



回転するディンプル球まわりの境界層遷移に関する 実験と数値計算の比較

メタデータ	言語: ja 出版者: 日本流体力学会 公開日: 2024-02-19 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 富永, 悠介, 丸山, 昂起, 坂上, 昇史, 新井, 隆景, 大貫, 正秀, 佐蔭, 隆弘, 坪倉, 誠 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10466/0002000373

回転するディンプル球まわりの境界層遷移に関する 実験と数値計算の比較

大阪府立大学 大学院 工学研究科	富 永 悠 介
大阪府立大学 大学院 工学研究科	丸 山 昂 起
大阪府立大学 大学院 工学研究科	坂 上 昇 史*
大阪府立大学 大学院 工学研究科	新 井 隆 景
住友ゴム工業	大 貫 正 秀
住友ゴム工業	佐 嶋 隆 弘
神戸大学 大学院 システム情報学研究科	坪 倉 誠

Comparison between Experimental and Numerical Results on Boundary Layer Transition around Rotating Dimpled Sphere

Yusuke Tominaga, Department of Aerospace Engineering, Osaka Prefecture University

Koki Maruyama, Department of Aerospace Engineering, Osaka Prefecture University

*Shoji Sakaue, Department of Aerospace Engineering, Osaka Prefecture University

Takakage Arai, Department of Aerospace Engineering, Osaka Prefecture University

Masahide Onuki, Sumitomo Rubber Industries, Ltd.

Takahiro Sajima, Sumitomo Rubber Industries, Ltd.

Makoto Tsubokura, Graduate School of System Informatics, Kobe University

*E-mail : sakaue@aero.osakafu-u.ac.jp

1 はじめに

一様流中に置かれた球まわりの流れは、レイノルズ数が大きくなるにつれて、球表面の境界層が層流剥離して大きな後流域が生じ圧力抵抗が支配的となって抗力係数が一定となる亜臨界領域、境界層が乱流遷移して剥離点が下流に移動して圧力抵抗の寄与が急激に小さくなり最小抗力係数に達する臨界領域、摩擦抵抗の増加に伴って緩やかに抗力係数が増加する超臨界領域に分類される¹⁾。球表面に凹凸（ディンプル：dimple）を有する球（以下ディンプル球と呼ぶ）の場合も、表面が滑らかな滑面球と同様の傾向を示すが、滑面球の場合より低いレイノルズ数で境界層が乱流遷移し臨界領域に入ることが知られている²⁾。ゴルフボールは、この特性を利用する代表例であ

るが、球まわりの流れは3次元的で複雑であり、また、球が回転する場合の境界層遷移などについては不明な点が多く、飛距離向上を目指したゴルフボールの設計は経験則に基づく試行錯誤的なものとなっている。

本研究は、回転するディンプル球の空力特性に及ぼす球まわりの流れを解明することにより飛距離向上を目指した住友ゴム工業、神戸大学および大阪府立大学による共同研究の一環として行ったものである。ここでは、回転するディンプル球表面に発達する境界層の乱流遷移過程において観察される速度変動について実験により調べ、その結果を数値計算結果と比較して、その特徴について考察した。

