

# 低速度領域におけるバドミントン用シャトルコックの空力特性

板倉嘉哉, 桑原直弘, 古村文音  
千葉大学 教育学部

## Aerodynamic Characteristics of Badminton Shuttlecocks at Low Speed Range

by  
Yoshiya ITAKURA, Naohiro KUWAHARA and Ayane KOMURA  
Chiba University, Faculty of Education

### ABSTRACT

As you know, badminton is a well-known sport that young and old can play. The reason why everyone can enjoy is in strong deceleration of the shuttlecock, but its aerodynamic characteristics have not been elucidated well. In the present work, using a low speed wind tunnel, static drag and rolling moment acting on a feather shuttlecock were measured for a range of Reynolds number  $4,000 < Re < 40,000$  at angle of attack  $0^\circ$ . Dynamic drag and number of revolution in free flight were also measured with vertical wind tunnel for a range of Reynolds number  $11,000 < Re < 15,000$ . Dependencies of Reynolds number on aerodynamic characteristics of feather and synthetic shuttlecock are discussed.

### 主な記号

$C_A$  : 軸力係数  
 $C_N$  : 法線力係数  
 $C_l$  : ローリングモーメント係数  
 $Re$  : レイノルズ数 ( $Re = U_\infty L / \nu$ )  
 $Ro$  : ロスビー数 ( $Ro = U_\infty / (2 \omega L)$ )  
 $Sr$  : 回転速度比 ( $Sr = \omega L / U_\infty$ )  
 $L$  : 代表長, m  
 $F_A$  : 軸力, N  
 $m$  : シャトルコック質量, kg  
 $N$  : 回転数, rpm  
 $U_\infty$  : 一様流流速, m/s  
 $\alpha$  : 迎角, degree  
 $\omega$  : 角速度, rad/s

### 1. 緒論

バドミントン用シャトルコックにはガチョウの羽を使用した水鳥球と、ナイロン製の樹脂球が存在する。樹脂球は安価であり耐久性もあるが、競技者からは「打球時の感覚が違う」、「飛びが違う」との指摘があり、試合でも練習でもほとんど使用されていない。「飛びの違い」は流体力学的視点から見ると、シャトルコックに作用する抵抗の速度依存性に起因するものであり、抵抗のレイノルズ数依存性や飛行特性の違い等、航空工学的な観点からも興味のある対象である。

バドミントン用シャトルコックに関するスポーツ工学的な先行研究としては、榎原<sup>1)</sup>が風洞試験により、抵抗の速度依存性、羽根破折や変形の影響を調べている。また、綿貫<sup>2)</sup>は YONEX 社からの受託研究として、水鳥球と樹脂球の空気力学的特性の相違点を明らかにしている。国外においても、水鳥球の代替となる樹脂球の開発に向けて、Cooke<sup>3)</sup>が風洞及び水槽を使用した試験を実施し、その空気力学的特性を取得している。また、Alam<sup>4)</sup>らは高レイノルズ数領域での水鳥球と樹脂球の風洞試験を行い、羽根の構造の変形が抵抗特性に与える影響を明らかにしている。筆者らも、水鳥球及び樹脂球の静的状態（無回転）における空気力学的特性を、3 分力測定、シャトル内部の静圧分布測定、後流における静圧・総圧分布測定及び内部流れの可視化実験等により明らかにし、羽根基部の隙間の存在による、大きな抵抗の発生機構を解明してきた<sup>5)</sup>。これまでの筆者らの風洞試験は静的試験であり、風洞内でシャトルコックを支持し、無回転及び流速一定（約 23 m/s）の条件下

で空気力を測定してきた。しかし、シャトルコックを固定した静的風洞試験では、回転による影響が考慮されておらず、実際の飛行状態の流れ場を十分に再現していない可能性があった。

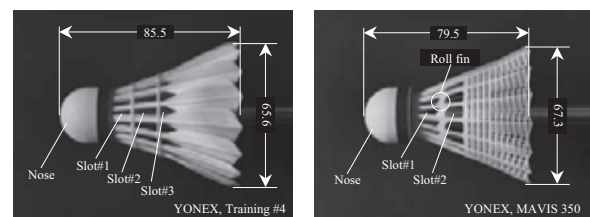
本論文では、これまでにない低速度領域（約 2 ~ 23m/s）における風洞試験を実施し、静的状態（無回転）における抵抗及びローリングモーメントのレイノルズ数依存性を明らかにした。また、垂直風洞を製作し、シャトルコックを風洞内で自由飛行させる動的試験も実施し、回転を伴う飛行時の抵抗及び回転数特性のレイノルズ数依存性も明らかにした。両者の比較により、低速度領域におけるシャトルコックの静的及び動的な空力特性の相違について検討した。

