

氏名	たか いし てつ お 高 石 鉄 雄
学位(専攻分野)	博 士 (人間・環境学)
学位記番号	論 人 博 第 19 号
学位授与の日付	平成 18 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	自転車運動に対する身体適応および日常的自転車使用による健康づくり の可能性
論文調査委員	(主 査) 教 授 森 谷 敏 夫 教 授 津 田 謹 輔 教 授 小 田 伸 午 教 授 前 川 覚 助 教 授 林 達 也

### 論 文 内 容 の 要 旨

本学位申請論文は、最初に、「高強度自転車運動に対する身体適応」について応用生理学およびバイオメカニクスの立場から明らかにし、次に「日常生活強度における自転車運動の特徴とその問題点」について健康科学の立場から検討したものである。

自転車関連研究においては、自転車競技者達が実際にレースで使用するペダル回転数(90-10 rpm)と機械効率(仕事とエネルギー消費量との関係)から求めた至適ペダル回転数(70-80 rpm)との不一致の原因の解明が一つの大きな研究テーマであった。本論文ではまず、同テーマに対して従来とは異なる研究方法、すなわち筋電図による神経・筋疲労評価を用いてその原因の解明に取り組んだ。

第一段階として、神経・筋疲労の評価指標としての筋電図の有用性について明らかにするため、被験者に一定強度以上の運動強度で自転車運動を継続させ、その間の筋活動様式をワイヤー電極および表面電極を用いて検討した。その結果、自転車運動継続に伴う筋放電量の増加が表面筋電図について得られると同時に、ワイヤー電極による筋電図から、新たな運動単位の動員、更には既に動員されている運動単位の放電頻度増加が確認され、表面筋電図による神経・筋疲労評価が可能であることが確認された。また、複数の異なる負荷上昇率を用いて漸増自転車運動を実施した際の仕事率とエネルギー消費量および主働筋放電量との関係に関する実験では、神経・筋疲労の発生が、自転車の絶対的な負荷強度ではなく、被験者の代謝状態と関わっていることが明らかになった。

第二段階として、長距離自転車競技者と非自転車競技者に対して中等度以上(75~85%V<sub>O2</sub>max)の一定強度自転車運動を継続させ、その間のエネルギー消費量と主働筋神経・筋疲労との関係を求めた。その結果、同一仕事率における自転車運動であっても、ペダル回転数によって神経・筋疲労の進行の程度が異なることが明らかになった。また、被験者がその運動実施に際して好んで用いるペダル回転数は、エネルギー消費量を最小にするペダル回転数ではなく、神経・筋疲労が最小となるペダル回転数とほぼ一致することが明らかになった。更に、その神経・筋疲労最小ペダル回転数は、自転車競技経験を重ねるに従って高ペダル回転数域へと移行する可能性が示された。

次に、長距離自転車競技者と非自転車競技者とのペダリング技能の違いについて検討するため、仕事率一定条件下において、様々なペダル回転数における脚筋群の筋活動様式およびペダル踏力を両群間で比較した。その結果、非自転車競技者群では、ペダル回転数増加に伴う膝伸筋群の活動量増加を認めた。競技者群では、膝伸筋群の活動量増加は認められなかったが、ペダル回転数増加に伴う膝屈曲筋および股関節伸筋の放電量増加を認めた。これは、競技者が自転車運動に関わる筋活動をより多くの筋に分散させて特定の筋の疲労を回避させるようなペダリング技能、すなわち、ペダルの踏み下ろしだけでなくクランクを絶えず滑らかに回転させるためのペダリング技能を獲得していることを示唆するものである。この動作適応の可能性は、同一仕事率の自転車運動を同じペダル回転数で行った際のペダル踏力が、競技者群で有意に小さかったことによって裏付けられた。

