

Development and improving performance of roller type badminton machine

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	https://doi.org/10.24517/00008673

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



ローラ式バドミントンマシンの開発と性能向上*

酒井 忍^{*1}, 北山 哲士^{*1}, 野辺 亮太^{*2}, 水口 さゆり^{*3}

Development and Improving Performance of Roller Type Badminton Machine

Shinobu SAKAI^{*1}, Satoshi KITAYAMA, Ryota NOBE and Sayuri MIZUGUCHI

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

Shuttlecock used in badminton match is light in mass, which is strongly influenced by air resistance. The highest launching velocity of the shuttlecock exceeds 300km/hr for professional badminton players. In this study, the improving performance of the badminton machine with the two rollers developed by the author is examined. Finite element models of a feather shuttlecock and the badminton machine with two rollers are made, and the projection simulations proceed with the moving behavior and contact stress of the shuttlecock. The coefficient of friction is examined from the surfaces in contact with the shuttlecock and the roller in the analysis. From the results of analysis, it is found that the roller with a large diameter attains the higher speed of the shuttlecock than the small rollers for every project. The taper angles of the roller edge and the insert height of the shuttlecock relative to the roller surface are optimized for attaining the maximum shuttle speed by the projection simulation and the response surface approach. In the results of the optimization, the performance of the machine has been improved as the shuttle speeds increased by about 7% and the stress causing the shuttle deterioration decreased. Additionally, the validity of the optimum condition has been confirmed by the corresponding shot experiments using the two-roller type badminton machine.

Key Words : Badminton, Badminton Machine, Sport Engineering, Optimum Design, Finite Element Method, Simulation

1. 結 言

バドミントン愛好者は、国内で 20 万人、世界では EU はじめ中国、マレーシア等のアジア諸国を中心に 160 ヶ国、5,000 万人以上にも上ると言われている⁽¹³⁾。バドミントンは、青少年から高齢者に至るまで気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法（ショットまたはストローク）はもちろん、高い瞬発力や視覚能力が要求され、一般には上達するには相当な練習が必要とされる^{(1)~(6)}。他方、バドミントンは、球技スポーツの中では打球の初速度が最も速いことで有名であり、一流バドミントン選手のスマッシュ時の最高初速度は、84 m/s 以上にも達する^{(3), (4)}。

これまでのバドミントンに関する研究としては、練習法に関する研究^{(5), (6)}、各ストローク時の三次元動作解析およびバイオメカニクス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)}、各ストロークにおける飛翔軌道を理論解析や実験あるいは数値シミュレーションによって算出する研究等^{(14), (15)}は盛んに行われてきた。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の高いコーチや練習相手が同一チーム内には必要とされ、事実これらの監督やコーチが所属しているチームが強い傾向にある。このことは、他の野球やサッカーなどの球技スポーツとやや異なっている。特

* 原稿受付 2011 年 3 月 24 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

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



に野球の場合は、投手の代わりとなるピッチングマシンが 30 年以上前から市販、実用化されてきており、近年はプロ野球の投手をも凌ぐ投球能力のマシンも開発されている⁽¹⁶⁾。これらのマシンを有効に活用して、打撃技術の向上を図っているチームが多く存在している。

一方、バドミントンでも対人練習の代替として、その練習機が 20 年以上前から考案されている。これらのシャトル発射機構としては、ラケットでシャトルを打撃する、圧縮空気の圧力を利用し発射する、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する等の方式がある^{(17)~(20)}。しかし、いずれの練習機も最高飛距離 (5~8m) が短く、実際のバドミントン練習で必要とされる飛距離 (10m 超) や速度、位置精度を有するものはほとんどなく、カットやドライブ等の種々のストロークを再現する練習機は皆無である。その一番の理由は、シャトルの特殊性にある。シャトルは、半球形のコルクと 16 枚の水鳥の羽根を用いた複雑な形状、かつ質量が約 5g と非常に軽い。その一方で、初速は 42 m/s を超え、高価な割には耐久性が低いという他の球技とは大きく異なる特徴を有している。従来の打撃や発射法では、シャトルを高速に発射するためには、ラケットを高速に回転動作させ打撃する、あるいは圧縮空気を高圧にして発射する必要があるが、当然シャトルに大きな衝撃負荷がかかり数回の打撃や発射で破損をし、特に羽根部が大きく損傷するといった問題を引き起こす。バドミントン用練習機の需要は高いものの、このような特殊性を有するシャトルを高速かつ羽根を損傷させずに打ち出す (発射する) 機械を開発することは極めて困難であった。

そこで本研究では、二つの回転ローラ間にボールを挿入、投球する二ローラ式ピッチングマシンと同様の機構・構造をベースにした二ローラ式のバドミントンマシンの設計、開発を試みた。この発射機構自体は、従来から発案されてはいたもののシャトルの形状が球形ではないため、困難であるとされてきた。著者らは、シャトルのローラへの挿入部、挿入方法を工夫し、シャトルの構成部品としては比較的堅牢なコルクとその周辺部をローラで挟持し、シャトルを発射する機構・構造を発案した。本研究では、まず中学生のバドミントン選手のスマッシュとクリアを対象とした練習機を開発する。対象者の最高初速度は約 50m/s であるため、本マシンの発射性能としては、発射初速度 50 m/s 以上、飛翔距離 10m 以上、位置精度 0.5m 以内を目標とした。本論文では、開発したマシンの概要およびシャトルの発射実験等から得た発射性能について記述する。また、開発したマシンのシャトルの発射速度を向上させるために応答曲面法^{(22)~(24)}を用いて、シャトルの挿入高さやローラ形状を最適化したことについて述べる。

