

術中MRIを軸とした情報誘導下精密手術をめざした インテリジェント手術室が歩んだ15年間

Fifteen-year History of the Intraoperative MRI-based Information-guided Surgeries
in the Intelligent Operating Theater of the Tokyo Women's Medical University

吉光喜太郎 Kitaro Yoshimitsu
丸山 隆志 Takashi Maruyama
岡本 淳 Jun Okamoto
正宗 賢 Ken Masamune

村垣 善浩 Yoshihiro Muragaki
田村 学 Manabu Tamura
生田 聡子 Soko Ikuta
伊関 洋 Hiroshi Iseki

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

今回、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 村垣 善浩 教授にご監修いただき、MRI装置を中心としたインテリジェント手術室から、最新のSCOT(Smart Cyber Operating Theater)開発まで、背景から将来展望を3回に分けて連載していただくこととなりました。

第一回である今号はインテリジェント手術室稼働開始から現在に至るまでについてです。

MEDIX編集事務局

東京女子医科大学インテリジェント手術室は2000年3月の稼働開始以来、2016年7月末日時点での症例数は1,623例に到達した。インテリジェント手術室は術中MRIを軸とした画像情報に加え、機能的・組織学的情報も最大限に生かした手術を可能とする高機能手術パッケージとして、今なお医工融合の実践場として臨床現場を共有し日々進化している。本稿では術中MRIを元に手術支援を行う手術ナビゲーションや、脳腫瘍摘出の最大化を目的に工学技術を駆使して開発導入され臨床成績の向上に貢献している多種多様な手術支援システムについて述べ、今日のスマート治療室開発プロジェクトに結びつくまで、15年間稼働し続けているインテリジェント手術室の技術を紐解く。

Intelligent Operating Theater of the Tokyo Women's Medical University experienced 1,623 brain tumor resections since March 2000 till July 2016. The Intelligent Operating Theater has been continuing progress through both engineering based technological upgrading and improvement of the collaborative skills of the staff members, including medical doctors, engineers, researchers, industrial Ph.D. students, and companies' representatives. The maximum resection of brain tumors is performed by skilled expert surgeons and the integrated use of the variable intraoperative information for guidance of surgery. This paper introduces the current advanced techno-solutions in the intelligent operating theater looking back its fifteen-year of the history.

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

1. はじめに

脳腫瘍摘出手術における術後成績を向上させるためには、可能な限りの最大摘出が理想とされているが、悪性脳腫瘍は浸潤型病変のため正常な脳組織との境界が不鮮明である。そのため過度な摘出は正常組織を損傷し、術後合併症を生じさせるおそれがある。執刀脳外科医は自身の経験と技術を頼り

に施術せざるを得ず、脳腫瘍摘出手術は外科医の暗黙知による職人芸と言われていた。そこで伊関らは、脳腫瘍の高精度な最大摘出を実現するために、客観的に再現性のある情報や可視化された画像情報に基づいた情報誘導下手術を提案し、外科医の新しい「目」と「手」と「脳」を実現する場として

「インテリジェント手術室」(図1)を2000年に構築した¹⁾。インテリジェント手術室は手術室内にMRI(磁気共鳴画像)装置が設置されていることをその最大の特徴としている。2000年3月の稼働以来、2016年7月末日時点での症例数は1,623例を数え、医工融合の元で臨床現場との情報交換を重ね改良を行い、さまざまな手術支援システムを導入し臨床成績の大いなる向上に貢献している²⁾。本稿では今日のスマート治療室開発プロジェクトに結びつくまで、15年間稼働し続けているインテリジェント手術室の技術を紐解く。

