

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04066

研究課題名（和文）スポーツボールの飛翔軌跡，非定常流体力，及び渦構造の解明と展開研究

研究課題名（英文）Elucidation and development of techniques related to flight trajectory, unsteady fluid force, and vortex structure of a sports ball

研究代表者

浅井 武 (Asai, Takeshi)

筑波大学・体育系（名誉教授）・名誉教授

研究者番号：00167868

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,800,000円

研究成果の概要（和文）：回転しながら自由飛翔するスポーツボールの非定常揚力は、飛翔速度の低下と回転数の減少により、低下すると考えられた。低回転で自由飛翔するスポーツボールの非定常揚力は、ボール後流の非定常性に強く依存し、ボール後流におけるラージスケールの渦対の形成、崩壊、再形成（反転）等により、大きく動揺すると考えられた。ボールインパクト時におけるインパクト面の迎え角は、ボール回転数を制御する大きな要因になっており、ボール後流の渦動態に大きな影響を与えていると考えられた。この迎え角やボール射出速度、角度を制御するインパクト技術を駆使することにより、非定常流体力を効果的に利用したスポーツ技術を発揮できると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、流体科学、スポーツ科学、スポーツコーチングを連携させて、非定常流体力が大きく影響を与える、スポーツにおける変化球のメカニズムや実現方法を示した。また、それを応用したボールキック技術を示し、従来、効果的だが、習得が困難であった、無回転キック技術の普及、発展に大きく貢献すると考えられる。また、本研究におけるスポーツボールの非定常流体力特性やボール射出技術特性は、他のバレーボールやベースボール等のボールゲームに応用可能であり、原因が明らかでない変化球のメカニズムが検討出来るだけでなく、実現方法が不明瞭な打撃（投球）技術についても、科学的、コーチング学的見通しを与えると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The unsteady lift of a rotating sports ball in free flight was considered to decrease due to the decreased flight and rotation speeds. The unsteady lift of a slowly rotating, free-flying sports ball strongly depends on the unsteadiness of the wake of the ball and was considered to considerably fluctuate due to large-scale counter rotating vortex pairs that formed, collapsed, and reformed (reversed) in the wake of the ball. The angle of attack of the impact surface at the time of ball impact is a major factor that controls the ball's rotation speed, and it is considered to have a significant effect on the vortex dynamics of the wake of the ball. The results showed that fully utilizing the impact techniques that control the angle of attack as well as the ball ejection speed and angle can effectively demonstrate sports techniques that use unsteady fluid force.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：ボール 空力 回転 無回転 サッカー バレーボール 渦

## 様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

これまで、ボールゲームにおける変化球の研究では、高速ビデオを中心とした画像処理手法であり<sup>1)</sup>、その解像度やデジタイズ精度、3次元座標合成精度等の制限から、非常にラフな精度である場合が多い<sup>2)</sup>。また、多くのスポーツにおける変化球は、野球やサッカーを例に上げるまでもなく、非常に広範囲のスペースで実現される技術であり、その現象の初期から末期までの全体像を計測することは、計測技術的に問題が多いと考えられてきた。さらに、風洞実験や飛翔軌跡計測を用いた空力、及び空力係数推定においても、時間平均による定常空力係数を計測しており、それを基にした飛翔軌跡予測にとどまっている<sup>3)</sup>。

1) Jinji, T. & Sakurai, S.; Direction of spin axis and spin rate of the pitched baseball. *Sports Biomechanics*, 2006, 5(2), 197–214.

2) Mehta, R.D. Aerodynamics of sports balls. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1985, 17, 151–189.

3) Goff, J. E. & Carré, M. J. Trajectory analysis of a soccer ball. *Am. J. Phys.* 2009, 77, 1020–1027.

### 2. 研究の目的

本研究では、回転、及び無回転（低回転）で自由飛翔するスポーツボール（サッカーボール等）の飛翔軌跡、非定常流体力、及び非定常渦構造を、3次元モーションキャプチャシステム、ボールインパクトロボット、流体可視化用特製ボール、高速カメラ、ステレオPIV流体可視化システム（Particle Image Velocimetry）を用いて高精度に同時計測し、ボール飛翔軌跡と、流体力、渦構造の関係を検討すると共に、ボールリリース時（インパクトを含む）の初期条件（直線運動と回転運動）やボール変形、打突形状が、ボール飛翔軌跡や非定常流体力に与える影響を示す。さらに、サッカーフリーキック等における、リリース初期条件、リリース技術（含むインパクト技術）が、非定常流体力、渦構造、変化球タイプに及ぼす影響を検討し、ボールゲームにおける効果的変化球の実現方法、及びパフォーマンス向上方法を検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 風洞実験（定常状態空力特性の分析）

