

軟式野球ボールのデザインと空力特性

木下 康浩^{*1}・青木 克己^{*2}・長瀬 二郎^{*3}

Aerodynamic Characteristics for the Design of Rubber-Ball

by

YASUHIRO KINOSHITA, KATSUMI AOKI and JIRO NAGASE

(Received on Sep. 28, 2001 & accepted on Dec. 19, 2001)

Abstract

This paper is described on the aerodynamic characteristics for the design of a rubber ball. This study is a basic research for optimum design of surface structure of the rubber-ball used in the baseball. As a first stage, it is important that the flying characteristics of the rubber-ball in the non-rotational stage is grasped. The balls used for experiment were of 5 kinds of surface structure such as a smooth sphere, a ball with dimples, a ball with the seams, and a ball with dimples and seams. From the experimental results, the difference in aerodynamic lift and drag among these surface structures of the ball was clarified. The flow pattern of the rubber ball circumference for each ball was confirmed by the visualization experiment.

Keywords: Rubber-Ball, Drag, Lift, Drag Coefficient, Surface Structure

1. 緒言

今日、球体を用いたスポーツにおいて変化球はとても重要な技術であり、野球では投手の投げる変化球によって、試合の勝敗が大きく支配されている。

現在、野球ボールには硬式ボールと軟式ボールがあり、硬式ボールはプロ野球や高校野球で、軟式ボールは小学生から一般の方まで幅広く使用されている。そして、ボールの軌道が変化するのは、硬式ボールに関しては、*H.Nomo* や *K.Sasaki* などフォークボールを武器に活躍する投手の出現により流体力学的観点から解明されつつある⁽¹⁾⁽²⁾。

硬式ボールには、ボールの表面を覆う瓢箪の形をした2枚の皮を繋ぎ止めるために、縫い目が施されている。そのため、ボールが回転しながら飛んでいくと、ボールにあたった流れは、よどみ点で両側に分かれ、お互いに縫い目を乗り越えるときの攪乱によって、乱流境界層に発達し剥離が遅れるが、このとき縫い目の位置は対象ではないので、剥離点はボールの縫い目のために非対称的になる。そして剥離位置が非対称であれば、流れの速い領域面積の相違に伴って、圧力の低い方向に力が働く⁽³⁾こととなる。これにより流体中を進行する球または円柱が回転するとき、流れと垂直な方向に力が発生するとして古くから知られている“マグナス効果”が生じるとされており、このように、硬式ボールの研究については報告されている。しかし、我々がよく目にする軟式ボールには、縫い目に似せた山形の突起物のほかに、ゴルフボールのように楕円形のディンプル

が球体表面に施されている。ディンプルは、ゴルフボールの研究報告によると、ボールに働く抵抗を低減させる効果がある⁽⁴⁾と言われているが、軟式ボールに施されているディンプルは、工業意匠であり、抗力低減につながるものであるか否か流体力学的には検討されておらず、また軟式ボールに関しては、ボールの機能に対する科学的議論がどれだけされているか著者の知る限りでは見受けられない。確かに、軟式ボールの表面デザインは、見た目の美しさやボールのつかみ易さ等が考えられ、それにより商品価値が向上していると思われる。しかし、ボールの商品価値はそのボールの飛翔特性、すなわち投球時のボールの変化や飛翔時のボールに働く空気抵抗等の流体力学的観点から見た性能も重要であり、今後、ボールに対する高い価値観を求めるには、次のようなことを考慮しなければならないと考える。

- ・見た目の美しさ
- ・投げやすさ
- ・耐久性、耐摩耗性
- ・流体力学的性能 [投球時のボールの変化の多彩性]
[飛翔時の空力特性の良さ]

これを踏まえて本研究では、軟式野球ボールの表面に施されているディンプルと縫い目が及ぼす影響についての研究および開発を目的とし、その第1段階として滑面球や硬式ボールなど表面構造の異なる球体の特性に対して、現在使用されている公認軟式野球ボールがどのような空力特性を示すか、そしてシームやディンプル等の表面構造がどう影響を及ぼすのか比較検討し明らかにする。

