

Brain THEATER : MRI誘導・ニューロナビゲーション一体型 脳神経外科手術室と手術支援情報ネットワークシステム

Brain THEATER : MRI Guided Neuronavigation Operating Room with Surgery Information Network System

梶田 泰一 Yasukazu Kajita

吉田 純 Jun Yoshida

名古屋大学 脳神経外科

術中画像誘導手術は、脳神経外科手術において顕微鏡の導入に続く第2のブレイクスルーである。脳腫瘍の外科手術において、術中にMagnetic Resonance Image(MRI)画像を撮像し腫瘍の摘出度を確認、残存する腫瘍は付随するナビゲーション画像をアップデートして確実に摘出できるため、患者の後遺症を減らし生存期間を延長させる。しかしながら、磁場の影響を及ぼすMRI装置の側で手術を行い、かつ手術周辺機器からの電氣的ノイズを遮断して高画質の画像を撮像するには、独自のMRI装置周辺手術環境を確立しなければならない。われわれは、平成18年3月、当院新中央手術部に、MRI装置(日立メディコ オープンMRI APERTO^{®1})とナビゲーション(BrainLAB VectorVision^{®2})一体型手術室、そして、画像解析や画像転送システムを研究している名古屋大学情報科学研究科、放射線技術学科 研究室や近隣の脳神経外科手術室(BrainSUITE^{®3})との間でネットワークが結ばれた未来型ヴァーチャル手術システム(このネットワークシステム全体を称してBrain THEATER)を確立した。このようなIT(Information Technology)技術に支えられた未来型ヴァーチャルネットワーク手術室のなかでは、当院手術室は多種多様な手術画像情報を統合するヘッドクォーターの役割も担う。

Magnetic Resonance Image (MRI) guided surgery is the second breakthrough following the microscopic surgery on the history of neurosurgery. In the brain tumor surgery, especially, intraoperative MR imaging in combination with neuronavigation increase the extent of tumor resection, thus improving surgical results. MRI provides the reliable image and powerful diagnostic tool. For intraoperative use, there are some limitation concerning compatibility of instruments used in the MRI scanner. It is very important to develop operating room safely adapting MRI system. The newly developed operating room in Nagoya University hospital is integrated MRI and navigation system. Also, this operation room has a network with the Nagoya University Department of Intelligent Media Integration, Department of Radiological Technology and affiliated neurosurgical operating room (BrainSUITE^{®3}) as Virtual integrated network system operating room (Brain THEATER). Brain THEATER represents a major step forward the future Neurosurgery.

Key Words: Open MRI, Intraoperative MRI, Image Guided Surgery, Neuronavigation, Neurosurgery

1. はじめに

脳外科手術が従来困難とされたのは、1)脳の機能局在が未明のまま脳にメスを入れたことで、予期せぬ後遺症が出現したこと、2)脳手術は、脳内の極めて狭いスペース内で操作しながら、常にオリエンテーションを正確にし、重要な血管や神経を損傷させない繊細な手術操作技術が要求されたことにある。近年、脳画像、特にMRI装置の進歩は、脳病変を明

らかにするのみならず、脳機能の解明にも多大な貢献をしてきた。脳外科診療において、MRI画像は最も精度の高い解剖学的画像を提供するとともに、fMRIやMRS画像は脳機能の局在や病変の性状まで明らかにすることで、中心的役割を果たしている。近年、欧米や日本でこのMRI装置を手術室に設置し、手術中にMRI画像を撮影する画像誘導手術の試

みが開始されている^{1)~8)}。

脳神経外科手術は、顕微鏡の導入により繊細な手術操作が可能となり、手術成績は格段に向上した。しかしながら、狭い視野でみる顕微鏡手術は、脳深部に到達するとオリエンテーションを失ったり、手術の到達度(脳腫瘍手術であれば、腫瘍の摘出度)が確認できない課題が残されていた。画像誘導手術は、手術中に画像を撮像し、手術の到達度を画像で確認することを可能とする(図1)。加えて、ナビゲーション技術を併用すると、究極の安全で確実な脳神経外科手術となる。一方、診断機器として開発されたMRI装置を手術室で安全に、そして有機的に運用するには、入念な手術環境の確立が必要である。

