

「心エコー法のモノクロ時代 —心臓診断法の革命—

国立循環器病センター 仁村 泰治

●はじめに

心エコー法の研究は1953年(昭和28)Edler and Hertzによって始められ、およそ10年でMモード心エコー法の基本的な概念は出来上がった¹⁾。しかし、昭和30年代には世界的にもまだいくつかの研究室に限られており、一般にはあまり知られてはいなかった。

●Mモード心エコー法の展開

昭和40年(1965)ごろになってMモード心エコー法は急速に普及し始めた。その理由は、従来なかった全く新しい診断法としての情報が次第に浸透したこともさることながら、ブラウン管面のMモード画像を直接モニターできるような型の装置が一般化したことも大きい契機になったであろう。この型の装置を用いると取り扱いが単に便利になっただけではなく、このモニターによって、ビーム方向を操作して心内構造物を追いつながりながら広く心臓内部を探索することが可能になり、ごく初期に欧州で市販されていた装置に比べて実地における探索性能が著しく上昇した(図1)。

上記のような装置がまず米国で一般化したことから、Mモード

心エコー法はFeigenbaumらやGramiakらのごとく、まず米国で急速に普及し、新鮮な知識が続々と報告されて、世界の循環器学界に強いインパクトを与えた。またFeigenbaumは特にエコー診断の教育に留意し、Indiana大学に心エコー法の教育コースを設けて後進を指導したことも米国における展開に大きく貢献したといわれている²⁾。

このようにして昭和40年代の終わりごろには広く国際的に心臓には不可欠な検査法と考えられるまでになった。

●Mモード心エコー法の診断学的効用と限界

Mモード心エコー法の診断学

的効用の第1はいうまでもなく心内構造物の形態、動態の分析、診断学的特徴の認識であった。その対象は上記のような探索性能の向上のために、欧州におけるごく初期の対象であった僧帽弁狭窄(図2)を超えて広く各種の心疾患に及んだ。心筋虚血では心電図変化に先行して心室壁運動異常の現れることも次第に知られてきて、これはのちのストレス・エコーの発想³⁾につながったといえる。また僧帽弁逸脱症、腱索断裂、感染性心内膜炎(疣贅)、肥大型心筋症など、これまで診断がしにくかった疾患も容易に診断できるようになった。これらの疾患において診断的価値の高い僧帽弁後方の層状エコーやいわゆるSAMなどが実際の解剖学的にどのような状況を表しているのか、当時の研究者の推理力を大いに刺戟したものである。またMモード・スキャンなどの技法を系統的に組み合わせると、複雑な先天性心奇形もかなりの程度に診断することができた⁴⁾(図3)。

しかし、なお問題も残されていた。例えば昭和40年代前半の

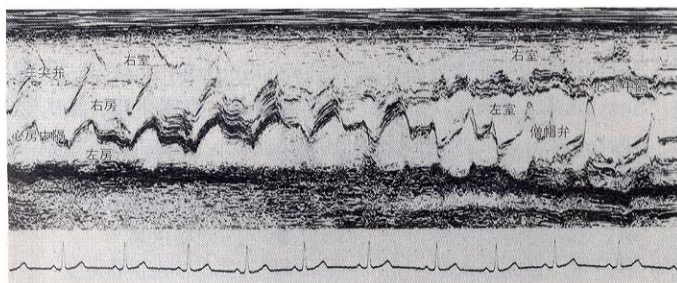


図1：心房中隔より心内構造物を連続的に追って僧帽弁に至るエコーの推移

本図(これは昭和50年ごろの記録であり、画像は初期のものより改良されている)はいわゆるMモード・スキャンであるが、このような記録の仕方はともかくとして、心内構造物を連続的に追って観察することは心エコー検査としては基本的に重要で、この操作によって心臓内を広く探索することができる。欧州で昭和30年代前半に一般化されていた装置ではモニターがAモードであるため、このような観察操作は事実上不可能で、それはモニター上のエコー曲線を直接に観察しながら行うことにより初めて可能になった。

