

異なる環境温下における心拍数と 酸素摂取量との関係について

Relationship between Heart Rate and Oxygen Uptake
at Different Thermal Environments

安田好文
Yoshihumi Yasuda

The present experiment has been undertaken to examine the effects of environmental temperature on relationship between heart rate and oxygen uptake. The measurements of oxygen uptake and heart rate were determined in six healthy male subjects during the maximal treadmill exercise conducted at three different temperatures of 5, 18 and 35°C respectively in a climatic chamber.

Although no statistical differences are seen in maximum oxygen uptake at the three different room temperatures, the maximal heart rate was found significantly higher at 35°C than at 5°C. It was also found that the mean slope of the regression lines obtained from oxygen uptake and heart rate at these environmental temperatures were approximately the same, and the three lines took increasingly a higher position according as the room temperature rises. It is thus suggested from the experiment that the relationship between heart rate and oxygen uptake during the exercise at different environmental temperatures may be varied remarkably by the change of heart rate rather than that of oxygen uptake.

I. は じ め に

呼吸の最も重要な働きは、組織の代謝に必要な酸素を供給し、その代謝産物である炭酸ガスを排出することである。運動開始と同時に呼吸は盛んになるが、酸素摂取量を測定することにより、その運動の強度やエネルギー消費量を知ることができることから、一般的には Douglas bag 法を用いて、各種の運動時の酸素摂取量が測定されてきた。しかし、この方法を用いて、潜水・ロッククライミング・鉄棒などの運動中の酸素摂取量を測定することは不可能である。このような場合には、運動中の心拍数が、酸素摂取量の測定より比較的容易に測定することができることや、一定条件内での運動中の心拍数と酸素摂取量の間には、極めて高い相関関係が認められている¹ ことから、この関係を利用して、間接的に心拍数から酸素摂取量、さらには運動強度を推定する方法が考えられてきた。

一方、心拍数や酸素摂取量が、温度・湿度・気圧などの環境条件によって影響される^{2, 3} ことはよく知られていることであり、その結果、両者の関係にも変化が起きると考えられる。従って、心拍数から酸素摂取量を予測する場合には、これら環境条件を考慮しなければならないと思われる。

そこで本研究では、環境条件として特に温度条件に着目し、異なる三種の環境温度条件下で一定強度の運動を行わせた時の、心拍数と酸素摂取量の関係にどのような影響を及ぼすかについて明らかにしようとした。

II. 方 法

被検者は健康な男子6名であり、表1に被検者の年齢・体重・身長を示した。

実験はすべて一定環境温度および湿度に設定された人工気候室で行った。すなわち、同一被検者に対しそれぞれ日を変え、35°C(高温)・18°C(中間温)・5°C(低温)、湿

Table 1. Physical characteristics of subjects

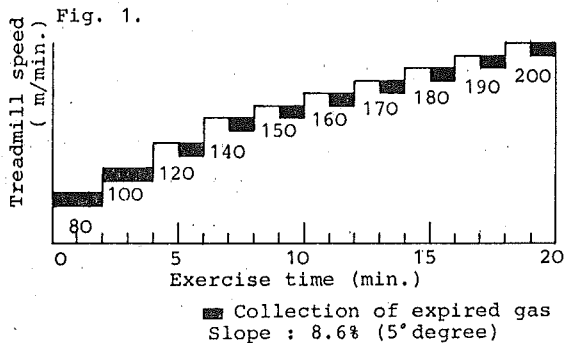
Subjects	Age (yr.)	Weight (kg)	Height (cm)
M . M	3 7	58.0	170.0
K . S	3 1	60.2	164.0
Y . Y	3 0	62.5	170.6
T . K	2 3	70.0	173.0
S . H	2 1	60.0	162.0
T . S	1 8	64.0	165.9

心拍数と酸素摂取量の関係

度60%（ただし5°C時は装置の容量により約80%であった）の3条件下で最大運動を行わせ、それぞれの環境温における運動中の心拍数と酸素摂取量を測定した。

実験はすべて午後行ったが、被検者には、少なくとも実験開始1時間前までに食事を取るよう指示した。そして、被検者を各環境温に設定された人工気候室に入室させ、心拍数を測定するための電極を装着した後、座位で30分間安静な状態で待機させた。