平成18年1月、名古屋大学医学部附属病院では新たに中央診療棟が完成し、新手術室が14室設置された。われわれは、最先端の画像誘導手術を提供できるMRI装置とニューロナビゲーションが一体化された独自の手術室を院内に確立し(図2)、

さらに画像研究室や他のMRI手術室とネットワークが結ばれ、最新の手術支援画像情報が統合される未来型ヴァーチャル手術室(Brain THEATER)を4年の歳月をかけて開発し、運用を始めた(図3)。

2. Brain THEATER

Brain THEATERは、MRI装置とニューロナビゲーション装置を中心に、高い安全性と有機的に機能する最新の手術環境の確立をコンセプトに開発された。Brain THEATERの最大の特徴は、MRI装置5ガウスライン外で通常の手術機器を用いて開頭術を行い、術中MRI使用時にはベッドを180°回転し、ベッド上天板を滑らせて撮像する回転型手術台システムと、MRIを使用しない一般脳神経外科手術時にも使用

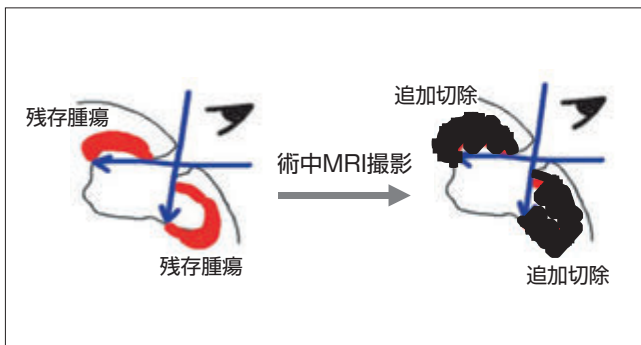


図1：画像誘導手術



図2：名古屋大学医学部附属病院 Brain THEATER

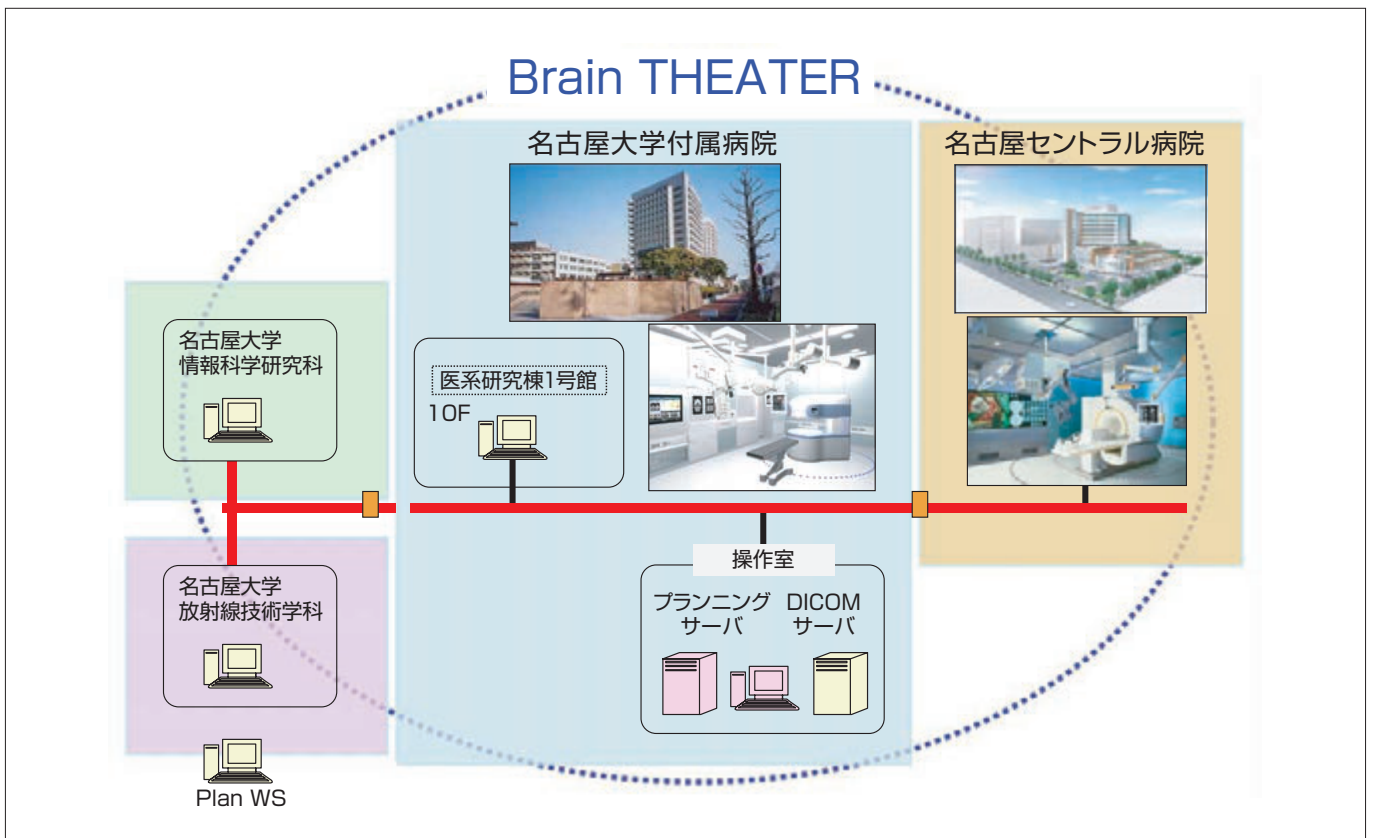


図3：Brain THEATER：ヴァーチャルネットワーク手術室 全体図

