

日本の伝統的軟式野球ボールとメジャーリーグボールの空力特性の比較

青木克巳^{*1}, 岡永博夫^{*1}, 長瀬二郎^{*2}

Comparison of Traditional Rubber-ball Baseball Ball of Japan and Aerodynamic Characteristic of the Measure League Ball

Katsumi AOKI^{*1}, Hiroo OKANAGA^{*1} and Jiro NAGASE^{*2}

^{*1} Tokai Univ. Dept. of Mechanical Engineering, 4-1-1 Kitakaname Hiratsuka Kanagawa, 259-1292 Japan

^{*2} NAGASE KENKO Co. Ltd., 2-36-10 Sumida, Sumida-ku, Tokyo 131-8520, Japan

In this report, aerodynamic characteristic such as lift and drag of official rubber-balls used in the game of the baseball are studied experimentally. And the aerodynamic characteristic of these rubber-ball is compared and is examined with the aerodynamic characteristic of smooth sphere and sphere with dimple and the Major League ball. In addition, the aerodynamic characteristic for seam angle and spin rate ratio $\alpha (=V/U, V: \text{peripheral velocity of test balls}, U: \text{flow velocity})$ is also clarified. And, the flow pattern around the test balls are visualized by the spark tracing method. Following conclusions were got from these results.

- (1) The dimpled rubber-ball has a critical region where the drag coefficient decreases in the same way as the smooth surface balls. (2) Depending on the surface structure of test balls, the aerodynamic characteristics differ significantly. When dimples are added to the balls with seams, the critical region moves toward the lower Reynolds number side, but the minimum drag coefficient increases. (3) About the rubber-ball and Major League ball, C_D shows the almost same values without rotation. However at the rotational state, C_D of the Rubber-ball is lower than that of the Major League ball. (4) The values of C_D take different values depending on type A~E and become large as α increases. The values of C_L stand in a same line which rises as α increase.

Key Words : Rubber-balls, Major League Ball, Smooth Surface Ball, Aerodynamic Characteristics, Spin Rate

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であり、特に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左右される。現在使用されている野球ボールを大別すると、硬式野球ボールと軟式野球ボールであり、前者は主にプロ野球や高校野球で、後者は小・中学生を始め一般の方に幅広く使用されている。硬式野球および軟式野球にはそれぞれボールに対する規則があり、ボールの構造、重さ、周囲（軟式野球ボールは直径）、そしてある高さから大理石に落として測定を行う反発力などが定められている^{(1),(2)}。これによると、硬式野球ボールは、ボール構造がコルク・ゴムまたはこれに類する材料の小さい芯に糸を巻きつけ、白色の馬皮または牛皮革2枚で包み、丈夫に縫い合わされているのに対して、軟式ボールは外周がゴム製で一般にはボール内が中空になっており、それぞれ野球ボールの内部構造が異なる。さらに、硬式野球ボールと軟式野球ボールの表面構造も異なる。我々が普段よく目にする歴代の軟式野球ボールの表面には縫い目模様 に似せたデザインの他にボール表面に円形状や楕円状のデインプルと呼ばれるくぼみが施されている。これまで、軟式野球ボールのメーカーは独自の長い歴史の中において、豊富な経験的データを下に工業意匠を重要視し、投げやすさや耐久性に対する

^{*1} 正員, 東海大学 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1)

^{*2} ナガセケンコー株式会社

E-mail: katumi@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

進化がなされ、図2に示すように歴代の数々のボールが生み出されてきている。このような歴史の中で、軟式野球は日本で生まれ育ったスポーツである。しかしながら、野球発祥の地であるアメリカのメジャーリーグや日本のプロ野球、大学、高校野球の大会などで使用されているボールは2枚の皮を縫い合わせた硬式野球ボールであり、このイメージが強いあまり海外においては認知されていないのが現状である。これまで野球ボールの研究に関してはその多くが硬式野球ボールである。近年、野茂や佐々木らのフォークボールを変化球の武器としているプロ野球選手の活躍により、その変化球に話題が注目され、流体力学的な観点からも研究がなされてきている。その結果、硬式野球ボールに関しては、フォークやナックル等非回転の球種に対する空力特性について徐々に解明されてきている⁽³⁾⁻⁽⁹⁾。しかしながら軟式野球ボールに関しては流体力学観点からの議論および報告は著者らの報告以外にはほとんど行われていない⁽¹⁰⁾。軟式野球ボールは硬式野球ボールよりも優れた点も数多くあり、例えば、ゴム製なので製造コストが低く、耐久性、同品質の製品が製造しやすく、さらにボールの握り安さや空力特性を考慮してボールの表面構造を変化させることが容易である。そして、外周がゴム製でボール内が中空という軟式野球ボール特有の構造により硬式野球ボールよりも衝撃に対する変形が多きいため安全性の面でも非常に優れており、これらにより小・中学生をはじめ女性や高齢の方など様々な年齢層の方が使用できるメリットがある。そして、スポーツにおいて、多くの人が参加できることは非常に重要であり、その点においても軟式野球ボールの構造は重要であると考えられる。しかしながら、野球ボールにおいてもっとも重要な性能のひとつにボールの飛翔特性、すなわち、投球時のボールの変化や飛距離に影響する飛翔時のボールに働く空気抵抗等の流体力学観点から見た性能である。今後、ボールに対する価値観を求めていくためには流体力学的性能を高め、見た目の美しさ、投げ易さ、耐久性、耐磨耗性、安全性であろう。

ここでは、歴代の軟式野球ボールの変遷を眺めて、代表的な公認軟式野球ボールに対しメジャーリーグボールの空力特性との比較、及びこれらの代表的なスポーツボールに対し基本的な滑面球体、滑面球の表面にデインプルを施した場合、シーム模様が球表面より突起しない場合等の場合に対し、非回転、回転時の空力特性の比較検討を行っている。さらに、代表的な供試ボール周りの流れを火花追跡法により可視化し観察した。これらの結果より軟式野球ボールの特徴を明らかにしている。