### 2. 風洞試験の概要

#### 2.1 風洞試験用模型

風洞試験には YONEX 社製の水鳥球（Feather）及び樹脂球（Synthetic）の実物を使用した。図 1 にシャトルコックの構造及び各部の代表寸法を示す。水鳥球は 16 枚の羽根が交互に重なるようにコルク製 Nose 部に植え込まれており、羽根骨部の 2 箇所が糸で固定されている。羽根を交互に重なるように植え込むことにより、ローリングモーメントが発生し、シャトルコックは飛行方向に向かって反時計回りに回転することになる。また、樹脂球では、羽根補強部に設けられた小翼（Roll fin）と羽根メッシュ部のピッチを非対称にすることにより、ローリングモーメントを発生させ、シャトルコック飛行時に反時計回りに回転するように製作されている。

なお、シャトルコックの羽根基部にある隙間（以下 Slot と呼ぶ）が空力特性に与える影響を検証するために、それぞれの模型に対して、Slot#1 及び Slot #2 をテープで塞いだもの（Filled）と塞がない通常形態（Normal）について実験を行った。



(1-A) 水鳥球

(1-B) 樹脂球

図 1 風洞試験用模型

## 2.2 静的風洞試験

風洞試験には、千葉大学教育学部機械工学研究室が所有する測定部寸法 250mm 角の吹き出し型低速風洞を使用した。なお、風洞は自作であるが、最大風速 23m/s、最大乱れは 0.8% 以内の性能を有している。模型に作用する空気力は、模型支持用支柱後端に接続された汎用 6 軸力覚センサー（ニッタ株式会社製：IFS-20E12A15-I25-EX）により検出され、DSP レシーバーボードを介して PC に取り込まれ処理される。

静的風洞試験では模型を風洞内で固定した状態で、主流の風速を 2~23m/s に変化させ、図 2 に示す機体軸により空気力を測定し、 $C_N$ 、 $C_A$ 、 $C_l$  の各空力係数を算出した。一様流のレイノルズ数は Nose 部直径  $D$  を基準とすると、約 4,000 ~ 40,000 となる。

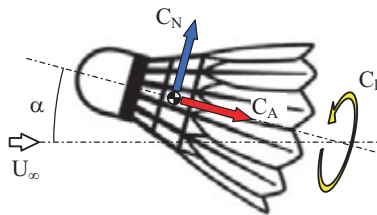


図 2 機体軸座標系と空力係数

## 2.3 動的風洞試験

シャトルcockの動的風洞試験では、質量を変化させた模型を製作し、垂直風洞内で自由飛行させ空力特性を取得した。模型の質量はノーズ部のコルクをくり貫き、錘の量により変化させた。その模型を図 3 に示すように重力  $mg$  と軸力  $F_A$  が釣り合い、回転しながら定位置を維持できるように風速を調整し、その時の重力を軸力として軸力係数  $C_A$  を算出した。また、自由飛行するシャトルcockを高速度カメラで撮影し、画像解析により各風速における定常飛行時の回転数  $N$  も算出した。

なお、垂直風洞による動的試験では、軸力と重力が釣り合うようにして自由飛行させるため、必然的に迎角  $0^\circ$  でしか実験することができない。

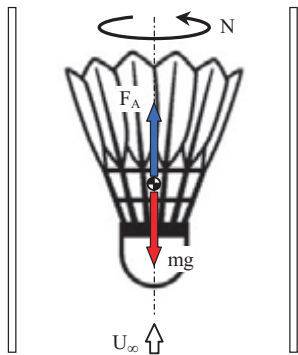


図 3 自由飛行するシャトルcockの軸力計測

## 3. 結果及び考察

### 3.1 軸力係数の迎角依存性（静的風洞試験）

図 4 に水鳥及び樹脂球における、通常形態（Normal）と Slot を塞いだ（Filled）シャトルcockの軸力係数の迎角依存性を示す。なお、 $Re$  数は約 40,000 で実験を行った。

軸力係数は迎角  $0^\circ$  で最大値を取り、その値は水鳥球で 3.58、樹脂球で 3.72 と非常に大きな軸力が作用していることがわかる。また、両者とも軸力係数の迎角依存性は鈍く、迎角変化に対し原点を中心とした緩やかな山形分布を形成しており、迎角依存性に大きな相違は無いと言える。

一方、両シャトルcockの Slot #1, #2 を塞いだものでは、迎角に対して軸力はほとんど変化を示さず、ほぼ一定値で推移しており、水鳥球で約 2.4、樹脂球で 2.1 と、通常形態の 6~7 割程度に減少している。この現象は榊原<sup>1)</sup>や綿貫<sup>2)</sup>の実験でも報告されており、その結果と良く一致している。この軸力の減少を、榊原<sup>1)</sup>は羽根骨部や固定用糸からの渦発生によるものと推測しているが、その検証はなされていない。直感的には、「スロットを塞ぐと主流に対する投影面積が増大するとともに、塞いだ部分の圧力上昇により軸力は増大するのでは？」と考えられるが、事実はその逆である。この軸力発生メカニズムは、以下に述べる内部圧力分布測定及び可視化結果から説明することができる。