* 1 工学研究科機械工学専攻博士課程前期
* 2 工学部機械工学科教授
* 3 ナガセケンコー(株)

2. 実験装置および方法

2.1 供試球体

供試球体は Fig.1 に示した 5 種類であり, Smooth, D type のボールは塩化ビニール製で, 他はゴム製で作られている. そして Smooth type は滑面球であり, A type は硬式野球ボールに似せた縫い目を施してあるボールである. そして B および C type はともに縫い目とディンプルが同時に施された軟式野球ボールであるが, B type は縫い目の高さがボール表面と同じになるようにデザインされている. そして, B type から縫い目を取り除きディンプルのみにしたものが D type である. これらの主要諸元を Table.1 に示す.

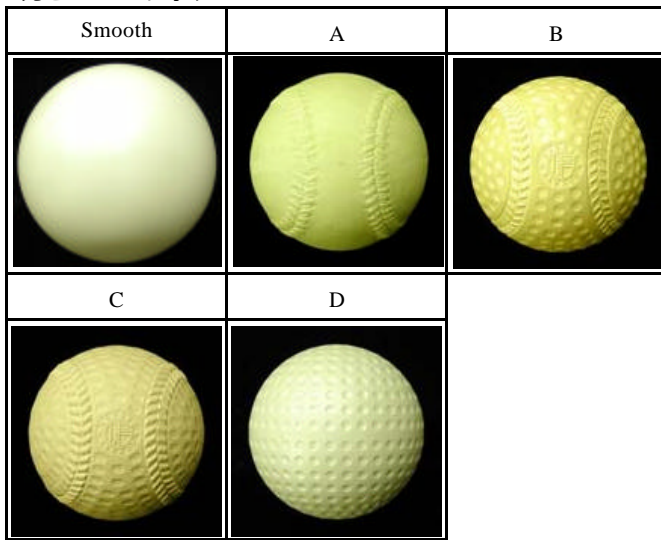


Fig.1 Test ball

Table.1 Specifications of the test ball

Type	D [mm]	Seam	Dimple	Number
Smooth	80.00			
A	72.20			
B	71.16			304
C	71.14			324
D	71.20			462

2.2 実験装置

次に, 今回使用した風洞は 700×700mm の出口を持つ回流式風洞である. 風洞の概要図を Fig.2 に示す.

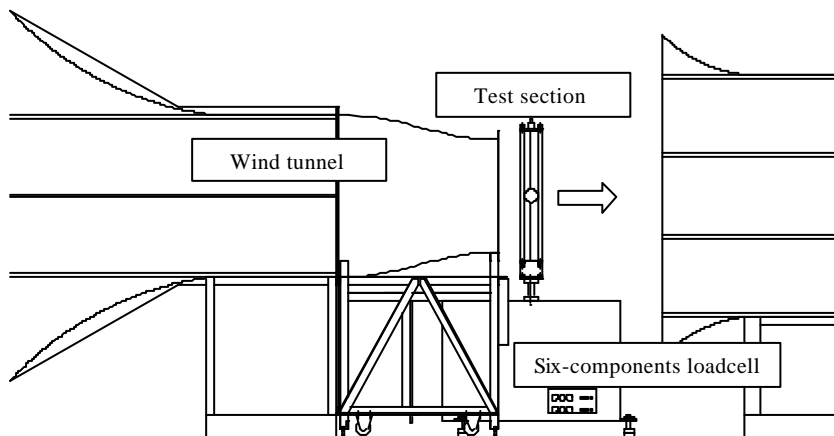


Fig.2 Experimental apparatus

そして風洞下流下 100mm の位置に 800×800mm の正方形のフレームがストラット型六分力天秤装置に設置されている. 供試ボールはピアノ線を介して Test section の中央部に配置させ, 両固定端にテンションを加えたピアノ線が張られている. これにより, 供試ボールは 700×700mm の風洞測定部中央にあり, フレーム部は風の影響を受けない風洞測定部の外にあって, ストラット型六分力天秤装置に設置している. ボールとピアノ線に加わる空気力を測定できるようになっている. そして, ピアノ線による空気力への影響を考慮して, 測定した空気力からピアノ線のみ働く力を差し引いて, ボールのみ空気力を算出する.

