

スポーツボールの飛翔軌道の不思議と流体力学

Strange behavior of sports ball flight and its aerodynamics

溝田武人 (福岡工業大学)

Taketo Mizota

Professor emeritus of Fukuoka Institute of Technology

硬式野球ボール, ゴルフボール, サッカーボールが不思議な 3 次元飛翔軌道を示す空気力学的なメカニズムの研究を行ってきた. ボールの飛翔の様子を TV 画像などにより観察し, 風洞実験により空気力を求め, 可視化実験により流れを観察して, 運動方程式により軌道を求める, という研究方法である. 硬式野球ボールでは, ナックルボール, フォークボール, 縦スライダー, 2 & 4 シームなどの変化球を取り扱った. ゴルフボールは“サイドスピン”しているからではなくて“回転軸がバンク”しているから 3 次元的な運動をするのであると提案している. サッカーボールの弱回転魔球については Taneda による滑面球の非定常空気力の発生メカニズムの説明を適用することで説明できた. 風洞流速 40m/s での観察をスモークワイヤ法で可能にした最近の可視化技術の進歩についても述べる.

1. はじめに

空気中を飛ぶスポーツボールがある初期速度で運動を開始した後に, 鉛直平面からそれて 3 次元的に飛翔する, いわゆる軌道変化は空気力の作用によるものである. 飛翔中のスポーツボールの速度ベクトル, 回転ベクトル, 特に硬式野球ボールでは縫い目との関係などが分かれば, ボールに作用する空気力を風洞実験等によって正確に求めることができるはずである.

硬式野球ボールでは, ナックルボール^{1),5)}, フォークボール⁶⁾, 縦スライダー⁷⁾, 2 & 4 シーム⁸⁾などの魔球と言われる変化球を取り扱った. ゴルフボール^{9),10)}では飛翔観察によって 3 次元の飛翔軌道方程式を求め, 屋外の自然風¹¹⁾の影響下での飛翔実験によってこれを検証した. そして 100 年以上言われて来た“サイドスピン”と呼んでいるゴルフボールの曲りの概念から, “回転軸がバンク”しているからだと呼ぶべきだと提案している. サッカーボールの弱回転魔球は Taneda^{12),13)}による滑面球の非定常空気力の発生メカニズムの説明を適用することで説明できた¹⁴⁾. 最後に, 風洞流速 40m/s での流れ観察がスモークワイヤ法で可能になった最近の可視化技術の進歩¹⁵⁾についても述べる.

2. ボールの飛翔に関係する物理量の無次元量

回転しながら飛翔する野球ボールなどの空力 3 分力などの座標系を Fig. 1 のように定める. 縫い目と回転軸の関係を決め, 回転軸の方向が定まると空気力は空力 4 分力係数 (C_D , C_L , C_S , C_M) はレイノルズ数 Re , スピンパラメータ Sp の 2 種類の無次元数で決まる. (C_D , C_L , C_S)

$= (D, L, S) / (0.5 \rho U^2 A)$, $C_m = M / (0.5 \rho U^2 A d)$, $Re = Ud / \nu$, $Sp = \pi Nd / U$ である. D, L, S, M はボールに作用する抗力, 揚力, 横力及びボール回転軸まわりの空力トルクである. ρ : 空気密度, ν : 空気の動粘性係数, U : ボール(風洞気流)速度, N : ボールの回転数, d : ボールの直径, m : ボール質量, A : 直径断面積 $A = \pi d^2 / 4$, とする. g : 重力加速度, θ : ボール回転軸ベクトル N が X - Z 平面となす角度で pitch 角, ϕ : N が X - Z 平面上で X 軸からの角度で Yaw 角と称する.

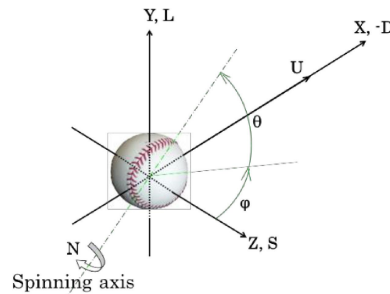


Fig.1 Coordinate system of ball flight

3. 硬式野球ボールの変化球

3. 1 硬式野球ボールの変化球の呼称

日常テレビなどで観察できる変化球の呼称は, 変化の様子(直球, カーブ, シュート, スライダー, 縦スライダー, シンカー, ...), 握り方(フォーク, ナックル, スプリット, パームボール, サークルチェンジ, ...), 投げ方(チェンジアップ, カットボール, カッター, ...), 回転軸と縫い目の関係(2-シーム, 4-シーム, ジャイロ(回転)ボール), 握り方と変化の様相(ナックルカーブ), などなどであり, とても統一されているとは言い難い. ある投手のボール軌跡を高速度カメラで撮影した結果, 本人が“直球”と称しているが変化の様子からは“シュート”であり, “シュート”と呼ぶ変化球がきれいな“直球”であった, という報告もある. 2-シーム, 4-シームと称するボールだけは回転軸と縫い目の関係のみによってそのように呼ばれており, 回転軸の方向とボールが進む方向は問わない, という呼称もある.

投手板前方端部からホームベース後端までの距離は 18.44m である. 投手の指を離れたボールには空気力と重力のみが作用する. ボールの飛翔中, 回転軸の方向および縫い目との関係は Fig.1 の座標系と並行な地表に固定した座標系に対して変化しない. そこで, ここでは変化球の呼称は野球界の習慣に従う. ボールの縫い目と回転軸の関係と運動条件(U, N, θ, ϕ)を示しながら議論を進め, 直球とフォークボール, ナックルボール, 縦スライダー, 2 & 4-シームボールを主に述べる.

3. 2 直球とフォークボール: 揚力によるボールの吊り上げ量⁶⁾

18.44m を進む間に, ボールは重力加速度 g で自由落下すると同時に空気力の揚力(マグナス力)により吊り上げられる. Fig. 2(a) はボールに作用する重力と揚力による鉛直方向等加速度(実線)と等落下距離(破線)であって, ボール回転数(横軸)と初速(縦軸)によってまとめている. (b) には 4-シ

ームの回転条件を示している。Fig. 2(a)の図中 $a=+0.25g$ の実線上の条件では重力加速度の $1/4$ に相当する加速度が作用していることを示す。 $Y=+0.0g$ とは上下方向に重力と空気が釣り合って、その結果ボールが落下もホップもしない条件であり、右軸に $y=0$ (m)と記している線と一致している。例えばボール速度 $U=40\text{m/s}$ (144Km/h) で回転数 N が 40rps の場合には 20cm 程度 ($y=0.2\text{m}$ の破線上)は落下する。最近の日本ハムの大谷翔平投手の 162Km/h (45m/s), 40rps のボールの場合はボールの初期条件の方向から 2~3cm 以上ホップしているはずである。この速度でも飛翔時間が 0.4 秒あると重力のみによる鉛直落下量は 80cm 以上になるがこれを空気で吊り上げてさらにホップさせている。

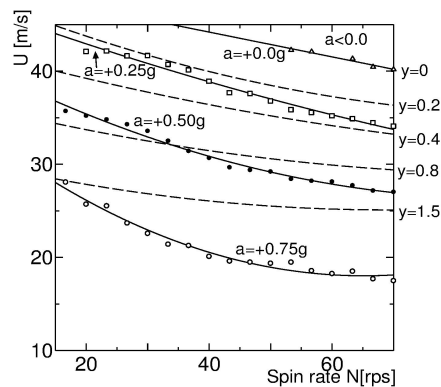
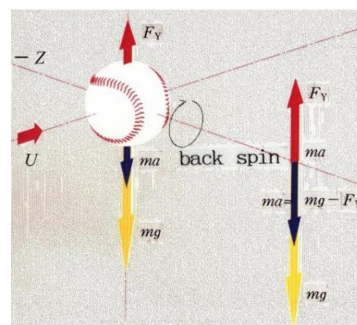
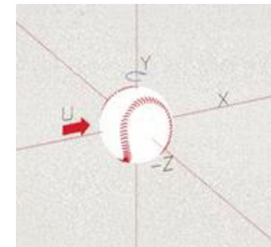


