

平成 21 年 6 月 25 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19500555

研究課題名 (和文) サッカーボール・バレーボールが無回転で飛翔する際に  
ゆらゆら揺れる魔球の研究研究課題名 (英文) Erratic and strange flight behavior of less spinning soccer  
and Valley balls

研究代表者

溝田 武人 (MIZOTA TAKETO)

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：10038557

研究成果の概要：

サッカーボールがほぼ無回転で飛翔する場合にしばしば観察されている不規則な軌道変化の不思議を扱ったものである。ボール後方の渦を可視化撮影し、変動する揚力・横力を測定し、お互いの対応関係を明らかにした。

サッカーボールの無回転発射装置を作成し、激しい変化の様子を観察できるようになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：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：スポーツボール飛翔、サッカーボール、弱回転魔球、流れの遷移、  
超臨界レイノルズ数、自己励起型バフエーティング、 $\Omega$ 型渦、縦渦

## 1. 研究開始当初の背景

TVなどで日常的に観ることができるサッカーボールの弱回転魔球は流体现象がなせる不思議として研究者の間ではよく知られていた。しかしその空気力学的なメカニズムは分かっておらず、流体力学者の間では謎・不思議の1つとして関心を呼んでいた。マスコミレベルでは間違った説明がなされていた。また魔球の再現が極めて困難な状態であ

り、科学的な解明が待たれていた。

## 2. 研究の目的

この現象のメカニズムを風洞実験により明らかにして、不思議の1つを科学的に解くこと、その際に魔球発生の流体力学的な見地から解明することが目的である。また発射装置を作って青少年の眼前で再現して不思議を体感してもらうこと。競技者には魔球発生のメカニズムを科学的に知ってもらい、その

後の競技に故障なく生かすこと、を目的としている。この魔球の発射装置を作成し、商品化して産業創成を狙っている。

### 3. 研究の方法

風洞実験により、サッカーボールに加わる定常、非定常力を調べる。煙とタフト法による可視化実験により、流れを高速カメラで撮影する。揚力、横力のランダムな変化と流れの変化の対応を付けた。

#### (1)大型風洞装置と非定常空気力の測定

実験に使用したのは、九州大学応用力学研究所の大気動態シミュレーション装置（測定部高さ x 幅 x 長さ=2.0 x 3.6 x 15m, 乱れ度 0.5%以下）である。実験装置を Photo. 1 に示す。測定流速は  $U=5\sim 30$  [m/s] とし 3 分力ロードセルを用いて抗力、揚力、横力を同時に測定する。測定系の固有振動数は 19Hz であり、測定対象の 2~3Hz の現象に対しては十分高い。

#### (2)タフト法による可視化実験

ボール後方に 50 x 50 mm (部分的に 25mm) のメッシュに配置したピアノ線に絹糸を結んで流れを観察する。ボールの後方から高速カメラをセットし、250 [f/s] で撮影した。画像ソフトにより、微小時間内の重ね (積分) 描きなどを行っている。

