

野球ボールの LES 空力解析

ー 大谷翔平のスーパー再現 ー

東京工業大学 学術国際情報センター

青木 尊之



自己紹介



東京工業大学 学術国際情報センター
評議員 (2021年度 ~ 現在)

教授 (2001年 ~ 現在)
副センター長 (2009年 ~ 現在)

- ACM ゴードンベル賞 (2011)
- 文部科学大臣表彰 (2012)
- 日本応用数理学会・業績賞 (2012)
- NVIDIA CUDA Fellow (2012)
- SC'16 Best Paper Award (2016)
- 日本学術振興会 学術システム研究センター 専門研究員 (2016-2019)
- 東京都功労者表彰 (2022)
- HPCIコンソーシアム理事 (2018-2019, 2022-2023)
- 科研費・基盤研究 (S) 研究代表者 (2014-2018) 「HPC ものづくりシミュレーション」
基盤研究 (S) 研究代表者 (2019-2023) 「革新的 混相流シミュレーション」

著作権の関係で、表示できません。

9表
アメリカ 2
日本 3

これまでの成果



- フォークボール・スプリット（低速回転のツーシーム・バックスピン）は、マグヌス効果による揚力が小さいだけでなく、**負のマグヌス効果**も効いていたことが明らかになった。

hp200070: 回転するハイスピード野球ボールの空力解析 (TSUBAME3.0)

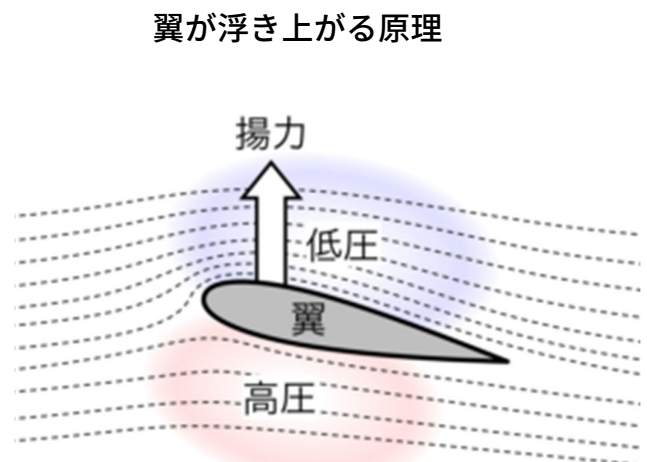
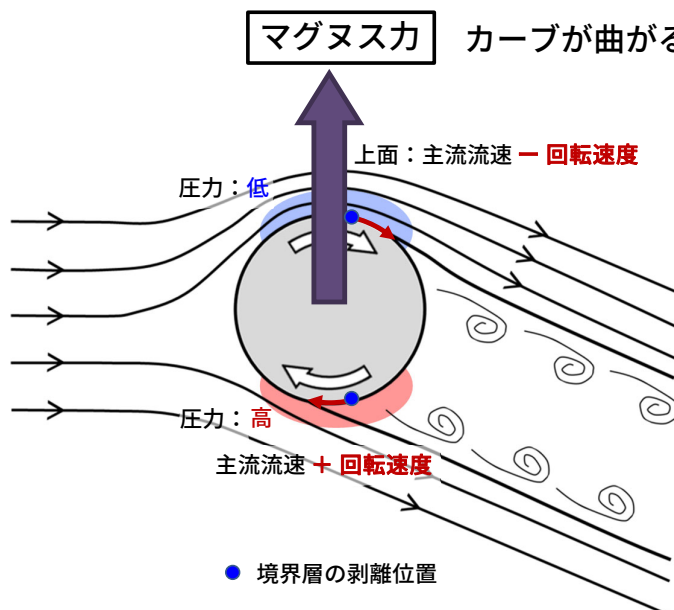
- 大きく落ちる大谷翔平のスプリットは、ツーシーム・バックスピンではなく、**ジャイロ回転**していることが分かった。

hp220063: ジャイロ回転する野球ボールの空力解析 (「富岳」, 「不老」)

ボールの軌道を決める要素

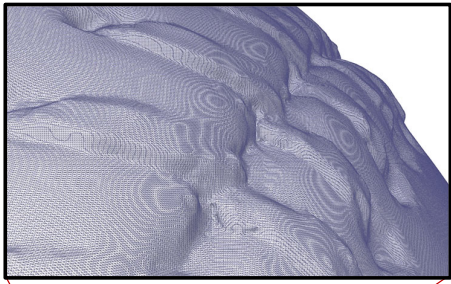
- **球速**：ボールの進行方向の速度。
(プロ野球投手 130km/h ~ 160km/h)
 - **回転数**：ボールを速く投げようとする、ボールに回転がかかってしまう。(1000 rpm ~ 2500 rpm)
 - **回転軸**：どの方向に回転しているか。
- +
- **縫い目の向き**：フォーシーム、ツーシーム

回転している球に働く力 (マグナス効果)

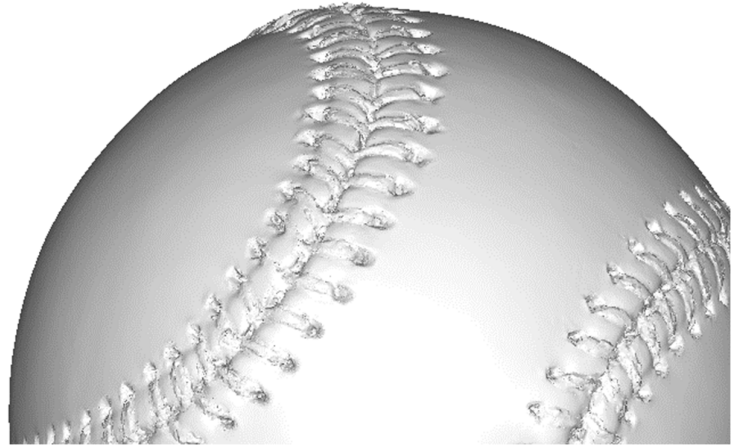
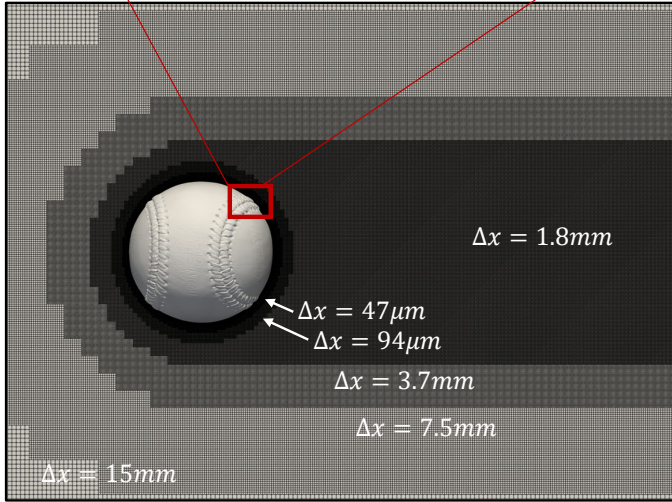


