内科学の展望 (第10回)

一循環器疾患について一

A1. 断層心エコー法の進歩

東北大学抗酸菌病研究所電子医学部門

田中 元直

REVIEW ON INTERNAL MEDICINE (1982) —CARDIOVASCULAR DISEASES

A1. NEW ASPECT OF TWO-DIMENSIONAL ECHOCARDIOGRAPHY

Motonao TANAKA, MD

Department of Medical Engineering and Cardiology

The Research Institute for Chest Diseases and Cancer, Tohoku University

I. 結 言

断層心エコー図法 (心断層法) は、単独で用いた場合でも、断面設定に際し、その方向あるいは傾きを変えることによつて、心臓構造を立体的に知ることができ、描出されたエコー像の形、あるいはエコーの繋がりから各種心疾患の病理解剖学的な形態と、その動的变化を定性的、定量的に測定できる特徴をもっている。さらにMモード心エコー図との併用を行なうと、構造物の動態解析を詳細に行なうことができ、心機能評価の一手法としても利用できる。従つて、最近では循環器領域における超音波診断法の中心的役割をもつにいたつている。

この心断層法のこの数年間の進歩としては一部はなお一般的実用化までに至っていない面もあるが、次の3方面での進歩があげられよう。

1) 臨床的な実用的手法を工夫することによる臨床診断技術面での進歩。

2) 心断層装置に附加装置を加えることによつて、臨床時間の短縮と診断精度を向上させる方向への進歩。

3) 新方式を開発附加して、超音波診断法自体を拡大させる方向への進歩である。

ここではこれらの3方面における進歩について、代表的例を提示し、概説する。

II. 超音波心断層法の臨床的応用における進歩

1) 実用手手段の工夫による診断技術面での進歩

これは超音波断層法の特徴を十分に利用するために、臨床的実用手技に工夫を加えて用い、これまで臨床診療上の隘路となつていた所を除去し、臨床診断と治療の技術を向上させる方向への進歩である。その代表的なものとして心断層造影法 (コントラスト心断層法) と超音波心・心膜穿刺術の実用化があげられる。

a) 心断層造影法 (コントラスト心断層法)¹⁾

これは心断層図描写中に血液と音響的性質が異なり、かつ生体に無害な物質 (生食水等) を末梢血管あるいはカテーテルを通して血管内に注入し、人工的に血流内にエコーを生ぜしめ、拍動と共に血流に乗つて移動する人工エコーの状況から、構造異常に伴う異常血液の存在と流れの状況とを知る方法である。

この方法では末梢血管からの注入によつて中等度ないしは軽度の三尖弁閉鎖不全の存在や、先天性心疾患での右→左短絡などこれまで、その判断が比較的難かしかつたものが容易に診断できるようになつた。また、左心系の疾患でもカテーテルを通して注入することにより異常流の存在を容易に知ることができ、薬剤の副作用などのためにX線造影の難かしい例にも適用でき、疾患の特徴を

引き出すことができるようになっていく。

b) 心断層図モニター下における心・心膜穿刺術²⁾

心膜炎における心膜腔穿刺, 2弁置換患者における弁機能障害時のカテーテルの導入などに際して, 心断層図上で針先あるいはカテ先を監視しつつ追跡して安全かつ確実に穿刺し, 目的とする場所に針先を到達せしめる方法である。

心膜腔内に液体が貯留した際, 貯留液の空間的な存在位とその量, tamponadeの状況とpendulum motionの程度を見極めた上で, 心筋あるいは冠血管への損傷を避けながら, 安全に穿刺することができる。これまでの, 熟練によつてカバーし, 盲目的に穿刺が行なわれていたが, この方法によつて安全かつ確実に穿刺が実施できるようになり, 排液によりtamponadeが改善される状況も同時に把握することができるようになった。

一方, 弁膜症に対する外科的治療法の進歩に伴い, 2弁以上の多弁置換術を実施した患者の数も増加してきている。それに伴い弁置換後の人工弁機能障害の早期発見も重要な問題となつていく。置換弁の障害発生時にはICU等で緊急かつ正確に, 機能障害弁を判断することが要求される。このようなときに, 心内へカテーテルを挿入する必要も生ずる。しかし, 人工弁を通して上流にカテーテルを挿入することは困難であるため, ときに直接穿刺法によらざるを得ないことがある。心断層図モニター下で胸壁上から直接穿刺を行なうと, 主冠動脈, 刺激伝導系の主要部を避けて穿刺針を進めることができ, 比較的安全かつ, 確実に心腔内に到達できる。このような方法を超音波穿刺法と呼んでいる。

