

フローターサーブ速度域におけるバレーボール後流のPIV解析

伊藤 慎一郎 (工学院大学)^{*1}, 永井 達也 (工学院大学)^{*2},
八江 一至 (工学院大学大学院)^{*3}, 上野 裕也 ((株)ダイダン)^{*4}

PIV analysis of volley ball wake on the floater serve velocity area

Shinichiro ITO^{*1}, Tatsuya NAGAI^{*2}, Kazuyuki YAE^{*3}, Yuuya UENO^{*4}

^{*1} Dept. of Mechanical Engineering, Kogakuin University,
1-24-2 Nishishinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 163-8677

Non spinning serve or shot exist as a technique in volleyball and soccer ball. Because the flight paths of these non-spinning balls are not stable. In the volleyball, it is called floater serve. Floater serves in volleyball and erratic path shots of the soccer ball are different in their speed area. In other words, they are the phenomena in a transition region on volleyballs and that in the super critical domain on soccer balls. It is thought that origin of each erratic phenomenon is different. In this study, three dimensional twin vortices were visualized behind volleyball using three-dimensional dynamic PIV and solved the origin of erratic motion on the floater serve. Quick motions of three-dimensional twin vortices were confirmed in the transition region on volleyball.

Key Words : Volleyball, drag crisis, floater serve, 3D twin vortices

1. 緒 言

近年の球技スポーツにおいて、ボール形状は大会を追うごとに変化し、ボールの軌道に大きく影響することで試合の内容や戦術も変わってきている。その中でも、バレーやサッカーといった競技において、ボールが回転しない無回転ボール、低回転ボールによって通称“ブレ球”が注目視されている。Passmoreら¹⁾はサッカーボールの回転、非回転を調べ低振動においては不規則な軌道を描かないことを報告している。Asaiら²⁾は実際のサッカーボールの揺れからボールにかかる流体力の大きさを推定している。著者の一人伊藤ら³⁾はサッカーボールのパネルに注目し、パネルの変化により無回転ボール、低回転ボールでボールが変化する機構が異なることを示している。このようにサッカーボールではボールパネルの違いによって変化する技であり注目されているが、バレーボールにおいては、旧パネル当時からこの技は使われてきた。この技はサーブで用いられ、フローターサーブと呼ばれている。無回転で放たれたボールは不規則なボール軌道を描くことで、落下点の予測が困難になったり手で変化したりすることで、ラリーが続かず選手本来の技術が反映されないため、ブレないボールが望まれている。球は円筒形のような2次元カルマン渦を一般的には持っていない。3次元的にカルマン渦に相応するものがVortex Ringであり、その端面から排出される部分には3次元双子渦が形成されるとされ種子田⁴⁾の可視化によって予想されたものである。この3次元双子渦の変化がブレを産む。そもそもバレーボールとサッカーボールとは現象の起きる速度域が異なるため、その発生原因が異なり、前者は遷移領域、後者は超臨界領域での現象であると筆者らは考える。

本研究では、各バレーボールの流体力測定及びフローターサーブの速度領域でのボール後方にできる三次元双子

^{*1} 正員, 工学院大学 (〒163-8686 東京都新宿区西新宿 1-24-2)




^{*2} 工学院大学 (〒192-0015 東京都八王子市中野町 2665-1)

^{*3} 工学院大学大学院 (〒192-0015 東京都八王子市中野町 2665-1)

^{*4} (株)ダイダン (〒550-8520 大阪市西区江戸堀 1 丁目 9 番 25 号)

E-mail: ito@cc.kogakuin.ac.jp

Table 1. Volleyballs used in the experiments

Appearance			
Name and Year developed	Molten MTV5SLIT in 2001	MIKASA MVA200 In 2008	Molten FLISTATEC in 2009
Specification	Flat with 18 panels	8 panels with dimples	18 panels with hexagonal borders

