

# 術中オープンMRI下での脳外科手術

Neurosurgical Operation in the Intraoperative Open MRI Operating Theater

伊関 洋 <sup>1)</sup>	Hiroshi Iseki	大和 雅之 <sup>2)</sup>	Masayuki Yamato
杉浦 円 <sup>2)3)</sup>	Madoka Sugiura	堀 智勝 <sup>1)</sup>	Tomokatsu Hori
村垣 善浩 <sup>1)</sup>	Yoshihiro Muragaki	立花 美紀 <sup>4)</sup>	Miki Tachibana
川俣 貴一 <sup>1)</sup>	Takakazu Kawamata	白川 洋 <sup>5)</sup>	Hiroshi Shirakawa

- <sup>1)</sup>東京女子医科大学脳神経センター 脳神経外科  
<sup>2)</sup>東京女子医科大学 医用工学研究施設  
<sup>3)</sup>株式会社日立製作所 医療システム推進本部  
<sup>4)</sup>株式会社日立メディコ CT・MRI 営業本部  
<sup>5)</sup>株式会社日立メディコ MRI 事業部

MRI 手術室は、従来の脳外科手術を変えるインパクトを持っている。磁場を乱す手術機器は使用できず、非磁性体で構成された特殊な顕微鏡や手術器具が必要である。しかし、5 Gaussラインが狭く、手術用器具の制限も少ないため、実用的である。今回手術室内に設置したオープンMRIは、永久磁石0.3Tハンバーガー型で開口部が43cmである。また、MRI対応手術用ベッドは、本体および粗動での移動が容易で、かつ撮像位置を調整するためにX-Y平面移動が微調節できる。手術内容に応じた手術用コイルの開発が必要である。術中MRIおよびリアルタイムアップデートナビゲーションによりダイナミックな状況をモニタリングできるため、術中に脳などの臓器移動の状態を見ながら機能的手術をすることができ、腫瘍の切除率の向上が期待される。

Intraoperative open MRI operating theater (Intelligent operating theater in the twenty-first century) has the impact which changes the conventional neurosurgery operation. Removal rate of the malignant brain tumor is statistically correlated with survival rate. Our intraoperative MRI system gives digital image information of location and volume of residual tumor to the operating staff, and the MR image causes that removal extent could be surely improved up to 90~95%. In addition, the operation staff could pursue total removal (98-100%) with the combination of the real-time update navigation, which can be updated by new image and avoid the error of brain shift. The MR image at various operative stages makes to start new era of surgical procedures decided by experience and "craftmanship". Thus, Intelligent operating theater in the twenty-first century firstly supports evidenced based medicine (EBM) in surgical field by accurate, objective, and visualized information and it supplies high-quality operation to patients.

**Key Words:** Open MRI, Real-time Update Navigation, Intraoperative Imaging, Neurosurgery

## 1. はじめに

術中オープンMRI手術室(21世紀の手術室)は、従来の脳外科手術を変えるインパクトをもっている。手術室でのMRIの使用は、磁場を乱す手術機器は使用できず、MRI対応の麻酔器・非磁性体で構成された特殊な顕微鏡や手術器具が必要である。しかし、術中MRIの多断面・多種類のシーケンスで撮像した画像は、手術操作による脳の変形・移動にも対応し、正確で客観的な術中画像を提供することで手術スタッフを支援する。まさに、evidenced based medicine(EBM)を手術操作に持ち込むことになる。誰にでもわかる医療情報の可視化は、患者・手術スタッフ双方にadvantage(高品質な手術)をもたらし、それを実践する場所が21世紀の手術室である<sup>1)</sup>(図1)。



