

歩行時エネルギー消費量推定ノモグラムの作成

山崎 昌廣¹⁾, 鳥井 正史²⁾, 山元 総勝³⁾, 佐々木 隆¹⁾

1) 熊本大学医学部遺伝医学研究施設生体制御部門

2) 九州工業大学工学部一般教育体育学教室

3) 熊本リハビリテーション学院

Nomogram for Predicting Energy Expenditure during Treadmill Walking

Masahiro YAMASAKI¹⁾, Masafumi TORII²⁾, Soukatu YAMAMOTO³⁾ and Takashi SASAKI¹⁾1) *Department of Bioregulation, Institute for Medical Genetics, Kumamoto University Medical School, Kumamoto 862, Japan*2) *Department of Health and Physical Education, Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu 804, Japan*3) *Kumamoto College of Rehabilitation, Oyama 862, Japan*

Three equations were derived to predict the energy expenditure of adult males walking on the treadmill. The estimation from walking speed is the most satisfactory with a mean deviation of 0.73% (SD=±8.97%) from values actually observed; the equation is

$$E/BW = 0.0006732V^2 - 0.0549V + 3.42$$

where E, BW and V stand for energy expenditure (kcal/hr), body weight (kg) and walking speed (m/min), respectively. Other two equations in terms of heart rate are as follows:

$$E/BW = 6.39W/R - 4.15$$

$$E/BW = 7.08R_1/R - 4.78$$

where R, W and R₁ are heart rates expressed in beats/min before walk, during walk and for the first 30 sec after walk, respectively. The mean variability of the values obtained from the equations is within 4% of those actually observed. By using the last equation, the energy expenditure can be easily predicted without measuring the walking speed and the heart rate during walk, although the accuracy of the prediction is a little inferior to the other equations. Based on these prediction equations, three nomograms were developed not only to predict the energy expenditure of walking but also to preset the treadmill speed to obtain a given energy expenditure.

Key words: Nomogram, Energy expenditure, Walking, Heart rate

緒 言

歩行時のエネルギー消費量あるいは酸素消費量推定式はこれまでいくつか考案されている (Givoni & Goldman, 1971; McDonald, 1961; 杉山ら, 1981; Pearce et al., 1983; 志野ら, 1983). その多くは歩行速度や傾斜角度から推定するものである。一方, 心拍数が

運動強度とほぼ直線関係にあることやその測定が比較的容易なことから, 心拍数からエネルギー消費量を推定する方法も提唱されている (Datta & Ramanathan, 1969; 桑田と杉浦, 1970; Malhotra et al., 1963; 沼尻, 1974; 佐藤ら, 1977, 1978). ただし心拍数による推定は歩行運動に限られたものではなく, 運動一般を

対象としたものが多い。このように歩行運動中のエネルギー消費量を推定するための式の数は少なくないが、歩行速度あるいは心拍数を用いるいずれの場合も実際の応用からすると推定式が繁雑であるという欠点がある。それに対し、推定式をノモグラムとして表わすと計算方法がはるかに容易となり、より実用的と思われる。

これまで歩行時のエネルギー消費量を歩行速度から推定するノモグラムは作成されてはいるが (Workman & Armstrong, 1964), 本邦人を対象としたものではなく、また心拍数を用いたものについてはまだ作成されていない。

本研究の目的は歩行速度および心拍数を用いて、簡潔なエネルギー消費量推定ノモグラムを作成することである。心拍数は歩行中だけでなく歩行後の測定も行った。歩行後の心拍数が利用できるならば、心電計といった装置を必要とせず触診法による測定でも十分だからである。

歩行にはトレッドミルを用いた。トレッドミルは臨床負荷試験装置としても広く採用されているため、エネルギー消費量推定ノモグラムの作成は臨床応用上にとっても有効であろう。

