

# シャトルcockの空気力学的性質について

榊 原 芳 夫

## On the Aerodynamic Characteristics of the Shuttle Cocks

Yoshio SAKAKIBARA

### Abstract

A shuttle cock of badminton flies drawing the peculiar white locus in the air. The wind tunnel tests were performed in order to investigate the aerodynamic characteristics of the shuttle cocks which caused the unique flights of the shuttle cocks. A new precise measurement apparatus was made and set up in a wind tunnel for the test. A shuttle cock was attached at the tip of a balance. The tests were conducted in two different conditions, in one condition the shuttle cock rotated freely at the tip, and in the other condition the shuttle cock was fixed at the tip without rotating. The test results showed that the shuttle cocks flew like the birds in the air and that the unique flights of the shuttle cocks were attributed to both its aerodynamic drag and light weight.

This interesting flight of the shuttle cocks due to the air-brake of feather makes a badminton the most popular sport.

### 1. ま え が き

バドミントンは極端な筋力の訓練を必要としない誰でも楽しめるスポーツである。それは使用するシャトルcockの独得の空気力学的性質と軽量によるものである。打撃瞬間の運動は鋭く感じられるが、最大の特徴である激しい減速性のため、短い飛行距離の最終点では、低速運動になり時間的余裕を生ずるので、これを捕捉して、打返す事が容易である。さらに種類の打法により空中に変化のある軌跡を画く。

このシャトルcockの空気力学的性質を調べるために風洞試験を行なった。従来このシャトルcockのように形状が小さく軽量で構造的に変形し易い物体の風洞試験は困難とされ、文献等は、ほとんど皆無であったが、本試験においてはシャトルcockを風洞気流中に保持して、微小荷重を計測するために特別のストレングス方式天秤を研究、自作し、この天秤先端の針軸にシャトルcockを取付け、回転及び固定状態における空気力を計測した。

試験は最高風速 65 m/s まで行なった。抗力が最も強く、揚力、横力、縦揺レモーメント、偏揺レモーメント

は微々たるものであったが同時に計測した。

また煙風洞における気流試験の結果と併せてシャトルcockの空力現象も調べた。

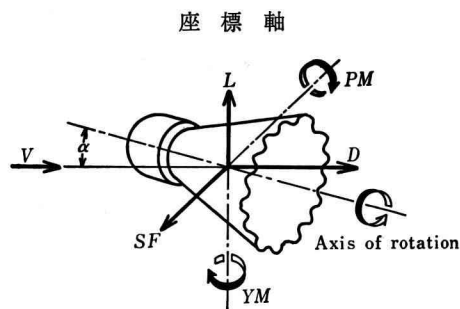


Fig. 1 Axis system used in the investigation

### 記 号

- D: 抗力 (kgf)
- L: 揚力 (kgf)
- SF: 横力 (kgf)
- PM: 縦揺レモーメント (kgf·m)
- YM: 偏揺レモーメント (kgf·m)
- V: 試験風速 (m/s)

$\rho$ : 空気密度 ( $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ )

$q$ : 動圧  $1/2 \rho V^2$  ( $\text{kgf}/\text{m}^2$ )

$d$ : シヤトルコックの頭部径 (m)

$S$ : 頭部断面積  $\pi d^2/4$  ( $\text{m}^2$ )

$C_D$ : 抗力係数  $D/qS$

$C_{mg}$ : 重心周りの縦揺レモーメント係数  $PM/qsd$

## 2. 試 験

### 2.1 試験に使用したシヤトルコック

水鳥羽根球 2 種 (日本製, 中国製) とプラスチック製 2 種 (日本製, 中国製) を使用した。水鳥球は外観が同一でも, 詳細に調べると羽根の大小, 硬軟, 仕上りの不均一がある。プラスチック球の羽根は重量制限の関係上, 肉厚が薄く作られている。供試用のシヤトルコックを Fig. 2 に示す。外形寸法は各種とも大体, 同一で重量は約 5 g である。

