

超音波パルス・ドプラー法
による心室中隔欠損におけ
る左右心室圧較差の推測：
誤差要因を中心に

Pulsed Doppler echo-
cardiographic estima-
tion of pressure gradient
across a ventricular sep-
tal defect: With parti-
cular reference to poten-
tial factors of error

富田 英*
清水 俊男
新垣 義夫
中谷 茂和
二木 志保
中島 徹
神谷 哲郎
宮武 邦夫**
仁村 泰治***

Hideshi TOMITA*
Toshio SHIMIZU
Yoshio ARAKAKI
Shigekazu NAKAYA
Shiho FUTAKI
Toru NAKAJIMA
Tetsuro KAMIYA
Kunio MIYATAKE**
Yasuharu NIMURA***

Summary

The clinical validity and some problems concerning pulsed Doppler echocardiography (PD) in non-invasive estimates of pressure difference (ΔP) across a ventricular septal defect were studied. The maximum velocity (max V) of the left to right shunt flow in the right ventricle was converted to ΔP using the simplified Bernoulli equation: $\Delta P=4V^2$. We also used the equation: $\Delta P=4(V_2^2-V_1^2)$ to estimate the ΔP in cases who had left to right shunt flows of high velocity in the left ventricle. Simultaneous recordings of both left and right ventricular pressures and PD were obtained during cardiac catheterization of 11 cases.

国立循環器病センター 小児科

**同 内科

***同 研究所

吹田市藤白台 5-7-1 (〒565)

* (現) 札幌医科大学 小児科

札幌市中央区南 1 条西 16 丁目 (〒060)

Departments of Pediatrics and **Internal Medicine,
and ***Research Institute, National Cardiovascular
Center, Fujishirodai 5-7-1, Suita 565

*(present address) Department of Pediatrics, Sapporo
Medical College, Sapporo 060

Received for publication May 11, 1985, accepted June 7, 1985 (Ref. No. 30-30)

Accurate Doppler estimates of ΔP only from the maximum velocity of the left to right shunt flow in the right ventricle were impossible in nine cases whose actual ΔP 's were large (more than 41 mmHg) and also in eight cases whose right ventricular systolic pressure was high (either equal to or higher than left ventricular systolic pressure).

Besides these 17 cases, ΔP estimated by PD using the simplified Bernoulli equation in 39 cases, with pansystolic left to right shunt flows in the right ventricle, correlated well with the actually measured ΔP ($Y=0.99X+2.77$, $r=0.91$, $p<0.01$). The difference in the maximal instantaneous pressure gradient and Doppler ΔP was considered insignificant (between 0 and 7 mmHg, mean 4 mmHg).

In nine cases, the left to right shunt flows of relatively high speed (0.63~2.00 m/sec, mean 1.31 m/sec) were observed also in the left ventricle, and calculated ΔP using the simplified Bernoulli equation overestimated the actually measured ΔP by 2 to 16 mmHg ($Y=1.52X+4.88$, $r=0.95$, $p<0.01$). However, if the ΔP is estimated by using the equation, $\Delta P=4(V_2^2-V_1^2)$, without ignoring the maximum speed in the left ventricle (V_1), it correlates well with the actually measured ΔP ($Y=1.07X+0.76$, $r=0.98$, $p<0.01$).

Thus, in cases with left to right shunt flows with high speeds in the left ventricle, the equation: $\Delta P=4(V_2^2-V_1^2)$ was more accurate in estimating the ΔP by pulsed Doppler echocardiography.

Key words

Ventricular septal defect Pulsed Doppler echocardiography Pressure gradient Bernoulli's equation

はじめに

Holen ら¹⁾, Hatle ら²⁾の報告以来, 弁狭窄例において, 狭窄部後の最大流速 (max V) を連続波ドプラー (CWD 法) により計測し, 簡略化したベルヌーイの定理を用いて, 狭窄部前後の圧較差が推測されるようになってきた¹⁻⁵⁾.

我々は, 計測可能な最大流速に限界はあるが, 超音波パルス・ドプラー法 (PD 法) を用い, 心室中隔欠損 (VSD) の右室内における左右短絡血流最大流速から, 簡略化したベルヌーイの定理を用いて, 左右心室の収縮期圧較差 (ΔP) を推測しうることを報告した⁶⁾. しかし, 本法では圧較差の小さな症例において, 観血法と非観血法との相関にばらつきが大きかった.

本研究では, パルス・ドプラー法を用いた圧較差の推測におけるいくつかの問題点について, さらに検討を加えたので報告する.

対 象

対象は **Table 1** に示す VSD 56 例で, 年齢は

4 ヶ月から 29 歳, 平均 3 歳 3 ヶ月であった. 5 例に動脈管開存, 3 例に僧帽弁逆流, 2 例に心房中隔欠損の合併をみた. 平均肺動脈圧 25 mmHg 以上を肺高血圧 (PH) とした.