運動は傾斜5度（8.6%）のトレッドミルを用い、図1で示したような漸



増負荷法を用いて、歩およびオールアウト走を行わせた。すなわち、最初のトレッドミルのスピードを80m/分とし、8分までは2分毎に20m/分づつ、それ以後は10m/分づつスピードを上げ、被検者が疲労困憊し、走行不可能な状態（オールアウト）に至るまで運動を行わせた。なおすべての被検者に、100m/分のスピードまでは歩き、120m/分から走るように指示した。

運動中の呼気ガスは、内径30mmの蛇管を用い、運動開始4分までは2分間、4分以後は同一スピードの後半の1分間、さらに、被検者がオールアウトに近づいた時は連続して Douglas bag に採集し、湿式ガスマーター（1回転10ℓ型、品川製作所）を用いて毎分呼気ガス量を測定した。呼気ガス中の酸素(O₂)と炭酸ガス(CO₂)濃度は、O₂分析装置（モーガン社、Model 262D）と赤外線CO₂分析装置（ゴダルト社、Capnograph）を用いて分析した。なおこれらの装置は、あらかじめ Scholander 微量ガス分析器で分析した既知濃度の2種類の混合ガスを用いて校正した。

運動中の心拍数は、胸部双極誘導法により多元電気現象記録器（日本光電製）に記録し、運動開始からオールアウトに至るまで1分毎の心拍数を求めた。

なお本実験は、昭和53年7月13日から7月25日の間に行われた。

Ⅲ．結 果

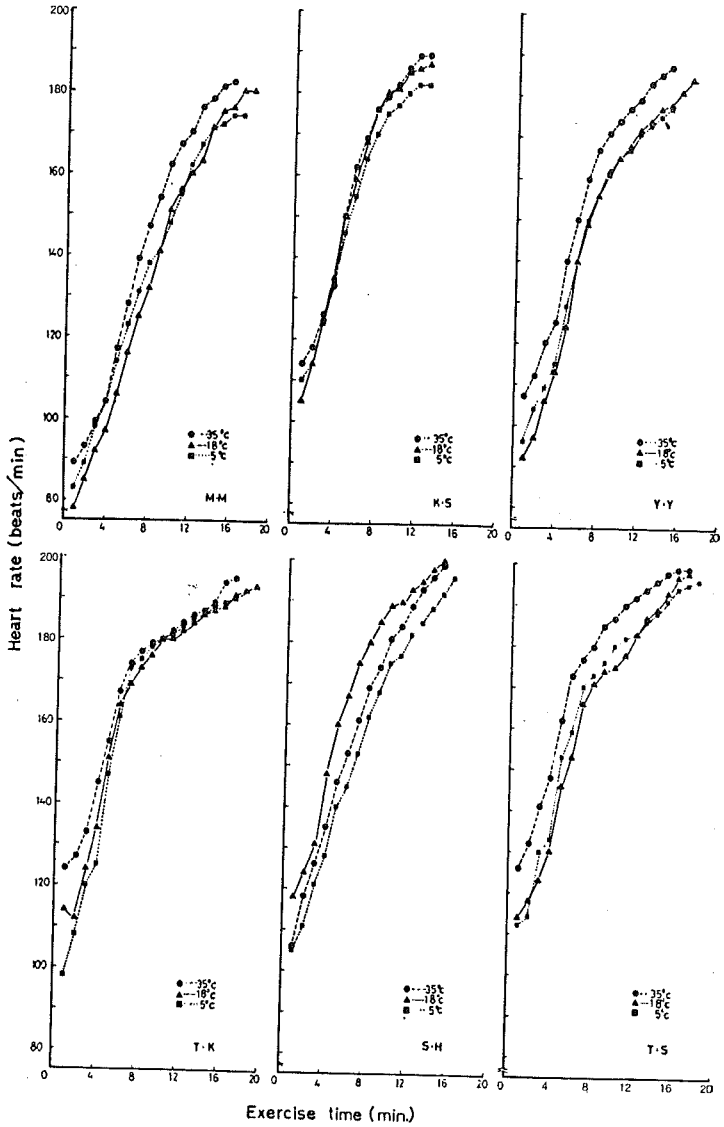
図2・3は、環境温35°C、18°Cおよび5°Cにおける各被検者の最大運動中の心拍数と酸素摂取量の変化を示したものである。また表2は、環境温35°C、18°Cおよび5°Cにおける各被検者の最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2 \max$)、体重1 kg 当りの最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2 \max/W$)、最高心拍数 (HR max) および最大毎分換気量 ($\dot{V}E \max$) を示したものである。また表3の1と2は、環境温5°Cと35°Cおよび18°Cにおける運動中の酸素摂取量と心拍数を、同一時間帯について比較し、その差を百分率で示し、平均したものである。

