

運動負荷漸増に伴う酸素摂取量と心拍数の関係 (第2報)

— 波状負荷変動による動態について —

塩野谷 明*

THE RELATIONSHIP BETWEEN $\dot{V}O_2$ AND HR WITH EXERCISE. Part. 2

— Dynamics of $\dot{V}O_2$ and HR to triangle wavelike work load —

Akira SHIONOYA

It is well-known that the relationship between oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and heart rate (HR) is correlative in the middle level of exercise load. In this paper we reported that dynamics and relationship between $\dot{V}O_2$ and HR to triangle wavelike work load under the load of Anaerobic threshold (AT) level.

The results of this study led us to decide:

- 1) The response curve of $\dot{V}O_2$ and HR is a triangle wavelike curve with the same period as exercise.
- 2) Time lag of $\dot{V}O_2$ response to work load is approximate to that of HR response.
- 3) It thought that response of $\dot{V}O_2$ and HR to ramp load exercise have not been a time lag under the load of AT level.

Key word: $\dot{V}O_2$ /HR/dynamics

1. はじめに

酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) および最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) は、有酸素性代謝機構における運動能力、心肺機能等の指標として一般人の体力維持のためのトレーニングや肥満、糖尿病といった成人病の運動療法等に利用されている。 $\dot{V}O_2$ は一般に中程度の強度の運動においては、心拍数との間に正の直線関係が報告され、これに基づいて心拍数 (HR) から $\dot{V}O_2$ を推定する方法が広く一般に用いられている。

前回 AT (無酸素性作業閾値) に基づいて、この $\dot{V}O_2$ と HR の関係について検討したが、その結果は以下のように要約された^{9,10)}。

1) $\dot{V}O_2$ と HR が直線関係を示す中程度の強度の運動とは、AnT に相当する閾値に至るまでの強度と推定できる。

2) $\dot{V}O_2$ と HR の直線関係にあるということが呼吸性代謝を補償するという条件に立つなら、AnT に相当する閾値が有酸素性の代謝から無酸素性の代謝への大きな変化点と考えられる。

3) その意味では、AT が呼吸性補償を意味するものなのか、最大乳酸定常を示唆するものなのか明らかにする必要がある。

以上であった。

ここに示されるように、 $\dot{V}O_2$ と HR の直線関係が呼吸性補償される閾値であるとすれば、AnT に至る強度の運動が安全な運動負荷強度と考えられ、これまでおこなわれていた運動療法の指標 (AerT) とは明らかに異なる。これは Conconi⁹⁾ が報告した AT 決定法がこれに基づいていると考えられるが、この方法による AT 決定は、Riberiro⁹⁾ が指摘するように AerT ではなく AnT を決定したものと考えられ、これをもって安全な運動強度と考えるのは無理がある。その意味でも、 $\dot{V}O_2$ と HR が直線関係にあるということが果して呼吸性代謝を完全に補償しているのかという点を明かにする必要がある。

Karlsson らや福岡^{4,5,6)} が報告するように、組織に対する CO_2 の溶解度よりも大きいことに起因する二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$) の応答の $\dot{V}O_2$ の応答に対する遅れが存在する。これと同様に $\dot{V}O_2$ の応答の HR の応答に対する遅れが存在するのかが等といったことは、これによって HR あるいは $\dot{V}O_2$ と HR の関係が運動強度に対する生体負担のいかなる情報とはなっ

原稿受付：平成4年5月28日

*長岡技術科学大学体育・保健センター

いるのかを明確にする手がかりとなることが予想される。

そこで本研究では、第1報に続き $\dot{V}O_2$ と HR の関係について運動負荷漸増（変動）に伴う HR の応答に対する $\dot{V}O_2$ の応答の遅れの存在を、AT（前回報告における AerT に相当）以下での波状運動負荷を中心に検討を行った。

2. 方 法

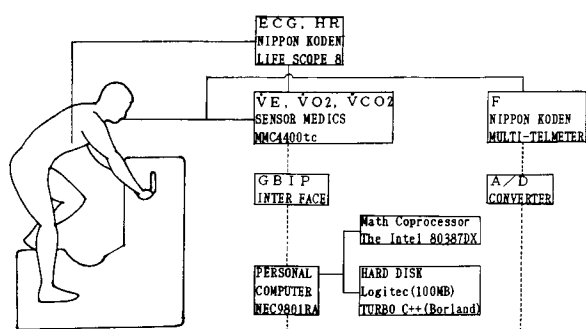


Fig. 1: Setting of this experiment.

