

数値計算による円管内での管軸からずらした球の揚力について

A Numerical study of the lift force on a sphere placed off a pipe center.

- 渡辺 正宏, 北陸先端大院, 〒 923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1-1, E-mail:m-wata@jaist.ac.jp
 松澤 照男, 北陸先端大情報科学センター, 〒 923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1-1, E-mail:matuzawa@jaist.ac.jp
 Masahiro WATANABE, School of Information Science, JAIST, Ishikawa 923-1292
 Teruo MATSUZAWA, Center for Information Science, JAIST, Ishikawa 923-1292

The lift force acting on a stationary sphere in a poiseuille flow inside a pipe are numerically studied by means of a three-dimensional numerical simulation. The sphere set an eccentric position by separating the pipe axis. The result show that the lift force in a poiseuille flow acts from the low-fluid-velocity side to the high-fluid-velocity side for low particle Reynolds numbers of about $Re_p = 170(190)$ (sphere's radius $D_s = 0.1D_p(0.2D_p)$).

1. はじめに

近年, 計算機の高速度化, メモリの大規模化に伴い, 大規模な 3 次元物体回りの流れ場の解析が多く行われている. 流れの中に置かれた球に働く揚力と抗力は古くから研究されているが, 近年 Kurose らは, 線形な速度場に置かれた球に働く抗力と揚力を数値的及び実験的に検討し, 球レイノルズ数 (Re_p) が 60 以上になると揚力の向きが速度の速い方向から速度の遅い方向に反転することを示した¹. また, N.Shahcheraghi² らは円管内で円管の中心から離れた位置に球を置き, 管レイノルズ数 $Re = 25, 125$ の計算を行い, 球にかかる揚力を計算した.

本研究では円管ポアズイユ流れ中に円管の中心から離れた位置に球を置き, 放物型の速度場及び円管壁が球の揚力に及ぼす影響について, 球レイノルズ数 $Re_p = 12.6 \sim 256$ について計算を行った.

2. 計算モデル

円管と球のモデルを文献²を参考に, 次のように設定した. (Fig.1) 流れ方向を X 軸, 円管軸からの距離 E を Y 軸方向とした. 円管の直径を D_p , 長さを $L = 15D_p$ とし, 球の直径を D_s , 円管中心からの距離を E , 円管入り口からの球までの距離を $5D_p$, 球から円管出口までの距離を $15D_p$ とした. 本報告では球の直径として $D_s = 0.1D_p$ (Case 1), $0.2D_p$ (Case2), それぞれの球の直径に対し, 管中心軸からの距離を Case 1 では $E = 0.2D_p, 0.3D_p, 0.4D_p$, Case 2 では $E = 0.2D_p, 0.3D_p$ と設定した.

対象の流体を非圧縮粘性流体とし, 流れは層流を仮定した.

本報告で球 Reynolds 数は, 代表長さを D_s , 代表速度を円管の流入面における球の中心の速度 U_∞ で定義した. 揚力係数 C_L は

$$C_L = \frac{F_L}{1/2\rho U_\infty^2 A_s} \quad (1)$$

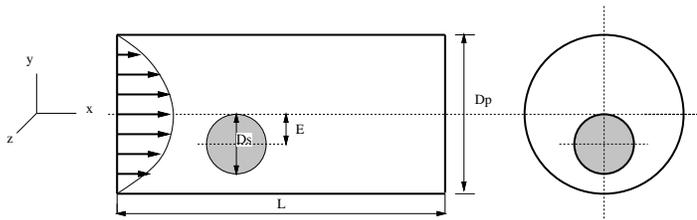


Fig. 1: Model

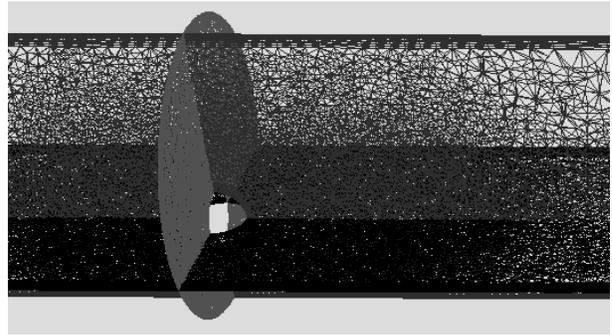


Fig. 2: Mesh in section, No. of Elements 1044241, No of Nodes 74020

とした. ただし F_L は揚力, A_s は球断面積で $\pi(D_s/2)^2$ である.

