座位における下腿筋長軸方向部位別横断面積と 足関節底背屈筋力の関係

*Relationship between Muscle Cross-sectional Areas of the Longitudinal Regions and
Muscle Torque of the Lower Leg While Sitting*

宮地 諒^{1,2)} 大野 直樹²⁾ 宮地 利明²⁾ 山崎 俊明²⁾

Ryo MIYACHI, RPT, PhD^{1,2)}, NAOKI OHNO, RT, PhD²⁾, TOSHIKI MIYATI, PhD, DMSc²⁾, TOSHIKI YAMAZAKI, RPT, PhD²⁾

¹⁾ Department of Rehabilitation, Ishikawa-ken Saiseikai Kanazawa Hospital: Ni-13-6 Akatsuchimachi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-0353, Japan TEL +81 76-266-1060 E-mail: yamazaki@mhs.mp.kanazawa-u.ac.jp

²⁾ Faculty of Health Sciences, Institute of Medical, Pharmaceutical and Health Sciences, Kanazawa University

Rigakuryoho Kagaku 34(4): 411-415, 2019. Submitted Jan. 16, 2019. Accepted Mar. 2, 2019.

ABSTRACT: [Purpose] To clarify the relationship between the muscle cross-sectional areas (MCSA) of each longitudinal muscle region and the muscle torque of the lower leg while sitting. [Participants and Methods] The participants were 30 healthy young males and females. The participants sat with the ankle in the neutral position. MCSA images were obtained using gravity MRI, which can be performed in any body position. Five points of the soleus, anterior tibialis, and medial and lateral heads of the gastrocnemius were selected and measured. Muscle torque was measured using a hand-held dynamometer. [Results] The muscle torque correlated with the MCSA of the distal 1/4 and the most distal parts of the female lateral heads of the gastrocnemius. The muscle torque correlated with the proximal 1/4 part of the male anterior tibialis, and the middle and the maximum MCSA parts of the female anterior tibialis. [Conclusion] The MCSA of the parts related to maximum muscle torque depend on both muscle and gender, and it is necessary to consider the longitudinal part of the muscle when estimating the muscle torque from images.

Key words: MRI, sitting position, muscle torque

要旨:〔目的〕座位にて下腿筋長軸方向部位別の筋横断面積と足関節最大筋力の関係性を明らかにすること。〔対象と方法〕健康成人男女30名を対象とした。測定肢位は足関節底背屈中間位の椅子座位とした。臥位以外の座位などの任意の体位で撮像可能なGravity MRIを使用し、ヒラメ筋、腓腹筋外側頭・内側頭、前脛骨筋の筋腹から5ヵ所を選出して筋横断面積を計測した。最大筋力値は徒手筋力計を使用し測定した。〔結果〕筋横断面積と最大筋力値について、女性の腓腹筋外側頭は遠位1/4部と最遠位部に相関関係がみられた。前脛骨筋は男性は近位1/4部にのみ、女性は中央部と最大筋腹部に相関関係がみられた。〔結語〕筋や性別で筋横断面積と最大筋力が関連する部位は異なり、画像などから筋力を推測する際には筋長軸方向の部位を考慮する必要がある。

キーワード: MRI, 座位, 筋力

¹⁾ 石川県済生会金沢病院 リハビリテーション部: 石川県金沢市赤土町二13-6 (〒920-0353) TEL 076-266-1060

²⁾ 金沢大学 医薬保健研究域保健学系

I. はじめに

下腿筋は単純な足関節のみの運動だけでなく、姿勢制御^{1,2)}や歩行^{3,4)}などに関しても多くの重要な役割を担っており、不活動や加齢に伴う下腿筋の筋力低下が日常生活に与える影響は大きい。