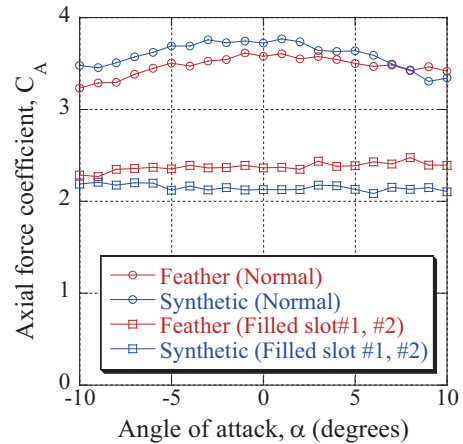
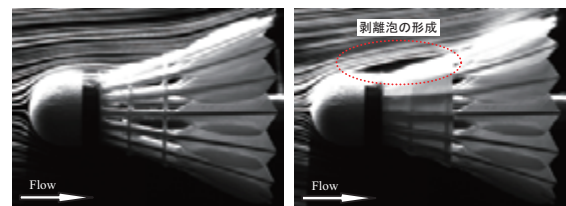


図 4 水鳥球及び樹脂球における軸力の迎角依存性

スロット部分を塞ぐとなぜ軸力は減少するのか？（もしくは、スロットのある通常形態の方が、なぜ軸力は増大するのか？）をシャトルcock周り及び内部の可視化画像、シャトル内部正中面での静圧力分布測定から検証する。なお、如何なる迎角においても、スロットを塞ぐことにより軸力は減少することになるが、その流体力学的なメカニズムは本質的に同じであると考えられるので、迎角  $0^\circ$  での実験結果により検証することにする。なお、本節の詳細については、引用元である文献 5 を参照されたい。

図 5 は、正中面における流れ場をスモークワイヤ法で可視化したものである。図(5-A)の Normal 形態では Nose 部近傍を過ぎた流れは剥離することなく、Slot #1 及び#2 から吸い込まれるように内部へ流れ込んでいるのがわかる。また、それよりも Nose 部上方を過ぎた流れは、Slot #3 から羽根内側へいくものと、外側に沿って流れるものとに分かれており、その羽根内外の圧力差により、シャトルを回転させる反時計回りのローリングモーメントを生み出している。一方、図(5-B)の Filled 形態では、Nose 部を過ぎる流れは肩部で剥離を起こし、分離流線は Slot #3 前部（スロットを塞ぐテープ後端近傍）で再付着しており、テープ部上方に剥離泡を形成しているのがわかる。すなわち、スロットを塞いでも、その部分の圧力は著しく上昇することは無く、通常形態以上の軸力増加には結び付かないのである。

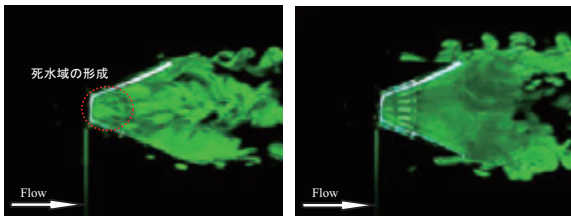


(5-A) Normal (5-B) Filled slot #1, #2  
図 5 シャトルcock周りの流れ場 ( $\alpha = 0^\circ$ )

シャトル内部の流れ場の構造を検証するために、正中面に切断した半裁模型（正中面は透明アクリルシートにより遮蔽）による可視化結果を図 6 に示す。シャトル内部の流れ場は 3 次元旋回流（シャトル後方から見て時計回り）となるため、このような半裁模型では実際の流れ場を忠実に再現することはできないが、Slot #3 より前方の流れ場では基本的な構造に大きな差異は無いと考えられる。

図(6-A)の通常形態では、Slot #1 からの流れは中心軸方向へ引き込まれるようになり、スロット前端からの分離流線により、Nose 部背後に三角錐状の死水域が形成されているのがわかる。Slot#2 からの流れは羽根方向と中心軸方向へ向かうものに分かれるが、大きく方向を変化させることは無く、下流へと流れ去っている。また、Slot #3 からの流れは、Slot #2 からの流れと合流するものと、羽根方向へ流れるものとに分かれ、羽根面に沿った旋回流を形成する。

