原著

脳神経外科領域における三次元画像を用いた手術

—シミュレーションとナビゲーション—

大上 史朗 久門 良明 河野 兼久
白石 雅裕 榊 三郎 菊池 恵一*
三木 均*

Preoperative Neurosurgical Simulation and Intraoperative Navigation using Three-dimensional Images

by

Shiro Ohue, M.D., Yoshiaki Kumon, M.D., Kanehisa Kohno, M.D.,
Masahiro Shiraishi, M.D., Saburo Sakaki, M.D., Keiichi Kikuchi, M.D.*, and
Hitoshi Miki, M.D.*

from

Department of Neurological Surgery and *Radiology, Ehime University School of Medicine

We used three-dimensional (3D) images for preoperative surgical simulation and intraoperative navigation in 23 patients with intracranial tumors. Preoperative 3D images provided useful information concerning the relationship among the tumors, critical cortices and vessels, and allowed a choice of the optimal surgical approach and the extent of tumor resection in order to minimize surgical destruction of vital structures. Intraoperative navigation using 3D images was useful to keep the intraoperative orientation by real-time anatomical interaction. Functional mapping and intraoperative monitoring were also useful for preservation of postoperative motor function. Therefore, presurgical simulation and intraoperative navigation using 3D images are essential to perform less invasive surgery.

(Received July 23, 1998; accepted October 2, 1998)

Key words : three-dimensional image, simulation, navigation

Jpn J Neurosurg (Tokyo) 8: 657-663, 1999

はじめに

脳腫瘍の摘出術に際しては、術前にCT scanやMRI、脳血管撮影などの画像診断をもとに、腫瘍と周辺の脳組織や血管との位置関係を詳細に検討し、そのうえで正常組織にできるだけ損傷を加えないように、手術操作を行わなければならない。そのために得られた画像情報を再構成して、術者が解剖学的な位置関係を容易に把握できるように工夫する必要がある。さらに、これら

の情報が実際の手術操作中に手術の進行状況に合わせた情報として、オンラインで術者に明示するシステムが必要となる⁴⁾。

術前に提供する画像情報の再構成法として、われわれは立体表示が可能な3次元MR画像を作成し、この3次元画像による術前シミュレーションが有用なことをすでに報告した⁶⁾⁸⁾⁹⁾。また、術前の画像を術野に直接反映させ得る手段として、最近ではナビゲーションシステムが開発され、さまざまな形で臨床応用されつつあ

愛媛大学医学部脳神経外科／〒791-0295 愛媛県温泉郡重信町志津川〔連絡先：大上史朗〕

Address reprint requests to: Shiro Ohue, M.D., Department of Neurological Surgery, Ehime University School of Medicine, Shitsukawa, Shigenobu-cho, Onsen-gun, 791-0295 Ehime, Japan

*同放射線科

Table 1 Advantages of three-dimensional imaging for presurgical simulation

Advantages for simulation	Number of cases				
	Gliomas (N=7)	Meningioma (N=7)	Metastasis (N=4)	Others (N=5)	Total (N=23)
Position and extent of lesion	7	4	4	1	16
Definition of and relationship to functional important cortex	5	3	4	0	12
Position, direction and depth of corticotomy	5	0	4	0	9
Position, direction and depth of interhemispheric approach	0	4	0	2	6
Relationship to surrounding major vessels and nerves	0	3	0	3	6
Extent of tumor resection	7	3	0	2	12

る^{3)11)~13)}。そこで今回われわれは、術前に作成した3次元画像を術前のシミュレーションのみならず、術中のナビゲーションにも応用したので、その有用性と限界について報告する。

対象および方法

対象は、1997年4月～1998年3月までの1年間に、腫瘍摘出術に際し3次元画像を用いた術前シミュレーションと術中ナビゲーションを行った23症例とした。症例の内訳は、男性10例、女性13例、年齢は11～73歳、腫瘍組織型は神経膠腫7例、髄膜腫7例、転移性脳腫瘍4例、下垂体腺腫1例、胚芽腫1例、海綿状血管腫1例、頭蓋骨腫瘍2例である。

