

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25282197

研究課題名(和文) スポーツ飛翔体に作用する流体力推定と飛翔初期条件を決定づける身体技能の評価

研究課題名(英文) Estimation of the Fluid Dynamic Forces acting on the Sports Projectiles and the Evaluation of Human Skill which determines Initial Flight Condition

研究代表者

仰木 裕嗣 (OHGI, Yuji)

慶應義塾大学・政策・メディア研究科・准教授

研究者番号：90317313

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：スポーツにおける飛翔体は空気力学的な力を受けることでその飛翔距離や軌道が決定される。さらにはこの飛翔初期条件を決定するのは競技者のスキルであることから、これら空気力学的な力の推定、並びに競技者のスキルを同時に計測・評価するための方法論を確立することを目指した。高速・広範囲に飛翔するスキージャンプにおいては、レーザー光を使ってリアルタイムで軌道計測を実現し空力特性を明らかにし、選手の飛翔フォームについては慣性センサで復元する技法を確立した。ボール飛翔については無回転投球動作についての投球フォームの原理について明らかにし、円盤投については最適飛行のための初期条件シミュレーションが完成した。

研究成果の概要(英文)：A flight distance and path of the sports projectiles are determined by the aerodynamic forces acting during its flight. Obviously, its initial conditions are determined by the athlete's skill. Therefore, our research objectives were both the estimation of the aerodynamic forces and the optimum athlete's skill for the sports projectiles. We developed a real time monitoring system for the ski jump trajectory using the infrared red laser scanner. Then, we have established the methodology for the aerodynamic forces on the skier. For the baseball pitching, we could elucidate the theory of the knuckle ball throwing skill of the baseball pitcher. For the discus throwing, we established a computer simulation method for the initial conditions of the optimum flight trajectories.

研究分野：スポーツ工学

キーワード：スポーツ流体力学 スポーツ飛翔体 スキージャンプ 野球ボール 円盤投 慣性センサ

### 1. 研究開始当初の背景

スポーツ流体力学には大きく分けて、ボールや円盤に代表される、競技者によって投射される用具とスキージャンプや水泳などのように競技者本人が流体中を移動する、二つのテーマが存在する。用具によって取り囲まれた競技者、例えばボートや、ボブスレーなどは後者に属するものと考えてもよい。これらを我々は、スポーツ飛翔体と呼ぶことにする。選手あるいは競技ルールの目的から、スポーツ飛翔体を細分すれば、円盤投やスキージャンプに代表されるように、距離最大であることがパフォーマンス上望ましいスポーツ飛翔体という分類と、野球における変化球や、サッカーのぶれ玉シュートなどに代表されるような、相手をかく乱する為に予測不能な挙動をすることが望ましい飛翔体に分類される。いずれの目的においても、競技特性や競技採点基準に応じて選手が合目的にその技能を発揮した結果が、スポーツ飛翔体の挙動であることは間違いない。したがって、選手のもつ技能が表出したものが、スポーツ飛翔体の挙動であり、且つ競技パフォーマンスであると言える。我々は、この「スポーツ飛翔体の挙動」と「選手の技能」の両方を、研究対象にする。

これらスポーツ飛翔体は航空機や船舶等と異なり、形状変化による影響や乱流の発生メカニズム等が未解明なものが数多い。なかでも野球における変化球のメカニズムやスキージャンプなどは流体力学的特性が競技パフォーマンスに直接結びつき、流体力学者のみならず競技者・コーチの興味が高い。ところが、スポーツ飛翔体は高速で広範囲の移動による場合が多く、これをカメラで観測することは難しい。そこで、現象をカメラによって観測する困難を克服するためコンピュータシミュレーションが候補として挙げられる。理化学研究所の姫野らは CFD によるボール周り流れのシミュレーションをスーパーコンピューターを用いて、行っている(姫野 2001)。検証では投球後の限られた区間におけるボールの運動を画像分析によって同定しているのみであり、飛翔中全期間にわたる解析は実験的手法・シミュレーション的手法共に国内外研究は非常に少ない。ボール以外の飛翔体の代表として円盤投が挙げられるが、投射時の円盤迎え角はマイナス10度からマイナス5度を有するべきであるとされている(Dyson ら, 1986)。しかしながら、50m にわたって飛翔する間の微小な角度変化を漏れなく観測することはこれまで不可能とされてきた。

