

左室心内膜と心外膜の収縮 様式の差異

Difference of the shortening characteristics between left ventricular endocardium and epicardium as measured by radiopaque markers in experimental dogs

金政 健
石川 欽司
大里修一郎
香取 瞭
津山 泰子*
谷口由美子*
山本 義憲*

Ken KANAMASA
Kinji ISHIKAWA
Shuichiro OSATO
Ryo KATORI
Yasuko TSUYAMA*
Yumiko TANIGUCHI*
Yoshinori YAMAMOTO*

Summary

This study was performed to clarify the difference of shortening characteristics between left ventricular epicardium and endocardium. Four to five pairs of radiopaque markers (lead beads, ϕ 0.3–0.8 mm) were implanted just beneath the epicardium and endocardium, respectively in eight open-chest dogs. After the pericardium and thorax were closed, biplane cine-roentgenograms were obtained. The spatial distance (segment length) between any two of the markers was calculated using a digitizer-computer-plotter system. Left ventricular wall thickness (Th) was measured as a distance between epicardial and endocardial markers. The maximum left ventricular thickness (Th_{max}) was 9.4 ± 3.4 mm (mean \pm SD), the minimum (Th_{min}) 8.4 ± 3.1 mm, and a percent increase of wall thickness $\{(Th_{max} - Th_{min})/Th_{min}\}$ was $12.7 \pm 6.5\%$. The value of epicardial segment length divided by endocardial segment length as normalized by each length at R wave of ECG was 1.088 ± 0.071 at the end of systole and 0.979 ± 0.016 at end diastole, indicating that endocardial segment shortened and distended more than epicardial segment during systole and diastole, respectively. Epicardial segment began to shorten 3 ± 26 msec earlier and distend 4 ± 50 msec earlier than endocardial one. This study revealed a small but consistent difference in the amount of shortening and its initiation and termination between the epicardium and endocardium.

近畿大学医学部 第一内科

*同 中央放射線部

大阪府南河内郡狭山町西山 380 (〒589)

The First Department of Internal Medicine, and

*Department of Radiology, Kinki University School of Medicine, Nishiyama 380, Sayama-cho, Minamikawachi-gun Osaka 589

Presented at the 22nd Meeting of the Japanese Society of Cardiovascular Sound held in Tokyo, March 25–26, 1981

Received for publication January 11, 1982

Key words

Radiopaque marker Epicardium Endocardium Segment length
Left ventricular wall thickness

はじめに

左室壁厚の心周期での動きを調べることは古くから行われているが¹⁻⁵⁾, ほとんどは内層, 外層の区別なくある部分の左室壁厚の全体的動きとしてしかとらえていない. 左室内層と外層は心筋線維の走向方向が異なるし, また, 冠循環の面からも差があるから, その収縮様式に差があることが予想される. 心臓表面の動きを認識する方法としては, 心臓の外科手術のさいに X 線不透性マーカーを装着する方法および冠動脈分岐間距離を測定する方法⁶⁾がある. しかしこれは外層のみの動きを検索する方法であり, これに対応する内層の動きを同時に検索できない. 外層とそれに対応する内層の伸縮様式にどの程度の差異があるかを知る目的で, イヌの左室心外膜側に対応する心内膜側に X 線不透性マーカーを埋め込んで, 内層および外層の伸縮様式を検討した.

方 法

雑種成大 8 頭 (13~33 kg, 平均 20 kg) をペントバルビタール 25 mg/kg で静脈麻酔し, 陽圧換気下 (1 回換気量 250~400 ml, 呼気終期圧 5~10 cm H₂O, 換気数 20~30 回/分) に第 5 肋間左側開胸を行った. 心膜切開後, マーカーとして直径 0.3~0.8 mm の鉛玉を心外膜下および心内膜下に埋め込んだ. マーカーの埋め込み場所は左前下行枝 (LAD) と左回旋枝 (LCX) の分岐部, 左前下行枝と対角枝 (DIAG) の分岐部, 左回旋枝と鈍縁枝 (MAGR) の分岐部, 左回旋枝の posterior crux 部, LAD と DIAG の分岐部から LAD 本幹の末梢の中心点および心尖部 (心尖部は心外膜のみ) の 6 ヶ所である (Fig. 1). マーカーをエラストマーの外筒に入れ, それを内筒で目的の心外膜下および心内膜下へ押し出して埋

