2. 超音波画像技術の応用

2-1 医学の応用

——パルス反射法による生体映像法の現状——

竹 原 靖 明†

1. ま え が き

近代医学の開花は、診断学、とくに生体映像法の進歩に負うところがきわめて大きい。しかし、これらの生体映像法には、正確な情報を与える一方、被検者に何らかの苦痛や障害を与える欠点も有していた。

超音波検査は、無痛で障害も皆無に等しいうえ、軟部組織の解像力に優れ、さらに電子スキャンなどの開発によって、心拍や呼吸によって運動する臓器の断面がリアルタイムで観察できるようになり、新しい生体映像法として高い臨床評価を受けている。本稿では、この中心的存在であるパルス反射法による超音波診断の現状について紹介する。

2. パルス反射法による超音波診断の歩み

医学の世界では打診法や聴診法にみられるように、音は古くから診断に利用されていた。超音波という聞くことを必要としない音を診断学の分野に導入したのは1940年代になってからで、K. T. Dussik (1942~49, オーストリア)の報告をもって嚆矢とされている。この内容は、超音波を透過して脳室系を描写するもので、診断に貢献するほどの成果は得られなかった。しかし、診断学の分野に超音波という波動を導入し、生体軟部組織の描写能力についてX線に優ることを立証して、今日の超音波診断への端緒を開いたという点では画期的な研究であった。

現在、超音波診断の主流をなしているパルス反射法に関する研究は、1950年に入ってから J. J. Wild, G. T. Ludwig および D. H. Howry らによって着手された。一方、わが国においても、ほぼ時を同じくして菊池、田

中、和賀井、内田らによって開始された。この時期に使用された機器は、金属用超音波探傷器に少し手を加えた程度のAモード表示装置で、頭蓋内構造の描写および脳腫瘍などの検出に主力が注がれた。当時は透過法と反射法が並行して研究され、その有用性について論議が盛んであったが、1956年、ケンブリッジで開かれた国際音響学会議を境にパルス反射法が主流の座を占め、今日に至っている。

現在、超音波診断装置の中心的存在であるBモード表示は、1952年、J. J. Wild が、two dimensional echoscope とよばれる Chamber 式の水浸法で乳房の描写に成功したのをはしりに登場してきた。D. H. Howry はセクター走査で摘出した肝の断面を描写 (1952)、ついで Somascope と呼ばれる compound circular scanning を発表した (1957)。また菊池らは水浸法で脳の断面像を描写、この方式を Ultrasono-Tomography と命名した (1956)。

現在、腹部、産婦人科領域で広く利用されている接触複合走査法 (Contact Compound Scan 以下 C. C. Scan) は I. Donald (1958) によってはじめられ、超音波診断装置の歴史に一頁を開いた。1960年に入り G. Kossoff は水浸法で Arc sector scan を行い、胎児を鮮明に描写し、この原理を拡大して1975年、全自動で乳房や腹部の断面像を描写する U. I. Octoson を開発した。

最近、普及の兆を見せている泌尿器科領域の超音波診断の中心的存在である経直腸的ラジアル走査法は、高橋、大内 (1964) によって着手され、渡辺ら (1967) によって改良が加えられ、実用化への端緒が開かれた。

電子走査形装置は1971年、Bom らや内田らにより開発され、とくに内田らの方式は現在、広く利用されているリニア電子走査形装置 (以下リニア電子スキャン) の基本形をなすものである。ついで飯沼ら (1975) は、彼らの装置の欠点といわれる走査線密度や方位分解能の向

† 関東中央病院
“Clinical Application of Ultrasound” —Diagnostic Imaging by
Pulse Reflection Method— by Yasuaki Takehara (Kanto
Central Hospital, Tokyo)

上に力点を置いた高分解能を有する装置の開発・実用化に成功した。

電子スキャンには、リニア走査形とセクター走査形があり、主として前者は腹部全般の、後者は循環器領域の診断に供され、昨今の爆発的普及の原動力となっている。また、探触子に種々の改良が加えられ、臓器穿刺術、術中診断法、集団検診、および体腔式診断など多方面で活用されている。

Mモードは、スウェーデンの Edler や Hertz(1954~57) がAモードで心臓の弁運動のエコーをとらえ、フィルムを一定速度で流して記録したことに始まるとされており、現在、心臓検査の必須とされる M モードによる U. C. G. (Ultrasound Cardiography) への道が開けた。