計算格子

縫い目の高さ : 最大 0.9 mm
球直径(縫い目を除く) : 72 mm



STLデータ



MLB公式球を Keyence VL-500 により3Dスキャン, (株) TOKYO HOKUTO

Cell 数	1,067,141,120 (約10億)
GPU数	24 GPUs (Flow Type II 6 node)
最細格子間隔	D/1536 (0.047 mm)

7

利用したスパコン



理化学研究所「富岳」

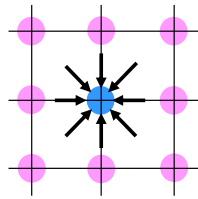


名古屋大学情報基盤センター
「不老」Type-II Sub-system

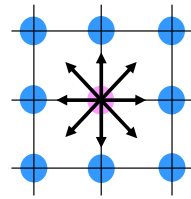
LBM (Lattice Boltzmann Method)

SRT:
$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \mathbf{e}_i \cdot \nabla f_i = -\frac{f_i - f_i^{eq}}{\tau}$$

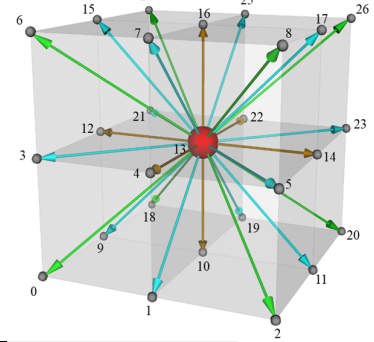
$$f_\alpha^{eq} = w_\alpha \left[1 + \frac{(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u})}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u})^2}{2c_s^4} - \frac{|\mathbf{u}|^2}{2c_s^2} \right]$$



Collision Step:



Streaming Step:



Collision Model	Collision Process	Number of Relaxation Time
SRT (Single Relaxation Time)	Distribution function	1
TRT (Two Relaxation Time) ^[1]	Distribution function	2
MRT (Multiple Relaxation Time) ^[2]	Moment	15, 19, 27
Cascaded ^[3]	Central Moment	27
Cumulant ^[4]	Cumulant	27

[1] Ginzburg, I., Verhaeghe, F., d'Humieres, D., Commun. Comput. Phys., 3, 427-478 (2008).
 [2] D. d'Humieres, I. Ginzburg, M. Krafczyk, P. Lallemand, and L.-S. Lou, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A 360, 437 (2002).
 [3] Geier, M., Greiner, A., & Korvink, J. G., Phys. Rev. E, 73, 066705 (2006).
 [4] Geier, M., Schönherr, M., Pasquali, A., & Krafczyk, M., Comput. Math. Appl., 70(4), 507-547 (2015).

Cumulant LBM

- High Accuracy and Stability for high-Reynolds number flows

Laplace Transformation of f_{ijk}

$$F(\Xi, \Upsilon, Z) = \mathcal{L}[f(\xi - u, v - v, \zeta - w)] = e^{-u\Xi - v\Upsilon - wZ} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) e^{-\Xi \cdot \xi} d\xi$$

Cumulant Statistical Quantity

$$= e^{-u\Xi - v\Upsilon - wZ} \sum_{ijk} f_{ijk} e^{-\Xi ic} e^{-\Upsilon jc} e^{-Zkc}$$

$$k_{\alpha\beta\gamma} = c^{-\alpha-\beta-\gamma} \frac{\partial^\alpha \partial^\beta \partial^\gamma}{\partial \Xi^\alpha \partial \Upsilon^\beta \partial Z^\gamma} \ln(F(\Xi, \Upsilon, Z)) \Big|_{\Xi=\Upsilon=Z=0}$$

Cumulant Collision term

$$k_{\alpha\beta\gamma}^* = \omega_{\alpha\beta\gamma} k_{\alpha\beta\gamma}^{eq} + (1 - \omega_{\alpha\beta\gamma}) k_{\alpha\beta\gamma} \quad \begin{array}{l} \alpha\beta\gamma: \text{moment} \\ \omega_{\alpha\beta\gamma}: \text{relaxation} \end{array}$$

Geier, M., Schönherr, M., Pasquali, A., & Krafczyk, M. Computers & Mathematics with Applications, 70(4), 507-547 (2015).

任意形状の移動物体の扱い

Interpolated bounce-back scheme

$$f_{ijk}(\mathbf{x}, t + \Delta t) = \begin{cases} 2qf_{ijk'}(\mathbf{x}, t) + (1 - 2q)f_{ijk'}(\mathbf{x} + \xi_{ijk}\Delta t, t) + \frac{2W_{ijk}\rho(\xi_{ijk} \cdot \mathbf{u}_{\text{wall}})}{c_s^2} & \left(0 < q \leq \frac{1}{2}\right) \\ \frac{1}{2q} \left(f_{ijk'}(\mathbf{x}, t) + \frac{2W_{ijk}\rho(\xi_{ijk} \cdot \mathbf{u}_{\text{wall}})}{c_s^2} \right) + \frac{(2q - 1)}{2q} f_{ijk}(\mathbf{x}, t) & \left(\frac{1}{2} < q \leq 1\right) \end{cases}$$

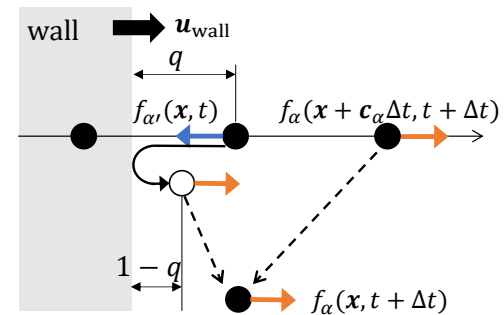
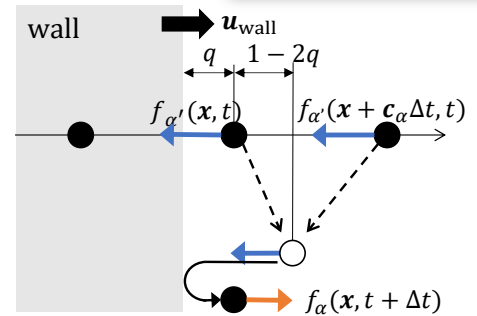
*Bouzidi, M., et al., *Physics of Fluids*, Vol. 13, No. 11 (2001), pp. 3452–3459.

