

原著論文

収縮様式の違いが力発揮時の下腿三頭筋の形状におよぼす影響

Effects of differences in the type on muscle contraction to the geometry of the triceps surae muscle during force generating.

佐久間淳、黒川貞生¹⁾

Jun Sakuma, Sadao Kurokawa

1) 明治学院大学

Abstract

The previous studies revealed that the length of tendon tissue (tendon and aponeurosis) differ between isometric contraction and eccentric contraction. The tendon tissues connect to fascicle of muscle, so it was thought that the length of fascicle was influenced by the type of contraction. Therefore, it was assumed that the muscle geometry (the length of fascicle and the angle of pennation) differ between the type of contraction. The purpose of this study was to investigate that the effects of differences in the types on muscle contraction to the geometry of the triceps surae muscle (medial gastrocnemius and soleus) during force generating. The ten male subjects participated in this study, and they performed maximal isometric and maximal eccentric plantar flexion exercises on an isokinetic dynamometer at a pre-set velocity of angle at 25 deg / sec. The lengths of fascicle and angles of pennation in medial gastrocnemius and soleus muscles were measured by ultrasonography. It was found that no significant difference in the peak torque between isometric contraction and eccentric contraction. The lengths of fascicle and angles of pennation in medial gastrocnemius and soleus muscles did not found significant difference between isometric and concentric contractions. The present results indicated that the type of contraction was not influenced on the muscle geometry (the length of fascicle and the angle of pennation) during contraction.

Key words : isometric contraction, eccentric contraction, the length of fascicle, the angle of pennation, ultrasonography

I はじめに

身体運動は、骨格筋（筋と腱で構成）が収縮し、その力が骨へ伝達された結果として関節が回転することで生じる。骨格筋の収縮形態は、目的によって異なり、3つ（等尺性収縮、短縮性収縮、伸張性収縮）存在する。したがって、身体運動時における骨格筋の収縮動態を観察し、異なる収縮条件間で比較することは骨格筋が身体運動において果たす役割を明らかにするうえで重要である。

動物の摘出筋を用いた先行研究¹⁾は、筋と腱を含む筋腱複合体の両端を固定した状態で筋を電気刺激し収縮させる等尺性収縮（筋力発揮の際、筋の長さが一定）と、一端を固定し、電気刺激で短縮させた状態から筋を強制的に伸張させる伸張性収縮時の腱膜の長さを同一張力で比較した。その結果、伸張性

収縮時の腱膜の長さが等尺性収縮時のそれよりも長くなることを明らかにした。このことは、筋の収縮様式によって筋形状への影響が異なることを意味している。しかしながら、彼らは、筋線維（筋束）の長さや羽状角といった筋形状の違いについて明らかにしていない。腱膜は筋束と結合しており、筋束の収縮によって影響を受けることから、腱膜長が長いということは、一方で筋束が短くなることが予想される。ヒト生体における伸張性収縮時の筋束の長さ変化あるいは腱膜の長さ変化については、Sugisaki²⁾や Chino³⁾などが超音波装置を用いて下腿三頭筋（腓腹筋内側頭あるいはヒラメ筋）について明らかにしているが、伸張性収縮時の筋束長と等尺性収縮時のそれを比較した報告はみられない。

そこで、本研究は腓腹筋内側頭およびヒラメ筋を

被験筋として伸張性収縮時および等尺性収縮時の筋束長および羽状角について超音波装置を用いて計測し、筋の収縮様式の違いが筋形状へ及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

II 方法

健康な成人男性 10 名（身長：1.81±0.05 m、体重：81.1±5 kg、年齢：23.8±2.4 歳）が図 1 のような姿勢で筋力計（キスラー社製、スイス）を用いて、等尺性最大筋力及び伸張性最大筋力を発揮した。



図 1 実験設定

足関節は、非伸縮性のバンドでダイナモメーターに接続されたプレートに固定された。試行は各収縮様式をランダムに実施した。各試行は 3～6 回実施し、試行間は最低 3 分間の休憩を設けた。等尺性収縮試行は、足関節角度背屈 10 度（解剖学的正位を 0 度とする）で計測し、伸張性収縮試行は足関節角度底屈 20 度で最大筋力を発揮し、そこから背屈 10 度まで強制的に足関節角速度 25 deg/s で背屈した。

