

超音波連続波ドプラー法による大動脈弁狭窄および閉鎖不全の診断

Continuous wave Doppler echocardiographic assessment of aortic stenosis and aortic regurgitation

鄭 忠和

木佐貫 彰

有川 清猛

尾辻 豊

有馬 新一

鹿島 友義

田中 弘允

櫛谷 征昭*

Pravin M. SHAH**

Chuwa TEI

Akira KISANUKI

Kiyotake ARIKAWA

Yutaka OTSUJI

Shinichi ARIMA

Tomoyoshi KASHIMA

Hiromitsu TANAKA

Masaaki KUSHITANI*

Pravin M. SHAH**

Summary

Twenty-four patients with aortic stenosis and 22 with aortic insufficiency were evaluated using continuous wave Doppler echocardiography (echo). Doppler echo studies were performed 48 hours before cardiac catheterization. Fifteen normal subjects served as controls.

Peak velocity in the ascending aorta in aortic stenosis ranged from 2.0 to 6.0 m/sec with a mean of 3.7 m/sec, and this was significantly increased over the normal controls (mean 1.1 m/sec: 0.7~1.4 m/sec). Using the simplified Bernoulli equation ($P=4V^2$, P: peak pressure gradient, V: peak flow velocity), the peak pressure gradient across the aortic valve was measured from the peak velocity in patients with aortic stenosis. The results (Y) correlated well with the peak-to-peak pressure gradient (X) between the left ventricular pressure and aortic pressure as obtained by cardiac catheterization ($Y=1.1X+2.5$, $r=0.83$).

Aortic regurgitation was detected by continuous wave Doppler echo in all patients with aortic insufficiency, but in only half of the patients the peak velocity could be measured (3.8 ± 0.3 m/sec, mean \pm SD). In the remaining patients, it was difficult to measure the peak velocity, but it seemed to be greater than 3.0 m/sec. On the simultaneous recordings of the gradient between aortic and left ventricular pressures and continuous wave Doppler echo in patients with aortic regurgitation, the shape and pattern of the pressure gradient during diastole were similar to those of continuous wave Doppler echo.

鹿児島大学医学部 第一内科
鹿児島市宇宿町 1208 の 1 (〒890)

*東芝メディカル(株)

**Wadsworth VA Hospital, ロサンゼルス

The First Department of Internal Medicine, Faculty of Medicine, Kagoshima University, Usuki-cho 1208-1, Kagoshima 890, *Toshiba Medical Co., and **Wadsworth VA Medical Center, Los Angeles, CA 90073, USA

Received for publication June 18, 1984; accepted August 20, 1984 (Ref. No. 28-52)

We conclude that continuous wave Doppler echo is a very sensitive method for diagnosing aortic stenosis and regurgitation, and it provides a quantitative assessment of the severity of aortic stenosis.

Key words

Aortic stenosis Aortic regurgitation Continuous wave Doppler echocardiography Pressure gradient

はじめに

断層心エコー図, M モード心エコー図およびパルス・ドプラー心エコー図が大動脈弁狭窄(AS)や大動脈弁閉鎖不全(AR)の診断に有用であり, その sensitivity が高いことはよく知られている¹⁻⁸⁾. しかし大動脈弁疾患の定量的評価, とくに AS の重症度評価については, 理学的検査, 心電図, 胸部 X 線写真に心エコー図を加えた非観血的検査を総合しても, なお困難なことが多い^{5,9)}. 高齢者の AS では大動脈弁硬化症との鑑別が必ずしも容易でないことは日常よく経験するところである^{10,11)}. 断層心エコー図を用いることにより, 大動脈弁の肥厚, 石灰化を診断することは容易であるが, 僧帽弁狭窄と異なり, AS の弁口部面積の測定は困難である. したがって AS の重症度の評価は, 最終的には心臓カテーテル検査により, 弁口部圧較差を計測してなされているのが現状である.

一方, 連続波ドプラー法の弁膜疾患における臨床応用が Hollen ら¹²⁾や Hatle ら^{13,14)}により報告されて以来, 最近, この方法は米国において急速に注目され始めている^{15,16)}. しかし我が国ではまだ連続波ドプラー法を用いた弁膜疾患の検討報告は極めて少ない¹⁷⁻¹⁹⁾. この方法は送信波として連続波を用いるため, 血流の最高速度を測定することが可能であり, これより血流速度と密接な関係にある弁口部圧較差を算出することが可能である.

この研究の目的は, 連続波ドプラー法を用いて, AS, AR の診断および重症度評価を非観血的に行うことである.

対象と方法

対象は心臓カテーテル検査で確定診断がなされた AS 24 例 (28~74 歳: 平均 56 歳), および AR 22 例 (32~68 歳: 平均 48 歳) である. 連続波ドプラー法は心臓カテーテル検査の 48 時間以内に施行した. また健康者 15 例 (平均年齢 37 歳) をコントロールとした.

連続波ドプラーエコーは IREX System III または東芝製 SSH40B, あるいは Pedof Doppler System を一部改良した同社製断層心エコー・ドプラー装置 (SSH11A/SDS10A) に接続して, 断層心エコー図と同時に記録するか, あるいは単独で記録した. ドプラー探触子の周波数は 2.0 MHz あるいは 2.4 MHz で, 最高血流速度は 6 m/sec または 12 m/sec まで測定可能である. ドプラー探触子の位置は, 断層心エコー図を参考にして, 超音波ビームが大動脈弁を通過する血流に対し, 平行に入射するような体位を工夫して決定した.

