

2012年度 卒業論文

野球における流体现象を考慮した
変化球の軌道計算手法の提案に関する研究

指導教員：渡辺 大地 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト
学籍番号 M0109104
加藤 聖章

2012年度 卒業論文概要

論文題目

野球における流体现象を考慮した
変化球の軌道計算手法の提案に関する研究

メディア学部

学籍番号：M0109104

氏名

加藤 聖章

**指導
教員**

渡辺 大地 講師

キーワード

変化球、空気力、ベルヌーイの定理、
揚力、抗力、風

回転して飛翔する球体に働く空気力について、スポーツ科学の分野では古くから大きな関心が寄せられてきた。この力を利用したものに、野球における変化球というものがあるが、そのメカニズムについて現在でも多くの研究者によって研究が行われ、ピッチングマシンによる計測データを基にした変化球の軌道解析や、ボールの運動方程式を用いて変化球の軌道計算のシミュレーションを行う研究もある。また、近年では、実在する様々な変化球について、より現実に近い表現をしている野球ゲームも複数存在している。しかし、そのような野球ゲームには、変化球の表現におけるわずかな問題があるように見受けられる。それは、現実には吹いている風の影響が考慮されていないように見えることである。現実世界では、プロ野球界でも存在するはずの風の影響がほとんど表現されていないのである。風の影響を考慮する場合、実測データを利用する方法と、軌道計算時に風による影響力を加算するという簡単な力学計算の方法があると考えられる。前者では、条件の異なる様々な風のデータを集めなくてはならず、制作に利用するには非効率であり、後者では、どのような変化球に対しても同じ影響力を見せてしまうため、変化球の特性を考えた表現ができず、リアルな表現を求める場合には不向きであると言える。

本研究は、風の影響も含めたボールに働く空気力を、ある程度簡単な流体計算から導き、それを基に変化球の軌道変化を表現するための計算手法を提案するものである。本手法ではボールの周りを流れる空気をパーティクルで表現しつつ、その速度やレイノルズ数によって、ボールに働く揚力、抗力を計算から導きだし、それらの力による横方向、縦方向への変化と球速の減少量を総合した軌道計算を行い、ビジュアルシミュレーションとして軌道の表現を行った。また、6種の変化球データ、ボールの初速度や回転数など、表現する変化球ごとに異なる条件を設定し、ボールに働く揚力の大きさや向き、抗力の大きさに違いが出ることを示した。さらに、風の影響について、本手法による計算結果と力学計算手法による計算結果の違いを示し、その結果、風の影響を考慮する場合に本手法を用いる利点を示した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	論文構成	4
第2章	提案手法	5
2.1	変化球の種類と条件の設定	5
2.2	ボールの回転と流体现象	9
2.3	ボールに働く揚力	10
2.3.1	ベルヌーイの定理	10
2.3.2	揚力の計算	11
2.4	ボールに働く抗力	13
2.4.1	抗力係数	14
2.4.2	抗力の計算	16
2.5	ボールの軌道変化	18
2.6	本手法による風の影響の考慮	19
第3章	検証と考察	21
3.1	実装結果	21
3.2	計算手法の検証	23
3.3	実行速度の検証	29
3.4	考察	31
第4章	まとめ	34
	謝辞	35
	参考文献	36

目次

1.1	変化球とボールの回転	2
2.1	投手から見た回転の向きと軸：ストレートの場合	6
2.2	投手から見た回転の向きと軸：スライダーの場合	7
2.3	投手から見た回転の向きと軸：カーブの場合	7
2.4	投手から見た回転の向きと軸：シュートの場合	8
2.5	投手から見た回転の向きと軸：チェンジアップの場合	8
2.6	投手から見た回転の向きと軸：ジャイロボールの場合	9
2.7	格子と注目する領域	12
2.8	ジャイロボールにおける抗力係数とレイノルズ数の関係	15
2.9	ボールに対する追い風	19
2.10	ボールに対する横風	20
3.1	空気のパーティクルと変化球の軌道変化	22
3.2	空気のパーティクルと変化球の軌道変化	22
3.3	横方向への変化	23
3.4	縦方向への変化	24
3.5	球速の変化	24
3.6	本手法の横方向への変化（向かい風）	25
3.7	力学計算手法の横方向への変化（向かい風）	25
3.8	本手法の縦方向への変化（向かい風）	25
3.9	力学計算手法の縦方向への変化（向かい風）	25
3.10	本手法の球速の変化（向かい風）	25
3.11	力学計算手法の球速の変化（向かい風）	25
3.12	力学計算手法改の横方向への変化（向かい風）	26
3.13	力学計算手法改の縦方向への変化（向かい風）	26
3.14	力学計算手法改の球速の変化（向かい風）	27
3.15	無風と比較した横方向の大きさの違い（向かい風）	27
3.16	無風と比較した縦方向の大きさの違い（向かい風）	28
3.17	無風と比較した球速の大きさの違い（向かい風）	28
3.18	本手法の横方向への変化（右方向横風）	29

3.19 力学計算手法の横方向への変化（右方向横風）	29
3.20 無風と比較した横方向への大きさの違い（向かい風）	29

表 目 次

2.1	流体密度と粘性係数	15
3.1	実行環境	30
3.2	球種別の描画速度	30
3.3	風向き別の描画速度	30
3.4	風速別の描画速度	31

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景

回転して飛翔する球体に働く空気力について、スポーツ科学の分野では古くから大きな関心が寄せられてきた。この空気力は、飛翔する球体の軌道を様々な方向に変化させる力となる。サッカーやゴルフ、野球といったボールを扱うスポーツでは、空気力によりボールの軌道が変化する現象を利用して、意図的に狙ったコースに飛ばしたり、攻撃側と守備側の間で絶妙な駆け引きを生んでいる。その中でも、野球というスポーツでは、この現象を利用した様々な変化球を使用している。野球ボールに回転を与えることで、様々な変化球が生まれる [1]。投手は打者に簡単には打たせないために、この変化球を最大限に駆使している。同じ球種ばかり使用すると、打者は徐々に目が慣れていき次第に打てるようになる。

図 1.1 は、ボールの回転によって変化球が生まれることを簡単に示したものである。

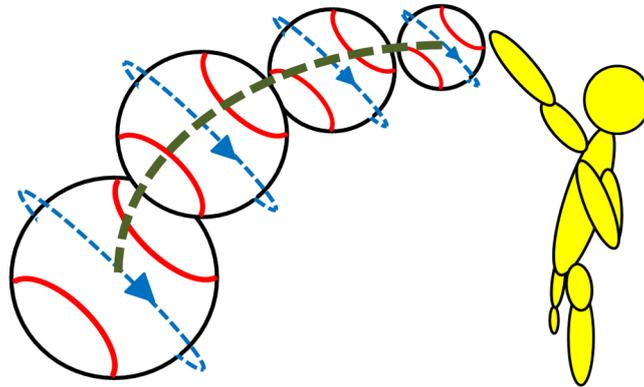


図 1.1: 変化球とボールの回転

ボールを扱うスポーツにおいて、ボールに働く空気力について数多くの研究がなされてきた。藤村、趙ら [2] による回転するサッカーボールに働く空気力の研究や、鳴尾、溝田ら [3] によるゴルフボールの空気力測定と 3 次元飛翔軌道解析の研究など、スポーツの分野も様々である。特に野球における変化球のメカニズムについては、未だに全て解析されておらず、現在でも多くの研究が行われている。宮崎、姫野ら [4][5] の研究では、野球ボールに働く空気力の測定や、ボールがバックスピンしながら進む時に発生するマグナス力など、野球ボールに働く空気力に関する様々な現象を、実験により検証した。マグナス力とは、一様流中にある回転する球体に発生する揚力である。カーブやスライダーなどの、ボールに回転をつけることで生まれる代表的な変化球は、そのほとんどがマグナス力により軌道変化する。坂本、長谷川ら [6][7] は、従来日本のプロ野球で使用してきたボールおよび近年規格統一したボール、アメリカのメジャーリーグで使用しているボールに関して、風洞実験による空力特性の解析を行った。また、小関、子安ら [8] の投球したボールの画像解析から挙動を検討する研究や、南 [9] による変化球の軌道変化の数理的解析など、変化球の解析をする様々な研究がある。さらに、変化球に関する研究には、ボールの周りを流れる空気の流れを可視化する研究もある。姫野ら [10] はジャイロボールにおける流体解析の実験を行い、その流体の様子を可視化するとともに解析を行った。また、青木 [11] はゴルフボールと野球ボールの飛

翔特性を解析し、空気の流れを可視化する研究を行った。しかし彼らの研究では、メカニズムを正確に解析するために彼ら自身が設定したコストで研究を行っていることで、その研究過程を他人が再現することが難しくなっていたり、飛翔するボールの状態から解析していることで、可視化した空気の流れに利用する時の汎用性がないという問題がある。

また、近年では現実に近い変化球の表現を行う野球ゲームが複数存在しており、変化球の球種ごとに軌道変化の違いを表現している。また、野球ゲームには実在するプロ野球選手が登場する作品が多い。特に投手に関しては、それぞれの選手によって設定してある変化球の球種や変化レベルは様々である。ユーザーにとって、どの選手でどのような変化球を駆使するか、プロ野球の世界を感じながら遊ぶという楽しさを演出できている。