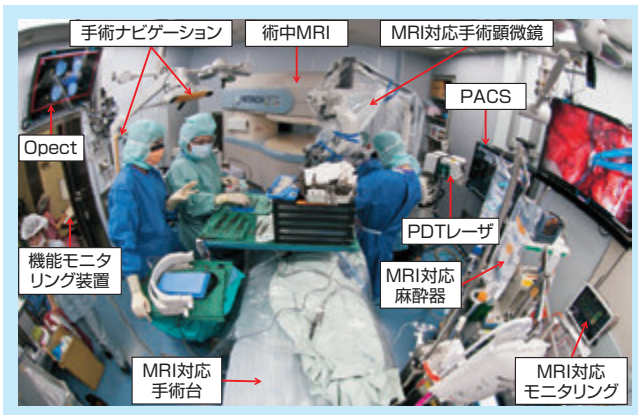


図1：インテリジェント手術室と手術支援システム

2. インテリジェント手術室と術中MRI

インテリジェント手術室は0.4T オープンMRI(APERTO[®]*1 Lucent、株式会社日立製作所製)をその核としている。手術中に運用することから術中MRIという呼称で広く知られている(図2)³⁾。術中MRIが果たす役割は大きく2つある。1つ目はブレインシフトの可視化である。ブレインシフトとは脳外科手術の際に開頭すると脊髄液が失われることで脳が重力に伴い沈み込むことである⁴⁾。これにより術前に撮影した画像と、実際に手術する病変部の解剖学的位置情報に“ズレ”が生じてしまい、高精度な画像情報を最大限に摘出術に生かすことができない。そこで開頭後に術中MRIを撮影することでブレインシフト後の画像を取得し、正確な解剖学的位置情報の把握を可能としている。2つ目は摘出の判断である。開頭後の1回目の術中MRI後、通常3、4時間かけて腫瘍を摘出した後、おおよそ摘出したと判断した時点で2回目の術中MRIを



図2：術中MRI撮影中の様子

0.4T オープンMRI APERTO LucentでT1、T2合わせて200枚を撮影し、約20分で再度摘出のセッティングに戻ってくる。

施行する。この時点で残存腫瘍病変がある場合にはさらに摘出を進め最大摘出をめざすことができる。摘出を進めた場合は最終的な術中MRIを施行し、執刀チームが最大摘出の完遂を確認し手術を終える。冒頭にも述べたとおり悪性脳腫瘍はその浸潤特性から正常組織との境界を術中に顕微鏡下で判断するのは非常に困難である。しかしながら術中MRIを施行することで即時的に残存腫瘍を可視化し最大摘出を遂行することができるため、術中MRIは術後成績の向上に大いに貢献していると考えられる。

低磁場のオープンMRIは術中MRIとしての運用に最も適していると言える。なぜなら低磁場MRIは5ガウスエリアの極小範囲化の恩恵を受けMRI対応以外の機器でも手術室に導入し共存させMRI近傍で手技を行えるのに対し高磁場MRIでは近傍に介在できる機器が著しく制限されるため、MRI単独の部屋やエリアが設営されるのが一般的であり、術中MRI施行時には細心の注意の元で機器の搬入出作業を行い、MRIもしくは手術台を移動して撮影する。このため移動も大がかりとなり時間を要する。さらにオープン型はその空間解放的なボア構造により、ガントリ導入時のセッティングが制限されること無く、撮影中も随時患者の様子を目視観察できる。一方ドーナツ型では、狭いボア空間内に導入するためのドレープ処理、ベッド高調整等施術時セッティングからの変更が多く、調整・確認を繰り返しながら導入するためセッティングに時間を要する。当然ながら患者の様子を観察するのは困難である。以上により、インテリジェント手術室では術中MRIを約20分で施行できるが、高磁場MRIを保有する施設ではゆうに1時間を超えてくる。当手術室の成績は5年生存率：インテリジェント手術室 Grade II 91.7%、Grade III 74.5%、Grade IV 18.8%、日本脳腫瘍統計 Grade II 68.3%、Grade III 26.7%、Grade IV 7.0%である²⁾。

3. 術中MRIを基盤とした手術支援アプリケーション

3.1 手術ナビゲーション

手術ナビゲーションは術中MRIによる最新画像をベースに執刀脳外科医が外科操作を施行する三次元的な位置情報を三面図上でリアルタイムに提供するシステムである(図3(a))⁵⁾。東京女子医科大学インテリジェント手術室では手術ナビゲー

