

## 等尺性収縮における外側広筋の筋電位伝導速度 —その筋線維組成との関連—

宮田 浩文\* 佐渡山 亜兵\*\* 勝 田 茂\*\*\*

### MUSCLE FIBER CONDUCTION VELOCITY IN HUMAN VASTUS LATERALIS DURING ISOMETRIC CONTRACTIONS —RELATION TO MUSCLE FIBER COMPOSITION—

HIROFUMI MIYATA, TSUGUTAKE SADOYAMA and SHIGERU KATSUTA

#### Abstract

Relationship between muscle fiber conduction velocity and muscle fiber composition was studied in vastus lateralis of well-trained athlete students, who differed considerably regarding their fiber type distribution with averaged 69.2 % fast twitch (FT) muscle fibers for sprinters (12 male subjects) and 39.7 % FT muscle fibers for distance runners (7 male subjects). Measurement of muscle fiber conduction velocity during brief and maintained isometric contraction was made directly, using the zero-crossing time delay method between two surface myoelectric signals. Muscle fiber conduction velocities increased 4.40 to 4.84 m/sec for sprinters and 3.91 to 4.31 m/sec for distance runners as developing force increased from 25 to 100 % maximum voluntary contraction (MVC). The correlation coefficients between conduction velocity and % FT fibers were 0.59, 0.63, 0.64 and 0.84 for 25, 50, 75 and 100 % MVC, respectively. During maintained at 50 % of MVC conduction velocities in sprinters decreased lineally from 4.77 to 4.38 m/sec and in distance runners decreased from 4.11 to 3.96 m/sec at only last stage. It was suggested that the individual difference in conduction velocity was caused by different muscle fiber composition and that the changes of conduction velocity depended on the recruitment of muscle fibers.

(J. Physical Fitness Japan 1985, 34 : 231~238)

**key words :** human vastus lateralis, muscle fiber conduction velocity, muscle fiber composition, voluntary contraction.

#### I. はじめに

ヒトの骨格筋線維は、その収縮特性に基づいて2種類の線維—速筋線維 (Fast Twitch fiber, 以下 FT 線維と略す) 遅筋線維 (Slow Twitch fiber, 以下 ST 線維と略す)—に分類される。一般的には、FT 線維は収縮速度が速く、発生張力も大であるが疲労しやすい。逆に ST 線維は収縮速

度が遅く、発生張力も小さいが、疲労しにくいという性質を持っている。

このようなタイプの異なった線維がどのような割合で筋を構成しているかによって、筋全体の機能が特徴づけられる。バイオプシーによる筋線維組成に関する研究はほとんどのスポーツ種目について検べられており、例えば、陸上の長距離や水泳など持久的な種目に関連のある競技者は、その

\* 筑波大学大学院  
305 茨城県新治郡桜村天王台1-1-1  
\*\* 製品科学研究所  
305 茨城県筑波郡谷田部町東1-1-4  
\*\*\* 筑波大学体育科学系  
305 茨城県新治郡桜村天王台1-1-1

*Master's program in Health and Physical Education, University of Tsukuba. Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki(305)*  
*Human Factors Science Division, Industrial Products Research Institute. Yatabemachi-higashi, Tsukuba-gun, Ibaraki(305)*  
*Institute of Health and Sports Science, University of Tsukuba. Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki(305)*

主働筋においてST線維の割合が多く, また陸上の短距離走者はFT線維の割合が多いことが報告されている<sup>3)6)15)</sup>. しかし, このバイオプシーによる方法は筋の一部を摘出しなければならず, 摘出の技術的問題のほかに, 被検者に苦痛を与えることから, 幼児や児童を対象とすることが難しい. このため, バイオプシーによらない方法で筋線維組成を推定することが, スポーツ科学分野での重要な課題の一つとなっている.

