

ドップラー法による大動脈 弁狭窄症の重症度判定法

Severity of aortic steno- sis assessed by Doppler techniques

中村 憲司
椎名 哲彦
里見 元義
酒井 吉郎
田村 光司
松村 研二
梅村 純
孫崎 信久
小柳 仁
廣澤弘七郎

Kenji NAKAMURA
Tetsuhiko SHIINA
Gengi SATOMI
Kichiro SAKAI
Koji TAMURA
Kenji MATSUMURA
Jun UMEMURA
Nobuhisa MAGOSAKI
Hitoshi KOYANAGI
Koshichiro HIROSAWA

Summary

Continuous wave (CW) Doppler ultrasound has facilitated accurate estimates of pressure gradient (PG) across a stenotic valve. However, the severity of stenosis cannot be assessed using PG alone because it is dependent on actual flow across the valve. In this study, Doppler techniques were used to predict PG and aortic valve areas (AVA) in adults with aortic stenosis (AS).

Fifty-four adult patients undergoing cardiac catheterization for suspected AS were prospectively evaluated. There were 28 men and 26 women, who ranged in age from 25 to 68 years with a mean of 56 years.

These Doppler ultrasound studies were performed using a 2 MHz transducer and an Aloka SSD-730. With CW Doppler ultrasound, the highest velocities of the aortic jet were recorded from an apical approach. Left ventricular outflow flows were recorded about 1.0–1.5 cm below the aortic annulus using high PRF.

Doppler waveforms were analyzed for the AT/ET (AT: acceleration time, ET: ejection time), and Doppler PG was calculated from the maximum velocity (V) of the aortic jet based on a modified Bernoulli equation ($PG=4V^2$), and aortic valve area was obtained using the continuity equation ($AVA=\text{left ventricular outflow tract stroke volume} \div \text{AS jet velocity integral}$). These data were compared with hemodynamic data obtained from cardiac catheterization.

The following results were obtained:

1. In eight patients with substantial aortic regurgitation, whose maximum catheter PG were from 20 to 45 mmHg, the AT/ET was less than 0.30. The ratio of AT/ET correlated with the peak velocity of the aortic jet ($r=0.88$) and the maximum PG ($r=0.87$) obtained from cardiac catheterization.

2. In 46 patients with AS, the maximum PG by CW Doppler showed an excellent correlation

with maximum catheterization PG ($r=0.97$, SEE 6 mmHg), and the mean PG as calculated by the two techniques also disclosed a good correlation ($r=0.97$, SEE 5.4 mmHg).

3. Aortic valve area (AVA) calculated noninvasively using the volume flow in the left ventricular outflow tract and the systolic velocity integral of the aortic jet correlated well with the aortic valve area determined at catheterization ($r=0.87$, $AVA (cath)=0.86 \times AVA (Doppler)+0.12 \text{ cm}^2$, SEE 0.23 cm^2).

4. Defining the critical AS as $AVA \leq 0.75 \text{ cm}^2$, 15 patients had mean PG greater than 50 mmHg, but the remaining seven patients did not. The Doppler AVA and mean PG better identified patients with severe AS.

It was concluded that in technically adequate studies, Doppler techniques correctly distinguish critical from non-critical AS.

Key words

Aortic stenosis Doppler echocardiography Pressure gradients Aortic valve area

はじめに

大動脈弁狭窄症 (aortic stenosis: 以下 AS と略) の重症度評価にあたっては, 大動脈弁圧較差 (AV-PG) と大動脈弁口面積 (AVA) の2つの指標が少なくとも必要である.

AV-PG は, 連続波ドップラー法により大動脈弁口血流を記録し, Bernoulli の簡易式を用いて算出されるが, 弁口血流量に大きく依存するため, AV-PG のみで重症度を判定するのは極めて危険である¹⁻⁴⁾. また連続波ドップラー法の手技, 対象例の年齢, 心調律, 合併する大動脈弁逆流の程度にも影響されるため, AV-PG, AVA の算出に際しては注意を要すると言われている²⁻⁵⁾.

今回は, 臨床上 AS の疑われた症例について, 心断層図, ドップラー法を施行し, AS の重症度判定にあたって, どこまでこの検査法が有用かにつき検討を加えたので報告する.

症例と方法

症例

1年3ヶ月の間に, 臨床的に AS が疑われ, 左心カテーテルにて大動脈と左心室の同時圧記録のなされた54例を対象とした. この54例のうち, AS と確定診断されたのは46例(男23例, 女23例)で, 年齢は20歳~66歳, 平均年齢は56歳であった. 25例は洞調律, 21例は心房細動を示し,

Table 1. Patients' data

	NSR	AF
MVD	7	21
AR		
Absent	4	0
Mild	15	18
Moderate	6	3

NSR=normal sinus rhythm; AF=atrial fibrillation; MVD=mitral valve disease; AR=aortic regurgitation.