2. ニローラ式バドミントンマシン

設計、開発した二ローラ式バドミントンマシンの外観を図 1 に示す。本マシンの寸法は図に示す通りで、全重

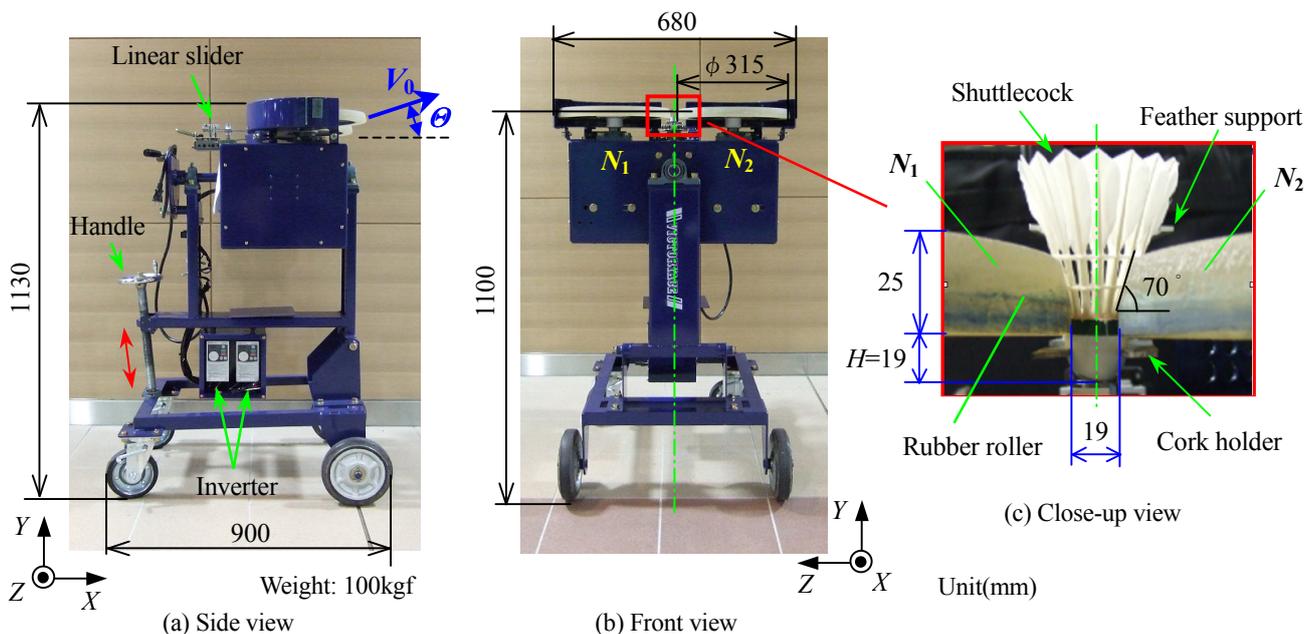


Fig. 1 Appearance of badminton machine with two rollers

量は約 100kgf である。外径 $\phi 315\text{mm}$ 、幅 25mm の二つの対向する回転ローラを有し、両ローラはそれぞれ AC モータ（出力 0.2kW、4 極）と直結しており、これらのモータへの入力周波数を 0~70Hz に可変するインバータ制御を行うことによって、各ローラ回転数を 0~4200 min^{-1} の範囲で任意に速度調整ができる。シャトルの発射機構は、シャトルのコルク直径 ($\phi 26\text{mm}$) よりもやや狭い間隔 (19mm) に配置した二つのウレタンゴム製ローラ (N_1, N_2) の間にシャトルを X 方向に挿入、通過させ、このときの両ローラとシャトルのコルクとの摩擦力を利用して発射される。なお、ゴムローラ端部の表面形状は、平面ではなくシャトルのコルクと羽根の設置角 (約 70°) と同じ角度の台形形状にカットし、羽根の損傷を低減するように工夫している。また、シャトルは図のようにコルクを鉛直下向きにセットし、羽根部の保持具とバネを用いたワニノクリップ式のコルク保持具の両保持具によって二ヶ所で保持されている。シャトルと両保持具をスライドブロック上に設置し、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直線運動させ、シャトルを両ローラ間に挿入・案内し、シャトルを発射する。

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変更することができる。例えば、両ローラ回転数を等しく設定した場合、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となり、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は、このような条件で発射する。一方、カットやドライブなどの横方向に軌道が変化する種類の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実現できる。また、本マシン下部に設置した仰角調整ハンドルを回転させ、マシンの発射仰角 θ を上下方向に調整することによって、ハイクリアや仰角の異なるスマッシュ等、バドミントンで実際に使用されている一般的な種類のストロークはもちろん、急激に横方向に軌道が変化する多彩で高度なストロークを再現できる。

以上、著者らが発案した二ローラ式バドミントンマシンに採用している発射方法や発射機構を用いれば、幅広い速度や多様なストロークを再現でき、高性能で実用性の高い練習機が実現できると考えた。次章では、発射実験を通して、本マシンの発射速度や飛翔距離等の発射性能について記述する。

3. バドミントンマシンの発射実験と発射性能

3.1 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の発射性能を評価するため、高速度ビデオカメラ (nac 製 MEMRECAM fx-K3) を用いてシャトルの発射実験を行った。カメラの撮影速度は 2000 fps(frame/s) とし、発射から発射直後の 2 秒間の

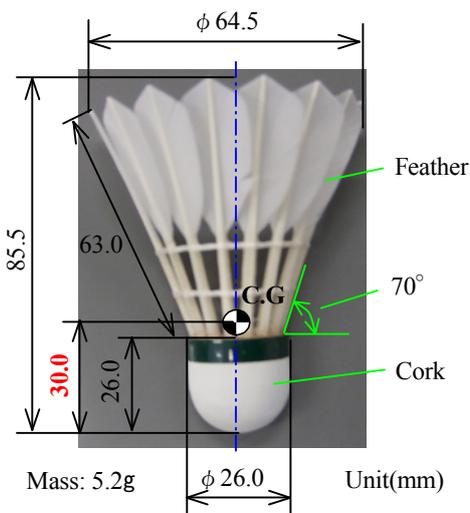


Fig. 2 Feather shuttlecock

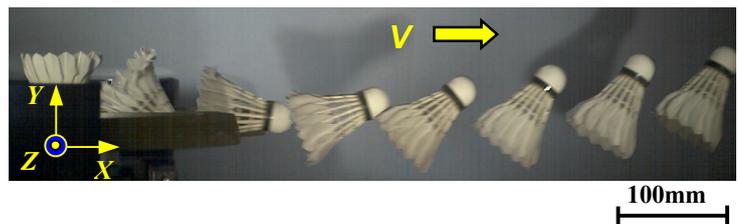


Fig.3 Observed behavior of shuttlecock using badminton machine (2 ms/frame, $N_1=N_2=3600\text{min}^{-1}$)



Fig.4 Observed behavior of shuttlecock by racket shot (2 ms/frame)

撮影を行った。発射実験で用いたシャトルは、市販されている水鳥球（YONEX 製 NEW OFFICIAL 3 番）を用いた。使用した 5 球のシャトルの質量および主要寸法を図 2 に示す。なお、シャトルの質量や寸法等は、日本バドミントン協会の競技規則第 2 条⁽²¹⁾によって規格化されており、本実験に使用したシャトルも規格内のものであることを確認している。

