

# 動的運動負荷心エコー図法による左心機能予備力の評価

# Evaluation of left ventricular reserve by dynamic exercise echocardiography

杉下 靖郎  
小関 迪  
松田 光生

Yasuro SUGISHITA  
Susumu KOSEKI  
Mitsuo MATSUDA

## Summary

Left ventricular reserve was evaluated by "dynamic exercise echocardiography" in healthy persons and patients with left ventricular diseases. The ergometer exercise was performed in a supine position, until heart rate elevated to 100 beats/min.

During exercise, stroke volume (SV) remained constant in healthy persons and mild or moderately severe cardiac patients, but decreased slightly in severe patients. The velocity of left ventricular circumferential fiber shortening (mVCF) increased in healthy persons and mild cases, and decreased in severe cases. Left ventricular end-diastolic diameter (Dd) also played a compensatory role in maintaining SV.

The reserve of pump function can be maintained by the reserve of myocardial contractility and that of preload. Their contributions to pump function are dependent upon the severity of the heart disease.

Dynamic exercise echocardiography is useful, i) because it can discriminate left ventricular reserve among various cardiac status, and ii) because it gives many kinds of parameters of left ventricular reserve.

## Key words

Left ventricular reserve      Myocardial contractility      Preload      Afterload      Severity of heart diseases

## はじめに

非観血的な方法により心機能を評価する試みは、従来より種々の方法により行われている。その1つとして、心エコー図は有力な方法と見なされ、最近急速に用いられるようになってきた。我々は

心機能、とくにその予備力が臨床的に重要であることを考え、その検出法として、「動的運動負荷心エコー図法 dynamic exercise echocardiography」を考案、発表してきた<sup>1-4)</sup>。ここでは、その方法により、左室機能予備力評価として得られるもの、および問題点などについて、一部既発表の

筑波大学臨床医学系 内科  
茨城県新治郡桜村 (〒305)

Cardiovascular Division, Department of Internal  
Medicine, Institute of Clinical Medicine, The Uni-  
versity of Tsukuba, Sakura-mura, Niihari-gun, Iba-  
raki-ken 305

Presented at the 19th Meeting of the Japanese Society of Cardiovascular Sound held in Kyoto, October 20-21, 1979  
Received for publication January 28, 1980

ものも含め総括的に述べる。

### 対 象

1) 健常者, すなわち理学的所見ならびに各種循環器検査所見に異常のない 46 例を対象とし, それを若年(20~30 歳), 中年(31~49 歳), 老年(50~71 歳)に分けて検討した。

2) 各種左心疾患患者 59 例: 高血圧 12 例, 僧帽弁膜症 16 例, 大動脈弁膜症 13 例, 特発性心筋症 7 例, その他 11 例である。これらの心疾患例は New York Heart Association 旧機能分類により, I, II, III 度に分けた(IV 度例は運動負荷試験不可能と考えて除外した)。これらは各年代を含んでいる。

3) 労作性狭心症 12 例: 全例 50 歳以上である。現病歴上, 典型的な労作時狭心症状を有し, 負荷心電図陽性例である。

### 方 法

「動的運動負荷心エコー図法」によった。その詳細は別に述べている<sup>1-4)</sup>ので省略するが, ごく簡単に述べると, 本法のために作った特殊な台の上で, 被検者を仰臥位にして自転車エルゴメーター運動負荷を行った。台は被検者の肩を固定する装置を有し, それにより運動中の胸部の動揺を防いだ。心エコー図は Aloka 製 SSD 110 により撮影し, 記録はロールフィルム(Kodak Linagraph, 1895), 紙送り速度 50 mm/秒にて Honeywell 製 strip chart recorder 1956 によった。時間分析のために, 心電図, 心音図, 頸動脈波を同時記録した。安静時より運動終了後まで, 探触子を手で保持し, 撮影時には毎回, 僧帽弁から左室後壁へのスキャンを行って左室内径撮影部位を一定とするように努めた。撮影および計測は呼気時に行った。心エコー図記録時にカフにより上腕の血圧を測定した。

