

## 99. 微細な関節角度変動を伴う下腿三頭筋活動の制御特性

木村 哲也

神戸大学 大学院人間発達環境学研究所 人間発達専攻 からだ系講座

Key words : 弾性負荷, 非弾性負荷, コヒーレンス, 筋音図, 筋電図

### 緒言

ヒトの静的二足立位平衡は、足関節周囲の随意的な筋トルク制御と受動的な筋ステイフネスによって維持されるが<sup>1)</sup>、その制御則には不明な点が多い。安定した静的二足立位においても、身体は前後方向に絶えず動揺し、足関節角度は微小な角度 (60 秒間の最大振幅: 約 0.02 rad) で常に変動する<sup>2)</sup>。すなわち、静的二足立位において、足関節に付着する筋・腱組織群は単調な等尺性筋収縮ではなく、微細な角度変動を含んだ弾性的活動動態を示す。そこで本研究は、リハビリテーション等において、二足立位時により近い筋・腱動態での筋トレーニングへの応用を目指し、微細な足関節角度変動を伴うトルク発揮課題の確立とその筋活動制御特性を検討した。

### 方法

本研究は、神戸大学大学院人間発達環境学研究所研究倫理審査委員会に承認され、ヘルシンキ宣言に基づいて実施された。全ての被験者は、本研究の内容と目的の説明を口頭と文書で受けた後、署名をした。

健康者 8 名 (20~21 歳) は、利き足にて足関節トルク調節課題を実施した。各被験者の最大随意収縮 (Maximum Voluntary Contraction, MVC) の 5% に相当する力 (5%MVC) にて、新たに作製した装置 (図 1) を用いて 2 種類の位置調節課題 (非弾性負荷課題、弾性負荷課題) を行った。非弾性負荷課題では、非伸縮特性を持つワイヤーに 5%MVC に相当する重りを直列に吊るし、足底背屈に向けて 5%MVC の負荷をかけた。弾性負荷課題では、重り負荷の代わりにばね (ばね定数 2419 N/mm、初張力 27.86 N) をワイヤーに直列に組み込み、各被験者の足関節角度が 5° 底屈に一致した際に足関節背屈負荷が 5%MVC に一致するようにばねの長さを調節した。各課題実施中、オシロスコープから足関節角度を被験者にリアルタイムでフィードバックし、被験者にはできる限り足関節角度を一定 (5° 底屈) に保つように指示した。足関節角度は、高精度レーザー変位計 (LK-500、キーエンス) により計測した (図 1)。ワイヤーに直列に組み込んだロードセル (LUR-A-100NSA1、共和電業) より足関節背屈にかかる力を測定した。足関節底屈筋群の腓腹筋外側頭 (LG) 及び内側頭 (MG)、ヒラメ筋 (SOL)、長腓骨筋 (PL)、足関節背屈筋群の前脛骨筋 (TA) の各筋頭から筋の電氣的活動である表面筋電図 (電極間距離 2 cm) を記録した。さらに、MG、SOL 各筋の機械的活動 (筋音図) を加速度計 (MPS110、メディセンス) により抽出した。各力調節課題は 70 秒間実施し、3 分間以上の休憩を挟みながらランダム順序で各 3 試行実施した。各信号は 2 kHz でサンプリングされ、時間領域 (二乗平均平方根 (RMS)、最大振幅)、及び周波数領域 (パワースペクトル密度 (PSD)) で定量化された。各変数において、10 Hz 付近 (6-12 Hz) の tremor 成分が検出されたため (図 2)、6-12 Hz の coherence 値を算出し、tremor 成分における各変数間の関連性 (線形性) を検討した。さらに、各負荷条件時に SOL より H 反射を 5 回導出した。刺激強度は、最大の H 波振幅が得られる強度とした。加算平均で得られた H 波から最大振幅を求め、負荷条件間で比較を行った。記述統計は全て平均値 (標準偏差) で示した。

