

## 立位姿勢制御と筋線維長変化動態の連環

Muscle fiber length changes while upright standing posture in humans

三好扶, 萩原義裕

Tasuku MIYOSHI, Yoshihiro HAGIHARA

岩手大学 工学部 機械システム工学科 バイオ・ロボティクス部門  
Department of Mechanical Engineering, Iwate University

**キーワード:** mono-articular muscle, bi-articular muscle, activity level, recruitment pattern, preferred direction

**連絡先:** 〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5 岩手大学工学部機械システム工学科  
三好扶, Tel&Fax: 019-621-6357, E-mail: tmiyoshi@iwate-u.ac.jp

### 1. はじめに

一般に, ヒト立位姿勢は矢状面内における足関節を回転中心とした 1 自由度倒立振子によって, 系の挙動がモデル化される. この系の安定保持について, Winter らは足関節周りの粘弾性のみによって自律的に達成可能であると報告した<sup>1)</sup>. 一方, Morasso らは中枢神経系の積極的な動員が不可欠である<sup>2)</sup>と報告しており, 未だ統一的な見解は得られていない. ヒト立位姿勢では身体重心 (Center of Mass; COM) を高い位置に保持するという前提条件がある以上, COM の位置がヒト立位姿勢制御での制御変数の 1 つであり, また足関節周囲筋群の筋線維長変化に COM の位置が何らかの影響を与えていることは疑いない.

近年, Loram らは, 立位にて随意的に身体前後動揺を行った際の内側腓腹筋 (medial gastrocnemius; mGAS) の筋線維が, paradoxical な挙動を示すと報告した<sup>3)</sup>. Maganaris ら<sup>4)</sup>は伏臥位における足関節底屈動作で mGAS が短縮すると報告しており, Loram らの結果は従来の生理学・解剖学的見解に反するよう考えられる. そこで「立位時の mGAS 筋線維長変化は, 矢状面内における足関節回転中心と COM との相対的な位置関係によって規定される」と仮説を立て, 1) 随意的身体前後動揺, 2) 爪先 / 踵立ち時の mGAS 筋線維長変化を実験的に検証した. また, 随意的身体前後動揺に見られる mGAS の

逆説的筋線維長変化動態は, 身体が前傾位にあるとき足関節底屈筋の短縮を促すが, このときアキレス腱は伸長されることから脊髄運動ニューロンプールは Ib 由来の抑制性修飾を受ける. しかしながら, 前傾位で短縮するにはむしろ興奮性修飾を受ける必要があるため, 局面依存的な Ib 興奮性修飾が表出するか否かについて合わせて検討した.

### 2. 方法

#### 2.1 随意的身体前後動揺実験

健常成人男性 6 名の右脚 mGAS を対象に, 随意的に身体前後動揺を行った際の, 筋線維長変化を評価する. 被検者は右脚の mGAS に超音波診断装置 (東芝株式会社, プローブ周波数 8 [MHz], Aplio) のプローブをあて PC 上に映し出された目標波形に追従して, 身体前後動揺をフォースプレート (KISTLER, 9286A) 上で 10 周期行った. また, 同時に被検者の足・中足指節関節にはゴニオメータ (DKH, SG110) を取り付け, 関節角度を計測した. 目標波形は, PC ベース計測制御システム (YOKOGAWA, WE7000) から出力された 0.1 [Hz] のサイン波形とし, 追従波形は足圧中心軌跡 (Center Of Pressure; COP) とした. なお, 膝および股関節は副木によって固定し, 身体を足関節周りの 1 自由度倒立振子にモデル化した.

## 2.2 爪先 / 踵立ち実験

被検者は超音波診断装置のプローブをあてたまま、PC上に映し出された目標波形に追従して、背伸びおよび踵立ちを同条件で行った。目標波形は前述のサイン波形とし、追従波形は足関節角度とした。なお、足関節角度変位は背屈を正とした。

## 2.3 超音波画像解析

超音波診断装置によって得られた筋線維変化の映像はビデオカウンタ (DKH, PH-1520) を通して、アナログデータと同期して取り込んだ。この映像を 30[frame/s]で画像化し、Fig. 1のような筋画像から筋線維を 20 本抽出し、それらの筋線維長を得た。筋線維長の算出は、腱膜・筋膜を直線と仮定し直線を引き、超音波画像上の筋線維上の両端二箇所点を取り、その点を線でつなぎ、引いた 3 線の交点の距離から行った。