シャトル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 3 に示す。発射前は鉛直方向に向いていたシャトルは、発射時にローラから並進力と回転力が与えられ、発射直後は並進しながら反時計方向に回転し、発射 4 ms 後にはシャトルの姿勢はほぼ水平に近いことがわかる。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回転力は減少し、抵抗が減少する方向に姿勢を傾けながら飛翔していく。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練習と同様、シャトルをラケットで打撃したときの様子を高速度ビデオカメラで撮影した。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。数回の試技のうち、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 4 に示す。図 3 と図 4 の両画像を比較すると、ラケットによる打撃後のシャトルの飛翔挙動とマシンによる発射時の挙動は、飛翔仰角は異なっているものの発射（打撃）直後の両者の挙動はよく似ていることがわかる。また、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 5）。これより、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、ラケットによる打撃とほぼ同等であり、バドミントンの練習用として本マシンが十分使用できるものと予測される。

3・2 マシン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。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 $0 \sim 8400 \text{ min}^{-1}$ まで 1200 min^{-1} ずつ増加させた。なお実験は、異なるシャトル 5 球を用いて同じ発射条件で実施した。図 6 は、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 の関係を示す。図より、両者には線形性があることがわかる。また、

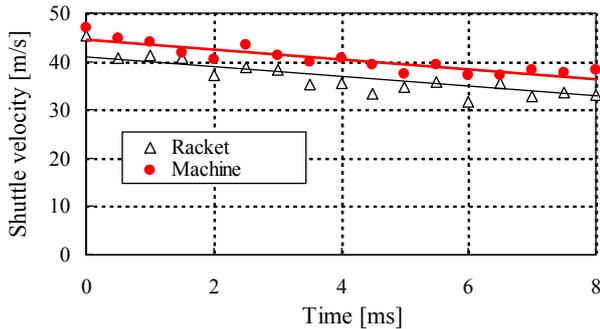


Fig.5 Shuttle velocity after shot and launch

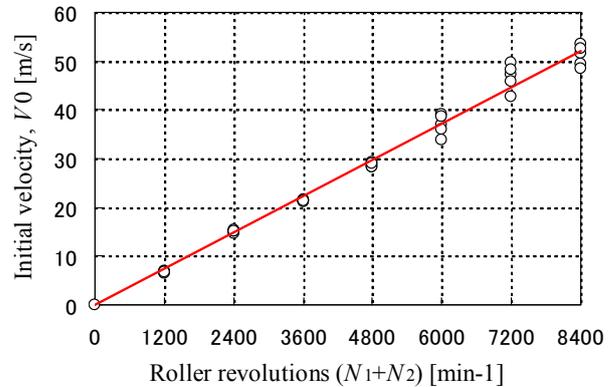


Fig.6 Relation between initial velocity and roller revolutions

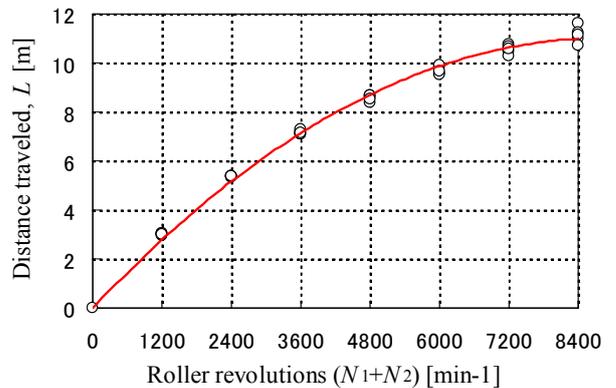


Fig.7 Relation between distance traveled and roller revolutions

図7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となっている。これは当然ではあるが、シャトルは速度の2乗に比例した空気抵抗を受けるため、初速度 V_0 が速くなくても飛距離 L が比例して大きくならないことが、本研究でも明らかとなった^{(14), (15)}。

本発射実験におけるシャトルの落下位置（5球）を計測したものを図8に示す。図より、総ローラ回転数の増加にともない落下距離（飛距離）は長くなるが、落下位置のバラツキの範囲も広がっていくことがわかる。しかし、それらのバラツキの値は最大で縦方向（飛翔方向： X ）0.8m、横方向（飛翔と直角方向： Z ）0.3mであった。

以上の発射実験の結果、開発したバドミントンマシンの最高初速度は約52m/s、最高飛距離は11.5mであった。バドミントンコートの全長は13.4mであるが、練習マシンの設置位置を相手コートの中央付近と仮定すれば、この飛距離は練習者のコート全体をカバーできる値である。また、シャトルの落下位置の平均値は、縦方向±0.4m、横方向±0.15m未達の精度である。これより、本バドミントンマシンは、中学生のバドミントン選手のスマッシュおよびクリアを対象としており、この目標性能（発射初速度、飛距離、位置精度）には十分達しており、実用的練習機として具備すべき発射性能を有していると言える。