Fig.2 (a) Acceleration of $-Y$ direction and distance(m) contours during 18.44m



(b) Spinning condition and direction forces on ball



(c) Axes of 4-seam fork ball

それに対して威力のあるフォークボールは Fig. 2 (c) のように回転軸が Y 軸方向を向いている。サイドスピンの回転数は 10~20rps 以下のものである。図では 4-シームでサイドスピンしている様子を示しているが、2-シームのサイドスピンもある。このような回転軸の場合は、ボールを吊り上げる揚力は働かないので、ボールは重力で落ちる。フォークボールの特徴は落ちるのである。

一方、威力あるフォークボールの代名詞でもある佐々木投手のフォークボールは、打者の松井秀喜選手からも“視界から消える”と絶賛されている。後述の Fig. 12(a)の結果からは 2-シームボールの回転軸が鉛直方向から前上げ 30° 傾いている場合には、横力は下方向の空気力 (-揚力) になり、重力方向と相まって激しく沈む魔球になる。フォークボールはサイドスピンによる (横滑り) + (鉛直下方向 + 重力) が相まって“視界から消える”という魔球になる。

3. 3 サイドスピンおよびバックスピン 型魔球ナックルボール 1~3)

断面形状 400x400mm の風洞により硬式野球ボールに作用する空気力をボール回転角度 5° 毎に調べた結果を Fig. 3 に示す。図の上部に top view によるボールの回転角度を示す。抗力係数は

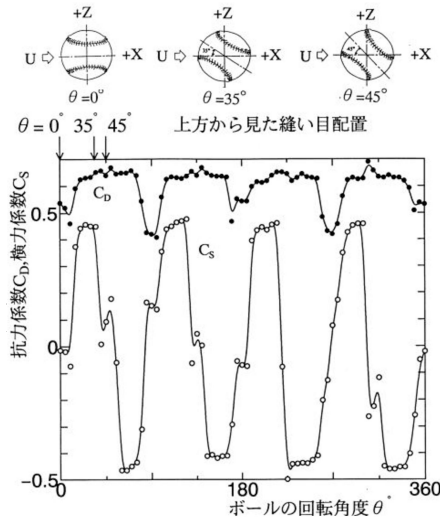


Fig.3 Drag force C_D and side force C_S of ball one round

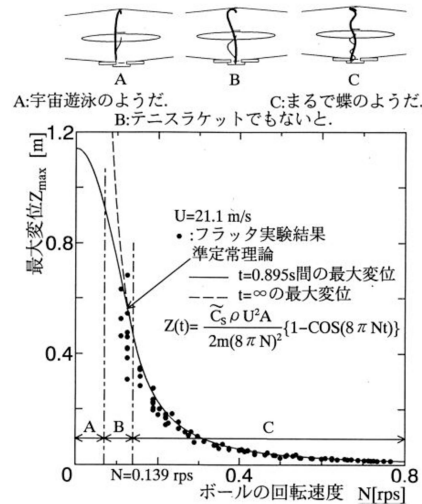


Fig.4 Oscillation amplitude with 18.44m flight of side spin knuckle ball

$C_D=0.4\sim0.7$ の間でボール回転角度に応じて変化している。横力係数 C_S は振幅 0.45 でボールの 360° 回転にともなって 4 回正弦関数的に変化している。横力の振幅が抗力係数と同程度の大きさであることは、基本形状が bluff body の球であることを考えると驚異的である。

風洞気流に直交する横方向(ただし Fig. 3 上部に示す Z 方向は Fig. 1 と逆方向)に、少ない摩擦で横滑りするレール上の台車を設置し、その上に載せた回転軸にボールを保持する。回転軸を Fig. 2(c)の Y 軸として、モーターにより $N=0\sim1$ rps の回転数で回転させる。風洞測定部に位置するボールには回転にともない Fig. 3 のような横力を受ける。ボールは台車と共にレール上を往復振動変位する。この変位量をレーザー変位計で測定して、ボール回転数毎にプロットしたものを Fig. 4 に示す。風洞の気流の流速は 21.1 m/s, この時乱れ度は 0.08% である。ボールの稼働範囲が風洞気流の中心部 200mm 以内に限定するように、ボールの質量は 0.1445 kg であるが一緒に振動する台車などの質量+さらに附加質量を加えて振動させている。実測の振動変位に対してこれらの負荷質量分を補正して Fig. 4 に全振幅として黒丸で示している。

計算によって、Fig. 3 に示した横力係数による振動振幅を求めるために、ボール回転速度にともなう横力係数の変化を余弦関数で表して運動方程式の外力とする。その結果、Fig. 4 の図中に記入したような横方向変位の式 $Z(t)$ を求めることができる。準定常理論によるナックルボールの Flutter 方程式である。これをサイドスピン型ナックルボールと呼ぶことにしよう。この式の右辺の係数が振動変位の片振幅である。分母に $(8\pi N)^2$ の項があることに注意して欲しい。回転数 N の 2 乗で振幅は小さくなり、ボールの横揺れ程度は少なくなるということである。図には 18.44m だけボールが飛翔する間のボールの全振幅を実線で示している。実験結果と C_S の測定値を使った semi-empirical な結果は良く一致している。図中 A, B, C と記入している回転数領域はそれぞれ、ボールが 18.44m を飛翔する間に往復運動を達成するかどうかを示す。A の回転数では 1 方向への変化のみ、B では最大振幅を達成するが 1 サイクルは終えない、C は 1 サイクルの往復運動を 1 回以

上達成して飛翔を終える。BとCの境界回転数は $N=0.139\text{rps}$ であり、破線はそれ以下の回転数では 18.44m に限定しなければ振動振幅が無限に大きくなる様子を示す。

ナックルボールと対峙した打者達のファジーな表現のいくつかを, Fig. 4 の上方に記している。ボールの回転数に依って振動変位が異なることが印象表現に現れていることが分かる。これはボールがサイドスピン型の場合であるが, A 領域でバックスピン型のナックルボールであって, +揚力が作用する縫い目で投げられれば, “宇宙遊泳のようだ” という表現のボールになる。

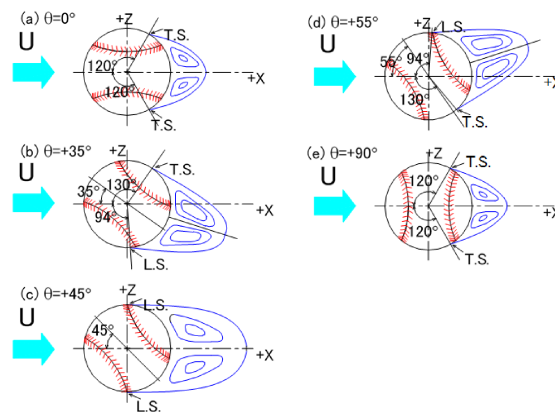


Fig.5 Wake field changes of ball a quarter round with seam effects.

Watching as top view: 4-seam side spin type. Watching as side view: 4-seam back spin type.

大きな横力は何故発生するのであろうか？直径が同じ滑面球が回転しながら投げられた場合流れの Re 数は亜臨界域である。滑面球の表面の境界層は前面のよどみ位置から層流のまま次第に発達して厚さが 1mm 程度になり, 前面から $80^\circ \sim 90^\circ$ 付近で剥離する。硬式野球ボールの場合, 高さ 0.8mm 程度の縫い目が tripping wire の役割を担う。境界層外流が速くなると, その後方は乱流境界層になり, 流れの剥離線は背面側 130° あたりに後退する。反対側には縫い目がない状態になると 90° 付近で剥離する。Fig. 5 はそのようなプロセスを画いた図で, (b) およびそれから 20° 回転した (d) では後流が逆に大きく傾いている。(b) は図中 $+Z$ 方向に, (d) では $-Z$ 方向に横力