いっぽう, 筋の特性を非侵襲的に検べる方法として表面筋電図がある. この表面筋電図のスペクトル分析から活動電位の相対的伝導速度に関する情報を引き出すことができ, 筋疲労や筋疾患に関する多くの報告がある. Komi と Tesch<sup>11)</sup>は筋疲労にともなう表面筋電図のスペクトル変化が筋線維の伝導速度によるもので, 筋線維組成と密接に関連していることを報告している. しかし, 表面筋電図のスペクトル変化は生理的な要因だけでなく, 電極条件によってもそのスペクトルの形は異なることが指摘されており<sup>16)19)</sup>, 測定上の問題のほかに, スペクトル変化から筋線維組成を分析できるほど精度は十分でない.

最近, Lynn<sup>12)</sup>, Masuda ら<sup>13)</sup>により, 筋の活動

電位の伝導速度を非侵襲でかつ直接計測できる手法が提案された. この方法は, 随意収縮中の活動電位が筋線維に沿って伝播するという筋生理学の基本的な性質を利用したもので, 表面電極から記録される筋全体の平均的な伝導速度を計測することができる.

これまで, 筋線維タイプと伝導速度に関する直接的なデータはほとんど無い. もし, 筋線維タイプと筋電位伝導速度との間に, 生理学的特性に基づいた対応関係が得られれば, 実際に筋を摘出することなく, 非侵襲的な計測により筋線維組成を推定することが可能となり, スポーツ科学への応用も広がることになる.

本研究は, バイオプシー法によって下肢の筋の線維組成がすでに知られている被検者を対象に, 膝関節の伸展による随意収縮中の筋電位伝導速度を外側広筋から計測し, 収縮レベルおよび局所的な筋疲労の側面から線維組成と伝導速度との関係を検討した.

## II. 方 法

### A. 被検者

対象とした被検者は, 筑波大学に在学し, 過去

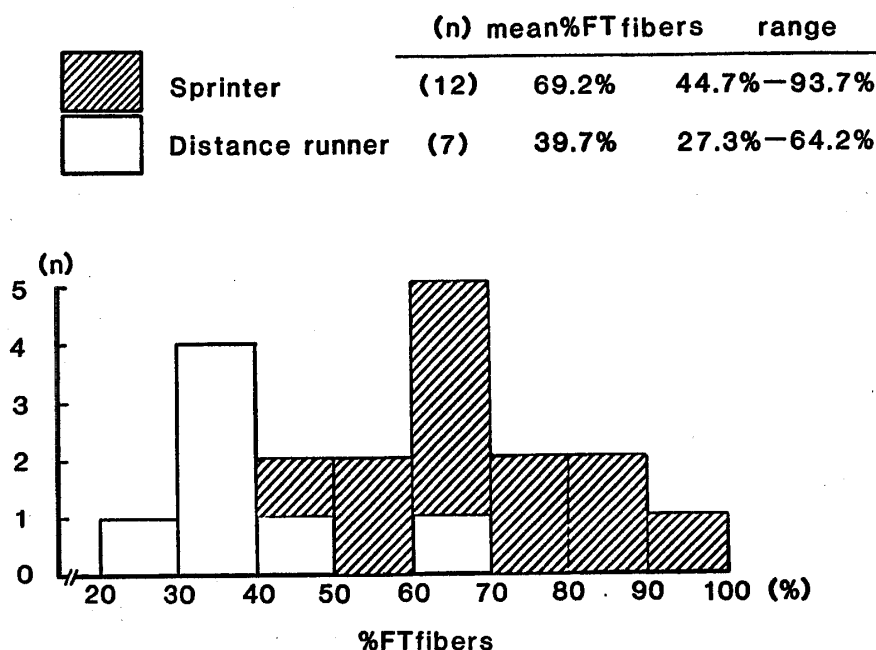


Fig. 1. Histograms of percent fast-twitch fibers in the vastus lateralis of nineteen track athletes.

