

バドミントンシャトルコックのインパクト直後の空力安定性

中川 健一^{*1}, 長谷川 裕晃^{*2}, 村上 正秀^{*3}, 大林 茂^{*4}

Aerodynamic Stability of a Badminton Shuttlecock Just after Impact

Kenichi NAKAGAWA^{*1}, Hiroaki HASEGAWA, Masahide MURAKAMI, and Shigeru OBAYASHI

^{*1} Graduate School of Akita University
1-1 Tegata gakuen-machi, Akita-shi, Akita 010-8502

A badminton shuttlecock generates significant aerodynamic drag and has a complex flight trajectory. The objectives of this study were to measure the aerodynamic properties of feather shuttlecocks under a wide range of wind speeds and to investigate the aerodynamic stability for the pitch movement (rotation about lateral axis). In particular, measurements of aerodynamic forces were performed at high Reynolds numbers. The lift and drag characteristics of shuttlecock have the same tendency with and without spin rotation. On the other hand, the pitching moment coefficient is affected by spin rotation. The pitching moment for a rotating shuttlecock is larger than that for a non-rotating shuttlecock. Furthermore, a shuttlecock is aerodynamically stable for the pitch movement just after impact. It was confirmed that the aerodynamic stability of a badminton shuttlecock is related to the gaps between the slots located at the leg portion and the feather of shuttlecock skirt.

Key Words : Drag, Aerodynamics, Vortex, Spin Rotation, Flow Visualization

1. 緒 言

バドミントンは、近年ロンドン五輪で日本史上初のメダルを獲得し、日本中が沸き競技の注目度が増すとともに、手軽にできるレジャースポーツとしての魅力も改めて注目されるようになってきた。また、バドミントンは全ての球技の中で打球の初速が最も速いことで有名である。スマッシュ直後の初速は、最速で時速 300 km (83 m/s) 以上に達することもある。バドミントンが他の競技と大きく異なる点として、使用する球がシャトル状の独特な形状を有している点が挙げられる。シャトルコック (シャトル) →以降"シャトル"と記載するは、半球状の形のコルクなどに、水鳥等の羽根を接着剤などで固定した簡単なつくりになっている。競技としてのバドミントンは、緩急を使い分ける様々なショットやフットワーク、対戦相手との駆け引きを要する。バドミントンはコースとスピードの緩急で試合をするスポーツと言える。このスピードは、力を入れ具合でも変化させることができるため、バドミントンは簡単に戦略性の高いゲームが楽しめるとともに、手軽にできるスポーツとしての楽しさの両面を兼ね備えている。こうしたバドミントンの魅力を引き出している要因に、シャトルの有する飛翔体としての空力特性があげられる。シャトルは、非常に抵抗の大きい飛翔体で、相手コートに届くまでに、空気抵抗を受けて急激に減速する。たとえば、初速 67 m/s で打ち出した場合、約 0.6 秒後には 7 m/s にまで減速する。こうしたシャ

^{*1} 学生員, 秋田大学大学院 工学資源学研究所 (〒010-0852 秋田市手形学園町 1-1)

^{*2} 正員, 秋田大学大学院 工学資源学研究所

^{*3} 筑波大学名誉教授

^{*4} 正員, 東北大学流体科学研究所
E-mail: n-ken@mech.akita-u.ac.jp

トルの初速と終速の差が著しいことも、他の球技には無い大きな特徴と言える。これまでの研究では、さまざまなショットによる軌道の実験的解析およびシミュレーション⁽¹⁾やショット時の動作についての研究など、道具やバイオメカニクスの視点からの研究が盛んに行われている⁽²⁾⁽³⁾。シャトルは独特な形状から高い減速特性を有していると同時に高い飛翔安定性も有している。特にシャトルはラケットによる打撃（インパクト）直後、クルリと急激な迎角変化（縦回転）が生じ、非常に短い時間で安定飛翔していく。この高い空力安定性について、明らかにされているとは言い難い。そこで、本研究ではこうした姿勢変化をとまなう状態について着目し、シャトルの持つ独特な形状のどの部位、構造が高い空力安定性を生じさせているのかについて風洞実験で調べた。その際、シャトルの隙間部、羽根部に一部加工を施したシャトルを製作し使用した。

