

# 野球ボールのLES空力解析

## – 大谷翔平のスイーパー再現 –

東京工業大学 学術国際情報センター



青木 尊之

## 自己紹介



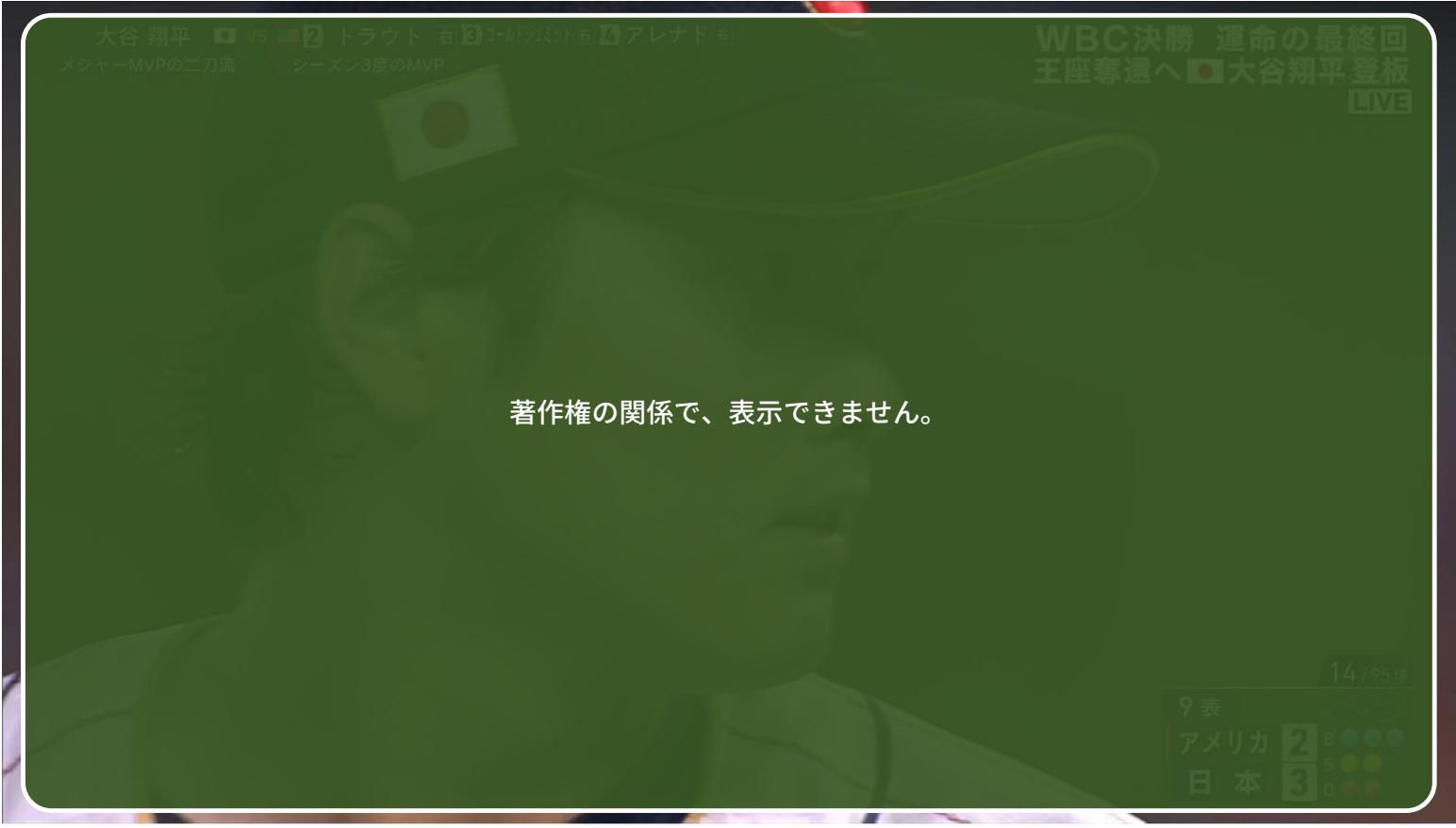
東京工業大学 学術国際情報センター

教授（2001年～現在）

評議員（2021年度～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。

## これまでの成果

AOKI Lab.  
Tokyo Institute of Technology

- 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

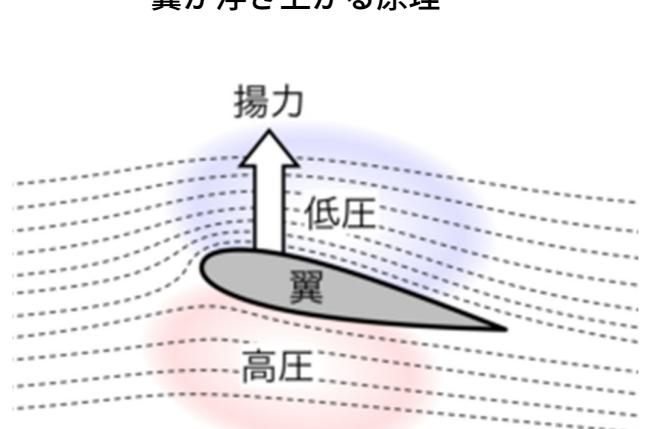
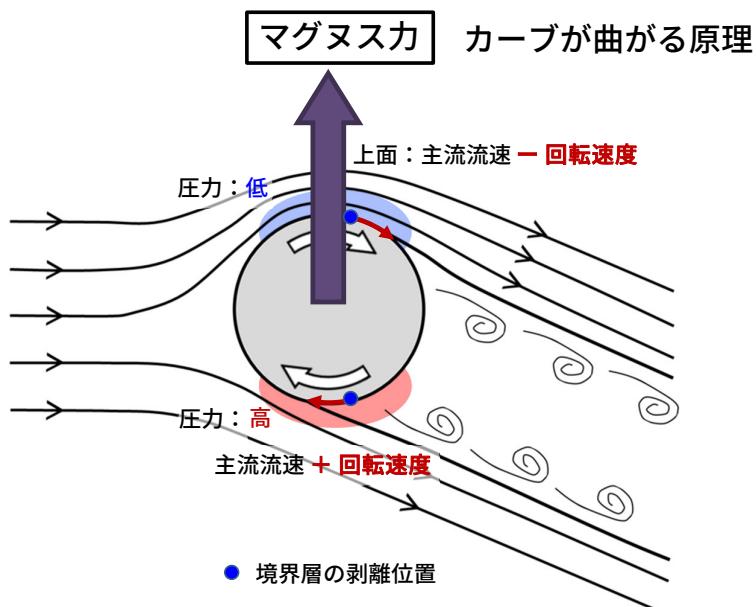
- 球速：ボールの進行方向の速度。  
(プロ野球投手 130km/h ~ 160km/h)
- 回転数：ボールを速く投げようとするとき、ボールに回転がかかってしまう。(1000 rpm~2500 rpm)
- 回転軸：どの方向に回転しているか。