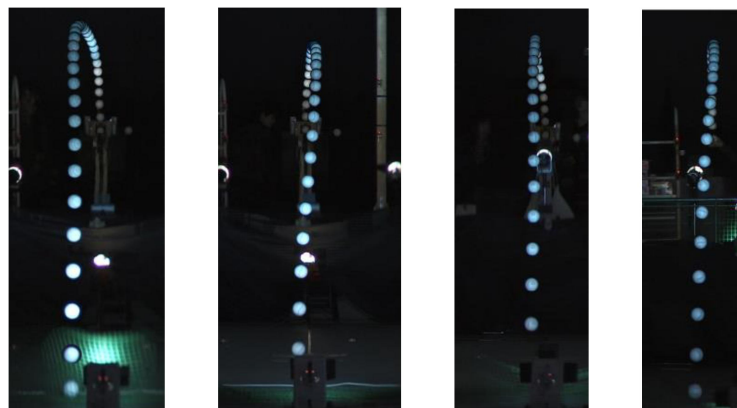


Fig.6 Strange behaviors of side spin type knuckleball

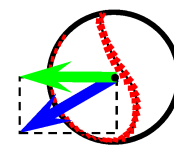
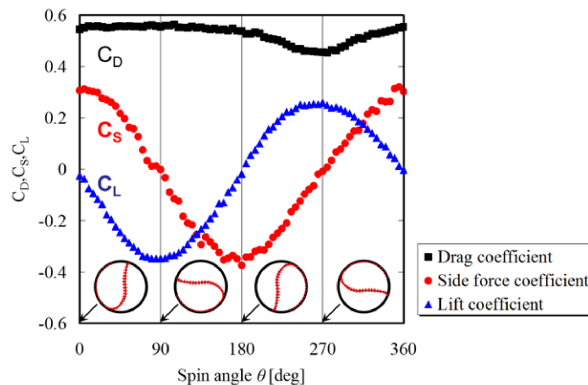
が作用している流れになっており, Fig. 3 の横力の図と対応している. ずれも同じ条件で発射させているが, サイドスピン型の回転により極めて奇妙な 3 次元飛翔軌道を示している. 一つとして同じ軌道を示すものは観察できなかった.

3. 4 ローリングスピン型魔球ナックルボール⁴⁾

以上は, ボールをサイドスピン型やバックスピン型で投げた場合であった. しかしながら, Fig. 5 の(b)の縫い目配置の初期条件で回転が X 軸まわりで投げられるとどのようなようになるであろうか. Fig. 7 に実際にそのように投げられたボールを投手側から撮影した様子を示す. 写真 1 には投手の指が, すべての写真 1 ~10 にボールの縫い目とボールの 1 カ所にある連盟マークが常に写っている. 回転軸はボールの進行方向を向いていること, カメラのフレーム速度から回転数は 0.8rps であることが分かる. このボールをローリングスピン型のナックルボールと呼ぶことにしよう.



Fig.7 Rolling type knuckle ball by Tim Wakefield, $U=30\text{m/s}$ (108km/s), $N=0.8\text{rps}$



(b)Side force components

Fig.8 (a)Aerodynamic forces on spiral spinning knuckle ball,
 $U=110\text{km/h}$ (30.6m/s), $N=0.5\text{rps}$

of $\theta=120^\circ$

このような飛翔条件でボールが飛翔する場合にボールにかかる空力 3 分力を測定した結果を Fig. 8(a)に示す. 捕手側からみて $\theta=0^\circ$ から 90° 毎に反時計方向(C.C.W.)に回転させた場合の縫い目配置を図中に記入している. 同図(b)にはボールが半時計方向に 120° 回転した場合の水平方向横力を緑色で示している. $\theta=0^\circ$ の際の横力は, ボールの回転にともなってこの時 $Y=0$ 軸を基準にして -120° の方向に作用しているが, その水平方向成分が横力 C_S になり, 鉛直下方成分が揚

力 C_L になる。その結果、揚力 C_L と横力 C_s は Fig. 8(a) のようにお互いに位相が 90° シフトして正弦波状に変化する。そして、Fig. 3 で示したサイドスピン型の横力変化の場合はボール 1 回転で 4 周期の変化をしたことに比べると、rolling 型のナックルボールはボールの 1 回転で Fig. 8(a) のように 1 周期の変化になる。これは縫い目と回転方向の関係の結果である。なお、抗力係数 C_D は $\theta = 270^\circ$ 付近で回復する傾向が現れており、実験を行った流速では何れも同じ傾向を示した。この実験の場合はボール背後に $\phi 4\text{mm}$ のシャフトを挿入して $\phi 20\text{mm}$ のモーター部分と接続している。 270° の角度ではボールの後流がこのモーター部分に入るの、そのため流れが歪み、このように抗力係数がその角度範囲で回復するという影響が現れたと考えられる。

この横力の成分によってボールが 18.44m の間で横方向に変位する振幅の計算結果と風洞実験結果を Fig. 9 に赤線で記入している。Fig. 9 には、Fig. 4 に示したサイドスピン型のナックルボールの振幅も合わせて青線で記入している。図中、両方のナックルボールの flutter 方程式を記入している。上方がローリングスピン型のナックルボールの方程式であり、半振幅を示す係数項の分母が $2m(2\pi N)^2$ になっている。 $2\pi N$ は Fig. 8(a) に示す横力の変化が 360° で 1 回であることと対応している。前述のサイドスピン型のナックルボールの $2m(8\pi N)^2$ に比べて、同じ流速と横力係数であれば 16 倍大きな振動振幅になることが分かる。

Tim Wakefield 投手が投げた 1-シーム型のナックルボールのストロボ映像を Fig. 9(b) に示す。ボールはおよそ $N=0.8$ rps の回転数で投げられており、横揺れの全振幅は 40cm にもなる。またナックル投手が投げたローリング型のナックルボールを捕手側からビデオ撮影したカメラ映像のストロボ映像のボール直径がほぼ同一になるように重ね書きした結果を Fig. 9(c) に示す。1/30 秒毎の映像であるが、縫い目がほぼ 1-シーム型のナックルボールの様相を呈している。1 コマ毎の縫い目の回転角度からボールの回転速度を調べると $N=1.9\sim 2.4\text{Hz}$ の間にばらついており平均値は $N=2.1\text{Hz}$ 付近であった。このナックルボールの飛翔中の振幅値はほぼ 10cm であったので、

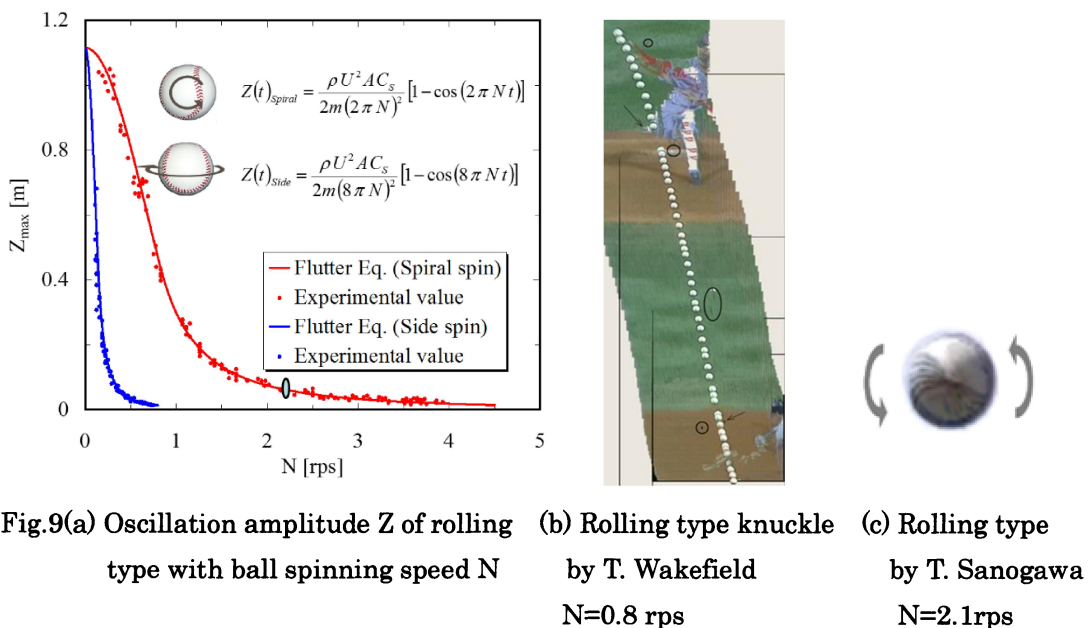
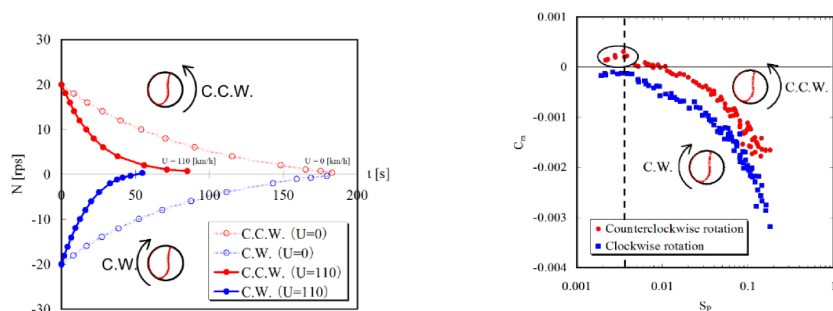


