

Development of launcher machine with two rollers for badminton

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/31414

ニローラ式バドミントンマシンの開発*

酒井 忍^{*1}, 野辺 亮太^{*2}, 水口 さゆり^{*3}, 村口 さよ^{*4}

Development of Launcher Machine with Two Rollers for Badminton

Shinobu SAKAI^{*1}, Ryota NOBE, Sayuri MIZUGUCHI and Sayo MURAGUCHI

^{*1} Kanazawa University, School of Mechanical Engineering
Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192 Japan

Shuttlecock used in a badminton match is light in mass (around 5 grams), and is strongly influenced by air drag force. For professional badminton players, the highest initial speed of the shuttlecock exceeds 84m/s (300km/hr), which is the fastest speed for a ball, racket or projectile sports. The shuttlecocks are of two kinds: one of feather and one that is a synthetic shuttlecock. A feather shuttlecock is constructed of 16 goose feathers with a cork base mostly. Also, a synthetic shuttlecock is made of plastic or nylon with a cork. Both shuttlecocks are light and of a complicated shape, therefore, it is extremely difficult for the shuttlecock to be launched at speeds of more than 42m/s without breaking the feather, even if the newest mechanical technology is used. In this study, new insertion equipment and the motion control system were proposed, and an exercise machine for badminton, used to project the shuttlecock at high speeds (over 42m/s), has been developed. The mechanism of the shuttlecock launcher in this machine was achieved using the friction force between two turn rollers and the shuttlecock. The results of the launcher experiments using the badminton machine show that the machine can project the feather shuttlecock at the maximum flight distance of about 11.5m, with a standard error of about 0.32m and the highest initial speeds being 52.8m/s. In the case of the synthetic shuttlecock, this machine achieved the maximum flight distance of about 9.7m, and the highest speeds being 47.8m/s.

Key Words : Badminton, Badminton Machine, Sport Engineering, Rotary Machinery, Mechanism, Motion Control, Flight Trajectory

1. 緒 言

現在, バドミントンの愛好者は, 国内で 24 万人, 世界ではマレーシアや中国等のアジア諸国を中心に 160 ヶ国, 5000 万人以上にも上る⁽¹⁾. バドミントンは, 青少年から高齢者に至るまで手軽にできるスポーツとして幅広く親しまれている反面, 競技としてはスマッシュやクリア等の各種の打撃(ストローク)技術はもちろん, 高い瞬発力や視覚能力が要求され, 上達するには相当な練習が必要とされる^{(2)~(6)}. 一方, バドミントンは, 球技スポーツ中, 打球の初速度が最も速く, 一流バドミントン選手の場合, スマッシュ時の最高初速度は, 84 m/s (300 km/h) 以上にも達する⁽⁴⁾.

バドミントンに関する先行研究としては, 練習法に関する研究^{(5), (6)}, 各ストローク時における三次元動作解析やバイオメカニク的な観点からの研究^{(7)~(9)}, シャトルコック(以下, シャトル)の空力特性に関する研究^{(10)~(13)}, 各ストロークによるシャトルの飛翔軌道を実験や数値シミュレーションによって算出する研究^{(14), (15)}が主に行われてきた. 他方, 実際のバドミントン練習はもっぱら人手に頼っており, 優れたストローク技術や運動能力

* 原稿受付 2011 年 7 月 12 日

^{*1} 正員, 金沢大学 理工研究域 機械工学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

^{*2} 正員, JFE スチール(株)

^{*3} 越後製菓(株)機械開発部

^{*4} 金沢大学 理工研究域 機械工学系

E-mail: sakai@t.kanazawa-u.ac.jp



の高いコーチや対戦相手が同一チーム内では必要とされ、これらの監督やコーチが所属しているチームが試合では強いのが一般的である。これは、野球やテニスなどの他の球技スポーツと異なっている。特に野球の場合、打撃技術向上のために投手の代わりを努めるピッチングマシンが 30 年以上も前から開発されてきており、最近、プロ野球の一流投手をも凌ぐ球速や多様な変化球を高い制球精度で投球できる高性能ピッチングマシンが開発されてきている⁽¹⁶⁾。

一方、バドミントンにおいても練習機を要望する声は以前からあり、シャトルの発射方法としては、次のものが既に考案または試作されている。ラケットでシャトルを打撃する、圧縮空気の空気圧を利用し発射させる、バネの復元力やクランク機構を利用してシャトルを発射させる等の方式である^{(17)~(20)}。しかし、いずれの練習機もシャトルの初速度は 28 m/s 以下、最大飛距離は 5~8 m 程度であり、これは実用上、小学生や高齢者用の練習機としても物足りない発射性能である。もちろん、大学生や社会人、全日本の一流バドミントン選手を対象とした練習機は皆無である。

その最大の理由は、シャトルの特殊性にある。一般に球技の多くはボール等の球形状のものが使用されるのに対し、シャトルは半球状のコルクとガチョウ等の水鳥の羽根 16 枚を用いた複雑な形状をしており、質量は約 5g と極めて軽量である。その一方、初速は 40 m/s を超える高速性を有し、高価な割には耐久性が低いという他の球技スポーツとは大きく異なる特徴がある^{(10)~(14)}。特に、シャトルの羽根は非常に損傷しやすく、ラケットのフレーム部で一度強打すると容易に損傷する。ラケット打撃式や空気圧式などを利用してシャトルを高速発射させるには、ラケットでより強く打撃する、あるいはより高圧で発射しなければならない。必然的にシャトルに大きな衝撃負荷が作用するため、羽根部破損の危険性が高まることが容易に予測できる。シャトルは高価なため練習機としては、シャトルの損傷や消耗を最小限にすることが要求される。以上のような理由があるため、バドミントンの対人練習の代替としてバドミントン練習機の需要は高いものの、従来のシャトル発射法では、このような特殊性を持つシャトルを、羽根を損傷することなく高速に打ち出す（発射する）ことが極めて困難であった。

そこで本研究では、従来のシャトル発射法とは異なる方法の新型バドミントンマシンを開発する。なお、開発マシンの最終目標は一流バドミントン選手用であるが、本研究ではその前段階として、中学生のバドミントン選手を対象とした。その理由は、スマッシュやクリア等の基本的ストロークをすべて含んでいるため実用性があり、その最高初速度も約 42 m/s に達するからである。これらのストロークを再現できる実用的練習機を開発目標とした。本マシンのシャトル発射機構には、二ローラ式ピッチングマシンで採用されている二つの回転ローラの間にボールを挿入、投球する機構を採用した。この発射機構自体は、従来から発案されてはいたもののボールのような球あるいは球に近い形状以外のもの、すなわちシャトル等の複雑な形状のものを発射することは難しいとされてきた。著者らは、回転ローラへのシャトル挿入方法や新たなシャトル把持機構を考案したことによって、シャトルの羽根が損傷しにくく、かつシャトルを高速で発射させることに成功した。

本論文では、開発したバドミントンマシンの発射機構や構造等について報告する。また、開発したマシンを用いたシャトル発射実験を実施し、本マシンの発射速度、飛距離などの発射性能について記述する。さらに、空気抵抗を考慮したシャトルの理論飛翔軌道と発射実験による飛翔軌道との比較、検討を行った。

