中・長距離ランナーにおける筋線維組成, 毛細血管,
酸化酵素活性と有酸素的作業能との関係

満 園 良 一* 勝 田 茂** 金 尾 洋 治***
田 渕 健 一**** 永 井 純**

RELATIONSHIP BETWEEN MUSCLE FIBER COMPOSITION,
CAPILLARY SUPPLY, OXIDATIVE ENZYME ACTIVITY
AND AEROBIC WORK CAPACITY IN MIDDLE-
AND LONG-DISTANCE RUNNERS

RYOICHI MITSUZONO, SHIGERU KATSUTA, YOUJI KANAO,
KEN-ICHI TABUCHI and JUN NAGAI

Abstract

It was the purpose of this study to examine the property of skeletal muscle fiber in middle- and long-distance runners, and to evaluate the relationship between the property of skeletal muscle fiber and aerobic work capacity.

Biopsy samples were taken from M. vastus lateralis of 23 middle- and long-distance runners, and analyzed for muscle fiber composition, capillary supply and SDH activity. Aerobic work capacity was measured on a treadmill with continuous method.

The mean value for %ST in M. vastus lateralis was 61.3%, and the muscle fiber distribution showed the tendency of slow type. The crosssectional area of ST and FT fibers ranged approximately from $3,000 \mu\text{m}^2$ to $13,000 \mu\text{m}^2$, and the cross-sectional area of ST fiber tended to be larger than that of FT fiber. The mean values for CD, C/F ratio, and CC(/ST) as capillary supply were $279/\text{mm}^2$, 1.62 and 5.7, respectively. The mean value for SDH activity was $5.86 \mu\text{moles/g/min}$, and was lower than reported previously for elite runners. In addition, SDH activity correlated with %ST and CC(/ST) ($r=0.480$, $p<0.05$, $r=0.640$, $p<0.01$). On the other hand, the mean value for $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ was 68.5 ml/kg/min ($4,066 \text{ ml/min}$), while $\dot{V}\text{O}_2\text{@AT}$ averaged 45.9 ml/kg/min ($2,756 \text{ ml/min}$). And it was found that $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ and $\dot{V}\text{O}_2\text{@AT}$ correlated significantly with %ST, CC(/ST) and SDH activity. Particularly, $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ was most strongly related to SDH activity ($r=0.612$, $p<0.01$).

The results of this study suggest that in regard to middle- and long-distance runners, structural characteristics of the ST fiber and capillary are some of the indispensable factors to regulate such a functional property as SDH activity and that the distinctive characteristics of the skeletal muscle fiber might possibly influence aerobic work capacity to a great extent.

(J.Physical Fitness Japan 1986, 35 : 182~191)

key words : capillary supply, SDH activity, $\dot{V}\text{O}_2\text{@AT}$, middle and long-distance runners

* 久留米大学商学部
福岡県久留米市御井町

** 筑波大学体育科学系
茨城県新治郡桜村天王台

*** 愛知県立看護短期大学
愛知県名古屋市中区上志段味東谷

**** 関東中央病院
東京都世田谷区上用賀

Faculty of Commerce, Kurume University, Fukuoka, 830.

Institute of Health and Sports Science, The University of
Tsukuba, Ibaraki, 305.

Aichi Prefectural Junior College of Nursing, Aichi, 463.

Kantou Central Hospital, Tokyo, 154.

I. 緒 言

ヒトの骨格筋線維は, ニードル・バイオプシー法の導入と分析法の進歩により, Fiber type, Capillary supply, 諸酵素や基質などの特性について検討されるようになった¹⁾⁹⁾¹⁵⁾¹⁹⁾²⁴⁾²⁶⁾. 中・長距離ランナーを対象とした研究においても, パフォーマンスを規定する生理学的要因として, 主働筋の諸特性が検べられ, 骨格筋線維にみられるトレーニングの影響なども明らかにされてきている⁴⁾⁵⁾⁹⁾²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾²⁹⁾. 例えば, 長距離ランナーの主働筋は, ST 線維の構成比が高く, 高い酸化酵素活性を示すことが認められている. しかしながら, わが国においては, 中・長距離ランナーに限らず, 各スポーツ競技者の骨格筋線維の諸特性に関する研究報告は極めて少ない¹⁷⁾¹⁸⁾. とりわけ, 中・長距離ランナーの Capillary supply について検討した報告は, いまのところみあたらない.

本研究は, 組織化学的および生化学的手法により, 高い持久的能力をもつ中・長距離ランナーの骨格筋線維における諸特性について明らかにし, これら骨格筋線維の諸特性と有酸素的作業能との関係について検討することを目的とした.

