

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：34417

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25350763

研究課題名(和文) 自転車ペダリング動作中の逆力学シミュレーションに基づく体幹深部筋の活動推定

研究課題名(英文) Estimation of trunk muscle force during bicycle pedaling using inverse dynamics simulation.

研究代表者

北脇 知己 (KITAWAKI, Tomoki)

関西医科大学・医学部・教授

研究者番号：40362959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では自転車ペダリング動作に影響する体幹深部筋の活動状態を推定することを研究目的とした。ペダリング動作、自転車への作動力(ペダル踏力、ハンドル力、サドル応力)、下肢筋表面筋電図、の3項目を同時計測可能な「自転車ペダリング運動状態測定システム」を開発し、ペダリング方法の違い(座り漕ぎ、立ち漕ぎ)、ペダル回転数、負荷強度などを変化させた各種条件で自転車ペダリング時のデータ収集を行った。これらの情報から逆力学シミュレーション計算を行って、計測された下肢筋の表面筋電図と逆力学計算で計算された表面筋の活動状態が一致する結果が得られたため、ペダリング動作中の体幹深部筋の活動を推定することができた。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate bicycle pedaling skills, it is important to describe the use of the trunk muscles of the subject. In this study, we therefore intended to estimate the trunk muscle force using actually measured value of the pedaling force for inverse dynamics computations in bicycle pedaling.

We use reacting force of the bicycle (pedal force, saddle force and handle force), and pedaling action (pedaling posture, crank angle), obtained from a measurement system. And surface muscle force using electromyogram (EMG) was used in order to evaluate the accuracy of the computations. A participant was given the pedaling load, with specified cadence and difference in pedaling method. Inverse dynamics calculation results were obtained using the measured forces and real pedaling action. Muscular activity changes calculate from the inverse dynamics results, agreed well with measured EMG values. This means that we were able to well estimate the activity of trunk muscles.

研究分野：数理モデリング

キーワード：スポーツバイオメカニクス 逆力学計算 自転車ペダリング

## 1. 研究開始当初の背景

自転車ペダリング動作には、下肢筋群の重要性はもとより、股関節屈曲の主動作筋である腸腰筋などの体幹深部筋の活動も重要である。こうした自転車ペダリング動作中の筋活動については、下肢表面筋群の表面筋電図を用いた計測・研究が数多く行われており、ペダルクランクの回転角度に依存した筋活動が研究されている。しかし体幹深部筋の発揮力が自転車ペダリングに与える影響については、体幹深部筋の筋電図が直接計測できないため、これまで研究が行われていない<sup>(1)</sup>。

スポーツサイクリングにおいては、高強度で長時間の運動を続ける必要があり、効率的なペダリング技術の習得が不可欠である。ここで、ペダリング効率とは、ペダル踏力に対する、実際にペダルクランクの回転に影響する接線方向成分の割合を言う(図1参照)。これまでの研究で、ペダル踏力やペダリング効率と筋活動の関係を示したものもあるが、下肢表面筋群のみが対象とされており、ペダリング効率に与える体幹深部筋の影響を解析した研究はない<sup>(2)</sup>。

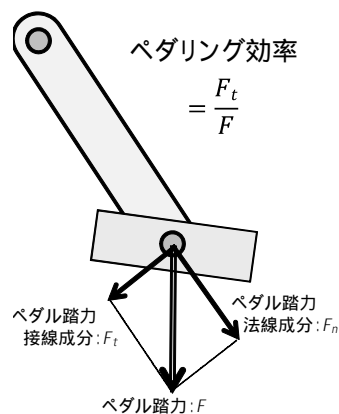


図1: ペダリング効率

(1) So R, Ng J, Ng G, Muscle recruitment pattern in cycling: a review, *Physical Therapy in Sport*, 6, 89-96, 2005.

