

バイペダルラットにおける殿筋の筋線維伝導速度に関して

高橋利幸*1 西本千奈美*1 西本哲也*1 椿原彰夫*1

はじめに

四足動物に二足立位や歩行を行わせて、ヒトの二足立位特性を類推する研究は、1929年の Colton¹⁾の発表以来数多く行われてきた。特に力学的変化が骨などに及ぼす影響に関する研究はよくみられる²⁾が、殿筋への影響に関する報告は少ない。大殿筋は股関節が深く屈曲している四足動物と股関節伸展位で活動するヒトでは、おのずと作用が異なることが予想される。ヒトは他の動物に比べて大殿筋や中殿筋の発達が著しく、これは直立二足立位及び歩行によって形作られたものであるといえる。それゆえ、高齢になり直立に姿勢を保つことができなくなると、殿筋は萎縮し殿部は扁平化する。

この度我々は、四足動物であるラットに自発的な起立位をとらせ、これによって引き起こされる大殿筋への影響に関して、筋線維タイプ分類や筋疲労の評価など、筋の性質を示す指標として注目されている、筋線維伝導速度（以下 MFCV³⁾）を計測し、検討した。

対象と方法

Sprague-Drawley 系雄ラット 8 匹（20週令、平均体重 456.3 ± 29.2 g、バイペダル群）に対して、バイペダル・トレーニングボックス（小原医科産業 KK）を利用して二足起立運動を行かせたのち、両側の16個の大殿筋における MFCV を測定した。コントロール群として通常飼育の同系雄ラット 8 匹（20週令、平均体重 495.0 ± 42.8 g）を用い、同様の測定を行った。バイペダル・トレーニングボックス（Fig.1）はスキナー箱の一種で、オペラントの条件付けを利用してラットに二足起立運動を促すものである。ラットが立位をとり、鼻先にてボックス壁面上部にあるレバーを任意の回数押すことによって、ペレット状の餌が与えられる仕組みとなっている。

バイペダル群の作成には、窓のない防音空調設備の施された飼育室を用いた。照明は人工照明で14時間の点灯と10時間の消灯を繰り返し、室温は 25 ± 1

℃とした。4週令のラットに対して毎朝夕、給飼時間に合わせて約1週間レバー押しの練習をさせた。立位でレバーを押し、餌をとる行為を確立させたうえで、15週間起立動作をとらせた（Fig.2）。起立時間は朝夕とも約30分とし、それぞれ起立練習終了後30分間ラットが求めるだけの餌を与えた。

MFCV の測定は Neuropack 4（日本光電 KK）を用いて、室温 25 ± 1 ℃の部屋にて行った。ラットに Na-pentobarbital の腹腔内投与による麻酔をかけ、痛覚刺激によって十分麻酔がかかったことを確認した上で、背部から殿部を展開し、大殿筋を露出した（Fig.3）。導出には自作の刺激・記録一体型櫛形電極を用いた。これはアクリル上に幅1mm長さ2mmの刺激電極2個、導出電極5個を2mm間隔で並び、双極法にて導出を行うものである（Fig.4）。

