

課題名(タイトル):

並列計算技術の数値流体力学への応用

利用者氏名:

○高橋 直也(1,2), 片山 敬佑(1,3)

理研における所属研究室名:

(1) 情報システム本部 研究開発部門 計算工学応用開発ユニット

(2) 東京電機大学 工学部 機械工学科

(3) 電気通信大学大学院 情報理工学研究科記入例)

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

サッカーや卓球といった球技において、回転する球に働く空力はボールの軌道に強い影響を及ぼすことから、回転する球の空力特性を理解することは重要である。これに対応するレイノルズ領域での空力特性は、抗力係数が急激に変化する現象（ドラッグクライシス）が起こる。この現象は球の回転角速度や回転軸から影響を受けることが、スポーツ流体の観点から注目され始めている。

実験では回転する球の抗力係数(CD)、揚力係数(CL)の回転数への依存性が調べられているが、飛翔実験（固定ジグなし）と風洞実験（固定ジグあり）で異なるなど、未だ議論に決着がつかない。このため数値シミュレーションによる現象の再現が期待されている。このようなレイノルズ数領域では乱流モデルを使って計算負荷を減らしレイノルズ数を増加させるのが一般的であるが、その影響を理解の鍵となる遷移や剥離の流れも受けってしまう可能性がある。

そこで本研究では、乱流モデルを用いず、直接数値シミュレーション(Direct Numerical Simulation, DNS)に基づく現象の再現を目指す。さらに回転する球の流体力学的な特性について、無回転球、バックスピンストレートボールのDNSを実行し、卓球ボールの飛翔実験と比較を行う。

昨年度は、卓球を想定した回転する球の直接数値シミュレーションを行い、解像度をさらに向上させるためのプログラムの見直しを行った。その結果、解像度を 8×10^7 から 2×10^8 へ向上させることができた。この時の実行時間は比較的長時間だが、簡易利用で実行できる範囲に収まった。このため CD, CL 値への解像度の影響を探ったが、有意な差は見られなかった。

今年度はさらに解像度を向上させた数値シミュレ

ーションを行い、実験で観測されている CD, CL 値の振る舞い、特に回転による揚力係数と抗力係数への依存性の再現を目指す。

2. 具体的な利用内容、計算方法

流体の数値シミュレーションは非圧縮のナビエ・ストークス方程式を、MAC 法[4]を用いて差分法により数値的に解いた。時間の離散化には一次精度の陰的オイラー法、空間微分項は中心差分、圧力項はSOR法を用いた。プログラムはFortranで作成し、MPIを用いて並列化を行った。

無次元化された回転数であるスピンパラメータ $SP(= \pi df/U)$, d は球の直径, f は回転数, U は主流速度)の増加に伴う増加を再現できた。一方で実験のように SP の増加にともなう CD の減少, CL の減少・再度増加していく様子は現在の解像度では確認できていない。

流れ場を表すパラメータのレイノルズ数 $Re=Ud/\nu$ について、 U は主流の速さ, d は球の直径, ν は流体の動粘性係数であり、卓球競技における代表的な値を考慮して $Re=30000$ で計算を行なった。

数値シミュレーションによる結果から CD , CL を見積り、実験結果と比較した。

3. 結果

昨年度までのプログラム開発および調整により、解像度が 2.3×10^8 において、実際のピンポン球の飛翔レイノルズ数である 30000 や 50000 での計算が、可能となった。その結果、図 1 に示すように、空力特性を表す抗力係数 CD および揚力係数 CL の値は概ね一致した。一方で、スピンパラメータ SP に対する依存性は再現できていない。特に飛翔実験で観測されている「クライシス」と呼んでいる現象、 SP の増加に伴う CD や CL の突発的な減少、は見られず、 CD , CL 共に一様な増加を

示した。この時の CD, CL の時間変化を確認したが、不自然な振動現象は現れていない。さらに数値シミュレーション結果を可視化解析 (図 2) したが、空間的にも不自然な振動現象は観察されなかった。

これらの現象を研究グループ内で議論したところ、表面方向の解像度不足の可能性が指摘された。さらにこのプログラムでは、従来のように 3 次元の全方向の解像度を増加させると計算終了まで極めて時間がかかることも見積もられた。そこで指摘のあった表面方向の解像度だけ、従来の 421 から 841 へと倍増させた。その結果、全体の解像度は 4.6×10^8 に留まり、ある程度現実的な時間でシミュレーションを実行できることを確認した。

現在、無回転 (SP=0) での実行が発散なく得られたことを確認した。今後はこの結果をもとに様々な SP での計算を行い、解像度不足の指摘を検証する。

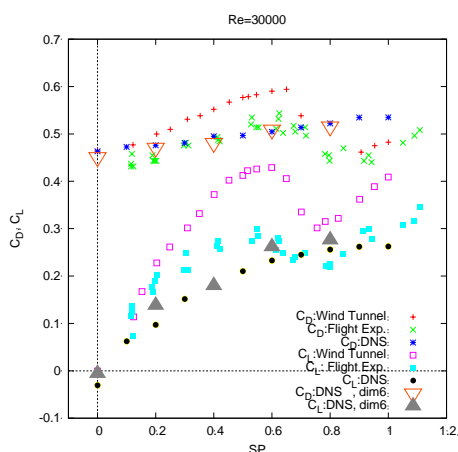


図 1 空力特性値 CD, CL のスピンパラメータ SP 依存性 (Re=30000)

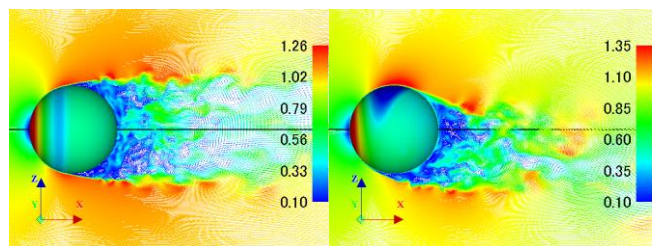


図 2 球周りの流れの可視化図. 左: SP=0(無回転), 右: SP=1.0.

4. まとめ

卓球を想定した回転する球の直接数値シミュレーションを行なった。空力特性値(抗力係数 CD, 揚力係数 CL)の回転数 SP 依存性について、いわゆるクライシス現象、SP の増加に伴い CD, CL が減少、が再現できない原因として球の表面方向の解像度不足を示唆する結果を得た。

このため、まず無回転においてこの方向の解像度を増加させて計算を行った。無回転では計算が収束し、流れ場が得られた。

5. 今後の計画・展望

今回得られた無回転での流れ場をもとに、他の SP 値における計算を行い、SP 依存性を改めて数値シミュレーションを行い、飛翔実験と検証する。

6. 利用がなかった場合の理由

該当せず。