

原著

## 経食道パルスドプラ法による肺静脈血流波形の検討

赤松 繁\* 寺澤悦司\* 加川憲作\*\*  
上松治孝\* 山本道雄\*

## 要 旨

経食道ドプラ心エコー図法を用いて肺静脈血流動態の検討を行った。肺静脈血流は経食道カラードプラ法で容易に描出された。経食道パルスドプラ法により肺静脈左房接合部で得られた肺静脈血流波形は、心室収縮期の1～2相性の順行波（S波）、心室拡張期の順行波（D波）と心房収縮期の逆行波（A波）よりなる3～4相性の波形であった。S波は心房の弛緩に伴う左房への流入波と心室収縮に伴う心房の伸展による流入波、D波は急速流入期の左室拡張に伴う流入波、A波は心房収縮により左房から肺静脈に向かう逆流波に由来すると思われた。加齢に伴いD波の最高流速PFVdは低下、S波とD波の最高流速の比PFV(S/D)は上昇する傾向があった。これらの結果は肺静脈血流動態に対する左室拡張能の関与を示唆するものと思われた。

## はじめに

肺静脈血流は左房への流入血流で左心系への還流血流ということができ、循環動態に大きな影響を与える血流である。しかしその解剖学的特徴から、肺静脈血流動態は従来動物実験や開胸手術時の検討<sup>1)~4)</sup>しかなく十分に解明されているとはいえなかった。近年、医用電子工学、超音波医学の発達に伴い、胸壁からの超音波ドプラ法により肺静脈血流動態を検討した報告<sup>5)6)</sup>がみられるようになってきた。しかし胸壁からのアプローチでは、成人の場合、カラードプラ法での肺静脈血流の描出そのものが容易ではない。また超音波ビーム方

向と肺静脈血流の方向の間の角度が大きい上、サンプル部位まで距離があるなどの理由で、パルスドプラ法で良好な層流パターン of 血流波形を安定して得ることは難しく、詳細な検討は困難であると思われる。

経食道心エコー図法は、超音波法による心臓への新しいアプローチとして近年急速に普及してきた。本法により、従来の方法では検討できなかった血行動態が明らかにされてきた<sup>7)</sup>とともに、本法は術中モニターとしても用いられている<sup>8)9)</sup>。経食道ドプラ心エコー図法は探触子が食道内にあるため、食道に接した左房および僧帽弁領域の血流情報の検討に優れている<sup>10)</sup>。今回われわれは、肺静脈血流動態を検討するため、手術症例を対象とし経食道パルスドプラ法を用いて肺静脈血流波形の検討を行った。

## 対象と方法

対象は本院で全身麻酔下に手術を受けた症例で、術中モニターとして経食道心エコー図法を施行したASA分類1の心臓に異常を認めない正常洞調律症例41例とした。このうち経食道パルスドプラ法で良好な肺静脈血流波形を記録することができなかった6例を除外し、17歳から70歳まで(平均年齢45±13歳)の35例の検討を行った。全身麻酔の導入はチオペンタール、フェンタニール、サクシニルコリン等で行った。気管内挿管後、食道内探触子を挿入しカラードプラ法で左右の肺静脈血流の描出を行った。カラードプラ法で肺静脈血流を確認した後、左上肺静脈の左房への開口部にサンプルボリュームを設定し、呼吸停止下にパルスドプラ法で肺静脈血流波形を記録し、続いてサンプルボリュームを肺静脈の上流に徐々に移動

\*岐阜大学医学部麻酔学教室, \*\*同第二内科学教室

し、サンプル部位による肺静脈血流波形の変化を記録した。

また、左房への開口部で記録した左上肺静脈の血流波形の心室収縮期波 (S波)、心室拡張期波 (D波)、心房収縮期波 (A波) の peak flow velocity (PFVs, PFVd, PFVa) を計測し、PFVs と PFVd の比 PFV (S/D) を計算し、各々の指標と年齢との相関関係を検討した。なお肺静脈血流波形の検討は、気管内挿管に伴う循環動態の変動がおさまった後、手術執刀前に行った。使用した超音波血流映像装置はカラー Doppler SSD-860 および870 (アロカ社)、食道内探触子は 5 MHz を用いた。

