

マルチゲート・ドップラー
心エコー図法を用いた心房
中隔欠損症の肺体血流量比
の新しい非侵襲的計測法

A new noninvasive
method for calculating
pulmonary to systemic
flow ratio (Q_p/Q_s) in
patients with atrial
septal defect using mul-
tigated Doppler echo-
cardiography

里見 元義
菊池 典子
片山 博視
神田 進
中村 憲司*
高尾 篤良

Gengi SATOMI
Noriko KIKUCHI
Hiroshi KATAYAMA
Susumu KANDA
Kenji NAKAMURA*
Atsuyoshi TAKAO

Summary

The number of patients with atrial septal defect (ASD) who undergo intracardiac repair without cardiac catheterization has been increasing. A noninvasive quantitative method to estimate the Q_p/Q_s ratio in this disease is therefore needed, but no simple, accurate method has yet been reported. The purpose of this study was to devise a new clinically useful method.

Study materials consisted of 15 patients with ASD who were catheterized and five post-operative patients. For this study a multigated Doppler echocardiographic instrument (Fujitsu ME 120A) was used, which allowed us to ascertain Doppler shift frequency at 64 consecutive sampling volumes up to 13 cm in depth simultaneously. In the parasternal four-chamber view, the cursor was set so as to cross obliquely the right ventricular inflow tract just below the tricuspid valve and the left atrium, just above the mitral valve. Two blood flow profiles were obtained from the flow crossing the tricuspid and mitral valves. The multigated Doppler echocardiogram was recorded on videotape and then analyzed. (1) The encircling area between the profile and the base line was measured for tricuspid and mitral flow independently throughout diastole. After summing up each area of tricuspid (TA) and mitral (MA) flow profiles, the ratio TA/MA was obtained (area calculation method). (2) The flow volume passing through each tricuspid (TF) and mitral valve (MF)

東京女子医科大学日本心臓血圧研究所 循環器小児科
*同 内科
新宿区河田町 8-1 (〒162)

Departments of Pediatric Cardiology and *Internal
Medicine, The Heart Institute of Japan, Tokyo
Women's Medical College, Kawada-cho 8-1, Shinjuku-
ku, Tokyo 162

Received for publication February 20, 1989; revised July 7, 1989; accepted July 28, 1989 (Ref. No. E-89-4)

was calculated from the flow profile using the “ring approach” reported by Jenni, and the ratio TF/MF was obtained (flow calculation method).

The TA/MA and TF/MF ratios correlated with the Qp/Qs ratio obtained using Fick's method ($r=0.87$ and 0.82 , respectively), and the possibility of making calculations automatically is discussed.

We concluded that TA/MA and TF/MF ratios as obtained using multigated Doppler echocardiography comprise a newly devised noninvasive method, which is accurate for estimating the Qp/Qs ratio in patients with ASD.

Key words

Multigated Doppler echocardiography

Atrial septal defect

Qp/Qs ratio

緒 言

近年心エコー図診断精度の向上に伴い、心房中隔欠損症に対してはカテーテル検査を行わないで手術を行うケースが増加している¹⁻⁴⁾。手術適応の決定を客観的に判断するためには非侵襲的な肺体血流量比 (Qp/Qs ratio) の計測が必要な場合もあるが、現在までに知られている方法は⁵⁻⁸⁾、精度が十分でなかったり、方法が複雑すぎて実用性に乏しかったりする欠点がある。パルス・ドップラー法では、流出路断面の算出に用いる断層心エコー図上の径の計測の精度が誤差要因になることは周知であり、また流入路血流などから血流量を定量化する場合には、血流プロファイルの形状が平坦であるか否かも誤差要因たり得る。カラードップラー法を用いた心房中隔欠損の短絡血流面積から短絡率を推定する方法は、体表面積や超音波の透過性によって誤差を生じることが知られている⁹⁾。今回我々はマルチゲート・ドップラー心エコー図法を用いて、心房中隔欠損症の肺体血流量比 (Qp/Qs ratio) を計測する方法を考案し、臨床評価を行ったので報告する。

対 象

心臓カテーテル検査を行った心房中隔欠損症 15 例と手術後の本症 5 例の計 20 例である。年齢は 1 歳から 27 歳まで、男子 8 例、女子 12 例である。

