

超音波パルス・ドプラー法
による大動脈弁閉鎖不全症
の逆流率の評価：大動脈造
影所見との比較検討

Evaluation of regurgi-
tant fraction of aortic
regurgitation by means
of pulsed Doppler echo-
cardiography as com-
pared with cine angio-
graphy

森田紀代造
鈴木 茂
佐々木達海
宮沢 総介
水野 朝敏
堀口 徹
窪内 洋一*
新井 達太

Kiyozo MORITA
Shigeru SUZUKI
Tatsuumi SASAKI
Sousuke MIYAZAWA
Asatoshi MIZUNO
Toru HORIGUCHI
Yoichi KUBOUCHI*
Tatsuta ARAI

Summary

The regurgitant fraction (RF) of aortic regurgitation (AR) was calculated using pulsed Doppler echocardiography (PDE), and the results were compared with those of aortography.

Two-dimensional echocardiography (2DE), PDE and cine angiography were performed for 33 patients, including nine in whom aortic regurgitation (AR) was ruled out by contrast 2DE and 24 in whom AR was confirmed by aortography (AOG). The latter were subdivided into six of Sellers' degree I, seven of degree II, eight of degree III and three of degree IV.

Sampling was obtained from the main pulmonary artery, the left ventricular outflow tract, and the mean circulation velocity (f_1) was calculated from the power spectrum wave pattern obtained from each source. With the following formula, Qp (pulmonary arterial blood flow), Qs (left ventricular ejectional blood flow) and RF $[(Q_s - Q_p)/Q_s]$ were calculated, and compared with the findings obtained from invasive methods:

$$Q = \pi \left(\frac{L}{2} \right)^2 \cdot \frac{C}{2 \cos \theta} \cdot \frac{f_1}{f_0} \cdot ET \cdot HR$$

(L = vascular diameter; θ = angle of incidence; C = velocity of sound; f_0 = oscillating frequency; ET

東京慈恵会医科大学 心臓外科
*同 第四内科
東京都港区西新橋 3-19-18 (〒105)

Department of Cardiovascular surgery and *the
Fourth Department of Internal Medicine, The Jikei
University School of Medicine, Nishi-shinbashi 3-19-
18, Minato-ku, Tokyo 105

Received for publication May 14, 1984; accepted July 2, 1984 (Ref. No. 27-11)

=ejection time; HR=heart rate)

A correlation of $r=0.81$ was found between Qp calculated with PDE and right cardiac output (CO) by the thermodilution method. A correlation of $r=0.66$ was observed between Qs and left ventricular ejection volume obtained from left ventriculography using Dodge's method.

Comparison of RF using Sellers' classification with AOG revealed that the RF in the group uncomplicated with AR was 0.14 ± 0.10 , and Sellers' degrees I, 0.27 ± 0.08 ; II, 0.36 ± 0.04 ; III, 0.53 ± 0.05 ; and IV, 0.64 ± 0.06 , indicating consistency with severity and RF.

By classifying the RF values with PDE, RF was <0.2 in Group I, $0.2 \leq RF < 0.4$ in Group II, $0.4 \leq RF < 0.6$ in Group III, and $RF \geq 0.6$. A nearly consistent relation; PDE Group I=AR uncomplicated group; Group III=Sellers' degree III; and Group IV=Sellers' degree IV, were observed. Therefore, RF by PDE correlates well with the severity of AR, and is applicable to clinical practice.

Key words

Aortic regurgitation

Pulsed Doppler echocardiography (PDE)

はじめに

近年, 超音波パルス・ドプラー法 (PDE) により, 心内血流情報の非観血的把握が可能となり, 従来, 断層心エコー図法 (2DE) のみでは間接的所見しか得られなかった心内シャントや, 弁性逆流を直接的検出がなされるようになった^{1,2)}. また最近では, 血流情報の定量的評価にも応用され, PDE により計測された心拍出量は観血的方法と良く相関し, 臨床的に有用であることが報告されている^{3,4)}.

