

インターベンション治療における縦型オープン MR 装置の 初期経験

森川茂廣¹, 犬伏俊郎¹, 松田昌之², 来見良誠³,
藤村昌樹⁴, 野坂修一⁵, 村田喜代史⁶, Viswanathan Seshan⁷

¹滋賀医科大学分子神経科学研究センター ²同脳神経外科 ³同第1外科 ⁴同第2外科
⁵同麻酔科 ⁶同放射線科 ⁷GE 横河メディカルシステム

はじめに

MRI は良好な軟部組織コントラストを有し、放射線被曝の心配がなく繰り返し撮像することが可能で、しかも横断面だけでなく撮像面を自由に設定することができ、骨や空気が介在しても実行可能であるなど、インターベンション治療の画像ガイドとして多くの利点を有する。しかし、患者へのアクセスの制限と、使用可能な機器に制約があることが大きな障害となっている。現在 MR ガイドのインターベンションに使用されているオープン MR 装置の多くは、いわゆるハンバーガータイプ¹⁾と呼ばれるもので、上下に設置された磁石間の水平ギャップから患者にアクセスしなければならず、疾患部位や治療法について制約があり、時には撮像のために患者を移動することも必要となる。本学では、本邦第1号機となる、いわゆるダブルドーナツタイプの縦型オープン MR 装置²⁾を導入し、臨床使用を開始した。ドーナツ型の磁石を縦に二つ並べたようなユニークなデザインにより、患者へのアクセスは大幅に改善され、MR 画像ガイド下に全身諸臓器の疾患部位に対する治療を行うことが可能となった。しかも、手術をしながら、患者を移動せずにリ

アルタイムの MRI をモニターできるゾーン I タイプの術中監視用 MR 装置といえる。ここでは、この装置の利点と我々の臨床使用経験を述べることとする。

システムの概要

MR 装置は、GE 社製 0.5T 超伝導タイプ SIGNA SP/i である (Fig. 1A)。磁石の間の垂直ギャップは幅 58 cm で、ここから磁石間に設置された 2 台の液晶パネルでリアルタイム MRI をモニターしながら治療を行う。患者ベッドを磁石の前方に固定するフロントドック方式では、患者がドーナツの穴にはいるような設定で、二人の術者が患者の両脇に立って治療を行うことができる (Fig. 1B)。これに対し、サイドドック方式は、患者ベッドが磁石の垂直ギャップの方向から入る設定で、術者は一人に限定されるが、頭頂方向からのアクセスや、碎石位での骨盤部病変の治療が可能となる (Fig. 1C, D)。MR 画像ガイドの大きな利点は、任意の撮像面を設定できることである。しかし、二次元画像である MRI をガイドとして用いて穿刺などの手術操作を行うには、その経路と目的部位が確実に撮像面に一致していなければな

キーワード open MRI, interventional MRI, MR-guided therapy, temperature mapping, thermoablation

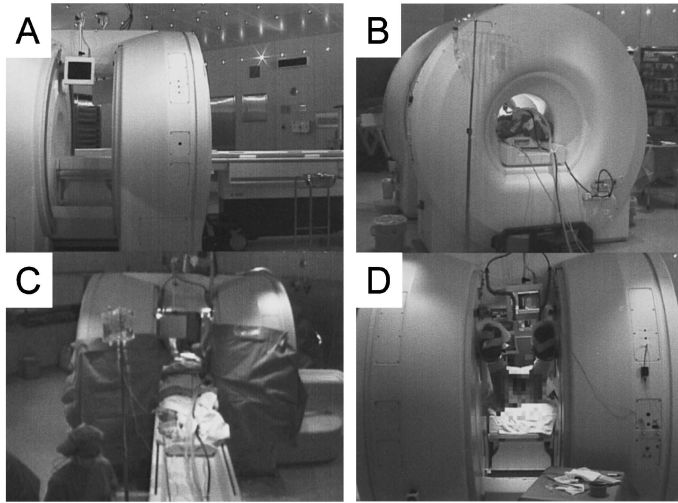


Fig. 1. Double-donut type 0.5T GE Signa SP/i. (A) Side view, (B) Patient-front docked, (C) Patient-side docked, and (D) Patient-lithotomy position.