本研究では、スポーツボール（サッカーボールやバレーボール等）の定常状態空力特性を検討するため、回流型低速低乱風洞（San Technologies Co., LTD）を用いて計測した。

サッカーボールでは、ボールパネル数が32枚から6枚までの6種類のボールにおける抗力係数を計測対象とした。

#### (2) フリーフライト実験（非定常状態空力特性の分析）

スポーツボール（サッカーボール、バレーボール、ラグビーボール）の非定常状態空力特性を検討するため、ハイスピードビデオカメラ、キックロボット、光学式3Dモーションキャプチャシステム（VICON, 1000 Hz）等を用いて、フリーフライトで飛翔するスポーツボールの軌跡を観察、計測した。

#### (3) 可視化実験

実際にフリーフライトするスポーツボールの周りの流れを、ボール表面に塗布した発煙物質、高速ビデオカメラ（1000 fps）、可視化用特殊ボール、PIV（Particle Image Velocimetry）可視化システム等を用いて可視化、観察した。

#### (4) ボールインパクト実験

サッカーのインステップキック、カーブキック、および無回転キックについて、足部のボールインパクト動態を計測した。実験協力者の足部には、Plug-in Gait の蹴り足踵 (RHEE) に加えて母趾球 (Mend1)、小趾球 (Mend5) の3ヶ所に反射マーカ―を貼付してバーチャルフットモデルを作成し、ボール表面には4点 (top, front, right, left) のマーカ―を貼付してバーチャルボールモデルを作成して、光学式 3D モーションキャプチャシステム (VICON, 2000 Hz) のカメラ 10 台を用いてキック動作を記録するとともに、ボールの速度と回転数を計測した。

また、ラグビーボールの垂直型とロケット型のプレス方法 (置き方) を対象に、光学式 3D モーションキャプチャシステム等を用いて、飛翔ボールの初期条件 (速度, 打ち出し方向, 回転速度等) を分析した (瀬尾ら, 2019)。

瀬尾和哉・來海 郁・洪 性賛・浅井 武・古川拓生, ラグビーゴールキックの飛翔局面. フットボールの科学, 14, 12-17. (2019).

### 4. 研究成果

#### (1) フリーフライトにおける非定常状態空力特性

サッカーのカーブキックにおける飛翔軌跡より求めた、各キックの平均横力係数 ( $Ave\_Cs$ ) は、平均スピンパラメータ ( $Ave\_Sp$ ) が増加するにしたがって、増大する傾向を示している (図 1)。しかし、このスピンパラメータ ( $Sp$ ) が増大すると横力係数 ( $Cs$ ) が増加するという関係は、それぞれの平均値を指標とした場合の関係である。それぞれのキックにおける非定常性を考慮してみると、流速 ( $U$ ) 等の減少により、スピンパラメータ ( $Sp$ ) が増加しながら、横力係数 ( $Cs$ ) は低下する傾向を示しており、風洞実験等の平均値による関係とは、異なる傾向になっている。

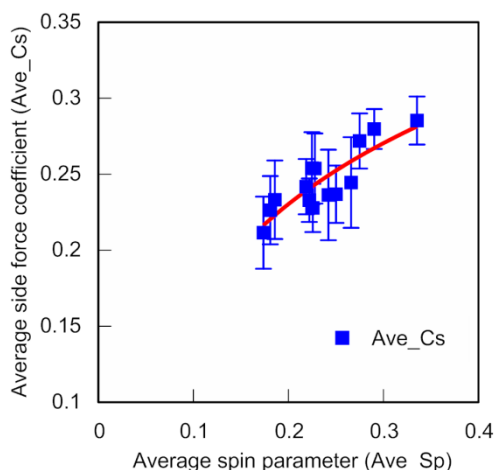


図 1 カーブキックの自由飛翔実験における平均スピンパラメータと平均横力係数の関係。

#### (2) フリーフライトにおけるボール後流の可視化

回転、及び無回転 (低回転) で自由飛翔するサッカーボール後流の渦構造をみると、歪んだ大規模渦対構造が、非常にしばしば観察される (図 2a-2f)。カーブキックのようにボールが回転して飛翔している場合の歪んだ渦対構造は、後面からみて回転方向の偏った位置に留まり続ける傾向がみられる (図 2a-2c)。このボール後流の渦対は、翼端渦と類似の

