

硬式テニスボール・ラケットのデジタル  
画像処理による流体力学的改善の研究  
—テニスボールの消耗度とボールの飛行距離—

東 京 大 学 小 林 敏 雄

(共同研究者) カールスルーエ工科大学 W. F r a n k

東 京 大 学 佐 賀 徹 雄

同 瀬 川 茂 樹

同 長 瀬 久 子

**A Study of Fluid Dynamics on A Tennis Ball and  
Racket Using the Digital Image Processing**

—A View on the Degree of Wear of a Tennis Ball and its Trajectory—

by

Toshio Kobayashi

*Institute of Industrial Science, University of Tokyo*

W. Frank

*Institut für Strömungslehre und Strömungsmaschinen*

*Universität Karlsruhe*

Tetsuo Saga, Shigeki Segawa, Hisako Nagase

*Institute of Industrial Science, University of Tokyo*

**ABSTRACT**

A relation between the degree of wear of a tennis ball and its motion trajectory has been quantitatively analyzed by using the digital image processing. The degree of wear of the tennis ball and its spinning speed having been taken as experimental parameters, the

influence of these two parameters on the trajectory has been examined statistically through numerous experiments.

The trajectory of a brandy new ball and an old one have been measured under three different spinning conditions, while maintaining the initial speed of these two balls, By taking the image of the initial movement of the balls with a high speed video camera when it has just come out of the tennis machine and analyzing those image through the digital image processing, the traveling speed, the spinning speed, and the flying angle of the balls are measured automatically.

Furthermore, the height of the moving ball from the court is measured when it passes over the line of the net, and the flying distance between the line of the net and the reaching position of the ball at court is also measured. The trajectory of the ball is decided by four positions ; the leaving spot of the ball at the tennis machine, the initial position of the ball near the tennis machine right after flying, the position of the flying ball over the net, and the reaching position of the ball at court.

The main results are as follows :

- 1) The influence of the degree of wear of the ball on its trajectory, decreases as the ball is spinning.
- 2) The trajectories of the balls with spinning forward (gravity direction) for the trajectory are similar, even if the degree of wear of those balls are different. And the variance of those trajectory are also small.
- 3) The flying distance (reaching distance of the ball) of the more worn balls is farther than that of the brandy new ones when the balls are spinning backward for the trajectory.
- 4) The variance of the trajectory of those two kinds of the balls is large when these balls are little spinning.

Concerning the above, the mutual influence of the initial spinning speed and spinning direction of the balls on the relation between the degree of wear and the trajectory of the balls is different.

## 要 旨

テニスボールの消耗度とボールの飛行軌跡との関係を画像処理を用いた実験により定量解析した。パラメータをボールの摩耗度と回転数に取り、これらがボールの飛行軌跡に及ぼす影響を実験により統計的に調べた。新しいボールと消耗したボールを用いてボールに与える初期速度を一定に保ち、ボールの回転数を三段階に変化させてボールの飛行軌跡を計測した。

ボールの初期の運動状態をボール打出し機から打出された直後に高速度ビデオカメラで撮影し、これを画像解析してボールの速度、回転数および飛行角度を自動的に求め、つぎにこのボールがテニスのネットを通過するときの高さを計測し、最後にボールのコート上の着地位置を計測した。ボールの打出し位置、打出し直後の位置、ネット位置における通過高さおよび着地点の4点からボールの飛行軌跡を推定した。同時に各計測位置におけるデータのばらつきを調べた。

本研究で得られた主な結果は、

- 1) ボールに回転を与えると、ボールの消耗度が飛行軌跡に及ぼす影響が減少する。
- 2) 順回転（重力方向）するボールは、ボールの消耗程度が違う場合でも類似の飛行軌跡をとり、軌跡のばらつきも比較的少ない。
- 3) ボールが逆回転する場合は、消耗度の高いボールは新しいボールに比べその飛行距離（ボールの着地点位置）が増大する。
- 4) ボールの回転がほとんどない場合には、新しいボールも消耗したボールもその飛行軌跡のばらつきが大きくなる。

以上のように、ボールの消耗度とボールの飛行軌跡との関係は、ボールに与えられる初期の回転数と回転方向によりその影響が異なることがわかった。

## まえがき

テニス（硬式）は、現在かなり普及したスポーツのひとつである。老若男女を問わず、また技術レベルに応じたプレーが可能でプレーにかかる費用も安価なことから、今後さらにテニス人口が増加していくものと思われる。テニスで使用される用具のうち最も重要な物はボールとラケットである。