らない。こうしたナビゲーションは、フラッシュポインター (Fig. 2A) により実現される。ここに備えられている発光ダイオード (LED) (Fig. 2A, 矢印) から発射される赤外線は術野の天井部分に設置された3箇所の検出器 (Fig. 2B, 矢印) によって検知され、これによって、穿刺面の座標を自動的に計算し、リアルタイムMR画像の撮像面が決定される。Fig. 2A左は3個のLEDを有するもので、上方向からの穿刺に、右は2個のLEDを有するもので、横方向からの穿刺に用いられる。

施設および周辺機器

この装置は、術中監視用に用いられるので、検査室ではなく、手術室として設計された新しい建物に設置されている (Fig. 3)。治療を行う磁石設置室の落下細菌レベルも手術室並で、操作室に入るにも術衣に着替えることにしている。この磁石はオープンなデザインであるため

シールドが困難であるので、磁石設置室全体に磁気シールド、電波シールドが施されている。磁石室内の照明も、電磁ノイズの混入を避け、発熱が少なく十分な照度を得られるよう、最近美術館の照明などに用いられている光ファイバー方式を採用し、隣室に設置された大容量の光源 (Fig. 4A) からの光がファイバーを通して天井に導かれている。これらのファイバーの一部はフレキシブルアームを通して術野の照明にも用いられている (Fig. 4B)。操作室の隣には、患者のリカバリーコーナーが設けられており、全身麻酔後の患者の観察に用いられている。また、滅菌装置も建物内に備えられ、大きな器具以外のほとんどの手術器具がここで滅菌できるので、一般の手術器具の混入を防ぐためにも有効である。

MRガイド下インターベンションに用いることのできる機器に求められる要件としては、①磁石に引かれて危険を及ぼさないこと、②MR画像にノイズやひずみなどの悪影響を与えない

2001年1月12日受理

別刷請求先 〒520-2192 滋賀県大津市瀬田月輪町 滋賀医科大学分子神経科学研究センター 森川茂廣

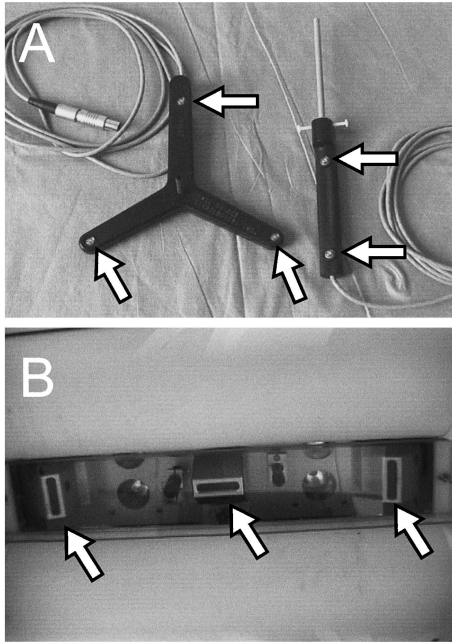


Fig. 2. (A) Flash pointers with light emitting diodes (arrow) for the determination of real time MR image planes. (B) Three detectors (arrow) are located on the ceiling.

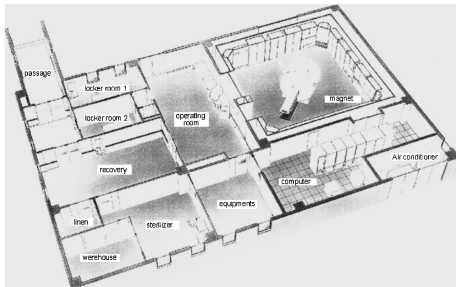


Fig. 3. Layout of the new building for interventional MRI with Signa SP/i

こと、③磁場の中でも正常に本来の機能を発揮することなどがあり、周辺機器も特別なものや対策が必要である。

全身麻酔下での治療を行うために、MR対応麻酔器 (Exel 210-MRI, Datex Ohmeda)、ベン



Fig. 4. (A) Light sources of fiber optic illumination in the computer room. (B) Some fibers are utilized for lighting the operation field with flexible light guides.

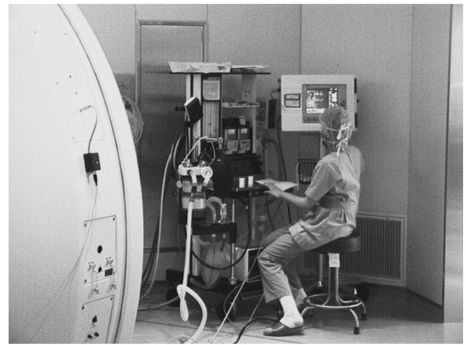


Fig. 5. MR-compatible anesthesia machine and monitors

チレーター (ventiPAC 5 MRI, pneuPAC)、心電図、血圧、呼気ガスなどのモニター (AS/3CM-MRI, Datex Ohmeda) が導入されている (Fig. 5)。またMR対応手術用顕微鏡 (SMED-3MR, スイス) も準備され (Fig. 6)、垂直ギャップの利点をいかした顕微鏡下の手術が行われている。その他、電気メス (ICC350-MR, ERBE) やエアートーム (MIDAS REX IV-MR) などMR対応のものが備えられている。温熱治療用には、レーザー (CLT50, SLT Japan)、マイクロ波手術器 (マイクロターゼ OT-110M, アズウェル) を導入し、これらの本体は隣室に設置し、ケーブルやファイバー