+

- 縫い目の向き：フォーシーム，ツーシーム

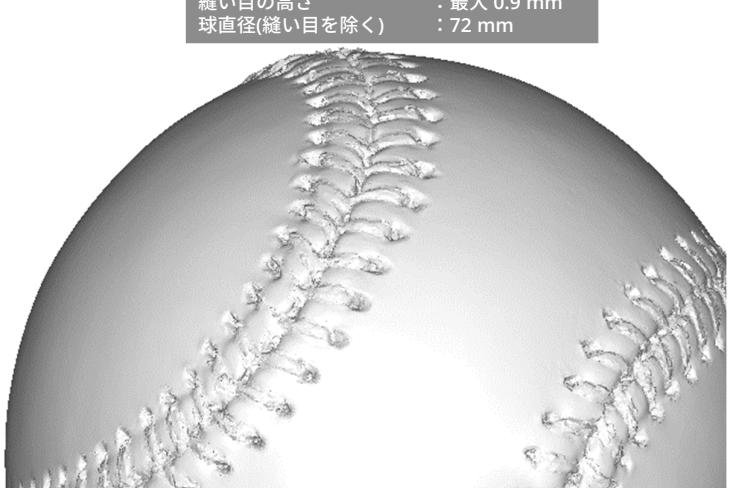
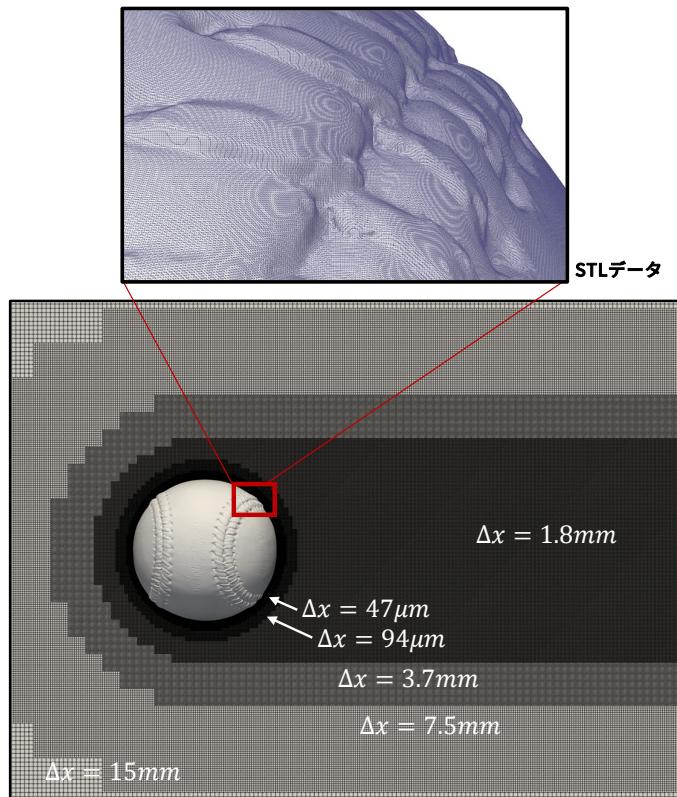
5

## 回転している球に働く力（マグヌス効果）



6

# 計算格子



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」

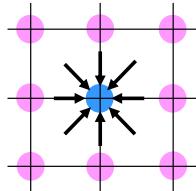


名古屋大学情報基盤センター  
「不老」Type-II Sub-system

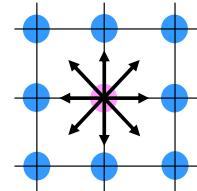
# LBM (Lattice Boltzmann Method)

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

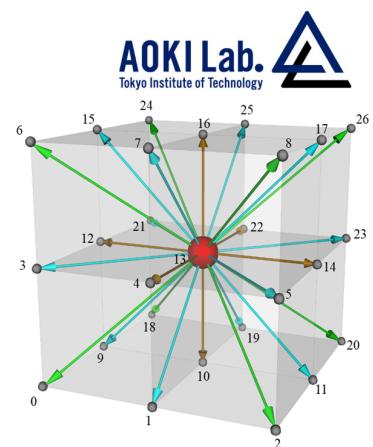
$$f_\alpha^{eq} = w_\alpha \left[ 1 + \frac{(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u})}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u})^2}{2c_s^4} - \frac{|\mathbf{u}|^2}{2c_s^2} \right]$$



**Collision Step:**



**Streaming Step:**



Collision Model	Collision Process	Number of Relaxation Time
SRT (Single Relaxation Time)	Distribution function	1
TRT (Two Relaxation Time) <sup>[1]</sup>	Distribution function	2
MRT (Multiple Relaxation Time) <sup>[2]</sup>	Moment	15, 19, 27
Cascaded <sup>[3]</sup>	Central Moment	27
Cumulant <sup>[4]</sup>	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  $f_{ijk}$

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

$$\text{Cumulant Statistical Quantity} = e^{-u\Xi - v\Upsilon - wZ} \sum_{ijk} f_{ijk} e^{-\Xi i c} e^{-\Upsilon j c} e^{-Z k c}$$

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

Cumulant Collision term

$$k_{\alpha\beta\gamma}^* = \omega_{\alpha\beta\gamma} k_{\alpha\beta\gamma}^{\text{eq}} + (1 - \omega_{\alpha\beta\gamma}) k_{\alpha\beta\gamma}$$

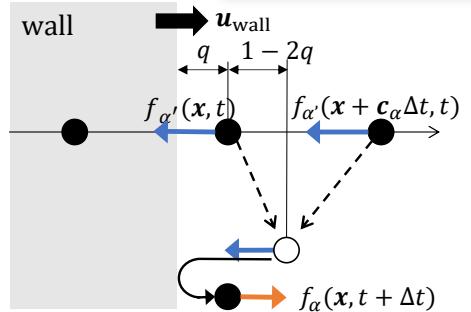
$\alpha\beta\gamma$ : moment  
 $\omega_{\alpha\beta\gamma}$ : relaxation

# 任意形状の移動物体の扱い

## Interpolated bounce-back scheme

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

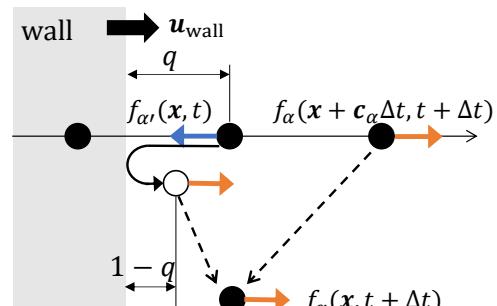
\*Bouzidi, M., et al., Physics of Fluids, Vol. 13, No. 11 (2001), pp. 3452–3459.



## Hydrodynamic force\*

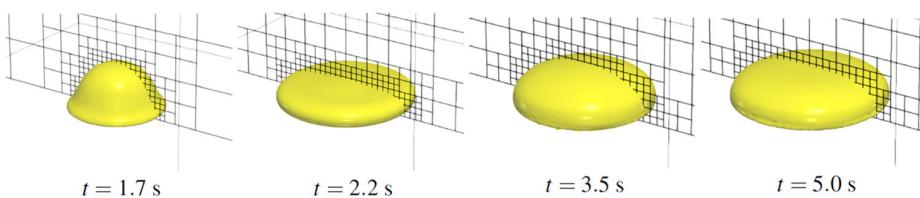
$$\mathbf{F}_{ijk}(x, t) = (\xi_{ijk} - \mathbf{u}_{\text{wall}}) f_{ijk}(x, t) - (\xi_{ijk'} - \mathbf{u}_{\text{wall}}) f_{ijk'}(x, t + \Delta t)$$

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



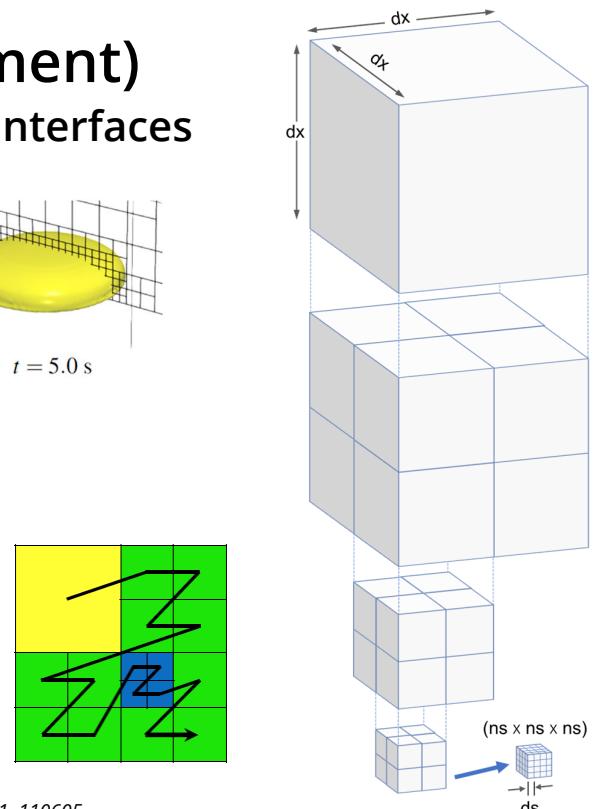
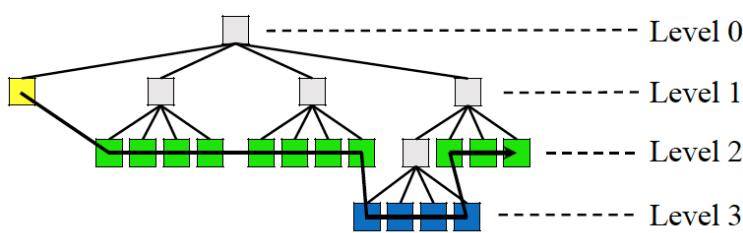
\*Wen, Binghai, et al. Journal of Computational Physics 266 (2014): 161-170.

