

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

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

野球や卓球といった球技ではボールが回転することによってその軌道は大きく変化する。そのため、球技にはボールに様々な回転を与えて球の軌道を変える変化球があり、様々な種類の球種がある。これら変化球の変化量はピッチャーがボールに与える回転数によって異なるが、ボールの変化にはボール表面上の縫い目が大きく影響を及ぼしている。卓球ではラケットのラバーとボールとの摩擦を利用してボールに様々な回転を与えている。卓球では真球度の小さい真球に近いボールであるが、軽量であることに加え、ラケットのラバーとボールとの摩擦が大きく回転をかけやすいことから、回転を与えた際の変化量は非常に大きいものになる。

数値シミュレーションにおいて、「負のマグナス効果」が確認されている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、現象の鍵となる遷移や剥離といった流れも乱流モデルの影響を受けてしまう可能性がある。そのため本研究では、乱流モデルを用いない直接数値シミュレーション(Direct Numerical Simulation, DNS)を行い、回転する球の流体力学的な特性について先行研究と比較し、球の空力特性について議論する。

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

($= \pi d f / U$, d は球の直径, f は回転数, U は主流速度)の抗力係数 C_D , 揚力係数 C_L に対する依存性について, SP が約 0.6 以下では C_D, C_L の増加が概ね再現できた。一方で SP が約 0.6 以上では, 実験で観察されているような, SP の増加にともなう C_D の減少, C_L 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 $Re = 3.0 \times 10^4$ での計算を行ない, 数値シミュレーションによる結果から C_D, C_L を見積り, 実験結果と比較した。

3. 結果

図 1 に $Re = 3.0 \times 10^4$ における球周りの速度分布を示す。図 1(a) は $SP = 0.0$, 図 1(b) は $SP = 0.2$, 図 1(c) は $SP = 0.4$, 図 1(d) は $SP = 0.6$, 図 1(e) は $SP = 0.8$, 図 1(f) は $SP = 1.0$ の結果である。無回転 $SP = 0.0$ (図 1(a)) において, 剥離位置は概ね上下対称であるのに対し, バックスピン回転がある SP が有限な場合(図 1(b)-(f)) において, 剥離位置の変化およびそれに伴う流れ場の変動が確認できる。また SP が増加するにつれて球上面の剥離位置が下流域に後退していることも確認できる。可視化を行った結果, 圧力場および流れ場のどちらにおいても空間的に不自然な振動現象は観察されなかった。

これらの数値シミュレーション結果と先行研究の比較を行う。図 2 に $Re = 3.0 \times 10^4$ における C_D, C_L の SP 依存性を示す。赤色は Konishi *et al.* による風洞実験結果であり, 青色は Miyazaki *et al.* による飛翔実験結果, 黒色は数値シミュレーション結果である。また, 実プロットは C_D であり, 中空プロットは C_L である。図 2 より, 無回転($SP = 0.0$) において C_D, C_L は共に定常状態である風洞実験結果と概ね一致し

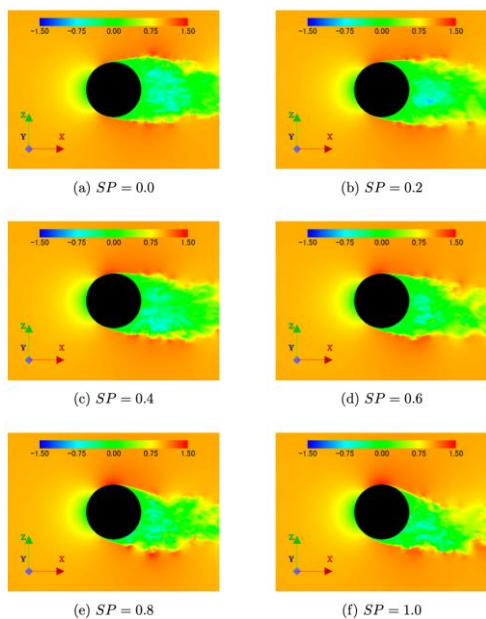


図 1 様々な SP に対する速度場の可視化結果。
 $Re = 3.0 \times 10^4$.

た。また、 SP の増加に伴う C_D , C_L の増加も確認できる。しかし、回転する $SP = 0.2$ 以降においては定常状態である風洞実験結果と一致しておらず、実験で確認されている SP に対する依存性も確認出来ていない。特に SP の増加に伴う C_D , C_L の減少ののち再度増加していく現象は見られず、 C_D , C_L 共に一様な増加を示した。回転する場合において、数値シミュレーション結果と飛行実験結果の値が一致しているパターンも存在するが、 SP に対する依存性は確認出来ておらず現象が再現出来たとは言えない。このため、 C_D , C_L に格子数依存性が現れない十分な解像度をもった数値シミュレーションを行っても実験で確認されている現象の再現および球の空力特性の解明には至らない。

数値シミュレーション結果と実験結果が一致しない要因

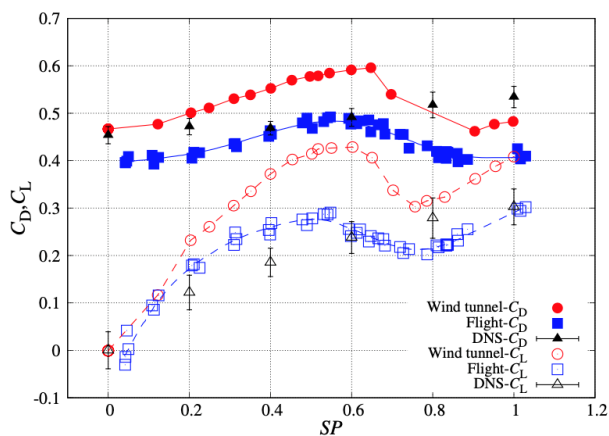


図 2 様々な SP に対する揚力・抗力係数 ($Re = 3.0 \times 10^4$).

