

運動負荷心エコー図(第1報):  
健常者の臥位 Ergometer  
単一水準負荷法による左心  
機能評価への試み

Echocardiographic estimation of left ventricular responses to supine bicycle exercise: A study on normal subjects

野田 汎史  
荻田 啓子  
天野 直美  
紅露 恒男  
伊藤 良雄  
赤池 陽\*  
木暮 喬\*

Hiroshi NODA  
Keiko OGITA  
Naomi AMANO  
Tsuneo KORO  
Yoshio ITO  
Akira AKAIKE\*  
Takashi KOGURE\*

**Summary**

For the assessment of cardiac performance, the changes of ECG, PCG, heart rate (HR), blood pressure (BP) and oxygen consumption ( $\dot{V}O_2$ ) during exercise have been widely examined. In patients who are prone to congestive heart failure, it is preferable to estimate safely myocardial contractility or left ventricular dimensional changes with lesser load, if it could be available. This paper presents a control study in healthy subjects at 50 watt-6 minutes load, which seems tolerable safely for the patients with NYHA grade III.

Forty-three healthy men (ranging from 20 to 30 years old) were studied by a single-level load exercise (50 watt $\times$ 6 minutes) in supine position using a bicycle ergometer. The ECGs (precordial bipolar leads and limb lead II) were monitored telemetrically. The blood pressure was measured auscultatorily by the Manchette method. Echocardiograms were taken using a Toshiba O1A echograph and Aerotech 2.25 MHz ultrasonic transducer. The expired air collected in Douglas bag was analyzed by a Fukuda Respilyzer BM-10 and body oxygen consumption ( $\dot{V}O_2$ ) was calculated.

In 15 cases with a measurable clear echo, the following were examined in the course of the exercise: the minute to minute changes of HR, BP, left ventricular end-diastolic diameter (LVDd), left ventricular end-systolic diameter (LVDs), stroke volume (SV), ejection fraction (EF), cardiac output (CO),  $\dot{V}O_2$ , pressure-rate-product (PRP: systolic BP $\times$ HR) and Katz's index (mean BP $\times$ HR). As for left ventricular diameter, the value of 5 consecutive heart beats were averaged in order to avoid the error in respiratory changes. LV volume was calculated by the method of Pombo. HR and BP responded

東京大学医学部 第四内科

\* 同 分院放射線科

東京都文京区目白台 3-28-6 (〒112)

The Fourth Department of Internal Medicine, and

\*Department of Radiology, University Branch Hospital Faculty of Medicine, University of Tokyo, Mejirodai 3-28-6, Bunkyo-ku, Tokyo, 112

Presented at the 15th Meeting of the Japanese Society of Cardiovascular Sound held in Kyoto, October 15-16, 1977

Received for publication December 16, 1977

rapidly to the exercise and reached steady state within one or two minutes, as a reflection of sympathetic stimulation. On the other hand, SV and  $\dot{V}O_2$  reached steady state rather slowly, requiring five or six minutes. Therefore, a steady state of HR does not always mean a steady state of LV hemodynamics.

In the initial phase of exercise, diast. BP increased rapidly and LVDd increased by 98 per cent of maximal change, and LVDs began to reduce. After 3 minutes of exercise, however, diast. BP began to fall, although LVDd remained almost constant and LVDs continued to reduce linearly. Since PRP and Katz's index, which are considered to have a close relation to myocardial oxygen consumption, reached a plateau in this phase, we supposed that LVDs decreased due to reduced peripheral vascular resistance resulting in the increase of SV and CO. The echocardiographic method is likely to be one of useful noninvasive methods to examine the responses and adaptations of cardiovascular systems to exercise.

### Key words

Supine bicycle exercise

Left ventricular diameter

Oxygen consumption ( $\dot{V}O_2$ )

### はじめに

NYHA 心機能分類で III 度以上の心不全を有する例の心機能を評価検討する場合, step 法, treadmill 法, ergometer 法等による最大あるいは亜最大の運動負荷試験を利用することは, 危険性などの点で問題なしとしない. また, 外的運動量および体酸素消費量など, 身体レベルでの負荷量, 心拍数と血圧に代表される血行力学的変量, および冠循環, 心筋代謝レベルの情報としての心電図の他に, 心筋収縮性と左室径に関するデータが採取されれば, 心不全を有する例の治療, 管理に有力な情報となりうる. 負荷時の心エコー図に関しては本邦でもすでに 2, 3 の研究発表がみられている<sup>1-3)</sup>. 今回, 我々は上記の目的に沿ったコントロールとして, 健常者を対象に検討を試みた.