Fig.9(a) Oscillation amplitude Z of rolling type with ball spinning speed N (b) Rolling type knuckle by T. Wakefield $N=0.8$ rps (c) Rolling type by T. Sanogawa $N=2.1$ rps

Fig. 9(a)に楕円で記入している．投球ボールでは回転軸と縫い目配置の関係が最大振幅になる Fig. 3 の $\theta=35^\circ$ となる条件と一致することは極めて困難であるが，飛翔中の1-シーム型のナックルボールにおいてもほぼ正しく空気の準定常性が成立していることが分かった．

このような1-シーム型のナックルボールに作用する空力トルクによっては，飛翔中ボールが自動回転している可能性がある．そこで，風洞気流中に回転摩擦が少ない支持をした1-シーム型ナックルボールに初期回転数20rpsを与えてその後の回転数の変化を調べた結果を Fig. 10(a), (b)に示す．Fig. 10(a)は無風時の回転方向 C.C.W. と C.W. の回転減衰の様子であり，この指示条件では20rpsからほぼ静止するまで3分程度かかりボールベアリングの摩擦は小さい．それに対して $U=110\text{km/h}$ (30m/s) の流速中では，初期回転方向 C.C.W. の場合には80sec. 付近まで急激に回転数が減少しその後は1rp程度で永久に回転し続ける．C.W. 方向の初期回転の場合は50sec. で一旦ボール回転は静止しその後逆回転の C.C.W. で回転し，やはり1rps程度の回転速度で永久に回転し続ける．Fig. 10(b)はボールの回転数の変化から空力回転減衰係数 C_m を $U=22.2\sim 38.9\text{m/s}$ の実験範囲でまとめたもので， $Sp=0.01$ 以下の C.C.W. では自動回転モードになる．



(a) Spinning speed change with 1-seam type knuckleball, $U=0$ and 110km/h . Wind tunnel test.

(b) Aerodynamic torque coefficients C_m of 1-seam type knuckle ball $U=80\text{km/h}$ (22.2) $\sim 140\text{km/h}$ (38.9m/s)

Fig.10 (a), (b) Aerodynamic torque characteristics of 1-seam type knuckleball

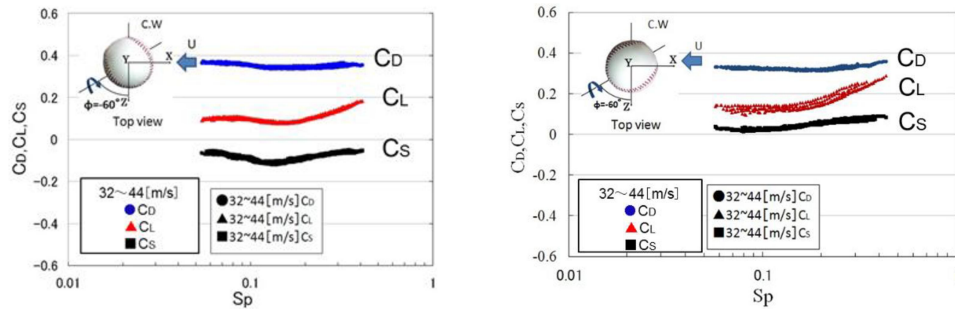
ここで，自動回転空力回転トルクが最大となる Fig. 9(b)の $Sp=$ の値 C_m によって，例えば $N=0\text{rps}$ で投げられたボールが18.44m間を飛翔する間でどの程度回転するのか，その角度を求めると，わずかに $\theta=5.6^\circ$ となった．この程度の変化では，縫い目位置が変わることによるボールの振動的変化は生じない．したがって，ナックルボールには常に投手によって適当な回転速度 N が初期条件として与えられて回転飛翔していることになる．

なお，ここで取り上げた3種類のナックルボールを投げているのは200勝を挙げて，すでにメジャーリーガーを引退したTim Wakefield投手である．投げ方の違いなどNHKの取材陣に聴いてもらう機会があったが，本人は全く投げ分けていない，という返事であった．投げるナックルボールは速度が違ったり，回転軸が異なったりしているが，この返事もまた不思議に満ちている．

3. 5 2 および 4-シーム 型高速変化球⁸⁾

最近特に一流投手が武器する 2-シーム, 4-シームと称されるのが次の魔球である。打者の手元で大きく変化する場合もあるが, 140km/h 前後の速度で投げられ小さく変化する場合もあって, 変化の様子が分からない, というボールである。

Fig. 11(a), (b)には(a)2-シームと(b)4-シームの空力 3 分力特性の風洞実験結果を示す。ボールの pitch 角 θ は $\theta=0^\circ$ として, yaw 角 $\phi=-60^\circ$ にセットした場合である。流速 U は $U=32\sim44\text{m/s}$ まで色々変化させているが, C_D , C_L , C_S のいずれの結果も spin parameter S_p の一本の線でまとめられ, この流速範囲におけるレイノルズ数 Re の影響は見られない。2-シームと 4-シームの空力特性で際立った違いは横力 C_S に現れている。ボールの回転軸方向とボールの進行方向, あるいは風洞気流方向は両者同一であるが, 2-シームボールでは $-Z$ 方向に, 4-シーム方向では $+Z$ 方向に空気が逆方向に作用している。



(a) 2-seam type ball with $\theta=0^\circ$, $\phi=-60^\circ$, (b) 4-seam type ball with $\theta=0^\circ$, $\phi=60^\circ$

Fig.11 (a), (b) Aerodynamic force characteristics of 2 and 4-seam type ball

このような実験から, 流速 $U=40\text{m/s}$ と回転数 $N=35\text{rps}$ ($S_p=0.2$) を固定させて, ただボールの Yawing angle を $\phi=0\sim90^\circ$ の範囲で変えて, 空力 3 分力特性をまとめた結果を Fig. 12 に示す。ここでは, $\phi=0\sim30^\circ$ 付近の揚力係数 C_L と $\phi=50\sim60^\circ$ の横力係数 C_S の変化に着目する。まず $\phi=0\sim30^\circ$ の範囲で特に 4-シームボールの揚力係数はほとんど変化しない。上下方向にボールは変

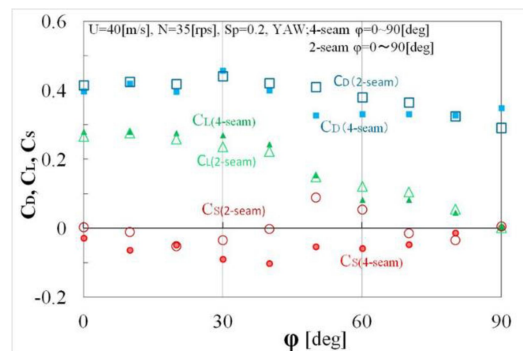


Fig.12 Aerodynamic characteristics 2 and 4-seam ball with yawing angle change, $\phi=0\sim90^\circ$ ($\theta=0^\circ$), $U=40\text{m/s}$ (144km/h), $N=35\text{rps}$ ($S_p=0.2$)

化しない．そして回転軸は同じ方向でも縫い目との関係によっては逆方向の横力が作用する．ボールは逆方向に移動することになる．そこで Flutter 実験として，風洞装置にこのような条件でボールをセットして回転させると測定結果の横力の作用方向に従ってボールは逆方向にシフトした．しかし，空気力の測定実験も Flutter 実験もボール表面の 2 か所にベアリングが構造上埋め込まれている．また $\phi 0.3\text{mm}$ のピアノ線がベアリングの内穴から片側 4 本出ている．Flutter 実験用のボールには回転させる $\phi 4\text{mm}$ のシャフトがボール後方から出ている．これらがボールに作用する空気力の特に横力に影響する程度は小さいと思われる．しかし，これらの影響が無いボールを投手に投げてもらい，飛翔様子を高速カメラで観察した．その結果を Fig. 13(a), (b) に示す．