筋疲労の影響を考慮し、等尺性収縮試行と伸張性収縮試行を別日（試行間は 3 日以上あけた）に実施した。計測された足関節トルクおよび足関節データは、A/D 変換機（CED power 1401, ケンブリッジエレクトロニクス社製、イギリス）を介してパーソナルコンピュータに記録し、保存した。等尺性収縮試行時および伸張性収縮試行直後の力発揮中（ほぼ等尺性収縮）の腓腹筋内側頭およびヒラメ筋の筋線維長（筋束長）を計測するために、超音波装置（α 10、アロカ社製、日本）のプロープ（7.5MHz リニ

アプローブ、アロカ、日本）を下腿長 30% 部位に固定し、力発揮中の筋束および羽状角を撮像した。撮像された画像から画像解析ソフト（Image j 1.41、National Institutes of Health、アメリカ）を用いて筋束長および羽状角を計測した（図 2）。

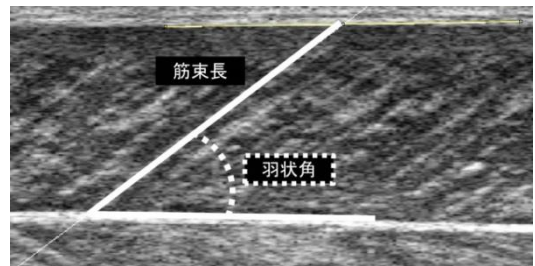


図 2 筋束長および羽状角の計測方法

筋力計と筋束長・羽状角のデータの同期はデジタルシグナルを用いた。筋力計にはシグナルが入ると矩形波として記録され、撮像された腓腹筋内側頭の画像には心電図用の ECG シグナルを利用して矩形波として表示させた。なお、本研究で用いた方法は医療用の超音波装置を改良し、筋力計と超音波装置で撮像された画像にタイムラグが無い状態にセッティングされたものであり、多数の論文で使用されている^{4),5),6)}。筋束長の計測区間は、等尺性収縮試行時においては最大筋力発揮時、伸張性収縮時においては足関節角度が背屈 10 度に到達した時点とした（図 3, 6 頁）。等尺性収縮時と伸張性収縮直後の足関節トルクの差および各筋の筋束長および羽状角の差の検定は、一元配置分散分析を用いた。なお、危険率 5% 未満（ $p<0.05$ ）をもって有意とした。

III 結果

等尺性収縮時の足関節トルクは 443±70 Nm であり、伸張性収縮時の足関節トルクは 444±74Nm と両試行間における有意差は認められなかった。また、両試行の腓腹筋内側頭およびヒラメ筋の筋束長（表 1）と羽状角（表 2）においても、試行間に有意差は認められなかった。

表 1 各試行における各筋の筋束長

	筋束長(cm)	
	腓腹筋内側頭	ヒラメ筋
伸張性収縮試行	4.5 ± 0.9	3.3 ± 0.7
等尺性収縮試行	4.8 ± 1.2	3.1 ± 0.5

表 2 各試行における各筋の羽状角

	羽状角(deg)	
	腓腹筋内側頭	ヒラメ筋
伸張性収縮試行	24.4 ± 4.7	32.0 ± 4.9
等尺性収縮試行	23.4 ± 7.6	31.8 ± 6.6

IV 議論

本研究は、ヒト生体における伸張性収縮時および等尺性収縮時の筋束長を比較し、筋の収縮様式による筋形状への影響を検討することを目的とした。その結果、伸張性収縮時および等尺性収縮時における腓腹筋内側頭およびヒラメ筋の筋束長および羽状角は、いずれの試行間においても有意差は認められず、筋形状に違いがないことが明らかとなった。したがって、先行研究より導いた仮説（筋の収縮様式の影響を受けて、力発揮時の筋形状が異なる）は棄却された。