方 法

使用装置は ATL 製 Mark V duplex system である. 発振周波数は 3.0 MHz で, パルス繰り返し周波数は 7.7, 9.6 および 12.7 KHz であるが, このうちおもに 12.7 KHz を用い, 最大流速の低い症例では 7.7 または 9.6 KHz を用いた. パルス繰り返し周波数 7.7, 9.6 および 12.7 KHz を用いた際の最大視野深度は, それぞれ 9, 7 および 5 cm であり, 測定可能な最大流速は, 1 回の aliasing を含め, それぞれ 1.90, 2.40 および 3.20 m/sec である. 血流パターン記録は ATL 製 130A line scan recorder により, 紙送り速度 50 または 100 mm/sec にて行った.

左右短絡血流の方向を確認するため, アロカ製リアルタイム二次元血流装置 XA54 プロトタイプ, または同社製 SSD880 を使用した.

Table 1. Materials

Perimembranous defect with PH	32
Perimembranous defect	4
Perimembranous defect with PS	1
Perimembranous defect with PH and PS	1
Outlet septal defect with PH	13
Outlet septal defect	5
Total	56

PH=pulmonary hypertension (mean PA pressure ≥ 25 mmHg); PS=pulmonary stenosis.

左右短絡血流最大流速の算出は以下の方法で行った。Fig. 1 に示すように、第2ないし第4肋間胸骨左縁からの右室流出路断面、左室長軸断面または四腔断面にて心室中隔欠損を描出し、右室

内における左右短絡血流の血流パターンを記録した。また左室内で、右室に向う左右短絡血流を検出し得る症例では、その血流パターンも記録した。得られた血流パターンの最大周波数偏位 (f) より、次の式にて最大流速を算出した。

$$V = \frac{C \cdot f}{2 \cdot f_0 \cdot \cos \theta}$$

V= maximal velocity of the jet

C=velocity of sound in the blood (1500 m/sec)

f= maximal frequency shift

f_0 =transmitted ultrasound frequency

θ =angle between the ultrasonic beam and direction of the maximal velocity

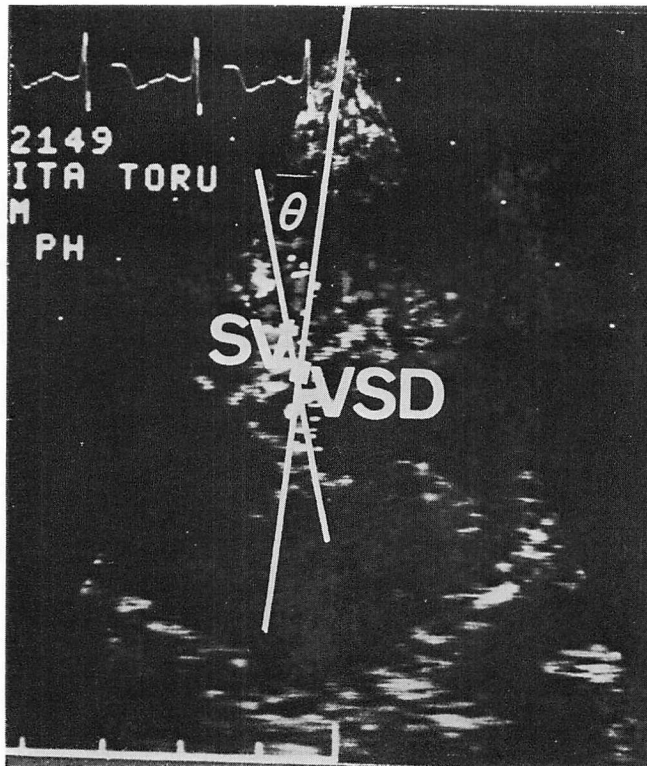


Fig. 1. Sampling method to obtain high velocity blood flow across a ventricular septal defect by the right ventricular outflow view.

θ =angle of incidence.