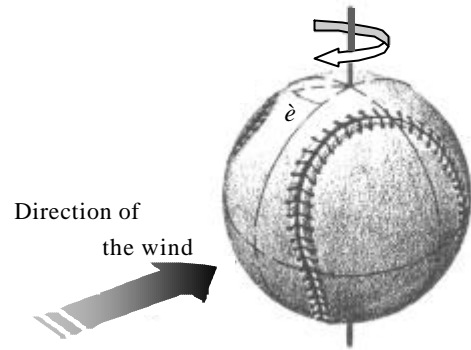


Fig.3 Seam position

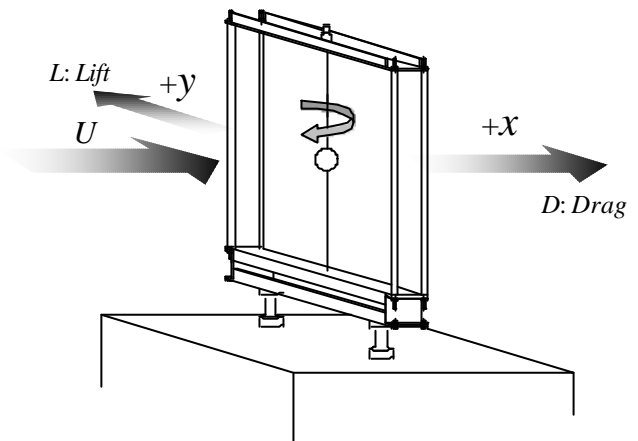
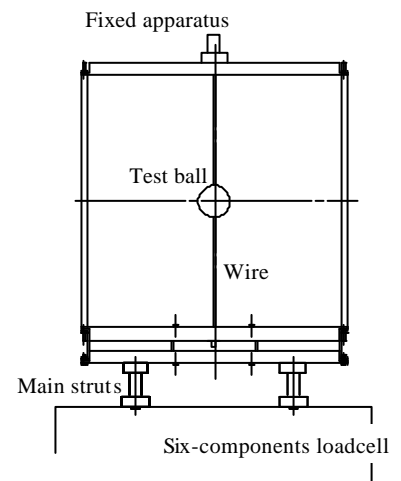


Fig.4 Measurement condition



2.3 実験方法

本実験では、流速を $U=5\sim 35\text{m/s}$ までの間を 5m/s 間隔で変化させて測定を行なった。この流速に対するレイノルズ数は $Re=2.3\times 10^4\sim 1.6\times 10^5$ である。また表面に縫い目の施してある球体は Fig.3 の状態から時計方向に $\vartheta=0\sim 90^\circ$ の間を 10° 間隔に変化させ測定を行なう。測定座標は Fig.4 のように、風洞の一樣流れ方向を x 軸、 y 軸を x 軸に直交する水平方向とする座標を定め、 x 軸方向に働く空気を抗力 D 、 y 軸方向に働く空気を揚力 L とし、流速 U の進行方向上流から見て抗力 D は下流側を正として、揚力 L は左側を正とする。

2.4 揚・抗力の測定

本実験では、六分力検出器を用いて風洞測定部の中央に設置された供試球体に働く抗力および揚力を測定するが、歪測定器からはそれぞれ電圧値 $V[\text{V}]$ として測定されるので、抗力 $D[\text{N}]$ 、揚力 $L[\text{N}]$ は変換係数をかけ、そして得られた数値からピアノ線のみ働く空気を差し引いた値を用いて、次式より抗力係数 C_D を算出する。

$$D_B = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{U^2}{2} \quad [\text{N}] \cdots \cdots (1)$$

$$L_B = C_L \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{U^2}{2} \quad [\text{N}] \cdots \cdots (2)$$