Physiological parameters in maximal
Table 2. exercise at different room temperature

Subjects	Temp. (°C)	$\dot{V}O_2 \max$ (l/min)	$\dot{V}O_2 \max/W$ (ml/kg·min)	H·R max (beats/min)	$\dot{V}E \max$ (l/min.)
M . M	35	3.11	53.3	182	108.99
	18	3.27	56.4	180	104.77
	5	3.17	54.4	174	95.72
K . S	35	3.14	52.3	189	101.27
	18	3.18	53.0	187	100.11
	5	3.28	53.8	182	101.83
Y . Y	35	3.13	50.5	187	103.04
	18	3.37	53.9	184	95.14
	5	3.32	53.3	177	98.60
T . K	35	4.02	57.4	195	131.16
	18	4.44	63.9	193	134.84
	5	3.89	55.6	192	113.56
S . H	35	3.95	65.3	199	109.67
	18	3.53	59.1	200	96.89
	5	3.49	59.5	196	101.66
T . S	35	3.67	51.1	199	98.39
	18	3.86	61.0	198	89.96
	5	4.03	63.3	196	100.59

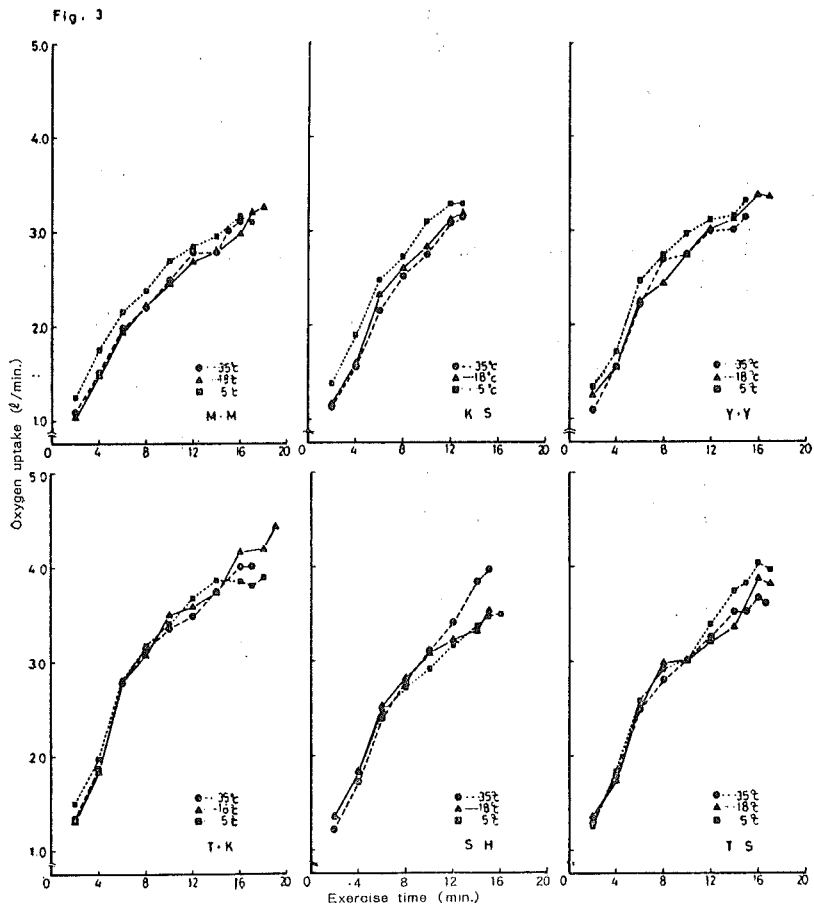
心拍数と酸素摂取量の関係

Fig. 2



であり、表3の3と4は、各環境温下の最大酸素摂取量と最大心拍数の差を百分率で示したものである。