運動負荷は Siemens 製自転車エルゴメーターにより 40 廻転/分にて行った。負荷量は被検者の脚力などに応じて 20~50 watts から開始し,

以後 1 分ごとに 10 watts ずつ増加させ, 心拍数 100/分 になったところで, 一般に運動を中止した。運動持続時間は心疾患患者 I 度 2.5±1.1 分, II 度 1.9±0.7 分, III 度 1.8±0.5 分であった。運動中止直前の運動負荷量は I 度 59±16 watts, II 度 39±6 watts, III 度 38±12 watts (平均値±標準偏差)であり, II, III 度群間に差がなかった。労作性狭心症の場合は狭心症状の出現あるいは, 心電図上 2 mm 以上 ST 降下が見られた場合にはその時点で運動負荷を中止させた。

標準法により, 左室内径(Dd, Ds), 壁厚(Wd, Ws) (d: 拡張終期, s: 収縮終期)を計測した。左室円周短縮速度(mVcf)は(Dd-Ds)/Dd・ET (ET: 駆出時間)により求め, また Gibson 法<sup>5)</sup>により左室容積, 一回拍出量(SV), 心拍出量(CO)を求めた。左室応力は Sandler<sup>6)</sup>の式から導かれた Weiss<sup>7)</sup>の式により,

左室最高収縮期応力( $\sigma$ )

$$= \frac{Ps \cdot Dd}{2Wd} \left[ 1 - \frac{Dd^3}{2Ld^2(Dd+Wd)} \right]$$

により求めた(Ps: 収縮期圧)。以上より, ポンプ機能の指標として SV, CO, 心筋収縮速度の指標として mVcf, 前負荷の指標として Dd, 後負荷の指標として( $\sigma$ )を用い, 心筋収縮性は $\sigma$ と mVcf による張力・速度関係より求めた。また運動による各指標の変化率は, 安静時の値からの%変化率(% $\Delta$ )として求めた。安静時の心拍数は各群間に差はなかった。

労作性狭心症全例および健常者・左心疾患患者のうち 12 例においては, 左室後壁および心室中隔について, おのおの規準化短縮速度(Vpw, Vivs)を求めた<sup>8)</sup>。拡張期については(松田, 杉下ら<sup>9,10)</sup>, 拡張早期最大弛緩速度(pVcf(d))を求め, 収縮期最大短縮速度(pVcf(s))と対比した。大動脈起始部, および断層法による腹部大動脈の径も計測した。

本法の再現性, 希釈法など他の方法による心拍出量の対比などはすでに報告した<sup>4)</sup>。

運動負荷による各指標の変動の意義づけをする

ために、一部の例に i) メトキサミン (M) 0.08 mg/kg 静注, または フェントラミン (Ph) 10 μ/kg/min 点滴静注による 後負荷の増減, ii) イソソルバイド・ダイナイトレート (ID) 5 mg 舌下投与による前負荷の減少, の各時に同様な測定を行った。

結 果

1. ポンプ機能の予備力

逆流あるいは心内シャントのない例について、安静時には CO, SV とともに、健常者各群, 心疾患患者 I, II, III 度各群の間に有意差はなかった。

運動時には CO の上昇度は、III 度でやや低い傾向があったが、健常者各群, 心疾患患者 I, II 度群の間に差はなかった (Fig. 1)。

運動時に、SV は健常者, 心疾患 I, II 度各群で不変, III 度で低下した。

2. 心筋収縮力の予備力

mVCF と σ により張力・速度関係をみると、安静時には、III 度心疾患例の一部は σ が大きく

mVCF が小さい傾向があったが、それ以外では各群間に差が認められなかった。とくに逆流のある例では、III 度であっても mVCF が高値を示した。

M あるいは Ph 投与により画かれた張力・速度曲線と対比すると、運動時に、軽症例では張力・速度曲線から直角に上方へ移動し、重症例ではその曲線にそって右下に移動した。

ID 投与による前負荷の変化の場合に対して、運動時に、軽症例ではそれに直角に上方へ移動し、中等症では右方に移動し、重症例では前負荷変動時に非常に近くなり、とくにそのうちの1例では運動時と ID 投与時が全く同じ線上に位置した (Fig. 2)。

多数の例についてみても、軽症例では mVCF が増加して張力・速度関係は上方へ移動し、中等症では mVCF の変動は少なく張力・速度関係は右方へ移動し、重症になると mVCF は減少して、張力・速度関係は右下方へ移動した。すなわち、運動時の mVCF の変化率は、張力・速度関係の変動、すなわち心筋収縮力の予備力の指標と

