

負荷下降時のHR- $\dot{V}O_2$ 関係式を利用した スポーツ活動時の酸素摂取量の推定

高見京太・北川 薫・石河利寛

Estimation of Oxygen Uptake During Sports Activity Using HR- $\dot{V}O_2$ Relationships in Consideration of Downloading Phase.

Kyota TAKAMI, Kaoru KITAGAWA and Toshihiro ISHIKO

Abstract

HR- $\dot{V}O_2$ relationship has been used to estimate the intensity of sports activity. However, it is not always accurate because the intensity of sports activity during a game can vary. This study investigated the validity of estimated oxygen uptake with combined applications of HR- $\dot{V}O_2$ relationships under stepwise increase of workloads (UP-formula) and stepwise decrease of workloads (DOWN-formula). Thirteen young male adults without regular exercise played four different sports (tennis, badminton, table tennis and bowling) during which, their heart rate and oxygen uptake were continuously measured. The oxygen uptake estimated from the UP-formula, and UP and DOWN formulas were compared with the actual oxygen uptakes measured by a portable O_2 meter (Oxylog; Morgan Corp., UK). In all activities, the calculated value from the UP-formula overestimated the actual oxygen uptake. However, using both the UP and DOWN formulas for estimation was more valid than estimation by the UP formula alone. These results suggest that the UP and DOWN formulas are useful for in estimating oxygen uptake during sports activities.

Key words : HR- $\dot{V}O_2$ relationship, sports activity, protocol

I. 緒言

ヒトの身体活動時のエネルギー消費量を求める試みは古くからさまざまな方法によって行われてきた。現状においては、間接的手段ながら身体活動時の酸素摂取量を測定し、その値をカロリーに換算することにより推定する方法がよく実施されている^{10,14,28)}。しかし、酸素摂取量を測定することは、被検者にとってマスクの装着による心理的な煩わしさ、測定器を身につけることによる運動の妨げなど、被検者に種々の負担を与えるため測定法としての問題がある。そこで、被検者の負担が少なく実施の容

易な簡便法として、心拍数から酸素摂取量を推定することにより、エネルギー消費量を求める方法がある^{8,12,13,18,19,24,29)}。

この方法はエネルギー代謝の増加につれて心拍数も増加すること、さらに心拍数と酸素摂取量との間に高い相関関係が認められる^{3,4,20)}ことを応用するものである。最近、小型の心拍数記録装置が開発され運動中などにも簡便、かつ的確に心拍数を連続記録することが可能となり、運動生理学の分野でも広く応用されている。本法は、あらかじめ数種類の強度で運動を行わせて、定常状態での心拍数と酸素摂

中京大学体育学部運動生理学研究室 (〒470-03 愛知県豊田市貝津町床立101)

Laboratory for Exercise Physiology and Biomechanics, School of Physical Education, Chukyo University.

101 Tokodate, Kaizu-cho, Toyota, Aichi 470-03

取量を同時に測定し、両者間の関係式を作成しておく。そして、その関係式に対象とする身体活動時の心拍数を代入して酸素摂取量を求めるという方法である。この方法によれば身体活動を中断することなく、連続的に酸素摂取量の推定が可能であり、カロリーへの換算ができることになる。この場合に、心拍数と酸素摂取量との関係式(以下「HR- $\dot{V}O_2$ 関係式」と略す)は、漸増負荷法によって作成するのが一般的である^{6,7,11,12,16,30}。

しかし、漸増負荷法による推定には、精度において問題点があると考えられる。青木と形本¹⁾によれば、負荷強度が高いときには漸増でも漸減でも同一心拍数に対する酸素摂取量にはほとんど差がなく、酸素脈の変動範囲も2~3 mLにすぎないが、負荷強度が低くなると同一心拍数に対して、漸減時の酸素摂取量は漸増時よりも低くなり、酸素脈は小さい方へ移行し、変動範囲も6~7 mLになることが報告されている。すなわち、負荷の漸増時と漸減時では、心拍数と酸素摂取量との関係が異なる。したがって、負荷の上昇と下降とが繰り返される身体活動時の酸素摂取量を推定する場合、漸増負荷法に基づいた式のみ利用ではつねに酸素摂取量を過大評価する可能性がある²²⁾。

