原 著

開頭術中支援としての超音波診断に関する技術的検討

綿谷崇史 吉田和道 押本 剛 北条雅人 沈 正樹 後藤泰伸 山形 専

倉敷中央病院脳神経外科

Technical Principles in Intraoperative Ultrasonography for Guidance during Intracranial Neurosurgery

Takafumi WATAYA, Kazumichi YOSHIDA, Takeshi OSHIMOTO, Masato HOJO, Masaki CHIN, Yasunobu GOTO, Sen YAMAGATA

Department of Neurosurgery, Kurashiki Central Hospital

The beneficial potential of ultrasound for neurosurgical procedures has been noted for decades. However, after intraoperative manipulations, many acknowledge that there are difficulties in obtaining high-quality images. Therefore, we analyzed the causes of these problems and possible measures to prevent them. Intraoperative ultrasonography (IOUS) was performed on patients with intracranial mass lesions using a convex-type ultrasound probe (7.5MHz). We performed mainly B-mode scan, and adjusted the imaging parameters when images were of poor quality. We obtained high-quality images with pre-procedural IOUS, but this became more difficult after surgical manipulation. We found that it was very important to position the head to allow filling of the skull with saline by rotation of the operation bed. Walls of cavities left after lesion removal by electrocoagulation and cottonoid coverings were the major causes of poor imaging of residual tumors. This problem was overcome by carrying out IOUS of residual tumors from the intact brain surface, rather than via the removal cavities. Adoption of these strategies made IOUS a very easy and useful intraoperative navigation tool.

Key words : intraoperative ultrasound, scan technique, image-guided surgery, imaging parameters

はじめに

開頭術の際、直視下に観察できない病変に対して、各種術中診断装置の開発がなされてきている。術中 CT, MRI, DSA などが近年急速に普及してきており、その有用性の報告は増加してきている^{6,10)}。しかしながら必要とされる費用や侵襲性などを考慮すると、現状ではごく限られた施設および症例でしか導入は困難と思われる。

一方、開頭術中に超音波診断装置 (B mode) を用いる報告は古くからなされており^{2,3,8)}、その非侵襲性、経済性、簡便性という特徴は疑う余地がない。それにも関わらず、超音波検査手技、画像読影、装置操作に不慣れであることなどから敬遠されがちな面も多く、その克服のために近年は各種新機能の搭載や造影剤の応用などがなされてきているが、それはひいては上記の非侵襲性、経済性、簡便性という超音波診断固有の利点を失いかねない。しかしながら実際にひとたび術中操作が加わると良質な画像を得るのは困難な事が多く、画像診断としての信頼感が非常に薄い現状である⁹⁾。術中画像診断を困難にする一大要因は操

作技術にあると考えるが、術中超音波診断に関してその技術や操作・設定などについて、詳細に解説した成書及び文献はほとんどない。今回我々は、診断技術の要点を分析し対策を検討した上で、術者によらず誰でも良質な画像を簡便に得られるべく、超音波検査技術の標準化を行った。

対象と方法

6ヶ月間に当院において開頭術を行った占拠性病変の30症例を対象にした。内訳は脳腫瘍23例、脳内出血4例、脳動静脈奇形2例、脳膿瘍1例である。胸腹部超音波診断において各施設に導入可能な標準的な装置と考えられる、ALOKA 社製 SSD-5500 と 7.5MHz を中心周波数としたコンベックス型プローブを主に利用し、造影剤、ハーモニックモードは用いず、通常の B mode にて超音波画像検査を硬膜切開直後、病変摘出中、摘出後に施行し病変部位の診断を行った。

あらかじめ正常脳実質に対して良好な画像が得られると予測される機器設定を検討し、術中超音波診断用の preset mode を作成した。具体的には、gain を 14dB, frequency

Reprint request

綿谷崇史 : 〒710-0052 倉敷市美和1-1-1 倉敷中央病院脳神経外科

Takafumi WATAYA : Department of Neurosurgery, Kurashiki Central Hospital, 1-1-1, Miwa Kurashiki, Okayama, 710-0052, Japan

[Received February 24, 2003 ; Accepted May 16, 2003]

