

シャトルコックの空力特性

板倉嘉哉, 古村文音
千葉大学教育学部

Aerodynamic Characteristics of Badminton Shuttlecocks

by

Yoshiya ITAKURA 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, however, its aerodynamic characteristics have not been elucidated well. In the present work, using a low speed wind tunnel, effects of the flow passing through the slot located at leg part of the feather on the aerodynamic characteristics are demonstrated. Aerodynamic force and moment acting on the shuttlecock and flow field structure in the shuttlecock are measured in angle of attack range from -10 to $+10$ degrees. Typical two observed aerodynamic characteristics are significant reduction of the drag without the slot and non-liner lift characteristics (N shaped change) around angle of attack zero. This lift behavior is remarkable result we have never seen.

主な記号

- C_A : 軸力係数 (機体軸)
 C_N : 法線力係数 (機体軸)
 C_l : ローリングモーメント係数 (機体軸)
 C_p : 圧力係数
 q : 動圧 Pa
 S : 面積 m^2
 α : 迎角 degree
 ϕ : ロール角 degree

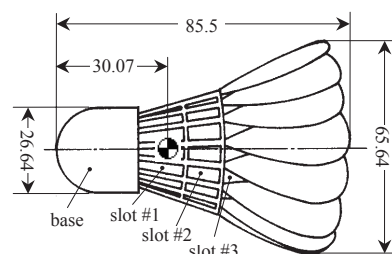


図 1 水鳥球各部の寸法および名称

1. 緒言

バドミントンは老若男女を問わずに楽しめる競技であり、誰でもが一度は経験したことがあるはずである。その要因として、スマッシュ時の速度は $250 \sim 300$ km/h となるが、コート端ではほぼ 0 となる激しい減速性が挙げられる。しかし、その空気力学的特性を扱った報告は榊原¹⁾と綿貫²⁾の2篇しか見当たらず、未解明な部分が残されているのが現状である。その一つとして、羽根基部に設けられた隙間（以下スロットと呼ぶ）の効果が挙げられる。榊原、綿貫の両氏とも、意図的にスロットを塞いだシャトルコックを製作し、抵抗が減少することを明らかにしたが、その流体力学的メカニズムについては明確に解明していない。

本報告では、シャトルコックの静的空力特性におけるスロットの作用を解明するために、風洞による空気力測定、内・外部流れの可視化、内部静圧および後流における静圧・総圧分布の測定を行った。主たる内容はスロットによる抵抗増大メカニズムの解明であるが、風洞実験の過程で得られた特異な揚力特性についても報告する。

2. 実験装置

2. 1 風洞模型

シャトルコックは気温や湿度の変化により飛距離が変化するため、適性使用温度ごとに番手により分類されている。本実験では、YONEX 社製の水鳥球 4 番（適正使用温度 $17 \sim 23^\circ\text{C}$ ）およびナイロン球ブルー（適正使用温度 $12 \sim 23^\circ\text{C}$ ）を使用した。水鳥球における各部の寸法を図 1 に示す。風洞模型としては、図 1 の実物のシャトルコックを使用し、実験内容に合わせた加工を施した。力測定および後流の静圧・総圧測定用には全機模型を、内部流の可視化、内部静圧の測定には正中面で切断した半裁模型を製作した。なお、それぞれの模型に対して、第 1～第 3 スロットをそれぞれ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。

2. 2 実験の概要

実験には、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。また、後流の静圧および総圧分布の測定では、ステンレスパイプ（外径 1mm ・内径 0.5mm ）を 5mm 間隔で 25 本並べた楕円形静圧および総圧管を、シャトル模型後端の後方 $10, 60, 110\text{mm}$ の位置で、主流に対して垂直な面内でトラバースさせて計測を実施した。

