

# インテリジェントオペ室・MRI誘導手術対応システム

Intelligent Operating Theater and MR-compatible Operating System

伊関 洋 <sup>1)</sup>	Hiroshi Iseki	村垣 善浩 <sup>1)</sup>	Yoshihiro Muragaki	中村 亮一 <sup>1)</sup>	Ryoichi Nakamura
堀 智勝 <sup>1)</sup>	Tomokatsu Hori	高倉 公朋 <sup>1)</sup>	Kintomo Takakura	杉浦 円 <sup>1)2)</sup>	Madoka Sugiura
谷口 拓樹 <sup>1)3)</sup>	Hiroki Taniguchi	小澤 紀彦 <sup>1)3)</sup>	Norihiko Ozawa	白川 洋 <sup>3)</sup>	Hiroshi Shirakawa

<sup>1)</sup> 東京女子医科大学大学院 先端生命医科学研究所 先端工学外科学分野

<sup>2)</sup> 株式会社日立製作所 研究開発本部

<sup>3)</sup> 株式会社日立メディコ MRIシステム本部

インテリジェント手術室は、現場に根ざしたニーズとそれを実現するためのシーズがすり合わされることで完成した。フロントランナーとして手本がないまま走り抜けるためには、従来の常識にとらわれないイノベーションが必須であった。手術工程の解析からPit-in systemが誕生したように、手術を中断し手術道具の撤去・移送のための透明ドレープによるドレーピングと手術室内の手術顕微鏡などの最適配置や動線の最短化、麻酔器・点滴装置と手術台の移動における危険性の回避の工夫など、mobile pit-in systemというべき仕組みの構築が必須であった。手術患者は移動しないという原則で成り立っていた手術室の常識を一変するためには、イノベーションしかなかった。今後の開発においても、「ピットインシステム」と呼んでいる必要に迫られて行われた現場に根ざした開発を想起し、前を向いて進んで行く必要がある。

The intelligent operating theater was completed by combining the needs derived from the clinical front with the seeds to bring those needs to realization. In order to run through as a front runner without any model to follow, an innovation not bound by past common knowledge was indispensable. As Pit-in System was born from the analysis of operation process, it was necessary to construct a system to be called Mobile-Pit-in System by taking into consideration, for instance, interruption of operation, draping of operation tools with drapes for removal and move, the optimum layout of operation microscope, minimization of transit path, means to avoid dangers in moving anesthetizer, dripper and operating table. There was nothing but the innovation to completely change the common knowledge in operating theater which is consisted with the concept that the operating table should not be moved. In the future development also, it is necessary to move forward recalling the development of a system called "Pit-in System" based on and urged by necessity of the clinical front.

**Key Words:** Intelligent Operating Theater, Real-time Update Navigation, Pit-in System, Head-frame Coil

## 1. はじめに

手術を術前の計画どおりに、術中の安全を確保しながら終ることが今問われている。手術計画を立てるにあたり、術前に解剖学的位置関係を画像化し、機能領域の位置および分布を機能画像や神経生理学的な検査法で確認することが必須であることは、言うまでもない。

脳外科医を長年悩ましてきたbrain shiftは、術前検査での解剖学的位置関係を基にした手術戦略をbrain shiftに対応してどのように修正するかがポイントであった。その修正を手助けする手段が術中検査である。形態学的には、術中に超音波、モバイルCT、オープンMRIなどで術中操作による

brain shiftの状況を把握する。機能的には、術野の機能領域を再度同定する。すなわち、術中の状況を形態学的にも機能的にも把握しながら手術することがポイントである。特に術中オープンMRI手術室は、従来の脳外科手術を変えるインパクトで、手術スタッフを支援する。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・移動にも対応する。

正確で客観的な術中画像に基づくリアルタイムアップデートナビゲーションと術中の脳機能計測・ケミカルナビゲーションと共に、脳機能を温存しながらの覚醒下手術による手術操作は、evidence based medicine(EBM)そのものである。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インテリジェント手術(室)である<sup>1)2)</sup>。

