

ラット内側腓腹筋の異なる部位の 持久性トレーニングに対する適応変化

鈴木英樹* 藤沢良史** 辻本尚弥***

*愛知教育大学保健体育講座

**愛知教育大学健康科学選修

***久留米大学健康・スポーツ科学センター

Adaptive response to endurance training in different compartments of the rat medial gastrocnemius muscle

Hideki SUZUKI*, Yoshifumi FUJISAWA** and Hisaya TSUZIMOTO***

*Department of Health and Physical Education, Aichi University of Education, Kariya 448-8542, Japan

**Department of Health Science, Aichi University of Education, Kariya 448-8542, Japan

***The Institute of Health and Physical Education, Kurume University, Kurume 839-8502, Japan

ABSTRACT

Adaptive responses to endurance training were studied in two medial gastrocnemius muscle compartments of the rats. An increase in the cross-sectional area of the proximal fibers was observed after the training program. However, the same does not hold in distal fibers. The increase of succinate dehydrogenase activities was observed only in proximal fibers. These results indicate that the response to endurance training varies in different muscle compartments.

1. 緒 言

骨格筋を形成する筋線維は収縮特性や組織化学的染色法によっていくつかのタイプに分類され^{2),10),16)}, さらに, 筋線維の動員はそのタイプによって異なることが報告されている^{8),9)}. 運動トレーニングの実施により筋線維は肥大し, 酸化系能力が向上することが報告されている^{3),17),18)}. 一方, 底屈動作を担う内側腓腹筋については膝関節に近い近位部と末梢に近い遠位部で, 筋線維の動員は必ずしも同じではないことが報告されている^{5),6)}. しかし, 活動に伴う筋線維の動員について骨格筋内の部位による違いを検討した報告は数少ない^{5),6)}. そこで本研究は内側腓腹筋内の異なる部位における持久性走運動に対する適応変化を明らかにするため行われた。

2. 実験方法

実験には10週齢のFischer系雌性ラット(日本SLC)13匹を用いた。ラットは1週間の予備飼育後, コントロール群(7匹)とトレーニング群(6匹)に分けた。トレーニング群には11週齢から19週齢まで持

久性走トレーニングを実施し, トレーニング期間後に両群のラットから内側腓腹筋を摘出した。飼育条件は室温 $22 \pm 1^\circ\text{C}$, 昼夜逆転の12時間の明暗サイクルであった。トレーニング及び実験時の動物の取り扱いについては「実験動物の飼養および保管に関する基準」に沿って行った¹¹⁾。走トレーニングは小動物用トレッドミルを用い, 分速30mの速さで, 一日60分, 週5日行った。なお, トレーニング開始から1週間はラットが前記したトレーニング条件に慣れるまで, 走行速度

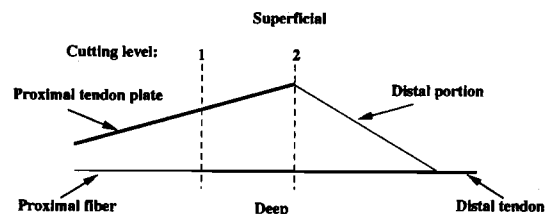


Fig. 1. Schematic drawing of rat medial gastrocnemius muscle. Hatched vertical lines indicate the level (1 and 2) from which cross-sections were taken of each muscle.

と時間を除々に漸増した。

摘出した内側腓腹筋は急速凍結後、De Riuter らの方法^{5),6)}に従い、近位部と遠位部よりそれぞれ連続横断切片を作成した(図 1 参照)。切片には筋線維のタイプ分類を行うためにミオシン ATPase (pre-incubation; pH4.6, pH10.3) 染色を施し、タイプ I, II a, II d, II b の同定を行った¹⁰⁾。さらに連続切片には Martin ら (1985) の方法を用いて定量的な SDH (Succinate dehydrogenase) 染色を行った¹⁵⁾。染色結果は 550nm の励起波長下にて顕微鏡に取り付けた CCD カメラ (Victor; KY-F55B) を介してパーソナルコンピュータに取り込み画像処理ソフト (Wayne Rasband [Research Services of NIMH of NIH] ; NIH Image ver. 1.61) を用いて筋線維の平均染色濃度と横断面積を測定した。筋線維の平均染色濃度は同時に取り込んだステップタブレット (Kodak; 405ST146) の濃度を用いて光学的濃度値に変換した。筋線維の SDH 活性は光学的濃度を染色時間で除した値 (Optical density, OD/min) で表した。

