

外科領域における最近の進歩：術中オープンMRIとリアルタイムナビゲーション

村垣, 善浩
東京女子医科大学大学院先端生命医科学研究所先端工学外科

橋爪, 誠
九州大学大学院医学研究院災害・救急医学

<https://doi.org/10.15017/7232583>

出版情報：福岡醫學雑誌. 93 (11), pp.223-230, 2002-11-25. Fukuoka Medical Association
バージョン：
権利関係：



総 説

外科領域における最近の進歩

——術中オープン MRI とリアルタイムナビゲーション——

¹⁾東京女子医科大学大学院 先端生命医科学研究所 先端工学外科²⁾九州大学大学院医学研究院 消化器・総合外科学 (第2外科)³⁾九州大学大学院医学研究院 災害・救急医学村 垣 善 浩 ¹⁾²⁾・橋 爪 誠 ³⁾

Recent Advances in Surgical Technology

——Open MRI and “real-time” navigation——

Yoshihiro Muragaki¹⁾²⁾, Makoto Hashizume³⁾¹⁾*Faculty of Advanced Techno-surgery, Institute of Advanced Biomedical Engineering and Science, Graduate school of Medicines, Tokyo Women's Medical University, Tokyo, Japan*²⁾*Department of Surgery and Science, Graduate School of Medical Sciences, Kyushu University, Fukuoka, Japan*³⁾*Department of Disaster and Emergency Medicine, Graduate School of Medical Sciences, Kyushu University, Fukuoka, Japan*

Abstract Many advances of neurosurgery had been achieved about diagnostic and operative tools such as CT scan, MRI, stereotaxy, and microscope, in 20 th century. However, intraoperative diagnostic tools are not sufficient for providing solid data. So we developed new operating system for 21 st century (Intelligent Operating Theater: IOT). The IOT has an open MRI machine for intraoperative MR imaging that provides objective anatomical data and the “real-time” navigation updated with iMRI that navigates surgeons to the target area. The IOT has contributed to the improvement of the resection rate in brain tumor cases.

はじめに

20 世紀, 外科学は様々な診断機器・手術器具の開発によって大きな発展を遂げた。外科医はそれらの優れた診断機器による術前情報を判断し, 新しい手術器具の習得に研鑽しより安全で確実な手術を目指してきた。加えて 1990 年代後半, 技術革新により 21 世紀を担う新しい外科技術が登場した。一つは循環器・腹部外科において外科医の新しい“手”となりうる da Vinci や Zeus などの手術用“ロボット”, もう一つは脳神経外科において外科医の新しい“目”となりうる術中 MRI やナビゲーションである。本稿では後者を中心に述べる。

脳神経外科領域において CT, MRI の導入, 顕微鏡手術により低侵襲な手術が可能になった。しかし術中判断は従来通り術者の経験によっており, グリオーマなどの術中肉眼的に境界が不明瞭な腫瘍や下垂体腺腫などの手術時術野から残存腫瘍の確認が困難な腫瘍の手術において, 客観的な情報を提供する機器が求められていた。そこで開発された一つが術中オープン MRI (ガントリーが開放型のためにオープンと呼ぶ) である。また一方, 1990 年代にナビゲーション—術者の手術機器の先端がどこにあるかを CT や MRI の画面上に示す技術—が開発され臨床使用されている⁹⁾。ナビゲーションは術者が病変部までの経路(皮切や開頭の部位)と摘出範囲(皮質切開の部位)を決定する際に有用な情報を与える。しかし術前検査から

取得した画像を基にしたものである為、術中におこる様々な変化に対応できない。特に脳内病変では、髄液漏出や病変部摘出によって脳が沈み込む現象いわゆるブレインシフト (Brain Shift: 脳偏位) が起こり、この変化による誤差が時に 1 cm 以上と致命的なものとなる⁷⁾。また、術者が術中最も知りたい情報であるどれくらい腫瘍などの病変が取れたのかあるいはどこに残存病変部があるのかーに関しても現在のナビゲーションは無力である。そこで今回開発した、リアルタイムアップデートナビゲーション (“Real-Time” Update Navigation: RUN) は、術中オープン MRI により得られた最新画像情報で更新する画期的なナビゲーション装置である。これにより Update な情報を的確に術者に伝え、術者を残存病変部へと誘導することが可能で、脳偏位の問題も解決できた。この術中オープン MRI と RUN は 21 世紀手術に求められる客観的データを提供するシステムであり⁸⁾、その実際を脳腫瘍特にグリオーマ症例を中心に述べる。

術中オープン MRI⁴⁾

超音波エコー、X 線 CT スキャン、MRI が現在医療現場で主に使用されている形態画像装置である。MRI はその空間識別能の高さ、自由な切断面、加えて腫瘍描出に優れていることから、脳神経外科において診断のための First Choice になりつつある。当然術中画像モニターとしても MRI が最適であることは明らかである。しかし磁場強度を保つための装置の閉鎖性、アーチファクトを防ぐ為の特殊な撮影条件などから MRI の術中撮影は技術的に困難であった。しかし垂直磁場方式によるオープン化、撮影の高速化、工学技術進歩による MR 対応機器開発からようやく MRI 手術室が現実のものとなった¹⁾¹⁰⁾。