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



2D: Quad-based refinement/coarsening

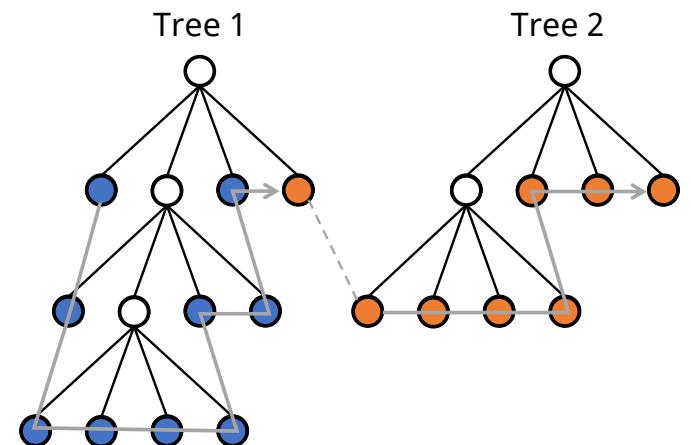
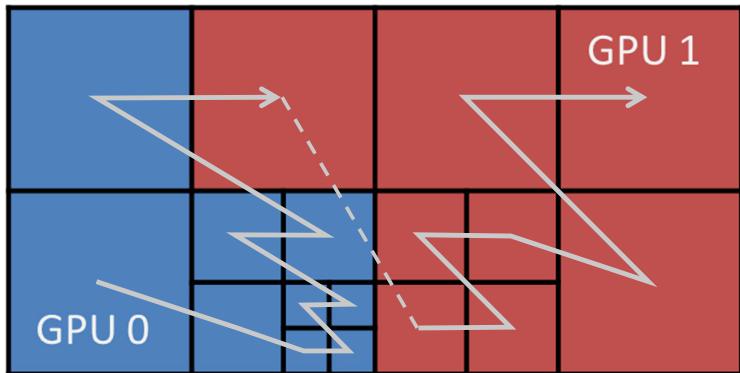
3D: Octree-based



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

# Dynamic Load Balance using Space-filling Curve

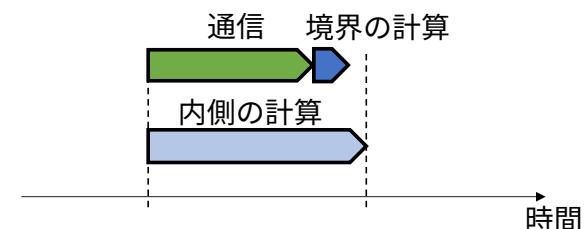
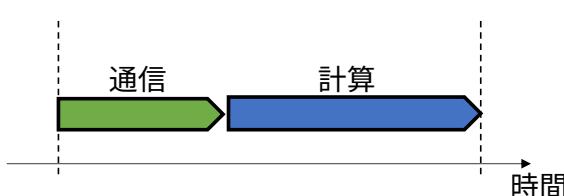
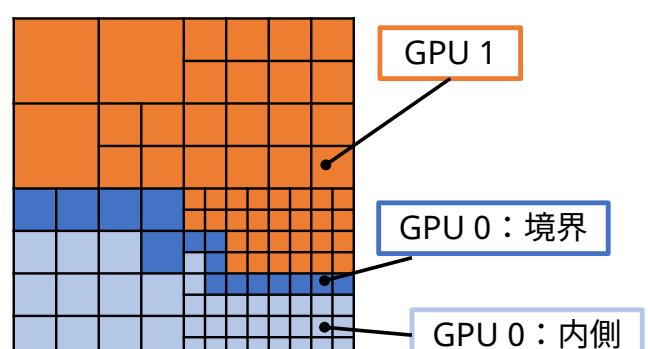
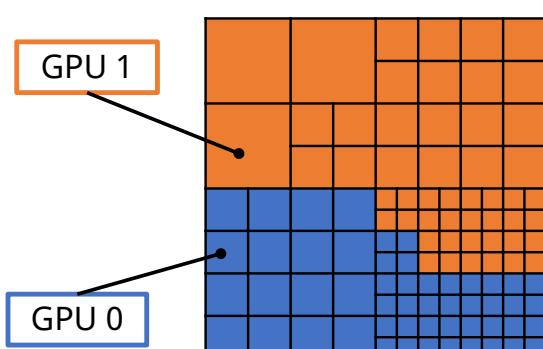
- Ordering by using Morton Space-filling Curve
- Each sub-domain has the same number of blocks



