

野球のジャイロ・フォークボールの空力解析

尹, 昱炜
東京工業大学工学院機械系

青木, 尊之
東京工業大学学術国際情報センター

渡辺, 勢也
九州大学応用力学研究所

小林, 宏充
慶應義塾大学法学部

他

<https://hdl.handle.net/2324/7183294>

出版情報 : Journal of Japan Society of Fluid Mechanics. 42 (6), pp.376-385, 2023-12. The Japan Society of Fluid Mechanics

バージョン :

権利関係 : ©2023 日本流体力学会

野球のジャイロ・フォークボールの空力解析

東京工業大学 工学院機械系
東京工業大学 学術国際情報センター
九州大学 応用力学研究所
慶應義塾大学 法学部
フリー・スポーツライター

尹 昱 炜
青 木 尊 之*
渡 辺 勢 也
小 林 宏 充
丹 羽 政 善

Aerodynamic Study on “Gyro-forkball” of Baseball

Yuwei YIN, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology

*Takayuki AOKI, Global Scientific Information and Computing Center, Tokyo Institute of Technology

Seiya WATANABE, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

Hiromichi KOBAYASHI, Faculty of Law, Keio University

Masayoshi NIWA, Free Sportswriter

*E-mail : taoki@gasic.titech.ac.jp

(Received 7 July 2023; revised 18 August 2023; accepted 5 October 2023; published 25 December 2023)

Baseball pitchers throw a 2-seam low backspin rate “Forkball”. Recently some of them have thrown a “Gyro-forkball” including a gyro-spin with a higher spin rate. We study the aerodynamics of gyro-spin balls for 2- and 4-seam orientations by using a simulation based on the Lattice Boltzmann Method with a cumulant collision term suitable for a large-eddy simulation model. The normal Forkball has a certain lift force due to the Magnus effect by the backspin. On the other hand, the time-averaged lift forces of Gyro-forkball for both orientations are almost zero in the vertical and horizontal directions since the boundary layer separations and swirling wake behaviors are synchronized with the ball rotation. The lift forces are changing periodically in time and are canceled by the time average for one ball rotation. The vertical movement data of a Major League pitcher are in good agreement with the computational results and we have succeeded in reproducing ball trajectories similar to those of game videos.

(KEY WORDS): baseball, aerodynamics, gyro-spin, 2-seam, 4-seam, LBM, LES, forkball, flight trajectory, boundary layer separation, wake

1 緒言

野球の試合では、投手の投球が勝敗に大きく影響する。プロ野球の投手の場合、球速が約 130 km/h～160 km/h であり、このような高い球速でボールをリリースすると、ボールは必ず高速で回転する。ボ

ールの回転をうまく利用し、ボールの軌道の変化を制御することは重要な投球術である。投手の投げるボールは、「球速（初速）」に加えて、「回転数」、「回転軸」、「縫い目の向き」がパラメータとなり、ボールは様々な軌道を描く。回転軸を次の 2 つに分解することができる。回転軸がボールの進行方向と垂直

な「バックスピン／トップスピン」や「サイドスピン」と、進行方向と同じ「ジャイロスピン」である。縫い目の回転は投手のボールの握りに強く影響され、主に図1に示す2-seam回転と4-seam回転の2種類である。フォークボールやスプリットは回転数の少ない2-seam回転のバックスピンのストレート(直球)は高速4-seam回転のバックスピンである。

回転軸がボールの進行方向と垂直な2-seam回転と4-seam回転の2種類の変化球については研究が盛んに行われてきた。Lyuら¹⁾は高速カメラを使い、回転する野球ボールの軌道を撮影し、時間平均した抗力や揚力を測定している。大橋他²⁾は数値シミュレーションを行い、2-seam回転のフォークボールに働く負のマグナス効果を見出し、フォークボールが落ちる理由を解明し、4-seam回転のストレート(直球)に働く正のマグナス効果による揚力の回転数依存性も示した。



図1 バックスピンにおける2種類の縫い目の回転(左: 2-seam回転, 右: 4-seam回転)

一方で、図2に示したような回転軸が進行方向と一致するジャイロボールが最近注目されているが、この場合も2種類の縫い目の向きの違いが重要となる。横山他³⁾は実験で高速カメラを使い、ジャイロボールでドラッグクライシスの発生を示し、縫い目の違いによりレイノルズ(Re)数依存性が明確に異なることを示した。Shahら⁴⁾は風洞実験で非回転の野球ボールを計測し、縫い目の向き(姿勢)によって抗力係数が大きく異なることを示した。しかし、実験では時間平均した抗力や揚力についての議論しかできず、ボール飛翔中の非定常な空力特性や境界層の剥離と後流への影響などのメカニズムは十分に解明できていない。



図2 ジャイロスピンにおける2種類の縫い目の回転(左: 2-seam回転, 右: 4-seam回転)

本研究では、数値シミュレーションを用いて野球ボール周りの流れを解析し、ジャイロボールの飛翔中の空力特性および後流の振舞を明らかにする。さらに、数値シミュレーションの結果に基づいてボールの飛翔軌道を再現し、メジャーリーグの試合で測定された軌道との比較を行う。

2 数値計算手法

2.1 Cumulant-LBM(Lattice Boltzmann Method)

空力解析には先行研究で開発したコード²⁾を用いる。乱流計算に対して十分な研究実績^{2,5)}のある格子ボルツマン法⁶⁾に基づいており、流体を仮想的な粒子群と見なし、その速度分布関数の時間発展方程式を解く。高レイノルズ数の流れを計算するため、数値安定性と計算精度の高いD3Q27型のCumulant衝突モデルを使用している。十分な格子解像度がある場合には数値粘性が小さくなり非常に高精度な計算が可能である一方、格子解像度が下がるとCumulant衝突項が優れた陰的large-eddy simulation(LES)モデルの役割を果たし、安定性と精度を両立したLES計算が可能である。

2.2 AMR(Adaptive Mesh Refinement)法

野球ボール表面の境界層を解像するためには高解像度の格子が必要である。また、後流の領域にもある程度高い解像度の格子が必要である。均一格子を用いて計算領域全域に高解像度格子を用いると膨大な格子点数になり、非現実的な計算資源が必要になる。そこで、野球ボール表面近傍の高解像度計算が必要な領域にのみ細かい格子を割当て、遠方では解像度を粗くすることのできるAMR法を導入し、計算の効率化と高精度化を実現している^{7,8)}。

2.3 Interpolated bounce-back 法

格子ボルツマン法は直交格子を用いて計算を行う。野球ボールの表面のような格子の方向に沿わない物体形状に対して、物体形状を階段状に表現するのではなく、2次精度のInterpolated bounce-back法を導入して境界条件を設定している^{9,10)}。D3Q27型の格子ボルツマン法を用いているため、物体表面の位置を26方向で高精度に表現することができる。