Hydrodynamic force*

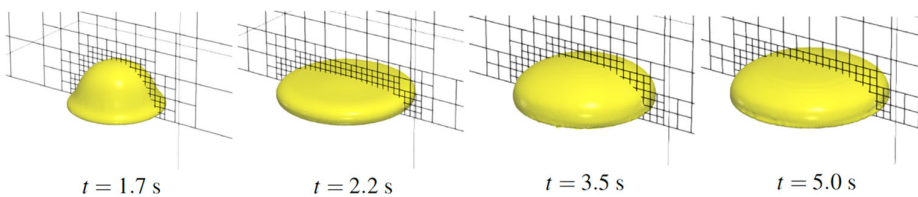
$$\mathbf{F}_{ijk}(\mathbf{x}, t) = (\xi_{ijk} - \mathbf{u}_{\text{wall}})f_{ijk}(\mathbf{x}, t) - (\xi_{ijk'} - \mathbf{u}_{\text{wall}})f_{ijk'}(\mathbf{x}, t + \Delta t)$$

$$\mathbf{F}_{\text{fluid}} = \sum_{\mathbf{x} \in \text{boundary}} \sum_{i,j,k=-1}^1 \mathbf{F}_{ijk}(\mathbf{x}, t)$$

*Wen, Binghai, et al. *Journal of Computational Physics* 266 (2014): 161-170.

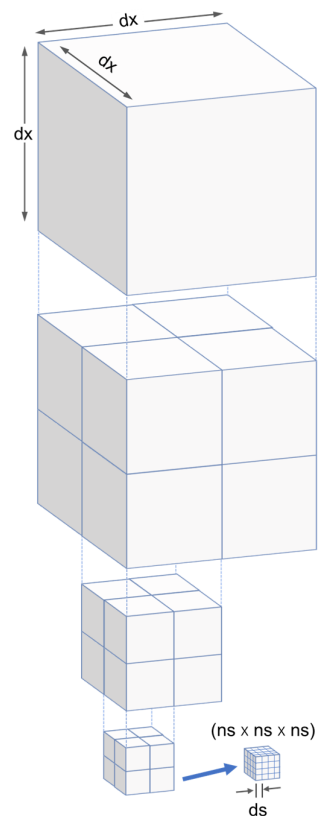
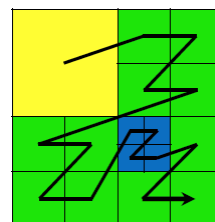
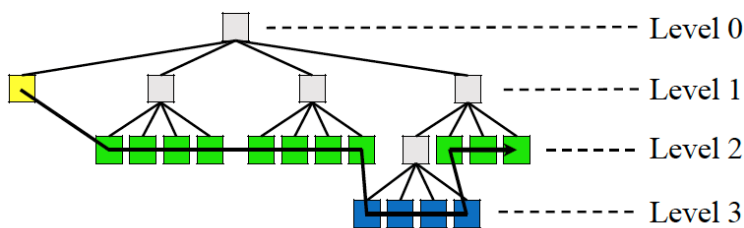


AMR (Adaptive Mesh Refinement) to assign high-resolution mesh near the interfaces



2D: Quad-based refinement/coarsening

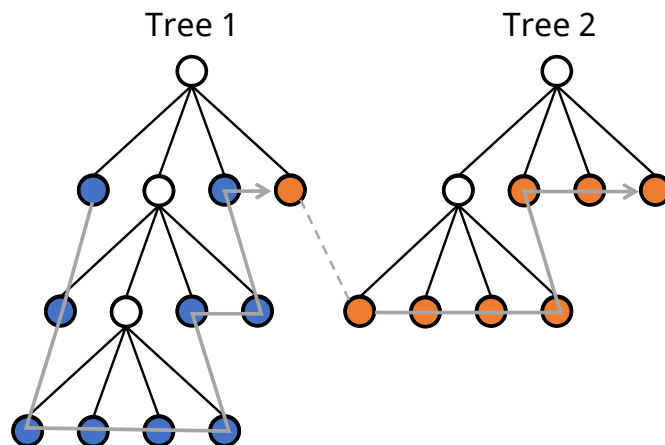
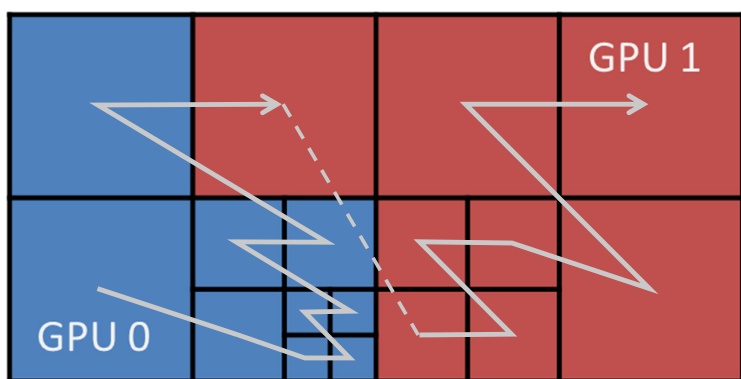
3D: Octree-based



*Shintaro Matsushita, Takayuki Aoki, *Journal of Computational Physics*, Vol. 445, 15 Nov 2021, 110605

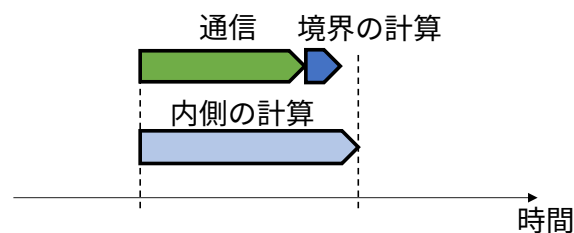
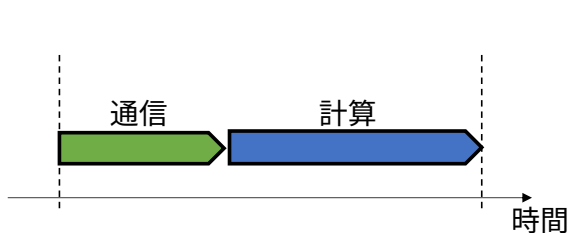
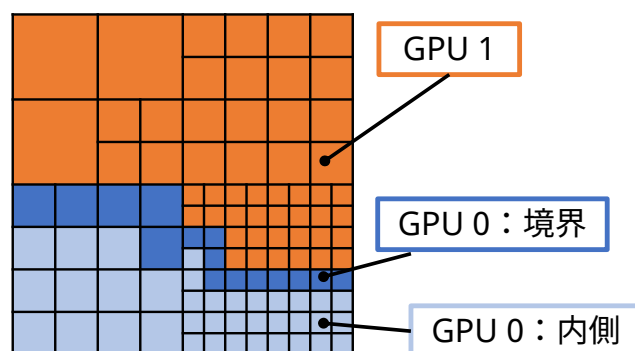
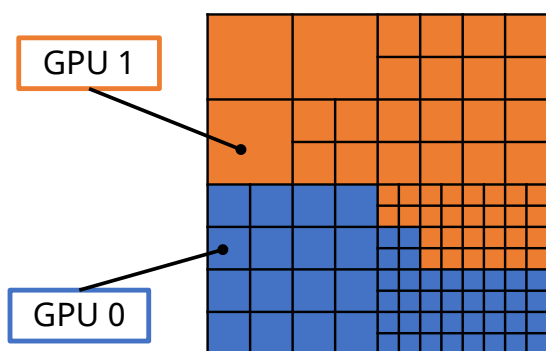
Dynamic Load Balance using Space-filling Curve

