

弁性肺動脈狭窄における血
流動態分析：超音波パルス・
ドプラー法による研究

Blood flow analysis with
pulsed echo Doppler
cardiography in valvular
pulmonary stenosis

岡本 光師
宮武 邦夫
木下 直和
松久茂久雄
仲宗根 出
永田 正毅
榊原 博
仁村 泰治

Mitsunori OKAMOTO
Kunio MIYATAKE
Naokazu KINOSHITA
Mokuo MATSUHISA
Izuru NAKASONE
Seiki NAGATA
Hiroshi SAKAKIBARA
Yasuharu NIMURA

Summary

Blood flows in the main pulmonary artery, right pulmonary artery and right ventricular outflow tract were analyzed in 11 cases of valvular pulmonary stenosis and 10 healthy subjects by pulsed echo Doppler cardiography (two-dimensional) with the parasternal and suprasternal approaches.

1) The systolic flow in the right pulmonary artery was detected in 7 cases of valvular pulmonary stenosis, in which the flow of both right and main pulmonary arteries was detected in only one case. The flows seemed to be turbulent. These abnormal signals were never detected in healthy subjects and considered to be caused by the narrowing of the pulmonic orifice.

2) Abnormal flow signals were also detected in the right ventricular outflow tract in patients of pulmonary stenosis. Their features were as follows:

(1) A systolic turbulent flow was detected in a case with severe hypertrophy of the wall and narrowing of the lumen of the right ventricular outflow tract.

(2) A/S ratio, which is a ratio of the peak velocity in atrial contraction (A) to the peak velocity in systole (S), was larger in cases with pulmonary stenosis than in healthy subjects ($p < 0.05$). It was considered that the atrial component in the right ventricular filling was augmented in pulmonary stenosis.

(3) The PEP/ET (pre-ejection period / ejection time) of the right ventricle was smaller in cases with pulmonary stenosis than in healthy subjects ($p < 0.05$). The ratio exhibited a reverse correlation with the pressure gradient between the right ventricle and pulmonary artery ($r = -0.74$, $p < 0.025$).

(4) Acceleration time index, a ratio of the time interval between the upstroke and the peak velocity of ejection flow to the ejection time, as a parameter indicating the time delay of the peak velocity exhibited a significant correlation with the pressure gradient between the right ventricle and pulmonary

国立循環器病センター
吹田市藤白台 5-125 (〒565)

National Cardiovascular Center, Fujishirodai, 5-125
Suita, Osaka 565

Presented at the 22nd Meeting of the Japanese Society of Cardiovascular Sound held in Tokyo, March 25-26, 1981
Received for publication August 7, 1981

artery ($r=0.67$, $p<0.05$).

(5) No correspondence was revealed between the time interval of Q-peak velocity in systole and that of Q-peak intensity of the murmur during systole. It was remained to be clarified.

Key words

Valvular pulmonary stenosis
interval

Two-dimensional pulsed echo Doppler cardiography

Systolic time

はじめに

近来, 超音波ドプラー法, 心血管造影法などにより, 心臓ないし主要血管内の血流状況を観察することが可能となってきた。血流の状況は流路の状況と不可分であり, その意味で流路の狭窄があれば, その前後の流れの状況も変わってくるはずである。本研究ではそのような予想のもとに, パルス・エコー・ドプラー法により肺動脈狭窄における肺動脈内および右室流出路内の血流を検討した。

対 象

対象は純型弁性肺動脈狭窄 7 例, 心房中隔欠損と合併するもの 4 例の計 11 例である。年齢は 20~44 歳(平均 40 歳)である。全例, 心カテーテル検査によって肺動脈と右室との圧較差を測定されている。

コントロールとして健常者 10 名についても検討した。

装置および方法

使用装置は超音波パルス・ドプラー血流計(日立メディコ製 EUD-4Z), およびリアル・タイム断層法に重畳させたエコー・ドプラー装置(東芝製プロトタイプ)である。前者の性能は既報のとおりであり¹⁾, その時間分解能は 6 msec である。後者は電子扇形走査型超音波断層装置にパルス・ドプラー機構を組み込んだシステムで, 共用一個のスキナーでリアル・タイムに断層心エコー図とドプラー・シグナルとが同時に得られる装置である²⁾。その超音波周波数は 2.4 MHz, パルス繰

り返し数は 4 KHz, または 6 KHz である。サンプルボリウムの大きさは方位方向 4×4 mm, 距離方向に 3 mm である。ドプラー・シグナルは高速フーリエ変換によって周波数分析され, リアル・タイムにスペクトルグラム表示され, M モード心エコー図, 心音図, 心電図と同時併列記録された。記録上, 振動子に向う流れは基線より上, 遠ざかる流れは下に表示された。紙送り速度は 50 mm/秒 とした。