2. 軟式野球ボールの変遷

軟式野球ボールの発明者は京都の文具商の鈴鹿栄さんと言われている⁽¹²⁾。日本に野球が入ってきたのは硬式でしたが高価で硬く危険なため子供たちが気軽に野球を楽しめないかと研究を重ね表面に多くの滑り止めの突起を



Fig. 1 The first rubber-ball baseball ball

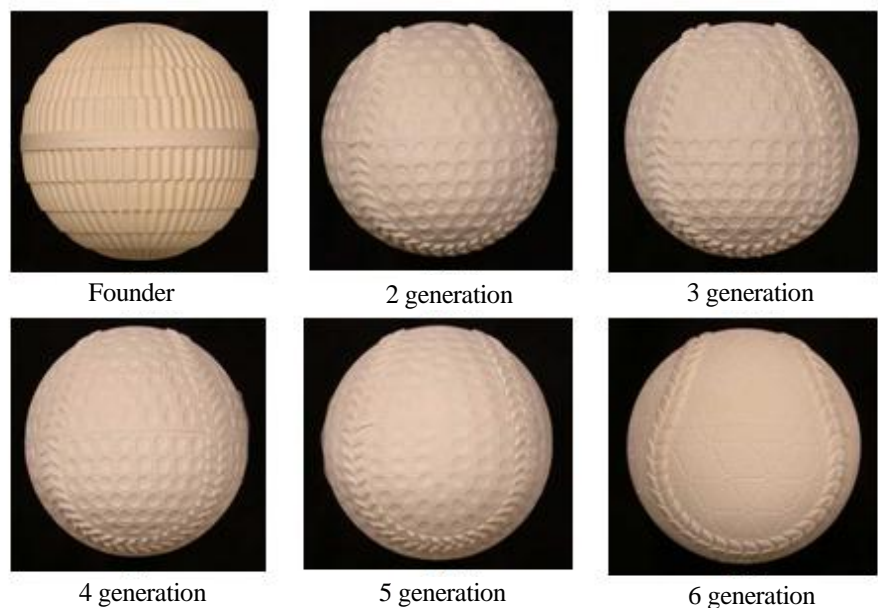


Fig. 2 Rubber-ball baseball ball of successive

「New official recognition the sixth generation ball: Weight: 163±1.8g,
diameters: 72±0.5mm and static repulsions: 95±10cm」

つけた図1に示すゴムボールを大正8年に完成させた。その後、野球熱の高まりにつれ各地で様々なゴムボールが使用されるようになったが軟式野球の全国的な普及に伴って規格の統一が必要となり、ナガセケンコーが昭和9年に開発した初代「菊型ボール」(図2)が昭和21年に当時のボールの中から選ばれ全日本軟式野球連盟の初代の公認球に指定された。翌年にはこのボールを使って第1回全日本軟式野球大会が開催されている。後に種々のボールの中から選ばれ全日本軟式野球連盟の初代の公認球に指定された。翌年にはこのボールを使って第1回全日本軟式野球大会が開催されている。後にこのボールは初代公認球に指定されることになった。

当初のゴムボールは一層構造で割れやすいという欠点があり、『割れたボールの大きい方をとったらアウト』というルールがあったほどである。「菊型ボール」はこの割れやすさを、内部を内層と外層の2層構造にすることによって解消した画期的なボールでした。公認球に指定された理由も耐久性が評価されたからである。2層構造はそれ以降、歴代のボールに採用されている。このボールの外観は菊の花びらのような模様で、ディンプルも縫い目もなく、ディンプルが登場したのは2代目からで、5代目まで同じようなデザインが踏襲されている。しかし、ディンプルの形や、表面とか内側のデザインなどが少しずつ変化している。球技スポーツの原点は「ボール」と「ルール」であり、バレー、サッカー、ゴルフなどいずれの球技でも同じように、球技を面白くするにはボールを進化させる必要がある。ゴルフボールなどは急激に進化しており、これと比べると軟式野球ボールは遅いくらいである。約10年間隔で変化してきており、その理由には意匠権の問題もあり、権利期間の15年が切れると海賊版などが出てくるので、それまでにデザインを変える必要があった。新ボールの製作に当たっては、軟式野球のボール規定に沿って、投手が「投げ」、打者が「打ち」、野手が「守る」この3つのバランスを持った条件をクリアすることである。すなわち、投手は打者を抑えるために、種々の変化球に対応でき、スピードが落ちないことである。また、打者からするとボールが遠くへ飛ぶことである。55年ぶりに第6代目新公認ボールが2007年4月に生まれた。このボールは従来の公認ボールよりデザインがアカデミックで、変化球に優れ、且つ飛距離が10% (約10m) 伸び、相反する条件を克服しており、これまでの経験的設計の上に空力設計を考慮した素晴らしいボールである。

3. 実験装置及び方法

3.1 供試ボール

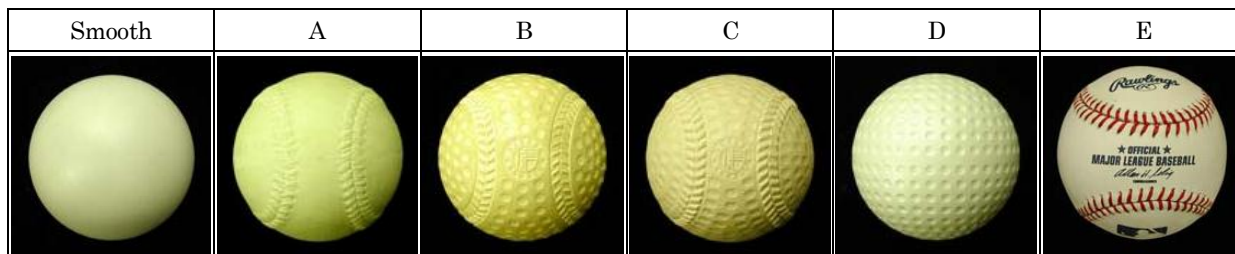


Fig.3 Test. balls

Table 1 The specification for the test balls

	D [mm]	Seam	Dimple	Number
Smooth	80.00	—	—	—
A	72.20	○	—	1922
B	71.16	○	○	324
C	71.14	○	○	324
D	71.20	—	○	462
E	73.00	○	—	—