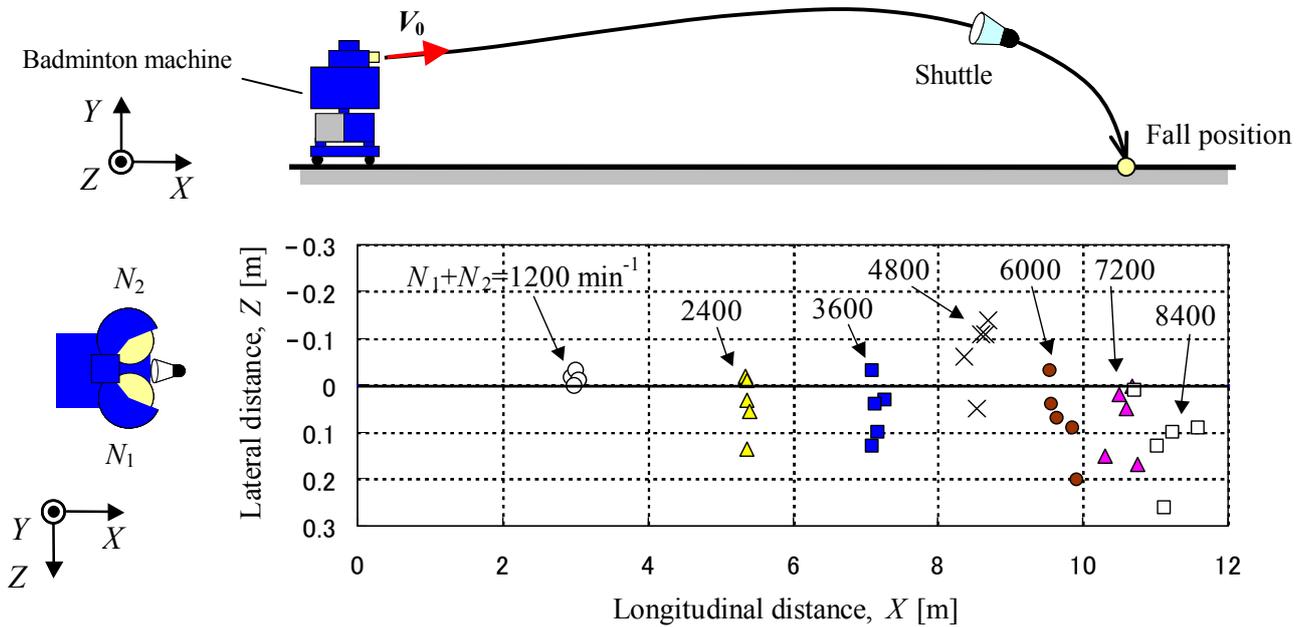


Fig.8 Measurements of fall position after shuttle launch

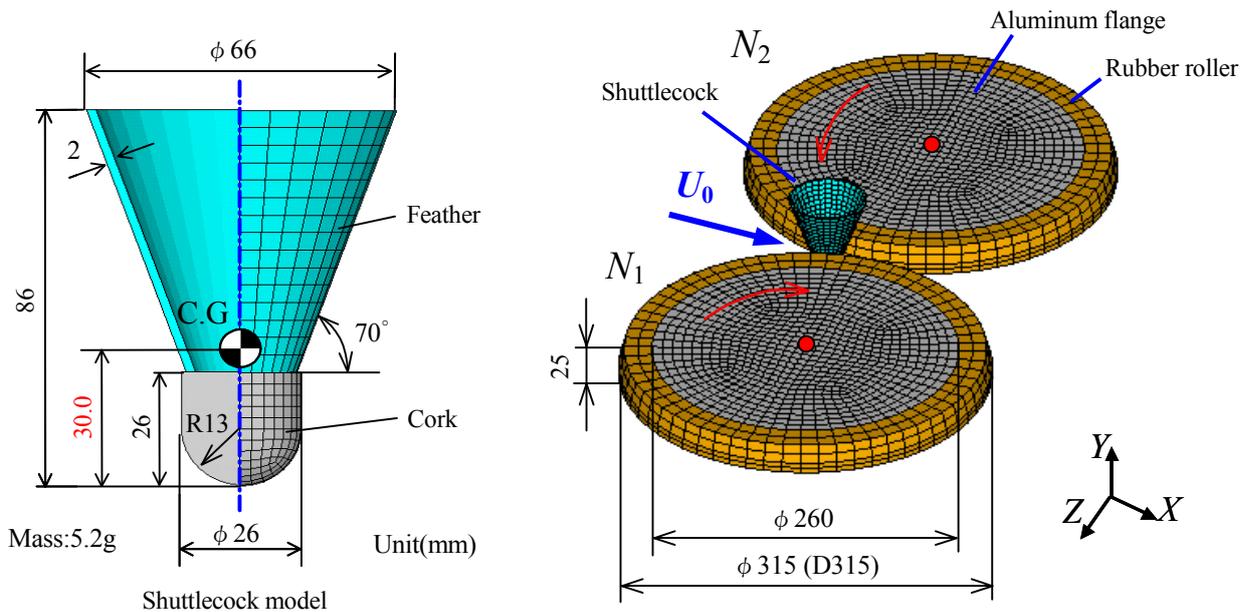


Fig.9 Finite element models of shuttlecock and badminton machine with two rollers

Table 1 Material properties in analysis

Property		Mass density [g/cm ³]	Young's modulus [MPa]	Poisson's ratio [-]	Number of elements [-]
Shuttlecock	Cork	0.30	10.0	0.05	2 688
	Feather	0.108	1 000	0.30	480
Rubber roller		1.00	15.0	0.45	512
Aluminum flange		2.70	-	-	3 072

4. シャトルの発射シミュレーションと考察

4.1 解析モデルと解析条件

前章で述べたように、開発したバドミントンマシンの発射性能は、既存のマシンに比べると高いものの中学生程度しかない。当然、高校生や大学生、プロ用などにレベルアップを図る必要がある。そのための一番重要であり困難なことは、シャトルの発射速度の向上である。本章および次章では、本マシンのシャトル速度のさらなる高速化を目的とし、その手法および結果について記述する。

開発したバドミントンマシンでは、ローラの材質、形状、両ローラの間隔、シャトルの挿入姿勢およびローラへの挿入位置などが、発射性能に大きく影響することが予測される。これらの影響を明らかにするためには、発射実験からの知見ももちろん重要であるが、有限要素解析等を行った方が、より詳細に把握することができると考えた。そこで、開発したバドミントンマシンの解析モデルを作成し、シャトルの発射シミュレーションを実施することにした。

本マシンでは、二つのゴム製ローラとシャトルが重要と考えられるため、それらの解析モデルを作成した。作成した有限要素モデルを図9に示す。ローラは、実形状と同様、外直径 $D=\phi 315\text{mm}$ 、内直径 $\phi 260\text{mm}$ 、厚さ25mmのウレタンゴム製のラバー部と外直径 $\phi 260\text{mm}$ 、厚さ25mmのアルミニウム製のフランジ部から構成されており、ローラの先端は台形にカットされている。一方、実際のシャトルは図2のように形状が非常に複雑なため、コルクと円錐形の羽根（厚さ2mmのシェル要素）の二部材で構成された単純なモデル（図9）とした。その理由として、本発射シミュレーションでは、発射時から発射直後のシャトルの初速度や発生する応力等の動的挙動を明らかにすることが主な目的であって、発射後の空気抵抗や重力が支配的となるシャトルの飛翔軌道全体を対象としないためである。本シミュレーションでは、ゴムローラと接触するコルク部の形状、材料特性、接触時の摩擦係数、質量等が最も重要と予想される。特に、質量と重心位置は発射直後の動的挙動に大きく影響するため、シャトルの羽根部の密度を変化させ、シャトルの重心位置が実物と同じ（30.0mm）になるように調整した。解析モデルの材料定数と各構成要素数を表1に示す。ここで、シャトルやゴムローラの材料定数は材料試験から算出した。なお、アルミニウム製フランジ部は、他の材料に比較して剛性が高く変形量が微小なため剛体と仮定した。