被検者を安静仰臥位とし, 胸骨上窩からのアプローチにより右肺動脈内, 傍胸骨からのアプローチにより肺動脈主幹内ならびに右室流出路内の血流を呼気停止下で記録した。肺動脈内では, 肺動脈弁の狭窄によってもたらされる収縮期の血流の乱れの有無について検索した。また, 右室流出路中央部領域内で得られた流速波形からは以下のような計測を試みた(Fig. 1)。計測するための記録は日立製によった。

1) A/S: 心房収縮期の流速(A波)の増減を知る指標として, 駆出血流の流速波形(S波)のピークに対する比(A/S)を求めた。

2) 右室 PEP/ET: 右室前駆出期(PEP)は心電図 Q 波より駆出血流の立ち上がりまで, 右室駆出時間(ET)は駆出血流の開始時から終了時までとした。

3) AT/ET: 右室駆出期において駆出血流の立ち上がりから流速がピークに達するまでの時間 acceleration time(AT)の駆出時間(ET)に対する比を AT/ET (acceleration time index) とし, 時間経過からみたピーク流速の時相の遅れを表わす指標とした。

4) Q-peak velocity 時間ならびに Q-peak

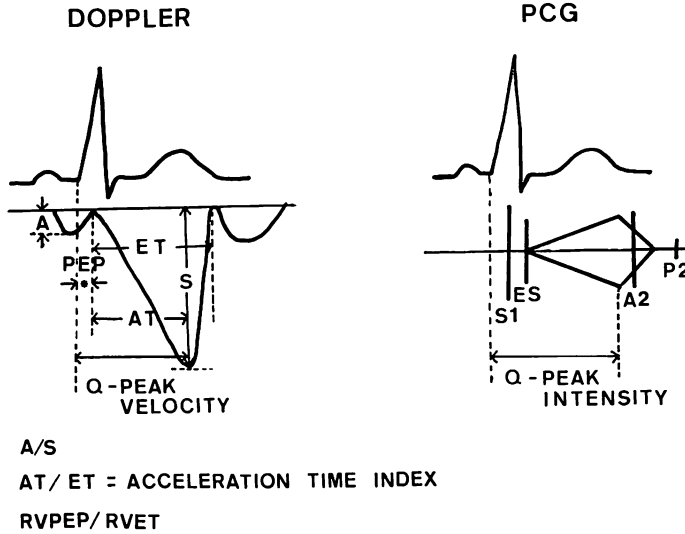


Fig. 1. Measurements on the flow velocity pattern in the right ventricular outflow tract and the phonocardiogram.

PEP=pre-ejection period; ET=ejection time; AT=acceleration time; ES=ejection sound.

intensity 時間：心電図 Q 波から駆出血流のピーク流速までの時間ならびに心電図 Q 波から収縮期雑音最強点における心音図の高音領域（東大第二内科方式のフィルター）で、雑音の振幅が最大となるまでの時間（同順）をそれぞれ測定し、流速と心雑音の様相との関係を検討した。

成 績

1. 肺動脈内血流パターン

A) 健常者

胸骨上窩からのアプローチにて、健常者の右肺動脈内では、収縮期に振動子から遠ざかる方向の周波数帯域の幅の狭い流れが検出された (Fig. 2 上段)。時に、拡張早期にわずかな逆方向の血流が見られた。また、それに続いて順方向のごく遅い流れが見られることもあった。

傍胸骨領域からのアプローチによれば、肺動脈主幹内では、収縮期に振動子が遠ざかる方向の周波数帯域の幅の狭い流れが認められるが、既報のごとく³⁾領域によりパターンに多少の相異がみられた。

B) 肺動脈狭窄

肺動脈狭窄の右肺動脈内の血流シグナルは胸骨上窩からアプローチを行うことにより、11 例中 7 例で記録された。これらは主として収縮期のみ認められ、両方向成分を有するシグナルであり、このことは血流の乱れを示すものと考えられた (Fig. 2 下段)。他の 4 例では血流は捕捉されなかった。

傍胸骨領域よりのアプローチでは、肺動脈主幹内血流は、心房中隔欠損を合併した 1 例で捕捉されたのみであり、なおこれも乱流であった。

2. 右室流出路内血流パターン

A) 健常者

駆出期には振動子から遠ざかる方向の成分のみならず、周波数帯域の狭いドーム型の血流パターンが見られた (Fig. 3 上段)。そのピーク流速は収縮中期にあった。また、拡張早期および心房収縮期には振動子から遠ざかる方向の遅い流れも認められた。

