
原 著

術前 3 次元仮想シミュレーションと
術中顕微鏡融合ナビゲーションシステムを統合した
大型頭蓋底腫瘍に対する手術支援法の確立

本 橋 邦 夫

新潟大学脳研究所脳神経外科学分野

(主任：藤井幸彦教授)

Establishment of a Surgical Assistant Method for Large Skull-base Tumors
by Integration of Presurgical 3-D Virtual Simulation
and Intraoperative Microscope-coregistered Neuronavigation System

Kunio MOTOHASHI, M.D.

Department of Neurosurgery, Brain Research Institute, Niigata University, Niigata, Japan.

(Director: Prof. Yukihiko Fujii)

要 旨

【はじめに】大型の頭蓋底髄膜腫の摘出術は難易度が高く、複雑な解剖構造の理解だけでなく適切な手術戦略の立案が必要とされる。我々は独自の3-D手術シミュレーション (interactive virtual simulation: IVS) 法により作成した手術計画を手術顕微鏡と連動させたニューロナビゲーションシステムに融合し、実際の摘出術の手術支援法として確立したので報告する。

【材料と方法】大型の頭蓋底髄膜腫 13 症例に対し、放射線画像データから作成した 3-D CG 画像をもとに IVS 法を用いて術前シミュレーションを行った。まず骨開窓や脳の牽引により腫瘍への到達路を作成、次いでこの到達路内での視点の移動による見え方の変化や周辺構造との関係などから、大きな腫瘍の摘出可能域を順次コンパートメント化して行った。IVS で作成したデータは、手術室でのニューロナビゲーションシステムのデータに融合し、このシステムと手術顕微鏡を連動させることで、実際の術野を 3-D CG 画像やスライス画像の連動により確認しながら腫瘍摘出を遂行した。

【結果】全症例において 3-D CG データの作成と IVS 法による術前シミュレーションが有効に行われた。腫瘍は 3～6 個のコンパートメントに分割された。手術中はナビゲーション画面

Reprint requests to: Kunio MOTOHASHI
Department of Neurosurgery,
Brain Research Institute, Niigata University,
1-757 Asahimachi-dori, Chuo-Ku,
Niigata 951-8585, Japan.

別刷請求先：〒 951-8585 新潟市中央区旭町通 1-757
新潟大学脳研究所脳神経外科学分野

本 橋 邦 夫

上に3-D CG画像、連動させた顕微鏡手術画像、および各種軸断面画像を表出し、腫瘍摘出を進めながら3-D CG画像の腫瘍も削除し、残存部を確認しながら手術を施行した。予測していなかった大量の出血があった2症例を除いて、11症例の摘出術は手術計画と一致した。

【考察と結論】大型頭蓋底髄膜腫をコンパートメント化し摘出する手術計画を、我々独自のIVS法から顕微鏡連動ナビゲーションシステムへの融合を通して視覚的に遂行することを可能とし、「IVS誘導手術」と呼べる高難度頭蓋底腫瘍手術に対する新たな手術支援法を確立することができた。

キーワード：頭蓋底腫瘍、3次元画像、術前シミュレーション、ニューロナビゲーション、摘出手術

緒 言

頭蓋底部に発生する腫瘍性病変の摘出術は、脳神経外科手術の中でも難易度が高いものの一つである。とりわけ大型で深部に存在する髄膜腫の場合、頭蓋底部の骨削除を行い、複雑な構造の硬膜を展開し、安全な範囲で脳を牽引することで、腫瘍への到達路を確保するよう努めるが、その三次元解剖の把握は熟練の脳神経外科医でも難しく、症例個々においても解剖学的な個人差が大きいため、適切な術野の作成は個々の手術において問題となる。近年は術前CTやMRIデータの3次元画像解析により、頭蓋内の腫瘍性病変やそれを取り囲む微細な血管や脳神経などの微小解剖を可視化できるようになり¹⁾²⁾、我々の施設では早期から様々な脳神経外科手術の術前評価法として応用し、その取り組みについて報告してきた³⁾⁻⁵⁾。その中で3-D computer graphics (3-D CG) データを用いたinteractive virtual simulation (IVS) 法は我々が術前シミュレーション手法として独自に開発したものであり⁶⁾⁷⁾、とりわけ頭蓋底部腫瘍の手術で適切なアプローチ方法を決定する点における有用性について報告した⁸⁾。このような発展により、頭蓋底部腫瘍への手術アプローチに関しては確実性、安全性が飛躍的に向上してきたが、深部の大きな腫瘍性病変では、それでもやはり開口は狭く、脳神経や主幹動脈が腫瘍を取り巻いており、腫瘍の全貌を確認したり一塊に摘出したりすることはできない。したがってこのような腫瘍性病変に関しては、術前に適切な摘出計画を組み立てておき、術中にそれをいかに的確に再現して

ゆくかが重要となる。

本研究では、大型で頭蓋底深部に局在する髄膜腫の摘出術において、術前IVS法により実際の手術で想定される摘出の手順の中で切除域を一つずつコンパートメント化してゆくことで大きな腫瘍を分割して理解し、手術中にはこれらの情報をニューロナビゲーションシステムに投影し、ナビゲーションシステムと手術顕微鏡の連動も確立することで、IVS法にて作成された手術計画をもとに実際の摘出手術を進める「IVS誘導手術」の確立を試みたので報告する。