2 解析対象の流れと方法

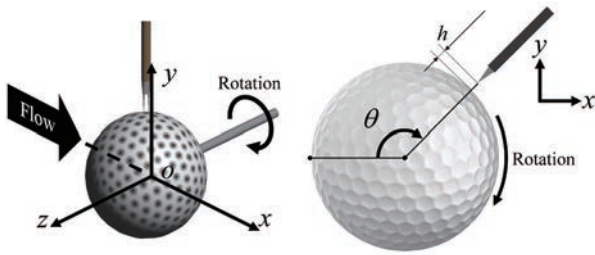


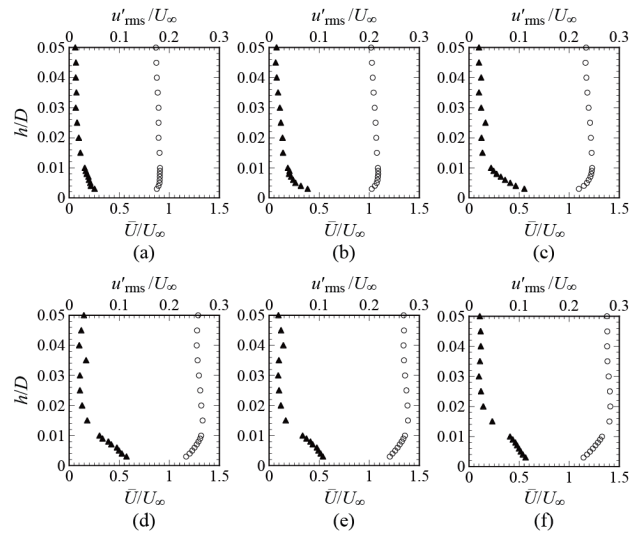
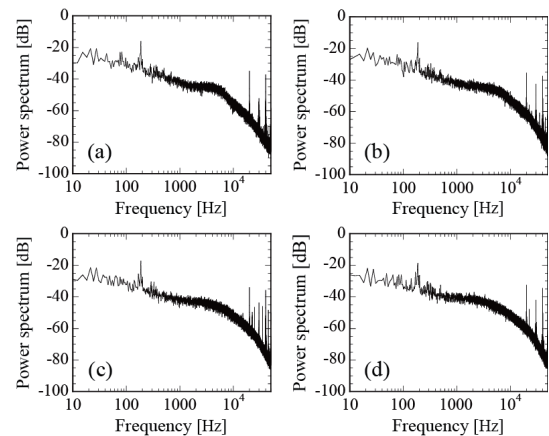
図1 実験装置の概略と座標系.

本研究では、回転するディンプル球の表面に発達する境界層の乱流遷移を対象とした。図1に実験装置の概略を示す。実験には、直径 $D=100\text{ mm}$ のモデル球を用い、 $195\text{ mm} \times 235\text{ mm}$ の吹き出し口を持つ回流式風洞測定部中央に設置した。座標系は球中心を原点とし、主流方向を x 、鉛直上向きを y 、スパン方向を z とする。球は z 軸周りに回転できるように片持ち支持されている。 x 軸を含む平面を計測断面とし、 y 軸と計測断面のなす角を ϕ 、前方淀み点からの角度を θ とする。本研究では、 $\phi = 0^\circ$ の断面を計測面とし、球表面からの高さ h 方向の球近傍の速度分布を定温度型熱線流速計により計測した。計測条件は、実際のゴルフボールの飛翔中に相当する条件として、主流速度と球直径に基づくレイノルズ数を $Re = 1.1 \times 10^5$ 、周速度と主流速度の比である周速比 SR を $SR = 0.1$ とした。実験結果と比較する数値計算は、LES (Large Eddy Simulation) に基づく非圧縮流の Navier-Stokes 方程式を非構造格子を用いた有限体積法により離散化し、球の回転を格子点の移動により再現した。なお、数値計算法の詳細については、文献3)~5)を参照されたい。

3 実験結果と考察

図2は、(a) $\theta = 40^\circ$, (b) $\theta = 50^\circ$, (c) $\theta = 60^\circ$, (d) $\theta = 70^\circ$, (e) $\theta = 80^\circ$, (f) $\theta = 90^\circ$ における平均流速 $\bar{U}$ と流速変動実効値 u'_{rms} の高さ方向分布で、○は平均流速、▲は変動実効値を示す。縦軸は球直径 D 、横軸は主流速度 U_∞ で無次元化している。 $\theta = 40^\circ$ では、平均流速が高さ方向にあまり変化しておらず、境界層が薄いため境界層内を計測できていないと考えられる。 $\theta = 60^\circ$ 付近から球表面近傍の変動実効値が増し、境界層が遷移状態にあると考えられる。