刺激は筋近位部に対して0.2msecの短矩形波を用い1Hzにて行った。導出部位は、大殿筋の筋内機

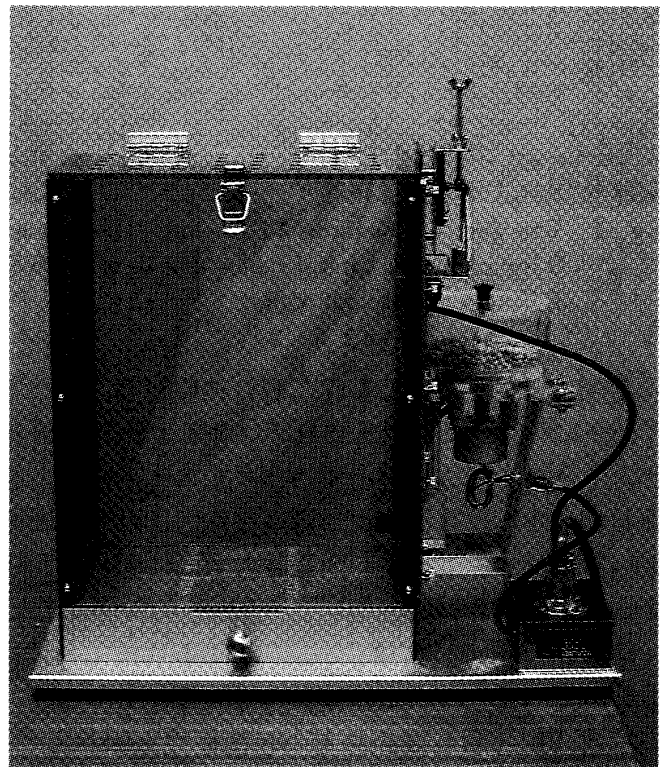


Fig. 1 Bipedal training box (Skinner's operant box used in bipedal training)

*1 川崎医療福祉大学 医療技術学部 リハビリテーション学科
（連絡先）高橋利幸 〒701-0193 倉敷市松島288 川崎医療福祉大学

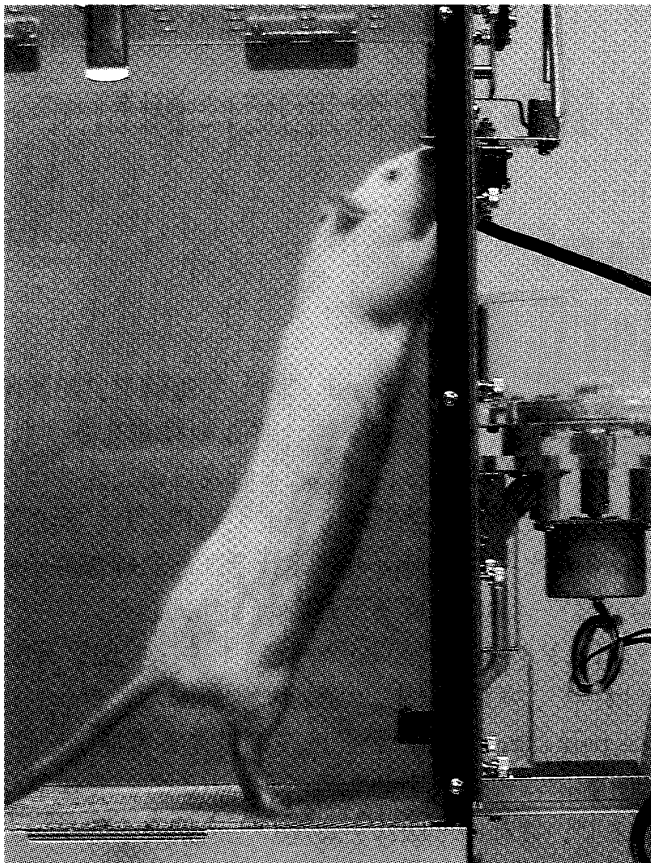


Fig. 2 A rat standing in the bipedal training box.

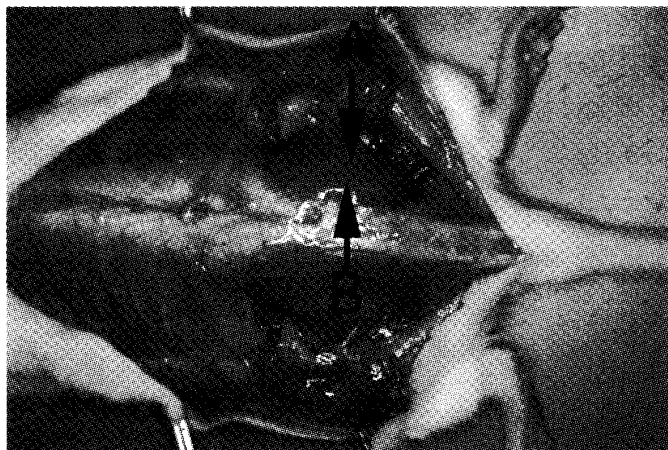


Fig. 3 The gluteus maximus of the rat. The arrow A indicates the lateral region and the arrow B indicates the medial region.