最大筋力と密接に関連する因子として筋横断面積 (Muscle cross-sectional areas: 以下, MCSA) は古くから知られており、足関節底屈筋や背屈筋においても MCSA が大きいほど最大筋力が大きくなるとされている^{5,6)}。大まかな筋量を知る方法として周径を測定することが多いが、脂肪や骨、神経など多くの因子の影響を受けるため筋量の測定としては十分ではなく、画像による筋量の評価の重要性が指摘されている⁷⁾。超音波画像診断装置や磁気共鳴画像診断装置 (Magnetic resonance imaging: 以下, MRI) などによる画像評価では筋を個別に評価できる利点がある。各筋の筋厚や筋横断面積を最大筋力値の指標とするうえで筋長軸方向のどの部位の測定値が最大筋力値を最も反映するのかが重要であると考えられるが、明らかにされていない。さらに、MRI は超音波画像診断装置と比較して正確な広範囲の情報を得られ、下腿筋を対象にした報告も散見される⁸⁻¹⁰⁾が、機器の性質上肢位が限定されるためほとんどの報告が臥位で測定を行ったものである。

Kumagai¹¹⁾は超音波画像診断装置を用いて各身体部位の筋厚を臥位と立位で比較し、臥位の筋厚が立位よりも小さく、臥位では筋量を過小評価してしまう可能性があるとして述べている。また、Berg ら¹²⁾は Computed tomography を用いて大腿および下腿部の筋や脂肪の横断面積を計測し臥位が立位よりも低い値を示したことを報告しており、臥位と抗重力姿勢とで筋形態に違いがあるとしている。そのため、MRI を使用した測定においても床面からの圧迫や重力の影響により筋などの軟部組織がつぶれることや重力方向へとたわむこと、側方へとずれることなどの影響により抗重力位での MCSA の測定値や最大筋力値との関係性が異なる結果を示す可能性が挙げられる。

近年、Ohno らにより開発・実用化された Gravity MRI (Gravity MRI with 0.4-T permanent magnet, Hitachi Healthcare 社製) は臥位だけでなく座位や立位など任意の体位で撮像が可能であり、抗重力肢位での形態情報を得られるものである¹³⁾。これを用いることでこれまで測定ができなかった抗重力肢位での広域の下腿筋形態の評価が可能であり、臥位での測定が困難である場合や抗重力肢位をとることによる筋の位置変化を想定した筋量の指標に役立てることが可能であると考えられる。

以上より本研究の目的は抗重力位での MCSA と最大足関節底背屈筋力値の関係性を筋長軸方向部位別に明らかにすることである。

II. 対象と方法

1. 対象

下肢や脊柱に関節障害などの既往がなく日常生活に支障をきたす疼痛がない健康成人 30 名 (男性 15 名: 年齢 21.6 ± 1.2 歳, 身長 171.6 ± 4.2 cm, 体重 63.2 ± 7.0 kg, 女性 15 名: 年齢 21.0 ± 1.0 歳, 身長 160.4 ± 3.8 cm, 体重 52.4 ± 7.3 kg: 平均 $\pm$ 標準偏差) の利き脚 (ボールを蹴る方の脚) を対象とした。本研究は所属大学倫理委員会の承認を得て行った (承認番号: 687)。被験者には事前に研究の目的および内容について、得られたデータを研究以外には使用しないこと、および個人情報漏洩に注意することについて十分に説明し、参加の同意署名を得たうえで実施した。

2. 方法

座位は抗重力肢位の中で立位などと比較して MRI 撮像時の重心動揺による下腿の偏位の影響を受けにくいため正確な値を得られやすく、撮像中の肢位の保持も容易である。そのため、測定肢位には座位を選択した。上肢を胸部で組み、膝関節屈曲 90° で下腿を床と垂直にした椅座位 (背もたれがある椅子を使用) とし、足関節肢位は足関節底背屈 0° とした。撮像時に下腿が動かないようにするため、大腿部をクッションとバンドにて固定し、被験者にも極力動かないよう指示した。撮像は Gravity MRI を使用し腓骨頭から 290 mm 遠位部まで T1 強調像を 30 枚撮像した。撮像条件はスライス面は軸方向、パルスシーケンスは Rf-Spoiled Steady state Gradient echo, 視野は 280 mm, 反復時間は 110.0 ms, エコー時間は 8.6 ms, Flip angle は 35° , スライス厚は 10.0 mm, スライス間隔は 10.0 mm, マトリックスサイズは 256×256 , 平均化された信号数は 2, Receiver bandwidth は 20.6 kHz, スキャン時間は 4 分 32 秒にて行った。画像解析は画像解析プログラム ImageJ を使用してヒラメ筋 (Soleus: 以下, SOL), 腓腹筋内側頭 (Gastrocnemius medial head: 以下, GM), 腓腹筋外側頭 (Gastrocnemius lateral head: 以下, GL), 前脛骨筋 (Tibialis anterior: 以下, TA) の筋膜の境界を基準に筋を特定し、画像上に印をつけた内部の領域の面積を各筋の MCSA として計測した。

