

背泳ぎのスタートにおける力学解析

The dynamics analysis of the backstroke starting motion in swimming

前田 時生*

*慶應義塾大学大学院 政策メディア研究科 修士課程 1年, 仰木裕嗣研究会

1. 背景・目的

関節の力やトルクを算出するには、逆動力学解析を用いることが多い。その逆動力学解析は、地面から受ける力をフォースプレートなどで計測し、足部から足関節、下腿から膝関節、胴部、上肢へと、各部位ごとに運動方程式を解き、関節の力やトルクを算出していく。この解析を、背泳ぎのスタート動作において行うためには、壁を蹴る力を測定する床反力計（フォースプレートなど）が必要であり、水場であつ、フォースプレートを 90° 回転させなければならないため、特別に、防水であること、床反力計を壁に完全に固定する必要がある。このような厳しい条件を満たす設備を所有している施設はほとんどなく、床反力の計測が困難であるため、運動学的な研究が多く、運動力学的な研究はそれほどされてこなかった。

糸井ら⁽¹⁾は、背泳ぎのスタート動作を行う際に、手部が握るグリップ（上部（横グリップ）、側部（縦グリップ）、低部（横グリップ）の3箇所）にフォースプレートを埋め込み、手部の発揮している力を計測した。糸井らによれば、低い位置のグリップを握ると、他のグリップ位置を握った時よりも、身体の多くの体積が水の中に入水した状態となり、飛び出し速度や入水位置など、スタートに重要なパラメーターの値が低く、パフォーマンスを低下させると報告している。つまり、スタート動作を行う前の初期姿勢が高い位置であることが大切であるということだ。しかし、鉛直方向への力発揮、つまり身体を持ち上げ、その高さを支えるために必要な力は、低いグリップを握った時のほうが小さい力ですんでいる。これは、身体が水に入水している部分が受ける浮力のおかげであるとも報告しており、ジュニアの選手で身体全体を腕の筋力で支えることが難しい場合、低いグリップを握らせて浮力を利用することを推奨していた。筋力の発達とともに、グリップ位置を変えていく指導が必要であると述べられている。このように、手部の力を計測しているものの、そこから逆動力学解析を用いて、上肢の関節の力やトルクは算出せず、カメラから得られた、重心の飛び出し速度やその角度、大転子入水距離などの運動学的な部分に着目している。

しかし、先に既述の通り、壁を蹴る力を計測する床反力計を背泳ぎのスタート動作のために設置することはかなり難しい。筆者⁽²⁾は、背泳ぎのスタートを 90° 度回転させた動作と似ている垂直跳び動作において、左右対称であるこの動作を矢状面上のモデルとして簡略化し、床反力を推定した。逆動力学計算では、床反力計で計測した力ベクトルを用いて足先から順に算出し

ていくことが主流だが、床反力計がない場合を考え、末端が固定されておらず、外力は重力しか働かない手部から順にニュートン・オイラーの運動方程式を解いて上肢、胴部、下肢へと関節の力とトルクを算出した。結果、算出されたつま先の力が、床反力計で計測した力とおおむね一致（正確には鉛直成分は逆動力学解析のみで概ね一致する値を示したが、水平成分は逆動力学で推定した鉛直成分を利用し、さらに別の推定式を利用して概ね一致）したと報告している。これは当然といえば当然であり、外力は重力と床反力のみであるため、重心の加速度と質量（いわゆる体重）が分かれば、質点モデルまで簡略化したニュートンの運動方程式で、床反力を推定することもできる。

床反力の推定は、歩行解析など多くの動作でも多くなされている。加藤ら^③は、小型の三軸加速度センサを、仮想重心位置として第三腰椎の棘突起に装着した。このセンサから得られた加速度情報を用いて、床反力計の鉛直方向と前後方向を推定しており、臨床現場でも広く利用されることを目指している。横方向の床反力が有意に測定できなかった考察として、歩行動作での横への動きはそもそも小さく、棘突起周辺の皮膚や筋、脂肪などの振動によるものであると推察していた。また、宮脇ら^④は、鉛直方向成分だけが測定できる F-SCAN を用いて水平成分を二次元モデルで算出している。F-SCAN は、フォースプレートとは違い、靴のインソールにも入ることができるため、場所を選ばず歩けことができる利点がある。鉛直成分しか測定できないが、位置座標をカメラなどで取得できればフォースプレートがなくても床反力の水平成分が推定できると報告した。

