

ランニングの経済性に影響をおよぼす要因

山地啓司*

Effects of Various Changing Factors on Running Economy

Keiji YAMAJI*

Summary

A distance running performance is decided upon a magnitude of energy production in a body and how to make profitably use of the energy produced to enhance the power of propulsion of running. The former is maximal aerobic power ($\dot{V}O_{2max}$) and relative maximal steady state oxygen consumption ($\% \dot{V}O_{2max}$), and the latter is oxygen consumption ($\dot{V}O_2$) at a given submaximal running velocity (running economy). Running economy is remarkably affected by various factors; (1) anatomical factors (2) physiological factors (3) biomechanical factors (4) psychological factors (5) environmental factors (6) others (shoes and circadian rhythm etc.). It was concluded that following factors played an important part in determining running economy, by judging synthetically from numerous investigations associated with factors which effected on running economy reported up to now. (1) Reduction of impact at a forefoot touch down and leg muscle damage during the support phase due to (a) decrease a body mass with a less %fat, (b) taking lightshoes with moderate cushion, and (c) decrease vertical oscillation of the centre of mass. (2) Longer stride length with a less shock due to (a) taller body height with longer leg length, (b) most rate of I type fibres (slow-twitch) and IIa type fibres (fast-twitch), (c) moderate a frictional resistance between running surface and shoes, and (d) running surface with moderate solidity and elasticity. (3) An efficient interaction of cardio-respiratory organs and working muscle when total energy was produced, and much saving and supplying carbohydrate at the working muscles. (4) more positive mood state with relaxation during running. (5) better weather conditions (temperature, hummed, air pressure etc.) without air and wind resistance. (6) better body condition without fatigue.

Key words: running economy, running speed, oxygen intake, changing factors

I. 緒言

全身持久性の performance は、1500m 走や3000m 障害走のような4~10分間程度の競技では酸素負債量や最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) によって、また5000m 走からフル・マラソンまでのより長い距離の

競技では $\dot{V}O_{2max}$ や酸素摂取水準 ($\% \dot{V}O_{2max}$)、あるいは $\% \dot{V}O_{2max}$ と密接な関係を有する無酸素的作業閾値 (AT) 等の単位時間当たりのエネルギー出力の大きさとその維持能力によって決定される。その一方で、エネルギーの出力の大きさだけでなく、

*富山大学教育学部 (〒930 富山市五福3190)

*Faculty of Education, Toyama University, 3190, Gofuku, Toyama, 930 Japan

体内で産生されたエネルギーがいかに有効にランニングの推進力を高めるために利用されるかという経済性 (economy) も重要な問題である。たとえば, Joyner⁷⁸⁾ は, マラソンのランニング・スピード ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) は $\dot{V}_{O_2\text{max}}$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) $\times$ $\% \dot{V}_{O_2\text{max}}$ at LA $\times$ running economy ($\dot{V}_{O_2}$; $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) の三要素によって決まるとした。この三要素の中でも $\dot{V}_{O_2\text{max}}$ と running economy は endurance performance を決定する最も重要な要素である。しかし, この両者には必ずしも直線関係が認められるとは限らない。特に, エリート・ランナーのほぼ $\dot{V}_{O_2\text{max}}$ が等しいランナー間では, $\dot{V}_{O_2\text{max}}$ よりも running economy が performance を決定する重要な因子である^{24, 101, 118, 126, 143)}。これまで running の performance と $\dot{V}_{O_2\text{max}}$ および running economy に関する幾つかの論文が紹介されている。

例えば, Daniels³⁷⁾ は, $\dot{V}_{O_2\text{max}}$ が $73.3 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ と $60.4 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ の二人の女子ランナーを例に挙げ, 3000m 走のベスト記録が 9 分 06 秒, 9 分 07 秒とほぼ等しい原因が一定ランニング・スピードにおける $\dot{V}_{O_2}$ の 17.6% の相違によるとみなした。また, Costill and Winrow³²⁾ は逆にほぼ同じ $\dot{V}_{O_2\text{max}}$ を持つ中高年者の約 13 分のマラソンの競技記録の差が約 10% の running economy の差によるものとみなした。

このように全身持久性を競う競技の performance はエネルギーの出力の大きさとそのエネルギーがいかに有効に利用するかによって決定される。本稿はランニング・スピードに対する $\dot{V}_{O_2}$ の変動要因をより総合的・多角的に検討し, 今後さらに running economy を改善するための方策, 留意点等を探る指針を得ることを目的とした。

II. running economy とは

1915 年世界で最初に身体作業中の酸素摂取量 (oxygen consumption) を測定したのはコペンハーゲン大学の Lindhard⁸⁹⁾ である。続いて, ストックホルムのカロリンスカ・スポーツ研究所の Liljestrand and Stenstrom⁸⁸⁾ が測定した。しかし, 身体活動の強度とエネルギー消費量との関係を理論化し, 体系化したのはイギリスの A.V. Hill⁶⁵⁾ である。特に, 彼の著書 “Muscular Activity” はエネルギー代謝に関する運動生理学の最初の教科書的存在として今日でも広く愛読されている。Hill and Lupton⁶⁷⁾ は,

時速 10.9km, 12.1km および 16.0km のランニング・スピードと $\dot{V}_{O_2}$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) との間に定常状態が認められ, その際のランニング・スピードと $\dot{V}_{O_2}$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) との間に直線関係が存在することを認めた。その後, 1950 年代に入って $\dot{V}_{O_2}$ とランニング・スピードの直線関係を Henry⁶³⁾ が再確認し, Balke¹⁰⁾ によって実証され, Cooper²⁷⁾, Daniels et al³⁹⁾ によって一般化された。さらに, 近年に至って, Cavanagh and Kram²¹⁾, Cavanagh and Williams²³⁾, Daniels³⁷⁾ 等が economy という言葉が持久的能力の評価のために有効であり, ランニングの効率を示す一つの生理学的指標として位置づけられるとした。たとえば, Daniels³⁷⁾ は, 効率 (Efficiency) という言葉は外的仕事を成すのに要したエネルギー量と体内で消費した全エネルギー量との割合によって示されるものであり, 実際にランニング・スピードのようにある位置からある位置にからだを運ぶ仕事を示す場合には, “efficient” とか “efficiency” という言葉よりもむしろ “ランニング” の “economy” としてランニング・スピードと $\dot{V}_{O_2}$ との関係を示すことが適切であるとした。さらに, この際用いられる requirement, cost, oxygen cost, gross energy cost, aerobic demand 等の言葉はかならずしも aerobic と anaerobic metabolism の両者の合計を表すものではない。少なくとも本稿ではランニング・スピードに対する $\dot{V}_{O_2}$ は aerobic demand を意味し, ランニングの economy を示すことにする。

ランニング・スピードと $\dot{V}_{O_2}$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) との間に直線関係が存在するが, そこには必ずからランニング・スピードに上下限が存在する。Hill and Lupton⁶⁷⁾ は $260 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ が定常状態出現の上限とし, Margaria et al⁹³⁾ は $10 \sim 22 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, Léger and Mercier⁸⁷⁾ は $8 \sim 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ を, さらに, 競技選手では $8 \sim 25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ の範囲で直線関係が成り立つとしている。Hagan et al⁶⁰⁾ の男女 76 名を対象にした実験では $147 \sim 282 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ の範囲をあげている。このように $\dot{V}_{O_2}$ —running speed 直線の成立の範囲は体力や競技レベルによって異なる。そのような意味では相対比較である $\% \dot{V}_{O_2\text{max}}$ が好ましい。Daniels and Daniels³⁸⁾ は $\dot{V}_{O_2}$ —running speed 直線は上限を $90\% \dot{V}_{O_2\text{max}}$ とし, Bransford and Howley¹⁵⁾ は約 $50 \sim 90\% \dot{V}_{O_2\text{max}}$ の範囲で非鍛練者と鍛練者の比較を行っている。それに対して, Nagle et al¹⁰⁷⁾ は少なくとも $80\% \dot{V}_{O_2\text{max}}$ を越えるランニング・ス

ピードでは $\dot{V}_{O_2}$ は指数関数的に増加するとした。これらの報告を基にすると $80 \sim 90\% \dot{V}_{O_2\max}$ あたりに $\dot{V}_{O_2}$ —running speed 直線の成立の上限があるといえる。

なお、多くの論文では speed, velocity, pace が厳密に区別されて使われているとは限らない。そこで本稿ではランニング・スピードという言葉に統一した。また、スピードの表示も $m \cdot \min^{-1}$, $m \cdot s^{-1}$, $km \cdot h^{-1}$, $mile \cdot h^{-1}$ 等統一性がない。そこで、本稿では比較が容易なように $m \cdot \min^{-1}$ に努めて統一した。

Ⅲ. running economy の変動因子

ランニングのエネルギー ($\dot{V}_{O_2}$) は外的仕事をなすために必要なエネルギー (external energy: EE) とそのエネルギーの産生に必要なエネルギー (internal energy: IE) からなる。すなわち、ランニング・スピード (V ; $\min^{-1}$) とそれに必要な一分間のエネルギー消費量 ($\dot{V}_{O_2}$; $ml \cdot kg^{-1} \cdot \min^{-1}$) は、

$$\dot{V}_{O_2} = (EE + IE) V + K$$

となる。ただし、 K は定数。したがって、一定ランニング・スピード ($m \cdot \min^{-1}$) におけるエネルギー消費量 ($\dot{V}_{O_2}$) は個人の特性や種々の環境条件によって変動する。予想される変動因子を次にあげる。

A. 解剖学的要因

(1) 年齢 (2) 性 (3) 体型と体組成 (4) 筋繊維のタイプ

B. 生理学的要因

(1) $\dot{V}_{O_2\max}$ (2) トレーニング (3) エネルギー源 (炭水化物と脂肪) (4) 疲労

C. バイオメカニックス的要因

(1) 重心の上下動 (2) ストライドの長さとはステップの頻度

D. 環境的因子

(1) 空気抵抗 (2) 気温 (3) 走路 (4) シューズ

E. 心理学的要因

F. その他

(1) リラクセーション (2) 日差変動 (3) シューズ

A. 解剖学的要因

1. 年齢

子どもの一定ランニング・スピードに対する $\dot{V}_{O_2}$ は成人のそれに比べて高い^{6,42,83,84,130}。たとえば、6～10歳の少年を対象にした報告^{84,130} から導き出された $\dot{V}_{O_2}$ —speed は、

$$\dot{V}_{O_2} (ml \cdot kg^{-1} \cdot \min^{-1}) = 0.223 \times \text{speed} (m \cdot \min^{-1}) + 5.809 \dots\dots\dots (1)$$

