

垂直風洞によるバドミントン用シャトルコックの 静的空力特性の解明

板倉 嘉哉, 遠藤 果歩, 重田 実穂 (千葉大学)

Experimental Study on Static Aerodynamic Characteristics of Badminton Shuttlecocks with Vertical Wind Tunnel

ITAKURA Yoshiya, ENDO Kaho, SHIGETA Miho (Chiba University)

ABSTRACT

According to many badminton players, there are some differences in impact feeling and flight trajectory between feather and synthetic shuttlecocks. The stiffness of the structural materials must affect the impact feeling. The difference in-flight trajectory is thought to be causally related to the Reynolds number dependency. In the present study, using the vertical wind tunnel, static axial force and rolling moment acting on shuttlecocks were measured for a range of Reynolds number $10,000 < Re < 43,000$. Typical results are as follows: (1) Axial force of the feather shuttlecock declined sharply as the Re number decreased, and differences of axial force between feather and synthetic became remarkable. (2) Contribution of wind-milling drag to the total drag was estimated. The contribution ratio of windmill drag was about 15 ~ 40 %.

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鷺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、日本バドミントン協会が認定する公式な試合用の検定合格球は存在せず、中学生の練習用等に使用される程度である。また、競技者からは水鳥球と樹脂球では「打球時の感覚が違う」、「飛びが違う」、特に「最後の延びが無い」と指摘されている。「飛びの違い」は、流体力学的にシャトルコックに作用する抵抗の Re 数依存性の違いに起因するものであり、航空工学的な観点からも興味の尽きない研究対象である。

抵抗の Re 数依存性については、榎原¹⁾が風洞試験により、高 Re 数領域で樹脂球の構造的変形が抵抗を低下させることや羽根の破折や変形の影響を調べている。また、綿貫²⁾らは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、Cooke³⁾が風洞およ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、Alam⁴⁾らは高 Re 数領域での水鳥球と樹脂球の風洞試験を行い、羽根の構造的変形が抵抗特性に与える影響を明らかにしている。最近では、Hart⁵⁾らにより高 Re 数領域 (Re 数 2.7×10^5 以上) における回転する水鳥球全機周りの流れ場を数値計算することも試みられており、風洞試験では得られない詳細な流れ場の構造解明が期待されている。しかし、樹脂球における「最後の延びが無

い」は落球直前の状態であり、その解明には低 Re 数領域での微小な抵抗測定が必要である。筆者⁶⁾らも、水平風洞により水鳥球および樹脂球の静的状態における抵抗、揚力、ローリングモーメントの迎角依存特性等を流速一定 (Re 数約40,000) の条件下で明らかにしてきたが、低 Re 数領域での微小な空気力測定を実現することは困難であった。

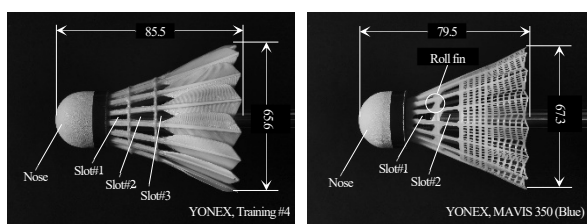
本報告では、垂直風洞内でシャトルコック模型をロードセルから吊下げて支持することにより、微小な空気力の計測が可能なシステムを構成し、 Re 数10,000~43,000程度 (流速約 6 ~ 24 m/s) における、シャトルコックに作用する静的軸力およびシャトルコックを風車のように回転させるローリングモーメントの Re 数依存性を明らかにした。また、ローリングモーメントに付随して生じる軸力 (以下Wind-milling軸力とする) を概算し、全軸力に対する寄与比率を算出した。

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) および樹脂球 (Synthetic) の実物を使用した。図1に実際に使用したTraining (#4: 適正使用温度17~23 °C) およびMAVIS 350 (Blue: 適正使用温度12~23 °C) の構造および各部の代表寸法を示す。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およびSlot #2 をシールで

塞いだもの (Filled) と塞がない通常形態 (Normal) についても試験を実施した。



(1-A) Feather

(1-B) Synthetic

図1 風洞試験用シャトルコック模型

2.2 微小空気力計測システム

これまでに筆者らが実施してきた風洞試験では、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、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、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、図2に示すように、垂直風洞内で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、表1に示す定格容量の小さなロードセルを使用した微小な空気力（軸力および静止トルク）の計測が可能なシステムを構築した。本計測システムにより、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度における軸力およびローリングモーメントの計測に制約される。

