

低磁場永久磁石装置による MR fluoroscopy の臨床的評価

安藤容子¹, 深津 博¹, 石垣武男¹, 石口恒男²,
青木郁男³, 山田孝士⁴, David M Kramer⁵, Leon Kaufman⁵

¹名古屋大学医学部放射線医学教室

²同 医療技術短期大学部診療放射線技術学科

³東芝メディカル中部サービス株式会社

⁴株式会社東芝

⁵Radiologic Imaging Laboratory, University of California, San Francisco

はじめに

近年, MRI における技術開発はめざましいものがあり, 特に種々の高速・超高速撮影法が導入されてきている^{1)~12)}. それを応用した1技法である MR fluoroscopy では, 撮影—再構成—画像表示をそれぞれ連続して行うことによって, 従来の X 線透視のような画像表示が行える. 高磁場 MR 装置での MR fluoroscopy の報告はなされているが^{13)~15)}, その適応領域には限界がある. 今回我々は低磁場 MR 装置による MR fluoroscopy の臨床的有用性につき検討した.

対象および方法

使用した装置は 0.064T, 東芝アメリカ MRI 社 (Toshiba America MRI Inc.) 製 ACCESS である^{16)~17)}. 垂直磁場の永久磁石で, 前後左右が開放されているオープンタイプであるため, 撮像中に膝・肩関節や四肢等を運動させたり, 任意の方向から種々の手技のアプローチが可能である.

以下に本装置での MR fluoroscopy の原理¹⁰⁾を簡単に示す (Fig. 1). Gradient echo 法,

TR=20 ms, TE=9 ms, flip angle (以下 FA と略す) =45°, phase encoding 数 (以下 PE 数と略す) 44 の場合を例に挙げると, 1 画像の撮像時間は約 0.9 秒となり連続してデータの収集を行う. 一方, 再構成においては, 1 番目の画像は scan-1 のデータのみから構成されているが, 2 番目の画像は scan-1 のデータの後半 0.3 秒分と scan-2 のデータの前半 0.6 秒分から成り立っている. よって 2 番目以後の, 1 画像を表示するのに要する時間は約 0.6 秒となる. この様に, 直前の画像データの一部を利用して再構成を行う事によって, 実際の撮像時間よりも短い時間で画像表示する事が可能である.

今回検討した事項および撮像シーケンスは, Table 1 のごとくである. なお, いずれも gradient echo 法を用い, slice 厚=15mm, frequency encoding 数 128, 1 NEX とした.

本装置では, 位置決めの際にも MR fluoroscopy を用いることができる (quick locator). 横断像, 矢状断像, 冠状断像の三断面を同時に連続撮影し, モニター画面を観察しながらベッドを移動させて, 位置決めを行った. 以下に検討項目を示す.

- 1) 針生検
食用マーガリンの中に標的として約 1.5cm 角

キーワード MR fluoroscopy, open type MRI, low field magnet, MR guided needle biopsy, dynamic study

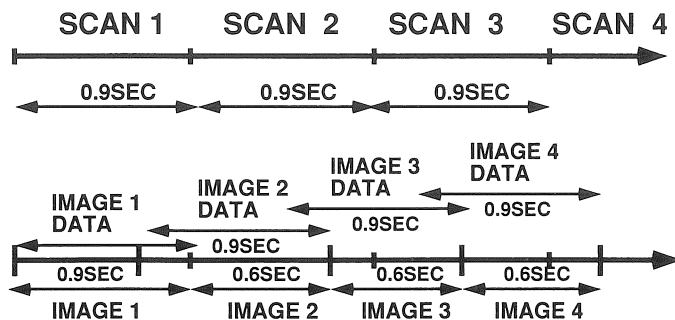


Fig.1. Acquisition-reconstruction-update array.

Although scan time per 1 image is about 0.9s, image display time is 0.6s because latter one third of previous scanned data(0.3s) and former two thirds of current scanned data(0.6s) are used for reconstruction.