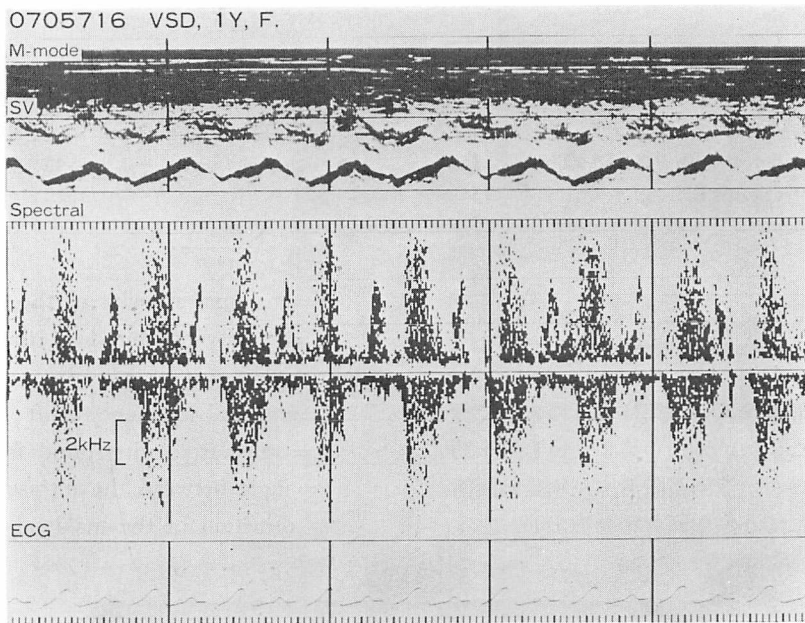


Fig. 2. Left to right shunt flow pattern in a case with actually measured interventricular pressure gradient (ΔP) of more than 41 mmHg.

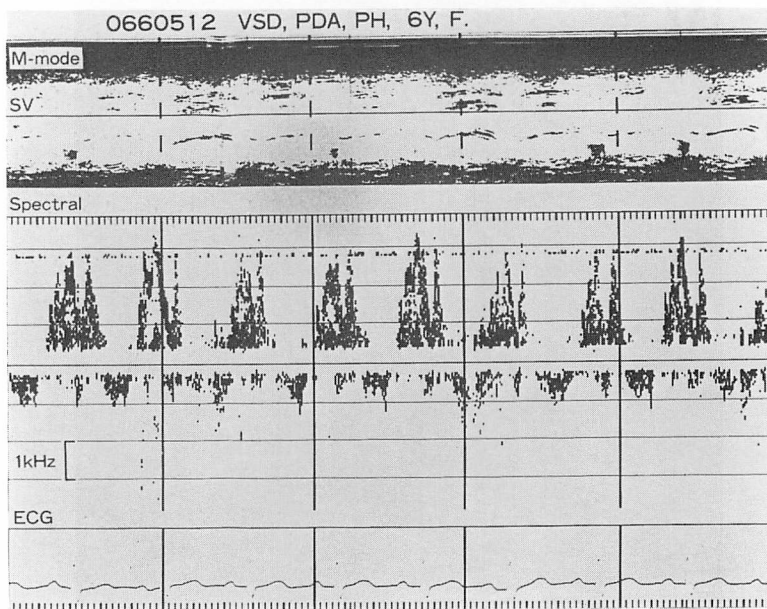


Fig. 3. Left to right shunt flow pattern in a case with right ventricular systolic pressure exceeding left ventricular systolic pressure.

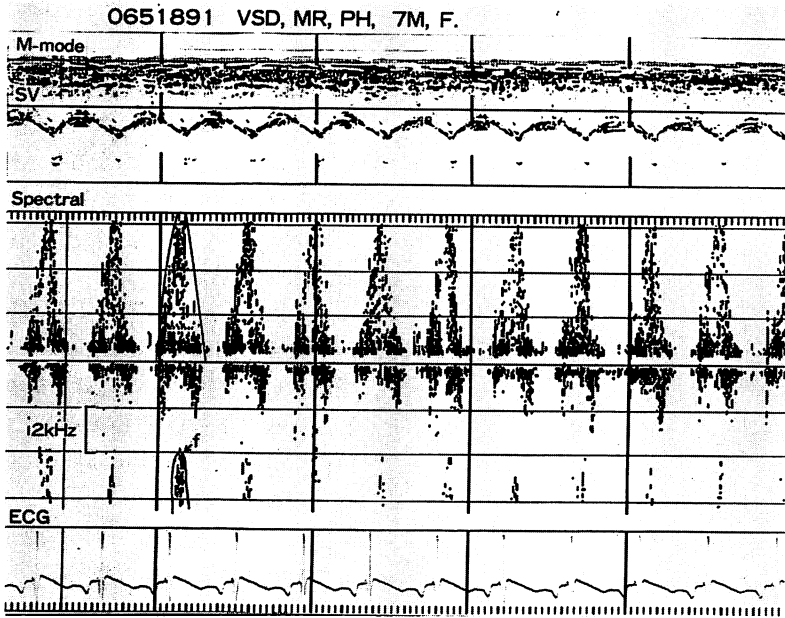


Fig. 4. Pansystolic left to right shunt flow pattern usually recorded in the right ventricle in case of ventricular septal defect.

f = maximal frequency shift reversed due to aliasing.