図2：僧帽弁狭窄における僧帽弁前尖エコー

昭和30年代前半、僧帽弁前尖エコーが左心耳前壁エコーと誤って解釈されていた時期からこの矩形波自体には高い診断的価値が認められていた⁹⁾。また当時は矩形波エコーの背面の多層エコーは左房内血栓エコーといわれていたが、その後の見解では肥厚、硬化した後尖を超音波ビームがほぼtangentialに通過して生じたエコーであろう。昭和45年ごろ、国産装置。

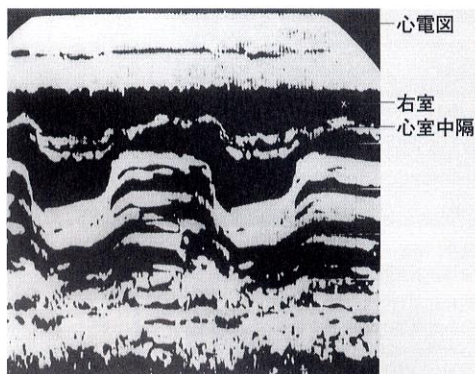


図3：完全大血管転換症のMモード心エコー図による診断(生後10日、女児の1例)

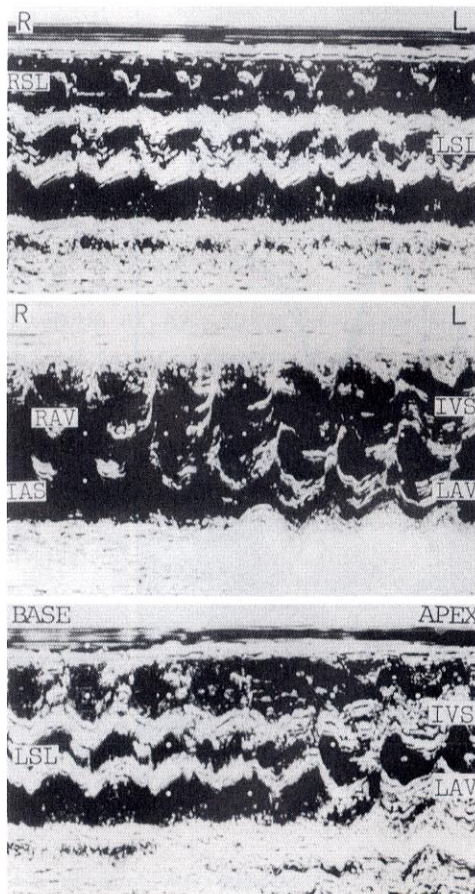
上：心基部での右→左Mモード・スキャン。半月弁が二つ認められ(RSL, LSL)、右前と左後の位置関係にあることがわかる。したがって大血管の転換が予想される。

中：房室弁レベルでの右→左Mモード・スキャン
房室弁も二つ認められ、右前(RAV)と左後(LAV)の関係にある。

下：心基部→心尖部Mモード・スキャン
左半月弁(LSL)から左房室弁(LAV)への移行は連続的であるので、この房室弁は僧帽弁と判定される。したがって中図における他の一つの房室弁(RAV)は三尖弁と考えられる。

両房室弁の位置関係から、この症例における胎生期の心臓管の屈曲は通常の右、すなわちd-loopと考えられる。van Praaghのloop ruleによると、d-loopの症例で大血管転換症があると、一般に大動脈弁が肺動脈弁より右にあるd-transpositionのことが多いので、この症例ではRSLが大動脈弁、LSLが肺動脈弁と考えられる。上図でLSLの閉鎖時期がRSLのそれよりも多少遅いことから上記の考えは支持される。さらに下図で上のように判断される肺動脈が左室に通じ、大動脈が右室に通じていることが認められる。結局この症例はd-loop、d-transpositionの完全大血管転換症と判断される。なお、中図の左下の部分で心房中隔(IAS)のエコーが断続しており、心房中隔欠損もあることがわかる。