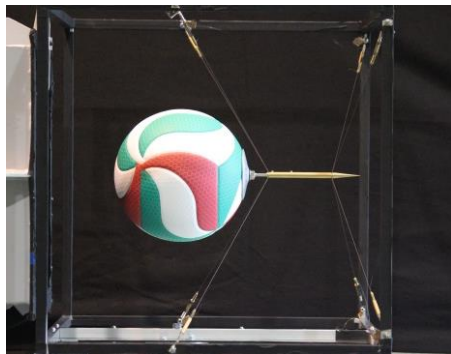


Fig.1 Wire type downwind ball support system

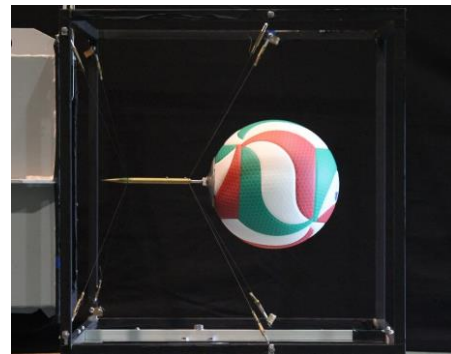


Fig.2 Wire type upwind ball support system

渦の可視化 PIV 実験装置を用いて行い、フローターサーブによるブレ球の現象解明を行う。

2. 実験方法

以下の実験は工学院大学流体力学研究室所有のコンピュータ制御、データ検出の主流乱れ度±1%の風速 1～30m/s 可能な風洞を用い、表 1 に示す 3 種類のバレーボールを用いた。ボールパネル面は空気入れがある面を打撃したと仮定し表 1 のパネル面を風上として実験を行った。

2・1 流体力測定

無回転状態のボールに作用する流体力検証のため、風洞実験装置と三分力検出器を用いて、風速 6～30m/s までの流体力の計測を行った。ボールとサポートロッドはボール曲面に合わせたφ100mm のカップに両面テープを付け、それをフレームにワイヤ固定したスティングでサポートし、フレームを三分力検出器につないでいる。図 1 に示すワイヤ風下支持固定法、さらに PIV での後流計測時に用いる図 2 に示すワイヤ風上支持固定法で流体力測定を行い、性能比較した。三分力検出器には F_x [50N]、 F_y [50N]、 M_z [5N・m]が定格の 3 分力検出器、日章電機製 LMC-3501A-50N を使用した。

2・2 PIV による後流速度場測定

ボールによって、ボール後流の渦変動の様子を確認するため 3 種類のボールを用いて行った。フローターサーブ速度域は 13～17m/s であり、それはちょうどバレーボール抗力特性の遷移領域（ドラッグクライシスエリア）に相当する。フローターサーブの原因が遷移領域で流場の不安定性に基づくと考えて、それぞれのボールの遷移領域の速度に設定し PIV 後流計測を行った。ボール後方の速度場を計測するために通常のボール風下支持においては、ボール背部サポートロッドの影になる部分が多くなるため、ボールを支えるスティングは図 2 に示すワイヤ風上支持固定法を用いて実験を行った。

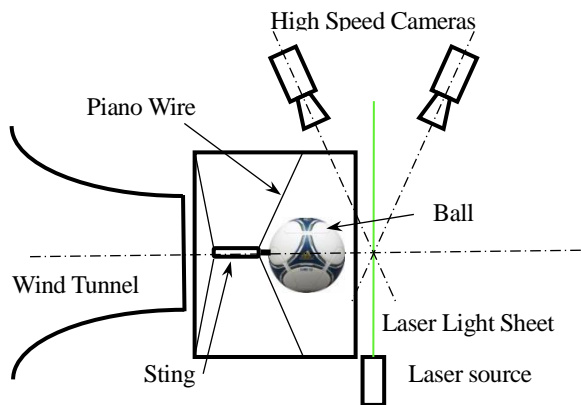


Fig.3 Placement of the experimental device in horizontal view

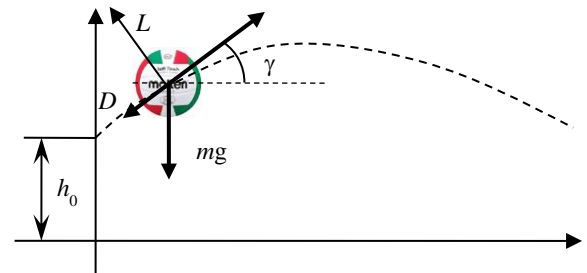


Fig.4 Coordinate of the ball

遷移領域において同じ抗力値ではほぼ同じ流場と考えて2・1で行った流体力計測から、ワイヤ風下支持型で得られた抗力の遷移領域の中心部での抗力域をワイヤ風上支持で得られた風速に置き換えて、MTV5SLIT とMVA200は12m/s、FLISTA TECは10m/sに設定しPIV計測を行った。

