

水中ウォーキングにおける力学的身体負荷の シミュレーション解析【要約】

Simulation analysis of mechanical body load during walking in water (Summary)

米山 啓子 (Keiko Yoneyama)

中島 求 (Motomu Nakashima)

三好 扶 (Tasuku Miyoshi)

東京工業大学大学院情報理工学研究所

東京工業大学大学院情報理工学研究所

岩手大学工学部福祉システム工学科

〔要旨〕

本研究では、水中ウォーキングにおける力学的な身体負荷をシミュレーションにより解明することを試みた。すなわち、流体力を考慮した力学的身体負荷を解析可能なシミュレーションモデルを開発し、力学的身体負荷（関節トルク、関節間力、筋力）を求めた。その結果、水中ウォーキングは関節へ大きな負担をかけずに積極的に膝屈筋・股伸筋を使用するため、リハビリテーションに適した運動であることを示した。さらに本モデルの応用例として、筋力強化に最適な歩行フォームを求め、その効果を被験者実験により確認した。

キーワード：バイオメカニクス、シミュレーション、流体力、SWUM

1. 緒言

水中ウォーキングは陸上に比べて関節に負担をかけずに全身の筋肉を使うことができるため、関節炎、腰痛の患者らのリハビリに広く用いられているが、その力学的な身体負荷についてはいまだ不明な点が多い。そこで本研究では、流体力を考慮した力学的身体負荷（関節トルク、関節間力、筋力）をシミュレーションにより解明することを試みた。関節トルク・関節間力の解析には、著者らが既に開発済みの水泳人体シミュレーションモデル SWUM を応用して開発したモデルを用いた。また筋力の解析には、山崎による二次元下肢筋骨格モデルを用いた。さらに、本解析モデルの応用例として、筋力強化に最適な歩行フォームを求め、その効果を被験者実験により確認した。

2. 関節トルク・関節間力の解析

本解析に用いたシミュレーションモデルは、著者らが水泳運動の解析ツールとして開発した水泳人体シミュレーションモデル SWUM⁽¹⁾ を応用して開発された。SWUM では、身体は剛体リンクで表現され、流体力はモデル化されて考慮され、入力として与えられた身体の相対運動に対して、絶対運動や身体に働く流体力等が求められる。以上の SWUM の仕様に対し、本モデルでは身体の絶対運動および作用点から加わる床反力が入力として与えられ、流体力、床反力、人体自身の慣性力および重力の合計により、関節間力、関節トルクが求められる。本モデルへの入力値は、以前三好らにより行われた実験データを用いた⁽²⁾。

解析の結果、水中では陸上に比べ大きな股関節トルクを發揮する一方、関節への負担に相当する圧縮方向の関

節間力は陸上より水中の方が小さいことがわかった。よって、水中歩行では陸上に比べて股関節に大きな負担をかけずに股関節まわりの筋肉を鍛えることができると言える。この特徴は、関節に大きな負担をかけることのできない関節炎患者や高齢者にとって、水中歩行が有用なリハビリテーションの手段となり得ることを示唆する。

3. 筋力の解析

本章では前章で求めた関節トルクを用いて筋骨格モデルにより下肢筋力を算出した。本解析には山崎による二次元下肢筋骨格モデルを用いた⁽³⁾。図1にモデルの模式図を示す。

解析の結果、解析による筋力と筋電図による筋活動パターンは概ね一致していることから、解析の妥当性が確認された。また、HAMは陸上に比べて水中の方が大きな筋力を長時間発揮することがわかった。HAMは前十字靭帯損傷患者のリハビリの際に強化訓練が行われる⁽⁴⁾。そのため水中ウォーキングは特にこのような患者のリハビリに適しているのではないかと考えられる。

