

断層心エコー・ドプラー法  
による心拍出量測定を試  
み：肺動脈基部サンプリン  
グ法

Two-dimensional pulsed  
Doppler echocardiogra-  
phic estimates of cardiac  
output in man: Sampling  
at the entrance to the  
main pulmonary artery

桑子 賢司\*  
佐久間 徹  
松田 光生  
関口 達彦  
杉下 靖郎  
伊藤 巖

Kenji KUWAKO\*  
Toru SAKUMA  
Mitsuo MATSUDA  
Tatsuhiko SEKIGUCHI  
Yasuro SUGISHITA  
Iwao ITO

**Summary**

To assess the feasibility and accuracy of measuring cardiac outputs (CO) by two-dimensional (2-D) pulsed Doppler echocardiography, taking samples at the main pulmonary artery just beyond the pulmonary valve, 62 cardiac patients were studied. The results obtained were compared with CO values determined by the thermodilution technique.

2-D Doppler echocardiograms suitable for computing CO were recorded in 37 (60%) of 62 patients. A significant correlation ( $r=0.64$ ) was observed between 2-D echocardiographic and angiographic pulmonary ring diameters (PRD), but the echocardiographic PRD was smaller than that of angiography by  $0.4\pm 0.2$  cm. Thus, to compute the Doppler CO, the echocardiographic PRD had to be corrected by the difference between the angiographic and echocardiographic PRD. The angle between the ultrasound beam and the pulmonary blood flow was  $7.8\pm 6.1^\circ$  ( $0\sim 18^\circ$ ), and this was negligible for computing the Doppler CO. Even in cases with atrial fibrillation, the Doppler CO could be computed as is done in sinus rhythm. The correlation between the thermodilution and Doppler CO was highly significant ( $r=0.92$ ), and the regression equation was as follows:

$$\text{Thermodilution CO} = 1.09 \times (\text{Doppler CO}) - 0.19$$

The difference between thermodilution and Doppler CO was  $3.4\pm 10.0\%$  ( $-21\sim +21\%$ ). Comparing the differences in CO between the thermodilution and dye-dilution techniques, those between thermodilution and the Fick methods, and those among thermodilution methods reported in the literatures, the difference in this study was not large and was acceptable.

Thus, measurement of CO by pulsed Doppler echocardiography, with sampling entrance to the main pulmonary artery, can be used clinically.

筑波大学臨床医学系 内科  
茨城県新治郡桜村 (〒305)  
\*(現)三井記念病院 循環器センター

Department of Internal Medicine, Institute of Clinical  
Medicine, University of Tsukuba, Sakura-mura,  
Niihari-gun, Ibaraki 305

Received for publication January 23, 1984 (Ref. No. 27-53)

## Key words

Pulsed Doppler echocardiography

Cardiac output

Entrance to the pulmonary artery

## はじめに

非侵襲的な血流量測定は、ドプラー法の最終目標の一つである。心拍出量測定の試みは、動物実験<sup>1-4)</sup>のみならず臨床例についてもすでにいくつかの報告がある。連続波ドプラー法は深さの分解能がなく、従来の報告は測定部位が大動脈に限られていた<sup>5-7)</sup>。一方、パルス・ドプラー法は特定の領域の血流測定を可能とし、しかも断層心エコー図との組み合わせにより、サンプリング部位を断層図上に表示できるようになった。このため、大動脈内<sup>8-10)</sup>のみならず、僧帽弁口<sup>4)</sup>や肺動脈内<sup>10,11)</sup>での測定も行われるようになった。しかし、まだ確立された方法はなく、解決すべき問題点も少なくない。

肺動脈内サンプリングによる心拍出量の測定は、アプローチは簡単であるが、成人では肺動脈の完全な描出が難しいため、小児についての報告しかみられない<sup>10)</sup>。今回、我々は成人を対象に、本法による心拍出量の測定を試み、熱希釈法と対比し、本法に対し影響を与える諸因子について検討した。

## 対 象

対象は1982年4月より1983年3月までの1年間に、当施設で心臓カテーテル検査時に熱希釈法による心拍出量測定を行い、かつドプラー法による血流検査を施行した62例である。年齢、性、疾患の内訳を、ドプラー法による心拍出量測定が可能であった群 (Group I) と不可能であった群 (Group II) に分けて **Table 1** に示した。

## 方 法

### 1. 熱希釈法, 右室・肺動脈造影

心臓カテーテル検査時に、熱希釈法による心拍出量測定を行った。用いた装置は、日本光電製心

拍出量計測ユニット (EQ-611V, AH-611V) であり、各症例で3~7回(平均4.4回)測定し、その平均値を用いた。また、右室用ピッグテイル・カテーテルを用いて右室・肺動脈造影を行い、35 mm シネフィルムに撮影、左前斜位60°像より肺動脈弁輪径を計測した。