(2) Blake OM, Champoux Y, Wakeling JM Muscle coordination patterns for efficient cycling, *Med Sci Sports Exerc.* 44, 926-938, 2012

我々は、これまでの研究でペダルクランクとペダルの回転状態を非接触で計測する装置を開発する<sup>(3)</sup>一方、予備実験によって、上級者のペダル踏力の強度が変化しても、下肢筋の表面筋電図に大きな変化は現れないことを確認した。これは、自転車ペダリング技術を評価するためには、これまで検討されていない体幹深部筋の影響を正確に把握しなければいけないことを示している。つまり、非侵襲的に体幹深部筋の筋力発揮状態を推定することができれば、体幹深部筋の発揮力も含めた総合的なペダリング効率を上げることができ、ひいては自転車スポーツ科学分野の発展に資する成果が得られると考えた。

(3) Kitawaki T, Oka H. Proposal of a new evaluation index of bicycle pedaling skill --- using wireless multi-axis acceleration and angular velocity sensors ---, *Book of abstracts 17th annual congress of the European College of Sport Science*, 340-341, 2012

ここで、逆力学シミュレーションとは、生体の骨格と骨格筋とをモデル化し、自転車

への作動力とペダリング動作の情報を与えることで、この作動力を実現するための各骨格筋の発揮筋力を、逆運動学計算から求める方法である。この、逆力学運動シミュレーション技術に、実際の自転車ペダリング状態の計測データを用いれば、体幹深部筋の筋力発揮状態を推定することができる考えた。

## 2. 研究の目的

本研究では、自転車ペダリング運動時の作動力と動作状態を正確に計測する装置を構築した上で、この計測値を逆力学シミュレーションに与えることで、体幹筋の筋活動を推定する技術を確立し、効率的なペダリング

### 1. ペダリング状態の計測

#### 1.1 自転車ペダリング運動状態測定システムの開発

(1) 自転車への作動力計測

(2) 自転車ペダリング動作計測

(3) 下肢筋群筋電図計測

#### 1.2 自転車ペダリング動作データ収集



### 2. 逆力学シミュレーション

(1) 逆力学計算

(2) 計算結果と表面筋電図とを比較

(3) 体幹筋の活動状態を推定  
(本研究の主題)

図2: 研究内容の概要

を行うための筋活動について検討を行うことを目的とする(図2参照)。

まずペダリング状態の計測については、新たに「自転車ペダリング運動状態計測システム」を開発し、自転車クランクに作動するペダル踏力とサドルとハンドルにかかる作動力を同時に計測し、ペダリングを行っている被験者の動作をモーションキャプチャ装置で計測すると同時に、下肢筋の表面筋電図を計測する。こうして計測した自転車ペダリング時の作動力とペダリング動作とのデータを用いて逆力学シミュレーションを行うが、その計算結果を計測した表面筋電図と比較することで、逆力学計算の確からしさを評価し、体幹深部筋の発揮力を推定することができる。

## 3. 研究の方法

### (1) 自転車ペダリング運動状態測定システム

体幹深部筋の逆力学シミュレーションを行うためには、解析に必要な自転車ペダリング状態を正しく計測する必要がある。この

ため、自転車への作動力、ペダリング動作、発揮筋力を同時に計測可能な「自転車ペダリング運動状態測定システム」を開発した。図3に測定システムの概念図を示す。被験者は、後輪軸で負荷装置に固定されたロードサイクルを用いてペダリング動作を行う。実験プロトコルとして、強度(100W・250W)、回転数(60rpm・90rpm)、ペダリング方法(サドルに腰掛ける・立ち漕ぎ)をそれぞれ組み合わせ、条件の違うペダリング状態を計測した。

