D201

卓球ボールまわりの空気流動の画像解析

葛西順一[○] (早稲田大学), 岡本孝司 (東京大学), 桑原譲二 (東京大学),

山本富士夫 (福井大学)

Image Analysis of Air Flow around a Ping-pong Ball

Junichi KASAI, Koji OKAMOTO, Joji KUWABARA,

Fujio YAMAMOTO

ABSTRACT

We try to visualize the air flow around a flying Ping-pong ball and analyze the flow velocity field and vortex shedding using PIV. The images of the air flow are visualized by oil mist and YAG laser light sheet with a metal halide light and recorded by a CMOS type of high speed video camera at a rate of 10,000 fps. The final goal of this study is to give scientific information about ball motion to table tennis players and coaches who are struggling to make new tactics and develop new skills.

Keywords: Visualization, Ping-pong Ball, PIV, Air Flow, Vortex Shedding

1. 緒 論

卓球ボールは、直径 40mm で質量 2.7g であり、球技の中では最も小さい。ボールの材質はセルロイドまたはプラスチックである。卓球ボールは、二つ割れの球体をのりしろ（継ぎ目）約 1.5mm の部分を重ねて接合して作られる。

世界レベルの男子選手が打ち出すボールの最高速度は 40m/s(144Km/h)程度である。また、ボールの最高回転速度は 150rps 程度であるので、その周速度は約 19m/s となる。回転には、トップスピンとバックスピンの他に右か左の横回転（サイドスピン）や斜め回転もある。空中での弾道（球道とも言う）にはカーブやシュートもあり、パンウンド前後での弾道の変化も大きい。日本卓球協会登録選手数は約 30 万人と言われ、年齢は幼少から 90 歳前後までを含む。初心者級のボールの速度と回転速度は、上述の最高値の 1 桁から 2 桁低い。

最高速度のボールに対するレイノルズ数 ($Re = v d / \nu$, 速度 $v = 40\text{m/s}$, 直径 $d = 0.04\text{m}$, 空気の動粘性係数 $\nu = 1.5 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$) は約 100,000 程度と見積もられるから、静止空气中をボールが飛んでも、その後方の気流は乱流になっている。初心者の打球の場合も、レイノルズ数は少なくとも数千程度なので、気流はやはり乱流であろう。

特に、無回転のボールをナックルボールと呼んでいる。その場合、弾道が「ゆれる」と言う選手がいる一方で、「ゆれない」と言う選手もいる。ナックルボールを返球することは、弾道と回転速度の予測に混乱を来し、苦手と

する者も多い。そのため、ナックルボールを戦術に使う選手も多い。ナックルボールの「ゆれ」の問題は、流体力学の研究者にとっても興味深い。筆者らも研究課題として取り上げているところである。

スポーツ科学の分野において、ボールの弾道（軌跡）や飛行速度を、高速度カメラを用いて解析してきた報告は多い¹⁾。しかしながら、ボールのまわりの空気流動を可視化し、PIVなどを適用して、その速度場を示した研究は見あたらない。そこで著者らは、第 1 段階としてナックルボールまわりの気流を対象として実験を行った。可視化にはオイルミスト注入法とレーザー照明を、画像記録には 2,000~10,000fps の CMOS 型高速度カラービデオカメラを用いた。その結果かなり鮮明な画像を取得でき、さらに、PIV 解析を適用して気流の速度場を求めてみた。本報では、卓球ボールの運動についていくつかの課題を検討した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 概要

実験は早稲田大学スポーツ科学部（所沢市）の卓球研究室で、2008 年 12 月 26 日に行った。気候は快晴であった。実験には、ITTF（国際卓球連盟）公認球の中で特に真球度が高いもの 2 ダースを目視検査で選び出し実験に用いた。卓球台は、2008 年度全日本選手権大会で使用されたメーカーの同タイプのものを用いた。送球には、ボールの速度や回転速度を遠隔制御できるロボットマシン（中国・威海双蛇運動機材会社製、FQJ-1 型）

を用いた。その制御精度は高く、ボールは、ビデオ撮影のウインドウ内をかなり高い再現性で飛ばすことができる。本実験では、飛行中のボール及び卓球台でバウンドする前後のボールの運動とそのまわりの可視化された気流を高速ビデオで撮影する。気流の画像を PIV 解析して速度場を求める。

2.2 ボールの運動撮影

ボールの回転を見るため、ボールの縫い目に沿った線とそれに直角の線を十字になるようにして、共に幅 1.5mm の赤線を油性マジックペンで描いた。実験ではボールの速度は約 16m/s(57Km/h)とした ($Re=40,000$)。ロボットマシンではボールが無回転となるように制御して送球した。

撮影には CMOS 型高速度カラービデオカメラ (Photron 社製, SA1.1) を用いた。撮影速度は 2,000 ~ 10,000fps, 画素数は 1024×1089 とした。画像は 3 色 RGB で撮影され、手動で任意の時間にスタートさせ 10,000 コマを連続記録した。カメラから PC への画像転送は 2 分程度で可能である。実験のたびに PC 上ですぐに画像を再生して必要なものを選択してデータをハードデスクに保存した。撮影ウインドウの全幅は 500mm 程度 (ボール直径の 15 倍程度) である。ボールが卓球台上でバウンドする点の前後、及び、バウンド前を飛行しているところを撮影した。照明にはメタルハライド (250W、白色) とヤグレーザー (200~300mW、緑色) を連続照射した。レーザーライトシートの厚さは約 2mm とし、ボールの中心がその平面を横切った映像だけを保存した。

気流の可視化のために送球のたびにオイルミストを散布した。ミストのサイズは約 $10\mu\text{m}$ である。ミストは無毒である。実験の後ミストが沈降し卓球台が滑りやすくなるのを避けるため、常時室内換気を行った。

2.3 画像解析

保存された気流の画像 (ビットマップ) をローイメージに変換した後、画像相関法に基づく PIV を適用して速度場を求めた。2 画像間の時間間隔は 1/1000 秒とした。

3. 実験結果及び考察

図 1 にボールまわりの速度場を示す。誤対応ベクトルの除去などの後処理は不十分なままであるが、伴流中に放出された渦の可視化に成功し、流体解析の基礎データとできる見通しが立った。しかし時系列速度場から渦周波数などを求めてみたが、また十分な結果を得ていない。

図 2 は、ナックルボール (無回転) が台上でバウンドした後、回転が発生することを示して示す。図 3 は、回転していたボールがバウンド後ナックルに変化することを示している。このようなバウンド前後の回転の変化から摩擦係数と反発係数を計算することは可能であるが、現在のところまだ、十分な整理ができていない。

図 4 はバウンド後のナックルボールの弾道を示してい

る。弾道は緩やかな放物運動となっているが、いわゆる「ゆれ」についてはまだ十分議論できていない。

Fig.1 Velocity map in the wake of a ball ($v=16\text{m/s}$)

Fig.2 Overlapped ball images show a spin change from knuckle to top spin at bouncing on the table

Fig.3 Spin change from top spin to knuckle

Fig.4 Overlapped ball images show a parabolic trajectory

4. 結論

卓球ボールまわりの気流の可視化と PIV 解析によって速度場と放出渦を示し、ボール弾道の変化を検討できた。

参考文献

- 1) 葛西順一, 卓球—ボールの速度と回転数, Jap. J. Sports Sciences, Vol.12, No.6, 372-378, 19993.