ボール後流の渦変動のPIV計測は西華産業Koncertoによる3D-Dynamic PIV実験装置と高速度ビデオ2000FPSを用いて可視化する。ボール後流変化の計測のため図2に示すワイヤー前面支持固定法でボールを固定し、可視化位置はボール端面から170[mm]の位置に設定した。図3に実験器具の配置を示す。250mm四方の広域を撮影するためにレーザー光源はカメラの前方からレーザー光を放出する前方散乱方式でカメラ配置した。西華産業Koncertoによる3D-DynamicPIVシステムを用いて可視化した。250mm×250mmの広域を撮影するために1000Hzの高繰り返しレーザー光源を前方散乱方式で水平に配置し、NAC社製HX-3高速度ビデオカメラ2台を用いて1280×1280Pixels, 2000FPSでPIV実験を行い、毎秒1000コマごとの流場の変化を観察した。

2・3 飛翔距離と速度変化予測

サーブボールは打ち出し後、空気抵抗により減速する。フローターサーブはネット前後の球速が重要であり、打ち出し速度がそのまま維持されるわけではない。そこでフローターサーブの平均初速度(15~19m/s)の15m/s, 17m/s, 19m/sでネット前後のエリアでの球速変化を実験によって得られた抗力係数 C_D を用いて飛翔距離と速度を計算した。図5に計算に用いたボールのパラメータ定義を示す。初速 V_0 、打ち出し角度 γ 、打ち出し点 h_0 を入力することにより式(1)~(3)に示す運動方程式をRunge-Kutta法により、ボールの打ち出しから着弾までの飛翔距離と速度を算出する。打ち出し角度は 15° とし、 C_D 値は速度に応じて0.2~0.5とした。

ボールの運動方程式

$$x \text{ 方向} : m\ddot{x} = -D\cos\gamma - L\sin\gamma \quad (1)$$

$$y \text{ 方向} : m\ddot{y} = -D\sin\gamma + L\cos\gamma - mg \quad (2)$$

$$\text{抗力 } D = Cd \cdot 0.5\rho|\vec{V}|^2 \pi r^2 \quad (3)$$

3. 実験結果及び考察

3・1 流体力測定

ワイヤ風下支持固定法(図1)と、ワイヤ風上支持固定法(図2)での流体力測定を行い比較した。ワイヤ風下支持固定法(図1)の結果を図5に示す。各ボールの正面パネル面毎の C_D 値の比較を図5に示す。3種類のボール特性が顕著に表れ、それぞれの特性の把握が可能となっている。FLISTA TECでは遷移領域に入るレイノルズ数 Re の値が、 $Re=1.2 \times 10^5$ 以下であるのに対し、MTV5SLIT, MVA200は遷移領域が 1.7×10^5 以上の領域で起きて

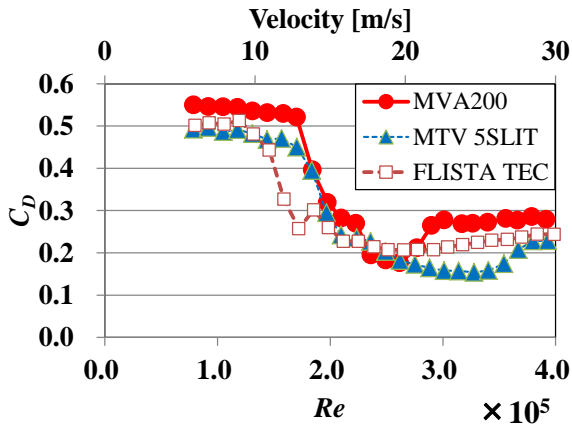


Fig.5 Aerodynamic characteristics of balls.

