

## 筋力トレーニングが筋線維伝導速度に及ぼす影響

松永 智\* 佐渡山亜兵\*\* 宮田浩文\*\*\* 勝田 茂\*\*\*\*

THE EFFECTS OF STRENGTH TRAINING ON  
MUSCLE FIBER CONDUCTION VELOCITY OF  
SURFACE ACTION POTENTIALSATOSHI MATSUNAGA, TSUGUTAKE SADOYAMA, HIROFUMI MIYATA  
and SHIGERU KATSUTA

## Abstract

We investigated the effects of strength training a muscle fiber conduction velocity in biceps brachii of 7 male students. The subjects were trained to exhaustion by 60% of maximum isotonic voluntary contraction with 3 sets/day, 3 days/week for 16 weeks. The muscle fiber conduction velocity was measured with a surface electrode array placed along the muscle fibers, and calculated from the time delay between 2 myoelectric signals recorded during a maximal voluntary contraction. Upper arm girth significantly increased ( $p < 0.01$ ), from  $29.2 \pm 1.4$  cm (means  $\pm$  S. D.) to  $30.6 \pm 1.5$  cm. On the other hand, training induced no significant changes in upper arm skinfold. A significant difference between pre- and post-training was found in maximum isotonic strength ( $p < 0.01$ ). Although maximum isometric strength showed no significant changes with training, there was a tendency for an increase in maximum isometric strength. Muscle fiber conduction velocity increased by 3.5% during training period, but this was not significant. These results suggest no effects of strength training on muscle fiber conduction velocity.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1990, 39 : 99~105)

**key words** : human biceps brachii, strength training, muscle fiber conduction velocity

## I. 緒 言

随意収縮中の活動電位が筋線維を伝わる速度は多点の表面電極により容易に計測できるようになった。この筋線維伝導速度は表面筋電図のスペクトルにも関係が深く、筋の機能的な側面を反映する指標として注目されはじめており、最近その関連研究報告も多い。古くは Buchthal<sup>4)</sup> や Stålberg<sup>19)</sup> の势力的な研究があり、局所的な筋疲労や血流阻止にともなって伝導速度が低下するこ

と、伝導速度の変化が活動電位の発射頻度や筋内温度に依存すること、さらには筋の種類や個人によって伝導速度に違いがあることなど、生理学的な示唆に富む内容であった。しかし多点の針電極による侵襲的な方法であったため、技術的な困難さから、筋線維伝導速度の計測手法が一般にはほとんど広まらなかった。Lynn<sup>11)</sup> がはじめて表面筋電図から伝導速度を計測する手法を開発して以来、次第に伝導速度に関する研究も増えてきている。なかでも宮田たち<sup>14)</sup>は、走運動の主働筋であ

\*青山学院大学  
〒243-01 神奈川県厚木市森の里青山1-1\*\*製品科学研究所  
〒305 茨城県つくば市東1-1-4\*\*\*山口大学教養部  
〒535 山口県山口市大字吉田1677-1\*\*\*\*筑波大学体育科学系  
〒305 茨城県つくば市天王台1-1-1

Aoyama Gakuin University, Atsugi-shi, Kanagawa. (243-01)

Human Factors Science Division, Industrial Products  
Research Institute, Tsukuba-shi, Ibaraki. (305)College of General Education, Yamaguchi University,  
Yamaguchi-shi, Yamaguchi. (753)Institute of Health and Sports Sciences, University of  
Tsukuba, Tsukuba-shi, Ibaraki. (305)

る外側広筋の速筋線維の割合と筋線維伝導速度とが高い相関関係があることを報告しており, Andreassen & Arendt-Nielsen<sup>1)</sup> は前脛骨筋への筋内刺激によって引き起こされる単収縮力のトルクと活動電位の伝導速度が高い相関関係にあることから, 伝導速度が運動単位タイプの特徴を表す指標であることを報告している. これらの関係は速筋線維の活動電位伝導速度が遅筋線維のそれに比べて速いことを示唆するものであり, このことはまた表面筋電図の平均周波数と筋線維組成とが相関関係にあるといういくつかの報告からも推察される<sup>8, 15, 21)</sup>. しかし, こうした仮定は伝導速度に関するより多くの実験的データの蓄積が必要で, 伝導速度の個人差, 筋線維の直径と伝導速度の関係, トレーニングによる影響などまだ不明な点が多い. もしこうした関係が明らかになれば, トレーニングによる神経系の要因や筋線維タイプとの関連などのメカニズムの解明に役立つであろう.