ここで、

- D_B : 球体だけに生じる抗力 [N]
- L_B : 球体だけに生じる揚力 [N]
- C_D : 抗力係数
- C_L : 揚力係数
- A : 測定物体の投影面積 [m^2]
- ρ : 空気密度 [kg/m^3]
- U : 流速 [m/s]

である。

2.5 可視化実験法

ボール表面に針状電極を中心角 90° の位置に設置し、線状電極を、ボールをはさむように配置した。電極はいずれもタンゲステンワイヤである。そして、高電圧・高周波発生装置によりパルスを加え、一定時間に繰り返し放電を行ない、それにより描かれたタイムライン(火花列)を記録する火花追跡法を用いて流速分布の定量的な測定を行った。

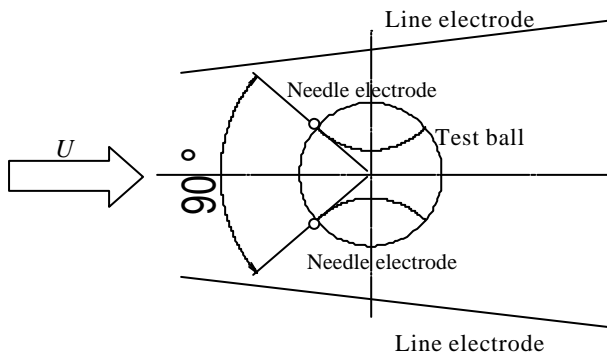


Fig.5 Spark tracing method

3. 実験結果および考察

実験は Fig.3 の状態から時計方向に $\vartheta=0\sim 90^\circ$ の間を 10° 間隔で変化させた 10 パターンにおける各供試球体の揚・抗力測定を行った。

3.1 抗力係数

$\vartheta=0^\circ$ における各供試球体の抗力係数を Fig.6 に示す。

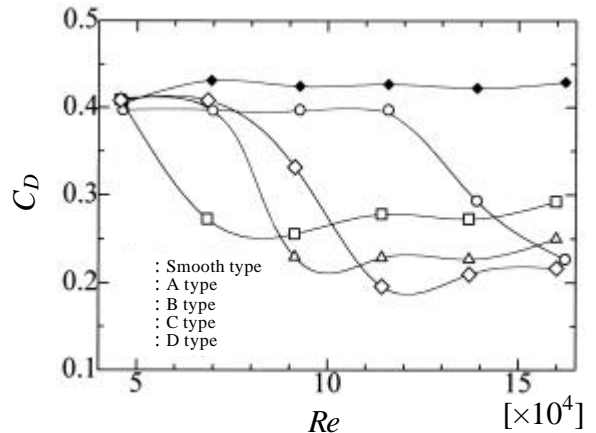
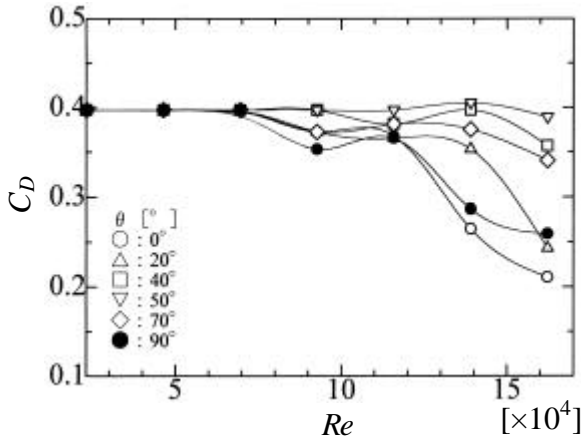


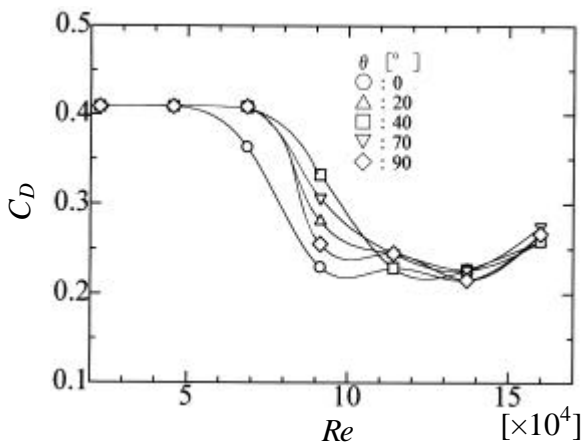
Fig.6 Drag coefficient in $\vartheta=0^\circ$