6年以上トレーニングを積んできている男子陸上競技選手19名(22.8±1.2歳)であった。このうち100~400mを専門とする短距離走者は12名、1500~10000mを専門とする長距離走者は7名であった。これらの被検者は、ニードルバイオプシー法により、右外側広筋の筋線維組成が既に知られており<sup>10)</sup>(図1)、被検者全体の%FT線維における平均値は58.3%で、短距離走者群と長距離走者群の%FT線維はそれぞれ69.2、39.7%であった。

## B. 測定方法

脚伸展力の計測に際し、被検者は椅座位で下腿を下垂し、足首とロードセル(共和電業製:容量100kg)をワイヤーで連結することにより膝関節を90度に固定した状態で、伸展方向に等尺性収縮を行った。ロードセルの出力はストレインアンプ(共和電業製)で増幅したのち、被検者の前面に置かれたオシロスコープに表示した。被検者は収縮レベルに相当する電圧値をモニターすることにより、最大収縮および目標の収縮レベルを一定時間保持するよう教示された。

短時間の収縮レベルテストは、最大筋力(Muximum Voluntary Contraction, 以下MVCと略す)を測定した後、25、50、75、および100%の筋力レベルを約3秒間ずつ行った。筋力発揮による筋疲労の影響を避けるため、各試行毎に適度な休息をはさんだ。また持続テストは、50%MVCをその筋力が維持できなくなるまで持続させた。各被検者の持続時間は、筋力水準が40%MVCを下回った時点とし、ストップウォッチにて計測した。

## C. 筋電位の記録および伝導速度の計測

等尺性収縮中の筋電図は、直径1mm、長さ10mmのステンレス線を厚さ2mmの透明な塩化ビニールシートに13本平行に配列したArray電極の長軸(図2a)を外側広筋の筋線維の走行に沿って配置し、隣り合った電極から双極性に12チャンネル同時に誘導記録した。また、アース電極は膝蓋骨上に置いた。

生体増幅器の時定数は0.003秒であり、高域遮断周波数は1kHzを選んだ。増幅された筋電信号は、伝導速度計測のためFMテープレコーダーに

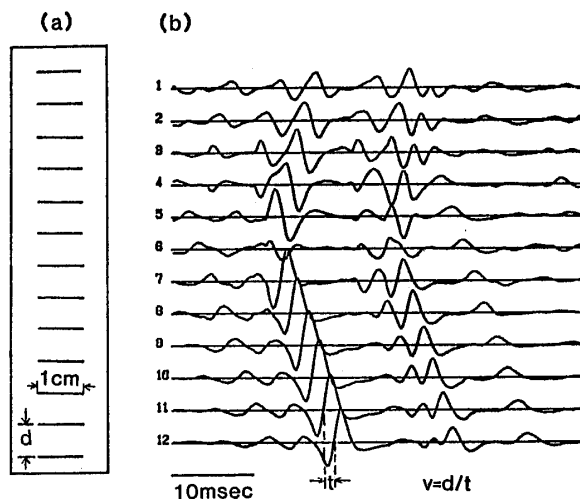


Fig. 2. Schema of electrode assembly (a) and an example of twelve myoelectric signals (b).

記録された。図2bは、磁気テープに記録された筋電信号を小型計算機により、サンプリング周波数5kHzでA/D変換し、プロッターに出力した結果の例である。この筋電図パターンから活動電位がチャンネル5(電極番号5-6)において発生し、筋線維に沿って一定の時間遅れをもって両側に伝播している様子が観測できる。活動電位の発生する部位が神経筋接合部である。

筋電位伝導速度は、二つの信号の時間差( $t$ )を計測し、電極間距離( $d$ )から速度 $v=d/t$ を算出する。なお、時間の計測において、二つの信号間の対応および計算機による自動処理のため、信号がゼロレベルを通過する時点を計測するゼロクロス法<sup>13)</sup>を採用した。波形のゼロクロス毎に伝導速度が計算される。筋電波形のゼロクロスの回数は、収縮レベルによって異なるが、毎秒数回から百数十回くらい起こる。そこで、伝導速度は1秒間の平均値とし、収縮レベル実験では3秒間の平均値で表した。

## III. 結 果

膝関節伸展における最大筋力と%FT線維との関係を図3に示した。脚伸展最大筋力は、39.1kgから72.1kgまでかなりの個人差が認められたが、%FT線維との関係は $r=0.58$ であり、両者の間には1%水準の有意な相関関係が示された。