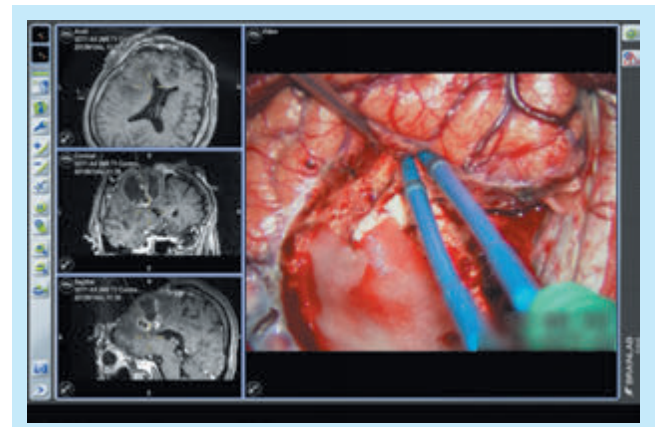


図3(a)：手術ナビゲーションは術中MRI上における外科操作位置を三次元的にリアルタイムで示す。

ション(Curve、Brainlab AG製)による手術計画や術野の画像化がより最適化され、安全で高精度な治療を実現できている。APERTO Lucentは術中にDiffusion画像を撮影できるため、術中MRIとのフュージョン画像を構成することで術中の運動線維を可視化し、より正確な手術プランニングが可能となった。加えて、脳機能情報に関してはFunctional MRI (f-MRI)、MR Spectroscopy (MRS)、悪性度判断に関してはPET画像、神経線維の走行に関してはDiffusion Tensor Imaging (DTI)を取得することで腫瘍近傍の重要な情報を擬似的に可視化しナビゲーションフュージョンし腫瘍摘出の最大化につなげている(図3(b))⁶⁾。

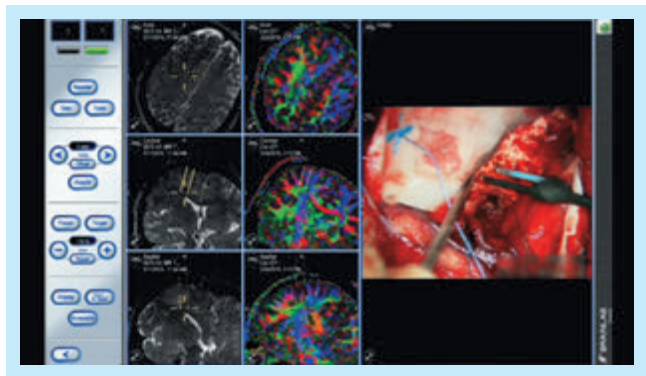


図3(b)：手術ナビゲーションにおけるPET画像とのフュージョン画像

3.2 Opect

IT技術を駆使し開発された術中意思決定支援用ジェスチャーインタフェースがOpect(ニチイ学館製)である⁷⁾。Opectは術中MRIをはじめ、術前検査画像、術前画像を元にした解析画像、術中病理画像などをセンサ(Kinect^{®2}、Microsoft Corporation製)に対し執刀医が自身の小さな手振り動作だけで、術野にしながら「非接触」かつ「直観的」に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操作できるジェスチャーインタフェースである(図4)。執刀脳外科医はマウスやキーボードなどに触らず操作し画像を参照、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