結 果

1. 経食道 Doppler 心エコー図法による肺静脈血流波形の描出

肺静脈血流映像は、僧帽弁が描出される位置よりも 1~2 cm 探触子を引き抜き左右に回転させることにより、経食道カラー Doppler 法で全例左房内に流入するのが容易に検出された。さらに走査方向が直交する 2 つの探触子を備えた bi-plane 探触子 (図 1) を用いることにより上下の肺静脈を識別することは容易であった。経食道パルスド

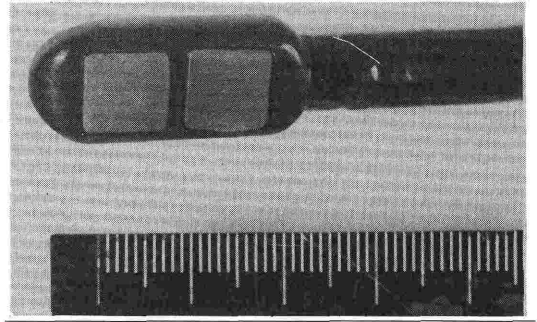


図 1 Bi-plane color Doppler transesophageal transducer.

プラ法での肺静脈血流波形の描出は41例中35例 (85.4%) の症例で明瞭な層流パターンで描出可能であった。

2. 経食道パルスドプラ法による正常肺静脈血流波形

左上肺静脈の左房への開口部で経食道パルスドプラ法により得られた肺静脈血流波形は、心室収縮期の 1~2 相性の順行波 (S波)、心室拡張期の順行波 (D波) と心房収縮期の逆行波 (A波) よりなる 3~4 相性の波形であった (図 2)。S波は 1 相性であった症例と収縮早期の心房拡張期の波 (S<sub>1</sub> 波) とこれに続く第二の収縮期波 (S<sub>2</sub>

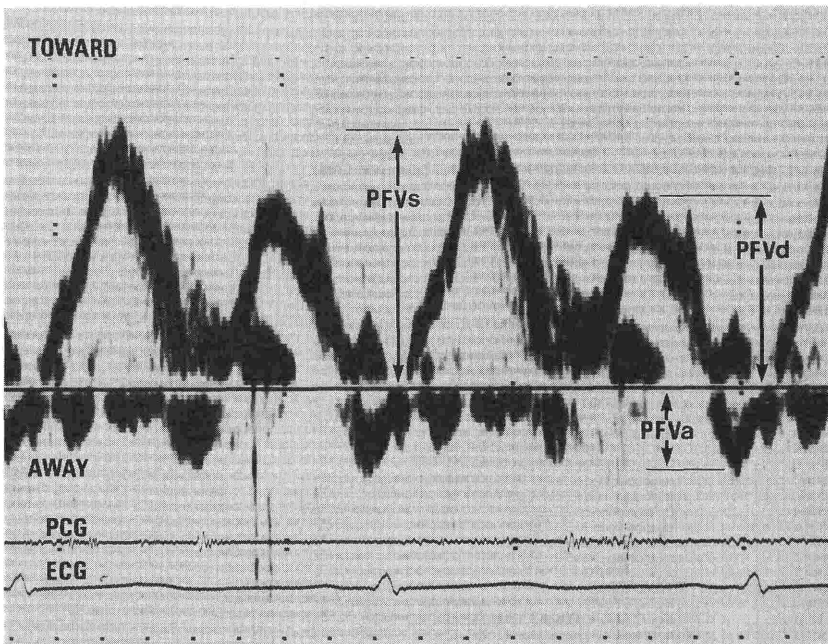


図 2 Transesophageal pulsed Doppler echocardiogram of pulmonary venous flow and its measurements.

表1 Mean peak flow velocities of each wave.