空気力および静圧・総圧測定では、主流の風速を 22m/s に固定し、シャトルの迎角を $-10^\circ \sim 10^\circ$ まで 1° 間隔で変角させて計測を行った。このとき、全長を基準としたレイノルズ数は $Re=1.4 \times 10^5$ となる。また、流れの可視化では、風速を 3m/s に設定し高速度カメラにより流れ場の撮影を行った。この場合、レイノルズ数は $Re=1.9 \times 10^4$ となり、力計測よりも約一桁小さくなるため、全体的な流れ場の構造は再現されていても、遷移や剥離点の位置等は力計測時と厳密には整合していない可能性がある。

3. 結果および考察

シャトルコックは、16 枚の羽根が交互に重なった周期的な軸対称構造をしているが、以下で使用しているロール角とは、羽根固定用糸の結び目が最上端に来る位置を基準（ $\phi=0$ ）として定義したものである。また、シャトルコックに作用する空気力には機体軸を採用し、慣用的に使用されている方法で無次元化した。

3. 1 軸力特性

図2に、ロール角 0° および 180° の通常形態 (Normal) とスロットを塞いだ (Filled) シャトルコックの軸力係数の迎角依存性を示す。通常形態においては、迎角 0° を中心とした緩やかな山形分布を形成しており、その最大値は約 3.5 と非常に大きな軸力が作用していることがわかる。また、ロール角の変化に対しては大きな変化は見られず、その依存性は無いと考えられる。第3スロットを塞ぐと、軸力は通常形態よりも 1 割程度減少するが、その迎角依存性は通常形態と同様な変化を示している。一方、第1、第2スロットを塞いだものでは、迎角に対してほとんど変化を示さず、約 2.4 程度で推移している。両者の値を比較すると、塞いだものでは通常形態の約 7 割程度に減少しており、綿貫による実験結果²⁾ と良く一致している。この軸力の違いを、榊原¹⁾ は羽根根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。

以下に、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分布測定、後流での静圧・総圧測定およびローリングモーメント特性から検証する。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° での実験結果により検証することにする。

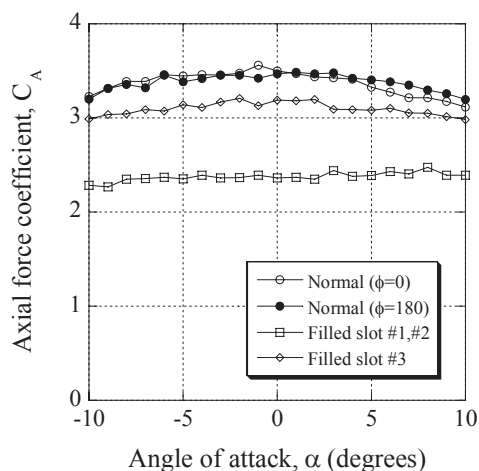
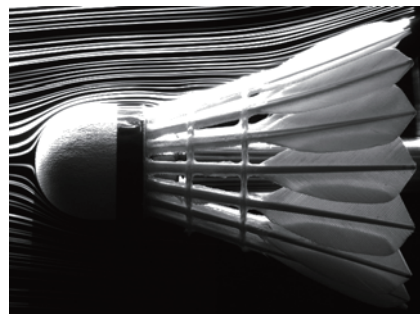


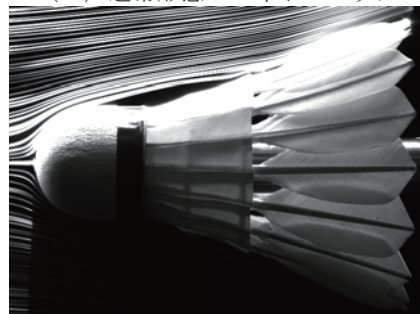
図2 軸力係数の迎角依存性

シャトルコック周りの流れの可視化 図3は、両シャトルコック正中面における流れ場を可視化したものである。通常形態では台近傍を過ぎた流れは剥離することなく、第1および第2スロット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、それよりも台上方を過ぎた流れは、第3スロット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、スロットを塞いだものでは、台を過ぎる流れは肩部で剥離を起こし、分離流線は第3スロット直前 (スロットを塞ぐテーブ後端近傍) で再付着しており、テーブ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。



