

濡れた表面をもつソフトテニスボールの飛翔特性

小園 茂平¹⁾・出口 新²⁾

Aerodynamic Characteristics of a Flying Soft Tennis Ball

Shigehira OZONO, Arata DEGUCHI

Abstract

It is well-known that a soft tennis ball hit with topspin tends to curve down, but we often experience a wetted ball appears to bend upward on rainy days. The purpose of the present study is to understand this puzzling motion. First, we observed a trajectory of a falling wetted circular cylinder suspended with a thread, from which the aerodynamic force coefficients were estimated. Using these values, trajectories of the flying dry and wetted soft tennis ball were simulated by a finite difference method. It was found that the wetted ball with topspin does not bend upward, but travels in a significantly flatter trajectory.

Key Words:

Aerodynamic force, Reynolds number, Soft tennis ball, Spin parameter, Wetted surface

1. はじめに

通常、ボールにトップスピンをかけるとマグナス効果により曲がり落ちていく。しかし、雨や霧の日には、ボールが一瞬浮き上がったように見えることがある。この現象は『ボールが吹く』と呼ばれ、ソフトテニスプレーヤーにとっては極めて身近な現象だが、意外なことに、研究の対象として扱われたことはほとんどない。この不思議な現象が起こる理由

として次のようなことが考えられる。

- (1)ラケットとテニスボールが水の影響で滑りやすくなり、通常よりボールの回転数が少なくなる効果。
- (2)ボールに付着した水が、ボールが飛翔する間に飛び散る運動量減少効果。
- (3)水の質量が保持される場合、形状変形や付加質量の効果。

しかし、プレーヤーの雨天時の方がボールの回転数は速いという証言や、雨天時は常にボールは湿っているという証言から、本研究ではボールが吹く原因は(3)による可能性が高いと考えた。ボール表面に

1) 材料物理工学科教授

2) 材料物理工学科4年

付着した水が空気力に対してどのような影響を与え、その軌道が、ボール表面に付着した水によってどのように変化するかを解明することが本研究の目的である。

本研究は次の三つの段階からなる。

段階 1: 糸付き回転円柱を落下させ、視覚的に濡れた円柱と乾いた円柱の挙動を比較する。

段階 2: 段階 1 の方程式を求めシミュレーションし、スピンパラメータ $Sp=1$ の各空気力係数 C_D, C_L を求める。

段階 3: 段階 1, 2 をもとに実際のボールの軌道をシミュレーションする。

ボールが吹くという現象は 2 次元的なものと考えられる。よって、本実験ではボールを円柱によってモデル化した。

2. 主な記号

d : 円柱, ボールの 2 次元モデルの直径 [m]

r : 円柱, ボールの 2 次元モデルの半径 [m]

l : 円柱, ボールの 2 次元モデルの長さ [m]

A : 円柱, ボールの 2 次元モデルの見付面積
円柱 $A = ld$ [m²]

I : 円柱, ボールの 2 次元モデルの慣性モーメント

$$I = \frac{mr^2}{2} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

m : 円柱, ボールの 2 次元モデルの質量 [kg]

ρ : 空気の密度 [kg/m³]

U : 流速, 円柱, ボールの 2 次元モデルの速度 [m/s]

ω : 円柱, ボールの 2 次元モデルの角速度 [rad/s]

μ : 空気の粘性係数 [Pa·s]

ν : 空気の動粘性係数 [m²/s]

D : 抗力 [N]

L : 揚力 [N]

M : 回転方向の空気抵抗モーメント [N·m]

T : 糸の張力 [N]

Torque: 回転方向のすべての力モーメント [N·m]

W : 重力 [N]

$$Sp: \text{スピンパラメータ } Sp = \frac{\pi d N}{U} = \frac{r \omega}{U}$$

$$Re: \text{レイノルズ数 } Re = \frac{Ud}{\mu}$$

$$C_D: \text{抗力係数 } C_D = \frac{D}{0.5 \rho U^2 A}$$

$$C_L: \text{揚力係数 } C_L = \frac{L}{0.5 \rho U^2 A}$$

$$C_M: \text{空力係数 } C_M = \frac{M}{0.5 \rho U^2 A d}$$

α : 円柱, ボールの 2 次元モデルの迎角 [°, rad]

t : 時間 [s]