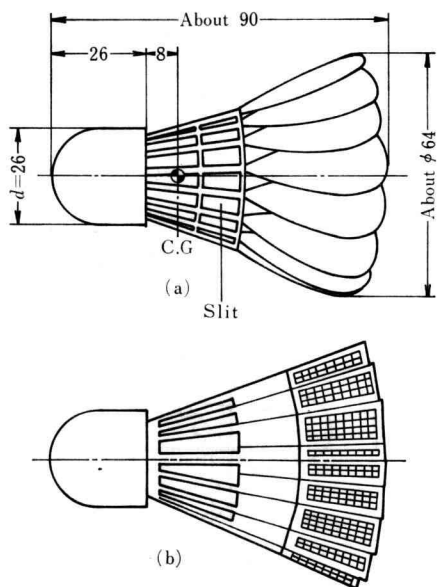


Fig. 2 Sketch of the shuttle cocks.  
(a) Bird feather (b) Plastic

### 2.2 試験装置及び計測の原理

シヤトルコックのように形状が小さく, 構造は変形し易く, かつ空気力が微小な物体の風洞試験を行なうことは従来困難とされていたが, 本試験においては数型式の計測装置を試作して予備研究を行ない, Fig. 3 に示すような天秤を自作した。

ゲージベースはクロムモリブデン鋼が, もっともヒステリシスが少なかったのを, これを使用し, ゲージは箔フェステルゲージの最小形のもの (ゲージ長 1 mm, ゲリッド幅 1.4 mm) で 2 ゲージ方式とした。

天秤の形状がシヤトルコックの空力特性に干渉することを避けるため, 極力, 直径を細くした。さらに天秤前部に 3 mm 径の針軸を取付け, この先端にミニチュア軸受部を設けて, 自由に回転させ, 又は固定し得るようにした。

天秤は前部をモーメント計測部とし, 後部を抗力計測部とした。

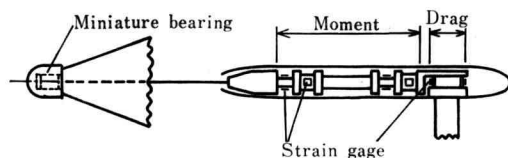


Fig. 3 Side view of balance system with a shuttle cock attached to the tip of sting.

計測の原理は水平面上の 2 モーメント計測により, 揚力, その着力点及び縦揺レモーメントを計算で求めた。これと直交する平面上の 2 モーメントより同様に横力, 着力点, 偏揺レモーメントを得る。抗力は天秤出力の計測値より直接に算出した。

その計算式は Fig. 4 により次のとおりである。

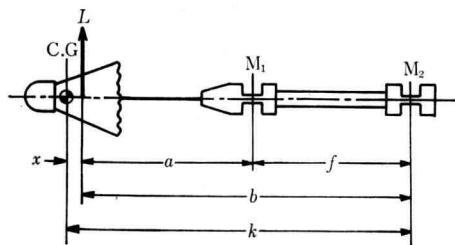


Fig. 4 Schematic drawing for the calculations.

i) 揚力係数  $C_L$

$$M_1 = La \quad (1)$$

$$M_2 = Lb \quad (2)$$

(1), (2) および実測値  $f$  より

$$L = \frac{M_2 - M_1}{f} \quad (3)$$

$$\therefore C_L = \frac{M_2 - M_1}{fqs}$$

ii) 着力点  $a$ 

(2), (3) から

$$\frac{M_2}{b} = \frac{M_2 - M_1}{f} \quad (4)$$

$$b = a + f \quad (5)$$

(4), (5) より

$$a = \frac{M_1 f}{M_2 - M_1}$$

 iii) 縦揺レモーメント係数  $C_{mg}$ 

実測値  $k$  を使用すると、重心周りの縦揺レモーメント  $PMg$  は

$$PMg = Lx = Lk - Lb \quad (6)$$

(6) に (2), (3) を代入する

$$PMg = \frac{k}{f} (M_2 - M_1) - M_2$$

$$\therefore C_{mg} = \frac{1}{qs d} \left\{ \frac{k}{f} (M_2 - M_1) - M_2 \right\}$$

## 2.3 試 験

試験風速はスマッシュによる打撃の瞬間をストロボ計測して 65 m/s とした。

レイノルズ数は  $V=65$  m/s, 羽根の平均径=5 cm とすると  $Re=2.2 \times 10^5$  である。

試験はシヤトルコックの飛行性に影響する抗力及び安定度を示す縦揺レモーメントに重点をおき、迎角を  $\pm 10^\circ$  まで変角し、シヤトルコックの回転及び固定状態につき行なった。

