

原 著

巨大左房縫縮術における心房心室間至適容量に関する
実験的検討

小見山 秀一*

要 旨

僧帽弁狭窄や逆流に合併する巨大左房の左房縫縮術に関しては左心房容量が左心室の拡張期に与える影響が不明な点が多く、現在のところ的確に判定する指標はない。今回は左房縫縮術の有効性を評価するため心房心室シュミレータを開発し、至適な心房心室間容量を検討した。左心房の急速流入期ピーク値、左心房コンプライアンスを指標とした結果、急速流入期ピーク値の最大値は左心房容量100 ml、左心房コンプライアンス0.81 ml/mmHgのときに67 cm/secとなり、また生体に近似した波形を記録した。左心房容量の増加に伴って左心室拡張期末の絶対容量が増大する正の相関が認められ左心房容量の減少に伴って前負荷が減少している可能性が示唆された。したがって急速流入期における左心室への血液の流入を促進させるという点で左房縫縮術の意義が示された。

緒 言

高度の僧帽弁狭窄や逆流に対する外科的治療として、弁置換術や弁形成術がある。しかし、巨大左房を併発している場合には、左心房の大きさが術前と同様であると、左心房内の血液はうっ滞する。この血液うっ滞が血栓形成に結びつき、更に至適な前負荷を保ちにくく、左室後壁を圧迫することなどから心機能を低下させる。そこで、巨大左房を併発する僧帽弁の弁膜症の手術に関しては左心房の一部を縫縮する手術が行われる。しかし、左心房の容量が左心室の拡張機能及び前負荷に与

える影響に関しては、不明な点が多く、左房縫縮術における縫縮部位や程度は外科医の経験に基づく判断に委ねられるのが現状である。本研究では左房縫縮術の意義を水力学的観点から明確にするために、空気圧駆動方式の機械式循環シュミレータを開発し、これを用いた血行動態上の改善と、左房縫縮術の有効性を明らかにすることを目的とした。

方 法

1. 心房心室シュミレータの開発

早稲田大学機械工学科と心房心室疑似モデルを共同開発し、これを用いた左房容量の変化により左房縫縮術の意義を検討した。実験モデルとして図1に左心室モデルを示す。左心室モデルは生体心臓の形態からその形状を回転楕円体とした。完成した左心室モデルで静特性試験を行ない、コンプライアンスは1.3 ml/mmHgの結果を得た。また、左心室モデルの容量は150 mlとした。これは、左心室の拡張期末容量が 79 ± 11 ml/m²、日本人の平均体表面積が1.72 m²ということから決定した。

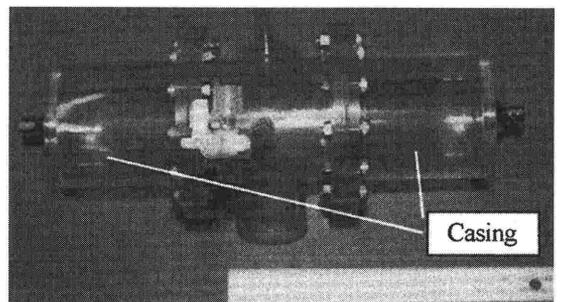


図1 Newly-developed normal LA model

*東京女子医科大学附属日本心臓血圧研究所循環器外科

循環様式としては拡張期において血液が左心房から左心室へ受動的に流入するようにし左心室への受動的な流入を可能とした。次に図2に設計開発した左心房モデルを示す。このモデルは中央に流入口, 流出口を持つタンクがあり, 左右に容量調節タンクを取り付けることで容量を増加させる。タンク容量は100 ml, 容量調節タンクの容量は50 mlで, 最大500 mlまで容量を増加させることが可能である。材質は, ダイアフラム以外は全てアクリルである。また, ダイアフラムの材質や膜厚を変えることでコンプライアンスの定量的な調節も可能である。さらには, 容量調節タンクを左右に取り付け, 容量を増加させる方式を採用しているため左心房容量のみを定量的に増減させることが可能である。その際, 左心房収縮を模擬するため, アクリル製のケーシング内に左心房モデルを取り付け, 空気圧を加える方法を採用した。駆動装置として, 東洋紡社製の空気圧駆動型補助人工心臓駆動装置 (VCT-100) を使用した。