Table 1. Pulse sequence of studies

	TR(msec)	TE(msec)	FA	PE Step	FOV(cm)	Scan Time(sec)
1. needle biopsy	20	9	45°	128	34×36	2.56
2. dynamic study						
(a) eye movement	30	9	45°	170	24×24	5.10
(b) vecalization	20	9	45°	128	24×24	2.56
(c) knee movement	40	9	45°	128	24×24	5.12

FA=flip angle, PE Step=phase encoding step, FOV=field of view

の豚肉の小片を埋め込んだものを実験用ファントムとして作成した。使用した針は、純チタン製の Chiba needle type の二重針で、全長 150 mm、外筒の長径 1.3 mm である。横断、矢状断、冠状断面を連続撮像し、モニター画面を観察しながら標的に針を到達させるように穿刺を行った。受信コイルは、腹部用ベルトコイルを用いた。臨床応用では、3 症例で計 4 回の MR ガイド下針生検を行った。この間に表示されている画像はすべて観察、記録された (real-time fluoroscopy)。

2) Dynamic study

部位別に、異なるシーケンスで撮像した MR fluoroscopy の画面をビデオに録画する (real-time fluoroscopy) と同時に一定の間隔で 16 画像をハードディスクに収集した。前者のビデオ画像および後者のシネ表示したもの (cine dynamic study) を、視覚的に評価した。後者に要する最短時間は、TR (ms)×PE 数×16 (画像数) ms である。以下の項目について検討した。

a) 眼球運動 健康人ボランティア 3 名と 2 症例 (計 4 回) を対象とした。横断面を撮像し、被

験者に眼球の内転、外転を緩徐に繰り返すように命じ、3.4秒毎に画像を収集した。受信コイルはQDヘッドコイルを用いた。

b) 発声 健康人ボランティア3名と多系統萎縮症(以下MSAと略す)患者4例を対象とした。矢状断、横断面を撮像し、被験者に母音(ア・イ・ウ・エ・オ)を緩徐に発声するように命じ、上記のごとくreal-time fluoroscopyと2.56秒毎に画像を収集して得たcine dynamic studyの評価を行った。頸部用ベルトコイルを用いた。

c) 膝関節運動 健康人ボランティア3名を対象とした。矢状断、冠状断像を得た。被験者に伸展位から15°ずつ6秒毎に屈曲していくように命じ、上記のreal-time fluoroscopy, cine dynamic studyを行った。リング状のショルダーコイルを用い、7.5°刻みの目盛り付き装具に下腿を固定して、運動を安定させ、角度が保持でき

るように図った。

結 果

本装置のquick locatorは、ルーチンワークの際の位置決め用に用いられたが、横断、矢状断、冠状断の3方向での同時観察が可能で、解剖学的位置関係が認識でき、画像の対称性など正確な位置決めが容易となった。しかもpre-scanを必要としないので検査時間の短縮に役立った。

1) 針生検

高信号を呈するマーガリン中で、標的はやや低信号に、また生検針はアーチファクトの少ないsignal voidとして良好に描出され、針先端も確認できた。標的に向かって生検針の進んで行く様子がよく観察され3次元的ガイドが可能であった。3方向での同時観察により標的に十分穿