であった (表1)。活動的な成人を対象にした報告^{15,123,130} (表2) から導き出された $\dot{V}_{O_2}$ —speed 直線は

$$\dot{V}_{O_2} (ml \cdot kg^{-1} \cdot \min^{-1}) = 0.189 \times \text{speed} (m \cdot \min^{-1}) + 3.740 \dots\dots\dots (2)$$

であった。さらに、我々が行った13歳から18歳までを対象にした少年の $\dot{V}_{O_2}$ —speed 直線は¹⁴⁴、

$$\dot{V}_{O_2} (ml \cdot kg^{-1} \cdot \min^{-1}) = 0.150 \times \text{speed} + 10.367 \dots\dots\dots (3)$$

であった (表1 参照)。仮に、共通のランニング・スピードである $200 m \cdot \min^{-1}$ と $250 m \cdot \min^{-1}$ における $\dot{V}_{O_2}$ を比較すると (1) 式が 50.4 と $61.6 ml \cdot kg^{-1} \cdot \min^{-1}$, (2) 式が 41.5 と $51.0 ml \cdot kg^{-1} \cdot \min^{-1}$, (3) 式が 44.4 と $51.9 ml \cdot kg^{-1} \cdot \min^{-1}$ となり、6～10歳の少年の $\dot{V}_{O_2}$ が成人に比べて約17%, ジュニアに比べて11.9～15.7% 高くなる。少年と成人との差約17%は Thorstensson¹³⁰ が報告した子どもと成人の差17～20%にほぼ一致する。また、Krahenbuhl et al⁸³ は、8歳の少年が $174 m \cdot \min^{-1}$ のランニング・スピードで走っている時の $\dot{V}_{O_2}$ ($ml \cdot kg^{-1} \cdot \min^{-1}$) が $45.5 ml \cdot kg^{-1} \cdot \min^{-1}$ と、同じスピードにおける中年者の40.2, 成人の非鍛練者の36.2, トラックのフィールド選手の35.3などに比べて13～29%高いと報告している。

なお、これまで報告されている $\dot{V}_{O_2}$ とランニング・スピードの回帰直線を、表3に男子ランナー、表4に女子ランナー、表5に男女混合を示した。

一定ランニング・スピードに対する子どもの高い $\dot{V}_{O_2}$ は身長や体重などの容量の差異に負うところが大きい。たとえば、Margaria et al⁹³ は、ランニングのエネルギー (E) は体重 (M) の $1/2$ とランニン

Table 1. Regression equations for the relation between $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) and running speed ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) on the treadmill in boy and girls.

Authors (yrs)	Subjects		Range of Running Speed ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Type of Exercise	$\dot{V}O_2 = a \times \text{speed} + b$	
	Characteristics	No.			a	b
Krahenbuhl et al (1979) ⁸³⁾	good running ability	10	134–174	T	0.227	5.562
	poor running ability (6–8 yrs old)	10	134–174	T	0.218	7.825
Thorstensson (1986) ¹³⁰⁾	boys (10 yrs old)	6	133–183	T	0.224	4.039
Yoshizawa et al (1990) ¹⁴⁵⁾	boys (5 yrs old)	12	160–210	G	0.19	11.04
山地 & 奥井 (1997) ¹⁴⁴⁾	good boy runners	40				
	good boy cross-country skiers	19	150–320	T	0.150	14.367
	good girl runners	26	120–260	T	0.186	6.952
	good girl cross-country skiers					

T : treadmill

0.215 $\pm$ 0.017 7.117 $\pm$ 3.043

Table 2. Regression equations for the relation between $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) and running speed ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) on the treadmill in untrained men.

Authors (yrs)	Subjects		Range of Running Speed ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Type of Exercise	$\dot{V}O_2 = a \times \text{Speed} + b$	
	Characteristics	No.			a	b
Shephard (1969) ¹²³⁾	normal men		80–147.5	T	0.179	7.582
Brasford & Howley (1977) ¹⁵⁾	untrained men	10	144–225	T	0.204	–0.510
Thorstensson (1986) ¹³⁰⁾	habitually active men	6	133–183	T	0.185	4.149

T : treadmill

0.189 $\pm$ 0.013 3.74 $\pm$ 4.061

グ・スピード (V) の二乗に正比例するとした。すなわち、体重の重い方がより多くのランニング・エネルギーを必要とする。そこで、体重の差を消去するために運動のエネルギー ($\dot{V}O_2$) は一般に体重当たり ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) で表されている。しかし、Léger and Mercier⁸⁷⁾ は、 $\dot{V}O_2$ を体重当たりで表すと体重の軽い者の方が重い者に比べて $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) を高く評価する傾向があるので、むしろ、 $\dot{V}O_2$ を体重の $2/3$ 乗当たり ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-2/3} \cdot \text{min}^{-1}$) で表すべきだと主張した。しかし、現実にはそれでも一定スピードにおける子どもの $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-2/3} \cdot \text{min}^{-1}$) は成人よりも大きい傾向を示す。

Davies⁴⁴⁾ は、体重の 5% に相当するジャケットを身につけた子どもの $\dot{V}O_2$ –speed と成人のそれとを比較した結果、スピードが高まるにつれて $\dot{V}O_2$ –speed 直線は徐々に成人の $\dot{V}O_2$ –speed 直線に近づくことを認めた。また、Thorstensson¹³⁰⁾ は、少年

が体重の 10% の負荷を身につけることによって、一定スピードの $\dot{V}O_2$ の成人との差が 17–20% あったものが約 12% にまで近づいた。さらに、同一ランニング・スピードでは、一ステップに要する $\dot{V}O_2$ が少年と成人との間にほとんど差がないことから、一分間のステップの頻度が両者の 12% の差を生んだものとみなした。この見解は Åstrand⁶⁾、Högberg⁶⁸⁾、Morgan et al¹⁰⁴⁾ がストライドの長さでステップの頻度がランニングの経済性に影響を与えるという見解に一致する。また、Bailey and Pate⁹⁾ は成人に比べて子どもの基礎代謝率が高いことや脂質の利用が高いことも一因とみなしている。

ランニングの economy は中高年になるにつれて低下する。その要因として、筋の弾性の減少、柔軟性の欠如、拮抗筋の弛緩の減退、%Fat の増加、ストライドの長さの短縮等が考えられている^{3,53,125)}。

2. 性

一定ランニング・スピードに対する男女の $\dot{V}O_2$

Table 3. Regression equations for the relation between $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) and running speed ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) on the treadmill in male runners.

Authors (yrs)	Subjects		Range of Running Speed ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Type of Exercise	$\dot{V}O_2 = a \times \text{Speed} + b$	
	Characteristics	No.			a	b
Costill & Fox (1969) ²⁹⁾	national ranked marathon runners	6	189–313	T	0.204	– 5.24
Pugh (1970) ¹¹⁹⁾	elite runners	9	133–358	G	0.219	– 4.012
				T	0.180	+ 4.052
Fox & Costill (1972) ⁵⁴⁾	marathon runners	9	208–304	T	0.232	–12.016
Costill et al (1973) ³⁰⁾	runners	16	215–325	T	0.252	–15.54
Daniels (1974) ³⁶⁾	J. Ryun	1	215–375	R	0.250	–16.70
Brasford & Howley (1977) ¹⁵⁾	trained runners	10	144–307	T	0.203	– 3.562
Dressendorfer (1979) ⁵⁰⁾	runners	5	180–330	R	0.173	+ 5.1
Conley & Krahenbuhl (1980) ²⁴⁾	runners	12	241–295	T	0.209	– 5.67
Conley et al (1981) ²⁵⁾	elite runners (before Tr)	1	241–295	T	0.213	– 4.109
	“ (after Tr)	1	“	T	0.260	–23.27
Morgan et al (1990) ¹⁰⁴⁾	distance runner	6	174–215	T	0.214	– 1.767
Helgerud et al (1990) ⁶²⁾	long distance runners	6		T	0.21	– 0.62
Weltman et al (1990) ¹³⁴⁾	runners	15	100–330	T	0.205	+ 3.85
Joyner (1991) ⁷⁸⁾	high running economy				0.204	– 9.019
	average running economy		241–295		0.209	– 5.513
	low running economy				0.216	– 4.498
Daniels, J. & Daniels, N. (1992) ³⁸⁾	elite runners	45	270–380		0.240	–16.094

T : treadmill, G : ground, R : road

0.216 $\pm$ 0.023 –6.368 $\pm$ 7.796**Table 4. Regression equations for the relation between $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) and running speed ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) on the treadmill in female runners.**

Authors (yrs)	Subjects		Range of Running Speed ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Type of Exercise	$\dot{V}O_2 = a \times \text{Speed} + b$	
	Characteristics	No.			a	b
Brasford & Howley (1977) ¹⁵⁾	trained runners	10	144–307	T	0.151	10.942
Helgerud et al (1990) ⁶²⁾	long distance runners	6		T	0.20	3.53
Daniels, J. & Daniels, N. (1992) ³⁸⁾	elite runners	20	250–333	T	0.212	– 7.555

T : treadmill

0.189 $\pm$ 0.027 2.985 $\pm$ 7.721

($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) には女子が男子よりも高い報告^{7,12,15,29,60,73,92)}と、男女に差がないという報告^{6,34,41,45,123)}とがある。唯一の例ではあるが、200名以上の被験者を対象にした Bruce et al¹⁶⁾の調査では逆に女子の running economy が男子よりも高いという報告がある。

Daniels J and Daniels N³⁸⁾は、アメリカ・オリンピック候補選手女子22名と男子45名について比較した結果、男子の身長・体重・ $\dot{V}O_{2\text{max}}$ は女子よりも大きく、一定ランニング・スピードにおける $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) は女子が男子よりも有意に高いことを認めた。また、Helgerud et al⁶²⁾は、

$\dot{V}O_{2\text{max}}$ がほぼ等しい男女各6名について、一定ランニング・スピードの時の生理学的応答を比較した結果、女子の $\dot{V}O_2$, HR, RQ, 血中乳酸が男子に比べて高く、女子の running economy が男子に比べて低い。そして、男女の身長や%Fatの差を無視すれば、男女の持久性の performance の違いが running economy によるものとみなした。

男女の running economy の相違は、女子が男子に比べヒップの幅が広いことや脚の長さが短いこと、結果的にストライドの長さが短いこと^{48,92,108,128)}や Wilmore et al¹³⁹⁾が指摘する女子ランナーのヒップや大腿部の脂肪が多いことが weight stress を与

Table 5. Regression equations for the relation between $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) and running speed ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) on the treadmill in male and female combines.