B) 肺動脈狭窄

11 例中 10 例で駆出血流のピーク流速は健常者

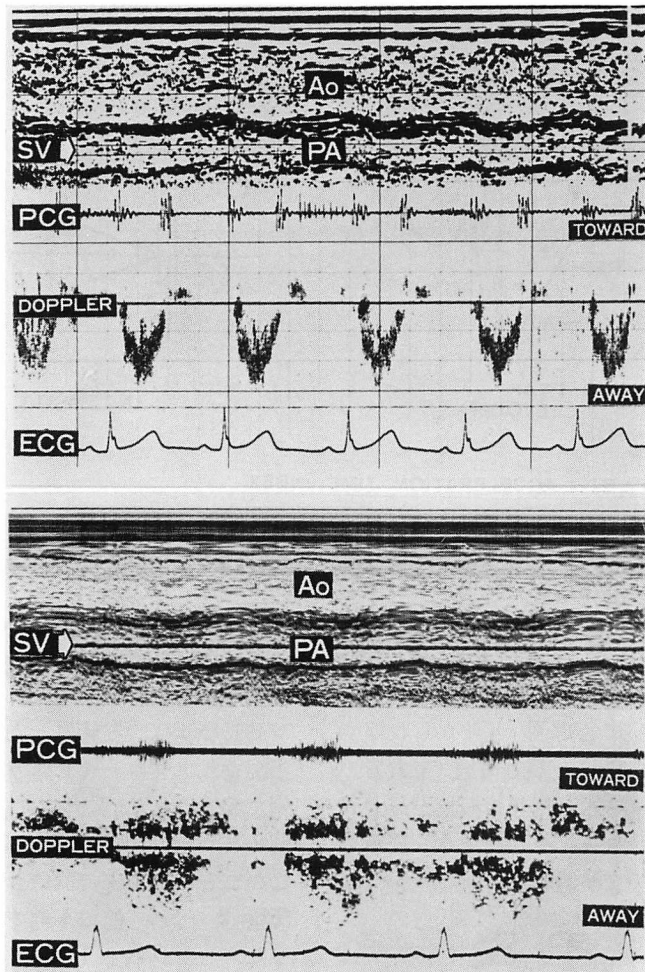


Fig. 2. Blood flow patterns in the right pulmonary artery from the suprasternal approach.

A healthy subject on the top and a patient with pulmonary stenosis on the bottom.

Ao=aorta; PA=pulmonary artery; SV=site of sampling volume. Turbulent flow signals are detected in a patient with pulmonary stenosis (M.Y., a 28 year-old-woman).

のそれよりも時間的に遅延を示し、収縮期の後半にあった (Fig. 3 下段)。また、流速成分のうち心房収縮期の振動子から遠ざかる成分が全般的に増大している傾向が見られた。

しかし、残りの1例では収縮期に乱れた血流シグナルが見られた (Fig. 4)。この症例では、断層心エコー図ならびに右室造影によって右室流出路壁の著明な肥厚が見られた。この例は以下の計測

では除外されている。

3. 肺動脈狭窄における右室流出路血流パターンからの各種計測

1) A/S 比

A/S 比は健常者では 0.24 ± 0.04 (平均 \pm 標準偏差)、肺動脈狭窄では 0.30 ± 0.07 であり、両者の差は統計的に有意であったが、画然と分かれたものではなかった (Fig. 5)。

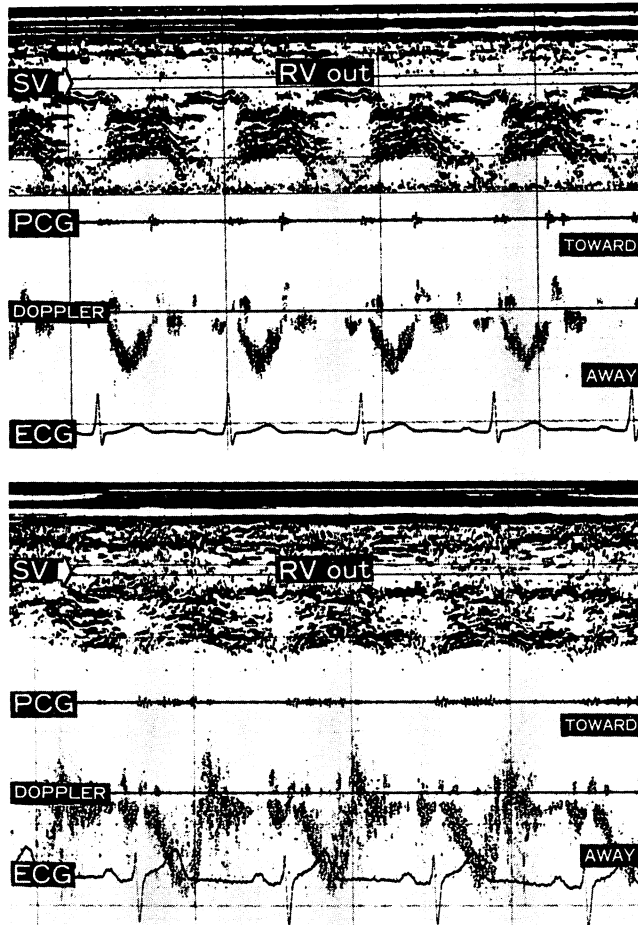


Fig. 3. Blood flow patterns in the right ventricular outflow tract.

A healthy subject on the top and a patient with pulmonary stenosis on the bottom.

RV out=right ventricular outflow tract. In a patient with pulmonary stenosis, the A wave in atrial contraction is prominent and the peak velocity is relatively delayed during systole (K.K., a 43 year-old-man).