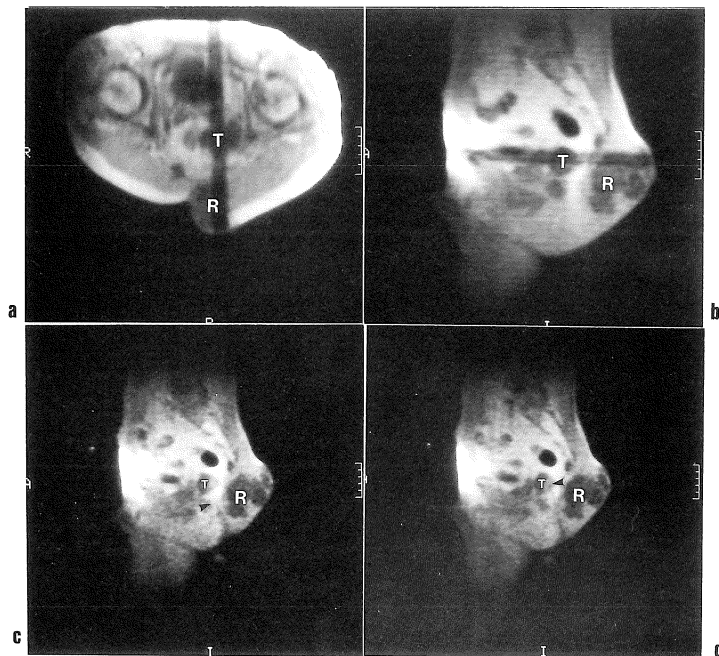


Fig.2. Needle biopsy of the case of a 79-year-old man with recurrent chordoma.
a. Quick locator ; axial image. Black band shows sagittal slice level.
b. Quick locator ; sagittal image. Black band shows axial slice level.
c. d. Biopsy needle (arrow head) reaches the pelvic tumor (T) avoiding the local recurrence (R).

刺されていることが実際に確認できた。Fig.2 は 79 歳男性仙骨脊索腫の局所再発および骨盤内転移の臨床例で、骨盤内の腫瘍の穿刺時に横断面でのアプローチでは仙骨部の腫瘍も一緒に穿刺せざるをえないが、矢状断面でのアプローチでは、標的のみ穿刺する事が可能であり、有用であった。

2) Dynamic study

a) 眼球運動 健常人では視神経、眼球、レンズ、内・外側直筋が良好に描出された。ただし real-time fluoroscopy では円滑に連続した眼球運動として把握するのは困難であったが、cine dynamic study では良好に描出された。Fig.3 は 61 歳男性右眼窩腫瘍例（放射線治療前後で撮影）で、治療前に著しく障害されていた眼球の外転運動が、治療後には改善しているのが動的に確認できた。

b) 発声 舌、軟口蓋、声帯は描出され、発声に伴うそれらの動きが十分把握できた。MSA 例では健常人と比較して舌、軟口蓋の動きはほぼ同様であるが、4 症例のうち 2 症例では声帯の運動が障害されていることが、横断像で確認され

た。Fig.4 は健常人男性と 52 歳男性の MSA 例の横断像を示したもので、MSA 例で発声時に声帯の開閉が障害されているのが容易に確認された。

c) 膝関節運動 slice 厚が 15 mm であるので矢状断面では、前十字靭帯・後十字靭帯が同時に観察された。real-time fluoroscopy では大腿骨、膝蓋骨、脛骨、腓骨、前・後十字靭帯は良好に描出されており、それぞれの全体的な動きと相互の関係が認識できた。さらに cine dynamic study では前・後十字靭帯は伸展時に弛緩し、屈曲時に緊張する事が視認できた (Fig. 5)。また大腿骨内顆、外顆は屈曲にともなって脛骨関節面上で後方へ移動しそれと同時に内側、外側半月板も後方へ移動するのが確認された。冠状断面では外側側副靭帯が伸展時に緊張し、屈曲時に弛緩するのが認められた。

考 察

MR 装置のハード・ソフトウェアの技術革新により、高速・超高速撮影が可能となり、撮像

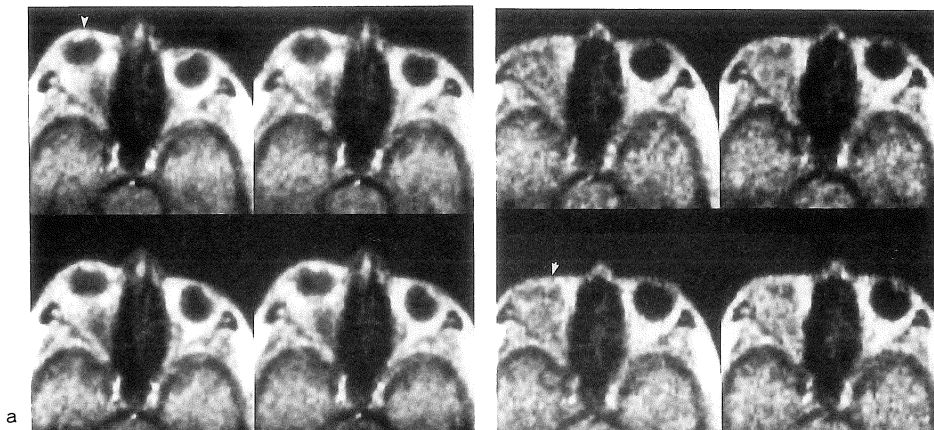


Fig.3. Dynamic study of eye movement ; 61-year-old man with right orbital tumor.

a. Pre therapy ; axial images at 4 positions. Right lens (arrow head) is visualized.

b. Post irradiation ; axial image at 4 positions.