本研究は筋力トレーニングによって生じるであろう筋の肥大や収縮力の変化が活動電位伝導速度に影響を及ぼすのかどうかを検討するものである.

## II. 方 法

被検者は筑波大学体育専攻男子学生7名(18.9±0.8歳, 174.3±6.6cm, 68.4±5.4kg)とした. 対象とした筋は筋力トレーニングの実施やそれにもなる生理的, 形態的变化の計測に適していることから上腕二頭筋を選んだ. なお, 被検者は全て右利きであり, 測定も右上腕二頭筋で行った.

筋力トレーニングはバーベルを用い, これを両腕かつ逆手で保持し, 両肘を体測に固定して肘関節を軸に前腕を屈伸する, いわゆる Two Hands Curl と呼ぶ運動を行った. 負荷重量は最大持ち上げ重量の60%とした. この運動を可能な限り繰り返し行い, これを1セットとした. およそ5分の休息をはさみ, 1日3セット, 週に3日の割合で, 16週間にわたりこのトレーニングを継続した. 60%の負荷重量は4週間毎に修正した.

測定は形態的变化と機能的変化の両面から行った. 筋力トレーニングによる形態的变化は, 筋の

肥大を反映する指標として上腕囲をマルチンの巻尺で計測した. またその上腕囲の肥大が筋によるものなのか, または脂肪によるものかをチェックするために, 上腕部の二頭筋側の皮脂厚を皮脂厚計で計測した. 測定部位は肩峰点と肘頭の間中部で行った.

一方機能的変化については, 等尺性収縮および等張性収縮における最大筋力を計測した. なお等尺性筋力計測に際し, 被検者は, 椅座位で正対した台上に上腕をのせ, 肘関節が90度になるように前腕を曲げ, 回外位で手首と筋力計のロードセルとをワイヤーで連結することにより, 肘関節を90度に固定した状態で伸展方向に等尺性収縮を行った. 検者の合図によって, 被検者にはできるだけ速く最大値に達するように収縮を行わせ, 筋電位計測のために約2秒間収縮を保持するように指示した. ロードセルの出力はストレインアンプで増幅したのちペングラフで記録し, そのチャートから最大値を計算した. また, 等張性最大筋力の計測には, バーベルを用い肘を支点に肩と上体を動かさないようにして Two Hands Curl を行わせ, 1回しか持ち上げられない場合の負荷を等張性最大筋力値とした.

筋電位の計測は直径1mm, 長さ10mmのステンレス線を5mm間隔で5本平行に配列したアレイ状の表面電極を用いた(図1-a). この電極の配列が上腕二頭筋の筋線維方向と直角になるよう配置した. 隣り合った電極から双極性に4チャンネルの筋電位を同時に誘導記録した. アース電極は第一中手骨上に置いた. 計測の際, 電極列の位置が神経支配帯に一致すると伝導速度の計測ができなくなるので, 4チャンネルの筋電信号(図1-b)をストレージ式のオシロスコープでモニターし, 一定の時間遅れをもつ波形が得られるのを確認した上で, 電極がずれないように粘着テープで固定した. この電極位置が実験期間中, 同じになるように注意した.

筋線維伝導速度の測定は, できるだけ多くの運動単位が筋の収縮活動に参加すると考えられる等尺性の最大筋力発揮時に行った.

