

研究ノート

自転車運動中の仕事率及びペダル回転数が膝蓋大腿関節の関節間力に及ぼす影響

星川 秀利

The influence of work rates and pedal rates on the patellofemoral joint forces during cycling

Hidetoshi HOSHIKAWA

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effect of pedal rates and work rates on patellofemoral joint forces. Seven healthy male college students pedaled at 60rpm with two power output of 150W (150 W/60 rpm) and 200W (200 W/60 rpm), and 90rpm with two power output of 150W (150W/90rpm) and 200W (200 W/90 rpm). Pedal forces and kinematic data were used to calculate joint moments at the ankle, knee, and hip by a standard inverse dynamics model. Then, the patellofemoral joint forces (F_{PF}) were quantified using Bressel's model (2001).

Maximum F_{PF} at 200 W/60 rpm was significantly higher than those at 150 W/60 rpm, 150 W/90rpm, and 200 W/90 rpm ($P < 0.01$, 2235.8 ± 517.6 N, 1587.8 ± 428.5 N, 1193.5 ± 317.7 N, and 1405.8 ± 395.5 N, respectively). There were no significant differences in the maximum F_{PF} among 150 W/60 rpm, 150W/90rpm, and 200 W/90 rpm. There were no significant differences in integrated F_{PF} over the pedal cycle among four test conditions.

These data suggest that utilizing higher pedaling rates such as 90 rpm reduce patellofemoral joint forces and prevent overuse knee injuries.

Key words: cycling, patellofemoral joint forces, overuse knee injuries

1. 緒言

自転車運動は、呼吸循環器系、神経系、およびメンタルヘルスの改善など、他の有酸素運動と同等の効果が認められる。また、バイオメカニクスの観点からも、自転車運動は代表的な有酸素運動であるランニングと比較して下肢への負担が少ないと言われ、肥満者などにも推奨されている⁸⁾。

一方、Weiss (1985)¹⁴⁾ は、8日間で500マイル走行するレースに参加したアマチュアサイクリスト114名(平均年齢41.4歳±11.7歳、平均走行距離: 週95.8マイル)を対象に自転車運動に関連した非外傷性の障害についてアンケート調査を実施した。その結果、参加者の20.7%で膝に何らかの問題が生じており、膝蓋骨の痛みが共通した問題であったことを報告している¹⁴⁾。

このように、自転車運動においても膝などに障害が起こり得ることが明らかになってきたが、これまで膝関節の負担に関しては定量的な検討はなされていなかった。最近、Bressel (2001)³⁾が、膝蓋骨を長方形の2次元剛体としてモデル化し、自転車運動中の膝蓋大腿骨関節に作用する関節間力(F_{PF})の値を示した。しかし、Bressel (2001)³⁾は、ペダリングの方向(正および逆回転)の影響を検討したが、自転車の乗車条件については検討していない。

膝への障害の原因の一つとして、ペダル回転数の選択が適切でなかったことが指摘されている^{5,11,13)}。一定の仕事率で自転車運動を実施する場合、ペダルをゆっくり回してこげば力学的に重い負荷がかかり、逆に、ペダルを速く回してこげば軽い負荷になる。レクリエーションで自転車運動を実践している人は、ゆっくりとしたペダル回転数を度々使用しており⁵⁾、このことが結果的に大きな負担を膝に作用させ、障害をもたらすと考えられる。しかし、自転車運動の仕事率及びペダル回転数の影響について詳細な検討はこれまでに行われていない。これらを検討し、膝に負担の少ない乗車条件が明確にできれば、リハビリテーションやトレーニングで自転車を利用する際に役立つ情報を提供できるものである。

