



超音波心臓病診断学の確立へ

—— 田中元直先生に聞く

ゲスト：田中元直先生(財団法人結核予防会宮城県支部複十字健診センター)

ホスト：吉川純一先生(大阪掖済会病院院長)

田中元直先生は、心音の音源探査の研究から超音波に携わるようになり、工学系の専門家との理想的な共同研究のなかから、凹面振動子による音場収束法、心拍同期法による経胸壁心断層法、電子スキャン、パルスドプラ法など数々の画期的な技術を開発されてきました。最近では、世界で初めて心臓機能の断面を捉えることができたEcho-Dynamographyの特許を取得し、心臓医学に新たな学問領域を提起されています。

その田中元直先生をゲストにお迎えし、超音波断層診断学を確立されてきた道のりとその裏に秘められた努力、興味深いエピソードを披露いただきました。田中先生のお話から、ものごとの本質を見失わない強い意志と、たゆまぬ研究への情熱が伝わってきます。



心音図の研究から超音波の道へ

吉川 今日は田中元直先生をお迎えし、これまで培われてきた超音波心臓病診断学の業績と、将来の展望も伺うことを楽しみにしておりました。最初に東北大学時代の恩師や、ご研究に関して思い出に残っていることをお話いただければと思います。

田中 私が医学部を卒業したのは1958年で、その後1年間、大学を出て研修をして、1959年に、当時、結核の研究を行っていた抗酸菌病研究所に入りました。ペニシリンも十分に使えない時代で、結核をはじめとした感染症がもっとも流行していた時期です。研究の一環として集団検診が始まったころです。検診で撮った写真には、肺野の影がものすごく増えている、いわゆる肺紋理増強の所見をもった人が、子どもから大人までたくさんいました。

そこで、私の主任教授だった海老名敏明先生に「肺の勉強をするのなら、心臓がわからないとだめだから、君は心臓をやれよ」といわれて、心臓の研究を始

めました。幸い海老名先生がメディカル・エンジニアリング関連の研究に興味をもって取り組んでおられて、呼吸音図を記録して呼吸器を診断するというのをされていました。その装置を使わせてもらい、まずは心音図の研究に入りました。

吉川 私たちには、田中先生は超音波、それも断層を最初に手がけられた先生というイメージもっていますが、心音図から入られたというのは興味深いお話です。

田中 東北大学の心音マイクロフォンは、昭和元年に特許を取った、世界でももっとも古い接触型マイクロフォンで、マグノスコープというものでした。そのマイクロフォンでは心音が非常にきれいに記録できたのです。それがきっかけで、現在の日本心臓病学会の礎を築かれた坂本二哉先生、町井潔先生、古田昭一先生との親交を得ました。

しかし、きれいに心音や心雑音が記録できればできるほど、なぜ心音、心雑音が出るのか、どこから出るのかということが問題になり、そこで音源探査

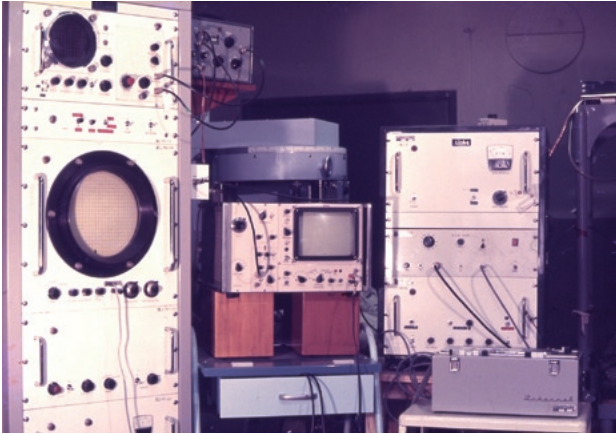


写真1 凹面振動子を用いた装置の第1号機

文部省の科学研究費で試作された心断層図とMモード像とを描写できる第1号機。右は心拍同期装置(1964年)

先生のほうでは、頭の断層と同時に肝臓などの腹部も行っておられましたが、なかなかきれいな画像が撮れないという話を内田さんから聞きまして、そこで私は凹面振動子による収束音場を使用することを勧めました。それ以来、当時の日本無線医理学研究所で開発するものは、すべて凹面振動子を使う方向になったと思います。

当時、アメリカの腹部エコーは平面振動子を使っていたため、風呂桶のなかに入って、遠くからスキャンしないときれいな画像が撮れないという報告がありました。平面振動子では遠距離音場を使い、ビームが減衰して細くなったところを利用して描かせれば画像になるけれど、振動子に近いところは絵にならないのです。それが、凹面振動子を使って音場を収束させることで、その問題がほとんど解決でき、接触させても断面が撮れるのです。

収束音場を使うことは、一つの大きなブレークスルーになり、それなしでは超音波断層法は成功しなかったらと思うと思います。

振り返ってみますと、MモードはEdler先生らが行っており、大阪大学の仁村泰治先生が超音波ドプラ法を使っておりましたが、構造を描かせることは難しい。とくに心臓は両側に肺があるので難しいと