すなわち, AS 症例では以下の三つのアプローチで記録した. まず患者を左側臥位とし, 探触子を左室心尖部におき, 左室流出路から大動脈弁を経て上行大動脈に向う方向にビームを投入した. 次に患者を仰臥位にして探触子を胸骨上窩におき, 上行大動脈の血流に超音波ビームが平行に入射するように工夫した. 最後に右側臥位とし, 探触子を胸骨右縁第 1 あるいは第 2 肋間に置き, ビームを上行大動脈の血流に平行となるようにして入射した. いずれの場合にも超音波ビームの方向が最高血流速度の測定に相当であるかどうかは high-pitched Doppler signal から判断した. 二つ以上のアプローチで大動脈弁を通過する血流の速度が測定された場合, 速い方の値をその症例の最高血流速度と判定した.

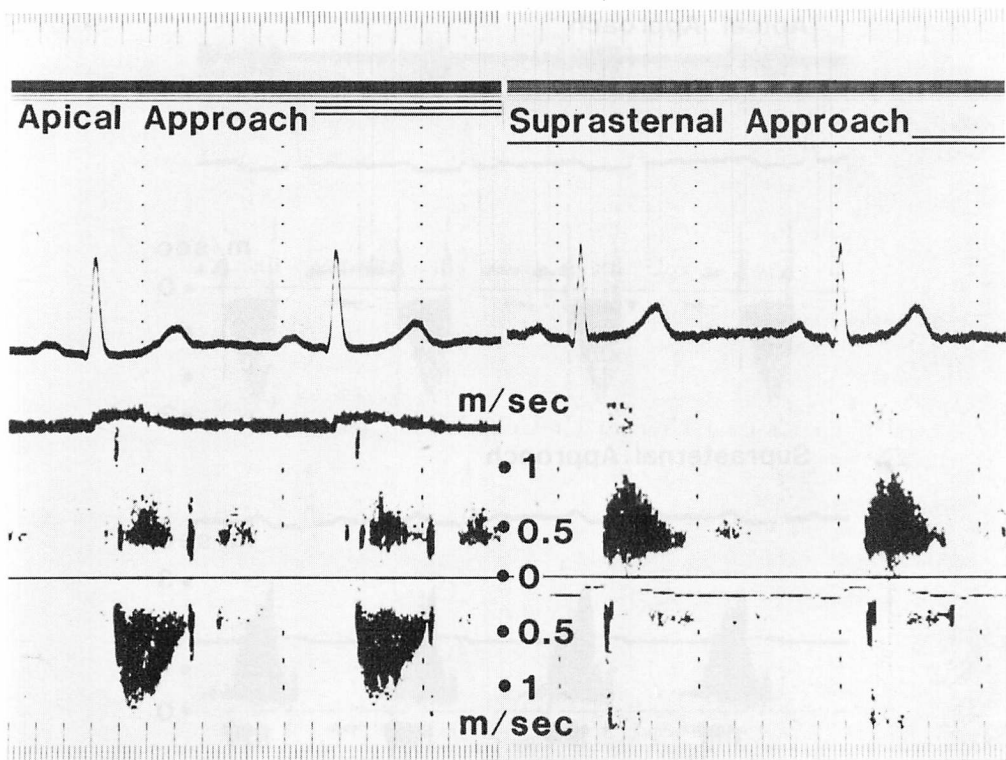


Fig. 1. Aortic flow velocity recorded with continuous wave Doppler transducer placed in the left ventricular apex (left panel) and in the suprasternal notch (right panel) in a normal subject.

The flow toward the transducer is seen below the zero line (left panel). The peak velocity is 1.2 m/sec in the left panel and 1.0 m/sec in the right panel.

連続波ドプラーエコーの記録は、探触子に向う血流は基線より上向き、遠ざかる血流は基線より下向きの血流として描出した。ドプラーエコーより血流速度を測定する場合、血流方向と超音波ビーム方向とのなす角度が重要であるが、ビームが血流に対して平行に入射されているものとして、角度 0° として計算した。こうして連続波ドプラー法により得られた血流最高速度を Hatle ら¹³⁾の提唱した簡易 Bernoulli の式：

$$P = 4V^2$$

P = 圧較差 (mmHg)

V = 血流最高速度 (m/sec)

に代入することにより、非観血的に AS の大動脈

弁口部圧較差を算出した。一方、心臓カテーテル検査では、左室から大動脈への引き抜き圧曲線において、大動脈弁口部圧較差を左室圧の最大値と大動脈圧の最大値との差より求め、連続波ドプラー法で求めた弁口部圧較差の値と比較した。

AR の症例では、体位を左側臥位にして探触子を左室心尖部におき、左室流出路から大動脈の方へビームが入射するようにして、AR の連続波ドプラーを記録した。このさいも、high-pitched Doppler signal から超音波ビームの方向が適当であるかどうかを判断した。一部の症例では、ミラー製カテ先マンメーターを用い、左室圧と大動脈圧の同時記録を行い、さらに AR の連続波ド