θ の計測にあたっては、パルス・ドプラー法の場合と同様の断面で、リアルタイム二次元ドプラー血流映像システムにより、収縮早期に記録した左右短絡血流の方向を参考にした。

得られた最大流速より、Hatle らの提唱した簡略化したベルヌーイの定理

$$\Delta P = 4 V^2 \text{ (mmHg)}$$

$$\Delta P = \text{pressure gradient,}$$

$$V = \text{max V}$$

より圧較差 (ΔP) を算出した。また、左室内で右室に向う左右短絡血流を検出した症例では、

$$\Delta P = 4 (V_2^2 - V_1^2) \text{ (mmHg)}$$

$$V_1 = \text{max V in LV}$$

$$V_2 = \text{max V in RV}$$

の式による圧較差の推測についても検討した。

全例にパルス・ドプラー法とその 30 日以内(平均 4 日)に心臓カテーテル検査(心カテ)を行い、ミラー製カテ先圧マノメータによる左心、右心の心内圧測定を行った。11 例では心カテ時に、左右

心室圧の同時測定とパルス・ドプラー記録を同時に行った。

結 果

1. 心室間圧較差とパルス・ドプラー法による最高流速検出能

1) 心カテでの収縮期圧較差 (ΔP) が 41 mmHg 以上であった 9 例では、全例、Fig. 2 に示すように、3.20 m/sec 以上の高速の最大流速を持つ左右短絡血流を右室内において検出し、パルス・ドプラー法による正確な圧較差の推測は困難であった。

2) 心カテ時の右室収縮期圧が、左室収縮期圧に等しいか、またはそれ以上の 8 例では、有意な左右短絡血流を検出できないか、Fig. 3 に示すような、拡張期の右室への流入血流に続き、収縮早期のみ、左右短絡血流を右室内において検出した。このような症例でも、左右短絡血流の最大流速のみから心室間の収縮期圧較差を正確に推測

することは困難であった。

3) これら 17 例を除く 39 例では, Fig. 4 に示すように, 右室内において全収縮期に左右短絡血流を検出した. $\Delta P=4V^2$ の式を用いてパルス・ドプラー法と, 心カテにより計測した ΔP とは,

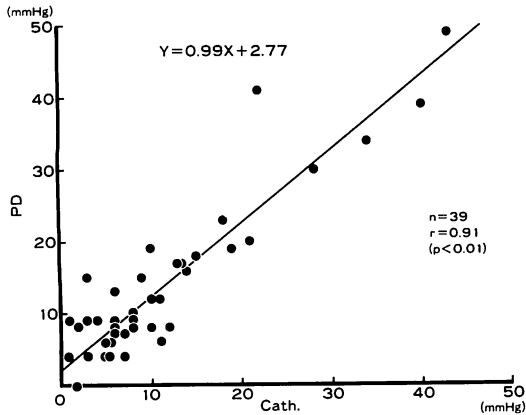


Fig. 5. Correlation between interventricular (LV-RV) pressure gradients estimated by pulsed Doppler method (PD) using an equation of $\Delta P=4V^2$ and the actually measured values at cardiac catheterization (Cath) in 39 cases with pansystolic left to right shunt flow in the right ventricle.

$Y=0.99X+2.77$ ($r=0.91$, $p<0.01$) の有意な正相関を示した (Fig. 5).

2. 心カテ, パルス・ドプラー同時記録による観察

心カテ時同時記録した左右心室圧, 瞬時の圧較差, 及び右室内における左右短絡血流パターン of 1 例を Fig. 6 に示す. 最大瞬時圧較差は収縮早期にあって 30 mmHg を示すのに対し, 左右心室最大収縮期圧の差 (ΔP) は 28 mmHg であった. 一方, 右室内における左右短絡血流の最大流速は収縮早期にあり, パルス・ドプラー法により推測した本症例の圧較差は 30 mmHg であった. 心カテ時に左右心室圧の同時記録を行った全 11 例の諸計測値を Table 2 に示す. 右室収縮期圧が左室収縮期圧と等しいか, それよりも高かった 2 例を除く 9 例では, 最大瞬時圧較差とパルス・ドプラー法により求めた圧較差との差は 0~7 mmHg, 平均 4 mmHg と小であった.

これら 9 例のパルス・ドプラー法による推定圧較差 ($\Delta P=4V^2$) と心カテによる最大瞬時圧較差 (instantaneous ΔP) は, $Y=1.10X-2.66$ ($r=0.93$, $p<0.01$) と有意な正相関を示した (Fig. 7). また, 同様に両計測法による圧較差 (ΔP) も, $Y=1.09X+1.55$ ($r=0.91$, $p<0.01$) の有意な正相関

Table 2. Data obtained from 11 patients examined by simultaneous pulsed Doppler and catheterization techniques

No.	Age	ΔP by Cath (mmHg)	Maximal instantaneous ΔP (mmHg)	max V in RV (m/sec)	ΔP by PD (mmHg)	θ
1	11 m	15	20	2.00	18	20
2	1 y	18	25	2.40	23	0
3	1 y 1 m	22	26	3.20	41	0
4	1 y 8 m	40	40	3.12	39	0
5	1 y 10 m	13	20	2.08	17	0
6	1 y	28	30	2.75	30	0
7	6 y	-12	12	0.75	—	0
8	2 y 9 m	5	6	1.00	4	0
9	2 y 9 m	0	2	0.50	—	0
10	10 m	11	12	1.25	6	0
11	1 y	43	49	3.00	49	30

ΔP =pressure gradient; Cath=cardiac catheterization; max V=maximum velocity of blood flow in the right ventricle (RV); θ =angle of incidence of the ultrasonic beam.

