

「超音波ドップラ診断法の最初の10年」

国立循環器病センター 仁村 泰治

●はじめに

昭和30年(1955)ごろは戦後の平和指向の時代であり、理工学者、工学技術者も生体現象に関心を寄せることが多かった。医学診断法としての超音波ドップラ法はこのような時代を背景として昭和30年代に大阪大学で創始された。

すなわち、このころ阪大産業科学研究所の里村茂夫氏(1919~1960)は超音波が反射体の運動によって受けるDoppler周波数偏移を利用して微小振動の速度を計測することを考案した。まず固体の振動などの計測を試みていたが、恩師の岡部教授^{注1}から生体応用を奨められた。両氏は心臓は動いているので、まず適当な対象ではないかと考え、里村氏は医学側の検討を求めるため雑誌や新聞の科学欄にこの技術の紹介記事を載せた。筆者がみたのは昭和30年6月4日の朝日新聞紙上の紹介記事である。そこで数日後、里村氏を訪問し以後共同研究を行うことになり、同年8月からバラ

ック・セットを阪大第一内科に運んで検討を開始した。目的は「ドップラ計測法によって、心臓からどのような情報がどのような形で得られ、どのような意味があるのか」を見出すことである。これが世界における医用ドップラ法の具体的な第一歩である。

里村氏も意欲的で、しばしば来院して機器の調整などにあたったが、医学方面には全くの門外漢であるので、検討の着想、進め方、分析、解釈などは自ずとすべて筆者ら、医側が行った。方法そのものはoriginalなものであり、何らかの成果が得られるものと期待はしていたが、それほど自信があるわけでもなかった。

●最初の非侵襲的 心内情報—弁ドップラ

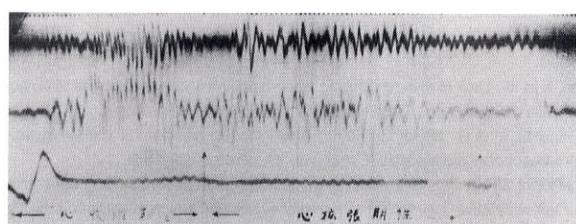
探触子(3MHz)を心臓領域におけば、100Hz前後のドップラ信号がほとんど連続的に記録される(以下これをfundamental cardiac Dopplerと呼ぶ)(図1)。当時のdisplay装置は電磁オシロであり、

誰からも一見同じようなドップラ信号は比較的容易に得られる。しかし、約半年以上かけていろいろな症例について行ったが、特別の意味づけは困難なようであった。それゆえ、この方法もあまり有望とは思えず、そのうちに「お蔵入り」になるのではないかという気もした。ところが運よく、たまたま上記の100Hz前の波の上に所々、周波数の高い、しかし微小さな振動が重なるのに気がついた。ドップラ原理の方からみればこの反射体は動きの早い、小さい構造物であり、弁かもしれないと考えられた。そこでこの小振動を濾波器で取り出すことにした。当時はまだ戦後の物資の乏しい時代であったが、ようやく利用できた一台の古いBrüel帶状濾波器がまた幸いにも目的によく合っており、これによって収縮、弛緩、互いに転換する時期にsnappyなドップラ信号が描出され、いよいよ弁の可能性が大きくなつた(図2)。そこで、昭和31年(1956)日循総会で発表を行い^{1,2)}、以降はこの信号を中心にさらに動物実験なども加えて検討を続け、弁開閉のドップラ信号と結論した^{3~7),注2}(図3, 4)。

弁ドップラの意義は、第一に超音波を用いると非侵襲的に心臓内部についても直接的な情報を採れることが明らかになったことである。Edler & Hertzの心エコー法の研究は昭和28年(1953)から始められており、すでに欧州の一部では臨床的に応用されていたが、

図1: Fundamental cardiac Doppler

おおむね100Hz前後の波が収縮期、拡張期とも不規則に続く(中段)。precordiumではこのような波は比較的容易に記録できるが、細部は各データで異なり、このままでは共通した特徴を見出すことはむずかしい。



昭和32年当時はまだ弁帽弁エコーの解釈が確立していなかった。それゆえ、弁情報の概念に到達したのはわれわれの方が先行していた。この点はEdlerらの論文⁸⁾の中でも言及されている。弁ドプラについてはその後に町井ら⁹⁾の追試もある。