方法

健康な成人男子20名を被験者とし、毎分40mから120mまで10m毎の9段階の各速度について7分間のトレッドミル歩行を課した。被験者にまず椅坐位で約20分間の安静を保たせた後、立位にて2分間の心拍数を記録した。その後7分間の歩行を行なわせ、最後の2分間の心拍数記録と、同時に呼気ガスを採集し酸素摂取量および二酸化炭素排出量を求めた。

歩行終了後被験者は再び立位姿勢を保ち、1分30秒間の心拍数を記録した。この手順を各速度毎に繰り返す。歩行速度の実施順序は無作為に設定した。心拍数はテレメータによる胸部誘導心電図記録から求めた。呼気ガス採集はダグラスバッグ法を用い、換気量は湿式ガスメータにより、またO₂とCO₂の濃度は労研式ガス分析装置により求めた。エネルギー消費量(kcal)は得られた呼吸商を非蛋白呼吸商に代用することにより、酸素1リッターに対する熱量を決定して算出した(佐々木, 1975)。

被験者には極端な肥満者あるいは細長者は含まれて

おらず、身体的特徴は次のとおりである(範囲と括弧内は平均値); 年齢18-37(24.7)歳, 身長163-178(169.4)cm, 体重52-74(62)kg, 除脂肪体重47-63(55)kg, 体表面積1.61-1.90(1.72)m². 除脂肪体重は高崎ら(1979)の方法により身体4箇所(胸部, 上腕背部, 肩甲骨下部および腸稜部)の皮脂厚から体密度を求め, Brožek et al. (1963)の式から算出した。体表面積は高比良(1925)の式から求めた。

実験は4月上旬より6月下旬にわたり, その時の実験室内気温は25±3℃, 湿度は40-60%であった。各被験者は1日に3ないし4種目の測定とし, 食後少なくとも3時間経過後に実験を開始した。

結果

エネルギー消費量は歩行速度が増加するにつれて指数関数的に増大し, 特に毎分80mを越えるとその増加率は大きくなった(図1上)。また標準偏差も速度増加に伴い大きくなっている。エネルギー消費量を推定する一般式を求めるためには, できるだけこの個人差を表わす標準偏差を小さくする必要がある。通常使われ

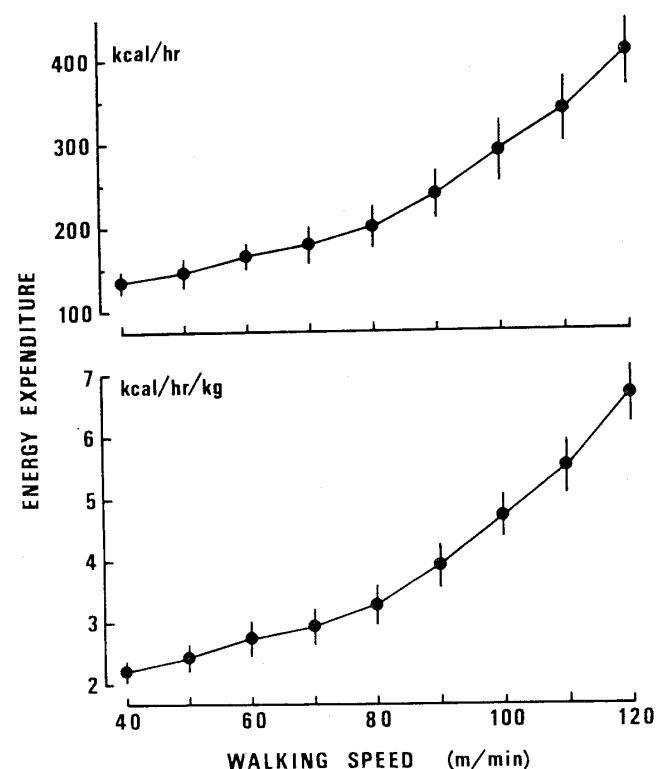


Fig. 1. Relationship between walking speed and energy expenditure(upper) and energy expenditure per kilogram of body weight(lower).