図3は、遷移状態にあると考えられる $\theta \geq 60^\circ$ の領域の壁面近傍 $h/D = 0.3 \times 10^{-2}$ における速度変動のスペクトル分布で、(a) $\theta = 60^\circ$, (b) $\theta = 70^\circ$, (c) $\theta = 80^\circ$, (d) $\theta = 90^\circ$ の結果である。200 Hz 付近に見られるスペクトルのピークは、ディンプルによるものである。一方、 $60^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ では、2 kHz 付近に卓越周波数帯域の存在が確認できる。この高周波数変動は、上流側や下流側では確認できないことから、境界層の乱流遷移に起因する攪乱であると考えられる。

図2 平均速度 (○) と速度変動実効値 (▲) の高さ方向分布 : (a) $\theta = 40^\circ$, (b) $\theta = 50^\circ$, (c) $\theta = 60^\circ$, (d) $\theta = 70^\circ$, (e) $\theta = 80^\circ$, (f) $\theta = 90^\circ$.図3 $h/D = 0.3 \times 10^{-2}$ における速度変動のスペクトル分布 : (a) $\theta = 60^\circ$, (b) $\theta = 70^\circ$, (c) $\theta = 80^\circ$, (d) $\theta = 90^\circ$.

数値計算結果より、境界層中に現れる攪乱を可視化すると、この卓越周波数帯域が確認できる領域において微小擾乱の発生が確認された。この微小擾乱について詳細に調べるため、実験結果を数値計算結果と比較した。図4は、 $\theta = 70^\circ$ の各壁面高さにおける速度の時系列データで、(a)は実験結果、(b)は数値計算結果であり、上から、 $h/D = 1.0 \times 10^{-2}$, $h/D = 0.5 \times 10^{-2}$, $h/D = 0.3 \times 10^{-2}$, $h/D = 0.2 \times 10^{-2}$ の結果である。最下段のグラフは $\phi = 0^\circ$ の断面の表面形状を表し、速度変動波形は、この球の表面形状に同期させて切り出している。横軸は球の一回転における位相 ψ を示しており、縦軸は主流速度 U_∞ または球直径 D で無次元化している。図4より、実験、数値計算どちらの結果もほぼ同様の傾向を示すことが確認できる。 $h/D = 1.0 \times 10^{-2}$ では、ある一定周期の揺らぎが観察されるが、この変動の周波数は回転に伴うディンプルの平均的な変動周波数に一致している。 $h/D = 0.5 \times 10^{-2}$ では、 $90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ の範囲でスパイク状の速度変動波形が現れている。