(A) 通常形態のシャトルコック



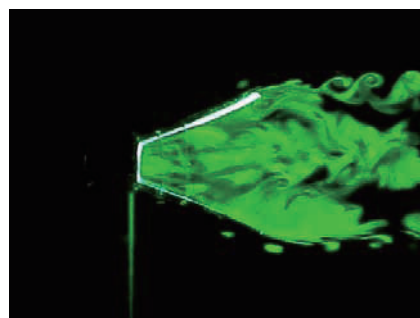
(B) スロットを塞いだシャトルコック

図3 シャトルコック周りの流れ場 ($\alpha=0^\circ$, $\phi=180^\circ$)

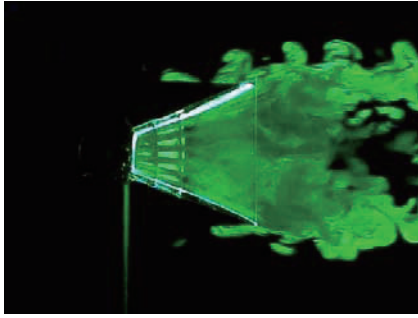
シャトルコック内部の流れの可視化 シャトル内部の流れ場の構造を検証するために、正中面で切断した半裁模型 (正中面は透明アクリル板により遮蔽) による可視化結果を図4に示す。シャトル内部の流れ場は3次元旋回流 (シャトル後方から見て時計回り) となるため、このような半裁模型では実際の流れ場を忠実に再現することはできないが、第3スロットより前方の流れ場では基本的な構造に大きな差異は無いと考えられる。

通常形態では、第1スロット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、台裏直後に三角錐状の死水域が形成されているのがわかる。第2スロット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、あまり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、第3スロットからの流れは、第2スロット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。

スロットを塞いだ場合でも、第3スロットからの流れは存在するが、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。また、スロットを塞いだものでは、シャトル後方に煙の入り込まない孤立した領域が形成されているが、その発生のメカニズムについては、今後の検討課題である。



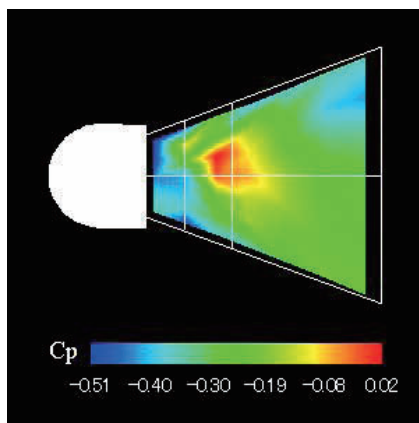
(A) 通常形態のシャトルコック



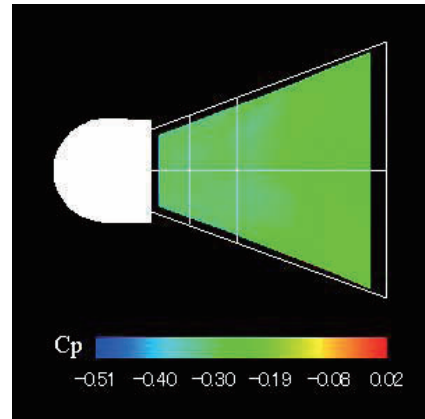
(B) スロットを塞いだシャトルコック
図 4 シャトルコック内部の流れ場 ($\alpha=0^\circ$)

シャトルコック内部の静圧分布 図 5 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。なお、台後方にある 2 本の白い縦線は羽根固定用糸の位置を示している。

通常形態で特徴的なのは、台裏直後の低圧領域と中心軸上の圧力上昇領域の存在であり、これらは、台裏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。第 1 スロット前端から剥離した流れは加速され内部へと流れ込み、台裏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。スロットによる台裏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。