著者らはこれまでに、心拍数から身体活動時の酸素摂取量を推定する際に、負荷が上昇したときには漸増負荷法によって作成した式を、下降したときには漸減負荷法によって作成した式を用いることにより、より高い精度で推定し得ることを人工気候室内(室温23℃, 相対湿度40%)での実験において確認している²⁶⁾。そこで本研究は、運動強度が絶えず変動するスポーツ活動時においても、漸増と漸減の2つのHR- $\dot{V}O_2$ 関係式を組み合わせる利用することにより、高い精度で酸素摂取量の推定が可能か否かを検討することを目的とした。

II. 実験方法

A. 被検者

被検者は規則的な運動習慣を持たない健康な13人

の男性であり、身体的特徴はTable 1に示した。表中の%fat(体脂肪率)は水中体重秤量法によって身体密度を求め¹⁵⁾、これをBrožekら⁵⁾の式に代入することによって算出した。また、最大酸素摂取量は医師の監視下でトレッドミルによる漸増負荷運動によって測定した。酸素摂取量はあらかじめダグラスバッグ法により測定精度の検定のなされているAeromoniter AE-280(ミナト医科学)にて、心拍数はDynascope DS-502(フクダ電子)によって測定した。

なお、被検者には中京大学倫理委員会規定に基づき、研究の目的、方法、意義などについて十分な説明を行い、実験に参加することを書面にて承諾を得た。

B. HR- $\dot{V}O_2$ 関係式の作成

HR- $\dot{V}O_2$ 関係式を作成するための運動は、10分間の椅座位安静後、Fig. 1に示したプロトコールによるトレッドミルでの歩行および走行であった。なお、実験にあたっては被検者にトレッドミル運動を十分習熟させた。

トレッドミルの速度は心拍数と酸素摂取量が定常状態になることの確認できる時間を考慮して、歩行については3分間、走行については4分間を1ステージとして、60m $\cdot$ min⁻¹から30m $\cdot$ min⁻¹ずつ、210m $\cdot$ min⁻¹まで上昇させた。その後続けて、30m $\cdot$ min⁻¹ずつ60m $\cdot$ min⁻¹まで下降させた。そして、各

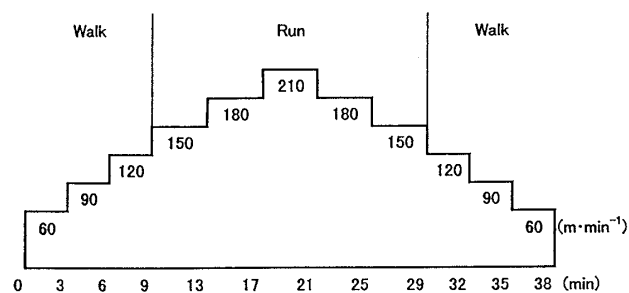


Fig. 1 The protocol to determine of HR- $\dot{V}O_2$ relationship.

Table 1. Physical characteristics of subjects. (mean $\pm$ SD.)

n	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)	%fat (%)	$\dot{V}O_{2max}$ (L·min ⁻¹)	$\dot{V}O_{2max}$ (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	HRmax (beats·min ⁻¹)
13	23.8 $\pm$ 2.4	172.6 $\pm$ 5.2	69.0 $\pm$ 5.7	14.0 $\pm$ 4.2	3.49 $\pm$ 0.32	50.71 $\pm$ 3.62	190.0 $\pm$ 7.8

ステージの最後の1分間の心拍数と酸素摂取量を、速度の上昇局面と下降局面とに分けて最小二乗法による1次回帰方程式を導きだし、それぞれUP式、DOWN式とした。

C. 測定種目と酸素摂取量の推定

研究対象としたスポーツ種目は、テニス（ダブルス1セット）、バドミントン（シングルス1セット）、卓球（シングルス2セット）、ボウリング（1レーンを2人で用い、連続して2ゲーム）の4種目であり、公式ルールに則ってゲームを行った。被検者にはあらかじめダグラスバッグ法によって測定精度の検定を行った携帯用の酸素摂取量測定器（Oxylog: Morgan社製）を装着させて酸素摂取量の実測を行うとともに²⁵⁾、心拍数記録装置（MAC HEART MEMORY VAM1-001: VINE社製）によって心拍数を1分ごとに測定した。