写真2 心拍同期法を用いた経胸壁スキャナーの実験風景

座位で胸壁上から極近接水浸法で走査できる手作りスキャナーで心断層図描写を実験中。若手研究生が被検をひき受けている(1964年)

いわれていました。今度はその点のブレークスルーが必要になってきました。最初は食道のなかから行おうということになり、1cmくらいの小さい凹面振動子をつかって動物実験を始めたのですが、心臓像はきれいに出るのですが、金属の硬い棒の先につけるので、イヌの実験ならまだしも、とてもヒトではできない。それは内視鏡装置自体の技術進歩を待つしかなかったのです。

吉川 探触子よりも、挿入するテクニックの問題でできなかったのですね。

田中 それで一時、食道内法の研究はストップしましたが、泌尿器科の領域で成功しました。

心拍同期法による経胸壁心断層法の開発

田中 そして、体表から行う方法を考えなければいけないということになりました。しかし、体表から行うには超音波を入れられる窓が小さいので、直接胸壁にくっつけなければいけない。初めは水の袋をくっつけてみたり、いろいろな方法を試みました(写真2)。

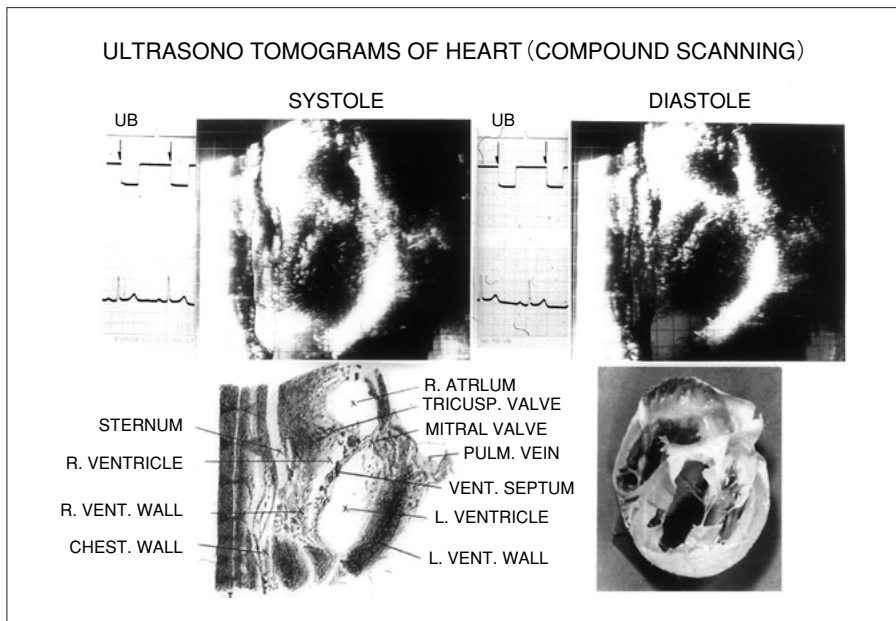


図 1
経胸壁心断層図の 1 例

写真 2 の方法で得られた心臓像を、第 63 回日本内科学会総会(福岡)で発表した(1966 年 4 月)

吉川 田中先生は、日本超音波医学会誌を中心に多数ご報告されて、われわれは強い刺激を受けました。経胸壁心断層法は何年に完成したのでしょうか。

田中 経胸壁スキャナーをつくり体表から撮って、それを動画にしてみせるといふ発表は 1968 年でした。心拍に合わせる心拍同期法で、継ぎ合わせでやったのが 1964 年ですね。1966 年 4 月の日本内科学会総会で、初めて心臓の断面を描いたという報告をしました¹⁾²⁾(図 1)。

吉川 われわれは驚嘆しました。肝臓などの静止臓器と違って、心臓は動いていますね。田中先生は心拍同期法とさらっといわれましたが、それをお考えになるのに、あまり時間はかからなかったのですか。

田中 それは、それほど難しい問題ではありませんでした。心臓の動きに合わせて画像を描かせないときれいに描けない。では、どんな電気信号が使えるかといったら、心電図がありましたから、それをパルスとして使えばよいと考えました。同じことをすでにベクトル心音計でも行っていましたので。

問題は、心拍に同期させて振動子を振ろうとすると、0 から速いスピードまで動かさなければいけないのですが、それでは機械的に壊れやすい。そこを

どう乗り切るか。振動子を一定のスピードで動かしていて、像を描かせる時間だけ心拍同期で描かせるというアイデアが、非常に重要だったと思います。ブラウン管の光る時間だけ心拍動に同期して、パッ、パッ、パッと制御します。そのあたりがもう一つのブレークスルーだったように思います。

あとは、振動子のつくり方、超音波ビームをハイスピードに動かす方法、音の信号のコントロールなどは、技術的な問題であり、工学系の方が興味をもって開発が進めばどんどん進歩するし、それが装置として売れば、機械屋さんでどんどん開発するだろう。そう思って待ちました。