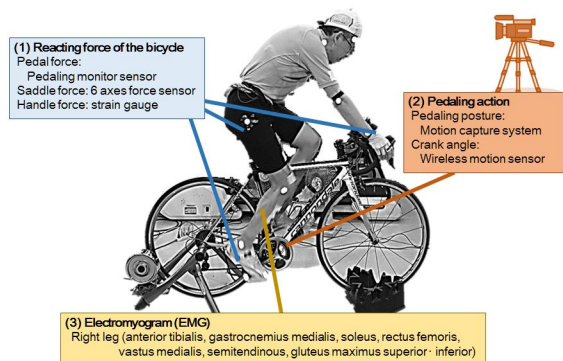


図3：自転車ペダリング運動状態測定システム

#### 自転車への作動力

被験者が自転車に与える力として、ペダル踏力、サドル力、ハンドル力を図4に示す装置を用いて計測した。ペダル踏力として、左右のクランクに設置したペダリングモニタセンサ(SGY-PM900H90：パイオニア)を用いて計測した。左右クランクにおける30°ごとの接線(tan)、法線(rad)方向の踏力ベクトルを用いた。サドル力はシートポストに設置した6軸力覚センサ(CF5 100CA152AS：レプトリノ)を用いてサドル軸にかかる力とサドル座面上の作用点を計測した。ハンドル力は、本体とハンドルを接続するステムに設置した2軸重ね配置型歪みゲージ×2個(KFG-5-120-D16：kyowa)を用いて左右ハンドルの手を置く位置での上下、前後方向の力を計測した。

#### ペダリング動作

##### 運動姿勢：

モーションキャプチャ装置(GE60 Move-tr/3D：ライブラリー)を利用してペダリング動作中の運動姿勢を計測した。また、被験者のペダリング動作によるクランク角

度の時間変化を、ワイヤレスモーションセンサ(9軸ワイヤレスモーションセンサ：ロジカルプロダクト社)を自転車のクランクに設置して計測した。

#### 発揮筋力：EMG

被験者の筋電図(EMG)を、下腿(利き足)の8カ所(前脛骨筋、内側腓腹筋、ひらめ筋、大腿直筋、内側広筋、半腱様筋、大殿筋上部、大殿筋下部)に小型筋電センサ(追坂電子機器)を取り付けて記録した。EMG波形は、ノイズ除去後、整流化し、積分処理して積分筋電図(IEMG)を得た。

#### (2) 逆力学シミュレーションモデルの構築

構築した「自転車ペダリング動作解析システム」の計測データを用いて逆力学シミュレーション計算ができるように、動力学計算ソフト AnyBody Modeling System (AnyBody Technology)を用いて解析モデルの構築を行った。

ここで構築した解析モデルは、モーションキャプチャで計測したペダリング中の運動姿勢に人体の筋肉モデルの動きを合わせた後、人体から発生する力が自転車にかかる作動力と一致するように、各筋肉の発揮力を逆計算するものである。このモデルでは、わずかなペダルクランクの回転変動を考慮しつつ、ペダル踏力、サドル力、ハンドル力を規定し、各筋肉の発揮力を推定できるようにしている。ペダルクランク回転を正確に反映するよう、1周を180分割しており計測されたクランク回転数の動きに同調している。

今回のモデルでは、滑らかな計算結果が得られるように被験者のペダリング動作や自転車に与える力はすべてクランク回転角度を変数とするフーリエ級数(4倍周波数まで)で近似した関数として解析計算を行った。

#### (3) 体幹深部筋の発揮力推定

体表面で計測した下肢筋群の筋電図変化を参照値として、逆力学シミュレーションの解析結果である計算した各筋力の筋発揮力とを対応させ、ペダルクランクの角度ごとの値を比較して、計算した体幹深部筋の発揮力の確からしさを検討する。このとき、解析モデルにおいて複数の筋に分かれている筋は、これらの平均値を解析に用いた。

