

術中MRIを軸とした「画像・情報誘導下手術」を可能にするインテリジェント手術室の最前線

Update on the Intraoperative MRI-based Information-guided Surgeries
in the Intelligent Operating Theater of the Tokyo Women's Medical University

小西 良幸 ¹⁾	Yoshiyuki Konishi	吉光喜太郎 ¹⁾	Kitaro Yoshimitsu
岡本 淳 ¹⁾	Jun Okamoto	田村 学 ¹⁾³⁾	Manabu Tamura
丸山 隆志 ¹⁾³⁾	Takashi Maruyama	正宗 賢 ¹⁾	Ken Masamune
伊関 洋 ²⁾	Hiroshi Iseki	村垣 善浩 ¹⁾³⁾	Yoshihiro Muragaki

¹⁾東京女子医科大学 先端生命医科学研究所 先端工学外科学分野

²⁾東京女子医科大学・早稲田大学共同大学院 共同先端生命医科学

³⁾東京女子医科大学 脳神経外科

従来の脳腫瘍摘出術は外科医の経験と技術によって行われてきたが、より精度の高い手術を実現するために客観的に再現性のある情報に基づいた手術「情報誘導下手術」を提案してきた。それを実現する場が「インテリジェント手術室」である。手術室内にMRI装置を設置し、2000年3月に初めて国産の技術で立ち上げ、2014年末時点での摘出術が1,400例、覚醒下手術が330例を超えた。稼働以来、臨床現場との情報交換を重ね、医工融合の下で進化させたシステムになっている。

Up to recent time performance of the neurosurgical procedures, particularly directed on resection of brain tumors, was strongly dependent on experience and skills of the individual surgeons. To overcome possible influence of such subjective factors on results of treatment, the concept of the intraoperative MRI-based information-guided surgery was developed. It is relied on the integrated use of the variable intraoperative information for guidance of surgery and attainment of the best possible outcome with minimal risk of complications. Such surgical strategy was realized in the Intelligent Operating Theater of the Tokyo Women's Medical University, where more than 1,400 brain tumor resections were performed from March 2000 till December 2014. In 330 cases removal of the neoplasm was done during "awake craniotomy" and direct intraoperative brain mapping. Intelligent Operating Theater mainly equipped with domestic medical devices and constitutes constantly developing infrastructure. Its continuing progress has being attained through both technological upgrading and improvement of the collaborative skills of the staff members, including medical doctors, engineers, researchers, and companies' representatives.

Key Words: Smart Cyber Operating Theater, Intelligent Operating Theater, Intraoperative MRI, Open MR

1. はじめに

脳腫瘍の摘出手術においては、完全摘出が理想だが、悪性脳腫瘍は正常な脳との境界が分かりにくく無理に摘出しようとすると、正常な脳神経を損傷する可能性があり、手術後に合併症が生じるおそれがある。従来の脳腫瘍摘出術は外科医の経験と技術によって行われてきたが、より精度の高い手術

を実現するために客観的に再現性のある情報に基づいた手術「情報誘導下手術」を提案してきた。それを実現する場が「インテリジェント手術室」である。東京女子医科大学インテリジェント手術室は手術室内にMRI装置を設置した手術室であり、2000年3月に初めて国産の技術で立ち上げ、2014年末

時点での摘出術が1,400例、覚醒下手術が330例を超えた。稼働以来、臨床現場との情報交換を重ね、医工融合により改良を行い本日のシステムになっている(図1)。

2. 「インテリジェント手術室」

インテリジェント手術室はMRIを中心とした「画像・情報誘導下手術」を再現するための手術室である。「画像・情報誘導下手術」を可能とするために、MRI(磁気共鳴画像)を手術室に組み入れ、医師や看護師など医療スタッフがリアルタイムに状況を共有しながら手術を進めることが可能になった(図2)。また、術中に得られる最新の画像を基にしたリアルタイムアップデートナビゲーションシステムが解剖学的情報を提供し、より安全な治療を提供する。現在では、新たに導入された「0.4TMRI(APERTO^{*1})」を軸に、術中迅速病理診断を可能にするフローサイトメトリー、覚醒下手術における脳機能検査システムの「Intraoperative Examination Monitor for Awake Surgery(IEMAS^{*2})」、手術中に執刀医が必要な情報を即時に得るために、非接触かつ直感的に画面を操作することを可能とした「OPECT」などを開発し、さらに進化した手術室となっている。また、術前に高磁場MRI撮影、硬膜下電極留置、および機能的MRIの情報を用いて脳機能マッピング(図3)を行い、手術中にどのような情報が有用であるかを判断している。さらに、術中の脳機能解析、解剖学的情報(術中MRI、アップデートナビゲーション)、機能的情報(脳機能解析、覚醒下手術)、組織学的情報(術中迅速病理診断、フ

