運動時におけるリアルタイムでの心拍変動解析に基づく至適運動強度の決定

大 島 秀 武¹⁾ 志 賀 利 一¹⁾ 森 谷 敏 夫²⁾
梶 田 出³⁾ 林 達 也⁴⁾ 中 尾 一 和⁴⁾

DETERMINATION OF OPTIMAL EXERCISE INTENSITY BASED ON REAL-TIME ANALYSIS OF HEART RATE VARIABILITY DURING EXERCISE

YOSHITAKE OSHIMA, TOSHIKAZU SHIGA, TOSHIO MORITANI, IZURU MASUDA,
TATSUYA HAYASHI and KAZUWA NAKAO

Abstract

The purpose of the present study was to develop a new method that enables individualized determination of the optimal exercise intensity for health promotion. Our study was based on the following observations: (1) physical activity at ventilatory threshold (VT) has been useful for enhancing physical fitness and even improving medical conditions such as heart failure, hypertension and diabetes, (2) exercise intensity at VT is characterized by suppressed vagal activity, and (3) vagal activity can be evaluated by analyzing heart rate variability (HRV). In the first study we defined a criteria for determining the exercise intensity corresponding to VT using HRV analysis (heart rate variability threshold, T_{HRV}). In 16 normal subjects, a time series of ECG RR interval were recorded and the means of the sum of the squared differences in successive RR intervals (MSSDs) were calculated during a ramp exercise test with a cycle ergometer. Based on the values of MSSD and the differences in successive MSSDs (Δ MSSD) at the intensity of VT, we defined the criteria of T_{HRV} as follows: $MSSD < 25 \text{ msec}^2$ and Δ MSSD $< 6 \text{ msec}^2$. Another exercise test with a cycle ergometer was performed to evaluate the relationship between T_{HRV} and VT in 63 normal subjects. Heart rate (HR) and oxygen uptake ($\dot{V}O_2/\text{wt}$) at T_{HRV} were $111.8 \pm 13.2 \text{ beats/min}$ and $15.2 \pm 4.4 \text{ ml/kg/min}$, and HR and $\dot{V}O_2/\text{wt}$ at VT were $116.2 \pm 11.6 \text{ beats/min}$ and $16.5 \pm 3.7 \text{ ml/kg/min}$, respectively. There was a significant correlation between T_{HRV} and VT (HR: $r=0.82$, $p<0.001$, $\dot{V}O_2/\text{wt}$: $r=0.88$, $p<0.001$). Thus, T_{HRV} and VT provided almost identical exercise intensities. As a result, we propose that, similar to VT, T_{HRV} can be used as an indicator of the optimal exercise intensity suitable for health promotion in normal subjects.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 2003, 52: 295~304)

key word: exercise intensity, heart rate variability, ventilatory threshold

I. 目 的

近年、乳酸性作業閾値(Lactate Threshold, LT)あるいは換気性作業閾値(Ventilatory Threshold,

VT)の強度での運動が健康の維持・増進に有用であるとして勧められている。その理由として、この強度の運動であれば長時間の持続が可能、血中乳酸値の持続的増加がみられない、アシドーシス

¹⁾ オムロン株式会社 ヘルスケアビジネスカンパニー
〒615-0084 京都市右京区山ノ内山ノ下町24番地

²⁾ 京都大学大学院 人間・環境学研究所
〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町

³⁾ JT 京都専売病院 内科
〒605-0932 京都市東山区東大路渋谷下る

⁴⁾ 京都大学大学院 医学研究科 内分・代謝内科学
〒606-8507 京都市左京区聖護院川原町54

Omron Corporation Healthcare Company, 24, Yamanouchi Yamanoshita-cho, Ukyo-ku, Kyoto, 615-0084, Japan
The Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan
Kyoto Senbai Hospital, 447, Myouhouinmaekawa-cho, Higashiyama-ku, Kyoto, 605-0932, Japan
Department of Medicine and Clinical Science, Kyoto University Graduate School of Medicine, 54, Shogoin Kawahara-cho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8507, Japan