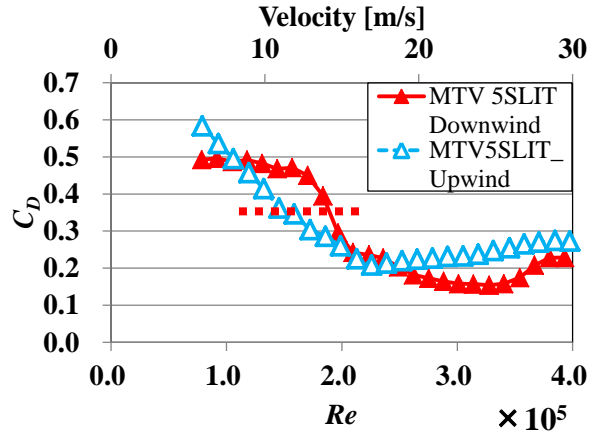


Fig.6-1 Difference of C_D between downwind support and upwind support on MTV 5SLIT

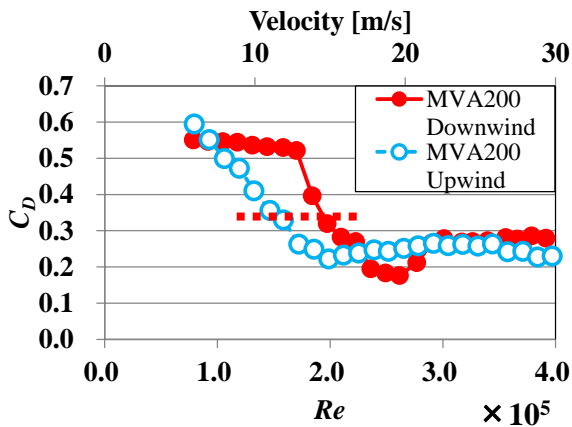


Fig.6-2 Difference of C_D between downwind support and upwind support on MVA200

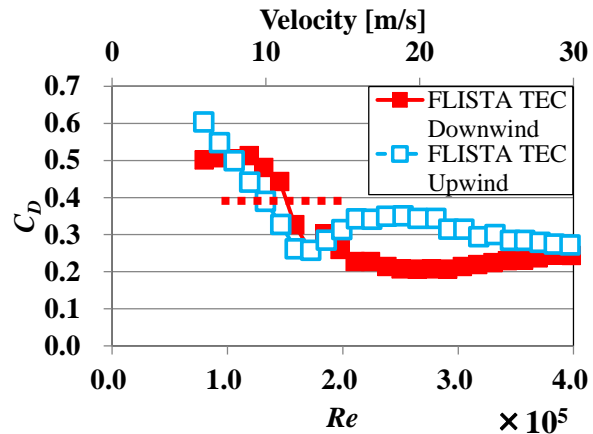


Fig.6-3 Difference of C_D between downwind support and upwind support on FLISTA TEC

いることがわかる。この結果より、FLISTA TEC の遷移領域は六角形のディンプルによって乱流促進された結果、低い速度域で遷移が始まると考えられる。また MVA200 に関しては、 $Re = 2.9 \times 10^5$ において $C_D = 0.27$ と MTV5SLIT, FLISTA TEC らの C_D と比較して若干高めである。これは細長いパネル形状が影響し、他のボールよりも上流側で剥離を起こしている可能性がある。遷移領域における速度に着目すると MTV5SLIT においては 13 ~ 18 m/s, MVA200 は 13 ~ 20 m/s, FLISTA TEC は 10 ~ 16 m/s で緩やかに抗力値の低下がみられ、ドラッグクライシスを起こしていることがわかる。これらの速度域はフローターサーブの速度域と合致する。ボール支持ステーングを風上に前置した場合、ボール前面のステーングおよび固定皿の影響でボール抗力特性は変化する。遷移領域の速度域も変化するが、それぞれの遷移領域変化のほぼ中央部の C_D におけるの流場は変化しないと仮定し、ワイヤ風上支持法による遷移領域変化中央値の流速を決定するためにワイヤ風上支持法での空力特性を把握した。その結果、いずれのボールにおいても 6 m/s ですでに遷移領域入っており、ほぼ直線的に C_D は下降することがわかった。これは固定皿の影響で剥離位置が固定されているため、また層流から乱流への遷移が固定皿によって生じているためと思われる。またこの影響で遷移領域はいずれもレイノルズ数の低い領域へすなわちグラフは左へシフトしている。図 6 中の点線に示すように遷移領域中央における速度は MTV5SLIT で風速 14[m/s] から 12[m/s], MVA200 で風速 14[m/s] から 12[m/s], FLISTA TEC 風速 12[m/s] から 10[m/s] と変化していた。PIV においてはこの実験値を採用して MTV5SLIT, MVA200, FLISTA TEC でそれぞれ風速 12[m/s], 12[m/s], 10[m/s] の速度で実験を行った。