Fig. 6. MR-compatible surgical microscope

はペネトレーションパネルを通して磁石本体まで導いて使用している。手術器具は、ほとんどがチタン製のMR対応のもの(SIMAL, ベルギー, 瑞穂医科など)であるが、一部, セラミックや樹脂製のものも用いることが可能である。穿刺針, 生検針は, DAUM, E-Z-EM, Cook社製のMR対応のものを使用している。

国内では, MR対応の内視鏡が入手できないので, 一般の内視鏡からMR内で安全に使えるものを見つけ出した。AutoSutureの腹腔鏡

は使用可能であるが, 通常の内視鏡は, マグネット内の限られたスペースでは使いづらいため, やや短めの220 mmのSTORZの内視鏡を鼻内視鏡, 腹腔鏡, 胸腔鏡として使用している(Fig. 7A~C)。CCDカメラとCマウントはELM社製のものを非磁性体の部品に置き換える改造を行った。ライトガイドは10 mのものを特注し, 光源は操作室に設置している。MR画像と内視鏡画像の二つの画像情報は, ビデオ編集機のピクチャーインピクチャー機能を使って術者に送出し, 必要に応じて主画面と副画面の切り替えを行っている。MR画像と内視鏡画像を組み合わせることで表面と深部の両方の情報を得ることができるとともに, 止血操作等も可能となり, 治療範囲の拡大と安全性の向上が実現された。

リアルタイム MR 画像と MR 温度画像

この装置では, 通常の内視鏡同様, マルチスライスの撮像が可能であるが, インターベンション治療に用いられるのは, 高速のシングルスライスリアルタイムMR画像である。通

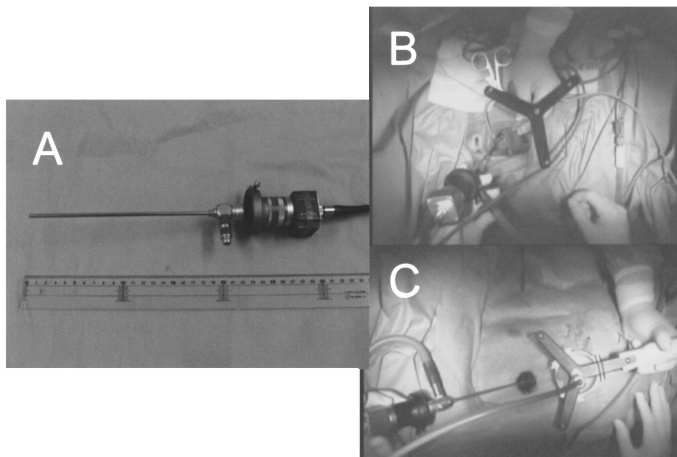


Fig. 7. MR-compatible endoscope (A), used as a nasal scope (B) and thoracoscope (C)

常, spoiled gradient echo (SPGR) 法 (14/3.7: TR/TE, 256×128 matrix) を用いて, 約2秒に1枚の割合で画像がアップデートされて術者用のモニターに表示される. 前述のように撮像面はフラッシュポインターで決定され, 穿刺針の進行方向がMR画像上にカーソルで表示されるので, 穿刺を正確かつ容易に行うことができる. T₂系のコントラストが必要な場合には, シングルショットのファーストスピンエコーもリアルタイムMR画像に用いることができる.

もう一つのMRガイド下インターベンションの大きな利点は, MR信号には温度の情報が含まれており, これを画像化すれば, 温度プローブなどを挿入することなく非侵襲的に組織の温度をモニターすることができることである. これは, 温熱治療の効果判定の大きな武器となることが期待される. MR温度画像には, T₁, diffusionなども用いられるが, 我々は温度の数値化が容易に可能な水信号のproton resonance frequency法³⁾により構築している. このMR温度画像は, SPGR (50/12: TR/TE) で約7秒に1枚撮像し, ワークステーション

で温度計算を行い治療中の術者にリアルタイムに送出している. 寒天ファントムにマイクロ波照射したときの温度画像をFig. 8に示す.