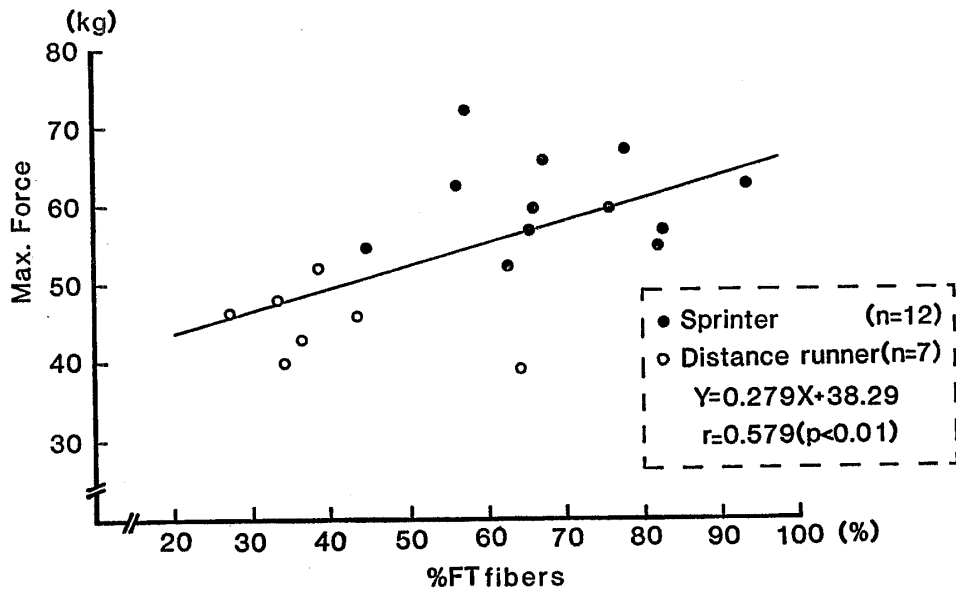


Fig. 3. Relationship between percent fast-twitch fibers and maximum force of knee extension.

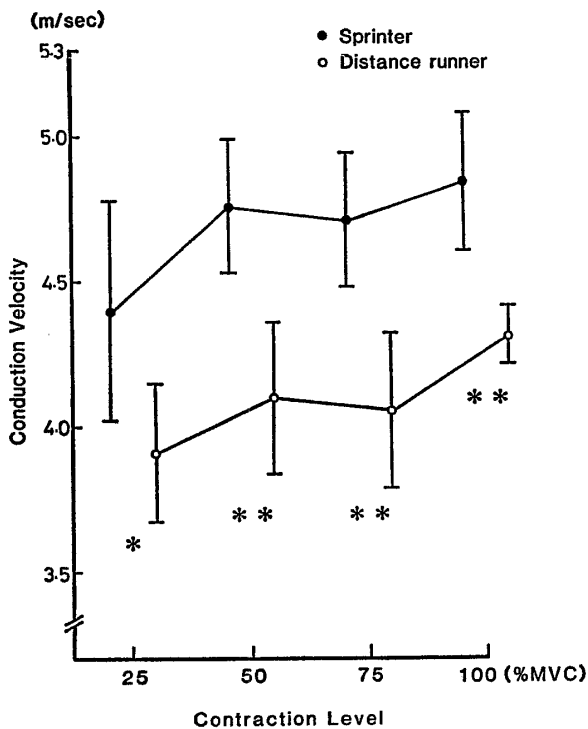


Fig. 4. Changes of average conduction velocity during brief isometric contractions at 25, 50, 75 and 100 percent maximum voluntary contraction. Significance of difference between sprinter and distance runner group: \*:  $p < 0.05$  \*\*:  $p < 0.01$ .

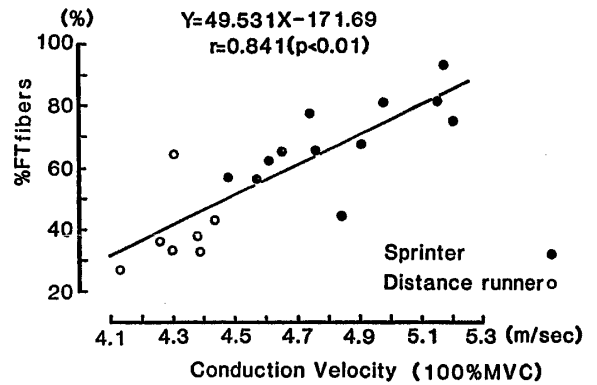


Fig. 5. Relationship between conduction velocity at 100 percent maximum voluntary contraction and percent fast-twitch fibers.