2.4 野球ボール周りの流れの計算条件

計算領域のサイズは2m×1m×1mであり、その中に図3のように(0.5m, 0.5m, 0.5m)の位置に野球ボールを配置し、x方向の一樣流を流入条件に与える。指定した回転速度でボールの中心を通る固定軸

周りに強制的にボールを回転させている。ボール表面近傍(表面から約30メッシュ程度)に格子幅 $\Delta x = D/2048$ (D はボールの滑面の直径)の最細格子を配置する。後流の領域にも $\Delta x = D/256$ の格子を設置し、総格子点数は1,921,792,000となった。ボール後方の計算境界には流出境界条件を課し、それ以外の計算境界には流入境界条件を設定する。理化学研究所のスーパーコンピュータ「富岳」の384ノードを利用し、物理時間0.1secの計算に約212時間を要した。

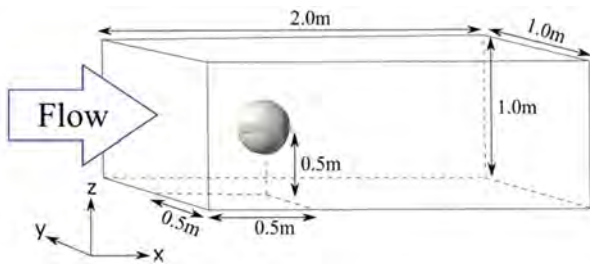


図3 計算領域及びボールの配置

2.5 野球ボールモデルと球種の定義

本研究では、メジャーリーグ (MLB) の2022年の公式試合球をキーエンス製3次元測定機VL-500で3Dスキャンし、得られた3D形状データ(解像度0.038 mm)をシミュレーションに用いた。

図4は計算格子およびスキャンした生データに対して穴埋めやノイズ除去等の処理後の表面形状である。縫い目を除くボールの直径は $73.5\text{ mm} \pm 0.3\text{ mm}$ 、縫い目高さは $0.7\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 、縫い目幅は $8.7\text{ mm} \pm 0.4\text{ mm}$ である。縫い目数は108個であり、メジャーリーグの公式規格¹¹⁾を満たし、標準的なMLB野球ボールの寸法である。

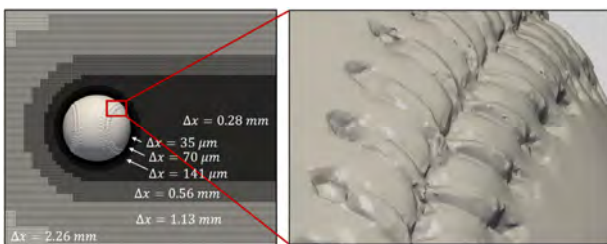


図4 左:階層的に細分化された計算格子,右:MLB野球ボールの形状データ

3 非回転野球ボールの検証計算

3.1 野球ボールのドラッグクライシスの再現

ボールが回転していない場合の縫い目の違いによる空力特性を実験結果と比較して、シミュレーションの妥当性を検証する。図2に示した2種類の縫い目の初期姿勢をそれぞれ2-seam姿勢と4-seam姿勢と定義し、回転しないものとする。Shahら⁴⁾の実験

結果において、2-seam姿勢の場合、 $1.0 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^5$ の領域で抗力係数が急激に減少するが、4-seam姿勢の場合は明確な臨界レイノルズ数が存在せず、レイノルズ数の増加に応じて緩やかに抗力係数が減少している。このような境界層が層流から乱流への遷移をシミュレーションするために、最細格子として $\Delta x = D/2048$ 以上の格子解像度が必要である。上流よどみ点から90度下流における球の層流境界層厚さ δ の理論式¹²⁾

$$\delta = 3D \sqrt{\frac{1}{2Re}} \quad (1)$$

によれば、 $\Delta x = D/2048$ の場合、 $Re = 1.0 \times 10^5$ では境界層内部13.7メッシュ、 $Re = 2.0 \times 10^5$ では9.7メッシュが割り当てられている。

本計算で得られた野球ボールの非回転球の抗力係数のプロットを図5に示す。いずれも物理時間0.08秒まで計算し、流れが安定した時点から計算が終了した時点までの時間平均値を取得した。

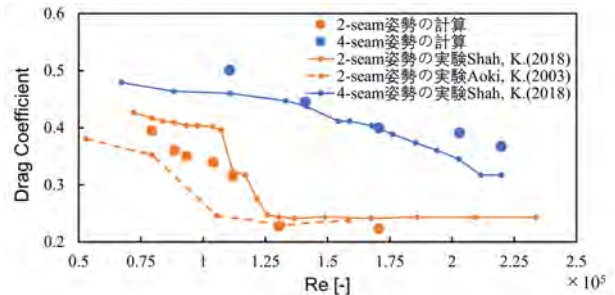


図5 非回転野球ボールの抗力係数のレイノルズ数依存性。青丸とオレンジ丸は本研究の計算結果で、実線⁴⁾、破線¹³⁾はそれぞれ実験結果。

4-seam姿勢の場合、流れの方向にボール表面の縫い目による凹凸の割合が多いため、球のような滑面で特徴的に現れるドラッグクライシスが発生しないことが計算でも示された。

2-seam姿勢の場合、4-seam姿勢よりも流れの方向に滑面の割合が多いため、レイノルズ数の増加に伴い4-seamよりも急峻な抗力係数の低下が生じている。球の場合と比較すると、縫い目があることにより臨界レイノルズ数が低くなり、それらの傾向を計算ではほぼ再現している。臨界レイノルズ数付近($Re = 0.89 \times 10^5 \sim 1.12 \times 10^5$)では、 $Re = 1.12 \times 10^5$ の抗力係数の計算値はShahら⁴⁾の結果とよく一致しており、 $Re = 1.04 \times 10^5$ の抗力係数の計算値はShahら⁴⁾の結果とAokiら¹³⁾の結果の間にきていて、実験結果に近い。

一方、メジャーリーグの公式試合球は形状のばらつきが大きく、計算では2022年のMLB公式試合球を用いたが、実験は2018年と2003年のボールを用

いているため、縫い目高さや表面の状態の違いが抗力係数に影響している可能性がある。

図 6 に 2-seam 姿勢の野球ボール周りの流れに対し、 $Re=0.8 \times 10^5$ と $Re=1.7 \times 10^5$ について、速度勾配テンソルの第二不変量の等値面を示す。 $Re=0.8 \times 10^5$ のときは、よどみ点から約 90 度下流の位置で層流境界層が剥離していることが分かる。一方、 $Re=1.7 \times 10^5$ では乱流境界層の剥離位置が下流へ後退し、後流領域が縮小しており、ドラッグクライシスがよく再現できている。以上のことから、本研究で扱うメジャーリーグ (MLB) の公式試合球の 3D モデルでの解析の妥当性を確認できたと考えられる。