図1：オープンMRI手術室全景

## 2. 新しいテクノロジーは、 それを使う環境やシステムが伴って初めて その性能を発揮するという原則

診断室仕様のオープンMRIは、世界各国および本邦にも多数導入されている。では、診断室仕様のオープンMRIは、脳神経外科手術を変えたか。答えは、「何も変えなかった」である。診断室仕様のオープンMRI下で、脳内血腫除去吸引や脳腫瘍のバイオプシーなどのインターベンションを行なっても、それはCTガイド下での代替であり、なぜオープンMRI下であるべきなのかの説得性は持たなかった。所詮、診断室仕様の環境下では全身麻酔を行ない通常の脳神経外科手術に対応するシステムや支援を受けることはできず、インターベンション程度のことしかできなかったのが現実である。しかし、現時点で本邦に3台導入され、2台が現実に稼働している手術室仕様のオープンMRI(東京女子医科大学、滋賀医科大学)は、脳神経外科手術を変える。術中MRIによりダイナミックな状況をモニタリングできるため、術中に脳などの臓器移動の状態を見ながら機能的手術をすることができる。特に悪性脳腫瘍の切除率を向上させ、5年生存率を上昇させる。オープンMRIの併用により90から95%まで切除率は確実に向上する。特に、術中画像データを必要に応じて、常にリフレッシュするリアルタイムアップデートナビゲーションの併用により、手術スタッフは98から100%への切除率を追求することができる。

## 3. オープンMRI手術室の環境とシステム(図2)

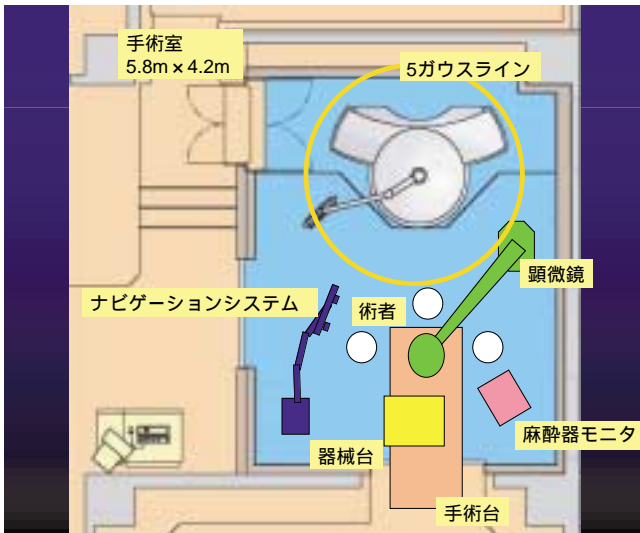


図2: オープンMRI手術室の概要図

今回手術室内に設置したオープンMRI AIRIS®-II(日立メディコ製)は、垂直磁場永久磁石方式で、静磁場強度0.3テスラ(T)(共鳴周波数: 12.7MHz)のハンバーガー型で開口部が43cmである。漏洩磁場(5 Gaussライン)は狭く、中心より左右2.0m、前2.2m、後1.8m、上2.5mの範囲である。冷却システムが不要なため、低ランニングコスト(1万円/月)であるという利点もある。5 Gaussラインが狭いということは、狭い手術室内でも十分に通常の手術器具を使えるという別の利点もある(図3)。



図3: オープンMRI(AIRIS®-II)の特徴



図4: MRI対応麻酔器・術中モニターと手術用無影灯

非磁性体で構成された特殊な顕微鏡、麻酔器・モニター(20 Gaussまで対応)、手術照明や手術器具も必要である(図4)。MRI対応手術用ベッド(瑞穂医科工業製)は、本体および粗動での移動が容易で、かつ撮像位置を調整するためにX-Y平面移動が微調節できる。さらに診断用のコイルは手術用には適さず、手術内容に応じた手術用コイルの開発が必要である。ただし、5 Gaussラインが狭く、手術用器具の制限も少ないため、実用的である。多分世界で一番狭いインテリジェント手術室は、5.8m x 4.2mの空間ではあるが、狭くても工夫により一般の手術室よりも広い空間と少ない動線を実現した高密度実装型手術室である。隣の手術室と連動し、搬送システムを備えているため、手術の内容により全身麻酔をしたままで、転送することができるのも特徴の一つである。オープンMRI下での外科手術は、F1レースにたとえられる。すなわち、レース中にpit-inでの作業を迅速に終了させてコースにF1を送り出すという行程である。レース中のF1マシンは、脳外科手術をしているクルーであり、pit-inは術中オープンMRIを行っていることに相当する。オープンMRIで術中撮影を行い、手術操作による脳の変形や腫瘍の状況を確認する。次に術中リアルタイムアップデートナビゲーションのために画像転送を行い、手術を継続する。これらの行程を繰り返しながらオープンMRI下での手術を終了するわけである。この際、問題になるのは術中オープンMRIによる手術中断の時間と手間である。したがって、勝負はpit-inに入り、出てくるまでの時間の短縮が重要なこととなる。現実的な解決法としては、まずpit-inに入る回数を少なくする。次に、pit-inからpit-inまでの間は、術中リアルタイムアップデートナビゲーションシステムにより、術中の脳内の状況を確認しながら手術

