

ペダリング運動時の無酸素性パワーとクランク力発揮特性

Characteristics of anaerobic power and crank force during a pedaling exercise

田中 重陽, 角田 直也

Shigeharu TANAKA and Naoya TSUNODA

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effects of crank force to the generation of anaerobic power and characteristics of crank force in a pedaling exercise created by different loads. The subjects were twenty collegiate male athletes studying physical education. The anaerobic power generation capacity was obtained by a cycling ergometer with an analysis program. Subjects performed the exercise for ten seconds with maximal effort intermitted between three-step loads, and they were requested to perform warm-ups and take two minutes rest. The first load was 4.0kp, the second load was 6.0kp, and the third load was 8.0kp. The crank force and crank angle for fifth rotation was measured by a cycling ergometer with a custom-made measurement system. In addition, anaerobic power and crank force impulses were calculated for each pedaling exercise. The impulses of anaerobic power in the second and third loads were significantly higher than those of first load. In all pedaling exercises, the impulse of crank force was closely related to that of anaerobic power. Peak crank force on the first and second loads showed lowering values from first pedaling to fifth pedaling. On the other hand, peak crank force of the third load had not changed due to pedaling times. The peak pedal force crank angle differed by load. In this study, significant correlation between crank force and anaerobic power during pedaling exercises was considered to have been obtained. In addition, the crank force and crank angle were affected by increases in load.

Key words; anaerobic power, pedaling exercise, crank force

I. 研究目的

自転車エルゴメーターによって得られる無酸素性パワーは作業負荷（力）と回転数（速度）の積であらわされる。近年、自転車エルゴメーターを用いた無酸素性パワーの測定は、簡便かつ有効な測定法として多用されている。ペダリング運動において、高いパワーを発揮するためには、運動開始からクランクを回転させるための力が必要とされる。下肢で生み出した力をペダルに伝達したとしても、それらの力がクランクを回転させるための力、即ちクランクに対して垂直の力として発揮されなければ十分な回転力は得られず、結果として大きなパワー発揮には繋がらない。先行研究においてペダリング運動時のクランク力について検討されたものには、ペダリング頻度¹²⁾ やクランク角度^{1) 3) 14)} に伴うクランク力の変化についての報告がなされている。また、ペダル踏力に対するクランク力の比を力効率指数として検討した報告^{1) 3) 4) 8) 12)} も幾つかみられる。例えば、日常よりペダリング運動を行っている男性を対象に、ペダルに作用した力とクランクに作用した力の比 (Force effectiveness index) について異なる運動強度での比較を行った報告¹²⁾ によれば、低い運動強度においてペダルに作用する力をクランクに伝達することは難しいことが指摘されている。また、Coyle et al¹⁾ は持続的なペダリング運動において、鍛錬されたエリート選手は若干競技レベルの劣る対象者に比べ、ダウンストローク局面でクランクを回転させる方向への力が大きいことを報告している。しかしながら、これらの報告では数名のサイクリストや経験者を対象としたものが多く、ある程度ペダリング技術に長けたものの特長として考えられる。他の競技スポーツ選手を対象にペダリング運動時のクランク力について検討されたものは比較的少なく、異なる負荷条件下での全力ペダリング運動時のクランク力発揮特性について検討されたものはみあたらない。クランク力がペダリング頻度やクランク角度に伴い変化す

ることはこれまでの報告からも予想されるが、負荷強度の違いによってそれらの変化度合いや外部に出力される無酸素性パワーへの影響度は異なるのであろうか。異なる負荷条件下での全力ペダリング運動における、クランク力やクランク回転の運動特性について検討することは、無酸素性パワー発揮能力を高めるための要因を探る手がかりとして有効であるとともに、多用される自転車エルゴメーターでの無酸素性パワーを評価することの意味について理解を深めるために有用であるものと思われる。

さらに、これまでの先行研究によるペダリング運動時のクランク力の測定は、ペダル部に圧力センサーを装着し、ペダルにかかる前後方向の力を計測し、その合力として算出したもの^{1) 3) 4) 8) 12)} や、ペダル面に対して二方向の踏力とクランクとペダルの角度データからクランク力を算出する手法²⁾ が用いられている。本研究では自転車エルゴメーターに独自の改良を施し、ペダルにかかる荷重によってクランクに対して垂直に作用する力を直接計測するシステムを構築した。