能特性の変化を見るため、左右の大殿筋の、主として伸展に作用すると考えられる中央より内側の部分と、主として回旋に作用すると考えられる外側の部分とし、それぞれ5回づつ測定した。この際、モーターポイントを避けて、筋線維の方向に平行に並ぶように電極をおいた。

得られた伝導速度は、cross-correlation methodを用いて計算した。これは、各導出電極での波形のピーク時間と電極間距離との相関係数を割り出し、それが0.8以上であった場合のデータを妥当値として、その回帰直線の傾きをもって測定時の伝導速度とする手法である (Fig.5)。

伝導速度測定後、大殿筋を骨盤および大腿骨附着

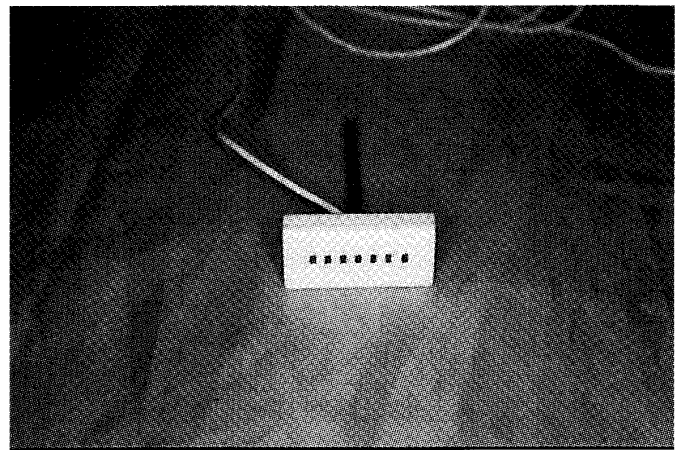


Fig. 4 Comb style electrode.

It is made of acrylic acid resin and consists of two stimulation and five recording array electrodes. The interval between electrodes is 2 mm.

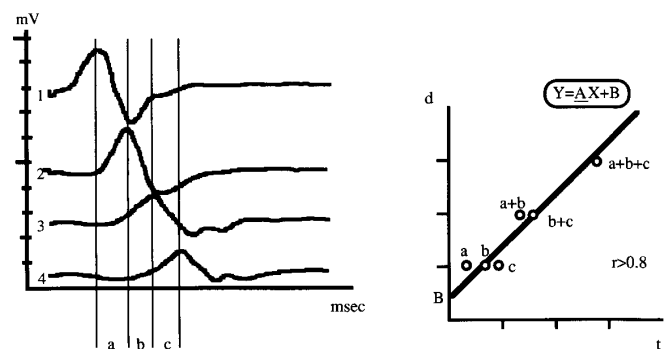


Fig. 5 Cross-correlation method.

The correlation coefficient of the conduction velocity of each measurement point was calculated. If it was over 0.8, the slope of the regression line was regard as the overall conduction velocity. Actually, all of the correlation coefficients of the study were over 0.9.

部よりはらずし、湿性重量を測定した。これから各ラットの体重に対する百分率を計算し、バイペダルラット群とコントロール群で比較した。

比較検討に際して、バイペダル群とコントロール群のMFCVと、筋の湿性重量の比較には対応のない2群間のStudent's t-testを行い、内側と外側の筋の比較にはWilcoxonの符号付順位検定を用いた。

結 果

ラットの大殿筋は、大腿骨附着部を中心として放射状に筋線維が並んでいる。内側の線維は大腿骨の長軸延長上に近い線維走行となり、外側の線維は同骨長軸に直行する方向に近い。そこで、筋線維の走行から、その作用特性を大きく伸展方向と外旋方向に分類し、両者の検討を試みた。ただし明確な境目に関しては判別しがたかったため、この度の試行では重量測定は分けて行うことはできなかった。