図3は本実験の供試ボールであり、Smooth ボール、Type A は第6代目公認軟式ボールで突起したシャープなシーム模様と表面は非常に小さなディンプルが1922個トライアングル状にデザイン化してつけられている。Type B は第5代目公認ボールであるがシームは表面に面一にあり、ディンプル数は324個である。Type C は第6代目でシームが球面よりわずかに突起し、ディンプル数は324個である。Type D は球体表面に均一なディンプルが462個つけられている。Type E はメジャーリーグボールである。表1は供試ボールの代表的な諸元である。

3.2 装置と実験方法 実験に使用した風洞は700×700mmの出口サイズを持つゲッチンゲン型循環タイプである。供試ボールは図4に示されているように800×800mmサイズの長方形構造物の中心に設置され、流体力(抗力、揚力)の測定器はこの構造物に連結されている6分力歪型測定器により測定される。この長方形構造物の設置は風洞下流下100mmの位置に設置されている。供試ボールはテスト部の中心にワイヤーを介して固定され、ワイヤーを支柱の両端で若干の張力を与えながら使用する。供試ボール回転時の「ブレ」を防ぐ為ワイヤーに張力を与えて調整する。ワイヤー(ピアノ線)の直径は3/32インチ[2.38mm]である。供試ボールの回転数は支柱端に設置しているモーターの電圧で制御している。

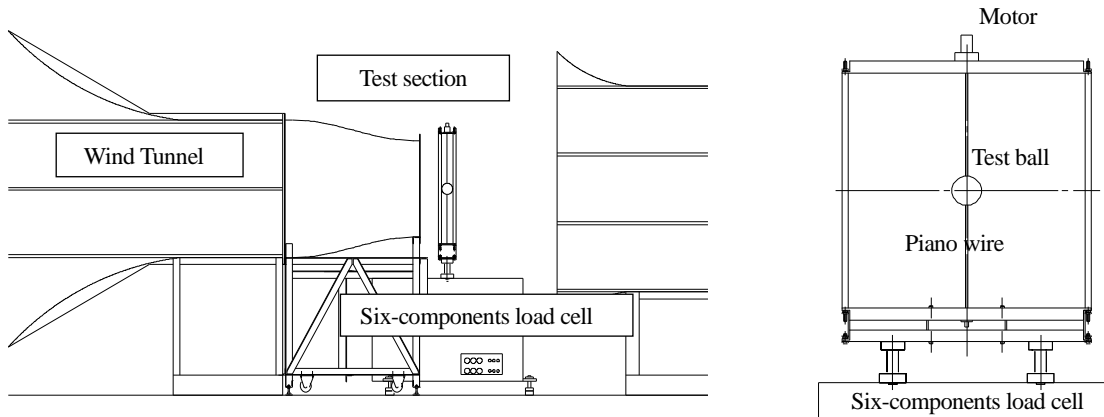


Fig.4 Wind tunnel and hydrodynamic force measuring device.

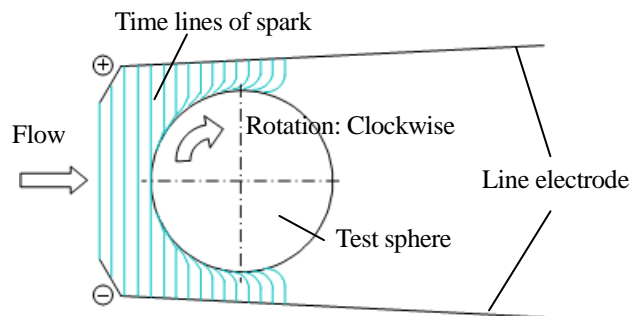


Fig.5 Spark tracing method and electrodes

実験は抗力と揚力が風速 $U=5\sim 35(\text{m/s})$ の範囲(レイノルズ数 $Re=2.3\times 10^4\sim 1.6\times 10^5$)で5m/s毎の間隔で測定している。また、ボール表面のシームの影響を調べるために流れの中に図6のような座標軸を考え、流れに対するシームの影響を調べるため、シーム角 θ を $0^\circ\sim 360^\circ$ の範囲を時計方向に 10° 毎変化させて、その角度ごとの抗力、揚力の測定を行った。また、供試ボール回転時の揚力、抗力の測定は、風速 $U(\text{m/s})$ 毎に、ボールの回転を時計方向に $0\sim 3500\text{rpm}$ の範囲で回転させ、この回転数に対するボールの周速度 $V(\text{m/s})$ との比、即ちスピレイト $\alpha=V/U$ の値として、 Re, α , および抗力係数 C_D , 揚力係数 C_L との関係データとして整理している。ボール周りの流れは火花追跡法により可視化している。図5は供試ボール周りの流れ場を可視化するための電極配置図を示している。電極は $300\mu\text{m}$ のタンゲステンワイヤーを供試球体の赤道面と同じ位置に、広がりを持たせて空間上に設置し、一方のワイヤーを負極、他方を陽極とする。火花は高電圧の高周波パルス発生器から、一定の放電所要電圧(250kV)の基に、火花パルス間隔を $250\mu\text{s}$ で40~50本とばし、その火花によるタイムラインの可視化観察を供試球体上部に設置してあるカメラより記録する。抗力、揚力の測定値より、次式(1),(2)より抗力係数 C_D , 揚力係数 C_L を算出している。