通常, 大動脈弁閉鎖不全症 (AR) については, 逆流に起因する拡張期乱流を検出することにより確定診断が容易であり^{1,2)}, その検出範囲を検討することにより, 重症度の判定が可能である⁵⁾. しかし, この左室流出路マッピング法による AR 重症度評価には, 逆流の形態, 方向性, 合併する僧帽弁狭窄 (MS) の弁下乱流などの問題点があり, したがって本法による定量的診断は必ずしも容易ではない.

我々は, 本来, 容量負荷疾患である AR の重症度を決定するものは逆流量 (逆流率) であると考え, PDE による両心拍出量計測法⁶⁻⁸⁾を応用して, 逆流率を算出することにより, AR のより定量的な診断を試みた.

対 象

対象は断層心エコー図, PDE および心カテテル法を施行した 33 例で, **Table 1** のごとくコントラスト断層心エコー図法により AR を否定し得た 9 例, 大動脈造影により AR の確認された 24 例 (Sellers 分類 I 度 6 例, II 度 7 例, III 度 8 例, IV 度 3 例) である. このうち純型 AR は 7 例で, 他は連合弁膜症である.

Table 1. Materials

		No. of case	Diagnosis		
Without AR	9		MS	4	
			MR	3	
			Others	2	
With AR	24		pure AR	7	
			+AS	1	
			+MS	7	
		Sellers I	6	+MR	2
		Sellers II	7	+MSR	2
		Sellers III	8	+AS+MS	3
Sellers IV	3	+AS+MSR	2		
Total	33 cases				

AR=aortic regurgitation; AS=aortic stenosis; MR=mitral regurgitation; MS=mitral stenosis.

使用装置および方法

計測には凸型トランスデューサーを用いたパルス変調ドプラー心断層複合装置 Aloka 製 XA31, 発振周波数 2.75 MHz, パルス繰り返し周波数 4.4 KHz を使用した. ドプラー表示は FFT を用いたパワースペクトラム表示で, 記録には同社製 Aloka SSZ-93 を用い, 紙送り速度は 100 mm/sec とした. 上記装置を用い, 肺動脈血流量 Q_p および左室駆出血流量 Q_s を計測, $Q_s - Q_p$ をもって AR による逆流流量とした.

肺動脈血流の計測は, Fig. 1 のごとく, 傍胸骨左縁アプローチにより, 主肺動脈をできる限りビーム方向と平行になる様に描出し, サンプル部位を主肺動脈内弁直上中央部に設定して行った. さらに収縮中期断層図より, 主肺動脈左右径, ドプラー入射角 θ を計測した.

一方, 左室駆出血流の計測には, Fig. 2 のごとく, 心尖部アプローチにより左室流出路を描出し, サンプル部位を左室流出路大動脈弁直下中央部に設定した. さらに収縮中期断層図より大動脈弁輪径, ドプラー入射角 θ を計測した. またこの際, 流出路血流方向は心尖部と大動脈弁中央を結ぶ直線と仮定した.

主肺動脈, 左室流出路において得られた各々のパワースペクトラム (Figs. 3, 4) の駆出期波形面積 (S) を駆出時間に相当する長さ (L) で除し, 洞調律の場合は 5 心拍, 心房細動では 10 心拍の平均値をもって f_1 (駆出期における平均流速に対応する周波数偏移) とした (Fig. 5). さらに式 1, 式 2 (Fig. 5) によって, Q_p , Q_s および逆流率 (RF) を算出し, 各々, 観血的方法と対比検討した.

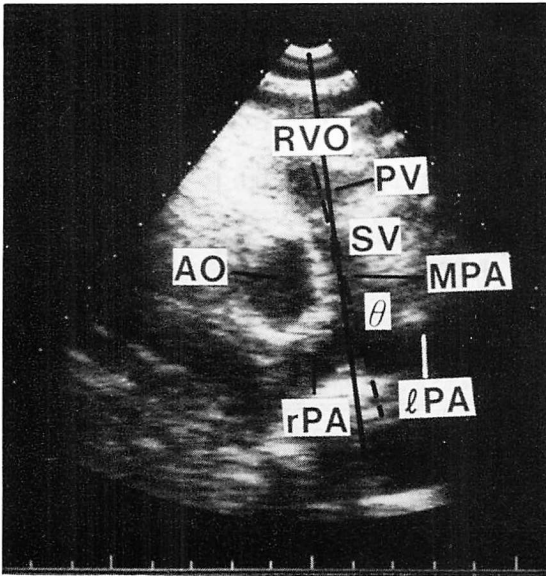


Fig. 1. Sample volume location used in detecting the pulmonary flow.