そこで本研究では、自転車運動時の仕事率及びペダル回転数が膝蓋大腿関節の関節間力に及ぼす影響、及び膝への負担の少ない条件について検討することを目的とした。

2. 方法

2. 1 被験者

被験者は、短期大学の健康スポーツ専攻に所属する男子学生7名(年齢: 19.1±0.7歳、身長: 174.2±4.8cm、体重: 72.4±7.7kg、最大酸素摂取量: 51.2±9.0 ml/分/kg)であった。彼らには、実験の目的、内容、起こり得る危険性を十分に説明し、実験参加への同意を得た。

2. 2 実験条件

被験者に、仕事率150Wと200W、ペダル回転数60rpmと90rpmの4条件で自転車運動を行わせた。また、サドル高は、先行研究による計算式¹²⁾から算出し、各被験者で微調整した。また、ハンドルの位置も被験者毎に調整し、足の位置は拇指球がペダル軸の真上にくるように合わせた。各被験者とも、全ての実験条件を通して、同じサドル高、ハンドル及び足の位置で行い、姿勢が変化しないようにした。

各実験条件において、設定したペダル回転数に達してから、約1分間のペダリング運動を行わせた。自転車運動中は、電子メトロノームで設定ペダル回転数に相当するピッチ音を鳴らし、さらに実際のペダル回転数を表示させ、設定ペダル回転数に合わせるようにした。実験は1日で行ったが、実験間には十分な休息をおき、疲労の影響がないように配慮した。

2. 3 実験システム

本実験で使用したシステム及びデータ処理については別に詳述した⁷⁾ので、ここでは概要を示す。自転車エルゴメータには、ペダルに作用している力(図1)が計測できるようペダルに力センサ(TFS-3015、ニッタ)を搭載した。また、被験者の足、膝、および股関節のそれぞれの関節中心、ペダル軸、ペダル踏面延長線上に反射マーカを取り付け、右側面方向よりビデオ(DCR-TRV900、ソニー)で撮影した。

ビデオデータは、動作解析システム (Frame-Dias II、DKH) を用いてデジタル化し、座標データに変換した。また、力データと座標データは、トリガーを用いて同期させた。

2. 4 データ処理及び解析

ペダルに作用していた力及び座標データは、4次のバターワースフィルタ (遮断周波数 6 Hz) にて平滑化した。以下の関節モーメントを算出する際には、関節位置座標及び角度の2回微分が必要となるが、実際の処理には差分による移動平均値で算出した。差分後のデータには上記のフィルタを用いてデータの平滑化を行った。

なお、解析には定常的な自転車運動中の連続した10回転分のデータを用いた。

2. 5 膝蓋大腿関節の関節間力 (F_{PF}) の算出

膝蓋大腿関節の関節間力を算出するためには、膝関節の関節モーメントが必要となる。そこで、下肢を足部、下腿部、大腿部の3棒剛体リンクとしてモデル化し (図1)、標準的な逆動力学的手法を用いて膝関節の関節モーメントを算出した⁷⁾。また、この計算に必要となる下肢セグメントの慣性係数は、阿江ら (1992)²⁾ の文献値より推定した。

