

クランク長の違いが自転車運動時の 酸素摂取量及び下肢の筋活動に与える影響

積田連¹⁾, 本嶋良恵²⁾, 蓮沼哲哉²⁾, 安田俊広²⁾

The effect of different crank lengths on systemic oxygen uptake and muscle activity
in the lower limbs during cycling

Ren TSUMITA¹⁾, Yoshie MOTOSHIMA²⁾, Tetsuya HASUNUMA²⁾, Toshihiro YASUDA²⁾

Abstract

The length of the crank in the bicycle structure may affect oxygen uptake and muscle activity in the lower limbs during cycling. Based on the length of the athlete's lower limbs, it was considered whether determining a more efficient crank length could reduce the total energy production required and muscle exertion necessary to perform the same absolute intensity exercise. It would be possible to output power with a lower oxygen uptake. The purpose of this study was to clarify the effects of cranks of different lengths on oxygen uptake and lower limb muscle activity during pedaling in endurance cyclists and triathletes. The bicycle exercise was conducted for 15 minutes at 70% $\dot{V}O_2$ max intensity. The participants in the experiment consisted of 9 endurance cycling athletes. Their age was 21.7 ± 3.2 years, and all 9 were male. The experimental conditions included 3 setups with cranks of lengths corresponding to the lower limb length (short crank condition, medium crank condition and long crank condition). In each condition, the ratio of crank length when the lower limb length is considered 100% was 19.0% for the short crank condition, 19.7% for the medium crank condition, and 20.2% for the long crank condition. The pedal cadence was 90 rpm. Analysis items include oxygen uptake, heart rate, electromyogram (rectus femoris, vastus lateralis, long head of biceps femoris, lateral head of gastrocnemius), hip joint angle and angular velocity, knee joint angle and angular velocity and trunk angle. We compared these responses among the three conditions. As a result, no significant differences were observed among the conditions in terms of oxygen uptake, average heart rate, and maximum heart rate.

Gastrocnemius lateral head muscle activity was significantly higher in the long crank condition than in the short crank condition ($p < 0.05$), and in the long crank condition compared to the medium crank condition ($p < 0.05$). The minimum knee joint angle was significantly lower in the medium crank condition than in the short crank condition ($p < 0.05$), and in the long crank condition showed significantly lower values than the short crank condition and the medium crank condition ($p < 0.05$). In cycling exercise at 70% of $\dot{V}O_2$ max intensity, the use of cranks with a length of 20.2% of lower limb length requires more activity from the peroneus longus muscle compared to the use of cranks with lengths of 19.0% and 19.7%.

Key words : cycling, crank, oxygen uptake, electromyogram

キーワード : 自転車運動, クランク, 酸素摂取量, 筋電図

1) 福島大学大学院 人間発達文化研究科

〒960-1296 福島県福島市金谷川 1 番地

2) 福島大学 人間発達文化学類

〒960-1296 福島県福島市金谷川 1 番地

1. 緒言

自転車競技種目において、ロードレース、マウンテンバイク・クロスカンントリー、シクロクロスの3種目は、1時間もしくはそれ以上の競技時間を有する持久系自転車競技である。持久系自転車競技のパフォーマンスに影響を及ぼす要因として、最大酸素摂取量などによって表される有酸素能力や単位時間当たりの最大仕事量(S.Padilla et al.1999)、フォームや集団走行時の位置取りで空気力学的抵抗をより少なくする事(D.P.Swain et al.1987)などが挙げられる。その中でも、同一強度の運動をより少ない酸素摂取量で遂行する、すなわち効率的なペダリングを行うことはパフォーマンスに影響を与える重要な一要因である。

自転車のペダリング運動効率を決定する因子として、1点は関節運動などのサイクリスト自身のペダリング技術、もう1点はサドル高やハンドル位置などの車体構造が挙げられる。車体構造の中でもクランクは、自転車におけるペダル軸とクランク軸を連結させるパーツである。自転車駆動において、ペダルを脚で踏み込むことで、クランクにペダル踏力が伝えられ、クランクが回転し、チェーンを通じて自転車を前に動かすことで自転車を走行させることができる。すなわちクランクは自転車駆動系の動力伝達に關与するパーツの1つといえる。

自転車のコンポーネントメーカーから販売されているクランクの長さは155mmから185mmまで存在する。しかしながら身長や下肢長といった身体的特徴を考慮した、効率的ペダリングが可能となるクランク長の推奨基準は明確でない。そのため、特にアマチュア自転車競技選手においては、自転車フレームメーカーから販売されている完成車に付属している170mmのクランクを交換せずにそのまま使用するケースが多くみられる。しかしながら前述のとおりクランクは、自転車駆動系の動力伝達に關与するパーツであるため、異なる長さのクランクを使用することでペダリング時にペダルが描く円の直径が変わり、膝関節や股関節運動範囲も変化する可能性がある。そのため、これら関節運動の変化がペダリング効率に影響を与える可能性がある。クランク長の違いが生体に与える影響を検討した研究として大森ほか(1993)は、125mmと165mmのクランク長を用いて循環応答を検討している。彼らは40% $\dot{V}O_2$ peak強度と60% $\dot{V}O_2$ peak強度では有意な差は認められなかったものの、80% $\dot{V}O_2$ peak強度において心拍数と収縮期血圧が、165mmクランクに比べて125mmクランクの方が有意に高かったことを報告している。しかしこの研究では膝関節に疾患を抱えている対象者の機能訓練を主眼にしているため、膝関節可動域が小さくなるよう著しく短いクランクが用いられており、自転車競技に応用することはできない。またこの研究では下肢長を基準としたクランクの長さを設定していない。下肢長を基準とした研究ではJ.Martin and W.Spriduso (2001)が、長さの異なる5種類のクランクを用い

て、クランク長と最大パワーの関係式を求め、下肢の長さの20%または脛骨長の41%の長さのクランクが最大パワーを発揮するために最適であることを明らかにしている。このように、自転車競技においてクランクの長さが筋パワー発揮に影響を及ぼす可能性が示唆されているが、持久的な自転車運動における効率的なクランク長については不明なままである。持久系自転車競技での使用が想定される155mm~185mmの範囲のクランク長で、選手の下肢長を基準とし、同一絶対強度の運動を遂行するために必要となる総エネルギー産生量や筋力発揮を低減させることができるクランク長が分かれば、持久系自転車競技において有益な情報を提供することとなる。