足関節底背屈筋力の測定にはハンドヘルドダイナモメーター (μ Tas F-200, アニマ社製) を使用した。測定肢位は甲斐ら¹⁴⁾の方法を参考に MRI 撮像時と同様に椅座位とした。足関節底背屈中間位にて踵を床の上に置き、ハンドヘルドダイナモメーターのセンサーパッドの下端を第 1 中足骨頭に合わせて固定した。足底面に直接接触するアタッチメントカバーの凹型面は第 2 趾を中心とした位置となるよう調節した。開始の合図後 3 秒間最大等尺性収縮運動を行い、2 回測定した平均値 (kg) を値と

表 1 各筋の筋横断面積

	SOL	GM	GL	TA
男性				
最近位部 (cm ²)	1.83 ± 1.14	3.96 ± 1.74	3.02 ± 1.22	0.91 ± 0.70
1/4 近位部 (cm ²)	14.42 ± 2.56	11.04 ± 1.68	8.37 ± 1.29	7.71 ± 1.26
中間部 (cm ²)	23.35 ± 2.44	16.33 ± 3.70	9.72 ± 1.42	9.29 ± 1.05
1/4 遠位部 (cm ²)	16.65 ± 2.11	9.19 ± 3.79	6.50 ± 2.19	3.16 ± 0.85
最遠位部 (cm ²)	3.50 ± 3.17	0.46 ± 0.57	1.60 ± 0.85	0.38 ± 0.41
最大筋腹部 (cm ²)	23.93 ± 2.18	16.64 ± 3.58	11.09 ± 1.30	10.09 ± 1.17
女性				
最近位部 (cm ²)	0.19 ± 0.31	3.13 ± 1.60	1.18 ± 0.37	0.16 ± 0.16
1/4 近位部 (cm ²)	10.48 ± 2.84	9.05 ± 2.02	4.33 ± 1.01	4.54 ± 0.16
中間部 (cm ²)	20.27 ± 4.48	12.71 ± 3.58	6.38 ± 1.69	5.89 ± 1.23
1/4 遠位部 (cm ²)	11.70 ± 3.18	4.65 ± 2.84	4.11 ± 1.95	1.85 ± 0.54
最遠位部 (cm ²)	1.89 ± 1.36	0.15 ± 0.28	0.44 ± 0.46	0.14 ± 0.11
最大筋腹部 (cm ²)	21.20 ± 4.36	13.14 ± 3.57	6.91 ± 1.64	7.28 ± 1.11

平均値 ± 標準偏差. SOL: ヒラメ筋, GM: 腓腹筋内側頭, GL: 腓腹筋外側頭, TA: 前脛骨筋.

して使用した. その際に最大の力を発揮すること, 足趾や股関節の力を可能な限り入れず足関節底背屈方向のみの運動とすることを指示した. 得られた値に対してアーム長 (内果下端から第一中足骨頭内側面までの距離 (m)) を乗じた最大筋力値を算出した. なお, 全ての測定に関して, 検者は筆者ではない他の 1 名 (理学療法経験年数 5 年未満) にて盲検化されたうえで行った.

統計解析は SPSS 19 (IBM SPSS Statistics, IBM 社製) を使用し, 棄却域は $p < 0.05$ とした. 筋長軸方向で一定距離ごとの筋腹の端部から筋腹中央部までの MCSA を調べるために筋腹が確認できる最端部 (最近位部, 最遠位部) と筋腹 1/4 ごとの部位 (1/4 近位部, 中間部, 遠位 1/4 部) の計 5 カ所を抽出した. さらに, 抽出した 5 カ所の部位に加えて筋腹のなかで最大の MCSA を示した部位についての計測値も統計解析に使用した. また, 男女の筋横断面積と最大筋力値の関係性の違いを調べるために解析は男女で分けて行った. 各部位の MCSA と最大筋力値に対して Pearson の積率相関係数を適用した. 全ての測定値は平均値 ± 標準偏差で示した.