2. 駆動条件設定と計測方法

合計15種類の左心房モデルにおける, 左心室圧 (LVP), 左心房圧 (LAP), 大動脈圧 (AoP), 肺静脈流量 (PVF), 僧帽弁位流量 (MiF), 大動脈流量 (AoF) を計測し, 左房縫縮術の水力学的観点からの意義を明確にするために, 空気圧駆動

方式の機械式循環シミュレータを用いた血行動態上の改善と, 左房縫縮術の有効性を検討した。駆動条件を表1に示した。左心房は左心室が収縮する前の150 msec前に100 msec間収縮させた。左心室は, 収縮時間300 msec, 駆動圧160/0 mmHgにて駆動させた。大動脈圧は平均90 mmHgになるように設定した。左心室モデルはコンプライアンスが1.3 ml/mmHgのものを使用した。左心房モデルは空気圧による心房収縮を行なうため, 両側にケーシングを取り付けた。実験の装置写真を図3に, その略図を図4に示した。左心房モデルは肺静脈圧を一定の6 mmHgとしたオーバーフロータンクに接続した。大動脈や末梢血管はコンプライアンスタンクと抵抗からなるウィンドケッセルモデルとし, 大動脈圧は平均90 mmHgに設定した。僧帽弁にはBSM 29 (縫合輪径29 mm弁口直径24 mm), 大動脈弁にはBSM 23 (縫合輪径23 mm弁口直径18 mm) を使用した。左心房モデルは容量100 ml, コンプライアンス0.81 ml/mmHgとした。左房の収縮方法として, 片側のみ収縮させた。実験で使用し

表1 Drive condition

Items		Setting value
LV pressure	mmHg	160/0
LV systolic period	msec	300
LA pressure	mmHg	16/0
Pulse rate	BPM	70

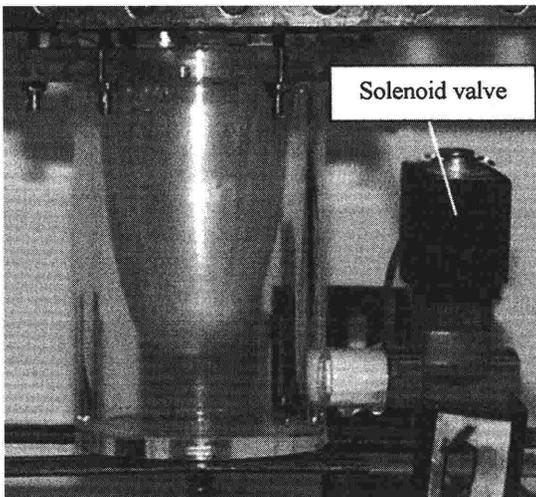


図2 Photograph of a solenoid valve attached to the LV casing

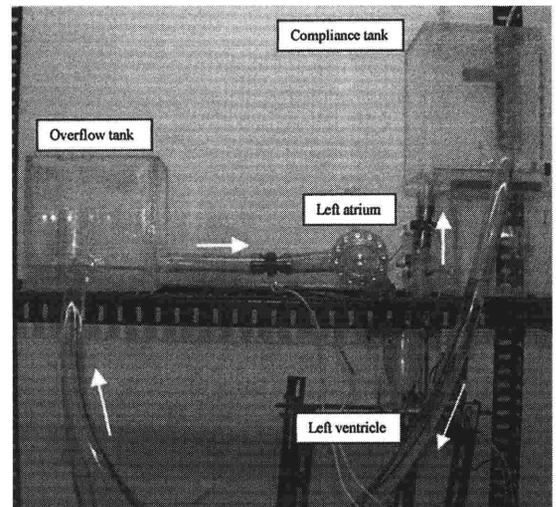
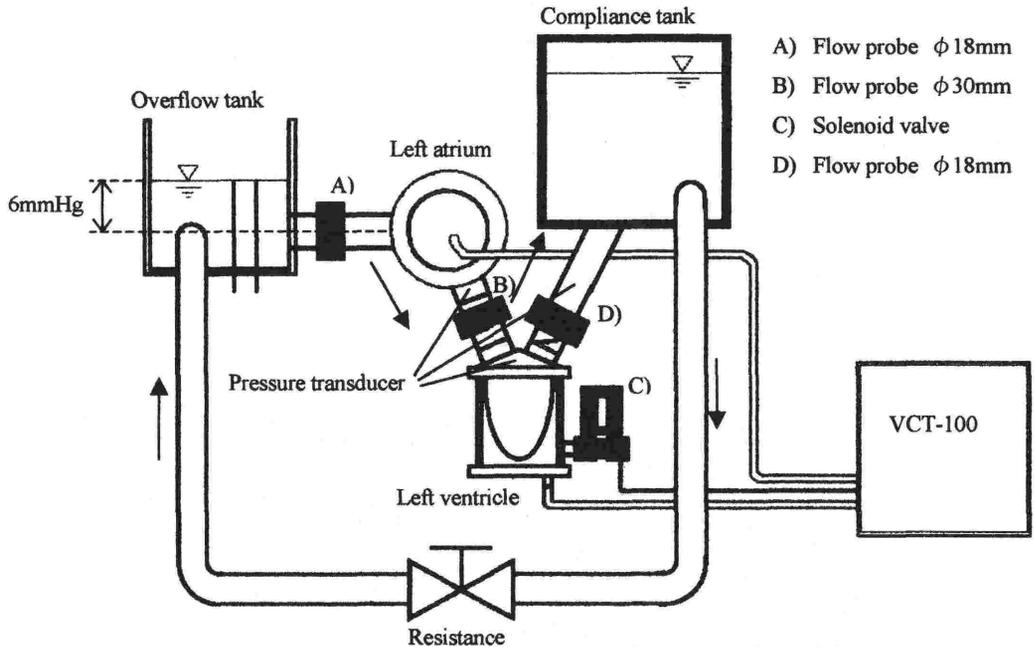