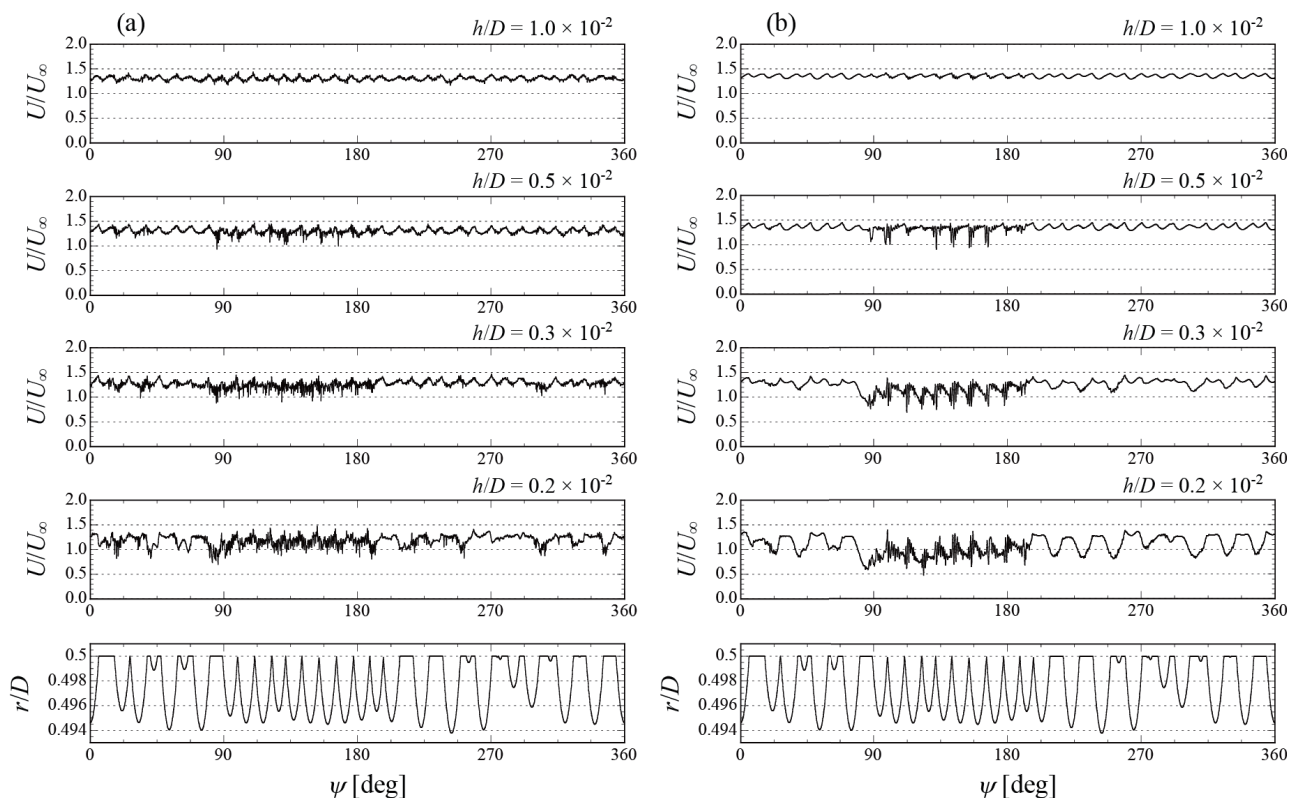


図4 $\theta = 70^\circ$ における各壁面高さでの速度変動の時系列波形: (a) 実験結果, (b) 数値計算結果. 上から, $h/D = 1.0 \times 10^{-2}$, $h/D = 0.5 \times 10^{-2}$, $h/D = 0.3 \times 10^{-2}$, $h/D = 0.2 \times 10^{-2}$ の結果, 最下段は, $\phi = 0^\circ$ の断面の表面形状を表す.

