

論文の内容の要旨

ヒト全力移動運動における 腰椎・骨盤・股関節複合体の バイオメカニクス

Biomechanics of lumbo-pelvic-hip complex in human maximal locomotion

総合文化研究科 広域科学専攻 生命環境科学系
31-167710 佐渡 夏紀

【背景】

競技スポーツなどで行われる最大努力の移動運動では、ヒトはあらゆる身体機能を駆使して最大成果を目指し、その動作は身体機能に依存する。従って、全力移動運動の遂行機序にはヒト身体機能の特徴が表出していることが推察される。従来、走などの全力移動運動の遂行機序は下肢の働きを中心に検討されてきた。この両下肢を連結する腰椎・骨盤・股関節複合体の制御もまた、移動運動に多大な影響を及ぼすことが推察される。また、各種身体運動において腰椎・骨盤・股関節複合体の力発揮は、受動的な作用を相殺して骨盤の動作を抑制するスタビライザーとして機能するとされてきた。

腰椎・骨盤・股関節複合体には29の筋が停止し、その中に大きな筋も存在する。また、ヒトの腰椎・骨盤・股関節複合体には、矢状面の屈曲・伸展だけでなく、前額面で側屈と内外転、横断面で捻転と内外旋という3次元的な解剖学自由度が存在するという特徴がある。特にヒト全力移動運動が遂行される片脚支持という状況下では腰椎・骨盤・股関節複合体の中心をなす骨盤自体が3次元的に動くという特徴があり、各種移動運動で骨盤の動きが観察されてきた。しかし、骨盤の動きが生じる動力学的な機序は明らかではない。すなわち、腰椎・骨盤・股関節複合体の力発揮によって能動的に骨盤の動きを生み出している可能性もある。もしこの仮説が支持されるならば、腰椎・骨盤・股関節複合体の動力学的な役割に関する新たな洞察が得られることが期待される。

そこで本博士論文は、ヒト全力移動運動における腰椎・骨盤・股関節複合体の動力学的挙動と役割の解明を目的とした。本研究は、次の仮説の下で行われた：

1. 腰椎・骨盤・股関節複合体は、常に受動的な作用を打ち消して骨盤を固定するだけでなく、能動的に動きを惹起するジェネレーターとしても機能する。
2. 腰椎・骨盤・股関節複合体の力発揮によるジェネレーターとしての機能が求められる何らかの共通法則が

存在する。

【各章の結果】

仮説の検証のため、3章ではまず、3次元的な力学的仕事の算出手法の検討と、力学的仕事によって引き起こされた個々の身体部分の回転に由来する質量中心の移動に有効なエネルギー変化の定量分析の提案を行い、妥当性検証実験を行った。

4章では基礎的な前方移動として最高速度疾走の研究を行った。矢状面では股関節伸展トルクと腰仙関節伸展トルクが拮抗することで、前額面では股関節外転トルクと腰仙関節側屈トルクが協働することで、それぞれ骨盤を固定することを示した。横断面では離地に先行した骨盤の回旋を捻転トルクが惹起することで下肢の回復動作を先導すること、幅広い走速度で速度が増大すると、捻転トルクはステップ頻度と類似して増大することが明らかになった。

5章では基礎的な上方移動として助走からの片脚踏切 (RSLJ) の研究を行った。腰椎・骨盤・股関節複合体の前額面の力発揮が遊脚側の骨盤挙上を通して力学的エネルギー生成すること、骨盤の挙上は跳躍高を獲得することを示した。続いて、片脚垂直跳と両脚垂直跳の比較により、骨盤の挙上は両脚踏切に対する片脚踏切の大きな利点であることが明らかになった。

6章では基礎的な側方移動として方向転換の研究を行った。方向転換では、下肢を側方に傾けて接地することで下肢の矢状面上の働きを通して側方速度を獲得すること、下肢が傾いた姿勢 (股関節外転位) で十分に発揮できない股関節外転トルクの代わりに腰仙関節側屈トルクが遊脚側の骨盤下制を抑制することが明らかになった。横断面では、側方への体幹の回転が単一の剛体のように回転するのではなく胸郭から骨盤へ順々に回転すること、段階的なそれぞれの回旋を捻転トルクが制御していること示した。

7章では走速度獲得局面としてクラウチングスタート・加速局面の研究を行った。前方速度は主に支持脚大腿の前回転によって獲得されることを示した。しかし、この下肢の動きは質量中心を低下させること、スタート・加速局面で共通して骨盤の挙上による質量中心上昇作用によって下肢による低下作用が相殺され、質量中心高を保持することが明らかになった。

8章では、垂直・水平距離を目的とした RSLJ と曲線助走を利用した RSLJ における条件変化が踏切に及ぼす影響を検討した。RSLJ という様式をとるならば、前額面の力発揮による力学的エネルギー生成と骨盤挙上による跳躍高獲得機序は、同様に用いられることを示した。ただし、骨盤挙上の動作域に限界があり、同じ RSLJ でも踏切時間が長い場合は前額面の力発揮は最大下で調節されることも明らかになった。また、骨盤挙上は水平速度に影響を持たずに鉛直速度を生み出すという特徴も明らかになった。

