

回転する球の空力に対する誘導迎え角の影響

Effect of the induced angle of attack

to aerodynamic force of a spinning sphere

発表者：岩切 静矢

指導教員：坪井 一洋

1 はじめに

回転するボールと無回転のボールではボールに働く抵抗や揚力が異なることが過去の研究でわかっている^{[1][2]}。このとき、回転するボールや無回転のボールの抵抗と揚力はそれぞれボールの進行方向に逆向きとボールの進行方向に垂直上向きとして計測される。

本来、回転する球のまわりには循環が発生している。航空機の翼にも循環が発生しており、それによって誘導迎え角が生じる^[3]。したがって、回転する球にも誘導迎え角が発生すると考えられる。本来、抵抗や揚力は飛翔体と気流の相対速度に対して定義されなければならない。

回転する球に誘導迎え角が発生しているとすれば、球と気流の相対速度は球の進行方向と一致しない。そこで、本研究では回転する球の誘導迎え角の導出方法と空力係数に対する誘導迎え角の影響について考察する。

2 ポテンシャル流れと誘導迎え角

図1に回転しながら飛翔する球のまわりの気流を模式的に示した。回転する球にはダウンウォッシュが発生するため、球が受ける気流の向きと進行方向が一致しない。これが誘導迎え角 θ である。

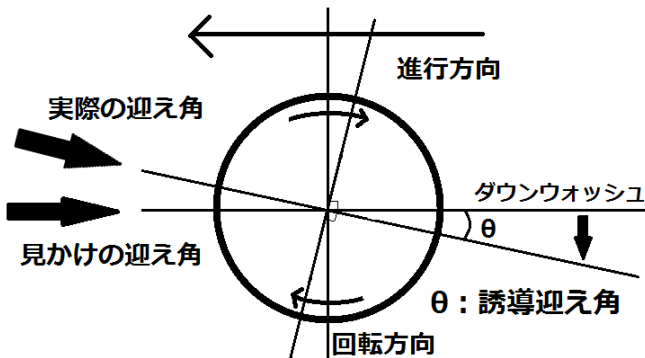


図1 誘導迎え角(バックスピンの例)

球の飛翔軌道から空力係数を計測する際には抵抗係数 C_D や揚力係数 C_L は球の進行方向に対して定義される。そこで、誘導迎え角を考慮した抵抗係数と揚力係数をそれぞれ C'_D および C'_L とすると、図1より以下の関係式が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} C'_D \\ C'_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_D \\ C_L \end{pmatrix} \quad (1)$$

ポテンシャル流中での円柱の循環は

$$\Gamma = 2\pi\omega r^2 \quad (2)$$

で表される^[4]。ここで ω は角速度、 r は円柱の半径である。したがって、スパン方向を y とすると球の循環分布 $\Gamma(y)$ は

$$\Gamma(y) = 2\pi\omega(r^2 - y^2) \quad (3)$$

となり、これをスパン方向に積分すると、球の循環 Γ_3 は

$$\Gamma_3 = \frac{8}{3}r^3\pi\omega \quad (4)$$

と表すことができる。さらに、式(3)を用いるとダウンウォッシュ分布 $w_i(y)$ は

$$w_i(y) = \omega \left\{ 2r + y \log \left| \frac{-r + y}{r + y} \right| \right\} \quad (5)$$

で与えられる^[4]。図1からわかるように誘導迎え角は球の進行速度とダウンウォッシュの大きさで決まるので、

$$\tan \theta = \pm \frac{w_i}{v} \quad (6)$$

と表せる。 v は球の進行速度である。なお、 θ は図1で反時計回りを正とするのでトップスピンでは正值、バックスピンでは負値をとる。

一般に、球まわりの流れのレイノルズ数は

$$\text{Re} = \frac{\text{慣性力}}{\text{粘性力}} = \frac{2vr}{\nu}$$

と表される。ここで ν は動粘性係数で一般に $\nu = 1.512 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (20°C, 1気圧)である。

一方、スピンパラメータSPは

$$\text{SP} = \frac{2\pi r f}{v}$$

と表すことができる。ただし、 f は回転数で、この式は球の並進速度と周速度の比である。

したがって、スピンパラメータとレイノルズ数をかけると

$$\text{Re} \times \text{SP} = \frac{4\pi r^2 f}{v}$$

となり、これは周速度に基づくレイノルズ数となる。

3 ゴルフボールへの適用

ここで、上記考えのゴルフボールへの適用を試みる。ゴルフボールのダウンウォッシュ分布 $w_i(y)$ を図2に示す。ここでは、ボールの半径 r を0.02 mとした。

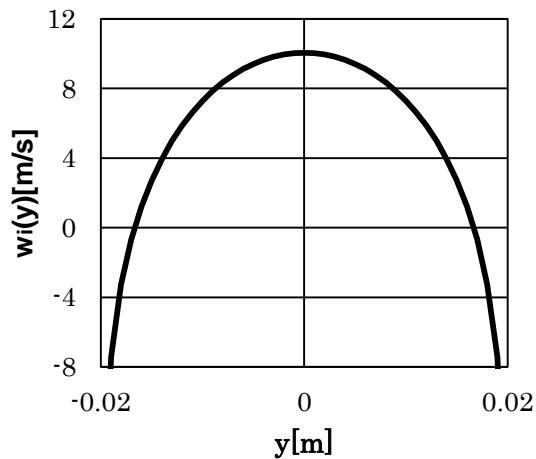


図2 ゴルフボールのダウンウォッシュ分布
($r = 0.02\text{m}$, 40rps , トップスピン)