ボールはトーナメントプロ等の試合ではサービス時に 200 km/h 以上の速度で打ち出され、高速でしかも回転しながら相手コートに向かって飛ぶ。この時、ボールには非常に大きな空気抵抗が作用し、ボールはその速度と回転数に応じた飛行軌跡で運動する。また、着地後のバウンドの変化も多種多様である。テニスボールの運動特性を流体力学的見地から解析した例は、空気抵抗を省略した弾道方程式により解析した数例の報告<sup>1,2)</sup>はあるが、ボールの摩耗程度によりその飛行軌跡を解析した例はなく、また実験的方法により解析した例もない。そこで、本研究は打ち出されたボールの着地するまでの飛行軌跡に、ボール表面の「フェルト」の状態（ボールの使用回数による摩耗程度）がどのように影響を与えるのか流体力学的立場から実験解析を行ない、その後考察を行なったので報告する。実験は未使用のボールと、「フェルト」をほとんど取り除いた2種類のボールを用いて行なった。

### 1. テニスボールに働く流体力

テニスボール飛行軌跡の鉛直断面内でボールの運動を考えた場合、回転飛行しているボールに働く力は図1に示すように重力G、抗力D、揚力Lの3力である。テニスボールの空中での運動を考察する場合は、2次元断面内の運動に限定してもボールの飛行軌跡はほぼ正確に記述できる。抗力Dは流速の2乗に比例し、揚力Lは（以下、順回

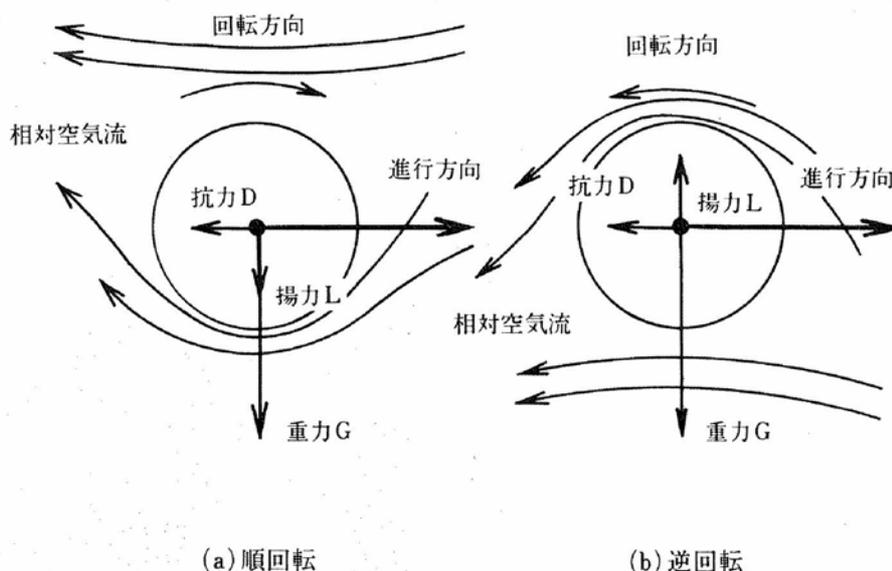


図1 回転する球体に働く力

転と呼称) 図中 (a) で示すように進行方向に向かっている回転の場合は進行方向に垂直下向きに、(以下、逆回転と呼称) 図中 (b) で示すように進行方向に向かっている逆回転の場合は上向きに作用する。揚力の大きさは回転数に比例し、また重力に比べてかなり小さい。これらの3力の合力によりボールの鉛直断面内の飛行軌跡は決定される。

### 1.1 抵抗力

球状物体に働く抵抗力  $D$  は次式であらわすことができる。  $D = (1/2) \rho U^2 C_D S$  (ここに  $\rho$  は空気の密度、 $U$  は速度、 $C_D$  は抵抗力係数、 $S$  は物体の代表面積)。抵抗力係数  $C_D$  は物体の形状によって異なり  $Re$  数 ( $Re = Ud/\nu$ ,  $d$  はボール径、 $\nu$  は空気の動粘性係数である) によって変化する。流体中に置いた物体に働く力を考察する場合  $Re$  数を調べることは重要である。

いま市民テニスレベルの中級クラスのテニスプレーヤを想定すると通常のスロークスピードは  $70 \sim 90 \text{ km/h}$  と考えられ、ボールの径は約  $6.6 \text{ cm}$  であるから  $Re$  数は約  $10^5$  となる。球のまわりの流れは、 $Re$  数が  $1.5 \sim 4 \times 10^5$  程度になると抵抗係数が急激に減少するところがある。この  $Re$  数を臨界  $Re$  数、速度を臨界速度と呼ぶ、流

れの乱れ、物体表面の粗さなどの条件により臨界速度は変化する。本報告の場合、ボール表面に付着した「フェルト」の影響で臨界速度はかなり下がり、ボールまわりの流れは乱流状態になっていると推測できる。

### 1.2 マグナス効果による流体力

ボールが回転して運動する場合は、回転面内で運動方向と直角方向の揚力が生じる。回転のないボールのまわりの流れは上下対称であるが、ボールが回転すると流れが上下非対称になる。図1の (a) に示すようにボールが順回転している時はボール下側の相対流速が上側の相対流速に比べて大きくなり、下側の圧力が上側の圧力に比べて小さくなる。このために上から下に向かう揚力が働く。逆に (b) に示すようにボールが逆回転している時は下から上に向かう揚力が生じる。