次に、Bressel (2001)³⁾ のモデル (図2) を用

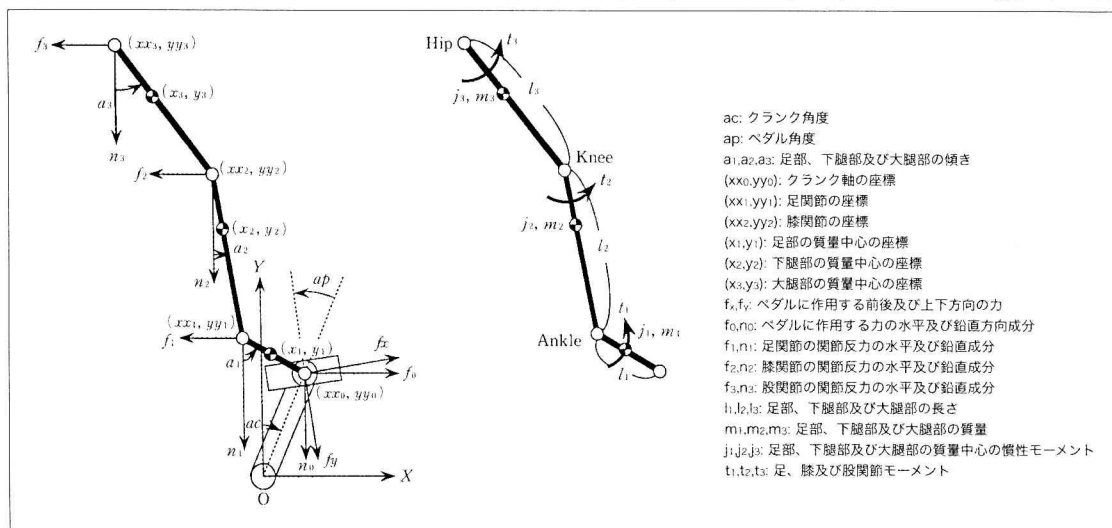


図1. 自転車運動中の矢状面リンクセグメントモデル

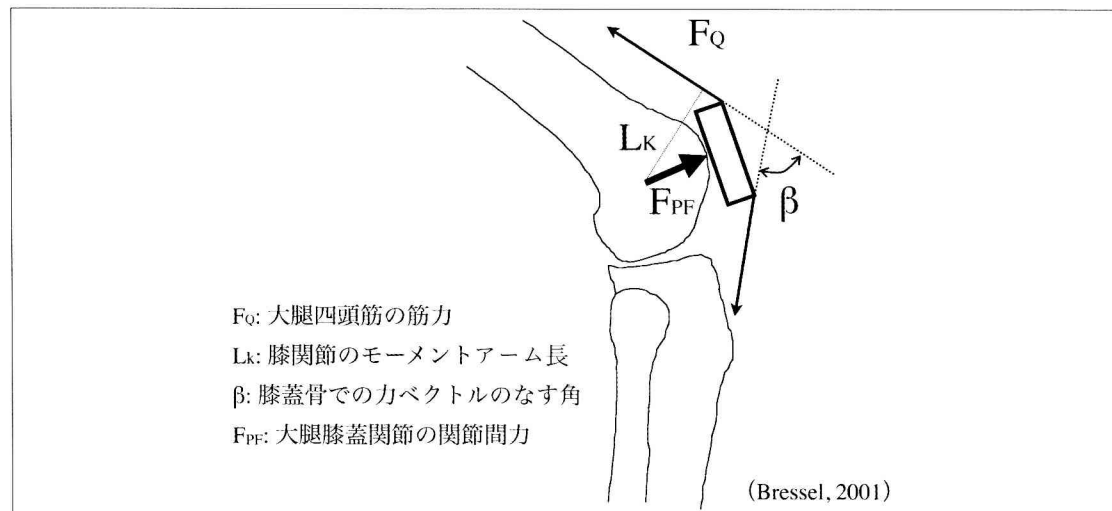


図2. 膝蓋骨のモデル化とそれに作用する力

いて、以下のように膝蓋大腿関節の関節間力 (F_{PF}) を計算した。

$$F_Q = M_K / L_K \quad \dots (1)$$

$$F_{PF} = 2 F_Q \sin \beta / 2 \quad \dots (2)$$

ここで、

F_Q : 大腿四頭筋の筋力

M_K : 膝関節モーメント

L_K : モーメントアーム長

β : 膝蓋骨での力ベクトルのなす角

式(1)から求めた F_Q を式(2)に代入することで膝蓋大腿関節の関節間力 (F_{PF}) が算出される。なお、 L_K はYamaguchiとZajac (1989)¹⁵⁾、 β はMatthewsら (1977)¹⁰⁾の報告により推定した。

