

# $\dot{V}O_2AT$ および $\dot{V}O_2submax$ による長距離選手 Performance の推定について

丸山 敦夫・美坂 幸治

(1983年10月15日 受理)

## Prediction of Running Performance from $\dot{V}O_2AT$ and $\dot{V}O_2submax$ in the Long Distance Runners

Atsuo MARUYAMA and Kouji MISAKA

### I はじめに

すべての身体運動は、主に、糖質と脂質のエネルギー源を使って、TCA 回路および電子伝達系をもつ有酸素的代謝 (aerobic metabolism) や、ATP-CP 系および解糖系をもつ無酸素的代謝 (anaerobic metabolism) を経て ATP を産生し、筋の収縮を引き起こすことによって成立している。この両代謝が運動強度に対してどのような割合で関与するかについては、つぎのように考えられる。すなわち、日常生活、体操、ジョギング等、最大運動強度の40~50%までの強度の身体運動は、ほとんど有酸素的代謝に依存するが、50%を超えて、強度が高くなるにつれ、有酸素的代謝の他に無酸素的代謝系が動員され、この両者から ATP が供給される。さらに100%以上の強度になると、そのほとんどが無酸素的代謝に依存する。この有酸素的代謝を代表する生理学的パラメータは酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$ ) で、無酸素的代謝のそれは酸素負債量 ( $O_2debt$ ) である。特に、酸素摂取量の最大値は持久性評価や体力の指標として活用され、重要な生理学的パラメータである。

この最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2max$ ) は、持久性競技者<sup>16) 24) 26)</sup> では、一般人や他の競技者と比較して著しく高く、70~80 ml/kg·min を示している。陸上競技の長距離種目の選手は高い  $\dot{V}O_2max$  を有し、さらに  $\dot{V}O_2max$  値と長距離走 performance との間には密接な関連が認められている。しかしながら、数多くの長距離選手の  $\dot{V}O_2max$  が測定され、その performance との関連が検討されている中で、一概に、 $\dot{V}O_2max$  から performance を推定することはできなくなっている。すなわち、 $\dot{V}O_2max$  が performance を決定づける唯一の生理学的パラメータではないことが指摘されている。このように、鍛練度の高い長距離選手の performance に影響を与える身体的要因としては、無酸素的能力<sup>4) 20) 38)</sup>、走行時の酸素摂取水準の維持能力<sup>17) 18)</sup>、走行時の酸素摂取量の経済性・効率<sup>5) 10)</sup>、有酸素的代謝から代謝性 acidosis への変移点での  $\dot{V}O_2$  で表される無酸素的閾値<sup>19) 25) 36)</sup>、さらに走の技術<sup>1) 23)</sup>、などをあげることができる。

特に、走の経済性・効率および無酸素的閾値での  $\dot{V}O_2$  は、 $\dot{V}O_2max$  が量的能力を代表するのに

対して、質的な能力を表し、performance の優劣に大きく影響を与えていると考えられる。つまり、走の経済性・効率の良さは、 $\dot{V}O_2max$  が同水準であるが、同一スピードで走行している時の  $\dot{V}O_2$  が低い者ほど、相対的な生体負担度が低いことを示している。そして、無酸素的閾値は<sup>33)35)36)</sup>、疲労物質である乳酸の蓄積に伴う代謝性の acidosis の臨界値であり、この値が高い者ほど、走スピードが高くても有酸素的に走行することが可能であることを示している。

本研究は、この走の経済性・効率と無酸素的閾値における  $\dot{V}O_2$  に注目し、長距離選手の performance をより客観的に評価しうる指標について検討した。

## II 実験方法

被験者は、5000 m, 10 km および 20 km の記録をもつ11名の鹿児島大学陸上競技部に所属している長距離選手で、毎日定期的に専門練習を実施している者である。彼らの身体的特性は表1に示したように、年齢、身重、および体重は、それぞれ平均21才、168.8 cm および 58.5 kg であり、最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2max$ ) は 67.3 ~ 76.3 ml/kg·min の範囲にわたり、平均値および標準偏差値は、 $71.6 \pm 3.28$  ml/kg·min であった。また、5000 m, 10 km および 20 km の記録は、それぞれ15分40秒、32分53秒および66分56秒であった。