このように球体の回転によって揚力が生じる現象をマグナス効果という。揚力  $L$  は次式であらわすことができる。  $L = (1/2) \rho U^2 C_L S$  (ここに  $C_L$  は揚力係数)。ボールの運動軌跡を示すもっとも単純な式は、  $m (dV/dt) = D + G + L$  ( $m$  はボール質量、また  $G$  と  $L$  は同一方向に正方向を取る) となる。したがって、いかに  $D$  と  $L$  の流体力学的な力を評価するかが課題となる。ボール表

面が滑面の場合には理論的あるいは実験的に D, L を推定することができるが、「フェルト」がある場合には理論的推測は困難であるし、また実験データの集積もきわめて少ないのが現状である。

## 2. 実験方法

テニスボールの「フェルト」が十分に付着している場合 (Ball-A : 未使用ボール) とかなり消耗した場合 (Ball-B) の 2 種類のボールを用いて以下のような実験を行なった。

### 2.1 飛行軌跡の計測

ボールに一定の初速度を与えボールの回転状態を (1) 順回転, (2) 逆回転および (3) 回転を与えない場合と分けて「フェルト」の有無による飛行軌跡を調べた。Ball-A, B の物性値と実験条件を表 1, 表 2 (表 1 中, 硬式テニスルールによると反発高さは高さ 254 cm の位置からテニスボールをコンクリート床に自由落下させた場合のバウンドによる高さであり, その高さは 134.6 cm から 147.3 cm の間でなければならない) に実験

表 1 使用したBallの物性値

Ball	摩耗程度	直径 (mm)	重量 (g)	反発高さ (mm)
A	未使用	66.6	56.9	146.4
B	摩耗大	64.1	55.8	155.4

表 2 実験条件

Case	使用Ball	速度 (km/h)	回転数 $s^{-1}\{rps\}$	打出し角度 (deg.)
a	Ball-A	84.7	73.0	16.5
b	Ball-B	86.1	74.8	17.5
c	Ball-A	77.5	-61.3	10.8
d	Ball-B	75.7	-68.3	10.3
e	Ball-A	81.2	-5.7	10.5
f	Ball-B	81.6	-1.8	17.5