3・2 飛翔距離と速度変化予測結果

無回転サーブ射出後の球速の減速の様子を確認した。初速度 15~19m/s のバレーボールの C_D は 0.15~0.3 程度であるが、減速するにしたがって、0.4~0.5 まで変化する。そこで $C_D=0.3$ に固定した直径 210mm の球がネットを超える射出角度 15°、高さ 2m にて初速度 15m/s、17m/s、19m/s でサーブした時のボールの速度変化と飛翔距離の様子を図 7 に示す。ネット位置 9m 付近では 15m/s で放ったボールは 12m 前後に、17m/s で放ったボールは 13.5~12m/s 前後に、19m/s で放ったボールは 15~12m/s まで球速が落ちており、いずれのボールも抗力係数は層流から乱流への遷移領域であることが確認され、フローターサーブは抗力係数 C_D の遷移領域で生ずるとした本研究の仮定が間違っていないことを示している。

3・3 PIV 実験結果

ボール後流の流れ場の変化を動的 PIV で 1000Frame/s で捉えることに成功した。図 8-10 はボール後流の流れ方向のボール後方 170/210 ボール直径位置での断面での速度ベクトル分布の変動を時間系列で示したものである。図 8 は MTV5SLIT の後流変化を示す。各図の白丸はボールの投影位置を示す。ボール後方に三次元双子渦の断面が見られ、3 次元双子渦によって形成されたジェット流が確認できる。ジェット流の方向を矢印で示す。図 8-1 は 3 時方向に 3 次元双子渦によって形成されたジェット流が確認できる。その 0.115 後の図 8-2 には 4 時の方向に 0.300 秒後の図 8-3 には三次元双子渦が崩れ 1 時と 4 時方向に分割している様子がわかる。図 9 は MVA200 の後流変化の様子である。図 9-1 では 3 時の方向に 0.377 秒後の図 9-2 では 4 時の方向に、0.500 秒後の図 9-3 では 3 時の方向にジェット流が向いている。同様に図 10-1 は FLISTA TEC の後流の様子である。図 10-1 では 4 時の方向を向いている。0.159 秒後の図 10-2 では双子渦がボール中央部付近に移動し 5 時方向を指している。0.410 秒後の図 10-3 では渦始点が下方にずれ再び 4 時方向を向いている。このようにこの速度域では後流に変化が見られ、これがボールのブレをもたらしていると考えられる。この速度域においてはこのような頻度の多い速度変動が見られ渦変動も見られた。さらに渦は常に発生しているのではなく、時間経過と共に発生と消滅を繰り返し、発生位置も不規則であることが確認できた。これがフローターサーブをもたらす原因であると思われる。

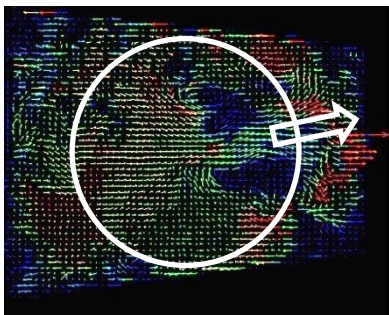


Fig.8-1. MTV5SLIT 0.000[s]