ている手法はエネルギー消費量を体重あるいは体表面積あたりに換算する方法である。その一例として歩行速度と体重 1 kg あたりのエネルギー消費量との関係を図 1 の下図に示している。

エネルギー消費量を標準化するのに最適な指標を検索するために、身長、体重、除脂肪体重および体表面積を用いて比較検討した。図 2 の上図は速度 40m/min の時の標準偏差を規準として、各速度についてその変化率を算出したものである。図から明らかのように体重と除脂肪体重の成績がよい。さらに、変動係数についても検討したが、ここでも体重と除脂肪体重はよい成績を示している (図 2 下)。

次に実際に推定式を求めて、その妥当性について検討してみた。歩行速度とエネルギー消費量との関係は

図 1 からわかるように二次式に回帰することができ、表 1 はその二次の回帰式を相関係数および実測値からの偏差と共に示している。ここでも体重と除脂肪体重の成績がよく、相関係数および偏差についても両者は大差ない結果となっている。

標準化としては体重あるいは除脂肪体重のどちらを用いようがほぼ同じ結果が得られるわけである。しかし測定の簡便性からすると体重の方がはるかに容易である。従って、歩行速度からの推定式は体重あたりで表わした次の式を採用することにした。

$$E/BW = 0.000673V^2 - 0.0549V + 3.42 \dots \dots \dots (1)$$

ただし、E, BW および V はそれぞれエネルギー消費量 (kcal/hr), 体重 (kg) および歩行速度 (m/min) である。

次に心拍数とエネルギー消費量の関係であるが、表 2 に両者の相関係数をまとめて示してある。歩行中の心拍数がエネルギー消費量と高い相関を示すことは当然として、歩行終了直後 30 秒間の心拍数は相関係数 0.7 とまだ高い値を示している。しかし、次の 30 秒になる

Table 1 Prediction equations, coefficient correlations (r), mean percentage and its SD of deviation of estimated energy expenditure from actual value. V stands for the walking speed(m/min).

Prediction Equation	r	Deviation(%)	
		Mean	SD
$E = 0.041250V^2 - 3.3506V + 209.17$	0.955	-1.20	11.36
$E/Ht = 0.024375V^2 - 1.9822V + 123.62$	0.957	-1.09	10.76
$E/BW = 0.000673V^2 - 0.0549V + 3.42$	0.974	-0.73	8.97
$E/LBM = 0.000738V^2 - 0.0601V + 3.75$	0.973	-0.81	9.10
$E/SA = 0.023977V^2 - 1.9519V + 121.74$	0.970	-0.79	9.19

Table 2 Correlation coefficients between heart rate and energy expenditure. W, R1, R2, R3, and R stand for heart rates expressed in beats/min for each experimental period. W: walking, R1, R2 and R3: first, second and third 30 sec after walking, respectively, and R: standing before walking.

	W	R1	R2	R3	W/R	R1/R
E	0.811	0.702	0.481	0.416	0.900	0.864
E/Ht	0.806	0.695	0.473	0.407	0.909	0.872
E/BW	0.810	0.702	0.479	0.424	0.913	0.878
E/LBM	0.810	0.701	0.478	0.417	0.913	0.879
E/SA	0.810	0.700	0.477	0.415	0.914	0.879

