# CLBM による回転移動する野球ボールの空力解析

An aerodynamic study on moving and rotating baseballs using cumulant LBM

$\bigcirc$	大橋	河 , 東京工業大学, 東京都目黒区大岡山 2 丁目 12-1, rohashi@sim.gsic.titech.ac.jp:
	渡辺	地 , 東京工業大学, 東京都目黒区大岡山 2 丁目 12-1, watanabe@sim.gsic.titech.ac.jp
	青木	之,東京工業大学,東京都目黒区大岡山2丁目12-1, taoki@gsic.titech.ac.jp:
	佐山	太郎, 東京工業大学, 東京都目黒区大岡山 2 丁目 12-1, sayama.s.ab@m.titech.ac.jp:
	田中	1人 , 東京工業大学, 東京都目黒区大岡山 2 丁目 12-1, tanaka.h.cb@m.titech.ac.jp:

There are many types of pitching balls in baseball. The difference among types of pitching is caused by baseball's "moving speed, rotating speed and axis of rotation". It has been understood that the stitch of the ball is very important. These parameters change the fluid force acting on a baseball, and it causes different trajectories of the ball. In this study, we calculated flows around rotating and moving baseballs by using Cumulant-LBM. First, we analyze the flow around a sphere in high Reynolds number region and reproduce the drug crisis. Next, we study trajectories of a ball under various conditions by calculating the flow around the baseball.

# 1. 緒言

野球において投手の投げたボールの軌道に変化を与える要素は, 投手が与える力の大きさと向きによるボールの移動速度・回転速 度・回転方向である.これらのパラメータはボール周りの流れに 影響を与え,軌道の変化を生む.このパラメータの違いによる軌 道の変化が,変化球として野球のプレーにおける重要な要素とな る.

一般的に野球ボールの変化は、球の回転によるマグヌスカが生 むものと考えられている。横回転を与えることで横に曲がるスラ イダーなどだけでなく、フォークボールなどの落ちるボールも、 回転を極端に抑えることで重力による落下の効果をストレートな どと比べて相対的に大きくすることでバッターに落ちる感覚を与 えているのだと考えられている。

しかし、バッターの手元付近で球に落ちる"消える魔球"や、ホ ップアップするような"伸びのあるストレート"、ゆらゆらと動く "ナックルカーブ"など、マグヌス力の作用だけでは説明のつか ない変化球も多く存在する.これらの魔球と呼ばれるような変化 球については、変化の原理について未だ不明な部分が多くある.

このように未だ不明な部分の多くある野球ボール周りの流れに ついて、野球ボール周りの流れや流体力を解析した実験が行われ ている[1][2]. しかし、実際のピッチャーの投球環境に近い条件と して、計測機器などの影響を受けずに空中で高速に回転移動する 野球ボールの流れや流体力を直接解析するためには、数値計算に よる解析が最適であると考えられる.また、数値計算によってピ ッチャーの投げる野球ボールの挙動を再現することで、ボールに 与える初速や回転量などのパラメータを自由に変更できるため、 今までにない新たな変化球を生み出すヒントともなりうる.

投手の投げる野球ボール周りの流れは、レイノルズ数が200,000 程度と高レイノルズ数であり、大規模かつ高精度・高解像度の流 体計算を行う必要がある。そこで本研究では、ピッチャーの投げ る高速移動・高速回転する野球ボールまわりの流れについて、大 規模乱流計算に適した Cumulant-LBM を用いた数値解析を行う。 野球ボールモデルの表面に高解像度格子を集める AMR 法により 計算精度を向上させ、複数 GPU による並列計算による大規模計算 を行う。回転軸や回転量のパラメータを変化させ、回転する野球 ボールに作用する流体力及び軌道を解析する。

## 2. Cumulant-LBM

格子ボルツマン法(Lattice Bolzmann Method)は、流体を並進・衝 突する仮想粒子の集合体と仮定し、その個々の粒子を扱うのでは なく粒子の速度分布関数 f の時間発展方程式を解く手法である. 時間発展方程式は

$$f_{ijk}(\mathbf{x} + \boldsymbol{\xi}_{ijk}\Delta t, t + \Delta t)$$

$$= \frac{1}{\tau} f_{ijk}^{eq}(\mathbf{x}, t) + \left(1 - \frac{1}{\tau}\right) f_{ijk}(\mathbf{x}, t) + G_{ijk}(\mathbf{x}, t)$$
(1)

であり、ここでくは速度分布関数の速度、 たは緩和係数、f<sup>eq</sup>は局 所平衡状態の速度分布関数である.この手法は局所性に優れたス テンシル計算を行えるため、並列計算による計算時間の高速化が 可能となる[3].