可能とする手術室内の合理的な設計の工夫を加えたことである(図4)。

2.1 MRI装置(日立メディコ製APERTO^{※1} 0.4T)

手術室内で、全身麻酔下の開頭術中に画像撮像するためには、撮影が安全に施行されることが必須条件である。1.5T MRI装置で、リアルタイムにMRI撮像下に手術を行う試みもあるが、1)MRI対応の非磁性体手術機器が必要、2)ガントリー内の狭いスペースでの手術操作の煩雑さ、などの理由により、汎用に至っていない。われわれは、ガントリーはオープンタイプのものが術中画像撮影用に最適と考え、高画質で高機能を併せ持つ上記機種を選択した。本装置は、低磁場タイプであるが、手術中に必要な画像を十分提供している。また、通常の手術機器を自由に使用できる5 Gauss圏内は装置近傍に限定され、その外側で通常の手術器具を用いた開頭術が安全に施行できる(図4)。

2.2 ナビゲーション装置(BrainLAB VectorVision^{※2})

BrainLAB VectorVisionナビゲーションは、z-touch^{※4}レジストレーションシステムなどの操作性や、各種画像のfusionや解析機能に秀でている。加えて、ネットワーク関連技術(iPlan^{※5} NETシステム)で、他に先んじ院内のあらゆる場所でタブレットPCを用いて術前計画を立てたり、ネットワークを院外に拡充すれば自宅で手術計画を検討したり、他病院と共同で手術

