

# 超音波パルス・ドプラー血 流量計による連続的心拍出 量測定の研究：自転車エル ゴメーター運動負荷応答の 測定

# Continuous measurement of cardiac output during ergometer exercise using an ultrasonic pulsed Doppler flowmeter

高山 和久  
高橋 郁美  
河野 敏彦  
原 正忠  
照屋日出夫  
中山 信彦  
中塚 喬之  
古幡 博\*  
吉村 正蔵

Kazuhisa TAKAYAMA  
Ikumi TAKAHASHI  
Toshihiko KAWANO  
Masatada HARA  
Hideo TERUYA  
Nobuhiko NAKAYAMA  
Takayuki NAKATSUKA  
Hiroshi FURUHATA  
Shozo YOSHIMURA

## Summary

A method for determining cardiac output was developed, which provided the product of the absolute blood flow rate at the aortic arch (as measured non-invasively from the suprasternal notch by an ultrasonic pulsed Doppler flowmeter: UPDF) and the cross-sectional area of the aorta at that level, as estimated from two-dimensional echograms. Using this method, non-invasive continuous measurements of cardiac output were made during bicycle ergometer exercise. The results were summarized as follows:

1. Resting cardiac output values obtained by this method correlated reasonably well with those by the thermodilution method (correlation coefficient  $r=0.76$ ).
2. Eight healthy male volunteers exercised for 2 min on a bicycle ergometer at 250 kpm/min, and serial cardiac outputs were determined by this method for five of these subjects during and after the loading.
3. The cardiac output curves thus obtained clearly demonstrated abrupt increases in cardiac outputs initially, followed by rapid returns to resting cardiac output levels after the end of exercise.

We intend to conduct additional studies for larger groups of subjects to further evaluate and to establish this method for use in cardiac examinations.

## Key words

Ultrasonic pulsed Doppler flowmeter

Cardiac output

Bicycle ergometer exercise

東京慈恵会医科大学 第四内科  
\*同 ME 研究室  
東京都港区西新橋 3-19-18 (〒105)

The Fourth Department of Internal Medicine and  
\*Department of ME Laboratory, The Jikei University  
School of Medicine, Nishishinbashi 3-19-18, Minato-  
ku, Tokyo 105

Received for publication January 20, 1984 (Ref. No. 25-20)

緒 言

心臓ポンプ機能の評価法として, 心拍出量測定は必須のものである. 我々は超音波パルス・ドプラー血流量計 ultrasonic pulsed Doppler flowmeter (以下 UPDF と略す) を用い, 胸骨上窩より大動脈弓部の絶対血流速を計測し, 非観血的かつ連続的に心拍出量を算出する方法を開発した<sup>1,2)</sup>. 今回, 本法を用いて自転車エルゴメーター運動負荷時の心拍出量連続測定を行い, 心機能評価法としての有用性を検討した.

対象と方法

対象は健康男性, 22~38 歳, 8 例である.

方 法

1. 装 置

使用した UPDF は当大学医用エンジニアリング研究室, 古幡<sup>3,4)</sup>の基本設計による日立メディコ製で, Fig. 1 にそのブロック図を示す. 超音波発振周波数は 2 MHz, パルス繰り返し周波数は 5 KHz と 10 KHz の 2 段切り換え, ゲート幅は 6 mm ステップで 30 mm まで, またゲート位置は 3 mm ステップで, それぞれ可変である. 本装置ではパルス繰り返し周波数 5 KHz の場合, 最深計測深度は 15 cm, 測定可能最高流速は約 200 cm/sec で, パルス繰り返し周波数 10 KHz においては, それぞれ 7.5 cm, 約 400 cm/sec である. 今回は繰り返し周波数 10 KHz, ゲート幅 12 mm を使用し, サンプルボリュームは 10×10×12 mm である. 血流信号は, 次の理論式に基づき, 実時間アナログ演算にて, 流速波形  $V_m(f)$  と相対流量波形  $Q(f)$  の 2 種類を算出し, ペン書き記録計 (三栄測器製 rectigraph 8 S) にて記録した.