第2に、弁閉開の時期が非侵襲的にわかるようになったので、それに基づいて心周期を直接的に分析できるようになった。特に従来難しかった房室弁開口時期の意義は大きい。後日の心室拡張機能不全を示す等容性弛緩時間の延長も早くから知られている¹⁰⁾(図5)。

●生体ドプラ研究の 第2ラウンド—血流ドプラ

心臓には弁ドプラとともに、収縮期、拡張期に微弱な、しかし周波数の高い音が持続的に聽かれ、当初は心臓壁の振動かとも推測されたが¹¹⁾(図3)，その後大動脈弓などでも同様の音が聽かれるので血流に関係したものかもしれないと考えられていた。同じころ阪大精神科の金子仁郎教授らが脳循環の研究を計画し、旧知の里村氏に研究手段について協力を求めた。そこで昭和33年(1958)1月から共同研究を始めることになり¹²⁾、頸動脈にドプラ法を試みたところ、上記の持続音が浅在の同動脈では明瞭に記録された。さらにその後の検討により、その波型、出現時間などその性状が病態をよく反映していることが見出された。このようにして血管上での雜音様の信号は血流ドプラ信号と解釈され、ドプラ血流計測の概

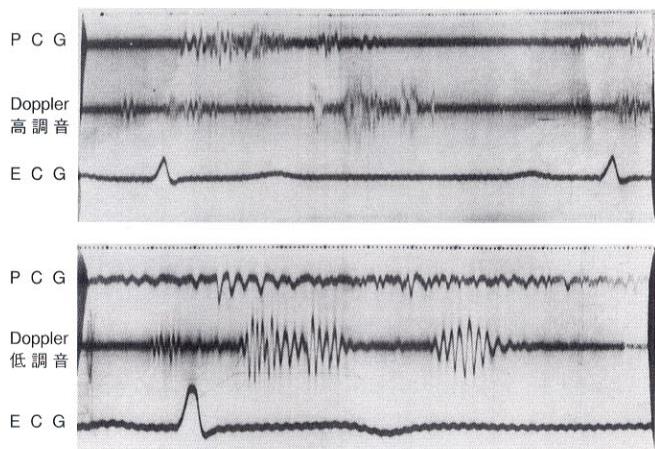


図2: Fundamental Dopplerから高調成分の分離(第20回日循総会スライド, 1956年4月, 福岡)

上:高調成分 下:fundamental Doppler高調で、snappyな信号は収縮期の初めと終わりに一致して現れているようである。PCG:心音図, ECG:心電図

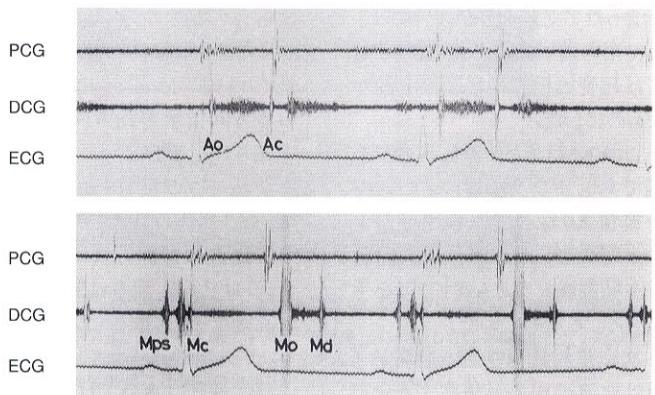


図3: 大動脈弁, 僧帽弁のドプラ信号

このデータは昭和30年代後半のもので、弁運動のうち超音波ビーム方向に200mm/secの成分がドプラ信号として表現されている。

上:大動脈弁 Ao; 閉口, Ac; 閉鎖, 下:僧帽弁 Mo; 開口, Mc; 閉鎖, Mps; 心房収縮時の弁の動き, Md; 急速流入直後の半閉鎖。DCG: Doppler cardiotogram
弁ドプラの間の弱い振動はいわゆるドプラ心雜音で、後日血流ドプラとわかった。