働きをして横力を発生し、ボール飛翔軌跡を横方向に偏向させていると推測される。それに対して、ナックルキックのようにボールが無回転（低回転）で飛翔している場合では、渦対構造の主流方向軸回り回転と共に、渦対の形成（図 2d）、崩壊（図 2e）、再形成（反転）（図 2f）等が観察され、それらの渦構造変化に伴う流体力の変動が、ボールを揺らしたり、落したりする原因の一つになっていると考えられる（図 3）。したがって、この渦対の強さや、動態をコントロールする方法が理解、習得できれば、目的に応じた、より効果的なキック技術が実現可能になると思われる。

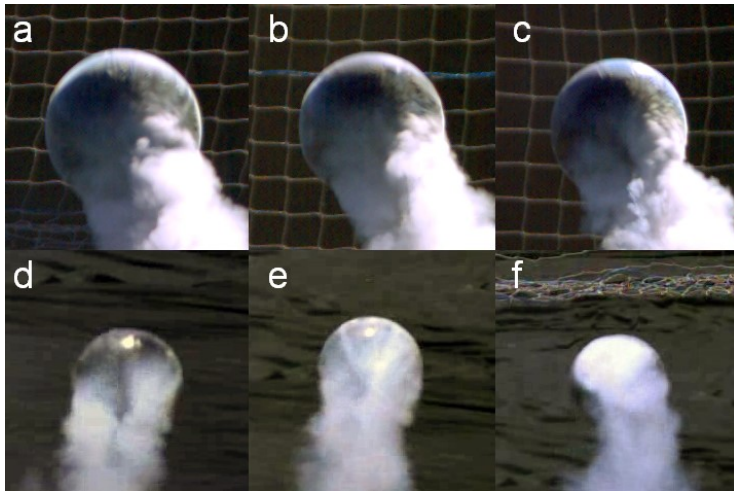


図 2 カーブキック（回転系, a-c），及びナックルキック（低回転系, d-f）における自由飛翔するサッカーボール後流の大規模渦対構造動態例。

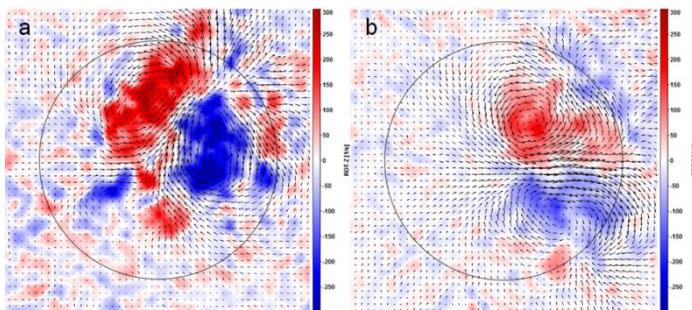


図 3 ナックルキックにおける自由飛翔するサッカーボール後流の大規模渦対構造動態の PIV 可視化例（飛翔方向に対して横断面スナップショット）。

### (3) ボールンパクト特性

サッカーボールキック時における足部インパクト面の法線ベクトル（フェースベクトル）と、スイング方向ベクトル（スイングベクトル）との成す角度をインパクト部位の迎え角（水平面上の迎え角）とし、ボール回転数（横回転）との関係を見ると、迎え角が大きい程、ボール回転数も大きくなる傾向を示している（図 4）。これは、ゴルフクラブのロフト角がボール回転数を制御しているメカニズムと基本的には同様の原理であり、インパクト時の迎え角を調整することによりボール回転数をコントロール出来、カーブキックやナックルキックを自在に繰り出すことが可能になるといえる。

光学式 3D モーションキャプチャシステムを用いて得られたインステップキック、カーブキック、及びナックルキックにおける、ボールインパクト時の足部の前額面に対する内