筋電計測のための増幅器の周波数帯域は53

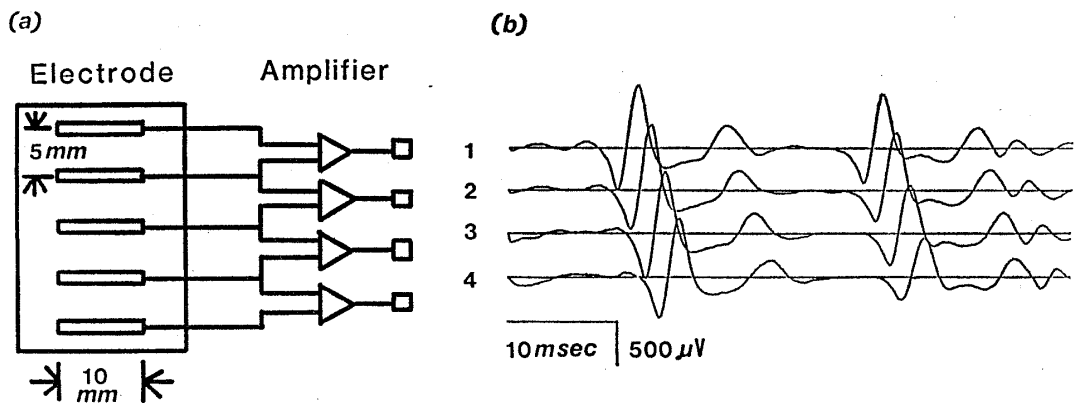


Fig. 1. Schematic representation of surface electrode array(a) and an example of four myoelectric signals(b).

Hz~1 KHz とし、増幅された筋電信号をサンプリング周波数 5 KHz で A/D 変換(分解能 12-bit)し、フロッピーディスクに記録させた。サンプル数は 1 チャンネル当り 4096 点で、その時間はおよそ 0.8 秒の長さに対応する。A/D 変換の開始は等尺性最大収縮の筋力曲線をオシロスコープでモニターしながら筋力曲線がピークに達した時点を見計らってスイッチを押し、スタートさせた。

伝導速度の算出は相関法によって<sup>16)</sup>、2つの隣接する筋電信号の相互相関係数を計算し、3つの組合せから最も相関の高いチャンネルを選び、電極間隔 5 mm で相関係数の最大値で得られる時間差から筋線維伝導速度を計算した。信号間の相関係数が 0.8 以下の場合には、測定をやり直した。この相関法で算出された伝導速度は、電極幅 10 mm の表面電極を用いていることから、1個の運動単位の活動における伝導速度ではなく、電極直下にある多数の筋線維の活動電位を加重した干渉波形から計算されたものであり、多数の運動単位活動電位の平均的な伝導速度といえる。

### III. 結 果

筋力トレーニングにともなう上腕囲の変化を被検者 7 人の平均値として図 2 に示した。ひとりの被検者はトレーニングによって上腕囲の変化がほとんどみられなかったが、他の 6 人についてはトレーニングを積み重ねるにしたがって増加する傾向を示し、被検者全体の平均値ではトレーニング前  $29.2 \pm 1.4$  cm であった上腕囲がトレーニング終

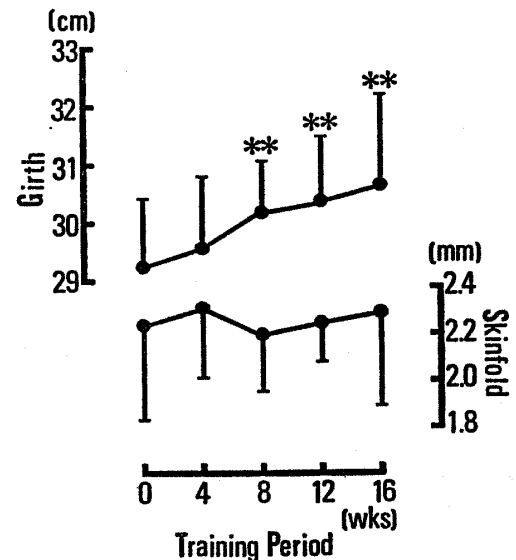


Fig. 2. Upper arm girth and skinfold during a 16-wk training period. Each point is means  $\pm$  SD. \*\* indicates significant difference at  $p < 0.01$  compared to 0 week.