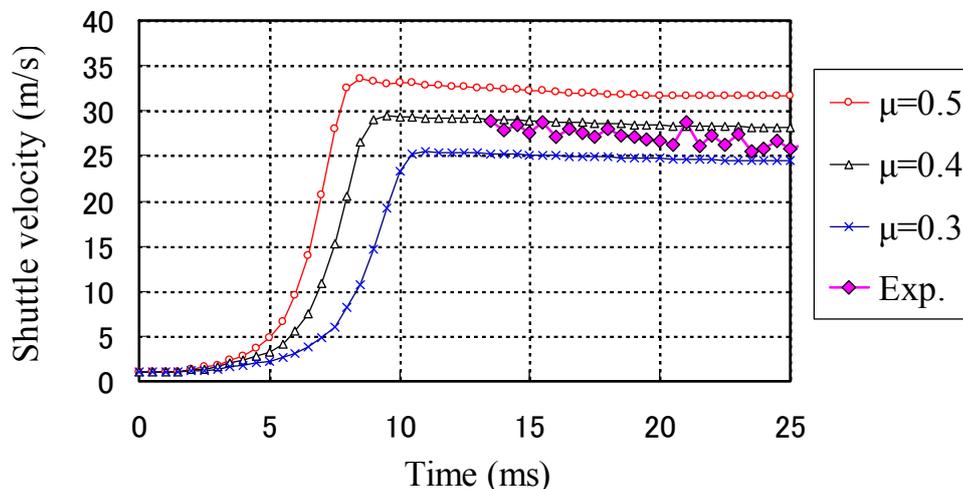


Fig.10 Time series of shuttle velocity during projection

本発射シミュレーションには、汎用の動的有限要素解析ソフトウェア ANSYS/ LS-DYNA を使用した。解析条件としては、両ローラを任意の回転数で回転させ、鉛直方向にセットしたシャトルを両ローラ間に挿入する。なお、シャトルには実験と同じ速度である X 方向の挿入速度 $U_0 = 1\text{m/s}$ を与えた。

4・2 解析結果と考察

本発射シミュレーションでは、高速で回転するゴムローラとシャトル間の摩擦係数 μ が重要な因子となることが予測される。しかしながら、 μ を実測することは非常に困難である。このため、 μ を 0.3, 0.4, 0.5 に変化させた予備解析を実施した。両ローラ回転数が $N_1=N_2=2400\text{min}^{-1}$ のときのシャトル発射時の速度-時間曲線および同発射条件における発射実験の結果を図 10 に示す。解析結果からシャトルの挿入から発射に要する時間や発射後の速度は μ の値によって異なっており、 μ の値が大きいと発射時間は短く、シャトルの発射速度は速いことがわかる。これは当然のことではあるが、 μ の値によってローラとシャトルの間で発生するすべり量が変化するためであると考えられる。シャトル発射後の解析結果と実験結果を比較すると、 $\mu=0.4$ が比較的良好一致を示しており、実際の摩擦係数に近い値ではないかと推察される。なお、シャトル発射後の解析値と実験値の減速率の違いは、解析では空気抵抗を考慮していないことが主な原因であると考えられる。本予備解析の結果から得られた摩擦係数の値 $\mu=0.4$ を以降の解析では用いることにした。

発射シミュレーション結果の一例として、図 11 に両ローラ回転数が $N_1=N_2=2400\text{min}^{-1}$ のとき、5 ms/frame ごとのシャトルの発射挙動を示す。また、同条件における発射実験のシャトルの挙動を図 12 に示す。シャトルの発射初速度を比較すると、解析値および実験値は、それぞれ 28.6m/s, 28.9m/s であり、両者はほぼ一致している。他方、シャトル発射後の挙動に注目すると、シャトルは、ローラから発射された瞬間に並進速度 (X 方向) だけでなく、反時計方向 (Z 軸回り) の回転を開始するが、解析では空気抵抗を考慮していないため、回転運動が減衰することなく持続している。一方、実験では時間の経過とともに、シャトルの回転が徐々に減衰していることがわかる。

以上の発射シミュレーションの結果、発射後のシャトルの回転運動はやや異なっているものの、シャトルの発射速度や速度変化については十分に信頼できると言え、解析モデルや解析条件はほぼ妥当なものであると考えられる。

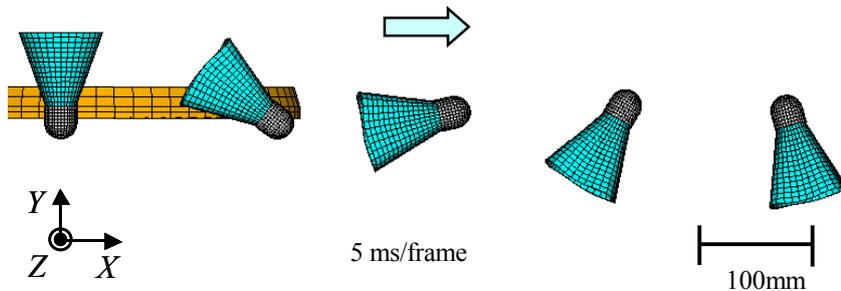


Fig.11 Observed behavior of shuttle using simulation

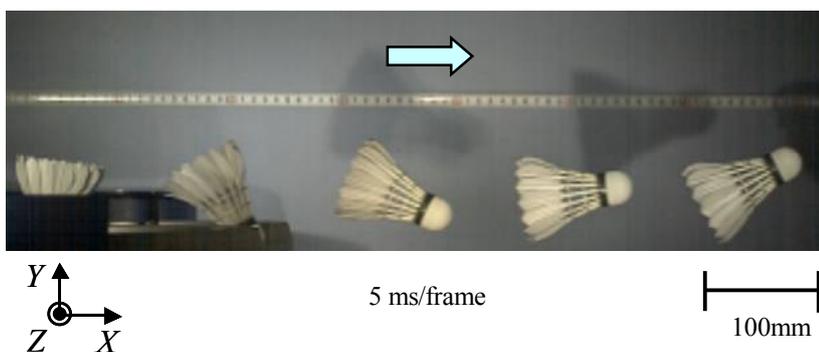


Fig.12 Observed behavior of shuttle using high-speed video

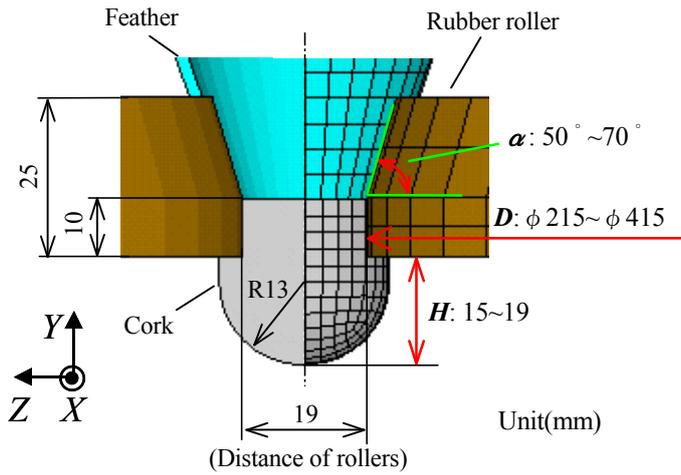


Table 2 Design variables

Roller diameter D [mm]	Taper angle α [degree]	Insert height H [mm]
215	50	15
315	60	17
415	70	19