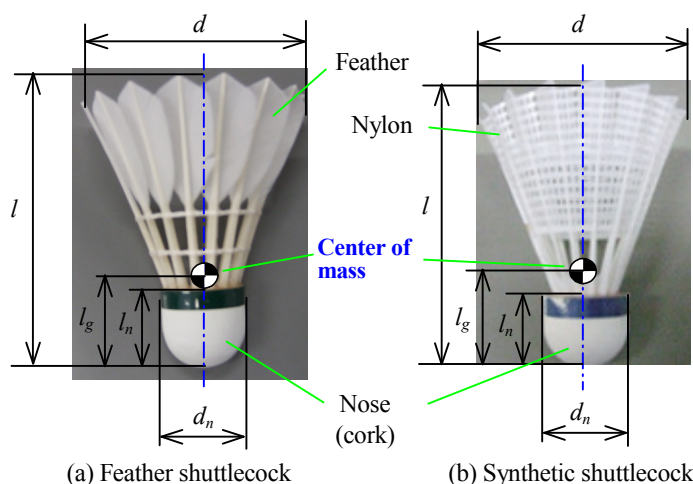


Fig.1 Shuttlecock geometries

Table 1 Shuttlecock dimensions

Shuttlecock model	Feather	Synthetic
Length of shuttlecock, l (mm)	85.4	80.1
Skirt diameter, d (mm)	66.4	66.5
Length of shuttlecock nose, l_n (mm)	25.2	23.0
Nose diameter, d_n (mm)	26.2	26.7
Position of center of mass, l_g (mm)	30.0	32.0
Mass, m (g)	5.2	5.1

2. シャトルと新型バドミントンマシン

2・1 バドミントンシャトル

シャトルは、半球形のコルクの台とガチョウ等の水鳥の羽根 16 枚で作られており、天然素材で作られた水鳥シャトルと天然の羽根の代わりにスカート部がナイロンやプラスチック等の合成素材で作られたナイロンシャトルの 2 種類がある。シャトルの質量や寸法等は、BWF (Badminton World Federation) および (財)日本バドミントン協会の競技規則第 2 条で規定されている⁽²¹⁾。本研究では、YONEX 製の水鳥シャトル (第 1 種検定合格球: NEW OFFICIAL 3 番) とナイロンシャトル (MAVIS 370P) を使用した。両シャトルの外観および主要寸法を図 1、表 1 にそれぞれ示す。

2・2 新型バドミントンマシンの発射機構と構造

(1) シャトルの発射機構

本バドミントンマシンのシャトル発射機構には、二ローラ式ピッチングマシンと同様、二つの回転ローラの間をボールの代わりにシャトルを挿入、発射させる機構を採用した。しかし、シャトルはボールと異なり球形ではないため、野球用の一般的なゴムローラ（厚さ $t=55\text{mm}$ ）でシャトル全体を挟持すると、シャトルは容易に破損する。シャトルの羽根部の損傷を防止するため、ゴムローラの厚さ t を薄くした。また、シャトルのコルク部は比較的強度が高いのでコルク部を挟持し、両ローラの間隔 d_r はシャトルのコルク直径 d_n よりもやや狭い間隔とした。なお、これらの形状や寸法は発射性能に大きく影響することが予測される。このため、動的有限要素解析ソフトウェア（ANSYS/LS-DYNA）を用いた発射シミュレーションを実施し、これらの主要寸法を決定した。なお、本発射シミュレーションについては参考文献(22)で記述しているため、ここでは詳細は割愛する。

発射シミュレーションの一例を図2に示す. 図のようにシャトルはコルクを鉛直下向きにセットし, ローラ間隔 d_r に配置した二つのウレタンゴム製ローラの間を X 方向に挿入速度 U_0 で挿入する. コルクがローラに触れた

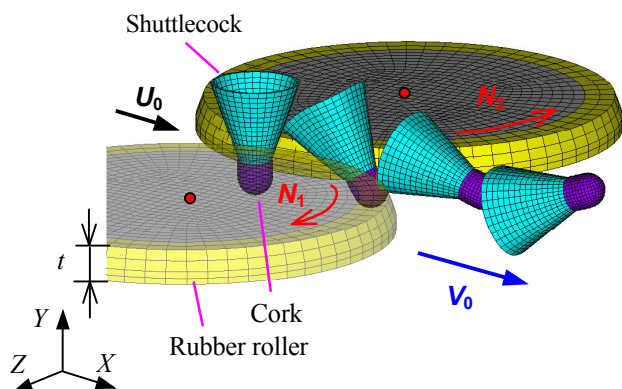


Fig.2 Launcher simulation of shuttlecock

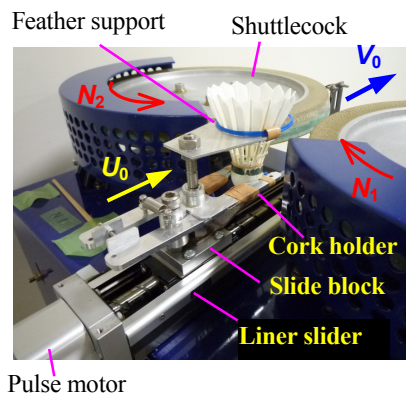


Fig.3 Insertion equipment of shuttlecock

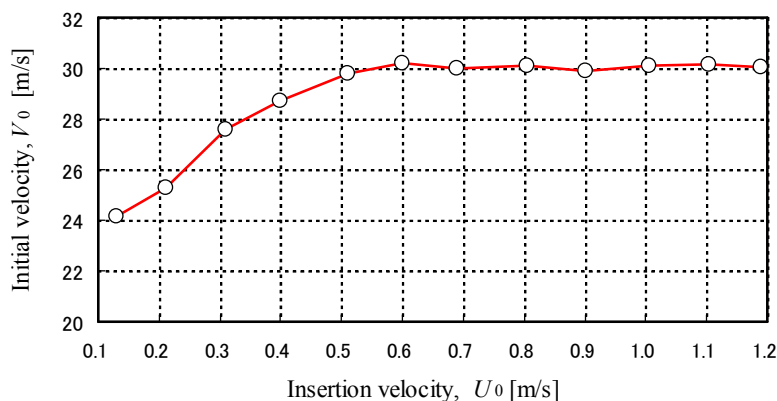


Fig.4 Relation between insertion velocity and initial velocity

瞬間、両ローラの回転力がコルクに伝達されてシャトルが発射される。図より、発射直後のシャトルの羽根はやや変形しているものの、羽根が回転ローラに接触や巻き込まれることなく、スムーズに発射できていることがわかる。発射シミュレーションの結果から、回転ローラの厚さ t を 25 mm、両ローラ間隔 d_r を 19 mm に決定した。また、ローラ端部の表面形状は、羽根部に発生する応力を低減させるため、平面ではなくシャトルのコルクと羽根の設置角とほぼ等しい角度 (70°) になるように台形形状にカットした。

シャトル挿入装置について述べる。図 3 のように、シャトルは羽根（羽根保持具）とバネを用いたワニ口リップ式のコルク把持具の両把持具によって、鉛直下向きに固定される。シャトルと両把持具はスライドブロック上に設置されており、ステッピングモータとボールねじを用いたリニアスライダ機構によってスライドブロックを往復直線運動させ、シャトルを両回転ローラ間に挿入・案内する。シャトルのコルクが回転ローラと接触すると、シャトルは把持具から外れ回転ローラの回転力によって発射される。

ここで、シャトルの挿入速度 U_0 がシャトルの発射初速度 V_0 に影響することが容易に推察されたため、予備発射実験を実施した。実験は両ローラの回転数を $N_1=N_2=2400 \text{ min}^{-1}$ の一定条件下で、 U_0 の可変速度範囲 ($0.13 \sim 1.2 \text{ m/s}$) で変更し、このときの水鳥シャトルの発射速度 V_0 を高速ビデオカメラによって計測した。その結果を図 4 に示す。図より、 $U_0=0.13 \sim 0.6 \text{ m/s}$ では U_0 の増加とともに V_0 も増加するが、 $U_0=0.6 \text{ m/s}$ 以上では V_0 は約 30 m/s でほとんど変化しない。これより、シャトル速度の高速性と安定性を考慮して、挿入速度 U_0 は 1.0 m/s とした。