2. 実験方法および方法

本実験で使用する実験装置の概略図を図1に示す。風洞は0.29×0.29 mの正八角形の吹き出し口を有する回流風洞である。座標系は主流方向をXとし、測定部スパン方向をY、高さ方向をZとし、シャトル重心を原点とする。シャトルの重心は、コルク部先端から31.4 mm ($X_0=31.4$ mm) である。実験装置は、流体力測定のために三分力天秤（LMC-3501-50N, NISSHO-ELECTRIC-WORKS）を用いた。迎角 α はZ軸について時計回りを正とし、コルク部先端が主流方向に向かって平行な状態を $\alpha=0^\circ$ とする。

実験で使用したシャトルは、試合球として利用されている第一種検定合格球のYONEX製NEW OFFICIALを使用した。シャトルの主要寸法を表1に、使用したシャトル(通常シャトル)の写真を図2に示すシャトルは隣同士の羽根が重なり合うように配置されている。その為、飛翔時の進行方向に対してシャトルの羽根側から見た時、シャトルの主軸周りに反時計回りに回転する。しかし、シャトルはインパクト直後の縦回転時には、スピン回転は起こらない。そのため本研究ではシャトルの回転を行わず、回転なしの流体力測定を実施した。また、シャトルの特徴的な構造である羽根付け根部の影響について調べるために、この隙間を塞いだシャトルでも実験を行った。図3に加工したシャトル(隙間なしシャトル)の写真を示す。羽根付け根部の隙間を通気性のない滑らかなテープで覆った(図3丸印)。これにより、羽根付け根部の隙間からシャトル内部への流れを遮断した。

レイノルズ数 Re は、シャトル最大幅である羽根部後端径 D を代表長さ、主流速 U_0 を代表速度として定義した。また、シャトルの先端（コルク部）が風上方向に向いている状態を迎角 $\alpha=0^\circ$ と定義した。流体力測定では、 $Re=4.3 \times 10^4 (U_0=10 \text{ m/s}) \sim 2.6 \times 10^5 (U_0=60 \text{ m/s})$ の範囲で実施した。流れ場の測定には、スモーク発生装置（LSG500-S；SEIKA CORPORATION）、ハイスピードカメラ（FASTCAM-SA3, Photron Ltd）及びNd-YAGレーザー（G8000；Katoukouken Co.）を用いた。

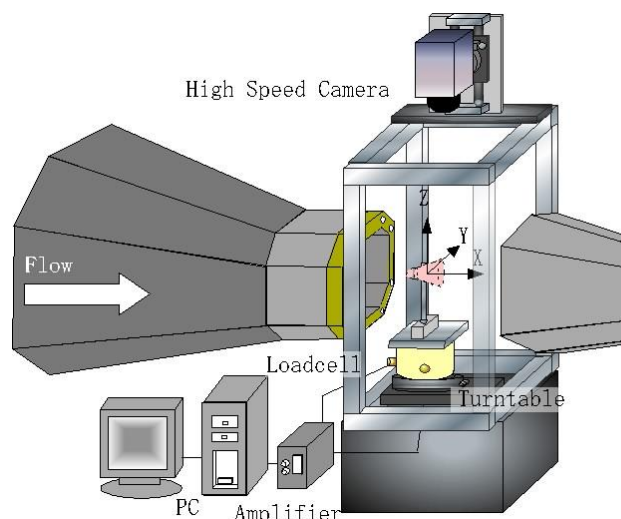


Fig.1 Schematic diagram of experimental set up.