Mean peak flow velocities of each wave

m-PFVs	49 ± 13 (cm/sec)
m-PFVd	35 ± 10 (cm/sec)
m-PFVa	13 ± 4 (cm/sec)

波)の2相性であった症例があったが、若年者のS波は1相性の症例が多く、加齢に伴い2相性の症例が増加する傾向があった。なお、A波は5例(14.3%)で記録できなかった。各波の peak flow velocity の平均値 (m-PFV) は、m-PFVs が 49±13 cm/sec, m-PFVd が 35±10 cm/sec, m-PFVa が 13±4 cm/sec であった (表1)。

左右の肺静脈血流波形は、ほぼ同様なフローパターンを示した。サンプル部位による肺静脈血流波形の変化は、左房への開口部で各波は最大流速を示し、サンプルボリュームを肺静脈の上流に移

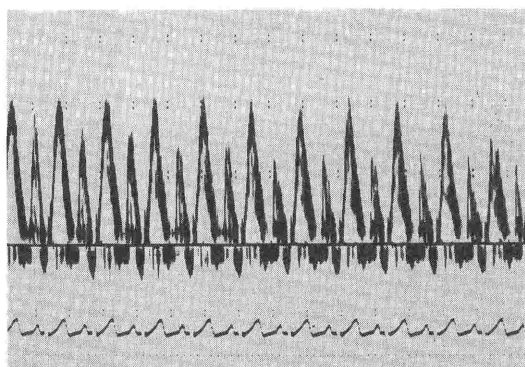


図3 Pulmonary venous flow pattern in different sampling sites.

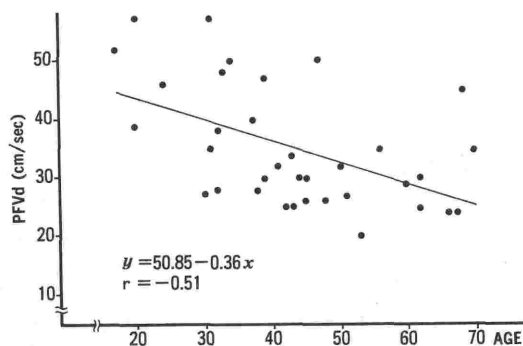


図4 Relationship between peak flow velocity of D wave (PFVd) and age. PFVd decreased with aging.

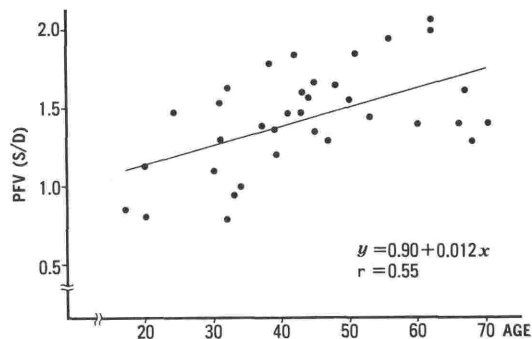


図5 Relationship between the ratio of peak flow velocity of S wave to that of D wave (PFV (S/D)) and age. PFV (S/D) increased with aging.

動するに伴い、各波の流速は低下した。流速の低下はS波に比べD波でより著明であった (図3)。

3. 肺静脈血流波形の年齢的特徴

年齢と PFVs, PFVa の間には相関関係は認められなかったが、PFVd との間には  $r = -0.51$  ( $p < 0.01$ ) の粗な負の相関関係が認められた (図4)。また、年齢と PFV (S/D) との間には  $r = 0.55$  ( $p < 0.001$ ) の正の相関関係が認められた (図5)。

考 察

肺静脈血流動態は、従来動物実験や開胸手術時の研究<sup>1)-4)11)-16)</sup>により報告されてきた。しかし、その解剖学的特徴から肺静脈血流動態を詳細に検討することは容易ではなく、その血流動態は解明されているとはいえなかった。肺静脈血流動態を規定する因子には、肺血管床を通しての右心系からの圧の伝播<sup>1)11)-13)</sup>や左心系の内圧変化による吸引効果<sup>2)-4)14)-16)</sup>などが挙げられてきた。動物実験により右室の拍出が肺静脈に伝播することが確認され<sup>1)12)</sup>、1960年代には肺静脈の拍動、左房の充満は右心系がその駆動力となっていると考えられていた。しかし、肺動脈血流は心室収縮期の1相性の血流であるのに対し、肺静脈血流は心室収縮期の血流とともに心室拡張期の血流を有する拍動流であること、上大静脈と右肺動脈を吻合した実験モデルで右肺静脈から心室収縮期に血流波形を記録できることなどから、肺静脈血流動態には右心系以外の規定因子が存在すると考えられるようになった<sup>15)</sup>。Rajagopalan ら<sup>2)-4)</sup>は、肺血管