(2) ローラ式バドミントンマシンの構造

開発した二ローラ式バドミントンマシンの外観および主要寸法を図 5 に示す。シャトル発射用回転ローラ (N_1 , N_2) は、外径 $\phi 315 \text{ mm}$ 、厚さ $t=25 \text{ mm}$ のものを二個用い、 $H=1100 \text{ mm}$ の位置に設置した。両ローラはそれぞれ AC モータ（出力 0.2 kW 、4 極）と直結しており、これらのモータへの入力周波数を $0 \sim 70 \text{ Hz}$ に可変するインバータ制御装置によって、各ローラ回転数を $0 \sim 4200 \text{ min}^{-1}$ の回転速度の範囲で任意に調整が可能である。また、本マシンの全重量は約 100 kgf であり、一人でも運搬、移動が容易で可搬性に優れている。

本マシンのシャトル速度や各種のストロークは、二つのローラ回転数を様々に変えることによって容易に選択することができる。例えば、両ローラの回転数を等しく設定すると、シャトルは野球の直球のように横方向にはほとんど変化しない飛翔軌道、つまりスマッシュやドロップ等の縦方向のみ変化するストロークとなる。一方、カットやドライブなどの横方向に軌道が変化するストロークを再現するには、左右のローラ回転数を変えた条件でシャトルを発射すれば容易に再現できる。また、本マシンにはシャトルの発射仰角 θ を上下方向に可変できる機構（仰角調整機構）を設けた。マシン下部に設置した仰角調整ハンドルによって、マシンの発射仰角 θ を変更

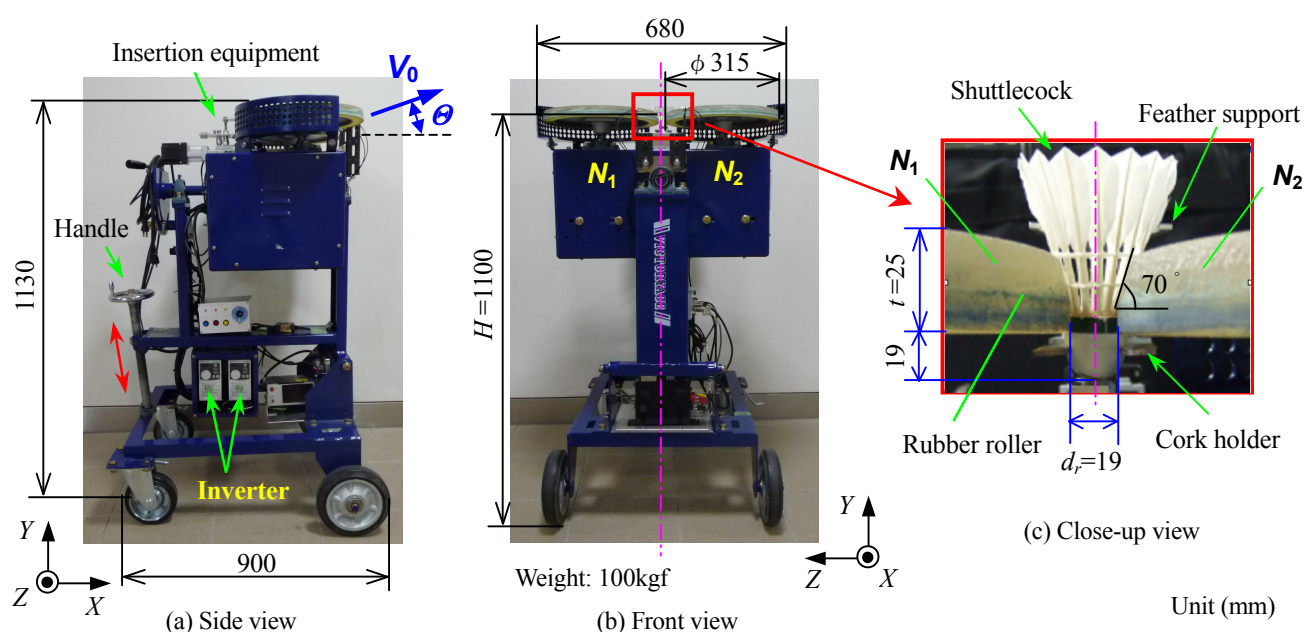


Fig. 5 Roller type badminton machine

し、同じ打撃（ストローク）のクリアやスマッシュでも仰角の異なるストロークを再現でき、実際のバドミントンで用いられている一般的なストロークはもちろん、横方向に軌道が変化するカットやドライブなどの多彩で高度なストロークも再現できる。

以上、開発した二ローラ式バドミントンマシンは、新しいシャトル発射法や発射機構を採用しており、幅広い速度で多様なストロークを再現することができる実戦的バドミントン練習機である。次章では、シャトルの発射実験を実施し、本マシンの発射速度や飛翔距離等の発射性能について述べる。

2・3 バドミントンマシンとラケット打撃によるシャトルの飛翔挙動

開発したバドミントンマシンによるシャトルの飛翔挙動を観察するため、高速度ビデオカメラ（nac 製 MEMRECAM fx-K3）を用いて発射実験を実施した。カメラの撮影速度は 2000 fps (frame/s)とし、発射から発射後の 2 秒間の撮影を行った。水鳥シャトルを用いた発射実験の一例として、両ローラ回転数が $N_1=N_2=3600 \text{ min}^{-1}$ のときの 2 ms/frame ごとに撮影したストロボ画像を図 6 に示す。図より、シャトルが回転ローラに接触や巻き込まれることなく発射できていること、シャトルには発射時にローラから X 方向の並進力だけでなく回転力も与えられていることがわかる。発射後、並進しながら反時計方向に回転し、発射から 4 ms 後にはシャトルはほぼ水平に近い姿勢になっていることがわかる。その後、シャトル全体に空気抵抗を受けるため徐々にこの反時計方向の回転速度は減少し 0 となり、さらに空気抵抗が減少するように今度は時計回りに回転しながら飛翔していく。なお、このときのシャトルの発射初速度を測定した結果、47.0 m/s であった。

次に、実際のバドミントンにおけるスマッシュ時のシャトルの挙動、つまりラケットでシャトルを打撃したときの様子を同様の撮影条件で撮影した。なお、被験者は経験年数 10 年の女子大学生で、バドミントン部の選手である。水鳥シャトルを用いた数回の試技を実施し、その中で打撃時の初速度 (45.3 m/s) が、マシンによる初速度とほぼ等しいときの 2 ms/frame ごとのストロボ画像を図 7 に示す。打撃の瞬間、シャトルは大きく変形し、羽根がラケットのガット面と広く接触する。打撃直後からシャトルの姿勢は急激に変わり、その後、シャトルはコルクが前向きになるように姿勢を変えながら飛翔していく様子がわかる。図 6 と図 7 の両画像を比較すると、飛翔後の飛翔方向の仰角は異なっているものの発射（打撃）後の両者の挙動はよく似ていることがわかる。

両画像からシャトルの発射および打撃後のシャトルの速度変化を算出した（図 8）。図より、ややバラツキはあるものの両者の減速率はほぼ一致しており、本マシンで発射したシャトルの挙動は、実際のバドミントン選手に