として、解像度不足が考えられる。「負のマグナス効果」は球下面の境界層が乱流遷移して剥離した後、球下面後方で再附着し、剥離点が球後方に移動することで発生する。数値シミュレーションではその剥離をとらえなければ現象を再現することは出来ない。DNS はモデル化を行わないため、すべての渦を解像できるほど十分細かい計算格子を用いなければならない。3次元のDNSで必要となる格子点数は $Re^{9/4}$ 程度であることが知られている。本研究で計算を行った $Re = 3.0 \times 10^4$ では 10^{10} 程度の格子点数が必要な見積もりになる。解析で用いた解析モデルの格子点数は 4.6×10^8 であるため、必要格子数を下回っている。このため、球表面の剥離が再現できず実験結果と一致しなかったと考えられる。格子点数を増加させた際に格子依存性が確認できなかったのは格子点数 4.6×10^8 以下では微小な渦を捉えることが出来ておらず、概ね同じ値をとったと考えられる。しかし、3次元の全方向の解像度を増加させ試験的に行なった格子点数 1.8×10^9 のシミュレーションでさえ計算終了まで極めて時間がかかることが見積もられたことから、目安となる格子点数 1.2×10^{10} の解析モデルによる数値解析は事実上不可能である。

別の要因として、主流の乱れの影響が考えられる。そのため、流入条件として主流に攪乱を加えた数値シミュレーションを行い、主流の攪乱が球の空力特性に及ぼす影響を調査した。図 3 に $Re = 3.0 \times 10^4$, $SP = 0.4$ における球周りの速度分布を示す。図 3(a)は一樣流、図 3(b)は主流に 1.0%の攪乱を加えた結果である。こちらも図 3(a), (b)共に回転による剥離位置の変化およびそれに伴う流れ場の変動が確認できるが、攪乱の有無による剥離位置および速度分布の変化は見られなかった。また、攪乱を加えた場合において空間的に不自然な振動現象は観察されなかった。

一樣流と攪乱を加えた揚力・抗力係数の結果を比較すると、 C_D , C_L 共に若干減少している。しかし、 C_D , C_L 共に減少していることから、実験結果と近い値になったとはいえない。これより、攪乱は実験結果と数値シミュレーション結果が一致しない主たる要因ではない。本解析は主流の 0.2% および 1.0%の正規乱数を加えるという限られた条件での検証結果であることから、系統的な検証を行う必要がある。

4. まとめ

回転する球の空力特性、特に回転によって揚力係数が減

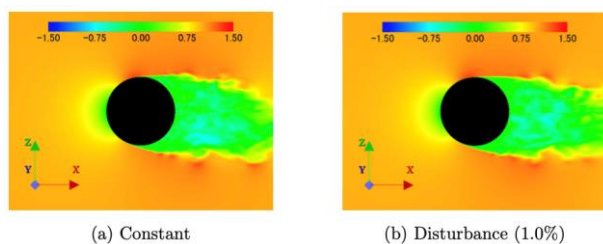


図 3 球周りの速度場の可視化結果, $Re = 3.0 \times 10^4$, $SP = 0.4$. (a)攪乱なし, (b)攪乱あり(1.0%)

少するリフトクライシスを, 直接数値シミュレーションで捉えようと様々な観点から計算を行った.

流れ場の可視化解析から, 少なくとも不自然な振動など数値的な問題の発生は認められなかった. 一方で実験結果と概ね結果は一致するものの, 無次元化した回転数パラメータ SP への依存性を再現することはできなかった.

原因として解像度不足が考えられるが, これ以上の解像度増加を行うことは, 現段階では計算時間の観点からも現実的ではない.

別の原因として, 主流に対する乱れの影響を考慮するため, 乱流を模した正規乱数を投与した. 乱れが主流の1%程度を想定した乱れでは揚力・抗力係数に優位な差は見られなかった.

5. 今後の展望・計画

主流の乱れに対する応答については, 乱れとして用いた正規乱数は, あくまで乱流の代用であり, 乱流ではない. そこで既存の非圧縮性乱流の知見に基づいた乱れを模擬し, その応答性を解析する必要がある.

6. 利用がなかった場合の理由

該当しない.

2019年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

【会議の予稿集】

- 片山 敬佑, 伊藤 学成, 宮寄 武, 高橋 直也, 姫野 龍太郎, 卓球ボールの空力特性～飛翔実験と数値計算～, 日本流体力学会 年会 2019 講演論文集, 2019年9月

【口頭発表】

- 片山 敬佑, 伊藤 学成, 宮寄 武, 高橋 直也, 姫野 龍太郎, 卓球ボールの空力特性～飛翔実験と数値計算～, 日本流体力学会 年会 2019, 2019年9月, 電気通信大学(東京都調布市)

【ポスター発表】

【その他(著書、プレスリリースなど)】