

自由飛行試験によるバドミントン用シャトルコックの 非定常空力特性の解明

板倉嘉哉, 赤井貴洋, 桑原直弘
千葉大学 教育学部

Experimental Study on Unsteady Aerodynamic Characteristics of Badminton Shuttlecocks by Means of Free-Flight Tests

by
Yoshiya ITAKURA, Takahiro AKAI and Naohiro KUWAHARA
Chiba University, Faculty of Education

ABSTRACT

According to many badminton players, there are differences in impact feeling and flight trajectory between feather and synthetic shuttlecocks. Stiffness of the structural materials must affect impact feeling. Difference in flight trajectory is thought to be causally related to Reynolds number dependency of the aerodynamic drag and the unsteady forces due to added mass. In the present study, using vertical wind tunnel, number of revolution and dynamic drag acting on shuttlecocks in steady flight were measured for a range of Reynolds number $11,000 < Re < 15,000$ at the angle of attack 0° . And unsteady drag and number of revolutions during accelerated motion were also measured by means of free-flight tests for a range of Reynolds number $10,000 < Re < 16,000$. From the results of steady and unsteady aerodynamic force measurements, added mass around the shuttlecocks were estimated.

主な記号

C_A : 定常軸力係数 ($C_A = F_A / (qS)$)
 C_A' : 非定常軸力係数 ($C_A' = F_A' / (qS)$)
 Re : レイノルズ数 ($Re = U_\infty L / \nu$)
 Sr : 回転速度比 ($Sr = \omega L / U_\infty$)
 a : 加速度, m/s^2
 L : 代表長, m
 F_A : 定常軸力, N
 F_A' : 非定常軸力, N
 m : シャトルコック質量, kg
 m' : 付加質量, kg
 N : 回転数, rpm
 U_∞ : 一様流流速, m/s
 q : 動圧, Pa
 S : 基準面積, m^2
 ω : 角速度, rad/s

1. はじめに

バドミントン競技で使用するシャトルコックには鷲鳥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、中学生の練習用に使用される程度である。「飛びの違い」すなわち「飛行経路の違い」は流体力学的に、シャトルコックに作用する抵抗の Re 数依存性と飛行時の加速度運動による非定常空気力の違いに起因するものと考えられる。抵抗の Re 数依存性については、高 Re 数域で樹脂球の構造的変形が抵抗を低下させることを榊原¹⁾、綿貫²⁾、Cooke³⁾及び Alam⁴⁾らが風洞試験により明らかにしている。しかし、これらの風洞試験はシャトルコックを静止した状態（非回転）で実施された静的試験であり、回転に伴う遠心力による羽根の変形等が再現されておらず、実際の飛行時の特性とは異なる可能性がある。筆者らは、シャトルコックを回転させた状態で抵抗を測定する動的試験を垂直風洞で実施し、回転する水鳥球では Re 数 $11,000 \sim 12,000$ の領域で抵抗係数が急激に変化することを明らかにした⁵⁾。一方、非定常空気力が飛行経路に与える影響としては、シャトルコ

ックの質量が約 5 g （外形による体積で算出した密度は約 0.04 g/cm^3 ）であることから、加速度運動時の付加質量による非定常空気力の作用が考えられる。しかし、付加質量はポテンシャル理論により球や楕円体等の単純な形状の物体が並進及び回転運動する場合しか求められていない。シャトルコックのような複雑な形状をした物体が、粘性流体中を回転を伴う加速度運動する時の付加質量を理論的に求めることは非常に難しく、非定常空気力が飛行経路に与える影響の解明を困難なものにしている。

本報告では、垂直風洞により非回転状態での静的風洞試験を水鳥及び樹脂球に対して実施し、広範囲な Re 数域におけるスロットの存在による軸力増大効果と静的軸力特性の Re 数依存性を明らかにした。また、これまでに実施してきた垂直風洞による回転を伴う動的試験を樹脂球においても実施し、樹脂球における定常飛行時の動的軸力特性も明らかにした。それに加え、自由飛行試験装置を製作し、高速度カメラで撮影したシャトルコックの飛行経路を画像解析することにより算出した変位、速度、加速度及び回転数から非定常飛行時の空力特性を導いた。動的試験及び自由飛行試験で得られた結果から、シャトルコック飛行時における付加質量の Re 数依存性を推算した。