そこで本研究では、独自に改良した自転車エルゴメーターを用いて異なる負荷条件下でのクランク力を測定し、外部へと出力された無酸素性パワーとの関係性やクランク力発揮特性について検討することを目的とした。

II. 研究方法

1. 被検者

被検者は体育系大学の運動部に所属する男子大学生20名とした。これらの被検者は、年間を通じてそれぞれの専門種目のトレーニングを実施しているものであった。被検者の年齢、身長及び体重はそれぞれ、 19.8 ± 1.3 歳、身長 173.2 ± 7.2 cm、体重： 69.0 ± 11.0 kgであった。被検者には研究の目的や方法について十分に説明し、参加の同意を得た。なお、本研究は国士舘大学研究倫理評価委員会の承認を得た後、実施した。

2. 無酸素性パワーの測定

無酸素性パワーの測定は電磁式自転車エルゴメーター (Power Max VII, COMBI社製) を用いて実施した。3 試技の負荷設定については、第1 試技を体重の $6.2 \pm 0.4\%$ に相当する 4 kp (1st load)、第2 試技を体重の $9.3 \pm 0.5\%$ に相当する 6 kp (2nd load)、第3 試技を体重の $12.4 \pm 0.7\%$ に相当する 8 kp (3rd load) に設定した。これは、無酸素性パワーを評価する際に用いられる、Power Max VII に内蔵されている無酸素性パワーテストの負荷設定に基づいて設定した。測定前には、サドルの高さを立位姿勢時の大転子の高さに調整し、つま先はトゥークリップによってペダルに固定した。被検者には十分なウォーミングアップを行わせた後、座位姿勢での全力ペダリングを実施させた。Power Max VII と PC を RS232C で接続し、PMV II データ収集プログラム (Combi

wellness社) を用いて作業負荷 (kp) とペダル回転数 (rpm) を 1/10 秒でサンプリングした。得られた作業負荷と回転数から、次式を用いて各試技の無酸素性パワーを算出した。

$$\text{各試技の無酸素性パワー}(w) = \text{kp} \times \text{rpm} \times 6 \times 9.8 / 60^{9)}$$

ここで、kpは作業負荷、rpmは回転数、6 (m) は1回転で進む距離、9.8 (m/s²) は重力加速度とした。さらに、運動開始からピークパワー発揮時間 (Time to peak power) までの仕事量 (Impulse of power) を算出した。

3. クランク力及びクランク角度の測定

クランク力及び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)。本測定システムは Power Max VII の右脚側のクランク軸の中央部にストレインゲージを