大殿筋MFCVにおいて、全てのデータで相関係数

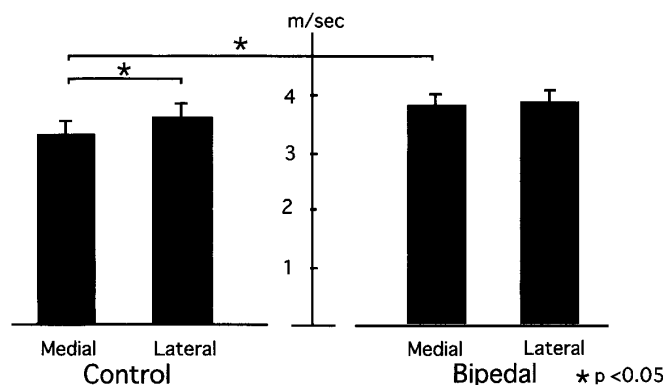


Fig. 6 Muscle fiber conduction velocity of the gluteus maximus muscles of rats.

が0.9を越えており、その平均はコントロール群で 0.988 ± 0.006 、バイペダル群で 0.969 ± 0.007 であった。それぞれの回帰直線の傾きから得られた伝導速度を内側と外側に分けて平均すると、コントロール群では内側 3.45 ± 0.43 m/sec、外側 3.67 ± 0.35 m/secとなり、有意 ($p < 0.05$) に内側の方が外側に比べて遅かった。バイペダル群では内側 3.7 ± 0.27 m/sec、外側 3.87 ± 0.28 m/secとなり、内側が外側より若干遅いものの有意な差ではなかった。バイペダル群とコントロール群の比較では、外側は有意な差はみられなかったが、内側はバイペダル群の方が有意 ($p < 0.05$) に速くなっていた (Fig.6)。

大殿筋の湿性重量では、体重比での比較で、バイペダル群が $0.68 \pm 0.05\%$ だったのに対してコントロール群は $0.63 \pm 0.07\%$ で、有意 ($p < 0.05$) にバイペダル群の相対重量が大きかった (Fig.7)。

考 察

ヒトの直立二足歩行は、哺乳類の移動形態の中でも極めて特殊であり、四足動物としての機能を持つ器官を流用しつつ適応させて、我々は日々の動作を行っているといえる。それゆえ、それらのバランスが少し崩れることで円滑な二足歩行、起立は障害されると考えられる。

さて、ヒトの臀部は他の哺乳類とは異なり、ふくよかに盛り上がっている。これは二足立位の姿勢や二足歩行を維持するために、大殿筋がよく発達しているためである。これはヒトが立位時に体幹前傾を行なった時や、通常歩行における立脚初期において増大する股関節屈曲モーメントに対抗するため、大殿筋の肥大がおきたと考えられる。脊柱後彎などのようなアライメントに変容を来した場合、身体後方の筋への負担が大きくなる事を、以前より我々は報告してきた⁴⁾⁵⁾。これにより、高齢者では健常人のように、膝を伸ばし、体を起こした姿勢での立位、歩行の維持が困難になる。つまり、変形の程度がひどくない場合は、膝と股関節を軽度屈曲位にして、

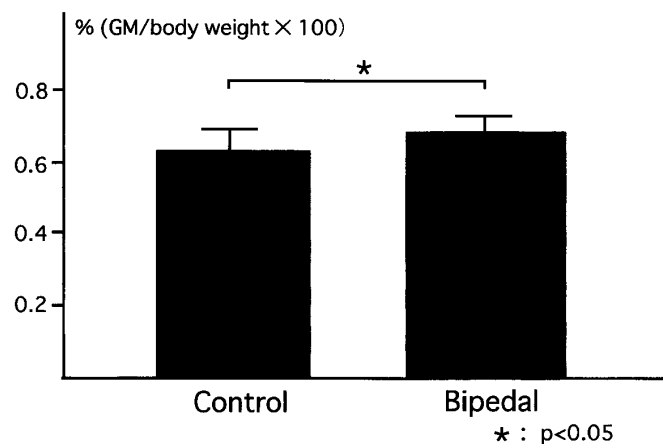


Fig. 7 Weight of the gluteus maximus muscles of rats.