2. 実験の概要

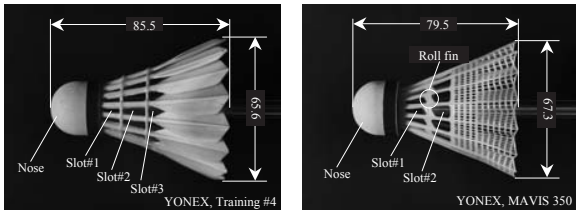
本報告の実験では実物のシャトルコックを使用し、垂直風洞による静的及び動的試験、自作したシャトルコックの打出し装置による自由飛行試験を実施した。以下に実験で使用したシャトルコック模型及び各実験の概要を述べる。

2.1 実験用シャトルコック模型

全ての実験には 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スロット（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 形態）と塞がない通常形態（Normal 形態）について静的及び動的試験を実施した。



(1-A) 水鳥球 (1-B) 樹脂球
図1 風洞試験用模型

2.2 静的試験

これまでに筆者らが実施してきた静的試験⁶⁾では、水平風洞を使用し、スティング先端にシャトルコック模型を取付け、後端に接続した6軸力覚センサーにより6分力を計測してきた。しかし、この方法では模型の自重により、計測すべき空気力やモーメントより大きな風袋がセンサーに作用することになるため、容量の大きな力覚センサーで模型を支持する必要がある。低速域での微小な空気力を精度良く計測するには限界があった。そこで本報告では、図2に示すように、垂直風洞内でシャトルコック模型をスティングによりロードセルから吊下げて支持することにより、容量の小さなロードセル（共和電業：LTS-50GA、最大計測荷重：500 mN）を使用した微小空気力の計測が可能なシステムを構成した。本計測システムにより、 Re 数 5,000 程度（流速では約 3 m/s）の低 Re 数領域においても精度良く軸力を計測することが可能になった。しかし本計測システムでは、原理的に迎角 0° における軸力計測に制約される。

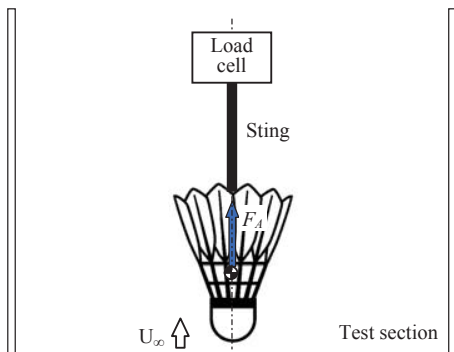


図2 静的試験によるシャトルコックに作用する軸力の計測

2.3 動的試験

動的風洞試験では、質量を変化させたシャトルコック模型を製作し、垂直風洞内で飛行させ定常飛行時の軸力及び回転数を取得した。模型質量はノーズ部のコルクをくり貫き、その空間に入れる錘の量により変化させた。その模型を図3に示すように風洞内で重力 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定常状態における軸力係数 C_A を算出した。また、回転するシャトルコック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。

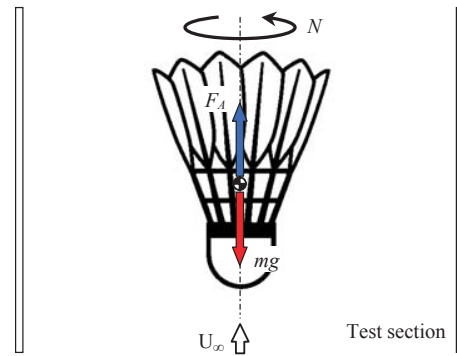


図3 動的試験によるシャトルコックに作用する軸力の計測

2.4 自由飛行試験

射出装置から鉛直上方に打出されたシャトルコックは、図4のように重力と軸力を受けて減速する。その飛行状態を高速度カメラで撮影し、画像解析することにより飛行速度 v 、加速度 a 及び回転数 N を算出した。また、シャトルコックの質量を m とした運動方程式は鉛直上向きを正とすると式(1)で与えられる。なお、加速度 a は正負を含むものとする。