計画を検討することも可能である。モニター類は天つりタイプで、術者が容易にタッチパネルを操作する(図5)。



図5 : Navigation

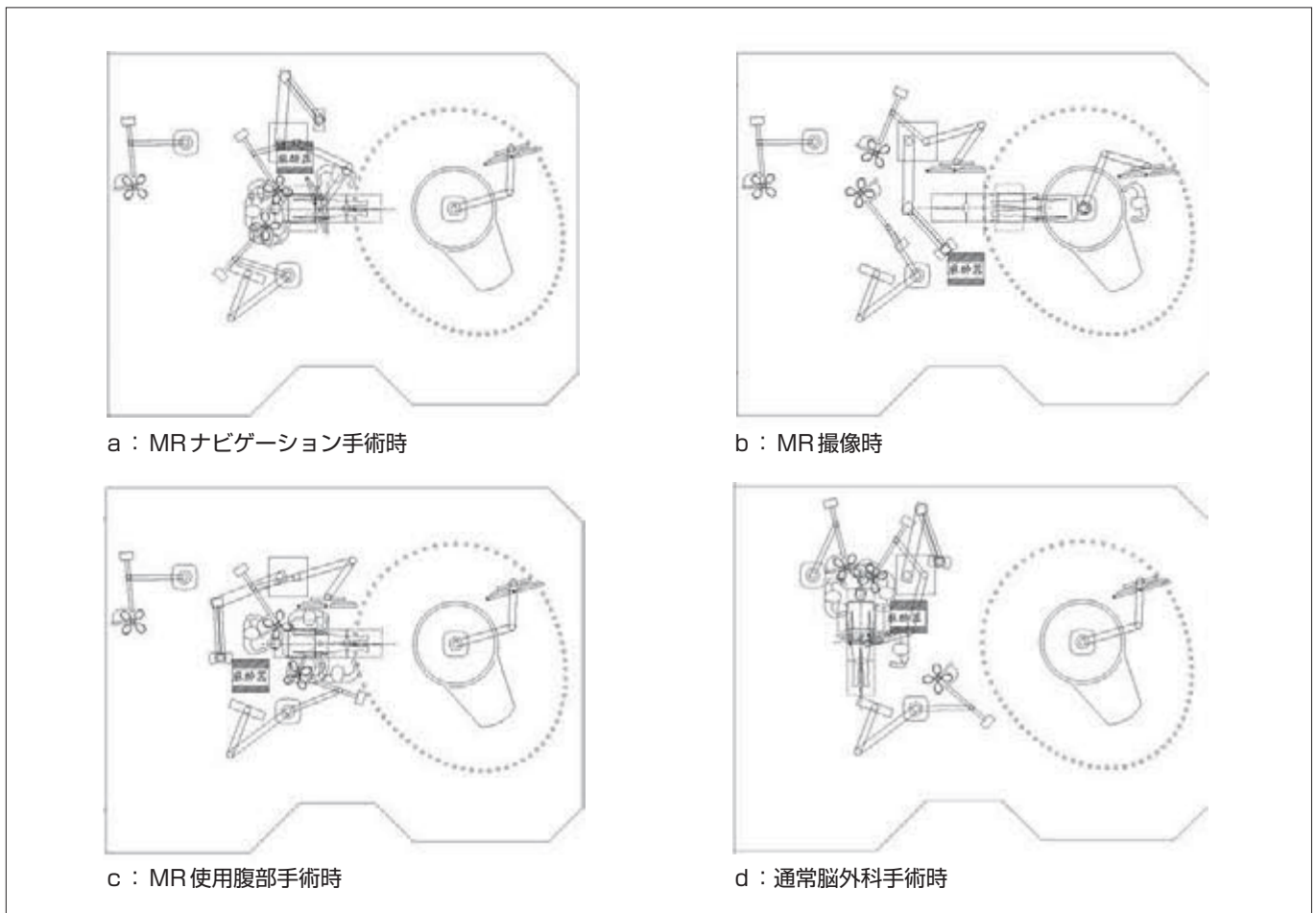


図4 : 各種手術時の機器配置例

2.3 回転式手術台と頭部固定装置

Brain THEATERは、MRIを使用しない汎用手術にも対応している。手術用ベッドは可動式で、MRIを使用しない手術は、図4-dのレイアウトで実施する。手術台を回転盤よりとりはずし移動することで、開頭術や脊椎手術なども実施可能である。

手術台は、MRI撮像のため非磁性体の材質で製作されている。開頭術に最適な体位がとれるよう、長軸方向のベッドの屈曲、回旋が可能になるよう開発されている点が類をみない。MRI撮像時には、自動的に水平位に復帰し、ガントリー内にベッド上天板が滑り込む最適の高さにセットされる工夫がされている。

頭部固定装置も、非磁性体で製作されるとともに、2つのジョイントを設け、頭部姿勢が任意に選択される。また、撮像時のコイルは頭部フレームに連結される(図6)。

2.4 シールドボックス、清潔ドレープほか

MRI撮像時には、画像ノイズ予防のために切断可能な電源はオフとする。輸液ポンプなど、電源の継続が必要な機器を、磁場を乱さないように収納するシールドボックスが製作された。術中、開頭された状態でMRI撮像する際、清潔を維持する透明ドレープも必須である(図7)。

2.5 運用マニュアルの作成

Brain THEATERを安全に運用するために、安全対策事項、手術マニュアル、機器マニュアルなどを目次とする運用マニュアルが作成された。実際の手術開始まで、手術室のス

タッフ全員(脳外科医、麻酔医、看護師、看護助手他)を対象に安全講習会を3度開催し、マニュアルの実施が徹底された。さらに、模擬患者を用いての入念な手術シミュレーションが3回実施され、平成18年3月10日吉田脳神経外科教授執刀の再発神経膠腫の第1例目の手術に至った。