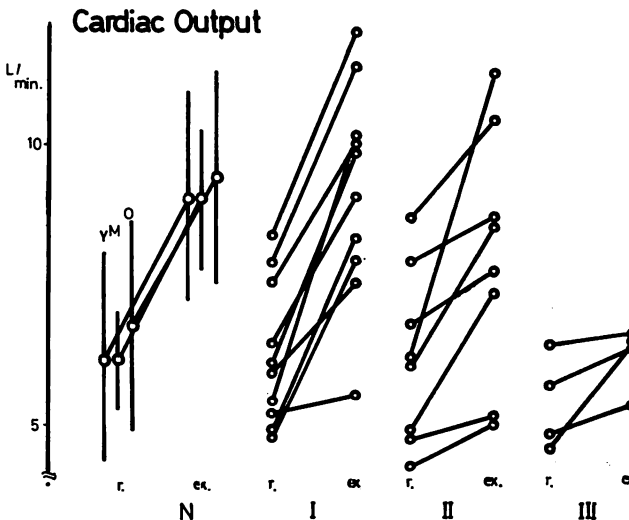


Fig. 1. Changes of cardiac output during exercise.

N=normal; I, II and III=I, II and III in NYHA classification. r=rest; ex=exercise; Y=young; M=middle-aged; O=old. The cases with valvular regurgitation are excluded.

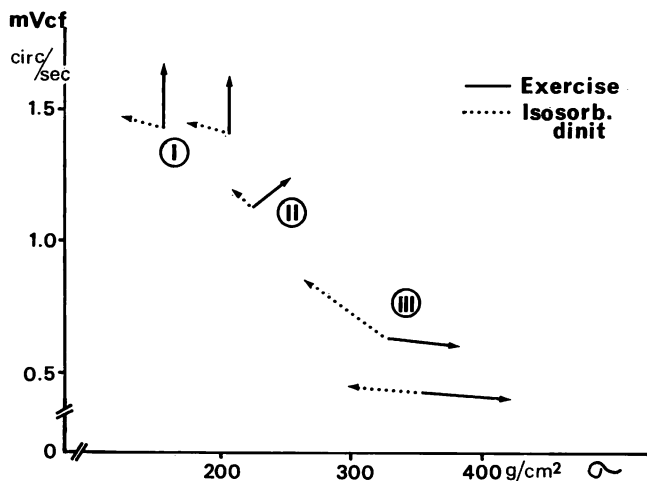


Fig. 2. Changes of force-velocity relationship during exercise and at administration of isosorbide dinitrate, in representative cases of NYHA I, II and III.

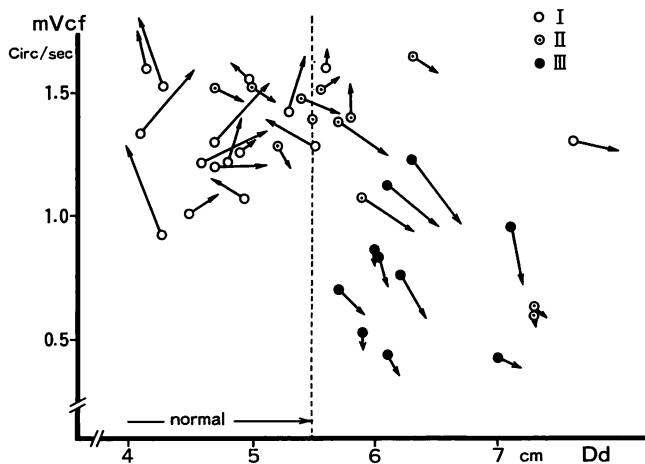


Fig. 3. Changes of the relationship between mVCF and Dd during exercise in Cases of NYHA I (○), II (⊙), and III (●) (MS is excluded.).

なりうると思われた。

### 3. 心筋収縮力, 前負荷の予備力の関係

健常者および心疾患 I 度の一部は, 安静時 Dd は正常範囲内にあり, 運動時 Dd は減少し, mVCF は増加した. 僧帽弁狭窄症 (MS) は, 臨床症状では III 度と考えられても, 運動負荷上はこの反応形式をとった. 心疾患 I 度のかなり多

くの例は, 安静時 Dd は正常範囲内にあり, 運動時, mVCF 増加とともに, Dd も軽度増加した. II 度の多くは, 運動中 mVCF 不変ないしやや増加し, Dd は増加した. III 度の多くは, 安静時 Dd は大きく, 運動時それは増加ないしやや増加傾向を示し, mVCF は減少した (Fig. 3).

