

拡張期左室内圧・僧帽弁口
血流速度曲線の検討：心房
ペースングによる心拍数変
動の影響

Diastolic left ventricular
pressure-mitral valve
flow velocity curve: In-
fluence of heart rate
change induced by atrial
pacing

中谷 茂和*
新垣 義夫
富田 英
竹内 則夫
神谷 哲郎

Shigekazu NAKAYA*
Yoshio ARAKAKI
Hideshi TOMITA
Norio TAKEUCHI
Tetsuro KAMIYA

Summary

To assess the left ventricular (LV) diastolic properties, the influence of heart rate change induced by atrial pacing on LV pressure-mitral valve (MV) flow velocity curves was studied. Simultaneous recording of MV flow velocity using pulsed Doppler echocardiography and LV pressure via a catheter-tip micromanometer was performed in 12 cases with past history of Kawasaki disease. Heart rates were increased in gradations of 10 beats from rest to 180 beat/min, or to the time when A-V block occurred. Diastolic LV pressures and MV flow velocities were plotted manually every 10 msec to establish pressure-velocity relationships at each heart rate. The relationship of LV pressure and MV flow velocity was non-linear, and formed a loop. At rest, this loop showed counterclockwise rotation (CCR) in all cases. By increasing heart rate, rotation changed from CCR to clockwise rotation (CR), except in two cases. With much greater increase in heart rate, CCR reappeared in five cases (second CCR). CCR may indicate that the increment of MV flow is smaller than the fall in LV pressure in the early diastolic filling period, suggesting the existence of inflow resistance. This is thought to be physiologic, and it is suspected that it is produced mainly by the MV and subvalvular structures. CR indicates that the MV flow velocity increases more rapidly than the fall in LV pressure, demonstrating that the resistance to inflow is reduced by increasing heart rate, and the increment of left atrial (LA) driving pressure plays a main role. In a case with simultaneous recording of LA and LV pressures, LA pressure became elevated and the LA-LV pressure gradient increased with an increasing heart rate. This suggests that the increment of LA pressure relates to a decrease of inflow resistance. The second CCR suggests that a resistance is produced beyond a capacity to compensate for elevated LA pressure. It can be speculated

国立循環器病センター 小児科
吹田市藤白台 5-7-1 (〒565)
*(現)金沢大学医学部 小児科
金沢市宝町 13-1 (〒920)

Department of Pediatrics, National Cardiovascular
Center, Fujishirodai 5-7-1, Suita 565
*(Present address) Department of Pediatrics, Kana-
zawa University School of Medicine, Takara-machi
13-1, Kanazawa 920

Received for publication September 21, 1985; accepted December 20, 1985 (Ref. No. 28-4)

that this resistance is related to visco-elasticity of the LV, in addition to the MV and subvalvular structures.

Key words

Pulsed Doppler echocardiography Mitral valve flow Diastolic left ventricular pressure Atrial pacing

はじめに

左室拡張期特性について、従来より、拡張期左室内圧とシネアンジオ¹⁻³⁾または心エコー図法⁴⁻⁶⁾から求めた左室容積との関係、心筋レベルでのストレス・ストレイン関係^{7,8)}などの解析がなされてきた。近年、心腔内の特定部位の血流速度を計測する一方法として、超音波パルス・ドプラー法を用いる非侵襲的な計測法が用いられるようになり、この方法により得られる僧帽弁口流入血流波形から、左室拡張期待特性を評価する試みがなされている⁹⁻¹³⁾。

本研究では、超音波パルス・ドプラー法から得られる僧帽弁口血流速度と、カテ先圧マンメーターを用いて得られた拡張期左室内圧について、心拍数の変動による影響を検討し、左室拡張期流入特性につき解析を試みた。

対 象

対象は器質的心疾患を認めない川崎病既往児12例で、冠動脈に軽度の拡大性病変を有する例を2例を含むが、いずれもその狭窄性病変は認めない例である。年齢は1~6歳、平均3.1±2.2歳である。左室拡張末期圧と左室容積はいずれも正常範囲内にあり、壁運動にも異常を認めなかった。

方 法

断層心エコー図により心尖部左室長軸断面を描出し、超音波ビームを心尖部より僧帽弁口に向け、パルス・ドプラーのサンプルボリュームを僧帽弁口中央部に置き、弁口血流速度を計測した。使用したパルス・ドプラー装置は東芝製断層心エコー図装置SSH 40AにドプラーユニットSDS 21A