前者の7例と後者全例の計28例が, リウマチ性の僧帽弁膜症をも有していた (Table 1).

心臓カテーテル

左・右心カテーテルを fluid-filled の double lumen カテーテルを用いて行い, 全例で大動脈と左心室の同時圧記録を行った. 得られた圧曲線より, maximum, mean, peak to peak の3つの AV-PG を算出し, 洞調律では5心拍, 心房細動では10心拍を平均して求めた (Fig. 1). 同時圧測定後, 熱希釈法もしくは Fick 法にて心拍出量を測定し, ついで大動脈, 左室造影, 冠状動脈造影を行い, 大動脈弁逆流の程度と冠状動脈病変の有無を調べた.

ドップラー検査

使用した装置はアロカ製メカニカルスキャン SSD-730-断層エコー, パルス および 連続波ドッ

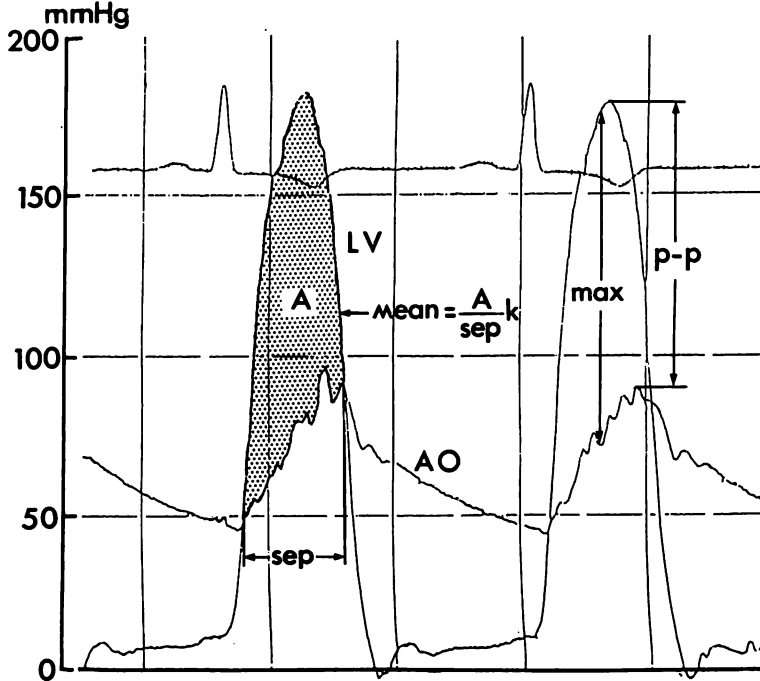


Fig. 1. Aortic and left ventricular pressure tracings from a patient with AS.

The maximum (max) instantaneous PG represents the greatest difference at any points between the two curves; the peak to peak PG (P-P) is the difference between the two peak pressures, and the mean PG is obtained by planimetry.

プラー複合装置で、一本の探触子でパルス・ドップラー法と連続波ドップラー法を行うことが可能である。パルス・ドップラー法は、発振周波数 2 MHz, パルス繰り返し周波数 (pulse repetition frequency: PRF) は 4.2 KHz から 19.2 KHz までの振動子を用いて行い、 ± 3.7 m/秒までの血流を aliasing をおこすことなく表示することが可能である。また連続波ドップラー法は、描出した断層像に超音波ビームを示すカーソルラインを表示し、断層像を固定したまま、このカーソルラインを自由に可変することができ、目的とする方向の血流を容易に表示することが可能である (Fig. 2).

心エコー図とドップラー法検査は、心カテーテルの施行前 24~48 時間以内に施行した。症例はすべて左半側臥位とし、探触子を心尖部において

左室長軸断面像を描出後、超音波ビームを示すカーソルラインを左室流出路、大動脈弁、上行大動脈を結ぶ方向にあわせ、連続波ドップラー法にて大動脈弁口を通過する血流を記録した。ついで、high PRF を用いたパルス・ドップラー法にて、大動脈弁輪より 1.0~1.5 cm 下の左室流出路に sample volume をおき、少しずつ sample volume を大動脈弁直下の方向へと移動し、急激に血流速の増加する直前にて、左室流出路の血流パターンを記録した⁴⁾。

ドップラー波形よりの計測

連続波ドップラー法によって得られた大動脈弁血流波形より AT/ET (AT: acceleration time, ET: ejection time) を先ず求め、Bernoulli の簡易式 (圧較差 = $4 \times \text{velocity}^2$) を用いて、maximum および mean AV-PG を計算した。心カテ