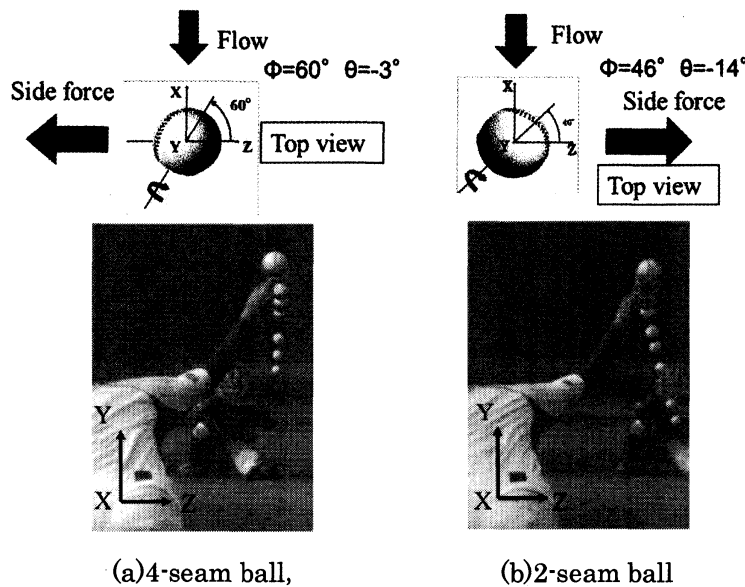
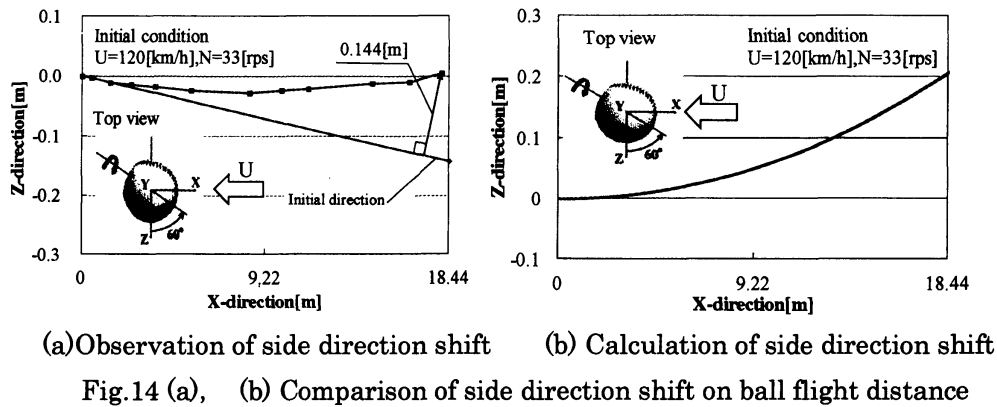


Fig.13(a), (b) 4-seam and 2-seam type boll thrown by A. Yano, a pitcher of F.I.T. team.

(a) は 4-シーム type で投げられていることを示し，横力 C_s の測定結果や Flutter 実験の結果と矛盾なくボールは左方向に曲がっている．(b) は 2-シーム type で投げられたボールで，こちらは右方向に曲がっていることを示している．どちらも，空気力の測定結果 Fig. 11, 12 や Flutter 実験の観察結果と矛盾しない．

特に Fig. 13(a) の 4-シーム type ボールの観察結果は $(\phi, \theta) = (60^\circ, -3^\circ)$ の場合であり $\theta = 0^\circ$ で行われた $\theta = 0^\circ$ に近いので，空力係数の測定結果に基づき軌道計算を行った．その結果を Fig. 14(a) 投球ボールの観察結果，(b) 風洞実験による空力 3 分力からの計算結果として示す．(a) 投球ボールの観察結果，はボールの飛翔軌道の平面図における接線方向に対して 18.44m では 0.144m 曲がっていることを示している．これに対して，計算結果は 0.20m となっている．すなわち，ボール回転軸の方向とボールの進行方向が同じでも，縫い目との関係でボールに作用する横力係数が逆方向になる，という結果である．縫い目の作用として不思議な結果であるが，現在の



所その空気力学的なメカニズムの詳細は不明である。

このような風洞実験による空気力の測定結果 Fig. 12 から面白い計算が可能になる。この図の $\phi = 0^\circ \sim 30^\circ$ 付近に注目すると、この角度範囲で特に揚力係数 C_L はほとんど変化していない。したがって、ボールの Yaw 角度 ϕ だけをこの間で変えて投げても垂直方向のボールの軌道の違いは生じない。横力 C_s は $\phi = 0^\circ$ の場合は縫い目の対称性からは左右に生まれないはずであるが、縫い目の不均一性やボールのセッティングの精度の関係で少し現れた。それに対して $\phi = 30^\circ$ にはかなり $-Z$ 方向に横力係数 C_s の値が生じている。これらの実験値を使って軌道計算をした結果を Fig. 15(a) にボール軌跡の top view として、(b) には catcher から観察図として示す。

これらの計算結果の内、 $\phi = 0^\circ$ と 30° の結果に注目する。両方の条件では揚力係数 C_L がほとんど変わらないので、(b) 図のように上下方向の落下程度の違いはほとんど無い。しかし、(a) 図のように横方向へのシフトの程度は 30cm もの違いがある。

例えば左打席で構えている打者に左腕投手が $\phi = 30^\circ$ の 4-シーム直球を打者の腰付近を狙って投げたとする。馴れない打者には自分の腰に当たるデッドボールに見えるので、バットを振るところか腰を引いてこのボールを避ける。しかし、ボールはストライクと判定されてしまう。このようなケースは、甲子園で活躍する好投手と言われる高校生レベルであればしばしば見ることが出来る。

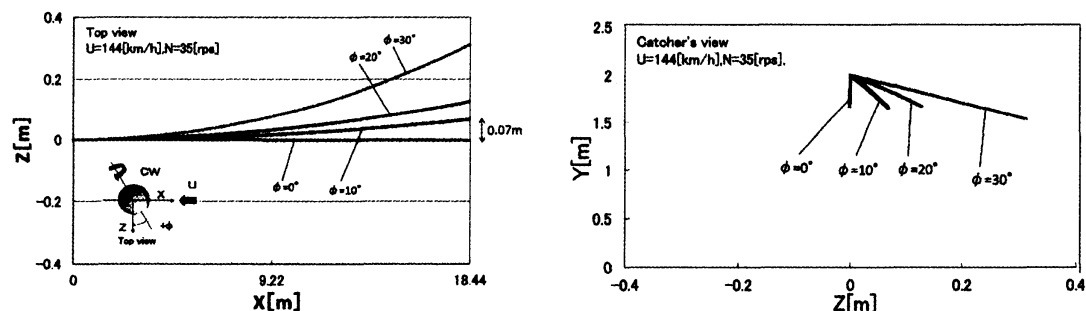


Fig.15(a), (b) Calculations of 4-seam ball trajectory with $\phi = 0 \sim 30^\circ$, $U = 144 \text{ km/s}$ (40 m/s), $N = 35 \text{ rps}$

また、1960年代に活躍した稲尾和久右腕投手は制球力が良いことで有名であったが、右打者のホームベースの外角からさらに2, 3個ボールが外れていても審判はストライクと判定して、打者泣かせの稲尾ボールと言われていた。しかし、実際にはボールを4-シームの回転軸で投げて真横にスライドさせて、ホームベースの外角をよぎるストライクであった可能性は十分にある。

4. ゴルフボールの3次元飛翔軌道方程式^{9),10),11)}

ゴルフボールの2次元的な飛翔に関する運動方程式とその検証はP. W. Bearman¹⁵⁾によって行われている。この研究では飛翔中のボールに加わる空気力は風洞実験により求められている。一方、ゴルフボールが3次元的な運動を行うことの一般的な概念は、J. J. Thomson¹⁶⁾によって提唱されている。その様子をFig. 15に示すが、要するにサイドスピンにより右や左にマグヌス効果で曲がるという説明である。この説明はその後100年以上も使われて来たようで、現在でもゴルフプレーの指導者はバックスピンによりボールは持ち上げられて飛び、同時にサイドスピンによって右や左に曲がると説明する。ゴルフボールに2本の回転軸があるかのような説明をする。