3次元画像の作成にあたり、MRIおよびCT scanの画像データを用いた。MRIではGd-DTPA 0.01 mmol/kgを静注後に、1.5 T MRIを用いてT1強調gradient echo法により撮像し、データを採取した。撮像条件はTR 14～15 ms, TE 2.8～4.2 ms, FA 20, matrix 256×128, slice thickness 1～1.5 mmである。CT scanではhelical CTを用い、管電圧135 kV, 管電流150 mA, Xビーム幅3～4 mm, テーブル移動速度3～4 mm, スキャン時間1秒として撮像し、得られたデータを1.5～2 mmピッチに補間再構成した。

手術シミュレーションに用いた3次元画像は、3次元画像作成ワークステーションであるAllegro (ISG)を用いて作成した。Allegroでは脳表、脳表静脈および腫瘍などを閾値処理法と領域拡張法を用いて抽出し、surface rendering法を用いて表示した⁸⁾⁹⁾。術中ナビゲーションには、メカニカル・アームタイプのナビゲータであるEVANS (富木医療器)を用い、ナビゲーション画面には3次元画像と複数の2次元画像を表示できる

operation viewを使用した。ナビゲーションに用いた3次元画像は、EVANSに含まれる3次元作成ソフトを用いて、皮膚、脳表、脳表静脈および腫瘍などを閾値処理法によって抽出後、volume rendering法にて表示した。

術後運動機能温存を企図した手術を行った6例では、術前にfunctional MRIを施行した⁸⁾。また、術中には体性感覚誘発電位 (somatosensory evoked potential; SEP) による中心溝の同定を行った後、一次運動野を直接電気刺激し、脊髄硬膜外電極より導出した運動誘発電位 (motor evoked potential; MEP) を経時的に測定した⁸⁾。

結 果

3次元画像を用いた術前シミュレーションでは、腫瘍と脳回、血管系、神経などの周囲構造物との位置関係が3次的に明瞭に把握でき、適切な手術経路や範囲の決定に有用であった (Table 1)。

すなわち、神経膠腫7例、転移性腫瘍4例、髄膜腫4例、海綿状血管腫1例の16例では腫瘍の位置や進展範囲が、脳回や脳表静脈との関係も含め容易に理解できた。このうち、中心前回、後回や優位半球上側頭回、下前頭回などの機能的に重要な脳回の近傍に腫瘍が存在した12例では、全例で解剖学的にこれらの脳回を同定できたとともに、術中の静脈による脳回の同定方法が確認できた。また9例ではこれらの重要な脳回の損傷を避けたcorticotomyの部位や方向、深度の決定にも3次元画像は有用であった。

大脳半球間裂より到達した大脳鎌髄膜腫、海綿状血管腫、胚芽腫などの6例では、架橋静脈の位置の同定は容易で、架橋静脈間の適切な進入位置が決定できた。傍鞍

Table 2 Advantages of three-dimensional imaging for intraoperative navigation

Advantages for simulation	Number of cases				
	Gliomas (N=7)	Meningioma (N=7)	Metastasis (N=4)	Others (N=5)	Total (N=23)
Position and extent of skin incision, Position and extent of craniotomy	4	4	4	1	13
Position and extent of superficial lesion	2	0	0	0	2
Position, direction and depth of transcortical approach	5	0	4	0	9
Position, direction and depth of interhemispheric approach	0	4	0	2	6
Definition of critical cortex	5	3	4	0	12
Position of surrounding major vessels and nerves	0	3	0	3	6
Position and direction during removal	1	7	0	2	10

Fig. 1 Preoperative magnetic resonance (MR) images in a patient with multiple metastatic tumors (Case 1)

- A :** Gd-enhanced T1-weighted image demonstrates a small enhanced lesion beneath the left superior frontal gyrus.
- B :** Three-dimensional (3D) MR image clearly demonstrates the relationship between the tumor (white arrow), precentral gyrus (arrow), superficial cerebral vein (small arrowhead) and superior sagittal sinus (large arrowhead).
- C :** Rotated 3D image demonstrates the optimal surgical approach (arrow) for minimizing surgical invasion.

