

肺高血圧における肺動脈弁
収縮中期半閉鎖の発生機序
に関する実験的研究

An experimental study
on the mechanism of
mid-systolic semiclosure
of the pulmonary valve
echogram in pulmonary
hypertension

田原 稔
田中 弘允
中尾正一郎
吉村 寿一
桜井 修吾
鄭 忠和
鹿島 友義
金久 卓也

Minoru TAHARA
Hiromitsu TANAKA
Shoichiro NAKAO
Hisakazu YOSHIMURA
Shyugo SAKURAI
Chuwa TEI
Tomoyoshi KASHIMA
Takuya KANEHISA

Summary

The purpose of this study is to elucidate the determinants of mid-systolic semiclosure of the pulmonary valve (PV) echogram in pulmonary hypertension (PH). PH was produced in 7 open-chest dogs by constriction of the right and left pulmonary arteries (PA), and 2 catheter-tip micromanometers were placed in the right ventricle (RV) and pulmonary trunk. In 4 of 7 dogs, a probe of electromagnetic flowmeter was placed around the pulmonary trunk. Simultaneous recording of PV echogram, PA flow, PA pressure, RV pressure, and PA-to-RV pressure gradient were performed.

When the PA pressure was elevated progressively, mid-systolic semiclosure of various degrees appeared in the PV echogram. At the same time, transient reversal of the PA-to-RV pressure gradient and the transient decrease in PA flow during ejection were also observed simultaneously. Temporal relationship between PV echogram and PA-to-RV pressure gradient disclosed that the beginning and end of the rapid opening of PV echogram coincided with the beginning and end of the period in which RV pressure was higher than PA pressure during early systole, respectively. The beginning and end of mid-systolic semiclosure in PV echogram coincided with the beginning and end of the period in which PA pressure was higher than RV pressure during mid-systole, respectively. Late-systolic reopening of PV echogram started at the time when RV pressure began to exceed PA pressure.

鹿児島大学医学部 第一内科
鹿児島市宇宿町 1208-1 (〒890)

The First Department of Internal Medicine, Faculty
of Medicine, Kagoshima University, Usuki-cho 1208-
1, Kagoshima 890

Presented at the 17th Meeting of the Japanese Society of Cardiovascular Sound held in Sendai September 20-21, 1978

Received for publication September 7, 1979

The temporal relationship between PV echogram and PA flow wave was also examined. The beginning and end of the rapid opening of PV echogram preceded the beginning and end of the period in which PA flow increased in early systole by approximately 15 msec, respectively. The beginning and end of mid-systolic semiclosure in PV echogram preceded the beginning and end of the period in which PA flow decreased in mid-systole by approximately 15 msec, respectively. Late-systolic reopening of PV echogram started earlier than the beginning of re-increase in PA flow by approximately 15 msec. The reason why PA flow wave followed PV echogram wave can be explained by the distance of 1 cm from PV orifice to the site to which a probe was attached.

We conclude that, in acute PH, (1) PV echogram during ejection period is determined by PA-to-RV pressure gradient and by PA flow, and (2) mid-systolic semiclosure of PV echogram seems to be caused by the transient decrease of PA flow and by the transient reversal of the PA-to-RV pressure gradient in mid-systole.

Key words

Pulmonary valve echogram Pulmonary hypertension Mid-systolic semiclosure Pulmonary artery-to-right ventricle pressure gradient Pulmonary artery blood flow

緒 言

従来, 肺高血圧に特徴的とされていた肺動脈弁エコー所見¹⁻³⁾のいくつかは, 肺高血圧と必ずしも直接的関係を有しないことが最近の研究⁴⁻⁷⁾によりわかってきた. 肺高血圧に限らず, 心エコー図所見の発生機序の解明はその所見の診断上の特異性を考える上にも, またその所見から得られる血行力学的異常の推定の上にもきわめて重要である.

我々はイヌを用いて実験的急性肺高血圧を作成し, 肺高血圧の時にみられるいくつかの肺動脈弁エコー所見の発生機序を明らかにしてきた⁶⁻⁸⁾. とくに収縮期の肺動脈弁エコー所見については, その時の肺動脈血流量の変化がその発生に密接な関連を有していることを報告した⁹⁾. この研究では肺動脈血流量を規定すると思われる肺動脈(以下 PA)-右室(以下 RV)間圧較差をとり上げ, これと肺動脈弁エコー図ならびに肺動脈血流量との相関を検討したので報告する.

対象と方法

雑種成犬 7 頭 (体重 19~33 kg) を対象とした. ペントバルビタール (30 mg/kg) による静脈麻酔後気管内挿管を行い, 人工呼吸器 (SN-480-3,

シナノ製)を用いて空気による陽圧呼吸を行った. 1 回呼吸量を 30 ml/kg に, 呼吸数を 20~25 回/分にそれぞれ設定した. 正中開胸後, 右室自由壁より右室流出路へ, また左肺動脈第一分枝より肺動脈主幹部へそれぞれミラー製カテ先マノメーター (Millar 製 micro-tip catheter pressure transducer, Model PC-350 5F) を挿入した. これらのカテーテルより得られた電気信号を圧トランスジューサーコントロールユニット (Millar 製 transducer control unit, Model TCB-100) に接続し, そこから得られた電気信号は, 一方では直接超音波装置の入力端子に接続し, PA 圧および RV 圧を記録し, 他方では両者を引き算回路に通してそこから得られた電気信号を超音波装置に接続して, PA-RV 間圧較差波形を記録した. 実験開始前に, 右室流出路のカテーテルを肺動脈主幹部へ進めて, 2 本のカテーテルの圧波形が一致することを確認した. さらに 7 頭中 4 頭には, 肺動脈主幹部に電磁流量計 (日本光電製 MF-27) のプローブを装着して, 肺動脈血流量を記録した.