2) 附加装置を加えることによつて臨床時間を短縮させ, 診断精度を向上させる方向への進歩

その代表的なものとして次の二つの方向への進歩があげられる。

a) コンピューターの導入^{3)~5)}

心断層図では心臓形態とその動的变化を示すことができる。そこで, その画像の上から, 心内膜

あるいは心外膜のエコーを識別し, 用手的あるいは自動的に読みとり, これをコンピューターに導き, 形態計測の自動化, 2次元画像から3次元画像の作成, 更に運動機能の良否を部位別に詳細に判断する方法などが行なわれ, 形態と動態をより便利かつ判断し易いものになっている。しかし, もともと原画像の質が高くなければ誤差も大きくなるため, 現在画像の精度の上で大きな問題を含んでいる。

b) Biplane法の導入⁶⁾

従来の心断層法が一断面の画像を得る方法であつたのに対し, 異なる任意の2方向の断面をほぼ同時に描写せんとする方法である。この方法には, 1個の探触子を機械的に4字あるいは8字に施回させて2断面を得る機械走査法, 電子走査振動子を機械的に動かして行なう機械電子走査法の他, 図1の如く2個の振動子を用い周波数の異なつた2種類の超音波を2チャンネルで用いて, 同時に異なつた任意の2断面, あるいは同一断面上で異なつた方向からの画像を合成して, 視野を広くする方法などが行なわれるようになってきた。この方法によつて, 心臓の長軸断面と短軸断面とがほぼ同時に観察できると, 心の立体構造とその異常を直観的に短時間で知ることができる。臨床時間の短縮と形態計測の精度をより高めることができる。

3) 新方式の開発導入による心断層法の進歩

前述の1)および2)で示した進歩は, いずれも心断層図から読みとる情報としては心臓構造の解剖学的な形状および形態の計測を主としたものであり, いずれも, 超音波情報としては反射エコーの間隔, すなわち, 距離に関する情報を主として用いたものである。このような目的のためには解剖学的断面として, 実際の断面により近似した画像として表示されるようにすればよい。これに対し, エコーの間隔情報のみでなく, 組織内での超音波の音速と減衰とを反映したエコー強度についての情報や, 反射波の位相変化の情報を利用して超音波診断の精度と適用範囲を更に広げる方向への進歩がみられる。この方向への進歩を計るためには

図1、2探触子、2周波方式によるbiplane心断層装置による画像。

- 1： 同一断層面上で2方向からの画像を一つに合成表示し、視野を拡げる目的に使用する。
- 2： 直交2断面の同時表示 右図は長軸断層図、左図は短軸断層図で、2断面は図中の白線で交叉する。

(富士通研究所 三輪氏提供)

超音波の送受波を人工的に位相制御して、超音波走査する電子走査法では超音波ビームの方向変化と共にビーム幅と音場内での位相関係が変化するため、問題がある。従つて1個の振動子を用いて機械走査する方法を行なわざるを得ず、大口径振動子と可能な範囲で高い振動数を用いる方法とが行なわれるようになっていく。

その結果、極めて高い分解能をもつた画像が得られるようになり、計測精度も高くなつてきている。

a) 大口径集束ビームを用いる心断層法

大口径の凹面振動子を用いると、その焦点付近では超音波ビームは1ミリ前後に集束することができ、高い分解能が得られると共にその附近2～3cmの範囲では音場分布が比較的均一化し、周辺部からの信号を同時に取り込むことが避けられる。その結果組織の音速差を主体とした音響インピーダンスの差を反映するエコー強度を精度よく補えることができ、組織の質的变化を判断することが可能になつていく。

口径30ミリの凹面振動子を用い、左室後壁に焦点を合わせ異常心筋についての画像を描かせると、図2の如き所見が得られる。これらはいずれも心筋症の症例である。肥厚した異常心筋部には