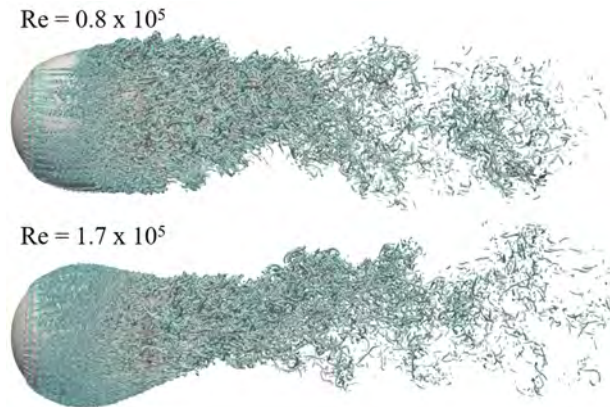


図 6 非回転 2-seam 姿勢のボール周りの流れの速度勾配テンソルの第二不変量の等値面

4 ジャイロ回転する野球ボールの空力解析

ジャイロ回転する野球ボール周りの流れの詳細な数値シミュレーションを実施する。同じ初期速度、同じ回転数で縫い目だけが異なる 2-seam 回転のジャイロボールと 4-seam 回転のジャイロボールの 2 球種を解析する。

4.1 計算条件

参照する Lyu ら¹⁾の実験と同じ条件とし、流入流速は 129 km/h ($Re=1.7 \times 10^5$)、ボールの回転数は 1500 rpm で空力計算を行った。ボールが 3 回転する 0.12 sec まで計算した。回転軸は図 3 で示すボールの重心を通り x 軸に平行で、回転方向は x 軸正方向である。縫い目だけが異なる 2-seam 回転のジャイロボールと 4-seam 回転のジャイロボールの 2 球種を計算した。

4.2 空力係数の時間変化

4-seam 回転のジャイロボールの空力係数の時間変化を図 7 に示す。3 回転までの結果を示しているが、3 回転以降も周期的な揚力特性が維持することを確認している。揚力係数の時間変化は、縦方向 (z 方向)

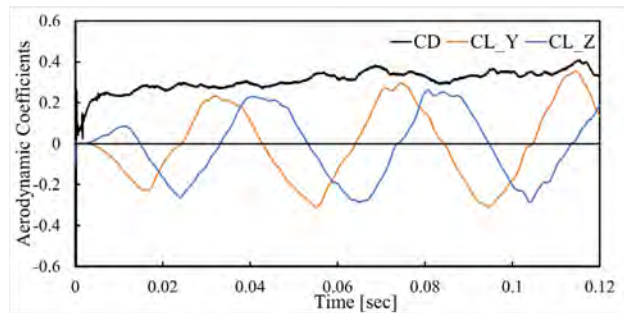


図 7 流速 129 km/h の流れに対して 1500 rpm で回転する 4-seam 回転のジャイロボールの空力係数の時間変化。黒い線が抗力係数、オレンジ色が y 方向の揚力係数、青色が z 方向の揚力係数。

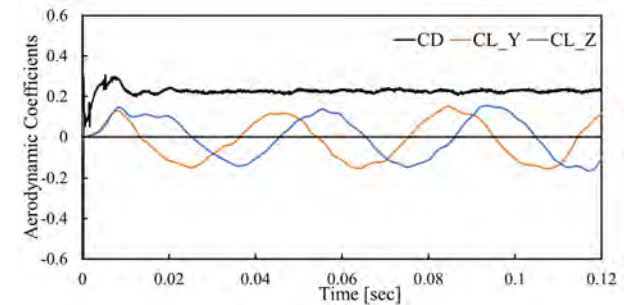


図 8 2-seam 回転のジャイロボールの図 7 と同じグラフ

と横方向 (y 方向) 共に 1 回転ごとに正の値と負の値のピークが 1 周期に 1 度ずつ現れる。2~3 回転目の平均の抗力係数は約 0.334 である。非回転の 4-seam 姿勢のボールより抗力係数は小さく、既存の実験結果¹⁾の 0.370 と近い値である。実験と計算はボールの形状も完全には一致していないので、十分良く一致している結果と言える。

2-seam 回転のジャイロボールの空力係数の時間変化を図 8 に示す。抗力係数の時間変動は 4-seam 回転のジャイロボールに比べて小さく平均値は約 0.227 であり、実験結果¹⁾の 0.280 と近い。非回転の 2-seam 姿勢の場合とも余り変わらない。4-seam 回転のジャイロボールの場合と同様に、揚力係数の縦方向と横方向共に、1 回転ごとに正の値と負の値のピークが 1 度ずつ現れる。

図 9 に 2 種類のジャイロボールの y 方向の揚力係数と z 方向の揚力係数の関係の履歴を示す。両方とも回転と一致する明確な周期的な揚力特性が確認できる。4-seam 回転のジャイロボールの揚力係数は 2-seam 回転のジャイロボールの場合と比べて変動幅が大きい。

ボールのジャイロ回転と共に回転する系 (図 10 に示す y'-z' 系) での直交する 2 方向の揚力係数の関係を図 11 に示す。y'-z' 系では縫い目の位置が移動しない。4-seam 回転のジャイロボールの場合、プロットが y'-z' 系の第 1 象限にあり、運動量保存の観点から揚力の方向と逆向きに後流領域が常に第 3 象

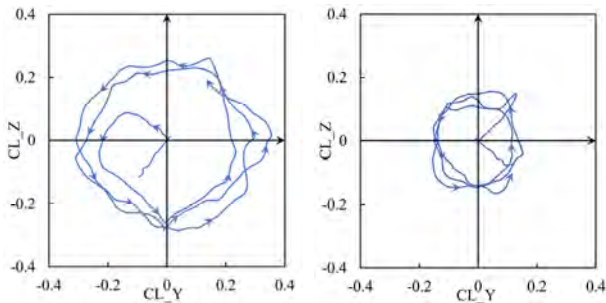


図9 静止系における2方向の揚力係数の関係(左:4-seam 回転のジャイロボール, 右:2-seam 回転のジャイロボール)

限の方向に偏り, ほぼ固定されることになる。

2-seam 回転のジャイロボールは2方向の揚力係数の関係のプロットが常に y' - z' 系の第4象限にある。後流領域が第2象限に偏り, 固定されていることが分かる。図10の赤枠が後流領域の偏っている位置を表し, 後流領域が一箇所に偏って固定されている。