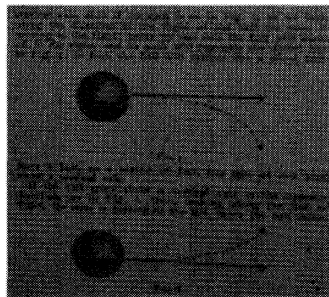
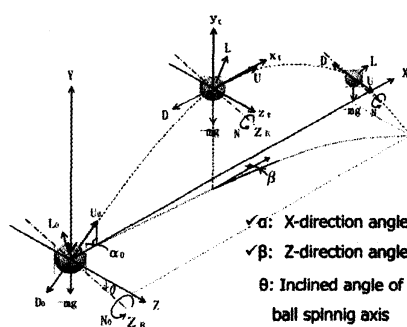
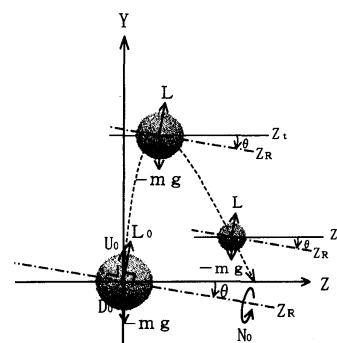


Fig.15 Side spin concept of 3-D flight of golf ball by J. J.Thomson¹⁷⁾



(a) 3-D flight trajectory of golf ball

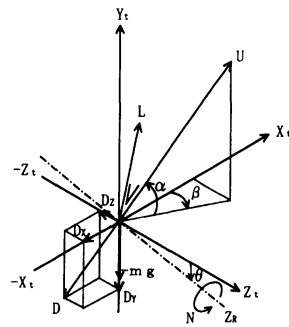


(b) Back view of golf ball flight

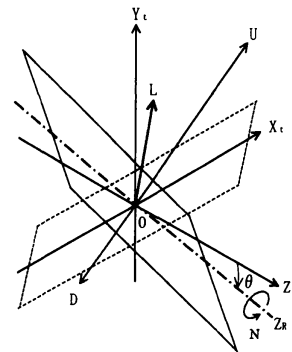
Fig.16 (a) 3-D trajectory of golf ball flight and (b) back view of ball flight for the formulations

この説明は矛盾である。そこで、ゴルフボールが3次元的な飛翔をする様子を Fig. 16(a)に示す。X, Z 軸が水平軸, Y 軸が垂直軸である。ゴルフクラブ(ドライバーなどのウッド, ユーティリティ, アイアン, ウェッジ)でヒットされたボールは回転軸が水平軸 Z から θ だけ傾いて(バンクして)飛翔を開始する。その θ は着地まで変化しない。Fig. 16(b)には後ろから見たボールの回転軸, 揚力, 重力の様子を示す。

Fig. 17(a)はボールが進行する方向と速度 U とそれに対して逆方向に抗力 D が作用し D の (X, Y, Z) 軸方向への成分を示す。(b)は速度 U と回転軸 N に対して直交する方向に揚力 L が作用している様子を示している。揚力 L の (X, Y, Z) 軸方向への成分を求める。その結果, (X, Y, Z) 軸方向への空気力は (F_x, F_y, F_z) となって次式のようにまとめられる。この式は運動方程式の外力項である。



(a) Drag force vector diagram



(b) Lift force vector diagram

Fig. 17 (a), (b) 3-components of drag and lift force on (X, Y, Z) directions

$$F_x(t) = \frac{1}{2} \rho A |U(t)|^2 \{-C_D(t) \cos \alpha \cos \beta - C_L(t) (\sin \alpha \cos \theta + \cos \alpha \sin \beta \sin \theta)\}$$

$$F_y(t) = \frac{1}{2} \rho A |U(t)|^2 (-C_D(t) \sin \alpha + C_L(t) \cos \alpha \cos \beta \cos \theta) - mg$$

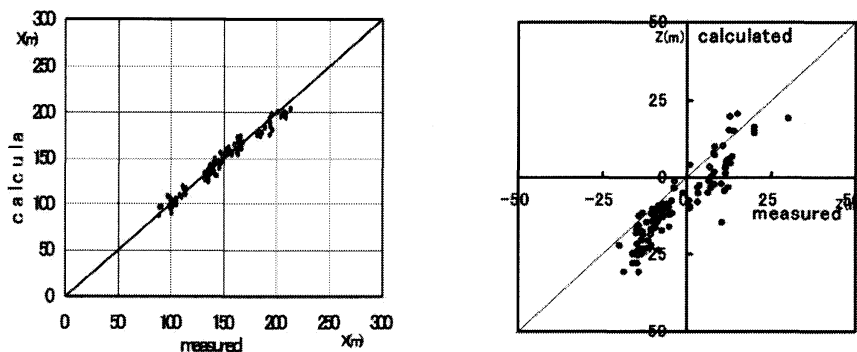
$$F_z(t) = \frac{1}{2} \rho A |U(t)|^2 (-C_D(t) \cos \alpha \sin \beta + C_L(t) \cos \alpha \cos \beta \sin \theta)$$

そしてこの式に必要な空力係数 (C_D , C_L) は風洞実験^{9),10)}により正確に求めておく。実験的に検証を行う際には、ショット直後の高速度カメラ映像から、ボールの飛翔軌道の数値 U , 各角度 (α , β , θ), 回転数 N などの初期値を求める。その後のボール速度や飛翔軌道はニュートン法により時間ステップ 0.01s 毎の数値計算により求めた。

3次元飛翔の結果を Fig. 18(a), (b) に示す。Fig. 18(a)はボールの着地点の X 距離の計算結果を縦軸に、観測結果を縦軸として示している。Fig. 18(b)は横ブレ距離 Z を同じく示している。両者共 45° の線上にあれば計算値と実験値が一致したことになる。横ブレ距離 Z はばらつきが大きいが大略 45° の線のまわりにばらついている。これは、実験時に横風が吹いていたことにもよるが、ボールの回転軸の傾き角度の測定精度の向上については今後さらに検討を要する。

ゴルフは自然風の影響下のスポーツである。自然風は地形や樹木によって大きく飛翔ボールへの影響が異なる。一様な海風が吹く海岸の風環境の中で大気境界層による高さ方向の流速が異な

る場



(a) Destination distance X

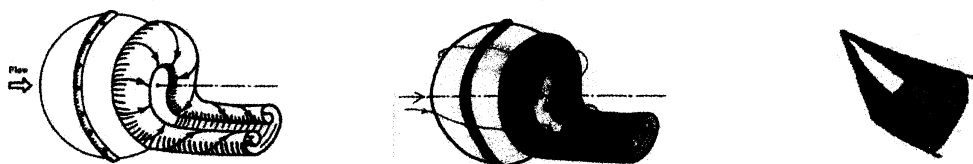
(b) Destination distance Z

Fig.18 (a), (b) Comparison of experiments and calculation of 3-D flight distance

合であるが、ボールに加わる空気力は大気境界層の影響を考慮して求めることが出来る。飛翔中のボールに加わる相対的な流速を考慮した 3-D の飛翔軌道の計算と実験を比較した研究¹¹⁾を行って良好な結果を得た。

5. サッカーボールの弱回転魔球の発生メカニズム¹⁴⁾

Taneda (1978)^{12), 13)}によると、滑面球の遷移レイノルズ数より高い流速域 ($Re=3.8 \times 10^5 \sim 10^6$) の超臨界レイノルズ数領域においては球背後に Fig. 19(a) のように 2 本の縦渦が発生する。これは球表面の境界層流れが Integrate して出来た渦の組織構造である。この渦は球の背後の流れ方向の中心線をほぼ対称軸として、 $5 \times 10^5 < Re < 10^6$ の範囲で全くランダムな回転が開始する。その結果、球には流体反力としてランダムな空気力が作用する、ということである。



(a) Vortex structure¹³⁾

(b) Original sketch by Taneda

(c) Delta wing flow

Fig.19 (a) Schematic representation of vortex structure in the range of $3.8 \times 10^5 < Re < 10^6$

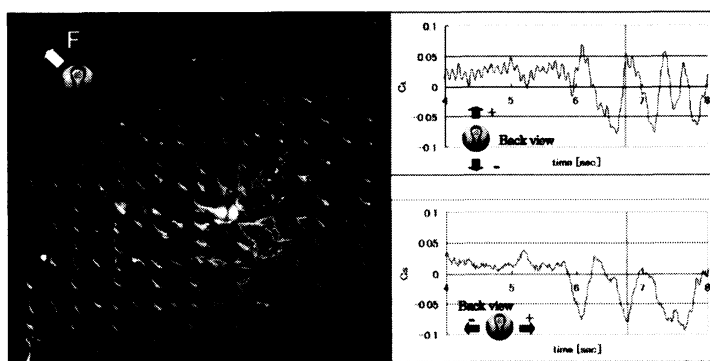
(b), (c): From his research notebook with permission of his family.