を組み合わせたものである。左室内圧は Millar 製カテ先圧マンメーターを用い、逆行性に左室内に挿入して計測した。Strip chart recorder にて、紙送り速度 100 mm/sec で、僧帽弁口血流波形と拡張期左室内圧を同時記録した。拡張期現象解析のため、拡張期の左室内圧はキャリブレーションを大きくとり記録した。記録の直前、直後にカテ先圧マンメーターのゼロシフトを検討し、シフトがある場合は補正した。また、吸気時と呼気時で左室内圧、僧帽弁口血流波形ともに異なるため、呼吸曲線を同時記録し、以下の解析は呼気時の一心拍について行った。右房にペーシングカテーテルをおき、安静時心拍数から出発して、約 10 心拍ごとに段階的に心拍数を上昇させ、房室ブロックをきたさない場合、最大心拍数 180/sec まで上昇させた。記録した拡張期左室内圧と僧帽弁口血流速度を 10 msec ごとにマニュアルで計測し、プロットした。

結 果

Fig. 1A は 1 歳男児例の実記録である。左より安静時 (心拍数 130/sec)、ペーシングによる心拍数 150/sec, 180/sec のさいの左室内圧と僧帽弁口血流速度の変化を示す。この例は、カテ先圧マンメーターを右心系より卵円孔を経て左房へ挿入し、左房圧を記録した例で、左室圧は逆行性に同じくカテ先圧マンメーターを左室に挿入して、左室圧を左房圧と同時に記録したものである。Fig. 1B は本例で、心拍数が 130, 150, 180/分のさいの拡張期左房圧を心電図 R 波から 10 msec ごとに遡って求めてプロットしたものであり、左房圧は心拍数増加とともに上昇を示した。Fig. 1C は本例の左房-左室圧較差をプロットしたものである

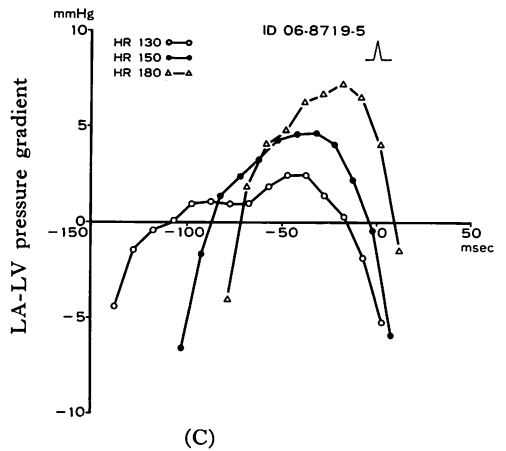
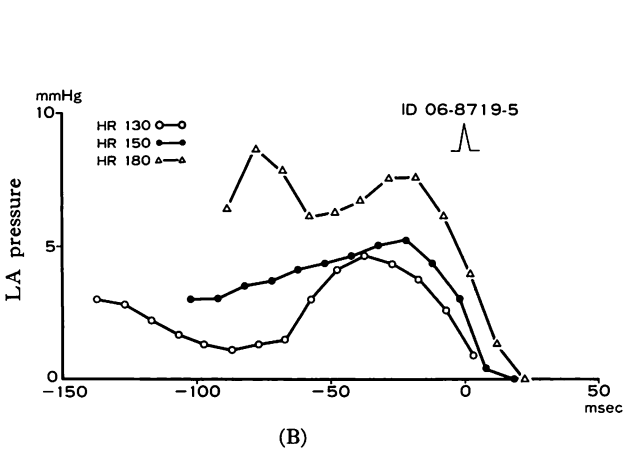
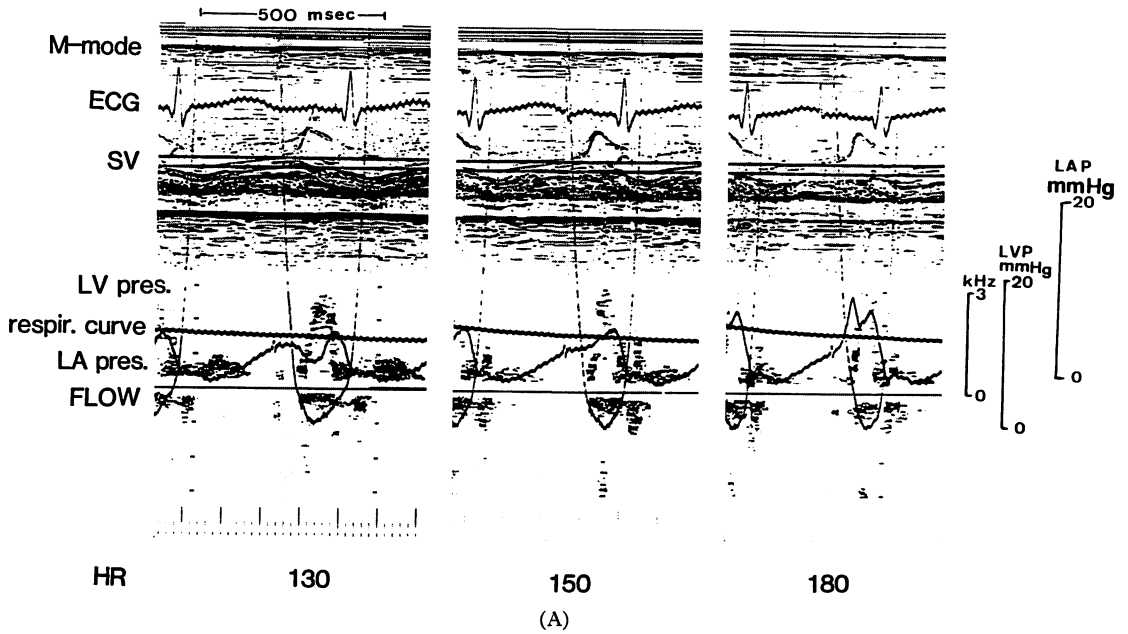