本報告では ESI 社製の有限要素法数値解析ソルバである PAM-FLOW²⁾ を使用した. 時間方向は分離型解法である two step predictor corrector scheme を用いた.

メッシュの作成は Advancing Front 法を用いるメッシュジェネレータ PAM-GEN3D⁴ を使用した. 円管壁, 球の周囲と後流に円筒形の範囲指定を行い, その領域内に細かいメッシュを設定した. 円筒形のメッシュの細かい領域の長さを $10D_s$, 球を中心としたときの径を $2D_s$ とした. 境界条件は円管壁面及び球表面を no-slip とし, 円管出口面の圧力を 0 とした. 境界層をよりよく計算するため, 球表面から 0.1 の距離を指定し, その距離を 10 分割する設定を行った.

球レイノルズ数が $12.6 \sim 256$ の範囲で計算を行った. 計算機は富士通製 VX-E(4.8GFLOPS, 2GB memory) を使用した.

球のモデル精度

球のモデルを作成する場合, モデル精度が問題となる. 本報告で使用した PAM-FLOW では, 複数の点をつなぐことで一つの線分を構成している. その線分によって面を作成し, 面によってモデルを構成する.

まず, モデルの面の分割を以下のように行った. 線分が球表面上で集中する場所を極と考え, 極に対して緯度方向と経度方向に次のように分割を行う.

- 点
 - 経度方向 5 度, 緯度方向 5 度
- 面の分割
 - 経度方向 45 度, 緯度方向 30 度

このモデルを用いてメッシュの節点の精度を、節点の座標を球の半径として計算し確認したところ、Tab.2. のような結果となった。なお max は最大誤差, ave は誤差の和を節点数で除した平均値である。モデルを構成する点数は 814 である。節点数 106 がもっとも精度がよい事がわ

No. of nodes	Error
106	max 3.59588E-07 ave 7.32450E-08
1426	max 6.41881E-04 ave 1.04284E-04
3962	max 6.59615E-04 ave 1.16723E-04

Tab. 1: Model precision

かるが、これでは球表面上のずり応力などの精度を得ることが出来ないと予想された。よって、

- モデル点
 - 経度方向 3 度, 緯度方向 1.2 度
- 面の分割
 - 経度方向 45 度, 緯度方向 15 度

モデル点数 2090, モデルの面数 72 となる。メッシュの設定は、Tab.2. の最下段と同じとする。球表面上の節点数は 15226 点となり、誤差は

max 4.668141e-05 ave 6.953143e-06

となる。以後の計算ではこの計算モデルを使用する。

3. 結果

Case 1 の $E = 0.2Dp$ の $Re_p = 12.6$ と 256, Case 2 の $Re_p = 12.6$ と 256, Case 1 の $E = 0.4Dp$ の $Re_p = 12.6$ と 256 の速度の等速度線と、球中心を通るの X-Y 段面のベクトル図を Fig.3, 4, 5 に示した。

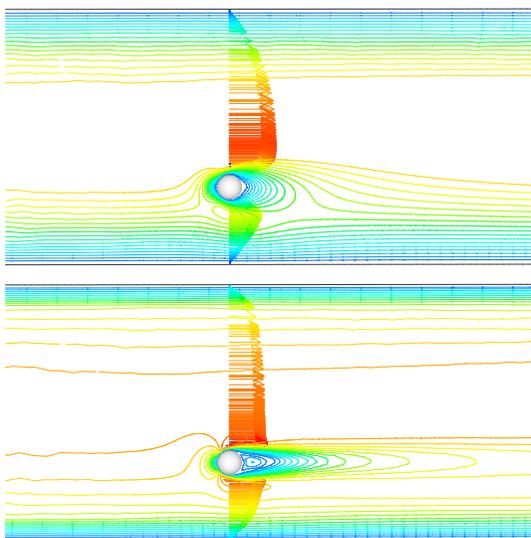


Fig. 3: Case 1 $E = 0.2Dp$ $Re_p = 12.6, 256.0$ Velocity contours in section.

