

肺高血圧症における主肺動脈の収縮期反転流の成因について：超音波パルス・ドプラー法による検討

Hemodynamic determinants of late systolic reversed flow in the main pulmonary artery in pulmonary hypertension: A pulsed Doppler echocardiographic study

小泉 克己
遠田 栄一
樫田 光夫
磯部 光章
桑子 賢司
梅田 徹
町井 潔

Katsumi KOIZUMI
Eiichi TOHDA
Mitsuo KASHIDA
Mitsuaki ISOBE
Kenji KUWAKO
Toru UMEDA
Kiyoshi MACHII

Summary

Pulsed Doppler echocardiograms of the main pulmonary artery were evaluated in 46 cases including 23 cases with valvular heart disease, 13 with an intracardiac shunt, two with severe right ventricular failure and low cardiac output state, and eight healthy normals.

In each Doppler echocardiogram the sample volume was placed at well defined nine locations within the main pulmonary artery.

Among 23 cases with valvular heart disease, 10 cases with pulmonary hypertension showed a late systolic reversed flow ("rebound" pattern: type B) in all nine sample volumes examined. This pattern was neither detected in any cases with normal pulmonary arterial pressure, cases with an intracardiac shunt, cases with low cardiac output state, nor healthy normals.

A comparative study of 10 cases with "rebound" pattern (type B) and 13 cases without it disclosed that the former had a significantly increased pulmonary arterial pressure (30.9 ± 15.1 mmHg vs 17.8 ± 9.0 mmHg, $p < 0.001$), an increased total pulmonary resistance (789 ± 496 dynes·cm·sec⁻⁵ vs 285 ± 170 dynes·cm·sec⁻⁵, $p < 0.001$) and a decreased pulmonary arterial compliance expressed as stroke volume divided by pulmonary arterial pulse pressure (1.75 ± 0.94 ml/mmHg vs 3.80 ± 1.65 ml/mmHg, $p < 0.01$). Mean acceleration of the pulmonary ejection expressed as peak flow velocity divided by acceleration period was also significantly larger in cases with "rebound" pattern (type B) than in cases with "normal" pattern (938 ± 255 cm·sec² vs 675 ± 160 cm·sec², $p < 0.01$).

三井記念病院 循環器センター
東京都千代田区神田和泉町1 (〒101)

Center for Cardiovascular Disease, Mitsui Memorial
Hospital, Kanda Izumi-cho 1, Chiyoda-ku, Tokyo 101

Received for publication October 20, 1983 (Ref. No. 24-42)

In conclusion, “rebound” pattern (type B) in pulmonary hypertension is not simple swirl formation, but a totally reversed late systolic flow in the main pulmonary artery, which is caused by sudden interruption of the distal run-off due to markedly elevated total pulmonary resistance under normal right ventricular ejection.

Key words

Doppler echocardiogram

Rebound pattern

Pulmonary hypertension

“Windkessel” model

緒 言

各種心疾患に伴う肺高血圧症の非観血的評価法として、従来、Mモード心エコー図上の“a” dipの消失、e-f slopeの平坦化、systolic notchingの出現等が認められており¹⁻⁷⁾、電磁流量計による血行動態の検討も行われている⁸⁾。しかし、右心不全合併による“a” dipの消失、記録ビーム入射位置によるe-f slopeの変動⁷⁾、systolic notchingの検出頻度が必ずしも高くないことなどから、いずれも心カテテル法による諸計測値と十分な相関を持つには至らなかった。

一方、心腔内血流動態を可視化する方法として、コントラスト・心エコー法が左右短絡疾患や三尖弁閉鎖不全症等の診断に用いられるようになった^{9,10)}。我々は同法を断層心エコー図と併用し、肺高血圧症例で収縮後期反転血流を持つものがあることを認め、心カテテル法による諸計測値との比較から、反転流が著明な肺高血圧および高肺血管抵抗に関係していると報告した^{11,12)}。しかし、一方、肺動脈圧の低い主肺動脈拡張症例でも反転流の混入する症例があり、記録部位を精密に規定し難い本法では、その差異を十分明らかにすることができなかった。

その後、近年にいたって超音波パルス・ドプラー血流計¹³⁻¹⁷⁾と断層図との複合装置が開発され¹⁸⁾、逆流疾患の部位、重症度判定¹⁹⁾や、左右短絡疾患の部位診断²⁰⁾などに用いられるようになった。主肺動脈血行動態についても、肺高血圧症例で収縮中期の血流減少によるW型パターンや、収縮後期の反転流が報告され、拡張した主肺動脈内の渦流形成がその成因としてあげられている²¹⁻²⁵⁾。

今回、われわれは、上述した同複合装置を用い、主肺動脈内のmappingによって反転流をさらに詳細に検討し、肺高血圧症における反転流の発生機序が渦流形成によらない場合のあることを認め、その成因を血行動態との関連について考察したので報告する。

対 象

対象は正常者8例を含む46例である。このうち心カテテル検査を施行した症例は、Table 1に示すように、男子16例、女子20例で、その平均年齢は38.9歳(5歳~64歳)である。このうち23例は後天性弁膜疾患で、僧帽弁膜症8例、大動脈弁膜症3例、僧帽弁および大動脈弁の両者、もしくはそれに三尖弁病変を合併する連合弁膜症12例で、これらはリウマチ性および非リウマチ性の両者を含んでいる。また、他の13例は先天性左右短絡疾患で、心房中隔欠損症9例、心室中隔欠損症4例である。またこの他に、後述する右心不全2例を特殊症例として含めた。

なお、Table 1ではこれらの36症例をさらに主肺動脈圧により分類してある。肺動脈収縮期圧が35 mmHgより小、かつ拡張期圧が10 mmHg以下で、平均肺動脈圧が20 mmHg以下のものをnormal群とした。また収縮期圧が40 mmHg以上、または拡張期圧が20 mmHg以上、または平均肺動脈圧が25 mmHg以上のものをmarked PH群とした。両群の中間値を示すものか mild PH群である。Table 1に示すように、弁膜症群、左右短絡疾患群ともに、その肺動脈圧値は、正常値のものから著明に上昇しているものまで、各段階のものを含んでいる。

Table 1. Clinical data of subjects

	Normal	Mild PH	Marked PH	Total
Valvular diseases	8	8	7	23
Mitral	3	2	3	8
Aortic	1	2	0	3
Combined	4	4	4	12
Intracardiac shunt	3	4	6	13
ASD	2	3	4	9
VSD	1	1	2	4
Total	11	12	13	36 cases

Total 36 cases are categorized as three groups according to the pulmonary artery pressure (PAP). Cases with systolic PAP < 35 mmHg, diastolic PAP \leq 10 mmHg, and mean PAP \leq 20 mmHg are regarded as "normal" group. Cases with systolic PAP \geq 40 mmHg, or diastolic PAP \geq 20 mmHg, or mean PAP \geq 25 mmHg are regarded as "marked PH" group. The other cases are grouped as "mild PH".

Abbreviation: PH=pulmonary hypertension.