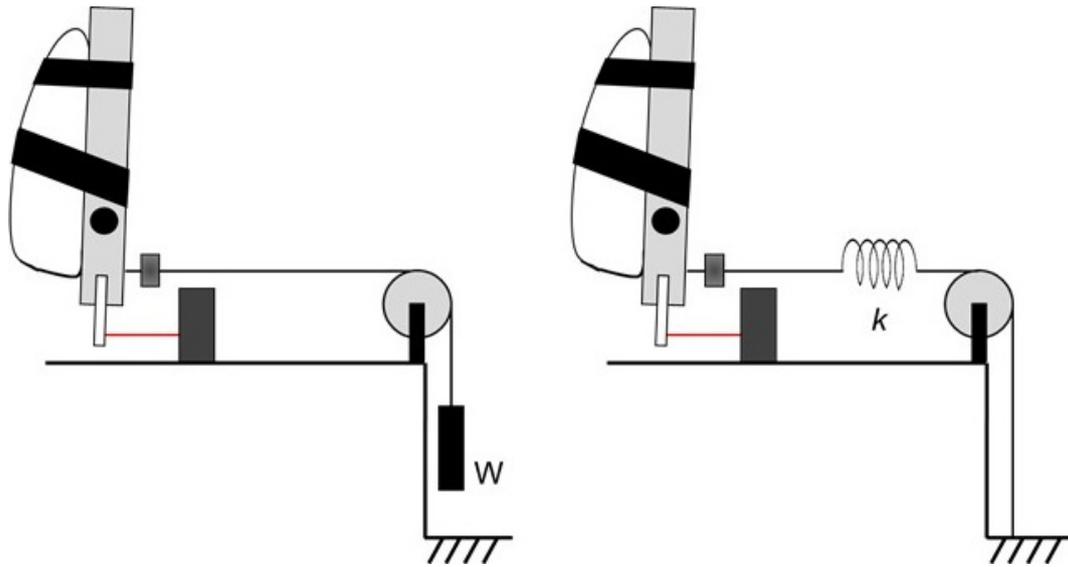


図1. 新たに作製した装置  
非弾性負荷（左）、弾性負荷（右）にて位置調節課題を実施した。

### 結果および考察

足関節角度変動のRMSは非弾性負荷条件（0.00046（0.00023）rad）に比べ弾性負荷条件（0.00082（0.00054）rad）で有意に増加し（ $P < 0.05$ ）、最大振幅は0.0046（0.0021）radで静的立位にて報告された値<sup>2)</sup>の約20%であった。一方で、力変動のRMSは非弾性負荷条件（0.92（0.16）N）に比べ、弾性負荷条件（0.29（0.12）N）にて有意に減少した（ $P < 0.05$ ）。さらに、足関節角度のtremor成分（6-12 Hz）の総PSD値は、弾性負荷条件で増加する傾向が見られた（ $P = 0.053$ ）。また、筋電図と足関節角度変動間のcoherenceピーク値（6-12 Hz）はPLにおいて、非弾性負荷（0.082（0.020））に比べ弾性負荷（0.123（0.049））で有意に高い値を示した（ $P < 0.05$ ）。LG（ $P = 0.068$ ）、SOL（ $P = 0.093$ ）の筋電図に関しても同様の傾向が見られた。筋の機械的活動である筋音図と足関節角度変動間のcoherenceピーク値（6-12 Hz）は、弾性負荷（MG: 0.41（0.10）、SOL: 0.80（0.09））において、非弾性負荷（MG: 0.26（0.11）、SOL: 0.56（0.12））よりも有意に高い値を示した（ $P < 0.05$ ）。以上から、本研究で新たに作成した弾性負荷条件により、足関節角度の微細動揺が惹起され、さらに関節角度動揺と足関節底屈筋機械的活動がtremor成分において時間・空間的に関連することが示唆された。一方で、各負荷課題中にSOLより記録されたH波に関して、各被験者にて最大振幅は両条件間でほぼ同じであり、平均値の差は認められなかった（ $P > 0.05$ ）（図3）。この結果は、両条件間でSOLを支配する脊髄 $\alpha$ 運動ニューロンの興奮性に差は認められないことを示す。しかしながら、上述の力学的特性の結果より、非弾性負荷、弾性負荷では異なる筋紡錘、腱紡錘求心性入力が予測されることから、他の協働筋群や異なる実験設定での検証等、より詳細な検討が必要である。

