

連続波ドップラー法による
肺動脈拡張末期圧の非侵襲
的推定

Pulmonary arterial end-
diastolic pressure nonin-
vasively estimated by
continuous wave Dopp-
ler echocardiography

増山 理
上松 正朗*
佐藤 洋
中谷 敏
南都 伸介
平山 篤志
朝田 真司
児玉 和久
北島 顕*
井上 通敏*

Tohru MASUYAMA
Masaaki UEMATSU*
Hiroshi SATO
Satoshi NAKATANI
Shinsuke NANTO
Atsushi HIRAYAMA
Shinji ASADA
Kazuhisa KODAMA
Akira KITABATAKE*
Michitoshi INOUE*

Summary

To estimate pulmonary arterial end-diastolic pressures noninvasively, we measured the pulmonary regurgitant flow velocity by continuous wave Doppler echocardiography in 17 patients with pulmonary hypertension (pulmonary arterial end diastolic pressure greater than or equal to 18 mmHg) and in 23 patients without pulmonary hypertension. Pulmonary regurgitation was successfully detected by continuous wave Doppler echocardiography in 14 of the 17 patients with pulmonary hypertension and in 14 of the 23 patients without pulmonary hypertension. The end-diastolic pulmonary artery-to-right ventricular pressure gradient was estimated from the Doppler-determined pulmonary regurgitant flow velocity by means of a simplified Bernoulli equation. The Doppler-determined end-diastolic pulmonary artery-to-right ventricular pressure gradient correlated well with the catheter measurement ($r=0.94$). It also correlated well with the pulmonary arterial end-diastolic pressure ($r=0.92$). Thus, continuous wave Doppler echocardiography was useful in estimating noninvasively pulmonary arterial end-diastolic pressures.

大阪警察病院心臓センター
大阪市天王寺区北山町 10-31 (〒543)
*大阪大学医学部 第一内科
大阪市福島区福島 1-1-50 (〒553)

The Cardiovascular Division, Osaka Police Hospital,
Kitayama-cho 10-31, Tennouji-ku, Osaka 543
*The First Department of Internal Medicine, Osaka
University School of Medicine, Fukushima 1-1-50,
Fukushima-ku, Osaka 553

Received for publication February 7, 1986; accepted March 16 1986 (Ref. No. 31-18)

Key words

Continuous wave Doppler echocardiography
Pulmonary hypertension

Pulmonary regurgitation

Bernoulli equation

序

連続波ドップラー法を用いて狭窄弁口部ジェット血流速度が計測されれば, Bernoulli 式より狭窄弁圧較差を求めうる¹⁻⁴⁾. 本手法は弁逆流疾患にも応用でき⁵⁻⁷⁾, 例えば三尖弁逆流血流速度からは収縮期右室-右房間圧較差, さらに右室収縮期圧をも非侵襲的に推定しうる⁸⁻¹⁰⁾ことが最近報告されている。本研究では連続波ドップラー法を用いて肺動脈弁逆流血流速度を捕捉し, その定量的解析から, 拡張末期肺動脈-右室間圧較差, および肺動脈拡張末期圧の非侵襲推定を試みた。肺動脈拡張末期圧は, 肺疾患を合併しない例では左房圧, 左室拡張末期圧を反映することから, これを非侵襲的に推定し得れば, 臨床的意義は大きいと考えられる。

対象と方法

1. 対象

対象は心臓カテーテル検査を施行した各種心疾患 40 例(男性 17 例, 女性 23 例; 年齢 8~70 歳, 平均 51 歳)である。内訳は僧帽弁疾患 12 例, 冠動脈疾患 11 例, 先天性心疾患 7 例, 拡張型心筋症 5 例, 原発性肺高血圧症 3 例, 高血圧性心臓病 1 例, 大動脈弁疾患 1 例であり, うち 9 例は心房細動例であった。これらを 2 群に分類し, それぞれ拡張末期肺動脈圧 18 mmHg 以上の 17 例を肺高血圧症群, それ未満の 23 例を正常肺動脈圧群とした。

2. 肺動脈弁逆流血流の捕捉

使用装置は超音波断層心エコー・ドップラー装置(東芝製 SSH-40A+SDS-21B)である。肺動脈弁逆流血流速度の計測には発信周波数 2.4 MHz の探触子を用いた。血流計測に際しては, 患者を安静仰臥位または左側臥位とし, 肺動脈弁を描出