Fig. 1A. Simultaneous recordings of mitral valve flow velocity, left ventricular and left atrial pressures in heart rates of 130, 150 and 180 per min.

ECG=electrocardiogram; M-mode=M-mode echocardiogram; SV=sample volume; LV pres.= left ventricular pressure; respir. curve=respiratory curve; LA pres.=left atrial pressure; FLOW= mitral valve flow velocity; HR=heart rate; LVP=left ventricular pressure; LAP=left atrial pressure.

Fig. 1B. Changes of left atrial diastolic pressure by atrial pacing.

0 means the timing of the R wave of the electrocardiogram. Each measurement is made at 10 msec apart.

Fig. 1c. Changes in left atrial-left ventricular pressure gradient in diastoles by atrial pacing.

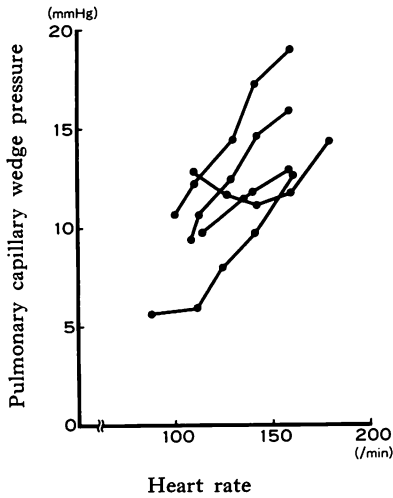


Fig. 2. Relationships between pulmonary capillary wedge pressure and heart rate.

が、心拍数増加により圧較差は増大した。

Fig. 2 は計測し得た 5 例における肺動脈楔入圧 (拡張期最大値) に対するペースングによる心拍数変化の影響をみたもので、心拍数増加により楔入圧は上昇傾向を示した。

Fig. 3 は、おのおのの心拍数について、10 mm/sec ごとに左室内圧と僧帽弁口血流速度をプロッ

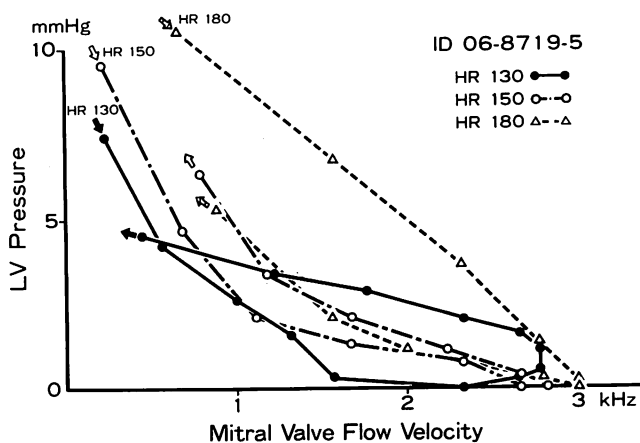


Fig. 3. Rotation of left ventricular pressure-mitral valve flow velocity loop in three increments of the heart rate (130, 150 and 180).

Heart rate 130: counterclockwise rotation, 150: counterclockwise rotation, 180: clockwise rotation.