方 法

1. 個々の患者の3-D CGモデルの作成

我々が開発したIVS法について記す。まず画像解析ソフトウェアZed-View® (LEXI, Inc.) にて、MRI, CT, DSAなどの異なる画像機器にて撮像されたDICOM形式の画像データの中で、腫瘍、脳、脳神経、血管、頭蓋骨、腫瘍などの構造物を最適なデータからそれぞれ抽出する。抽出された各構造データをそれぞれ3次元ポリゴンデータに変換し、座標軸を統一し、3次元情報を併せ持つStandard Triangulated Language (STL) 形式にて出力する。これら全てのデータをComputer-assistant designing (CAD) ソフトウェア (Freeform Modeling®, 3D Systems, Inc.) 上で統合作業を行い、各構造物を色分けして表示し、症例個々の3-D CGモデルを完成させる。3-D CGモデルは自由に回転させたり、構造物ごとに透過させたり、外したりしながら対象部位の解剖学的な関係の観察を行う。

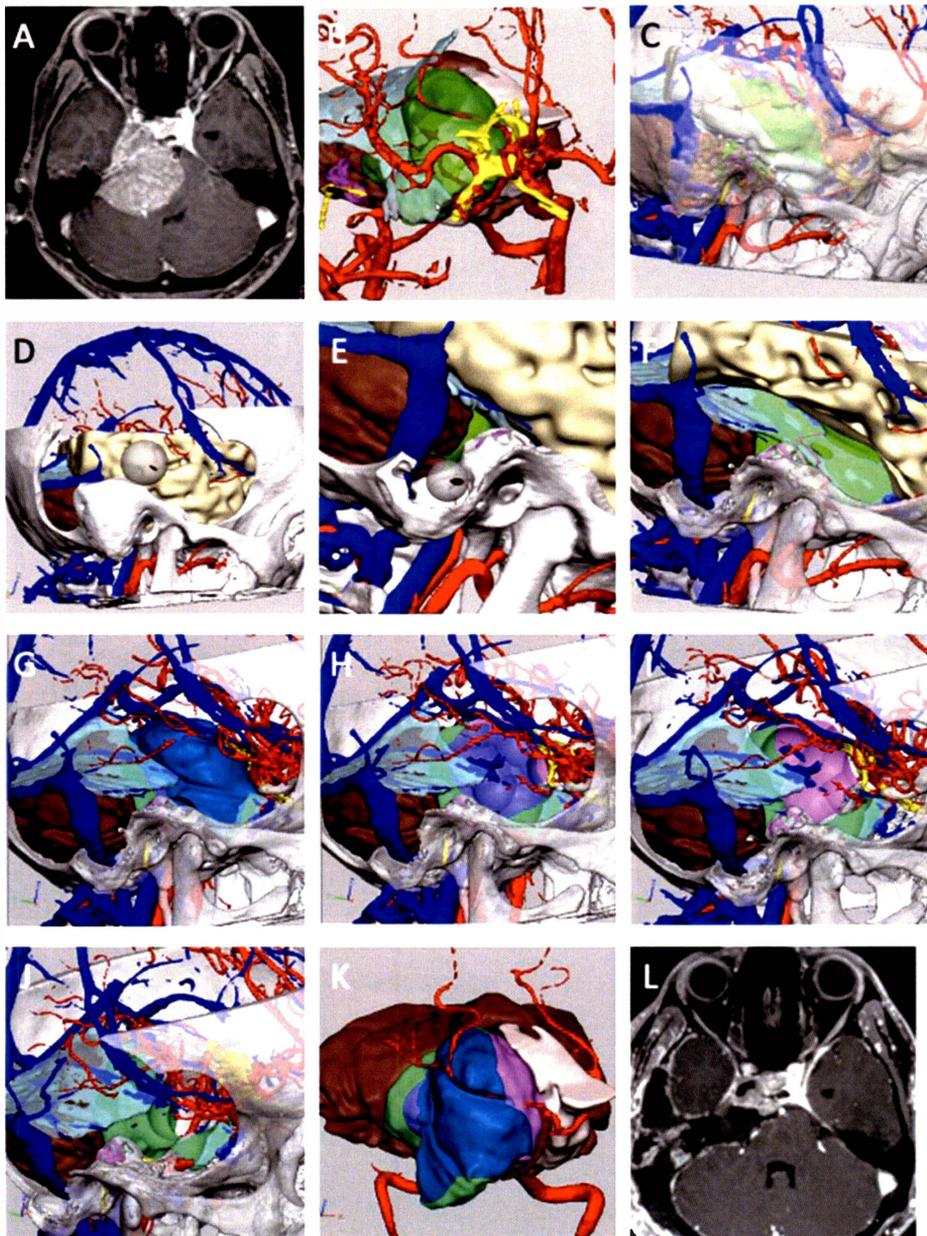


図1 大型の頭蓋底部髄膜腫に対するIVSの手順。A：術前MRIにて頭蓋底部に大型の髄膜腫を認める。B, C：3-D CGモデルを作成，神経や血管との位置関係の把握(B)や，頭蓋骨を透過して腫瘍(緑色)の位置の理解(C)に役立つ。D-F：開頭(D)および頭蓋底部の骨削除(E)，脳の牽引(F)により，腫瘍への到達路を確認する。G-J：腫瘍のコンパートメント化による摘出計画。最も表面かつ腫瘍の発生母地を青に塗り(G)除去，内部の最も安全な部分を紫色に塗り(H)除去，方向を変えて脳幹・脳神経・脳底動脈に付着する可能性のある部分をピンクに塗り(I)除去，最後にまた視点を変え残った緑色の部位(J)は問題なく引き抜けると予想した。K：腫瘍は4つのコンパートメントに分離された。L：術後MRIで計画通りの摘出が行われたことを確認される。