## 2.4 ヒラメ筋 H 反射計測

脊髄運動ニューロンの興奮性調節に対し局面依存的 Ib 興奮性修飾が表出するか否かについて、ヒラメ筋 H 反射テストにより検証した。10 名の被験者から、静止立位時のヒラメ筋 H 反射動員曲線を刺激間隔は 5 秒、各刺激強度での刺激回数は 3 回として導出した。その後、最大 M 波の 5-15 % の M 波振幅が得られる強度下にて、静止立位時と前傾姿勢時のヒラメ筋 H 反射を最低 20 回導出した。

# 3. 結果と考察

## 3.1 mGAS 筋線維長変化動態

Fig. 2(A)に随意的身体前後動揺時、(B)に爪先 / 踵立ち時それぞれにおける足関節角度変位と mGAS 筋線維長変化の典型例を示した。被検者は随意的身体前後動揺時および爪先踵立ち時において目標波形に追従する運動課題を達成できていたとわかる。

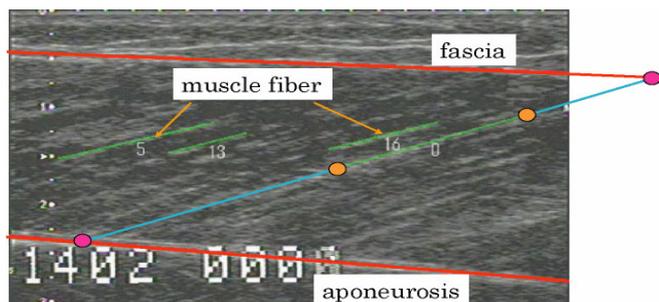


Fig. 1 Ultrasound image of muscle fibers

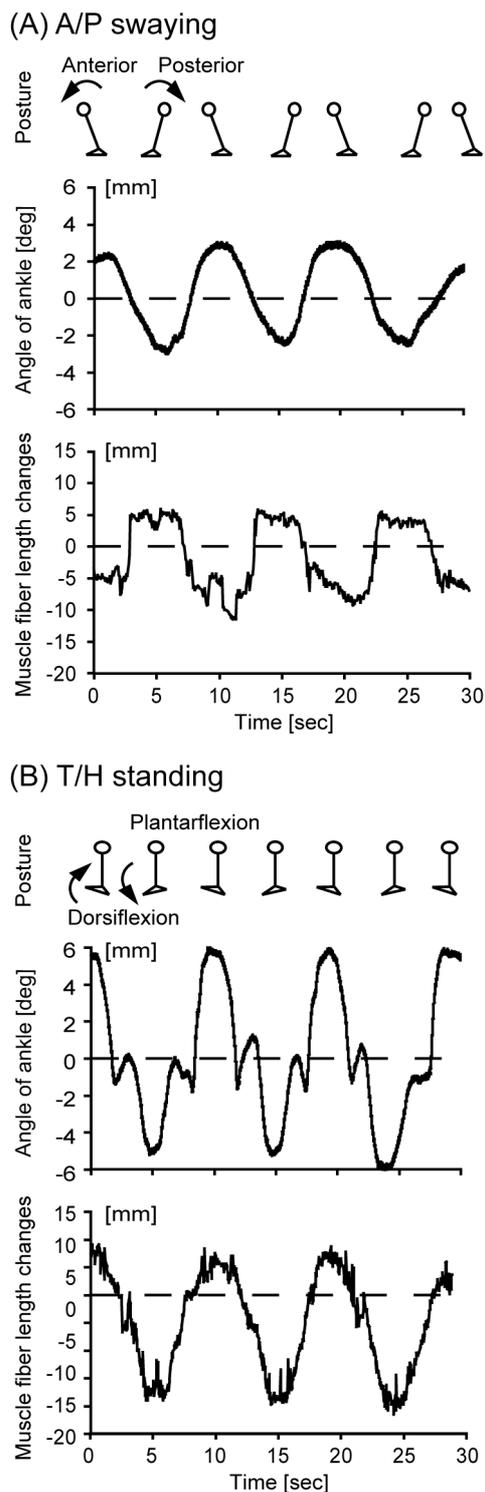


Fig. 2 Typical ankle angular displacement and changes in the length of mGAS muscle fiber while (A) voluntary body swaying (A/P swaying) and (B) tiptoe-heel standing (T/H standing).

