

事例報告

フリーフライトにおける回転サッカーボールのマグナス力に関する 一考察

中屋敷 眞 浅井 武¹⁾

Makoto Nakayashiki, Takeshi Asai¹⁾: A study on Magnus force of actual flight spinning soccer ball: Bulletin of Sendai University, 49 (2) : 175-180, March, 2018.

Abstract: The flight trajectory of a soccer ball is greatly affected by the ball's aerodynamic properties. Thus, determination of these aerodynamic properties is extremely important for both ball design and soccer techniques. In this study, we used a technologically advanced optical three-dimensional (3D) motion capture system and a conventional 32-panel soccer ball with a reflective surface to relate the side force and spin parameters of a spinning soccer ball in a free flight. We also developed a 32-panel soccer ball model with a rear support capable of spinning to measure the side force during wind tunnel testing and to subsequently evaluate the validity and reliability of the free flight test measurements. Moreover, we have visualized the wake of spinning soccer balls and demonstrated the dynamics of their vortex structures. A comparison of the free flight and wind tunnel lift forces indicated slightly higher free flight lift forces. Test results also revealed a logarithmic relationship between the lift force coefficient and spin parameter. The one of the dominant vortex structure of the wakes from spinning soccer ball was determined to be a large-scale counter rotating vortex pair. Further, the variation in the large-scale counter rotating vortex pair for a spinning ball was estimated to be smaller and more stable than that of a non-spinning ball.

Key words: aerodynamics, visualization, side force, lift force

キーワード: 空力, 可視化, 横力, 揚力

I はじめに

サッカーボールの飛翔軌跡は、その空力特性に大きく影響を受ける。したがって、その空力特性を明らかにすることは、サッカーの技術や戦術においても、非常に重要である。とりわけ、ボールに回転をかけて横力（マグナス力）を発生させ、飛翔軌跡を曲げるカーブキックは、フリーキックやシュートに頻繁に用いられ、サッ

カーにおいて極めて重要な技術の一つになっている。

これまで、サッカーボールの空力特性は、風洞実験を中心に検討されてきており^{1, 6, 8)}、その空力特性を基に、飛翔軌跡も分析されている^{2, 4, 9)}。しかし、一般に、風洞実験システムの機構上、計測エリアにおいて、なんらかの治具でボールを支えることが必要であり、空力特性がその治具の影響を受けることは不

1) 筑波大学体育系

可避となっている。また、風洞実験でボールを計測する場合、横力（揚力）を計測できたとしても、ボールに当る風の向きはボールに対して固定であり（stagnation pointが固定）、実際のフリーフライト時のボール周りの流れ構造（stagnation pointが変動）とは異なっている。さらに、実際の試合状況に近いと考えられる、支持治具の無い、フリーフライト時におけるボール空力特性の計測も試みられているが、ビデオカメラの解像度やデジタル技術の制限があり、サンプル数も制約されている³⁾。

そこで本研究では、反射シートを表皮にしたサッカーボール（conventional 32 panels）を開発し、光学式3次元モーションキャプチャシステム（Vicon MX; Vicon Motion Systems）を用いて、回転しながらフリーフライトするサッカーボールの横力とスピンパラメータの関係を明らかにしようとした。また、後方支持タイプの回転可能なサッカーボールモデル（32 panels）を作成し、風洞実験を用いて、横力を計測することにより、フリーフライト計測による横力の妥当性、信頼性を検討した。さらに、高速ビデオカメラと発煙薬を用いて、フリーフライトで飛翔する回転サッカーボール周りの流れを、可視化、解析することにより、その渦構造を示そうとした。

そして、フリーフライト実験における横力は、風洞実験の横力と比較すると、僅かに大きいことが示された。また、大規模渦対構造は、フリーフライトにおけるサッカーボール後流の支配的渦構造の一つであると考えられた。さらに、回転サッカーボール後流の大規模渦対構造は、比較的安定していることが明らかになった。この回転サッカーボール後流の大規模渦対構造は、他のスポーツボール後流にも観察される可能性が示唆された。