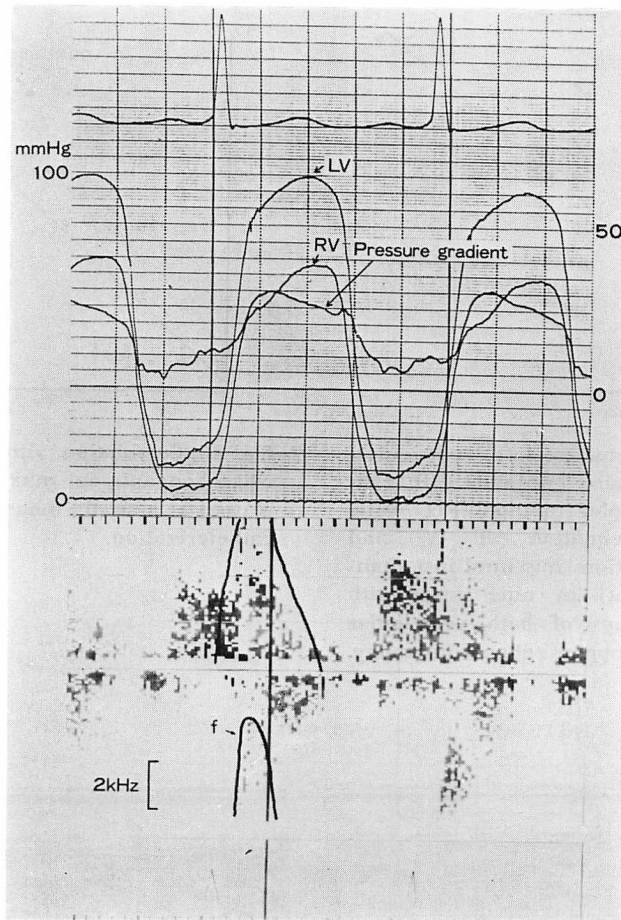


Fig. 6. Simultaneous recording of both left and right ventricular pressures, instantaneous pressure gradient and left to right shunt flow pattern in the right ventricle.
f= maximal frequency shift.

を示した (Fig. 8).

以上の9例中, Figs. 7, 8 中の矢印で示した症例3)は, 圧較差が 22 mmHg, 最大瞬時圧較差が 26 mmHg であるのに対し, パルス・ドプラー法により推測した圧較差は 41 mmHg で, 過大評価を示した. 本症例の左右短絡血流パターンを Fig. 9 に示す. 左が左室内における左右短絡血流パターン, 右が右室内における左右短絡血流パターンである. 左室内で 2.00 m/sec と比較的速い最大流速を持つ血流を検出し, sample volume (SV) を右室側に移動させるに従い, この流速は

3.20 m/sec まで上昇した. 本症例では, 連続波ドプラー法にても同様の最大流速を持つ左右短絡血流を検出した. 本症例で, $\Delta P = 4(V_2^2 - V_1^2)$ の式を用いて推測した圧較差は 25 mmHg と, 最大瞬時圧較差とよく一致した.

3. 左室内左右短絡血流について

今回検討した 56 例中9例で, 左室内において左右短絡血流を検出した. その最大流速は, 0.63 ~ 2.00 m/sec, 平均 1.31 m/sec であった. これら9例で, パルス・ドプラー法より推測した圧較差と心カテにより計測したそれとの相関は, $Y =$

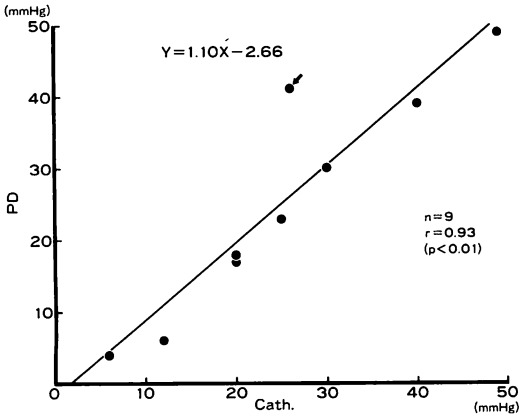


Fig. 7. Correlation between left ventricular-right ventricular pressure gradients (ΔP) estimated by pulsed Doppler method (PD) using simplified Bernoulli equation ($\Delta P = 4V^2$) and by cardiac catheterization (maximal instantaneous pressure gradient) in nine cases with simultaneous recordings of both ventricular pressures and pulsed Doppler echocardiography.