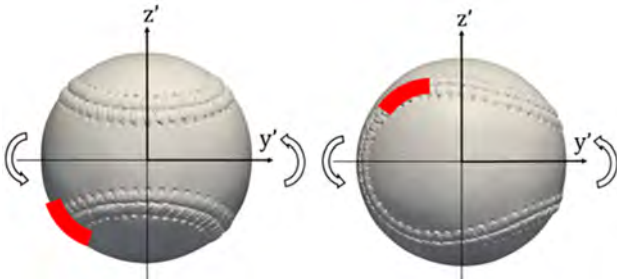


図10 ボールの回転と共に回転する系において流れ後方から見たボール。赤色の部分は後流領域が偏っている位置。(左:4-seam 回転のジャイロボール, 右:2-seam 回転のジャイロボール)

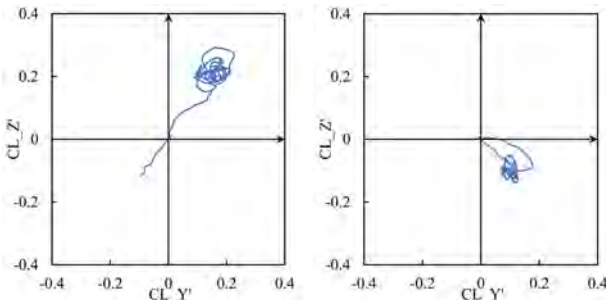


図11 回転座標系における2方向の揚力係数の関係 (左:4-seam 回転のジャイロボール, 右:2-seam 回転のジャイロボール)

4.3 4-seam 回転のジャイロボールにおける縫い目の角度と剥離状態及び後流の変化

ジャイロボールの揚力係数の時間変化は回転と同期した周期性があるため, 一回転分を解析すれば十分である。図7の0.04 sec~0.08 secの1回転を取り出し, ボールの回転角 ϕ と揚力係数の関係を図12に示した。この一回転の間に縫い目は図13のように回転する。図13には速度勾配テンソルの第2不変量の

等値面を付加して, ボール表面の剥離状態及び縫い目近傍の境界層の乱流遷移が確認できる。

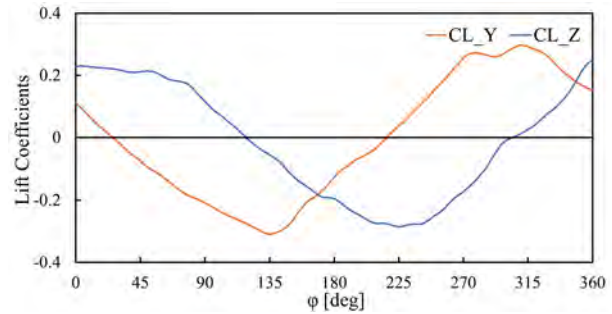


図12 4-seam 回転のジャイロボールの縫い目の回転角 ϕ に対する揚力係数

図12に示すように1回転の中で縫い目の角度が $\phi = 0 \sim 45^\circ$ の範囲で縦方向の揚力係数が最大となり, 角度 $\phi = 135^\circ$ と 315° 付近で0となる。最も代表的な $\phi = 45^\circ$ におけるボール表面の圧力係数と接線方向の流速分布を図14に示す。 z 軸の正の向きをボールの上面, 負の向きをボールの下面と定義し, 上段がボールの上面, 中段がボールの側面, 下段がボールの下面から見たボール表面の圧力分布と流速の接線方向の成分である。速度勾配テンソルの第二不変量の断面も示している。また, $\phi = 135^\circ$ における同様な図を図15に示す。

4-seam 回転のジャイロボールの境界層剥離点は, 回転角によらず, ほぼ一定の位置に固定されている。図14から分かるように, 回転角 $\phi = 45^\circ$ の時, 上下の縫い目付近の剥離点は非対称である。下面と比べると上面の剥離点が後方に来ているため後流領域が斜め下に下がり, $\phi = 45^\circ$ では縦方向の正の揚力が生じる。一方, $\phi = 135^\circ$ では図15に示すように上下2本の縫い目付近の剥離点がほぼ同じ角度で剥離しており, 上下の縫い目付近の非対称性が弱いため縦方向の揚力が作用しなくなる。このとき非対称な剥離点を持つ2本の縫い目が側面にあるため横方向の剥離点の非対称性が現れ, 回転角 $\phi = 135^\circ$ では横方向の揚力が生じる。図16に $\phi = 45^\circ$ と $\phi = 135^\circ$ におけるボール上面と下面の圧力係数分布を示す。 $\phi = 45^\circ$ における上下剥離点の非対称, $\phi = 135^\circ$ における上下剥離点の対称性が確認できる。また, 縫い目付近の剥離点の非対称性とジャイロ回転により, 後流領域が図17のようにらせん状になり, 揚力が周期的に変化する。