しかしながら、野球ゲームにおける変化球の表現にはわずかに問題がある。それは、変化球が投げられ捕手に到達するまでに、現実世界で吹いているはずの風の影響を全く考慮していないことである。プロ野球の試合では、屋内球場と屋外球場の両方を利用しているが、屋外球場を利用する際、試合中に風が吹いていることが多い。球場の立地条件によっては、一時的に風速 10m を超える風が吹く試合もある。試合中に強い風が吹いている場合、打者が打った打球に影響が出るだけでなく、投手が投げる変化球にも大きな影響が出る。プロ野球選手の中には、風の影響を計算に入れて変化球を投じる選手もいる。このように実際には、変化球に対しても風の影響が存在するが、野球ゲームでは球場の屋内屋外に関わらず、変化球に対して風の影響を考慮していない。通常、風が物体に与える力をシミュレーションとして表現する場合は、流体力学を用いた複雑な計算式が必要となる。ゲーム制作においては、計算の効率や手間を考えた場合、複雑な計算式を利用する方法は取りづらい。仮に、流体力学を全く用いずに風の影響を考慮しようと考えた場合、過去の研究や制作の予算内で行った変化球の実測に基づく軌道解析データを利用する方法や、元々組み立ててある変化球の軌道計算式に風の影響を力として加算する簡単な力学計算手法が考えられる。しかし、前者の方法では、通常時

の変化球に加え、様々な条件の風が吹いている時の計測データも必要となるため、時間がかかる上にデータの量が膨大になる恐れがあり、ゲームを制作するうえで効率が悪い。一方、後者の方法は、風向きと風速を考えて軌道計算式に風の力を加えるだけという簡単な処理であるが、全ての変化球に対してその影響力が全く同じになってしまう。実際の変化球では、その球種によって風から受ける影響力も異なる。しかしこの方法では変化球の球種に関わらず、影響力や影響の仕方まで全て等しくなってしまうことが予想できる。近年の野球ゲームにおけるリアルな表現を追求する傾向を考えると、この方法は不向きである。

そこで本研究では、ある程度簡易化した流体計算を利用し、風の影響を簡易的に考慮できる変化球の軌道計算手法を提案する。本手法では、まず、ボールの周りを流れる空気をパーティクルで表現する。次にパーティクルの速度やレイノルズ数によって、ボールに働く揚力、抗力を計算から導き出す。導いた揚力、抗力から横方向、縦方向への変化と球速の変化を計算し、変化球の軌道変化を表現した。また、表現する変化球として6種類を挙げ、変化球データ、ボールの初速度や回転数など、表現する変化球ごとに異なる条件を設定し、ボールに働く揚力の大きさや向き、抗力の大きさに違いが出ることを示した。さらに、風の影響について、本研究の計算手法と力学計算手法の結果を比較し、その計算結果の違いを示すことで、風の影響を考慮する場合に本手法の方が有用であることを示した。

1.2 論文構成

本論文は全4章で構成する。第2章で本研究の提案手法について述べ、第3章ではその手法に基づいた結果の検証とその考察を行う。最後に第4章で研究のまとめと今後の展望について述べる。

第 2 章

提案手法

本章では、本研究で提案する流体现象を用いた変化球の表現方法について述べる。まず、2.1 節で表現する変化球の種類とその変化球の条件を設定する。2.2 節では、前節で挙げたそれぞれの変化球について、ボールの回転とボールの周りを流れる空気の表現方法について述べる。2.3 節では、それぞれの変化球において発生する揚力とその計算手法について述べる。2.4 節では、それぞれの変化球において発生する抗力とその計算手法について述べる。2.5 節では、前節までの内容を用いて、軌道変化の計算手法について述べる。最後に 2.6 節で、本手法の風の考慮について述べる。

2.1 変化球の種類と条件の設定

近年の野球界で用いている変化球の種類は様々で、投球する選手によってボールの回転角度や球速などは多種多様である。そもそも変化球とは、空気中を進行するボールに重力以外の力が働くことにより軌道が変化するものを指す [12]。一般的に変化球に分類されていないストレートという球種があるが、重力以外に重力と逆方向に揚力という力が働いていることで真っ直ぐな軌道になる。このことは変化球の要件を満たしていると言えるので、本研究では変化球とする。

本研究では、表現する変化球の種類を 6 種類挙げる。また本手法で利用する変化球のパラメータとして、回転軸や回転の向きから決定する変化球の球種データ、

ボールの初速度、回転数をあらかじめ設定し、それらの条件を設定した場合の変化球の軌道変化を表現する。本研究で選択した変化球の種類と条件は次の通りである。以下で示す選択した変化球の条件や軌道変化は、全て右投げの選手の投球を想定したものとする。ただし、ボールの初速度に関して、野球では時速での表示が一般であるが、本研究ではシミュレートの関係上、秒速に換算して計算する。また、図 2.1, 図 2.2, 図 2.3, 図 2.4, 図 2.5, 図 2.6 は、投球する変化球について、回転軸と回転の向きを投手側から見たものを示している。回転軸の角度に関しては、ストレートの回転軸を 0 度とし、そこからの回転角度を示している。ジャイロボールの回転軸については、回転軸を進行方向へ 90 度回転させたものである。