し, 超音波ビームを肺動脈弁弁口部に向け, 各心拍における肺動脈弁逆流血流速度のピーク血流速度が最も速く記録されるようにビーム方向を設定し行った (Fig. 1)。

3. 肺動脈弁逆流血流速度波形の解析

連続波ドップラー法を用いて得られた肺動脈弁逆流血流速度波形より, 拡張末期の肺動脈弁逆流血流速度を計測した (Fig. 1)。肺動脈弁逆流血流速度の算出には超音波ビーム入射角による角度補正を行わず, 瞬時最高周波数から, ドップラー原理式を用い求めた。また, Hatle らが提唱した簡易 Bernoulli 式^{1,2,4)}を用い, 拡張末期肺動脈-右室間圧較差 (PG) を次式のごとく算出した。

$PG = 4V^2$ (但し $V =$ 拡張末期肺動脈弁逆流血流速度, m/秒)

これらの値は 3 心拍以上の平均として求め, カテーテル法による実測値と対比検討した。

結 果

1. 連続波ドップラー法による肺動脈弁逆流血流の検出

連続波ドップラー法による正常例の肺動脈弁逆流血流速度波形を Fig. 2 に示す。肺動脈圧が正常な症例における弁逆流血流速度は, 肺動脈弁閉鎖後速やかにピークに達し, その後徐々に減速する波形を呈した。一方, 肺高血圧症例においても弁逆流血流速度波形は類似の形状を示したが, 正常肺動脈圧症例に比し, 流速において明らかに大であった (Fig. 3)。連続波ドップラー法による肺動脈弁逆流血流検出率は, 正常肺動脈圧症例 23 例中 14 例 (61%), 一方, 肺高血圧症例では 17 例中 14 例 (82%) で, 明らかに大であった。

2. 肺動脈弁逆流血流速度に基づく肺動脈-右室間圧較差の推定

拡張末期の肺動脈弁逆流血流速度は拡張末期肺動

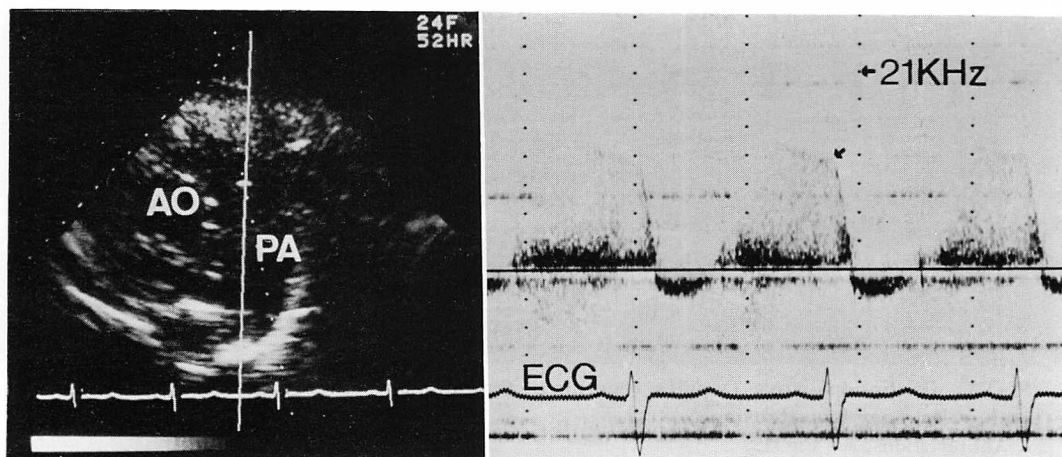


Fig. 1. Illustration of method of measuring end-diastolic velocity of pulmonary regurgitant flow by continuous wave Doppler echocardiography.

Appropriately transmitted or received ultrasonic beam direction is represented by a white solid line in the two-dimensional echocardiogram (left). A small oblique arrow in the right panel indicates the end-diastolic velocity of pulmonary regurgitant flow.

Abbreviations: AO=aorta, PA=pulmonary artery, ECG=electrocardiogram.