表1 使用したロードセル

測定量	製造会社	型番	定格容量
軸力	TEAC	TU-UJIN-G	± 1 N
静止トルク	TEAC	TQ-NR	50 mN・m

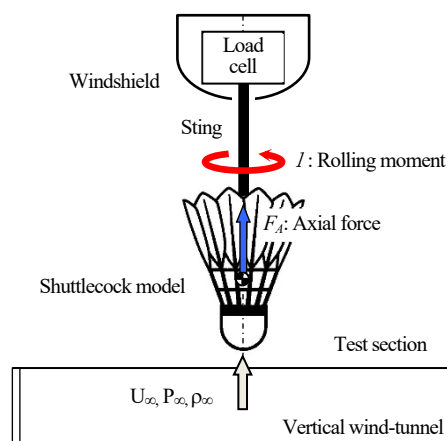
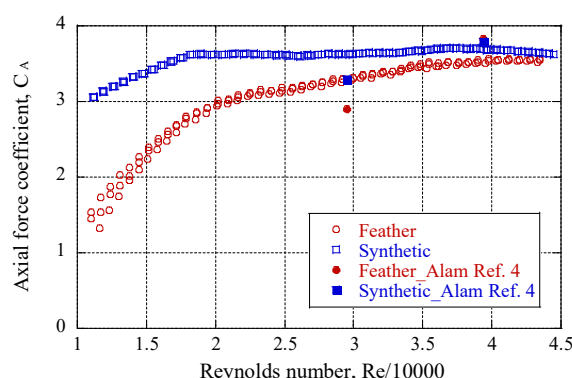


図2 垂直風洞による微小空気力計測システム

3. 結果および考察

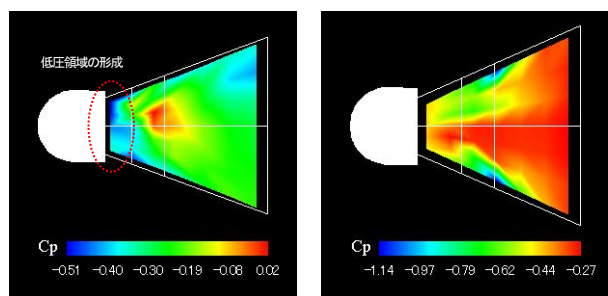
3.1 通常形態における軸力特性

図3はNormal形態における水鳥球と樹脂球の軸力係数の Re 数依存性である。樹脂球の軸力係数は Re 数約44,000~17,000では約3.7で一定であり、動圧に比例した軸力が作用しているが、 Re 数約17,000以下では緩やかに減少している。しかし水鳥球では、 Re 数約43,000で樹脂球とほぼ同じ軸力係数であるが、 Re 数の減少とともに軸力係数は低下し、特に Re 数20,000以下で軸力低下が著しい。水鳥球と樹脂球とでは軸力係数の Re 数依存性が大きく異なることが確認された。

図3 軸力係数の Re 数依存性

このような軸力係数の Re 数依存性の相違は、Nose部背後の静圧力分布に起因するのではと考えている。図4は Re 数約40,000における両シャトルコック内部正中面の静圧分布を測定した結果である⁶⁾。Nose部を過ぎた流れはSlot#1からシャトルコック内部に流入し、Nose部背後に低圧領域を形成する。その圧力係数値は水鳥球で-0.5程度、樹脂球では-0.45程度であり、この低圧領域の形成が大きな軸力の発生源として支配的であると考えられる。しかし、 Re 数が低下し20,000以下になると、Nose部における剥離点の移動などでSlot#1から流入する流れ場が大きく変化し、低圧領域の形成が阻害されるのではないかと考えられる。特に水鳥球でその影響が大きく、 Re 数20,000以下で樹脂球よりも軸力係数の低下が著しいのではと推測される。現在、低 Re 数領域における圧力分布の変化を数値解析により検証する準備を進めている。

また、図中にはAlam⁴⁾によるデータを本風洞試験の無次元化に合わせて再計算したものも載せている。Alamの結果においても水鳥球の軸力は Re 数が下がるとともに低下しており、定性的には一致しているが、その低下幅は我々の試験結果より大きい。また、使用しているシャトルコックが異なるため単純な比較はできないが、樹脂球においては、 Re 数の低下に対し軸力も低下しており、該当する Re 数領域の我々の試験結果とは異なる依存性を示している。