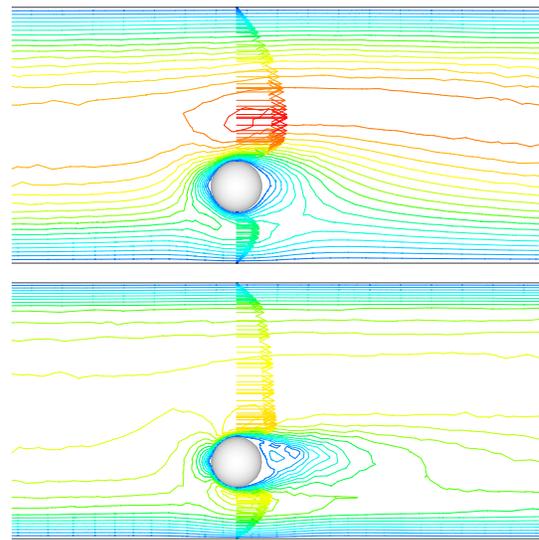


Fig. 4: Case 2 $E = 0.2Dp$ $Re_p = 12.6, 256$ Velocity contours in section.

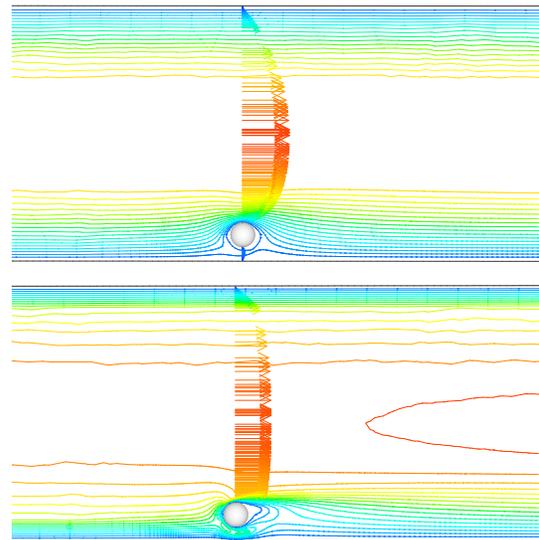


Fig. 5: Case 1 $E = 0.4Dp$ $Re_p = 12.6, 256$ Velocity contours in section.

ベクトル図を観察すると Fig.3 $Re_p = 12.6$ の場合、円管中心側 (上) と円壁面側 (下) では円管中心側の速度が速くなる。Fig.3 $Re_p = 256$ の場合、Fig.3 に比較し球の後流に剥離が見られ、円壁面側 (下) では円管中心側の速度に近くなっている。また、速度の等速度線を見ると、球後流の流れ場の影響が $Re_p = 12.6$ に比較して長い。Fig.3 と同じ位置で球径が Case 2 の Fig.4, $Re_p = 12.6$ の場合、円管中心側 (上) と円壁面側 (下) では円管中心側の速度の違いが大きい。しかし、Fig.5, $Re_p = 256$ では球の円管壁側の速度が大きくなり、円管中心側の速度に近い。Fig.4 $Re_p = 256$ の等速度線を見ると、Fig.3 $Re_p = 256$ に比較して後流域の球の等値線が伸びていない。最後に Fig.5 のベクトル図では、 $Re_p = 12.6$ と 256 とも、球の円管壁側の速度が小さい。また、 $Re_p = 12.6$ に比べ 256 は剥離領域が大きくなった。