ペダル一回転中で生じた F_{PF} 波形より、最大値 ($\max F_{PF}$) 及び積分値 ($\text{sum} F_{PF}$) を算出した。

2. 6 統計処理

本文で示した数値は平均値及び標準偏差として表した。仕事率とペダル回転数が及ぼす $\max F_{PF}$ と $\text{sum} F_{PF}$ への影響を検討するために、反復測定による二元配置分散分析を行った。さらに、条件間の差を検討するためにScheffeによる多重比較を行った。なお、有意水準は $P < 0.05$ とした。以上の処理には、SPSS ver.13 for Windowsを用いた。

3. 結果

図3に、膝蓋大腿関節の関節間力 (F_{PF}) 波形の一例を示した。ペダル位置の約144~216度では値が出ていないが、これは F_{PF} が膝関節の伸展モーメントから算出されるため、このモーメントが発揮されていない時には F_{PF} 値がゼロとなるためである。

二元配置分散分析の結果、 $\max F_{PF}$ においては、仕事率×ペダル回転数の交互作用には有意な差は認められず ($F=3.9$, $P=0.10$)、仕事率 ($F=35.5$, $P<0.01$) 及びペダル回転数 ($F=21.3$, $P<0.01$) に有意な差が認められた。一方、 $\text{sum} F_{PF}$ については、仕事率×ペダル回転数 ($F=1.6$, $P=0.26$) の交互作用、及びペダル回転数 ($F=1.9$, $P=0.22$) には有意な差は認められず、仕事率 ($F=11.9$, $P<0.05$) にのみ有意な差が認められた。

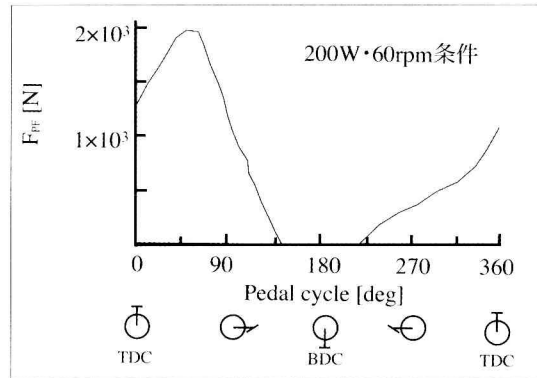


図3. ペダル回転に伴う膝蓋大腿関節の関節間力の変化

ペダル一回転を360degとして表している。
TDC: 上死点、BDC: 下死点
 F_{PF} : 大腿膝蓋関節の関節間力

図4に、各条件における F_{PF} の最大値 ($\max F_{PF}$) を示した。 $\max F_{PF}$ は、200W·60rpmで 2235.8 ± 517.6 Nと、150W·60rpmの 1587.8 ± 428.5 N、150W·90rpmの 1193.5 ± 317.7 N及び200W·90rpmの 1405.8 ± 395.5 Nよりも有意に高い値を示した ($P < 0.01$)。一方、150W·60rpm、150W·90rpmと200W·90rpmの $\max F_{PF}$ の間には統計的な有意差は認められなかった。

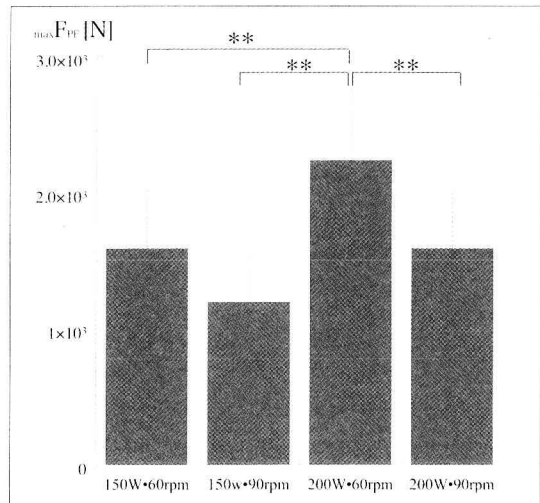


図4. 膝蓋大腿関節の関節間力の最大値

** : $P < 0.01$

$\max F_{PF}$: 膝蓋大腿関節の関節間力の最大値
W: Watt

rpm: revolutions per minute

図5に、各条件におけるペダル一回転の F_{PF} の積分値 ($\text{sum}F_{PF}$) を示した。200W・60rpmで、他の条件よりも高い値を示していたものの、統計的な有意差は認められなかった。