2) 右室 PEP/ET と右室・肺動脈間圧比較との関係

右室 PEP/ET は健常者では 0.31 ± 0.02 (平均±標準偏差), 肺動脈狭窄では 0.22 ± 0.10 であり, 肺動脈狭窄で有意に低値を示した ($p < 0.05$).

また, 右室 PEP/ET と右室・肺動脈間圧較差とは, 粗ではあるが有意な負の相関を示した ($y = -175x + 104$, $x = \text{PEP/ET}$, y は右室・肺動脈間圧較差, $r = -0.74$, $p < 0.025$) (Fig. 6).

3) Acceleration time index と右室・肺動脈間圧較差との関係

健常者における acceleration time index は 46.1 ± 3.2 (平均±標準偏差) であった. このことは駆出血流のピーク流速がほぼ収縮中期にあることを示す. 一方, 肺動脈狭窄の acceleration time index は $68.0 \pm 5.7\%$ で, 健常者よりも有意に大であった ($p < 0.01$). すなわち, 肺動脈狭窄では, 駆出血流のピーク流速が時間経過からみて健常者

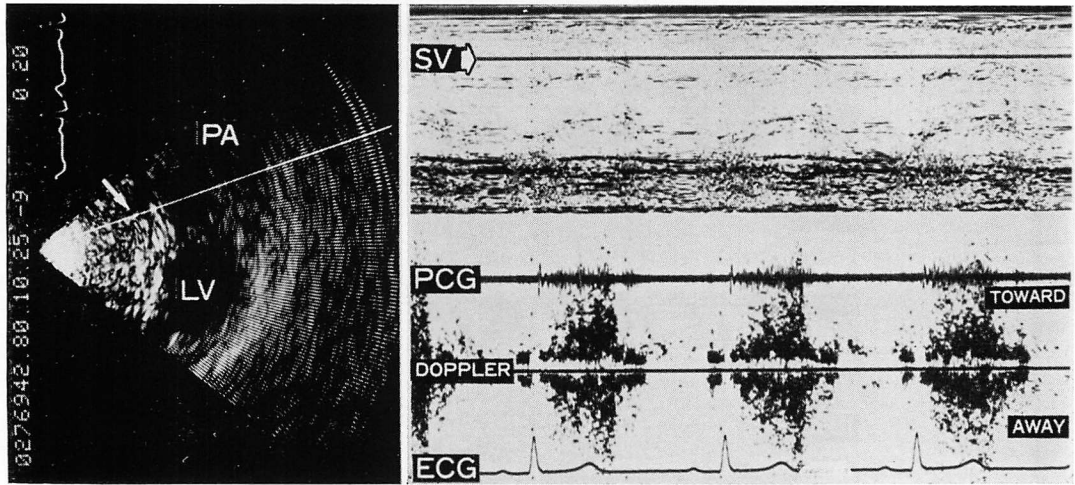


Fig. 4. A blood flow pattern in the right ventricular outflow tract in a case with severe right ventricular hypertrophy.

It looks like turbulent (M.O., a 38 year-old-woman).

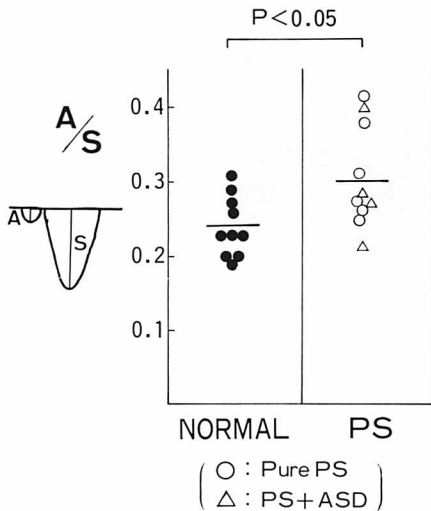


Fig. 5. Comparison of normal subjects and patients pulmonary stenosis in A/S ratio.

The ratio is significantly higher in with pulmonary stenosis than in healthy subjects.

よりも遅延していた。

また, acceleration time index と右室・肺動脈間圧較差とは有意な正相関を示し, 右室・肺動脈

間圧較差が大きくなるほど, ピーク流速は収縮後期に移行する傾向があった ($y=2.65x-115$, x = acceleration time index, y は右室・肺動脈間圧較差, $r=0.67$, $p<0.05$) (Fig. 7).

4) 右室流出路血流速度と心雑音との関係

肺動脈狭窄 11 例中 6 例において, 収縮期雑音が最強となる時相が明確に収縮後期であった (Fig. 8). 残りのそれはほぼ収縮中期ないしやや前期であった。

心電図 Q 波から駆出血流のピーク流速までの時間と, 心電図 Q 波から収縮期心雑音の振幅が最大となるまでの時間との間には有意な相関は得られなかった (Fig. 9).

