

# ラット足底筋における異なる部位での持久性 トレーニングに対する適応変化

鈴木英樹\* 稲垣 洋\*\* 辻本尚弥\*\*\*

\*愛知教育大学保健体育講座

\*\*高浜市立病院

\*\*\*久留米大学健康・スポーツ科学センター

## Adaptive responses to endurance training in different regions of the rat plantaris muscle

Hideki SUZUKI\*, Hiroshi INAGAKI\*\*, Hisaya TSUJIMOTO\*\*\*

\*Department of Health and Physical Education, Aichi University of Education, Kariya 448-8521, Japan

\*\*Takahama Municipal Hospital, Takahama 444-1321, Japan

\*\*\*The Institute of Health and Sports Science, Kurume University, Kurume 839-8502, Japan

### Abstract

The purpose of this study was to investigate adaptive responses of proximal and distal regions along the longitudinal axis in the rat plantaris muscle. Cross-sectional areas (CSA) and succinate dehydrogenase (SDH) activities of each typed fiber in individual regions were determined after 8 weeks endurance training. CSA of each typed fiber in both regions were increased by endurance training. However the CSA of fibers in distal region were greater than in proximal region of trained muscle. SDH activities of each typed fiber were increased by the training, but that of type I fiber was not increased in the distal region.

These results indicate that recruitment of motor units is dependent on the compartment region and that the adaptive responses of different regions in the plantaris muscle are not uniform.

### 緒 言

先に我々は、筋内部位により組織化学的・生理学的特性が異なるラットの内側腓腹筋<sup>3),4),5),17)</sup>において、筋線維の運動トレーニングに対する適応変化は筋長軸方向の異なる部位で同一ではなく、同じ筋線維タイプでも部位によってその変化は異なることを報告した<sup>14)</sup>。

一方で、Sakumaら<sup>11)</sup>はラットの足底筋について、共同筋切除による機械的過負荷で筋線維の肥大は同じタイプの筋線維であっても長軸方向の異なる部位間で肥大率は異なることを報告している。また、山内ら<sup>18)</sup>もラットの足底筋について、非荷重状態で観察される筋線維の萎縮は長軸方向の近位部に比べて中央部や遠位部で顕著だったことを報告している。これらはいずれも足底筋の筋線維の適応変化は部位により異なることを報告している。また、足底筋は内側腓腹筋と同様に足関節の底屈動作に働くため、筋線維の運動に対する適応変化も内側腓腹筋と同様に部位により異なることが考えられる。

そこで本研究では、足底筋の異なる部位の運動ト

レーニングに対する適応変化を検討するために、ラットに持久性の走トレーニングを実施し、長軸方向の異なる部位の筋線維を組織化学的に調べた。

### 実験方法

実験動物として10週齢のFischer344系雌ラットを用い、コントロール群とトレーニング群に群分けした。飼育は室温 $22 \pm 1$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ 、昼夜逆転12時間の明暗サイクルの環境下で行った。飼料は固形飼料CE-2(日本クレア株式会社)を用い、飲水ともに24時間自由摂取とした。なお、実験動物の取り扱いについては「実験動物の飼養及び保管等に関する基準」<sup>8)</sup>に沿って行った。

トレーニング群には1週間の予備トレーニング後、2週目から分速30m、走行時間60分の持久性の走トレーニングを1日1回、週5日実施した。8週間のトレーニング期間終了後の19週齢の時点で、ペントバルビタールを過投与したうえで断頭屠殺し足底筋を摘出した。摘出した筋は冷却したイソペンタン中にて急速凍結させた。その後、足底筋の異なる長軸部位(膝関

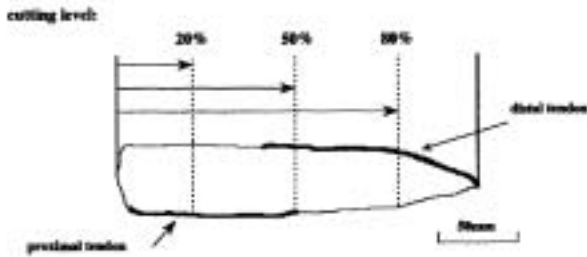


Fig. 1. Schematic drawing of the plantaris muscle. Dotted lines indicate the levels from which cross-and vertical-sections were taken of each muscle.