まず、Smooth type のボールの抗力係数は C_D 値が急激に減少する臨界領域を確認することができない。これは、一般的に滑面球は $Re=10^3\sim 10^5$ では $C_D=0.4\sim 0.5$ でほぼ一定で、 $Re=3.5\times 10^5$ 付近で C_D 値が急激に減少するといわれており、これにより今回の実験と従来の結果が一致していることがわかる。これに対して、今回実験で使用した滑面球以外のすべての球体に関しては臨界領域が確認できる。また、A・B・D type の球体に対しては亜臨界領域が、そして B・C・D type の球体に対しては超臨界領域がそれぞれ確認できる。また、一般的に滑面球の場合、 $Re=3.5\times 10^5$ 付近で臨界領域に達するが、A~D type の臨界領域は低レイノルズ側に移動している。これにより、野球ボールに施されている縫い目は、ゴルフボールのディンプルと同じように抗力を減少させる効果があることがわかる。また、ボールのタイプによって抗力係数の変化に違いがあり、縫い目のみの A type よりも、ディンプルのみの D type の方が早く臨界領域に達している。そして 2 つが同じ球体表面に施されている B・C type の場合は、さらに臨界領域が低レイノルズ数側に移動している。また、B・C type を比較してみると、C type の方の臨界領域が低レイノルズ数側に移動しているが、逆に最小 C_D 値が増加している。

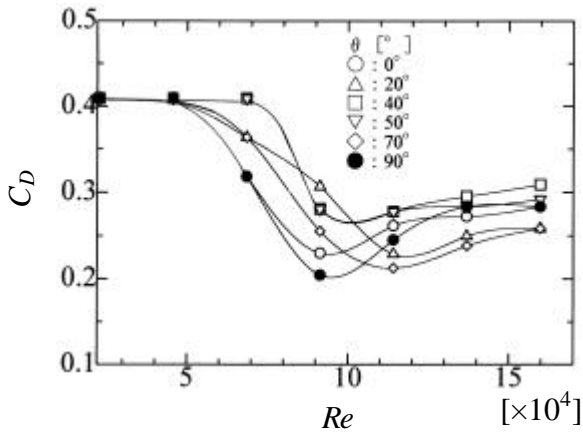
Fig.7 は、各野球ボールの角度を変化させた場合の、各レイノルズ数における抗力係数 C_D を示している。いずれのタイプも臨界領域における C_D 値が大きく変化しており、 $\vartheta=0^\circ$ から徐々に増加を始め、 $\vartheta=40\sim 50^\circ$ 付近で最高値になり、そこからまた減少している。これはボールの角度が $\vartheta=0\sim 45^\circ$ の範囲で増加していくにつれてボールの表面上の流れが乱流境界層となる角度が後方に移動し、剥離点が徐々に前方に移動し、 $\vartheta=45^\circ$ の時、縫い目の位置がよどみ点から $\vartheta=\pm 90^\circ$ 近くにあり、そこで流れの剥離が発生しているからと思われる。また、A type と C type とではどの角度に対しても C type の方が臨界領域に達するレイノルズ数が低い。これは C type に施されているディンプルの影響を受け、抗力が減少したためと思われる。これにより C type の方が低レイノルズ数のとき、A type よりも抵抗が小さい事が分かる。



