

2003年7月4日

人間科学研究科委員長 殿

星川 秀利氏 博士学位申請論文審査報告書

星川 秀利氏の学位申請論文を下記の審査委員会は、人間科学研究科の委嘱をうけて審査をしてきましたが、2003年6月11日に審査を終了しましたので、ここにその結果をご報告します。

記

1. 申請者氏名 星川 秀利
2. 論文題名 自転車エルゴメータにおけるペダリング運動のバイオメカニクス的研究
3. 本論文の主旨

自転車エルゴメータは、運動負荷試験、リハビリテーション、および運動時の生理的応答の研究における負荷装置として良く用いられている。その理由としては、負荷の定量性とその操作・調節の簡便さ、ならびに負荷の再現性が高いこと等が挙げられる。そこで、これまでの研究では、これを用いて運動の結果として出力された生体の生理的応答、例えば、機械的効率、筋の最大パワー出力や呼吸循環系応答等に関心が寄せられてきた。一方、自転車エルゴメータの主運動であるペダリング動作が、下肢筋のどのような活動によって生じているのかといったバイオメカニクスの観点からの研究は少ない。

ところで、下肢で発揮された筋張力はペダルを介して自転車エルゴメータ装置のクランク、ギア、チェーン、そして負荷装置に伝達される。従って、ペダルはヒューマン・マシンのインターフェイスとして、その相互作用を知る上で重要な部分である。また、ペダル踏力をペダリング運動時の下肢の位置計測データとともに逆動力学的解析をすることで、関節モーメントを算出することができ、下肢筋で発揮された筋力を定量的に推定することが可能となる。そして、これらを詳細に分析することで、ペダリング運動のスキル評価や、サイクリストの好みの回転数とエネルギー的に経済的な回転数が一致しないという問題点の解明、またサドル高の低下に伴う下肢関節への力学的な負担の定量化等が可能になるとと思われる。

そこで本論文では、ペダル踏力および下肢関節の関節モーメントが計測可能な自転車エルゴメータ・システムを構築し、スキル評価、ペダル回転数の選択、およびサドル高の低下の影響に関する研究課題を遂行して、ペダリング運動におけるバイオメカニクスの解析の有効性を示すことを目的とした。

4. 本論文の概要

本論文は以下の5章から構成されている。

第1章では、ペダリング運動のスキル評価、ペダリング運動時の回転数の選択、およびペダリング運動時のサドル高の影響に関する従来の知見を概観している。そして、それぞれにおける先行研究の問題点を指摘するとともに、これまでの研究において十分に解明されていない点を浮きぼりにし、それに基づいて、未解明の問題を含めて4つの研究課題を設定した。

第2章では、本研究で用いるために構築した自転車エルゴメータ・システムについて、既

存の自転車エルゴメータの改良、ポジション可変システムの作製、踏力・角度データ計測システムの構築、および基礎データの収集とデータ処理方法について、それぞれ詳細に記述している。

第3章～第5章では、ペダリング運動のスキル評価（2つの研究課題）、ペダル回転数の選択、およびサドル高の選択に関する計4つの研究課題について、詳細に記述している。以下にその概要を記す。

【研究課題1】

研究課題1では、ペダリング運動のスキルが明らかに異なると思われる被験者群を対象として、これまでに報告されている力効率指数（IE；ペダル踏力に対するクランク接線方向成分力の割合）に加えて、下死点から上死点（up phase）までおよび左右それぞれの駆動時におけるIEを、3種類の運動強度で比較検討した。その結果、サイクリスト群と非サイクリスト群において、3種類の運動強度ともいずれのIEにも統計的な有意差は認められなかったが、ペダル踏力のピーク値はサイクリスト群でより低値を示していた。このことは、筋への負担を軽減させるものであり、そこにはup phase付近での脚の引き上げ動作や神経筋の調節能力の差が関与していると考えられた。以上のことから、ペダリング運動のスキルはIEにはなく、むしろペダル踏力の低さに反映されると結論された。

【研究課題2】

研究課題1において、IEが負荷強度に伴って変化することが明らかとなったため、研究課題2では、IEがこれまでの研究ではある限られた範囲の強度でしか検討されていないことに着目し、軽い負荷から疲労困憊に至る強度までの広範囲に亘る強度で検討を行った。その結果、総IEは、負荷の増大に伴って直線的に増加すること、down phaseでのIEは中強度まで増加すること、up phaseでのIEは負荷の増大に伴って直線的に増加することを明らかにした。また、最大負荷に対する50%強度で比較すると、総IEおよびup phaseでのIEは、サイクリスト群で高いことを示した。このことから、相対負荷時のIEを比較することによって、ペダリング運動のスキルを評価できる可能性も示唆された。