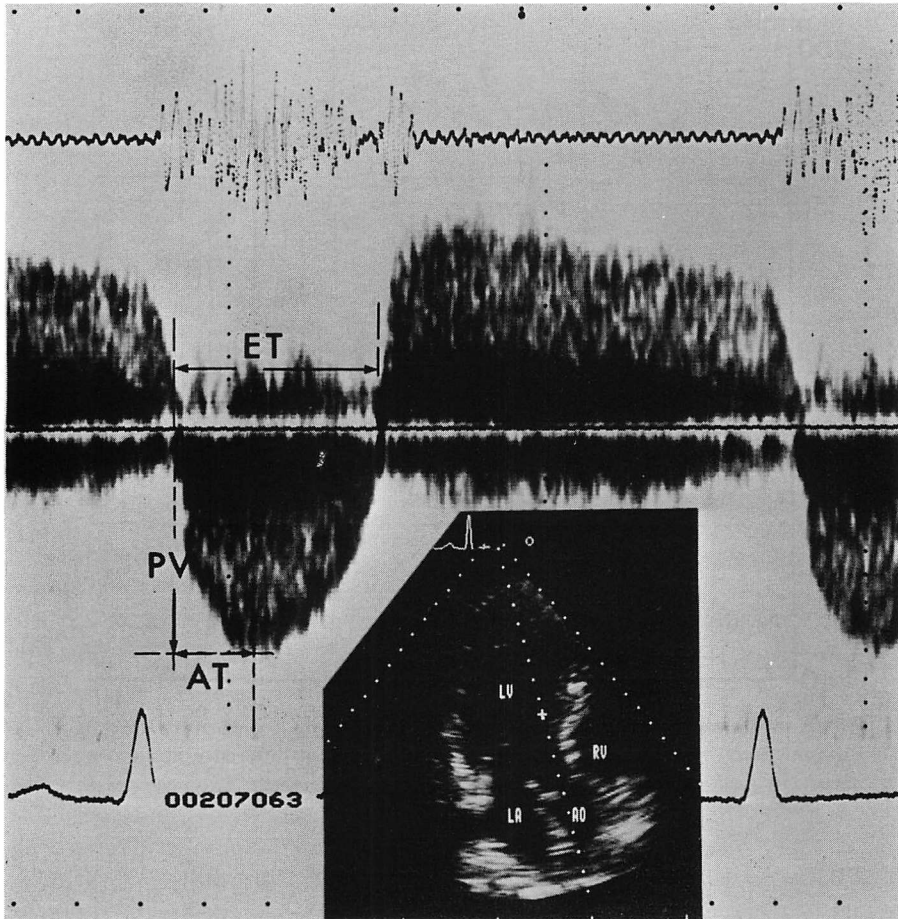


Fig. 2. Two-dimensional and Doppler echocardiograms showing the method of measurements.

Apical long-axis view of the left ventricle (LV) and continuous wave (CW) Doppler study in a patient with aortic stenosis (AS) are shown. The maximum pressure gradient (PG) is derived from the highest point of the velocity curve by the modified Bernoulli equation: $PG = 4 \times (\text{velocity})^2$. The mean PG is calculated with our digitized computer. The ratio of acceleration time (AT) (defined as the time from the onset to the peak flow) to ejection time (ET), AT/ET, is also calculated from the peak velocity profile.

ーテルと同様に、洞調律では5心拍、心房細動では10心拍を平均して算出した (Fig. 2).

大動脈弁口面積 (AVA) の算出

左室流出路を通過する血流量と大動脈弁口を通過する血流量は等しいという考えのもとに、連続の式より $AVA \left(= \frac{mVLVOT \times CSALVOT}{mVAO} \right)$ を求めた ($mVLVOT$ = 左室流出路での平均血流速, $mVAO$

= 平均大動脈弁血流速, $CSALVOT$ = 左室流出路断面面積).

左室流出路断面面積は、左室長軸断面像にて大動脈弁輪直下の心室中隔より僧帽弁と大動脈弁の移行部まで計測し、その距離を長径 (R) として $(R/2)^2 \cdot \pi$ で算出、前述の方法で求めた大動脈弁口血流速、左室流出路血流速より各々の平均血流速を計算し、AVA を求めた (Fig. 3). そして、ドッ

