

剛性楕円に基づく冗長自由度の立位平衡機能評価法の開発

Development of assessment procedure for postural equilibrium based on stiffness ellipse

2041011



研究代表者

京都大学大学院
人間・環境学研究科

教授

神 崎 素 樹

〔研究の目的〕

平均寿命の増加により高齢者の健康が社会問題となっている。一般に、老化に伴う歩行時の転倒は高齢者の QOL (Quality of Life) に直接関与すると考えられている。高齢者の転倒には立位平衡機能の低下が最も関連していることが指摘されているため、立位平衡機能のスクリーニングは高齢者の転倒予防策として有意義である。これまで、立位平衡機能のスクリーニング検査には、力学的な観点から平衡機能の評価方法は皆無である。力学的観点から立位評価法を確立できれば、具体的な平衡機能改善策を提言することが可能となる。そこで本研究では、高齢者の QOL 向上を念頭に置き、剛性楕円の観点から力学的二足立位平衡機能の評価法を開発することを目的とする。

ヒトの二足立位姿勢は狭い支持面に身体重心が高い位置にあるために、立位を安定させることは実に困難な作業である。ヒトの二足立位姿勢を「倒立振子モデル」で近似した場合、身体重心の動揺に応じた適切な足圧中心点を決める制御機構が立位安定性に重要である。足圧中心点は、神経的および力学的な調節による各関節のトルクによって制御されている。しかし、力学的な調節には着目されておらず、力学的変数は、動物実験やヒト屍体データを定数として代入されているにすぎない。また、これまでは二足立位は単純な倒立振子とみなし、簡略化した

観点から平衡機能を評価してきた。本研究では、転倒にはつまずきなどによる突然の立位不安定に関与することから、外乱立位時における水平面の剛性楕円を定量することを具体的な目的とする。

〔研究の内容、成果〕

実験課題は外乱に対する立位の保持とした。被験者は床反力計上で静止立位を行った。立位維持中に、スライドテーブルを水平面 12 方向に移動 (外乱) させた (図 1)。外乱の振幅は 50 mm, 速度 500 mm/s, 加速度 0.6 G とした。立位の足幅は 0 cm (narrow), 10 cm (normal), 20 cm (wide) の 3 種類とした。試行回数は足幅 3 種類×外乱 12 方向×5 セットの計 180 試行であった。課題中、ヒラメ筋、腓腹筋内側頭、前脛骨筋、長腓骨筋、外側広筋、大腿直筋、大腿二頭筋長頭、中殿筋の筋電図データを両脚から導出し、床反力計からの反力の 3 分力を取得した。さらに、三次元動作解析装置 (オプティトラック) より、各関節の三次元座標を取得した。解析は取得したデータから下肢終端位置での外乱に対する抵抗力と足圧中心点の変位、速度、加速度に関する関係式を解き、剛性を表す K , 粘性を表す B を求めることを目的とした。 2×2 行列で表される K , B (次ページの式) を特異値分解して得られた固有値、固有ベクトルがそれぞれ軸の大きさ、軸の向きを表してお

り、楕円を図示することで立位の粘弾性特性を定量化した。

$$K = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} B_{xx} & B_{xy} \\ B_{yx} & B_{yy} \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{pmatrix}$$

外乱立位時の下肢終端位置での粘弾性楕円を定量化することができた。その結果、粘弾性をもっとも大きく働いている方向を表す長軸が外乱の方向を向いていた(図2)。このことから外乱の方向に合わせて粘弾性を制御することによって立位の安定性を獲得していることが示唆された。特に、長軸の長さが前後左右方向の外乱に対して長くなっていることから、粘弾性は前後左右方向に強く発揮されることがわかった。また、足幅が小さくなるにつれて長軸方向の試行間のばらつきが大きくなっており、足幅の違

いは粘弾性の発揮する方向のばらつきに表れた。このことから、立位の不安定性は粘弾性の大きさではなく、発揮する方向のばらつきによって特徴づけられることが示唆された。斜め方向に対して粘弾性が小さいため、斜め方向には力学的にヒトは倒れやすいことを意味している。神経的な立位安定を定量化するために、外乱立位時の各筋電図の振幅を水平面上にプロットした(図3)。その結果、解剖学的至適方位を前後左右方向にもつ筋であっても、外乱立位の保持には斜め方向に神経的至適方位を持つことがわかった。これは、ヒトは前後左右方向に粘弾性が大きく、斜め方向には力学的に倒れやすいため、倒れやすい斜め方向を神経系により補っていると考えられた。

