

## 異なる負荷を伴ったペダリング運動時の下肢筋群の活動様式

### Characteristics of muscle activity on lower limb muscles during a pedaling exercise consisting of different loads

田 中 重 陽\*, 角 田 直 也\*\*

Shigeharu TANAKA\* and Naoya TSUNODA\*\*

#### ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate characteristics of muscle activity on lower limb muscles during a pedaling exercise consisting of different loads. The subjects consisted of 24 male collegiate athletes. The anaerobic power generation capacity was measured by a cycling ergometer with a custom made measurement-analysis system. All of the subjects performed the exercise for ten seconds with maximal effort intermitted between three-step loads. The loads were 5.0%kp, 7.5%kp and 1.0%kp to body weight. The muscle activities of the lower limbs were observed by surface electromyography (EMG) methods. The muscle activities were used to evaluate integrated EMG (iEMG) and %iEMG from initial pedaling to top speed pedaling.

The iEMG during pedaling did not change due to different loads. The power per iEMG ratio in rectus femoris, vastus lateralis, biceps femoris and tibialis anterior muscles did change between the different loads. However, muscle activity level in initial and top speed pedaling showed no significant difference among the three trials with the different loads. The biceps femoris and gastrocnemius muscles during top speed pedaling showed higher activity levels than that of initial pedaling. From these results, it can be suggested that lower muscles activity pattern depends on each muscle's specific function. Moreover, muscle activity levels were affected by crank speed more than the load in maximal effort pedaling.

*Key words; Anaerobic power, Pedaling, Muscle activity.*

#### I. は じ め に

ペダリング運動は足関節の底屈・背屈、膝関節

及び股関節の伸展・屈曲運動を伴った多関節的な運動であり、下肢筋群の筋形態や筋機能特性が大きく関与するものと考えられる。これまでに、大

\* 国士舘大学大学院スポーツ・システム研究科 (Assistant of Graduate school of Sports System, Kokushikan University)

\*\* 国士舘大学体育学部身体運動学研究室 (Lab. of Biodynamics and Human Performance, Faculty of Physical Education, Kokushikan University)

腿部の推定筋量<sup>6) 13)</sup>や羽状筋の筋形状<sup>15)</sup>といった筋形態特性や下肢筋力<sup>1) 10)</sup>といった筋機能特性が、ペダリング運動により発揮された無酸素性パワーに大きく影響を及ぼす因子であることが報告されている。

一方、ペダリング運動中の筋活動様相について検討された報告<sup>3) 7) 11) 12)</sup>では、主動的に活動する大腿部の筋群に着目したものや、筋活動量から負荷の増加に伴う疲労の観点について検討されたものがある。また、複数の負荷条件の下、クランク角度に伴う各筋群の活動パターン(タイミング)を検討<sup>3) 11) 12) 14)</sup>したものや、運動姿勢<sup>3) 5)</sup>や測定環境の違いによる下肢筋群の活動<sup>4)</sup>について検討されたものがある。これらの報告の多くは、設定された負荷重量に対して一定のクランク速度で運動するといった手法が用いられている。しかし、全力ペダリング運動時の下肢筋群の活動様相に関する報告<sup>5) 6)</sup>はほとんどみられず、それらが外部に出力されるパワーにどのように関与するのかについて、また、それらが負荷重量やクランクの回転速度によりどのように変化するのかは十分な知見が得られていない。

そこで本研究では、異なる負荷が設定された全力でのペダリング運動における下肢筋群の活動様相を明らかにすることを目的とした。

## II. 研究 方 法

### 1. 被 検 者

被検者は体育系男子大学生24名とした。被検者の年齢、身長及び体重はそれぞれ $20.1 \pm 1.5$ 歳、 $175.4 \pm 6.5$ cm、 $83.6 \pm 17.8$ kgであった。本研究は国士舘大学体育学部研究倫理審査委員会の承認を得て実施し、全被検者には研究の目的及び方法について十分な説明をし、測定への参加の同意を得た。