の危険性が少ない, 運動強度の増加に対して心機能の応答が保たれているといった点が挙げられ¹⁰⁾, 心疾患²⁹⁾, 高血圧症³¹⁾, 糖尿病¹⁴⁾などの有疾患患者に対してもそのトレーニング効果が報告されている。また, 最大酸素摂取量($\dot{V}O_2\max$)の測定のように最大までの運動を必要とするのではなく, 最大下の運動負荷から求められる点もVTあるいはLTが勧められている理由の一つとして考えられる。特に, 高強度の運動による生体への負担を考えると, 運動強度を決定するためであっても, できるだけ低強度での運動負荷からの決定が望ましいと考えられる。しかしながら, LTの測定は観血的であったり, VTの測定には高価な装置が必要であったりするなどの理由から, その測定は病院や大学などの専門施設に限られており, 一般のトレーニング施設などでは, ほとんど実施されていないのが現状である。そのため, 一般的には220から年齢を差し引くなどの推定式を用いて算出した予測最大心拍数に一定の係数を乗じて運動時の目標心拍数を決定する方法²⁾を用いている場合が多い。この方法は特別な検査を実施せず, 簡易に運動強度を決定できるものの, 同じ年齢であれば設定される運動時の心拍数も同じになり, 個人の体力レベルや健康状態が反映されていないという問題点がある。また, 心拍数などの測定を行わずに運動強度を決定する方法として, 「楽～ややきつい」と感じる程度の運動など運動中の自覚症状に基づいたBorg指数⁴⁾も実際の運動療法の現場で多く用いられている。しかし, この方法も実施者がBorg指数の表現法に慣れていなかったり, 説明が不十分であったりするなどの理由により, 運動中のBorg指数が過小評価されるという問題がある²⁾。このように, それぞれの簡便な運動強度決定方法には問題点があり, 特に高齢者では最大心拍数の個人差が大きく, 冠動脈疾患のリスクも高いため²⁾, 運動強度の設定の際には注意が必要となる。そのため, 個人に適した運動強度をより簡便で高強度の運動負荷を必要とせずに設定する方法が求められている。

一方, 運動強度の増加に伴って心拍数が増加する生理的メカニズムを自律神経応答の面から明ら

かにする試みとして, 運動負荷変化と心拍変動との関係が検討されている。パワースペクトル解析を用いて漸増負荷運動中の心拍変動を解析した報告では, 高周波(HF)成分が運動開始から強度の増加とともに急激に減少したことが報告されている^{16~20,27,28,34)}。さらにHF成分の消失後にVTが出現し, その後, HF成分と低周波(LF)成分の比(LF/HF)の増加が認められたという報告もあり^{16,20,34)}, 心臓自律神経活動の応答とVTとの関連性が示唆されている。また, Tulppoら³⁰⁾は, パワースペクトル解析によるHF成分だけでなく, Poincare plotから得られるSD1および隣り合った心拍間隔の差の標準偏差から求められるSDsdが副交感神経の薬理ブロックによって消失し, 漸増負荷運動時にはVTに達するまで有意に減少し, それ以降はほとんど消失していたと報告している。さらに, 一定時間内の心拍間隔の標準偏差を平均値で除して100を乗じることで求められるCVRRは運動強度の増加に伴い50% $\dot{V}O_2\max$ 強度までは著しく低下し, それより強い運動では低下がわずかであったことが報告されている⁷⁾。このように, VT前後の強度において副交感神経活動を反映する指標の消失が認められており, 漸増負荷運動時の副交感神経活動の消失レベルからVTあるいはVTに近い運動強度が得られる可能性が示唆されている。

心臓自律神経活動の評価に用いられる心拍間隔の測定は, 高価な機器を必要とせず, 非観血的に, かつ容易に計測が可能である。そのため, 運動中の自律神経活動の変化からVTもしくはVTに近い運動強度が決定できれば, より簡易に個人の体力レベルに応じた至適運動強度を提供できる可能性が考えられる。そこで, 本研究では心臓自律神経活動の変化を利用して, トレーニング時の至適運動強度を決定する方法を開発し, さらに, VTおよび年齢に基づく運動時の目標心拍数設定法との比較から, 本方法の信頼性を明らかにすることを目的とした。