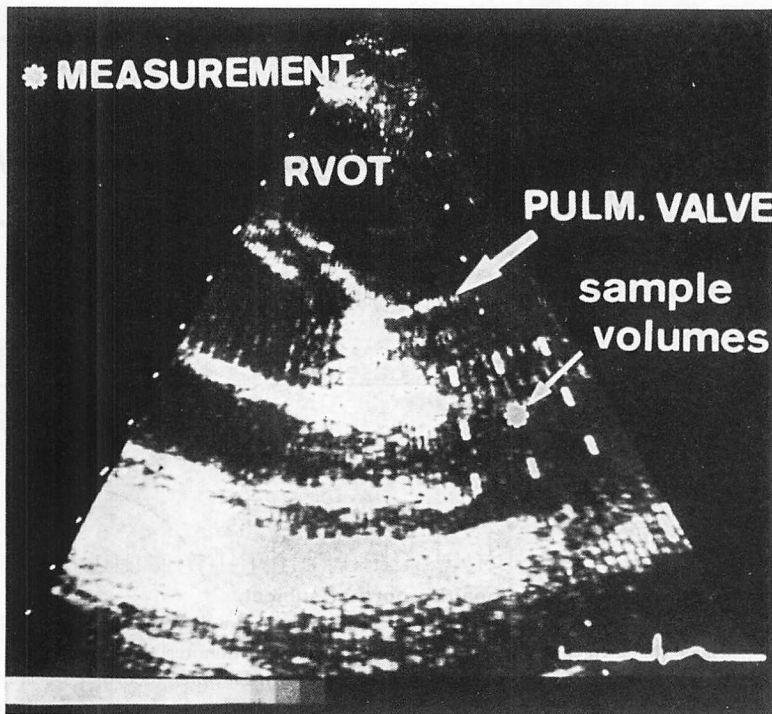


Fig. 1. Sample volumes for Doppler measurements.

Sample volumes (nine points) for Doppler measurement are located between 1 to 3 cm distal from the pulmonic valve in the medial, mid and lateral parts of the main pulmonary artery (MPA).

装置と方法

使用装置は東芝製 SSH-11 A 超音波断層装置と SDS-10 A パルス・ドプラー血流計, または同社製 SSH-40 A 超音波断層装置と SDS-21 A パルス・ドプラー血流計の複合システムで, 発振周波数は 2.4 MHz, パルス繰返し数は 6 KHz, 周波数分析は高速フーリエ変換方式である. サンプル・ボリュームは横方向 3×3 mm, 深さ方向 2 mm および 3 mm のものを使用した. Fig. 1 のごとく, 実時間断層図上で超音波ビーム方向およびサ

ンプル部位を決定後, ドプラー血流信号単独に切りかえ, strip chart recorder 上に, 心電図, 心音図とともに, 紙送り速度 10 cm/sec で記録した.

記録方法: セクター電子走査用プローブを第 3 または第 4 肋間胸骨左縁に置き, 肺動脈主幹部の最大径付近の内腔を可能な限り十分な奥行をもって記録しうる断層面を設定しておき, ついでドプラービームを肺動脈主幹部の中央と外側縁および内側縁の 3 方向に向け, 各方向とも弁口から 1~3 cm 末梢側まで, 約 1 cm ごとに, 計 9 点の mapping を行った. なお各症例とも記録前後一カ

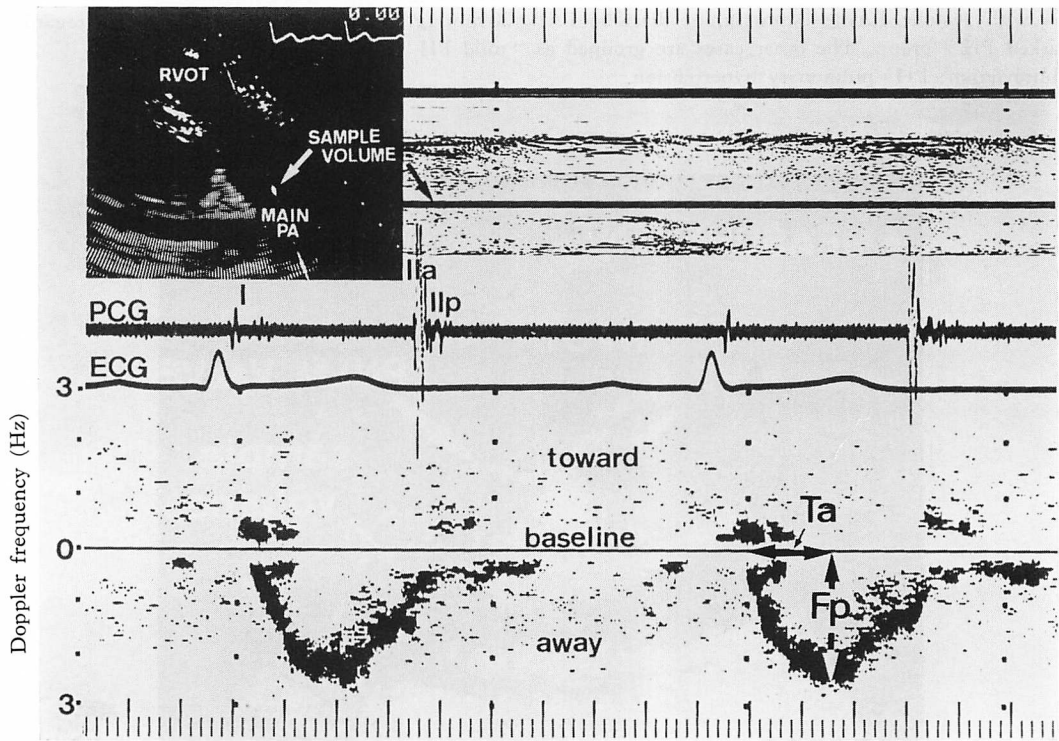


Fig. 2. Doppler flow pattern in a healthy normal subject.

In this record, upper deflection of the Doppler signal from the baseline denotes a blood flow toward the transducer (backward flow), and downward deflection denotes the blood flow away from the transducer (forward flow). The frequency shift of 1 KHz in Doppler records corresponds to the blood flow velocity of 32 cm/sec along the direction of the Doppler beam. In normal subject, systolic pulmonary flow in the center axis is always forward, and velocity of the flow gradually increases and decreases. The peak of the systolic velocity curve is situated in mid-systole. A narrow frequency spectrum of the flow signal is a laminar flow.

Abbreviation: Ta=time interval between the onset and the peak of systolic flow; Fp=peak flow velocity in systole within the main pulmonary artery (MAIN PA).