## 3. 結果及び検討

## 3.1 正常なシヤトルコックの空気抗力

バドミントンが、あまり広くない空間で楽しめる理由はシヤトルコックの大きな空気抗力のためである。正常な水鳥球の計測による抗力係数  $C_D$  を Fig. 5 に示す。ただし、計算に用いた面積は頭部断面積である。これによると抗力係数は大体 4.0 であり、これは直径 5 cm の円板 (最大羽根径の 80% に相当) が空気に直面して飛ぶのと同じ抗力である。羽根は柔らかく、すき間が多いが意外に抗力は大きい。抗力は速度の 2 乗に比例するので打った瞬間の速度が速い時は抗力が大きく、減速が激しいので運動エネルギーを消耗して遠方に飛ばない。

プラスチック球の抗力係数は Fig. 5 に示すように平均 3.0 で水鳥球より小さい。羽根部の肉厚が薄いので速度が大きくなると風圧により変形して径が小さくなるため、更に抗力は減少する。

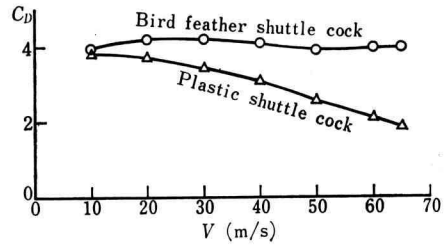


Fig. 5 Drag coefficient of the normal shuttle cocks.

## 3.2 羽根の剛性と抗力との関係

水鳥球は生物の羽根を使用しているの、各製品には剛性の強弱があり、そのための抗力の差がある。Fig. 6 によると剛性の弱い水鳥球は回転による遠心力のため羽根が広がって抗力が増大する。このような球を使用すると強い打力でも飛行距離は短い。

プラスチック球にも剛性の非常に弱いものがあり速度の増加に従い羽根径が縮小するので抗力が小さくなる。特に打撃の瞬間の高速度では風圧により羽根が萎縮して小さくなり抗力は減少するので、水鳥球よりも高速度で飛びその距離も長くなる。

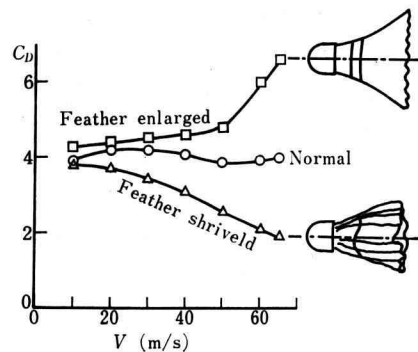


Fig. 6 Drag coefficient of the deformed shuttle cocks.

## 3.3 羽根の根もとにあるすき間の動き

羽根の根もととは骨だけで大きなすき間になっている。このすき間がシヤトルコックの飛行に影響していることが試験の結果分った。Fig. 7 はすき間のために抗力が増加していることを示している。すき間から気流が通りぬけるので抗力は減少するものと考えられるが、実際はその逆で骨や結合糸からも渦が発生して抗力は大きくな

る。すき間があれば重量を軽減し、さらに風圧中心を後方に移動させるので安定飛行の役目も果している。

すき間の効果を煙風洞の気流試験で見ると Fig. 8 (a) のように正常なシャトルコックでは、空気が根もとのすき間より内部に流れこみ、羽根後方の気流は平行状態で、その間の流れは混流となり、抗力をまともに受けていることを示している。次に (b) は根もとのすき間を塞ぎ気流が内部に入らないようにした場合で、流線は羽根後方で収縮しており、これは流線形の物体の流れに似ていて抗力の少ないことを示している。