III. 結 果

各筋の MCSA の値を表 1 に, 最大筋力値を表 2 に, MCSA と最大筋力値の相関係数を表 3 に示した. SOL と GM は男女ともいずれの部位でも MCSA と最大足関節底屈筋力値との相関関係はみられなかった. GL では男性は MCSA と最大足関節底屈筋力値との相関関係はみられなかったが, 女性は遠位 1/4 部 ($p = 0.03$, $r = 0.56$) と最遠位部 ($p = 0.03$, $r = 0.57$) において有意な相関関係がみられた. TA では MCSA と最大足関節背屈筋力値

表 2 足関節底屈筋および背屈筋の最大筋力値

最大筋力値 (kgfm)		
足関節底屈	男性	6.38 ± 1.66
	女性	6.13 ± 0.37
足関節背屈	男性	3.19 ± 0.55
	女性	1.43 ± 0.33

平均値 ± 標準偏差.

について男性は近位 1/4 部にて有意な相関関係がみられた ($p = 0.02$, $r = 0.62$). 一方, 女性では中間部において有意な相関関係がみられた ($p = 0.01$, $r = 0.69$). MCSA の最高値と最大筋力値について男性はいずれの筋においても相関関係がみられなかった. しかし女性は TA のみ MCSA の最高値と最大背屈筋力値において有意な相関関係がみられた ($p = 0.03$, $r = 0.58$).

IV. 考 察

本研究は Gravity MRI を用いることで従来までは測定できなかった座位での下腿筋の MCSA と最大足関節底屈筋力値を同一筋長軸部位別に比較し, それらの関係性を調べた報告である. 本研究結果は下腿周径や超音波画像診断装置を用いての筋厚測定などの計測を抗重力肢位で行わざるを得ない時の指標となるとともに, 臥位と比較して正確な筋の形態情報と最大筋力との関係性を把握するためにも重要であると考えられる.

結果より GL は女性のみ MCSA と足関節底屈最大筋力値との相関関係があった. その一方で足関節背屈筋である TA は男女ともに足関節背屈最大筋力値と相関関係

表3 筋横断面積と最大筋力の相関係数

	SOL	GM	GL	TA
男性				
最近位部 (cm ²)	0.10	0.09	-0.46	0.30
1/4 近位部 (cm ²)	0.20	0.28	-0.11	0.62*
中間部 (cm ²)	0.41	0.19	-0.14	0.52
1/4 遠位部 (cm ²)	0.30	0.48	0.00	0.35
最遠位部 (cm ²)	0.10	0.50	0.01	0.27
最大筋腹部 (cm ²)	0.44	0.21	0.19	0.51
女性				
最近位部 (cm ²)	-0.31	0.03	0.42	-0.14
1/4 近位部 (cm ²)	-0.21	0.03	0.47	0.35
中間部 (cm ²)	0.28	0.05	0.48	0.69**
1/4 遠位部 (cm ²)	0.33	0.05	0.56*	0.49
最遠位部 (cm ²)	0.25	-0.16	0.57*	0.23
最大筋腹部 (cm ²)	0.23	-0.03	0.39	0.58*

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$. SOL: ヒラメ筋, GM: 腓腹筋内側頭, GL: 腓腹筋外側頭, TA: 前脛骨筋.