トした左室内圧-僧帽弁口血流速度曲線で、いずれもループを形成している。心拍数 130/sec のループは反時計回転 (counterclockwise rotation: 以下 CCR) を示した。心拍数 150/sec のループも安静時同様 CCR であるが、ループは狭小化を示した。心拍数 180/sec では、ループは時計回転 (clockwise rotation: 以下 CR) に変化した。

Fig. 4 は 2 歳男児例で、安静時心拍数 91/sec、ペースングによる心拍数 128/sec および 156/sec 時の左室内圧と僧帽弁口血流速度の同時記録である。**Fig. 5** に左室内圧-僧帽弁口流入速度曲線を示す。安静時では前例と同様、ループは CCR であるが、心拍数 128/sec では CR に変化した、さらに心拍数 156/sec に上昇すると再び CCR となった。

12 例全例について、心拍数の変動によるループの回転方向の変化を **Fig. 6** に示す。全例安静時 CCR を示し、2 例を除き、心拍数増加とともに CR となった。また、5 例では、さらに心拍数が上昇すると、再び CCR (以下 second CCR) となった。8 の字形は CCR と CR の中間に出現しており、回転方向変化の移行形と考えられた。

各症例の心拍数が異なるため、安静時心拍数を

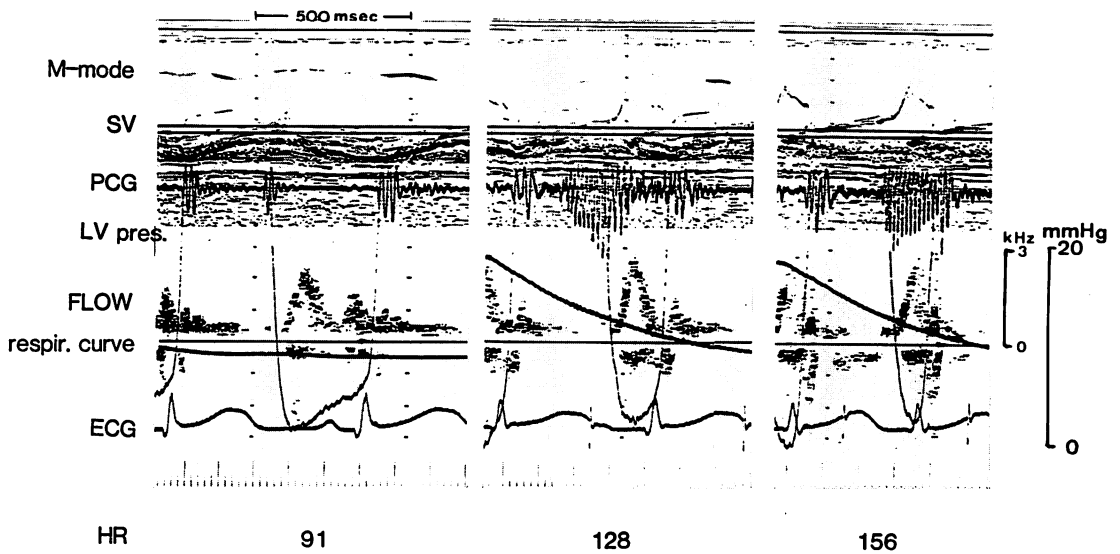


Fig. 4. Simultaneous recordings of mitral valve flow velocity and left ventricular pressure in heart rates of 91, 128 and 156 per min.

PCG=phonocardiogram. Other abbreviations: see Fig. 1.

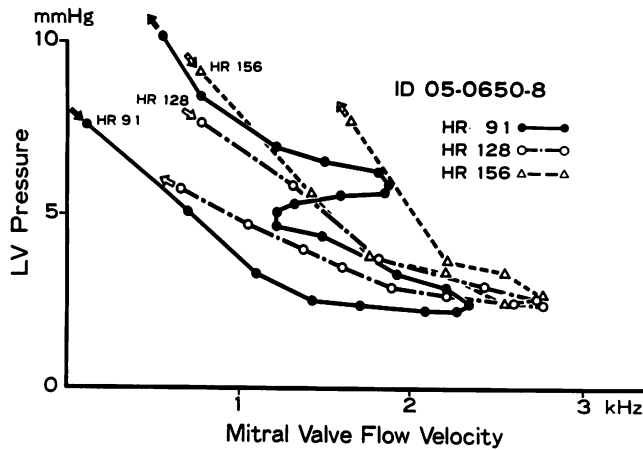


Fig. 5. Relationship of left ventricular pressure-mitral valve flow velocity loop to the heart rate (heart rates: 91, 128 and 156).

Heart rate 91: counterclockwise rotation; 128: clockwise rotation; 156: counterclockwise rotation.