め込んだ (Fig. 2). マーカー埋め込み後, 心嚢を閉じ閉胸, 自発呼吸下で仰臥位同時 2 方向 X 線撮影を施行した. シネ映画撮影は Siemens 製 Sirecon-2 duplex 25/15 で高分解 image intensifier に組み込まれた Arritechno 35 mm cine camera (90 frames/sec) を用いて行った. 左室内圧および心電図を電磁オシロ式 Hewlett-Packard (HP) 4588 recorder を使い, 200 mm/秒の紙送り速度にて記録した. 分析は 35 mm シネフィルムをモーションアナライザー (Vanguard 製) に撮影し, ソナーペン (graph pen) (GP 3-HP, Science Accessories Corporation) を用いてマーカーの座

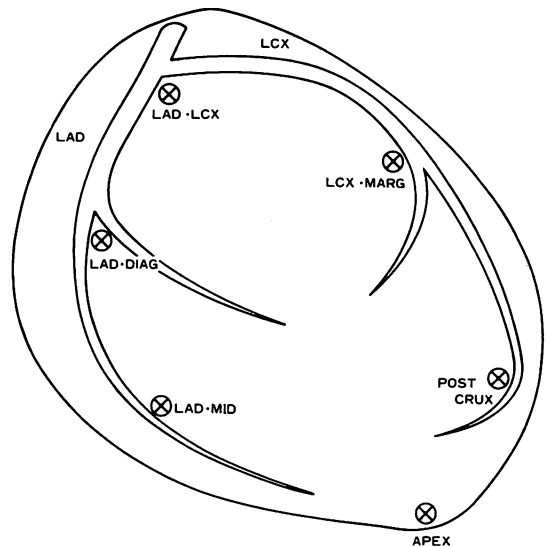


Fig. 1. A schematic representation of marker implantation sites.

LAD=left anterior descending artery; LCX=left circumflex artery; LAD DIAG=bifurcation of the diagonal branch from LAD; LAD-Mid=mid portion of LAD; LCX-MARG=bifurcation of the obtuse marginal branch from LCX; POST-CRUX=posterior crux.

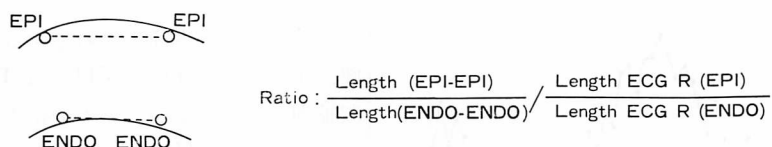


Fig. 2. A formula indicating the difference of shortening rate between epicardial and endocardial segments.

Segment lengths of the epicardium (length (epi-epi)) and endocardium (length (endo-endo)) are calculated using two pairs of epicardial and endocardial markers. The ratio of segment length of the epicardium to the endocardial segment is normalized by the ratio of both lengths at R wave of ECG. If the epicardium and endocardium shorten or distend proportionately, the ratio will remain unchanged, while its decrease or increase will indicate more shortening or less shortening of the endocardium than epicardium.