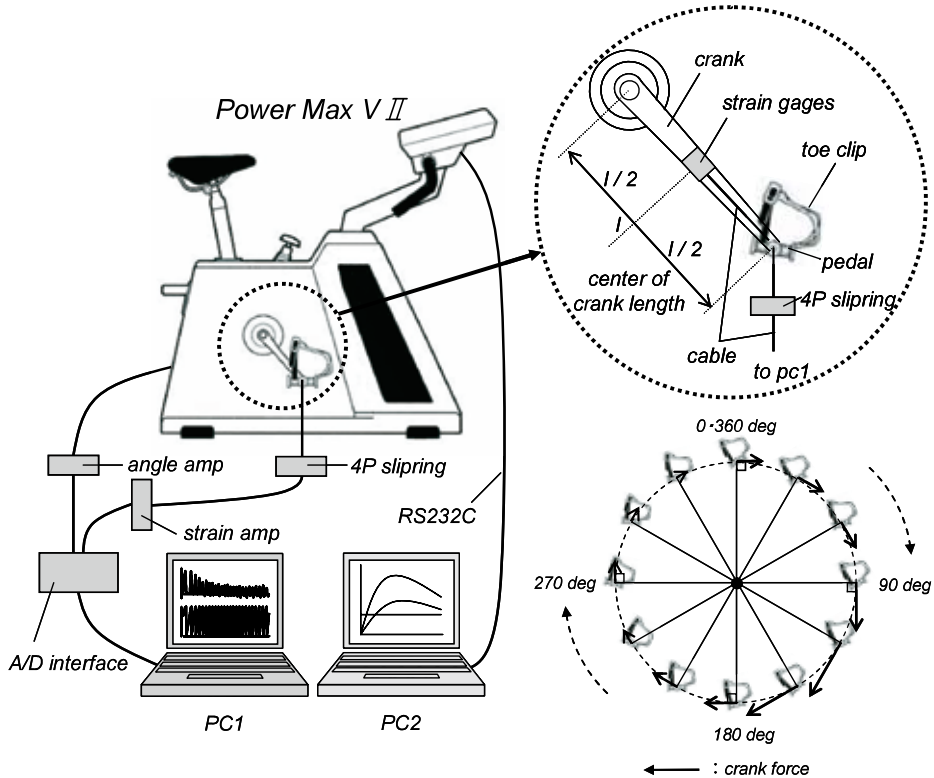


Fig.1. Schematic drawing anaerobic power generation capacity and crank force measurement system.

貼付し、ブリッジ法アンブによりペダルにかかる荷重を記録する（4アクティブゲージによる曲げひずみ測定法）ものである。従って、得られる値はクランクに対して垂直に作用した力、即ちクランク力（clank force）として評価可能である。また、クランク角度の測定は、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位を0、360deg、最下位を180degに設定し、クランク力とともにPCにサンプリング（1/100秒）した。なお、測定に際し、50kg～120kgまで10kg毎の重りを用いて実荷重較正を行った。

3試技ともに測定開始直後の第1回転から第5回転のペダリングまでを分析対象とし、1回転毎のピーククランク力（Peak crank force）及びピーククランク力出現時のクランク角度（Crank angle）をそれぞれ分析した。また、運動開始からピークパワー発揮時までのクランク力の積分値（Impulse of crank force）を算出した。本研究において第1回転から第5回転までのペダリングを分析の対象とした理由は、ペダリングが進むにつれて、前回転の慣性が次回転に影響を及ぼす⁷⁾ことから、慣性の影響を比較的受けにくい運動開始直後のペダリング運動を対象とする必要性が考えられたためである。

4. 統計処理

全ての測定値は全被検者の平均値及び標準偏差値で示した。各測定項目における試技間の差の検定には、一元配置の分散分析を実施し、要因に有意な差が認められた際はpost-hoc測定（Bonferroni法）を施した。また、試技間及びペダリング回数における2つの要因における差の検定には、2元配置分散分析を行い、要因に有意な差が認められた際には、post-hoc測定を実施した。各試技におけるクランク力とピークパワーの間の相関係数は、ピアソンの単純相関によって算出した。いずれも、5%未満を有意とした。

Ⅲ. 結果

Table 1は各試技のピークパワー発揮時間、ピークパワー及び運動開始からピークパワー発揮時までの仕事量を比較したものである。ピークパワー発揮時間は、負荷の増加に伴い遅くなる傾向を示し、3rd loadのピークパワー発揮時間は、1st load及び2nd loadのそれよりも有意に遅い時間であった。ピークパワーは2nd loadが最も高い値を示し、各試技間に有意な差が認められた。また、仕事量については1st loadが2nd load及び3rd loadよりも有意に低い値を示した。2nd loadと3rd load間には有意な差は認められず、ほぼ同程度であった。

Table 1. Comparisons of time to peak power, peak power and impulse of power on three loads.

item	1 st load	2 nd load	3 rd load
Time to peak power (s)	5.7±0.9	6.0±0.9	6.9±2.0
	* └──────────────────┘		- * -
Peak power (w)	665.8±22.7	817.3±31.4	711.9±133.5
	- * -	* └──────────────────┘	
impulse of power (w)	26887.1±4168.8	33560.2±5185.3	33531.0±10178.7
	- * -	* └──────────────────┘	

* :p < 0.05, values are mean ± S.D.