吉川 それは大きなポイントですね。

共同研究に望まれる姿勢

吉川 田中先生は工学系のこともご堪能ですが、われわれ医師は工場も技術ももっていませんので、工学関係の方に興味をもたせるのは医師の役目だと思います。そこで、先生は大きな役割を果たされたと思います。

田中 私のところも研究所、菊池先生のところも電

られた一人です。でも、それは先生のおっしゃるとおりだと思います。一つの疾患、例えば肥大型心筋症(hypertrophic cardiomyopathy ; HCM)なら、HCMの基本形態、基本画像があの本でまとまっているので、われわれも勉強しやすい。

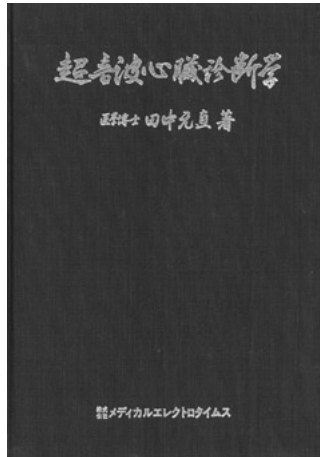


写真3 『超音波心臓診断学』の表紙(1978年刊)

手に置いておいて、さっと参考ができる、たいへん貴重な本だと思います。ですから、私はあの本は高い役割を果たしたと考えています。

田中 私にとっては備忘録みたいなものでしたが、外国にも断層の本がなかったし、Mモードも空間的な場所の判断は断層によってできるようになったのですから、その点では参考にしていただけたかもしれませんね。坂本二哉先生の『臨床心音図学』⁶⁾のように集大成してみたいとは思っていますが、私の『超音波心臓診断学』はただデータをまとめただけです。

高精度な2D断層画像
SSH-11Aの開発まで

吉川 話は前後しますが、電子スキャンを共同研究された先生などのかかわり、思い出などをお話いただけますか。

田中 先ほど申しあげたように、私の研究はほとんどが工学系研究者との共同研究です。一人の能力には限界がありますが、医学の領域は非常に幅広い知識を要求されます。ですから、それぞれが専門とする領域のいろいろな人と共同研究をしていく必要があります。そうして行ってきた共同研究は、すべて超音波診断学の研究と結びついています。

私の研究の大本は心音図でしたが、音源探査に取

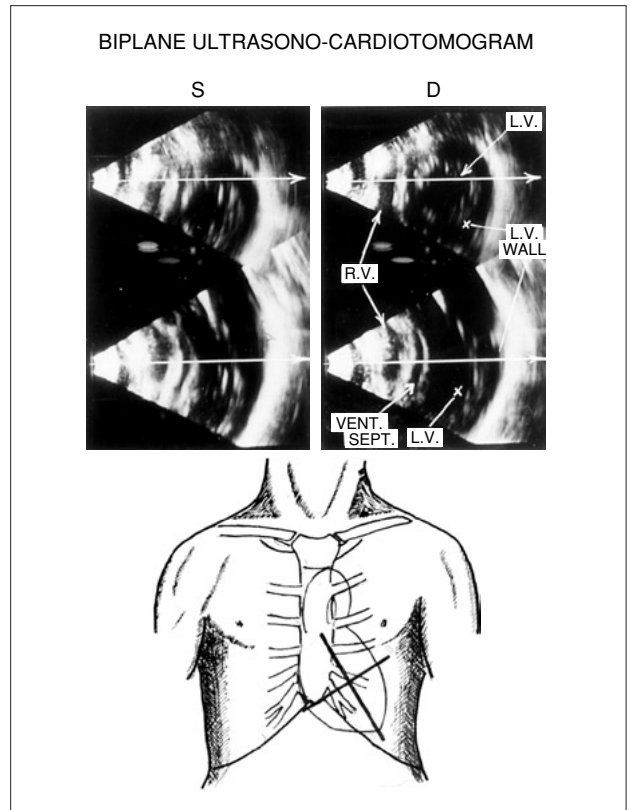


図2 機械走査方式のbiplane断層法で描写した心断層図の例(1977年開発)

り組む過程で、雑音は心臓の構造の異常に伴う血液の流れの変化から出てくるのが想定されました。その構造を詳細にみるためには2Dの断層画像が必要であり、エコートモグラフィを主体にした、構造の把握にとりかかりました。

京都大学工学部機械工学科出身で、日本無線株式会社を定年後、アロカ株式会社に移ってこられた儀我健二郎さんは、非常にアイデアに富んだ方でした。私がやりたいと思っているスキャンの話をするので、高速スキャンができる小さなスキャナーをつくってくれました。それがアロカが出したメカセク(メカニカルセクター)の基本になりました。そして振動子を8の字に振らせるbiplaneのスキャナーをつくることによって、構造が立体的に細かく把握できました(図2)。