### 2. 無酸素性パワー及びクランク角度の測定

無酸素性パワーの測定は独自に改良したPower

Max VII (COMBI社製)を用いて実施した。全被検者に異なる作業負荷を伴った全力によるペダリングを3回行わせた。負荷は、第1試技が体重の5%kp (1<sup>st</sup> load)、第2試技が体重の7.5%kp (2<sup>nd</sup> load)、第3試技が体重の10%kp (3<sup>rd</sup> load)にそれぞれ設定した。測定開始前には十分なウォーミングアップを実施させ、また、各試技の間には十分な休息を取らせ疲労の影響がでないよう配慮した。ペダリング中の運動姿勢は座位とし、あらかじめサドルの高さを立位姿勢時の大転子の高さに調整し、つま先はトークリップによってペダルに固定した。測定時には、Power Max VIIとPCをケーブルで接続し、データ収集プログラムソフトを用いて回転数(rpm)を記録した。設定した負荷と得られた回転数から、中村ら<sup>8)</sup>のパワー算出式を参考に各試技の無酸素性パワーを求めた。さらに、ピークパワー到達時間を求め、運動開始からピークパワー到達時点までのパワーの積分値(Impulse of power)と、単位時間あたりの積分値を平均パワー(Mean power)として算出した。

クランク角度の測定は、独自に改良したPower Max VIIを用いて実施した(Fig.1)。クランク角度はギアに装備したプラスチックギアから、エンコーダーの出力をA/Dインターフェースを介してPC(1/1000秒)に取り込んだ。本測定システムでは、クランク角度をペダル位置の最上地点が0、360deg、最下地点を180degと定義した。

### 3. 下肢筋群の筋活動の測定

ペダリング運動時の筋活動は、無線型筋電計(日本光電社製)を用いて、表面電極誘導法により測定した。筋活動の測定と無酸素性パワーの測定は同期して実施した。被験筋は、右脚大腿部の大腿直筋(RF)、外側広筋(VL)、内側広筋(VM)及び大腿二頭筋長頭(BF)、右脚下腿部の前脛骨筋(TA)、腓腹筋内側頭(GS)とし、電極添付位置は各筋の筋腹中央とした。コードレス電極添付前には抵抗値を除去するために剃毛処

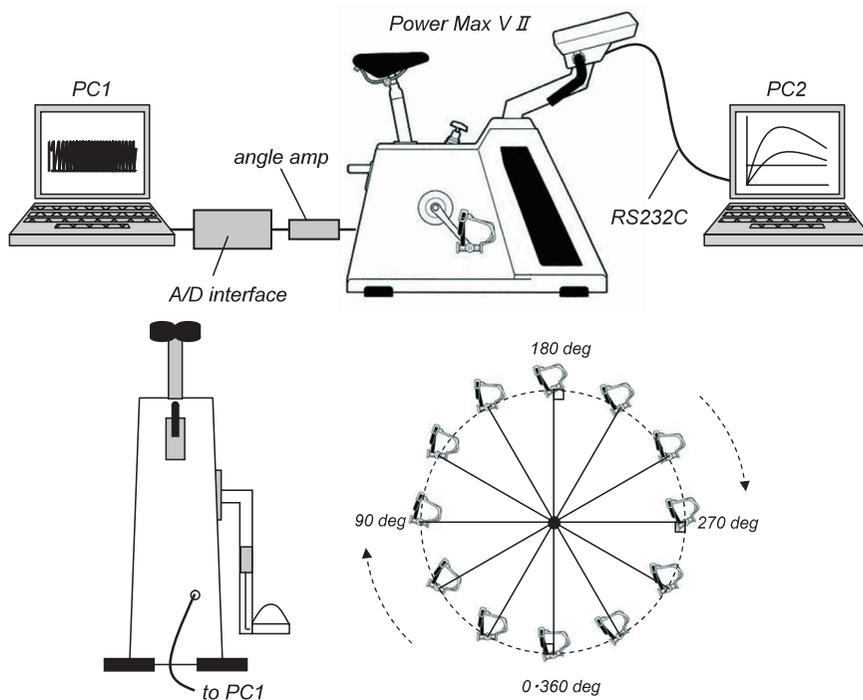


Fig.1. Schematic drawing power and crank angle measurement system.