II. 方法

対象は, 12歳から65歳までの健康な男女総数79

名を対象として、以下の方法で実施した。

最初に、心拍変動の解析に基づいた VT に相当する運動強度の判定基準を設定する目的で、事前の健康スクリーニング(問診)で問題がないと判断された健常者、男性 9 名(35.7±15.5歳)、女性 7 名(33.0±6.8歳)の計16名を対象として下記の運動負荷テストを施行した。次いで、幅広い年齢層において心拍変動の解析から判定した運動強度の信頼性を確認するため、10歳台 8 名、20歳台11名、30歳台14名、40歳台19名、50歳台 6 名、60歳台 5 名の男女計63名を対象として、同様の運動負荷を施行した。

A. 運動負荷テスト

測定に先立ち、被験者には前日からの激しい運動、薬物の服用を禁じ、測定前 3 時間の飲食を避けるよう指示した。

運動負荷はコンビ社製の自転車エルゴメータ 232CXL を用いた。5 分間の座位安静の後、15 watt で 2 分間のウォーミングアップを行い、表 1 に示す年齢と体重の属性で決定した負荷変動率に基づくランプ負荷を60回転/分のペダル回転速度で行った。負荷の増加は、運動中の心拍数が220-年齢によって計算した年齢予測最大心拍数(HRmax)の80%に至るまで続けた。

テスト中の換気諸量およびガス交換諸量は Sensor Medics 社製の呼吸代謝測定装置 Vmax を用い、breath-by-breath での測定を行った。呼気ガス分析の結果から、換気性作業閾値(VT)を V-slope 法³⁾に基づいて決定し、VT 出現時の心

拍数および酸素摂取量を求めた。

B. 心拍変動の解析

テスト中の心電図は日本光電社製のマルチテレメータシステム WEB-5000 により、胸部双極誘導によって導出した。心拍間隔は、実時間で10ビットの A/D 変換を用いて 4 msec(250 Hz)で心電図 R 波をサンプリングし、独自に開発したコンピュータプログラムによってリアルタイム処理にて検出した。また、心拍間隔データをバッチ処理形式にて、式 1 を用いて心拍間隔変動値(the mean of the sum of the squared differences in successive R-R intervals ; MSSD)を15秒ごとに求めた。

$$MSSD_n = [\Sigma (RR_n - RR_{n-1})^2 / N] (\text{msec}^2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

これは、単位計測時間(30秒間)に観察された互いに隣り合う心拍間隔(RR)の差の自乗の合計値を、単位計測時間に観察された心拍間隔の個数(N)で除すことで求めた平均値で、1心拍間隔あたりの心拍変動の大きさを示している。我々の先行研究²⁶⁾における薬理ブロック実験結果より、同様の手法にて計算した心拍間隔変動値は propranolol 投与による交感神経ブロックにより有意に増加し、atropine 投与による副交感神経ブロックにより消失しており、心臓副交感神経活動を反映する指標であることが示されている。

この心拍間隔変動値の運動中のトレンドをリアルタイムで捉える方法として、連続する 3 点のデータから、現在に近い値ほど大きなウェイトをかけて計算する加重移動平均処理

$$[X_n = (MSSD_{n-2} + MSSD_{n-1} \times 2 + MSSD_n \times 3) / 6]$$

を行った。

C. 統計解析

データの値はすべて平均±標準偏差で示した。また、各変数間の関係はピアソンの相関分析を用い、統計的有意水準はすべて危険率 5 %未満とした。

Table 1. Ramp exercise protocol.

Age (year)	Weight (kg)	Male	Female
< 60	< 40	10 W/min	5 W/min
	< 80	15 W/min	10 W/min
	≥ 80	20 W/min	15 W/min
≥ 60	All	10 W/min	5 W/min

Ⅲ. 結 果

A. 心拍変動の解析に基づいた VT に相当する運動強度 (T_{HRV}) の判定基準の設定

図 1 にランプ負荷運動中における心拍間隔変動値の変化の代表例を示した。心拍間隔変動値はランプ負荷運動開始から指数関数的に減少し VT 近傍で収束したが、この傾向はすべての被験者で同様に認められた。このことから、各個人の心拍間隔変動値の収束点を、VT レベルにおける心拍間隔変動値との関連で検討した。

図 2 に 15 watt でのウォーミングアップ時、および VT を基準とした各運動強度での心拍間隔変動値の平均値を示した。ウォーミングアップ時では $673.9 \pm 604.1 \text{ msec}^2$ と高値を示し、運動強度の増加に伴って減少し、100% VT 強度では、

Fig. 1. Representative time course of change in heart rate variability during ramp exercise. MSSD: the mean of the sum of squared differences in successive RR intervals, VT: ventilatory threshold.

