Nagoya J. Health, Physical Fitness, Sports Vol.43, No.1 (May 2020)
DOI: 10.18999/njhpfs.43.1.37

等速性収縮における中間広筋を含む大腿四頭筋の神経筋活動の検討

Neuromuscular activation patterns of vastus intermedius and superficial muscles in the quadriceps during isokinetic knee extensions

前　田　知　宏*　　島　　典　広**　　秋　間　　広*,***

Kazuhiro MAEDA*　　Norihiro SHIMA**　　Hiroshi AKIMA*,***

The purpose of this study was to assess the neuromuscular activation patterns of four synergistic muscles of the quadriceps femoris (QF), including the vastus intermedius (VI) muscle, during concentric and eccentric isokinetic knee extensions at 30, 90 and 120 deg/sec. Ten healthy men (age, 21.0 ± 0.6 year; height, 170.3 ± 4.8 cm; weight, 62.6 ± 6.4 kg) performed maximal voluntary isokinetic knee extension at knee joint angle from 80° to 160° (full extension = 180°). Surface electromyography (EMG) was recorded from the four individual muscles of the QF. The normalized EMG amplitude of the VI was significantly higher at knee joint angle between 80° and 100° during both the concentric and eccentric phases in all angular velocities compared to that of the rectus femoris ($P < 0.05$). The present results suggest that VI could highly contribute at the flexed position during concentric and eccentric phases of isokinetic knee extension as has been found in previous studies.

Ⅰ　背景

大腿四頭筋は表層部に位置する外側広筋、内側広筋、大腿直筋と深層部に位置する中間広筋の４つの筋から構成されており、歩行、ランニング、ジャンプなどヒトの身体運動において非常に重要な役割を果たす。

大腿四頭筋の外側広筋を用いた多くの研究では、外側広筋の神経筋活動が大腿四頭筋の代表と考えられ（Alkner et al., 2000）、これまで検討されてきたが、実際にはそれが当てはまらない事例が確認されている。例えば、中間広筋の大腿四頭筋全体に占める筋体積の割合は30％前後であり（Akima et al., 2007）、その割合は大腿四頭筋の中で外側広筋に次いで大きい（O'Brien et al., 2010a, 2010b）。一方、電気刺激により誘発された等尺性収縮の膝伸展において中間広筋の貢献度は、発揮トルクの50％を占めることが報告されており（Zhang et al., 2003）、先に示した中間広筋の筋量から考えると貢献度は大きいことがわかる。したがって、大腿四頭筋の機能を正確に調べるためには、大腿四頭筋の４つの筋頭から神経筋活動を記録する必要がある。

骨格筋の収縮様式は、静的収縮と動的収縮に大別できる。一般的に静的収縮は等尺性収縮を意味し、動的収縮には等張性収縮と等速性収縮があり、前者はフリーウエイトのような負荷に対する収縮で、後者は等速性筋力測定機器のような特別な装置を用いて一定速度条件で発揮された力を示す。これまで等尺性収縮と等張性収縮時の大腿四頭筋の神経筋活動は、関節角度や用いる負荷によって、その神経筋活動が変化することが示されてきた（Watanabe and Akima, 2011; Akima and Saito, 2013）。

等尺性膝伸展による随意筋力発揮では、伸展位と比較して屈曲位において、中間広筋の神経筋活動の実効値（Root Mean Square: RMS）は有意に高値を示し、他の３筋との比較においても屈曲位で有意に高値を示した（Watanabe and Akima, 2011）。つまり、中間広筋の標準化 RMS―膝関節角度関係は、そのパターンが他の３筋と異なることが示された。このことは中間広筋が屈曲位において力発揮により貢献し、伸展位ではその貢献が

＊　名古屋大学大学院教育発達科学研究科
＊＊　東海学園大学スポーツ健康科学部
＊＊＊　名古屋大学総合保健体育科学センター
＊　Graduate School of Education and Human Development, Nagoya University
＊＊　School of Sports and Health Science, Tokai Gakuen University
＊＊＊　Research Center of Health, Physical & Fitness and Sports, Nagoya University

低下することを示唆している。

動的な膝伸展運動では、最大挙上重量の60％から100％において、中間広筋の神経筋活動はコンセントリック局面（伸展局面）およびエキセントリック局面（屈曲局面）の両方で膝関節の屈曲位で標準化 RMS は他の３筋のそれと比べて有意に高値を示し、一方、伸展位では有意に低値を示した（Akima and Saito, 2013）。このことから、動的な伸展においても中間広筋は屈曲位において重要な役割を果たしている可能性が考えられる。