1. ストレート

- ボールの初速度:時速 160km/h
- 回転数:毎秒 40 回転

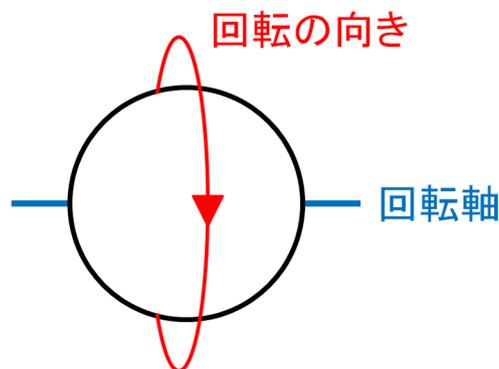


図 2.1: 投手から見た回転の向きと軸：ストレートの場合

2. スライダー

- ボールの初速度:時速 140km/h
- 回転数:毎秒 35 回転

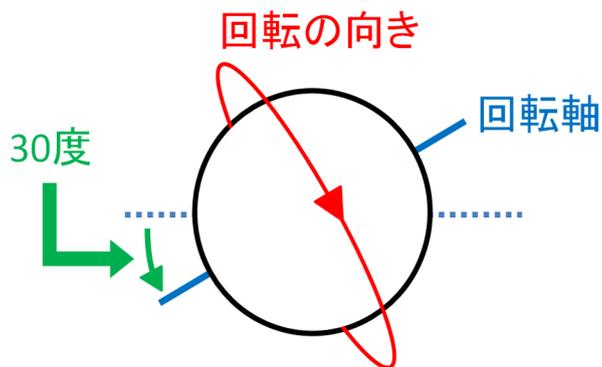


図 2.2: 投手から見た回転の向きと軸：スライダーの場合

3. カーブ

- ボールの初速度: 時速 120km/h
- 回転数: 毎秒 35 回転

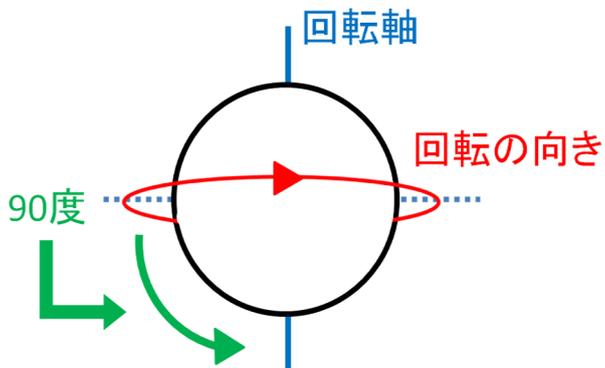


図 2.3: 投手から見た回転の向きと軸：カーブの場合

4. シュート

- ボールの初速度: 時速 140km/h
- 回転数: 毎秒 35 回転

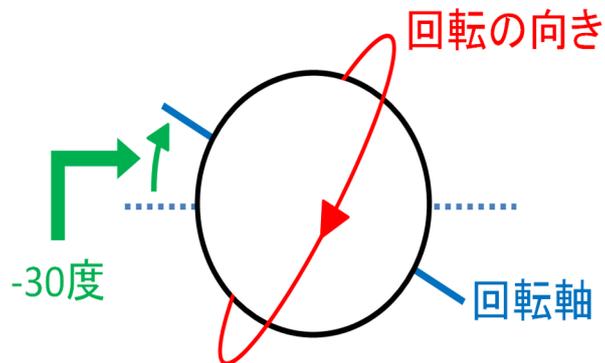


図 2.4: 投手から見た回転の向きと軸：シュートの場合

5. チェンジアップ

- ボールの初速度: 時速 120km/h
- 回転数: 毎秒 25 回転

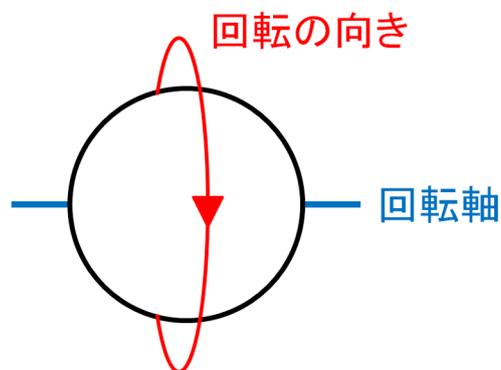


図 2.5: 投手から見た回転の向きと軸：チェンジアップの場合

6. ジャイロボール

- ボールの初速度: 時速 150km/h
- 回転数: 毎秒 40 回転

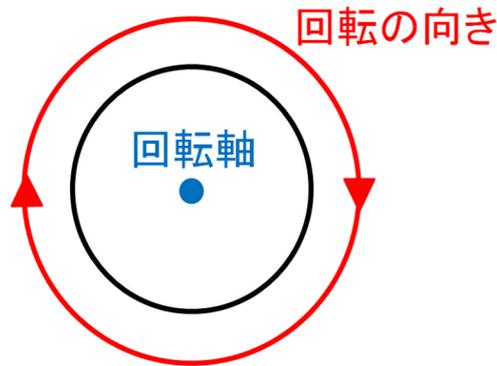


図 2.6: 投手から見た回転の向きと軸：ジャイロボールの場合

2.2 ボールの回転と流体现象

ボールが空気中を進む時、ボールは周りを流れる空気から大きく2つの力、揚力と抗力を受けている。ボールの周りの空気の流れが変わることで、力の大きさやかかる方向は大きく変化する。これらの力がボールに影響を与えることで、様々な軌道の変化球が生まれる。本研究では、空気の流れの表現において軌道計算に利用するデータなどを求めるため、パーティクルによって擬似的に可視化した空気の流れと変化球の軌道変化を同時に表示する。

本研究のパーティクルの表現は、ボールから見た空気の流れを再現するものとなっている。通常、風が吹いていない場合は空気の流れる速さは限りなく0である。しかしボールを中心に見た場合、ボールの周りを空気が流れているような表現として可視化できる。そのためパーティクルの初速度は、ボールの球速の初速度と空気の速度の相対速度を利用する。また、空気の流れを表すパーティクルがボールを避けて進む現象を以下の偏微分方程式 (2.1)[13] を用いて表現する。

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{P} = \mathbf{V} + \frac{R^3}{2} \left(\frac{\mathbf{V}}{r^3} - \frac{3\mathbf{V} \cdot \mathbf{P}}{r^5} \mathbf{P} \right) \quad (2.1)$$

ここで、 \mathbf{V} はパーティクルの速度ベクトル、 \mathbf{P} はパーティクルの位置ベクトル、 R はボールの半径とする。 r はボールの中心とパーティクルの距離であり、ボールの

中心が原点にあるため、 $r = |\mathbf{P}|$ で求められる。

また、ボールが回転することで、その周りの空気の流れはボールの回転につられて変化する。これは、空気に粘度があるため起きる現象である。粘度とは物質が持つ粘りの度合いのことで、この粘度が高いほど、接触した物質間に働く力が大きくなる。ボールと空気との関係の場合、空気に粘度があるために、ボールの回転運動に伴い、空気の流れも変化する。本研究では、ボールの回転から生まれる空気の速度ベクトルをボールの直径や回転数を利用して求め、 \mathbf{V}_r とし、元々の空気の速度ベクトル \mathbf{V} に加えることでボールが回転することで空気のパーティクルがそれにつられる動きを再現した。

2.3 ボールに働く揚力

揚力とは、物体が流体中にある時に流体から受ける力であり、流体の流れる方向に対して垂直方向に働く力のことである [14]。垂直方向というのは、流れに対して上向きとは限らず、下を向いたり、左右を向く場合もある。揚力が大きければ大きいほど、同時間で物体が揚力の方向へ移動する量も大きくなる。また、この力は球体が一様流中にある時に限り、マグナス力とも呼ばれる。回転しながら飛ぶ球体は、このマグナス力を空気から受けて軌道が変化する。変化球は、この力から大きな影響を受けており、変化球のメカニズムとして重要な要素となっている。例えば、進行方向に対しバックスピンの回転しながら進んでいる場合、ボールには上向きの力が働いている。この力で重力を部分的に打ち消し、真っ直ぐ飛ぶように見えるわけである [15]。

2.3.1 ベルヌーイの定理

本研究では、揚力を求める方法としてベルヌーイの定理を用いる。ベルヌーイの定理とは、流体力学において流体の速度、圧力、密度の関係を表す定理であり、

その関係性は次の式 (2.2) で表される。

$$\frac{1}{2}v^2 + \frac{p}{\rho} = \text{一定} \quad (2.2)$$

ただし、 v は流体速度、 ρ は流体密度、 p は流体の圧力である。

本研究では、式 (2.2) の右辺の一定とする値を、気温 20℃の標準気圧を想定して求めることとする。また、流体密度 ρ に関して、本研究では空気を非圧縮性流体と考え、空気がどの領域にあっても、圧縮による密度の変化は起きないものとする。

ボールが回転することで周りの空気の流れはそれに伴った動きをする。ボールの回転に伴った動きをする時、ボールの周りでは、空気の流れが速くなる部分と遅くなる部分ができる。その時、ベルヌーイの定理から、流れが速い部分では圧力が小さくなり、遅い部分では圧力が大きくなる。圧力の大きさに変化が生じると、圧力の大きい方から小さい方へ物体を押し力が働く。本研究では、後述する揚力計算時に求めた圧力の差をボールに影響する揚力と考え、大きさと向きを軌道計算に用いることとする。

2.3.2 揚力の計算

本研究では、次の手順で揚力を求めることとする。

1. 空気の流れが速くなる部分と遅くなる部分の平均速度を求める
2. 求めた 2 つの平均速度を用いてベルヌーイの定理からそれぞれにおける圧力を求める
3. 求めた 2 つの圧力と圧力が加わるボールの表面積との積をそれぞれ求め、2 つの積の差を揚力とする

まず、空気の流れが速くなる部分と遅くなる部分でのそれぞれの平均速度を求める。ボールの回転を横から二次元的に見て、ボールとその周りを縦横 15 マスずつ

つの格子状に区切る。そして、流れにおいて速い部分と遅い部分が顕著に表れるに注目し、その部分でのパーティクルの速度の平均値を求める。この平均速度をそれぞれ v_1 、 v_2 とする。図 2.7 は、ボールとその周りを格子状に区切り、速度の変位が顕著に表れる部分を赤い格子で示したものである。

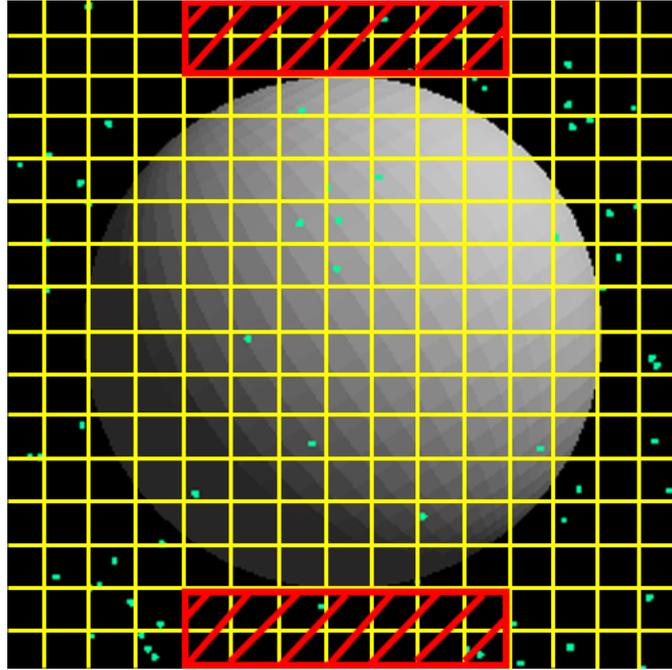


図 2.7: 格子と注目する領域

次に、求めた平均速度 v_1 、 v_2 を用いてベルヌーイの定理から圧力を求める。ここで、式 (2.2) で示した、右辺の一定の値を標準気圧から求める。標準気圧を p_0 、その時の空気の流速を v_0 とすると、標準気圧 p_0 におけるベルヌーイの定理式は $\frac{1}{2}v_0^2 + \frac{p_0}{\rho}$ と表せる。標準気圧における空気の速度を 0 と想定すると、式 (2.2) の右辺の値を表す式は $\frac{p_0}{\rho}$ とできる。これを踏まえた、パーティクルの速度が v_1 におけるベルヌーイの定理式は次の式 (2.3) である。

$$\frac{1}{2}v_1^2 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{p_0}{\rho} \quad (2.3)$$