理を施した。得られた筋電図データを基に、各試技の運動開始からピークパワー到達時点までの活動量を積分値として算出した (Fig.2)。また、この積分値に対するパワーの積分値の比 (Impulse of power/iEMG) を算出した。さらに、第1回転及び最高速度到達時のペダリング運動の筋活動量を、クランク角度30deg毎にあらかじめ測定した最大努力による筋力発揮時の活動量に対する割合 (%iEMG) として算出した。

#### 4. 統計処理

本研究において測定した項目については、全被検者の平均値及び標準偏差値で示した。ピー

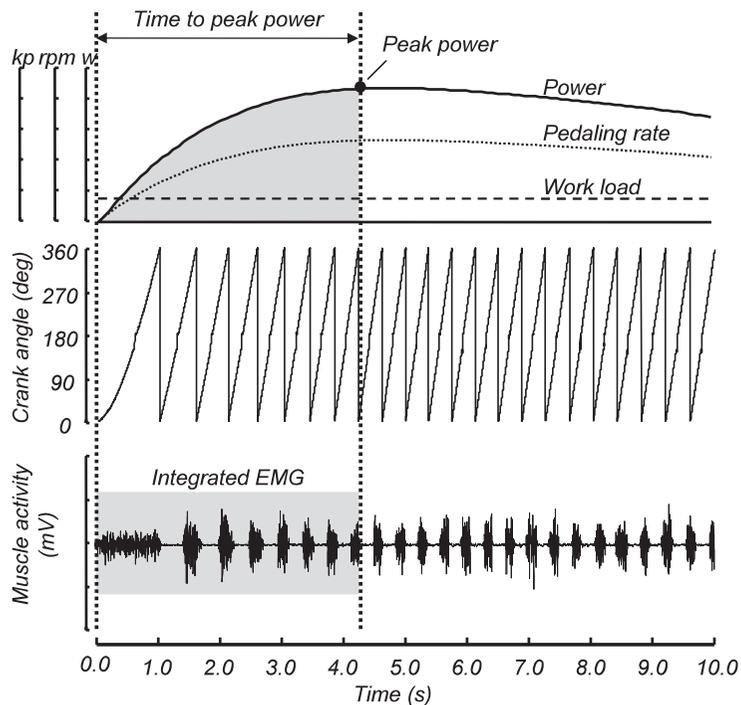


Fig.2. Analysis of power and muscle activity.

クパワー、ピークパワー到達時間、パワー積分値及び平均パワーについては分散分析を用いて試技間の差の検定を行った。また、各試技における各筋群の活動量の比や割合については、2元配置の分散分析を行った。いずれの分散分析においても有意な差が認められた場合にはPost-hoc test (Bonferroni法)を実施した。有意水準は5%未満とした。

### Ⅲ. 結 果

Table1は、異なる負荷を伴ったベダリング運動時の無酸素性パワー発揮特性について示したものである。ピークパワー到達時間は負荷の増大に伴う著しい変化は認められず、各試技ともほぼ同値であった。ピークパワーは1<sup>st</sup> loadから3<sup>rd</sup> loadにかけ高い値を示し、全ての試技間に有意な差が認められた。また、Impulse of powerは負荷の増加に伴い高い値を示す傾向にあり、1<sup>st</sup> loadと2<sup>nd</sup> load及び3<sup>rd</sup> load間に有意な差が認められた。平均パワーについては、全ての試技間に著しい差が確認された。

ベダリング運動時の下肢筋群の活動量をFig.3に示した。活動量及び単位時間あたりの活動量は、

全ての筋において負荷重量に伴う著しい変化は認められなかった。比較的活動量が高い値を示したのは、内側広筋及び外側広筋であった。次に、Impulse of power/iEMGは、大腿部の大腿直筋、外側広筋及び大腿二頭筋、下腿部の前脛骨筋において、負荷重量の増加に伴う著しい差が確認された (Fig.4)。

MVCに対する30deg毎の筋活動量の割合は、第1回転目では負荷の増加に伴う著しい変化は認められなかった。一方、ピークパワー到達時のベダリングにおいては、内側広筋の270deg、外側広筋の60degと270deg、前脛骨筋及び腓腹筋の360deg局面において負荷重量の変化に伴う差が確認された。また、ピークパワー到達時のベダリングの値は、第1回転目の値に対して各筋群ともに高い割合を示す傾向にあった (Fig.5)。

### Ⅳ. 考 察

ベダリング運動は、股関節伸展・屈曲、膝関節伸展・屈曲及び足関節底屈・背屈運動を伴う多関節運動であり、EMG法を用いてベダリング運動時の下肢筋群の活動動態を観察した報告が幾つかみられる。例えば複数の負荷条件の下、クランク

Table 1. Comparisons of power generation capacities due to three loads.

