原 著

超音波による脳神経外科手術支援

山根冠児¹ 島 健¹ 西田正博¹ 畠山尚志¹ 三原千恵¹ 石野真輔¹ 宗前 匠¹
 辻上周治¹ 辻上智史¹ 出井 勝¹ 石之神小織¹ 豊田章宏¹ 平松和嗣久¹ 真辺和文²

¹ 中国労災病院 脳神経外科

² 井野口病院 脳神経外科

Intraoperative Ultrasound Imaging for Technical Assistance in Neurosurgery

Kanji YAMANE¹, Takeshi SHIMA¹, Masahiro NISHIDA¹, Takashi HATAYAMA¹, Chie MIHARA¹, Shinsuke ISHINO¹,
 Takumi SOUZEN¹, Shuji TSUJIGAMI¹, Satoshi TSUJIGAMI¹, Masaru IDEI¹, Saori ISHINOKAMI¹, Akihiro TOYOTA¹,
 Kazuhisa HIRAMATSU¹, Kazuhumi MANABE²

¹ Department of Neurosurgery, Chugoku Rosai Hospital

² Department of Neurosurgery, Inokuchi Hospital

Object. We intended to evaluate the usefulness of intraoperative ultrasound imaging for assistance during neurosurgical operations.

Methods. Thirty-four consecutive patients (19 with brain tumor, 9 with subarachnoid hemorrhage, 4 with intracerebral hemorrhage, 2 with hydrocephalus) underwent neurosurgical operations with the assistance of intraoperative ultrasound imaging. A total of 46 operations (removal of tumor in 18 patients, biopsy in one, removal of intracerebral hematoma in 4, ventricular drainage in 16, and ventriculo-peritoneal (VP) shunt in 7) were performed. Two different types of ultrasound machines (General Electric, RT4600 and LOGIQ 500) were used in this series, and their probes were the sector (3.3 and 3.5 MHz) linear (6.7 MHz), and pencil (5 MHz) types.

Results. Ventricular drainage and placement of the ventricular tube were easily accomplished under real-time visualization of the ventricles by B-mode imaging. Tumors were clearly demonstrated over the dura mater and then the shortest approach to the tumor could be determined. Arteries and veins around the tumors were detected by color Doppler imaging. Intracerebral hematoma was easily detected and the appropriate site for evacuation could be determined.

Conclusion. Intraoperative ultrasound imaging can contribute to the safety and precision of ventricular drainage and VP shunt, and removal of brain tumor and intracerebral hemorrhage.

Key words: intraoperative ultrasound imaging, neurosurgical operation

はじめに

超音波検査は非侵襲的で繰り返し行うことができ、しかも real-time に画像が得られる特徴があるため、脳神経外科手術の術中支援に向いていると考えられる。これまでも多くの報告^{3,5-9)}があるが、今回、著者等が超音波装置を術中に使用した経験から、現時点における超音波の脳神経外科手術支援の有用性について検討した。

対象と方法

対象は脳神経外科手術を行った34例で、内訳は脳腫瘍が19例(髄膜腫10, 神経膠腫6, 転移性3), くも膜下出血9例, 脳内出血4例, 外傷後の水頭症2例であった。おこなった手術は、腫瘍摘出術が18, biopsy 1, 血腫除去術が4, 脳

室ドレナージが16, 脳室腹腔シャント術が7回行われ、それぞれで超音波による手術支援を行った。

使用した超音波装置はGE社製RT4600とLOGIQ500で、Bモードによる画像を基に手術支援を行った。プローブをあらかじめエチレンオキサイドガスにより滅菌しておき、手術時に目的に応じてペンシル型(5MHz), sector型(3.3, 3.5 MHz), linear型(6.7MHz)を用いた。また脳腫瘍にはColor Doppler flow imagingを加え腫瘍周辺の血管構築も観察した。脳室腹腔シャント術ではペンシル型のプローブが硬膜に密着するようにburr holeを拡大した。脳腫瘍や脳内出血では開頭した後に、まず硬膜の上からsector型のプローブを当て病変部の描出を行った。Linear型のプローブの使用は長径が約5cmと大きいので、大きな開頭を行った症例に限られた。検討項目は、病変の描出、手術操作のreal-timeな描出、color