同様にパーティクルの速度が v_2 におけるベルヌーイの定理式は次の式 (2.4) である。

$$\frac{1}{2}v_2^2 + \frac{p_2}{\rho} = \frac{p_0}{\rho} \quad (2.4)$$

この時流体密度 ρ は気温 20 °C の標準気圧における密度として計算する。よって、式 (2.3)、式 (2.4) から、それぞれの圧力 p_1, p_2 が求められる。

次に、求めた圧力 p_1, p_2 から揚力を求める。圧力の差からボールに働く揚力を求めるためには、圧力が加わるボールの範囲を考慮しなければならない。そこで、圧力が加わるボールの範囲として流体による力を受ける面の面積を求める。ボールの直径を d として、 $d/2$ を直径とするボールの表面に圧力が加わると仮定する。その範囲の面積を A とすると、 A を求める式は次の式 (2.5) になる。

$$A = \frac{d^2}{16}\pi \quad (2.5)$$

上の式から圧力が加わる面の面積が求められるので、求めた面積 A と圧力 p_1, p_2 のそれぞれの積を求める。求めた積をそれぞれ f_1, f_2 とし、 $f_1 - f_2$ を求め、その値を揚力とする。

以上の手法で求めた値を揚力として軌道変化に用いる。

2.4 ボールに働く抗力

抗力とは、物体が流体中にある時、流体から受ける力の一つで、流れの速度方向とは逆向きに働く力のことである。流体中を物体が進んでいる時、この力が大きいほど、物体の進行速度が遅くなる。変化球が抗力を受けている時、ボールの進行速度はだんだんと遅くなるが、それによってボールに働く揚力も小さくなる。ボールにかかる重力に変化はないため、仮に揚力が上向きであった場合、揚力が小さくなることで、重力による下向きの力の方が大きくなり、進行するほどより落下するようになる。抗力が大きいほど、この現象は顕著になっていく。

2.4.1 抗力係数

抗力係数とは、抗力を理論的に求める時に利用する無次元数であり、抗力を D 、抗力係数を C_D とすると、次の式 (2.6)[16] で表せる。

$$D = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_D \quad (2.6)$$

ただし、 S は流体の流れを受けるボールの面の面積である。

野球の変化球において、回転によって揚力が発生するような変化球では、抗力係数は一定値であることが多い。しかし、宮﨑、姫野ら [17] の研究から、ジャイロボールにおいて、レイノルズ数が増加すると抗力係数が減少するドラッグクライシスという現象が起こることがわかっている。ジャイロボールとは、回転軸が進行方向に向かっていて、ライフルの弾丸のような回転をしながら進む変化球である。ジャイロボールのレイノルズ数が増加するほど、ボールは空気抵抗を受けにくくなり、抗力の発生による球速の減少を小さくすることができる。図 2.8 は宮﨑、姫野らの研究においてドラッグクライシス現象を捉えた実験結果である。ここで SP とは、スピンパラメータというボールの回転数に関する無次元数であり、 $SP \approx 0.23$ はプロ野球投手が投げるボールの領域である。ただし、本研究では、スピンパラメータというデータは用いない。

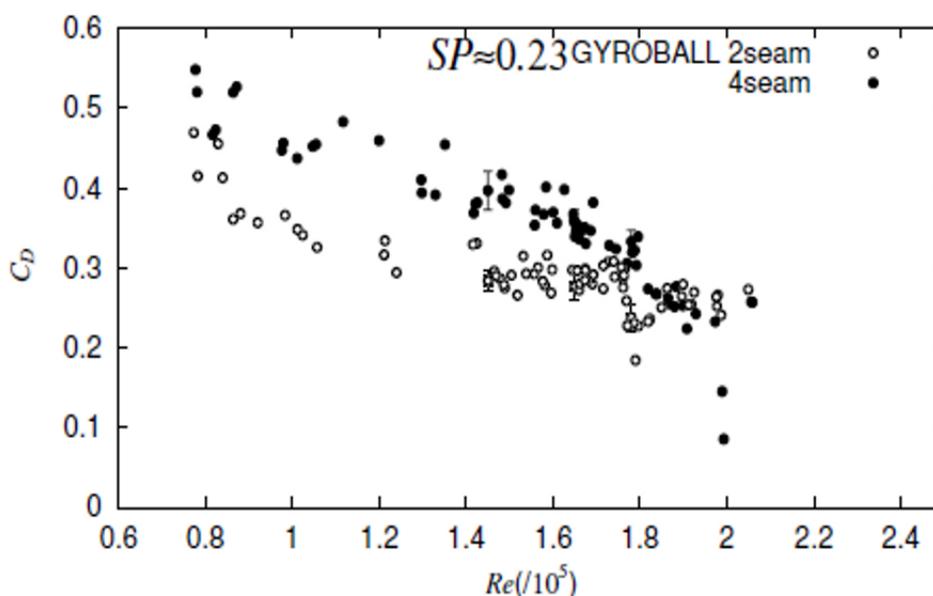


図 2.8: ジャイロボールにおける抗力係数とレイノルズ数の関係

ここでレイノルズ数とは、流体密度、流体速度、空気の粘度、代表長さによって求められる無次元数である。ボールのような球体の場合、代表長さはボールの直径として扱える。レイノルズ数を Re とすると、この時の Re は次の式 (2.7) で表せる。

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2.7)$$

ただし、 v は流体速度、 d はボールの直径、 μ は空気の粘性係数である。また、本研究で用いる流体密度 ρ 、粘性係数 μ は全て標準気圧における気温 20℃ の場合を想定している。この時の ρ 、 μ [18] は次の表 2.1 の通りである。

流体密度 ρ (kg/m^3)	1.205
粘性係数 μ ($Pa \cdot s$)	1.822×10^{-5}

表 2.1: 流体密度と粘性係数

ただし、粘性係数 μ に関して、そのまま利用してしまうとレイノルズ数が大変大きな値となる。レイノルズ数が大きくなりすぎてしまうと、レイノルズ数が影響する他の計算結果にも大きな誤差が出るため、本手法で利用する際には 10^{-5} は考えないものとする。

2.4.2 抗力の計算

通常、抗力を理論的に計算するのは大変難しく、実験から抗力を導くのが一般である。しかし本研究では、ジャイロボールにおけるレイノルズ数と抗力係数の関係を考慮した抗力と、それ以外の抗力係数が一定である変化球に働く抗力について、抗力から影響を受けた変化球の挙動を表現するための値を計算から導く。

本研究では、抗力の求めるために、以下の手順を行う。

1. 変化球のレイノルズ数を求める
2. 求めたレイノルズ数を用いて、抗力係数を求める
3. 求めた抗力係数を用いて、公式から抗力を求める

ただし、ジャイロボール以外の変化球に関して、レイノルズ数に関係なく抗力係数は一定と想定する。その理由は、回転軸が空気の流れに対して垂直である場合、どの方向を向いていても抗力係数は大きく変わらないためである。よって、手順1と手順2は省略し、あらかじめ抗力係数を設定したうえで、手順3を行う。

まず、ジャイロボールのレイノルズ数を求める。ジャイロボールのレイノルズ数を Re_g として、式(2.7)から Re_g を求める。

次に求めた Re_g を用いて、抗力係数を求める。2.4.1節でも述べたように、宮崎、姫野らの研究からジャイロボールにおいてドラッグクライシス現象が起きることが分かっている。本研究で想定する球速の領域は、プロ野球選手の投球する球速の領域であるので、球速領域はおよそ100km/h~160km/hとなる。本研究のジャイロボールはフォーシームジャイロボールを想定している。フォーシームジャイ

ロボール [19] とは、一般的な直球に近い握りで投げられたもので、打者から見てボールの縫い目などの模様が左右対称になって見えるように回転しているジャイロボールである。図 2.8 から、100km/h のレイノルズ数の時、抗力係数は約 0.5 をとり、160km/h のレイノルズ数の時、抗力係数は約 0.17 をとることがわかる。以上を考慮したうえで、ジャイロボールの抗力係数を C_{Dg} として、求めたレイノルズ数 Re_g と抗力係数 C_{Dg} の関係を、次の式 (2.8) で表す。

$$C_{Dg} = 0.5 - \frac{Re_g}{6} \quad (2.8)$$

ここで、ジャイロボール以外の変化球の抗力係数を設定する。回転するボールが一様流中を進行する時、回転軸が空気の流れに対して垂直である場合、どの方向を向いていても抗力係数は大きく変わらない。本研究で取り上げている変化球は、ジャイロボール以外、回転軸が空気の流れに対して垂直であることを想定しているので、抗力係数は全て統一できる。宮寄、姫野らの研究から、バックスピンする野球ボールの抗力係数は約 0.38 であることがわかるので、本研究の想定を考慮すると、ジャイロボール以外の変化球の抗力係数を C_{Da} として、 $C_{Da} = 0.38$ とできる。