了時では  $30.6 \pm 1.5$  cm と増加した。トレーニング前後の上腕囲の平均値は 4.8% の有意な増加が認められた ( $p < 0.01$ )。これに対し皮脂厚は有意な変化は示さなかった(図 2)。このことはトレーニングにともなう上腕囲の増加が筋そのものの肥大によることを示している。

図 3 に等張性最大筋力のトレーニングによる経時的変化を示している。トレーニングを重ねるにしたがって全ての被検者の筋力は漸増し、トレーニング前に平均  $36.1 \pm 5.6$  kg であった筋力はトレーニング 4 週目で  $38.5 \pm 3.2$  kg ( $p < 0.05$ ) に、12 週目で  $41.8 \pm 2.3$  kg で 1% 水準で有意な増加を、ト

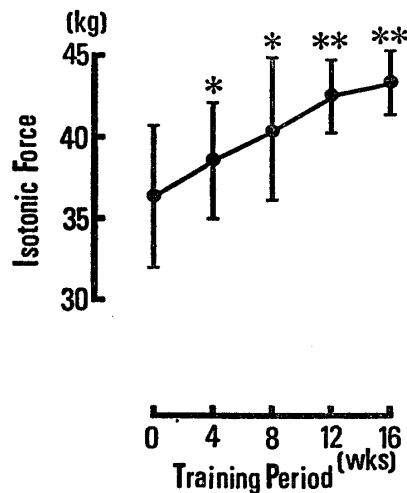


Fig. 3. Average maximal isotonic force of elbow flexion during a 16-wk training period. Each point is means $\pm$ SD. \* and \*\* indicate significant difference at  $p < 0.05$  and  $0.01$  compared to 0 week, respectively.

トレーニング終了時点では  $42.5 \pm 2.2$  kg とトレーニング前に比べ 17.7% の有意な増加を示した ( $p < 0.01$ ).

図 4 は等尺性最大筋力の経時変化である。トレーニング前に  $33.8 \pm 3.9$  kg であった筋力がトレーニング終了時点では  $36.4 \pm 4.3$  kg と 7.7% の増加を示したが、その変化は有意なものではなかった。図 5 は等尺性最大筋力発揮時の筋線維伝導速度の筋力トレーニングによる変化を示している。トレーニング前  $4.04 \pm 0.6$  m/sec であった伝導速度が 12 週目で  $4.22 \pm 0.36$  m/sec と変化し、最終の 16 週目では  $4.18 \pm 0.4$  m/sec となった。トレーニング前後では 3.5% の増加を示した。7 人のうち 5 人はトレーニングの前後で伝導速度が増加していたが後の 2 人は伝導速度がわずかに減少してい

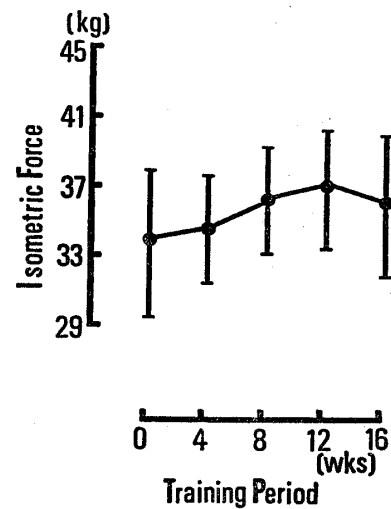


Fig. 4. Average maximal isometric force of elbow flexion during a 16-wk training period. Each point is means $\pm$ SD.

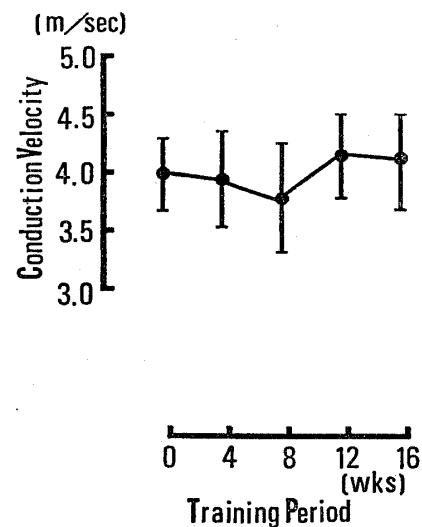


Fig. 5. Conduction velocity of biceps brachii during a 16-wk training period. Each point is means $\pm$ SD.