そこで、研究代表者の仰木らは、科研費基盤研究(B) (課題番号 22300219 平成 22 年から平成 24 年度)において、スポーツ飛翔体そのものに加速度センサ、ジャイロセンサなどの慣性センサを内蔵し、飛翔中に得られる運動学情報から、スポーツ飛翔体の運動解析を行う基盤技術開発に取り組み以下の成

果を得た。(1) スポーツ飛翔体に内蔵する多軸無線慣性センサの開発。(2) 風洞実験によるスポーツ飛翔体に作用する流体力同定。(3) 三次元映像解析によるスポーツ飛翔体の追尾と逆動力学手法による流体力推定。本研究では、これらの成果の元にスポーツ飛翔体における流体力学的研究をさらに進めるものであった。

### 2. 研究の目的

本研究では、スポーツにおける飛翔体の運動を、飛翔体自身に内蔵または装着した慣性センサによって計測し、得られるセンサデータから飛翔中に作用する流体力の推定に取り組み、スポーツ飛翔体の飛翔メカニズム解明を第一の目的とする。第二目的として、飛翔体を計測する目的で開発した慣性センサを用い、飛翔前すなわち投擲・投球・踏切動作などの選手の動作を解析する事を、飛翔運動の解析と同時に達成することも本研究の目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、スポーツ飛翔体の代表であるスキージャンプ、野球ボール、円盤投を題材とし、その飛翔中の運動計測をスポーツ飛翔体そのものに内蔵/装着する慣性センサによって、「飛翔前」、「飛翔中」、「飛翔後(着陸後)」にわたって、その運動解析を行う。その運動解析は、スポーツ飛翔体が飛翔する大空間における、マクロな挙動とボールや円盤の回転、スキージャンパーの姿勢変化などのミクロな挙動を同時並行して観測することに相当する。またこれまでの研究方法論のスタンダードである光学式モーションキャプチャ、高速度カメラも同時に併用し、特にスポーツ飛翔体が放たれる直前の選手の動きの解析に用いた。

スキージャンプについては、これまで広範囲に飛翔するスキージャンパーの移動軌跡を踏切から着陸までの全区間を通して観測することが困難であったが、本研究では踏切直下の位置、ならびに着陸地点前方の2点から赤外線レーザー光を空中に照射し、Time of Flight 方式の計測原理によって精密にスキージャンパーの身体位置を捕捉する方法を開発した。踏切直下の位置からの回転するレーザー光によって 0.66 度の角度精度によって選手の位置を観測しネットワークに繋がった PC 画面上でリアルタイムで飛翔軌跡を描画し、その軌跡データから、速度・加速度を導出し、飛翔中の空気力を算出した。

この飛翔軌跡の計測と並行して、スキージャンプ選手の身体各部の動きについては、9 軸慣性センサを身体各部計 9 カ所に装着し、加速度、角速度、地磁気の各センサデータから姿勢角を算出するものとした。この時、環境、計測位置によって変化する磁場の影響を補正するため、スタートゲート地点、踏切地点において、装着全センサの磁気キャリブレ

ーションを行い、このデータを用いて計算処理を行った。

姿勢推定には、カルマンフィルタを始めとする複数の姿勢復元アルゴリズムを適用し、誤差の評価を行い、それぞれのアルゴリズムの精度を検証した。

野球ボール・ソフトボールの投球時における飛翔については、ボール表面に貼付したマーカールによって飛翔軌跡を光学式モーションキャプチャ装置で計測し、得られた軌跡からボール重心を求めたのちに、飛翔中に作用する空気力の推定を行った。さらに本研究期間内には、特にナックルボールの投球動作に着目し、回転を抑止してボールをリリースさせる、すなわち飛翔初期条件を決定する投球技術の分析を逆力学解析によって行った。

#### 4. 研究成果

高速・広範囲に飛翔するスキージャンプにおいては、踏切後の飛翔中の選手の体にレーザー光を照射することで軌道計測をリアルタイムで行う方法を実現した。得られた軌道から速度、加速度を算出することで空力特性を明らかにした。選手のスキルによって飛距離には大きな違いが存在するが、移動軌跡から求められた選手個々の空力特性である抗力・揚力はそのスキルの違いを明らかにし、どの局面からの違いで飛距離に違いが出るのかを説明できた<sup>(3)</sup>。踏切後、15m程度の区間で比較してわずかな飛翔軌跡の違いが、結果として飛距離で約10mの大きな差となることが明らかになった。