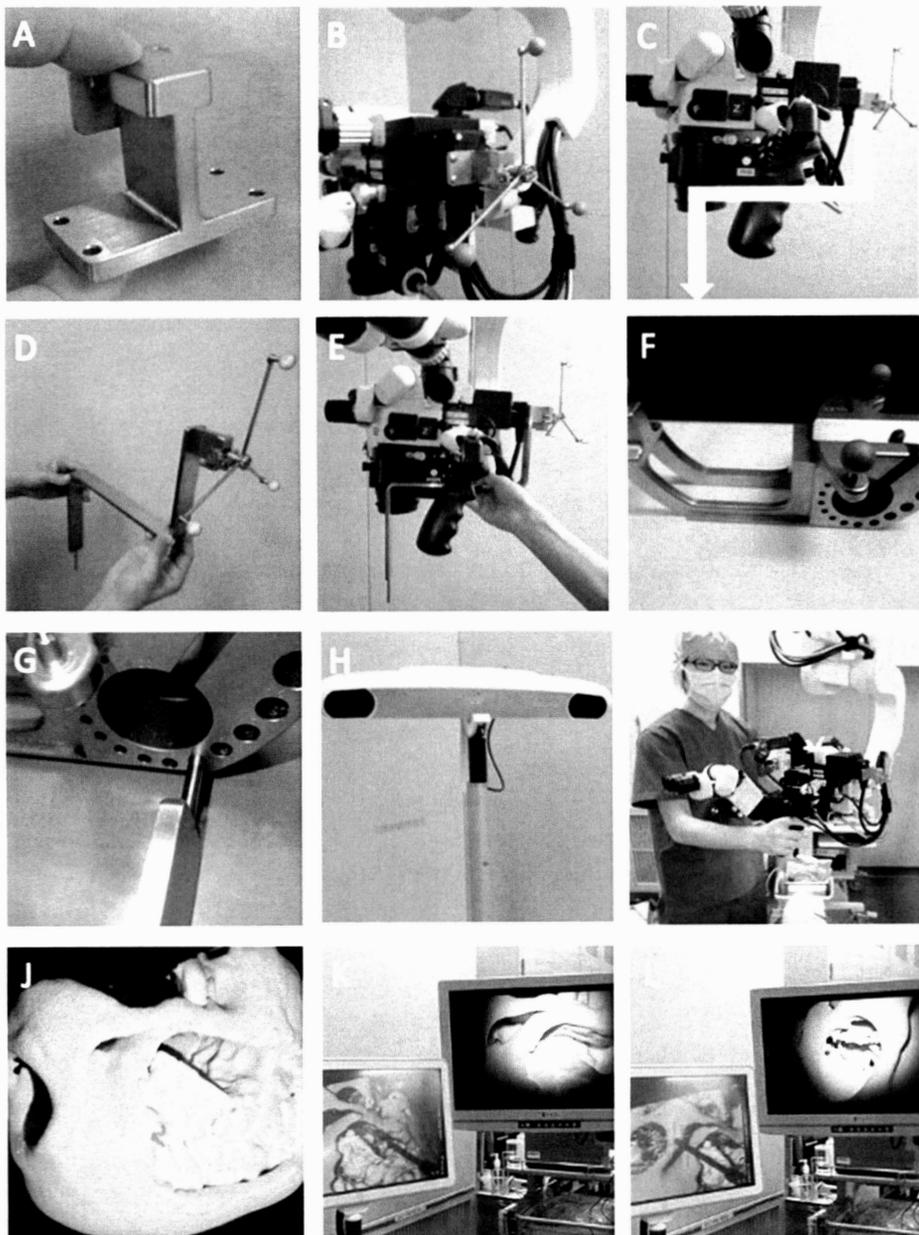


図2 ニューロナビゲーションと手術顕微鏡の連動化. A, B: 自作した金属製のアタッチメント (A) でナビゲーション用の反射マーカを手術顕微鏡の背面に取り付けた (B). C-E: 手術顕微鏡の視軸と反射マーカ的位置補正 (C) を必要とし, 補正用の金属アダプター (D) を自作し, レジストレーション用に合わせた (E). F-H: ナビゲーションシステムのレジストレーション用デバイス (F) に金属アダプターの先端を適用し (G), 赤外線カメラ (H) でレジストレーションを施行. I, J: 手術顕微鏡での視野 (I) とナビゲーション画面が連動したことを, 3-D CGとそれを元に作成した石膏モデル (J) で確認した. K: 手術顕微鏡モニター (右) とナビゲーション画面 (左) の中心が一致している. L: 手術顕微鏡が動くとき, ナビゲーション上の3-D CG画像が連動する.