$$ma = -mg - F_A' \quad (1)$$

式中の F_A' は付加質量の影響を含む非定常な軸力であり、画像解析から得られた加速度 a より求めることができる。その値から非定常な軸力係数 C_A' は式(2)で与えられることになる。ここで、 q は飛行速度 v における動圧、 S は基準面積である。

$$C_A' = F_A' / (qS) = -m(a + g) / (qS) \quad (2)$$

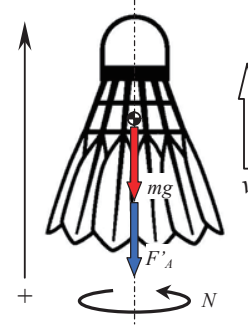


図4 自由飛行時にシャトルコックに作用する力

3. 結果および考察

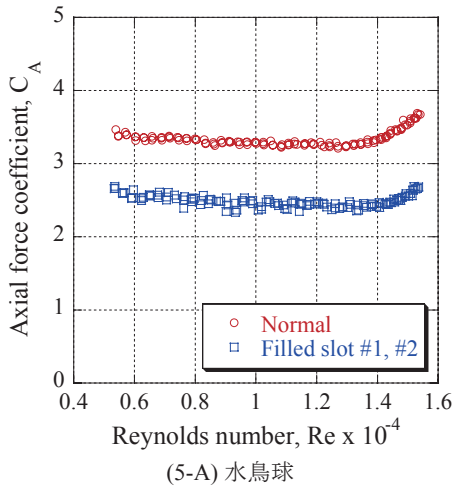
3.1 静的試験

3.1.1 軸力係数の Re 数依存性

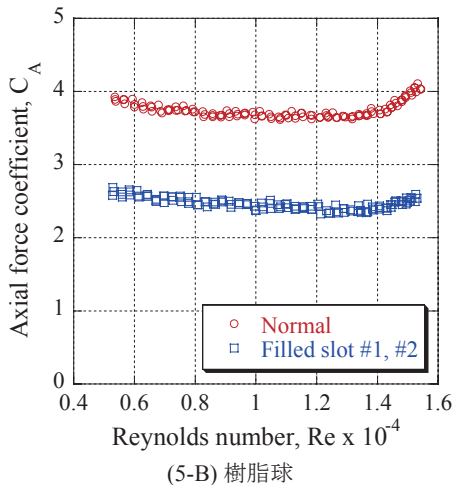
図5は、迎角 0° における水鳥球及び樹脂球の軸力係数の Re 数依存性である。水鳥球及び樹脂球ともに、Normal 形態（通常形態）の軸力係数は Re 数約 5,000 ~ 14,000 の範囲ではほぼ一定であり、 Re 数の変化に対し急激に変化することは無く、動圧に比例した軸力が作用しているのがわかる。その値は水鳥球で 3.3、樹脂球では 3.7 であり、非常に大きな軸力が作用していることがわかる。しかし、 Re 数約 14,000 を過ぎた辺りから軸力係数は緩やかに上昇するようになり、軸力と動圧の比例関係は崩れることになる。

一方、Slot を塞いだ Filled 形態では、両シャトルコックとも軸力係数は低下し、水鳥球、樹脂球共に約 2.4 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¹⁾や綿

貫²⁾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。筆者らの実施した Re 数 40,000, 迎角 0° における静的試験⁶⁾においても、Filled 形態で軸力係数が低下することを確認しており、今回の実験のような低 Re 数領域においても、Slot を塞ぐことにより軸力は Normal 形態より低下することから、大きな軸力の発生メカニズムである流れ場の構造は Re 数に対して大きく変化することは無いことを示している。



(5-A) 水鳥球



(5-B) 樹脂球

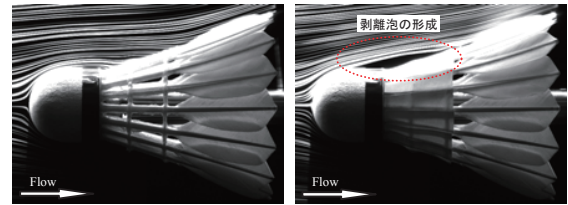
図5 軸力係数の Re 数依存性

3.1.2 Slot 閉鎖による軸力減少のメカニズム

この軸力の減少を、榊原¹⁾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。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 Normal 形態の方が、なぜ軸力は増大するのか？）。この軸力発生メカニズムは、シャトルコック内・外の可視化画像、シャトル内部正中面の静圧分布測定から説明することができる。なお、本項の詳細については、引用元である文献5を参照されたい。