次なる段階として、本研究では、筋疲労の背景となる血液循環動態に注目し、自転車運動中の作業筋の酸素利用動態と循環動態について近赤外分光法を用いて検討した。まず、一般成人男性に漸増自転車運動を行わせ、主働筋の筋酸素動態および血液量変動を近赤外分光法によって測定した。得られたデータを、それぞれの近赤外分光法データが採取されたクランク角度に従って再配置した結果、ペダルがクランク周りを一回転する間の作業筋の経時的な酸素利用動態と循環動態を世界で始めて明らかにすることができた。更に、この解析方法によって自転車運動では比較的低強度から主働筋への血流抑制が始まっていること、また、最大運動強度付近において作業筋への血液配分の低下が発生していることなどを明らかにした。

次に、自転車競技経験の異なる3群（長距離自転車競技者、トライアスリート、非自転車競技者）に80%V02max程度の自転車運動を様々なペダル回転数で行わせ、その間の筋酸素動態および血液量変動を比較した。その結果、長距離自転車競技者は、高ペダル回転数における高いヘモグロビン脱酸素化能を持ち、また、ペダルの踏み下ろしタイミングが高ペダル回転数域でも遅れないなど、生理的にも技能的にも自転車運動に適応していることが明らかになった。

本論文では更に、実践研究として日常的な自転車走行時の運動強度について明らかにするため、平地および坂道における自転車走行中のエネルギー消費量やペダル踏力、筋活動などを3段変速機付の軽快車と電動アシスト機能付自転車を使って測定した。その結果、有酸素運動としての負荷強度、あるいはペダリングに必要な筋力発揮の程度、いずれの面においても日常生活レベルでの自転車利用は強度的に体力維持に不十分であり、健康科学的な立場からは決して推奨されるものではないことが明らかになった。本論文では更に、運動強度に依存しない自転車の運動効果を模索するため、中高齢者に対してギア比の高い自転車を一定期間日常生活において使用させた。その結果、ギア比の高い自転車使用は、60歳代男女被験者の日常自転車走行中のペダル回転数を有意に増加させ、敏捷性を有意に改善した。この結果は、日常の自転車運動が、全身持久性向上や単なるエネルギー消費とは違った体力要素においても健康づくりにつながる可能性があることを示唆するものであった。

## 論文審査の結果の要旨

わが国における日常生活の機械化、省力化は、別名運動不足病とも言われる生活習慣病罹患者を増加させ、体力低位者を増加させる一因ともなっている。その治療・予防にとって日常生活における身体運動実施は不可欠とされ、大筋群を用いる自転車運動は、歩行に次いで手軽な健康づくり運動と考えられている。

本学位申請論文は、高強度自転車運動を長期にわたって実施している長距離自転車競技者が自転車運動に対してどのような身体適応を獲得しているかということについて、応用生理学およびバイオメカニクスの立場から検討し、また、比較的運動強度が低いと考えられる日常生活レベルでの自転車利用が、我々の身体にどのような影響を及ぼすのかということについて、様々なデータを基に健康科学の立場から検討を加えている。

筋電図による神経・筋疲労評価の妥当性確認実験は、自転車運動継続に伴う筋放電量の増加を表面筋電図で確認し、同時に、新たな運動単位の動員、更には既に動員されている運動単位の放電頻度増加が生じることを筋内埋入ワイヤー電極による筋電図により確認した。また、複数の異なる負荷上昇率による漸増自転車運動実験では、神経・筋疲労の発生が、自転車の絶対的な負荷強度ではなく、被験者の代謝状態と関わっていることを明らかにした。自転車運動時の筋活動をワイヤー電極で捉えた研究は過去に例が無く、これらの知見は、*European Journal of Applied Physiology* (1992) および *Journal of Applied Physiology* (1993) に掲載され、筋電図による神経・筋疲労評価の妥当性を示した研究として当該分野の論文にも多数引用されている。