図2・3で示したように、酸素摂取量と心拍数は運動強度の増加と共にほぼ直線的に増加しているが、環境温の違いにより運動中の酸素摂取量と毎分心拍数は異なっていた。すなわち、酸素摂取量は5名の被検者において5°C時が他の2条件に比べて平均4~5%高い傾向を示したのに対し、5°Cにおける毎分心拍数は、35°Cの時に比べ平均約5%低い値であった。(表3)



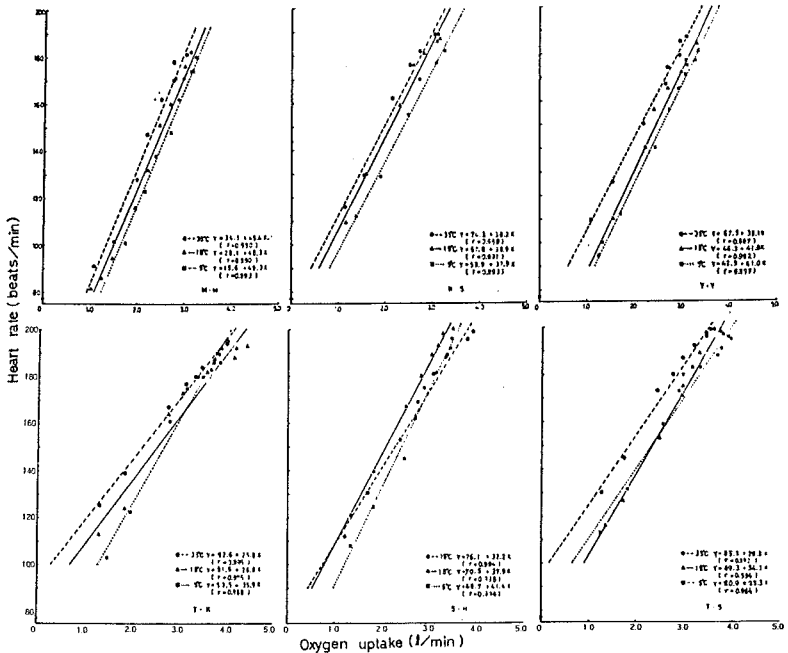
心拍数と酸素摂取量の関係

Average difference in heart rate and oxygen uptake
Table 3. between cold and hot or comfortable room temperature

		M . M	K . S	Y . Y	T . K	S . H	T . S	Mean	
1	$\dot{V}O_2$	5°C→35°C	-7.6	-11.2	-7.9	-2.0	+2.9	-4.2	-5.0
		5°C→18°C	-8.1	-8.6	-6.9	-1.1	+1.9	-2.3	-4.2
2	H·R	5°C→35°C	+5.2	+2.9	+7.1	+5.3	+4.2	+6.0	+5.1
		5°C→18°C	-2.4	+1.6	-1.1	+1.6	+10.0	-0.9	+1.5
3	$\dot{V}O_2$ max.	5°C→35°C	-1.9	-4.3	-5.7	+3.3	+13.2	-8.9	-0.7
		5°C→18°C	+3.2	-3.0	+1.5	+14.1	+1.1	-4.2	+2.1
4	H·R max.	5°C→35°C	+4.6	+3.8	+5.7	+1.6	+1.5	+1.5	+3.1
		5°C→18°C	+3.4	+2.7	+4.0	+0.5	+2.0	+1.0	+2.3