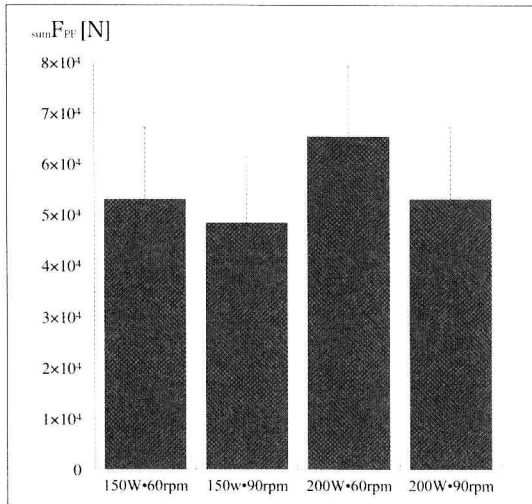


図5. ペダル1回転で積分した膝蓋大腿関節の関節間力

$\text{sum}F_{PF}$: 膝蓋大腿関節の関節間力のペダル一回転での積分値

W: Watt

rpm: revolutions per minute

4. 考察

先行研究との比較

Bressel (2001)³⁾ の実験条件は157W・80rpmと本研究の条件とは異なっていたが、波形パターンは類似していた。また、 F_{PF} の最大値 ($\text{max}F_{PF}$) は、Bressel (2001)³⁾ が $1544.3 \pm 321.5\text{N}$ であったのに対して、本研究の150W・60rpm及び150W・90rpmで、それぞれ $1587.8 \pm 428.5\text{N}$ 、 $1193.5 \pm 317.7\text{N}$ と類似した値であった。したがって、本研究で算出した F_{PF} 値は妥当であると考えられる。

仕事率及びペダル回転数が膝蓋大腿関節の関節間力 (F_{PF}) に及ぼす影響

仕事率及びペダル回転数を因子とする二元配置分散分析を行った結果、膝蓋大腿関節の関節間力の最大値 ($\text{max}F_{PF}$) には交互作用はみられず、両因子とも有意な差が認められた。この結果から、

仕事率及びペダル回転数によって膝への負担が異なることが明らかになった。そこで、今回の実験条件間での差を検討したところ、150Wから200Wに仕事率を増加させた場合、60rpmの $\text{max}F_{PF}$ は有意に増加した ($P < 0.01$) が、90rpmでは200Wで高値を示していたものの統計的な有意差は認められなかった (図4)。一方、ペダル回転数を60rpmから90rpmに増加させた場合、200Wの $\text{max}F_{PF}$ は90rpmで有意に減少した ($P < 0.01$) が、150Wでは90rpmで低値を示していたものの、60rpmとの間には統計的な有意差は認められなかった (図4)。

このように、150W・60rpmと150W・90rpm、及び150W・90rpmと200W・90rpmの間で有意差が認められなかったのは、150W・90rpmでは、ペダルにかかっている負荷が低くなっているにもかかわらず、膝への負担が下がらないことによるものと考えられる。本研究で用いた150W及び200Wの仕事率では、一般人が好むペダル回転数は、60～70rpmであることが報告されている⁹⁾。したがって、90rpmという高回転で、さらに低い仕事率であるため、スムーズにペダルを回すことができていなかったと思われる。Chapmanら (2008)⁴⁾ は、自転車運動中の下腿筋群の筋活動を記録し、トレーニングを積んだサイクリストよりも、自転車運動の初心者で無駄な筋活動が顕著であったことを報告している。彼らの研究では下腿筋群のみしか検討されていないが、大腿筋群でも同様であると推測される。このように、自転車運動に慣れていない初心者で、さらに90rpmという高ペダル回転数のため、必要以上に大腿四頭筋が活動し、その結果として $\text{max}F_{PF}$ が増加したものと考えられる。