ただし、メカニカルな工夫でよい画像は得られま

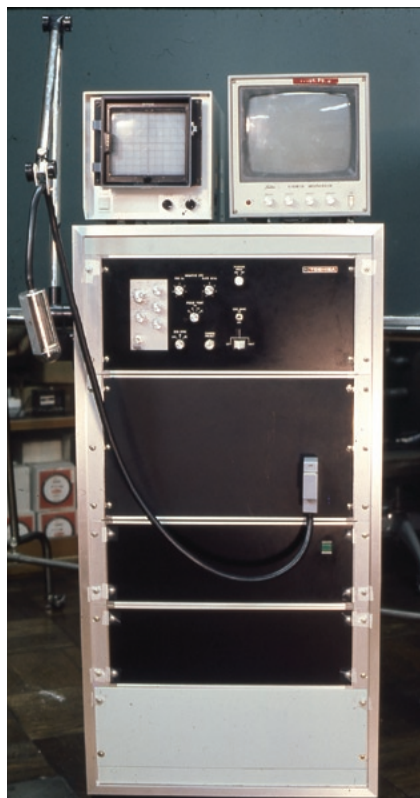


写真4 扇形電子走査法による心断層装置の第1号機

東芝総研で1977年に飯沼、城所らによって試作された(素子数64本)

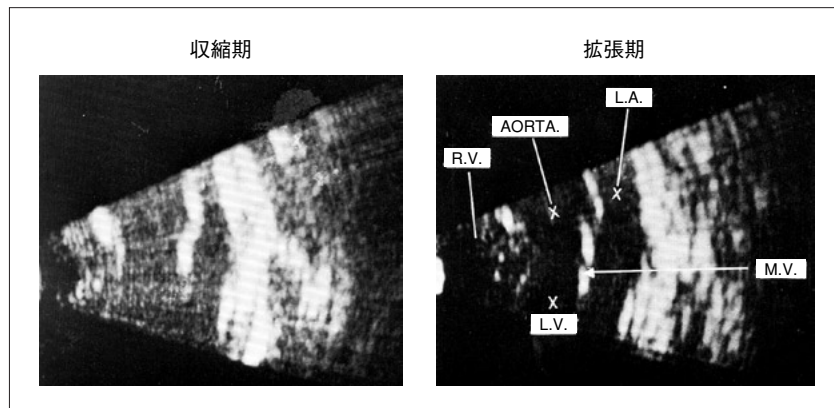


図3 扇形電子走査法による心断層法開発初期の心断層図描写例
飯沼、城所らによって試作された装置によって得られた(1975年)。素子数20本、25fr/秒、約40度の走査範囲

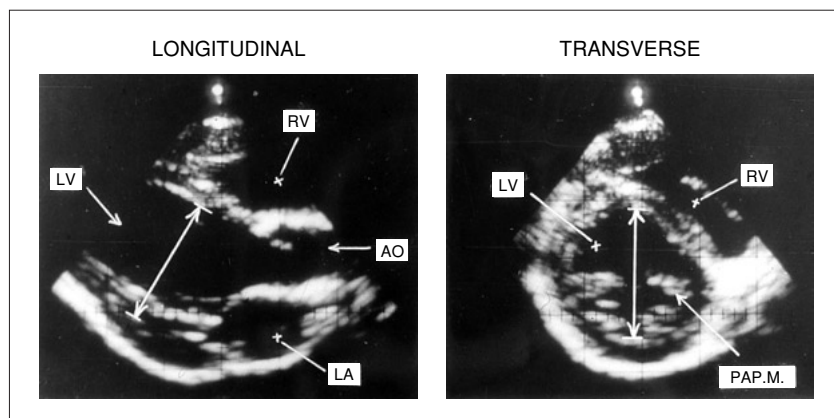


図4 扇形電子走査法の実験による心断層図描写例(正常例)
長軸断面および短軸断面を示した。写真4の装置で記録(1977年)。飯沼、城所らの協力による

すが、その先のことを考えると、もっと高速で振らせないといけない。しかし高速にすると、機械はどうしても油漏れがしてくるのです。

吉川 私は最初に川崎病の冠動脈瘤の研究をCirculation⁷⁾で発表しましたが、そのときにはメカセクの断層装置を使いました。画像はすごくきれいでしたが、ご指摘のとおり油漏れがありました。

田中 そこで、東工大の奥島基良先生が、アンテナの理論を用いたならば十分に指向性をもたせた超音波の制御ができるのではないかと考え、奥島先生に相談しました。奥島先生は、短冊型の細長い振動子

をまず12本並べてやってみようといわれました。いまは電子スキャンといっていますが、フェーズドアレイの方式ができるのではないかとということで、初めて試されました。

その材料の加工を株式会社東芝に頼まれたようです。ちょうどそのころ、東北大学の工学部にいた飯沼一浩さんが東芝総研に入社したものですから、おみやげのテーマとして、奥島先生が開発したばかりのこの理論でやってみてほしいと頼みました。

吉川 SSH-11Aですね。そういうふうにして東芝に渡ったわけですね。

田中 次の年には、東北大出身で、残念ながら早世されてしまいましたが、数学がえらく堪能な後輩の城所剛君が入社され、信号をこういう順序で、こういう方向で打ち出せば、ビームが絞れるとって設計し、齊藤興治氏が振動子を試作してくれて装置を完成させてくれました。1977年です(写真4)。