このように等尺性収縮および等張性収縮における大腿四頭筋の神経筋活動パターンは類似していることが示唆されてきた（Watanabe and Akima, 2011; Akima and Saito, 2013）。しかしながら、等速性収縮においても類似した神経筋活動パターンを示すのかについて明らかとなっていない。

そこで、本研究ではコンセントリックおよびエキセントリック収縮による等速性収縮において、中間広筋を含む大腿四頭筋の神経筋活動について明らかにすることを目的とした。動的収縮である等張性収縮における中間広筋を含む大腿四頭筋の神経筋活動は膝関節角度に依存し、特に中間広筋の標準化 RMS は屈曲位で他の３筋のそれと比べて有意に高値を示した（Akima and Saito, 2013）ことから、同じ動的収縮である等速性収縮においても中間広筋の神経筋活動は膝関節角度の影響を受けると仮説を立てた。

Ⅱ　方法

A. 被検者

被検者は男子大学生10名（年齢：21.0±0.6歳、身長：170.3±4.8cm、体重：62.6±6.4kg）で、すべての被検者に対して実験の目的、内容、危険性および有用性等について説明した後、参加の同意を書面にて確認した。なお、本研究は、名古屋大学総合保健体育科学センターにおける健康･スポーツ系研究倫理委員会の承認（承認受付番号：19-05）を得て実施された。

B. 実験プロトコール

被検者は本実験の１週間前に実験室に訪れ、等速性筋力測定器（CON-TREX 社製）を用いて、コンセントリック（CON）収縮およびエキセントリック（ECC）収縮による等速性膝伸展の練習を行った。被検者は再び実験室に訪れ、最大努力による角速度30、90、120deg/sec の等速性膝伸展運動を行なった。測定に用いた角速度の順序はランダムとした。中間広筋を含む大腿四頭筋４筋と大腿二頭筋・長頭の神経筋活動を測定した。

C. 等速性収縮膝伸展筋力

被検者は等速性膝伸展の異なる３つの角速度において最大努力で筋力発揮を行い、中間広筋を含む大腿四頭筋と大腿二頭筋・長頭より神経筋活動が記録された。

角速度30deg/sec で２試行、90、120deg/sec では３試行が実施された。試行間には十分な休息を設けた。被検者は等速性筋力測定器に股関節角度100°（180°＝完全伸展）で座り、上半身および被検者の右脚と足首はストラップによって固定された。膝関節の可動域は80°–160°（180°＝完全伸展）に設定した。

D. 表面筋電図

中間広筋、外側広筋、内側広筋、大腿直筋、大腿二頭筋・長頭から表面電極（FAD-SEMG1、フォーアシスト社製）を用いて等速性膝関節伸展中の表面筋電図を記録した。表面筋電図の記録装置の詳細は、電極間距離：１cm、入力インピーダンス：10GΩ、周波数特性：10-1000Hz であった。得られた筋電図信号はアナログ BOX（FAD-ABOXB、フォーアシスト社製）を経由して、サンプリング周波数2000Hz に設定した AD 変換器（PowerLab、ADInstruments 社製）を介し、専用のソフトウェア（Chart7、ADInstruments 社製）を用いてパーソナルコンピュータへ保存した。

電極を貼付する前に皮膚処理として剃毛および皮膚の研磨を行い、その後アルコール綿で十分に拭いた。外側広筋の電極貼付位置は大転子と膝蓋骨上縁を結ぶ皮膚上の線分の中点とした。内側広筋の電極貼付位置は、膝蓋骨から大腿骨の４分の１近位かつ内側とした。大腿直筋の電極貼付位置は、上前腸骨棘と膝蓋骨上縁を結ぶ線分の中点とした。大腿二頭筋・長頭の電極貼付位置は、大腿骨外側上顆と坐骨結節を結ぶ皮膚上の中点とした。なお、大腿二頭筋・長頭の電極貼付位置は、超音波装置（ProSound SSD-α7、アロカ社製）を用いて確認した。これらの電極は、推定される筋線維の走行方向と並行にセンサが並ぶように正確に貼付した。中間広筋の電極貼付位置は、（Watanabe and Akima, 2009）の方法に、基づいて決定した。膝関節角度80° とした座位姿勢において大腿部の遠位外側から横断画像を得た。皮下脂肪、中間広筋、外側広筋および大腿骨を画像から同定し、遠位および近位方向にプローブを移動させ、中間広筋の表出部位の周囲を耐水性マーカで印をつけた。中間広筋の表出部位は、横断画像において外側広筋の外側端から皮下１cm 以上の深さに位置している中間広筋の外側端までと定義した。膝関節角度160° とした座位姿勢においても同様に中間広筋の表出部位の周囲をマーカで印をつけ、膝関節角度80° と160° での表出部位が共通する部分を中間広筋の電極貼付位置とした。な