Fig. 13 Optimum design in rubber roller

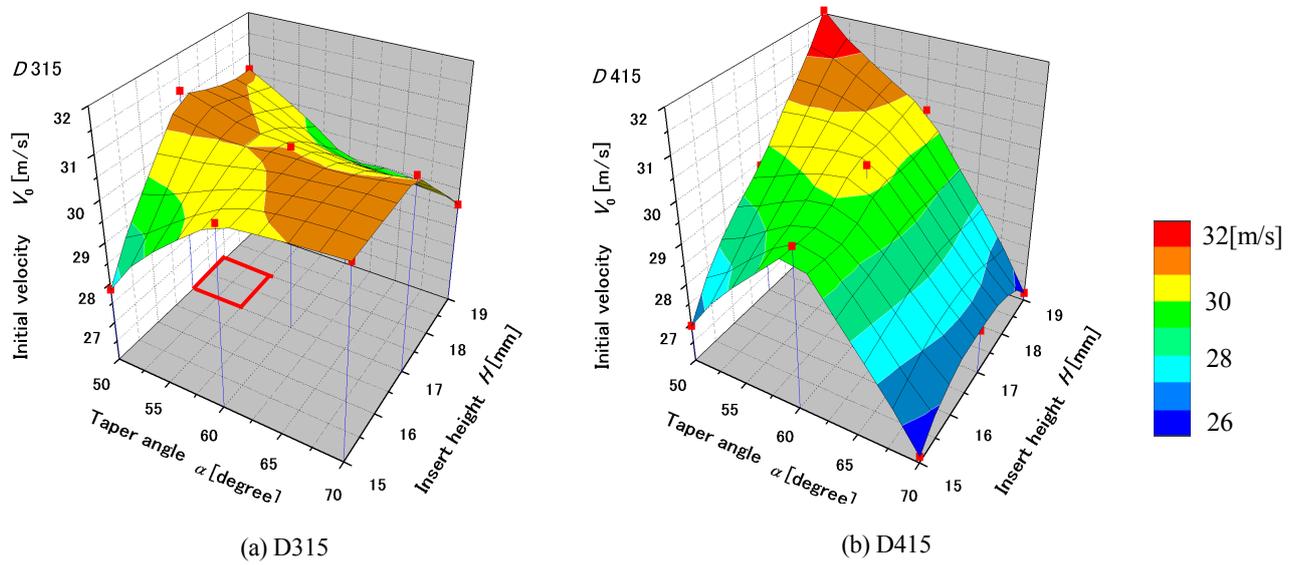


Fig. 14 Response surface of initial velocity in shuttle (V_0)

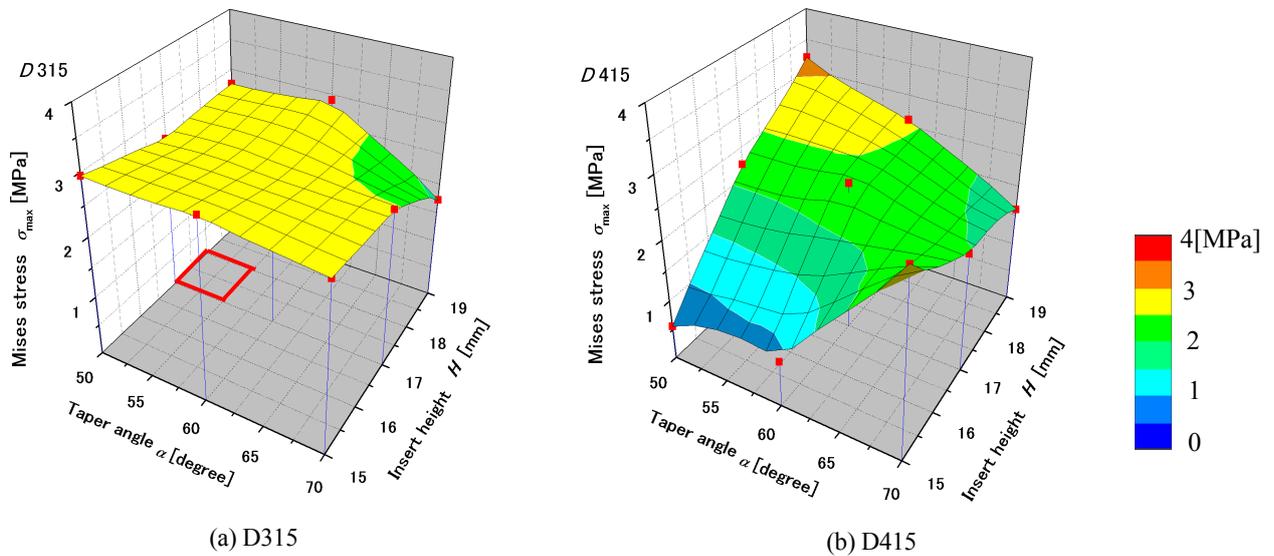


Fig. 15 Response surface of Mises stress occurred shuttle (σ_{max})

5. マシンの発射性能の向上

開発したマシンでは二つの回転ローラでシャトルを挟持し発射する機構のため、シャトル速度はローラによって決まると言っても過言ではない。このため、本章では現状のマシンのシャトル速度の高速化と安定化を行うため、一番重要なローラ形状の最適化をする。最適化手法としては、前章で行った動的有限要素解析と応答曲面法⁽²²⁾、⁽²³⁾を用いる。

本マシンでは、二つのローラの間隔が発射性能に大きく影響すると予測されるため、ローラ間隔を変更した予備発射実験を行った。その結果、現状の間隔 19mm を僅かに (1~2mm) 広げた場合、シャトルの初速度は急激に低下することがわかった。逆にローラ間隔を近づけるとシャトルがスムーズに発射されることは稀で、シャトルの羽根部がローラに接触し損傷することが数多く生じた。また、ローラ間隔が狭いとコルクと羽根の付け根部の磨耗が激しく、数回の発射でシャトルが大きく破損する現象が現れた。他方、回転ローラのゴムの材質も発射性能に影響すると考えられるが、現状ではゴム材質の変更は困難なため、本研究では除外することにした。