### 対象と方法

健常男子 43 例 (年齢  $25 \pm 5$  歳, 身長  $169.8 \pm 5.5$  cm, 体重  $61.8 \pm 8.7$  kg) を対象に, ergometer 50 watt, 6 分の単一水準運動負荷を臥位にて施行した.

心電図は, 第 II 肢誘導の他, テレメーターによる胸部双極 2 誘導を記録した. 体酸素消費量の測定はダグラスバッグ法により, 15 例中 6 例は 3 分単位, 9 例については 1 分毎に行い,  $O_2$ ,  $CO_2$  の

分析に関してはフクダ産業製 Respilyzer BM-10 を用いた. 血圧はマンシット法にて 1 分毎に測定した.

負荷前・中・後を通じての UCG 記録は東芝製 OIA にて行い, 2.25 MHz の探触子を用い, 紙送り速度は 50 mm/sec とした. 心室中隔と左室後壁とが同時に検出され, 僧帽弁前尖エコーの立ち上がりのみをみるビームの方向で, 1 分毎に 10 拍以上を記録し, 計測は呼吸性変動を考慮にいれ, 連続する 5 拍の平均値として算出した. 試験は 43 例に行ったが, うち全経過を通じて良好な記録を得た 15 例につき, 心拍数 (HR), 血圧 (BP), 左室拡張終期径 (LVDd), 左室収縮終期径 (LVDs), 駆出量 (SV), 駆出分画 (EF), 分時心拍出量 (CO), 体酸素消費量 ( $\dot{V}O_2$ ), pressure-rate-product (PRP: 収縮期血圧  $\times$  心拍数), Katz's index (平均血圧  $\times$  心拍数) を検討した.

Fig. 1 は, 全経過を通じて良好な記録が得られたものの経時的変化を表わすエコー図であるが, このように運動中においても, たえず左室長軸スキャンを十分に行うことにより, 計測にたえる良好な記録が可能であった.

Fig. 2 は, 運動中 5 分目の左室エコー図であるが, 図に示すごとく, LVDd は ECG の R 波の頂点, LVDs は PCG 上の II 音大動脈成分 (II A) 高調成分の開始点で計測した. なお, 左室容積に