そこで本研究は、持久系自転車競技選手及びトライアスロン選手を対象に、クランク長の違いがペダリング動作時の酸素摂取量及び下肢の筋活動に与える影響について明らかにすることを目的とした。

2. 方法

(1) 被験者

被験者は持久系自転車競技選手(ロードレース, マウンテンバイク, シクロクロスのいずれか)及びトライアスロン競技選手9名とした。性別は男性9名であった。競技レベルは、国際大会レベルが4名, 全国大会レベルが4名, 地域大会レベルが1名であった。被験者の年齢, 身長, 体重, $\dot{V}O_2\max$ の平均値±標準偏差はそれぞれ, 21.7 ± 3.2 歳, $173.3 \pm 5.6\text{cm}$, $65.9 \pm 7.8\text{kg}$, $3533.3 \pm 597.4\text{ml/min}$ であった。被験者には、研究の目的, 方法, データの取り扱い等について説明し、書面にて実験参加の同意を得た。

(2) 自転車運動

本実験では、長さを変えることのできるスライドクランク(shiromoto 社)を使用するため、被験者はダイレクトドライブ式ローラー台(後輪を外した状態の自転車のチェーンをローラー台に取り付ける)(TURNO, ELITE 社)に装着したロードバイク(CONTENT, GIANT 社)に乗って自転車運動を行った。実験時の室温は25°Cに設定した。

試技中の負荷はローラー台に内蔵されているパワーメーターから送信される ANT+規格の無線信号をサイクルコンピューター(Edge530, GARMIN 社)で受信し、サイクルコンピューターに watt で表示した。被験者は、それぞれの下肢長に基づき、短クランク条件, 中クランク条件, 長クランク条件の3条件で自転車運動を行った。下肢長は大転子と内果を直線で結んだ線分の長さとし、メジャーで測定した。測定した下肢長をもとに各条件のクランク長の算出を以下の手順で行った。

クランク長の違いが酸素摂取量と筋活動に与える影響

① 定数の算出

市販されている最短クランクの 155mm 及び最長クランクの 185mm を基に、定数の算出を行った。

定数 A=185/全被験者の中で最も長い下肢長であった被験者の下肢長

定数 B=155/全被験者の中で最も短い下肢長であった被験者の下肢長

最も長い下肢長は 910mm, 最も短い下肢長は 820mm であった。よって定数 A=0.203, 定数 B=0.189 とした。

② 各条件におけるクランク長の算出

I. 短クランク条件：(下肢長×定数 B)mm

II. 中クランク条件：(I と III の中間)mm

III. 長クランク条件：(下肢長×定数 A)mm

以上の手順で、155mm から 185mm の範囲のクランク長で全被験者が自身の下肢長に応じて相対的に同じ 3 条件になるように設定をした。実験で使用した可変式クランクは 2.5mm 間隔でクランク長を変更することができる。中クランク条件の設定において、可変式クランクでは設定できない長さが計算され、かつ設定可能なクランク長との差が同じであった場合、その長さに近い 2 種類のクランクからランダムで 1 種類を選び、設定した。各条件におけるクランク長の平均値と下肢長を 100% としたときのクランク長の割合の平均値を表 1 に示した。

サドルの前後位置はシートポストの中間点、サドルの角度は地面と平行になるよう統一した。サドル高はサドルとボトムブラケット(BB)を地面と垂直になるように結んだ長さが下肢長の 88.3% となるよう設定する LeMond 法(E.R.Burke, 2003)を用いた。ペダルはシューズとペダルが固定されるビンディングペダルを用いた。実験中の手部はハンドルブラケットを握るよう指示をした。

生体反応の測定は以下の手順で行った。まず、負荷量設定のために自転車エルゴメーター(ERGOMETER 232C, コンビ社)を用いて、多段階漸増負荷試験により最大酸素摂取量を測定した。次に負荷と酸素摂取量の関係をより正確に算出し、相対的な負荷を決定するために多段階負荷試験を行った。本実験に影響が出ないように、本実験とは別日に行った。最大酸素摂取量の測定は安静 30 秒、1 分間のウォーミングアップの後、100watt をスタートとして 30 秒毎に 10watt 漸増させた。運動の終了基準は、症候限界により運動の継続が困難になった場合及び回転数 40rpm 以下となった場合とした。多段階負荷試験は 30 秒間の安静ののち、負荷 50watt, 100watt, 150watt にて各 4 分間の運動中の酸素摂取量の測定をした。酸素摂取量は各負荷の最後の 1 分間の値を平均し、得られたデータか

クランク長の違いが酸素摂取量と筋活動に与える影響

ら酸素摂取量と仕事率の関係式を求めた。どちらの測定も本実験に倣い回転数は 90rpm, サドル高は股下長の 88.3%とした。最大酸素摂取量と多段階漸増負荷試験から得られた酸素摂取量と仕事率の関係式をもとに、各被験者の $70\% \dot{V}O_{2max}$ に相当する仕事率を算出した。

本実験における、異なる長さのクランクを用いた 3 条件の試技は、施行順序による影響を考慮してランダムに実施し、疲労の影響を出さないよう 1 時間の休息を挟んだ。試技では、まず 100watt にて 3 分間のウォーミングアップをしたのち、 $70\% \dot{V}O_{2max}$ に相当する強度にてそれぞれ 15 分間ずつ自転車運動を行った。クランク回転数については、ウォーミングアップ時は指定をせず、 $70\% \dot{V}O_{2max}$ 強度での運動時は 90rpm となるようギヤ比の設定をした。試技中は電子メトロノームで設定回転数に相当するピッチ音を鳴らし、被験者にはその回転数に合わせてペダリングをするよう指示をした。

表 1 各条件におけるクランク長の平均値と下肢長を 100%としたときのクランク長の割合の平均値

	短クランク	中クランク	長クランク
クランク長の平均値[mm]	163.8 ± 5.7	169.5 ± 6.3	174.3 ± 6.4
クランク長/下肢長[%]	19.0 ± 0.0	19.7 ± 0.2	20.2 ± 0.2