前傾した体幹をその上に載せるような姿勢をとる場合が多く、著しい変形の場合は膝関節、股関節を深く屈曲し、体幹も後方の靭帯などの支持組織で支えるように屈曲させることで、脊柱起立筋や殿筋の緊張がなくても立位姿勢が取れるような方法を取る⁶⁾。もちろん、杖や歩行器などの歩行補助具によってこれらの筋の作用を肩代りさせることも多い。この事により、殿筋は使われなくなり、歩行可能な高齢者においても殿筋の萎縮による臀部の扁平化がよく見られると考える。しかし、どの程度のアライメント障害から大殿筋の萎縮が引き起こされ、またどの筋線維タイプの萎縮が著しいのか、などに関しての報告は乏しい。ヒトの二足立位による機能とバイペダルラットのそれを直接比較することはできないが、このような現象を運動学的に解析するための基礎的な資料として本研究を行った。

この度の報告では、バイペダル・トレーニングボックスを用いて二足起立運動を行ったラット (バイペダルラット) を作成した。この方法を用いると、二足歩行は行えないものの、前脚離断やシリンダー内拘束飼育に比べて、ラットにストレスを与えることなく、自発的に起立位の保持及びスクワット動作の反復を行わせることができたと考えられる。

直立二足立位を行うためには身体後方の筋、つまり背筋や殿筋、ハムストリングスなどの筋群の強い支持的緊張が求められる。松村⁷⁾ は、13週間われわれと同様な起立訓練を課したバイペダルラットでは、コントロール群に対して大腿二頭筋椎骨頭に有意な筋重量増加と横断面積増大を認めるとともに、同筋の筋線維構成においても速筋線維構成比がコントロール群23%に対してバイペダル群が26.4%とやや上回っていたと報告している。この理由として、バイペダル群の大腿二頭筋椎骨頭では、股関節伸展の維持のために、同筋の股関節安定化機能が増したため、筋全体としての酸化能力を高めるために遅筋線維の代わりに速筋線維が肥大したと結論づけてい

る。しかし大殿筋（浅殿筋）に関しては筋重量において有意な増加が認められず、また筋線維タイプの報告も行われていない。

さて、MFCVについては1966年のStålbergの報告で、すでに基本的な手法と特性が示されている⁸⁾。昨今は筋電測定機器の低価格化を背景に、筋疲労の評価⁷⁾や筋線維径の増大⁸⁾¹⁰⁾、筋線維タイプの変化に反応する指標¹¹⁾としてクローズアップされてきている。

我々は筋線維方向と機能に着目し、その筋線維の方向の違いが運動機能に密接に関連していて、筋にかかる負荷の違いで特定部位の筋の構成に特徴的な変化が見られるのではないかと考えた。この度は大殿筋に着目し、四足の肢位に加えて二足立位をとらせることで、股関節伸展に関与すると思われる部分においてMFCVがより亢進するのではないかと考えたのである。主に股関節伸展に関与すると思われる同筋内側部と、主に回旋に関与すると思われる外側部とを分けて、その比較をMFCVの変化にて検討を行った。MFCVは同一筋の中でもばらつきが大きく、これは筋線維タイプや筋線維径などの分布特性に依存すると考えられている¹²⁾。今回のラットは4週令から実験を始めたため、ラットの筋線維は加齢とともにそのタイプ分類が変化することが知られていて、例えばヒラメ筋などでは生直後は全てtype I Cであったものが、徐々に他のタイプIIに変化していくとされ、4週以降でもこの変化があると報告されている¹³⁾。この変化に関して立位訓練が何らかの影響を及ぼした可能性もあるが、現在の時点ではこの点に関して明らかではない。