肺動脈弁エコー図の記録は Sonocardiograph SSL-51U (東芝製)を用い, 探触子は 3 MHz 口径 5 mm の平板型を用いた. 肺動脈弁エコー図の記録は探触子を右室流出路の心のう面上に直接あてて行った. 記録装置は strip chart recorder

Model OR-01A を使用し、紙送り速度 100 mm/sec で心電図、血行力学的諸指標および心エコー図を同時記録した。

コントロールの記録を行った後、肺動脈狭窄を作成し、同様の記録を行った。肺動脈狭窄の作成にさいしてはまず左肺動脈分枝の一部をテフロンテープで結紮し、ついで右主肺動脈を vascular occluder で徐々に締めつけ種々の程度の一過性肺高血圧を作成した。

結 果

今回の実験で肺動脈狭窄による肺高血圧作成を行った7頭のイヌのうち、6頭において肺動脈弁

エコー図に W パターンが認められたが、1頭においては各段階の肺高血圧状態においても W パターンは認められなかった。Fig. 1 はイヌ No. 1 において、肺動脈狭窄の程度を強めていく過程における実際の記録(上段)とそのトレース像(下段)を示したものである。上から順に肺動脈弁エコー図および肺動脈血流量、PA-RV 間圧較差、PA 圧、RV 圧が記録されている。

このイヌのエコー図には、肺動脈弁の前尖と左尖の両弁尖が同時に記録されているので、各血行力学的諸指標との関連性を検討する上に適している。図の左から右に向かって肺動脈狭窄の程度が強くなるに従い、肺動脈弁エコー図ならびに肺動

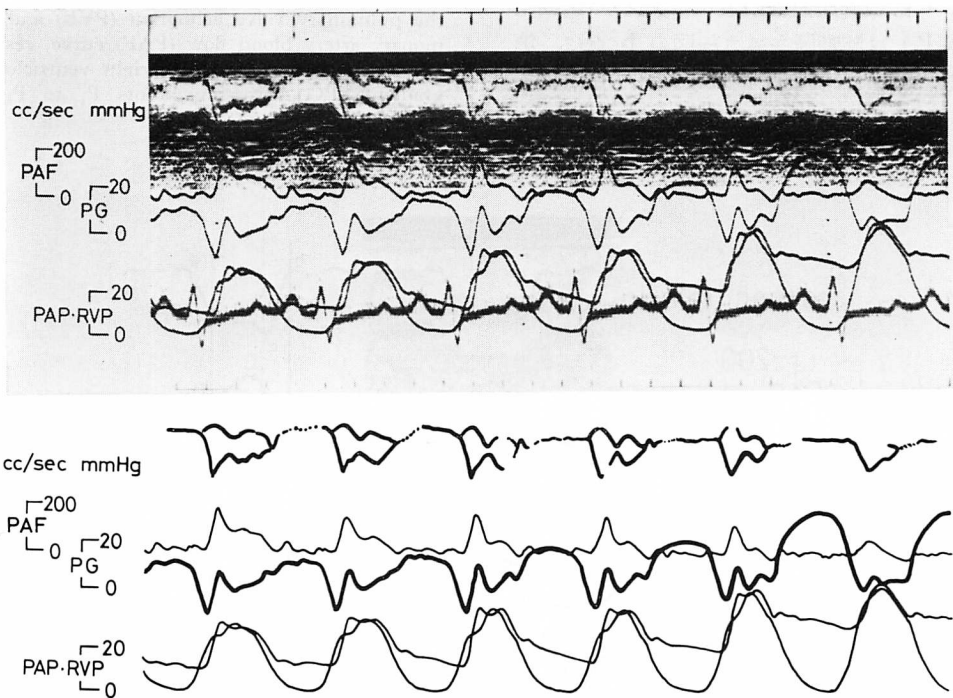


Fig. 1. Simultaneous recording of the pulmonary valve echogram, pulmonary artery blood flow (PAF), pulmonary artery-to-right ventricle pressure gradient (PG), pulmonary artery pressure (PAP) and right ventricular pressure (RVP) during progressive constriction of the pulmonary artery (Dog No. 1).

Lower panel shows traced waves of upper original ones. Note the changes in pattern of each wave and the relationship among the pulmonary valve echogram, PAF and PG during progressive pulmonary hypertension.

脈血流量, PA-RV 間圧較差, PA 圧, RV 圧の各波形が相互に関連しつつ連続的に変化している. 肺動脈弁エコー図および肺動脈血流量, PA-RV 間圧較差の相関関係を各心拍ごとに検討するために, 各波形に Fig. 2 に示すような変曲点ならびに交叉点を設定し, それぞれに命名を行った.

Fig. 3 は肺動脈狭窄作成前の記録である. 収縮前期には RV 圧が PA 圧より高く, 収縮中期から後期にかけては両圧波形の較差がほとんどなく, 両者が収縮中期に一過性の逆転を呈することはなかった. その時の肺動脈血流量波形には収縮中期の一過性切痕は認められず, またその肺動脈弁エコー図には mid-systolic semiclosure も認められなかった.

PA と RV の両圧曲線の最初の交叉点(圧較差曲線上の P_1) は肺動脈弁エコー図の b 点に, 第二の交叉点 (P_2) は肺動脈弁エコー図の d 点にそれぞれ一致している. また, P_1 と P_2 の間にお

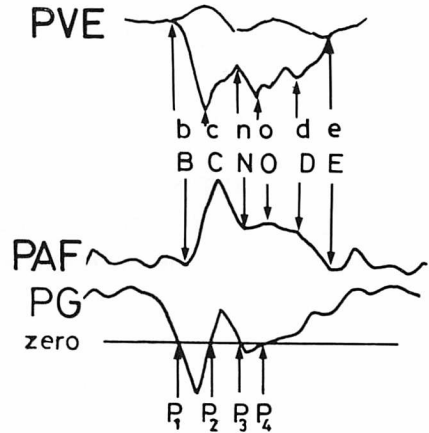


Fig. 2. Schematic representation of the first beat in Fig. 1.

Six points from b (B) to e (E) are designated on the pulmonary valve echogram (PVE) and the pulmonary artery blood flow (PAF) curve, respectively. On the pulmonary artery-to-right ventricle pressure gradient (PG), crossing points P_1 to P_4 are also designated.