Parameters	1 <sup>st</sup> load	2 <sup>nd</sup> load	3 <sup>rd</sup> load
Time to peak power (s)	4.5±0.6	4.6±0.7	4.6±1.0
Peak power (w)	636.4±84.3	834.7±107.1	903.9±143.4
Impulse of power (w)	21245.1±3995.0	27107.0±5448.9	29838.4±5683.3
Mean power (w/s)	4743.2±610.4	5946.6±809.9	6568.3±1123.3

Values are mean ± S.D. \* :p<0.05

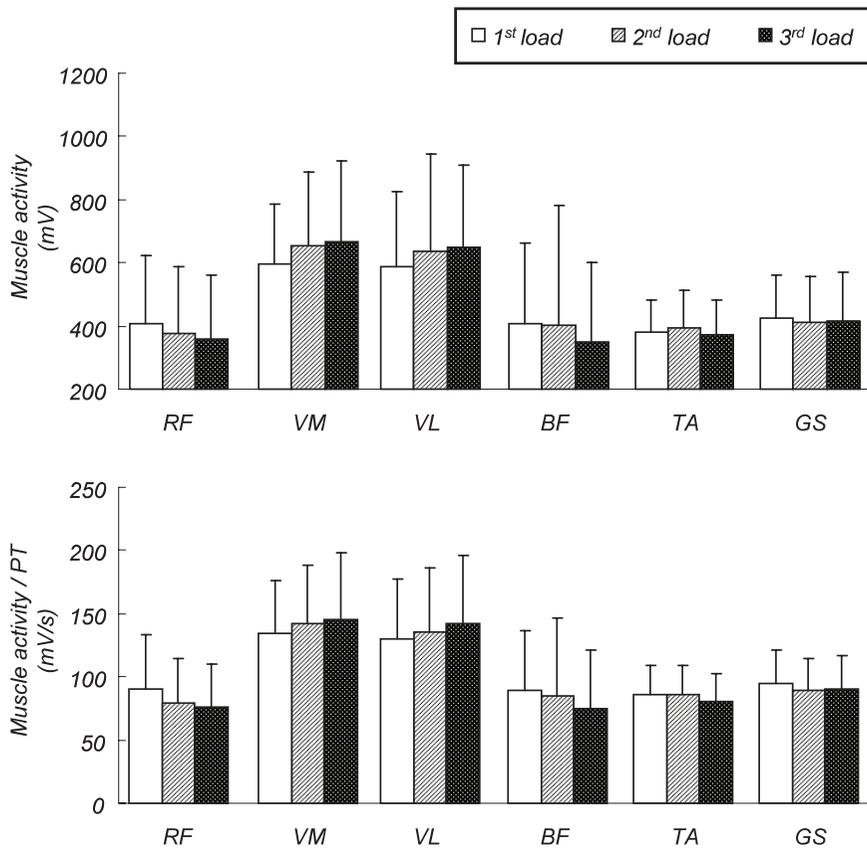


Fig.3. Comparisons of muscle activity among the three loads.

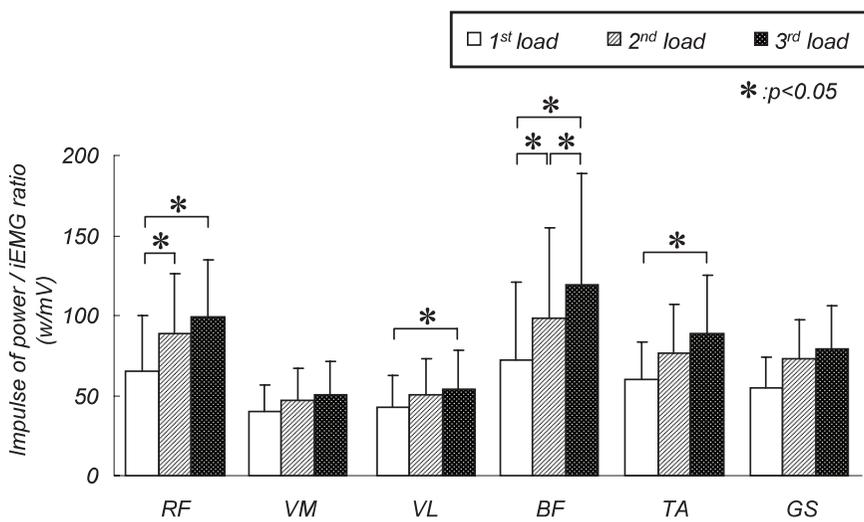


Fig.4. Comparisons of impulse of power to iEMG ratio among the three loads.

