

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 人間・環境学 )	氏名	進矢 正宏
論文題目	歩行中の踏み外しに対する姿勢制御活動		
(論文内容の要旨)			
<p>100年以上にわたって実験動物やヒトを対象として行われてきた歩行中の外乱研究によって、外乱後に脊髄反射や随意的な制御を組み合わせた姿勢制御活動が引き起こされることが知られてきた。とりわけ、予期せぬ穴に足を踏み外す、という外乱は押される・躓くといった他の外乱とは異なり、外乱を直接的に示す感覚入力に殆ど得られないという点において異なる。また、被験者が外乱の発生する可能性を教示された際に、予備知識を用いて姿勢制御を行うという能力は、他の動物には見られないヒトに特異的な機能であると言える。本学位申請論文は、ヒトが歩行中の踏み外しをする際の表面筋電図、床反力、および動作学的データを計測し、踏み外しに対する姿勢制御活動のメカニズムを解明し、踏み外す可能性に対する事前知識が姿勢制御活動に与える影響について研究したものである。</p> <p>第一章では、歩行中の外乱に対する姿勢制御活動に関する研究小史をまとめた。まず、実験動物を対象とした研究のうち、歩行研究の基礎をなす重要なものを挙げ、その上でヒトにおける歩行中の外乱に対する姿勢制御活動の背景知識を記述した。筋応答を引き起こす感覚入力の様式が何であるか、筋応答が中枢神経系のどの領域で処理され出力されたものかを解明する上で、外乱が与えられてから筋応答が観察されるまでの潜時が重要な情報であることを明示し、本研究を行う上での理論的枠組みを提供し、本研究の意義を先行研究の流れの中に位置づけた。</p> <p>第二章では、健常成人7名を被験者として、歩行路の途中に深さ6.5cmの穴を設け、被験者が踏み外す可能性を全く知らない状況において踏み外したときにみられる姿勢制御活動を記録した。踏み外しに対してバランスを回復するための時系列に沿った3つの姿勢制御戦略が観察された。最も早いタイミングで観察されたものは、反射的な筋応答であった。踏み外した足の腓腹筋は、踏み外した瞬間から97ms後に筋電図活動を開始した。これは前脛骨筋の筋電図の活動開始が踏み外しの瞬間から126ms後であったこと、また踏み外した後の穴の底への着地までの時間が128msであったことと比較して、有意に早いタイミングであった。このことは、踏み外しに対する素早い筋応答が、踏み外した後の床への着地に伴う求心性入力をトリガーにしたものではなく、ある筈の床がなかったという差分情報が引き金になったことを示唆している。さらに、この素早い筋応答は足関節底屈筋が先行し、背屈筋が後から活動を開始するというパターンを示したが、この筋活動パターンは歩行停止時に見られるものと酷似しており、足先を下げ衝撃を吸収しその後共収縮により足関節の安定を保つという機能を有していることが示唆された。踏み外した後の立脚期に着目すると、穴の底に接地した足が離地するタイミングが遅れていた。これは中枢神経系が、立脚期全体の長さを維持する</p>			

というフェイズリセットの制御を行っていたものと考えられる。全ての被験者は踏み外し後、少なくとも2歩、穴から脱出するためのステップを行っており、踏み外し後のステップの遊脚期では、左右両方とも膝関節の最大屈曲角度が通常歩行と比較して大きくなっていた。穴の段差につまずかないように、落ちた足と次の足を注意深く高く上げる適応的な歩行戦略をとっていたものと考えられる。

第三章では、20名の健常成人を被験者として、踏み外す可能性に対する被験者の事前知識が、踏み外しに対する姿勢制御活動に与える影響について検討した。踏み外す可能性を知っていて実際には穴に落ちない条件では、歩行中に足先を下げ両脚支持期間を長くするという、より慎重な着地戦略をとっていた。また、実際に踏み外した際においても、踏み外す可能性に関する事前知識を持っていた時は、持っていなかった時と比較して、筋応答が開始されるまでの潜時が短縮していた。踏み外す可能性に関する事前知識を持っていたが実際には穴はなかったという条件では、足裏が歩行路に着地した50~60ms後には、歩行開始とよく似た筋活動パターンが観察された。これらの結果から、中枢神経系は、穴がある歩行路と穴がない歩行路の二つの物理的可能性を想定し、それぞれに応じてプレプログラムされた歩行停止と歩行再開の筋活動パターンのいずれかが実際の状況に応じて誘発されるというswitch-case型の戦略をとることが示唆された。

第四章では、第二章・第三章で示した申請者の研究の内容を総括し、第一章で述べた姿勢制御研究の流れの中に位置づけた。従来の研究では、外乱が発生してから50~100ms後という潜時を報告した先行研究は、脳幹や大脳皮質を経由した中長潜時伸張反射や前庭系に大きな入力を与えられた際の反射を調べたものである。本研究は、歩行中の踏み外しに対する筋応答がこれらの反射と同様の潜時で誘発されることを示した。また、この筋応答は外乱が発生する可能性に関する事前知識を有していた際に潜時が短縮することから、プレプログラムされたものであることが示唆された。