図2よりダウンウォッシュ分布の最大値は $y = 0$ のときである。そこで今回はこの最大値をゴルフボールに生じるダウンウォッシュとすると、式(5)より

$$w_i = 2r\omega$$

となる。したがって、誘導迎え角は式(6)から

$$\tan \theta = \pm \frac{2r\omega}{v} \quad (7)$$

となる。ただし、式(7)はポテンシャル理論による結果である。実際には粘性などによりダウンウォッシュが小さくなると考えられるので式(7)に補正係数 k を導入する。

$$\tan \theta = \pm k \frac{2r\omega}{v} \quad (8)$$

なお、補正係数の値を以下では $k = 1, 1/5, 1/10$ に設定した。

今回使用するデータはTrackMan^[5]によって測定されたゴルフボールの軌道データである。今回はバックスピンの2つのデータ No.1 と No.2 から抵抗係数 C_D 、揚力係数 C_L 、速度 v および回転数 f を使用した。データ No.1の誘導迎え角、抵抗係数と揚力係数の結果を図3から図5に示す。 k の値が大きいほど誘導迎え角は大きくなり、抵抗係数は大きく、揚力係数は小さくなるのがわかる。

4 まとめ

回転する球に生じる誘導迎え角が空力に及ぼす影響を考察した。誘導迎え角の大きさを軌道データから求めた。

バックスピンのデータでは、誘導迎え角によって抵抗係数は大きく、揚力係数は小さくなるという結果が得られた。このことから、角度が小さい場合でも空力係数への誘導迎え角の影響は無視できないことがわかった。また、回転する球の空力係数には周速度の影響が大きいこともわかった。

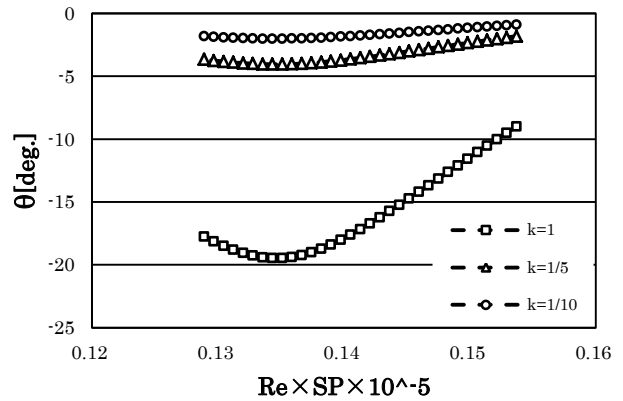


図3 誘導迎え角(データ No.1)

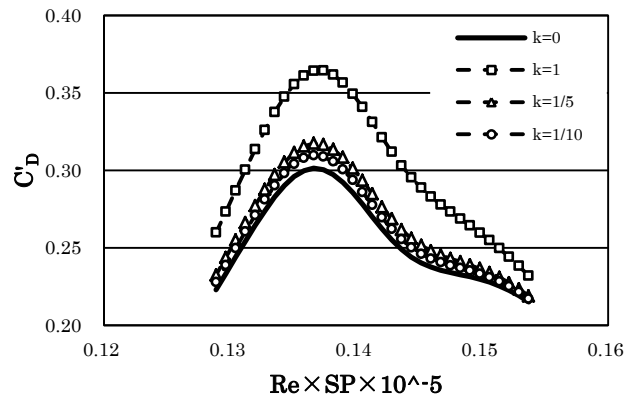


図4 抵抗係数と誘導迎え角(データ No.1)

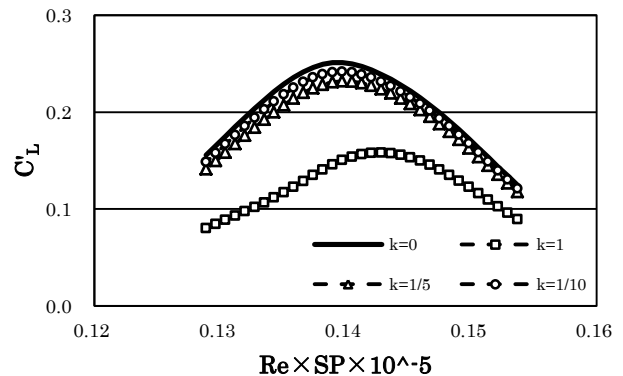


図5 揚力係数と誘導迎え角(データ No.1)

参考文献

- [1] 杉山剛史: ボール軌道の局所的特徴量を用いた空力係数の推定, 茨城大学大学院理工学研究科知能システム工学科専攻修士学位論文 2014
- [2] Kazuhiro Tsuboi and Kaito Yasuda: "Aerodynamic Coefficients Estimation based on Local Geometry of Ball Trajectory", Proceeding of IACSS 2014 Darwin Conference, 2014
- [3] 牧野光雄: 『流体抵抗と流線形-流体力学的にみた乗り物の形状デザイン』, (産業図書, 1991年)
- [4] 今井功: 『流体力学(前編)』, (裳華房, 1973年)
- [5] TrackMan: <http://trackmangolf.com/>