図の上段の例の如く、粗大顆粒状エコーを示すものから、下段の如く微細な霧状エコーを示すものまで種々の段階の所見がみられ、3種類に大別できる。粗大顆粒状エコーを示す部分の心筋には斑状に組織の変性がみられ、線維性組織の増加がみられる。又、内膜部に幅広い強いエコーが示される部分には内膜の肥厚がみられる。中等度の点状ないし網目状エコーがみられるものでは、心筋部にも結合組織の増加が網目状に存在し、霧状の微細エコーを示す例では線維性組織の増加は少ない。断層像の上には心筋部の組織変化の状況がエコー強度とその分布状況の差として反映され、このエコー強度は受信器の利得を定量的に測定することで量的に扱うことができ、組織性状変化の評価が可能になつてきている。

一方、この方法で検出されるエコー強度とその分布状況は図3の如く、心周期とともに変化するものと、しないものとがみられる。心周期を通じてエコー強度と性状とがあまり変化しないものは心筋組織の変性が強く、心筋変性が少ないか、あるいは線維組織の増加が少なく、網目状になつていくような例では収縮期に異常エコーが減少ないし消失し、拡張期には増加ないし出現するのがみられる。これらの変化は異常線維組織の立体構築

図2. 肥厚性心筋症にみられる左室壁の異常エコー

状況と、心筋内血流分布によつて生ずるものと考えられるもので、動的な組織性状の変化も把握できるようになつてきている。

b) 反射波の位相変化を診断情報として用いる方法

位相情報を利用する方法には、エコー法については超音波のパルス幅以下の薄い組織、例えば弁、血管壁などについて干渉法を利用して厚みを測定する方法が現われてきており、ドプラ法においては変調方式超音波ドプラ法が出現し、心内血流性

状の判定と、流量の測定のための方法として新しい発展をみるようになってきている。

i) エコー法における位相情報の利用

弁、血管壁など比較的薄い組織についてその厚みを非観血的に測定することは、弁膜症や動脈硬化の判定に重要である。超音波がパルス幅より薄い組織に投入された際、その反射波には表面と裏面とから反射されたエコー同志で干渉を生じて干渉波が含まれてくる。この干渉によつて生ずる周波数の変化は、周波数スペクトルの変化として現

SYSTOLE

DIASTOLE

図3. 心筋症における左室壁異常エコー(矢印)の心周期中における変化(IHSS例), 拡張期(Diastole)の像は上段は初期, 下段は末期のものである。

われる。その変化分は組織の厚みによつて一定の変化をするので、弁あるいは血管壁のエコーの周波数スペクトラムと、単一反射面からの反射波のスペクトラムとを比較することによつて検出する

と、組織の厚みを算出できる。周波数分析機能をもたせた超音波診断装置を用いることによつて臨床的にも実用できる。この場合、断層図上で目標とするエコー(例えば弁エコー)を捕え、これにゲートをかけて抽出し、周波数スペクトラムを求めると、図4の上段(c)のようなスペクトルが得られる。これを下段(a)の如き単一反射面から得られたスペクトルを標準として引き算すると、(c-a)のようなスペクトルが得られる。これは干渉の結果生じたものである。このときに現われる谷の間隔は一定周期であり、この周波数間隔は反射体の厚みに比例するので、この読み取り値を用いて一定の計算式で計算すると厚みを求めることができる。その結果によると摘出弁のマイクロメーターによる直接測定値とよく一致し、左心系の弁は右心系の弁より約2倍の厚みをもつことも示されている。今後血管壁の動脈硬化等に伴う厚み変化の計測などにも、応用が計られていくものといえよう。

ii) 超音波ドブラ法

最近の進歩としては変調方式のドブラ法、すなわち、距離識別能をもつたドブラ法が開発導入さ

図4. 弁エコーの周波数分析結果(大動脈弁)

図5. 心房中隔欠損症における左室流出路および右室流出路の流速パターン。肺動脈の拡大があるにもかかわらず、流速最高値は左心系より右心系の方が速い。

れたことである。この方法では心断層法との併用で使用できるので、あらかじめ心内構造を確認した上で、心臓内の任意の目標とする場所を決定し、その部分の血流速度信号を直接的に記録できる。また、その血流波形は心電、心音、圧波、メカノカルジオグラム、Mモード心エコー図などと同時に記録できるようになり、臨床的にも実用され始

まっている。この方法では更に受信回路をマルチチャンネル化することによって心臓内でビーム上の多数点の血流信号を同時に検出することもでき、心臓、大血管内の任意の方向上における流速分布をも把えることが可能になっている。