### 2. 断層心エコー図, パルス・ドプラー法

用いた装置は東芝製電子走査型超音波診断装置 SSH-11A とパルス・ドプラーユニット SDS-10A の複合システムである。超音波周波数 2.4 MHz, パルス繰り返し周波数 4 KHz または 6 KHz (検出可能最大深度は各々 15 cm, 9 cm) 可変, サンプリングゲート幅は 2, 3, 5, 10 mm の 4 段, high pass filter は 100, 200, 400 Hz の 3 段可変である。サンプル部位は断層心エコー図中に同時表示される。ドプラー信号は高速フーリエ変換にて周波数分析され、ブラウン管上に周波数スペクトルとして表示される。なお周波数分解能は 46.9 Hz である。

断層心エコー図、ドプラー法は、全例心臓カテーテル検査の3日後に、15分間の安静臥床の後、軽度左側臥位、軽い呼気停止下で行った。探触子を第3~4肋間胸骨左縁に置き、大動脈基部短軸または右室流出路長軸像にて肺動脈弁輪部から左右肺動脈分岐部までを描出した。断層像をポラロイド写真に撮り、肺動脈弁付着部の管径を計測し、肺動脈弁輪径とした。また、超音波ビームは、肺動脈弁輪の中心を通り、できるだけ肺動脈に平行になるように投入した。サンプル部位は弁輪の肺動脈側におき、超音波ビームと肺動脈血流のなす角度(入射角)をポラロイド写真にて計測した (**Fig. 1**)。

ドプラー法は、全例繰り返し周波数 6 KHz, high pass filter 200 Hz, サンプリングゲート幅 3 mm の条件で行い、紙送り速度 50 mm/秒で心電図、心音図、Mモード心エコー図とともに記録

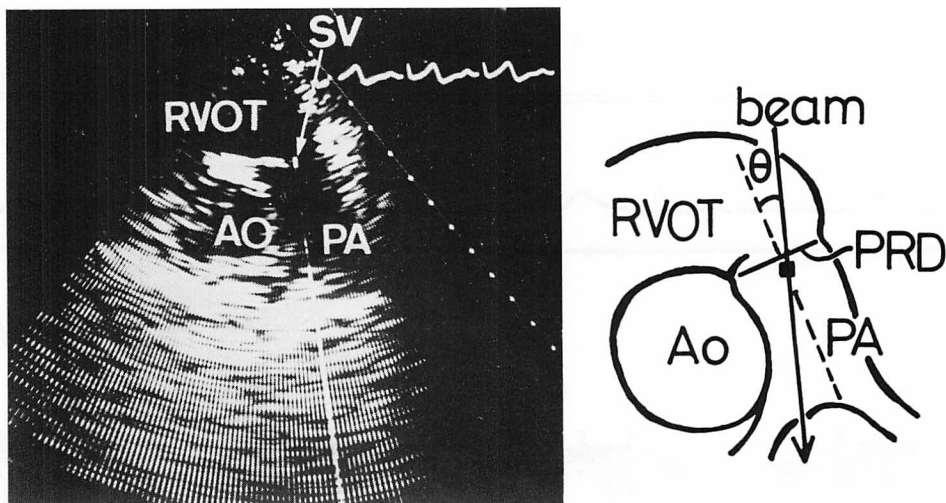


Fig. 1. Two-dimensional echocardiogram of the main pulmonary artery and the Doppler sampling site.

Left panel shows the two-dimensional echocardiogram of the main pulmonary artery (PA), the right ventricular outflow tract (RVOT), and the short axis of the aorta (AO). A solid line indicates the ultrasonic beam direction. The site of sampling volume (SV), which is just beyond the pulmonary valve within the main pulmonary artery, is indicated by an arrow. Right panel illustrates pulmonary ring diameter (PRD) and angle ( $\theta$ ) between the ultrasonic beam (solid line) and the pulmonary blood flow (dashed line).

した (Fig. 2). この場合、肺動脈弁輪部は体表から約 5 cm の深さにあるため、サンプルボリュームは  $3 \times 3 \times 3$  mm となる。

3. ドプラー法による心拍出量の算出

超音波周波数 (transmitted frequency) を  $f_0$ , ドプラーシフト周波数を  $fd$ , 超音波入射角を  $\theta$ , 生体内音速を  $C$  ( $\approx 1500$  m/秒) とすると、血流速度 ( $v$ ) は

$$V = \frac{C \cdot fd}{2 f_0 \cos \theta} \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。また、肺動脈弁輪断面を円形かつ面積一定、流速分布は平面と仮定し、肺動脈弁輪径を PRD とすると、一回拍出量 (SV) は

$$SV = \pi \left( \frac{PRD}{2} \right)^2 \frac{C}{2 f_0 \cos \theta} \int fd(t) dt \dots\dots (2)$$