この図はMモード時代の用法の一端を象徴する図といえよう。昭和50年(1975)ごろ。



米国文献の左室後壁エコーや自験例のそれ(図4)を見ると、心外膜側の広いエコー帯を後壁全体を現すものと考えており、心内膜面は全く見落とされている

ようである。これらはおそらく画像の階調性の不足か、あるいは図の解釈の誤りによるかも知れないが、いずれにせよ画像の判定には予想以上の慎重さを要

したことがわかる。左室後壁の心内膜面が確実に記録されているのは昭和40年代の終わり近くになってからである。

第2の診断学的効用は心腔の

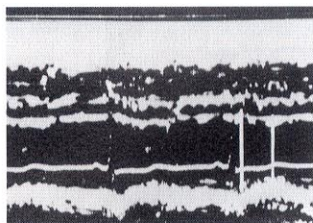


図4：Mモード心エコー図における心室中隔，左室腔，左室後壁

昭和45年(1975)ごろ。画質はまだ良くなく、階調性も不十分である。左室後壁の心内膜面はよく出ていない、画質の問題もあったかも知れないが、また、心内膜面であるとか、超音波ビームが一部筋梁や乳頭筋にかかるためエコーではないか、などの鑑別がまだ確かではなかった。などの事情によったのかも知れない。しかし、40年代後半には一般に心内膜面もよく出るようになった。

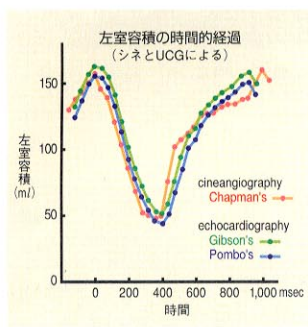


図5：Mモード心エコー図よりの左室容積計算

Mモードの左室計測値より左室容積算出のためにPombo法、Gibson法、Teichholz法など、いろいろ経験式が提案された。本図のように左室の形状が正常ないしそれに近いときはどの方法でも互いに近い値になる。しかし、肥大型あるいはうっ血型心筋症のように左室腔の形状が正常のそれから大きく異なるようなときは、計算値は各方法の間で分散することが多い。昭和50年(1975)ごろ。

大きさ、容積、心拍出力、収縮速度など、心機能評価への応用である。これは一般の超音波応用の基本であるAモード法による距離計測の拡大応用であったともいえる。しかし、三次元的にいろいろの形状を示すことのある心臓を単一のビーム方向で計測するのみでは、その限界がみられる場合もあった(図5)。

第3の基本的な効用としてコントラスト法が早くから試みられている⁹⁾。これは心内構造物の境界を明示し、また心腔内の血流可視化の途を開いた点で大きい進歩であり、初期から先天性心奇形の短絡検出には盛んに用いられた。当初にはコントラスト剤としてindocyanine greenが用いられたが、実際にエコー源になるのはこの色素ではなく、混入した気泡であることが次第にわかってきた。その後コントラスト法についてさらに認識が深められて、心筋灌流状況の造影が求められるようになり、コントラスト剤についても一般に気泡内のガスの種類と壁の素材との問題として取り上げられるに至り、また新しい超音波技術も提案されて、現今の重要課題の一つになっている。

要するに昭和40年代にはMモード心エコー法は広く普及し、独自の診断分野と認められるよ

うになった。しかし、その所見が一見抽象的に受け取られることもあり、これを専攻していない人々の間ではその価値が十分理解されたとはいえないところもあった。また、事実単一の超音波ビームで三次元的な心臓を扱うため、知見の解釈、心室容積の算出などにはやはり問題も残り、このような面からも二次元エコー法の発達が待たれた。

●二次元心エコー法への動き

二次元エコー法は夙に乳腺などを対象にWildら⁶⁾によって創始されていたが、当時の装置を心臓に用いることは、その拍動によって画像が乱されるため、不可能であった。そのため、Wild⁷⁾、Olofsson⁸⁾、Åsberg⁹⁾らはそれぞれ特殊な探触子を考案してこの問題を解決しようとしたが、いずれも試みに終わったようである。結局この方面でそれなりの成果を上げたのはわが国のオリジナルの一つである田中元、菊池らの心拍同期方式の超音波心臓断層法ultrasonocardiographyである¹⁰⁾。この研究はすでに昭和30年代末に始まり、昭和40年代を通じてこれを用いて心臓の形態、動態がかなり詳しく調べられた¹¹⁾。筆者もこの方式を検討し