3. 超音波診断装置の種類とその臨床応用

3.1 Aモード表示装置の臨床応用

このようにパルス反射法による診断は、まずAモードに始まり、次いでBモード、Mモード表示と発展してきた。この方式によって表示されるエコーパターンは、被検対象物の大きさや距離の計測には便利であるが、1次元像であるため客観性や再現性が乏しく、現在では種々の計測の他は一部の施設で頭部検査に利用されているに過ぎない。

この方法は、正中線エコー (midline echo) の変移の有無により、頭蓋内の占拠性病変、たとえば血腫や腫瘍の存在診断にスクリーニング的に利用されていたが、X線 C. T の登場により衰微の一途を辿りつつある (写真1)。

3.2 Bモード表示装置の臨床応用

(1) 画像の変遷

これはAモードで得られるエコーを輝度変調し、ブラウン管などにエコーの強さ (振幅の大きさ) に応じた明るさの強弱で表示する方式である。したがって、この方式ではビームの入射する方向と走査する方向からなる2次元像、すなわち断面像が得られる。この種の装置によ

写真1 Aモード表示、2素子法によるミッドラインエコー (✓)

写真2 ダイナミックレンジのせまい装置で撮った胆石症 (✓) のエコーグラム

相対感度

0dB

-5

-10

-15

写真3 感度断層法による乳癌のエコーグラム

る断面像には、画像の表示の仕方にいくつかの変遷があった。初期の装置は分解能が悪いうえに、増幅器の増幅度やブラウン管の表示能力にも限界があり、表示像は中間調が少なく階調性の乏しい白黒の像として表示された(写真2)。

このような白黒の階調のダイナミックレンジの狭い装置では、生体内部から返ってくる種々の強さのエコーを、1枚の表示像のなかに描き出すことは不可能であり、また同一物を表示させても感度のわずかな変化によって表示パターンが大きく変化する欠点があった。このような欠点を補い、かつパターン認識を共通の立場から論議できるようにするために、1965年菊池によって“感度断層法”(sensitivity graded tomography)なる方法が提案された。

この方法は、エコーグラムの読影に感度の次元を加えようとしたもので、AモードやBモードで得られるエコーの強さをある程度、定量的に把握でき、また、一定の感度変化によって得られる一連のパターンを1つのグループとして読影の資料に供するため、情報量が著しく増加するという利点があり、日本独自のすぐれた診断法として、現在もおお一部で利用されている(写真3)。

一方、井出らは、生体から返ってくる種々の強さのエコーを1枚の表示パターンの中にエコーレベルに応じた白黒の明暗の濃淡として表示する方式について報告し、和賀井はその臨床応用における有用性を発表した(1967～68)。

1973年、第2回世界超音波医学会議において、オーストラリアのG. Kossoffはグレイスケールエコーグラフィと称して、階調性のすぐれたエコーグラムを発表し、世界的な脚光を浴びた。このような画質の改善は分解能の向上と相まって、超音波診断機器への評価を著し

く高めた。

このグレイスケールエコーグラフィに続いて、リアルタイム表示装置を代表する高分解能の電子スキャンが開発され、超音波診断の有用性を不動のものとした。電子スキャンは探触子の操作がきわめて簡便であるため、検査時間は短く、また像の描写に熟練を要さず、運動する臓器の動態をリアルタイムに観察できる利点があり、心臓、血管、肝胆道系、産科および泌尿器科領域の診断に不可欠のものとなっている。

(2) その臨床応用

Bモード表示装置には、手動走査形、機械走査形、および電子走査形の3種類があり(表1)、広汎な領域の診断に供されている。またこれら3種類の装置には、検査目的とする臓器に適するよう走査方式がつくられており(図1)、次のような領域で活用されている。

(a) 乳腺、甲状腺の検査 この領域の超音波検査には、もっぱら水浸法が用いられている。この方法は、ごく薄いビニール製の水袋に脱気水を入れ、これを前頸部(甲状腺)や乳房の皮膚に密着固定し、この中を探触子が自動的に低速で走査して断面像を描かせるものである。この場合の探触子の走査方式には、リニアスキャンとアークスキャンがあるが、最近では後者が多用されている(写真4)。

現在の装置は、探触子の走査する範囲が狭いため、触診によって腫瘤などの存在部位を確かめた後、その質的判定のために使用されているが、最近電子スキャンの技術を導入して、走査範囲の広い触診を前提としない集団検診用の装置が開発されている。