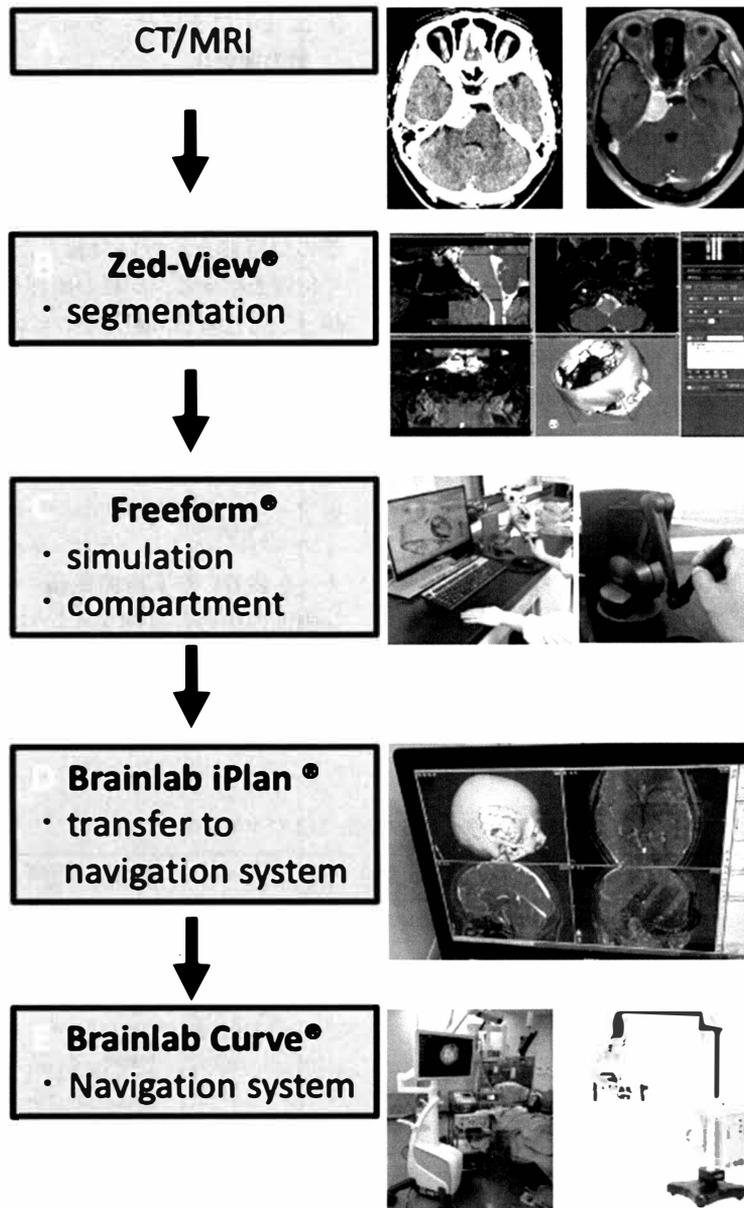


図3 術前シミュレーションから術中活用までの流れ。A：CT、MRI などから得た画像を Zed-View® に移行する。B：Zed-View® で腫瘍、脳、脳神経、血管、頭蓋骨などの構造物を個々の 3-D CG モデルに変換する。C：作成した個々のデータを Freeform Modeling® で統合させる。特殊な 3-D 触感デバイスを介して、3-D CG モデルの削除や牽引を行い、手術のシミュレーションを行う。腫瘍をコンパートメント化し、IVS 法にて加工したデータを STL 形式で再出力する。D：ナビゲーション用のソフトウェア（Brainlab iPlan®）に STL 形式のデータを登録させる。E：登録したシミュレーションデータはナビゲーション本体（Brainlab Curve®）のディスプレイに表示可能であり、連動化させた手術顕微鏡の動きに合わせて 3-D CG 画像も動く。

2. IVSによる大型深部頭蓋底腫瘍に対するシミュレーション

CADソフトウェアによるIVSでは、作成された3-D CGデータを構造ごとに自由に变形することができ、頭蓋骨の削除、脳の牽引、腫瘍の摘出など、手術操作を模した操作が可能である。この操作には特殊な3-D触感デバイスを介して、データの3次元感覚を触知しながら実際の手術感覚に近い操作を実現している。大型深部の頭蓋底部髄膜腫に対するIVSの手順を以下に示す(図1)。

- 1) 3-D CGデータの観察による腫瘍の局在と分布、周辺解剖の把握。
- 2) 頭蓋底骨削除や脳の牽引による至適術野の作成と腫瘍の露出。
- 3) ある視野角における腫瘍の切除可能域を色付してその部を別構造として分離。
- 4) 視野角を変え、順次3)の手順(腫瘍の分離分割)の繰り返し。
- 5) 最後に摘出前の腫瘍のコンパートメント化の全体像を確認。

3. ニューロナビゲーションシステムと手術顕微鏡の連動化

手術用ナビゲーションシステム (Brainlab, Inc.) では、患者頭部に固定したリファレンスフレームと反射マーカを装着したポインタプローベの光学的位置関係で、ポインタプローベ先端の位置測定を行い登録したCTやMRI画像上で位置表示する。同様の原理を応用して手術顕微鏡(三鷹光機MM60)をナビゲーションシステムと連動させるために、自作した金属製のアタッチメントを手術顕微鏡背面に固定し、これに反射マーカを装着した。顕微鏡の視軸と反射マーカの位置関係を再現したZ型の金属棒も自作し、反射マーカを取り付けたこの金属棒でナビゲーションへのレジストレーションを行い、その後はマーカを装着した手術顕微鏡の中心がナビゲーション画面の中心と連動するように工夫した(図2)。