長距離自転車競技者と非自転車競技者が中・高強度の自転車運動を継続した際の主働筋の神経・筋疲労を扱った2つの実験では、1) 同一仕事率における自転車運動であっても、ペダル回転数によって神経・筋疲労の進行の程度が異なること、2) その運動実施に際して被験者が好んで用いるペダル回転数は、エネルギー消費量を最小にするペダル回転数ではなく、神経・筋疲労が最小となるペダル回転数とほぼ一致すること、更に3) その神経・筋疲労最小ペダル回転数は、自転車競技経験を重ねるに従って高ペダル回転数域へと移行する可能性が高いことなどを明らかにした。これらの結果は *European Journal of Applied Physiology* (1994)、*Medicine and Science in Sports and Exercise* (1996) に掲載済みであり、ペダル回転数によって運動継続時間も影響を受けることを示唆するこれらの研究結果は、自転車競技関連論文のみならず、リハビリ

リテーション関連雑誌においてもすでに多数の引用がある。

長距離自転車競技者と非自転車競技者とのペダリング技能の違いについて検討した実験においては、非自転車競技者群について、ペダル回転数増加に伴う膝伸展筋群の活動量増加を認めた。一方、競技者群では、膝伸展筋群の活動量増加は認められなかったが、ペダル回転数の増加に伴う膝屈曲筋および股関節伸展筋の放電量増加を認めた。これらの結果は、自転車運動を高強度で継続的に実施する中で、人は、自転車運動に関わる筋活動をより多くの筋に分散させて特定の筋の疲労を回避させるような技能を獲得することを示すものである。このような動作適応は、同一仕事率の自転車運動を同じペダル回転数で行った際のペダル踏力が競技者群で有意に小さかったことによっても裏付けられた。これらの新知見は、アメリカスポーツ医学会の機関紙 *Medicine and Science in Sports and Exercise* (1998) に掲載され、非常に高い評価を受けている。

自転車運動中の作業筋の酸素利用動態と循環動態について近赤外分光法を用いて検討した1つ目の実験においては、自転車運動中に得られた近赤外分光法データを、それぞれが採取されたクランク角度に従って再配置し、ペダルがクランク周りを一回転する間の作業筋の経時的な酸素利用動態と循環動態を世界で始めて明らかにした。この独創的解析方法は、自転車運動時の作業筋のダイナミックな酸素利用動態および循環動態の解明に大きく貢献した。自転車競技経験の異なる被験者群が80%V<sub>O2</sub>max 程度の自転車運動を様々なペダル回転数で実施した際の筋酸素動態および血液量変動を比較した2つ目の実験では、長距離自転車競技者は、高ペダル回転数における高いヘモグロビン脱酸素化能を持ち、また、ペダルの踏み下ろしタイミングが高ペダル回転数においても遅れないなど、生理的にも技能的にも自転車運動に適応していることが明らかになった。これら2編の研究結果は *Medicine and Science in Sports and Exercise* (2002a ; 2002b) に掲載され、特に、近赤外分光法による新たな解析方法を提示した前者の論文は、Guest Editorial によるコメントが1ページを使って掲載され、非侵襲的な循環動態評価の方法として非常に高く評価されている。

更に、実践研究として日常的な自転車走行時の運動強度に関わる数々の実験も行ない、1)、様々な場面におけるエネルギー消費量やペダル踏力、筋活動などの詳細な検討により、日常生活レベルでの自転車利用は運動強度的にも不十分であり、健康科学的な立場からは決して推奨されるものではないこと、2) 中高齢者を、従来よりも高いペダル回転数でこがなければ十分な速度が出ない自転車に乗せるだけで、日常的な歩行に比べて有意に速い左右の足の踏み替え動作を誘発し、敏捷性改善につながることを示した。この結果は、自転車運動が、全身持久力向上あるいは、単なるエネルギー消費とは違った体力要素においても健康づくりにつながる可能性があることを示唆するものであり、今まで見落とされていた自転車運動の特性を再認識させる興味深いものである。

以上、本研究は、人間がどのような基本的な機能を持つかを解明し、人間が今までの文明の中で作り出した環境とどのように関わっていくかを究明する共生人間学専攻の目的にふさわしい内容を備えたものと言える。

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18年1月10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。