考 案

1. 肺動脈内血流分析とその意義および問題点

一般に液体の流れでは, 流路狭窄の末梢側に種々の流れの乱れが生じることが知られている. 今回の検討では肺動脈狭窄の肺動脈主幹内で 11 例中 1 例, 右肺動脈内では 7 例に, 収縮期に乱れた流れと解される異常ドプラー・シグナルが検出された. 肺動脈基部は解剖学的に超音波検査にとつ

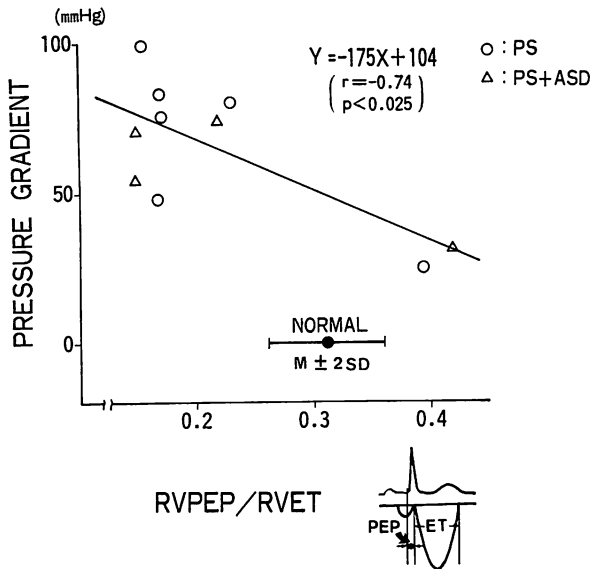


Fig. 6. The PEP/ET of the right ventricle is inversely correlated with the pressure gradient between the right ventricle and pulmonary artery.

て制約があり、かつ装置の分解能の点からも、狭窄後の流れの剝離、渦流などの詳細を指摘することはできない。しかし、上述の乱れた血流は肺動脈狭窄に由来したものと考えてよからう。

Goldberg ら⁴⁾は、M モードを血流サンプル部位のモニターとするパルス・ドプラー法によって、小児の肺動脈狭窄について検討している。彼らの装置は time interval histogram 表示によるものである。彼らは、これより肺動脈主幹内ないし右肺動脈内に乱流を検出したとしている。今回の検討は血流サンプルの位置モニターを確実にするため断層心エコー図を用い、かつ、成人例を対象にしたものである。また、ドプラー出力は高速フーリエ変換によってスペクトログラム表示されている。これらの条件の差異はあるが、いずれにせよ、今回の装置のほうが確実に出力を理解しやすく、肺動脈狭窄では肺動脈主幹ないし右肺動脈内に血流の乱れがあることは確実に考えられる。

パルス・ドプラー法による肺動脈内血流分析は、

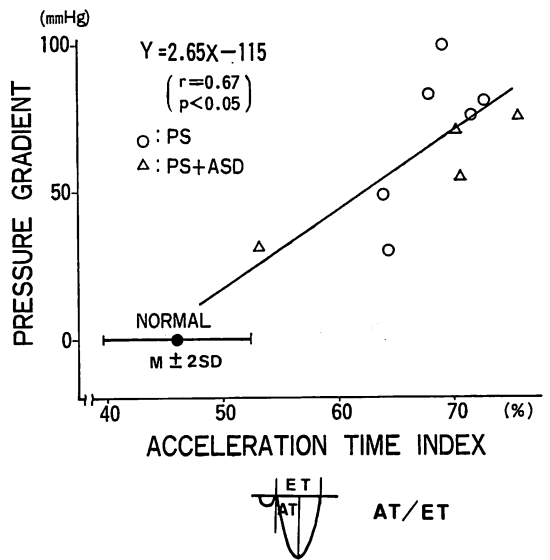


Fig. 7. Correlation between the acceleration time index and the pressure gradient.

すでに肺高血圧³⁾、特発性肺動脈拡張症⁵⁾、動脈管開存症^{6,7)}等で行われている。しかし、肺高血圧や特発性肺動脈拡張症の肺動脈主幹内では収縮末期から拡張早期にかけて左前方より右後方に旋回するような異常血流が得られるが^{3,5)}、肺動脈狭窄で見られたようなきわめて乱れの強い流れではない。また、動脈管開存症の肺動脈主幹内から右肺動脈内では、連続性に乱れた血流シグナルが得られ、肺動脈狭窄の乱流とは検出時相を異にする。以上のように肺動脈内の収縮期乱流は、それが検出されれば肺動脈狭窄に比較的特異的な所見といえよう。しかし、私達の対象が成人であったためか、胸骨上窩からのアプローチによる右肺動脈が描出し難い場合や、描出されても振動子から遠いためか血流シグナルの得られない場合もあった。肺動脈主幹内の異常血流も検出し難く、これらは超音波検査そのものとしての本質的な問題といえよう。