に使用したボール A, B の断面部分写真をスケールと共に図 2 に示した (左は Ball-A, 右は Ball-B)。

ボールの打出しに際して人間が一定の速度と回転数と打出し角度をボールに与えることはほとん

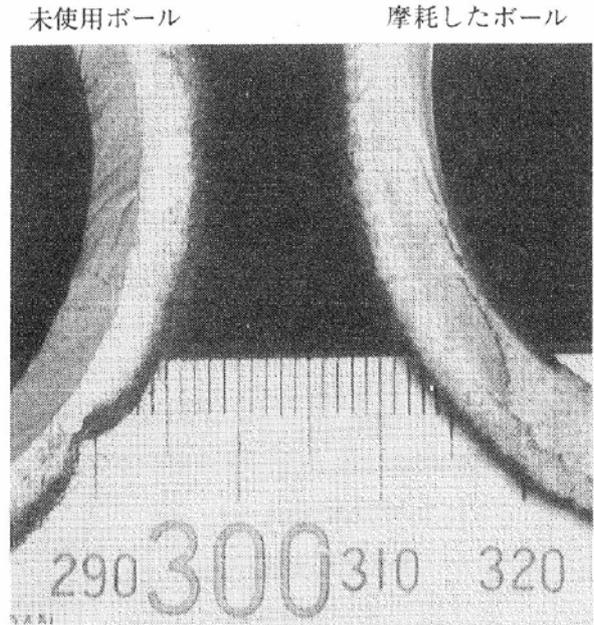


図 2 2種類のテニスボールの断面図

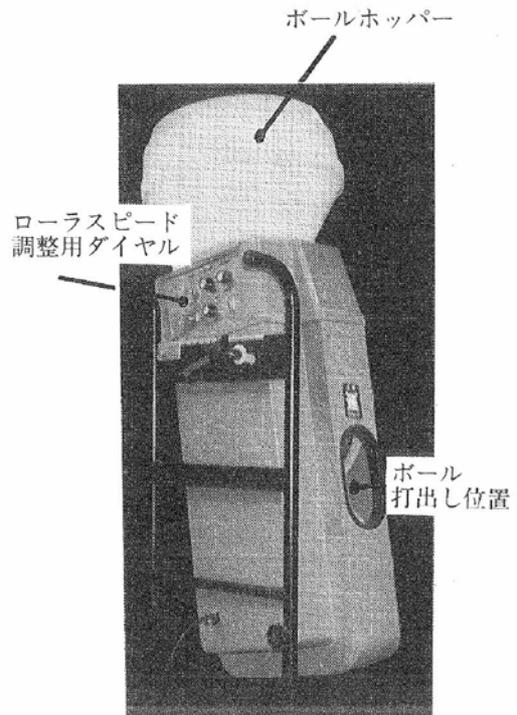


図 3 硬式テニスボール打出し機

ど不可能であるので、図3に示す硬式テニスボール打出し専用機（シルバー精工株式会社，PM 20 SH）を用いた。

この装置は、内装した上下のゴムローラの回転を調整することによりボールにはほぼ二次元的な順回転、逆回転、あるいは回転無しの状態を与えることができる。打出し機の設定条件は中級程度のテニスプレーヤを想定し速度約 80 km/h，回転数は順・逆回転とも毎秒約 60 回とした。回転は「フェルト」の有無によっては変えずほぼ一定とした。Ball-A, B に対して，上記回転条件の違いによる飛行軌跡の状態を，ボールがネット位置を通過するときの高さ  $h$  と，ネットからボールが着地するまでの飛距離  $l$  によって評価することから（参考までに硬式テニスルールによるとネットの高さは中央で 0.914 m，ネットからベースラインまでの距離は 11.89 m である），本実験ではボールがネットを越え，ベースライン内に着地するように打出し角度を設定した。ベースライン後方から相手コートに向かって撮影した写真を模式図とともに図4に示した。

ボール打出し機をベースライン上に設置し，相手コートに向けボールを打出すので打出し直後のボールを観測するため，黒い紙で作ったボール観測用の箱（長さ 2 m×高さ 1 m×奥行き 0.5 m）をコート内にバックラインに沿って設置した。ボールが箱の中を通過する様子を，ボール進行方向とほぼ直角な右方向から図5に示す高速度ビデオカメラ（ナック製 HV 200，200 コマ/秒）により撮影した。この時，瞬間的なボールの運動状態を連続的に撮影するためにカメラの撮影とストロボスコープの照明（照明時間 1 / 10000 秒）とを同調させた。

撮影されたボールは模式図で示すように，ネット位置でのボール通過高さ  $h$  と飛距離  $l$  の計測が行なわれた。高速度ビデオカメラにより 1 / 200 秒の時間間隔で撮影された飛行中のボール 2 画像