- Ordering by using Morton Space-filling Curve
- Each sub-domain has the same number of blocks

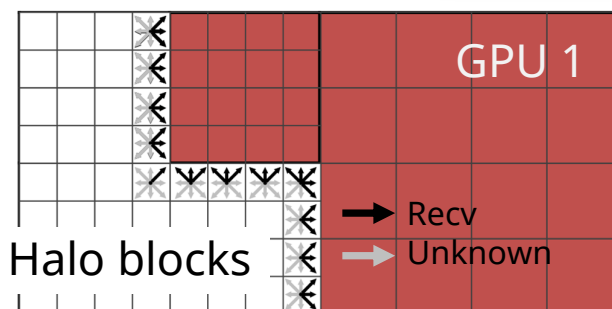
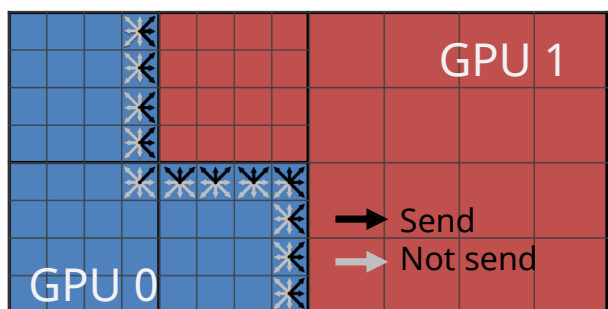


*Seiya Watanabe, Takayuki Aoki, *Computer Physics Communications*, Vol. 445, 15 Nov 2021, 110605

Overlapping computation with communication

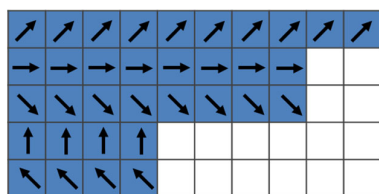


袖領域のGPU間通信



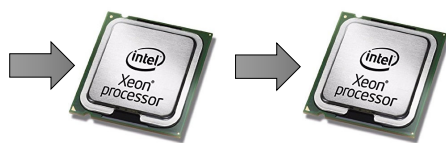
(1) 送信データのパッキング

(5) 受信データのアンパッキング

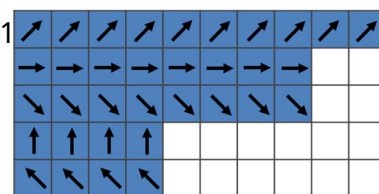


(2) GPU0からCPU0

(4) CPU1からGPU1

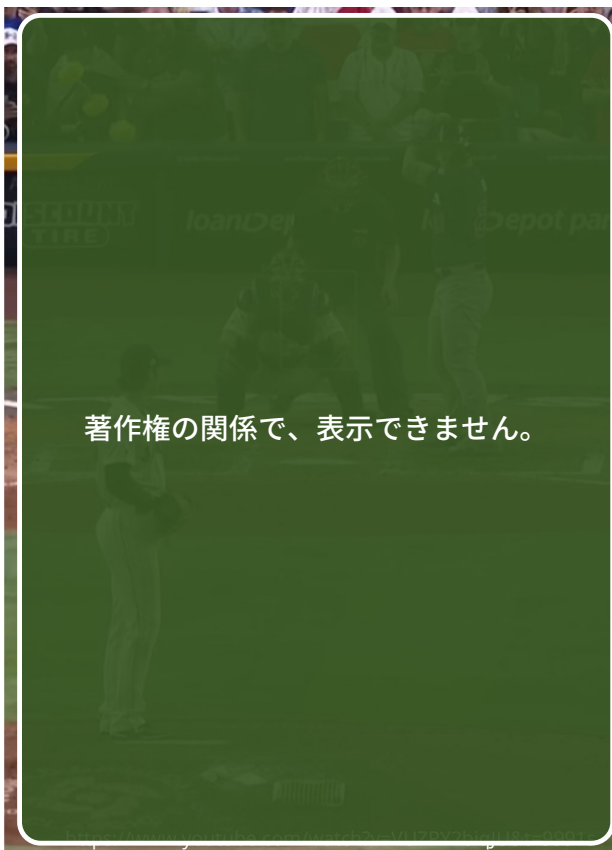


(3) MPI 通信



スーパーとは

横に大きく曲がるスライダー
(縦の変化が少ない)