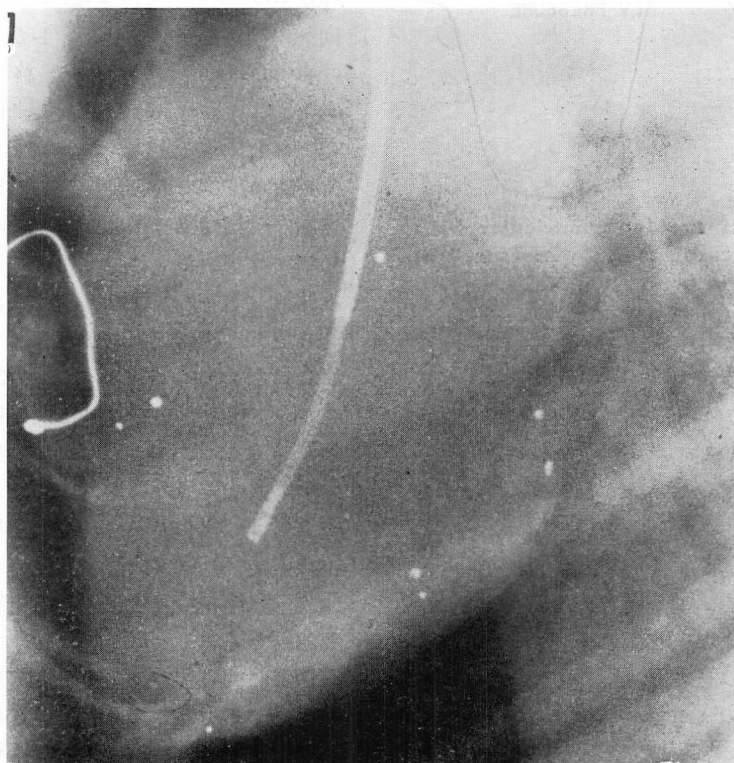


Fig. 3. Lateral view of the dog heart with markers.

Multiple radiopaque markers are seen as shown by white dots. The tip of a catheter-tip micro-manometer is in the left ventricle and an electrode with wire is placed at the epicardium for ECG lead.

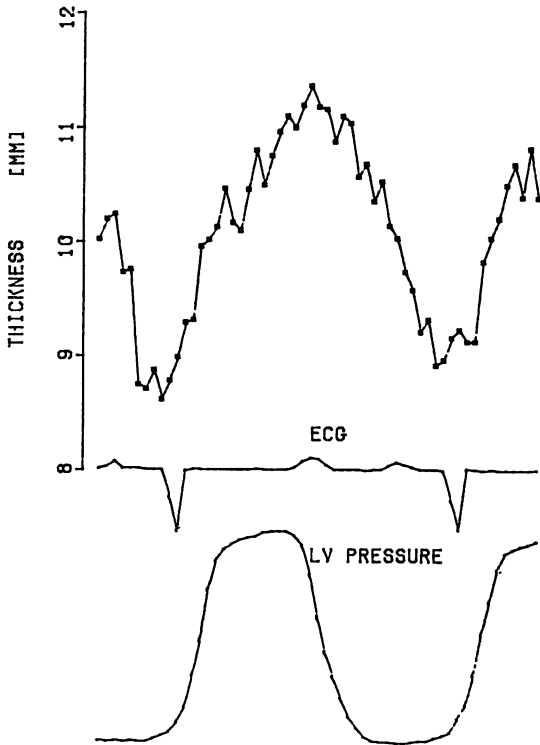


Fig. 4. Changes in the left ventricular wall thickness during cardiac cycle measured at posterior the crux in or the dog No. 3.

標位置をコンピューター (HP 2100A) に1コマずつ入力した。入力正面のフィルムにつき任意の番号から最大150コマまで各コマにつき最大6カ所を入力し、続いて側面のフィルムについても同じコマ番号より同じ点について入力した。このデータを使用して拡大率等の補正を行い、2点間空間距離計算を行った^{7,8)}。シネフィルム上のマーカの埋め込み部位の同定はマーカの数、大きさ、およびイヌの冠動脈造影にて行った (Fig. 3)。心電図 R 波での segment length を $L_{ECG R}$ 、negative dp/dt max の時点が収縮末期によく一致することを利用して、収縮末期での segment length を L_{ES} とした。収縮期収縮率を $(L_{ECG R} - L_{ES})/L_{ECG R}$ (%) として算出した。

結 果

心外膜下と心内膜下の対応するマーカ間の距離、すなわち心筋壁厚 (Th) は Fig. 4 のごとく収縮期に増加するが、その変化の程度は様々であり、また、各部位による差も明確ではなかった。計17個の壁厚計測部位での壁厚変化率 $\{(Th_{max} - Th_{min})/Th_{min}\}$ は 12.7 ± 6.5 (mean \pm SD) % であった (Table 1)。

