

筋線維タイプ特性と身体運動

的場 秀樹*

FIBER TYPE CHARACTERISTICS AND EXERCISE

Hideki MATOBA

1. はじめに

1970年代以降、ニードル・バイオプシー法の普及により、ヒトの骨格筋の筋線維タイプ特性および各筋線維タイプのトレーニングへの適応に関する多くの知見が蓄積されてきた。さらに筆者は、これまで主に実験動物を用いて骨格筋に及ぼす発育やホルモンの影響を調べてきたが、この所見はヒトの筋線維タイプ特性を理解する上で有用と思われる。

本論文では、筋線維タイプ特性に関する知見を合理的な身体運動の修得のための考え方や具体的な方法にどのように反映させることができるか考察してみたい。

2. 体づくりの適時性についての考え方の検討

宮下(1984)は、思うような動作が不自由なくできる成人となるためには、動作発現に関与する身体諸機能をそれぞれの発達する時期に合わせて、重点的に活動させる必要があると述べている。そして発育の各段階での具体的目標を次のように定めることを勧めている。つまり、動作の調整にかかわる脳・神経系の発達が著しい小学校低学年時には、さまざまな身のこなしを修得させることに重点をおく。続いて動作の持続にかかわる呼吸・循環系の発達の著しい小学校高学年から中学校にかけての時期には、持久力の養成を重点的に行わせる。そして動作の起動にかかわる筋・骨格系のそれぞれの発達が著しい高等学校期に、筋力の向上をはかることを目的とした運動を重点的に行わせる。

自然な発育の条件下での伸びが最も盛んな時に、適正な運動刺激を与えることによって、身体の各器官およびそれぞれと最も関連の深い体力要素を最大限に発達させるべきであると宮下(1984)の考え方は、骨格筋の筋線維タイプ特性に関する研究の成果に照らせば、次のように解釈される。

* 徳島大学総合科学部、運動生理学教室

* Laboratory of Exercise Physiology, Faculty of Integrated Arts and Sciences, The University of Tokushima, Tokushima 770, Japan

ヒトを含む哺乳類では、筋線維の速筋線維タイプと遅筋線維タイプへの分化は、遅くとも出生後数週間以内に完了する。つまり、筋線維タイプの分化の面からみると、種々の運動パターンの修得に必要な骨格筋の条件は出生後まもなく整うといえる。したがって、神経・筋機能協応の生後における発達、神経側の発達に依存するところが極めて大きいはずである。以上のことから、神経系の発達の著しい小学校低学年までの時期に、多様な運動を経験させて神経と速筋線維および遅筋線維との協応能を高め、それを基本にして運動パターンの形成および定着をはかるべきであるとの考えは、理にかなっていると思われる。

また宮下 (1984) の考えでは、持久性を高めるための運動に重点を置く時期を筋力を高めることに重点を置く時期よりも早期に設定するべきとなっている。これを筋線維タイプ特性の面から意義づけるためには、ヒトの各筋線維タイプ特性の发育変化についてのデータが必要であるが、この方面の研究は現在のところ十分には行われていない。しかしこれまでに報告された研究結果から判断すると、自然な发育条件で骨格筋の各筋線維タイプがはじめに成人なみの能力を備えるのは、代謝面では酸化能力であり、無酸素的な解糖能力が成人なみとなるのはそれよりも時期的に遅れると言えるようである (Bell et al., 1980; Eriksson et al. 1973)。このことは、骨格筋の代謝レベルでも、持久性を高めるための運動を行う素地ができる時期のほうが筋力を高めるための運動を行う素地のできる時期よりも早いと言えることを意味している。

3. 静的あるいは動的な筋力の发育・加齢変化とその性差についての考え方の検討

握力、背筋力あるいは上腕屈筋力のような等尺性の最大筋力で評価できるいわゆる静的筋力は发育にともない増加するが、増加の様相は男女で異なることが示されている (金久ら, 1985; 高石ら, 1982)。つまり、11-12 歳までは男女とも静的な筋力の発揮能力は年齢とともにゆるやかに増加する。しかし、この年齢以降 17 歳までは男子で著しい増加が見られる。これに対して、女子ではその増加率は 15 歳までは 11-12 歳までの増加率とほとんど変わらず、16 歳以後はほとんど増加しない。結果的に、13 歳以降は男子の静的筋力の発揮能力が女子に比べて著しく高くなる。

