

アドバンス・シミュレーション 第4回 ・セミナー 2023

2023年 7月21日(金) 離

プログラム

1. アドバンスソフト株式会社についてと、先生のご紹介 1

招待講演

2. 「GPU スパコンによる混相流シミュレーション・流体構造連成のシミュレーション」 3
東京工業大学 学術国際情報センター 教授 青木 尊之 様

3. アドバンスソフトからの情報提供 51

講演概要

「GPU スパコンによる混相流シミュレーション・流体構造連成のシミュレーション」

東京工業大学 学術国際情報センター 教授 青木 尊之 様

混相流は数値解析が難しい流れとしてよく知られている。ものづくり分野では複雑形状の物体が激しく移動するため、気体と液体の密度の違いから気液界面がせん断流れとなる。界面での密度と運動量プロファイルを整合させ、運動量が保存するように解く必要がある。さらに、8分木データ構造の適合細分化格子 (AMR) 法を用い、気液界面と物体近傍に高解像度格子を効率的に配置している。また、流体構造問題も AMR 法と Cumulant 型格子ボルツマン法を用いて解いている。これらを GPU スパコンに実装するために、空間重点曲線を用いた動的負荷分散を行っている。

講演では、多数の動画とともにさまざまな応用事例を紹介する。



アドバンスソフト株式会社 セミナー事務局

〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台四丁目3番地 新お茶の水ビルディング 17階西

TEL: 03-6826-3971 FAX: 03-5283-6580

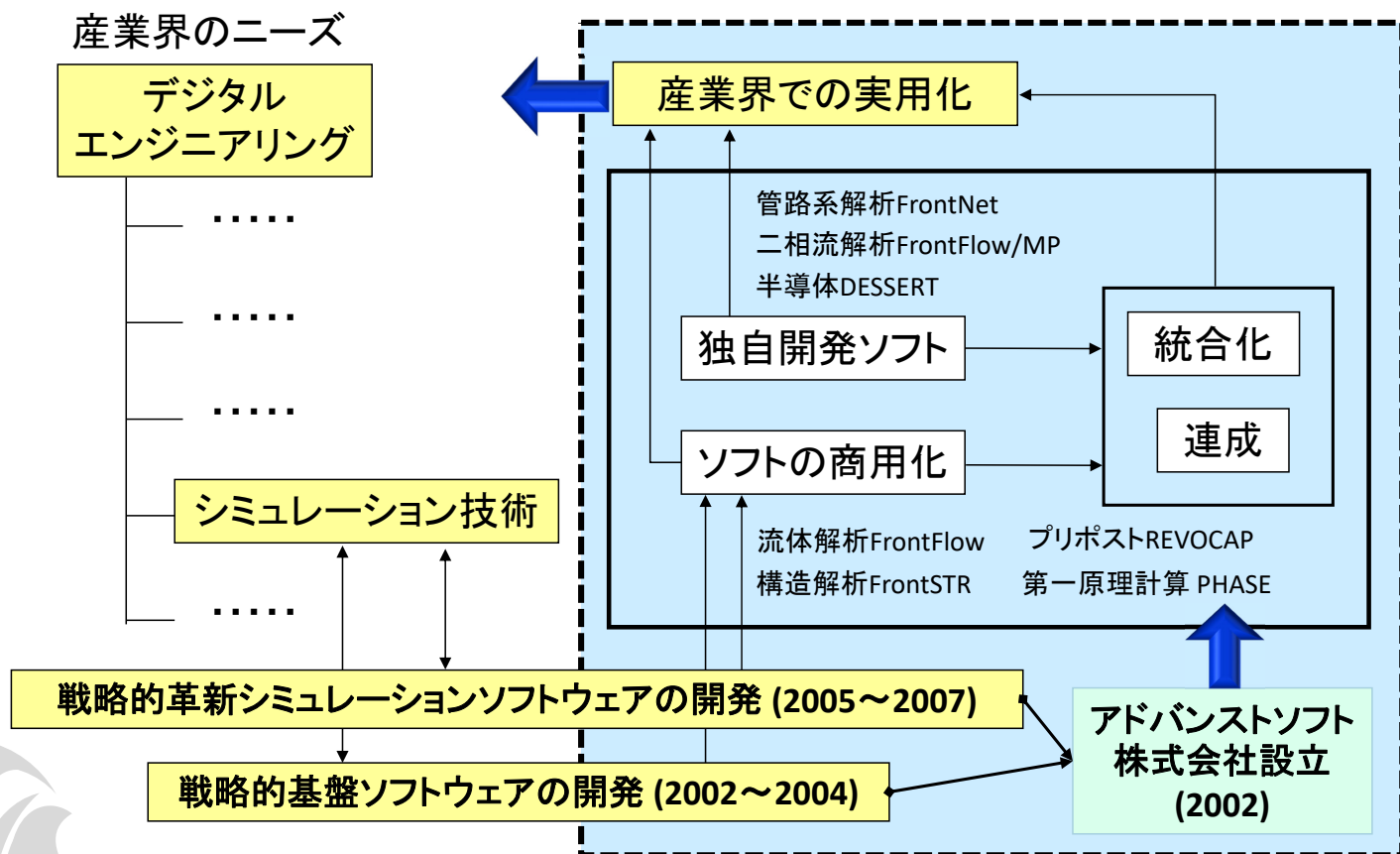
URL: <http://www.advancesoft.jp/> E-mail: office@advancesoft.jp

アドバンスソフト株式会社についてと 先生のご紹介

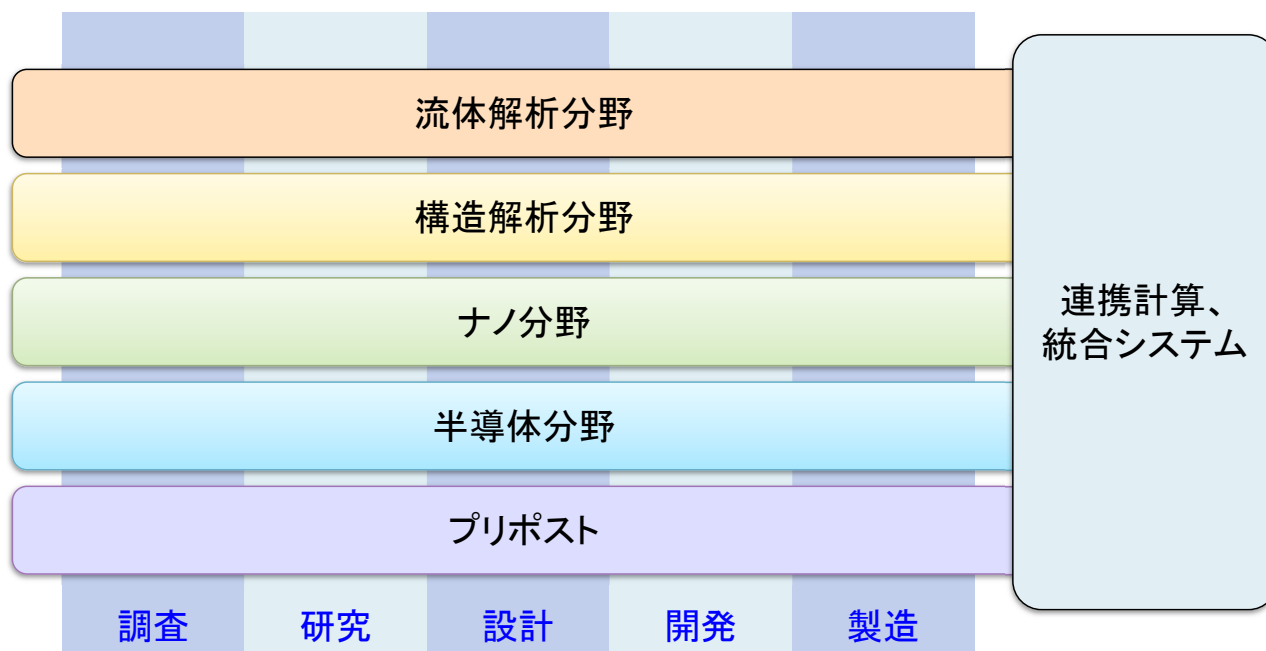
第4回 アドバンス・シミュレーション・セミナー
(東京工業大学 学術国際情報センター 教授 青木 尊之 様)

2023年7月21日 (金) 開催
アドバンスソフト株式会社

アドバンスソフトとは



事業分野



産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、科学技術計算によるソリューションをご提供します。

青木 尊之 先生 のご紹介

ご経歴

- 1983年 東京工業大学・理学部・応用物理学科卒業。
- 2001年 東京工業大学・学術国際情報センター 教授。
- 2011年 ACMゴードンベル賞。
- 2012年 文部科学大臣表彰。
- 2022年 東京都功労者表彰。

ご研究内容

GPUスパコンを用いた高性能計算アプリケーションおよび混相流の大規模シミュレーション研究に従事。科学研究費補助金・基盤研究（S）を研究代表者として、2回連続で採択・実施。最近では野球ボールの空力解析も実施。

GPU スパコンによる混相流シミュレーション・ 流体構造連成のシミュレーション

東京工業大学 学術国際情報センター



青木 尊之

本日の内容

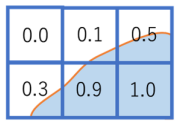


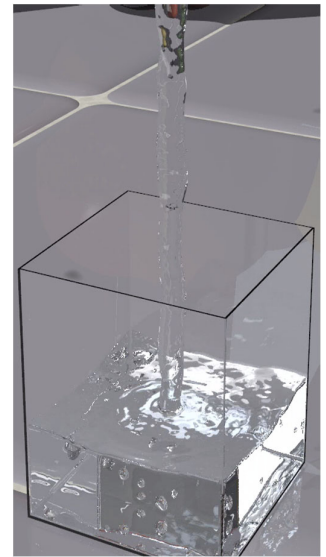
- 気相・液相・固相（粒子）シミュレーション
- 流体構造連成問題のシミュレーション
- 野球ボールの空力解析と変化球の軌道シミュレーション

- 解法の特徴：
- 非圧縮性流体に対する弱圧縮性流体解法
(NSソルバー, LBMソルバー)
 - AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法
 - GPU 計算

Incompressible Gas-Liquid Two-Phase Flow

Navier-Stokes Equation

Continuum equation	$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$	
Momentum equation	$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \tau + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho} \mathbf{F}_s$	
Viscos stress tensor	$\tau = \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)$	
Advection equation for VOF	$\frac{\partial f}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) f = 0$	 <p>VOF</p>

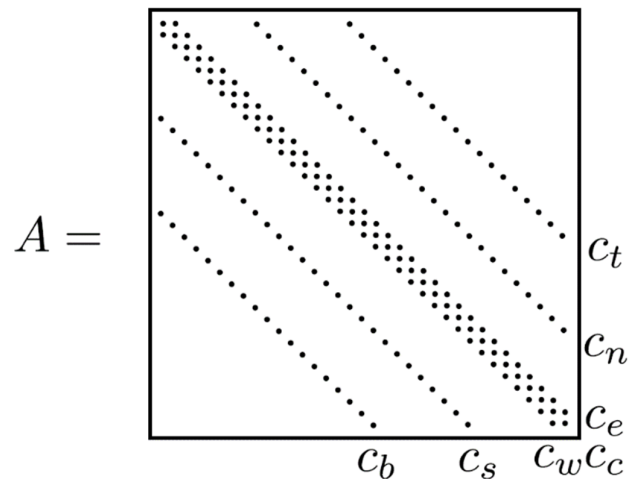
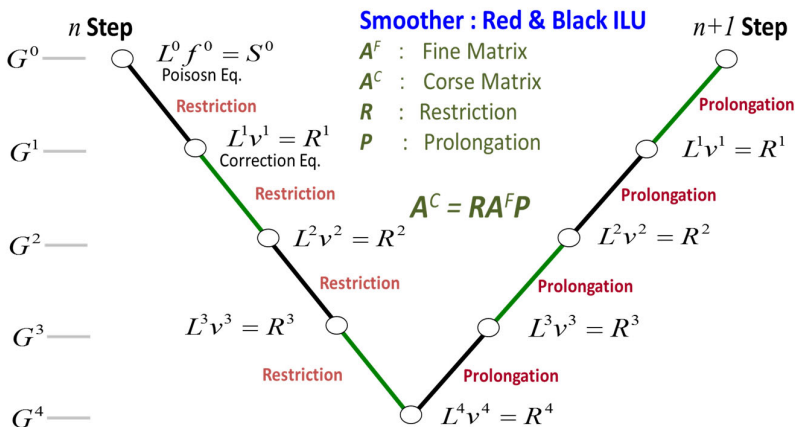


\mathbf{u}	velocity	ρ	density	\mathbf{F}_s	Surface tension	f	VOF
p	pressure	\mathbf{g}	gravity	μ	Viscosity coefficient		

Linear Sparse Matrix Solver

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad \text{for} \quad \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla p \right) = \frac{\nabla \cdot \mathbf{u}}{\Delta t}$$

BiCGStab + MG preconditioner



弱圧縮性流体計算手法による 非圧縮性流体計算

- 弱圧縮性 Navier-Stokes FDM/FVM solver
- SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)
- LBM (Lattice Boltzmann Method)

5

弱圧縮性 NS 計算手法

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \frac{1}{\rho} \mathbf{F}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\rho C_s^2 \nabla \cdot \mathbf{u}$$

ρ : 密度
 \mathbf{u} : 流速ベクトル
 p : 圧力
 $\boldsymbol{\tau}$: 粘性応力テンソル
 \mathbf{g} : 重力加速度
 \mathbf{F}_{sf} : 表面張力
 C_s : 音速

- 等温過程
- 弱圧縮性近似 (流速が音速に比べて十分小さい)
- 疑似圧縮法のような緩和時間 τ を入れない

ポアソン方程式の代替: 音速 C_s の音波伝播を含む **圧力発展方程式**

半陰解法から **完全陽解法** へ

人工的な音速の低減: Mach 数の制御 (時間刻み Δt を大きくし, 計算の大幅な高速化)

現実よりも大きな圧縮: 十分に非圧縮性流体と見なせる範囲内

気液界面識別手法

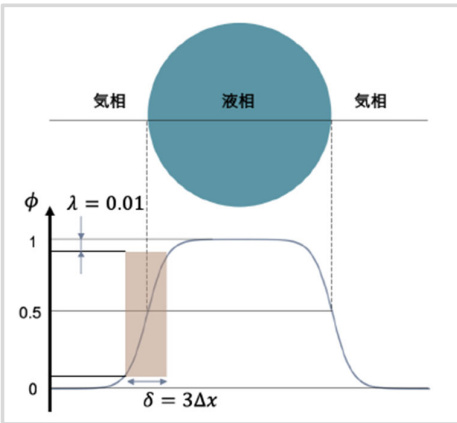
Phase Field 法の保存型Allen-Cahn方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) = \bar{\gamma} \left[\epsilon \nabla \cdot \nabla \phi - \nabla \cdot \left(\phi(1 - \phi) \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|} \right) \right]$$

保存方程式

拡散項

逆拡散項

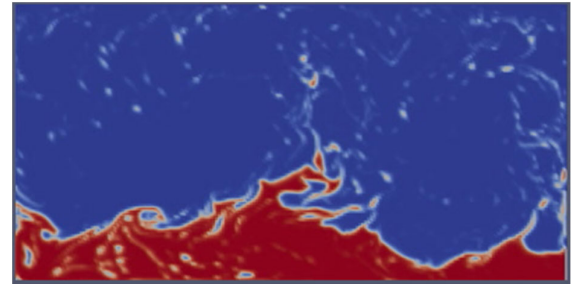


レベルセット関数 ψ (符号付距離関数) から法線ベクトルを計算して界面形状精度を向上

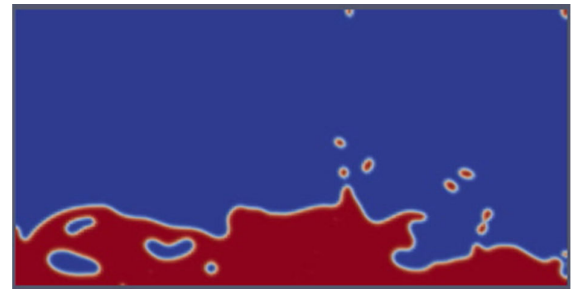


拡散・逆拡散で界面幅を一定

VOF系 THINC/WLIC



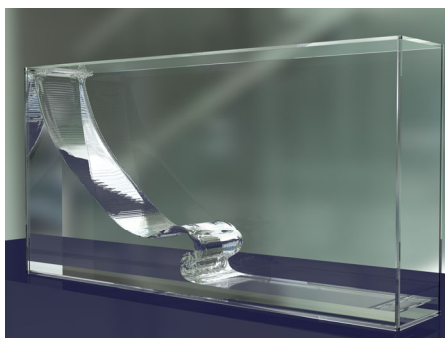
保存型 Allen-Cahn方程式



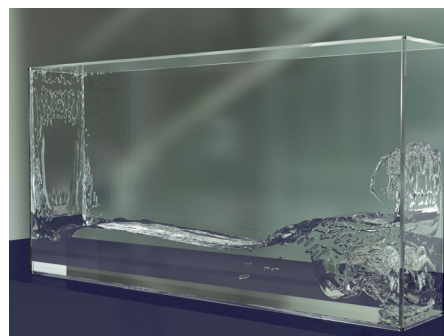
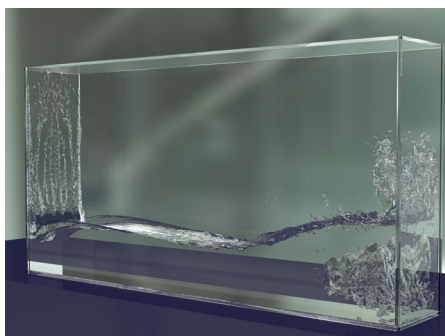
Incompressible solver

Weakly compressible solver

t=0.2



t=0.4

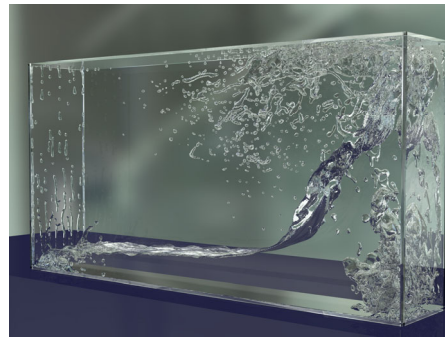
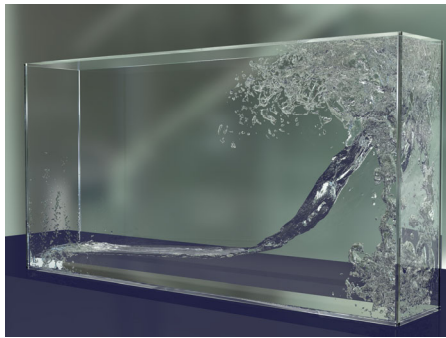


mesh : 576 x 96 x 288
(about 16million meshes)

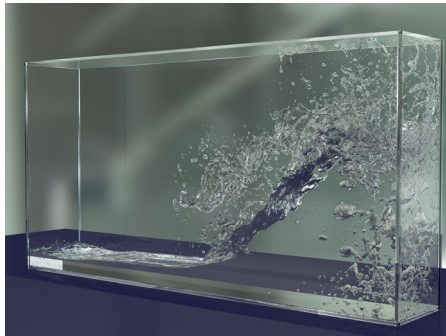
Incompressible solver

Weakly compressible solver

t=0.6



t=0.8



mesh : 576 x 96 x 288
(about 16million meshes)

Shintaro Matsushita, Takayuki Aoki, *Journal of Computational Physics*, Vol. 376, 1 January 2019, Pages 838-862

運動量保存型スキーム

Navier-Stokes方程式

非保存形(既存手法)
$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \frac{1}{\rho} \mathbf{F}$$



保存形
$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F}$$

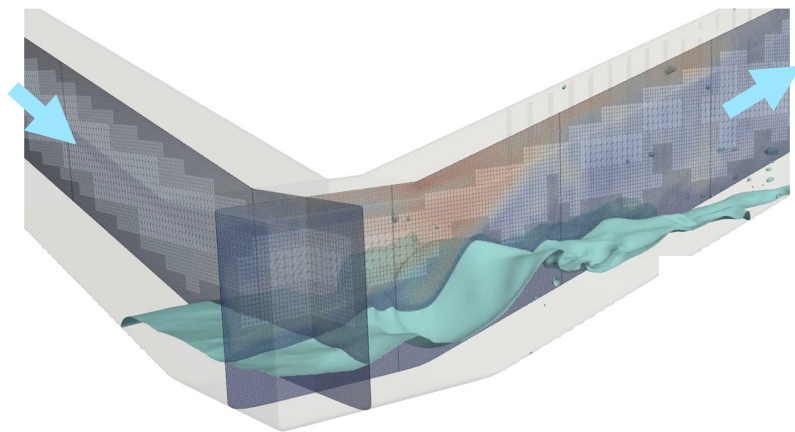
$$\mathbf{u} = \frac{\rho \mathbf{u}}{\rho}$$

普通に計算すると ρ が小さいところで、 ρ と $\rho \mathbf{u}$ のプロファイルの不整合で計算が発散

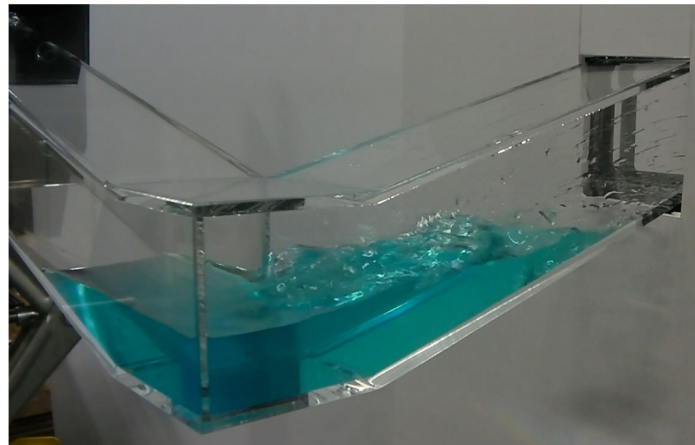
矩形流路内に溜まった凝縮水のエア流入による排出

エア：flow in 10 m/sec

flow out



計算結果（動的接触角も考慮）



実験結果

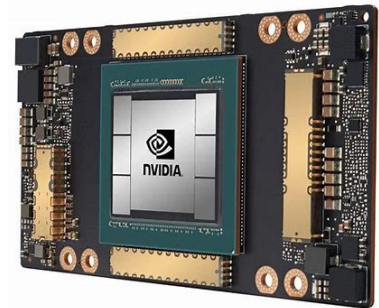
※ マツダ(株)との共同研究 2018

より高解像度・高効率計算を目指して

GPUコンピューティング (CAEの観点)