□ :1<sup>st</sup> load   ▨ :2<sup>nd</sup> load   ▩ :3<sup>rd</sup> load   \* : $p < 0.05$

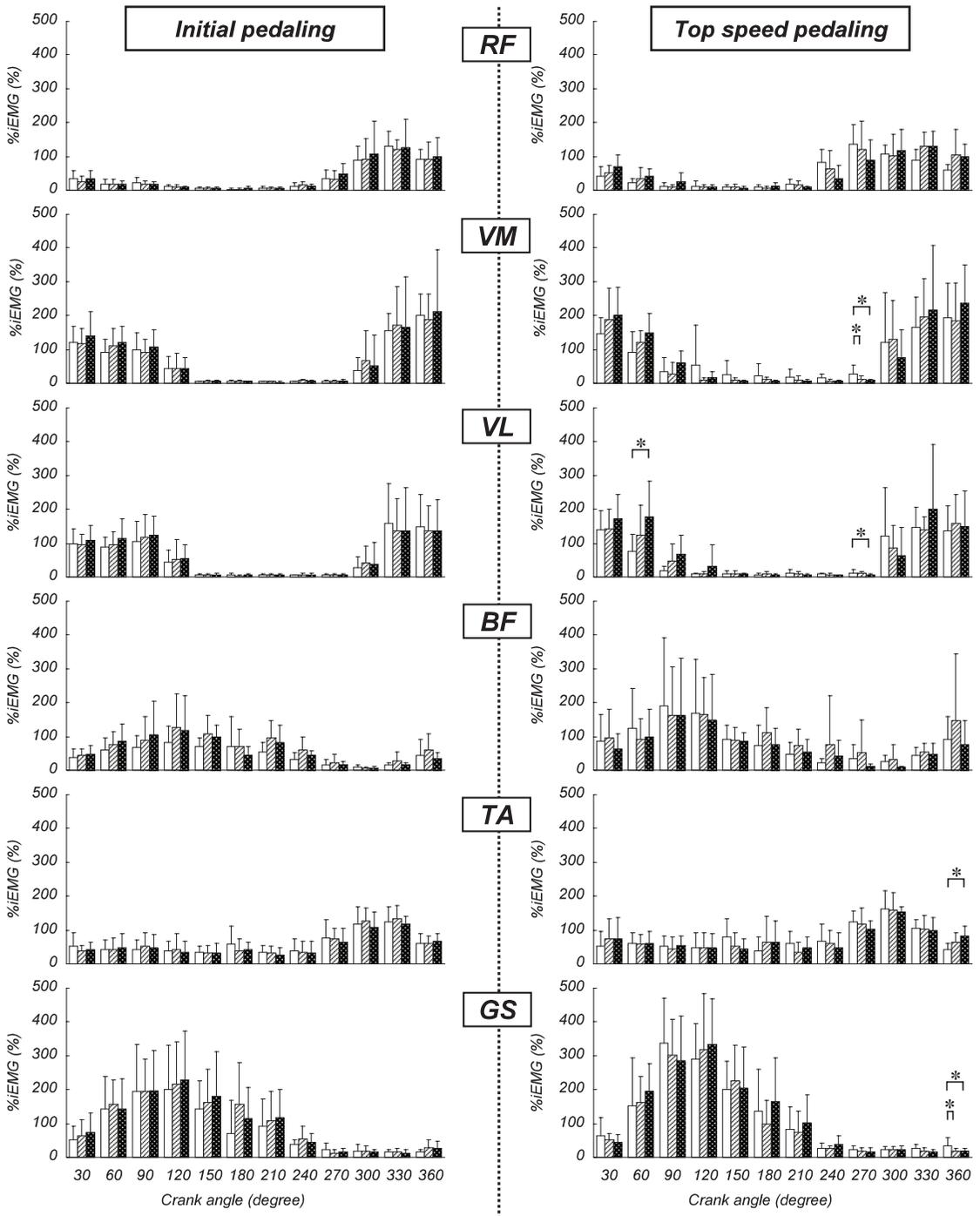


Fig.5. Comparisons of %iEMG among the three loads in initial and top speed pedaling.