mGAS 筋線維長変化について、随意的身体前後動揺では足関節角度変位が背屈位にあると筋線維長は短縮し、底屈位にあると筋線維長は伸長する、逆説的筋線維長変化<sup>3)</sup>が確認された。一方、爪先踵立ちでは足関節角度が背屈( / 底屈)

位にあると筋線維長は伸長（/短縮）し，解剖学的見地と一致した．身体重心から見ると，随意的身体前後動揺では矢状面内における足関節回転中心との距離（モーメントアーム長）が前傾位（足関節背屈位）では伸長，後傾位（足関節底屈位）では短縮するが，爪先踵立ちではモーメントアーム長はほぼ一定である．従って，本研究の最初の目的である，「立位時の mGAS 筋線維長変化は，矢状面内における足関節回転中心と COM との相対的な位置関係によって規定される」はモーメントアーム長，またモーメントアーム長により一意に規定される足関節トルク量によって mGAS 筋線維長変化が調節されることが示唆される．

### 3.2 ヒラメ筋 H 反射応答

Fig. 3 は被験者 1 名分の(A)静止立位時，(B)前傾位（足関節背屈位，mGAS 筋線維長短縮時）それぞれでのヒラメ筋 H-M 動員曲線を示した．この図より，最大 H 反射応答は静止立位に比べ前傾位の方が大きいことがわかる．この傾向がすべての被験者について確認されるか否かを明らかにしたのが Fig. 4 である．ヒラメ筋背景筋活

動，M 波（5-15% Mmax 刺激強度下）および H 反射応答それぞれについて，静止立位時と前傾位とを比較した結果，背景筋活動量の変化を伴わず，ヒラメ筋 H 反射応答は前傾位の方が有意に高いことが示された．従って，前傾位における mGAS 筋線維長の短縮，アキレス腱の伸長により脊髄運動ニューロンプールの興奮性は亢進することが示された．前傾位ではモーメントアーム長が伸長しており，これにより足関節底屈トルクの増強を達成する必要があり，ヒラメ筋脊髄運動ニューロンプール興奮性の亢進は，足関節底屈トルク増強に合目的と言える．事実，トレッドミル歩行時のネコの mGAS 筋活動動態に対し Ib 求心性入力興奮性修飾であり<sup>5)</sup>，本結果から，足関節底屈トルク増強ではネコで示された機序と同様な神経回路網が作動している可能性が示唆される．

### 3.3 今後の展望

介護・福祉分野における介護者として見ると，介護動作に必要な力がシステムの出力，その調節は脊髄以下の反射系あるいは状態変数フィードバック系によってなされ，関節に発生するトルク量の調節を実施することと同義である．

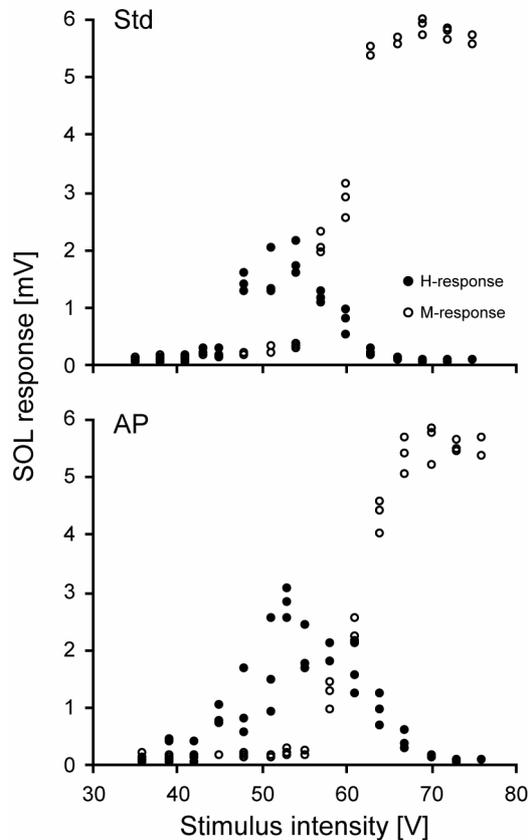


Fig. 3 H-M recruitment curve while standing (Std) and anterior swayed posture (AP).

