

# 腹腔鏡下手術のための新規超音波プローブの開発 —臓器をあらゆる方向から診るために—

New Echo Probe for Laparoscopic Surgery –To look Organs from every Direction–

金子 順一 Junichi Kaneko  
宮田 明典 Akinori Miyata  
有田 淳一 Junichi Arita  
長谷川 潔 Kiyoshi Hasegawa  
国土 典宏 Norihiro Kokudo

工藤 宏樹 Hiroki Kudo  
山本 訓史 Satoshi Yamamoto  
赤松 延久 Nobuhisa Akamatsu  
菅原 寧彦 Yasuhiko Sugawara

東京大学医学部附属病院 肝胆膵・人工臓器移植外科

従来の腹腔鏡下手術用超音波プローブは、硬性シャフトのため臓器の観察可能な範囲が制限されていた。今回、新規開発した超音波プローブは、硬性シャフト部分をケーブルに変更し、プローブを小型化したうえ高性能化した。この新規プローブにより、腹腔鏡下手術でも開腹と同等の診断能力を実現できる可能性が高くなり、ロボット手術も含む腹腔鏡下手術の発展に大きな役割が期待される。

The conventional ultrasonography probe for laparoscopic surgery has a long stiffness shaft. Thereby, only narrow area on abdominal organ can be scanned. We developed new laparoscopic surgery probe that has a flexible shaft and a smaller probe head and that is equipped with contrast-harmonic ultrasonography and elastography functions. New probe is expected to have potential to provide same high quality image for open surgery to diagnose under laparoscopic surgery and is also expected to be a big role for growing laparoscopic surgery including robotic surgery.

**Key Words:** Ultrasonography Probe, Elastography, Laparoscopic Surgery

## 1. はじめに

開腹手術中、外科医は直接手で臓器に触れ腫瘍の位置を確認する触診という方法を行うが、腹腔鏡下手術では鉗子を通しての触診しかできず、感度は大幅に低下する。近年普及してきたロボット下手術では触診は行うことはできず、基本的に外科医の触覚が完全に遮断された状態で手術を行う必要がある。このような状況において、触診を代替するものとして術中超音波検査があらためて注目されている。

## 2. 術中超音波検査と腹腔鏡下手術

超音波検査は、通常体表に超音波プローブを当てて行うが、術中超音波検査は開腹手術で腹腔内臓器表面に直接プローブを接触させることで診断する。この、術中超音波検査は、肝臓外科において、驚くほど肝内の解剖や病変を鮮明に見ることができ、目的とする腫瘍の質的診断、位置の確認が容易なだけでなく、肝内血管の走行を確認しながら正確な肝切除に必要な肝切離線の決定が可能で、肝切除手術の安全性

向上に寄与している。近年増加している腹腔鏡下で行う肝切除術は、腹壁に作成した小孔(トロッカー)から挿入したビデオスコープで腹腔内を観察し、別の複数の小孔から長いシャフトを持つ鉗子で対象物を操作することで、大きく開腹(腹壁を大きく切開)することなく低侵襲な手術を実現できるとされる。しかし、腹腔鏡下手術における術中超音波検査は、開腹と同等の術中診断能と正確性が再現できるかについてはいまだ分かっていない。

### 3. 開発の背景と経緯

従来から、腹腔鏡下に小孔を通して体内で術中超音波検査が可能な形状の腹腔鏡下手術用超音波プローブが開発されてきた。しかし、今までのプローブは問題点があった。それは、観察のしにくさと観察可能な範囲の狭さである。例えば、腹腔鏡下肝切除術では、腹腔内に出入りするための経路が限られており、従来の腹腔鏡下超音波プローブは、一般的な内視鏡と同様に先端のプローブと硬性シャフトの間的一部分がフレキシブルに動くようになっており、先端のプローブを左右上下に向けることができる(図1)。このプローブの操作範囲は腹壁に設置した小孔の位置と腹腔鏡下超音波プローブの硬性シャフトに大きく影響を受け、プローブの稼働範囲は制約を受ける。例えば、先端を下方に屈曲させながら左右に移動させることや先端を硬性シャフトと直角に回転させる動きを利用した検査は困難で、時に目的としていた病変を見失うことがある。

われわれは、既に海外のロボット下手術で応用されている超音波プローブ(UST-5550-R、Hitachi Aloka Medical America, Inc., Wallingford, CT)を参考にし、2011年より新規超音波プローブを開発した。UST-5550-Rの形状は従来の腹腔鏡下超音波プローブの形状(図1)と異なり、先端を小型化し硬性シャフト形状を廃止、細く柔軟なケーブルで小孔を通して体外の超音波機器本体に接続し画像を得ることができる(図2)。小型化された超音波プローブを鉗子で把持し腹腔内で操作することで、2本の鉗子(術者(ロボット含む)の両手または、術者の片手と助手の片手)同士で受け渡しすることや