角度に伴う各筋群の活動パターン（タイミング）を検討<sup>3) 11) 12) 14)</sup>したものや、運動姿勢<sup>3)</sup>や測定環境の違いによる下肢筋群の活動<sup>4)</sup>について検討されたものがある。これらの報告では、ペダリング時の筋活動量をRMS（Root Mean Square）値、RFEMG（Rectified Filtered Electromyography）値及びiEMG（Integrated Electromyography）値を用いて評価している。一方、先行研究<sup>9)</sup>においてペダリング運動時の無酸素性パワーの評価には運動開始からピークパワーに達するまでの過程を考慮する必要性が指摘されている。そこで本研究では、運動開始からピークパワー到達時点までと、運動開始の第1回転目と各試技の最高速度到達時（ピークパワー発揮時）のペダリングに着目して、実際に筋の活動量を捉えるために、下肢筋群の活動動態を記録し量的（iEMG）な観点から評価した。

ペダリング運動における下肢筋群の活動量及び単位時間当たりの活動量は、負荷重量の増加に伴う著しい変化は認められなかった。比較的活動量が大きい値を示したのは、内側広筋及び外側広筋であった。筋によっては大きさや筋線維組成が異なるために直接的な比較は難しいものの、各試技の内側広筋及び外側広筋の活動量は、全ての筋の活動量の総和に対して約42%~47%を占めていることから、内側広筋及び外側広筋が主動的に活動する膝関節伸展運動が全力でのペダリング運動において貢献度が高いものと予想される。岩下ら<sup>4)</sup>は、負荷重量を0.5kpから2.0kpまで増加させた際の下肢筋群の活動量について検討したところ、負荷重量に伴い下肢筋群の活動量が増加したことを報告している。本研究では負荷重量の設定を各被検者の体重の5%kp、7.5%kp及び10%kpとしており、実際の負荷値に換算するとそれぞれ $3.6 \pm 0.5$ kp、 $5.4 \pm 0.7$ kp、 $7.2 \pm 0.9$ kpに相当する。また、岩下ら<sup>4)</sup>は一般人を対象にリハビリ的な観点で検討しているため、回転速度を40rpm及び60rpmと制限しているが、本研究ではスポーツ選手を対象に全力でのペダリングを行わせている。

負荷重量に伴い下肢筋群の活動量が増加するという先行研究<sup>4)</sup>の結果と、本研究の結果は異なるものであったが、その要因として、対象者や運動条件が異なったことが影響したものと考えられる。先行研究<sup>4)</sup>の結果と本研究の結果を合わせて考えるならば、負荷重量に伴い下肢筋群の活動量は増加するものの、全力ペダリング運動においては、ある一定の負荷重量以降は下肢筋群の活動量そのものに大きな変化は認められないものと考えられる。また、Samozino P. et. al<sup>14)</sup>は、ペダリング運動時の大臀筋、大腿直筋、外側広筋及び大腿二頭筋の筋活動水準について調べたところ、回転速度の大小に関わらずほぼ同程度であることを報告している。従って、全力ペダリング運動時の下肢筋群の活動量そのものは、負荷重量や回転速度の変化に伴う著しい変化は認められないものと推察された。

三田村ら<sup>7)</sup>は全力ペダリングを間欠的に行わせ、得られた筋活動量とパワー値からEMG/Power比を算出し、疲労の影響について検討している。その結果、外側広筋は低強度の運動に対して高強度の運動では有意に高い値を示し、大腿直筋では運動強度の違いによる著しい差は認められなかったことを報告している。即ち、間欠的なペダリング運動による疲労の影響は、運動強度や筋によって異なることを意味するものである。本研究では、Impulse of power/iEMG比を算出し、この比をパワー発揮の効率として捉えると、股関節及び膝関節にまたがる二関節筋である大腿直筋と大腿二頭筋に加え下腿の筋群である前脛骨筋及び腓腹筋のImpulse of power/iEMG比は、外側広筋及び内側広筋のそれよりも全ての試技において高い値を示す傾向にあった。また、Impulse of power/iEMG比を試技間で比較したところ、全ての筋群において試技に伴って高値を示す傾向にあり、大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋及び前脛骨筋では、試技間に有意な差が認められた。一方、内側広筋及び腓腹筋については試技間に著しい差は認められなかった。本研究ではImpulse of powerは試

