

## 高速度映画撮影による僧帽弁 SJM 人工弁々葉の動態の解析

原 太久茂

X線シネ撮影装置を用いて僧帽弁 St. Jude Medical 人工弁の撮影を行い、人工弁々葉の動態の解析を行った。対象を心房細動の有無と後尖側弁下組織を温存したか否かに分け、それぞれにおける人工弁開放、閉鎖時間、及び腹側、背側弁葉の動態を比較検討した。弁葉の開放は心調律と関係なく対称的な動きを示し、開放時間も一定であった。弁葉の閉鎖時間は、洞調律例では一定であったが、心房細動例では閉鎖時間の延長した心拍や腹側、背側弁葉の非対称的な動きをする心拍を認めた。閉鎖時間の延長した心拍は背側弁葉が拡張末期、R波に先行し閉鎖が開始するため、これは心電図の先行 R-R 間隔が平均 R-R 間隔より延長した心拍に認められた。腹側弁葉の早期の非対称的な閉鎖の開始は、温存術式の心房細動例で高頻度に認められ、心電図の R 波より平均  $14 \pm 6$  msec 先行して閉鎖が開始していた。腹側弁葉の早期の閉鎖運動開始は左室拡張末期圧、肺動脈楔入圧、僧帽弁圧格差との間に関係はなく、弁下組織の機能により生じた血流変化により生じたものと推測された。

(平成 3 年 6 月 12 日採用)

## High-Speed Cinematoradiographical Study of the Movement of the SJM Prosthetic Mitral Valve

Takumo Hara

The dynamics of the St. Jude Medical (SJM) prosthetic mitral valve were analyzed by cinematoradiography. The valve open and closure times as well as the movement of the ventral and dorsal leaflets of the valve were examined in relation to the presence or absence of atrial fibrillation and preservation or non-preservation of the posterior mitral leaflet apparatus. The valve movement in the opening phase was symmetrical and the valve open time remained constant irrespective of cardiac rhythms. The valve closure time remained constant in patients with sinus rhythm. In patients with atrial fibrillation, however, cardiac beats with a prolonged valve closure time or beats with asymmetrical movement of the dorsal and ventral leaflets were observed. Prolongation of the valve closure time was attributable to closing of the dorsal leaflet at end-diastole prior to the appearance of the R wave on the ECG. This phenomenon was observed in cardiac beats where the preceding R-R interval was longer than the average R-R interval. Early closure of the ventral leaflet was frequently observed in patients with atrial fibrillation and preservation of the

posterior leaflet. In these cases, the ventral leaflet began to close  $14 \pm 6$  msec prior to the R wave on the ECG. Early closure of the ventral leaflet did not correlate with left ventricular end-diastolic pressure, pulmonary artery wedge pressure and the mitral valve pressure gradient. It was suggested that the early closure of the ventral leaflet was attributable to the flow dynamics in the mitral orifice associated with the posterior apparatus function. (Accepted on June 12, 1991) *Kawasaki Igakkaishi* 17(2):

140-147, 1991

**Key Words** ① Cinematoradiography ② Prosthetic valve dynamics  
③ Mitral valve replacement ④ St. Jude Medical valve  
⑤ Early closure

## はじめに

人工弁の機能は、心臓超音波検査<sup>1)~4)</sup>や *in vitro*<sup>5)~8)</sup> および X 線シネ撮影<sup>9)~14)</sup> などにより検討されている。心臓超音波や *in vitro* での人工弁の機能評価は、主にその血流動態に及ぼす影響を示標として行われ、人工弁々葉自体の動態に関する報告は少ない。これは高速で開閉する人工弁の動態を超音波検査や圧変化で評価することが困難であるためと考えられる。これに対し、X 線シネ撮影は人工弁々葉の細かな動態の観察に適し、主として最大開放角などの計測による人工弁機能不全の診断に有用とされ、SJM 人工弁自体の動態を解析した報告はみられない。