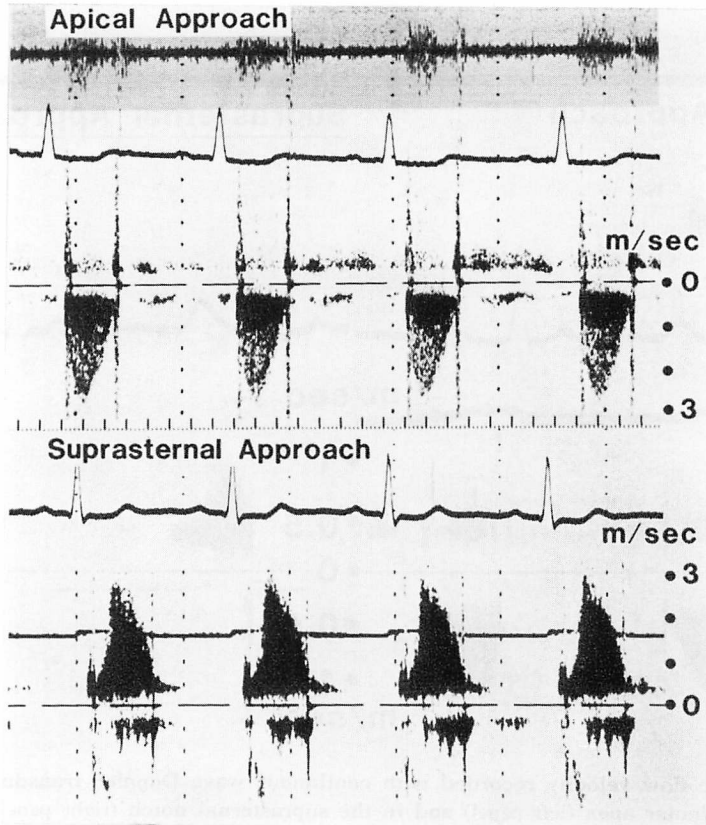


Fig. 2. Aortic flow velocity recorded with continuous wave Doppler transducer placed in the left ventricular apex (upper panel) and in the suprasternal notch (lower panel) in a patient with mild aortic stenosis.

Peak velocity is 2.8 m/sec in the upper panel and 3.0 m/sec in the lower panel.

プラーエコーを同一用紙に記録することにより、同一心拍における拡張期の圧較差と逆流の最高速度との相関について検討した。さらに同一心拍における圧較差を圧曲線および連続波ドプラーエコーから求め、両者の相関についても検討した。

結 果

1. 大動脈弁狭窄 (AS)

AS における大動脈弁を通過する血流の最高速度は平均 3.7 m/sec (2.0~6.0 m/sec) で健常人のそれ (平均 1.1 m/sec : 0.7~1.4 m/sec) に比べ、全例において明らかに増大していた。

Fig. 1 は健常人の大動脈弁血流の連続波ドプ

ラーエコー図を示す。Fig. 1A は探触子を左室心尖部に置いて記録したもので、駆出血流は基線から下向きの血流、すなわち探触子から遠ざかる血流として示されており、一方、Fig. 1B は探触子を胸骨上窩に置いて記録したもので、基線から上向きの血流、すなわち探触子に近づく血流として示されている。血流最高速度は前者で 1.2 m/sec、後者で 1.0 m/sec で、このように探触子の位置により血流速度が異なる時には、大きい値をその症例の血流最高速度の値とした。したがって本例の血流最高速度は 1.2 m/sec である。

Fig. 2 は軽症 AS の連続波ドプラーエコーを示す。Fig. 2A, Fig. 2B はそれぞれ探触子を左室

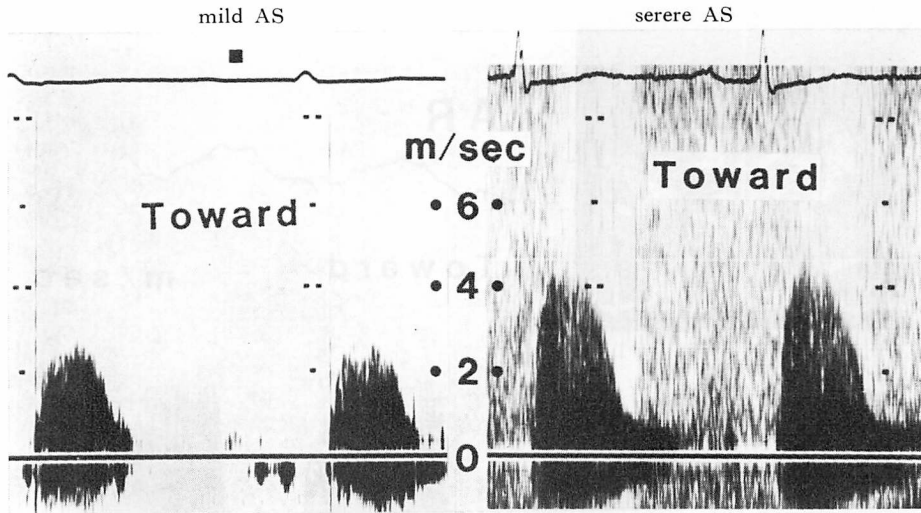


Fig. 3. Aortic flow velocity obtained from suprasternal notch in mild (left panel) and severe (right panel) aortic stenosis (AS).