著作権の関係で、表示できません。

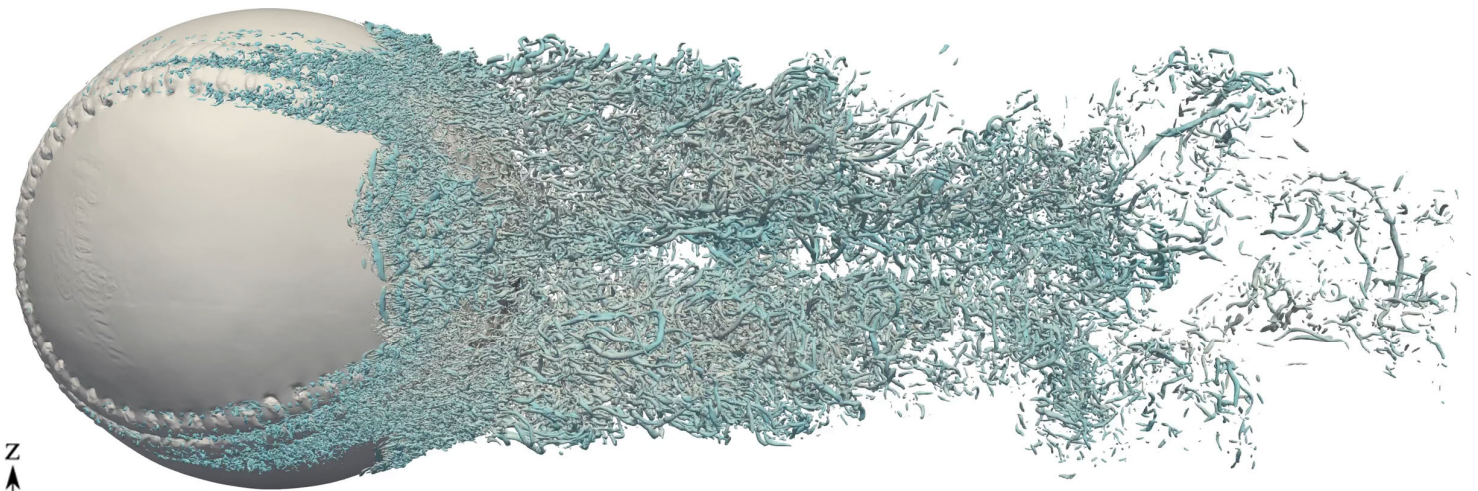
NHK
NEWS

©NHK

横回転のボールの後流

AOKI Lab.
Tokyo Institute of Technology

球速 136.8 km/h, 回転数 2590 rpm



水平に回転していると、浮き上がる成分はない

著作権の関係で、表示できません。

著作権の関係で、表示できません。

<https://www.youtube.com/channel/UCJlavxr4G9OFkymtkbKZmOw>

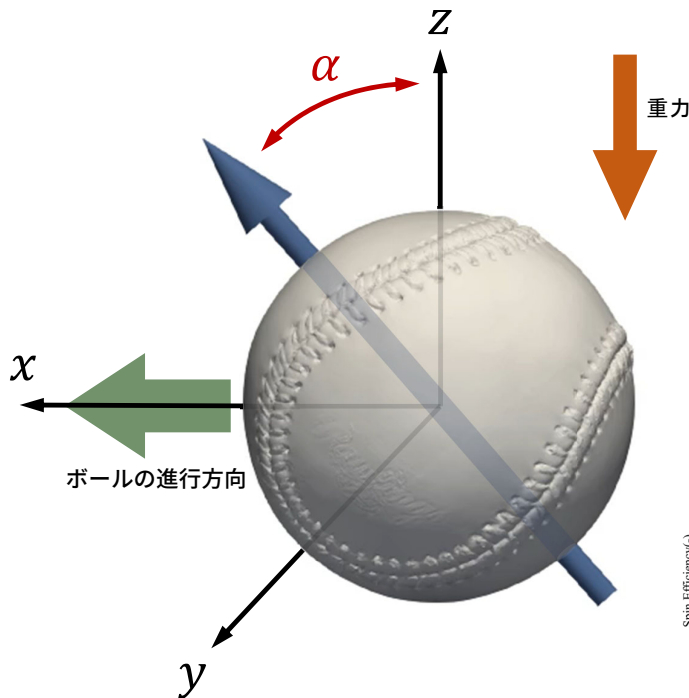
著作権の関係で、表示できません。

ピッチャー側から見たボールの回転

バッターの方に50° 傾ける



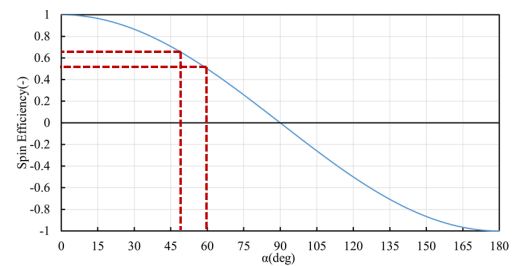
α	回転効率
0.00°	100 %
36.83°	80 %
45.57°	70 %
49.46°	65 %
53.13°	60 %
56.63°	55 %
60.00°	50 %
66.42°	40 %
72.54°	30 %
78.46°	20 %
90.00°	0 %



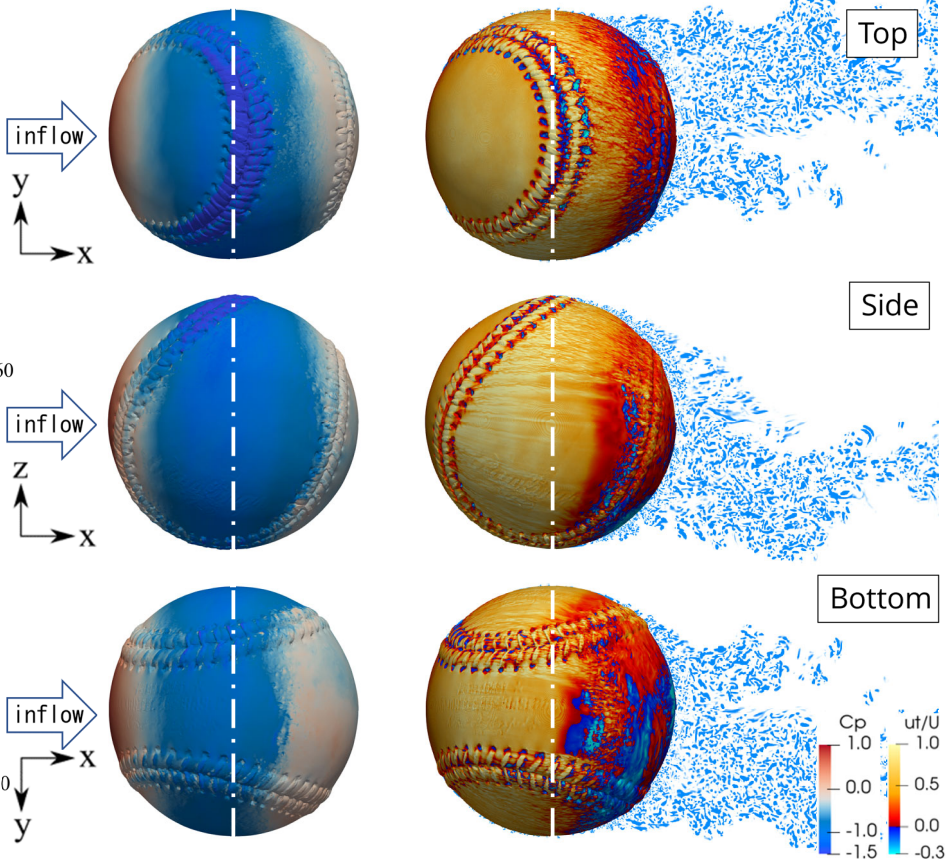
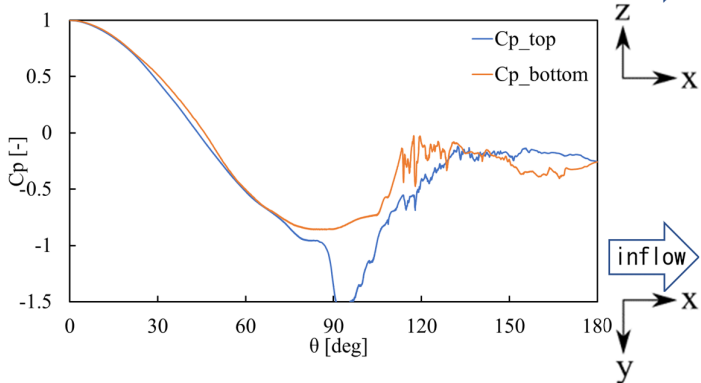
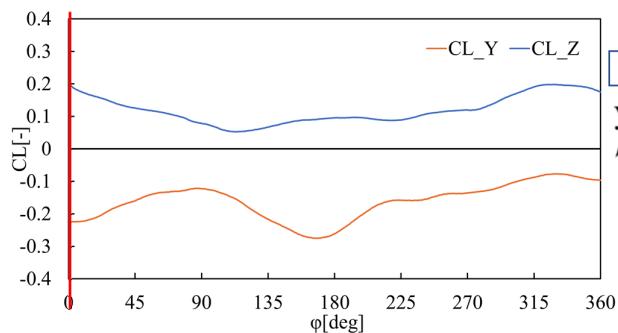
回転効率