(a) A type



(b) B type

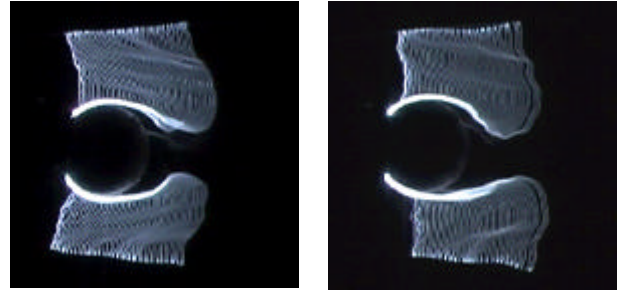


(c) C type

Fig.7 Drag coefficient to the angle (A, B, C type)

3.2 可視化結果

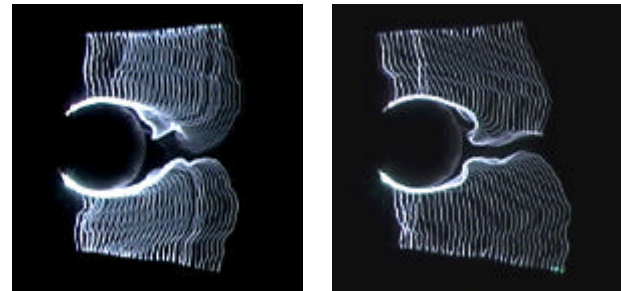
次に $\vartheta=0^\circ$ における A・C type の可視化結果を Fig.8, Fig.9, Fig.10 に示す．これによると，まず A・C type のボールとも，亜臨界領域である Fig.8(a), (b) での剥離点位置が $\vartheta=\pm 90^\circ$ でほぼ等しく，球体下流に形成される後流域も，類似した流れを示している．しかし C type のボールはレイノルズ数が $Re=0.9 \times 10^5$ になると球体まわりの流れは Fig.9(b) のようになり，亜臨界領域における球体回りの流れと比較してもわかるように，剥離点位置が後方に移行し，後流域も縮小しているのがわかる．



(a) A type

(b) C type

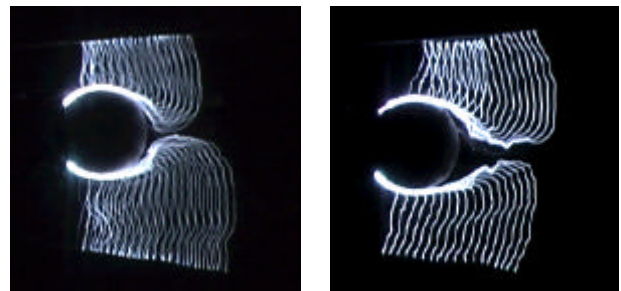
Fig.8 Visualization around ball ($Re=0.5 \times 10^5$)



(a) A type

(b) C type

Fig.9 Visualization around ball ($Re=0.9 \times 10^5$)



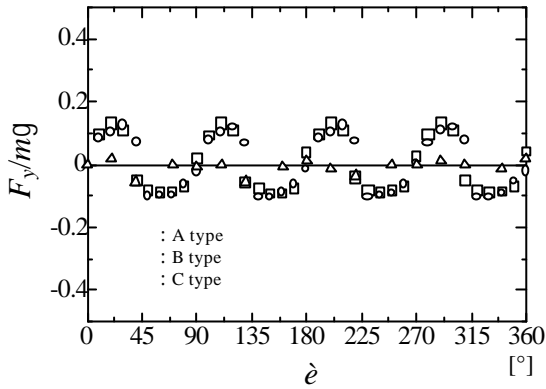
(a) A type

(b) C type

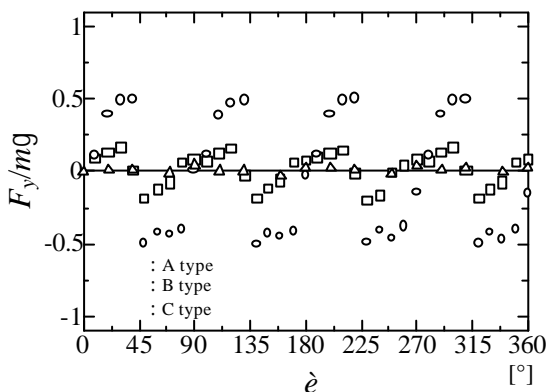
Fig.10 Visualization around ball ($Re=1.4 \times 10^5$)