Cumulant モデルは速度分布関数を統計量キュムラントに変換し 衝突項の計算を行う手法である.緩和係数 τ を用いた一般的なモ デルである SRT モデルでは不安定になる高レイノルズ数での乱流 計算における安定性が向上する.本研究では、高レイノルズ数領 域での流れを解析するため、Cumulant モデルを採用する.

## 3. AMR法

野球ボールまわりの流れは、特にボール表面付近において高解 像度格子を用いた計算が必要となる.そのため、計算コストとメ モリ使用量の削減のため、野球ボールモデルの表面に高解像度格 子を集める AMR 法[10]を導入した.細分化格子の構造には、Fig1 に示すような、木データ構造による再帰的領域分割で生成される 構造を用いた.木データ構造の各節点(Fig1の各点)はノードと呼 ばれ、3次元計算では、1度の領域分割で領域が8つに分割される (各ノードが8つのノードを持つ)Octree データ構造となる.本研究 ではこの Octree アルゴリズムに従った再帰的格子細分化を行う [3][11].実際に計算で使うノードであるリーフにはそれぞれ8×8×8 の格子を配置し、メモリの連続性を確保している.

複数 GPUによる大規模計算のため、AMR 法の MPI 並列計算を 行う. このとき、Fig1 のように同じ大きさで分割すると、A,D と B,E でブロック数が大きく異なるように、各 GPU の計算コストが 異なる. この差により、A や D の領域を計算する GPU は、B や E の領域を計算する GPU の計算が終わるまで待機するため、結果と して GPU 使用率の低下につながってしまう. 効率的に複数 GPU での計算を行うためには、各 GPU の計算コストを均一にする必要 があり、そのため空間重点曲線に基づいた動的領域分割を行うこ とで、GPUの負荷バランスを確保している[10].本研究では、Fig 2に示すようにモートン曲線に基づいてブロックに番号付けをし、 これに従いブロック数が均一になるように領域分割を行うことで、 GPUのメモリ使用量を均一化している.



Fig. 1 Rectangular computational domain represented by multiple tree structure.



Fig. 2 Domain decomposition of a rectangular computational domain using the Morton curve.

## 4. 球周りの流れの解析

CLBM を用いた球周りの流体解析についての評価を行う. 空気 中で投手の投げる一般的な野球ボール周りの流れのレイノルズ数 が10<sup>5</sup>付近であることから,本研究ではRe =  $10^4 \sim 10^6$ における球 の抗力値を実験値と比較する.抗力係数とレイノルズ数に関する 流体現象として代表的なものに、ドラッグクライシスと呼ばれる, 滑らかな球であれば、レイノルズ数が1.5 ×  $10^5 \leq Re \leq 5.0 \times$  $10^5$ 付近において抗力係数が急激に低くなる現象がある. この現 象は、球表面付近の境界層が乱流化することで渦の剥離位置が風 下側に後退することが原因と考えられている. また、計算格子の 幅を変えた際の抗力値の推移の比較を行うことで、メッシュサイ ズによる流体計算の精度の検証を行う.

この章以降, 球直径を d, 球直径に対して割り当てられる格子幅 (計算領域内の最も細かい格子)を $\Delta x$ , レイノルズ数を Re, 球の抗 力係数を $C_D$ とする.

#### 4.1 計算条件[2]

計算領域は2×1×1とし、直径0.0625の球を座標位置(0.5, 0.5, 0.5)に設置した.ここでは、レイノルズ数が20,000~5,000,000の間のいくつか条件での球周りの流体計算をした.

球まわりの渦の剥離点位置などを正確に再現するためには、球 表面の粘性低層を解析する必要があり、この粘性低層の厚さは Re=50万で球直径の0.3%程度と非常に薄い領域である.球表面付 近では正確な流体計算には高い格子解像度を要するため、AMR 法 によって球表面の格子を集中的に細分化している.球の表面近傍 には格子幅が $\Delta x = d/2048$ の格子を、球から生まれた渦の追跡の ため球後方には格子幅がd/256の格子を設置した.計算には九州 大学スーパーコンピューターシステム ITO(サブシステム B)の GPUTesla P100を48台用い、タイムステップ数は約210万とした.