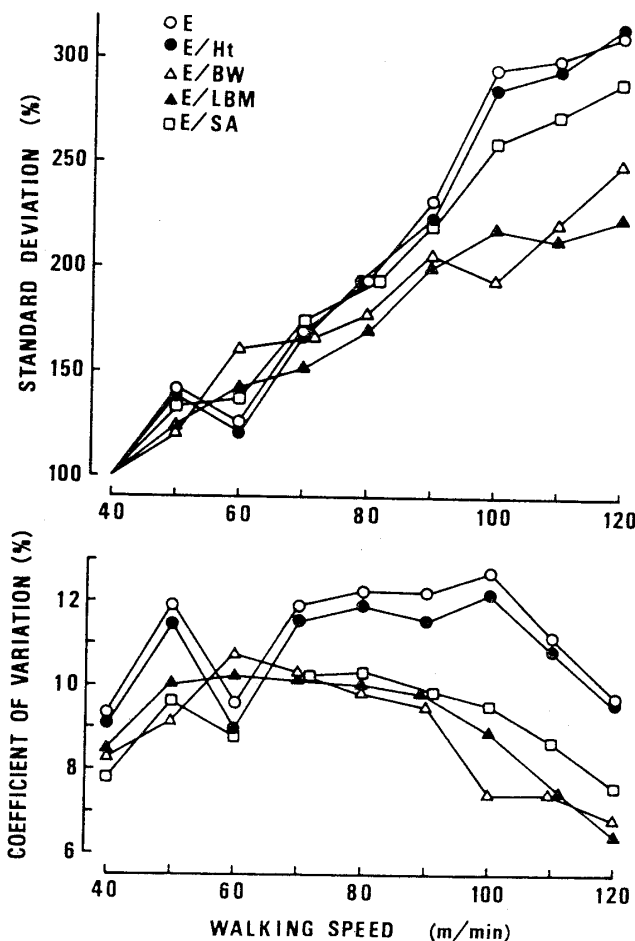


Fig. 2 Changes in standard deviation and coefficient of variation of various standardized energy expenditures with increasing speed. E: energy expenditure(kcal/hr), Ht: height(cm), BW: body weight (kg), LBM: lean body mass(kg), SA: surface area (m²).

と急に相関は悪くなっている。一方、歩行中および歩行終了直後の心拍数を歩行前の心拍数で除した心拍数増加率との関係では相関係数の著しい改善が観察された。

そこで、まず歩行中の心拍数増加率についてエネルギー消費量推定式を求めてみると、表3で示した結果が得られた。相関係数および実測値からの偏差からすると、体重、除脂肪体重および体表面積のいずれを用いようがほぼ同じであることを示している。そうなることや簡便性の点から体重を採用することになる。

Table 3 Prediction equations, mean percentage and its SD of deviation from actual value. The energy expenditures were estimated from heart rates expressed in beats/min during(W) and before(R) walking.

Prediction Equation	r	Deviation(%)	
		Mean	SD
E = 397.37W/R - 261.36	0.900	-3.10	17.07
E/Ht = 236.26W/R - 156.41	0.909	-2.87	16.50
E/BW = 6.39W/R - 4.15	0.913	-2.75	15.90
E/LBM = 7.07W/R - 4.62	0.913	-2.76	15.95
E/SA = 230.51W/R - 151.54	0.914	-2.70	15.76

表4は同じ分析を歩行終了直後30秒間の心拍数について行なったものである。ここでも同じ理由から体重を用いた式を採用することにした。

$$E/BW = 6.39W/R - 4.15 \dots\dots\dots(2)$$

$$E/BW = 7.08R1/R - 4.78 \dots\dots\dots(3)$$

ただし W, R および R1はそれぞれ歩行中、歩行前および歩行終了直後30秒間の心拍数であって、いずれの単位も拍/分である。

以上の(1), (2)および(3)式について作成したノモグラムを図3および図4に示している。図3の左端の軸は

Table 4 Prediction equations, mean percentage and its SD of deviation from actual value. The energy expenditures were estimated from heart rates expressed in beats/min after(R1) and before(R) walking.

Prediction Equation	r	Deviation(%)	
		Mean	SD
E = 438.01R1/R - 297.50	0.864	-4.23	21.40
E/Ht = 260.08R1/R - 177.48	0.872	-4.04	20.98
E/BW = 7.08R1/R - 4.78	0.878	-3.83	19.83
E/LBM = 7.81R1/R - 5.29	0.879	-3.80	20.07
E/SA = 254.42R1/R - 172.91	0.879	-3.77	20.02

