

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ルの検討

高見京太*, 北川 薫**, 石河利寛***

A Study on Protocol for HR- $\dot{V}O_2$ Relationships in Estimating Energy Expenditure During Sports Activity.

Kyota TAKAMI, Kaoru KITAGAWA and Toshihiro ISHIKO

Abstract

It is very difficult to estimate the intensity of sports activity by heart rate with a HR- $\dot{V}O_2$ relationship because intensity of the sports activity during a game is undulatory. This study aimed at establishing the validity of estimated energy consumption with combined applications of HR- $\dot{V}O_2$ relationships under stepwise increased workloads (UP-formula) and stepwise decreased workloads (DOWN-formula). Nine male physical education majors pedaled a bicycle ergometer under undulatory workloads for 16 min. Oxygen uptake was estimated from UP-formula, DOWN-formula and combination usage of UP and DOWN formulas. Results showed that the estimated value with combination usage was nearest to the actually measured value. It was concluded that combination usage is more valid than single use of the UP or DOWN formulas in estimating energy consumption of sports activity.

I. 緒 言

運動処方を行う際に、心拍数を指標として用いることはきわめて有効である。なぜなら心拍数は代謝の増加につれて増加し、酸素摂取量との間に一定の関係が認められるからである¹⁻³⁾。ただし、この関係は理論的には運動が定常状態にあり、心拍数がおおむね110から170拍・分⁻¹の範囲にあるときに成立する。しかし、非定常状態の運動や無酸素性の運動であっても、実際には一定の関係が認められることから、これらの場合においても運動強度の指標として用いられている⁴⁾。

また、心拍数は単なる運動強度の指標としてだけでなく、エネルギー消費量の推定にも利用できる⁴⁻¹³⁾。この方法は、心拍数と酸素摂取量とが一定の関係にあることを応用するとともに、心拍数の連続記録が小型装置の開発によって、簡便にできるようになったことから広く用いられている。具体的には数種類の強度で運動を行わせて、心拍数と酸素摂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。この方法によれば活動を中断することなく、連続的な酸素摂取量の推定が可能となるため、カロ

*助手, **教授, ***非常勤講師

リーへの換算も可能である^{14,15})。この場合、心拍数と酸素摂取量の関係式(以下「HR- $\dot{V}O_2$ 関係式」と略す)を作成するためのプロトコールは、漸増負荷法によるのが一般的である^{16,17})。しかし、実際のスポーツ活動や日常生活は、負荷の上昇と下降とが繰り返される¹⁸⁻²²)ことから、漸増負荷法によって作成した式のみで、すべての活動のエネルギー消費量を推定することには、問題があると指摘されている²³)。青木と形本²⁴)によれば、負荷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から3 mLにすぎない。しかし負荷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て、変動範囲も6から7 mLになるとのことである。したがって、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ことから、漸増負荷法に基づいた式のみで推定すると、つねに過大評価をする可能性があるとして指摘している。

このような問題点の指摘にもかかわらず、心拍数によるエネルギー消費量の推定には、4分間づつの漸増負荷法によって作成されたHR- $\dot{V}O_2$ 関係式が用いられているのが現状である。そこで本研究はHR- $\dot{V}O_2$ 関係式での、より精度の高い推定方法を見つけることを目的とし、関係式の利用についての検討を行った。

II. 方法

A. 被検者

事前に十分な説明を行ったうえで、実験に参加することを承諾した、体育学部の男子大学生9人(21.2±1.2歳, 169.5±5.5 cm, 63.1±6.9 kg)を被検者とした。彼らのうち7人がトライアスロン、残りの2人はそれぞれサッカーとバスケットボールの選手であった。被検者は、日ごろからそれらの種目のトレーニングを行っていたが、実験前には自転車エルゴメータによる運動に慣れるための練習を1回行った。

