

# A study on throw simulation for baseball pitching machine with rollers and its optimization

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	<a href="http://hdl.handle.net/2297/17362">http://hdl.handle.net/2297/17362</a>

# ローラ式ピッチングマシンの投球シミュレーションと その最適化に関する研究\*

酒井 忍<sup>\*1</sup>, 北河 勇一郎<sup>\*2</sup>  
金井 亮<sup>\*3</sup>, 尾田 十八<sup>\*4</sup>

## A Study on Throw Simulation for Baseball Pitching Machine with rollers and its Optimization

Shinobu SAKAI<sup>\*5</sup>, Yuichiro KITAGAWA,  
Ryo KANAI and Juhachi ODA

<sup>\*5</sup> Department of Human and Mechanical Systems Engineering, Kanazawa University,  
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-1192 Japan

Pitching machine is widely used in venues ranging from professional baseball stadiums to batting centers. However, the throw performance of the pitching machines that have been developed so far for use during batting practice is not very high. Pitches such as the fastball, curveball and screwball are easily achieved by the pitching machine with three rollers which were developed by the authors. In this study, the moving behavior and contact stress state of the ball pitched with the three rollers type pitching machine is analyzed using dynamic finite element analysis software (ANSYS/LS-DYNA). The effect of the seam of a baseball to the throw accuracy is analyzed numerically. In the analysis, the finite element models of a detailed baseball with a seam and a pitching machine with three rollers are used. Additionally, convex and concave rollers are made and those are analyzed. From the analytical results, it is understood that the convex roller is higher than other rollers in throw accuracy. The convex roller geometry is optimized, and the optimum conditions (shapes and material properties) of the convex roller are decided. Moreover, the validity of the condition is confirmed by the throw experiment.

*Key Words* :Baseball, Pitching Machine, Finite Element Method, Experimental Mechanics,  
Simulation, Optimum Design

### 1. 緒 言

ピッチングマシンは、野球の練習機あるいはバッティングセンターなどで幅広く利用されている。現在、市販されているピッチングマシンは、任意のコースにボールを投げ分けることは難しい。このため、我々は三つのローラを用いた三ローラ式ピッチングマシンを提案し、その研究開発を行ってきた<sup>(1)(2)</sup>。しかし、その研究過程で、硬式野球ボールの縫い目がローラと接触することによって、ボールの回転や発射角が微妙に変化し、その結果、投球精度が低下することが実験的に明らかとなってきた<sup>(3)</sup>。

そこで本研究は、動的有限要素解析を用いて三ローラ式ピッチングマシンの投球シミュレーション解析を行い、投球時のボールの速度や自転回転数（スピン）などのボール

の動的挙動を把握し、マシンに投入されるボールの縫い目姿勢による投球精度の影響を明らかにした。また、それらの解析結果から縫い目姿勢によって投球精度が低下しにくいローラの形状や材質つまりロバスタなローラ（最適なローラ）について検討をした。さらに、得られた結果を基に最適なローラを製作し、これを用いた投球実験により、解析結果の妥当性の検証を行った。

### 2. 新型ピッチングマシンの構造と性能

開発した新型の三ローラ式ピッチングマシンを図1に示す。ボールは発射位置周りに120°間隔で設置された三つのゴム製ローラとの摩擦力を利用して投球される。各ローラにはそれぞれモータを設置し、マシン下部にはマシン全体の縦回転角 $\theta_M$ 、横回転角 $\phi_M$ を可変する機構を付加し、それらはすべてパーソナルコンピュータ（PC）によって独立に制御している。なお、各ローラの制御方法にはニューラルネットワークを用い、ローラ回転数などの各種パラメータを決定している。これより、本マシンはいつでも任意の球速、変化球（球種）のボールを広範囲のコースに投球することができる。

\*原稿受付 2008年5月14日。

<sup>\*1</sup> 正員、金沢大学工学部（〒920-1192 金沢市角間町）。

<sup>\*2</sup> 正員、コマツ（〒107-8414 東京都港区赤坂二丁目3番6号）。

<sup>\*3</sup> 正員、金沢工業高等専門学校（〒921-8601 金沢市久安2-240）。

<sup>\*4</sup> 正員、名誉員、金沢大学工学部。

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

他方、ボールの縫い目姿勢には、一般にボール一回転当たり縫い目が二回現れる二シームと呼ばれるものと四回現れる四シームがある。なお、先に行った投球実験から、二シームの方がボールの飛翔軌道や到達位置のバラツキが小さく投球精度が高い結果が得られている<sup>(3)</sup>。