II 方法

1. 光学式3次元モーションキャプチャシステムを用いた横力の計測

一般的なサッカーボール（32枚パネル）の

表面を赤外線反射シートとしたサッカーボール（質量430g、直径220mm）を作成した（図1）。実験協力者（被験者）は、比較的キック技術が高く、カーブキックの蹴り分けが可能である大学サッカー選手5名とし、サッカーゴール正面から20mの地点にボールをプレースし、ボール速度と回転数を、主観的にそれぞれ3段階に分けて、各カーブキックを3球ずつ各被験者27本の計135本、ゴールに向かってキックさせた（図2）。各試技は、光学式3次元モーションキャプチャシステム（VICON MX:Oxford Metrics）（500fps）12台、及びボール後方の高速ビデオカメラ（Photron Ultima, フォトロン社）（1000Hz）1台を用いて撮影した。本実験では、ボールの追跡が比較的安定する、飛翔中期における0.1s間を、ボール座標取得対象とした。そのボール座標値から変位、速度、加速度を算出し、横力（揚力）（ S ）を求めた。計測した横力から、横力係数（ C_s ）を求めた（eqn (1)）。

$$C_s = \frac{S}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (1)$$

ここで、 ρ は空気密度、 U は流速、 A は投影面積である。

また、 Sp は流速と角速度の比率である（eqn (2)）。

$$Sp = \omega R/U \quad (2)$$

ここで、 ω はボールの角速度（rad/s）で、 R はボールの半径（0.11 m）を示す。

ボールの回転数、及び飛翔方向に対する断面（前後方向）における回転軸の傾きは、ボール飛翔中の変化は小さいと仮定し、蹴り出し直後のボールを高速ビデオカメラで撮影した映像から、ボール周囲の4点をデジタル化し、2次元座標値から算出した。



図1 赤外線反射シートで構成されたモーションキャプチャシステム用サッカーボール (32枚パネル).

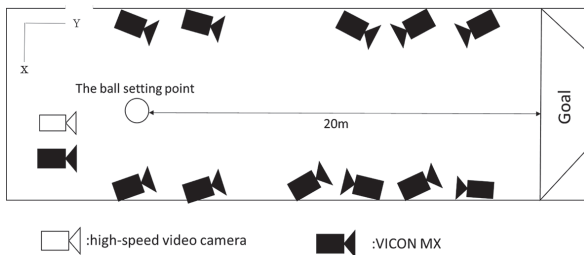


図2 光学式3次元モーションキャプチャシステムを用いた回転サッカーボールキック実験のセットアップ.

2. 風洞実験を用いた横力の計測

風洞実験用回転ボールは32枚パネルボール (Vantaggio, Molten Inc.) を型取りしたFRP製モデルである (図3). 風洞実験用回転ボールは大きく分けて, 半球上部, 中央部, 半球下部の3つのパーツによって構成されている. 中央部は風洞の스팅への結合部分となるため回転は発生しない. 中央部を挟むように位置する半球上部, 半球下部は, ボール内部中央を縦断するシャフトによって結合されている. ボールの回転は, エアジェットを吹き付けることによって, 発生させた. 空気力の計測時には, エアジェット吹き出しシステムを主流と干渉しない位置まで移動させ, ボールモデルが慣性回転している間に計測を実施した. 風洞実験は, 循環式実験風洞 (San Technologies Co., Ltd., Tochigi, Japan) を用いて実施された. 実験風洞の最大風速は55 m/s, 吹き出し口サイズは1.5 m × 1.5 m, 流れの乱れ度は0.1%以内であった. 実験に用いた風速は13 m/s から30 m/s の範囲とした. ボールの回転の範囲は, 実際の競技

でよく用いられる, 2 rps から8 rps の範囲とした. 回転ボールが発生する横力は, スティング型天秤 (LMC-61256, Nissho Electric Works) を通してコンピュータに収録した.

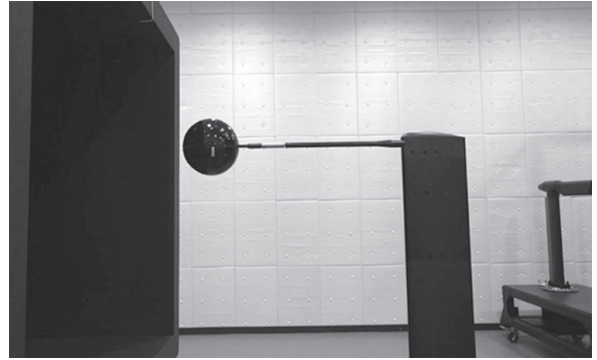


図3 回転可能な (上から見て時計及び反時計回りが可能) FRP製サッカーモデル (32枚パネル) を用いた風洞実験のセットアップ.