3. 脳腫瘍開頭術の実際

(1)症例1：29歳 女性

平成17年4月痙攣発作で発症し、前医で右前頭葉腫瘍と診断された。4月30日開頭腫瘍摘出術を施行されるも、部分摘出に終わった。病理診断は、星細胞腫(grade 2)であった。術後経過観察中に全身痙攣発作が出現し、MRI検査にて残存腫瘍の再増大が指摘され、当院に紹介された。平成18年3月7日入院。10日Brain THEATER内術中MRI誘導・ナビ



図7：回転台とシールドボックス

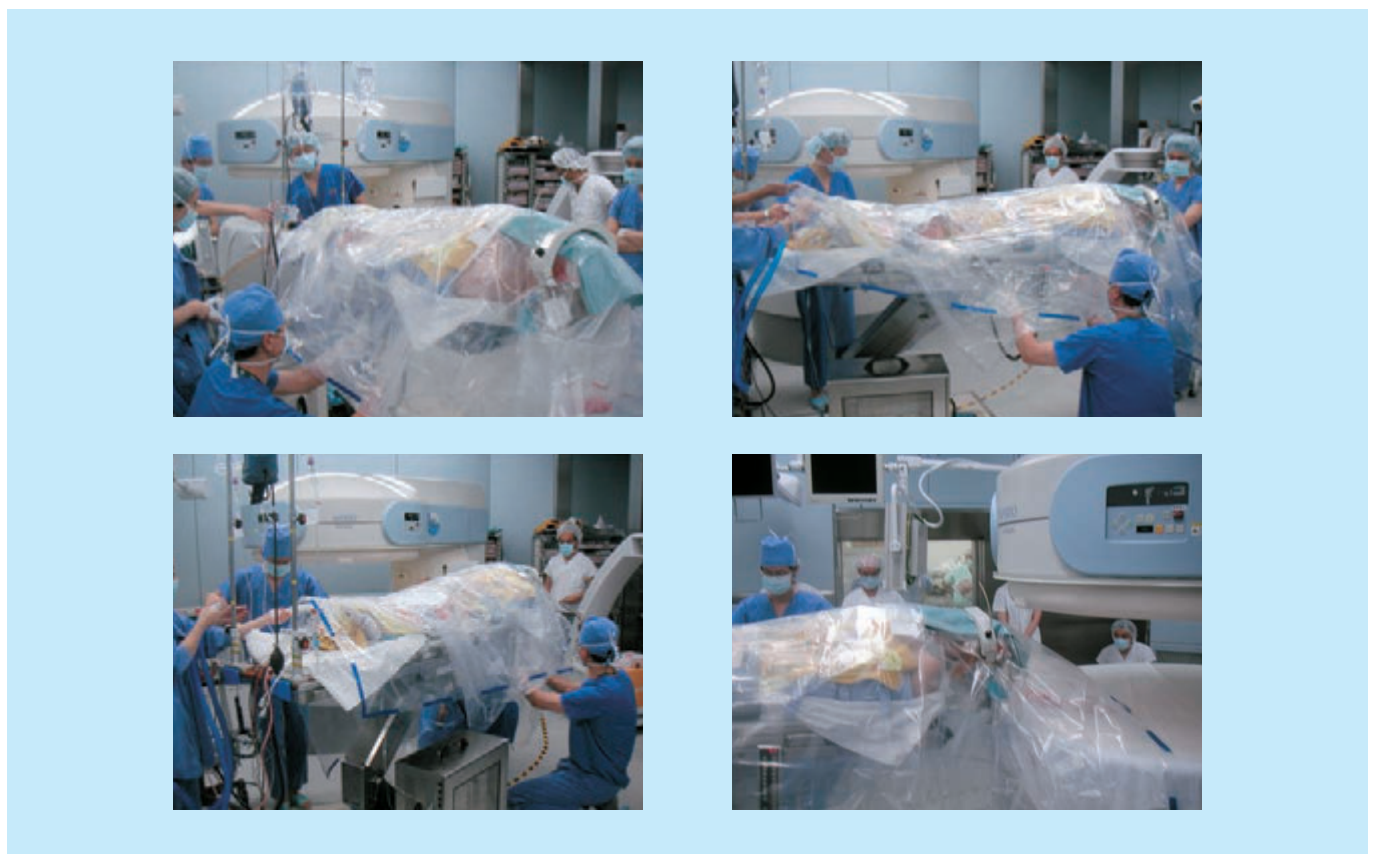


図6：手術台の回転

レーション手術にて、腫瘍は全摘出された(図8)。術後、神経脱落症状の出現もなく、3月28日退院された。

(2)症例2：59歳 男性

平成18年1月左片麻痺で発症し、前医受診。MRIにて、右基底核部に脳腫瘍を認め、1月17日当院に紹介された。入院時は左不全麻痺(上肢4/5、下肢4/5)は軽度で歩行も可能であったが、徐々に進行。入院後、1週間に左片麻痺は上肢1/5、下肢2/5に悪化したため、2月2日開頭腫瘍摘出術を施行された。腫瘍は脳深部に位置したため全摘出術に至らず、術後MRIで腫瘍摘出部外側に残存腫瘍が確認された。