ここで重要なのが、逆力学シミュレーション



(a) ペダル踏力

(b) サドル力

(c) ハンドル力

図4：自転車への作動力の計測

ン結果で得られた各筋肉の発揮力は絶対値であり、相対的な発揮力を表現している下肢筋群の筋電図とは直接比較することができない点である。そこで次の2つの方法を用いて、逆力学シミュレーションによって得られた下肢筋群の発揮力と下肢筋群の筋電図とを比較することで、逆力学シミュレーションによって推定された体幹深部筋の発揮力が正しいかどうかを検討する。

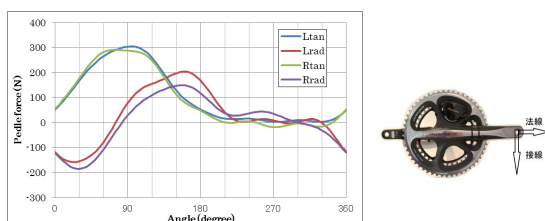
ペダル踏力強度の違いによる筋活動の違い：筋電図計測では相対的な筋肉の発揮力が得られることを利用して、ペダル踏力強度の違いによる各筋肉の発揮力変化を考察する。

ペダルクランク角度依存性：下肢筋群の筋電図では、ペダルクランク角度ごとの筋力発揮のタイミングが正確に計測できることを利用して、クランク回転数の変化による違いを検討する。

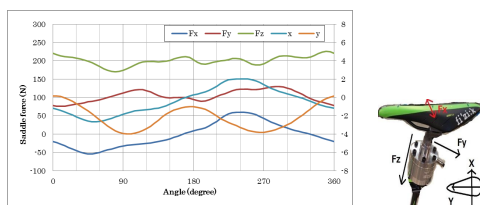
#### 4. 研究成果

##### (1) 自転車ペダリング運動状態測定システム

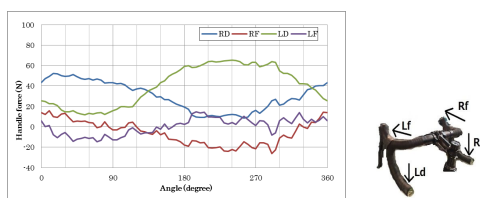
新たに構築した自転車ペダリング運動状態測定システムの計測例として、自転車への作動力を図5に示す。図5(a)のペダル踏力は、クランクが水平になる90°付近で回転方向踏力が最大となり、210~330°の脚を引き上げるフェイズで、ほとんど踏力がかかっていないことから効率的なペダリングができていていることがわかる。また、図5(b)のサドル力からは、ペダリングをしても体



(a) ペダル踏力



(b) サドル力



(c) ハンドル力

図5： 自転車への作動力

重による下方向の荷重( $F_z$ )がほとんど変化せず、左右方向( $F_x$ )と前後方向( $F_y$ )の応力のみが変動していることと、サドルに対する力の作用点が変わっていることが計測できている。このようなペダリングに伴う応力の変動は、図5(c)のハンドル力にも現れており、自転車に対する差動力として、ペダル踏力だけでなく、これらのサドル力とハンドル力も考慮すべきことを示している。

##### (2) 逆力学シミュレーション

逆力学計算を行った結果例として、右脚の上死点を0°とした時に90°となる時の状態を図6に示す。この図で緑線は足底部がペダルから受ける反力ベクトルを示しており、筋肉の色の濃淡は力発揮の強弱を示している。この結果から、逆力学計算を行うために付与したペダル踏力の反力を足部が受けており、そのペダル踏力を実現するために、下肢筋だけでなく腸腰筋・腹横筋・脊柱起立筋などの体幹の筋肉が協力して力発揮をしている様子が見て取れる。