II. 実験方法

A. 被検者

被検者は, 過去6年以上にわたりトレーニングを積んできた男子中・長距離ランナー23名である. これらのなかには, 全日本大学対校駅伝大会および関東学生対校東京一箱根間往復駅伝大会に出場した17名が含まれている. また, 被検者の1,500m, 5,000m 走におけるパフォーマンス・レベルは, それぞれ平均タイムで4分01秒7, 15分04秒7である. さらに, 表1に, 被検者の身体的

Table 1. Characteristics of subjects.

	Mean	S. D.	Max.	Min.
Age (yrs)	21.2	1.9	25.0	19.0
Height (cm)	170.0	3.3	176.0	165.0
Weight (kg)	59.5	3.6	65.2	53.1
% Fat (%)	10.2	1.5	14.6	9.0

特性を示した. 体脂肪率(% Fat)は, 上腕背部と肩甲骨下部の皮下脂肪厚から推定した²⁰⁾.

B. 筋組織の採取方法

被検筋は, 右側の外側広筋(M. vastus lateralis)であり, ニードル・バイオプシー法³⁾によって, 膝蓋骨上端から6~7cmの部位における20~30mgの筋組織を2片採取した. 採取した筋組織は液体窒素により冷やされたイソペンタン中で, 瞬間凍結後, 1片が組織化学的分析(Muscle fiber composition, Capillary supply), もう1片が生化学的分析(Succinate dehydrogenase activity)に用いられた. これらの筋組織は, 分析するまで液体窒素中に冷凍保存された.

C. 組織化学的および生化学的分析

組織化学的分析用の筋組織については, -20℃のクリオスタット(Bright社製FS-FCS型)により, 厚さ10μmの連続凍結切片を作成した. 各切片に, Myosin ATPase²³⁾, DPNH-diaphorase²¹⁾, Amylase PAS¹⁾の染色をそれぞれ施した.

Myosin ATPase染色を施した標本から, Gollnickら⁹⁾の分類方法にしたがい, ST(Slow-twitch)およびFT(Fast-twitch)の2線維に分け, 総筋線維数に対する各ST, FT線維の比率から筋線維構成比(% ST, % FT)を求めた. DPNH-diaphorase染色の施された標本の写真資料から, フィルム解析装置(ナック社製スポーティアスGP2000)を用いて, ST・FTの各筋線維の平均横断面積を算出した. さらに, ST・FTの各筋線維横断面積と筋線維構成比から, 全体に占めるST線維の面積比(% area ST)を求めた. Amylase PAS染色の施された標本の写真資料についても, 1mm²あたりの毛細血管数(CD; Capillary density), CDを同じ範囲内にある筋線維数で除したC/F ratio (Capillary per fiber), ST・FTの各筋線維1本あたりをとり囲んでいる毛細血管数(CC; Mean number of capillaries in contact with fiber)をそれぞれ算出した.

生化学的分析用の筋組織は筋重量を秤量した後, 均等質化された. その後, Sembrowichら²⁷⁾の方法にしたがい, 蛍光法によりコハク酸脱水素酵素(SDH)活性を測定した.

D. 有酸素的作業能の測定方法

被検者は、30分～1時間の安静状態を保った後、斜度0°のトレッドミル走での Exhaustive 運動を行った。走行負荷は、分速 180 m で4分間走行した後、Exhaustion に至るまで1分毎に 10 m ずつ走速度を増加させる負荷漸増法を用いた。呼気ガスはダグラス・バッグ法により、運動開始後3分めから Exhaustion に至るまで連続的に採気し、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) を算出した。なお、換気量 ($\dot{V}_E$) は乾式ガスメーター(品川社製)で計量し、呼気ガスの分析は、酸素分析器 (OM-11; Beckman 社製) および二酸化炭素分析器 (LB-2; Beckman 社製) により行った。両分析器の校正は、ショランダー微量ガス分析器により分析された標準混合

ガスを用いた。

最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) が得られたかどうかの判定は、 $\dot{V}O_2$ のレベル・オフ、ガス交換比 ($R > 1.0$) を基準として用いた。また、採気と同時に、胸部誘導法により心拍数 (HR; Heart rate) を連続して記録した。

さらに、最大下走運動中における有酸素的作業能の指標として、血中乳酸の蓄積開始点とされる無酸素的作業閾値 (AT; Anaerobic threshold) を用いた。AT の判定には、Wasserman ら³³⁾、Davis ら⁶⁾ の呼気ガス法による判定規準にもとづいて行った。

Table 2. Muscle fiber composition and SDH activity in middle- and long-distance runners.