#### 4.2 計算結果

球周りの流体計算の結果として、レイノルズ数20万、40万、80万における抗力係数 $C_D$ の時刻歴を Fig 3 に示す.ある程度のタイムステップ数を過ぎると $C_D$ の値が一定に収束している.このことから、各計算結果において値がある程度まで一定に収束した後の抗力係数の平均を、その条件における球の抗力係数 $C_D$ とした.



Fig. 3 Time variation of drag coefficient at Re = 200,000, Re = 400,000, Re =  $800,000, \Delta x = d/2048$ .

球直径dに対する格子幅 $\Delta x \epsilon \Delta x = d/2048$ とし、各レイノルズ 数での $C_D$ の値を計算した結果を Fig 4 に示す. 図中でプロット点 は計算結果を示し、実線は Almedeij による  $Re \ c_D$ の近似式[5]の 曲線を示す. Almedeij の近似式と比較し、結果は  $Re \ c \ 200,000$  ほ ど遅れてドラッグクライシスが再現された. この結果から、CLBM を用いた球周りの流体計算において、格子幅が $\Delta x = d/2048$ のと きドラッグクライシスが再現されることがわかった.



Fig. 4 Variation of the drag coefficient with *Re.* : ●, result ; -, Almedeij.

#### 5. 回転する野球ボールの流体解析

本研究で用いる Cumulant-LBM を用いた流体計算について、球 周りの流れにおいて球表面付近の格子幅を $\Delta x = d/2048$ とする ことでドラッグクライシスが再現されることがわかった.本章の 野球ボールまわりの流体計算では、投手からバッターまでの到達 時間 0.4sec の流体計算を行うため、計算コストとの兼ね合いから  $\Delta x = d/144$ という荒い格子での解析を行った.回転する野球ボ ールは縫い目の影響から、 $\Delta x = d/2048$ よりも低い格子解像度で ドラッククライシスが再現できると考えられ、 $\Delta x = d/144$ での 計算でもある程度の空力解析ができることが期待できる.

## 5.1 計算条件

投手が投げた野球ボール周りの流れを再現するため、投手がマ

Copyright © 2019 by JSFM

## 第 33 回数値流体力学シンポジウム 講演番号 C11-3

ウンド上からバッターに向かって野球ボールを投げる時を想定し, 風速 40 m/s 以上の風を受けながら高速で回転する野球ボールモデ ルまわりの流れを解析する.投手の投球速度と同じ風速の風を野 球ボールの前方から流し,かつ野球ボールを任意の回転軸でその 場で回転させる.

MLB や NPB などのプロの投手の投球スピードは球種差や個人 差があるものの, MLB 投手であれば概ね初速にして 140~160 km/h (≈39-45 m/sec)である([7]). そのため、本研究において球に当てる 風の流速は"プロの投手が投げる野球ボールの平均的な球速"と し、流速 U=42 m/sec(≈ 150 km/h)とした.

ボールの回転についてだが、こちらも球種や投げる人によって 差があるが、MLB 投手の各球種による回転数[4]を参考に、Table 1 に示す.3つの球種についての回転軸と回転量を定めた.なお、回 転軸については、Fig 6 のように重力方向を z 軸負、風の方向を x 軸正となるように定め、4seamFB については初期の状態が Fig 6 か ら z 軸を中心に 90deg 回転させた状態となる.また Y 軸周りの回 転は、正の時がバックスピン、負の時がトップスピンに相当する.

Tab	ole	1.	Parameter	setting	for eacl	1 type of	pitches.
-----	-----	----	-----------	---------	----------	-----------	----------

球種(和名)	回転軸	回転量
4seamFB(ストレート)	Y 軸正	2700rpm
Cutter (カットボール/スライダー)	Z軸正	1800rpm
Splitter (スプリット/フォーク)	Y 軸負	1000rpm

計算領域をFig5のように2×1×1とし,直径0.072の野球ボー ルモデル(Fig5)を座標位置(0.5,0.5,0.5)に設置した.球直径はMLB 公式球規格"円周9-9.25inch"より定めた[8].計算には東京工業大 学スーパーコンピューターシステム TSUBAME3.0 の GPU Tesla P100 を 64 台用い,計算に要する時間は,格子解像度が $\Delta x =$ d/144(=0.5mm)のとき,約24時間で物理時間0.51sec分の流体計算をした.一般的にピッチャーが投球してからホームベースに届く時間が0.4~0.5secであることを考えると,24時間で0.5secを $計算できる最大の格子解像度が<math>\Delta x = d/144$ である.