Table 1. Results of the various tests before and after 16 weeks of strength training

		Before	After	% Difference
Upper arm girth	(cm)	29.2 $\pm$ 1.4	30.6 $\pm$ 1.5	4.8*
Upper arm skinfold	(cm)	2.2 $\pm$ 0.4	2.3 $\pm$ 0.4	4.5
Isotonic force	(kg)	36.1 $\pm$ 5.6	42.5 $\pm$ 2.2	17.7**
Isometric force	(kg)	33.8 $\pm$ 3.9	36.4 $\pm$ 4.3	7.7
Conduction velocity	(m/sec)	4.04 $\pm$ 0.31	4.18 $\pm$ 0.40	3.5

Values are means $\pm$ S. D. (n=7) \* =  $p < 0.05$ , \*\* =  $p < 0.01$

た。被検者全体として筋線維伝導速度にはトレーニングの前後で有意な増加傾向は認められなかった(表1)。

#### IV. 考 察

一定期間以上の筋力トレーニングが筋力や筋肥大といった筋の機能性や形態的な側面に及ぼす影響については、これまでも多くの報告があり<sup>12)</sup>、今回の実験でも今までの報告と同様、筋力の増大と筋肥大が生じた。筋力トレーニングによるこうした筋の機能的因子として神経系、構造的因子として筋線維継面積や筋線維数および筋線維タイプが密接に関連しているといわれている<sup>13)</sup>。トレーニングによるこれらの変化が筋の機能特性と関連が深い活動電位とどのように関連しているのかを検討した。

まず、最も関連が深いと考えられるのは筋の肥大である。この筋の肥大は、筋線維の肥大<sup>6)</sup>、筋線維数の増加<sup>7)</sup>、あるいはその両方の可能性が示されているが、一般的には筋線維の肥大によるものと考えられている。筋線維伝導速度は筋線維の直径に比例するという報告がある<sup>3,10)</sup>。しかしながら、これらの報告は筋バイオプシー法によって筋の組織を採取して直接筋線維の径を測ったものではなく、上腕囲や下腿囲とが伝導速度と直線的な関係にあったことから伝導速度と筋線維の径との間の関係を結論づけている。こうした推論は、特に有髄線維である神経線維の直径と伝導速度とが直線関係にあること<sup>9)</sup>、つまり 1) Fタイプ(Fast Type)とよばれる運動単位は軸索が太く、運動ニューロンの伝導速度は速く、それに支配された筋線維の収縮力は大きくかつ収縮速度も速いこと、2) Sタイプ(Slow Type)とよばれる運動単位は軸索の伝導速度が遅く、収縮力が小さくかつ収縮速度も遅い、といった運動単位の特性から筋線維についても同様の関係が帰結されたものと考えられる。こうした点で、本研究においてもトレーニングによって引き起こされた筋の肥大と増加する筋線維伝導速度が密接に関係する結果が得られるものと期待された。しかしながら、各個人のトレーニング前後で上腕囲の変化と伝導速度の

変化との間には有意な相関関係は見いだすことができなかった。Buchthal et al.<sup>4)</sup> や Sadoyama et al.<sup>17)</sup> は筋線維の直径と筋線維伝導速度との間には特別な関係が見いだされなかったと報告しており、これらのことを考慮するとトレーニングにともなう筋肥大が筋線維伝導速度に及ぼす影響は低いものと考えられる。

トレーニングによる末梢的变化のもうひとつの要因として筋線維タイプが考えられる。今まで、骨格筋を構成する筋線維の構成比は先天的なもので、トレーニングによっては変化しないといわれてきたが<sup>10)</sup>、最近になってこれに否定的な報告もみられるようになってきた<sup>18)</sup>。またこの筋線維タイプの構成比、すなわち速筋線維の比率と筋線維伝導速度との間には高い相関関係があることが報告されている<sup>14)</sup>。もしトレーニングによって筋線維タイプの移行が起これば、伝導速度にもそうした影響が現れると考えられる。3.5%の伝導速度の変化から考えると、移行が起これなかったか、あるいは中間的なタイプの筋線維の質的变化による程度と考えられる。