NVIDIA H100 FP64/FP32 Performance (F_{peak}): 34/67 TFLOPS
Memory Bandwidth (B_{peak}): 3.35 TB/sec

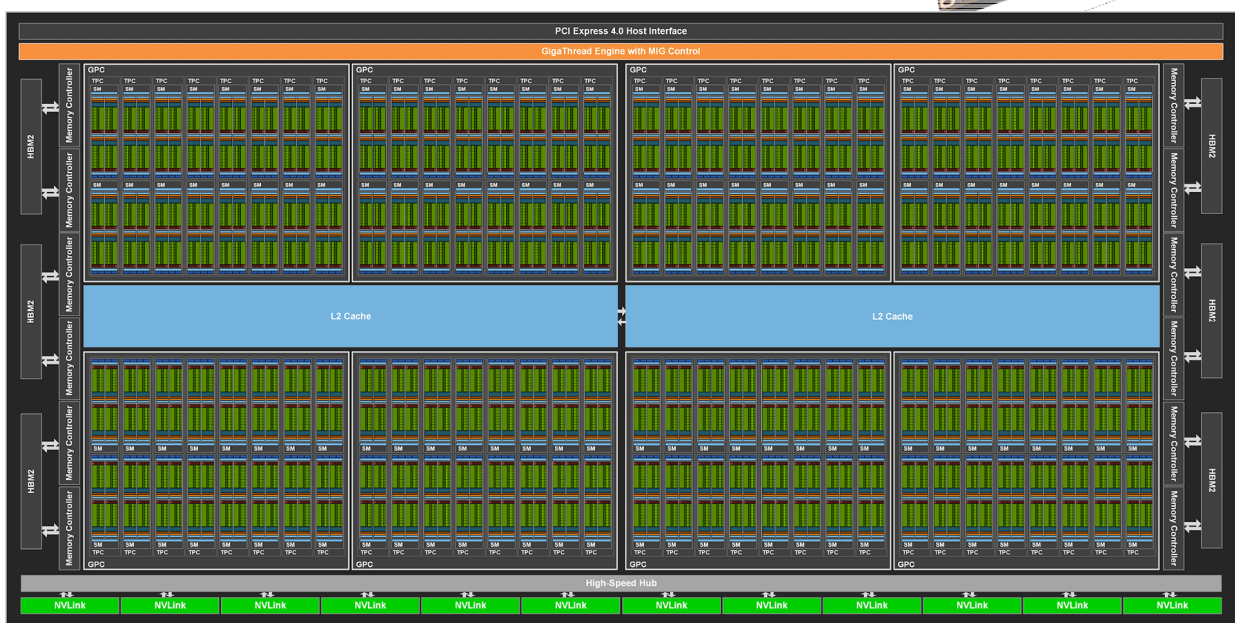
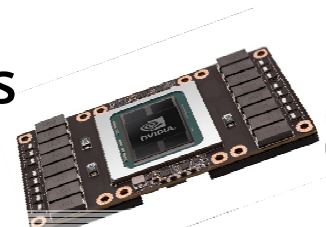
B_{peak} / F_{peak} : 0.102 (FP64)
0.051 (FP32)



GeForce RTX 4090 FP64/FP32 Performance (F_{peak}): --/83 TFLOPS
Memory Bandwidth (B_{peak}): 1.008 TB/sec

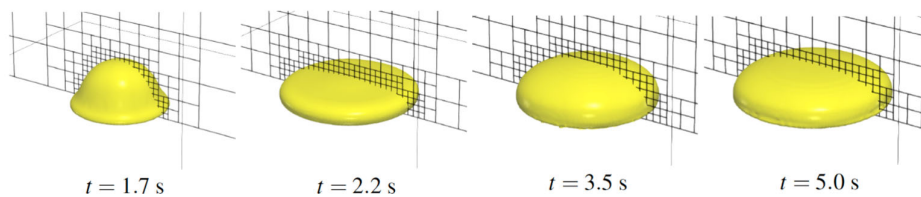
B_{peak} / F_{peak} : 0.012 (FP32)

GPU NVIDIA H100 18,432 cores
NVIDIA A100 8,192 cores



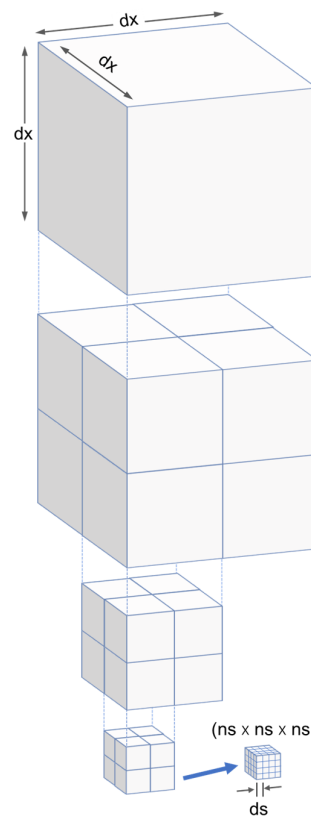
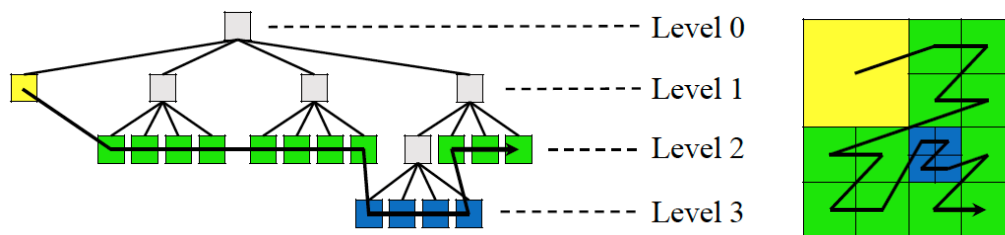
AMR (Adaptive Mesh Refinement)

to assign high-resolution mesh near the interfaces



2D: Quad-based refinement/coarsening

3D: Octree-based



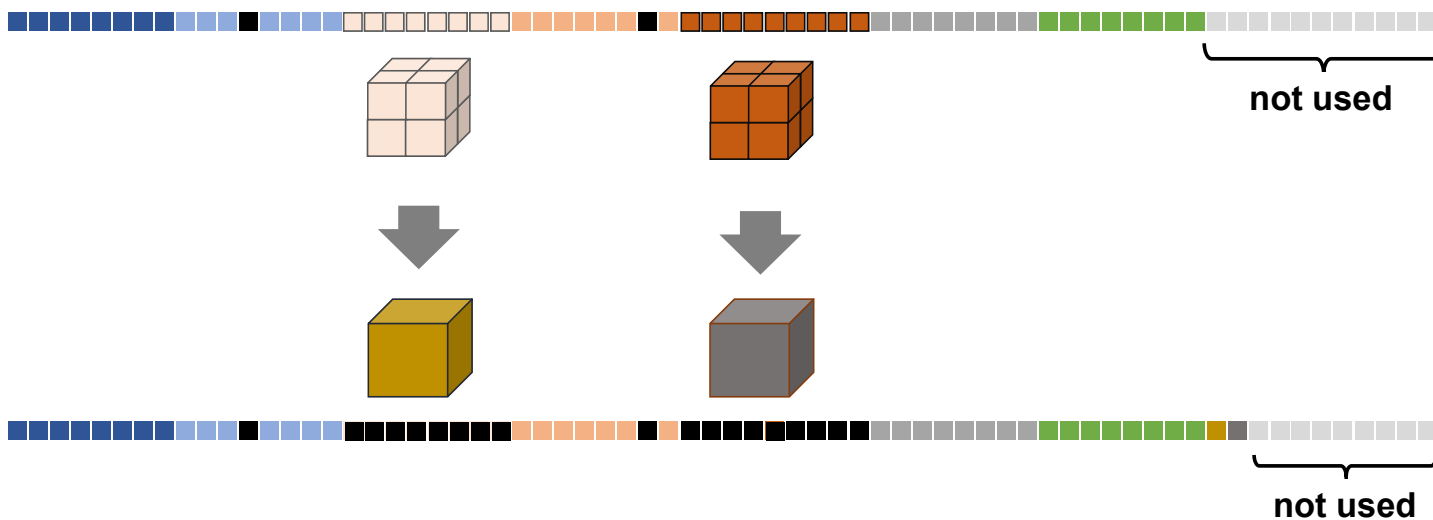
Shintaro Matsushita, Takayuki Aoki, *Journal of Computational Physics*, Vol. 445, 15 Nov 2021, 110605

GPU メモリ管理



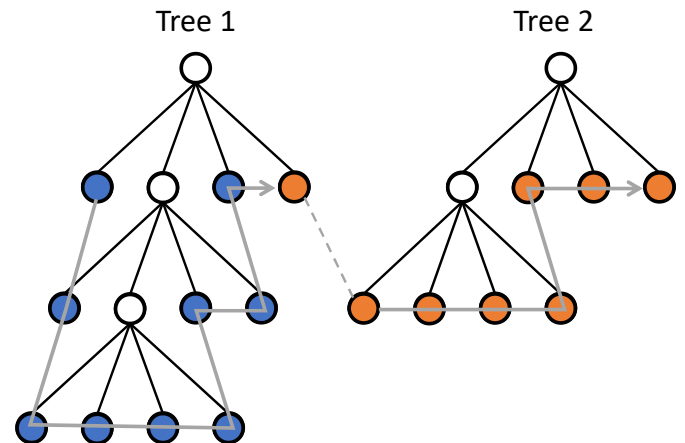
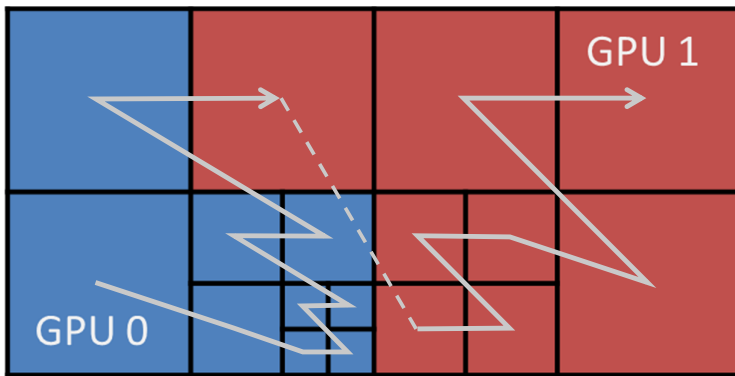
AMR Coarsening

メモリ・プールをアプリ内で用意



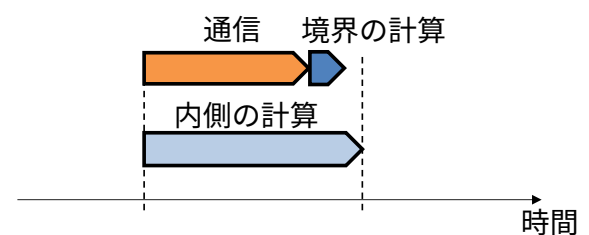
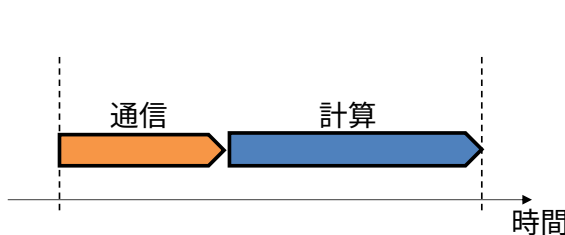
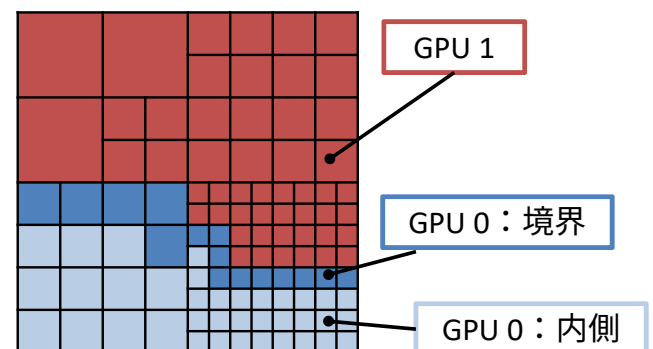
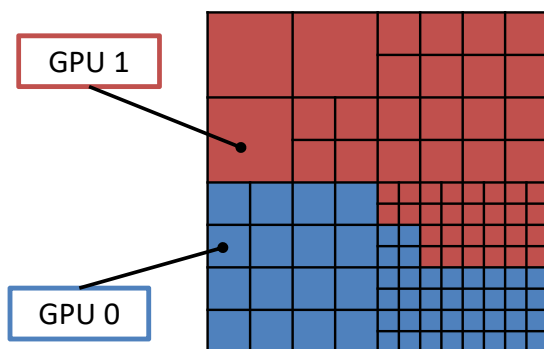
Dynamic Load Balance using Space-filling Curve

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



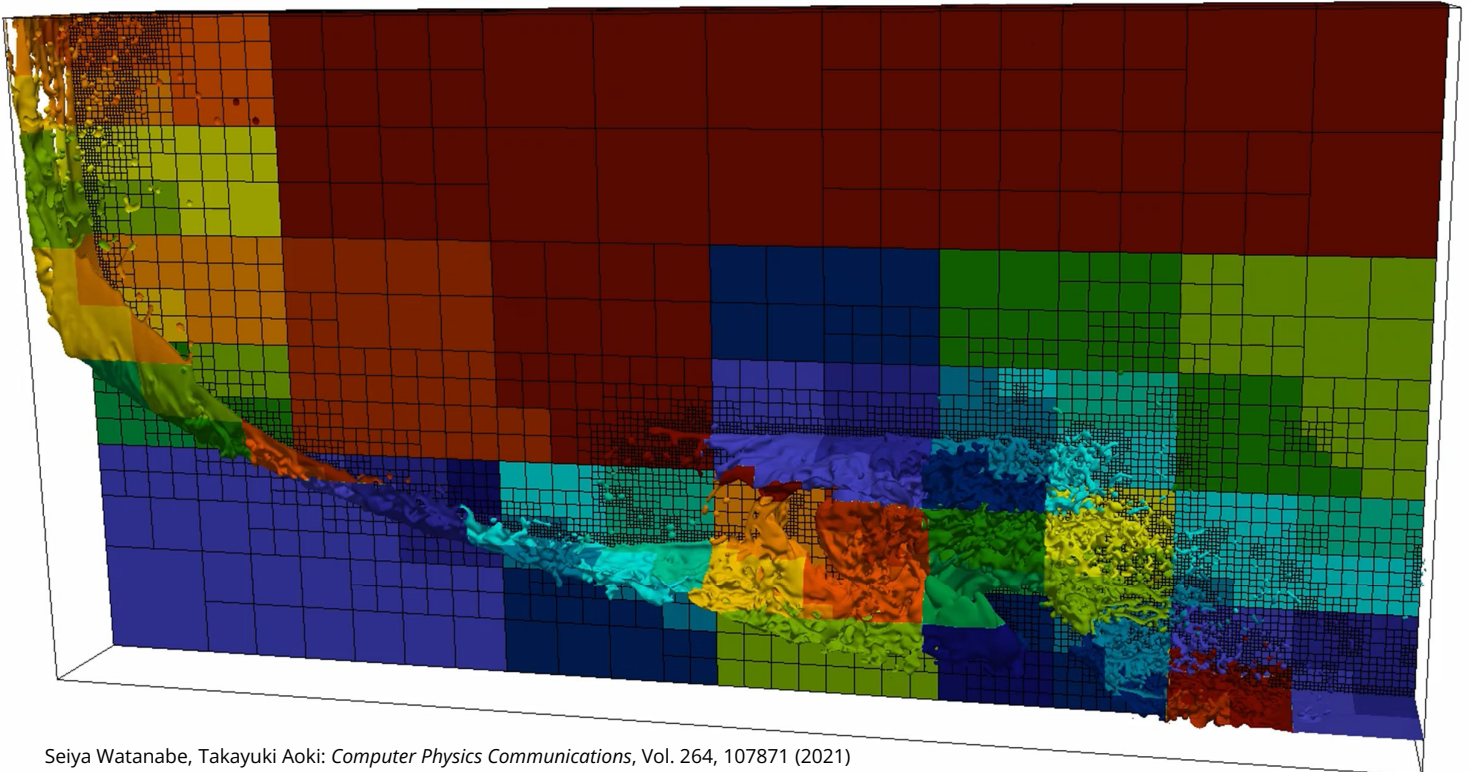
17

Overlapping computation with communication



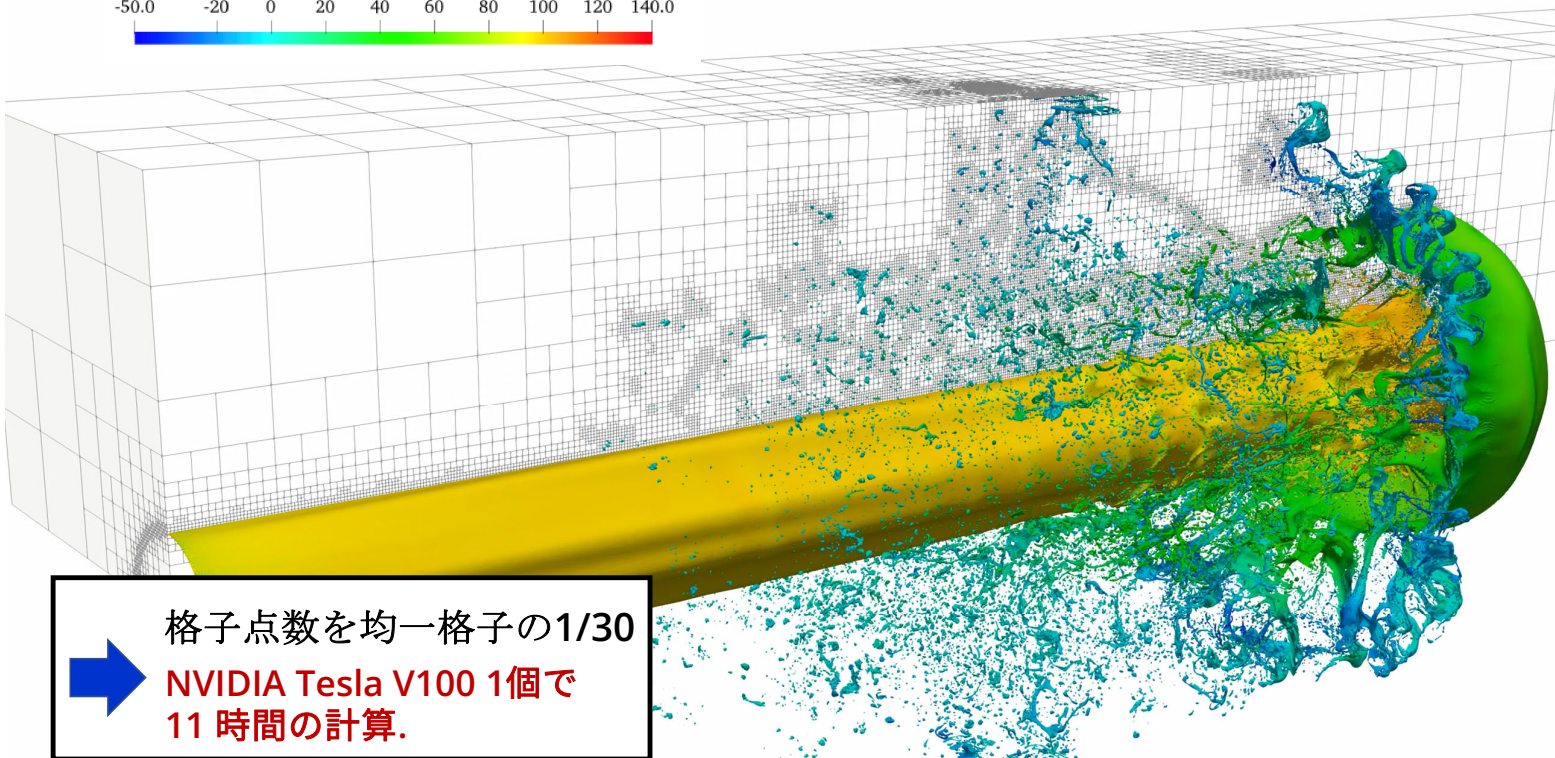
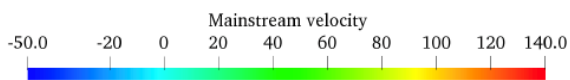
18

Dynamics Domain Partitioning



Seiya Watanabe, Takayuki Aoki: *Computer Physics Communications*, Vol. 264, 107871 (2021)

19



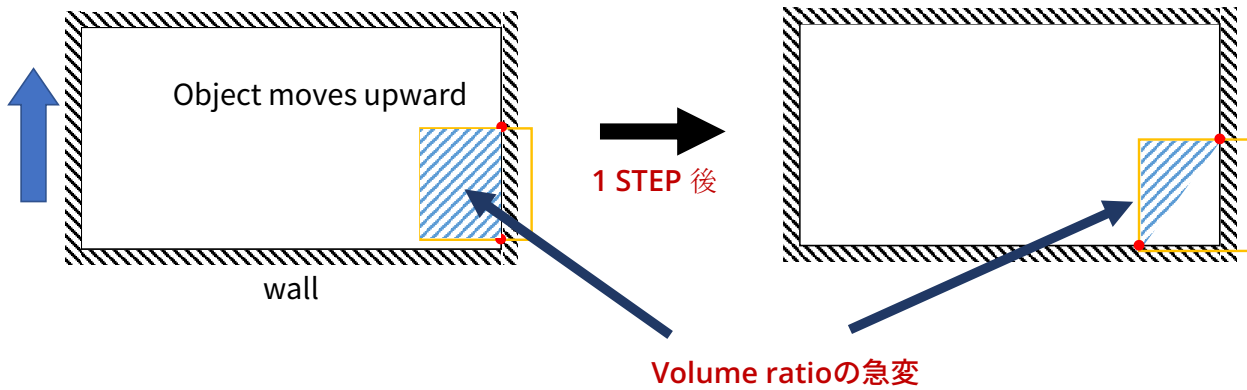
格子点数を均一格子の1/30
NVIDIA Tesla V100 1個で
11時間の計算.