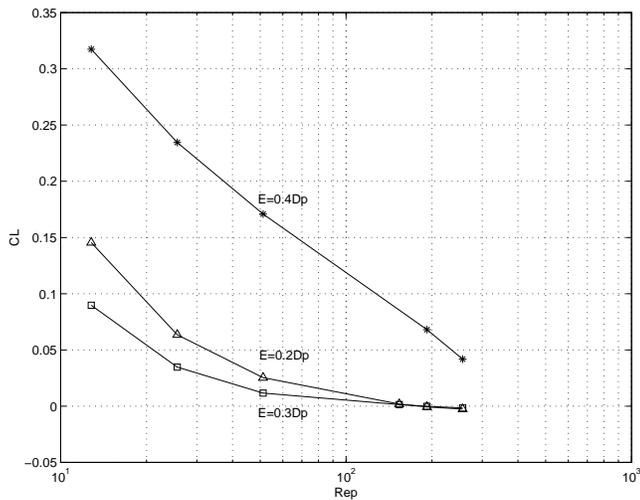


Fig. 6: C_L for sphere (Case 1) $E = 0.2D_p, 0.3D_p, 0.4D_p$

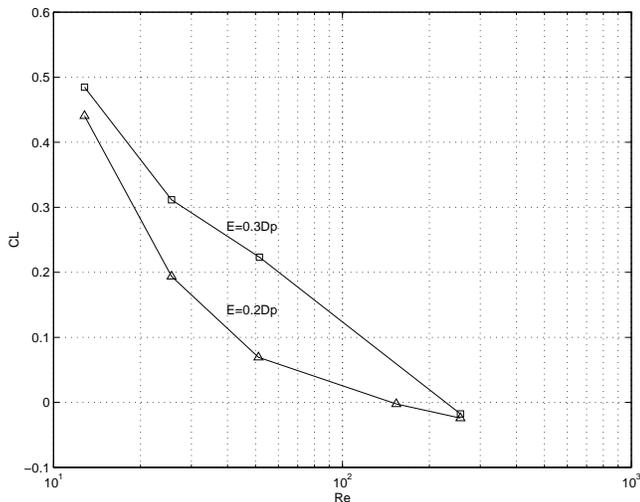


Fig. 7: C_L for sphere (Case 2) $E = 0.2D_p, 0.3D_p$

次に、Case 1, $E = 0.2D_p, 0.3D_p, 0.4D_p$, Case 2, $E = 0.2D_p, 0.3D_p$ の場合、揚力係数 C_L と球 Reynolds 数 (12.6 ~ 256) の関係を Fig.6, 7 に示した。Fig.6, 7 は揚力係数が正の場合、円管中心方向に揚力が働くことを示している。Case 1, Case 2 と同様に、球 Reynolds 数 Re_p が大きくなるにつれ揚力係数が小さくなっている。

Case 1 では $E = 0.2D_p, 0.3D_p$ では約 $Re_p < 170$, Case 2 $E = 0.2D_p$ では約 $Re_p < 190$ $E = 0.3D_p$ では $Re_p < 200$ で揚力は正の値である。また、上の Re_p 値を越えると揚力の値は負になり、働く方向が管壁方向に反転した。ただし、 $E = 0.4D_p$ では揚力は反転しなかった。

計算した球 Reynolds 数では、Case 1, 2 と同様に円管中心に向かう揚力係数より、管壁に向かう揚力係数が小さい値となった。また $Re_p = 256$ での管壁方向の揚力係数は、Case 1 $E = 0.2D_p$ で -0.0016 , Case 2 $E = 0.2D_p$ で -0.0240 となり、Case 1 より Case 2 の方が揚力係数の負の値が大きくなった。

上述の揚力係数の中で Fig.8 に Case 2 $E = 0.2D_p$ の場合の Y 方向の圧力とずり応力の揚力係数 $C_{L,p}, C_{L,s}$ グラフを示す。 $Re_p = 12.6$ では圧力の揚力への効果がずり応力に比較的大きい。しかし、 $Re_p = 256$ では、ほぼ同程度の揚力への効果となった。

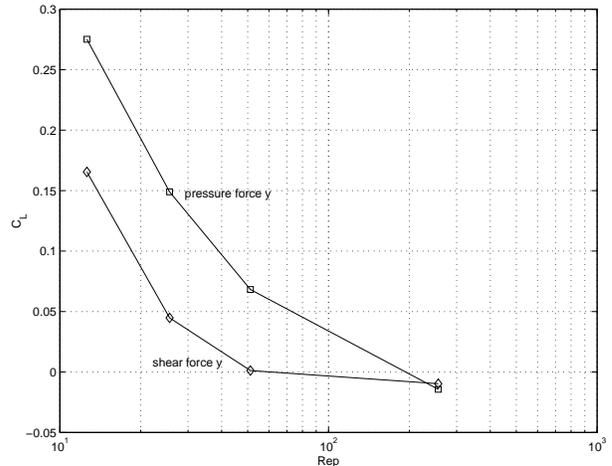


Fig. 8: $C_{L,p}, C_{L,s}$ for sphere (Case 2, $E = 0.2D_p$) pressure and wall shear force y-component