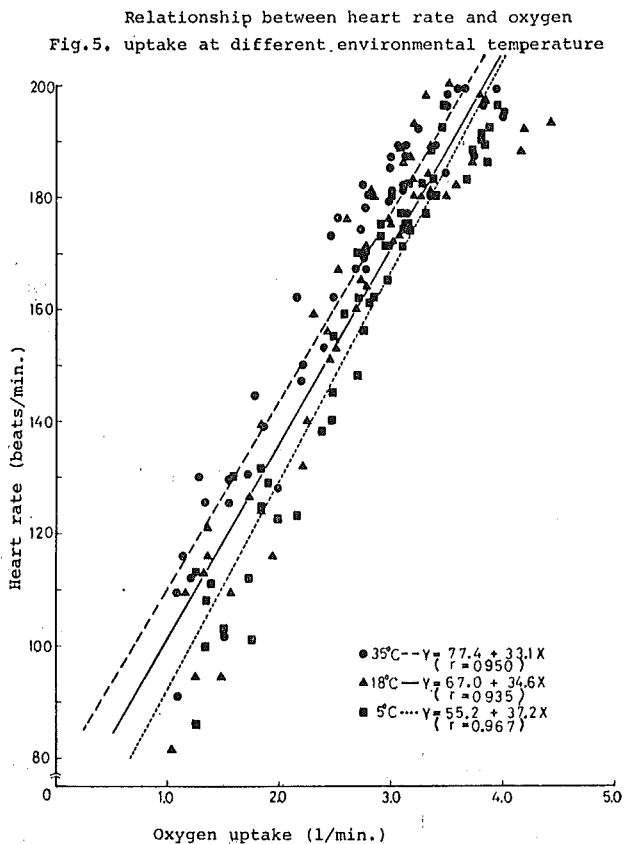
環境温 35°C, 18°C および 5°C における最大酸素摂取量の平均と標準偏差はそれぞれ 3.40±0.43 l/分, 3.47±0.40 l/分 および 3.48±0.33 l/分となり, 環境温の違いによる有意な差は認められなかった。一方,

Relationship between heart rate and oxygen
Fig. 4, uptake for each subjects at 35°C, 18°C and 5°C.



最高心拍数は全被検者とも環境温 5 °C に比べ、18 °C と 35 °C の時は 0.5 ~ 5.7 % 高い値を示した。

図 4 は、各被検者の室温 35 °C、18 °C、5 °C における毎分心拍数と酸素摂取量の関係を示したものであるが、各被検者の各環境温における両者の相関係数は、0.998 ~ 0.976 であった。さらに被検者全員の環境温 35 °C、18 °C および 5 °C における毎分心拍数 (Y) と酸素摂取量 (X) との関係は、 $Y = 77.4 + 33.1X$ ($r = 0.950$)、 $Y = 67.0 + 34.6X$ ($r = 0.935$)、



心拍数と酸素摂取量の関係

$Y = 55.2 + 37.2X$ ($r = 0.967$) であった。つまり、各環境温毎の毎分心拍数と酸素摂取量から求めた回帰直線は、 18°C を基準にして、環境温が低い場合 (5°C) には右へ、逆に高い場合には左方へ、ほぼ平行に近い形で移動し、そして心拍数からみてそれぞれの回帰直線の切片には、約10回/分の差が認められた。(図5)

IV. 考 察

安静時において、環境温が低くなると心拍数は低下し、酸素摂取量は増加する。また環境温が高くなれば、特に心拍数の増加が著しくなることもよく知られている (Scholander ら⁴ 1958, Raven ら⁵ 1970, Wells ら⁶ 1977)。本実験では、 35°C 、 18°C および 5°C の三種の環境温度条件下で、トレッドミルを用いて、漸増負荷法により被検者がオールアウトに至るまで運動を行わせ、運動中の毎分心拍数と酸素摂取量を測定した。その結果、運動中の毎分心拍数は、被検者により多少ばらつきが認められるものの、環境温が高くなるにつれて上昇する傾向が見られ、環境温 5°C の最高心拍数は、 18°C と 35°C に比べ有意に低かった。これらの結果は、これまでの報告⁷ と一致するものである。