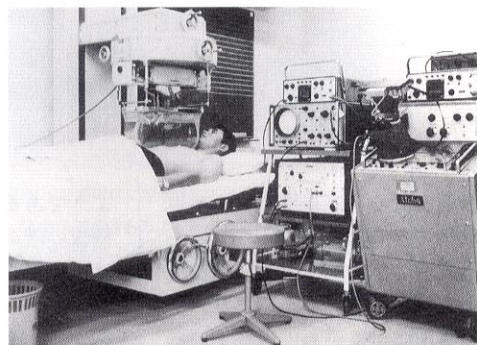


図6：初期の心拍同期式心臓断層装置

昭和41年(1966)。アロカSSD-10型。探触子水浸式、複合走査方式。

てある程度の結果を得た(図6)。

ところで心臓の場合、断面の設定の際には心内構造物との位置、方向関係について微細な調整が必要である。しかし、当時の装置の本体は一般の他臓器用のものと同じで、その探触子操作機構は大型、水浸式であり、上述のような微調整はきわめてむずかしかった。探触子操作を接触複合走査にすると、画質は悪くなるが断面設定はかなり楽になる¹²⁾(図7)。この走査を用いていくつかの先天性心奇形を判別することはできた^{13,14)}(図8)。この走査形式のものをKing¹⁵⁾なども試みている(米国では心拍同期方式はstop-action principleあるいはstop-motion principleと呼ばれている)。しかし、結局心拍同期方式はルーチン化するには至らなかった。理由は心拍同期方式という基本原理はさることながら、上述のような走査の繁雑さも大きく、二次元心エコー法には一段の技術的進歩が望まれた。

一方、高速走査の研究もすでに昭和40年代前半(1960年代後半)から始められていた^{16,17)}。昭和48年(1973)ロッテルダムの第2回世界超音波医学会議(WFUMB前身)でBomら¹⁸⁾の心臓を対象とするリニア電子走査の装置が公にされたが、画像はまだ十分とはいえなかった。しかし、その後2~3年のうちに扇形電子走査(phased array)^{19,20)}、高速機械的走査^{21,22)}などが急速に進み、リアル・タイムの時代となった(二次元心エコー法, two-dimensional echocardiographyはまた断層心エコー法, cross-sectional echocardiographyとも呼ばれているが、高速走査が普及したところは特にそのはじめにリ

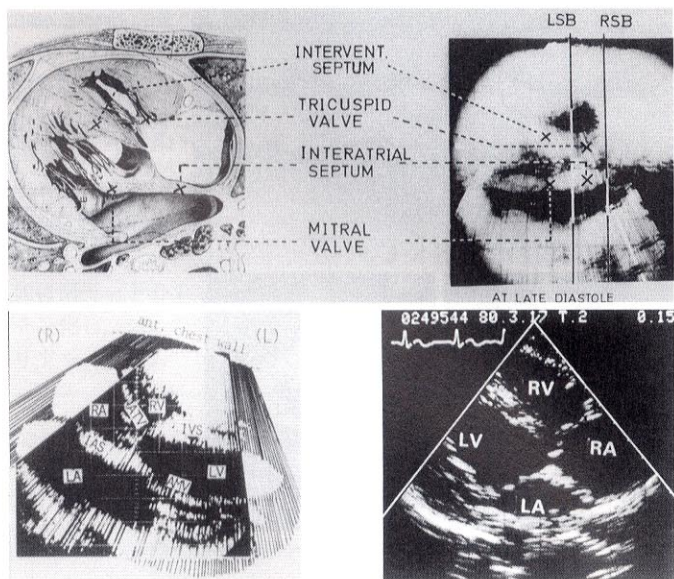


図7：各種の走査方式による心房中隔の二次元エコー

第4肋間水平断面(被験者はそれぞれ異なる)