Subjects	% ST (%)	% area ST (%)	area ST (μm^2)	area FT (μm^2)	SDH activity ($\mu moles/g/min$)
T. K.	68.5	65.7	9,856	11,211	7.10
H. S.	51.0	52.5	7,381	6,953	4.00
T. Ka.	60.5	65.5	6,610	5,323	3.84
Y. M.	76.7	75.5	5,826	6,233	6.27
M. S.	67.5	76.7	12,790	8,066	12.35
M. N.	71.0	73.6	5,785	5,082	6.19
S. T.	63.5	59.1	5,469	6,575	5.25
Y. K.	34.9	35.9	4,391	4,203	3.88
S. K.	50.3	48.9	8,407	8,884	3.53
H. M.	66.5	61.5	4,801	5,957	—
T. F.	35.8	38.7	4,390	3,869	4.39
S. F.	54.5	68.3	7,124	3,969	2.98
Y. Ma.	65.7	71.4	9,581	7,350	6.66
S. Y.	57.3	64.1	4,250	3,189	7.13
S. Ts.	61.6	73.2	8,217	4,815	3.57
T. O.	62.8	67.1	9,611	7,957	7.53
T. A.	72.7	77.4	4,814	3,744	6.66
A. N.	66.6	66.6	4,796	4,800	4.66
K. A.	63.3	62.7	4,251	4,369	6.66
R. M.	63.5	63.7	4,544	4,498	6.74
M. Y.	72.4	71.6	5,496	5,707	9.68
S. Ta.	56.5	59.4	10,471	9,280	7.10
K. M.	78.2	70.2	7,754	11,787	5.57
Mean	61.3	63.4	6,815	6,250	5.86
S. D.	11.1	11.0	2,354	2,319	2.23

III. 実験結果

A. 骨格筋線維の各特性

表2は, 筋線維組成と SDH 活性の分析結果を示したものである。破線より上段の12名は, 中距離種目を得意としており, 破線より下段の11名は, 長距離種目を得意としている。ただし, これは走パフォーマンスによる分類ではなく, 各被検者の走種目における出場頻度, およびトレーニング内容によった。

筋線維組成は, 構成比(% ST), 面積比(% area ST)ともに, 幾分 ST 線維の構成比が高い遅筋型の傾向を示していた(% ST; $61.3 \pm 11.1\%$, % area ST; $63.4 \pm 11.0\%$)。しかしながら, 中距離を得意とする12名の筋線維組成は, 2名が35%前後, 3名が50%台の% ST をそれぞれ示しており, 50%台の% ST が2名しかみられなかった長距離を得意とする11名に比べると, 広範囲にわたっていた。ST および FT の各筋線維横断面積は, $3,000 \mu\text{m}^2$ から $13,000 \mu\text{m}^2$ の範囲に分布しており, ST 線維の横断面積が, FT 線維の横断面積よりも大きい傾向にあった。SDH 活性は, $5.86 \pm 2.23 \mu\text{moles/g/min}$ の平均値であったが, 1名の被検筋のみが $12.35 \mu\text{moles/g/min}$ と他に比べ高い値を示していた。

表3は, Capillary supply について, CD, C/F ratio, CC の分析結果を示したものである。表2と同様に, 破線より上段に中距離を得意とする者について, 破線より下段に長距離を得意とする者について分けて示した。

単位面積(1mm^2)あたりの毛細血管数である CD と, CD を同じ 1mm^2 あたりの筋線維数で除した C/F ratio は, 被検者間で大きなばらつきがみられた。また, ST 線維および FT 線維をとり囲む毛細血管数 CC は, FT 線維に対し ST 線維の方に有意に多く認められた($p < 0.01$)。

骨格筋線維の諸特性間については, Capillary supply としての CC(/ST)と SDH 活性, および % ST と SDH 活性との関係を図1に示したが, CC(/ST)と SDH 活性との間に最も高い相関係数が認められた。SDH 活性に対しては, % area ST

Table 3. Capillary supply in middle- and long-distance runners.

Subjects	CD (/mm ²)	C/F ratio	CC (/ST)	CC (/FT)
T. K.	242	1.82	7.0	5.4
H. S.	340	1.52	5.9	4.2
T. Ka.	290	1.51	4.8	4.4
Y. M.	312	1.56	6.8	3.1
M. S.	208	1.74	6.6	4.6
M. N.	316	1.67	5.5	4.4
S. T.	275	1.71	5.7	4.9
Y. K.	261	1.52	5.1	4.5
S. K.	206	1.69	4.9	5.6
H. M.	—	—	—	—
T. F.	210	1.52	4.6	5.3
S. F.	262	1.59	4.9	5.2
Y. Ma.	360	1.52	5.8	3.7
S. Y.	274	1.57	6.5	4.3
S. Ts.	368	1.62	6.0	5.2
T. O.	268	1.79	6.2	4.1
T. A.	298	1.80	6.1	3.7
A. N.	330	1.46	6.5	4.7
K. A.	314	1.43	5.9	5.0
R. M.	348	1.75	6.8	4.3
M. Y.	255	1.86	6.8	4.7
S. Ta.	223	1.81	5.6	4.7
K. M.	206	1.45	4.5	4.8
Mean	279	1.62	5.7*	4.5*
S. D.	51	0.15	0.9	0.7

CD : Capillary density, C/F ratio : Capillaries per fiber, CC : Mean number of capillaries in contact with fiber. * : Significantly different between CC (/ST) and CC (/FT), $p < 0.01$.