## 2. オープンMRI手術室の環境とシステム

2000年3月13日より、東京女子医科大学 研究所手術室にオープンMRI(AIRIS -II : 日立メディコ製)を導入し、2003年5月15日までに166例の脳外科手術を行っている。設置したオープンMRIは、垂直磁場方式永久磁石で静磁場強度0.3テスラ(T)(共鳴周波数 : 12.7MHz)のハンバーガー型となっていて、開口部が43cmである。漏洩磁場(5 Gaussライン)は狭く、MRIの磁石中心より左右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。付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いなかった。画質および使い勝手の面で大きな問題となり、手術操作に適したコイルを開発・改良し、診断用コイルと遜色のない画質の手術用コイルで手術を行っている。

また、非磁性体で構成された窒素ガス駆動手術顕微鏡(三鷹光器製)、麻酔器・モニター、カウンターバランス式手術照明(山田医療照明製)や手術器具も必要である。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。ただ、5 Gaussラインが狭く(ガントリー辺縁より約1m)、手術用器具の制限も少ないため、5 Gaussライン外では通常の手術器具が何不自由なく使用でき実用的である。

おそらく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(図1)。

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



図1 : インテリジェント手術室

左上 : 全景 右上 : 手術用顕微鏡 左下 : 光学式ナビゲーター  
右下 : 手術用ベッド

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、脳の変形にでき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>3)</sup>。

一方、機械台と手術ベッドの患者を覆う滅菌布を分離することが必須であった。従来はベッドに機械台がおかれ、一体となった布かけが行われていた。また、吸引システムやバイポー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い、必要に応じて簡単に分離する仕組みと分離に適した機械台が必要であることがわかり、透明ドレープの開発と分離式布掛けの工夫により問題点を解決した。透明ドレープ(スケルトンドレープ : 通称スケドレ)の導入は、術中の患者肢位・輸液ライン・気道確保ルート(気管内挿管)・コイルの装着具合の視覚化による安全性の確保とAwake surgeryにおける患者の顔および状況の把握と同時に不安の解消をすることができた。オープンMRI 開口部を開閉式厚手のソフト透明ビニールシートにて閉鎖した。これらにより、不慮の事故を防ぐと同時に手術スタッフへの安全域と磁場空間との境界の警告を兼ねることができ、手術の安全性も高まった。

Pit-in systemは、機械台と手術機械用上方展開ボックスの二つの部分より成っている。機械台には、吸引システム・双極凝固装置(バイポーラ)・電気メス装置(モノポーラ)の組み込みと多電源コンセントの設置と機械台昇降機能と手術台との分離機能が付加されている。手術機械台はオーバーヘッドテーブル型で、常時手術に必要な機器(モノポーラ、バイポーラや吸引装置)を収納し一体化することにより、すばやく分離・移動できる機能を持っている。機械台に展開する手術器

具は、手術の進行に応じて各ステージごとに分類し、分類した収納ケース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った。具体的には、手術工程立体収納ボックス型システムである。また、両側にそれぞれの手術器械だしに応じたウイングを持ち、動線が最小限な立座椅子で身体を保持し、術者を支援する。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。狭い手術室内では、その能力に見合ったスペースしか与えられないというのが原則である。この原則の基に、不具合を最適化するしかないのである。分離式器械台や立体的な手術道具の配置(手術ステージに応じた収納トレーボックス)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)以外にも、まだまだ解決すべき課題が山積みしている。また、オープンMRIが垂直ギャップと水平ギャップのどちらが優れているかの評価は、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、穿刺や生検のために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、われわれのように必要に応じ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うかを重視するかにかかると思われる。しかし、リアルタイムアップデートナビゲーションによるbrain shiftの解決により、脳外科領域においてはガントリー内に患者を常時入れて撮像する必然性は存在しない<sup>9)</sup>。

### 3. 術中MRI用受信コイルの形状および特性の最適化

まず、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、撮像時間の短縮と画質の向上に直結する。特に局所感度は診断用と同等の水準を維持するだけではなく、手術に特化した形状および機能仕様が要求される手術用コイルの最適化も重要事項である。付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なく、画質および使い勝手の面で大きな問題となり、手術操作に適したコイルの開発・改良が急務であった。さらに従来術中オープンMRI撮影では、いったん手術を中断し、患者をドレープで覆布し、患者の形態情報をとらえる受信用RFコイルを患者の頭部を覆うように装着した後、MRIを撮影するという手順を踏むため、頭部固定具やドレープなどにより受信用RFコイルを装着するスペースが大幅に必要となり、通常の診断用頭部コイルの使用は不可能であった。