部髄膜腫や頭蓋骨腫瘍などの頭蓋底部に腫瘍が存在した6例では、周囲に存在する主要血管（内頸動脈、深部静脈など）や神経（視神経、三叉神経など）と腫瘍との位置関係が明瞭に把握された。さらに、浸潤性に進展した神経膠腫7例、髄膜腫3例、頭蓋骨腫瘍2例では腫瘍の切除範囲の決定にも3次元画像は有用であった。

ナビゲータを用いた手術では皮切や開頭、硬膜切開の位置や範囲、手術進入部位、進入方向や深度、腫瘍の進展範囲、周囲の重要な脳回や構造物の同定、摘出中や摘出後の進入方向や深度の確認が容易であった（Table 2）。3次元画像を2次元画像とともにナビゲーションにも用いることで、probe先端の位置や方向が直感的に理

解できたが、3次元画像のみでは正確な位置や方向の同定は困難であった。

具体的には、23例中13例で皮切や骨窓の位置や範囲の同定に有用であった。また、脳表に腫瘍が露出した2例では腫瘍の位置と進展範囲の同定に、corticotomyを要した9例ではcorticotomyの部位、方向やその深度の決定に、大脳半球間裂より到達した6例では半球間裂の部位と方向の同定に有用であった。さらに、12例では腫瘍近傍に存在する中心前回、後回などの重要な脳回の同定にナビゲーションは有用であった。頭蓋底部腫瘍6例では、周囲の重要な構造物である動脈、静脈洞、脳神経などの同定に有用であった。

Fig. 2 Intraoperative navigation in Case 1

- A**: Intraoperative photography demonstrates the navigational probe (arrow), which was placed on the brain surface.
B, C: 3D (**B**) and two-dimensional (2D) (**C**) MR images with indicators shown by a navigation system. The cross-shaped points represent the position of the navigational probe tip, and the oblique lines indicate its trajectory.

Fig. 3 Preoperative MR image in a patient with left midbrain germinoma (Case 2) demonstrating a high intensity lesion

術中、術後を通じて brain shift はほとんどないか、軽度であったものは 13 例で、これらの症例は頭蓋底腫瘍や髄膜腫、切除範囲の小さい腫瘍であった。このうち、en bloc に腫瘍摘出を行った転移性脳腫瘍 3 例を除く 10 例では、腫瘍摘出中もナビゲーションを用いて正確に手術操作位置の同定が可能で、腫瘍摘出も容易となった。一方、術中 brain shift が生じ、ナビゲーションの信頼性が失われた症例は 10 例で、その多くは神経膠腫症例であった。

運動機能温存を企図した手術を行った 6 例では、術前に functional MRI で運動野を同定した。この結果は全例で 3 次元画像を用いた解剖学的同定の結果とよく一致

していた。さらに術中には、ナビゲータで中心前回を同定することに加え、SEP や MEP を用いた術中モニタリングを行い、術後の運動機能を温存し得た。以下に、代表例を呈示する。

【Case 1】 多発性転移性腫瘍症例

造影 MRI では左前頭葉上頭回の皮質下に腫瘍を認めた (Fig. 1A)。最大径 6mm の小さい腫瘍であったが、脳表静脈の走行は同定できなかった。術前に作成した 3 次元 MR 画像では腫瘍が最も浅い位置となる上矢状洞と脳表静脈との間からでは、矢状洞と脳表静脈との間隔が狭いため、腫瘍への到達は困難が予想された (Fig. 1B)。そのため、Fig. 1C の矢印に示したように、中心前回より前方で、脳表静脈の外側より腫瘍に到達するのが適切と判断した。手術では、まず頭皮上よりナビゲータを用いて腫瘍の位置を確認しつつ、皮膚切開や骨窓の位置や大きさを決定した。その際にナビゲータを用いることで、皮膚切開や骨窓の大きさを最小限にでき、手術侵襲も軽減し得た。また本例では小開頭のため、周囲の脳回や脳表静脈の同定が不十分であったが、脳表よりナビゲータを用いることで、術野の脳表も同定でき、さらに腫瘍の位置や方向も確認し得た (Fig. 2)。probe の方向に corticotomy を行い、腫瘍を全摘出した。このように小さい腫瘍でも、ナビゲータを用いることで、容易にかつ少ない侵襲で腫瘍摘出を行うことが可能であった。