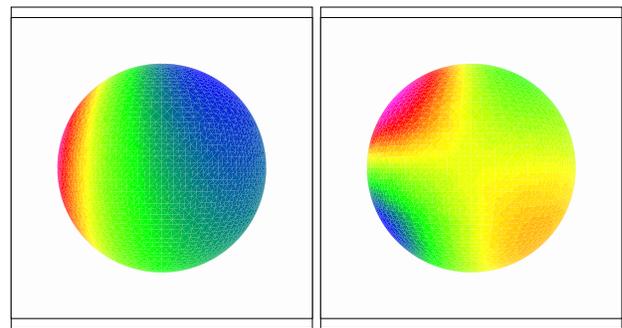


Fig. 9: Case 2 $E = 0.2D_p$ $Re_p = 12.6$ Surface contours of the instantaneous pressure and the y-component of wall shear force.

次に Case 2 の $Re_p = 12.6, 256$ の球表面の圧力のコンター図、球上の Y 方向のずり応力値のコンター図を、Fig.9, 10 に示した。それぞれの図は、X-Y 段面で示した。球表面の圧力のコンター図では、 $Re_p = 12.6$ の場合流れ場の上流 (左) が最も圧力が高く、下流方向に向かうにしたがって圧力の値が低くなった。放物型の流れの Y 方向の勾配のため、流れ場上流に垂直な状態ではなく、球左上部に向かつて圧力値の高い部分が集中している。また、球右上方に他の部分より低い圧力が見られた。このため円管中心方向に揚力が働くと思われる。同じ $Re_p = 12.6$ での球表面のずり応力のコンター図 (Fig.9 右図) では、流れ場の上流 (左) 上部に正の値が分布している。また、流れ場下流の球の下の部分にも正のずり応力値が分布しており、圧力同様に球の Y 軸の正方向に働く揚力を与えていた。

揚力が負の方向に働く $Re_p = 256$ の場合、圧力のコンター図 Fig.10 左図では、上流側がもっとも高く、球中心部で圧力の値はもっとも低くなった。また、球中心から下流方向に向かうにしたがって値が高くなり、Fig.10 のように圧力値の分布は上下にほぼ対称となる。球表面の Y 方向ずり応力のコンター図より、流れ場上流 (左) 上部に正のずり応力値が分布しているが、流れ場上流 (左) 下部と流れ場下流 (右) 下部に負のずり応力値が分布していた。流れ場上流 (左) 上部と下部で、下部の負の値が正の値より大きいため、球は管壁方向に押されていると考えられる。

球の中心を通る X-Y 断面上の Y 方向のずり応力を、横軸を X 方向として Fig.11, 12 を示す。それぞれ、上図は

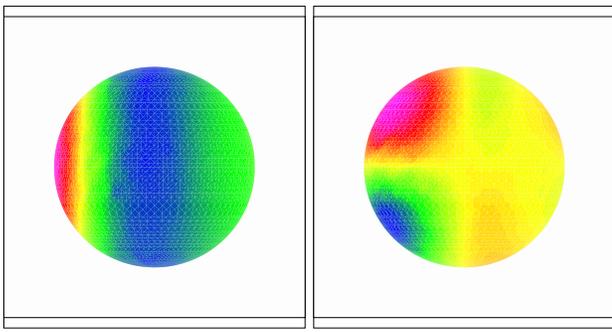


Fig. 10: Case 2 $E = 0.2D_p$ $Re_p = 256$ Surface contours of the instantaneous pressure and the y-component of wall shear force.

球の上部, 下図は球の下部を表面に沿ったずり応力値を示す. Fig.11の上下を比較すると, 値の分布は2つの図で対称に近い傾向となっているが, 上図の最大値が下図の負の最大値より大きい. $Re_p = 12.6$ ではこのことから, 球がY方向に正の向きに揚力を受ける事が分かる. Fig.12より, $Re_p = 12.6$ の場合と同様に, 上下で値もほぼ対称に近い. 他の領域の分布により, 球は管壁方向に押されていると考えられる.

