

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23650381

研究課題名(和文) 追尾型流体可視化システムの開発と展開研究

研究課題名(英文) Research and development of a tracking type airflow visualisation system

研究代表者

浅井 武 (ASAI, Takeshi)

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：00167868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：実際に飛翔しているサッカーボール周りの渦流れを可視化，検討するため，発煙物質をボールに薄く塗布してキックさせ，後方から高速ビデオカメラ(1000 fps)で撮影した．ボール後流の2次元ベクトル図では，渦の大規模構造として1対の渦対が観察されるフェイズと，複雑に渦が混在しているが，大規模構造が不明確なフェイズがみられた．この渦対の大規模構造に，翼端渦のアナロジーを適用すると，ダウンウォッシュに関連した揚力の発生が推測された．この大規模渦対構造による揚力は，ボール進行長軸を軸方向として，ゆっくり回転する場合があり，その場合は，ボールがゆっくり揺れる原因の一つになる可能性があると考えられた．

研究成果の概要(英文)：A thin smoking agent was applied to a soccer ball to make the vortex flow around the ball in actual flight visible, and images were captured from behind by using a high-speed video camera (1,000 fps). Two-dimensional vector diagrams depicting slipstreams of the ball featured a phase in which a pair of vortices were observed as large-scale vortex structures, as well as a phase in which the large-scale vortex structure was unclear. Based on an analogy between wingtip vortices and the large-scale structures of these vortices, a lift force related to downwash was speculated to have occurred. The lift force due to such a large-scale vortex pair structure can at times slowly rotate the ball, whose major axis is in the direction of movement, in the axial direction. This was considered to be a potential cause for the slight wobbling of the ball.

研究分野：スポーツバイオメカニクス・スポーツ工学

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学、スポーツ科学

キーワード：スポーツ 流体 サッカー ボール 可視化 渦 揚力 抗力

1. 研究開始当初の背景

オリンピックや世界選手権等のトップレベルの競技では、1/100 秒差でメダル色が異なるとされており、スポーツにおける流体力学的研究が最先端のトピックになってきた。北京オリンピックにおけるレーザーレーサー水着騒動をあげるまでもなく、流体力学的研究・開発は世界各国の最重要課題の一つになっている。これまでの流体力学的手法では、対象物にかかる定常的な(平均的、静的な)流体力を風洞実験等で分析し、その定常的な力が各瞬間、瞬間に成立すると仮定し、飛翔軌跡や空気力等を検討してきた。しかし、実際のスポーツ競技は、非定常性が非常に強く、まさにそこに技術やパフォーマンスの違いが潜むと考えられる(Asai & Kamemoto, 2010, *IUTAM*)。また、従来の風洞実験では、対象物と流体の座標系が実世界とは逆であり、非定常現象を正確に記述できていない(加速度現象が生ずる場合は力学的に一致しない)。

2. 研究の目的

本研究では、非定常現象をより正確に検討するため、移動する物体を追尾しながら移動体周りの流体を可視化する追尾型 PIV (Particle Image Velocimetry) システムを開発し、従来、不可能であった実座標系、実運動系における PIV 流体可視化、流体力学的解析を実現する。また、本研究で開発される追尾型 PIV システムを、実際に飛翔するスポーツボール後流の可視化研究に適用し、世界に先駆けて実運動中のボール後流の動態を定量的に明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 風洞実験

実験には、筑波大学スポーツ風洞(吹き出し口サイズ縦 1.5 m、横 1.5 m のゲッチング型低速風洞)と山形大学実験風洞(吹き出し口サイズ縦 0.7 m、横 0.7 m のエッフェル塔型低速風洞)を用いた。計測対象は、フルスケールのロテイロ; 32 枚, ティームガイスト II; 14 枚, ジャブラニ; 8 枚, タンゴ 12; 変形 32 枚の 4 種とした。パネル接合部総延長距離は、キルビメーターで接合部をトレースすることにより計測した。

(2) 可視化実験

実際に飛翔しているサッカーボール周りの渦流れを可視化、検討するため、発煙物質(四塩化タン)をボールに薄く塗布してキックさせ、高速ビデオカメラで撮影した。以下は、発煙物質を用いた可視化実験の手順である。

サッカーボールに発煙物質をブラシで可能な限り薄く塗る。

サッカーボールを所定の場所に置く。
サッカーゴールに向かってキックする。
サッカーボールがゴールに向かって飛翔し、ボールの周りの流動状況に応じた流れが発煙物質から白煙によって描かれる。
高速ビデオカメラで撮影する。
ボールを回収してクリーンアップする。