月以内に右心カテーテル検査を行い Fick 法により肺血流量その他を求めた。

成 績

1. 主肺動脈ドプラー血流波形および計測項目

Fig. 2 は正常成人男子の主肺動脈ドプラー血流波形である。ドプラー波形は基線より上方向が逆方向流 (toward), 下方向が順方向流 (away) をあらわす。また図中の点であらわす calibration は隣り合う各点間が 1 KHz (ビーム方向が血流方向に一致し、体温 37°C のとき、約 32 cm/sec の血流速度に相当する) である。この図に示すように、順方向流の最大値 (Fp), 順方向流の立ち上がり点から peak までの立ち上がり時間 (加速時間:

Ta), および順方向流の立ち上がり点から心音図の第 2 音肺動脈弁成分までの駆出時間 (RVET) 等を計測した。Figs. 2 & 3 に示すように、正常肺動脈圧例のドプラー波形は丸味を帯びた三角波であり、駆出期を通じて narrow frequency band である。

Fig. 4. は主肺動脈圧 52/30 (平均 38 mmHg) の肺高血圧症を伴った僧帽弁狭窄症の 1 例で、肺動脈主幹部の中央で、弁下約 2 cm における記録である。Fig. 2 に比し、その血流波形は peak に達するまでの加速時間が短かく、また収縮期後半には順方向流が wide frequency band となり、かつ著減し、逆に肺動脈弁方向に向かう反転血流 (逆方向流) が明らかに優勢となっている。これは

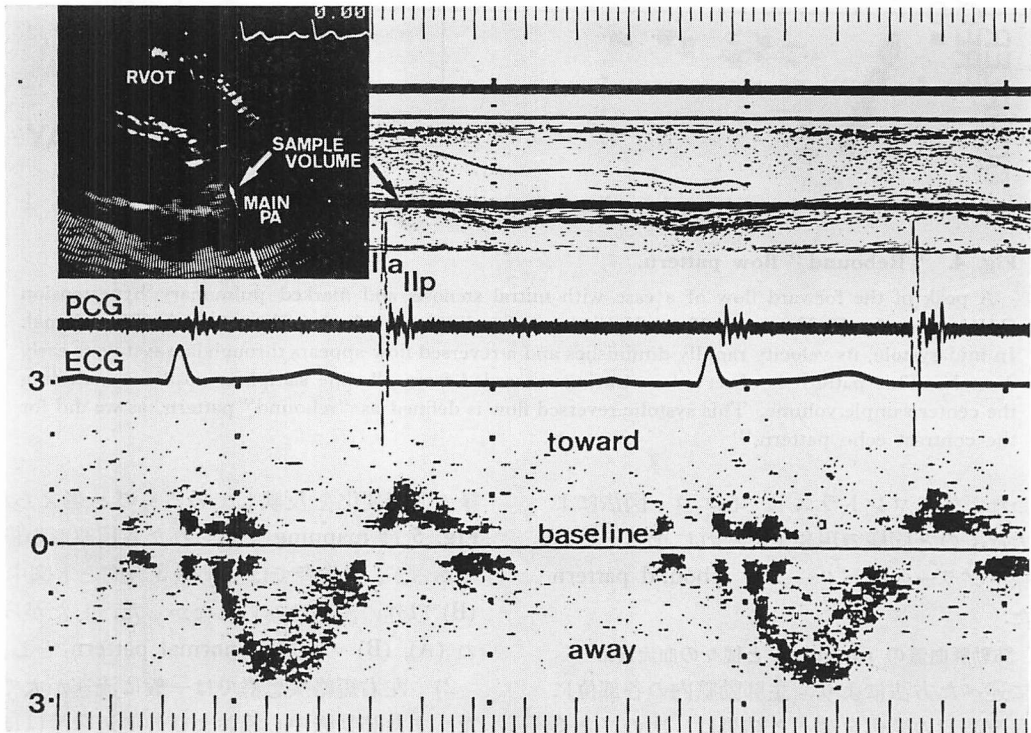


Fig. 3. Peripheral Doppler flow pattern in a healthy normal subject.

This figure is obtained from the same case in Fig. 2. When sample volume is located near to the inner wall of the MPA, a late systolic reversed flow of a short duration can be observed. This phenomenon is thought to reflect a swirl formation near the MPA wall. We define these two patterns of Figs. 2 and 3 as "normal".

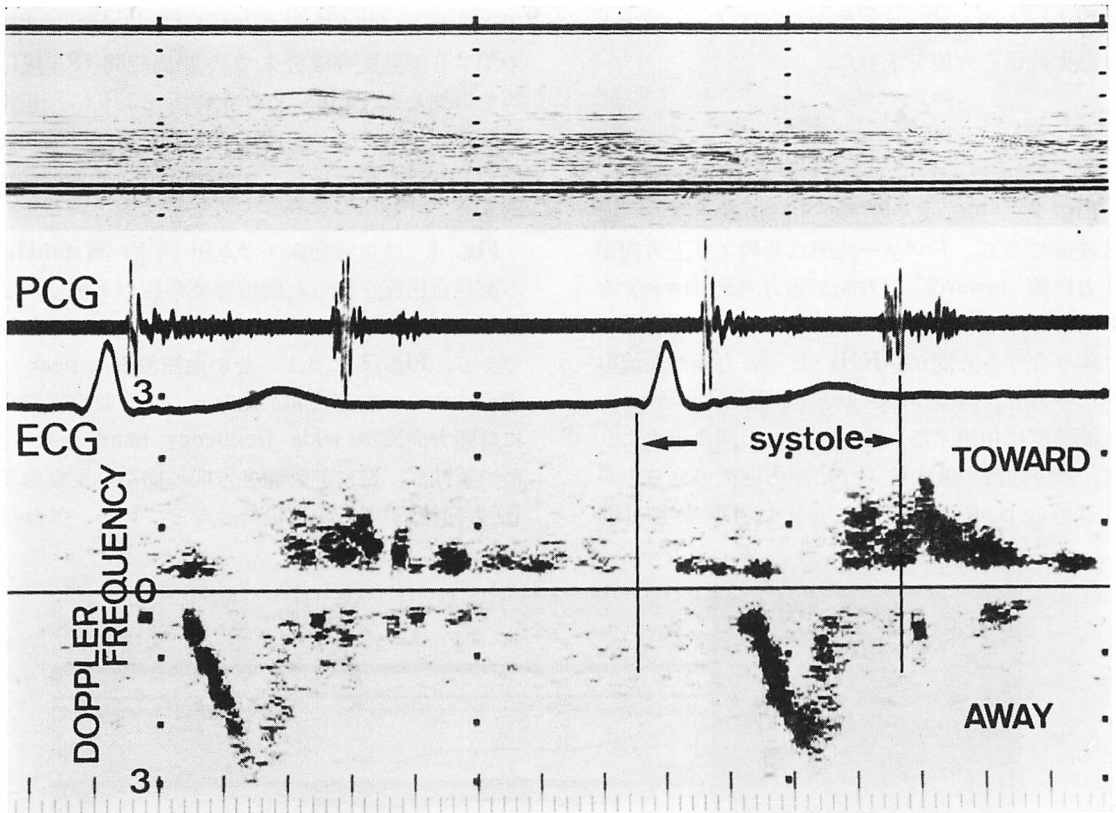


Fig. 4. "Rebound" flow pattern.