測定の結果、外側部には特に変化が見られなかった半面、内側部はバイペダル群がコントロール群に対して有意に伝導速度の上昇を認めた。これは四足支持時に大殿筋に対して求められていた、回旋を中心とした安定性にかかわる機能に加えて、前後方向への安定にかかわる機能が付加されたためと考えられる。一般にMFCVが速くなるということは、相対的にtype I線維が増加していることや、筋線維径の増大がみられることが考えられている。type I線維の相対的増大により大殿筋内側部のMFCVが速くなったとすると、松村の報告によるバイペダルラットでの大腿二頭筋椎骨頭の速筋線維の相対的増大と一致するところであるが、今後生化学的研究を進める必要があると考える。また筋線維伝導速度の

変化には、筋線維膜特性の変化も考える必要があるといえ、今後の課題とされる。

さて、Ishida¹⁴⁾らによると、ニホンザルの二足立位時において、股関節を安定させるために必要なハムストリングスと殿筋の筋活動が増大すると報告されている。これはわれわれがヒトに対して行った体幹前傾歩行時の筋電図所見と一致する⁶⁾。つまり、われわれの行ってきた体幹前傾歩行での研究は、四足動物が二足立位を取るのと反対に、二足歩行を行っているヒトが筋力の低下や姿勢維持に関するアライメントの異常により、その姿勢を維持できなくなることで体幹が前傾し、その結果脊柱起立筋やハムストリングス、殿筋に負荷が増大するのではないかと考えて行われたもので、四足動物が二足立位を取る過程を反対に見たものに相当するからである。すなわち、この度のバイペダルラットにおいて、殿筋において負荷の増大による変化と考えられる結果が出たことは、直立二足立位を四足動物が獲得する過程において、非常に大きな負担を背部や臀部の筋に負荷させていたと考えられ、そのために膝や股関節を伸展位にして、各関節に増大したモーメントに対抗したと考える。しかし、その姿勢そのものは哺乳類がもともと四足動物であるがゆえに、無理な姿勢であることは否めない。ヒトは加齢などによって骨、筋、靭帯が変性し、それによって生じる脊柱の後弯では、重心線の前方移動によって殿筋への負担を増加させる。それに十分対抗できなくなると、前述のようなかえって筋力を使わない立位、歩行姿勢を取るようになり、結果として殿筋の萎縮につながってくると考えられるのである。

次に、MFCVの活用について考えてみたい。この度の研究では、ラット大殿筋に負荷された運動方向に見合う筋線維にMFCVの亢進が認められた。このことは、運動負荷を与えることである特定筋の部分的な影響を、MFCVをもって確認することができる可能性があるのではないかと考える。もちろん、現段階においてヒトでこれをすぐに活用することは技術的に困難であるといえるが、今後の課題としたい。

今後は対象数を増やし、他の筋との関係や、酵素組織学的検討も行っていきたいと考える。

本研究は、川崎医療福祉大学平成9年度プロジェクト研究費（代表 高橋利幸）の助成を受けて行った。

文 献

1) Colton HS (1929) How bipedal habit affects the bones of the hind legs of the albino rats. *J. Exp. Zool*, **53**(1),