次に求めた抗力係数 C_{Dg} 、 C_{Da} を利用し、2.4.1 節で示した式 (2.6) を用いて抗力を求める。ジャイロボールの抗力を D_g 、速度を V_g 、それ以外の変化球の抗力を D_a 、速度を V_a とする。また、流体の流れを受けるボールの面の面積 S を、揚力において圧力を受けるボールの面の面積と同じであると仮定すると、 $S = A$ とすることができる。以上を考慮すると、それぞれにおける抗力の式は次の式 (2.9),(2.10) で表せる。

$$D_g = \frac{1}{2}\rho V_g^2 AC_{Dg} \quad (2.9)$$

$$D_a = \frac{1}{2}\rho V_a^2 AC_{Da} \quad (2.10)$$

以上の手法で求めた値を抗力とし、変化球の軌道変化に用いる。

2.5 ボールの軌道変化

前節までで、ボールに働く揚力、抗力について、理論と計算手法を述べてきた。本節ではそれらを用いて、変化球の軌道変化を計算する手法を提示する。

まずは揚力を用いて、変化球の縦、横方向の軌道変化について計算する。縦方向の変化については、揚力による上向きに働く力と、重力による下向きの力を考慮する。また、横方向の変化については、揚力による横方向に働く力のみを考慮する。変化球に働く揚力の向きは、その回転軸の角度や回転の向きにより異なる。例えば、バックスピンするボールに働く揚力の向きは上向きであるが、これが逆にトップスピンである場合、働く揚力の向きは下向きとなる。同様にボールがサイドスピンしている場合であれば、揚力の向きは左右に向くことになる。求めた揚力を F_M 、重力を F_G 、横方向への変化量を X 、縦方向への変化量を Y として、横方向、縦方向へのそれぞれの変化量を、次の式 (2.11),(2.12) で表す。

$$X = \frac{F_M \sin \theta}{2m} t^2 \quad (t = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2.11)$$

$$Y = 1.8 + \frac{F_M \cos \theta}{2m} t^2 - \frac{g}{2} t^2 \quad (t = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2.12)$$

ただし、 θ は水平方向を 0 度とした時のボールの回転軸の角度、 m はボールの質量、 g は重力加速度、 t は時間である。また、縦方向への変化量 Y に関して、上手投げのプロ野球選手がボールを投球するときの高さを 1.8m と想定しているため、揚力と重力による縦方向の変化量に 1.8m を加えた値を Y としている。

次に抗力を用いて、変化球の速度と進行距離の変異を計算する。ボールの速度は、抗力が働くことにより、時間に比例して減少する。つまり、減少後のジャイロボールの速度を V'_{Dg} 、同じくそれ以外の変化球の速度を V'_{Da} とすると、求めた抗力 D_g と D_a から次の式 (2.13),(2.14) となる。

$$V'_{Dg} = V_{Dg} - \frac{D_g}{m} t \quad (t = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2.13)$$

$$V'_{Da} = V_{Da} - \frac{D_a}{m} t \quad (t = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2.14)$$

また、変化球の進行距離について、ジャイロボールを Z_g 、それ以外の変化球を Z_a とすると、次の式 (2.15),(2.16) で表せる。

$$Z_g = V_{Dg}t - \frac{D_g}{2m}t^2 \quad (t = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2.15)$$

$$Z_a = V_{Da}t - \frac{D_a}{2m}t^2 \quad (t = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2.16)$$

ただし、実際のプロ野球のルールでは、ピッチャーマウンドからホームベースまでの距離を 18.44m と定めている。よって、 $Z_g \leq 18.44$ 、 $Z_a \leq 18.44$ である。

以上の方法で求めた横方向、縦方向への変化量、進行距離によって変化球を表現する。

2.6 本手法による風の影響の考慮

本節では本手法における風の影響を考慮する方法について述べる。

風の影響を考慮する際、本手法では、風の世界ベクトルを利用する。例えば、ボールに対して追い風として流れる風を想定する場合、風の世界ベクトルは進行方向に対して正方向を向く。図 2.9 はその様子を左側から見たものである。

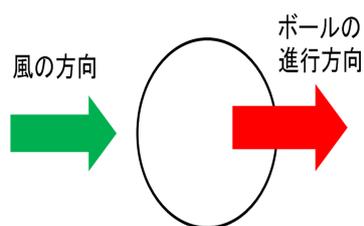


図 2.9: ボールに対する追い風

この時、風の世界の大きさを V_W とすると、 V_W を 2.3 節で述べたベルヌーイの定理で用いるパーティクルの平均速度と、2.4 節で述べた抗力の式 (2.9)、または式 (2.10) におけるパーティクルの速度から減算する。風速を減算する理由は、パーティクルの速度をボールの初速度と空気の速度の相対速度から求めているためで

ある。空気の速度ベクトルがボールの速度ベクトルと同じ方向に流れると、相対速度は低下する。ただし、これは追い風となる時の考慮である。向かい風となる方向に速度ベクトルが向いた時は、追い風の速度を正の値と想定して、向かい風の速度を負の値と想定する。その想定の下、同じ手順を行うようにする。

ボールに対して横方向の風が吹いていた場合は、処理が異なる。例えば、ボールを捕手側から見た時にボールに対して右方向に風が流れる場合を想定すると、風の速度ベクトルはボールの横方向の軌道変化に対して正方向を向く。図 2.10 はその様子を示したものである。

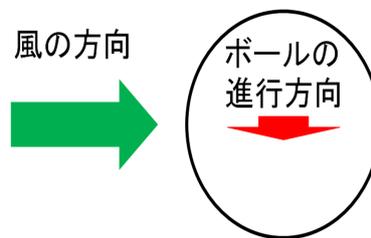


図 2.10: ボールに対する横風

この時、ボールは風から横方向へ空気抵抗を受けるので、 V_W と 2.4 節で述べた抗力の式 (2.10) を利用して、風によって発生する抗力を求める。求めた抗力を、2.5 節で述べた X の軌道計算式に加えることで、風の速度ベクトル方向への影響を考慮する。速度ベクトルが逆方向を向いていた場合、抗力を負の値にすればよい。ここで、横風における風速をパーティクルの平均速度に加えない。その理由は、パーティクルの平均速度はボールの進行方向に対する空気の流れにおける平均速度を利用しているためである。横方向の風の時には、ボールの進行方向に対する空気の流れには影響がほとんどないため、本研究では加える必要がないと判断した。

本手法では以上の方法を用いて、風の影響を考慮する。

第 3 章

検証と考察

本章では、第2章で述べた変化球の軌道計算手法について、その実装結果を示し、検証と考察を行う。また、本手法による変化球の軌道変化をビジュアルシミュレーションで表現するために3DグラフィックツールキットであるFine Kernel ToolKit System[20]を用いた。

3.1 実装結果

実装結果として、回転するボールの周りを流れる流体をパーティクルで表現したものと変化球の軌道変化の様子をマルチウィンドウで表示したものを示す。図3.1、図3.2は、その表現の様子を表したものである。

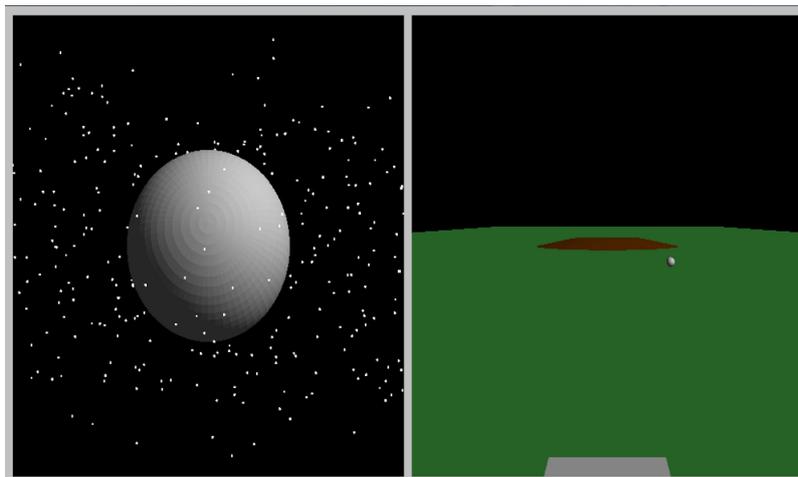


図 3.1: 空気のパーティクルと変化球の軌道変化

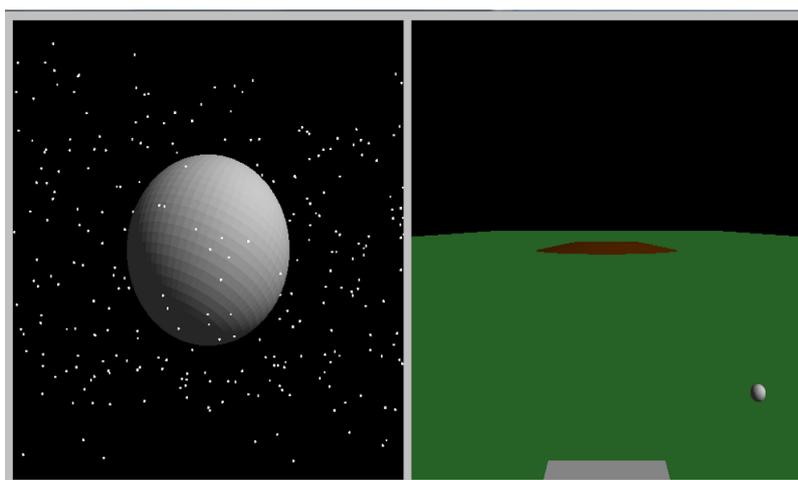


図 3.2: 空気のパーティクルと変化球の軌道変化

今回の実装では、パーティクルと軌道変化は同期しており、1つの変化球の軌道変化に対応する空気の流れを表示している。設定した6種類の変化球を、それぞれキーボードの1キーから6キーに対応させ、押したキーに対応する変化球を表示するようになっている。また、パーティクルによる空気の可視化の画面では、カメラを回転する機能を実装し、角度を変えて流れの様子を見ることができるよう