Shintaro Matsushita, Takayuki Aoki, *Journal of Computational Physics*, Vol. 445, 45 Nov 2021, 110605

20

移動境界の扱い

- PLIC法では鋭角がセル内に存在すると、実際の体積率との誤差が大きくなる

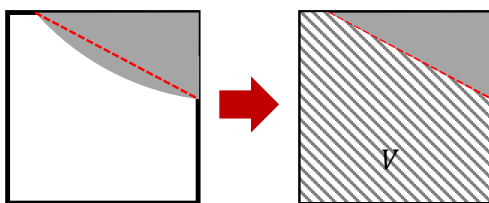


上の図のように物体が移動したときに体積率が半分程度に急変し、計算が発散

Dual Contouring法による 体積率・面積率の計算

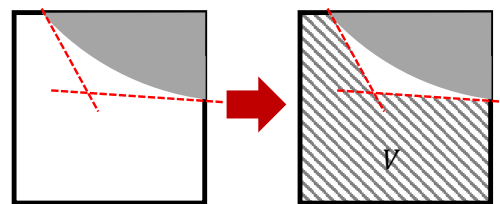
• PLIC法

セル内の物体界面を平面で近似



• Dual contouring法

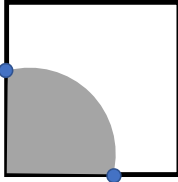
- セルエッジと物体界面の交点での接面によって物体界面を近似
- セル内の凸面を表すことが可能



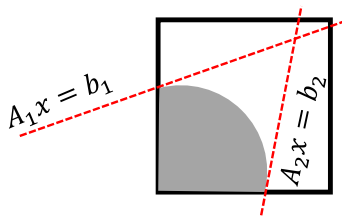
実際の物体領域
 それぞれの手法を用いて近似した平面
 それぞれの手法を用いて計算した体積率

Dual Contouring法 (2次元)

1. セルエッジとの交点を計算



2. それぞれの交点での平面の式を計算

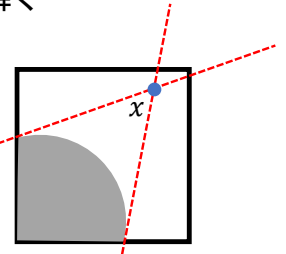


3. 平面の式を連立方程式としてSVD (Singular Value Decomposition) 法を用いて解く

$$Ax = b$$

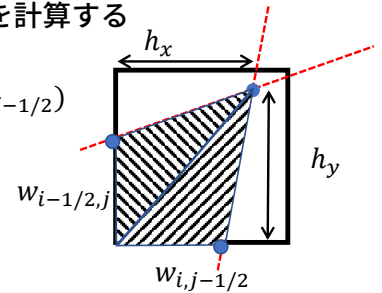
$$\therefore x = \frac{A^T b}{A^T A}$$

$$\left(A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \right)$$



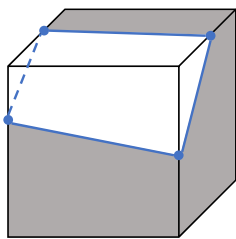
4. 面積x高さの式から体積率を計算する

$$V = \frac{1}{2} (h_x w_{i-1/2,j} + h_y w_{i,j-1/2})$$

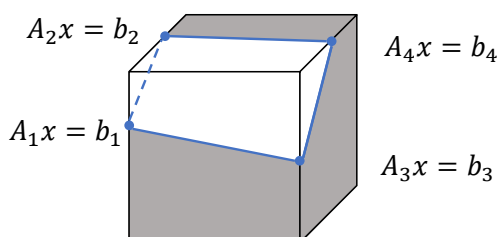


Dual Contouring 法 (3次元)

1. セルエッジと物体の交点を計算



2. それぞれの交点での平面の式を計算

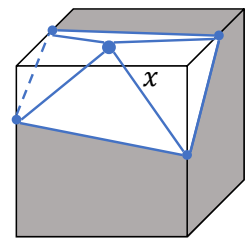


3. 平面の式を連立方程式としてSVD法を用いて解く

$$Ax = b$$

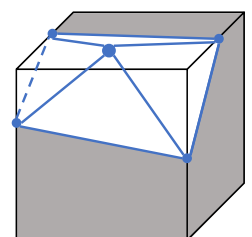
$$\therefore x = \frac{A^T b}{A^T A}$$

$$\left(A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \right)$$



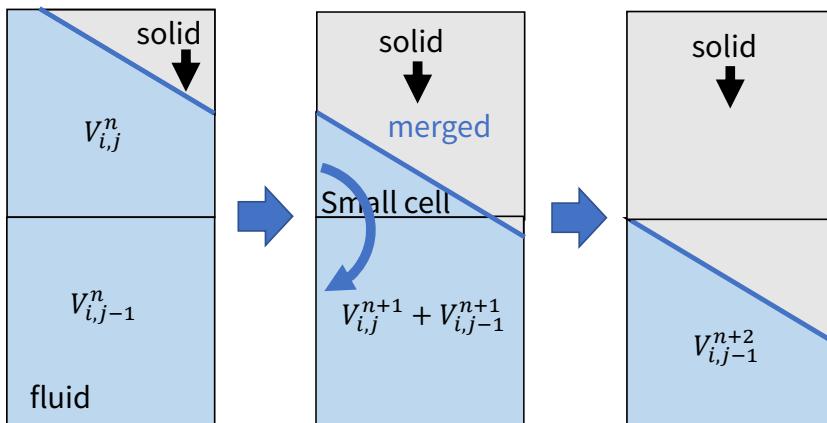
4. 面積x高さの式から体積率を計算する

セルフェイスの面積は2次元のDual Contouring法を用いて計算



運動量・VOFの更新

- 物体の移動した後、体積積分量が保存されるように修正する。
- セルマージング法を用いているため、消滅するセルの体積積分量は自動的にホストセルにマージされる



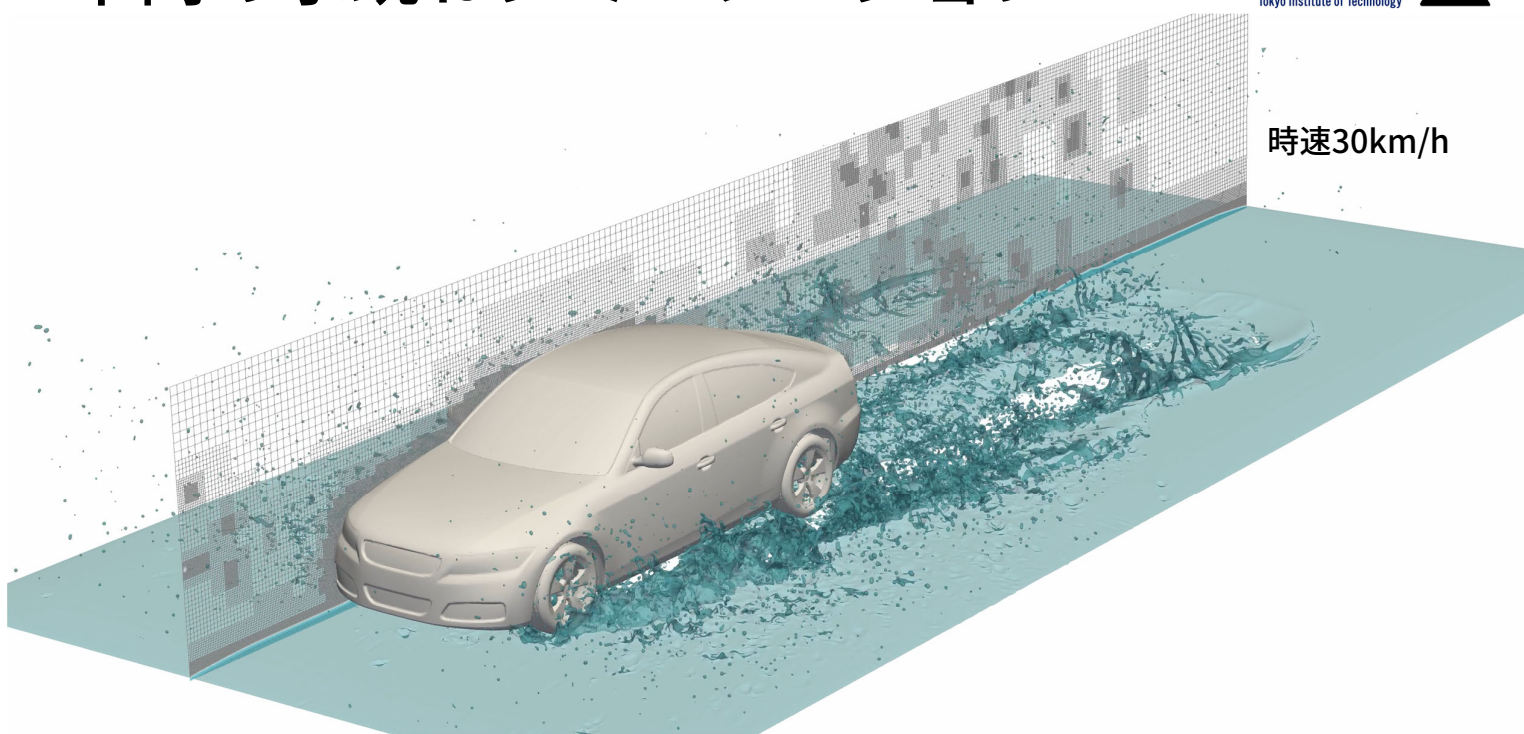
$$\phi^{**} = \frac{V^{n+1}}{V^n} \phi^n$$

$$u^{**} = \frac{\rho V^{n+1}}{\rho V^n} u^n$$

$$v^{**} = \frac{\rho V^{n+1}}{\rho V^n} v^n$$

V : volume ratio
 ϕ : VOF
 u, v : velocity
 ρ : density
 $**$: variable after update

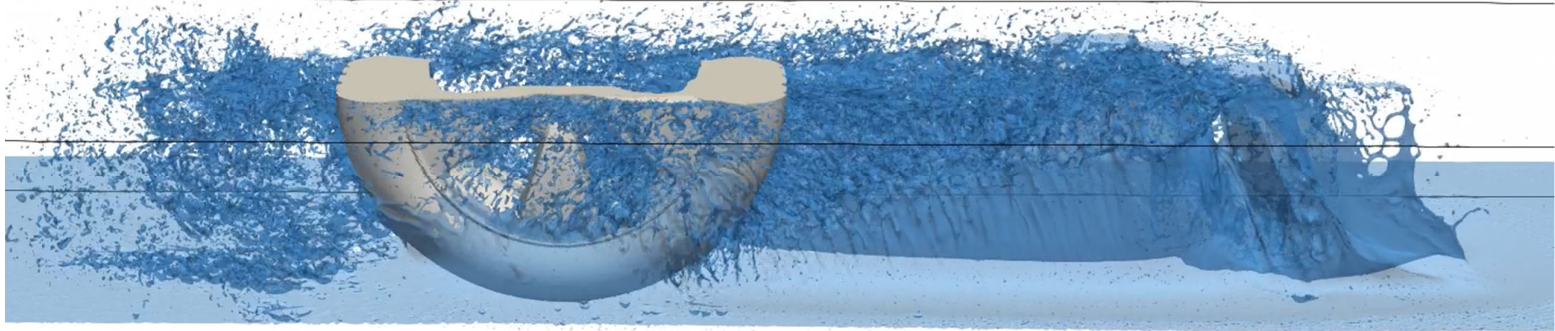
車両の水跳ねシミュレーション



タイヤの水撥ねシミュレーション

$\Delta x = 1\text{mm}$

Side view



27

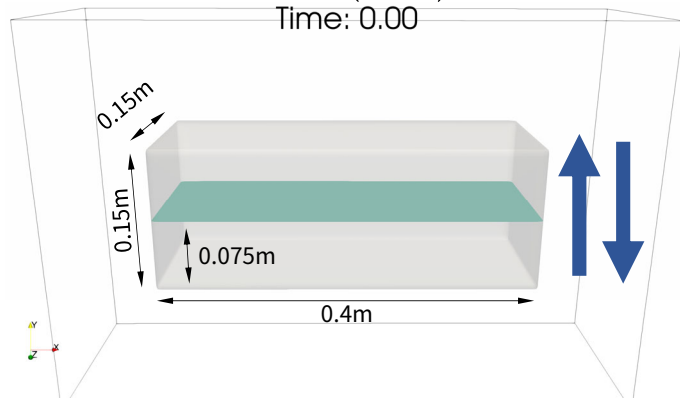
Moving object

Time: 1.805

- Moving an object up and down

$$\Delta z = 0.1 \sin\left(2\pi \frac{t}{0.1}\right)$$

Time: 0.00

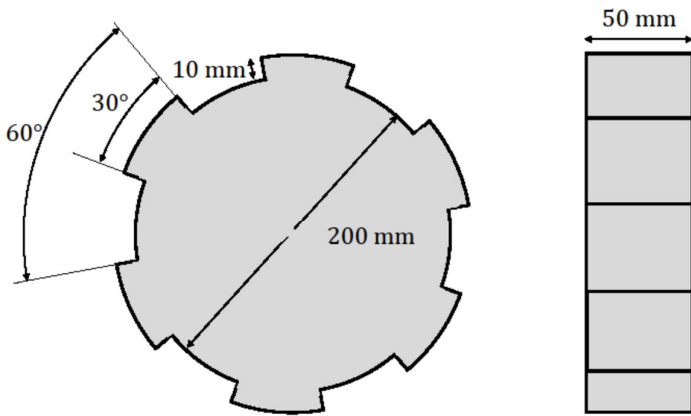


Initial condition



ギアによるオイル攪拌のシミュレーション

- ギア形状



- 格子点数

r 方向：100

θ 方向：600

z 方向：100

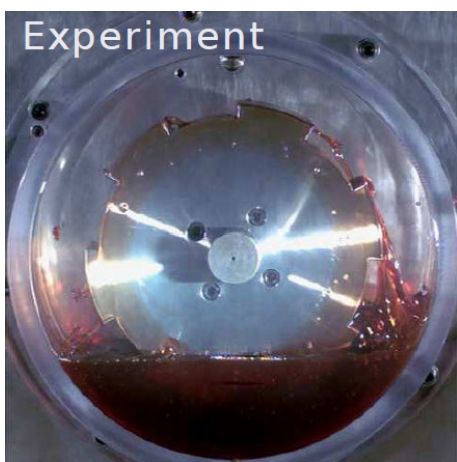
- 物性値

空気： $\rho_g = 1.2 \text{ kg/m}^3$
 $\mu_g = 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

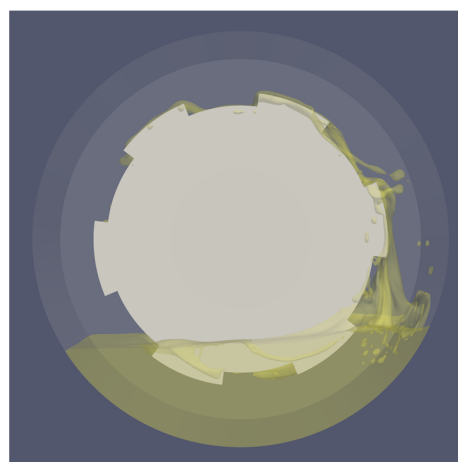
オイル： $\rho_l = 829 \text{ kg/m}^3$
 $\mu_l = 4.77 \times 10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

29

界面プロファイルの実験との比較



実験結果 (100 rpm) *



計算結果 (100 rpm)

オイルが巻き上げられる高さや飛散する液滴、歯先と歯先にまたがるオイルといった界面挙動を非常によく再現

*丹愛彦, 青木尊之, 井上景介, 吉谷清文: 回転体に駆動される気液二相流の数値計算, 日本機械学会論文集B編, Vol.77, No.781, 1699-1714, (2011).

30

攪拌抵抗値の評価

攪拌抵抗

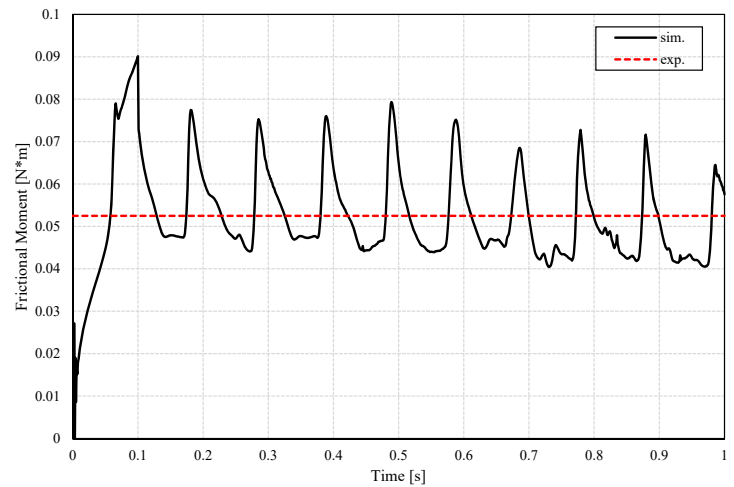
$$T = T_p + T_s$$

圧力による攪拌抵抗

$$T_p = \sum e_z \cdot (\mathbf{r} \times (p \cdot \Delta \mathbf{r}) \mathbf{n}) \Delta z$$

粘性応力による攪拌抵抗

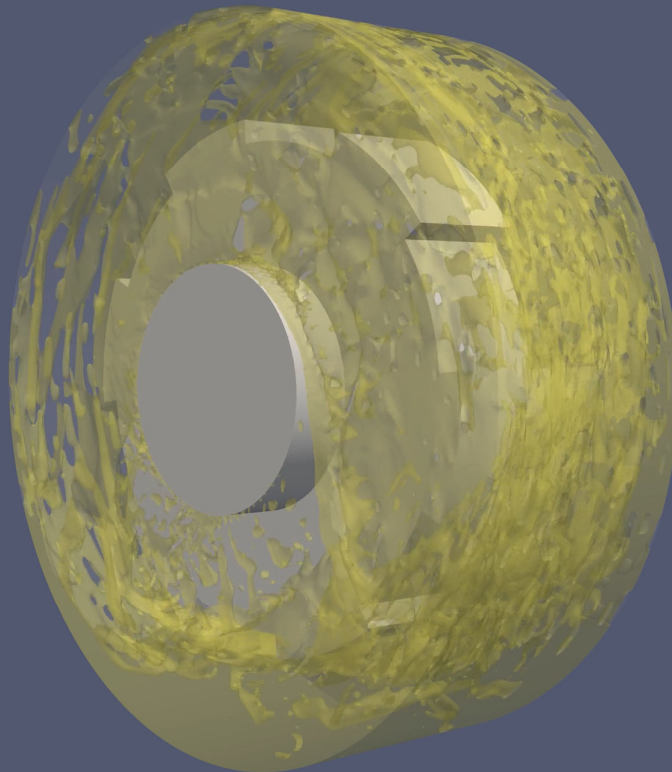
$$T_s = \sum e_z \cdot \left(\mathbf{r} \times \left(\mu \frac{\Delta u_\theta}{\Delta r} \cdot r \Delta \theta \right) \mathbf{n} \right) \Delta z$$