床は大きな血液のリザーバとしての機能を持ち、肺静脈血流は左房の内圧変化により規定されると報告した。このようにして1970年代には、肺静脈血流動態の規定因子としては右心系からの圧の伝播よりも、心周期における左心系の内圧変化が重要と考えられるようになってきた。

胸壁からの超音波パルスドプラ法を用いた Keren ら<sup>5)</sup>の報告では、健常者の肺静脈血流波形は心室収縮期波と心室拡張期波からなる2相性の波形であり、肺静脈血流動態は主として左房、左室の収縮と弛緩により生じる左房の内圧変化により規定されると記されている。彼らは超音波ドプラ法を用いることにより、これまでほとんど検討されていなかった人での肺静脈血流動態の検討を行ったわけである。しかし胸壁からのパルスドプラ法では、解剖学的位置関係から超音波ビームの肺静脈の血流方向に対する入射角の問題や探触子からサンプル部位まで距離があることなどのため、良好な層流パターンで安定した血流波形を得ることは難しいものと考えられる。

これに対し経食道ドプラ心エコー図法では、探触子が左房の背側に接した食道内にあり肺静脈までの距離が近く、超音波の透過性、減衰の問題もなく血流波形を検討することができた。われわれの検討では、経食道カラードプラ法で全症例で肺静脈血流の描出は可能であり、経食道パルスドプラ法により85%の症例で明瞭な層流パターンで肺静脈血流波形を記録することができた。15%の症例で良好な血流波形を記録することができなかったのは、肺静脈の走行には上下の肺静脈が左房に開口する前に早期に合流するなどの変異があること、超音波ビームと肺静脈血流の三次元的な位置関係が十分でなかった症例が存在したことによると考えられる。しかし、経食道心エコー図法は経胸壁心エコー図法よりも肺静脈血流の検討には明らかに優れている。

Keren ら<sup>5)</sup>が心室収縮期波と心室拡張期波よりなる2相性の波形であると報告した肺静脈血流波形は、経食道パルスドプラ法を用いたわれわれの検討では、心室収縮期の1~2相性のS波、心室拡張期のD波と心房収縮期のA波よりなる3~4相性の血流波形として描出することができた。S波は心房の弛緩に伴う左房への流入波(S<sub>1</sub>波)と心室収縮に伴う心房の伸展による流入波(S<sub>2</sub>

波)からなり、D波は急速流入期の左室拡張に伴う流入波、A波は心房収縮により左房から肺静脈に向かう逆流波であると思われた。Keren らの報告にはS波の2つの波と、A波に相当する波形の記載がない。これは胸壁からのパルスドプラ法では、前述の理由や超音波の透過性などの問題により、肺静脈血流波形を明瞭な層流パターンで描出できないためS<sub>1</sub>波とS<sub>2</sub>波を分離することができず、遅い流速のA波を検出できなかったものと思われる。

肺静脈血流波形の各波の血流速度は左房への開口部が最高速で、サンプルボリュームを左房から遠ざけるに伴い流速が低下した。これは肺静脈血流動態の規定因子として、右心系よりも左心系の方が重要であることを意味するものと思われる。また、D波の流速の低下の方がS波の流速の低下よりも著しかったが、これはS波には右心系からの圧の伝播も関与していることを示唆するものと考えられる。