4.4 2-seam 回転のジャイロボールにおける縫い目の角度と剥離状態及び後流の変化

2-seam 回転のジャイロボールの場合も回転周期と一致する周期的な揚力特性がある。図8の0.04 sec

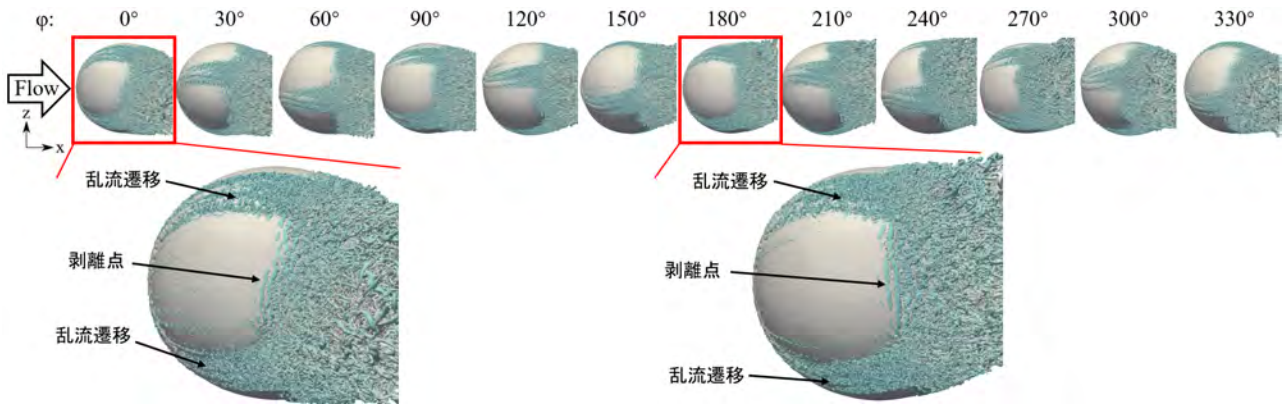


図 13 4-seam 回転のジャイロボールの回転角 ϕ とその角度での速度勾配テンソルの第二不変量の等値面

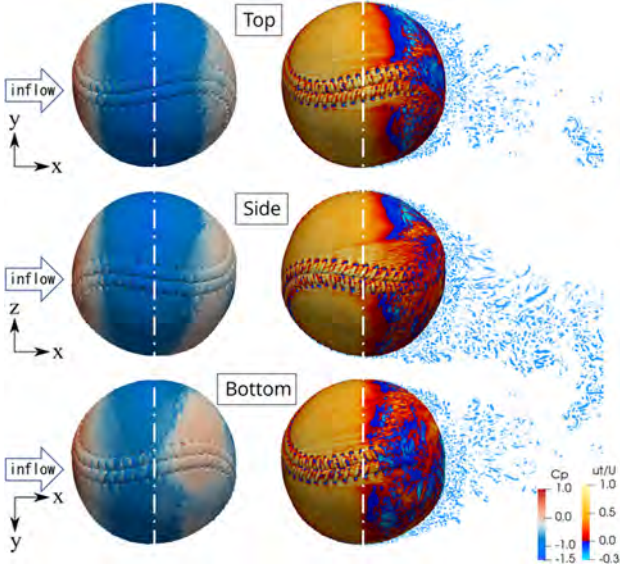


図 14 4-seam 回転のジャイロボールの $\phi = 45^\circ$ における圧力係数と接線方向の流速分布の可視化

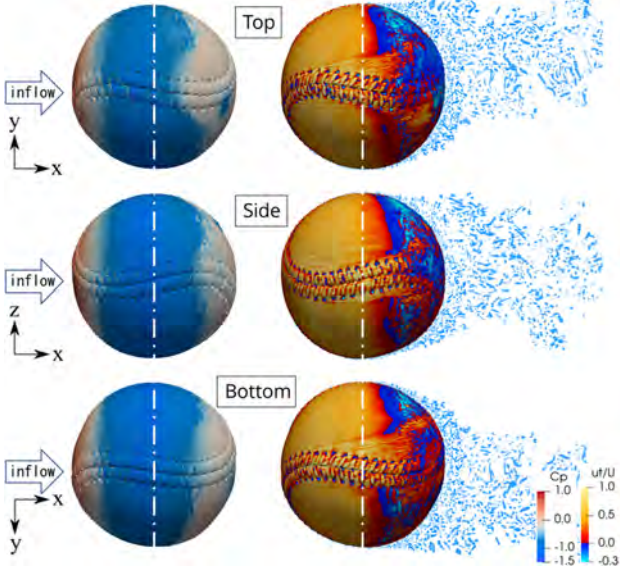


図 15 4-seam 回転のジャイロボールの $\phi = 135^\circ$ における圧力係数と接線方向の流速分布の可視化

~0.08 sec の 1 回転を取り出し、回転角 ϕ と揚力係数の関係を図 18 に示す。この一回転の間に縫い目は図 19 のように回転する。図 19 は速度勾配テンソル

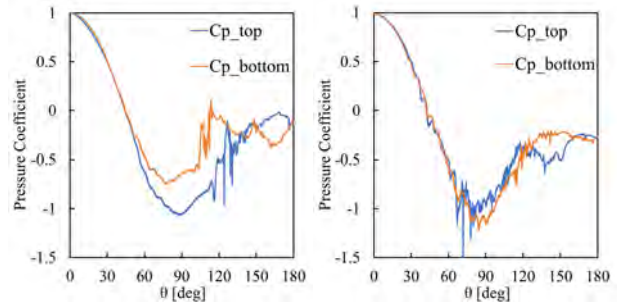


図 16 4-seam 回転のジャイロボールのボール上面と下面の圧力係数分布 (左 : $\phi = 45^\circ$, 右 : $\phi = 135^\circ$)