ローサイトメトリー)を集約し、ヘッドクォータである「戦略統括デスク」にて情報の分析・共有を行い、手術現場とともに意思決定を行っている(図4)。

3. 術中MRIの役割

近年では、画像診断装置も進化を遂げ、以前より高精度な多くの情報が得られるようになった。脳機能情報としては「functional MRI(f-MRI)」、「MR Spectroscopy(MRS)」が上げられ、悪性度判断に関してはPET画像、「Diffusion Tensor Imaging(DTI)」では腫瘍近傍の重要な神経線維の走行を擬似的に可視化することも可能になった。また、「0.4TMRI(APERTO)」は術中にDiffusion画像を撮影することが可能であり、術中の運動線維を可視化することも可能となった(図5)。これらの画像情報を利用することにより正確な手術プランニングが可能となった。しかしながら、術前に正確な脳の形態的・機能的・組織学的情報を得られたとしても、術中に脳が沈み込む「ブレインシフト」が起こることで、術前に得られた高精度な情報を最大限に生かすことができない。ブレインシフトによって術前に得られた画像情報と、実際に手術する際の腫瘍位置の解剖学的位置情報に“ズレ”が生じるからである。そこで開頭後に術中MRIを撮影することによりブレインシフトに対応した位置情報を取得し、正確な解剖学的位置情報の把握に努めている。また、脳機能情報に関しては、術中脳機能モニタリング・脳機能マッピングを行うことでリアルタイムに生体情報を得ることが可能となり、さらに「IEMAS」