Items Authors (yrs)	Subjects		Range of Running Speed ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Type of Exercise	$\dot{V}O_2 = a \times \text{Speed} + b$	
	Characteristics	No.			a	b
ACSM (1975) ²⁾ Daniels et al (1977) ⁴¹⁾		F=10 M=10	147.8–288.2	T	0.184	5.242
					0.211	–5.29
Hagan et al (1980) ⁶⁰⁾		F=9 M=67		T	0.213	5.66
ACSM (1980) ²⁾ Davies (1980) ⁴⁴⁾					0.201	3.250
	athletic men	M=9	133–267	T	0.213	5.689
	active men	M=9				
		F=5				
Maughan & Leiper (1983) ⁹⁵⁾	elite and nonelite runners	M=18 F=10			0.151	9.415
Léger & Mercier (1984) ⁸⁷⁾					0.190	2.191
T : treadmill					0.195±0.022	3.737±4.585

えること、また、女子のヘモグロビン量が少ないこと⁷⁾等が原因として考えられる。

桜井¹²⁰⁾は、男女の形態的な相違と running economy について次のように解説している。

「骨盤（腰幅）が大きく、下肢が太く（重く）、しかも上半身は男性とほぼ相似形であるという女性特有の体型は、下半身と上半身の間の角運動量の相殺のために余計なエネルギーを消費せねばならず、ランニングにかならずしも有利とはいえない。さらに、ランニングのストライドの長さステップの頻度について、ランニングの力速度（a）、時間（t）、速度（v）との関係式を生物学的ディメンションからみると、ストライドの長さは下肢長に比例し、ステップの頻度は下肢長に反比例するので、走速度は下肢長（身長）には影響を受けない。しかし、筋力を無視して下肢の自由な振り子運動を考えると、ステップの頻度は下肢長の $\frac{1}{2}$ 乗に比例し、ストライドの長さは $\frac{1}{2}$ 乗に比例する。つまり、下肢長が長いほど有利となる。」

このように考えてくると、下肢長が長く、比較的体脂肪（%Fat）の少ない男性が女性よりもストライドを長くしたり、着地時の衝撃等を弱めたりするのに適しているので疲れにくく、それだけ running economy が高いと考えられる。

3. 体型と体組成

体重の重いことが一定ランニング・スピードの $\dot{V}O_2$ を高めることが知られている^{60,93,131,136,137)}。

それは、からだに重りを負荷することによって $\dot{V}O_2$ が高まることによっても証明される^{35,38)}。ただし、Cureton et al³⁵⁾によると、230 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ のトレッドミル走では体重の15%増の重りの負荷まで $\dot{V}O_2$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) はほとんど変化をみないという。

Burke and Brush¹⁷⁾は、競技生活で成功した女子ランナー（24～37歳）は同世代の者に比べて身長が高く、体重が軽いのが特徴であるとした。統計的にはマラソンの記録と身長との間にわずかな関係が認められ、 $W \cdot H^{-2}$ との間に有意な関係が認められる⁴⁹⁾。Van der Walt and Wyndham¹³¹⁾も身長や脚長が高く、長いことが running economy を高めるとしている。

一般に身長や体重が小さい者は大きい者に比べて四肢が占める割合が比較的大きく、一定ランニング・スピードの $\dot{V}O_2$ が大きくなる¹³⁷⁾。Myers and Steudel¹⁰⁶⁾はこの事実を証明するため、体幹（腰部）、大腿部、膝、足首の四か所に同じ重りをつけて走った。その結果、腰部に重りをつけた場合が他の脚部に重りをつけた場合よりも $\dot{V}O_2$ が小さいことが判った。また、Martin et al⁹⁴⁾は男子長距離ランナーを対象に大腿部と足部に同じ重さの負荷をつけた場合、足部の方が約2倍に近い $\dot{V}O_2$ の増加をみたことを報告した。さらに、足長が長いことはエリートランナーには economy にマイナスに作用する¹³⁶⁾。また、骨盤や肩幅が広いことが running economy に若

干の低下を与えることが報告されている^{79,120)}。その一方で Anderson と Tseh⁵⁾ は running economy とは無関係であると主張している。Burke and Brush¹⁷⁾ は、成功したランナーの特徴的な体型からランナーとしての理想の体型は、脚長でありながら下腿に比べて上腿が短いことであるとしている。この特徴的な体型は脚の重心を臀部に近づけ、それだけ弛緩期の慣性モーメントが小さくてすむとしている。一流の女子陸上長距離・マラソン・ランナーの %Fat は約 10% である^{29,142)}。一般に %Fat が 1% 増加することによって $\dot{V}_{O_2\max}$ が約 1% 減少する⁹⁰⁾。

Anderson³⁾ はランニングの economy がすぐれているランナーの体型の特徴として、①男子では平均あるいは平均値よりも身長が低く、女子では平均身長よりもわずかに高い、②中・外胚葉的体型、③低い %Fat、④脚が長い、⑤足長は平均よりも小さい、⑥骨盤が狭い、の 6 項目を挙げている。

4. 筋線維のタイプ

slow-twitch fibers (I タイプ) が多いランナーほど高い running economy が期待される^{14,79)}。一般に I タイプの筋線維の多いマラソンランナーは、マラソン・レース時のスピード以下では $\dot{V}_{O_2}$ が低いが、それ以上のランニング・スピードになるとむしろ中距離ランナーの方が $\dot{V}_{O_2}$ が低くなる傾向がある³⁸⁾。Williams and Cavanagh¹³⁷⁾ は 31 名の男子ランナーを good, medium, poor economy の 3 グループに分け、running economy と筋線維のタイプとの関係を調べた結果、有意な差を認めなかった ($p > 0.05$)。しかし、一定距離を走る際の $\dot{V}_{O_2}$ と fast-twitch fibers (II タイプ) の占める割合 (%) とが有意な反比例の関係を示した ($p < 0.01$)。これらの報告はより収縮速度に優れている fast-twitch fibers (IIa と IIb タイプ) の多い中距離ランナーではより速いスピードでのランニングにおいてより高い economy が保証されることを示唆している。この点についてはさらに研究を要するであろう。

B. 生理学的要因

1. $\dot{V}_{O_2\max}$

Pate et al¹¹⁴⁾ は $\dot{V}_{O_2\max}$ と $160\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ との間に負の相関関係を認めた。Pollock¹¹⁸⁾ は $\dot{V}_{O_2\max}$ と $270 \sim 324\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ の $\dot{V}_{O_2}$ との間では、エリート中距離ランナーの方がエリート・マラソン・ランナーよりも高い負の相関関係を認めている。しかし、山地と

奥井¹⁴⁴⁾ は $\dot{V}_{O_2\max}$ と一定ランニング・スピードでの $\dot{V}_{O_2}$ との間に相関関係を認めていない。

Bailey and Pate⁹⁾ は $\dot{V}_{O_2\max}$ と running economy との間に有意な相関関係が認められない理由として、 $\dot{V}_{O_2\max}$ が高いランナーは高い % $\dot{V}_{O_2\max}$ でトレーニングを行い、逆に $\dot{V}_{O_2\max}$ が低いランナーは低い % $\dot{V}_{O_2\max}$ でトレーニングする傾向があること、また、 $\dot{V}_{O_2\max}$ の高いランナーはエネルギー源としてグリコーゲンよりも脂肪をより利用すること等を挙げている。

2. トレーニング

a. 横断的研究

1930 年代に活躍したアメリカの D. Lash 選手は 5000m 走に 14 分 30 秒の世界新記録を樹立した。彼の $\dot{V}_{O_2\max}$ $5.351 \cdot \text{min}^{-1}$ ($81.4\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) は今日の世界のエリート・ランナーに比べても見劣りしない¹⁴²⁾。しかし、彼の記録は今日の世界記録に比べ 1 分 30 ～ 40 秒遅い記録となっている。これは一定ランニング・スピードにおける $\dot{V}_{O_2}$ 、すなわち、running economy の差に原因しているものとみなされている³⁰⁾。

running economy はトレーニング量と密接な関係を有する。たとえば、一週間の走行距離によって 60km, 60 ～ 100km, 100km 以上の 3 グループに分けると、約 $11 \sim 20\text{km} \cdot \text{k}^{-1}$ のランニング・スピードの範囲では走行距離の長いグループほど running economy が高い¹²¹⁾。

一般に、performance の高いランナーは低いランナーに比べて一定ランニング・スピードの $\dot{V}_{O_2}$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) が低い^{15,30,83)}。good ランナーは poor ランナーに比べて、脚が長く (64.2 と 61.9cm), %Fat が低く (17.5 と 19.7%), $\dot{V}_{O_2\max}$ が高い (53.5 と $49.3\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) ことが、一定スピードにおける $\dot{V}_{O_2}$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) を低くする。陸上競技選手ではレースの時のランニング・スピードにおけるランニングの経済性が重要な要素である。たとえば、マラソン・ランナーは自己のランニング・ペースあたりまで中距離ランナーよりも running economy が高く、それ以上のランニング・スピードではむしろ中距離ランナーの方が economy が高い³⁸⁾。Costill²⁸⁾ はマラソンのランニング・スピードの範囲ではマラソン・ランナーが中距離ランナーに比べ 5 ～ 10% 効率が高いという。また、ランナーは非ランナーに比べ同じランニング・スピー