方 法

1. 使用機器

使用装置は富士通製電子セクタースキャナー ME 120A である。B-mode と実時間マルチゲート・ドップラー心エコー図の同時表示が可能である。マルチゲート・ドップラー心エコー図は断層心エコー図内で任意のカーソルラインを設定し、そのカーソルラインに沿い、13 cm の深度内で 64 点の連続したサンプルボリュームのドップラー偏位を FFT 周波数分析し、テレビ画面に表示するものである¹⁰⁻¹³⁾。この場合の距離方向でのサンプルボリュームサイズは 2 mm である。垂直に表示された基線の片方に探触子に対して近づく方向の血流を、もう片方に遠ざかる方向の血流を表示するが、基線の左右は選択可能である。探触子は 5 MHz または 3.5 MHz のいずれかを用いた。

2. マルチゲート・ドップラー心エコー図の設定

基線の右側に探触子に近づく血流が表示されるように装置を設定した。断面は胸骨傍四腔断面を用いた。三尖弁および僧帽弁が最も大きな振幅で観察される断面上で、カーソルラインが三尖弁下で右室流入路と、僧帽弁直上で左房をそれぞれ斜めに横切るように設定した。ドップラーの繰り返し周波数は、aliasing を起こさない範囲で、4 KHz から 8 KHz の間に設定した。この超音波ビーム上のマルチゲート・ドップラー心エコー図を 3/4 インチ幅のビデオテープに録画し、後にその再生画像を分析した。

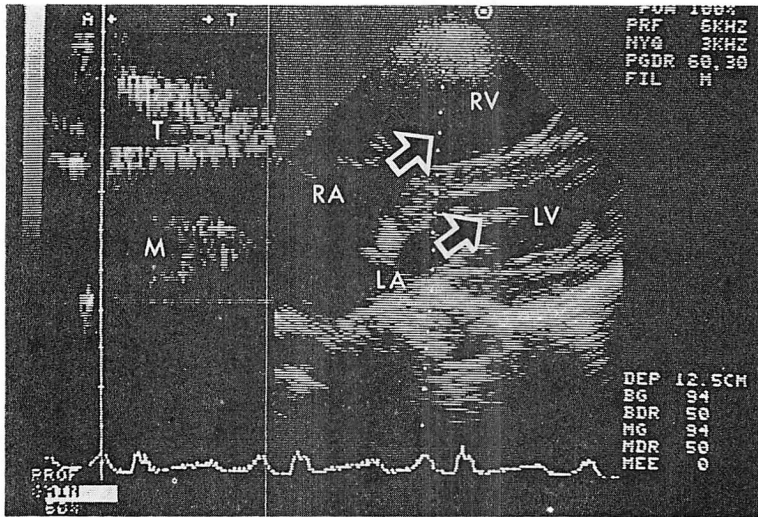


Fig. 1. A multigated Doppler echocardiographic image from a patient with atrial septal defect.

The cursor line is set to cross the right ventricular inflow tract below the tricuspid valve and the left atrium just above the mitral valve, obliquely in the parasternal four-chamber view. Note that the two flow velocity profiles correspond to the tricuspid and mitral inflows.

3. 画像の解析

ビデオテープを1フレームずつ確実に再生し、三尖弁と僧帽弁のそれぞれの流入路で得られるマルチゲート・ドップラー心エコー図を、拡張期全般にわたってトレースした。三尖弁と僧帽弁の血流プロファイルが基線と囲む面積を計測し、それらを拡張期全般にわたって加算したものをそれぞれTA, MAとし、TA/MA比を求めた(Fig. 1)。これを面積計測法(area calculation method)とした。また三尖弁輪、僧帽弁輪の形状を円形と仮定してそれぞれの流入路における通過血流量をJenniら¹⁴⁾のring approachを用いて推定し、TF, MFとしTF/MF比を求めた。すなわち、Fig. 2に示したように、房室弁を通過する血流プロファイル内にn個のサンプルボリュームが含まれ、血流プロファイルの中心からi番目までの半径を r_i 、 $i+1$ 番目までの半径を r_{i+1} とし、それぞれの周波数を f_i 、 f_{i+1} とした場合、この1フレームに表示された血流量はFig. 2に示した計算式で求められる。これを全拡張期を通じて加算すること