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

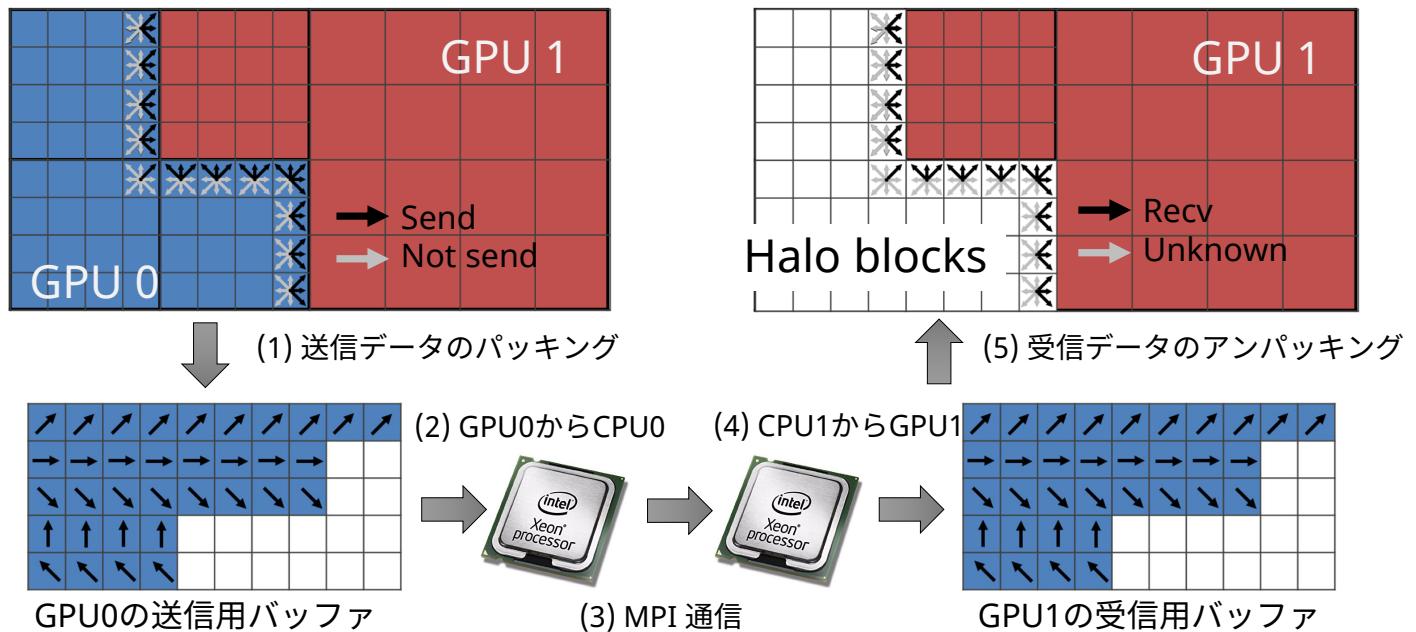
13

## Overlapping computation with communication



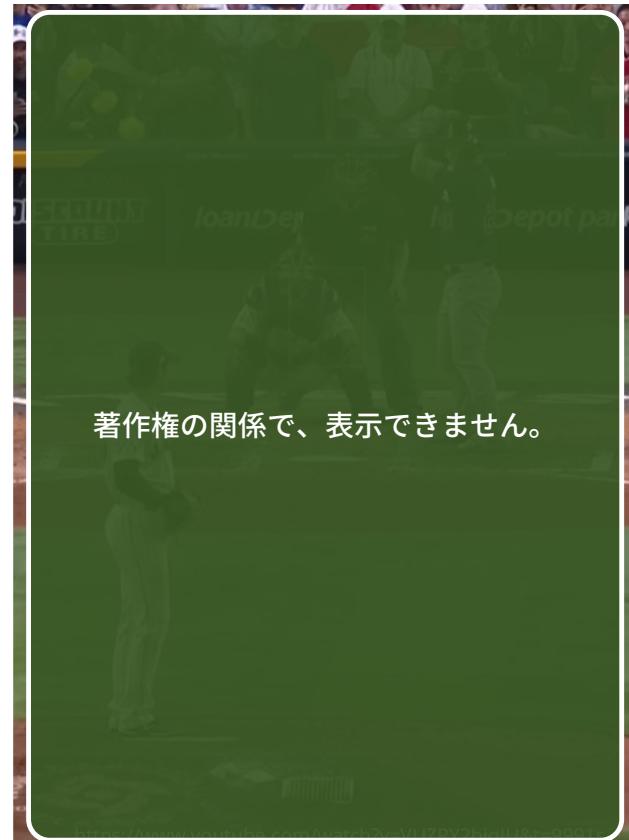
14

# 袖領域のGPU間通信



## スイーパーとは

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。

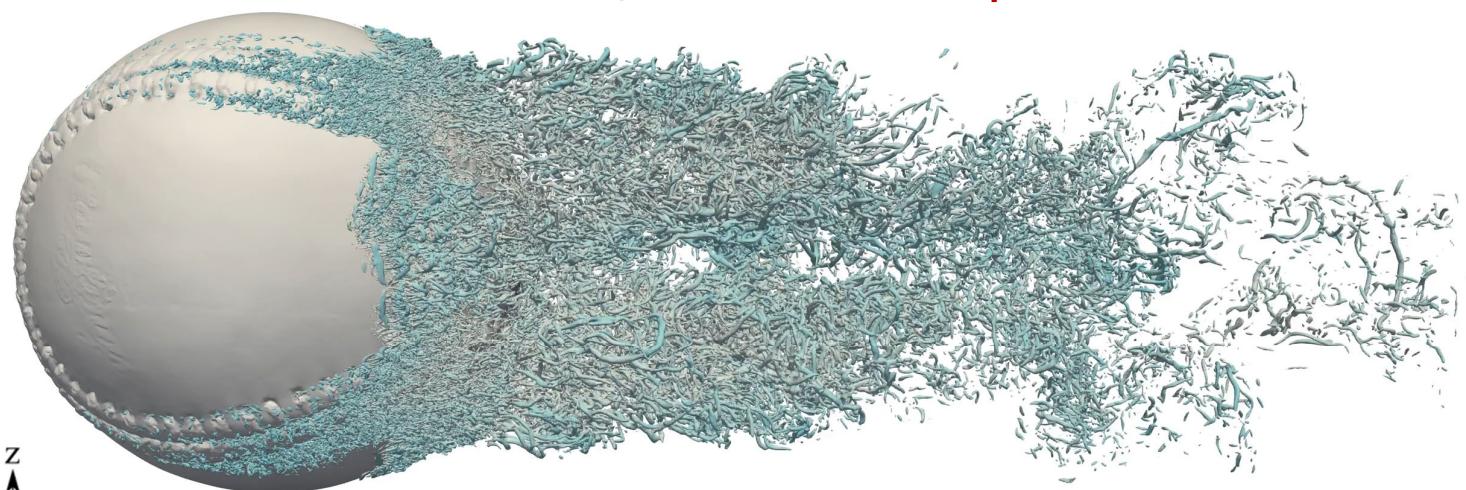
NHK  
NEWS

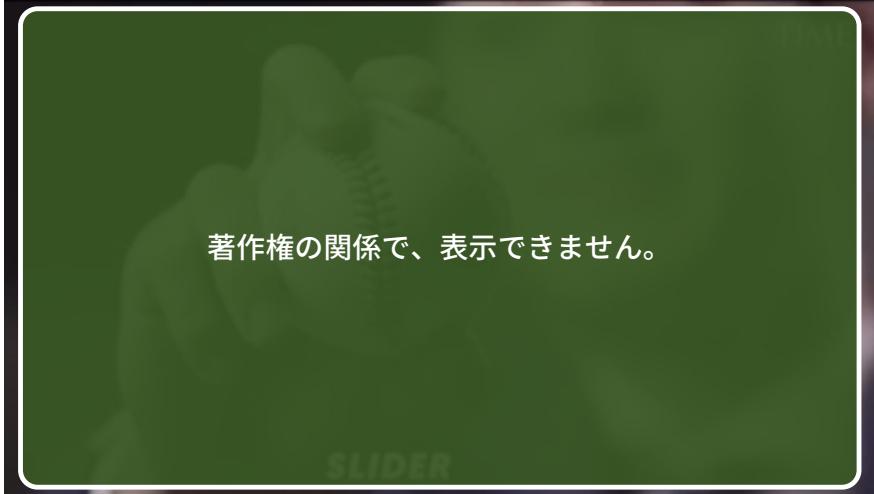
©NHK

## 横回転のボールの後流

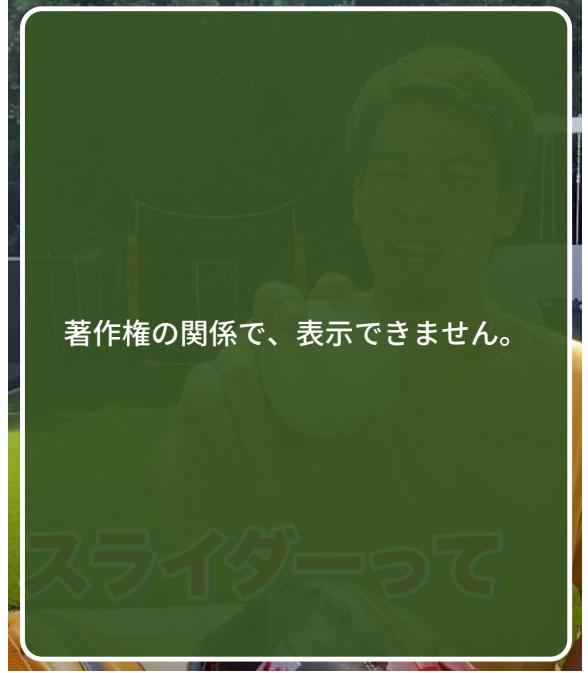