研究協力者(キッカー)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 3 名を対象とし、ほぼ無回転、又は低回転のボール(ナックルボール)を各被験者 40 本ずつの計 120 本、ゴールに向かってキックさせた。分析対象試技は、サッカー指導経験 10 年以上の指導者 3 名が観察して、比較的ナックリングエフェクトが顕著に発現され、かつゴール正面に飛翔したと考えられた試技 10 本とした。サッカーゴール正面 25 m の地点にボールを静止してプレースし、その後方に高速ビデオカメラ(1000 fps)をセットし、各試技のボール後流を撮影した。したがって、撮影される画像は、ボール飛翔方向に対して垂直な、クロスセクションの映像となる。撮影された映像は、高速カメラを固定した絶対座標系の映像となるが、ボール追尾ソフトウェアにより、ボールを固定したローカル座標系の映像に変換した。変換した映像から、2DPIV (Particle Image Velocimetry)ソフトウェア(Davis, LaVision GMBH)により、ボール後流の 2D ベクトル図を取得した。

また、本実験は、屋外でのフィールド実験であるため、自然流の影響は不可避である。自然流の影響を小さくするため、風速 1m 以下の環境で実験をセットアップし、可能な限り自然流が収まっているタイミングで各試技を行った。風速 1m においてボールが受ける抗力は約 0.1 N 以下であると推定されることから、自然流が本実験の空気力に与える影響は比較的小さいと判断された。

4. 研究成果

各ボールの臨界レイノルズ数は、ロテイロが $\sim 2.2 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.12$), ティームガイスト II が $\sim 2.8 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.13$), ジャブラニが $\sim 3.3 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.11$), タンゴ 12 が $\sim 2.4 \times 10^5$ ($Cd \approx 0.15$)でした。タンゴの超臨界領域における Cd の平均値は ~ 0.18 であり、ジャブラニの ~ 0.15 より、やや大きな値を示していた。また、タンゴの亜臨界領域における Cd の平均値は ~ 0.47 であり、ジャブラニの ~ 0.44 より、やや大きな値となっていた。ロテイロ、ティームガイスト II、ジャブラニと年代を追うごとに、臨界レイノルズ数が増大し、抗力係数カーブは右側にシフトする傾向を示しましたが、タンゴの抗力係数カーブは、ジャブラニよりロテイロに近い傾向を示していた。

また、飛翔軌跡シミュレーションにおいても、17 m/s の初速の場合、ジャブラニの飛距離よりタンゴの方が、2.0 m 大きく、28 m/s

の初速の場合、逆にジャブラニの飛距離よりタンゴの方が、3.0 m 小さくなっていた。同様に、同じボールインパクトの力積 (7.45 kgm/s と 12.26 kgm/s) でシミュレーションでは、ボール質量の小さいタンゴの飛距離が増大し、タンゴの抵抗係数が小さい中速領域では、飛距離の差が 2.9 m と増大し、タンゴの抵抗係数が大きい高速領域では、逆に飛距離の差が、1.4 m と縮小していた。これらのことから、タンゴ 12 (カフサ) の空気抵抗は、中速領域 ($11 < U < 19$ m/s) において、従来のガイスト II (Wcup 2006 公式球) やジャブラニ (Wcup 2010 公式球) より空気抵抗が小さくスピードが出やすいが、逆に高速領域では ($20 < U < 29$ m/s)、従来ボールより空気抵抗が大きいと考えられる。したがって、タンゴ 12 は、ジャブラニ等より中速領域での空気抵抗が小さく、その領域で大きな初速を得やすいボールであると考えられる。このことは、中速領域を多用するパスのスピードが上げやすいことを意味し、パスサッカーに比較的適したサッカーボールであると推測できる。

さらに、臨界レイノルズ数とパネル接合部総延長距離との間には、高い相関関係がみられた ($r = 0.9$)。このことから、パネル接合部総延長距離が大きなボールほど、ボール表面のラフネスが増大し、結果的に臨界レイノルズ数が小さくなっていると考えられた。一方、ロテイロのパネル表面は比較的スムーズであり、ガイスト II には小さな突起が、ジャブラニには小さなレール、タンゴには小さなグリップ意匠がそれぞれデザインされた。しかし、ロテイロの臨界レイノルズ数がタンゴ 12 と同様に大きなことから、臨界レイノルズ数に対する、パネル表面の小さな意匠の影響は、パネル接合部総延長距離に比べて小さいと思われた。