100 rpm

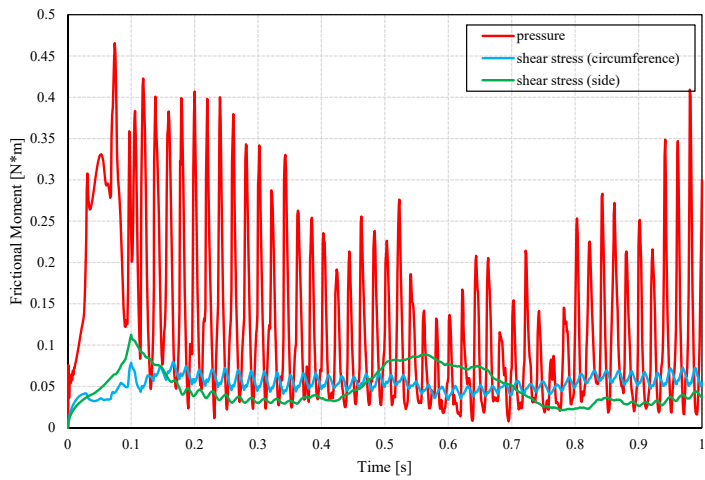
31

Time: 0.936 s

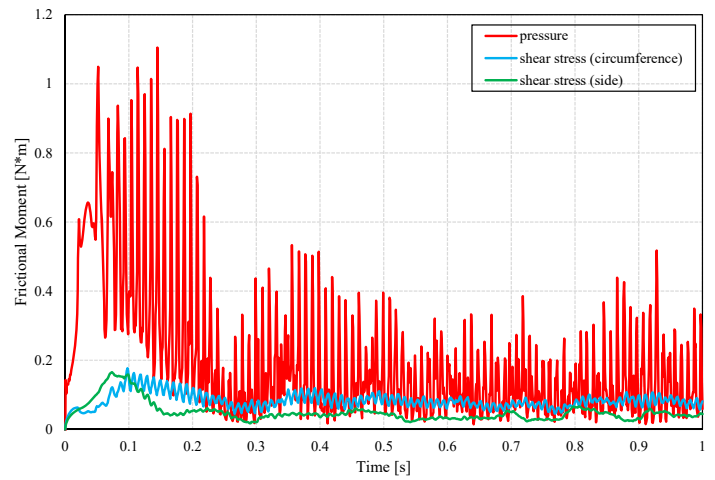


1000 rpm

各回転数における攪拌抵抗の内訳

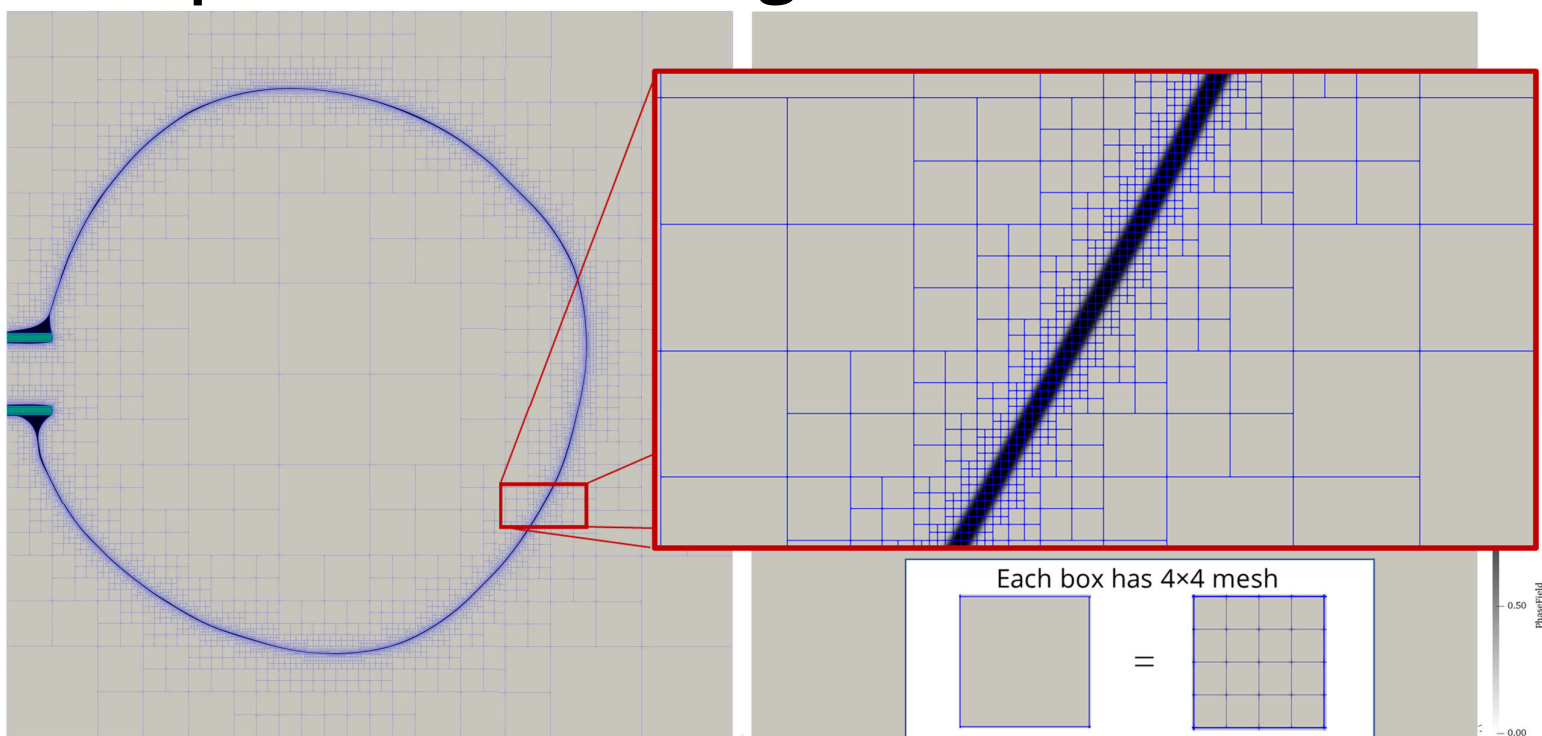


500 rpm



1000 rpm

Soap Bubble Growing



Break-up of Liquid Bridge

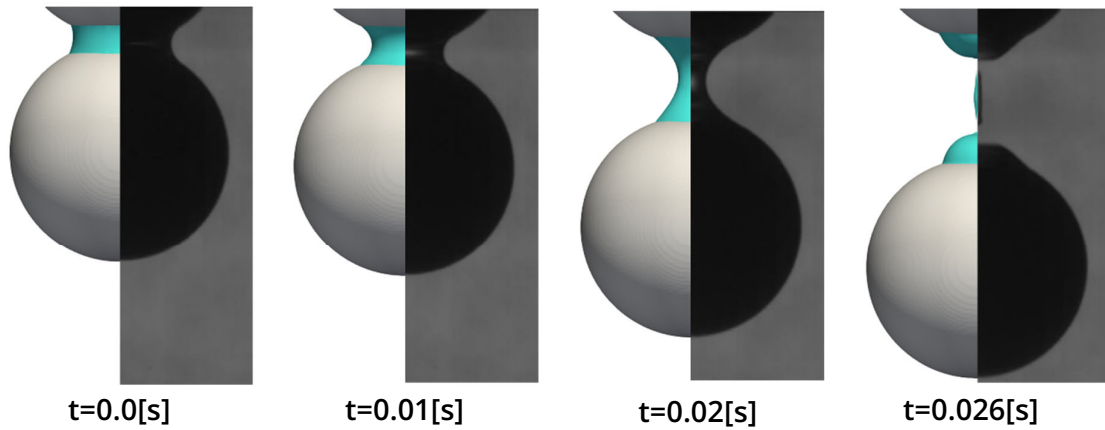
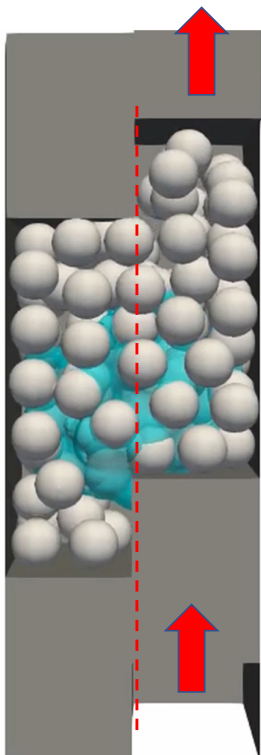


Fig.11 Snapshots Compared with Results by Kan[5]
(Left : Calc. Results Right: Exp. Results by Kan)

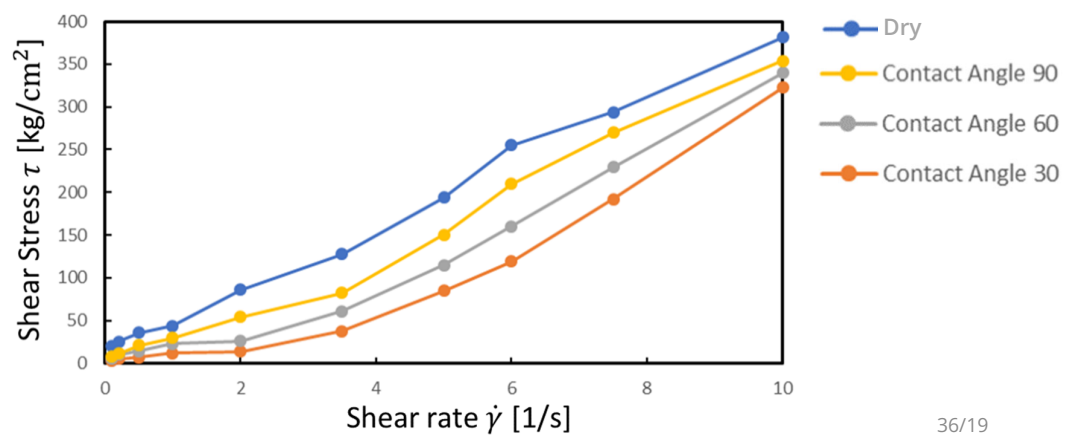
吉泉瑛, 青木尊之, 松下真太郎, 渡辺勢也, Kai Yang: , 日本混相流学会誌「混相流」, Vol.35 No.2, P.294-301 (2021)

一軸せん断試験

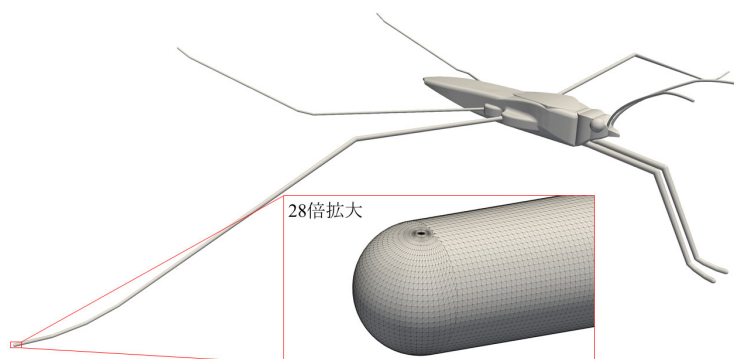
水分を含んだ粉体の流動特性の評価



Particle diameter[mm]	1.0
Contact angle[deg]	30, 60, 90
Initial water diameter[mm]	2.0
Surface tension[N/m]	16.9e-3
Cell Numbers[-]	(250×250×500)
Bottom movement speed [m/s]	0.02, 0.05

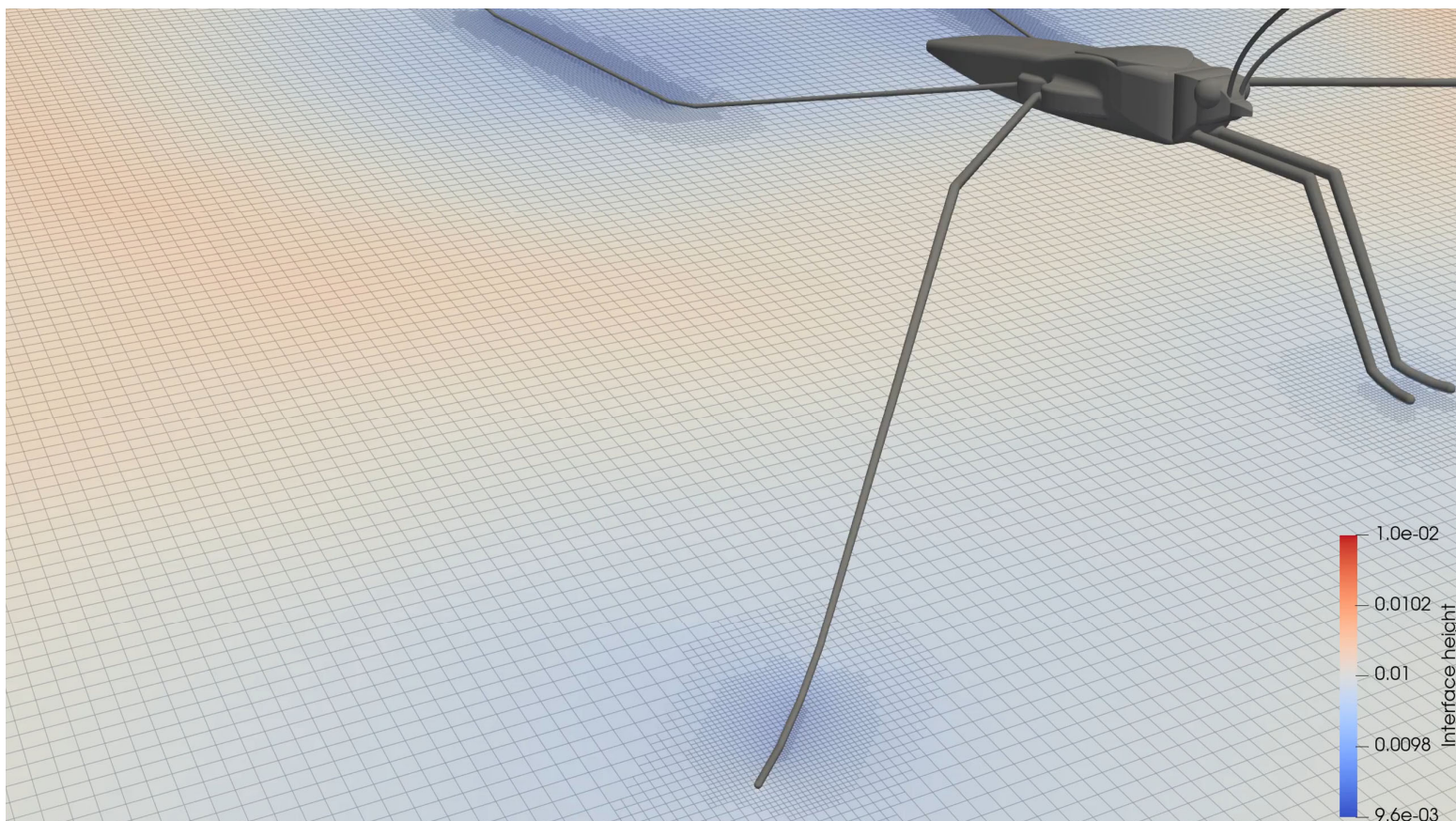
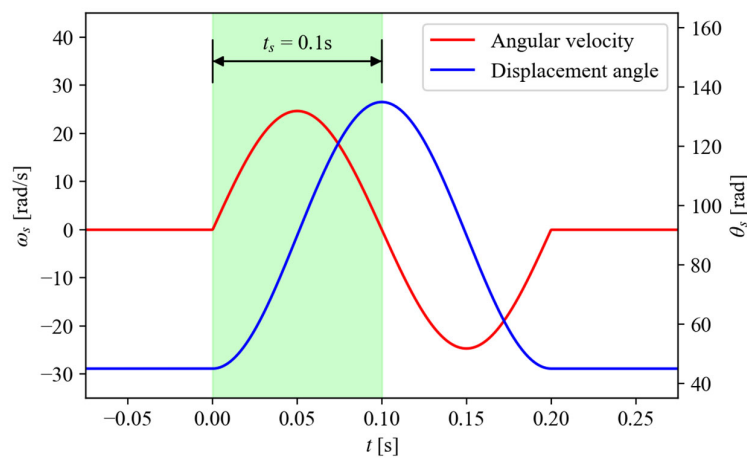


アメンボの水面走行計算



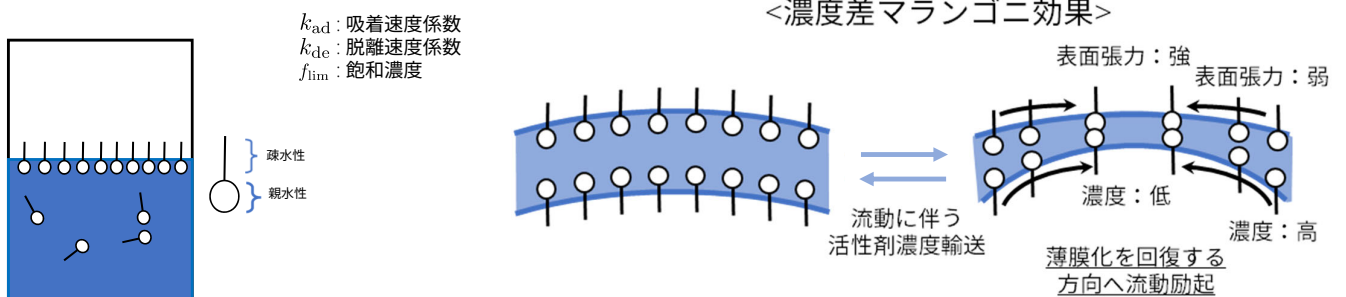
接触角 120° の撥水性を設定

3D model of water strider.





界面活性剤の吸着・脱離を考慮した液膜計算



界面活性剤
イオン性界面活性剤
 水に溶けた時電離してイオンになる
非イオン性界面活性剤
 水に溶けた時イオンにならない

アニオン界面活性剤		衣料用洗剤, シャンプー等
カチオン界面活性剤		衣料用柔軟剤, 殺菌剤等
両性界面活性剤		台所洗剤, シャンプー等

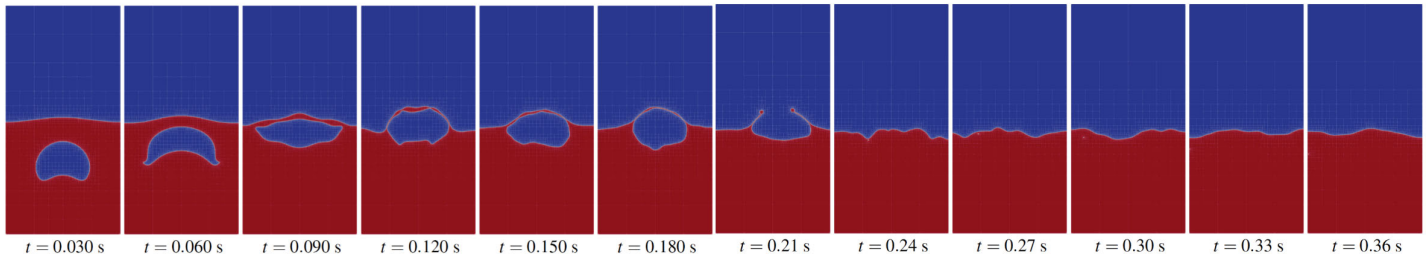
Langmuir modelで記述できる非イオン性のみ扱う

界面活性剤による液膜の安定化

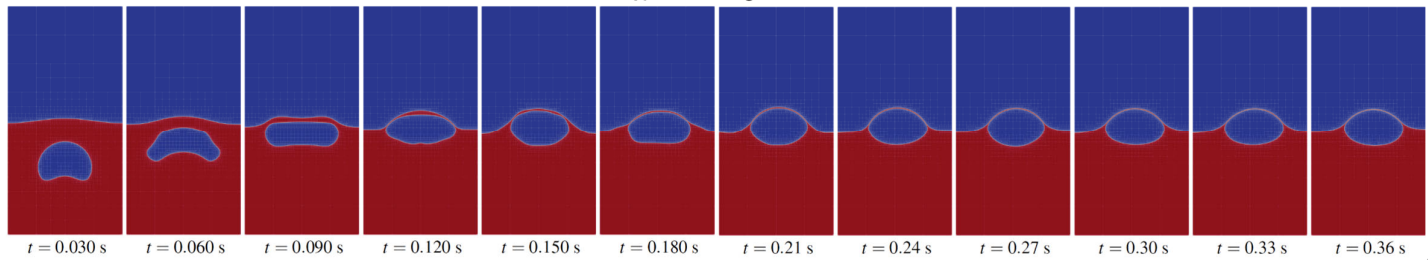
初期の界面上活性剤濃度を0として計算

$$j(t=0) = 0$$

$$La = 0.15$$



$$La = 1.5$$



41

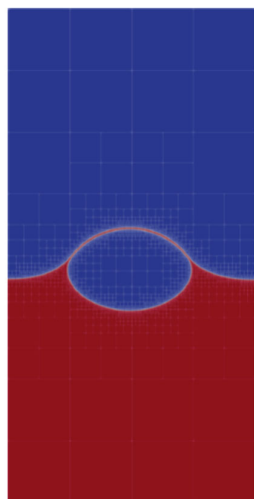
界面活性剤付与による液膜安定化

$$La = 15$$

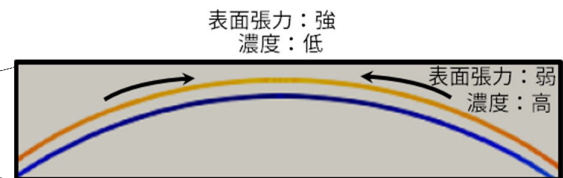
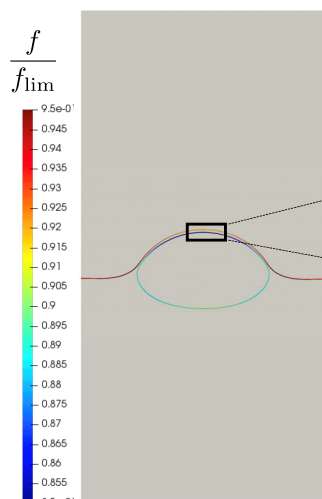
- ✓ 吸着・脱離を考慮した界面活性剤の輸送
- ✓ 吸着性質をより支配的に設定(物理的には添加する活性剤濃度をあげる)

重力下で安定に存在し続ける液体自由膜を再現

カラー：界面上の界面活性剤濃度の飽和濃度に対する比率



$t = 0.36 \text{ s}$

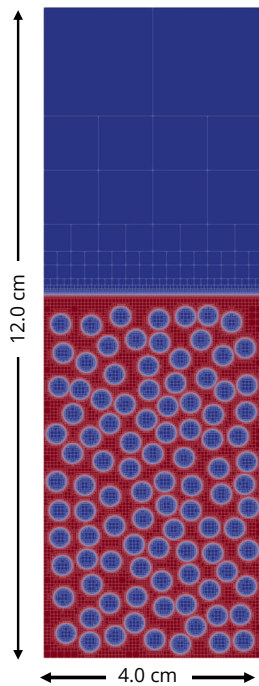


重力による薄膜化と逆向きにマランゴニ効果による流動が発生

界面活性剤による表面張力低下効果も安定化に寄与

42

2次元泡沫形成シミュレーション



初期条件

$$k_{ad} = 50.0 [mol \cdot s]$$

$$k_{de} = 0.033 [s^{-1}]$$

$$F_0 = 1.0 \times 10^{-2} [mol/m^3]$$

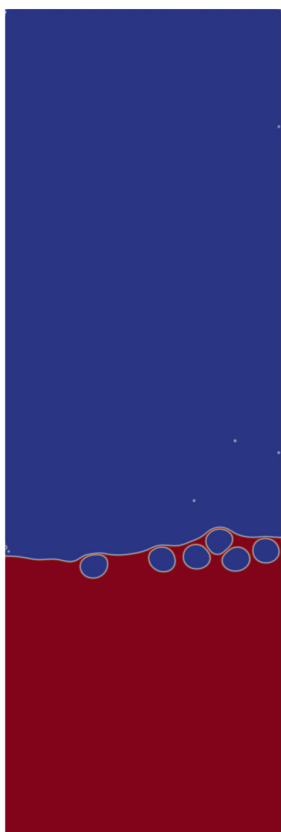
$$\therefore La = 15$$

$f_{sat} = 2.9 \times 10^{-6} [mol/m^3]$ の平衡状態 $j = 0$ から

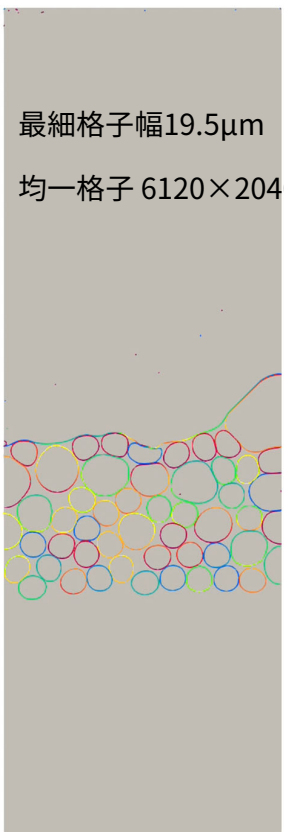
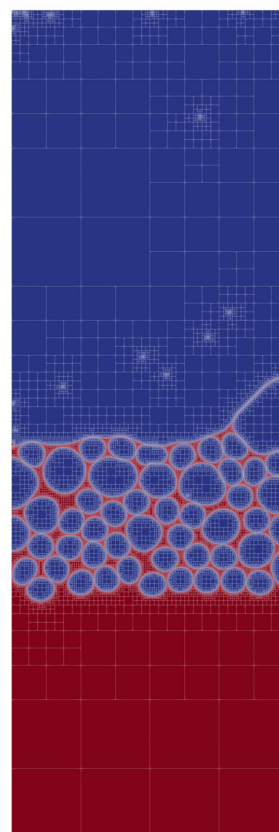
初期濃度 $f_0 = 2.72 \times 10^{-6} \left[\frac{mol}{m^3} \right]$