しかし、有意差は認められなかったものの、本研究の実験条件の中で150W・90rpmの $\text{max}F_{PF}$ が最も低値を示していた。150W・60rpmと150W・90rpmの比較では、1名の被験者が60rpmよりも90rpmで高値を示した (それぞれ1102.9N、1258.7N) のみで、他の6名の被験者は90rpmの $\text{max}F_{PF}$ で低値を示していた。したがって、さらに被験者数を増やして検討していく必要あるものの、低い仕事率の条件においても90rpmで膝への負担が軽減されるものと思われる。

膝への負担を軽減させる条件

本研究の結果から、高い仕事率で $\max F_{PF}$ は増加することが示された。したがって、膝への負担を軽減させるためには低い仕事率で自転車運動を実施することが必要だと言える。しかし、トレーニングの原則にあるように、身体には過負荷をかけないと効果が得られず、また心肺機能を向上させるためには酸素予備量の40/50~85%が必要であると言われている。また、トレーニング効果を増大させていくためには、漸増負荷の原則からトレーニングの継続とともに運動強度を上げていく必要もある。そのため、高い仕事率での自転車運動を実施しなければならなくなる。本研究において、200W・60rpmでの $\max F_{PF}$ が200W・90rpmよりも有意に減少し ($P<0.01$)、50Wも仕事率が低い150W・60rpm条件と同等であった。このことから、このように高い仕事率で自転車運動を実施する際には、高ペダル回転数を用いることで膝への負担を軽減できるものと考えられる。

ところで、高ペダル回転数での自転車運動では内的仕事量が増加するため、同じ仕事率であっても低ペダル回転数と比較して酸素摂取量が増加することが知られている⁶⁾。このため、高ペダル回転数では目標とする%酸素予備量を超えてしまうことになる。しかし、このことは高ペダル回転数では、低ペダル回転数での仕事率よりも低い仕事率で目標とする酸素予備量を達成できることを意味している。例えば、MarshとMartin (1997)⁹⁾が報告した酸素摂取量とペダル回転数の関係から類推すると、100W・60rpmでの酸素摂取量は75W・90rpm条件で達成できる。つまり、高ペダル回転数を用いること、さらに、低い仕事率を利用することにより $\max F_{PF}$ を減少させ、膝への負担を60rpmよりも軽減できると考えられる。ただし、前述したように、慣れない90rpmのペダル回転数ではスムーズにペダルを回すことができないために、予想されるほどの $\max F_{PF}$ の減少は得られないかも知れない。したがって、トレーニングの開始時点では90rpmよりも低ペダル回転数(例えば、70rpmなど)を用いて実施し、高ペダル回転数に少しずつ慣れさせていくような工夫が必要なのかも知れない。

5. まとめ

自転車運動中の膝蓋大腿関節の関節間力 (F_{PF}) を算出し、これが仕事率及びペダル回転数によってどのような影響を受けるのかを検討し、以下の知見を得た。

- 1) F_{PF} の最大値 ($\max F_{PF}$) は、二元配置分散分析の結果、仕事率とペダル回転数で有意な差が認められた。条件間の比較では、200W・60rpmで $2235.8 \pm 517.6N$ と、150W・60rpmの $1587.8 \pm 428.5N$ 、150W・90rpmの $1193.5 \pm 317.7N$ 及び200W・90rpmの $1405.8 \pm 395.5N$ よりも有意に高値を示していた ($P<0.01$)。一方、150W・60rpm、150W・90rpmと200W・90rpmの $\max F_{PF}$ の間には統計的な有意差は認められなかった。
- 2) ペダル一回転の F_{PF} の積分値は、二元配置分散分析の結果、仕事率で有意な差が見られたが、いずれの条件間にも有意差は認められなかった。