4. IVS誘導手術の実践

IVS法にて加工したデータ(削除した頭蓋骨、

表1 症例, IVS結果, および手術結果

| 症例 | 年齢 | 腫瘍の局在 | 左右 | 最大径(mm) | 手術方法 | IVSでの分割部数 | 残存可能性部数 | 残存想定部数 | 想定理由 | 摘出結果 | 残存分割部 | 残存理由 | 病理診断 |
|----|----|--------|----|---------|------------------------|-----------|---------|--------|--------------|-----------|-------|--------------|--------|
| 1 | 66 | 小脳橋角部 | 左 | 26 | 前方経離体法 | 3 | | | | 計画通り | | | 髄膜腫 |
| 2 | 47 | 小脳橋角部 | 右 | 41 | 前方経離体法 | 4 | | 1 | 重要神経内在 | 計画通り | 1 | 重要神経内在 | 髄膜腫 |
| 3 | 34 | 小脳橋角部 | 右 | 50 | 前後合併経離体法 | 4 | | 1 | 海綿静脈洞浸潤 | 計画通り | 1 | 海綿静脈洞浸潤 | 髄膜腫 |
| 4 | 54 | 小脳橋角部 | 右 | 39 | 前後合併経離体法 | 5 | 1 | | | 計画通り | | | 髄膜腫 |
| 5 | 56 | 小脳橋角部 | 右 | 37 | 前後合併経離体法 | 6 | 2 | | | 計画通り | | | 髄膜腫 |
| 6 | 39 | 小脳橋角部 | 左 | 39 | 前後合併経離体法 | 6 | 2 | | | 計画通り | | | 非定型髄膜腫 |
| 7 | 73 | 小脳橋角部 | 左 | 40 | 前後合併経離体法 | 4 | | 1 | 到達限界域 | 計画以上の残存あり | 2 | 腫瘍組織の堅さおよび出血 | 髄膜腫 |
| 8 | 61 | 小脳橋角部 | 左 | 68 | 前後合併経離体法および外側後頭下法 | 6 | 1 | 1 | 到達限界域 | 計画以上の残存あり | 3 | 腫瘍からの想定以上の出血 | 髄膜腫 |
| 9 | 74 | 蝶形骨縁内側 | 左 | 68 | 前頭側頭開頭 | 4 | | 1 | 海綿静脈洞・内頸動脈内在 | 計画通り | 1 | 海綿静脈洞・内頸動脈内在 | 髄膜腫 |
| 10 | 52 | 蝶形骨縁内側 | 左 | 47 | 前頭側頭開頭および眼窩縁頬骨弓切除 | 3 | 1 | | | 計画通り | | | 髄膜腫 |
| 11 | 58 | 蝶形骨縁内側 | 左 | 37 | 前頭側頭開頭および眼窩縁頬骨弓切除 | 3 | | 1 | 海綿静脈洞・内頸動脈内在 | 計画通り | 1 | 海綿静脈洞・内頸動脈内在 | 非定型髄膜腫 |
| 12 | 40 | 蝶形骨縁内側 | 左 | 48 | 前頭側頭開頭および眼窩縁頬骨弓・前床突起切除 | 5 | 1 | | | 計画通り | | | 髄膜腫 |
| 13 | 70 | 蝶形骨縁内側 | 左 | 64 | 前頭側頭開頭および眼窩縁頬骨弓・前床突起切除 | 4 | 1 | | | 計画通り | | | 髄膜腫 |

牽引した脳、分割切除した腫瘍のコンパートメント)をそれぞれSTL形式で再出力し、ナビゲーションシステムに登録した。手術中は手術室のモニターディスプレイ上に手術顕微鏡の術野画像と3-D CGデータを統合したナビゲーション画像を並べて表示でき、手術顕微鏡の回転動作に合わせて3-D CG画像が連動する。軸位、冠状断、矢状断の各断面画像には手術顕微鏡の視軸方向が表示され、術者の進んでいる方向が手術の進行中に常に描出される。腫瘍摘出を進めながら、摘出終了が確認されたコンパートメントを1つずつ削除し、残存部を確認しながら手術を進行した。以上のような術前から術中までの一連の「IVS誘導手術」(図3)を、小脳橋角部および蝶形骨縁内側部を局在とする大型(直径25mm以上)の頭蓋底髄膜腫13症例の手術において行なった(表1)。

結 果

1. IVS 結果

全症例で3-D CGデータの作成とIVSによる

術前シミュレーションが有効に行われ、手順1)における解剖学的観察が有効であった。手順2)による骨開窓部の評価は術野および術後のCT骨条件と比較され、全例でIVSにて決定した通りの開頭および骨削除が確認された。手順3)-5)の結果として、13例中で、コンパートメント数は前方経錐体法を行なった小脳橋角部腫瘍では3-4個、合併経錐体法を行なった小脳橋角部腫瘍では4-6個、前頭側頭開頭を行なった蝶形骨縁内側腫瘍では3-5個となった。コンパートメント数は腫瘍の最大径よりも解剖学的な理由で数が規定された。