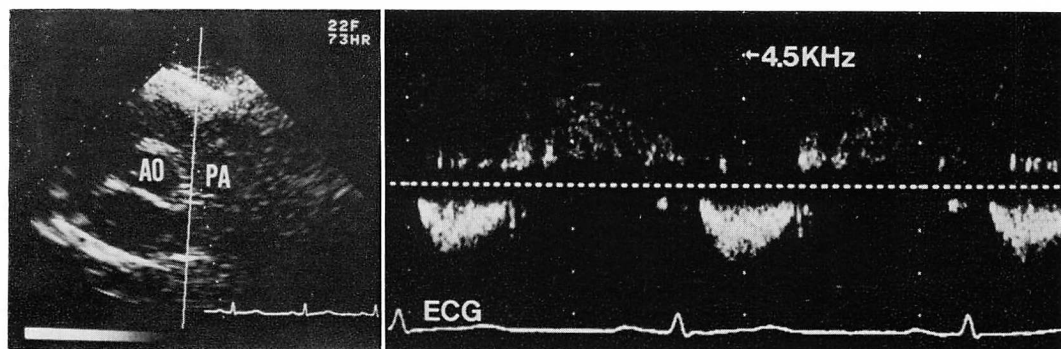


Fig. 2. Continuous wave Doppler recording of pulmonary regurgitant flow in a patient without pulmonary hypertension.

Abbreviations: see Fig. 1.

脈-右室間圧較差の大きい例ほど高値であり、両者間に $r=0.90$ と良好な相関を認めた. 簡易 Bernoulli 式より推定した肺動脈-右室間圧較差は、実測値とさらに良好な相関 ($r=0.94$) を示した (Fig. 4).

3. 肺動脈弁逆流血流速による肺動脈拡張末期圧の推定

拡張末期肺動脈弁逆流血流速は肺動脈拡張末期

圧の大きい例ほど高値であり、両者間には $r=0.90$ と良好な相関を認めた. また、簡易 Bernoulli 式より推定した肺動脈-右室間圧較差との間には、さらに良好な相関 ($r=0.92$) を認めた (Fig. 5).

考 按

連続波ドップラー法を用いて肺動脈弁逆流血流を捕捉し、その定量的解析より、肺動脈拡張末期

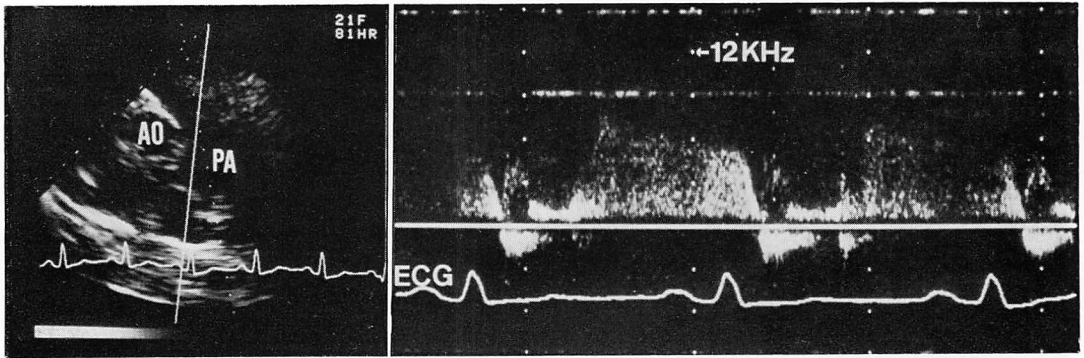


Fig. 3. Continuous-wave Doppler recording of pulmonary regurgitant flow in a patient with pulmonary hypertension.

Abbreviations: see Fig. 1.

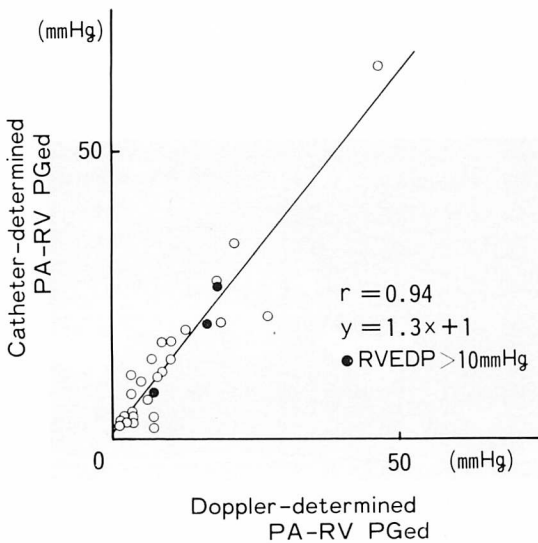


Fig. 4. Correlation between Doppler-determined and catheter-determined pulmonary artery-to-right ventricular pressure gradient at end-diastole (PA-RV PGed).

Closed circle represents right ventricular end-diastolic pressure (RVEDP) higher than 10 mmHg.