心外膜の収縮様式を比較分析するため心外膜下の2つのマーカ間距離 (epi-epi; epicardial segment length) およびそれに対応する心内膜下の2つのマーカ間距離 (endo-endo; endocardial segment length) を求めた。対応する epi-epi, endo-endo では Fig. 5 に示すように同じ方向への動きを示していた。しかし部位が異なると endo-endo の収縮の開始、終了にずれが認められた。また、epi-epi の動きと同様に他の epi-epi のそれと比べると大きな差異があった。すなわち、対応する部位での心外膜と心内膜の動きは同様の方向、時相で動くが、異なる segment 間では時相にずれが認められた。この心外膜と心内膜の収縮様式の違いの程度を検討するために、対応する心外膜下と心内膜下およびもう1つの心外膜下と心内膜下でのマーカによって構成される epi-epi 間距離を endo-endo 間距離で除した比を求めた。この比は $length (epi-epi)/length (endo-endo)$ として表わされ、この比が大きくなるということは $length (epi-epi)$ のほうが $length (endo-endo)$ より大きいということを表わし、拡張期-収縮期の差をとれば心内膜側のほうが大きく収縮しているということを示す。この比は心外膜側と心内膜側のマーカ間の組み合わせによって異なってくるので、値を基準化して他の組み合わせと比較するため、心電図 R 波での比で除して基準化した。すなわち、心電図 R 波での値は1となる。全例で心周期を問わないすべての値は最小 0.979 ± 0.016 から最大 1.088 ± 0.071 であった。Fig. 6 に示されるように心電図 R 波から nor-

Table 1. Comparison of segment length shortening between the epicardium and endocardium

	Range	Mean±SD
Thickness at ECG R (mm)	3.3-15.8	10.0± 3.1
Minimal thickness (mm) (1)	3.1-15.8	9.8± 3.1
Maximal thickness (mm) (2)	3.7-16.5	10.9± 3.2
% increase of thickness [(2)-(1)]/(1) (%)	2.3-28.7	12.7± 6.7
Epicardial segment length (epi-epi) (mm)	L_{max}	40.7±12.0
	$L_{ECG R}$	39.7±11.8
	L_{min}	37.9±11.5
Endocardial segment length (endo-endo) (mm)	L_{max}	33.0±10.1
	$L_{ECG R}$	31.9± 9.5
	L_{min}	28.4± 9.3
Epicardial segment shortening ($L_{ECG R}-L_{ES}$)/ $L_{ECG R}$ (%)	(-1.1)- 8.3	2.1± 2.6
Endocardial segment shortening ($L_{ECG R}-L_{ES}$)/ $L_{ECG R}$ (%)	0.3-19.7	7.2± 5.4
Time difference of the beginning of shortening between epi and endo (msec)	(-78)*-67	(-3)±26
Time difference of the end of shortening between epi and endo (msec)	(-122)-100	(-4)±50

epi=epicardium; endo=endocardium.

* minus sign reveals that epicardium (epi) contracts earlier than endocardium (endo).

§ p<0.001

malized epi-epi/endo-endo 比は増大し, 最大値を示したのち, 再び減少した. このことは収縮期では心内膜側が心外膜側に比し強く短縮し, 拡張期は心内膜側がより強く伸展することを意味する.

収縮期収縮率は epi $2.1\pm 2.6\%$, endo $7.2\pm 5.4\%$ で endo は epi より $5.1\pm 4.9\%$ 収縮期収縮率が大きであった. Fig. 7 は心外膜間 マーカー距離 (縦軸) に対応する心内膜間 マーカー距離 (横軸) が心周期でいかに変動するかを見たものであり, 心電図 R 波のときの値が 100 となる. 心外膜側, 心内膜側がまったく同様に伸縮すれば $Y=X$ の直線となる. 3つの図に共通して認められることは, 図の右上から収縮が開始して segment length が短縮していくが, 短縮していくときその傾きが小さく, すなわち, 心内膜側マーカー間距離のほうが心外膜側マーカー間距離よりもより大きく短縮していることが示されている.

考 察

1. 壁厚変化

動物での壁厚増加度は, Ross ら⁹⁾のイヌで silicone-rubber-cast を用いた固定法では, 平均 28%, Feigel and Fry³⁾の麻酔犬の心筋壁厚測定用トランスジューサーを用いての報告では平均 21%, Mitchell ら¹⁰⁾の麻酔犬でビーズ法を用いた報告では 25~45% としている. また, Guntheroth⁵⁾の慢性実験犬で心外膜と心内膜に超音波トランスジューサーを用いた報告では, 平均 9.3% であったと述べている. 我々の今回の自発呼吸下での閉胸実験犬での壁厚増加度は平均 13% であり, 今までの諸家の報告とほぼ同様の結果であった.