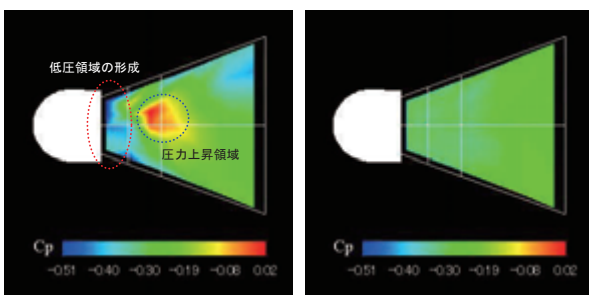
図(6-B)の Filled 形態でも、Slot #3 からシャトルコック内部へ入り込む流れは存在するが、その流れは非常に弱く、中心部へ向かうことなく羽根方向へ沿うようになる。これは、後述するシャトルの内部圧力に起因するもので、スロットを塞ぐと羽根内外の圧力差が小さくなるからであり、その結果シャトル内部の流れは全域に亘って緩慢となり、淀んでいる。



(6-A) Normal (6-B) Filled slot #1, #2  
図 6 シャトルコック内部正中面の流れ場 ( $\alpha = 0^\circ$ )

図 7 は正中面に 47 個の圧力孔を設けた半裁模型により、シャトル内部の静圧分布を測定したものである。Nose 部後方にある 2 本の白い縦線は羽根固定用糸の位置を示している。図(7-A)の通常形態で特徴的なのは、Nose 部背後に低圧領域が形成されることと中心軸上の圧力上昇領域の存在である。これらは、Nose 部背後に形成される三角錐形状の死水域の底面と頂点に対応している。slot #1 前端から剥離した流れは加速され内部へと流れ込み、Nose 部背後に低圧領域を形成するとともに、中心軸上に集中するため圧力は上昇し、このような静圧分布が形成されるものと考えられる。スロットによる Nose 部背後の低圧領域の存在こそが、大きな軸力発生の主因と考えるのが妥当である。

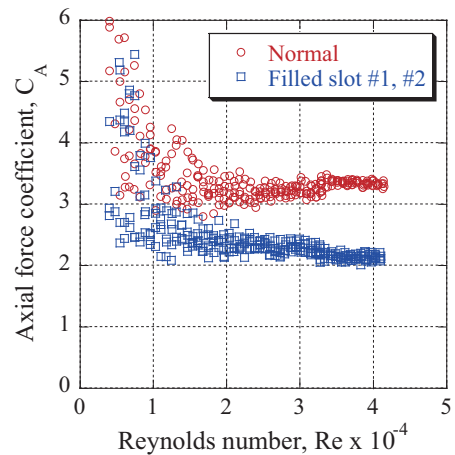
一方、Slot を塞いだ(7-B)では、通常形態で現れた Nose 部背後の低圧領域と、その後方に現れる高圧領域は消失し、内部全域に亘り大きな変化の無い、平坦な圧力分布となる。また、その圧力値も通常形態よりは高くなるため、その結果、Slot を塞ぐと通常形態よりも軸力は小さくなる。



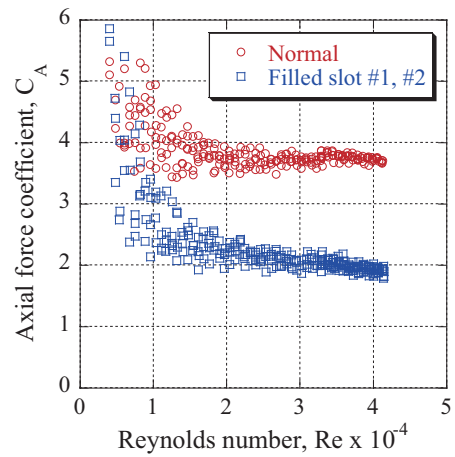
(7-A) Normal (7-B) Filled slot #1, #2  
図 7 シャトルコック正中面での圧力分布 ( $\alpha = 0^\circ$ )

### 3.2 軸力係数の Re 数依存性（静的風洞試験）

図 8 は、迎角  $0^\circ$  における水鳥球及び樹脂球の軸力係数の Re 数依存性である。なお、Re 数 10,000 以下ではロードセル及びマノメータの測定限界に近いので、ばらつき大きくデータの信頼性は低いと考えられる。水鳥球及び樹脂球ともに、軸力係数は Re 数約 15,000 以上ではほぼ一定となり、レイノルズ数の変化に対し急激に変化することは無く、動圧に比例した軸力が作用しているのがわかる。また、その値は通常形態の水鳥球で 3.4、樹脂球では 3.7、Slot を塞ぐと両シャトルコックとも低下し水鳥球で 2.3、樹脂球では 2.1 であり、3.1 節の Re 数 40,000、迎角  $0^\circ$  における軸力係数とほぼ一致する。どの速度領域においても、Slot を塞ぐことにより軸力は通常形態よりも低下しており、前述した大きな軸力の発生メカニズムである流れ場の構造は大きく変化することは無いことを示している。