があった。足関節背屈筋は主要なものでは前脛骨筋の他には長趾伸筋、長母趾伸筋のみである。最大筋力に関与する因子として筋線維に対して垂直に横断した断面積である生理学的筋横断面積 (Physiological cross-sectional area: 以下, PCSA) が筋全体の長軸に対して垂直に横断した解剖学的筋横断面積 (Anatomical cross-sectional area: 以下, ACSA) よりも影響が大きいことや羽状筋では PCSA が ACSA よりも大きくなり、同程度の ACSA でも羽状角が大きい筋ほど最大筋力大きいことが知られている。TA の羽状角はヒラメ筋などと比較すると小さく¹⁵⁾、河上らは TA を紡錘状筋に分類している¹⁶⁾。また、TA は筋の生理学的横断面積とモーメントアームから算出された背屈トルク率において足関節背屈筋力の大半を占めている¹⁷⁾。一方、足関節底屈筋は腓腹筋、SOL に加え、長・短腓骨筋、後脛骨筋、長母趾屈筋、長趾屈筋など多岐にわたる。そのなかで底屈筋のなかでは最大で腓腹筋の3倍程度の底屈トルク率を有する SOL は¹⁷⁾、腓腹筋の3倍程度の羽状角を持つ¹⁵⁾とされる。そのため足関節背屈最大筋力への影響が大きい TA が、羽状角が小さく ACSA の影響を直接的に受けやすかったことが、足関節底屈筋と比較し TA の MCSA と足関節背屈最大筋力に相関関係がみられやすいことにつながったと推測される。TA の MCSA と足関節最大背屈筋力との相関があった部位は異なり、男性は近位 1/4、女性は中間部と最大筋腹部で最大背屈筋力との相関関係があった。男女で筋線維タイプ構成¹⁸⁾や筋厚、加齢に伴う変化¹⁹⁾に差があり筋の特性が異なることが報告されている。筋線維タイプ構成²⁰⁾や収縮特性の違い²¹⁾については筋長軸方向においても部位差があるとされて

いる。これらの影響により、男女で筋長軸方向部位で異なる筋の発達が生じていたことや、座位姿勢をとることでの姿勢筋緊張による筋の偏位が男女間での差をもたらした可能性が考えられる。結果から超音波画像診断装置などを用いて筋厚測定による潜在的な筋力を評価するうえで、TA では男性では筋腹近位 1/4 部、女性では中間部もしくは最大筋腹部が指標となり得ることが示唆される。一方で GL では女性のみ遠位部を指標に用いることが可能であると考えられるが、先述したように GL の底屈トルク率は低く底屈筋全体の筋力としての指標としては不十分であることは否めない。

本研究の限界として MCSA の計測は ACSA のみであり羽状角を考慮した PCSA の評価を行えていないことがある。Fukunaga ら⁵⁾は、ACSA のみの評価では最大筋力の評価には不十分であるため PCSA の評価が必要であるとしており、今後筋力との関連を調べるうえで羽状角を考慮した筋長軸方向部位での PCSA と最大筋力との関係についても検討していく必要がある。また、本研究では座位の条件下での MCSA と最大筋力値との関係性について調べることに主眼を置き行ったため、臥位と座位で MCSA を比較していない。そのため足関節底屈筋が背屈筋と比較し MCSA と最大筋力値との相関が得られにくかった理由が PCSA の影響なのか抗重力肢位をとることでの筋の形態変化による影響なのか定かではないことが挙げられている。そのため、筋による差や性差などの結果の原因を調べるうえで臥位と座位との筋形態の比較や他の因子の検討についても行う必要があると考えられる。

加えて、本研究ではサンプル数が少ないことについて

も研究の限界として挙げられるため、サンプル数を増やしたうえでの検討も必要であると考えられる。展望としては、本研究で使用した Gravity MRI を有する環境は限定されているため、一般的な指標として用いることができるように、座位での MRI による筋横断面積と超音波画像診断装置を使用した筋厚値との関連についても検証する必要があると考える。

本研究は抗重力肢位での筋長軸部位別の MCSA と足関節最大筋力の関係性を明らかにすることを目的に行った。本研究結果から筋や性別で MCSA と最大筋力が関連する部位は異なり、周径や画像などから潜在的な筋力を推測する際には筋長軸方向の部位を考慮する必要があることが考えられる。

利益相反 本研究に関連して、筆頭著者に開示すべき利益相反はない。

謝辞 実験に協力頂いた 金沢大学医薬保健学保健学類所属の石崎遥氏、片矢朋子氏、酒井丈裕氏に深謝いたします。本研究は、JSPS 科研費 JP16K01500 の助成を受けたものです。