で表わされる。  $\int fd(t) dt$  はドプラーシフト周波数の全駆出時間についての積分であるが、実際には Fig. 2 のドプラー波形の外縁を X-Y デジタ

イザーにてトレースし、点で覆われた面積をミニコンピューター YHP-1000F にて計算した。洞調律例では 5 心拍の、心房細動例では 10 心拍の平均を算出し、心拍出量 (CO) は (2) 式に心拍数 (HR) を乗じて

$$CO = SV \cdot HR \dots\dots\dots (3)$$

にて計算した。

成 績

1. 成功率

62 例の患者にドプラー法を試み、計測可能な断層心エコー図およびドプラー信号の得られたものは 37 例 (60%) であった (Table 1)。計測可能群 (Group I) と不可能群 (Group II) との間に年齢、性、疾患の内訳に大きな差は認められなかった。

2. 肺動脈弁輪径

Group I の中から 20 例を無作為に選び、2 人の検者が別々に同一のポラロイド写真から心エコー図による肺動脈弁輪径を計測した。2 人の計測

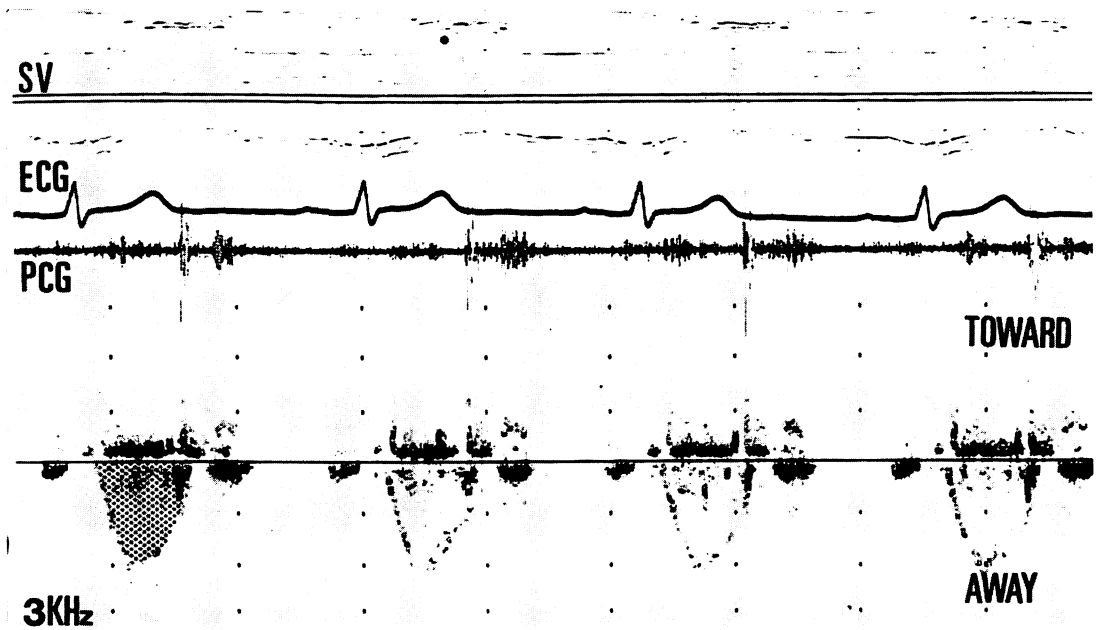


Fig. 2. Doppler flow curve.

Doppler shift spectrum is shown, which is sampled in the vicinity of the pulmonary valve within the main pulmonary artery. The M-mode echocardiogram, electrocardiogram (ECG) and phonocardiogram (PCG) are simultaneously recorded. Dotted area indicates the Doppler shift frequency integral. TOWARD=flow direction toward transducer; AWAY=flow direction away the transducer.

者の値に有意差はみられず (Fig. 3), 誤差は  $1.5 \pm 4.5\%$  (mean  $\pm$  SD) であった. これを心拍出量に換算すると  $1.5 \pm 7.7\%$  (mean  $\pm$  SD) であった.

計測可能なアンジオ像が得られた 20 例について, 断層心エコー図による計測値とアンジオによるそれとを比較した. 両者の間には  $r=0.64$  ( $p < 0.01$ ) の相関を認めた (Fig. 4). アンジオによる弁輪径はエコーによるそれよりも大きく, その差は  $0.4 \pm 0.2$  cm であった (Fig. 5).