小笠原ら^⑤は、ACL 損傷のリスクを、静力学を導入して評価している。ACL 損傷時、下腿部はほとんど動かない状態で、膝関節に回転力が生じることで損傷する。オイラーの回転の運動方程式において、下腿部の回転がほとんどない場合、慣性項のモーメントが床反力によるモーメントに対して十分に小さい時、慣性項を無視することで静力学に近似することが可能となる。実際に、床反力計を用いて逆動力学で算出した膝関節トルクと、床反力によるモーメントを比較してみると、概ね一致したと報告している。つまり、各関節の位置座標と、床反力ベクトルとその作用点が分かれば、各関節のトルクを静力学的計算で算出することができると報告した。

以上のことから、本研究では、床反力計を用いた逆動力学解析を行い、関節の力やトルクを算出し、トルクの発揮パターンを観察することを目的とする。そこから、歩行動作や垂直跳び動作で使用されている床反力の推定式を用いて床反力を推定、静力学モデルを利用した下肢トルクの静力学近似を検証し、評価実験の簡略化をさらなる目的とする。

筆者は昨年、ポルトガルのポルト大学を訪問した。ポルト大学は、背泳ぎのスタート動作のために開発された防水加工のフォースプレートを所有している。そのフォースプレートと、モーションキャプチャシステム(Qualisys)、ハイスピードカメラを併用して撮影した実験を行ってきた。まずはフォースプレートを用いて逆動力学計算を行い、関節の力やトルクを算出する。ま

た、オイラーの運動方程式において、下肢の各部位の回転が小さく、慣性項によるモーメントが外力によるモーメントに対して十分に小さかった場合、背泳ぎのスタート動作でも、下肢のトルクは静力学に近似できることを示唆できる。また、垂直跳びの時と同様に、床反力の推定ができれば、フォースプレートを使わずに背泳ぎのスタート動作の評価が行える。床反力の推定と静力学近似を検証し、有意な結果が得られたら、位置座標が取得できれば、瞬時に床反力ベクトルと下肢の関節周りのトルクの発揮を観察することができるようになる。

2. 力学モデルと運動方程式

本研究では、背泳ぎのスタート動作は矢状面での動作に近似できると仮定した、矢状面上の力学モデルを作成し、運動方程式をたてた。ただし、今学期は下肢の関節トルクに注目した。以下に矢状面上での下肢の力学モデルの図（図1）と、代表的に足部、下腿部位の運動方程式を示す。