にした。

3.2 計算手法の検証

本節では、本研究の計算手法の有用性を検証する。風の影響について、向かい風と右方向横風に着目する。本手法を用いた場合と力学計算手法を用いた場合の軌道計算の結果の違いを示し、結果についての考察を行う。今回の検証では、全ての変化球において、球速の初速度を 44.4m/s とし、各方向の風について風速 10m を想定して行った。また、本手法と比較する力学計算手法について、風速を V_W 、時間を t 、空気抵抗係数を C_W 、風力を W とし、 W を次の式 (3.1) によって決定し、本手法における風が無風だった場合の軌道計算式に加えるものとする。

$$W = C_W V_W t \quad (3.1)$$

ここで、空気抵抗係数は 0.008 が定説とされているので、これを採用することとする。

最初に本手法による無風の計算結果について、横方向の変化を図 3.3、縦方向の変化を図 3.4、球速の変化を図 3.5 でそれぞれ示す。

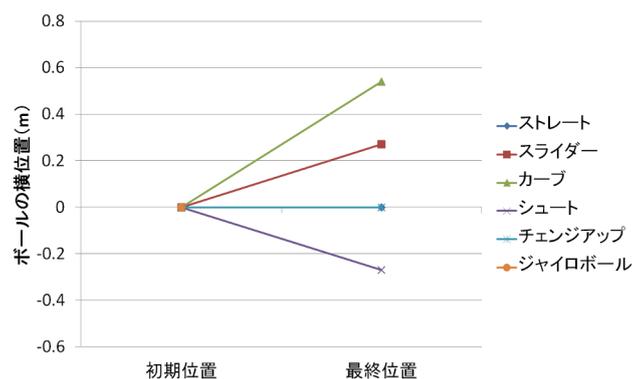


図 3.3: 横方向への変化

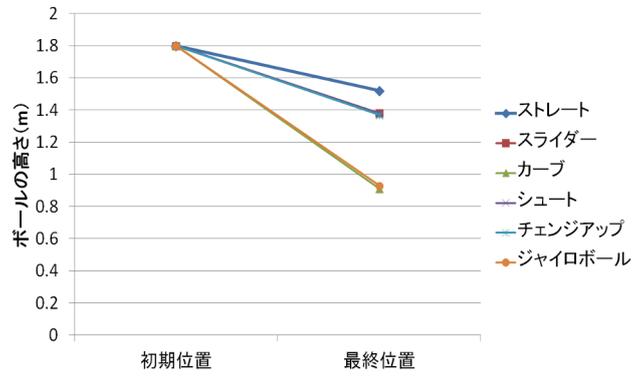


図 3.4: 縦方向への変化

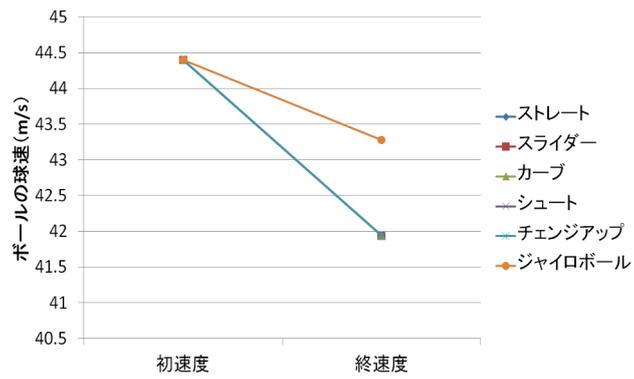


図 3.5: 球速の変化

次に風の影響について、向かい風を考慮した時の結果を示す。図 3.6、図 3.7 は横方向、3.8、図 3.9 は縦方向、3.10、図 3.11 は球速についてそれぞれ本手法と力学計算手法の計算結果を示している。

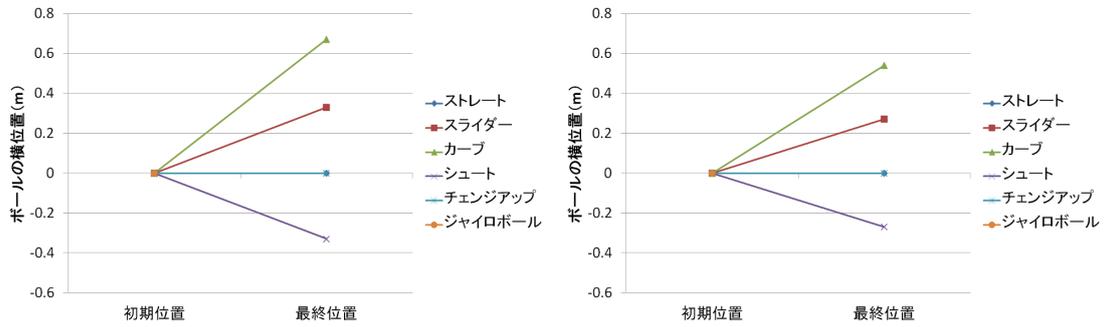


図 3.6: 本手法の横方向への変化 (向かい風) 図 3.7: 力学計算手法の横方向への変化 (向かい風)

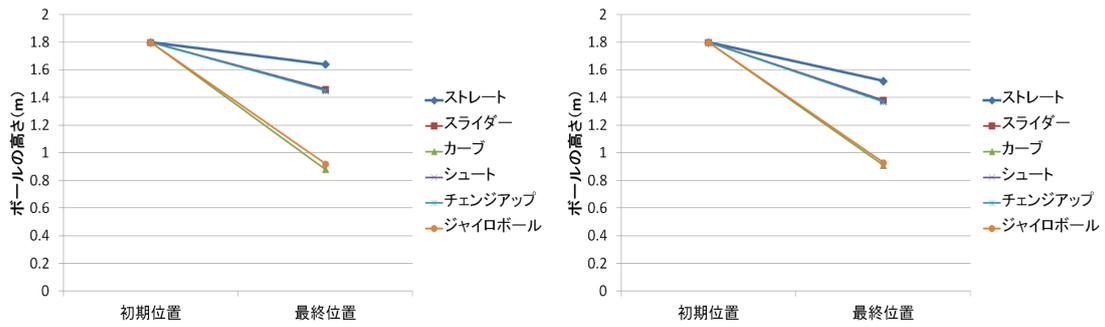


図 3.8: 本手法の縦方向への変化 (向かい風) 図 3.9: 力学計算手法の縦方向への変化 (向かい風)

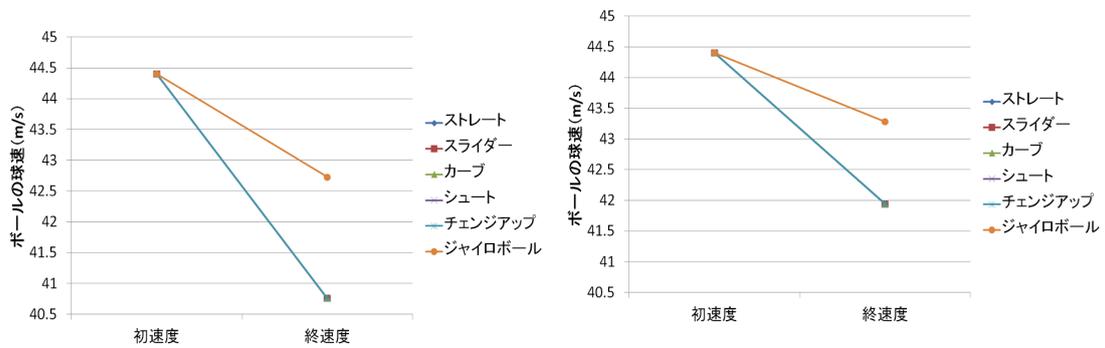


図 3.10: 本手法の球速の変化 (向かい風) 図 3.11: 力学計算手法の球速の変化 (向かい風)

力学計算手法の計算結果について、無風状態と全く変化のない結果となった。原因は、力学計算手法として想定した空気抵抗係数 C_W が小さいために、影響力が極端に小さくなったためと考えられる。そこで、力学計算手法による風の影響を測るために、空気抵抗係数 C_W を 10 倍の 0.08 に上げて、再び計算を行った。計算結果を表すのが、図 3.12、図 3.13、図 3.14 である。

