

2種類のバレーボールの飛行時における空力係数比較

Comparison of aerodynamic coefficients in flight for two types of volleyball

発表者： 梶山 佑樹

指導教員： 坪井 一洋

1 はじめに

一般的に、スポーツにおいて使用されるボールの流体力は風洞実験により測定されている。風洞実験では固定したボールに定常流を送ることにより流体力を測定している。しかし、投射されたボールは加減速しながら飛行しており、ボールの周りの気流は非定常流となるため風洞実験とは条件が異なる^[1]。

そこで最近では、投射されたボールの軌道から抵抗係数を推定する研究が行われている^[2]。今回、飛行中のバレーボールに働く空力係数を推定するために飛行実験を行い、位置情報から抵抗係数および揚力係数を推定した。

本研究では、MIKASA と Molten の 2 種類のバレーボールを使用した。それぞれのボールでパネル数や表面特性が異なっており、それが空力特性に大きく影響すると考えられる。実際、MIKASA は飛行時に大きくブレる傾向があり、逆に Molten はブレが小刻みであることが一般的に知られている。今回の飛行実験によって、このことを確認することが本研究の目的である。

2 空力係数の推定法

鉛直上向きを z 軸、ボールの初速度が $x-z$ 平面に含まれるように x 軸を定義する。以下ではボールはこの 2 次元平面内で運動すると仮定する。

ボールに速度の 2 乗に比例する抵抗と揚力が働くと、ボールの重心の運動方程式は次式となる。

$$m \frac{du}{dt} = -kqu - lqw \quad (1)$$

$$m \frac{dw}{dt} = -kqw + lqu - mg \quad (2)$$

ここで (x, z) は重心のベクトル、 (u, w) は速度ベクトル、 $q (= \sqrt{u^2 + w^2})$ は速度の大きさ、 m は質量、 g は重力加速度である。

さらに(1)式と(2)式の k および l は次式で示す抵抗と揚力の比例定数である。

$$k = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi}{4} d^2 C_D \quad (3)$$

$$l = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi}{4} d^2 C_L \quad (4)$$

ただし、 d はボールの直径、 ρ は空気密度、 C_D と C_L は無次元の抵抗係数と揚力係数である。

ここで(1)式の両辺に u 、(2)式の両辺に w をかけて差をとると、抵抗 k について(5)式の関係式が導かれる^[3]。

$$k = -\frac{m}{q^3} \left(u \frac{du}{dt} + w \frac{dw}{dt} + gw \right) \quad (5)$$

また(1)式の両辺に w 、(2)式の両辺に u をかけてまとめると、揚力 l について(6)式の関係式が導かれる^[3]。

$$l = \frac{m}{q^3} \left(u \frac{dw}{dt} - w \frac{du}{dt} + gu \right) \quad (6)$$

3 実験方法

本実験では、2種類のバレーボール (MIKASA と Molten) の飛行実験を行った。バレーボール経験者が試技者としてサーブを打ち、無回転サーブ、ドライブサーブ、それぞれの軌道を 5 つ撮影した。軌道の測定にはデジタルカメラを用い、撮影は 240 fps で行った。

撮影した動画からボールの位置座標を読み取るために、市販のソフトウェア「PV Studio 2D」を使用した。通常はボールの中心点にマーカを設置することで飛行するボールの軌道をモーショントラック機能 (自動軌道追従機能) で測定することが可能である。しかし、本実験では用いた動画の画質が悪かったために、この機能では誤追従をしまい軌道を正確に測定することができなかった。そのため、飛行中のボールに対して 20 フレーム毎に手動で位置座標を読み取り、これらの中でモーショントラック機能を使用した。ここで図 1 に、ボールとサーブの異なる 4 種類の軌道を示す。なお、サーブの打ち始めを図の原点とする。