(A) 通常形態のシャトルコック



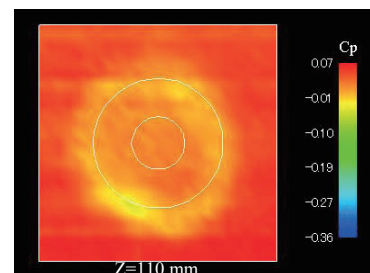
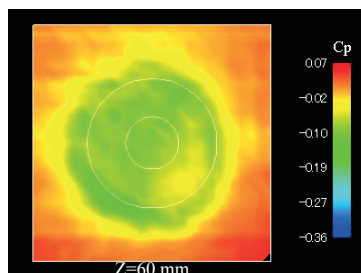
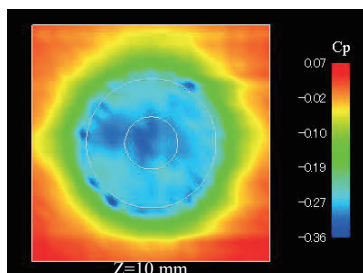
(B) スロットを塞いだシャトルコック
図 5 シャトルコック正中面での圧力分布 ($\alpha=0^\circ$)

一方、第 1 および第 2 スロットを塞ぐと、通常形態で現れた台裏の低圧領域と、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、その圧力も通常形態よりは高くなるため、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。ローリングモーメントの低下はシャトルコックのウィンドミル状態を弱め、その結果、軸力も小さくなると考えられる。

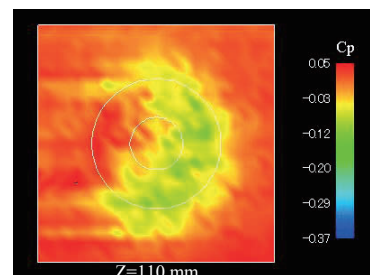
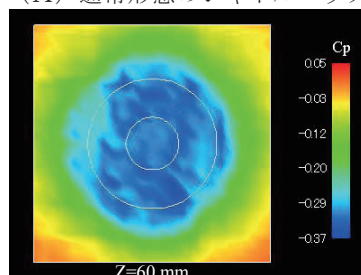
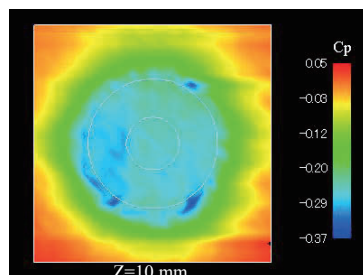
後流での静圧・総圧分布 図 6 はシャトル後方 10, 60 および 110mm における静圧係数の測定結果である。図中の 2 個の白円は、台およびシャトル後端の位置を示している。

通常形態における $Z=10\text{mm}$ の断面では、後端円内部での静圧は低く、第 1 および第 2 スロットを抜けて中心軸方向へ集まる、加速された流れが存在しているのがわかる。その加速した流れも下流へと進むに従い、外周部の主流と混合しながら、徐々に静圧を回復することになる。

一方、スロットを塞いだシャトルでは、後流領域で静圧は特異な挙動を示しており、下流に向けて静圧は一旦低下した後、上昇し回復するようになる。図 6 (B) では、 $Z=60\text{mm}$ の断面で静圧係数は-0.37 まで低下しているが、この位置は前述した煙流入の無い孤立領域に対応しており、このような圧力が低く外部から孤立した閉領域が形成される流体力学的なメカニズムの解明が今後の課題となる。



(A) 通常形態のシャトルコック



(B) スロットを塞いだシャトルコック

図 6 シャトル後流での静圧係数分布 ($\alpha=0^\circ$)