2. 融合ニューロナビゲーションによる術中支援

術中にはナビゲーション画面上に3-D CG画像、連動させた顕微鏡手術画像、および各種軸断面画像などを表出し、手術の進行とともに適宜レイアウトを切り替えながら進めることが有用であった(図4)。並列した3-D CG画像と顕微鏡画像が連動し、表面から見た解剖的理解、とりわけ実際は視野の先で脳に隠された腫瘍の広がりを見

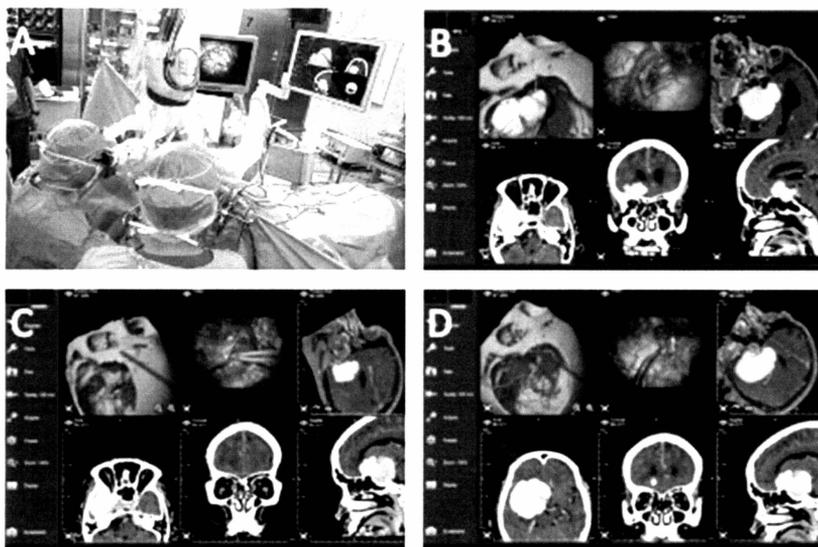


図4 融合ニューロナビゲーションによる術中支援。A：手術室での配置。B：ナビゲーション画面上に3D-CG画像、連動させた手術顕微鏡の術野画像、CT、MRIの画像を同時に表示できる。各軸断面の画像では顕微鏡の刺入角と方向も確認できる。C、D：腫瘍摘出の進行度に合わせて、3-D CG画像の腫瘍をコンパートメントごとに順次消去していく。

覚的に理解することができた。また、腫瘍に内在する主幹動脈や腫瘍の裏側に走行する脳神経などの重要構造の位置関係も認識できることが利点であった。また各軸断面の画像では、顕微鏡の視入角と方向が一目で確認でき、術者の現在地と進行方向がわかることが利点であった。腫瘍摘出の進行とともに、摘出が終了したと考えられる腫瘍コンパートメントから順次消去してゆき、残存腫瘍の広がりや理解しながら手術を進めることが可能であった。

3. IVS 結果と手術結果の比較

各症例における IVS の結果と手術結果を表 1 に示した。IVS にて残存可能性があるとして判断したコンパートメントに関しては症例 8 を除いて全て摘出がなされた。IVS 法での残存想定部位としては、重要神経の内在した部位、海綿静脈洞への浸潤や内頸動脈との強い癒合が予想された部位、アプローチ上の到達限界と予想された部位が挙げられたが、これらは全てが最終的に残存となった。残存想定部位が想定通りに残存した 6 例を含め、13 例中 11 例で IVS 法での計画通りの手術が施行された。2 例では計画以上の残存を生じたが、理由は腫瘍組織が極端に堅く摘出に難渋したものと、腫瘍からの予想外の持続性出血のため、なんとか止血を得て摘出を終了したことが理由であった。

術後に重大な後遺症を残した症例はなかった。症例 11 のみ、術後 4 年で定位放射線照射および再手術が施行されたが、非定型髄膜腫であった。症例 6 も非定型髄膜腫であったが、計画通りに全摘出がなされ、再発はみられていない。

考 察

本研究では、3-D CG データと CAD ソフトウェアの活用により我々が開発した IVS 法で、実践に則した手術シミュレーションを頭蓋底部の大型髄膜腫の摘出に適応し、摘出を模しながら腫瘍をコンパートメント化することで摘出手順をシナリオ化し、術中には手術ナビゲーションシステム

上にシミュレーション結果を投影し、かつ術者の使用する手術顕微鏡とナビゲーションシステムを連動させることで、摘出シミュレーションを術中操作に反映させる「IVS 誘導手術」と呼べる手術手法について確立を試みた。実際に症例シリーズを通して、満足すべき手術成績を得ることができた。これまで発展してきた 3 次元画像技術を解剖の理解や手術中の確認だけでなく、実際に手術計画とそれを基盤にした手術の遂行にまで発展させた試みは、本研究以外に類を見ない。以下に各項目につき考察を加える。