1964年 Lillebei ら<sup>15)</sup> が、弁下組織を温存した僧帽弁置換術を報告して以来、同手術の左室機能に対する有効性に関しては多くの報告がみられる<sup>16)~20)</sup> が、本術式における人工弁の動態を検討した報告はない。

本研究は僧帽弁 SJM 弁置換症例を対象とし、弁葉の動態を高速 X 線シネ撮影法を用いて撮影し、心房細動および後尖側弁下組織温存の有無が弁葉の動態に及ぼす影響について検討した。

## 対象および方法

### 1) 対象

当科で SJM 弁を用いて僧帽弁人工弁置換術を行った33例を対象とした。大動脈弁病変合併

例、人工弁機能不全例、弁周囲逆流を認める例、適切な方向より弁葉撮影を行い得なかった症例は対象から除外した。症例は、狭窄9例、狭窄兼閉鎖不全7例、閉鎖不全17例、心調律は、洞調律14例、心房細動19例であった。用いた SJM 弁のサイズは僧帽弁用 27~31 mm で、全例人工弁ピボットが僧帽弁前、後交連と垂直になるように縫着した。三尖弁輪形成術を10例に追加した。これら症例を心房細動の有無と後尖側弁下組織を温存したか否かにより、I 群：弁下組織非温存術式で洞調律例 (10例)、II 群：同術式で心房細動例 (11例)、III 群：弁下組織温存術式で洞調律例 (4例)、IV 群：同術式で心房細動例 (8例) の4群に分類し、比較検討した。各群の弁病変はII群で狭窄症が多かったが、他群では差はなかった (Table 1)。X 線シネ撮影は人工弁置換術後1か月以降に行った。

### 2) 方法

人工弁の撮影には、Phillip 社製循環器系 X

Table 1. Diseases in each groups

Disease Group	MS	MSR	MR	Total
I	1	1	8	10
II	7	2	2	11
III	0	0	4	4
IV	1	4	3	8
Total	9	7	17	33

MS : Mitral stenosis

MSR : Mitral stenosis and regurgitation

MR : Mitral regurgitation

線診断装置を用いた。患者は安静、仰臥位とし、心電図の同時記録下に2枚の弁葉と垂直になるtangenital projectionの方向からフィルム速度毎秒90コマで撮影した。

弁葉の閉鎖から最大開放までに要する時間を人工弁開放時間(以下、開放時間)、最大開放から閉鎖までに要する時間を人工弁閉鎖時間(以下、閉鎖時間)とした。閉鎖の開始と

は両弁葉の一方でも閉鎖が始まった時とし、各測定項目は連続する10心拍から求めた。両交連部と人工弁ピボットを垂直に縫着したSJM弁をtangenital projectionの方向から撮影すると弁葉の上側は腹側、下方は背側に位置し、それぞれの弁葉を腹側、背側弁葉とした。心房細動を有するII群の3例、IV群の6例に右室ペースングを加え、IV群の6例では左室拡張末期圧と肺動脈楔入圧の測定を弁撮影と同時にを行った。

3) 統計処理

各測定値は平均±標準偏差(mean±SD)で表わし、有意差検定には $\chi^2$ 検定、t検定を用い危険率 $p < 0.05$ をもって有意とした。

結 果

1) SJM 弁々葉の動態

二枚の弁葉の開放は、各群ともにすべての心拍において対称的な運動を示したが、閉鎖は対称的に動くものと非対称的に動くものとに分けられた。対称的な閉鎖は洞調律例、ペースング調律例に、非対称的な閉鎖は心房細動例でみられ、背側弁葉の総心拍190中32、腹側弁葉の総心拍190中36心拍と、背側、腹側弁葉のいずれにもみられた。これら非対称的に閉鎖を開始する心