シャトル後流の各断面における総圧係数分布を図7に示す。なお、全ての図の中央に現れる水平線状の総圧が低い領域は、模型支持用パイプの影響である。

通常形態のシャトルでは、 $Z=10\text{mm}$ の断面で、総圧が 0.3 程度の境界がはっきりした円状領域が形成されている。これは、第1および第2スロットからの流れが大きく広がることなく、中心軸に集中するように下流へと流れていることを示しており、図4 (A) の可視化画像からも予想される結果である。また、下流へ行くに従い総圧も緩やかに回復していく。

図7 (B) のスロットを塞いだ模型では、シャトル内部へ入り込む流れがほとんど存在しないことから、シャトル背後の後流全域で、総圧の損失が著しいことがわかる。下流へ向かうに従い、総圧は外周部から回復していくが、中心部の回復は非常に遅い。

静圧がある程度回復している $Z=110\text{mm}$ 断面での静圧および総圧測定結果に、式(1)の運動量理論を適用することにより軸力係数の推算を試みた。その結果を表1に示す。

$$C_A = 2/S \iint_{\text{wake}} (\sqrt{q/q_0} - q/q_0) ds \quad (1)$$

定量的な比較において、推算値は実際の力測定結果よりも過大に見積もられているが、その原因としては、流出検査面での静圧回復不足、後流域での旋回流の影響、逆流の存在等が考えられる。しかし、定性的には、スロットを塞ぐことにより軸力が低下する現象は捉えられている。

表1 運動量理論による軸力係数の推算値 ($\alpha=0^\circ$)

	力測定	運動量理論
通常形態	3.5	4.7
スロット塞ぎ	2.4	3.1

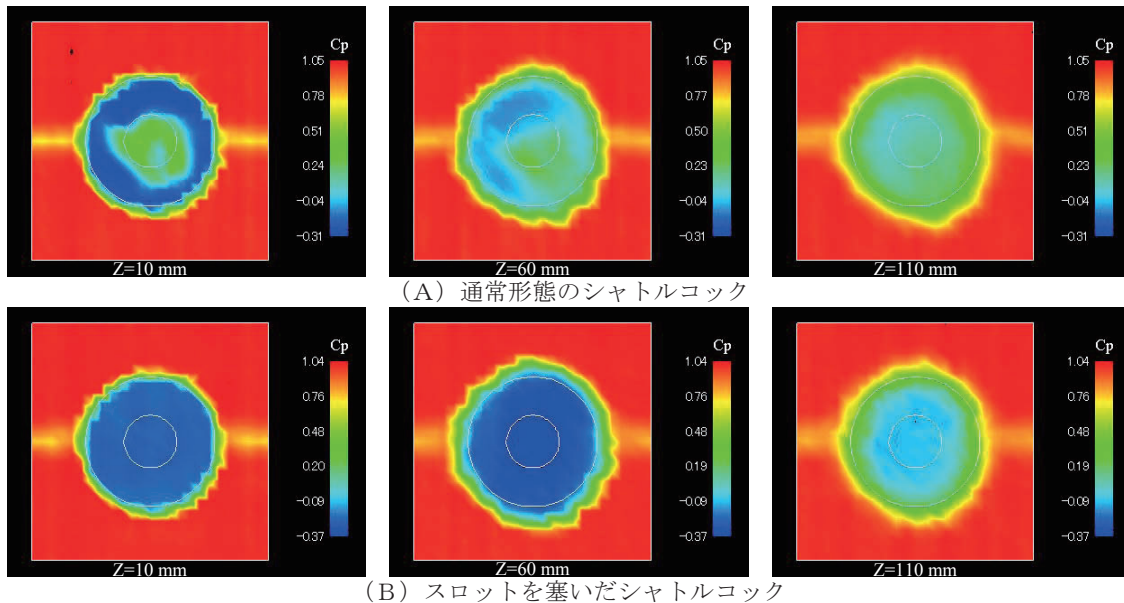


図7 シャトル後流での総圧係数分布 ($\alpha=0^\circ$)