技に伴い高い値を示したのに対して、各筋群の筋活動量は試技に伴う大きな変化は認められていない。従って、下肢筋群の活動量は無酸素性パワー程、負荷重量の影響を受けないものと考えられ、さらに、ペダリング運動において比較的大きな活動量を示した外側広筋や内側広筋の Impulse of power/iEMG 比は、他の筋群のそれよりも低値を示すことが明らかになった。以上のことから、負荷重量に伴い Impulse of power/iEMG 比が著しく変化する筋とそうでない筋が存在することが明らかになった。

また、%iEMG は全ての筋群において第 1 回転目に対して最高速度到達時のペダリングの方が比較的高く、クランクの回転速度が高くなるに従い下肢筋群の活動水準が高くなるものと考えられる。一方、負荷重量に伴う活動レベルの有意な差は、第 1 回転目では認められなかったが、最高速度到達時のペダリングにおいては、内側広筋の 270deg、外側広筋の 60deg 及び 270deg、前脛骨筋及び腓腹筋の 360deg において認められた。しかし、全筋群において一様な傾向は認められず、低速回転時及び高速回転時においてもさほど負荷重量の影響は無いものと考えられた。大腿二頭筋及び腓腹筋については、ダウンストローク局面 (30deg から 180deg) において大きな活動水準であり、大腿二頭筋では 200% 近く、腓腹筋では 300% 以上の値を示す局面も存在していた。船渡<sup>2)</sup> は、ペダリング運動において大腿二頭筋が股関節伸展トルクに作用することを指摘している。腓腹筋は足関節の底屈運動時に作用する筋であり、ダウンストローク局面において主動的に作用する筋である。従ってペダリング運動においてダウンストローク局面における股関節伸展運動及び足関節底屈運動は、作用する筋の活動水準が高いことが明らかになった。

また、特徴的な傾向を示した部位として、大腿四頭筋を構成する内側広筋及び外側広筋は、その活動パターンや活動水準が極めて類似しており、動作への関与度が負荷重量に関わらず同等である

ことが考えられる。また、大腿四頭筋の内、二関節にまたがる大腿直筋は、股関節の屈曲動作による活動が先行し、その後、膝関節伸展動作に伴い内側広筋及び外側広筋共に膝関節伸展動作に作用するものと考えられた。さらに、大腿直筋は第 1 回転目ではペダルをより踏込んだ 300deg から 360deg の角度間で 100% 以上の値を示したのに対して、最高速度到達時のペダリングにおいては、その活動水準に大きな変化はみられないものの、100% 以上の値を示したのが 240deg から 360deg の角度間であり、高い水準での活動範囲が異なっていた。Samozino P. et. al<sup>14)</sup> は大臀筋を対象に、クランクの回転速度に伴う筋群の活動水準が 20% 以上である角度局面が、回転速度に伴いアップストロークを含む局面へと移行し、その結果、発揮された力が負の仕事として作用してしまうことを指摘している。本研究では、大腿直筋において活動水準の高い局面がクランク速度に伴って、よりペダルの最下位方向へと移行しており、アップストロークにおいて高い水準で活動していたことが示唆された。以上のことから、ペダリング運動における下肢筋群の活動に応じたパワー発揮の効率性は、負荷重量に伴い変化する筋とそうでない筋が存在すること、また下肢筋群の活動様式は筋によって異なり、負荷重量の影響よりもクランクの回転速度に影響を受けるものと推察された。