最大酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2max$ ) および無酸素的閾値の酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$  anaerobic threshold,  $\dot{V}O_2AT$ ) を得るために、図1で示したように、被験者に斜度5°のトレッドミルを用いて、速度漸増法による走行を行わせ、exhaustion に至らせた。そのトレッドミル速度は、53.3 m/min で開始し、1分ごとに16.7 m/min ずつ増加させた。走の経済性・効率の  $\dot{V}O_2$  を求めるために、一定速度を負荷した。この速度は、Costill ら<sup>8)</sup>、および Farrell ら<sup>10)</sup>、の268 m/min のレースペースを参考にし、斜度0°のトレッドミルを267 m/min で6分間走行させた。この走行中の酸素摂取

表 1. 被験者の身体特性,  $\dot{V}O_2max$  および Performance について

SUBJ	AGE yr	HEIGHT cm	WEIGHT kg	$\dot{V}O_2$ MAX ml/kg·min	PERFORMANCE		
					5000m	10km min sec	20km
1	22	178.0	66.0	75.4	15' 10"	31' 24"	65' 01"
2	19	164.5	55.0	69.1	14' 56"	31' 19"	62' 57"
3	22	165.7	56.0	72.4	14' 52"	31' 36"	66' 00"
4	21	166.6	57.3	69.5	15' 42"	32' 46"	66' 45"
5	20	171.8	58.6	74.9	15' 57"	33' 40"	69' 34"
6	21	179.0	69.2	67.6	15' 56"	33' 58"	68' 34"
7	20	165.5	52.9	67.3	16' 32"	37' 30"	70' 02"
8	20	174.0	59.0	75.0	15' 15"	31' 30"	65' 21"
9	23	160.0	53.5	76.3	14' 38"	31' 00"	63' 00"
10	2	173.3	61.9	68.8	15' 43"	32' 52"	67' 20"
11	22	166.0	54.5	71.3	16' 20"	34' 05"	71' 37"
$\bar{X}$	21	168.8	58.5	71.6	15' 40"	32' 53"	66' 56"
SD	1.1	6.02	5.00	3.28	41" 7	1' 48" 5	2' 41" 5