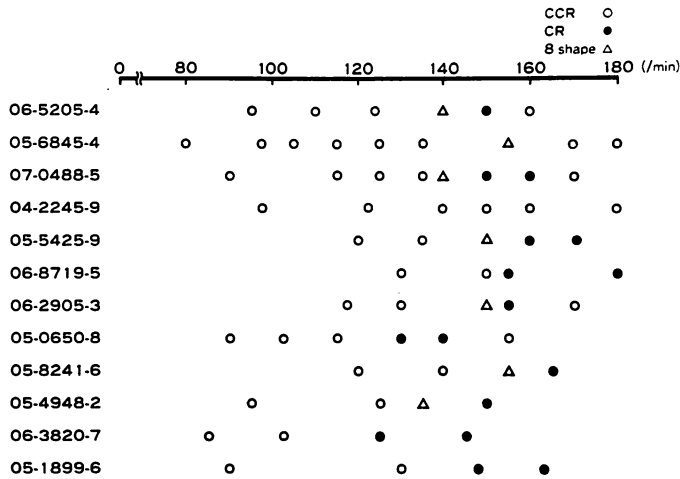


Fig. 6. Relationship between rotation of left ventricular pressure-mitral valve flow velocity loop and heart rate in all cases.

CCR=counterclockwise rotation; CR=clockwise rotation; 8 shape=figure-in-8 shape.

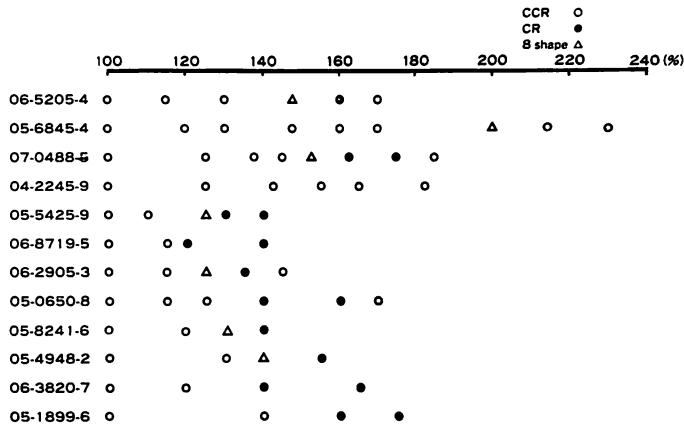


Fig. 7. Relationship between rotation of left ventricular pressure-mitral valve flow velocity loop and percent change (%) of heart rate in all cases.

CCR=counterclockwise rotation; CR=clockwise rotation; 8 shape=figure-in-8 shape.

100% とし, 心拍数増加率によるループの変化を検討すると, 心拍数による変化と同様の傾向を示した (Fig. 7).

Fig. 8 に CCR, CR, second CCR 各群の心拍数および心拍数増加率の平均値を示した.

Fig. 8 上図の上段は各群の開始時点の平均値,

下段に各群すべての平均値を示す. 安静時心拍数の平均値 $101.4 \pm 18.0/\text{sec}$, CR に変化する開始時点の平均値は $148.8 \pm 12.9/\text{sec}$, second CCR の開始時点の心拍数の平均値は $166.8 \pm 6.7/\text{sec}$ であった. また, 各群の心拍数のすべての平均値はそれぞれ $114.7 \pm 18.0/\text{sec}$, $152.4 \pm 13.6/\text{sec}$, $170.7 \pm 7.4/\text{sec}$

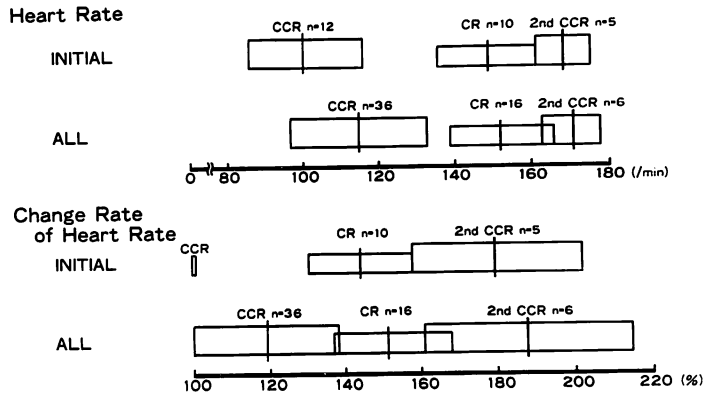


Fig. 8. Mean values of heart rate and percent change (%) of heart rate in each group.
 CCR=counterclockwise rotation; CR=clockwise rotation; second CCR=second counterclockwise rotation. INITIAL means initial point in each group; ALL means all points in each group.