ここで、A: 供試ボールの投影面積、 ρ : 空気の密度 U : ボール周りの一様流速 D : 抗力、 L : 揚力

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

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

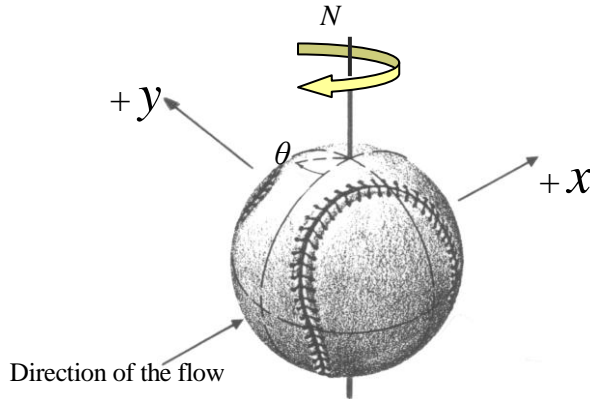


Fig. 6 The coordinate for the flow

4. 実験結果及び考察

4.1 レイノルズ数の変化に対する各ボールの抗力係数

図7は各ボール Type のレイノルズ数(Re)に対する抗力係数の変化を示している。これより,Smooth Type のボールは本実験の Re 数範囲において, 抗力係数 C_D はほぼ $C_D=0.45$ で一定であり, 他者の結果における抗力係数ともほぼ一致しており, 亜臨界領域であることがわかる。また, 滑面球における臨界 Re 数は 3.0×10^5 付近に存在すると言われている⁽¹¹⁾。これに対し, 球体表面にディンプルやシームの表面構造を有する各 Type のボールは Re 数が增大するに従い急激な抗力係数の低減する領域, 即ち滑面球の臨界 Re 数より低い Re 数で臨界領域が存在していることがわかる。また, 抗力係数が最小値に達した後, Re 数が增大しても抗力係数がほぼ一定になっている領域 (超臨界領域) が存在していることもわかる。D Type は球体表面に円弧形的ディンプルを均等に 462 個配列したもので, この実験の供試ボールの中では臨界領域が一番低 Re 数領域にあり $Re=0.6 \times 10^5$ 以上での抗力係数はほぼ $C_D=0.275$ 一定であり, 超臨界での C_D 値が他のボールの値より大きい。B, C Type は表面のディンプル模様は同じであるが, 表面にシームを突起させたボールは C Type である。この両者とも亜臨界領域、及び超臨界領域での抗力係数の変化は同じようであるが, C Type の臨界領域が B type より臨界点の値は小さく Re 数の高い方で生じている。従って, 超臨界領域での C_D 値は B Type の C_D より低減している。A Type は現在公認ボールとして使用されている第 6 代目のボールであり, 空力設計に基づいている。表面のディンプルは極小さくし, 1922 個の極小ディンプルを見た目にも美しい三角模様デザイン化しており, シーム模様はこれまでよりシャープに作られている。供試ボールの中では臨界領域 ($Re=1.2 \sim 1.5 \times 10^5$) が高 Re 数領域で最少抗力係数も小さい。即ち, 変化球はボールの回転による場合と非回転でボール周りの流れの非対称性(ボール表面の構造: シーム)による場合及び飛翔速度が臨界領域へ突入する場合が考えられる。ここにこのボールの特徴があり, バットで打って遠くへ飛距離が伸びる(Re 数の大きいところに超臨界領域があり且つ抗力係数が小さい), また, 時速 100km 前後に臨界領域が存在する。この臨界領域にボールが突入するとボールは「揺らぐ」「変化」する。E Type のメジャーリーグボールは軟式野球ボール B Type の空力特性に類似している。図 8 (a),(b),(c)は A Type, B Type, C Type のシーム角を $\theta=0, 20, 40, 50, 70, 90^\circ$ に変化させたときの抗力特性を示したものである。いずれの Type も Re 数の変化に対し抗力係数 C_D が一定な値を示している亜臨界領域、Re 数の変化に対し抗力係数 C_D が急に低減する臨界領域が存在している。A Type はこの Re 数範囲ではいずれのシーム角 θ に対しても最少抗力値を示すまでに至っていない。B type, C type は抗力係数が最少抗力係数を示す臨界点後 Re 数の増加に対しやや増加傾向を示す超臨界領域が示されている。いずれの Type もシーム角 θ に対し臨界領域での抗力係数が変化している。