HR- $\dot{V}O_2$ 関係式による酸素摂取量の推定は、2つの方法により行った。すなわちゲーム時のすべての心拍数をUP式のみに入力する方法による値（以下「UP値」と略す）と、UP式とDOWN式を併用する方法による値（以下「UP-DOWN値」と略す）である。UP-DOWN値では算出すべきある時点の心拍数が直前の1分間値と比較して、上昇あるいは同じ場合にはUP式を、下降した場合にはDOWN式を用いた。そして、これらの推定値とOxylogによって求めた値（以下「実測値」と略す）の差の検定を、対応のあるt検定によって行った。

Ⅲ. 結果

HR- $\dot{V}O_2$ 関係式の1例をFig. 2に示した。このような関係をすべての被検者について検討した結果、相関係数はUP式、DOWN式ともに0.96以上であること、同一の心拍数に対する酸素摂取量はUP式（傾き：0.019～0.024，切片：-1.461～-0.220）がDOWN式（傾き：0.027～0.036，切片：-3.741～-1.830）を上回ることが明らかになった。

Fig. 3に示したのは、テニスゲーム時の心拍数と酸素摂取量の経時変化の1例である。Fig. 3aは実測値での変化の様相であり、Fig. 3bは $\dot{V}O_{2\max}$ とHRmaxを100%とした相対値での変化の様相である。図から明らかなように酸素摂取量の変化と心拍数の変化とは必ずしも対応しない。特に負荷が下降した局面における心拍数の減少は、酸素摂取量に比

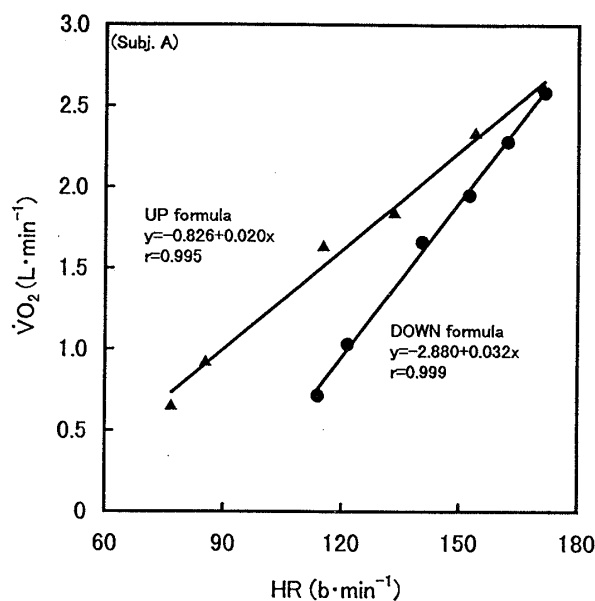


Fig. 2 An example of HR- $\dot{V}O_2$ relationships.

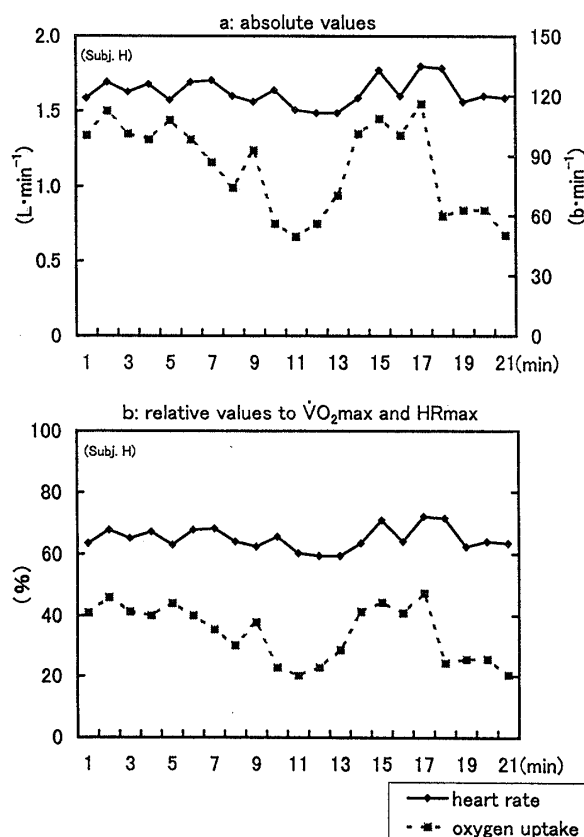


Fig. 3 An example of changes of heart rate and oxygen uptake during playing tennis.