東京女子医科大学においてドーナツ型中磁場オープン MRI 装置 (AIRIS II 日立製, 0.3 T, 永久磁石型) を中心とした手術室システムを構築した (インテリジェント手術室 intelligent operating theater: IOT, 図 1 A, 図 2)。0.3 テスラであるが十分な画像レベルであり (図 1 B), 3 D 再構成 (図 1 C) や MRA も可能である。術中 CT との比較では、放射線被爆がないことや腫瘍描出能が高いこと、任意の断面が切れることなどが利点としてあげられる。MR 対応手術顕微鏡 (図 2 B: 三鷹光器製)、麻酔器、頭部 4 点固定 (瑞穂医科製) を配し、手術用ベッド (図 2 C: 瑞穂医科製) は可動式とした。執刀時は MRI 磁場の 5 ガウスライン外に患者頭部を移動し、一般手術と同環境とし、術者スペースも確保した。

オープン MRI 手術室は脳腫瘍や脳内視鏡手術を中心に使われている。現在まで 78 例に用いているが、中でも神経膠腫 (グリオーマ) が 32 例と最も多い。従来、脳神経外科医のなかで、術中正常脳組織と区別が困難で浸潤性とされている神経膠腫は、手術で取れないものあるいは取っても仕方がないものとされてきた。しかし最近日本脳腫瘍統計で神経膠腫の手術摘出度が予後に強く相関していることが示され、手術の重要性が再認識されてきた。この術中オープン MRI は、神経膠腫手術の最大の問題点である残存腫瘍の確認が行えるようになり、過不足のない腫瘍摘出を可能にしたのである。

24 歳悪性神経膠腫の症例を提示する (図 3 A)。運動野近傍にあるため摘出術前に硬膜下電極を埋め込み腫瘍内に重要な脳機能が残存していないことを確認した後 (図 3 B) 摘出術を施行した。ほぼ全摘出できたと考えた時点で、術中 MRI を施行してみると僅かな残存腫瘍が前下方に認められた (図 3 C 矢印)。再度摘出を施行し MRI で全摘出を確認した後手術を終了した (図 3 D)。

しかし生存率が飛躍的に伸びる 95% から 100% 摘出を目指した場合⁹⁾、すなわち非常に小さい残存腫瘍を摘出する場合には、MRI 上の残存腫瘍が実際の術野でどこにあるかを示すナビゲーションが是非必要になってくる。

ナビゲーション装置 (PRS Navigator: PRS ナビ) (図 4)

今回用いたナビゲーションは従来より開発してきた PRS 用ナビゲーション装置 (PRS Navigator. 図 4 A) を改変した。PRS (Photon Radiation System: フォトン放射線治療装置) は短時間に大量の放射線を集中的に術中照射ができる装置であり、PRS ナビはこの PRS の正確な定位的照射のために開発されたナビゲーションである⁶⁾。原理は光学的追尾方式 (Poralis: Northern Digital Inc) であり、アーム両端 (図