を施行し、必要に応じてオープンMRI(pit-in)を行なうことで、現状の術中画像データをリフレッシュし、脳の変形に出来るだけ追従したリアルタイムアップデートナビゲーション手術をすることである<sup>5)</sup>(図5)。



図5：手術およびMR画像撮像時の様子

#### 4. Pit in 滞在時間短縮のための周辺装置・システムの開発および改良

##### 1. オープンMRI用手術台の移動に伴う問題点の改善

まず、滅菌布かけの改善および最適化が重要である。器械台と手術ベッドの患者を覆う滅菌布を分離する必要がある。従来は、ベッドに器械台がおかれ、一体となった布掛けが行なわれていた。また、吸引システムやパイポラなどの凝固装置もその上に一体となってセットされていた。そのため、手術を中断してオープンMRI撮像のためには、これらを分離することに多大の手間と時間を要した。これを解決するためには、最初から別個に布掛けを行ない分離することが必要である。それと同時に次に述べる分離に適した器械台が必要であることがわかり、その開発と分離式布掛けの工夫により問題点を解決した。

##### 2. 手術用器械台システムの新たな発想での開発および改良

オーバーヘッドテーブル型で、常時手術に必要な機器(モノポラ・パイポラや吸引装置)を収納し、一体化することによりすばやく移動できる機能を持っている。器械台に展開する手術器具を、平面展開から立体的展開を図ることにより有効利用面積の最適化を行なう。具体的には、立体収納システムの考案である。両側にそれぞれの器械出しに応じたウイングを持ち、その場所で術者を支援する(図6)。



図6：Pit-in用分離型手術台

##### 3. 手術用コイルの開発と術中のノイズの検索

AIRIS®-IIに附属していたコイルは全て診断用コイルであり、手術操作には適してはいなかった。初期の段階では、付属のコイルを工夫しながら使ったが、画質および使い勝手の面で大きな問題となり、開発・改良を行なっている。下垂体手術用に開発したコイルは、現時点では有用で画質および操作性に問題は少ない。開頭手術は、腹部用のコイルを代用しているが、画質の点では満足いくものではなく、また操作性も悪いため、新に開頭手術用のコイルを開発している。術中のノイズの検索も、画質を向上させるという点で重要である。特に手術専用のコイルは、局所感度は診断用のものと同様でなおかつ各手術操作に邪魔にならないという原則で柔軟な対応が求められる(図7)。



図7：開発した術用受信コイル

##### 4. MRI対応の手術用ベッド

オープンMRI対応手術用ベッドといえども、通常の手術機能すなわち手術内容に応じた様々な体位を取る条件を満たしていなければ、手術ベッドとは言えないことは言うまでもない。この条件を満たす手術ベッドを開発した。その機能は上下・左右横転・前後縦転はもちろんのこと、X-Y平面の10cmの範囲での微動および患者を載せたまま最大1.5mまでの範囲でオープンMRIのガントリー内に送り込むことができる。また、全身麻酔下の患者を載せたまま前後・左右・縦横に容易に移動させることもできる。さらに、隣接の手術室と



図8：MRI対応手術台と窒素ガス駆動手術用顕微鏡



連動し、全身麻酔下の患者を安全に隣室の手術ベッドに転送するシステムも完備している(図8)。

### 5. MRI 対応手術用顕微鏡

三鷹光器製の顕微鏡の特徴は、オープンMRIの5 Gaussライン内で通常の手術顕微鏡と同様の機能仕様を持っていることである。対物深度は50cmで、ズーム・フォーカス機能を有し、従来の油圧駆動と異なり窒素ガス駆動によるエアモーターで対応していることである。さらに、懸垂部のアームは通常よりも20cmほど長く軽量化しているため移動操作も容易であり、固定も簡単である。映像記録は、高精細画像(HD)CCDを搭載している。また、ハイビジョンビデオ顕微鏡システム(ハイビスカス)にも対応しており、将来の拡張性も十分な機能仕様を持っている。