初めは40度ぐらいしか振れなかったのですが(図3)、60度まで振れるようにして撮ってみたら、非常にきれいな画像が得られました(図4)。それで、ちょうど坂本先生と一緒にAIUMの学会に出席するのを機会にアメリカの諸施設を回り、デモンストレーションを行いました。

吉川 日本の超音波分野のテクノロジーに、みんな驚いていましたね。5年以上はSSH-11Aが日本、アメリカ、ヨーロッパでシェアを誇っていました。

田中 アメリカでの話題はすごかったです。当地のHenry先生、Feigenbaum先生もメカセクで一所懸命、研究していましたけれども、あまりきれいに撮れてはいなかったようです。

吉川 田中先生がアドバイスされて、東芝がつくった画像は、当時世界に誇れる立派な2D画像でした。

田中 城所君が設計したものは本当によくできていましたので、東芝は電子スキャンのものを一気に生産したのです。

吉川 飯沼先生もフレキシビリティが旺盛ですから、臨床に役立つSSH-11Aをおつくりになったという点は立派ですね。

田中 とても画期的なものを提供してくれました。プロトタイプを試作1号機は心電図も何も入らないものでしたが、画像は本当にきれいでうまくいきましたね(写真5)。そのあたりでエコートモグラフィはだいたい完成しました。あとは技術屋さんの努力でした。ハイスピードスキャンで動く心臓がみえ、ビームもあてやすくなったし、どこからでも撮れるようになりました。さらに臨床的にどう役立つのかというデータを取っていくことでした。幸いMモードのリアルタイムの画像も得られるようになりましたから、電子スキャンが出て初めていろいろな施設で

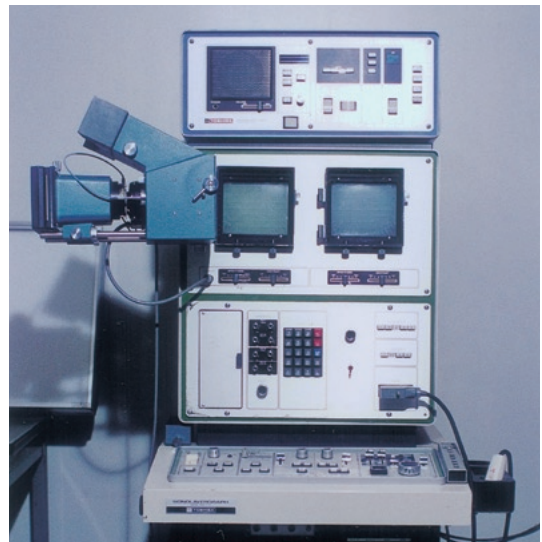


写真5 SSH-11Aのプロトタイプ第1号機

飯沼らにより市販を目的に試作された基本モデルの第1号機(1979年)。最上段は後から追加したドプラ法の装置部分

使ってくれるようになりましたね。

音源探査を達成 M系列変調ドプラ法

田中 ただ、私の以前からのテーマである音源探査の研究がうまくいっているかといったら、決してそうではありませんでした。音源探査にはエコー法だけでは足りず、どうしても血流の計測ができなければいけない。そこで、同じ超音波を使ってできる方法をと、ドプラ法を取り入れることを考えました。

吉川 田中先生はドプラを2次元的、3次元的にマッピングしながら、研究されておられましたね。

田中 連続波のドプラは大阪大学の仁村泰治先生が研究していましたし、外国でも血管内血流検出の分野で行われていました。ただ、心臓で断層と一緒にドプラが使えるかというのが大きな問題でした。そのころ菊池先生は定年で退官され、「東北大学ではエコー診断装置をやる人がいないから、あとは東工大の実吉純一教授のところの奥島さんと一緒にやるとよい」といわれて、このテーマは奥島教授との共同研