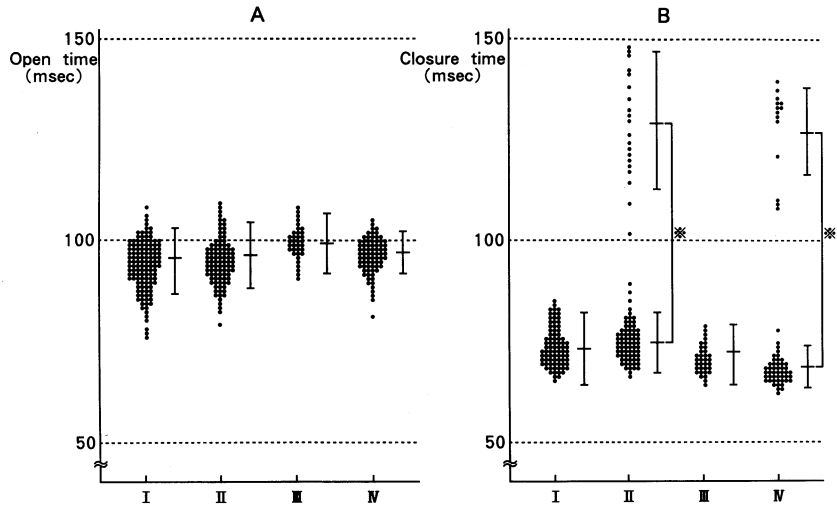


Fig. 1. Open time (A) and closure time (B) of the prosthetic valve leaflets in each group (\* P<0.05)

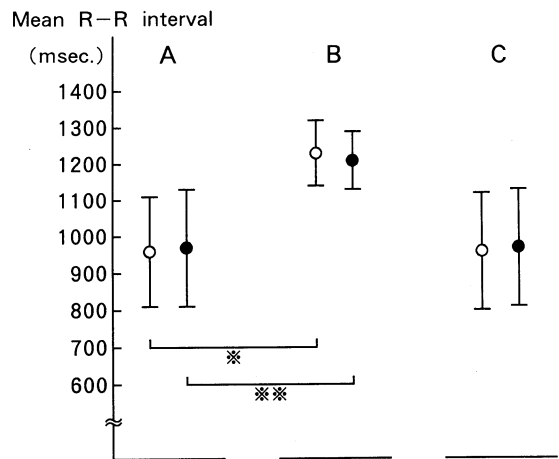


Fig. 2. Relationship between heart beats with non-symmetrical closure of the ventral and dorsal valves and the R-R interval on ECG  
A: Mean R-R interval in 10 heart beats in each patient  
B: Preceding R-R interval in heart beats showing early closure of the dorsal valve  
C: Preceding R-R interval showing early closure of the ventral valve  
○ Group I, ● Group II horizontal bars indicate ±SD (\*, \*\*: p<0.05)

拍においても閉鎖の終了は両弁葉ともに同時であった。

2) 開放および閉鎖時間

開放時間は I 群 $91 \pm 12$ , II 群 $94 \pm 13$ , III 群

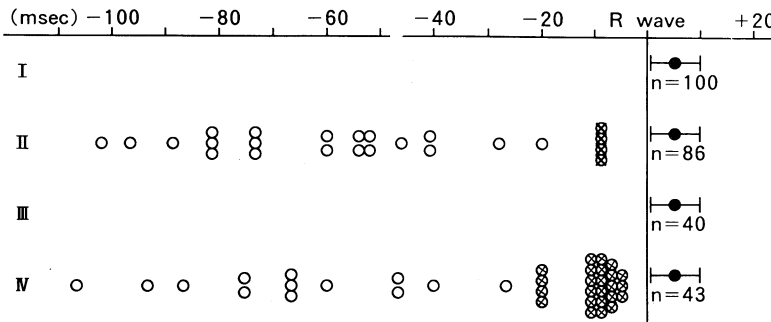


Fig. 3. Relationship between the time of initiation of closure of ventral and dorsal valves and R waves on ECG in each group  
 ○ : Early closure of the dorsal valve  
 ⊗ : Early closure of the ventral valve  
 ● : Symmetrical closure of both valve