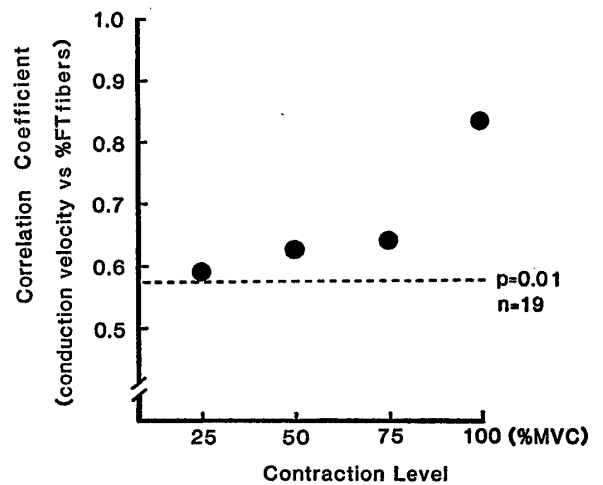


Fig. 6. Correlation coefficients between conduction velocity at various contraction levels and percent fast-twitch fibers.

図4は、4段階の収縮レベルにおける各々の伝導速度を短距離走者および長距離走者別に平均した値を示したものである。収縮レベルの増大とともに、短距離走者群の伝導速度は4.40 m/secから4.84 m/secに、また長距離走者群のそれは3.91 m/secから4.31 m/secに、それぞれS字状の増加傾向を示した。競技種目の異なる両群間には、各収縮レベルにおいて、いずれも有意な差が

認められた。

図5は、100% MVCにおける伝導速度と%FT線維との関係を示したものである。両者の間には $r=0.84$ の有意な相関関係が認められた。同様の関係を各収縮レベルでみると、収縮強度が25, 50, 75% MVCに対して相関係数はそれぞれ0.58, 0.63, 0.64であった(図6)。

最大筋力に対して50%の筋力を維持できなくな

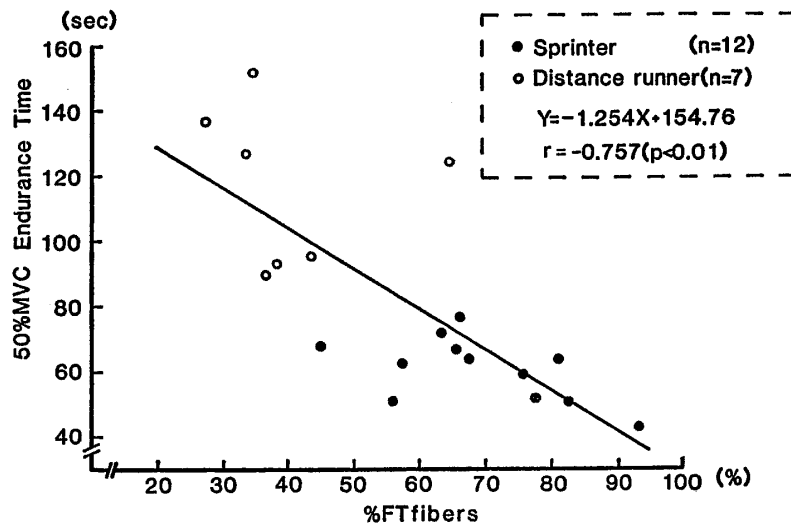


Fig. 7. Relationship between percent fast-twitch fibers and endurance time at 50 percent maximum voluntary contraction.