以上の結果から、高ペダル回転数を利用することで、膝蓋大腿関節の関節間への負担を軽減できる可能性が示唆された。

謝辞

稿を終えるあたり、実験及びデータ解析にご協力頂いた高橋光平先生(城西国際大学)及び大橋慶子さん(前 武蔵丘短期大学)、さらに実験の被験者として協力して頂いた学生のみなさんに心よりお礼申し上げます。

なお、本研究は、(財)シマノ・サイクル開発センターによる研究委託金により実施された。

引用文献

- 1) American College of Sports Medicine. ACSM's guidelines for exercise testing and prescription, 7th ed. New York, NY: Lippincott Williams and Wilkins, P141-142, 2006
- 2) 阿江通良、湯海鵬、横井孝志、日本人アスリートの身体部分慣性特性の推移、バイオメカニズム11、p2-33、1992

- 3) Bressel, E.: The influence of ergometer pedaling direction on peak patellofemoral joint forces., *Clin. Biomech.*, 16, p431-437, 2001
- 4) Chapman, A.R., Vicenzino, B., Blanch, P, and Hodges, P.W.: Patterns of leg muscle recruitment vary between novice and highly trained cyclists., *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 18(3), p359-371, 2008
- 5) Dickson, T.B.: Preventing overuse cycling injuries., *The physician and SportsMedicine*, 13(10), p116-123, 1985
- 6) Francescato, M.P., Girardis, M., and di Prampero, P.E., Oxygen cost of internal work during cycling., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 72, p51-57, 1995
- 7) 星川秀利、藤本浩志. サドル高の低下がペダリング運動中の膝関節に及ぼす影響、日本機械学会論文集 (C編)、69 (巻680号)、p244-249、2003
- 8) 池上晴夫、新版 運動処方 理論と実際、p234-235、1991、朝倉書店
- 9) Marsh, A.P. and Martin, P.E.: Effect of cycling experience, aerobic power, and power output on preferred and most economical cycling cadences., *Med. Sci. Sports Exer.*, 29(9), p1225-1232,1997
- 10) Matthews, L.S., Sonstergard DA, and Henke JA. Load bearing characteristics of the patellofemoral joint., *Acta Orthop. Scand.*, 48, p511-516, 1977.
- 11) Mellion, B.M.: Common cycling injuries: Management and prevention., *Sports Medicine*, 11(1), p52-70, 1991
- 12) 村岡功, 青木純一郎, 形本静夫, 内藤久土, 三重野寛治, 海村昌和, 中村好男, 玉木啓一, 木村裕一, 藤本浩志, 星川秀利, 恩田悦守, 佐藤吉朗, 塩原正長, 広島和彦, 斎藤浩一: I. 身体形態と自転車乗車姿勢との関係を表すモデルの作成, II. 自転車駆動時の下肢関節トルクならびにパワーの計測システムの開発, III. 自転車乗車条件の力学的評価. 平成6年度日本体
育協会スポーツ医・科学研究報告No.Ⅱ競技種目別競技力向上に関する研究-第18報-, p159-169、1995
- 13) Nichols, C.E.: Injuries in cycling. In P.A. F.H. Renstrom (ed) *Clinical practice of sports injury prevention and care*, Blackwell scientific publications, Oxford,p514-525,1994
- 14) Weiss, B.D.: Nontraumatic injuries in amateur long distance bicyclists., *Am. J. Sports Med.*, 13(3), p187-192, 1985
- 15) Yamaguchi, G.T. and Zajac, F.E.: A planar model of the knee joint to characterize the knee extensor mechanism., *J. Biomech*, 22 (1), p1-10, 1989