【総括論議】

前方・上方・側方の全力移動運動では共通して腰仙関節伸展トルクが発揮されることが明らかになった。すなわち、正味のトルクで考えた際には腰仙関節で大きな屈曲トルクが求められないことが明らかとなった。また、全ての全力移動運動で股関節伸展トルクが発揮されること、目的とする速度獲得の半分程度が大腿の回転に由来することが共通していた。股関節伸展は骨盤の後傾と大腿の前回転から成るが、各種移動運動では腰仙関節伸展トルクが股関節伸展トルクの骨盤後傾作用を相殺するため、骨盤は大きく後傾しなかった。つまり、腰仙関節伸展トルクが骨盤を固定することで、股関節伸展仕事は大腿の回転に作用していた。従って、腰仙関節伸展トルクが股関節伸展トルクと拮抗して骨盤を固定することで大腿の回転による質量中心の移動を促進するという意義が全力移動運動に共通して明らかになった。また、股関節伸展トルクに匹敵する腰仙関節伸展トルクの必要性は、股関節の重要性が認識されている各種動作に広く一般化されることが示唆された。

片脚支持で行われる各種全力移動運動では骨盤の遊脚側下制を抑制する必要がある。従来、これは股関節外転筋群の機能とされてきた。しかし、全力疾走では腰仙関節側屈トルクが股関節外転トルクと同程度に骨盤下制の抑制に貢献すること、方向転換の研究から腰仙関節側屈トルクのみで下制を抑制する動作も存在することが明らかになった。つまり、骨盤の下制抑制は腰仙関節側屈と股関節外転の間にある動力学的な相補関係によって遂行されていることが示された。

片脚踏切の研究を通して、前額面の力発揮を強めることで能動的に骨盤の遊脚側を挙上させ、力学的エネルギーを生成すること、骨盤挙上は質量中心の上昇を引き起こすことが定量的に明らかになった。加えて、前に倒れることで下肢が質量中心高を低下させてしまう全力疾走のスタート・加速局面では、骨盤が最高速度疾走の約2倍挙上し、骨盤挙上によって質量中心が上昇するように作用していた。つまり、前額面の力発揮は質量中心高獲得の必要性に応じて骨盤の挙上を調節することで質量中心高の調節の一端を担うことが、全力移動運動の様式を横断して明らかになった。

横断面では、前方と側方への全力移動では、捻転トルクが支持期後半に骨盤を遊脚方向（すなわち支持脚股関節を前に移動させる方向）へ回旋させていた。一方、RSLJでは捻転トルクは大きく発揮されず、骨盤は踏切局面を通して反対方向へ回旋していた。これらの移動運動の相違点は、下肢回復動作の必要性の有無である。また、前方・側方への全力移動では、骨盤が離地に先行して支持脚を前に牽引することで回復動作を補助していた。従って、支持脚の素早い回復動作が必要であるときは、捻転トルクが能動的に骨盤の回旋を先導することが、全力移動運動の様式を横断して明らかになった。

前方・側方移動で、胸郭から先行して回旋することで捻りが生じ、その後支持期の後半に骨盤が追従して回旋していた。捻転しながら胸郭から順に回旋することは、体幹（胸郭・腰部・骨盤を合わせた身体部位）を単一の剛体とするのに対し、体幹の筋群を骨盤の回旋に動員できること、より小さな慣性で回旋させられることといった観点から、大きな骨盤の回旋角速度が期待できる。

質量中心高が必要な移動運動では骨盤の前額面での回転（遊脚側の挙上）が、下肢の前方への回復動作が求められる移動運動では骨盤の横断面での回転がそれぞれ寄与しており、これらの回転は力発揮により能動的に生じたものであった。ヒト骨盤は縦に短く幅広いという形態的特徴により、長軸が左右方向である。腰椎・骨盤・股関節複合体が骨盤を回転させる本質的意義は「求められる並進運動の方向と骨盤の長軸から形成される平面」で骨盤を能動的に回転させることで、骨盤の形態的特性に即して求められる並進運動を生み出すことであった。

本博士論文を通して、全力移動運動に共通した矢状面での伸展トルク発揮の必要性和骨盤の固定の意義が明らかになった。さらに、固定という機能に加え、前額面では「質量中心の上昇の必要性」、横断面では「支持脚の素早い回復動作の必要性」に応じて腰仙関節トルクが能動的に骨盤を動かすことが、全力移動運動の様式を横断して明らかになった。新たに明らかになった腰椎・骨盤・股関節複合体が能動的に骨盤を動かすことの力学的意義は、縦に短く幅広というヒトの骨盤の形態的特徴に即して必要な並進運動を生み出すことであることが示された。