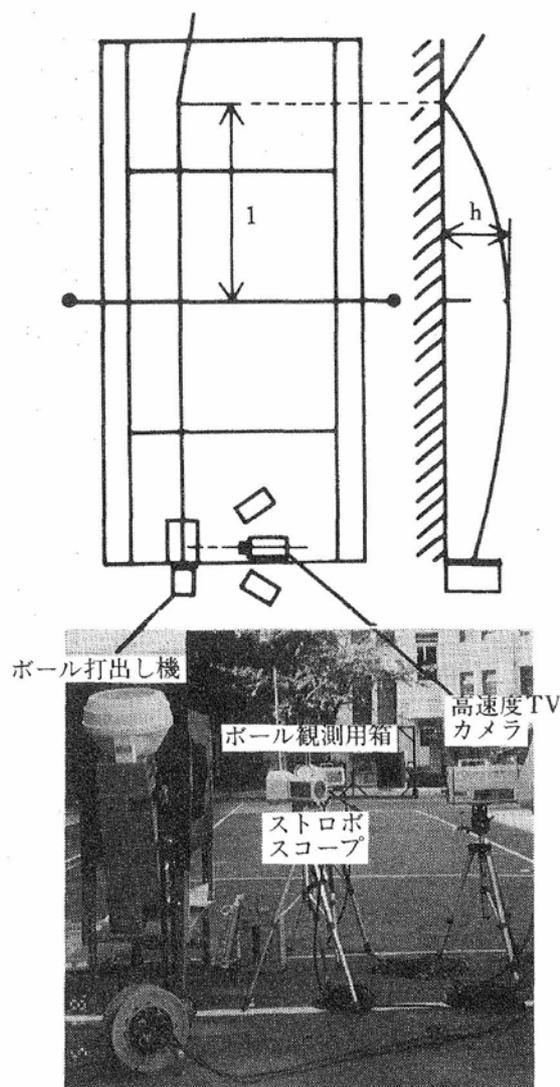


図4 実験風景

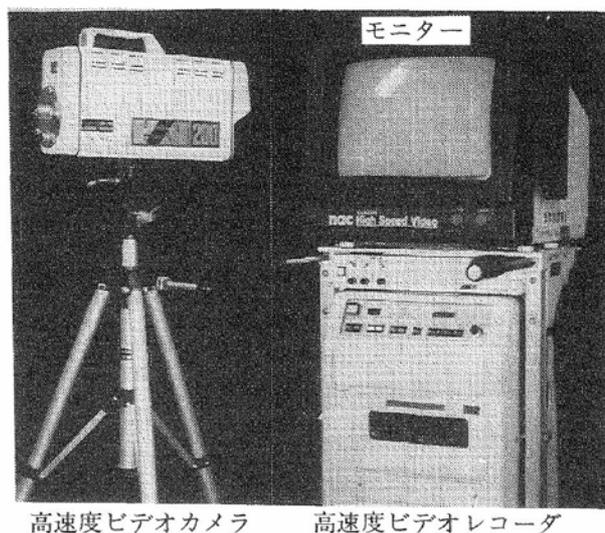


図5 高速度ビデオカメラ

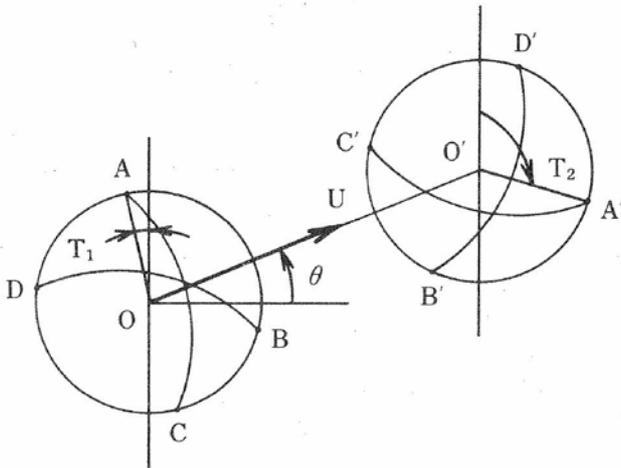
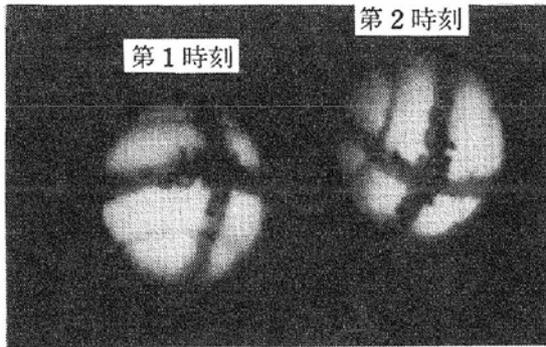


図6 飛行中のテニスボール (Case e)

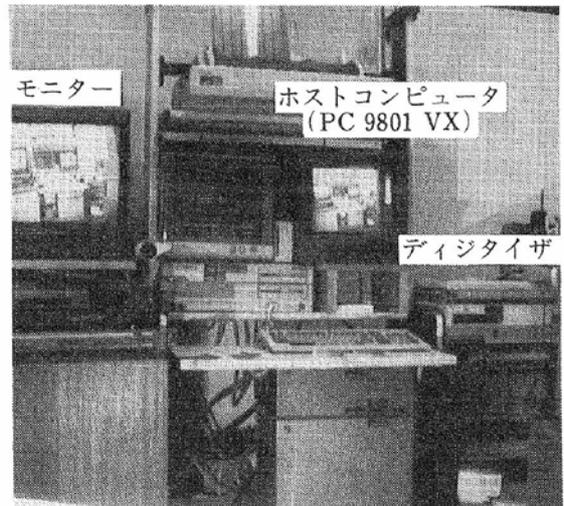
を重ね、模式図とともに図6に示した。

図中のボールは、左から右方向に約 80 km/h で飛び、毎秒約 60 回の逆回転をしている。ボールに描いた十文字の線はボールの回転数を計測のために用いる線である。実験はいずれの場合も 50 回行ない、ボール個々の物性値のばらつきを避けるために単一のボールを使用して行なった。

### 2.2 画像解析

ビデオテープに記録されたボールの映像は、図7に示す画像処理解析装置により画素数 512 × 480、濃度階調 256 で A/D 変換され、デジタル画像としてイメージメモリーに記録された。ボールの相対速度  $u$ 、回転数  $n$ 、打出し角度  $\theta$  の計算は独自に開発した高速画像解析プログラム<sup>3,4)</sup>を用いて行なった。これらの計算は鉛直 2 次元断面内における運動を仮定して求めた。

図6の模式図において、ボールの速度  $u$  と打出し角度  $\theta$  は以下に示す方法で決定した。第1時刻



画像処理装置

図7 画像解析処理装置

のボールの鉛直断面内の重心位置  $o$  を画像処理装置のディジタイザを用いボールの上下左右端点を読み取ることにより求め、さらに同様の方法で 1 / 200 秒後に撮影した第2時刻のボールの重心位置  $o'$  を求める。その後第1, 2時刻間(時間間隔 1 / 200 秒)のボール重心位置  $o, o'$  の移動距離と方向により決定した。またボールの回転数  $n$  は次に示す方法により決定した。