A peak of the forward flow of a case with mitral stenosis and marked pulmonary hypertension (MPA pressure: 52/30, mean: 38 mmHg) is located earlier in systole than that of the healthy normal. In mid-systole, its velocity rapidly diminishes and a reversed flow appears through late systole to early diastole. This pattern is observed in tracings recorded from all nine sampling positions including the center sample volume. This systolic reversed flow is defined as "rebound" pattern, as we did for the contrast echo pattern.¹¹⁾

われわれが先にコントラスト・心エコー図法により認めたと同様の現象で、それに準じ、この肺動脈ドプラー血流パターンを rebound pattern とした。

2. 肺動脈血流の mapping と種々の血流波形

先に述べた方法により、主肺動脈内の各部位による血流波形の変化を調べた結果は、次のごとくであった。

1) Fig. 3 は正常者例での肺動脈弁下約 2 cm 内側縁での記録である。収縮末期にわずかな反転流が記録されている。これは弁閉鎖に伴う弁口近

縁の血流変化を反映しているものと考えられる。

Fig. 5 は mapping で見られた各種波形の模式図であるが、正常者では肺動脈 3 方向とも図中 (A), (B) 以外の波形はみられなかった。したがってこの (A), (B) の両者を normal pattern とした。

2) 左右短絡疾患群では一般に流速が大であった。また肺動脈中心流および外側辺縁流はほとんどの症例(心カテーテル施行 13 例中 12 例)で、肺動脈圧の値に関係なく、Fig. 5 (A) (B) に示すような、正常者例と同様の normal pattern を呈した。

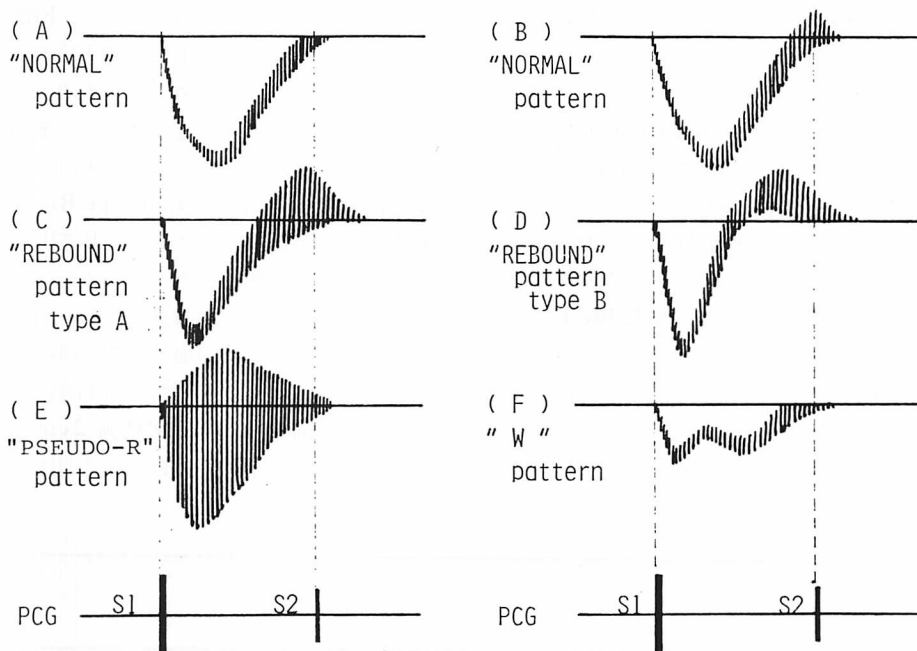


Fig. 5. Schema of the Dopple flow patterns.

A: A systolic flow pattern shows a forward flow with a slow upstroke and a narrow frequency band. No backward flow is observed in systole.

B: Only a small backward flow is recorded in end-systole. This pattern is detected in sampling sites near the inner wall of the MPA.

C: The peak of a systolic flow is a early systolic in timing, and a backward flow with a wide frequency band appears in later half of systole. A systolic flow also continues to the pulmonary second heart sound with gradually increasing frequency band. This pattern is observed in a peripheral flow near the inner wall of the dilated MPA in cases with an intracardiac shunt and cases with valvular heart disease without marked PH.

D: In this pattern, a systolic flow disappears in mid-systole, and totally reverses in its direction in later half of systole. We call them "rebound" pattern, type B, which is observed exclusively in cases with valvular heart disease and marked PH.

E: Systolic pattern shows a bidirectional turbulent flows. This pattern is observed when the Doppler beam is directed in a plane perpendicular to the markedly dilated MPA.

F: A systolic flow reveals "W" shaped low velocity profile. This pattern is observed in cases with severe right ventricular failure complicated with low cardiac output state.

3) ただし左右短絡疾患群においても、肺動脈内側辺縁流の記録は、Fig. 5 の (C) または (E) に示すような反転流を含むパターンとして得られた。(E) のパターンは収縮初期から両方向性の血流波形となっており、これは主肺動脈の拡大屈曲による前方偏位のため、超音波ビーム方向が血流に対し直角に近い大きな入射角をとっているた

め、もしくは乱流形成を示すものと考えられた。

(C) のパターンでは収縮期後半にかなりの反転流が出現するが、一方順方向流も途切れることなく収縮末期まで持続している。このパターンを A 型反転流 (rebound pattern of type A) とした。なお、心カテーテル検査を施行した左右短絡疾患中、3 例で内側辺縁流にこのパターンを記録しえ

たが, いずれも 40 歳以上であり, 他の左右短絡疾患例に比し, より高齢であった。

4) 正常肺動脈圧の弁膜疾患例では, 中心流, 外側辺縁流ともに, いずれも normal pattern であった。内側辺縁流では, 少数例で rebound pattern of type A を認めた(記録しえた 6 例中 2 例)。

5) 肺高血圧症を伴う弁膜症例では, 内側辺縁流だけでなく, 中心流および外側辺縁流でも反転流が認められることが多く, ことに **Table 1** で定義した marked PH のほとんどの症例では, mapping で主肺動脈内のすべての部位に反転血流を検出しえた。

6) また弁膜症例で認められる中心流および外

側辺縁流での反転血流パターンは, **Fig. 4** で明らかのように, 収縮期後半には順方向流が減少消失し, 反転血流のみで占められており, この場合肺動脈内の血流のほとんど全体が, 一瞬逆転していることをうかがわせた。この血流パターンを B 型反転流 (rebound pattern of type B) とした (**Fig. 5 (D)**)。短絡疾患群では, この B 型反転流を示したものは 1 例も観察されなかった。

7) 従来, 肺動脈弁口部ドプラー記録では, 肺高血圧症例で W 型の血流波形が得られると報告されている。今回の検討でも弁口部では同様であったが, 肺動脈弁よりも末梢側 2 cm 以上では中心流で W 型を示す例はほとんど認められなかつ

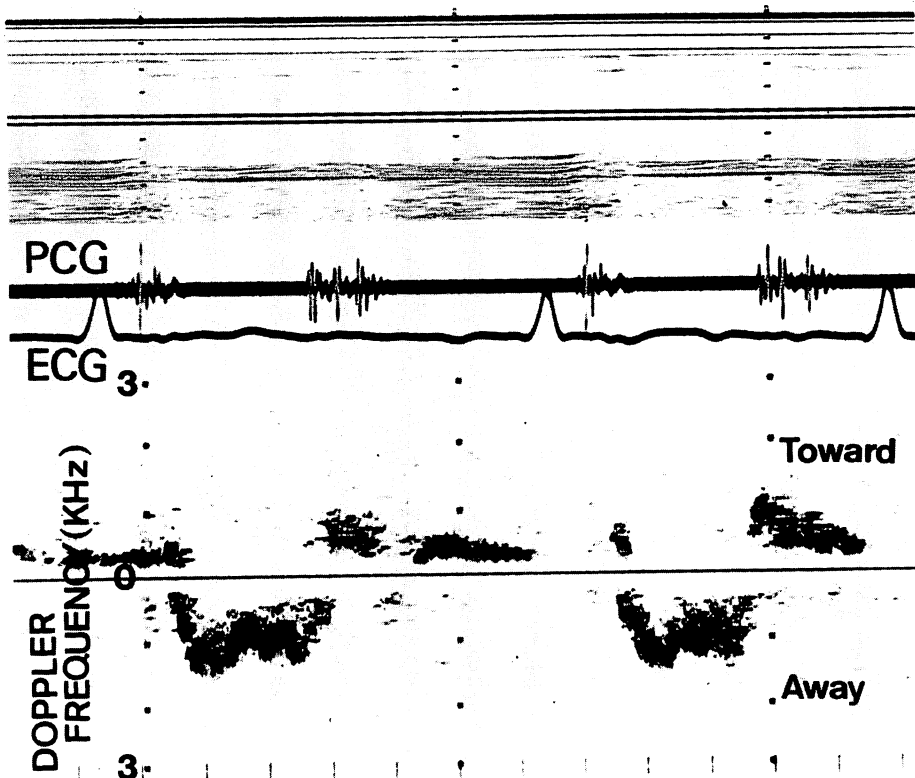


Fig. 6. An example of Doppler echocardiogram showing "W" pattern.