ローリングモーメント特性 ご存知のように、シャトルロ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。これは、16枚の羽根が交互に重なった構造により、羽根内外の圧力差が生じ、負のローリングモーメントを生み出しているからである。図8に、通常形態およびスロット塞いだシャトルにおける、ローリングモーメントの迎角依存性を示す。

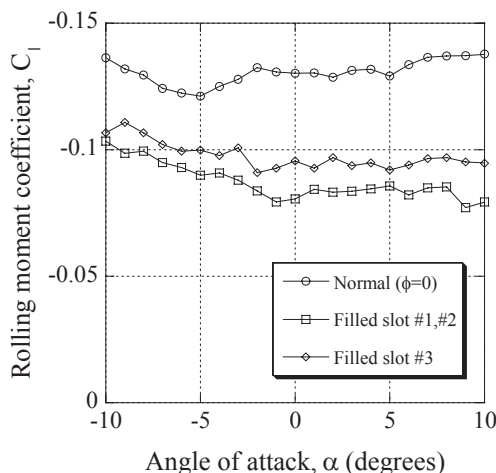


図8 ローリングモーメント係数の迎角依存性

迎角 0° において、通常形態でのローリングモーメントは約-0.13程度であるのに対し、第1および第2スロットを塞いだものでは-0.08、第3スロットを塞いだものでは-0.095となっており、約3~4割程度低下している。スロットを塞ぐことによるローリングモーメントの低下と軸力低下の因果関係は、以下のように考えることができる。

ローリングモーメントの発生原理は羽根内外の圧力差に起因するものであるが、運動量の変化からも説明することができる。すなわち、第3スロット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。スロットを抜けた流れは旋回流を形成することになるが、その際、エネルギーの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大きいほど、ウィンドミル効果が高まり、軸力は増加すると考えられる。

以上の観点から、図2の軸力特性を見直すと、3スロットを塞いだ場合でも、台裏の低圧領域は形成されていることから、このときの軸力低下は、ローリングモーメントの低下（機体軸方向の運動量損失の減少）が主因であると考えられる。一方、第1および第2スロットを塞いだ場合は、ローリングモーメントの低下に加え、台裏の低圧領域も消滅するため、軸力は著しく低下するものと考えられるが、詳細は周方向の速度計測等による検証が必要となる。

3. 2 法線力特性

図 9 に、ロール角 0° の通常形態とスロットを塞いだシャトルcockの法線力分布を示す。

シャトルcockは周期的軸対称構造をしており、迎角の変化に対して法線力是对称な特性を示すものと予想される。事実、スロットを塞いだものでは原点を通る直線的な変化となっているが、通常形態のシャトルcockでは零揚力角が 0° にならないとともに、非線形に変化する迎角が存在することが明らかになった。