病理診断は、神経膠芽腫であった。術後、インターフェロン、MCNUの化学療法と放射線療法を併用するも、残存腫瘍は増大した。4月21日Brain THEATER内MRI画像誘導・ナビゲーション手術が施行された。腫瘍はさらに中脳部の奥深くまで浸潤していたが、2度の術中MRI画像撮影を行い

(図9)、3D ヴァーチャル画像に変換され(図10)、術野内での残存腫瘍の位置が明瞭にされた。3D ヴァーチャル画像をもとにナビゲーションを用い、腫瘍を全摘出した。

4. 考察

4.1 術中画像誘導・ニューロナビゲーション脳神経外科手術

従来の顕微鏡手術は、狭い視野で脳内に深く進むと、オリエンテーションを失ったり、視野が限定された。近年、普及しているニューロナビゲーションは、術者に手術操作部位を術前MRI画像上に示す画期的な技術開発と思われた。この技術を用いて、これまで手術不可能とされた重要な脳機能(運動野、言語野など)近傍の腫瘍手術に対する摘出術も試みられた。しかしながら、ナビゲーション下で腫瘍を摘出して、術後に麻痺が出現したり、言葉がしゃべれなくなる後遺症が出現した。腫瘍を摘出したり髄液が排出されると、脳が予想