次に、運動開始からピークパワー発揮時までのクランク力の積分値を試技間で比較した (Fig.2)。積分値は1st loadが最も低い値を示し、次いで2nd load、3rd loadであり、設定負荷の増加に順じて有意に大きくなる傾向を示した。さらに、各試技の運動開始からピークパワー発揮時までのクランク力の積分値と仕事量の関係についてみたところ、全ての試技において有意な相関関係が認められた (Fig.3)。

ここで、本測定システムにおいてベダリング運動時のクランク力発揮特性を明らかにするために、ピーククランク力及びその発揮角度について検討した。まず、各試技の運動開始後、第1回転から第5回転までの各ベダリングにおけるピーククランク力の変化をFig.4に示した。1st loadのピーククランク力は、ベダリング回数の増加に伴い低下する傾向を示し、2nd loadでは第2回転以降にピーククランク力が低下する傾向であった。一方、3rd loadのピーククランク力は第1回転から第5回転まではほぼ同程度であり、低下傾向は確認されなかった。各試技間におけるピーククランク力の差は、第2、第3回転で1st loadと3rd load間で、第4、第5回転では全ての試技間に有意な差が認められた。ピーククランク力発揮角度の変化については、全試技ともベダリング回数の増加に伴い角度が変化する傾向を示した。1st load及び2nd loadでは、第1回転と第2回転の間で著しい変化が認められ

たが、3rd loadでは有意なピーククランク力発揮角度の変化は認められなかった。試技間の有意差は、第1回転では3試技の間に認められなかったが、第2回転以降では1st loadと3rd loadの間、2nd loadと3rd load間にそれぞれ有意な差が認められた (Fig.5)。

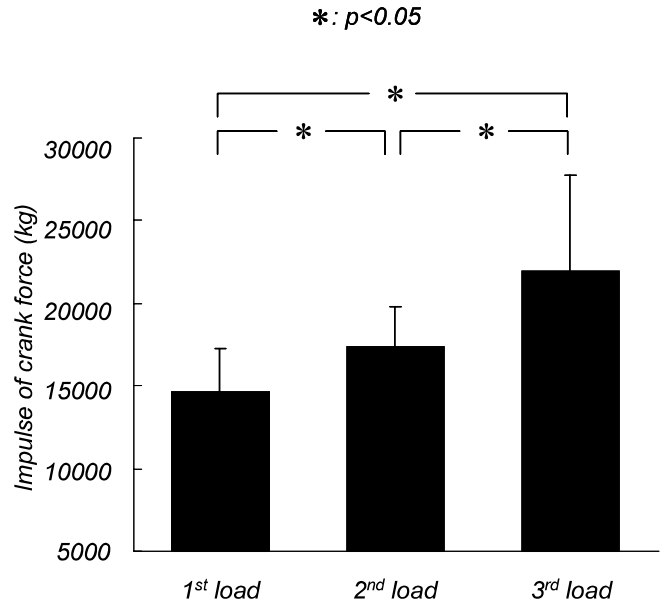


Fig.2. Comparisons of impulse of crank force on three loads.