B. プロトコール

実験はすべて、室温23°C、相対湿度40%に設

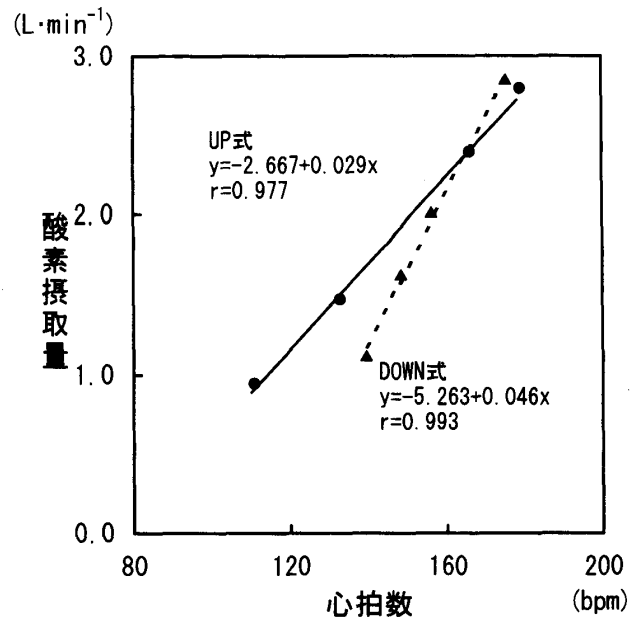


図1 心拍数と酸素摂取量の関係式(HR- $\dot{V}O_2$ 関係式)の1例

定した人工気候室内で行った。運動様式は毎分50回転に規定した自転車こぎ運動であり、負荷の制御は、STBコントロールプログラム(NIHON KOHDEN)によって行った。そして、酸素摂取量はOxycon-4(MIJNHARDT)を、また心拍数はDynascope DS-502(フクダ電子)を使用することによって測定した。被検者は5日以内に以下の3つのプロトコールを実施した。ただし、順序は無作為に決定した。

第1と第2のプロトコールはHR- $\dot{V}O_2$ 関係式の作成を目的として行った。第1のプロトコールは各ステージが4分間で50, 100, 150, 200 Wの順に負荷が漸増する内容であり、これにより得られたHR- $\dot{V}O_2$ 関係式をUP式とした。第2のプロトコールは各ステージが4分間で200, 150, 100, 50 Wの順に負荷が漸減する内容であり、これにより得られたHR- $\dot{V}O_2$ 関係式をDOWN式とした。なお、これらの関係式は、各ステージの最後の1分間値をもとに、最小二乗法によって導きだされた1次回帰方程式であり、その1例を図1に示した。第3のプロトコールは、上述したUP式とDOWN式の適用を検討するためのもので、実際のスポーツ活動を想定して、図2に示したように1分間ごと

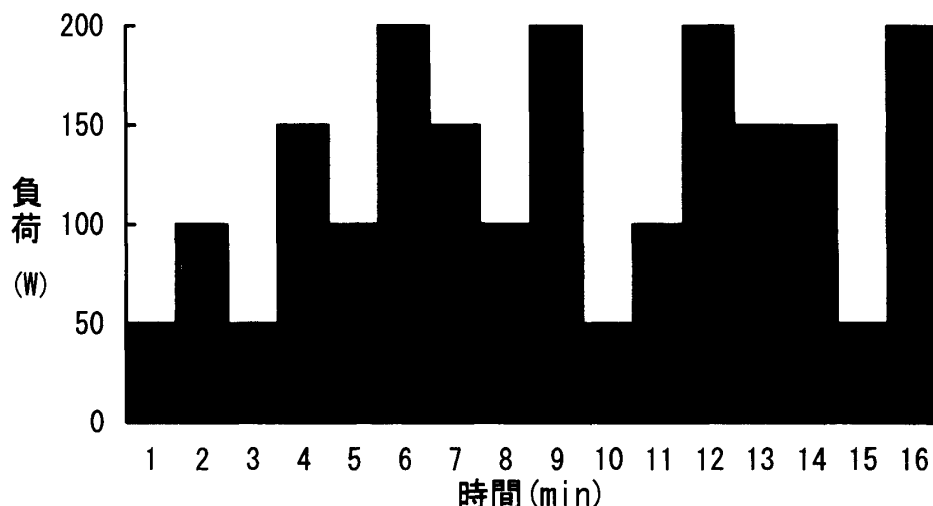


図2 スポーツ活動を想定した1分ごとに負荷の変動する自転車エルゴメーターでのプロトコール

に負荷が変動する内容であった。なお、負荷の設定はランダムに行った。

C. 酸素摂取量の推定

第3のプロトコールの酸素摂取量は、運動時に実測するとともに（以下「実測値」と略す）、後で心拍数をもとにUP式だけを利用する推定（以下UP式と略す）、DOWN式だけを利用する推定（以下DOWN式と略す）、そしてUP式とDOWN式の両方を使用する推定によって求めた。この両方を利用する推定法は、算出すべきある時点での心拍数が、直前の心拍数と比較して、上昇あるいは同じ場合にはUP式を、下降した場合にはDOWN式を用いる方法（以下「U-D式」と略す）である。