Fig. 1 A : Preoperative axial T1-weighted magnetic resonance (MR) image with gadolinium (Gd) enhancement showing a postoperative tumor removal cavity and a hyperintense new mass lesion in the basal cistern.
B : Intraoperative ultrasonographic (IOUS) image without rotation of the patient's head. It is very difficult to identify the lesion because of artifacts in the image due to air.
C : IOUS image after rotating the patient's head to fill the removal cavity with saline. A residual hyperechoic tumor attached to the tentorium cerebelli is evident.
C, removal cavity ; T, residual tumor ; BS, brainstem

を7.5MHzに設定し、さらにはcontrast, range, frame rateも固定設定とした。まず全てのスキャンを以上の設定にて行った。良好な画質が得られない際には、各症例にてその原因を考察し、解決策を検討した。

結 果

術中超音波画質を低下させる主たる要因は以下に集約された。典型的な症例と共に、その対策を提示する。

1. プローブの非密着性

超音波診断においてプローブと検体との密着性は不可欠であるが、開頭術中には脳脊髄液は流失し、さらに脳表への圧迫過多をおそれて密着性が悪くなる事が多い。その克服法としては術野に生理食塩水を満たすことが簡便であった。しかしながら開頭野は上方を向いていないことが多く、左右いずれかに傾いているために生理食塩水を満たすことが困難である事が多かった。これは検査時に開頭術野を上方に向け、生理的食塩水が満たされるようにベッドの傾き操作により頭位及び体位を取り直すことによって、解決された。また、市販されている寒天様のパッド (SONAR-AID®) をプローブと脳表の間に置くことによって局所的な圧迫を避けつつ密着性を得ることもできた。burr hole型プローブを用いる際には、硬膜を十分に切開するか、もしくは硬膜を切開せず穿頭孔に超音波用滅菌ゼリー (Aquasonic 100®) を満たすことによって診断に十分な画質を得ることが容易になった。

【症例1】30年前に摘出された髄膜腫の再発例 (Fig.1)。抗痙攣剤無効の痙攣発作が頻発していた。MRIにて病変は小脳テントから斜斜にかけて認められる (Fig.1A)。右側頭下開頭にて摘出術を行った。前回手術による大きなremoval cavityが存在しており術中超音波画像は当初劣悪であった (Fig.1B)。手術台と頭位をローテートすることによって生理的食塩水をcavityに満たした後は良好な画像

Fig. 2 Schematic illustration of the appropriate way of scanning a residual mass lesion. IOUS scanning via the removal cavity (A) cannot visualize the residual lesion well owing to artifacts, even after filling the cavity with saline. On the other hand, the residual lesion can be easily visualized by scanning from the intact brain surface (B). Although acoustic noise was evident in any case, it did not mask the residual lesion because it appeared behind the lesion.

が得られた (Fig.1C)。

2. 術中操作による新たなアーティファクトの出現

硬膜切開直後には全ての症例において良好な画像を得ることができたが、病変の部分摘出後に残存病変を観察する際には、多くの症例で残存病変の量、状態、周囲の構造物との関係を同定することができなかった。その原因としては、シルビウス裂や脳槽に取り込まれた空気による超音波の遮断がまず原因として挙げられた。この点に関しては前項にて指摘した方法で術野の空気を排除することによって、すなわち、頭位変換にて解決された。次にあげられるアーティファクトの要因としては、摘出腔壁に広がる血腫や綿花、オキシセルロース、電気凝固された組織等が主要なものであった。これらは全て超音波を散乱させるためにその後方の構造物が視認できなくなった (Fig.2A)。対策としてはそれらの存在する面が残存病変の後方に配置されるような方向に超音波撮像を行うことによって目標病変を画像化することができた (Fig.2B)。すなわち開頭野から離れた脳室ドレナージ用の穿頭孔や摘出腔以外の正常な脳実質側からの超音波診断が有効であった。実際には皮膚切開線内でプローブを正常脳表面に密着させられる面積だけあら

Fig. 3 A : Sagittal IOUS image of an olfactory groove meningioma. Pre-procedural image (with color Doppler flow imaging) showing a homogeneous mass.

B : IOUS image obtained during removal of the tumor. It is very difficult to identify the residual mass by inserting the probe into the removal cavity. Coagulated blood or tissue on the wall of the cavity produces underlying hyperechoic halation.