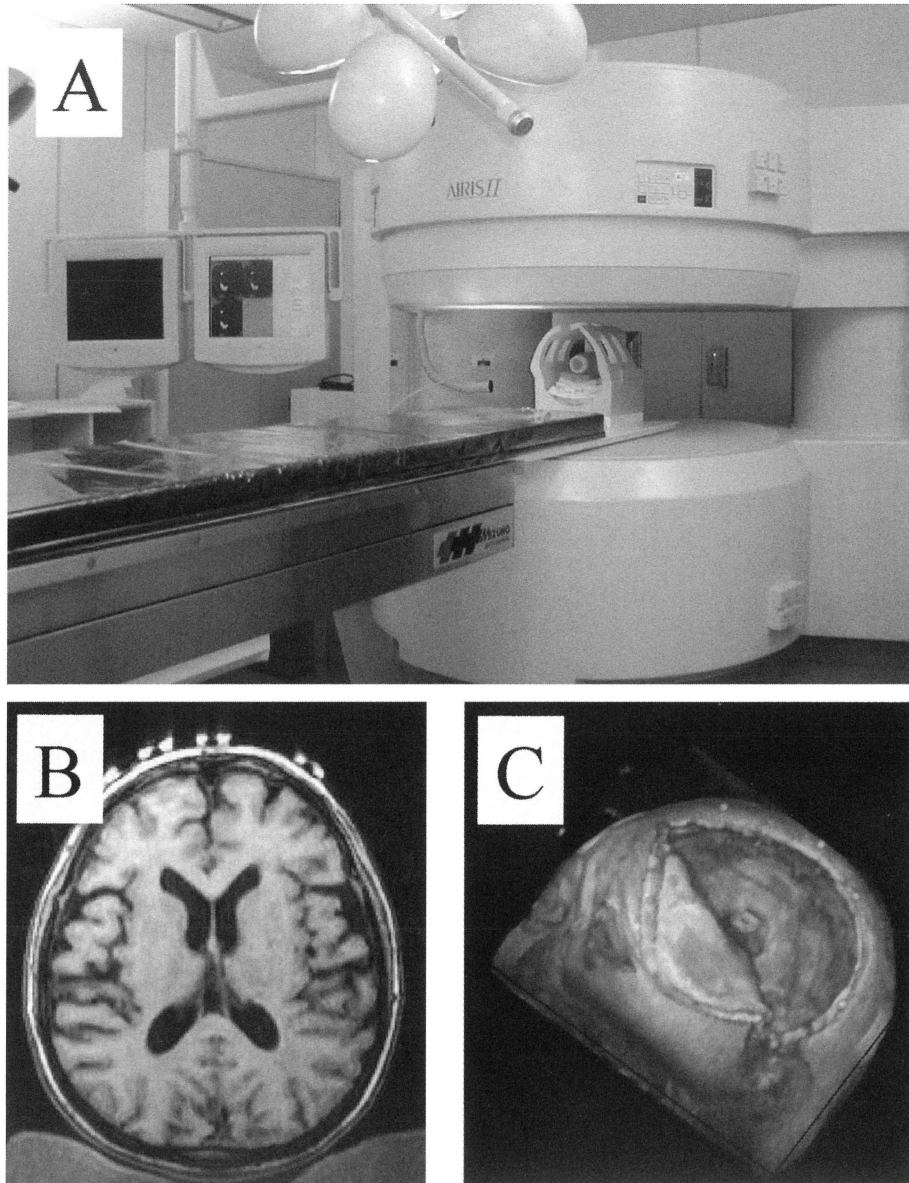


図1 オープンMRI (A:日立). 0.3 テスラであるが手術判断に耐えうる画質である (B). 3次元再構成も可能 (C).

4 C) から出た赤外線が手術道具に装着した3つのマーカーに反射し(図4 B), その反射をアームのCCDカメラが探知し三角計測法で位置を同定するのである. 光学式なので従来の定位手術のようなフレーム(測定用金属枠)をつける必要がなく, 登録すればどんな器具もナビゲーションの対象になる. 取り込んだ患者のCTやMRI上で手術器具先端の位置を3面図で表示する(図4 D) 一般ナビゲーション機能のほか, 仮想先端表示やPRS照射計画表示機能を備えている. しかし今ある場所を示すのみ(Passive方式)であるため, 先端をあらかじめ設定した到達目標に誘導する(Active方式) Universal Studioを開発し, 生検やPRS照射に利用している. 最近では先端だけの表示のみならず, 器具の向く方向を表示することも可能になった. 現在XYZの断面上の表示であるが, 直感的に位置を確認できる3次元画面上での表示を開発中である.

このPRSナビと術中オープンMRIを組み合わせることによりいわゆるリアルタイムナビゲーションが可能になった. すなわち術中MRIの画像情報を, DICOM形式でローカルエリアネットワーク(LAN)を介し, PRSナビのコンピュータに転送して最新情報にアップデートする. これにより従来ナビゲーションの誤差の原因である脳偏位が起こったあとの画像でナビゲーションできるのである. 転送の所要時間も