ドの $\dot{V}_{O_2}$ が低い²⁵⁾。

b. 縦断的研究

Conley et al²⁵⁾ は31歳のエリート・ランナーを対象にして18週間のトレーニングを実施したところ、 $\dot{V}_{O_2\max}$ は70.2から77.6 ml $\cdot$ kg⁻¹ $\cdot$ min⁻¹に増加、一方%Fat は12週間後には7.1%が6.0%に減少し以後そのまま維持された。また、241 m $\cdot$ min⁻¹のランニング・スピードでは $\dot{V}_{O_2}$ が47.2から39.6 ml $\cdot$ kg⁻¹ $\cdot$ min⁻¹ (16%)、296 m では58.7から53.6 ml $\cdot$ kg⁻¹ $\cdot$ min⁻¹ (9%) の改善を認めた。このトレーニング実験では最初の10週間は持続走的トレーニング・プログラムを実施したところ、 $\dot{V}_{O_2\max}$ が約3%増加、続いてインターバル・トレーニングを5週間行うことによって $\dot{V}_{O_2\max}$ が約7%改善した。一般には、持続走的トレーニングよりもインターバル・トレーニングのような強度の高いトレーニングが $\dot{V}_{O_2\max}$ だけでなく、running economy も高めるのに有効であることが知られている^{25,26,126)}。

横断的研究では、6か月以上の長期にわたるランニング・トレーニングによって running economy は改善する^{102,103,113,129)} が、比較的短期(1~2か月)のランニング・トレーニングでは $\dot{V}_{O_2\max}$ に改善が認められても running economy に変化が認められない^{30,59,86,135)}。

最近、アメリカでは cross training が普及している。それに伴って、cross training のランニングへの影響に関する研究も行われている。たとえば、Pizza et al¹¹⁷⁾ は10日間のランニング・トレーニングと cross training の running economy への影響を調べた結果、cross training によってむしろ running economy が若干低下した。しかし、5 km の performance に影響を与えるまでに至っていない。この研究は running economy を改善するためには余りにも短期間であったのかも知れない。

その他、overtraining が running economy を低下させ⁸⁵⁾、10週間の detraining によって running economy に変化がないという報告⁷¹⁾ や3週間の detraining では改善が認められたという報告⁷⁹⁾ がある。

c. トレーニングによる running economy 改善の要因

トレーニングによる running economy の改善は、一定ランニング・スピードにみられる心拍数 (HR) や肺換気量 ($\dot{V}_E$) の減少、体温の上昇率等の減少

による⁹⁾。

Kitamura et al⁸¹⁾ によると中等度の作業では心筋の酸素消費量は全エネルギー消費量の1~2%に相当する。トレーニングによって一定ランニング・スピードのHRが低下し、SVが増加することから若干の $\dot{V}_{O_2}$ の低下が期待できる。Bailey and Pate⁹⁾ は、仮にトレーニングによってHRが20拍/分低下したとすると、心筋の100gに対して1.6 ml $\cdot$ min⁻¹の $\dot{V}_{O_2}$ の減少が期待でき、たとえば、心重量が500gとすると、心筋で8.0 ml $\cdot$ min⁻¹の $\dot{V}_{O_2}$ の節約が可能であると推定した。

またトレーニングによって一定ランニング・スピードにおける $\dot{V}_E$ は10~20 l $\cdot$ min⁻¹減少する¹⁴¹⁾。Milic-Emili et al⁹⁹⁾ の推定によると、作業中の $\dot{V}_E$ は全エネルギー消費量の約7~8%である。したがって、トレーニングによる $\dot{V}_E$ の低下によって1~2%の $\dot{V}_{O_2}$ の低下が期待できる。

d. テーパリング (tapering)

ランニングのレース前の休息が performance を高める上で重要であることを最初に記述したのは Stampfl¹²⁷⁾ である。この考えを世界に紹介したのはチェコのザトパック選手であるといわれている。それは、彼がレース数日前からけがのためにほとんどトレーニングができなかったにもかかわらず、世界最高記録で優勝したことによる¹¹¹⁾。ヒトはこれを“Zatopek 現象”と呼んだ。今日ではほとんどのランナーがレース1~2週間前からテーパリングを実施している。Galloway⁵⁷⁾ によると、マラソン・レースの2週間前には30%ほどトレーニングを減らし、レース前1週間の最初の4日間でいつもの週に走る全距離の30%、最後の3日間は毎日2~5 km 走るだけでよいとしている。

Houmard et al⁷²⁾ はレース前の7日間普段のトレーニング量の85%のインターバル・トレーニング (run taper) を実施したところ5 km の記録が3% ($p < 0.005$)、80% $\dot{V}_{O_2\max}$ 時のランニング・スピードにおける $\dot{V}_{O_2}$ に6% ($p < 0.01$) の改善を認めた。一方、普段のトレーニング量の70%でのより長期間(1~4週間)のテーパリングでは running economy の改善が認められなかった^{71,96)}。したがって、テーパリングの効果はトレーニングの期間が重要な点かも知れない。

Costill et al³¹⁾ は水泳選手に対する一般的なテーパリングを行うことによって3%の performance の

改善を認めた。それは筋パワーの向上に原因するとみなした。ランナーのテーピングによる running economy の改善に関する原因はまだ十分明らかにされていない。

3. エネルギー源

ランニング中体内で燃焼するのはグリコーゲン（炭水化物）と遊離脂肪酸（FFA；脂肪）である。仮に、グリコーゲンだけが燃焼したと仮定すると酸素 1 ℓ で 5.05Cal のエネルギーが、また、FFA が 100% 燃焼したと仮定すると同じ 1 ℓ で 4.69Cal のエネルギーが産生されることになる。安静時の燃焼率は FFA が 2，グリコーゲンが 1 の割合である。しかし、運動強度が高まるにつれてグリコーゲンの燃焼率が高まり、より効果的なエネルギー産生が促進される。

トレーニングによって、 $\dot{V}_E$ が減少することによって RQ が低下し、同一のランニング・スピードではグリコーゲンよりもむしろ FFA の燃焼率が高くなる。それだけ、ランニング中の $\dot{V}_{O_2}$ は高くなる傾向がある。見方を変えれば、FFA の燃焼率を高め、その分グリコーゲンを長く温存することによって、マラソンなどのより長いレースの後半からの勝負どころでより economy なランニングを可能にすることができる。

4. 疲労

Morgan et al¹⁰⁴⁾ は 30 分間の全力走の後 RQ のわずかな減少、すなわち、FFA の消費量の高まりを認め、激しい作業後ではわずかではあるが一定のランニング・スピードにおいて $\dot{V}_{O_2}$ の増加を認めた。ただし、その増加は有意な高まりを示すまでに至っていない。しかし、Daniels³⁷⁾、Cavanagh et al²⁰⁾ は疲労による running economy の低下を報告している。フル・マラソンのように 30km 以降徐々に体内のグリコーゲンが枯渇し、FFA の代謝の増加が生じる場合には running economy の低下は十分考えられる。

Costill et al³⁰⁾ は毎日 10 マイル走のタイムトライアルを実施することによって活動筋のグリコーゲン量が減少することを報告している。このような激しいトレーニングを連日実施することは 24 時間で十分グリコーゲンを回復することができないために、running economy は当然減少することが予想される。Morgan et al¹⁰⁴⁾ は exhaustive treadmill run によって 1～2 日間 RQ の低下を報告している。この際も running economy の低下が十分考えられる。し

かし、Martin et al⁹⁵⁾ は激しいトレーニングでも 1 日で RQ が回復することを報告しているように、被験者の持久能力やトレーニング強度・時間等によって RQ の回復力に差があるために一概に結論を下すことは難しいであろう。

最近の研究^{8,76)} では、85% $\dot{V}_{O_2max}$ 以上の運動を約 10 分以上続けることによって、呼吸筋の収縮力の低下や横隔膜の圧（transdiaphragmatic pressure）が 15～30% 低下することが報告されており、running economy の低下が十分予想される。

マラソンのような長時間にわたる激しいランニング時にみられる economy の低下は単に FFA の燃焼率の増加だけでなく、筋の損傷による影響も無視できない。たとえば、マラソン・レースでは腓腹筋の筋原繊維レベルでの収縮時の滑走抵抗の増大に伴う機械的変化や、ミトコンドリアにみられる巣状の腫脹（facal swelling）や、cystalline inclusion 等の病理学的変化が報告されている^{64,133)}。筋の損傷はランニング・スピードだけでなく走路の影響も強く受ける。たとえば、下り坂（downhill）走では平地（level）走や上り坂（uphill）走に比べ筋の損傷は顕著である^{47,52)}。Dick and Cavanagh⁴⁷⁾ の報告によると、40 分間の平地走の 10 分目と 40 分目の $\dot{V}_{O_2}$ 、EMG の積分値およびストライドの長さにそれぞれ差が認められないが、下り坂走では 10 分目と 40 分目の間に $\dot{V}_{O_2}$ で 10% の増加と EMG の積分値に 23% の増加を認めている。

近年バイオプシー法の普及によって、持久的運動と筋の損傷、疲労およびけがの原因等がより具体的に究明されてきた。また、筋力の低下、筋の硬度（soreness）や痛み、クレアチン・キナーゼの増加等の指標からも検討されてきている⁵²⁾。

C. バイオメカニックス的要因

ランナーのランニング・フォームは単に技術能力だけでなく体格や姿勢、総合的体力（筋力、スピード、パワー、持久性、柔軟性、リズム・バランス・タイミング等）、心理的状态まで総合された能力を顕在化させる。したがって、優れた指導者はランニング・フォームからそのランナーの長所・短所は勿論、その強化や補強の仕方、将来の記録の限界まで見通すことが可能である。しかし、それは主観（勘）の世界の領域で科学的とはいえない。

今日ランニング・フォームに関する運動学的研究

は高速度カメラやビデオによる撮影、解析によって数多く報告されている。しかし、先に述べたようにランニング・フォームは個人の総合された能力を表出するので、普遍化が難しい。たとえば、エリート・ランナーのフォームがすべてのランナーに最適とは限らない。そのため、今日のランニング・フォームに関するバイオメカニックス的研究から統一的理解を導き出すことが困難な部分も少なくない。