開発した手術仕様の受信用RFコイルの要求仕様は、簡便で安全性の高い撮影手順が図れること、診断用頭部コイルと同程度の局所感度を取得できること、脳神経外科手術の一助となる機能を有することが挙げられる。以下にその条件を列挙すると：1. 診断用コイルと同程度もしくは、それ以上の画質を得ることができること、2. 手術の操作性を妨げないこと、3. 術中のコイルの着脱が容易か、もしくは装着後は手術終了まで手術操作の邪魔にならずにコイル機能が維持されていること、4. 手術操作部位により、必要最低限の範囲でのコイルの装着・高画質・易脱着性を有していること、5. コイル機能

だけでなく、手術用デバイスと共生する機能を有していることである。上記条件を満たす手術用コイルを開発した。

下垂体手術用コイルは、患者の頭囲に応じて3種類のサイズを開発した。防水性も高く、コイルの外装は柔らかく装着も簡単であり、画質および操作性に問題はなかった。また、頸部の手術にも使用できる。しかし、サイズにより受信感度が一定ではなく、外科医からは後述するヘッドフレーム型コイルに付属する形での頭部固定装置つきの下垂体手術用コイルの要望が高く、杉田式4点固定ヘッドフレーム型コイルに非観血的頭部固定用台座を設置するアダプターを改良中である。

開頭手術は、腹部用のコイルを代用していたが、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、術中オープンMRI装置に対応し、手術器具として従来から使用されている4点頭部固定用フレームと一体となった開頭手術専用の手術用コイル(4点固定ヘッドフレーム型コイル)を開発した。手術用の頭部固定ヘッドフレームとコイルを一体化することで、従来のコイルと同等以上の性能と手術操作性および撮像時の作業性を向上することができた(図2)。

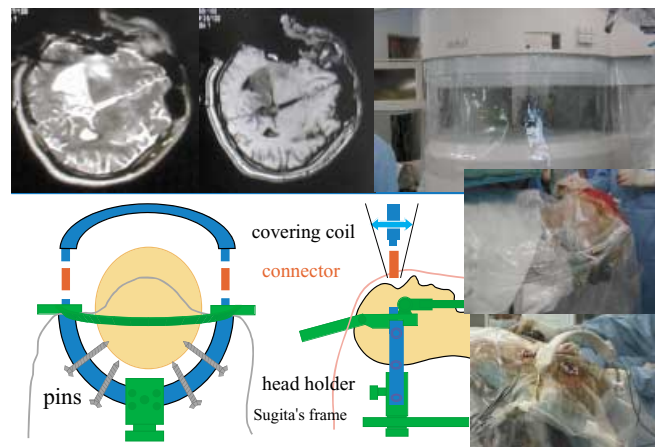


図2：手術仕様受信用RFコイルと術中MR画像(T2/T1)

### 4. 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(瑞穂医科工業製)は、T1・T2共にhigh intensityに撮像される特徴がある。開頭した骨に挿入固定できるため、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。2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へ瞬時に転送できる。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。



バーチャルチップ機能による三次元画像リアルタイムアップデートシミュレーション・ナビゲーションシステムは、術中にMRIの多断層像スライスから、三次元画像をレンダリングボードにて簡単に再構成することができ、さらにバーチャルチップ(仮想先端)機能を利用するとナビゲーションの前に術中にシミュレーションを簡単にすることができる。たとえばバーチャルチップを50mmに設定しておけば、頭皮上から50mm先の脳の構造が液晶モニタ上にリアルタイム表示され、手術アプローチの選択や目標とする病変周囲の情報が手術スタッフに提供される。すなわち、術中に直前に得られた三次元再構成MRI画像上で簡単にシミュレーションにより、術者は手術経路の確認などが簡単にできることとなる。さらに、術具先端位置のログ機能を有しているために、手術操作を加えた位置とまだ加えていない部位の峻別ができ、摘出状況の把握が容易である特徴も有している。これら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。また、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3)。