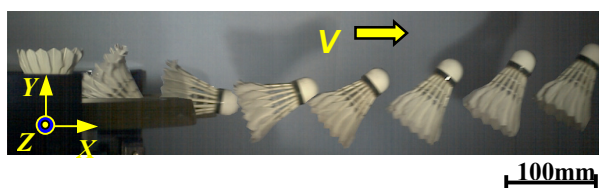


Fig.6 Observed behavior of shuttlecock using machine (2 ms/frame, $N_1=N_2=3600 \text{ min}^{-1}$)

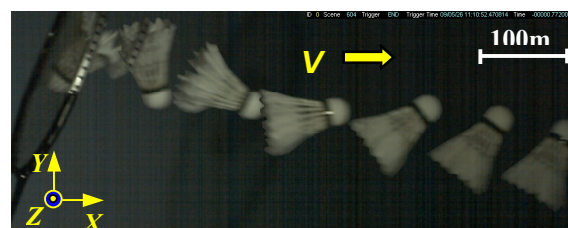


Fig.7 Observed behavior of shuttlecock by racket shot (2 ms/frame)

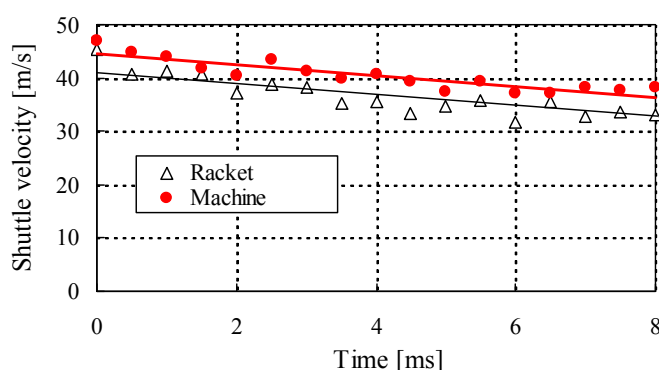


Fig.8 Shuttle velocity after shot and launcher

よるラケット打撃とほぼ同等であることがわかる。以上より、開発したバドミントンマシンは、実戦的練習用マシンとして使用することが十分可能であると考えられる。

3. 開発したバドミントンマシンの発射性能

3・1 シャトルの発射初速度と飛距離

開発したマシンのシャトルの発射初速度と飛距離を測定するため、ローラ回転数を変更した発射実験を行った。なお、実験は室温 21℃、無風状態の屋内環境で実施した。実験条件は、両ローラの回転数を等しく ($N_1=N_2$) し、それらの総和 (N_1+N_2) を 1200～8400 min^{-1} まで 1200 min^{-1} ずつ増加させた 7 パターンの実験を実施した。1 パターンは 5 球で、水鳥、ナイロンシャトルともにそれぞれ異なるシャトルで実施した。合計：70 球 (5 球×7 パターン×2 種類) である。

両ローラ回転数の総和 (N_1+N_2) とシャトルの発射初速度 V_0 の関係を図 9 に示す。図より、水鳥およびナイロンシャトルともに多少バラツキはあるもののほぼ線形性が認められる。また、水鳥の方がナイロンよりも初速度がやや速いことがわかる。図 10 は、両ローラ回転数の総和とシャトルの飛距離 L の関係を示す。この場合、両者の関係は非線形になっている。また、初速度同様、水鳥の方がナイロンよりも飛距離が長く、両ローラ回転数が 4800 min^{-1} よりも速い領域では、両者の差が大きくなっていることがわかる。飛距離 L は、シャトルが受ける空気抵抗が速度の 2 乗に比例するため初速度 V_0 と多少関係はするものの、シャトルの速度、速度変化、抗力係数などと密接に関係するため、非線形となるのではないかと考えられる。

3・2 シャトルの位置精度

前節の 7 パターンの発射実験における落下位置を水鳥、ナイロンシャトルごとに計測した。その結果を図 11 に示す。図より、両シャトルとも総ローラ回転数の増加にともなって、落下位置 (飛距離 L) は長く、そのバラツキの範囲が広がる傾向にあることがわかる。また、左右方向のバラツキに注目すると、水鳥では飛距離が 9 m を超えると +Z 方向にバラツキの範囲が偏る傾向があるのに対し、ナイロンでは左右両方向 ($\pm Z$ 方向) にその範囲が拡大していることがわかる。

このバラツキを定量的に評価するため、各発射パターンにおける落下位置の発射方向 (X 方向) と横方向 (Z 方向) の標準偏差をシャトルの種類ごとに算出した。その結果を図 12 (a), (b) にそれぞれ示す。これより、 X 方向の標準偏差は、両シャトルともローラの回転数が高くなると大きくなる傾向がある。また、水鳥の方がナイロンよりも全体的に大きな値となっており、その最大値は水鳥が 0.32 m、ナイロンが 0.19 m であり、水鳥の方がやや大きい。 Z 方向の標準偏差は、ナイロンの場合、 X 方向と同様、回転数が高くなるとその値は大きくなる傾向があり、最大値は 0.22 m で X 方向と同程度であることがわかる。一方、水鳥の場合はローラの回転数が高くなっても Z 方向の標準偏差はあまり大きくなり、最大でも 0.09 m であり、位置精度がよいことがわかる。これより、水鳥シャトルはナイロンに比べ、横方向のバラツキが少なく直進性が高いと言える。

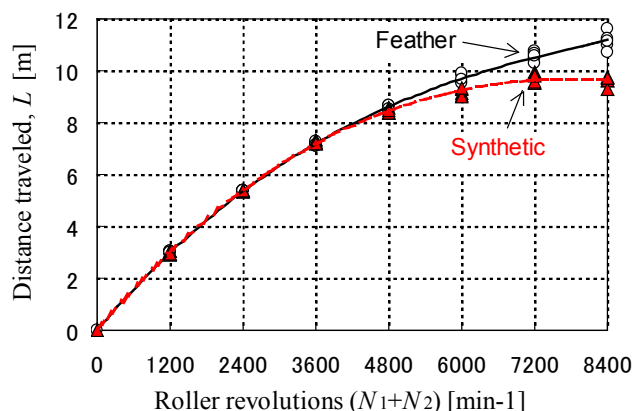
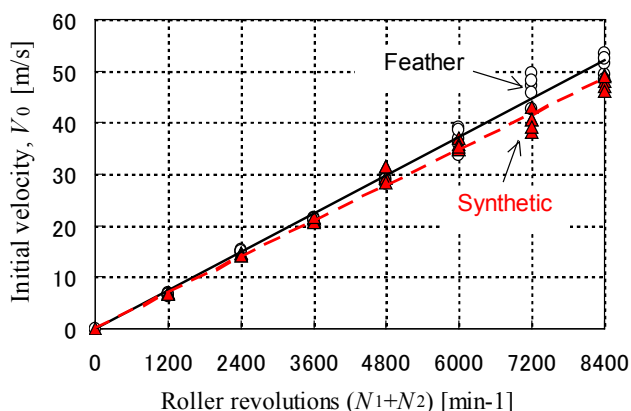


Fig.9 Relation between initial velocity and roller revolutions

Fig.10 Relation between distance traveled and roller revolutions

一般に、バドミントン練習ではコートを 3×3 の領域に分割した9つのゾーンに対して実施され、その位置精度としては、発射方向1.1m、横方向1.0m以内が要求される。発射実験の結果、本バドミントンマシンの発射能力の範囲内では、シャトルの種類や速度、飛距離に関わらず発射方向は0.32m以内、横方向では0.22m以内となっており、要求精度に対し高い位置精度を有していた。一方、位置誤差の原因としては、シャトル発射時の姿勢と羽根変形量のバラツキおよびシャトル個々の個体差が影響しているのではないかと考えられる。