図1：インテリジェント手術室

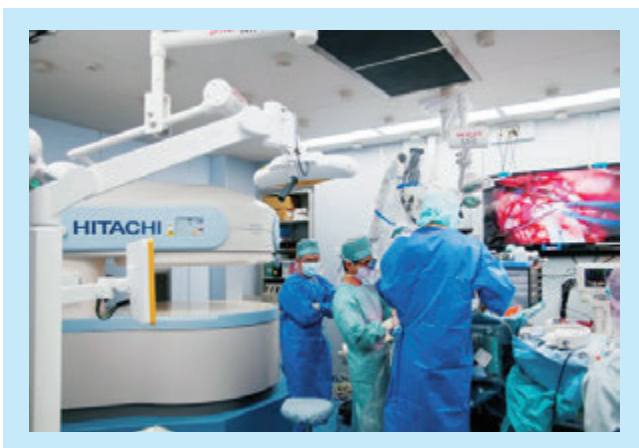


図2：画像・情報誘導下手術

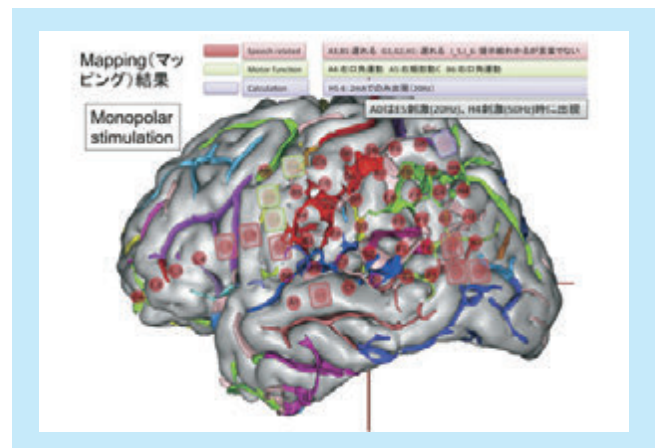


図3：脳機能マッピング

を用いることによって、術中に得られる情報をスタッフで正確に共有可能となった。また組織学的な情報に関しては、フローサイトメトリーを用いて細胞レベルでの情報を迅速に判断するシステムを開発している(図6)。これらの術前・術中に得られる形態的・機能的・組織学的情報は正確な位置情報と合わせて用いることにより情報としての価値を最大限発揮する。そのため、術中MRI画像を用いたナビゲーションシステムは形態的情報のみならず、術中で得られる「機能的・組織学的情報」も最大限に生かした手術を可能としている。これらのことから術中MRIは手術に必要な多岐にわたる情報を最大限に活用するための重要な武器だと考えられる。

また、低磁場オープンMRIを術中MRIとして手術室で活用する際の運用面における貢献度は非常に大きい。1つ目は5 Gaussエリアの極小範囲化である。手術室には種々の医療機器が導入され使用されるが、MRIが導入された手術室ではその磁石の影響による機器の故障や、MRIに機器が吸い寄せられる等のインシデントアクシデントを防ぐために、導入可能機器が著しく制限され、中にはMRI対応機器のみ持ち込みが許可される施設もある。しかしながら低磁場MRIを使用することで5 Gaussエリアは極力小さくでき、MRI対応以外の機器でも手術室に導入し共存させることが可能である。0.4T APERTOを有する東京女子医科大学インテリジェント手術室では一般の医療機器の導入に限らず、術中MRI近傍で手

技を行うことも可能である。2つ目はフレーム型コイルの使用である。撮影時に使用するコイルは頭部固定用のフレームと、撮影用コイルの二役をなすハイブリット型コイルである。下半分のコイルは患者頭部のピン固定を兼ねた設計仕様になっており、上半分のコイルは撮影時にワンタッチで取り付け運用されている。撮影時は清潔野保護用のドレープで覆うことで撮影環境を整えることができスムーズなMRI撮影が実施できる。東京女子医科大学インテリジェント手術室では執刀脳外科医が撮影前に手技を終えてから、撮影後再度手技を展開するまでわずか20分で実施可能である。3つ目はオープン型になっていることから、MRI撮影中に側面からでも患者を目視でき、万が一患者の様態が変化しても即座に状況を確認・対応できることが挙げられる。一方、高磁場MRIを有する施設における術中MRIは上述の運用方法と比較して運用面でのデメリットが顕著である。例として3Tのドーナツ型MRIを使用する施設では、手術室に入ると一歩目に5 Gaussラインがあり、MRI近接では450 Gaussになるため導入可能機器や、デバイスに対する制限が非常に大きく、実施できる手技も限られる。加えて、MR撮影準備のための機器搬入出作業、頭部専用のコイル固定手技、ドレープ処理、およびMRIボアへの患者を導入するためのベッド高さ調整等に多くの時間を要し、全体撮影処理に約1時間20分要する。更に、強磁場MRIを術中MRIとして活用するためには広域の作業スペースを確保するか、手術室とMR室を2つに分割し、撮影時にMRIまたは患者を移動して撮影しなければならず、この点からも低磁場MRIを使用することのメリットは大きい。



図4：戦略統括デスク

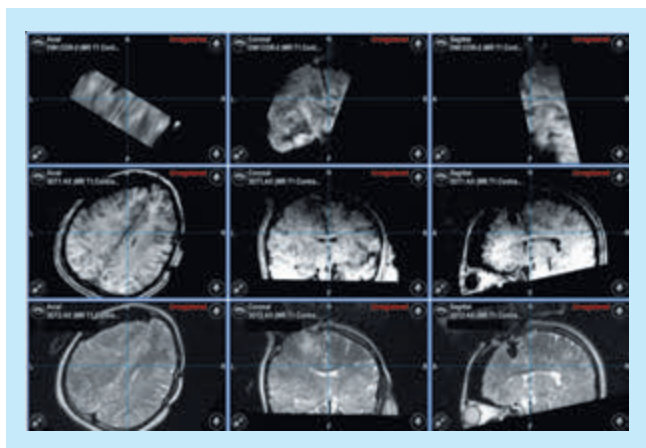


図5：術中Diffusion画像と術中MRIのFusion画像

4. インテリオペと意思決定支援システム

東京女子医科大学インテリジェント手術室では、手術の流れを可能な限り妨げることなく最適化された手術環境を構築するために、常に工学・IT技術を駆使し細部までさまざまに工夫を凝らしたデバイスやシステムの実現を追求し、即時的なプロトタイプの開発から実践応用へ野心的に取り組んでいる。