3. 超音波ビームと肺動脈血流方向のなす角度 (超音波入射角)

超音波入射角は  $7.8 \pm 6.1^\circ$  (mean  $\pm$  SD), 範囲は  $0 \sim 18^\circ$  の間に分布した (Fig. 6). この入射角を無視して心拍出量を計算した場合の誤差は  $1.5 \pm 1.7\%$  (mean  $\pm$  SD), 最大 5% であった.

4. 両検査時での心拍数の差

熱希釈法とドプラ法の検査時期のずれによっ

て心拍数に大きな差がみられた症例もあるが, 全体としては各々  $71 \pm 2$ ,  $70 \pm 2$  拍/分 (mean  $\pm$  SEM) と有意差をみなかった (Fig. 7). その心拍出量に及ぼす影響をみると, 熱希釈法時に対するドプラ法時の心拍数の多い例, 少ない例, 等しい例ともすべて回帰直線の両側に均等に分布し, 一定の傾向を示さなかった (Fig. 8).

5. 心房細動

37 例中, 洞調律は 28 例, 心房細動は 9 例であったが, Fig. 9 および Fig. 10 にみるごとく, 両群は明らかに同一回帰直線上に分布した.

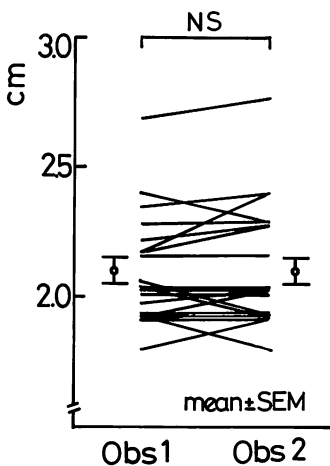
6. 熱希釈法とドプラ法による心拍出量の相関

熱希釈法と, 種々の肺動脈弁輪径を用いてのドプラ法による心拍出量との直線回帰式を Table 2 に示した. 両者は  $r=0.87 \sim 0.92$  と高い相関を示した. しかも, Fig. 4 の直線回帰式および Fig. 5 の平均差 (0.4 cm) で肺動脈弁輪径を補正

**Table 1. Classification of diagnosis, age and sex of the two groups**

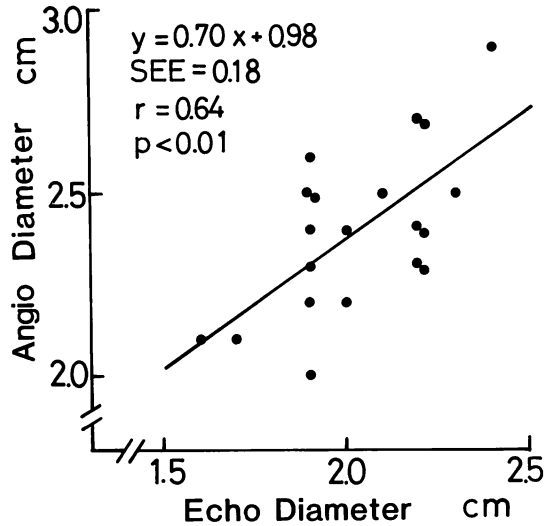
Diagnosis	Group I	Group II	Total
Valvular heart disease	12	7	19
Old myocardial infarction	8	6	14
Angina pectoris	5	4	9
Chest pain syndrome	4	2	6
Dilated cardiomyopathy	3	2	5
Hypertrophic cardiomyopathy	2	1	3
Aortitis syndrome	2	1	3
Postpartal cardiomyopathy		1	1
Complete atrioventricular block	1		1
Arrhythmogenic right ventricular dysplasia		1	1
<b>Total</b>	<b>37 (60%)</b>	<b>25 (40%)</b>	<b>62 (100%)</b>
Age (mean±SD)	50±9	50±12	50±11
Sex			
Male	24	14	38
Female	13	11	24

Group I: Doppler cardiac output (DCO) is obtained successfully, Group II: DCO is not obtained because of poor quality of 2-dimensional or Doppler echocardiograms.

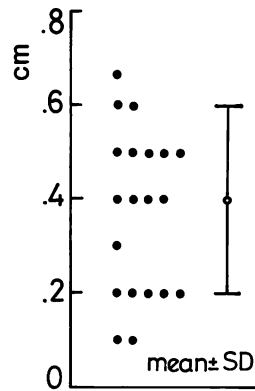


**Fig. 3. Comparison of two-dimensional echocardiographic pulmonary ring diameters measured by two observers.**

Obs 1=the first observer; Obs 2=the second observer.



**Fig. 4. Correlation between angiographic and echocardiographic pulmonary ring diameters.**



**Fig. 5. Difference between angiographic and echocardiographic pulmonary ring diameters.**

した場合には、傾きは各々 1.13, 1.09 と 1 に近く、Y 切片は -0.26, -0.19 という 0 に近い直線回帰式を得た (Table 2, Figs. 9, 10).