節より20と80%)より連続切片を作成した(図1参照)。それぞれの切片にはATPase染色を施し、Gorzaの方法<sup>6)</sup>に従い筋線維をタイプ a, dおよび bに分類した。さらに連続切片には筋線維のコハク酸脱水素酵素(succinate dehydrogenase:SDH)活性を測定するために、Martinらの方法<sup>9)</sup>に従い定量的なSDH染色を施した。SDH染色の結果は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 Service 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。サンプルリングは先に示した長軸部位において、各筋線維タイプごとに30本を目安に行った。

各測定値は群ごとに平均値、標準偏差及び標準誤差を求め、統計的な検定を行った。体重および筋重量については、分散の検定にはF検定法を、平均値の検定についてはt検定法を用いた。筋線維タイプ別の横断面積と酸化系酵素活性の検定には、二要因(群×部位)の分散分析法を用いた。なお、有意水準は5%( $P<0.05$ )とした。

## 結 果

### 1. 体重および組織重量の変化

Table 1 に各群の体重、筋重量および相対的筋重量

Table 1 Body weight, muscle weight and relative muscle weight in control and trained groups in control and trained groups

	Control	Trained
Body weight (g)	174 ± 4	179 ± 4
Muscle weight (mg)	172 ± 12	183 ± 5
Relative muscle weight(mg/100gB.W.)	172 ± 12	183 ± 5

Values are means ± SD

を示した。体重、筋重量および相対的筋重量はコントロール群に比べてトレーニング群が高値を示したが、それらはいずれも有意差は認められなかった。

### 2. 筋線維横断面積の変化

Fig. 2 に各群の筋線維タイプ別横断面積を示した。コントロール群において、遠位部の筋線維横断面積は近位部に比べてすべてのタイプ筋線維で高値を示した。トレーニング群の筋線維横断面積はコントロール群に比べて両部位のいずれのタイプの筋線維も高値を示し、すべてのタイプにおいて有意な差が認められた。トレーニング終了の筋線維横断面積は近位部に比べて、すべてのタイプの筋線維で遠位部で高値を示した。

### 3. 筋線維のSDH活性の変化

Fig.3に筋線維タイプ別のSDH活性を示した。コントロール群において、近位部の筋線維SDH活性は遠位部に比べてタイプ筋線維で高値を示した。トレーニング群の筋線維SDH活性はコントロール群に比べて両部位のいずれのタイプの筋線維も高値を示したが、有意差がみられたのは近位部のタイプ線維と遠位部のタイプ a および d 線維であった。

## 考 察

### 1. 近位部と遠位部の筋線維の違い

DeRuiterら<sup>3)</sup>はラットの内側腓腹筋の筋線維SDH活性は遠位部に比べて近位部で高く、近位部は疲労耐性に優れ、遠位部は高い発揮張力を有していることを報告している。本研究において、筋線維のSDH活性はいずれのタイプの筋線維も遠位部に比べて近位部で高値を示した。また、筋線維横断面積はいずれのタイプの筋線維も近位部に比べて遠位部で高値を示した。発揮張力は筋線維の横断面に比例することから、足底筋では近位部に比べて遠位部でより大きな出力ポテンシャルを有していると考えられた。これらのことは、足底

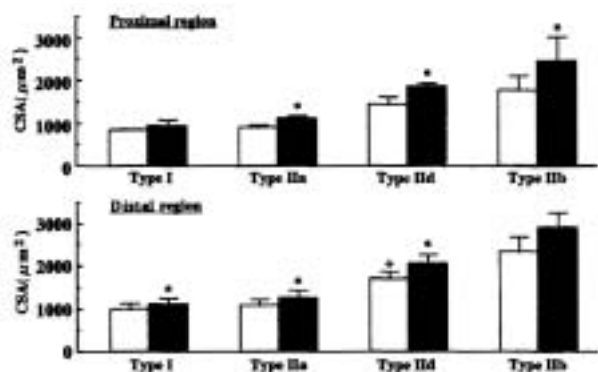


Fig. 2. Cross-sectional area (SDH) activity of each typed fiber at proximal and distal regions in the control and training plantaris muscle. Values are in mean ± SD. \*Show the significant difference to control fiber in each region. + Show the significant difference to control fiber in proximal region.