1. 腫瘍のコンパートメント化

大型の頭蓋底腫瘍性病変の摘出術においては、安全かつ確実に腫瘍を摘出するためには解剖学的関係の理解だけでなく手術戦略のさらなる理解が必要となる⁹⁾¹⁰⁾。この点においては、熟練した脳外科医のみがその豊富な経験から、腫瘍と重要構造物の解剖学的な関係や術野の中で見えない腫瘍の広がりを想像し、大きな腫瘍を的確にいくつかの部分に分けることで腫瘍摘出に関わる手術戦略を脳内で構築することができ、安全で速やかに除去できる部分、硬膜への付着を考えなくてはいけない部分、脳幹・神経や血管との関係が懸念される部分などの判断を術中に行うことができる¹¹⁾。我々が本研究にて採用した IVS 法により術前に腫瘍性病変の摘出術をシミュレーションしながらコンパートメントに分けてゆく作業は、まさにこの経験を個々の症例で誰でも行うことが可能となり、実際の術中所見と照合しても極めて有用であることが実感された。

2. 術中融合ナビゲーション法の確立について

今回我々は、IVS 法による計画結果の術中での再現方法として、ニューロナビゲーションシステムへの投影が最適であると判断し、さらに手術顕微鏡とナビゲーションシステムを連動させることでリアルタイムにシミュレーションでの手術計画を実際の手術に反映させることができるのではないかと考えた。実際にナビゲーションシステムを基盤にして仮想現実 (VR) や拡張現実 (AR) と

いった技術を手術環境に反映させる試みに関する報告¹²⁾⁻¹⁴⁾がなされてきているが、我々はあくまでシミュレーションでの計画を基盤にして手術を進行させてゆくためのツールとしてナビゲーションシステムを採用した。したがって、既存のナビゲーションシステムに我々独自の工夫を適用することで、手術顕微鏡とナビゲーションシステムの連動を特別に高価な装備を導入することなく実現した。術中は、解剖学的な確認が一眼で可能なことから安全性を実感するとともに、その進行にしながら画像を変化させてゆくことで手術の進行度が可視化されるため、手術の確実性にも寄与すると感じられた。手術ナビゲーションの短所として、脳の沈み込みや手術中に脳を動かすことで腫瘍の位置を把握しにくくなるとする報告¹⁵⁾⁻¹⁷⁾もあるが、頭蓋底の髄膜腫は硬膜面に大きく付着しており、この点は大きく影響するものではない。

3. IVS 誘導手術の結果について

術前から術中に至る一連のIVS誘導手術としての結果は、頭蓋底の大きな腫瘍性病変の手術結果としては非常に満足のゆく結果が得られたと考えている。術前に残存想定部としたコンパートメントは、術後に患者に不利益を及ぼす後遺症のリスクがあると考えられた部位や、採用した術式で摘出するには無理があると考えた部位であるが、実際の手術でも同様の判断で同様のコンパートメントが残存した結果となった。それに準じた残存の可能性もあったとしたコンパートメントはほとんどが摘出できており、それ以外の部分はほぼ想定通りに摘出がなされており、IVS法による計画の精度の高さと、術中の顕微鏡連動ナビゲーションシステムへの投影的的確さによる恩恵と考えられる。その中で錐体斜台部に付着する大きな小脳橋角部腫瘍では、狭い経錐体骨ルートで硬い腫瘍組織を切除することが困難であったり、また制御不能な腫瘍出血により予定していた切除ができないことがあり、今回のシリーズでも2症例がそのような腫瘍であった。頭蓋底部の大型腫瘍では全摘出が困難である症例は多く¹⁸⁾¹⁹⁾、患者の年齢や腫瘍の成長速度、予測される神経障害のリスクを

考慮し、将来的な定位放射線治療の適応も見据えた上での手術計画を立て、確実にそれを遂行する必要がある、とりわけ非定型髄膜腫においても同様の考え方が重要であろう。

4. 教育について

本研究での「IVS誘導手術」に関しては、手術の確実性だけでなく、手術教育の側面における有用性も強調したい。本システムでは、術者だけでなく手術助手や手術室で見学する若い脳神経外科医たちも、解剖学的情報だけでなく、その時点における術者の位置や方向、手術の進度をモニター上で確認しながら、リアルタイムに理解することができる。術者以外の手術に関わるメンバーの手術理解の向上は、最終的にはまた安全な手術の遂行に関わってくることとなる²⁰⁾²¹⁾。リアルタイムな映像環境下で手術アプローチや戦略を議論したり、学んだりすることは、脳外科医の教育に有効な手段となろう。

結 論

脳神経外科手術の中で高難易度とされる大型頭蓋底部髄膜腫の摘出に、3次元医療画像技術を応用したIVS法による術前腫瘍摘出計画と、術中顕微鏡連動ナビゲーションシステムを融合させた「IVS誘導手術」を確立した。今度のさらなる発展で、この領域の手術成績の向上に寄与するものと確信された。

参 考 文 献

- 1) Yoshino M, Kin T, Nakatomi H, Oyama H, Saito N: Presurgical planning of feeder resection with realistic three-dimensional virtual operation field in patient with cerebellopontine angle meningioma. *Acta Neurochirurgica* 155: 1391-1399, 2013.
- 2) Kin T, Nakatomi H, Shono N, Nomura S, Saito T, Oyama H, Saito N: Neurosurgical Virtual Reality Simulation for Brain Tumor Using High-definition Computer Graphics: A Review