7. 熱希釈法とドプラー法による心拍出量の誤差

熱希釈法とドプラー法による心拍出量の誤差は、 $3.4 \pm 10.0\%$  (mean±SD), 範囲は -21~+21% であった (Fig. 11).

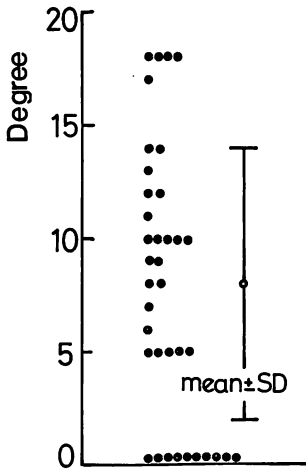


Fig. 6. Angles between the ultrasonic beam and the pulmonary blood flow direction.

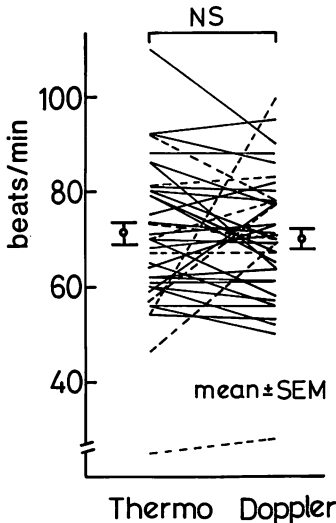


Fig. 7. Comparison of heart rates at the times of the thermomodulation and Doppler cardiac output measurements.

Solid lines indicate cases with sinus rhythm and dashed lines those with atrial fibrillation.

考 接

1. 肺動脈血流速度

パルス・ドプラー法の利点は、連続波ドプラー

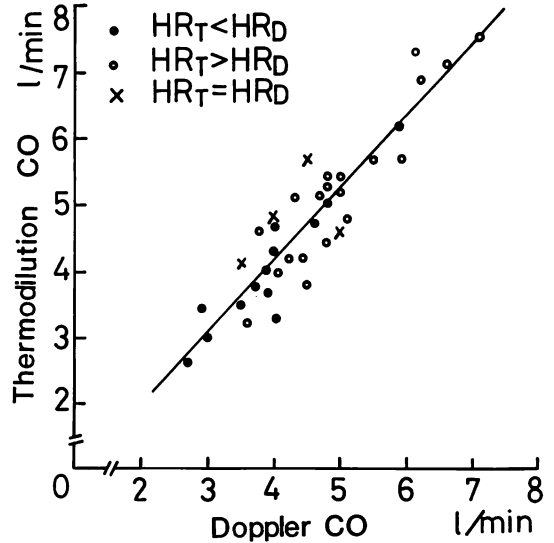


Fig. 8. Effect of the difference of heart rate on cardiac output.

The values of cardiac output are equally scattered on both sides of the linear regression line, regardless of the difference of heart rate. The regression line in this panel is the same as one in Fig. 10.

$HR_T$  = heart rate in cardiac output measurement by the thermomodulation technique;  $HR_D$  = heart rate in cardiac output measurement by the Doppler technique.

法と異なり、特定のサンプルボリューム内の血流を検出できる点にある<sup>12)</sup>。しかし、サンプルボリュームの部位が深くなれば、繰り返し周波数を高められないから、検出可能最高流速は制限される<sup>14)</sup>。肺動脈基部は胸壁から約 5 cm の深さにあるため (Fig. 1), 本装置の繰り返し周波数 6 KHz (検出可能最大深度 9 cm) を選択でき、検出可能最高流速は約 95 cm/秒となる。一方、健常者の肺動脈血流速度は 100 cm/秒以下であるから<sup>11)</sup>、大部分の症例は本装置で測定可能である。事実、今回記録できた 37 例は全例が最高流速 95 cm/秒以下であったが、これを越える症例についても、反対側に折り返し表示されるから、症例によっては測定可能であろう。

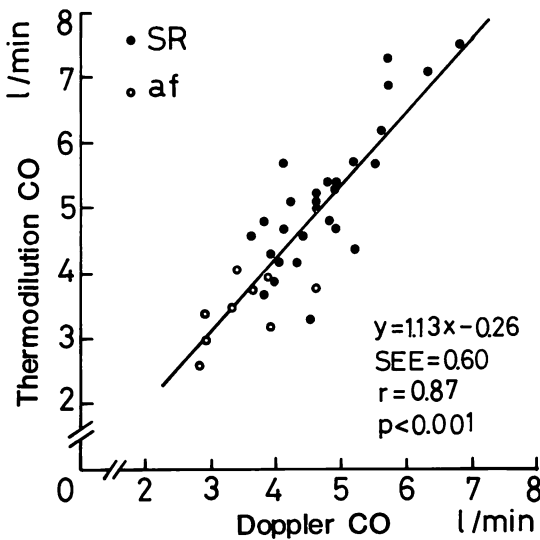
2. 肺動脈血流速度分布

直管の入口部の流速分布は、理論的にも実験的

**Table 2. Correlation between the thermodilution and Doppler cardiac outputs for different pulmonary ring diameters (PRD)**