C : IOUS image obtained by orienting the probe in the opposite direction from the wall of the removal cavity. The residual mass becomes clearly identifiable.

T, tumor ; D, dural attachment (olfactory groove)

Fig. 4 A : Preoperative axial T1-weighted MR image with Ga enhancement showing a large sphenoidal ridge meningioma.

B : IOUS imaging via the removal cavity. Halation makes diagnosis of the residual mass difficult.

C : IOUS imaging from the intact brain surface. The residual mass is clearly visualized.

C, removal cavity ; T, residual tumor

はじめ少し開頭範囲を広げておくだけで、病変部位の観察は非常に容易となった。術中に継続的観察が必要な場合にはあらかじめ開頭範囲の拡大や穿頭を行い、フリーアームによるプローブの脳表への密着固定が有用であった。

【症例 2】52 歳女性の嗅神経溝膜腫 (Fig.3A)。前大脳動脈の術中損傷を避けるために超音波診断画像にて適時確認しながら摘出術を行った。摘出作業を開始する前には非常に視認性のよい画像が得られたが、摘出を開始すると摘出面より遠方の残存腫瘍が hyperechoic なハレーションのために確認できなくなった (Fig.3B)。そこで開頭野の最も腫瘍から離れた部位からスキャンを行うとハレーションは摘出腔側に出現するものの残存腫瘍や腫瘍脳組織の境界面が良好に描出された (Fig.3C)。

【症例 3】右蝶形骨稜髄膜腫再発症例 (Fig.4A)。術中病理組織診断にて atypical meningioma であったために全摘出術を行うこととなった。術中 removal cavity が大きくなり、また綿花や電気凝固などの影響も加えて超音波画像診

断が困難になり、手術台のローテートなどを行うのみでは残存腫瘍と正常脳組織の区別が困難になった (Fig.4B)。摘出面からできるだけ離れた面からスキャンを行うことにより残存腫瘍のみならず脳室などの解剖が明瞭となり、全摘出に際して非常に有用であった (Fig.4C)。

3. 不適切な機器設定及び術中調整

開頭術中診断に適切と考えられる標準設定を定め、術中画質調整には限られたパラメータのみを用いる事にした。良好な画像が得られない際には contrast, gain のみを操作することによって、ほとんど全ての症例で良好な画質を得ることができた。さらに本研究にて用いた超音波診断装置においては、搭載されている AGC (auto gain control) を操作することにより脳浮腫と腫瘍性病変との境界が明瞭化された。

【症例 4】モンロー孔近傍の肺癌脳転移 (Fig.5)。急性水頭症にて発症したために、脳室ドレナージを行った。その後腫瘍内出血を併発し腫瘍摘出術を行うこととなった。

Fig. 5 A : Preoperative coronal T1-weighted MR image showing an intraventricular mass lesion, which was later shown to be a metastatic tumor.

B : IOUS image of the patient with no adjustment of the auto gain control (AGC). The tumor surface is not clearly identified.

C : IOUS image of the patient after adjustment of the AGC. The tumor can be distinguished from the surface of the lateral ventricles.

F, falx cerebri ; V, lateral ventricle ; T, tumor

脳室内腫瘍を術中超音波にて観察したが、腫瘍は出血のために MRI 画像より増大していた。脳室周囲組織との関係がやや不明瞭であったが (Fig.5B), AGC を調節することにより組織境界が明瞭化し、視認性が改善された (Fig.5C)。本機能はいわば各種パラメーターの自動調整機能であり、本症例においては contrast を優先した自動調整が行われている効果が大きいと考えている。

考 察

1980 年からの Rubin らによる脳神経外科手術中の超音波画像診断の報告以来⁸⁾、術中超音波診断は便利な術中画像診断ツールとして使用されてきた。1996 年には MRI 画像との対応が良好であるとの報告がなされており⁵⁾、部位診断のみならず、正確な切除範囲の同定にも有用であると考えられる。

近年は術中画像診断として、DSA, CT, さらに MRI と、新たなモダリティの開発は著しく進んでおり^{6,10)}、その中で古くから用いられてきている超音波画像は、その画質の悪さから敬遠される傾向にある。しかしながら、大きな手術室内機器設置変更も要さず、繰り返し、低コストで非侵襲的に行える超音波画像診断は、使いこなすことさえできれば術者の「第二の眼」として脳神経外科手術におけるその有用性に疑いの余地はない⁹⁾。