(b) 循環器領域の検査 最近、機械的あるいは電子的に高速度でビームを走査させる装置、すなわち高速度メカニカルスキャンや電子スキャンが開発、実用化さ

図1 走査方式の種類

表 1

写真 4 水浸法、アーク走査方式による乳房検査

写真 5 セクター電子スキャンによる心臓長軸断層像
(僧帽弁狭窄と大動脈弁狭窄の連合弁膜症)

れ、心臓の運動する断面を長時間で観察記録できるようになった。この種の装置にはリニアスキャンとセクタースキャンがあるが、心臓の検査では、肋間という狭い echowindow から広い範囲の情報を得る必要があるため、主としてセクタースキャンが活用されている(写真 5)。

この領域では、従来から Mモードによる U. C. G. が活用されている。これは弁運動などを 1 次元的に表現したものであるが、これに 2 次元の像が得られるこれらの装置が加わり、U. C. G. と共に循環器領域では欠くことのできない検査法になっている。

ここで最近の話題のひとつである Contrast Echocardiography について紹介する。この方法は 1969 年 Rochester 大学の Gramiak らによって提唱されたもので、心腔内にエコーを発生させるコントラスト剤を注入し、

その動きを観察することにより心臓動態や血流の状態を探知する方法である。コントラスト剤には生理的食塩水やブドウ糖などが用いられ、末梢静脈からと心カテーテルを通して注入する方法がある。

前者は、右心系の疾患(三尖弁閉鎖不全狭窄、肺動脈弁疾患、先天性の短絡を有するもの)の診断に、後者は右心系のみならず左心系の疾患(僧帽弁、大動脈弁などの疾患、先天性の短絡を有する疾患など)の診断に用いられている。

最近、このコントラスト法は、U. C. G と心臓断層法との併用により、異状流の性質、逆流や短絡流の量的評価、また流速や流量の計測など、定量的測定へと発展しつつある。

(c) 消化器領域の検査 この領域で超音波検査の

写真 6 リニア電子スキャンによる消化器疾患のエコーグラム (gb: 胆嚢, ao: 大動脈, p: 膵臓)

写真 7 C.C. Scan で記録した転移性肝癌(✓)のエコーグラム

対象となる臓器は、肝・膵・脾などの実質性臓器と胆道であり、食道・胃・腸などの管腔臓器はガスの貯溜のため超音波検査には不適である。疾患別では腫瘍（リンパ節転移を含む）・結石症・慢性炎症などが対象になる（写真 6）。

使用される装置は、従来、主に手動走査形装置が用い

られてきた。この装置は皮膚に探触子を接触させ手動で走査することから接触複合走査法 (C. C. Scan) と呼ばれている。この C.C. Scan の長所は、像が緻密かつ鮮明であること、1 回の走査で得られる視野が広いために、周辺臓器との位置関係を含めた全体像が得られることで、肝・膵・脾臓などの実質臓器の腫瘍の検出に適している（写真 7）。

しかし探触子の操作に熟練を要することと、実時間で観察することができない欠点があるため、呼吸性に移動しやすい臓器や位置異常の多い臓器には不適當である。この点、電子スキャンは実時間で観察でき、かつ探触子の操作が簡便で熟練を要しないため、種々の部位や角度からビームを走査することができ、肝内血管、胆嚢、胆管などの観察に適している（写真 8）。

したがって腹部の検査においては、スクリーニングとして電子走査形を用い、走査位置や角度を決定した後、C.C. Scan により、再度断面像を描写するなど被検臓器や疾患によって両装置が使い分けられている。この領域

写真 8 リニア電子スキャンによる各種血管像 (gb: 胆嚢, pv: 門脈, p: 膵臓, sma: 上腸間膜動脈, ao: 大動脈, sv: 脾静脈, lrv: 左腎静脈)

写真 9 リニア電子走査形臓器穿刺用探触子
(中央に穿刺針を通す溝がある)

の検査には、通常リニア走査形の電子スキャンが用いられている。

ついでながら、ここで電子スキャンの利点を生かした新しい利用法を紹介すると、まず第一は、肝・胆道系の集団検診への導入である。従来は経口胆嚢造影法がもっぱら用いられていたが、造影剤による副作用やX線被曝の問題があるうえ、胆嚢の描写率や小結石の検出率が超音波に劣り、さらに超音波検査では、膵・腎・脾などの周辺重要臓器も同時に簡単にチェックできることから、経口胆嚢造影法にとって代わりつつある現状である。

第二は、各種穿刺法の利用である。これは“超音波穿刺術”(Ultrasonically Guided Puncture)とも呼ばれ、超音波映像をガイドに臓器を穿刺する方法で(写真 9)