腕屈曲パワーや等速性収縮時の最大トルク、あるいは自転車エルゴメーターの全力駆動時の仕事率で評価される動的な筋力の発揮能力も、静的な筋力の発揮能力と同様な发育変化を示すことが報告されている (金子, 1974; 淵本と金子, 1981; 金久ら, 1984; 生田と猪飼, 1972)。つまり男子では、動的な筋力の発揮能力も、13 歳から 15 歳に著しい増加を示し、その後もゆるやかに増加するが、女子では急激な動的筋力の増加期は認められず、しかも 14 歳以後はほとんど伸びがみられないことが示されている。またこのような发育変化の結果、13 歳以降は動的な筋力の発揮能力にも著しい性差が見られることが示されている。

上に述べたような静的あるいは動的な筋力の発揮能力の发育変化および性差の発現は、筋肉の量的な増加をよく反映しており、質的なちがいはそれほど関与していないというのがこれまでの通説であった。また時に筋機能の質的な変化の関与が論議される場合でも、それは神経支配様式の改善と関連づけて論じられており (金久ら, 1985)、筋組織そのものの質的な変化が関与することの可能性は、ほとんど考慮されてこなかった。しかし、最近の筋線維タイプ特性に関する研究では、速筋線維と遅筋線維は静的な筋力の発揮能力に差はないが、動的な筋力の発揮能力の点では速筋線維が遅筋線維よりも優れていることが明らかにされてい

る (Fualkner et al., 1980)。また、筆者らはアンドロゲンがオスのマウスの速筋線維比率を高く保つ働きがあることが明らかにしている (Matoba & Niu 1981; 的場と村上 1986)。さらに速筋線維の思春期における肥大の程度は、男子が女子より著しいことが報告されている (Saltin et al., 1977)。このため、思春期以後はたとえ筋線維組成に差がない場合でも、男子の骨格筋が女子の骨格筋よりも速筋的な傾向が強いと解釈される。したがって、筋線維タイプ特性についての研究の成果を考慮に入れると、少なくとも動的な筋力の発達および性差の発現には、骨格筋の量的な変化ばかりでなく、質的な面での変化も関与していると考えたほうが良さそうである。

4. 運動の種目適性についての考え方の検討

ある個人がどのような運動種目に適しているかということ、すなわち個人の運動種目適性を判断するためには、これまで多くの方法が試みられてきた。それらの一つは、運動能力テストを課し、それらのテスト結果から個人に適した運動の種目を推定するという方法である。この方法により、例えば 50 m 走の記録のよい者であれば陸上競技の短距離走に、逆に 1,500 m 走の記録がよければ長距離走に向いているなどの判断がなされてきた。校内あるいは学校対抗の各種競技会に参加する機会を与え、各競技会で活躍する者を、それぞれの種目に適性をもつと判断するのも、この方法の延長にあると考えられる。いずれにしても、実際に各種の運動を行わせる場を設定し、パフォーマンスの優れた者を各運動種目に適していると判断する方法である。

他に、体格あるいは体型から各人がどのような運動種目に適しているかを予測するということも、これまでによく行われてきた。身長の高い者はバスケットボールやバレーボールに適しているとしたり、逆に身長が低く筋肉の発達のよい者はレスリングやウエイトリフティングに適していると判断するのが、この方法の一例である。

しかしながら、上に述べたような方法で運動の種目適性を推定するのは、次のような意味で必ずしも満足できるものでない。つまり、ある時点でのパフォーマンスは、遺伝で決定されるような先天的な要因ばかりでなく、トレーニングのようなそれまでの運動歴にも強く影響される。このためパフォーマンスによる種目適性の決定は、遺伝的な可能性に基づいて運動の種目特性を決定しているとは言いがたい面がある。また体格あるいは体型についても同様なことがいえる。つまり、身長などはかなり遺伝の影響が強いとはいえ、一般的にはやはり栄養をはじめとする環境因子に依存するところも大きい。また体格あるいは体型のような形態的な特徴がある種目の要求を満たしても、身体の機能的な面での要求を満足するとは限らないことも大きな問題である。