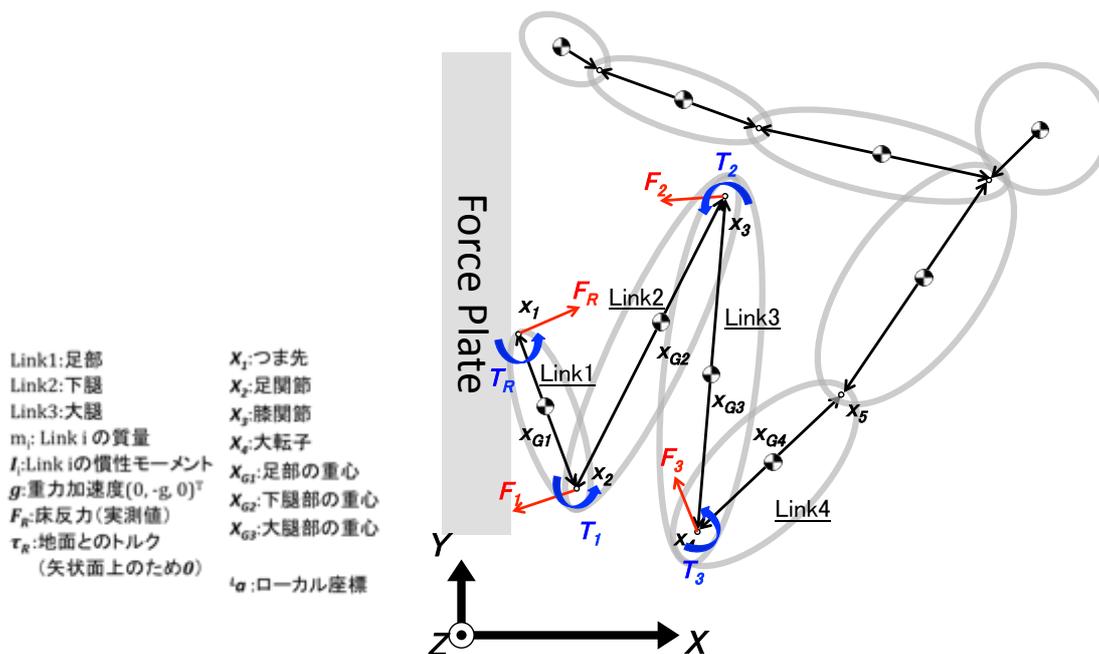


図 1 矢状面上の下肢の力学モデル

リンク 1 : 足部

並進の運動方程式

$$m_1(\ddot{x}_{G1} - g) = F_R + F_1$$

$$F_1 = m_1\ddot{x}_{G1} - m_1g - F_R$$

回転の運動方程式

$$\begin{aligned}
 I_1 \dot{\omega}_1 &= \tau_R + \tau_1 + (x_0 - x_{G1}) \times F_R + (x_1 - x_{G1}) \times F_1 \\
 \tau_1 &= I_1 \dot{\omega}_1 - \tau_R - (x_0 - x_{G1}) \times F_R - (x_1 - x_{G1}) \times F_1 \\
 &= I_1 \dot{\omega}_1 - \tau_R - (x_0 - x_{G1}) \times F_R - (x_1 - x_{G1}) \times (m_1 \ddot{x}_{G1} - m_1 \mathbf{g} - F_R) \\
 &= I_1 \dot{\omega}_1 - \tau_R - (x_0 - x_{G1}) \times F_R - (x_1 - x_{G1}) \times m_1 \ddot{x}_{G1} + (x_1 - x_{G1}) \times m_1 \mathbf{g} \\
 &\quad + (x_1 - x_{G1}) \times F_R \\
 &= I_1 \dot{\omega}_1 - (x_0 - x_1) \times F_R + (x_{G1} - x_1) \times m_1 \ddot{x}_{G1} - (x_{G1} - x_1) \times m_1 \mathbf{g}
 \end{aligned}$$

リンク 2：下腿部

並進の運動方程式

$$\begin{aligned}
 m_2 (\ddot{x}_{G2} - \mathbf{g}) &= -F_1 + F_2 \\
 F_2 &= m_2 (\ddot{x}_{G2} - \mathbf{g}) + F_1 \\
 &= m_2 \ddot{x}_{G2} + m_1 \ddot{x}_{G1} - m_2 \mathbf{g} - m_1 \mathbf{g} - F_R
 \end{aligned}$$