3. 実験

3.1 観察での実験装置及び方法

本実験は空気の流れの影響が少ない閉めきった体育館で行なわれた。円柱に糸を巻き付け、その一端を高さ 2.7m の脚立に固定し、円柱を落下させた。その落下軌道をビデオカメラで撮影した(図 1, 2)。

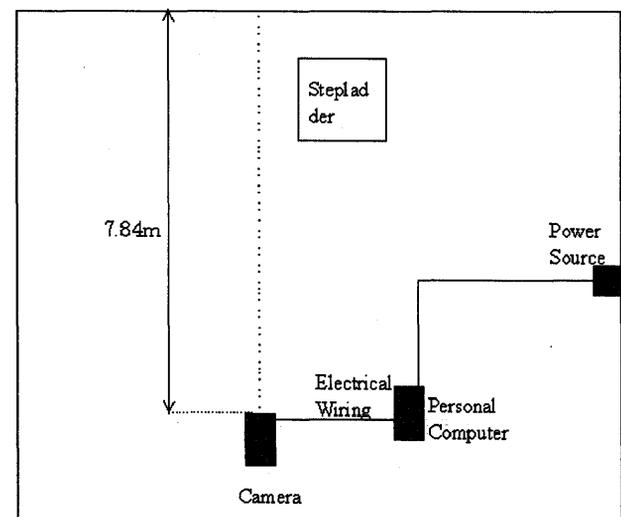


図 1 実験装置の平面図

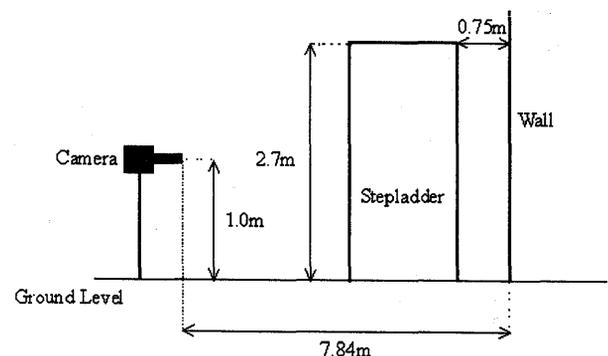


図 2 実験装置の側面図

図3に実験状況を示す。円柱は発泡スチロール製のものを使用した。色々なサイズの円柱を使って予備実験を行い、安定感と作業性から $m=0.0038\text{kg}$, $d=0.03\text{m}$, $l=0.3\text{m}$ の円柱を使用した。乾いた円柱の両サイドには、質量 0.00075kg の錘を取り付けた。その理由は、濡れた円柱と乾いた円柱の質量を一致させるためである。できるだけ実験条件を揃えるために、全ての場合で濡らした木綿糸を使用した。