This case has multiple pulmonary infarctions and congestive heart failure with low cardiac output state. Despite elevated pulmonary arterial resistance, the Doppler record does not show "rebound" pattern. The flow curve resembles the figure of W, and the peak flow velocity is markedly decreased.

Table 2. Correlation between main pulmonary arterial pressure and systolic Doppler flow pattern in cases with valvular heart disease

Doppler pattern	Main pulmonary arterial pressure			
	Normal	Mild PH	Marked PH	Total
Normal pattern	8	4	1	13
Rebound pattern	0	4	6	10
Total	8	8	7	23 cases

た。わずかに W 型を認めた 2 例は、いずれも心カテーテル検査は行っていないが、1 例は反復する肺梗塞のため、著明な右心不全と低心拍出量症候群をきたしている両下肢血栓性静脈炎の症例で (Fig. 6), 他の 1 例は原因不明の両心不全で、断層心エコー図上、うっ血性心筋症を思わせる (EF 0.15) 症例であった。いずれも、ドプラー波形上、駆出血流速 peak の小さな、W 型順方向流パターンを呈した。

3. 主肺動脈中心流の血流パターンと血行動態諸計測値

以上の mapping による観察より、内側辺縁流は肺動脈拡大の影響を受けやすく、また超音波ビーム方向を血流方向と平行に設定することが困難なことが少なくなかった。それに対し、中心流は記録が容易で、かつ辺縁流と異なり、超音波ビーム方向が血流方向に平行に近く設定しうる。この主肺動脈中心流について、心カテーテル検査で得られた血行動態諸計測値との関連は以下のごとくであった。

1) 弁膜疾患 23 例での平均肺動脈圧と肺血流パターンとの関係は、Table 2 にみられるように、肺動脈圧正常例の中心流はすべて normal pattern であり、反転流は 1 例も認めえなかった。一方、marked PH 例では大多数 B 型 rebound pattern を示し、明らかな反転流が容易に記録された。また B 型 rebound pattern を示した症例は、いずれも肺高血圧症を有する症例であった。Mild PH 例では、反転流は 50% の症例にのみ検出され、一定の傾向は示さなかった。Fig. 7 にその圧分布を

表示したが、ドプラー血流波形が normal pattern を示すものの肺動脈圧 (平均 および 標準偏差) は 17.8 ± 9.0 mmHg, rebound pattern 群のそれは 30.9 ± 15.1 mmHg で、両者間に明らかな有意差 ($p < 0.001$) がみられ、反転流は明らかに肺動脈圧の高値のものに出現した。

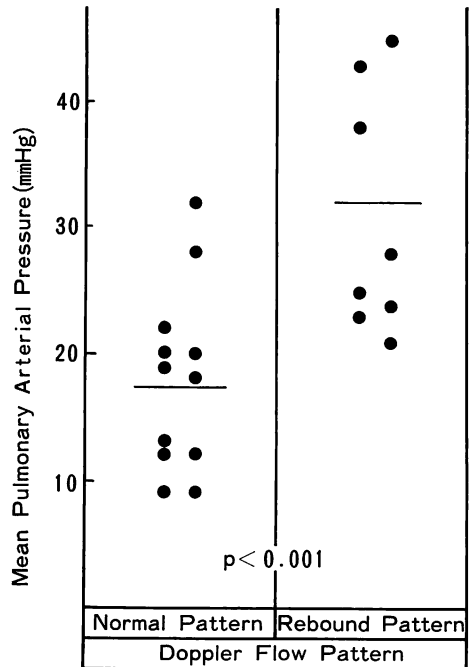


Fig. 7. Doppler flow patterns and MPA pressure in 23 cases with valvular heart disease.

In cases with "rebound" pattern, mean pulmonary arterial (MPA) pressures are significantly higher than those in cases with "normal" pattern.

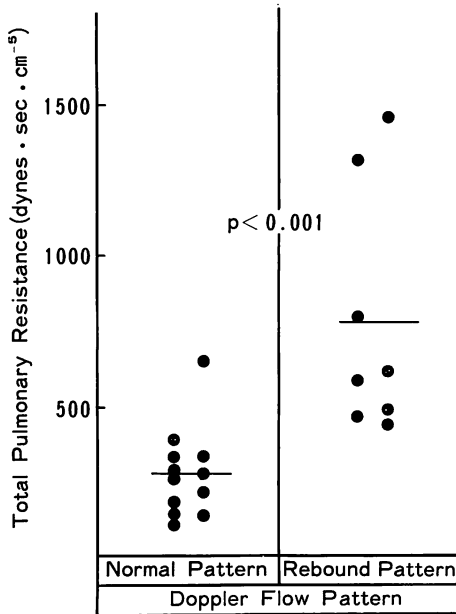


Fig. 8. Doppler flow patterns and total pulmonary resistance (TPR) in 23 cases with valvular heart disease.

TPR are markedly and significantly elevated in cases with “rebound” pattern.

2) Fick 法より求めた肺血流より全肺血管抵抗(以下 TPR)を計算し, そのドプラー血流パターン別の違いを Fig. 8 に表示した. Normal pattern 群, rebound pattern 群の TPR (平均および標準偏差)は 285 ± 170 および 789 ± 496 dynes · cm · sec⁻⁵ で, その差は有意であり ($p < 0.001$), 反転流が出現する症例では明らかに肺血管抵抗の増大を認めた.

3) 一方, 肺血流量は normal pattern 群と rebound pattern 群でそれぞれ 3.77 ± 2.03 l/min/m², 2.35 ± 1.03 l/min/m² で, 反転流のない症例の方がわずかに血流量が多い傾向がみられた ($p < 0.05$) (Fig. 9).

4) 肺動脈容積コンプライアンスの一指標として, 肺血流量および計測時の心拍数より求めた一回拍出量 (SV) を肺動脈脈圧 (PP) で除した SV/PP を計算し, それとドプラー血流パターンとの

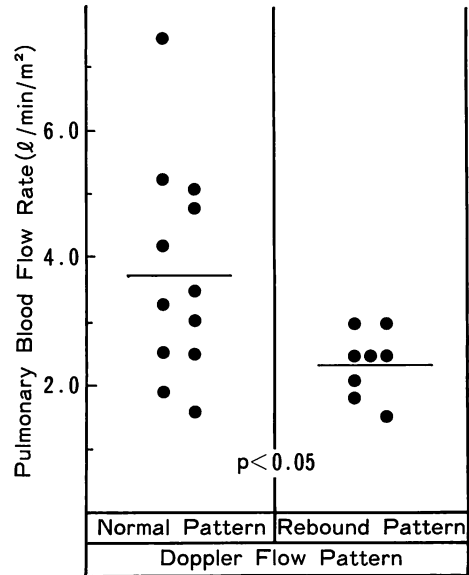


Fig. 9. Doppler flow patterns and pulmonary blood flow rate in 23 cases with valvular heart disease.