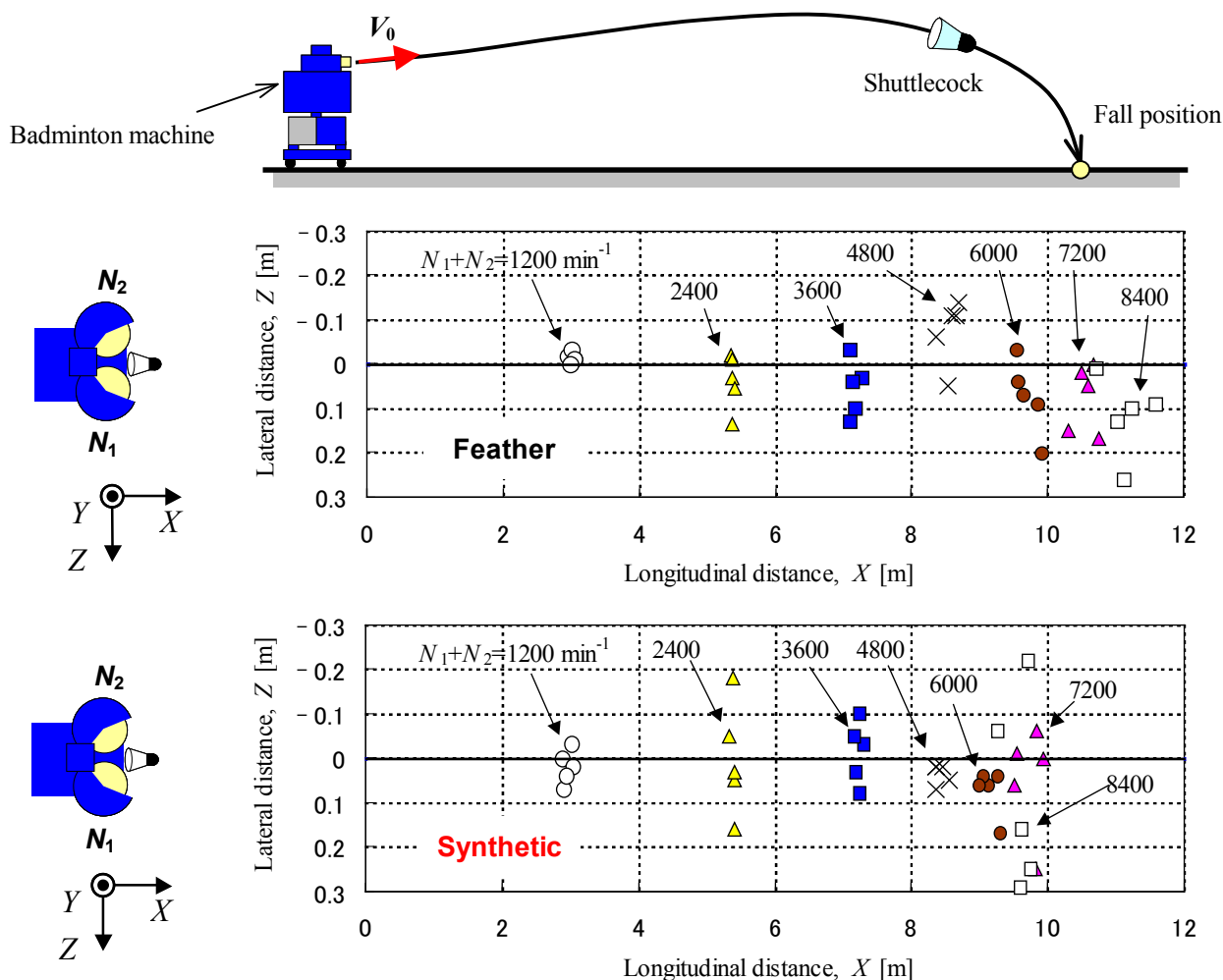


Fig.11 Measured data of fall position for feather and synthetic shuttlecocks

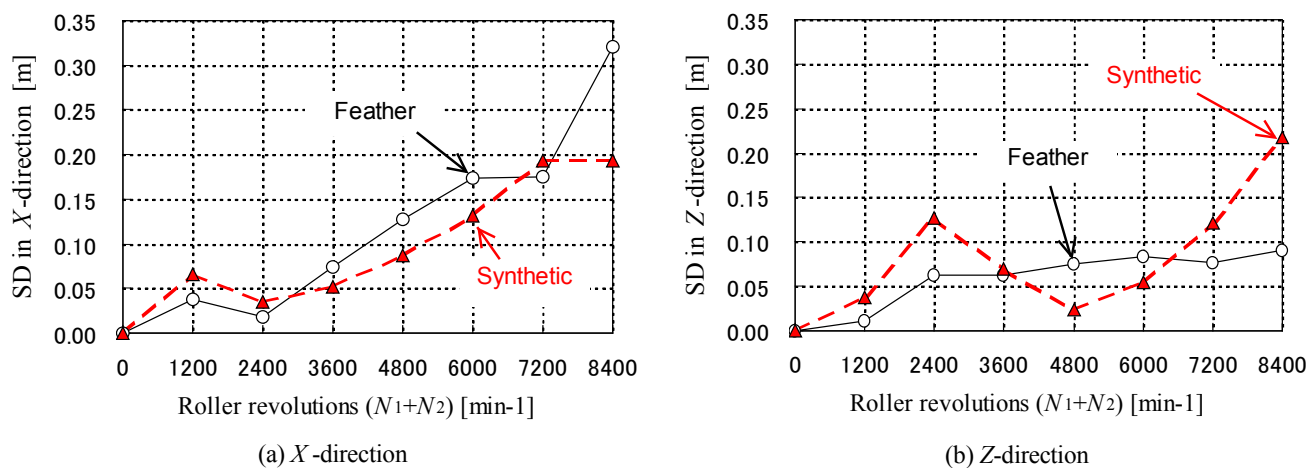


Fig.12 Standard deviation of feather and synthetic shuttlecocks

3・3 シャトルの発射範囲

開発した二ローラ式マシンでは、カットやドライブなどの横方向に軌道が変化するストロークは、二つのローラ回転数 (N_1 , N_2) を変えてシャトルを発射すれば再現できる。そこで、両ローラ回転数を $600 \sim 4200 \text{ min}^{-1}$ の範囲で 600 min^{-1} ごとに任意に組合せた 43 パターンの発射実験を実施した。1 パターンは 5 球で、水鳥、ナイロンシャトルともにそれぞれ異なるシャトルで行い、合計 430 球 (5×43 パターン $\times 2$ 種類) の発射実験を行った。水鳥、ナイロンシャトルの発射実験の結果をそれぞれ図 13 (a), (b) に示す。ここで図中の原点 ($X=Z=0$) は、本マシンを設置した位置を表わしており、この位置は実際のバドミントンにおける相手コートを中心と仮定している。なお、バドミントンコートの大きさは、全長 44 ft (13.4 m)、全幅 20 ft (6.1 m) である⁽²¹⁾。