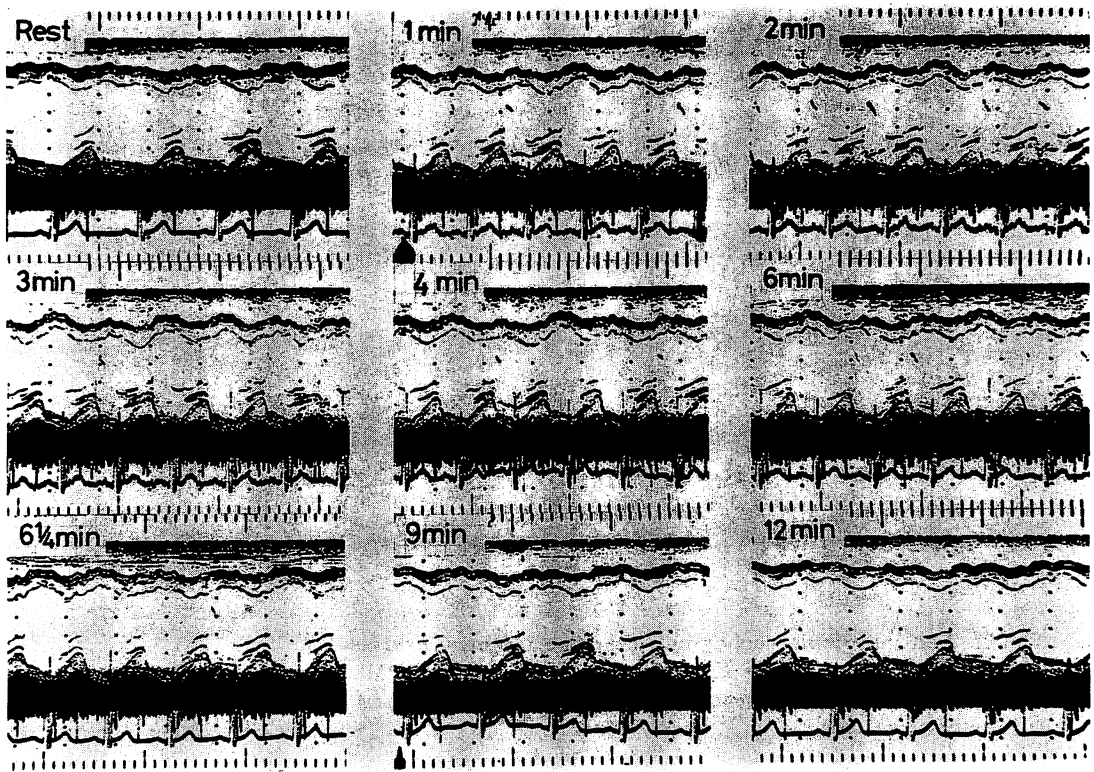


Fig. 1. Left ventricular echograms during exercise.

関しては、Pombo ら<sup>4)</sup>に従い、左室内腔を長径と短径の比が2:1の回転楕円体とみなして計算した。

## 結 果

### 1. HR と $\dot{V}O_2$

まず型のごとく負荷時の HR,  $\dot{V}O_2$  の反応様式をみると、Fig. 3のごとく安静時  $68.6 \pm 10.1/\text{min}$  の HR は運動初期に急速に増加し、2分後には  $99.0 \pm 9.2/\text{min}$  となり、ラトーに達した。一方、安静時  $271.9 \pm 47.7 \text{ ml}$  の  $\dot{V}O_2$  の反応は遅れて5分後に  $928.9 \pm 77.5 \text{ ml}$  となり、steady state に達した。すなわち、酸素欠損 ( $O_2$  deficit) の相を作っていた。

### 2. CO と $\dot{V}O_2$

この  $O_2$  deficit の相における CO と  $\dot{V}O_2$  との関係を見ると、Fig. 4 に示すごとく良く似たパ

ターンを示し、CO も初期には十分な反応がないものの、しだいに新しい動的状態に対して適応し、運動開始6分後には安静時の約2倍の分時心拍出量を得ていることがわかる。

### 3. CO と HR, PRP, Katz's index

一方、高まった循環機能を支える心筋の酸素消費量とほぼ平行して変化するといわれる Katz's index, PRP など、HR や BP のみの関与する指数の動きをみても、Fig. 5 にみられるごとく迅速に反応し (rapid response)、50 watt 程の負荷量でも運動後1~2分で高いレベルに達した。左室径が関与する CO などは、これに遅れて緩徐適応 (slow adaptation) を示した。

### 4. HR と SV

UCG を利用することにより、CO や SV が経時的に観察可能になるが、CO の構成成分である

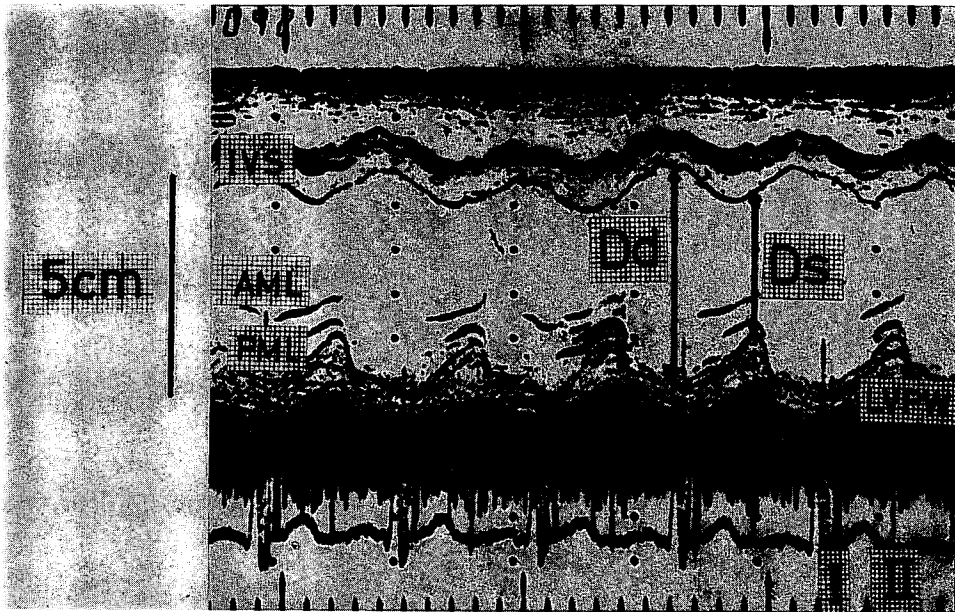


Fig. 2. Left ventricular echogram after five minutes' exercise.