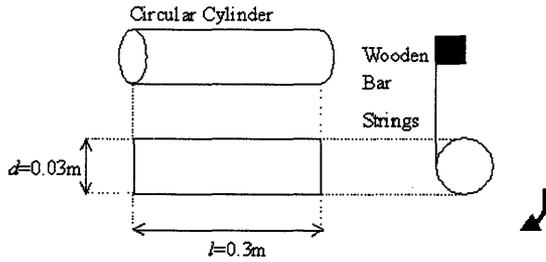


図3 実験状況

3.2 落下円柱またはボールに作用する力

円柱が落下する時、空気力である抗力 D , 揚力 L , 空力モーメント M と重力 W , 糸の張力 T が働く。

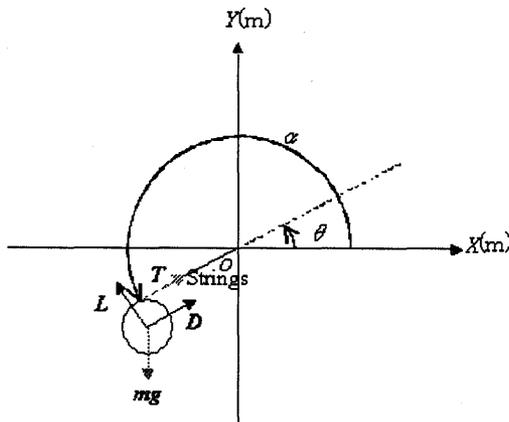


図4 落下円柱のパラメータ定義

D , L , M , W は次のように定義される。

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A \quad (1)$$

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho U^2 A \quad (2)$$

$$W = mg \quad (3)$$

$$M = \frac{1}{2} C_M \rho U^2 A d \quad (4)$$

張力 T は内力であり、次のように差分法を使って求める。

円柱が落下する間の、円柱の中心周りのモーメント式は円柱回転方向を正と考えると、次のように表わされる。

$$I \frac{d\omega}{dt} = rT - M \quad (5)$$

式(5)を、差分法を使って書き直すと、

$$T = I \frac{\omega(t + \Delta t) - \omega(t)}{r\Delta t} + M \quad (6)$$

円柱の出発点を原点 O とし、重力 W の働く方向を Y 軸、それに鉛直に X 軸をとる。円柱に作用する各力を、 X 方向、 Y 方向に分けるとそれぞれの方向の力成分は次式で表わされる。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho A U^2 \{-C_D \cos \alpha + C_L \sin \alpha\} - T \cos \alpha \quad (7)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho A U^2 \{-C_D \sin \alpha - C_L \cos \alpha\} - mg - T \sin \alpha \quad (8)$$

これらの式で、 $T=0$ とすると、ボール飛翔の式に一致する。

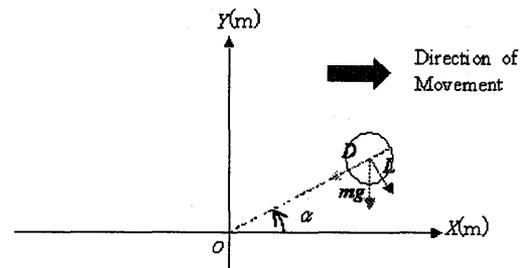


図5 ボール飛翔のパラメータ定義

3.3 スピンパラメータ S_p

スピンパラメータの定義は、次の流速と回転速度の比で表わされる。

$$S_p = \frac{\pi d N(t)}{U(t)} = \frac{r \omega(t)}{U(t)} \quad (9)$$

本実験では糸が滑らないという条件

$$U(t) = r \omega(t) \quad (10)$$

を考慮した結果、常に $S_p=1$ となる。

3.4 空気力係数

表面が滑らかな円柱の C_D , C_L , C_M は、臨界レイ

ノルズ数($Re_c \approx 3.0 \times 10^5$)まではレイノルズ数にあまり依存しないが、その値を過ぎると、各係数は急激に減少することが知られている。

糸付き円柱の落下実験でのレイノルズ数は、 $U=0\sim 3.6(\text{m/s})$ より、せいぜい

$$Re = \frac{3.6 \times 0.03}{1.5 \times 10^{-5}} = 7200 \quad (11)$$

となり臨界レイノルズ数より充分小さい。

また、レイノルズ数が 200 以下の場合、 C_D , C_L , C_M 共に大きくなるのが分かっているが、使用したレイノルズ数はこれより充分大きい。よって、各係数は Sp のみに依存すると考えた。

糸付き円柱の落下実験は、 $Sp=1$ であるので、田中他(1972)¹⁾、松永他(1985)²⁾らの実験値 $C_D=0.55$, $C_L=1.09$ を使用した。

いっぽう、テニスボールの飛翔シミュレーションにおいては、糸の条件がないために $Sp=1$ ではない。よって、スピンパラメータは式(9)より算出する。

実際のテニスボールの初速を $100\text{km/h}\sim 200\text{km/h}$ とすると、それに対応するレイノルズ数は $1.0 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^5$ なので臨界レイノルズ数と同等である。しかし、今回の実験では C_D , C_L , C_M は Sp のみに依存することとした。