実験は長岡技術科学大学・体育保健センター運動機能実験室において、一定気温（摂氏25度）及び一定湿度（50%）の環境下において実施した。

被験者は、22歳から24歳までの健康で、内科および外科的にあらゆる疾患を持たない男性4名であった。

第1実験として被験者は、予め25 watt/min のランプ負荷漸増に負荷制御された自転車エルゴメータ（タケイ機器社製 ISO-POWER ERGOMETER）を用いて、被験者各々の AT（無酸素性作業閾値）および $\dot{V}O_{2max}$ ($\dot{V}O_2$ peak) の決定を行った。AT の決定は換気応答から行い、換気性作業閾値 (VT) をもって AT

とした。図1は、そのシステムを示している。自転車駆動運動中の換気応答は、センサーメディックス社製エネルギー代謝システム MMC4400tc を用い、プレス・バイ・プレス (B-B 法) によって換気量 (VE)、一回換気量 (VT)、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、呼吸交換率 (R) 等を測定して、また HR については日本光電社製ライフスコープを用いて、テレメータの信号を上記エネルギー代謝システムに入力させ、他の換気応答との同期を行った。AT (VT) の決定は Davis^{3,9)}らの報告を基に

- 1) $\dot{V}E$ 、 $\dot{V}CO_2$ の急激な上昇
- 2) $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ の変化を伴わない $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ の変化
- 3) R の急激な上昇

等の指標をもって決定し、また $\dot{V}O_{2max}$ の決定は、上記負荷漸増条件における被験者の疲労困憊 (all out) に至る数値をもって決定した。被験者の疲労困憊は被験者の判断に併せて、 $\dot{V}O_2$ のレベルオフ、HR、R 等の数値から判断した。

第2実験では、第1実験において決定した各被験者の AT を基に、AT 以下のレベルおよび AT を境界としたレベルでの波状負荷で、前述のエルゴメータを制御し、図1のシステムに基づいて測定、分析を行った。

測定されたデータはパーソナルコンピュータに取り込み、ハードディスク (Logitec 100MB) に機能させたフーリエ変換によってスペクトル解析を行った。フーリエ変換のプログラムは、C 言語によって構築した。

波状負荷制御は、各被験者の AT の80%の負荷を MAX、さらにその1/2を MIN に波状に変動するように制御した。

また選択した波形は三角波としたが、その理由は三角波のピークに至るまでの漸増はランプ状の負荷漸増に相当すること。加えてこれまで数多く報告される正弦波での変動に近い変動であると考えたためである。また、周期は1周期を4分および8分として、合計24分間行った。すなわち4分は6周期、8分は3周期となる (図2および4参照)。

Table-1: $\dot{V}O_{2max}$ and AT (Anaerobic threshold) of each subjects.

| SUB. | HIGHT (cm) | WEIGHT (kg) | AGE (yrs) | $\dot{V}O_{2max}$ (ml/min) | $\dot{V}O_{2max}/WE$ (ml/kg*min) | $\dot{A}T-\dot{V}O_2$ (ml/min) | AT-% $\dot{V}O_{2max}$ (%) | HRmax (beats/min : %) | AT-%HRmax (beats/min : %) |
|------|---------------|----------------|--------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| N.A | 172.0 | 60.0 | 23 | 3124.0 | 52.10 | 2131.0 | 68.20 | 192 | 153(78.6) |
| H.I | 162.0 | 56.0 | 23 | 2941.0 | 52.50 | 1956.0 | 66.30 | 189 | 149(77.8) |
| Y.O | 164.0 | 58.0 | 22 | 2829.0 | 48.80 | 1708.0 | 60.37 | 188 | 143(76.1) |
| I.H | 161.0 | 55.0 | 23 | 2857.0 | 51.00 | 1907.0 | 66.70 | 185 | 145(77.3) |
| AVE. | 164.75 | 57.25 | 22.75 | 2937.75 | 51.10 | 1925.5 | 65.39 | 188.5 | 147.5 |