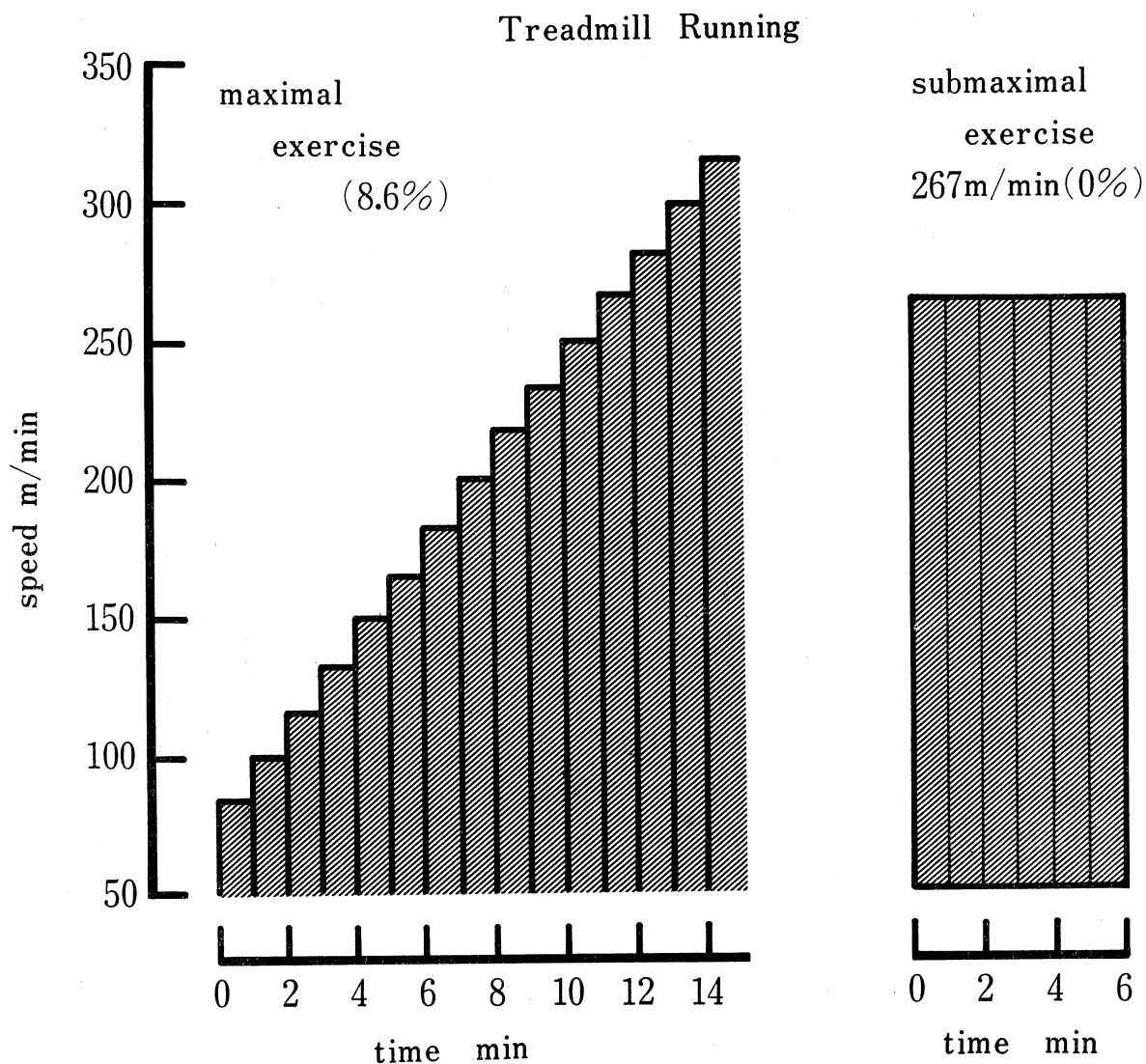


図 1 最大運動および最大下運動の負荷法について

量 ( $\dot{V}O_2$  267) は走行開始の1分目から6分目の  $\dot{V}O_2$  を1分間値に平均して求めた。無酸素的閾値の酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2AT$ ) は、図2にみられるように、肺換気量 ( $\dot{V}ESTPD$  l/min)、二酸化炭素排泄量 ( $\dot{V}CO_2$  ml/min)、呼吸交換比 (R)、 $\dot{V}O_2$  に対する  $\dot{V}E$  ( $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ ) および  $\dot{V}CO_2$  に対する  $\dot{V}E$  ( $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ ) の各 gas exchange parameter から AT 出現時間を決定した。特に、 $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$  が上昇しない状態でも  $\dot{V}E/\dot{V}O_2$  が上昇する時点を重視した。この AT 出現時間を、 $x$  を時間 (min) とし、 $y$  を体重当りの  $\dot{V}O_2$  (ml/kg·min) とした  $y = Ax + B$  の回帰式に代入して  $\dot{V}O_2AT$  を求めた。

心拍数 (HR)、 $\dot{V}O_2$  および各 gas exchange parameter は、最大走行運動および一定の最大下走行運動中すべて連続して測定した。HR は ECG 法による R 棘波を1分ごとに数えた。 $\dot{V}O_2$  および各 gas exchange parameter は、aerobic processor (日本電機三栄社製) の respiratory

metabolic analyzer を使用した。この analyzer の較正は従来の Douglas' bag 法によって行った。 $\dot{V}O_2$  は、 $y=0.999x+2.75$  ( $x$ : Douglas' bag 法,  $y$ : analyzer),  $Se=1.58$  ml/kg·min,  $r=0.995$  となり、 $\dot{V}E$  は、 $y=0.999x+1.63$ ,  $Se=1.39$  l/min STPD,  $r=0.999$  という回帰式、標準誤差および相関係数が得られ、この analyzer は測定に際し、信頼できる値を得ることができると考えられる。