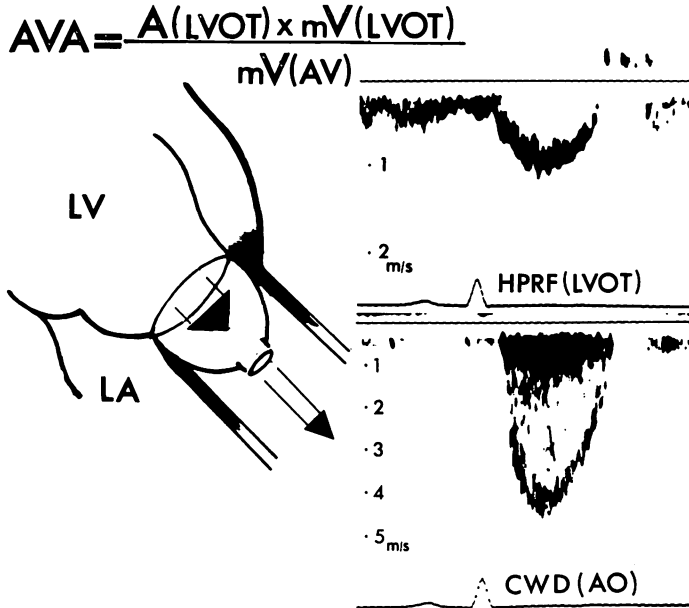


Fig. 3. Method of calculating of the aortic valve area by Doppler echocardiography.

Transaortic stroke volume can be measured just below the stenotic aortic valve as the cross-sectional area of the left ventricular outflow tract (A LVOT) times the mean velocity in the left ventricular outflow tract (mV LVOT). As the volume of systolic flow through the left ventricular outflow tract and that in the aortic jet should be equal, the aortic valve area (AVA) can be calculated as shown in the formula.

プラー法で得られた maximum, mean AV-PG, AVA をカテーテル法で得られた 各々の値と比較した。

結 果

心臓カテーテル, 造影所見

心カテーテルで得られた peak to peak AV-PG と maximum AV-PG を比較すると, $r=0.96$ の極めて良い相関が得られた (Fig. 4). 今回は peak to peak AV-PG=0 mmHg の症例を AS なしとした。

AS を有する 46 例の心カテーテル所見では, mean AV-PG は 15.2 mmHg~113 mmHg, AVA は $0.29 \text{ cm}^2 \sim 1.7 \text{ cm}^2$ であった。

mean AV-PG=50 mmHg, AVA=0.75 cm^2 の line で区別すると, mean AV-PG \leq 50 mmHg, AVA \leq 0.75 cm^2 の区域には 7 例みられ, 4 例が心

係数 (C.I.) $\leq 2.2 \text{ l/min/m}^2$ であった (Fig. 5).

大動脈弁逆流症は 42 例にみられ, 逆流の程度を mild, moderate, severe の 3 段階にわけると, mild 33 例, moderate 9 例であった。また冠動脈の病変は 8 例 (17%) にみられたが, 何れも前下行枝における 50~75% の病変であった。

ドップラー心エコー図所見

56 例全例において, 心尖部に探触子を置き, 左室長軸断面像もしくは 5-chamber 像を描出後, カーソルラインを左室流出路から大動脈弁方向にあわせ, 大動脈弁を通過する血流を連続波ドップラー法で記録した AS 48 例では, 44 例が短時間に容易に記録され, 残り 4 例は呼吸停止のタイミングに時間を要したが, 計測にはなんら差しつかえない良好なパターンが得られた。

AT/ET について

連続波ドップラーにて記録された大動脈弁口血

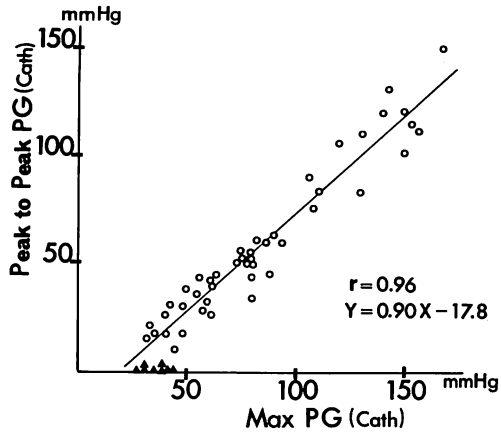


Fig. 4. Correlation of the peak to peak catheter PG with the Max PG in the 46 patients.

The regression equation is peak to peak PG=0.90 × Max PG-17.8. Closed triangles show the patients with substantial aortic regurgitation. In these 8 patients there is no peak to peak PG, but the max. catheter PG is from 25 to 45 mmHg.

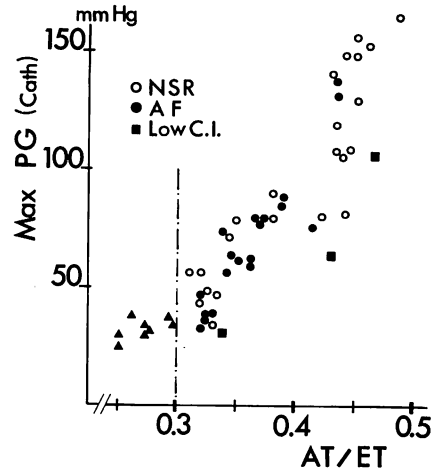


Fig. 6. Relation between the AT/ET derived from the CW spectrum of the aortic jet and the catheterization Max PG.