### 6. リアルタイムアップデートナビゲーション

開発した術中イメージング用マーカーは、T1・T2共にhigh intensityに撮像される特徴がある。また、直接チタンピンで開頭した骨に固定できるため、皮膚マーカーなどに比べて精度を簡単に維持することができる。ナビゲーションシステム(PRSナビゲーター)は、本来術中照射装置PRS(Photon Radio-surgery System)用に開発した光学式パッシブナビゲーションシステム(東芝メディカル製)を改変した。二次マーカーシステムにより、術中の体位変換などにも、再レジストレーションすることなくナビゲーションすることもできる。オープンMRIからの術中画像データは、LAN(local area network)を介して、DICOM規格でナビゲーションシステムを瞬時に転送できる。この最新画像で、ナビゲーション画像データをアップデートすることにより、術前画像データを基にした従来のナビゲーションの欠点である術中構造物の手術操作によるbrain shiftなどの諸問題を確実に回避することが可能となった。これにより、悪性腫瘍などの切除率を飛躍的に高めることが可能となった。術中MRAによるモニタリングとアップデートナビゲーションも可能である(図9)。

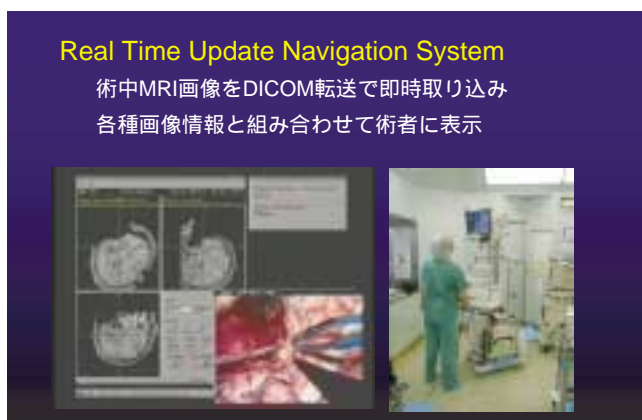


図9：光学式リアルタイムアップデートナビゲーションシステム (PRSナビゲーター)

### 7. 通常の手術室には見られないオープンMRI手術室の特徴

電場および磁場シールドである。電場は0.07mmの銅箔で、磁場は珪素鋼板の積層で漏れを完全にシールドしている。ドアは、自動で開閉される。特に、新幹線のドアと同じように閉鎖するときに圧着することによりシールドの漏れを防ぐ特殊な機構を有している。照明は、手術に必要な照度1500ルクスをハロゲンランプと蛍光灯の組み合わせにより実現した。レーザー使用も考慮した200V電源や通常の手術室よりも多い電源を配置した(図10)。また、将来および現在必要なモニター・検査装置のための拡張性のあるラインフィルターの設置も特徴の一つである。特に電気系統は徹底的なノイズ対策およびアース対策も厳密に整備した(清水建設施工)。映像系としては、2画面のインルームモニターが特徴である。MRI、顕微鏡・内視鏡、ネットワークPC画面をスイッチで切り替え表示することができる。たとえば、術中の迅速診断の顕微鏡像は、パソコン画面を介して手術スタッフらに提示することもできる(図11)。