回転数 × 回転効率を「有効回転数」

$$\begin{aligned} \text{回転効率} &= \sin(90 - \alpha) \\ &= \cos \alpha \end{aligned}$$



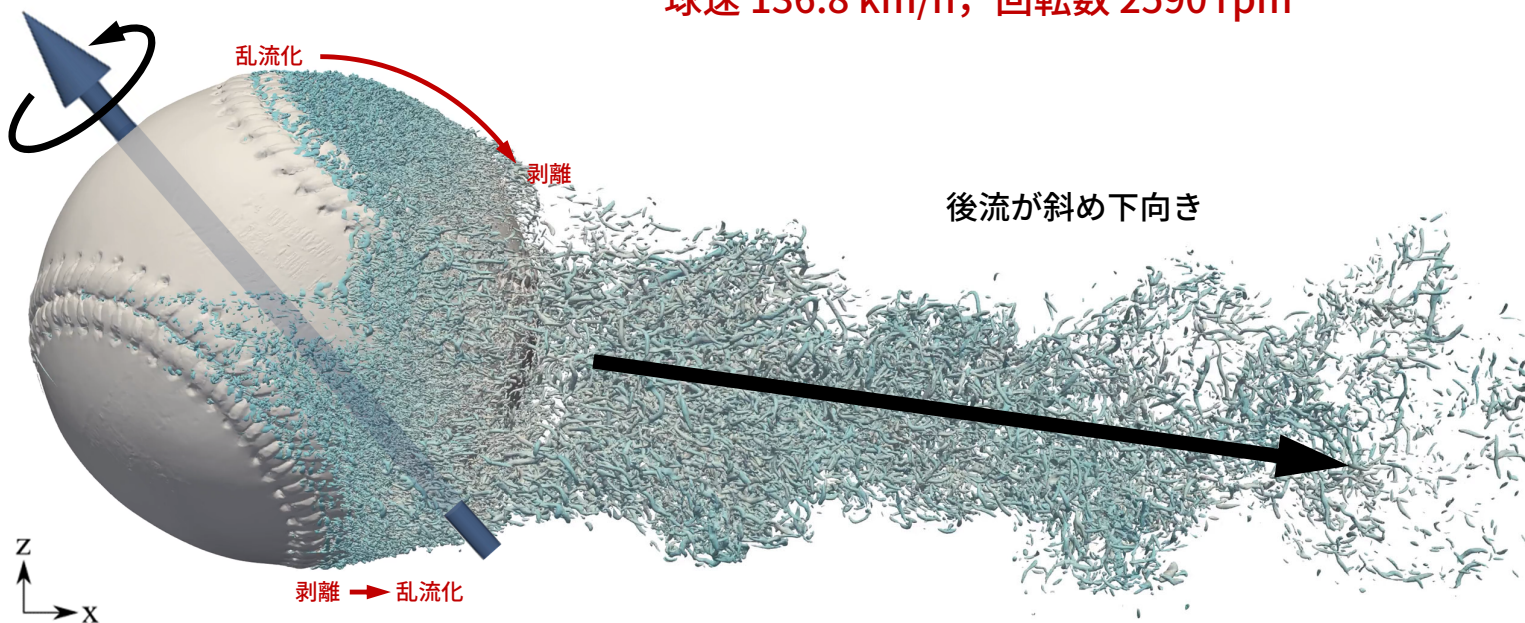
0.7 deg



x 軸方向に 53° 傾く場合 (回転効率 60%)

AOKI Lab.
Tokyo Institute of Technology

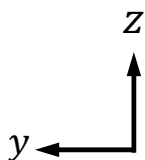
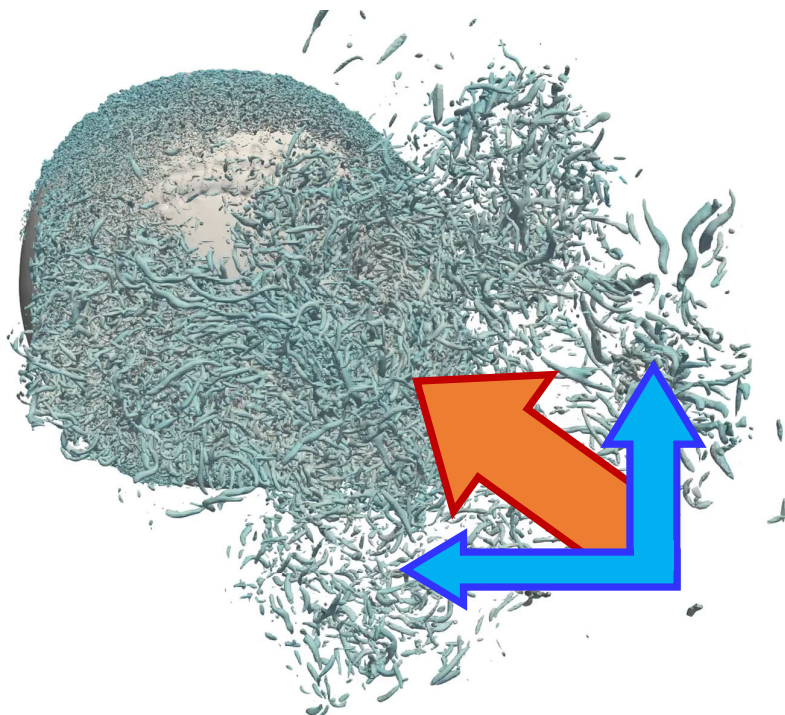
球速 136.8 km/h, 回転数 2590 rpm