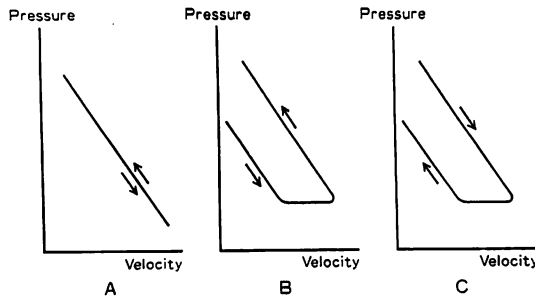


Fig. 9. Schemata of left ventricular pressure-mitral valve flow velocity loop.
 B and C correspond to CCR and CR, respectively.

secであった。

心拍数上昇率による検討では (Fig. 8 下図), CRの開始時点の平均値は $144.4 \pm 13.7\%$, second CCRの開始時点の平均値は $180.2 \pm 22.2\%$ であった。CCR, CR, second CCR各群すべての平均値は、それぞれ $119.1 \pm 19.5\%$, $151.6 \pm 16.4\%$, $188.2 \pm 27.0\%$ であった。

考 察

僧帽弁口血流の開始は僧帽弁の開放とともに始まり¹⁴⁾, 左房-左室間の圧較差により生じるものと考えられている¹⁵⁾。Foltsらは、僧帽弁口血流

は急速流入期の前半は左房-左室間の圧較差に一致して流速を増し、ピークに達した後、後半は徐々に減速し、その間は左房-左室間の圧較差はほとんど無く、後半の僧帽弁口血流速は慣性によると報告している¹⁵⁾。また、Nolanらは、急速流入期の血流速は左房-左室間の圧較差のほか、左房および左室の容量、弾性により影響されると述べている¹⁶⁾。僧帽弁口血流速は、そのほか、一回拍出量、僧帽弁および付属弁下組織、心膜、右室圧などの影響を受けるものと考えられる¹⁰⁾。また、僧帽弁口血流は、短絡および弁逆流が無い場合、左室容量の経時的変化に等しく、そのため左室の

拡張能を反映するものと考えられる^{9,17,18)}。近年、超音波パルス・ドプラー法を用いて僧帽弁口血流速度が非侵襲的に計測可能となり、本法から得られる僧帽弁口血流波形を分析することにより、左室拡張能の評価の試みがなされている⁹⁻¹³⁾。

本研究では、器質的心疾患を認めない例を用い、ペースングによる心拍数変動時の僧帽弁口血流速度と左室内圧との関係から、左室拡張期流入特性へのアプローチを試み、心拍数変動によって、僧帽弁口血流に対する生理的因子の関与について検討を試みた。

僧帽弁口血流速度は左房-左室間の圧較差により生ずるため、本来、左房-左室間の圧較差と僧帽弁口血流速度の関係を検討することがより妥当と考えられる。しかし、臨床例では左房圧と左室圧の同時記録は卵円孔開存例以外はほとんど不可能であり、一方、肺動脈楔入圧の計測は fluid-filled カテーテルによるため時間遅れが大きい。したがって左房-左室間の圧較差の計測は困難である。そのため、今回は左房圧を実測せず、左室圧と僧帽弁口血流速度との関係を検討した。また別の問題として、本研究では左室内圧はカテ先圧マンメーターを用いて測定し、僧帽弁口血流速度はパルス・ドプラー法を用いて測定した。パルス・ドプラー法では fast Fourier transformation 方式により周波数分析しているが、血流信号表示までに時間を要するため、カテ先圧マンメーター法との比較では、時間的差異を考慮する必要がある。今回用いたドプラー装置の time delay は 10~13 msec 程度と考えられ¹⁹⁾、カテ先圧マンメーターの time delay がほとんど無いものとする、両者の時間的差異は 10 数 msec 程度と考えられる。今回、左室内圧と僧帽弁口血流速度の二次元曲線の検討の場合、time delay の 10~20 msec はループの形成に大きな変化を与えなかったため、この点も考慮せずに解析を行った。

拡張期左室内圧と僧帽弁口流入血流速度のプロットにより得られるループの形成は、一般に履歴現象 (hysteresis) と呼ばれる現象で、両者の時間

的推移に位相のズレを生じていることを表わしている。

Fig. 9 は、ペースングによるループの回転方向の変化を模式的に表わしたものである。安静時は全例 B の形をとり、この場合、拡張早期の左室内圧の低下に僧帽弁口血流速度の増大が追従しない形であり、左室の急速流入障害があると考えられ、流入抵抗の存在を示す。これはいわば生理的に存在する抵抗であるが、これには主として僧帽弁および付属弁下組織など物理的抵抗の関与が大きいものと推測される。これに対し、ペースングによる心拍数増加に伴って CR となる場合は C の形となり、左室内圧の低下がいまだ十分ではない時期からすでに僧帽弁口血流速度が増大している形で、生理的流入障害が減少したものとする。8 の字形は明確なループを形成しておらず、A の形と考えられる。A は hysteresis を生じていないことを示すが、8 の字形は CCR と CR の中間に存在しており、A は B から C、または C から B への移行過程に出現するものと考えられる。