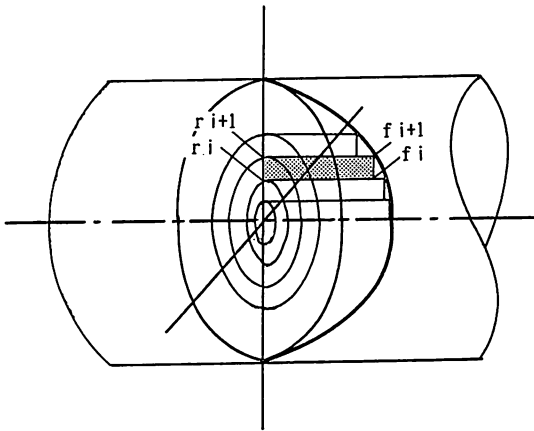
によりその房室弁を通過する血流量が求められる。これを流量推定法(flow estimation method)とした。左右両心室の流入路の超音波ビームに対する入射角は等しいと考えて角度補正は行わなかった。

4. Fick法との比較

TA/MAとFick法で求めた Q_p/Q_s の比較を行った。またTF/MFとFick法で求めた Q_p/Q_s を比較した。術後症例においては肺体血流量比=1.0として比較した。

結 果

Fig. 3にFick法で $Q_p/Q_s=2.0$ の症例のマルチゲート・ドップラー心エコー図の拡張期像を示す。パネル1から6まではテレビ画面の拡張期の流入開始から6画面目までに対比している。三尖弁流入血流が僧帽弁のそれよりも1画面早期に出現し、僧帽弁の流入血流が終了した後まで持続している。三尖弁流入血流のプロファイルの面積は、拡張期を通じて僧帽弁流入血流のプロファイルの面積よりも大きい。三尖弁、僧帽弁の流入血



$$V = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\pi r_i^2}{2} - \frac{\pi r_{i+1}^2}{2} \right| \cdot \left| \frac{f_i + f_{i+1}}{2} \right| \cdot \frac{154000}{2 \cos \theta} \cdot \frac{1}{f_0} \cdot \frac{1}{\sin^2 \theta} \cdot \frac{1}{30}$$

Fig. 2. Method of calculating the flow volume passing through the atrioventricular valve indicated in one TV frame.

V=volume in one TV frame, r_i and r_{i+1} =distance from the center of the flow profile to the sample volume "i" and "i+1", respectively. f_i and f_{i+1} =the Doppler shift frequencies of the sample volume "i", and "i+1", respectively. Although θ is the angle of incidence between the blood flow and the ultrasonic beam, these are not concerned because these parameters are used for the calculations for both tricuspid and mitral valves.

n=number of the sampling volumes including the flow profile in one TV frame. f_0 =frequency of the ultrasound (3.5 or 5.0×10^6 Hz).

流プロファイルの形状はともに必ずしも平坦ではなく、加速期にはいずれも放物線に近い形状を呈していた。

Fig. 4 に心房中隔欠損症術後症例のマルチゲート・ドップラー心エコー図の拡張期像を示す。パネル 1 から 4 まではテレビ画面の拡張期の開始から 4 画面までに対比しており、パネル 5, 6 の血流プロファイルはテレビ画面の拡張期の開始から 10 および 11 画面目に対応している。三尖弁および僧帽弁の流入血流は同時に開始し、僧帽弁流入血流プロファイルの面積の方が拡張早期には大き

いが、より早期に終了している。その結果、三尖弁と僧帽弁の流入血流プロファイルの面積の和はおおよそ等しくなっている。

面積計測法 (area calculation method)

Fick 法と $r=0.87$ の正相関を認めた ($Y=1.13X+0.05$; $N=20$) (**Fig. 5a**).

流量推定法 (flow estimation method)

Fick 法と $r=0.82$ の正相関を認めた ($Y=1.7X-0.37$; $N=20$) (**Fig. 5b**).

考 按

マルチゲート・ドップラー心エコー図法は、1971 年、McLeod ら¹⁵⁾ によつてはじめて実現されたドップラー法のモードで、その後我が国の Tanaka ら¹⁶⁾、Matsuo ら¹⁷⁾ や Brandestini ら¹⁸⁾ もそれぞれ別個にマルチゲート・ドップラー心エコー図法を実現し、心内や大血管内の血流プロファイルの観察を行っている。最近の high technology の恩恵を受けて大量の演算を高速に処理することが可能となり、本研究で使用した装置では、断層心エコー図を観察しながら同時にカーソルライン上のマルチゲート・ドップラー心エコー図を実時間観察することが可能となっている。カーソルラインの設定の仕方を工夫すれば血流速度プロファイルを観察することも可能であり¹¹⁾、これを利用して、心内や大血管内の血流や短絡血流の定量化への応用が期待される。