図3 Experimental apparatus



- A) Flow probe ϕ 18mm
- B) Flow probe ϕ 30mm
- C) Solenoid valve
- D) Flow probe ϕ 18mm

図4 Schematic drawing of the experimental apparatus

た左心房の容量とコンプライアンスの種類は表2に示した。計測項目は、肺静脈流量 (PVF), 僧帽弁位流量 (MiF), 心拍出量 (CO), 左心房圧 (LAP), 左心室圧 (LVP), 大動脈圧 (AoP) とした。僧帽弁位流速は流量プローブから得られた流量と流量プローブの断面積から算出した。実験中にデジタルビデオカメラを使用し, 左心室モデルを撮影し, この画像を多機能汎用画像解析ソフト Cosmos 32 (株式会社ライブラリー) を用いて以下のデータを採取した。

A. 左心房のコンプライアンスと容量を一定の条件下にて変化させることによる急速流入期ピーク値の変化

B. 左心室拡張期末の絶対容量の変化

統計学的な検討は ANOVA と t 検定を用い, p 値が 0.05 未満を有意とした。

健常例では左心室流入量の多くが急速流入期に流入する。したがって, 左心房の急速流入期ピーク値 (Rapid filling peak at early diastole) は心房収縮期ピーク値 (A) よりも大きくなる。循環シミュレータを用いた実験では左心房を空気圧駆動装置によって収縮させた。また, 左心室の拡張期は電磁弁によって大気圧開放しているため, 左心房

表2 LA model used in this study

Model	LA volume mL	LA compliance mL/mmHg
A	100	0.26
B		0.42
C		0.81
D	200	0.26
E		0.42
F		0.81
G	300	0.26
H		0.42
I		0.81
J	400	0.26
K		0.42
L		0.81
M	500	0.26
N		0.42
O		0.81

から左心室への流入は受動的に起こり, 急速流入期ピークは, 左心室収縮期において左心房に貯えられたエネルギーに依存するため急速流入期ピーク値を評価項目の1つとした。また左心室の前負荷は左心室の拡張機能と静脈還流によって決定されるため, 前負荷の指標として左心室拡張期末の絶対容量およびコンプライアンスが左心室拡張期