球速 136.8 km/h, 回転数 2590 rpm

AOKI Lab.  
Tokyo Institute of Technology





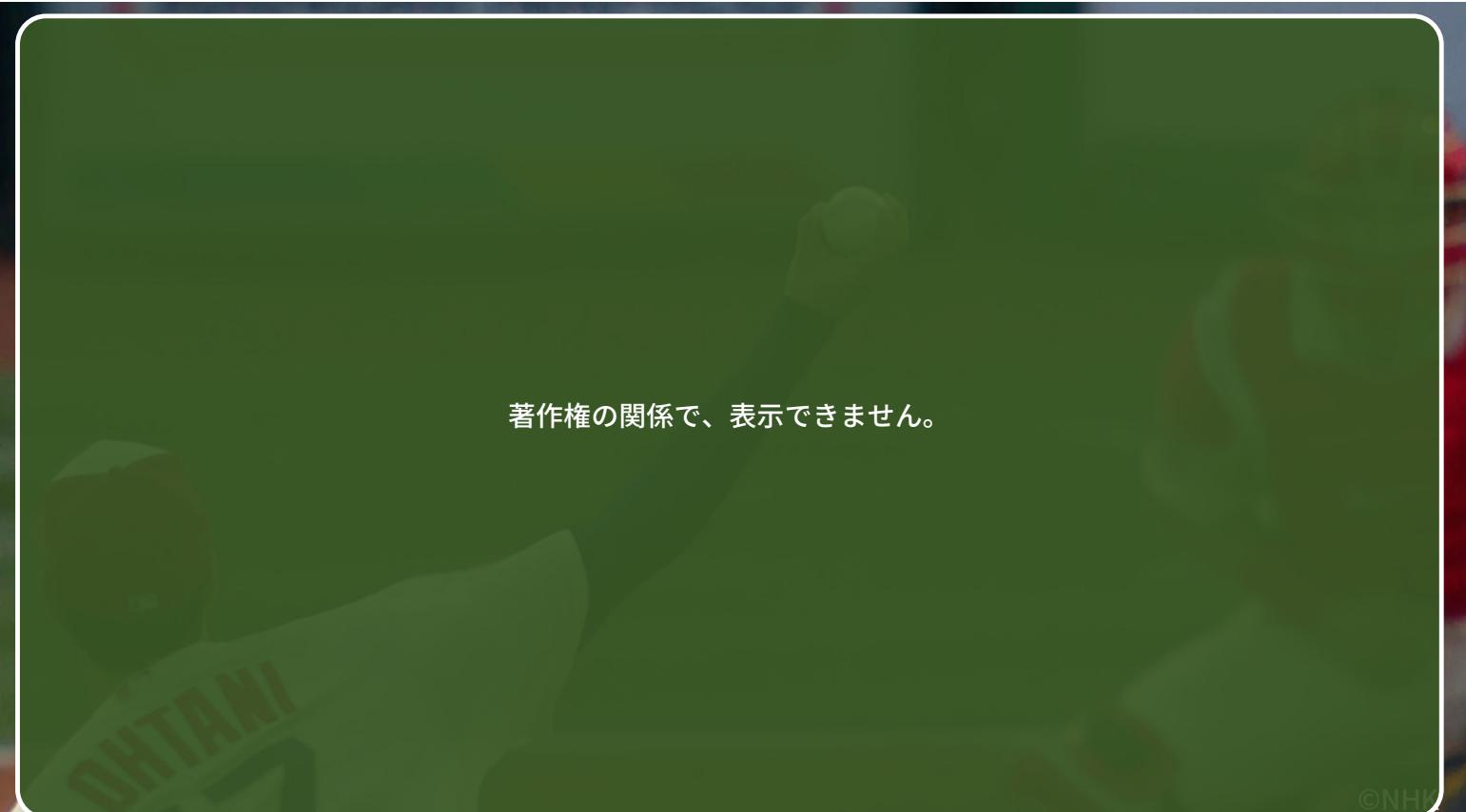
著作権の関係で、表示できません。



著作権の関係で、表示できません。

スライダーって

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



著作権の関係で、表示できません。

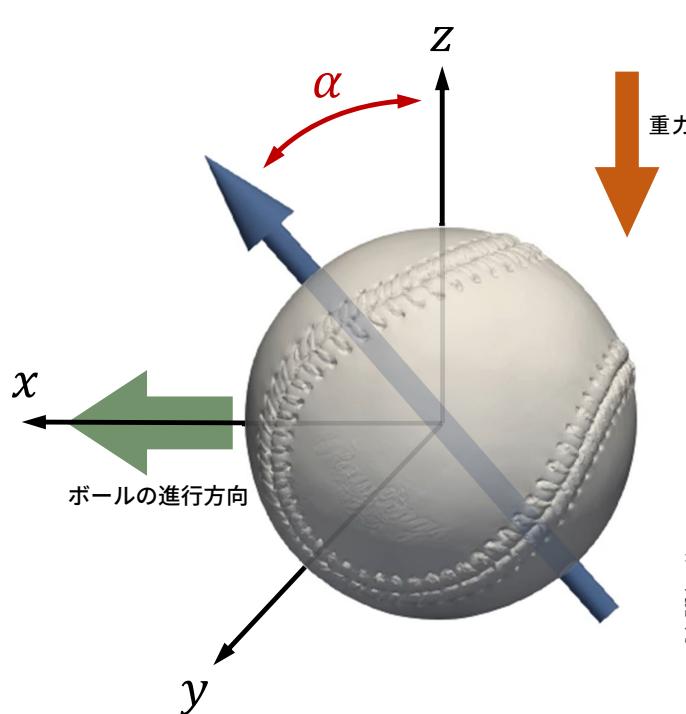
©NHK

# ピッチャー側からみたボールの回転

バッターの方向に50° 傾ける



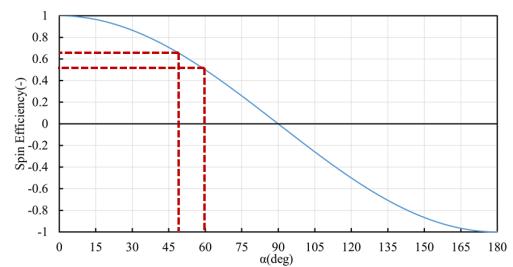
$x$   
 $y$



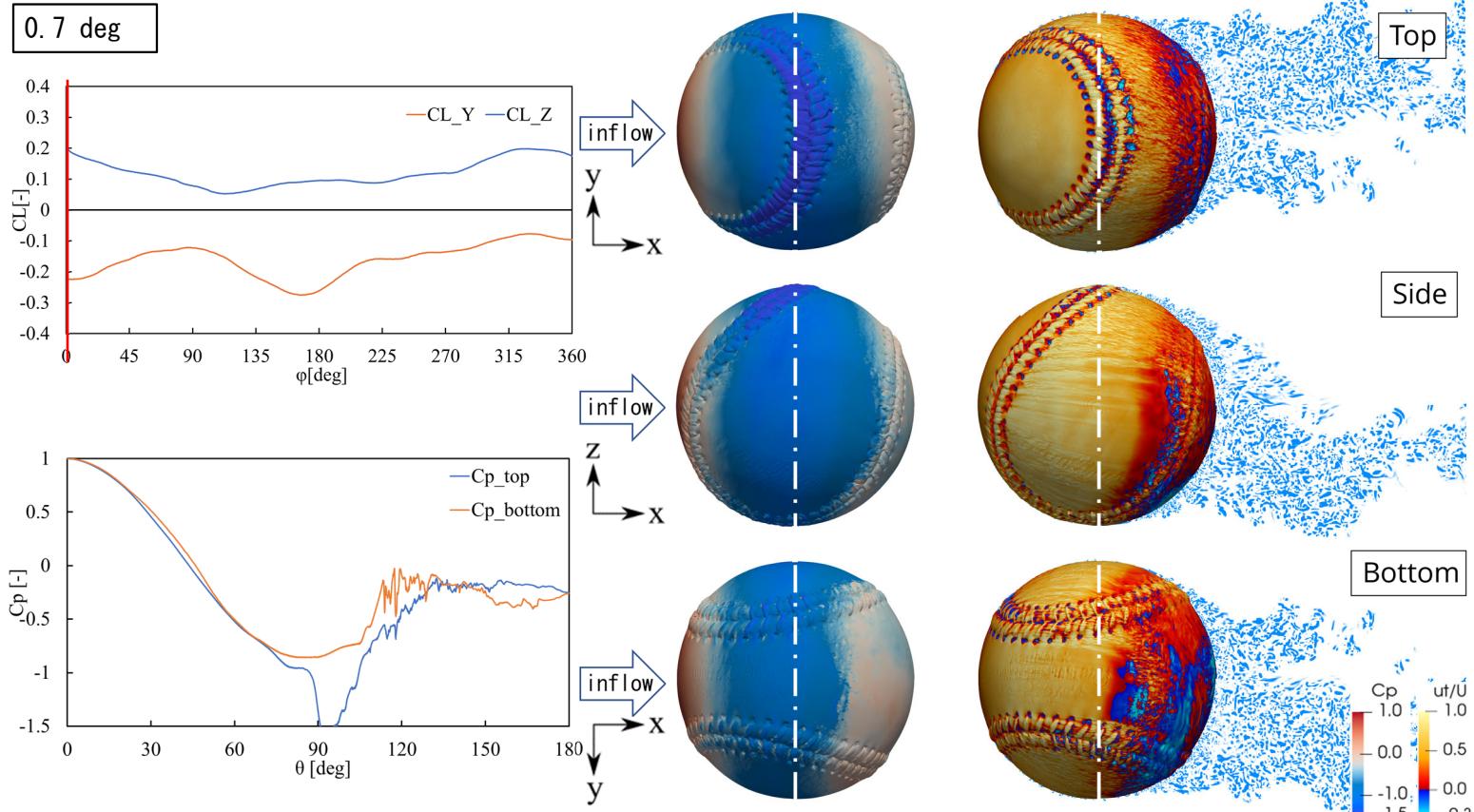
## 回転効率

回転数 × 回転効率を「有効回転数」