種子田は高レイノルズ数における滑面球の最初の論文¹²⁾では球のまわりの流れの概念図を画いていないが、論文¹³⁾には Fig. 19(a) を載せている。ご家族の許しを得てその間の研究ノートを見せて頂くと (b), (c) のようなカラーの綺麗な図が描かれており、デルタ翼の流れのスケッチもあり、深い洞察力によって (a) 図に辿り着いた思考過程が伺えて興味深い。生前、種子田はこの構造が正しいかどうか証明して欲しいと言われていた。この構造は位相幾何学的にも正しいと思わ

れる。この説明は、サッカーボールの弱回転魔球発生のメカニズムに適用できる。

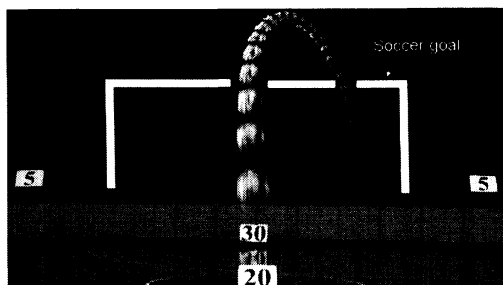
近年のサッカーボールの表面は5角形や6角形のパネルや、プロペラ状やローター状のパネルが張り合わされている。パネルの間は深さ1mm程度の張り合わせ溝がある。これが、表面ラフネスとなって境界層の乱流化への流速が滑面球に比べて早まる。同じ直径の滑面球では、 $U=25\text{m/s}$ で Drag crisis が発生するが、サッカーボールは $U=15\text{m/s}$ で Drag crisis が終わって、超臨界レイノルズ数領域の流れの特性を示す。

Fig. 20(a)にはサッカーボールの背後の流れをタフト法で可視化観察した一例を示す。可視化観察は250 fpsの高速度カメラで撮影している。(b), (c)には同時に計測した(b)非定常揚力と(c)非定常横力の時間履歴を示す。(b), (c)は4秒間の空気力の履歴であるが、実にランダムに作用していることが分かる。赤線の時刻の間($t=6.75\sim 6.85$)の0.1s間の流れの映像25枚の重ね書きを(a)に示した。揚力と横力の作用方向の合力を(a)に矢印Fで示しているが、渦はボール背後に伸びる中心シャフトに対して丁度対称の位置にあることが分かる。

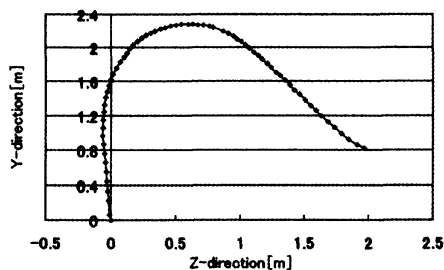


(a) Flow visualization of soccer ball by tuft method, (b) Upper: lift force, (c) Lower: side force
Fig.20 Vortex position behind soccer ball and unsteady aerodynamic force, $U=22.0\text{ m/s}$

実際に発射装置を使ってサッカーボールとバレーボールをほぼ無回転で発射させて観察した結果を Fig. 21 のサッカーボールの飛翔の(a)ストロボ映像と(b)飛翔軌道, Fig. 22 (a), (b):バレーボールの(a)ストロボ映像と(b)飛翔軌道として示す。いずれも奇妙な飛翔軌道を示しているが、

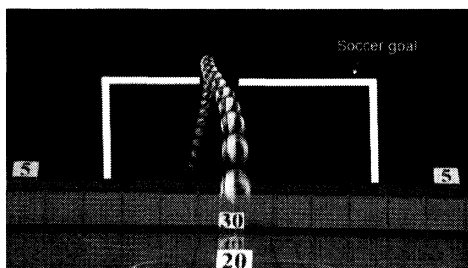


(a) Stroboscopic trajectory of soccer ball

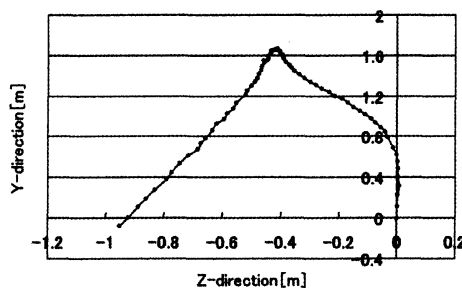


(b) Trajectory on Y-Z plane

Fig.21 Slowly spinning soccer ball flight by shooting machine, $U=110(31) \sim 65(18)\text{ km/h (m/s)}$



(a) Stroboscopic trajectory of valley ball



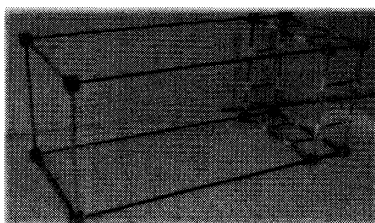
(b) Trajectory on Y-Z plane

Fig.22 Slowly spinning volleyball flight by shooting machine, $U=105(29) \sim 65(18)$ km/h (m/s)

サッカーボールの直径 $d=0.22\text{m}$, 質量 $m=0.430\text{kg}$ に対してバレーボールは 0.21m , 0.270kg と軽いのでバレーボールのフローターサーブの揺れ方がいかに激しいかが理解できる。

6. 流れの可視化技術スモークワイヤ法の進歩¹⁵⁾

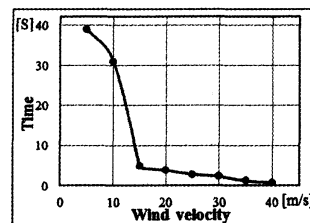
風洞実験で物体まわりの流れを可視化する方法の一つであるスモークワイヤ法はその簡便さから良く利用される。流れの中の細線に流動パラフィン塗り、加熱して発生するミストをトレーサーとして流し、それを照明して観察する。従来この方法の観測限界流速は 4m/s 程度以下であった。その理由は発煙時間が短いからであった。これまでの細線の配置は“一様流に直交させる”方法であった。ここでは、Fig. 23(a)のように“一様流方向に沿う”方法のミスト発生装置を作っ



(a) Frame structure,



(b) Illuminated mist in wind,



(c) Duration time of mist

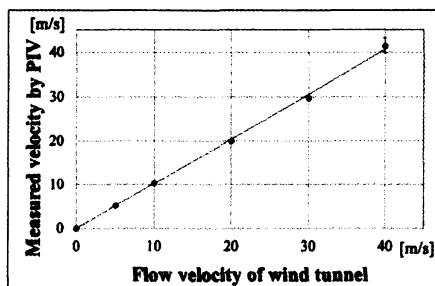
Fig.23 Stream-wise smoke-wire method and duration time with wind velocity up to 40m/s

た。これで発生させたミストに照明を当てると、Fig. 23(b)のように明るく光り、発煙時間は、Fig. 23(c)のように 5m/s では 40 秒間、 15m/s では $4 \sim 5$ 秒間、この風洞の最高流速 40m/s でも 1 秒程度は明るく発煙する。従来の方法に比べて 10 倍の流速で可視化が可能になった。

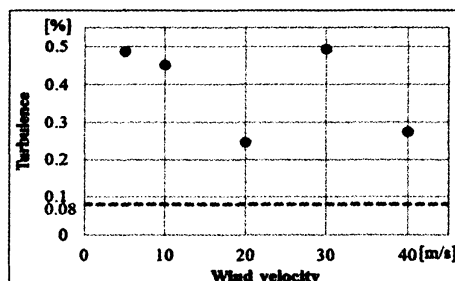
この条件で、ミスト発生装置の細線に流速と乱れ度の変化を PIV 法により調べた結果を Fig. 24(a), (b)に示す。風洞測定部の流速は設定流速とほぼ一致している。この風洞の乱れ度 0.08% から最大 0.5% まで増大している。乱れ度の増大を抑える工夫は今後の研究課題である。

