

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

LES for the Aerodynamic Characteristics of the Golf Ball Rotating at Different Speeds

- 池田隼, 神戸大, 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail: jun_ikeda@port.kobe-u.ac.jp
 金炯哲, 住友ゴム, 兵庫県神戸市中央区筒井町 2-1-1, E-mail: hyoungchol-kim.az@srigroup.co.jp
 大貫正秀, 住友ゴム, 兵庫県神戸市中央区筒井町 2-1-1, E-mail: masahide-onuki.az@srigroup.co.jp
 坪倉誠, 理研/神戸大, 兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-26, E-mail: mtsubo@riken.jp

Jun Ikeda, Kobe Univ., 1-1, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe, Hyogo, 657-8501

Hyoungchol Kim, SRI, 2-1-1, Tsutsui-cho, Chuo-ku, Kobe, Hyogo, 651-0071

Masahide Onuki, SRI, 2-1-1, Tsutsui-cho, Chuo-ku, Kobe, Hyogo, 651-0071

Makoto Tsubokura, RIKEN/Kobe Univ., 7-1-26, Minatojima-minami-machi, Chuo-ku, Kobe, Hyogo, 650-0047

Unsteady aerodynamic forces acting on a rotating golf ball and flow structures were investigated using Large Eddy Simulation combined with the moving boundary method. The Reynolds number based on the ball diameter and the uniform flow velocity was 0.11 million, which is the supercritical region in a dimpled sphere. In this study, the focus was on the effect of rotational speed on the same golf ball. Thus, the rotational speed was set to the spin parameter $\Gamma = 0.1$ and 0.16 . As a result, both drag and lift increased as the rotational speed was increased. For the difference of flow structures, there was a difference in the strength of downwash and a pair of longitudinal vortices generated behind the ball.

1. 緒言

ゴルフボールは、その表面にディンプルが存在することから、飛翔中に受ける空気力やボールまわりの流れ構造が滑面球とは大きく異なることが知られている。その一つに、レイノルズ数を上げていったとき、境界層が層流から乱流に遷移して剥離点が後退することで抗力が大きく低下するドラッグクライシス現象が挙げられる。滑面球ではこれがおよそ 3.5×10^5 程度で生じるのに対し、ゴルフボールでは 1.0×10^5 近辺となり、より低いレイノルズ数でも抗力が低下する⁽¹⁾。したがって、打ち出されたゴルフボールに作用する抗力は滑面球に比べ小さく、飛距離を伸ばすことができる。また、ゴルフボールには、打ち出し時に回転が与えられるためマグヌス効果が生じ、揚力が作用する。揚力もまた、滑面球に比べて大きな力が作用する。このことから、ディンプルによって生じるボール周りの空力現象の解明により、より抗力が小さく揚力大きいディンプル形状や配置が明らかになれば、ゴルフボールの性能向上が期待できると考えられる。

これまで、ゴルフボール周りの空力現象を明らかにするため、Bearman and Harvey⁽¹⁾ や Smits and Smith⁽²⁾, Choi ら⁽³⁾ による実験的な研究や, Beratlis ら⁽⁴⁾ や Li ら⁽⁵⁾ による数値的な研究が試みられてきた。これらの結果として、ボールのレイノルズ数やディンプルの深さ、パターン、そして回転数に対して、揚力や抗力が強く依存することが明らかになっている。しかしながら、風洞実験ではボール周りの詳細な流れ現象、特にディンプルごく近傍の遷移剥離現象の計測が難しく、数値シミュレーションでは、遷移剥離を捉えられるだけの十分な格子解像度が必要であることと、ボール回転を再現するために移動境界手法が必要とされることから、計算コストが膨大になる。このことから、ゴルフボール周りの流れ現象の解明は難しく、その知見は未だ十分とは言い難い。

本研究では、ゴルフボールの空力特性について、回転速度の違いによって生じる差に着目し、数値シミュレーションを行った。ゴルフボールの回転はスピンパラメータ S_p と呼ばれる無次元数によって整理される。これは、回転数を N [rpm]、ボール直径 D [m]、飛翔速度を U [m/s] としたとき、 $\pi ND/60U$ で表される。一般に打ち出し時の回転数はおよそ 3500rpm で、スピンパラメータで 0.1 程度である⁽²⁾。打ち出されたゴルフボールは、空気抵抗を受けることで飛翔速度が低下してレイノルズ数が低下する一方、回転数はわずかに低下するものの大きく変化しないため、結果としてスピンパラメータは大きくなる。

したがって、飛翔中に変化するこれらの条件に関わらず、性能が得られるゴルフボールの設計開発のためには、スピンパラメータの違いが空力特性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

2. 解析手法

本研究では、ゴルフボールの飛翔速度を 34m/s 程度としたため、非圧縮性流体を仮定した。また、乱流モデルとして LES を用いたことから、支配方程式として空間フィルタを施された連続の式およびナビエ-ストークス方程式を用いた。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \bar{u}_i (\bar{u}_j - u_g) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + 2 \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu + \nu_{SGS}) \bar{S}_{ij} \quad (2)$$