- ① 胆管・膵管、脈管などの造影
- ② 組織や細胞の採取
- ③ ドレナージ

などを行う場合に利用されている。

第三は、術中診断への応用である。この方法は、現用の電子スキャンの探触子を改良して小形化したものを用いて、術中、たとえば肝などに直接あてて腫瘍の浸潤度、門脈、肝静脈などとの関係をリアルタイムに観察しながら切除範囲を決定するもので、肝臓手術などの分野に利用され始めている。

写真 11 経直腸的ラジアル走査で記録した正常前立腺像(✓)

写真 12 経直腸縦断層法を行うために開発した探触子
(リニア電子スキャン)

(d) 産婦人科領域の検査 この領域の検査では、前述した消化器領域の場合と同様、従来から C. C. Scan が主に使用されていたが、最近リニア電子スキャンが活用され、子宮内胎児の運動・畸形など診断目的が拡大されている(写真 10)。

(e) 泌尿器科領域の検査 腎腫瘍や腎嚢胞などの腎疾患や副腎腫瘍の検査には、C. C. Scan や、リニア電子スキャン、セクター電子スキャンが用いられているが、膀胱・前立腺・精嚢などの疾患にはラジアルスキャンによる経直腸超音波診断装置が用いられている。

この方法は、被検者の肛門より直腸内にゴムバルーンで包まれた探触子を挿入し、脱気水を注入してバルーンを膨らませ、探触子を機械的に 380° 回転して、任意の高さでの断面像を描かせるものである(写真 11)。最近では、経直腸用のリニア電子スキャンの探触子(写真 12)が開発され、一段と使用が簡便化された。

写真 10 リニア電子スキャンでコマ撮りした連動する胆児像 (15 週 4 日)

写真 13 経直腸的リニア電子走査形探触子を用いて記録した正常前立腺縦断面層像

表 2 現在一般的に実施されている超音波検査の適応範囲と使用装置の種類

領 域	疾患または検査対象	使用装置の種類
頭 部	正中線エコーの検出, 頭蓋内血腫, 脳腫瘍, 水頭症, 頭蓋内拍動性エコーの検出	A, 拍動エコー曲線
眼 科	眼軸長測定, 眼球異物, 出血, 網膜剝離, 眼窩腫瘍	A, B (手, 機(低))
耳 鼻 咽 喉 科	側頸部腫瘍 ultrasono-glottography	B (機(低)リ, ア), M
甲 状 腺	甲状腺腫瘍, 甲状腺重量測定	B (機(低)リ, ア)
乳 腺	乳腺腫瘍	B (機(低)リ, ア)
心 臓	先天性疾患, 各種弁疾患, 心筋疾患, 心嚢炎, 血流測定	B (機(高)セ, 電セ) M (U. C. G.) D (パ, M系)
血 管	動脈瘤, 血流計測	B (手, 機(高)リ, 電リ) D (パ, M系)
肺 ・ 縦 隔	縦隔腫瘍	B (手, 電, リ, セ, 機(高)セ)
胆 嚢 胆 管	胆石症, 胆管結石, 胆嚢・胆管腫瘍, 総胆管嚢腫	B (電リ, 手, 機(高)リ)
肝 臓	肝硬変症, 肝腫瘍	B (電リ, 手, 機(高)リ)
脾 臓	慢性脾炎, 脾腫瘍	B (電リ, 手, 機(高)リ)
脾 臓	脾腫	B (電リ, 手, 機(高)リ)
腹部腫瘍全般	大網腸間膜腫瘍, 後腹膜腫瘍, その他腹部腫瘍全般	B (電リ, 手, 機(高)リ)
子宮・付属器	子宮筋腫, 卵巣腫瘍	B (電リ, 手, 機(高)リ)
産 科	妊娠早期診断, 胎盤附着部位診断, 胎児児頭計測, 骨盤計測, 異常妊娠	B (電リ, 手, 機(高)リ), A, D (連), M
泌 尿 器 科	腎腫瘍, 水腎症, 前立腺肥大, 前立腺癌, 膀胱腫瘍, 精嚢疾患, 副腎腫瘍	B (手ラ, 機ラ, 電リ電セ)

(注) A: Aモード表示装置

B: B " "

手: 手動走査型

機(低): 低速機械走査型

機(高): 高速 " "

電: 電子走査型

リ: リニア

セ: セクター

ア: アーク

ラ: ラジアル

M: Mモード表示装置

D: ドブラ装置

連: 連続波ドブラ

パ: パルスドブラ

M系: M系列変調ドブラ

この方式で得られる画像は、ラジアルスキャンの横断面像に対して縦断面像になる。そのうえリアルタイム表示であるため膀胱頸部および前立腺部尿道の動態観察が可能になり、排尿機構の解明に大きな期待が寄せられている(写真 13)。