$$V_m(f) = \frac{c \cdot \Delta f(f)}{2fc \cos \theta} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f \cdot p(f) df}{h \int_{-\infty}^{\infty} p(f) df} \dots\dots\dots (1)$$

$$Q(f) = K \int_{-\infty}^{\infty} f \cdot p(f) df \dots\dots\dots (2)$$

$\Delta f(f)$ : 瞬間平均ドプラー周波数

$f$ : ドプラー周波数

$p(f)$ : ドプラー信号の瞬間周波数スペクトル

$h = c/2fc \cos \theta$

$c$ : 音速,  $fc$ : キャリア周波数,  $\theta$ : 入射角

$K = 1/L \cdot Q_s \cdot T_s \cdot h$

$L$ : ビーム幅,  $Q_s$ : 単位面積当りの散乱パワー,  $T_s$ : 超音波伝搬経路の透過率

2. 血 流 計 測 法

被検者を仰臥位とし, 頸部を伸展させ, 大動脈弓部血流速の測定は, UPDF のプローブを胸骨上窩において行った. Fig. 2 の上段は, 同部より超音波断層装置 (東芝製 SSH 11-A) にて捉えた大動脈弓部長軸断層像で, 矢印は UPDF のビーム方向を示しており, サンプル点は上行大動脈の腕頭動脈分岐直前である. 下段は健康人安静時における UPDF 出力波形で, その中段は流量波形  $Q(f)$ , 下段は流速波形  $V_m(f)$  である.

3. 血 流 速 度 測 定 時 の 超 音 波 入 射 角 の 決 定

UPDF による絶対血流速の測定には, 超音波の血流への入射角  $\theta$  を決定しなければならない. 理論的には, 生体内の血液, 血管壁, 周囲生体組織の音響インピーダンスの差により, 相対流量波形  $Q(f)$  の振幅と入射角  $\theta$  の関係は, 1 峰性の特性曲線となることが明らかにされている. モデル実験, ホルマリン固定大動脈弓部, および生体におけるヒト腹部大動脈を用いた実験により,  $Q(f)$  は入射角  $\theta = 60^\circ$  の時最大振幅となる 1 峰性の特性曲線を持つことが明らかにされた<sup>2)</sup>. この原理を基に, 大動脈弓部血流速測定において,  $Q(f)$  が最大振幅となるプローブ位置が, 入射角  $\theta = 60^\circ$  であるとして絶対血流速を算出した.

4. 心 拍 出 量 の 測 定

大動脈弓部断面積は, 胸骨上窩より超音波断層装置にて大動脈弓部を描かせ, ビームと大動脈弓が垂直になる部位で, 収縮期の大動脈径を M モード心エコー図により計測し, 同部断面が真円であると仮定して求めた.

平均血流速  $V_m$  は次式により算出した. すな

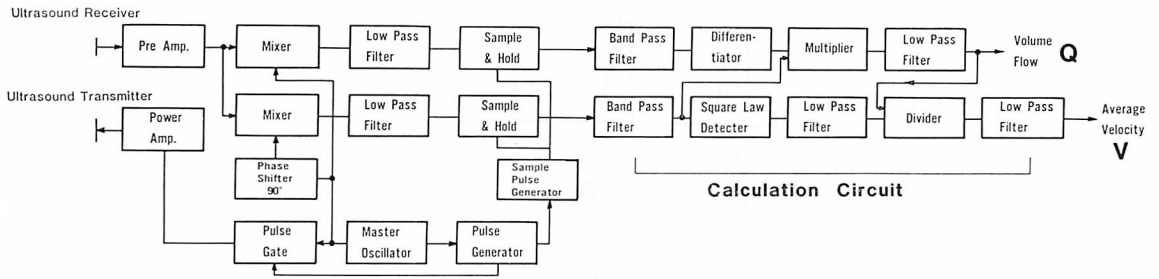


Fig. 1. Blockdiagram of an ultrasonic pulsed Doppler flowmeter (UPDF) with a calculation circuit for waveforms of volume flow ( $Q$ ) and velocity ( $V$ ).