(8-A) 水鳥球



(8-B) 樹脂球

図 8 軸力係数の Re 数依存性 ( $\alpha = 0^\circ$ )

### 3.3 ローリングモーメント係数の Re 数依存性（静的風洞試験）

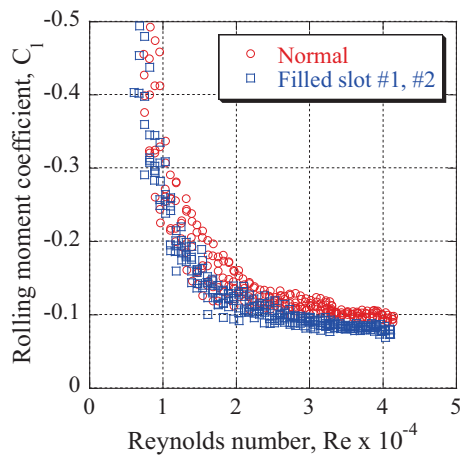
シャトルコックは進行方向に対して反時計方向に回転しながら飛行する。水鳥球では 16 枚の羽根が交互に重なった構造で、樹脂球では、Roll fin 及び羽根メッシュ部ピッチの非対称により、ローリングモーメントを発生させているからである。このシャトルコックの回転を生み出すローリングモーメント係数の Re 数依存性を図 9 示す。

図(9-A)の水鳥球のローリングモーメント係数は Re 数の増加に対し緩やかに減少しているのがわかる。また、Re 数の減少に伴っては、ローリングモーメント自身は小さく

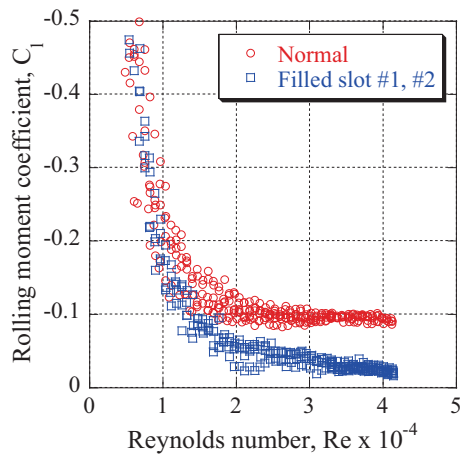


なるが、係数算出における分母である動圧が小さくなるため、反比例的に係数は増大することになる。一方、Slot を塞いだ形態のローリングモーメント係数は通常形態よりも小さい値になっている。ローリングモーメントは羽根部内外の圧力差により発生することになるが、Slot を塞ぐとシャトルcock内部の静圧は通常形態の静圧ほど低下しないため、このような差が生ずるものと考えられる。また、前述した Slot を塞いだシャトルcockの軸力係数低下も、ローリングモーメントの低下と関係していると考えられる。すなわち、Slot #3 から内部へ入り込む流れは、羽根の重なりにより、流れは周方向へ偏向され、その反作用としてローリングモーメントが発生する。Slot を抜けた流れは旋回流を形成することになるが、その際、エネルギー損失が無視できるものとしても、速度は周方向へ偏向されることにより、機体軸方向の運動量に損失が発生する。この機体軸方向の運動量の損失が小さいほど（すなわちローリングモーメントが小さいほど）ウィンドミル効果は減少し、軸力は低下すると考えられる。

図(9-B)の樹脂球では、水鳥球と同様に Slot を塞ぐことによりローリングモーメント係数は低下するが、その減少幅は非常に大きいことがわかる。樹脂球の場合、ローリングモーメントの主たる発生源は Slot #1 と #2 の間にある Roll fin であるが、Slot が塞がれることにより、Roll fin が機能しなくなるため、ローリングモーメントは著しく低下することになる。ローリングモーメントの低下はウィンドミル効果を減少させるため、図 4 に示されるように Slot を塞いだときの軸力低下は水鳥球より樹脂球の方が大きくなる。



(9-A) 水鳥球



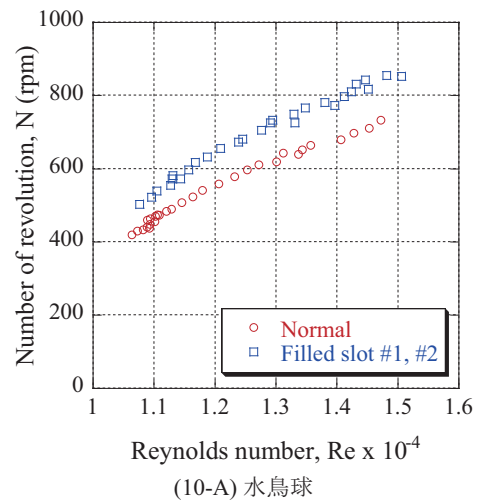
(9-B) 樹脂球

図9 ローリングモーメント係数の Re 数依存性 ( $\alpha = 0^\circ$ )