係数 C_D , C_L , C_M は円柱の落下実験の結果をもとに見積もった。但し、 $Sp=1$ と固定する場合と、空気力係数が Sp の関数とする場合の両方でシミュレーションを行なって、妥当性を検討した。

$Sp=1$ の場合、乾いたモデルでは $C_D=0.55$, $C_L=1.09$, $C_M=0$ 、濡れたモデルでは $C_D=0.5$, $C_L=0.95$, $C_M=0$ とおいた。空気力係数が Sp の関数の場合、鳴尾他(2004)³⁾の研究よりゴルフボールにおける係数 C_D , C_L , C_M とスピンパラメータの関係式はすでに解っている。本論文の C_D , C_L , C_M とスピンパラメータの関係式もゴルフボールの関数と同じ挙動をとると仮定した。この仮定より、先の実験の $Sp=1$ の場合と鳴尾他(2004)³⁾の関数の $Sp=1$ のときの比をとり、 C_D , C_L を見積もった(図6, 7)。 C_M については、 C_D , C_L に比べて値が小さいため、すべて鳴尾他(2004)³⁾の式をそのまま使用した。

ゴルフボールの空気力係数と Sp の関係式は次のとおりである。

$$C_D(Sp) = 0.751Sp^4 - 1.76Sp^3 + 1.098Sp^2 + 0.214Sp + 0.2049 \quad (12)$$

$$C_L(Sp) = -0.2158Sp^4 + 1.006Sp^3 - 1.644Sp^2 + 1.25Sp + 0.0616 \quad (13)$$

$$C_M(Sp) = e^{(3.78Sp - 6.707)} \quad (14)$$

$Sp=1$ の時の係数の値は、

$$C_D(1) = 0.552 \quad (15)$$

$$C_L(1) = 0.458 \quad (16)$$

よって、これをもとに 2 次元モデルの空気力係数とスピンパラメータの関係式を作る。

乾いた 2 次元モデル

$$C_D(Sp) = 0.751Sp^4 - 1.76Sp^3 + 1.098Sp^2 + 0.214Sp + 0.2049 \quad (17)$$

$$C_L(Sp) = -0.5206Sp^4 + 2.427Sp^3 - 3.9663Sp^2 + 3.016Sp + 0.1486 \quad (18)$$

$$C_M(Sp) = e^{(3.78Sp - 6.707)} \quad (19)$$

濡れた 2 次元モデル

$$C_D(Sp) = 0.6802Sp^4 - 1.5942Sp^3 + 0.9946Sp^2 + 0.1938Sp + 0.1856 \quad (20)$$

$$C_L(Sp) = -0.4538Sp^4 + 2.1153Sp^3 - 3.4568Sp^2 + 2.6283Sp + 0.1295 \quad (21)$$

$$C_M(Sp) = e^{(3.78Sp - 6.707)}$$

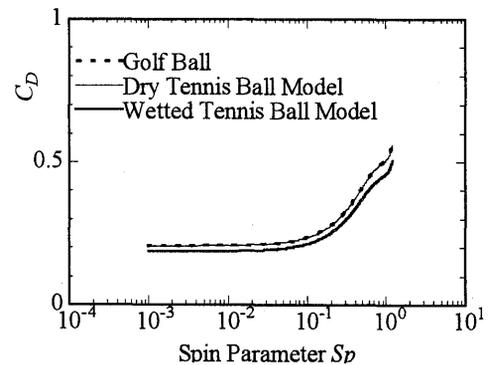


図6 抗力係数とスピンパラメータ

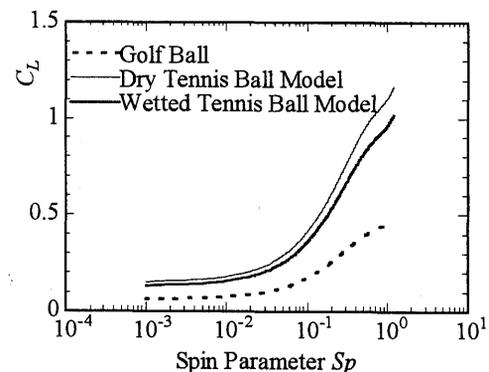


図7 揚力係数とスピンパラメータ

回転円柱やボールの運動における C_M については、 C_L 、 C_D に比べて影響が薄いことが鳴尾他(2004)³⁾の実験で分かっている。また、ボールの中心周りの回転に対してのモーメントを比較すると $rT \gg M$ なので、ここでは、 $C_M=0$ と仮定しておき、後にしかるべき値を代入し運動に影響を与えないことを確認する。