左室壁厚の収縮期増大が部位によって異なるか否か興味あるところであるが, 我々が今回選択した 3~4 ヶ所の壁厚測定部位では明瞭な部位間における差異は見られなかった. 本法の精度は 0.2 mm であるので, その誤差範囲に入るのでどうか

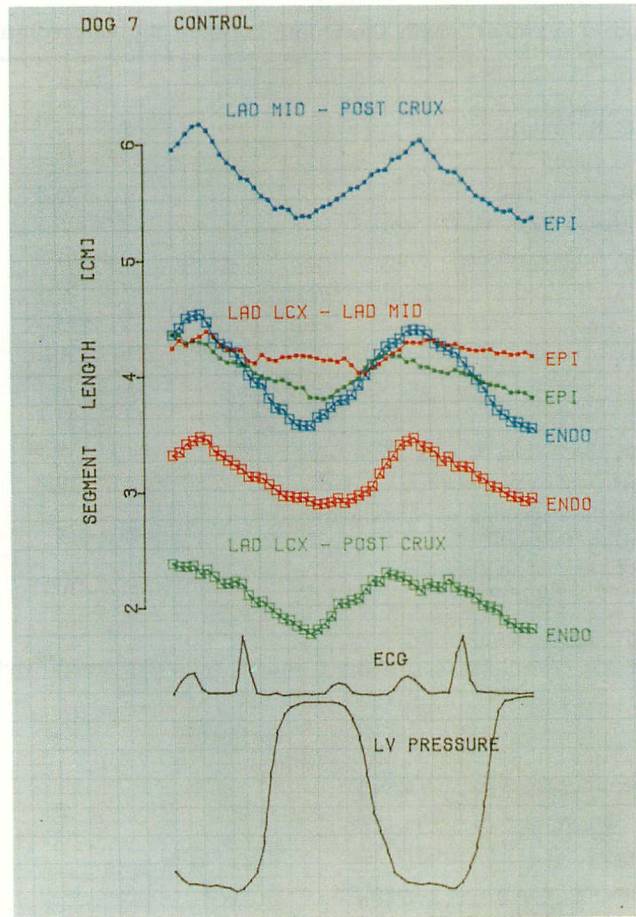


Fig. 5. Three pairs of epicardial and endocardial segment lengths during cardiac cycle.
The shortening characteristics of epicardial and correspondent endocardial segment are apparently similar. On the other hand, shortening characteristics among 3 segments at different regions differ considerably from each other.

今後の検討を要する。

2. 心外膜下筋層と心内膜下筋層の短縮度の差異

今回の研究では対応する心外膜側に比べて心内膜側マーカー間距離のほうが $5.1 \pm 4.9\%$ 大きく、収縮末期に短縮した。心外膜下の2つのマーカー間距離とそれに対応する心内膜下の2つのマーカー間距離の比、すなわち epi-epi/endo-endo 比を求めて心周期での左室壁厚の伸縮と心外膜下、心内膜下マーカーの動きを対比させてみた。これを見ると収縮末期付近になると epi-epi/endo-endo

比は最大に大きくなった。この現象は特に収縮末期付近にて内層が大きく短縮したことを示し、これは収縮末期に心筋壁厚が増大したためと思われる。この現象は **Fig. 5** でみても心内膜下筋層間距離が心外膜下筋層間距離よりも大きく短縮することが3つのsegmentのすべてでみられる。Normalized epi-epi/endo-endo 比が収縮末期付近で 1.011~1.243, 平均 1.088 まで、全例で増加した。これは心内膜側が収縮末期にかなり圧縮されることを示している。

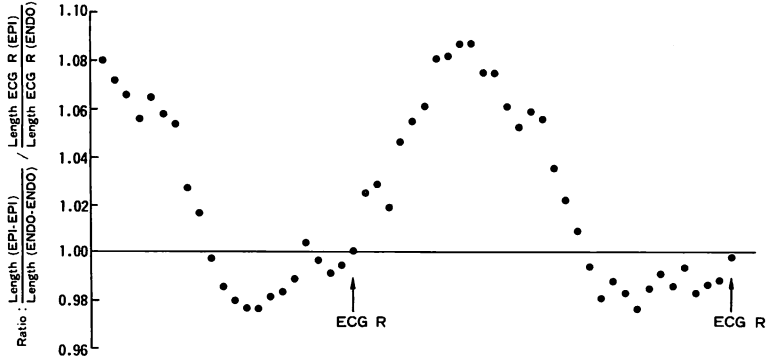


Fig. 6. Changes in the ratio of epicardial segment length to endocardial segment length during cardiac cycle.