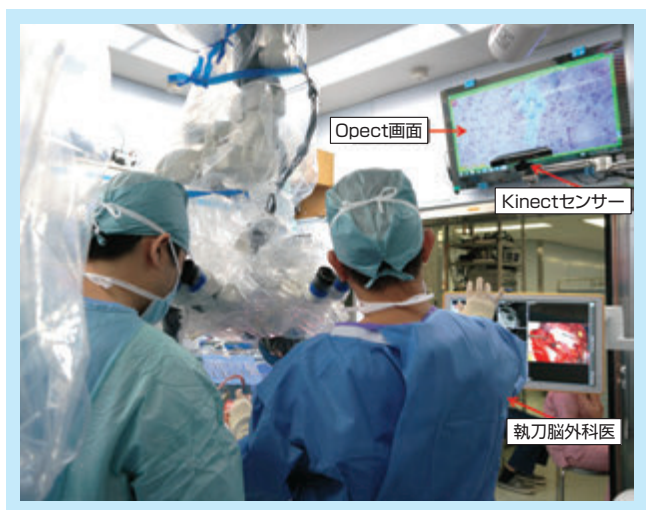


図4：ジェスチャーインタフェースOpect

意思決定の局面で術中病理画像を参照する執刀脳外科医。術野を離れることなく自身の手振り動作で画像操作できる。

する。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、ロシアでも導入され全世界の使用実績は250症例を超え、その有用性が示されている。

3.3 手術顕微鏡用サブモニタ

手術顕微鏡の接眼レンズユニット上部に8インチのタブレット端末を取り付け、シーンに合わせて手術ナビゲーション等の映像をタブレット端末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ソリューションを開発し運用を開始した(図5)⁸⁾。当該システムは執刀医が視線を僅かにずらすだけで視野内に多次元映像情報を配信でき、情報確認のために執刀医が顕微鏡から目をそらして姿勢を崩して確認することを防ぐ。本確認動作のために外科操作の流れが絶たれるのは手術リズムが乱れるため大きなストレスであったが既存の技術の組み合わせによりエンドユーザーである医師に大いに称賛され手術品質の向上に貢献するソリューションである。

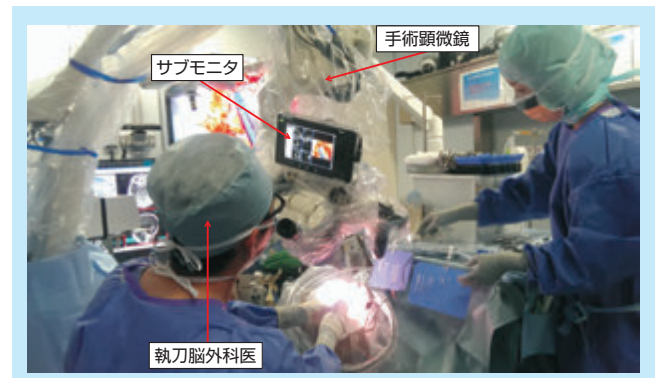


図5：手術顕微鏡用サブモニタ

執刀医は顕微鏡接眼レンズから僅かに視線をずらし、楽な姿勢で手術ナビゲーションの画面を参照できる。

4. インテリジェント手術室における医工融合

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無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。

4.1 光線力学的療法(Photodynamic therapy : PDT)

東京女子医科大学では、2007年より悪性脳腫瘍患者に対する光線力学的療法(以下PDT)の医師主導治験を実施した(図6)⁹⁾。PDTは光感受性物質(タラポルフィンナトリウム)が

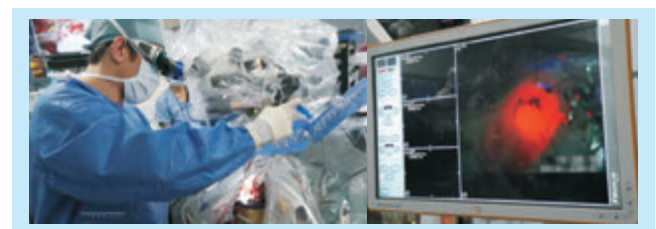


図6：PDレーザー照射中の手術ナビゲーション画面

執刀医は保護用眼鏡を装着し照射する。1度の照射で10円玉大の領域に対し照射でき、照射には3分要する。

集積した腫瘍細胞に対し、半導体レーザー装置(波長664nm)を照射することで活性酸素を発生させ、局所的に殺細胞効果を生じさせる治療法である。薬事承認されたレーザー装置(PDレーザー BT、パナソニックヘルスケア株式会社製)は、レーザープローブを焦点位置で固定するために三鷹光器株式会社製手術顕微鏡に内蔵され使用される¹⁰⁾。本治療法に関し、薬事承認取得(2013年9月20日)、保険収載(2014年1月)を経て、2014年1月30日に本学において臨床第1例を実施し、2016年7月末時点までに90症例を越えている。