4. 結果

4.1 糸付き落下円柱の観察

図8は糸付き落下円柱の軌跡を示す。乾いた円柱、濡れた円柱に関係なく、ほぼ1.2secで糸が伸びきる状態まで変位した。円柱表面に付着した水の影響で、回転円柱に対するマグナス効果は減少した。

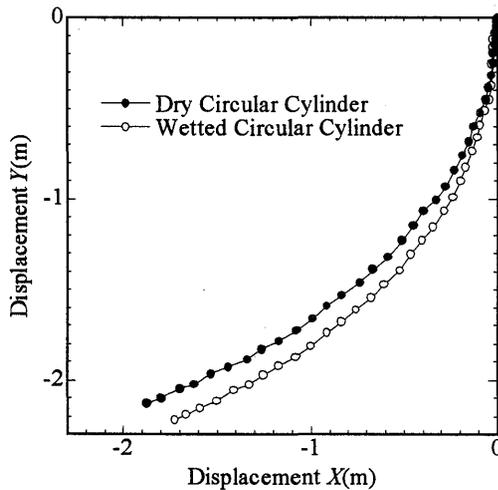


図8 ビデオ観察による変位のプロット図

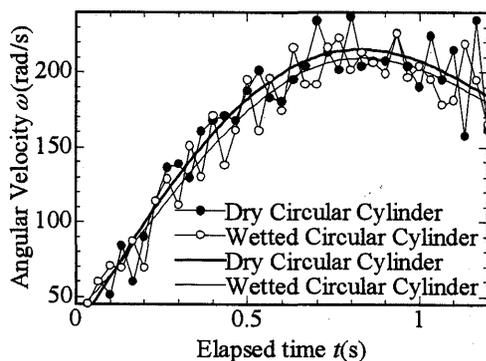


図9 観察における角速度と落下時間の関係

ある時刻での円柱の位置は画像により容易に解るので、それらの対応から任意時刻 t の運動速度 U を求

めた。これを $\omega=U/r$ に代入して角速度 ω を求め図9にプロットした。図9を見ると、角速度 ω はある点までは増加するが、ある点より緩やかな減少に転じる。また、図9では、プロット点を4次関数で最小自乗近似したが、乾いた円柱と濡れた円柱の曲線はほぼ一致した。

4.2 落下における円柱シミュレーション

本研究の数値シミュレーションは、全て Microsoft Excel 2000 を用いて行なった。

図10は、糸付き落下円柱の実験との比較である。運動方程式に $C_D=0.55$ 、 $C_L=1.09$ を代入したら、段階1の乾いた円柱の軌跡とほぼ重なった。この結果により、本シミュレーションは極めて信頼性が高いと判断した。シミュレーションを濡れた円柱の値に重ねることにより、 $C_D=0.5$ 、 $C_L=0.95$ と見積もられた。よって、水が付着することによって各空気力係数が減少すると思われる。 $C_M=0$ 、0.05、0.5を代入したが、円柱の軌道に影響はなかった。図11は、角速度の時刻歴を示す。角速度 ω は、落下円柱の観察同様に、どちらの円柱もある時刻より減少に転じ、緩やかに減少していく。また、シミュレーションにおいては濡れた円柱の方が角速度は速くなった。