べて小さかった。このような傾向は他の被検者や他の種目についてもみられた。

Table 2 には酸素摂取量の実測値および推定値を平均値と標準偏差で示したが、すべての種目において、UP-DOWN 値は UP 値よりも実測値に近い値であった。なお、表中の実測値、UP-DOWN 値、UP 値ともに、運動開始から終了までの値であり、回復期は含まれていない。また、心拍数を的確に測定し得なかった 1 例を除外したために、被検者数はテニス以外は 12 人であった。

IV. 考察

従来行われている方法である UP 式のみにもとづいて推定されたテニス、バドミントン、卓球、ボウリングのゲーム時の酸素摂取量は、いずれも実測値よりも有意に高く、その誤差の割合は 13.8% から 51.9% の範囲であった。伊藤ら¹²⁾ はソフトボール、卓球、バレーボールの 3 種目の基本動作について、ダグラスバッグ法による実測値と、HR- $\dot{V}O_2$ 関係式からの推定値（本研究における UP 値）との比較を行っているが、この報告でも 6.7% から 16.1% の範囲で酸素摂取量を過大評価する傾向があることを示している。このような誤差を生む要因の 1 つとして、運動様式の違いが考えられる。Vokac ら²⁷⁾ によれば、脚作業よりも活動筋群の少ない腕作業の方が、同一心拍数に対する酸素摂取量が低いとのことである。したがって運動様式が異なれば HR- $\dot{V}O_2$ 関係式も異なるため^{9,22)}、トレッドミルの走運動で作成した

HR- $\dot{V}O_2$ 関係式によって、上肢をより多用するスポーツ活動時の酸素摂取量を推定すれば、実測値よりも大きく算出する可能性があるものと推測される。

また、永井ら²²⁾ は、負荷上昇時の HR- $\dot{V}O_2$ 関係式のみで酸素摂取量を推定した場合の誤差は、運動中に起こる負荷の下降時と、心拍数レベルの低い場面に大きくなると述べている。これは、テニスやボウリングといった身体移動が必ずしも持続的でないスポーツ種目ほど、測定誤差が大きいという結果と似た傾向といえる。つまり体温の上昇に心拍数が影響される²¹⁾ことや、回復期における酸素摂取量は心拍数よりも減少が速いために²⁾、負荷が下降した時は上昇した時よりも、同一の心拍数に対する酸素摂取量が低くなる。そこで、本研究では負荷下降時の HR- $\dot{V}O_2$ 関係式を作成し、負荷上昇時の式と組み合わせることで酸素摂取量を推定したところバドミントン、卓球、ボウリングでは実測値との間に有意な差がみられなくなった。そして誤差の範囲も -1.2% から 6.8% となり、UP 式のみで推定した場合よりも、実測値に近い値が得られた。また、テニスについては UP-DOWN 値にても有意差はあるが、実測値に対する過大評価は UP 値の 36.6% から 20.8% まで減少された (Table 2)。

以上のことから、負荷が下降した時には漸減負荷法による HR- $\dot{V}O_2$ 関係式を用いることにより、より精度の高い推定ができると考えられる。しかし、2 つの関係式を作成するには余分の時間と手間がかかるという欠点がある。この他にも心拍数から酸素摂

Table 2. The absolute and relative values of the actual and estimated oxygen uptake during sports activities using HR- $\dot{V}O_2$ formulas and a portable oxygen meter. (mean $\pm$ SD.)