本研究では三尖弁と僧帽弁の流入血流プロファイルを用いて心房中隔欠損症の肺体血流量比を推定し、Fick 法で求めた肺体血流量比と比較したところ、良好な正相関を認めた。血流プロファイルの面積を単純に加算して比をとる方法 (area calculation method) と、弁輪を円形と仮定してそれぞれの弁を通過する血流量を推定して比をとる方法 (flow estimation method) の両方法とも、良好な相関関係を認めたが、area calculation method の方がより高い相関係数を認めた ($r=0.87$)。Area calculation method の意味づけとしては、弁の中心部分における単位スライス当たり

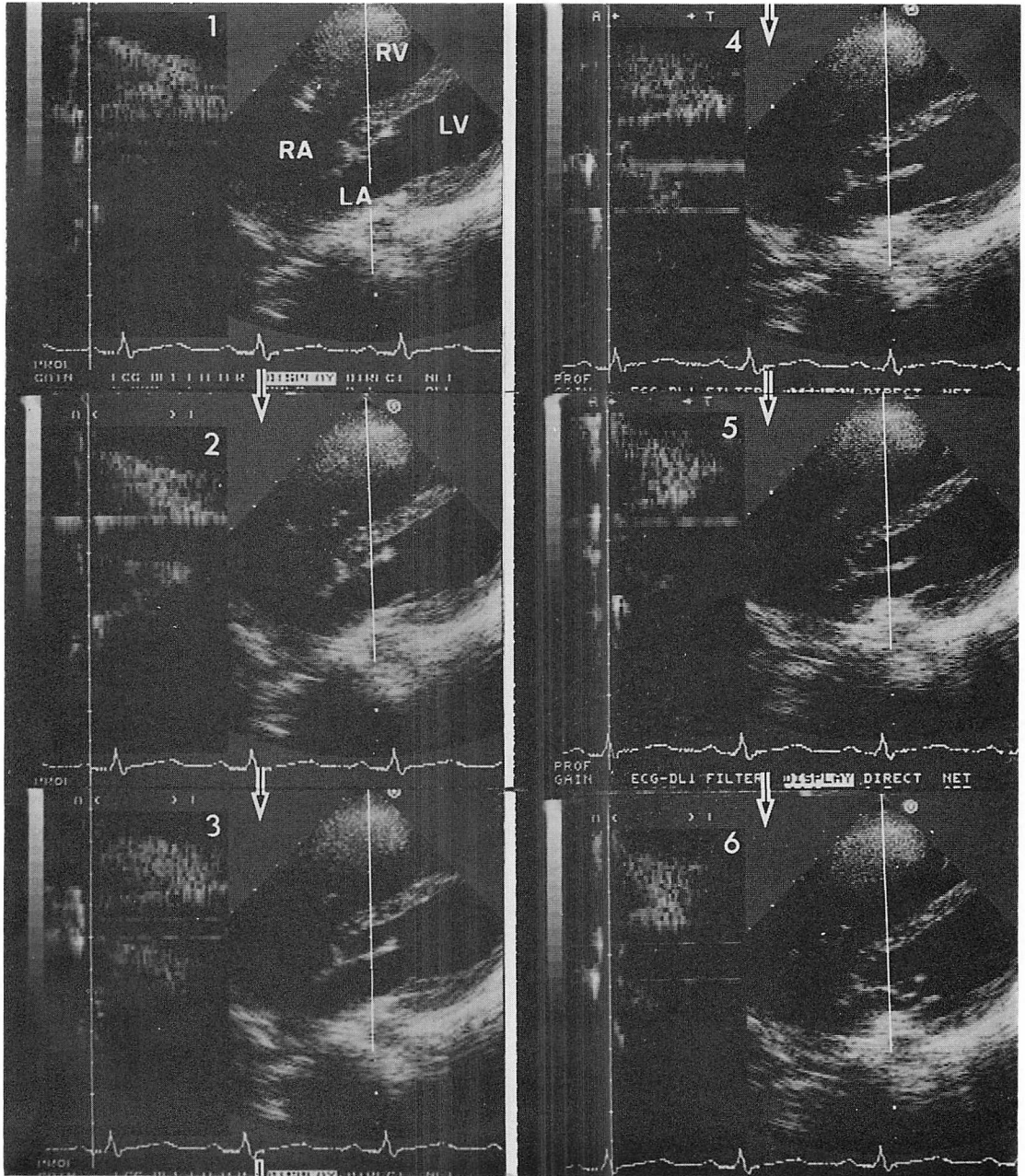


Fig. 3. Multigated Doppler echocardiograms throughout the diastolic phase from a patient with ASD whose Qp/Qs is 2.0.