In mild stenosis, the peak velocity is 2.9 m/sec and the calculated peak pressure gradient across the aortic valve is 34 mmHg. In severe stenosis, the peak velocity is 4.5 m/sec and the calculated peak pressure gradient is 81 mmHg.

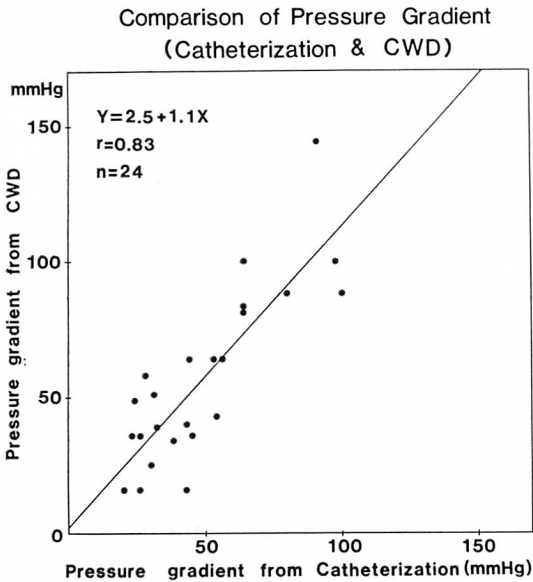


Fig. 4. Peak pressure gradient across the aortic valve obtained by the continuous wave Doppler compared with the value of peak-to-peak gradient between left ventricular and aortic pressure tracings in 24 patients with aortic stenosis.

The correlation coefficient (r)=0.83.

心尖部あるいは胸骨上窩に置いて記録したもので、血流の方向は前者では探触子から遠ざかる血流として、後者では探触子に近づく血流として表示されている。血流最高速度はそれぞれ 2.8 m/sec, 3.0 m/sec で、本症の血流最高速度は 3.0 m/sec と判定された。

AS 24 例中、二方向以上から血流速度が記録された症例は 12 例で、残り 12 例では、明瞭な血流最高速度はいずれか一つの方向からのみ得られた。その血流最高速度は AS の重症度によって異なり、重症例では軽症例に比し、より大きな値を示した (Fig. 3)。Fig. 4 は連続波ドプラーエコーより求めた血流最高速度から算出した大動脈弁口部の圧較差 (Y) と、心臓カテーテルにより求めた圧較差 (X) との相関を示したものである。両者の相関は $Y = 1.1X + 2.5$ で表わされ、相関係数は $r = 0.83$ と良い相関を示した。

2. 大動脈弁閉鎖不全 (AR)

AR の 22 例全例で、連続波ドプラーにより逆流の検出が可能であった。しかし逆流の最高速度の測定は半数においてのみ可能で、残りの半数で

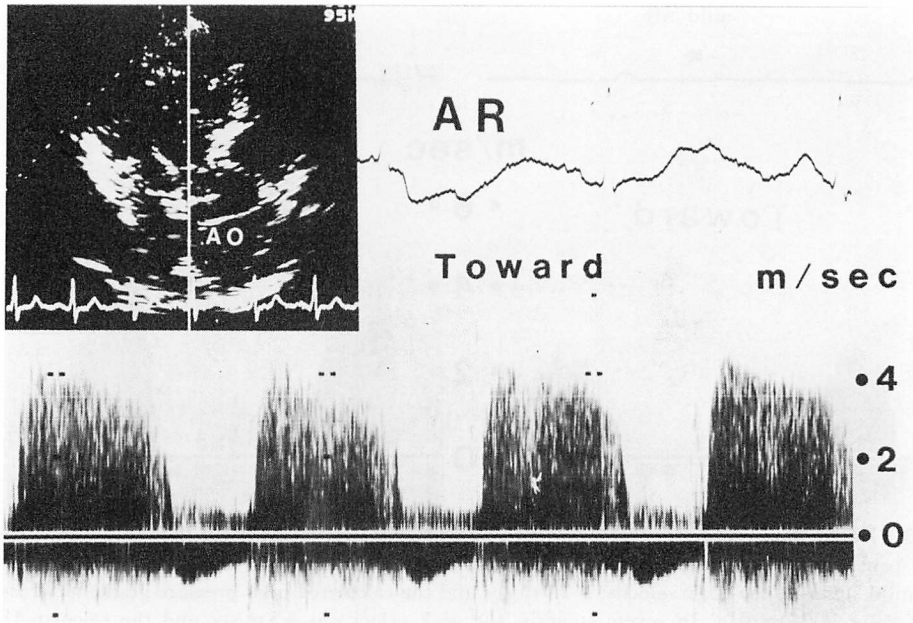


Fig. 5. Two-dimensional echocardiogram and continuous wave Doppler echo tracing obtained with the transducer positioned in the left ventricular apex from a patient with aortic regurgitation.

Peak velocity of aortic regurgitation above the zero line during diastole is 4.6 m/sec.