測定で得られた値より平均と標準誤差を算出した。統計的処理は分散の検定には Bartlett 法を、平均の検定については一元配置分散分析を用いた。各群間の平均値の差の検定には Scheffe's の多範囲検定法を用いた。なお、有意水準は 5% (P < 0.05) とした。

3. 結 果

体重及び筋重量を表 1 に示した。体重は両群間で違いはなかった。内側腓腹筋の重量は絶対的の重量、体重 100g あたりで表した相対的の重量共にトレーニング群がコントロール群に比べて有意に高値を示した。

筋線維の横断面積を表 2 に示した。コントロール群において筋線維横断面積は近位部に比べて遠位部ですべてのタイプの筋線維で高値を示し、タイプ II b 線維については有意差が得られた。トレーニング群の近位部の筋線維横断面積はコントロール群に比べてすべてのタイプの筋線維で有意に高値を示した。トレーニング群の遠位部の筋線維横断面積はコントロール群と違いはなかった。

筋線維の SDH 活性を表 3 に示した。コントロール群の筋線維 SDH 活性は部位間で違いはなかった。ト

Table 1. Body weight, muscle weight and relative muscle weight in each group

	Control (n=7)	Trained (n=6)
Body weight (g)	174 ± 2	179 ± 2
Medial gastrocnemius muscle weight (mg)	374 ± 8	406 ± 7 *
Relative medial gastrocnemius weight (mg/100g body weight)	220 ± 5	239 ± 4 *

Values are mean ± SE. n: number of rats.

* Significantly different from the value of control group (p < 0.05).

Table 2. Cross-sectional area in each typed fiber of medial gastrocnemius muscle

	Proximal portion		Distal portion	
	Control	Trained	Control	Trained
Type I fiber	1603 ± 54	2034 ± 165 *	1685 ± 161	1764 ± 58
Type II a fiber	1117 ± 51	1447 ± 91 *	1249 ± 72	1436 ± 80
Type II d fiber	1603 ± 142	2341 ± 241 *	2180 ± 327	2421 ± 279
Type II b fiber	1581 ± 75	2348 ± 155 *	2313 ± 177 #	2604 ± 249

Values are mean ± SE.

* Significantly different from the value of control group (p < 0.05).

Significantly different from the value of proximal fiber in control group (p < 0.05).

Table 3. Succinate dehydrogenase (SDH) activity in each typed fiber of medial gastrocnemius muscle

	Proximal portion		Distal portion	
	Control	Trained	Control	Trained
Type I fiber	23.5 ± 2.1	37.5 ± 1.1 *	27.3 ± 8.2	31.6 ± 3.4
Type II a fiber	35.4 ± 3.0	44.6 ± 0.4 *	34.0 ± 5.4	35.6 ± 2.7
Type II d fiber	33.5 ± 2.6	41.6 ± 1.2	32.3 ± 6.0	33.8 ± 2.6
Type II b fiber	20.5 ± 1.8	24.9 ± 1.7	19.0 ± 8.7	18.4 ± 0.6

Values are mean ± SE. SDH activity: Δ Optical density (O.D.) / min. × 10⁻²

* Significantly different from the value of control group (p < 0.05).

レーニング群の近位部の筋線維 SDH 活性はコントロール群に比べてすべてのタイプの筋線維で高値を示し、タイプ I, II a 線維に関しては有意差が得られた。遠位部の筋線維 SDH 活性は両群間で違いはなかった。