(4-A) Feather (4-B) Synthetic

図4 正中面における静圧分布

3.2 水鳥球と樹脂球の飛行経路

風洞試験により得られた軸力係数の Re 数依存性を多項式近似し、シャトルコックを質点と見なした運動方程式をRunge-Kutta法により数値計算した。打法としてはバドミントン競技における代表的スマッシュ (Smash) を想定し、表1に示す打球時の初期条件を与えた。

表1 初期条件

Type of stroke	Initial conditions			
	Angle (°)	Speed (m/s)	H_0 (m), x_0 (m)	
Smash	-10	47.0	3.0	1.0

図5は両シャトルコックの飛行経路の解析結果であり、コート中央6.7 mの位置には高さ1.524 m (中央高さ) のネットが描かれている。打球からネット上空までは両シャトルコックの経路に大きな変化は無く、ネット上空における水鳥球の速度は13.8 m/s, 樹脂球で11.6 m/sである。しかし、ネットを過ぎた辺りから両者の経路に差が出始め、床面に到達したときには樹脂球の方が水鳥球よりも水平到達距離で57 cm手前に着地している。水鳥球の軸力が急激に低下し始める Re 数20,000 (速度約11.4 m/s) はネット上空通過0.09 sec後に相当しており、ネット上空を過ぎた辺りから経路に大きな差が生じるものと考えられる。

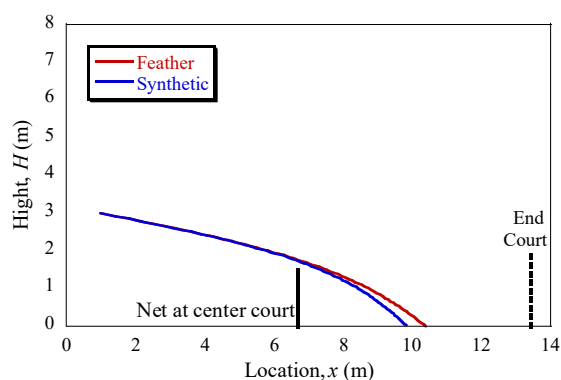
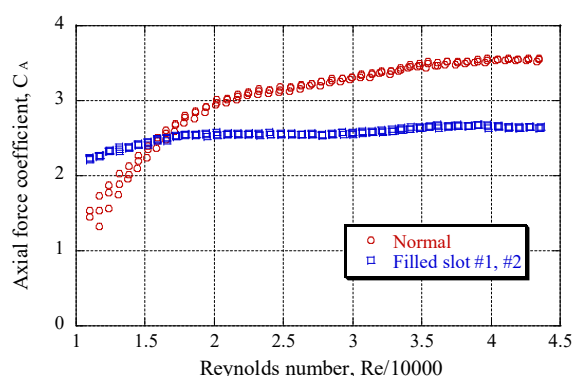


図5 スマッシュにおける水鳥球と樹脂球の飛行経路

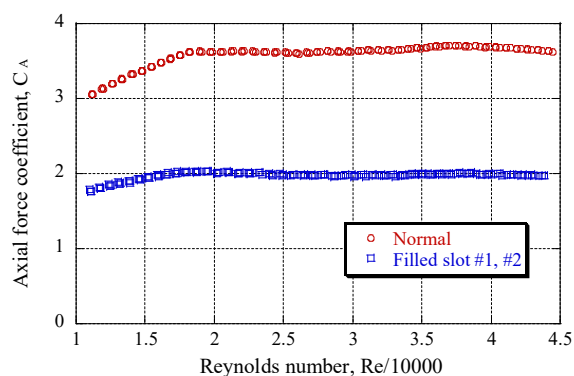
このように樹脂球の方が57 cm手前に着地することが、バドミントン競技者が言う「最後の伸びが無い」に対応するものと考えられる。しかし、数値計算に使用した軸力係数の Re 数依存性は静的状態 (非回転) で得られたものであり、現実の動的状態とは大きく異なる可能性が有る。現在、動的状態での風洞試験を実施しており、その相違を検証している。