($r = 0.475$, $p < 0.05$), C/F ratio($r = 0.518$, $p < 0.05$)との関係においても有意な相関関係が得られた。

B. 有酸素的作業能

表4は, 有酸素的作業能の指標となる, 最大運動時および AT 時に測定された呼吸循環系機能の結果を示したものである。最大運動時, および AT 時における呼吸循環系機能の各変数は, 表4の最大値と最小値の範囲にみられるように, 広範囲にわたっていた。また, AT 時における $\dot{V}\text{O}_2$, すなわち $\dot{V}\text{O}_{2@AT}$ は, $57.3 \sim 75.0\% \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ の範囲に相当していた。

Fig. 1. Relationships between % ST, CC (/ST) and SDH activity.

Table 4. Aerobic work capacity in middle- and long-distance runners.

Variables		Mean	S. D.	Max.	Min.
$\dot{V}E_{max}$	(l/min)	153.3	15.3	188.5	120.1
$\dot{V}O_{2max}$	(ml/min)	4,066	329	4,637	3,326
$\dot{V}O_{2max}$	(ml/kg/min)	68.5	7.3	83.9	56.0
HR _{max}	(beats/min)	197.0	8.8	209.0	177.0
$\dot{V}E@AT$	(l/min)	73.6	7.7	88.5	61.3
$\dot{V}O_{2@AT}$	(ml/min)	2,756	313	3,469	2,363
$\dot{V}O_{2@AT}$	(ml/kg/min)	45.9	5.1	62.8	36.9
HR@AT	(beats/min)	160.0	10.3	176.0	135.0

$\dot{V}E@AT$, $\dot{V}O_{2@AT}$, HR@AT : $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$ and HR corresponding to anaerobic threshold.

Table 5. Correlation coefficients of the properties of skeletal muscle fiber to $\dot{V}O_{2max}$ and $\dot{V}O_{2@AT}$.

	$\dot{V}O_{2max}$		$\dot{V}O_{2@AT}$	
	ml/min	ml/kg/min	ml/min	ml/kg/min
% ST (%)	0.583**	0.363	0.537**	0.393
% area ST (%)	0.567**	0.387	0.446*	0.358
CD (/mm ²)	0.216	0.142	0.293	0.249
CC (/ST)	0.509*	0.534*	0.358	0.430*
SDH activity (μmoles/g/min)	0.504*	0.612**	0.313	0.450*

** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$.

なお, $\dot{V}O_{2\max}$ の判定規準として用いた, ガス交換比 ($R > 1.0$) は, 平均で 1.106 ± 0.101 であった。さらに, 本被検者のすべてにおいて, レベル・オフが認められたので, 本被検者については, すべて $\dot{V}O_{2\max}$ が得られたものと判断した。

C. 骨格筋線維の各特性と有酸素的作業能との関係

表5は, 筋線維組成, Capillary supply, SDH活性のそれぞれと, $\dot{V}O_{2\max}$ および $\dot{V}O_{2@AT}$ との相関係数を示したものである。

筋線維組成のなかでは, %ST, %area ST ともに, $\dot{V}O_{2\max}$ および $\dot{V}O_{2@AT}$ の絶対値と有意な相関関係が認められた。Capillary supply のなかでは, CC(/ST)のみ $\dot{V}O_{2\max}$, $\dot{V}O_{2@AT}$ の相対値との間にそれぞれ有意な相関関係が認められた。SDH活性は, CC(/ST)の場合と同様に, $\dot{V}O_{2\max}$ および $\dot{V}O_{2@AT}$ の絶対値よりも, 相対値との方に高い相関係数を示す傾向にあったが, SDH活性と $\dot{V}O_{2@AT}$ の絶対値との関係は, 統計的に有意ではなかった。

IV. 考 察

これまでの研究報告により, 各スポーツ競技の種目と骨格筋線維の比率(%ST)との間には密接な関係が示されており, 一般に, 持久性競技者の典型とされる長距離ランナーの下肢の筋(腓腹筋・外側広筋)では, %STが優勢であるという報告は多い。本研究で得られた筋線維組成は, 著しく高いST線維の構成比ではないが, Gollnickら⁹⁾, Fosterら⁸⁾, Farrellら⁷⁾がそれぞれ報告した58.9%, 56.0%, 63.9%という長距離ランナーの%STとはほぼ同様の範囲にある。しかしながら, Costillら⁴⁾, Ruskoら²⁵⁾の対象とした一流ランナーの%STである79.0%および78.0%と比較すると本被検者の値は著しく低い。Costillら⁴⁾やRuskoら²⁵⁾の被検者はオリンピック代表を含んでおり, パフォーマンス・レベルの差が筋線維組成にも表われたものと推察される。