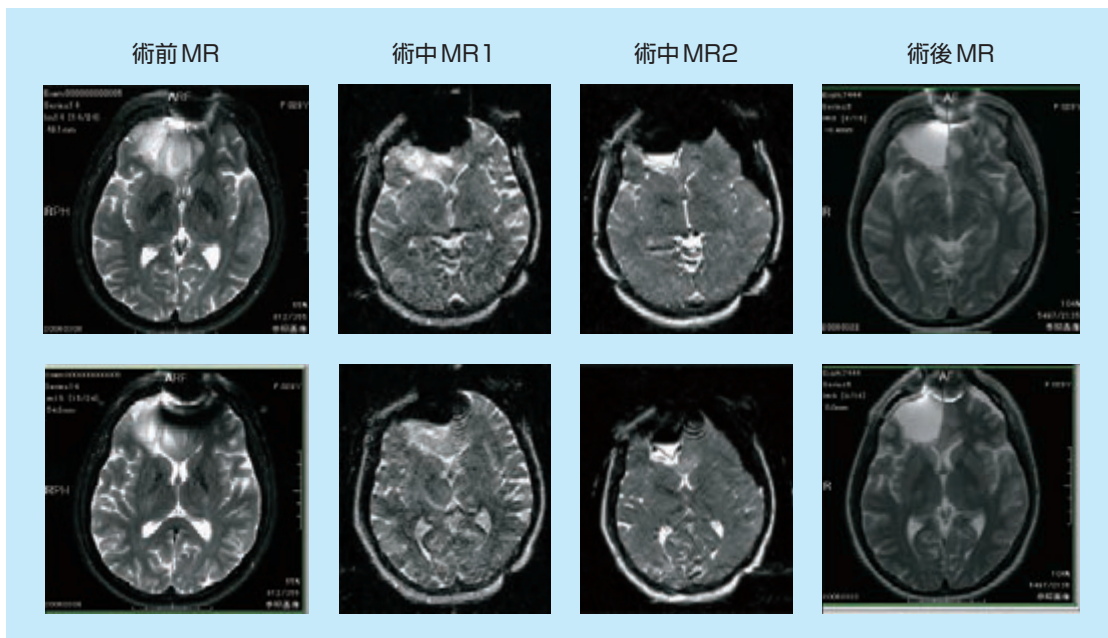


図8：症例1：
乏突起膠腫再発

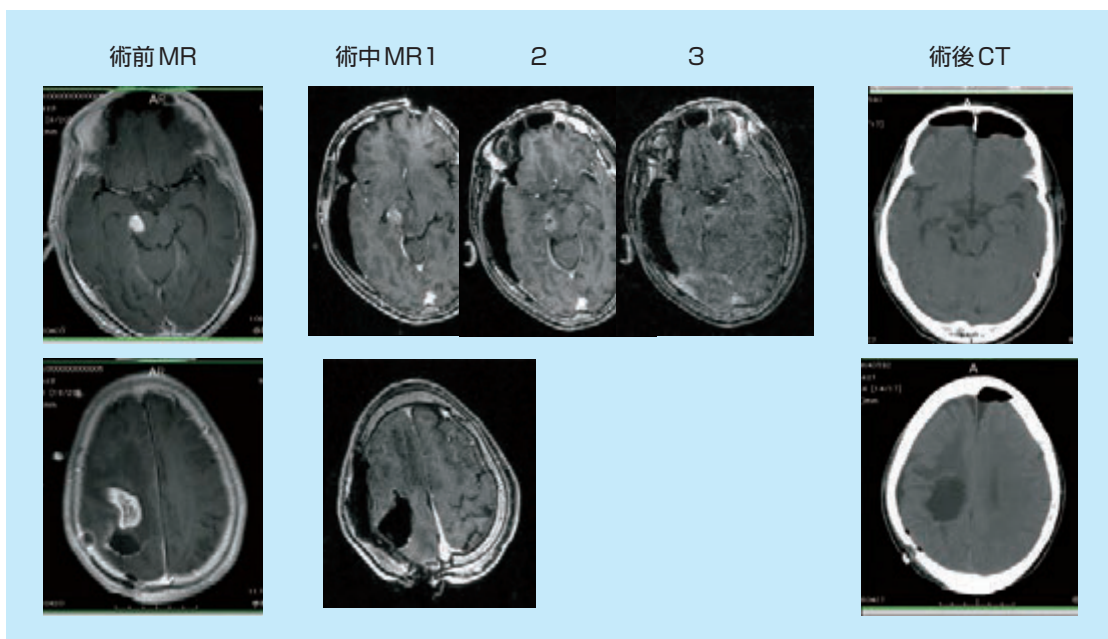


図9：症例2：
膠芽腫再発

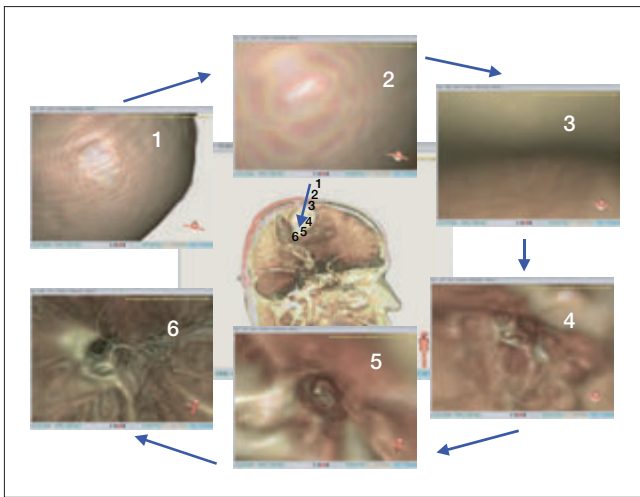


図 10：ヴァーチャル腫瘍摘出腔 3D 画像

外に大きく偏位し、実際の脳と術前 MRI 地図が合致しなくなるのが原因であった。術中 MRI 画像を撮像した報告⁹⁾では 64 例患者で術中撮影すると、平均脳表で 24mm、脳深部で 3mm 偏位していた。このように、ナビゲーション手術は、術中 MRI 撮影を行いリアルタイムの画像地図で navigateしないと信頼性を欠くことになる。Brain THEATER は、手術中に何度も MRI 画像を撮像し、オンラインで転送されたリアルタイム画像で正確なナビゲーション手術が実施可能である。