軽症例を主として, 運動負荷を強くして, 心拍

数を 100/分 からさらに 110~120/分 まで上げると、当初 mVcf のみ増加したものに、Dd の増加も加わった。

4. 心筋収縮力、前負荷、ポンプ機能の各予備力の関係

運動時の %  $\Delta mVcf$ , %  $\Delta Dd$  をおのおの縦軸と横軸にとって、各点について各運動時点の %  $\Delta SV$  を表示すると、Fig. 4 のように、%  $\Delta SV$  は右上から左下に 10% ごとに明確に区分された。そのワクの上で、I, II, III 度の分布を表示する

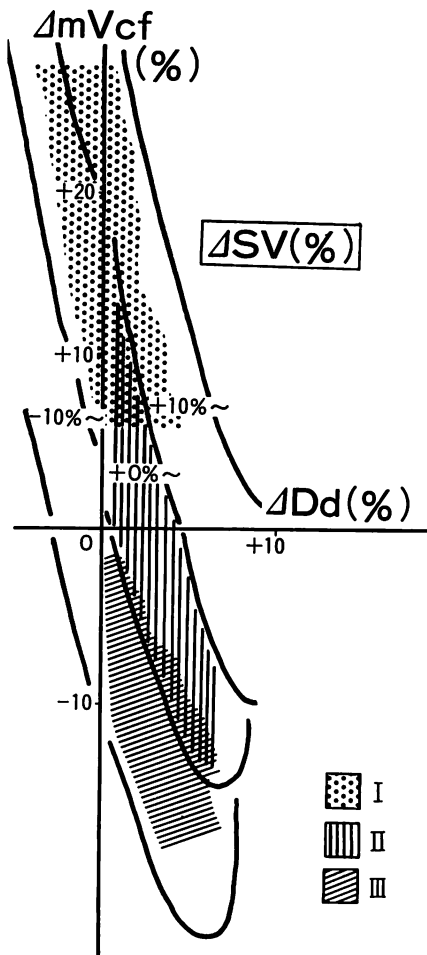


Fig. 4. Relationship between the changes of mVcf, Dd and SV (schema) in cases of NYHA I, II, and III.

と、I 度の多くは mVcf を増加させて SV を保ち、II 度の例は mVcf 増加+Dd 不変か、mVcf 減少+Dd 増加により、概して SV を一定に保った。III 度の例は前述のごとく mVcf は低下し、Dd は余り増加せず、SV は低下傾向を示した。しかし、I, II, III の各例は混在して重なり合うものもあり、明確には分かれな場合もあった。

運動経過中に、SV が減少する例があった。この場合、%  $\Delta Dd$  は 10% まで増加した後、それ以上増加しなかった。

収縮終期の圧・内径関係を、運動中の変化について検討したが、各群間は余り明確な区分はされなかった (Fig. 5)。

5. 左室局所心筋機能および左室全体機能

運動中に、健常者および左心疾患 (虚血性心疾

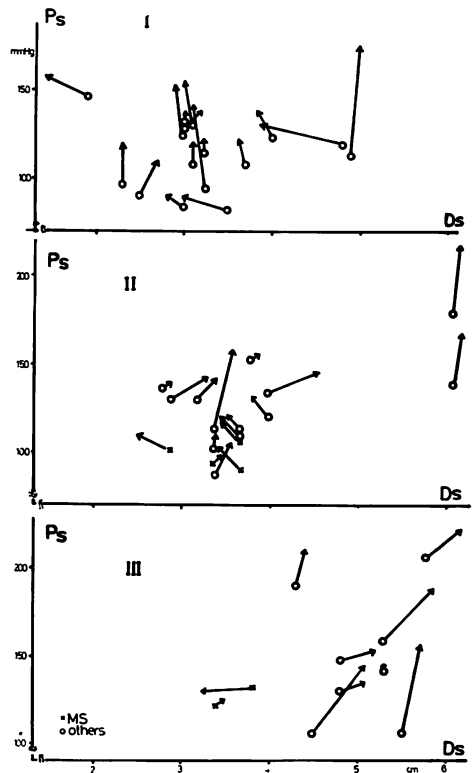


Fig. 5. The changes of end-systolic pressure-diameter relationship during exercise.