また, 筋線維横断面積は, 異なるトレーニング様式により, ST・FT線維のタイプ別に肥大することが報告されている。すなわち, 筋力トレーニ

ング²⁴⁾³²⁾はFT線維を, 持久的トレーニング¹⁰⁾はST線維を肥大させることが示されている。さらに, Costillら⁵⁾は一流陸上競技選手と非鍛練者を比較し, 前者においてST・FTの両線維とも肥大を認め, とくに, 長距離選手のST線維において肥大が顕著であることを指摘している。本研究においても, ST線維の筋線維横断面積はFT線維よりも大きい傾向にあり, 長年の持久的トレーニングによる選択的肥大がみられたものと考えられる。

骨格筋線維における毛細血管は, 主に持久的トレーニングにより変化すると考えられているが, 長距離ランナーに限定してCapillary supplyを検討したものは皆無である。トレーニング実験としては, Andersen and Henriksson²⁾が, 一般健常者を対象とした8週間におよぶ持久的トレーニングにより, 単位面積あたりの毛細血管数CDに約20%の増大(トレーニング後のCD; 395/mm²)を報告している。また, 横断的に比較した研究として, Hermansen and Wachtlova¹³⁾は, CDにおいてランナーやサイクリストなどの持久性競技者と非鍛練者との間に有意な差がなく, C/F ratio(競技者で1.57, 非鍛練者で1.05)に有意な差を認めている。これに対し, Ingjer¹⁵⁾は, 激しい持久的トレーニングを行っているスキー距離競技者と非鍛練者を比較して, 競技者のCD, C/F ratio, CCなどが約50~70%高いことを示している。また, Nygaard and Nielsen²²⁾も, 男子競泳選手との比較において同様な報告をしている。これらの持久性競技者は, CDが465~640/mm², C/F ratioが1.49~3.07, CC(/ST)が5.2~7.8の範囲にあり, 本研究のCapillary supplyと比較すると, 本被検者のCDが小さい傾向にある。このことは, 本被検者の筋線維横断面積が, ST・FT線維ともに, 先に報告された持久性競技者のものより2,000 μm^2 程大きかったことによると考えられる。

しかしながら, Capillary supplyを検討する際には, 筋細胞内における酸素などの拡散距離ということにより, 筋線維横断面積が考慮されている¹⁾²⁾²⁶⁾。Nygaard and Nielsen²²⁾は, 男女の競泳選手を被検者として極めて小さな筋線維横断面

積, すなわち毛細血管あたりの筋線維面積が小さいことを報告し, 筋細胞内での拡散距離の重要性を示唆している. 一方, Saltin ら²⁶⁾は, 酸素の拡散促進要因として, 拡散距離以外のミトコンドリアやミオグロビンの分布状態および機能が大きく関与していることを指摘している. 本研究においては, 筋線維横断面積の肥大がみられ, 毛細血管からの拡散距離という点では不利な結果を示している. しかし, 持久性競技者に関する先行研究と比較して, 本被検者の C/F ratio, CC からみた Capillary supply には差がみられないことから, 本被検者の酸素の拡散要因としては, 拡散距離以外のミトコンドリアやミオグロビンなどの影響が大きいものと推察される.

本研究で測定した酸化酵素活性である SDH 活性は, Gollnick ら⁹⁾の報告した中・長距離ランナー($n=8$)の $6.4 \pm 0.5 \mu\text{moles/g/min}$ とほぼ同様な値を示していたが, Costill ら⁴⁾の $21.6 \mu\text{moles/g/min}$, Rusko ら²⁵⁾の $44.6 \mu\text{moles/g/min}$ と比較すると著しく低い. これも, 筋線維組成と同じく, パフォーマンス・レベルの差が表われたものと思われる. また, SDH 活性は, TCA 回路のキイ・エンザイムであり, 骨格筋の有酸素的な潜在能力の指標として, Henriksson and Reitman¹²⁾, Saltin ら²⁶⁾はとらえている. そして, SDH 活性はトレーニング水準の状態を反映し, 大きく変動することも認めている. 本被検者の SDH 活性が低かったことは, 駅伝レース終了後 1~2 週間のトレーニング・オフ期に測定したことにもよると考えられる. 同時に, 本被検者の SDH 活性が, 持久的トレーニングにより改善される可能性を示唆している.