PRD for calculation	r	SEE	Slope	Y intercept
Echocardiographic diameter	0.92†	0.44	1.48	0.22
Echocardiographic diameter corrected by the regression equation between Angio and Echo*	0.87†	0.60	1.13	-0.26
Echocardiographic diameter corrected by the difference between Angio and Echo (0.4 cm)**	0.92†	0.47	1.09	-0.19

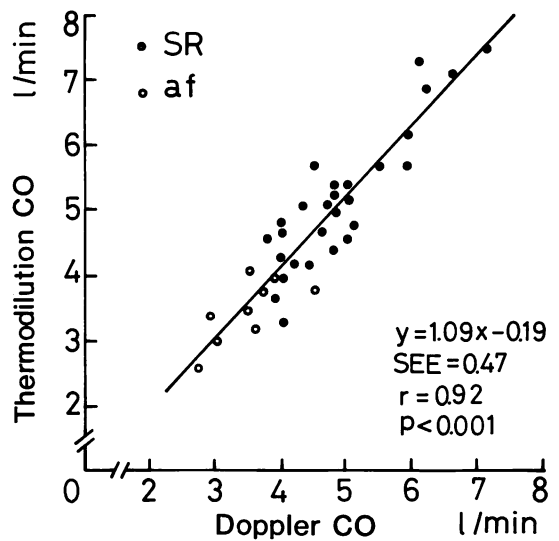
r=correlation coefficient ; SEE=standard error of the estimate. \*: see Fig. 4, \*\*: see Fig. 5, †: p<0.001.



**Fig. 9. Correlation between the thermodilution and Doppler cardiac outputs.**

To compute the Doppler cardiac output, the echocardiographic pulmonary ring diameters are corrected by the regression equation indicated in Fig. 4.

SR=sinus rhythm; af=atrial fibrillation.



**Fig. 10. Correlation between the thermodilution and Doppler cardiac outputs.**

To compute the Doppler cardiac output, the echocardiographic pulmonary ring diameters are corrected by the mean difference (0.4 cm) as indicated in Fig. 5.

にもほぼ平面である<sup>13,14</sup>。一方、動物実験でも、大動脈基部から弓部にかけての流速分布は平面であることが確かめられている<sup>13,14</sup>。したがって、解剖学的に同様な形態を有する肺動脈基部の流速分布も平面と考えられる。また、肺動脈は厳密には曲管であるが、このことも基部では問題とならないであろう<sup>14</sup>。またサンプル部位は心周期によって1~2 cm 変位し、このこともサンプリングを

平均化することに役立っていると考えられる。したがって、肺動脈基部中央で測定した血流速度が、同断面全体の流速を表わしているとした仮定は妥当であろう。

Sequeira らによれば、期外収縮も心房細動も流速分布には影響せず、心拍毎の大動脈最高流速はドプラー法と電磁血流計で良く一致したという<sup>6</sup>。したがって、十分な心拍数を平均すれば、心

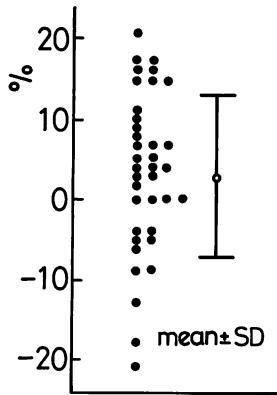


Fig. 11. Difference between the thermodilution and Doppler cardiac outputs expressed in percentages.

房細動例でも洞調律例と同様に心拍出量を算出できると考えられるが、我々の結果は、心房細動例も洞調律例と同一の回帰直線上に分布し、これを支持するものであった。

### 3. 超音波入射角

本法では、超音波ビームが血流にほぼ平行に入るため、入射角は問題とならず、無視しても心拍出量の誤差は5%以下であった。

### 4. 肺動脈弁輪径

肺動脈弁輪径は、心拍出量計算にさいしその半径が二乗されるため(2)式、最大の誤差要因となるが、断層心エコー図上、弁輪はビームと直角な方向で計測されるため、方位分解能やサイドロープの影響を受けやすく、誤差も大きくなる<sup>15,16)</sup>。計測者による誤差は問題にならないが、アンジオに比し過小評価されたのは、上記の理由により血管内壁が厚く描出されるからであろう。したがって、心エコー図による弁輪径は、アンジオとの差によって補正する必要がある。我々の結果が示すように、事実それによって、ドプラー法と熱希釈法による心拍出量の値が良く一致するようになった (Table 2)。