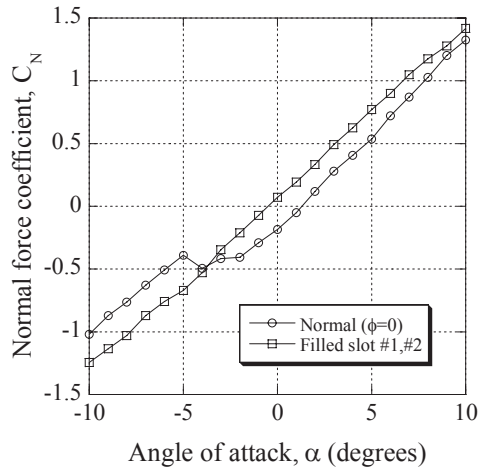


図 9 法線力係数の迎角依存性

次に、法線力のロール角依存性を検証するために、ロール角を 45° 間隔で変化させて法線力の測定を行った結果を

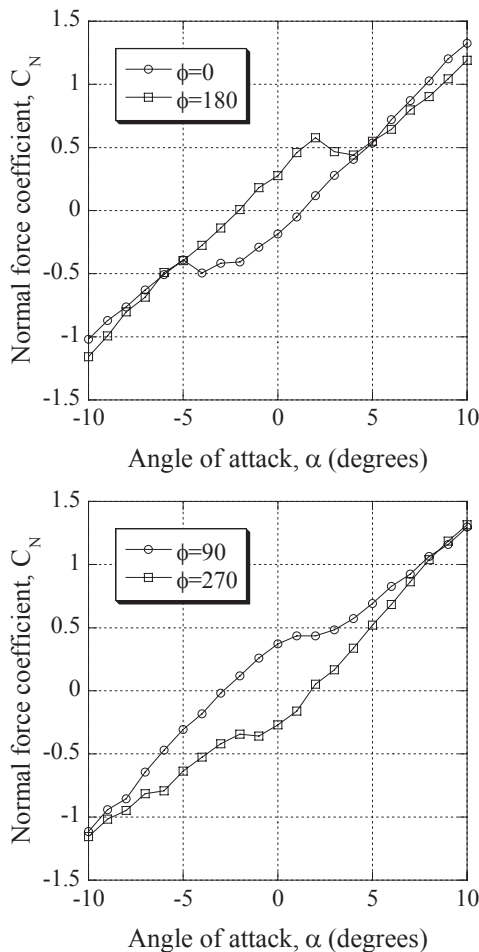


図 10 に示す。軸力はロール角依存性を示すことは無かったが、法線力はロール角に対して大きく変化することになり、模型を上下反転（ロール角を 180° 回転）させると、法線力も原点を対称点として 180° 回転させた分布となった。このことから、シャトルcock形状の非対称性が、このような特異な法線力特性を生み出していること推測することができる。

法線力曲線が原点を通らない原因としては、シャトルcock形状細部の非対称性、すなわち、羽根固定用糸の結び目、骨部の断面形状、羽根形状、羽毛重なり部の隙間の影響が考えられる。図 11 は結び目が最上端にあるときの流れ場であり、第 1 糸の結び目で流線は大きく湾曲し、後方には剥離域が形成されているのが確認できる。上下を反転させた（結び目は最下点）図 3 (A) の流れ場と比較すると、その違いが良くわかる。しかし、同一シャトルにおいて、結び目および骨部の形状を整形しても、法線力特性に大きな変化は無かった。

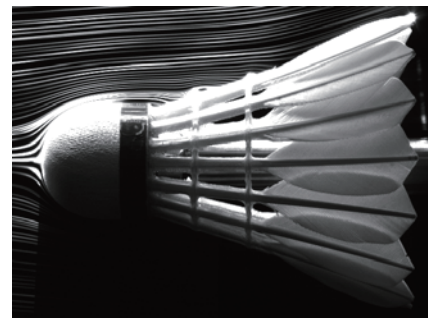


図 11 シャトルcock周りの流れ場 ($\alpha=0^\circ$, $\phi=0^\circ$)