患以外)では,  $V_{pw}$  と  $V_{ivs}$  は同時に増加あるいは同時に減少した。それに対し, 労作性狭心症では  $V_{pw}$  が増加したとき  $V_{ivs}$  は減少, あるいは前者が減少したとき後者は増加した<sup>4)</sup>。そのさい左室全体の  $mVcf$  は減少するものが多かったが, 増加したものもあった。

#### 6. 左室拡張機能<sup>9,10)</sup>

健常者において, 運動中に  $pVcf(d)$  は  $pVcf(s)$  より増加し, その関係は運動中止3分後にも継続して存在した。心疾患例(大動脈弁閉鎖不全)では  $pVcf(d)$  は安静, 運動時, 健常者に比し低かった。

#### 7. 大動脈機能

運動中に大動脈径は縮小した<sup>11)</sup>。この現象は腹部大動脈においても同様に認められた。すなわち, 大動脈の圧・内径関係では径縮小方向への移動が認められた<sup>12)</sup>。

### 考 案

左心機能の指標は, 従来, 左心カテーテル法と左室造影法により求められ, それにより左心機能の概念も発展をみたことは確かである。しかし, それらの方法は必ずしも危険性をなしとせず, また繰り返し施行も容易でない。近年, 超音波心エコー図法はその目的のために使われ始めた。この方法は, 左室の寸法 (dimension) の測定が基本にあり, その方法論上の妥当性は, 左室内径が標準的手法により明瞭に描出されていれば良いとされている。またこのようにして得られた左室内径からの容積その他の算出は, 左室不均等収縮のない限り妥当とされている。

我々は, 運動負荷中の撮影についても, 毎回, 大動脈から左室に向けてスキャンすることにより, 左室内の同じ部位を撮影していることを確認した。また我々は先に<sup>2)</sup>, 左室断層図によってみても, 安静時と運動中に撮影部位に位置の差のないことを確認している。また運動中にも明瞭な画像を得るために<sup>4)</sup>, 仰臥位運動負荷, 肩の固定, 呼吸時撮影および計測, トランスジューサの保持法, などに注意を払っている。

心機能の研究の流れは, 迂余曲折を辿っている。最初は, 血液の拍出能力, ポンプ機能から出発し, その後, 骨格筋生理の理論の導入により, 心筋収縮性が張力・速度関係により分析されるようになった。その1つとして,  $V_{max}$  が一時流行したが, 分析上の問題などで急速に消退した。最近では圧・容積関係, とくに収縮終期における  $E_{max}$  について関心が持たれているが, それについては病的心にどの程度に応用可能かについて批判がなされつつある。我々は, 当初の考えに立ち帰り, ポンプ機能を最終目標とし, それに関与するものとして, 心筋収縮性, 前負荷, 後負荷を考え, 心筋収縮性の表現としては, 張力・速度関係を用いた。

心疾患患者もその重症度によって適宜身体を動かす必要もあり, その程度の判定, 予後の判定には, 心機能の予備力 reserve の程度が重大な問題である。しかるに従来は, 客観的な良い方法がなかった。そこで我々は 前述のごとく, 「動的運動負荷心エコー図法」を開発したのである。

前述のごとく, ポンプ機能としての  $SV$ ,  $CO$  は, 心臓の機能としての最終段階であり, それに到達するまでには種々の因子による代償機能が働くと考えられる。我々の成績でも, 安静時の  $SV$ ,  $CO$  は, 各群間に有意差は認められなかった。運動時に心疾患患者 III 度群で  $SV$  の低下傾向を示したのは, 代償機転の破綻の現われであろう。

つぎに,  $mVcf$  と  $\sigma$  による張力・速度関係により心筋収縮性を検討すると, 安静時に III 度群の一部の例で  $mVcf$  低下,  $\sigma$  増加が見られた以外には差は見られなかった。逆流のある例で, III 度群であっても  $mVcf$  が高値を示すことは, 心筋の短縮は逆流分も含むことから当然であり,  $mVcf$  の値のみでは心機能が判定できないことを示す。