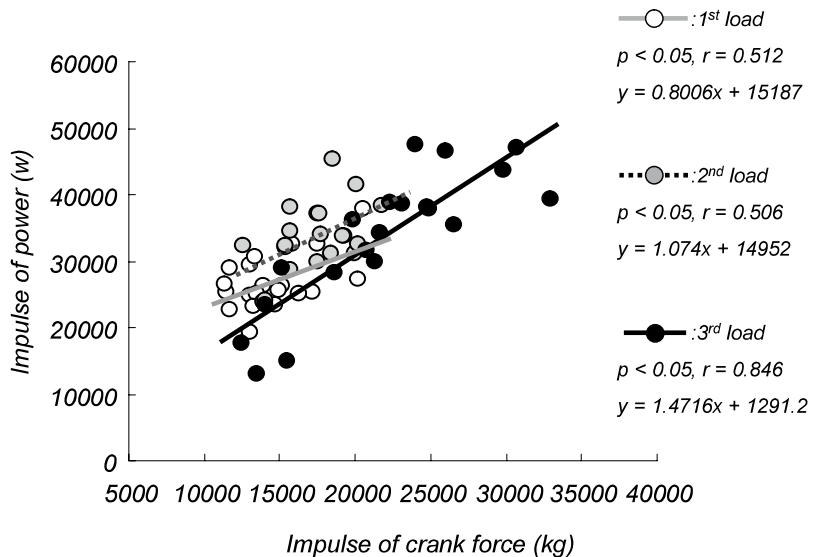
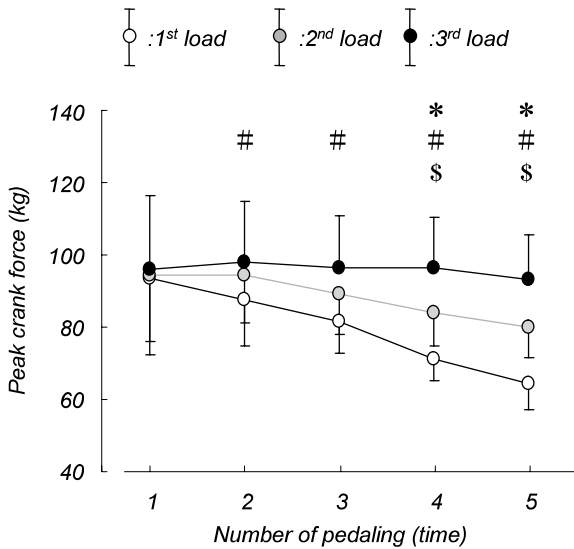
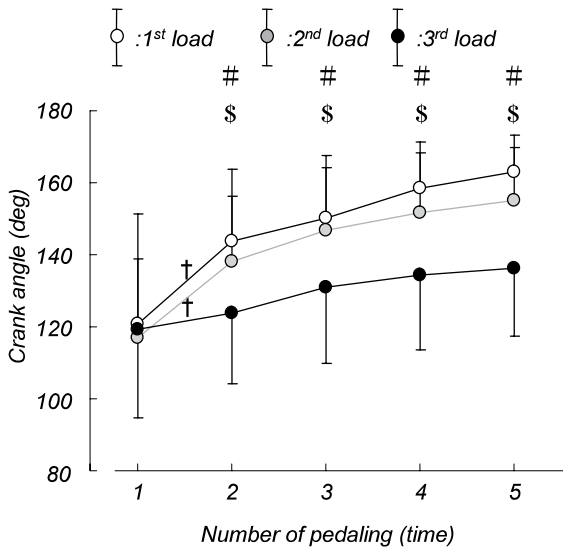


Fig.3. Relationship between impulse of crank force and impulse of power.



- * :significant difference of between 4kp and 6kp
 # :significant difference of between 4kp and 8kp
 \$:significant difference of between 6kp and 8kp
 † :significant difference of between 1:2, 2:3, 3:4, 4:5 pedaling
 * , # , \$, † : $p < 0.05$

Fig.4. Changes of peak crank force on three loads.



- * :significant difference of between 4kp and 6kp
 # :significant difference of between 4kp and 8kp
 \$:significant difference of between 6kp and 8kp
 † :significant difference of between 1:2, 2:3, 3:4, 4:5 pedaling
 * , # , \$, † : $p < 0.05$

Fig.5. Changes of crank angle for peak crank force on three loads.

IV. 考察

自転車エルゴメーターの無酸素性パワーは、負荷（力）と回転数（速度）の積によって決定される。そのため、パワーを構成する要素である力と速度の調節機能を調査することが可能である。本研究では、異なる負荷条件下において全力によるペダリング運動時のピークパワー発揮時間、ピークパワー及び運動開始からピークパワー発揮時間までの仕事量を測定した。その結果、負荷が重くなるにつれてピークパワー発揮時間は遅くなる傾向を示し、最も重い負荷設定である3rd loadは1st load及び2nd loadよりも有意に遅くピークパワーに達していた。この結果は、異なる慣性負荷を伴ったペダリング運動時のピークパワー発揮時間について検討したPearson et al.¹³⁾の報告と同様であった。ピークパワーについては、2nd loadが他の試技よりも有意に高い値を示した。試技によって、ピークパワー到達時間やピークパワーが異なったことは、作業負荷の大小に影響されたものであり、筋の機能的特性である力-速度関係に依存した^{5) 6) 10)}ものと考えられる。これまでのペダリング運動時の無酸素性パワーに関する報告では、最大値を評価したものが多くみられるが、ピークパワー発揮までには数秒を要することから、ピークに達するまでの過程についても評価しなければならない必要性が指摘¹⁰⁾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発揮時間までの仕事量を算出した。その結果、2nd load及び3rd loadの仕事量はほぼ同値を示し、1st loadよりも有意に高い値であった。