上に指摘したような従来の方法の欠点を克服するためには、筋線維組成の面から運動の種目適性を予測するという考え方を導入することが有効であると考えられる。なぜならば、筋線維組成は遺伝の影響が強いことが明らかにされているので (Komi & Karlsson, 1979)、筋線維組成の面から運動の種目適性を予測すれば、それは明かに先天的な要因を重視した種目適性の予測ということになるからである。なお、この筋線維組成は遺伝の影響が強いとの所見は、一見、筋線維タイプがホルモンあるいは神経の刺激パターンに依存して変化するという考え方と矛盾するようにみえる。しかし生理的条件下における筋線維タイプの変化の方向および大きさが遺伝的に決められたプログラムに従っている場合には、筋線維タイプが変化す

ることと筋線維組成が主に遺伝的な要因により決定されることは矛盾しない。また筋線維組成は骨格筋の機能的な特性と密接な関連があることも確認されているので (Hulten et al., 1975; Thorstensson, 1976), 筋線維組成をもとに種目適性を予測すれば、各種目が要求する機能的要求を満たさないという不都合も生じないと考えられる。

実際に、バイオプシー法により種々の一流スポーツ選手の筋線維組成を検討した結果は、筋線維組成が運動の種目適性を予測するために有用であることを示唆している (Saltin et al., 1977; 的場, 1985; 勝田と和田, 1986)。つまりこれまでに、陸上競技の短距離選手は遅筋線維比率が低くその値はほとんど例外なく 20-25% の範囲にあると報告されている。このことから、発揮できる最高スピードによって競技成績が大きく左右される種目に関しては、主働筋の遅筋線維比率が低いほどその種目への適性が高いと判断される。一方、陸上競技の長距離、マラソン、クロスカントリースキー、オリエンテーリング選手の脚筋、競泳選手の上肢筋では、個人による差があるものの、平均的には遅筋線維比率が高いことが明らかにされている。このことから、主に持久力により競技成績がほぼ決まる種目については、遅筋線維比率が高い者ほどそれらの種目に対する適性が高いと言えそうである。これらに対して、球技種目の選手では、個人差はかなり大きいものの、平均的には 50% ずつの速筋線維と遅筋線維を持つことが多いと報告されている。したがって、比較的複雑な動きと総合的な体力が要求される球技のような運動種目では、筋線維組成が速筋線維あるいは遅筋線維に極端に偏ることは望ましくないと考えられる。

今後、筋線維組成から運動の種目適性を見極め、それを運動指導の場で生かすことができるようにするためには、バイオプシー法のような侵襲的な方法にたよることなく、非侵襲的に筋線維組成を決定する方法を確立する必要があると思われる。現在、磁気共鳴映像法 (MRI) における弛緩時間あるいは筋電図のパワースペクトラムから、非侵襲的に筋線維組成を推定する方法が提案されているが、これらの方法は運動指導の場で日常的に使用するには複雑すぎる (Wretling et al., 1987; 久野ら, 1988)。今後、より簡便な非侵襲的方法の開発が望まれる。

5. 筋出力の向上を目的とするトレーニング方法の見直し

筋出力の向上を目的としたトレーニングには持久性トレーニングと筋力トレーニングがあるが、このうちの持久性トレーニングでは運動を持続する能力の向上をめざす。また持久性トレーニングの具体的なトレーニング手段には、比較的低い強度の運動を休息を入れることなく継続する持続トレーニングと比較的強度の高い運動を休息を挿入しながら繰り返すインターバル・トレーニングがある (宮下, 1986)。しかしこれらのトレーニング手段をどのように使い分けるのが持久力を高めるために効果的かということは、これまで明確にはされていない。

この問題は、筋線維タイプと関連づけると答えが出しやすと思われる。つまり、トレーニング手段によって持久性の指標となる酸化酵素活性が向上する筋線維タイプが異なり、インターバル・トレーニングではおもに速筋線維の酸化能力が、また持続トレーニングではおもに遅筋線維の酸化能力が向上することが明らかにされている (Henrikson & Reitman, 1976)。したがって、両トレーニング手段は、それらの比率を骨格筋全体の酵素活性を最も大きく高められるように調整して用いるべきであると考えられる。