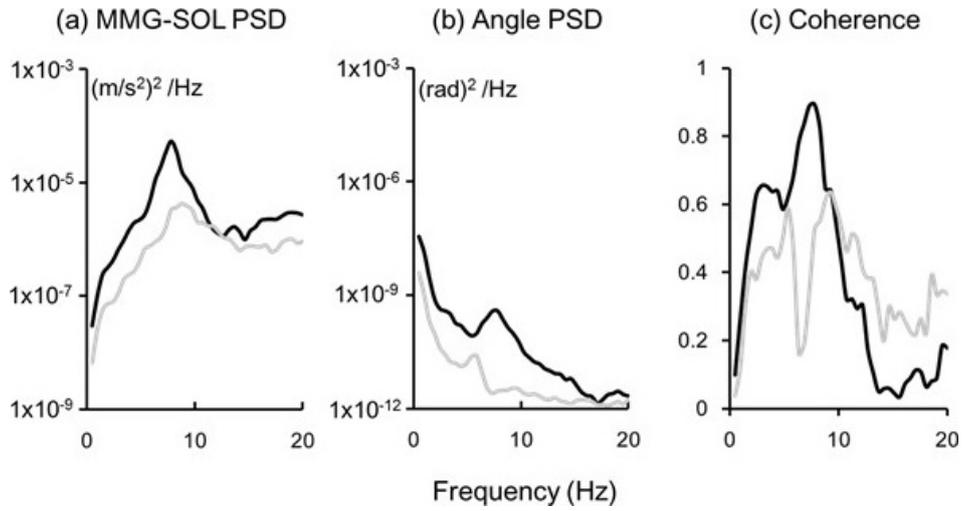


図2. PSD・コヒーレンス解析の一例

(a) ヒラメ筋筋音図 (MMG-SOL) の PSD、(b) 足関節角度 (Angle) の PSD、(c) 両信号間の coherence、の同一被験者における一例。各スペクトルは弾性負荷条件 (黒線)、非弾性負荷条件 (灰色線) 各々でアンサンブル平均されている。

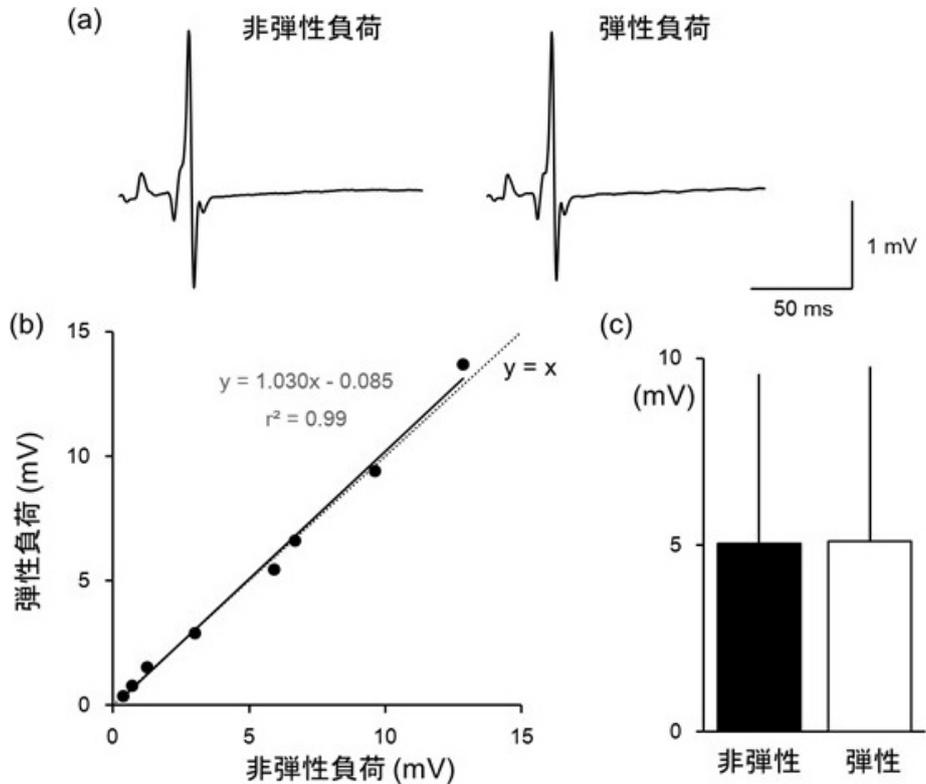


図3. H波振幅の分析結果

(a) 同一被験者の両負荷条件における H 波の一例、(b) 全被験者の両負荷条件での H 波振幅、(c) H 波振幅の両条件でのグループ平均 (標準偏差)。

## 共同研究者

本研究の共同研究者は、立命館大学の塩澤成弘、神戸大学大学院の瀧千波である。本研究に対して助成をして頂きました、上原記念生命科学財団に深く感謝申し上げます。

## 文 献

- 1) Morasso PG, Schieppati M. Can muscle stiffness alone stabilize upright standing? J Neurophysiol. 1999;82(3):1622-6. PubMed PMID:10482776.
- 2) Masani K, Vette AH, Kawashima N, Popovic MR. Neuromusculoskeletal torque-generation process has a large destabilizing effect on the control mechanism of quiet standing. J Neurophysiol. 2008;100(3):1465-75. PubMed PMID:18596181.