念が生まれた^{10~14)}(図6)。

●ドプラ診断法の基礎固め— 加藤金正教授との共同研究

里村氏は昭和35年に急逝した

が、われわれや精神科グループは引き続き同産業科学研究所の加藤金正教授の協力を得られることになった。

さて、われわれはすでに弁ド

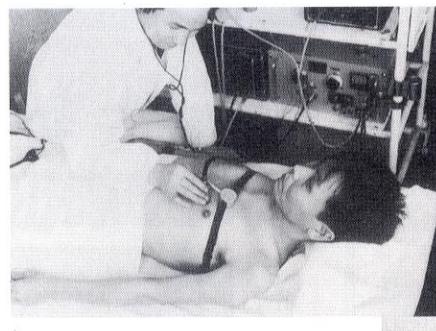
注1 岡部金治郎(1896~1984):阪大教授、阪大産業科学研究所長、マグネットロンの研究で昭和18年文化勲章受章。

注2 文献7)は途中で里村氏が個人的に米国音響学会誌にドプラ法を紹介したものであるが、その内容には文献2~4)の結果の一部が用いられている。しかし、その際その出所が明記されていないため、一般にはあたかも別の里村氏個人のoriginal workのように受け取られ、国内、国外で情報が混乱している。誤解を生じないよう特に注意を要する。

ラを得ていたが、上述のように同じころ僧帽弁エコーは確立されていなかった。そこでわれわれは弁ドプラを手引きとして僧帽弁エコーを求める試みを試みた。加藤教授考案の同軸2波長(一つをドプラ用、他方はエコー用とする)の単一探触子を用いて、一つのビームで弁ドプラを捉えて弁の方向を確保しながら、同軸の他のビームでドプラに対応するエコーを求めた。その結果、1心周期2峯性のエコーが得られ、これが僧帽弁エコーと考えられた^[14, 15]。時と同じくしてEdlerら^[17]の方でも僧帽弁エコーが確立されたが、両者の結論は全く一致した。エコーとドプラ、それぞれ異なるところから始まったアプローチが同一のところに落ちていたことは、当時としては超音波検査の信頼性を確かなものにした。

このころはまだ一般に装置が不備であり、ドプラ装置の方がエコー装置より総合的な検出能がよかつたので、われわれは大動脈弁や肺動脈弁なども弁ドプラを手引きとして求めていた。

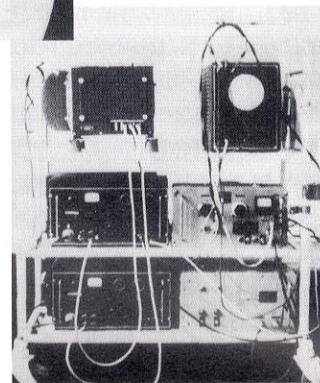
次に里村氏は生前、血流ドプラは血流の中の乱流によるものではないかと考えていたが、昭和37年(1962)加藤、金子ら^[18]の実験的検討によって主として血球から



b

図4：初期のドプラ装置と検査実施状況

試作第1号機(a)。右下の白い部分がドプラ装置および電源、他は心電計、記録装置など(昭和31年、神戸工業(現富士通テクノ)製)。この装置は昭和31年(1956)より同36年まで使用された。実施時、手に持ったのが探触子(b)。



a

の散乱によるものであることが明らかにされた。Doppler出力のpowerは単位容積中の血球数に比例することがわかったが、これはその後のドプラ血流計測の定量的基礎である。

また、これまでのドプラ法では反射体の動きの方向はわからなかったが、昭和41年(1966)加藤、泉^[19, 20]によりlocal oscillationを用いる方向指示方式のドプラ法が考案された(図7)。

なお、ドプラ出力のdisplay装置は、われわれの場合、初期にはすべて周波数弁別方式による電磁オシロであり、現在は周知のように高速フーリエ解析によるスペクトログラフが用いられている。両者の間の期間は海外では主にzero-cross counterが用いられていたが、われわれはすでに昭和30年代後半からスペクトログラフ(ヘテ

ロダイム方式; Sonagraph/Bell Co.)を用いており、これは波形の解読にはきわめて便利であった。

● 海外における ドプラ法の試み

心臓および血流のドプラ法は1960年(昭和35)ロンドンでの第3回国際ME会議に出され^[5, 11]、また同じく別に論文報告もされたが^[6, 12]、これらに引き続いて海外でもドプラ法の試みが現れ始めた。