上：心拍同期水浸式複合走査

RSB：胸骨右縁、LSB：胸骨左縁

下左：心拍同期接触式複合走査

RA：右房、LA：左房、IAS：心房中隔、RV：右室、LV：左室、IVS：心室中隔、ATV：

三尖弁前尖、AMV：僧帽弁前尖

この図では左右のとり方が上図、下右図のそれとは逆であることに注意。

下右：phased array

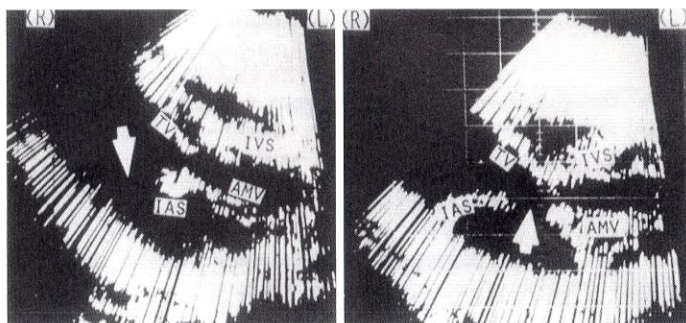


図8：心拍同期接触式複合走査による心房中隔欠損の二次元エコー

第4肋間水平断面

左：二次口心房中隔欠損症

右：心内膜床欠損症

IAS：心房中隔、IVS：心室中隔、TV：三尖弁、AMV：僧帽弁前尖

両心奇形における心房中隔の欠損部位(矢印)の違いがよくわかる。(文献14)より)

アル・タイムをつけて呼ばれた)。

●リアル・タイム二次元心エコー法の普及—心臓超音波の医学的地位の確立

昭和50年代の半ばを中心にリ

アル・タイム二次元心エコー装置は急速に普及した。Mモードだけの時代には心臓の専門家であっても直接に心エコーを扱っていない人からはなお「雲のような図形で何がわかるか」とい

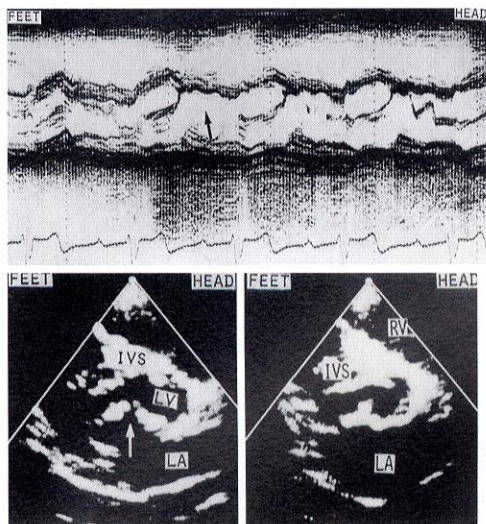


図9：心内膜症欠損症におけるmitral cleftのMモードおよび二次元エコー像

上：胸骨左縁で、ほぼsagittalに近い、下から上に向かってのゆるやかなMモード・スキャン

下：同じ面での二次元エコー像（左：diastole, 右：systole）

LA：左房, LV：左室, IVS：心室中隔

Mモード・スキャンでは僧帽弁前尖エコーがところどころ欠落しており（矢印）、これは一見アーチ・ファクトのようにみえる。しかし、二次元エコーと比べると、上記の欠落は実はcleft（矢印）そのものであることがわかる。

う感想が聞かれることもあった。しかし、リアル・タイムの動画で弁が開閉する様子を目のあたりにしてはもはやそのような言葉は聞かれなくなった。超音波は心臓診断法としてその地位を確立したといえよう。「心電図以来の心臓診断法の革命」といわれたのはこのころである。

リアル・タイム二次元心エコー法自身の効用は、唯、各フレーム1枚の記録時間が短くなったというだけではなく、同時に探触子の走査も著しく容易になり、リアル・タイムの動画を観ながら、心臓内を探索する性能が予想以上に高められたところにある。Mモード像ではその意味の判読に大いに推理することを要したような所見も、その多くは簡単に理解できるようになった(図9)。かくしてリアル・タイムの二次元心エコー法はMモード法に代わって昭和50年代の心臓超音波の主流となった。