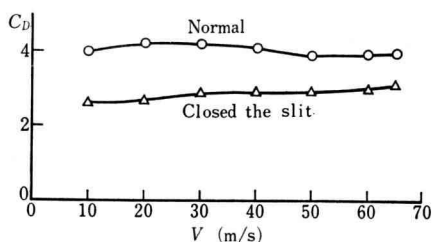
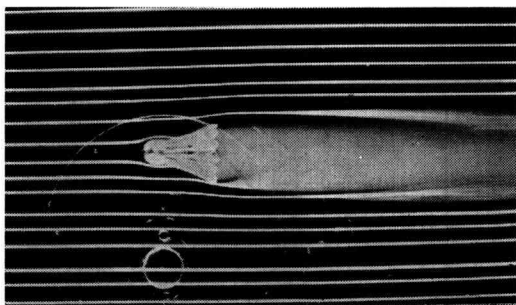
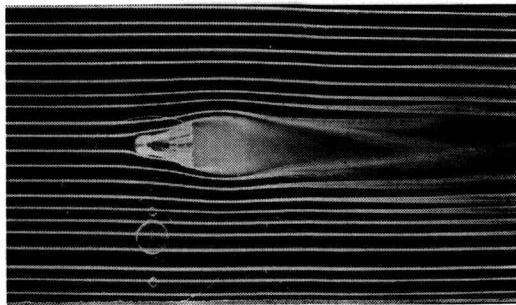


Fig. 7 Effect of slit which opened at the root of feather.



(a)



(b)

Fig. 8 Stream line around the shuttle cock.  
(a) Opened slit (b) Closed slit

### 3.4 羽根径を大きくした場合の空気抗力

シャトルコックの羽根を指先で滑らかに外側に広げている人を見ることがある。どんな効果があるのかと羽根の後面直径を 10% 大きくして試験を行った。その結果 Fig. 9 に示すように抗力は 20% 増加した。即ち、面積に比例して抗力は増加するので、飛びすぎるシャトルコックは羽根を痛めないように滑らかに広げると、ブレーキがかかり本来の飛び方になる。

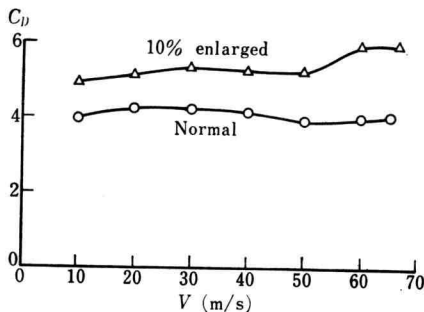


Fig. 9 Drag coefficient of the enlarged feather diameter.

### 3.5 羽根の折損による空気抗力

激しい打ち合いによりシャトルコックの羽根が折れて無くなることもある。この状態のものを試験して抗力を調べると Fig. 10 のように折れた羽根の数が多い程、少しずつ抗力は減少するが、外観的に見た感じ程、大きな量ではない。単にバドミントンで遊ぶ場合、使用できる範囲の抗力減少である。しかし飛行の安定性は減少するものと思われる。

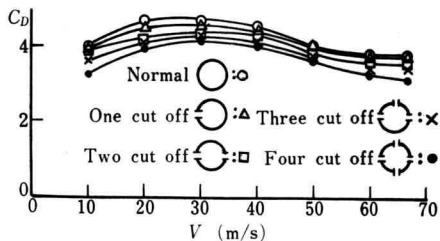


Fig. 10 Variation of drag coefficient of the shuttle cock with cut off feathers.

### 3.6 シャトルコックの回転

水鳥球の羽根は Fig. 2 (a) のように互に重なり合っているため、進行方向に対して各個の羽根の風圧分布が非

対称となり、高速度の場合は進行軸周りに風車のように回転する。飛行速度が速い程、高速回転をし、 $V=40\text{m/s}$ の試験では最高 4000 r, p, m, まで記録した。

次に回転起動試験を行なった結果、停止状態からの回転始動までの時間は大方のシャトルコックでは、ほとんど 0.3 秒であった。実際は減速が激しく飛行時間も短かく不回転の場合が多いので、回転による影響はほとんど無いものと思われる。Fig. 11 に示すように一般に正常に作られた羽根の場合は回転による抗力の差は表われない。しかし、まれに細い骨を持つ剛性不足の羽根は回転による遠心力のため径が拡大して抗力が急に増加することもある。

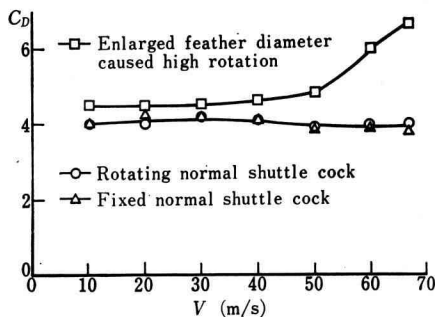


Fig. 11 Drag coefficient of the rotating shuttle cocks.