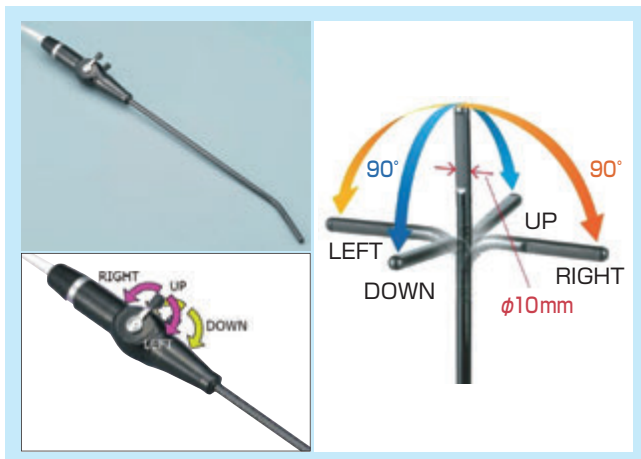


図1：従来の腹腔鏡下超音波プローブ

方向転換が可能となり、腹腔内での可動域が広がる。特に肝臓の場合、超音波プローブを当て操作したい肝臓の頭側の肝表面は、仰臥位の時に体の軸に対し垂直となる。この時超音波プローブを横に把持したまま、肝の垂直面に当てることは従来の硬性シャフト型の超音波プローブでは困難である。一方、UST-5550-Rは後述する造影超音波検査、Elastography検査、ブロードバンドハーモニクス、空間コンパウンドイメージングに対応していなかった。

UST-5550-Rの形状を採用し、よりプローブを小型化し(図2)、いくつかの技術へ対応するように高性能化することと画質の大幅な向上にも取り組んだ。また、医師のチームは腹腔鏡下肝切除を目的として、新規プローブをいくつかの腹腔鏡用の鉗子を使用し、腹腔内においてつかみやすいか、確実な把持力の維持ができるかどうかについて、プローブの羽(突起)の形状の検討を重ね、試作品を作成した(図3)。



図2：UST-5550-R(下)と新規超音波プローブ(上)<sup>(※2)</sup>



図3：新規超音波プローブの羽(突起)の形状の検討

### 4. 新規プローブにより実現した技術

(1) High Definition Tissue Harmonic Imaging(HdTHI)<sup>(※3)</sup>

広帯域送信によって入射された超音波が、生体内組織を伝搬するにつれて生じる非線形効果により生じる高調波成分を

利用して画像を構成する技術(ハーモニックエコー)においても従来方式では得られなかった高い深部感度と距離分解能の両立が可能となる。二次高調波の特性を生かした、多重エコーノイズやサイドローブアーティファクト(副極による虚像)の低減効果に加え、より向上した感度と距離分解能により、画像全体において精細な描出力が可能となる。

### (2)Compound Imaging(空間コンパウンドイメージング)

管腔構造を、より鮮明に描出するために、超音波を複数方向からスキャンさせた画像を重ね合わせることで、管腔の側壁構造などの描写能力を向上させたものである。実質臓器の粒状の模様(スペックルパターン)がより細かく表示され、ビーム方向に依存するアーティファクトが低減される。

### (3)Trapezoidal Scan

Trapezoidal Scanは、リニア探触子では視野(スキャン範囲)がほぼ長方形に表示されるところを、限られたスキャン範囲を可能な限り広げ、深部をより幅広くスキャンし台形状(trapezoidal)に表示するものである(図4a: 超音波断層像(B-mode画像))。

### (4)術中造影超音波と振幅変調法(Tissue Reduction Contrast Harmonic Imaging(TrC)、Amplitude Modulation法)

近年普及した造影超音波検査は、造影エコー情報のみを正確に抽出することを目的とし、造影剤投与前の生体組織からの信号を極力抑えた状態(TrC)で検査を開始する必要がある。TrCとは、振幅変調法で、位相は同じでも振幅が異なる2つのパルス波(例として1倍の振幅と1/2倍の振幅)を発生させ、2つの反射波のうち、最初のパルスから2度目のパルスを2倍したものを引き算し得られた波を画像化する。この、振幅変調法は深部造影感度に優れるとされる。Sonazoid<sup>®1</sup>(第二世代perflubutane超音波診断用造影剤、第一三共株式会社)のように比較的高い音圧を使用する場合は組織からのハーモニック成分を抑えバブルからの信号を強調する手法でバブル/組織信号比を上げるのに有効とされる<sup>1)</sup>。新規プローブのコントラスト画像設定(Contrast Harmonic Echo)はこのTrCに近似した方法を用いており、周波数は4MHz、超音波による非熱的作用の安全性の指標であるMI(Mechanical Index)値は0.20前後となる。