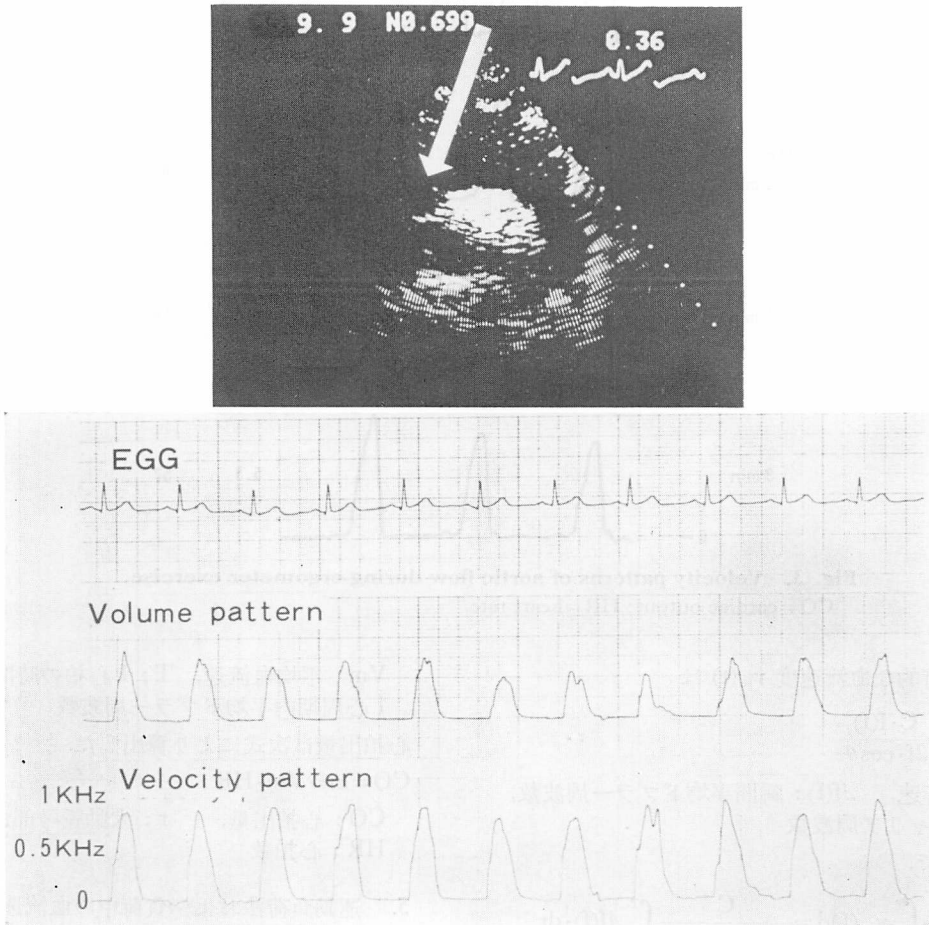


Fig. 2. Two-dimensional echogram of the aortic arch (top), and ascending aortic flow patterns by UPDF in a normal subject (bottom).