上記の周期条件において、負荷入力と $\dot{V}O_2$ およびHRの応答の時間的遅れと負荷入力に対する応答波形について考察した。遅れ時間については、 $\dot{V}O_2$ とHRのプロットにおいて2直線を連結したモデルに適應させ、残差平方和が最小となる点を求め、入力との遅れ時間を求めた。また波形については、前述のフーリエ変換によるスペクトルより考察した。

以上の実験をとおして、波状変動における $\dot{V}O_2$ とHRの関係について考察した。

3. 結 果

表1は、被験者の身体的な特徴および第1実験における結果、 $\dot{V}O_{2max}$ 、AT等を示している。

$\dot{V}O_{2max}$ は2937.75 ml/kg*min平均、体重当り51.10 ml/kg*min平均であった。AT- $\dot{V}O_2$ は1925.50 ml/kg*min平均で、 $\dot{V}O_{2max}$ の65.39%であった。

図2群は、4分周期の三角波負荷入力に対する $\dot{V}O_2$ の応答(2-1)およびHRの応答(2-2)の被験者一例を示している。また図3群は、この負荷入力(3-1)、 $\dot{V}O_2$ 応答(3-2)、HR応答(3-3)とそのフーリエ変換によるスペクトルを示している。

1周期240secの入力に対して、 $\dot{V}O_2$ およびHRはある一定の遅れ時間をもって、入力波形に同調していることが伺える結果であった。これは他の3名についても同様に、1周期成分が大きく、他の高次周波数成分は低いものであった。

次に図4群は、8分周期の三角波負荷入力に対する $\dot{V}O_2$ の応答(4-1)およびHRの応答(4-2)の同一被験者一例を示している。また図5群では、この負荷入力(5-1)、 $\dot{V}O_2$ 応答(5-2)、HR応答(5-3)を示している。

4周期の場合と同様に、1周期480secの入力に対して、 $\dot{V}O_2$ およびHRがある一定の遅れ時間をもって、入力波形に同調していることが伺える結果であった。またこの周期においても、他の3名も同様の傾向にあった。ただしこの一例とした被験者の場合、HRの応答が何等かの理由から負荷の下降に不完全な同調であったために、求められたスペクトルもある高次周波数成分(2から4周期成分)がやや高い傾向となった。