### 3. 三ローラ式ピッチングマシンの投球解析

**3・1 有限要素モデルと投球条件** 三ローラ式ピッチングマシンのローラ部と硬式野球ボールの有限要素モデルおよびそれらの各寸法を図2に示す。本解析では、アルミフランジ部は他の材料に比べ剛性が高く変形が微小であるため剛体とし、ボールはその動的特性を考慮し粘弾性体とした<sup>(4)</sup>。解析モデルの材料特性を表1に示す。なお、予備解析の結果、硬式ボールの縫い目は、材料定数よりもその形状が投球特性に影響することを確認しており、ボール本体と同じ材料定数を用いている。

解析条件は、ボールとゴムローラの接触摩擦係数  $\mu=0.5$ 、解析時間0.1秒で行い、ボールに初期並進速度  $V_0=1\text{m/s}$ 、初期角速度  $\omega_0=28.56\text{ rad/s}$  を与えた。なお、 $\mu$ の値を含めこれらの解析条件は、実際のピッチングマシンにボールが投入される様子を高速ビデオカメラで撮影し、その画像から算出している<sup>(5)</sup>。

投球条件は、表2に示すような三種類の球種（無回転直球、カーブ）とした。 $N_1, N_2, N_3$ は各ローラの回転数であり、三つのローラ回転数の総和は $4500\text{ min}^{-1}$ で一定とした。

なお、本解析には汎用動的有限要素解析ソフト ANSYS/LS-DYNA を用いた。また、投球開始からリリース直後までを解析対象とし、リリース後のボールの飛翔軌道は考慮していない。その理由については、ここでは省略するが参考文献<sup>(6)</sup>にその詳細を記述している。

**3・2 縫い目姿勢変更モデルの投球解析** ボールの縫い目やその姿勢による投球の影響を調べるため、二シーム、四シームおよび縫い目のないボール（真球）の三つのモデルで解析を行った。マシンの投球精度は、リリース後のボールの球速  $V$ 、スピン数  $\omega$ 、発射仰角  $\theta$ （+Y軸方向を+）、発射偏角  $\phi$ （+Z軸方向を+）およびボールの中心に発生する最大ミーゼス応力を評価基準とした。

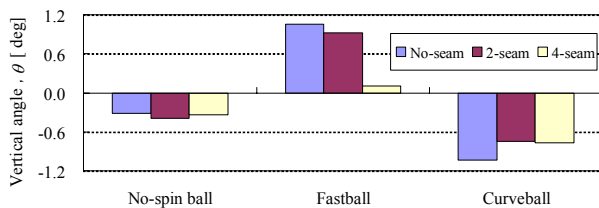


Fig.3 Influence of seam on vertical angle  $\theta$

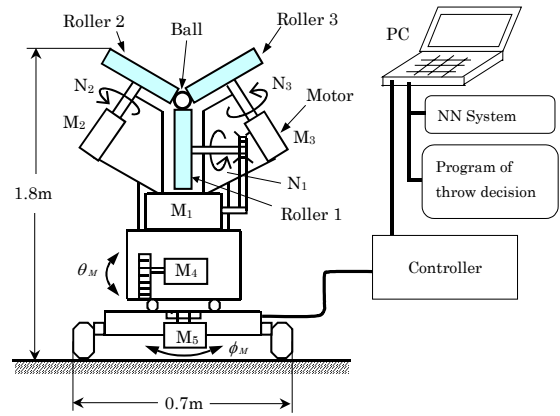


Fig.1 Constitution of three rollers type pitching machine

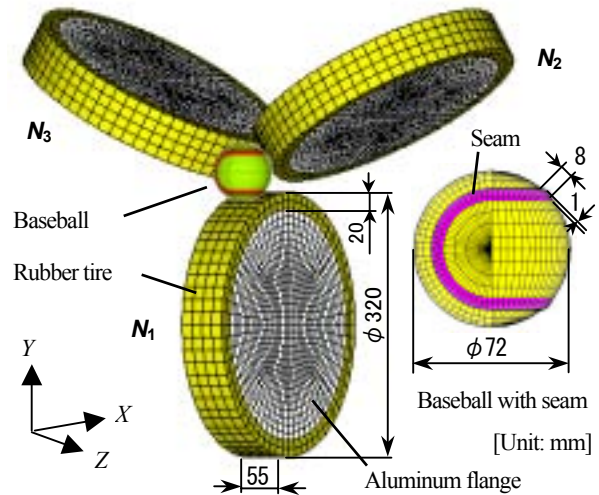


Fig.2 Finite element models of baseball and three rubber rollers (15 104 elements)

