

回転しながら飛翔する 卓球ボールの 3 次元軌道シミュレーション

伊藤 建一*, 上島 慶**

(令和元年 10 月 31 日受理)

Three-Dimensional Simulation of the Flying Trajectory of a Spinning Table Tennis Ball

Kenichi ITO* and Kei KAMIJIMA**

In this study, a prototype system was developed to simulate the three-dimensional (3D) flying trajectory of a spinning table tennis ball. First, drag coefficients, Magnus coefficients, and fluid torque coefficients at various conditions were computed using computational fluid dynamic analyses. Second, the value of each coefficient in the speed range of a table tennis ball was determined via interpolation. Finally, a motion equation model was used to calculate the 3D trajectories of a table tennis ball that was spinning leftwards and downwards. The flight trajectories obtained by the computer simulation were in-line with the expected results.

Key words: spinning table tennis ball, three-dimensional flying trajectory, CFD, motion equation model

1. まえがき

卓球ボールは小型軽量であり、また、ラケットに貼付されているゴム製のラバーによって回転がかけやすいため、ボールに働く空気力によって飛翔する軌道が大きく変化するという特徴がある^[1]。本研究で対象とする卓球ボール運動は、ラケットで打球した後の飛翔落下運動である。飛翔するボールの落下時に働く力は、重力の他に空力である抗力、揚力、流体トルクがある。ボールは重力を受け続けても最終的に抗力との釣合いで一定の速度になる。また、揚力の影響により回転をかけたボールは空中で曲がるとともに流体トルクの影響により回転数が減少する^[2]。本研究では、卓球ボールの空力特性（抗力係数、Magnus係数、流体トルク係数）や物理運動特性を考慮した飛翔軌道シミュレーターの開発を試みた。本シミュレーターは、中高速カメラを用いた飛翔軌道計測による回転速度の推定^[3, 4]やネット高さの影響解析などへの応用を想定している。また、シミュレーションによって、

* 工学科(知能機械・情報通信学系)教授

Professor, Division of Intelligent Machine, Department of Engineering

** 工学科(基礎教育・教養系)准教授

Associate Professor, Division of Fundamental Education and Liberal Arts, Department of Engineering

ボールの軌道変化を視覚的に捉えることができれば、イメージの共有が可能になり、選手のトレーニングや指導にも貢献できるものと考えられる。

2. 数値流体解析

本研究では、CFD (Computational Fluid Dynamics)解析を用いて、抗力係数 C_D 、Magnus係数 C_M 、流体トルク係数 C_m を算出する^[5, 6]。図1にCFD解析モデルを示す。CFD解析では風洞実験を模したシミュレーションを行った。風洞(円柱:半径 r_{xy} [m]の円×長さ L_z [m])の内部の位置 (x_b, y_b, z_b) に半径 a の卓球ボールを固定し、 x 軸周りに一定の速度 ω_x [rad/s]でスピンさせる。風洞の空気流入口は $z = L_z$ の側面、流出口は $z = 0$ の側面であり、他の側面から空気の入りは無いものとする。風洞の流入口から $-z$ 軸方向に並進速度 V_z [m/s]の空気を流入させる。風洞の大きさは $r_{xy} = 0.2$ m, $L_z = 0.8$ m, ボールの固定位置は $x_b = 0$ m, $y_b = 0$ m, $z_b = 0.6$ m, ボールの半径は $a = 0.02$ mとした。流体の数値シミュレーションでは、乱流モデルの一つである $k-\epsilon$ モデルを用い、卓球ボールの壁面粗さは砂粒粗さモデルを用いた。解析には商用ソフトウェアのCOMSOL 5.4を使用した^[7]。

本研究では、空気の並進速度 $V_z = 10, 20, 30, 40$ m/s, 卓球ボールの回転速度 $\omega_x = 30, 60, 90, 120$ rpsの各組み合わせにおいて、まず卓球ボールの圧力分布を求め、その圧力分布から流体力 (F_x, F_y, F_z) と流体トルク T_x を算出した。図2に並進速度30 m/s, 回転速度90 rpsの卓球ボールにおける周囲の流速と表面の圧力を示す。図2のような $y-z$ 平面で見ると、卓球ボールは左回転しながら上に移動していることになり、下側方向に抗力 F_z を受け、さらに卓球ボールの左側の方が右側より流速が速くなる。今回の条件では、左側の流速は40 m/s強まで上昇している。この速度差によって卓球ボールの圧力分布は偏り、左側方向に揚力 F_y が発生する。