Control Training

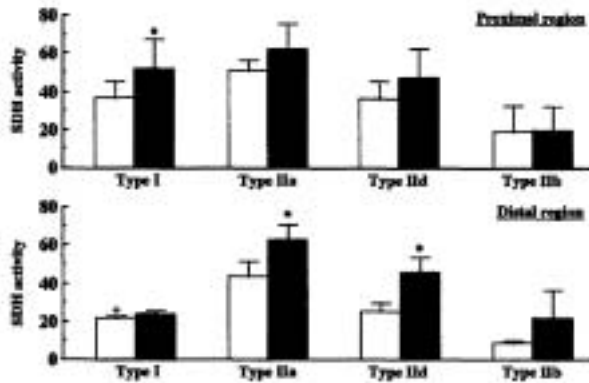


Fig.3. Succinate dehydrogenase(SDH) activity of each typed fiber at proximal and distal regions in the control and training plantaris muscle. Values are in mean ± SD. SDH activity, Optical density(O.D.)/min × 10<sup>-3</sup>. \*Show the significant difference to control fiber in each region. + Show the significant difference to control fiber in proximal region.

Control Training

筋の部位による機能的特性や代謝的特性の違いは内側腓腹筋と同様であることを示唆していた。両筋における異なる部位での筋線維のこれらの特性が同様である原因として、両筋ともに足関節の底屈動作に寄与していること、さらに、足底筋の近位腱が腓腹筋に付着している<sup>15)</sup>という解剖学的な特性の類似が考えられた。また、DeRuiterら<sup>3)</sup>は内側腓腹筋における部位による筋線維の各種特性の違いから、近位部では緊張的な、遠位部では相同的な活動要求なされていることを示唆している。したがって、本研究で観察した足底筋においても通常の飼育状態で同様な活動要求があったと考えられた。

## 2. 持久性トレーニングに対する異なる部位の適応変化

持久性トレーニングによって筋線維は肥大し、ミトコンドリア量の増加によって筋の酸化系能力が亢進することが報告されている<sup>2), 7), 10), 13)</sup>。本研究では両部位においても筋線維の肥大や筋線維 SDH 活性の亢進が観察されたことは、本研究で採用した走トレーニングが持久性運動として十分な刺激条件であったと考えられた。

しかしながら、トレーニング後の筋線維横断面積はいずれのタイプの筋線維も近位部に比べて遠位部で大きく、遠位部により大きな活動要求があったものと考えられた。Sakumaら<sup>11)</sup>は過負荷に伴う足底筋の筋線維の肥大は近位部に比べて中央部や遠位部で大きいことを報告している。また、彼らは過負荷に伴う筋線維の肥大やタイプ移行の程度は、観察部位の筋線維組成と関係していることを示唆している<sup>11)</sup>。足底筋の筋線維組成は近位部に比べて遠位部で相動的な収縮特性を有するタイプ b の割合が高いことから、遠位部に高い機械的負荷が選択的に加わっていたと考えられた。

一方で、タイプ 線維の SDH 活性は遠位部ではト

レーニングにより変わらなかったが、近位部では約40%の亢進が観察された。歩行や走運動時における運動単位の動員は運動強度に伴い S FR FI FF の順であることが報告されている<sup>19)</sup>が、ラットの下肢筋において同じタイプの運動単位 (MU) でも大きなサイズの MU より小さいサイズ MU が先に動員されることが報告されている<sup>5)</sup>。また、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先に動員されることが報告されている<sup>1), 20)</sup>。本研究ではタイプ 線維の横断面積は遠位部に比べて近位部で小さかったことから、近位部のタイプ 線維が先に動員され、SDH 活性と密接に関係するミトコンドリア<sup>12), 16)</sup>を増加させる活動刺激が加わっていた可能性が考えられた。しかしながら、タイプ 線維はトレーニングにより両部位で同様に肥大していたことから、どのような刺激が選択的に近位部のタイプ 線維のミトコンドリアを増加させたか不明であった。この点については今後詳細な検討が必要である。

## 結 語

本研究ではラットの足底筋の異なる部位について、持久性トレーニングに対する適応変化を検討した。その結果、トレーニングに対する適応変化は筋内部位で必ずしも一様でないことが明らかにされた。これらの適応の違いは筋線維構成比の違いが影響する可能性があることから<sup>11), 18)</sup>、異なる筋内部位の適応変化に関して筋線維組成や収縮タンパク組成比などの検討も必要であると考えられた。