図6：DNA量解析専用フローサイトメータ：FCM-2011

その1つが「IEMAS」と呼ばれるモニタリング装置である。東京女子医科大学で実施される悪性脳腫瘍の症例の4分の1は「覚醒下手術」である。局所麻酔で意識を保ったまま行う覚醒下手術は、患者の状態をリアルタイムに確認できるというメリットがある。この覚醒下手術で大きな役割を担っているのが、IEMASである。IEMASのモニタには患者の顔表情、言語機能テスト用のイラスト、覚醒度を示す脳波数値、手術ナビゲーション映像、および執刀医が見ている顕微鏡映像が1つの映像ソースに時間的に同期かつ集約され手術室に設置されている大型のディスプレイに映し出される。例えば、異常陰影を示す部位が言語領域なのか否かを調べる場合、該当部位に微弱の電気刺激を与えながら、患者にイラストを見せてその絵が何であるか答えを促す。このとき患者の言葉が詰まる(電気刺激によって正常言語野の機能が妨げられた)と、その場所が言語野位置と判断される。運動野に対しては電気刺激を実施し、手足や舌の動きに異常が見られると、その場所が運動野であると判断される。言語野や運動野を傷つけてしまうと言語障害や運動麻痺を生じさせてしまうため、傷つけてはいけない場所を科学的に特定できるのである。また、覚醒下で施術することで手術中にも話ができるか否かを常に確認できるため、思いもかけない術後の言語障害が起こることが極めて少ない。こうした手術の一部始終はすべて可視化され手術チーム全員が共有し、患者の状態をモニタリングできるため積極的な摘出が可能になる。

IEMASの映像に加え、術中MRI、顕微鏡映像、手術ナビゲーション、手術室内外映像、術中病理を含む手術室で扱われるあらゆる手術室映像はリアルタイムに「戦略統括デスク」に送られる。戦略統括デスクはいわゆる手術ヘッドクォータとして、新幹線の通信指令室やNASAの管制センターと同様の役割を果たす。ここでは手術室の情報がすべて院内のイントラネットワークを介しストリーミングされる。戦略統括デスクではベテランの脳外科医が手術を客観的に把握し、外科操作のアドバイスを送るなど手術チームの意思決定をサポートする。

もう1つ先端工学外科学分野でIT技術を駆使し開発された術中意思決定支援ソフトウェアとして、「OPECT」がある(図7)。OPECTはMicrosoft社製Kinect^{®3}センサを用い、手術を進行する際に必要な画像情報を、執刀医が自ら手を動か

すことによって術野や患者の側にいながらにして「非接触」かつ「直感的」な手振り動作で操作できる非接触直感操作型インタフェースである。Kinectセンサに向かって手を上下左右に小さく動かすと、大画面に映し出された術中MRIや術中病理画像が切り替わり、意思決定のために重要な複数のキーフレームとなる画像情報を自在にコントロールすることができる。このようにOPECTを用いることでマウスやキーボードなどを触らず、かつ患者の側を離れることなく操作し参照、手術戦略立案ができるため、手術効率・品質の大幅な向上に貢献している。これまでに国内の脳神経外科、呼吸器外科、形成外科、歯科口腔外科等をはじめロシアの脳神経外科でも導入し全世界の使用実績は150症例を超え、その有用性が示されている。

そのほかにも手術顕微鏡の接眼レンズ近傍にスマートフォンを取り付けIEMASや手術ナビゲーションの映像をスマートフォンに無線伝送することで、ケーブルを介すことなく執刀医の元に映像を提供するコンテンツを開発し運用を開始した。執刀医が目だけを動かして見ることができる視野内に映像を配信できるため、多種情報を確認するために顕微鏡から目を外し姿勢を崩してほかのモニタを確認する動作のために外科操作の流れが絶たれるのを防ぐことができる。当該ソリューションは些細な技術応用ではあるが、既存の技術の組み合わせによりエンドユーザである医師が大いに称賛し手術品質の向上に貢献するソリューションである。