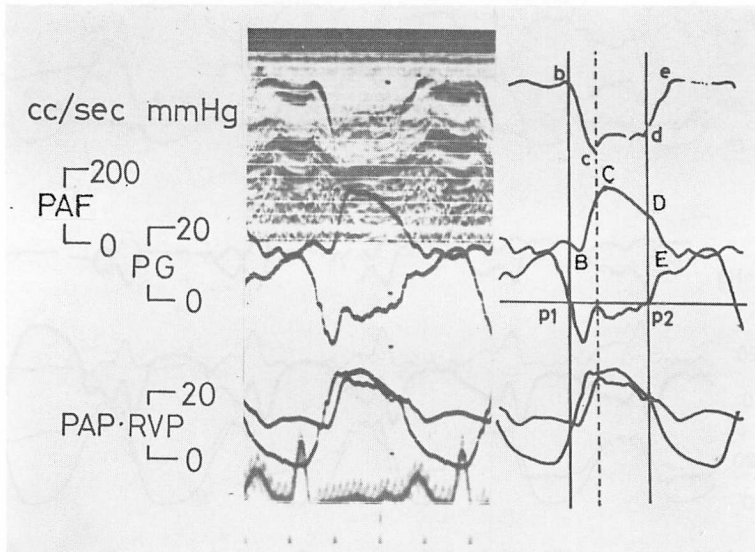


Fig. 3. Original data and their schematic representations before the constriction of the pulmonary artery (Dog No. 1).

The pulmonary valve echogram shows no mid-systolic semiclosure, and pulmonary artery blood flow (PAF) shows normal pattern. Pulmonary artery-to-right ventricle pressure gradient (PG) becomes negative in early systole and almost zero in mid to end systole.

PAP=pulmonary artery pressure; RVP=right ventricular pressure.

いて PA 圧曲線と RV 圧曲線が最も接近した点は点線で示すごとく肺動脈弁エコー図の c 点にほぼ一致していた。

Fig. 4 は Fig. 1 の第 1 心拍を示したもので、軽度の肺動脈狭窄が加えられた時の記録である。収縮中期において RV 圧は一過性に増大率の停滞を示すが、PA 圧にはそれが認められない。そのために収縮中期に PA 圧が RV 圧を一過性に凌駕して、PA-RV 間圧較差が正となる圧逆転現象が認められた (Fig. 4 の圧較差曲線の P₂-P₃ 間の付点領域)。その時には肺動脈弁エコー図の c-n 間に mid-systolic semiclosure が認められ、またそれから 10~20 msec 遅れた肺動脈血流量波形の C-N 区間では一過性の急激な低下が認められた。さらに収縮後期において PA 圧は減少

率の一過性増大を示すが、RV 圧はそれを示さなかった。そのために収縮後期に RV 圧が再度 PA 圧を凌駕して、圧較差が再び負となる圧逆転現象が認められた (Fig. 4 の圧較差曲線で P₃-P₄ の間)。その時には肺動脈弁エコー図の n-o 間に late-systolic reopening が認められ、またそれから 10~20 msec 遅れた肺動脈血流量曲線の N-O 区間では一過性の再増大が認められた。

Fig. 5 は Fig. 1 の第 3 心拍を示したもので、中等度の肺動脈狭窄が加えられた時の記録である。この図で収縮中期の圧逆転 (Fig. 5 の圧較差曲線 P₂-P₃ の付点領域) がみられた時には肺動脈弁エコー図の c-n 間に mid-systolic semiclosure が認められ、またそれから 10~20 msec 遅れた肺動脈血流量波形の C-N 区間では一過性の急激

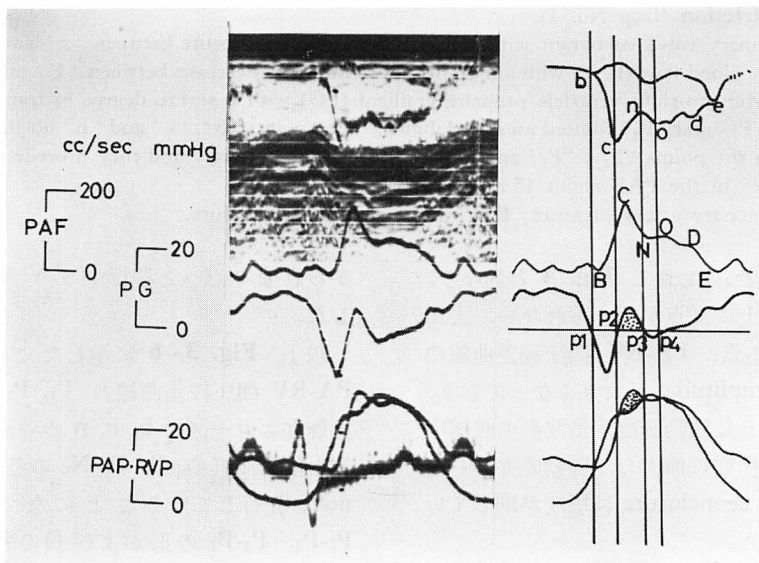


Fig. 4. Original data and schematic representations during slight degree of pulmonary artery constriction (Dog No. 1).

The pulmonary valve echogram shows a slight mid-systolic semiclosure between 'c' and 'n', pulmonary artery blood flow (PAF) a slight degree of transient decrease between 'C' and 'N', and pulmonary artery-to-right ventricle pressure gradient (PG) a slight degree of transient reversal between 'P₂' and 'P₃' (dotted area). The points 'b', 'c', 'n' and 'o' on the echogram coincide with the points 'P₁', 'P₂', 'P₃' and 'P₄' in the PG, respectively. The points 'b', 'c', 'n' and 'o' on the echogram precede the points 'B', 'C', 'N' and 'O' in the PAF about 15 msec, respectively.

PAP=pulmonary artery pressure; RVP=right ventricular pressure.