以上のようにして得られた、3種の推定法（UP式、DOWN式、U-D式）による値と、実測値との間の差の検定を、paired t test によって行った。なお、有意水準は $p < 0.05$ とした。

III. 結 果

図3は、第3のプロトコールによる運動時の、酸素摂取量の実測値と推定値を1分ごとに、全被検者の値を平均して示した経時変化である。これによるとUP式は、5分目と7分目を除いて、実測値よりも高い値を示した。また、DOWN

式は運動の前半においては実測値よりも低い値を示したが、後半になるとほぼ等しいか、実測値よりも高い値を示す傾向がみられた。

表1には、第3のプロトコールによる運動の総酸素摂取量を、各算出法別に示すとともに、実測値に対する推定値の誤差の割合を示した。UP式は実測値よりも3.5 L 高く、誤差の割合は+13.8%であった。なお、paired t test の結果、この差は有意 ($p < 0.05$) であった。また、DOWN式では逆に実測値よりも2.2 L 低く、誤差の割合は-8.5%であった。しかし、この差は有意 ($p < 0.05$) ではないものの $p = 0.050$ であった。一方、UP式とDOWN式を組み合わせたU-D式によると、誤差の割合は+1.6%となり有意差はなく、ほぼ実測値と等しい値が得られた。

IV. 論 議

本研究では負荷の設定条件以外の、心拍数と酸素摂取量の関係に影響を与える要因を最小限におさえる必要があった。そこで、環境条件を一定に保つために、全実験を室温と相対湿度の設定ができる人工気候室内で行った。また、サーカディアンリズムに配慮し、全日程において各被検者は、それぞれ同一時刻に運動を開始した。その結果、運動開始前の安静時心拍数および安

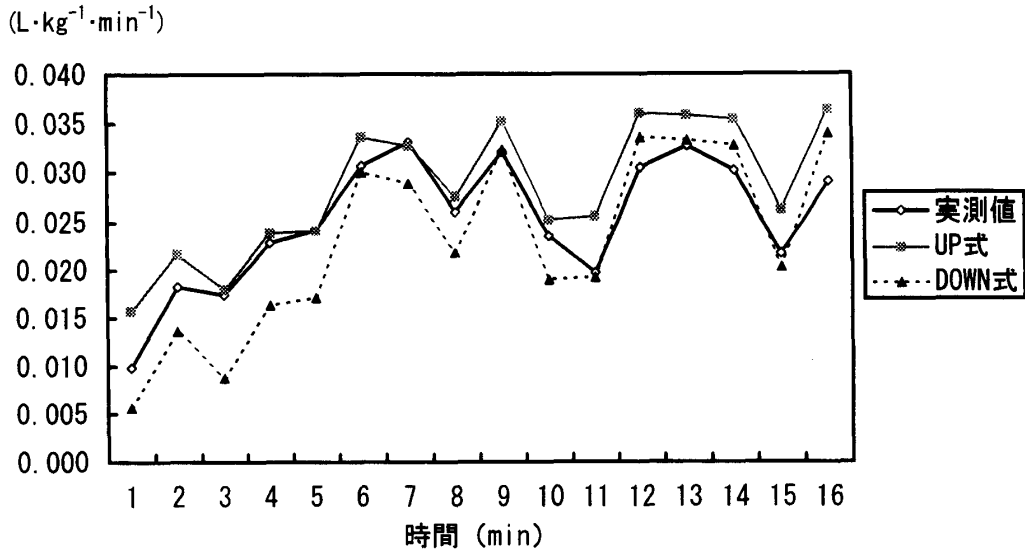


図3 第3のプロトコル時の実測およびHR- $\dot{V}O_2$ 関係式の推定による酸素摂取量の経時変化

表1 第3のプロトコル時の実測およびHR- $\dot{V}O_2$ 関係式の推定による総酸素摂取量と実測値に対する各算出方法の誤差の割合

	総酸素摂取量 (L)	実測値に対する割合 (%)	p 値 <実測値 対 各推定値>
実測値	25.7 ± 1.9	100	
UP式	29.2 ± 5.7	113.8 ± 20.6	0.040
DOWN式	23.5 ± 4.1	91.5 ± 13.8	0.050
U-D式	26.1 ± 4.0	101.6 ± 13.1	0.358