AO=ascending aorta; RVO=right ventricular outflow tract; MPA=main pulmonary artery; SV=sample volume; θ =angle between the axis of the main pulmonary artery and the Doppler beam.

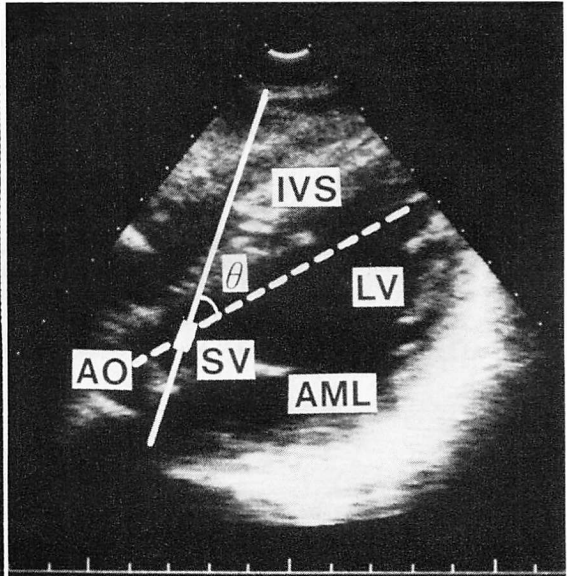


Fig. 2. Sample volume location used in detecting the left ventricular ejectional flow.

AO=ascending aorta; LV=left ventricle; IVS=interventricular septum; AML=anterior mitral leaflet; SV=sample volume; θ =angle between the direction of the blood flow in the LV outflow tract and the Doppler beam.

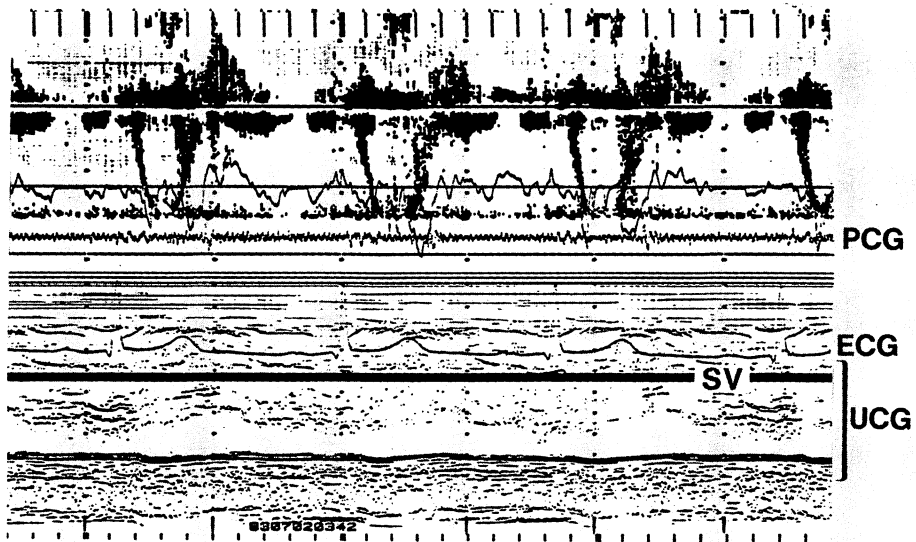


Fig. 3. Doppler signals in the main pulmonary artery.

In the upper part of the tracing, Doppler signal of the flow velocity in the main pulmonary artery is displayed. Above the zero base line is the flow toward the transducer and below the base line the flow away from the transducer. Full scale is 2.2 kHz.

Phonocardiogram (PCG) and M-mode echocardiogram (UCG) are shown, where a horizontal line indicates the position of SV.