Reprint request

山根冠児: 〒737-0193 呉市広多賀谷1-5-1 中国労災病院脳神経外科

Kanji YAMANE: Department of Neurosurgery, Chugoku Rosai Hospital, 1-5-1, Hirotagaya, Kure 737-0193, Japan

[Received November 25, 2002; Accepted July 23, 2003]

Fig.1 A: The anterior horns of the lateral ventricles visualized by intraoperative ultrasound B-mode imaging. B: A ventricular tube (arrows) introduced into the anterior horn under real-time echo guidance. C: Postoperative CT demonstrates proper positioning of the ventricular tube in the ventricle.

Doppler flow imaging 法による血管の描出, およびプローブタイプと検査の関係とした。

結 果

脳室ドレナージや脳室腹腔シャントのための脳室側チューブの留置は, 全例で超音波 B モードによる echo-guide によりあたかも透視下でおこなうように確実に脳室内にチューブを留置することができた。そのうち 5 例では burr hole を利用してペンシル型のプローブで echo-guide により脳室穿刺した。

脳腫瘍に対しては, 髄膜腫, 転移性脳腫瘍, glioblastoma は全例で脳腫瘍の局在は硬膜の上から明瞭に認識できた。Low grade の glioma の 1 例では腫瘍は hyperechoic に描出され, 確実に biopsy ができた。Color Doppler flow imaging を行った 7 症例では腫瘍周辺にある血管の検索ができ, Doppler 音から動脈と静脈の同定が可能であった。また, プローブを硬膜の上を自由に移動させることができるため腫瘍への進入方向を決定することに有用であった。腫瘍と正常脳の区別が困難な症例の biopsy を行う場合は B モードにより腫瘍内から採取していることが確認できたため, 確実な診断につながった。

Sector 型のプローブではいずれも脳内の十分な観察ができたが, linear 型ではそのサイズが大きいこと, プローブの形状と脳表の形状が合わないため 3 例でしか用いることができなかった。

脳出血例では硬膜上から出血の位置を確認でき, 血腫を除去する方向や範囲を決めることができた。

以下に代表的な症例を呈示する

症例 1

くも膜下出血後の脳動脈瘤に対するクリッピングに先立って開頭後に脳室ドレナージを行った症例で, 脳室チューブを脳室の適切な位置に留置するために冠状断の B モードで脳室前角を描出しておき, 脳室穿刺針あるいは脳室チュー

Fig.2 A: The posterior horn of the lateral ventricle visualized by B-mode imaging. B: A ventricular tube (arrows) introduced into the posterior horn. C: Postoperative CT demonstrates the ventricular tube placed in the posterior horn.

ブの脳室前角への挿入を real-time に観察し, 適切な位置に留置できるように誘導した。術後の CT で脳室チューブの位置が前角の適切な位置にあることを確認した (Fig.1)。

症例 2

52 歳男性, 左側頭葉の astrocytoma grade 3 の症例で, 8 ヶ月後両側前頭葉に再発した。水頭症を併発し傾眠傾向となったために, 脳室腹腔シャントを計画した。両側前角は腫瘍に接しているため右の側脳室後角に脳室チューブを留置することにした。右後頭側頭部に burr hole を穿ち, さらにペンシル型のプローブが硬膜の上から当てることができるように穿孔部を広げておいた。硬膜の上から B モードにより後角を同定し, real time に脳室穿刺を行った後, 脳室チューブを後角の適切な位置に挿入した。術後の CT にて, 脳室チューブが後角内に挿入されていることを確認した (Fig.2)。

症例 3

60 歳の女性で, 頭頂側頭部に小さな convexity meningioma を認めた。摘出を強く希望したため, 手術を行った。腫瘍は小さいため, 開頭後に硬膜の上から B モードで腫瘍の位置を確認し, 硬膜を必要以上に広く切開しないようにした。腫瘍は硬膜とともに一塊として摘出できた (Fig.3)。

症例 4

25 歳の男性。交通事故を起こし, 頭部 CT と MRI にて脳腫瘍を疑われた。Biopsy 目的で手術を行った。肉眼的に脳表からは腫瘍と正常脳との境界が不明瞭であったため, 確実な biopsy を行う目的で超音波エコー検査を行った。B モードで腫瘍は hyperechoic な病変として明瞭に認められ, real time に腫瘍組織の採取を確認することができた。組織は oligodendroglioma であった (Fig.4)。

症例 5

Fig. 3 A: Small convexity meningioma in the posterior temporal region demonstrated on CT and MRI. B: Intraoperative B-mode image indicates the tumor (arrow heads). C: Tumor exposed after dural opening.