お、基準電極は、左足の膝蓋骨に貼付した。

E. データ分析

膝関節角度の違いによる大腿四頭筋の神経筋活動の大きさを比較するため、膝関節角度80°–160° は以下の４つのフェーズに細分化して分析した：80°–100°、100°–120°、120°–140°、140°–160°。全ての筋収縮において大腿四頭筋の RMS は、角速度30deg/sec における膝関節角度80°–160° のコンセントリック収縮時の RMS で標準化され、大腿二頭筋・長頭の RMS は角速度30deg/sec における膝関節角度160–80° のコンセントリック収縮時の RMS で標準化された。

F. 統計処理

本研究で得られたすべてのデータは、平均と標準偏差で示した。大腿四頭筋および大腿二頭筋・長頭の標準化 RMS は反復測定による二元配置分散分析（膝関節角度×筋）を用いて分析した。主効果あるいは交互作用が認められた場合には、Bonferroni の多重比較検定を用いて多重比較を行った。統計解析には IBM SPSS Statistics（version 25）を用いて行い、有意水準は５％未満とした。

Ⅲ　結果

図１にはコンセントリックおよびエキセントリック収縮時の標準化 RMS―関節角度関係について示した。全ての角速度のコンセントリック収縮およびエキセントリック収縮において、膝関節角度80°–100° の中間広筋の標準化 RMS は大腿直筋のそれと比較して有意に高値を示した。一方、角速度30deg/sec のコンセントリック収縮において、膝関節角度120°–140°、140°–160° の中間広筋の標準化 RMS は大腿直筋のそれと比べて有意に低値を示した。

角速度30、90、120deg/sec のコンセントリック収縮および30deg/sec のエキセントリック収縮において、膝関節角度80°–100° の中間広筋の標準化 RMS は外側広筋のそれと比べて有意に高値を示した。

角速度30deg/sec のエキセントリック収縮において、膝関節角度120°–140° の中間広筋の標準化 RMS は外側広筋、大腿直筋のそれと比較して有意に低値を示した。

角速度120deg/sec のコンセントリック収縮において、膝関節角度80°–100° および100°–120° の中間広筋の標準化 RMS は、中間広筋および大腿直筋のそれと比較してそれぞれ有意に高値を示した。

全ての角速度のコンセントリック収縮およびエキセントリック収縮において、全ての関節角度の中間広筋を含む大腿四頭筋４筋の標準化 RMS は大腿二頭筋・長頭のそれと比較して有意に高値を示した。（図１）

Ⅳ　考察

本研究の目的は、等速性収縮における中間広筋を含む大腿四頭筋の神経筋活動について検討することであった。各膝関節可動域で、全ての角速度のコンセントリック収縮およびエキセントリック収縮において、膝関節角度80°–100° の中間広筋の標準化 RMS は大腿直筋のそれと比較して有意に高値を示した。一方、角速度30deg/sec のコンセントリック収縮において膝関節角度120°–140°、140°–160° の中間広筋の標準化 RMS は大腿直筋のそれと比べて有意に低値を示した。これら本研究で得られた結果は、等尺性収縮（Watanabe and Akima, 2011）および等張性収縮を用いた先行研究（Akima and Saito, 2013）と同様に、等速性収縮においても中間広筋の神経筋活動は膝関節の屈曲位で他の筋より高値を示すという点において一致していた。一方、屈曲位において中間広筋の標準化 RMS と有意な差が認められたのは大腿直筋のみであり、等張性収縮時の神経筋活動を研究した（Akima and Saito, 2013）結果とは異なり、外側広筋、内側広筋のそれとは有意な差が認められなかった。その原因として、測定に用いた被検者の数の違いや測定に用いた動作様式が影響した可能性が考えられる。