発射実験装置を製作し、魔球を 100% 実現可能にする。

### 4. 研究成果

#### (1)時間平均抗力について

2 種類のサッカーボールについて、時間平均抗力  $C_D$  を測定した結果を図 1 に示す。

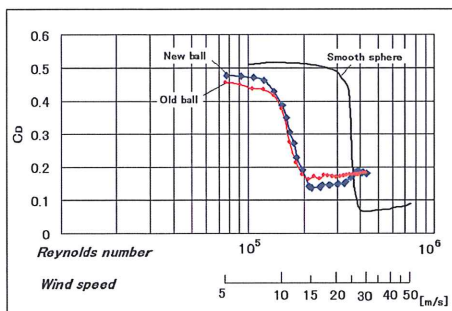


図 1 流速 (レイノルズ数) 変化にともなう抗力係数  $C_D$  の変化

サッカーボールについては他の結果もほぼ同様であった。滑面球の結果とも比較している。サッカーボールでも流速の増加とともに抗力が大きい亜臨界領域から急激に低下して Drag crisis が明確に発生し、抗力が低い流れの超臨界領域が実現している。サッカーボールの直径の滑面球の Drag crisis は 25m/s の流速で発生しているが、実際のサッカーボールでは 10m/s 前後でこの現象が起きている。滑面球では有名なこの遷移現象は、球の表面の層流境界層が流速の増加にともなって自然に乱流になり、剥離位置が急激に後退するので抗力係数が下がる。球表面に粗さがあると境界層壁面に流れに擾乱が人口的に加えられたことになり、Drag Crisis はより低い流速で発生する。サッカーボールの場合がこの例である。詳しく見ると、チームガイストボールの方が亜臨界領域の抗力係数が高く、超臨界領域の値がより低く、滑面球の特性により近い。後述する魔球発生メカニズムが正しいとすれば、新ボールになってより魔球が発生しやすくなったという観測と関係があるのかも知れない。

#### (2)非定常空気力の測定結果

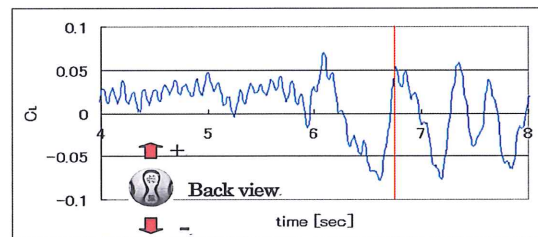


図 2(a) 4 秒間の揚力の変化  
 $U=22$  [m/s]  $Re=3.3 \times 10^5$

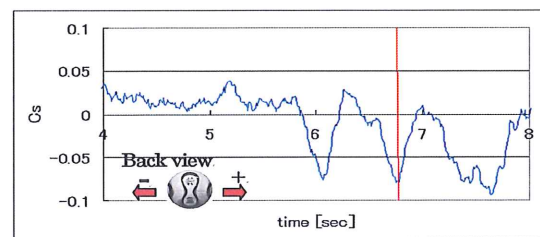


図 2(b) 4 秒間の横力の変化  
 $U=22[\text{m/s}] \text{ Re}=3.3 \times 10^5$

図 2 (a), (b) にはチームガイストボールに加わる (a) 非定常揚力と (b) 横力の 4 秒間の時間履歴を求めてた結果を示す。

ボールをシューターからの観察として力の方向を図中のように定義している。波形は非常にランダムであることが特徴である。非定常揚力、横力の時間平均値は常に+あるいは-方向にシフトしていること、その平均値まわりに振幅 0.05 程度のランダムな変動を示した。

(3) 非定常力によるボール変位の計算結果

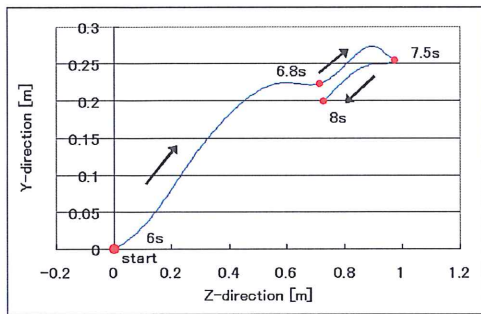


図 3 サッカーボールの変位

図 3 には、図 2 の場合の測定結果の 6~8 秒間における空気力の変化から、ボールの変位を計算した結果を示す。ただし、重力の影響は入れていない。

この事例では蹴られた方向に対してボールは最初の 1.5 秒で右に 100cm シフトし、上下方向には自然落下に対して 25cm 浮いて飛ぶ。その後急激に逆の左へ 30cm 近く方向変化する、という不思議な変化をする。

(4) タフト法によるボール後方の流れ観察による魔球の発生メカニズムの説明

図 4 には流れの様子をタフト法で観察した結果の 1 つを示す。図 4 は図 2 の 6.7 秒付近の 0.1 秒間の重ね (積分) 描きをした結果を示す。図の左上には揚力と横力の合力の方向を図 2 から求めた合ベクトルで示す。渦