一方、大きな筋力あるいはパワーの発揮能力の向上を目的として行われるトレーニングは筋力トレーニングと呼ばれ、その具体的手段にはアイソメトリック・トレーニング、アイソトニック・トレーニング、アイソキネティック・トレーニングがある(宮下, 1986)。これらのいずれの手段を用いて筋力トレーニングを行っても、筋肥大および筋力の増加がみられることがすでに実験的に確かめられている(福永, 1983; Moritani & DeVries, 1979; Coyle et al., 1981)。また、高価な機器の必要なアイソキネティック・トレーニング以外は、現場でも筋出力の向上を計るためのトレーニング手段としてしばしば用いられている。しかし問題は、現在一般的に行われているトレーニング方法では速筋線維(type II)にかなりの肥大をひきおこすことができるが、遅筋線維(type I)にはわずかな肥大しかおこすことができないことである(MacDougall, 1986)。したがって今後、トレーニング負荷のかけ方を再検討し、遅筋線維の肥大も引き起こすことのできるようトレーニング方法を改善する必要がある。これは不可能でないと考えられる。なぜならば、速筋線維と遅筋線維の両筋線維タイプを肥大させることに成功した陸上競技の砲丸投げの選手の例がすでに報告されているので(Coyle et al., 1978)、遺伝的には遅筋線維にも速筋線維なみのトレイナビリティーが備わっていると判断されるからである。

6. 筋線維タイプ特性を考慮して身体運動を把握することの意義

従来、運動は走る、泳ぐ、這うなど外から観察できる運動形式、あるいは運動時に外に発揮されるパワーや必要とされるエネルギーの大きさを目安として論じられることが多かった。また、心拍出量や心拍数のような生理的指標を目安に運動が論じられることもあった。しかしいずれにしても、これまでの運動の把握法は、運動を生起させる原動力を提供する組織の活動状況を直接捉えているわけではなかった。しかし筋線維タイプの考えを導入し、どの筋のどのタイプの筋線維をどの程度活動させるかという観点から運動をみると、運動を形式で捉えるよりは統一的に、また運動に必要なエネルギー、あるいは心拍出量や心拍数のような生理的指標に着目するよりは、より直接的に捉えることができるようになる。したがって今後は、従来からの見方に、筋線維タイプ(あるいは運動単位)の立場から運動を捉えるという見方を加える必要があると思われる。たとえば走るという運動の場合、心拍数や心拍出量やエネルギー消費量に加えて、S (slow-twitch), FR (fast-twitch fatigue resistant), FF (fast-twitch fatiguable)の各運動単位がどの程度の走速度の時に動員され、またどの程度活動するかが明らかになれば、走運動に対する理解は一段と深まると考えられる。

7. ま と め

本論文では、筋線維タイプ特性に関する知見を合理的な身体運動の修得のための考え方や具体的な方法にどのように反映させることができるかを考察した。

具体的には、まず体づくりの適時性についての従来の考え方を、筋線維タイプ特性に関する知見に照らして検討した。次いで、筋力あるいは大きなパワーを発揮する能力の発育・加齢変化とその性差、運動の種目適性についての考え方を検討した。さらに、筋力および持久力の向上を目的とするトレーニング方法を、筋線維タイプについての研究成果に照らして見直し、最後に身体運動を筋線維タイプ特性を考慮して把握することの意義を考えた。

謝 辞

本論文の執筆にあたり、京都大学名誉教授で富山県立大学教授の熊本水頼先生と東京大学教授の宮下充正先生に多くの貴重な御意見をいただきました。ここに謹んで深謝の意を表します。