4.2 術中画像誘導手術の意義

脳腫瘍手術、特に神経膠腫の手術においては、腫瘍の切除が不十分に終わると、再発後は腫瘍死をきたす可能性が高く、腫瘍の完全切除が最高の治療である。早期胃ガンの手術においては、摘出後の残胃組織内に癌細胞がないことを確認して手術が終了されるものの、脳腫瘍手術では、今までその術がなかった。顕微鏡下の狭い鍵穴のような視野から脳内をくまなく観察し、腫瘍を完全摘出することは不可能であった。

1997 年頃より、手術室で術中 MRI 撮影が可能になり、術中に腫瘍の摘出度が確認されることが可能となった。Kanuae らは¹⁾、38 例の悪性神経膠腫の患者を対象として、術中 MRI 撮影を施行することで 15 例 (36.6%) で完全摘出が確認されたものの、22 例 (53.7%) の患者で腫瘍は残存した。17 例で追加切除された結果、最終的には完全摘出例は 31 例 (75.6%) に向上した。Black らは²⁾、60 例の脳腫瘍患者で完全摘出と判断した患者に術中 MRI 撮影を行い、1/3 以上の症例で腫瘍が残存していた。Wirts らは³⁾、97 症例の神経膠腫症例で、術中 MRI 撮影により残存腫瘍が 62% から 33% に減少した。結果、有意に生存期間が延長したと報告している。このように、神経膠腫の手術での画像誘導手術の有用性は絶対的と思われる。

4.3 Brain THEATER の適用拡大

近年、画像解析技術やネットワークシステムの進歩はめざましい¹⁰⁾。Brain THEATER は、名古屋大学 MRI 手術室を核に、3D 画像解析を研究する名古屋大学情報科学研究科、

放射線技術学科と高容量転送ネットワークシステムで結ばれる仮想空間手術室である。術中 MRI 画像からヴァーチャル 3D 画像を作成し、手術支援される。また、近隣の名古屋セントラル病院とは、BrainSUITE^{※3)}の稼働開始とともにネットワークシステムを用いて術前、術中画像を共有し、手術計画を検討する予定である。

5. 結語

われわれは、最先端の画像誘導手術を提供できる MRI 装置とニューロナビゲーションが一体化された独自の手術室を開発し運用を始めた。本手術室は、名古屋大学情報工学科、放射線技術学科や他病院の MRI 手術室 (BrainSUITE) と手術支援ネットワークシステムで結ばれることで Brain THEATER と称する近未来型ヴァーチャル手術室となる。

※1 APERTO は株式会社日立メディコの登録商標です。

※2 VectorVision、※3 BrainSUITE、※5 iPlan はブレインラボアーゲーの商標です。

※4 z-touch はブレインラボアーゲーの登録商標です。

参考文献

- 1) Knauael M, et al : Intraoperative MR image increase the extent of tumor resection in patients with high grade gliomas. Am J Neuroradiol, 20 : 1642-1646, 1999.
- 2) Black PM et al : Craniotomy for tumor treatment in an intraoperative magnetic resonance imaging unit. Neurosurg, 45 : 423-433, 1999.
- 3) Wirts CR et al : Clinical evaluation and follow-up results for intraoperative magnetic resonance imaging in neurosurgery Neurosurg, 46 : 1112-1122, 2000.
- 4) Fahlbusch R et al : Intraoperative magnetic resonance imaging during transsphenoidal surgery. J Neurosurg, 95 : 381-390, 2001.
- 5) Sutherland GR et al : A mobile high-field magnetic resonance system for neurosurgery. J Neurosurg, 91 : 804-813, 1999.
- 6) Schlder M, et al : Cranial surgery navigation aided by a compact intraoperative magnetic resonance imager. J Neurosurg, 94 : 936-945, 2001.
- 7) 伊関洋, ほか : インテリジェントオペ室・MRI 誘導手術対応システム. MEDIX, 39 : 11-16, 2001.
- 8) Kanner A, et al : Intracranial navigation by using low-field intraoperative magnetic resonance imaging : preliminary experience. J Neurosurg, 97 : 1115-1124, 2002.
- 9) Nimsky C, et al : Quantification of, visualization of, and compensation for brain shift using intraoperative magnetic resonance imaging. Neurosurg, 47 : 1070-1079, 2000.
- 10) 津坂昌利 : ネットワーク技術の基本と 3D PACS 構築のノウハウ. INNERVISION, 20 : 69-84, 2005.