

# 軌道解析による空力特性の評価

## Estimation of Aerodynamic Characteristics using Trajectory Analysis

学籍番号： 20T1141F 氏名： 岡崎 健悟 指導教員： 坪井 一洋

### 1. はじめに

ゴルフボールのディンプルは空力特性と深い関係にあることが知られている<sup>[1]</sup>。しかし、その詳細については未だ不明な点も多い。そのため、ゴルフボールの軌道データから空力係数および回転軸を推定する研究がおこなわれている<sup>[2]</sup>。

本研究では、先行研究で用いられる推定方法を改良し、空力係数および回転軸の推定を行う。そして、それらを用いてゴルフボールの空力特性から特にその非定常性を明らかにすることを試みる。

### 2. 空力特性の計算方法

飛行体の運動方程式は、空気抵抗  $\mathbf{D}$ 、揚力  $\mathbf{L}$ 、横力  $\mathbf{S}$  とすると以下で表される。

$$m\ddot{\mathbf{x}} = m\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{D} + \mathbf{L} + \mathbf{S} - mg\mathbf{e}_z \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}$  および  $\mathbf{v}$  はそれぞれ飛行体の位置ベクトルと速度ベクトル、 $m$  は質量、 $g$  は重力加速度、 $\mathbf{e}_z$  は鉛直( $z$  軸)方向の単位ベクトルである。

空力係数である抵抗係数 $C_D$ 、揚力係数 $C_L$ 、横力係数 $C_S$ はそれぞれ次式で定義される。

$$|\mathbf{D}| = \frac{1}{2}\rho AC_D q^2, \quad |\mathbf{L}| = \frac{1}{2}\rho AC_L q^2, \quad |\mathbf{S}| = \frac{1}{2}\rho AC_S q^2 \quad (2)$$

ここで空気密度を $\rho$ 、放物体の断面積を $A$ 、速度ベクトルの大きさを $q$ とする。

今回の推定では回転軸の推定に次式を用いる。

$$K\boldsymbol{\omega} = \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{N}}{q^2} + m\tau\mathbf{v} \quad (4)$$

ここで $K$ をいくつかの定数をまとめた係数、 $\boldsymbol{\omega}$ を回転軸ベクトル、 $\mathbf{N}$ をマグヌス力、 $\tau$ を振率とする。

### 3. 推定結果

ゴルフボールの3次元速度データから空力係数を推定する。その際、速度の時系列データから隣り合う $2n+1$ 個を最小二乗法によって補間する。推定された抵抗係数のレイノルズ数による変化を Fig. 1 に示す。

Fig. 1 を見ると $0.75 \times 10^5 < Re < 1.00 \times 10^5$ の範囲ではレイノルズ数が増加すると抵抗係数が急激に減少するドラッグクライシスが見られる。 $Re = 0.75 \times 10^5$ 付近で再びレイノルズ数の増加が確認できる。このとき、レイノルズ数の増加に伴って抵抗係数が急激に減少している。この結果は加速状態と減速状態でドラッグクライシスが起るレイノルズ数が異なる可能性を示唆している。

回転軸の時間変化の結果を Fig. 2 に示す。図中に×で先

行研究<sup>[2]</sup>の結果をプロットする。Fig. 2 を見ると0sから5sの範囲において $x$ 成分、 $y$ 成分、 $z$ 成分でともに先行研究よりも回転軸の時間変化が大きくなっている。

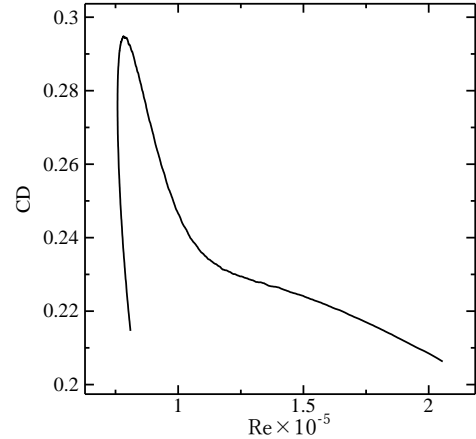


Fig. 1 Estimated result of  $C_D$

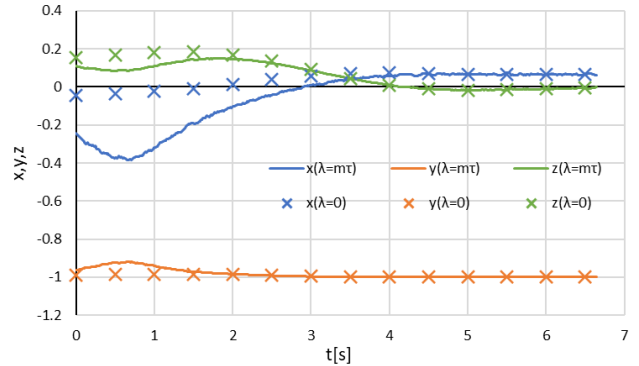


Fig. 2 Estimated results of rotation axis

### 4. まとめ

ゴルフボールの3次元速度データから飛行時の空力特性評価を行った。レイノルズ数と空力係数の関係から風洞実験では再現できない傾向を確認した。回転軸の推定については先行研究より明確に軌道に沿った回転軸の変化が見られた。これらの結果から、飛行体の加減速が空力特性に大きな影響を及ぼすことを示した。

### 参考文献

[1] R.D. Mehta. : AERODYNAMICS OF SPORTS BALLS, Ann. Rev. Fluid, pp.151-189.1985

[2] 村上航輝：三次元軌道データを用いたゴルフボールの空力評価，茨城大学工学部機械システム工学科学士論文，2023