Table 1 Material properties of rubber tire and baseball

Property	Rubber tire	Baseball
Density, $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	1 000	835
Young's modulus, $E$ (MPa)	100	—
Poisson's ratio, $\nu$	0.45	—
Istantaneous modulus, $G_0$ (MPa)	—	46.15
Relaxed shear modulus, $G_\infty$ (MPa)	—	8.85
Bulk modulus, $K$ (MPa)	—	100
Decay constant, $\beta$ ( $\text{s}^{-1}$ )	—	7 000

Table 2 Analytical conditions

	$N_1$	$N_2$	$N_3$	unit ( $\text{min}^{-1}$ )
Case 1 (No-spin ball)	1 500	1 500	1 500	$N_1+N_2+N_3$
Case 2 (Fast ball)	1 700	1 400	1 400	$N_1+N_2+N_3$
Case 3 (Curve ball)	1 325	1 750	1 425	$N_1+N_2+N_3$

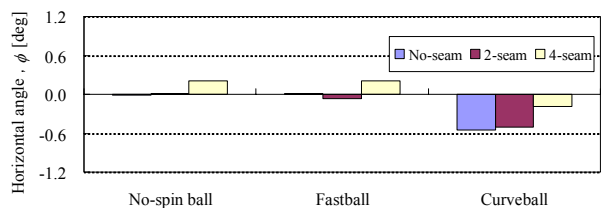


Fig.4 Influence of seam on horizontal angle  $\phi$

解析結果の一例として、各球種における発射角( $\theta, \phi$ )を図3, 4にそれぞれ示す。これより、いずれの球種においても真球モデルと二シームの両発射角( $\theta, \phi$ )は定性的傾向が良く似ており、他方これらの姿勢と四シームでは明らかに傾向が異なることがわかる。このことから、二シームは縫い目の影響を受けにくい姿勢であることが、本解析においても確認された。

**3・3 ローラ形状変更モデルの投球解析** 前節の結果から二シームは縫い目の影響を受けにくい、実際にピッチングマシンで投球する際、二シームで投球するには人為的にボールの姿勢を揃えなければならない。そこで、ボールの投球精度が縫い目やその姿勢に影響されにくいローラ（ロバストなローラ）を開発することにした。このことから、まずローラ断面の形状を変化させることを考案した。しかし実際に様々な形状のローラを試作し、それらの投球実験から性能評価をすることは時間的、コスト的に多大な労力が必要である。そこで、断面形状を変更したローラの有限要素モデルを作成し、投球解析を行うことで縫い目に対しロバストなローラ形状を推定していく方法を採用。

これまで用いていたローラ断面は、長方形の平型ローラ（flat roller）であったが、ボールに接触する中央部が窪んだ凹型ローラ（図5）、逆に盛り上がった凸型ローラ（図6）を考案した。両モデルとも曲率半径  $R=100\text{mm}$ 、ボール中心からローラ外表面までの距離  $r=25.1\text{mm}$  である。なお、これらの値は、実際に製作が比較的容易な形状寸法等を考慮して決定した。

直球投球時の解析結果の一例を図7~10に示す。図7は、二シーム投球時におけるボール速度の時刻歴を示している。いずれもほぼ同様な速度-時間曲線を描き、ローラと接触し始めると急激に速度が上昇し、リリース後はほぼ一定の球速で投球されている。ただ、平型ローラよりも凸型では球速がやや速く、凹型では僅かに遅いことがわかる。なお、ここでは示していないが、これらのことは他の球種や異なる縫い目姿勢においてもほぼ同様であった。これより、球速はローラ形状にはあまり影響されないことがわかった。