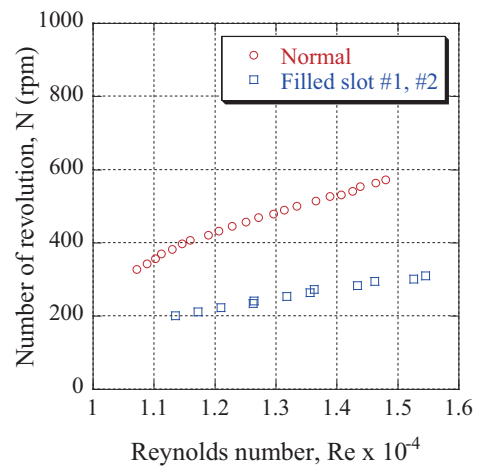
### 3.4 シャトルcock回転数の Re 数依存性 (動的風洞試験)

図 10 は、垂直風洞でシャトルcockを自由飛行させ測定した回転数の Re 数依存性である。図(10-A)の水鳥球の場合、Re 数の増加に対し回転数も増加するが、その関係は必ずしも一次関数的ではないことがわかる。また、Slot を塞いだシャトルcockの方が通常形態よりも回転数は約 100 rpm 増加している。前節の静的試験におけるローリングモーメントの測定では、Slot を塞ぐとローリングモーメント係数は低下しており、動的試験の回転数の大小関係とは矛盾することになる。シャトルcockが回転することにより、Nose 部で形成された旋回流が Slot #3 後方の羽根先端に到達するときに静的試験では再現できない何らかの動的効果が作用し、ローリングモーメントを増大させていると考えられるが、現時点ではその流体力学的なメカニズムは未解明である。

図(10-B)に示す樹脂球における回転数の Re 数依存性も、水鳥球と同様な特性を示している。その回転数は通常形態で水鳥球の約 8 割程度の回転数しかなく、飛行中は水鳥球よりもかなり遅い回転状態となっている。また、Slot を塞いだ場合、水鳥球とは異なり、回転数は著しく低下することになり、通常形態の半分以下となる。静的試験による、Slot を塞ぐことによりローリングモーメントが低下することからも予想できる結果であるが、なぜ水鳥球のような逆転現象が生じないかは疑問の残るところである。水鳥球の羽根と樹脂球のメッシュ状羽根の構造的な違いが、動的効果に及ぼす影響については、今後の研究課題である。



(10-A) 水鳥球

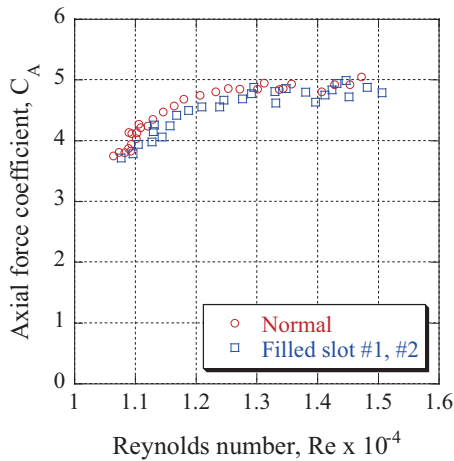


(10-B) 樹脂球

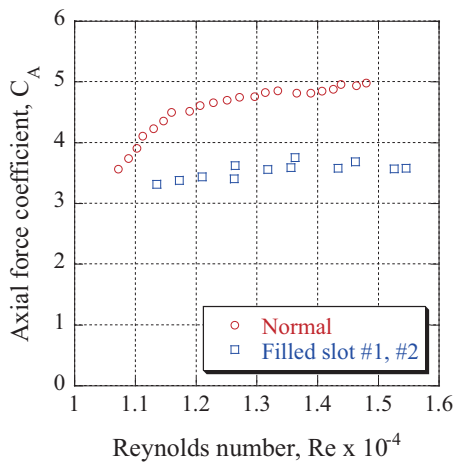
図10 回転数の Re 数依存性 ( $\alpha = 0^\circ$ )

3.5 軸力係数の Re 数依存性 (動的風洞試験)

図 11 に軸力係数の Re 数依存性を示す。水鳥球の通常形態の静的試験において、軸力係数が Re 数に依存せず、ほぼ一定となる時の値は約 3.2 であった。しかし、図(11-A)の動的試験で得られた軸力係数は Re 数により変化し 3.7~5.0 で推移しており、シャトルコック回転の影響により軸力係数は著しく増大している。また、静的試験で観察された Slot を塞ぐことによる軸力の大幅な低下は動的試験では現れず、軸力の低下は Re 数全域にわたり極微小である。前述したように Slot を塞ぐと通常形態よりも回転数は増加することになり、ローリングモーメントが増加していることを意味している。ローリングモーメントの増加は機体軸方向の運動量の損失を増大させ、軸力を増加させる。このように、Slot を塞いだ水鳥球ではウィンドミル効果が強まることにより軸力は増大し、通常形態との差が無くなると考えられる。また、水鳥球の両形態の軸力係数は Re 数 11,000~12,000 範囲で約 3.7 から 4.8 へと急激に変化しており、静的試験とは異なる Re 数依存性を示している。軸力係数がこのような Re 数依存性を示す原因としては、シャトルコックの回転による Nose 部近傍の流れ場が変化していることが考えられる。