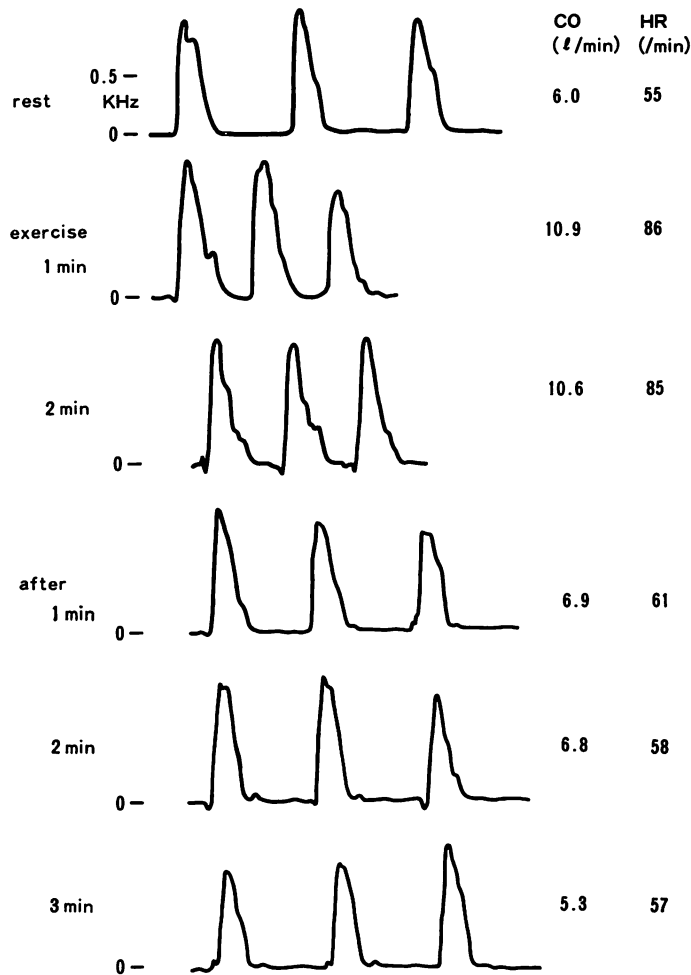


Fig. 3. Velocity patterns of aortic flow during ergometer exercise.  
CO=cardiac output; HR=heart rate.

わち, 経時的な血流速度  $v_m(t)$  は

$$v_m(f) = \frac{C \cdot f(f)}{2f \cdot \cos \theta}$$

C: 音速,  $\Delta f(f)$ : 瞬間平均ドプラー周波数,  
f: キャリア周波数

であるので,

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T v_m(f) dt = \frac{C}{T \cdot (2f \cos \theta)} \int_0^T \Delta f(f) \cdot dt$$

$$= \frac{C \cdot \Delta f_m}{T \cdot 2f \cos \theta}$$

$V_m$ : 平均血流速度, T: 1心拍の時間,  $\Delta f_m$ :  
1心周期内平均ドプラー周波数

心拍出量は次式により算出した.

$$CO = \pi r^2 \cdot V_m \cdot HR$$

CO: 心拍出量, r: 大動脈弓部血管半径,  
HR: 心拍数

5. 運動負荷法および負荷中の血流速度測定  
運動負荷には Monark 製の自転車エルゴメーターを用い, 被検者を仰臥位とし, UPDF にて胸骨上窩より大動脈弓部血流速度を測定しつつ行っ

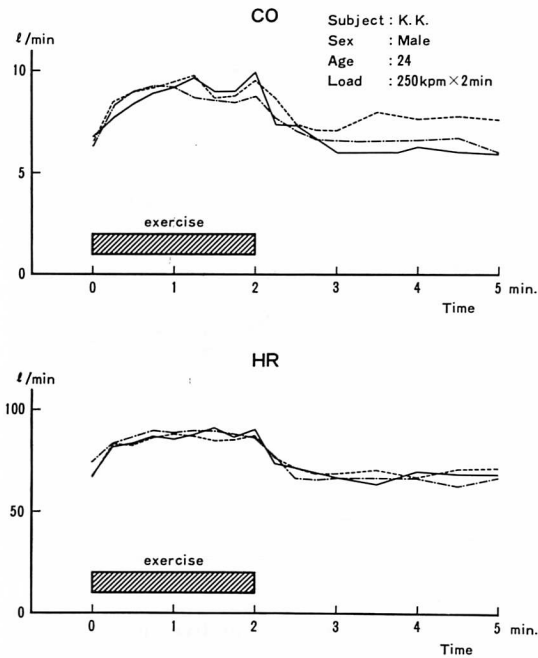


Fig. 4. Cardiac output and heart rate responses to ergometer exercise in a 24-year-old man.