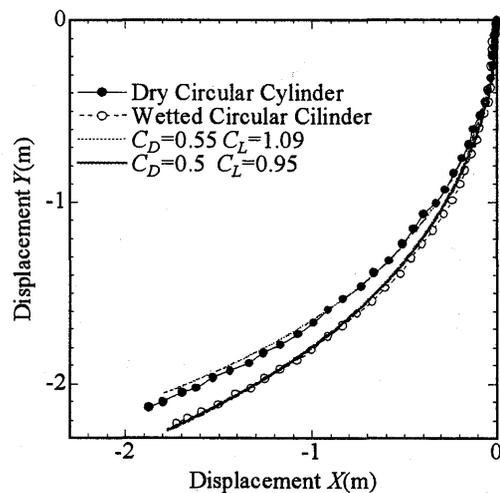


図10 観察とシミュレーションの飛翔軌跡の比較

本実験ではさらに糸が長い場合もシミュレーションしてみた。その結果、図12のように、角速度 ω は、はじめ緩やかに減衰し正弦曲線を描きながらある一定値へ収束した(乾いた円柱 $\omega=188\text{rad/s}$ 、濡れた円柱 $\omega=198\text{rad/s}$)。

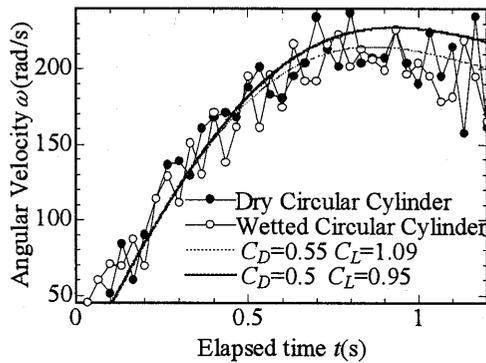


図 11 観察とシミュレーションの角速度の比較

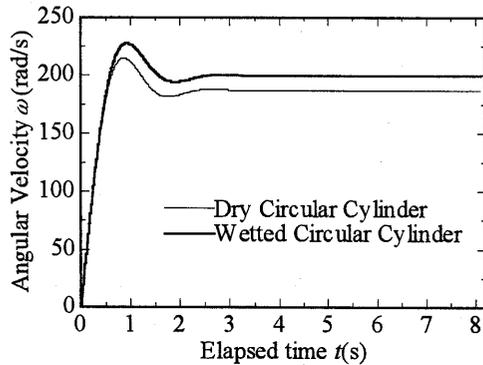
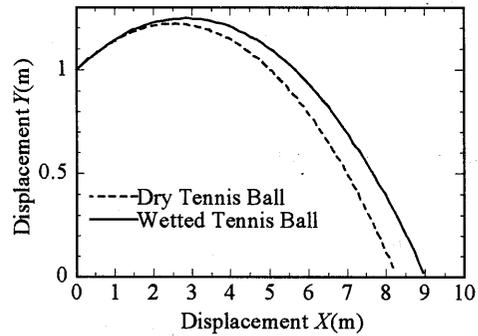


図 12 長時間における角速度と時間の関係

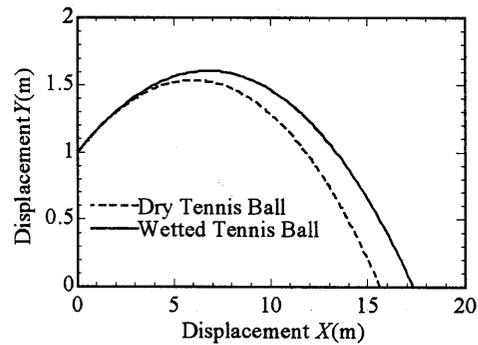
4.3 ボールの2次元モデルのシミュレーション

円柱の落下実験で使用した円柱の質量を 0.1kg としたものを、ソフトテニスボールの2次元モデルと考え、差分法によるシミュレーションを二通り行なった。一つは、落下円柱の実験の空気力係数をそのまま使える $Sp=1$ の場合。他方は、より実際のボール飛翔特性に近づけるために、空気力係数が Sp の関数の場合である。これらの場合のテニスボールの飛翔のシミュレーションの結果は次のようになった。 $Sp=1$ の場合の結果を図 13 に示す。常に $Sp=1$ で2次元モデルが飛翔した場合、濡れたモデルの方が乾いたモデルより遠くに飛ぶことが分かった。また、飛翔方向より平坦なコースを辿る。大きく運動全体をみると、両軌道は放物線であり相似している。空気力係数を Sp の関数とした場合の結果を図 14 に示す。濡れたモデルの方が乾いたモデルより平坦なコースをとっている。また、運動の特徴は $Sp=1$ の場合とほぼ同じである。 $Sp=1$ の場合より、空気力係数が Sp の関数とした場合の方がボールは遠くへ飛ぶ。なお、