【研究課題3】

研究課題3では、長距離自転車選手が好んで用いるペダル回転数（90～110rpm）は、エネルギー効率的な回転数とは一致しないことから、筋への負担を軽減するためではないかとの仮説に基づき、サイクリストおよび非サイクリストを対象として、一定仕事率でのペダリング運動時における足・膝・股関節の平均モーメントを算出し、回転数の影響を検討した。その結果、膝および股関節の平均伸展トルクは回転数の増大に伴って減少し、サイクリスト群ではいずれも90rpmで最小値を示すことを明らかにした。これらのことから、サイクリストは高ペダル回転数を用いることで、関節トルクを最小にし筋疲労を軽減させている可能性が示唆された。一方、好みの回転数が低い非サイクリストでは、90rpm以上の回転数を用いても筋の負担が軽減できないことも示され、それゆえ、神経筋調節能やペダリングのスキルが、好みのペダル回転数に影響を及ぼしている可能性が考えられた。

【研究課題4】

研究課題4では、これまで未解明のサドル高の影響に関して、サドル高の低下がペダリング動作中の関節可動域を変化させ、膝関節への負担を増大させるとの仮説に基づき、一定仕

事率でのペダリング運動時の膝関節における関節モーメントおよび関節間に作用する力を算出し、膝関節に及ぼすサドル高の影響を検討した。その結果、膝関節でリンク間に作用している力及び伸展モーメントの最大値は、サドル高を低くしても変化しなかったが、これらの出現時の関節角度は有意に屈曲位に移動していることが明らかとなった。このことは、大腿脛骨および大腿膝蓋骨における関節面の接触力を増大させるものと考えられ、それゆえ、低いサドル高でのペダリング運動は、膝関節に過度の負担を及ぼし障害をもたらす可能性が示唆された。

第6章では、各研究課題によって得られた成果を相互に検討し、ペダリング運動時のスキル評価、一定仕事率でのペダリング運動時における回転数の選択、サドル高の選択について、それぞれ総括している。そのうえで、ペダリング運動のスキルをより良く反映する基準を精査することの必要性、ペダリング運動の力・エネルギー伝達経路の中でどこを捉えることがスキルをより良く反映するかの検討、好みの回転数を決定するその他の要因の検討、さらには、安全性を考慮した「健康づくりのための乗車姿勢」の検討など、今後さらに検討すべき課題について言及している。

5. 本論文の評価

本論文における主な知見は、ペダリング運動のスキルをIEによって評価する場合には、少なくとも最大負荷に対する相対負荷で比較することが必要であること、ペダリング運動のスキルは、IEよりもむしろ低い踏力およびそれに対応するup phaseでの負の踏力の減少として反映されること、サイクリストは90~110rpmの回転数を用いることで、関節トルクを最小にし筋疲労を軽減させている可能性があること、サドル高が低い状態でのペダリング運動は、大腿脛骨および大腿膝蓋骨における関節面の接触力を増大させ、膝関節の障害をもたらす可能性があること、を示したことである。

以上のように、本論文は、新たに構築した自転車エルゴメータ・システムを用いて、ペダリング運動をバイオメカニクスの解析することで、ペダリング運動におけるスキル評価、自転車競技選手が好んで用いるペダル回転数、およびサドル高を低くした場合の影響に関する新たな知見を提示したという点で意義深い。そして、これらの成果は既に学術雑誌（バイオメカニズム学会誌、体力科学、機械学会論文集、等）に掲載され、関連する分野の研究者からも高い評価を得ている。

以上のように、本論文は、新たに構築した自転車エルゴメータ・システムの有用性と自転車ペダリング運動時のバイオメカニクスの解析の重要性を示唆するものであり、同時に、これまでの研究で不十分であったあるいは不明であった3つの課題に対して結論を導き出したものである。これらのことより、本論文は博士（人間科学）の学位論文として相応しいと判断した。

以上

星川 秀利氏 博士学位申請論文審査委員会

審査員(主査)	早稲田大学教授	博士(医学)東京医科大	村岡 功
(副査)	早稲田大学教授	教育学博士(東京大)	中村 好男
(副査)	早稲田大学教授	博士(工学)早稲田大	藤本 浩志