末の絶対容量に与える影響を比較検討した。

結 果

すべての僧帽弁位流速波形は図5の生体の僧帽弁位流速波形と同様に、二峰性であり、急速流入期ピーク値については55~67 cm/secとなった(図6)。

各左心房容量および左心房コンプライアンスにおける急速流入期ピーク値を図7にまとめた。

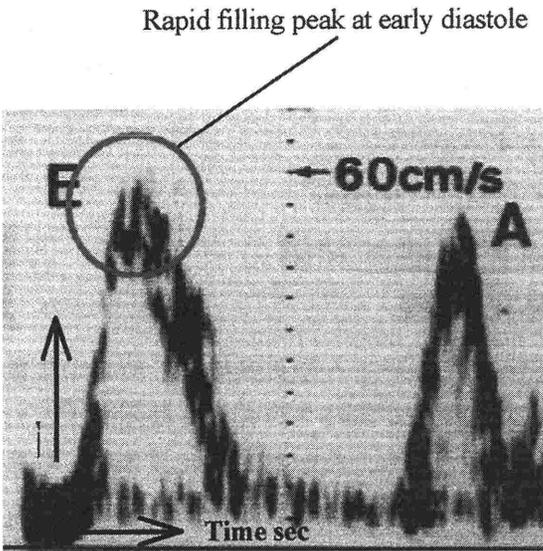


図5 Mitral flow velocity¹⁾

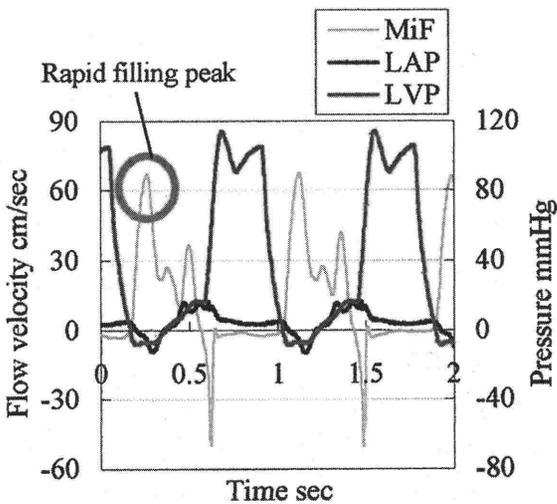


図6 Waveforms obtained from the experiment under LA volume of 100mL and LA compliance of 0.85mL/mmHg

その結果、以下に示す傾向が得られた。

- (1) 左心房容量を一定にして左心房コンプライアンスを変化させた場合、左心房コンプライアンスの減少に伴い急速流入期ピーク値は減少した。
- (2) 左心房コンプライアンスを一定にして左心房容量を変化させた場合、左心房容量の増加に伴い急速流入期ピーク値は減少した。

なお、急速流入期ピーク値の最大値は左心房容量100 ml、左心房コンプライアンス0.81 ml/mmHgのときに67 cm/secであった。

左心室拡張期末の絶対容量

各左心房容量および左心房コンプライアンスにおける左心室拡張期末の絶対容量の関係を図8にまとめた。

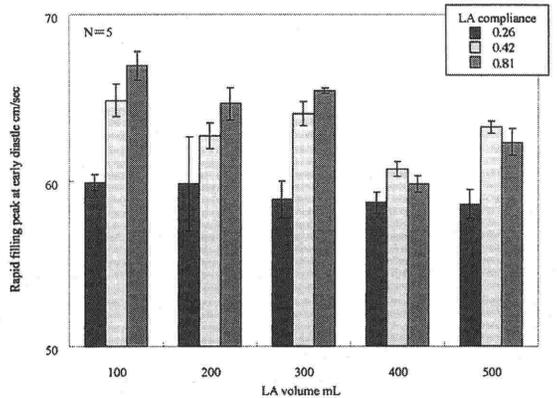


図7 Comparison of rapid filling peak at early diastole for different LA models

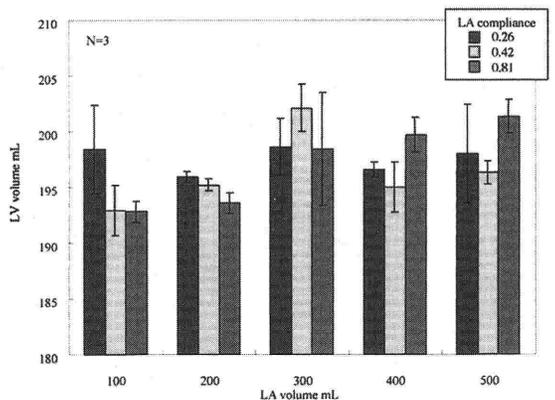


図8 Comparison of LV volume at end diastole for different LA models

これから左心房コンプライアンスを一定とし左心房容量を変化させたときについて回帰分析を行ったところ以下の結果を得た。

- (1) 左心房コンプライアンスが0.26, 0.42 ml/mmHgのときは無相関
- (2) 左心房コンプライアンスが0.81 ml/mmHgのときは、左心房容量の増加に伴って左心室拡張期末の絶対容量が増大する正の相関 ($P=0.00015$, $r^2=0.6802$) (図9) を示した。