図3：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  
左：システム全景 右上：センシング用CCDカメラ  
中央：ナビゲーション画面(3D・ログ機能搭載)  
右下：センシング手術デバイス

## 5. 術中の錐体路可視化と生理的モニタリングによる温存

経頭蓋脳刺激による運動誘発電位 motor evoked potentials(MEP)の生理的モニタリングは、一次運動野近傍に経頭蓋的に高電圧、短持続時間の単発刺激を加えて、刺激と反対側の四肢に筋電図反応が誘発されることを利用して、モニタリングするものである。麻酔深度に依存するため、麻酔科との協力の下に行われる必要がある。術中に錐体路と思われる箇所を術中操作している時、電気刺激することにより錐体路の温存を図るものである。

一方、拡散強調画像 Diffusion Tensor Imaging による運動野からの軸索(錐体路)の可視化は、大脳白質における拡散の異方性を利用して拡散強調像で種々の繊維束を明瞭に描出することである。重要な機能繊維(錐体路など)を術中に温存するために、術前のDTIによる錐体路繊維の解剖学的ナビ

ゲーションを併用することが必要である。また、術前のDTIによるナビゲーションに加え、術中にaxonographyの撮像によるリアルタイムアップデートが可能となれば、その有用性はさらに高くなる。

術前拡散テンソル画像の利用においては、ナビゲーションと同様、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などの諸問題が発生する<sup>9)</sup>。これを回避するためには、術中拡散テンソル画像を使い、リアルタイムアップデート拡散テンソル画像ナビゲーションが必須である。現時点での術中拡散テンソル画像は、1.5T機に比べて鮮明さではまだまだ改良の余地がある。しかし、確実に術中拡散テンソル画像でのナビゲーションに脳外科手術は向かっているのである(図4)<sup>9)</sup>。

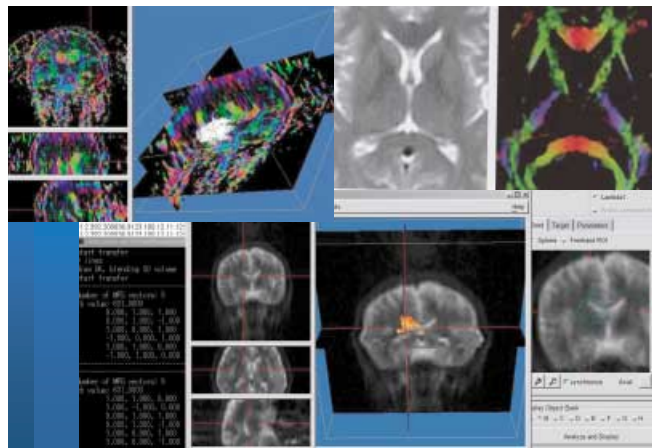


図4：術前DTIと術中DTIナビゲーション

## 6. ケミカルナビゲーション

悪性脳腫瘍の切除率を向上させると5年生存率が上昇する。しかし、悪性脳腫瘍では腫瘍組織と正常脳との境界が不明瞭なため、100%の組織摘出が難しく、術後に残存組織が存在するとの想定のもとに放射線療法、化学療法が一般的には補充療法として追加されている。手術操作による脳の変形・移動にも対応するオープンMRIの併用と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、平均摘出率は91%に向上した。ケミカルナビゲーションとして使用する5・アミノレブリン酸塩酸(5ALA)は腫瘍にのみ特徴的に蓄積する性質を持ち、405nmの青色光を照射することで赤色光を発する性質がある。術者はフィルタを介して発光部位を観察しながら残存腫瘍を確認し、正確にその部位を摘出できる<sup>7)</sup>。