平滑球後流の渦構造について、 $Re=24000$ では、交番型の渦構造がみられ、後流は波長が直径の約 4.5 倍の進行波運動をしていることが報告されている。また、 $Re=600000$ では、後流が互いに逆方向に回転する 2 本の縦渦を形成し、遠い下流まで構造を変えないこと、後流が球の対称軸から外れて存在すること等が示されている。 $Re=380000$ におけるサッカーボールの場合、超臨界領域であるにも関わらず、平滑球のような直線的な安定した後流構造ではなく、平滑球の亜臨界領域と超臨界領域の中間的かつ不安定な構造を示していると思われた。

無回転系ボールの飛翔軌跡より、やや離れた大きな画角での大規模渦構造をみると、後流の歪んだ渦リング放出とは異なる、約 1~4 Hz の大規模な渦構造の振動 (うねり) が観察された。これは、平滑球のストローハル数におけるハイモード、及びローモードとは異なる、より低い周波数であると推定され、この大規模構造の渦振動がナックルボールの不規則な変化を引き起こす、大きな原因の一

つになっていると考えられた。

実際に飛翔しているサッカーボールの後流構造 ($Re=370000$) をみると、進行方向軸に対して偏向し、歪んだループ渦 (歪んだヘアピン渦) が放出されている場合が多くみられる。しかし、その偏向方向は、一定方向ではなく、上下が逆転したような構造 ($Re=380000$) になることも観察される。これらのことから、ボール後流の渦構造は不安定であり、進行方向軸周りに回転する大規模構造変化もあると考えられる。そして、この大規模構造の渦振動は、出発渦の形成、変形、崩壊によって励起されている可能性がある。

ボール後流の 2 次元ベクトル図 (ボール進行方向を横断するクロスセクションの画角) では、渦の大規模構造として 1 対の渦対が観察されるフェイズと、複雑に渦が混在しているが、大規模構造が不明確なフェイズがみられた。この渦対の大規模構造に、翼端渦のアナロジーを適用すると、ダウンウォッシュに関連した揚力の発生が推測された。この大規模渦対構造による揚力は、ボール進行長軸を軸方向として、ゆっくり回転する場合があります。その場合は、ボールがゆっくり揺れる原因の一つになる可能性があると考えられた。しかし、この渦構造は、不安定である場合が多く、詳細は今後の課題である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

Goff, J. E., Asai, T., Hong, S. (2014) A Comparison of Jabulani and Brazuca Non-Spin, Aerodynamics, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: J Sports Engineering and Technology*, IMechE (In print) 査読有

Keiko, S. and Asai, T. (2013) Comparison of Kicking Motion Characteristics at Ball Impact between Female and Male Soccer Players, *International Journal of Sports Sciences & Coaching*, 8(1), 63-76. doi:10.1260/1747-9541.8.1.63 査読有

Asai, T. and Seo, K. (2013) Aerodynamic drag of modern soccer balls, *SpringerPlus*, 2:171. 査読有
doi:10.1186/2193-1801-2-171

Asai, T., Ito, S., Seo, K., Hitotsubashi, A. (2012) Fundamental aerodynamics of a new volleyball, *Sports Technology*, 3 (4), 235-239. 査読有

Asai, T., Ito, S., Seo, K., Koike S. (2012) Characteristics of modern soccer balls, *Procedia Engineering*, The Engineering of Sport 9, Volume 34, Elsevier, pp.122-127. 査読有

Asai, T. and Kamemoto, K. (2011) Flow structure of knuckling effect in footballs, *Journal of Fluids and Structures*, 27,

〔学会発表〕(計 3件)

Hong, S., Go, Y., Sakamoto, K., Nakayama, M., & Asai, T., Characteristics of ball impact on curve shot in soccer, APCST, 2013. 9. 19, 香港 (中国)

Hong, S., Chung, C., Sakamoto, K., Nagahara, R., Asai, T., A biomechanical analysis of the knuckling shot in football, *Science and Football VII*, 2011. 5. 30, 名古屋大学 (愛知県)

Asai, T., Aerodynamic characteristics of new soccer balls, *Science and Football VII*, 2011. 5. 30, 名古屋大学 (愛知県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅井 武 (ASAI, Takeshi)

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：00167868

(2) 研究分担者

小池 関也 (KOIKE, Sekiya)

筑波大学・体育系・准教授

研究者番号：50272670