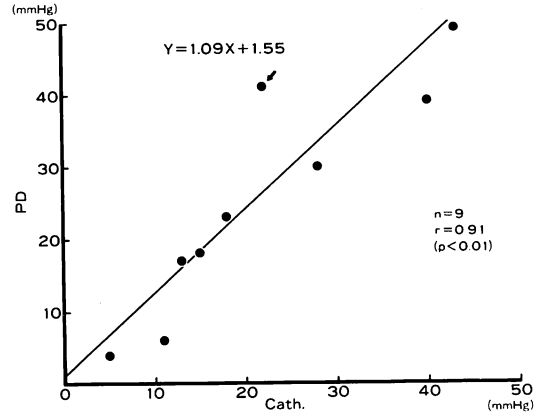


Fig. 8. Correlation similar to that in Fig. 7 when conventional maximal pressure gradient is used as actually measured values at cardiac catheterization.

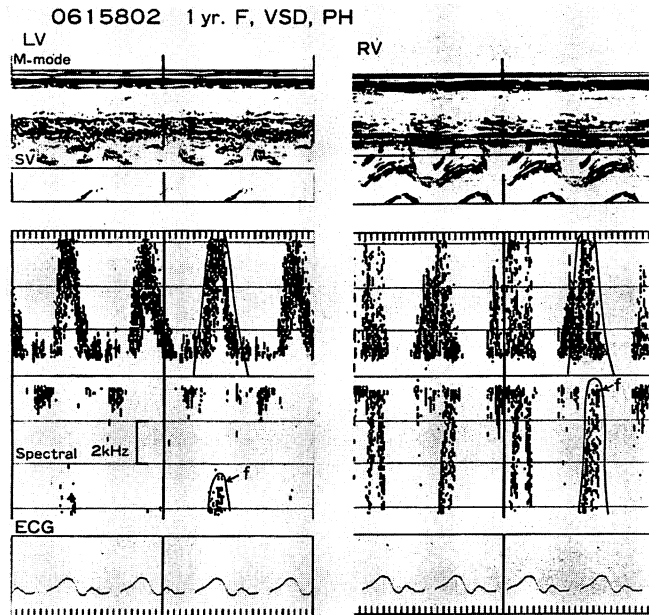


Fig. 9. Left to right shunt flow pattern in the left (LV) and right (RV) ventricles in Case 3 (indicated by arrow in Figs. 7 and 8), in which overestimation of gradient occurred by pulsed Doppler echocardiography.

f = maximal frequency shift.

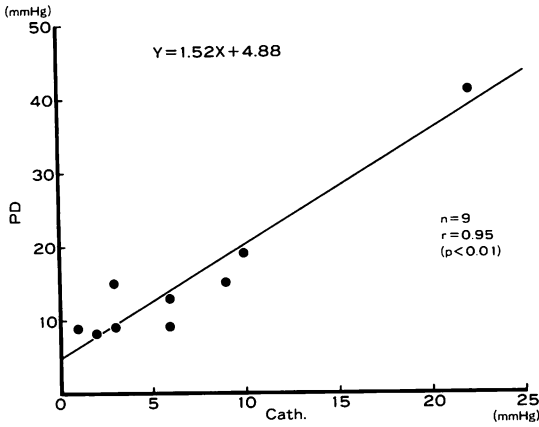


Fig. 10. Correlation between left to right inter-ventricular pressure gradients (ΔP) estimated by PD using the equation $\Delta P=4V^2$ and actually measured ΔP at cardiac catheterizations in nine cases with high-speed left to right shunt flows (0.63–2.00 m/sec; mean 1.31 m/sec) in the left ventricle.

1.52X+4.88 ($r=0.95, p<0.01$) で、パルス・ドプラー法において過大評価の傾向があった (Fig. 10)。また、 $\Delta P=4(V_2^2-V_1^2)$ の式を用いてパルス・ドプラー法により推測した圧較差と心カテにより計測した圧較差は、 $Y=1.07X+0.76$ ($r=0.98, p<0.01$) と、 $Y=X$ に近い関係で有意の正相関を示した (Fig. 11)。

考 察

簡略化したベルヌーイの定理は、弁狭窄における狭窄部前後の圧較差、三尖弁閉鎖不全における右室収縮期圧などの推測に広く応用されている^{1-5,7)}。我々は、すでに VSD において、パルス・ドプラー法により、右室内における左右短絡血流最大流速 (max V) を計測し、左右心室の収縮期圧較差を推測しうることを報告した⁶⁾。しかし、この方法には、以下に示すようないくつかの問題点があった。