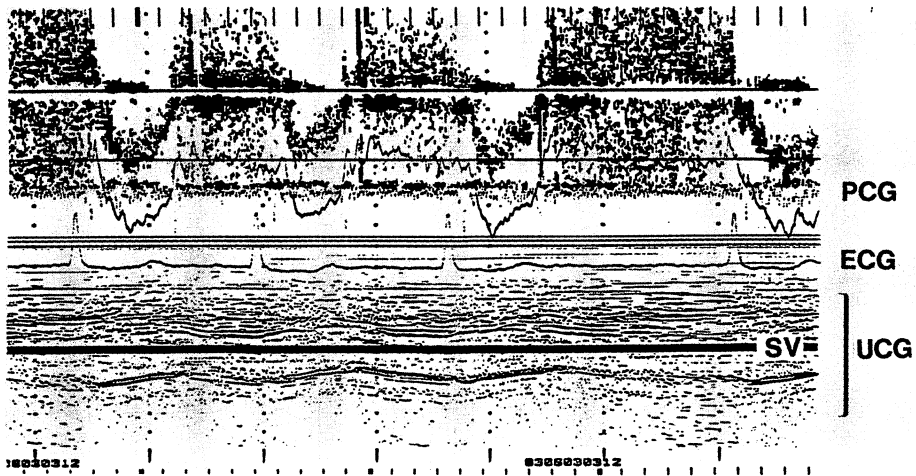
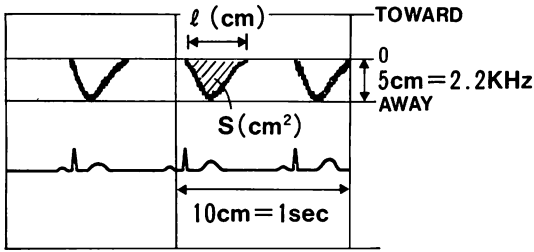


Fig. 4. Doppler signals in the left ventricular outflow tract in a case with AR.

The systolic flow shows a narrow band pattern away from the transducer, whereas the diastolic flow is widely dispersed bilateral flow.



$$f_1 \left(\text{mean velocity during the ejection period} \right) = \frac{2.2}{5} \times \frac{S \text{ (cm}^2\text{)}}{l \text{ (cm)}}$$

$$Q = \pi \left(\frac{L}{2} \right)^2 \cdot \frac{C}{2 \cos \theta} \cdot \frac{f_1}{f_0} \cdot ET \cdot HR \dots\dots\dots (1)$$

- L: internal diameter of the main pulmonary artery or aortic valve ring
- θ : angle between blood flow and Doppler beam
- C: velocity of sound in tissue (1500 m/sec)
- f_0 : frequency of transmitted ultrasound
- ET: ejection time
- HR: heart rate

$$RF \text{ (regurgitant fraction)} = \frac{Q_s - Q_p}{Q_s} \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 5. Measurement of pulmonary flow (Qp) and left ventricular ejection flow (Qs).

成 績

1. 肺動脈血流量 (Qp) (Fig. 6)

PDE によって求めた Qp と、心カテーテル検査時熱希釈法によって求めた右心系拍出量 CO との間には、 $y=0.61x+0.41$, $r=0.81$ の相関を認めた。また洞調律 ($r=0.84$) に比し、心房細動 ($r=0.78$) の症例では、バラツキが大きい傾向を示した。

2. 体血流量 (Qs) (Fig. 7)

MR を伴わない 11 例について、PDE によって求めた Qs と、左室造影所見より Dodge 法にて算出した一回拍出量に心拍数を乗じた左室駆出血流量 (LVSV×HR) とを比較検討すると、 $y=0.54x-0.21$, $r=0.66$ の相関を認めた。

3. 逆流率 (RF) (Figs. 8, 9)

PDE によって求めた RF と、大動脈造影による Sellers 分類とを比較検討すると、AR 非合併例では $RF=0.14 \pm 0.10$, Sellers I 度 $RF=$