Fig. 2. Effect of exercise intensity on MSSD during ramp exercise.

Fig. 3. Effect of exercise intensity on Δ MSSD ($MSSD_n - MSSD_{n-1}$) during ramp exercise.

$19.3 \pm 4.9 \text{ msec}^2$ であった。このように、VT 時にはウォーミングアップ時の2.9%にまで減少しており、その値は個人によってややばらつきが認められたが、全例 25 msec^2 以下の値であった。また、110% VT 強度では $12.1 \pm 4.3 \text{ msec}^2$ であり、VT を超えるとほとんど変化がなくなった。

次に、VT を基準とする各運動強度での1つ前の心拍間隔変動値との差 (Δ MSSD: $MSSD_n - MSSD_{n-1}$) を算出し、図 3 に示した。その結果、運動初期の 50% VT 強度では $-119.4 \pm 215.9 \text{ msec}^2$ と大きな減少を示していたが、運動強度の増加に伴う絶対値の低下とともに、その変化量も小さくなった。100% VT 強度では、 $-2.8 \pm 2.5 \text{ msec}^2$ とほとんど変化が認められない者からやや低下傾向を示す者までおり、最も大きい変化量の絶対値は 6 msec^2 であった。

これらの結果より、心拍間隔変動値が 25 msec^2 を下回り、その変化量が 6 msec^2 以下となるという条件を2回連続で満たした時点を中心拍間隔変動値の収束、すなわち、心拍変動の解析から判定した VT に相当する運動強度 (heart rate variability threshold: T_{HRV}) とした。

B. T_{HRV} の信頼性の検討

次いで、計63名の男女を対象として運動負荷テストを実施し、それぞれの T_{HRV} と VT を決定し、両者を比較検討することによって T_{HRV} の信頼性を検証した。 T_{HRV} での心拍数 (T_{HRV} -HR) および体重あたりの酸素摂取量 (T_{HRV} - $\dot{V}O_2/\text{wt}$) はそれぞれ 111.8 ± 13.2 拍/分、 $15.2 \pm 4.4 \text{ ml/kg/分}$ であった。一方、呼気ガス分析から求めた VT

Fig. 4. Correlation between heart rate variability threshold (T_{HRV}) and VT; a: heart rate (HR), b: oxygen uptake ($\dot{V}O_2$ /wt).

出現時の心拍数(VT-HR)および体重当たりの酸素摂取量($VT-\dot{V}O_2$ /wt)はそれぞれ、 116.2 ± 11.6 拍/分、 16.5 ± 3.7 ml/kg/分であった。

図4-aにVT-HRと T_{HRV} -HRとの関係を、図4-bに $VT-\dot{V}O_2$ /wtと $T_{HRV}-\dot{V}O_2$ /wtとの関係を示した。VTと T_{HRV} との関係は、心拍数および $\dot{V}O_2$ /wtのどちらの検討においても $r=0.82$ ($p<0.001$), $r=0.88$ ($p<0.001$)とそれぞれ統計的に有意な相関関係が認められた。

また、従来から多く用いられている年齢に基づく運動時の目標心拍数設定法の妥当性を検討するため、VT強度に相当すると考えられるHRmaxの65%強度の心拍数(65%HRmax)を目標心拍数として設定し、VT-HRとの関係について図5に示した。その結果、65%HRmaxとVT-HRの間には有意な相関関係が認められた($r=0.50$, $p<0.001$)。

さらに、それぞれの関係について詳細に検討するため、10歳台から60歳台までの各年代における T_{HRV} -HRとVT-HR、65%HRmaxとVT-HRとの相関係数を算出し、表2に示した。VT-HRと T_{HRV} -HRとの関係については、 $r=0.75\sim0.88$ ($p<0.05\sim0.001$)とすべての年代において有意な相関関係が認められた。しかし、VT-HRと65%HRmaxとの関係についてみると、すべての年代において有意な相関関係が認められなかった($r=0.09\sim0.50$, N.S.)。

Fig. 5. Correlation between 65% value of age-predicted maximal heart rate (65%HRmax) and VT-HR.

