ローラ式ピッチングマシンの投球精度に関する研究*
(ボール縫い目とローラの検討)酒井 忍^{*1}, 尾田 十八^{*2}
河田 憲 吾^{*3}, 北河 勇一郎^{*4}Study on Throw Accuracy for Baseball Pitching Machine with Roller
(Study of Seam of Ball and Roller)Shinobu SAKAI^{*5}, Juhachi ODA,
Kengo KAWATA and Yuichiro KITAGAWA^{*5} Department of Human and Mechanical Systems Engineering, Kanazawa University,
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa, 920-1192 Japan

The most common commercial pitching machines for baseball are the “roller” type and the “arm” type. 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 a 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, the initial velocity and the spin rate of the pitched ball are filmed using a high-speed videograph, and those pictures are compared with the finite element analysis. From the analytical results, it is understood that the coefficient of friction between the baseball and the rollers is not affected. Additionally, it is obvious that the ball's velocity and spin rate are relatively unaffected by the seam orientation, while the throw's horizontal and vertical angles are notably affected by the relative angular velocity of the rollers and the orientation of the seam.

Key Words: Baseball, Finite Element Method, Pitching Machine, Motion Control, Experimental Mechanics, Simulation

1. 緒 言

現在、野球用ピッチングマシンとしてはアーム式とローラ式が市販されている。アーム式は、速度を可変できるが、カーブなどの変化球を投げることは難しく、二つの回転ローラを持つ二ローラ式では、変化球も投球可能であるが、瞬時にそれを変更することは難しい。また、いずれのタイプも任意のボールを希望するコースに投げ分けることは極めて困難である⁽¹⁾⁽²⁾。そこで、著者ら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、各ローラの制御法にニューラルネットワーク(NN)を用いることで、任意の速度や変化球のボールを打者が希望するコースに投球可能なピッチ

ングマシンを研究開発してきた⁽²⁾。

しかしながら、開発したマシンを実用化するためにはコストを始めとしたいいくつかの問題がある。特に重要なこととして、打者にデットボール(死球)を絶対に投げない高い投球精度を有することである。他方、プロ野球などで使用される硬式ボールには、特有の縫い目が付いている。ボールとローラの摩擦係数を用いて投球するローラ式ピッチングマシンでは、同じ投球条件下でもローラと接触する縫い目の位置や向きによってボールの回転や投射角度が微妙に変化し、その結果、投球精度が悪化することが一般に言われている。著者らが行った試験的な投球実験においても同様の結果が得られている⁽³⁾。

そこで、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とし、ボール縫い目の影響やローラ材質などの検討を行った。具体的には、開発したピッチングマシンおよび縫い目付きボールの有限要素モデルを作成し、投球シミュレーション解析を行い、ボ

* 原稿受付 2007年4月9日。

^{*1} 正員, 金沢大学工学部(☎920-1192 金沢市角間町)。^{*2} 正員, フェロー, 金沢大学工学部。^{*3} 准員, (株)PFU(☎929-1192 かほく市宇野気ヌ98-2)。^{*4} 学生員, 金沢大学大学院自然科学研究科。

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

ールの速度や自転回転数（スピン）などの動的挙動を明らかにする。また、ローラの材質やローラ間隔を変えたモデルを作成し解析を試みる。これらの結果から、ボールの縫い目が投球精度に及ぼす影響を検討する。

2. 三ローラ式ピッチングマシン

開発した三ローラ式ピッチングマシンを図1に示す。ボールは投射位置周りに 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が設置されており、マシン下部にはローラ部の縦投射角 θ 、横投射角 ϕ を可変できる機構を付加してある。また、これらはすべてコントローラを介してパーソナルコンピュータに接続され、一括制御される。三ローラ式を採用することで、広い速度範囲で多様な変化球のボールを瞬時に任意のコースに投球できる。また、各ローラの制御方法には学習機能を有する NN を使い、ローラ回転数や投射角などの各種パラメータを決定している⁽²⁾。

3. 投球シミュレーション

3・1 三ローラとボールの有限要素モデル 図1に示すピッチングマシンのモデル化にあたり、マシン全体をモデル化することは非常に大規模かつ計算コストが高い。本研究では、投球精度評価が目的であるため、ボールおよびボールと接触するローラ部が重要であることからそれらを解析対象とした。