4.2 術中異種多種情報を統合するIEMAS

インテリジェント手術室で実施される症例数の約1/4は覚醒下手術であり、2016年7月末時点までに376症例実施している¹¹⁾¹²⁾。局所麻酔で意識を保ちながらの覚醒下手術は、言語機能や運動機能等の脳機能をリアルタイムに確認できるというメリットがある。Intraoperative Examination Monitor for Awake Surgery : IEMAS^{※3)}は患者の顔、言語機能タスク用のイラスト、覚醒度を示す脳波数値、手術ナビゲーション映像、および手術顕微鏡映像を1つの映像ソースに集約表示する(図7)¹³⁾。当該映像は同時に手術室に設置されている大型のディスプレイに映し出すことで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。アナログ、デジタル、さらにはVGAからHDまでありとあらゆる映像ソースを全て時間同期させ、かつ違和感のないタイムラグでユーザに提供できるのはIEMASの最大の機能的特徴と言える。

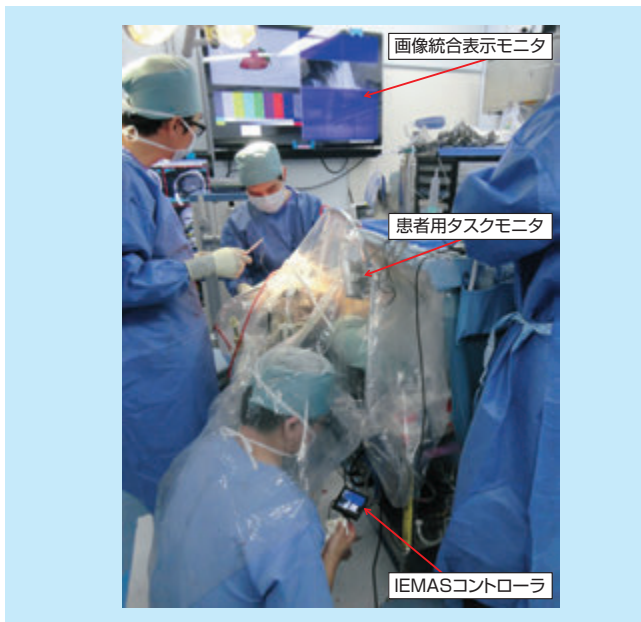


図7：覚醒下手術時にIEMASを使用する脳外科医

手元のリモコンで患者の目の前に設置されたモニタに映し出すイラストを操作する。リモコンの小型モニタには患者の顔や表情、手術ナビゲーション映像、手術顕微鏡映像などが集約的に表示される。

4.3 術中迅速病理診断に用いる高DNA量測定装置

冒頭で述べたように、悪性脳腫瘍はその浸潤特性がゆえに正常脳組織と腫瘍の境界が不明瞭である。そのため、摘出時

は前述の手術ナビゲーション等を用いて画像的に境界域を特定する手法をとるが、加えて細胞レベルで境界領域を同定するために、病理医が術中迅速病理診断を実施している¹⁴⁾。診断には約20分要するが、機械的に術中迅速病理診断を可能にする高DNA量測定装置(FCM-2200セルタック^{※4)} PEAK、日本光電工業株式会社製)を用いることで細胞の増殖時に増加するDNA量を10分以内に迅速かつ定量的に測定できる(図8)。当該装置では摘出した2mm角程度の細胞組織をDNA染色試薬の容器に入れ、細胞単離キットを装置に装着し自動測定を行う。細胞内に含まれるDNA量や、DNA量に応じた細胞分布を解析し、増殖細胞の存在比率を定量的に算出できることから、病理医の診断と併用することで摘出判断の意思決定に役立っている。