Ⅳ. 考 察

心拍変動の解析方法は、大きく分けて周波数領域での解析方法と時間領域での解析方法とがあり⁸⁾、近年では周波数領域での解析方法であるパワースペクトル解析を用いた検討が多くなされている^{16-20,24,27,28,34)}。しかし、パワースペクトル解析ではデータの定常性が必要であり²¹⁾、呼吸パターンの変化による影響を受けるため^{5,9)}、ランプ負荷運動中の心臓自律神経活動の評価には不適との意見もある。これに対して、Penttiläら²³⁾は時間領域での解析方法はデータの定常性を必要とせず、呼吸パターンの変化による影響を

Table 2. Correlation coefficients (R) of VT-HR vs. 65%HRmax and T_{HRV} -HR in different age groups.

Age Group	N	Age (year)	Weight (kg)	R vs. 65%HRmax	R vs. T_{HRV} -HR
10's	8	16.3 ± 2.4	52.6 ± 11.3	0.09	0.81**
20's	11	26.4 ± 2.1	64.5 ± 12.0	0.17	0.83**
30's	14	36.4 ± 3.5	65.7 ± 12.8	0.31	0.85**
40's	19	44.0 ± 2.8	71.5 ± 12.8	0.43	0.75**
50's	6	53.2 ± 3.8	52.9 ± 3.1	0.04	0.88 *
60's	5	63.8 ± 1.8	61.2 ± 6.8	0.50	0.81 *

** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

受けないため、運動時の心臓自律神経活動の評価に適していると報告している。さらに、パワースペクトル解析に比較して時間領域での解析は計算量が非常に少なく、リアルタイムで処理を行う場合など、高速な処理が求められる際に非常に有利である。そこで本研究では心臓自律神経活動の評価指標として、時間領域での解析方法を用いた。

また、本研究では近年トレーニング強度の設定の際に用いられ、その運動効果が多く確認されているVTを至適運動強度と考え、非観血的に高価な装置を用いることなく至適運動強度を決定することを目的とし、運動中の心拍間隔の解析に基づいてVTに相当する運動強度(T_{HRV})を決定した。心拍間隔変動値(MSSD)のトレンドを捉えるため、現在の値に近いほど大きなウェイトをかけて算出する加重移動平均処理を行った。データのトレンドを捉える代表的な方法としては、全データを用いて近似曲線を当てはめる方法も考えられるが、本研究では運動中にリアルタイムで心拍間隔変動値のトレンドを捉えるため、加重移動平均処理を用いた。また、ランプ負荷運動中におけるVT強度での心拍間隔変動値は全例 25 msec² 以下であり、その変化量は全例 6 msec² 以下であったため、①心拍間隔変動値が 25 msec² 以下、②心拍間隔変動値の変化が 6 msec² 以下、という両条件を満たした時点を心拍変動の解析から判定したVTに相当する運動強度(T_{HRV})とした。ここ

で、両条件に用いる値をVT時に得られたそれぞれ最大値としたが、VT時の心拍間隔変動値が低値であり、変化量が小さい者ではこの決定条件をそのまま用いると T_{HRV} がVTに比較して低い強度で決定されてしまう。また、両条件に用いる値を本実験で得られた平均値に設定すると、VT時の心拍間隔変動値が高値であり、その変化量が大きい者は T_{HRV} がVTに比較してかなり高い強度で決定され、中には T_{HRV} が決定できない場合が考えられる。さらに、運動強度の増加に伴う心拍間隔変動値の変化は、必ずしも単調減少ではなく、一旦減少した後に上昇し、その後また減少するといったような変動を示す例も認められた。そのため、決定条件に用いる値はそれぞれ本実験で得られたVT時の最大値に設定し、①と②の条件を2回連続で満たした時点を T_{HRV} として決定した。

これに対して、心拍間隔の変動がなくなる心臓への自律神経支配を遮断した際¹⁾の心拍間隔変動値に基づき、ランプ負荷運動時に心拍間隔変動値が自律神経遮断時の値に達したレベルを T_{HRV} とする方法も考えられる。しかし、自律神経遮断時の心拍数は年齢¹³⁾や心筋の機能¹²⁾などの違いによって異なり、さらに個々の自律神経遮断時の心拍間隔変動値を求めるとなると薬剤の投与が必要となる¹⁾などの理由から実用的ではないと考え、VTとの比較から統計的手法によって T_{HRV}