この時代における他のハード的な大きな変化はリアル・タイム二次元心エコー法とドプ

ラ機能との結合である(詳しくは稿を改めて次号に述べる予定である)。このエコーとドプラとの結合はこれ以後の心臓超音波の基本的な形式となつて、ドプラ心エコー法Doppler-echocardiographyと呼ばれており、また単に心エコー法といっただけでドプラ機能も併せて受け取られるようになった。

●心エコー法の用法拡大

昭和50年代の心エコー法について注目されることはその用法が拡大される傾向が現れてきたことである。この理由は超音波によって得られる診断情報の特徴が次第に理解されてきたことと関連技術の進歩とであろう。

これらの新用法には、例えば、すでに先に触れたコントラスト・エコー、ストレス・エコーに加えて新しく、超音波穿刺術、経食道心エコー法、術中心エコー法などがあり、その内容は多彩である。これらの中で特にmodality-orientedの傾向の強いのは経食道心エコー法transesophageal echocardiography

である。心エコー法の食道からのアプローチについてはすでに昭和40年(1965)ごろに尾本ら、田中元ら、貞本によって行われているが、これらは試みに終わったようである。多分関連技術の発達が不十分であったためであろう。昭和50年代前半(1970年代後半)になって経食道アプローチはFrazinら²³⁾、松崎ら²⁴⁾、久永ら²⁵⁾、それぞれによってはじめはMモードで、続いてリアル・タイム二次元エコーの形で順次開発された。ことに久永らは自らの手で経食道探触子の製作も行った。経食道法ははじめは主に心臓手術中の心臓モニターとして用いられる傾向にあったが²⁶⁾、そのもたらす診断情報の豊富さ、質の良さなどのゆえに、次第に広く用いられ、心臓超音波の中で重要な分野となった。

一般に超音波診断法はこれまでnon-invasiveであることを特色としてきたが、経食道心エコー法は被検者の身体的負担を多少増しても探触子を対象領域に近接させて診断性能を向上させよ

うという思想に基づいている。のちに発達した血管内超音波 intravascular ultrasound (IVUS) や心腔内心エコー法なども同様の考えに基づくもので、併せて体腔内心血管エコー法とも呼ばれている。同じように対象領域を close-up することは、例えば超音波内視鏡などのように他臓器にもある。いずれにしても、このように close-up できることは、

non-invasive と並んで、各種画像診断法の中での超音波のまた一つの特徴といえよう。

●むすびに代えて

心エコー法の研究は1953年(昭和28)Edler and Hertzらによって創められ、おおむね昭和40年代にMモード心エコー法がルーチン化し、ついで昭和50年代にリアル・タイム二次元心エコー

法が主流となり、超音波は心臓診断法としての地位を確立した。この意味で心臓超音波のルーチンとしてはMモードが第I世代、リアル・タイム二次元法が第II世代といえよう。後者も約10年続いたが、昭和60年ごろからカラー・ドブラ法が次第に主流となり、第III世代、すなわち現段階となった。

●文献(重要文献は多数あるが、紙面の都合一部に限定した)