Table 1 Shuttlecock dimensions

	The total length H (mm)	Length of shuttlecock L (mm)	Length of cock h (mm)	Width at the end of skirt D (mm)	Width of cock d (mm)	Mass M (g)	Distance of center of mass X_0 (mm)
NEW OFFICIAL	85.0	60.0	25.0	66.0	26.4	5.4	31.4

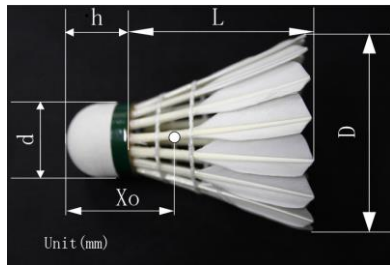


Fig.2 Standard shuttlecock

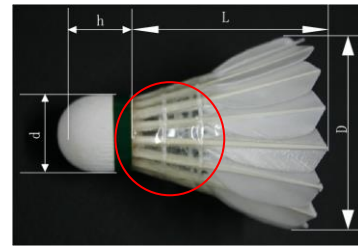


Fig.3 Shuttlecock without gaps

3. 実験結果および考察

3・1 シャトルの減速特性

図4にシャトルの各レイノルズ数について、無回転時におけるシャトルの隙間の有無を比較した抗力係数 C_D を示す。隙間があるシャトル（通常シャトル）に着目する。通常シャトルの場合、抗力係数は $Re=8.6 \times 10^4$ まで増加し、 $Re=8.6 \times 10^4$ を超えると徐々に減少している。それに対して、隙間のないシャトルの場合、通常シャトルのあるシャトルと比べ、約3割程度減少している。一般的に投影面積などが増加する隙間を塞いだシャトルのほうが抗力は大きいように感じられる。しかし、実際に実験を行なうと通常シャトルのほうが抗力係数は大きくなる。この理由については、既報で詳しく述べているのでここでは省略する⁽⁴⁾。

3・2 各迎角でのシャトルの空力特性

シャトルの減速特性に、羽根付け根部隙間が影響していることは確認できた。一方、インパクト直後にシャトルはクルリと急激な迎角変化（縦回転）をし、その後安定に飛翔する。しかしこの縦回転時の安定性について影響をおよぼすシャトルの構造は未だ不明である。そこで、羽根を取り除き、代わりにスカート部を滑らかなテープで覆ったシャトル（円すいシャトル）を導入し実験を行った。図5に加工した円すいシャトルを示す。通常シャトルと羽根付け根部隙間の構造は、同じである。

図6(a)から(c)に $Re=1.3 \times 10^5$ における迎角を変化させた際の通常シャトル、隙間のないシャトル、円すいシャトルの揚力係数 C_L 、抗力係数 C_D 、ピッチングモーメント係数 C_M を示す。図6(a)の揚力係数曲線において、 $\alpha=0^\circ$ から 180° までの範囲では、いずれのシャトルでも、第一ピークは約 40° 付近にあり、ピークの値も類似している。一方、2番目のピークの位置は、隙間のあり、なしで値が異なっている。隙間を塞いだシャトルでは、羽根部が上流側を向いて傾いている状態で、大きな揚力が発生している。つまり、羽根部に通気性がないことで揚力が大きくなるといえる。抗力係数では、羽根部が上流側を向いている大きな迎角時で、隙間あり、なしの違いが生じている。羽根部が上流側にある場合、隙間のないことで大きな抗力が発生する。

図6(c)にピッチングモーメント係数を示す。モーメントの向きはZ軸周りにおいて反時計回りが正である。ピッチングモーメント係数では、いずれのシャトルでも 0° を境に符号が変わることが確認できた。また、 0° 付近のピッチングモーメントの立ち上がりの傾きは、通常シャトルが一番大きく、隙間なし、円すいシャトルの順になっている。この 0° を境にしたピッチングモーメントの立ち上がりは、シャトルの安定性に関連する。つまり、大きな値になっていけば、シャトルが縦回転し、仮に 0° をオーバーシュートした際にも、 0° への戻り易さにつな