一方、最大下作業時における酸素摂取量については、環境温の変化によって影響をうけるか否かについて、必ずしも一致した報告はなされていない。例えば、Consolazio ら⁸ (1963) は、室温 21°C 、 29°C 、 37.7°C における最大下作業中の酸素摂取量を測定し、 21°C に比べ 29°C と 37.7°C 時の酸素摂取量は高かったと報告している。Hori ら⁹ (1976) も、自転車エルゴメーターを用いて最大下作業 ($600\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{分}$) を行かせた時に、室温 23°C に比べ 30°C 時の酸素摂取量が有意に高い値を示したと述べている。しかし Dill ら¹⁰ (1931) は、室温 34°C と 43°C で、Rowell ら¹¹ (1966) は 12°C と 25°C で最大下作業を行かせた時の酸素摂取量を比較し、これらの環境温の違いでは酸素摂取量に有意な差は認められなかったと報告している。本実験では、運動中の同一時間における酸素摂取量を比較した時、環境温 5°C の時の方が他の二条件に比べて、平均して多

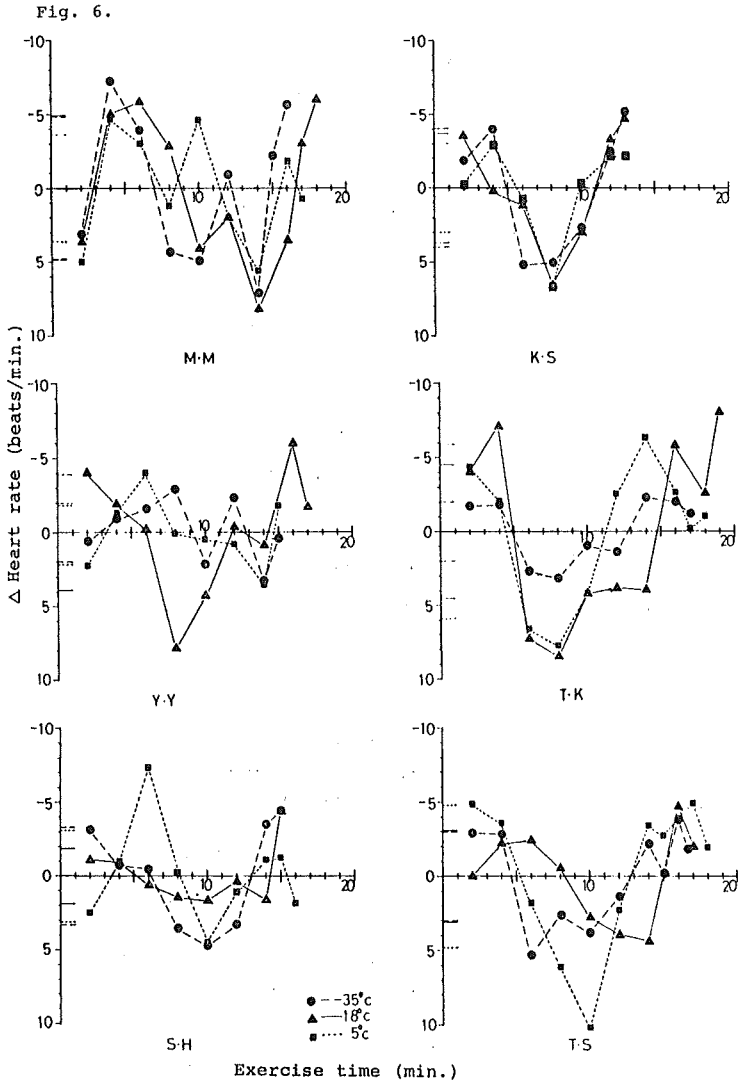
少高い値を示したが、図3で示したように各条件間に明らかな差があるとは思われない。さらに本実験では、それぞれの環境温度条件で測定したオールアウト時の酸素摂取量を最大酸素摂取量と仮定したが、環境温の違いによる最大酸素摂取量には、有意な差は認められなかった。この結果は、43.3°C、46°C、35°Cの各環境温に急性暴露して測定した最大酸素摂取量が、平常温下の最大酸素摂取量とほぼ同じであったというRowellら¹² (1965)、Pirnayら¹³ (1970)、Adamsら¹⁴ (1975)の報告と一致するものである。従って、最高心拍数が、環境温18°Cに比べて、35°Cでは高く、5°Cでは低かったにもかかわらず、最大酸素摂取量がほぼ同じであったという結果は、環境温の変化が、一回拍出量に影響を及ぼすものと考えられる。(Williamsら¹⁵ 1962, Mcardleら¹⁶ 1976)