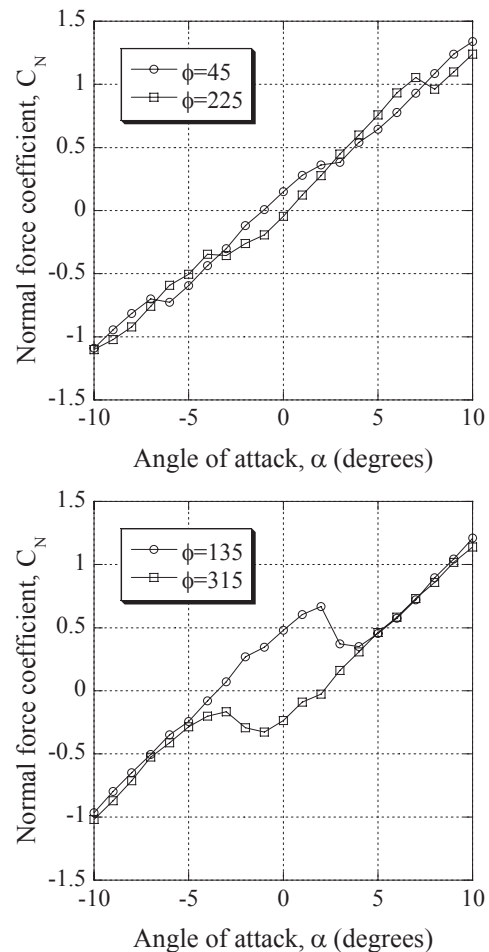


図 10 各ロール角における法線力係数の迎角依存性（通常形態）

シャトルコックの羽根 16 本をそれぞれ詳細に観察したところ、羽毛が重なっている部分の隙間や羽毛先端部の形状に、それぞれ微妙な違いがあることがわかった。そこで、これらの影響を調べるため、羽根重なり部の隙間を全て塞いだもの（Filled gap）と第 3 スロットのみを塞いだシャトルコックに対して、空気力測定を行った。その結果を図 1 2 に示す。

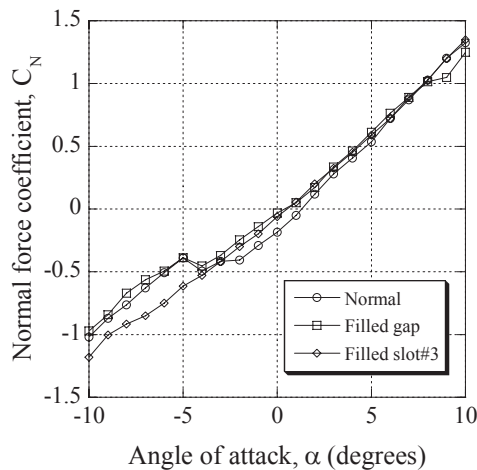


図 1 2 法線力係数の迎角依存性 ($\phi=0^\circ$)

羽毛間の隙間を全て塞いだシャトルコックでは、零揚力角がほぼ 0° となっている。通常形態では正中面の上側と下側に位置する羽根で、重なり部の隙間に微妙な違いがあるため、その間を貫ける流れの圧力分布に差が生じ、非対称な法線力特性を示すものと考えられる。

しかし、隙間を塞いだとしても、迎角 -5° 近傍で観察される法線力の不連続変化は依然として残っており、隙間の不均一とは異なる発生源が考えられる。そこで、第 3 スロットを塞いでみたところ、この非線形な変化が消失することが明らかになった。第 3 スロット部へ到達した流れは、羽毛部先端が前縁となり、羽毛内・外へ行くものに分かれることになる。しかし、この前縁部は、固定用接着剤の仕上げ精度や羽根取り付け角の誤差により、羽根ごとに微妙に形状が異なっている。その影響が主因となり、シャトル上側と下側の羽根でその空力的状態に違いが生じ、このような特性を示すものと考えられる。羽毛部の工作精度が、シャトルコックの法線力特性に与える影響は大きいと言える。

4. 結言

シャトルコックにおけるスロットの存在が空力特性に与える影響を明らかにするために、力測定、圧力測定、流れの可視化を実施し、以下に述べる新たな知見が得られた。

- (1) スロットを塞いでも、塞いだ部分に剥離泡が形成されるため、軸力の増大にはつながらない。
- (2) スロットの存在により、シャトルコック内部の圧力は低下する。特に、台裏部に低圧領域が形成され、大きな軸力の発生源となる。
- (3) シャトル内部の圧力低下は、ロールモーメントの増大をもたらし、シャトルコックのウィンドミル状態を強め、軸力を増大させる。
- (4) 羽毛部隙間の違いにより、上下羽根で非対称な圧力分布となり、通常形態のシャトルコックでは零揚力角は 0° からはずれることになる。
- (5) 通常形態のシャトルコックにおいて、第 3 スロット後部にある羽毛部先端形状の違いにより、法線力は不連続な特性を示すことになる。

今回の報告は静的な空力特性であり、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や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.