3.3 スロット閉鎖による軸力減少

水鳥球および樹脂球のSlot#1と#2を塞いだFilled形態における軸力係数の Re 数依存性を図6に示す。3.1節で示したNormal形態と異なり、両シャトルコックFilled形態の軸力係数は Re 数17,000以下で緩やかに低下する傾向がみられるが、それ以上の Re 数領域では軸力係数は大きな変化は示さず、水鳥球で2.6, 樹脂球では2.0程度で推移している。この値は Re 数40,000において水鳥球はNormal形態の76%, 樹脂球では55%であり、Slotを閉鎖することにより軸力係数は著しく低下することになる。Slot閉鎖による軸力低下は、榊原¹⁾や綿貫²⁾の風洞試験でも確認されている。



(6-A) Feather shuttlecock

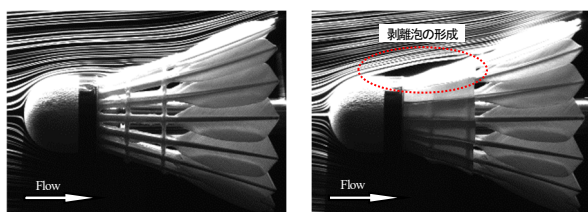


(6-B) Synthetic shuttlecock

図6 スロット閉鎖による軸力の低下

水鳥球の高 Re 数領域におけるスロット閉鎖による軸力低下は、筆者⁶⁾らによりシャトルコック周りおよ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されている。図7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(7-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および#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(7-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前で再付着しており、閉鎖部上方に剥離泡を形成しているのがわかる。直感的にはスロットを閉鎖すると閉鎖部の圧力は上昇し軸力は増大すると考えられるが、閉鎖部上方には剥離泡が形成されることにより圧力は上昇することなく、Slotを閉鎖してもNormal形態以上の軸力増加には結び付かないことがわかる。

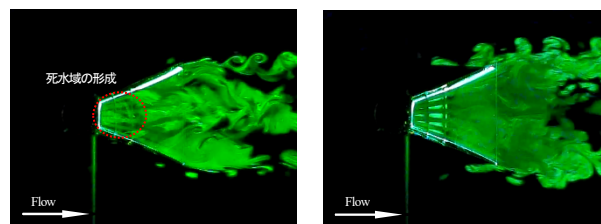


(7-A) Normal (7-B) Filled slot #1, #2

図5 シャトルコック周りの流れ場⁶⁾

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8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(8-A)のNormal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、Slot #1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、大きく方向を変化することは無く、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(8-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。



(8-A) Normal (8-B) Filled slot #1, #2

図8 シャトルコック内部正中面の流れ場⁶⁾

3.1節の図(4-A)で示したように、Normal形態ではNose部背後に低圧領域形成されることにより、シャトルコックには大きな軸力が作用することになる。しかし、Slotを閉鎖すると図9に示す静圧分布となり、Normal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Normal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。また、Slotを閉鎖すると内部の圧力は全体的にNormal形態より高くなるため、羽根内外の圧力差は減少し、ローリングモーメントの低下を招くことになる。その結果、後述するローリングモーメントに付随して発生するWind-milling軸力も低下することになる。

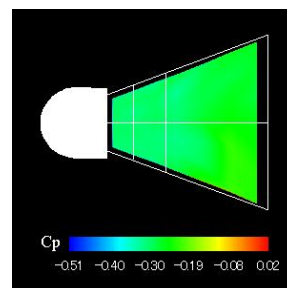


図9 水鳥球Filled形態における静圧分布⁶⁾

樹脂球においては、風洞試験を実施した Re 数全域にわたりSlot閉鎖による軸力低下が認められた。しかし、水鳥球の場合、 Re 数20,000以下でFilled形態は Re 数の減少とともに軸力は緩やかに低下するが、Normal形態では急激に低下するため、Slot閉鎖による軸力の大小関係が逆転することとなる。このような現象は初めて得られたものであり、今後の研究課題である。

3.4 ローリングモーメント特性

図10はNormal形態の水鳥球と樹脂球におけるローリングモーメント係数の Re 数依存性である。水鳥球および樹脂球ともに Re 数による変化はほとんどなく、動圧に比例したローリングモーメントが作用していることがわかる。その値は水鳥球で約0.027、樹脂球では約0.016で推移している。いずれの Re 数においても水鳥球のローリングモー