Fig. 5 The image of calculation area around a baseball.



Fig. 6 Coordinate axes around a baseball.

5.2 4seamFB での野球ボールまわりの流れ

4seamFB(ストレート)を想定した条件での計算結果を Fig 7(a)に示す. 速度勾配テンソルの第2不変量であるQ値を

$$Q = \frac{1}{2} (\nabla \times \boldsymbol{u}) \cdot (\nabla \times \boldsymbol{u}) - \frac{1}{4} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2$$
(2)

$$u = \{u_1, u_2, u_3\} = \{u, v, w\}$$
$$\{x_1, x_2, x_3\} = \{x, y, z\}$$

より求め、これにより流れの可視化をしている. Fig7(a)は渦の剥 離点がボールの縫い目と離れているとき、Fig7(b)は剥離点と縫い 目が重なっているときの流れの様子を表している. Fig7(a)と Fig 7(b)を比較すると、特にボールの上部において、縫い目が剥離点と 重なる Fig7(b)での縫い目付近の流れが、Fig7(b)と比べて上方向に 流れるように変化している. このことから、野球ボール周りの流 れにおいて、野球ボールの縫い目が流れに対して影響を及ぼして いることがわかる.



(a)Pattern 1: Conditions where the distance between the separation point and seam is far



(b)Pattern 2: Conditions where separation point and seam overlap Fig. 7 Flow around a rotating baseball. (4seamFB).

野球ボールまわりの流体力の計算について, Table 1 の 3 条件で のボールが受ける流体力の時刻歴を Fig 8 に示す. Fig 8(a)はボー ル進行方向(x 軸方向)の抗力値であり, 3 条件に大きな違いはなか った. Fig 8(b)はボールの横方向(y 軸方向)の流体力であり, 4seamFB と splitter が 0[N]付近であるのに対して, 横回転を与え た cutter では絶対値で 1.0[N]前後の流体力を受けている. Fig 8(c) はボールの縦方向(z 軸方向)の流体力であり, 4seamFB の強いバ ックスピンによる 1.0~1.5[N]程度の揚力や, splitter のトップスピ ンによる 0.5[N]程度の重力方向の力が確認された.

また, Fig8の各流体力の時間変化の振動は縫い目が剥離点と 重なる周期と一致しており,野球ボールモデルの縫い目が流体力 に一定の影響を与えていることが分かった.



(a)Direction: Flow direction (x-axis)



(b)Direction: Horizontal direction (y-axis)



(c)Direction: Gravity direction (z-axis) Fig 8 Time changes of fluid force around a rotating baseball.

#### 5.3 野球ボール軌道の解析

計算により得られた抗力の時刻歴から、ボール軌道の変化を評価することができる. 重力 mg を受け速度 42m/s で移動する質量 m の球の運動において、 $f_x$ ,  $f_y$ ,  $f_z$  をそれぞれ x,y,z 方向の球にかかる抗力とした時の各方向の運動方程式は

$$m\ddot{x} = -f_x \qquad (3)$$
  

$$m\ddot{y} = f_y \qquad (4)$$
  

$$m\ddot{z} = -mq + f_z \qquad (5)$$

である. 各式の2階の時間微分項を離散化することにより各タイムステップ間での球の変位の量を計算する. この変位をピッチャーがボールを投げてからバッターのもとに届くまでの間で加算していくことで,最終的なリリースからバッターまでのボール軌道を間接的に求める.

投手のリリース位置は一般的に投手板から 1.5~2.5m ほど前方と なるため[7][9], MLB 規格で定められた投手板とホームベースの 距離である 18.44m から[5]この距離を差し引いた 16.5m を軌道計 算をする距離とする.

# 第 33 回数値流体力学シンポジウム 講演番号 C11-3

軌道計算の結果として、ボールが全く流体力を受けずに重力の 影響のみを受けて移動したときの到達位置との変化の大きさの比 較を Fig 9 に示す.これは投手側から見た時の変化量であり、 4seamFB の揚力によるホップ成分(z 軸正)、cutter の横回転による スライド成分(y 軸)、splitter のトップスピンによる負のホップ成分 (z 軸負)がそれぞれ良く確認できた.