を決定した。その結果、 T_{HRV} は VT と強い相関関係を示し、本方法によって VT に近い運動強度を決定することができた。高橋²⁸⁾は、ランブ負荷運動中における心拍変動スペクトル解析を行い、HF 成分の低下の程度が変わる変化点を求めた結果、VT と近い酸素摂取量値を示したが、相関は認められなかったと報告している。また、Moritani ら¹⁶⁾も、漸増負荷運動中の HF 成分の消失は VT と同時もしくは先行していたと報告しており、必ずしも HF 成分の消失点は VT と一致していないことも考えられる。このように、心拍変動の解析からどのように運動強度を決定するかによって結果は異なり、心臓自律神経活動の変化から VT に近い運動強度を決定するためには、本研究で実施したような VT に合わせる決定アルゴリズムを作成する必要があると考えられる。

一方、従来から多く用いられている年齢に基づいた目標心拍数では VT との相関が低く、さらに年代ごとに検討するとすべての年代で相関関係が認められなかった。年齢に基づく心拍数設定法の問題点としては、HRmax を年齢のみ変数として算出している点が挙げられる。山口³³⁾の報告によると実測最大心拍数は加齢によって低下するものの、同じ年齢であっても ± 20 拍/分以上の個人差が認められている。さらに、トレーニングを行っている運動選手では一般健常者に比較して最大心拍数が低下しているという報告¹⁵⁾もあるなど、年齢以外に影響を及ぼしている要因もあると考えられる。Dwyer⁶⁾はトレーニングを行っている健常者群、心疾患患者群、トレーニングを行っていない健常者群、心疾患患者群の4群に分け、最大心拍数に対する VT 時の心拍数の割合が、それぞれの群で異なっていたと報告している。このように同じ年齢であっても最大心拍数にはばらつきがあり、最大心拍数に対する VT 時の心拍数の割合も異なるため、年齢に基づいた統計的手法で心拍数を設定するよりも、個々の特性に応じた運動強度の設定が望ましいと考えられる。

また本研究では、VT の決定のために80% HRmax 強度まで運動負荷を実施したが、 T_{HRV}

の決定では T_{HRV} までの運動負荷、すなわち $61.8 \pm 6.0\%$ HRmax までの運動によって決定できた。VT レベルでは、有酸素代謝による CO_2 産生に加えて重炭酸系による乳酸の緩衝作用の結果としての CO_2 産生が重畳され、また、この緩衝作用の結果、生じた水素イオン (H^+) が頸動脈体を刺激して換気ドライブを亢進させて運動中の換気量が増す³²⁾。これにより、VT はガス交換諸量の変曲点から決定できるが、変曲点を検出するためには、その前後のデータが必要となり、変曲点を中心とした広い範囲でのデータがあるほど検出が容易となる。V-slope 法を用いて VT を決定する場合、 $\dot{V}O_2$ に対する $\dot{V}CO_2$ の上昇度が変化する点から VT が求められるが、変曲点となる VT レベルよりも高強度での運動時のデータが少ないほど、VT の決定が困難となる。当然ながら、運動器の障害があったり被験者の努力不足などで VT 以上の運動負荷が実施されなかった場合には、VT は決定できない¹¹⁾。一般的には、VT の決定を行う場合、 $\dot{V}O_2$ が負荷量の増加に対して直線的に上昇し始める点から呼吸性代償が始まる respiratory compensation (RC) ポイントまでのデータを解析に用い、その間のデータから得られた2つの回帰直線の交点から VT が決定される¹¹⁾。そのため、呼吸性代償が始まる RC ポイントが $90\% \dot{V}O_{2max}$ 付近で出現することを考えると²²⁾、ガス交換諸量の変曲点から求める VT の決定には、疲労困憊に至るまで運動を実施しなくても最大に近い強度までの運動負荷の実施が必要となると思われる。これに対して、本研究では運動中の心拍変動をリアルタイムで解析し、その収束点を決定することで、VT の決定時よりもより低い運動負荷から安全に運動強度の決定が可能となった。

なお、今回の研究は若年から初老期の健常者を対象として検討を行ったのみであり、有患者や高齢者への適応は今後の課題である。実際、心不全患者では心拍変動スペクトル解析による HF 成分が、健常者に比較して安静時から低値を示し、運動による低下はわずかなことが報告されている²⁵⁾。また、糖尿病患者においても HF 成分は

健常者に比較して安静時から低値であり, 漸増負荷運動によって減衰したが絶対的変化が小さいことが報告されている¹⁷⁾. このような患者に対しても, 本研究で得られた基準を用いて VT に相当する運動強度の決定が可能かどうかには今後の慎重な検討が必要である.

