

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 人間・環境学 )	氏名	山下 大地
論文題目	The mechanics of human sideways locomotion (ヒト横方向の移動運動の力学的特性)		
(論文内容の要旨)			
<p>ヒトは左右肢を自由に協調させ、非常に巧みな移動動作を実現することができる。その中でも、横方向の移動運動はスポーツや日常生活などさまざまな場面でみられ、下肢の解剖学的特性、進行方向に対する下肢の配置が前方移動とは明らかに異なるため、前方への歩行や走行とは異なる制御メカニズムがあると考えられる。したがって、横方向の移動運動メカニズムを解明することは、各種スポーツにおける移動運動能力向上や障害予防に貢献できると考えられる。本学位申請論文は、ヒト横方向の移動運動において、移動様式を分類し、分類された各様式の力学的特性を明らかにすることを目的として行われ、以下の4章から構成される。</p> <p>第1章では、本学位申請論文の意義と目的、研究の背景と研究小史、論文の構成について述べた。</p> <p>第2章では、15名の男子学生を被験者として実験を行った。トレッドミル上で横方向の移動運動を行うことにより、速度依存的に選択される移動様式についてハイスピードカメラで接地・離地の時刻を判定し、移動様式を分類した。低速度では全被験者で両脚支持期があり跳躍期がなく、各脚の接地タイミングも対称な“walk”を選択した。速度が上昇し、3.5 km/h 以上になると15名のうち13名で両脚支持期と跳躍期があり、接地タイミングの非対称な“gallop”を愛好することが明らかになった。一方、2名は両脚支持期がなく跳躍期のある“run”を選択した者もいた。つまりヒトは横方向の移動において、遅い速度では前方向の場合と同様に“walk”を選択するが、速度を上げていくと前後方向の移動様式では普段用いられない“gallop”の様式を選択することが明らかになった。</p> <p>第3章では、12名の被験者に対して地上で様々な速度にて横方向への移動運動を行ってもらい、三次元動作解析と地面反力により移動様式の力学的特性を明らかにすることを目的とした。身体に貼られた31点のマーカーより身体重心位置を算出し、身体重心周りの位置エネルギーと運動エネルギーの変換効率を求めた。身体重心位置と足圧中心点を結ぶ線分を下肢長とみなすモデルにより先導脚と後続脚の伸張速度を検討した。さらに三次元逆動力学法によって各関節のトルク、パワー、仕事量を求めた。その結果、“walk”では、後続脚は位置エネルギーを運動エネルギーに、先導脚では運動エネルギーを位置エネルギーに効率よく変換する横方向特有の役割分担をする振り子的な振舞いを行っていることが明らかとなった。“gallop”では、ステップ速度と共に後続脚の伸張速度は増し、先導脚は短縮速度が増大するという役割分担によって移動速度を調節してい</p>			

ることが明らかとなった。また後続脚の最大短縮速度と先導脚の最大伸張速度は移動速度によらず分散していたが、両者に有意な相関関係があり、後続脚と先導脚の協調関係が確認された。さらに、後続脚、先導脚ともに足関節底屈パワー波形から弾性エネルギーを利用するバネ的な役割が観察されたが、これらは移動速度に依存しなかった。

第4章では、上記の研究を総括して“gallop”と“run”を比較して議論を行った。本学位論文は、横方向の移動運動は、遅い速度では“walk”を、速度を上げていくと“gallop”もしくは“run”の様式が選択されることを明らかにした。また“walk”、“gallop”はそれぞれ運動の力学的特性は異なるが、どちらの様式も先導脚・後続脚が異なる役割を果たし、それらが協調されて円滑かつ効率的な横方向の移動動作が達成されていることが明らかとなった。

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、スポーツ動作や日常生活の場面で見られる「横方向の移動運動」という現象をテーマにして研究がまとめられている。横方向の移動運動について定義した上で、その力学的特性の解明を試みた非常に意義深い論文である。