3. 高速ビデオカメラを用いたボール後流の可視化

実際に飛行している非定常状態のサッカーボール周りの流れを検討するため, 発煙物質を用いた可視化実験を行なった. 実験協力者の前方25 mにサッカーゴールをセットし, ゴール中央をめがけて, 回転系カーブボール (4回転毎秒以上) を試合時のフリーキックと同様の速度でプレスキックさせた (図4). ボールをプレスキックした地点とサッカーゴールの中間点に高速ビデオカメラ (FASTCAM PCI, Photron社) をセットし, 毎秒1000フレームで撮影した. 試技を行なう実験協力者は, キック技術が比較的高いと考えられる大学サッカー選手であり, 目標のカーブボールが撮影できるまで, 継続的に反復して撮影を実施した. 撮影された映像はモノクロ映像 (1024 × 1024 pixel) であり, 撮影した後, コンピュータにAVIファイルとして取り込んで分析を行なった. 本研究では, ボール後流の渦動態を, 出発時, 渦放出時, 及び大規模構造の観点から検討した.

以下は, 実験手順である.

1. サッカーボールに発煙物質をブラシで塗る.
2. サッカーボールを所定の場所に置く.
3. サッカーゴールに向かってキックする.

4. サッカーボールがゴールに向かって飛翔し, ボール周りの流動状況に応じた流れが発煙物質からの白煙によって描かれる.
5. 高速ビデオカメラで撮影する.
6. ボールを回収してクリーンアップする.

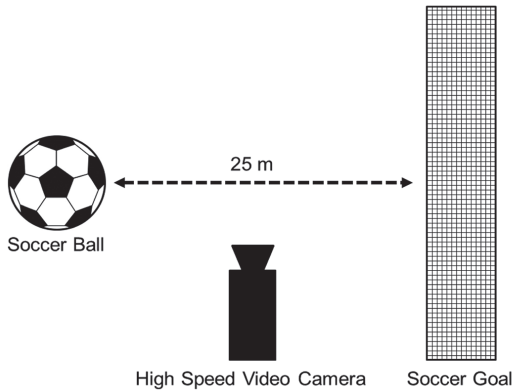


図4 高速ビデオカメラと発煙物質を用いた回転ボール後流の可視化実験のセットアップ.

なお, 本研究は, 筑波大学体育系研究倫理委員会において研究計画の承認を得たものである.

III 結果及び考察

本研究における, 後方支持ボールモデルを用いた風洞実験では, スピンパラメータ (Sp) が約 0.1 から 0.4 において ($Re = 1.88 \times 10^5 \sim 4.34 \times 10^5$), 横力 (マグナス力) (C_s) は約 0.1 から 0.3 を示し, Sp が増大するにつれて C_s も増加する傾向を示した (図5). 下方支持ボールモデルを用いた風洞実験では⁷⁾, Sp が約 0.05 から 0.3 において ($Re = 2.74 \times 10^5 \sim 4.56 \times 10^5$), C_s は約 0.05 から 0.25 であり, 強い速度依存性がみられたことが報告されている. また, 後方支持ボールモデル (14 枚パネルボール) を用いた風洞実験では³⁾, Sp が約 0.05 から 0.3 において ($Re = 3.42 \times 10^5 \sim 4.62 \times 10^5$), C_s は約 0.05 から 0.3 であり, Sp が増大するにつれて C_s も増加する傾向を示していた. 本風洞実験における横力は, 他の風洞実験の横力と完全に一致してはいないが, 妥当な計測結果が得

られていると考えられる. これらのことから, 風洞実験における横力は, 流速や回転数に対する依存性が高く, ボールパネル数や支持方法の影響は比較的小さいと推測される.

光学式モーションキャプチャシステムを用いた, フリーフライト実験における横力では, Sp が約 0.1 から 0.4 において ($Re = 1.88 \times 10^5 \sim 3.76 \times 10^5$), C_s は約 1.15 から 0.35 であり, Sp が増大するにつれて C_s も増加する傾向を示した. フリーフライト実験における横力は, 風洞実験の横力と比較して, ばらつきが大きい傾向がみられるが, 全体的な傾向は, 風洞実験と同様に, Sp が増大するにつれて C_s も増加する傾向を示した. これらのことから, 本フリーフライト実験における横力は, 従来の風洞実験値と概ね妥当な横力を示していると考えられる. フリーフライト実験における横力の対数回帰曲線 ($C_s = 0.0642 \ln(Sp) + 3427$) と風洞実験の横力と比較すると, フリーフライトの横力は, 風洞実験の横力より, やや大きい傾向を示した. この横力の増大の原因の一つとして, フリーフライトでは, 支持具による後流渦構造への干渉が無いため, より明確な渦構造の形成が促進され, 循環が大きくなっている可能性が考えられる. ただ, 本フリーフライトの実験では, ボール回転軸の前後方向への傾きや, 飛翔中の変化は, 無視しているため, その影響が出ている可能性がある. したがって, 今後は, ボールの運動及び飛翔軌跡を 3 次元的に分析し, より詳細に検討する必要があると思われる.