図8は直球投球時の縫い目姿勢ごとにボール中心に発生する最大ミーゼス応力をローラ形状で比較したもので、凸型ローラが縫い目姿勢にかかわらず最も低い値となった。このことから凸型ローラにはボールへの損傷を軽減する効果が期待できると考えられる。

一方、直球投球時の発射仰角 $\theta$ （図9）と発射偏角 $\phi$ （図10）は、縫い目姿勢やローラ形状で大きく変動している。両図より、凸型ローラは縫い目姿勢による変動が小さく、その差も小さいことがわかる。ここで、両縫い目姿勢の差

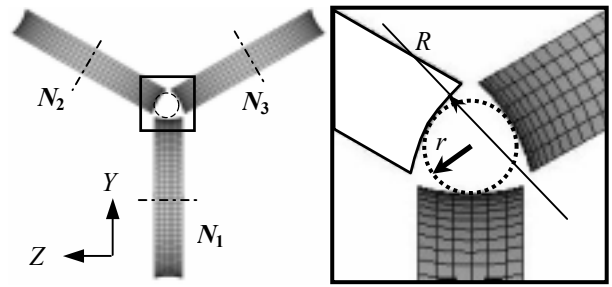


Fig.5 Concave type roller

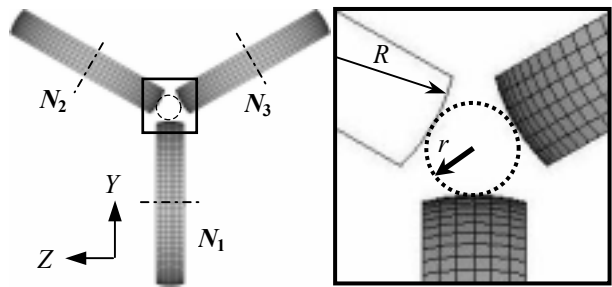


Fig.6 Convex type roller

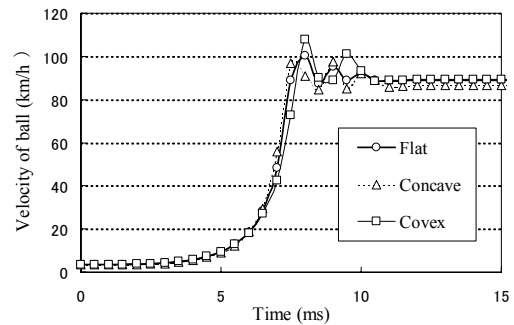


Fig.7 Time series of ball's velocity in two-seam fastball

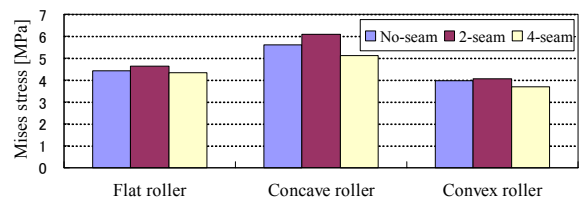


Fig.8 Maximum Mises stress of ball with several rollers in fastball

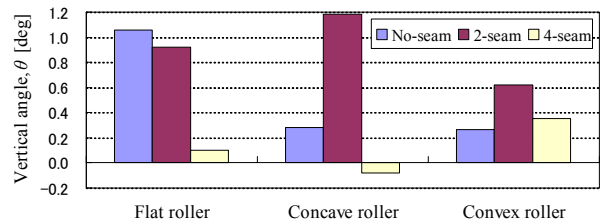


Fig.9 Vertical angle with several rollers in fastball

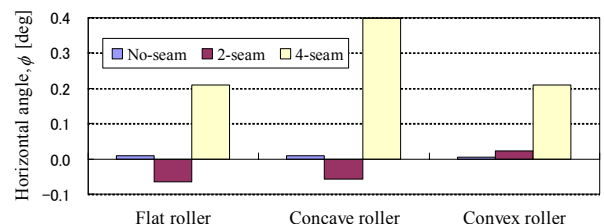


Fig.10 Horizontal angle with several rollers in fastball

が小さいということは、縫い目の影響が小さく投球精度がよいと言え、特に偏角 $\phi$ の値は、死球の要因となることから投球精度の面では重要な因子となる。これより、凸型ローラは、平型や凹型ローラよりも投球精度が高いと考えられる。