図8：高DNA量測定装置

手術室の入口付近に設置されており、術中に組織を採取し次第速やかに測定に移行できる。(日本光電工業株式会社HP：<http://www.nihonkohden.co.jp/iryo/products/hematology/fcm2200.html>)

4.4 病理医の顕微鏡映像を手術室で共有するSplashtop

前述の術中迅速病理診断において病理医が観察する顕微鏡視野を手術室の大型モニタで共有可能にしたのが、顕微鏡映像シェアリングアプリケーション(Splashtop^{※5)}、株式会社NTTドコモ)である。本アプリケーションは病理医が使用している顕微鏡が駆動するプラットフォームと、手術室に設置したタブレット端末(iPad^{※6)} air、アップルインコーポレイテッド製)を院内ネットワークで結び、病理医と執刀医の判断材料となる顕微鏡映像を遅滞なく共有できることがその最大の特徴である。従来は病理医が凍結切片上の特徴的なポイントを選び出して撮影したキーフレーム画像を、ネットワークドライブにアップロードし手術室で画像共有する作業を必要としていたが、本システムを用いることで凍結切片全般を映像として即時的に共有することができるため、迅速な意思決定が可能となる。

4.5 手術情報統合ヘッドクォータとしての手術戦略デスク

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、IEMAS映像を含む手術室の情報は院内ネットワークを通じて手術戦略デスクで共有される(図9)。手術戦略デスクは手術ヘッドクォータとして、新幹線の通信指令室や、NASA^{※7)}の管制センターと同様の役割を果たす¹⁵⁾。手術戦略デスクではベテラン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。また術前に得られた高磁場MRI、PET検査の解析結果を用いて脳機能マッピングを行い、手術中にどのような情報が有用であるかを判断するなど手術現場とともに意思決定を行っている。

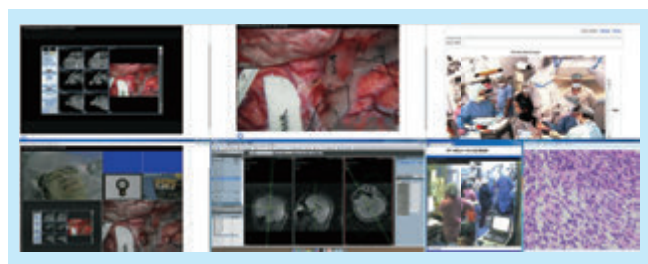


図9：手術戦略デスク

手術室から直線距離にして約200mの先端工学外科学分野に手術室からのあらゆる情報を院内ネットワークを介してストリーミングする。ベテラン脳外科医はこれらの情報を総合的に判断し、現場の執刀脳外科医とディスカッションを行い最終的に意思決定をする。

5. Smart Cyber Operating Theater : SCOTへの展開

SCOT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」をめざしている(図10)¹⁶⁾。手術では、術前に周知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。このような予期せぬ出来事も過去の経験に基づくビッグデータを分析することでリスクを最小化できると考えられる。未来予測手術は手術工程をリアルタイムで分析し工程ごとの達成目標を定め、同時に各工程で予測されるリスクを洗い出し、サーバ内のデータと照会し手術戦略を立てる。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工程に遷移する。加えてSCOTでは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アプリケーションを互いにリンクさせることで「外科医の新しい眼と手と頭脳」を近未来型に進化させる。2000年3月に術中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進化を続けている。