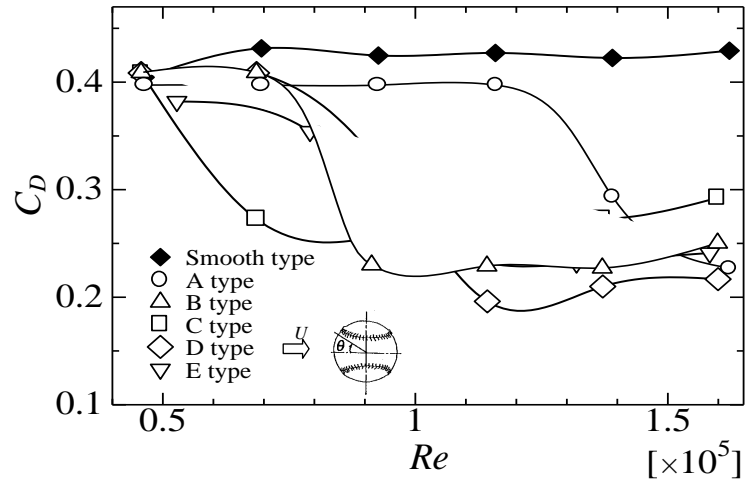


Fig. 7 The drag coefficient for Re number of each ball Type

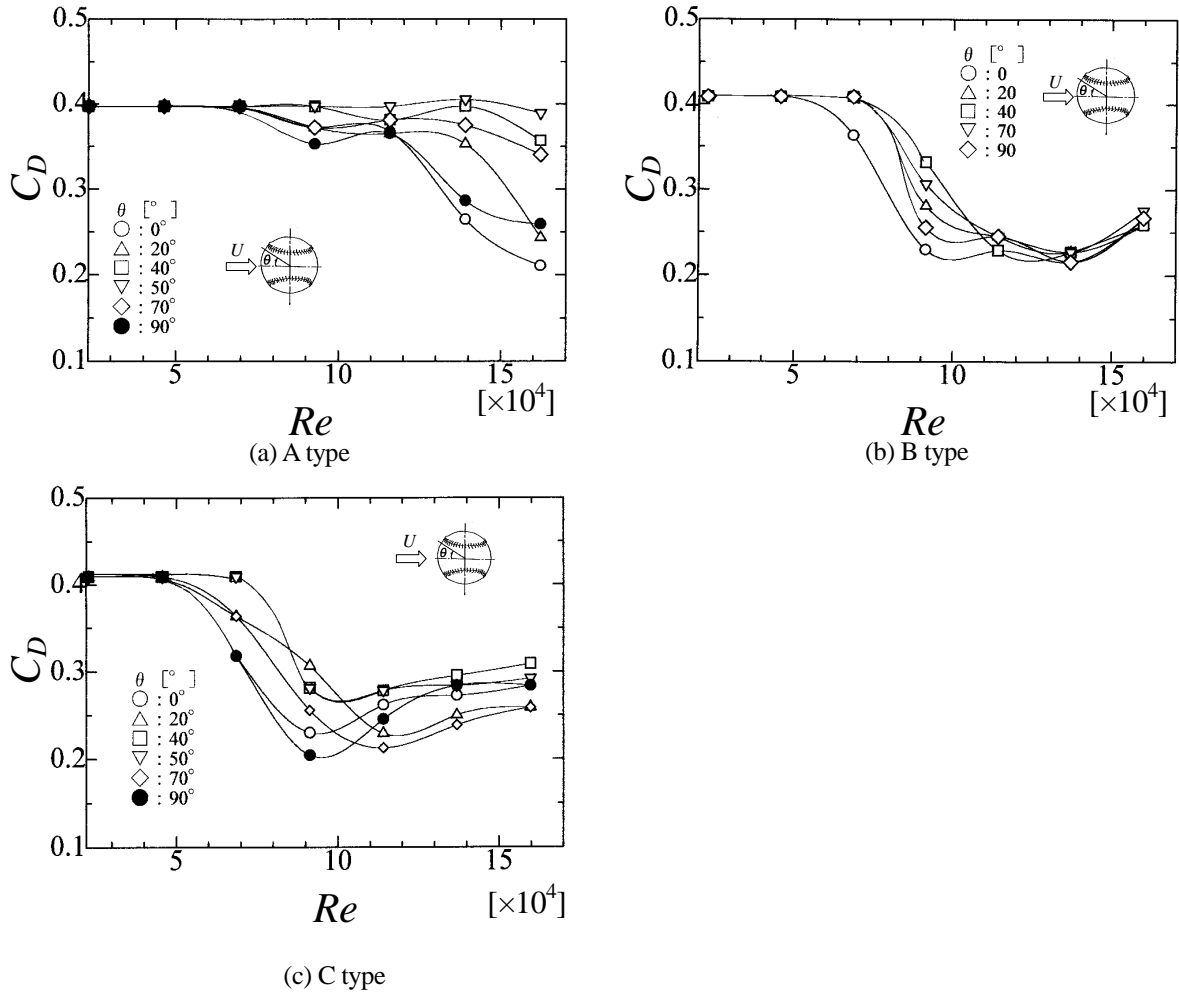


Fig.8 The change of the drag coefficient for the seam angle of the ball.

特にシーム角 0° と 90° の場合がほぼ最少抗力係数値になっていることがわかる。これはどちらのシーム角もシームにより流れが剥がれ再付着した後表面の流れが剥がれることにより、剥がれる位置が下流に移動し後流を形成する領域が小さくなるために、結果として抗力係数 C_D は小さくなると考えられる。 Re 数が増加するに従い

剥離点は上流に移動し後流が徐々に大きくなることにより抗力係数 C_D は増加するものとする。しかしながら、シームは対称なためにボール周りの流れはほぼ対称となり揚力の発生を抑えているとも考える。

4.2 火花追跡法による供試ボール周りの流れの可視化結果

図9は火花追跡法による供試ボール周りの流れと抗力係数との関係の一例として A Type と C Type の可視化を示している。ここではシーム角 $\theta=0^\circ$ の場合である。A Type に関し、(a),(b)の場合は亜臨界領域であり可視化結果より剥離点並びに後流の規模は同じ程度である。従ってその領域での抗力係数は図7から $C_D=0.4$ である。また、(c)は臨界領域にあり、剥離点はかなり下流に位置し、後流の規模が亜臨界領域より小さく、抗力係数 C_D も小さく、可視化結果とも対応していることがわかる。これに対し同じ Re 数で C Type を比較している。Re 数 0.5×10^5 の亜臨界領域の可視化結果は A Type と C Type は類似しており後流の規模もほぼ等しく、抗力係数も一致している。しかし、(b)において C Type は臨界領域に入り A Type より抗力係数が低減し、後流も小さい。また、(c)は、超臨界に入り臨界点後のあと Re 数の増加により抗力係数は徐々に増加するため、可視化結果も臨界領域より後流が大きくなっていることが観察される。