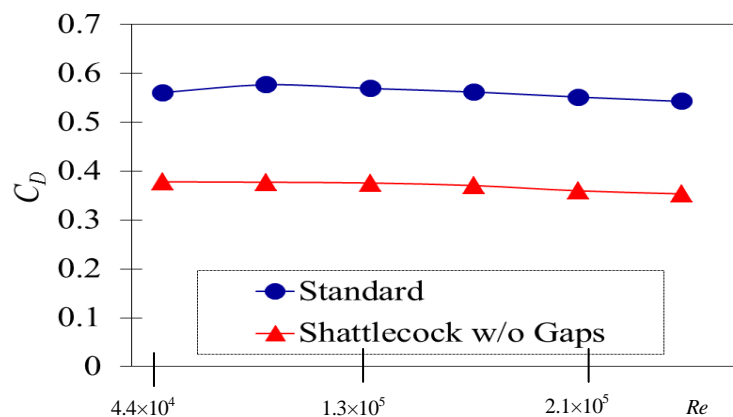


Fig. 4 Drag coefficients variations versus Re ($\alpha=0^\circ$).

がる。また、いずれのシャトルでも 180° 付近ではピッチングモーメントの値が小さい。縦回転の実験中、初期角度を 180° に設定し実施した場合、シャトルが回転しなかったり、回転方向が定まらなかったりしたことがあった。

この 180° 付近のモーメントの傾向がこうした初期状態でのシャトルの挙動に影響している。さらに、通常シャトルでは、ピッチングモーメント係数のピークは、一番大きな値となった。

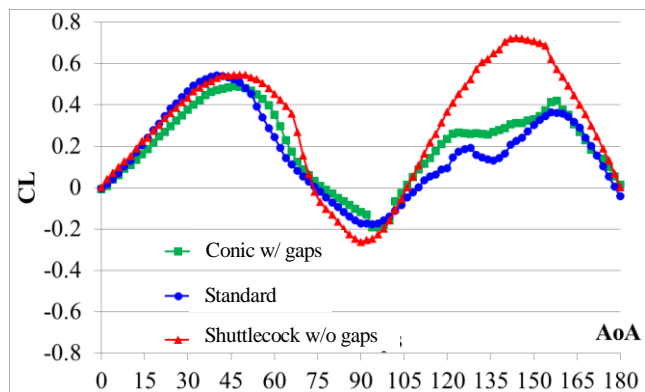
3.3 インパクト直後を模擬したシャトル縦回転速度

インパクト直後のシャトルの空力安定性を調べる為に、シャトル固定軸（Z 軸）周りにおけるシャトル縦回転時の回転速度の測定を行った。ハイスピードカメラを用いて撮影した画像から平均角速度 ω の算出を行った。シャトルは Z 軸周りに反時計回りに回転し、ボールベアリングにより滑らかに回転する。平均回転速度は、初期角度でシャトルの回転軸を保持し、保持を開放し迎角 0° でシャトルが安定するまでの時間から求めた。実験条件は $Re=1.7 \times 10^5$ ($U_0=40$ m/s), 初期角度は $\alpha=150^\circ$ とした。初期角度を 150° で実施したのは、前述した 180° 付近のピッチングモーメント係数の傾向によるためである。通常シャトル、隙間なしシャトル、円すいシャトルの平均角速度は、それぞれ 134 rad/sec, 82 rad/sec, 87rad/sec である。通常シャトルの回転速度が最も大きい結果となった。シャトルは縦回転時、 0° に安定する前に角度のオーバーシュートが起こる。このオーバーシュートの角度は、通常シャトル、隙間なしシャトル、円すいシャトルでそれぞれ $\alpha=-48.7^\circ$, $\alpha=-55.6^\circ$, $\alpha=-66.7^\circ$ となり、円すいシャトルが最も大きい。その後シャトルは、何度かオーバーシュートを繰り返しながら 0° に安定する。