密度 $\rho_l = 1000.0 [kg/m^3]$, $\rho_g = 1.0 [kg/m^3]$

粘性係数 $\mu_l = 1.0 [Pa \cdot s]$, $\mu_g = 1.0 \times 10^{-3} [Pa \cdot s]$



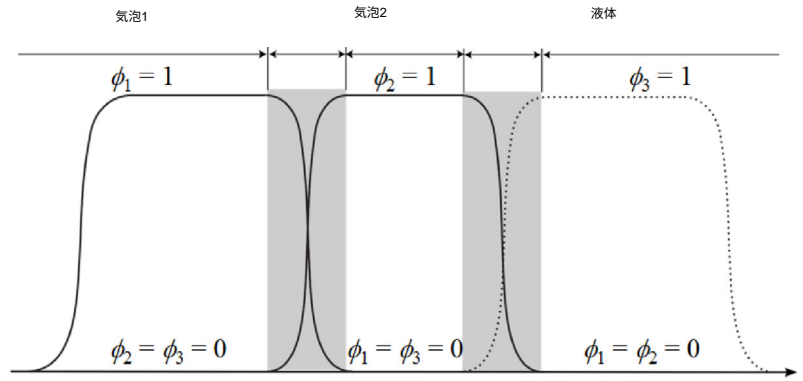
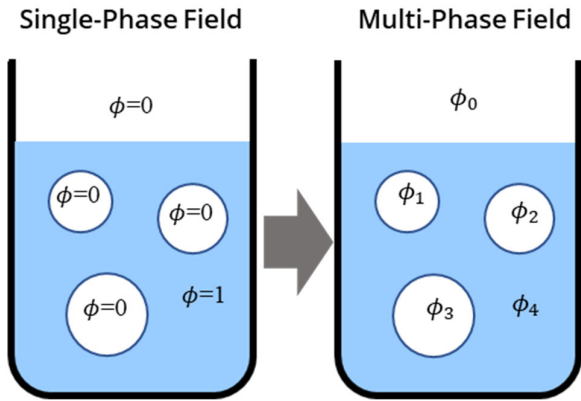
最細格子幅 78.15 μ m
均一格子 1530 \times 510 相当



最細格子幅 19.5 μ m
均一格子 6120 \times 2040 相当

MPFによる泡沫シミュレーション

MPF (Multi-Phase Field) 法の導入



Transactions of JSCES, Paper No.20130018
「多結晶粒成長シミュレーション」岡本成史, 山中晃徳, 下川辺隆史, 青木尊之

Yos Panagaman Sitompul, Takayuki Aoki and Tomohiro Takaki, *Intl. J. Multiphase Flow*, Vol. 134, January 2021, 103505

45

Multi-phase Field model

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_i \mathbf{u}) = D \left[\nabla \cdot \left\{ \nabla \phi_i - B \phi_i (1 - \phi_i) \frac{\nabla \phi_i}{|\nabla \phi_i|} \right\} - \frac{\phi_i^2}{\sum_{j=1}^N \phi_j^2} \sum_{j=1}^N \left[\nabla \cdot \left\{ \nabla \phi_j - B \phi_j (1 - \phi_j) \frac{\nabla \phi_j}{|\nabla \phi_j|} \right\} \right] \right]$$

Solver: FVM, WENO-3, RK3

Density and viscosity:

$$\rho = \phi_d \rho_l + (1 - \phi_d) \rho_h$$

$$\mu = \phi_d \mu_l + (1 - \phi_d) \mu_h$$

$$\phi_d = \sum_l \phi_l$$

Surface tension:

$$\mathbf{F}^S = - \sum_l \sigma (\nabla \cdot \mathbf{n}_l) \nabla \phi_l$$

46

単一液膜を形成する気泡上昇(3/3)

(a) シングルフェーズフィールド

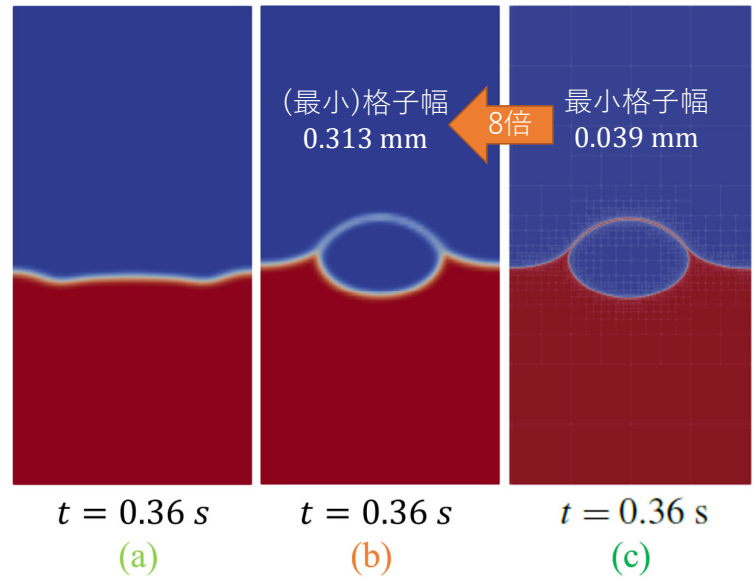
解像度[64×128]

(b) マルチフェーズフィールド

解像度[64×128]

(c) シングルフェーズフィールド
界面活性剤輸送を考慮(マランゴニ効果)

解像度[512×1024相当]



高解像度で界面活性剤の輸送を考慮した計算
を低解像度で実現

47

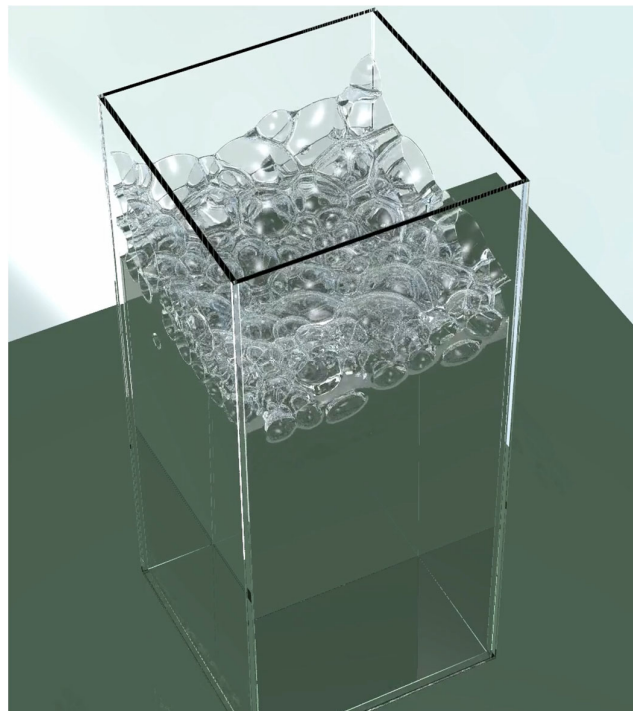
3D foam 形成

$$\rho_h/\rho_l = 832 \quad \mu_h/\mu_l = 56$$

$$Eo = 5 \quad Mo = 6.3 \times 10^{-10}$$

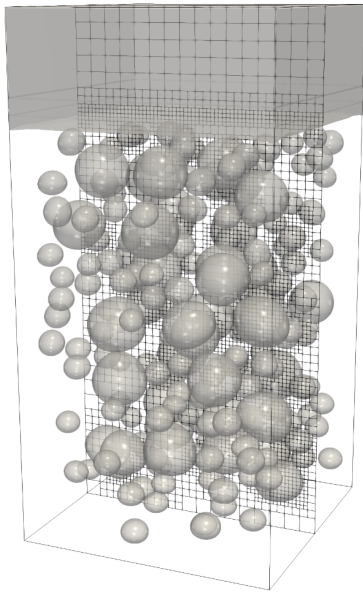
$$\text{Resolution} = L_x/200$$

$$\#\text{bubbles} = 200$$



48

Foam Computation with AMR



AMR法の導入
で高速化

49

弱圧縮性流体計算手法による 非圧縮性流体計算

- 弱圧縮性 Navier-Stokes FDM/FVM solver
- SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)
- LBM (Lattice Boltzmann Method)

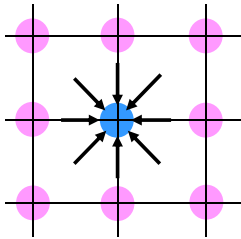
50

Lattice Boltzmann Method

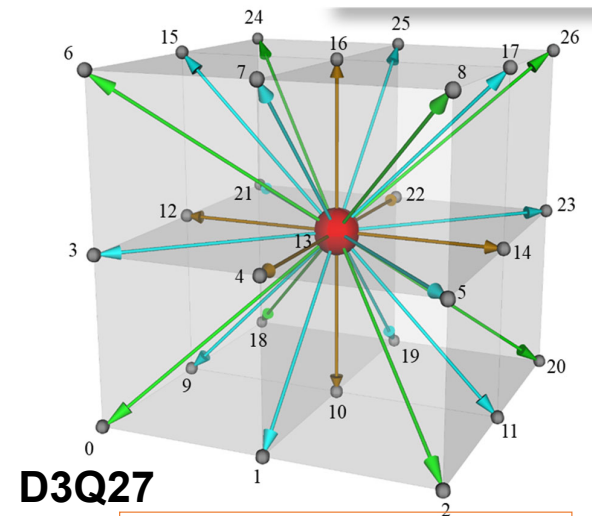
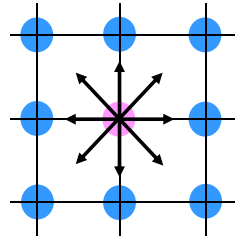
SRT (Single Relaxation Time)

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + e_i \cdot \nabla f_i = -\frac{1}{\lambda} (f_i - f_i^{eq})$$

Collision Step:



Streaming Step:



D3Q27

i is discrete velocity in the i -th direction
 e_i is the discrete velocity set;
 w_i is the weighting factor
 c is the particle velocity
 \mathbf{u} is the macroscopic velocity

MRT (Multi Relaxation Time)

$$\text{Collision term} = M^{-1} \hat{S} M \left\{ |f(x, t)\rangle - |f^{eq}(x, t)\rangle \right\}$$

Collision Model

Relaxation Time of Collision Process

$$\tau = \frac{1}{2} + \frac{\nu}{c_s^2 \Delta t} \quad \begin{array}{l} \nu : \text{viscosity} \\ c_s : \text{sound speed} \end{array}$$

Collision Model	Collision Process	Number of Relaxation coefficients
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).

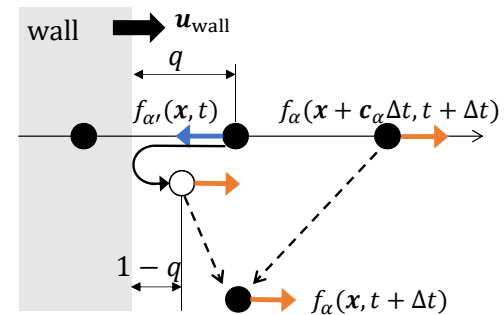
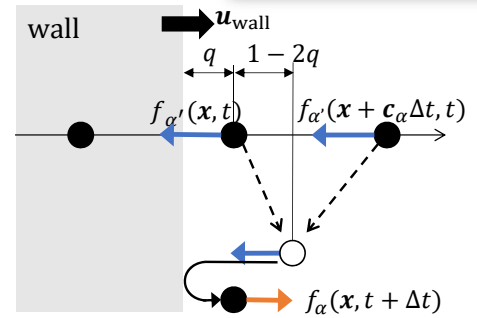
[3] Geier, M., Greiner, A., & Korvink, J. G., Phys. Rev. E, 73, 066705 (2006).

[4] Geier, M., Schönherr, M., Pasquali, A., & Krafczyk, M., Comput. Math. Appl., 70(4), 507-547 (2015).

任意形状の物体の扱い

Interpolated bounce-back scheme

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



Hydrodynamic force*

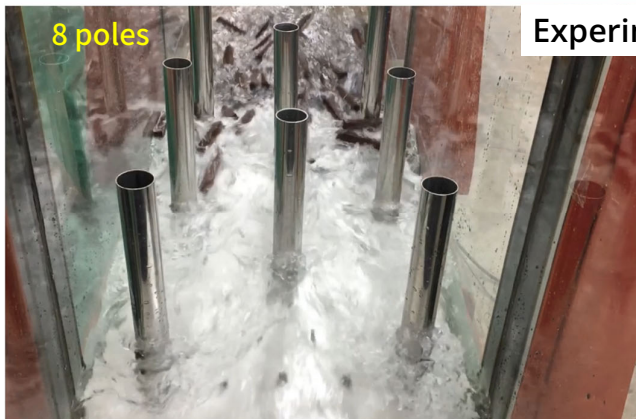
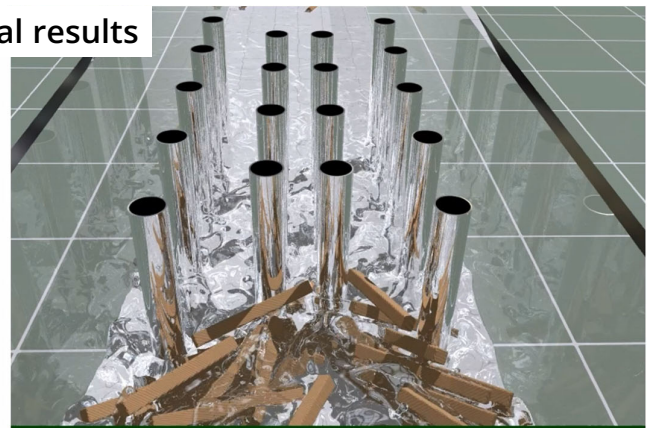
$$\mathbf{F}_{ijk}(\mathbf{x}, t) = (\xi_{ijk} - \mathbf{u}_{\text{wall}})f_{ijk}(\mathbf{x}, t) - (\xi_{ijk}' - \mathbf{u}_{\text{wall}})f_{ijk}'(\mathbf{x}, t + \Delta t)$$

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

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

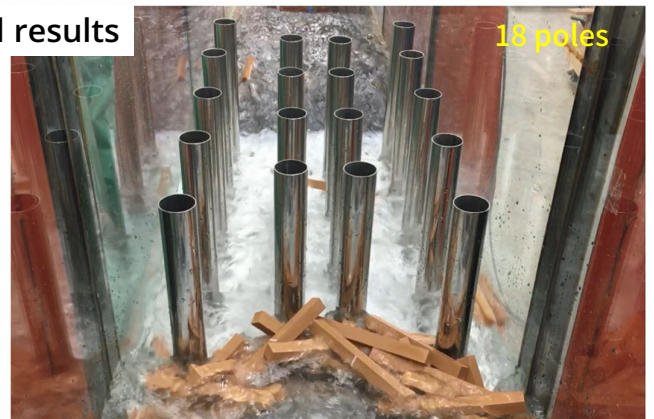


Computational results

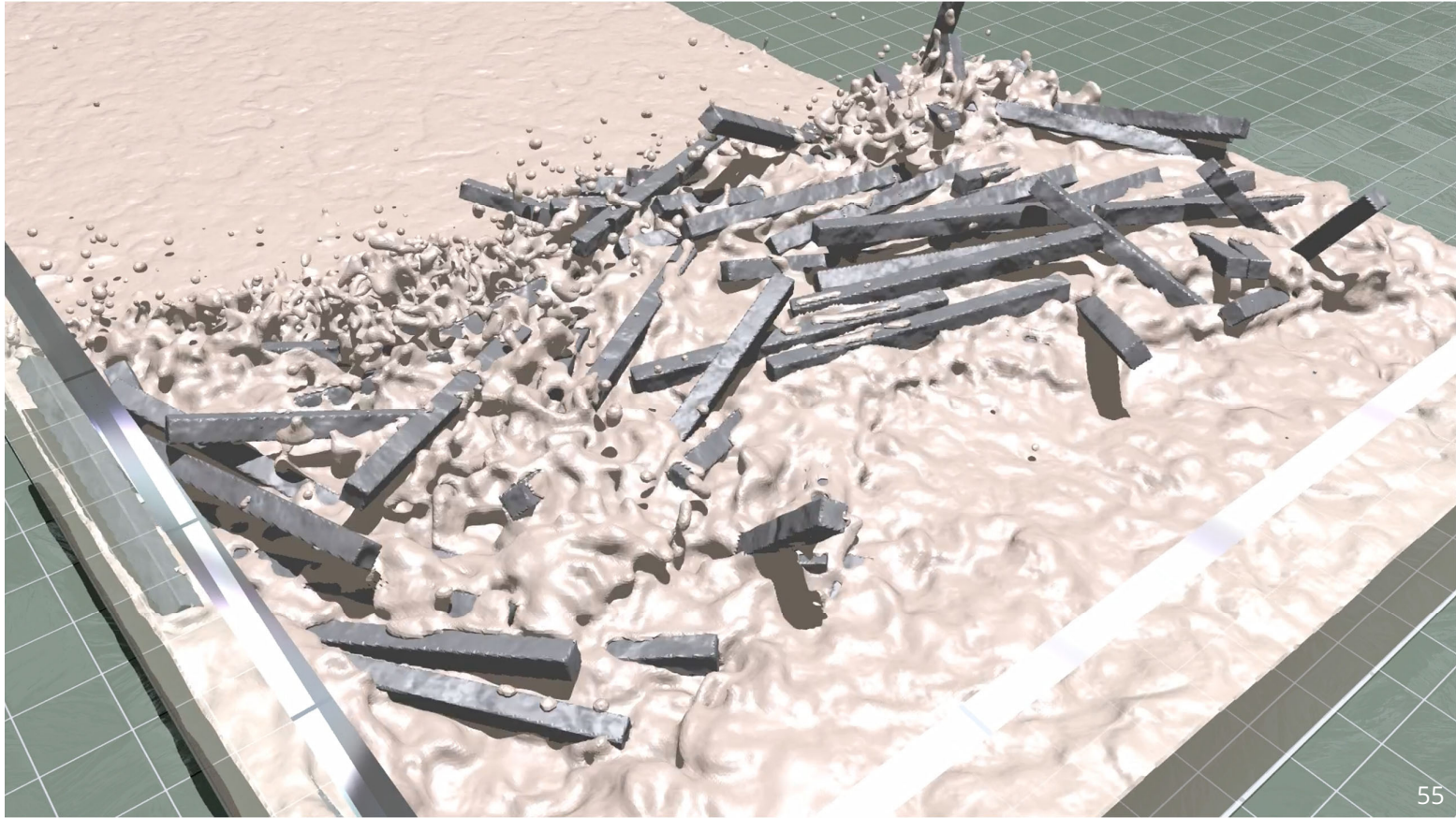


8 poles

Experimental results



18 poles



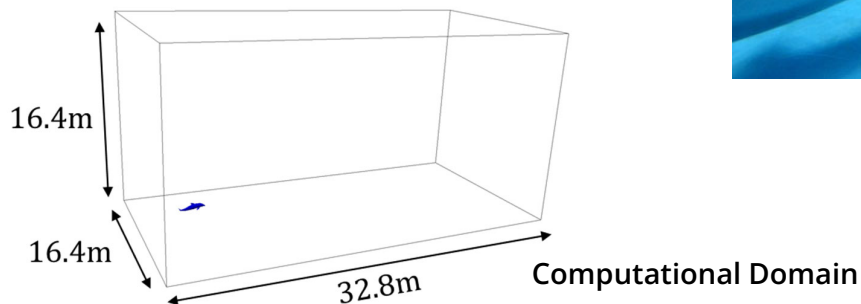
55

Dolphin Free Swimming

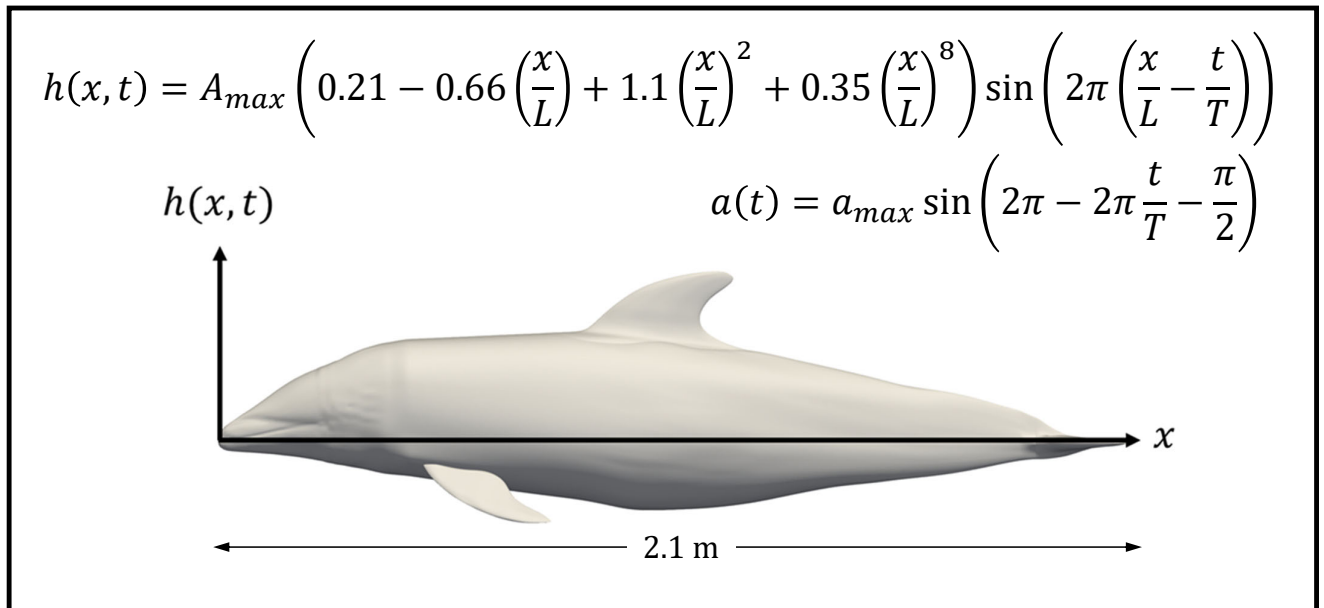


Computational Conditions:

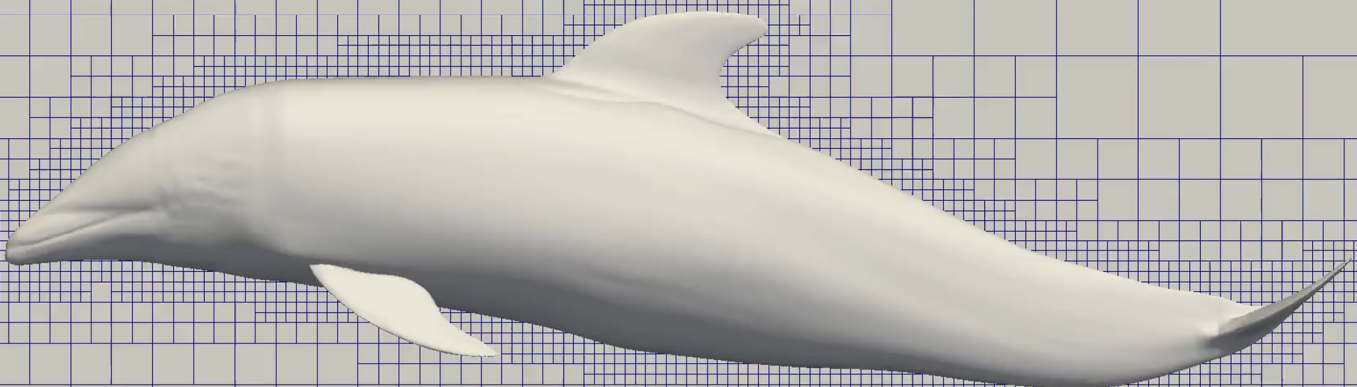
- CFL - 0.03
- Kinematic viscosity - $\mu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Resolution - $\Delta x_{\min} = 2.0\text{mm}$, $\Delta x_{\max} = 256.0\text{mm}$
- GPU - 8
- Physical Time - 5.76s
- Calculating Time - 9days