Each panel from 1 through 6 corresponds to the 1st to the 6th TV frame in the diastolic phase. RA=right atrium; LA=left atrium; RV=right ventricle; LV=left ventricle.

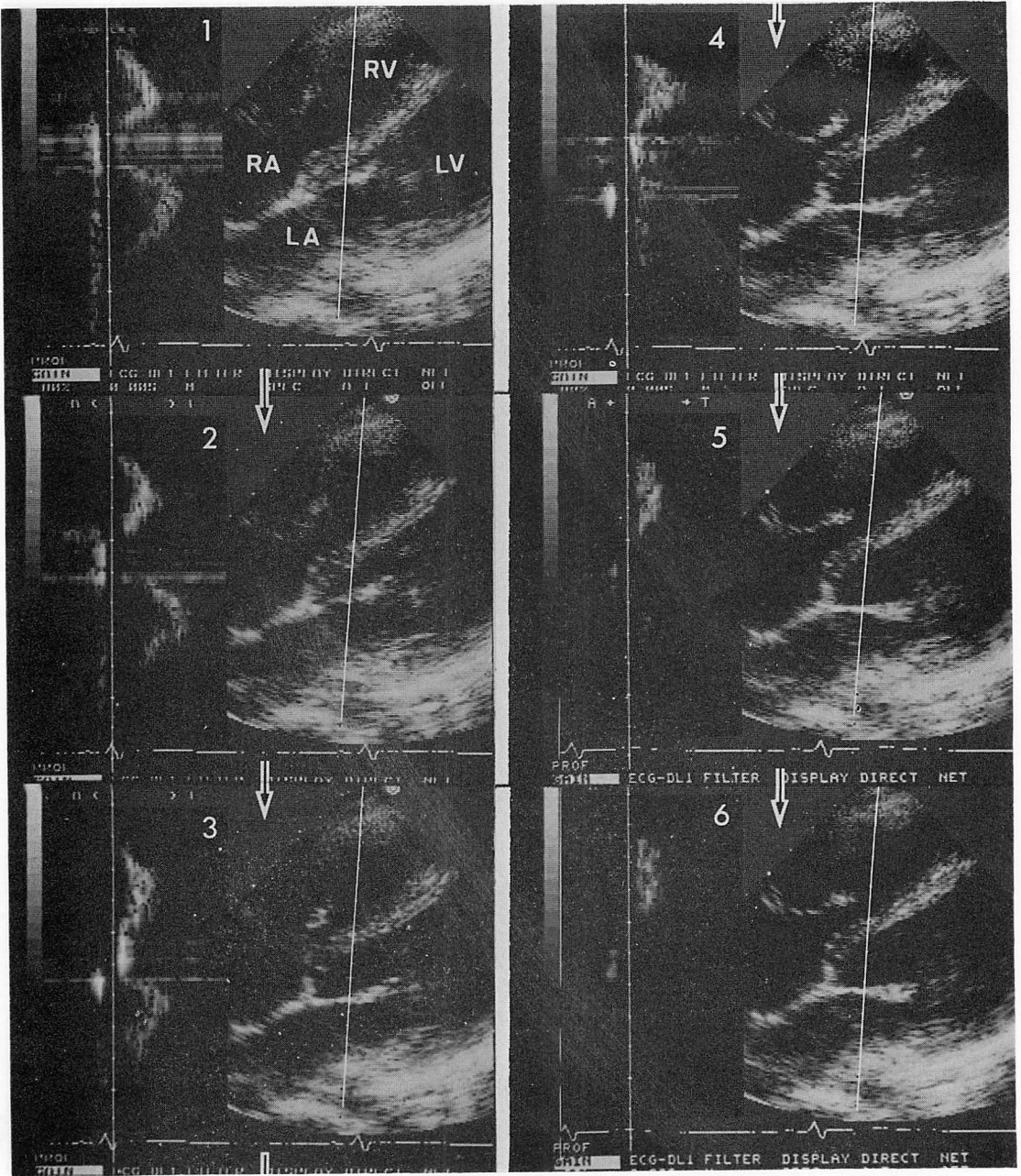


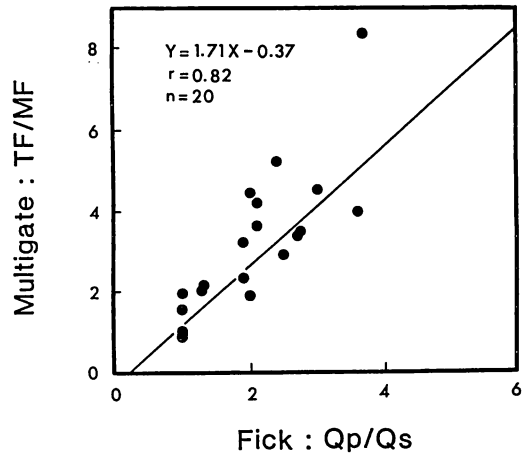
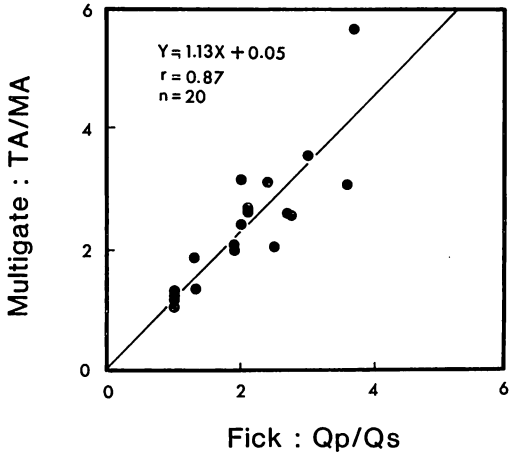
Fig. 4. Multigated Doppler echocardiograms throughout the diastolic phase from a patient with ASD after surgery whose Qs/Qs is 1.0.

Each panel from 1 through 4 corresponds to the 1st to the 4th TV frame in the diastolic phase. Panel 5 and 6 correspond to the 10th and the 11th TV frames in diastole, respectively.