以上の結果より、左心房コンプライアンスが0.81 ml/mmHgのときには、左心房容量の減少に伴って前負荷が減少している可能性が示唆された。これにより、コンプライアンスが急速流入期ピーク値に影響を及ぼすことが分かった。

考 察

臨床の場合においては巨大左房による心室、主気管支、または右肺中葉の圧迫で低心拍出量症候群や呼吸器合併症などの重大な問題が発生することがある。そこでそのリスクを軽減するため左房縫縮術が有効な手技とされ、実際に当術式により合併症や死亡率の低下が報告されている²⁾。手術に関しては図10の様な左心房の一部を縫縮する手術が行われる。今回の実験結果より左心房容量を一定にして左心房コンプライアンスを変化させた場合、左心房コンプライアンスの増加に伴い急速流入期ピーク値も増加した事が確認された。また、左心房・左心室間の流入動態に着目するために左心房および左心室を力学モデルにおきかえ、健常時における生体の値、健常時の値から推定した巨大左房時における値を各パラメータに代入し、急

速流入期ピーク値を求めたところ、左心房容量が増大、または左心房コンプライアンスが減少すると急速流入ピーク値は減少する事も確認された。これらの結果から、左心房の容量およびコンプライアンスは急速流入期における左心室への流入動態に大きく関与し、低下した左房コンプライアンスが影響を与えるパラメータであることが明らかとなった。

また、実験条件において拍動数を70 BPMに設定したが、これは、大気開放方式を用いて受動的に左心室モデルを拡張させたため、高拍動領域において、左心室の拡張が十分に行われなからである。生体では、拡張早期に収縮した心筋が元々の長さと同張力に戻る能動的過程がある。高拍動領域でも左心室モデルが拡張できるように、受動的な拡張しか行われな現行の駆動方法を改良し、広い拍動領域の下でさらなるデータを取得する必要がある。

更に、急速流入期ピーク値という点からは左房縫縮手術は意義があるという結論を得た。

しかし、左心室の容量に対し、切除すべき左心房の容量というものを定量化させるまでには至らなかった。今後は、健常時、巨大左房時、左房縫縮手術後の生体データを取得し、そのデータから、

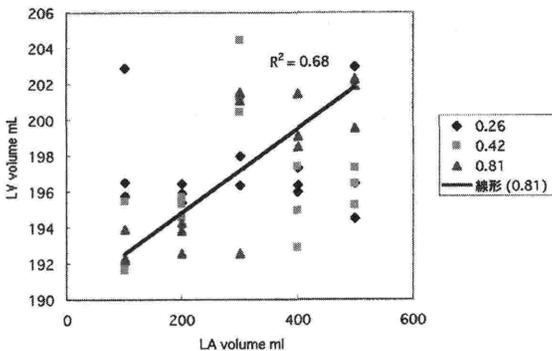


図9 左房容積と拡張期末容積に関する回帰分析

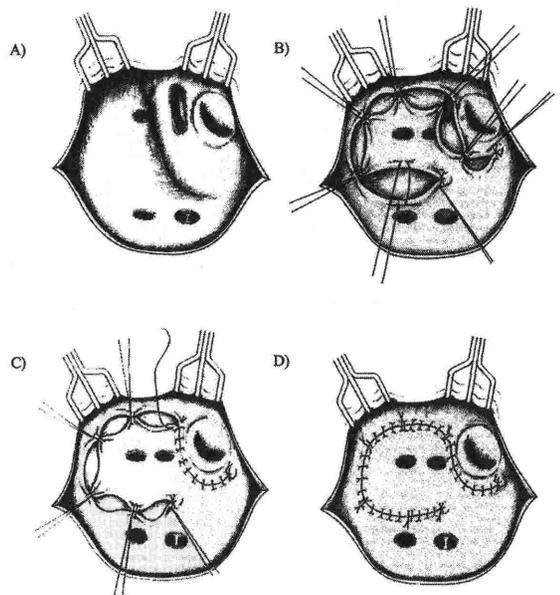


図10 Surgical treatment for giant LA⁴⁾

より生体に近い状態を再現することにより、切除すべき左心房容量について定量化を計りうると考える。また洞調律を前提として行っているため実際の臨床で遭遇する場面の多い心房細動を考慮に入れた設定モデルも将来検討する必要があると思われる。