- 1-11.
- 2) 松村秋邦 (1991) バイペダル・ラットと下肢骨の形態. 人類誌, **99**(3), 297-318.
 - 3) 岡島康友, 千野直一 (1998) 筋線維伝導検査とその臨床応用. 最新医学, **53**(7), 1645-1650.
 - 4) Takahashi T (1998) Electromyographic examination of how using a cane affects kyphotic gait. *Kawasaki Journal of Medical Welfare*, **4**(1), 45-48.
 - 5) 高橋利幸 (1998) 脊柱後弯状態での歩行時筋活動. 理学療法学会25学会特別号, 193.
 - 6) 高橋利幸, 西本千奈美, 渡邊 進 (1997) 脊柱後弯を呈する高齢者の歩行時の筋電図所見. 川崎医療福祉学会誌, **7**(2), 399-403.
 - 7) 松村秋邦 (1991) 二足起立行動がラット下肢筋に及ぼす影響. 科研費総合 A「ホミオイド (ヒト上科) における二足歩行能の起源と進化」成果報告書, 33-48.
 - 8) Stålberg E (1966) Propagation velocity along human muscle fibers in situ. *Acta Physiol Scand*, **70**(Suppl 287), 1-112.
 - 9) Hanayama K (1994) Recovery of conduction velocity of muscle fiber action potential after strenuous isometric contraction. *Jpn J Physiol*, **44**(1), 75-88.
 - 10) Hakansson CH (1956) Conduction velocity and amplitude of the action potential as related to circumference in the isolated fiber of frog muscle. *Acta Physiol Scand*, **37**(1), 14-34.
 - 11) Sadoyama T, Masuda T, Miyata H, Katsuta S (1988) Fiber conduction velocity and fiber composition in human vastus lateralis. *Eur J Appl Physiol*, **57**(6), 767-771.
 - 12) 野田幸男 (1987) 正常人における直接的筋線維伝導検査法とその臨床応用に関する研究. リハビリテーション医学, **24**(3), 153-162.
 - 13) 椿原彰夫 (1987) 正常ラットの運動負荷に関する酵素組織学的研究. -自由走行と筋線維タイプ変遷-. リハビリテーション医学, **24**(1), 25-35.
 - 14) Ishida H, Kumakura H, Kondou S (1985) Primate bipedalism and quadrupedalism : Comparative electromyography. In S. Kondo (Ed.), *Primate Morphophysiology, Locomotor analyses and Human Bipedalism*. Univ. of Tokyo Press, Tokyo, pp.59-79.

(平成11年11月10日受理)

Muscle Fiber Conduction Velocities of the Gluteus Muscles of Bipedal Standing Rats

Toshiyuki TAKAHASHI, Chinami NISHIMOTO, Tetsuya NISHIMOTO and Akio TSUBAHARA

(Accepted Nov. 10, 1999)

Key words : BIPEDAL STANDING, RAT, MFCV, GLUTEUS MAXIMUS

Abstract

Muscle fiber conduction velocities (MFCV) of the gluteus maximus muscles of bipedal standing rats were measured to determine whether exercise induces changes in intra muscular function. Sixteen four-week old male Sprague-Dawley rats were divided into two groups ; a control group (N=8) and a bipedal exercise group (N=8). Bipedal standing exercise was performed in a special bipedal training box called a Skinner's operant box. The animals were trained twice every day, in the morning and evening, five days a week. After 15 weeks of training the MFCV of the medial side (MFCV-M) and the lateral side (MFCV-L) of the gluteus maximus were measured using a comb style electrode under general anesthesia with thiopental sodium. Muscle fiber action potentials were evoked by electrical stimulation directly to the muscles, and recorded using a comb style electrode array on the surface of the muscles. The mean MFCV-M participation in hip extension in the bipedal exercise group (3.83 ± 0.39 m/sec) was significantly higher than that in the control group (3.45 ± 0.43 m/sec). However, there were no significant differences in the mean MFCV-L participation in hip rotation between the bipedal exercise group (3.81 ± 0.34 m/sec) and the control group (3.67 ± 0.35 m/sec). These results suggest that the increase in MFCV in the bipedal exercise group was caused not only by structural changes in the muscles, but also by changes in muscle function including muscle strength.

Correspondence to : Toshiyuki TAKAHASHI Department of Restorative Science, Faculty of Medical Professions
Kawasaki University of Medical Welfare
Kurashiki, 701-0193, Japan
(Kawasaki Journal of Medical Welfare Vol.9, No.2, 1999 251-256)