は不可能であった。最高速度を測定できた 11 例の平均値は 3.8 ± 0.3 m/sec (平均±標準偏差) であり, 測定が困難であった残り半数の症例においても, 少なくとも 3 m/sec 以上であることが示唆された。

Fig. 5 は AR の連続波ドプラーの 1 例を示す。この例における血流最高速度の測定は 4.6 m/sec である。Fig. 6 は大動脈圧, 左室圧および連続波ドプラーの同時記録を示し, Fig. 7 は Fig. 6 と同一症例の大動脈-左室間圧較差と, 連続波ドプラーエコーの同時記録を示している。拡張期の圧較差と連続波ドプラーは, 時相的にもパターンのにも極めてよく一致している。Fig. 7 の第 2 心拍の平均拡張期圧較差を planimeter を用いて測定した値は 42 mmHg で, 同時記録された同一心拍の連続波ドプラーから圧較差曲線を作成し, planimeter を用いて得られた平均圧較差は 41 mmHg で, 両者は実質的に一致した。

Fig. 8 は大動脈弁狭窄兼閉鎖不全 (ASR) の連続波ドプラーを示す。探触子を左室心尖部に置いて記録されているために, AS の順方向の血流は基線より下向き, AR の逆流は基線より上向きに記録されている。このように AS と AR の合併例では, 収縮期と拡張期に反対方向の血流として検出されるが, AS の血流と AR の血流が常に同一直線上にあるとは限らず, そのような例での血流最高速度は, AS と AR のそれぞれが別々のビーム方向で記録された。

考 察

連続波ドプラー法は, 1956 年, 里村ら²⁰⁾によって開発された方法で, 血流の最高速度の測定が可能であるが, 距離分解能がないために, 複雑な心内血流を有する弁膜疾患の血流計測には従来用いられず, もっぱら末梢血管の血流計測に用いられてきた。しかし断層心エコー図の普及とともに,

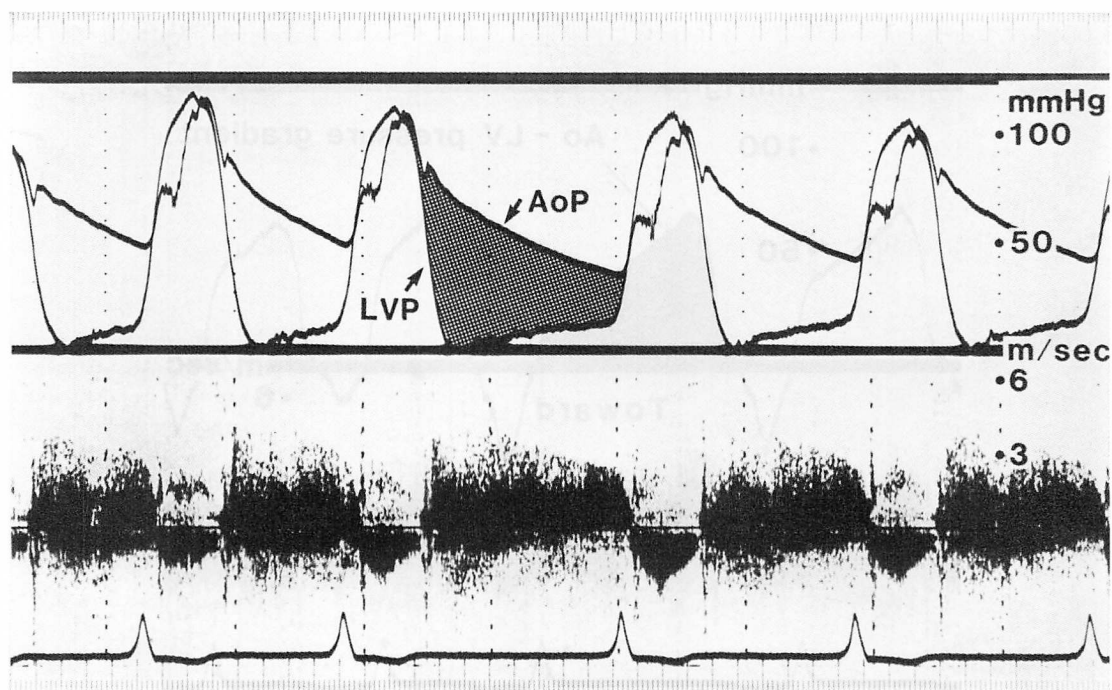


Fig. 6. Simultaneous recording of aortic pressure (AoP), left ventricular pressure (LVP) and continuous wave Doppler echo in a patient with aortic regurgitation.

AoP and LVP were measured using two catheter-tip manometers. Continuous wave Doppler echo is recorded from the left ventricular apex.

心内構造物の解剖学的位置関係がよく理解されるようになり、探触子をどこに置いてどのような方向でビームを入射すると、目的とする血流に平行となるかが分ってきた。連続波ドプラーはその到達距離に制限がみられず、心拡大のみられる症例でも心尖部から容易にビームを入射することができるので、AS や AR の症例において、大動脈弁口を通過する血流に対してビームをほぼ平行に入射し、その最高速度を測定することが可能である。

ドプラー法より血流速度を測定する場合、ビーム方向と血流のなす角度の補正が必要である。しかし真の角度補正を行うには三次元でなされねばならず、現実的には不可能である。したがって今回の研究では角度を無視し、超音波ビームの方向が適当であるかどうかは、high-pitched Doppler

signal から判定した。それゆえ、連続波ドプラー法より求めた血流速度は、実際の速度よりもいくらか過小評価されていることが示唆される。しかし、このようにして得られた血流速度から求めた弁口部圧較差は、心臓カテーテル法で求めた値によく一致していた。とくに **Figs. 6, 7** で示したように、実際の左室圧、大動脈圧と連続波ドプラーの同時記録を行った症例では、連続波ドプラーから得られた平均圧較差は心カテーテルより求めた同一心拍における平均圧較差にきわめてよく一致している。これは大動脈弁疾患に限らず、他の弁膜疾患における圧較差と連続波ドプラーの同時記録においても、同様な成績が報告されている。このことは、ドプラーエコーの記録のさいに、探触子の位置と high-pitched Doppler signal がビーム方向の決定に重要であり、臨床では、角度補正