### III 結果および考察

#### 1 $\dot{V}O_{2max}$

持久性評価の指標として生理学的に最も信頼されている  $\dot{V}O_{2max}$  は、体重当りで見ても平均  $71.6 \pm 3.28$  ml/kg·min となり、持久性競技者の  $\dot{V}O_{2max}$  同様に高い値を示した。本研究の被験者の  $\dot{V}O_{2max}$  および 5000 m performance (15 分 40 秒  $\pm$  41 秒 7) は、長距離選手を対象とした山崎および青木<sup>38)</sup>、Tanaka<sup>32)</sup>、丸山および美坂<sup>21)</sup> の報告とほぼ同水準であった。Costill<sup>9)</sup> も、3 マイルの平均記録が 13 分 18 秒 (5000 m 相当 13 分 47 秒) となる一流長距離選手の  $\dot{V}O_{2max}$  は、平均で  $77.4 \pm 3.69$  ml/kg·min と非常に高い値を持っていることを報告している。

また、このような長距離選手の筋線維タイプは 70% 以上が slow twitch fiber で占められていると言われ、この slow twitch fiber (%ST) はミトコンドリア量、コハク酸脱水素酵素量、毛細血管の密度など、酸素を摂取するのに非常に有益な基質を豊富にもっている。Ivy<sup>12)</sup> は、 $\dot{V}O_{2max}$  が 38.3~70.9 ml/kg·min の 20 名の被験者を用いて、 $\dot{V}O_{2max}$ —%ST,  $\dot{V}O_{2max}$ —筋の呼吸能力および %ST—筋の呼吸能力の関係を調べたところ、それぞれに 0.1% 水準で、有意な相関を得ている。また  $\dot{V}O_{2max}$  を制限する因子として、%ST や筋の呼吸能力をあげており、筋自体の酸化能力が  $\dot{V}O_{2max}$  に大きく影響していることを示唆している。本研究では、 $\dot{V}O_{2max}$ —performance の関係は、Foster<sup>11)</sup> や Farrell<sup>10)</sup> と異なり、有意な相関が得られなかった (図 3) が、これは被験者群の  $\dot{V}O_{2max}$  の範囲が 67.3~76.3 ml/kg·min と比較的狭かったからであろう<sup>3) 5) 38)</sup>。

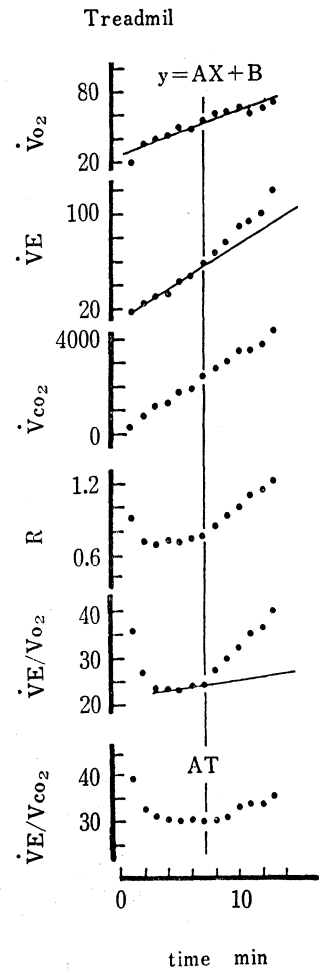
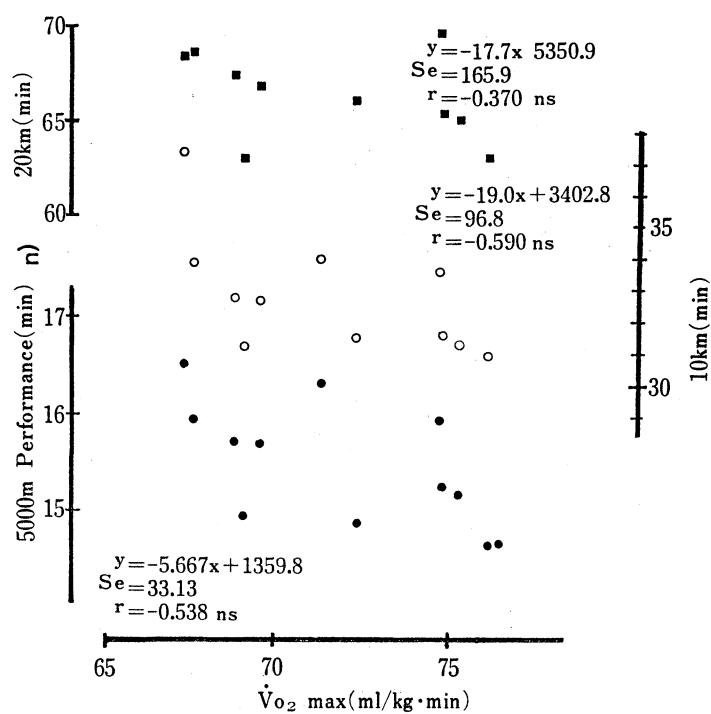