下肢の関節トルクとクランクパワーの関連性について検討した船渡²⁾によれば、第1回転時では膝関節伸展パワーがクランク

へのパワー発揮に貢献するが、第2回転時から膝関節伸展パワーの貢献度は減少し、第3回転時からクランクが最高速度に達する過程では股関節伸展パワーの貢献度が大きいことを指摘している。また、Pearson et al.¹³⁾は下肢で発揮されたパワーとペダリング運動時のパワーとの関係性について、両者の間には有意な相関関係が成り立つことを報告している。このように、ペダリング運動において高い無酸素性パワーを得るためには下肢で生み出されたパワーが重要な因子であり、さらには、クランクを回転する力、即ち、クランク力が重要な要素として考えられる。Patterson et al.¹²⁾は、ペダル力を構成する回転数と出力パワーについて検討しており、クランクに対して垂直な力は最適回転速度に依存することを指摘している。この指摘からも、クランクの運動特性を明らかにする上では、クランクを回転させる力を検討する必要性が考えられる。そこで、運動開始直後の第1回転からピークパワー発揮時間までのクランク力を積積で求め、各試技の無酸素性パワーの仕事量との関係について検討した。その結果、Fig.3に示したように、全ての試技において両者の間には有意な相関関係が認められ、ペダリング運動における無酸素性パワーの大小には、クランクを回転させるための力が大きく影響を及ぼす因子として考えられた。一方、船渡²⁾は、運動開始直後の第1回転では膝関節伸展パワーがクランクへのパワー発揮に貢献し、第3回転以降は股関節伸展パワーの貢献が大きいことを指摘している。また、尾縣¹¹⁾は、膝関節伸展・屈曲筋力が高い者は、ペダリング開始直後の股関節トルク発揮に優れ、高い無酸素性パワー発揮に影響することを指摘している。さらに、ペダリング運動時のペダル踏力に対するクランク力の比率について検討された幾つかの先行研究^{1) 3) 4) 8) 12)}からも、運動者によって発揮された力が、実際にクランクを回転させるためのクランク力として作用することの重要性が考えられる。本研究において、無酸素性パワーの大小に影響を及ぼす因子の一つとして運動開始か

らピークパワー発揮までのクランク力が考えられたが、ペダリング運動において出力される無酸素性パワーには、運動者の発揮する力^{2) 11)}やペダリング技術^{1) 3) 4) 8) 12)}等、様々な要因が複雑に関与するものと思われる。本研究では独自に改良した自転車エルゴメーターによって得られたクランク力と外部へと出力されるパワーとの間に有意な相関関係を認めたことから、本測定システムは無酸素性パワーを評価する手法の一つとして有効であろうことが示唆された。しかし、ペダリング運動時のクランク力発揮特性については、本測定システムを用いて、より詳細の検討が必要であるものと思われる。そこで、全力によるペダリング運動時のクランク力発揮特性について、1回転毎のペダリングに着目し詳細に分析を試みた。その結果、Fig.4に示した様に、1st loadのピーククランク力は、運動開始の第1回転から第5回転にかけて徐々に低下する傾向を示し、2nd loadは、第2回転以降ペダリング回数に伴い低値を示す傾向を示していた。一方、負荷の重い3rd loadは第1回転から第5回転までほぼ同様な値であり、大きな変化は認められなかった。この結果から、ペダリング運動時におけるクランクの回転運動として、軽い負荷時は運動開始から1回転毎のピーククランク力が徐々に低下し、負荷の増大に伴ってピーククランク力の低下は認められなくなるといった特性が存在することが明らかになった。より大きな負荷が設定された時はペダリング運動の第5回転までには、木越⁷⁾が指摘する前回転の慣性が次回転に影響するといった運動特性は、軽い負荷設定時に比べてそれ程認められないものと推察された。Coyle et al.¹⁾は、サイクリストを対象に持続的なサイクリングパフォーマンスに及ぼすバイオメカニクスの要因について検討したところ、よく鍛錬されたエリート選手は対象群と比較すると同じ負荷においてダウンストロークで大きなパワー発揮がなされていることを報告している。本研究では、異なる作業負荷時のペダリング運動におけるピーククランク力発揮角度について