静時酸素摂取量は、3日間とも有意な差はなかった。

本研究におけるUP式とは、心拍数からエネルギー消費量を推定する際に用いられる、最も一般的に利用されている方法である^{16,17)}。しかし、推定された酸素摂取量は実測値に対して有意に過大評価し、その誤差の割合は+13.8%であった。図3にも示されているように、16分間の運動中ほとんどが実測値よりも高い値を算出し、特に10分目を過ぎてからは、その差はさらに大きくなる傾向がみられた。伊藤ら⁷⁾は、HR- $\dot{V}O_2$ 関係式による推定誤差の測定を、ソフトボール、卓球、バレーボールの基本動作について行っている。この報告においても、推定された値は実測値に対して6.7から16.1%の

範囲で過大評価しており、その原因として心理的な興奮や利用される筋群の違い²⁵⁾をあげている。しかし、本研究の実験設定からすると、伊藤らの指摘する原因は、本質的な問題としての関連は低いと考えられる。本研究で指摘したように、誤差を生む要因として考えられるのは、負荷上昇時の式であるUP式によって、負荷が下降する局面を含む運動の推定をすることにある。つまり、負荷の上昇時と下降時では、心拍数と酸素摂取量の変化の速度が異なること²⁶⁾、また体温の変化が心拍数に影響を与えること²⁷⁾によって、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。このため、負荷下降時のHR- $\dot{V}O_2$ 関係式は、傾きが大きく切片が小さくなるため、運動

中に起こる負荷の下降時と、心拍数レベルの低い局面で、誤差が大きくなるからである²³⁾。

そこで、本研究はこの点に対処するため、負荷下降時の式として DOWN 式を作成して推定を試みた。結果は、図 3 に示されているとおり、運動を開始した直後には、実測値よりも大幅に過小評価したが、9 分目以降の特に負荷が下降した時には実測値に近い値を算出した。運動全体を通しては 8.5% の過小評価となったが、このような結果になったのは、負荷下降時の式である DOWN 式のみで運動全体を推定しているため、当然の結果といえる。そこで、心拍数が直前の 1 分間値に比較して上昇あるいは変化がなかった時には UP 式を、下降した時には DOWN 式をとるように、2 つの式を組み合わせて利用した U-D 式によると、実測値にはほぼ等しい値を得ることができた。以上のことから、HR- $\dot{V}O_2$ 関係式によってスポーツ活動時の酸素摂取量を推定する場合、心拍数が下降した時には負荷下降時の関係式を利用することは、推定精度を上げるのにきわめて有効であり、現実には則していると考えられる。

しかし、2 つの関係式を作成するには 2 倍の時間がかかり、酸素摂取量を算出する時にも多少の手間が増えるという欠点がある。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- $\dot{V}O_2$ 関係式によって、非定常状態の運動の酸素摂取量を推定していることがある。この点については、理論的には矛盾しているが、大道と岩崎²⁸⁾、また、北村ら²⁹⁾ の報告によると、実際には推定は可能であると考えられる。

HR- $\dot{V}O_2$ 関係式によってスポーツ活動時のエネルギー消費量を推定することは、もともと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心拍数から推定するため、ある程度の誤差は避けられない。しかし、本研究で行ったように 2 つの式を組み合わせて利用することは、多少の手間は増えるものの、推定誤差を低く抑えるために、きわめて有効であると考えられる。結論として、心拍数をもとに、より精度の高いエネルギー消費量の推定を行うために

は、負荷の上昇時と下降時のそれぞれに HR- $\dot{V}O_2$ 関係式を用意し、それらを組み合わせて利用するべきである。

V. 要 約

本研究の目的は、HR- $\dot{V}O_2$ 関係式によってスポーツ活動時のエネルギー消費量を推定する際、漸増負荷法によって作成した式だけでなく、漸減負荷法によって作成した式も組み合わせて利用することの有効性を検討することであった。方法は、負荷の設定以外をできるだけ等しい条件にし、3 種類のプロトコールによって毎分 50 回転に規定した自転車こぎ運動を行った。このうちの 2 つは HR- $\dot{V}O_2$ 関係式を作成するためのものであり、4 分間ごとの漸増負荷法 (UP 式) と、4 分間ごとの漸減負荷法 (DOWN 式) であった。そして残りの 1 つは、スポーツ活動を想定した負荷の増減が繰り返される運動であり、この時の酸素摂取量を UP 式と DOWN 式のそれぞれの関係式によって求めるとともに、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 式を用いる 2 つの式を組み合わせた方法 (U-D 式) の合計 3 種類の方法によって推定し、実測による値との比較を行った。結果は、U-D 式が最も実測値に近い値を得ることができた。したがって、心拍数からスポーツ活動時のエネルギー消費量を推定する場合には、漸増負荷法と漸減負荷法による 2 つの HR- $\dot{V}O_2$ 関係式を組み合わせることが、より実測値に近い値を得るのに有効であると考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたって、中京大学体育学部運動生理学研究室の金成裕晋君、比嘉善明君、桜井則彦君のご協力を得たことを記し、深く感謝致します。

文献 (References)

- 1) Åstrand I., P. O. Åstrand and K.