背面からの後流

x 軸方向に53°傾く
(回転効率 60%)

球速 136.8 km/h
回転数 2590 rpm



マグナス効果ではない揚力



ボールの上面は縫い目で一度乱流化し、乱流状態で境界層剥離する。境界層の内部が乱流になると、剥離し難くなる。

ボールの下面は層流が縫い目で境界層剥離する。比較的上流側で、縫い目が剥離点を固定化している。

マグナス効果ではなく、
回転軸が傾いていることにより、ボールに揚力が働いている。

6:15

6月
埼玉



秘密

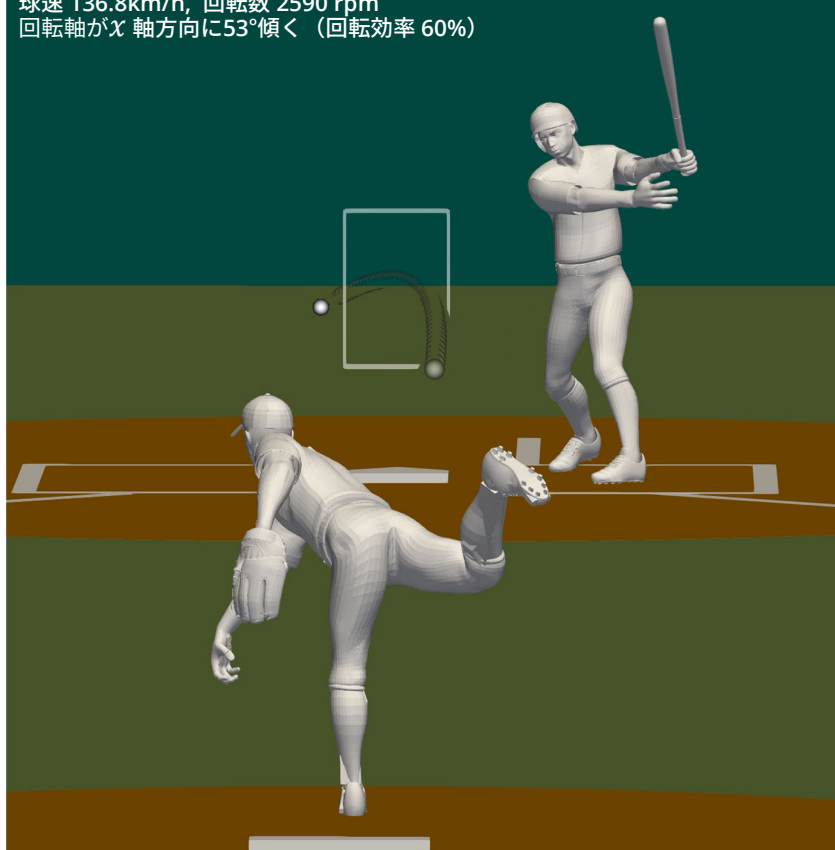
“大谷魔球”やっぱりスゴかった！
スパコン「富岳」が解き明かす
「落ちない魔球」謎に迫る