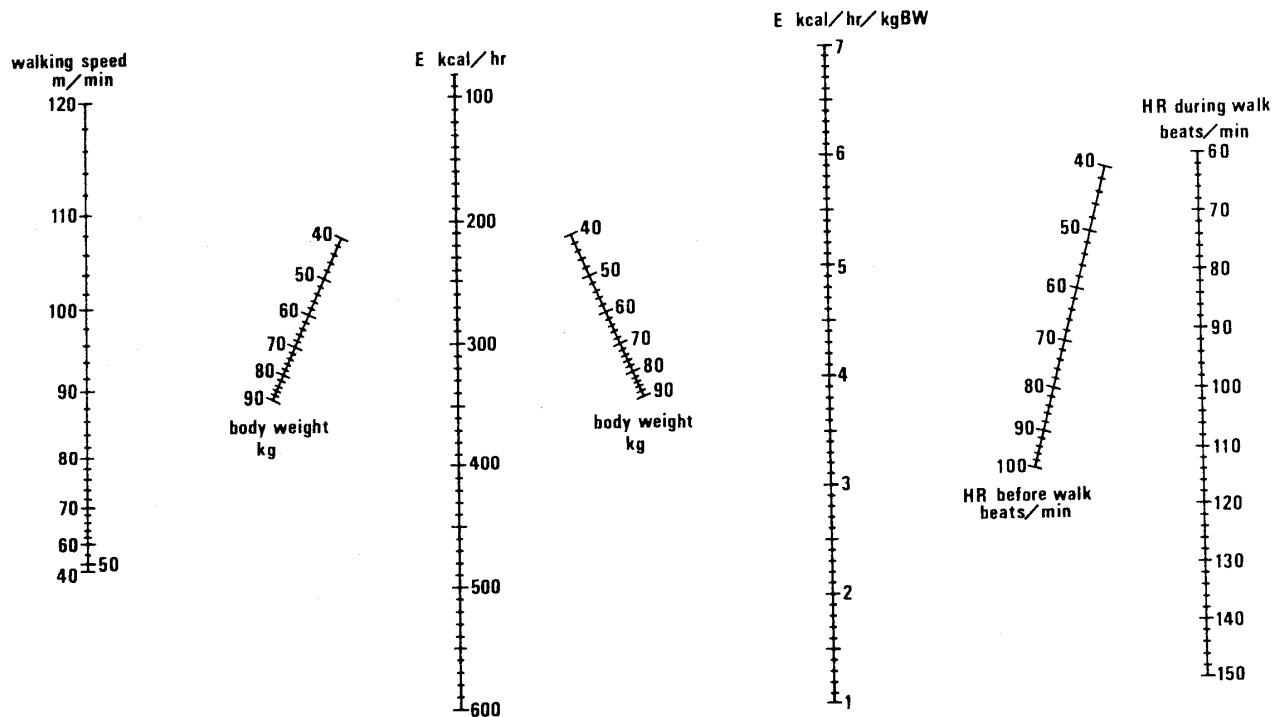


Fig. 3 Nomogram to calculate the energy expenditure in treadmill walking from the walking speed or from the heart rate before and during walking.