4. 考 察

内側腓腹筋は底屈動作時に動員される骨格筋であるが、筋の近位部と遠位部では生理学的特性や代謝的特性が異なると報告されている^{4),5),6)}。De Riuter らは内側腓腹筋の異なる部位を支配する神経枝を電気刺激することにより内側腓腹筋の近位部と遠位部の収縮特性の違いを明らかにし、筋線維の動員について部位による違いがあることを報告した^{4),5)}。本研究では収縮特性は調べていないが、コントロール群において筋線維の横断面積は彼らの報告と同様に同タイプの筋線維であっても近位部に比べて遠位部で大きかった。これは我々の用いた Fischer 系ラットにおいても、内側腓腹筋の部位による収縮特性や動員の違があることを裏付ける結果であった。さらに、彼らは内側腓腹筋の異なる部位より作成した切片に定量的組織化学染色を施し、タイプ II B d (d), II B m (b) 線維について遠位部に比べて近位部で酸化系酵素活性 (SDH) が高いことを報告している^{5),6)}。本研究においても同じ方法を用い内側腓腹筋の異なる部位における代謝特性の検討を行ったが、遠位部と近位部間で酸化系酵素活性 (SDH) に違いは見られなかった。この原因として、本研究では遠位部においてもタイプ I や II a 線維が存

在するエリアを分析の対象としたのに対して、De Ruiterらは遠位部において、それらのタイプの筋線維が存在しないエリアを分析していたためと考えられた。また、我々の用いた研究 Fischer 系ラットの体重（対照群：174±2g）は彼らの用いた Wistar 系ラット（250-300g）に比べて軽量であり、常時下肢筋へ加わる負担が小さいことも関係していたかもしれない。しかし、いずれにしても本研究結果で得られた部位間の筋線維横断面の違いから、通常状態での内側腓腹筋の動員は部位により異なると考えられた。

持久性トレーニングの実施により動員された筋線維が肥大することや酸化系代謝能力が高くなることが報告されている^{3),7),18)}。本研究においても、それらの報告と同様にコントロール群に比べてトレーニング群ですべてのタイプの筋線維において横断面積、SDH 活性共に高値を示した。しかしながら、有意差が得られたのはいずれの指標も近位部においてのみであり、走トレーニングに伴う筋線維の動員は同じタイプの筋線維であっても近位部と遠位部では異なっていたと考えられた。

筋線維とそれを支配する運動ニューロンは運動単位と総称され、筋線維の動員はそれを支配する運動ニューロンの発火・動員によって決定される^{2),12)}。その動員の順番は運動ニューロン大きさに依存（小さい順に動員）しており、運動単位の動員は S→FR→FI→FF タイプの順で、対応する筋線維はタイプ I→II a→II x（または II d）→II b の順である。Walmsleyらや Hoffer らの一連の研究から、歩行や走運動時においても運動単位の動員は運動強度に伴い S→FR→FI→FF の順であったことが報告されている^{13),14),19)}。しかし、本研究では走運動において同じタイプの筋線維（運動単位）であっても動員は近位部と遠位部で明らかに異なる結果を示した。Walmsleyらや Hoffer らは一つの筋における異なる部位での動員について検討を行っていないため、本研究結果との違いを検討することはできない。しかしながら、内側腓腹筋における動員は運動単位のタイプだけに依存しないことは明らかであろう。Bawaらや Zajacらは同じ運動単位であっても筋を引き伸ばした場合、より小さく、出力の低い運動単位がより先に動員されることを報告しているが^{1),20)}、これだけではすべてのタイプの運動単位の動員が筋内の部位で異なることは説明できない。また、脊髄内のモータープール内における運動ニューロンの発火頻度の調節にはニューロンサイズとは関係のない何らかのニューロン固有の因子が関与している可能性もある⁷⁾。これらの問題に関しては今後検討の余地が残された。

以上のことから、内側腓腹筋における持久性走トレーニングに対する適応変化は筋内部位で異なり、筋線維の動員はそのタイプより、筋内における筋線維の

位置（筋内の部位）の違いに左右されることが示唆された。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省研究費（平成14年度基盤研究C14580025）の補助を受けた。