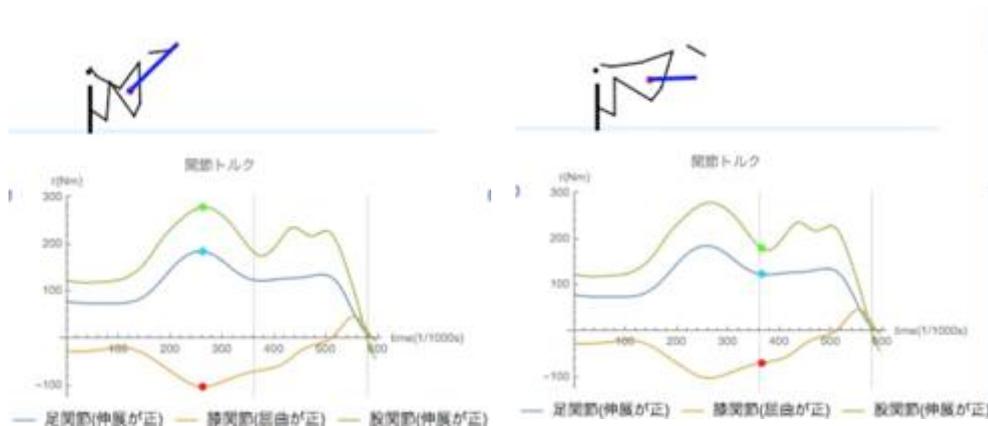
回転の運動方程式

$$\begin{aligned}
 I_2 \dot{\omega}_2 &= -\tau_1 + \tau_2 - (x_1 - x_{G2}) \times F_1 + (x_2 - x_{G2}) \times F_2 \\
 \tau_2 &= I_2 \dot{\omega}_2 + \tau_1 + (x_1 - x_{G2}) \times F_1 - (x_2 - x_{G2}) \times F_2 \\
 &= I_2 \dot{\omega}_2 + \tau_1 + (x_1 - x_{G2}) \times (m_1 \ddot{x}_{G1} - m_1 \mathbf{g} - F_R) - (x_2 - x_{G2}) \times (m_2 \ddot{x}_{G2} \\
 &\quad + m_1 \ddot{x}_{G1} - m_2 \mathbf{g} - m_1 \mathbf{g} - F_R) \\
 &= I_2 \dot{\omega}_2 + I_1 \dot{\omega}_1 - (x_0 - x_1) \times F_R + (x_{G1} - x_1) \times m_1 \ddot{x}_{G1} - (x_{G1} - x_1) \times m_1 \mathbf{g} \\
 &\quad + (x_1 - x_{G2}) \times (m_1 \ddot{x}_{G1} - m_1 \mathbf{g} - F_R) - (x_2 - x_{G2}) \times (m_2 \ddot{x}_{G2} \\
 &\quad + m_1 \ddot{x}_{G1} - m_2 \mathbf{g} - m_1 \mathbf{g} - F_R) \\
 &= I_2 \dot{\omega}_2 + I_1 \dot{\omega}_1 - (x_0 - x_2) \times F_R + (x_{G1} - x_2) \times m_1 \ddot{x}_{G1} \\
 &\quad + (x_{G2} - x_2) \times m_2 \ddot{x}_{G2} - (x_{G1} - x_2) \times m_1 \mathbf{g} - (x_{G2} - x_2) \times m_2 \mathbf{g}
 \end{aligned}$$

3. 結果

3.1 下肢の関節トルクの発揮

以下の図 2 に、動作時の下肢のトルク発揮パターンと、動作中のある時間での姿勢を示す。



3.2 静力学の導入

背泳ぎのスタートにおいて、下肢部の回転はかなり小さい。動作中 0.6 秒で回転する角度はそれほど大きくはないことを考慮すると、回転の運動方程式における動的な慣性項におけるモーメントは、外力（床反力や重力）によるモーメントは小さいことが考えられる。以下に、代表例として足部の回転を構成する各成分をグラフで示す(図 3)。

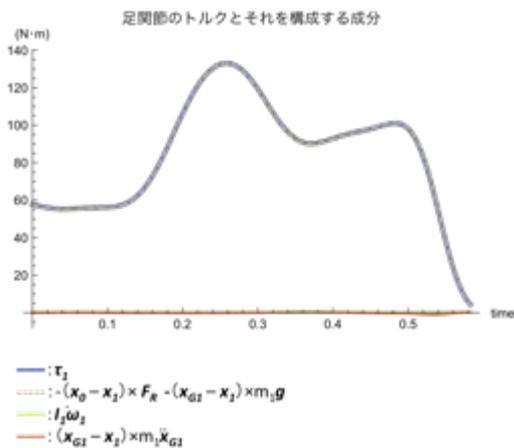


図 2 足関節のトルクとそれを構成する成分

グラフからわかるように、予想通り慣性項によるモーメントは外力項によるモーメントに対して十分に小さく、慣性項を無視した場合、以下の式が成り立つ。

$$\tau_1 \cong -(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_1) \times \mathbf{F}_R - (\mathbf{x}_{G1} - \mathbf{x}_1) \times m_1 \mathbf{g}$$