1. 重心の上下動

ランナーの着地時の支持脚の足底にかかる圧は体重の約2～3倍にも達する。仮に体重が50kgとすると100～150kgが約0.2秒の間片脚にかかることになる。長い距離のレースではわずかな足圧の差が脚筋に大きく影響を与えることから、いかに体重を軽くするかということと、技術的に着地や支持の際の足や脚への衝撃や負担をいかに少なくするかが重要な課題となる。Cavanagh et al²²⁾は同じランニング・スピードではエリート・ランナーの重心の上下動が準エリート・ランナーよりも少ないことを認めたが、Williams and Cavanagh¹³⁷⁾は、31名のランナーをrunning economyによって上中下の3つのグループに分け、ランニング中の上下動の相違を比較したところ、グループ間に有意な差を認めるまでに至らなかった。

また、腕を進行方向に対して左右に大きく振ることは体幹に横揺れが生じrunning economyを低下させる⁵⁾。

2. ストライドの長さステップの頻度

ランニングにおいてストライドの長さが長いことがより高速で走るのに有利であることを最初に明らかにしたのがHögborg⁶⁸⁾である。彼はランニング・スピードが約8～24km・h⁻¹まではステップの頻度よりもむしろストライドの長さを長くすることによってより速いランニングが可能になることを示唆した。その後多くの研究者によってそれが追認された^{6,48,92,104,108,128)}。

Hoshikawa et al⁶⁹⁾は、400m走のオリンピック選手はインターハイ出場選手に比べて一步のストライドが長く、その分ステップの頻度が少ないことを、また一定スピードにおけるEMGの積分値がperformanceに優れた選手ほど少ないことを明らかにした。

ランニングのトレーニングによってストライドの長さが長くなり、running economyも改善されるが、

この改善が明らかになるためには数カ月以上にわたるトレーニングが必要である^{4,36)}。しかし、大学陸上部の4か年にわたるトレーニングの報告の中に平均すると一定ランニング・スピードにおいてストライドが短くなったという報告もある¹¹⁾。ただ、この報告の個々のランナーについて考察してみると、ストライドが延びたランナーも少なくない。Morgan et al¹⁰⁵⁾の実験では、至適なストライドの長さよりも短か目のストライドでのトレーニングが長目のストライドでのトレーニングよりも結果的にrunning economyを改善したという。Anderson³⁾は、トレーニングにみられるrunning economyの改善がストライドの長さステップの頻度の効果的バランスとリズムや、弾性エネルギーの蓄積と再利用による活動筋の巧みな作用によるとみなした。

一般にストライドの長短は脚の長さや体重、柔軟な足首とキック力、股・膝・足関節の可動性、脚パワー、脚筋線維の種類と割合、腕振りや体幹の前傾角度等種々の要因に負う。個人の至適なストライドの長さステップの数はそれらの総合された能力に依存することから、一定のランニング・スピードでは意図的にストライドの長短を決めるよりは、自由に選択したストライドの長さが最もrunning economyが高い^{23,68,82)}。ストライドの長さは脚の長さによっても大きく影響される。たとえば、Shields¹²²⁾は至適なストライドの長さが左右の脚の長さの和の約80%であるとした。その一方で、長距離ランナーをrunning economyからみて有意な差が認められる3つのグループにわけて調査した結果、四肢の長さや体重とrunning economyとの間に関係がないという報告もある¹³⁷⁾。むしろ、体幹の前傾角度は最もeconomicalなグループが5.9°、中程度と最もpoorなグループがそれぞれ3.3°と2.4°であることから、約5～6°の前傾がrunning economyに最適とみなした^{75,137)}。

Williams and Cavanagh¹³⁷⁾は、最も経済的なランニング・フォームは前方にスウィングされたかかとが振りもどされながら衝撃の少ない着地を行い、支持脚の膝が安定し上下動が少なく、キックの際大地と足底の角度が狭く、素早いキックが行われることであるとしている。Anderson³⁾はrunning economyに関連したバイオメカニックス的要因として、①無意識に選択したストライドの長さ、②重心の上下動が少ないこと、③前方に振り出された脚の膝の角度

が大きいこと, ④キックの際足首の角速度が素早く, 可動範囲が狭いこと, ⑤腕の振りが適当であること, ⑥グランドの反作用のピークが低いこと, ⑦横平面に対する肩の素早いローテーション, ⑧左右いずれかの肩と臀部の振幅角度が大きいこと等を挙げている。要約すると, ストライドの長さが長く, 重心の上下動は小さく, 上体は適度なリズムとバランスを保つということになる。

D. 環境的因子

1. 空気抵抗

古くは A.V. Hill⁶⁶⁾ がランニングに要する全エネルギー消費量の 3～5% が空気抵抗のために使われるエネルギー量と計算した。Pugh¹¹⁹⁾ はトラック走 (シンダーあるいは全天候型) とトレッドミル走の同一ランニング・スピードに対する $\dot{V}_{O_2}$ の相違が空気抵抗に要する $\dot{V}_{O_2}$ の差と仮定した。そして $\dot{V}_{O_2}$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) とランニング・スピード (V ; $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) との間に,

$$\text{トラック走} \quad \dot{V}_{O_2} = 3.656V - 3.99 \quad \cdots (4)$$

$$\text{トレッドミル走} \quad \dot{V}_{O_2} = 2.979V + 4.245 \quad \cdots (5)$$

の関係式を導き出した。

たとえば, 時速 20km で走った場合, トラック走の $\dot{V}_{O_2}$ は $69.1 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, トレッドミル走は $63.8 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ となり, その差の $5.3 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ が空気抵抗に要するエネルギー量となる。Pugh¹¹⁹⁾ は式 (4) (5) から空気抵抗に要するエネルギー量 ($\Delta \dot{V}_{O_2}$) が

$$\Delta \dot{V}_{O_2} (1 \cdot \text{min}) = 0.002V^3 (\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}) \quad \cdots (6)$$

によって導き出されるとした。ただし, 空気抵抗は進行方向全面の体表面積 (A_p) と密接な関係があることから, A_p を 0.478 m^2 と仮定した話である。

Bassett et al¹¹⁾ は $136 \sim 286 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ の, また McMiken and Daniels⁹⁸⁾ は $180 \sim 260 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ の範囲のランニング・スピードまではトラック走とトレッドミル走の $\dot{V}_{O_2}$ の間に有意な差を認めていないが, Pugh¹¹⁹⁾ の式 (6) から計算すると, $260 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ の際の空気抵抗に要する $\dot{V}_{O_2}$ は $0.1591 \cdot \text{min}^{-1}$ になる。一方, Daniels et al⁴¹⁾ は $250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上のランニング・スピードから空気抵抗の影響が $\dot{V}_{O_2}$ に現れるとしている。これらの報告は空気抵抗が顕著に出現する変移点が $250 \sim 260 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ あたりに存在

することを示唆している。

2000～2300m の高所では $\dot{V}_E$ の増加にもかかわらず空気抵抗の減少にともなって running economy が若干良くなる報告^{40,61)} とほとんど変化がないという報告¹⁾ とがある。

2. 温熱調節

気温の変化に対する生理学的応答は温度の高低と曝露時間の長短, 作業強度・時間と個人の適応能力によって異なる。個人の $\dot{V}_{O_2\text{max}}$ は筋温が $39.2 \sim 39.3^\circ\text{C}$ の時ピークに達する¹⁴²⁾。したがって, 1500m 走では比較的気温が高い $25 \sim 30^\circ\text{C}$ でも好記録が期待できる。しかし, それ以上の長い距離のレースでは熱放散を促進するため皮膚血流量が増加し, 筋への血流量が低下する¹¹⁶⁾。体温調節機能の主役は発汗であり, 高温下でトレーニングを実施することによって能動汗腺を多くし, 温熱調節を容易にする。また, 高温下の一定ランニング・スピードでの $\dot{V}_{O_2}$, HR, $\dot{V}_E$, 発汗量は運動時間と気温の高さに応じて体温を一定に保つよう徐々に増加する^{91,140)}。その増加の大部分は温熱調節に要するエネルギーである。Shvartz et al¹²⁴⁾ と Pandorf¹¹²⁾ は 39.4°C の高温下では $\dot{V}_{O_2\text{max}}$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) と直腸温との間に負の相関関係が認められる。すなわち, $\dot{V}_{O_2\text{max}}$ が高いランナーほど温熱調節に優れていることを示唆している。一般には持続走的トレーニングよりもインターバル・トレーニングの方が温熱順応が速い⁵⁸⁾。

3. 走路

トレッドミル走とグランド (トラック) 走の相違に関する研究は, 1 つは先に述べた空気や風の抵抗によるエネルギー消費量に関する研究, 他は運動学的研究^{51,56,109,132)} に大別できる。トレッドミル走とグランド走の基本的相違は, 前者がベルトが移動するのに対して, 後者がランナー自身が移動することである。両者の相違は着地の際の膝の角度 (83.9 vs 88.3 度) と大腿の角度 (67.1 vs 61.1 度) の有意な差 ($p < 0.05$) に起因する⁵⁶⁾。

今日の陸上競技のトラック種目の大幅な記録の更新はトラックの素材や施工法の進歩に負うところが大きい。速く走れるためのトラックはいかに接地時間を短縮し, ストライドを長くするかである。そのためには, 走路に適度な硬度と弾力性を持たせ, 合わせてランナーの質量 (体重) と脚パワー, そしてシューズ (スパイク) の硬度, 弾力性, 摩擦抵抗の

条件をいかに最高に組み合わせていくかである。McMahon and Green⁹⁷⁾はこれらの要素を考慮してハーバード大学に220ヤードのトラックを新設した。そして、接地時間の短縮と歩幅の増大によって2～3%のスピードの向上を予測した。ランナーの実際のスピードの平均向上率は2.91%であった。

トラックの施工素材も各種ある。Bonnen et al¹³⁾は二人のランナーを対象に $10\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ のランニング・スピードで10分間走行中の $\dot{V}_{O_2}$ ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)を求めたところ、タータントラック ($33.84\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) <トレッドミル ($33.88\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) <サイドウォーク ($34.96\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) <シンダートラック ($34.97\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) の順となった。