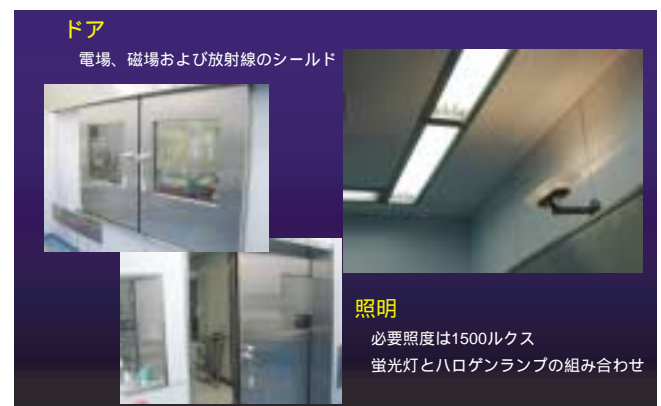


図10：MRI手術室特有のドア・照明システム



図11：MRI手術室特有の電気系統と映像用システム

## 8.脳神経外科手術への応用

悪性脳腫瘍では、オープンMRIの使用により、切除率の向上が明らかに認められた。特に、リアルタイムアップデートナビゲーションの併用により、その切除率は98から100%を目指せるといっても過言ではない。下垂体腫瘍においては、ナビゲーションとの併用により従来の透視装置による患者および手術スタッフのX線被曝は0となった。残存腫瘍および術中の状態も、簡単に多断面で確認でき有用である。また、この手術室は、従来と同じ内容の手術、例えば覚醒下手術、脳波、誘発電位などの電気生理学的モニタリング下の手術をすることもできる。本手術室で平成12年3月13日からオープンMRIによる手術を開始した。平成13年2月5日までに58症例に対し手術を施行した。男性23例、女性35例、年齢は、1歳から80歳まで平均39.3歳である。症例の内訳は、硬膜外血腫2例、動静脈奇形2例、水頭症3例、頭蓋咽頭腫7例、下垂体腫瘍14例、悪性脳腫瘍21例、その他9例である。その内、ナビゲーション使用は29例、覚醒下手術は5例である(図12、13)。

手術室利用状況	
・ H12.3.13使用開始	
・ H13.2.5 現在	58症例
・ 男性	23例
・ 女性	35例
・ 年齢	1~80歳
・ 平均	39.3歳
・ 主な症例	硬膜外血腫 2例
	動静脈奇形 2例
	水頭症 3例
	頭蓋咽頭腫 7例
	下垂体腫瘍 14例
	悪性脳腫瘍 21例
	その他 9例
(ナビ使用 29例、覚醒下手術 5例)	

図12：オープンMRI手術室での症例内訳(H.12.3.13-H.13.2.5)



図13：オープンMRI下での脳腫瘍摘出症例

## 9.モバイルCTがオープンMRIか

単に術中画像を撮るためだけでは、どちらもそれほど差は無い。悪性度の低い脳腫瘍など、CTではハッキリしない場合にはMRIが有用である。CTでは、決まった断面と造影剤の使用による画像撮影だけであるが、MRIは多断面・多種類のシーケンスで撮像した画像および造影剤を使用した画像を撮像できる。リアルタイムアップデートナビゲーション用として、術中画像を撮る時には、一症例に対しリアルタイムのための画像データを3ないし4回撮像すると約900スライスを撮像

した自験例での経験から勘案すると、X線被曝がないことは、決定的な差になると考えられる。特に、クリティカルな場所の手術を行なう場合には、画像のアップデートが確実に安全な手術に繋がるわけであるので、繰り返し撮像するということが求められる。

## 10.縦型・トンネル型MRIかハンバーガー型MRIか

縦型オープンMRIであるGE製のSigna SP(滋賀医科大学)は、静磁場としては、0.5Tであるがドーナツ1個が1.5Tあり手術室内は最低でも20ガウスライン内にある。5ガウスラインは手術室外に存在する。このため、手術に必要な機材は全て20ガウスライン内での使用となるため、磁場対応するためには極めて困難であるだけでなく、対応している機材の価格も高く、その機能仕様は必ずしも通常の手術用機材の水準を満たしてはいない。特に、手術ベッドはガントリー内に患者留置したまま使用するため、手術台としての機能はほとんど備えていない。上下動と水平移動に対応しているだけである。56cm幅に術者は入り込んで手術するため、脳外科では頭頂部手術では一人、側方手術では二人の対応となっている。また、装備された顕微鏡は、我々の開発した顕微鏡と異なり通常の機能仕様を満たしてはいない。形態画像に関して言えば、0.3Tでも0.5Tでも特に差は無い。また、最近経験したMRAおよびMRA元画像を使つてのリアルタイムアップデートナビゲーション下での脳動静脈奇形手術手術においても、0.3Tの術中画像は診断用画像と何ら遜色はなかった(図14)。