Table 2. Relationship between the time of initiation of closure of the ventral leaflet and R waves on ECG

Case Group	Early closure of leaflet	Symmetrical closure of leaflet
I	0	10
II	2 ( 4/20 beats)	9
III	0	4
IV	7 (32/70 beats)*	1

(\* : p<0.05)

98 ± 9, IV群 95 ± 8 msec で各群間に差はなかった (Fig. 1A). 閉鎖時間は、洞調律である I, III群では 72 ± 18, 70 ± 11 msec とほぼ一定の値を示したのに対し、心房細動を有する II, IV群の閉鎖時間は、大多数の心拍では I, III群と差はないが、II群の総心拍の18%, IV群の総心拍の16%で閉鎖時間の著しい延長をみ (p<0.05, Fig. 1B), これは一側の弁葉が他の弁葉に先行して閉鎖が開始したためであった.

3) 非対称的な弁葉閉鎖についての検討

非対称的な弁葉閉鎖をみた心拍について閉鎖の開始は腹側、背側弁葉のいずれが先行するかによりその閉鎖時間をみた。背側弁葉が先行閉鎖する心拍の閉鎖時間は 131 ± 17 msec, 腹側は 80 ± 9 msec で、対称的閉鎖を示す心拍の閉鎖時間 71 ± 13 msec と比べ、背側弁葉が先行閉鎖する心拍の閉鎖時間は有意に延長するのに対し、腹側弁葉が早期閉鎖する心拍では閉鎖時間の延長はみられず、両弁葉の早期閉鎖の機序は異なる

ことが示唆された。

II, IV群について腹、背側弁葉が非対称的な閉鎖をする心拍と心電図 R-R 間隔との関係について検討した (Fig. 2). II, IV群の各症例10心拍の平均 R-R 間隔は 962 ± 151 msec, 972 ± 163 msec であり、背側弁葉が先行閉鎖する心拍の先行 R-R 間隔は、II群 1240 ± 81 msec, IV群 1216 ± 76 msec と有意に延長し (p<0.05), 平均 R-R 時間より延長した R-R 間隔を有する次の心拍の閉鎖では背側弁葉の早期閉鎖を生じ、閉鎖時間は延長することを示した。腹側弁葉が先行閉鎖する心拍の先行 R-R 間隔と平均 R-R 間隔との間には差をみなかった。

4) 腹、背側弁葉の閉鎖開始時期の検討

各群の腹および背側弁葉の閉鎖開始時期と心電図 R 波との関係を Figure 3 に示した。早期に閉鎖が開始する腹側弁葉の閉鎖開始は R 波より平均 14 ± 6 msec 先行し、背側弁葉では II群で 59 ± 21, IV群で 63 ± 18 msec, R 波より先行していたが、II, IV群間には差をみなかった。腹側弁葉が早期に閉鎖を開始した心拍は、Table 2 に示すごとく II群の 2 例、4 / 110 心拍と IV群の 7 例、32 / 80 心拍に認められ、弁下組織温存例の IV群で有意に高頻度であった (p<0.05). II群の 4 例と IV群の 6 例に右室ペーシングを施行したところ、腹および背側弁葉の早期の閉鎖開始はすべて消失した。

5) 腹側弁葉の早期の閉鎖開始と左室圧、肺動脈楔入圧の検討

IV群の 6 例に左室拡張末期圧と肺動脈楔入圧を弁撮影と同時に測定した。拡張終期の腹側弁葉の早期閉鎖の有無と左室拡張末期圧、肺動脈

楔入圧、同圧格差との間に関係を認めなかった。

## 考 察

人工弁の機能の評価は *in vitro*<sup>5)~8)</sup>による血流、あるいは心臓超音波検査,<sup>1)~4)</sup>心臓カテーテル検査により主に血行動態を指標としてなされ、人工弁々葉の動態を検討した報告は少ない。これは高速で開閉する人工弁の動態を超音波検査や圧変化で評価することに限界があるためと考えられる。人工弁の動態を細かく観察し得る X線シネ撮影においても、人工弁の最大開放角の計測による人工弁機能不全の診断に主眼がおかれているのが現状である。<sup>9)~14)</sup>著者は高速 X線シネ撮影法を用いて SJM 弁の 2 葉の動態を詳細に解析し、心房細動の有無および弁下組織温存、非温存僧帽弁置換術と弁葉の動態との関係について検討した。