- 1) 仁村泰治：心エコー法の創始時代。心エコー 2000；1：96-99
- 2) Goldberg BB, Kimmelman BA："Medical Diagnostic Ultrasound：A Retrospective on Its 40th Anniversary" Eastman Kodak Company, 1988, p17
- 3) Wann LS, Faris JV, Ghildress RH, Dillon JC, Weyman AE, Feigenbaum H：Exercise cross-sectional echocardiography in ischemic heart disease. Circulation 1979；60：1300-1308
- 4) Solinger R, Elbl F, Mihas K：Deductive echocardiographic analysis in infants with congenital heart disease. Circulation 1974；50：1072-1096
- 5) Gramiak R, Shah P, Kraker DH：Ultrasound cardiography. Contrast studies in anatomy and function. Radiology 1969；92：939-948
- 6) Wild JJ, Reid JM：Echographic visualization of lesions of the living intact human breast. Cancer Research 1954；14：277-283
- 7) Wild JJ, Crawford HD, Reid JM：Visualization of the excised human heart by means of reflected ultrasound or echography. Preliminary report. Am Heart J 1957；54：903-906
- 8) Olofsson S：An ultrasonic optical mirror system. Acustica 1963；13：361-367
- 9) Åsberg A：Ultrasonic cinematography of the living heart. Ultrasonics 1967；5：113-117
- 10) 海老名敏明、菊池喜充、田中元直、香坂茂美、内田六郎：心臓の超音波断層写真法。日本超音波医学会第五回研究発表会講演論文集、1964；pp49-50
- 11) 田中元直：超音波心臓診断学。メディカルエレクトロタイムス、東京、1978
- 12) Matsumoto M, Nimura Y, Matsuo H, Nagata S, Mochizuki S, Sakakibara H, Abe H：Interatrial septum in B-mode and conventional echocardiograms—A clue for the diagnosis of congenital heart diseases. J Clin Ultrasound 1975；3：29-37
- 13) 仁村泰治、永田正毅、別府慎太郎：先天性心疾患の診断。超音波医学(日本超音波医学会雑誌) 1977；4：84-90
- 14) Beppu S, Nimura Y, Nagata S, Tamai M, Matsuo H, Matsumoto M, Kawashima Y, Sakakibara H, Abe H：Diagnosis of endocardial cushion defect with cross-sectional and M-mode scanning echocardiography. Differentiation from secundum atrial septal defect. Brit Heart J 1976；38：911-920
- 15) King DL：Cardiac ultrasonography. Cross-sectional ultrasonic imaging of the heart. Circulation 1973；47：843-847
- 16) Somer JC：Electronic sector-scanning for ultrasonic diagnosis. Digest of the 7th Int'l Conf on Medical and Biological Engineering, Stockholm, 1967；p321
- 17) 内田六郎、荻原芳夫、入江喬介：電子走査超音波診断装置。日本超音波医学会第19回研究発表会講演論文集、1971；pp65-66
- 18) Bom N, Lancee CT, van Zwieten G, Kloster FE, Roelandt J：Multiscan echocardiography. I. Technical description. Circulation 1973；48：1066-1074
- 19) von Ramm OT, Thurstone FL：Cardiac imaging using a phased array ultrasound system. I. System design. Circulation 1976；53：258-262
- 20) 近藤敏郎、黒田正夫、小川俊雄、片倉景義、神田 浩、中川健治：心臓診断用電子セクタ走査超音波診断装置。超音波医学(日本超音波医学会雑誌)、1977；4：289-294
- 21) Griffith JM, Henry VL：A sector scanner for real time two-dimensional echocardiography. Circulation 1974；49：1147-1152
- 22) 竹村靖彦、中川和雄、佐藤 茂、神宮雅晴、西村欣也、日比範夫、多田久夫、神戸 忠：機械走査による高速度超音波心臓断層法。超音波医学(日本超音波医学会雑誌)、1974；1：18-26
- 23) Frazin L, Talano JV, Stephanides L, Loeb HS, Kopel L, Gunner RM：Esophageal echocardiography. Circulation 1976；54：102-104
- 24) 松崎益徳、池江喜信、萬 忠雄、深川 英、前田準也、佐々田孝美、野元域弘、薦田 信、藤井英雄、森山勝利、清水正雄、野本良一、畚野信彰、谷門 治、重山貞夫：食道内UCG法の臨床応用—僧帽弁逸脱症候群への適用—。日本超音波医学会第31回研究発表会講演論文集、1977；pp89-90
- 25) 久永光造、久永朝香、永田和彦、吉田慎二：経食道超音波高速度断層撮影装置の開発と臨床応用。日本超音波医学会第32回研究発表会講演論文集、1977；pp43-44
- 26) Matsumoto M, Oka Y, Storm J, Frishman W, Kadish A, Becker RM, Fraster RWM, Sonnenblick EH：Application of transesophageal echocardiography to continuous intraoperative monitoring of left ventricular performance. Am J Cardiol 1980；46：95-105