引用文献

- 1) Horak FB, Nashner LM: Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations. *J Neurophysiol*, 1986, 55: 1369-1381.
- 2) Loram ID, Maganaris CN, Lakie M: Paradoxical muscle movement during postural control. *Med Sci Sports Exerc*, 2009, 41: 198-204.
- 3) Liu MQ, Anderson FC, Pandey MG, et al.: Muscles that support the body also modulate forward progression during walking. *J Biomech*, 2006, 39: 2623-2630.
- 4) Pandey MG, Andriacchi TP: Muscle and joint function in human locomotion. *Annu Rev Biomed Eng*, 2010, 12: 401-433.
- 5) Fukunaga T, Roy RR, Shellock FG, et al.: Physiological cross-sectional area of human leg muscles based on magnetic resonance imaging. *J Orthop Res*, 1992, 10: 928-934.
- 6) Gadeberg P, Andersen H, Jakobsen J: Volume of ankle dorsiflexors and plantar flexors determined with stereological techniques. *J Appl Physiol* 1985, 1999, 86: 1670-1675.
- 7) 斎藤昭彦, 丸山仁司, 新井正一・他: MR 画像から求めた大腿四頭筋の筋形態と大腿四頭筋最大膝伸展筋トルクとの関係について. 国際医療福祉大学紀要, 1998, 3: 35-43.
- 8) Morse CI, Thom JM, Mian OS, et al.: Gastrocnemius specific force is increased in elderly males following a 12-month physical training programme. *Eur J Appl Physiol*, 2007, 100: 563-570.
- 9) Morse CI, Thom JM, Reeves ND, et al.: In vivo physiological cross-sectional area and specific force are reduced in the gastrocnemius of elderly men. *J Appl Physiol* 1985, 2005, 99: 1050-1055.
- 10) Lee HD, Finni T, Hodgson JA, et al.: Soleus aponeurosis strain distribution following chronic unloading in humans: an in vivo MR phase-contrast study. *J Appl Physiol* 1985, 2006, 100: 2004-2011.
- 11) Kumagai K: The influence of posture on muscle thickness measurement using B-mode ultrasound. *Nagasaki Int Univ Rev*, 2011, 11: 1-7.
- 12) Berg HE, Tedner B, Tesch PA: Changes in lower limb muscle cross-sectional area and tissue fluid volume after transition from standing to supine. *Acta Physiol Scand*, 1993, 148: 379-385.
- 13) Ohno N, Miyati T, Hiramatsu Y, et al.: Quantitation of venous blood flow in gravity MRI: a phantom study. *Med Imaging Inf Sci*, 2017, 34: 141-143.
- 14) 甲斐義浩, 村田 伸, 相馬正之・他: 足関節底屈筋力測定の再現性と妥当性の検討. *Jpn J Health Promot Phys Ther*, 2013, 3: 25-28.
- 15) Ward SR, Eng CM, Smallwood LH, et al.: Are current measurements of lower extremity muscle architecture accurate? *Clin Orthop Relat Res*, 2009, 467: 1074-1082.
- 16) 河上敬介, 柴田 恵, 兼松美紀・他: ヒト骨格筋の肉眼解剖学的研究. *理学療法学*, 1996, 23: 424-429.
- 17) 市橋則明(編): 身体運動学 関節の制御機構と筋機能. メジカルビュー, 東京, 2017, pp305-307.
- 18) Haizlip KM, Harrison BC, Leinwand LA: Sex-based differences in skeletal muscle kinetics and fiber-type composition. *Physiology (Bethesda)*, 2015, 30: 30-39.
- 19) 宮谷昌枝, 東香寿美, 金久博昭・他: 下肢筋厚における加齢変化の部位差および性差—20歳代70歳代の比較—. *体力科学*, 2003, 52: 133-140.
- 20) Punkt K, Mehlhorn H, Hilbig H: Region- and age-dependent variations of muscle fibre properties. *Acta Histochem*, 1998, 100: 37-58.
- 21) De Ruiter CJ, Habets PE, de Haan A, et al.: In vivo IIX and IIB fiber recruitment in gastrocnemius muscle of the rat is compartment related. *J Appl Physiol* 1985, 1996, 81: 933-942.