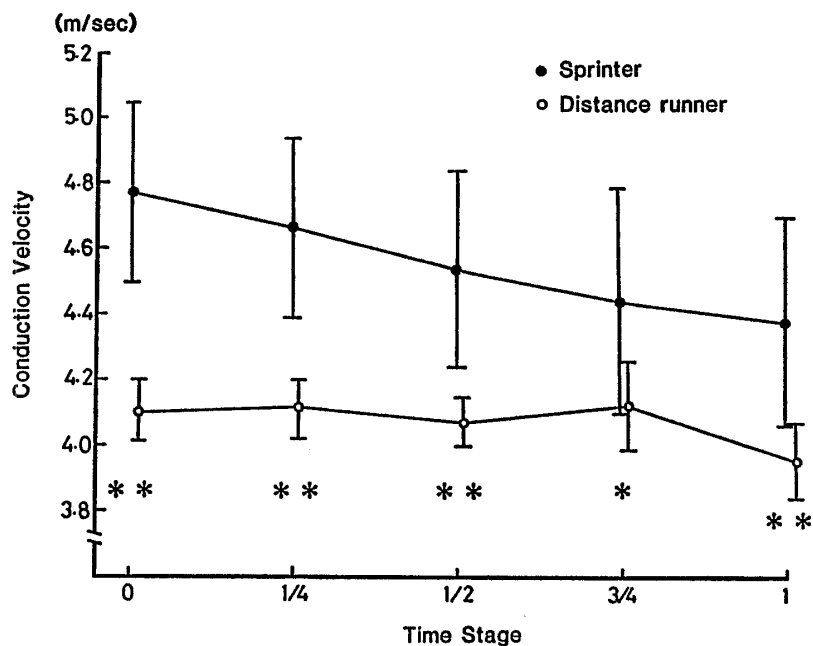


Fig. 8. Changes of average conduction velocity at each time stage in endurance time during 50 percent maximum voluntary contraction. Significance of difference between sprinter and distance runner group: \*:  $p < 0.05$  \*\*:  $p < 0.01$ .

るまで続けたときの持続時間と %FT 線維との関係を図7に示した. %FT 線維が高いほど持続時間は短かく, 両者の間には負の有意な相関 ( $r = -0.76$ ) が認められた.

持続テストにおける伝導速度の変化は各人ごとの最大持続時間を5段階に分け, その時点の前後10秒間の伝導速度を求め, 種目グループ別に平均した(図8). 時間経過にともない全体としては伝導速度が低下する傾向がみられたが, その低下パターンは種目グループで違いがみられた. すなわち, 短距離走者の平均伝導速度は 4.77 m/sec から 4.38 m/sec までほぼ直線的に減少したのに対し, 長距離走者のそれは 4.1 m/sec 前後で 3/4 ステージまでほぼ横ばいの経過をたどり, 最終段階においてのみ 3.91 m/sec に低下した. 両グループ間にはいずれのステージにおいても有意な差が見られた.

#### IV. 考 察

今回対象とした被検者の外側広筋の筋線維組成は, 陸上競技選手に関するこれまでの報告<sup>3)6)</sup>にほぼ一致する内容であった. また, %FT 線維と最大筋力および %FT 線維と持続時間との間にはそれぞれ相関があり, すでに報告されたものとほぼ同様な結果であった<sup>8)18)</sup>.

外側広筋に関する収縮レベル実験で, FT 線維の比率の高い短距離走者の伝導速度が, ST 線維の比率の高い長距離走者のそれより速く, 伝導速度と %FT 線維との関係は, 最大収縮では  $r = 0.84$  というかなり高い相関のあることが明らかになった. Stålberg<sup>17)</sup>は上腕屈と上腕筋の伝導速度に正の相関のあることを示し, 筋線維の直径と関係づけている. しかし, 筋線維タイプと伝導速度に関する直接的なデータはほとんどなく, 間接的に筋電図のスペクトルから伝導速度との関連性を述べているに過ぎない<sup>11)</sup>. Mortimer ら<sup>14)</sup>がネコを使った実験で, M. gastrocnemius(速筋型)の伝導速度は M. soleus(遅筋型)のそれより速いことを示しており, FT 線維の伝導速度は ST 線維のそれより速いことが類推される.