また, %ST や CC(/ST)などと SDH 活性との間に得られた有意な相関関係は, これまでの Costill ら⁴⁾, Foster ら⁸⁾, Sjödin ら²⁹⁾による長距離ランナーを対象とした報告と必ずしも一致しない. Costill ら⁴⁾, Sjödin ら²⁹⁾の報告において, 有意な相関関係が得られなかったことは, 被検者のパフォーマンス・レベルが高く, かつそのパフォーマンスに大きな差がみられないことによると考えられるが, 明らかでない. 一方, Henriksson

and Reitman¹¹⁾¹²⁾は, 持久的トレーニングによる Fiber type 別の SDH 活性増大が ST 線維の方において有意に大きいことを示している. このことや本研究の結果から, トレーニング初期あるいはトレーニングによる改善の低いレベルにおいては, ST 線維の比率および Capillary supply といった筋線維の構造的特性が, SDH 活性を規定する一要因であろうと考えられる.

有酸素的作業能は, 本被検者と同等な年齢層を対象とした山地と宮下³⁵⁾による $\dot{V}O_2\text{max}$ の 69.6 ml/kg/min , Tanaka ら³⁰⁾による $\dot{V}O_2\text{max}$ の 67.3 ml/kg/min , $\dot{V}O_2\text{@AT}$ の 48.5 ml/kg/min などの平均値とほぼ等しい範囲にある. この有酸素的作業能と骨格筋線維の諸特性との関係については, Foster ら⁸⁾が %ST と $\dot{V}O_2\text{max}$, Costill ら⁵⁾が SDH 活性と $\dot{V}O_2\text{max}$, Sjödin ら²⁹⁾が CS(Citrate syntase)と OBLA(Onset of blood lactate accumulation; 血中乳酸の 4 mmole 地点)との間に, 長距離ランナーにおいてそれぞれ有意な相関関係を報告している. また, Ivy ら¹⁶⁾, Tesch ら³¹⁾は, 骨格筋代謝を反映している AT (あるいは LT; Lactate threshold)と骨格筋線維に密接な関係があるとしている. さらに, Farrell ら⁷⁾は, $\dot{V}O_2\text{max}$ よりも OPLA(Onset of plasma lactate accumulation; AT に相当)時の $\dot{V}O_2$ と %ST との間に, より高い相関関係を認めている. 本研究においても, $\dot{V}O_2\text{max}$, $\dot{V}O_2\text{@AT}$ と骨格筋線維の諸特性との間に似たような相関関係が認められており, 骨格筋線維の構造的・機能的特性が有酸素的作業能に及ぼす影響は大きいと考えられる. しかし, Farrell ら⁷⁾による報告と異なり, 本研究では $\dot{V}O_2\text{@AT}$ と骨格筋線維の諸特性との間にみられた相関係数の方が, $\dot{V}O_2\text{max}$ の場合より低い傾向にある. 本被検者の $\dot{V}O_2\text{@AT}$ は, 同水準の $\dot{V}O_2\text{max}$ をもつランナーの $\dot{V}O_2\text{@AT}$ (Tanaka ら³⁰⁾の報告では 48.5 ml/kg/min) に比較して若干低く, その変動幅 (CV 値) も大きい. これまで, トレーニング中断による AT 低下の報告はみられないが, Williams ら³⁴⁾, Tanaka ら³⁰⁾はトレーニングにより AT が有意に改善されること, および $\dot{V}O_2\text{max}$ よりも AT の方が改善幅の大きいこ

とを報告している。トレーニング・オフ期に測定した本被検者のトレーニング状態は一様でなく、シーズンに比べ AT レベルの低下が推察される。これらのことから、被検者内において AT の変動が大きく、 $\dot{V}O_2@AT$ と骨格筋線維の諸特性との間に高い相関係数が得られなかったのではないかと考えられる。

毛細血管, 酸化酵素活性および AT は、トレーニングにより影響をうけると考えられている²⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹⁴⁾²²⁾²⁶⁾³⁰⁾。本研究のトレーニング・オフ期においてみられた CC (/ST) および SDH 活性と有酸素的作業能との有意な相関関係は、今後トレーニング期との関連で検討することにした。

V. 要 約

本研究は、中・長距離ランナー23名(年齢19~25歳)を対象として、外側広筋からニードル・バイオプシー法により筋組織を採取し、骨格筋線維の諸特性を明らかにすること、およびこれら諸特性と、トレッドミル走行により測定された最大、最大下運動時の有酸素的作業能との関係について検討した。

結果は、以下のように要約される。

1) 外側広筋における ST 線維の比率は、% ST が61.3%, % area ST が63.4%の平均値であり、ST 線維寄りの傾向にあった。また、ST・FT 線維の平均横断面積は 3,000~13,000 μm^2 の範囲にあり、ST 線維の方が FT 線維よりも大きい傾向にあった。

2) 外側広筋における Capillary supply は、CD が $279 \pm 51/mm^2$, C/F ratio が 1.62 ± 0.15 , CC (/ST) が 5.7 ± 0.9 , CC (/FT) が 4.5 ± 0.7 であり、CC については ST 線維の周りの毛細血管数が FT 線維のそれより有意に多かった($p < 0.01$)。