三つのローラ部およびボールの有限要素モデルを図2に示す。ローラ部は外径 $\phi 320$ mm、厚さ 20 mm のウレタンゴム製のタイヤ部と外径 $\phi 280$ mm のアルミニウム製フランジで構成されている。他方、ボールはプロ野球用の硬式ボール（外径 $\phi 72$ mm）をモデル化した。このボールモデルには、硬式ボール同様、幅 8 mm 高さ 1 mm の縫い目も付けて詳細なモデルを作成した。なお、本解析モデルでは、アルミ製フランジ部は他の材料に比較して剛性が非常に高く変形が微小と考え剛体と仮定した。

一方、ボールはローラと接触し、摩擦力を受ける。しかもそれは短時間の動的現象であるため、その動的特性を考慮した粘弾性特性が重要である。そこで、図3に示すような Maxwell モデルと、もう一つのバネ要素を並列にした三要素の粘弾性モデルを用いて、応力緩和現象を表わす。このモデルにおいて、せん断弾性係数 $G(t)$ と時間 t の関係は次式で示される⁽⁴⁾。

$$G(t) = G_\infty + (G_0 - G_\infty)e^{-\beta t} \quad (1)$$

ここに、 G_∞ は時間が経過した長期せん断弾性係数、 G_0 は負荷初期の短期せん断弾性係数、 β は指数減衰定数である。なお、式(1)における各材料定数は、ボールの静的実験、動的衝突実験およびそれらに対応した有限要素解析を行うことによって決定した⁽⁵⁾。

Fig.1 Three rollers type pitching machine

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

Fig.3 Viscoelastic model by three elements model

解析モデルの要素タイプは、ボールの縫い目部分も含めすべてソリッド要素を用いており、ボールの要素数は4352(縫い目:512)、ローラ部は10752、モデル全体の総要素数は15104である。解析モデルの材料特性を表1に示す。なお、縫い目の材料定数についてはボール本体と同じ材料定数を与えている。

3・2 解析条件 本ピッチングマシンのボール投入条件は並進速度1.0 m/s、スピニング数28.6 rad/sであるので、これをボールの初期条件とし、各ローラ回転数を種々変化させて解析を行った。ローラ回転数の一例を表2に示す。これらのローラ回転数は変化球を模擬しており、ケース1が無回転、ケース2がストレート、ケース3がカーブをそれぞれ表わしている。なお、各ローラ回転数の和が等しくなるように考慮した。また、本解析では、ボールとゴムローラの摩擦を伴う接触変形が考えられるため、摩擦係数 μ を0.3、0.5および0.8に設定して解析を行った。

さて、ボールの回転方向の条件としては、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四回現れる四シームがある。このため、このような条件(縫い目姿勢)を変えた解析も行い、縫い目の影響を比較検討した。なお、解析には、汎用動的有限要素解析ソフトANSYS/LS-DYNA Version 9.0を用いた。

3・3 解析結果および考察 解析結果の一例として、二シーム投球時におけるX-Y断面のボールおよびローラのミーゼス応力分布を図4に示す。なお、(a)はケース1(無回転)を、(b)はケース2(ストレート)をそれぞれ示す。同様に、X-Y方向せん断応力分布を図5(a)、(b)にそれぞれ示す。これより、ミーゼス応力は、応力分布がやや異なるもののその値は両者ともほぼ等しいことがわかる。一方、X-Y方向のせん断応力は、無回転よりもストレートの方がボールおよびローラともにその絶対値は大きくなっている。これは、ストレートの場合、 N_1 ローラの回転数が他のローラよりも速いため、接触面近傍のせん断応力値が高くなるからであると考えられる。

次に、摩擦係数 μ を変化させたときのケース2およびケース2のすべてのローラ回転数を1.67倍にしたときのボール中心のX方向速度の時刻歴変化を図6に示す。これより、いずれの条件でもボールがローラと接触し始めると急激に速度が上昇し、リリース(ボールがローラから離れる瞬間)の直前にピークを生ずる。一方、リリース後は一定のスピードでボールが投球されていることがわかる。また、このときの投球に要する時間は、 μ の値によって異なるものの10ms程度の短い時間である。

Table 1 Material properties of rubber tire and baseball

Property	Rubber tire	Baseball
Density, ρ (kg/m ³)	1 000	835
Young's modulus, E (MPa)	100	—
Poisson's ratio, ν	0.45	—
Instantaneous modulus, G_0 (MPa)	—	46.15
Relaxed shear modulus, G_∞ (MPa)	—	8.85
Bulk modulus, K (MPa)	—	100
Decay constant, β (s ⁻¹)	—	7 000