(f) その他の領域 以上, 述べた領域以外で B モード表示装置が利用されている分野は, 眼科・耳鼻咽喉科で, 眼科では 5 MHz 以上の高い周波数の超音波を用いた水浸法扇形走査が多く利用されている。耳鼻咽喉科では, 通常対象となる疾患が側頸部腫瘍であるため乳腺甲状腺用の装置が転用されている。

3.3 M モード示装置

これは運動体からのエコーの時間的变化を表示する方式で, B モードと同様にエコーをブラウン管上に輝度変調し, 探触子を固定して時間軸の位置を移動して, エコーの経時的变化を記録する方式である。この装置は, 循環器領域で最も広く活用されており, 心臓壁や弁の運動を表す曲線を, とくに U. C. G. (Ultrasound Cardiography) と呼び, 心電図と同様, 日常の心臓検査には不可欠の機器になっている(写真 14)。最近では前にも述べたように, セクター電子スキャンに代表されるリアルタイム断面層法と併用され, 高い臨床評価を受けている。

4. む す び

超音波の診断的応用といえば、このパルス反射法のほか、透過法、ドップラー法がある。前者には、ホログラフィーや超音波カメラがあり、後者は、リアルタイム表示法との複合走査で注目を集めているが、日常の臨床応用には今一步の感がある。また現在、大いに期待され精力的に研究されているものに、超音波顕微鏡とCTがある。これらは早晚、臨床に登場し、今までの生体映像法では得られない新しい情報を提供してくれることであろう。

以上「超音波の診断的応用」と題して、現在最も広く利用されているパルス反射法による生体映像について、その概略を紹介した。その使用範囲は表2に示すように

写真 14 正常大動脈弁の UCG

広範囲にわたり、画像診断のひとつの柱として、X線CT、シンチグラフィーなどと共に日常の診断に不可欠の機器となっている。
(昭和55年10月17日受付)

2-2 水中視への応用

似 鳥 一 彦†

1. ま え が き

水中では、可視光以外の電磁波はほとんど伝搬しないため、観測または計測のための媒体としては使用できない。可視光は比較的良好に伝搬するが、濁度が高い場合には視程はごく短距離に限られてしまう。このため、水中での光学映像装置の使用は限られたものになる。

これに対して、海水中での音波の吸収は少なく、かなりの濁度の水中においても、周波数が1 MHz (波長が1.5 mm) の超音波によって数十 m の、100 kHz (波長が15 mm) の超音波によって数百 m の距離の観測が可能になる。このため、光の代りに超音波を用いて水中を観察するための装置が種々開発されている。

2. 映像ソーナーと超音波水中映像装置

音波を用いて水中を観察するものとして、これまでも漁業用に魚群探知機、航海用および測量用に測深機、海底地形観測用にサイドスキャンソーナー、軍用に潜水艦探知用ソーナー、機雷探知機など、各種の水中音響機器 (映像ソーナー) が使われている。

これらはいずれもパルスエコー (パルス反射法) の原理により画面の一方の軸を分解し、音波の伝搬方向に沿った面内を映像化するものであり、水中または海底の断面像または海底面のボトムスキャン像を得るものである。

これらによって水中の状況はある程度把握できるが、水中物体の形状を直観的に認識するのに十分な情報は得られない。つまり、従来の映像ソーナーと光学映像装置の間には機能的に大きなギャップがあった。

このギャップを埋めるものとして、超音波を用いて光学映像装置と同様の正面像を得る超音波水中映像装置の開発が進められている。

表1に代表的な映像ソーナーおよび超音波水中映像装置の分類表を、図1にそれらの送受波ビームの形状と走査形式を示す。

①の測深機は、細い棒状の送受波ビーム (ペンシルビーム) を垂直下方に向けて発生し、得られるエコーの時間対強度の関係を濃淡表示する。送受波ビームと直角方向の走査はプラットフォームの移動による。この移動と記録機または表示器の水平軸の移動を同期させ、エコーの受信時刻と垂直軸の移動を同期させると、プラットフォームの航跡を通る垂直断面の映像が得られる。

②のボトムプロファイラーは、ペンシルビームを海底

† 沖電気工業株式会社

"2-2 Applications to Underwater Viewing" by Kazuhiko Nitadori (Okai Electric Industry Co., Ltd., Tokyo)