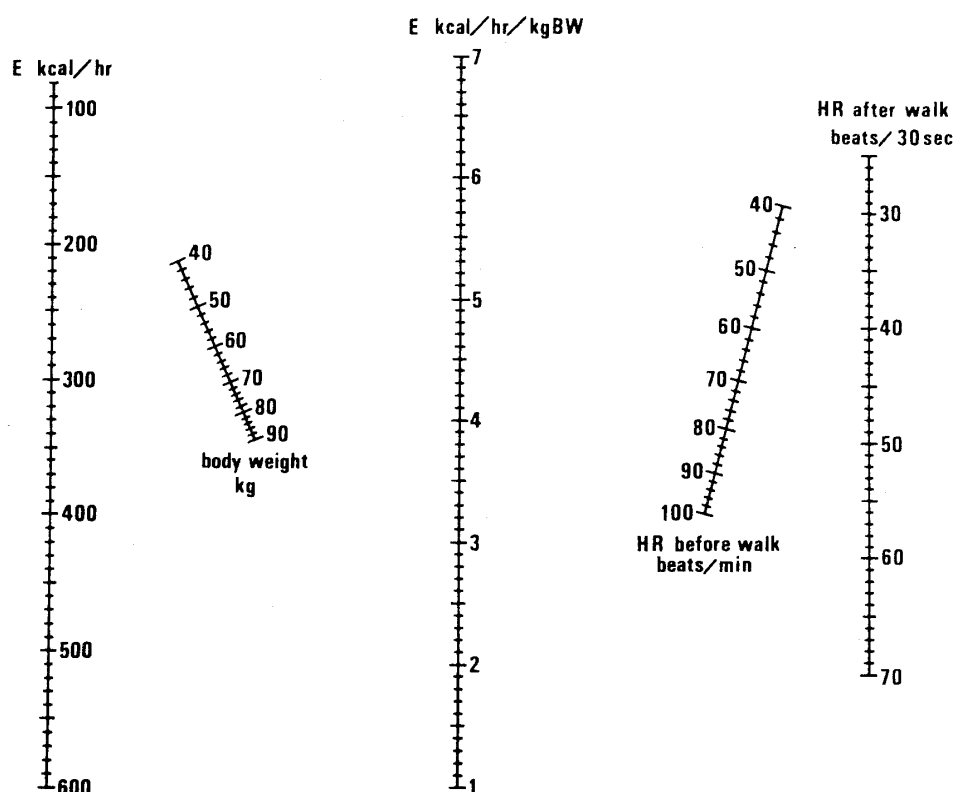


Fig. 4 Nomogram to calculate the energy expenditure in treadmill walking from the heart rate before and after walking. The nomogram should be used when both the walking speed and the heart rate during walking are unknown.

歩行速度であって、体重と結ぶと総エネルギー消費量が得られる。さらに中央の体重の軸と結ぶと体重 1 kg あたりのエネルギー消費量が求まる。右側は心拍数を利用したもので、右端の軸は歩行中の、次の斜めになった軸は歩行前の心拍数である。この両者を結ぶと体重 1 kg あたりのエネルギー消費量が得られる。さらに総エネルギー消費量は中央の体重の軸と結ぶと得ることができる。図 4 は歩行後の心拍数を用いたノモグラムであって、右端の軸は歩行終了直後 30 秒間の心拍数である。これを歩行前の心拍数と結ぶと体重 1 kg あたりのエネルギー消費量が得られる。さらに体重と結ぶと総エネルギー消費量が求まる。

考 察

これまで歩行速度からエネルギー消費量を推定する式はいくつか発表されているが、ノモグラムを作成したものは少ない。Workman & Armstrong(1964)はノモグラムを作成した数少ない例である。このノモグラムは標準化の指標として身長と体重を用いたものであって、多少複雑なものとなっている。

本研究では、体重のみによる標準化でも十分満足で

Table 5 Comparison between predicted energy expenditures by the present study and by other investigators. The energy expenditures were calculated as the subject weighing 60 kg. *Energy expenditures were calculated as 5 kcal per one liter of oxygen intake.

		Walking Speed(m/min)				
		40	60	80	100	120
McDonald ⁹⁾	(kcal/hr)	168	209	271	364	507
	(%)	4	17	16	12	11
Givoni & Goldman ⁴⁾	(kcal/hr)	161	187	250	338	449
	(%)	0	5	7	4	-2
Sugiyama et al. ¹⁸⁾	(kcal/hr)	192	198	258	373	543
	(%)	19	11	11	14	19
Pearce et al. ^{10)*}	(kcal/hr)	151	173	220	292	388
	(%)	-6	-3	-6	-11	-15
Present study	(kcal/hr)	161	178	234	326	457
	(%)	0	0	0	0	0