V. ま と め

ランプ負荷運動中における心拍変動の解析から判定した T_{HRV} は, 健常者における検討で, 各個人の VT レベル相当の運動強度を提示することが示唆された. T_{HRV} による運動強度の決定の利点として, 呼気ガス分析装置などの高価な機器を用いずに運動強度設定が可能なこと, 非観血的な心拍間隔の計測のみから決定できること, VT の決定よりも低い強度の運動負荷試験によって決定が可能であることが挙げられた. VT が健康増進のための運動強度として推奨されていることから, T_{HRV} も VT と同様に至適運動強度の指標として有用と考えられた.

(受理日 平成15年3月31日)

参 考 文 献

- 1) Akselrod S, Gordon D, Ubel FA, Shannon DC, Barger AC, and Cohen RJ. Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-by-beat cardiovascular control. *Science*, (1981), **213**, 220-222.
- 2) アメリカスポーツ医学協会編(日本体力医学会体力科学編集委員会監訳), 運動処方指針 原著第6版, 南光堂, 東京, (2001)
- 3) Beaver W L, Wasserman K, and Whipp B J. A new method for detecting the anaerobic threshold by gas change. *J Appl Physiol*, (1986), **60**, 2020-2027.
- 4) Borg G A. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports*, (1982), **14**, 377-387.
- 5) Brown T E, Beightol L A, Koh J, and Eckberg D L. Important influence of respiration on human R-R interval power spectra is largely ignored. *J Appl Physiol*, (1993), **75**, 2310-2317.
- 6) Dwyer J. Metabolic character of exercise at traditional training intensities in cardiac patients and healthy persons. *J Cardiopulmonary Rehabil*, (1994), **14**, 189-196.
- 7) 藤井宣晴, 鍋倉賢治, 権 五晟, 山崎文夫, 本間幸子, 池上晴夫. 運動強度の増大に対する心拍数および血漿カテコラミンの応答. *体力科学*, (1992), **41**, 313-321.
- 8) 早野順一郎. 心拍変動解析(1)ー時間領域と周波数領域の指標ー. *Therapeutic Research*, (1996), **17**, 53-60.
- 9) Hirsch J A and Bishop B. Respiratory sinus arrhythmia in humans: how breathing pattern modulates heart rate. *Am J Physiol*, (1981), **241**, H620-H629.
- 10) 伊東春樹. AT を基準とした運動療法. 呼と循, (1992), **40**, 1173-1182.
- 11) 伊東春樹. 呼気ガス分析による AT 測定, 谷口興一編, 心肺運動負荷テスト, 第1版, 南江堂, 東京, (1993), 155-164.
- 12) Jose A D and Taylor R R. Autonomic blockade by propranolol and atropine to study intrinsic myocardial function in man. *J Clin Invest*, (1969), **48**, 2019-2031.
- 13) Jose A D and Collison D. The normal range and determination of the intrinsic heart rate in man. *Cardiovasc Res*, (1970), **4**, 160-167.
- 14) Kawaji K, Fujita Y, Yamaji Y, Shirataka M, and Kubo H. Usefulness of anaerobic threshold in estimating intensity of exercise for diabetics. *Diabetes Res Clin Pract*, (1989), **6**, 303-309.
- 15) Lester F M, Sheffield L T, and Reeves T J. Factors affecting maximal heart rate during extreme exercise. *Ala J Med Sci*, (1969), **6**, 42-45.
- 16) Moritani T, Hayashi T, Shinohara M, Mimasa F, and Shibata M. Comparison of sympatho-vagal function among diabetic patients, normal controls and endurance athletes by heart rate spectral analysis. *J Sports Med Sci*, (1993), **7**, 31-39.
- 17) 森谷敏夫, 林 達也, 梶田 出, 中尾一和, 篠原稔, 見正富美子, 柴田真志. 安静時および運動負荷時における糖尿病患者の自律神経活動ー心拍変動スペクトル解析による比較検討ー. *プラクティス別冊9月*, (1994), 78-84.
- 18) 中村好男, 玉木啓一, 篠原稔, 木村裕一, 村岡功. 漸増負荷運動中の心拍揺動パワースペクトルの推移. *体力科学*, (1989), **38**, 208-214.
- 19) 中村好男, 木村裕一, 玉木啓一, 村岡 功. 運動時心迷走神経活動の指標としての呼吸性心拍変動の評価. *ヒューマンサイエンス*, (1990), **3**, 33-39.
- 20) 中村好男, 山本義春. 健康の維持・増進のための適正な運動強度の探索ー自律神経系拮抗調節からみた無酸素性作業閾値の実用上の意義についての検討ー. *体力研究*, (1991), **77**, 82-91.
- 21) 大坂元久, 齋藤寛和. 心拍変動解析のための装置とその解析方法. 外山淳治 渡邊佳彦 編 時空間心電情報の新しい視点, ライフメディアコム 愛知, (1998), 318-334.
- 22) Oshima Y, Miyamoto T, Tanaka S, Wadazumi T, Kurihara N, and Fujimoto S. Relationship between isocapnic buffering and maximal aerobic capacity in athletes. *Eur J Appl Physiol*, (1997), **76**, 409-414.
- 23) Penttila J, Helminen A, Jartti T, Kuusela T, Huikuri