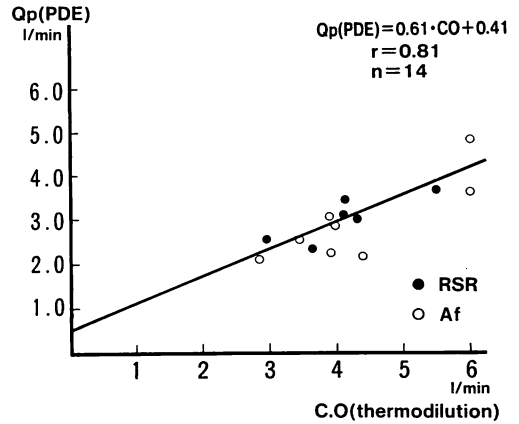


Fig. 6. Comparison of Qp obtained by PDE with cardiac output by thermodilution method. RSR=regular sinus rythum; Af=atrial fibrilation.

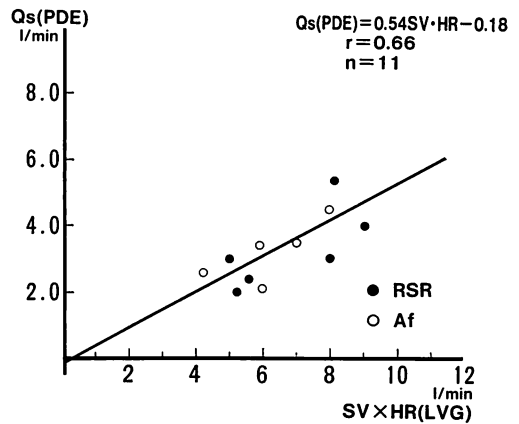


Fig. 7. Comparison of Qs by PDE with left ventricular ejection flow obtained by LVG.

0.27 ± 0.08 , II 度 $RF=0.36 \pm 0.04$, III 度 $RF=0.53 \pm 0.05$, IV 度 $RF=0.64 \pm 0.06$ となり、AR II 度以上で RF と重症度とはよく一致し、AR 非合併例でやや RF の分散が大きい傾向を示した。また左室-大動脈圧較差が 15~100 mmHg の大動脈弁狭窄症 6 例についても、ほぼ同様の傾向であった。

PDE による RF の値により、PDE Grade I ($RF < 0.2$), Grade II ($0.2 \leq RF < 0.4$), Grade

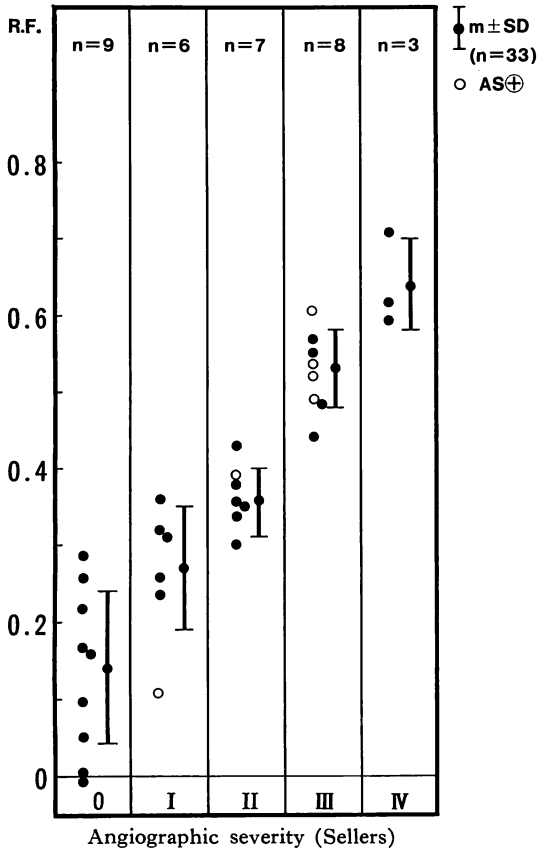


Fig. 8. Scatter diagram illustrating regurgitant fraction by PDE compared with angiographic severity.

III ($0.4 \leq RF < 0.6$) および Grade IV ($RF \geq 0.6$)に分けると, Grade I は AR 非合併例, Grade III は Sellers III 度, Grade IV は Sellers IV 度と良く一致した. これに反し, Grade II は一定した一致傾向を示さなかったが, 全例 Sellers II 度以下であった. 以上のように, PDE による AR 分類は中等度以上の AR, 特に II 度以下か III 度以上かの判定に有用であった.