フリーフライトにおける回転サッカーボール (上から見て反時計回り) ($\omega = 37.7 \text{ rad/s}$, $Re = 3.94 \times 10^5$) の後流の側面図では, ボールの進行軸に対して, 比較的, 対称的な後流となっていた (図6). また, 回転ボールの頭頂図では, 進行軸に対して後流の偏向がみられた (図7). さらに, 後面図では, 回転方向の下流側 (後面図右側) に大規模渦対構造が観察された (図8). これらのことから, 大規模渦対構造は, フリーフライトにおける回転サッカーボールの支配的大規模渦構造の一つであると考えられる. この, 大規模渦対構造は, フリーフライト中において, 比較的, 安定して変動が少ない傾向を示してい

た (図9). このボール後流に形成される大規模渦対構造は, 翼端渦と同様に, 横力 (横力) の発生源になるとされている⁵⁾. したがって, 回転ボールの後流の大規模渦対が安定していることが, その横力が安定している原因の一つになっていると考えられる. このボールの連続回転は (回転数が低いと非定常性が増大する), 外流と同方向側の境界層の剥離が, 反対方向側の剥離に対して定常的に遅れ, 剥離ラインの不規則な変動を抑制する働きを発現し, 大規模渦対構造が安定している大きな原因の一つになっていると考えられる.

本研究の結果より, 回転するサッカーボール (カーブボール) の飛翔軌跡は, 大規模渦対構造の働き (マグナス効果を含む) により偏向するものの, その軌跡は規則的かつ安定していることを示しており, カーブボールは, 正確にシュートコースを狙いやすい球種であると考えられる. 逆にゴールキーパーの観点から言えば, シュートコースを読みやすい球種なので, コースを予測し素早く反応することが, 防御するのに効果的であると思われる.

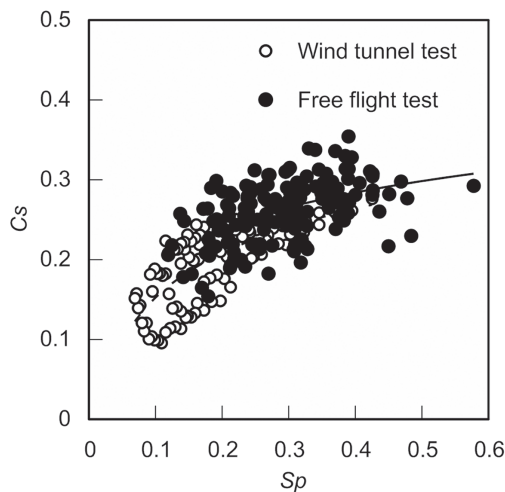


図5 風洞実験とフリーフライト実験における横力係数 (マグナス力係数) の比較.

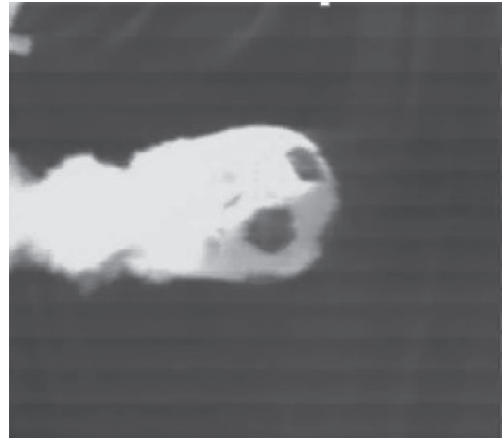


図6 回転して飛翔するサッカーボール後流の渦構造 (26 m/s, 8 rps, 側面図) (流れは右から左方向).



図7 回転して飛翔するサッカーボール後流の渦構造 (27 m/s, 7 rps, 頭頂図) (流れは右から左方向).