の位置が右下にあり、その反作用で合ベクトルは左上方向に作用しており、両者の対応は非常に良い。

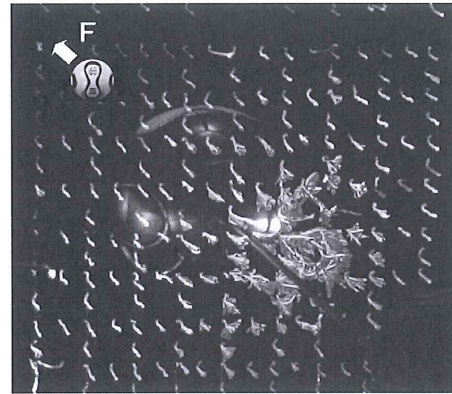


図 4 右下方に渦、左上方向に合力作用

図 5 には超臨界レイノルズ数における Taneda (1976) の流れのスケッチを示す。

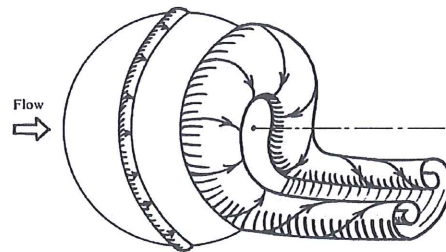


図 5 Taneda (1976) による超臨界レイノルズ数における活面球背後の流れのスケッチ

$\Omega$  渦と 2 本の縦渦は幾何学的な中心軸まわりにランダムに回転するとされている。この 2 列の縦渦を図 4 で示しことができた。後流のシフトした方向と作用した力の方向の対応関係は良い。ボール後流の流れのランダムな変化と揚力、横力のランダムな変化との対応が矛盾なく付いた。

サッカーボールの弱回転魔球の空気力学的な原因は、滑面球の超臨界レイノルズ数領域における流れの変化と同様なメカニズムである。二本の縦渦は、航空機の翼端渦と同種類のものである。ただし、航空機においては揚力は翼に限定されて発生し翼端渦が発

