

《小特集》

ゴルフボールと野球ボールの飛翔特性に対する流れの可視化

青 木 克 巳*

ABSTRACT In this report, the aerodynamic characteristics such as lift and drag of the golf ball and baseball ball are studied experimentally by comparing the characteristics of a smooth surface ball and sphere having different surface structures; the flow velocity distribution is also measured quantitatively using the spark tracing method. From the results, the flow patterns of these golf ball and baseball balls and the flow mechanism around the ball have been clarified.

1. はじめに

ボールを扱うスポーツには野球、バレーボールのように腕や手を使用した投擲によるもの、サッカーのように脚を使った蹴球、卓球、ゴルフ、テニス、野球等のように用具を使った打撃によるものなどがある。これらの球技はいずれもボールの大きさが異なり、ボールの飛翔速度、スピン、変化、飛距離等の特性によってゲームを盛り上げ、見る人を楽しませてくれる。ボール周りの流れはその境界層の剥離点がレイノルズ数によって変化する基本な流れであり、また当然のことであるが非回転球と回転球では飛翔特性が異なる^{1,2)}。非回転球では、我々が対象としている実用飛翔速度(球技の扱う範囲のボールの速度)範囲であっても、あるレイノルズ数 $Re (= U \cdot D/\nu$: U ボールの飛翔速度, D : ボールの直径, ν : 流体の動粘度)範囲では一定な抗力係数を示す亜臨界領域、あるレイノルズ数から抗力係数が急に減少し最小抗力係数値を示すまでの臨界領域、またこれ以上のレイノルズ数でほぼ最小抗力係数値を保つ超臨界領域と抗力係数はそれぞれのレイノルズ数領域において特有の値を示す¹⁾。このようにレイノルズ数の各領域において抗力係数が変化する場合はボール周りの流れ様式はどのようにになっているのだろうか。また、後者の回転球では回転軸に垂直な力(マグナス力)が働き、野球のカーブやシュート、ゴルフのスライスやフックなど我々に親しみのある変化を見せてくれる。しかしながら非回転時のレイノルズ数特性の各領

域で回転させながら飛翔させると、飛翔速度(U)に対しボールが回転するスピード(v :周速度)との比、即ちスピンレイト $\alpha (= v/U)$ により、マグナス力(揚力)並びに抗力がそれぞれ特有の値を示すことが報告されている²⁾。例えば、スピンを伴うゴルフボールで200 mの飛距離をだす人が、同じ条件で滑面球を打ったらどうであろうか。飛距離は100 mも飛ばない。これはあるレイノルズ数においてスピンレイト α により滑面球特有の負のマグナス力が発生するからである²⁾。また、球技で扱われている各種のスポーツボールの表面デザインは何のためであろうか。単なるデザインであろうか。これまでのスポーツボールはボール表面デザインと空力特性との関連を考えていたであろうか。ゴルフボールに関しては現在のようなゴルフボールの形態を整えたのは15世紀のゴルフ発祥の地であるスコットランドであり、フェザリボールからガッタバチャー(1845年頃)、その後ガティボール、糸巻きボールの原形といわれたハスケボール(19世紀末)へと、そして今日のディンプルボールの発明が英国人テラから特許(1905年)として出された。このようにゴルフボールの変遷はあるが、流体力学的に表面デザインとの関連付けが行なわれてきているのは近年のことである。他のボールに関しても、例えば野茂や佐々木のフォークボールが何故あんなに変化するのだろうか。硬式ボールのシームに対するボールの変化が溝田らの実験³⁾や姫野の数値解析⁴⁾により明らかにされてきている。また著者も硬式ボールおよび軟式ボールの表面構造に対する非回転時、回転時の飛翔特性と流れ様式の関係を可視化実験の観点から明らかにしてきている^{1,2)}。このように、野球ボールのシームが飛翔特性にどのように影響し流れにどのように関係しているか見る事が出来ると

Flow Visualization around Balls for the Flying Characteristics of Golf Ball and Baseball Ball. By Katsumi Aoki (Graduate School of Engineering, Tokai University).

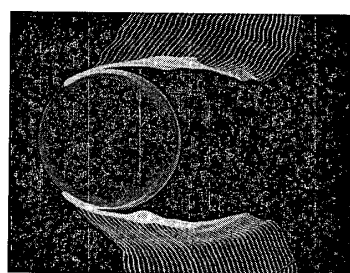
*東海大学工学部機械工学科

フットボールの変化を理解できるものと思われる。ここでは、紙面の都合上スポーツボールの中で特に、野球ボール(硬式並びに軟式)とゴルフボールの非回転ならびに回転時の飛翔特性を実用飛翔速度でボール周りの流れを種々の可視化手法により明らかにする。

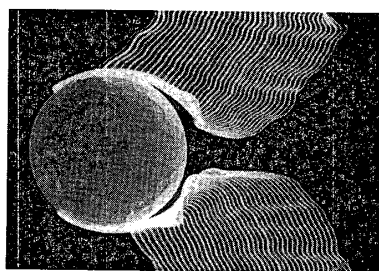
2. ゴルフボールの飛翔特性とボール周りの流れ：PIV並びに油膜法・火花追跡法、煙流脈法、アルミ懸濁法による可視化観察

一般にゴルフボールの弾道に影響を与える要因を大きく分けると、インパクト時(初速度、スピン、打ち出し角)と弾道時(打撃後)の初期条件に起因する空力特性であると思われる。ここでは、打撃後のゴルフボールの飛翔特性とボール周りの流れとの関係を種々の可視化により明らかにしてみたい。図1はレイノルズ数 $Re = 7 \times 10^4$ の時の滑面球とゴルフボール周りの流れを火花追跡法により可視化したもので、誰が見ても流れ様式が異なることが分かる⁵⁾。滑面球に比べゴルフボールの方がボールに沿って流れ、剥離点が下流にあり、後流の幅が極端に狭いことが分かる。当然として抗力係数もこの領域では滑面球体の $C_D = 0.45$ 付近であるのに対しゴルフボールでは約 $C_D = 0.3$ 程度でその違いが流れ様式にも現れてくる⁵⁾。ここでは、ゴルフボールの飛翔特性に対する流れ場を可視化により見てみたい。図2はディンプル数 $N_D = 184$ 個の場合の非回転時

における Re 数に対する抗力係数 C_D と揚力係数 C_L の関係を示している。これらより、滑面球の Re 数特性と同様にディンプル付き球体においても、抗力係数 C_D が一定な値を示す亜臨界領域、 C_D が急に減少しだし最小 C_D 値(臨界点)に達するまでの臨界領域、臨界点以降の Re 数の増加において、ほぼ最小 C_D 値を持続している超臨界領域の各領域が存在していることが分かる。また、揚力係数 C_L は物体が回転を伴うことによりマグヌス力が働き揚力発生につながるということが一般的に知られているが、亜臨界から臨界領域への変わり目である Re 数が約 $Re = 0.7 \times 10^5$ で C_L 値がピーク値を示し揚力が発生していることが考えられる。このような流れ場を可視化で見ることは非常に興味深い。図3(a)～(c)は図2の Re 数- C_D , C_L 特性において $Re = 0.4 \times 10^5$ [亜臨界領域], $Re = 0.8 \times 10^5$ [臨界領域], $Re = 1.2 \times 10^5$ [超臨界領域]でのPIVによるディンプル付き球体(ディンプル数184個)後流の速度分布の解析結果と油膜法による表面の可視化並びに火花追跡法による流れ様式のそれぞれの可視化結果を示したものである。可視化結果は図2において矢印で示したレイノルズ数を示している。図3(a), (b), (c)は供試球体周りの流れをカラーベクトル表示したもので分布は赤色が最大流速を示している。即ちいずれの Re 数領域においても球の外周に沿った後流では最大流速になっている。また、後流で楕円形双子渦に似た循環領域が見られ、後流中心部は周囲の逆流速度より小さな流れになっている。亜臨界領域では、後流で逆流領域の占める割合が他の領域より非常に大きく、その幅 B は球体直径 $d \cong B$ 程度で、下流方向には $1.5 \sim 2 \times d$ 程度の大きさになることが分かる。また、臨界領域では逆流領域が小さいが偏りその領域内の流れは亜臨界領域の流れより非対称性が強くなっている。このようなことからこの領域で揚力の発生が理解できる。超臨界領域では球体後流の逆流領域が小さくほぼ対称



(a) Smooth



(b) ゴルフボール

図1 滑面球およびゴルフボールの非回転飛翔時のボール周りの可視化 [$Re = 7 \times 10^4$, 火花追跡法]

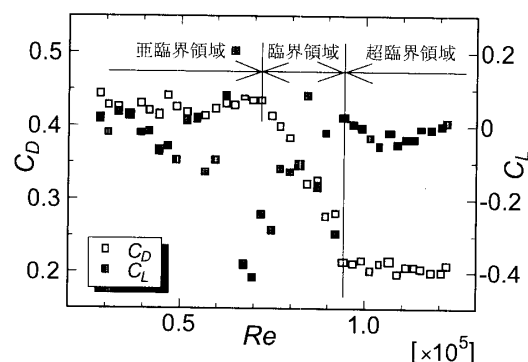


図2 Re 関数に対する揚抗力係数

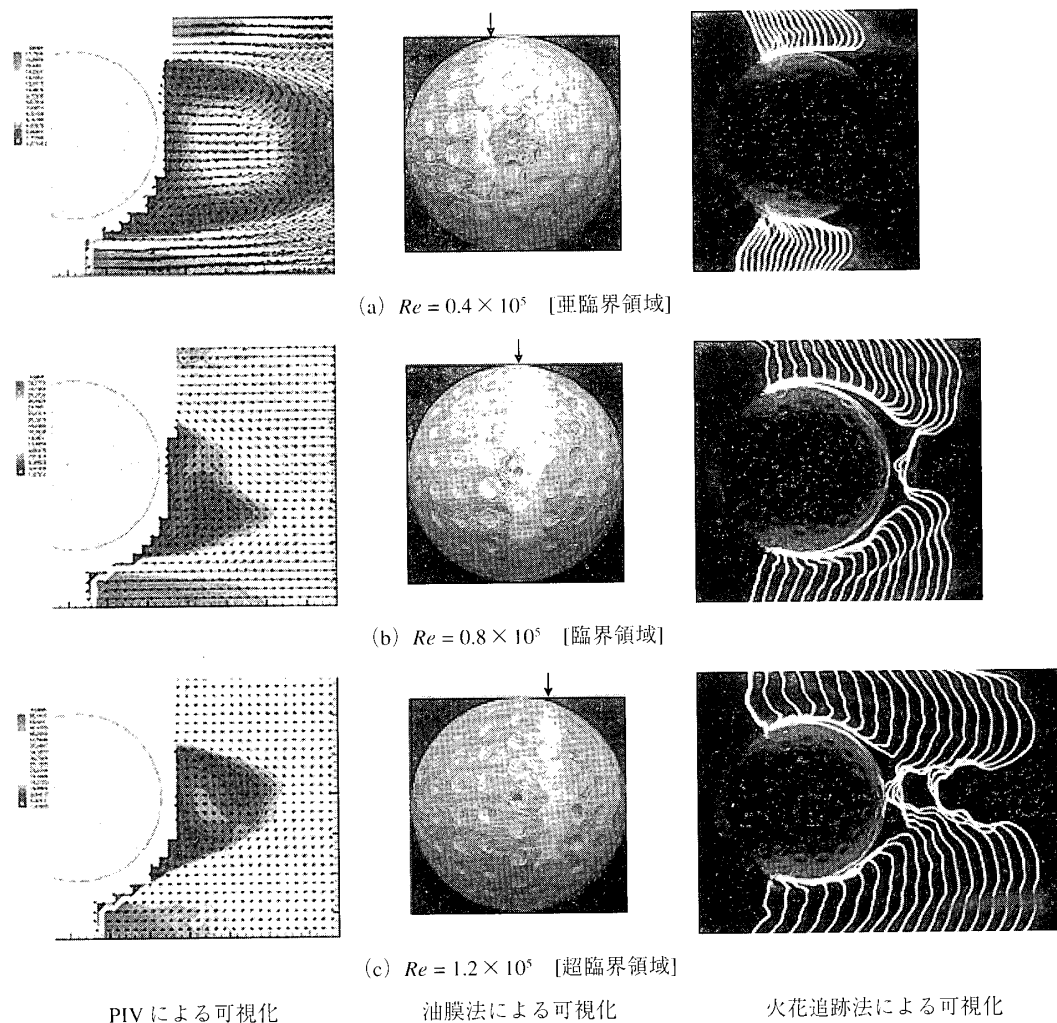


図3 PIV, 油膜法, 火花追跡法による球体周りの流れの可視化 $[N_D = 328]$

的な流れとなっており剥離点が亜臨界領域での剥離点よりかなり下流にあることが推測される。このことは抗力低減につながる事が分かる。

油膜法は物体表面に適度な粘性のオイル(例えば流動パラフィン)にアマニ油と酸化チタンを少々加えたものを刷毛状のもので薄く塗布し、流れによって表面のオイルが拭い去られ、流れの剥離の境界が観察できる。図3(b)より球体表面の流れを観察すると剥離点が観察できる。亜臨界領域では剥離点は 82° 前後であるのに対し、臨界領域では 100° 付近となり超臨界領域では 105° 前後と変化していることが分かる。図3(a)は火花追跡法により可視化したものである。供試球体には淀み点からそれぞれ $\pm 45^\circ$ の赤道上に $300\mu\text{m}$ のタングステンワイヤーの先端を針状に尖らせた電極を球表面上に 0.1mm 突き出したものをマイナス極とし、他方を供試球体の両側に同一レベル面の約 30mm の空間に同一針状電極をプラス極として設置した。実験条件として、

高圧高周波パルスの供給電圧を 50kV 、パルス間隔を $90\mu\text{s}$ 、パルス数を20本として、観察は供試球体上方 300mm の位置にデジタルカメラ(シャッタースピード：開放)を設置し撮影した。

可視化結果は供試球体周りの流れがタイムラインとして得られる。図(a),(b),(c)の順にタイムラインの間隔が伸びているのは流速がタイムラインの間隔に比例しているので、流速が増大していることを示す。また図より球体周りに沿った流れが剥がれていく様子が分かる。亜臨界領域では 80° 付近で流れが剥がれているのに対し、臨界領域($90^\circ \sim 100^\circ$)、超臨界領域(剥離点約 105° 前後)と剥離点は下流へと移動すると共に後流の幅が徐々に狭くなっていることが明白である。図(b)の臨界領域のタイムラインを良く視ると下側の球体近傍のタイムラインの間隔が上側のタイムラインの間隔より広がっていることが分かる。これは下側の流速が上側の流速より大きいことを示している。さらに良

く視ると上側の剥離点より下側の剥離点の方が下流に位置している。従って、この可視化結果より揚力が発生していることが分かり、その向きは上側より下向きに働いていることが分かる。これらより火花追跡法により各レイノルズ数領域での抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L と流れ場との関係が明らかとなった。ここで、ゴルフボールのディンプルが飛翔特性にどのように影響するか、ディンプル数 N_D を0(滑面球)、104, 184, 328, 504と変化させた時のレイノルズ数特性を示したのが図4である。いずれのディンプル数も滑面球の臨界点より低 Re 数側へ移行していることが分かる。またディンプル数が増えるに従い臨界点はより低 Re 数側へ移行していることも分かる。このように各ディンプル数に対し飛翔特性が異なる理由を明らかにするため供試球体表面の流れを油膜法により観察した。図5はディンプル数に対する供試球体周りの流れを油膜法により可視化したもので、剥離点の位置が理解できる。図6はこれらの結果をまとめたもので、ディンプル数に対する淀み点からの剥離点 θ_s を示している。これからディンプル数が増すに従い剥離点が下流に移行していることが分かる。図7はボールが回転しているときの一例であり、滑面球とディンプル数 $N_D = 328$ の場合の、 $Re = 7 \times 10^4$ 、回転数4000rpm(回転速度比 $\alpha = V/U = 0.36$)の時の火花追跡法による可視可結果である。滑面球では

揚力が下に向いているのに対しゴルフボールは上向きに揚力が発生していることが分かる。図8はゴルフボールと滑面球を一樣流速中(流速 $U = 21\text{m/s}$)に置き、ボールを挟んで $300\mu\text{m}$ 程度のタングステンワイヤーを末広がりになるように張り、一方の電極をプラス、他方をマイナスとしてパルス数50本に設定し、非回転と回転数3000rpmの場合における全体の流れ場の可視化を行なった。いずれもボール上流ではタイムラインの間隔が一定であり流速が一樣であることが分かる。供試物体に近づくにつれタイムラインの間隔は狭くなり減速している。非回転時の滑面球では後流に大きな渦が生じるためゴルフボールより大きな穴明き状態になり後流に大きな影響を与えている。また、剥離点がゴルフボールより上流にある。時計方向に回転を伴った場合、滑面球では後流の向きがやや右上がりになり穴が空いた状態で尾を引いた状態となり、ボールの頭がやや左下がりになる。即ち逆マグナスが作用し揚力は下向きとなる。これに対しゴルフボールでは、後流の流れが右下がりとなり揚力は上向きに発生していることが分かる。図9(a),(b),(c)は煙流脈法とアルミ懸濁法によりゴルフボール周りの流れを可視化したもので、前者の図(a),(b)はスモークワイヤー法により $100\mu\text{m}$ のタングステンワイヤーに10mm毎に節を作り、ワイヤ

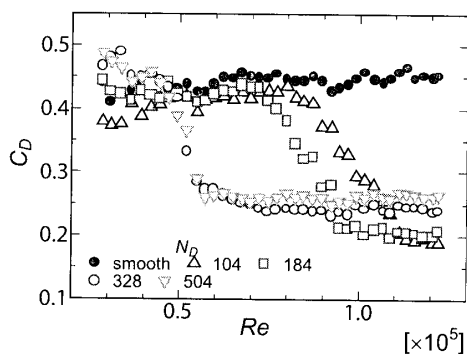


図4 非回転時における Re に対する抗力係数の変化

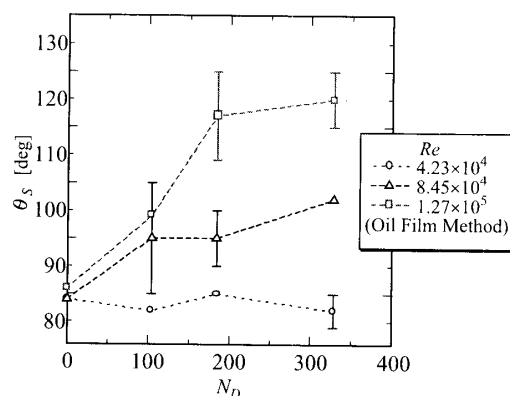
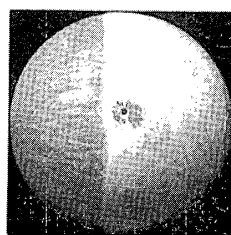
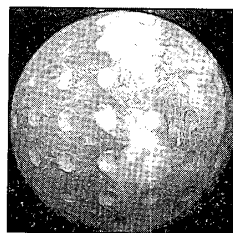


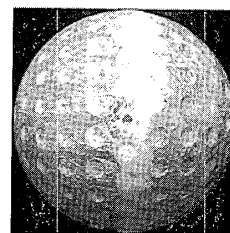
図6 油膜法による剥離点の比較



(a) Smooth, $\theta_s = 82^\circ$ [亜臨界領域]



(b) $N_D = 104$, $\theta_s = 82^\circ$ [亜臨界領域]



(c) $N_D = 184$, $\theta_s = 90^\circ$ [臨界領域]

図5 油膜法による剥離点の可視化 [$Re = 0.8 \times 10^5$]

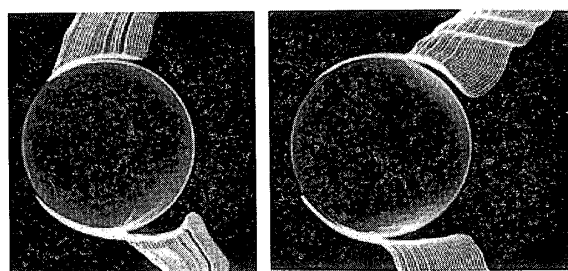
上部から流動パラフィンを通し電圧を掛けると節から気化した煙(ミスト)が流脈となって可視化される。流速は約 10m/s 程度であり、上部からスリット光で照射することにより流脈はクリアに可視化される。図(a)は非回転であるが供試球体近傍の流脈は上流の流れと比較すると、より狭い間隔となっており増速されていることが分かる。また剥離点の位置の推測並びに後流の対称的な逆流領域と周囲の流れの様子も理解できる。また図(b)は時計方向に回転しており、上側では増速し、剥離点は減速側よりも下流に移動する。後流の流れは右下がりの方向に向いており、揚力が上方に発生していることが伺える。後者の図(c)はトレーサにアルミ粉を水流中に懸濁(アルミ懸濁法)させ、その水流中に供試球体を水没させスリット光線(クセノンランプ 1500W)を照射して撮らえたもので、亜臨界領域におけ

る後流の流れを示している。一見低レイノルズ数で見られる双子渦に似た流れが観察されており流脈から流れを細かく視ることが出来る。図3(a)~(c)と対比して視ると球まわりの流れがより深く理解できるものと思われる。

3. 野球ボールの飛翔特性とボール周りの流れ：火花追跡法による可視化観察

野球投手の投げる球種には直球、カーブ、スライダー、フォーク、ナックルなどがありボールの回転の有無により大別されている⁶⁾。一般に変化球の名前の違いは、球筋が曲がる大きさ、方向によるもので、本質的な差はない。変化球の特徴は軌道が一定な方向に曲がることで、これは、ボールに一方の力が働いていることを意味している。このような流れは、球や円柱が回転しながら飛翔している場合に「マグヌス効果」により流れと垂直な方向に力が生じ、曲がることが知られている。これに対し現在大リーグで活躍している野茂や佐々木が投げるフォークボールやナックルボール等は比較的スローボールで、ボールの回転を殺して投げる変化球であり、ふらふらと不規則な軌道をたどって急に落ちたり特異な変化をするので球筋が予測できないことから最も打ちづらい変化球と言われており、このようなボールの変化はボールの縫い目(シーム)によるといわれている^{2,3)}。

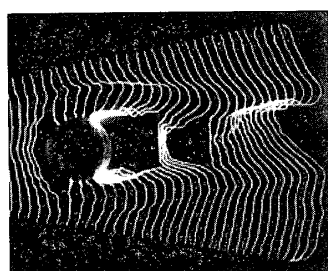
図10はプロ野球で使用している硬式野球ボール(E



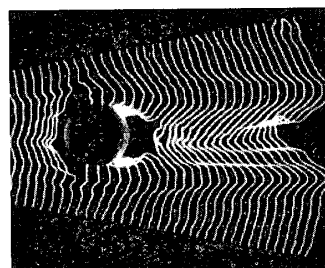
(a) Smooth

(b) ゴルフボール

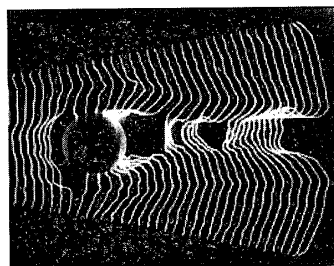
図7 回転飛翔時のボール周りの可視化
[$Re = 7 \times 10^4$, $N = 4000\text{rpm}$, 火花追跡法]



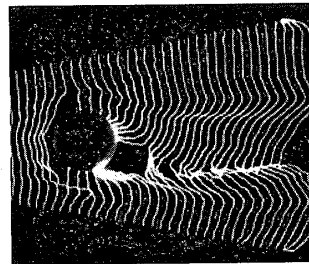
(a) Smooth [0rpm]



(b) ゴルフボール [0rpm]



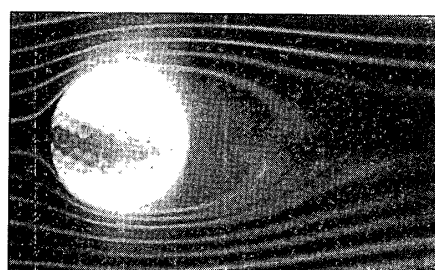
(c) Smooth [3000rpm]



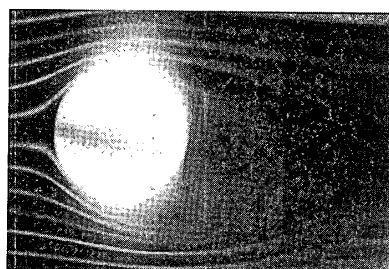
(d) ゴルフボール [3000rpm]

図8 火花追跡法による球体周りの流れの可視化 [$Re = 6 \times 10^4$]

type)を一様流中においてシーム角を $0 \sim 360^\circ$ 変化させた時のボールの主流方向に対する垂直方向の力(揚力)との関係を示している。尚、参考までに現在軟式野球で使用されている公認ボール(C type)も比較のため示している。これらよりボールが一回転する間に揚力も周期的に変化する。即ち、一回転する間に4つのピークが発生し、しかもそのピークは周期的にプラスからマイナスへと変化している。これは、例えばシーム角 0° の場合には揚力が発生していないのに 35° 付近では揚力が発生し、このままの角度でボールが進行すると絶えず垂直方向の力により曲げられることになる。ごくわずかに回転するように投げれば、途中で力の向きが変化するから、球がふらついた状態で変化することになる。図11(a),(b)は硬式ボールのシーム角が 0° と 35° の場合のボール周りの可視可を火花追跡法で観察したものである。シーム角 0° の場合には火花のタイムラインがボールの上下で対称であるのに対し 35° の場合には上部の剥離点は上流に、下部の剥離点は下流にあり、



(a) 非回転 [煙流脈法]



(b) 回転 [煙流脈法]



(c) 非回転 [アルミ懸濁法]

図9 ゴルフボール周りの流れの可視化

揚力が上に向いていることが分かる。また、著者は各種野球ボールの表面構造と飛翔特性の関係を明らかにする為に、図12に示した滑面球(smooth)、硬式野球ボール(E type)、ディンプルボール(D type)をはじめ表面構造を変えた各種軟式野球ボール(A type, B type, C type)の非回転時並びに回転時の特性を明らかにした。図13はシーム角 0° の Re 数に対する抗力係数 C_D の関係を示している。いずれのボールもこの Re 数範囲では滑面球より C_D が小さく、亜臨界領域、臨界領域、超臨界領域が存在し、いずれのボールも臨界点が低 Re 数側へ移行していることが分かる。図14,15は供試球体が超臨界領域($Re = 1.6 \times 10^5$)においてスピンパラメータ α を変化させた時の C_D , C_L を示している。これより C_D は滑面球が他の供試球体より大きく、 α の増加に伴い

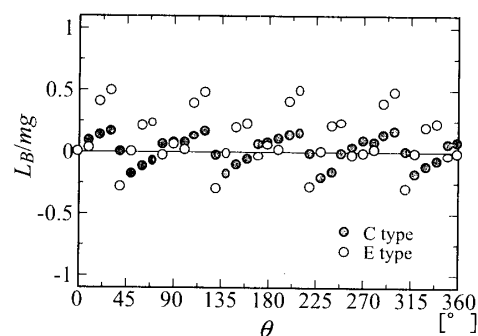


図10 シーム角に対する揚力

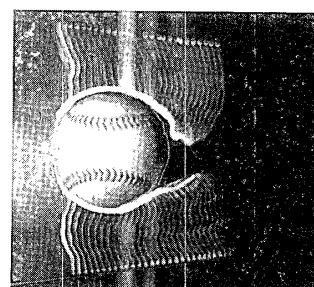
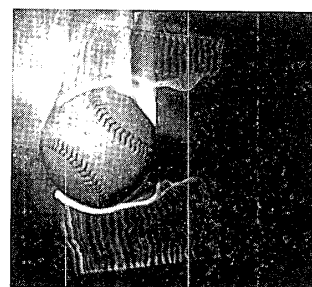
(a) シーム角 0° (b) シーム角 35°

図11 硬式野球ボールのシーム角に対するボール周りの可視化

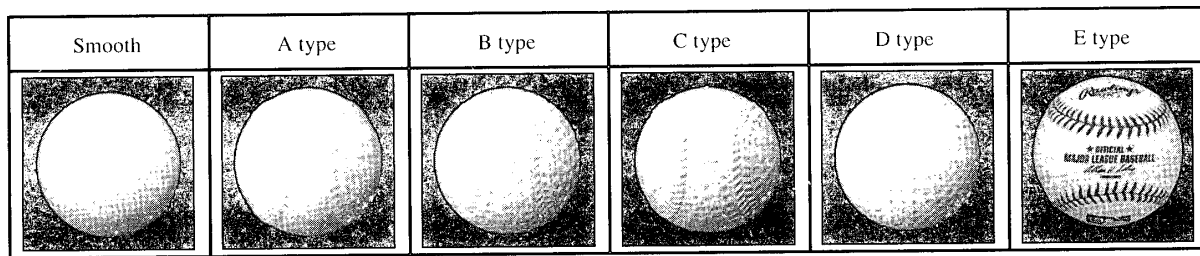


図12 各種野球ボール

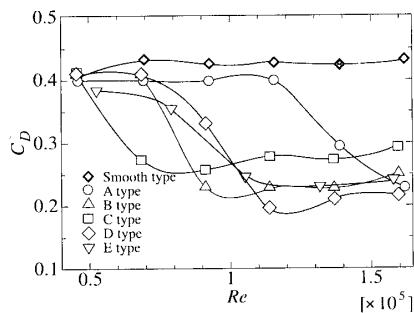
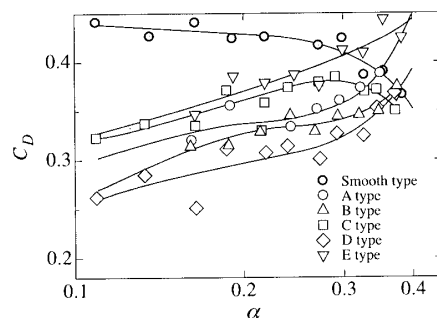
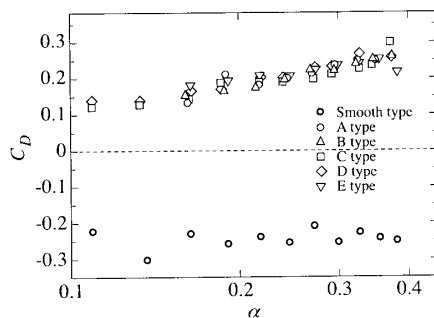
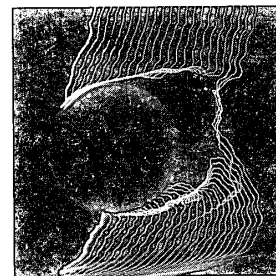


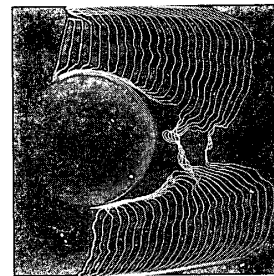
図13 シーム角0°における抗力係数

図14 α に対する抗力係数($Re = 1.6 \times 10^5$)図15 α に対する揚力係数($Re = 1.6 \times 10^5$)

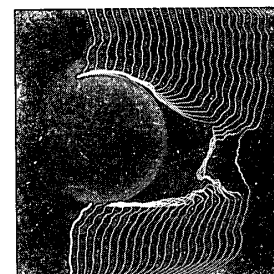
滑面球は減少を示すが、他の供試球体は増加の傾向を示す。また C_L に関し、滑面球では α の増加に対し負の揚力を示し、 $C_L = -2.5$ 前後ではほぼ一定な値を示すが他の供試球体は α の増加と共にいずれも同じ増加傾向を示す。図16(a),(b),(c)は回転数1500rpmで飛翔(速度35m/s)している滑面球、硬式野球ボール(E type)及び



(a) Smooth



(b) 硬式野球ボール



(c) 軟式野球ボール

図16 回転時のボール周りの可視化
($\alpha = 0.16$, $Re = 1.6 \times 10^5$, $N = 1500\text{rpm}$)

公認軟式野球ボール周りの流れを火花追跡法で可視化したものである。滑面球では時計方向に回転しながら右から左へ飛翔しているのにも関わらず、上部の剥離点は上流へ、下部の剥離点は下流へと移動し、逆マグナスが生じ、揚力は下方へ発生していることが分かる。また他のボールより後流幅の領域が大きく抗力が他のボールより大きいことも分かる。図16(b),(c)の硬式、軟式ボールとも上部の剥離点は下流へ、下部の剥離点

は上流へ移行し、揚力が上向きに発生していることが分かる。

4. おわりに

スポーツボールの中でも最もポピュラーなスポーツであるゴルフと野球に注目した。どちらのスポーツも一つのボールに執着し、ボールの変化、飛翔、飛翔距離等によりゲームに変化を与え、見る人にも快感を与えている。近年あらゆるスポーツに対し科学的な面から検討・検証が行なわれその改善により記録等の更新が進んできている。スポーツボールに関しても、コンピュータの発達に伴い種々の専門分野から総合的に研究が行なわれてきて明らかになりつつあるが、まだ充分ではない。特に飛翔特性と流れとの関係は重要である。本稿では視えないボール周りの流れを可視化により明らかにしたつもりであるが、少しでも現象の理解

に興味を持っていただければ幸いである。

参 考 文 献

- 1) Aoki,K., Oike,M., and Nakayama,Y.,: The effect of dimple number on the flying characteristics of a golf ball,The engineering of Sport4, 330/336 (2002)
- 2) Aoki,K., Kinoshita,Y., Hirota,E., Nagase,G., and Nakayama,Y.: The surface structure and aerodynamics of baseballs, The engineering of Sport4, 283/288 (2002)
- 3) 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 淳定常理論による飛翔解析とフラッタ実験), 日本風工学会誌, **62**, 3/13, (1995)
- 4) 姫野竜太郎, 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12回数値流体力学シンポジウム, D3-2, (1998)
- 5) Aoki,K., Nakayama,Y, Ohmura,K, and Okumoto,T.,: Drag and lift on spherical flying object, Proceedings of the first chinajapan symposium on flow visualization, 126/129 (1988)
- 6) 松井秀治: 野球の科学, 講談社, 48 (1981)