このような発展によって、これまで検出が極めて難かしかつた心内異常血流について、非観血的

表1. 心断層図とパルスドプラ法によつて得た心拍出量および短絡率の実測値

CASE	DIAG.	HR	CO(L/MIN)		SHUNT %		
			THERMO.	DOPPLER	OTHER	DOPPLER	
S.H.	MR	69	3.47	3.51			Af
M.E.	MR	55	5.40	4.61			
K.S.	PS	81	6.96	6.47			
G.S.	MS	73	3.5	3.92			
S.H.	COCM	81	6.3	6.85			
M.K.	ASD				76 F 63 D	73	F: Fick D: Dye
O.K.	ASD				62 F 56 D	61	
O.A.	ASD				45 D	43	

にその存在位置と範囲、層流性か乱流性かが判断でき、血流速度および速度分布の測定法としてだけでなく、血流性状の判断も可能になってきている。このような方法の導入は弁膜症や先天性疾患の臨床診断の面のみならず、これまでに存在しなかつた特異な情報であるため、心疾患の病態生理解明の手段としても利用されるようになるものと考えられる。その応用の一つの展開として、全く非観血的に薬剤等を用いず、しかも右心系と左心系とを区別して1回拍出量、心拍出量などの測定が可能になっている例をあげる。

図5は、ASDの症例の左室および右室流出路部の中心部の流出血流速度パターンを示したものである。いずれも層流性であるが、短絡により、右室流速の方が大きく示されている。IHSS等の流出路狭窄を除けば右室、左室共に収縮期血流は流出路部では層流性であり、又流出路における流速分布は放物線状で、その時間経過も又放物線ないしは三角波状を示す。このことから、放物線あるいは三角波で囲まれる範囲の面積平均を求める係数すなわち、平均速度を求める係数を定めておけば、流出路部の最高流速値を求めた上で、この係数との積を求めると流速分布を考慮した平均流速の近似値が求められることになる。この値と心断層図から求めた流出路断面積との積を求めると、1回拍出量を算出でき、心拍数との積を求めると、心拍出量を容易に算出できることになる。臨床例では、右室流出路の断面はほぼ円に近似で

きるが、左室流出路部の断面はほぼ楕円となる。従つて、直交2断面上から2軸を求めればよいが、正常例で求めた平均的な前後径と左右径との比は1:1.5であるので前後径を測定した上で、その値を1.5倍して左右径を算出し、断面積を求める方法でも、それほど大きな誤差とはならない。このようにして求めた結果と、Fick法およびDyeあるいはThermodilution法とで求めた短絡率および心拍出量と比較すると表1の如き値になる。Fick法およびThermodilution法の測定誤差を考慮すると、比較的良好な一致とみなすことができ、非観血的に、臨床レベルで利用できる方法として有用性も高いと考えられる。

III. 結 び

以上、超音波心臓診断法のこの数年間における進歩を、心断層法を中心として方法論の上からの進歩を自験例を中心に概説した。

心断層図は当初の解剖学的形態異常の定性的判断を主目的とした段階から、心臓超音波診断の中核をなす方法として有用性を増すと共に次第に定量的計測手段として、又、組織性状の非観血的判定手段として発展しつつある。臨床診療上のみならず、臨床心臓病学の研究手段としてもその重要が増してきている。

文 献

- 1) 田中元直, 他: 心断層造影法とその臨床的意義. 超音波医学 5: 23, 1978.
- 2) 田中元直: 経胸壁心カテーテル法. 渡辺決他編, 超音波穿刺術, テクノ, 1979, p57.
- 3) 永田敏雄, 他: 超音波心臓断層像の画像処理. 第20回ME学会論文集, 1-PB-1, 1981.
- 4) 浅田尚紀, 他: 超音波心臓断層像からの左心室立体構成と心機能評価. 第20回ME学会論文集, 1-PB-2, 1981.
- 5) 尾上守夫, 他: 左室短軸超音波断層像による局所収縮性の自動解析. 第20回ME学会論文集, 1-PB-5, 1981.
- 6) 田中元直, 他: 心断層法における2方位断面同時描写法. 超音波医学 5: 103, 1978.
- 7) 田中元直: 多チャンネル方式超音波ドプラ血流計による心臓内流速分布の測定. 電子医学 11: 248, 1976.