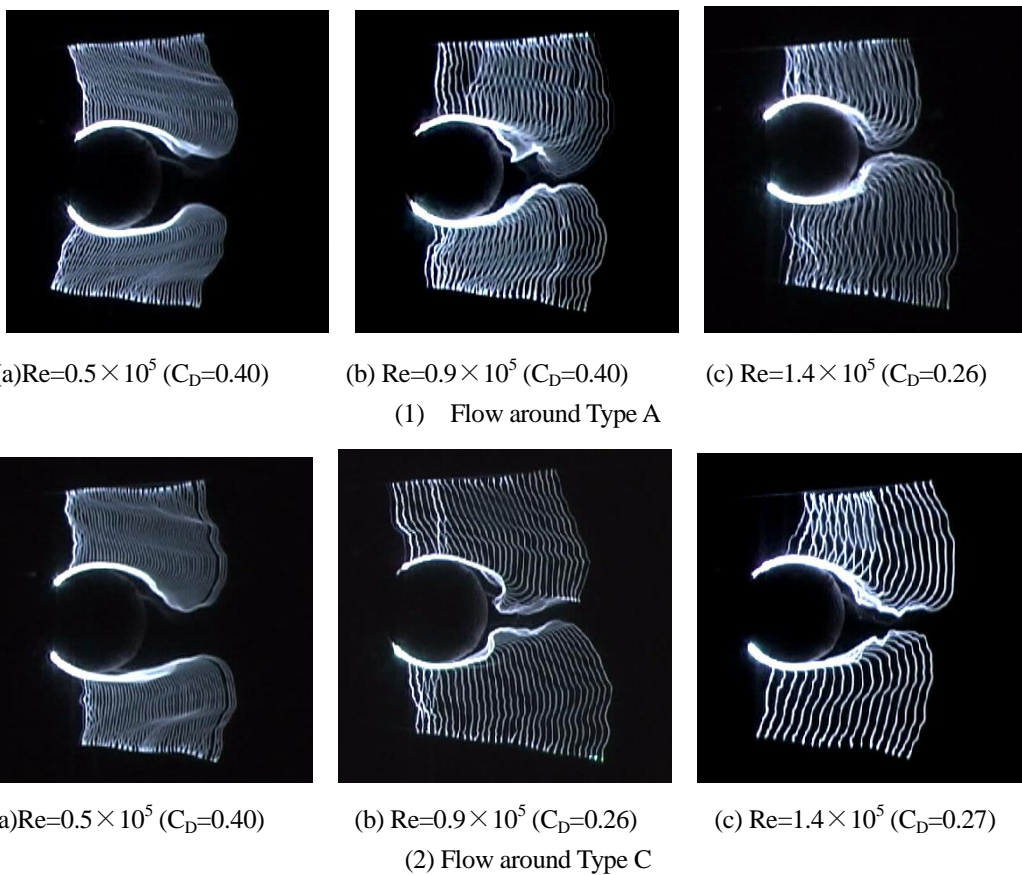


Fig. 9 Flow visualization ($\theta=0^\circ$) of the test ball (Type A, Type C) circumference by the spark tracing method.

4.3 供試ボールのシーム角に対する揚力の変化

図10は Type A,B,C,E のボールが飛行速度 $U=15\text{m/s}$ と $U=30\text{m/s}$ の場合に対して、ボールが一回転するとき、ボールのシーム角に対する揚力(y 方向の力)を示している。縦軸は揚力に対しボールの重量(mg)で除して無次元化している。これより、揚力はいずれの Type も流速に関係なく一回転する間に正、負の揚力が交互に発生し、4つのピーク揚力が発生していることが見て取れる。正の揚力は $20\sim 40^\circ$ 付近で最大になり、 $40\sim 60^\circ$ 付近で負の最大揚力となる。また、飛行速度が大きいほど揚力も大きく、A Type の公認軟式ボールと E Type のメジャーリーグボールの揚力挙動が類似して大きく変化していることがわかる。しかし、E Type のメジャーリーグボールは負の揚力から正の揚力へ変化する場合、小刻みな揚力の発生を伴った後ピーク揚力に達している。B Type と C Type の旧公認軟式ボールは A Type と E Type の周期にほぼ沿って変化しているものの流速を増しても揚力はあまり増加していないことがわかる。これは、ボール表面のシーム構造に依存して

いると考えられる. 図11はメジャーリーグボールE Typeの $\theta=0^\circ$ と 40° におけるボール周りの可視化であり, $\theta=0^\circ$ の場合,シームが対象のため剥離点も対称である.

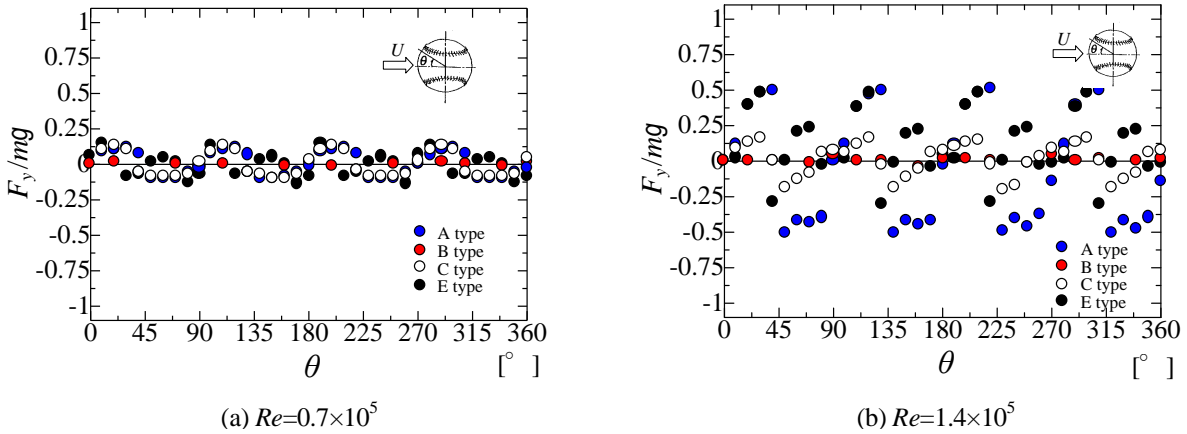


Fig.10 The aerodynamic lift of y direction for the seam angle of the Test ball.