	n	$\dot{V}O_2$ (L $\cdot$ kg ⁻¹ $\cdot$ min ⁻¹)	UP-DOWN (L $\cdot$ kg ⁻¹ $\cdot$ min ⁻¹)	UP (L $\cdot$ kg ⁻¹ $\cdot$ min ⁻¹)	Time (min)
Tennis	13	0.019 $\pm$ 0.003 [100%]	0.023 $\pm$ 0.003* [120.8 $\pm$ 20.5%]	0.026 $\pm$ 0.003* [136.6 $\pm$ 21.7%]	28.5 $\pm$ 7.8
Badminton	12	0.026 $\pm$ 0.004 [100%]	0.026 $\pm$ 0.006 [106.8 $\pm$ 16.7%]	0.028 $\pm$ 0.004* [113.8 $\pm$ 14.9%]	12.8 $\pm$ 4.0
Table Tennis	12	0.017 $\pm$ 0.004 [100%]	0.017 $\pm$ 0.004 [98.8 $\pm$ 18.9%]	0.021 $\pm$ 0.004* [121.1 $\pm$ 19.6%]	11.2 $\pm$ 1.1
Bowling	12	0.011 $\pm$ 0.002 [100%]	0.011 $\pm$ 0.004 [101.7 $\pm$ 30.0%]	0.016 $\pm$ 0.003* [151.9 $\pm$ 31.8%]	35.0 $\pm$ 3.1

$\dot{V}O_2$: The values measured by means of a portable oxygen meter

UP-DOWN : The estimated values from UP-formula and DOWN-formula

UP : The estimated values from UP-formula

*: p<0.05

($\dot{V}O_2$ vs. UP-DOWN, UP)

取量を推定する場合に、単なるトレッドミル走の場合よりも、勝敗を競うようなスポーツ活動時の方が、心拍数が増加する傾向が認められる。このような要因も心拍数からの推定が過大評価される原因になると考えられる。

さらに本質的な問題として、定常状態の運動時に作成した $HR \cdot \dot{V}O_2$ 関係式によって、非定常状態のスポーツ活動時の酸素摂取量を推定していることがある。これに関して、大道と岩崎²³⁾は実験によって、その推定は可能であろうと述べている。また、北村ら¹⁷⁾は漸増的な運動であれば、定常状態と非定常状態のどちらであっても、 $HR \cdot \dot{V}O_2$ 関係式には大差はないと述べている。さらに著者らの行った人工気候室内の実験では、負荷強度が1分ごとに不規則に変化する自転車こぎ運動にて $HR \cdot \dot{V}O_2$ 関係式を用いることの有効性を確認している²⁶⁾。

V. 結論

酸素摂取量からエネルギー消費量を求めること自体が間接的な方法であるうえに、さらにその酸素摂取量を $HR \cdot \dot{V}O_2$ 関係式によって推定すれば、ある程度の誤差が生じることは避けられない。したがって、この誤差をできるだけ小さくするためには、本研究で行ったように負荷の上昇時と下降時のそれぞれに $HR \cdot \dot{V}O_2$ 関係式を作成して、その2つを組み合わせで利用することが、有効であると考えられる。

文献 (References)