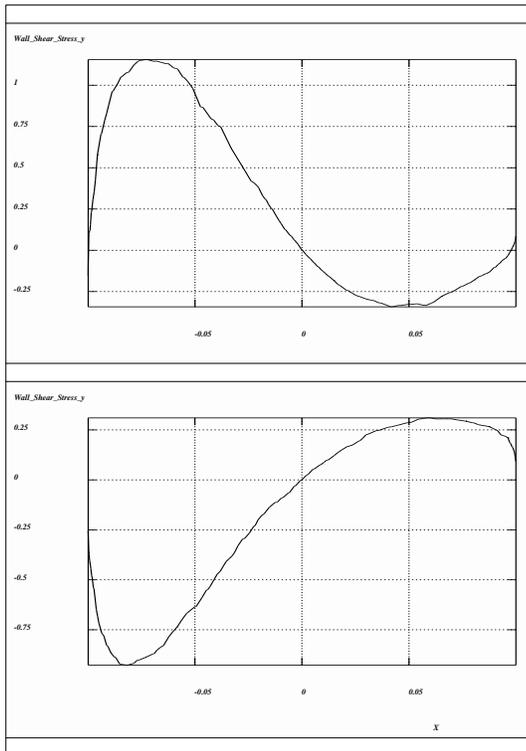


Fig. 11: Case 2 $Re_p = 12.6$ Surface the y-component of wall shear force.

4. 考察

Fig.3, 4の球の流れ場と Fig.6, 7の揚力の関係を見ると, 円管壁との距離の少ない側に流れが入る事によって流速が早くなり, これによって球表面に負の方向に向かうずり応力が起き, 揚力は負の向きに働いていると思われる. この事は, Fig.11, 12の球表面のコンター図にも現れている.

また, Fig.6, 7から円管中心からの距離 E が同じで球の大きさが同じ場合, 球にかかる揚力は大きくなる事がわかる.

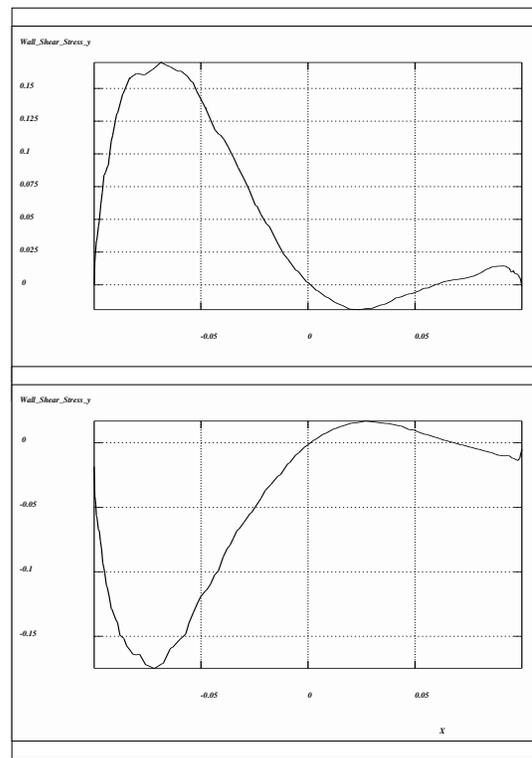


Fig. 12: Case 2 $E = 0.2D_p$ $Re_p = 256$ Surface the y-component of wall shear force.

5. まとめ

本報告では, 球の揚力が Case 1 の場合は約 $Re_p > 170$, また Case 2 では約 $Re_p > 190$ で円管中心に向かう方向から円管壁に向かう方向に反転した.

また, 球表面での圧力値とずり応力値を示し, それぞれの値が球の揚力に影響を与えるかを示した.

参考文献

1. Ryoichi Kurose and Satoru Komori, Drag and lift force on a rotating sphere in a linear shear flow, Journal of Fluid Mechanics (1999), Vol. 384, pp. 183-206
2. N. Shahcheraghi and H. A. Dwyer, Fluid Flow and Heat Transfer Over a Three-Dimensional Spherical Object in a Pipe, Trans. of ASME Journal of Heat Transfer Vol. 120, Nov., 985-990, 1998
3. PAM-FLOW Reference Manual
4. PAM-GEN3D Theory Manual