従来の方法の細線を流れに直交する配置で張られた場合に細線が作る後流の影響を調べた優れた研究¹⁸⁾がある。その結果によると、①トレーサーであるミストの浮上速度の影響は微風速の $U=0$ 。

3m/s 以下では現れるので補正が必要になる, ②細線が作る速度欠損が風洞一様流と同等に回復する距離は, $U=4.0\text{m/s}$ 以上の風洞流速で細線($d=0.11\text{mm}$)から 20mm(細線直径の 180 倍)程度となる。したがって, 流れ方向に細線を張ったスモークワイヤ法に関しては, 速い流速域ではミストの浮上や速度欠損の問題は少ないと思われる。



(a) Uniform flow velocity

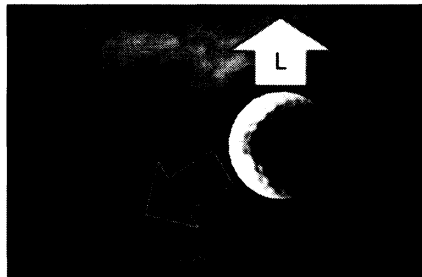
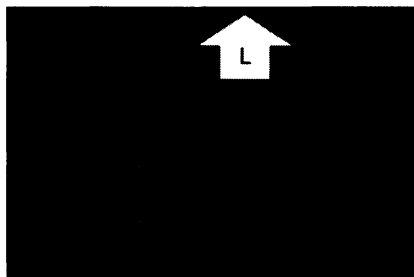


(b) Turbulence intensity

Fig.24 (a) Uniform flow velocity and (b) turbulence intensity influenced by “Stream-wise smoke wires”. In the fig. 24(b), 0.08% shows natural turbulence level in this wind tunnel.

高速度カメラで $U=40\text{m/s}$ の一様流中で回転する野球ボールとゴルフボールの後流を撮影した画像に PIV 解析を行って流線を描いた結果を Fig. 25(a), (b)に示す。20000fps の高速度カメラによる 40m/s での撮影でも, 明るさと持続時間に問題はなかった。

ボールの回転にともなって後流はいずれも下方に大きく傾いており, 大きな揚力の発生と対応している。



(a) 4-seam baseball ball, $Sp=0.40(N=69\text{rps})$ (b) Golf ball, $C_L=0.36$, $Sp=0.425(N=120\text{rps})$

Fig.25 Streamline behind spinning (a) baseball and (b) golf balls, $U=40\text{ m/s}$ (144km/h),
Frame speed of high speed camera was 20000 fps.

7. あとがき

筆者には硬式野球ボールの 2-シーム, 4-シームの変化の空気力学的な研究による移動方向の違いを王貞治ソフトバンクホークス会長に説明する機会があった。王会長は実に真摯に耳を傾けた後に「ダルビッシュが投げているボールだろう」と即座に理解し指摘された。魔球と言われるス

スポーツボールの変化球は、これまでも超一流のスポーツ選手によってすでに発見されており、武器として使われて来たものであるように思う。

ゴルフボールが3次元飛翔する原因は100年以上言われて続けて、ゴルフのインストラクターが教えて来た“サイドスピンとバックスピンが同時発生している”という説明は物理的には矛盾している。大西久光氏¹⁹⁾はその著書で“ボールは決して横に回って飛んでは行かない。ある程度、回転軸は地面に平行な方向で回転しているが、その軸が少しずれる。それがサイドスピンである”，と明快に書いている。実は研究当初われわれは大西氏の指摘を知らないで実際のゴルフプレーの中の観察からヒントを得て、3次元飛翔軌道の運動方程式として定式化したものであるが、概念を提唱した大西氏と同じ結論になった。大西氏の先見性に敬意を表す。回転軸が“バンクしている”という概念に沿ってボールの飛翔弾道をコントロールすることがプレーヤーの今後の課題である。

スポーツ選手はしばしば経験的な手法に頼りながら、常に極限状態のトレーニングを行っている。その場合に最大のテーマである“故障“をいかに減らすかという問題解決に、これらの研究成果が少しでも役立つことを望んでいる。

種子田定俊九州大学名誉教授は貴重な研究ノートを遺されて2011年6月10日に亡くなられた。その中から Fig. 19(b), (c)の転載を許可されたご遺族に深甚の謝意を表す。

引用文献

- 1) Taketo Mizota, Hiroyuki Kuba and Atsushi Okajima: Erratic behavior of knuckleball (1)Quasi-steady flutter analysis and experiment, J.of Wind Engineering, No.62, pp.3~13, January, 1995.
- 2) Taketo Mizota, Hiroyuki Kuba and Atsushi Okajima: Erratic behavior of knuckleball (2)Wake field and aerodynamic forces, J.of Wind Engineering, No.62, pp.15~21, January, 1995.
- 3) Taketo Mizota and Yoshiyuki Kawamura: 3-D trajectory anlysis os side-spin knuckle ball and quasi-steady side-force in flight, JSME(B), Vol.73, No.734, No. 06-1094, pp.1987-1992, 2007-10.
- 4) Daisuke Nishikiori and Taketo Mizota: Research on spiral-spin knuckle ball, JSME, Fluid Engineering Conference 2004, No.04-25, 619, p.222.
- 5) Daisuke Nishikiori, Taketo Mizota and Hiroyuki Kuba: Erratic behavior of knuckle ball (The 3rd Report), Wind Engineers, No.99, pp.105-106, April 2004.
- 6) Taketo Mizota, Hiroyuki Kuba, Shinichiro O-hara and Atsushi Okajima: Erratic behavior of forkball (Aerodynamic mechanism of sinking forkball), J.of Wind Engineering, No. 70, pp.27~38, January, 1997.
- 7) Taketo Mizota, Daisuke Nishikiori and Kazuaki Konishi: aerodynamics and trajectory of vertical slider of baseball ball, JSME, Ser.B, Vol.73, No.734, Paper No.06-1094, pp.1987-1992, 2007-10

- 8) Junya Hasegawa, Seima Sakamoto, Takeshi Naruo and Taketo Mizota: Aerodynamic force on spinning baseball ball with change of rotation axis direction by wind tunnel Ttst, JSME, No.11-17,A4, pp.31-34, Sports and Human Dynamics in Kyoto Oct.31-Nov. 3, 2011.
- 9) Takeshi Naruo and Taketo Mizota: Aerodynamic force measurements of a golf ball and 3D trajectory anylisis, Nagare Vol. 23(2004), pp.203-211.
- 10) Takeshi Naruo and Taketo Mizota: Aerodynamic force measurements of highly spinning golf ball in uniform flow and trajectory experiment, JSME, Ser.B, No.03-633, Vol.70, No.697(2004-9), pp.2371-2377.
- 11) Taketo Mizota, Sungmin Park, Takeshi Naruo and Tomokazu Fukamachi: 3-D flight forfulation of golf ball under atmoapheric boundary layer and experiment, Proceedings of the Symposium of Wind Engineering, No.18, 2008,pp.281-286.
- 12) 種子田定俊, 天本 肇, 石井幸治: 高レイノルズ数における球のまわりの流れ, 九州大学応用力学研究所所報, 第 44 号, pp. 1-11, 昭和 51(1975)年 1 月.
- 13) Sadatoshi Taneda: 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.
- 14) Taketo Mizota, Kouhei Kurogi, Yuji Ohya, Atsushi Okajima, Takeshi Naruo & Yoshiyuki Kawamura: The strange flight behavior of slowly spinning soccer Balls, 22 May 2013, www.nature.com/srep, nature, SCINTIFIC REPORTS, | 3:1871 | DOI:10.1038/srep 01871, pp.1 -7.
- 15) 溝田武人, 田北和幸, 鳴尾丈司, 大屋裕二, 阿比留久, 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, 2014.10.31
- 16) P.W. Bearman and J.K.Harvey: Golfball aerodynamics, Aeronaut.Q. 27, (1976), pp.112-122.
- 17) J. J. Thomson: The dynamics of a golf ball, nature, No.2147, Vol.85(1910), pp. 251-257.
- 18) 福富純一郎, 中瀬敬之: スモークワイヤ法による空気流の流速測定, ターボ機械, 第 22 巻, 第 10 号, pp.14~21, 1994.10.
- 19) 大西久光: ゴルフボールその飛びの秘密, 日本工業新聞社, 1986, pp.74(サイドスピン).

溝田武人 E-mail address : mizota@fit.ac.jp