図6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(6-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(6-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。



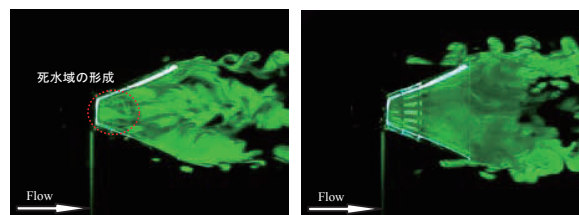
(6-A) Normal (6-B) Filled slot #1, #2

図6 シャトルコック周りの流れ場

シャトル内部の流れ場の構造を検証するために、正中面で切断した半裁模型（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7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(7-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に分かれ、羽根面に沿った旋回流を形成する。

図(7-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。



(7-A) Normal (7-B) Filled slot #1, #2

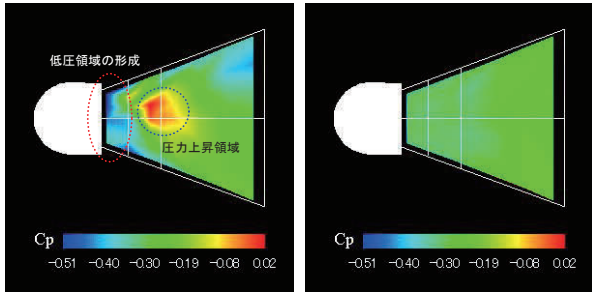
図7 シャトルコック内部正中面の流れ場

図8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本の白い縦線は羽固定用糸の位置を示している。

図(8-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 を塞いだ図(8-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。

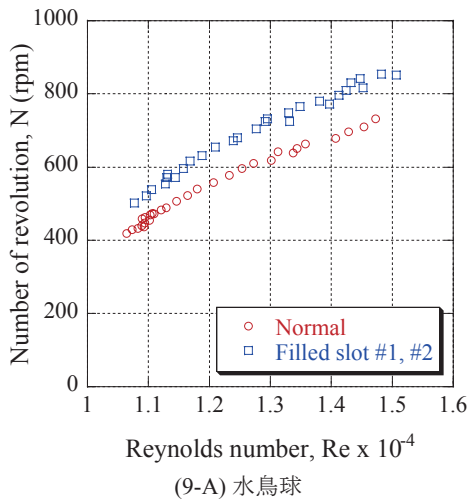


(8-A) Normal (8-B) Filled slot #1, #2
図 8 シャトルcock 正中面での圧力分布

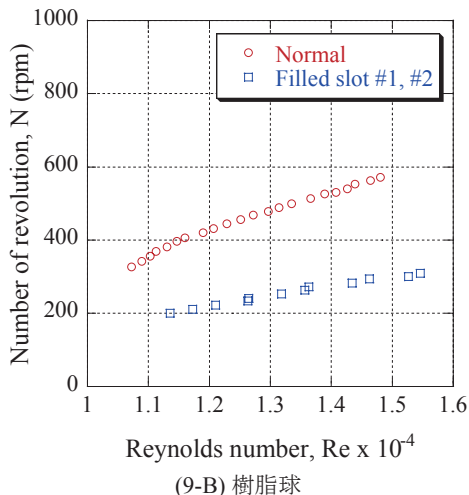
3.2 動的試験

3.2.1 回転数の Re 数依存性

図 9 は、垂直風洞内でシャトルcock を飛行させ測定した、水鳥球及び樹脂球における定常状態での回転数の Re 数依存性である。



(9-A) 水鳥球



(9-B) 樹脂球

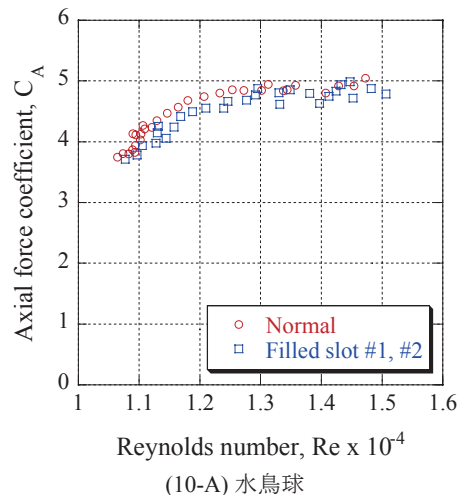
図 9 回転数の Re 数依存性

図(9-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。ローリングモーメントの測定⁵⁾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、現時点ではそのメカニズムは未解明である。