#### 4. ローラの最適設計

**4・1 最適設計問題** 前章の結果からローラ形状を凸型にすると、既存の平型ローラよりも投球精度が高くなる可能性がある。そこで、本章では動的有限要素解析を用いて、投球精度を向上させるローラの最適設計を試みる。具体的には、ローラのヤング率 $E$ 、曲率半径 $R$ およびボール中心からローラ外表面までの距離 $r$ （以下、中心間距離 $r$ ）の三つ（図6参照）を設計変数とし、縫い目姿勢の違いによる発射角の差が最小となるローラを設計する最適化問題である。

**4・2 応答曲面の作成と最適化** 最適設計を行うために、設計変数に対するローラ最適性の評価として縫い目姿勢別の発射偏角の差を用いることにした。この推定式を応答曲面法<sup>7)</sup>によって導くことにする。目的関数 $f_\phi$ は、投球精度において最も重要視される偏角の差である式(1)を用い、 $f_\phi$ が小さいほど縫い目の影響が小さくなるため、これを最小化する。

$$f_\phi = (\phi_2 - \phi_4)^2 + \eta \rightarrow \min \quad (1)$$

ここで、添字2, 4はボールの縫い目姿勢（2は二シーム, 4は四シーム）を表す。 $\eta$ はボールのスピンの数 $\omega$  ( $\text{min}^{-1}$ ) が極端に少ない場合には、意図した球種で投球されないため、最適解から除外するペナルティ項であり、次の条件で規定する。

$$\left. \begin{array}{l} \omega_2 \geq 400 \text{ かつ } \omega_4 \geq 400 \Rightarrow \eta=0 \\ \omega_2 < 400 \text{ または } \omega_4 < 400 \Rightarrow \eta=1 \end{array} \right\} \quad (2)$$

応答曲面の構築には、応答曲面作成ツール RSMaker for Excel<sup>®</sup>を用い、三つの設計変数 ( $R$ ,  $r$ ,  $E$ ) を表3に示すような水準に離散化し、表中の $3 \times 3 \times 5$ の45通りのすべての解析を実行した。なお、球種としては、前章の解析結果から発射偏角 $\phi$ のバラツキが最も大きいカーブを用いた。

その結果、得られた応答値には多峰性が認められ、設計空間すべてを精度良く近似することは困難であった。そこで、補間計算による応答曲面を作成し、最適点候補の予測を行った。グラフ作成ソフト ORIGIN による補間計算で作成した応答曲面の一例 ( $E=50\text{MPa}$ ) を図11に示す。図より、 $r=25\text{mm}$ 前後、 $R=100\text{mm}$ 近傍に最適点があることが予測され、その近傍で再度解析を行い、拡大応答曲面を作成し、

真の最適点を探索する。なお、再解析では $R$ を $100\text{mm}$ に固定し、 $r$ と $E$ の二つを設計変数とした（表4参照）。その理由は、 $R > 72\text{mm}$ の範囲では、 $r$ と $E$ の両者の方が目的関数に対する感度が敏感であったためである。

Table 3 Design variable

Radius of curvature $R$ [mm]	Center distance $r$ [mm]	Young's modulus $E$ [MPa]
36	22.1	10
72	25.1	20
100	30.1	50
		100
		500

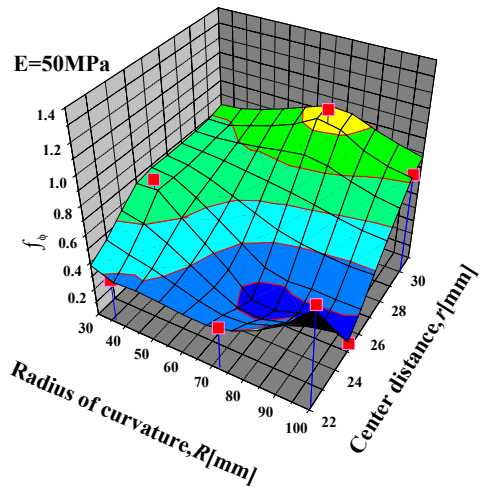


Fig.11 Response surface by interpolation calculation ( $E=50\text{MPa}$ )