メント係数の値の方が大きい。しかし、図11に示す試験的に実施した動的試験（未公表）によれば、樹脂球の方が回転数は高くなり、その大小関係が逆転している。直感的には、静止状態における最大ローリングモーメントの大きいほうが、回転数も高くなると考えられるが、予想に反し逆であった。静的試験で再現できない、何らかの動的効果が考えられるが、現時点では未解明である。

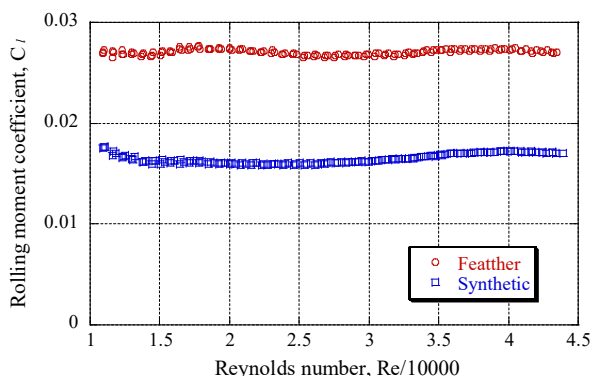


図10 ローリングモーメント係数の Re 数依存性

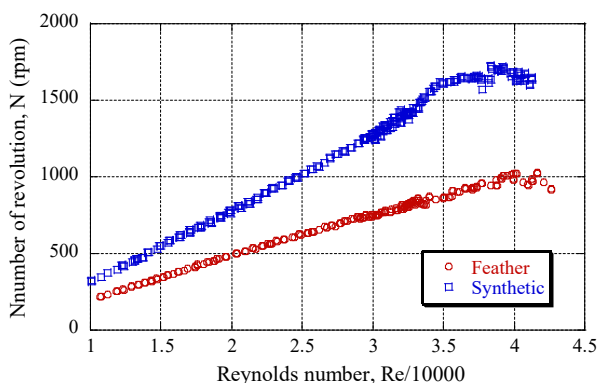


図11 回転数の Re 数依存性

3.5 羽根破折の影響

水鳥球の場合、ローリングモーメントの発生源は、振り角を与えて取り付けられた16枚の羽根毛部である。そこで、羽根破折による羽根枚数の減少がローリングモーメントに与える影響を検証するために、通風中に羽根毛部を破折する試験を実施した。

図12は Re 数30,000において、通風中に羽根毛部を人為的に破折（図中赤線部で切断）した時のローリングモーメントを計測したものである。試験前は、羽根枚数の減少とともにローリングモーメントは漸減すると予測していたが、全く異なる結果となった。羽根枚数が減少しても、残り3枚までローリングモーメント係数はほぼ影響を受けず、その値は約0.03で一定であった。2枚以下となると、ようやくローリングモーメントは低下し始め、羽根0枚でほぼ0となった。羽根が破折することにより流れ場の構造は大

きく変化し、ローリングモーメントも大きく影響を受けるはずであるが、このような特性を示す空気力学的なメカニズムに関しては、現時点では未解明である。

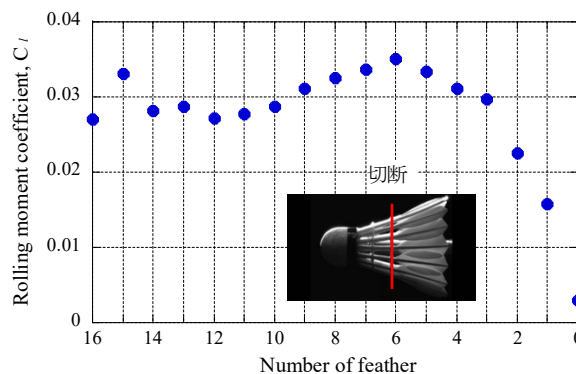


図12 羽根破折がローリングモーメントに与える影響

3.6 Wind-milling軸力特性

水鳥球を風車状態にするローリングモーメントの発生源は、羽根毛部に作用する空気力に起因するもののみである。そこで、ローリングモーメントの計測結果から羽根毛部に作用する空気力を逆算し、ローリングモーメントの発生に付随して生じるWind-milling軸力を概算した。