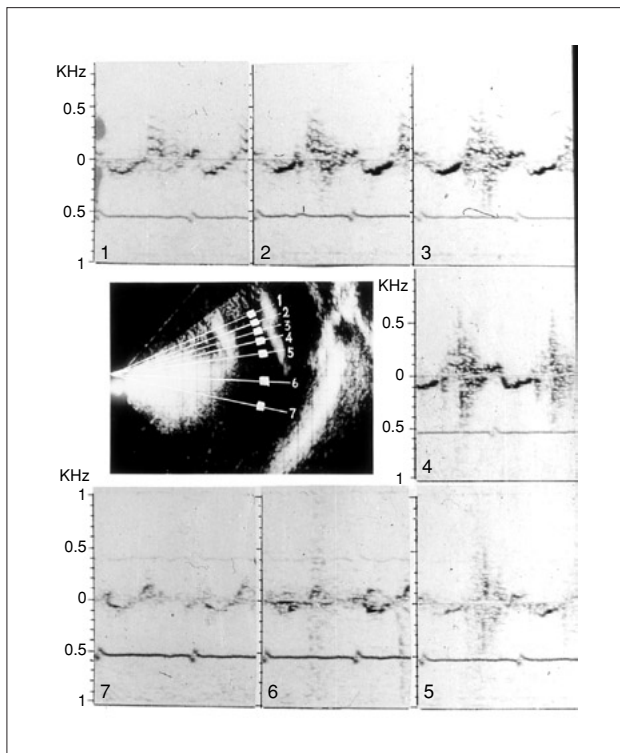


図5 M系列変調ドプラ法と心断層法との併用法で心臓内血流が拡張期に楽音様に振動している状況を捉えた記録

断層図上の1～7の部位で記録された血流速度データをソナグラム表示で示した

究に移行しました。

奥島研の助手で海流の研究をしていた大槻茂雄先生は、大きな導水管のなかの流速分布を超音波で測る研究をしていました。それでM系列変調ドプラ法を考案されたのです。連続波を使って距離分解能を持たせたほうがパワーは上げられるというもので、日本音響学会で発表されました⁸⁾。私はそれを見て、この方法が使えると思いました。大槻先生と顔なじみになり、これを心臓で使いたいので、協力してほしいと話し、それから、ドーナツ形振動子をつくって、無線で使う高周波発振器を使って同調させ、心臓にあてると、心臓内の血流速度信号が採れました。

心断層とともに使える装置ができたのが、1971年です。それを楽音性雑音の音源探査に使うと、スペクトル心音図と同様のきれいなハーモニックを含ん

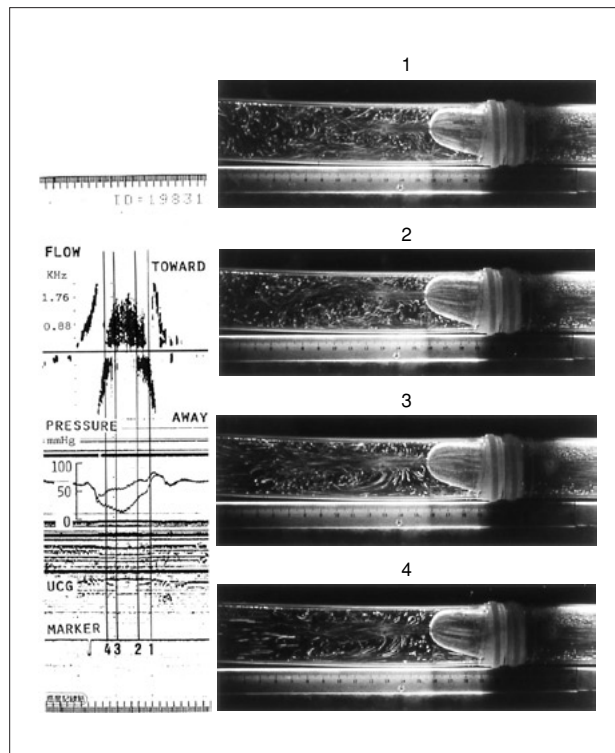


図6 パルスドプラ血流計開発時の水流モデル実験記録
直記式ポリグラフ記録によるパルスドプラ血流計測(1979年開発)の開発過程の水流モデル実験(1974年). 測定された局所の速度値がその部位の圧力差の平方根(0.5乗)に比例し、速度を測ることで圧力が測定できる実証が得られた記念すべき記録。これが今日、心臓内の流量分布図や圧力分布図を描かせるEcho-Dynamography開発の端緒となった

だ血流シグナルが出ました(図5)。これで音源探査という初期の目的をやっと達成できたのです。

吉川 私も覚えていますが、きれいな画像でしたね。
田中 あれは私も印象的です。坂本二哉先生にだいぶ褒めていただいた記憶があります。

血流速度が測れるということは、加速度が求まることになる。加速度が求まれば圧力が求まることになります。そこで血流速度と物理的な定数との間にどういう関係があるか、ドプラ法を使って圧較差と速度との関係がどうなるかという基礎的な実験を行い、圧力が測れる、速度が測れるということがわかりました(図6)。そして、臨床心音図研究会などで発表してきました^{9)~11)}。

心臓機能の描写を目指して
パルスドプラ法の開発へ

田中 ただ、一番の問題は、M系列変調ドプラ法ではビーム方向の速度成分しかわからないということです。臨床の場で心臓の機能がわかるようにしなければ意味がないわけですから、構造が2次元で出るなら、機能も2次元で出すべきで、2次元画像生理学があってよいはずで、心臓の機能がわかるようなデータとするのには、ビームの方向と関係ない速度ベクトルがわからなければいけない。そこから流体力学の勉強と大槻先生との共同研究が本格的に始まりました。

機能の画像診断、機能の断層画像ができなければいけないということと、面上の速度分布をどう採ったらよいかということから、M系列変調ドプラ法からパルスドプラ法に移りました。

そのころパルス技術もだいぶ進んできました。ビーム上の速度分布をマルチチャンネルで採るようにして、このビームでスキャンする方法と、もっと簡便にリアルタイムでできる方法と2通りなければ困るだろうと、大槻先生と相談しながら、パルスドプラを利用した2つの方法を考えていくという研究のスタンスを取りました。