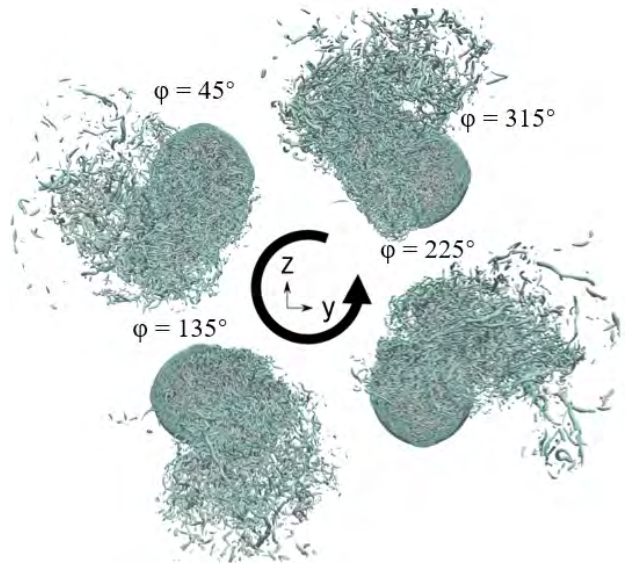


図 17 背面から見た 4-seam 回転のジャイロボールの速度勾配テンソルの第二不変量の等値面

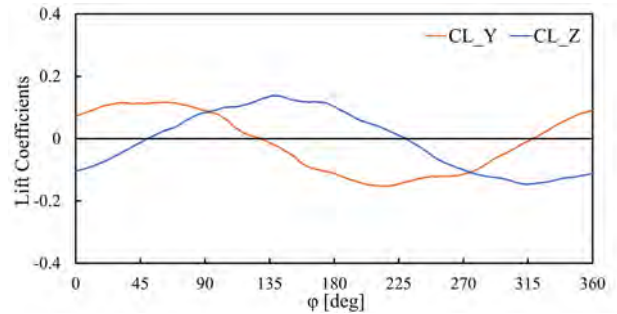


図 18 2-seam 回転のジャイロボールの縫い目の回転角 ϕ に対する揚力係数

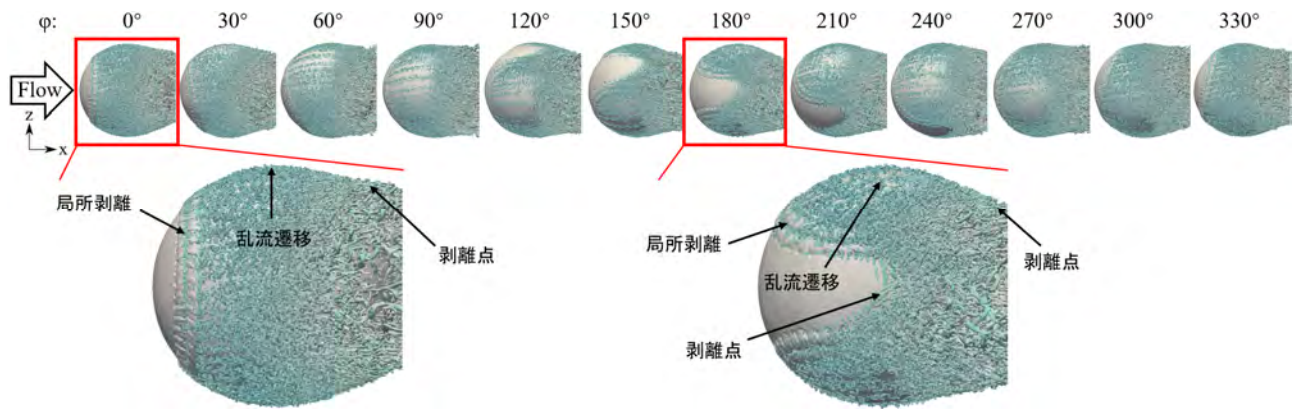


図 19 2-seam 回転のジャイロボールの回転角 ϕ とその角度での速度勾配テンソルの第二不変量の等値面

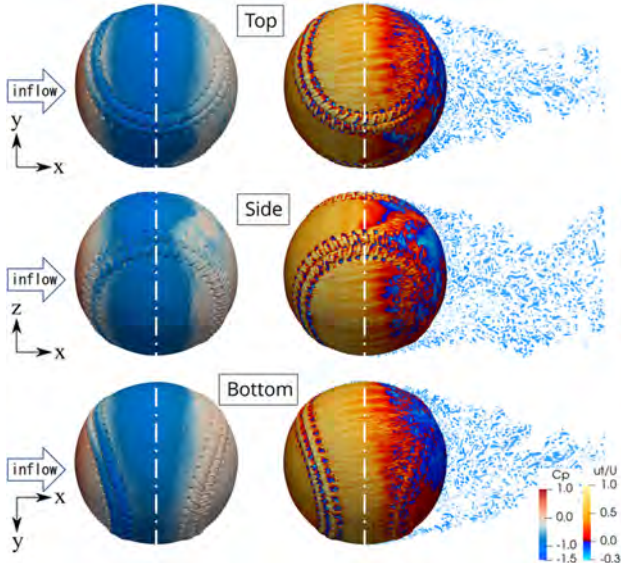


図 20 2-seam 回転のジャイロボールの $\phi = 135^\circ$ の圧力係数と接線方向の流速分布の可視化

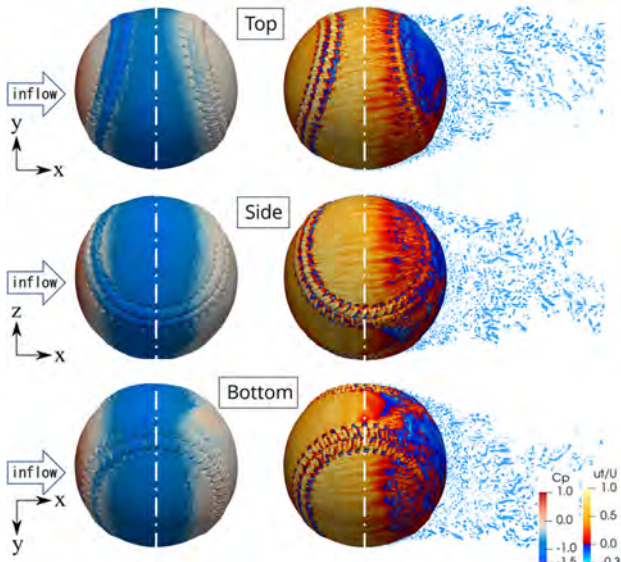


図 21 2-seam 回転のジャイロボールの $\phi = 225^\circ$ の圧力係数と接線方向の流速分布の可視化

の第 2 不変量の等値面を示している。ボール表面の剥離状態及び縫い目近傍の境界層の乱流遷移が確認できる。図 18 に示すように、1 回転の中で縦方向の揚力係数が最大となる縫い目の角度 ($\phi = 135^\circ$ 付

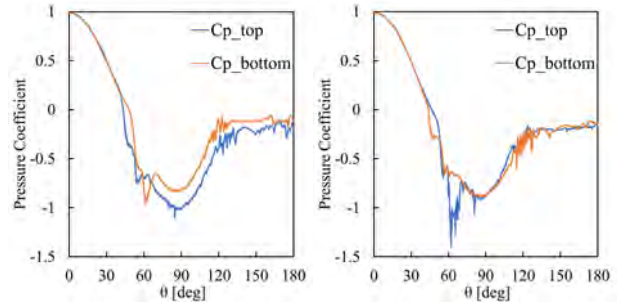


図 22 2-seam 回転のジャイロボールのボール上面と下面の圧力係数分布 (左: $\phi = 135^\circ$, 右: $\phi = 225^\circ$)

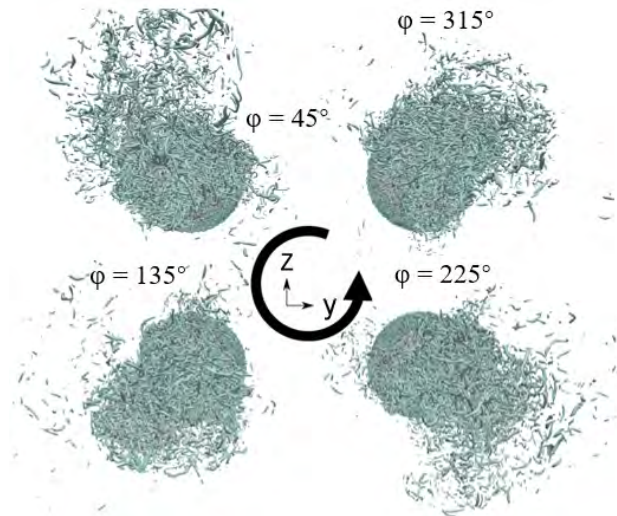


図 23 背面から見た 2-seam 回転のジャイロボールの速度勾配テンソルの第二不変量の等値面

近), また 0 となる縫い目の角度 ($\phi = 45^\circ$ と 225° 付近) が確認できる。最も代表的な $\phi = 135^\circ$ と $\phi = 225^\circ$ におけるボール表面の圧力係数と接線方向の流速分布を図 20, 21 に示す。

図 19 に示すように、2-seam 回転のジャイロボールの場合、上流からくる気流と接触する縫い目が多く、縫い目における局所剥離によって縫い目近傍の広範囲に及ぶ乱流遷移が発生するが、2-seam 回転のジャイロボールの剥離点は 4-seam 回転のジャイロボールの場合と似ており、回転角によらずほぼ同じ

位置に固定される。図 20 に示したように、回転角 $\varphi = 135^\circ$ のとき、下面と比べて上面の剥離点が僅かに後方に来ている。これによって、上下の剥離点が僅かに非対称になり、後流領域が斜め下に下がり、縦方向の正の揚力が生じる。一方、図 21 に示したように、回転角 $\varphi = 225^\circ$ のときは上面と下面では剥離点がほぼ対称のため、縦方向の揚力が作用しなくなる。側面では剥離点が非対称になるため、横方向の揚力が生じる。