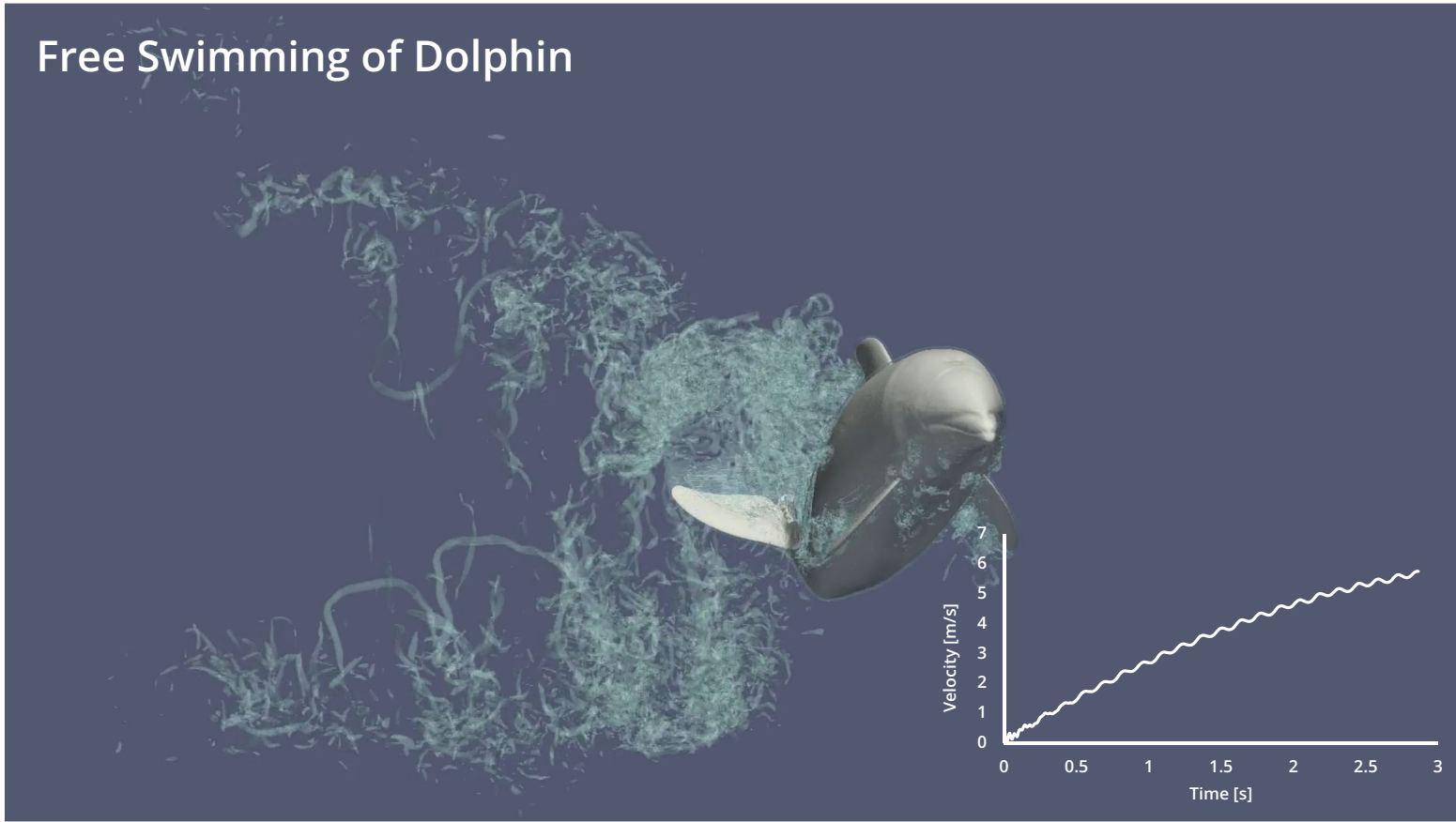
Dolphin Free Swimming



Adaptive Mesh Refinement Method



Free Swimming of Dolphin



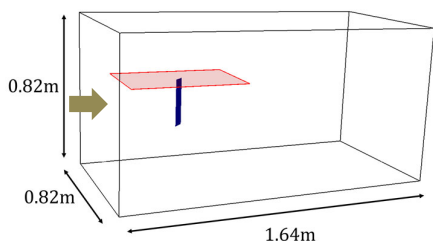
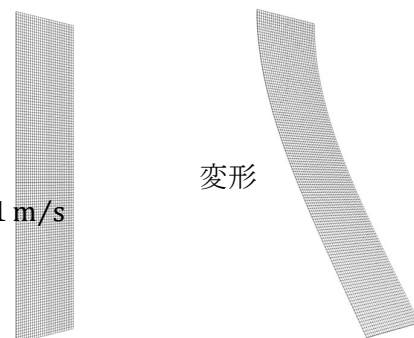
空力による薄板変形（流体構造連成）



薄板の変形モード

- 壁面に固定された薄板は流れによって3つの異なる変形モード(Jin et al.,2019)
→ **シミュレーションは未実施.**
- 薄板にかかる抗力が速度の2乗ではなく,
 $2 + V$ 乗に比例 (V は負値)
→ **変形による抵抗低減効果の確認.**

流入流速 $U_{in} = 3.2 \text{ m/s} \sim 11.1 \text{ m/s}$



- サイズ - $240\text{mm} \times 60\text{mm} \times 0.5\text{mm}$
- ヤング率 - $E = 2.4 \times 10^9 \text{ Pa}$
- 密度 - $\rho = 1180 \text{ kg/m}^3$
- ポアソン比 - $\nu = 0.35$
- 断面2次モーメント $I = 6.25 \times 10^{-13} \text{ m}^4$
- 境界条件 - 上面:固定端, 他:自由端

JIN, Yaqing, et al. Flow-induced motions of flexible plates: fluttering, twisting and orbital modes. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 864: 273-285.

有限要素法解析

- 6面体2次要素.
- 数値積分には節点内力に低減積分, それ以外は完全積分.
- 要素の剛体回転を考慮したGreen-Lagrangeひずみ.

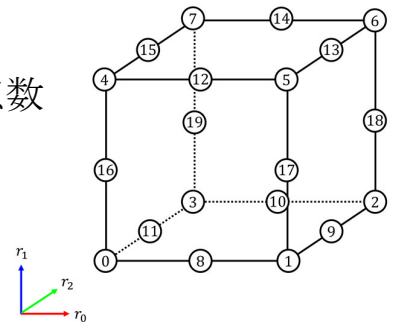
平衡方程式

$$[M]\{\ddot{u}\} = \{f_{ext}\} - \{f_{int}\} \dots \text{積分点数}$$

$3 \times 3 \times 3$ $3 \times 3 \times 3$ $2 \times 2 \times 2$

Green-Lagrange ひずみテンソル

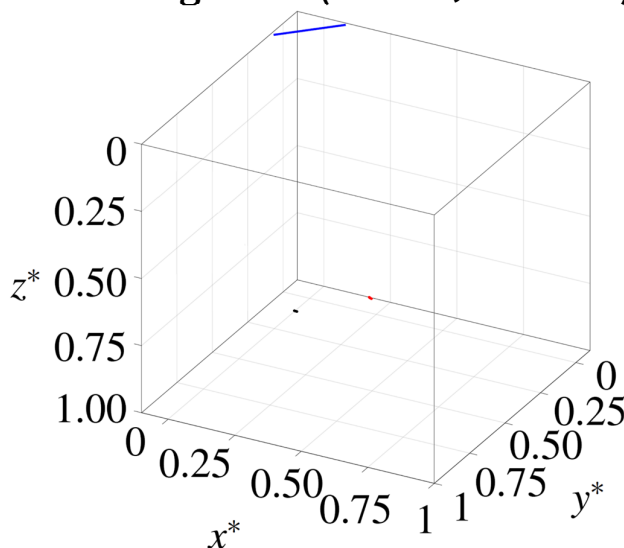
$$E_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right)$$



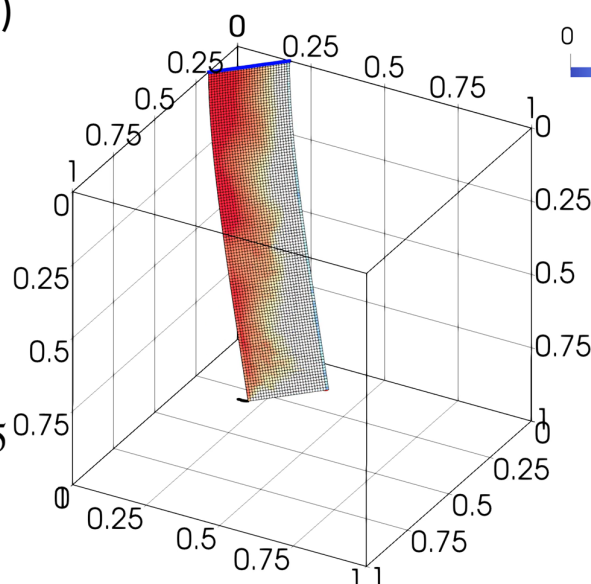
61

コーシー数による変形モードの分類 Fluttering モード

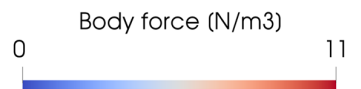
Flutteringモード ($Ca = 7, \alpha = 45^\circ$)



実験結果



計算結果



- 体積力は非対称
- z方向の微小振動



今後の課題
適切な減衰の導入

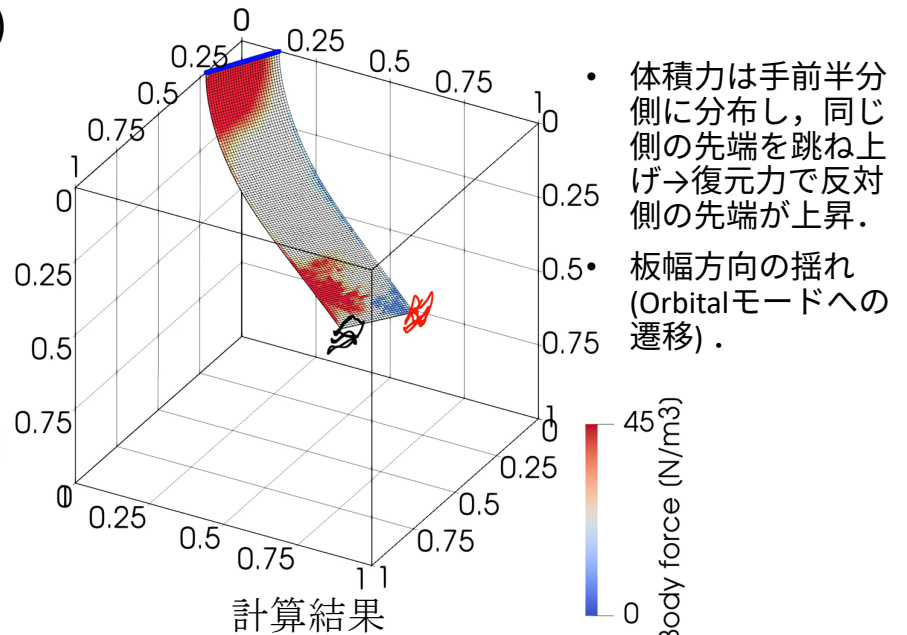
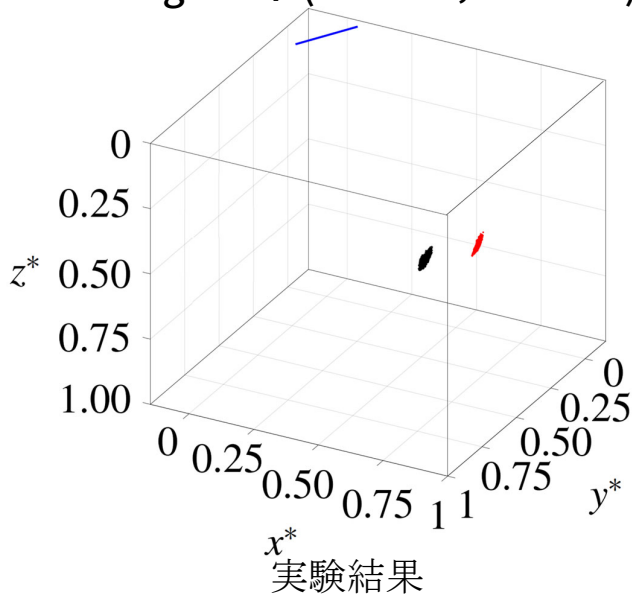
x^*, y^*, z^* は薄板の長さLで無次元化された座標系. 先端手前側の軌跡:黒, 奥側の軌跡:赤.

62

コーシー数による変形モードの分類

Twisting モード

Twistingモード ($Ca = 41, \alpha = 30^\circ$)



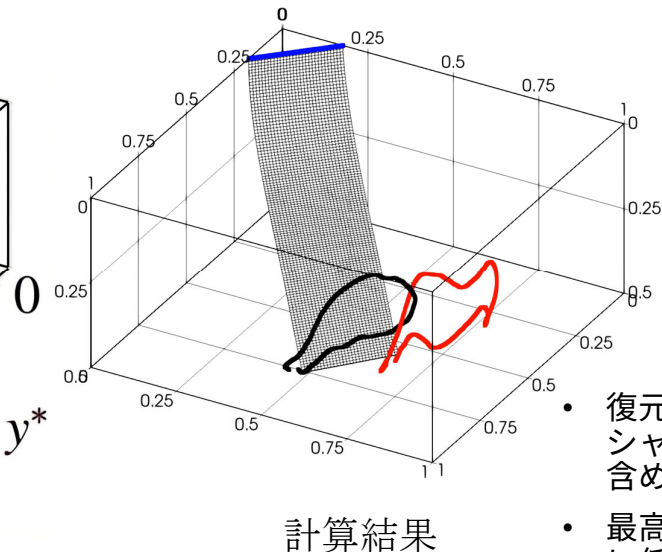
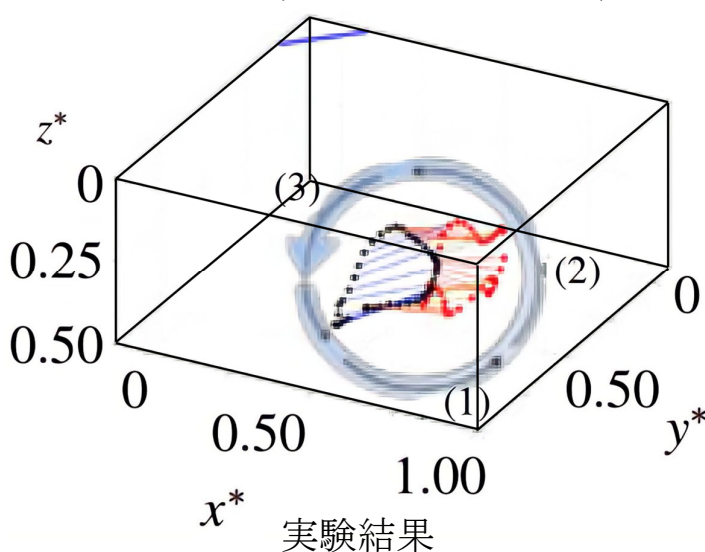
- 体積力は手前半分に分布し、同じ側の先端を跳ね上げ→復元力で反対側の先端が上昇。
- 板幅方向の揺れ (Orbitalモードへの遷移)。

x^*, y^*, z^* は薄板の長さ L で無次元化された座標系。先端手前側の軌跡:黒, 奥側の軌跡:赤.

コーシー数による変形モードの分類

Orbital モード

Orbitalモード ($Ca = 68, \alpha = 45^\circ$)



- 復元力によるシャープな変形も含め、概ね一致。
- 最高到達点は僅かに低い。

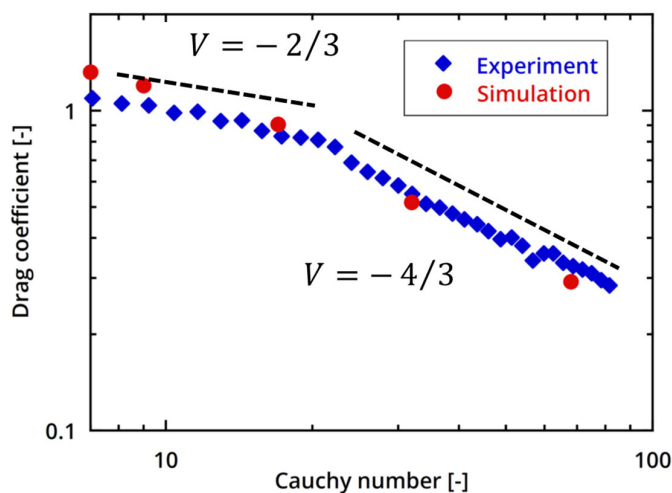
x^*, y^*, z^* は薄板の長さ L で無次元化された座標系。先端手前側の軌跡:黒, 奥側の軌跡:赤.

抗力係数とコーシー数の関係

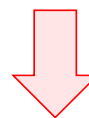
抗力係数とコーシー数($\alpha = 45^\circ$)

抗力 $F \propto U^2 \rightarrow F \propto U^{2+V}$

Vogel 指数: V



- $Ca = 20$ 前後での傾きの変化.
- 流線形効果→面積低減の遷移.



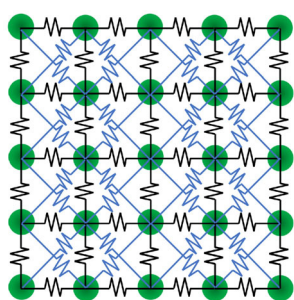
実験結果と類似した傾向.

Violently Fluttering Flag

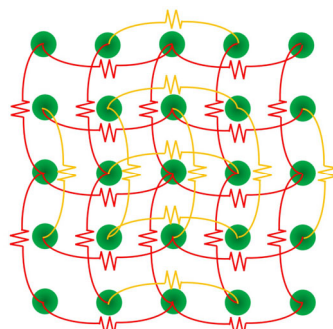
- Gravity
- Strong wind
- Cloth Collision
- Turbulent flow generation

A typical fluid-structure Interaction

● Mass-Spring System for Cloth Structure



Normal (black) and shear (blue) springs



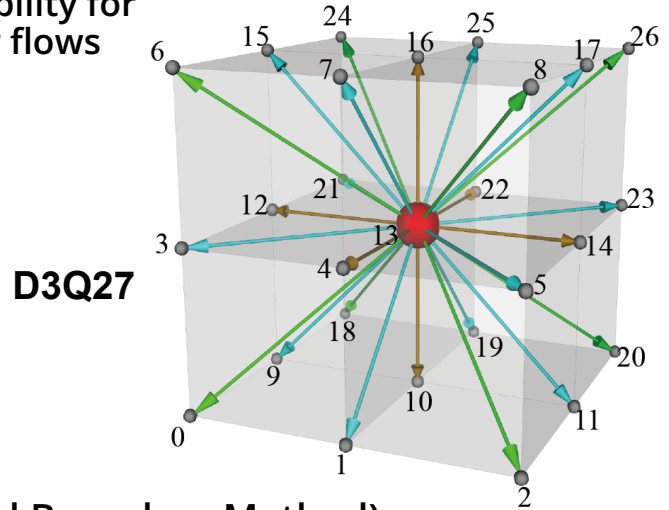
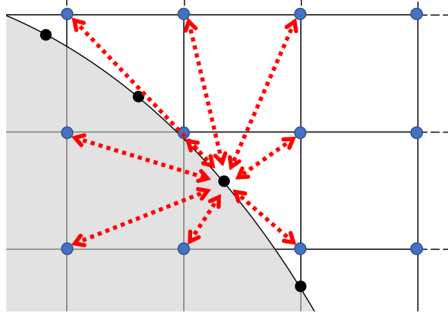
Bending springs



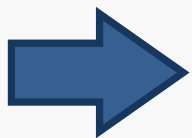
CFD: Lattice Boltzmann Method coupling with a moving cloth

Cumulant LBM: High Accuracy and Stability for high-Reynolds number flows

Cloth: Mass-Spring System



Coupling: Direct Forcing IBM (Immersed Boundary Method)