考 按

1. Qp, Qs 算出について

PDE による右心系拍出量 (RCO) の計測はサンプル部位を右室流出路や主肺動脈に, また左心

		n=33					
		AOG	0	I	II	III	IV
PDE							
Group I	(PF<0.2)		●●●●	○			
Group II	($0.2 \leq RF < 0.4$)		●●●	●●●●	●●●○		
Group III	($0.4 \leq RF < 0.6$)				●	●●●●	●
Group IV	($0.6 \leq RF$)					○	●●

○ Cases with AS (n=6)

Fig. 9. Comparison of severity of AR as assessed by PDE and cine angiography (aortography).

A significant correlation is noted between the two methods.

系拍出量 (LCO) については左室流出路, 大動脈弁直上, あるいは胸骨上窩アプローチによる上行大動脈内などに設定して行う方法が報告されている^{3,4,6-8}. 北島ら⁶⁾は虚血性心疾患を対象として両心室流出路血流を分析し, RCO については熱希釈法による心拍出量との間に, $CO (thermo) = 1.08RCO - 0.32, r = 0.88$, LCO については, $CO (thermo) = 1.25LCO - 1.32, r = 0.90$ と高い相関を認め, LCO がやや過小評価するものの, ほぼ一致した値を示すことを報告している. また里方ら⁷⁾は, 主肺動脈および上行大動脈内の駆出血流分析により, 同様の原理で両心拍出量を算出し, 熱希釈法, Fick 法との比較検討を行っているが, $Qp (PDE) = 0.41 \cdot CO (thermo) + 23.19, r = 0.96$, $Qs (PDE) = 0.40 \cdot CO (thermo) + 40.09, r = 0.92$, さらに Fick 法ともほぼ同様の高い相関性を認めたものの, いずれも回帰式の傾きは 0.4 前後と過小評価し, モデル回路による検討でも同様の結果を報告している.

我々は, 右心系については, 入射角がほぼ 0° となり, 内腔の断面計測が容易で, より誤差が少ないと考え得る主肺動脈内サンプリングとし, 血管径は断層心エコー図法にて収縮中期の左右径とした. また左心系については, 描出が容易で,

AS 合併例においても計測可能な左室流出路大動脈弁直下サンプリングとし、できる限り入射角を小さくできるよう、心尖部アプローチ長軸像を用いた。また内径は計測条件を一定にするため、大動脈弁輪部前後径とした。Qp は熱希釈法より求めた RCO とよく関連し、その回帰式の傾きは 0.61 となった。また Qs も LVG より求めた LCO と関連し、回帰式の傾きは 0.52 となり、里方らの報告と同様に、いずれも観血的方法より過小評価する傾向を示した。本来、本法による血流量測定では、血管腔内のある一点に、ある大きさを持った sample volume を設定し、この流速パターンから平均流速を計測して算出しており、必ずしも観血的測定値と一致しないことは、里方ら⁷⁾や揖場ら⁹⁾のモデル回路による報告からも予想される。我々の方法における Qp および Qs 計測の誤差の原因としては、次の 3 点が考えられる。すなわち

i) 断層面を横切る方向での入射角の影響；本法では断層面上の 2 次元的な入射角 θ についての補正を行うが、血流方向と断層面とは必ずしも同一平面上には存在しない。

ii) 血管径および断層面積計算上の問題点；血管内径は心拍動に伴い変動しているが、本法では心周期中のある一時点における断面積を用いている。

iii) 心拍動に伴うサンプル部位の相対的变化と血管内の流速プロフィールとの相互関係、あるいは sample volume の大きさと血管径との関係などに規定される、平均流速計測上の誤差などがあげられる。

i) については、予想される血流方向にできる限り一致する心断層面を使用することで、ある程度の誤差を防ぎ得る。しかし左室流出路においては血流方向の推定が必ずしも容易でなく、 θ の誤差が主肺動脈の場合より大きくなり、これが Qs 計測においてややバラツキが大きくなった一因と考えられる。ii) と iii) については、誤差の性質上、すべてを理論的に補正し得るものではな