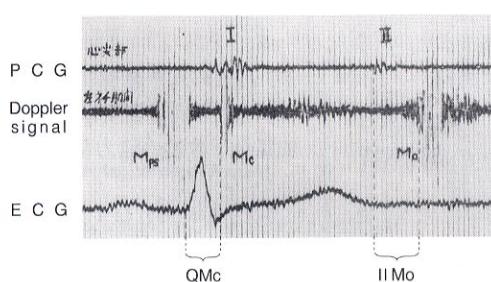
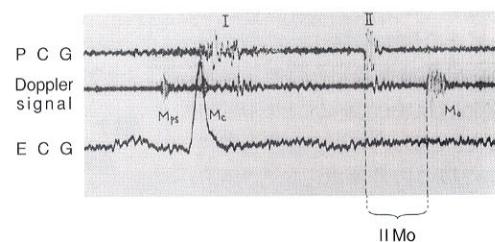


図5：高血圧症例における等容性弛緩時間の延長

左：健常例、右：高血圧例

弁開閉の面からは大動脈弁閉鎖(Ac)終了から僧帽弁開口(Mo)開始までの等容性弛緩時間である。Acの終了は第2心音(II)開始に一致するので、ここではそれで代用している。高血圧例では健常者に比し等容性弛緩時間が延長していることがわかる。目盛りは1/100秒。



まず、Lube(ソ)²¹⁾やTumanovsky(ソ)²²⁾が弁ドプラの検討を行い、Belletら(米)が弁運動と不整脈との関係を論じている。

また、シャトルのRushmer研究室のFranklinらはドプラ血流計測の研究を発表している²³⁾。Franklinらは血管に貼り付け方式の振動子を用い、無麻痺、無拘束動物を自然の状態におき、その血流状況の300m無線搬送システムを開発したのは注目に値する²⁴⁾(図8)。しかし、この試みはその後は行われていないようである。

上述した加藤らの方向指示方式の同じ年(1966)にMc Leod(米)が全く独立に、また異なった形の方向指示方式を考案している²⁵⁾。

なお、これらと同時代に早くもCallagan²⁶⁾(1964)やJohnsonら²⁷⁾(1965)が胎児ドプラによる妊娠の診断を発表しており、この診断法は現在に至っている。前述のようなfundamental cardiac Dopplerの出力の大部分は心臓壁の運動によるものであるが、この部分は後日いわゆる組織ドプラ(TDI)が開発されるまでは成人では利用されなかつた。しかし、最も簡単な形の胎児ドプラ診断装置では初期のfundamental Dopplerがそのままの形で現在まで利用されている。

●むすびに代えて

超音波ドプラ診断法はわが国で生まれたoriginalであり、上述したのはその発足から基本的な性質がおむね固まるまで、すなわち萌芽時代の状況である。心エコー法の萌芽時代がそうであったようにドプラ法もこの期間に約10年を経ている。

一般に、必ずしも超音波に限らず、ME的な研究、開発においてMとEとの知識が集約される過程を強いて類型化すると次の二つ

図6：総頸動脈血流パターンの種々相(金子仁郎ほか、1958年)

A:55歳、男性、B:59歳、男性、C:66歳、男性、D:67歳、男性、E:69歳、男性、F:84歳、女性
Aでは連続的に近く、DおよびFでは断続的である。B、C、Eはその中間のようにみられる。