図 2 Anaerobic threshold の決定方法

図 3  $\dot{V}O_2 \text{ max}$  と Performance の関係について

## 2 $\dot{V}O_2 267$ および $\% \dot{V}O_2 267$

267 m/min の一定速度で走行した時の平均  $\dot{V}O_2$  ( $\dot{V}O_2 267$ ) は表 2 のように平均  $50.0 \pm 3.3$  ml/kg·min となり、その範囲は 44.8~54.4 ml/kg·min に亘った。 $\dot{V}O_2 \text{ max}$  に対する  $\dot{V}O_2 267$  の割

表 2. 各被験者の  $\dot{V}O_2 267$ ,  $\dot{V}O_2 \text{ AT}$ ,  $\% \dot{V}O_2 267$  および  $\% \text{ AT}$  について

SUBJ.	$\dot{V}O_2 267$ ml/min ml/kg·min	$\dot{V}O_2 \text{ AT}$ ml/kg·min	$\% \dot{V}O_2 267$ %	$\% \text{ AT}$ %
1	48.5	55.0	64.3	72.9
2	44.8	56.1	65.0	81.2
3	51.1	58.7	70.6	81.1
4	51.3	53.5	73.8	76.8
5	53.4	50.4	71.3	67.4
6	46.2	48.6	68.4	72.0
7	52.3	45.6	77.8	67.8
8	52.3	56.9	70.0	75.9
9	49.9	56.2	65.3	73.7
10	45.5	47.1	66.2	68.5
11	54.4	52.7	76.3	73.9
$\bar{X}$	50.0	52.8	69.9	73.8
SD	3.31	4.33	4.42	4.58