また、空力特性を決定する選手の踏切及び飛翔中のフォームについては、身体に装着した9軸慣性センサで復元する技法を確立した。運動中に得られる加速度・角速度からの姿勢推定において、屋外測定地点毎に異なる磁場を較正に用い、これをカルマンフィルタと併用することで精度よく運動中の全身の姿勢変化を同定した<sup>(1,2,4)</sup>。

野球ボールの解析については、無回転で投げられるナックルボールの投球動作について逆力学解析により、手首関節の関節トルク、関節間力を算出することで分析を行った。その結果、ストレート、カーブなど回転する他の球種との差がボールリリース時における手首関節の向きの違いによることを示した。これまで投球動作の動作解析は過去に多く行われてきたが、ナックルボールはその投球を実現できる投手が少なかったため、国内外を探しても文献は見当たらない。本研究の結果、ナックルボールの投球時には、前腕を回外することで手首関節を投球時に橈尺方向の高い剛性を利用して関節を固定することで手首の背屈位を防いでいると考えられる、新たな知見が得られた。

円盤投については最適飛行、すなわち飛距離を最大にするための初期条件シミュレーションが完成した。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

(1) Kazuya Seo, Koji Shimoyama, Ken Ohta, Yuji Ohgi, Yuji Kimura, Optimization of the Size and Launch Conditions of a Discus, The Engineering of Sport 10, Procedia Engineering, Volume 72, 2014, pp. 756-761, 2014. (DOI: 10.1016/j.proeng.2014.06.128)

(2) Masahide Murakami, Masato Iwase, Kazuya Seo, Yuji Ohgi, Reno Koyanagi, High-speed video image analysis of ski jumping flight posture, Sports Engineering, April 2014, DOI 10.1007/s12283-014-0157-z

(3) Kazuya Seo, Ken Ohta, Yuji Ohgi, Yuji Kimura, Aerodynamic Hysteresis of a Discus, 6th Asia-Pacific Congress on Sports Technology (APCST), Procedia Engineering, Volume 60, Pages 294-299, 2013. (DOI: 10.1016/j.proeng.2013.07.020)

〔学会発表〕(計 5 件)

(1) Brock, H., Ohgi, Y. (2016). Towards Better Measurability-IMU-Based Feature Extractors For Motion Performance Evaluation. In Proceedings of the 10th International Symposium on Computer Science in Sports (ISCSS) (pp. 109-116). Springer International Publishing.

(2) Brock, H., & Ohgi, Y. (2015). Estimating Kinematics in Ski Jumping Using Inertial Sensors, International Society of Skiing Safety (ISSS) Symposium 2015, San Vito di Cadore, Belluno, Italy. March 8-13. Page 70

(3) 仰木裕嗣, Heike Brock, 瀬尾和哉, スキージャンプ選手の飛翔軌跡の計測, シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2015 [2015.10.30-11.1], USB 講演論文集

(4) Brock, H., Ohgi, Y. (2014). Evaluating Orientation Estimation Methods from Inertial Sensor Data for Sports Motion Analysis. International Association of Computer Science in Sports, IACSS Conference 2014, Darwin, NT, Australia. June 22-24th. Page 12.

(5) 瀬尾和哉, 下山幸治, 木村裕次, 太田憲, 仰木裕嗣, ヒステリシスを考慮した円盤投の最適化, 日本機械学会シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2013 講演論集(USB 講演論集), 129, 2013.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

(解説記事) 仰木裕嗣, スポーツパフォーマンスのセンシング-コーチングを支援するセンシング技術-, 電子情報通信学会誌, Vol197, No.8, pp.707-711, 2014.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

慶應義塾大学・政策・メディア研究科・  
准教授

仰木 裕嗣 ( Yuji OHGI )

研究者番号：90317313

### (2) 研究分担者

慶應義塾大学・政策・メディア研究科・特  
任准教授

太田 憲 ( Ken OHTA )

研究者番号：10281635

### 研究分担者

山形大学・地域教育文化学部・教授

瀬尾 和哉 ( Kazuya SEO )

研究者番号：60292405

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：