つまり、足首のトルクは、床反力と位置座標のみで算出できることが示唆された。

3.3 床反力の推定

背泳ぎのスタートにおいて、外力は床反力と重力のみであり、位置座標から得られた重心位置の加速度を二階微分して求めた重心の加速度と、身体全体の質量を用いて床反力を算出した。

$$F_R + F_G = m\ddot{x}$$

$$F_R = m\ddot{x} - F_G$$

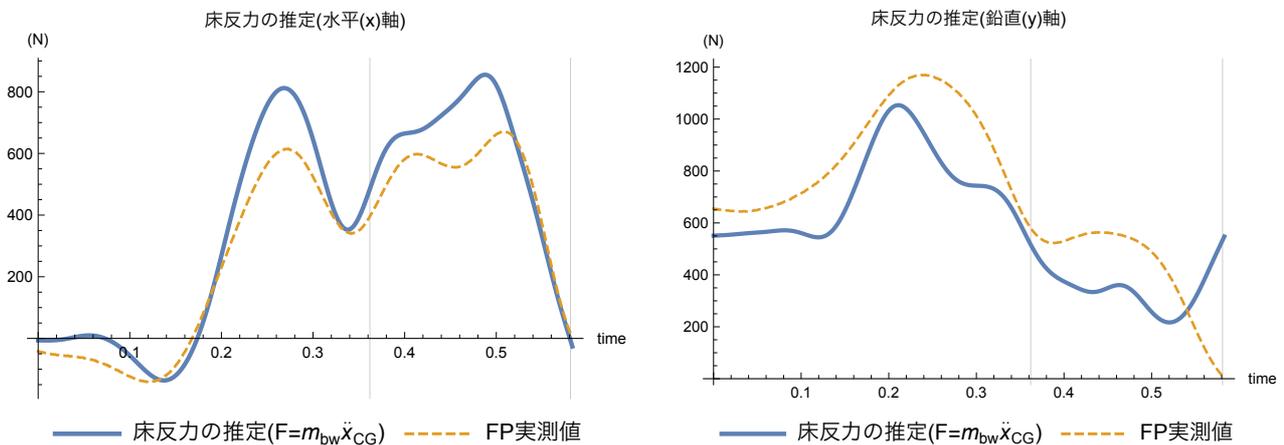
ここで、 F_G は重力であり、

$$F_G = mg$$

であるため、以下のようになる。

$$F_R = m(\ddot{x} - g)$$

この式から、床反力を推定した。以下の図は、床反力の推定結果と、推定結果を検証するためにフォースプレートから得られたデータを比較対象として同じグラフで示した。



上のグラフの通り、特に水平方向は概ね特徴は捉えているものの、床反力計の値と代替できるとは言えない。これらの要因として、位置座標の取得方法がデジタルであり、PCの性能や画面の画素数、人的な操作などによる誤差がひとつ挙げられる。さらに、このモデルは矢状面上での動作として解析を進めているが、上肢の動作は実際には矢状面上だけではないことも挙げられる。

4. まとめと問題点

本研究では、背泳ぎのスタートにおける力学解析を行った。これまでプールという環境からフォースプレートを用いることが難しく、運動学的な研究が多くなされてきたが、床反力の推定が可能となれば、今後は力学的な研究も飛躍的に増えていくことが考えられる。しかし、水泳のスタートの評価は、15m通過タイムが速くて初めてスタートが上手であると評価される。本研究は、スタート前の構えの姿勢から水の中に入る直前までの解析であり、「背泳ぎのスタートの良し悪し」を決めるためには、入水後の水中運動も考慮していく必要があることも示唆された。

文 献

引用文献

1. Osamu ITOI, Tsuyoshi TAKEDA, Shozo TSUBAKIMOTO. “Effects of grip position on hand force in backstroke start”, Japanese Journal of Sciences in Swimming and Water Exercise Vol.13, No.1, 2010
2. 前田時生.「背泳ぎのスタート動作における評価基準の確立とその評価実験の簡略化」.慶應義塾大学 平成 26 年度卒業論文
3. 加藤 浩 1),米山 満 2) 1)九州看護福祉大学,2)三菱化学科学技術研究センター.「小型三軸加速度センサを用いた歩行分析の有用性 —床反力計・三次元動作解析装置との比較検討—」第 49 回日本理学療法学会大会. 2014.06.02
4. Kazuto MIYAWAKI, Takehiro IWAMI, Goro OBINATA, Yoichi SHIMADA 『Estimate of Floor Reaction Force vector using Foot-Pressure Sensor』 Journal of System Design and Dynamics Vol. 2 (2008) No. 4
5. Issei OGASAWARA. “Statics model for risk determination of anterior cruciate ligament injuries”, symposium on sports engineering : symposium on human dynamics 2009, 247-252, 2009-12-02