Applied Physics, University of Tsukuba*  
*1-1-1 Tennoudai, Tsukuba-City, 305*

Rapid NMR imaging methods are reviewed historically and some of their pulse sequences are described. A simple graphical representation which classifies the various imaging methods with the numbers of excitation and refocus pulses has been introduced. This review has concluded for the future prospects that any rapid imaging method proposed until now can be well performed in EPI machines which are now available in the MRI market, so that how we should utilize them will become future important subjects in clinical applications.