その要因としては、以下のものが考えられる。まずは、試行中に発揮された筋力についてである。本研究の結果では、伸張性収縮時と等尺性収縮時の足関節トルクに差がみられなかった。一般的に、伸張性収縮時の最大筋力は、等尺性収縮時のそれより大きくなることが知られている。しかしながら、伸張性収縮時は抑制性の機序が機能することによって、筋の長さを円滑に引き伸ばせるようになっていることも知られていることから、伸張性収縮時、抑制性の機序が機能したことによって足関節トルクの値が等尺性収縮時と同程度になったものと推察される。詳細は不明であるが、筋の長さや変化率の情報を神

経系や供給している筋紡錘や筋張力の情報を供給しているゴルジ腱器官といった受容器関与した結果であると思われる。

Laidlaw ら⁷⁾は、伸張性収縮試行のトレーニング実験を行い、その結果、伸張性収縮時の抑制性の神経機構にトレーニングが存在することを明らかにした。彼の研究の被験者は高齢者であるが、若齢者においてもトレーニングが存在するものと思われる。したがって、伸張性収縮試行を採用する研究においては、事前のトレーニングが必要となる可能性がある。本実験を実施するにあたり数日前に力発揮の練習を実施したものの、「慣れる」までには至らなかったため、伸張性収縮試行と等尺性収縮試行の足関節トルクに違いが認められなかったものと推察される。すなわち、「慣れた」状態であれば伸張性筋活動時の筋力が等尺性収縮時のそれよりも高くなった可能性は否定できない。本研究では、筋電図を計測しておらず、試行中に被験者が最大筋力を発揮しているか否かを明らかにできない。これらの点については更なる検討が必要である。

次に、力発揮時における腱膜の「幅」の変化が挙げられる。Maganaris ら⁸⁾や Muraoka ら⁹⁾は、ヒトの前脛骨筋を対象とし等尺性足関節背屈トルク発揮中に伴う中間腱膜の幅の変化を超音波法によって明らかにし、幅の広がりにより部位差などがあることを報告した。さらに、MRI 法を用いて力発揮中のアキレス腱の変形を 3 次元的に捉えた報告^{10,11)}においても、腱組織の「幅」の変化に関して、超音波法と同様の結果が得られている。本研究は筋束長のみの計測であり、「幅」の変化について明らかにすることができないが、腱膜の幅の変化が伸張性収縮時と等尺性収縮時で異なり、その結果、筋束長および羽状角といった筋形状に違いがみられなかったものと思われる。

そして、粘性の影響である。先行研究¹²⁾において、等尺性収縮時の膝蓋腱の長さ - 力関係が力の立ち上げ速度（安静から最大筋力発揮までの時間が異なる）によって影響を受け、力の立ち上げ速度が高い試行の膝蓋腱のスティフネスが高いことが明らかになっ

ている。その要因として粘性の影響と考えられている。本研究における角速度 25 deg/s はゆっくりとした関節の回転運動であり、腱組織の粘性の影響を受けなかったため、粘性の影響はないものと思われる。しかしながら、摘出筋を用いた先行研究においても 2 mm/s と非常にゆっくりとした伸張速度であるにもかかわらず筋の収縮様式の影響が生じていた。この点については今後、詳細に検討する必要がある。

最後に、協働筋間差についてである。腓腹筋内側頭とヒラメ筋は、筋線維組成や体積、筋束長や羽状角などが異なる^{13),14),15),16)}ものの、本研究の結果、両筋とも等尺性収縮時と伸張性収縮時の筋束長および羽状角に有意差が認められず、収縮様式が及ぼす影響に筋間差がないことが明らかとなった。腓腹筋側頭およびヒラメ筋の筋束長や羽状角の変化を観察した先行研究をみると、両筋の筋腱動態が異なるという報告^{17),18)}と一致しているという報告^{3),19),20)}に分かれる。両者の大きな違いは、試行の動作にある。両筋の筋腱動態が試行によって異なった先行研究^{17),18)}は、歩行やドロップジャンプといった多関節動作であり、両筋の筋腱動態の変化が一致した先行研究^{3),19),20)}は足関節トルク発揮のみの単関節動作であった。腓腹筋内側頭は足関節と膝関節にまたがる 2 関節筋であり、歩行やドロップジャンプといった多関節動作時には膝関節および足関節の角度変化が生じる。よって、多関節動作時の腓腹筋内側頭とヒラメ筋の筋腱動態の違いは、膝関節角度変化が影響しているものと思われる。