Pulmonary blood flow rates, measured by the Fick method in right cardiac catheterization are slightly lower in cases with “rebound” pattern.

関連をみた (Fig. 10). SV/PP は normal pattern 群, rebound pattern 群のそれぞれで 3.80 ± 1.65 ml/mmHg, 1.75 ± 0.94 ml/mmHg で, 反転流を有する症例で有意に低値の傾向を示した ($p < 0.001$).

4. 主肺動脈中心流のドプラー波形各種計測値と血流パターン

ドプラー血流波形より求めた以下の指標により, 反転流を有する症例の特徴を検討した. すなわち, 反転流を有する弁膜症 10 症例を対象として, その血流波形の特徴を調べた. なお対照として正常肺動脈圧の弁膜症例 13 例, および健康男子 8 例の計測値を用いた (Table 3).

1) 肺動脈最大血流速度

Fig. 11 に肺動脈中心流の最大速度 (Fp) を, 左方より, 正常男子 8 例, 反転流のない弁膜症 13 例, および反転流を有する弁膜症 10 例の順に表

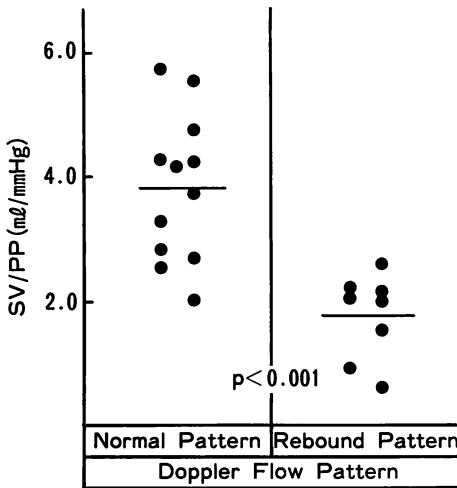


Fig. 10. Stroke volume divided by pulmonary arterial pulse pressure (SV/PP) as an index of the pulmonary arterial compliance.

This parameter in cases with “rebound” pattern is significantly lower than those in cases with “normal” pattern.

示し、グラフ中の横線によりその平均値を示した。超音波ビームと血流とは厳密には平行でないため、血流速度計測には誤差が生じるが、ここでは無視した。図中では近似的にドプラー偏位周波数 1 KHz = 32 cm/sec として、血流速度を cm/sec に換算し表示した。図に明らかなように、図の左方の群より順に、76.2±14.1 cm/sec, 76.8±8.3 cm/sec および 77.4±11.5 cm/sec と肺動脈最大血流速度は 3 群でほぼ等しかった。

2) 加速時間

ドプラー血流波形の収縮期立ち上がりから最大血流速度に達するまでの時間(加速時間 Ta) を 3 群間で比較したのが Fig. 12 である。正常男子群では 0.16±0.02 sec, 反転流のない弁膜症例群 0.12±0.03 sec, 反転流を有する弁膜症例群 0.09±0.02 sec で、反転流を有する症例では明らかに加速時間は短縮していた (p<0.01)。また肺動脈圧正常の弁膜症例でも、正常男子群に比し、加速時間が有意に短縮する傾向があった (p<0.005)。こ

Table 3. Hemodynamic parameters derived from right cardiac catheterization and Doppler flow curves

	Healthy normals	Valvular disease	
		Normal pattern	Rebound pattern
	8 cases	13 cases	10 cases
Mean PAP (mmHg)	—	17.8±9.0	30.0±15.1
		p<0.001	
TPR (dyne·sec·cm ⁻⁵)	—	285±170	789±496
		p<0.001	
Qp (L/min/m ²)	—	3.77±2.03	2.35±1.03
		p<0.05	
SV/PP (ml/mmHg)	—	3.80±1.65	1.75±0.94
		p<0.001	
Fp (cm/sec)	76.2±14.1	76.8±8.3	77.4±11.5
		NS	
Ta (sec)	0.16±0.02	0.12±0.03	0.09±0.02
	p<0.005		p<0.01
Fp/Ta (cm/sec ²)	477±100	675±160	938±255
	p<0.01		p<0.01
RVET/Ta	2.01±0.20	2.74±0.70	3.34±0.48
	p<0.05		p<0.05

Abbreviation: Qp=pulmonary blood flow rate; Fp=peak velocity of Doppler flow curve in systole.

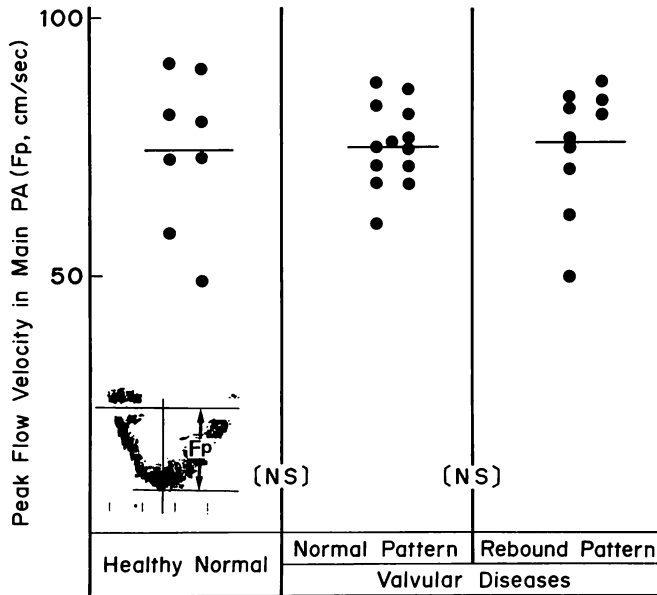


Fig. 11. Peak flow velocity in the MPA measured by Doppler method in 23 cases with valvular heart disease and eight healthy normals.

There is no significant difference among healthy normals, cases with valvular heart disease with “normal” Doppler flow pattern (13 cases), and cases with valvular heart disease with “rebound” Doppler flow pattern (10 cases).