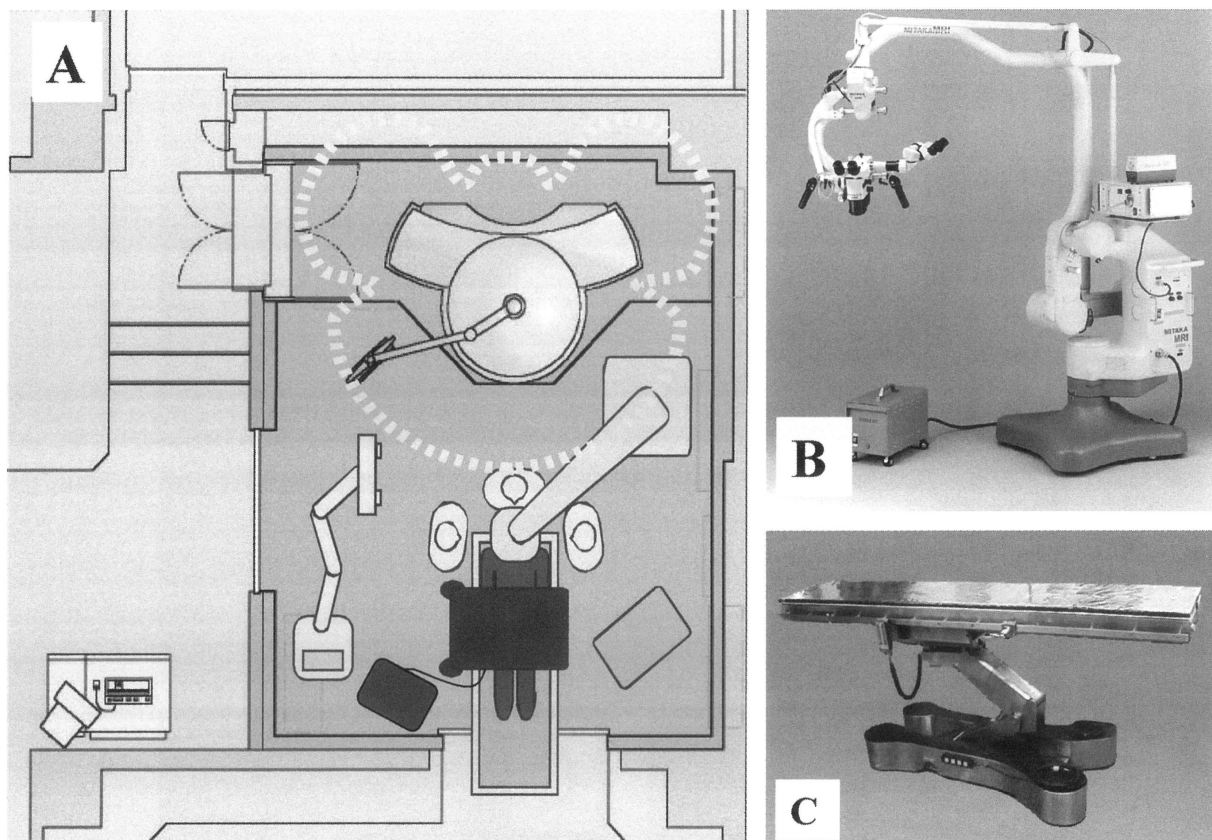


図2 インテリジェント手術室(A)．MRIの5ガウスライン(---)外で手術を行う．窒素駆動のMR対応顕微鏡(B)とMR対応手術台(C)．

1 mm スライス 150 枚の転送に 1 分以内，また基準マーカー設定などを含めても，転送開始からナビゲーション開始まで 5 分以内と実用的である。

RUN の実際を述べる．麻酔導入後，開頭し開頭野の周囲骨に基準マーカーを埋め込み，MRI を撮影する(図 5 (1))．下垂体腫瘍の場合は皮膚にドーナツ型マーカーを貼り付ける．MRI 画像データを PRS ナビ用コンピュータに転送する(図 5 (2))．MRI 画像上の基準マーカーと PRS ナビの赤外線で空間位置を認識した基準マーカーをコンピュータ上で重ね合わせて登録させる(図 5 (3)) ことにより，術者の道具先端を MRI 上で示すことが出来るのである．ナビゲーションの誘導で，脳皮質切開と腫瘍摘出を行う(図 5 (4))．ある程度摘出し，肉眼的に腫瘍と正常の区別が困難になった時点で術中オープン MRI を撮影する．同様の基準マーカーを登録し(図 5 (1)-(4) の繰り返し)，最新情報でナビゲーションを開始する(図 5 (5))．必要ならば MRI 撮影を繰り返し行う．リアルタイムで脳偏位による誤差のないナビゲーションであり，正常脳を損傷することなく腫瘍を最大限に摘出することが出来る．また腫瘍浸潤の可能性がある部位は，PRS による術中照射を行う．現在まで RUN は神経膠腫と下垂体腫瘍の症例を中心に行っているが，残存腫瘍の同定と摘出に非常に有用であった．オープン MRI を用いた 31 例の神経膠腫手術では，14 例が全摘出，10 例が亜全摘，7 例が部分摘出であった．部分摘出例はいずれも海馬，脳幹，運動野に腫瘍が存在しており意図的に摘出を断念した症例である．大部分が機能領域近傍の症例にもかかわらず術後の神経症状は，4 例が増悪したが，21 例が不変で 6 例が改善し，また 4 例で術後痙攣発作が消失した．ナビゲーションの誤差は，開頭術用のチタン埋込タイプで平均誤差 1.45 mm と最大誤差 2.49 mm であった．経鼻的腫瘍摘出術のドーナツタイプでは，平均誤差 1.39 mm で最大誤差 1.99 mm であった．