傾角は、インステップキックが最も小さく (図 5a)、ナックルキック (図 5b)、カーブキック (図 5c) の順に大きくなる傾向がみられている。

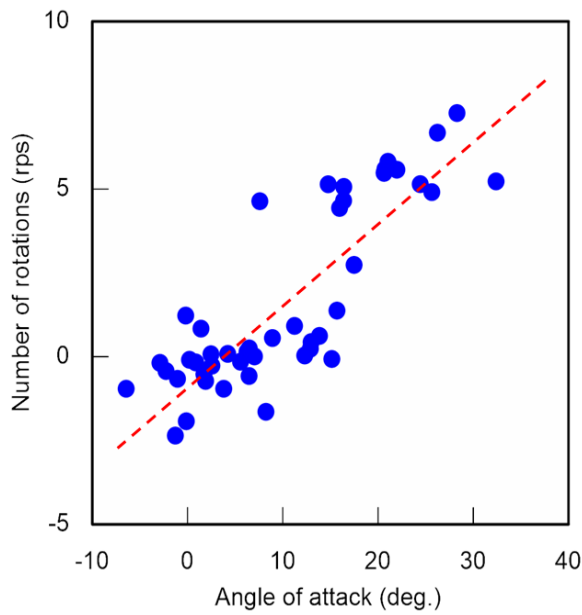


図 4 ボールキックにおける足部インパクト部位の迎え角（水平面上の迎え角）とボール回転数（横回転）との関係。

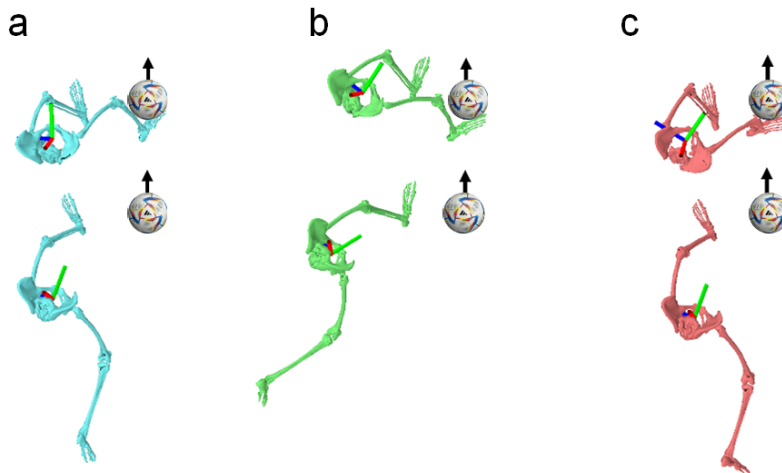


図 5 光学式 3D モーションキャプチャシステムを用いたインステップキック (a)、カーブキック (b)、及びナックルキック (c) における、ボールインパクト時 (上図) とバックスイング時 (下図) の下肢骨格姿勢とモーション例 (平面図)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Hong Sungchan, Ozaki Hiroki, Watanabe Keita, Asai Takeshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Aerodynamic Characteristics of New Volleyball for the 2020 Tokyo Olympics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 3256 ~ 3256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10093256	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Asai Takeshi, Nakanishi Yasumi, Akiyama Nakaba, Hong Sungchan	4. 巻 10
2. 論文標題 Flow Visualization of Spinning and Nonspinning Soccer Balls Using Computational Fluid Dynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 4543 ~ 4543
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10134543	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hong Sungchan, Asai Takeshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Effect of Surface Groove Structure on the Aerodynamics of Soccer Balls	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 5877 ~ 5877
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10175877	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Goff John Eric, Hong Sungchan, Asai Takeshi	4. 巻 49
2. 論文標題 Influence of Surface Properties on Soccer Ball Trajectories	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings	6. 最初と最後の頁 143 ~ 143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/proceedings2020049143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kimachi Kaoru, Liu Richong, Koido Masaaki, Hong Sungchan, Shimonagata Shuji, Nakayama Masao, Asai Takeshi	4. 巻 49
2. 論文標題 Comparison of Biomechanical Factors among Straight, Curve and Knuckle Kicking Motions in Soccer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings	6. 最初と最後の頁 119 ~ 119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/proceedings2020049119	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Asai Takeshi, Kimachi Kaoru, Liu Richong, Koido Masaaki, Nakayama Masao, Goff John Eric, Hong Sungchan	4. 巻 49
2. 論文標題 Measurements of the Flight Trajectory of a Spinning Soccer Ball and the Magnus Force Acting on It	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings	6. 最初と最後の頁 88 ~ 88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/proceedings2020049088	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	洪 性賛  (Hon Sonchan)  (10638547)	東京工業大学・リベラルアーツ研究教育院・研究員   (12608)	
研究分担者	小池 関也  (Koike Sekiya)  (50272670)	筑波大学・体育系・教授   (12102)	

#### 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------