著作権の関係で、表示できません。

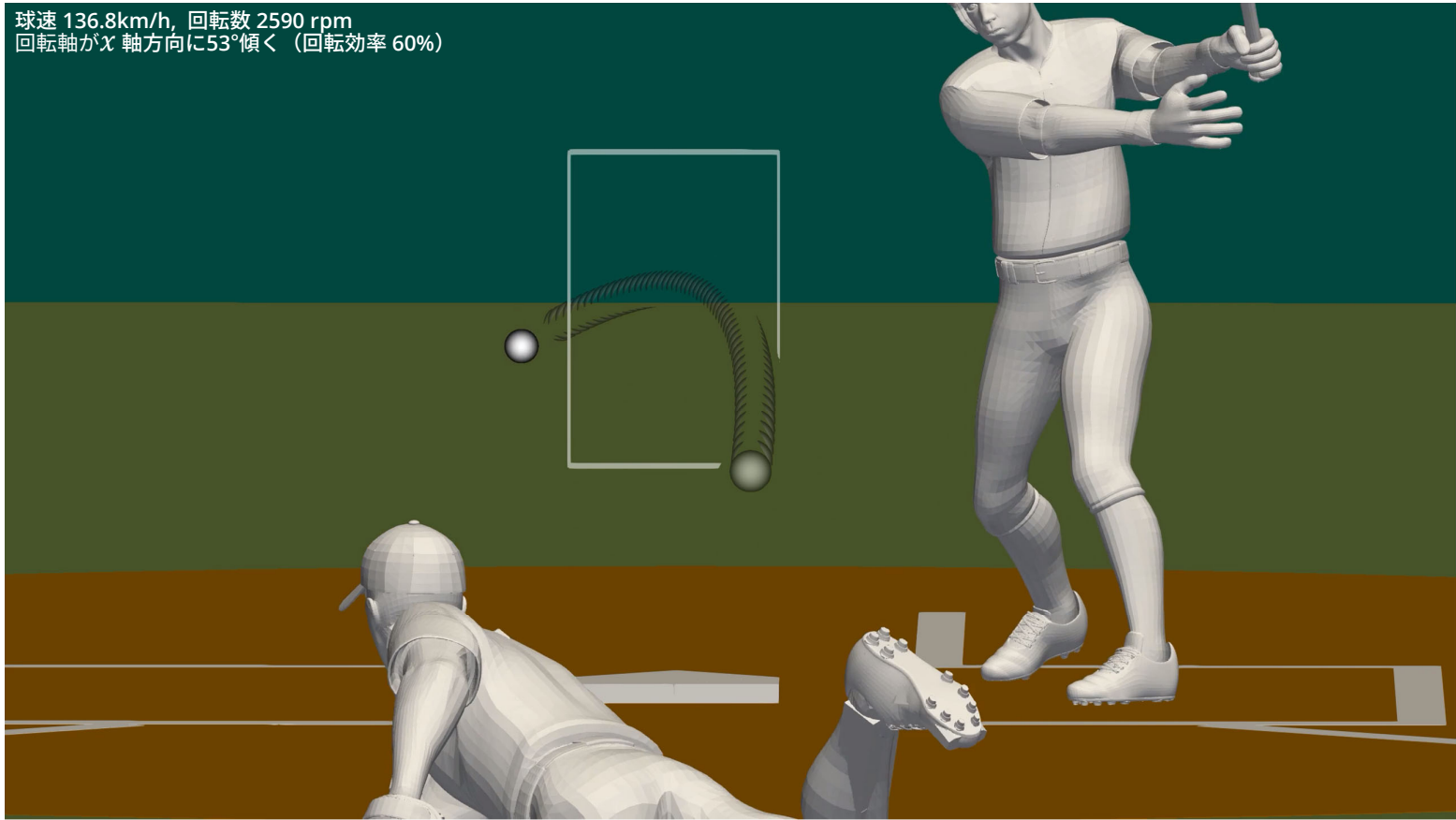
©フジテレビ「イット！」

著作権の関係で、表示できません。

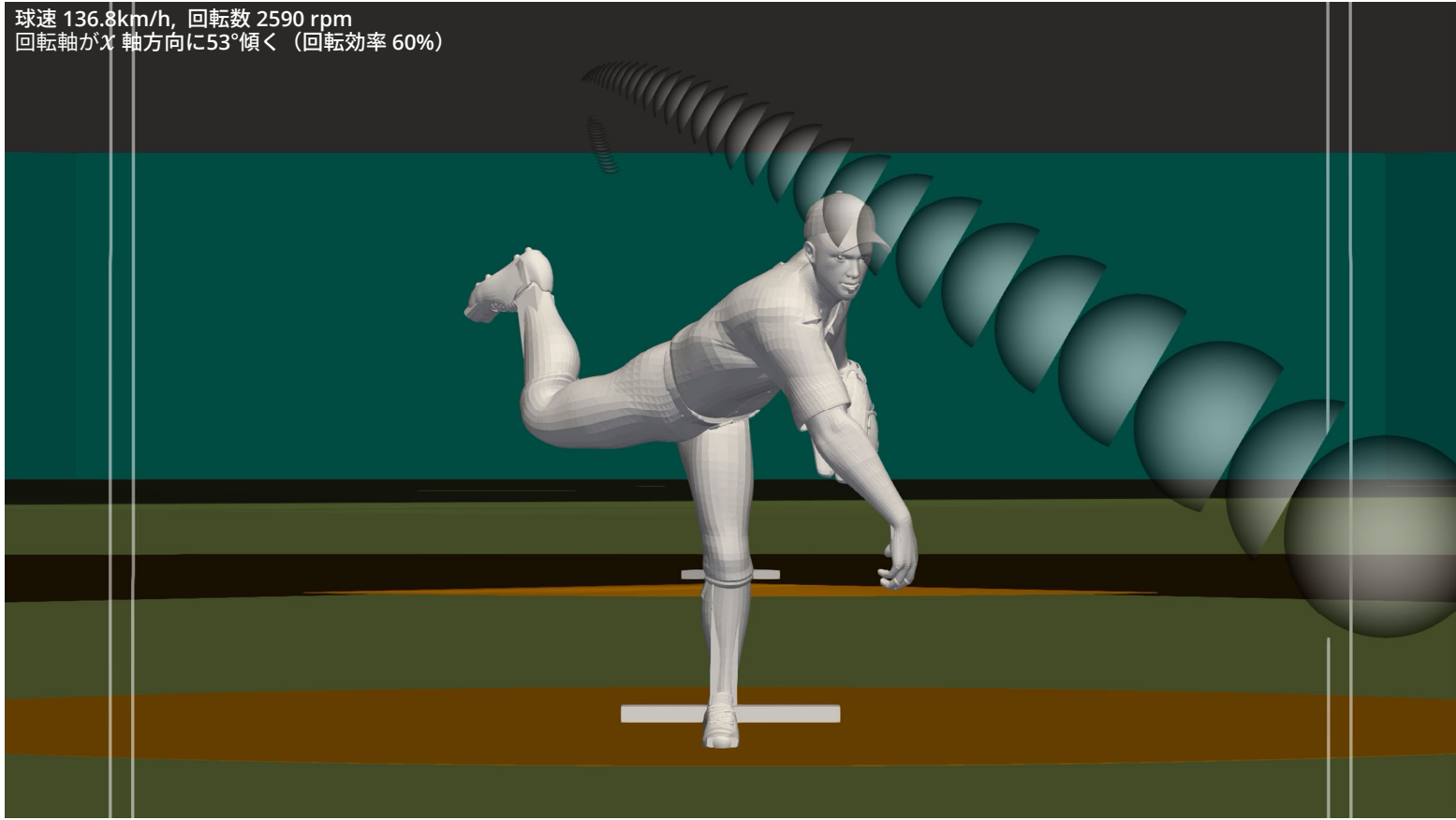
球速 136.8km/h, 回転数 2590 rpm
回転軸がX軸方向に53°傾く (回転効率 60%)



球速 136.8km/h, 回転数 2590 rpm
回転軸がX 軸方向に53°傾く (回転効率 60%)



球速 136.8km/h, 回転数 2590 rpm
回転軸がX 軸方向に53°傾く (回転効率 60%)



まとめ

- Cumulant LBM, AMR 法により、回転する野球ボールの空力解析を行った。
 - スーパーは回転軸がバッター側に傾くことで、マグヌス効果とは異なるメカニズムの揚力が働いている（落ち難い）。
 - 大谷翔平のスーパーのボール軌道を再現することができた。
- 流体シミュレーション（計算科学）により、未知のメカニズム（新しい知見）を明らかにすることができた。

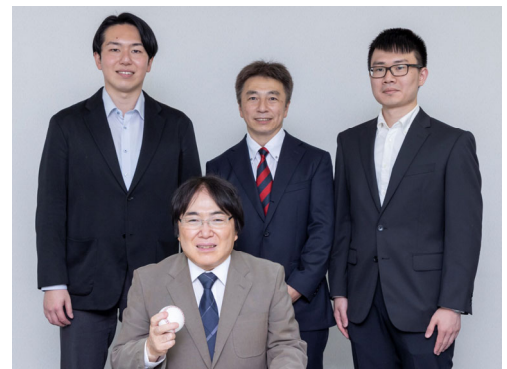
33

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)一般課題 hp220063「ジャイロ回転する野球ボールの空力解析」の元に行った研究である。

東京工業大学・工学院 インイクイ氏、九州大学・応用力学研究所 渡辺勢也助教、慶應義塾大学 小林 充宏 教授らの協力によるものであり、心より感謝の意を表す。また、フリー・スポーツライターの丹羽政善氏にも多くの情報を提供していただいた。

計算には理化学研究所「富岳」、名古屋大学情報基盤センター「不老」Type-II Subsystem を利用させていただいた。記して謝意を表す。



34