Greenfield ら<sup>17)</sup>によれば、上行大動脈断面積は心周期によって5.4~16.8(平均11)%変化すると

いう。したがって、肺動脈弁輪径も心周期により変化すると考えられ、厳密には駆出期全体の径の変化を考慮しなければならないが、本法では拡張終期の弁輪径を計測した。それは、現在の断層心エコー図装置では肺動脈弁輪の心周期による変化を検出するのは難しく、収縮期には肺が障碍となり、弁輪径計測の不可能な症例が多いからである。したがって、肺動脈弁輪断面積を一定としたことにより、10%程度の誤差は見込まなければならないであろう。

### 5. 検査時期のずれによる心拍数の差

肺動脈の最高血流速は、呼吸や日によって10%程度は変動するものであるから<sup>11)</sup>、熱希釈法とドプラー法の3日間のずれは、心拍数に大差なければ、“同時測定”との違いは問題にならないであろう。我々の結果では、全体としては両検査時の心拍数に有意差はみられず、心拍出量にも影響は認められなかった。しかし、両検査時の心拍数差の大きな症例では、他の要因によって誤差が相殺された可能性を否定できない。

### 6. 熱希釈法とドプラー法の比較

熱希釈法とドプラー法の心拍出量の間には、用いた肺動脈弁輪径によって $r=0.87\sim0.92$ と従来の報告(連続波ドプラー法<sup>7)</sup>  $0.83\sim0.99$ , パルス・ドプラー法<sup>4,9,10)</sup>  $0.72\sim0.94$ )とほぼ同様の相関が認められた。

また、両者間の誤差( $3.4\pm 10.0\%$ )は、従来報告されている熱希釈法自体のパラッキ<sup>18)</sup> ( $4.1\pm 3.1\%$ ,  $-2\sim+10\%$ )、あるいは熱希釈法と色素希釈法間の誤差<sup>18)</sup> ( $-17\sim+16\%$ )、熱希釈法とFick法間の誤差<sup>19)</sup> ( $-16.0\sim+15.5\%$ )と比較して大差なく、十分許容し得る範囲の誤差である。

### 7. 成功率

臨床的有用性について論じるには、成功率に言及する必要がある。これはアプローチや対象によっても異なり、連続波ドプラー法による胸骨上窩からの大動脈内サンプリング<sup>7)</sup>で85~100%、パルス・ドプラー法による傍胸骨または心尖部からの大動脈、僧帽弁口サンプリング<sup>4,10,11)</sup>で69~



83%とされている。一方、肺動脈については、Goldbergらが小児を対象にして10/10人(100%)で測定可能であったとしており<sup>10)</sup>、我々の37/62人(60%)とはかなり開きがある。これは成人では小児に比し、径の計測が可能な肺動脈(弁輪部)の像を描出できない症例が多いことが原因と考えられる。

しかし、今後より小型で操作性の良い探触子が開発されれば、肺動脈の描出が容易となって成功率が高まり、成人例に対する本法の臨床的有用性も更に増すものと期待される。

### 結 論

断層心エコー・ドプラー法を用いて、成人を対象に、肺動脈基部サンプリングによる心拍出量の測定を試み、以下の結論を得た。

対象の60%で測定可能であり、ドプラー法による心拍出量と熱希釈法によるそれとの間には、 $r=0.92$ の高い正相関が認められた。しかし、心エコー図による肺動脈弁輪径はアンジオに比し過小評価されるので、その分、補正が必要である。また、入射角を無視しても、心拍出量の誤差は5%以下である。さらに、ドプラー法による心拍出量と熱希釈法によるそれとの誤差は、熱希釈法自体のバラツキ、熱希釈法と色素希釈法間の誤差あるいは熱希釈法とFick法間の誤差と比較して大差なく、許容し得る値である。従って、本法は臨床的に十分有用な方法であると考えられる。

### 要 約

肺動脈基部サンプリングによる、断層心エコー・ドプラー法を用いての心拍出量測定の有用性と正確性について評価する目的で、62例の各種心疾患患者で測定を行い、熱希釈法と対比検討した。

62例のうち37例(60%)で、心拍出量を計算できる良好な断層心エコー図、ドプラー波形が記録できた。断層心エコー図による肺動脈弁輪径とアンジオによるそれとは正の相関を示したが( $r=0.64$ )、エコー法ではアンジオ法に比し0.4±