また, 収縮力を増すことにより短距離, 長距離

両グループとも, 伝導速度の水準は異なるが, いずれも S 字状の増加傾向を示した. 収縮力の調節に対する運動単位の活動様式に関して, Henneman<sup>7)</sup>は, 収縮レベルの低い時点で小さい運動ニューロンが活動に参画し, 収縮レベルが高まるにつれて大きい運動ニューロンが活動に参加してくると述べている. また, 運動ニューロンと筋線維はそれぞれの特性が互に対応したかたちで機能的に分化していることが多くの研究で明らかになっている<sup>2)5)</sup>. たとえば, 軸索伝導速度の速い運動ニューロン(Fタイプ)ほどその支配筋線維の収縮速度が速く, また発生する張力が大きい. 一方, 軸索伝導速度の遅い運動ニューロン(Sタイプ)に支配された筋線維は, 収縮速度も遅く, 発生張力も小さい<sup>2)</sup>. 収縮力の増大にともなう伝導速度の増加は, 大きな運動ニューロンに支配された FT 線維の活動が優勢になったものと考えられる. 中程度の収縮において, 伝導速度に変化がみられないのは, 運動単位の活動様式からみて, 新たなユニットの参画というよりは発射頻度の増加によるものと考えられる. DeLuca<sup>4)</sup>は, 力を次第に強めていく際の運動単位活動の発射頻度と参画の相互作用について, 30% MVC までは運動単位の参画が主体的であり, 30%から75% MVC までは発射頻度が優勢となると述べている. しかし, Bigland<sup>11)</sup>や Kanosue ら<sup>9)</sup>は, 中程度の収縮ではほとんど運動単位の発射頻度が増加していないという結果を報告しており, この点についてはさらに詳細な分析が必要であろう.

50% MVC を疲労にいたるまで保持したとき, 持続時間と %FT 線維とは負の相関関係にあり, %FT 線維の高いものほど持続時間は短かい傾向にあった. この結果は, FT 線維, ST 線維の機能的な特徴をそれぞれに反映した結果であり, すでに多くの報告がなされている. 筋線維組成に関連した持続時間のちがいは, 伝導速度の時間的变化にも現れており, %FT 線維の高い短距離走者群の伝導速度が収縮開始時期よりほぼ直線的に低下するのに対し, 長距離走者群のそれは持続時間の最終段階においてのみ有意に低下していた. 50%の筋力水準ではおよそ90%の筋線維が活動に参画

しているといわれている。FT 線維が疲労により収縮力を失い、疲労しにくい ST 線維が活動を続けるために、平均値としてあらわされる伝導速度が低下したように観測されるのであろう。Komi と Tesch<sup>11)</sup> は isokinetic な繰返し収縮中、筋電図のスペクトルの平均周波数が、FT 線維の比率の高いグループで有意に減少したことを示した。このスペクトルの低周波数側へのシフトを伝導速度の低下によるものとしており、われわれの得た結果と同じメカニズムによるものと思われる。しかし、Mortimer<sup>14)</sup> らは、反復電気刺激によって得られた伝導速度の低下が、疲労による代謝産物の蓄積に起因するとしており、この点についても考慮しなければならない。

以上のように、被検者が陸上競技の短、長距離というやや偏りのある集団ではあるが、筋線維組成のちがいが収縮力や持続時間だけでなく、筋線維の伝導速度においても筋線維タイプの収縮特性に対応したかたちで密接に関係していることが明らかになった。このことは筋電位伝導速度によって筋線維組成の推定が可能であることを示すものであり、スポーツ科学への応用が期待される。

## V. 要 約

陸上競技選手の右外側広筋における等尺性収縮中の筋電位伝導速度と、その筋線維組成の関係について検討した。被検者の筋線維組成は短距離走者群が平均 69.2%FT 線維(男子12名)であり、長距離走者群は 39.7%FT 線維(男子7名)であった。

1) 外側広筋の筋電位伝導速度は2つの表面筋電位信号のゼロクロス時間差により計測した。その結果、脚伸展による収縮力を最大筋力(MVC)の25%から100%まで増すことにより、伝導速度は短距離走者群では平均 4.40 から 4.84 m/sec, また長距離走者群では平均 3.91 から 4.31 m/sec まで S 字状に増加した。両者の間には有意な伝導速度の差が認められた。