本学位申請論文は、歩行中の踏み外しに対して素早い姿勢制御活動が行われることを示した。踏み外しというタスクを用いて、プレプログラムされた筋活動が、実際的感覺入力が予測と乖離した際に誘発されるというメカニズムが存在することを示唆した。また、外乱に関する事前知識を持つことによって、外乱後の筋応答の潜時が短縮することを報告し、意識的な予測が反射的な筋活動に関与している可能性を示唆した。

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、歩行中の踏み外しに対する姿勢制御活動を計測し、踏み外す可能性に関する事前知識が姿勢制御活動に与える影響を検討した運動制御研究である。歩行中の外乱に対する筋反射に関する神経生理学知見を俯瞰し、踏み外しという外乱を研究することの意義について述べた第一章、被験者が完全に予測不可能な状況での歩行中の踏み外しに対する姿勢制御活動を筋電図・床反力計・画像解析装置を用いて計測した第二章、踏み外す可能性に関する事前知識が踏み外しに対する姿勢制御活動に与える影響を検討した第三章、および第二章・第三章の内容を先行研究の流れの中に位置づけ総合考察を行った第四章から構成されている。

第一章では、歩行中の外乱に対する姿勢制御活動に関する先行研究を、実験動物を対象とした神経生理学、ヒトにおける歩行中の外乱に対する姿勢制御活動、および事前知識に基づいたプレプログラム反応、という枠組みでレビューし、踏み外しという外乱を研究することの学術的意義を的確に述べている。また、外乱が与えられてから筋応答が観察されるまでの潜時が、筋応答が誘発されるメカニズムを推測する上での重要な情報であることを明示することで、本研究の理論的な枠組みを提供することに成功している。

第二章において、申請者はまず、被験者が踏み外す可能性を全く知らない状況下で、歩行路に設けた深さ6.5cmの穴への踏み外しに対する姿勢制御活動を記録した。その結果、踏み外しに対してバランスを回復するための時系列に沿った3つの姿勢制御戦略が観察された。第一に、踏み外しに対して足関節の底屈および背屈筋に素早い筋電図活動が観察され、第二に、踏み外した後の立脚期において歩行リズムのリセットが観察され、第三に、踏み外した穴から脱出するための適応的なステップが観察された。踏み外した足の下腿筋から観察された筋活動パターンは、足関節底屈筋が背屈筋と比べて早いタイミングで活動を開始するというものであり、歩行運動中の身体重心にブレーキをかける機能を持っていると推察された。また、ヒラメ筋の活動開始が早い被験者ほど、着地に伴う衝撃が小さくなるという相関関係を示し、素早い筋活動が足関節に適切なスティフネスを与え、踏み外した後の着地に伴う衝撃を吸収するという機能を持っていたことが示唆された。本研究のオリジナリティーは、踏み外した足の下腿筋から観察された素早い筋活動は、ある筈の床がないという予測と実際の感覚入力に差が生じたことが引き金となって誘発されることにあり、この研究成果は、歩行と姿勢制御の専門誌である *Gait and Posture* (2009) に掲載された。

上記の結果を踏まえ第三章では、被験者の踏み外す可能性に関する事前知識が素早い筋応答に与える影響について検討した。事前知識を有していた場合の歩行は、事前知識を有していなかった場合の歩行と比較して、両脚支持期が延長し、足先を下げるという慎重な歩行戦略をとることが明らかとなった。踏み外す可能性に関する事前知識を有した状態で踏み外した場合は、事前知識を有していなかった場合に比べて、踏み外し後の筋応答開始までの潜時が短縮していた。これらの結果は、一度も踏み外し

を体験したことがない被験者においても観察されたことから、教示によって与えられた穴の位置・大きさ・深さといった情報をもとに、踏み外した際の反応をプレプログラムしていたと考察した。踏み外す可能性に関する事前知識を有していたが実際には歩行路に段差がなかった試行では、踏み外した足が穴の底に着地して50ms後から足関節底屈筋に活動が見られた。この筋活動は歩行を再開し身体重心を前方へ移動させる働きがあると考えられる。このような筋活動は通常の平地歩行では観察されなかったことから、踏み外しに関する事前知識を有していた際には、踏み外さなかった時のための筋活動も併せてプレプログラムしていたことが示唆された。

以上のように、本学位申請論文は、一連の手堅い研究手法によって着実に成果を重ねており、踏み外しという外乱に対する姿勢制御研究という枠におさまらず、予測と実際の感覚入力之差が素早い筋応答を引き起こすこと、またその筋応答は事前知識によってさらに潜時が短縮すること、外乱が発生した時と発生しなかった時の両方に備えて筋応答をプレプログラムしそのいずれかを状況に応じて出力するというswitch-case型の姿勢制御が行われることを示して、この領域の研究を進展させた。さらに、本研究は、姿勢制御に関する神経生理学的あるいは物理的研究のなかに、外乱発生の可能性に関する予測という被験者の心理的要素を研究視点に取り入れることの意義および重要性を暗示している。そのことは、本研究がリハビリテーションやロボット工学といった近隣の研究領域に対して学術的価値を持つことを意味している。以上のように、上記の研究成果は、共生人間学専攻認知・行動科学講座に相応しい内容を備えている。

よって、本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年2月8日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

Webでの即日公開を希望しない場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：                    年            月            日以降