(3) 酸素摂取量及び心拍数

試技中は、呼気ガス分析器(エアロモニタ AE-310S, ミナト医科学社)を用いて酸素摂取量を測定、胸部ハートレートセンサー(HRM-Dual, Garmin 社)を装着して心拍数を測定した。試技では、15 分間中の酸素摂取量及び心拍数を測定し、後半の 5 分間では変化がないことを確認し、最後 2 分間の平均値を酸素摂取量、平均心拍数として採用した。また、試技 15 分間中の最も高い心拍数を最高心拍数として採用した。

(4) 筋電図の測定

本研究では表面筋電図(DSP ワイヤレス筋電センサ, Sports Sensing 社)を右側の大腿直筋, 外側広筋, 大腿二頭筋長頭, 腓腹筋外側頭から双極誘導法にて測定した。電極貼付部位はそれぞれ、大腿直筋が膝蓋骨上縁内角と上前腸骨棘を結んだ直線の midpoint, 外側広筋が膝蓋骨上縁より 5 横指近位部の大腿外側面, 大腿二頭筋長頭が腓骨頭坐骨結節を結んだ直線の midpoint, 腓腹筋外側頭が膝窩皮線より 5 横指遠位部でふくらはぎの外側とした。それぞれの電極は、筋線維の走行方向に対して平行となるように配置した。電極及び筋電計は運動中の脚の揺れによる脱落を防ぐためにマスキングテープおよびキネシオテープで

固定した。電極を貼り付ける前には、皮膚と電極間の抵抗を最小にするために皮膚の研磨処理及び剃毛処理を施した。被験者はまず、各筋の最大随意等尺性収縮(Maximum Voluntary Contraction 以下 MVC と略す)時の筋電図を測定した。MVC の測定は、大腿直筋及び外側広筋は座位姿勢での膝関節伸展運動にて、大腿二頭筋長頭は腹臥位での膝関節屈曲運動にて、腓腹筋外側頭は立位姿勢での足関節底屈運動にて行い、測定タイミングは本実験に疲労の影響が出ないように配慮した。本実験では、各条件の $70\% \dot{V}O_{2\max}$ 運動中 5 秒間の筋電図波形を記録した。記録した筋電図波形は、解析ソフト(ワイヤレス筋電センサ Viewer, Sports Sensing 社)を用いて二乗平均平方根(root mean square 以下 RMS と略す)処理をした。MVC 時の RMS 及び $70\% \dot{V}O_{2\max}$ 試技中の RMS はサンプリング周波数 1000Hz でデータ収集をした。試技中の RMS データから 90rpm の 1 回転分に相当する 0.67 秒分の RMS を抽出し、ペダリング 5 回転分を対象に、1 回転分の平均値を算出した。条件間で筋活動量の比較をするため、試技中の RMS を MVC 時の RMS で割った値(%maximum voluntary contraction ; 以下%MVC)を算出した。

(5) ペダリング動作の撮影

被験者の体幹及び下肢の動作を評価するために、被験者の右側、高さ 1m にデジタルカメラ(HERO11Black, GoPro 社)を設置し、240fps(露出時間 1/500 秒)でペダリング動作を撮影した。撮影した映像を基に、解析ソフト(MATLAB, MathWorks 社)を用いて、肩峰-大転子間の線分上の点、大転子、大腿骨外側顆、外果の計 4 点をデジタル化した。デジタル化区間は筋電図測定開始から 1000 フレームとし、DLT 法により 2 次元座標値を算出した。座標値はバターワース型ローパスフィルタを用いて遮断周波数 10Hz で平滑処理をした。静止座標系は、進行方向を X 軸正方向、鉛直上方向を Y 軸正方向とした。

分析項目は、膝関節角度、股関節角度、体幹角度、膝関節角速度、股関節角速度とした。膝関節及び股関節角度は、XY 平面における肩峰と大転子を結んだ線分と大転子と大腿骨外側顆を結んだ線分のなす角度を股関節角度とし、大転子と大腿骨外側顆を結んだ線分と大腿骨外側顆と外果を結んだ線分のなす角度を膝関節角度とした。体幹角度は、肩峰と大転子を結んだ線分と X 軸に平行な線分のなす角度を算出した(図 1)。各クランク条件の 5 回転分のデータにおいて、1 回転ごとの最大値と最小値を算出し、1 回転分に平均化した。

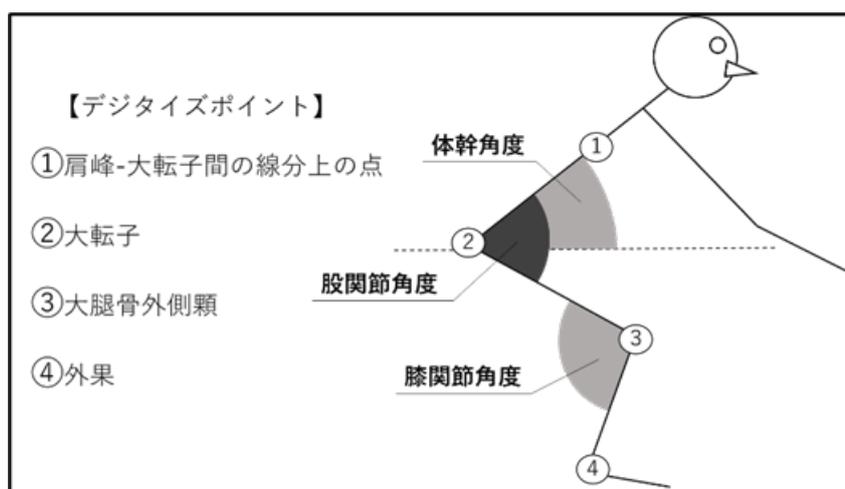


図1 デジタルポイントと各関節角度

(6) 統計処理

各分析項目について、各クランク条件の比較を行うため、まず Shapiro-Wilk 検定により正規性を確認した。その後、正規性からの逸脱が認められなかった項目については反復測定分散分析を行った。さらに、Mauchly の球面性の検定が有意であった場合については、Huynh-Feldt 法による球面性の補正をかけた p 値を採用した。正規性からの逸脱が認められた場合はノンパラメトリック検定の Friedman 検定を行った。有意差が認められた場合、反復測定分散分析では Bonferroni 法による多重比較、Friedman 検定では Conover 法による多重比較を行った。統計処理には、JASP0.18.1.0 を用い、何れも危険率 5%未満をもって統計的に有意とした。各分析項目は平均値±標準偏差で表した。