本実験では、各被検者とも、それぞれの環境温度条件において毎分心拍数と酸素摂取量の間に極めて密接な関係が認められた。(図4)そして各条件下の回帰直線の傾斜は、ほぼ同じであったが、しかし回帰直線から見た環境温5°Cと35°Cの同一酸素摂取量に対する毎分心拍数を差は、およそ15~20回/分となった。これらの結果は、年令19~24才の某大学陸上競技部に所属する男子学生を対象に、環境温10°C、20°C、30°Cでオールアウトに至る運動を行った時の毎分心拍数とパーセント最大酸素摂取量の関係を観察した黒田ら¹⁷ (1973)の報告と基本的に一致するものであり、心拍数と酸素摂取量の関係を利用して、心拍数から酸素摂取量を推測する場合には、環境温の違いを考慮する必要があることを示唆するものである。

一方、最大酸素摂取量を測定するために、被検者に最大運動を行わせるが、時には測定が非常に困難な場合もある。そのような場合には、心拍数と酸素摂取量の回帰直線から最大酸素摂取量を推測することが可能であるが、運動中の時間経過と共に増加する心拍数と酸素摂取量の増加率が異なるため、当然回帰式から求めた予測値と実測値が一致しない場合がある。

図6は運動中に得られた酸素摂取量を、各環境温度別に求めた回帰直線に代入して求めた心拍数(予測値)と実測値との誤差を表わしたものであるが、このばらつきにはほぼ一定の傾向が見られた。特にオールアウト時には、実測値に比べ予測値が低く、この傾向は5°Cに比べ18°Cと35°Cでは顕著であった。従ってÅstrandら¹⁸の言うように、回帰直線から最

心拍数と酸素摂取量の関係



高心拍数を代入して求められる最大酸素摂取量（予測値）は、実測値より低い値を示し、結果として最大酸素摂取量を過小評価することになると思われる。このことから、心拍数と酸素摂取量は運動に伴い同一比率的に増加するが、オールアウトに近づくと、酸素摂取量の増加比率が相対的に高まると考えられる。これは、Wyndham ら¹⁹（1959）、Williams ら¹⁵（1962）によっても報告されていることであり、その偏倚が、低温下に比べ高温下で大きいことは、各環境温度別に求めた回帰直線が異なることと、最高心拍数に差が見られたこと、最大酸素摂取量に有意な差が見られなかったことから予想されたことである。従って運動中の最高心拍数を、各環境温度別に求めた回帰直線に代入して得られた最大酸素摂取量（予測値）を実測値と比較することにより、この偏倚による誤差はおおよそ5%以内であろうと思われる。