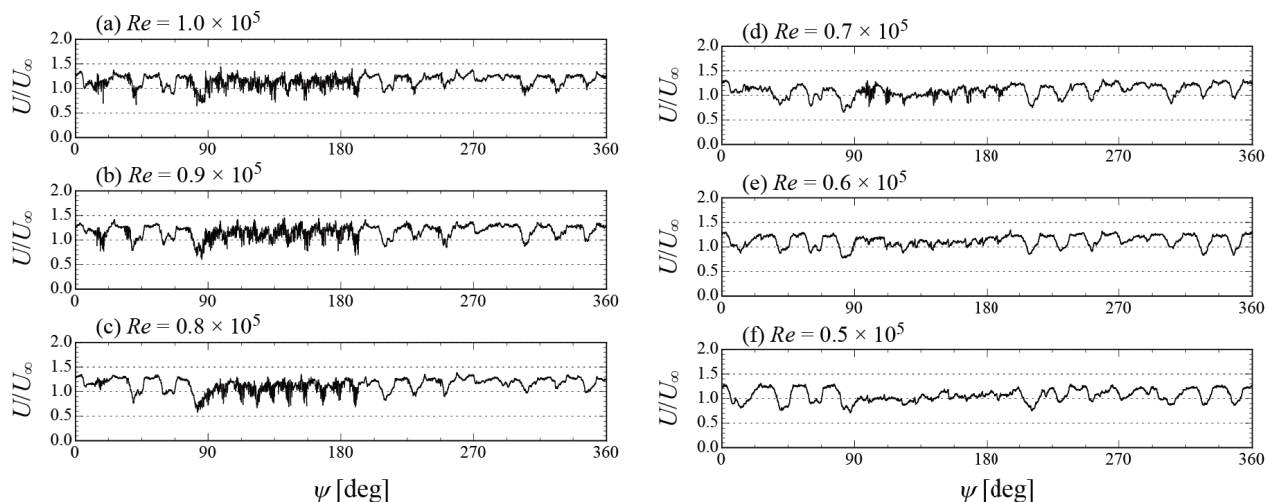


図5 周速比一定でレイノルズ数を変化させたときの $\theta = 70^\circ$, $h/D = 1.0 \times 10^{-2}$ における速度変動の時系列波形の計測結果: (a) $Re = 1.0 \times 10^5$, (b) $Re = 0.9 \times 10^5$, (c) $Re = 0.8 \times 10^5$, (d) $Re = 0.7 \times 10^5$, (e) $Re = 0.6 \times 10^5$, (f) $Re = 0.5 \times 10^5$.

が, それ以外の位相範囲では $h/D = 1.0 \times 10^{-2}$ と同様の揺らぎが観察される. $h/D \leq 0.5 \times 10^{-2}$ の壁面近傍では, $90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ におけるスパイク波形が強まっており, これが図3の卓越周波数帯域に対応する速度変動であること, この変動はディンプルが連続的に通過する特定のディンプル配列において発生することが確認できる. この速度変動は, ディンプルにおける境界層剥離によって生じる剪断層の不安定性に起因して急速に発達する可能性が考えられるが, 回転する球のディンプル内を実験的に計測

することは困難であり, その詳細の解明には至っていない. なお, この変動は, 下流に行くに従ってディンプル配列に関わらず観察されるようになることから, 本研究で対象とした回転するディンプル球まわりの境界層の乱流遷移は, この特定のディンプル配列に起因する変動により引き起こされていると考えられる.

図4の $h/D = 0.2 \times 10^{-2}$ の速度波形に注目すると, 図(b)の数値計算結果では, $90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ の位相を除くと, ディンプル形状に対応する変動波形が観察されているのに

対し、図(a)の実験結果は、ほぼ全域で高周波数変動が発生し、ディンプル形状に対応する変動が確認できない。これは、実験における攪乱の成長が数値計算よりも早く、乱流遷移が早まっているためであると考えられる。遷移が早まる理由として、風洞の主流乱れや回転軸のぶれなど、実験における外乱の影響などが考えられるが、それらとともに、数値計算において数値粘性の影響により乱流遷移が抑制されていることが考えられる。そこで、数値粘性の影響を実験的に考察するため、周速比を $SR=0.1$ で一定に保ち、主流流速を変化させて、レイノルズ数を $0.5 \times 10^5 \leq Re \leq 1.0 \times 10^5$ の条件で実験を行った。図5は、各レイノルズ数条件での $\theta = 70^\circ$, $h/D = 0.2 \times 10^{-2}$ の速度変動の時系列データであり、(a) $Re = 1.0 \times 10^5$, (b) $Re = 0.9 \times 10^5$, (c) $Re = 0.8 \times 10^5$, (d) $Re = 0.7 \times 10^5$, (e) $Re = 0.6 \times 10^5$, (f) $Re = 0.5 \times 10^5$ の実験結果である。図4と同様、球の表面形状に同期させて速度変動波形を切り出しており、縦軸は主流速度 U_∞ で無次元化している。レイノルズ数を下げるとともに、ディンプル形状に対応する変動波形が現れるが、下げすぎると特徴的なスパイク波形も消滅することがわかる。この傾向は、下流の $\theta = 80^\circ$, $h/D = 0.2 \times 10^{-2}$ でも同様である。