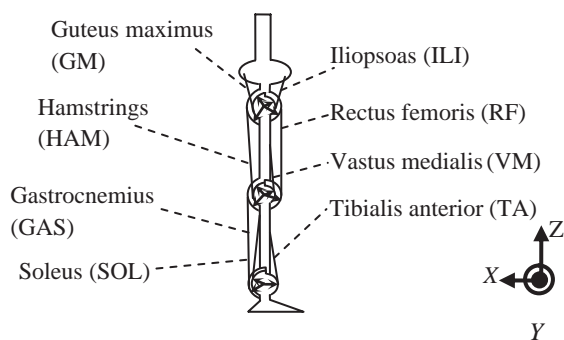


Fig. 1 Schematic view of musculoskeletal model

4. 筋力強化に最適なフォームの提案

本章では、本シミュレーション手法の応用例として、筋力強化に最適なフォームを提案する。本解析では三好らの実験に基づく歩行フォームを基に、さまざまな歩行フォームを作製して解析を行った。図2に解析結果の歩行の様子を示す。各フォームは遊脚期においてそれぞれ、以下の動作を強調した運動となっている。HF：股関節屈曲，HE：股関節伸展，KF：膝関節屈曲，KE：膝関節伸展，HFKEおよびHFKE2：股関節屈曲・膝関節伸展である。ここでHFKEは大腿を大きく振り上げた後、大腿と直線状になるよう下腿を振り上げ、最後に大腿と下腿を一直線に振り下ろすフォームである。一方、HFKE2は大腿と下腿を一直線に振り上げた後、自然に振り下ろすフォームである。

解析の結果、HFKEとHFKE2の二つのフォームの筋力が突出して大きく、筋力強化の効果が大きいことがわかった。さらに、これらのフォームは関節への負担も陸上歩行の半分以下であったことから、筋力強化に最適な歩行フォームとして、HFKEおよびHFKE2を選定した。

最後にシミュレーションで提案した最適フォームの効果を、被験者実験にて検証した。実験の結果、最適フォームの筋電図が最大となり、シミュレーションと同様の傾向を示したことから、最適フォームの効果を確認することができた。

5. 結言

本論文では、水中ウォーキングにおける流体力を考慮した力学的身体負荷（関節トルク、関節間力、筋力）を

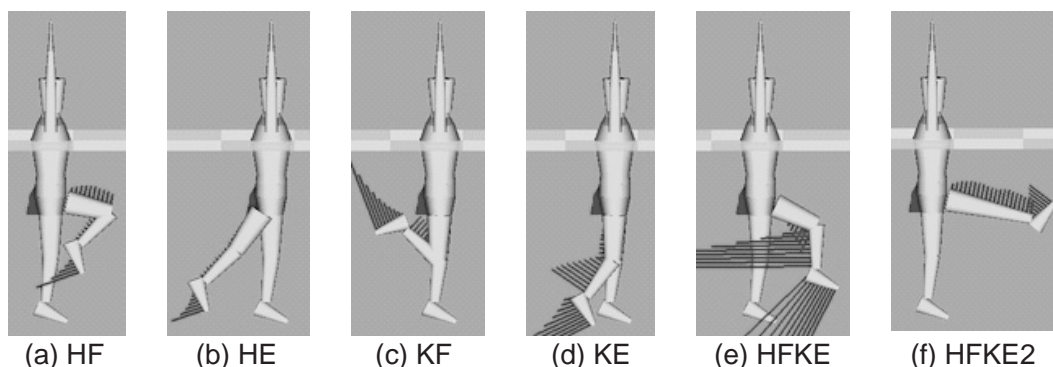


Fig. 2 Appearance of various gaits at swing phase in the simulation results

解析可能なシミュレーションモデルを用いて解析を行った。その結果、水中ウォーキングは関節へ大きな負担をかけずに積極的にハムストリングスを使うため、リハビリに適した運動であることを示した。さらに本モデルの応用例として、筋力強化に最適な歩行フォームを求めた。その結果、脚全体を大きく振り上げるフォームを最適フォームとして提案し、その効果を被験者実験により確認した。

引用文献

- (1) 中島, 佐藤, 三浦 (2005). 全身の剛体動力学と非定常流体力を考慮した水泳人体シミュレーションモデルの開発, 日本機械学会論文集 (B編), 71(705), 1361-1369.
- (2) Miyoshi, T., Shirota, T., Yamamoto, S., Nakazawa, K. and Akai, M. (2003). Lower Limb Joint Moment during Walking in Water, *Disability and Rehabilitation*, 25(21), 1219-1223.
- (3) 山崎 (1975). 2足歩行の統合解析モデルとシミュレーション, *バイオメカニズム*, 3, 261-269.
- (4) 栗山, 渡辺, 石川, 川島 (2001). スポーツ外傷: 膝前十字靭帯損傷のリハビリテーションについて, *リハビリテーション医学*, 38(6), 493-501.