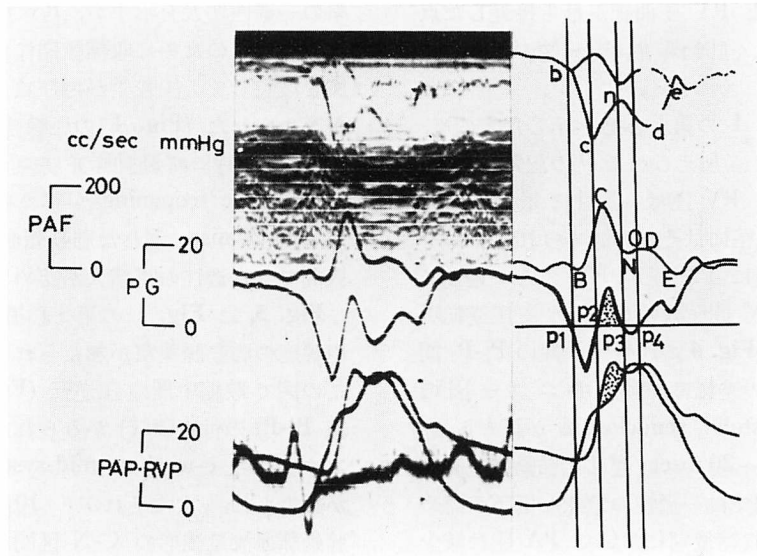


Fig. 5. Original data and schematic representation during moderate degree of pulmonary artery constriction (Dog No. 1).

The pulmonary valve echogram with severe mid-systolic semiclosure between 'c' and 'n', pulmonary artery blood flow (PAF) with a high degree of transient decrease between 'C' and 'N' and pulmonary artery-to-right ventricle pressure gradient (PG) with a severe degree of transient reversal between 'P₂' and 'P₃' (dotted area) are shown. The points 'b', 'c' and 'n' on the echogram coincide with the points 'P₁', 'P₂' and 'P₃' in the PG, respectively and they precede to the 'B', 'C' and 'N' in the PAF about 15 msec, respectively.

PAP=pulmonary artery pressure; RVP=right ventricular pressure.

な低下が認められた。しかし **Fig. 4** と異なり、肺動脈弁エコー図上に o 点が認められない。また **Fig. 4** と比較すると、PA-RV 間圧較差曲線の P₂-P₃ 間の最大 amplitude が大きくなっており、それに関連するように肺動脈血流量波形の収縮中期の一過性低下の程度は増大し、肺動脈弁エコー図の mid-systolic semiclosure は程度が増していることが観察された。

Fig. 6 は **Fig. 1** の第 6 心拍を示したもので、高度の肺動脈狭窄が加えられた時のものである。PA-RV 間圧較差曲線には収縮初期の P₁-P₂ を除いて負の部分が認められず、肺動脈血流量波形には収縮中期の切痕がなく、肺動脈弁エコー図には mid-systolic semiclosure は認められるが、late-systolic reopening は認められない。したがって、肺動脈弁エコー図は W パターンを示さず、c 点

から直接 e 点へと移行する V 型のパターンを示した。

以上、**Fig. 3~6** に示したことをまとめると、PA-RV 間圧較差曲線の P₁, P₂, P₃ の各点は肺動脈弁エコー図の b, c, n の各点に一致し、肺動脈血流量波形の B, C, N の各点より 10~20 msec 先行していることになる。また、P₁-P₂, P₂-P₃, P₃-P₄ の正および負の変化は b-c, c-n, n-o および B-C, C-N, N-O の増減とも一致していることになる。これらの結果より、PA-RV 間圧較差曲線が肺動脈血流量波形および肺動脈弁エコー図の各変曲点の時相や各変曲点間の増減を規定していると考えられた。これらの点をさらに明確にするために、PA-RV 間圧較差曲線の P₁-P₄ の各点ならびに肺動脈血流量波形の B, C, N, O の各点と肺動脈弁エコー図の b, c, n, o

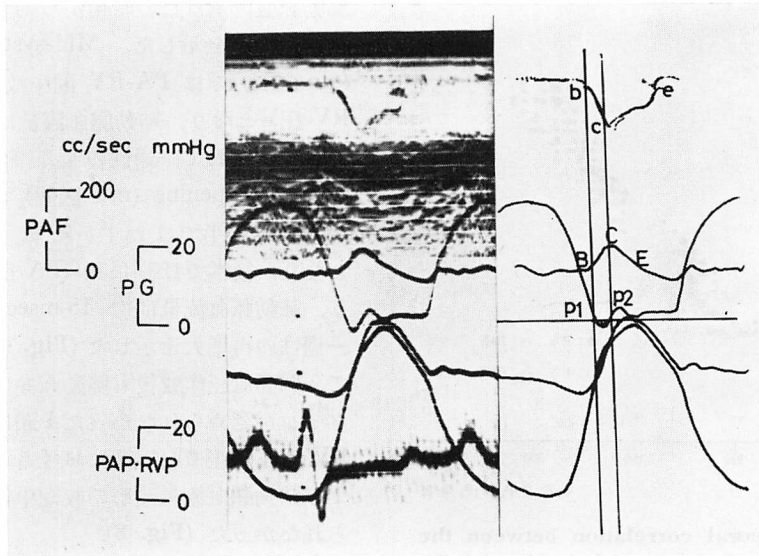


Fig. 6. Original data and schematic representations during high degree of pulmonary artery constriction (Dog No. 1).

The pulmonary valve echogram showing mid-systolic semiclosure without late-systolic reopening, pulmonary artery blood flow (PAF) with a high degree of mid-systolic decrease without re-increase in late systole and pulmonary artery-to-right ventricle pressure gradient (PG) without a transient reversal are shown.

PAP=pulmonary artery pressure; RVP=right ventricular pressure.

の各点との間の時相的相関性を6頭のイヌについて比較検討してみた。心電図Q波の開始よりPA-RV間圧較差曲線のP₁~P₄までの時間をそれぞれQ-P₁, Q-P₂, Q-P₃, Q-P₄時間、Q波の開始より肺動脈血流量波形のB, C, N, Oまでの時間をそれぞれQ-B, Q-C, Q-N, Q-O時間、Q波の開始より肺動脈弁エコー図のb, c, n, oまでの時間をそれぞれQ-b, Q-c, Q-n, Q-o時間として、それぞれ計測し相関性の検討を行った。

Fig. 7はイヌNo. 1についての結果をグラフに示したものである。横軸にQ-P₁, Q-P₂, Q-P₃, Q-P₄を、縦軸にQ-B, Q-C, Q-N, Q-Oをとり、Q-P₁とQ-B, Q-P₂とQ-C, Q-P₃とQ-N, Q-P₄とQ-Oの各相関を黒丸でプロットして示した。同じく縦軸にQ-b, Q-c, Q-n, Q-oをとりQ-P₁とQ-b, Q-P₂とQ-c, Q-P₃とQ-n, Q-P₄とQ-oの各相関を中抜き丸で