結 語

心房心室の機械シュミレータを用いた検討から巨大左房における左房縫縮術は、急速流入期における左心室への血液の流入を促進させるという点でその意義が示された。

謝 辞

稿を終えるにあたり、御指導、御高閲を賜りました東京女子医大循環器外科小柳仁主任教授に深大なる謝意を表すると共に、直接御助言、御教授を頂いた東京女子医大循環器外科北村昌也元講師（現新潟大学第2外科助教授）、及びシュミレータ開発に御助力いただきました早稲田大学機械工学科梅津光生教授と教室の研究生の皆様へ感謝いたします。

文 献

- 1) 川副浩平, 高原善治, 田中一彦ら: 僧房弁膜症における巨大左房-左室, 気管支および肺の圧迫解除を目的とした縫縮手技について. 日外雑誌 84: 31-39, 1983
- 2) Shigenobu M: Effect of left atrial plication for the giant left atrium on left ventricular function. Acta Med Okayama 46(3): 189-193, 1992
- 3) Sankar NM, Farnsworth AE: Left atrial reduction for chronic atrial fibrillation associated with mitral valve disease. Ann Thorac Surg 66(1): 254-624, 1998
- 4) Hagihara H, Kitamura S, Kawachi K, et al: Left atrial plication combined with mitral valve surgery in patients with a giant left atrium. Surg Today 25(4): 338-342, 1995
- 5) 梅津光生: 計測と制御. 38: 314-315, 1999
- 6) Kawazoe K, Beppu S, Takahara Y, et al: Surgical treatment of giant left atrium combined with mitral valvular disease. Plication procedure for reduction of compression to the left ventricle, bronchus, and pulmonary parenchyma. J Thorac Cardiovasc Surg 85(6): 885-892, 1983
- 7) Naemura K, Umezumi M, Dohi T: Preliminary study on the new self-closing mechanical mitral valve. Artif Organs 23(9): 869-875, 1999
- 8) Wu ZJ, Hwang NH: Ventricular pressure slope and bileaflet mechanical heart valve closure. ASAIO J 41(3): M763-767, 1995

Experimental Examination Regarding the Optimum Volume between the Atrium and the Ventricle in Giant left Atrium Plication.

Shuichi Komiyama*

*Department of Cardiovascular Surgery ,
The Heart Institute of Japan, Tokyo Women's Medical University, Tokyo, Japan

Background: Today the influence that left atrium volume gives to the left ventricle (LV) in end-diastolic period regarding the left atrial (LA) plication of giant left atrium that merge to mitral valve stenosis or mitral valve regurgitation is still controversial. Atrio-ventricular mechanical simulator was developed to evaluate the efficacy of LA plication and was examined on the optimum volume between atrium and ventricle. Rapid inflow period peak which was made passively during inflow period from LA to left ventricle (LV) was related to the energy saved in LA during LV contraction period. For those reasons, the rapid inflow period peak was determined to be the evaluation item. Also LV end-diastolic volume (LVEDV) recognized as LV preload and the influence that LA compliance gives to LVEDV was measured to make clear the significance of the LA plication.

Methods: Being the rapid inflow period peak and LA

compliance as the evaluation item, the mitral valve flow wave form that approximated the living body was obtained. The correlation between LA and LV volume and the inflow of the fluid to the left ventricle in the rapid inflow period were measured.

Results: Mitral valve wave form of mechanical simulator was much like that of living body. The maximum rapid inflow period peak value was 67cm/sec at the time of 0.8ml/mmHg of LA compliance along with 100ml of LA volume. There was a positive correlation between LA volume and LVEDV ($P=0.00015$, $r^2=0.6802$). LVEDV was decreased along with the decrease of LA volume at the time of 0.81ml/mmHg of LA compliance.

Conclusion: It was proved that LA plication in giant LA promoted the inflow of the fluid to the left ventricle in the rapid inflow period using our mechanical atrio-ventricular simulator.

Key words : Left atrial plication, Giant left atrium, Atrio-ventricular mechanical simulator, Rapid inflow period peak, LA compliance

(Circ Cont 21 : 290~296, 2000)