3.3 揚力

Fig.11 は，A・B・C type のボールの角度によって y 方向にどのような力を受けるか示したものである．これによるとボールが 360° ，1 回転する間に流速に関わらず 4 周期変化しており， $\vartheta=30\sim 40^\circ$ のときに揚力が最大になり， $\vartheta=50\sim 70^\circ$ になると負の方向に揚力が最大となる．また，B・C type は流速が変化してもボールに働く揚力はあまり大きく変化しないのに対して，A type は $U=30\text{m/s}$ になると揚力が増加している．これは，揚力は抗力と深く関係しており，抗力係数が臨界領域で急激に減少するとき，球体まわりの流れはとて不安定になる．そして，そのとき揚力が大きく発生するといわれており，A type は $U=30\text{m/s}$ 付近で臨界領域に遷移しているため，Fig.11(b) のように揚力が発生したと思われる．そして，B・C type にあまり揚力の変化が見られなかったのは， $U=15\sim 30\text{m/s}$ で臨界領域から抗力係数が再び安定する超臨界領域に遷移してしまったからと思われる．これより，一般的に滑面球の場合，静止している状態では揚力は発生しないのに対して A type のボールには静止状態でも揚力が



(a) $U=15\text{m/s}$



(b) $U=30\text{m/s}$

Fig. 11 The force to accept in the y-direction to the angle of the ball

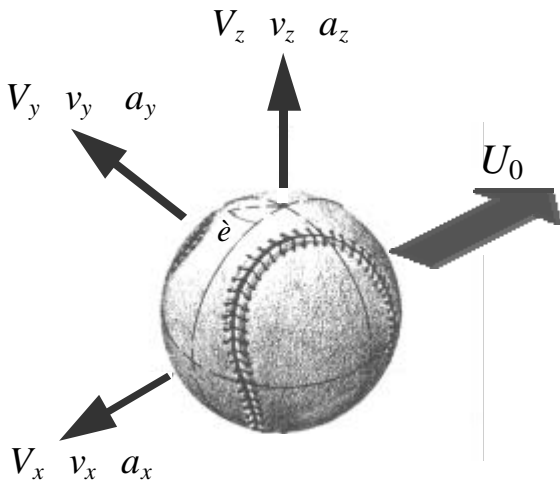
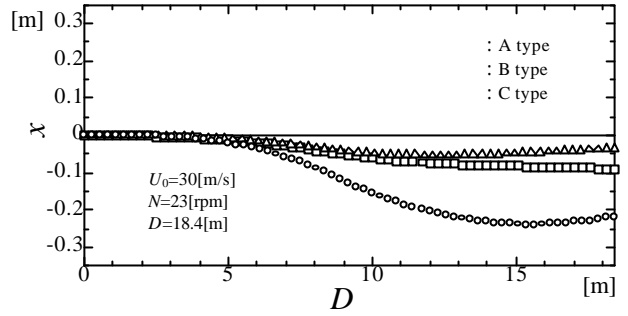
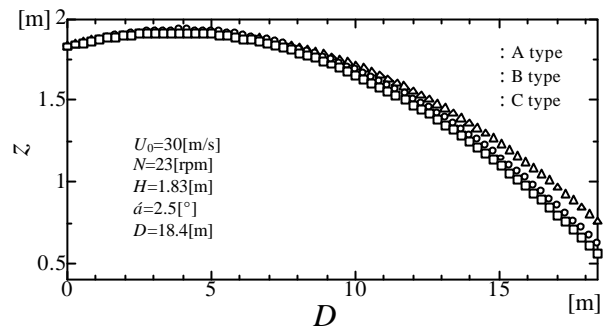


Fig.12 Orbital calculation of a baseball ball

発生することから、フォークボールやナックルボールなど回転を抑えることによりボールに大きな変化が生まれるのは、この揚力が原因ではないかと推測される。そこで今回の実験結果を用いてボールの軌道計算を行なってみる。まず計算方法としては時刻 $t=0$ における速度成分 v_x, v_y, v_z 、および時間 Δt の加速度 a_x, a_y, a_z を今回の実験で得られた各方向に働く空気力から算出し、そして時間 Δt 後の速度成分 V_x, V_y, V_z を次式より算出する。