Fig. 4 A: Poorly demarcated tumor demonstrated in the left frontal lobe on CT and MRI. B: Tumor is clearly seen as a hyperechoic lesion in a B mode image. Short arrows indicate the brain tumor and long arrows indicate forceps used for biopsy. C: Histological examination revealed that the tumor was an oligodendroglioma.

53歳の男性。後頭部にcystを伴った腫瘍を認め、摘出術を施行した。頭頂後頭部からBモードにより腫瘍を検索した。腫瘍の一部はcystを形成していた。Bモードで得られた腫瘍の形態はCTのaxial像と一致した形を示し、摘出にあたって腫瘍の形状をイメージすることができて安全に、かつ確実に摘出ができた (Fig. 5)。

症例 6

左前頭部の parasagittal meningioma の症例。術中BモードにColor Doppler flow imagingを加えることで、腫瘍周辺の血管構築を観察できた。血管を捕捉したときに得られるDoppler音と波形から、動脈と静脈を区別することができた。腫瘍の周辺にどのような血管があるかが分かり、摘出してゆく順序と範囲を計画する上で有用であった (Fig. 6)。

症例 7

52歳の女性でガリア静脈近傍の髄膜腫。脳血管撮影で

Fig. 5 Glioblastoma in the occipital region has the same shape as that demonstrated by CT.

Fig. 6 A: Frontal parasagittal meningioma demonstrated by CT. B, C: Intraoperative B-mode with color Doppler imaging indicates the tumor with an attached artery (circle in B) and vein (circle in C). Artery and vein could be differentiated by the Doppler waveform.

posterior choroidal artery が主要な feeding artery であり、BモードにColor Doppler flow imagingを加えることで、feeding arteryを捕らえることができた。また、腫瘍に接するように位置しているガレン静脈も同定できた。これらの情報は、腫瘍を摘出する際、最初に摘出する部位や摘出してゆく方向を決めることにきわめて有用であった。またガレン静脈と腫瘍との位置関係があらかじめ分かっていたため、腫瘍の後下方を摘出する際にガレン静脈を傷つけることがなく安全に摘出できた (Fig. 7)。

考 察

超音波の頭部への応用は1942年にDussikがAモードにより側脳室を検出したことに始まるが、本格的に応用されるようになったのは、Bモード画像が得られるようになった1970年代からである。1990年代に入るとColor Doppler flow imagingが導入され、Bモード上で血管に関する情報が得られるようになりさらに応用が広がった。

今回の使用経験から、現時点で超音波Bモードによる脳神経外科手術の支援で最も有用であると考えられることは、開頭部から病変部の局在を知り、手術操作をreal-timeにあたかも透視下で行うように観察できることである。さらにColor Doppler flow imagingを用いることで、病変部および病

Fig. 7 A: Falx meningioma in the occipital region demonstrated by CT and MRI. The feeding artery (large arrows) to the tumor is demonstrated by angiography and also by B-mode with power Doppler imaging. B: The vein of Galen (arrow heads) is adjacent to the tumor (small arrows).