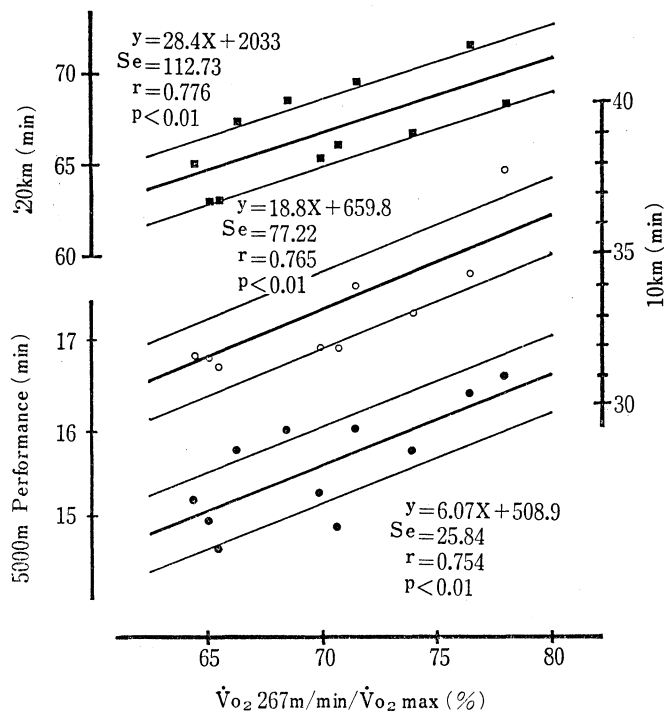


図 4  $\% \dot{V}O_2$  267 と Performance との関係について

合 ( $\% \dot{V}O_2$  267) は、平均  $69.9 \pm 4.42\%$  であった。Costill ら<sup>8)</sup>、Farrell ら<sup>10)</sup> および Bransford および Howley<sup>2)</sup> の  $268 \text{ ml/min}$  の  $\dot{V}O_2$  は、それぞれ  $51.2$ 、 $50.2$  および  $50.8 \text{ ml/kg} \cdot \text{min}$  となっており、本研究の値とほぼ同じ値を示した。Scheen ら<sup>27)</sup> は、6段階の一定負荷で20分間運動させ、ほぼ連続的に乳酸を測定しているが、 $\dot{V}O_2$  max の71%強度での一定運動は、 $\dot{V}O_2$  が一定であるのに対し、血中乳酸が著しく上昇していた。この乳酸値は63%の運動での乳酸上昇より、1.5倍以上大きいことを指摘している。本研究の6分間の  $\% \dot{V}O_2$  267 が71%以上を示した被験者が、No. 5.7 および 11 の3名おり、これらの被験者は鍛練者であるが、走行中に乳酸蓄積の可能性が大きく、performance にも大きく影響していると考えられる。

$\dot{V}O_2$  267-performance の関係は、Conley および Krauhenbuhl<sup>5)</sup> の報告と異なり、5000m、10km および 20km とも有意な相関が得られなかった。しかしながら、 $\% \dot{V}O_2$  267-performance の関係は図4に示したように、3種目とも1%水準で有意な相関を認めた。走の経済性や効率を評価する際に、 $\dot{V}O_2$  267 の絶対値と  $\% \dot{V}O_2$  267 の相対値はほとんど変わらないとされているが、本研究の結果  $\dot{V}O_2$  max の範囲が狭い場合、絶対値だけでなく、相対値でも検討することが必要である。このことは、ある走スピードに対する経済性のよさを表わすものであり、最大下走行時の  $\dot{V}O_2$  相対値の performance への影響についても考慮すべきであるといえよう。

### 3 $\dot{V}O_2$ AT および $\%AT$

$\dot{V}O_2$  AT ( $\dot{V}O_2$  anaerobic threshold) は、運動強度が一定の割合で漸増する状況で、有酸素的代

謝に無酸素的代謝が加わり、後者の産物である乳酸の増加によって、筋中および血中の pH,  $\text{HCO}_3^-$  などが低下し、酸性に傾く（代謝性 acidosis）変移点での  $\dot{V}_O_2$  で表されている<sup>30)33)</sup>。この  $\dot{V}_O_2$  AT は、表2で示されたように平均で  $52.8 \pm 4.33 \text{ ml/kg}\cdot\text{min}$  であり、%AT は、 $73.8 \pm 4.58\%$  となった。Tanaka ら<sup>32)</sup> は27名の、中、長距離選手を対象にトレッドミルを用いて、distance performance,  $\dot{V}_O_2$  AT,  $\dot{V}_O_2$  max について検討しているが、3マイルの performance が平均14分50秒2（5000 m 15分22秒）をもつ選手群の  $\dot{V}_O_2$  max が  $70.1 \pm 5.9 \text{ ml/kg}\cdot\text{min}$  で、その  $\dot{V}_O_2$  AT が  $52.8 \pm 7.9 \text{ ml/kg}\cdot\text{min}$  であり、%AT は、 $75.6 \pm 7.9\%$  であったという。この  $\dot{V}_O_2$  AT の値は、本研究のものと一致し、%AT は、わずかに高い値である。また、Withers ら<sup>37)</sup> も長距離選手を対象に  $\dot{V}_O_2$  AT および %AT をみており、 $52.7 \pm 6.2 \text{ ml/kg}\cdot\text{min}$  および  $77.3 \pm 2.6\%$  という値を示した。本研究の  $\dot{V}_O_2$  AT および %AT 値はほぼ妥当な値であると考えられる。