外科領域での応用

ナビゲーション技術は脳神経外科のみならず他の外科領域においても応用が始まっている．特に術中の

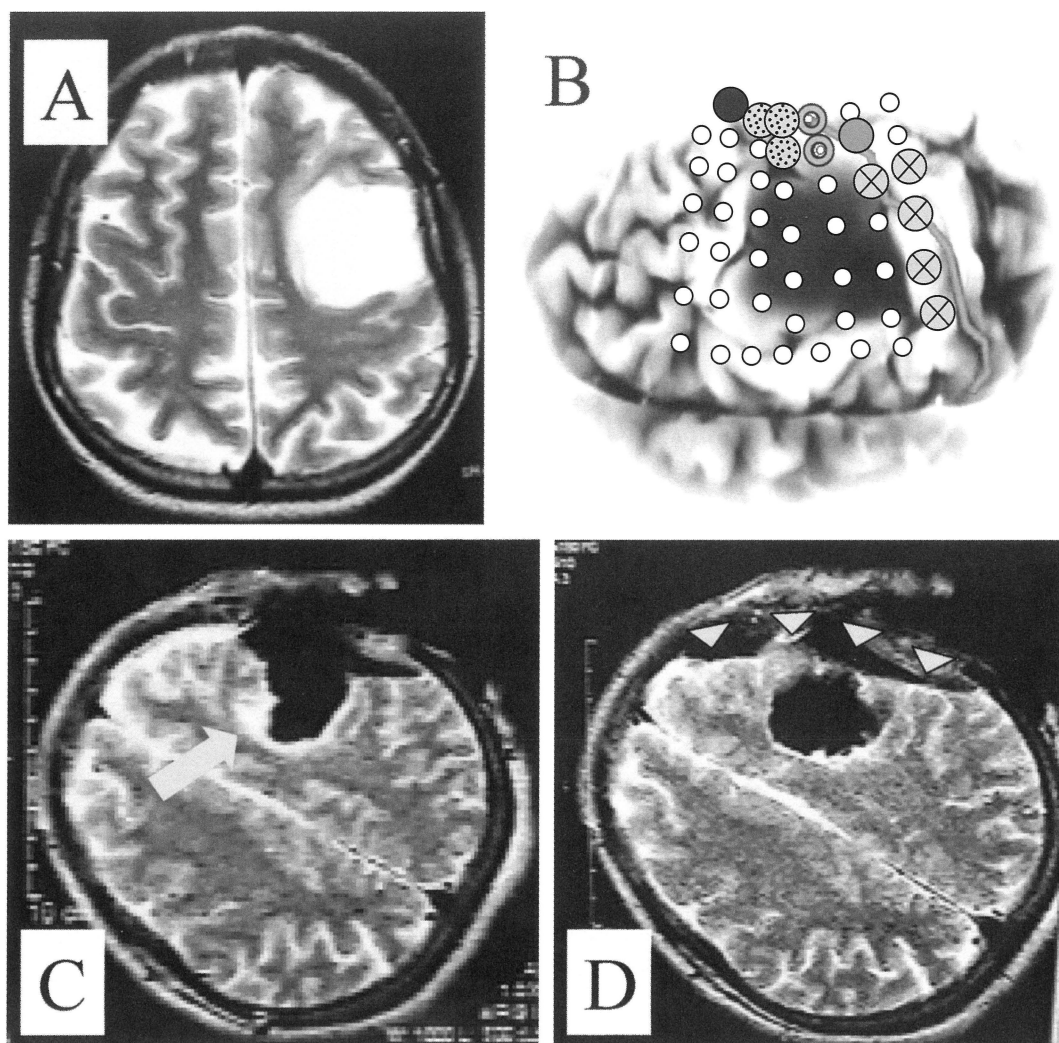


図3 運動野近傍悪性神経膠腫(A)．覚醒下手術での脳機能マッピングで腫瘍上の機能がないこと(○)を確認(B:⊗は運動野,●は感覚野,⊙は口運動野)．術中MRIで残存腫瘍が認められ(C)再度摘出を施行した．MRIで全摘出を確認し(D)．術後欠損症状なく再発は認められていない．術中は著明な脳偏位がおこっていることがわかる(D矢頭)．

変形移動が少ない骨を扱う手術では非常に正確なナビゲーションが可能で、耳鼻科での側頭骨のドリリングや整形外科での骨削除や固定ピン挿入などの操作に利用されている。

腹部外科でもナビゲーションの応用が肝臓の生検などで始まっており、東京慈恵会医科大学と九州大学との共同研究でロボット操作コンソール内での3次元の画像重ね合わせ技術を開発した²⁾³⁾(図6)．しかし腹部臓器においてもBrain shift同様、呼吸性移動や圧排操作による術中臓器移動の問題がある．この問題解決のため、RUNの腹部外科への応用を共同研究が現在進行中である。

おわりに

現在まで術者は、腫瘍の形や位置を自分の頭の中で術前画像から3次元の再構成を行い、吸引時組織の硬さ、色調、異常血管などから腫瘍か正常組織かを判断してきた．経験のある上手い術者はこれらの判断が正確なのである．しかしこの術者の“職人芸”に依存していた手術において、術中オープンMRIは腫瘍摘出の段階を誰にでもわかる方法で示し、RUNは残存腫瘍の位置を正確に誘導することを可能にしたのである．これらは脳神経外科のみならず様々な外科領域での応用が期待できる。