両図より、両シャトルとも落下位置は、 $N_1=N_2$ の場合、横方向 (Z 方向) にはほとんど変化せず、 $N_1>N_2$ の場合は $-Z$ 方向に、 $N_1<N_2$ の場合は $+Z$ 方向に変化することがわかる。これは、シャトルは発射時に両ローラの回転数の差によって回転力が与えられ、発射後はその影響で回転数の遅いローラ方向にシャトルの軌道が野球の横の変化球 (カーブ等) と同様、マグナス力によって曲がる現象であると推察される。また、水鳥シャトルの方がナイロンよりも縦、横ともにその範囲が広いことがわかる。これは、水鳥シャトルの方がスピンやマグナス力の影響を受けやすいためであると考えられる。本実験の結果、本バドミントンマシンでは、両ローラの回転数を種々変化させることによって、シャトルの種類を問わずコート内の広い範囲にシャトルを落下させることができることが示された。その発射範囲は、横方向は $\pm 1.0 \text{ m}$ 前後、縦方向はネットからエンドラインまでのほぼすべての範囲である。

本章で述べた発射実験の結果、開発したバドミントンマシンの発射性能は、水鳥シャトルの場合、最高初速度は約 52 m/s (190 km/h)、最大飛距離は 11.5 m であり、ナイロンシャトルでは、最高初速度は約 48 m/s (172 km/h)、最大飛距離は 9.7 m であった。また、両シャトルとも落下位置精度は、約 0.3 m 以下であり、高い発射精度を有している。本マシンの設置位置を相手コートの中央とすると、縦方向の飛距離は練習者の自コートの長さをほぼ網羅する値であり、開発したバドミントンマシンの目標であった中学生のバドミントン選手用練習機として十分な性能を持っていると言える。また、これまでに試作されたバドミントンマシン^{(18)~(20)}と比較しても格段に高い発射性能を有している。

なお、バドミントンコートの幅 (6.1 m) 全域にシャトルの落下位置範囲を拡大させるためには、 Y 軸を中心にマシン全体を左右方向に $\pm 30^\circ$ 程度、回転させる必要がある。この点については今後の課題ではあるが、テニスマシンや卓球マシンで既に実用化されているクランク機構等を用いた首振り機構を本マシンに付加することによって実現可能であり、それほど困難なことではないと推測される。

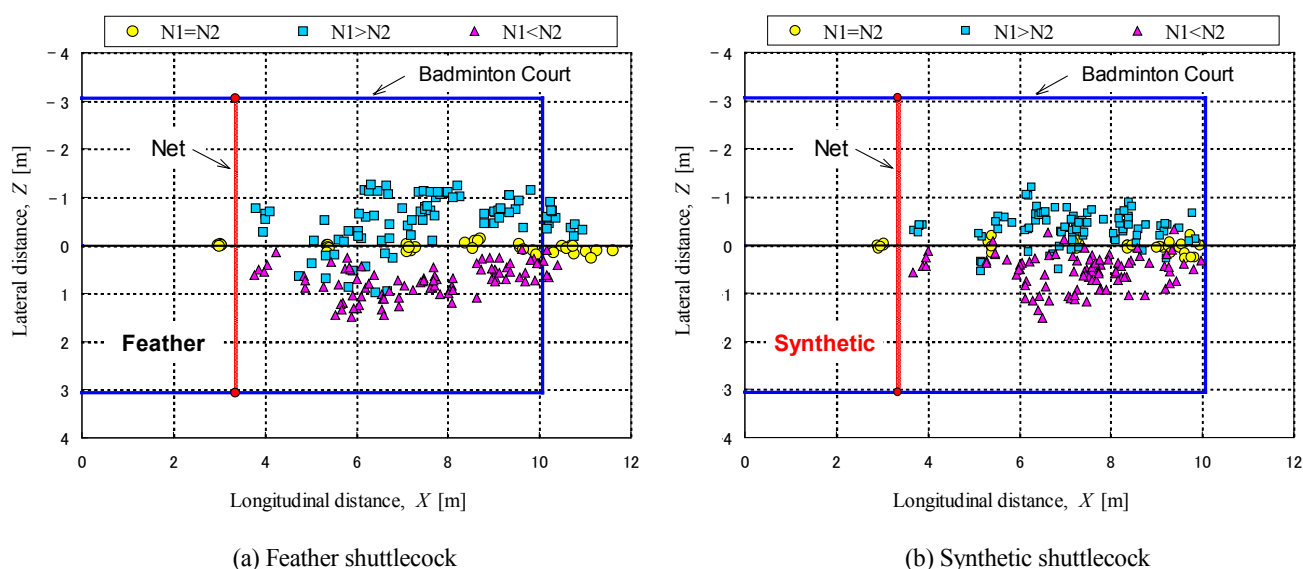


Fig. 13 Fall position of shuttlecocks in badminton court by badminton machine

4. シャトルの飛翔軌道

本章では、シャトルの理論飛翔軌道を算出し、本バドミントンマシンによって発射したシャトルの実測による飛翔軌道との比較、検討を行う。

4・1 シャトルの飛翔理論

空気中を質量 m のシャトルが、速度 v 、仰角 θ で飛翔する場合について考える。実際のシャトルの形状は、図 1 のように羽根のスカート先端部が重なっており、中心軸に対し非対称なため、飛翔中のシャトルには自転回轉（スピン： S ）が生じマグナス力が発生する。このため、厳密にはシャトルの運動は三次元となる。しかし、このマグナス力の影響を無視すると図 14 に示すような二次元座標系で扱うことができる。

実際のシャトルの打撃や発射直後においては、シャトルの姿勢が急激に変化し、シャトルの仰角 θ （水平軸と速度 v の角度）とシャトルのピッチ角 β （水平軸と中心軸のなす角）は一致せず（ $\theta \neq \beta$ ）、両者には角度差 α （ $=\beta - \theta$ ）が生じる。このことを考慮し、発射後の時刻 t におけるシャトルの運動方程式を並進分と回轉モーメントに分けて表わすと次式(1)～(3)となる⁽¹⁴⁾。ただし、シャトルに働く重力、抗力、揚力およびピッチングモーメントをそれぞれ F 、 D 、 L 、 M とする。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -D \cos \theta - L \sin \theta \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -F - D \sin \theta + L \cos \theta \quad (2)$$

$$I \frac{d^2 \beta}{dt^2} + c \frac{d\beta}{dt} + \left| \frac{dM}{d\alpha} \right| \alpha = 0 \quad (3)$$

ここで、 I 、 c はそれぞれ重心（G 点）回りの慣性モーメント、減衰係数である。

重力加速度を g 、空気の抗力係数を C_D 、揚力係数を C_L とすると、 F 、 D 、 L は、次式となる。ただし、空気密度を ρ （ $=1.205 \text{ kg/m}^3$ ）、シャトルのスカート部の投影面積を A （ $=\pi d^2/4 \approx 3.47 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ）とする。

$$F = mg \quad (4)$$

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 \quad (5)$$

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho A v^2 \quad (6)$$

本章では、シャトル発射後の飛翔軌道の概形を求めることが主な目的であるため、シャトルの変形や急激な姿勢変化である動的な現象を除外し、シャトルの準静的現象を対象とする。つまり、シャトル飛翔中は、仰角 θ とピッチ角 β は常に等しく（ $\theta = \beta$ ， $\alpha = 0$ ）、回轉モーメント成分および揚力 L は、抗力 D と比べて小さいため無視する。これより、シャトルの運動方程式は、 x 、 y 方向の速度を $v_x = dx/dt$ 、 $v_y = dy/dt$ とすると、次式となる。