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



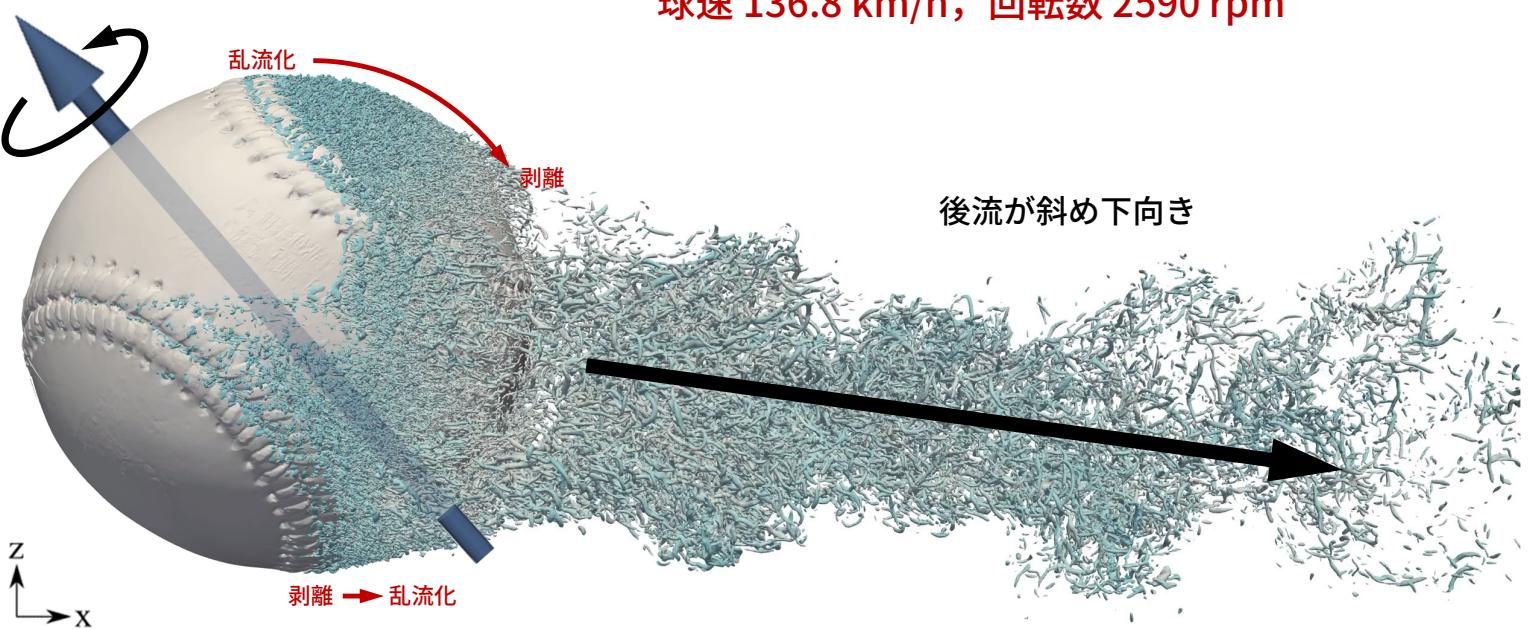
$\alpha$	回転効率
0.00°	100 %
36.83°	80 %
45.57°	70 %
49.46°	65 %
53.13°	60 %
56.63°	55 %
60.00°	50 %
66.42°	40 %
72.54°	30 %
78.46°	20 %
90.00°	0 %



$x$ 軸方向に53°傾く場合（回転効率 60%）

AOKI Lab.  
Tokyo Institute of Technology

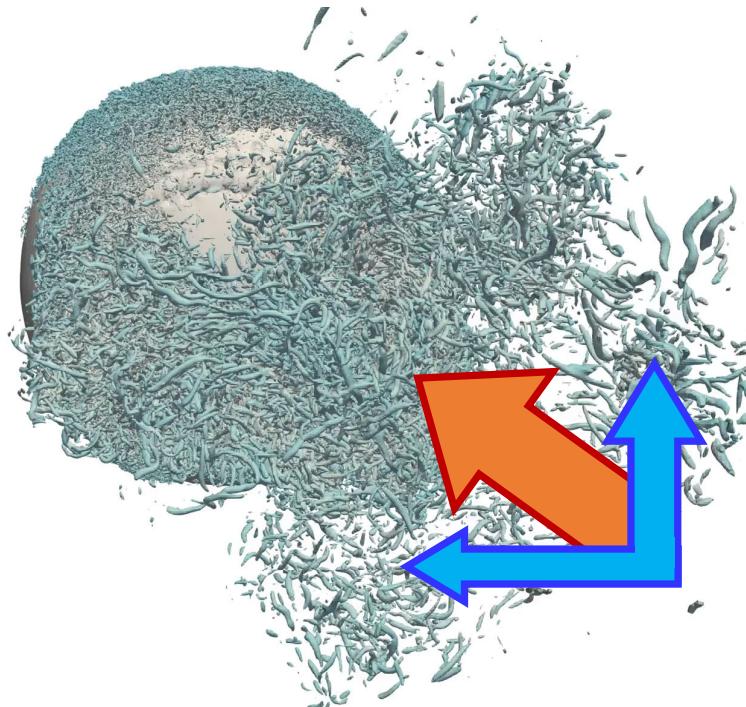
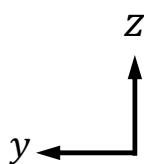
球速 136.8 km/h, 回転数 2590 rpm