RA=right atrium; LA=left atrium; RV=right ventricle; LV=left ventricle.

MULTIGATE TA/MA vs Qp/Qs

MULTIGATE TF/MF vs Qp/Qs



(a)

(b)

Fig. 5. Correlations of the TA/MA (a) and TF/MF (b) ratios with the Qp/QS ratio obtained by the Fick's method.

TA/MA and TF/MA: see text.

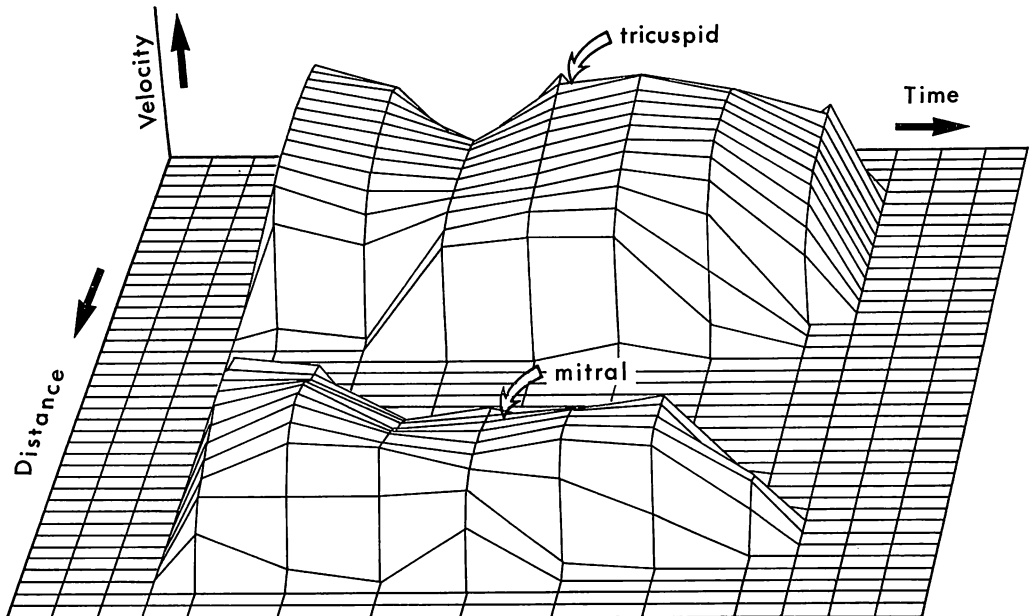


Fig. 6. Three-dimensional display of the tricuspid and mitral flow profiles of the unit slice of area situated at the center of each valve ring.