本研究で最も重要な点は、大腿四頭筋の神経筋活動が収縮様式に関係なく、類似した振る舞いが見られたことである。すなわち、等尺性収縮（Watanabe and Akima, 2011）および等張性収縮（Akima and Saito, 2013）では、屈曲位において中間広筋の神経筋活動が他のいずれかの筋と比較して有意に高値を示し、伸展位では有意に低値を示すことが明らかにされていた。今回は等速性収縮においても同様な結果が認められた。つまり、膝関節が関与する身体活動においては、屈曲位には中間広筋の貢献度が大きく、伸展位では相対的にその貢献度は低下することを示唆している。同様な結果は Zhang et al.（2003）においても報告されている。彼らは大腿四頭筋の各筋を電気刺激によって収縮させ、その際の筋張力を測定した。その結果、中間広筋は最大で発揮トルクの50％程度まで貢献することが示されている。同様に Lieb and Perry.（1968）は屍体から切断した下肢を用いて、大腿四頭筋の各筋をワイヤーで直接牽引する際に必要となった力を測定することによって、力の伝達効率について検討した。その結果、中間広筋は最も少ない牽引力で膝関節の伸展動作を引き起こすことができたことから、最も効率的な筋であると述べている。さらに、Ando et al.（2016）は等尺性膝伸展筋力発揮時の筋束動態を検討したところ、関節角度や張力発揮レベルにかかわらず、