## 参 考 文 献

- 1) Bawa, P., Binder, M. D., Ruenzel, P. and Henneman, E. (1984) Recruitment order of motoneurons in stretch reflexes is highly correlated with their axonal conduction velocity. *J. Neurophysiol.*, 52 ( 3 ): 410-20.
- 2) Chilibeck, P. D., Bell, G. J., 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.
- 3) De Ruiter, C. J., De Haan, A. and Sargent, A. J. (1995) Physiological characteristics of two extreme muscle compartments in gastrocnemius medialis of the anaesthetized rat. *Acta Physiol. Scand.*, 153 ( 4 ): 313-324.
- 4) De Ruiter, C. J., De Haan, A. and Sargent, A. J. (1995) Repeated force production and metabolites in two medial gastrocnemius muscle compartments of the rat. *J. Appl. Physiol.*, 79 ( 6 ): 1885-1861.
- 5) De Ruiter, C. J., Habets, P. E. M. H., De Haan, A. and Sargeant, A. J. (1996) In vivo X and B fiber recruitment in gastrocnemius muscle of the rat is compartment related. *J. Appl. Physiol.*, 81 ( 2 ): 933-942.
- 6) 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.
- 7 ) 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 ( 1 ) : 91-97.
- 8 ) 実験動物飼育保管研究 ( 1980 ) 実験動物の飼養及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 , ぎょうせい : 東京 .
- 9 ) Martin, T. P., Vailas, A. C., Durivage, J. B., Edgerton, V. R. and Castleman, K. R. ( 1985 ) Quantitative histochemical determination of muscle enzymes: biochemical verification. *J. Histochem. Cytochem.*, 33 ( 10 ) : 1053-1059.
- 10 ) Proctor, D. N., Sinning, W. E., Walro, J. M., Sieck, G.C. and Lemon, P. W., ( 1995 ) Oxidative capacity of human muscle fiber types : effects of age and training status. *J. Appl. Physiol.*, 78 ( 6 ) : 2033-2038.
- 11 ) Sakuma K., Yamaguchi, A. and Katsuta, S. ( 1995 ) Are region-specific changes in fiber types attributable to nonuniform muscle hypertrophy by overloading? *Eur. J. Appl. Physiol.*, 71 : 499-504.
- 12 ) Schwerzmann, K., Hoppeler, H., Kayar, S. R. and Weibel, E. R. ( 1989 ) Oxidative capacity of muscle and mitochondria: correlation of physiological, biochemical, and morphometric characteristics. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 86 : 1583- 1587.
- 13 ) 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.
- 14 ) 鈴木英樹, 藤沢良史, 辻本尚弥 ( 2003 ) 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 . *愛知教育大学研究報告*, 52 : 31-34.
- 15 ) Tamaki, T., Akatsuka, A., Tokunaga, M., Uchitama, S. and Shiraishi, T. ( 1996 ) Characteristics of compensatory hypertrophied muscle in the rat: Electron microscopic and immunohistochemical studies. *Anat. Rec.*, 246 : 325-334.
- 16 ) Takekura, H. and Yoshioka, T. ( 1989 ) Specific mitochondrial responses to running training are induced in each type of rat single muscle fiber. *Jap. J. Physiol.*, 39 : 497-509.
- 17 ) Vanden Noven, S., Gardiner, P. F. and Seburn, K. L. ( 1994 ) Motoneurons innervating two regions of rat medial gastrocnemius muscle with differing contractile and histochemical properties. *Acta Anat.*, 150 : 282-293.
- 18 ) 山内秀樹, 宮野佐年 ( 2000 ) ラット内側腓腹筋線維タイプの分布特性と非加重による変化 . *リハビリテーション医学*, 37 : 1102.
- 19 ) Walmsley, B., Hodgson, J. A. and Burke, R. E. ( 1978 ) Forces produced by medial gastrocnemius and soleus muscle during locomotion in freely moving cat. *J. Neurophysiol.*, 41 ( 5 ) : 1203-1216.
- 20 ) Zajac, F. E. and Faden, J. S. ( 1985 ) Relationship among recruitment order, axonal conduction velocity, and muscle-unit properties of type-identified motor units in cat plantaris muscle. *J. Neurophysiol.*, 53 : 1303-1323.

( 平成18年 9 月19日受理 )