プロットして示した。各4群を通じて求めた相関係数は前者が0.99 (p<0.001), 後者が0.98 (p<0.001)と両者とも非常に高い値を示した。全体として黒丸が中抜き丸より約10~20 msec上方にあるのは、肺動脈弁エコー図の各変曲点に対して肺動脈血流量波形の各変曲点が約10~20 msec遅れていることを示すものである。さらに、肺動脈弁エコー図にWパターンが認められた他の5頭についても、イヌNo. 1と同様の検討を行ったが、Q-P₁₋₄とQ-b~cおよびQ-P₁₋₄とQ-B~Cの各4群を通じて求めた各相関係数はすべて0.98~0.99と非常に高い値を示した。

Fig. 8は肺動脈狭窄においてPA圧およびRV圧の上昇が認められたにもかかわらず、肺動脈弁エコー図にWパターンが認められなかったイヌNo. 7のデータで、肺動脈狭窄の程度により5段階に分けて示したものである。上段には実

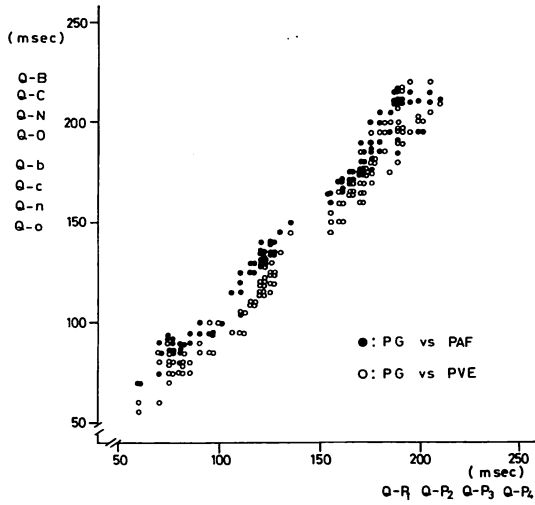


Fig. 7. The temporal correlation between the points 'P₁', 'P₂', 'P₃' and 'P₄' in the pulmonary artery-to-right ventricle pressure gradient (PG) and points 'b', 'c', 'n' and 'o' in the pulmonary valve echogram (PVE) or points 'B', 'C', 'N' and 'O' in the pulmonary artery blood flow (PAF) (Dog No. 1).

Note the close relationship among them.
Q=Q wave in the electrocardiogram.

際のデータを, 下段にはそのトレース像を示した. PA-RV 間圧較差波形には収縮中期における一過性の正負の逆転は認められず, 肺動脈血流量波形にも収縮中期の切痕は認められない. また肺動脈弁エコー図にも mid-systolic semiclosure が認められない. しかしながら, 肺動脈弁エコー図と肺動脈血流量波形が互いにミラーイメージを呈している点は他の 6 頭と同様であった.

考 案

1. 急性肺高血圧における肺動脈弁エコー図の W パターン出現機序についての考察

肺高血圧作成後の肺動脈弁エコー図に W パターンが認められた 6 頭の各心拍においては, 以下のような共通点が認められた. すなわち, 肺動脈弁エコー図の rapid opening (b-c 区間) では, PA-RV 間圧較差は負 (PA 圧 < RV 圧) となり,

肺動脈血流量はこの時相から約 15 msec 遅れて急激な増大を示した. Mid-systolic semiclosure (c-n 区間) では PA-RV 間圧較差は正 (PA 圧 > RV 圧) となり, 肺動脈血流量はこの時相から約 15 msec 遅れて一過性の低下を示した. Late-systolic reopening (n-o 区間) では, PA-RV 間圧較差は前半ではわずかに負 (PA 圧 ≤ RV 圧) となり, 後半では逆に正 (PA 圧 ≥ RV 圧) となり, 肺動脈血流量は約 15 msec 遅れてわずかな一過性の再増大を示した (Fig. 4, 5). これに反して, 肺高血圧作成後も肺動脈弁エコー図に W パターンが認められなかった 1 頭については, PA-RV 間圧較差の収縮期における一過性逆転現象および肺動脈血流量波形の収縮中期切痕形成は認められなかった (Fig. 8).

以上の事実より, 収縮期肺動脈弁エコー図は late-systolic reopening の後半部分を除いて, PA-RV 間圧較差および肺動脈血流量の収縮期における変化により正確に規定されているものと考えられた. つまり, mid-systolic semiclosure の発現機序は収縮中期において PA 圧が RV 圧を一過性に凌駕し, 肺動脈血流量が一過性に低下するためであり, late-systolic reopening の発現機序は収縮後期において RV 圧が PA 圧を一過性に凌駕し, 肺動脈血流量が一過性に再増大するためであると考えられた. 以上述べた著者らの仮説に立てば, mid-systolic semiclosure においては Fig. 9 下段に示すように, PA 圧が RV 圧を一過性に凌駕するために弁口部での血流方向とは逆の血液移動が肺動脈弁の肺動脈主幹部側において生じ, 最大開放位にあった弁が肺動脈側から右室側へヨットの帆が膨らむように偏位するものと推定された.

Late-systolic reopening の後半においては弁が開放運動をしているにもかかわらず, PA 圧が RV 圧をわずかながら凌駕しており, これは著者らの仮説の問題点の 1 つである. 著者らはその原因として 2 つの可能性を考えている. その第 1 は late-systolic reopening (n-o 区間) における PA-