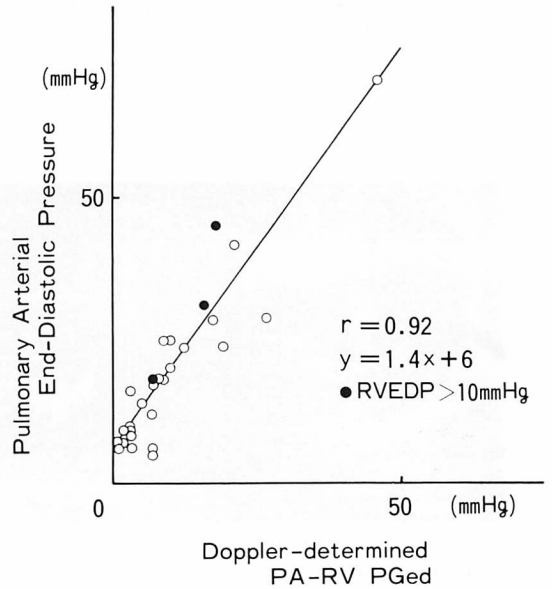


Fig. 5. Correlation between Doppler-determined pulmonary artery-to-right ventricular pressure gradient at end diastole (PA-RV PGed) and pulmonary arterial end-diastolic pressure.

Closed circle represents right ventricular end-diastolic pressure (RVEDP) higher than 10 mmHg.

圧の非侵襲的推定を試みた。その結果、肺動脈弁逆流は、正常肺動脈圧症例に比し、肺高血圧症例でより高頻度に捕捉し得、また拡張末期肺動脈弁逆流血流速より、Bernoulli 式を用い、肺動脈拡張

末末期圧を非侵襲的に推定しうることを示された。連続波ドップラー法により求めた肺動脈弁逆流血流速波形は、従来より報告されている大動脈弁逆流血流速波形¹¹⁻¹⁵⁾に酷似していたが、その流

速はピーク、拡張末期とも明らかに低値であった。これは流速を規定する圧較差が、大動脈-左室に比し、肺動脈-右室の方ではるかに小さいためと考えられた。

肺動脈弁逆流血流は正常肺動脈圧症例でも約61%で捕捉しえたが、肺高血圧症例においては82%と、さらに高率に検出した。Waggoner¹⁶⁾はパルス・ドップラー法を用いた検討で、肺動脈弁逆流血流が肺動脈圧の高い例ほど検出されやすいと報告しており、我々の成績と一致した。しかし、彼らが報告した検出率は肺高血圧症例で61%、正常肺動脈圧症例で13%に留まり、我々の結果に比し低かった。検出率はドップラー信号の解析法、S/N比や探触子の操作性や検者の技術など、種々の因子の影響を受ける。Waggoner¹⁶⁾の成績は1980年のものであり、我々の成績との差異は5年間の装置の進歩に依るところが大であると考えられる。事実、高尾¹⁷⁾は、超音波パルス・ドップラー法を用い、肺動脈弁逆流が健常者や正常肺動脈圧症例においてもほぼ全例に存在すると報告している。さらに装置や探触子が改良されれば、連続波ドップラー法による肺動脈弁逆流血流の検出率も一層向上することが期待される。かかる際には、肺動脈圧の推定は肺動脈弁逆流の有無よりも、血流速から行う方がより有用と考えられる。

今回の検討で、肺動脈弁逆流血流速は肺動脈圧の高い例ほどより大であった。宮武¹⁸⁾はパルス・ドップラー法を用いて肺動脈弁逆流血流を記録・解析し、正常肺動脈圧症例ではドップラーспекトラムが一方向性であるのに対し、肺高血圧症例では両方向性であると報告している。これは、肺高血圧症例では肺動脈弁逆流血流が速く、aliasing効果により両方向性を呈したものと理解し得、我々の成績も同一と考えられる。

簡易 Bernoulli 式より求めた拡張末期肺動脈-右室間圧較差は、実測値に比し、約25%過小に評価された。肺動脈弁逆流血流の方向を周囲の構造物より推定することは困難であり、今回の検討

では角度補正を行っていない。しかし、肺動脈弁逆流血流は、通常、肺動脈弁の器質的病変に起因せず、生理的あるいは二次的に生じることから、肺動脈弁逆流血流が肺動脈弁に垂直に吹くと仮定すると、超音波ビーム入射角がそれに対し20度以上の角度を成していると考えられる例は約半数存在している。このことは、この入射角が過小評価の主因である可能性が大であることを示唆し、今後、この点において、角度補正を含めた検討が必要と考えられた。