SJM 弁は圧較差が低く、中心流で乱流が少なく、開放、閉鎖の抵抗も極めて低い<sup>14), 21)~23)</sup>などの特徴を有し、したがって 2 枚の弁葉の開閉は左室圧、左房圧、血流等のわずかな変化の影響を受けると考えられる。機能不全を有しない僧帽弁 SJM 弁置換例の 2 枚の弁葉の動態を知ることが心不全や弁の機能不全の診断の対照として意義が大きい。

弁葉の閉鎖は、一心拍ごとの心拍出量が等しい洞調律、ペースメーカー調律など規則正しい左室収縮の心拍で、両弁葉は対称的な閉鎖を示し、閉鎖時間もほぼ一定であった。一方、一心拍ごとに左室収縮、心拍出量の異なる R-R 間隔の不整な心房細動では、腹側及び背側弁葉が非対称的に動く心拍がみられた。

Kotler ら<sup>2)</sup>は SJM 弁の動態を超音波検査を用いて検討し、R-R 間隔の延長した心房細動において腹側弁葉が開放時に早期開放を、背側弁葉が閉鎖時、拡張終期に早期閉鎖をみたと述べ、この動きは重力の影響により弁葉が背側へ落ち込むために生じると推測している。本研究では人工弁の開放は、心調律に関係なく対称的な動きを示し、開放時間も各群間で差はなく一定で

あった。閉鎖時は、心房細動例である II, IV 群に閉鎖時間の延長した心拍が認められ、この閉鎖時間の延長は、背側弁葉が腹側弁葉より先行して閉鎖することにより生じ、先行 R-R 間隔が平均 R-R 間隔に比し延長した心拍に認められた。Cieslinski ら<sup>24)</sup>は心房細動において左室の充満は R-R 間隔に関係なく R 波より一定時間内に生じ、R-R 間隔の延長した心拍の拡張終期の僧帽弁血流はほとんどないと述べている。R-R 間隔の延長した心拍における背側弁葉の早期閉鎖は、拡張期の延長による左室の拡張終期容量の増大と拡張終期に左房左室間の血流が停止した状態において、Kotler ら<sup>2)</sup>が示唆した重力の影響が関与したものと考えられた。一方、腹側弁葉の先行閉鎖による非対称的な閉鎖を示す心拍では、閉鎖時間の有意な延長を認めず、各 R-R 間隔との間にも関係はなく、重力に対向する方向に動くため、重力の影響により閉鎖が開始されたと考えられない。

僧帽弁の早期閉鎖は、心房細動で拡張期の長い心拍や重度大動脈弁閉鎖不全例において、左室拡張末期圧の上昇が関与することで生じるとされているが、<sup>2)~4)</sup>今回の検討で腹側弁葉の早期閉鎖の開始は心電図 R-R 間隔、および左室拡張末期圧、肺動脈楔入圧との間に関係はなく、異常に高い左室拡張末期圧を来していた心拍もなかった。

生体内での僧帽弁位 SJM 弁の圧較差はドップラー上  $2.3 \pm 0.9$  mmHg と低く、<sup>1)</sup>腹側弁葉の早期閉鎖が弁前後の圧較差により生じたとは考えられない。