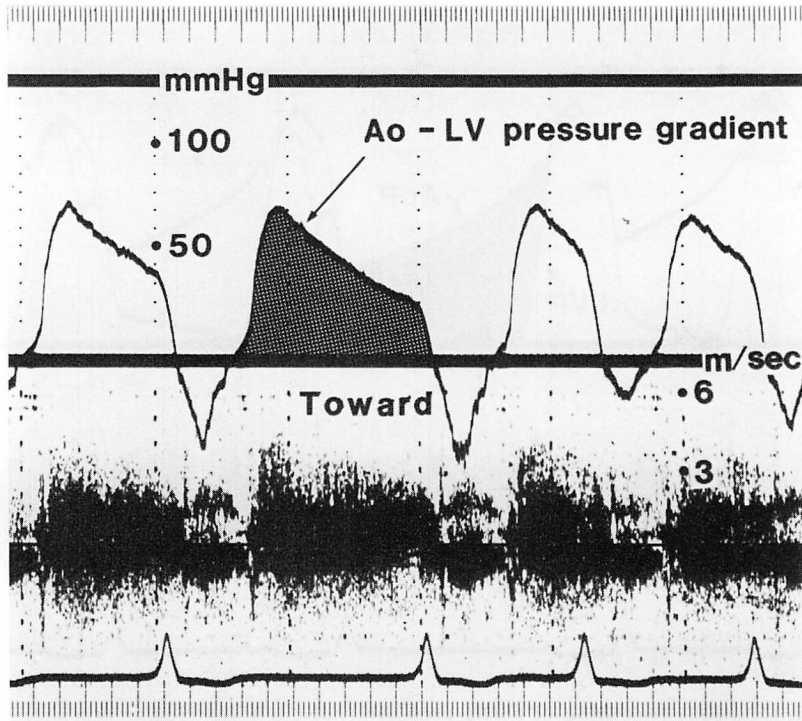


Fig. 7. Simultaneous recording of gradient between aortic and left ventricular pressure (Ao-LV pressure gradient) and continuous wave Doppler from the same patient as Fig. 6.

The shape and pattern of the cross-hatched area showing Ao-LV pressure gradient are similar to those of continuous wave Doppler echo. Mean Ao-LV pressure gradient measured from the cross-hatched area is 42 mmHg and the one calculated from continuous wave Doppler echo on the same heart beat is 41 mmHg.

をしなくても、十分耐えうるものであることが示唆される。

連続波ドプラーによる圧較差の過小評価をできるだけ避けるためには、探触子の位置を変えて、少しでも血流に平行になるように記録することが大切である。通常、血流シグナルは左室心尖部あるいは胸骨上窩から記録されやすいが、高齢者では、上行大動脈が動脈硬化とともにしばしば右側へ偏位しており、胸骨右縁の肋間からのみ血流速度が明瞭に記録されることもある。

大動脈弁膜症は僧帽弁膜症を合併していることが多く、そのような症例において探触子を左室心尖部に置いて記録するさい、ASと僧帽弁閉鎖不全(MR)、あるいはARと僧帽弁狭窄(MS)の

血流を鑑別する必要がある。まずASとMRの鑑別では、血流はともに探触子から遠ざかる方向のシグナルとして記録されるが、収縮期の血流波形の持続時間がASの方がMRより短いことで、容易に鑑別される。またMRの最高速度は通常4 m/sec以上であり、3 m/sec以下になることはない。したがって最高速度が3 m/sec以下の時は、速度だけからでも軽症ASの診断が確定的である。

ARとMSとの鑑別では、ともに探触子に近づく波形として記録されるが、ARの最高速度は通常3 m/sec以上であるのに対して、MSのそれは常に3 m/sec以下であることにより容易である。また拡張期血流の持続時間がARの方がMS