Right orbital tumor reduced, and right eye movement is improved well compared with that before treatment.

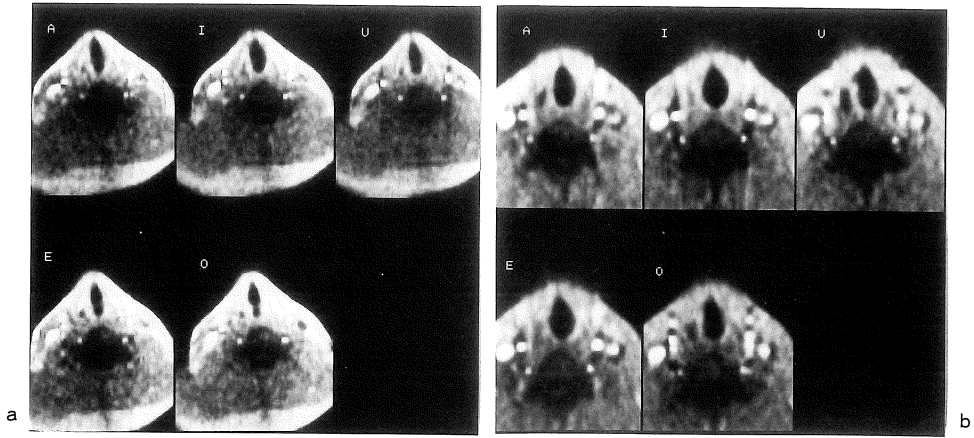


Fig.4. Dynamic study of vocalization of "a, i, u, e, o" ; axial image.

a. 31-year-old normal volunteer.

b. 52-year-old man with multiple system atrophy.

The movement of vocal cord is disturbed compared with that of normal volunteer.

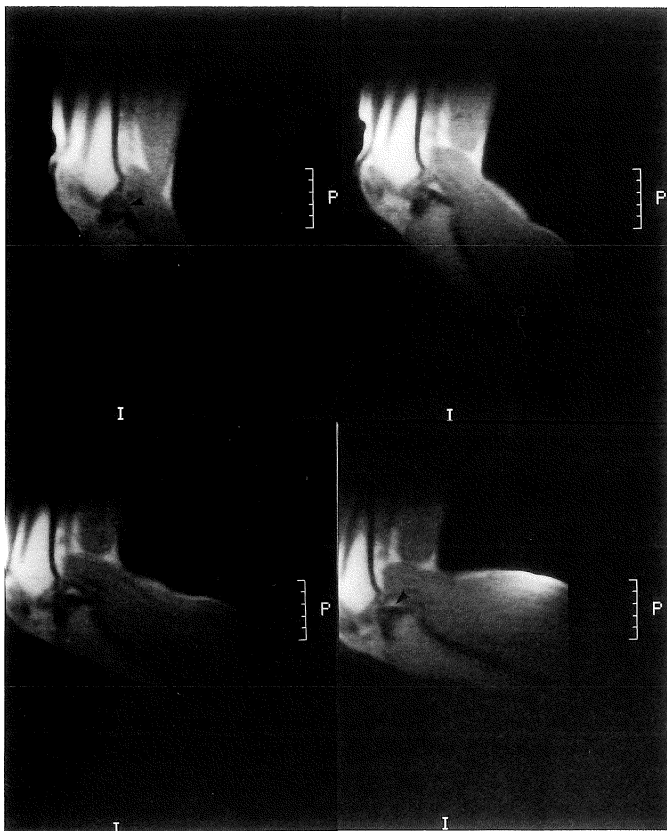


Fig.5. Dynamic study of knee joint ; sagittal image.

a. Anterior and posterior cruciate ligament (PCL ; arrow head) are relaxed at extension.

b. 30 degrees flexion.

c. 60 degrees flexion.