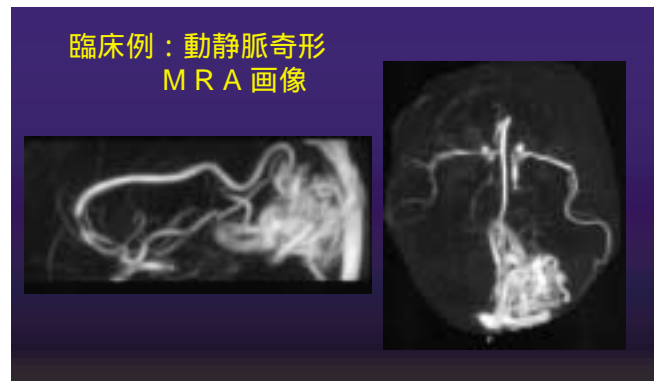


図14：臨床例 動静脈奇形

縦型・トンネル型MRIかハンバーガー型MRIかは手術時における手術スタッフの術中画像に対する要求度の問題である。すなわち、手術の操作性を犠牲にしても常に患者をガントリー内に留置し、それこそリアルタイムに画像を撮像する必要性を重視するか、我々のように必要に応じて、患者をガントリー内に送り画像をアップデートするPit-inシステムにより、手術は何ら通常と変わらずに行なうかを重視するかにかかると思われる。5ガウスラインが狭いハンバーガー型MRIとしては、日立メディコ製のAIRIS®-II(0.3T)とシーメンス製の0.2T MRI<sup>2)</sup>が現在普及している。5ガウスライン外では、通常の手術器具装置が使えるため、ガントリー内に持ち込むもののみをMRI対応にすることで手術が可能であるという利点がある。ただし、5ガウスライン内に通常使用している器具や装置を持ち込む可能性があるため注意が必要なこととは言うま

でもない。我々の経験でも5 Gaussライン内に持ち込んで、デジタルカメラやデジタルビデオを壊した例が散見される。つまりはっきりして腕時計、ポケットベル、磁気カードなどMRI室に持ち込んで、後で後悔する手術スタッフが跡を絶たないことから注意する必要がある。

### 11. オープンMRI手術室の最適化

各症例に応じたMRI撮像プロトコルの最適化が一番重要である。これにより、撮像時間の短縮がはかれる。手術用コイルの最適化も重要で、局所感度は診断用と同等の水準を維持するだけでなく、手術に特化した形状および機能仕様が要求される。狭い手術室では時間および空間の最適化も重要な課題である。分離式器械台の開発や立体的な手術道具の配置および局所空間の有効利用(吸引システムのビルトインなど)を含め、まだまだ解決すべき課題が山積みしている。しかし、一番の解決策はスピードであることは言うまでもない。smart、speedy、simple、suitableの4Sでインテリジェント手術室の最適化をはかる必要がある。同時に、インテリジェント手術室はその環境・システムが一体化して提案されることにより、その能力を発揮すると言う原則を忘れてはならない(図15)。



図15：ノイズ対策によるMRI画像の最適化

## 5. おわりに

術中オープンMRI手術室(21世紀の手術室)は、従来の脳外科手術を変えるインパクトをもっている。悪性脳腫瘍の切除率を全摘までに向上できれば、5年生存率も95%摘出時の22.5%から40.9%にまで上昇させることができる<sup>6)</sup>。オープンMRIの併用により90から95%まで脳腫瘍の切除率は確実に向上する。特に、術中画像データを必要に応じて、常にリフレッシュするリアルタイムアップデートナビゲーションの併用により、手術スタッフは98から100%への切除率を追求することができる。また、術中MRIの多断面・多種類のシーケンスで撮像した画像は、手術操作による脳の変形・移動にも対応し、正確で客観的な術中画像を提供することで手術スタッフを支援する。まさに、evidenced based medicine(EBM)を手術操作に持ち込むことになる。誰にでもわかる医療情報の可視化は、患者・手術スタッフ双方にadvantage(高品質な手術)をもたらし、それを実践する場(所)が21世紀の手術(室)である。さらにオープンMRI手術室から、PET(positron

emission tomography)手術室で脳腫瘍の全摘を目指すシステムの構築が次の課題となるであろう。放射線被曝をクリアするための技術開発の土台は既に整っている。再生医療・遠隔医療・マニピュレータ手術がこの次世代のPET手術室で花開くことは間違いない。

AIRISは株式会社日立製作所の登録商標です。

## 参考文献

- 1) 伊関洋, ほか: 脳神経外科におけるバーチャルリアリティ. 先端医療シリーズ6・脳神経外科. 高倉公朋監修. 先端医療研究所. 東京, 269-76, 2000
- 2) Nimsky C, et al: Integration of functional magnetic resonance imaging supported by magnetoencephalography in functional neuronavigation. Neurosurgery 44(6): 1249-55; discussion 1255-6, 1999
- 3) 伊関洋, ほか: 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
- 4) 村垣善浩, ほか: Open MRIを用いた“Real-Time Navigation”の開発. 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. 119-120, 2000
- 5) 杉浦円, ほか: 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
- 6) The committee of brain tumor registry of Japan: Report of brain tumor registry of JAPAN(1969-1993) 10th edition. Neurologica medico-chirurgica. Supplement 40: 54, 2000