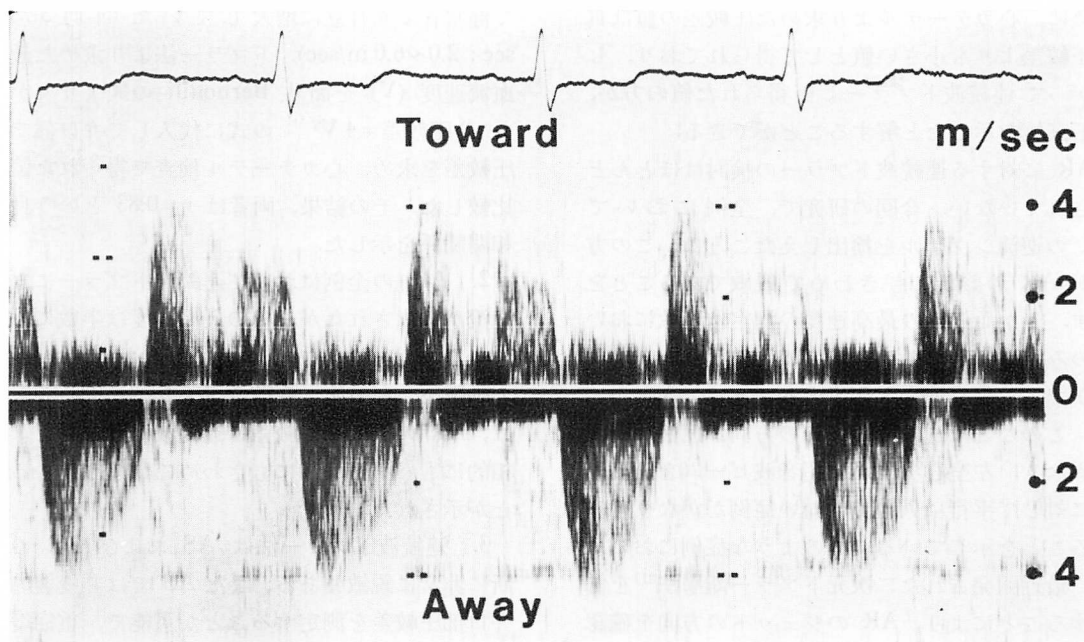


Fig. 8. Continuous wave Doppler echo from a patient with aortic stenosis and regurgitation with the transducer in the left ventricular apex.

Aortic jet in aortic stenosis is recorded below the zero line and its peak velocity is 4.4 m/sec. Aortic regurgitation is recorded above the zero line and its peak velocity is 4.0 m/sec.

のそれより長いことも両者の鑑別に役立つ。

連続波ドプラー法の大動脈弁疾患診断に対する有用性は、今までにいくつか報告されている¹⁴⁻¹⁶⁾。今回の研究では、ASの全例で血流速度が健常者に対して有意に増大しており、このことは連続波ドプラー法がASの診断に極めて鋭敏であることを示している。临床上、ASの鑑別が問題になることはよく遭遇するが、とくに高齢者における大動脈弁硬化症との鑑別は、従来の心エコー図や心音図を用いても困難な場合がある。連続波ドプラー法は狭窄と硬化を区別する点でも有用な方法と思われる。また純型ARの場合でも、容量負荷のために、相対的なASが出現するが、真のASとの鑑別は、相対的ASでは収縮期の血流速度は増加してもその程度は軽く、我々の経験では通常2 m/sec以下である。したがって連続波ドプラー法は、相対的ASと弁に器質的变化を

伴ったASとの鑑別にも有用と思われる。

ASの診断上、連続波ドプラーのもう一つの大きな利点はASの重症度を評価できる点である。すなわち連続波ドプラーより求めた血流の最高速度から簡易Bernoulliの式¹³⁾を用いて弁口部圧較差を容易に計算することができる。こうして得られた圧較差は、心カテーテル検査で得られた圧較差とよく相関している。今回の成績では連続波ドプラーから求めた値が、わずかながら心カテーテルから求めた値より高値を示しているが、本研究でのドプラーの計測が角度補正を0としてなされていることから、この結果は一見矛盾すると思われる。その理由は、心カテーテルから求めた圧較差が左室圧の最大値から大動脈圧の最大値を引いて測定されている点を考慮すると理解できる。すなわち、一般にASにおける大動脈圧の最大値の時相は、左室圧の最大値の時相より遅れる

ために, 心カテーテルより求めた圧較差の値は真の圧較差よりも小さい値として得られており, したがって連続波ドプラーより得られた値の方が, 若干高値を示したと解することができる.

AR に対する連続波ドプラーの検討はほとんどなされていない. 今回の研究で, 全例において AR の逆流シグナルを検出したことは, この方法が AR の診断にもきわめて鋭敏であることを示す. しかし逆流の最高速度の測定は半数においてのみ可能で, 残りの半数では, 逆流の存在は明らかでも, 最高速度を測定することはできなかった. このことは逆流ジェットの方法が症例によって異なり, 左室心尖部から超音波ビームを逆流方向に対して平行に入射できない症例がかなり存在することを示している. このような症例においては, 最近開発された二次元ドプラー断層法²¹⁾を併用することにより, AR のジェットの方法を確認し, ドプラー探触子の位置と方向を変えることにより, 最高速度の測定が可能となるかもしれない.

AR の重症度評価は逆流の拡がりの程度によってなされるが, 連続波ドプラーでは逆流の拡がりを評価することができない. しかし連続波ドプラーを AR の定量的評価に応用できる点は, 左室拡張期圧を推定できることである. すなわち, 逆流の最高速度から拡張期の大動弁圧較差を測定し, この値を拡張期血圧から差し引くことにより, 左室拡張期圧を非観血的に推定することができる. こうして AR による左室負荷の程度を評価することが可能であろう. しかし, この点に関しては今後の検討が必要である.

要 約

超音波連続波ドプラー法を用いて, 大動脈弁狭窄 (AS) 24 例, 大動脈閉鎖不全 (AR) 22 例の診断, ならびに弁口部圧較差の評価を行った. コントロールとして健常者 15 例を用い, 比較検討した.