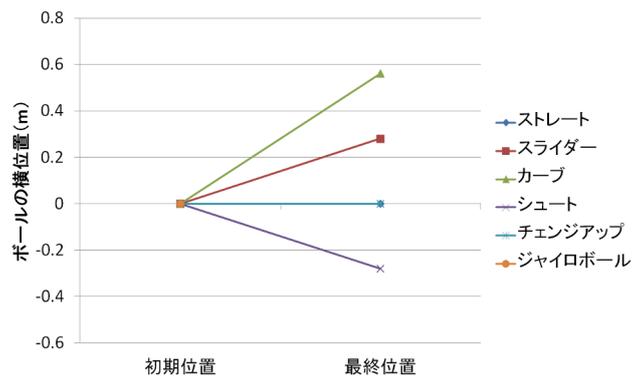


図 3.12: 力学計算手法改の横方向への変化 (向かい風)

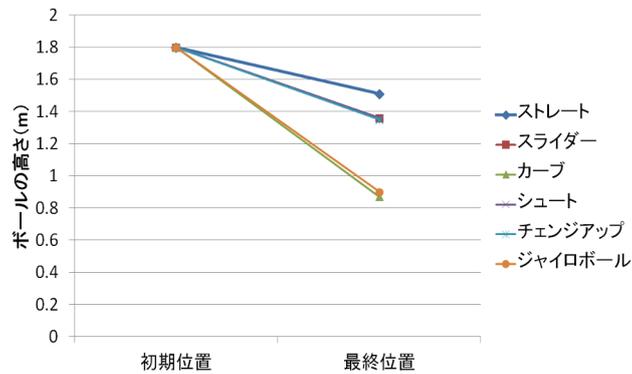


図 3.13: 力学計算手法改の縦方向への変化 (向かい風)

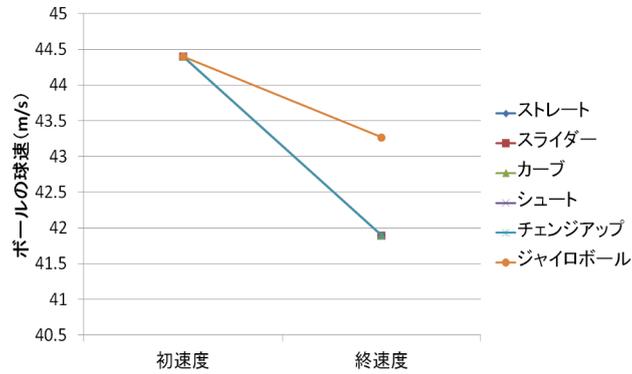


図 3.14: 力学計算手法改の球速の変化 (向かい風)

また、図 3.15、図 3.16、図 3.17 は向かい風による横方向、縦方向、球速の変化について、本手法、力学計算手法による計算結果と無風での計算結果を比較した時の違いを示したものである。

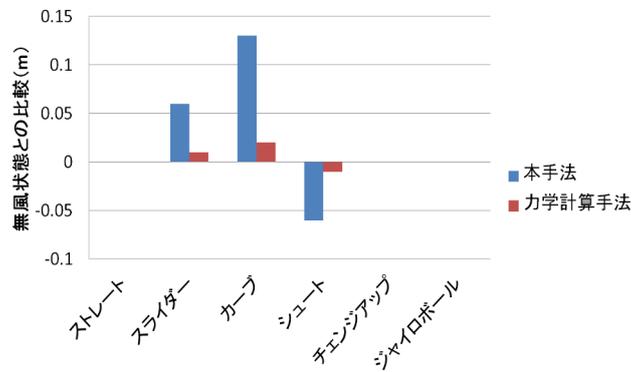


図 3.15: 無風と比較した横方向の大きさの違い (向かい風)

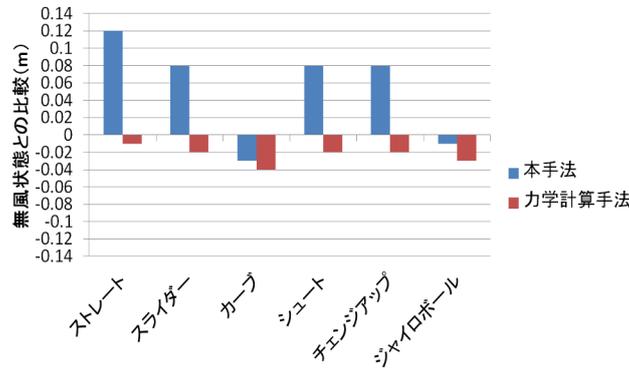


図 3.16: 無風と比較した縦方向の大きさの違い (向かい風)

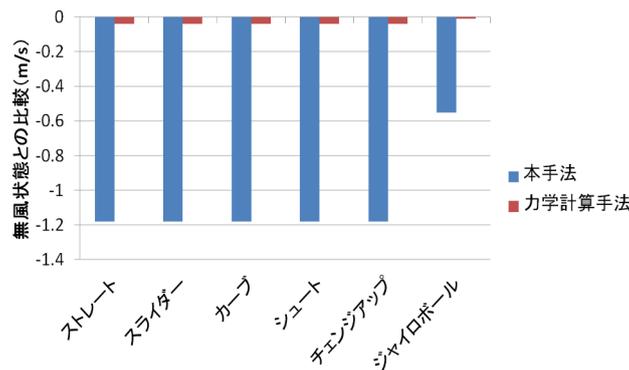


図 3.17: 無風と比較した球速の大きさの違い (向かい風)

次に右方向横風を考慮した時の結果を示す。ただし、縦方向、球速の変化について、本手法、力学計算手法のどちらにおいても、違いが全く見られなかったもので、横方向への変化のみを示す。尚、力学計算手法において空気抵抗係数を変化させても、縦方向、球速に関して、違いは見られなかった。図 3.18 は本手法を利用した結果、図 3.19 は力学計算手法を利用した結果である。また、図 3.20 は、右方向横風について本手法、力学計算手法による計算結果と無風での計算結果を比較した時の違いを示したものである。

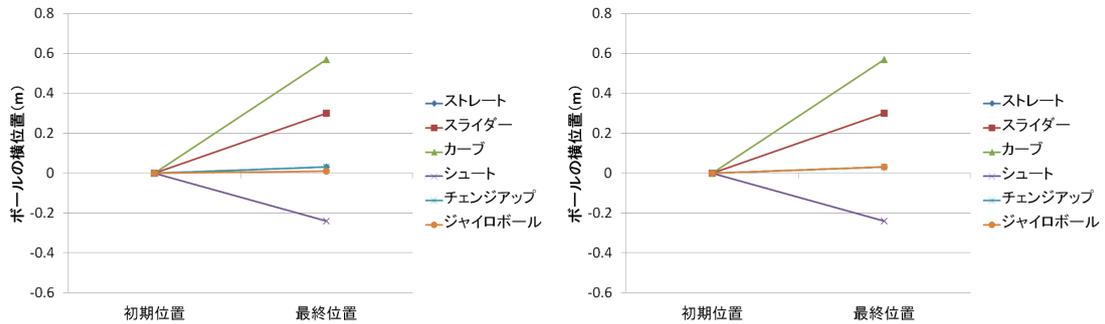


図 3.18: 本手法の横方向への変化 (右方 図 3.19: 力学計算手法の横方向への変化
向横風) (右方向横風)

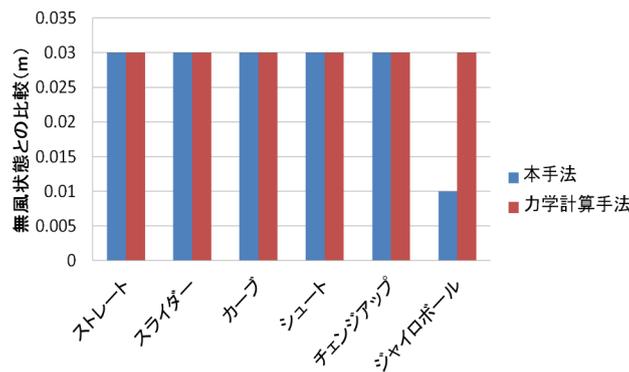


図 3.20: 無風と比較した横方向への大きさの違い (向かい風)

3.3 実行速度の検証

本節では、本研究の計算手法の実行速度について検証する。本手法はゲーム制作への応用を考えたものであるため、リアルタイム性を実現することも重要な要素の一つとなる。表 3.1 は、検証をした際の実行環境を示している。

OS	Windows 7 Home Premium
CPU	Intel(R) Pentium(R) CPU B960 @ 2.20GHz
メモリ	4.00GB

表 3.1: 実行環境

表 3.2 は、表 3.1 の環境の下に検証した、無風における球種別の描画速度の結果である。

球種	描画速度 (fps)
ストレート	118
スライダー	100
カーブ	118
シュート	100
チェンジアップ	118
ジャイロボール	125

表 3.2: 球種別の描画速度

表 3.3 は、本手法における風速 5m を想定した風向き別の描画速度の検証結果である。検証した変化球は、表 3.2 において最も描画速度が遅かったスライダーである。