きる結果が得られた。これまで発表されているエネルギー消費量推定式をみても、体重による標準化を採用

しているものが多い。そこで、これまで発表されている推定式と本研究で求められた推定式との比較を行なってみた(表5)。ここでは被験者の体重が60kgとして計算を行なった。本研究結果と最も良く一致したものはGivoni & Goldman(1971)の式である。この式は自らのデータにそれまで発表された文献からのデータも含めて算出されている。一方、その他の推定式は過大評価するもの過小評価するものなど様々であるが、推定値が20%以上も違うものはなかった。

心拍数からのエネルギー消費量推定は一般的な運動を目的としたものが多く、歩行運動に限られてはいない(Datta & Ramanathan, 1969; 桑田と杉浦, 1970; Malhotra et al., 1963; 沼尻, 1974; 佐藤ら, 1977, 1978)。しかしながら、運動の様式の違いにより心拍数と酸素消費量の関係が異なるという指摘もあり(山地, 1981)、ここで作成したノモグラムは歩行運動に限定することにする。

運動中の心拍数が運動中のエネルギー消費量を推定するのに用いられるのは、両者に高い相関があるからである。しかし、運動中の心拍数を測定するには心電計といった器具が必要となり、簡単には測定ができない。運動終了後の心拍数ならば触診法で測定できるので、この値を利用できるならば大変都合がいいことになる。本研究において歩行中だけでなく歩行後の心拍数を測定した目的もここにある。

運動直後の心拍数を用いて運動中の生理的負担を評価する方法はすでにその有効性が指摘されている(Bruha & Maxfield, 1962; Maxfield, 1964; 佐藤ら, 1980, 1981)。運動後の心拍数を利用する場合にはその測定時間の長さの決定が問題になってくる。簡潔なノモグラムを作成するという目的からいって、心拍数が安静値に戻るまで長い時間測定することは意味がない。佐藤ら(1981)は実際的な見地から、作業中の負担を評価するのに、回復期の測定は3分間という短い時間で十分であることを指摘している。今回はさらに短く、歩行終了後から30秒毎に3期に分けて分析を行なった。その結果歩行終了後最初の30秒の心拍数はエネルギー消費量との相関が高く、十分利用できることが確認された(表2)。

運動時心拍数の安静時からの増加率と酸素消費量には高い相関を示すことが指摘されている。心拍数の測定回数の増加、安静の同定の微妙さから増加率の採用

に疑問とする意見もあるが(佐藤ら, 1977)、酸素消費量の推定にも用いられていて(桑田と杉浦, 1970)、その有効性が示唆されている。今回、歩行中および歩行後とも心拍数増加率を用いたのは、高い相関が得られたのが第一の理由であるが、増加率を用いると個人差の減少(沼尻, 1974)および気温の影響の減少(Sato, 1973)などの利点も示されているからである。運動前の心拍数測定においては、運動に先立って心拍数の上昇が観察されることから、この影響のない状態で測定するように留意すべきである。

ここで作成したノモグラムの使用に際しては、歩行速度が分かっているならば歩行速度を利用すべきである。この方法による推定成績が最も優れているからである。歩行速度が不明なときは歩行中の心拍数を利用する。さらに歩行中の心拍数測定ができないときは、歩行後の心拍数を利用する。この方法では推定成績は劣るが、触診法による心拍数計測が可能であって、実用的という長所がある。

これらのノモグラムの適用は速度からの推定では実験範囲内とし、外挿による推定を避けた。実際の歩行はこの速度範囲内に収まるものであるし、またこの速度範囲外のものを含むと推定式も変わりうるものが考えられるからである。このノモグラムにはもう一つの利用方法がある。それは目的とするエネルギー消費量を得るための歩行速度を設定できることであって、目的とするエネルギー消費量と体重とを結び歩行速度が求まる。

心拍数からの推定は環境温25℃前後において適用できるものとする。心拍数の増加率を用いたことにより温度による影響を軽減したとしても、その裏付けはまだなされていない。温熱環境に加えて、性差、年齢差などといった要素は歩行速度および心拍数とエネルギー消費量との関係を変えうるものであり、これらは今後検討を加えるべき課題である。