ロード走やクロスカン트리走の走路はアスファルト、コンクリート、土、石畳、芝地、砂丘などさまざまである。それだけではない。上り下り、大小のカーブや表面には凹凸もある。また、天候状態によっても条件は大きく変動する。これらの具体的な条件下におけるランニング・スピードと $\dot{V}_{O_2}$ との関係に関する研究は今後に期待される。

E. 心理学的因子

体調と精神状態は密接な関係を有している。最近のPOMS (Profile of Mood States) の各項目とrunning economyとの関係では、積極的な心理状態(活力)とrunning economyとの間に比例関係が、また、怒り、不安、憂鬱、緊張等の心理的に消極的な要素を解消することによってrunning economyが高まることが明らかにされている^{33, 131)}。たとえば、10名のランナーを対象にしたムードの状態とrunning economyに関するWilliams et al¹³⁸⁾の研究によると、1週間ごとに4回、3速度における $\dot{V}_{O_2}$ の平均とPOMSの6項目との間の相関関係がTension $r=0.81$, Depression $r=0.73$, Anger $r=0.58$, Vigor $r=-0.60$, Fatigue $r=0.18$, Confusion $r=0.60$, 6項目の平均では $r=0.88$ と両者に密接な関係を有した。しかし、Crews³³⁾のムードとrunning economyとの関係に関するこれまでの研究のreviewでは、否定的報告も少なくない。この方面の研究は実験条件や心理状態の指標等をさらに厳密に整え、被験者数を増やして検討していく必要がある。

F. その他

1. リラクセーション

視覚や聴覚、あるいは条件づけ (operant conditioning) 等のフィードバック法による筋のリラクセーションがEMGの積分値を減少させることが知られている^{18, 46, 74)}。その他、臨床の分野ではリラクセーションが血圧、心室性期外収縮、喘息、吃り、不安、神経症等の治療に用いられている¹¹⁵⁾。ランニングのトレーニングやレースではリラクセーションの重要性がしばしば指摘されるがeconomyへの影響に関する研究報告は現在のところ見当たらない。

2. 日差変動

Morgan et al¹⁰⁰⁾は10名のランナーを対象に230, 248, 268, 393 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ の4速度でのトレッドミル走中の $\dot{V}_{O_2}$ とストライドの長さについて日をおいて3回調べた結果、個人的には $\dot{V}_{O_2}$ が5～9%変動するものの、全体的には $\dot{V}_{O_2}$ とストライドの長さに有意($p>0.05$)な差を認めていない。しかし、Daniels⁴³⁾は1月、3月、5月、7月の4回の268 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ のランニング・スピードの $\dot{V}_{O_2}$ に有意($p<0.01$)な差を認めている。Morgan and Craib¹⁰²⁾はこれまでの報告から男女のランナーでは170～268 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ のランニング・スピードでは平均変動係数(CV)は1～4% $\dot{V}_{O_2}$ とみなした。その際の測定誤差は全変動係数の10%以下とみなしている。これらの報告からrunning economyには日差変動が生ずるが、その程度には個人差が大きいと考えられる。

3. シューズ

シューズの重さが約50g増加することによって、約1%ランニング中の $\dot{V}_{O_2}$ が増加する^{19, 77)}。ただその影響の度合はランニング・スピードが高まるにつれて少なくなる⁵⁵⁾。Martin et al⁹⁴⁾の報告によると男子長距離ランナーに大腿部と足部に同一の負荷をつけた場合、後者の方が約2倍の $\dot{V}_{O_2}$ の増加が生ずるという。また、Frederick⁵⁵⁾は、適切な弾力性を有するシューズは同じ重さの硬いシューズを着用した際よりも2.8% $\dot{V}_{O_2}$ が減少する、という。

IV. 結 論

長距離走のperformanceはエネルギー発生量の大きさと、そのエネルギーをいかに有効に使うかによって決まる。後者は一定ランニング・スピードの $\dot{V}_{O_2}$ の大小(ランニングの経済性)によって判断す

ることができる。

ランニングの経済性は、(1) 解剖学的要因、(2) 生理学的要因、(3) バイオメカニックス的要因、(4) 環境的要因、(5) 心理学的要因、(6) その他 (リラクゼーション、日差変動、シューズ) 等によって変動する。

それらを総合的にみると、(1) %Fat やシューズ等の質量の減少あるいはランニングの技術の巧拙からくる重心の上下動の大きさ等による着地の際や支持脚の衝撃や負担の軽減、(2) 体型特に脚の長さ、脚筋力や筋線維の種類とその割合、走路やシューズの硬度・弾性・摩擦抵抗等による適切なストライドの長さとのステップの頻度、(3) エネルギー発生に際しての効率的呼吸・循環機能の働きと燃焼エネルギー源の割合 (炭水化物と脂肪)、(4) 心理的状态 (ムード)、(5) 風や気温等の気象条件が微妙にランニングの経済性に影響する。Williams and Cavanagh¹³⁷⁾ は running economy の個人差の 54% がバイオメカニックス的要因に負うという。しかし、この根拠は明確ではない。今後は、これらの変動要因がどの程度 running economy に影響を与えるのか、あるいは running economy を高めるための具体的なトレーニング方法やレースで最高の performance を出すために、いかに running economy を最高の状態に維持するかを究明していかなければならないであろう。

引用文献

- 1) Adams W C, Bernauer E M, Dill D B and Bomar J B (1975) Effects of equivalent sealevel and altitude training on $\dot{V}O_2\max$ and running performance. *J Appl Physiol* 39 : 262-266
- 2) American College of Sports Medicine (1975 ; 1980) Guidelines for Graded Exercise Testing and Exercise Prescription. Lea and Febiger' Philadelphia. Cited by Léger L and Mercier D (1984)
- 3) Anderson T (1996) Biomechanics and running economy. *Sports Med* 22 : 76-89
- 4) Anderson M B, Lamb J L and Maestras R W (1986) Changes in running economy in cross country runners. *Int J Sports Med* 7 : 177
- 5) Anderson T and Tseh W (1994) Running economy, anthropometric dimensions and kinematic variables. *Med Sci Sports Exerc* 26 : S170
- 6) Åstrand P -O (1952) Experimental Studies of Physical Working Capacity in Relation to Sex and

- Age. Ejnar Mundsgard Copenhagen
- 7) Åstrand P -O, Cuddy T E, Saltin B and Stenberg J (1964) Cardiac output during submaximal and maximal work. *J Appl Physiol* 19 : 268-274
- 8) Babcock M A, Johnson B D, Pegelow D F, Sumon O E, Griffin D and Dempsey J A (1955) Hypoxic effects on exercise-induced diaphragmatic fatigue in normal healthy humans. *J Appl Physiol* 78 : 82-92
- 9) Bailey S P and Pate R R (1991) Feasibility of improving running economy. *Sports Med* 12 : 228-236
- 10) Balke B (1963) A Simple Field Test for the Assessment of Physical Fitness. Oklahoma City OK : CARI FAA Report No. 63-66. Cited by Daniels J T (1985)
- 11) Bassett D, Giese M, Nagle F, Ward A and Raab D (1985) Aerobic requirements of overground versus treadmill running. *Med Sci Sports Exerc* 17 : 477-481
- 12) Bhambani Y and Singh M (1985) Metabolic and cinematographic analysis of walking and running in men and women. *Med Sci Sports Exerc* 17 : 131-137
- 13) Bonen A, Gass G C, Kachadorian W A and Johnson R E (1974) The energy cost of walking and running on different surfaces. *Aus. J Sports Med* 6 : 5-11
- 14) Bosco C, Montanari G, Ribacchi R, Giovenali P, Latteri F, Iachelli G, Faina M, Colli R, Dal Monte A, La Rosa M, Cortili G and Saibene F (1987) Relationship between the efficiency of muscular work during jumping and the energetics of running. *Eur J Appl Physiol* 56 : 138-143
- 15) Bransford D R and Howley E T (1977) Oxygen cost of running in trained and untrained men and women. *Med. Sci Sports* 9 : 41-44
- 16) Bruce R A, Kusumi F and Hosmer D (1973) Maximal oxygen intake and nomographic assessment of functional aerobic impairment in cardiovascular disease. *Am Heart J* 85 : 546-562
- 17) Burke E J and Brush F C (1979) Physiological and anthropometric assessment of successful teenage female distance runners. *Res Quart* 50 : 180-186
- 18) Budzynski T H and Stoyva J M (1969) An instrument for producing deep muscle relaxation by means of analog information feedback. *J Appl Behavior Analysis* 2 : 231-237