以上の結果から、心拍数から酸素摂取量（あるいは最大酸素摂取量）を間接的に予測する場合には、少なくとも温度条件を考慮しなければならないことが示唆された。

この実験は、名古屋大学総合保健体育科学センターの人工気候室で行ったが、松井秀治センター長はじめ、実験に御協力いただいた諸先生方に心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1 Åstrand, P. O., T. E. Cuddy, B. Saltin and J. Stenberg: Cardiac output during submaximal and maximal work, *J. Appl. Physiol.* 19 (2) 268-274, 1964.
- 2 P. V. Carpovich and W. E. Sinning 著, 石河利寛訳「運動の生理学」ベースボールマガジン社, 1976, pp. 306~308.
- 3 D. R. Lamb: *Physiology of Exercise*, Macmillan Publishing Co., Inc. 1978, pp. 269-286.
- 4 Scholander, P. F., H. T. Hammel, K. L. Anderson and Y. Løfving: Metabolic acclimatization to cold in man, *J. Appl. Physiol.* 12, 1-8, 1958.
- 5 Raven, P. B., I. Niki, T. E. Dahms and S. M. Horvath: Compensatory cardiovascular responses during an environmental cold stress, *J. Appl. Physiol.* 29, 417-421, 1970.
- 6 Wells, C. L. and A. M. Paolone: Metabolic responses to exercise in three thermal environments, *Aviat. Space Environ. Med.* 48, 989-

心拍数と酸素摂取量の関係

- 993, 1977.
- 7 加賀谷潤彦：第5章，運動を持続させる機能，石井喜八他著「運動生理学概論」大修館書店，1975，pp. 176~185.
 - 8 Consolazio, C. F., L. R. O. Matoush, R. A. Nelson, J. B. Torres and G. J. Isaac : Environmental temperature and energy expenditures, *J. Appl. Physiol.* 18, 65-68, 1963.
 - 9 Hori, S., J. Tsujita and H. Yoshimura : Energy requirement of man during exercise in a hot environment and a comfortable environment, *J. Appl. Physiol. Soc. Jap.* 38, 507-509, 1976.
 - 10 Dill, D. B., H. T. Edwards, P. S. Bauer and E. J. Levenson : Physical performance in relation to external temperature, *Arbeitsphysiol.* 4, 508-518, 1931.
 - 11 Rowell, L. B., H. T. Edwards, R. A. Bruce, R. D. Conn and F. Kusumi : Reductions in cardiac output, central blood volume, and stroke volume with thermal stress in normal men during exercise, *J. Clin. Invest.* 45, 1801-1816, 1966.
 - 12 Rowell, L. B., J. R. Blackmon, R. H. Martin, J. A. Mazzarella and R. A. Bruce : Hepatic clearance of indocyanine green in man under thermal and exercise stress, *J. Appl. Physiol.* 20, 384-394, 1965.
 - 13 Pirnay, F., R. D. Eroanne and J. M. Petit : Maximal oxygen consumption in a hot environment, *J. Appl. Physiol.* 28, 642-645, 1970.
 - 14 Adams, W. C., R. H. Fox, A. J. Fry and I. C. Macdonald : Thermal regulation during marathon running in cold, moderate, and hot environments, *J. Appl. Physiol.* 38, 1030-1037, 1975.
 - 15 Williams, C. G., G. A. G. Bredell, C. H. Wyndham, N. B. Strydom, J. F. Morrison, J. Peter, P. W. Fleming and J. S. Ward : Circulatory and Metabolic reactions to work in heat, *J. Appl. Physiol.* 17, 625-628, 1962.
 - 16 Mcardle, W. D., J. R. Magel, G. R. Lesmes and G. S. Pechar : Metabolic and cardiovascular adjustments to work in air and water at 18, 25 and 33°C, *J. Appl. Physiol.* 40, 85-90, 1976.
 - 17 黒田善雄，塚起克己，雨宮輝也，鈴木洋二，伊藤静夫：3温度（10°C，20°C，30°C）条件下における運動中の心拍数と% $\dot{V}O_2 \text{ max}$ との関係，日本体育協会スポーツ科学研究報告，1973.
 - 18 P. O. Åstrand and K. Rodahl，朝日奈一雄監訳「運動生理学」大修館書店，1976，pp. 254~278.
 - 19 Wyndham, C. H., N. B. Strydom, J. S. Maritz, J. F. Morison, J. Peter and Z. U. Potyietter : Maximum oxygen intake and maximum heart rate during strenuous work, *J. Appl. Physiol.* 14, 927-936, 1959.