術中造影超音波の報告によると、Aritaらは195例の肝細胞癌患者を対象に、Sonazoidを用いた術中超音波と既存の術前画像の肝細胞癌の診断能の比較を行い、術中造影超音波が感度65%、特異度94%、正診率87%であり、16例(8%)で術前およびBモードの術中超音波でも指摘できなかった病変21個を新たに発見したことを報告し、Sonazoidによるスクリーニングの有用性を示した<sup>2)</sup>。Takahashiらは、102例の大腸癌肝転移例を対象に術中造影超音波を適用し、術前の315結節に対して、従来の術中超音波までで350結節、術中造影超音波でさらに20結節が追加で指摘され、術中造影超音波の診断能は感度97%、特異度59%、正診率93%であり、129件中19件で術式の変更が発生したと報告した<sup>3)</sup>。このように開腹肝切除では術中に病変の良悪性の判断や、新規病変の発

見に活用されている。本機能を新規プローブに搭載し、腹腔鏡下肝切除での応用が期待される。新規プローブによる最初の画像(Tissue Reduction画像)を示す(図4b)。

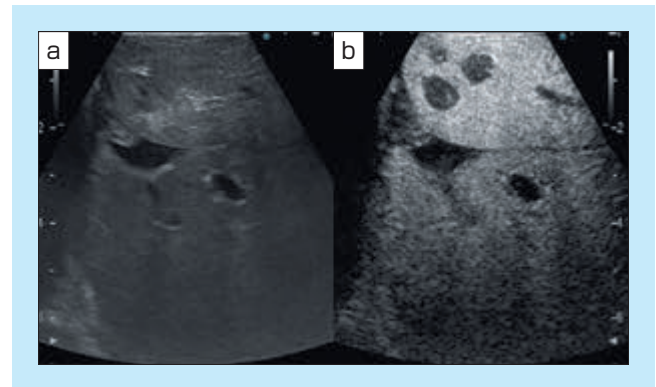


図4: 新規超音波プローブの画像

a: 超音波断層像(B-mode画像)

b: 造影超音波のTrC画像

### (5)Real-time Tissue Elastography<sup>\*\*4</sup>(RTE)

触診は医師の手指によってなされ、外科手術においても視診とともに適切な手術を進めるために重要である。しかし触診は客観性が低く、定量化することは比較的困難である。触診から得る情報を客観的に評価する手法として、RTEと言われる超音波を用いた組織弾性Imaging技術が開発されてきた。本技術により組織性状としての組織の硬さが新たな情報として得られ、医療現場において腫瘍の鑑別能を向上させる可能性が示唆されている。この手法は、体表から静圧を加えた時の組織の変形率(歪み分布)の画像化を行ったものである。RTEは、弾性画像に必要なコア演算アルゴリズムとして、複合自己相関法を適用している<sup>4)</sup>。複合自己相関法とは、超音波受信信号を用いて弾性情報の基となる変位の情報を得る方法であり、まず圧迫前後の高周波信号の包絡線(エンベロープ)の情報を用いて相関係数の演算を行い、大まかな変位を生じない領域を検出する。次にその位相差の情報を用いて領域中で細かく変位を較正していく方法であり、これにより効率的に高精細な変位を演算できると同時に、波長以下の微小な変位から波長以上の大きな変位まで広範囲に安定して求めることができ、手動的圧迫に適した処理法である<sup>5)6)</sup>。

超音波検査は肝臓領域において長く非侵襲的かつ簡便な診断法として用いられてきており、術中に肝内の腫瘍性病変をElastographyで描出する試みがなされている<sup>7)8)</sup>。Strain Imagingは、対象にプローブで軽い外圧を加えて変形させた際の組織の歪み具合を画像化する技術である。Strain Imaging法の一つである前述のRTEにより、肝切除中に、全方向から肝を探索することが可能である。術中Elastographyの報告については、Omichiらは158人開腹手術で92個の肝細胞癌、92個の腺癌、19個のほかの悪性腫瘍、18個の良性腫瘍に対し診断を試みた。肝細胞癌に対してのElastographyの感度は83%、特異度は67%、腺癌に対しての感度は73%、特異度は95%であったと報告した<sup>9)</sup>。新規プローブでRTEを導