最後に、トレーニングが中枢の興奮水準を変化させた結果、参加する運動単位が増え、そのために筋力が増加するという考えがある。筋力増加に及ぼす神経系の要因について、Komi et al.<sup>10)</sup>は一卵性双生児を被検者に12週間の筋力トレーニングを実施し、種々の筋機能特性への影響について検討した。その結果、収縮力の増大とともに積分筋電位の増大が起これ、その原因として活動に参加する運動単位数が増えたためと考察している。また福永<sup>5)</sup>も絶対筋力の増加にともなう筋電図積分値が増加することを報告しており、トレーニング前に参加しなかった運動単位が収縮に参加するようになったと推察している。こうした解釈が正しいとすると、活動電位の伝導速度にもそうした影響が現れなければならない。しかしながら、伝導速度の増加は3.5%で、期待されたほどのものではなかった。筋線維伝導速度は収縮力の増大にともなう速くなることが知られている<sup>3,3,14)</sup>。このことは大きい力を発揮する際に活動する運動単位の筋線維伝導速度が速いことを意味するもので、

筋力トレーニングによって, これまで活動に参加していなかった活動閾値の高い運動単位が収縮に参加するとすれば, より速い伝導速度が計測されるであろう. Thorstennsson et al.<sup>20)</sup> は筋力トレーニングによる筋力の増大と神経筋機能との関連について, 特に運動単位タイプの活動参加の様式がトレーニングによってどう変化するかを明らかにするため, 積分筋電図や運動単位電位を計測した. 彼らの実験の意図は, 筋力トレーニングによってFタイプの運動単位が刺激され, 収縮力を高めた場合にこのFタイプの運動単位が活動に参加し, その活動電位が記録波形に反映されると考えたからである. しかしながら, トレーニングによる筋力増大効果にもかかわらず積分筋電位は増加しなかったと報告している. その点で, 計測したパラメーターは異なるがほぼ同様の結果であったといえる.

以上のように, 今回の研究では筋力トレーニングによる伝導速度の変化自体は, 期待されたほど大きいものではなかった. これは筋線維伝導速度が表面から計測されているために多くの運動単位の活動が平均化されていること, また伝導速度の変化の幅がそれほど大きくないなど, 筋力トレーニングによる筋力増加や, 筋肥大に対応した筋の神経生理学的なメカニズムを説明できるほどの感度を持ち合わせていなかったことによるものとも考えられる. トレーニングの質, 量, 方法などについては今後の課題としたい.

## V. 総 括

筋力トレーニングにともなう筋力の増大が筋線維伝導速度に及ぼす影響について検討した.

被検者は男子学生7名とし, 被検筋には上腕二頭筋を用いた. トレーニングはTwo Hands Curlを最大筋力の60%の負荷で反復可能な限り繰り返す運動を1セットとし, それを1日3セット, 週3日の頻度で16週間行わせ, 以下の結果を得た.

1. 上腕囲はトレーニング前に比べてトレーニング終了時で $29.2 \pm 1.4$  cm から  $30.6 \pm 1.5$  cm ( $p < 0.01$ )に増加したが, 皮脂厚には有意な変化は認められなかった.

2. 等尺性最大筋力は $33.8 \pm 3.9$  kg から  $36.4 \pm 4.3$  kg, 等張性最大筋力は $36.1 \pm 5.6$  kg から  $42.5 \pm 2.2$  kg ( $p < 0.01$ )に増加した.

3. 等尺性最大筋力発揮時の筋線維伝導速度は $4.04 \pm 0.31$  m/sec から  $4.18 \pm 0.40$  m/sec へとトレーニングの前後で3.5%の増加を示したがその変化は有意なものではなかった.

これらの結果より筋力トレーニングは筋力増加を生じさせたが, 活動電位の伝導速度には変化を及ぼさなかった.

## 謝 辞

本研究を行うに当たり御指導および御助言いただきました通商産業省工業技術院製品科学研究所, 主任研究官増田 正氏に感謝の意を表します.