これらのことを考慮し、ローラの最適設計としては図 13 に示すように、ローラ外直径 D 、ローラ端部のテーパ角 α およびシャトルの挿入高さ H の三つを設計変数とし、シャトル発射後の初速度 V_0 を最大化することを目的関数とした設計問題を考え、次式のように定式化した。

$$f(x) = V_0 \rightarrow \text{Max} \tag{1}$$

最適化には応答曲面法を用い、 V_0 の応答値を解析で求め応答曲面を作成した。また、応答曲面の構築には、 D 最適基準を用いた RSMaker for Excel⁽²⁴⁾を用い、三つの設計変数 (D , α , H) を表 2 に示す水準に離散化し、表中の $3 \times 3 \times 3$ の 27 通りすべての解析を実施した。なお、両ローラの回転数の条件は、外直径 $D = \phi 315\text{mm}$ のローラ回転数 $N_1 = N_2 = 2400\text{min}^{-1}$ を基準とし、 D を変更した場合、基準であるローラ外周の周速度 $V_r \approx 39.6\text{m/s}$ が一定となるような回転数を両ローラに与えた。

得られた結果の一例として、外直径 $D = \phi 315\text{mm}$ (D315) と $D = \phi 415\text{mm}$ (D415) のときの初速度 V_0 の応答曲面を図 14(a), (b) にそれぞれ示す。図より、D415 では設計変数の値によって初速度 V_0 の変動が $26 \sim 32\text{m/s}$ と大きく、D315 では V_0 が $28 \sim 31\text{m/s}$ の小さい変動幅で安定していることがわかる。D415 ではテーパ角 α が 70° の場合、発射時にシャトルの羽根がローラと接触し多少巻き込まれる状態となり、シャトルはやや下向きに発射され、シャトル速度は低下する。他方、テーパ角 $\alpha = 50^\circ$ のとき、挿入高さが低い $H = 15\text{mm}$ の場合は、シャトルのコルクがローラに十分に挟持されず上方向に滑り、シャトルはやや上向きに発射されてシャトル速度が低下する。これらのことが速度変動の要因と考えている。なお、ここでは示していないが $D = \phi 215\text{mm}$ (D215) の場合は、いずれの設計変数値においても V_0 が低い値であった。また、これらの解析におけるシャトル発射時に発生する最大

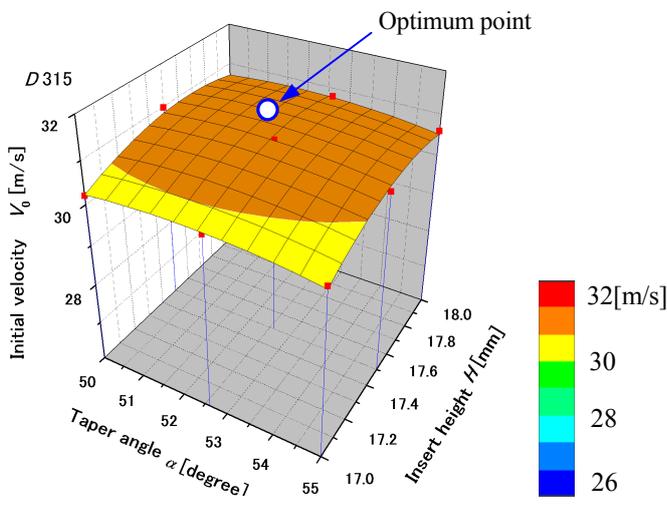


Fig.16 Zoomed response surface by RSMaker

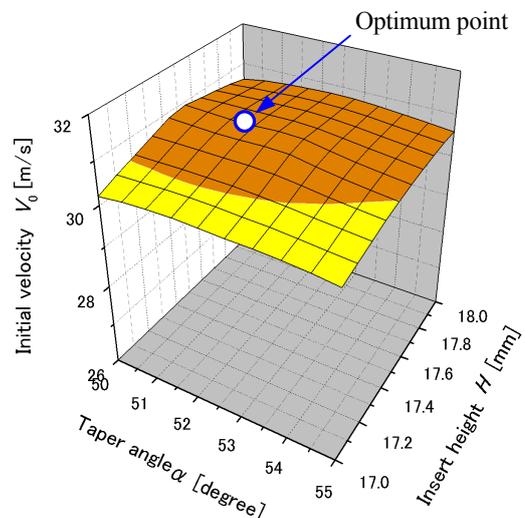


Fig.17 Zoomed response surface by EG-OPT

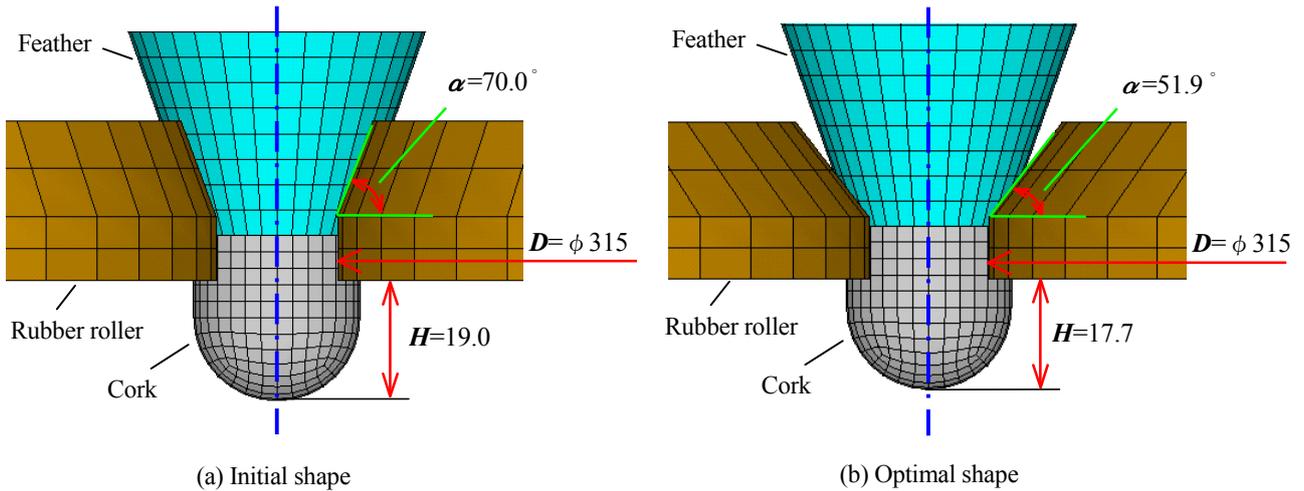


Fig.18 Shape optimization in rubber roller

ミーゼス応力 σ_{max} の応答曲面を図 15(a), (b)にそれぞれ示す. 図より, 初速度と同様, D415 の応力の変動は大きく, D315 では変動幅は小さくほぼ一定値となっている.