た。運動負荷量は、体動が少なく安定した血流測定が行える 250 kpm/min の軽負荷とし、負荷時間は 2 分間、負荷前より負荷終了後 3 分までの計測を行った。大動脈弓部血流速度の測定は、負荷前に UPDF の流量波形  $Q(t)$  が最大となるプローブ方向を求め、その後用手的にプローブ方向を一定に保ちつつ計測を行った。プローブの方向が保てないと測定誤差が大となる。そこでプローブに小形の鏡をとりつけ、これに光を照射し反射光が一点を指すようにすることで、安定な測定を可能とした。

## 成 績

### 1. UPDF による運動負荷試験時の血流速度、心拍出量の測定結果

運動負荷を行った 8 例について、安静時は全例で大動脈弓部血流速度、心拍出量が測定可能であったが、うち 3 例は運動負荷時体動や呼吸等の影響

により、安定した血流速度波形の測定が困難で、連続した心拍出量の測定が行えなかった。

Fig. 3 は良好な計測を行い得た 1 例につき、運動負荷前より負荷後 3 分までの大動脈弓部血流速度波形と、算出された心拍出量、および心拍数の変化を示したものである。血流速度波形に呼吸性変動を認めるが、運動負荷中も良好な記録が得られ、心拍出量は安静時 6.0 l/min より、運動負荷時 1 分で 10.9 l/min まで増加している。

Fig. 4 は本法の再現性を示す。同一被検者に対し行った 3 回の負荷結果で、測定手技等の熟練は要するが、かなり良好な再現性が得られた。

Fig. 5 は計測できた 5 例につき、運動負荷による心拍出量、心拍数の変化率を示したものである。いずれも心拍出量の負荷中の増加、負荷後の安静レベルへの復帰状態をよく捉えており、健常男性に対する今回の負荷では、心拍数、心拍出量の増加は負荷開始後約 1 分でプラトーに達し、負荷終了後約 1.5 分で安静時レベルに下っている。

心拍数、心拍出量の関係について特徴ある 2 例を示すと、Fig. 6 の例では運動負荷による心拍出量の増加率が心拍数の増加率より大で、負荷初期に一回心拍出量の増加が心拍出量増加に大きく影響していることが示され、Fig. 7 の例では心拍出量の増加率と心拍数の増加率が近似し、本例では負荷初期より 1 回心拍出量の変化は少なく、主に心拍数の増加により心拍出量の増加が起こることが示されている。

## 考 察

心拍出量の測定は心臓のポンプ機能を評価する上で非常に重要である。また安静時のみならず、運動負荷試験時の心拍出量の変化を連続的に測定できれば、心予備力、心機能評価にさらに有用な指標が得られる。

心拍出量の測定法として信頼性の高いものに、Fick 法<sup>5)</sup>、色素希釈法<sup>6,7)</sup>、左室造影法<sup>8)</sup>、熱希釈法<sup>9~12)</sup>等があるが、いずれも侵襲的方法であり、また連続測定は困難である。電磁流量計を用いる