Table 4 Design variable

Radius of curvature $R$ [mm]	Center distance $r$ [mm]	Young's modulus $E$ [MPa]
100	24.1	30
	24.6	40
	25.1	50
	25.6	60
	26.1	70
		80

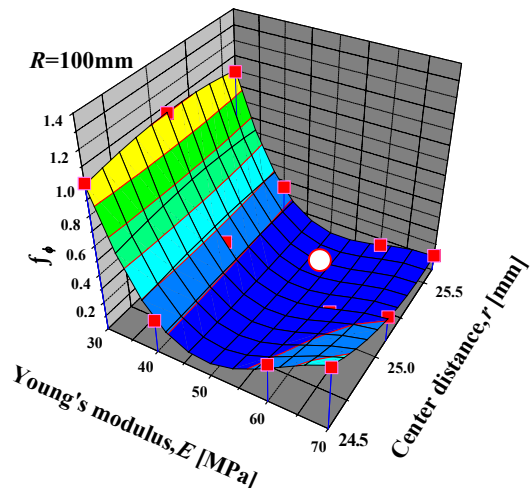


Fig.12 Response surface and optimum solution in curveball ( $R=100\text{mm}$ )

三次多項式近似により求められた拡大応答曲面および最小化による最適点 (○印) を図 12 に示す. このようにして, 凸型ローラの最適条件 ( $r=25.4\text{mm}$ ,  $E=52.4\text{MPa}$ ) を求めた. なお, この条件で再解析を実行し最適値であることを確認している. また, 図 12 より最適点近傍は緩やかな曲面となっており, ある程度の範囲を有してしていることが分かる.

次に, 球種を直球に変更した場合のローラ最適化をカーブ同様に行った. 作成した拡大応答曲面を図 13 (○印はカーブの最適点) に示す. カーブに比べ両設計変数による変化は全体的に小さく, その最適点はほぼカーブで求めたものと同様であった.

以上のことより, 先に求めた最適条件は, 直球でも最適点近傍にありカーブ以外の球種においても最適値に近いものであると考えられる.

### 5. 凸型ローラの投球実験と投球精度評価

前章では FEM 解析等を用いて, 凸型ローラの最適条件を決定した. これらの解析結果の妥当性を検討するために, 実際に求めた最適条件の凸型ローラを製作し, 投球実験を行った. 製作したローラは, 外形形状が曲率半径  $R=100\text{mm}$  の凸型, 材質は軟質ゴム製でそのヤング率は, 直球とカーブの最適値に近い値  $E=50\text{MPa}$  である. これを軟質凸型ローラと呼ぶ. このローラ三つを図 6 に示すように中心間距離  $r=25.4\text{mm}$  になるように調整セットした.

投球実験の様子は, 高速度ビデオカメラ (nak 製: fx-k3) を用いて発射直後のボールの挙動を  $0.5\text{ms}$  間隔で撮影した. なお, 撮影方向は, 発射仰角および偏角を計測するため, 水平方向と鉛直上向きの方角とした. また, ローラ形状の比較のため, 既存の平型ローラおよび製作した軟質凸型ローラの撮影をそれぞれ行った. 投球条件は, FEM 解析との比較を行うため, 表 2 に示す解析条件と同じ条件で行った.

軟質凸型ローラを用いた投球実験結果の一例として, 四シーム, カーブ投球時のボールの飛行画像を図 14 に示す. 他方, 同条件で投球した FEM 解析の画像を図 15 に示す. これより, 両図とも鉛直から Z 軸 (紙面手前) 方向に傾いた軸を中心に順回転しながら投球されている様子がわかる. また, 両画像から球速  $V$  とスピン数  $\omega$  を算出した. その結果, 実験値と解析値はほぼ等しい値であった. なお, ここでは示していないが, 他の球種や縫い目姿勢においても同様の結果を得ている.

図 16 は, 直球およびカーブの球種を四シームで投球したときの球速をローラ形状で比較したものを実験値と解析値の両方をそれぞれ示す. 図から平型ローラ

よりも凸型ローラの球速  $V$  は, 球種によらずやや増加していることがわかる. その効果は約 3% であり, 先の FEM 解析結果 (図 7 参照) と同様の結果となった.