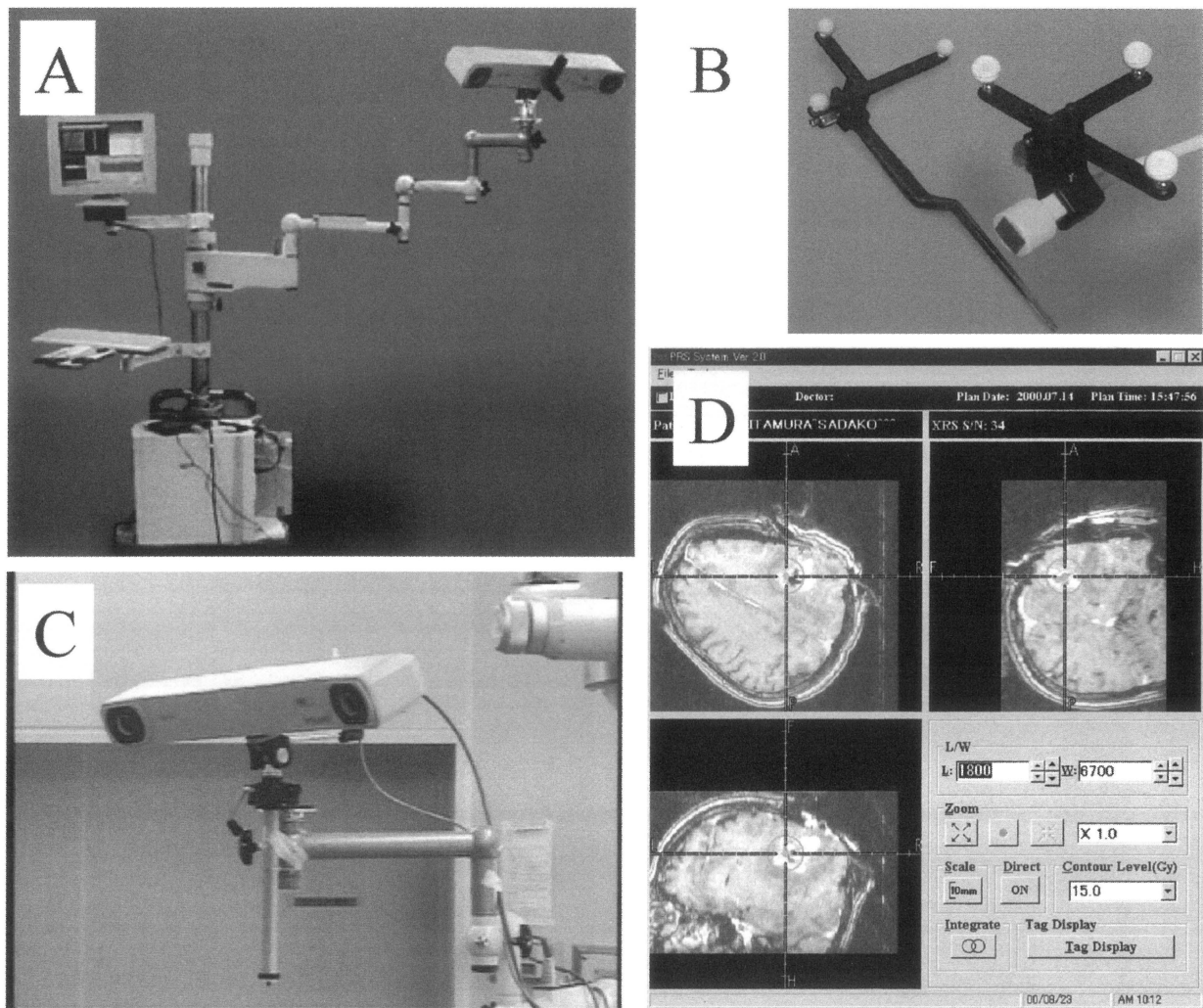


図4 PRS ナビゲータ。(A) 本体。PRS スタンド(永島医科器械)に赤外線位置認識装置(ポラリス)と PRS ナビ用コンピューターが搭載されている。(B) ポラリス本体 両端2箇所より赤外線を発し、手術器具の反射球からの反射を両端の CCD カメラで同定し位置を計測する。(C) 汎用ロケータ(三鷹光器) 様々な手術器具に取りつけ可能な反射球ツール。(D) PRS による術中放射線照射。3画面の十字は PRS の先端を示し、円は 15 Gy の照射線量を示している。これにより術中の定位的照射が可能になった。

最新の医療機器が氾濫する医学にあって、様々な理由—清潔性、患者移動が困難、手術室の狭さ、時間的な制約、術者の理解のなさ—からその恩恵を受けず手術は術者の主観によっていた。今後も実用上の様々な問題点を解決しなければならないが、この術中オープン MRI による手術は、視覚で認識できる客観的な術中情報を得て、21 世紀を担う新しい Stage に入ったといえる

参 考 文 献

- 1) 伊関 洋, 杉浦 円, 村垣善浩, 川俣貴一, 上川秀士, 平 孝臣, 岡田芳和, 堀 智勝, 白川 洋, 立花美紀, 橋田かおり, 岩野英明: 術中オープン MRI 下での脳外科手術, 第 10 回コンピュータ支援画像診断学会大会, 第 9 回日本コンピュータ外科学会合同論文集 117-118, 2000.
- 2) 服部麻木, 鈴木直樹, 橋爪 誠, 赤星朋比古, 小西晃造, 山口将平, 島田光生, 林部充広: ナビゲーション機能を備えたロボット手術システム (da Vinci) の開発: J JSCAS 3: 281-287, 2001.
- 3) 小西晃造, 橋爪 誠: 三次元表示に何を求めるのか—外科医からみた三次元画像の有用性と問題点—: 消化器内視鏡, 14: 293-298, 2002.