ここで、 u_i は i 方向の流速を表し、 ρ , ν はそれぞれ流体密度と動粘性係数を表す。本研究では、ゴルフボールの回転を再現するための移動境界手法として、Hirt ら⁽⁶⁾ によって提案された Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 法を用いた。したがって、移流項において格子節点の移動速度 u_g を考慮している。なお、 \bar{P} および、 \bar{S}_{ij} は次式のように定義される。

$$\bar{P} = \frac{\bar{p}}{\rho} + \frac{1}{3} (\bar{u}_k \bar{u}_k - \bar{u}_k \bar{u}_k) \quad (3)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

本研究では、サブグリッドスケール (SGS) モデルとして Lilly⁽⁷⁾ によって提案されたダイナミック SGS モデルを用いた。

支配方程式は非構造格子有限体積法によって離散化される。空間離散化手法は 2 次精度中心差分法を用いた。ただし、移流項の離散化では 2 次精度中心差分 95% に 1 次精度風上差分を 5% ブレンドしたスキームを用いた。これは、非構造格子の非直交性に起因する数値振動を抑制するためである。時間積分法には 1 次精度 Euler 陰解法を用いた。なお、速度と圧力のカップリングにはフラク

シヨナルステップ法を用い、圧力ポアソン方程式の解法には ICCG 法を用いた。

つぎに、解析対象の外形と回転方向について図 1 に、ボール表面近傍の格子配置を図 2 に示す。計算領域は、ALE 法によって計算領域全体を剛体回転、並進移動させるため球状に設定した。境界条件として、ゴルフボール表面は Spalding による対数則に基づいて壁面せん断応力を与え、計算領域壁面は速度勾配をゼロとし、圧力を規定した大気開放の条件とした。なお、解析領域の半径はゴルフボール直径の 15.2 倍とし、壁面境界条件の影響を回避した。計算領域はテトラ要素を中心とした計算要素によって離散化した。ゴルフボールのような球周りの解析では、境界層の遷移と剥離を精確に捉えることができる格子解像度を確保する必要がある。そこで、ゴルフボール周りには境界層解像のためのプリズム要素を挿入した。本研究では、滑面球を対象とした LES 計算を行った武藤ら⁽⁸⁾と、ゴルフボールを対象とした LES 計算を行った Li ら⁽⁵⁾の知見に基づき、それよりもさらに細かい格子となるように格子を生成した。具体的には、ボール壁面に対して垂直方向の第一格子点の位置を、円柱の淀み点から周方向 90 位置における層流境界層厚み δ_B の 1/28 とし、水平方向の三角形要素の 1 辺は δ_B の 1/2 以下とした。このとき、壁面からの無次元距離 y^+ は 1 未満が確保されている。

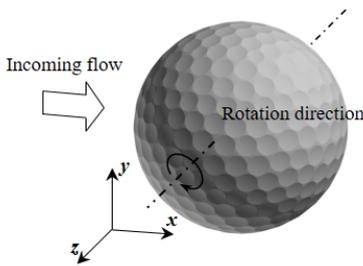


Fig. 1: Geometry of the golf ball and the coordinate system

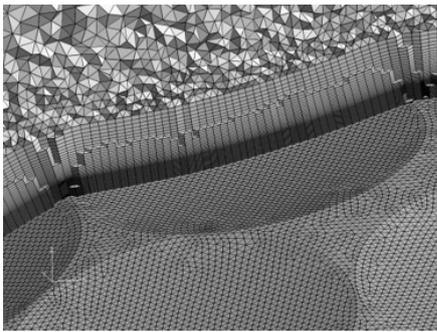


Fig. 2: Numerical meshes around the golf ball surface

物理条件としては、流体はゴルフボール直径を代表長としたときのレイノルズ数が 1.1×10^5 となるように設定した。また、スピンパラメータは 0.10 と 0.16 に設定し両者の結果を比較した。この物理条件は、飛行速度 34.8027 m/s に対して、回転数をそれぞれ 1542.19 rpm と 2467.50 rpm としたときに相当する。

3. 結果

計算はボールを回転させた状態から開始し、流れ場が十分に発達したのち、ボールが 1 回転する間の結果を出力した。図 3 に 1 回転する間の空気力の時間変化、図 4 に時間平均した C_D 値 ($= 2F_x/\rho U^2(D/2)^2\pi$) と C_L 値 ($= 2F_y/\rho U^2(D/2)^2\pi$) 値を示す。本計算結果はディンプル配置は異なるものの、同様の解析を行った Li ら⁽⁵⁾の結果

や、Choi ら⁽⁴⁾の実験とほぼ同程度であり、概ね妥当な値が得られたと考えられる。スピンパラメータ違いの影響として、抗力、揚力ともに増大することが報告されている⁽²⁾。本計算結果でもその傾向が捉えられており、 C_D 値、 C_L 値ともに増大している。