文 献

- 1) Bell, R. D., MacDougall, J. D., Billeter, R. and Howald, H.: Muscle fiber types and morphometric analysis of skeletal muscle in six-year-old children. *Med. Sci. Sports Exerc.* 12; 28-31, 1980.
- 2) Coyle, E. F., Bell, S., Costill, D. L. and Fink, W.: Skeletal muscle fiber characteristics of world class shotputters. *Res. Quart.* 49: 278-284, 1978.
- 3) Coyle, E. J., Feiring, D. C., Rotkis, T. C., Cote III, R. W., Roby, F. B., Lee, W. and Wilmore, J. H.: Specificity of power improvements through slow and fast isokinetic training. *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol.* 51; 1437-1442, 1981.
- 4) Eriksson, B. O., Gollnick, P. D. and Saltin, B.: Muscle metabolism and enzyme activities after training in boys 11-13 years old. *Acta Physiol. Scand.* 87; 485-497, 1973.
- 5) Faulkner, J. A., Jones, D. A., Round, J. M. and Edwards, R. T. H.: Dynamics of energetic processes in human muscle. Cerererielli, P. and Hipp, B. J. (eds.) *Exercise bioenergetics and gas exchange*, Elsevier/North Holland Biomedical Press, p 81-90, 1980.
- 6) 淵本隆文, 金子公有: 人体筋の力・速度・パワー関係における年齢差, *体育学研究* 25; 273-279, 1981.
- 7) 福永哲夫: 筋の活動性肥大と筋力, *J. J. Sports Sci.* 2; 13-22, 1983.
- 8) Henriksson, J. and Reitman, J. S.: Quantitative measures of enzyme activities in type I and type II muscle fibres of man after training. *Acta Physiol. Scand.* 97; 392-397, 1976.
- 9) Hulten, B., Thorstensson, A., Sjodin, B. and Karlsson, J.: Relationship between isometric endurance and fibre types in human leg muscles. *Acta Physiol. Scand.* 93: 135-138, 1975.
- 10) 生田香明, 猪飼道夫: 自転車エルゴメーターによる Maximum Anaerobic Power の発達. *体育学研究* 17; 151-157, 1972.
- 11) 金久博昭, 根本勇, 宮下充正: 年齢および性との関連でみたアイソキネティック・ピーク・トルクとその持久力. *J. J. Sports Sci.* 3; 91-98, 1984.
- 12) 金久博昭, 福永哲夫, 角田直也, 池川繁樹: 発育期青少年の単位筋断面積当りの筋力, *体力科学 suppl.* 34; 71-78, 1985.
- 13) 金子公有: 瞬発的パワーからみた人体筋のダイナミクス, 杏林書院, 東京, p 110-123, 1974.
- 14) 勝田 茂・和田正信: 筋線維組成と運動競技適性, *デサントスポーツ科学* 7: 34-43, 1986.
- 15) Komi, P. V. and Karlsson, J.: Physical performance, skeletal muscle enzyme activities, and fibre types in monozygous and dizygous twins of both sexes. *Acta Physiol. Scand. Suppl.* 462, 1979.
- 16) 久野贈也, 勝田 茂, 秋貞雅祥, 阿武泉, 松本邦彦: 磁気共鳴映像法(MRI)による筋線維組成の推定. *体力科学* 37; 376-382, 1988.
- 17) MacDougall: Morphological changes in human skeletal muscle following strength training and immobilization. Jones, N. L., McCartney, N. and McComas, A. J. (eds.) *Human muscle power, Human kinetics*, Champaign, p 269-288, 1986.
- 18) 的場秀樹: 運動競技者の骨格筋の組織化学的ならびに生化学的特徴. *山口県体育学研究* 28/29: 71-82, 1985.
- 19) Matoba, H. and Niu, H.: The effects of castration and testosterone administration on the histochemical fiber type distribution in the skeletal muscles of the mouse. In: Morecki, A., Fidelus, K., Kedzior, K., & Wit, A (eds.), *Biomechanics VII-B*, University Park Press and PWN-Polish Scientific Publishers, Baltimore and Warszawa, p 606-611, 1981.
- 20) 的場秀樹, 村上恵: 雌雄マウス・ヒラメ筋の生後発育に関する組織化学的研究, *日本生理学雑誌* 48: 466-473, 1986.
- 21) 宮下充正: トレーニングを科学する, 日本放送出版協会, p 96-108, 1986.
- 22) 宮下充正: 体育とはなにか, 改めて問う一体育の内容と本質, 大修館書店, 東京, 1984.

筋線維タイプ特性と身体運動

- 23) Moritani, T. and DeVries, H. A.: Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *Amer. J. Physical. Med.* 58; 115-130, 1979.
- 24) Saltin, B. and Gollnick, P. D.: Skeletal muscle adaptability: Significance for metabolism and performance. Peachy, L. D., Adrian, R. H. M., Geiger, S. R. (eds.): *Handbook of physiology*, pp 555-631, Skeletal muscle, Baltimore, Williams and Wilkinson, 1983.
- 25) Saltin, B., Henriksson, J., Nygaard, E. and Andersen, P.: Fiber types and metabolic potentials of skeletal muscles in sedentary man and endurance runners. *Ann. New York Acad. Sci.* 301: 3-29, 1977.
- 26) 高石昌弘, 樋口 満, 小島武次: からだの発達—身体発達学へのアプローチ, 大修館書店, 東京, p 143-147, 1982.
- 27) Thorstensson, A.: Muscle strength, fibre types and enzyme activities. *Acta Physiol. Scand. Suppl.* 443, 1976.
- 28) Wretling, M. L., Gerdle, B. and Henriksson-Larsen, K.: EMG: a non-invasive method for determination of fibre type proportion. *Acta Physiol. Scand.* 131; 267-268, 1987.