Voda ら<sup>25)</sup>は、僧帽弁の開閉運動には乳頭筋の作用による弁輪部の動きも関与し、Keren<sup>26)</sup>は、正常僧帽弁において僧帽弁輪は左室収縮期に心尖部に向かって動き、その最も動いた時点で左室の駆出が開始され、左房が収縮すると弁輪部は元の位置に戻り動きをし、乳頭筋による弁輪部の動きも僧帽弁の開閉に関与すると述べている。

弁下組織の機能は1956年の Rushmer ら<sup>27), 28)</sup>の報告に始まり、弁下組織の機能が収縮期にお

ける左室長軸径を短縮する動きをなし、左室収縮、特に収縮期早期で重要な役割を果たすとされている。<sup>29)~32)</sup> 本研究で腹側弁葉が拡張末期に早期閉鎖する心拍を認めたのは、心房細動を有し後尖乳頭筋を温存したIV群であり、弁下組織の中等度以上の癒合は1例の僧帽弁狭窄症のみで、他は後尖乳頭筋の機能は保たれていたものと思われる。心房細動例では、一心拍ごとの拡張終期容量と拡張終期圧が異なり、拡張終期、乳頭筋の作用によるわずかな血流変化が腹側弁葉の早期閉鎖を起こしたものと推測される。

弁下組織を温存した僧帽弁人工弁置換術の左室拡張能に及ぼす影響は、弁下組織切除例に比し左室拡張末期圧、容量の低下を認め、正常左室機能に近づく。<sup>18)~20)</sup> これは左室と僧帽弁、弁輪部の連続性が保たれ、拡張末期の等張性期に弁下組織の機能により左室長軸径を減じ、短軸径を増加させ、左室の過拡張を防ぐためと考えられている。Binkley ら<sup>33)</sup> は、心電図 R-R 間隔が 1720 msec と延長した心拍で拡張期末期の僧帽弁閉鎖後に超音波ドプラー上僧帽弁の flow velocity が 0 であるのに再開放を認め、これは乳頭筋の作用により生じると述べ、Gornick ら<sup>34)</sup> は乳頭筋の活動電位を測定し、乳頭筋の収縮は心

電図 QRS 波より  $30 \pm 13$  msec 早く、左室収縮より早期に認められたと述べ、本研究で腹側弁葉の早期閉鎖の開始が心電図 R 波より早く起こることに乳頭筋が関与しているものと推測された。

今後、心不全例、SJM 弁機能不全例の弁葉の動態を X 線シネ撮影により診断、評価するにあたり、特に心房細動を伴う例においてはかかる点に留意する必要があると考えられる。

## 結 語

SJM 弁を用いた僧帽弁置換術において、心房細動群にみられる背側弁葉の早期閉鎖は、先行 R-R 間隔の延長した心拍で重力の影響により生じたと考えられ、腹側弁葉の早期閉鎖開始は、温存された弁下組織の機能により拡張末期の等張性容量下での血流変化によるものと推測された。

本論文の要旨は、第89回日本外科学会総会、第19回日本心臓血管外科学会総会で発表した。

本稿を終わるにあたりご指導、ご校閲を賜りました川崎医科大学心臓外科 藤原 巍教授、同胸部心臓血管外科 勝村達喜教授に深く感謝するとともに、ご協力いただいた教室員諸氏に感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) Wesinstein, I. R., Marbarger, J. P. and Perez, J. E. : Ultrasonic assessment of the St. Jude prosthetic valve : M mode, two dimensional, and Doppler echocardiography. *Circulation* 68 : 897-905, 1983
- 2) Kotler, M. N., Mintz, G. S. and Segal, B. L. : Echophonocardiographic evaluation of normal and abnormal prosthetic valve function. *Noninvasive diagnostic methods in cardiology. In Cardiovascular Clinics* 9(2). ed. by Albert, N., Brest, M. D. 1st ed. Philadelphia, F. A. Davis Company. 1978, pp. 117-145
- 3) Kotler, M. N., Segal, B. L. and Parry, W. R. : Echocardiographic and phonocardiographic evaluation of prosthetic heart valves. *Noninvasive diagnostic methods in cardiology. In Cardiovascular Clinics* 9 (2). ed. by Albert, N., Brest, M. D. 1st ed. Philadelphia, F. A. Davis Company. 1978, pp. 187-207
- 4) Roelandt, J., Win, F., Bom, N. and Hugenholtz, P. G. : Resolution problems in echocardiology : A source of interpretation errors. *Am. J. Cardiol.* 37 : 256-262, 1976
- 5) Knott, E., Reul, H., Knoch, M., Steinseifer, U. and Rau, G. : In vitro comparison of aortic heart valve prosthesis. Part 1 : Mechanical valves. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 96 : 952-962, 1988
- 6) Gabbay, S., McQueen, D. M., Yellin, E. L., Becker, R. M. and Frater, R. W. M. : In vitro