表2は、被験者4名の三角波負荷入力に対する $\dot{V}O_2$ 応答およびHR応答の遅れ時間を、4分周期、8分周期について示したものである。

4分周期の場合、負荷入力に対してHR応答は29.53 sec (SD = 2.65) 平均の遅れ時間、また $\dot{V}O_2$ 応答は

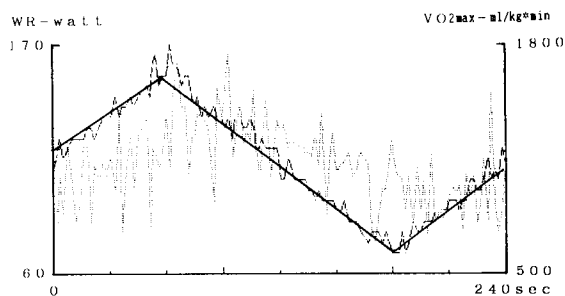


Fig-2-1

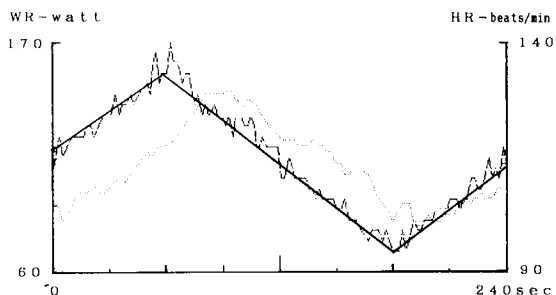


Fig-2-2

Fig-2: Response of $\dot{V}O_2$ and HR to triangle wave like work load with 240 sec of one cycle. 2-1 is $\dot{V}O_2$ and 2-2 is HR response.

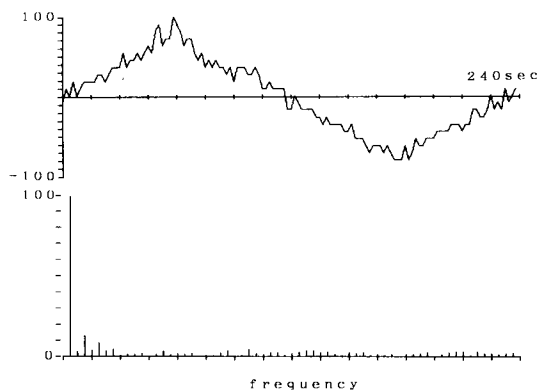


Fig-3-1

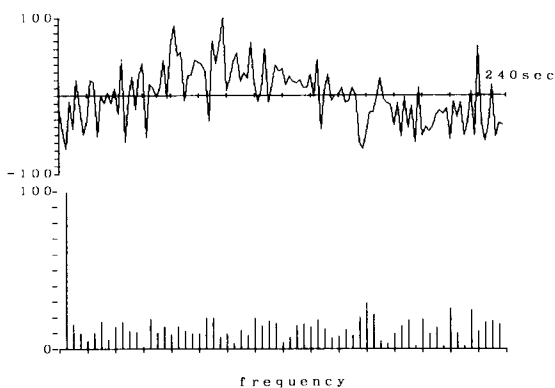


Fig-3-2

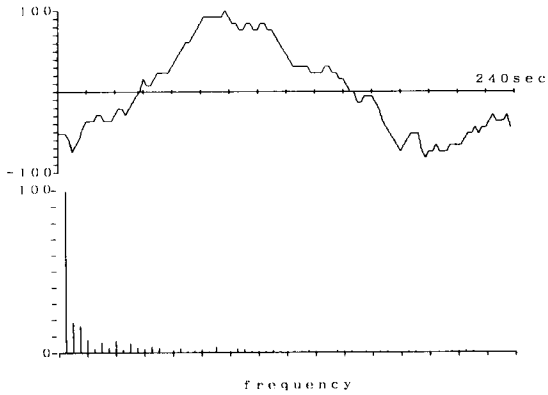


Fig-3-3

Fig-3: Input of work load and output (response) of $\dot{V}O_2$, HR to triangle wave like work load with 240 sec of one cycle and its spectrum by fourier transform. 3-1 is Input of work load, 3-2 is response of $\dot{V}O_2$ and 3-3 is that of HR.