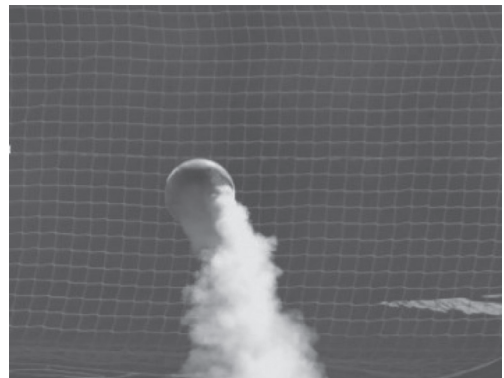


図8 回転して飛翔するサッカーボール後流の渦構造 (27 m/s, 8 rps, 後面図) (流れは前後方向). ボールの右側に大規模渦対が観察される.

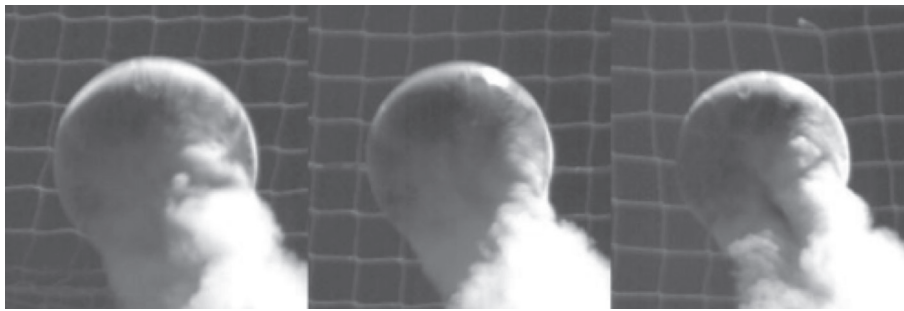


図9 回転して飛翔するサッカーボール後流の連続写真 (27 m/s, 8 rps, 後面図) (流れは前後方向で, 時間間隔は 1/20 秒).
ボールの右側に観察される大規模渦対は比較的安定している.

IV まとめ

本研究では, 反射シートで作成したサッカーボールと光学式3次元モーションキャプチャシステムを用いて, フリーフライトで飛翔する回転サッカーボールの横力を計測した. また, 高速ビデオカメラと発煙薬を用いて, フリーフライトで飛翔する回転サッカーボール周りの流れを可視化し, その渦構造を検討した. 結果を以下に要約する.

1. フリーフライト実験における横力は, 風洞実験の横力と比較すると, 僅かに大きい傾向を示した. 本実験から, 横力係数とスピンパラメータの関係は対数関数的 (logarithmic function) であると考えられた.
2. フリーフライトにおける回転サッカーボール後流の大規模渦対構造は, サッカーボール後流の支配的渦構造の一つであると考えられた.
3. 回転サッカーボール後流の大規模渦対構造は, 比較的安定している傾向を示した.

文献

1) Asai T., Seo K., Kobayashi O., Sakashita R., (2007). Fundamental aerodynamics of the football. *Sports Eng.* 10 (2007)101-109.

2) Bray K., Kerwin D., (2003). Modelling the flight of a soccer ball in a direct free kick. *J. of Sports Scie.*, 21: 75-85.

3) Carre M. J., Asai T., Akatsuka T. and Haake S. J., (2002) . The curve kick of a football II: flight through the air. *Sports Engineering*: 5, 193-200.

4) Goff J. E., Carré M. J., (2009). Trajectory analysis of a football. *Am. J. Phys.* 77 : 1020-1027.

5) Goverdhan, R. N. and Williamson, C. H. K., Vortex induced vibrations of a sphere, *Journal of Fluid Mechanics*, 531, pp. 11-47, (2015).

6) Kray T., Franke J., Frank W., Magnus effect on a rotating soccer ball at high Reynolds numbers. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*124: 46-53.

7) Passmore, M., Rogers, D., Tuplin, S., Harland, A., Lucas, T., Holmes, C., (2011). The aerodynamic performance of a range of FIFA-approved footballs. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part P, Journal of Sports Engineering and Technology*, 226(1): 61-70.

8) Passmore M., Spencer A., Tuplin S., Jones R., Experimental studies of the aerodynamics of spinning and stationary footballs. *Proceedings of IMechE, Part C.* 222, (2008), 195-205.

9) Tuplin S., Passmore M.A., Rogers D., Harland A. R., Lucas T., Holmes C., (2012). The application of simulation to the understanding of football flight. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part P, Journal of Sports Engineering and Technology*, 220 (2): 134-142.

(2017年11月30日受付)
(2018年1月30日受理)