つまり、ドプラ法の場合、圧較差と一番関係するのは最大速度値ですが、ゼロクロスやチャープZ方式は乱流のときは平均速度になってしまい、最大速度値でないので圧力は低く出てしまいます。そこで、最大速度値で2次元の分布を描かせようと、一度コンピュータで処理して最大速度を求め、正確に進めていく方法と、簡易方式の平均速度で進めていく方法の両方を検討しました。

その当時、レーダーの方面でMTI(moving target indication)方式が飛行機の管制の分野で使われてきたものですから、その方法を使ったらできるのではないかと検討しました。そのとき日本無線株式会社でレーダーを研究していた滑川孝六さんが、アロカ株式会社に移ってきました。そこで、ドプラを手伝っ



写真6 40チャンネルM系列ドプラ装置

40チャンネルの受信回路をもたせてビーム軸上の血流速度分布データを記録できるようにしたM系列ドプラ装置

てもらおうという運びになりました。

簡易方式は、滑川さんにMTI法で血流速度分布を求められるようなセットを頼みました。われわれはすでにコンピュータを使った精度の高い方向から40チャンネルのM系列ドプラの装置を、医療財団からお金をもらって株式会社日立メディコにつくってもらっていました(写真6)。最高速度で出すのと平均速度で出すのと両方から攻めることにしたわけです。

Echo-Dynamographyの特許を取得
2次元心臓機能の研究を新たな学問領域へ

吉川 そして田中先生は、2003年、「超音波診断システムおよび超音波診断方法」の特許を取得されました。

田中 それまでの間に関連特許は全部出して、最終的にEcho-Dynamographyという名前をつけて、心臓機能の断面図、機能断層法としてひとまとめにしました。やっと特許関連が済んだものですから、いまアロカ株式会社で試作中です。それが出ると、いままでの心断層法とは異なった機能の断面が得られ、

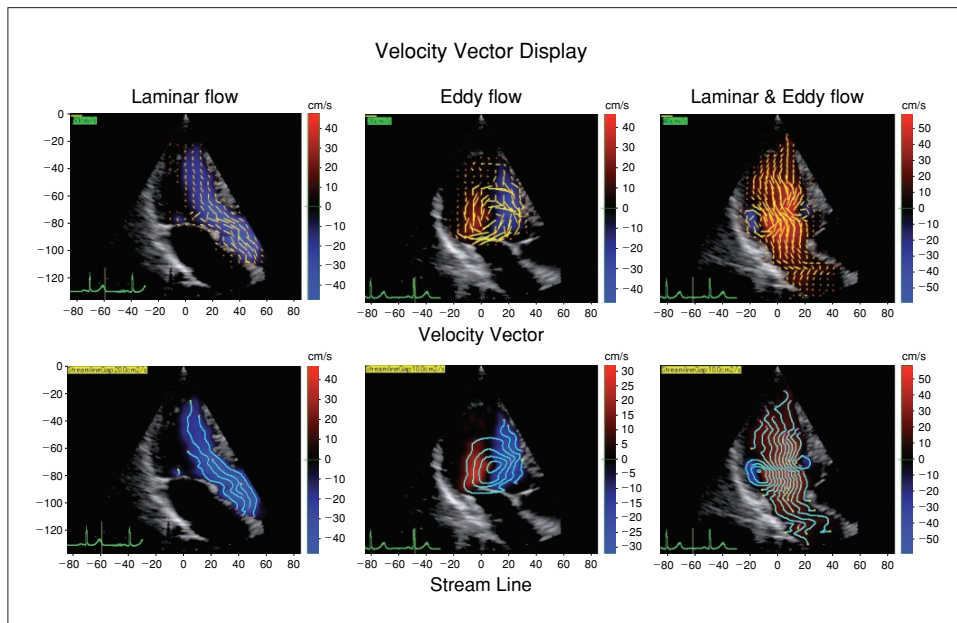


図7 Echo-Dynamographyの描画像
 健常者の左室長軸断面上で得られた速度ベクトル分布と流量分布の表示例。ベクトル分布からは流れの性質と方向がわかり、流量分布では各流線間は等流量であるので、局所の流量分布状況が判断できる。この方法ではさらに圧力分布を知ることができ、心機能、心筋機能の臨床的計測法として役立つ可能性が高い

いままでの圧容積関係とはまったく異質の機能が明らかになってきます。そのほうが臨床的に役に立つだろうと思っています。

吉川 楽しみにしています。それでは、最新のEcho-Dynamographyがどのような心機能を捉えられるのか、少し具体的にお伺いしたいと思います。

田中 Echo-Dynamographyではドプラ速度情報をコンピュータ処理して速度ベクトル分布や流線分布の画像が描けます。渦がどこにできていて、どれだけの流量があるのか、加速度の分布がどうなっているのか、それが心断面でわかります。短軸方向の流量と長軸方向の流量が求まりますから、力のかかり方がわかるし、収縮したときの流量の計算ができます。心臓の任意の場所での時間経過に伴う流量曲線も描けます(図7)。