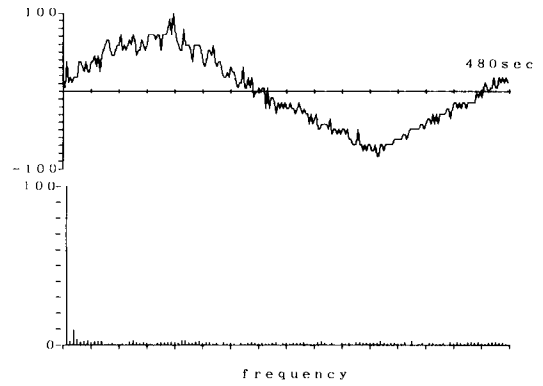


Fig-5-1

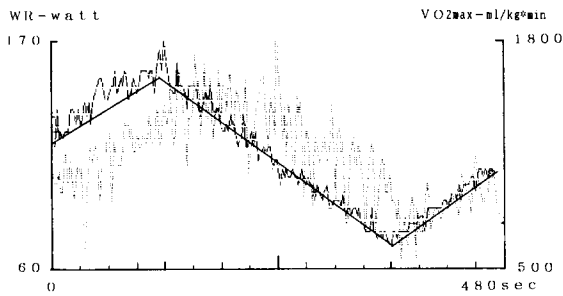


Fig-4-1

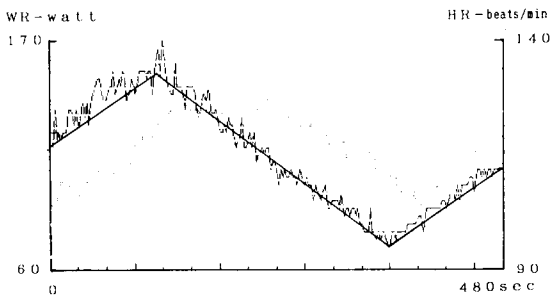


Fig-4-2

Fig-4: Response of $\dot{V}O_2$ and HR to triangle wave like work load with 480 sec of one cycle. 4-1 is $\dot{V}O_2$ and 4-2 is HR response.

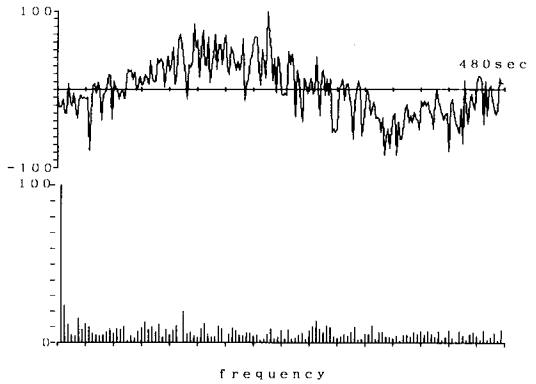


Fig-5-2

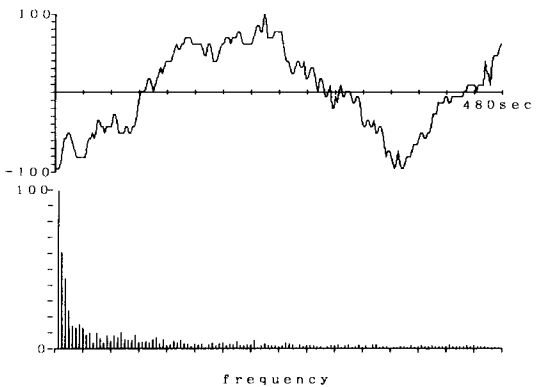


Fig-5-3

Fig-5: Input of work load and output (response) of $\dot{V}O_2$, HR to triangle wave like work load with 480 sec of one cycle and its spectrum by fourier transform. 5-1 is Input of work load. 5-2 is response of $\dot{V}O_2$ and 5-3 is that of HR.

Table-2: Time lag in responses of $\dot{V}O_2$ and HR to triangle wave like work load. The value in () is %time lag compared with times of one cycle.

| time of one cycle (sec) | 240 | | 480 | |
|-------------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| SUB. | HR | $\dot{V}O_2$ | HR | $\dot{V}O_2$ |
| N.A | 29.5(12.29) | 30.1(12.54) | 36.2(7.54) | 37.0(7.71) |
| H.I | 30.2(12.58) | 30.5(12.71) | 39.0(8.13) | 38.5(8.05) |
| Y.O | 32.9(13.71) | 33.8(14.08) | 39.6(8.25) | 39.8(8.29) |
| I.H | 25.5(10.63) | 27.0(11.25) | 30.5(6.35) | 32.5(6.77) |
| AVE | 29.53(12.30) | 30.35(12.65) | 36.33(7.57) | 36.83(7.67) |
| S.D | 2.65 | 2.41 | 3.60 | 2.70 |