This is reconstructed from the data obtained by multigated Doppler echocardiography.

の血流量を計測したことになる。Fig. 6 はこのような考えのもとに X 軸に時間を、Y 軸にドップラー偏位周波数または流速を、Z 軸に胸壁からの距離をとって三次元的に表示させた図である。三尖弁および僧帽弁の弁形状を円形と仮定して血流量を推定して行った flow estimation method では Qp/Qs を過大評価する傾向にあり、相関係数は低下する ($r=0.82$)。とくに Qp/Qs が大きい症例で過大評価の程度が大きくなる傾向が認められた。三尖弁の形状は一定ではなく、容量負荷が小さい場合には正常に近い三日月状を呈し、容量負荷が大きい場合には円形に近くなるものと考えられ、これが flow estimation method での相関を低下させる原因のひとつでもあると考えられる。また三尖弁と僧帽弁の流入血流は厳密には平行ではないであろうが、本研究ではあえて角度補正を行わないで、両血流は平行であるという仮定のもとに計測を行った。胸骨傍四腔断面で観察する限りにおいては、両流入血流はほぼ平行に認められることがその根拠であったが、両弁の流入血流の方向が平行でないとすれば、両方の血流プロファイルに対して異なった角度の $\cos\theta$ で補正されるべきところを省略したことになり、これも血流量を推定する方法において、誤差要因の一つとなっている可能性も否定できない。

しかしながら、結果的に本法で比較的良好な正相関を認めたことは、種々の誤差要因があったにせよ、1本のカーソルライン上で得られた両弁の血流プロファイルが、両弁の流入血流量と深い関係をもつことを示唆するものである。今後ソフトウェアの開発が行われれば、本研究では繁雑であった計算行程も所要時間の短縮、ひいては自動処理の可能性も期待される。

結 語

マルチゲート・ドップラー心エコー図法を用いた肺体血流量比の推定法、特に単純にプロファイルの面積を加算して比をとる area calculation method は、方法論的に簡単で客観的であるところから、

心房中隔欠損症の肺体血流量比を非侵襲的に推定する優れた検査法である。

要 約

マルチゲート・ドップラー心エコー図法を用いた心房中隔欠損症の肺体血流量比の非侵襲的計測法を考案し、カテーテル検査を施行した心房中隔欠損症 15 例と 5 例の本症術後症例に応用した。装置は富士通製電子セクタスキャナー ME 120A である。胸骨傍四腔断面においてカーソルラインを三尖弁直下の右室流入路と僧帽弁直上の左房を通過するように設定し、そのライン上でマルチゲート・ドップラー心エコー図法を行った。右室流入路と左室流入路においてそれぞれ拡張期流入血流プロファイルを記録し VTR に収録した。再生画像からそれぞれ三尖弁、僧帽弁を通過する血流プロファイルを拡張期全般にわたってトレースし、プロファイルが基線と囲む面積をそれぞれ TA, MA とし、これから TA/MA 比を求めて、これを面積計測法とした。三尖弁、僧帽弁輪の形状を円形と仮定し、それぞれの流入路における通過血流量を Jenni らの ring approach 法に従って血流プロファイル像を用いて算出し、それぞれ TF, MF として TF/MF 比を求め、これを流量推定法とした。面積計測法の TA/MA 比と流量推定法の TF/MF 比は、カテーテルデータから Fick 法で求めた Qp/Qs 比とそれぞれ $r=0.87$, $r=0.82$ の正相関を示した。面積計測法を用いた TA/MA 比は簡便で、Qp/Qs 比とほぼ 1:1 に対応し、したがって本法は新しい非侵襲的肺体血流量比の測定方法として有用である。

文 献

- 1) Huhta JC, Latson LA, Gutgesell HP, Cooley DA, Kearney DL: Echocardiography in diagnosis and management of symptomatic aortic valve stenosis in infants. *Circulation* 70: 438-444, 1984
- 2) Krabill KA, Ring WS, Foker JE, Braunlin EA, Einzig JM, Bass JL: Echocardiographic versus cardiac catheterization diagnosis of infants with congenital heart disease requiring cardiac surgery.