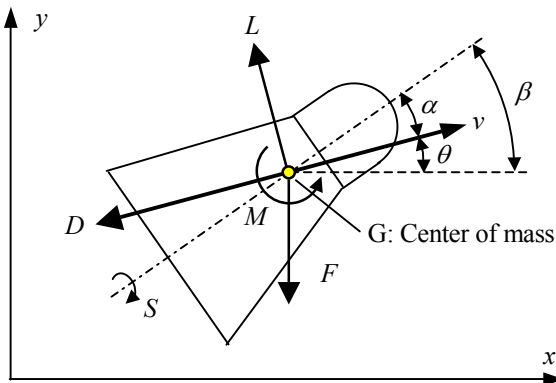


Fig.14 Coordinate and 2-dimension force system of shuttlecock

Table 2 Launcher conditions

Shuttlecock type		Feather	Synthetic
$N_1 + N_2 = 3600 \text{ min}^{-1}$	Initial velocity, v_0 (m/s)	21.4	21.1
	Launcher angle, θ_0 (deg.)	5.95	7.92
$N_1 + N_2 = 4800 \text{ min}^{-1}$	Initial velocity, v_0 (m/s)	29.8	29.0
	Launcher angle, θ_0 (deg.)	8.51	8.15
Drag coefficient, C_D		0.51	0.54
Mass, m (g)		5.2	5.1

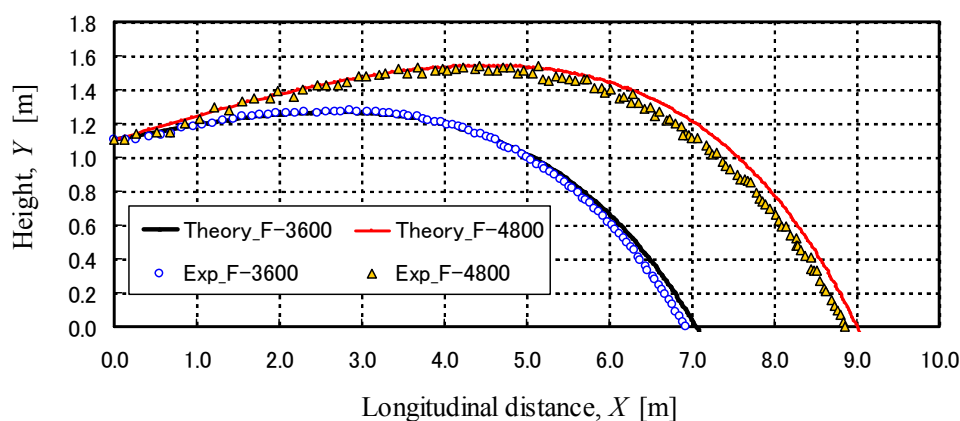
$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{C_D \rho A v^2}{2m} \cdot \cos \theta = -\frac{C_D \rho A v^2}{2m} \cdot \frac{v_x}{v} = -\frac{C_D \rho A}{2m} \cdot v_x \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (7)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = -g - \frac{C_D \rho A v^2}{2m} \cdot \sin \theta = -g - \frac{C_D \rho A v^2}{2m} \cdot \frac{v_y}{v} = -g - \frac{C_D \rho A}{2m} \cdot v_y \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (8)$$

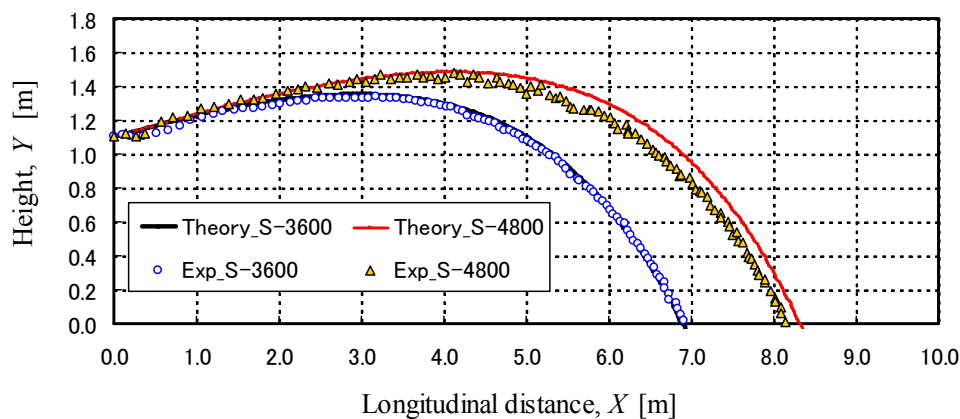
上式(7), (8)を数値積分等で v_x , v_y を求め, 再度時間 t で積分を行うと, シャトルの飛翔軌道が算出できる. ただし, C_D は Reynolds 数 ($Re = \rho v d / \mu$, 空気の粘性率 $\mu = 0.018 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) や室温等によって変化する. 本研究では, シャトルの C_D については風洞実験で実測した先行研究の結果^{(10), (13)}を参考にした. その結果, C_D は Re に依存することが報告されており, Re が小さいとき C_D は小さく, Re が大きいと C_D は大きくなる傾向があった. しかし, その値はそれほど大きな変動はなく, 本研究で対象となる室温 ($20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) や速度範囲 ($5 < v < 50 \text{ m/s}$, $22\,000 < Re < 220\,000$) では, 水鳥シャトルの C_D は約 $0.49 \sim 0.62$, ナイロンシャトルでは約 $0.53 \sim 0.59$ の変動幅であった. これより, 次節で算出するシャトルの飛翔軌道では, 飛翔中の C_D の変動はないものとし, 水鳥シャトル: $C_D = 0.51$, ナイロンシャトル: $C_D = 0.54$ の一定値としている.

4・2 実測と理論によるシャトルの飛翔軌道

開発したバドミントンマシンを用いてシャトルの発射実験を行い, その様子を高速ビデオカメラで側面から 100 fps で撮影をした. 実験条件は, 両ローラ回転数を等しくし, その総和 ($N_1 + N_2$) が $3600, 4800 \text{ min}^{-1}$ の 2 種類, 水鳥, ナイロンシャトルのそれぞれについて行った. この発射画像から発射初速度 v_0 と発射仰角 θ_0 を算出した. ただし, θ_0 については, 発射直後のシャトルの姿勢は回転モーメント等の影響で安定しないため, 姿勢が仰角とほぼ一致 ($\theta \simeq \beta$) する時間 (発射後 $0.08 \sim 0.12 \text{ s}$) の平均値を用いた. 算出した v_0 , θ_0 および次に述べる理論軌道の計算に用いた各シャトルの C_D と m を表 2 に示す. なお, 初期高さ Y_0 は, マシンの発射高さ ($H = 1.1 \text{ m}$) で



(a) Feather shuttlecock



(b) Synthetic shuttlecock

Fig.15 Calculated and measured flight trajectories of shuttlecock

ある。

表 2 に示す二つの発射条件を用いて、式(7), (8) から算出した水鳥およびナイロンシャトルの理論飛翔軌道と発射実験から計測した飛翔軌道を図 15(a), (b) にそれぞれ示す。これより、実験値は画像がやや粗いため多少バラツキがあるが、水鳥、ナイロンとも総ローラ回転数が 3600 min^{-1} のときは理論値、実験値ともほぼ一致をしている。総ローラ回転数が 4800 min^{-1} の場合、実験値は理論値よりもやや低い飛翔軌道となっており、最大飛翔高さ、最大飛距離とも多少小さくなっていることがわかる。また、両図とも発射直後の実験値の飛翔高さは、理論値よりもやや低い。この理由として理論式では、発射直後のシャトルの急激な速度変化や姿勢変化に伴う C_D , C_L , M 等の変化を考慮していないことが大きな原因であり、速度 v が速い（総回転数： 4800 min^{-1} ）場合、これらの影響が大きくなるためであると考えられる。