5. 「Smart Cyber Operating Theater(SCOT)」

2000年3月の術中MRIの導入で幕を開けたインテリジェント手術室は、ITの進化形であるスマート化技術も駆使し、次世代型手術室「Smart Cyber Operating Theater(SCOT)」へ進化している(図8)。

SCOTが目指すのは情報の収集・分析・蓄積により、効率的で安全な「未来予測手術システム」、すなわちサイバー空間を構成することにある。手術では、術前に周到な準備をしてもリスクを伴う予期せぬ出来事が起こりうる。しかしながらこのような予期せぬ出来事も、過去の経験から得られたデータを集積し分析することで、リスクをミニマム化することが



図7：OPECTシステム



図8：未来予測手術システム

可能である。インテリジェント手術室には過去1,400例を超える経験が生み出した財産とでも言うべき膨大なデータとノウハウが集積されている。これらのビッグデータの活用が次世代手術室の扉を開く鍵となる。サイバー空間に構築されたビッグデータに基づくデータベースサーバは現在行われている手術工程を分析し、工程ごとの達成目標を定める。同時に各工程で予測されるリスクを洗い出し、データベース内のデータと照会し対策を立てる。そして各工程の目標がクリアされたことを確認しながら次の工程に移る。こうした手術プロセスをビッグデータの解析を基に標準化する。さらにスマート化技術を搭載した手術室で用いるさまざまな医療機器やコンテンツをICT(情報通信技術)でお互いにリンクし“外科医の新しい眼と手と脳”を近未来型に進化させる。東京女子医科大学はこのようにして安全性、効率化を再優先し、リスクを最大限に回避する未来予測手術システム「SCOT」を実現しようとしており、3年後を目処にその第1弾を広島大学、信州大学に導入することで高品質治療を可能にする。

6. おわりに

東京女子医科大学「インテリジェント手術室」は2000年3月稼働以来、日々進化を遂げている。今後も医工融合の旗の下、より安全な治療を目指し進化を続けていく。

7. 謝辞

本稿を掲載するにあたりご協力いただきました東京女子医科大学 先端生命医科学研究所 先端工学外科学分野の Mikhail CHERNOV、生田聡子、前田真法、仁木千晴の各氏、および関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

※1 Apertoは株式会社日立メディコの登録商標です。

※2 IEMASは有限会社安久工機および株式会社アスター電機の登録商標です。

※3 KINECTは米国Microsoft Corporationの登録商標です。

参考文献

- 1) 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, Vol.39: 11-17, 2003.
- 2) Iseki H, et al.: Advanced computer-aided intraoperative technologies for information-guided surgical management of gliomas: Tokyo Women's Medical University experience. Minim Invasive Neurosurg. 2008; 51(5): 285-291.
- 3) Muragaki Y, et al.: Information-guided surgical management of gliomas using low-field-strength intraoperative MRI: Acta Neurochir Suppl. 2011; 109: 67-72. doi: 10.1007/978-3-211-99651-5_11.
- 4) Yoshimitsu K, et al.: Development and initial clinical testing of "OPECT": an innovative device for fully intangible control of the intraoperative image-displaying monitor by the surgeon. : Neurosurgery. 2014 Mar; 10 Suppl 1: 46-50; discussion 50.
- 5) Yoshimitsu K, et al.: Wireless modification of the intraoperative examination monitor for awake surgery. Neurol Med Chir (Tokyo). 2011; 51(6): 472-6.
- 6) Ozawa N, et al.: Shift of the pyramidal tract during resection of the intraaxial brain tumors estimated by intraoperative diffusion-weighted imaging. : Neurol Med Chir (Tokyo). 2009 Feb; 49(2): 51-6.
- 7) Shioyama T, et al.: Intraoperative flow cytometry analysis of glioma tissue for rapid determination of tumor presence and its histopathological grade: J Neurosurg 118: 1232-1238, 2013.