Table 2 Analytical conditions

	N_1	N_2	N_3	unit (min ⁻¹)
Case 1 (No-spin ball)	1 500	1 500	1 500	4 500
Case 2 (Fast ball)	1 700	1 400	1 400	4 500
Case 3 (Curve ball)	1 325	1 750	1 425	4 500

Fig. 4 Mises stress distribution in X-Y cross section

Fig. 5 Shear stress distribution of X-Y direction

Fig. 6 Time history of linear velocity of X-direction for pitched fast ball

本解析より、ローラ回転数が同じならば、接触時間がやや異なるもののほぼ同様な速度-時間曲線を描き、投球後のボール速度はすべて等しい結果となった。これは、ボールがローラと接触し始めるすべり状態では、 μ の大小でその接触時間は変化するが、ボールに最大変形（ローラがボールを挟持）が起こる瞬間は、図4、5のようにボールとローラの接触状態はほぼ全域で固着状態となっており、投球後のボール速度は、 μ の値によってあまり影響されないものと考えられる。このことから以降の投球シミュレーション解析では摩擦係数 $\mu = 0.5$ として投球精度評価を行った。

図7は、二シーム、ケース2（ストレート）のときの本解析による投球後のボールの飛翔挙動を示す。これより、ボールは反時計回転、いわゆるバックスピしながら飛翔していく様子がよくわかる。

3・4 投球実験と解析結果の比較 図1のピッチングマシンを用いて表2に示す条件で投球実験を行った。このときの様子を高速ビデオカメラ（nak製：fx-k3）を用いて1ms間隔で撮影した。その画像の一例として、二シーム、ケース2のとき、ボールの飛翔の様子を図8に示す。これより、同条件の解析結果である図7と比較すると、両者の投球速度 V やスピン ω などの動的挙動はほぼ一致していることがわかる。

図9は、二シームの実験結果と二、四シームの解析結果の投球速度 V を各ケース（球種）ごとに比較したものである。各球種とも実験値と解析値はよく一致しており、その速度はいずれも24~25 m/sとほぼ一定値になっていることがわかる。これは、いずれの解析条件も三ローラの回転数の和（ $N_1 + N_2 + N_3$ ）は一定で、ボールの速度は回転数の和によって決まることから当然のこととも言える⁽²⁾。

実験結果と解析結果のボールのスピン数（自転回転数）を比較したものを図10に示す。図より、縫い目姿勢にあまり関係なく、いずれの球種においても実験値と解析値はほぼ一致していることがわかる。

図11は、ボール投球後の縦投射角 θ （X-Y平面、Y方向が+）を各球種ごとに比較したものである。二シームの実験値と解析値を比較すると、ほぼ等しい値となっていることがわかる。他方、二シームと四シームの解析値を比較すると球種が無回転やストレートでは大きく異なることがわかる。これは、縫い目姿勢つまり縫い目の位置によって、投射角が変化することを表わしており、これが縫い目による投球時のコントロール精度低下の大きな要因であると考えられる。

以上、投球シミュレーションを行った結果、投球実験とほぼ同様の結果を得ることができた。これより、

Fig.7 Behavior of the ball using finite element analytical results in Case 2 (Fast ball, $V = 25.1$ m/s)

Fig.8 Behavior of the ball using high-speed videography in Case 2 (Fast ball, $V = 24.2$ m/s)

Fig.9 Comparison of ball's velocity by experimental and analytical values

Fig.10 Comparison of ball's spin rate by experimental and analytical values

Fig.11 Comparison of vertical angle θ of pitched ball by experimental and analytical values

作成した解析モデルは、十分妥当なものであると考えられる。

4. ローラの接触条件変更モデルの解析

本章では、ボールの縫い目に影響されにくいローラの接触条件等を検討する。

4・1 ローラ材料変更モデルの解析と考察 まず、現状使用しているマシンのゴムローラ材料をある程度柔らかく、あるいは硬くすることは比較的容易である。そこで、ローラ材料のヤング率 E を 1/5 倍、5 倍にしたモデルを作成した。つまり E を 20, 100, 500 MPa として、同様の解析を行った。なお、解析条件は表 2 に示すローラの回転数とし、縫い目姿勢を二シームおよび四シームとして解析を実行した。また、比較のため、縫い目のない（シーム無）ボールも同様に解析を行った。