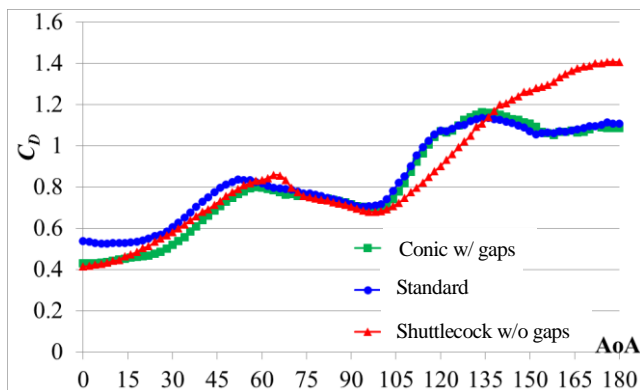
このオーバーシュートが収まり安定になるまでの時間は、通常シャトルが一番短かった。つまり、通常シャトルが縦回転時に最も安定性が高い。さらに、スカート部付け根に隙間があることで、シャトルは素早く回転し、羽根が存在することで、オーバーシュートが抑えられていると言える。シャトル縦回転時の安定性には羽根隙間、羽根形状が関係している結果となったが、現時点ではその詳細までは不明である。今後は、流れ場の解析も実施し、シャトルの形状と空力安定性の関連を解明していく予定である。



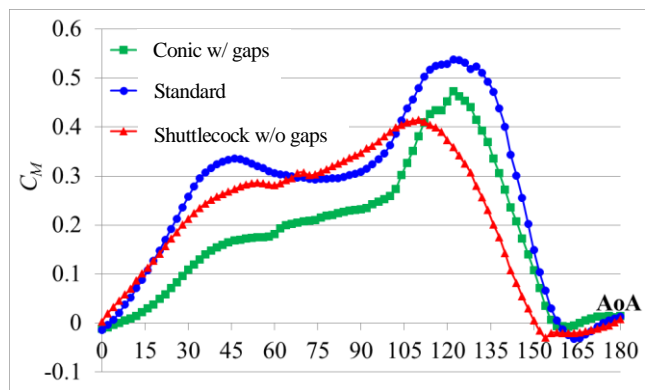
Fig.5 Conical shuttlecock with gaps



(a) Lift coefficient variations



(b) Drag coefficient variations



(c) Pitching moment coefficient variations

Fig.6 Aerodynamic coefficient variations for the shuttlecocks versus angle of attack at $Re=1.3 \times 10^5$.

4. 結言

シャトルの流体力特性について風洞試験を実施した。加えてインパクト直後におけるシャトル縦回転時の空力安定性について調べた結果は、以下のとおりまとめることができる。

- (1) $\alpha=0^\circ$ において回転のないシャトルの抗力係数は風速の増加に従い徐々に減少する。また、隙間なしシャトルの抗力係数は通常のシャトルより約 1/3 倍となった。
- (2) 各迎角での揚力変動、抗力変動において、シャトルの隙間あり、なしで傾向に違いが生じる。一方、ピッチングモーメントは、通常シャトルで一番大きい値となった。
- (3) シャトルのインパクト直後の縦回転時を模擬した挙動について、通常シャトルがもっとも平均回転速度が大きく、オーバーシュート角度が小さい。つまり、シャトルスカート部付け根の隙間と羽根が空力安定性に影響している。

文 献

- (1) A. Cooke, Shuttlecock aerodynamics, Sports Engineering (1999), pp. 85-96.
- (2) 湯海鵬, 阿江通良, “バトミントンのスマッシュ動作の三次元動作解析—腕とラケットの速度を中心に—”, バイオメカニズム学会誌 Vol.18.No.3(1994), pp.164-172.
- (3) 阿部一佳, 渡辺雅弘, 太田憲, 中谷敏昭, “バトミントン・ラケットに作用するモーメント・パターンから見たパワー・ストローク・プロダクションの類型,” 大学体育研究 14(1992), pp.53-61.
- (4) 長谷川裕晃, 和田謙治, 村上正秀, 大林茂, バトミントンシャトルコックの有する高い減速メカニズム,”ながれ 32 (2013) 153-162.