IVS: interventricular septum, AML: anterior mitral leaflet, PML: posterior mitral leaflet, Dd: left ventricular end-diastolic dimension Ds: left ventricular end-systolic dimension, LVPW: left ventricular posterior wall.

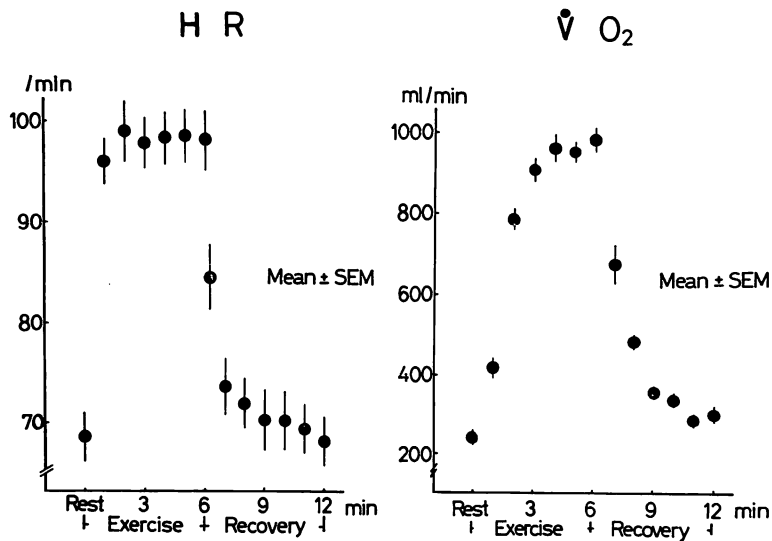


Fig. 3. Heart rate (HR) and oxygen consumption ( $\dot{V}O_2$ ) during and after exercise.

HR reaches steady state after one or two minutes' exercise.  $\dot{V}O_2$  reaches steady state rather slowly requiring five or six minutes.

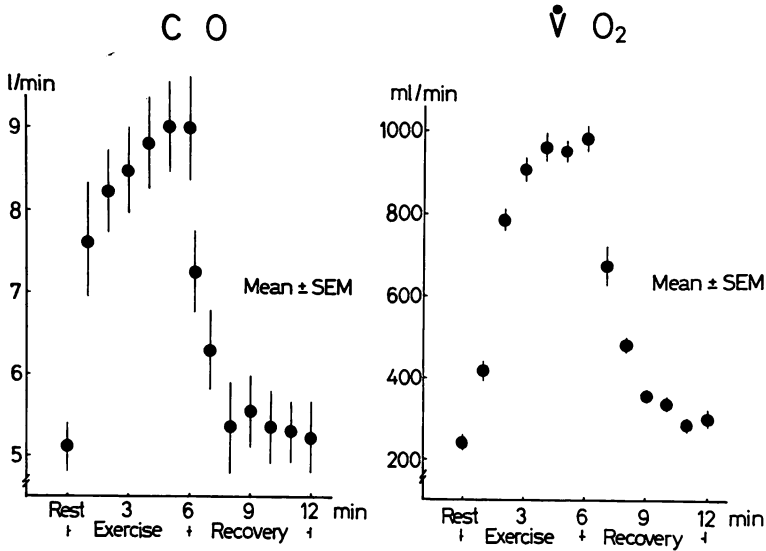


Fig. 4. Cardiac output (CO) and oxygen consumption ( $\dot{V}O_2$ ) during and after exercise.