その第 1 は、今回用いた装置によれば、最大血流速度は 1 回の aliasing を含め 3.20 m/sec までしか計測しえず、したがって 41 mmHg 程度ま

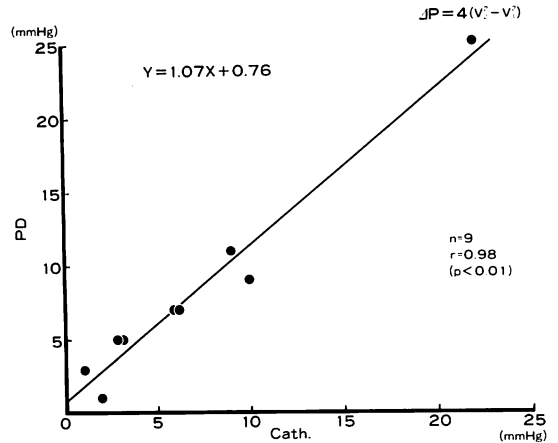


Fig. 11. Correlation similar to that in Fig. 10 when the equation: $\Delta P=4(V_2^2-V_1^2)$ is used for estimating pressure gradients.

での圧較差しか推測し得ないことである。左室収縮期圧が 100 mmHg 程度で、肺動脈狭窄や肺高血圧により右室収縮期圧が 60 mmHg 以上に上昇している症例では、今回用いた装置によりその圧較差を推測することが可能である。しかし、大動脈狭窄、高血圧などにより左室収縮期圧が上昇している症例や、肺動脈狭窄や肺高血圧が軽度な症例では、より早い血流速度を計測しうる high pulse repetition frequency Doppler (HPRF) や連続波ドプラー法を用いる必要がある。

第 2 の問題点として、右室収縮期圧が左室収縮期圧と等しいか、より高い症例では、右室内で有意の左右短絡血流を検出しえないか、収縮早期に左右短絡血流を検出するのみで、これだけの所見から正確に左右心室圧較差を推測することは困難であった。これらの症例では、収縮中期から後期にかけて右左短絡血流を検出する場合があります、この血流での最大流速についても検討する必要があると考えられた。

第 3 に、パルス・ドプラー法により計測した最大流速は最大瞬時圧較差を反映するものと考えられる。一方、臨床的に用いられる圧較差は、左室最大収縮期圧と右室最大収縮期圧の差であるとい

うことである。しかし今回検討した症例では、右室収縮期圧が左室収縮期圧と等しいかそれを上回る症例を除けば、パルス・ドプラー法での圧較差と最大瞬時圧較差の差は 0~7 mmHg で、誤差要因としては小さいものと考えられた。

元来、簡略化されないベルヌーイの定理は、

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (V_2^2 - V_1^2) + \rho \int_1^2 \frac{d\vec{V}}{dt} \cdot d\vec{s} + R(\vec{V})$$

P_1 = pressure in the prestenotic part

P_2 = pressure in the poststenotic part

V_1 = max V in the prestenotic part

V_2 = max V in the poststenotic part

ρ = mass density

R = viscous friction

で表わされる。右辺第 2 項は局所加速度であり、2 点間の圧力損失が流速に変化するまでの時間遅れを示し、2 点間の最大圧較差自体には関与しない。また、粘性によるエネルギー損失は、生体内では無視しうるとされている¹⁾。したがって、 $P_1 - P_2 = 1/2 \rho (V_2^2 - V_1^2)$ より 2 点間の最大圧較差を推測することが可能である。Hatle らは、弁狭窄での V_1 は V_2 に比し十分に小さく、無視し得るとし、 $\rho = 1.06 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$ として、 $P_1 - P_2 = 4 V^2$ の簡易式から、狭窄部前後の最大圧較差を推測しうるとした^{2,5)}。今回検討した VSD の症例でも、多くの場合、左室内で左右短絡血流を検出することはできず、 V_1 は無視し得るものとして、 $\Delta P = 4 V^2$ という簡易式により、その圧較差を比較的正確に推測することができた。しかし大きな VSD の症例で、左室内に比較的大きな最大流速を示す左右短絡血流をみる症例では、 V_1 を無視したことによる誤差が大きい場合があった。左室内に左右短絡血流を検出した 9 例での最大流速は 0.63~2.00 m/sec (平均 1.31 m/sec) であり、これが 2~16 mmHg (平均 7 mmHg) の誤差を齎す要因になっているものと考えられた。大きな欠損口を有し、左右短絡血流量の多い症例では、左室内におけるこの血流の流速は更に大きいと考えられ、大きな誤差要因になり得るものと考えられ

た。したがって、左室内に高い最大流速を有する左右短絡血流が検出される症例では、パルス・ドプラー法の距離分解能を利用し、左室内、右室内双方における左右短絡血流の最大流速をともに計測し、 $\Delta P = 4 (V_2^2 - V_1^2)$ の式を用いて、その圧較差を推測する必要があると考えられた。