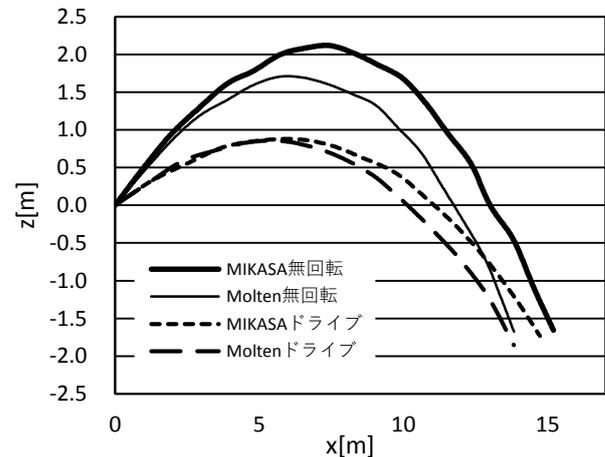


図 1 軌道データの比較

4 結果

飛行実験から得られた 2 種類のバレーボールの軌道データをもとに抵抗係数および揚力係数を推定した。

レイノルズ数は速度を無次元化したパラメータであり(7)式で定義される。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。

$$\text{Re} = \frac{qd}{\nu} \quad (7)$$

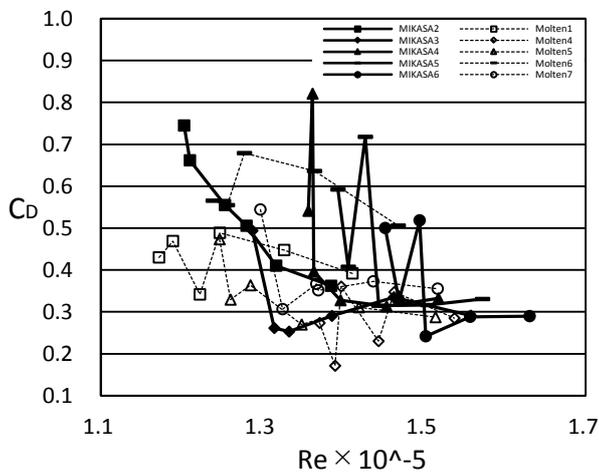


図2 抵抗係数(無回転サーブ)

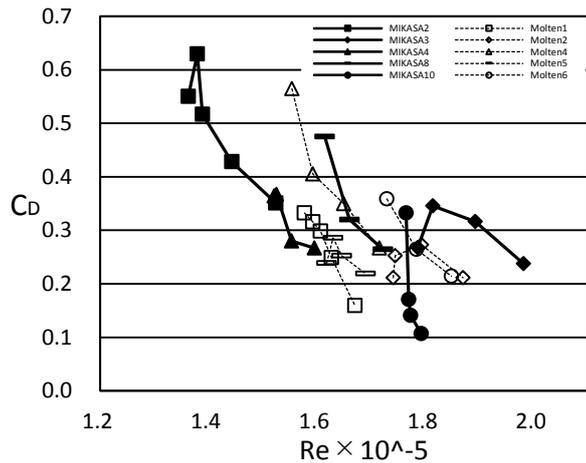


図3 抵抗係数(ドライブサーブ)

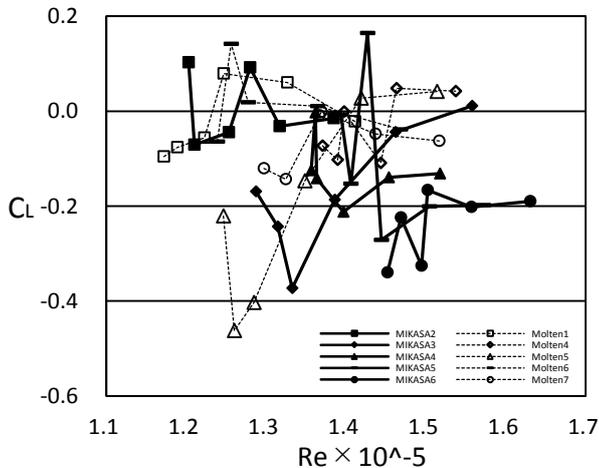


図4 揚力係数(無回転サーブ)