(7) 研究倫理について

本研究はヘルシンキ宣言に則り、被験者のインフォームドコンセントを得て行った。なお、本研究に関して開示すべき利益相反関連事項はない。

3. 結果

(1) 酸素摂取量と心拍数

図2に各条件における酸素摂取量、図3に各条件における平均心拍数及び最高心拍数を示した。酸素摂取量は、短クランク条件が $2668.9 \pm 228.7 \text{ ml/min}$ 、中クランク条件が $2676.4 \pm 284.4 \text{ ml/min}$ 、長クランク条件が $2719.5 \pm 169.0 \text{ ml/min}$ であった。平均心拍数は、短クランク条件が $149.7 \pm 15.1 \text{ bpm}$ 、

クランク長の違いが酸素摂取量と筋活動に与える影響

中クランク条件が 150.9 ± 17.4 bpm, 長クランク条件が 151.9 ± 17.0 bpm であった。最高心拍数は、短クランク条件が 153.9 ± 13.3 bpm, 中クランク条件が 154.9 ± 15.5 bpm, 長クランク条件が 155.1 ± 15.8 bpm であった。すべての項目で3条件間に有意な差は認められなかった。

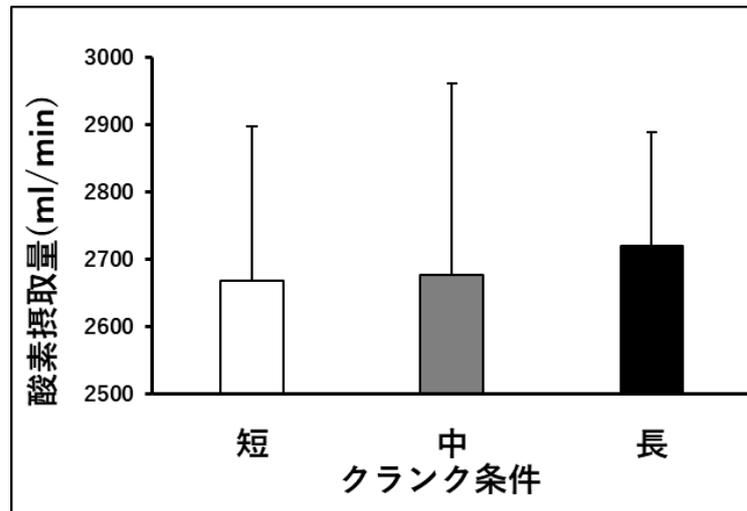


図2 各条件における酸素摂取量

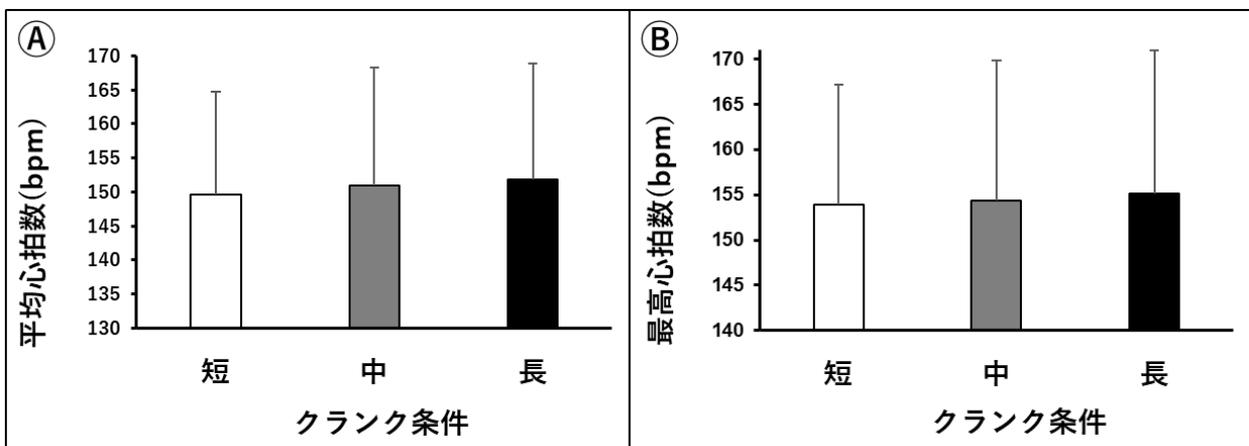


図3 各条件における平均心拍数 (A) 及び最高心拍数 (B)

(2) 筋電図で測定した筋活動量

図4に各条件における筋活動量を示した。Aが大腿直筋活動量, Bが外側広筋活動量, Cが大腿二頭筋長頭筋活動量, Dが腓腹筋外側頭筋活動量である。大腿直筋活動量は、短クランク条件が 11.4 ± 5.5 MVC, 中クランク条件が 11.1 ± 5.5 MVC, 長クランク条件が 12.4 ± 6.8 MVC であっ

クランク長の違いが酸素摂取量と筋活動に与える影響

た. 外側広筋活動量は, 短クランク条件が $59.7 \pm 52.1\%$ MVC, 中クランク条件が $61.0 \pm 50.2\%$ MVC, 長クランク条件が $61.9 \pm 52.8\%$ MVC であった. 大腿二頭筋長頭筋活動量は, 短クランク条件が $9.4 \pm 5.0\%$ MVC, 中クランク条件が $8.7 \pm 3.5\%$ MVC, 長クランク条件が $7.6 \pm 3.0\%$ MVC であった. 腓腹筋外側頭筋活動量は, 短クランク条件が $17.1 \pm 9.5\%$ MVC, 中クランク条件が $16.5 \pm 3.5\%$ MVC, 長クランク条件が $21.9 \pm 12.7\%$ MVC であった. 大腿直筋活動量, 外側広筋活動量, 大腿二頭筋長頭筋活動量では, 3 条件に有意な差は認められなかった. 腓腹筋外側頭筋活動量においては, 短クランク条件及び中クランク条件と比べて長クランク条件がそれぞれ有意に高い値を示した ($p < 0.05$).