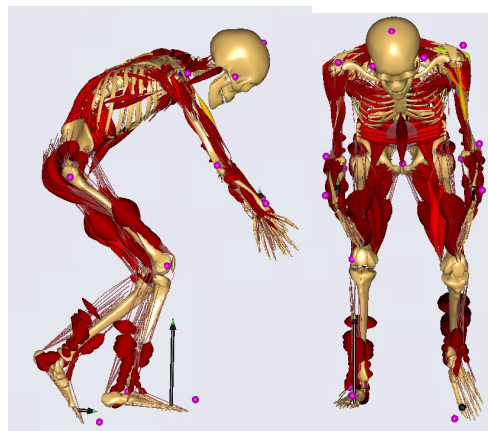


図6： 逆力学シミュレーションの計算例

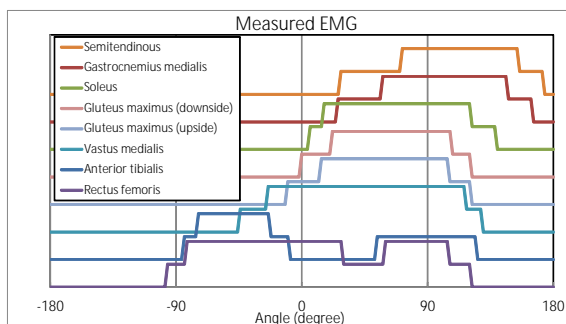
##### (3) 体幹深部筋の発揮力推定

右脚を対象としたペダリングによる筋電図と逆力学計算による筋発揮力との、それぞれクランク角度ごとの変化例を図7に示す。どちらの図も右クランクの上死点を0°とした時の筋力発揮状態を示しており、各筋の最大発揮力を100%としたときの20%以上と50%以上の値を段階的に示している。この図から、クランク角度のどのタイミングで各筋が力を発揮しているか、次のような特徴がわかる。

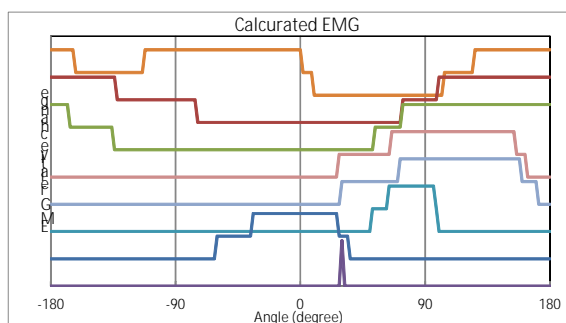
- ・計測した筋電図からは脚を踏み込む力が発生する-90~180°において、必要なタイミングで筋が順に力を発揮している様子が見られる。

- ・計算結果によると、ややタイミングが遅いものの、計測した筋電図とよく似た順に各筋肉が力を発揮している特徴が得られている。しかし下肢裏側の筋肉である、内側腓腹筋、ひらめ筋、半腱様筋が脚の引き上げ時にも筋力を発生していたり、大腿直筋が余り大きな力を発揮しなかったりして、異なる特徴を持つ点もある。

このような筋発揮力のタイミング比較により、計算した筋発揮力はペダリング時の特徴をよく表しており、逆動力計算が実際の筋発揮力やペダル発揮力と整合していることがわかる。一方で、現在のペダリング動作逆動力計算モデルでは、計算の残差(計算モデルが破綻しないように追加された計算誤差量)がまだ大きいと、計算モデルのさらなる改良を必要としていると考えられる。



(a) EMG 計測値



(b) 逆動力シミュレーション計算値

図7：筋発揮力の比較

#### (4) まとめ

本研究では、自転車ペダリング動作に影響を与えている体幹深部筋の活動状態を推定することを研究目的とした。これまでの研究では、計測が容易な表面筋の活動についてのみ解析が行われており、体幹深部筋の筋活動についての報告はなかった。そこで本研究では、ペダルクランク回転状態とペダル踏力を同時に計測し、これらの情報から逆動力シミュレーション計算を行うことによって、ペダリング動作中の体幹深部筋の活動を推定して、ペダリング動作の効率に与える体幹深部筋の影響を解析する研究を行った。