2) 伝導速度と %FT 線維との相関係数は25, 50, 75および100% MVC の各収縮レベルにおいて、それぞれ 0.59, 0.63, 0.64 および 0.84 であっ

た。

3) 50% MVC の持続にともなう伝導速度の変化は、短距離走者群が平均 4.77 から 4.38 m/sec へと直線的に低下したのに対し、長距離走者群のそれは 4.11 から 3.96 m/sec へと最終ステージにおいてのみ低下した。

これらの結果より、伝導速度の個人的なちがいは筋線維組成によるもので、FT 線維の比率の高い筋ほど伝導速度が速いこと、また伝導速度の変化は筋線維の動員様式に依存することが明らかになった。

(受付 昭和60年1月14日)

## 文 献

- 1) Bigland, B. and Lippold, O. C. J.(1954) : Motor unit activity in the voluntary contraction of human muscle. *J. Physiol.*, **125**, 322-335.
- 2) Burke, R. E.(1967) : Motor unit types of cat triceps surae muscle. *J. Physiol.*, **193**, 141-160.
- 3) 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.
- 4) DeLuca, C. J.(1979) : Physiology and mathematics of myoelectric signals. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **BME-29** (10), 564-571.
- 5) Edström, L. and Kugelberg, E.(1968) : Histochemical composition, distribution on fibers and fatiguability of single motor units. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiat.*, **31**, 424-433.
- 6) 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.
- 7) Henneman, E., Somjen, G. and Carpenter, D. C. (1965) : Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J. Neurophysiol.*, **28**, 560-580.
- 8) Hultén, B., Thorstensson, A., Sjödin, B. and Karlsson, J.(1975) : Relationship between isometric endurance and fibre types in human leg

- muscles. *Acta Physiol. Scand.*, **93**, 135-138.
- 9) Kanosue, K., Yoshida, M., Akasawa, K. and Fujii, K.(1979) : The number of active motor units and their firing rates in voluntary contraction of human brachialis muscle. *Jap. J. Physiol.*, **29**, 427-443.
  - 10) 勝田 茂(1983) : 筋線維の特性に基づくスポーツ適性の開発に関する研究. 昭和57年度科研費 (一般研究C) 研究成果報告書. 1-48.
  - 11) Komi, P. V. and Tesch, P.(1979) : EMG frequency spectrum, muscle structure, and fatigue during dynamic contractions in man. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **42**, 41-50.
  - 12) Lynn, P. A.(1979) : Direct on-line estimation of muscle fiber conduction velocity by surface electromyography. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **BME-26** (10), 564-571.
  - 13) Masuda, T., Miyano, H. and Sadoyama, T. (1982) : The measurement of muscle fiber conduction velocity using a gradient threshold zero-crossing method. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **BME-29** (10), 673-678.
  - 14) Mortimer, J. T., Magnusson, R. and Petersen, I. (1970) : Conduction velocity in ischemic muscle : effect on EMG frequency spectrum. *Amer. J. Physiol.*, **219**, 1324-1329.
  - 15) Rusko, H., Havu, M. and Karvin, E.(1978) : Aerobic performance capacity in athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **38**, 151-159.
  - 16) Sadoyama, T., Masuda, T. and Miyano, H. (1983) : Relationships between muscle fibre conduction velocity and frequency parameters of surface EMG during sustained contraction. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **51**, 247-256.
  - 17) Stålberg, E. (1966) : Propagation velocity in human muscle fibers in situ. *Acta Physiol. Scand.*, **Suppl. 287**, 1-112.
  - 18) Tesch, P. and Karlsson, J. (1978) : Isometric strength performance and muscle fibre type distribution in man. *Acta Physiol. Scand.*, **103**, 47-51.
  - 19) Zipp, P.(1978) : Effect of electrode parameters on the bandwidth of the surface e. m. g. power-density spectrum. *Med. Biol. Eng. Comput.*, **16**, 537-541.