超音波診断の安全性に関しては現段階では直接脳表にプローブをあててスキャンすることによる脳神経障害の文献的報告は無いが、種々の実験によるガイドラインは各団体から作成されている。World Federation for Ultrasound in Medicine and Biology (WFUMB) の具体的な見解としては、特に通常の診断機器による B-mode スキャン単独における温度上昇効果については無視できる程度であるとしており、その他の有害効果に関しても制限を必要としないとコメン

トしている¹⁾。

文献的諸報告にては非常に分解能の高い画像が提示されているが、そのほとんどは手術操作を加える前の画像であり、術者として本当に必要なのは、術中にさまざまなアーティファクトが出現している際に得られる画像である。ひとたび手術操作が腫瘍や血腫に加えられると、止血の際に凝固変性した組織や空気などが視野中に多く出現し、超音波透過性を非常に悪くするために、劣悪な画像となることが多い。その改善のために、各種テクノロジーが超音波機器に導入されており、noise reduction のための CT や MRI 技術の応用によりソフトウェア、ハードウェア共に著しい発展があるが^{4,7)}、現状ではなお高価であり普及は困難なために、超音波ならではの簡便性・反復性やすでにどの施設にも普及しているという利点からかけ離れたものとなっている。高画質画像を得るには、技術的な要因も大きいと考えられているのであるが、その技術について詳細に言及した文献はほとんどない。

我々が今回行った研究は、腹部や心臓などの諸臓器における超音波技術書にて強調されている事項を、開頭術に応用できるように書き換えたものといえる。すなわち、密着性を向上させ、アーティファクトとなりうるものを避け、機器の設定を適切化するというものである。視野中の空気存在は超音波画像を得るには致命的となり得るが、開頭範囲の設定と術中体位変換により解決された。術中体位変換は時に困難なことがあるが、ローテーション可能な手術台の選択、体位設定時から体位変換を計画しておくことにより多くの場合で可能であると思われる。しかしながら術中の髄液の吸引や脳実質のリトラクションにより術野深部に空気が貯留してしまうことがあり、その際には詳細な観察が困難な場合も考えられる。また、特にグリオーマ摘出術中には、腫瘍組織の残存の程度が術者にとって最も必要

な情報であるために、さまざまなアーティファクトを克服しなくてはならない。術中操作によるアーティファクトに関しては、根本的には手術手技そのものを変更しない限り無くなることはないために、アーティファクトを取り除くことができれば、それらができるだけ検査画像視野から外れるようにすればよいという逆転の発想を要する。脳切開や摘出操作を加えた部位からではなく、全く術操作を加えていない方角から超音波を送ることにより、様々なアーティファクトは注目すべき範囲内の画質には影響を与えなくなる。開頭範囲をあらかじめ拡大しておくことがそのために必要な場合があるが、実際に必要な接面積はコンベックス型プローブで約1.5cm×4cm必要なだけであり、特殊な症例を除いて大きな侵襲拡大とは認識していない。むしろ、特にグリオーマ摘出の際に腫瘍組織を過不足無く摘出できるので、骨侵襲は少し拡大するかもしれないが脳実質に対する侵襲は最小限にとどめることができる。

病巣から少し離れた部位からスキャンすることになるが、画質が向上するためにむしろ部位同定は容易となり、簡易ナビゲーションとしても応用できた。バーホールタイプのフェイズドアレイ型プローブが使用できれば、開頭野から離れた部位に穿頭を加えることにより画質の著明な改善が得られる¹²⁾。プローブを固定し picture-in などでも持続的に顕微鏡視野に表示することにより、新たな術中モニタリング下手術も可能になる。実際に内視鏡手術の際に術中持続超音波画像モニタリングを行い、有効であったとの報告もある¹¹⁾。