の関係は心拍数の影響を除くために、右室駆出時間 (RVET) と加速時間との比を見ても同様で、RVET/Ta はやはり反転流群で最も大であり、反転流を有する症例では駆出血流曲線の peak がより前方に偏位する傾向が明らかであった。

3) 平均加速度

上記より明らかなように、収縮初期の肺動脈駆出平均加速度 (Fp/Ta) は、正常男子群 $477 \pm 100 \text{ cm/sec}^2$ 、反転流のない弁膜症例群 $675 \pm 160 \text{ cm/sec}^2$ 、反転流を有する弁膜症例群 $938 \pm 255 \text{ cm/sec}^2$ で、反転流を示す症例で有意に ($p < 0.01$) 大であった。

考 接

われわれは先にコントラスト・心エコー図法により主肺動脈内血流様式について検討し、収縮期後半に反転流がみられること、およびその反転流出現様式に血流全体が反転するものと、順方向流

と反転流の混在するものの2種があることを報告した。しかし、コントラスト法では、その2者がどのような血行動態の違いに基づくものが、明らかにしえなかった。

正常人での反転流は肺動脈弁口付近の記録で収縮終期にわずかに認めるのみで、弁より2cm以上遠位部の記録ではほとんど認めないが、病的状態では血流の大半が反転する場合が認められる。このうち、Fig. 5 E. に示すようなパターンは、記録方向が血流方向に対して直角に近いための artifact、もしくは、著明な肺動脈拡大屈曲による乱流形成を示すものと思われる。

A型反転流 (Fig. 5 C) は短絡疾患群、弁膜疾患群の両群ともに認められ、とくに内側辺縁流で頻度が大であったが、そのような症例でも外側辺縁流では反転流はほとんどみられず、主として主肺動脈の病的拡張による渦流形成が関与しているものと思われる。

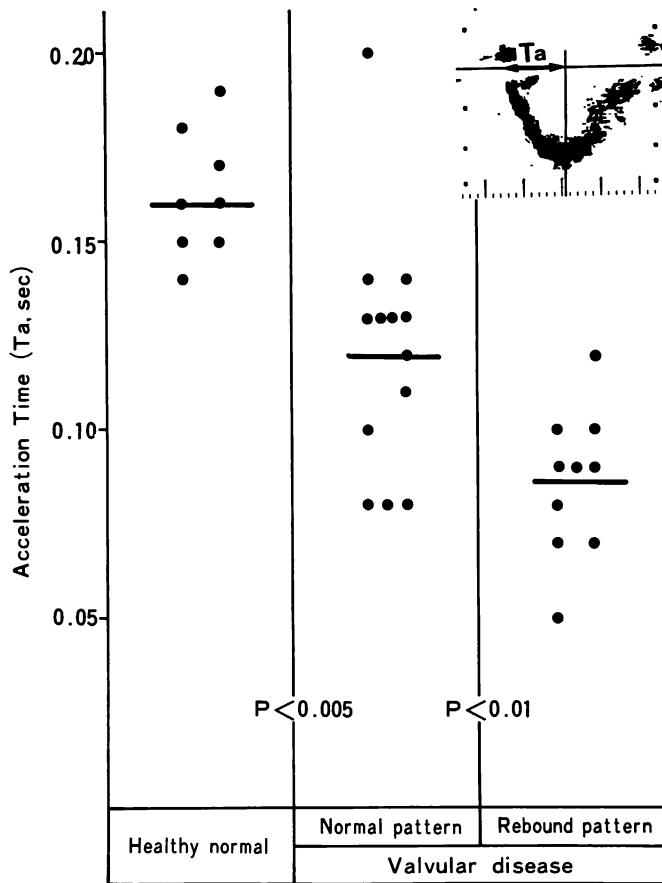


Fig. 12. Doppler flow patterns and acceleration time of pulmonary ejection (Ta) in 23 cases with valvular heart disease and eight healthy normals.

Cases with “rebound” pattern show significantly shorter acceleration time than other two groups.

B型反転流 (Fig. 5 D) は短絡疾患群にはなく、弁膜症例に認められたが、そのうち、中心流にこのパターンを有する症例は、内側および外側辺縁流のいずれにも同様の反転パターンが示され、したがって主肺動脈内の血流のほとんど全体が、収縮期後半に逆転していることが明らかである。

B型反転流を示す症例群のドプラー血流波形計測値は、正常成人と正常血流パターンを示す弁膜症例群間では、最大血流速度には差がないが、後者では加速時間 (Ta) が明らかに短縮し、ピークは前方にある。したがって、最大速度に達するま

での平均加速度 (Fp/Ta) は有意に大となっている。また肺動脈圧は有意に高く、肺血管抵抗も有意に大であり、さらに容積コンプライアンスの一指標と考えられる SV/PP が有意に減少している。

今回の検討では、肺動脈弁口より遠位部の中心流に W型血流波形をみた症例は、著明な右心不全および低心拍出量症候群の2例のみで、主肺動脈の拡大があり、肺血管抵抗の著増が推測されるにもかかわらず、反転流形成がみられていない。したがって肺血管抵抗が増大していても、右室障害により駆出血流量および血流速度が減少すれ

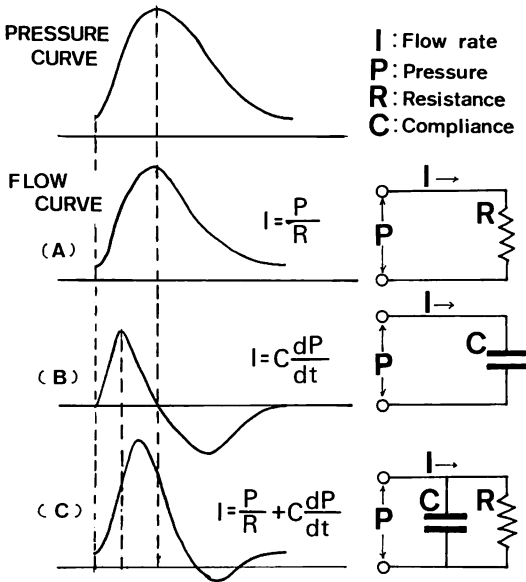


Fig. 13. Schema of the Windkessel model.
Abbreviations: t=time.

ば, B型反転流はみられず, 駆出速度の小さなW型となると考えられ, 反転流の形成には, 右心機能が比較的保たれていることが条件として必要であると推察される。

以上の成績より, 主肺動脈の血流様式には, 主として右心機能(右室駆出血流量および駆出速度), 肺動脈圧, 肺血管抵抗, および主肺動脈コンプライアンスの4者が関与していると考えられる。各因子間の関係をWindkessel modelにあてはめると, Fig. 13のように, 主肺動脈血流パターンは, 抵抗Rを流れる血流成分(A)と, コンプライアンスに対応するcapacitanceを流れる血流成分(B)との合成波形(C)となると考えられる。肺高血圧症において右心機能が十分保たれた状態下で, 抵抗R成分を流れる流量がコンプライアンス成分を流れる流量よりも相対的に減少すれば, 血流速度peakの前方偏位および収縮後半の反転流出現がよく説明されるであろう。今回はこの両成分の相対関係を実証しえなかったが, 主肺動脈内血流のほぼ全体が収縮後期に反転

する現象は, 従来の渦流形成による機序では説明しえず, Windkessel modelは一つの仮説としてさらに検討する必要があると考えられた。

結 語

1. 超音波断層図とパルス・ドプラー法の併用により主肺動脈内血流 mapping を行い, 渦流形成とは別に, 肺動脈内血流のほとんど全体が収縮期後半に反転する症例のあることを認めた。これをB型反転流とした。

2. B型反転流を示す症例は, 他群に比し, 主肺動脈最大血流速度は変わらないが, そのpeakは前方に偏位し, 主肺動脈圧, 肺血管抵抗は明らかに増大し, かつ容積コンプライアンスを表わす指標が有意に減少していた。

3. 低心拍出量症候群を呈する症例では, 肺血管抵抗が著明に上昇していると考えられるにもかかわらず, B型反転流はみられず, 駆出速度の小さなW型波形を示した。B型反転流の形成には, 右心拍出量が保たれていることが必要と推測された。