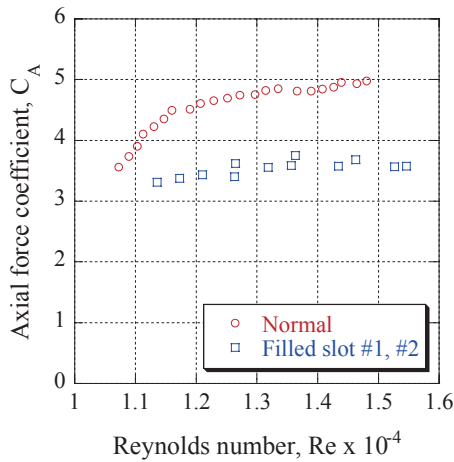
図(9-B)に示す樹脂球における回転数の Re 数依存性も、水鳥球と同様な特性を示している。その回転数は通常形態で水鳥球の約 8 割程度の回転数しかなく、飛行中は水鳥球よりもかなり遅い回転状態となっている。また、Slot を塞いだ場合、水鳥球とは異なり、回転数は著しく低下することになり、通常形態の半分以下となる。静的試験による、Slot を塞ぐことによりローリングモーメントが低下することからも予想できる結果であるが、なぜ水鳥球のような逆転現象が生じないかは疑問の残るところである。水鳥球の羽根と樹脂球のメッシュ状羽根の構造的な違いが、動的効果に及ぼす影響については、今後の研究課題である。

3.2.2 軸力係数の Re 数依存性

図 10 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、 Re 数 14,000 以下で軸力係数は Re 数に依存せず約 3.3 で一定であった。しかし、図(10-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cock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cock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。



(10-A) 水鳥球



(10-B) 樹脂球

図10 軸力係数の Re 数依存性

図(10-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って回転数が低下し、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。このような特性は静的試験（非回転）では見られなかったものである。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り Nose 部近傍の流れ場が遠心力不安定により乱流に遷移し、その構造が大きく変化するため、急激に変化すると考えられる。

3.3 自由飛行試験

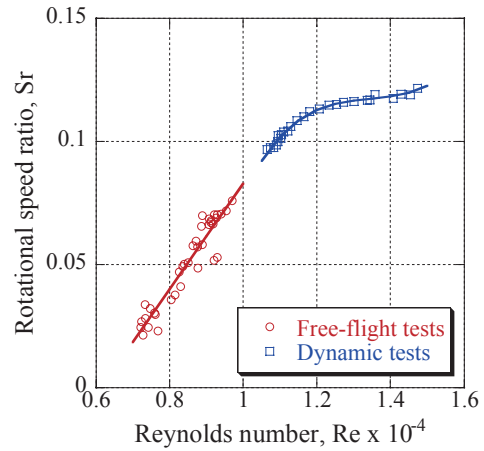
3.3.1 回転速度比の Re 数依存性

図 11 は、垂直風洞による動的試験及び自由飛行試験から得られた回転数と一様流の流速（飛行速度）より求めた回転速度比 Sr の Re 数依存性を示したものである。回転速度比とは回転による周速度と一様流の流速との比であり、回転状態を示す無次元数である。