簡易 Bernoulli 式より推定した拡張末期肺動脈-右室間圧較差は肺動脈拡張末期圧とも良好な相関を示し、肺動脈拡張末期圧の非侵襲的推定にも有用であることが示唆された。肺血管床に異常を有しない例では、肺動脈拡張末期圧は左房圧、左室拡張末期圧を反映することから、心不全例の病態把握、治療効果の判定などに、この肺動脈拡張末期圧の計測の有用性が期待される。右室拡張末期圧が10 mmHg以上の3例では過小評価傾向を認めたが、右室拡張末期圧が19 mmHgの症例を除き、誤差は5 mmHg以下であった。このことより、著明な右室拡張末期圧や右房圧の上昇が疑われる症例では注意が必要であるが、多くの症例では十分に臨床応用しうると考えられる。

パルス・ドップラー法を用いた肺動脈圧の非侵襲的推定法として、最近、右室流出路または肺動脈の血流速波形解析から求めた右心収縮時係数や加速時間が有用であることが報告されている¹⁹⁻²³⁾。本論文ではこれらの手法との対比検討は行わなかった。各手法の有用性は、各症例におけるドップラー記録の質、計測の容易さなど、種々の因子に規定されよう。

要 約

肺動脈弁逆流血流速を連続波ドップラー法を用い計測し、その解析から、肺動脈拡張末期圧の非侵襲的推定を試みた。対象は心臓カテーテル検査を施行した各種心疾患40例で、うち17例に肺動脈拡張末期圧18 mmHg以上の肺高血圧症を認め

た. 全例において, 断層心エコー・ドップラー装置を用い, 肺動脈弁逆流血流速を連続波モードで記録した. 肺動脈弁逆流血流速は正常肺動脈圧症例 23 例中 14 例 (61%), また肺高血圧症 17 例中 14 例 (82%) で検出された. 拡張末期肺動脈弁逆流血流速は拡張末期肺動脈-右室間圧較差の増大に伴い大となり ($r=0.90$), 簡易 Bernoulli 式を用いて求めた拡張末期肺動脈-右室間圧較差は実測値とさらに良好な相関を示した ($r=0.94$). また, 拡張末期肺動脈弁逆流血流速は肺動脈拡張末期圧とも良好な相関を示し ($r=0.90$), 簡易 Bernoulli 式より求めた拡張末期肺動脈-右室間圧較差は, 肺動脈拡張末期圧とさらに良好な相関を示した ($r=0.92$).

以上, 連続波ドップラー法を用いて肺動脈弁逆流血流速を計測することにより, 肺動脈拡張末期圧を精度良く, 非侵襲的に推定しうることが示された. 肺動脈弁逆流は肺高血圧症例で高率に検出しうることから, 本手法は肺高血圧症の非侵襲的評価に有用と考えられる.