S<sub>1</sub>波は若年者では分離されにくく、加齢に伴い2相性の症例が増加したが、これは左室充満に対する心房収縮の寄与の割合が若年者と高齢者では異なる<sup>17)</sup>ためと思われた。左室充満に対する心房収縮の寄与の割合が大きい高齢者では、心房収縮と密接な関係を持つ左房早期流入波<sup>18)</sup>がS<sub>1</sub>波として記録され、左室充満に対する心房収縮の寄与の割合が小さい若年者ではS<sub>1</sub>波をS<sub>2</sub>波から分離できなかったものと考えられる。

D波には左室拡張能が関与している可能性が考えられる。左室急速流入期には、僧帽弁は開放しており左房は肺静脈から左室への導管として働き、この時相の肺静脈血流は左室拡張能により規定されていることが考えられる。われわれの肺静脈血流波形の年齢的検討では、年齢とPFVdとの間には粗な負の相関関係が、PFV(S/D)との間には正の相関関係が認められた。PFVdは肺静脈の血流方向と超音波ビーム方向との間の三次元的な角度のため測定上の誤差が生じばらつきが出たのに対し、PFV(S/D)では比をとることにより角度による測定上の問題が相殺され、相関関係が上昇したものと思われた。これらの加齢に伴う肺静脈血流動態に対する心室拡張期波成分の寄与の低下は、健常者では左室収縮能は高齢者でも比較的良好に保たれるのに対し、左室拡張能は加齢に

に伴い低下してくることと関連があると思われる。

経食道パルスドプラ法を用いた本研究では、Rajagopalanら<sup>2)-4)</sup>、Keren<sup>5)</sup>らの意見と同様に、肺静脈血流動態には左心系の影響が大きいことが示され、さらに左室拡張能が重要な規定因子であることが示唆された。

結 語

- ① 経食道パルスドプラ法による肺静脈血流波形は、心室収縮期の1～2相性の順行波、心室拡張期の順行波と心房収縮期の逆行波よりなる3～4相性の波形であった。
- ② 加齢に伴い肺静脈血流波形のPFVdは低下、PFV(S/D)は上昇する傾向がみられた。
- ③ 肺静脈血流動態と左室拡張能の関連が示唆された。

本稿の要旨は、第36回日本麻酔学会（山口）、第10回日本循環制御医学会（東京）および第54回日本超音波医学会（東京）において発表した。

参 考 文 献

- 1) Morkin, E., Collins, J. A., Goldman, H. S., et al.: Pattern of blood flow in the pulmonary veins of the dog. *J. Appl. Physiol.* 20:1118-1128, 1965.
- 2) Rajagopalan, B., Friend, J. A., Stallard, T., et al.: Blood flow in pulmonary veins. I; Studies in dog and man. *Cardiovasc. Res.* 13:667-676, 1979.
- 3) Rajagopalan, B., Friend, J. A., Stallard, T., et al.: Blood flow in pulmonary veins. II; The influence of events transmitted from the right and left sides of the heart. *Cardiovasc. Res.* 13:677-683, 1979.
- 4) Rajagopalan, B., Bertram, C. D., Stallard, T., et al.: Blood flow in pulmonary veins. III; Simultaneous measurements of their dimensions, intravascular pressure and flow. *Cardiovasc. Res.* 13:684-692, 1979.
- 5) Keren, G., Sherez, J., Megidish, R., et al.: Pulmonary venous flow pattern—its relationship to cardiac dynamics.; A pulsed Doppler echocardiographic study. *Circulation* 71:1105-1112, 1985.