【Case 2】 小脳の静脈性血管腫を合併した中脳背側の胚細胞腫 (Fig. 3)

この腫瘍の到達方法には supracerebellar in-

► Fig. 4

A/B/C

► Fig. 5

▲ Fig. 4 Preoperative 3D MR images approached by supracerebellar infratentorial (A), occipital transtentorial (B) and parieto-occipital interhemispheric transcallosal approaches (C) in Case 2

The arrows indicate the drainer of the cerebellar venous angioma (A) and internal cerebral vein (B, C), respectively. The large and small arrowheads represent internal occipital vein and basal vein, respectively.

▲ Fig. 5 Intraoperative navigation in Case 2

A: Intraoperative photograph demonstrates the navigational probe (arrow), which pointed at the interhemispheric fissure.

B, C: 3D (B) and 2D (C) MR images with indicators shown by a navigation system

► Fig. 6 Preoperative MR images in a patient with left parietal astrocytoma (Case 3)

A: Preoperative T2-weighted MR image. The tumor mainly extends in the white matter of the left parietal lobe. The arrowhead indicates the central sulcus determined morphologically.

B: Functional MR image (fMRI) obtained by right hand grasping. The red pixels (arrow) indicate the location where significant signal increase is observed during the motor task. The arrowheads indicate the precentral gyrus determined by fMRI.

C, D: Preoperative 3D MR images. The arrowheads indicate the central sulcus determined morphologically.

▲ Fig. 6

fratentorial approach, occipital transtentorial approach, parieto-occipital interhemispheric transsplenial approach の3つが考えられた。それぞれを3次元画像で表示すると, supracerebellar infratentorial approach (Fig. 4A) では静脈性血管腫の導出静脈が, occipital transtentorial approach (Fig. 4B) では basal vein と internal occipital vein が摘出の障害となることからわかる。一方, parieto-occipital interhemispheric transcallosal approach (Fig. 4C) では脳梁の切開は必要であるが, 静脈系で障害される要素は少ないことが明瞭に把握され, このアプローチを選択した。手術では大脳半球間裂よりナビゲータにて進入方向を確認しつつ (Fig. 5), 容易に腫瘍に到達し得た。

【Case 3】 左頭頂葉の神経膠腫

2次元MR画像 (Fig. 6A) に比べ, 3次元MR画像 (Fig. 6C, D) では, 腫瘍が中心後回の深部白質まで進展していることが明瞭に把握できた。また, これらの画像から解剖学的に同定した中心前回の位置は, 運動負荷による functional MRI の結果 (Fig. 6B) と一致していた。本例では運動機能を温存しつつ, できるかぎりの腫瘍摘出を行うこととし, 到達経路は上頭頂小葉の皮質經由とした。手術ではまず SEP で中心溝を同定し, 脳回の形状より同定した中心後回の後方の上頭頂小葉を皮質切開し, 腫瘍に到達した。その際, 脳表よりナビゲータを用いて皮質切開の位置や方向を確認した。腫瘍摘出中は brain shift が生じたため, ナビゲーションはあまり有用ではなかった。しかし, MEP の D-response を指標として腫瘍摘出を行い, 腫瘍は亜全摘でき, 術後運動機能も温存し得た。