The ratio increases during systole, and reaches the maximal value at near end-systole.

DOG 7 #1 CONTROL

P1 LAD LCX EPI P3 LAD MID EPI P5 POST CRUX EPI
 P2 LAD LCX ENDO P4 LAD MID ENDO P6 POST CRUX ENDO

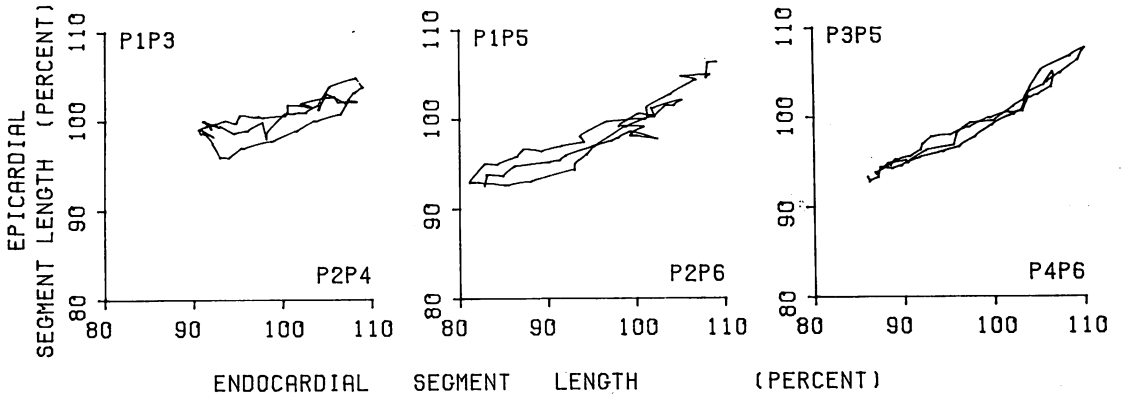


Fig. 7. Comparison of epicardial and endocardial segment shortenings during cardiac cycle.

The segment length is expressed as per cent of segment length at ECG R. Epicardial segment lengths are shown on ordinate and correspondent endocardial segment lengths are shown on abscissa. The locations of p₁-p₆ are indicated on the top of the figure. If epicardial and endocardial segments make a straight line, it is considered that both segments have a similar shortening characteristics.

3. 心外膜下筋層と心内膜下筋層の伸縮の時間差

心外膜下筋層と心内膜下筋層との収縮開始と収縮終了の時間差はほとんど認められなかった。これは、フィルムコマ数が 90 コマ/秒 であるので、フィルム間時間が 11 msec であり、心内膜下筋層と心外膜下筋層との間に収縮、拡張開始の時間差があったとしても、この範囲内であると考えられる。一方、epicardial segment 間で各部位の時間差をみると、Fig. 5 のように各部位で収縮開始終了に大きなずれがみられ、これは心外膜側と心内膜側間の小差に比べてはるかに大きかった。これは心外膜の表面の動きを観察して、心内膜側のそれを推測し得ることを示し、臨床的に心外膜表面のマーカ―認識による心内膜側の推定の妥当性が得られたことになる。対応する心外膜と心内膜の収縮の時間差は Fig. 5 のように極めてわずかである。Durrer ら¹⁴⁾は左室の電気的脱分極は心内膜側から心外膜へ向うとし、また、心筋の興奮伝播は心室中隔から起こり左室後基部に終わるので、心外膜上の興奮伝播もそれを反映している、としているので、心外膜上の segment と他の心外膜上の segment の収縮開始および終了に時間差が生じたのであろうと推察される。

すなわち、心外膜とそれに対応する心内膜は心周期にて同じように伸縮したが、その振幅の大きさは部位によって異なっていた。1つの部位と他の部位での心外膜、心内膜の動きをみると、明らかに短縮の開始の時期、短縮終了の時期に差異が認められ、局所心筋の伸縮様式が異なることが示され注目される。