まず、自転車への作動力、ペダリング動作、下肢筋の表面筋電図、の3つの項目を同時計測可能な「自転車ペダリング運動状態測定システム」を開発した。このシステムでは、ペダル踏力・サドル応力をペダリングモニタと6軸力覚センサで測定し、ハンドルステム部の歪みゲージと合わせて、自転車に加える作動力をすべて測定しながら、モーションキャプチャを用いて体の姿勢・動作を計測する装置構成となっている。このシステムを利用し、ペダリング方法の違い(座り漕ぎ、立ち漕ぎ)、ペダル回転数、負荷強度な

どを変化させた各種条件で自転車ペダリング時のデータ収集を行った。

さらに、このシステムで測定された自転車ペダリング動作データ(自転車にかかる作動力とペダリング時の動作)から詳細な逆動力計算を行った。このとき、逆動力解析モデルで股関節の大臀筋のように筋肉が巻きつくような動きをする場合を正確に取り扱うことで、正しい結果が得られることがわかった。この問題点を解決したことで、自転車ペダリング運動状態測定システムで計測した下肢筋の表面筋電図と逆動力計算で計算された表面筋の活動状態が一致する計算結果が得られ、計算された体幹深部筋の働きが正しいことを確認することができた。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Kitawaki T, Oka H. A measurement system for the bicycle crank angle using a wireless motion sensor attached to the crank arm. *Journal of Science and Cycling*, 査読有 2(2), 2013, 13-19.

〔学会発表〕(計8件)

Kitawaki T, Tokuyasu T: Evaluation of bicycle pedaling ability using vertical and horizontal components of pedaling force vector, 41st Annual Meeting of the American Society of Biomechanics, 2017/8/8 ~ 11 Boulder, USA

Kitawaki T, Tokuyasu T, Oka H: Evaluation of trunk muscle force in bicycle pedaling under various conditions using inverse dynamics calculation., 22nd annual congress of the European College of Sport Science (ECSS2017), 2017/7/5 ~ 8 Essen, Germany

北脇知己, 徳安達士, 岡久雄: 逆動力計算を用いた自転車ペダリング動作中の体幹筋力推定, 日本機械学会 シンポジウム スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2016, 2016/11/9~11 山形テルサ(山形)

Kitawaki T, Tokuyasu T, Oka H: Estimation of the trunk muscle force in bicycle pedaling using an inverse dynamics computation., 21st annual congress of the European College of Sport Science (ECSS2016), 2016/7/6 ~ 9 Austria, Vienna

Kitawaki T, Tokuyasu T, Oka H: Development of measurement system and computation of inverse dynamics for estimate the trunk muscle force in bicycle pedaling., World Congress on Bioengineering 2015 (WACBE 2015), 2015/7/6 ~ 8 Singapore, Singapore

北脇知己, 佐々木啓太, 脇安美里, 徳安達士, 岡久雄: 自転車ペダリング動作における逆動力学計算を用いた体幹部筋力推定のための測定システムの構築, スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス2014, 2014/10/29 ~ 30 長岡市

Kitawaki T, Tokuyasu T, Oka H: Influence of load power, cadence and weight on the efficiency index of pedaling monitor system., 2nd World Congress of Cycling Science, 2014. 2014 7/2 ~ 3, Leeds, United Kingdom

Tomoki Kitawaki, Tatsushi Tokuyasu, Hisao Oka: Evaluation of bicycle pedaling skills using a bicycle crank angular velocity irregularity index, The 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'13), 2013/07/04 Osaka International Convention Center, Osaka

〔その他〕

ホームページ等

准教授のペダリング講義室

<http://kitawakiokadai.blog.fc2.com/>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

北脇 知己 (KITAWAKI Tomoki)

関西医科大学・医学部・教授

研究者番号：40362959

### (2)研究分担者

### (3)連携研究者

岡 久雄 (OKA Hisao)

岡山大学・保健学研究科・教授

研究者番号：80116441

徳安 達士 (TOKUYASU Tatsushi)

福岡工業大学・情報工学部・教授

研究者番号：50435492