考 察

コンピュータグラフィックスの進歩により, 3次元画像は容易に作成できるようになり, その臨床応用も広く行われている¹⁾⁵⁾¹⁰⁾。3次元画像は従来の2次元画像に比べ, 解剖学的位置やその連続性の把握がきわめて容易なことはいうまでもない。したがって, 術前に手術到達方向や腫瘍摘出範囲を決定するにあたって, 3次元画像は病変と正常構造との位置関係に関する重要な情報を提供し得る。われわれは, 今まで大脳半球腫瘍を中心として, 多くの脳腫瘍症例に対して3次元画像を術前に作成し, 術前シミュレーションを行い3次元画像の術前検査としての有用性について報告してきた⁸⁾⁹⁾。

一方, 術前に得られた画像情報を実際の手術操作上に表す方法として, 最近ではナビゲーションシステム (ナ

ビゲータ) が開発され, すでに応用されている。ナビゲーションシステムはいくつかの問題点はあるものの, frameless navigational system, computed tomography-guided stereotaxic surgery, image-directed surgery などとよばれ, いくつかの報告もみられる^{3)11)~13)}。しかしながら, これらの多くは2次元画像を連続して表示したり, 異なる2次元断層面を同時に表示するナビゲーションであり, 3次元画像も用いたナビゲーションの報告はほとんどない。そこで今回われわれは, 3次元画像を術前シミュレーションとともに, 術中ナビゲーションにも用い, その有用性について検討した。

その結果, 3次元画像をナビゲーションに用いることで, 術中の位置や方向がきわめて直感的に理解でき, 2次元画像のみのナビゲーションと比較して, 術中の位置や方向の確認が容易であった。しかしながら, 3次元画像では深さが表示できないため, 術中の位置を詳細に検討するには, 2次元画像を同時に表示する必要性があった。現在臨床の場で使用可能な3次元画像は, 3次元画像を2次元上に表示した擬似3次元画像であり, 今後深さも表示可能な3次元画像の臨床応用が望まれる。

また, すべてのナビゲーションシステムに共通の問題である髄液の排出や脳の圧排によって生じる術中の brain shift による誤差も約半数の症例に生じた。この問題については, 術中リアルタイムに CT や MRI を行わないかぎり根本的な解決法はないと考えられる⁷⁾。しかしながら, 術中再度画像とのマッチングを行ったり, 超音波診断装置との併用で対処し得るとの報告もある⁷⁾。また, 機能温存を企図する手術では, 症例3で行ったような functional mapping⁸⁾¹⁰⁾や術中モニタリング⁸⁾を合わせて行うことも有用であると考えられる。

本研究では, 3次元画像をシミュレーション用とナビゲータ用にそれぞれ別個に作成した。この理由としては, ①ナビゲーション用の画像撮影は原則的に術前日に行うため, ナビゲーション画像で手術シミュレーションを十分に行うためには, 時間的な余裕がないこと, ②ナビゲーションシステムである Evans に付属した画像処理能力に比べ, 3次元画像作成専用のワークステーションである Allegro の画像処理能力の方が優れ, 3次元画像の作成が容易なこと, ③ Allegro で作成したシミュレーション用の3次元画像をナビゲータ (EVANS) に転送できないこと, ④シミュレーション用の3次元画像としては演算量が少なく, 回転などの表示時間が短い surface rendering が適していること²⁾, ⑤一方, ナビゲーション用の画像としては演算量が多く, 画像表示時間が

長いが、抽出領域の内部データを有している volume rendering 法が適していることなどである。特に③の画像転送の問題については、3次元画像ワークステーションとナビゲータが、同一メーカーの機種であればデータ互換が可能だが、本研究の場合のように他のメーカー間ではデータ互換ができないことがほとんどである。他機種間のデータの互換性も、今後解決されるべき問題であろう。