0.2 cm 過小評価されたため、心拍出量の算出にはアンジオによる弁輪径の補正を必要とした。超音波入射角は $7.8\pm 6.1^\circ$ であり、入射角を無視しても心拍出量への影響は5%以下であった。心房細動例でも洞調律例と同様に心拍出量の測定が可能であった。熱希釈法とドプラー法による心拍出量の間には高い相関を認め( $r=0.92$ )、その回帰式は以下のごとくであった。

$$(\text{熱希釈法})=1.09\times(\text{ドプラー法})-0.19.$$

熱希釈法とドプラー法の心拍出量の誤差は $3.4\pm 10.0\%$ ( $-21\sim +21\%$ )であったが、これは文献上にみられる熱希釈法自体のバラツキ、熱希釈法と色素希釈法間の誤差、熱希釈法とFick法間の誤差と比較して大差なく、十分許容し得るものであった。

従って、肺動脈基部サンプリングによるパルス・ドプラー法を用いての心拍出量測定法は、臨床的に有用な方法と言える。

### 文 献

- 1) Colocousis JS, Huntsman LL, Curreri PW: Estimation of stroke volume changes by ultrasound Doppler. *Circulation* **56**: 914-917, 1977
- 2) Steingart RM, Meller J, Barovick J, Patterson R, Herman MV, Teichholtz LE: Pulsed Doppler echocardiographic measurement of beat-to-beat changes in stroke volume in dogs. *Circulation* **62**: 542-548, 1980
- 3) Fisher DC, Sahn DJ, Friedman MJ, Larson D, Valdes-Cruz LM, Horowitz S, Goldberg SJ, Allen HD: The effect of variations on pulsed Doppler sampling site on calculation of cardiac output: An experimental study in open-chest dogs. *Circulation* **67**: 370-376, 1983
- 4) Fisher DC, Sahn DJ, Friedman MJ, Larson D, Valdes-Cruz LM, Horowitz S, Goldberg SJ, Allen HD: The mitral valve orifice method for noninvasive two-dimensional echo Doppler determinations of cardiac output. *Circulation* **67**: 872-877, 1983
- 5) Huntsman LL, Gams E, Johnson CC, Fairbanks E: Transcutaneous determination of aortic blood-flow velocities in man. *Am Heart J* **89**: 605-612, 1975
- 6) Sequeira RF, Light LH, Cross G, Raftery EB:

- Transcutaneous aortovelocity. A quantitative evaluation. *Br Heart J* **38**: 443-450, 1976
- 7) Huntsman LL, Stewart DK, Barnes SR, Franklin SB, Colocousis JS, Hessel EA: Noninvasive Doppler determination of cardiac output in man. Clinical validation. *Circulation* **67**: 593-602, 1983
  - 8) Angelsen BAJ, Brubakk AO: Transcutaneous measurement of blood flow velocity in the human aorta. *Cardiovasc Res* **10**: 368-379, 1976
  - 9) Magnin PA, Stewart JA, Myers S, von Ramm O, Kisslo JA: Combined Doppler and phased-array echocardiographic estimation of cardiac output. *Circulation* **63**: 388-392, 1981
  - 10) Goldberg SJ, Sahn DJ, Allen HD, Valdes-Cruz LM, Hoenecke H, Carnahan Y: Evaluation of pulmonary and systemic blood flow by 2-dimensional Doppler echocardiography using fast Fourier transform spectral analysis. *Am J Cardiol* **50**: 1394-1400, 1982
  - 11) Griffith JM, Henry WL: An ultrasound system for combined cardiac imaging and Doppler blood flow measurement in man. *Circulation* **57**: 925-930, 1978
  - 12) Baker DW: Pulsed ultrasonic Doppler blood-flow sensing. *IEEE Trans Sonics & Ultrasonics* **SU-17**: 170-185, 1970
  - 13) McDonald DA: *Blood Flow in Arteries*. 2nd ed, Edward Arnold, London, 1974, p 101-117
  - 14) Caro CG, Pedley TJ, Schroter RC, Seed WA: *The Mechanics of the Circulation*. Oxford University Press, Oxford, 1978, p 44-78, p 312-335, p 503-504
  - 15) 町井潔編著: 断層心エコー図. 東京. 中外医学社, 1981
  - 16) Feigenbaum H: *Echocardiography*. 3rd ed, Lea & Febiger, Philadelphia, 1981
  - 17) Greenfield JC, Patel DJ: Relation between pressure and diameter in the ascending aorta of man. *Circ Res* **10**: 778-781, 1962
  - 18) Ganz W, Donoso R, Marcus HS, Forrester JS, Swan HJC: A new technique for measurement of cardiac output by thermodilution in man. *Am J Cardiol* **27**: 392-396, 1971
  - 19) Pávek K, Boska D, Selecky FV: Measurement of cardiac output by thermodilution with constant rate injection of indicator. *Circulation* **15**: 311-319, 1964