いが、計測条件を一定にすれば、本法は観血的方法と一定の系統誤差を保ちながら良く関連し、臨床応用は可能であると考えられる。しかし iii) については、装置の特性、とくに sample volume についての特性の関与が大きく、この点についても留意が必要であろう。

2. AR 重症度評価について

AR の重症度評価には、左室内のマッピングによる方法⁵⁾や、胸骨上窩アプローチによる上行大動脈内での forward flow と reverse flow の分析による方法^{10) 11)}などが報告されている。しかし前者については、逆流の形態や方向性の乱流発生に及ぼす影響、僧帽弁狭窄合併における弁下乱流の関与、マッピング時の“乱流”そのものの認識の問題、心機能の関与などという問題点もあり¹²⁾、定量的診断は必ずしも容易ではない。また後者はやや定量的ではあるが、断層像の描出困難な例も多く、また AS をはじめ、各種弁膜症合併時や心機能低下時に、良好なドプラー信号を得がたい点など、やや実用性に欠けている。

今回我々は PDE による Qp, Qs の系統誤差はほぼ同一と考え、AR の逆流率算出に応用した。すなわち、通常右心系拍出量 (= 肺動脈血流量 Qp) と左心系拍出量 (左室駆出血流量 Qs - AR 逆流量) とは、ほぼ同一と考えられ、逆流量 = Qs - Qp、逆流率 = (Qs - Qp) / Qs として算出した。しかし正常例においても、気管支循環に起因する 5 ないし 10% 程度の両心拍出量の差が存在し、PDE による RF は実際より過大に算出する可能性がある。また Qp, Qs の各々の真の値に対する系統誤差が若干異なることが予想され、この場合、RF は過大あるいは過小評価することになる。これらの点を考慮し、

$$Qs \text{ (PDE)} = \text{true } Qs \times a$$

$$Qp \text{ (PDE)} = \text{true } Qp \times b$$

a, b: PDE によって算出した Qs, Qp の真の血流量に対する係数

とすると、RF の誤差 d は、

$$d = \text{true RF} - \text{RF (PDE)} = \left(1 - \frac{a}{b}\right) \frac{Q_p}{Q_s}$$

となり Q_p/Q_s に比例して, すなわち AR の重症度が増すにつれてその誤差は小さくなる. したがって我々の得た結果も, Sellers II 度以上でよく重症度と一致し, AR 非合併群, Sellers I 度群では RF の分散がやや大きくなったと考えられる.

以上のように PDE による RF は大動脈造影所見とよく関連し, 特に中等度以上の AR 重症度評価, Sellers II 度以下か III 度以上かの判定が可能で, 手術適応決定上, 極めて有用であると考えられた.

要 約

超音波パルス・ドプラー法 (PDE) を用いて, 大動脈弁閉鎖不全症 (AR) の逆流率を算出し, 大動脈造影所見と比較検討した. 対象は断層心エコー図, PDE および心カテータール法を施行した 33 例で, コントラスト断層心エコー図にて AR を否定し得た 9 例, 大動脈造影により AR の確認された 24 例 (Sellers I 度 6 例, II 度 7 例, III 度 8 例, IV 度 3 例) である. 肺動脈および左室流出路にてサンプリングを行い, 各々で得られたパワースペクトラム波形から平均駆出血流速 (f_1) を求め, 次式から Q_p (肺動脈血流量), Q_s (左室駆出血流量), RF [逆流率 = $(Q_s - Q_p)/Q_s$] を算出し, 各々, 観血的方法と対比検討した.

$$Q = \pi \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot \frac{C}{2 \cos \theta} \cdot \frac{f_1}{f_0} \cdot ET \cdot HR$$

L = 血管径; θ = 入射角; C = 音速; f_0 = 発振周波数; ET = 駆出時間; HR = 心拍数)

PDE によって求めた Q_p と, 熱希釈法によって求めた右心系拍出量 CO との間には, $r = 0.81$ の相関を認めた. RF と大動脈造影による Sellers 分類とを対比すると, AR 非合併群 RF = 0.14 ± 0.10 , Sellers I 度 0.27 ± 0.08 , II 度 0.36 ± 0.04 , III 度 0.53 ± 0.05 , IV 度 0.64 ± 0.06 とな