図 22 に $\varphi = 135^\circ$ と $\varphi = 225^\circ$ におけるボール上面と下面の圧力係数分布を示す。 $\varphi = 135^\circ$ では上下の剥離点が非対称であり、 $\varphi = 225^\circ$ では対称であることが確認できる。ジャイロ回転とともに剥離の位置が移動し、4-seam 回転のジャイロボールの場合と同じく後流領域がらせん状になることが図 23 から分かる。

4-seam 回転のジャイロボールと 2-seam 回転のジャイロボールはいずれも剥離の位置が非対称となっている。2-seam 回転のジャイロボールの場合、流れに対して縫い目が非対称なことから境界層剥離点が非対称になると考えられるが、4-seam 回転のジャイロボールの縫い目は流れに対して対称であるにもかかわらず剥離点は非対称である。縫い目での剥離はボールの回転とともに縫い目が回転するために同じ場所に固定される。しかしながら、剥離に応じて後流も偏るために同じ場所が剥離し易く、この状態が維持するものと推察される。

5 ジャイロ回転する野球ボールの飛翔軌道の再現

MLB の試合で測定された球速と回転数を用い、飛翔軌道を計算し、測定された縦方向・横方向の変化量との比較を行う。

5.1 飛翔軌道の再現手法及び投球条件

プロ野球選手の投手がボールをリリースしてからホームプレートに到達するまでの飛翔時間は概ね 0.45~0.55 sec である。この間にボールの回転速度が 1500 rpm 前後であれば 11~14 回転する。飛翔時間中にボールの受ける力を全て積分することにより飛翔軌道を再現することができるが、ボールの 1 回転で平均した空力係数は飛翔時間中に殆ど変化しないことが分かっている。そこで、初期値の影響の残る最初の 1 回転を除き、2~3 回転目の時間平均した空力係数を用いて軌道計算を行う。飛翔時間中を全積分した場合と比較すると縦横変位量の誤差が約 5% 以下であることを確認している。本研究では、ボールがかなり大きい慣性モーメントを持っているため、ボールの回転数、回転軸、流入流速の方向は変化し

ないとしている。ボール軌道の運動方程式を Adams-Bashforth 法と Adams-Moulton 法を用いた予測子修正子法で解く。投手は一般的にリリース時に投手板から 1.5 m~2.2 m ほど前方に腕を伸ばした状態でボールを投げるため、投手板とホームプレートの距離である 18.5 m から 2.0 m を差し引き、16.5 m を軌道計算の対象の距離とする。

大谷翔平選手の 2021 年の実投球¹⁴⁾を参照し、球種がスプリットとして分類されている 3 球 (①初速度 143.7 km/h で回転速度 1693 rpm, ②初速度 140.8 km/h で回転速度 1432 rpm, ③初速度 138.6 km/h で回転速度 1693 rpm) を選んだ。通常のスプリット(フォークボール)であれば 2-seam 回転のバックスピンであるため、同じ初速度、同じ回転数の 2-seam 回転のバックスピンと 4-seam 回転のジャイロボールの両方で計算を行った。計算条件及び各投球の時間平均した各種空力係数の値を表 1 に示している。表中の Backspin が 2-seam 回転のバックスピン、Gyro が 4-seam 回転のジャイロボールである。また、参照した投球が 2021 年のデータのため、メジャーリーグ (MLB) の 2021 年に使われた公式試合球の実物を 3D スキャンし、得られた 3D モデルを用いた。

5.2 飛翔軌道の計算結果

表 1 に示したように、ジャイロボールでは揚力が周期的に変化するため平均すると相殺され、横方向と縦方向の揚力係数がほぼ 0 となる。また、回転速度が増加すると、抗力係数は減少する傾向があることも分かる。一方、バックスピンで回転する場合、マグナス効果により回転速度の増加とともに縦方向の揚力係数は増加し、既存の研究結果と定性的に一致している²⁾。

表 1 球速・回転数に対する各方向の空力係数

初速度と 回転速度	回転軸	CD	CL_Y	CL_Z
① 143.7 km/h 1693 rpm	Backspin	0.294	-0.028	0.236
	Gyro	0.231	0.006	0.018
② 140.8 km/h 1432 rpm	Backspin	0.279	-0.020	0.219
	Gyro	0.259	0.027	0.008
③ 138.6 km/h 1322 rpm	Backspin	0.279	0.023	0.196
	Gyro	0.272	0.007	0.003

図 24 に x-z 平面内の軌道変化を示す。黒の破線は時速 143.7 km/h のボールが空力の影響を受けずに鉛直方向には重力で自由落下した場合の(放物線)軌道である。ジャイロボールの場合、揚力が縦方向と横方向でそれぞれ相殺されて重力だけが残る。黒の破線より下にきているのは、x 方向に抗力を受けて

減速するためである．一方，2-seam 回転のバックスピンは揚力が効くため，自由落下より 40 cm ほどホップしている．

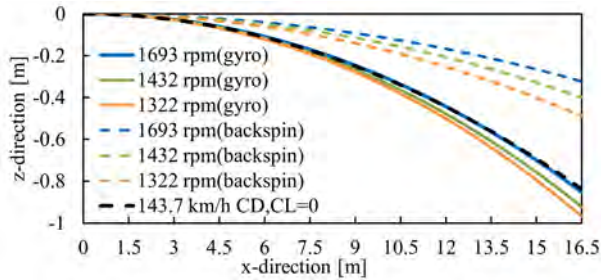


図 24 x-z 平面内のジャイロボール（1693 rpm 青色，1432 rpm 緑色，1322 rpm オレンジ色）とフォークボール（破線）の飛行軌道の違い．黒の破線は時速 143.7 km/h で空力を受けない軌道．

表 2 球速・回転数に対するリリースポイントからのボール軌道の変化量

初速度と回転速度	回転軸	縦方向の変化[cm]	横方向の変化[cm]
① 143.7 km/h 1693 rpm	Backspin	51.54	-6.97
	Gyro	-1.47	1.39
	BS	3.35	3.96
② 140.8 km/h 1432 rpm	Backspin	47.28	-5.01
	Gyro	-5.02	6.75
	BS	1.83	11.89
③ 138.6 km/h 1322 rpm	Backspin	41.27	5.65
	Gyro	-6.70	1.76
	BS	7.32	-3.05

リリースポイントからのボール軌道の変化量を表 2 に示す．表中の Backspin, Gyro は表 1 と同じ投球で，BS は Baseball Savant のデータである．2-seam 回転のバックスピンのホップ成分が約 40~50 cm であるのに対し，ジャイロボールのホップ成分が 0 付近を推移している．投球ごとに僅かに横方向の変化量が異なるが，これはボールの縫い目の僅かな非対称と後流の流体力学的不安定性と推測する．本研究の計算によるジャイロボールの飛行軌道は，Baseball Savant の結果とかなり一致していて，大谷投手のスプリットと言われている投球はジャイロ回転しているボールと言える．図 25 に打者視点でのボール軌道を表示した．打者は短い時間の中で軌道の違いを判断する必要がある．