1. AS の大動脈血流の最高速度は全例におい

て健常者より有意に増大していた (平均 3.7 m/sec: 2.0~6.0 m/sec). ドプラー法より求めた最高血流速度 (V) を簡易 Bernoulli の式より導かれた “圧較差 = $4V^2$ ” の式に代入して弁口部での圧較差を求め, 心カテーテル検査で得られた値と比較した. その結果, 両者は $r=0.83$ という良い相関関係を示した.

2. AR の全例において連続波ドプラーにより逆流が検出されたが, その最高速度は半数においてのみ測定可能であった (平均 3.8 ± 0.3 m/sec). 大動脈圧, 左室圧, 連続波ドプラーの同時記録では, AR の拡張期圧較差は連続波ドプラーと, 時相的にもパターンのにもきわめて類似していることが示された.

3. 連続波ドプラー法は AS および AR の診断に非常に鋭敏である. また AS では非侵襲的に弁口部圧較差を測定することが可能で, 重症度評価に有用である.

文 献

- 1) Gramiak R, Shah PM: Echocardiography of the normal and diseased aortic valve. *Radiology* 96: 1, 1972
- 2) Feizi O, Symons C, Yacoub M: Echocardiography of the aortic valve. Studies of normal aortic valve, aortic stenosis, aortic regurgitation, and mixed aortic valve disease. *Br Heart J* 36: 341, 1974
- 3) Chang S, Clemeuts S, Chang J: Aortic stenosis: Echocardiographic cusp separation and surgical description of aortic valve in 73 patients. *Am J Cardiol* 39: 499, 1977
- 4) Weyman AE, Feigenbaum H, Dillon JC, Chang S: Cross-sectional echocardiography in assessing the severity of valvular aortic stenosis. *Circulation* 52: 828, 1975
- 5) DeMaria AN, Bommer W, Joye J, Lee G, Bouteller J, Mason DT: Valve and limitations of cross-sectional echocardiography of the aortic valve in the diagnosis and quantification of valvular aortic stenosis. *Circulation* 62: 304, 1980
- 6) Winsberg F, Gavon GE, Hernberg JG, Weiss B: Fluttering of the mitral valve in aortic insufficiency. *Circulation* 41: 225, 1970
- 7) Cope GD, Kisslo JA, Johnson ML, Myers S:

- Diastolic vibration of the interventricular septum in aortic insufficiency. *Circulation* **51**: 589, 1975
- 8) Botvinik EH, Schiller NB, Wickramasekaran R, Klaunser SC, Gertz E: Echocardiographic demonstration of early mitral valve closure in severe aortic insufficiency: Its clinical implications. *Circulation* **51**: 836, 1975
 - 9) Gardin JM, Kaplan KJ, Meyers SN, Talano JV: Aortic stenosis: Can severity be reliably estimated noninvasively? *Chest* **77**: 130, 1980
 - 10) Hancock EW, Madison WM, Proctor MH: Aortic stenosis of no physiologic significance. *New Eng J Med* **258**: 305, 1958
 - 11) Finegan RE, Gianelly RE, Harrison DC: Aortic stenosis in the elderly: Relevance of age to diagnosis and treatment. *New Eng J Med* **281**: 1261, 1969
 - 12) Hollen J, Aaslid R, Candmark K, Simonsen S: Determination of pressure gradient in mitral stenosis with a noninvasive ultrasound Doppler technique. *Acta Med Scand* **199**: 455, 1976
 - 13) Hatle L, Brubakk A, Tromsdal A, Angelsen BA: Non-invasive assessment of pressure drop in mitral stenosis by Doppler ultrasound. *Br Heart J* **40**: 131, 1978
 - 14) Hatle, L, Angelsen BA, Tromsdal A: Non-invasive assessment of aortic stenosis by Doppler ultrasound. *Br Heart J* **43**: 284, 1980
 - 15) Stamm RB, Martin RP: Quantification of pressure gradients across stenotic valves by Doppler ultrasound. *J Am Coll Cardiol* **2**: 707, 1983
 - 16) Berger M, Berdoff RL, Gallerstein PE, Goldberg E: Evaluation of aortic stenosis by continuous wave Doppler ultrasound. *J Am Coll Cardiol* **3**: 150, 1984
 - 17) 鄭 忠和, 田中弘允, Vijayaraghavan G, Shah PM: 超音波連続波ドプラー法の各種弁膜疾患への応用. *日超医講演論文集* **43**: 631, 1983
 - 18) 鄭 忠和, 田中弘允, Shah PM: 弁膜疾患における連続波ドプラー法の有用性. *日超医講演論文集* **44**: 25, 1984
 - 19) 鄭 忠和, 木佐貫 彰, 有馬新一, 有川清猛, 尾辻 豊, 田中弘允: 超音波連続波ドプラー法による三尖弁閉鎖不全症における右室圧の定量的評価. *日超医講演論文集* **44**: 533, 1984
 - 20) Satomura S, Matsubara S, Yoshida M: A new method of mechanical vibration measurement and its application. *Memoirs Inst Scient and Indust Res Osaka Univ* **13**: 124, 1956
 - 21) 尾本良三, 横手祐二, 高本真一, 許 俊鋭, 朝野晴彦, 滑川孝六, 近藤祐司, 河西千広, 塚本盛陪, 小谷野 明: リアルタイム心腔内ドプラー血流映像法(ドプラー断層)——その開発と心臓外科領域における応用. *外科診療* **25**: 1005, 1983