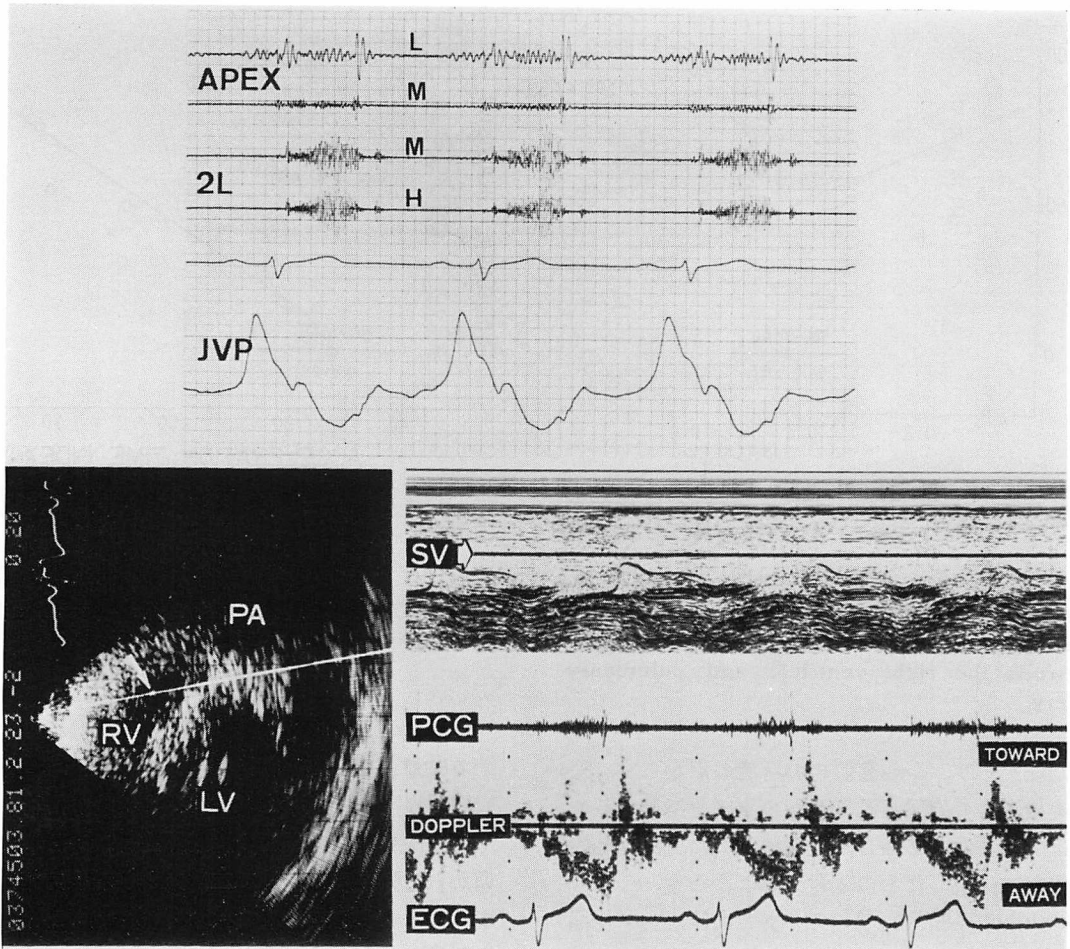


Fig. 8. The peak velocity during systole and the peak intensity of an ejection murmur exist (both) in late systole in a case of pulmonary stenosis (Y.N., a 43 year-old-man).

2. 右室流出路血流パターンおよびそれからの計測の意義と問題点

肺動脈狭窄では右室流出路にも流れの異常が認められた。その要点は波形からの計測値から論じることができる。なお、1例では右室流出路でも乱れたシグナルが検出され、これは乱流に加えて壁の振動をも捕捉したシグナルの可能性が有る。いずれにしても、この例では右室流出路の壁肥厚が著明であり、流出路自体がすでに狭窄の局所として作用していたものと思われる。

まず、A/S 比は肺動脈狭窄で有意に増大した。

このさい、A/S 比の検討は主として A 波の増減を知る目的で行ったものである。というのは、A 波の絶対値を知るためには超音波ビームと血流の方向とのなす角度を知る必要があるが、右室流出路は彎曲しているので、ここで流路とビームとの角度を正確に知ることは不可能に近い。そこで、流速の絶対値を求めることは避け、便宜上、A/S 比という拡張期の現象と収縮期の現象との対比をパラメータの1つとした。この比が増大したことは、A 波の増大ないしは S 波の減少を意味する。ところで、肺動脈狭窄では多少なりとも右室