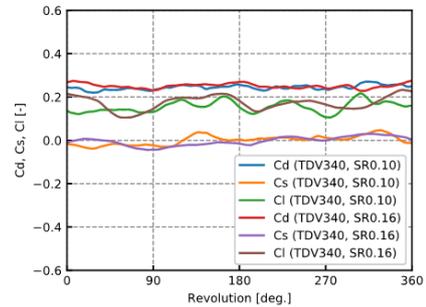


Fig. 3: Time history of C_D and C_L acting on the golf ball

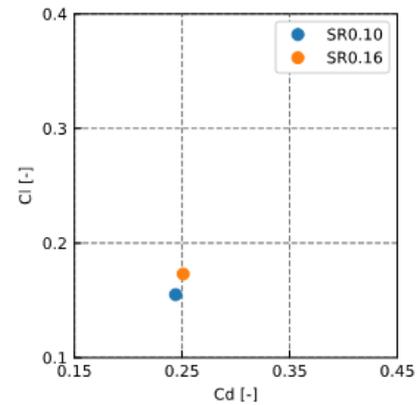


Fig. 4: Time averaged C_D and C_L acting on the golf ball

次に、背面から見た時間平均表面圧力を図 5 に示す。スピンパラメータ変更により生じた変化を調べるため、スピンパラメータ 0.16 の結果とスピンパラメータ 0.10 の結果の差分も示している。なお、本計算では格子が剛体回転しているため、単純に各節点の変数の値を時間平均するだけでは、静止系から見た流れ場の時間平均値を得ることはできない。そのため、静止した格子に一度変数をマッピングしたのちに、時間平均処理を施している。まず、 C_D 値が増大した理由として、ボール背面の圧力低下が挙げられる。また、背面上方における圧力低下は、 C_L 値の増大に寄与していると考えられる。さらに、側面下部では圧力が上昇しており、これは C_L 値の増大に寄与している。

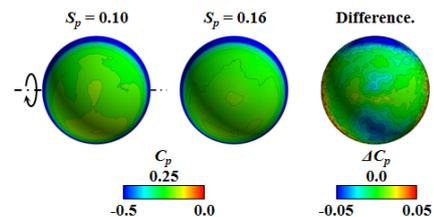


Fig. 5: Time averaged surface pressure distribution (left: $S_p = 0.10$, middle: $S_p = 0.16$, right: difference)

表面圧力変化の原因となる流れ構造を調べるため、ボー

ル周りの時間平均した流線を可視化した。スピンパラメータを上げると、ボール背面のダウンウォッシュが強まり、ボール後方に形成される縦渦が強まっていることがわかる。ダウンウォッシュによる回り込みと縦渦による圧力低下が強まるため、ボール背面の圧力がより低下し、抗力や揚力を増大させたと考えられる。

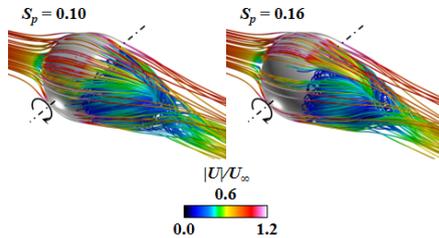


Fig. 6: Time averaged stream line around the golf ball

4. 結言

本研究では、回転するゴルフボールの空力特性について、スピンパラメータの違いに着目した LES 解析を行った。結果として、スピンパラメータを上げることで、ダウンウォッシュが強まり、抗力、揚力がともに増大する。今後は、瞬時の流れ構造、空気力の時間変動の差に着目し、より詳細な流れ構造に関する議論を行う予定である。

参考文献

- (1) Bearman, P.W. and Harvey, J.K., "Golf Ball Aerodynamics," *Aeronautical Quarterly*, 27 (1976), pp. 112-122.
- (2) Smits, A.J. and Smith D.R., "A new aerodynamic model of a golf ball in flight," *Science and Golf II*, (1994), pp. 340-347.
- (3) Choi, J., Jeon W. and Choi, H., "Mechanism of drag reduction by dimples on a sphere," *Physics of Fluids*, 18, (2006), 041702.
- (4) Beratlis, N., Squires, K., and Balaras, E., "Numerical investigation of Magnus effect on dimpled spheres," *Journal of Turbulence*, 13 (2014), N15.
- (5) Li, J., Tsubokura, M., and Tsunoda, M., "Numerical Investigation of the Flow Past a Rotating Golf Ball and Its Comparison with a Rotating Smooth Sphere," *Flow, Turbulence and Combustion* 99(3-4) (2017), pp. 837-864.
- (6) Hirt, C.W., Amsden, A.A., and Cook, J.L., "An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds," *Journal of computational physics*, 14(3), (1974), pp. 227-253.
- (7) Lilly, D.K., "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method," *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(3), (1992), pp. 633-635.
- (8) Muto, M., Tsubokura, M., and Oshima, N., "Negative Magnus lift on a rotating sphere at around the critical Reynolds number," *Physics of Fluids*, 24(1), (2012), 014102.