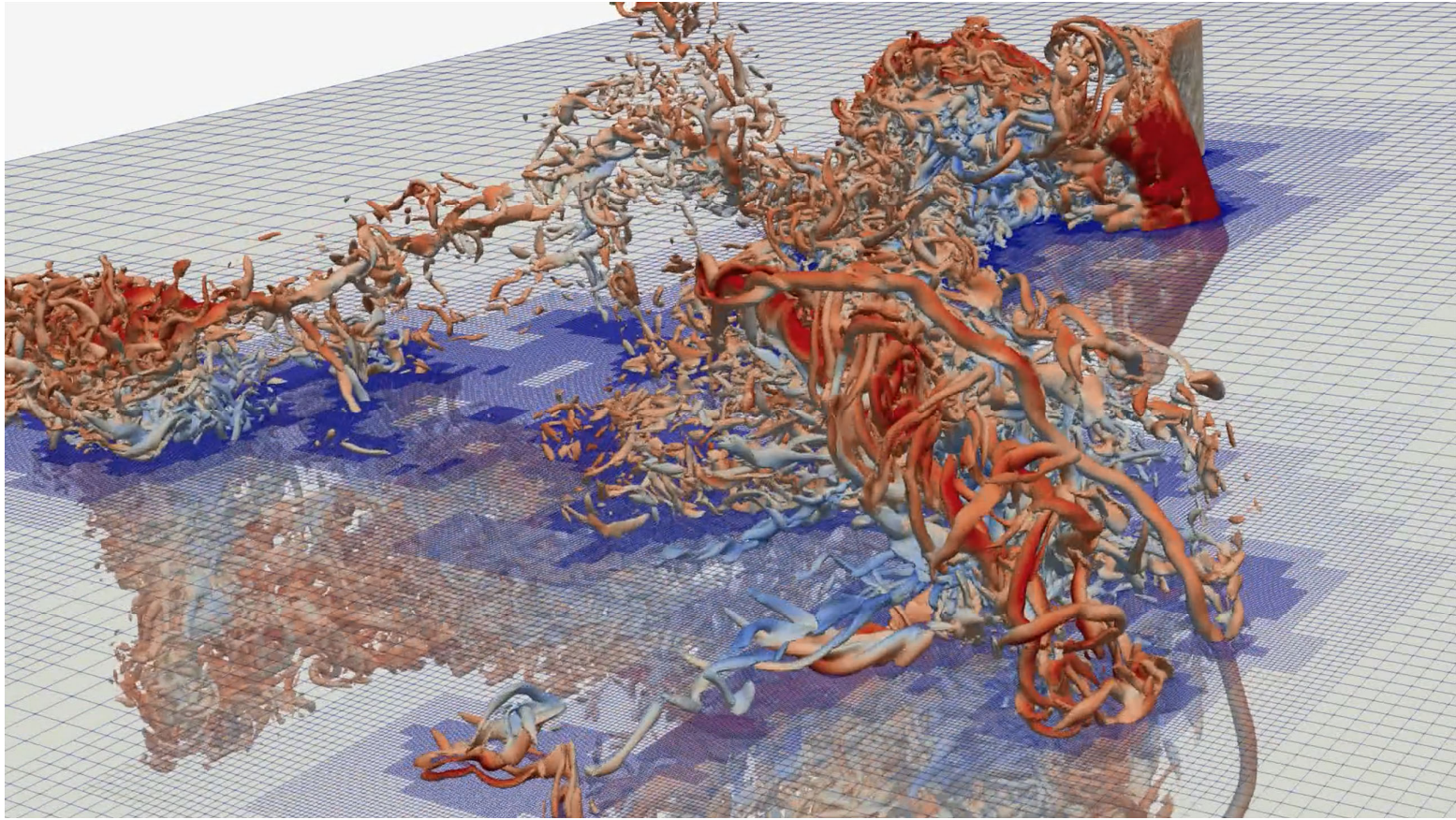
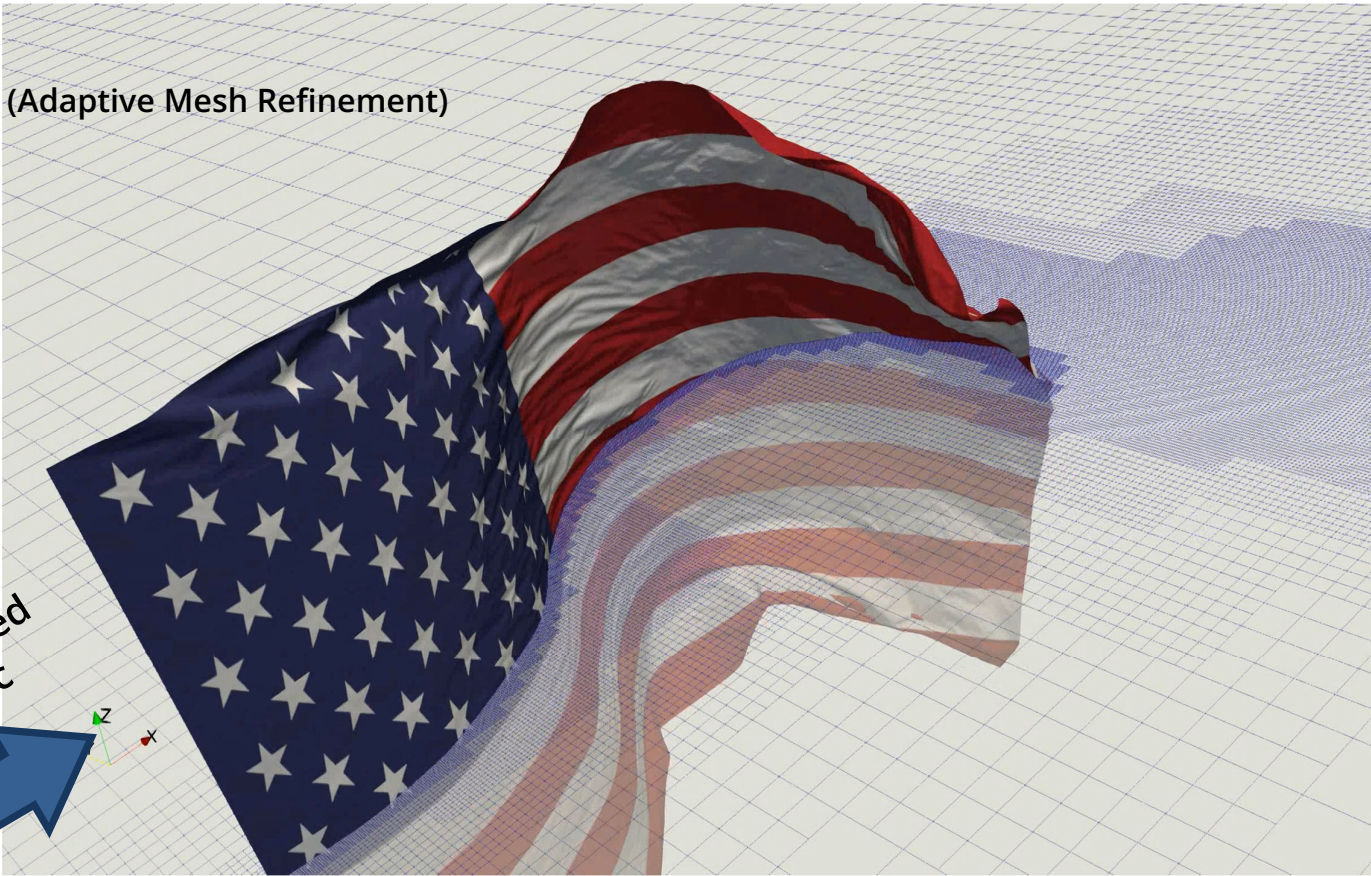
Wind speed
5 m/sec



Slow motion: 1/60

AMR (Adaptive Mesh Refinement)

Wind speed
10 m/sec



野球のフォークボールの落ちる謎

- 野球の「フォークボール」や「スプリット」は打ち難く、決め球
- 急に打者の手元で落ちる（見た目も）感じを与える。

「なぜ、落ちるのか？」

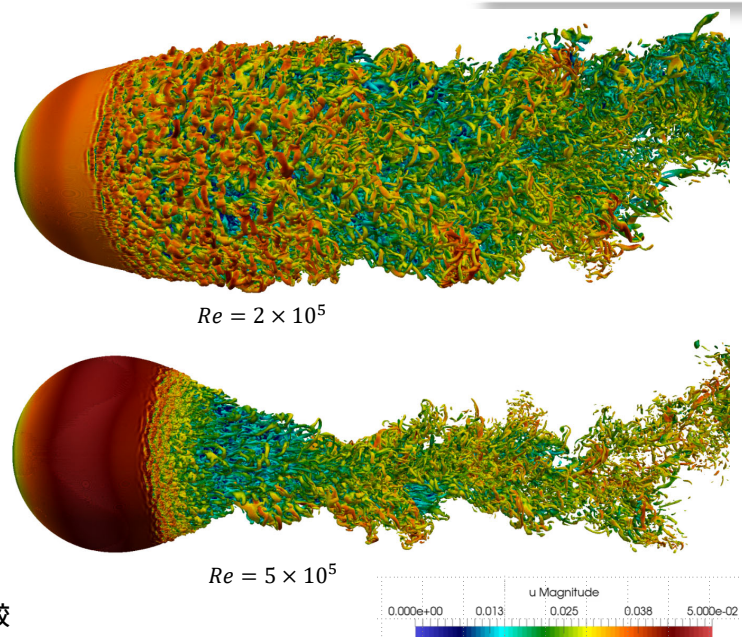
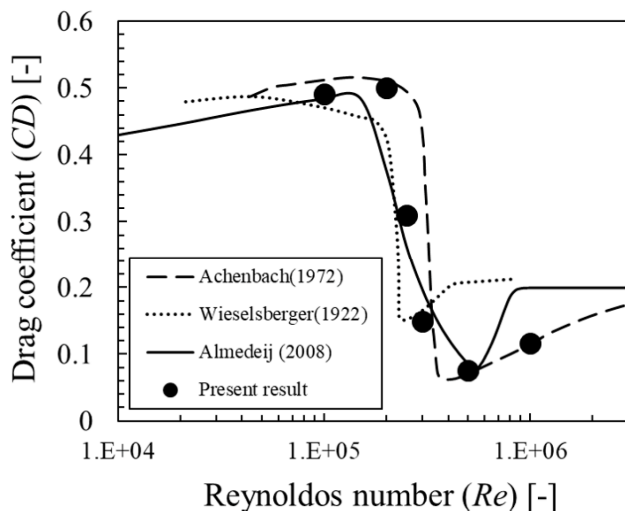


<https://www.youtube.com/watch?v=vLM4borOwAg&t=65s>

71

日本流体力学会・原著論文：大橋遼河, 青木尊之, 渡辺勢也, 小林宏充: 低スピンレートで回転する野球ボールの空力解析, 「ながれ」, 40-5 (2021)

ドラッグクライシス近傍の計算

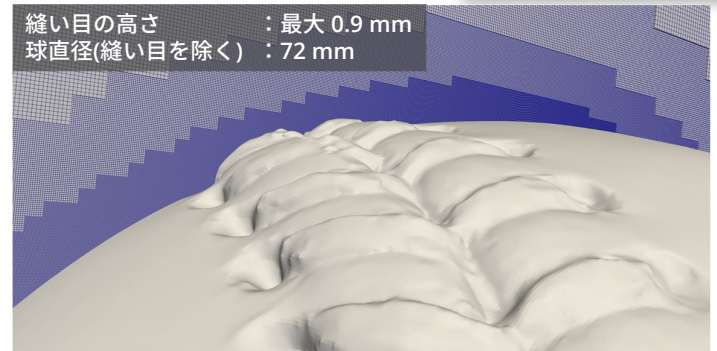
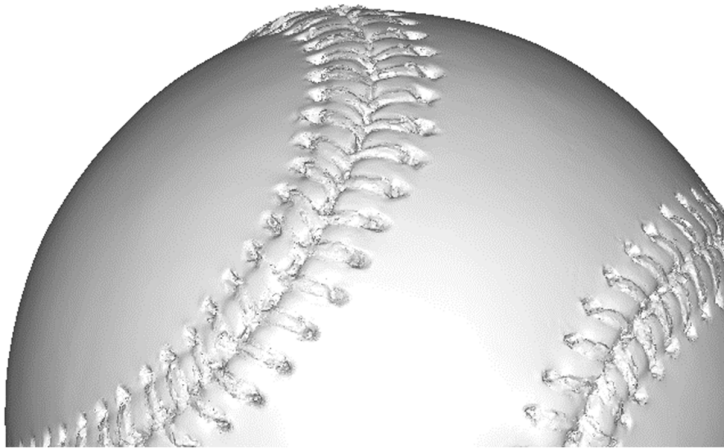


高レイノルズ数領域での球の抗力係数(計算結果と実験値の比較)

(グラフにおける引用(上から)) Jaber Almedej, "Drag Coefficient of Flow Around a Sphere: Matching Asymptotically the Wide Trend", (2008)
 Elmar Achenbach, "Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers", (1972)
 Kwangmin son et al., "Mechanism of drag reduction by a surface on a sphere"(2011)

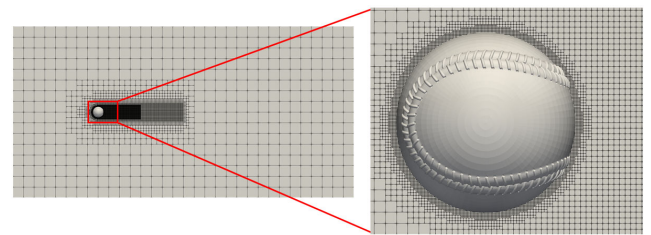
72

野球ボールまわりの空力解析



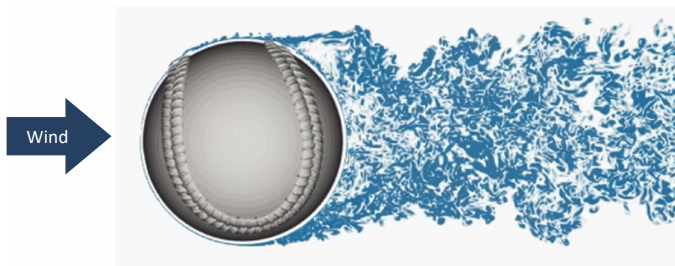
MLB公式ボールをキーエンス VL-500 にて3Dスキャン

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)



73

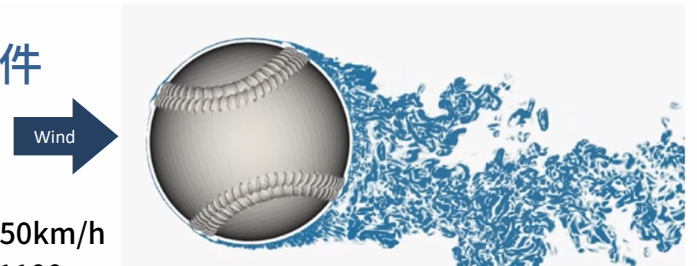
縦方向に受ける力 バックspinなので、浮き上がる力を受ける。



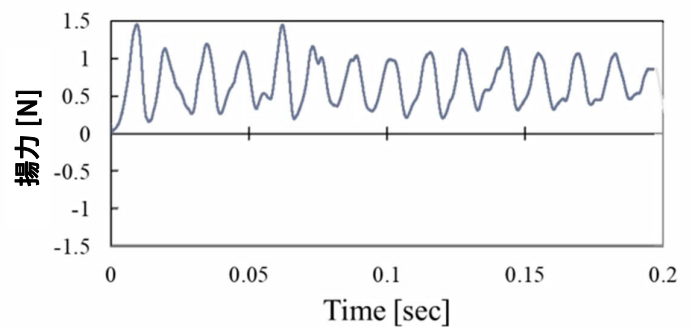
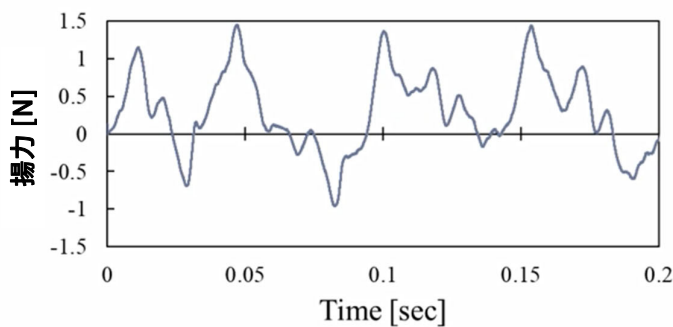
ツーシーム

同条件

球速：150km/h
回転数：1100rpm



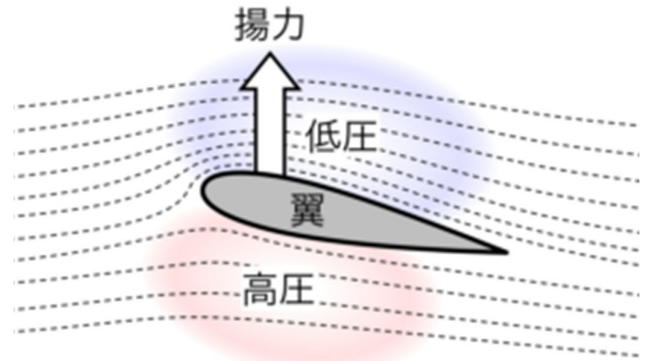
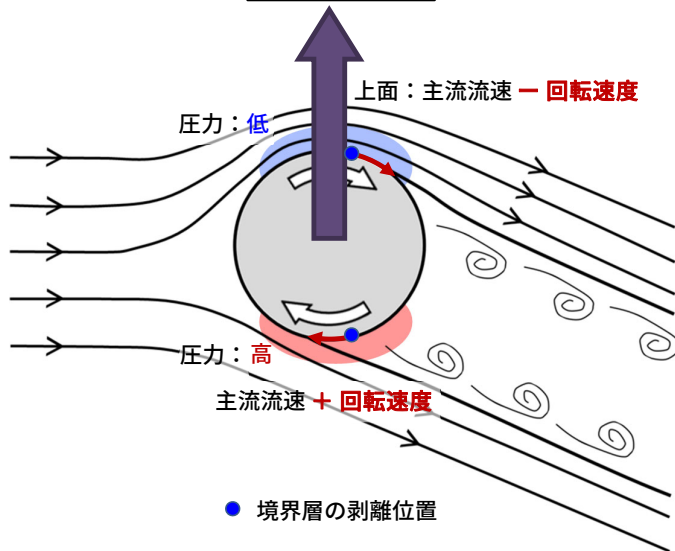
フォーシーム



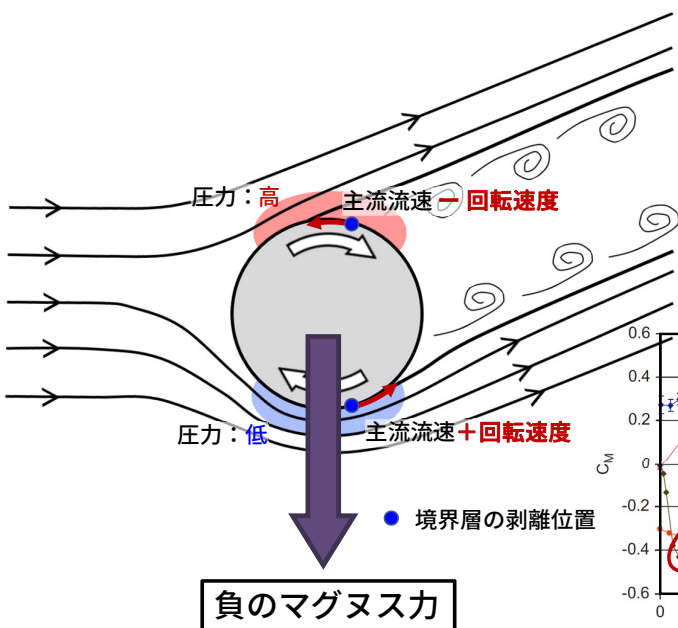
回転している球に働く力（低速流）

マグナス力 カープが曲がる原理

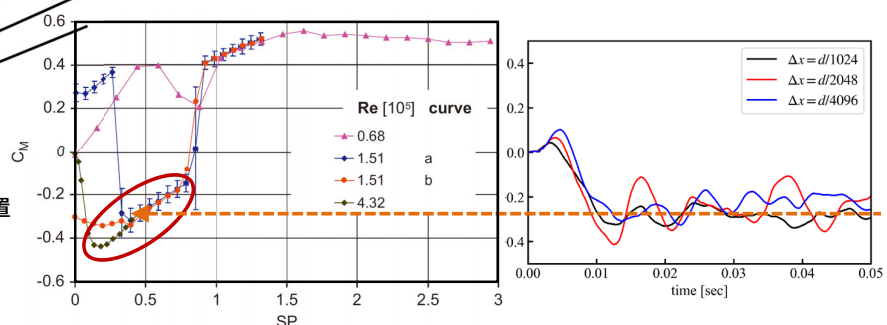
翼が浮き上がる原理



回転している球に働く力（高速流）



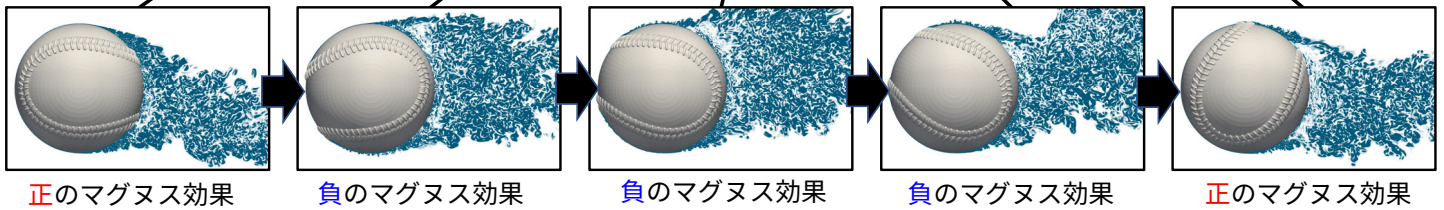
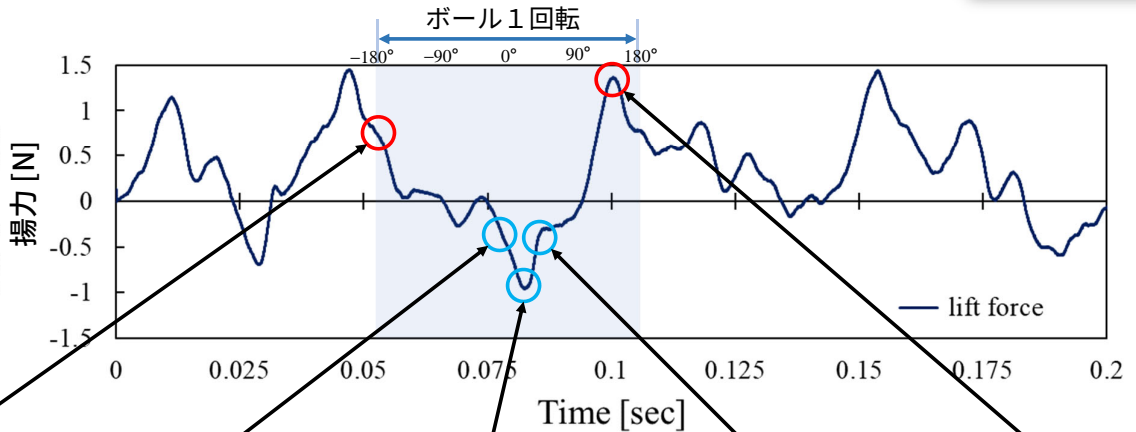
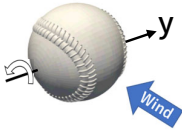
- ドラッグクライシス近傍の流速（風速）
- 後流が斜め上に上がる特徴
- 実験でも数値シミュレーションでも「負のマグナス効果」は確認



Thorsten Kray, Joerg Franke, Wolfram Frank: Magnus effect on a rotating sphere at high Reynolds numbers, J. WindEng.Ind.Aerodyn.110, 1-9 (2012)