- 6) 神田 進, 青墳裕之, 片山博視ほか: 肺静脈血流の解析, 一肺静脈血流はいくつの成分よりなるか—. *日児誌* 92:600, 1988.
- 7) Akamatsu, S., Uematsu, H., Yamamoto, M., et al.: Evaluation of physiological mitral regurgitant flow with transesophageal Doppler echocardiography. *Jpn. Circ. J.* 53:663, 1989.
- 8) Cahalan, M. K., Litt, L., Botvinick, E. H., et al.: Advances in noninvasive cardiovascular imaging; Implications for the anesthesiologist. *Anesthesiology*: 66, 356-372, 1987.
- 9) 赤松 繁, 上松治孝, 山本道雄ほか: 術中モニターとしてのリアルタイムドプラー断層心エコー図法の有用性. *麻酔* 37:1529-1536, 1988.
- 10) 赤松 繁, 加川憲作, 上松治孝ほか: 経胸壁ならびに経食道ドプラ心エコー図法による健常者僧帽弁逆流血流の検討. *超音波医学* 15(Suppl 2):785-786, 1988.
- 11) Pinkerson, A. L.: Pulse-wave propagation through the pulmonary vascular bed of dogs. *Am. J. Physiol.* 213:450-454, 1967.
- 12) Szidon, J. P., Ingram, R. H., Fishman, A. P.: Origin of the pulmonary venous flow pulse. *Am. J. Physiol.* 214:10-14, 1968.
- 13) Guntheroth, W. C., Gould, R., Butler, J., et al.: Pulsatile flow in pulmonary artery, capillary and vein in the dog. *Cardiovasc. Res.* 8:330-337, 1974.
- 14) Dixon, S. H., Nolan, S. P., Morrow, A. G.: Pulmonary venous blood flow.; The effects of alterations in atrial pressure, pulmonary arterial occlusion and mitral regurgitation in the dog. *Ann. Surg.* 174:944-949, 1971.
- 15) Morgan, B. C., Dillard, D., Guntheroth, W. C.: Effect of cardiac and respiratory cycle on pulmonary vein flow, pressure, and diameter. *J. Appl. Physiol.* 21:1276-1280, 1966.
- 16) Morgan, B. C., Abel, F., Mullins, G., et al.: Flow patterns in the cava, pulmonary artery, pulmonary vein, and aorta in intact dogs. *Am. J. Physiol.* 210:903-909, 1966.
- 17) Miyatake, K., Okamoto, M., Kinoshita, N., et al.: Augmentation of atrial contribution to left ventricular inflow with aging as assessed by intracardiac Doppler flowmetry. *Am. J. Cardiol.* 53:586-589, 1984.
- 18) Toma, Y., Matsuda, Y., Moritani, K., et al.: Left atrial filling in normal human subjects; Relation between left atrial contraction and left atrial early filling. *Cardiovasc. Res.* 21:255-259, 1987.

## Analysis of pulmonary venous flow pattern by transesophageal pulsed Doppler echocardiography

Shigeru Akamatsu, Etsuji Terazawa, Kensaku Kagawa  
Harutaka Uematsu and Michio Yamamoto

Department of Anesthesiology and the Second Department of  
Internal Medicine, Gifu University School of Medicine  
40 Tsukasa-machi, Gifu, 500

To assess pulmonary venous flow dynamics, we analysed pulmonary venous flow pattern, obtained by transesophageal pulsed Doppler echocardiography. We studied 41 surgical patients with no history or physical evidence of cardiac disorders under general anesthesia. In all cases pulmonary venous flow was easily identified by transesophageal color Doppler echocardiography. Pulmonary venous flow pattern, which was obtained clearly in 85% (35/41) of the patients by transesophageal pulsed Doppler echocardiography, was tri or quadriphasic: the first wave, which was often biphasic in elder patient, occurred during ventricular systole (S wave); the second wave occurred in diastole during the rapid ventricular filling phase of mitral flow (D wave); the third wave was reverse flow toward the pulmonary vein during atrial contrac-

tion (A wave). The reduction in left atrial pressure, that results from the relaxation of atrium and downward movement of mitral valve caused by the contraction of left ventricle, is responsible for S wave. Left ventricular relaxation and rapid emptying of left atrium initiate D wave. Atrial contraction results in a rise in left atrial pressure and it is responsible for A wave. S wave tended to be biphasic with aging. Peak flow velocity of D wave was correlated with patients' age ( $r = -0.51$ ,  $p < 0.01$ ) and decreased with aging. The ratio of peak flow velocity of S wave to that of D wave was correlated with age ( $r = 0.55$ ,  $p < 0.001$ ) and increased with aging. These data suggest pulmonary venous flow dynamics relate to left ventricular diastolic function.

**Key words:** Transesophageal Doppler echocardiography,  
Pulmonary venous flow, Diastolic function