3) 外側広筋における SDH 活性は、 $2.98 \sim 12.35 \mu moles/g/min$ の範囲にあり、% ST および CC (/ST) との間にそれぞれ $r = 0.480$ ($p < 0.05$), $r = 0.640$ ($p < 0.01$) の有意な相関関係が認められた。

4) トレッドミル走行により測定した有酸素的作業能は、 $\dot{V}O_{2max}$ が $68.5 \pm 7.3 ml/kg/min$

($4,066 \pm 329 ml/min$), $\dot{V}O_2@AT$ が $45.9 \pm 5.1 ml/kg/min$ ($2,756 \pm 313 ml/min$) であった。この有酸素的作業能と骨格筋線維の諸特性との関係については、 $\dot{V}O_{2max}$, $\dot{V}O_2@AT$ (ml/min) と % ST との間に $r = 0.583$, $r = 0.537$ (いずれも $p < 0.01$), $\dot{V}O_{2max}$, $\dot{V}O_2@AT$ ($ml/kg/min$) と CC (/ST) との間に $r = 0.534$, $r = 0.430$ (いずれも $p < 0.05$), さらに $\dot{V}O_{2max}$, $\dot{V}O_2@AT$ ($ml/kg/min$) と SDH 活性との間に $r = 0.612$ ($p < 0.01$), $r = 0.450$ ($p < 0.05$) の相関関係がそれぞれ認められた。

以上の結果は、中・長距離ランナーにおいて、ST 線維や毛細血管などの構造的特性が SDH 活性などの機能的特性を規定する一要因であること、および骨格筋線維の構造的・機能的特性が有酸素的作業能に大きく影響する可能性を示唆している。

本研究は昭和57年度文部省科学研究費、一般研究(C), 課題番号 558037 (研究代表者 勝田 茂) によるものである。

(受付 昭和60年8月28日)

参 考 文 献

- 1) Andersen, P. (1975) : Capillary density in skeletal muscle of man. *Acta Physiol. Scand.*, **95**, 203-205.
- 2) Andersen, P. and Henriksson, J. (1977) : Capillary supply of the quadriceps femoris muscle of man : Adaptive response to exercise. *J. Physiol.*, **270**, 677-690.
- 3) Bergström, J. (1962) : Muscle electrolytes in man. *Scand. J. Clin. L. Invest. Suppl.* **68**.
- 4) Costill, D. L., Fink, W. J. and Pollock, M. L. (1976) : Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. *Med. Sci. Sports*, **8**, 96-100.
- 5) Costill, D. L., Daniels, J., Evans, W., Fink, W., Krahenbuhl, G. and Saltin, B. (1976) : Skeletal muscle enzymes and fiber composition in male and female track athletes. *J. Appl. Physiol.*, **40**, 149-154.
- 6) Davis, J. A., Whipp, B. J., Lamarra, N., Huntsman, D. J., Frank, M. H. and Wasserman, K. (1982) :