図10：東京女子医科大学先端生命医科学研究所に構築されたスマート治療室最終モデルのコンセプトルーム

さまざまなハイテク手術支援システムが動き、おのおのがネットワークを介し情報連携を取り合っている様子を見ることができる。

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、術中MRIによる画像情報に加え、機能的・組織学的情報も最大限に生かした手術を可能とする高機能手術パッケージとして、今なお医工融合の実践場として日々進化を遂げている。本稿で取り上げたコンテンツのほかにも、先端工学外科学分野の大学院生が2000年以来インテリジェント手術室をフィールドとした研究活動に取り組んでおり、多くのテーマが症例にてその有用性を示し患者の生命予後に貢献している。以上のようにインテリジェント手術室には、2000年3月稼働以来15年の時を経て、1,600症例を越える経験が生み出した膨大なデータとノウハウが財産として集積されている。これらビッグデータの活用はスマート治療室実現の扉を開く鍵となる。

7. 謝辞

本稿を掲載するにあたり、インテリジェント手術室とともに作り上げ、日々の研究・開発活動を大いにご指導いただいている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、南部恭二郎、Mikhail Chernov、小西良幸、前田真法、堀瀬友貴、仁木千晴、岸本真治、泉美喜雄の各氏、先端工学外科学分野大学院生の皆様、株式会社日立製作所をはじめとする関係企業各社の皆様に深く感謝申し上げます。

- ※1 APERTOおよびAPERTO Lucentは株式会社日立製作所の登録商標です。
- ※2 KINECTはMicrosoft Corporationの登録商標です。
- ※3 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。
- ※4 セルタックは日本光電工業株式会社の登録商標です。
- ※5 SplashtopはDeviceVM, Inc.の登録商標です。
- ※6 iPadおよびiPad Airはアップルインコーポレイテッドの登録商標です。
- ※7 NASAはナショナル エアロノティクス アンド スペース アドミニストレーションの略称および登録商標です。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Jolesz F, et al. : MRI-Guided Surgery. *Third International Congress on New Technology and Advanced Techniques in Surgery.* Abstract XVI. June 1995.
- 4) Nimsky C, et al. : Integration of functional magnetic resonance imaging supported by magnetoencephalog-

- raphy in functional neuronavigation. *Neurosurgery* 1999 ; 44(6) : 1249-55 ; discussion 1255-6.
- 5) 伊関 洋, ほか : 脳神経外科領域におけるハイテク・低侵襲手術の現状と医工学的支援. *医工学治療* Vol.15, No.1, 43-48, 2003.
 - 6) 小西良幸, ほか : 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. *MEDIX* Vol.62.
 - 7) 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, pp.46-50.
 - 8) 平野朝士, ほか : “脳外科手術における顕微鏡用サブモニタ機器”, in 第24回脳神経外科手術と機器学会, PP1-6, 152. 大阪, 2015.
 - 9) Muragaki Y, et al. : Phase II study on intraoperative photodynamic therapy with talaporfin sodium and semiconductor laser in patients with malignant brain tumors, *J Neurosurg* Vol.119, 845-852, 2013.
 - 10) 新田雅之, ほか : 光でがん細胞をたたく－光線力学療法 (PDT)を用いた悪性脳腫瘍の治療－. *Isotope News*, 2013年3月号, 13-16, No.707.
 - 11) Tamura M, et al. : Strategy of Surgical Resection for Glioma Based on Intraoperative Functional Mapping and Monitoring. *Neurologia medico-chirurgica*, 2015 ; 55(5) : 383-98.
 - 12) 田村 学, ほか : 「覚醒下手術ガイドライン」の解説. *脳神経外科速報* vol.25, no.12, 1292-1299, 2015.
 - 13) Yoshimitsu K, et al. : Wireless modification of the intraoperative examination monitor for awake surgery. *Neurologia medico-chirurgica*, 2011 ; 51(6) : 472-6.
 - 14) 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.
 - 15) 伊関 洋 : 医療情報の可視化と手術戦略－ME連携ラボ－ 第1回 耳鼻咽喉科ナビゲーション研究会, 耳鼻咽喉科展望, 第43巻第5号, 90-92, 2000.
 - 16) Okamoto J, et al. : Development of a prototype model of “Hyper SCOT (Smart Cyber Operating Theater)”, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* Vol.11, Supplement 1, 163-164, 2016.