薬剤により前負荷あるいは後負荷を変えた場合と運動時の変動とを対比すると, 重症度によって, 運動時の張力・速度関係の移動方向が異なることが知られた。すなわち, 軽症では心筋収縮力の増加により, 同関係は上方へ移動し,  $mVcf$  は増加

する。中等症では、 $mVcf$  は余り増加せず、前負荷増大により、同関係は右方へ移動する。重症の場合は、心筋収縮力は増加せず、後負荷は著明に増加し、同曲線は右下方へ移動し、 $mVcf$  は低下する。すなわち、 $\Delta mVcf$  は、前負荷、後負荷の動きも中に含んで、心筋収縮力の予備力の指標と考えてよいように思われる。逆流例も適用できる。

つぎに、 $mVcf$  と  $Dd$ 、さらに  $\% \Delta mVcf$  と  $\% \Delta Dd$  の関係をみると、重症例によってその動きが異なる。前述のごとく、軽症では心筋収縮力が用いられ、重症になるほど、前負荷が用いられる。軽症でも、運動負荷量が増すと前負荷も動員される。 $\% \Delta mVcf$  と  $\% \Delta Dd$  の座標の上で  $\% \Delta SV$  をプロットすると、右上から左下へ  $\% \Delta SV$  が明瞭に区分され、この三者の関係が明瞭になる。すなわち、重症度に応じて  $\% \Delta mVcf$  と  $\% \Delta Dd$  を使い分けながら、 $SV$  を維持しようとする。これは概念上当然のことではあるが、従来定量化されなかったものであり、この分析は意義があると思われる（この三者の変動は、その演算上、まったく独立でないことに議論があるかも知れないが、しかし先に述べたごとく<sup>4)</sup>、運動負荷中の本法施行時に本法により求めた  $SV$  と希釈法により求めた  $SV$  がよく一致したので、希釈法により求めたものをプロットしても同じ関係が得られるものと思われる）。

軽症例においても、運動負荷量増加とともに前負荷が増加する時期を、後述の cardiovascular drift phase に対して、我々は left ventricular drift phase と呼んだ<sup>2)</sup>。中等症では軽い運動負荷では前負荷動員により  $SV$  が保たれるが、運動量が増すとそれは限度に達し、 $SV$  は低下する。これは Detry ら<sup>13)</sup> の cardiovascular drift phase に相当すると思われる。重症例では、運動負荷により  $SV$  は低下し、そのまま運動を続ければ症状が出現し、心不全に陥ると思われる。

以上のごとく、本法によれば心疾患の程度によりその反応性が異なる。NYHA 機能分類と関係があるようにみえる例もかなりあり、本法の結果

は重症度、とくに予備力の程度を表わすと考えてよからう。NYHA 機能分類と合わないものの第一は MS であり、これはその場合の症状が左室機能と関係ないことで説明されよう。その他の合わない例は、NYHA 機能分類が自覚症状に基づくための非客観性が関係あるかも知れない。本法は客観的指標を与えうると思われる。

先に我々は<sup>14)</sup>、 $\% \Delta mVcf$  はその患者の予後を推定しうることを述べた。これは上に述べてきた心機能の予備力の、臨床的意義づけとして重要であると思われる。

労作性狭心症発作時の局所心筋機能の部位差は、心筋虚血による左室均等収縮の現われと考えられ、心機能との関連において考えることができる。拡張機能と収縮機能の違いは興味ある問題であり、今後の検討が必要である。大動脈径の運動時の変化は、左室機能と関係があり、また末梢に血液を送る上に有用であろう。

以上より、

1) 「動的運動負荷心エコー図法」は、速度・長さ・張力間の関係の変動をみることによって、心筋収縮性、前負荷、後負荷の関係をみ、ポンプ機能を含めて、各因子の予備力と、その相互関係を知ることができる。

2)  $\% \Delta mVcf$ 、 $\% \Delta Dd$  座標は、その相互関係の分析に有用である。

3)  $\% \Delta mVcf$  は、心筋収縮力の敏感な指標である。といえる。これらの点より、本法は特異的な方法といえよう。そして、これらは、心機能の機序の理論的分析に役立つとともに、臨床的には心不全の予知にも用いることができる。

問題点としては、心エコー図全体の共通の問題点のほかに、運動時については、安静時心エコー図撮影可能な例の中の 17% では、運動負荷中、明瞭な画像の心エコー図が撮影不可能となり、とくに、老人、虚血性心疾患例で不可能の率が増加することがあげられる。

## 要 約

動的運動負荷心エコー図法を用いて, 健常者および左心疾患患者において, 左室機能予備力の評価を行った. 被検者を仰臥位にして, 自転車エルゴメーターにより, 心拍数が 100/分 になるまで, 運動負荷を行った.