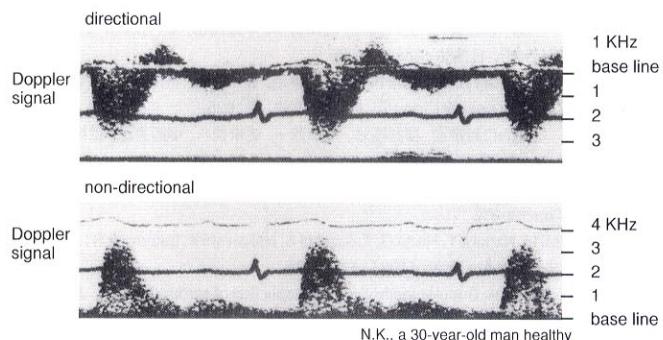
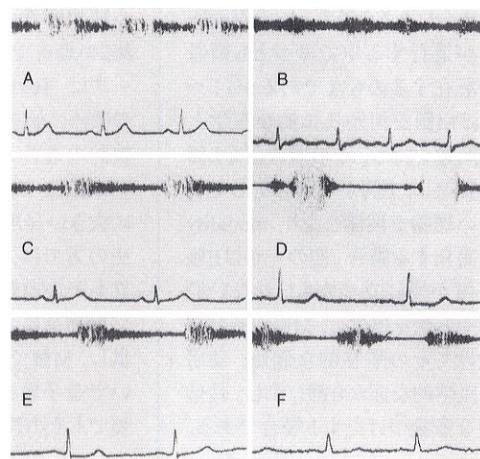


図7：方向指示方式のドプラ装置による血流ドプラ(スペクトグラム表示)(加藤ら、1966年)
上：方向指示方式。順流を基線より下に、逆流を上に表示している(順逆と上下の定め方は特に方向指示方式とは関係がない。この場合のみのもの)。
大腿動脈。大腿動脈では最初の急速相の次に必ず逆流相がある。
下：非方向指示方式。両方式の差異がよくわかる。