吉川 こういうものがさっと出ると説得力がありますね。

田中 心臓のなかでこういう渦が出るというのはみたことがないと思います。

吉川 血球がみえるような拡張型心筋症の末期では、ときどきみえることがありますけどね。

田中 また大動脈への駆出の血流は、まっすぐでは

なく、曲がって、らせん状に出るということが初めてわかったのです。台所の流しの水の流れのように、らせん状に出したほうが効率がよいわけです。

吉川 それは左室の機能ですか、左室と血管の共同作業ですか。

田中 大動脈弁の半月弁のつけ根のところが少しづつ曲がっていて、駆出の始めは高圧で非常に速いので曲がりやすく、収縮中期から末期になると抵抗が減って穏やかになり、大量の血液が流せるようです。こういうデータが採れたのは初めてです。

心筋梗塞では心室瘤のなかで渦ができたりします。閉塞型肥大型心筋症は、中隔のところに向かって、削岩機の振動と同じような圧力の定在波が左室内に出てきます。心室中隔の肥厚部のところのdisarrayの原因かもしれません。心筋の変性は圧力の定在波で起こる可能性があることが初めてわかりました。

吉川 これはまた教えていただく機会をつくってほしいですね。Echo-Dynamographyの開発を契機とした今後の超音波心臓診断学の展望を一言お聞かせください。

田中 圧力分布が2次元で表せるようになって、2次元の心機能という新しい学問領域ができ、これか



らはエコーによって局所心機能の医学領域が確立されると思います。また、いままでの生理学とはまったく異なる、日本オリジナルの2次元生理学という方向に、超音波は発展していく可能性があります。心エコーの技術は今でもアメリカより少なくとも5年は先行していると思います。

.....
**本質に立ち戻り、
 絶えず疑問をもって研究すること**

吉川 最後に田中先生から、超音波領域を研究していない人も含めて、循環器科専門医を志している方々に対してアドバイスをいただきたいと思います。

田中 学会で講演を聞いていてもと思いますが、若い先生方はどうして基礎に立ち戻って考えないのだろうかと思いますね。なぜだろうという疑問をもたないことが一つ、もう一つはものごとの本質に立ち戻って考えていないことが、私は非常に残念に思います。

一番大きな問題は、大学教授の先生方が定年になると研究をやめてしまうということです。一生を通した、自分のライフワークとしての研究テーマを持っていない。教授になった途端に自分の研究をやめてしまって、若い連中にテーマを与えて、自分はレフリーのようにみている。自分でプローブをもっ

てやるのがなくなっていますでしょう。

吉川 そういう傾向はありますね。

田中 いろいろな薬が出てきても、やはり心臓はジギタリスと麻薬にはかなわない。本質に戻って現象をみようとしないと、いたずらにアメリカナイズされて、日本の技術を見失ってしまうことになると思います。日本のオリジナリティを尊重していくためには、絶えず、なぜか、なぜかと基本に立ち戻って物事を考えることが非常に重要だと思います。

吉川 田中先生がやっておられるように、自ら興味ある研究を続けるということは、みんな肝に銘じるべきですね。先生のまねをしてがんばりたいと思います。どうもありがとうございました。

文 献

- 1) 海老名敏明, 田中元直, 香坂茂美, ほか: 超音波反射法による心臓大血管の断層写真法 - 第63回日本内科学会講演会, 福岡. 日内会誌 1966; 55
- 2) 田中元直, 海老名敏明, 菊池喜充, ほか: 日超医論文集 1966; 9: 11-12
- 3) 菊池喜充, 田中元直: 超音波断層写真法の改良 - 凹面振動子による方位分解能. 電気通信学会超音波研究会資料 1966; 26
- 4) 田中元直, 菊池喜充: 凹面振動子の超音波断層像に及ぼす効果. 医用電子と生体工学 1967; 5: 352-363
- 5) 田中元直: 超音波心臓診断学. 東京: メディカルエレクトロタイムス社; 1978
- 6) 上田英雄, 海渡五郎, 坂本二哉: 臨床心音図学. 東京: 南山堂; 1963
- 7) Yoshikawa J, Yanagihara K, Owaki T, et al: Cross-sectional echocardiographic diagnosis of coronary artery aneurysms in patients with the mucocutaneous lymph node syndrome. *Circulation* 1979; 59: 133-139
- 8) 奥島基良, 大槻茂雄: M系列変調超音波ドブラ流速計. 電気通信学会超音波研究会資料 1970; 70
- 9) 田中元直, 香坂茂美, 寺沢良夫, ほか: 音源を探索した大動脈弁閉鎖不全症における楽音性雑音. 臨床心音図 1973; 3: 1-11
- 10) 田中元直, 柏木 誠, 香坂茂美, ほか: 心雑音発生機序の検討(1). 臨床心音図 1975; 5: 251-262
- 11) 田中元直, 柏木 誠, 香坂茂美, ほか: 三心房心症の心雑音とその発生機序. 臨床心音図 1974; 4: 457-469