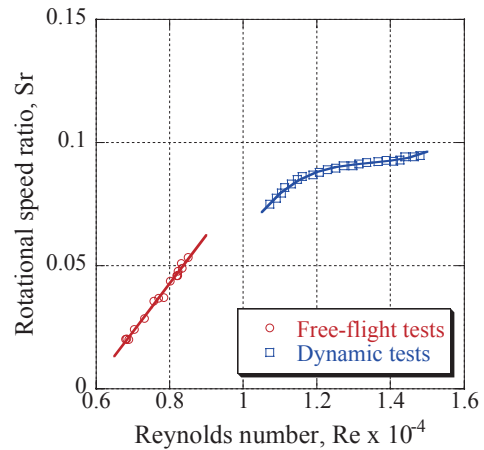
図(11-A)に示す水鳥球の自由飛行試験から得られた低 Re 数域における回転速度比は、 Re 数の増加に対し直線的に増加しており、回転数は飛行速度の自乗に比例していることがわかる。しかし、動的試験においては Re 数と速度比の関係は必ずしも線形ではなく、 Re 数が約 13,000 までは Re 数の増加に伴い速度比は緩やかに上昇するが、それ以上の Re 数では約 0.12 でほぼ横ばいに推移しており、回転数は Re 数に比例することを示している。今回の自由飛行試験では、高速度カメラ解像度の制約から動的試験と同じ Re 数域で実験データを得ることができなかったが、自由飛行試験の延長線上近傍に動的試験による実験結果が存在しており、 Re 数 7,000 ~ 15,000 の範囲における速度比の Re 数依存性を明確に示していると思われる。

図(11-B)の樹脂球においても、自由飛行試験で得られた回転速度比は計測範囲内で Re 数に対して線形関係にあるが、自由飛行試験で得られた結果の延長線と動的試験の間には微妙な「ずれ」が存在しているのが確認できる。この「ずれ」が計測誤差によるものか、樹脂球特有な流体力学

的な現象によるものなのかは、現時点では特定することはできない。今後の課題としたい。



(11-A) 水鳥球



(11-B) 樹脂球

図 11 回転速度比の Re 数依存性

3.3.2 軸力係数の Re 数依存性

図 12 に水鳥球及び樹脂球における軸力係数の Re 数依存性を示す。図中の C_A' は自由飛行試験で得られた加速度を基に式(2)で算出された非定常軸力であり、 C_A は垂直風洞による動的試験で得られた定常軸力係数を示している。また、実線はそれぞれの近似曲線である。

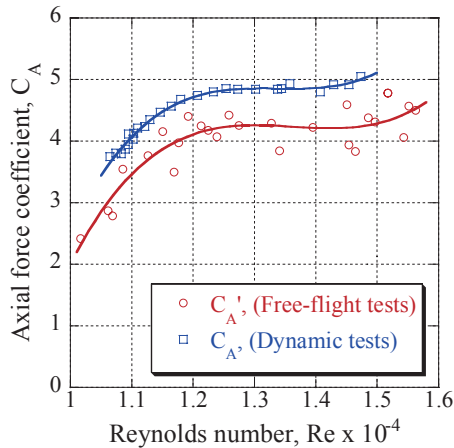
水鳥球の動的試験で得られた軸力係数は Re 数により変化し 3.7~5.0 で推移しているが、 Re 数 10,500~13,000 の範囲で約 3.7から 4.8 へと急激に変化し、ほぼ一定値となっている。一方、自由飛行試験による非定常軸力係数は、動的試験による定常状態と定性的には同様な Re 数依存性を示しているが、測定した Re 数範囲で動的試験よりも小さい値となっている。本来、非定常軸力を考えるにはシャトルコック周りの空気の運動も考慮し、付加質量 m' を運動方程式に含めて式(3)のように定式化しなければならない。

$$(m + m')a = -mg - F_A \quad (3)$$

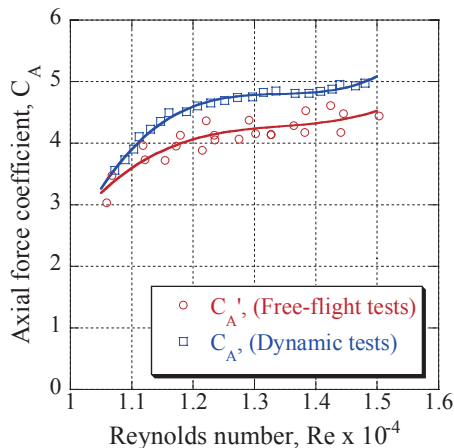
式中の F_A は動的試験で得られた定常軸力である。式(2)と(3)から非定常軸力は式(4)で求められる。今回の実験ではシャトルコックを打上げているため、加速度は負であり、非定常軸力は付加質量の慣性力分だけ小さい値となる。そのため、非定常軸力係数は定常軸力係数よりも小さくなる。

$$F_A' = F_A + m'a \quad (4)$$

図(12-B)の樹脂球においても、定常軸力係数と非定常軸力係数の Re 数依存性は定性的に一致しており、定量的には非定常軸力係数の方が定常軸力係数よりも小さい値となっている。これは水鳥球と同様、加速運動時は付加質量の慣性力だけ非定常軸力は小さくなるからである。