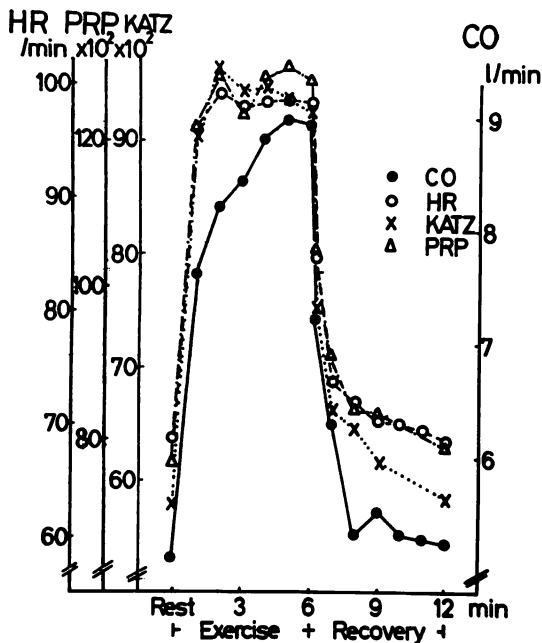


Fig. 5. Cardiac output (CO), pressure-rate-product (PRP), heart rate (HR) and Katz's index (Katz's index) during and after exercise.

HR と SV の関係を対比してみると、Fig. 6 のごとく HR の迅速反応 (rapid response), SV の緩徐適応 (slow adaptation) の様相が明らかになった。安静時  $75.3 \pm 18.5$  ml の SV は、50 watt 程度の比較的軽度の負荷に対しても steady state に入るのに約 6 分を要して  $92.4 \pm 22.9$  ml となっており、HR からみた steady state は、左室の循環動態面からみると、まだ non-steady state phase であるといえる。

#### 5. LVDD, LVDs と diast. BP, SV

この点を LVDD, LVDs の動きからさらに検討してみると、LVDD の変化量は比較的小さく約 1.5 mm であるが、運動開始後 1 分で大きく反応し、最大偏位値の 98% に達し、以後の増大は緩徐であった。一方、LVDs の変化量は 2.2 mm であるが、運動開始後 5~6 分に至るまでほぼ直線的に減少した。

#### 考 案

心機能評価の一つとして、運動負荷による心電図、心拍数、血圧値、体酸素消費量の変化、また

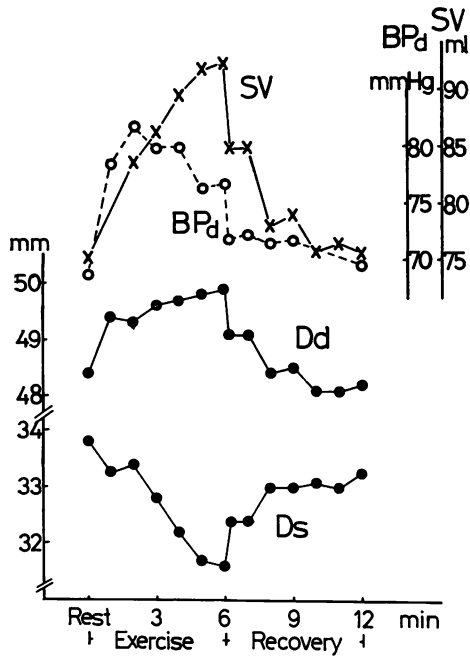


Fig. 6. Left ventricular end-diastolic diameter (Dd), left ventricular end-systolic diameter (Ds), diastolic blood pressure (diast. BP) and stroke volume (SV) during and after exercise.

In the initial phase of exercise, diast. BP increases rapidly and Dd increases by 98 per cent of maximal change, and Ds begins to reduce. After three minutes of exercise, however, diast. BP begins to fall although Dd remains almost constant and Ds continues to reduce linearly.

最近では STI の変化の測定も広く行われている。しかし、NYHA 心機能分類で III 度以上の心不全を有する例では、危険性などの点で軽度の運動負荷が必要であり、また、上記の指標以外に左室径に関する情報採取が強く望まれている。

負荷中の体動が少ない isometric exercise による経時的な左室径の変化については、すでにいくつかの報告がみられるが<sup>5,6)</sup>、dynamic exercise における心エコー図を利用した経時的な心機能評価への試みは数少ないようである。我々は NYHA 心機能分類で III 度以上の心不全を有する例でも、可能と思われる運動負荷量を 50 watt、6 分間

(これは約 5 cal/分 で Master's two step test の約 60% の仕事量に相当する) と設定し、今回は control study として、健常男子を対象に ergometer による単一水準運動負荷を仰臥位にて施行し、LVDd, LVDs, SV, CO, HR, BP,  $\dot{V}O_2$ , PRP, Katz's index を検討した。