この心拍数増加による生理的流入障害の減少には、拡張期左房圧の上昇が関与するものと考えられる。実際、ペースングにより心拍数を増加させると、拡張期左房圧および肺動脈楔入圧は上昇している。従来報告では、心房ペースングにより心拍数を変化させた場合、左室拡張末期圧は低下するが、肺動脈楔入圧は変化せず両者に解離が起こるとの成績がある²⁰⁻²²⁾。しかしながら、本研究の結果では、同様に心拍数の増加に伴って左室拡張末期圧は低下傾向にあるが、同時に左房圧または肺動脈楔入圧は増加の傾向が認められた。これらの事実より、心拍数増加により CCR から CR に変化する原因は、左房圧の上昇、左室拡張末期圧の低下により、左房-左室間の圧較差の増大をきたし、生理的流入障害の軽減をもたらすためと考えられる。また、心拍数増加に伴い、再び CCR となる場合は、左房-左室間の圧較差増大では代償しきれない流入抵抗が生じていることを示すものと考えられる。僧帽弁口血流には、僧帽弁、付

属弁下組織の他に左室の粘弾性を含む左室伸展性が関与するものと考えられ、この変化は心拍数上昇における左室伸展性の変化を示唆している可能性があるものと考えられる。

結 論

器質的心疾患を認めない川崎病既往児について、僧帽弁口流入血流速度と拡張期左室内圧とにより形成される2次元曲線について、心房ペーシングによる心拍数変動の影響について検討した。その結果、生理的流入障害の存在が示唆された。この僧帽弁口流入血流速度-拡張期左室内圧曲線は、左室拡張期流入特性を検討する一つの方法と考えられた。

要 約

器質的心疾患を認めない川崎病既往児 12 例を対象として、超音波パルス・ドプラー法から得られる僧帽弁口血流速度と、カテ先圧マンメーターを用いて計測した左室内圧とから、二次元曲線を作製し、それに対する右房ペーシングによる心拍数変動の影響を検討し、左室拡張期流入特性について解析を試みた。

超音波パルス・ドプラー法を用いて僧帽弁口中央付近の血流速度を計測し、カテ先圧マンメーターを逆行性に左室に挿入して計測した左室内圧を、紙送り速度 100 mm/sec で同時記録した。右房ペーシングにより、安静時心拍数より約 10 心拍ごとに心拍数を段階的に増加させ、房室ブロックをきたさない場合、最大心拍数 180/sec まで上昇させた。記録した拡張期左室内圧と僧帽弁口血流速度を 10 msec ごとにマニュアルで計測し、プロットした。

プロットした左室内圧-僧帽弁口血流速度曲線はループを形成し、これは hysteresis の表われと考えられた。このループの回転方向は、安静時は全例 counterclockwise rotation (CCR) で、心拍数増加により、2 例を除き、clockwise rotation (CR) となった。5 例では、さらに心拍数を増加さ

せると、再び CCR となった。

CCR となる場合は、拡張早期の左室内圧低下に僧帽弁口血流速度が追従し得ず、左室の急速流入に対する障害(流入抵抗)があると考えられ、これは主として僧帽弁および付属弁下組織によるもので、いわば生理的に存在する抵抗と考えられた。ペーシングによる心拍数増加に伴って CR となる場合は、左室内圧低下が少ない時期から僧帽弁口血流速度が増加しており、流入抵抗の減少を示すものと考えられた。

左房圧と左室圧を同時記録し得た症例では、心拍数増加とともに左房圧は上昇し、左房-左室圧較差の増大を認めた。また、肺動脈楔入圧を測定した症例でも、同様の傾向を認めた。

これらの事実より、心拍数増加による生理的流入抵抗の減少には、左房圧の関与が大きいものと考えられた。またさらに、心拍数増加に伴って再び CCR となる場合は、左房-左室間の圧較差では代償しきれない流入抵抗が生じていることを示し、これには僧帽弁、付属弁下組織のほかに、左室の粘弾性を含む左室伸展性が関与するものと考えられた。

文 献

- 1) Gaasch WH, Battle WE, Oboler AA, Banas JS, Levine HJ: Left ventricular stress and compliance in man with special reference to normalized ventricular function curves. *Circulation* **45**: 746, 1972
- 2) Gaasch WH, Levine HJ, Quinones MA, Alexander JK: Left ventricular compliance: Mechanisms and clinical implications. *Am J Cardiol* **38**: 645, 1976
- 3) Sakamoto S, Yasuda H, Murakami R, Ando M, Nishino T: The diastolic pressure-volume relationship of the left ventricle. *Jpn Circ J* **46**: 84, 1982
- 4) 松尾裕英, 北畠 颯, 浜中康彦, 別府慎太郎, 土井光徳, 千田彰一, 仁村泰治, 阿部 裕: 左室拡張と心室壁弾性特性—UCG による検討—*日本臨床* **33**: 67, 1975
- 5) Grossman W, Stefadouros MA, McLaurin LP, Rolett EL, Yound DT: Quantitative assessment of left ventricular diastolic stiffness in man. *Circulation* **47**: 567, 1973