文 献

- 1) Hu X, Tan KK, Levin DN, Galhotra S, Mullan JF, Hekmatpanah J, Spire J-P: Three-dimensional magnetic resonance images of the brain: Application to neurosurgical planning. *J Neurosurg* **72**: 433-440, 1990.
- 2) 片田和廣: 頭蓋骨, 脳表, 脳腫瘍の3次元表示と手術計画. *病態生理* **13**: 96-105, 1994.
- 3) Kato A, Yoshimine T, Hayakawa T, Tomita Y, Ikeda T, Mitomo M, Harada K, Mogami H: A frameless, navigational system for computer-assisted neurosurgery. *J Neurosurg* **74**: 845-849, 1991.
- 4) 加藤天美, 吉峰俊樹, 中島 伸, 平野俊一朗, 金山拓司, 谷口理章, 田辺敬貴, 原田貢士, 早川 徹: 機能解剖に基づいた脳手術支援. *脳外* **22**: 7-16, 1994.
- 5) Kikins R, Gleason PL, Moriarty TM, Moore MR, Alexander E, Stieg PE, Matsumae M, Lorensen WE, Cline HE, Black PM, Jolesz FA: Computer-assisted interactive three-dimensional planning for neurosurgical procedures. *Neurosurgery* **38**: 640-651, 1996.
- 6) Kumon Y, Sakaki S, Kohno K, Ohta S, Ohue S, Miki H: Three-dimensional imaging for presentation of the causative vessels in patients with hemifacial spasm and trigeminal neuralgia. *Surg Neurol* **47**: 178-184, 1997.
- 7) 西崎隆文, 吉川功一, 出口 誠, 原田克己, 梶原浩司, 秋村龍夫, 藤井正美, 加藤祥一, 伊藤治英: 脳外科手術支援ナビゲーションシステムの使用経験. *脳外誌* **7**: 177-181, 1998.
- 8) 大上史朗, 久門良明, 河野兼久, 長戸重幸, 中川 晃, 大田信介, 榊 三郎, 楠 勝介: 運動領近傍神経膠腫症例に対する運動機能温存手術—術前の運動野同定と術中モニタリングの有用性. *脳外* **26**: 599-606, 1998.
- 9) 大上史朗, 久門良明, 大田信介, 福井啓二, 河野兼久, 藤堂浩興, 岩田真治, 榊 三郎, 三木 均, 菊池恵一, 石丸良広: 脳神経外科術前検査としての三次元 MR 画像の有用性. *CI 研究* **18**: 339-343, 1996.
- 10) Pujol J, Conesa G, Deus J, López-Obarriol L, Isamat F, Capdevila A: Clinical application of functional magnetic resonance imaging in presurgical identification of the central sulcus. *J Neurosurg* **88**: 863-869, 1998.
- 11) Sandeman DR, Patel N, Chandler C, Nelson RJ, Coakham HB, Griffith HB: Advances in image-directed neurosurgery: Preliminary experience with the ISG Viewing Wand compared with Leksell G frame. *Bri J Neurosurg* **8**: 529-544, 1994.
- 12) 渡辺英寿: ニューロナビゲーター. *脳外* **17**: 1097-1103, 1989.
- 13) Watanabe E, Watanabe T, Manaka S, Mayanagi Y, Takakura K: Three-dimensional digitizer (Neuro-navigator): New equipment for computed tomography-guided stereotaxic surgery. *Surg Neurol* **27**: 543-547, 1987.

要 旨

脳神経外科領域における三次元画像を用いた手術—シミュレーションとナビゲーション—

大上 史朗 久門 良明 河野 兼久 白石 雅裕
榊 三郎 菊池 恵一 三木 均

現時点での3次元画像の手術への応用について検討するために、脳腫瘍症例23例に対して、3次元画像を用いた術前シミュレーションや術中ナビゲーションを行った。その結果、3次元画像を用いたシミュレーションでは腫瘍の3次元的位置が把握でき、到達方向や摘出範囲の決定が容易であった。また、3次元画像を用いたナビゲーションを行うことで、術中の位置や進入方向が3次元的に確認できた。さらに、術後運動機能を温存する手術では、シミュレーションやナビゲーションに加え、functional mappingや術中monitoringを行うことが有用であった。以上より、3次元画像によるシミュレーションやナビゲーションに加え、functional mappingや術中のmonitoringを行うことで、より低侵襲な手術が可能となった。

脳外誌 8: 657-663, 1999