第1時刻の画像において、撮影された画像におけるボールの周囲と十文字にマークした線の4ヵ所の交点(図中 A, B, C, D)のボール重心を通る鉛直線からの角度(例えば  $T_1$ )を求め、次に第2時刻のボールについても同様の操作を行なうことにより4ヵ所(図中 A', B', C', D')の角度(例えば  $T_2$ )を求める。その後、対応する各交点(Aは A', Bは B', Cは C', Dは D')の 1 / 200 秒間の角度変化量を求め、これらを平均化することにより求めた。

### 3. 実験結果および考察

図8に実験 Case a~f におけるテニスボールのネット位置からベースラインまでの飛行軌跡を模式的に示した。図は(1)順回転、(2)逆回転および(3)回転を与えない場合の3例に分け、

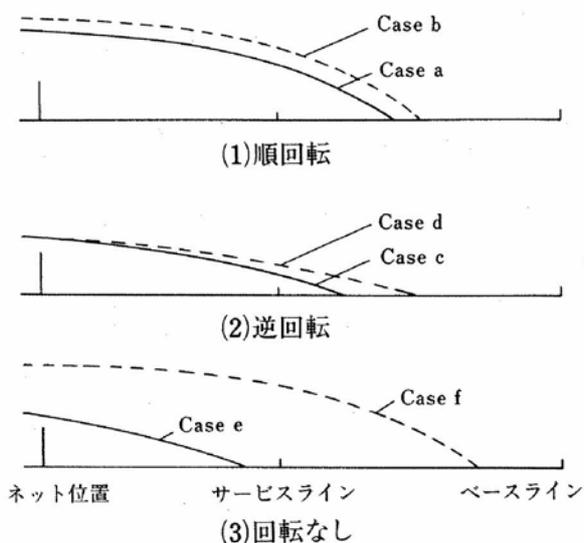


図8 テニスボール飛行軌跡

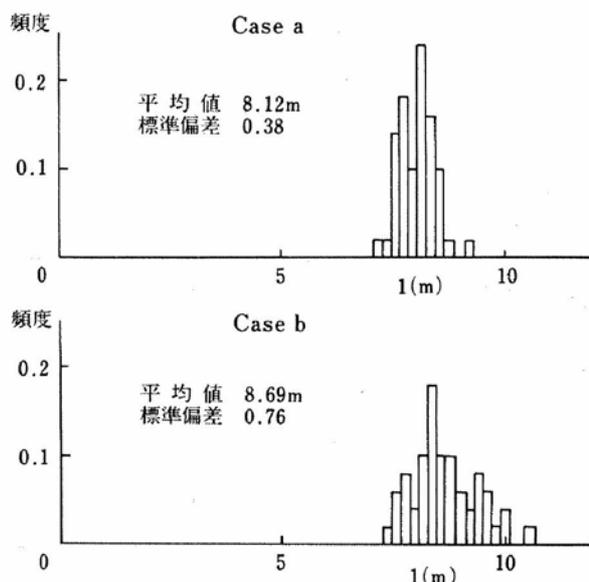


図10 Case a, b (順回転) のボール飛距離ヒストグラム

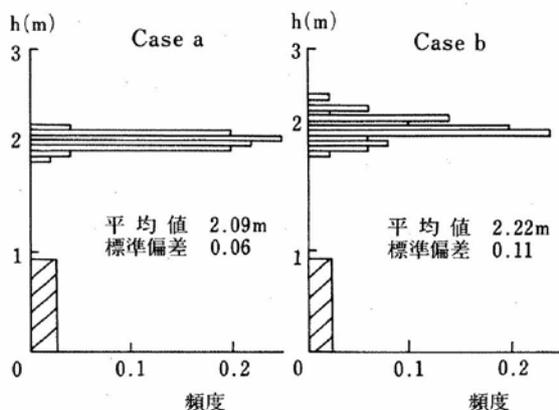


図9 Case a, b (順回転) のネット位置でのボール通過高さヒストグラム

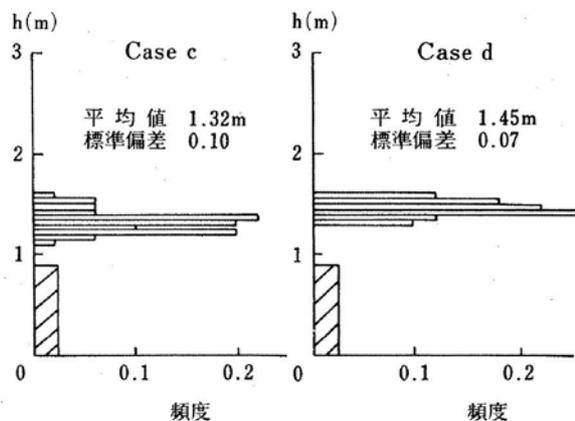


図11 Case c, d (逆回転) のネット位置でのボール通過高さヒストグラム

実線は Ball-A を、破線は Ball-B を示している。この軌跡はボールの打出し位置、ネット位置でのボール通過高さ、着地点位置の3点から推測した図である（縦横比は1：1で示している。）