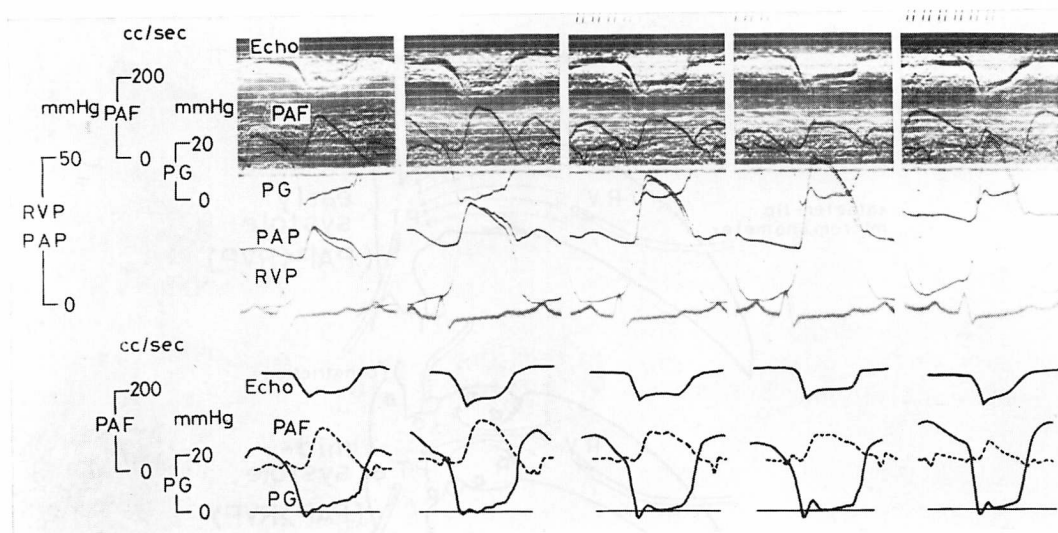


Fig. 8. Simultaneous recording of the pulmonary valve echogram, pulmonary artery blood flow (PAF), pulmonary artery-to-right ventricle pressure gradient (PG), pulmonary artery pressure (PAP) and right ventricular pressure (RVP) during progressive pulmonary artery constriction (Dog No. 7).

Lower panel shows traced waves of upper original ones. In spite of high degree of pulmonary artery constriction, mid-systolic semiclosure is not shown in the pulmonary valve echogram. The transient decrease in PAF and transient reversal of PG are not recognized as well.

RV 間圧較差は非常に小さいために、肺動脈弁の動きに反映され難い可能性である。第2は圧測定部と弁直近部の圧の間にわずかな差が存在するために、測定した圧較差と弁運動の間に不一致が生じた可能性である。

2. 収縮期における PA-RV 間圧較差の一過性逆転の機序に対する考察

PA-RV 間圧較差の収縮期における逆転現象については我々の調査した限りでは報告がなく、肺動脈弁エコー図の W パターンの発現機序を検討した今回の実験において始めてその存在が確認されたものである。この現象は結果の項 (Fig. 4, 5) で述べたように、収縮前期における RV 圧の一過性増大率低下と収縮後期における PA 圧の一過性低下率増大に起因すると考えられた。

そこで、RV 圧および PA 圧波形の一過性変形の機序について、今回の実験結果と未発表の実験結果をもとに若干の考察を加えてみた。RV 圧波

形を規定している因子は右室心筋収縮力および右室内血液量の収縮期における変化であり、PA 圧波形を規定している因子は肺動脈主幹部の血管壁張力および同部の血液量の収縮期における変化であると思われる。しかし、収縮期における右室心筋収縮力の変化は単調なものと仮定すれば、それは RV 圧波形の一過性変形には直接の関連がないと思われる。また、肺動脈血管壁の張力は同部の血液量と相関すると考えられる。以上の理由より、肺動脈狭窄作成後に認められた RV 圧および PA 圧の一過性変形は、おもに右室内血液量の減少率および肺動脈主幹部内血液量の変化により規定されていると考えた (Fig. 10)。

この考え方に立って収縮期における PA 圧および RV 圧の一過性変形の機序を説明するために、Fig. 11 に示すようなシェーマを作成した。これは肺動脈弁エコー図に W パターンが認められた 6 頭に共通した各血行力学的諸指標、および

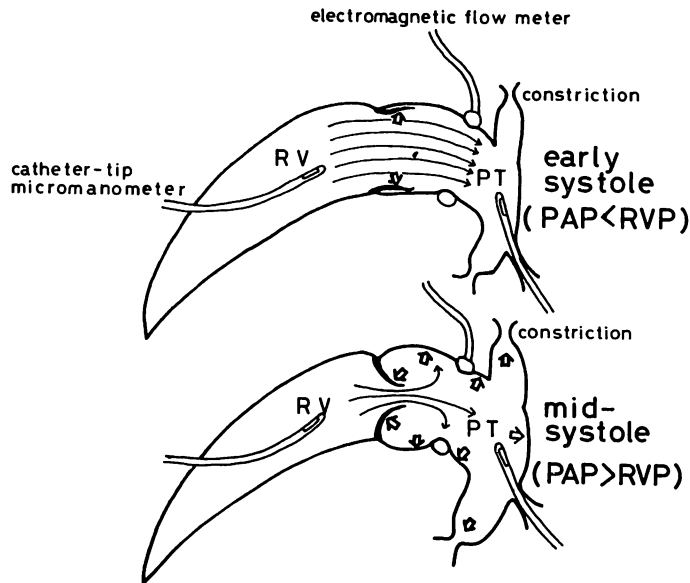


Fig. 9. Diagram explaining the relationship between pulmonary valve motion and PA-to-RV pressure gradient during early systole (upper panel) and mid-systole (lower panel).

Note that, in mid-systole, the pressure gradient between PA and RV becomes positive so that the shape of the pulmonary valve cusp changes from convex toward the pulmonary trunk (PT) to convex toward the right ventricle (RV).

RVP=right ventricular pressure; PAP=pulmonary artery pressure.

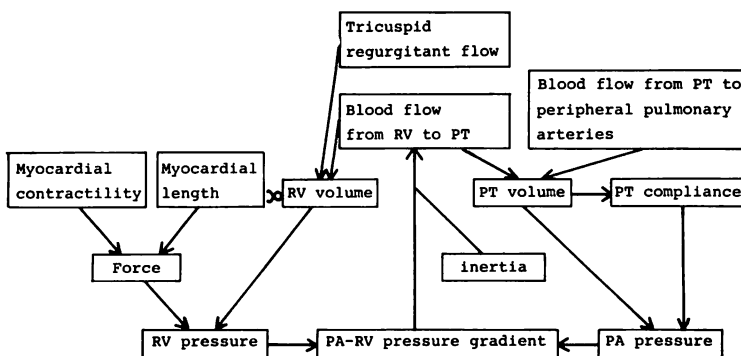


Fig. 10. Relationship among physiological determinants of PA-to-RV pressure gradient during systole in experimental pulmonary hypertension.