(11-A) 水鳥球



(11-B) 樹脂球

図 11 軸力係数の Re 数依存性 (α = 0°)

図(11-B)の樹脂球においては、静的試験と同様に Slot を塞ぐことにより、軸力係数は大幅に低下している。Roll fin が機能しなくなることにより回転数が低下し、ウィンドミル効果が弱まるためと考えられる。また、通常形態の Re 数依存性は水鳥球と同様な特性を示しており、軸力係数は Re 数

11,000~12,000 の範囲で急激に変化している。しかし、Slot を塞いだ形態では、軸力係数が急激に変化することは無く、フラットな変化を示しており、水鳥球の特性とはかなり異なることがわかる。

水鳥球の両形態及び樹脂球の通常形態で軸力係数が急激に変化する Re 数領域が存在することが確認された。このような Re 数依存性を示す原因としては、シャトルコックの回転により Nose 部近傍の流れ場が大きく変化していることが考えられる。図 12 は小濱, 小林<sup>6)</sup>による、回転する長短軸比 2:1 の楕円体表面の流れを可視化したものであり、遠心力不安定による境界層の乱流遷移が鮮明に捉えられている。シャトルコックの動的試験で軸力が急激に変化する回転数領域は約 400~600 rpm であり、ほぼ同様な回転状態であると考えられる。シャトルコックの Nose 部は半球であり楕円体とは形状が異なるため断言はできないが、遠心力不安定により Nose 部で境界層が乱流に遷移し、流れ場の構造が大きく変化するため、軸力係数が急激に変化すると考えられる。

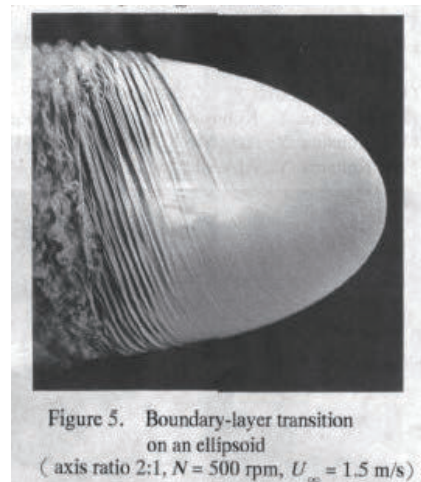


図 12 回転楕円体周りの流れの可視化<sup>6)</sup>

ここで、この現象を整理するために、式(1)に示す流れの慣性力と回転による遠心力の比となる無次元数を考えると、流れの慣性力と回転によるコリオリ力の比であるロスビー数 Ro の自乗、一様流の流速と回転による周速度の比である回転速度比 Sr の逆数の自乗となることがわかる。回転速度比は遠心力不安定を支配する無次元数であり、当然の帰結である。

$$\frac{F_{flow\ inertia}}{F_{centrifugal}} = \frac{mU_{\infty}^2/L}{mL\omega^2} = \left(\frac{U_{\infty}}{L\omega}\right)^2 \propto Ro^2 \propto \left(\frac{1}{Sr}\right)^2 \quad (1)$$

この(1/Sr)<sup>2</sup>を導入し、水鳥球及び樹脂球の通常形態における Re 数依存性をグラフ化したものが図 13 である。Re 数の変化に対し(1/Sr)<sup>2</sup>は一次関数的に変化するが、その勾配が変化する Re 数が存在するのがわかる。水鳥球及び樹脂球の動的試験において、軸力係数が急激に変化するのは Re 数が 11,000~12,000 の範囲であり、慣性力と遠心力の比である(1/Sr)<sup>2</sup>の傾きが変化する領域と一致している。無次元数の観点からも、遠心力の作用が大きく変化する Re 数領域が確認され、流れ場の状態が遷移する Re 数の存在が示唆される。