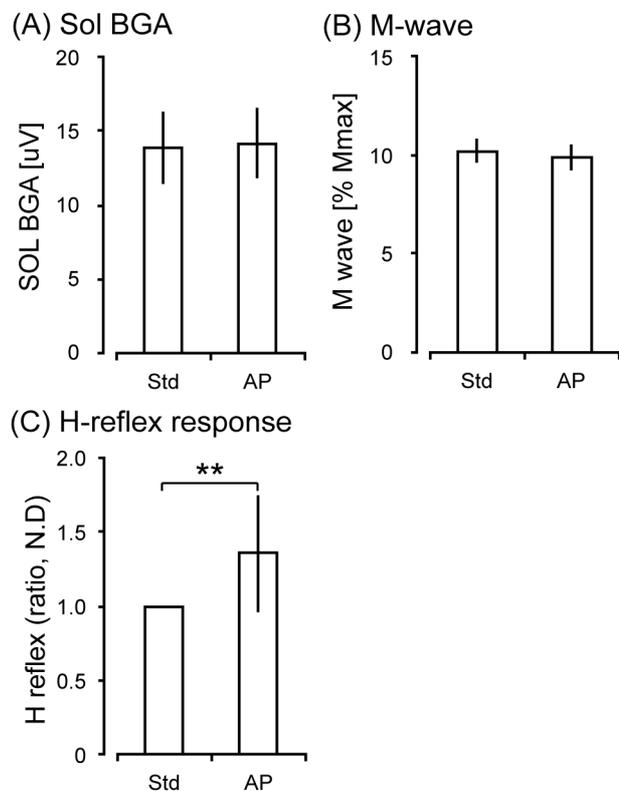


Fig. 4 Grand-averaged Sol background EMG activities (A), M-wave amplitude (B) and H-reflex responses (C) while AP compared with those of Std.

このとき関節を跨ぐ筋群の活動量は、当該関節の関節トルクを調節するように、脊髄運動ニューロンプールが興奮性あるいは抑制的に動員されることで調節される。脊髄運動ニューロンプールの興奮/抑制性は、単シナプス性伸張反射弓 (Ia 群) を介する末梢性感覚神経フィードバックの貢献度が高く、伸張反射弓の積極的動員は筋活動量の増大を誘起する。従って、主動筋の伸張反射弓を賦活できれば、筋活動量の増大と同時に関節トルクの増大が見込まれる。仮に伸張反射弓の動員を定量的に外部からコントロールできるなら、関節トルクの調節も定量的に外部からコントロールすることが可能となる。

本研究で得られたトルク調節に起因する筋線維長変化、および局面依存的 Ib 興奮性修飾は、主動筋の脊髄運動ニューロンプール興奮性調節動態を記述するとともに、関節スティフネス調節を達成する可能性があり、今後の更なる研究は必要であるが、介護支援機器開発の基礎データとして有用となることが期待される。

#### 4. まとめ

随意的身体前後動揺と爪先/踵立ち課題における mGAS 筋線維長変化を調べた結果、足関節回転中心に対する COM の相対的な位置変化に応じて収縮様式 (短縮性/伸長性) が規定されることが示された。つまり、身体前後動揺では mGAS が短縮することで足関節底屈トルク産生を達成し、爪先/踵立ちでは静止立位時と同程度のトルク量しか要求されないため、解剖学的見地に基づいた筋線維長変化となる。また、

前傾姿勢での筋線維長短縮によって生じるアキレス腱伸長は脊髄運動ニューロンプールの興奮性調節に対して局面依存的 Ib 興奮性修飾することが示された。

#### 謝辞

本研究の一部は、財団法人御器谷科学技術財団平成 21 年度研究開発助成によって実施した。記して謝意を示す。

#### 参考文献

- 1) Winter DA et al. Stiffness control of balance in quiet standing. *J Neurophysiol*, 80, 1211/1221, (1998).
- 2) Morasso PG and Sanguineti V. Ankle muscle stiffness alone cannot stabilize balance during quiet standing. *J Neurophysiol*, 88, 2157/2162, (2002).
- 3) Loram ID et al. Paradoxical muscle movement in human standing. *J Physiol*, 556, 683/689, (2004).
- 4) Maganaris CN et al. Human calf muscle responses during repeated isometric plantarflexions. *J Biomech*, 39, 1249/1255, (2006).
- 5) Pearson KG, Ramirez JM, Jiang W. Entrainment of the locomotor rhythm by group Ib afferents from ankle extensor muscles in spinal cats. *Exp Brain Res*, 90, 557/566, (1992).