Fairly good correlation exists between the AT/ET and Max PG (catheter), with $r=0.87$. The ratio of 0.30 successfully separates those with AS from those with substantial aortic regurgitation.

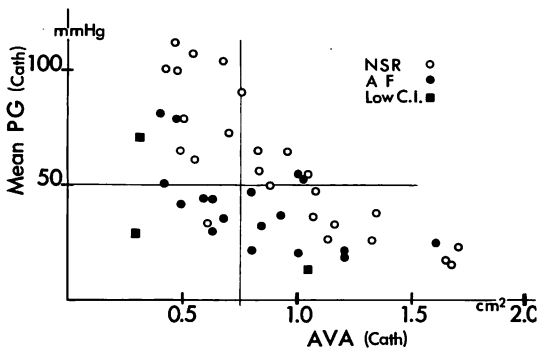


Fig. 5. Comparison of mean aortic PG and AVA at cardiac catheterization.

Critical aortic stenosis is defined in this plot by the vertical line at 0.75 cm^2 .

Low C.I. $\leq 2.0 \text{ l/min/m}^2$.

流パターンより, 全例 AT/ET が容易に算出された. Peak to peak AV-PG=0 mmHg を示した 8 例の AT/ET はすべて 0.3 以下であった. 残りの AS を有する 48 例では, AT/ET は 0.31~0.48 を示した (Fig. 6).

AT/ET と心カテーテルによる maximum

Table 2. Comparison among pressure gradients, the peak velocity and the AT/ET

Comparisons	Total (n=46)	SRN (n=25)	AF (n=21)
Peak velocity(D)—AT/ET	0.88	0.89	0.85
Maximum PG(C)—AT/ET	0.87	0.88	0.83
Mean PG(C)—AT/ET	0.86	0.87	0.83
Maximum PG(C)—Maximal PG(D)	0.97	0.97	0.97
Mean PG(C)—Mean PG(D)	0.97	0.98	0.96

PG=pressure gradient; (C)=catheterization; (D)=Doppler.

AV-PG との間には $r=0.87$, AT/ET と大動脈弁口血流の peak velocity との間には $r=0.87$ の直線的な相関関係が得られ, maximum AV-PG が大きくなるに従い, 大動脈弁口血流の連続波ドップラー波形は, 対称性の丸みを帯びた形状に近づく傾向がみられた. $CI \leq 2.0 \text{ l/min/m}^2$ を示した low CI 群の 3 例は, 右下方へずれる傾向がみられた (Fig. 6).

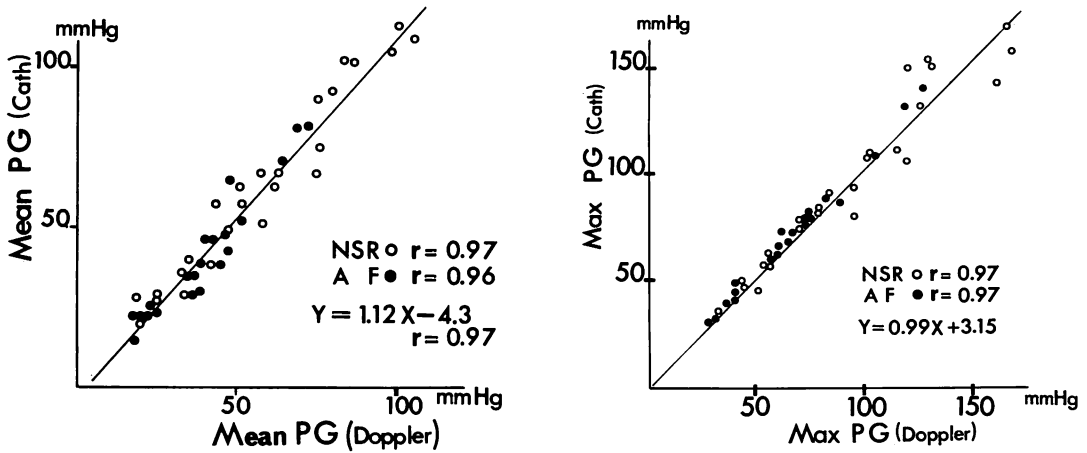


Fig. 7. Comparison between mean PG (right), Max PG (left) measured with Doppler ultrasound and those measured at catheterization.

There is a good correlation between the data obtained by both methods (mean PG, $r=0.97$; Max PG, $r=0.97$).

AV-PG の比較

ドップラー法によって算出された maximum, mean AV-PG と、心カテーテル法によって得られた各々の値を、心房細動、洞調律にわけて比較した (Table 2). いずれの AV-PG も洞調律の方が良い相関を示したが、全症例を含めても maximum, mean AV-PG とともに両法間には $r=0.97$ の極めて高い相関関係が得られた (Fig. 7).