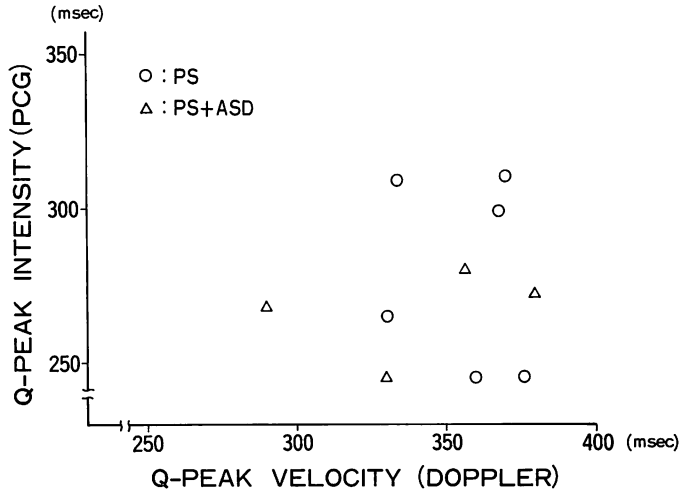


Fig. 9. Relationship between Q-peak velocity interval and Q-peak intensity interval of a systolic murmur.

No significant correlation is found between them.

流出路は肥厚狭小化するため S 波は増大すると考えられる。実際の記録上の S 波も、正常の場合に比し同程度ないしやや増大傾向にあり、A/S 比の増大は A 波が増大したことによると思われる。すでに左室流出路の血流状況⁹⁾で知られているように、拡張期の流入は心尖方向へ向った後、反転して流出路方向に向う。このことが右室流出路でも当てはまるとすれば、A 波の増大はとりもなおさず心房収縮期の右室への流入が増強しており、これが右室流出路に反映された結果を示すものと思われる。

次に、右室の収縮期心時相分析結果について考察する。それに先立って今回の値は、パルス・ドプラー法によっていること自体を吟味しておく必要がある。今回の健常者における PEP/ET は、M モード心エコー図による値⁹⁾ 0.24 ± 0.036 (平均±標準偏差)、弁ドプラー法による値¹⁰⁾ 0.27 ± 0.027 より多少長かった。これらの差は、なお症例数が少ないので決定的な結論には慎重を要するが、M モード心エコー図では肺動脈後尖の閉鎖点が必ずしも明瞭ではないこと、駆出血流パターンの開始点、終了点と弁ドプラーでの P_o , P_c ¹⁰⁾

との相的なずれ、パルス・ドプラー法の時間分解能 (6 msec) などが変動因子として考えられる。しかし、今回そのうちの因子が重要であるかは指摘できない。

さて、肺動脈狭窄では、PEP/ET が健常者のそれに比し減少傾向を示した。この結果は弁ドプラー法での成績¹⁰⁾と軌を一にした。肺動脈狭窄において PEP/ET を減少に向わせる因子としては、まず、収縮期の肺動脈圧が右室圧よりも低いため、収縮初期にはより早く右室圧が肺動脈圧を上回り、収縮末期にはより遅くまで右室圧は肺動脈圧より低くならないことがあげられる。このことにより、PEP は短縮し、ET は延長すると思われる。また、弁の狭窄自体の抵抗増加も ET を延長させると考えられる。加えて、Gleason ら¹¹⁾が述べているごとく、右室の圧・容量負荷時には右室 peak dp/dt が増加するとすると、これは PEP を短縮させる因子として作用する。実際のデータからみても ET は延長、PEP は短縮傾向にあり、この両者から PEP/ET は減少したと思われる。

次に、肺動脈狭窄における右室流出路内駆出血流のピーク流速は、健常者のそれよりも時間経過

からみて遅延を示した。この遅延の程度は、右室・肺動脈間圧較差との間に正の相関を示した。肺動脈狭窄では、右室と肺動脈間の圧較差の最大幅が収縮後期にあり、また右室圧の頂点が収縮後期にある¹²⁾とされているが、ピーク流速の遅れはこれらを直接反映している可能性がある。私達も一部の症例で圧較差波形を検討し、この傾向を示す症例もあった。また、Gamboaらは肥厚した心筋ではLaplaceの法則から収縮後期に強い力を生ずる¹³⁾としており、このことも別の側面から見た1つの要因と考えられる。

心雑音が収縮後期に増大することも、上述のごとく流速が収縮後期に増加するためと予想¹³⁾されていた。今回の検討では、必ずしも流速のピークと雑音の最強となる時相との間に相関は見られなかった。しかし、雑音の成因には流速以外の要因も多数あり、心雑音と流速の関係にはそれらを考慮して、さらに今後の検討を要しよう。

パルス・ドプラーの装置はまだ開発途上にあり、現在の装置から得られた波形から諸種の測定をする場合、測定誤差¹⁴⁾、時間分解能等の制約がある。しかし、今回示されたように、弁性肺動脈狭窄によって、狭窄の末梢側である肺動脈内はもとより、近位側である右室流出路にも血流異常を呈することは明白である。今後、装置の改良により、さらに広い臨床応用が期待される。

要 約

断層エコー・ドプラー法により、弁性肺動脈狭窄11例を対象にし、肺動脈主幹、右肺動脈および右室流出路内の血流分析を試みた。

対照として健常者10名も検討した。

1) 肺動脈狭窄11例中、右肺動脈内の収縮期血流は7例で、肺動脈主幹内のそれは1例のみで記録された。それらは健常者には見られない乱流であった。この異常血流の様相は、肺動脈狭窄に比較的特異的と考えられた。