## 7. 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、その平均切除率は91%を達成し、全摘率も39%(全国平均は8%)となった(図5)。

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

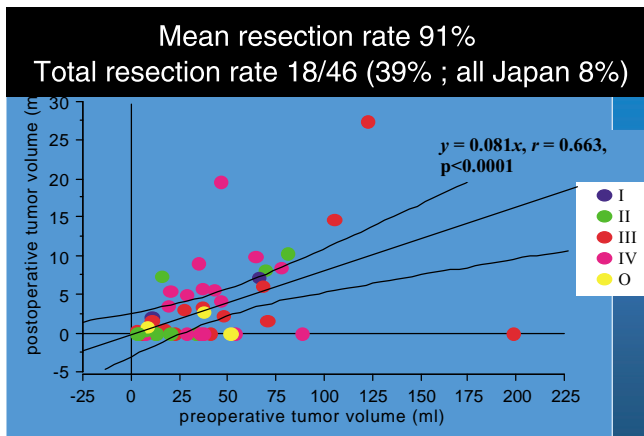


図5：インテリジェント手術システムによる平均摘出率と全摘出率


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。オープンMRIの水平ギャップ43cm幅の中で、手術用の体位をとるためには種々の工夫が必要である。工夫のしどころは、通常の手術であれば術中には、三つ折手術用のベッドを使って手術に適した体位をとったり体位変換をすることが可能であるが、MRI対応手術台は一枚天板であるため、術中の体位変換が制限されることにある。しかし、座位(sitting position)を除くほかの脳外科手術体位(supine、prone、semilateral position)をとることができるため、脳外科手術症例のほぼ95%をカバーすることができる。また、この手術室は、従来と同じ内容の手術、たとえば覚醒下手術、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日よりオープンMRIによる手術を開始した。平成15年5月15日までに166症例(男性84例、女性82例)に対し手術を施行している。年齢は、1歳から80歳まで平均40.5歳である。症例の内訳は、水頭症3例、頭蓋咽頭腫8例、下垂体腫瘍31例、悪性脳腫瘍89例、脳動静脈奇形8例、海綿状血管腫5例、髄膜腫4例、そのほか17例である。そのうち、ナビゲーション使用は102例、覚醒下手術は19例、ケミカルナビゲーション45例である(図6)。

## Indication of open MRI

To detect invisible residual mass and confirm hemostasis

- Glioma(89)
  - eloquent area
- Parasellar tumor(39)
  - pit. (31), craph. (8)
  - > transnasal approach
- hydrocephalus(3)
- AVM(8)
- Cavernous angioma(5)
- Meningioma(4)
- others(17)
- Navigation (102)
- Awake surgery (19)
- 5-ALA(45)



166 cases (2000.3.13-2003.5.15)

図6：オープンMRI手術室での166症例内訳

## 8. 他科領域への展開

オープンMRI手術室は、すなわち脳神経外科用の手術室システムの構築は、ほぼ完成に近づいている。今後の展開を考えると、オープンMRI手術室の稼働率を上げることに尽きる。緊急対応を含めて他科領域への応用を考える必要がある。対象領域として、腹部外科・整形外科・産婦人科・泌尿器科・耳鼻科が挙げられる。各科領域の対象疾患により、脳外科手術用コイルと同様に、それぞれの術式に最適な手術用コイルの開発が必須である。従来の汎用コイルで手術を行いながら問題点の発掘と改良だけではなく、リアルタイムで専用コイルと手術台に付属するアクセサリーの開発も同時に行う必要がある。例として前立腺肥大症への応用を考えると、cryosurgeryとの併用により、凍結した部位の信号は、MR画像では無信号となり、明確に描出可能である。MRI下の手術の良い適応と考えられる。また、内視鏡手術との併用は、脳外科の下垂体手術と同様にMRI対応内視鏡の開発により、有望な手術となることが予想される。仮に、脳腫瘍手術による手術時間午前8時30分から午後6時30分として、実際に3回術中MRI撮像を施行するとすれば、Pit-in systemで平均40分所要時間を必要とする。MRI撮像所要時間は計120分であり、残りの8時間は空いていることになる。手術室共用の条件としては、手術台が移動および固定も容易なストレッチャー型システム、手術台移動時における患者の状態を容易に把握可能な透明手術ドレープ、移動型麻酔器が、手術室毎の麻酔器との連携が容易な麻酔システム、移動対応患者モニタリングシステム、手術の内容に応じたPit-in systemの機械台が挙げられる。