比較したところ、全試技とも Coyle et al¹⁾ の報告と同様にダウンストロークに相当する角度 (0deg ~ 180deg) でピーククランク力が発揮されていた。また、ピーククランク力発揮角度は第1回転から第5回転にかけて徐々に、よりペダルを踏込んだ位置へと移行する傾向が確認された。しかし、1st load 及び 2nd load におけるペダリング回数に伴うピーククランク力発揮角度の変化様相と、3rd load のそれは異なっており、第2回転以降では1st load 及び 2nd load と 3rd load 間では有意な差が認められた。以上の結果から、1st load 及び 2nd load ではペダリング回数に伴いクランク力は低値を示し、ピーククランク力発揮角度は、よりペダルを踏込んだ位置へと変化する様相を示したのに対して、負荷が重い 3rd load ではペダリング回数に伴うクランク力の低下や、ピーククランク力発揮角度の著しい変化は認められないことが明らかになった。従って、エルゴメーターでのペダリング運動において、ピーククランク力及びその発揮角度はペダリング回数に伴い変化するものの、それらの変化度合いは負荷の大小により異なるといった特性が存在することが明らかになった。

V. まとめ

本研究では、独自に改良した自転車エルゴメーターを用いて異なる負荷条件下でのクランク力を測定し、外部へと出力された無酸素性パワーとの関係性やクランク力発揮特性について検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 全ての試技において運動開始からピークパワー到達までのクランク力の力積と仕事量との間には有意な相関関係が認められた。
- 2) ペダリング運動において軽い負荷の場合は、ペダリング回数に伴って1回転毎のピーククランク力は低値を示し、ピーククランク力発揮角度は、よりペダルを踏込んだ位置へと移行した。これに対して重い負荷の場合は、ペ

ダリング回数に伴う著しいピーククランク力の低下や、ピーククランク力発揮角度の変化は認められなかった。

以上の結果から、本測定システムにより測定したクランク力は、負荷の大小に関係なく無酸素性パワーを反映する因子であり、ペダリング回数に伴うピーククランク力及びその発揮角度の変化は負荷の大小により異なる特性があることが明らかになった。

参考文献

- 1) Coyle E.F., Feltner M.E., Kautz S.A., Hamilton M.T., Montain S.J., Baylor A.M., Abraham L.D., Petpek G.W. : Pyhsiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 23, (1), 93-107, 1991.
- 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) 星川秀利, 木村裕一, 玉木啓一, 藤本浩志, 中村好男, 村岡功：ペダリング運動におけるスキルの評価. *バイオメカニズム学会誌*, 17, (3), 173-181, 1993.
- 4) 星川秀利, 玉木啓一：自転車エルゴメーター駆動時の負荷が力効率指数に及ぼす影響. *武蔵丘短期大学紀要*, 2, (2), 73-78, 1994.
- 5) 金子公宥：パワーアップの科学. (37-53), 朝倉書店, 1988.
- 6) 金子公宥：人体筋のダイナミクス. (8-32), 杏林書院, 1999.
- 7) 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.
- 8) Lafortune M. A., Cavanagh P. R. : Force effectiveness during cycling. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 12, 95, 1980.
- 9) 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. *J. J. Sports Sci.*, 3, 834-839, 1984.
- 10) 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 第1巻*, 第1号, 105-113, 1988.
- 11) 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.

- 12) Patterson R. P., Moreno M. I. :Bicycle pedaling forces as a function of pedaling rate and power output. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 22, (4), 512-516, 1990.
- 13) Pearson S. J., Cobbold M., Harridge S. D. R., : Power output of the lower limb during variable inertial loading: a comparison between methods using single and repeated contractions. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 92, 176-181, 2004.
- 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, 2006.