生ずる位置は固定されるが、活面球やサッカーボールは幾何学的な中心線まわりに対照であるので、発生位置がランダムに変化する自由度を持つのである。

#### (5) サッカーボール発射装置および魔球観察

図6には新しく製作したサッカーボールの無回転発射装置を示す。

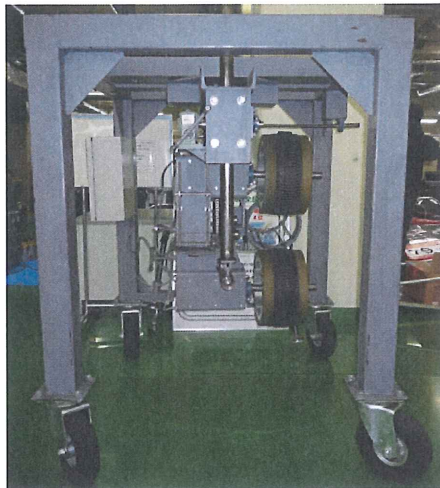


図6 サッカーボール発射装置

写真の右側のローラーの間からボールは手前に発射される。この装置からは最大110Km/hのスピードボールがほぼ連続的に発射できる。

この発射装置を使って無回転ボールを発射させ、ハイビジョンカメラにより撮影した結果から画像処理を行いストロボ映像に描いた結果を図7に示す。

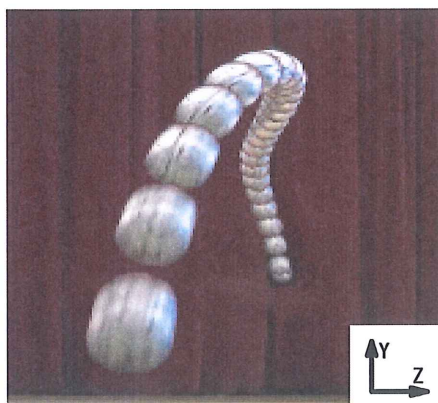


図7 サッカー魔球のストロボ映像

得られた結果はご覧のように信じられないような変化を示すことが分かった。この結果から、従来の研究室の技術によりZ方向、Y方向の流体力を求めることができた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 溝田武人, 硬式野球ボールの変化球に観る空力現象, バイオメカニクス研究, Vol. 12, No. 4, pp. 259-266, 2008, 査読なし
- ② 溝田武人, スポーツボールの飛翔に観る空力不安定現象の面白さ, 日本風工学会誌, 第33巻第3号(通号第116号), pp. 222-231, 2008, 査読なし
- ③ 溝田武人, ここまでは分かった空を飛ぶスポーツボールの軌道変化の不思議-特集, スポーツボールの進歩を支える化学工学-北京オリンピックに向けたスポーツ科学の技術開発動向, 化学工学, Vol. 72, No. 5, pp. 248-251, 2008, 査読なし

[学会発表] (計11件)

- ① 溝田武人, 魔球に観るスポーツボールのロマン, 市民フォーラム2009in筑紫「生活のロマンと可視化」, (社)可視化情報学会, 九州大学, 2009.3.28
- ② 溝田武人, 黒木康平, 大屋裕二, 岡島 厚, サッカーボールの弱回転魔球的变化の発生メカニズムに関する風洞実験, 日本機械学会・ジョイント・シンポジウム2008 スポーツ工学シンポジウム/シンポジウム: ヒューマン・ダイナミクス, 秋田

- 生涯学習センター分室ジョイナス, 2008. 11. 6-8
- ③ 黒木耕平, 根本孝治, 馬場豊治, 古賀勇揮, 緒方雄一, 溝田武人, サッカーボールのシュート発射装置の製作と飛翔予備実験, 日本機械学会・ジョイント・シンポジウム 2008 スポーツ工学シンポジウム/シンポジウム: ヒューマン・ダイナミクス, 秋田生涯学習センター分室ジョイナス, 2008. 11. 6-8
- ④ Taketo MIZOTA, Kouhei KUROGI, Yuji OHYA and Atsushi OKAJIMA, Strange 3-D trajectory mechanism of less rotation soccer ball flight, 8th UK Conference on Wind Engineering, University of Surrey [Guildford England], 2008. 7. 14-16
- ⑤ 黒木康平, 溝田武人, 大屋裕二, 岡島 厚, 風洞実験によるサッカーボールの弱回転ミドルシュートの後流観察と非定常流体力, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 横浜国大 [横浜市], 2008. 8. 3-7
- ⑥ 溝田武人, 黒木康平, 大屋裕二, 岡島 厚, 風洞実験による弱回転サッカーボールなどの飛翔軌道解析について, 全国共同利用研究所, RIAM フォーラム 2008, 九州大学応用力学研究所, 2008. 6. 6  
最優秀賞受賞 [ポスター発表 P-6]
- ⑦ 溝田武人, 魔球の流体科学-野球・サッカー・ゴルフボールの不思議な飛翔軌道の解析-, 平成 20 年電気学会全国大会実行委員会企画特別講演, 福岡工業大学, 2008. 3. 20
- ⑧ 溝田武人, 山本和幸, 小倉聡樹, 黒木康平, 大屋裕二, 岡島 厚, 風洞実験による低回転サッカーボールに作用する非定常空気の測定, 日本機械学会流体工学部門講演会, 東広島, 2007. 11. 17-18
- ⑨ 溝田武人, 山本和幸, 岡島 厚, 大屋裕二, サッカーボールの低回転魔球飛翔のメカニズム, 日本機械学会創立 110 周年記念 2007 年度年次大会, 関西大学 (吹田市), 2007. 9. 9-9. 12
- ⑩ 溝田武人, 山本和幸, 大屋裕二, 岡島 厚, サッカーボールの低回転ミドルシュートの挙動解析, 日本流体力学会年会 2007, 東京大学教養学部, 2007. 8. 6-8
- ⑪ 溝田武人, 山本和幸, 小倉聡樹, 大屋裕二, 岡島 厚, サッカーボールの低回転飛翔における不思議な軌道解析, 日本風工学会 平成 19 年年次研究発表会, 2007. 4.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

溝田 武人 (MIZOTA TAKETO)  
福岡工業大学・工学部・教授  
研究者番号：10038557

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし