

風洞実験技術の進歩と スポーツボールの飛翔の流体力学的研究

溝田 武人*

Progress of Wind Tunnel Experiments and the Research of Sports Ball Aerodynamics

Taketo MIZOTA

1. はじめに

これまで風洞装置を使った実験的手法を中心に、角柱などの非流線形物体のフタツラ現象や硬式野球ボール、ゴルフボール、サッカーボールなどのスポーツボールの飛翔の研究を行って来た。

そこでこの報告の前半では、これらの研究の途上で筆者が関係した風洞実験手法のうちで、その時代において少しは進歩であったかもしれない技術的な開発事例を列記する。すなわち、初期のフラッタ現象の研究では、一様流中で振動する角柱に加わる流体力を精度よく求める強制振動法の技術や、振動する角柱まわりの流線を自作のタンデム型熱線プローブを使って測定した例などを取り上げる。

スポーツボールの飛翔の研究を行うために、乱れ度の少ない風洞装置を製作した。これを使って回転するボールに加わる空気力の精密測定を行うためのボールの安定回転技術の開発を述べた。また最近開発したスモークワイヤ法による観察流速限界を 40m/s にまで可能にした技術について触れる。

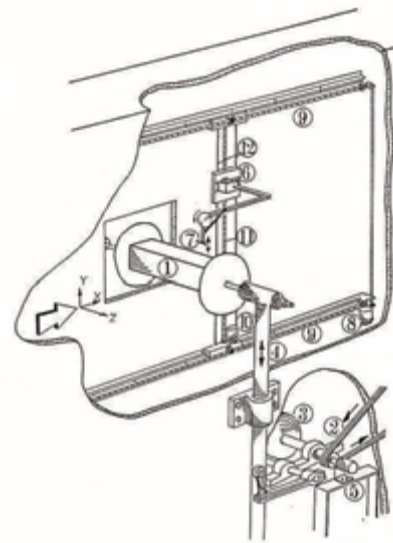
この報告の後半はスポーツボールの研究結果の要約である。すなわち、硬式野球ボールの投手が投げる変化球の中で、ローリングスピナックルボールや 2-シーム、4-シームボールと称されるボールは回転軸がボールの進行方向を向いて飛翔し奇妙な変化をする魔球である。ゴルフボールが左右に曲がるメカニズムと弱回転サッカーボールが魔球的变化をする理由についても触れる。

2. 角柱のフラッタの研究における風洞実験技術

* 日本風工学会, 日本機械学会, 日本流体力学会, 正会員,
福岡工業大学名誉教授
E-mail : mizota@fit.ac.jp

2.1 強制振動法による非定常空気力の測定

流れの中でフラッタを発生する角柱の振動メカニズムを調べるために、作用する空気力を強制振動法¹⁾で調べた。この方法は、Fig.1(a)のように風洞気流内に Active 模型、風洞外部に Dummy 模型を置いて同じように加振さ



(a) Wind tunnel and model set-up of forced oscillation method



(b) Shackle part attached at left hand of the shaft of active model



(c) Gimbal part attached at right hand of the shaft of dummy model

Fig. 1 Forced oscillation methods and shackle and gimbal parts to remove inconvenient mechanical noise. Wind tunnel equals 700mm wide.

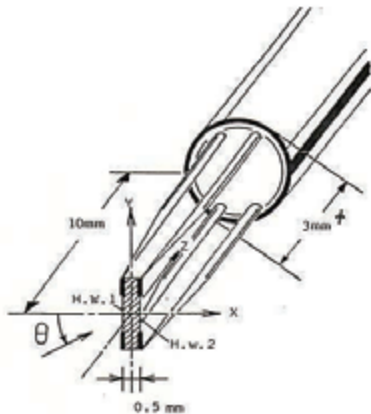
せる. 両者を静止空气中で振動させ, 大きな慣性力をあらかじめキャンセルしておく. Active 模型には求めたい空気力と模型の質量による慣性力が作用する. この場合慣性力が常に圧倒的に大きい. 振動条件にもよるが求めたい空気力は慣性力の1%以下になる.

模型の中心軸を揺り棒で直接保持して上下振動させると, 振動の平行度や振りなど不都合がともに中心軸に伝わり, 歪ゲージから検出される.

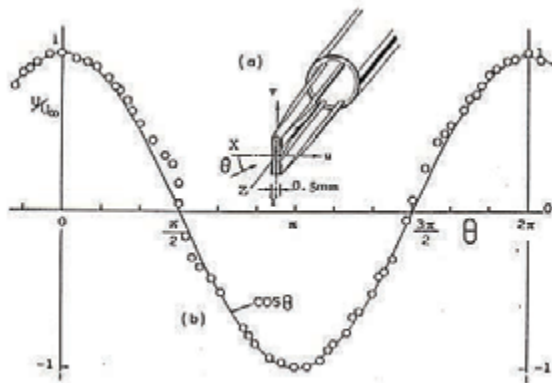
そこで角柱の中心軸の片側に Fig.1(b)に示すシャックル, 同図(c)のように他方にジンバルを介して, これらの不都合な力を逃がした. 結果として, 精密に非定常空気力を検出できて, 知られていなかったフラッタ現象を検出できた²⁾.

2.2 タンデム型熱線プローブの開発

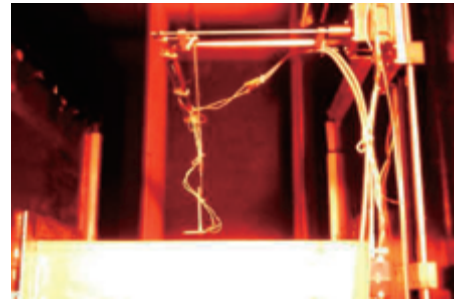
角柱のフラッタ現象を流れの変化と関連付けて説明するために, Fig.2(a)のようなタンデム型熱線プローブを自作した. 0.5mm幅で2本張った直径5 μ mメッキタングステン線間を耐熱性ゲージ接着剤で幕張りをしたものである. 0.5mm x 2mmの平板の前縁・後縁にセンサーが埋め込まれている構造である.



(a) Tandem-type hot-wire sensor



(b) Flow directivity of the sensor



(c) Set-up of this sensor just upward of active model.

Fig.2 Tandem-type hot-wire sensor. The sensor is available to oscillate with the same conditions of model oscillation amplitude ($A \sim 22.5$ mm), frequency ($f \sim 6.0$ Hz) and phase, and to traverse in (X, Y)=(2.5m, 1.5m) range with 0.1mm steps.

これはガソリンエンジンへの燃料パイプ内の逆流を含む非定常流量を測定するために開発されたセンサー³⁾であるが, 同図(b)に示す方向特性を持つことが知られていた. これを一様中で振動させながら角柱のまわりの多点の位置に順次トラバースさせて, 角柱と同一条件で振動させながら流速の測定を行う. 角柱の振動座標系に乗って流速を測定することが出来た. このセンサーの電気的な応答特性は1kHzや流れの応答特性は2kHzであった.

画いた非定常流線の一例を Fig.3 に示す. 断面比 $D/H=2.0$ 角柱がカルマン渦との共振領域で上下振動(振幅比 $A/H=0.05$, 振幅 $A=7.5$ mm, 加振振動数 $F=3.75$ Hz, $U=6.75$ m/s)している場合の流線である. 角柱の上下変位 $Y=(A/H) \cos(2\pi Ft)$ の $2\pi Ft = 120^\circ$ の瞬間である. これらをフラッタ現象との関連で議論した.

これらの測定結果は現代ではPIV法によって確認した所である.

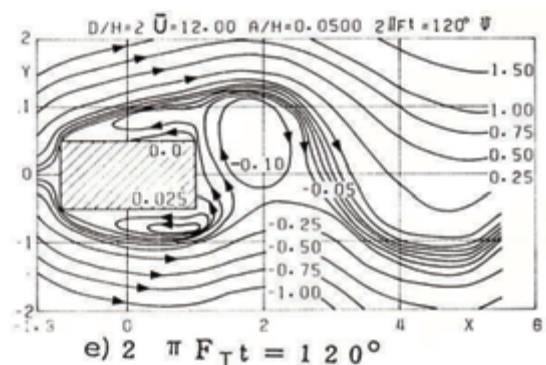


Fig.3 Unsteady stream lines around oscillating rectangular prism. Model depth $D=150$ mm and cord length $H=300$ mm, $D/H=1/2$, oscillating amplitude $A=7.5$ mm, frequency $F=3.75$ Hz, flow velocity $U=6.75$ m/s, model oscillation is $Y=(A/H) \cos(2\pi Ft)$, $2\pi Ft = 120^\circ$, $F=3.75$ Hz.

3. スポーツボールの空気力学の研究過程で得られた風洞実験技術

3.1 風洞装置の製作と周辺装置の開発

スポーツボールの空気力学的な研究を行うために福岡工業大学工学部知能機械工学科の卒業研究として低乱風洞を設計・制作した。主な仕様は以下の通りである⁵⁾。

測定部断面 $A=400\text{mm} \times 400\text{mm}$, 長さ 600mm.

最終縮流比: 28.125, 最大流速 $U_{max}=44.0\text{m/s}$,

乱れ度 0.08%(ただし縮流比9の場合の測定)

2014年3月に筆者は定年退職したので、ナックル風洞と称していたこの風洞装置一式をミズノテクニクス(株): 岐阜県養老郡養老町に譲渡移設した。設置されている様子を Fig.4 に示す。

この風洞では引き続きゴルフや野球ボールの空力実験などを行っているが、さらに最高流速を55m/sに上げて、計測の自動化を行えるように現在改修中である。

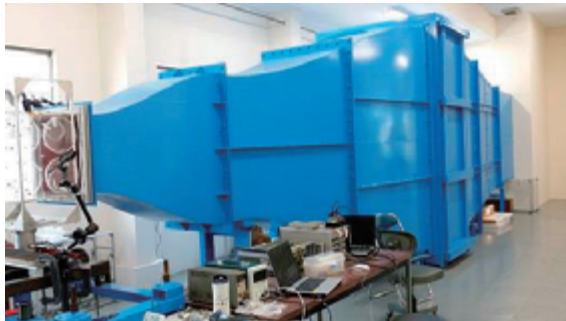


Fig.4 Wind tunnel now at Mizuno Technics Corporation, Mizuno, Yoro-Cho. Former name was “Knuckle wind tunnel” at Fukuoka Institute of Technology.

3.2 スポーツボールの高速安定回転の実現

ゴルフボールや野球ボールは回転しながら飛翔する。ゴルフボールの最高速度は $U=90\text{m/s}$, 最高回転数は200rpsにも達し、硬式野球ボールの最高速度はゴルフボールには及ばないが、40rps以上で投げられる。次元解析から実験条件を探り、レイノルズ数の影響を探れば、風洞流速をこのような速度に設定する必要はない。作用する空気力を精度良く測定するためには、ボール支持部の影響を少なくするために 1) 細いピアノ線などで懸架して、とにかく 2) 安定に回転させることが不可欠である。

ゴルフボールなどを安定に高速回転させるための仕組みを Fig.5 に示す。ボールの幾何学的な中心点を通る軸穴をあけて、両端にベアリングをセットした回転軸を挿入する。ベアリングの内径部に細管を貫通させて、細管の内部にピアノ線を通して。ボールが回転する赤道線上の 120° 毎にM4程度のネジ切り穴を開ける。それぞれにセットボルトをねじ込んで、その位置を調整して、ボール回転の静バランスを取る。風洞実験中ボール表面の穴はふさいでおく。この調整によって、実際のゴルフボールであれば200rps以下の回転数では問題なく安定に回転して、共振回転数も現れなかった。この方法についてはすでに特許を取得⁶⁾している。

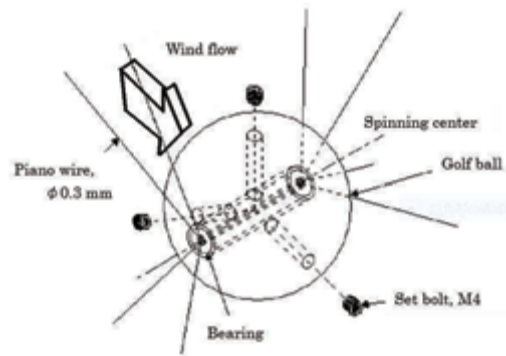


Fig.5 Stable spinning golf ball consists of a shaft ($\phi 10\text{mm}$) with a pair of bearings, 4-piano wires ($\phi 0.3\text{mm}$) and 3-setscrews on the equator of the ball.

なおボールに200rpsもの回転を与えるには、赤道線に沿って別途ノズル気流を当てることで得られる。

3.3 40m/sにおいてPIV観察が可能になった新しいSmoke Wire法

従来からスモークワイヤ法⁷⁾は、通常の風洞装置の中に簡単にセット出来るなど、その簡便性から非常に有効であった。しかしながらこれまでの可視化限界は4m/s程度に限られており、これを上げることが求められていた。

従来の方法は、主流が水平に流れている場合には、細線を直交させて上下方向あるいは水平方向に張るように配置することが行われて来た。

それに対して、ここでは単に主流方向に沿って平行に張るといふ細線の配置の変更によって、大幅にミスト発生時間を延ばすことができた⁸⁾。

Fig.6は風洞測定部に流れ方向に沿って水平に9本の直径0.54mmのステンレスワイヤ線を張って、発生させたミストを照明している概略図である。細線には鉄粉を混ぜた流動パラフィン塗布している。

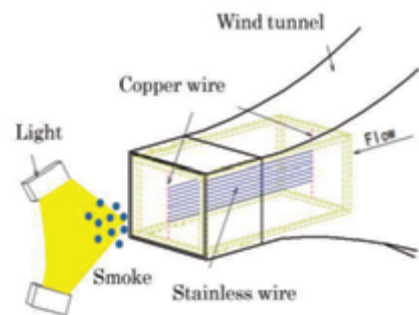


Fig.6 Experimental set-up of Stream-wise (SW2) method in wind tunnel and light-up system of mist.

Fig.6の状態を実際に $U=40\text{m/s}$ の気流中でステンレスワイヤ部に通电して、ゴルフボールまわりにミストを流している様子を Fig.7 に示す。

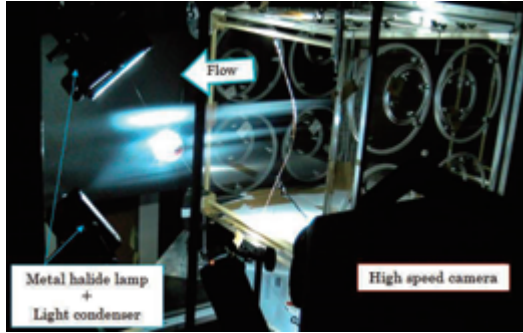


Fig.7 Set-up of golf ball in wind tunnel experiment and light illuminated mist of this new SW2 method. $U=40[m/s]$, Camera frame speed= $20,000[fps]$, and metal halide lamp of DC 210 [W].

さらに,この方法により明るいミストが得られる時間を測定した結果を Fig.8 に示す.

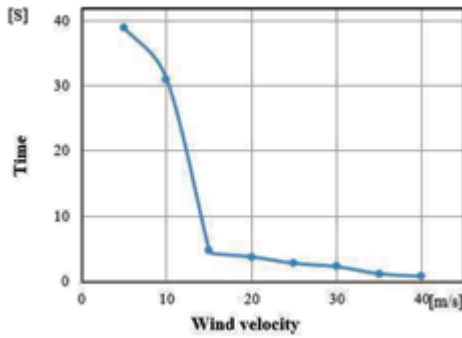


Fig. 8 Smoke duration time with increase of flow velocity.

この結果によると,計測した $40m/s$ でも 1 秒間程度は濃いミストが得られている.

物体上流にステンレスワイヤを流れ方向に挿入することによって,気流の乱れ度は $5\sim 40m/s$ の間で乱れ度は $0.25\sim 0.5\%$ に上昇していた.

一様流中でバックスピンの硬式野球ボールの後方のまわりの流れを PIV 法で調べて流線を描いた例を Fig.9 に示す.流速 $U=40m/s$,ボール回転数 $N=69rps$,高速度カメラのフレーム速度を $15000fps$ である.

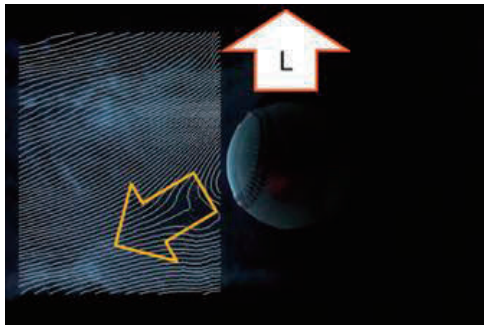


Fig.9 Stream line behind spinning baseball ball. Wind tunnel flow $U=40m/s$ is right to left, back spinning speed N equals $69rps$. Flame speed is $15000rps$.

この方法に関しても現在特許申請中である.

4. 風洞実験によるスポーツボールの飛翔の研究⁹⁾

ここでは,文献 9) で記述した内容のうち,硬式野球ボールではナックルボールと 2, 4-シームボールと称される変化球について延べ,ゴルフボールが左右に曲がるメカニズム,弱回転サッカーボールで発生魔球,を取り上げて要約的に述べる.

4.1 硬式野球ボールの変化球

(1) 3 種類のナックルボール

ナックルボールはボール回転数が $3rps$ 以下の場合に発生する.サイドスピン,バックスピンあるいはローリングスピンと呼ぶ種類がある.

Fig.10 はボールが右から左に進むとして,風洞実験ではボールを固定して気流が左から右に流れている場合のボールの $1/4$ 回転の後流をスケッチ的に画いた図である.ボール表面の縫い目が粗さとして作用し,境界層が層流から乱流へと遷移するので,流れの剥離位置がそちら側では大きく後退する.そのために剥離流れが大きく非対称になるので横力が発生する.横力の大きさは抗力に匹敵する.

サイドスピンボールはボールがこれらの図を上から観察しているとした回転状態である.

バックスピンボールとは,これらの図を 1 塁側から観察している状況であると考えれば良い.

ローリングスピンボールは左側の列の 2 番目(b)の図の状態から(上からでも 1 塁側からでも)ボールは X 軸まわりに回転しながら進んでいると思って欲しい.

横力によってサイドスピンボールは左右にゆらゆら揺れる.バックスピンボールは上下に揺れるが,打者にはボールの落下程度が異なって見えるようである.

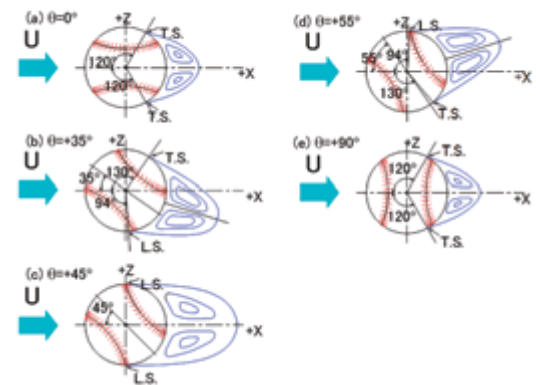


Fig.10 Wake field changes of ball a quarter round with seam effects. Watching as top view: 4-seam side spin type. Watching as side view: 4-seam back spin type. $Re=Ud/v=1 \times 10^5$. v : kinematic viscosity.

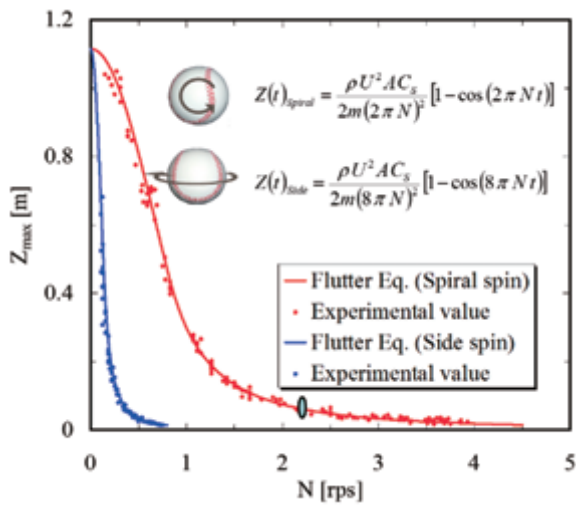


Fig.11 Oscillation amplitude Z of rolling type with ball spinning speed N . $U=21.1\text{m/s}$,

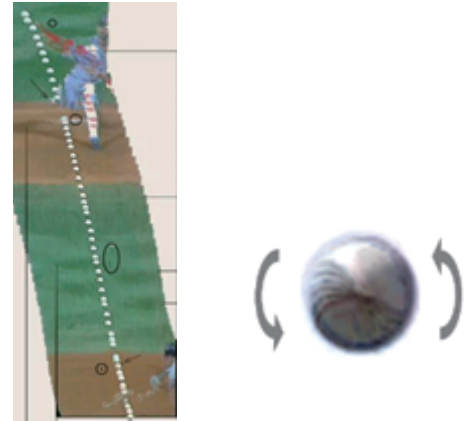
この2種類のボールはボールが1回転する間に縫い目が4回通過するので、回転数が少しでも上がると変化が急激に少なくなる。それに対してローリングスピンのボールは、Fig.10(b)+35°の流を保ったままX軸まわりに回転するボールであるので、一回転につき横力は1回しか変化しない。

ナックルボールのフラッタ実験を行って、ボールが横揺れする全振幅を調べた結果を Fig.11 に示す。図にはサイドスピンボールとローリングスピンボール（図中 Spiral spin と記している）のボール回転数 N にの違いによる横揺れ振幅 Z_{max} の実験結果である。

また各々のボールの1回転に対して横力の変化求め、その変化を外力にして、横揺れ振動 $Z(t)$ のフラッタ方程式を求めて、図中に記している。

いずれの実験結果も計算で求めて実線で記入したフラッタ振幅と良く一致している。ローリングスピンボールは回転数がサイドスピンボールより多少増えても大きな変化をすることにより、打者にとっては厄介な魔球である。

実際にナックル投手によって投げられたナックルボールの映像を観察した2例を Fig.12(a), (b) に示す。Fig.12(a)は Tim Wakefield が実戦で投げたローリングスピンボールの映像からボール軌跡をストロボ映像化して示した。この例ではボール回転数は $N=0.8\text{rps}$ であり、横揺れ振幅はおおよそ40cmになり、Fig.11で示した風洞実験結果と一致する。また Fig.12(b)は、現在慶応義塾大学4年生の佐野川 怜投手が投げたローリングスピンボールの回転の様子を見るために重ね書きした図である。この場合は $N=2.1\text{rps}$ であり全振幅はおおむね10cm程度であったので、Fig.11の中に記入している。



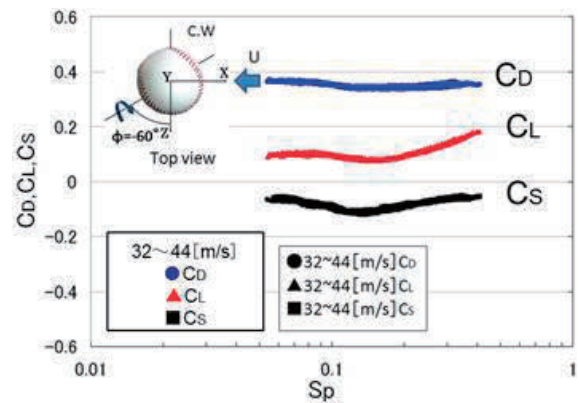
(a)Rolling type knuckleball by Tim Wakefield, Boston Red Sox. (b) Rolling type knuckleball by T. Sanogawa, Keio University, Shonan Fujisawa
Fig. 12 (a), (b) Rolling type knuckleball

(2) 2あるいは4シームボールの変化の違い

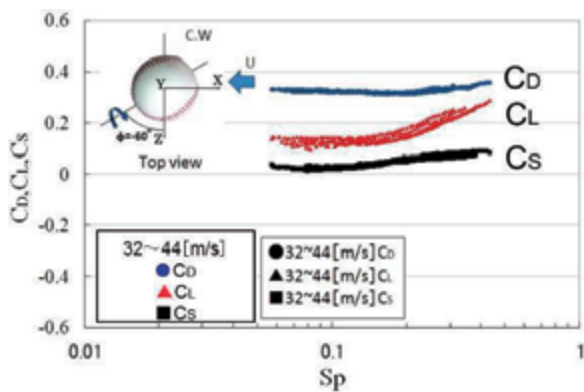
最近の野球中継ではしばしば“2シームボール,4シームボール”と称する変化球が登場する。その空力3分力特性を Fig.13(a),(b)に示す。

両図で Sp は $Sp = \pi dN/U$ であり、スピンパラメータと称して、(ボールの回転の接線速度)/(ボール速度)、を示す無次元量である。 C_D, C_L, C_S は空力3分力係数で $(C_D, C_L, C_S) = (D, L, S) / (0.5 \rho U^2 A)$, $A = \pi d^2 / 4$; ボール直径 d , $(D, L, S) = (\text{抗力}, \text{揚力}, \text{横力})$ である。同図には回転軸と縫い目の関係を Top view として示している。

これらのボールは回転にともなって赤道面上に縫い目が2(または4)度クロスするボールである。投手から見て、両者共回転軸はボール進行方向に対して30°左の方向に向いている。両者の空力特性のおおきな違いは、横力 C_S が前者で左、後者で右に向いていることである。他の条件は同じで、縫い目と回転軸の関係だけが異なるだけであり、縫い目の効果が顕著に表れている。



(a) 2-seam ball configuration and its aerodynamics



(a) 4-seam ball configuration and its aerodynamics

Fig.13.2 and 4-seam ball and its aerodynamic characteristics.

Attention is focused on side force C_S direction.

回転軸と縫い目の関係により逆方向の横力が発生することは、風洞装置によるフタッパ実験と投手が投げる実際のボールでも矛盾なく現れることが確認された。マグナス効果から生じるシュートボールなどとは違う。

4.2 ゴルフボールのフック・スライスのメカニズム¹⁰⁾

ゴルフボールの左右の曲がりやフック、スライスと呼ぶ。ボールはサイドスピンの曲がると100年以上にわたって行われている。実際にはサイドスピンではなく回転軸がバンクしているからである。

Fig.14にはゴルフクラブでショットされたボールの回転軸が右に傾斜した軸まわりに回転して進行する様子を示す。揚力 L も鉛直方向から右に傾いている。その横方向成分によりボールは右方向にスライスする。抗力も含めて空気力を (X, Y, Z) の3方向にベクトル合成して定式化に成功した。

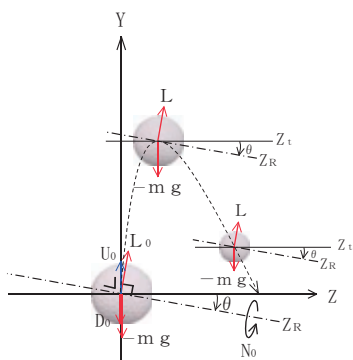


Fig.14 Slice flight of golf ball with banked spinning axes.

4.3 弱回転サッカーボールの奇妙な飛翔¹¹⁾

昔から、サッカーボールやバレーボールが少ない回転速度で放たれるとその軌道はほとんど予測不能な魔球になり、競技者は武器にしている。

一方、滑面球に関しては種子田¹²⁾によって、球の後方にできる2列の縦渦の発生がランダムにその位置を変える、ということが見いだされている。これをサッカーボー

ルの奇妙な現象に適用させることにより、魔球発生のメカニズムを説明できた。

5. あとがき

角柱に関する剥離流フラッタの研究からスタートし、風洞装置と実験方法の開発を行いながら、スポーツボールの飛翔軌道の不思議に関する研究を進めた。特にスポーツボールの軌道変化のメカニズムの研究では、流体力学の知見により説明できる数多くの面白さがあった。

これらの研究は多くの学生や諸先輩・同僚・後輩が絶え間ない関心を共に持ってくれたことによる共同研究の成果である。記して心から感謝する。

参考文献

- Halfman, R.L.: Experimental Aerodynamic Derivatives of a Sinusoidally Oscillating Airfoil in Two-dimensional Flow, N.A.C.A. Report 1108, 1952.
- Nakamura Y., Mizota T.: Unsteady Lifts and Wakes of Oscillating Rectangular Prisms, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.101, EM6, pp.855~871, 1975.12
- Asamura, T., Yamakawa, H. and Hayakawa, H.: Tandem Type Hot-wire Flow meter for measuring Intermittent Fuel Flow, J. of Soc. Automotive Engineers, Vol. 76, p.1781, 1970.
- 溝田武人, 岡島 厚: 一様流中で並進振動する角柱まわりの流線模様, 九州大学応用力学研究所所報(寄書), 第57号, pp.657~669, 1982.
- 溝田武人, 功能郁生, 市村日出夫: 福岡工業大学電子機械工学科施設 小型・低速風洞の製作と流速制御, 共和電業技報, 第369号, pp.2707~2711, 1988.11.
- 鳴尾丈司, 溝田武人: 回転体の空気力測定装置および空気力測定方法, 特許第4982148号, 2012.7.25.
- 神部 勉編, 「流れの事典」, 丸善株式会社, 計測, PIVとPTV, 鳥谷隆, p.183, 流れの可視化, 川橋正昭, pp.475~480, (2004)
- 溝田武人, 田北和幸, 鳴尾丈司, 大屋裕二, 阿比留久徳, 岡島 厚: スモークワイヤ法の進歩と40m/sの風洞気流中で回転するスポーツボール後流のPIV観察, 福岡工業大学エレクトロニクス研究所所報, 第31巻, pp.25-29, 2014.
- 溝田武人: スポーツボールの飛翔軌道の不思議と流体力学, 数理解析研究所講義録, 1940, 生物流体力学における計測問題, pp.40-58, 京都大学数理解析研究所, 2015.4
- 鳴尾丈司, 溝田武人: ゴルフボールの空気力測定と3次元飛翔軌道解析, 日本流体力学会誌 “ながれ”, 第23巻, 第6号, pp.203~211, 2004.6
- Mizota T., Kurogi K., Ohya Y., Okajima A., Naruo T. & Kawamura Y.: The Strange Flight Behavior of Slowly spinning Soccer Balls, 22 May 2013, www.nature.com/srep, nature, SCIENTIFIC REPORTS, [3:1871] DOI: 10.1038/srep 01871, pp.1-7.
- Taneda S.: Visual observation of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 10^4 and 10^6 , J. Fluid Mechanics, 1978, vol.85, part 1, pp.187-192.