なおドップラー検査時と心カテーテル施行時の心拍数の差は、 $\pm 6\%$ 以内であった。

AVA の算出

前述のごとく、連続波ドップラー法により大動脈弁口血流パターンを、high PRF 法により左室流出路血流パターンを記録しておのの平均血流速度を算出し、断層法にて求めた左室流出路断面積を連続の式に代入して、各症例の AVA を求めた。なお左室流出路における sample volume の至適位置は、心尖部から 8.3 cm~12.9 cm の間に存在した。AVA について、ドップラー法と心カテーテル法の相関をみると、洞調律 (25 例) では $r=0.90$ 、心房細動例 (21 例) では $r=0.84$ 、全体では $r=0.87$ (AVA (心カテ) = $0.86 \times AVA$ (ドップラー) + 0.12 cm^2 ・SEE 0.23 cm^2) の良い相関が得

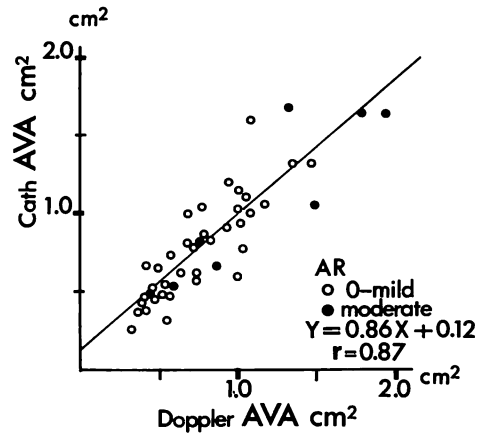


Fig. 8. Comparison of AVA calculated by Doppler and that determined at catheterization.

Results from patients with moderate aortic regurgitation are included (closed circles). For the total group, closer agreement ($r=0.87$, AVA (cath) = $0.86 AVA$ (Doppler) + 0.12 cm^2 , SEE 0.23 cm^2) is noted.

られた (Fig. 8).

中等度以上の大動脈弁逆流症の合併は 9 例 (洞調律 6 例、心房細動 3 例) で、AVA 算出における大動脈弁逆流症の影響については、評価できなかった (Fig. 8, Table 3).

Table 3. Comparison of AVA (r value/n)

	Total	NSR	AF
AVA(C)-AVA(D)	0.87/46	0.90/25	0.84/21
AR: none-mild	0.85/37	0.94/19	0.79/18
AR: moderate	0.88/ 9	0.86/ 6	0.89/ 3

Abbreviations: see Tables 1 & 2.

考 察

ドップラー法による AV-PG の算出は、弁口部を通過する拍出量に大きく依存しているため、心拍出量低下を来す症例では AV-PG は小さく算出され、AS の重症度判定には AVA も同時に必要であることは周知のことである。Yeager ら³⁾の報告例では、mean AV-PG 30 mmHg 以下の症例は、全例 AVA は 0.75 cm² 以上であったとされているが、今回の我々の報告例では、AVA ≤ 0.75 cm², mean AV-PG ≤ 50 mmHg の 7 例は全例心機能低下がみられ、そのうち 4 例は mean AV-PG 30 mmHg 以下を示していた。同様のことは Otto ら²⁾によっても報告されており、低い CI を示す左心機能不全例をいかにして予知するかが、極めて重要である⁶⁾。

AT/ET について

AS の重症化について、狭窄弁による心雑音の最大 peak が収縮期後半へとずれてゆくことは良く知られている。左室機能が正常である例では、大動脈血流のドップラー波形の形状(対称性か非対称性か)⁷⁾や AT/ET と peak to peak AV-PG⁸⁾ との相関についての報告がみられるが、大動脈血流の流速波形は maximum AV-PG を反映するものであり⁶⁾、後者の修正された AT/ET では、説得性に欠けるきらいがある⁸⁾。

今回の報告では、aortic jet の流速波形より計測した AT/ET と最高流速との間には r=0.87 (洞調律 r=0.89, 心房細動 0.84), また心カテーテルより得られた maximum AV-PG との間にも r=0.87 (洞調律 0.88, 心房細動 0.83) の有意な相関関係が得られた。

拍出量の大きい大動脈弁逆流症 8 例の AT/ET は全例 0.3 以下であり、CI ≤ 2.0 l/min/m² を示した左心機能不全群 3 例では、明らかに正常機能群より右下方へとずれており、AVA, AV-PG のともに小さい左心機能不全例も、おのおのの最高流速と AT/ET を参考にすることによって、非侵襲的に診断可能と考えられる。