風向き	描画速度 (fps)
追い風	100
向かい風	100
右方向横風	100
左方向横風	100

表 3.3: 風向き別の描画速度

表 3.4 は、本手法における向かい風を想定した風速別の描画速度の検証結果である。検証した変化球は、表 3.3 と同様にスライダーである。

風速	描画速度 (fps)
3m/s	100
5m/s	100
7m/s	100
10m/s	100

表 3.4: 風速別の描画速度

一般的にゲームにおいて良好とされる描画速度は毎秒 60 フレーム以上である。そのため、表 3.2、表 3.3、表 3.4 から本手法におけるリアルタイム性は実現できていると言える。また、風を考慮した場合にも、風向き、風速に関係なく、同じ描画速度を得られた。

3.4 考察

検証から、横方向の変化、縦方向の変化、球速の変化と、ボールに働く力が影響する 3 つの要素についての変化を表現できていると言える。

まず、無風の場合について考察する。図 3.3 から、横方向に関して変化を見せたのは、スライダー、カーブ、シュートの 3 つの変化球であり、その変化量や変化する方向の違いから、ボールに働く揚力の大きさや向きを考慮できていると言える。また、図 3.4 から、縦方向に関して全ての変化球が落下している結果を得られ、その落下距離が変化球によって違いが見られることから、ボールに働く揚力の大きさを考慮できていると言える。さらに、図 3.5 から、球速に関して全ての変化球に関して球速が減少する結果を得られ、変化球によってその減少量に違いが見られることから、ボールに働く抗力の大きさを考慮できていると言える。

次に向かい風を考慮した場合について考察する。図 3.15 から、横方向に関して、本手法、力学計算手法のどちらも無風状態より変化が大きくなった。これは向かい風によりボールに働く空気力が増加し、それに伴ってボールに働く抗力も大きくなり、その分捕手への到達時間が遅くなったことが原因と考えられる。また球

速に関しても、図 3.17 から、全ての球種で球速がより減少していることが分かるが、これについても横方向の変化と同じ理由が考えられる。向かい風に関して注目すべきは縦方向の変化である。図 3.16 から、本手法では、無風状態よりも変化が小さくなったものや大きくなったものがあるが、力学計算手法では全ての球種でより変化が大きくなった。先程も述べた通り、向かい風によってボールに働く空気力は増加したと考えられる。実際には、そのことに伴ってボールに働く抗力と共に揚力も大きくなるはずなので、到達時間が遅くなることで揚力による縦方向への変化も顕著になる。本手法では、ボールに対して上向きの揚力が働いている変化球に関して無風状態よりも落下距離が小さくなり、上向きの揚力が働いていない変化球は到達時間の遅延によって落下距離が大きくなったので、実際の現象に近い計算結果を得られていると考えられる。しかし、力学計算手法では、揚力や抗力の影響が無風状態と同じまま風の力に押されて到達時間だけが遅くなり、それによって全ての球種で落下距離が増加してしまった。そのことから、実際の現象に近い計算結果を得られていないと考えられる。

次に右方向横風を考慮した場合について考察する。図 3.20 から、どちらの手法もほとんど同じだけ無風状態より変化が大きくなったことが分かる。ここで注目するのは、ジャイロボールにおける変化の大きさである。ジャイロボールは、他の球種よりも抗力係数が小さいことを想定しているため、抗力の計算結果も当然小さくなる。それによって、ジャイロボールは他の変化球よりも捕手への到達時間が早くなっているはずである。到達時間が早くなれば、他の変化球に比べて、風の影響を受けている時間も短くなるので、実際には他の変化球よりも同じ距離をすすむ時の影響力は小さくなるはずである。本手法による計算結果では、他の変化球よりも風の影響による横方向への変化が小さくなっており、実際の現象に近い計算結果を得られていると考えられる。しかし、力学計算手法では、ジャイロボールは他の変化球と同じだけの影響を受けてしまって、風の影響による変化の大きさが全く一緒になってしまっている。そのことから、実際の現象に近い計算結果を得られていないと考えられる。

以上のことを総合すると、本手法ではどのような風向きにおいても、実際の現象に近い結果を得られているが、力学計算手法では、そのような結果が得られていない。よって、風の影響を考慮するとき際、本手法を用いた方がより本物に近い現象を表現できるため、力学計算手法を利用するよりも本手法を用いた方が良いと言える。

第 4 章

まとめ

本研究では、ある程度簡易化した流体計算を利用し、風の影響を簡易的に考慮できる変化球の軌道計算手法を提案し、それを実現することができた。ボールの周りを流れる空気をパーティクルで表現しつつ、その速度やレイノルズ数によって、ボールに働く揚力、抗力を計算から導きだし、それらの力から横方向、縦方向への変化と球速の変化を計算することで、それによる変化球の軌道変化を再現した。また、設定した6種の変化球において、変化球データやボールの初速度、回転数などの条件を設定し、それらの条件によりボールに働く揚力の大きさや向き、抗力の大きさに違いが出ることを示した。さらに、追い風、向かい風、両方向の横風の影響について本手法と力学計算手法の結果を比較し、その計算結果の違いや特徴から、風の影響を考慮する際の本手法の有用性を示した。しかし本研究では、野球ボールの独特の縫い目形状について考慮することができなかった。野球ボールの縫い目は、ボールに働く空気力に少なからず影響をもたらすので、縫い目の影響を実現することで、よりリアルな変化球の表現が可能になると考える。また、本手法の利用と合わせて、今後の野球ゲームにおける変化球の表現に貢献できるものになるだろう。

謝辞

本研究を進めるにあたり、手厚いご指導を頂いた渡辺大地講師をはじめ、三上浩司講師、岸本好弘准教授、竹内亮太様、阿部雅樹様、石川知一樣、藤本実様、各院生の皆様、そして苦楽を共にしてきた学部生の皆様に、深く感謝致します。大変難しい研究でしたが、それをなんとか形にすることができたのも、皆様からの様々な助言、協力によるものであると、心の底から思っています。この経験を糧にし、未来へ歩いていきたいと思えます。ゲームサイエンスの皆様、本当に、本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] TDK 株式会社, TDK Techno Magazine, <<http://www.tdk.co.jp/techmag/technobox/200610/index.htm>>.
- [2] 藤村龍平, 趙凌波, 池田治人, “風洞気流中で回転するサッカーボールの空気力の測定”, スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス, 2011.
- [3] 鳴尾丈司, 溝田武人, “ゴルフボールの空気力測定と3次元飛翔軌道解析”, 日本流体力学会会誌「ながれ23」, pp.203-211, 2004.
- [4] 谷口哲也, 宮崎武, 姫野龍太郎, “硬式野球ボールに働く空気力の測定”, 日本流体力学会会誌「ながれ25」, pp.257-264, 2006.
- [5] 高見圭太, 宮崎武, 姫野龍太郎, “バックスピンする球体に働く負のマグナス力～飛翔実験による測定～”, 日本流体力学会会誌「ながれ28」, pp.347-356, 2009.
- [6] 坂本誠馬, 長谷川淳哉, 田多輝洋, “統一球と日米硬式野球ボールの空力特性”, スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス, 2011.
- [7] 長谷川淳哉, 坂本誠馬, 田多輝洋, “風洞実験による硬式野球ボールの空力特性(回転軸の方向の違い)”, スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス, 2011.
- [8] 小関泰広, 子安大土, 前川仁, “野球のピッチングにおけるボールの画像解析”, 日本機械学会ジョイント・シンポジウム, No.07-24, pp.91-96, 2007.

- [9] 南大介, “変化球の数理解析”, 龍谷大学理工学研究科修士論文, 2009.
- [10] 姫野龍太郎, 望月義幸, 横山太一, 高野光太郎, 松本秀樹, 土肥俊, “新しい魔球ジャイロボールの投球動作とボールが作る流れの数値解析”, Computer Visualization Symposium 2000 論文集, pp.45-48, 2000.
- [11] 青木克己, “ゴルフボールと野球ボールの飛翔特性に対する流れの可視化”, 日本シミュレーション学会「シミュレーション 22(1)」, pp.26-33, 2003.
- [12] 小川恵太, 野村瑞貴, 池内智彦, 変化球のしくみ,
<<http://www.handai-vbl.net/teamsite/06team08/>>.
- [13] 渡辺大地, Fine Kernel ToolKit System ユーザーズマニュアル,
<http://fktoolkit.sourceforge.jp/Document/FK_UsersManual_2_8_10.pdf>.
- [14] 手塚一志, 姫野龍太郎, 「魔球の正体」, ベースボールマガジン社, 2001.
- [15] 姫野龍太郎, 「魔球をつくる 究極の変化球を求めて」, 岩波書店, 2000.
- [16] 大場謙吉, 板東潔, 「流体の力学—現象とモデル化—」, コロナ社, 2006.
- [17] 横山佳之, 宮寄武, 姫野龍太郎, “ジャイロボールのドラッグクライシス”, 日本流体力学会会誌「ながれ 27」, pp.403-409, 2008.
- [18] 坂田光雄, 坂本雅彦, 「流体の力学」, コロナ社, 2002.
- [19] シーサー株式会社, Seesaa BLOG, <<http://s614.seesaa.net/article/44777826.html>>.
- [20] Fine Kernel Project, FK Tool Kit System,
<<http://fktoolkit.sourceforge.jp/>>.