(受付 昭和63年11月26日)

## 文 献

- 1) Andreassen, S. and Arendt-Nielsen, L. (1987): Muscle fibre conduction velocity in motor units of the human anterior tibial muscle: a new size principle parameter. *J. Physiol.*, **391**, 561-571.
- 2) Arendt-Nielsen, L. and Mills, K. R. (1985): The relationship between mean power frequency of the EMG spectrum and muscle fibre conduction velocity. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, **60**, 130-134.
- 3) Broman, H., Bilotto, G. and Deluca C. J. (1985): Myoelectric signal conduction velocity and spectral parameters: influence of force and time. *J. Appl. Physiol.*, **58**, 1428-1437.
- 4) Buchthal, F., Guld, C. and Rosenfalck, P. (1955): Propagation velocity in electrically activated muscle fibres in man. *Acta Physiol. Scand.*, **34**, 75-89.
- 5) 福永哲夫(1978): ヒトの絶対筋力—超音波法による体肢組成・筋力の分析—. 杏林書院, 212-227.
- 6) Gollnick, P. D., Timson, B. F., Moore, R. L. and Riedy, M. (1981): Muscular enlargement and number of fibers in skeletal muscles of rats. *J. Appl. Physiol.*, **50**, 936-943.
- 9) Gonyea, W. J., Sale, D. G., Gonyea, F. B. and

- Mikesky, A. (1986) : Exercise induced increase in muscle fiber number. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **55**, 137-141.
- 8) Häkkinen, K. and Komi, P. V. (1983) : Electromyographic and mechanical characteristics of human skeletal muscle during fatigue under voluntary and reflex conditions. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, **55**, 436-444.
- 9) Hursh, J. B. (1939) : Conduction velocity and diameter of nerve fibers. *Am. J. Physiol.*, **127**, 131-139.
- 10) Komi, P. V., Viitasalo, J. H. T., Havu, M., Thorstensson, A., Sjödin, B. and Karlsson, J. (1977) : Skeletal muscle fibres and muscle enzyme activities in monozygous and dizygous twin of both sexes. *Acta Physiol. Scand.*, **100**, 385-392
- 11) Lynn, P. A. (1979) : Direct on-line estimation of muscle fiber conduction velocity by surface electromyography. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **BME-26**, 564-571.
- 12) MacDougall, J. D., Elder, G. C. B., Sale, D. G., Moroz, J. R. and Sutton, J. R. (1980) : Effects of strength training and immobilization on human muscle fibres. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **43**, 25-34.
- 13) 宮村実晴, 矢部京之助 (1986) : 体力トレーニング—運動生理学的基礎と応用—. 真興貿易医書出版部, 41-60.
- 14) 宮田浩文, 佐渡山亜兵, 勝田 茂 (1985) : 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—. *体力科学*, **34**, 231-238.
- 15) Moritani, T., Gaffney, F. D., Carmichael, T. and Hargis, J. (1985) : Interrelationships among muscle fiber types, electromyogram, and blood pressure during fatiguing isometric contraction. *Biomechanics*, **9**, 287-292.
- 16) Naeije, M. and Zorn, H. (1983) : Estimation of the action potential conduction velocity in human skeletal muscle using the surface EMG cross-correlation technique. *Electromyogr. Clin. Neurophysiol.*, **23**, 73-80.
- 17) Sadoyama, T., Masuda, T., Miyata, H. and Katsuta, S. (1988) : Muscle conduction velocity and fibre composition in human vastus lateralis. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **57**, 767-771.
- 18) Simoneau, J. A., Lortie, G., Boulay, M. R., Marcotte, M., Thibault, M. C. and Bouchard, C. (1985) : Human skeletal muscle fiber type alteration with high-intensity intermittent training. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **54**, 250-253.
- 19) Stålberg, E. (1966) : Propagation velocity in human muscle fibres in situ. *Acta Physiol. Scand.*, **Suppl. 287**, 1-112.
- 20) Throstensson, A., Karlsson, J., Viitasalo, J. H. T., Luhtanen, P. and Komi, P. V. (1976) : Effects of strength training on EMG of human skeletal muscle. *Acta Physiol. Scand.*, **98**, 232-236.
- 21) Wretling, M. L., Gerdle, B. and Henriksson-Larsen, K. (1987) : EMG : a noninvasive method for determination of fibre type proportion. *Acta Physiol. Scand.*, **131**, 627-628.