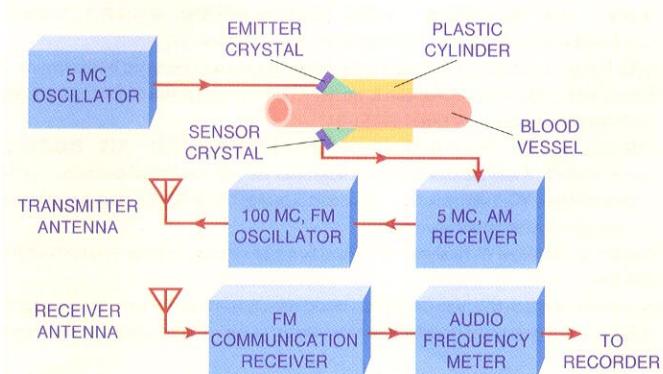


図8：血流ドプラの無線搬送システム(Franklinほか、文献24)より引用、改変

<p>の場合になろう(もちろん実際の研究が進行する中で多少とも両者が混在するのも常であるが)：一つはM側が何か具体的な医学上の問題を持ち、その解決法をE側に要望し、E側がそれに応じて新しい理論を展開したり、modalityを開発する場合；他の一つはE側が何か役に立つかもしれない概念や方法を提供し、M側がそれを受けてその潜在的な価値、効用を医学的な面から探し出し、具体的な意義づけをする場合である。</p>	<p>心臓超音波の始まりはまさにこの第2の場合である。例えば心エコー法は、HertzによるAモード応用の奨めに始まり、Edlerらの臨床的検討の進行とともにMモード心エコー法として結実し、さらにその後に大きい発展をきたした。ドプラ法の方では、里村氏が生体に役立ちそうな技術として超音波のドプラ効果による運動計測法を提供し、M側ではまず筆者らが、ついで金子教授らが加わり、またE側でもその後に加藤金正教授ら</p>	<p>の協力も得て、学際研究として臨床的なドプラ診断法としての意義が掘り出されたといえる。ドプラ法の生体応用の着想は岡部金治郎名誉教授に出ていることも記録にとどめる必要がある。いずれにせよドプラ診断法は、途中で多少の齟齬もなくはなかったが、学際研究の成功例といえよう。その当時大阪大学では医学部と産業科学研究所との間の学際研究がうまく行われていると斯界の評を受けたものである。</p>
<p>●文献</p> <p>1) 里村茂夫：超音波ドプラ法による心臓機能検査の研究 I. ドプラ法の原理；II. 装置. 日循誌 1956; 20: 227-228 2) 吉田常雄, 森 正義, 仁村泰治, 置村道雄, 斎田源一, 中西克己, 里村茂夫：超音波ドプラ法による心臓機能検査の研究 III. ドプラ唸の種類；IV. 臨床的応用(予報). 日循誌 1956; 20: 228 3) 斎田源一, 中西克己, 置村道雄, 高岸慎八, 仁村泰治, 森 正義, 吉田常雄, 吉岡 優, 松原茂雄, 里村茂夫：超音波ドプラ法による心臓機能検査の研究 V. 分のDoppler音について. 日循誌 1956; 20: 625 4) 吉田常雄, 森 正義, 仁村泰治, 置村道雄, 斎田源一, 高岸慎八, 中西克己, 里村茂夫：超音波ドプラ法による心臓機能検査の研究 VI. 分開閉の時間関係について. 日循誌 1957; 21: 170 5) Satomura S, Niimura Y, Yoshida T: Ultrasonic Doppler cardiograph. <i>in Proceedings of the Third International Conference on Medical Electronics</i> 1960; pp249-253 6) Yoshida T, Mori M, Niimura Y, Hikita G, Takagishi S, Nakanishi K, Satomura S: Analysis of heart motion with ultrasonic Doppler method and its clinical application. Am Heart J 1961; 61: 61-75 7) Satomura S: Ultrasonic Doppler method for the inspection of cardiac function. J Acoust Soc Am 1957; 29: 1181-1185 8) Edler I: The use of ultrasound as a diagnostic tool. Acta Med Scandinav 1961; 170 (Suppl): 17-22 9) 町井 潔, 関口 寿, 伊東貞三, 三科大和, 黒川 清, 太田 恵, 角田 均: 心臓超音波Doppler signal周波数分析. 日本臨床 1963; 21: 2222-2230 10) 金子仁郎: 私信 11) Satomura S, Kaneko Z: Ultrasonic blood rheograph. <i>in Proceedings of the Third International Conference on Medical Electronics</i> 1960; pp254-258 12) Kaneko Z, Kotani H, Komuta K, Stomura S: Studies on peripheral circulation by 'Ultrasonic Blood-Rheograph'. Jpn Circ J 1961; 25: 203-213 13) 里村茂夫: 超音波による末梢循環の検査法. 日音響会誌 1959; 15: 151-159 14) Kaneko Z: First steps in the development of the Doppler flowmeter. Ultrasound in Med & Biol 1986; 12: 187-195 15) 仁村泰治: 超音波検査法. その心臓への適用. 日内誌 1963; 52: 619-625 16) 加藤金正, 本宮 恵, 吉田常雄, 仁村泰治, 松尾裕英, 望月茂樹, 青木佳寿子, 中野伸平: 超音波ドップラー法とパルス法の同時重量使用による心臓弁運動の観察装置. 日本ME学会誌 1965; 3: 60-64 17) Edler I: Atrioventricular valve motility in the living human heart recorded by ultrasound. Acta Med Scandinav 1961; 170 (Suppl): 85-123 18) Kato K, Kido Y, Motomiya M, Kaneko Z, Kotani H: On the mechanism of generation of detected sound in ultrasonic flowmeter. Memoirs Inst Sci Industr Res Osaka Univ 1962; 19: 51-57 19) 加藤金正, 泉 朝見: 超音波血流計(ドップラ法)における逆流指示の一方法. 日超医論文集 1966; 10: 78-79 20) Kato K, Izumi T: A new ultrasonic Doppler flowmeter that can detect flow direction. Jpn Med Ultrasonics 1967; 28-30 21) Lube M, Safanov YD, Yakimenko LI: Ultrasonic detection of the motions of cardiac valves and muscles. Sov Phys Acoust 1967; 13: 59-65 22) Tumanovsky : personal communication 23) Franklin DL, Schlegel W, Rushmer RF: Blood flow measured by Doppler frequency shift of backscattered ultrasound. Science 1961; 134: 564-565 24) Franklin DL, Watson NW, Van Citters RL: Blood velocity telemetered from untethered animals. Nature 1964; 203: 528-530 25) McLeod FD: A directional Doppler flowmeter. Digest of the 7th International Conference on Medical Electronics and Biological Engineering 1966; 213 26) Callagan DA, Rowland TC, Goldman DE: Ultrasonic Doppler observation of the fetal heart. Obstet Gynecol 1964; 23: 637 27) Johnson WL, Stegall HF, Lein JN, Rushmer RF: Detection of fetal life in early pregnancy with an ultrasonic Doppler flowmeter. Obstet Gynecol 1965; 26: 305-309</p>		