4. 以上より, B型反転流は右心機能が保たれている状態下で, 正常例とほぼ同等の速度で駆出された血流が, 肺血管抵抗の著明な増大による末梢へのrun-off減少のために, 主肺動脈内で, 一瞬反転し, 停滞する現象と考えられた。Windkessel modelは, 収縮期血流速度peakの前方偏位とともに, この現象をよく説明しうる仮説として検討を要するものと思われた。

要 約

主肺動脈のドプラー血流波形につきて, 46例の各種心疾患を対象に検討を行った。内訳は弁膜症23例, 左右短絡疾患13例, 重症右心不全に低心拍出量症候群を合併する2症例, および健康男子8例である。ドプラー血流波形は主肺動脈内の9カ所を選んで記録した。

弁膜症例23例中, 肺高血圧症を伴う10例では, 9カ所の記録部位すべてに収縮後期反転流(B

型反転流)を認めたが、肺動脈圧正常の弁膜症例や、短絡疾患例、低心拍出量症候群例および正常者ではかかる反転流を認めなかった。

23例の弁膜症例について血行力学的諸指標を検討した結果、B型反転流を呈する症例群10例では然らざる13症例に比し、平均肺動脈圧の高値(30.9±15.1 mmHg 対 17.8±9.0 mmHg, $p < 0.001$)、全肺血管抵抗の増加(789±496 dynes·cm·sec⁻⁵ 対 285±170 dynes·cm·sec⁻⁵, $p < 0.001$)、及び肺動脈容積コンプライアンスの一指標と考えられる一回拍出量/主肺動脈脈圧比の減少(1.75±0.94 ml/mmHg 対 3.80±1.65 ml/mmHg, $p < 0.001$)を認めた。また収縮期最大血流速度をその頂点に到るまでの加速時間で除して得られる肺動脈平均加速度(Fp/Ta)も、反転流を有する群で有意に大であった(938±255 cm/sec² および 675±160 cm/sec², $p < 0.01$)。

肺高血圧症を有する症例で認められた反転流は、単に拡大した主肺動脈内にみられる渦流形成ではなく、正常者とはほぼ同等の速度で右心から駆出された血流が、全肺血管抵抗の著明な増大のため末梢へのrun-offを急激に阻害され、主肺動脈内で収縮期後半にほぼ全血流方向の反転をおこす現象を示すものと考えられた。

文 献

- 1) Gramiak R, Nanda NC, Shah PM: Echocardiographic detection of the pulmonary valve. *Radiology* **102**: 153, 1972
- 2) Nanda NC, Gramiak R, Shah PM, Robinson T: Echocardiographic diagnosis of pulmonary hypertension. *Excerpta Medica* **277**: 12, 1973
- 3) Nanda NC, Gramiak R, Robinson T, Shah PM: Evaluation of pulmonary hypertension by echocardiography. *J Clin Ultrasound* **1**: 255, 1973
- 4) Nanda NC, Gramiak R, Robinson T, Shah PM: Echocardiographic evaluation of pulmonary hypertension. *Circulation* **50**: 575, 1974
- 5) Weyman AE, Dillon JC, Feigenbaum H, Chang S: Echocardiographic patterns of pulmonic valve motion with pulmonary hypertension. *Circulation* **50**: 905, 1974
- 6) Sakamoto T, Matsuhisa M, Hayashi T, Ichiyasu H: Echocardiogram of the pulmonic valve. *Jpn Heart J* **15**: 360, 1974
- 7) Hada Y, Sakamoto T, Hayashi T, Ichiyasu H, Amano K, Tei C: Echocardiography of the pulmonary valve: Variability of the pattern and the related technical problems. *Jpn Heart J* **18**: 298, 1977
- 8) 田原 稔, 田中弘允, 中尾正一郎, 桜井修吾, 吉村寿一, 鄭 忠和, 鹿島友義, 金久卓也: 実験的肺高血圧における収縮期肺動脈弁エコーパターンの検討: 肺動脈血流量波形との相関. *超音波医学* **6**: 168, 1979
- 9) Gramiak R: Ultrasound cardiography: contrast studies in anatomy and function. *Radiology* **92**: 939, 1969
- 10) Lippe W, Behar V, Scallion R, Kisslo J: Detection of tricuspid regurgitation with two-dimensional echocardiography. *Circulation* **57**: 128, 1978
- 11) 小泉克己, 梅田 徹, 町井 潔, 遠田栄一: コントラスト・エコー法による肺動脈血流パターンと流速の推定について. *超音波医学* **6**: 251, 1979
- 12) Koizumi K, Thoda E, Umeda T, Machii K: Estimation of the flow pattern and velocity in the main pulmonary artery studied by simultaneous cross-sectional and M-mode echocardiography combined with contrast technique. *Abstr 71, 2nd Meeting of WFUMB*, 1979
- 13) Baker DW, Rubenstein SA, Lorch GS: Pulsed-Doppler echocardiography: principles and applications. *Am J Med* **63**: 69, 1977
- 14) Johnson SL, Baker DW, Lute RA, Dodge HT: Doppler echocardiography: the localization of cardiac murmurs. *Circulation* **48**: 810, 1973
- 15) Boughner DR: Assessment of aortic insufficiency by transcutaneous Doppler ultrasound. *Circulation* **52**: 874, 1975
- 16) Abbasi AS, Allen MW, Decristfaro D, Ungar I: Detection and estimation of the degree of mitral regurgitation by range-gated pulsed-Doppler echocardiography. *Circulation* **61**: 143, 1980
- 17) Thuillez C, Theroux P, Bourassa MG, Blanchard D, Peronneau P, Guermontprez J, Diebold B, Waters DD, Maurice P: Pulsed-Doppler echocardiographic study of mitral stenosis. *Circulation* **61**: 381, 1980
- 18) 瀬尾充武, 小松研一, 飯沼一浩: 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. *日超医講演論文集* **35**: 91, 1979
- 19) Miyatake K, Okamoto M, Kinoshita N, Ohta M, Kozuka T, Sakakibara H, Nimura Y: Evaluation of tricuspid regurgitation by pulsed-Doppler and two-dimensional echocardiography. *Circulation*

小泉, 遠田, 樫田, ほか

66: 777, 1982

- 20) 榑原 博, 仁村泰治: 超音波パルス・ドプラー法, 心断層法組合わせ使用による心房中隔欠損症の短絡血流の分析. J Cardiography **10**: 225, 1980
- 21) Mishima M, Matsuo H, Inoue M, Kitabatake A, Fukushima M, Asao M, Ohara T, Shimazu T, Senda S, Tanouchi J, Morita H, Mizushige K, Abe H: Study on the mechanism of abnormal pulmonary valve motion in pulmonary hypertension by pulsed-Doppler flowmeter. Jpn Circ J **43**: 712, 1979
- 22) 岡本光師, 宮武邦夫, 木下直江, 榑原 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. 日内会誌 **70**: 376, 1981
- 23) 北島 頤, 松尾裕英: 超音波パルス・ドプラー法による肺動脈圧の非侵襲的推定. 日超医講演論文集 **39**: 263, 1981
- 24) 鈴木 修, 伊東紘一: 超音波パルス・ドプラー法を用いての肺高血圧症の血行動態の分析. 日超医講演論文集 **39**: 261, 1981
- 25) 松田光生, 杉下靖郎, 山口 徹, 田村 勤, 伊藤巖: 超音波パルス・ドプラー血流計を用いた肺高血圧症における右室流出路および肺動脈内血流波形の検討. J Cardiography **11**: 603, 1981