- 19) Cartin M E and Dressendorfer R H (1979) Effect of shoe weight on the energy cost of running. *Med Sci Sports Exerc* 11 : 80
- 20) Cavanagh P, Andrew G, Kram R, Rodgers M, Sanderson D and Hennig E (1985) An approach to biomechanical profiling of elite distance runners. *Int J Sports Biomech* 1 : 36-62
- 21) Cavanagh P R and Kram R (1985) The efficiency of human movement— a statement of the problem. *Med Sci Sports Exerc* 17 : 304-308
- 22) Cavanagh P R, Pollock M J and Landa M J (1977) A biomechanical comparison of elite and good distance runners. *Ann NY Acad Sci* 301 : 328-345
- 23) Cavanagh P R and Williams K R (1982) The effect of stride length variation on oxygen uptake during distance running. *Med Sci Sports Exerc* 14 : 30-35
- 24) Conley D L and Krahenbuhl G S (1980) Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 12 : 357-360
- 25) Conley D L, Krahenbuhl G S and Burkett L N (1981) Training for aerobic capacity and running economy. *Phys Sportsmed* 9 : 107-115
- 26) Conley D L, Krahenbuhl G S, Burkett L N and Millar A (1984) Following Steve Scott: physical changes accompanying training. *Phys Sportsmed* 12 : 103-106
- 27) Cooper K H (1968) *Aerobics*. New York: Bantam Brooks Inc
- 28) Costill D L (1972) Physiology of marathon running. *JAMA* 221 : 1024-1029
- 29) Costill D L and Fox E L (1969) Energetics of marathon running. *Med Sci Sports* 1 : 81-86
- 30) Costill D L, Thomason H and Robergs E (1973) Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med Sci Sports* 5 : 248-252
- 31) Costill D L, Thomas R, Robergs A, Pascoe D, Lambert C, Barr S and Fink W J (1991) Adaptations to swimming training: influence of training volume. *Med Sci Sports Exerc* 23 : 371-377
- 32) Costill D L and Winrow E (1970) A comparison of two middle-aged ultramarathon runners. *Res Quart Exerc Sport* 41 : 135-139
- 33) Crews D J (1992) Psychological state and running economy. *Med Sci Sports Exerc* 24 : 475-482
- 34) Cureton K J and Sparling P B (1980) Distance running performance and metabolic responses to running in men and women with excess weight experimentally equated. *Med Sci Sports Exerc* 12 : 288-294
- 35) Cureton K J, Sparling P B, Evans B W, Johnson S M, Kong U D and Purvis J W (1978) Effect of experimental alterations in excess weight on aerobic capacity and distance running performance. *Med Sci Sports* 10 : 194-199
- 36) Daniels J T (1974) Running with Jim Ryun: A five-year study. *Phys Sportsmed* 2 : 62-67
- 37) Daniels J T (1985) A physiologist's view of running economy. *Med Sci Sports Exerc* 17 : 332-338
- 38) Daniels J and Daniels N (1992) Running economy of elite male and elite female runners. *Med Sci Sports Exerc* 24 : 483-489
- 39) Daniels J, Fitts R and Sheehan G (1978) *Training for Distance Running. The Scientific Aspects*. New York: John Wiley & Sons pp.30-31
- 40) Daniels J, Foster C, Daniels S and Krahenbuhl G (1977) Altitude and human performance with special consideration of the aerobic demands of running. *Proceedings of the NCPEAM/NAPECW National Conference, Orlando FL* pp.61-67
- 41) Daniels J, Krahenbuhl G, Foster C, Gilbert J and Daniels S (1977) Aerobic responses of female distance runners to submaximal and maximal exercise. *Ann NY Acad Sci* 301 : 726-733
- 42) Daniels J, Oldridge N, Nagle F and White B (1978) Differences and changes in $\dot{V}O_2$ among young runners 10 to 18 years of age. *Med Sci Sports* 10 : 200-203
- 43) Daniels J, Scardina N, Hayes J and Foley P (1984) Variations in $\dot{V}O_{2\text{submax}}$ during treadmill running. *Med Sci Sports Exerc* 16 : 108
- 44) Davies, C T M (1980) Effects of wind assistance and resistance on the forward motion of a runner. *J Appl Physiol* 48 : 702-709
- 45) Davies C and Thompson M (1979) Aerobic performance of female marathon and male ultramarathon athletes. *Eur J Appl Physiol* 41 : 233-245
- 46) DeVries H A, Burke R K, Hopper R T and Sloan J H (1977) Efficacy of EMG biofeedback in relaxation training. *Am J Physical Med* 56 : 75-81
- 47) Dick R W and Cavanagh P R (1987) An explanation of the upward drift in oxygen uptake during prolonged sub-maximal downhill running. *Med Sci Sports Exerc* 19 : 310-317
- 48) Dillman C J (1975) Kinetic analysis of running. *Exerc Sport Sci Rev* 3 : 193-218
- 49) Dotan R, Rotstein A, Dlin R, Inbar O, Kofman H

- and Kaplansky Y (1983) Relationships of marathon running to physiological, anthropometric and training indices. *Eur J Appl Physiol* 51 : 281-293
- 50) Dressendorfer R H, Scaff J H Jr, Wagner J O and Gallup J D (1977) Metabolic adjustments to marathon running in coronary patients. *Ann NY Acad Sci* 301 : 466-483
 - 51) Elliott B C and Blanksby B A (1976) A cinematographic analysis of overground and treadmill running by males and females. *Med Sci Sports* 8 : 84-87
 - 52) Eston R G, Mickleborough J and Baltzopoulos V (1995) Eccentric activation and muscle damage: biomechanical and physiological considerations during downhill running. *Br J Sport Med* 29 : 89-94
 - 53) Evans S L, Davy K P, Stevenson E T and Seals D R (1995) Physiological determinants of 10-km performance in highly trained female runners of different ages. *J Appl Physiol* 78 : 1931-1941
 - 54) Fox E L and Costill D L (1972) Estimated cardiorespiratory responses during marathon running. *Arch Environ Health* 24 : 316-324
 - 55) Frederick E C (1983) Measuring the effects of shoes and surfaces on the economy of locomotion. In: Nigg B M, Kerr B A, editors. *Biomechanical aspects of sport shoes and playing surfaces*. Calgary: University of Calgary. pp.93-106 cited by Anderson T (1996)
 - 56) Frishberg B A (1983) An analysis of overground and treadmill sprinting. *Med Sci Sports Exerc* 15 : 478-485
 - 57) Galloway J (1983) *Galloway's Book of Running*. J F Galloway, Armour Circle, Atlanta. Cited by Noaks T (1992)
 - 58) Gisolfi C and Robinson S (1969) Relations between physical training, acclimatization, and heat tolerance. *J Appl Physiol* 26 : 530-534
 - 59) Girardin Y and Roy B G (1984) Effects of non-directive type of training program on the running patterns of male sedentary subjects. In: *Biomechanics N*, Nelson R C and Morehouse C A (Eds). Baltimore: University Park Press. pp.113-120
 - 60) Hagan R D, Strathman T, Strathman L and Gettman L R (1980) Oxygen uptake and energy expenditure during horizontal treadmill running. *J Appl Physiol: Respirat. Environ. Exercise Physiol* 49 : 571-575
 - 61) Hagerman F, Addington W and Gaensler E (1975) Severe steady state exercise at sea level and altitude in Olympic oarsmen. *Med Sci Sports* 7 : 275-279
 - 62) Helgerud J, Ingjer F and Stremme S B (1990) Sex differences in performance-matched marathon runners. *Eur J Appl Physiol* 61 : 433-439
 - 63) Henry F (1953) The oxygen requirement of walking and running. *Res Q Exerc Sport* 24 : 169-175
 - 64) Hikida R S, Staron R S, Hagerman F S, Sherman W M and Costill D L (1983) Muscle fiber necrosis associated with human marathon runners. *J Neuro Sci* 59 : 185-203
 - 65) Hill A V (1925) *Muscular Activity*. London: Bailliere, Tindall and Cox
 - 66) Hill A G (1927) The air-resistance to a runner. *Proc R Soc B102* : 380-385
 - 67) Hill A V and Lupton H (1923) Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *Quarterly J Med* 16 : 135-171
 - 68) Höglberg P (1952) How to stride length and stride frequency influence the energy output during running? *Arbeitsphysiologie* 14 : 437-441
 - 69) Hoshikawa T, Matsui H and Miyashita M (1973) Analysis of running pattern in relation to speed. *Med Sports vol.8 : Biomechanics III*. pp.342-348
 - 70) Houmard J, Costill D, Mitchell J, Park S, Hickner R and Roemmich J (1990) Reduced training maintains performance in distance runners. *Int J Sport Med* 11 : 46-52
 - 71) Houmard J, Kirwan J, Flynn M and Mitchell J (1989) Effects of reduced training on submaximal and maximal running responses. *Int J Sports Med* 10 : 30-33
 - 72) Houmard J A, Scott B K, Justice C L and Chenier T C (1994) The effects of taper on performance in distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 26 : 624-631
 - 73) Howley E and Glover M (1974) The caloric costs of running and walking one mile for men and women. *Med Sci Sports* 6 : 235-237
 - 74) Jacobs A and Felton G S (1969) Visual feedback of myoelectric output to facilitate muscle relaxation in normal persons and patients with neck injuries. *Arch Phys Med Rehab* 50 : 34-39
 - 75) James S L and Brubaker C E (1973) Biomechanical and neuromuscular aspects of running. *Exerc Sport Sci Rev* 1 : 189-216
 - 76) Johnson B, Aaron E A, Babcock M A and De-