- hydrodynamic comparison of mitral valve prostheses at high flow rates. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 76 : 771—778, 1978
- 7) Reif, T. H. and Huffstutler, M. C. : Design considerations for the Omniscience pivoting disc cardiac valve prosthesis. *Int. J. Artif. Organs* 6 : 131—138, 1983
  - 8) Reif, T. H. and Huffstutler, N. C. : A comparative flow study of the Omniscience and the Bjork-Shiley cardiac valve prostheses. *Int. J. Artif. Organs* 7 : 227—282, 1984
  - 9) St. Jude Medical, Inc. : Noninvasive evaluation of the St. Jude medical heart valve. Cardiologist's report. Report No. 1, St. Jude Medical, Inc., U. S. A. : 1—11, 1987
  - 10) Casterneda-Zuniga, W., Nicoloff, D., Jorgensen, C., Nath, P. H., Zollikofer, C. and Amplatz, K. : In vitro radiographic appearance of the St. Jude valve prosthesis. *Radiology* 134 : 775—776, 1980
  - 11) Czer, L. S. C., Matloff, F. J., Chaux, F. A., DeRobertis, M., Yoganathan, A. and Gray R. J. : A 6 year experience with the St. Jude medical valve : Hemodynamic performance, surgical result, biocompatibility and follow-up. *J. Am. Coll. Cardiol.* 6 : 904—912, 1985
  - 12) Hartz, R. S., LoCicero III, J., Kucich, V., DeBoer, A., O-Mara, S., Meyer, S. N. and Michaelis, L. L. : Comparative study of warfarin versus antiplatelet therapy in patients with a St. Jude medical valve in the aortic position. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 92 : 684—690, 1986
  - 13) Mehlman, D. J. : A guide to radiographic identification of prosthetic heart valves : An addendum. *Circulation* 69 : 102—105, 1984
  - 14) Emery, R. W., Nicoloff, D. M. and Minn, M. : St. Jude medical cardiac valve prosthesis, in vitro studies. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 78 : 269—276, 1979
  - 15) Lillebei, C. W., Levy, M. J. and Bonnabeau, R. C. : Mitral valve replacement with preservation of papillary muscles and chordae tendineae. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 47 : 532—543, 1964
  - 16) Miller, D. W., Johnson, C. D. and Ivey, T. D. : Does preservation of the posterior chordae tendineae enhance survival during mitral valve replacement? *Ann. Thorac. Surg.* 28 : 22—27, 1979
  - 17) Azariades, M. and Lennox, S. C. : Rupture of posterior wall of the left ventricle after mitral valve replacement : Etiological and technical considerations. *Ann. Thorac. Surg.* 46 : 491—494, 1988
  - 18) David, T. E., Uden, D. E. and Straus, H. D. : The importance of the mitral apparatus in left ventricular function after correction of mitral regurgitation. *Circulation* 68 (Suppl. II) : 76—82, 1983
  - 19) David, T. E. : Mitral valve replacement with preservation of chordae tendinae : Rationale and technical considerations. *Ann. Thorac. Surg.* 41 : 680—682, 1986
  - 20) Spence, P. A., Peniston, C. M., David, T. E., Mihic, N., Jabr, A. K., Narini, P. and Salerno, T. A. : Toward a better understanding of the etiology of left ventricular dysfunction after mitral valve replacement : An experimental study with possible clinical implication. *Ann. Thorac. Surg.* 41 : 363—371, 1986
  - 21) Bruss, K. H., Reul, H., Gilse, J. V. and Knott, E. : Pressure drop and velocity fields at four mechanical heart valve prostheses : Bjork-Shiley Standard, Bjork-Shiley Concave-Convex, Hall-Kaster and St. Jude Medical. *Life Support System* 1 : 3—22, 1983
  - 22) Horstkotte, D., Haertes, K., Herzer, J. A., Seipel, L., Bircks, W. and Loogen, F. : Preliminary results in mitral valve replacement with the St. Jude Medical Prosthesis : Comparison with the Bjork-Shiley valve. *Circulation* 64 (Suppl. II) : 203—209, 1981
  - 23) Kawachi, Y., Tokunaga, K., Watanabe, Y., Nose, Y. and Nakamura, M. : In vivo hemodynamics of prosthetic St. Jude Medical and Ionescu-Shiley heart valves analyzed by computer. *Ann. Thorac. Surg.* 39 : 456—461, 1985
  - 24) Cieslinski, A., Hui, W. K. K., Oldershaw, P. J., Gregoratos, G. and Gibson, D. : Interaction between systolic and diastolic time intervals in atrial fibrillation. *Br. Heart J.* 51 : 431—437, 1984