圧較差の推定について

今回の報告では、心カテーテルによる AV-PG の測定はすべて大動脈の左室の同時圧測定で行い、得られた圧曲線より maximum, mean, peak to peak の 3 つの AV-PG を求め、ドップラー法より求めた maximum, mean AV-PG と比較した。Maximum および mean AV-PG ともにドップラー法と心カテーテル法との間には極めて高い相関が得られ、心房細動を有していても相関係数はほとんど変らなかつた。また大動脈弁逆流および左心機能不全の存在も、AV-PG の推定に関してはほとんど影響はみられなかつた。別々に施行した心カテーテル検査時とドップラー検査時の心拍数の差が、±6% 以内であったことが、高い相関の要因と考えられる。従来報告では、ドップラー法と心カテーテル法との間の相関係数は 0.72~0.94 と大きな差がみられるが^{1~6)}、ドップラー検査時の振動子の位置が、心尖部、高位肋間、胸骨上窩などと一定していなかつたことが原因と考えられる。Smith らの動物実験⁹⁾で示されるように、血流に対する超音波ビーム方向が平行に近ければ、ドップラー法と心カテーテル法との間に r=0.99 の高い相関が得られるため、大動脈弁口血流の方向、連続波ドップラーの超音波ビーム幅などを考えれば、心尖部から左室流出路、大動脈弁、上行大動脈へと結ぶアプローチの方法が最適と考えられる。従来報告例のほとんどが non-imaging の single probe でなされ、形が小さいがため操作し易く、様々な部位から記録されたことが、かえって相関係数が悪くした原因と思われる。

今回使用の imaged 連続波ドップラー法では、

ドップラー信号の送受信が断層像上のカーソル線に沿ってなされ、微妙な呼吸停止のタイミングをとらえることによって、全例心尖部からドップラー波形を記録することができた。

AV-PG の比較でも $r=0.96\sim 0.97$ の高い相関係数が得られ、AT/ET と心カテーテルによる maximum AV-PG との間に $r=0.87$ の相関係数が得られたのも、この装置の易操作性と、心尖部アプローチの重要性を示しているものと考えられる³⁾。

AVA 算出上の問題点

非侵襲的に AVA を求める方法として、上行大動脈、肺動脈や僧帽弁口を通過する血流量より stroke volume を算出して、Gorlin の式より求める方法^{10,11)}と、大動脈弁下と弁上の通過血流量は等しいという連続の式より求める 2 つの方法¹²⁾がある。临床上、僧帽弁疾患や僧帽弁、大動脈弁逆流の合併が多いことより、後者の連続の式の方が使用されつつあるが、いずれの方法においても、血流を記録する sample volume の位置設定が重要な問題となってくる。今回の報告では、sample volume の至適位置は、心尖部から 8.3 cm \sim 12.9 cm の位置まで、および、良好な血流パターンを得るためには high PRF 法が極めて有用であった。心カテーテル法とドップラー法との間には、 $r=0.87$ と高い相関が得られたが、sample volume の至適位置設定には熟練と経験を要し、flow mapping の使用など検討が必要である¹³⁾。

臨床的有用性について

今回の我々の報告では、AV-PG の算定については心カテーテル法と連続波ドップラー法との間に、極めて高い相関が得られた。両法を比較するには、心カテーテル室にて同時記録を行うのが望ましいが、心カテーテルの操作の繁雑さ、ドップラー記録の体位の問題などを考えると、良好な記録がどの程度できるか疑問であり、現に別々に施行した方が良い相関係数が得られたという報告がある¹⁴⁾。他の報告と同様に、mean AV-PG ≥ 50 mmHg の症例はほとんど AVA は 0.75 cm² 以下

を示すため、AVA の算出に関してはまだまだ検討の余地があるが、すくなくとも mean AV-PG を非侵襲的に算出することによって、AS の治療方法の選択に有力な指針を与えることができるはずである。

要 約

連続波ドップラー法の使用により、狭窄弁の圧較差の評価が正確になされるようになってきたが、狭窄弁の重症度は弁口を通過する血流量に依存している圧較差のみでは評価することはできない。本研究は、大動脈狭窄症例の左室大動脈圧較差と大動脈弁口面積の推定において、ドップラー法がどこまで有用かを検討した。大動脈弁狭窄症を疑って心臓カテーテルを施行した 54 例(男 28, 女 26, 年齢 25 歳 \sim 68 歳, 平均 56 歳)を対象とした。使用した装置はアロカ製 SSD-730 で、断層像上に超音波ビーム方向を表示できる 2 MHz の探触子を用いた。大動脈弁口の最高血流速度は心尖部より連続波ドップラー法にて記録し、左室流出路での血流速度は大動脈弁輪下方 1.0 \sim 1.5 cm の位置に sample volume をおき、high PRF 法にて心尖部より記録した。

得られたドップラー波形より、大動脈弁口血流の AT/ET (AT: 加速時間, ET: 駆出時間)、ベルヌーイの簡易式 ($P=4V^2$) より圧較差を求め、また連続の式より大動脈弁口面積を求め、心カテーテル法より求めたおのおの値と比較した。その結果、次の成績が得られた。