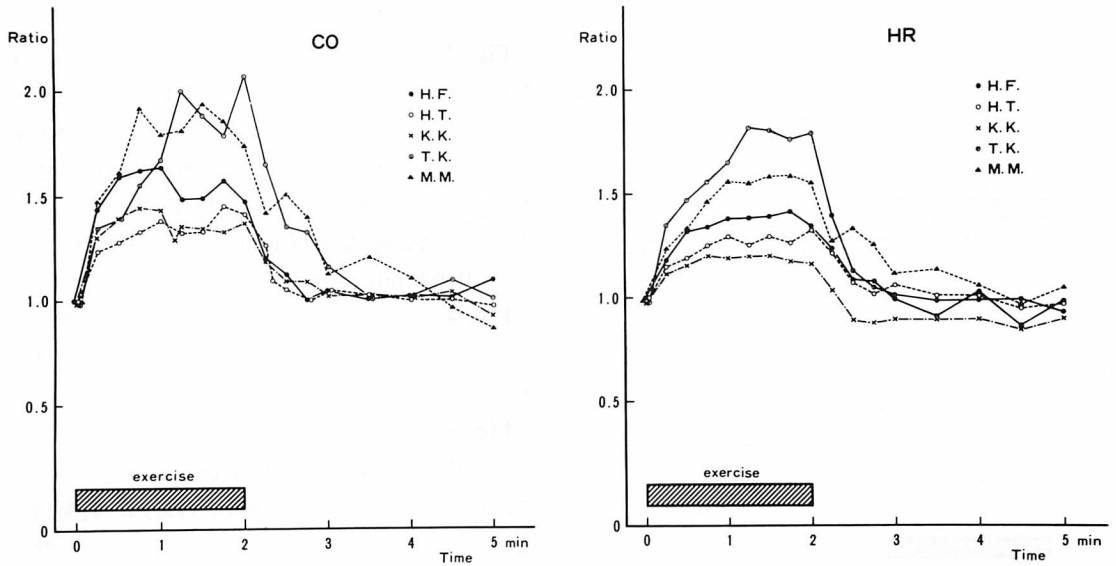


Fig. 5. Cardiac output and heart rate responses to ergometer exercise in five normal subjects.

CO=cardiac output; HR=heart rate.

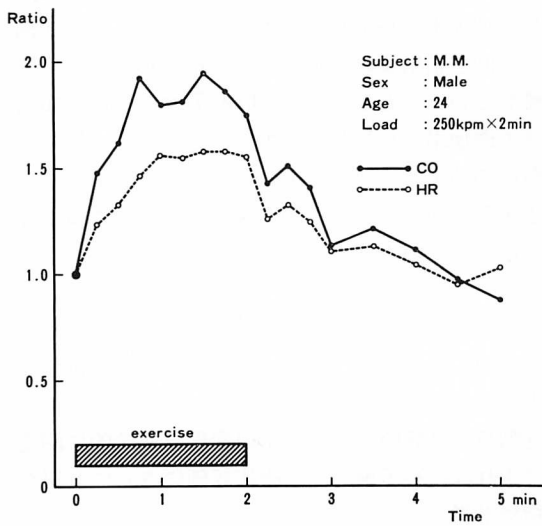


Fig. 6. Typical patterns of cardiac output and heart rate responses to exercise (increasing stroke volume type).

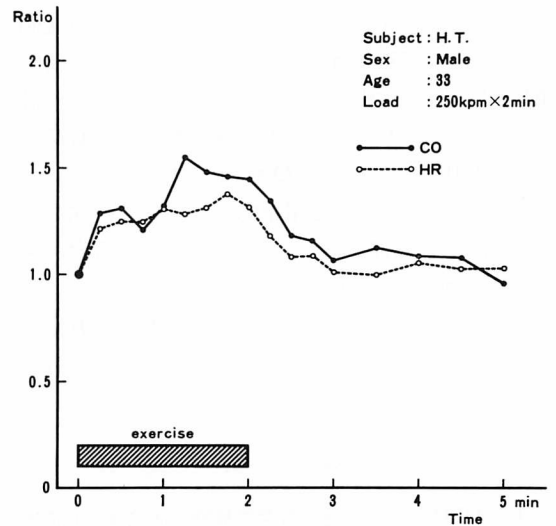


Fig. 7. Typical patterns of cardiac output and heart rate responses to exercise (unchanging stroke volume type).

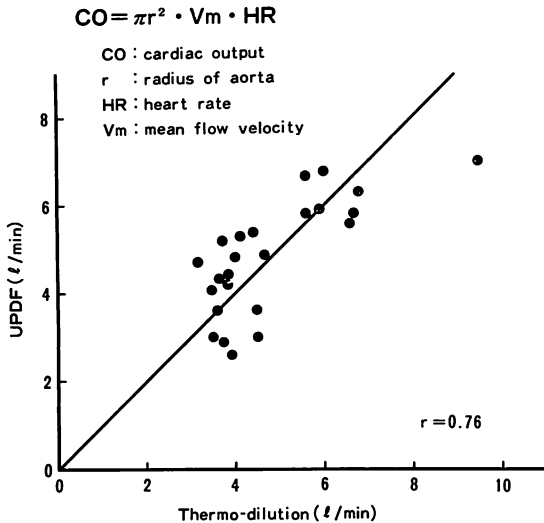


Fig. 8. Comparison of cardiac outputs measured by UPDF and the thermo-dilution method.