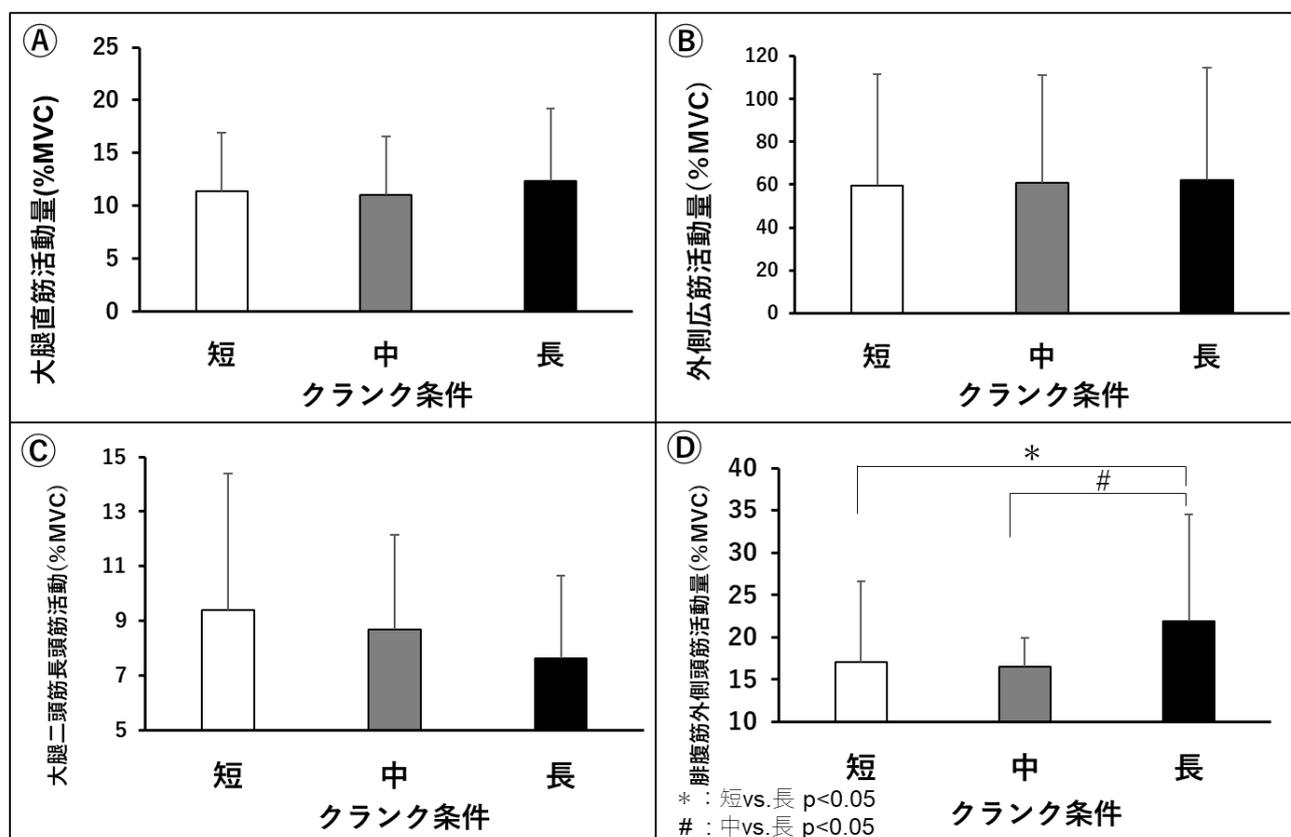


図4 各条件における筋活動量

(3) ペダリング動作

表2に各条件における股関節角度, 膝関節角度, 体幹角度, 股関節角速度, 膝関節角速度の最大値と最小値を示した. 最大股関節角度において, 中クランク条件が短クランク条件と比べて有意に低値を示した ($p < 0.01$). 最小股関節角度において, 中クランク条件が短クランク条件と比べて ($p < 0.01$), 長クランク条件が短クランク条件と比べて ($p < 0.01$), それぞれ有意に低値を示した. また, 長クラン

クランク長の違いが酸素摂取量と筋活動に与える影響

ク条件が中クランク条件と比べて有意に高値を示した($p<0.01$). 最大膝関節角度において, 長クランク条件が短クランク条件と比べて有意に高値を示した($p<0.05$). 最小膝関節角度において, 中クランク条件が短クランク条件と比べて有意に低値を示した($p<0.01$). また, 長クランク条件が短クランク条件及び中クランク条件と比べてそれぞれ有意に低値を示した($p<0.01$). 最大体幹角度において, 中クランク条件が短クランク条件と比べて有意に低値を示した($p<0.05$). 最小体幹角度において, 中クランク条件が短クランク条件と比べて有意に低値を示した($p<0.05$). 最大膝関節角速度において, 長クランク条件が短クランク条件と比べて有意に高値を示した($p<0.05$). 最小膝関節角速度において, 長クランク条件が短クランク条件と比べて有意に低値を示した($p<0.05$).