- Rodahl: Maximal heart rate during work in older men. *J. Appl. Physiol.* 14 : 562-566, 1959.
- 2) Åstrand P. O. and I. Ryhming : A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during submaximal work. *J. Appl. Physiol.* 7 : 218-221, 1954.
- 3) Morgan D. B. and T. Bennett : The relation between heart rate and oxygen consumption during exercise. *J. Sports Med.* 16 : 38-44, 1976.
- 4) 加賀谷淳子 : 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, 1986.
- 5) 星川 保・亀井貞次・松井秀治 : ゴルフに関する体力科学的研究. *体育科学* 4 : 89-98, 1976.
- 6) 池上久子・島岡 清・池上康男 : 女子短期大学生の日常生活における活動量と体力との関係. *体力科学* 40 : 321-330, 1991.
- 7) 伊藤 稔・伊藤一生・北村栄美子・小川邦子・前田喜代子 : 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, 1978.
- 8) Malhotra M. S., J. S. Gupta and R. M. Rai : Pulse count as a measure of energy expenditure. *J. Appl. Physiol.* 18 : 994-996, 1963.
- 9) McArdle W. D., J. R. Magel and L. C. Kyvallos : Aerobic capacity, heart rate and estimated energy cost during women's competitive basketball. *Res. Quart.* 42 : 178-186, 1971.
- 10) Sharkey B. J., J. F. McDonald and L. G. Corbridge : Pulse rate and pulmonary ventilation as predictors of human energy cost. *Ergonomics* 9 : 223-227, 1966.
- 11) 涌井忠昭・田川豊彦・浄土英二・粥川保洋・北川 薫 : 森林内歩行時の運動強度とエネルギー消費量心拍数-酸素摂取量関係式からの推定法を用いて. *中京大学体育学論叢* 29 : 9-16, 1987.
- 12) 山本高司・北川 薫・坪内伸司・加藤好信・朝比奈一男 : 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, 1983.
- 13) 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 : 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, 1989.
- 14) 石河利寛 : 消費カロリーの測定法とその問題点. *体育の科学* 36 : 884-885, 1986.
- 15) 山地啓司 : 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, 1992.
- 16) 橋本 勲 : 運動量の測定と評価. *臨床スポーツ医学* 1 : 650-655, 1984.
- 17) 星川 保 : 1 日の消費熱量の測定. *保健の科学* 31 : 425-432, 1989.
- 18) 青木純一郎・形本静夫 : ミニ・バスケットボールのトレーニングが児童の全身持久力に及ぼす影響 第 1 報 心拍数からみたミニ・バスケットボールの運動強度. *体育科学* 16 : 22-28, 1988.
- 19) 石河利寛・形本静夫・青木純一郎・柴田史香 : 中学生男子における陸上競技教材を中心とした体育授業の運動強度. *体育科学* 15 : 36-43, 1987.
- 20) 加賀谷熙彦・山本和雄 : 卓球・バドミントンの運動強度. *体育科学* 7 : 80-85, 1979.
- 21) 加賀谷淳子 : 心拍数と作業強度. *体育の科学* 26 : 203-208, 1976.
- 22) 齊藤 満・星川 保・松井秀治 : 体力の個人差からみた正課体育の運動量と質について. *新体育* 48 : 733-737, 1978.
- 23) 永井猛・青木純一郎・形本静夫 : 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, 1976.
- 24) 青木純一郎・形本静夫 : 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, 1977.
- 25) Vokac Z., H. Bell, E. B. Holter and K. Rodahl : Oxygen uptake/heart rate relationship in leg and arm exercise, sitting and standing. J. Appl. Physiol. 39 : 54-59, 1975.
- 26) 青木純一郎・喜多 弘 : 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, 1968.
- 27) Mostardi R., R. Kubiak, A. Veicsteinas and R. Margaria : 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, 1974.
- 28) 大道 等・岩崎輝雄 : 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, 1982.
- 29) 北村潔和, 鳥海清司, 布村忠弘, 堀田朋基 : 定常状態と非定常状態の運動で得られた HR- $\dot{V}O_2$ 関係. 体力科学 40 : 372-373, 1991.