PA=pulmonary artery; RV=right ventricle; PT=pulmonary trunk.

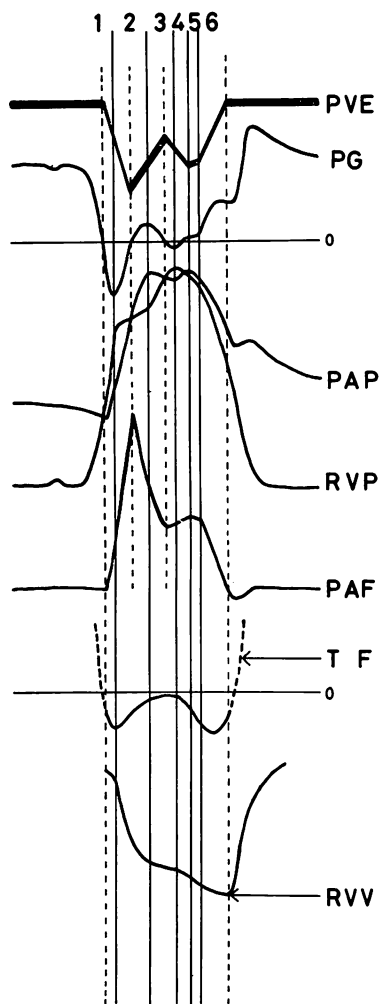


Fig. 11. Schematic representations of the pulmonary valve echogram (PVE), pulmonary artery-to-right ventricle pressure gradient (PG), pulmonary artery pressure (PAP), right ventricular pressure (RVP) and pulmonary artery blood flow (PAF) recorded in six dogs in which W-shaped pulmonary valve echogram is recognized during pulmonary artery constriction.

Tricuspid flow (TF) recorded in another two dogs during pulmonary artery constriction is shown for explanation. Right ventricular blood volume (RVV) derived from PAF and TF is also added to them for explanation.

肺動脈弁エコー図に未発表データの三尖弁逆流量波形を加えて示し、説明の都合上各波形をシェーマの最上段に示すような6区間に分けたものである。ただし、肺動脈血流量波形は電磁流量計のプロブが弁口より約1 cm 上方の肺動脈主幹部に装着された関係から、10~20 msec 遅れをもって記録されていることを考慮して、実際のデータより10~20 msec 前方へ平行移動させて描いてある。

Fig. 11 の第1区間では肺動脈血流量が低値にとどまっている。そのために右室内血液量の減少率が低くなっており、RV 圧増大率は大きくなると考えられる。第2区間においては肺動脈血流量が十分に大きくなり、ピークを形成している。そのために肺動脈主幹部血液量が增大してPA 圧増大率は大きくなり、右室内血液量の減少率が增大して、RV 圧増大率は一過性に減少すると考えられる。第3区間においては肺動脈血流量が一過性に低下している。そのために肺動脈主幹部内血液量が減少して、PA 圧は一過性に低下すると考えられる。また、この時相においては肺動脈血流量と並行して、三尖弁逆流量も低下しているようであり、これらの原因により右室内血液量の減少率が低下して、RV 圧増大率は再び増大すると考えられる。第4区間においては肺動脈血流量がわずかに再増大している。そのために肺動脈主幹部内血液量がわずかに再増大して、PA 圧は軽度の再増大を示すと考えられる。またこの時相では右室心筋収縮力はすでに低下しており、これに肺動脈血流量のわずかな再増大と三尖弁逆流量の増大による右室内血液量減少率の再増大が加わって、RV 圧はゆるやかに低下し始めると考えられる。

肺動脈狭窄時には三尖弁逆流が出現するとされているので⁹⁾、収縮期における右室内血液量の減少経過を正確に知るためには、肺動脈血流量波形と三尖弁逆流量波形を同時記録する必要がある。それで2頭のイヌを用いて追加実験を行い、三尖弁逆流量波形を記録し今回の考察の参考としたが、まだデータの量が不十分であり今後さらに検討を

重ねる必要があると考えている。

3. 肺動脈弁エコー図 W パターンの出現機序に関する従来の仮説に対する批判

従来肺高血圧時の肺動脈弁 mid-systolic semiclosure 発現機序については、多くの仮説があげられている。それらのうちで根拠となる実証データをそなえたものには以下の4つがある。

1) 肺動脈弁口を通過する右室有効駆出量が肺動脈弁エコー図 mid-systolic semiclosure の頂点(n点)で終了するためとした説¹⁰⁾。この説は肺高血圧で肺動脈弁エコー図に mid-systolic semiclosure が認められる時には、肺動脈弁エコー図のc点に始まりn点に終る漸減性の flow murmur が認められた事実を根拠としたものである。

2) 肺動脈弁口部における血流速度増大に伴う static pressure の増大率停滞が原因であるとする説¹¹⁾。この説はカテーテル型流速計による肺動脈弁口部の血流速度と、肺動脈弁エコー図の同時記録において、血流速度の頂点と肺動脈弁エコー図のn点が時相的に一致したことを根拠としたものである。

3) 肺動脈主幹部の拡大により肺動脈弁付近に乱流が生じ、Venturi 効果が作用することが原因であるとする説^{12,13)}。この説は特発性肺動脈拡張症¹²⁾や心臓手術後の肺高血圧を伴わない症例¹³⁾においても、肺動脈弁エコー図に明らかな mid-systolic semiclosure が認められたことを根拠としたものである。

4) 主肺動脈内における血流方向の逆転が原因であるとする説¹⁴⁾。この説は肺高血圧の症例において、肺動脈主幹部のコントラストエコー図を記録したさいに、収縮中期から後期にかけて M-mode 上一見逆流を思わせる像が得られたことを根拠としたものである。

以上の1)~4)の仮説につき著者らの仮説から批判を加えるとすれば、1)の説は肺動脈血流量の減少をあげている点で著者らの説と共通性を有する。また、この説で始めて報告された漸減性の flow murmur に対しては、PA 圧が RV 圧を一