V まとめ

本研究は、伸張性収縮時と等尺性収縮時における同一足関節角度での力発揮時の筋束長および羽状角の比較から、筋の収縮様式が筋形状変化に及ぼす影響を明らかにすることを目的として行った。その結果、伸張性収縮時と等尺性収縮時における同一張力での筋束長および羽状角に有意差は認められなかった。このことから、筋の収縮様式が筋形状変化に影響しないことが明らかとなった。

【参考文献】

1. Huijing, P. A., Ettema, G. J: Length-force characteristics of aponeurosis in passive muscle and during isometric and slow dynamic contractions of rat gastrocnemius muscle. *Acta Morphologica Neerlandica - Scandinavica* 26, 51 - 62, 1988/89.
2. Sugisaki, N., Kanehisa, H., Kawakami, Y., Fukunaga T: Behavior of aponeurosis and external tendon of the gastrocnemius muscle during dynamic plantar flexion exercise. *International Journal of Sport and Health Science* 3, 235 - 244, 2005.
3. Chino K, Oda T, Kurihara T, Nagayoshi N, Yoshikawa K, Kanehisa H, Fukunaga T, Fukashiro S, Kawakami Y: In vivo fascicle behavior of synergistic muscle in concentric and eccentric plantar flexions in humans. *J Electromyogr Kinesiol* 18, 79 - 88, 2008.
4. Kubo K, Kanehisa H, Takeshita D, Kawakami Y, Fukashiro S, Fukunaga T. In vivo dynamics of human medial gastrocnemius muscle-tendon complex during stretch-shortening cycle exercise. *Acta Physiol Scand.* 170(2), 127 - 35, 2000.
5. Kurokawa S, Fukunaga T, Fukashiro S. Behavior of fascicles and tendinous structures of human gastrocnemius during vertical jumping. *J Appl Physiol* (1985). 90(4), 1349 - 1358, 2001.
6. Kurokawa S, Fukunaga T, Nagano A, Fukashiro S. Interaction between fascicles and tendinous structures during counter movement jumping investigated in vivo. *J Appl Physiol* (1985). 95(6), 2306 - 2314, 2003.
7. Laidlaw DH, Kornatz KW, Keen DA, Suzuki S, Enoka RM: Strength training improves the steadiness of slow lengthening contractions performed by old adults. *J Appl Physiol* (1985),