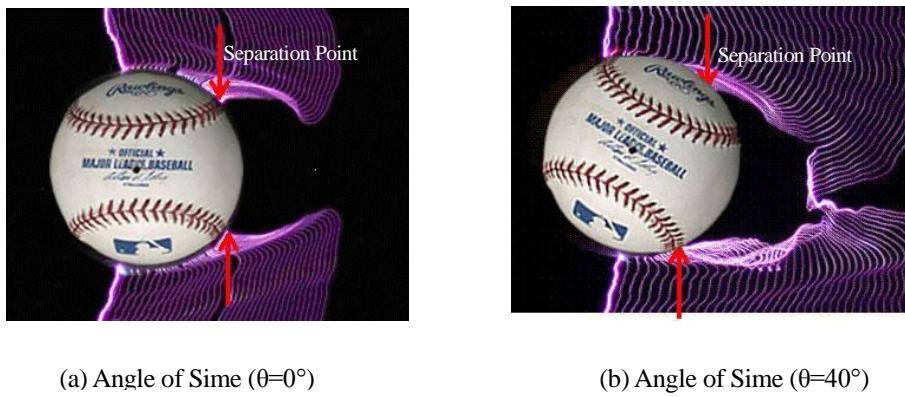


Fig.11 Visualization around ball by spark tracing method ($U=30\text{m/s}$)

これに対し, $\theta=40^\circ$ の場合の剥離点は上下で異なり後流が右下に形成され,揚力が上向きに発生していることがわかる.

4.4 ボールが回転しながら飛翔するときのスピンの対する揚・抗力特性 図12はSmooth ボールのRe数が $(0.7\sim 1.6) \times 10^5$ まで変化した時のスピンの対する揚・抗力係数の変化を示している. 抗力係数 C_D

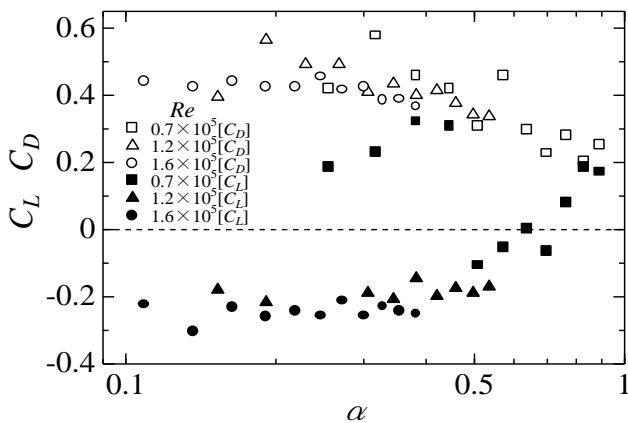


Fig.12 Lift and drag coefficient to α of Smooth ball

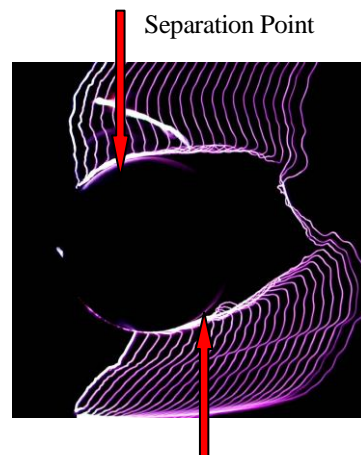


Fig. 13 Visualization around Smooth ball ($\alpha=0.4$, and negative lift)

は Re 数に関わらず α が約 0.1~0.4 付近までは $C_D \doteq 0.45$ 一定であるが、この α より大きくなるに従い C_D は徐々に低減し、 $\alpha \doteq 1.0$ で $C_D \doteq 0.2$ である。これに対し、揚力係数 C_L は $\alpha = 0.1 \sim 0.4$ 付近までは、 $C_L \doteq -0.2$ とほぼ一定な値を示し、 α が 0.4 より増加するに従い、 $\alpha \doteq 0.7$ で約 $C_L = 0$ となり、更に α が増すに従い正の揚力となり、漸次揚力は増加傾向を示している。 α に対し負の揚力の発生は、ボールが時計方向に回転して飛翔するとき、回転方向（増速側）とは反対側の減速側の剥離点が増速側の剥離点よりも下流に移動するため、ボールに逆マグナス力が働き、減速側に負の揚力が発生するためである⁽¹¹⁾。図 13 は火花追跡法による回転する Smooth ボール周りの可視化である。増速側の剥離点は減速側の剥離点よりも上流に位置し、従って、後流の形成が右上がりとなり減速側に負の揚力の発生しているのがわかる。

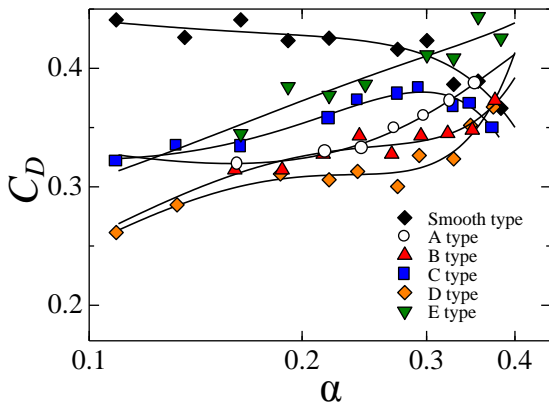


Fig.14 Drag coefficient to spine rate ratio α ($Re=1.6 \times 10^5$)

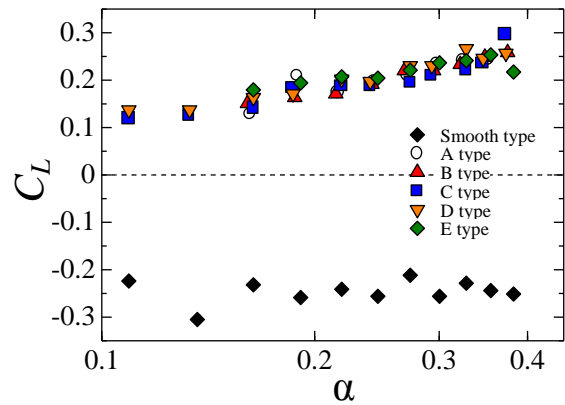


Fig.15 Lift coefficient to spine rate ratio α ($Re=1.6 \times 1.6 \times 10^5$)