1. かなりの大動脈弁逆流症を有する 8 例は、カテーテルでは最大圧較差 20 \sim 45 mmHg を示したが、AT/ET は全例 0.30 以下であった。AT/ET は、大動脈弁口最大血流速度とは $r=0.88$ 、カテーテルによる最大圧較差とは $r=0.87$ の良い相関を示した。

2. 大動脈弁狭窄症を有する 46 例では、ドップラー法によって得た値とカテーテル法によって得られた値を比較すると、最高圧較差では $r=0.97$ 、平均圧較差では $r=0.97$ の良い相関が得られた。

3. 大動脈弁口面積について, ドップラー法とカテーテル法にて計測された値を比較すると, $r=0.87$ (心カテーテル値 $=0.86 \times$ ドップラー値 $+0.12 \text{ cm}^2$) の良い相関が得られた.

4. 大動脈弁口面積 0.75 cm^2 以下を重症の大動脈弁狭窄症と定義すると, 15 例は平均圧較差 50 mmHg を示したが, 7 例はそれ以下であった. ドップラー法による大動脈弁口面積と平均圧較差の算出によって, 重症の大動脈弁狭窄症例を容易に検出することができた.

これらの結果より, 技術的に十分なドップラー血流波形を得ることができるならば, 非侵襲的に重症の大動脈弁狭窄症を診断することが可能であると結論した.

文 献

- 1) Ohlson J, Wranne B: Noninvasive assessment of valve area in patients with aortic stenosis. *J Am Coll Cardiol* **7**: 501-508, 1986
- 2) Otto CM, Pearlman AS, Comess KA, Reamer RP, Janko CL, Huntsman LL: Determination of the stenotic aortic valve area in adults using Doppler echocardiography. *J Am Coll Cardiol* **7**: 509-517, 1986
- 3) Yeager M, Yock PG, Popp RL: Comparison of Doppler-derived pressure gradient to that determined at cardiac catheterization in adults with aortic valve stenosis: Implications for management. *Am J Cardiol* **57**: 644-648, 1986
- 4) Skjaerpe T, Hegrenaes L, Hatle L: Noninvasive estimation of valve area in patients with aortic stenosis by Doppler ultrasound and two-dimensional echocardiography. *Circulation* **72**: 810-818, 1985
- 5) Panidis IP, Mintz GS, Ross J: Value and limitations of Doppler ultrasound in the evaluation of aortic stenosis: A statistical analysis of 70 consecutive patients. *Am Heart J* **112**: 150-158, 1986
- 6) Currie PJ, Seward JB, Reeder GS, Vlietstra RE, Bresnahan DR, Bresnahn JF, Smith HC, Hagler DJ, Tajik AJ: Continuous wave Doppler echocardiographic assessment of severity of calcific aortic stenosis: A simultaneous Doppler catheter correlative study in 100 adult patients. *Circulation* **71**: 1162-1168, 1985
- 7) Hatle L, Angelson BH, Trenesdel A: Non-invasive assessment of aortic stenosis by Doppler ultrasound. *Br Heart J* **43**: 284-289, 1980
- 8) Agatston AS, Chengot M, Rao A: Doppler diagnosis of aortic stenosis in patients over 60 years of age. *Am J Cardiol* **56**: 106-110, 1985
- 9) Smith MD, Dawson PL, Elison JL, Booth DC, Handshoe R, Kwan OL, Earle GF, DeMaria AN: Correlation of continuous wave Doppler velocities with cardiac catheterization gradients: An experimental model of aortic stenosis. *J Am Coll Cardiol* **6**: 1306-1314, 1985
- 10) Warth DC, Stewart WJ, Block PC, Weyman AE: A new method to calculate aortic valve area without left heart catheterization. *Circulation* **70**: 978-983, 1984
- 11) Kosturakis D, Allen HD, Goldberg SJ, Sahn DJ, Valdes-Cruz LM: Noninvasive quantification of stenotic semilunar valve areas by Doppler echocardiography. *J Am Coll Cardiol* **3**: 1256-1262, 1984
- 12) Skjaerpe T, Hegrenaes L, Hatle L: Noninvasive estimation of valve area in patients with aortic stenosis by Doppler ultrasound and two-dimensional echocardiography. *Circulation* **72**: 810-818, 1985
- 13) Satomi G, Nakazawa M, Takao A, Nakamura K: Real-time observation of intra- and extra cardiac blood flow profile in man using instantaneous B-mode and multichannel Doppler echocardiography. *Heart and Vessels* (in press)
- 14) Smith MD, Dawson PL, Elion JL, Wisenbaugh T, Kwan OL, Handshoe S, DeMaria AN: Systematic correlation of continuous-wave Doppler and hemodynamic measurements in patients with aortic stenosis. *Am Heart J* **111**: 245-252, 1986