- 1) 青木純一郎, 形本静夫(1977)漸増負荷時と漸減負荷時における心拍応答の差. 体育の科学 27 : 243-247.
- 2) 青木純一郎, 喜多 弘(1968)疾走後の酸素摂取量及び心拍数のタイム・コース. 体育学研究 12 : 249-259.
- 3) Åstrand I., P. O. Åstrand and K. Rodahl (1959) Maximal heart rate during work in older men. J. Appl. Physiol. 14 : 562-566.
- 4) Åstrand P. O. and I. Ryhming (1954) A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during submaximal work. J. Appl. Physiol. 7 : 218-221.
- 5) Brožek J. S., F. Drande, J. T. Anderson and A. Keys (1963) Densitometric analysis of body composition. Review of some quantitative assumptions. Ann. N. Y. Acad. Sci. 110 : 13-140.
- 6) 橋本 勲(1984)運動量の測定と評価. 臨床スポーツ医学 1 : 650-655.
- 7) 星川 保(1989)1日の消費熱量の測定. 保健の科学 31 : 425-432.
- 8) 星川 保, 亀井貞次, 松井秀治(1976)ゴルフに関する体力科学的研究. 体育科学 4 : 89-98.
- 9) 福田明夫, 北村潔和, 山地啓司, 有沢和男(1980)作業部位(活動筋量)の相違による $HR \cdot \% \dot{V}O_{2max}$ 直線の変異性. 体育の科学 30 : 751-758.
- 10) 石河利寛(1986)消費カロリーの測定法とその問題点. 体育の科学 36 : 884-885.
- 11) 池上久子, 島岡 清, 池上康男(1991)女子短大生の日常生活における活動量と体力の関係. 体力科学 40 : 321-330.
- 12) 伊藤 稔, 伊藤一生, 北村栄美子, 小川邦子, 前田喜代子(1978)女子学生の体育実技授業中の心拍数の変動と運動強度の推定について. 体育科学 6 : 65-76.
- 13) 加賀谷淳子(1986)心拍数に基づいた消費カロリーの算出法とその問題点. 体育の科学 36 : 858-863.
- 14) Katch F. I and W. D. McArdle (1988) Nutrition, Weight Control and Exercise, 3rd Ed., Chap. 4, Lee & Febiger, 97-98.
- 15) Kitagawa K, M. Miyashita and K. Yamamoto (1977) Maximal oxygen uptake, body composition, and running performance in young Japanese adults of both sexes. Jap. J. Phys. Educ. 21 : 335-340.
- 16) 北川 薫, 梅村義久, 高見京太, 石河利寛, 山本高司 : $HR \cdot \dot{V}O_2$ 関係式から推定した中学生の1日のエネルギー消費量とその問題点. 体育科学 19 : 57-63, 1991.
- 17) 北村潔和, 鳥海清司, 布村忠弘, 堀田朋基(1991)定常状態と非定常状態の運動で得られた $HR \cdot \dot{V}O_2$ 関係. 体力科学 40 : 372-373.
- 18) Malhotra M. S., J. S. Gupta and R. M. Rai (1963) Pulse count as a measure of energy expenditure. J. Appl. Physiol. 18 : 994-996.
- 19) McArdle W. D., J. R. Magel and L. C. Kyvallos (1971) Aerobic capacity, heart rate and estimated energy cost during women's competitive basketball. Res. Quart. 42 : 178-186.
- 20) Morgan D. B. and T. Bennett (1976) The relation between heart rate and oxygen consumption during exercise. J. Sports Med. 16 : 38-44.
- 21) Mostardi R., A. Veicsteinas and R. Margaria (1974) The effect of increased body temperature due to exercise on the heart rate and on the maximal aerobic power. Eur. J. Appl. Physiol. 33 : 237-245.
- 22) 永井 猛, 青木純一郎, 形本静夫(1976)種々なるタイプのエルゴメトリー時, 負荷上昇時および下降時における心拍数—酸素摂取量関係. 東京体育学研究 3 : 45-53.

- 23) 大道 等, 岩崎輝雄(1982)非定常状態における心拍数と酸素摂取量の相関. 体育の科学 32:869-874.
- 24) Sharkey B. J., J. F. McDonald and L. G. Corbridge (1966) Pulse rate and pulmonary ventilation as predictors of human energy cost. Ergonomics 9:223-227.
- 25) 高見京太, 北川 薫, 石河利寛(1993)酸素摂取量の実測によるスポーツ活動中のエネルギー消費量. 体力科学 42:257-264.
- 26) 高見京太, 北川 薫, 石河利寛(1995)スポーツ活動時のエネルギー消費量推定のためのHR・ $\dot{V}O_2$ 関係式作成のプロトコールの検討. 中京大学体育学論叢37:85-91.
- 27) Vokac Z., H. Bell, E. B. Holter and K. Rodahl (1975) Oxygen uptake/heart rate relationship in leg and arm exercise, sitting and standing. J. Appl. Physiol. 39:54-59.
- 28) 山地啓司(1992)酸素消費量から身体運動のエネルギーを推定する. Jpn. J. Sports Sci. 11:150-160.
- 29) 山本英弘, 北川 薫, 種田行男, 御手洗玄洋, 矢部京之助, 島岡 清, 広瀬恒夫(1989)ゴルファーの形態・体力的特徴及び1ラウンドプレーのエネルギー消費量と筋力・血圧への影響. ゴルフの科学 3:1-8.
- 30) 山本高司, 北川 薫, 坪内伸司, 加藤好信, 朝比奈一男(1983)小学生男子(11歳)の1日の消費エネルギー量. 体育科学 11:63-68.

(平成8年2月8日 受付)
(平成8年4月23日 受理)