### 1. HR と $\dot{V}O_2$ について

運動時に起こる HR の増加の反応は、年齢、性および運動強度や種類によって異なる。Lester<sup>7)</sup>によれば 20~30 歳の予測最大心拍数は、ほぼ 195/min であるので、今回の 50 watt 程度の負荷は、その約 50% に当たり、“moderate exercise” の範疇に入る。また、HR の初期の増加は、まず心臓抑制中枢の緊張が解除されることによって起こり、数秒後には心臓促進中枢の活動の増大によってこれが維持されるとされているが、さらに運動中にはカテコールアミンの分泌、体温の上昇、静脈環流の増加、活動筋からの反射などの影響で、HR のレベルが定まると考えられている。今回の我々の成績では、HR は運動開始 1 分後には  $68.6 \pm 10.1/\text{min}$  から  $96.0 \pm 9.2/\text{min}$  に上昇、以後ほぼ steady state に達した。一方、 $\dot{V}O_2$  はこれに遅れて、いわゆる  $O_2$  deficit の相を作る。すなわち、運動に要するエネルギーは呼吸系の酸素摂取機能、および循環系の酸素運搬機能に依存できず、酸素欠損相を形成する。この  $O_2$  deficit の相における CO は、初期には十分な増加がないが、しだいに新しい動的状態に対して適応し、エネルギー源の分解速度と取り込み速度との間に平衡がとれ、いわゆる「動的平衡」(dynamic equilibrium)<sup>8)</sup> が維持されてくる。

### 2. BP について

運動時の心筋エネルギー消費増大の主たる要素である収縮血圧は、今回の場合、安静時  $115.6 \pm 10.0 \text{ mmHg}$  から、運動開始 2 分後には  $129.3 \pm 8.5 \text{ mmHg}$  となり、以後プラトーを形成した。一方、拡張期血圧は血液循環に対する末梢抵抗の大きさを反映するが、活動筋が運動中に十分な血液を受けると、腹部内臓血管の収縮を代償として、

活動筋の小動脈の拡張が起こり、このため末梢血管抵抗が減少し、血液は毛細管床に流入しやすくなる。この効果については Carsten ら<sup>9)</sup>の報告にもみられるが、我々の成績でも安静時  $68.7 \pm 9.6$  mmHg の拡張期血圧が、運動開始3分後には  $79.7 \pm 9.3$  mmHg に上昇をきたし、以後は末梢血管抵抗の減少を反映してか下降を始め、5分後には  $76.1 \pm 8.9$  mmHg に低下した。

### 3. LVDd, LVDs について

今回の成績では、運動開始1~2分間においては LVDd の増加に伴って CO が増加するなど、Frank-Starling 機序が関与しているように思われるものの、以後は LVDs の減少に伴って CO が増加する点で Frank-Starling 機序のみで説明するには無理があるように思われた。このことについては Braunwald ら<sup>10)</sup>も、正常心臓の運動に対する反応は、心拍数の増加、交感神経刺激、および Frank-Starling 機序による作用の心筋への総合的效果を含んでおり、運動している骨格筋の非常に増大した酸素需要を満たすのに十分な心室筋の活動水準を確保するためには、これら3つの影響因子をすべて必要とすると述べている。

### 3. SV について

従来、運動時の SV は、安静時の値にくらべて必ずしも有意の増加を示さないといわれてきたが<sup>11-13)</sup>、今回の成績では、SV は  $75.3 \pm 18.5$  ml から  $92.4 \pm 22.9$  ml へと増加傾向がみられた。この不一致については、運動の強さ、種類、時期等の条件の相違、あるいは運動のごく初期に関するデータ不足などに起因するのかも知れない。

運動に対する生体の反応の主役は、Rushmer<sup>14)</sup>、Guyton ら<sup>15)</sup>によれば交感神経興奮であるとされ、HR, BP の迅速反応はこれを裏付けるデータである。また、これと並び運動時の適応反応に重要な役割を果たしている末梢血管の動態との関係を、左室径の変化と拡張期血圧とからみると、運動開始後早期には、一過性に拡張期血圧も上昇し、LVDd は拡大、LVDs も縮小反応を開始するが、3分を経過すると拡張期血圧が減少を始め、

LVDd がほぼ steady state に達しているにもかかわらず、LVDs は縮小を続ける。この時点での PRP, Katz's index など心筋酸素消費量を反映する指数がほぼプラトーであったことを思い起こすと、この相においては、左室はほぼ同様のエネルギー消費にもかかわらず、より大きな拍出量を得ていることになる。すなわち、末梢血管抵抗が低下し、より大きな LVDs の縮小が可能となり、SV の増大、CO の増加が得られたとも考えられる。