運動負荷中, 一回拍出量 (SV) は健常者ならびに軽症あるいは中等症心疾患患者においては一定に保たれたが, 重症心疾患患者では軽度減少傾向があった. 平均左室円周短縮速度 (mVcf) は, 運動負荷中に, 健常者および軽症心疾患患者においては増加したが, 重症心疾患患者においては減少した. 左室拡張終期内径 (Dd) は, 一回拍出量を維持するのに, 代償的な役割を演じた.

左室のポンプ機能の予備力は, 心筋収縮性の予備力と, 前負荷の予備力の両者によって維持されている. それら心筋収縮性, 前負荷, ポンプ機能の各予備力の相互関係は, 心疾患の重症度に依存する.

動的運動負荷心エコー図法は以下の点より有用と考えられた. すなわち, i) 種々の心臓の状態において, 左室機能の予備力を区分することができる. ii) 左室機能の各種の予備力の指標を知ることができる.

## 文 献

- 1) 杉下靖郎, 小関 迪: 動的運動負荷心エコー図法. 仰臥位エルゴメーター運動負荷における方法の検討. *J Cardiology* **7**: 551, 1977
- 2) 杉下靖郎, 小関 迪, 新富芳明: 運動負荷と心エコー図法. *日循誌* **42**: Suppl 38, 1978
- 3) 杉下靖郎, 小関 迪, 新富芳明, 松田光生, 伊藤 巖: 動的運動負荷心エコー図法. *臨床成人病* **8**: 611, 1978
- 4) Sugishita Y, Koseki S: Dynamic exercise echocardiography. *Circulation* **60**: 743, 1979
- 5) Gibson DG: Estimation of left ventricular size of echocardiography. *Brit Heart J* **35**: 128, 1973
- 6) Sandler H, Dodge HI: Left ventricular tension and stress in man. *Circulat Res* **13**: 91, 1963
- 7) Weiss MB, Ellis K, Scicca PR, Johnson LL, Schmidt DH, Cannon PJ: Myocardial blood flow in congestive and hypertrophic cardiomyopathy. Relationship to peak wall stress and mean velocity of circumferential fiber shortening. *Circulation* **54**: 404, 1976
- 8) Quinones MA, Gaasch WH, Alexander LJK: Echographic assessment of left ventricular function with special reference to normalized velocities. *Circulation* **50**: 42, 1974
- 9) 松田光生, 杉下靖郎, 小関 迪, 伊藤 巖: 左心の収縮速度と弛緩速度との関係: 第1報. 健常若年者における動的運動負荷心エコー図法による検討. *J Cardiology* **9**: 333, 1979
- 10) 松田光生, 杉下靖郎, 小関 迪, 伊藤 巖: 左心の収縮速度と弛緩速度との関係: 第2報. 大動脈弁閉鎖不全患者における動的運動負荷心エコー図法による検討. *J Cardiology* **9**: 753, 1979
- 11) Sugishita Y, Koseki S, Shintomi Y, Matsuda M, Ito I: Clinical study on the reactivity of aorta wall to exercise. *Jpn Circulat J* **42**: 771, 1978
- 12) 杉下靖郎, 小関 迪, 松田光生: 大動脈の構築から見たその機能. *脈管学* **19**: 317, 1979
- 13) Detry JM, Gain MG, Carlier AA: Hemodynamic and thermal aspects of prolonged intermittent exercise. *Int Z Angew Physiol* **30**: 171, 1972
- 14) 杉下靖郎, 小関 迪, 松田光生, 伊藤 巖: 心エコー図および動的運動負荷心エコー図による心機能評価と臨床経過との関係に関する研究. *日内会誌* **68**: 856, 1979