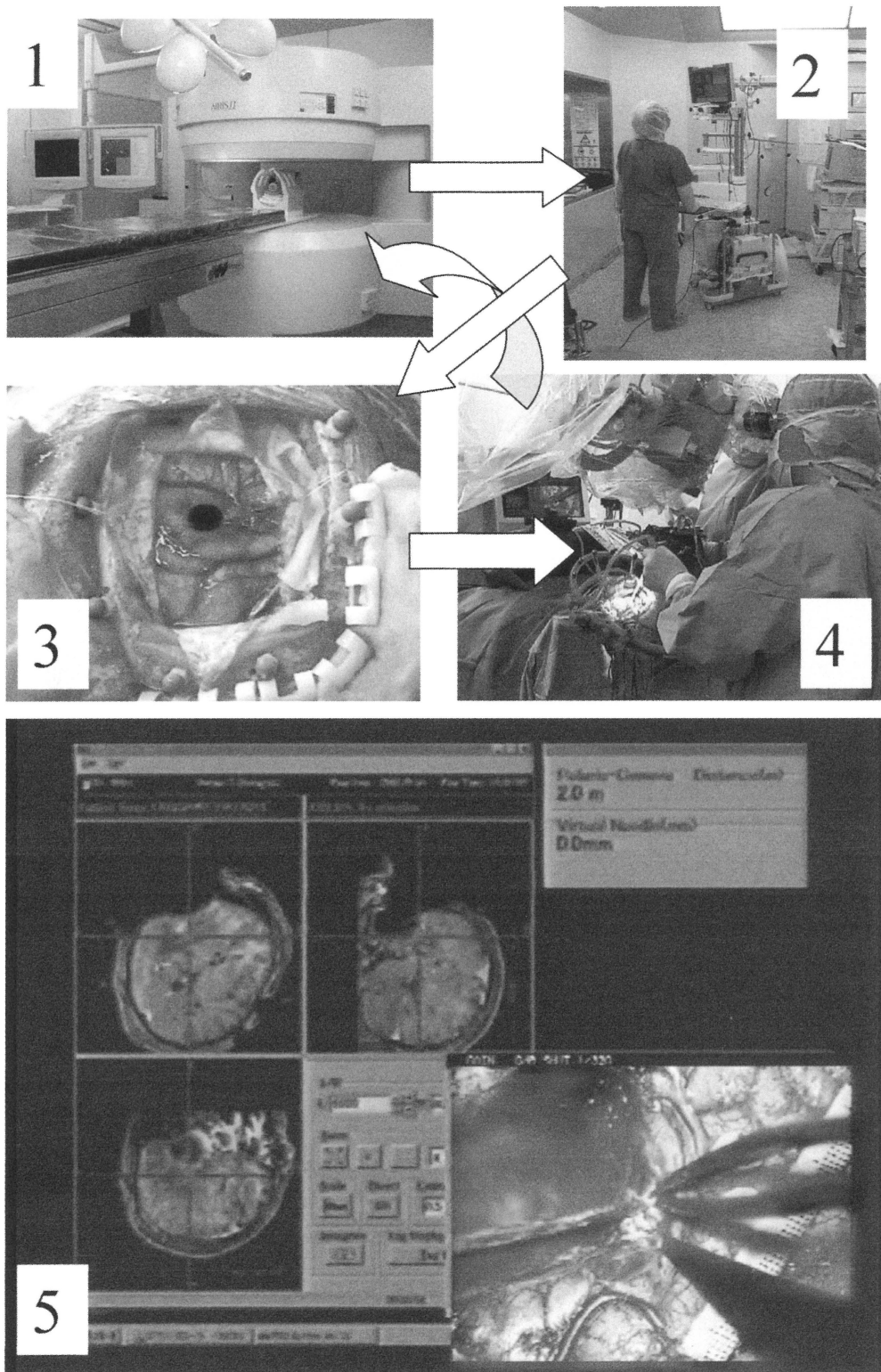


図5 リアルタイムナビゲーションの実際：(1) 術中MRIを撮影。(2) ネットワークによりPRSナビのコンピュータに転送。(3) 基準マーカを登録。(4) 最新画像データで腫瘍摘出。(5) ナビゲーション画面。症例は38歳言語野悪性神経膠腫の患者。PRSナビゲーターが吸引管先端を示している(十字交叉：矢印)。Picture in Pictureした顕微鏡画面も同時表示できる(画面右下)。覚醒下手術にて言語野を確認しナビゲータで腫瘍を全摘した。