図13に示すように振り角 θ で取り付けられた羽根毛面に圧力差による垂直力 F が作用すると、その周方向成分である F' によりローリングモーメント $l = F'r$ が発生することになる。また、垂直力 F の中心方向への成分である F'' は、羽根が傾角 θ で取り付けられていることにより、軸方向の成分 $F_{A,wm}$ を有することになる。この $F_{A,wm}$ がローリングモーメントに付随して発生するWind-milling軸力であり、ローリングモーメントから式(1)により計算することができる。なお、ローリングモーメントの腕である r は回転軸から羽根毛部図心までの距離と仮定した。

$$F_{A,wm} = \frac{l \cos \theta_1 \sin \theta_2}{r \sin \theta_1} \quad (1)$$

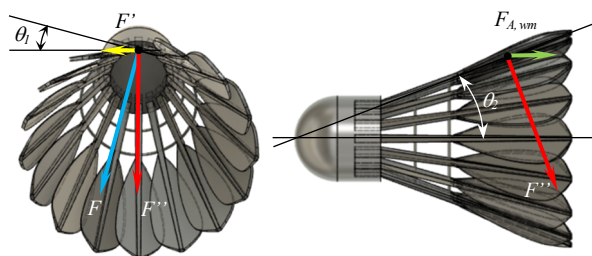


図13 Wind-milling軸力

風洞試験から得られたローリングモーメントからWind-milling軸力を推算した結果を図14に示す。ローリン

グモーメント係数が Re 数に依存せずほぼ一定であることから、風車状態によるWind-milling軸力係数 $C_{A,wm}$ もほぼ0.55で一定あり、軸力全体に占める比率は15~40%程度であることが明らかになった。

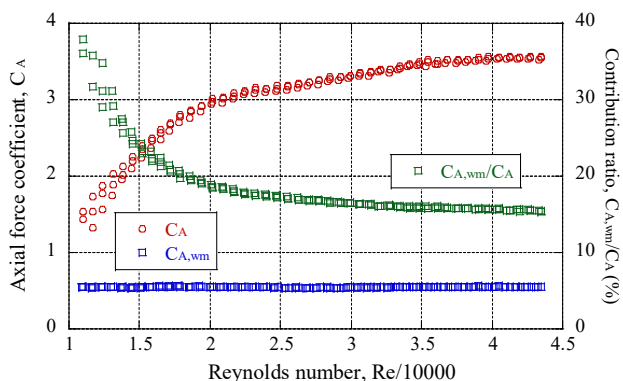


図14 Wind-milling軸力の Re 数依存性

4. おわりに

垂直風洞による微小な空気力の計測が可能なシステムを構成し、 Re 数10,000~43,000程度（流速約6~24 m/s）における、シャトルコックの静的空気力特性を明らかにした。本研究により、以下に述べる新たな知見が得られた。

- (1) 水鳥球と樹脂球の軸力係数は、 Re 数20,000以下でその依存性は大きく異なり、水鳥球の軸力係数は急激に低下する。
- (2) 低 Re 数領域における軸力係数の Re 数依存性の相違が「最後の伸びが無い」の主因と考えられる。
- (3) 水鳥球では、 Re 数20,000以下でNormal形態とFilled形態の軸力係数の大小関係が逆転する。
- (4) 水鳥球および樹脂球のローリングモーメント係数は Re 数に対しほぼ一定であり、動圧に比例したローリングモーメントが作用している。
- (5) 静的試験における水鳥球と樹脂球のローリングモーメント係数の大小関係と動的試験における回転数の大小関係は矛盾する結果となった。
- (6) 破折試験における羽根枚数とローリングモーメントの関係は単純な比例関係にはならない。
- (7) 水鳥球を風車のように回転させるローリングモーメントの発生に付随したWind-milling軸力は、全軸力に対し15~40%程度であると推測される。

今回の報告はシャトルコックが回転しない静的な空気力特性であり、実際のシャトルコック飛行時とは状況が異なっている。正確な空気力特性を把握するためには、ロール運動を伴った動的な空気力測定および可視化実験を実施する必要がある、今後の課題となる。

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気特性, 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) John Hart, Jonathan Potts, Numerical Investigation of the Flow around a Feather Shuttlecock with Rotation, 13th Conference of the ISEA, 2020.
- 6) 板倉嘉哉, 古村文音, シャトルコックの空気特性, 宇宙航空研究開発機構特別資料, SP-10-012, 2011.