図6は、 $h/D = 0.2 \times 10^{-2}$ における速度変動波形の各レイノルズ数条件での実験結果と $Re = 1.1 \times 10^5$ の数値計算結果について、球一回転分の波形の相関を求めた結果である。●は図4, 5に示した $\theta = 70^\circ$, ○は下流の $\theta = 80^\circ$ における相関係数の平均値を、エラーバーは $\theta = 70^\circ$ における相関係数の最大値・最小値を示す。どちらの計測位置でも、レイノルズ数を下げると相関係数が上昇し、 $Re = 0.7 \times 10^5$ の条件で相関係数が最大となること、下流に行くほど同じレイノルズ数条件でも相関係数が低下することがわかる。図5の結果からは、(d) $Re = 0.7 \times 10^5$ では $90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ の範囲でスパイク状の速度変動波形が小さくなっており、(c) $Re = 0.8 \times 10^5$ のほうがより相関係数が大きくなるように思われる。これは、もともと $90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ の範囲の速度変動が不規則であり、同じ実験条件でも周期毎に一致しないこと、スパイク状の速度変動以外のディンプル配列に起因する比較的規則的な変動が相関係数に与える影響が大きい、レイノルズ数が増すと高周波変動が成長し、変動の不規則性が増すことが原因であると考えられる。同様に、下流に行くほど相関係数が低下するのは、スパイク状の速度変動が発達し、不規則な乱流状態に近づくためであると考えられる。したがって、数値計算結果は、今回の実験における $Re = 0.8 \times 10^5$ 付近の流れに相当すると判断される。なお、実験結果には、主流乱れや回転のブレなどの影響が存在することを考慮すると、今回比較対象とした数値計算結果における数値粘性の影響は、レイノルズ数を20%程度低下させることであると推定される。

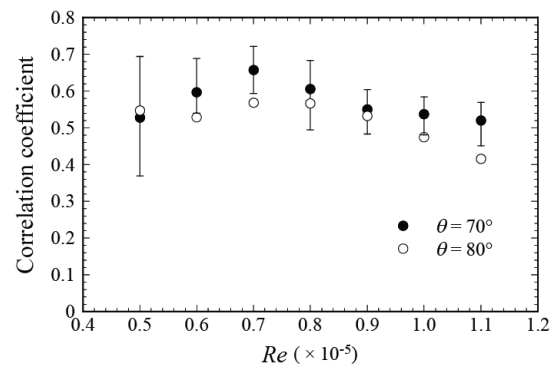


図6 実験と数値計算による速度変動波形の相関係数のレイノルズ数による変化. ●: $\theta = 70^\circ$, ○: $\theta = 80^\circ$ の相関係数の平均値. エラーバーは $\theta = 70^\circ$ における相関係数の最大値・最小値を示す。

4 まとめ

ゴルフボールに代表される回転するディンプル球の空力特性に及ぼす球まわりの流れの解明を目指し、球表面に発達する境界層の乱流遷移を熱線流速計により計測し、遷移過程で現れる特徴的な速度変動について考察した。その結果、今回対象とした回転ディンプル球まわりの境界層の乱流遷移は、特定のディンプル配列において発生する高周波数変動が原因であることを数値計算結果との比較により明らかにした。また、乱流遷移について実験結果と数値計算結果を定量的に比較する場合、実験は主流乱れや実験装置の振動など外乱の影響を、数値計算は数値粘性の影響を考慮する必要があることを確認した。

本研究では、回転する球の赤道面のみを計測したが、今後様々な断面についても計測し、ディンプル配列と速度変動の発生の関係について詳細に調べ、3次元的回転球まわりの境界層遷移について検討する。

引用文献

- 1) Schlichting, H., Gersten, K.: *Boundary Layer Theory, Ninth Edition*, Springer, (2017).
- 2) Achenbach, E.: The Effects of Surface Roughness and Tunnel Blockage on the Flow past Spheres, *J. Fluid Mech.*, 65, (1974), 113-125.
- 3) Li, J., Tsubokura, M., Tsunoda, M.: Numerical Investigation of the Flow Past a Rotating Golf Ball and Its Comparison with a Rotating Smooth Sphere, *Turbulence and Combustion*, 99 (2017) 837-864.
- 4) 池田隼, 金炯哲, 大貫正秀, 坪倉誠: 回転速度が異なるゴルフボールの空力特性に関する LES 解析, 第32回数値流体力学シンポジウム公演論文集, (2018).
- 5) 松木悠真, 小出規人, 大貫正秀, 佐々隆弘, 坪倉誠: 回転速度違いのゴルフボールに関する数値解析, 日本流体力学会年会 2021 講演論文集, (2021).