

課題名 (タイトル) :

卓球ボールの変化球の解析

利用者氏名 : 田中 晃平

所属 : 情報基盤センター

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

卓球はボールに様々な回転を与え、その回転による軌道の変化で試合を行っている。ここで、重要となるのは「回転」であり、ほかの球技に比べて競技中のレイノルズ数は低く、 $SP (2\pi rf/V)$ が大きくなるのが特徴である。そのため、ボールに働く空気力(抗力および揚力)が重力を凌駕し、飛翔軌道を変化させる。

一般にトップスピンボールには下向きの、バックスピンボールには上向きのマグナス力が働くことが知られている。しかし、Taneda の水槽実験ではマグナス力の方向が逆転する「負のマグナス効果」の発生するパラメーター領域の散在が示された。卓球競技において想定される Re 数、 SP は Taneda の提唱する「負のマグナス効果」が現れる領域と重なっている。「負のマグナス効果」は卓球競技に重大な影響を及ぼす可能性があるため、スポーツ流体力学の観点からもその詳細が注目される。

本研究ではバックスピンする卓球ボールにおける「負のマグナス効果」のメカニズムを直接数値計算により解明することを目標として、無回転回転する真球周りの空力特性を解析した。

2. 具体的な利用内容、計算方法

支配方程式は、連続の式 (1) とナビエ・ストークス方程式 (2) である。

$$\operatorname{div} \boldsymbol{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + (\boldsymbol{v} \cdot \operatorname{grad}) \boldsymbol{v} = -\operatorname{grad} p + \frac{1}{Re} \Delta \boldsymbol{v} \quad (2)$$

この方程式を MAC 法により解析し、差分法により数値的に解いた。

格子は 2 次元の 0 型格子を x 軸に対して回転させるようにして生成した 3 次元の格子を利用した。図 1 に格子とその中心部を示す。

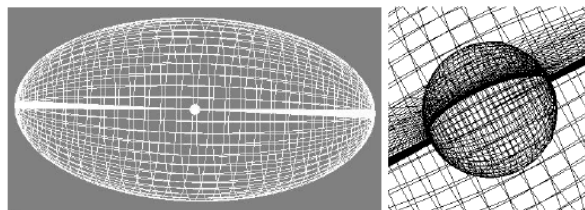
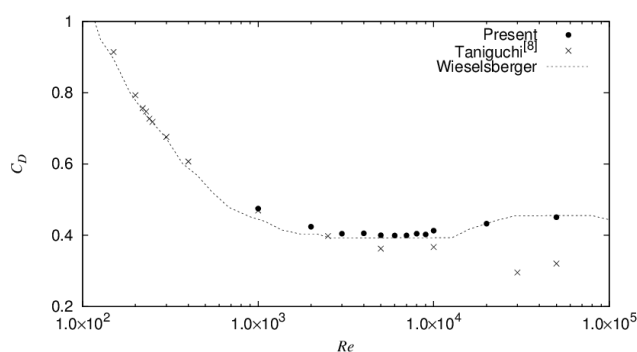


図 1 : 格子 (左) とその中心部 (右)

3. 結果

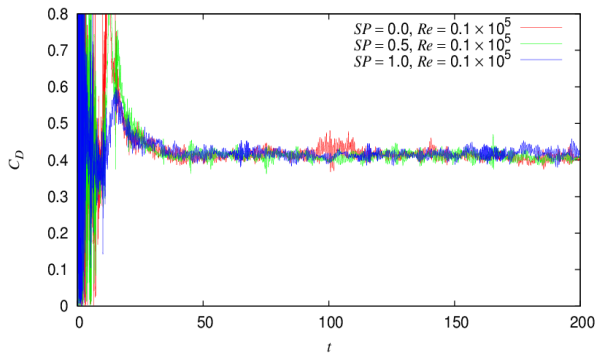
C_D の Re 数依存性についての数値計算結果を図 2 に示す。

図 2 : C_D の Re 数依存性

谷口による計算結果 (×印) では、解像度の不足により $1.0 \times 10^4 < Re$ において Wieselsberger が行った風洞実験結果よりも C_D の値が小さくなった。そこで、今回は谷口の計算の約 40 倍の解像度により再計算を行った。図 2 より、 $0.03 \times 10^5 \leq Re \leq 0.1 \times 10^5$ において $C_D \approx 0.41$ でほぼ一定となった。 $Re = 0.2 \times 10^5$ 、 0.5×10^5 において C_D はそれぞれ 0.43、0.45 となった。これは Wieselsberger が行った風洞実験結果と定性的に一致する。

回転による影響を検証するために $Re = 0.1 \times 10^5$ として真球にライフル回転を与えた場合について直接数値計算を行った。その結果を図 3 とに示す。また、 C_D の平均値、分散および標準偏差を表 1 に示す。

図 3、表 1 より、 $SP = 0.0, 0.5, 1.0$ における C_D は 0.413, 0.410, 0.417 となった。数値的に若干の違いはみられるが、標準偏差を考慮すると SP の変



化による C_D への影響は見られなかった。

図 3 : C_D の SP 依存性

表 1 : C_D の平均値、分散および標準偏差

SP	平均	分散	標準偏差
0.0	0.413	1.78×10^{-4}	1.33×10^{-2}
0.5	0.410	1.19×10^{-4}	1.09×10^{-2}
1.0	0.417	1.23×10^{-4}	1.11×10^{-2}

4. まとめ

無回転する真球周りの空力特性について数値計算を行い、以下のような結果を得た。

- $0.03 \times 10^5 \leq Re \leq 0.1 \times 10^5$ において C_D は一定となった。

ライフル回転する真球周りの空力特性について数値計算を行い、以下のような結果を得た。

- $SP = 0.0, 0.5, 1.0$ において C_D は 0.413, 0.410, 0.417 となった。

今回計算を行った領域に関して C_D は Wieselsberger が行った風洞実験結果と定性的に一致した。また、回転による影響を検証するために $Re = 1.0 \times 10^4$ において真球にライフル回転を与えた場合の空力特性についても数値計算を行った。しかし、 $SP = 0.0, 0.5, 1.0$ で C_D はほぼ同じ値となり、 SP の変化による C_D への影響は見られなかった。

5. 今後の計画・展望

バックスピンする真球において $Re \approx 1.0 \times 10^5$ で「負のマグナス効果」が発生することが高見らの実験から報告されている。そこで、まず $Re > 2.0 \times 10^4$ における無回転、ライフル回転、バックスピンする真球の数値計算を行う。また、 Re 数を徐々に上げた場合の数値計算を行っていき、

「負のマグナス効果」のメカニズムを解明する。