要 約

雑種成犬 8 頭で 0.3~0.8 mm 径の X 線不透過性マーカ―(鉛玉)を左室心外膜下筋層、心内膜下筋層にエラスト―にて埋め込み、閉胸自発呼吸下で同時 2 方向 35 mm シネ撮影 (90 frames/sec) を施行した。フィルム上の 2 点間距離を我々が開発したコンピュータープログラムを用い演算した (器種: HP 2100A)。シネフィルム上のマーカ―の埋

め込み部位の認識は、マーカ―の数、大きさ、およびイヌの冠動脈造影にて行った。マーカ―の埋め込み場所は左前下行枝と左回旋枝の分岐部、左前下行枝と対角枝の分岐部、左回旋枝と鈍縁枝の分岐部、左回旋枝の posterior crux、他の部位 2 カ所、計 6 カ所である。17 カ所の壁厚計測を行い、心電図 R 波での壁厚は 8.6 ± 3.1 mm (mean \pm SD) であり、壁厚変化率 $\{(Th_{max} - Th_{min}) / Th_{min}\}$ は $12.7 \pm 6.5\%$ であった。心外膜下筋層間の 2 つのマーカ―と対応する心内膜下筋層間の 2 つのマーカ―の動きは収縮・弛緩にさいして同様の動きをとるが、その変動量は収縮期収縮率として心外膜側よりも心内膜側で $5.1 \pm 4.9\%$ 大であった。心筋内・外 2 層間のそれぞれ 2 点間立体距離の短縮は特に収縮末期付近の内層で大であり、これは収縮末期に心筋壁厚が増大することが大きく関与するためと考えられた。心外膜と心内膜の segment length の収縮開始の時間差は 3 ± 28 msec、収縮終了は 4 ± 50 msec でわずかなものであった。しかし、心外膜間あるいは心内膜間の segment は部位が異なると極めて大きな差異があった。これらは心筋興奮伝播のずれによるものと思われた。

文 献

- 1) Eber LM, Greenberg HM, Cooke JM, Gorlin R: Dynamic changes in left ventricular wall thickness in the human heart. *Circulation* **39**: 455-464, 1969
- 2) Sandler H, Dodge HT: Left ventricular tension and stress in man. *Circulat Res* **13**: 91-104, 1963
- 3) Feigl EO, Fry DL: Myocardial mural thickness during the cardiac cycle. *Circulat Res* **14**: 541-545, 1964
- 4) Hawthorne EW: Dynamic geometry of the left ventricle. *Am J Cardiol* **18**: 566-573, 1966
- 5) Guntheroth WG: Changes in left ventricular wall thickness during the cardiac cycle. *J Appl Physiol* **36**: 308-312, 1974
- 6) Kong Y, Morris JJ Jr, McIntosh HD: Assessment of regional myocardial performance from biplane coronary cineangiograms. *Am J Cardiol* **27**: 529-537, 1971
- 7) 石川欽司, 林 健郎, 小林泰之, 大谷昌平, 金政

- 健，山門 徹，小橋紀之，田仕雅洋，大里修一郎，香取 瞭，石田 修，津山泰子，山本義憲，村川莊太郎：冠動脈二方向同時撮影法による左心室外壁短縮様式の検索。近大医誌 5: 67-75, 1980
- 8) 石川欽司，林 健郎，小橋泰之，大谷昌平，金政健，山門 徹，田仕雅洋，大里修一郎，香取 瞭：ヒト冠動脈二方向同時撮影による左心室外壁収縮様式の検索。J Cardiography 9: 293-301, 1979
- 9) Ross J Jr, Sonnenblick EH, Covell JW, Kaiser GA, Spiro D: The architecture of the heart in systole and diastole. Circulat Res 21: 409-421, 1967
- 10) Mitchell JH, Wildenthal K, Mullins CB: Geometrical studies of the left ventricle utilizing cine-fluorography. Fed Proc 28: 1334-1343, 1969
- 11) Durrer D, R Th van San Dam, Freud GE, Janse MJ, Meijler FL, Arzbaecher RC: Total excitation of the isolated human heart. Circulation 41: 899-912, 1970