参 考 文 献

- 1) Bawa P, Binder MD, Ruenzel P, and Henneman (1984) Recruitment order of motoneurons in stretch reflexes is highly correlation with their axonal conduction velocity. *J. Neurophysiol.* 52: 410-420, 1984.
- 2) Burke RE, Levine DN, Tsairis P, and Zajac FE (1973) Physiological types and histochemical profiles in motor units of the cat gastrocnemius. *J. Physiol.* 234:723-748.
- 3) Chilibeck PD, Bell GJ, Socha T, and Martin T (1998) The effect of aerobic exercise training on the distribution of succinate dehydrogenase activity throughout muscle fiber. *Can. J. Appl. Physiol.* 23(1): 74-86.
- 4) De Ruiter CJ, De Haan A, and Sargeant AJ (1995) Repeated force production and metabolites in two medial gastrocnemius muscle compartments of the rat. *J. Appl. Physiol.* 79(6): 1855-1861.
- 5) De Ruiter CJ, De Haan A, and Sargeant AJ (1995) Physiological characteristics of two extreme muscle compartments in gastrocnemius medialis of the anaesthetized rat. *Acta Physiol. Scand.* 153: 313-324.
- 6) De Ruiter CJ, Habets PEMH, De Haan A, and Sargeant AJ (1996) In vivo II X and II B fiber recruitment in gastrocnemius muscle of the rat is compartment related. *J Appl Physiol* 81(2): 933-942.
- 7) Eken T (1998) Spontaneous electricmyographic activity in adult rat soleus muscle. *J. Neurophysiol.* 80: 365-376.
- 8) Fleshman JW, Munson JB, Sybert GW, and Friedman WA (1981) Rheobase, input resistance, and motor-unit type in medial gastrocnemius motoneurons in the cat. *J. Neurophysiol.* 46: 1326-1338.
- 9) Gollnick PD, Piehl K, Saltin B (1974) Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibers after exercise of varying intensity and at varying pedaling rates. *J Physiol.* 241: 45-57.
- 10) Gorza L (1990) Identification of novel type 2 fiber population in mammalian skeletal muscle by combined use of histochemical myosin ATPase and anti-myosin monoclonal antibodies. *J. Histochem. Cytochem.* 38(29): 257-265.
- 11) 実験動物飼育保管研究，実験動物の飼育および保管等に関する基準の解説，総理府内閣総理大臣官房管理室，1版，ぎょうせい，東京（1990）
- 12) Henneman E, and Mendell LM (1981) Functional organization of motoneuron pool and its inputs. In: *Handbook of Physiology. Section I. The Nervous System. Vol II. Motor Control. Part 1* (eds Brookhart B, Mountcastle VB, Brooks VB and Geiger SR), American Physiological Society, PP. 423-507, Bethesda, MD.
- 13) Hoffer JA, Loeb GE, Marks WR, O'Donovan, Pratt CA, and Sugano N (1987) Cat hindlimb motoneurons during

- locomotion. I. Destination, axonal conduction velocity, and recruitment threshold. *J Neurophysiol.* 57: 510-529.
- 14) Hoffer JA, Sugano N, Loeb GE, Marks WR, O'Donovan, and Pratt CA (1997) Cat hindlimb motoneurons during locomotion. II. Normal activity patterns. *J Neurophysiol.* 57: 530-553.
- 15) Martin TP, Vails AC, Durivage JB, Edgerton VR, and Castleman KR (1985) Quantitative histochemical determination of muscle enzymes. *J Histochem Cytochem* 33 (10): 1053-1059.
- 16) Padykula HA, Herman E (1955) The specificity of the histochemical method of adenosine triphosphatase. *J. Histochem. Cytochem* 3: 170-195.
- 17) Proctor DN, Sinning WE, Walro JM, Sieck GC, and Lemon PW (1995) Oxidative capacity of human muscle fiber types : effects of age and training status. *J Appl Physiol* 78(6): 2033-2038.
- 18) 鈴木英樹, 春日規克, 内藤久士, 山内秀樹, 辻本尚弥, 石河利寛 (1995) 老齡期の骨格筋における持久性走トレーニングの有効性の検討. *デサントスポーツ科学* 16: 124-130.
- 19) Walmsley B, Hodgson JA, and Burke RE (1978) Forces produced by medial gastrocnemius and soleus muscles during locomotion in freely moving cats. *J Neurophysiol.* 41(5): 1203-1216.
- 20) Zajac FE, and Faden JS (1985) Relationship among recruitment order, axonal conduction velocity, and muscle-unit properties of type I -identified motor units in cat plantaris muscle. *J. Neurophysiol.* 53: 1303-1323.

(平成14年9月11日受理)