ヒトは左右肢を自由に協調させ、非常に巧みな移動動作を実現することができる。その中でも、横方向の移動運動はスポーツや日常生活などさまざまな場面でみられる。スポーツの場面では、攻撃者が防御者をかわすときの動作や、動くボールを捉えるときに必要となる。また、日常生活においては、狭い通路を歩くとときや物を抱えて歩行するときなど頻繁に見られる。横方向の移動動作は、下肢の解剖学的特性や進行方向に対する下肢の配置が前方移動とは明らかに異なるため、前方への歩行や走行とは異なる制御メカニズムが存在すると考えられるが、その基礎的研究はほとんどない。横方向の移動運動メカニズムを解明することは、各種スポーツにおける移動能力向上や日常生活における障害予防に貢献できる。一般に、左右肢の協調に関する研究では、前方への歩行動作が検討されてきた。これに対し、本学位申請論文は、横方向の移動動作における力学的特性を検証しており、新規性および独創性が認められる。

本学位申請論文は、ヒト横方向の移動運動の定義と三次元力学的性質の2つの実験によって構成されている。第1実験では、トレッドミル上で横方向の移動運動を行うことにより、速度依存的に選択される移動様式についてハイスピードカメラで接地・離地の時刻を判定することにより、選択される移動様式を分類している。低速度では全被験者で両脚支持期があり跳躍期がなく、各脚の接地タイミングも対称な“walk”を選択した。速度が上昇し、3.5 km/h 以上になると15名のうち13名で両脚支持期と跳躍期があり、接地タイミングが非対称的である“gallop”を選択することを明らかにした。一方、2名の被験者は両脚支持期がなく跳躍期のある“run”を選択した。つまり、ヒトは横方向の移動において、遅い速度では前方向の場合と同様に“walk”を選択するが、速度を上げていくと前後方向の移動様式では普段用いられない“gallop”の様式を選択することを明らかにした。この実験により、二足歩行のヒトにおいても四足動物と同様に速度依存的に“gallop”という様式を選択することを示した。その成果は、国際学術雑誌である *Journal of Electromyography and Kinesiology* (23巻、1480-1484頁、2013年) に掲載されている。

第2実験では、第1実験の結果を受け、それぞれの横方向の移動様式である“walk”・“gallop”・“run”の三次元力学的特性を検討している。すなわち、地上で

様々な速度にて横方向への移動運動中に、足関節・膝関節・股関節まわりのトルクおよびパワーを三次元動作解析と地面反力の解析により求めた。また、身体に貼られた31点のマーカより身体重心位置を算出し、身体重心周りの位置エネルギーと運動エネルギーの変換効率を求めた。その結果、先導脚と後続脚で役割が異なることを示した。すなわち、“walk”では、後続脚は位置エネルギーを運動エネルギーに、先導脚では運動エネルギーを位置エネルギーに効率よく変換する横方向特有の役割分担をする振り子的な振舞いをしていることを明らかにした。“gallop”では、ステップ速度と共に後続脚の伸張速度は増加し、先導脚は短縮速度が増加するという役割分担によって移動速度を調節していることを明らかにした。また後続脚の最大短縮速度と先導脚の最大伸張速度に有意な相関関係があり、後続脚と先導脚の特異的な協調関係を確認している。さらに、後続脚、先導脚ともに足関節底屈パワー波形から弾性エネルギーを利用するバネ的な役割を観察したが、弾性エネルギーの変化は移動速度に依存しないことを示した。

以上のように、本学位申請論文は、横方向の移動様式の記述に留まらず、その現象の背後にある各関節まわりの力学的特性を調査するバイオメカニクスの実験を行うことで、より深い研究成果を創出している。このような丹念な実験手続きによって得られた研究成果は、スポーツ科学やスポーツ医学といった近接の研究領域に対して発展的影響をもたらすことが期待される。さらに、生体工学やロボット工学などの研究分野にも応用可能である。一方で、実験のさらなる深化を求めたい点もあった。例えば、横方向の移動運動のエネルギー効率を実験的に定量することである。エネルギー効率を数値化するには運動出力だけでなくエネルギー消費量を測定する必要がある。したがって、本研究で対象とした横方向の移動様式の相転移メカニズムが何に起因しているか、については推測の域を脱しておらず、この点については今後さらに検証を重ねることを求めたい。

しかしながら、本学位申請論文の研究成果は国際学術雑誌に掲載されており、その独創性と学術的価値は高く評価される。また、スポーツ分野のみならず生体工学の分野への応用へと広く発展する可能性を有する基礎的知見を提供している点も評価に値する。したがって、本学位申請論文は、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おり、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26年1月23日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降