いずれにせよ、運動に対する循環系の「送血量を増す」という命題に合目的々な一連の適応反応が、交感神経緊張、末梢血管抵抗の減少、SV, CO の増大という形で行われていることが、左室径の動態を合わせた諸パラメーターの一心拍毎の経時的観察によって推測できたように思われた。

## 要 約

1) 健康男子43例を対象に、50 watt 6分間の ergometer 運動負荷を臥位にて施行し、UCG, PCG, ECG, 血圧、体酸素消費量を記録計測したが、UCG に関して全経過を通じて良好な記録が可能となったのは15例(35%)であった。

2) 心拍数は運動開始後1分でほぼプラトーに達したが、体酸素消費量、分時心拍出量は遅れて5分後に steady state に達した。

3) 拡張期血圧は運動開始後3分までは上昇し、以後は下降を示した。

4) 左室拡張終期径は比較的迅速に拡張反応をみせ、運動開始2分後にはほぼプラトーに達するが、左室収縮終期径はその後も直線的に減少傾向を示した。

5) 運動に対する循環系の「送血量を増す」という命題に合目的々な一連の適応反応を、左室径の動態を含めた循環系諸パラメーターの一心拍毎の経時変化から観察し、考察を行った。

三井記念病院循環器センター 町井 潔先生の御助言に感謝いたします。

文 献

- 1) 小関 進, 杉下靖郎, 新富芳明, 浅井克晏, 山口徹, 伊藤 巖: 心臓の肥大・拡張に関する研究—いわゆる“スポーツ心”の運動反応性を中心に—. 第41回日循総会発表, 1976
- 2) 矢端幸夫, 野呂忠慈, 木川田隆一: 運動負荷時における心機能の加齢による影響について. 第77回日循関東信越地方会発表, 1976
- 3) 鯉坂隆一, 谷口興一, 藤原秀臣, 家坂義人, 丹羽明博, 飯泉智弘, 宮原康引, 伊藤春樹, 武内重五郎: 労作性狭心症患者の ergometer 運動負荷における左心機能: UCG および STI による評価. 第14回臨床心音図研究会発表, 1977
- 4) Pombo JF, Troy BL, Russell RO Jr: Left ventricular volumes and ejection fraction by echocardiography. *Circulation* **43**: 480, 1971
- 5) Parisi AF, Harrington JJ, Askenazi J, Pratt RC, McIneyre KM: Echocardiographic evaluation of the Valsalva maneuver in healthy subjects and patients with and without heart failure. *Circulation* **54**: 921, 1976
- 6) Robertson D, Stevens RM, Friesinger GC, Oates JA: The effect of the Valsalva maneuver on echocardiographic dimensions in man. *Circulation* **55**: 596, 1977
- 7) Lester FM, Sheffield LT, Reeves TJ: Electrocardiographic changes in clinically normal older men following near maximal and maximal exercise. *Circulation* **36**: 5, 1967
- 8) Hill AV, Lupton H: Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *Quart J Med* **16**: 135, 1923
- 9) Carlsten A, Grimley G: The Circulatory Response to Muscular Exercise in Man. Charles C Thomas, Springfield, 1966
- 10) Braunwald E, Sonnenblick H, Ross J Jr, Glick G, Epstein SE: An analysis of the cardiac response to exercise. *Circulat Res* **20**, **21**: 44, 1967
- 11) Rushmer RF: Constancy of stroke volume in ventricular responses to exertion. *Amer J Physiol* **196**: 745, 1959
- 12) Mitchell JH, Sproule BJ, Chapman CB: The physiological meaning of the maximal oxygen intake test. *J Clin Invest* **37**: 538, 1958
- 13) Linderholm H, Strandell T: Heart volume in the prone and erect position in certain heart cases. *Acta Med Scand* **162**: 247, 1958
- 14) Rushmer RF: Autonomic balance cardiac control. *Amer J Physiol* **192**: 631, 1958
- 15) Guyton AC, Granger HJ, Coleman TG: Autoregulation of the total systemic circulation and its relation to control of cardiac output and arterial pressure. *Circulat Res* **28** (Suppl I): 93, 1971