解析結果の一例として、二シーム、ストレート投球時のボール速度の時刻歴を図 12 に示す。これより、いずれの解析条件においても同様の速度－時間曲線を描きヤング率 E にはあまり関係がなく、投球後の速度は $E=20$ MPa ではやや速いものの 25 m/s とほぼ一定値であった。なお、ここでは示していないが、四シームおよびシーム無のモデルでも全く同様な結果であった。

次に、ストレート投球時における縦投射角 θ および横投射角 ϕ (X - Z 平面, Z 方向が+) を図 13, 14 にそれぞれ示す。これより、 θ は各縫い目姿勢によってほぼ決まり、 E の違いによってその値はあまり変わらないことがわかる。他方、 ϕ も θ 同様、シーム無および二シームでは E にはあまり依存しないが、四シームでは E が高く、つまりローラが硬くなると ϕ は増加傾向にある。これは、四シームの縫い目方向に関係があると考えられる。つまり、四シームでは図 15(a) のように Y - Z 平面からみると、 N_2 , N_3 の両ローラに対し縫い目が非対称に位置するため横方向分力が発生する。また、ローラが硬くなるほど接触域が小さくなるため、縫い目の有無による接触力の差が顕著になると予測される。なお、横投射角 ϕ は、実際の野球における打者の死球と密接に関係しており、これを極力小さくすることがピッチングマシンの性能として非常に重要である。

これらの解析結果からローラ材質を柔らかくすると、二シームでは θ 方向の値はあまり変わらないものの縫い目無との差がやや小さくなる傾向があり、また四シームでは ϕ 方向は大きく減少することがわかった。

4・2 ローラ間隔変更モデルの解析と考察 ボールを挟持して投球するローラ式ピッチングでは、ローラ間隔は重要な因子である。そこで、図 15(b) のよう

に実際のマシンのローラ間隔（半径 $R=25.1$ mm）を基本モデル（ $R=251$ ）とし、 R を 2mm 小さくしたモデル（ $R=231$ ）および 2mm 大きくしたモデル（ $R=271$ ）をそれぞれ作成し、解析を行った。なお、同図中のボール下端の点 A を応力解析点とし、解析条件は表 2 に示す条件とした。

解析結果の一例として、二シーム、ストレートの投

Fig.12 Time history of velocity of ball in Case 2

Fig.13 Comparison of vertical angle for pitched ball

Fig.14 Comparison of horizontal angle for pitched ball

Fig. 15 Radius of each roller distance, R

Fig.16 Time history of velocity of pitched ball in Case 2

Fig.17 Time history of minimum principal stress at point A in Case 2

球時のボール速度および点 A の最小主応力（最大圧縮応力）の時刻歴を図 16, 17 にそれぞれ示す。両図から、ローラ間隔が接近すると接触力は増加し、逆に離れると接触力は減少する。しかし、投球後の速度は約 25 m/s であり、ほとんど変化しないことがわかる。これは、同じ投球速度を得るには、接触力やせん断力が小さい方がボールの摩擦や磨耗損傷の観点から有利であり、この点から R は大きい方がよいと考えられる。

本解析での縦投射角 θ と横投射角 ϕ の結果を図 18, 19 にそれぞれ示す。これより、 R が小さいと縫い目の有無や姿勢によって両投射角ともその差は大きく異なっている。一方、 R が大きくなると縫い目姿勢によらず両投射角とも減少する傾向にあり、特に、ニシームでは θ が、また四シームでは ϕ が大きく減少していることがわかる。

5. 結 言

本研究では、縫い目付き野球ボールの有限要素モデルを作成し、著者らがすでに開発している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、縫い目の影響について考察をした。また、縫い目の影響を受けにくいローラ材料等の検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 野球ボールの縫い目は、投球速度やスピンの影響を与えないが、投射角は大きく変化し、縫い目の姿勢によってもその値は異なる。

Fig.18 Relation of vertical angle θ and radius R Fig.19 Relation of horizontal angle ϕ and radius R

(2) 柔らかい材料でローラ間隔を広げたローラは、縫い目の影響を受けにくいロバストなローラとなる。

以上より、ローラの材質と間隔を変更することによって縫い目姿勢によらず横投射角 ϕ が大きく減少することは、ボール縫い目が要因で起こる打者への死球リスクが大幅に低減され、マシン投球性能が大きく向上すると考えられる。

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) Oda, J., Sakai, S., Yonemura, S. and Kawata, K., Research of Impact Force of the Baseball and its Damage Effect to Living Body, *Proceedings of the 42th Hokuriku-Shinetsu Branch Regular Meeting of the Japan Society of Mechanical Engineers*, No.047-1 (2005-3), pp. 205-206.