変部近傍の血管構築を知ることができ、腫瘍を安全に摘出する上で有力な情報となる。また、その他の超音波検査の利点としては繰り返し行うことができること、無侵襲であること、さらに手術中の髄液の流失による brain shift であっても手術支援に影響がないことがあげられる⁴⁾。

1. 病変の描出

今回の腫瘍は髄膜腫が多かったが、髄膜腫ではもともと脳との境界が明瞭であるため腫瘍の位置を確認することは容易であった。転移性脳腫瘍は症例が少なかったが、いずれも B モードにて明瞭に同定できた。Glioma に関しては CT や MRI で明瞭に判別できる glioblastoma は B モードでも同じように明瞭に同定できた。

脳表に位置する low grade の glioma では肉眼的には病変部と正常脳との区別がつかないことが多く、biopsy あるいは摘出に躊躇することが多い。Auer ら¹⁾は超音波で得られた画像を CT と比較し、大きさや形状に関しては CT とよく相関したが、glioma では超音波の方がより実際の手術の所見に近かったとしている。今回経験した Low grade glioma は症例が 1 例と少ないものの、B モードで病変部が hyperechoic に描出され腫瘍の局在を知ることができ、確実な biopsy

ができたことから、low grade の glioma の biopsy あるいは摘出を行う上で有用であると考えられる。しかし、腫瘍周囲の浮腫は CT では低吸収域に描出されるが超音波では hyperechoic になるため腫瘍との境界が不明瞭となり、摘出にあたっては注意が必要である。

腫瘍の質的な診断については、Auer ら¹⁾は CT では腫瘍内の cyst と necrosis の鑑別が困難であるが、超音波では necrosis は isoechoic か slightly hyperechoic に描出され、cyst は hyperechoic となるため鑑別できたと報告している。しかし、超音波による腫瘍の質的な診断については、echogenicity は病理組織診断と相関しないとされるため現状では質的な診断は難しい。

腫瘍が完全に除去されたかの判断は超音波検査からは難しい¹⁰⁾。理由として、正常脳と腫瘍の境界をはっきり示すことができないことがあること、腫瘍を除去した壁に血液や、サージセルなどの止血のための材料が貼り付いてであると構造が不明瞭になり、腫瘍の残存の有無が判定しにくくなるためである。

脳内出血は急性期に手術を行うことが多いと思われるが、急性期では血腫は hyperechoic に認められ血腫の局在を容易に知ることができる。今回の経験では、硬膜上から血腫の広がりを検知し、硬膜の切開後に血腫に到達するための最も適切な進入部位を決めることができた。また、血腫の除去範囲も確認できるので適宜超音波検査を行うことでより確実な血腫除去が可能であった。

硬膜の上から病変部を描出する際の硬膜の影響については、画像の明るさには影響するが解像度は低下しない²⁾。したがって、プローブの位置を変えたり、さまざまな方向に向ける操作が必要であるときは、脳を保護するために硬膜の上から行うべきである。

2. Real-time な手術操作の描出

水頭症の治療として、脳室チューブを確実に脳室の適切な位置に留置することが必要であるが、従来の方法では脳室を正確に穿刺することは術者の技量に頼ることが多く、確実性に乏しい。そのため脳室に当たらない場合何度も穿刺を繰り返したり、また反対の脳室に穿刺したりすることがあり、安全性に問題があった。その点、B モード上で脳室の位置をとらえ、リアルタイムに脳室まで誘導することで、誰にでも確実にしかも適切な位置に穿刺や脳室チューブの留置が可能となる。特に、くも膜下出血の急性期の手術で速やかに脳の減圧を行う必要がある場合、超音波 B モードを用いることで、脳室が小さい場合でも確実にかつ速やかに脳室穿刺が可能である。前角穿刺では、まず穿刺する脳室の位置を決め、冠状断で B モードをおこない脳室の大きさが最も大きく見える位置を探し、次に穿刺方向が脳室の適当な位置に向かうようにプローブの位置を決め、脳室穿刺を行う。このように B-mode を用いることで、脳室穿刺はほとんどの症例で 1 回の穿刺で可能であった。後角穿刺に

よる脳室ドレナージは後角の位置をイメージしにくく、また後角の周辺には視床などの重要な組織があり、穿刺方向を間違えると重篤な障害を起こす可能性がある。今回後角穿刺を3例で行い、いずれも後頭部の脳表にプローブをあて後角を同定した後にガイド下に脳室穿刺を行うことで確実にかつ安全に行うことができた。

3. Color Doppler flow imaging

Bモードにカラードップラー法を加えることで、腫瘍周辺の血管構築を探索することができる。また、血流ドップラーの波形から動脈と静脈の鑑別ができるため、静脈洞に接しているような腫瘍に対して静脈洞と腫瘍との位置関係を的確に把握することで、静脈洞を損傷しないように手術を行うことが可能である。腫瘍内の血管は今回の経験からは同定は困難であった。