過性に凌駕するために生じた一過性の機能的肺動脈弁狭窄状態 (Fig. 9 下段) 下に生じた ejection murmur と解釈することができる。

2)の説は肺動脈弁口における血流速度の増大を、肺動脈弁 mid-systolic semiclosure の原因として解釈したために導かれたものである。これに対して、著者らは異なった解釈を行っている。すなわち、PA 圧が RV 圧を一過性に凌駕し、肺動脈血流量が一過性に低下するために mid-systolic semiclosure が起こり、弁口面積が小さくなった結果、肺動脈血流量の低下に反して弁口部で測定された血流速度が増大を示したものと解釈している。

3)の説は肺高血圧が存在しない場合にも、肺動脈弁エコー図に mid-systolic semiclosure が発現しうる事実を示した点では大きな意味がある。しかし、その事実だけで肺動脈弁 mid-systolic semiclosure の発現機序を乱流の発生による Venturi 効果に帰するには問題があり、今後このような症例においても、肺動脈血流量の一過性の低下や PA 圧と RV 圧の一過性逆転現象の有無を検討する必要があると思われる。

4)の説は M-mode コントラスト心エコー図により示唆された逆方向血流の原因を、PA 圧が RV 圧を凌駕する現象に求めることによって、著者らの仮説と共通性を有することにもなる。しかし、M-mode コントラスト心エコー図の、一見逆流を思わせる像と肺動脈弁 mid-systolic semiclosure および late systolic reopening との時相的相関や血行力学的相関が不明であり、さらに検討が必要であると思われる。

結 論

肺動脈主幹部に電磁流量計を装着し、右室流出路と肺動脈主幹部にカテ先マンメーターを挿入して、急性肺高血圧作成前後の肺動脈弁エコー図、肺動脈血流量波形、RV 圧波形、PA 圧波形、PA-RV 間圧較差曲線を同時記録し分析した。その結果つぎの成績を得た。

1) 肺高血圧作成により収縮期肺動脈弁エコー図が W 型を示す時には, PA 圧波形と RV 圧波形が収縮期に 4 回の交叉を示し, 肺動脈血流量波形に収縮中期の切痕が認められた.

2) 肺動脈弁エコー図の rapid opening においては, RV 圧が PA 圧を凌駕し, 肺動脈血流量波形は急激な増大を示した. Mid-systolic semiclosure においては, PA 圧が RV 圧を凌駕し, 肺動脈血流量波形は一過性の低下を示した. Late-systolic reopening においては, その前半部分では RV 圧が再度 PA 圧を凌駕し, 肺動脈血流量波形がわずかに再上昇を示した. Rapid closure においては PA 圧が RV 圧を凌駕し, 肺動脈血流量波形が急激に低下を示した.

3) 実験的肺高血圧時に認められた肺動脈弁 mid-systolic semiclosure の原因は, 収縮中期に PA 圧が RV 圧を一過性に凌駕するために, 肺動脈弁の肺動脈主幹部側で弁口部の血流方向とは逆の(肺動脈主幹部側から右室側へ向かう)血液移動が生じ, それまで最大開放位にあった弁が右室側へ移動することによるものである.

文 献

- 1) Nanda NC, Gramiak R, Robinson TI, Shah PM: Echocardiographic evaluation of pulmonary hypertension. *Circulation* **50**: 575, 1974
- 2) Weyman AE, Dillon JC, Feigenbaum H, Chang S: Echocardiographic patterns of pulmonic valve motion with pulmonary hypertension. *Circulation* **50**: 905, 1974
- 3) Sakamoto T, Matsuhisa M, Hayashi T, Ichiyasu H: Echocardiogram of the pulmonary valve. *Jap Heart J* **15**: 360, 1974
- 4) Pocoski DJ, Shah PM: Physiologic correlates of echocardiographic pulmonary valve motion in diastole. *Circulation* **58**: 1064, 1978
- 5) Acquatella H, Schiller NB, Sharpe DN, Chatterjee K: Lack of correlation between echocardiographic pulmonary valve morphology and simultaneous pulmonary arterial pressure. *Amer J Cardiol* **43**: 946, 1979
- 6) 田原 稔, 田中弘允, 鄭 忠和, 中尾正一郎, 桜井修吾, 吉村寿一, 皆越真一, 鹿島友義, 金久卓也: 拡張期肺動脈弁エコー波形の規定因子に関する検討. 第 18 回臨床心音図研究会 45 席にて発表, 1979 (*J Cardiography* 投稿中)
- 7) 田原 稔, 田中弘允, 吉村寿一, 中尾正一郎, 桜井修吾, 鄭 忠和, 厚地良彦, 金久卓也: 肺動脈弁左尖エコーグラムの b-c slope を規定する因子に関する実験的研究. *J Cardiography* **8**: 773, 1978
- 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) Laks MM, Garner D, Morady F, Swan HJC: Hemodynamics in the conscious dog during progressive pulmonary arterial occlusion. *Amer J Physiol* **222**: 578, 1972
- 10) Sakamoto T, Matsuhisa M, Hayashi T, Ichiyasu H: Echocardiogram and phonocardiogram related to the movement of the pulmonary valve. *Jap Heart J* **16**: 107, 1975
- 11) 椎名 明, 柳沼淑夫, 松本芳彬, 川崎建市, 吉谷正雄, 宮田捷信, 富田忠孝, 松本陽子, 川井信義, 細田瑛一: Flow velocity 及び UCG 同時記録による肺動脈弁及び大動脈弁動態の解析. *J Cardiography* **7**: 599, 1977
- 12) Bauman W, Wann LS, Childress R, Weyman AE, Feigenbaum H, Dillon J: Mid systolic notching of the pulmonary valve in the absence of pulmonary hypertension. *Amer J Cardiol* **43**: 1049, 1979
- 13) 大脇 嶺, 加藤 洋, 柳原皓二, 鈴木隆夫, 高木義博, 奥町富久丸, 吉川純一: 心エコー図による肺高血圧症診断の問題点. *呼吸と循環* **25**: 247, 1977
- 14) 小泉克己, 梅田 徹, 町井 潔: Contrast echo 法による主肺動脈血流パターンと流速の推定について. *日超医講演論文集* **34**: 112, 1978