### 3.1 順回転の場合

Case a, B のネット位置におけるボールの通過高さのヒストグラムを図9に、ネット位置からベースラインまでの飛距離を図10に示した。各測定値の平均値、標準偏差を加えて示した。図9の縦軸はネット位置でのボールの通過高さ、横軸は頻度、またネット高さを斜線領域で示した。図10の横軸は、ネットからの距離、縦軸は頻度をあらわす。Case a に比べて Case b はネット位置

での通過高さは約 10 cm 高く、飛距離は約 60 cm 長い。また標準偏差も 2 倍程度大きい、いずれもその絶対値は小さく両者とも似た飛行軌跡となることが推測された。

### 3.2 逆回転の場合

Case c, d のネット位置での通過高さのヒストグラムを図11に、飛距離を図12に各測定値の平均値、標準偏差を加えて示した。この場合もボールに順回転を与えた場合と同様に両者ともに良く似た飛行軌跡で運動をすることが推測され

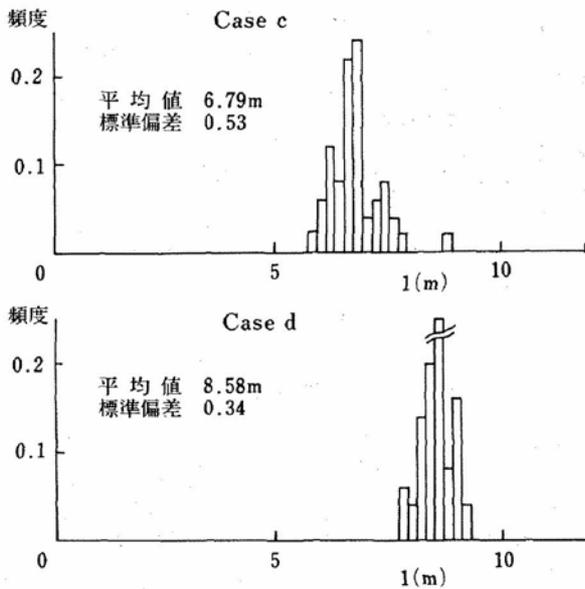


図12 Case c, d (逆回転) のボール  
飛距離ヒストグラム

た。ただし Case d の場合ボールが地面に接地する際に入射角度が小さい。流体力学的に考察するならば、Case c は「フェルト」が長いことにより飛行中の空気抵抗が Case d に比べて大きく、そのために接地時は速度、回転数ともに低下していると推測できる。重力の方向と Case c, d の速度と揚力の差を比較すると Case c は Case d に比べて地面に接地する際の入射角度が小さくなることが推測できる。

### 3.3 回転がない場合

Case e, f のネット位置での通過高さのヒストグラムを図 13 に、飛距離を図 14 に各測定値の平均値、標準偏差を加えて示した。Case e, f の場合はボールに回転を与えた場合と異なり「フェルト」の有無による差が大きかった。

図からわかるようにネット位置でのボール通過高さ、飛距離ともに Case f の方が高かつ遠い。ボールの速度、回転数はほぼ一定値であるがボールの打出し角度が Case e は 10.5 度、Case f は 17.5 度とその差が 7 度ある。これは打出されたボールがベースライン内に着地するように打出し機の角度を設定したためである。ここで、Case f