表2 各クランク条件における関節角度と関節角速度の最大値と最小値

測定項目	クランク条件					
	短		中		長	
最大股関節角度[deg]	123.0	± 1.6	119.3	± 0.3**	120.6	± 1.2
最小股関節角度[deg]	78.3	± 0.6	73.3	± 0.2**	74.8	± 0.5**. ^{††}
最大膝関節角度[deg]	143.3	± 0.3	145.1	± 0.2	146.2	± 0.2*
最小膝関節角度[deg]	72.5	± 0.1	71.8	± 0.1**	71.1	± 0.1**. ^{††}
最大体幹角度[deg]	56.9	± 11.0	52.0	± 8.4*	54.1	± 8.8
最小体幹角度[deg]	50.3	± 8.4	46.2	± 8.1*	48.8	± 7.6
最大股関節角速度[deg/s]	68.2	± 35.3	49.3	± 0.5	50.7	± 0.7
最小股関節角速度[deg/s]	-61.7	± 30.7	-43.4	± 0.5	-45.6	± 0.6
最大膝関節角速度[deg/s]	66.3	± 0.5	68.5	± 0.5	71.0	± 0.6*
最小膝関節角速度[deg/s]	-62.2	± 0.6	-68.0	± 0.6	-69.9	± 0.6*

*,[†] : $p<0.05$, **,^{††} : $p<0.01$

* : vs. 短, [†] : vs. 中

4. 考 察

本研究は, 持久系自転車競技場面でのクランク長の選択に役立てることを目的として行った. 実験では, 持久系自転車競技選手及びトライアスロン選手を対象として, 異なる長さのクランクを用いた3条件で自転車運動を行った時の, 酸素摂取量, 心拍数, 下肢の筋電図, 股関節, 膝関節及び体幹の

動作を比較した。

酸素摂取量、心拍数では、3条件間で統計的に有意な差は認められなかった。したがって本研究で使用したクランク長の範囲においては、酸素摂取量及び心拍数に差は生まれないと考えられる。すなわちペダリング効率には差は生じないということが明らかとなった。しかしながら短クランク条件での酸素摂取量は長クランク条件のそれと比較し、平均値において約50ml/min低値であった。実際に酸素摂取量において50ml/minの差があるのであれば、競技時間が数時間に及ぶ持久系自転車競技では、その酸素摂取量の総量差つまり有酸素性エネルギー供給量の差は大きくなることが想定されるため、その差は無視できない。短クランク条件及び中クランク条件では、酸素摂取量が長クランク条件のそれと比較して低値を示す傾向が見られたことから、長クランクよりも短クランクもしくは中クランクを用いる方がより効率の良いペダリングができる可能性が考えられる。

大森ほか(1993)が行った125mmと165mmのクランク長を用いて呼吸循環応答を検討した研究では、80% $\dot{V}O_{2peak}$ の強度において、心拍数が165mmクランクに比べて125mmクランクの方が有意に高かったと報告している。クランクが長い条件において心拍数が低値であったことは、本研究の結果と異なる。この結果の相違は使用したクランク長の違いによるものと考えられる。本研究では市販されている155mm~185mmの長さのクランクを使用した。大森ほか(1993)の研究では、膝関節に疾患を抱える患者を想定しなるべく膝関節の屈曲伸展角度を少なくしたままペダリングが出来るように著しく短い125mmのクランクを使用している。これらの研究からクランクの長さが変わることによって呼吸循環応答に変化が起こる可能性が示唆されるが、その変化の様相は使用するクランク長によって異なる可能性がある。

大森ほか(1993)の研究ではクランクの長さに応じて心拍数が有意に変化したが、本研究で有意な差が認められなかった。この原因も使用したクランクの長さで説明できるかもしれない。本研究では、市販されていて実際に自転車競技での使用が想定される155mm~185mmのクランク長で、全被験者が相対的に同じ3条件を使用するよう条件設定をした。その結果、使用したクランク長は、短クランク条件が 163.8 ± 5.7 mm、長クランク条件が 174.3 ± 6.4 mmであり、短クランク条件と長クランク条件の平均値の差は10.5mmであった。一方、大森ほか(1993)の研究では、前述の通り下肢関節疾患を抱える患者の機能訓練を想定しており、著しく短い125mm~165mmのクランクを使用しており、その差は40mmであった。この大きなクランク長の差が、心拍数や収縮期血圧の変化を大きくし、結果に影響を与えたと考えられる。このことから本研究で酸素摂取量や心拍数に変化が認められなかったことはクランク長の差が小さかったために変化を検出できなかった可能性を排除できない。

D.R.Knight et al.(1992)は、最大仕事量における自転車運動時の全身の酸素摂取量は、活動筋である脚の酸素摂取量を直接反映すると報告している。また K.Kawaguchi et al.(2001)は、近赤外分光法で測定した局所筋酸素化の動態が、全身の酸素摂取量と強い相関を認めたと報告している。これらの研究から、活動筋の酸素動態の変化が全身の酸素摂取量の変化に強く影響を与えることが示唆される。したがって本研究においても、酸素摂取量及び心拍数は、下肢の筋活動量の影響を強く受けていることが考えられる。そこで本研究では筋電図で下肢の筋活動量を検討した。その結果、腓腹筋外側頭筋活動量において、短クランク条件及び中クランク条件が長クランク条件と比較して、それぞれ有意に低値を示した($p<0.05$)。また、大腿直筋活動量及び外側広筋活動量においては、有意な差は認められなかったものの短クランク条件及び中クランク条件が低値を示す傾向が見られた。このことから短・中クランクが長クランクに比べ酸素摂取量が低くなる傾向は、筋活動量の低下で説明することが出来、より効率的なペダリングを生み出す一要因となる可能性がある。

しかしながら、大腿二頭筋長頭筋活動量においては、クランクが長くなるに従ってわずかに低値を示す傾向が見られた。この傾向は呼吸循環応答各項目や、筋活動量の他の項目で見られた長クランク条件が高値を示す傾向とは一致していない。このクランクが長くなるにつれて低値を示した傾向は、異なる長さのクランクを用いたことで、姿勢が変化したことによるものと考えられる。最大膝関節角度において、長クランク条件が短クランク条件と比較して有意に高値を示し($p<0.05$)、最小膝関節角度においても短クランク条件及び中クランク条件と比べて有意に低値を示した($p<0.01$)ことから、長クランク条件ではペダリング時の膝関節運動範囲が変化していることが分かる。ペダリング動作において、最大膝関節角度は主に下死点(ペダルが描く円の最も低い位置)付近で、最小膝関節角度は主に上死点(ペダルが描く円の最も高い位置)付近で観察される。すなわち、クランクが長くなるにつれて、膝関節を屈曲する際(引き脚局面)、膝関節角度がより大きい状態から屈曲運動を開始していることになる。この動作の違いが、大腿二頭筋長頭筋活動量に影響を与えた可能性が考えられる。大西ほか(1999)は、最大等速性膝屈曲運動において、大腿二頭筋長頭筋活動が膝角度 15~30 度でピークを示し、膝角度が大きくなるにつれて減少すると報告しており、膝関節角度の違いが筋活動量に影響を与えることを報告している。しかし、大西ほか(1999)の研究で実施した運動は最大運動であり、筋活動の低下はパフォーマンス低下を意味している。本研究では筋活動の低下は作業効率の向上と解釈されるため、大西ほか(1999)と同様に考えることはできない。これらの結果は本研究におけるクランク長の変化が膝関節角度の変化によって大腿二頭筋長頭筋活動を変化させる可能性を示唆するがその増減については他の筋活動の影響も考慮する必要があることを示している。