d. 90 degrees flexion. PCL becomes strained at flexion.

a	b
c	d

時間は1秒以下のレベルまで短縮し、リアルタイム画像の利用やその解析が現実化した。

低磁場 MR 装置による MR fluoroscopy では、高磁場 MR 装置における種々の高速撮影とは異なる点がいくつか挙げられる¹⁷⁾。低磁場装置での画質上の短所として S/N 比が劣ることがあり、そのため同じ撮像条件では画像は不良となる。そこでスライス厚を大きくし、TR を長くする等の措置が必要となるが、後者は撮像時間の延長につながる。また PE 数を増やせば、解像力は上がるが S/N 比はむしろ低くなり、撮像時間は延長する。一方長所としては磁化率の違いによる susceptibility artifact はほとんどみられず、血流、脳脊髄液などのアーチファクトも無視できる点が挙げられる。また、今回用いた装置の大きな利点はオープンタイプである点である。撮影中に膝・肩などの大関節を内部で動かす事や、針生検¹⁸⁾、レーザー照射等の MR intervention に応用する事が可能である。さらに、空間が広く圧迫感が少ないために、子供や、閉所恐怖症の患者への適応も拡大でき、撮影中も検査室内は静かで快適である。経済的な面では、設置時も、ランニングコストも中・高磁場装置と比較すると、かなり安価であることも有利な点である。高磁場における超高速撮影としては、RARE 法、turbo-FLASH 法、エコー・プラナー法、MR fluoroscopy などが挙げられるが¹¹⁻¹⁵⁾、いずれも肩・膝などの dynamic study は困難である点、エコー・プラナー法では生体への安全性に未だ問題が残る点、MR fluoroscopy 以外は厳密にはリアルタイム撮影とはいえない点などが挙げられ、その適応には限界がある。

今回、我々は MR fluoroscopy を、real-time fluoroscopy と MR fluoroscopy を用いた cine dynamic study に分けて検討したが、それぞれに長所・短所が認められた。前者は、非常に簡便であり、検査時の位置決めや針生検等の MR intervention への応用が可能であると考えられた。Dynamic study では種々の部位の運動を観察するのに非常に有利といえる。特に後者では、

意図的に運動速度を遅くできる場合（発声および眼球・膝関節運動など）には TR、マトリックスを増やして条件をよくすることができる。さらに、連続撮影が可能なので撮像時間も数十秒から数分であり、比較的簡便である。これは、シネ表示させて観察するためリアルタイムとは言えないが、高磁場装置における RARE 法、turbo-FLASH 法、エコー・プラナー法に近い位置づけにあると思われる。一方、解像力、S/N 比が劣るという欠点があり、TR、マトリックスを増やして画像の向上を図れば、リアルタイム性が悪くなるので、撮像部位ごとに至適シーケンスを検討する必要があった。画面上で細かい構造の解析を行うには十分とはいえないが、動画の観察に適した用途があると考えられる。

今回 real-time fluoroscopy を用いて MR ガイド下の biopsy についての検討を行ったが、断層面を任意に選択でき、針を進める間も文字通り real-time で観察できる点が、横断面のみで穿刺時には実際は盲目的である CT 下生検と比べて非常に有利であるといえる。今後適応症例を拡大し、レーザー照射等の他の MR intervention への応用を図りたい。Dynamic study については、治療前後に眼球運動を評価し効果判定を行い、発声では、健常人と臨床例とを比較し診断に有用であった。膝関節運動では、前・後十字靭帯の屈曲にともなう変化が観察された。

結 論

オープンタイプの低磁場 MR 装置による MR fluoroscopy は、種々の dynamic study を行う上で有用性は高く、さらに診断の質的向上や、種々の疾患での治療効果判定への応用等の検討を行う価値が十分ある。