結 語

VSD 56 例を対象として、パルス・ドプラー法による圧較差 ($\Delta P = 4 V^2$) 推測の有用性と、この方法が有するいくつかの問題点について報告した。本法により計測した最高流速 (max V) から、上記の式を用いて推測した圧較差は、心カテにより実測した圧較差とよく一致した。しかし、左室内に高速の血流を有する左右短絡が検出される症例では、パルス・ドプラー法では誤差が無視し得ぬ場合があり、そのような症例では、 $\Delta P = 4 (V_2^2 - V_1^2)$ の式を用いて圧較差を推測すべきであると考えられた。

要 約

VSD における左右心室の収縮期圧較差 (ΔP) の新しい非侵襲的評価法として、パルス・ドプラー法の有用性とその問題点について検討した。

右室内における左右短絡血流の最大流速 (max V) から、 $\Delta P = 4 V^2$ の式を用いて圧較差を求めた。また左室内に高速の左右短絡血流が検出される症例では、 $\Delta P = 4 (V_2^2 - V_1^2)$ の式を用いて得られる圧較差の推測についても検討した。また 11 例では、心カテ時に左右心室内の同時測定とパルス・ドプラー法を同時に行い、対比検討した。

心カテでの圧較差が 41 mmHg 以上であった 9 例と、右室収縮期圧が左室収縮期圧と等しいか、それを上回る 8 例、計 17 例では、右室内における左右短絡血流の最大流速のみから、圧較差を正確に推測することは困難であった。

これら 17 例を除くと、全収縮期にわたり、左右短絡血流を右室内において検出した 39 例では、 $\Delta P = 4 V^2$ の式を用いたパルス・ドプラー法での

圧較差と、心カテにより実測した圧較差は、 $Y = 0.99 X + 2.77$ ($r = 0.91$, $p < 0.01$) の有意な正相関を示した。心カテによる最大瞬時圧較差とパルス・ドプラー法での圧較差との差は $0 \sim 7$ mmHg, 平均 4 mmHg と、小であった。

9例で、左室内に $0.63 \sim 2.00$ m/sec, 平均 1.31 m/sec の最大流速を持つ左右短絡血流が検出され、これがパルス・ドプラー法による圧較差計算上、 $2 \sim 16$ mmHg の誤差要因になっているものと考えられた。これら9例において $\Delta P = 4 V^2$ の式を用いて推測した圧較差と、心カテにより実測した圧較差は、 $Y = 1.52 X + 4.88$ ($r = 0.95$, $p < 0.01$) で、パルス・ドプラー法は圧較差を過大評価する傾向があった。しかし $\Delta P = 4 (V_2^2 - V_1^2)$ の式を用いれば、心カテの成績とは、 $Y = 1.07 X + 0.76$ ($r = 0.98$, $p < 0.01$) となり、 $Y = X$ に近い正相関が得られた。

上記の成績は、左室内に高速の左右短絡血流が検出される症例では、欠損口の上流における最大流速 (V_1) を無視せず、 $\Delta P = 4 (V_2^2 - V_1^2)$ の式を用いて左右心室間圧較差を算定すべきであることを示すものと考えられた。

文 献

- 1) Holen J, Aaslid R, Landmark K: Determination of pressure gradient in mitral stenosis with a non-invasive ultrasound Doppler technique. *Acta Med Scand* **199**: 455, 1976
- 2) Hatle L, Bruback A, Tromsdal A, Angelsen B: Noninvasive assessment of pressure drop in mitral stenosis by Doppler ultrasound. *Br Heart J* **40**: 131, 1978
- 3) Hatle L, Angelsen B, Tromsdal A: Noninvasive assessment of aortic stenosis by Doppler ultrasound. *Br Heart J* **43**: 284, 1980
- 4) Lima CO, Sahn DJ, Valdes-Cruz LM, Goldberg SJ, Barron JV, Allen HD, Grenadier E: Non-invasive prediction of transvalvular pressure gradient in patients with pulmonary stenosis by quantitative two-dimensional echocardiographic Doppler studies. *Circulation* **67**: 866, 1983
- 5) Hatle L, Angelsen B: Doppler ultrasound in Cardiology. Lea & Febiger, Philadelphia, 1982
- 6) Tomita H, Nakaya S, Arakaki Y, Futaki S, Nakajima T, Kamiya T: Pulsed Doppler echocardiographic estimation of the pressure gradient between the left and right ventricles in ventricular septal defect. *Heart* **17**: 528, 1985 (in Japanese)
- 7) Tei C, Kisanuki A, Arima S, Arikawa K, Otsuji Y, Tanaka H: Quantitative assessment of right ventricular pressure in patients with tricuspid regurgitation by continuous wave Doppler echocardiogram. *Proc JSUM* **44**: 533, 1984 (in Japanese)