# 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

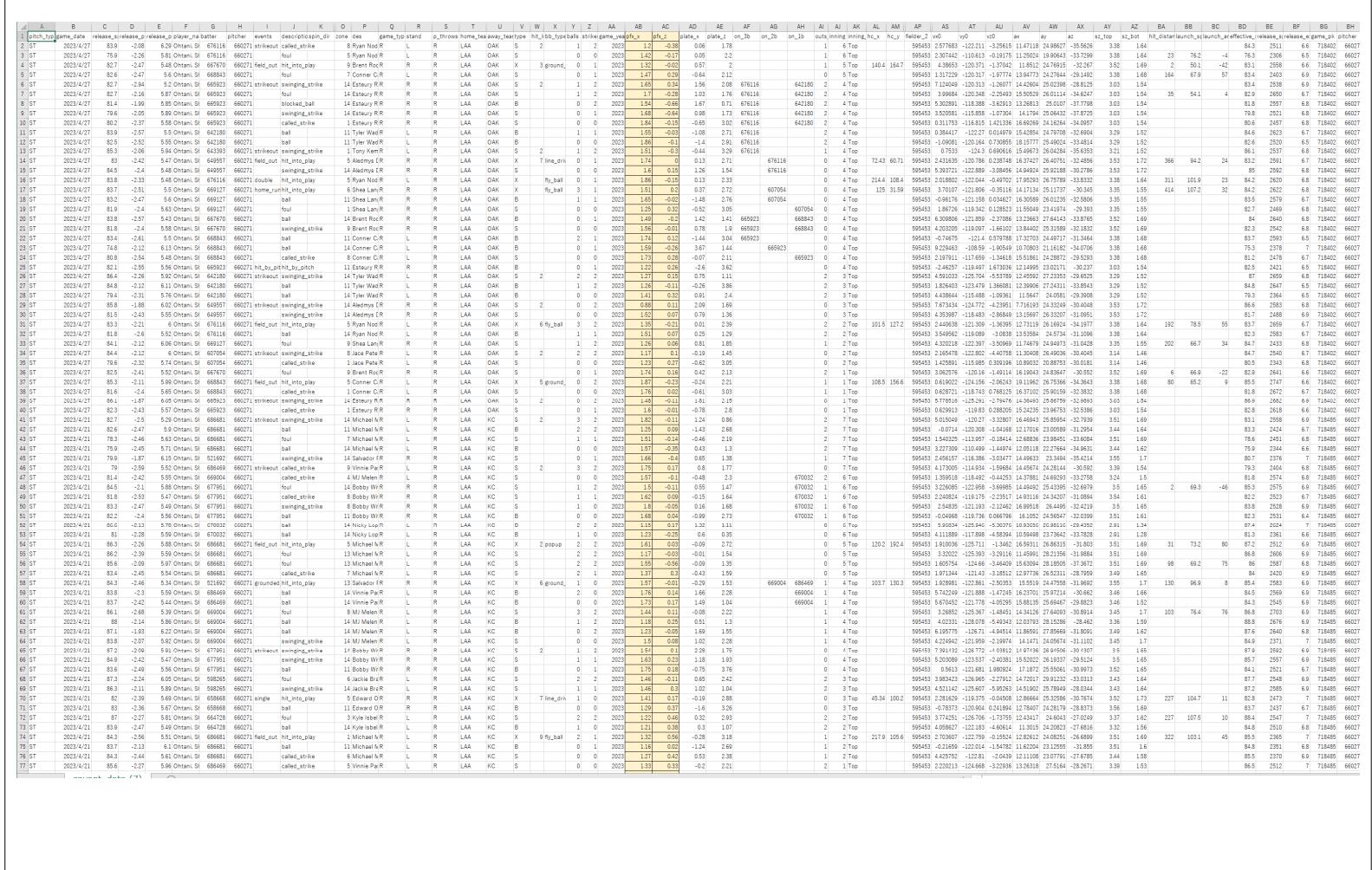


## マグヌス効果ではない揚力

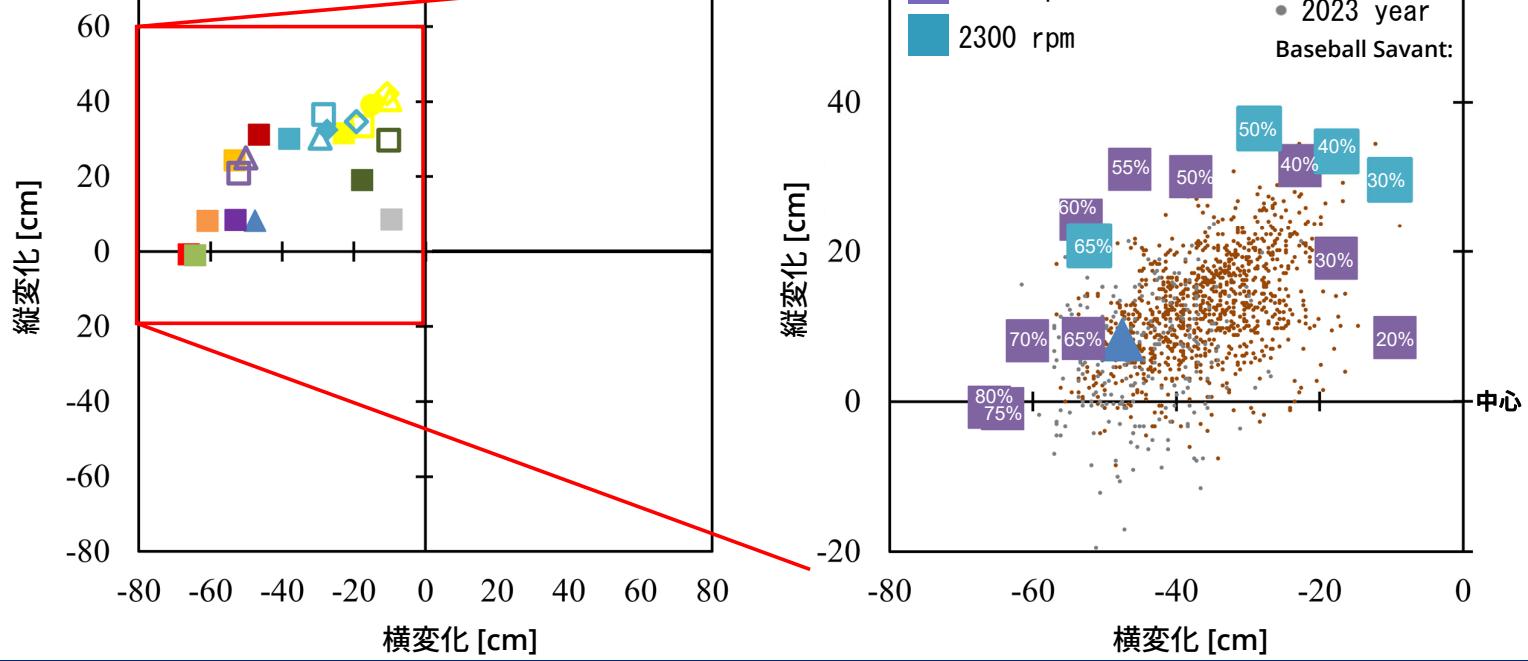
ボールの上面は縫い目で一度乱流化し、乱流状態で境界層剥離する。境界層の内部が乱流になると、剥離し難くなる。

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。

マグヌス効果ではなく、  
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。



• 2022 year



6:15

あす  
埼玉

秘密

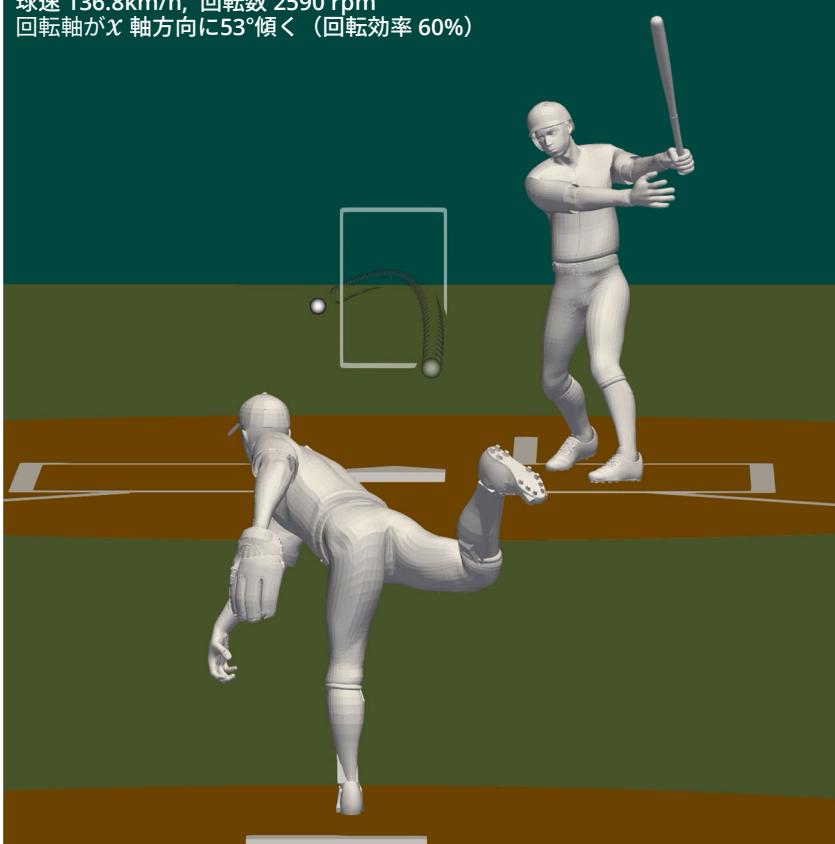
“大谷魔球”やっぱリスゴかった!  
スパコン「富岳」が解き明かす  
「落ちない魔球」謎に迫る