- of the Literature. *Neurologia medico-chirurgica* 57: 513-520, 2017.
- 3) Takao T, Oishi M, Fukuda M, Ishida G, Sato M, Fujii Y: Three-dimensional visualization of neurovascular compression: presurgical use of virtual endoscopy created from magnetic resonance imaging. *Neurosurgery* 63: ONS139-45-discussion ONS145-6, 2008.
 - 4) Oishi M, Fukuda M, Ishida G, Saito A, Hiraishi T, Fujii Y: Presurgical simulation with advanced 3-dimensional multifusion volumetric imaging in patients with skull base tumors. *Neurosurgery* 68: 188-99-discussion 199, 2011.
 - 5) Oishi M, Fukuda M, Ishida G, Saito A, Hiraishi T, Fujii Y: Prediction of the microsurgical window for skull-base tumors by advanced three-dimensional multi-fusion volumetric imaging. *Neurologia medico-chirurgica* 51: 201-207, 2011.
 - 6) Oishi M, Fukuda M, Hiraishi T, Yajima N, Sato Y, Fujii Y: Interactive virtual simulation using a 3D computer graphics model for microvascular decompression surgery. *J Neurosurgery* 117: 555-565, 2012.
 - 7) Hiraishi T, Matsushima T, Kawashima M, Nakahara Y, Takahashi Y, Ito H, Oishi M, Fujii Y: 3D Computer graphics simulation to obtain optimal surgical exposure during microvascular decompression of the glossopharyngeal nerve. *Neurosurgical Review* 36: 629-35-discussion 635, 2013.
 - 8) Oishi M, Fukuda M, Yajima N, Yoshida K, Takahashi M, Hiraishi T, Takao T, Saito A, Fujii Y: Interactive presurgical simulation applying advanced 3D imaging and modeling techniques for skull base and deep tumors. *J Neurosurgery* 119: 94-105, 2013.
 - 9) Lynch J, Pereira C, Gonçalves M, Zanon N: Extended Pterional Approach for Medial Sphenoid Wing Meningioma: A Series of 47 Patients. *J Neurological Surg Part B Skull Base* 81: 107-113, 2019.
 - 10) Alsofy SZ, Nakamura M, Suleiman A, Sakellaropoulou I, Saravia HW, Shalamberidze D, Salma A, Stroop R: Cerebral Anatomy Detection and Surgical Planning in Patients with Anterior Skull Base Meningiomas Using a Virtual Reality Technique. *J Clin Medicine* 10: 681, 2021.
 - 11) Kosuke M, Teruo I, Shigeo M, Tomu O, Shogo K, Shin T, Yasuhiro U, Yusuke T, Junichi K, Kazuhiko F: Surgical Management for Medial Sphenoid Wing Meningiomas. *Jpn J Neurosurg* 21: 724-730, 2012.
 - 12) Yoshino M, Saito T, Kin T, Nakagawa D, Nakatomi H, Oyama H, Saito N: A Microscopic Optically Tracking Navigation System That Uses High-resolution 3D Computer Graphics. *Neurologia medico-chirurgica* 55: 674-679, 2015.
 - 13) Watanabe E, Satoh M, Konno T, Hirai M, Yamaguchi T: The Trans-Visible Navigator: A See-Through Neuronavigation System Using Augmented Reality. *World Neurosurgery* 87: 399-405, 2016.
 - 14) Jean WC, Huang MC, Felbaum DR: Optimization of skull base exposure using navigation-integrated, virtual reality templates. *J Clin Neurosci* 80: 125-130, 2020.
 - 15) Asano K, Katayama K, Kakuta K, Oyama K, Ohkuma H: Assessment of the Accuracy and Errors of Head-Up Display by an Optical Neuronavigation System in Brain Tumor Surgery. *Operative Neurosurgery* 13: 23-35, 2016.
 - 16) Mikhail M, Mithani K, Ibrahim GM: Presurgical and Intraoperative Augmented Reality in Neuro-oncologic Surgery: Clinical Experiences and Limitations. *World Neurosurg* 128: 268-276, 2019.
 - 17) Koike T, Kin T, Tanaka S, Takeda Y, Uchikawa H, Shiode T, Saito T, Takami H, Takayanagi S, Mukasa A, Oyama H, Saito N: Development of Innovative Neurosurgical Operation Support Method Using Mixed-Reality Computer Graphics. *World Neurosurg X* 11: 100102, 2021.
 - 18) Verma SK, Sinha S, Sawarkar DP, Singh PK,

- Gupta D, Agarwal D, Satyarthee G, Kumar R, Singh M, Suri A, Chandra PS, Kale SS, Sharma BS: Medial sphenoid wing meningiomas: Experience with microsurgical resection over 5 years and a review of literature. *Neurol India* 64: 465-475, 2016.
- 19) Balasa A, Hurghis C, Tamas F, Chinezu R: Surgical Strategies and Clinical Outcome of Large to Giant Sphenoid Wing Meningiomas: A Case Series Study. *Brain Sci* 10: 957, 2020.
- 20) Sato M, Tateishi K, Murata H, Kin T, Suenaga J, Takase H, Yoneyama T, Nishii T, Tateishi U, Yamamoto T, Saito N, Inoue T, Kawahara N: Three-dimensional multimodality fusion imaging as an educational and planning tool for deep-seated meningiomas. *British Journal of Neurosurgery* 49: 1-7, 2018.
- 21) Cho J, Rahimpour S, Cutler A, Goodwin CR, Lad SP, Codd P: Enhancing Reality: A Systematic Review of Augmented Reality in Neuronavigation and Education. *World Neurosurg* 139: 186-195, 2020.

(令和3年12月27日受付)