30.35 sec (SD = 2.41) の遅れ時間をもっていることが伺える結果であった。また両者間には、統計上有意な差は認められなかった。

次に8分周期の場合、負荷入力に対してHR 応答は36.33 sec (SD = 3.60) 平均の遅れ時間、また $\dot{V}O_2$ 応答は36.83 sec (SD = 2.70) 平均の遅れ時間をもっていることが伺える結果であった。また4分周期同様、両者間には有意な差は認められなかった。さらに4分周期と8分周期についても、HR 応答および $\dot{V}O_2$ 応答に有意な差は認められなかった。

4. 考 察

Tiedt¹²⁾や Wigertz¹⁴⁾らは、 $\dot{V}O_2$ や $\dot{V}CO_2$ の応答は入力と同じ周期成分が大部分を占め、それ以外の高次周波数成分は20%以下であることを報告している。また Bakker¹⁾ら、Casabri²⁾ら、Miyamoto^{7,8)}ら、Fukuoka^{4,5,6)}らは、正弦波負荷に対する $\dot{V}O_2$ や $\dot{V}CO_2$ の応答は、一般に運動入力と同じ周期で正弦波状に変化すると報告している。さらに福岡らは正弦波入力に対する同周期のサインモデルを設定し、 $\dot{V}O_2$ 応答、 $\dot{V}CO_2$ 応答、R 応答が入力に近い応答を示し、その周期の入力からの遅れ時間は $\dot{V}O_2 > \dot{V}CO_2 > R$ の順に遅くなることを報告している。またその周期の遅れ時間は、入力周期が長い程遅くなることを併せて報告している。

入力周期からの遅れ時間が上記の序列をもつのは、Karlsson らは、宮村らが報告するように $\dot{V}CO_2$ の応答が $\dot{V}O_2$ の応答に遅れることに起因し、その原因は組織に対する CO_2 の溶解度が O_2 の溶解度よりも大きいと考えられている。

こういった応答の遅れ時間が起因し、AT において AerT (有酸素性作業閾値) と AnT (無酸素性作業閾

値) といった2つの閾値が存在することになると考えられる。その意味からも、臨牀的に安全な運動負荷の値としての AT という点では AerT がそれに相当していることは容易に判断できる。

前述のようにこれまで運動負荷漸増に対する $\dot{V}O_2$ と HR の関係は、中程度の運動強度までは正の直線関係のみられることが報告される。しかしこれまでの負荷入力はほとんどが一定の漸増運動で、今回のような波状負荷入力に対するものは少なかった。また三角波状での負荷入力に対しての $\dot{V}O_2$ 、HR 各々の応答の遅れ時間がわかるならば、ランプ負荷においてもそれぞれの応答の時間差が判断されるものと考えられた。

しかし今回の条件下での実験では、入力負荷に対する $\dot{V}O_2$ と HR の応答の遅れ時間には差のみられない結果であった。すなわち AT 以下の強度の運動においては、生体の負担度を示す指標となる $\dot{V}O_2$ を、HR がある程度あるいはかなり正確に示唆していることがわかる。その点を再度裏付けするために、図6では今回の実験設定における運動での $\dot{V}O_2$ と HR の関係の一例を示したが、両者の間に非常に高い有意な相関関係が認められた ($p < 0.01$)。

また4分周期における $\dot{V}O_2$ の応答および HR の応答は、8分周期のそれと比較して入力に対する遅れ時間が小さいことが伺えるが、 $\dot{V}O_2$ の応答に関しては福岡らが報告するものと同じ傾向が得られた。しかし表2に示したように周期に対する割合を考えた場合、4分周期の HR で12.30%、 $\dot{V}O_2$ で12.65%の遅れ時間であるのに対し、8分周期の場合 HR で7.5%、 $\dot{V}O_2$ で7.67%の遅れ時間となることから、単に遅れ時間の絶対値をみた場合は周期の短い方が遅れ時間の少ないことが伺えるが、周期時間との比率では周期の長い方が遅れ時間が小さくなる傾向のあることが伺える結果であった。