そこで、大腿二頭筋群の拮抗筋である大腿四頭筋群の筋活動について検討すると、外側広筋活動量ではクランクが長くなるにつれて高値を示す傾向が見られた。ペダリング動作時において、大腿二頭筋群は膝関節屈曲局面、大腿四頭筋群は膝関節伸展局面で活動量が多くなるということも、本研究における大腿二頭筋長頭活動量及び外側広筋活動量の結果に反映されている可能性がある。

また、大腿二頭筋活動には股関節角度も影響する。最大股関節角度において、中クランク条件が短クランク条件と比べて有意に低値を示した($p<0.01$)。最小股関節角度において、中クランク条件が短クランク条件と比べて($p<0.01$)、長クランク条件が短クランク条件と比べて($p<0.01$)、それぞれ有意に低値を示した。また、長クランク条件が中クランク条件と比べて有意に高値を示した($p<0.01$)。本研究では股関節角度について、最大股関節角度はクランクが長くなるにつれて大きくなり、最小股関節角度はクランクが長くなるにつれて小さくなる傾向を示すと仮定して実験を行ったが、その傾向は見られなかった。仮定は体幹角度が変わらないことを前提としていたが、実際は最大体幹角度及び最小体幹角度は中クランク条件が短クランク条件と比べて有意に低値を示した($p<0.05$)。股関節角度はX軸に平行な線分と体幹のなす角度と、X軸に水平な線分と大腿部のなす角度の和である。すなわち、本研究での各クランク条件における股関節角度の結果は、体幹角度の変化の影響を受けたことが推察される。木越ほか(2003)によると、短時間の全力自転車ペダリング運動において、体幹角度の増加により、大腿二頭筋長頭の筋活動が増加したことを報告している。木越ほか(2003)の結果に従えば、本研究の結果においても体幹角度と股関節角度の結果により、大腿二頭筋活動が変化することを示している。しかしながら前述の通り関節運動には複数の筋が関与しており、必ずしも同じ傾向になるとは限らないのかもしれない。

本研究において、大腿二頭筋長頭筋活動は有意な差は認められなかったものの、クランクの短縮とともに高値を示す傾向が見られ、これらの結果は体幹角度や股関節角度が関係していると考えられる。大腿二頭筋群は姿勢変化による影響を受けやすく(J.V.Basmajian and C.J.Luca, 1985)、本研究においても短クランク条件において、被験者は体幹を立てることでクランク長に適応したペダリングをし、その結果大腿二頭筋長頭筋活動量に作用したことが推察される。これらの理由により、大腿二頭筋長頭筋活動量では、他の筋と異なる傾向が見られたと考えられる。

腓腹筋外側頭筋活動量において、短クランク条件及び中クランク条件が長クランク条件と比較して、それぞれ有意に低値を示した($p<0.05$)。A.G.Cresswell et al. (1995)によると、膝関節屈曲角度の減少に伴い、最大足関節底屈トルクが減少し、腓腹筋のEMGが減少することが報告されている。すなわち、膝関節角度の変化により足関節底屈トルクが変化し、腓腹筋の筋活動に影響を及ぼす可能性が示

されている。本研究では、最大膝関節角度はクランク長の伸長に伴い増加し、最小膝関節角度は減少の傾向を示しており、短及び中クランク条件における腓腹筋外側頭筋活動の有意な低下は、膝関節角度の変化が足関節底屈運動に寄与した可能性が考えられる。しかしながら、本研究では足関節の動作分析を行っていないため、A.G.Cresswell et al.(1995)の報告にあるように足関節底屈運動の変化が起こっているかは定かではない。今後は足関節の動きを含めて、より詳細な下肢の動作について分析することが課題である。

また、最大膝関節角速度において長クランク条件が短クランク条件と比べて有意に高値を示し($p<0.05$)、最小膝関節角速度において長クランク条件が短クランク条件と比べて有意に低値を示している($p<0.05$)。各クランク条件における膝関節角速度の結果は、ペダリング時の膝関節運動範囲の変化によるものと推察される。本研究での短クランク条件で使用したクランクの平均値と長クランク条件で使用したクランクの平均値の差は 10.6mm であった。ペダリング時にクランクが描く円周は長クランク条件が短クランク条件と比べて 66.56mm 長くなる。すなわち、クランクが長くなるにつれてペダルが描く円の円周が長くなり、足部の運動が広範となっていることが分かる。長クランク条件では、短クランク条件と比較して運動範囲が広がっているため、より多くの総エネルギー産生量が必要となっていたことも推察される。

本研究ではすべてのクランク条件で 90rpm の回転数で実験を行った。岩下ほか(2013)のペダリングに関する研究において、身体能力の高いスポーツ選手、特に長距離サイクリストにおいては、90~110rpm 程度の、比較的速度の速い回転数を選択するとされている。その理由として、90rpm 前後の回転数は 60rpm 以下の低回転数や 120rpm 以上の高回転数と比較して、1 回転における活動筋の筋張力が減少することや、ペダルへ加わる力が低下し、筋の発揮トルクが減少することにより、遅筋線維が多く動員され、ペダリング動作の持続に適していることが考えられる。

本研究の被験者は自転車競技選手及びトライアスロン競技選手であることから、ペダリングスキルは一般人と比べ高いといえる。岩下ほか(2013)の報告より、本研究における 90rpm の回転数はペダリングスキルを発揮するための至適回転数に近いと考えられる。すなわち、長クランク条件において、クランクの伸長により足部の運動が広範となる環境下においても、同じ運動速度(回転数)でペダリングをできていたことが、膝関節角速度が長クランク条件で有意に高値を示した結果から説明することができる。