2) 肺動脈狭窄では、右室流出路にも異常血流が認められた。

① 1例に右室流出路でも乱流が検出され、この例は右室流出路壁の肥厚、内腔の狭窄がみられた。

② 心房収縮期の波高(A波)の駆出期のピーク流速(S波)に対するA/S比は、肺動脈狭窄では健常者よりも有意に高値を示した($p < 0.05$)。このことは、右室への拡張期流入において心房収縮の役割増大を意味するものと考えられた。

③ 右室のPEP/ETは、肺動脈狭窄では健常者より減少を示した($p < 0.05$)。また、この値と右室・肺動脈間圧較差とは有意な負の相関を示した($r = -0.74, p < 0.025$)。

④ 肺動脈狭窄の駆出血流のピーク流速は、健常者よりも時間的にみて遅れを示した($p < 0.01$)。ピーク流速の遅延度を表わすacceleration time indexは、右室・肺動脈間圧較差との間に正の相関を示した($r = 0.67, p < 0.05$)。

⑤ 駆出血流のピーク流速の時相と、収縮期心雑音が最強となる時相との間には有意な相関は得られなかった。この関係は今後なお検討の必要がある。

この研究の一部は、昭和55,56年度厚生省循環器病研究委託費(肺高血圧並びに右心障害の診断の体系化に関する研究)並びに昭和56年度厚生科学研究費補助金によったことを付記する。

文 献

- 1) 宮武邦夫, 木下直和, 永田正毅, 榊原 博, 仁村泰治: 僧帽弁閉鎖不全における逆流の超音波パルス・ドプラー法・断層法併用による検討. *J Cardiology* 9: 241-249, 1979
- 2) 瀬尾育式, 小松研一, 飯沼一浩, 佐藤 茂: セクタ電子走査法による実時間断層像とドプラー信号の同時表示. *日超医論文集* 35: 92-93, 1979
- 3) 岡本光師, 宮武邦夫, 木下直和, 榊原 博, 仁村泰治: 超音波パルス・ドプラー法による肺動脈血流の分析. *日本内科学会誌* 70: 28-36, 1981
- 4) Goldberg SG, Areias JC, Spitaels SEC, De Villedeneuve VH: Echo Doppler detection of pulmonary stenosis by time-interval-histogram analysis. *J Clin Ultrasound* 7: 183-189, 1979
- 5) 岡本光師, 宮武邦夫, 木下直和, 永田正毅, 別府慎

- 太郎, 朴 永大, 三神大世, 榑原 博, 仁村泰治: 特発性肺動脈拡張症における右室流出路および肺動脈内での異常血流. 日超医講演論文集 **38**: 49-50, 1981
- 6) Stevenson JG, Kawabori I, Guntheroth WG: Non-invasive detection of pulmonary hypertension in patent ductus arteriosus by pulsed Doppler echocardiography. *Circulation* **60**: 355-359, 1979
- 7) 岡本光師, 宮武邦夫, 木下直和, 三神大世, 永田正毅, 榑原 博, 仁村泰治: 超音波パルス・ドプラ法による動脈管開存症の短絡血流の検出. 日超医講演論文集 **37**: 33-34, 1980
- 8) Nimura Y, Matsuo H, Kitabatake A, Hayashi T, Aso M, Terao Y, Senda S, Sakakibara H, Abe H: Studies on the intracardiac blood flow with a combined use of the ultrasonic pulsed Doppler technique and two-dimensional echocardiography from a transcutaneous approach. *in* *Ultrasound in Medicine* (White D & Brown RE ed.), Plenum Publishing Co., New York, 1977, p 1279-1289
- 9) Hirschfeld S, Meyer R, Schwartz DC, Korfhagen J, Kaplan S: The echocardiographic assessment of pulmonary artery pressure and pulmonary vascular resistance. *Circulation* **52**: 642-650, 1975
- 10) 津田定成: 非侵襲的右室心時相分析による右心血行動態解析に関する研究. *Jpn Circulat J* **42**: 1373-1384, 1978
- 11) Gleason WL, Braunwald E: Studies on the first derivative of the ventricular pressure pulse in man. *J Clin Invest* **41**: 80-91, 1962
- 12) Kjellberg SR, Manheimer E, Rudhe V, Jonsson B: *Diagnosis of Congenital Heart Disease*. Chicago, The Year Book Publisher Inc, 1955
- 13) Gamboa R, Hugenholtz PG, Nadas AS: Accuracy of the phonocardiogram in assessing severity of aortic and pulmonic stenosis. *Circulation* **30**: 35-46, 1964
- 14) 松田光生, 杉下靖郎, 山口 徹, 田村 勤, 東郷利人, 飯田啓治, 伊藤 巖: 超音波パルス・ドプラ血流計による左室拡張期血流波型の検討. 日超医講演論文集 **38**: 37-38, 1981