- 87(5): 1786 - 1795, 1999.
8. Maganaris, C. N., Kawakami, Y., Fukunaga, T: Changes in aponeurotic dimensions upon muscle shortening: In vivo observations in man. *Journal of Anatomy* 199, 449 - 456, 2001.
 9. Muraoka, T., Muramatsu, T., Kanehisa, H., Fukunaga, T: Transverse strain of aponeurosis in human tibialis anterior muscle at rest and during contraction at different joint angles. *Journal of Applied Biomechanics* 19, 39 - 48, 2003.
 10. Azizi E, Roberts TJ: Biaxial strain and variable stiffness in aponeuroses. *J Physiol* 587, 4309 - 4318, 2009.
 11. Iwanuma S, Akagi R, Kurihara T, Ikegawa S, Kanehisa H, Fukunaga T, Kawakami Y: Longitudinal and transverse deformation of human Achilles tendon induced by isometric plantar flexion at different intensities., *J Appl Physiol* (1985),110 (6), 1615 - 1621, 2011.
 12. Pearson SJ, Burgess K, Onambele GN: Creep and the in vivo assessment of human patellar tendon mechanical properties. *Clin Biomech.* 22 (6), 712 - 7, 2007.
 13. Fukunaga T, Roy RR, Shellock FG, Hodgson JA, Day MK, Lee PL, Kwong-Fu H, Edgerton VR: Physiological cross-sectional area of human leg muscles based on magnetic resonance imaging. *J Orthop Res*, 10 (6), 928 - 934, 1992.
 14. Johnson MA, Polgar L, Weightman D, Appleton D: Data on the distribution of fibre types on thirty-six human muscles an autopsy study. *J Neurol Sci* 18, 111 - 129, 1973.
 15. Wickiewicz TL, Roy RR, Powell PL, Edgerton VR: Muscle architecture of the human lower limb. *Clin Orthopaed Rel Res* 179, 275 - 283, 1983.
 16. Kawakami, Y., Ichinose, Y., Fukunaga, T: Architectural and functional features of human triceps surae muscles during contraction. *Journal of Applied Physiology* 85, 398 - 404, 1998.
 17. Ishikawa M, Komi PV, Grey MJ, Lepola V, Bruggemann GP: Muscle-tendon interaction and elastic energy usage in human walking., *J Appl Physiol* (1985), 99(2), 603 - 608, 2005.
 18. Sousa F, Ishikawa M, Vilas-Boas JP, Komi PV: Intensity- and muscle-specific fascicle behavior during human drop jumps. *J Appl Physiol* 102, 382 -389, 2007.
 19. Oda T, Kanehisa H, Chino K, Kurihara T, Nagayoshi T, Fukunaga T, Kawakami Y: In vivo behavior of muscle fascicles and tendinous tissues of human gastrocnemius and soleus muscles during twitch contraction. *J Electromyogr Kinesiol* 17, 587 - 595, 2007.
 20. Sakuma J, Kanehisa H, Yanai T, Fukunaga T, Kawakami Y: Fascicle - tendon behavior of the gastrocnemius and soleus muscles during ankle bending exercise at different movement frequencies. *Eur J Appl Physiol.* 112(3), 887 - 898, 2012.

収縮様式の違いが力発揮時の下腿三頭筋の形状におよぼす影響

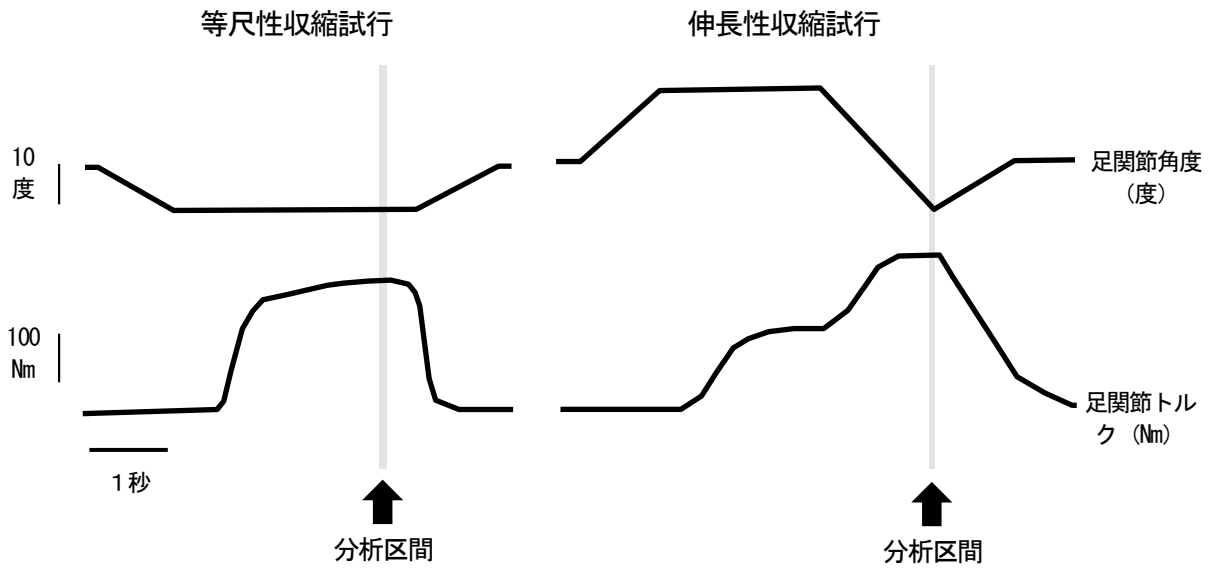


図3 筋束長および羽状角の分析区間