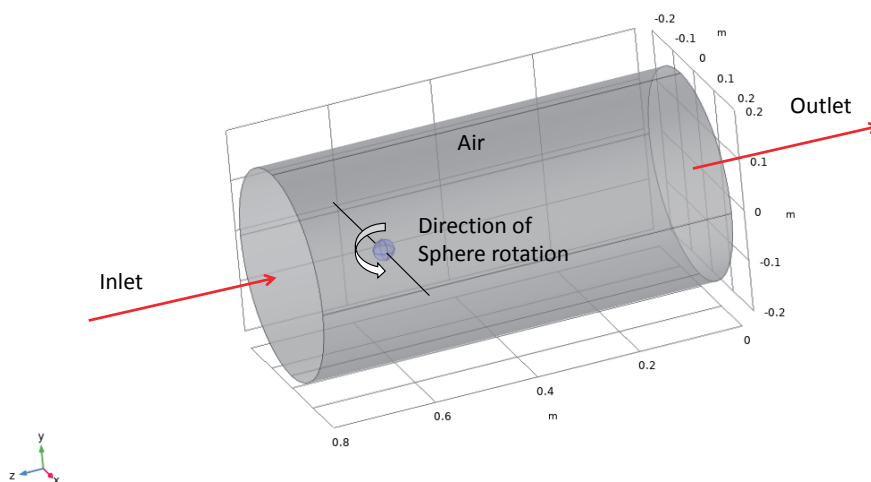


図1 CFD解析モデル：座標系と計算領域の形状

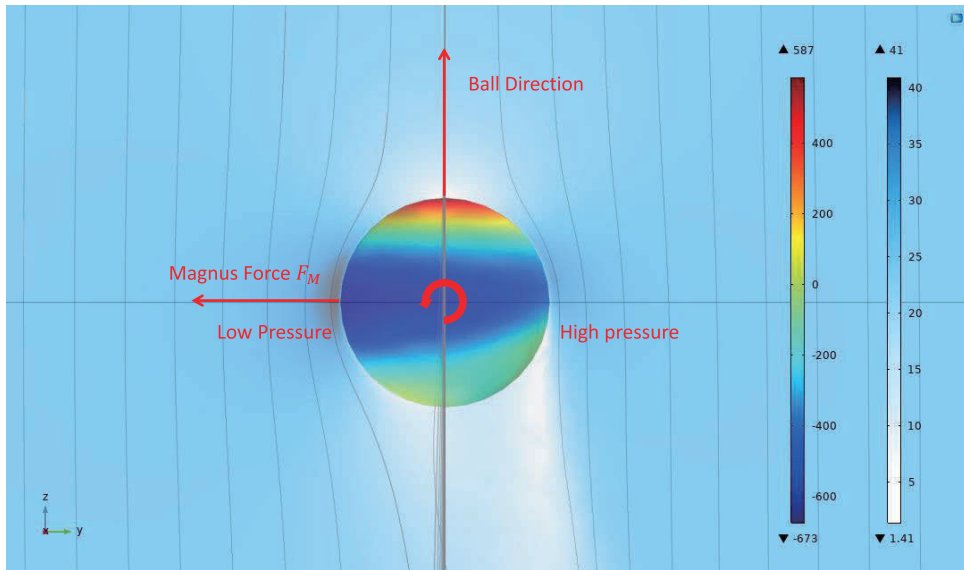
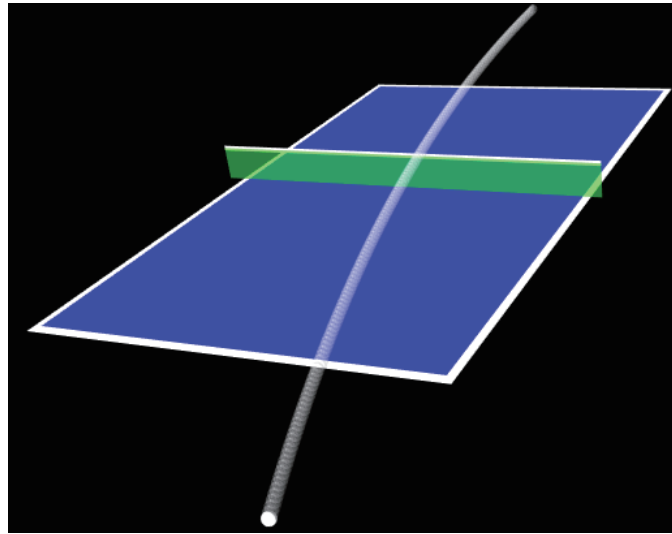