臨床例

Tableに示すように2000年9月現在, 腹部一般外科, 脳外科, 耳鼻科, 整形外科, 泌尿器科領域の各種疾患61例に対してインターベンションあるいは手術を行った. 半数を超える32例が全身麻酔下に治療を受けている. MRガイド下肝腫瘍マイクロ波凝固壊死療法については別に発表するので, ここでは肝腫瘍以外の

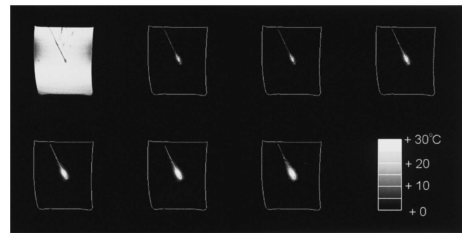


Fig. 8. MR temperature mapping of an agar phantom during microwave ablation

Table. Clinical Cases of MR-guided Operations and Interventions

		Cases (General Anesthesia)	
Surgery	Brain Tumor	4	(4)
	ENT	6	(3)
	Orthopedics	2	(2)
	Breast	1	
Thermotherapy	Microwave (Liver Tumor)	24	(16)
	Microwave (Others)	5	(3)
	Laser (Slipped Disk)	3	
	Hot Saline Infusion	2	
Ethanol Injection	Liver Tumor	2	
Biopsies	Brain Tumor	3	(3)
	Chest Wall/Mediastinum	5	
	Abdominal Tumor	3	
	Vertebral Tumor	1	(1)
Total		61	(32)

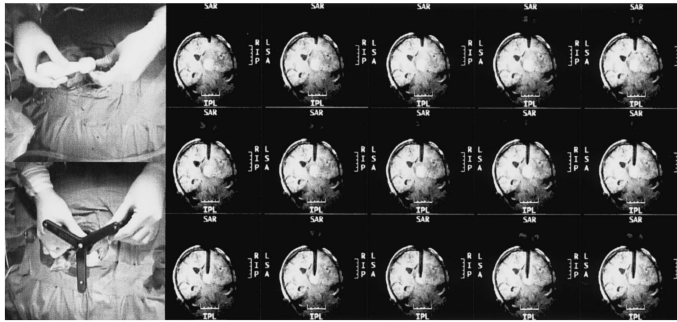


Fig. 9. MR-guided biopsy of the brain tumor

幾つかの症例を紹介することとする。

脳腫瘍に対しては、生検および開頭手術が行われている。生検では、頭部をマグネットセンターに固定し、MR画像で、腫瘍の位置と穿刺部位を決定した後、穿頭を行う。穿頭部頭蓋骨に穿刺針のガイドを自由に調整できるニューロゲイト (DAUM) を固定し⁴⁾、フラッシュポインターを用いたリアルタイムMR画像で穿刺方向を決定して固定し、リアルタイムMR画像をモニターしながらゆっくりと生検針を進めていく (Fig. 9)。目的部位を穿刺後、通常のマルチスライスMRIを撮像し、生検針の位置の最終確認を行った後サンプルを採取する。脳腫瘍の摘除は、MR対応顕微鏡下で行っている (Fig. 6)。開頭した患者の位置を動かさことなく、随時ガドリニウム造影MRの撮像を行い、必要かつ十分な領域の腫瘍を摘除し、重要領域の損傷を避けることができる (Fig. 10)。直腸切断術後、骨盤内仙骨前面に再発した直腸癌に対して、碎石位での治療を行った。この部位は超音波での画像ガイドは不可能であり、MRガイドが非常に有用であった。マイクロ波針型深部電極を、会陰部から経皮的に穿刺し、再発腫瘍に対するマイクロ波凝固壊死療法を行った。治療に際しては、MR温度画像によってマイクロ波による温度変化を検出することができた (Fig. 11)。本治療により、疼痛の著名な軽減とCEAの低下が得られた。