- H V, Tulppo M P, Coffeng R, and Scheinin H. Time domain, geometrical and frequency domain analysis of cardiac vagal outflow : effects of various respiratory patterns. *Clin Physiol*, (2001), **21**, 365-376.
- 24) Perini R, Milesi S, Fisher N M, Pendergast D R, Veicsteinas A. Heart rate variability during dynamic exercise in elderly males and females. *Eur J Appl Physiol*, (2000), **82**, 8-15.
- 25) 佐藤 廣, 山本真千子, 安部七郎, 矢部彰久, 飯沼宏之, 相澤忠範, 加藤和三. 心不全患者における運動中の自律神経活動の変化. *自律神経*, (1994), **31**, 14-20.
- 26) Shibata M, Moritani T, Miyawaki T, Hayashi T, and Nakao K. Exercise prescription based upon cardiac vagal activity for middle-aged obese women. *Int J Obesity*, (2002), **26**, 1356-1362.
- 27) 髻谷満, 林由紀子, 関川清一, 川口浩太郎, 大成浄志, 小林和典. 運動中の心拍変動と換気性作業閾値との関連 - MemCalc法による検討-(第一報). *体力科学*, (2001), **50**, 185-192.
- 28) 高橋光彦. 換気性作業閾値前後における筋電図および心電図 RR 間隔変動のスペクトル解析による運動特性に関する研究. *北海道医誌*, (1999), **74**, 7-18.
- 29) 竹田正樹, 田中喜代次, 浅野勝巳, 渡邊 寛, 檜山輝男. Lactate Threshold を用いた冠動脈疾患患者用の運動プログラムのあり方. *呼と循*, (1993), **41**, 999-1003.
- 30) Tulppo M P, Makikallio T H, Takala T E S, Seppanen T, and Huikuri H V. Quantitative beat-by-beat analysis of heart rate dynamics during exercise. *Am J Physiol*, (1996), **271**, H244-H252.
- 31) Urata H, Tanabe Y, Kiyonaga A, Ikeda M, Tanaka H, Shindo M, and Arakawa K. Antihypertensive and volume-depleting effects of mild exercise on essential hypertension. *Hypertension*, (1987), **9**, 245-252.
- 32) Wasserman K, Whipp B J, Koyal S N, and Cleary M G. Effect of carotid body resection on ventilatory and acid-base control during exercise. *J Appl Physiol*, (1975), **39**, 354-358.
- 33) 山口一郎. 運動負荷に対する生理的生体反応と運動負荷試験. *Coronary*, (1989), **6**, 12-18.
- 34) Yamamoto Y, Hughson R L, and Peterson J C. Autonomic control of heart rate during exercise studied by heart rate variability spectral analysis. *J Appl Physiol*, (1991), **71**, 1136-1142.