

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名：笹川 俊

本論文「Ankle and hip strategies in postural control during human standing: ヒト立位時の姿勢制御における足関節および股関節戦略」は、ヒト立位姿勢の制御メカニズムについて新たな知見を提供することを目的として行われた研究の成果をまとめたものである。ヒトの立位姿勢は、高い位置にある身体重心を狭い支持面内に保持しなければならないために不安定であり、姿勢の制御には高度な制御システムが要求される。立位時の姿勢制御に用いられる戦略は、足関節戦略と股関節戦略とに大別される。前者は足関節周りの運動を用いて姿勢を制御する方策であり、主に静的な状況において用いられ、後者は股関節周りの運動により姿勢を制御する方策であり、主に身体に大きな外乱が加えられた際に用いられる。これら2つの戦略を外的および内的環境に応じて適宜使い分けることにより、ヒトは、立位姿勢を効果的に制御しているとされる。これまで多くの研究者が立位姿勢制御の背景にあるメカニズムについて解明を試みてきたが、その全容は未だ明らかにされていない。本論文は、ヒト立位姿勢の制御メカニズムについて、神経生理学およびバイオメカニクスの観点から検討した研究の結果をまとめたものであり、その内容は身体運動科学における研究の新しい方向を示すものとして注目される。本論文は3つの実験結果に基づき構成されており、その主な内容は以下のようにまとめられる。

【実験1】静的立位時の足関節戦略における能動メカニズム

静的立位時の身体は、足関節を唯一の回転中心とした倒立振り子として近似され、足底屈トルクの調節が姿勢の制御において重要となる。足底屈トルクは、足底屈筋群の受動トーンズ（受動メカニズム）および同筋群の能動的な筋収縮（能動メカニズム）によってもたらされ、後者は、さらに持続的な成分と身体動揺に応じた間欠的な成分とに分類される。実験1では、被験者を3種類の斜面上（toes-up, level, toes-down）に立たせることにより、足底屈トルク発揮における受動メカニズムの貢献度を変化させ、静的立位姿勢制御における能動メカニズムについて詳細に検討した。その結果、受動トーンズが大きい（小さい）toes-up（toes-down）条件において、足底屈筋群の筋活動レベルが最低（最大）であることが明らかとなった。また、筋活動における持続的な成分は、toes-up（toes-down）条件において最小（最大）であった。一方、間欠的な成分には、斜面の条件による差異は認められなかった。本実験により得られた知見から、静的立位時の足底屈トルク発揮において、受動および能動メカニズムが相補的な関係にあること、中枢神経系が持続的な筋力発揮の強度を適切に調節することにより、受動トーンズの大小に関わらず筋トーンズを常に一定レベルに保つ制御方策を採用していることが示唆された。

【実験2】股関節戦略が顕著となる状況下での姿勢制御システムの定常特性

股関節戦略に関する従来の研究は、大きな外乱に対する制御システムの一過性の応答として、股関節戦略の過渡的な側面のみを検討してきた。そこで実験2では、股関節戦略が顕著となる状況における姿勢制御システムの定常特性について検討した。被験者には、十分に広い支持面（normal）および前後方向に狭い支持面（short）の上で立位姿勢を保持させ、その間の足関節と股関節の角度変位、および足圧中心位置（CoP）を測定した。その結果、short条件では、股関節戦略が顕著になった。また、CoPの軌跡についてフラクタル解析を適用したところ、両条件ともに約0.6秒以下の時間間隔ではCoPが持続性の性質を、それ以上の時間間隔では反持続性の性質を示すことが明らかになった。また、short条件では、短い時間間隔においてCoPが高いランダム性を示すが、長い時間間隔においては比較的高い安定性を示すことが明らかになった。これらの結果より、股関節戦略は短い時間間隔における繊細な姿勢制御には不向きであるが、長い時間間隔においては十分な安定性を供給し得ることが示唆された。

【実験3】静的立位時の全身キネマティクスに対する股関節周りの運動の影響

静的立位時の身体は、足関節を唯一の回転中心とした1セグメントの倒立振り子として近似し得るとする考えに対し、最近では、たとえ静的な状況においても股関節周りの運動は無視できず、身体は2セグメントの倒立振り子として振る舞うとする報告が散見される。そこで、実験3では、静的立位時の全身のキネマティクスに対し、股関節周りの運動が及ぼす影響について検討した。静的立位時における足関節と股関節の角度変位を測定し、両関節間における運動のコーディネーションを調べたところ、角度変位においては、両関節間に相関が認められなかったものの、角加速度においては、両関節周りの運動が逆位相で調節されていることが明らかになった。また、身体を1セグメントの倒立振り子として近似した場合に比べ、2セグメントの倒立振り子と仮定した場合の方が、全身のキネマティクスをより正確に記述し得ることが同時に示され、本実験の結果から、たとえ静的状況下においても、全身のキネマティクスに対し、股関節周りの運動が大きな影響を及ぼすことが示唆された。

以上のように、笹川俊氏の論文は、ヒト立位姿勢の制御メカニズムに対し、新たな知見を提供するものであり、身体運動科学の分野における意義は非常に大きい。したがって、本審査委員会は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する。