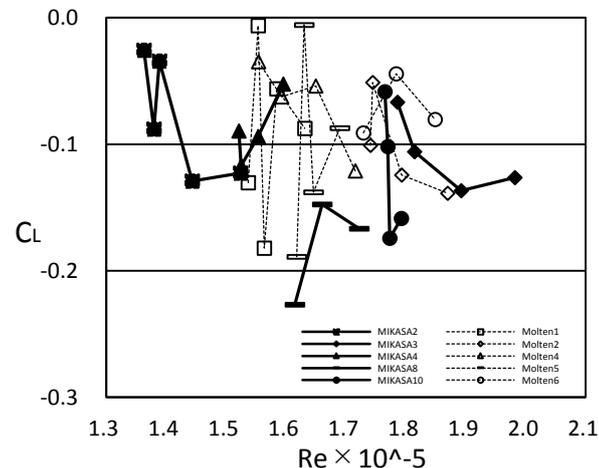


図5 揚力係数(ドライブサーブ)

無回転サーブおよびドライブサーブの抵抗係数の推定結果を図2と図3, また, 揚力係数の推定結果を図4と図5に示す. 横軸をレイノルズ数, 縦軸を C_D または C_L とする. ボールの速度は減速していくので抵抗係数および揚力係数はグラフの右から左へ推移する.

図2の結果において, レイノルズ数が減少するにつれて, 抵抗係数が上下に変動を繰り返していることがわかる. これは, 図1の軌道データからわかるように, 無回転で飛翔するバレーボールの軌道が不規則に変化したことが原因だと考えられる. 一方, 図3の結果では, レイノルズ数が減少するにつれて, 抵抗係数が増加していく傾向が得られた. 抵抗係数が増加していく要因として, 回転による影響が挙げられる. また, レイノルズ数 $1.4 \times 10^5 \sim 1.9 \times 10^5$ の間で抵抗係数が急激に増加していることから, ドラッグクライシスのような現象が起きていると考えられる^[3].

また, MIKASA と Molten の抵抗係数の変化率に注目すると, Molten よりも MIKASA の方がレイノルズ数に対する抵抗係数の傾きが急であることがわかる. このことは, 飛翔中において MIKASA の軌道は大きくブレ, Molten は小刻みにブレるということを示唆している.

図4では揚力係数が $-0.5 \sim -0.2$ の間で推移しているのに対して, 図5では -0.1 付近に集中しているのがわかる. また, 図5では全ての軌道において, 揚力係数が負の値になった. これは, トップスピンで飛翔するバレーボールに負のマグヌス力が発生し, 鉛直下向きに強い力が働いたためである.

5 まとめ

本研究では, 飛翔中のバレーボールに働く流体力を解明するために飛翔実験を行い, 位置情報から抵抗係数および揚力係数を推定した. 特に, 2種類のバレーボールと2種類のサーブにおいて空力係数の比較を行った.

空力係数の推定結果において, 無回転サーブでは, レイノルズ数が減少するにつれて, 抵抗係数や揚力係数が急激に増減する傾向が見られた. また, ドライブサーブでは, レイノルズ数が減少するにつれて, 抵抗係数は増加する傾向が見られた. これは, サッカーボールのドラッグクライシスと同様の現象が起きていると考えられる.

無回転サーブの抵抗係数において, MIKASA はレイノルズ数に対する抵抗係数の傾きが急であるのに対し, Molten は比較的緩やかであることがわかった. つまり, 飛翔中において MIKASA の軌道は大きくブレ, Molten は小刻みにブレるという2種類のバレーボールの空力特性の違いを実証的に示した.

参考文献

- [1] 渡辺卓馬:自由落下する球に働く非常流体力の解明, 茨城大学知能システム工学卒業論文, 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] 荒木田祐希:飛翔中のサッカーボールに働く流体力, 茨城大学知能システム工学卒業論文, 2015