$\dot{V}_O_2$  AT は高度に鍛練された選手ほど高いと言われている<sup>24)36)</sup> が、一流選手を対象とした  $\dot{V}_O_2$  AT をみると、Rusko ら<sup>25)</sup> は女子のクロスカントリースキーヤーを bicycle ergometer で測定し、 $\dot{V}_O_2$  max が  $47.3 \text{ ml/kg}\cdot\text{min}$ ,  $\dot{V}_O_2$  AT が  $40.9 \text{ ml/kg}\cdot\text{min}$  であり、%AT は86%という高い値であったと報告している。また Mickelson および Hagerenn<sup>22)</sup> は25名のエリートボート選手を対象に row ergometer を用いて、 $\dot{V}_O_2$  AT を測定し、絶対値で  $4.77 \text{ l/min}$  (weight 89.85 kg), %AT が83.5%であった。直接、 $\dot{V}_O_2$  AT を測定した報告ではないが、Costill ら<sup>7)</sup> の報告によると、2時間8分33秒の記録をもつマラソン元世界最高記録保持者のクレイトンの  $\dot{V}_O_2$  max は  $69.3 \text{ ml/kg}\cdot\text{min}$  でしかないが、マラソン時平均スピードで、30分間トレッドミルを走らせ、 $\dot{V}_O_2$  を測定したところ、 $\dot{V}_O_2$  max の86%にも相当する値でマラソンを走破していることを指摘している。マラソン時の血中乳酸値が低いこと<sup>6)</sup> から、この86%  $\dot{V}_O_2$  max は無酸素的閾値に相当する負荷であろうと考えられる。これらのことから、一流選手では80%以上の %AT を必要とすると考えられる。

次に、このATと、筋自体の特性や筋の酸化能力との関係について検討する。Ivy ら<sup>13)</sup> は、 $\dot{V}_O_2$  max, lactate threshold (LT), %ST および筋の呼吸能力について、これらの相互関係を考察している。それによると、%ST- $\dot{V}_O_2$  max の相関は0.62で、%ST-LT は0.74となり、%ST との結びつきはLTが高い。さらに、筋の呼吸能力- $\dot{V}_O_2$  max は0.83

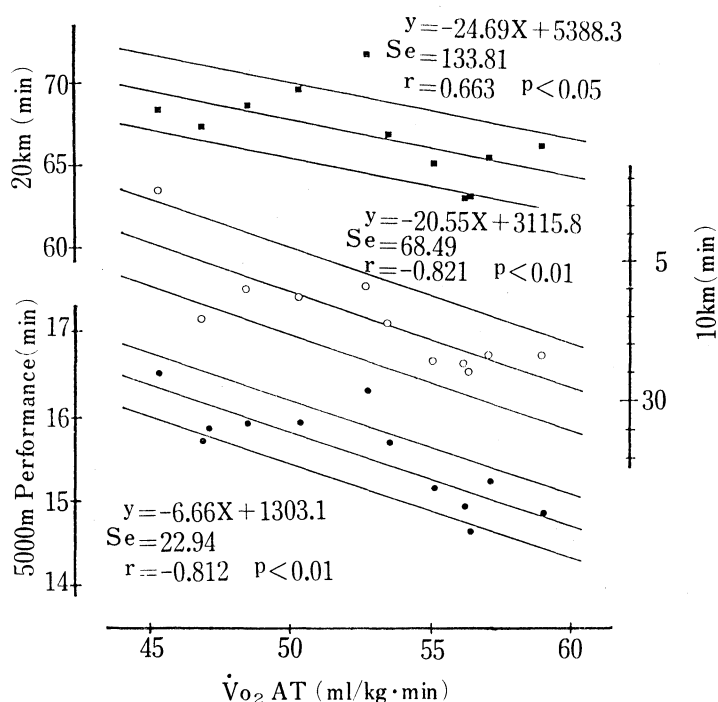


図5  $\dot{V}_O_2$  AT と Performance の関係について