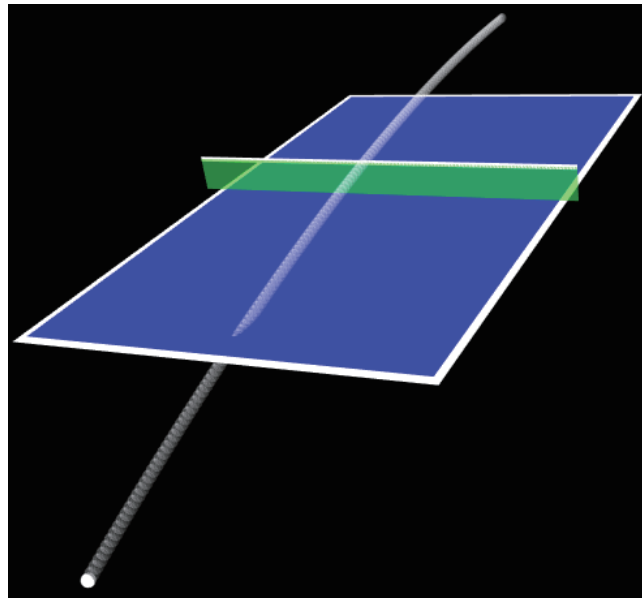
図 2 座標 $z = 0$ の中心断面上の卓球ボールにおける周囲の流速と表面の圧力

3. 3次元軌道シミュレーション

本研究では、各係数はそれぞれ並進速度 $V_z = 10, 20, 30, 40$ m/s、回転速度 $\omega_x = 30, 60, 90, 120$ rps の各組み合わせでしか算出してない。軌道シミュレーション時に各係数は連続的に変化するため、算出点以外の値は補間で求めた。軌道シミュレーションの例として、次の二つのパターンでシミュレーションを実施した。パターン 1 では、 y 軸方向速度 -2 m/s、 z 軸方向速度 30 m/s、 y 軸周りの回転角速度 565.2 rad/s (90 rps) に設定した。この場合、卓球ボールは進行方向に対して左回転するため、卓球ボールは左方向に曲がることになる。また、パターン 2 では、 z 軸方向速度 30 m/s、 x 軸周りの回転角速度 282.6 rad/s (45 rps) に設定した。この場合、卓球ボールは進行方向に対して下回転するため、卓球ボールは下方向に曲がることになる。卓球ボールの初期位置は、卓球台の端中央から、水平方向に 0.3 m、垂直上方向に 0.3 m 離れた場所とした。図 3 に卓球ボールの軌道変化を示す。なお、軌道シミュレーションの計算ソフトウェアは MATLAB を用いて開発し、表示ソフトウェアは WebGL のライブラリ Three.js を用いて開発した。図 3 に示すように、各パターンの軌道は想定通りの軌道を示した。パターン 1 では、卓球ボールは重力によって下方向に 0.27 m 変位するとともに揚力によって左に曲がり約 0.35 m 左に変位した。パターン 2 の下回転では、卓球ボールは重力の他に揚力も下方向に加わり約 0.35 m 下方向に変位した。なお、現在バウンドはモデル化していないため、パターン 2 の軌道は、卓球台を通過することになる。



(a) パターン 1



(b) パターン 2

図 3 卓球ボールの 3 次元軌道変化

4. あとがき

本研究では，卓球ボールの 3 次元軌道シミュレーターのプロトタイプを開発した．最初に CFD 解析を用いて抗力係数，Magnus 係数，流体トルク係数を算出した．次に，補間によって卓球ボールの速度範囲内の各係数の値を算出した．最後に，実際に運動モデルを用いて左回転と下回転の 3 次元軌道を求めた．シミュレーションによって得られた飛翔軌

道は、各種特性を反映した想定通りの軌道を示した。今後は、各係数の妥当性について実験を実施し確認したいと考えている。

文献

- [1] 田中晃平, 福重貴之, 宮寄武, 姫野龍太郎: 卓球ボールの空力特性; ながれ, 33, 37-45, 2014.
- [2] 上島慶, 牛山幸彦, 八坂剛史, 大庭昌昭: 卓球ボールの飛行中における回転数の変化について; 新潟体育学研究, 32, 3-10, 2014.
- [3] A. Nakashima, T. Okamoto and Y. Hayakawa: An online estimation of rotational velocity of flying ball via aerodynamics; Proceedings of the 19th IFAC world congress, 7176-7181, 2014.
- [4] 岡田尚基, 籾内智浩, 船富卓哉, 角所考, 美濃導彦: 映像からの運動モデル獲得によるボールの未観測運動推定; 電子情報通信学会論文誌 D, 91(12), 2950-2960, 2008.
- [5] 磯村優樹, 早川義一, 浅井徹, 有泉亮: スピンをしながら飛翔する卓球ボールの空力モデルについて; 第59回自動制御連合講演会講演論文集, 621-624, 2016.
- [6] M. Muto, M. Tsubokura and N. Oshima: Negative magnus lift on a rotating sphere at around the critical Reynolds number; Physics of fluid, 24, 014102, 2012.
- [7] Comsol Multyphysics at <http://www.comsol.com/>.