- 25) Voda, J., Glagov, S. and Brooks, H. : Mechanism of abnormal motion of the posterior leaflet in mitral stenosis. *Cardiology* 69 : 245—256, 1982
- 26) Keren, G., Sonnenblick, E. H. and LeJemtel, T. H. : Mitral anulus motion. Relation to pulmonary venous and transmitral flows in normal subjects and in patients with dilated cardiomyopathy. *Circulation* 78 : 621—629, 1988
- 27) Rushmer, R. F. : Initial phase of ventricular systole : Asynchronous contraction. *Am. J. Physiol.* 184 : 188—194, 1956
- 28) Rushmer, R. F., Finlayson, B. L. and Nash, A. A. : Movements of the mitral valve. *Circ. Res.* 4 : 337—342, 1956
- 29) Hansen, D. E., Cahill, P. D., DeCampi, W. M., Harrison, D. C., Derby, G. C., Mitchell, R. S. and Miller, D. C. : Valvular - ventricular interaction : Importance of the mitral apparatus in canine left ventricular systolic performance. *Circulation* 73 : 1310—1320, 1986
- 30) Semafuko, W. E. B. and Bowie, W. C. : Papillary muscle dynamics : *In situ* function and responses of the papillary muscle. *Am. J. Physiol.* 228 : 1800—1807, 1975
- 31) Schuler, G., Peterson, K. L., Johnson, A., Francis, G., Dennish, G., Utley, J., Daily, P. O., Ashburn, W. and Ross, J. : Temporal response of left ventricular performance to mitral valve surgery. *Circulation* 59 : 1218—1231, 1979
- 32) Sarris, G. E., Cahill, P. D., Hansen, D. E., Derby, G. C. and Miller, D. C. : Restoration of left ventricular systolic performance after reattachment of the mitral chordae tendineae. The importance of valvular-ventricular interaction. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 95 : 969—979, 1988
- 33) Binkley, P. F., Bonagura, J. D., Olson, S. M., Boudoulas, H. and Wooley, C. F. : The equilibrium position of the mitral valve : An accurate model of mitral valve motion in humans. *Am. J. Cardiol.* 59 : 109—113, 1987
- 34) David, D., Michelson, E. L., Naito, M., Chen, C. C., Schaffenburg, M. and Dreifus, L. S. : Diastolic “Locking” of the mitral valve : The importance of atrial systole and intraventricular volume. *Circulation* 67 : 640—645, 1983