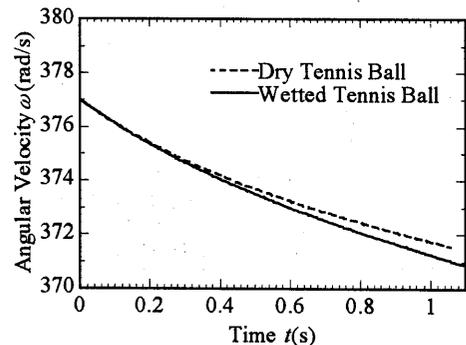
この実験では、 Sp は 1 よりも変数の値が小さい ($Sp=0.1\sim 0.2$)。よって、 Sp が小さい方が遠くにボールが飛ぶ。図 15 は角速度 ω の時刻歴を示す。角速度 ω は、乾いたモデルの方がわずかに大きい値をとり、緩やかに減少していく。



$$U_0=33.3(\text{m/s}), \alpha_0=10^\circ, N_0=60(\text{rps}), m=0.1(\text{kg})$$

図 13 $Sp=1$ の場合のボールの飛翔シミュレーション

$$U_0=33.3(\text{m/s}), \alpha_0=10^\circ, N_0=60(\text{rps}), m=0.1(\text{kg})$$

図 14 空気力係数が Sp の関数の場合のボール飛翔シミュレーション

$$U_0=33.3(\text{m/s}), \alpha_0=10^\circ, N_0=60(\text{rps}), m=0.1(\text{kg})$$

図 15 空気力係数が Sp の関数の場合の角速度と飛翔時間の関係

5. 結論と今後の課題

5.1 結論

本研究より、ソフトテニスボールのまわりに付着した水は空気力の各係数を減少させる効果がある。

図 13 や 14 のから分かるように濡れたボールの軌道が、乾いたボールの軌道より、曲率が小さい軌道をとる。しかし、その軌道の軌跡は、互いに相似している。このことより、『ボールが吹く』という現象は、空気力の低下により、我々プレーヤーが狙った軌道よりもテニスボールが曲がり落ちずに飛んでいくために、テニスボールが浮いた様に見えるという目の錯覚が原因であると考えられる。

今後の課題として次のようなものが挙げられよう。

(1) 糸付き落下円柱の観察実験では、物体が軽くなればなるほどピッチングのような振動を伴い落下運動は不安定になる。しかし、重い物体を使えば空気力による物体の変位が小さくなる。軽い物体を使用し、いかに運動の安定感を増していくかを究明したい。

(2) 円柱落下の観察とシミュレーション、そしてボールの飛翔シミュレーションにおいても角速度 ω について結果が出ている。しかし、その見解は濡れたものと乾いたものの初期条件は同じにも関わらず、観察では濡れた円柱も乾いた円柱も角速度はあまり変化がなく、落下シミュレーションでは濡れた円柱の方が角速度は速かった。

さらにボールの飛翔シミュレーションでは、乾いたボールの方が回転数ははやかった。このように、三つとも結果は異なっていた。この矛盾を整合的に理解したい。

(3) 物体を実際に風洞に入れて各空気力係数を S_p の関数としてその値をシミュレーションに代入し検証したい。

謝辞

先輩方に多くの助言を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 田中英穂, 長野進: 回転円柱まわりの流れに関する流れ. 日本機械学会論文集, 第 38 巻, 310 号(1972), pp. 1343-1352.
- 2) 松永成徳, 西道弘: 回転円柱に作用する流体力に関する研究. 日本機械学会論文集 B 編, 第 51 巻, 471 号(1985), pp. 3659-3664.
- 3) 鳴尾丈司: ゴルフボールの三次元飛翔軌道解析における空気力学的研究. 日本機械学会論文集 B 編, 第 70 巻, 697 号(2004), pp. 2371-2377