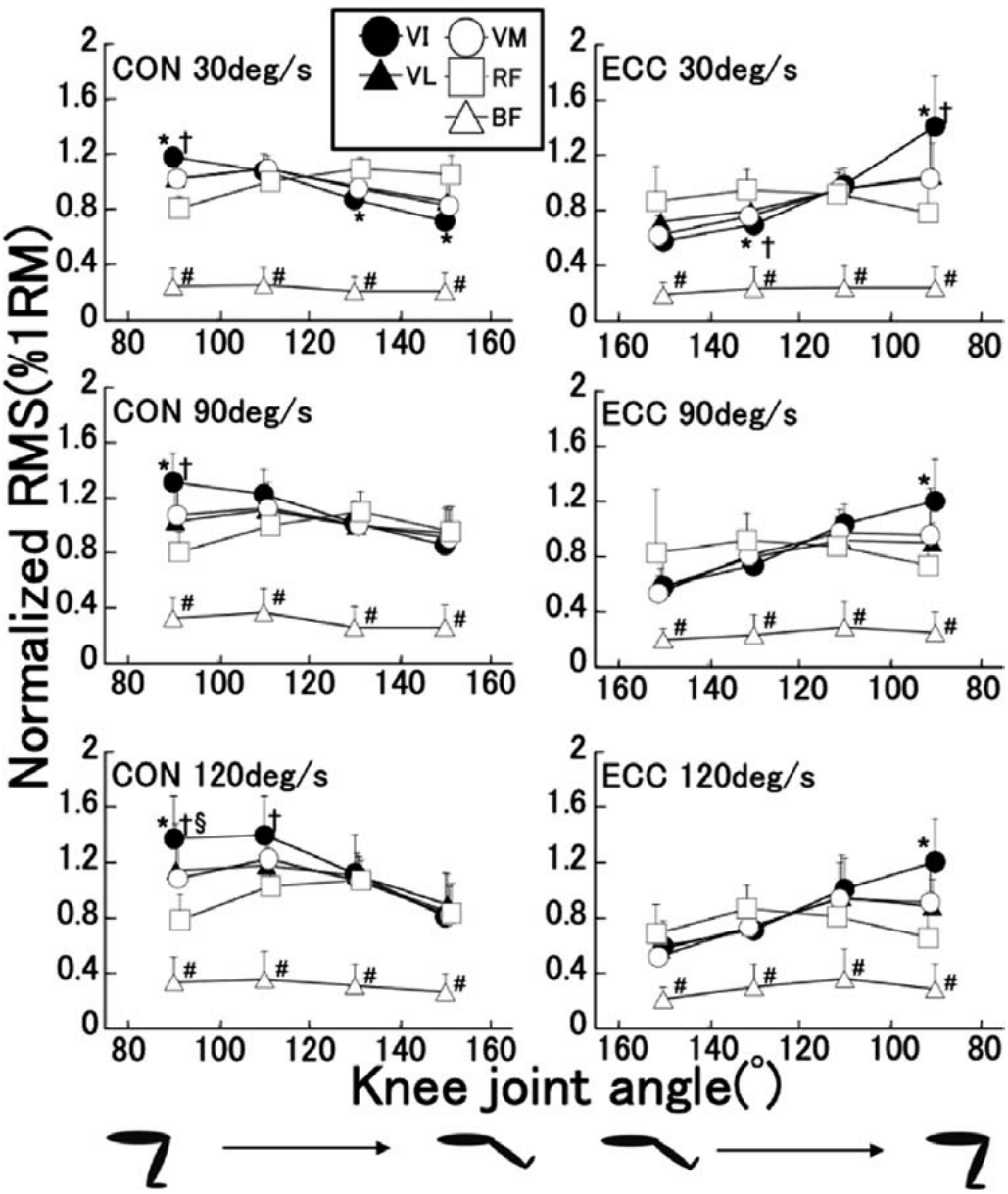

図1　角速度30、90、120deg/sec の等速性膝伸展における膝関節角度―標準化 Root Mean Square 関係

*P < 0.05 vs. RF; †P < 0.05 vs. VL; §P < 0.05 vs. VM; #P < 0.05 vs. VI, VL, VM, RF.

VI、中間広筋；VL、外側広筋；VM、内側広筋；RF、大腿直筋；BF、大腿二頭筋・長頭。

CON、コンセントリック収縮；ECC、エキセントリック収縮。

屈曲位での中間広筋は筋束の短縮率が外側広筋のそれと比較して大きい傾向が見られた。これは張力発揮初期の腱組織の伸長が少ないことを示唆しており、膝伸展動作を行う際に中間広筋はいわゆる“あそび”が少なく、発揮した筋張力を関節トルクとしてより効率的に伝達することができると考えられる。これらの先行研究と合わせて考えると、等速性筋力発揮における中間広筋の神経筋活動パターンは、神経筋系および解剖学的要因に由来する筋収縮パターンであることが示唆された。

Ⅴ　まとめ

本研究はコンセントリックおよびエキセントリック収縮による等速性膝伸展筋力発揮時の中間広筋を含む大腿四頭筋の神経筋活動について、表面筋電図を用いて記録した。その結果、屈曲位では中間広筋の神経筋活動は他の筋のそれより有意に高値を示し、伸展位では有意に低値を示した。これらの結果は等尺性および等張性筋力発揮を用いた我々の先行研究（Watanabe and Akima, 2011; Akima and Saito, 2013）と一致していた。以上のことから、中間広筋の神経筋活動は膝関節角度依存で変化することが等速性筋力発揮においても確認された。これには神経筋系および解剖学的影響が大きく関係していることが示唆された。

References

Akima, H., Ushiyama, J., Kubo, J., Fukuoka, H., Kanehisa, H., Fukunaga, T. (2007) Effect of unloading on muscle volume with and without resistance training. Acta Astronautica, 60: 728–736.

Akima, H., Saito, A. (2013) Inverse activation between the deeper vastus intermedius and superficial muscles in the quadriceps during dynamic knee extensions. Muscle Nerve, 47: 682–690.

Alkner, BA., Tesch, PA., Berg, HE. (2000) Quadriceps EMG/force relationship in knee extension and leg press. Med Sci Sports Exerc, 32: 459–463.

Ando, R., Nosaka, K., Inami, T., Tomita, A., Watanabe, K., Blazevich, AJ., Akima, H. (2016) Difference in fascicle behaviors between superficial and deep quadriceps muscles during isometric contractions. Muscle Nerve, 53: 797–802.

Blazevich, AJ., Gill, ND., Zhou, S. (2006) Intra-and intermuscular variation in human quadriceps femoris architecture assessed in vivo. J Anat, 209: 289–310.

Lieb, FJ., Perry, J. (1968) Quadriceps function. An anatomical and mechanical study amputated limbs. J Bone Joint Surg Am, 50: 1653–1659.

O'Brien, TD., Reeves, ND., Baltzopoulos, V., Jones, DA., Maganaris, CN. (2010a) In vivo measurements of muscle specific tension in adults and children. Exp Physiol, 95: 202–210.

O'Brien, TD., Reeves, ND., Baltzopoulos, V., Jones, DA., Maganaris, CN. (2010b) Muscle structure and dimensions in adults and children. J Anat, 216: 631–642.

Watanabe, K., Akima, H. (2011) Effect of knee joint angle on neuromuscular activation of the vastus intermedius muscle during isometric contraction. Scand J Med Sci Sports, 21: e412–e420.

Zhang, LQ., Wang, G., Nuber, GW., Press, JM., Koh, JL. (2003) In vivo load sharing among the quadriceps components. J Orthop Res, 21: 565–571.