り, 重症度と RF とはよく一致した. また PDE による RF の値により, Group I: RF < 0.2, II: $0.2 \leq \text{RF} < 0.4$, III: $0.4 \leq \text{RF} < 0.6$, IV: RF ≥ 0.6 と分類すると, PDE Group I = AR 非合併群, Group III = Sellers III 度, Group IV = Sellers IV 度とほぼ一致し, PDE による RF は AR 重症度と良く関連し, したがって PDE により求められる RF は, AR の臨床的評価に対し, 極めて有用と考えられた.

文 献

- 1) Toguchi M, Ichimiya S, Yokoi K, Nanki M, Itoh K, Matsubara T, Yanagisawa K, Hibi N, Fukui Y, Nishimura K, Kambe T: A study on aortic insufficiency by means of pulsed Doppler echocardiography. J Cardiology 10: 557, 1980 (in Japanese)
- 2) 宮武邦夫, 木下直和, 榑原 博, 仁村泰治: 大動脈弁閉鎖不全症における心臓内血流パターンについて. 日超医講演論文集 34: 13, 1978
- 3) Darsee JR, Mikolich JR, Walter PF, Schlant RC: Transcutaneous method of measuring Doppler cardiac output. 1. Comparison of transcutaneous and juxta-aortic Doppler velocity signals with catheter and cuff electromagnetic flowmeter measurements in closed and open chest dogs. Am J Cardiol 46: 609, 1980
- 4) Darsee JR, Walter PF, Nuller DO, Clapham DE: Transcutaneous Doppler method of measuring cardiac output. II. Noninvasive measurement by transcutaneous Doppler aortic blood velocity integration and M-mode echocardiography. Am J Cardiol 46: 613, 1980
- 5) Ciobanu M, Abbasi AS, Allen M, Hermer A, Spellberg R: Pulsed Doppler echocardiography in the diagnosis and estimation of severity of aortic insufficiency. Am J Cardiol 49: 339, 1982
- 6) 北島 顕, 浅生雅人, 田内 潤, 森田利男, 増山理, 伊藤 浩, 堀 正二, 井上通敏, 阿部 裕, 吉間英雄, 福島充也, 平松美代子: 右室および左室拍出量 of 非侵襲的計測による心拍出量推定の試み—超音波パルスドプラー法を用いて—. 日超医講演論文集 42: 479, 1983
- 7) 里方一郎, 新垣義夫, 富田 英, 竹内則夫, 神谷哲郎: 超音波パルス・ドプラー法による小児の体血流量および肺血流量測定の評価. 日超医講演論文集 42: 485, 1983
- 8) 田中元直, 武田久尚, 渡辺 恵, 大川井宏明, 仁田

- 新一, 仁田桂子, 十河 寛: パルス変調超音波ドプラー法による心拍出量の測定. 日超医講演論文集 **42**: 487, 1983
- 9) 揖場和子, 木下直和, 宮武邦夫, 岡本光師, 榑原博, 仁村泰治: 超音波エコードプラー法による腹部動脈血流量の計測の試み. 日超医講演論文集 **39**: 75, 1981
- 10) Nakayama N, Hara M, Teruya H, Kuno A, Koike M, Nakatsuka T, Yoshimura S, Furuhata H: Non-invasive quantitative evaluation of aortic regurgitation by ultrasonic pulsed Doppler flowmeter. *J Cardiology* **11**: 383, 1981 (in Japanese)
- 11) Quinones MA, Young JB, Waggoner AD, Ostojic MC, Ribeiro LGT, Miller RR: Assessment of pulsed Doppler echocardiography in detection and quantification of aortic and mitral regurgitation. *Br Heart J* **44**: 612, 1980
- 12) 宮沢総介, 鈴木 茂, 佐々木達海, 中村 譲, 森田紀代造, 水野朝敏, 新井達太: 超音波パルス・ドプラー法による大動脈弁閉鎖不全症の重症度評価における問題点: 特に逆流様式について. *J Cardiology* **14**: 113, 1984