[今後の研究の方向、課題]

本研究により、外乱立位維持課題において立位の水平面の安定性に粘弾性が大きく寄与していること、粘弾性楕円という指標が立位の安定性を評価するのに有用であることが示された。今後は、立位安定性の劣る高齢者の粘弾性楕円を定量化すること、その見解から高齢者の具体的な転倒予防策を提言する。また、本研究では、下肢終端位置での粘弾性特性のみの定量化である

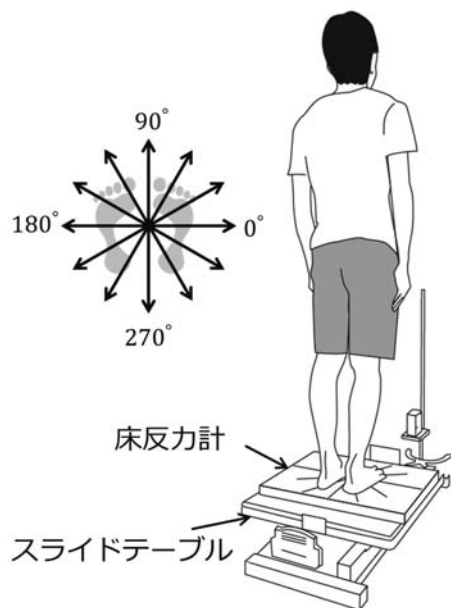


図1 実験方法

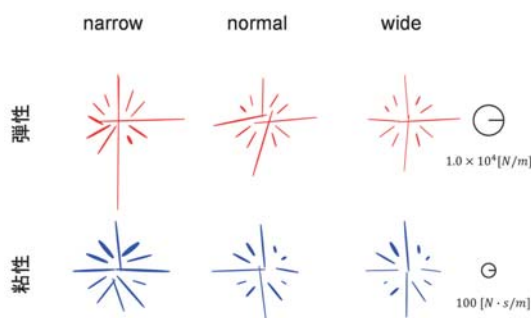


図2 3つのスタンス(narrow, normal, wide)での弾性(上段の赤色)および粘性(下段の青色)楕円

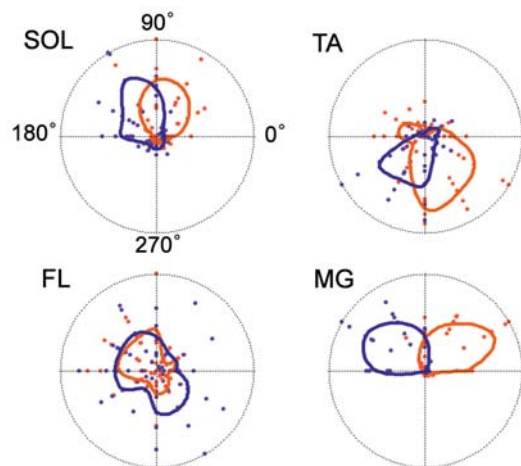


図3 normal スタンスの外乱立位時におけるヒラメ筋(SOL)、前脛骨筋(TA)、長腓骨筋(FL)、腓腹筋内側頭(MG)の左脚(橙色)および右脚(紫色)の筋電図振幅の分布

が、関節レベルでの粘弾性特性を定量することが今後の課題である。

[成果の発表, 論文等]

- (1) Tomida S, Tanabe H, Hagio S, Moritani T, and Kouzaki M. Viscoelastic control for Human Standing. 20th annual congress of the European College of Sport Science, Malmö (Sweden), 2015.
- (2) 神崎素樹, 萩生翔大, 寺田昌弘, 石岡憲昭.

JAXA 宇宙医科学研究シンポジウム: 宇宙からの帰還後における立位動作の運動制御の変化. 第52回日本リハビリテーション医学会学術集会, 新潟, 2015.

- (3) Kouzaki M. Muscle synergies are important for controlling human movements. International symposium on hand movement and muscle synergy "New approaches to complex musculoskeletal systems", National Center of Neurology and Psychiatry, Tokyo, 2015.