### 3.7 飛行の安定性

シャトルコックは、どのような飛行状態でも頭を進行方向に向けて飛ぶ性質がある。これを安定性が良いという。これは空気力の着点重心の後方 20 mm 附近にあるためである。また尻張りをしないで飛行することを動的安定性が良いという。これは羽根が軽いので重心周りの慣性モーメントが小さいことと、柔らかな羽毛がクッションの役目をして空力的に振動を制御するためである。

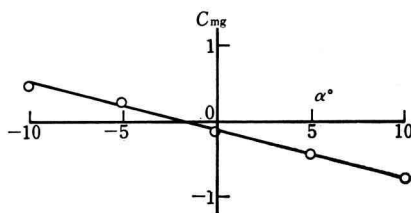


Fig. 12 Stability of the flying shuttle cock.

水鳥球の安定度を示す試験結果を Fig. 12 に示す。 $Cmg$  は縦揺レモーメント (首振りのモーメント) で、首振り角  $\alpha$  が大きくなると復元モーメントも大きくなり安定性のあることを示している。

### 4. 飛行の軌跡

シャトルコックの風洞試験より得た空力特性を用いて、計算により、水鳥球とプラスチック球の飛行の軌跡を調べた<sup>1)</sup>。いずれの場合もハイクリアのアンダーハンド打法で打角  $30^\circ$ 、打撃瞬間の初速  $45\text{m/s}$ 、抗力係数は水鳥球が 4.0、プラスチック球が 3.0 である。

飛行速度を Fig. 13 に示す。減速が激しいので打ち返して 0.2 秒未満で半分の速度になり、着地時では  $5\sim7\text{m/s}$  となる。

飛行高度を Fig. 14 に示す。抗力のため運動エネルギーを消耗して急激に落下する状態が分る。

プラスチック球は抗力が小さいので、水鳥球と比較すると飛行速度は速く、飛行高度は高く、距離も  $2\sim3\text{m}$  長くなるので、水鳥球と感覚が異なり、目測を誤ることがある。

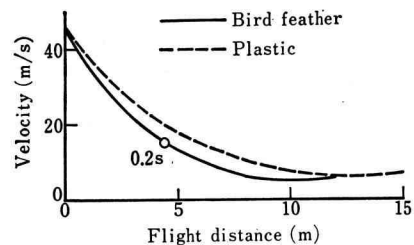


Fig. 13 Variation of flying velocity.

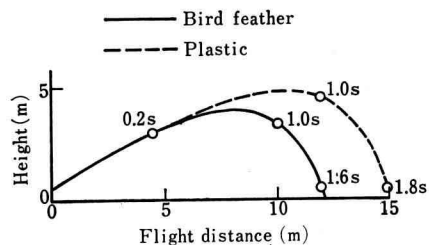


Fig. 14 Flight path of the shuttle cocks.

### 5. あとがき

シャトルコックの特性を空気力学の点から調べると、この小さな物体に多年の間に形成された合理性のあるこ

とが分った。

バトミントンが今日、ポピラースポーツとなったのはシャトルコックの多彩な飛行軌跡と、スポーツとしての容易性にあるが、これを空気力学的に解析すると、シャトルコックの大きな空気抗力と軽量が最大の理由であることが分った。

なお、この試験により従来、定石化していた大きな剛体模型による空気力計測法より、さらに一步進めて、困難とされていた可撓性物体につき、数 g 程度の微小空気

力測定の実績が得られた事は有意義な事であった。

この論文の作成に当り有益な御指導をいただいた大森幸衛防衛庁第 3 研究所長、幾徳工業大学鳥居亮助教授に深甚の謝意を表します。

## 文 献

- 1) 大森幸衛, シャトルコックの飛行計算 (未発表)