6 結言

これまでのジャイロボールの空力特性は実験による測定しか行われておらず，飛行時間全体を平均した各種空力係数でしか評価されていなかった^{1,3)}．本

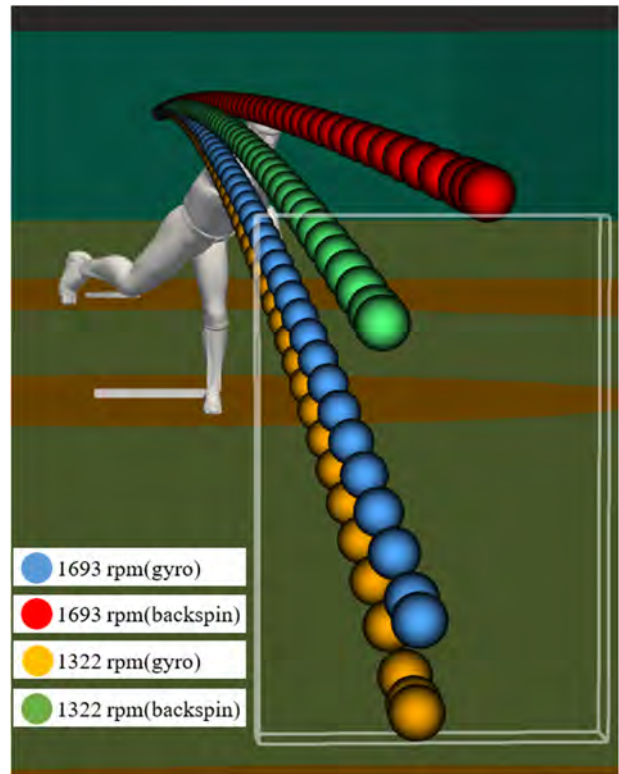


図 25 打者視点でのボール飛行軌道の可視化

研究では，メジャーリーグ（MLB）の公式試合球の実物を 3D スキャンして得られた 3D モデルを用い，格子ボルツマン法による数値シミュレーションで野球ボール周りの流れの空力解析を行い，ジャイロボールの非定常の空力特性を明らかにした．2-seam 回転のジャイロボールと 4-seam 回転のジャイロボールの後流領域はいずれもボール後方の片側に偏って固定される．後流が固定された縫い目の付近の境界層剥離点と反対側の縫い目での境界層剥離点が非対称となっている．剥離点の非対称性及びジャイロ回転により，回転周期と一致する周期的な揚力特性を示し，らせん状に変化する後流領域が存在する．「ジャイロ・フォークボール」とも呼ばれる 4-seam 回転のジャイロボールが落ちるのは，周期的に変化する揚力が相殺され，重力だけが作用することが原因であることを明らかにした．これにより，ボールの軌道はバックスピンの 2-seam 回転するフォークボールと比較して打者の地点で 40~50 cm も落差があることが分かった．

シミュレーションにより得られたボール軌道の動画は，TV 放送のために撮影された映像のボール軌道を非常によく再現していることを確認することができた．

謝辞：本研究は革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ（HPCI）の一般課題 hp220063「ジャイロ回転する野球ボールの空力解析」

として進めた研究である。また、科学研究費補助金・基盤研究(S) 課題番号 19H05613 から一部支援を頂いた。計算には理化学研究所「富岳」を利用して頂いた。NHKの安土直輝氏と(有)三浦ニュールームの三浦大輝氏に協力して頂いたことに、深く感謝する。記して謝意を表す。

引用文献

- 1) Lyu, B., Kensrud, J., Smith, L.: Investigation of the Aerodynamic Drag of Baseball with Gyro Spin, *MDPI Proceedings 2020*, 49 (162) (2020) 1-7.
- 2) 大橋遼河, 青木尊之, 渡辺勢也, 小林宏充: 低スピンドットで回転する野球ボールの空力解析～フォークボールの縦の変化の解明～, *ながれ*, 40 (2021) 343-355.
- 3) 横山佳之, 宮崎武, 姫野龍太郎: ジャイロボールのドラッグクライシス, *ながれ*, 27 (2008) 403-409.
- 4) Shah, K., Shakya, R. and Mittal, S.: Aerodynamic forces on projectiles used in various sports, *Physics of Fluids*, 31 (2019) 015106.
- 5) 長谷川雄太, 青木尊之, 小林宏充, 白崎啓太: 格子ボルツマン法による自転車競技の集団走行の大規模 LES 空力解析, *日本機械学会論文集*, 85(870) (2019) 18-00441.
- 6) Geier, M., Schönherr, M., Pasquali, A., Krafczyk, M.: The cumulant lattice Boltzmann equation in three dimensions: Theory and validation, *Computers & Mathematics with Applications*, 70(4) (2015) 507-547.
- 7) Wahib, M., Maruyama, N., Aoki, T.: Daino. A High-level Framework for Parallel and Efficient AMR on GPUs, *SC'16: Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, (2016) 621-632.
- 8) Watanabe, S., Aoki, T.: Large-scale flow simulations using lattice Boltzmann method with AMR following free-surface on multiple GPUs, *Computer Physics Communications*, 264 (2021) 107871.
- 9) Bouzidi, M. H., Firdaouss, M., Lallemand, P.: Momentum transfer of a Boltzmann-lattice fluid with boundaries, *Physics of Fluids*, 13(11) (2001) 3452-3459.
- 10) Gao, H., Li, H., Wang, L. P.: Lattice Boltzmann simulation of turbulent flow laden with finite-size particles, *Computers & Mathematics with Applications*, 65(2) (2013) 194-210.
- 11) Anthopoulos, A., Dipoto, J., Hill, M., Antonetti, C., Finley, J., Mozeliak, J., Daniels, J., Gorman, B., Stearns, D.: *Official Baseball Rules 2021 Edition*, (2021) 5: <https://img.mlbstatic.com/mlb-images/image/upload/mlb/atczj9j7wrgvsm8wnjq.pdf> 『最終アクセス日: 2023年6月12日』
- 12) Schlichting, H.: *Boundary Layer Theory* (McGraw-Hill, 1955)
- 13) Aoki, K., Kinoshita, Y., Nagase, J., and Nakayama, Y.: Dependence of aerodynamic characteristics and flow pattern on surface structure of a baseball, *J. Visualization*, 6(2) (2003) 185-193.
- 14) Baseball Savant: <https://baseballsavant.mlb.com/> 『最終アクセス日: 2023年6月12日』
- 15) Martin, E. P.: Predicting Major League Baseball Strikeout Rates from Differences in Velocity and Movement Among Player Pitch Types, *MIT Sloan Sports Analytics Conference*, (2019)