4. プローブ

プローブの周波数により、画像の解像度が変わってくる。High frequencyの方が画像の解像度は向上するが、超音波の到達する距離が短くなるため、深部の探索には不利になってくる。プローブの大きさに関してはburr holeから脳室穿刺などの操作を行うためには、ペンシル型の小さいプローブが適していた。Linear型では解剖学的な比率と同じように見えるため解剖学的なオリエンテーションを捉えやすいが、脳表は上方に湾曲していること、開頭範囲を大きくする必要があるためlinear型プローブを使う頻度は少なかった。Sector型を使ったBモードの特徴は、得られた画像は扇型に見える、しかも深部は浅い部位に比べ拡大されるため、解剖学的な位置関係をBモード上で構築する必要がある。そのための解剖学的なlandmarkとしては脳室、脈絡叢、falx、脳幹、小脳虫部、およびcingulate gyrusなどがあり、まず、landmarkを同定してから病変部の探索を行うことが重要である。

5. 術中神経超音波検査の問題点

欠点としては、深部の解像度が悪くなること、2次元の描出であること、組織学的な診断と必ずしも関連しないことがあげられる。

今回用いたプローブは、ペンシル型を除いては頭部専用のものではなく、そのため全体的に形状が大きく開頭範囲によってはプローブを当てる範囲が限られて、十分な検索ができない場合があった。また、超音波の支援下に手術操作を行うにはプローブを固定する機器があれば、さらに安全性が向上すると考えられる。

今後の展望としては、小さな開頭でも対応できる高解像

度のプローブの開発など、脳神経外科手術に特化したプローブの開発が望まれる。

結 語

このように、超音波Bモードによる病変の同定は簡便で侵襲も少なく繰り返し行うことができ、real-timeの解剖学的情報が得られるばかりではなく、病変周囲の血管構築の情報も得られるため手術の確実性と安全性を向上させることにきわめて有用な方法と考えられる。

本論文の要旨は第21回日本神経超音波学会にて発表した。

文 献

- 1) Auer LM, van Velthoven V: Intraoperative ultrasound (US) imaging. Comparison of pathomorphological findings in US and CT. *Acta Neurochir (Wien)* 104: 84-95, 1990
- 2) Auer LM, van Velthoven V: Intraoperative ultrasound imaging in Neurosurgery. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag 1990, pp10
- 3) Chandler WF, Knake JE, McGillicuddy JE, Lillehei KO, Silver TM: Intraoperative use of real-time ultrasonography in Neurosurgery. *J Neurosurg* 57: 157-163, 1982
- 4) Comeau RM, Sadikot AF, Fenster AF, Peters TM: Intraoperative ultrasound for guidance and tissue shift correction in image-guided Neurosurgery. *Med Phys* 27: 787-800, 2000
- 5) Gooding GA, Boggan JE, Powers SK, Martin NA, Weinstein PR: Neurosurgical sonography: intraoperative and postoperative imaging of the brain. *AJNR Am J Neuroradiol* 5: 521-525, 1984
- 6) 金沢 至, 白石一也, 神谷 博, 佐藤仁一, 益澤秀明: 穿頭孔よりの術中超音波画像診断. *脳神経外科* 14: 295-300, 1986
- 7) 尾崎高志, 田邊治之, 楠瀬幹雄, 梶本宜永, 松島滋: 開頭術中に応用した超音波断層撮影の経験—主として頭部外傷と脳内出血例—. *脳神経外科* 20: 645-649, 1992
- 8) Quencer RM, Montalvo BM: Intraoperative cranial sonography. *Neuroradiology* 28: 528-550, 1986
- 9) Strowitzki M, Moringlance JR, Steudel W: Ultrasound-based navigation during intracranial burr hole procedures: experience in a series of 100 cases. *Surg Neurol* 54: 134-144, 2000
- 10) von Velthoven V, Auer LM: Practical application of intraoperative imaging. *Acta Neurochir (Wien)* 105: 5-13, 1990