これらのことから AT 以下での運動においては、 $\dot{V}O_2$ と HR は入力に対してかなり近い、近似した遅れ時間をもって応答することが明かとなり、HR 単一の指標においてもある負荷に対するその瞬時の生体負担度の情報として用いることが可能になると考えられる。

次にこれまでなされた報告の多くは正弦波負荷変動の入力を用い、その入力に対する応答が同じ周期で正弦波状に変化するというものであった。そこで今回三角波による負荷変動入力を用いたが、その応答のスペクトルからこれまでの報告のように同じ周期で応答することが示唆される結果が得られた。しかし図7に示

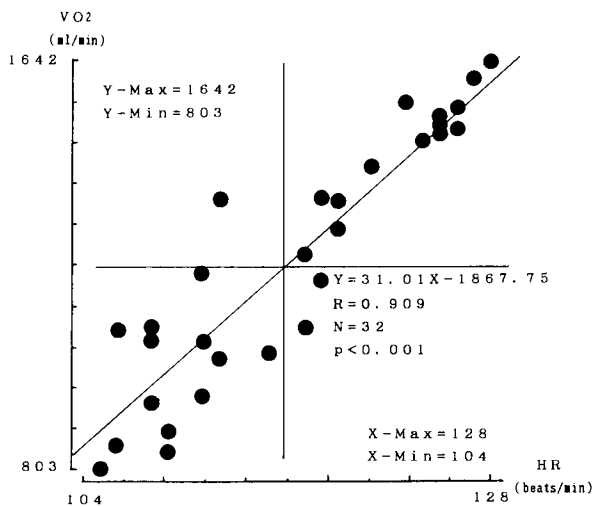


Fig-6: Relationship between $\dot{V}O_2$ and HR on condition of triangle wave like work load under the load-level of AT.

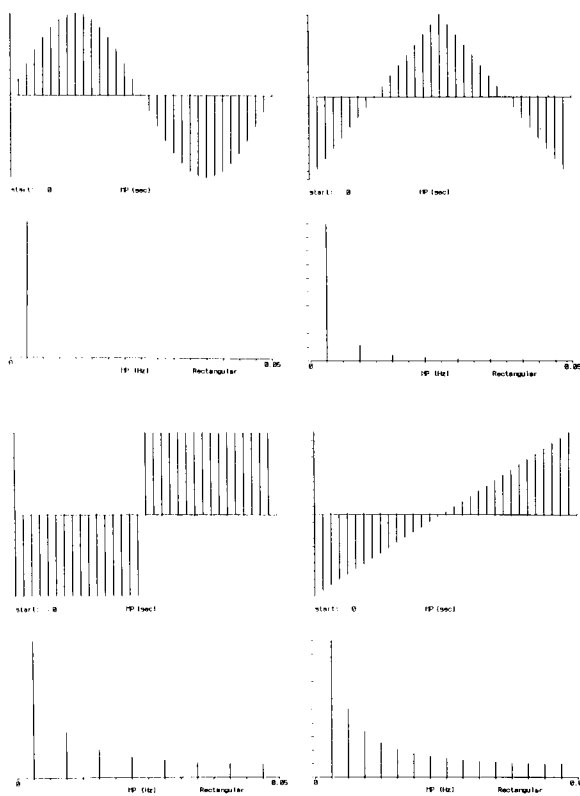


Fig-7: Basic wave of sinusoidal wave, triangle wave, square wave and saw like wave, and their spectrum by fourier transform.