シャトルコックが回転している動的状態と静的状態では、その空力特性に大きな違いが存在することが明らかになっ

た。現時点では、回転するシャトルコック近傍の流れ場の構造を把握するには至っていないが、自由飛行するシャトルコック周りの流れ場の可視化を準備している。

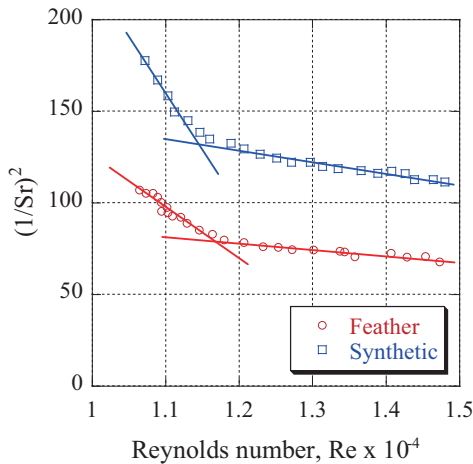


図 13  $(1/Sr)^2$  の  $Re$  数依存性 (通常形態,  $\alpha = 0^\circ$ )

参考として、慣性力と遠心力の比である  $(1/Sr)^2$  と軸力係数の関係を図 14 に示す。どの球種及び形態においても、軸力係数は  $(1/Sr)^2$  と線形な関係にあるのがわかる。この線形関係は実験を行った比較的速度の遅い  $Re$  数 10,500~15,000 の範囲でのみ確認できたものであり、広範囲な  $Re$  数領域でも成立するかは未検証である。現在、実験可能な  $Re$  数範囲を拡大するべく垂直風洞の改修を進めており、更なる軸力及び回転数の測定、回転するシャトルコック周りの流れの可視化を計画している。

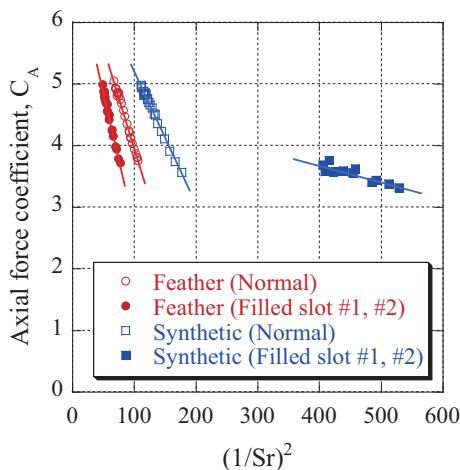


図 14 軸力係数の  $(1/Sr)^2$  依存性 ( $\alpha = 0^\circ$ )

#### 4. 結論

バドミントンで使用される水鳥及び樹脂製シャトルコックに対する低速度領域における静的及び動的風洞試験により、軸力、ローリングモーメント及び回転数の  $Re$  数依存性を明らかにした。本研究の遂行により、以下なる知見が得られた。

1. シャトルコックを固定した静的試験では、低速度領域においても Slot を塞ぐことにより、どの球種でも軸力は低下する。
2. 静的試験では、Slot を塞ぐことによりローリングモーメントは低下する。特に樹脂球で低下が著しいが、これは Roll fin が機能しなくなるからである。
3. シャトルコックを垂直風洞内で自由飛行させた動的試験では、 $Re$  数の増加により回転数も増加するが、その関係は必ずしも一次関数的ではない。
4. 水鳥球の静的試験では Slot を塞ぐとローリングモーメントは減少したが、動的試験ではむしろ回転数は上昇し、矛盾する結果となった。何らかの動的な効果が作用していると考えられるが、現時点では未検証である。
5. 水鳥球の動的試験では、静的試験のように Slot を塞ぐことにより軸力が低下することは無かった。水鳥球では回転数が増加することにより、ウィンドミル効果が強まるためと考えられる。
6. 水鳥の両形態及び樹脂球の動的試験において、軸力係数は  $Re$  数 11,000~12,000 の範囲で急激に変化する。遠心力不安定による境界層の乱流遷移が考えられるが、可視化実験等による検証が必要である。
7. 動的試験の  $Re$  数範囲で、軸力係数は慣性力と遠心力の比である  $(1/Sr)^2$  に比例することが確認された。その流体力学的なメカニズムは未解明であるが、実験範囲を拡大した測定等により検証する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 榊原芳夫, シャトルコックの空気力学的性質について, 幾徳工業大学研究報告 B-2, 1977.
- 2) 綿貫忠晴, 鈴木宏二郎, バドミントン用シャトルコックの基礎的空力特性, 第 38 回流体力学講演会講演論文集 (日本航空宇宙学会), 2006.
- 3) Cooke, A. J., Shuttlecock Aerodynamics, Sports Engineering, 2, 1999.
- 4) F. Alam H. Chowdhury et al., Measurements of Aerodynamic Properties of Badminton Shuttlecocks, 8th Conference of the ISEA, 2010.
- 5) 板倉嘉哉, 古村文音, シャトルコックの空力特性, 宇宙航空研究開発機構特別資料, SP-10-012, 2011.
- 6) 小濱泰昭, 小林陵二, 三次元境界層における乱流遷移の可視化, 可視化情報学会誌 Vol. 14, Suppl. No. 2, 1994.