図 15 から実験値と理論値の最大誤差を算出した。水鳥シャトルでは最大飛翔高さ 0.02 m 、最大飛距離 0.16 m 、他方、ナイロンシャトルでは最大飛翔高さ 0.04 m 、最大飛距離 0.18 m であり、式(7), (8)による理論値の精度がそれほど悪くないことがわかる。これは、速度 v による C_D , C_L , M 等の変化を考慮しなくても、シャトルの飛翔軌道はそれほど異なることはないものと考えられ、シャトルの飛翔軌道は、発射初速度 v_0 、発射仰角 θ_0 、Reynolds 数（室温変化を含む）に応じた C_D の三つの値でほぼ決定されるものと推察される。

以上のことより、シャトルの発射や打撃時の初期姿勢によって発射直後の飛翔軌道は多少影響されるものの、飛翔軌道全体が大きく変化することはない。つまり、シャトルはどのような初期姿勢で発射や打撃されたとしても、 v_0 , θ_0 , C_D の三つで飛翔軌道はほぼ決定すると言える。このことは、今後のバドミントンマシンの発射性能の向上に関して重要なことを示唆しており、シャトル羽根の損傷を考慮する必要があるが、マシンとしてはシャトルの初速度と仰角の二つを制御することが最も重要であることが示された。

5. 結 言

本研究では、中学生のバドミントン選手を対象とした二ローラ式バドミントンマシンを開発し、マシンの発射速度、飛距離、位置精度等の発射性能について記述した。また、シャトルの理論飛翔軌道と発射実験による飛翔軌道との比較、検討を行い、次の結論を得た。

- (1) 開発した二ローラ式バドミントンマシンの最高初速度は水鳥シャトル 52 m/s 、ナイロンシャトル 48 m/s 、最大飛距離は水鳥 11.5 m 、ナイロン 9.7 m 、落下位置精度は両シャトルとも縦 0.32 m 、横 0.22 m 以内であった。開発したマシンは、中学生のバドミントン選手用の実用的練習機として十分な性能を有している。
- (2) 空気抵抗を考慮したシャトルの理論飛翔軌道を算出し、発射実験による飛翔軌道との比較を行った。その結果、シャトルの飛翔軌道は、発射方法や発射時の初期姿勢にはあまり影響されない。シャトルの飛翔軌道を決定する重要因子は、発射初速度、発射仰角、Reynolds 数に応じた抗力係数である。

なお、本研究の一部は、独立行政法人 科学技術振興機構（JST）の平成 21 年度シーズ発掘試験 A（No.07-064）の援助を受けて行われたものである。ここに、謝意を表する。

最後に、本研究で述べたローラ式バドミントンマシンの発射機構および構造については、すでに特許申請（特願 2008-299253）していることを申し添えたい。

文 献

- (1) Alam, F., Chowdhury, H., Theppadungporn, C. and Subic, A., (2009), “Measurements of Aerodynamic Properties of Badminton Shuttlecock”, *Procedia Engineering*, No. 2 (2010), pp. 2487-2492.
- (2) Jackson, C.H. and Swan, L.A., *BETTER BADMINTON*, (1957), The Ronald Press Company.
- (3) 阿部一佳, 岡本 進, “バドミントン”, (1989), ぎょうせい.
- (4) 里見仁志, 鶴木秀夫, “バドミントンにおけるシャトルスピードと打球フォーム：男性によるスマッシュとドロップについて”, 人文論集, 神戸商科大学研究所, Vol. 27, No. 2 (1991), pp.155-174.

- (5) 阿部一佳, 須田和裕, 鷗木秀夫, 加藤幸司, “バドミントンの素振り練習による身体トレーニングについての検討”, 大学体育研究, Vol. 9, (1987), pp. 49-58.
- (6) 阿部一佳, 渡辺雅弘, “基本レッスン バドミントン”, (1985), 大修館書店.
- (7) 湯 海鵬, 阿部一佳, 加藤幸司, “バドミントンのスマッシュ動作の3次元動作解析:前腕と手関節の動きを中心に”, 体育学研究, Vol. 38, No. 4 (1993), pp. 291-298.
- (8) Gowitzke, B.A. and Waddel, D.B., “Qualitative Analysis of the Badminton Forehand Smash as Performed by International Players”, *National Symposium on the Racquet Sports*. University Illinois, (1979), pp.10-15.
- (9) Girard, O., Millet, G.P., “Neuromuscular Fatigue in Racquet Sports”, *Neurologic Clinics*, Vol. 26, No.1,(2008), pp. 181-194.
- (10) Cooke, A.J., “Shuttlecock aerodynamics”, *Sports Engineering*, Vol. 2,(1999), pp. 85-96.
- (11) 緒方正幸, 山口信行, “シャトルコックの空力特性に関する実験研究”, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集, Vol. 2 (2009), pp. 275-276.
- (12) 橘田征吾, 長谷川裕晃, 村上正秀, “シャトルコック後流での渦の挙動と流体力特性”, 日本機械学会 スポーツ工学シンポジウム, No. 09-45 (2009), pp. 56-59.
- (13) Alam, F., Chowdhury, H., Theppadungporn, C., Subic, A. and Khan, M.M.K., “Aerodynamic Properties of Badminton Shuttlecock”, *The International Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, Vol. 4, No. 3 (2009), pp. 266-272.
- (14) Cooke, A.J., “Computer simulation of shuttlecock trajectories”, *Sports Engineering*, Vol. 5,(2002), pp. 93-105.
- (15) Foong, S.K. and Tan, J.C.C., “Trajectories of Plastic and Feather shuttlecocks”, *The impact of Technology on Sport II*, Taylor & Francis Group, (2008), pp. 449-454.
- (16) Sakai,S., Oda,J., Yonemura,S., Kawata,K., Horikawa,S. and Yamamoto,H., “Research on the Development of Baseball Pitching Machine Controlling Pitch Type Using Neural Network”, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol. 1, No. 4 (2007), pp. 682-690.
- (17) 市屋 卓, 安達幸弘, 伊藤宏比古, 大平 洋, 末田 豊, 鈴木孝侑, 乗越博之, 三浦恭平, 相原広忠, 梶原逸朗, “打ち出し機および球出し機”, 日本国特許庁公開特許公報, 特許公開 2007-160045, 東京工業大学, (2007).
- (18) 田中裕一, 石崎繁利, 英崇夫, “卒業研究におけるゼロからのものづくりーバドミントン用シャトル打ち出し機の開発ー”, 工学・工業教育研究講演会講演論文集-VII, No. 4-326 (2008), pp. 506-507.
- (19) 鍋屋幸大, 田中裕一, 石崎繁利, 英崇夫, “卒業研究におけるゼロからのものづくりーバドミントン練習機の開発ー”, 工学・工業教育研究講演会講演論文集-IV, No. 2-215 (2009), pp. 218-219.
- (20) Tan, J.C.C., Foong, S.K., Veluri, S. and Sachdeva, S., “Testing of Badminton Shuttles with a Prototype Launcher”, *The impact of Technology on Sport II*, Taylor & Francis Group, (2008), pp. 443-448.
- (21) バドミントン競技規則 2010-2011, 日本バドミントン協会, available from<<http://www.badminton.or.jp/rule/rule2010.pdf>>, (accessed 2011-4-11).
- (22) 酒井 忍, 北山哲士, 野辺亮太, 水口さゆり, “バドミントンマシンの研究”, 日本機械学会 シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2010 講演論文集, No. 10-53 (2010), pp. 115-118.