- 6) Grossman W, McLaurin LP, Moos SP, Stefadouros M, Young DT: Wall thickness and diastolic properties of the left ventricle. *Circulation* **49**: 129, 1974
- 7) Mirsky I: Assessment of passive elastic stiffness of cardiac muscle: Mathematical concepts, physiologic and clinical considerations, directions of future research. *Prog Cardiovasc Dis* **18**: 277, 1976
- 8) Steeter DD, Spotniz HM, Patel DP, Ross J, Sonnenblick EH: Fiber orientation in the canine left ventricle during diastole and systole. *Circ Res* **24**: 339, 1969
- 9) Kitabatake A, Inoue M, Asao M, Tanouchi J, Masuyama T, Abe H, Morita H, Senda S, Matsuo H: Transmittal blood flow reflecting diastolic behavior of the left ventricle in health and disease—A study by pulsed Doppler technique—. *Jpn Circ J* **46**: 92, 1982
- 10) Matsuo H, Kitabatake A, Asao M, Terao Y, Mishima M, Senda S, Shimizu T, Tanouchi J, Abe H: Noninvasive evaluation of diastolic properties of left ventricle by pulsed Doppler flowmetry combined with real-time two-dimensional echocardiography. *J Cardiography* **10**: 697, 1980 (in Japanese)
- 11) Tanouchi J, Kitabatake K, Asao M, Morita T, Masuyama T, Hori M, Inoue M, Abe H: Role of left ventricular relaxation on transmitral flow dynamics during early diastole: A study with pulsed Doppler flowmetry. *J Cardiography* **13**: 301, 1983 (in Japanese)
- 12) Takemura H, Oki T, Murao A, Fukuda N, Asai M, Ohshima C, Sawada S, Niki T, Mori H: Study on flow velocity patterns at the left ventricular inflow and outflow tracts in hypertrophic cardiomyopathy using pulsed Doppler echocardiography. *J Cardiography* **11**: 125, 1981 (in Japanese)
- 13) Oki T, Asai M, Takemura H, Fukuda N, Sakai H, Tominaga T, Murao A, Ohshima C, Kusaka Y, Niki T, Mori H: Pulsed Doppler echocardiographic assessment of diastolic left ventricular hemodynamics in hypertrophic cardiomyopathy: Relationship between the mode of left ventricular filling and the distribution of left ventricular hypertrophy. *J Cardiography* **13**: 523, 1983 (in Japanese)
- 14) Laniado S, Yellin E, Kotler M, Levy L, Stadler J, Terdiman R: A study of the dynamic relations between the mitral valve echogram and phasic mitral flow. *Circulation* **51**: 104, 1975
- 15) Folts JD, Young WP, Rowe GG: Phasic flow through normal and prosthetic mitral valves in unanesthetized dogs. *J Thorac Cardiovasc Surg* **61**: 235, 1971
- 16) Nolan SP, Dixon SH, Fisher RD, Morrow AG: The influence of atrial contraction and mitral valve mechanics on ventricular filling: A study of instantaneous mitral valve flow in vivo. *Am Heart J* **77**: 784, 1969
- 17) Hammermeister KE, Warvasse JE: The rate of change of left ventricular volume in man: II. Diastolic events in health and disease. *Circulation* **49**: 739, 1974
- 18) Kennish A, Yellin E, Frater RW: Dynamic stiffness profiles in the left ventricle. *J Appl Physiol* **39**: 665, 1975
- 19) 高尾精一, 宮武邦夫, 岡本光師, 木下直和, 大森文夫, 椿森省二, 榊原 博, 仁村泰治: 血流波形のFFT分析における時間遅れの問題についての一検討. *JSUM proceedings* **41**: 479, 1982
- 20) Leighton R, Zaron SJ, Robinson JL, Wessler AM: Effects of atrial pacing on left ventricular performance in patients with heart disease. *Circulation* **40**: 615, 1969
- 21) 藤原秀臣, 杉本圭市, 梅沢滋男, 家坂義人, 谷口興一: 心房ペースティングと心室ペースティングの差異について: 血行動態および心機能との関連. *心臓* **15**: 961, 1983
- 22) Ajisawa R, Niita M, Miyaka S, Taniguchi K, Takeuchi J: Hemodynamic response to isoproterenol infusion in patients with ischemic heart disease: Comparison with that to atrial pacing. *Shinzo* **17**: 271, 1985 (in Japanese)