方法<sup>13,14)</sup>は信頼度が高く、連続測定も可能であるが、開胸時にしか使えない。

我々はアナログ演算回路を組み込み、平均流速、相対流量をアナログ表示できる超音波パルス・ドプラー血流計を開発し、これを用いて体内深部血流計測の応用法を検討<sup>15,16)</sup>、さらに心拍出量の測定法を開発してきた。

Fig. 8 は心臓カテーテル検査中に施行した熱希釈法により求めた心拍出量と、それより24時間以内にUPDFを使用する本法により求めた心拍出量を比較したものである<sup>2)</sup>。対象28例中UPDFで測定可能であった24例につき示したもので、両者の相関係数は $r=0.76$ と、比較的良好な相関を示している。

本法は無侵襲的測定法であるとともに連続的測定が可能であるため、エルゴメーター運動負荷時の連続的心拍出量測定に利用することが出来る。

#### 1. サンプルボリュームについて

UPDFを用いて大動脈血流速を計測する場合、小さなサンプルボリュームを用いると、曲管内の内外側の流速の違い<sup>17)</sup>などによる誤差を生じる可能性がある。そのためサンプルボリュームは大動

脈壁の動きが入らない範囲で、血流全域を覆うように、なるべく大きなものが望ましい。大動脈弓部血管径はWright<sup>18)</sup>によると $23.0 \pm 1.37$  mmであり、我々の対象例では22~28 mm、平均25 mmである。今回用いたサンプルボリュームは $10 \times 10 \times 12$  mmと比較的大きく、平均血流速測定上有利であると考えられる。

#### 2. 測定可能最高流速

本装置において、今回用いた繰り返し周波数10 KHzの場合、測定可能最高血流速は、378 cm/sec (約400 cm/sec)であり、Fig. 3に示したように、運動負荷中の心拍出量増加時にも、良好な一峰性の血流速波形を得ることが可能であった。

#### 3. 運動負荷法と測定結果

運動負荷は自転車エルゴメーターを用い、負荷強度は、負荷中体動があまり強くならぬよう250 kpm/secの軽負荷とし、負荷時間は、心拍数、心拍出量がプラトーに達するよう2分間とした。今回は健康男性を対象とし、運動負荷時は8例中5例で安定した血流速波形が記録でき、心拍出量の運動負荷開始直後の急激な増加、負荷終了後の速やかな安静時レベルへの復帰状態を明瞭に捉えることができた。運動負荷中記録困難になった例では、吸気量増大による肺の影響と大きな体動が原因と考えられた。

#### 4. 心機能評価法としての検討

心機能、心予備能の評価には、安静時の1点のみでなく、負荷を与えた状態での心機能指標を得ることが必要である。我々は超音波ドプラー血流計を用い、運動負荷時の鎖骨下動脈血流速波形を捉え、正常人と虚血性心疾患患者との間で、運動中、運動後の血流量変化の比に明らかな差があり、心予備能の低下を示すものとして報告してきた<sup>19)</sup>。今回、心ポンプ機能の指標として最も基本的な心拍出量の、運動負荷時における連続的計測を試み、良好な結果を得ることが出来た。本法は非侵襲的方法であり、繰り返し簡単に施行できる特徴を持ち、臨床的に極めて有用であり、今後症例数を増やし、心機能評価法として確立していきたい。

## 要 約

超音波パルス・ドプラー血流計 (UPDF) を用い、胸骨上窩より非侵襲的に大動脈弓部の絶対血流速を測定し、これと超音波断層法により求めた同部血管断面積との積より心拍出量を計測する方法を開発した、今回、この方法を用い、自転車エルゴメーター運動負荷時の非侵襲的、連続的心拍出量測定を行い、次の結果を得た。