本論文の要旨の一部は、第 19 回、第 20 回日本磁気共鳴医学会大会（1992 年 3 月および 10 月）にて発表した。

文 献

- 1) Hennig J, Nauwerth A, Freidburg H : RARE imaging : A fast imaging method for clinical MR, *Magn Reson Med*, 3 : 823-833, 1986.
- 2) Mugler III JP, Brookeman JR : Three-dimensional magnetization-prepared rapid gradient-echo imaging (3D MP-RAGE) : *Magn Reson Med*, 15: 152-157, 1990.
- 4) Haase A : Snapshot FLASH MRI. Application to T_1 , T_2 and chemical shift imaging. *Magn Reson Med*, 13 : 77-89, 1990.
- 5) Frahm J, Merboldt KD, Bruhn H, et al. : Communications 0.3-Second FLASH MRI of the human heart. *Magn Reson Med*, 13 : 150-157, 1990.
- 6) Mansfield P : Multiplanar image formation using NMR spin echoes, *J Phys C*, 10 : L55, 1977.
- 7) Mansfield P, Pykett IL : Biological and medical imaging by NMR. *J Magn Reson*, 29 : 355-373, 1978.
- 8) Haacke EM, Bearden FH, Clayton JR : Reduction of MR imaging time by the hybrid fast-scan technique. *Radiology*, 156(2) : 521-529, 1986 Feb.
- 9) Tweig DB : Acquisition and accuracy in rapid NMR imaging methods. *Magn Reson Med*, 2(5) : 437-452, 1985.
- 10) Mansfield P : Real-time echo-planar imaging by NMR. *Br Med Bull*, 40 : 187-190, 1984.
- 11) Constable RT, Anderson AW, Zhong J, Gore JC : Factors influencing contrast in fast spin-echo MR imaging. *Magn Reson Imag*, 10(4) : 497-511, 1992.
- 12) Constable RT, Smith RC, Gore JC : Signal-to-noise and contrast in fast spin echo (FSE) and inversion recovery FSE imaging. *J Comput Assist Tomogr*, 16(1) : 41-47, 1992 Jan-Feb.
- 13) Riederer SJ, Tasciyan T, Farzaneh F, et al. : MR fluoroscopy : Technical feasibility, *Magn Reson Med*, 8 : 1-15, 1988.
- 14) Wright RC, Riederer SJ, Lee JN : Real-Time MR fluoroscopic data acquisition and Image reconstruction. *Magn Reson Med*, 12 : 407-415, 1989.
- 15) Farzaneh F, Riederer S : MR fluoroscopy. *Radiology*, 171 : 545-549, 1989.
- 16) Sheldon P, Carlson J, Kaufman L : Forces and torques produced by a 640-gauss permanent magnet on ferromagnetic objects. *Journal of Neuroimaging*, Vol.1 No.4. Nov : 184-190, 1991.
- 17) Kramer DM, Hawryszko C, Ortendahl DA : Fluoroscopic MR imaging at 0.064 tesla. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, Vol.10. No.3. Sep : 358-361, 1991.
- 18) Gronemeyer DHW, Seibel RMM, Kaufman L : Low-field design eases MRI-guided biopsies. *Diagnostic Imaging*, Mar : 139-143, 1991.

Clinical Evaluation of MR Fluoroscopy on a Low-Field Permanent Magnet

Yoko ANDO¹, Hiroshi FUKATSU¹, Takeo ISHIGAKI¹,
Tsuneo ISHIGUCHI², Ikuo AOKI³, Takashi YAMADA⁴,
David M KRAMER⁵, Leon KAUFMAN⁵

¹*Department of Radiology, Nagoya University School of Medicine
65 Tsurumai-cho, Showa-ku, Nagoya 466*

²*Nagoya University College of Medical Technology,*

³*Toshiba Medical Chubu Service Co.,* ⁴*Toshiba Inc.*

⁵*Radiologic Imaging Laboratory, University of California, San Francisco*

Clinical evaluation of MR fluoroscopy on a low-field permanent magnet MR unit was performed. The unit is open-type so that a patient can move even his shoulders and legs during the scanning. During the continuous scan, the scan-reconstruction-display array system produces real-time fluoroscopic imaging by using a part of the prior image data to reconstruct the current image. In the studies of needle biopsy under MR fluoroscopic guide, three dimensional real-time information was effectively available. MR dynamic studies applied to vocal cord, eye and knee movement offered us many additional informations which were not obtained in static MR studies. MR fluoroscopy using open-typed apparatus showed the clinical potentiality in dynamic studies of various organs and conditions, and interventional procedures.