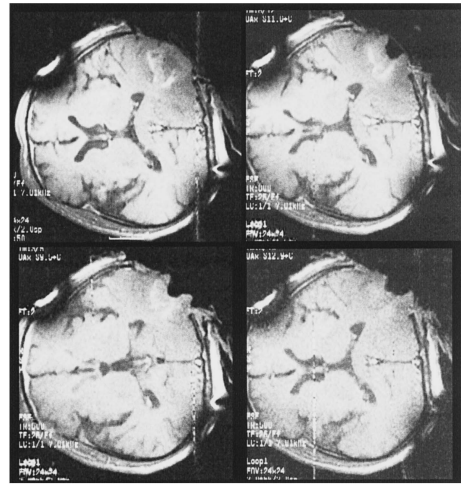


Fig. 10. MR images during the resection of brain tumor

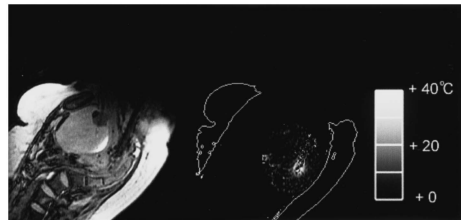


Fig. 11. MR-guided percutaneous puncture of presacral tumor and temperature mapping during microwave ablation

結 語

ダブルドーナツタイプの垂直ギャップを有する本MR装置は、患者へのアクセスの自由度が高く、様々な疾患部位に対してリアルタイムMR画像をモニターしながらのインターベンション・手術が実現された。今後は、治療機材の拡充を図るとともに、温度画像などMRの特徴と利点を十分に活用することにより、この治療法がますます発展するものと期待される。

文 献

- 1) Lufkin RB : Interventional MR imaging. Radiology 1995 ; 197 : 16-18
- 2) Schenck JF, Jolesz FA, Roemer PB, et al. : Superconducting open-configuration MR imaging system for image-guided therapy. Radiology 1995 ; 195 : 805-814
- 3) Ishihara Y, Calderon A, Watanabe H, Okamoto K, Suzuki Y, Kuroda K, Suzuki Y : A precise and fast temperature mapping using water proton chemical shift. Magn Reson Med 1995 ; 34 : 814-823
- 4) Kollias SS, Bernays R, Marugg RA, Romanowski B, Yonekawa Y, Valavanis A : Target definition and trajectory optimization for interactive MR-guided biopsies of brain tumors in an open configuration MRI system. J Magn Reson Imaging 1998 ; 8 : 143-159

Preliminary Clinical Experiences with a Vertically Oriented Open MR System in Interventional Therapy

Shigehiro MORIKAWA¹, Toshiro INUBUSHI¹, Masayuki MATSUDA²,
Yoshimasa KURUMI³, Masaki FUJIMURA³, Shuichi NOSAKA⁴,
Kiyoshi MURATA⁵, Viswanathan SESHAN⁶

¹*Molecular Neuroscience Research Center, Department of* ²*Neurosurgery,* ³*Surgery,*
⁴*Anesthesiology and* ⁵*Radiology, Shiga University of Medical Science*
Seta Tsukinowa-cho, Ohtsu, Shiga 520-2192
⁶*GE Yokogawa Medical Systems*

We started clinical studies of MR-guided intervention therapy using an open configuration MRI system (0.5T GE Signa SP/i) in January 2000. Our preliminary experiences with this system, and the advantages of MR-guided therapy are detailed. The unique “double-donut” design of the magnet increased patient accessibility. Two LCD monitors located in the 58 cm wide vertical gap of the magnet monitored real time MR images. The gap allowed two surgeons to simultaneously access the patient. The acquisition plane of the MR images could be controlled by the surgeon using a flash pointer. To house this magnet system, a new building for surgery was constructed. The magnet room was shielded from external electromagnetic noise. Fiber-optic illumination was used to circumvent noise and heat. MR-compatible components, such as anesthesia machine, monitors, microscope, and endoscope were installed. Instruments for thermal therapy, such as laser and microwave devices, were placed in the control room next to the magnet.

From January to September 2000, 61 patients were treated using this system. Of those 32 were under general anesthesia. The majority of cases were MR-guided microwave ablation of liver tumors (reported on elsewhere). Some of the other cases are described here. Biopsies of brain tumors were carried out under the guidance of real-time MR images. Brain tumor resections were also done under MR-compatible microscope. In these cases, Gd-enhanced MR images were acquired periodically during the surgical procedure for evaluation of the resected area. For a pelvic tumor, microwave ablation was carried out in the lithotomy position. Temperature change during ablation could be monitored by phase difference MRI.

MR-guided therapy has many advantages, such as superior soft-tissue contrast, and the ability to non-invasively monitor temperature. In addition, the open configuration of the SP/i remarkably increased patient accessibility. Although MR-compatible surgical equipment is currently limited, development is ongoing. We expect MR-guided therapy to become more popular for minimally invasive therapy in the future.