一方, 同図の球速  $V$  を球種やローラ形状ごとに実験値と解析値をそれぞれ比較すると, それらの値はほぼ

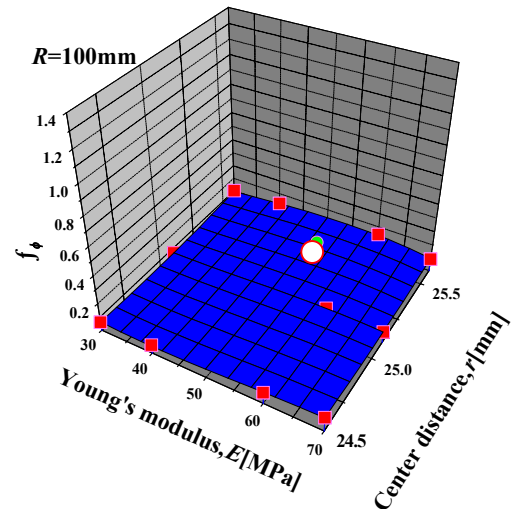


Fig. 13 Response surface and optimum solution in fastball ( $R=100\text{mm}$ )

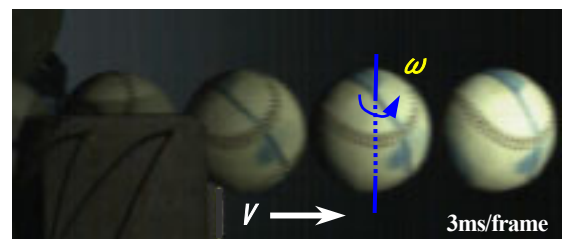


Fig. 14 Behavior of ball using high-speed videography in curveball ( $V=91.1\text{km/h}$ ,  $\omega=820\text{min}^{-1}$ )

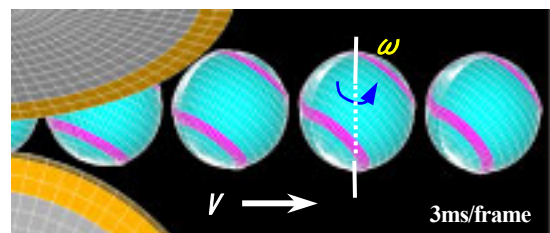


Fig. 15 Behavior of ball using FEM results in curveball ( $V=89.9\text{km/h}$ ,  $\omega=810\text{min}^{-1}$ )

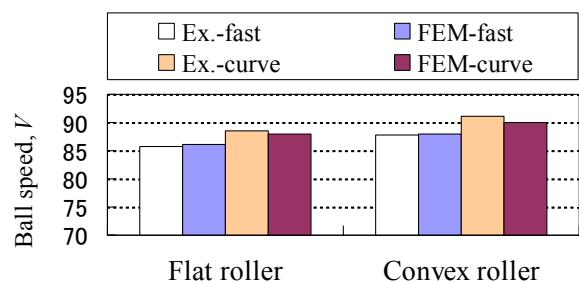


Fig. 16 Comparison of roller geometry on ball speed  $V$  in four-seam pitching

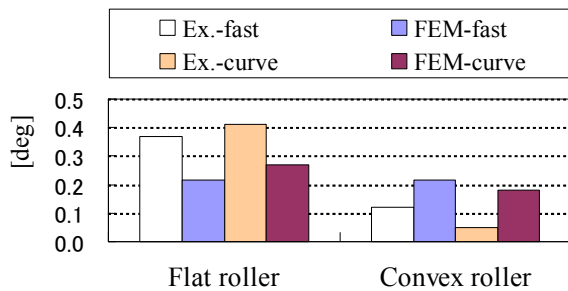


Fig.17 Comparison of roller geometry on difference of horizontal angle  $\Delta\phi$

一致しており、その差は最大でも1.3%であった。なお、投球実験は、数回行い再現性を確認している。

次に、ピッチングマシンの重要な性能の一つである発射偏角 $\phi$ について考察をする。縫い目姿勢によるマシンの投球精度を定量的に評価するため、発射偏角の差 $\Delta\phi$ を次式のように定義する。

$$\Delta\phi = |\phi_2 - \phi_4| \quad (3)$$

ただし、 $\phi_2$ 、 $\phi_4$ はそれぞれ二シーム、四シームの発射偏角である。ここで、 $\Delta\phi$ の値が小さければ、縫い目姿勢によらず、投球が安定していると言える。