- Am J Cardiol **60**: 351-354, 1987
- 3) Albolaras ET, Seward JB, Hagler DJ, Danielson GK, Puga FJ, Tajik AJ: Impact of two-dimensional and Doppler echocardiography on care of children aged two years and younger. Am J Cardiol **61**: 166-169, 1988
 - 4) Huhta JC, Glasow P, Murphy DJ Jr, Gutgesell HP, Ott DA, McNamara DG, Smitt EO: Surgery without catheterization for congenital heart defects: Management of 100 patients. J Am Coll Cardiol **9**: 823-829, 1987
 - 5) Sanders SP, Yeager S, Williams RG: Measurement of systemic and pulmonary blood flow and Qp/Qs ratio using Doppler and two-dimensional echocardiography. Am J Cardiol **51**: 952-956, 1983
 - 6) Kitabatake A, Inoue M, Asao M, Itoh H, Masuyama T, Tanouchi J, Morita T, Hori M: Non-invasive evaluation of the ratio of pulmonary to systemic flow in atrial septal defect by two-dimensional Doppler echocardiography. Circulation **69**: 73-79, 1984
 - 7) Stevenson JG: The use of Doppler echocardiography for detection and estimation of severity of patent ductus arteriosus, and atrial septal defect. Echocardiography **4**: 321-346, 1987
 - 8) Caccaipouti F, Varricchio M, D'Avino M, D'Angelo G, Gentile S, Lama D, Cotrufo M: Non-invasive evaluation of left-to-right shunts by Doppler echocardiography. Int J Cardiol **13**: 57-67, 1986
 - 9) 里見元義, 高尾篤良: 小児循環器領域におけるドプラー心エコー図法による各種計測値の信頼性と限界. 日小循会誌 **5**: 368-377, 1990
 - 10) Satomi G, Nakazawa M, Takao A, Nakamura K: Real-time observation of intra and extracardiac blood flow profile in man using instantaneous B-mode and multichannel Doppler echocardiography. Heart and Vessels **2**: 228-232, 1986
 - 11) 里見元義, 高尾篤良, 青墳裕之, 神田 進, 矢嶋茂裕, 中村憲司: 実時間マルチゲートドプラー心エコー図法を用いた先天性大動脈弁狭窄における血流速度プロファイルの変形の観察, 日超医講論文集 **49**: 501-502, 1986
 - 12) Satomi M, Takao A, Yajima S, Katayama H, Aotsuka H, Kanda S, Koyama K, Nakamura K: Azygos and hemiazygos connections imaged by two-dimensional, and pulsed and color Doppler echocardiography. J Cardiogr **18**: 435-441, 1988 (in Japanese)
 - 13) 里見元義, 中沢 誠, 神田 進, 青墳裕之, 片山博視, 菊池典子, 高尾篤良, 中村憲司: マルチゲートドプラー心エコー図法を用いた新しい心拍出量計測法の試み: Jpn J Med Ultrasound **17**: 486-491, 1990
 - 14) Jenni R, Vieli A, Ruffmann K, Krayenbuehl H-P, Anliker M: A comparison between single gate and multigate ultrasonic Doppler measurements for the assessment of the velocity pattern in the human ascending aorta. Eur Heart J **5**: 948-953, 1984
 - 15) McLeod FD, Anliker M: A multiple gate pulsed directional Doppler velocity flowmeter. Proc IEEE Ultrason Symp Miami, 1971 (Dec)
 - 16) Tanaka M, Okajima M, Ohtuka S, Terasawa Y, Konno K, Ebina T: Non-invasive measurement of the blood flow and of velocity distribution in cardiac chambers and great vessels by a new Doppler flowmeter system. Ultrasound in Med **3B**: 1263-1277, 1977
 - 17) Matsuo H, Inoue M, Kitabatake A, Hayashi T, Asao M, Terao Y, Mishima M, Senda S, Shimazu T, Tanouchi J, Morita H, Chihara K, Hirayama M, Inokuchi S, Sakurai Y: Analysis of Doppler flow signals by Winograd Fourier transform algorithm-detection of intracardiac flow dynamics by computer-based ultrasonic multi-gated Doppler flow meter. Jpn J Med Ultrason **34**: 3-4, 1978
 - 18) Brandestini M: Topoflow: A digital full range Doppler velocity meter. IEEE Trans-SU **25**: 287-293, 1978