臨床検査技師の台頭により脳神経外科医が超音波機器を直接操作する機会は減少しつつある。臨床教育においても超音波画像に重きを置かれていないという現状である。更に、近年の超音波機器の進化により、設定しなくてはならないパラメータは非常に多く、術中の限られた時間内に適切な設定に調節することは非常に難しい。また、術中診断の特徴として、プローブ操作と機器条件操作を異なる医師が行うことが多いために、適切な設定を得られないことも多い。今回の検討にて、画質を大きく改善することができる主要なパラメータは contrast, gain, frequency の3つであると我々は考え、まずは基本設定を設け、術中には基本的に前2者のパラメータのみを操作することにした。もちろんさらなる条件設定によりさらに高画質を得られる場合もあると考えるが、今回の検討においては、手術支援として十分な画質を得ることができた。

以上の検討と対策にて、当施設にては超音波診断技術が標準化でき、エキスパートでなくとも術中診断として十分な画質の超音波画像を得ることが容易になった。新たなテクノロジーや機器の購入を検討する以前に、従来機においても画質を改善できる余地が多大にあると考える。

結 語

今後は術中 CT, MRI が廉価化し、操作も簡便化してく

ることと考えられるが、超音波診断の反復性および経済性は今後もそのどれにも劣ることは無いと考えられる。超音波独自の機能であるドップラーの有用性や、対側 burr hole からの持続的モニタリング下手術などの発展性を考慮すると、今後も開頭術中超音波診断の重要性は依然高い。術中支援としての超音波画像診断における操作法を標準化することによって常に安定した画質を得ることができ、直視下に観察できない病変に対して非常に強力な武器として更に活用させることができると考えられる。

文 献

- 1) Barnett SB, Ter Haar GR, Ziskin MC, Rott HD, Duck FA, Maeda K: International recommendations and guidelines for the safe use of diagnostic ultrasound in medicine. *Ultrasound Med Biol* 26: 355-366, 2000
- 2) Chandler WF, Knake JE, McGillicuddy JE, Lillehei KO, Silver TM: Intraoperative use of real-time ultrasonography in neurosurgery. *J Neurosurg* 57: 157-163, 1982
- 3) Dohrmann GJ, Rubin JM: History of intraoperative ultrasound in neurosurgery. *Neurosurg Clin N Am* 12: 155-166, ix, 2001
- 4) Entekin RR, Porter BA, Sillesen HH, Wong AD, Cooperberg PL, Fix CH: Real-time spatial compound imaging: application to breast, vascular, and musculoskeletal ultrasound. *Semin Ultrasound CT MR* 22: 50-64, 2001
- 5) Hammoud MA, Ligon BL, elSouki R, Shi WM, Schomer DF, Sawaya R. Use of intraoperative ultrasound for localizing tumors and determining the extent of resection: a comparative study with magnetic resonance imaging. *J Neurosurg* 84: 737-741, 1996
- 6) Matula C, Rossler K, Reddy M, Schindler E, Koos WT: Intraoperative computed tomography guided neuronavigation: concepts, efficiency, and work flow. *Comput Aided Surg* 3: 174-182, 1998
- 7) Otsuki H, Nakatani S, Yamasaki M, Kinoshita A, Iwamoto F, Kagawa N: Intraoperative ultrasound arteriography with the "Coded Harmonic Angio" technique. Report of three cases. *J Neurosurg* 94: 992-995, 2001
- 8) Rubin JM, Mirfakhraee M, Duda EE, Dohrmann GJ, Brown F: Intraoperative ultrasound examination of the brain. *Radiology* 137: 831-832, 1980
- 9) Rubin JM, Quint DJ: Intraoperative US versus intraoperative MR imaging for guidance during intracranial neurosurgery. *Radiology* 215: 917-918, 2000
- 10) Schwartz RB, Hsu L, Wong TZ, Kacher DF, Zamani AA, Black PM, Alexander E 3rd, Stieg PE, Moriarty TM, Martin CA, Kikinis R, Jolesz FA: Intraoperative MR imaging guidance for intracranial neurosurgery: experience with the first 200 cases. *Radiology* 211: 477-488, 1999

- 11) Strowitzki M, Kiefer M, Steudel WI: A new method of ultrasonic guidance of neuroendoscopic procedures. Technical note. J Neurosurg 96: 628-632, 2002
- 12) Strowitzki M, Moringlane JR, Steudel W: Ultrasound-based navigation during intracranial burr hole procedures: experience in a series of 100 cases. Surg Neurol 54: 134-144, 2000