直球とカーブをそれぞれ二シーム、四シームで投球し、球種毎に発射偏角 $\phi$ を計測した。なお、実験は平型と軟質凸型の二種類のローラで行った。図17は、これらの実験から計測した $\phi$ の値から、式(3)を用いて計算した偏角の差 $\Delta\phi$ を示す。また、同図には、実験と同様の投球条件におけるFEM解析の値も示している。

同図の実験値をローラ形状で比較すると、球種に関らず平型よりも凸型の方が小さい値を示し、凸型は投球精度を向上させる効果があるものと言える。ボールの飛翔理論から本投球条件(初速91km/h)のカーブ投球時、 $\Delta\phi$ の値が $0.2^\circ$ あると18.44m先のホームベース上では、約70mm(ボール1個分)横方向にコース位置がずれる<sup>(6)</sup>。つまり、現状の平型ローラでは、直球投球時130mm、カーブ投球時150mm程度の制球精度であったものが、軟質凸型ローラを用いた場合、直球で約40mm、カーブで20mm程度の制球精度に向上することを表わしている。

最後に、解析精度について述べる。図17に示す実験値と解析値の $\Delta\phi$ の差を球種ごとにそれぞれ比較すると、平均で $0.13^\circ$ 、最大で $0.18^\circ$ であった。多少誤差はあるものの実験値のバラツキ(約 $0.1^\circ$ )を考慮すれば、解析精度は十分であると考えられる。これらのことから、本研究で作成した解析モデルや解析結果の妥当性が確認できた。

以上、ローラを最適化した軟質凸型ローラを使用すると直球やカーブでは縫い目姿勢を問わずボール1個分以下の制球精度となり、これは、現状のマシン(ボール2.5個分程度)に比較し、格段に制球精度が向上したと言える。

## 6. 結 言

本研究では、三ローラ式ピッチングマシンの投球精度向上を目的に、投球シミュレーション解析を行い、ボールの動的挙動や投球精度に与える縫い目の影響について考察をした。また、凸型形状のローラを提案し、そのローラの材質、形状の最適化を行った。さらに、最適ローラを用いた投球実験を行い、解析結果の妥当性を検証した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) ローラ式ピッチングマシンでは、ボールの縫い目や姿勢によって、球速はほとんど影響しないが、発射仰角や偏角は大きく影響する。
- (2) 最適化したローラである軟質凸型ローラは、縫い目の影響を受けにくく、ロバスト性が高い。

## 文 献

- (1) Mish, S.P. and Hubbard, M., Design of a Full Degree-of-freedom Baseball Pitching Machine, *Journal of Sports Engineering*, Vol.4, No.3 (2001), pp.123-133.
- (2) Oda, J., Sakai, S., Yonemura, S., Kawata, K., Horikawa, S. and Yamamoto, H., Development Research of Pitching Machine Controlling Variable Ball using Neural Network, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.71, No.702 (2005), pp. 201-206.
- (3) Sakai, S., Oda, J. and Kitagawa, Y., An Effect of a Baseball having Seam under Roller type Pitching Machine, *Proceedings of the Joint Symposium on Sports Engineering and Human Dynamics Conference*, No.06-35 (2006-11), pp. 120-124.
- (4) Nicholls, R.L., Miller, K. and Elliott, B.C., Modeling Deformation Behavior of the Baseball, *Journal of Applied Biomechanics*, Vol.21, No.1 (2004), pp. 9-15.
- (5) Sakai, S., Oda, J., Kawata, K. and Kitagawa, Y., Study on Throw Accuracy for Baseball Pitching Machine with Roller, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.73, No.735 (2007), pp. 90-95.
- (6) Sakai, S., Oda, J. and Kitagawa, Y., Study on Improvement in Throw Accuracy of Baseball Pitching Machine with Rollers, *Journal of Japan Society for Design Engineering*, Vol.43, No.5 (2007), pp. 90-95.
- (7) Myers, R.H. and Montgomery, D.C., Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, *John Wiley & Sons, Inc.*, (1995).
- (8) Todoroki, A., "RSMaker for Excel", available from <<http://todoroki.arrow.jp/soft/RSMkaisetsu.pdf>>, (accessed 2007-4-30).