オープンMRI手術室の共用化モデルとしては、手術室内での共用とICUまたはER(救急外来)と併用が考えられる。救急およびICUにおいては準清潔区域であり、清潔区域である手術室と共用すると考えると気圧の勾配を設けることで、清潔区域から準清潔区域に空調の流れを構築することが必要である。感染の可能性については、欧米の手術室、本邦では、成育医療センター手術室の思想を考えると、落下菌に対する注意以外には清潔区域・準清潔区域を厳密に区別することは、従来ほど神経質である必要はないと考える。

手術室内での共用は、患者移動時に対する安全対策を徹底すること以外には、大きな問題は存在しないと考える。手術室の効率的運営を一元管理するシステムの上で、限られたリソースを有効活用することに尽きる。また、麻酔科との連携することが必須な条件である。また、手術戦略デスクを手術室内に設置し、遠隔でのオペレーティングの操作を監視するだけでなく、リモートで操作する仕組みを導入する必要がある。必ずしも現場にいなくてもリアルタイムにアドバイス、バックアップすることができるサポート体制が重要である。

## 9. 超小型ガンマカメラによるRI誘導手術(RI-guided surgery)から情報誘導PET手術室へ

超小型ガンマカメラの開発が進められ、RI(radio isotope)を利用して病変部を標識し、術中に標識組織を可視化しながら



ら病変部を的確かつ容易に摘出する術中臨床応用が進められている。すでに、術中に大腸がんや直腸がんをより精度良く、正確に摘出する目的で免疫核医学を応用した免疫RIガイド手術(radioimmunoguided surgery)や乳がんのセンチネルリンパ節生検への臨床応用が始まり、さらに脳腫瘍への応用も試みられている<sup>8)</sup>。SPECT(single photon emission computed tomography)は、PET(positron emission tomography)に比べて空間分解能は劣るが、放射性医薬品を注射後24時間後に術中で検出しながらすることも可能で、逆にPETの被曝問題を解決することができる。悪性腫瘍そのものをガンマカメラで検出する免疫RIガイド手術の進展や病変の組織部位などや手術スケジュールなどにより、適切な放射性医薬品の選択が成されれば、RI誘導手術がCT/MRI誘導手術と並んで使われる日も近い。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>9)</sup>。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すでに整っている。

PETは体内の代謝機能や血流状態を定量的に計測し、3次元画像データとして提供できる。さらに、撮影に使用する放射性薬剤を変えれば、計測対象とする生化学反応の種類をさまざまに選択できる。このため遺伝子治療や自家移植治療(再生医療)における代謝機能計測をはじめ機能部位の同定、代謝・血流の計測などによって、手術中に患者の状態や手術の効果を確認できるevidence based medicine(EBM)が可能になる。しかし、放射線を比較的長時間使用するので、手術室内には患者以外は入れない。このため、高画質ビデオ映像を使って術野を観察しながら遠隔マニピュレータを介して手術操作を行うか<sup>3)10)</sup>、PET画像データを基に、C-APSモデルで0.1mmの精度でロボット手術が可能でガンマナイフ手術<sup>11)</sup>を実施することが必要である。このようなPET手術室は次世代の外科手術に多大なインパクトをもたらすに違いない。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(図7)。



図7：放射線被曝環境下でのPET誘導ロボット手術

## 10. おわりに

手術工程の解析からPit-in systemが誕生したように、手術を中断し手術道具の撤去・移送のための透明ドレーブによるドレーピングと手術室内の手術顕微鏡などの最適配置や動線の最短化、麻酔器・点滴装置と手術台の移動における危険性の回避の工夫など、mobile pit-in systemというべき仕組みの構築が必須であった。手術患者は移動しないという原則で成り立っていた手術室の常識を一変するためには、イノベーションが必要である。「ピットインシステム」と呼んでいる必要に迫られて行われた現場に根ざした開発を想起する必要がある。すなわち、インテリジェント手術室においては、手術を継続しながら手術室内の用具についても改良に改良を重ねられた。結局平面への展開スペースがないため、手術器具・物は縦に積む以外にないのである。そこで開発されたのが高層マンション型機器台である。狭いので従来のように横に物を並べると倒したり、足を引っ掛けたりということが起こったわけである。『どのように整理するか』ということが問題となるのである。結局、看護師のアイデアで横に並べていたものを縦に設置する方法を採用し、運用した。このアイデアがさまざまな効果をあげることになった。必要な物は1000~2000円くらいのプラスチックの箱である。その箱のケースに手術のステージごとの機械・道具を装填し、ステージごとに使う機械・道具は分類して収納したわけである。ステージが終了すると道具の入ったケースを箱に収め、別のケースを取り出すのである。この行動によってスタッフ全員が手術工程の“分類”、“流れ”を把握できるようになり、結果として“手術工程の可視化”という要素が明確となり、可視化されたことでスタッフ全員の手術工程の理解が深まったと言える。