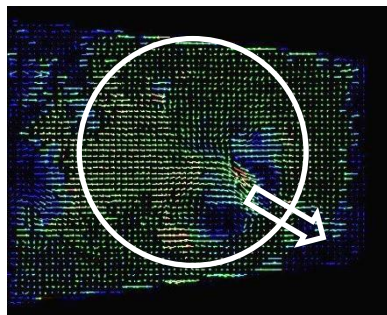


Fig.8-2. MVT5SLIT 0.115[s]

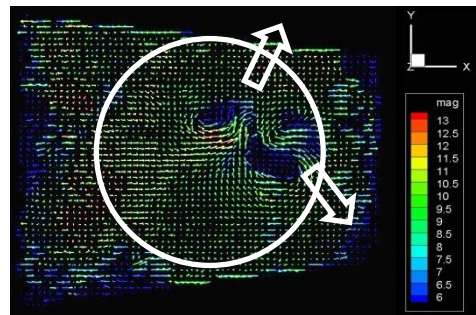


Fig.8-3. MVT5SLIT 0.300[s]

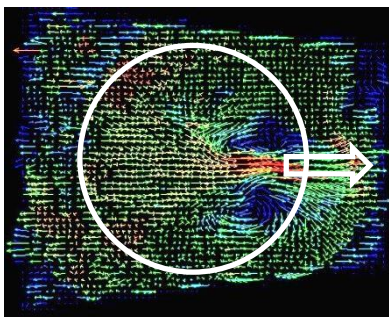


Fig. 9-1. MVA200 0.000[s]

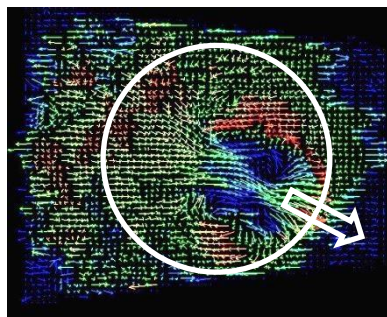


Fig. 9-2. MVA200 0.377[s]

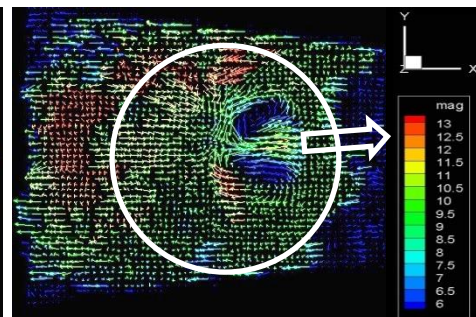


Fig. 9-3. MVA200 0.500[s]



Fig.10-1. FLISTA TEC 0.00[s]

Fig. 10-2. FLISTA TEC 0.159[s]

Fig.10-3. FLISTA TEC 0.410[s]

4. 結論

3種類のバレーボールごとの流体力計測を行い遷移領域に違いがあることを示した。抗力係数値 C_D からボールの飛翔速度、軌道解析を行った。その結果、バレーボールでのフローターサーブの初速度においてネット付近ではボールの抗力係数値 C_D 遷移領域になることが分かった。動的 PIV による後流変化の可視化によりバレーボール空力特性での遷移レイノルズ数付近でブレが起きると仮定を裏付けるバレーボールの後流が短時間で不規則に変化する速度変動を捉えることができた。

文 献

- 1) M. A. Passmore, S. Tuplin, A. Spencer and R. Jones, Experimental studies of the aerodynamics of spinning and stationary footballs, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2007, 222, 195-205
- 2) Asai, T., Seo, K., Sakurai Y., Ito, S., Koike S. & Murakami M., A Study of Knuckling Effect of Soccer Ball, *The Engineering of Sport 7: (Estivalet M. and Brisson P., eds.) Proceedings of the 7th International Sports Engineering Association Conference, Biarritz, France, 2008, Vol 1, pp. 555-562.*
- 3) Shinichiro Ito, Masaharu Kamata, Takeshi Asai, Kazuya Seo, Factors of unpredictable shots concerning new soccer balls, *Procedia Engineering* 34(2012),152-157
- 4) Taneda S., Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 10^4 and 10^6 , *J. Fluid Mech.* 1978; 85: 187-192.