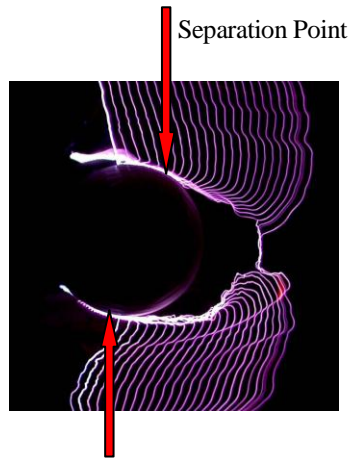


Fig.16 Visualization around A Type ($\alpha=0.4$: Lift of positive)

図 14 はスピイレイト α の変化に対する抗力係数を示している。Smooth ボールはスピイレイト α が増加するにつれ、抗力係数 C_D は徐々に減少している。しかしながら、これに対し、他の供試ボールは Smooth ボールとは異なりいずれの供試ボールも α が増すに従い抗力係数は右上がりに同じ傾向で増加している。しかしながら、メジャボール E Type は α の変化に対する抗力係数の増加は大きくほぼ直線的に増加している。図 15 はスピイレイトの変化に対する揚力係数をしめしている。これに対し、第 6 代目軟式公認ボール A Type は E Type とほぼ同じように α の増加と共に平行に抗力係数が増加しているものの全体的に C_D は約 0.5 だけ低減している。第 5 代目ボールの C Type は E Type に沿って $\alpha=0.3$ まで増加し、 $\alpha > 0.3$ では徐々に減少している。B Type 及び D Type は表面にディンプルが付けられており、B Type のシーム模様は球体表面に突起していない。ディンプル効果により供試ボールの中では抗力係数が一番低減している。Smooth ボール はスピイレイトの変化に対し負の揚力を示しているが他の供試ボールはスピイレイトが $\alpha=0.1 \sim 0.4$ と増加するに従いいずれの供試ボールも直線的に $C_D=0.1 \sim 0.25$ と漸次増加してい

る。図 16 は軟式野球ボール第 6 代目 A Type の可視化であり,増速側の剥離点は下流側に,減速側の剥離点は上流側に移動し,後流が右下に形成され揚力が増速側に発生していることが観察される。

5. 結 言

本報では歴代の軟式野球ボールの変遷を眺め,代表的な公認軟式野球ボールに対しメジャーリーグボールの空力特性との比較,及びこれらの代表的なスポーツボールに対し基本的な Smooth ボール,Smooth ボールの表面にデインブルを施した場合,シーム模様が球表面より突起しない場合等の非回転, 回転時の空力特性の比較検討を行っている。さらに, 代表的な供試ボール周りの流れを火花追跡法により可視化した。これらの実験結果より軟式野球ボールとメジャーボールの特性比較を行い以下の事が明らかになった。

- (1) いずれの供試ボールも Smooth ボールの空力特性と同様に亜臨界領域, 臨界領域及び超臨界領域が存在している。供試ボールの中での臨界領域は第 6 代目軟式公認ボールが高 Re 数側に臨界領域が存在していた。
- (2) 供試ボールの表面構造により空力特性に揚力係数, 抗力係数に差異が生じた。
- (3) 供試ボールの Re 数変化において, シーム角を変化させると臨界領域での抗力係数に差が生じた。
- (4) シーム角を $\theta=0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 変化させると, いずれの供試ボールも 流速に関係なく一回転する間に正, 負の揚力が交互に発生し, 4 つのピーク揚力が発生する。また, 正の揚力は $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 付近で最大になり, $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 付近で負の最大揚力となる。また, 飛翔速度が大きいほど揚力も大きく, A Type の公認軟式ボールと E Type のメジャーリーグボールの揚力挙動が類似して大きく変化していることがわかった。
- (5) Smooth ボールの回転特性は逆マグナス力が生じ負の揚力が発生する。しかし, 他の表面構造を有する供試ボールはマグナス力により正の揚力を発生した。
- (6) スピンレイト α の増加に従い Smooth ボールの抗力係数は減少するが, 他の供試ボールは α の増加に伴いほぼ直線的に増加する。供試ボールの中でメジャーリーグボール E Type の抗力係数が最も大きく, A Type の軟式ボールは同じような変化するものの抗力係数は全体的に $C_D=0.5$ 程度小さい。
- (7) 火花追跡法によりボール周りの可視化を行い, 剥離点の位置及び回転を伴った場合のボール周りの流れを観察することができた。

文 献

- (1)大島信雄：解説野球ルール, 成美堂出版, 1986. pp. 24, 25.
- (2)名取幸一：図解軟式野球ルール, 成美堂出版, 2000, pp.28, 29.
- (3) Robert G.Watts and Ricardo Ferrer : The lateral force on a spinning sphere : Aerodynamics of a curveball, Am.J.Phys.55(1987), pp.40-44.
- (4) Robert G.Watts and E.Sawyer : Aerodynamics of knuckleball, Am.J.Phys.43(1975), pp.961-963.
- (5) R.D Mehta : Aerodynamics of Sports Ball, Ann.Rev. Fluid Mech.(1989).
- (6) 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
- (7) 溝田武人, 久羽浩幸, 岡島厚：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
- (8) 上野敦史, 綿貫忠晴, 久保田弘敏：フォークボールの空気力学, The 27th JSASS Annual Meeting, 1996, pp.90-91
- (9) 姫野龍太郎, 佐藤早苗, 松本秀樹：野球ボールの縫い目が流れに与える影響の数値計算～第 2 報～ 第 12 回数値流体力学シンポジウム, 1998, D3-2
- (10) K. Aoki, Y. Kinoshita, J. Nagase, Y. Nakayama, Dependence of Aerodynamic Characteristics and Flow Pattern on Surface Structure of a Baseball, Journal of Visualization, Vol.6, No.2, 185-193, 2003.03.
- (11) Taneda, 1957, “NEGATIVE MAGNUS EFFECT”, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Vol. V, No. 20
- (12) www.baseball-museum.or.jp