文 献

- Brouha, L. and Maxfield, M.E., 1962: Practical evaluation of strain in muscular work and heat exposure by heart rate recovery curves. *Ergonomics*, 5, 87-92.
- Brožek, J., Grande, F., Anderson, J.T. and Key, A., 1963: Densitometric analysis of body composi-

- tion: revision of some quantitative assumptions. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 110, 113-140.
- Datta, S.R. and Ramanathan, N.L., 1969: Energy expenditure in work predicted from heart rate and pulmonary ventilation. *J. Appl. Physiol.*, 26, 297-302.
- Givoni, B. and Goldman, R.F., 1971: Predicting metabolic energy cost. *J. Appl. Physiol.*, 30, 429-433.
- 桑田百代, 杉浦徳美, 1970: 家事労働の負担について. エネルギー消費量と心拍数増加率との関係. *家政誌*, 21, 406-411.
- Malhotra, M.S., Gupta, J.S. and Rai, R.M., 1963: Pulse count as a measure of energy expenditure. *J. Appl. Physiol.* 18, 994-996.
- Maxfield, M.E., 1964: Use of Heart rate for evaluating cardiac strain during training in women. *J. Appl. Physiol.*, 19, 1139-1144.
- McDonald, I., 1961: Statistical studies of recorded energy expenditure in man. *Nutr. Abstr. Rev.*, 31, 739-762.
- 沼尻幸吉, 1974: エネルギー代謝と心拍数相関について. *労働科学*, 50, 79-88.
- Pearce, M.E., Cunningham, D.A., Donner, A.P., Rechnitzer, P.A., Fullerton, G. M. and Howard. J. H., 1983: Energy cost of treadmill and floor walking at self-selected paces. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 52, 115-119.
- 佐々木隆, 1975: 第9編 代謝と栄養. 問田直幹・内園耕二編, 新生理学(下巻) 第4版, 医学書院, 東京, 467-503.
- 佐藤陽彦, 福場良之, 井上馨, 安高悟, 1981: 回復期の生理的指標による動的筋作業の生理的負担の評価 2. 作業強度および作業時間を変えた場合. *人間工学*, 17, 137-142.
- 佐藤陽彦, 山崎和彦, 安河内朗, 原田一, 1980: 回復期の生理的指標による動的筋作業の生理的負担の評価 1. 作業の種類および強度を変えた場合. *人間工学*, 16, 83-87.
- 佐藤方彦, 中嶋幸恵, 石橋徹, 1978: 心拍数あるいは肺換気量による酸素摂取量の推定について. *人類誌*, 86, 11-17.
- Sato, M., Sakate, T., Ishii, M. and Katsuura, T., 1973: Relation between step test and body weight in children. *J. Human Ergol.*, 2, 109-118.
- 佐藤方彦, 佐藤陽彦, 勝浦哲夫, 津田隆志, 原田一, 山崎和彦, 安河内朗, 1977: 心拍数による酸素摂取量の推定. *人類誌*, 85, 23-28.
- 志野友義, 都築実紀, 近藤照男, 外畑巖, 1983: 临床上使用される treadmill 運動負荷試験における酸素摂取率の予測. *名医学*, 105, 69-77.
- 杉山允宏, 桐島日出夫, 平谷昭彦, 大八木達也, 1981: 歩行のエネルギー消費. *人間工学*, 17, 259-265.
- 高比良英男, 1925: 日本人新陳代謝論, 其二, 日本人体表面積の測定並びに之を表す式に就て. *栄養研報*, 1, 61.
- 高崎裕治, 鎌滝昭男, 山崎昌広, 1979: 日本人青年男子の体密度推定式. *人類誌*, 87, 439-444.
- Workman, J.M. and Armstrong, B.W., 1964: A nomogram for predicting treadmill-walking oxygen consumption. *J. Appl. Physiol.*, 19, 150-151.
- 山地啓司, 1981: 運動処方のための心拍数の科学. 初版, 運動様式, 大修館書店, 東京, 46-48.

(1988年4月20日受付)