(a) Displacement in the horizontal direction



(b) Displacement in the vertical direction

Fig.13 The comparison of the orbit of A, B and C type balls

$$V_x = v_x + a_x(\Delta t) \quad [\text{m/s}] \cdots (3)$$

$$V_y = v_y + a_y(\Delta t) \quad [\text{m/s}] \cdots (4)$$

$$V_z = v_z + a_z(\Delta t) \quad [\text{m/s}] \cdots (5)$$

そして、これにより最初の Δt 間におけるボールの変位した距離 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ はそれぞれ、

$$\Delta x = \frac{1}{2}(v_x + V_x) \times (\Delta t) \quad [\text{m}] \cdots (6)$$

$$\Delta y = \frac{1}{2}(v_y + V_y) \times (\Delta t) \quad [\text{m}] \cdots (7)$$

$$\Delta z = \frac{1}{2}(v_z + V_z) \times (\Delta t) \quad [\text{m}] \cdots (8)$$

となる。そして次に、時間 Δt 後の速度成分 V_x, V_y, V_z における空気力を実験値から算出し、それにより加速度を求め、さらに時間 Δt 後のボールの変位した距離を算出していく。そして、これを繰り返し行ない、投手が $H=1.83\text{m}$ の高さから、A・B・C type のボールを秒速 $U_0=30\text{m/s}$ 、迎角 $\dot{\alpha}=2.5^\circ$ で、1/4 回転を与えた場合の野球ボールの変位をシミュレーションしてみると Fig.13 のようになる。これによると、極めてゆっくりと回転するボールを投げた場合、揚力の発生によって加速しながら右側に変化していく。そして、ボールの角度が $\dot{\epsilon}=45^\circ$ 付近になった時、揚力が反転し逆向きに加速度が生じる。しかし、加速度と違って速度はすぐに応答せず、コースの変化は遅れて起こるため、ボールは Fig.13(a) のような軌道を描く。これにより、 $U=30\text{m/s}$ 時にボールに働く揚力が大きい A type のボールのほうがよく変化する事が証明された。

4 . 結言

球体表面に縫い目やディンプルを施し、さらに角度を変化させて抗力・揚力を測定した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 球体周りの流れは、供試球体においても滑面球同様に、 C_D 値が急激に減少する臨界領域が存在する。
- (2) 各供試球体は、表面構造の違いによって大きく特性が異なり、軟式野球ボールのように縫い目の施されている球体にディンプルを加えると、さらに臨界領域が低レイノルズ数側に移動するが、逆に、最小 C_D 値が増大してしまう。
- (3) 臨界領域において、軟式野球ボールなど球体表面に縫い目を施したボールは、ボール角度によって抗力係数が変化する。
- (4) 野球ボールは、ボールの角度が変化するにつれて揚力が周期的に増減し、 $\alpha=30\sim 40^\circ$ で最大となり $\alpha=45^\circ$ 付近で揚力が反転し、負の方向に対して最大となる。
- (5) 火花追跡法による可視化実験を行った結果、硬式および軟式野球ボールの各臨界領域における後方流れの様子や剥離点位置など把握することができた。

5 . 参考文献

- (1) 溝田武人，他：ナックルボールの不思議？(第1報 準定常理論による飛翔解析とフラッター解析)，日本風工学会誌，1995，pp.3-13
- (2) 溝田武人，他：ナックルボールの不思議？(第2報 硬式野球ボールの Wake Field と空気力)，日本風工学会誌，1995，pp.15-21
- (3) 幾島康夫，他：ナックルボールの空気力学的解析，電気通信大学紀要 3 巻 1 号，1990，pp.65-70
- (4) Bearman and Harvey (1976): Golf ball aerodynamics , aeronautical quarterly , 27 , pp.112-122