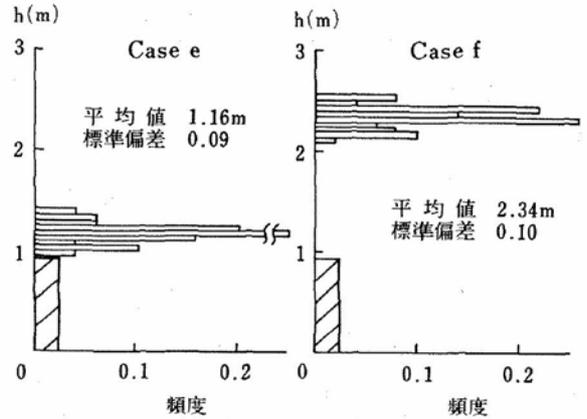


図13 Case e, f (回転なし) のネット位置での  
ボール通過高さヒストグラム

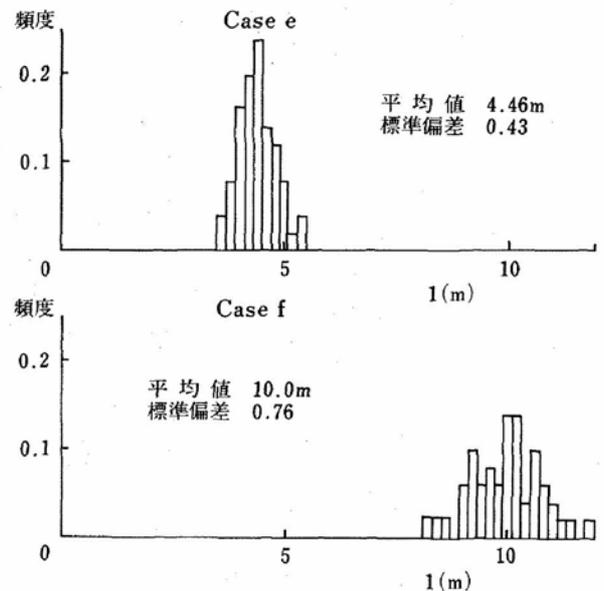


図14 Case e, f (回転なし) のボール  
飛距離ヒストグラム

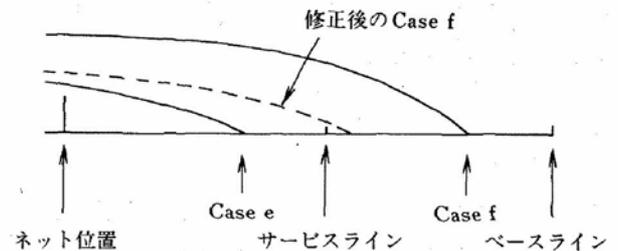


図15 Case f の補正後の飛行軌跡

のボールの飛行軌跡を図 8 (3) の Case f のように仮定して、ボール打出し位置を中心に 7 度下げた時の着地位置を推定し、Case e との着地位置

置の差を求めるとその差は約 1.3 m 程度になることが推測される。図 15 に Case e, f の推定飛行軌跡を実線で、Case f の修正後の軌跡を破線で示した。ボールの飛行中の状態を進行方向から観察すると、Case e, f とともに左右にゆらゆらと揺れ、野球のピッチャーが用いる「パームボール」的な動きをしている。

このようにボールの回転が少ないとき、飛行軌跡にはボールは背後の後流域の影響が顕著にあらわれてくる。このような状態ではボールコントロールは難しいと考えられる。特に、Case f は揺れが大きく飛距離のばらつきも大きい。「ボールの揺れ」はボールまわりの流れがボールから剥がれて（剥離と呼ぶ）背後に生じる乱れた領域（後流域と呼ぶ）が前後あるいは周方向に三次元的に変動する際に生じる抗力の変化により発生すると考えられる。

#### 4. まとめ

テニスボールの使用状態（摩耗の程度）とその運動軌跡の関係を、画像処理を用いた実験解析により定量的に調べた。ボール表面の「フェルト」の状態を、新品の物とかなり摩耗した状態のものに分け、一定速度のもとでボールの回転数を変えてその飛行軌跡を調べた。

- 1) 順回転を与えた場合、「フェルト」がある場合、ない場合ともに似た飛行軌跡となる。
- 2) 逆回転を与えた場合、摩耗したボールは新品のボールに比べ着地点は遠くまた入射角度も小さい。
- 3) 回転を与えない場合、両者とも飛行中のボールの運動が不安定で、特に摩耗したボールの場合は左右への揺れが大きく飛行軌跡が大きくばらつく。

以上のようにボールの表面状態は、ボールに順回転を与えた場合にはその飛行軌跡に与える影響は比較的小さく、逆回転や回転がない場合には大きいことがわかった。これはプレーヤが実際にこのようなボール回転を与えてプレーするときに感じる感覚と一致するものである。今後はボール飛行軌跡を連続的に捕らえるとともに、実際のテニスボールを用いた抵抗係数の計測、ボールまわりの流れの可視化、着地前後のボールの回転数変化や入射反射角度の変化の計測等の実験解析を行ない、従来から行なわれてきた弾道計算の補正を行なう予定である。

終わりに、実験に協力していただいた東京大学大学院博士課程の都徳熙、東京大学大学院修士課程の章潔波、東京大学生産技術研究所研究員の金森久幸、森 幸三、同所試作工場の小野寺 章の諸氏に心から感謝致します。本研究を遂行するに当たり、高速度ビデオカメラを快く貸与いただいた、東京大学生産技術研究所第 2 部棚沢研究室、テニスボール打出し機を貸与いただいた、東京都秋川テニス連盟に心から感謝致します。本研究は石本記念デサントスポーツ科学振興財団の援助により行なわれた。

#### 文 献

- 1) 三浦公亮；科学朝日，4，82（1980）
- 2) 吉田米夫；テニスボールの空気抵抗と回転効果について，昭和 56 年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告，121（1981）
- 3) 小林ほか；二次元流れ場の実時間画像処理システムの開発，日本機械学会論文集（B），55-509，107（1989）
- 4) Kabayashi, T., et al.; Velocity measurement of three-dimensional flow around rotating parallel disks by digital image processing, ASME, FED., 85, 29（1989）