Fig10(a)やFig10(b)から分かるように、強烈なバックスピンのか かった4seamFBではほとんど落ちることなくまっすぐな軌道とな り、逆に少しトップスピンがかかったSplitterでは軌道がホームベ ース付近で深く落ち込んでいる様子がわかる.また、Fig10(c)やFig 10(b)から、Cutterが他の2条件と比べて明らかに横方向に曲がっ ている様子がわかる.これらの変化は回転する球に対して働くマ グヌス力が要因となっていると考えられ、ボールの回転による流 体力の変化がボール軌道に対して影響を及ぼすことが確認できた.



Fig. 9 The amount of trajectory change for each type of pitches.



(a) view point: Side



(b) view point: Side around a batter



Copyright © 2019 by JSFM



(d) view point: Catcher

Fig. 10 The trajectory of a baseball that is loaded fluid force Red: 4seamFB, Yellow: Cutter, Blue: Splitter.

# 6. 結言

Cumulant-LBM による球周りの流れの解析を行い、高レイノルズ 数領域における流体現象の1つであるドラッククライシスが確認 され、高レイノルズ数領域において流体計算が精度良く行われる ことを検証した.同様の計算手法によって回転する野球ボール周 りの流れを解析し、回転がボールの受ける流体力に及ぼす影響と、 それによる軌道の変化を再現した.

今後, Fig 11 のように野球ボールに対してより高解像度を割り 当てた計算をピッチャーからバッターまでの距離で行うために, 計算の大幅な高速化を行う予定である.また,実際のピッチャー の投球をより再現するために,流体構造連成解析によるボール軌 道解析を行う.野球ボールモデルの空力解析については縫い目の 影響からΔ*x* = *d*/2048よりも荒い格子幅でもドラッククライシ スを捉えられることが考えられるため,ドラッククライシスを捉 えることのできる格子解像度の検証を行うことでの解像度依存性 について検討する.



Fig. 11 Flow around a rotating baseball using high resolution mesh  $(\Delta x = d/1024)$ .

#### 謝辞

本研究は科学研究費補助金・基盤研究 (S) 課題番号 19H05613 「自由界面を含む混相流の革新的数値流体シミュレーション」,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) 課題番号 hp190130 および学際大規模情報基盤共同利用・共同研究 拠点 (JHPCN) 課題番号 jh190054 から支援を頂いた.計算には東 京工業大学学術国際情報センターのスパコン TSUBAME3.0 を利 用させて頂いた.記して謝意を表す.

#### 参考文献

 Firoz Alam et al., "Aerodynamics of baseball", ScienceDirect Procedia Engineering, (2011), pp207-212

- (2) Jeffrey R.et al., "In situ drag measurements of sports balls", ScienceDirect Procedia Engineering, (2010), pp2437-2442
- (3) 渡辺 勢也, AMR 法を導入した格子ボルツマン法による混 相流の大規模 GPU シミュレーション, (2019), p9, pp131-134
- (4) Martin Geier et al, "The cumulant Boltzmann equation in three dimensions: Theory and validation", Computers and Mathematics with Applications, (2015), pp507-523
- (5) Jaber Almedeij, "Drag Coefficient of Flow Around a Sphere: Matching Asymptotically the Wide Trend", Powder Technology, (2008), pp218-223
- (6) Rahul Deshpande, et al., "Intermittency of laminar separation bubble on a sphere during drag crisis", J.Fluid Mech Cambridge university press, (2017), p815
- (7) MLB Advanced media, "Statcast", 最終閲覧日 2019/10/12, http://m.mlb.com/statcast/leaderboard#exit-velo,p,2019
- (8) Tom Lepperd, "OFFICIAL BASEBALL RULES 2018 Edition", Office of the Commissioner of Baseball, (2018), p5, p2
- (9) NHK SPORTS STORY, "MLB\_前田健太「リリースを前に」 意識したワケとは",最終閲覧日 2019/10/12, https://www.nhk.or.jp/sports-story/detail/20180411 2693.html
- (10) Mohamed Wahib, Naoya Maruyama, Takayuki Aoki: Daino: A Highlevel Framework for Parallel and Efficient AMR on GPUs, SC16, Salt Lake City, USA, November 18, (2016)
- (11) 長谷川 雄太, 適合細分化格子法を導入した格子ボルツマン 法による複数形状物体周りの複数 GPU を用いた空力解析, (2019), pp23-29