一方で、クランクの長さによってペダリング運動効率が変化する際、その要因は関節角度や関節角速度以外にも考えられる。クランクが短くなると、同一絶対強度で運動を行う際、同じトルクを発揮

するために大きな力を発揮しなければいけなくなるため、生理応答に影響を及ぼす可能性が考えられる。今後はクランクに掛かるトルクが生理応答に影響を及ぼす事について考慮した検討が必要である。

本研究では、ペダリング動作局面での筋電図を検討するため、ハイスピードカメラ撮影時に同期ランプを用いて、筋電図と撮影した動画の同期化を試みたが、筋電図解析システムの都合上、完全な同期化をすることができなかった。今後は各関節の動作を局面ごとに分け、作用している筋について詳しく検討していく必要がある。

また、本研究では、ペダリング時の筋活動や動作における左右差は極めて微小であると仮定し、右側の体幹及び下肢を対象として実験を行ったが、ペダリング動作時の左右差が認められたとする報告もいくつかある。R.R.Bini and P.A.Hume(2013)は自転車の漸増負荷運動において、ピーククランクトルクは利き脚を優先して増大したと報告している。右脚の膝関節屈曲局面時の左脚は伸展局面にあたり、左右の脚の動作のコーディネーションが、クランクに掛かる力を出力していることから、今後は利き脚と非利き脚を考慮した検討を行うことが課題である。

5. 結 論

本研究では、持久系自転車競技場面でのクランク長の選択に役立てることを目的とし、持久系自転車競技選手及びトライアスロン選手を対象として、下肢長を基にした異なるクランク長条件下での酸素摂取量、心拍数、下肢の筋活動量、ペダリング動作について比較検討した。その結果、酸素摂取量において、長クランク条件と比較して短クランク条件及び中クランク条件において低値を示す傾向が見られ、腓腹筋外側頭筋活動量において、短クランク条件及び中クランク条件が長クランク条件と比較して有意に低値を示した。これは自転車運動において、異なる長さのクランクを用いたことで、ペダリング動作時の関節角度及び角速度が変化したことで腓腹筋外側頭筋活動量が減少したと考えられる。すなわち、70% $\dot{V}O_2\max$ 強度の自転車運動において、下肢長の 19.0%及び 19.7%の長さのクランクの使用は、20.2%の長さのクランクの使用と比較して、より少ない腓腹筋外側頭筋活動量で運動を遂行できることが明らかとなった。

今後はペダリング動作局面ごとの筋活動や、脚の左右差を考慮した詳細な検討が必要である。

参考文献

A.G.Cresswell, W.N.Löscher and A.Thorstensson (1995) Influence of gastrocnemius muscle length on

- triceps surae torque development and electromyographic activity in man. *Exp Brain Res* 105 : 283-290.
- D.P.Swain, J.R.Coast, P.S.Clifford, M.C.Milliken and J.Stray-Gundersen (1987) Influence of body size on oxygen consumption during bicycling. *J Appl Physiol* 62 : 668-72.
- D.R.Knight, D.C.Poole, W.Schaffartzik, H.J.Guy, R.Prediletto and M.C.Hogan (1992) Relationship between body and leg VO_2 during maximal cycle ergometry. *J Appl Physiol* 73(3) : 1114-1121.
- E.R.Burke (2003) *High-Tech Cycling*. Human Kinetics.
- 岩下篤司・小西有人・吉田正樹 (2013) ペダリング動作において一定仕事率での負荷量と回転数の組み合わせが下肢筋の筋活動へ及ぼす影響. *理学療法学* 28(1) : 135-139
- J.V.Basmajian and C.J.Luca (1985) *Muscle alive, Their function revealed by electromyography*. 4th ed, Williams & Wilkins, Baltimore : 252-264
- J.Martin and W.Spiriduso (2001) Determinants of maximal cycling power: crank length, pedaling rate and pedal speed. *Eur J Appl Physiol* 84 : 413-418
- K.Kawaguchi, M.Tabusadani, K.Sekikawa, Y.Hayashi and K.Onari (2001) Do the kinetics of peripheral muscle oxygenation reflect systemic oxygen intake. *Eur J Appl Physiol* 84(1-2) : 158-161.
- 木越清信・尾縣貢・田内健二・大山卞圭悟・高松薫 (2003) 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及び最大パワーに及ぼす影響. *体力科学* 52 : 167-178.
- 国土交通省(2008)GOOD CYCLE JAPAN.
<https://www.mlit.go.jp/road/bicycleuse/good-cycle-japan/> , (参照日 2023 年 11 月 1 日).
- 大森豊・渡辺敏・武田秀和・銭谷嘉純・山田純生・山崎裕司・牧田光代・深井和良・前田秀博 (1993) 自転車駆動におけるクランク長変化と足部の位置が生体に及ぼす影響. *理学療法のための運動生理* 8(4) : 213-216.
- 大西秀明・池田知純・八木了・赤坂清和・大山峰生・百瀬公人・伊橋光二・半田康延(1999) 最大等尺性膝屈曲運動時のハムストリングスの筋活動について. *理学療法学* 第 26 巻第 2 号 : 62-67.
- R.R.Bini and P.A.Hume (2013) Assessment of bilateral asymmetry in cycling using a commercial instrumented crank system and instrumented pedals. *Int J Sports Physiol Perform*, 9 : 876-881.
- R.R.Neptune, S.A.Kautz and F.E.Zajac (2000) Muscle contributions to specific biomechanical functions

クランク長の違いが酸素摂取量と筋活動に与える影響

do not change in forward versus backward pedaling. J. Biomechanics 33 : 155-164.

R.R.Neptune and W.H.Herzog (2000) Adaptation of muscle coordination to altered task mechanics during steady-state cycling. J. Biomechanics 33 : 165-172.

S.Padilla, I.Mujika, G.Cuesta and J.J.Guillermo (1999) Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling. Medicine & Science in Sports Exercise 31(6) : 878-85.

(2024年2月12日受付 / 2024年5月13日受理)