ピットインシステムのもう一つのメリットが、装置群の着脱にある。従来、手術中にMRIを使用する場合は、手術台からあらゆる装置をいったん外す必要があり、所要時間は40分かかった。しかし、この「ピットインシステム」によって、わずか5分に短縮することができたのである。40分から5分への短縮であるから患者さんにとっても術者にとっても大きなメリットである。実際には5分で外し、10分程の撮影を行い、また5分で装着するということになるので所要時間は90分から20分に短縮したことになるわけである。同様に、mobile pit-in systemの導入により、手術を中断し・移送・撮像・再移送・手術の再開までの時間をどれだけ短縮できるかにかかってくる。この改善過程をおろそかにすると、インテリジェント手術室での手術は面倒くさいということで、必然的に使われなくなるという事態が起こる危険性がある。限られた時間内で、どれだけの手術を効率的にこなせるかが鍵である。そのためにも、簡便で使いやすいmobile pit-in systemを構築することが必須なことであった。

インテリジェント手術室を見学した方々に「よく入りましたね」という質問を必ず受けるが、「逆に、狭い隙間だったからさまざまなアイデアが生まれました。今にして思えば、広い空間を提供されていたら、多分何も最適化できなかったでしょうね」ということが答えである。手術室を運用して感じたことは、「医者の意見より、現場の意見が一番重要」手術

室に関しては、スタッフ全員の意見の集約した形と医工連携だけではなく、フラットな組織として運営した結果が実を結んだのである。唯一「いいものは残る」という原則があるだけで、これまでの常識は全く通じない状況下で作業が進められた結果なのである。

AIRISは株式会社日立メディコの登録商標です。

## 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: 269-276, 高倉公朋監修, 先端医療研究所, 2000.
- 2) H.Iseki, et al: New Possibilities for Stereotaxis Information-Guided Stereotaxis. Stereotactic and Functional Neurosurgery, 76: 159-167, 2001.
- 3) 伊関 洋, ほか: 脳神経外科におけるロボティックサージェリーの現状と将来. 臨床放射線, 47: 431-439, 2002.
- 4) 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.
- 5) Nimsy C, et al: Integration of functional magnetic resonance imaging supported by magnetoencephalography in functional neuronavigation. Neurosurgery, 44(6): 1249-1255; discussion 1255-1256, 1999.
- 6) 村垣善浩, ほか: 機能的マッピングと術中MRIを併用したグリオーマの手術. 特集・脳腫瘍. BRAIN MEDICAL, 13(3): 255-263, 2001.
- 7) Maruyama T, et al: Intraoperative detection of malignant gliomas using 5-Aminolevulinic acid induced protoporphyrin fluorescence, open MRI and real-time navigation system. Computer Assisted Radiology and Surgery, CARS2001 -H.U.Lemke, M.W.Vannier; K.Inamura, A.G.Farman & K.Doï (Editors): 270-275, Elsevier, 2001.
- 8) 土持 眞: RIガイド手術のための小型高分解能ガンマカメラ. 日本医学放射線技術学会雑誌, 57(7): 751-758, 2000.
- 9) 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.
- 10) Hongo K, et al: NeuRobot: Telecontrolled Micromanipulator System For Minimally Invasive Microneurosurgery -Preliminary Results. Neurosurgery, 51: 985-988, 2002.
- 11) 林 基弘, ほか: ガンマナイフ最新治療機器: APS-Model C: 機能的脳疾患治療の最前線: 393-397, 高倉公朋監修, 先端医療研究所, 2002.