著作権の関係で、表示できません。

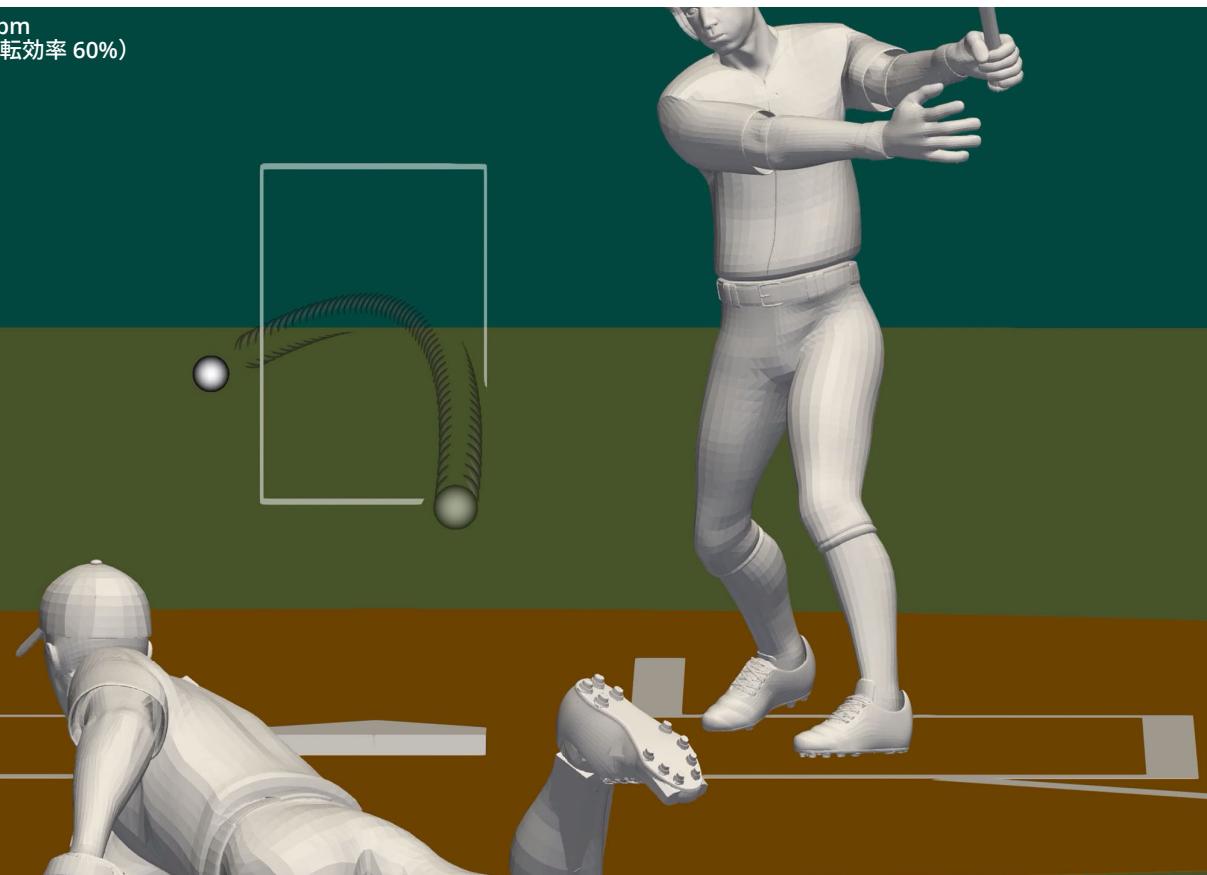
©フジテレビ「イット！」

著作権の関係で、表示できません。

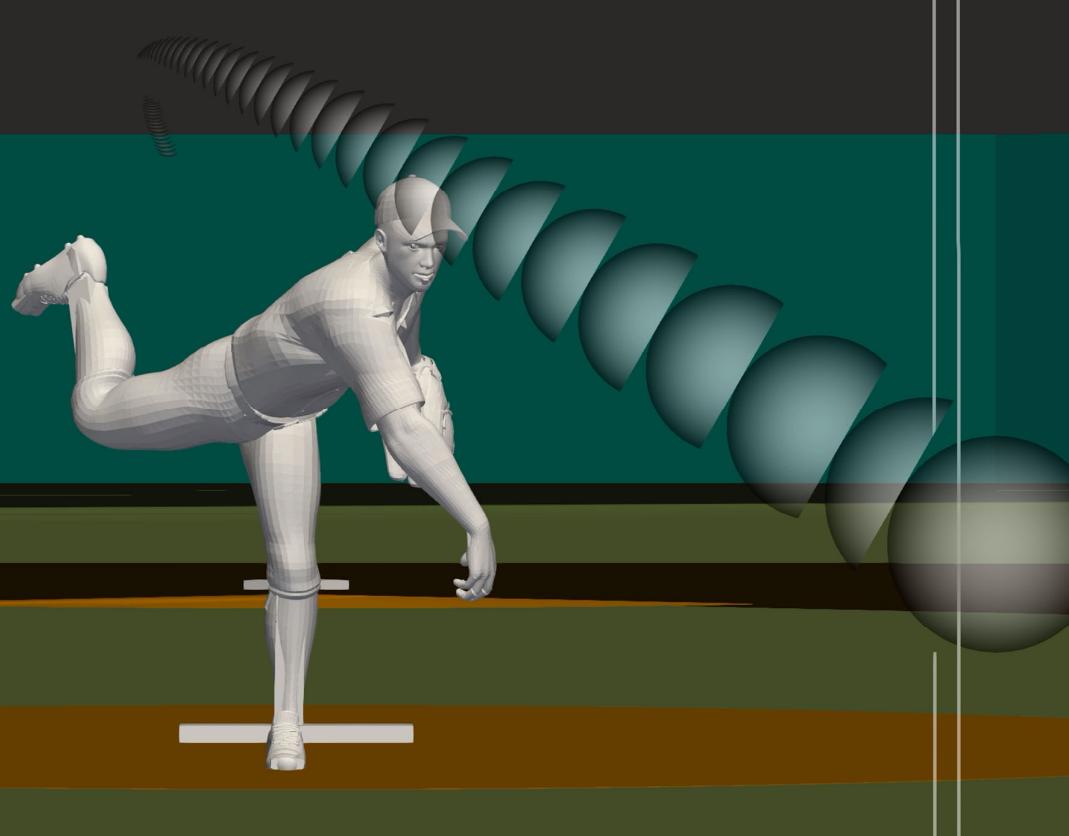
球速 136.8km/h, 回転数 2590 rpm  
回転軸が $\chi$  軸方向に53°傾く（回転効率 60%）



球速 136.8km/h, 回転数 2590 rpm  
回転軸が $\chi$  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 $\chi$  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。
  - スイ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）。
  - 大谷翔平のスイ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。

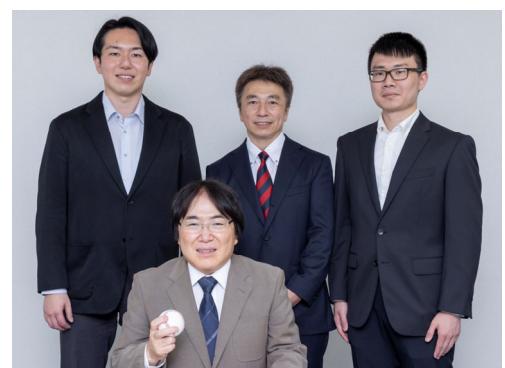
33

## 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」の元に行なった研究である。

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る。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 Sub-system を利用させていただいた。記して謝意を表す。



34