(12-A) 水鳥球



(12-B) 樹脂球

図 12 回転速度比の Re 数依存性

3.4 付加質量の推算

式(4)を空力係数で書き直し、付加質量を求めると式(5)となる。

$$m' = \frac{mqS}{mg + C_A'qS} (C_A - C_A') \quad (5)$$

式(5)より、定常及び非定常軸力係数の測定結果から、付加質量を推算することができる。各軸力係数を図 12 の近似曲線で評価し、付加質量を求めた結果を図 13 に示す。推算された付加質量は、水鳥球で $0.4 \sim 0.6$ g、樹脂球で $0.3 \sim 0.4$ g 程度であり、水鳥球、樹脂球で有意な差は無かった。付加質量を 0.4 g とすると、シャトルコック質量の約 8% であり、外形に対する体積比に換算すると約 3 ~ 4 となる。よく知られている球のポテンシャル計算による体積比 0.5 と比較すると、かなり大きな値となっている。複雑な形状、粘性、加速度及び回転等、球のポテンシャル計算とは条件が異なるためと考えられるが、更なる検証が必要である。

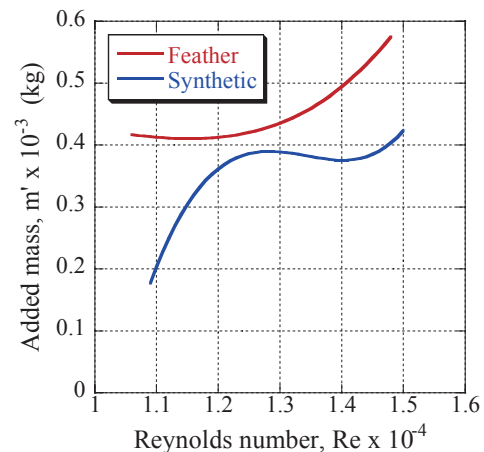


図 13 付加質量の Re 数依存性

4. おわりに

バドミントン用シャトルコック水鳥球及び樹脂球に対し、垂直風洞による静的及び動的試験、射出装置による自由飛行試験を実施し空力特性の Re 数依存性を取得した。本研究の遂行により得られた主な知見を以下に示す。

1. シャトルコックを固定した静的試験では、 Re 数 5,000 程度の微速領域においても Slot を塞ぐことにより、どの球種でも軸力は低下することが確認された。
2. 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 Slot を塞ぐことにより回転数が上昇するため、ウィンドミル効果が強まるためと考えられるが、その詳細については今後の課題である。
3. 樹脂球の normal 形態における動的試験では、水鳥球と同様に Re 数 11,000 ~ 12,000 の範囲で軸力係数が急激に変化することが確認された。これは静的試験では現れない特性であり、シャトルコックの回転により軸力係数の Re 数依存性は大きく異なることがわかった。
4. 自由飛行試験から得られた低 Re 数域では、回転速度比と Re 数は線形関係にあり、回転数は飛行速度の自乗に比例することが確認された。
5. シャトルコックの打上げ試験では、鉛直下向きに加速度が作用するため、非定常軸力は定常軸力より付加質量に作用する慣性力だけ小さい値となる。
6. 定常及び非定常軸力の計測結果から付加質量を推算したところ、水鳥球及び樹脂球ともに約 0.4 g 程度であり、シャトルコック外形に対する体積比では約 3 ~ 4 となる。

参考文献

- 1) 榎原芳夫, 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, 桑原直弘, 古村文音, 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, 第 47 回流体力学講演会/第 33 回航空宇宙数値シミュレーションシンポジウム, JSASS-2015-2017-F/A, 2015.
- 6) 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, JAXA-SP-10-012, 2011.