本最適化問題では初速度 V_0 を最大化することが目的であるが, σ_{max} の値も制約条件ではないものの実用上, シャトルの損傷を低減したいため, できるだけ低い方が望ましい. これらのことに考慮すると最適値の候補としては, D415 では $\alpha=50^\circ$, $H=19\text{mm}$ のとき初速度は高い ($V_0=32.0\text{m/s}$) が, このときの σ_{max} の値も 3.3MPa と高い. 一方, D315 では $\alpha=50^\circ$, $H=17\text{mm}$ 近傍で $V_0=30.2\text{m/s}$ と速く, このときの σ_{max} は 2.6MPa であり, それ程高くないことがわかる. また, D315 の $\alpha=70^\circ$, $H=17\text{mm}$ 近傍にも V_0 が速い領域が存在するが, このときの σ_{max} は 2.8MPa であり, やや高い値である.

他方, 直径の大きいローラを用いると, 一般にモータの出力が大きくなり, 必然的にバドミントンマシン自体が大型となり, 重量も増す. このため, 初速度 V_0 がローラ外直径 D の違いによってあまり変わらなければ, D が小さい方が有益である.

これらのことを総合的に判断し, 図 14(a)の赤枠で囲まれた小領域内に最適値が存在すると予測した. そこで, この小領域で再度解析を実施し, 二次多項式近似による拡大応答曲面を作成した. 図 16 に作成した拡大応答曲面を示す. この応答曲面を用いて, V_0 の最大化を実施した結果, $\alpha=51.9^\circ$, $H=17.7\text{mm}$ のとき, 最大応答値 $V_{0m}=31.0\text{m/s}$ を得た. なお, このときの自由度調整済み決定係数⁽²⁵⁾ R_a^2 は 0.84 であり, 一般的な解析精度である 0.8 を超えている. 求めた最適値を確認するため, この最適条件で再解析を実施した. その結果, 最大初速度 V_{0m}' は 30.6m/s となり, 最大応答値 V_{0m} と比較するとやや低い値となった. 両者の差は, 作成した応答曲面の近似誤差によるものと考えられる.

他方, 近似最適化法の一つである RBF ネットワーク⁽²⁶⁾ は, 非線形性が強い多峰性関数にも良好な近似を行える. そこで, 北山らが開発した RBF ネットワークを用いた逐次近似最適化プログラム (EG-OPT)⁽²⁶⁾ を用いて, 図 14(a)の赤枠に示した小領域の拡大応答曲面を作成した (図 17). その結果, $\alpha=51.2^\circ$, $H=17.6\text{mm}$ のとき, 最大応答値 $V_{0m}=30.9\text{m/s}$ を得た. この最適値で再解析を実施したところ $V_{0m}'=30.5\text{m/s}$ であった.

図 16 と図 17 から, 両者ともほぼ同様の応答曲面となっており, この小領域の範囲内では多峰性がほとんどなく, 二次多項式で十分近似できることがわかる. ここで, 求めた最適値は, 実験的検討を実施しておらず, 本最適化問題に対する厳密な最適値ではない. しかしながら, 求めた値は少なくとも最適値に準ずる値であると推測され, 本最適化では現状のマシンによるシャトル初速度を僅かでも向上させることが目的であることを考慮すると, 本最適化によって求めた最適値およびその最適条件は, ほぼ妥当であると考えられる.

また, 両応答曲面とも最適値近傍の傾きは緩やかとなっており, 僅かな設計変数値の変動によって急激に応答値が変化しないことがわかる. これは実用的に重要と考えられ, ローラの外直径 D やテーパ角 α は, 精度良く製作することが可能であるが, シャトルの挿入高さ H を常に最適値に保つことは実際には難しく, 本マシンでも発射機構の構造上, $\pm 0.3\text{mm}$ 程度の誤差は生じる. このような誤差範囲の挿入高さでシャトルを発射しても, 初速度 30m/s 以上は補償される. これより, 求めた最適値は, ロバスト性が高いと言える. 最後に, 最適化前のロー

ラの初期形状 ($D=\phi 315\text{mm}$, $\alpha=70.0^\circ$, $H=19.0\text{mm}$) と最適化後の最適形状 ($D=\phi 315\text{mm}$, $\alpha=51.9^\circ$, $H=17.7\text{mm}$) を図 18 に示す。

以上、本章では 2 段応答曲面法⁽²⁵⁾を用いてローラの形状最適化を実施した。その結果、最適化前のシャトルの発射初速度は 28.6m/s であったが、最適化後の初速度は 30.6m/s となり、最適化によって 2.0m/s (7.0 %) の高速化を達成することができた。また、最適化後のローラを用いることによって、異なるローラ回転数の条件でもシャトル速度の向上とそのバラツキが低減できると考えられる。

6. 結 言

本研究では、実用的なローラ式バドミントンマシンの開発を試み、発射実験を行い発射性能の評価を行った。また、開発したマシンのシャトルの発射初速度を向上させるローラの形状最適化を実施した。得られた結論は次の通りである。

- (1) 開発したローラ式のバドミントンマシンの最高初速度は 52m/s, 最高飛距離は 11.5m, 落下位置精度は縦方向 $\pm 0.4\text{m}$, 横方向 $\pm 0.15\text{m}$ 未満であり, 中学生のバドミントン選手用の実用的練習機としては十分な性能を有している。
- (2) 開発したバドミントンマシンの発射速度のさらなる高速化を目的として, ローラの形状最適化を実施した。その結果, シャトルの発射初速度は僅かに向上し, 速度が安定した。また, 求めた最適値および最適条件は, 異なる発射条件下でもロバスト性が高いと考えられる。

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のもである。ここに、謝意を表す。

文 献

- (1) Poole, J., *Badminton*, (1969), p.106, Goodyear Publishing Company, Inc.
- (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), p155-174.
- (5) 阿部一佳, 須田和裕, 鶴木秀夫, 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. and 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) “(財)日本バドミントン協会 競技規則”, available from <<http://www.badminton.or.jp/>>, (accessed 2011-3-12).
 - (22) Myers, R.H., Khuri, A.I. and Carter Jr., W.H., “Response Surface Methodology: 1966-1988”, *Technometrics*, Vol.31, No.2 (1989), pp. 137-157.
 - (23) Roux, W.J., Stander, N. and Haftka, R.T., “Response surface approximations for structural optimization”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.42, No.3 (1998), pp. 517-534.
 - (24) 轟 章, “RSMaker for Excel ver.0.1”, available from <<http://todoroki.arrow.jp/ssoft/RSMkaisetsu.pdf#search='轟章RSMaker'>>, (accessed 2011-3-18).
 - (25) 轟 章, Haftka, R.T., “積層パラメータを変数とした座屈荷重応答曲面を用いた遺伝的アルゴリズムによる複合材料積層構成最適化”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 64, No. 621 (1998), pp. 1138-1145.
 - (26) 北山哲士, 荒川雅生, 山崎光悦, “RBF ネットワークによる逐次近似最適化 (サンプル関数の基礎的検討)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.768, (2010), pp.1978-1987.
-