#### IV. ま と め

本研究では、異なる負荷が設定された全力でのペダリング運動における下肢筋群の活動様式を明らかにすることを目的とした。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) ペダリング運動時の下肢筋群の活動量は、負荷重量 (体重の 5 %kp から 10%kp) に伴う著しい変化は認められなかった。
- 2) 大腿部の外側広筋、内側広筋及び大腿二頭筋、下腿部の前脛骨筋の活動量に対する Impulse

of power比が負荷重量に伴い著しく大きくなることが明らかになった。

- 3) ペダリング運動時の下肢筋群の活動水準は、負荷重量に伴う著しい変化はさほどみられなかった。また、最高速度到達時のペダリングにおける大腿二頭筋及び腓腹筋の活動水準は、第1回転時よりも高い傾向にあった。

以上の結果から、ペダリング運動における下肢筋群の活動量に応じたパワー発揮の効率は、負荷重量に伴い変化する筋とそうでない筋が存在すること、また下肢筋群の活動様式は筋によって異なり、負荷重量の影響よりもクランクの回転速度に影響を受けるものと推察された。

本研究は、国土館大学体育学部附属体育研究所の2010年度研究助成によって実施した。

#### 参考文献

- 1) 会田宏, 高松薫, 杉森弘幸: 向井俊哉自転車エルゴメーターの全力ペダリングにおいて発揮される無氣的パワーの特性, 筑波大学体育科学系紀要, **15**: 191-197, 1992.
- 2) 船渡和男: クランキングによる自転車ペダルへのパワー発揮, *J. J. Sports Sci.* **11**, **3**: 194-199, 1992.
- 3) Hug F., Dorel S.: Electromyographic analysis of pedaling., *J. Electromyogr kinesiol.* **19**: 182-198, 2009.
- 4) 岩下篤司, 市橋則明, 池添冬芽, 大畑光司: ペダリング動作における下肢筋の筋電図学的解析, *理学療法学*, **31**, **2**: 135-142, 2004.
- 5) 木越清信, 尾縣貢, 田内健二, 高本恵美, 大山下圭悟: 短時間の全力自転車ペダリング運動における座位姿勢の相違が筋活動および最大パワーに及ぼす影響, *体力科学*, **52**: 167-178, 2003.
- 6) Martin J. M., Wadner B. M., Coyle E. F.: Inertial-load method determines maximal cycling power in a single exercise bout., *Med. Sci. Sports Exerc.* **29**, **11**: 1505-1512, 1997.
- 7) 三田村将史, 遠藤隆志, 高橋麗, 小宮山伴与志: 異なる負荷での反復的な最大ペダリング時の運動誘発電位の変化, *体力科学*, **52**: 555-564, 2003.
- 8) 中村好男, 武藤芳照, 宮下充正: 最大無酸素パワーの自転車エルゴメーターによる測定法, *Jap. J. Sports Sci.* **3**: 834-839, 1984.
- 9) 中村好男: 自転車エルゴメーターによる最大パワー評価の問題点, *早稲田大学人間科学研究*, **1**, **1**: 105-113, 1988.
- 10) 尾縣貢, 高本恵美, 大山下圭悟: 下肢関節の等速性筋力と Wingate test により測定された無酸素性パワーとの関係, *体力科学*, **49**: 523-526, 2000.
- 11) Rouffet D. M., Hautier C. A.: EMG normalization to study muscle activation in cycling., *J. Electromyogr kinesiol.* **18**, **5**: 866-878, 2008.
- 12) Rouffet D. M., Mornieux G., Zameziati K., Belli A., Hautier C. A.: Timing of muscle activation of the lower limbs can be modulated to maintain a constant pedaling cadence., *J. Electromyogr kinesiol.* **19**, **6**: 1100-1107, 2009.
- 13) 立正伸, 牛山潤一, 宮谷昌枝, 久野譜也, 金久博昭, 福永哲夫: 膝関節伸展トルクおよび脚伸展パワーにおける年齢差および性差, *体力科学*, **52**: 141-148, 2003.
- 14) Samozino P., Horvais N., Hintzy F.: Why does power output decrease at high pedaling rates during sprint cycling?: *Med. Sci. Sports Exerc.* **39**, **4**: 680-687, 2007.
- 15) 角田直也, 蒔野豊, 須藤明治: 外側広筋の等尺性随意収縮に伴う形状の変化と等速性筋力及び最大無酸素性パワー, *国土館大学体育学部附属体育研究所報*, **19**: 79-85, 2000.