入した場合、腹腔鏡下肝切除において触診に代わる方法として期待される。新規プローブによるRTEの画像を示す(図5)。

## 5. 臨床応用の実際

実際に臨床応用する機会を得たのでここで報告する。超音波画像は既に提示したように、従来の鏡視下手術用超音波プローブと比べて、撮像した画像の解像度は格段に上がり、造影超音波検査(図4b)やElastography(図5b)にも対応し、明瞭な画像が得られた。また、小孔を經由して腹腔内に落とし込んでから、プローブ先端を鉗子でつかむことで、複数の鉗子でプローブの受け渡しができるなど、自由度が増している(図6)。従来超音波検査がやや困難であった、肝の頭側の深部に関しても超音波検査を行えることが確認された。

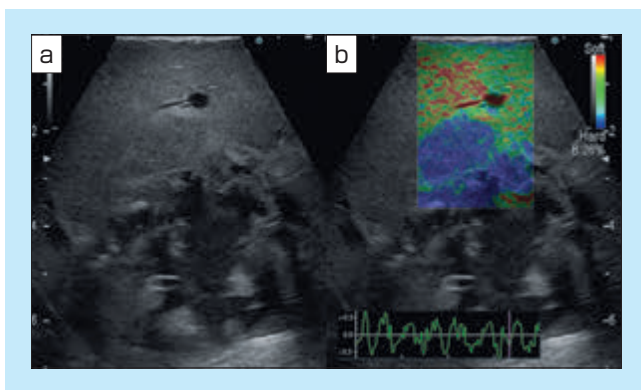


図5：新規超音波プローブのRTEの画像

a：超音波断層像(B-mode画像)

b：RTEの画像

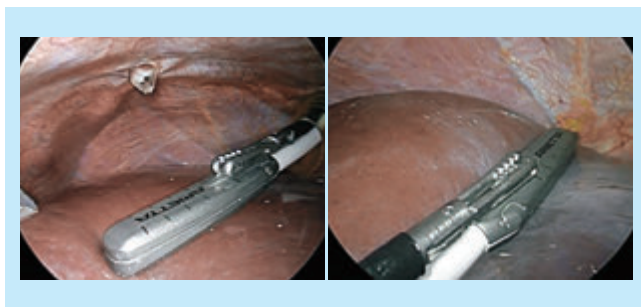


図6：新規超音波プローブの操作の実際

腹腔鏡用の鉗子でプローブの突起を把持し、肝表に当てている。

## 6. おわりに

新規プローブの開発とその経過、および初の臨床応用例を報告した。術中超音波検査は厚い腹壁を超えて直接臓器を診るため、小さな病変を鮮明に見ることができる。今回開発した腹腔鏡超音波プローブによって、より詳細に臓器を観察することができ、腹腔鏡下肝切除においても開腹と同等の診断能力を実現できる可能性が高くなった。ロボット手術も含め、腹腔鏡下手術の発展に大きな役割が期待される。

※1 SONAZOIDはジーイー・ヘルスケア・アクスイエ・セルスカブの登録商標です。

※2 ARIETTAおよびALOKAは日立アロカメディカル株式会社の登録商標です。

※3 HdTHI、※4 Real-time Tissue Elastographyは株式会社日立メディコの登録商標です。

## 参考文献

- 1) 森安史典, ほか：次世代造影剤「Sonazoid」の基礎と臨床 新しい超音波造影剤Sonazoidによる肝腫瘍診断 造影の基礎. INNERVISION. 2007 ; 22(5付録) : 2-7.
- 2) Arita J, et al. : Usefulness of contrast-enhanced intraoperative ultrasound using Sonazoid in patients with hepatocellular carcinoma. Ann Surg. 2011 ; 254(6) : 992-9.
- 3) Takahashi M, et al. : Contrast-enhanced intraoperative ultrasonography using perfluorobutane microbubbles for the enumeration of colorectal liver metastases. Br J Surg. 2012 ; 99(9) : 1271-7.
- 4) Shiina T, et al. : Strain imaging using combined RF and envelope autocorrelation processing. Ultrasonics Symposium, 1996 Proceedings, 1996 IEEE ; 1996 : p.1331-6.
- 5) Yamakawa M, et al. : Strain estimation using the extended combined autocorrelation method. Jpn J Applied Physics Part 1. 2001 ; 40 : 3872-6.
- 6) 松村 剛, ほか：Real-time Tissue Elastography技術の開発. MEDIX, 41 : 30-35, 2004.
- 7) 井上陽介, ほか：【肝切除をめぐる最近の話題】最新の肝術中超音波とエラストグラフィ. 外科. 2013 ; 75(11) : 1165-71.
- 8) Inoue Y, et al. : Intra-operative freehand real-time elastography for small focal liver lesions : “visual palpation” for non-palpable tumors. Surgery. 2010 ; 148(5) : 1000-11.
- 9) Omichi K, et al. : Differential diagnosis of liver tumours using intraoperative real-time tissue elastography. Br J Surg. 2015 102(3) : 246-53.