- mpsey J A (1996) Respiratory muscle fatigue during exercise: implications for performance. *Med Sci Sports Exerc* 28 : 1129-1137
- 77) Jones B H, Knapik J J, Daniels W L and Toner M M (1986) The energy cost of women walking and running in shoes and boots. *Ergonomics* 29 : 439-443
- 78) Joyner M J (1991) Modeling: optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *J Appl Physiol* 70 : 683-687
- 79) Kaneko M (1990) Mechanics and energetics in running with special reference to efficiency. *J. Biomechanics* 23 : 57-63
- 80) Karen G, Epstein Y, Magazanik A and Sohar E (1981) The energy cost of walking and running with and without a backpack load. *Eur J Appl Physiol* 46 : 317-324
- 81) Kitamura K, Jorgensen C R, Gobel F L, Taylor H L and Wang Y (1972) Hemodynamic correlates of myocardial oxygen consumption during upright exercise. *J Appl Physiol* 32 : 516-522
- 82) Knuttgen H G (1961) Oxygen uptake and pulse rate while running with undermined and determined stride lengths at different speeds. *Acta Physiol Scand* 52 : 366-371
- 83) Krahenbuhl G S, Pangrazi R P and Chomokos E A (1979) Aerobic responses of young boys to sub-maximal running. *Res Quart* 50 : 413-421
- 84) Krahenbuhl G S and Williams T J (1992) Running economy: changes with age during childhood and adolescence. *Med Sci Sports Exerc* 24 : 462-466
- 85) Kuipers M and Keizer H (1988) Overtraining in elite athletes. *Sports Med* 6 : 79-92
- 86) Lake M J and Cavanagh P R (1996) Six weeks of training does not change running mechanics or improve running economy. *Med Sci Sports Exerc* 28 : 860-869
- 87) Léger L and Mercier D (1984) Gross energy cost of horizontal treadmill and track running. *Sports Med* 1 : 270-277
- 88) Liljestrand G and Stenstrom N (1920) Respirationsversuche beim gehen, laufen, ski- und schlittschehlaufen. *Skand Arch f Physiol* 39 : 1-63. cited by Noaks T D (*Med Sci Sports Exerc* 20 : 319-330, 1988)
- 89) Lindhard J (1915) Über das minutenvolum des herzens bei ruhe und bei muskellarbeit. *Pflugers Arch f Physiol* 161 : 233-293. Cited by Noaks T D (*Med Sci Sports Exerc* 20 : 319-330, 1988)
- 90) Londeree B R (1986) The use of laboratory test results with long distance runners. *Sports Med* 3 : 201-213
- 91) MacDougall J D, Reddan W G, Layton C R and Dempsey J A (1974) Effects of metabolic hyperthermia on performance during heavy prolonged exercise. *J Appl Physiol* 36 : 538-544
- 92) Malina R M, Harper A B, Arent H H and Campbell D E (1971) Physique of female track and field athletes. *Med Sci Sports* 3 : 32-38
- 93) Margaria R, Cerretelli P, Aghemo P and Sassi G (1963) Energy cost of running. *J Appl Physiol* 18 : 367-370
- 94) Martin P E, Heise G D and Morgan D W (1993) Interrelationships between mechanical power, energy transfers, and walking and running economy. *Med Sci Sports Exerc* 25 : 508-515
- 95) Martin P, Fernald B and Krahenbuhl G (1987) The effect of workout intensity on running economy mechanism. Abstract. Hong Kong Sports Medicine Conference, Hong Kong. Cited by Bailey S P and Pate R R (1991)
- 96) McConnell G K, Costill D L, Widrick J J, Hickey M S, Tanaka H and Gastin P B (1993) Reduced training volume and intensity maintain aerobic capacity but not performance in distance runners. *Int J Sports Med* 14 : 33-37
- 97) McMahon T A and Greene P R (1978) Fast running tracks. *Sci Am* 239 : 148-163
- 98) McMiken D F and Daniels J T (1976) Aerobic requirements and maximum aerobic power in treadmill and track running. *Med Sci Sports* 8 : 14-17
- 99) Millic-Emili G, Petit J M and Deroanne R (1962) Mechanical work of breathing during exercise in trained and untrained subjects. *J Appl Physiol* 17 : 43-49
- 100) Morgan D W, Baldini F D and Martin P E (1987) Day-to-day stability in running economy and steps length among well-trained male runners. *Int J Sports Med* 8 : 242
- 101) Morgan D, Baldini F, Martin P and Kohrt W (1989) Ten kilometer performance and predicted velocity at $\dot{V}O_{2max}$ among well-trained male runners. *Med Sci Sports Exerc* 21 : 78-83
- 102) Morgan D W and Craib M (1992) Physiological aspects of running economy. *Med Sci Sports Exerc* 24 : 456-461
- 103) Morgan D W, Martin P E, Baldini F D and Krahenbuhl G S (1988) Biomechanical correlates

- of economical running. *Med Sci Sports Exerc* 20 : S49
- 104) Morgan D W, Martin P E, Baldini F D and Krahenbuhl G S (1990) Effects of a prolonged maximal run on running economy and running mechanics. *Med Sci Sports* 22 : 834-840
 - 105) Morgan D, Martin P, Craib M Caruso C, Clifton R and Hopewell R (1994) Effects of step length optimization on the aerobic demand of running. *J Appl Physiol* 77 : 245-251
 - 106) Myers M and Stuedel K (1985) Effect of limb mass and its distribution on the energetic cost of running. *J Exp Biol* 116 : 363-373
 - 107) Nagle F, Robinhold D, Howley E, Daniels J, Baptista G and Stoedefalke K (1970) Lactic acid accumulation during running at submaximal aerobic demands. *Med Sci Sports* 2 : 182-186
 - 108) Nelson R C, Brooks C M and Pike N L (1977) Biomechanical comparison of male and female distance runners. *Ann NY Acad Sci* 301 : 793-807
 - 109) Nelson R C, Dillman C J, Lagasse P and Bickett P (1972) Biomechanics of overground versus treadmill running. *Med Sci Sports* 4 : 233-240
 - 110) Nelson R C and Gregor R J (1976) Biomechanics of distance running: a longitudinal study. *Res Q Exerc Sport* 47 : 417-428
 - 111) Noaks T D (1992) *Lore of running*. Oxford University Press Southern Africa
 - 112) Pandolf K B (1979) Effects on physical training and cardiorespiratory physical fitness on exercise-heat tolerance: recent observations. *Med Sci Sports* 11 : 60-65
 - 113) Passmore R and Durnin J V G A (1955) Human energy expenditure. *Physiol Rev* 35 : 801-840
 - 114) Pate R R, Macera C, Bartoli W and Money C (1989) Physiological and anatomical correlates of running economy in habitual runners. *Med Sci Sports Exerc*. 21 (Suppl. 2) S26
 - 115) Peters R K, Benson H and Porter D (1977) Daily relaxation response breaks in a working population: I. Effects on self-reported measures of health, performance and well-being. *Am Public Health* 67 : 946-953
 - 116) Pirnay F, Deroanne R and Petit J M (1977) Influence of water temperature on thermal circulatory and respiratory responses to muscular work. *Eur J Appl Physiol* 37 : 129-136
 - 117) Pizza F X, Flynn M G, Starling R D, Brolinson P G, Sigg J, Kubitz E R and Davenport R L (1995) Run training vs cross training: Influence of increased training on running economy, foot impact and run performance. *Int J Sports Med* 16 : 180-184
 - 118) Pollock M L (1977) Submaximal and maximal working capacity of elite distance runners. Part 1: Cardiorespiratory aspects. *Ann NY Acad Sci* 301 : 310-322
 - 119) Pugh L G C E (1970) Oxygen intake in track and treadmill running with observations on the effect of air resistance. *J Physiol* 207 : 823-835
 - 120) 桜井伸一 (1983) 女子マラソンは男子を追い越すか— バイオメカニカルな視点から — 体育の科学 33(3) : 180-184
 - 121) Scrimgeour A G, Noakes T D, Adams B and Myburgh K (1986) The influence of weekly training distance on fractional utilization of maximum aerobic capacity in marathon and ultramarathon runners. *Eur J Appl Physiol* 55 : 202-209
 - 122) Shields S L (1982) The effect of varying lengths of stride on performance during submaximal treadmill stress testing. *J Sports Med Phys Fitness* 22 : 66-72
 - 123) Shephard R J (1969) A nomogram to calculate the oxygen-cost of running at show speeds. *J Sport Med Physical Fitness* 9 : 10-30
 - 124) Shvartz E, Shapiro E, Magazonik A, Meroz A, Birnfeld H, Mechtering A and Shibolet S (1977) Heat acclimation physical fitness, and responses to exercise in temperate and hot environments. *J Appl Physiol* 43 : 678-683
 - 125) Sidney K H and Shephard R J (1977) Maximum testing of men and women in the seventh, eighth, and ninth decades of life. *J Appl Physiol* 43 : 280-287
 - 126) Sjödin B and Svedenhag J (1985) Applied physiology of marathon running. *Sports Med* 2 : 83-99
 - 127) Stampfl F (1955) *Franz Stampfl on Running*, Herbert Jenkins, London. cited by Noaks T D (1992)
 - 128) Stanley L J and Brubaker C E (1973) Biomechanical and neuromuscular aspects of running. *Exerc Sport Sci Rev* 1 : 186-216
 - 129) Svedenhag J and Sjödin B (1985) Physiological characteristics of elite male runners in and off season. *Can J Appl Sport Sci* 10 : 127-133
 - 130) Thorstensson A (1986) Effects of moderate external loading on the aerobic demand of submaximal running in men and 10 year-old boys. *Eur J Appl Physiol* 55 : 569-574

- 131) Van Der Walt W H and Wyndham C H (1973) An equation for prediction of energy expenditure of walking and running. *J Appl Physiol* 34 : 559-563
- 132) Van Ingen Schenau G J (1980) Some fundamental aspects of the biomechanics of overground versus treadmill locomotion. *Med Sci Sports Exerc* 12 : 257-261
- 133) Warhol M J, Siegel A J, Evans W J and Silverman L M (1985) Skeletal muscle injury and in marathon runners after competition. *Am J Pathol* 118 : 331-338
- 134) Weltman A, Snead D, Stein P, Seip R, Schurrer R, Rutt R and Weltman J (1990) Reliability and validity of a continuous incremental treadmill protocol for the determination of lactate threshold, fixed blood lactate concentrations, and $\dot{V}O_{2max}$. *Int J Sports Med* 11 : 26-32
- 135) Wilcox A R and Bulbulian R (1984) The effect of a cross-country season on running economy. *Med Sci Sports Exerc* 24 : 321-326
- 136) Williams K R and Cavanagh P R (1986) Biomechanical correlates with running economy in elite distance runners. *Proceedings of the North American Congress on Biomechanics*. Montreal pp.287-288
- 137) Williams K R and Cavanagh P R (1987) Relationship between distance running mechanics, economy performance. *J Appl Physiol* 63 : 1236-1245
- 138) Williams T J, Krahenbuhl G S and Morgan D W (1991) Mood state and running economy in moderately trained male runners. *Med Sci Sports Exerc* 23 : 727-731
- 139) Wilmore J, Brown C H and Davies J H (1977) Body physique and composition of the female distance runner. *Ann NY Acad Sci* 301 : 764-776
- 140) Wyndham C H, Strydom N B, Van Rensburg A J, Benade A J S and Heyns A J (1979) Relation between $\dot{V}O_{2max}$ and body temperature in hot humid air conditions. *J Appl Physiol* 29 : 45-50
- 141) 山地啓司 (1977) 酸素運搬系からみた全身持久性の運動生理学的解明. 東京大学教育学研究科博士論文
- 142) 山地啓司 (1992) 最大酸素摂取量の科学. 杏林書院 pp.62-82
- 143) 山地啓司, 池田岳子, 横山泰行, 松井秀治 (1990) 最大酸素摂取量から陸上中長距離走, マラソンレースの競技記録を占うことが可能か. *ランニング学研究* 1 : 7-14
- 144) 山地啓司, 奥井明子 (1997) ランニングの経済性からみた5段階評価. *ランニング学研究投稿中*
- 145) Yoshizawa S, Honda H, Urushibara M and Nakamura N (1990) Effects of endurance run on cardiorespiratory system in young children. *J Human Ergol* 19 : 41-52
- 146) Ziegler S G, Klinzing J and Williamson K (1982) The effects of two stress management training on cardiorespiratory efficiency. *J Sport Psychol* 4 : 280-289

(平成9年2月18日 受理)