すように三角波の場合、例えば矩形波や鋸歯状波と比較してそのスペクトルは高次周波数成分が小さいため、今回の場合いくつかの例にもみられるように、同じ三角波状に応答したとは言いきれない場合もあった。さらに生体の場合、例えば入力方向のベクトルが急激に変化した場合(例えば矩形波)、その変化に完全に同調して生体の $\dot{V}O_2$ 等が応答するとは考えにくい。おそらくはなだらかな変化の過程を含んだ応答になることが予想できる。その意味では、今回の結果についても三角波変動に近似した応答を示したということは十分考えられる。

これらの点については、今後正弦波や三角波のみでなく、矩形波、鋸歯状波負荷入力をはじめ、乱数負荷入力等の方法によってより明確にされるものと考えられる。

5. 結 語

本研究は以下のようにまとめられる。

- 1) AT レベル以下の負荷で波状(三角波)に運動負荷変動をさせた場合、 $\dot{V}O_2$ と HR はある遅れ時間をもって入力と同じ周期成分で応答する。
 - 2) その際の $\dot{V}O_2$ と HR の遅れ時間は、かなり近似したものと考えられる。
 - 3) よってランプ負荷における $\dot{V}O_2$ と HR の直線関係は、AT レベル以下では運動負荷に対する時間的に同期した情報と考えられる。
- 以上である。

参考文献

- 1) Bakker, H.K., Struikenkamp, R.S, and DE Vries, G.A: Dynamics of ventilation, heart rate, and gas exchange: sinusoidal and impulse work loads in human. J. Appl. Physiol., Vol. 48, pp289-301, 1980.
- 2) Casabri, R., Whipp, B.J., Wasserman, K., Beaver, W.L. and Koyal, S: Ventilation and gas exchange dynamics in response to sinusoidal work. J. Appl. Physiol. Vol. 42, pp300-311, 1977.
- 3) Davis, J.A: Anaerobic threshold: review of concept and directions for future research. Med. Sci. Sports Exerc. Vol. 17, pp6-18, 1985.
- 4) Fukuoka, Y., and Ikegami, H: Respiratory response to sinusoidal work loads in humans. Ann. Physiol. Anthorp. Vol. 9, pp175-183, 1990.
- 5) 福岡義之, 近藤徳彦, 後藤真二, 池上晴夫: 正弦波運動負荷に対するガス交換応答特性 体力科学 Vol. 40, pp60-73, 1991.

- 6) 福岡義之, 鍋倉賢治, 曾根涼子, 権 五, 藤井宣晴, 池上晴夫: 正弦波運動における呼吸交換率(R)の応答 生理人類学誌 Vol. 10, pp91-100, 1991.
- 7) Miyamoto, Y., Nakazono, Y., Hiura, T., and Abe, Y: Cardiorespiratory dynamics during sinusoidal and impulse exercise in man. Jpn. J. Physiol, Vol. 33, pp971-986, 1983.
- 8) 宮村実晴, 本田良行: 運動中の中枢性呼吸・循環調節, 呼吸と循環 Vol. 36, pp3-11, 1988.
- 9) 塩野谷明: 運動負荷漸増に伴う酸素摂取量と心拍数の関係—AT(無酸素性作業閾値)に関連して—長岡技術科学大学研究報告, Vol. 12, pp63-70, 1990.
- 10) Shionoya, A: The relationship between $\dot{V}O_2$ and Heart rate with step loaded bicycle exercise. —From points of a threshold of respiratory compensation based on a mutual relation—. Ann. Physiol. Anthorp. Vol. 10, pp115-116, 1991.
- 11) 塩野谷明, 佐藤隆幸: いくつかの波状負荷変動に対する生体の換気応答特性 生理人類学会第27回大会, 1991.
- 12) Tiedt, N., Wohlgemuth, B., and Wohlgemuth, P: The response of heart rate to sinusoidally changed work load in human. Biocybernetics 4, Proc. Int. Symp. Biocyb. Jena, Fisher, pp286-290, 1971.
- 13) Wasserman, K: Ventilatory control during exercise in human.: New concepts. In, Modelling and Control of Breathing. Proceeding of breathing, held on September, 1982.
- 14) Wigertz, O: Dynamics of ventilation and heart rate in response to sinusoidal work load in man. J. Appl. Physiol., Vol. 29, pp208-218, 1970.