1. 安静時に得られた心拍出量は熱希釈法による心拍出量と比較的よく相関した (相関係数  $r = 0.76$ )。

2. 健常男性 8 例につき、250 kpm/min 2 分の自転車エルゴメーター負荷を行い、うち 5 例で、負荷中、負荷後の連続的心拍出量を測定できた。

3. 得られた心拍出量変化曲線は、運動負荷初期の急激な心拍出量増加、負荷終了後の速やかな安静時レベルへの復帰状態をよく示していた。今後症例を増やし、心機能評価法として確立したい。

## 文 献

- 1) 照屋日出夫: 超音波計測による心拍出量の非観血的測定. 脈管学 20: 559, 1980
- 2) Teruya H: Non-invasive measurement of cardiac output by using the ultrasonic pulsed Doppler flowmeter. 慈医誌 96: 1, 1981 (in Japanese)
- 3) 古幡 博: 超音波パルスドブラ血流計. 電子医学 23: 225, 1976
- 4) 古幡 博, 菅野亮一, 中塚喬之, 小池真弓, 中山信彦, 吉村正蔵: 深部血流計測用の超音波パルス・ドブラ血流計. 第 15 回日本 ME 学会論文集 15: 62, 1976
- 5) Fick A: Über den Messung des Blutquantums in den Herzventrikeln. in SB Physmed Ges, Würzburg. 1870, p 16
- 6) Spurling RG: Blood flow and intrathoracic blood volume as determined by the injection method and

checked by direct measurement in perfusion experiments. Am J Physiol 93: 654-655, 1930

- 7) 小橋泰之, 石川欽司, 林 健郎, 大谷昌平, 金政健, 山門 徹, 孫 連津, 香取 瞭: コンピューターを用いたキューベツト色素希釈法による心拍出量算出法の信頼性の検討. 近大医誌 3: 151-158, 1978
- 8) Kasser, IS, Kennedy, JW: Measurement of left ventricular volumes in man by single-plane cine-angiography. Invest Radiol 4: 83, 1969
- 9) Ganz W, Donoso R, Forrester JS, Marcus H, Swan HJC: Comparison of simultaneous dye-dilution and thermal-dilution cardiac outputs in dogs and man. Am J Cardiol 25: 97, 1970
- 10) Swan HJC, Ganz W, Center JC: Left ventricular end-diastolic volume (EDV) by angiographic and thermal methods in a single diastole. Circulation 38 (Suppl VI): 193, 1968
- 11) 田村康二: 熱希釈法による人の心拍出量測定法について. 心臓 3: 443-449, 1971
- 12) 田村康二: サーマディリュション法による心機能測定. 臨床検査 21: 301-305, 1977
- 13) Kolin A: An alternating field induction flowmeter of high sensitivity. Rev Sci Instrum 16: 109-116, 1945
- 14) 金井 寛: 体内用電磁血流量計. 計測と制御 4: 320-331, 1965
- 15) 中山信彦, 照屋日出夫, 吳羽正忠, 久能 晃, 小池真弓, 中塚喬之, 吉村正蔵, 古幡 博: 超音波パルスドブラ計による大動脈弁閉鎖不全症の定量的評価. 第 36 回日超医講演論文集 36: 27-28, 1980
- 16) 照屋日出夫, 吳羽正忠, 中山信彦, 久能 晃, 中塚喬之, 吉村正蔵, 古幡 博: 超音波パルスドブラ計による大動脈弁閉鎖不全症の定量的評価. 第 37 回日超医講演論文集 37: 31-32, 1980
- 17) Seed WA, Wood NB: Velocity patterns in the aorta. Cardiovasc Res 5: 319-330, 1971
- 18) Wright NL: Dissection study and measurement of the human aortic arch. J Anat 104: 377-385, 1969
- 19) Nakatsuka T, Koike M, Hayashi T, Muraoka K, Yoshimura S: Non-invasive measurement of subclavian arterial blood flows as a parameter of cardiac output by the Doppler ultrasonic flowmeter. Jap Heart J 15: 37-46, 1974