文 献

- 1) Hatle L, Brubakk A, Tromsdal A, Angelsen B: Noninvasive assessment of pressure drop in mitral stenosis by Doppler ultrasound. *Br Heart J* **40**: 131, 1978
- 2) Hatle L: Noninvasive assessment and differentiation of left ventricular outflow obstruction with Doppler ultrasound. *Circulation* **64**: 381, 1981
- 3) Lima CO, Sahn DJ, Valdes-Cruz LM, Goldberg SJ, Barron JV, Allen HD, Grenadier E: Noninvasive prediction of transvalvular pressure gradient in patients with pulmonary stenosis by quantitative two-dimensional echocardiographic studies. *Circulation* **67**: 866, 1983
- 4) Hatle L, Angelsen B: Doppler ultrasound in cardiology: Physical principles and clinical applications. Lea & Febiger, Philadelphia, 1985, p 153
- 5) Yock PG, Popp RL: Non-invasive estimation of ventricular pressures by Doppler ultrasound in patients with tricuspid or aortic regurgitation. *Circulation* **68** (Suppl II): II-230, 1983 (abstr)
- 6) Skjaerpe T, Hatle L: Noninvasive estimation of pulmonary artery pressure by Doppler ultrasound in tricuspid regurgitation. *In* Spencer MP, editor: *Cardiac Doppler diagnosis*. Martinus Nijhoff, Boston, 1983, p 247
- 7) Handshoe R, Handshoe S, Kwan OL, Smith MD, DeMaria AN: Value and limitations of Doppler measurement in the estimation of left ventricular end-diastolic pressure in patients with aortic regurgitation. *Circulation* **70** (Suppl II): II-117, 1984 (abstr)
- 8) Yock PG, Popp RL: Noninvasive estimation of right ventricular systolic pressure by Doppler ultrasound in patients with tricuspid incompetence. *Circulation* **70**: 657, 1984
- 9) Berger M, Haimowitz A, Tosh AV, Berdoff RL, Goldberg E: Quantitative assessment of pulmonary hypertension in patients with tricuspid regurgitation using continuous wave Doppler ultrasound. *J Am Coll Cardiol* **6**: 359, 1985
- 10) Currie PJ, Seward JB, Chan KL, Fyfe DA, Hagler DJ, Mair DD, Reeder GS, Nishimura RA, Tajik J: Continuous wave Doppler determination of right ventricular pressure: A simultaneous Doppler-catheterization study in 127 patients. *J Am Coll Cardiol* **6**: 750, 1985
- 11) Pedoe DST, Macpherson P: Cardiac diagnosis using continuous wave Doppler and a true spectral display. *In* Spencer MP, editor: *Cardiac Doppler diagnosis*. Martinus Nijhoff, Boston, 1983, p 143
- 12) Spencer MP, Fujioka K: CW Doppler with spectral analysis in acquired valve disease. *In* Spencer MP, editor: *Cardiac Doppler diagnosis*. Martinus Nijhoff, Boston, 1983, p 175
- 13) Teague SM, Sublett KL, Anderson J, Olson EG, Thadani U: Doppler half-time index correlates with the severity of aortic regurgitation. *Circulation* **70** (Suppl II): II-394, 1984 (abstr)
- 14) Masuyama T, Kodama K, Kitabatake A, Nanto S, Sato H, Uematsu M, Inoue M, Kamada T: Noninvasive evaluation of aortic regurgitation by continuous-wave Doppler echocardiography. *Circulation* **73**: 460, 1986
- 15) Masuyama T, Uematsu M, Naka M, Nanto S, Taniura K, Taniura T, Kimura Y, Kodama K, Kitabatake A, Inoue M: Continuous wave Doppler echocardiography as a noninvasive evaluation of aortic regurgitation. *J Cardiogr* **15**: 1207, 1985 (in Japanese)
- 16) Waggoner A, Quinones M, Young J, Brando T, Shah A, Verani M, Miller R: Pulsed Doppler echocardiographic detection of right-sided valve regurgitation. *Am J Cardiol* **47**: 279, 1981
- 17) Takao S, Miyatake K, Izumi S, Kinoshita N,

- Sakakibara H, Nimura Y: Physiological pulmonary regurgitation detected by the Doppler technique and its differential diagnosis. *J Am Coll Cardiol* **5**: 499, 1985 (abstr)
- 18) Miyatake K, Okamoto M, Kinoshita N, Matsuhisa M, Nagata S, Beppu S, Park Y, Sakakibara H, Nimura Y: Pulmonary regurgitation studied with the ultrasonic pulsed Doppler technique. *Circulation* **65**: 969, 1982
- 19) Foulst JM, Blanchard D, Raoul B, Bourassa MG, Water DD, Guermouprez JL, David PR, Theroux P: Noninvasive measurement of pulmonary artery pressure by pulsed Doppler echocardiography. *Circulation* **62** (Suppl): III-99, 1980 (abstr)
- 20) Masuyama T, Kitabatake A, Asao M, Tanouchi J, Morita T, Ishihara K, Fujii K, Ito H, Yasui K, Hori M, Tada M, Inoue M, Abe H: Measurements of right ventricular systolic time intervals with pulsed Doppler ultrasound for noninvasive evaluation of pulmonary artery pressures. *J Cardiology* **14** (Suppl V): 225, 1984
- 21) Kitabatake A, Inoue M, Asao M, Masuyama T, Tanouchi J, Morita T, Mishima M, Uematsu M, Shimazu T, Hori M, Abe H: Noninvasive evaluation of pulmonary hypertension by a pulsed Doppler technique. *Circulation* **68**: 302, 1983
- 22) Mahan G, Dabestini A, Gardin J, Allie A, Burn C, Dnry W: Estimation of pulmonary artery pressure by pulsed Doppler echocardiography. *Circulation* **68** (Suppl III): III-367, 1983 (abstr)
- 23) Kosturakis D, Goldberg SJ, Allen HD, Loeber C: Doppler echocardiographic prediction of pulmonary arterial hypertension in congenital heart disease. *Am J Cardiol* **53**: 1110, 1984