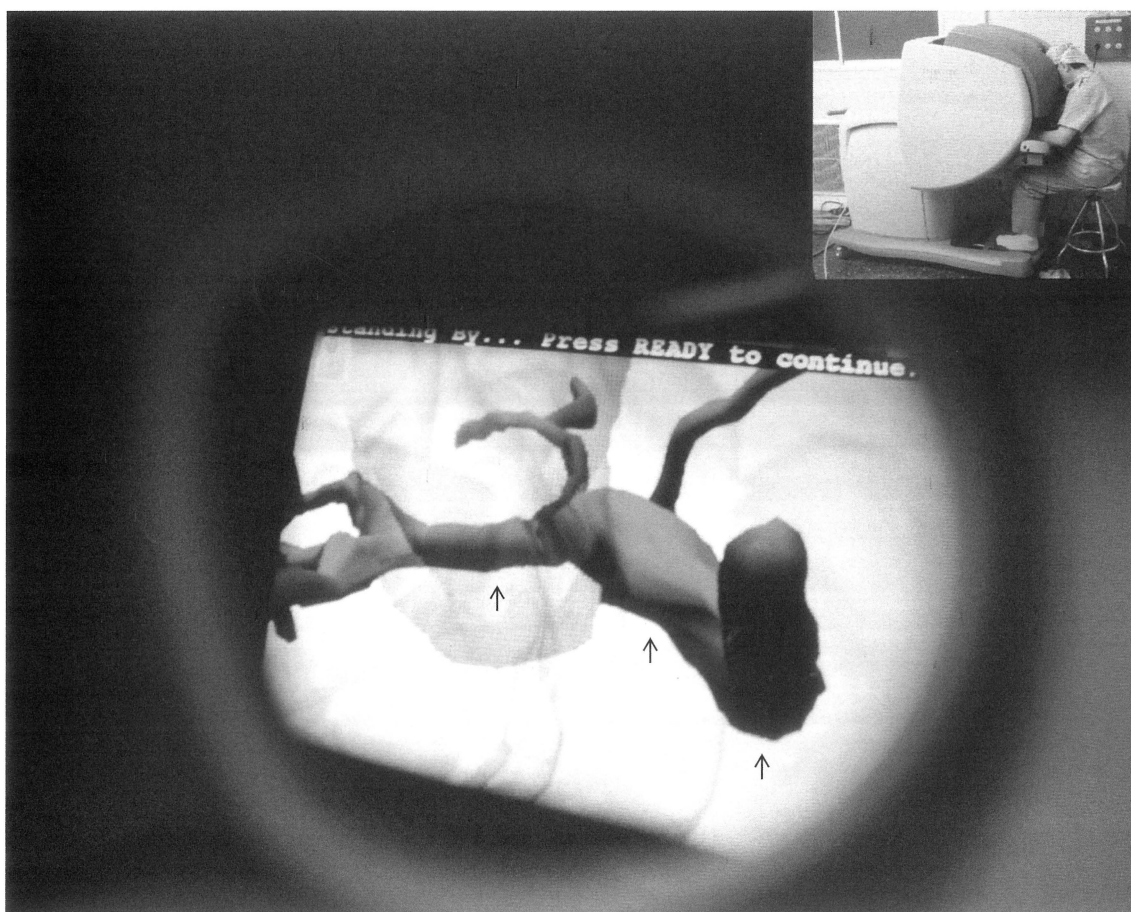


図6 ロボット手術へのナビゲーション応用：手術用ロボット da Vinci の操作コンソール（右上）の画面に，ナビゲーション画像（胆道系：矢印）が直接投影されている。

- 4) 村垣善浩：Open MRI と PRS ナビゲーター，医学のあゆみ 195：241-242，2000.
- 5) 村垣善浩，久保長生，伊関 洋，今村強，丸山隆志，堀 智勝：Navigation を用いた PRS 術中照射によるグリオーマ治療の工夫，NeuroOncology 10：64-69，2000.
- 6) 村垣 善浩，伊関洋，川俣貴一，杉浦円，天野耕作，平孝臣，堀智勝，南部恭二郎，鈴川浩一：術中 OpenMRI 画像による“Real-Time” Navigation System の開発，機能的脳神経外科 39：80-81，2000.
- 7) Nimsky C, Ganslandt O, Kober H, Buchfelder and Fahlbusch MR: Integration of functional magnetic resonance imaging supported by magnetoencephalography in functional neuronavigation. Neurosurgery 44: 1249- 1255,1999.
- 8) Report of brain tumor registry of JAPAN (1969-1993) 10th edition. Neurologica medico-chirurgica (Tokyo), Supplement 40: 54, 2000.
- 9) Rubino GJ, Farahani K, McGill D, de Wiele BV, Villablanca JP and Wang-Mathieson A: Magnetic Resonance Imaging-guided Neurosurgery in the Magnetic Fringe Fields: The Next Step in Neuronavigation. Neurosurgery 46: 643-654, 2000.
- 10) 杉浦 円，伊関 洋，村垣善浩，大和雅之，田村光司，立花美紀，橘田かおり，白川 洋，釘貫敏行，岡野光夫，高倉公朋：オープン MRI を中心とするインテリジェント手術室の構築，第 10 回コンピュータ支援画像診断学会大会，第 9 回日本コンピュータ外科学会合同論文集 121-122，2000.