- Effect of ramp slope on determination of aerobic parameters from the ramp exercise test. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **14**, 339-343.
- 7) Farrell, P. A., Wilmore, J. H., Coyle, E. F., Belling, J. E. and Costill, D. L. (1979) : Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med. Sci. Sports*, **11**, 338-344.
 - 8) Foster, C., Costill, D. L., Daniels, J. T. and Fink, J. (1978) : Skeletal muscle enzyme activity, fiber composition and $\dot{V}O_2\text{max}$ in relation to distance running performance. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **39**, 73-80.
 - 9) Gollnick, P. D., Armstrong, R. B., Saubert IV, C. W., Piehl, K. and Saltin B. (1972) : Enzyme activity and fiber composition in skeletal muscle of untrained and trained men. *J. Appl. Physiol.*, **33**, 312-319.
 - 10) Gollnick, P. D., Armstrong, R. B., Saltin, B., Saubert IV, C. W., Sembrowich, W. and Shephered, R. E. (1973) : Effect of training on enzyme activity and fiber composition of human skeletal muscle. *J. Appl. Physiol.*, **34**, 107-111.
 - 11) Henriksson, J. and Reitman, J. S. (1976) : Quantitative measures of enzyme activities in type I and type II muscle fibers of man after training. *Acta Physiol. Scand.*, **97**, 392-397.
 - 12) Henriksson, J. and Reitman, J. S. (1977) : Time course of changes in human skeletal muscle succinate dehydrogenase and cytochrome oxidase activities and maximal oxygen uptake with physical activity and inactivity. *Acta Physiol. Scand.*, **99**, 91-97.
 - 13) Hermansen, L. and Wachtlova, M. (1971) : Capillary density of skeletal muscle in well-trained and untrained men. *J. Appl. Physiol.*, **30**, 860-863.
 - 14) Ingjer, F. (1978) : Maximal aerobic power related to the capillary supply of the quadriceps femoris muscle in man. *Acta Physiol. Scand.*, **104**, 238-240.
 - 15) Ingjer, F. (1979) : Capillary supply and mitochondrial content of different skeletal muscle fiber types in untrained and endurance-trained men. A histochemical and ultrastructural study. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **40**, 197-209.
 - 16) Ivy, J. L., Withers, R. T., Van Handel, P. J., Elger, D. H. and Costill, D. L. (1980) : Muscle respiratory capacity and fiber type as determinants of the lactate threshold. *J. Appl. Physiol.*, **48**, 523-527.
 - 17) 勝田 茂, 田淵健一, 田中 守, 宮尾英俊 (1983) : スポーツ選手の利き手・非利き手における筋線維組成と作業性肥大. 筑波大学体育科学系紀要, **6**, 163-170.
 - 18) 勝田 茂, 満園良一, 田淵健一, 野村武男 (1984) : 大学女子競泳選手の筋線維組成, 筋毛細血管分布と呼吸循環系機能との関係. 筑波大学体育科学系紀要, **7**, 179-186.
 - 19) 勝田 茂, 麻場一徳, 田淵健一, 高松 薫, 田中守 (1985) : ニードル・バイオプシー法による日本人健康青年男子の筋線維組成. 筑波大学体育科学系紀要, **8**, 173-179.
 - 20) Nagamine, S. (1975) : Evaluation of body fatness by skinfold measurements. *JIBP Synthesis, Physiological Adaptability and Nutritional Status of Japanese.*, **4**, 16-20.
 - 21) Novikoff, A. B., Shin, W. and Drucker, J. (1961) : Mitochondrial localization of oxidative enzymes; Staining results with two tetrazolium salts. *J. Biophys. Biochem. Cyto.*, **9**, 47-61.
 - 22) Nygaard, E. and Nielsen, E. (1978) : Skeletal muscle fiber capillarization with extreme endurance training in man. *Swimming Medicine VI*, 282-293.
 - 23) Padykula, H. A. and Herman, E. (1955) : The specificity of the histochemical method for adenosine triphosphatase. *J. Histochem. Cytochem.*, **3**, 170-195.
 - 24) Prince, F. P., Hikida, R. S. and Hagerman, F. C. (1976) : Human muscle fiber types in power lifters, distance runners and untrained subjects. *Pflügers Arch.*, **363**, 19-26.
 - 25) Rusko, H., Havu, M. and Karvinen, E. (1978) : Aerobic performance capacity in athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **38**, 151-159.
 - 26) Saltin, B., Henriksson, J., Nygaard, E. and Andersen, P. (1977) : Fiber type and metabolic potentials of skeletal muscle in sedentary man and endurance runners. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **301**, 3-

- 29.
- 27) Sembrowich, W. L., Knudson, M. B. and Gollnick, P. D. (1977) : Muscle metabolism and cardiac function of the myopathic hamster following training. *J. Appl. Physiol.*, **43**, 936-941.
- 28) Sjödín, B. and Jacobs, I. (1981) : Onset of blood lactate accumulation and marathon running performances. *Int. J. Sports Med.*, **2**, 23-26.
- 29) Sjödín, B., Jacobs, I. and Karlsson, J. (1981) : Onset of blood lactate accumulation and enzyme activities in M. vastus lateralis in man. *Int. J. Sports Med.*, **2**, 166-170.
- 30) Tanaka, K., Matsuura, Y., Matsuzaka, A., Hirakoba, K., Kumagai, S., Sun, S. O. and Asano, K. (1984) : A longitudinal assessment of anaerobic threshold and distance-running performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **16**, 278-282.
- 31) Tesch, P. A., Daniels, W. L. and Sharp, D. S. (1982) : Lactate accumulation in muscle and blood during submaximal exercise. *Acta Physiol. Scand.*, **114**, 441-446.
- 32) Thorstensson, A., Hultén, B., Döbeln, W. and Karlsson, J. (1976) : Effect of strength training on enzyme activities and fiber characteristics in human skeletal muscle. *Acta Physiol. Scand.*, **96**, 392-398.
- 33) Wasserman, K., Whipp, B. J., Koyal, S. N. and Beaver, M. L. (1973) : Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J. Appl. Physiol.*, **35**, 236-243.
- 34) Willams, C. G., Wyndham, C. H., Kok, P. and Von Rahden, M. J. (1967) : Effect of training on maximum oxygen intake and on anaerobic metabolism in man. *Int. Z. angew. Physiol.*, **24**, 18-23.
- 35) 山地啓司, 宮下充正 (1976) : 3年間の全身持久性トレーニングが陸上中・長距離選手の呼吸・循環機能に及ぼす影響. *体育学研究*, **21**, 181-188.