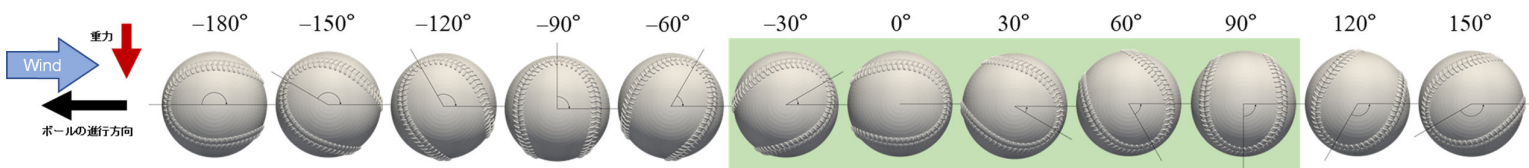
ツーシームの揚力特性

ツーシーム (フォークボール)	
流速	151.2 km/h
回転数	1110 rpm
回転軸	Y軸正



77

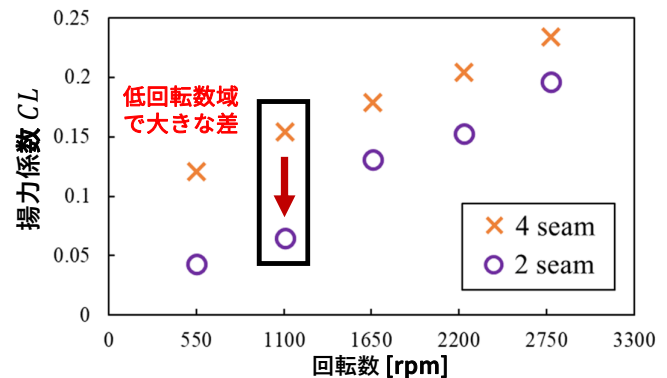
ツーシームの縦方向に働く力



結論 縫い目が -30° から 90° のときに、「**負のマグナス効果**」が発生

これまでの実験（測定）では、縫い目のある野球ボールでは、**負のマグナス効果**のは「発生しない」と思われていた。

縫い目の形状まで解像する**非定常**の数値流体シミュレーションを行ったことで、発見することができた。



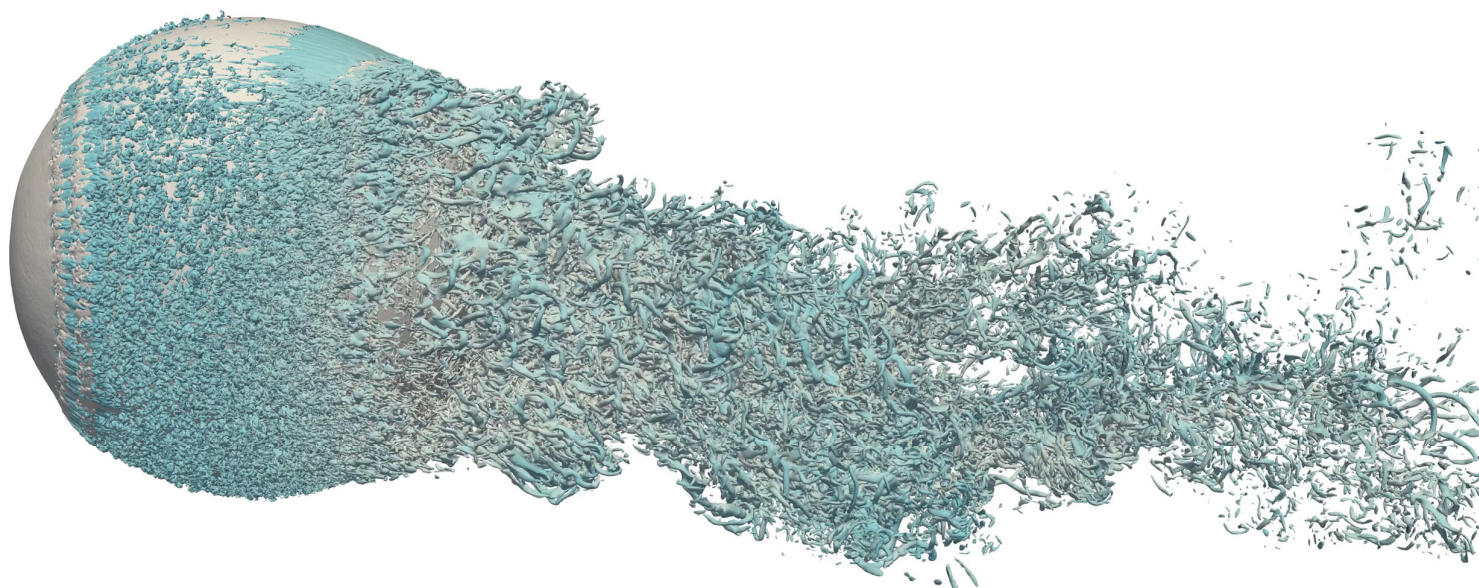
ボール軌道計算の範囲

リリースポイントからホームベースの一番ピッチャよりの場所までの距離



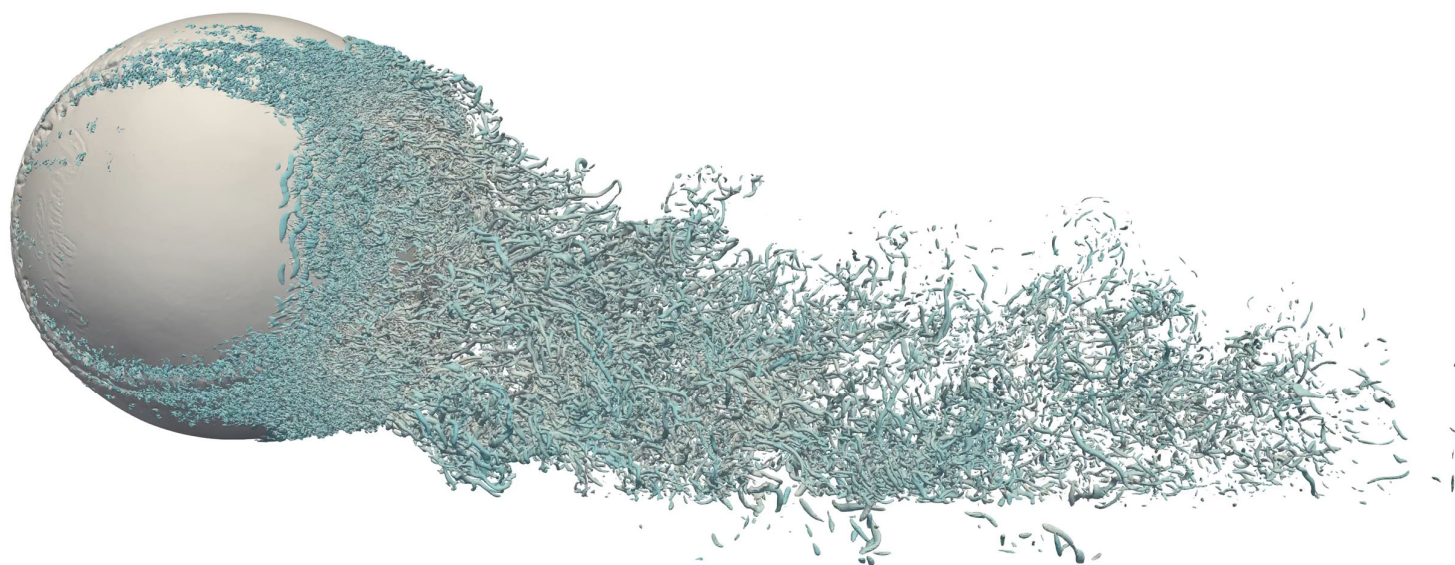
[1] MLB, "Official Baseball Rules 2019 Edition", (2019)

フォーシーム・バックスピン 160km/h, 2496 rpm



大谷: スプリット (球速 144 km/h, 回転数1710 rpm)

ツーシーム・バックspin



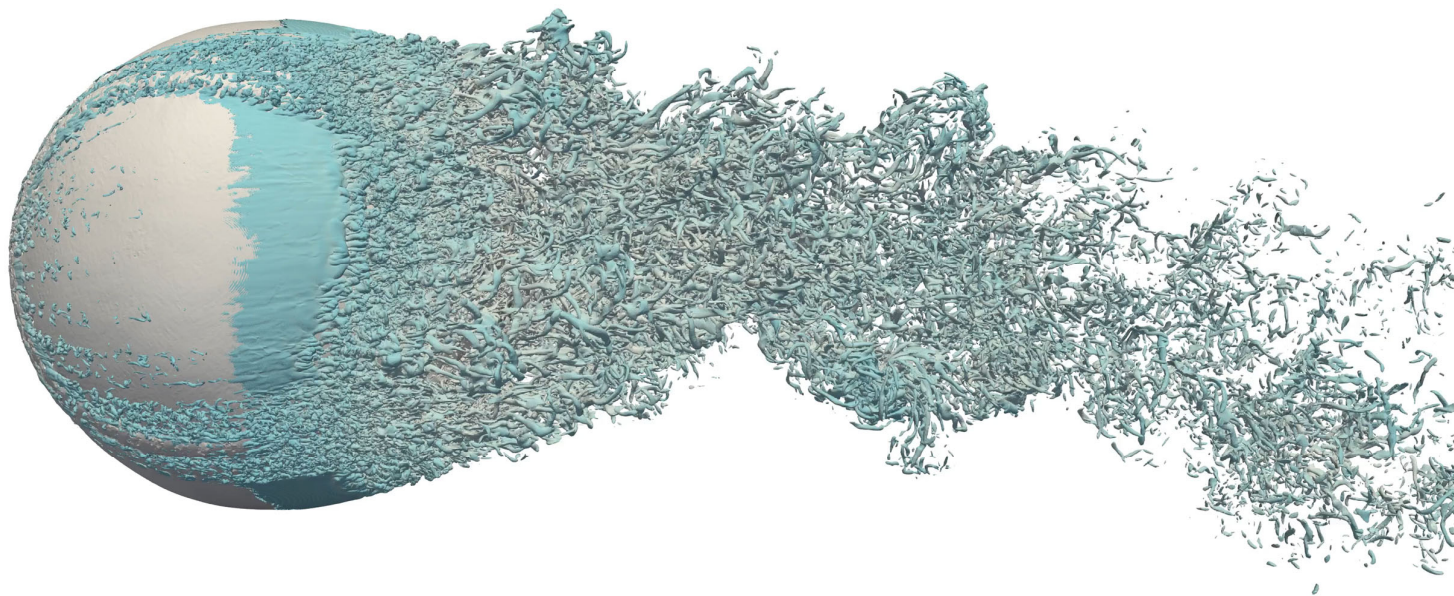
ジャイロボール

- 大谷翔平投手のフォークボールは、縫い目の回転がツーシームでなくジャイロ回転か。



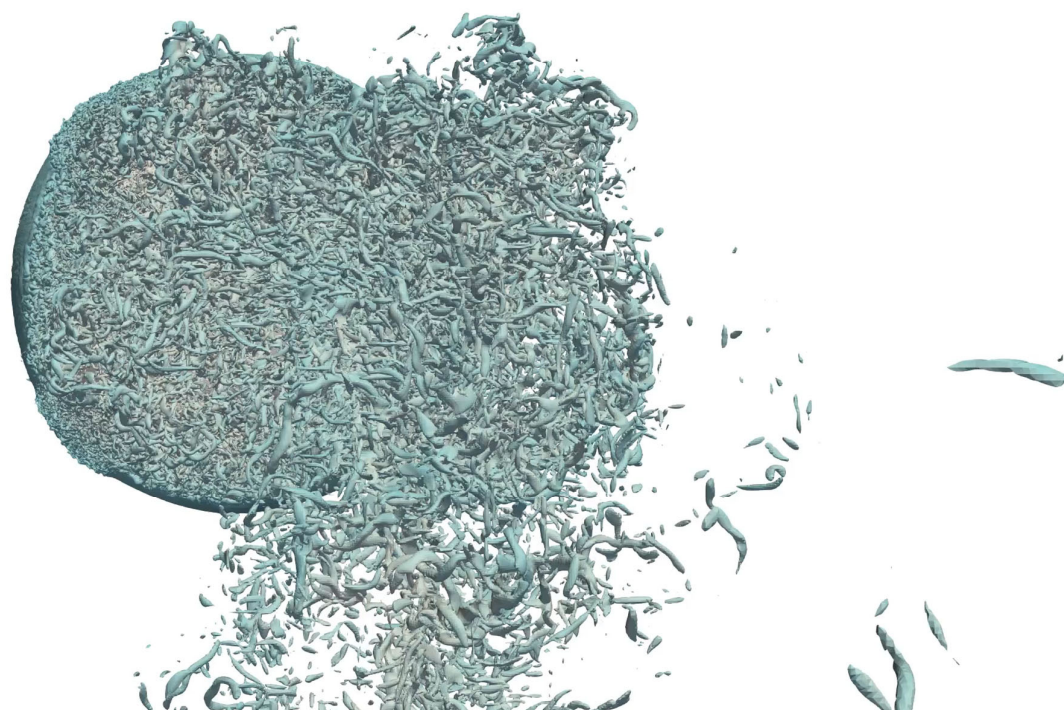
- ジャイロボールはボールの進行方向と回転軸が一致する（ライフル回転）。

ジャイロボール 144km/h, 1710 rpm



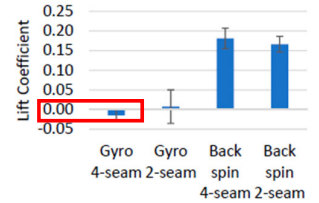
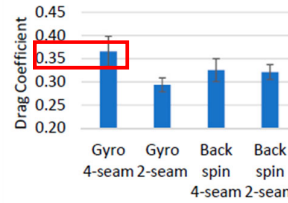
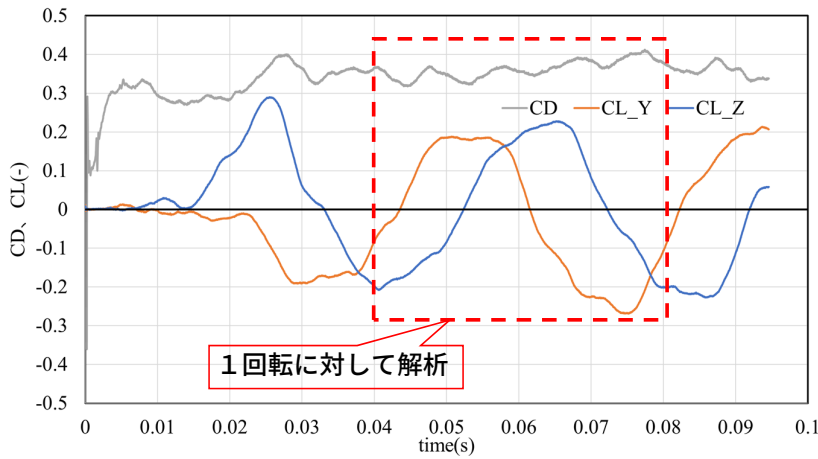
ボールの背面：投手からの視点

ジャイロボール
144km/h, 1710 rpm



ジャイロボールの揚力の時間変化

4-seam Gyro: 129km, 1500rpm ($Re \approx 170,000$ $SP=0.158$)

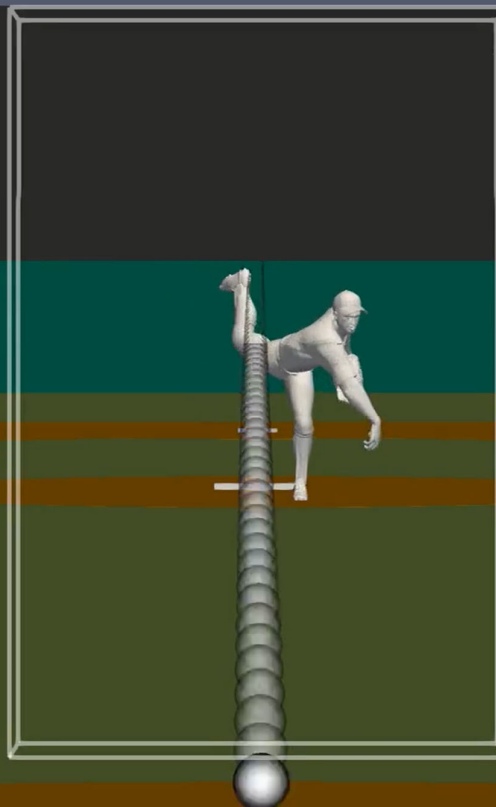


実験値: $CD=0.37$

Lyu, Bin, Jeff Kensrud, and Lloyd Smith. "Investigation of the Aerodynamic Drag of Baseballs with Gyro Spin." Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings. Vol. 49. No. 1. 2020.

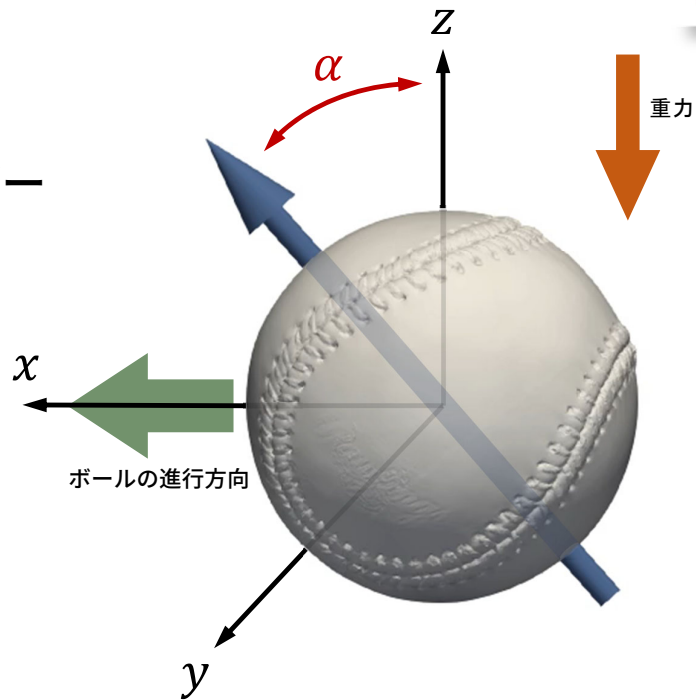
計算値: $CD=0.36$ $CL_Y=-0.02$ $CL_Z=0.01$

(球速 144 km/h, 回転数1710 rpm)



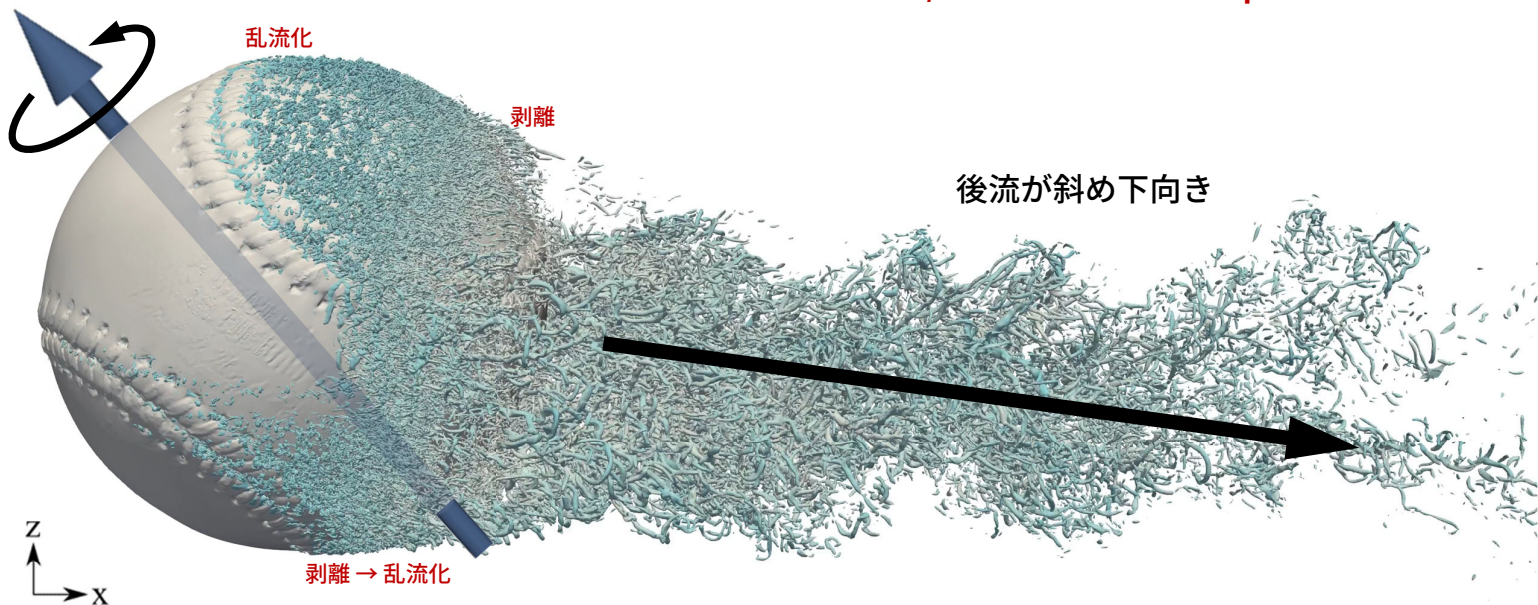
スーパースローとは

横に大きく曲がるスライダー
(縦の変化が少ない)



x 軸方向に 53° 傾く場合 (回転効率 60%)

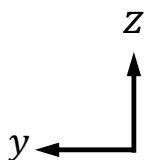
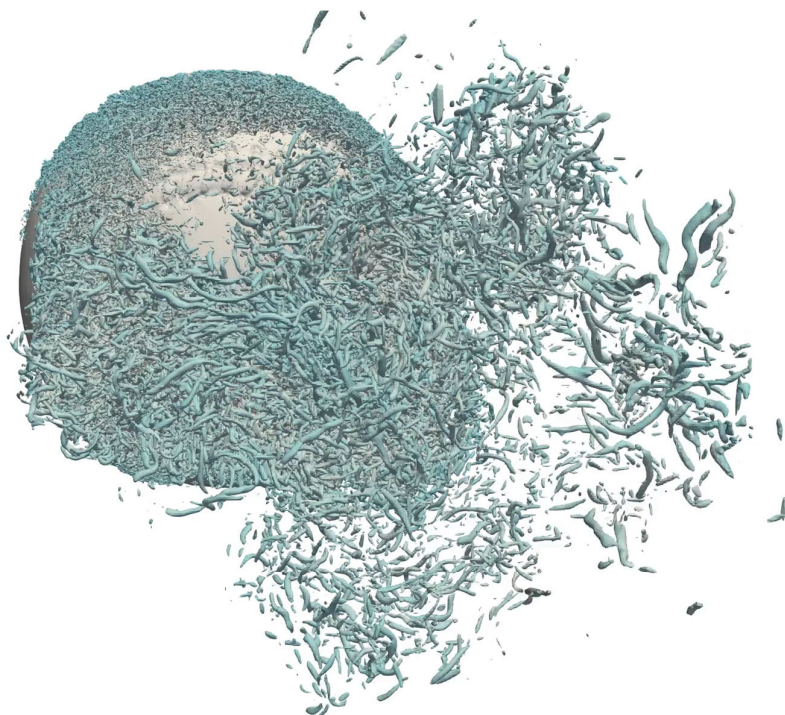
球速 136.8 km/h, 回転数 2590 rpm



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



後流の向きに応じてボールに働く力

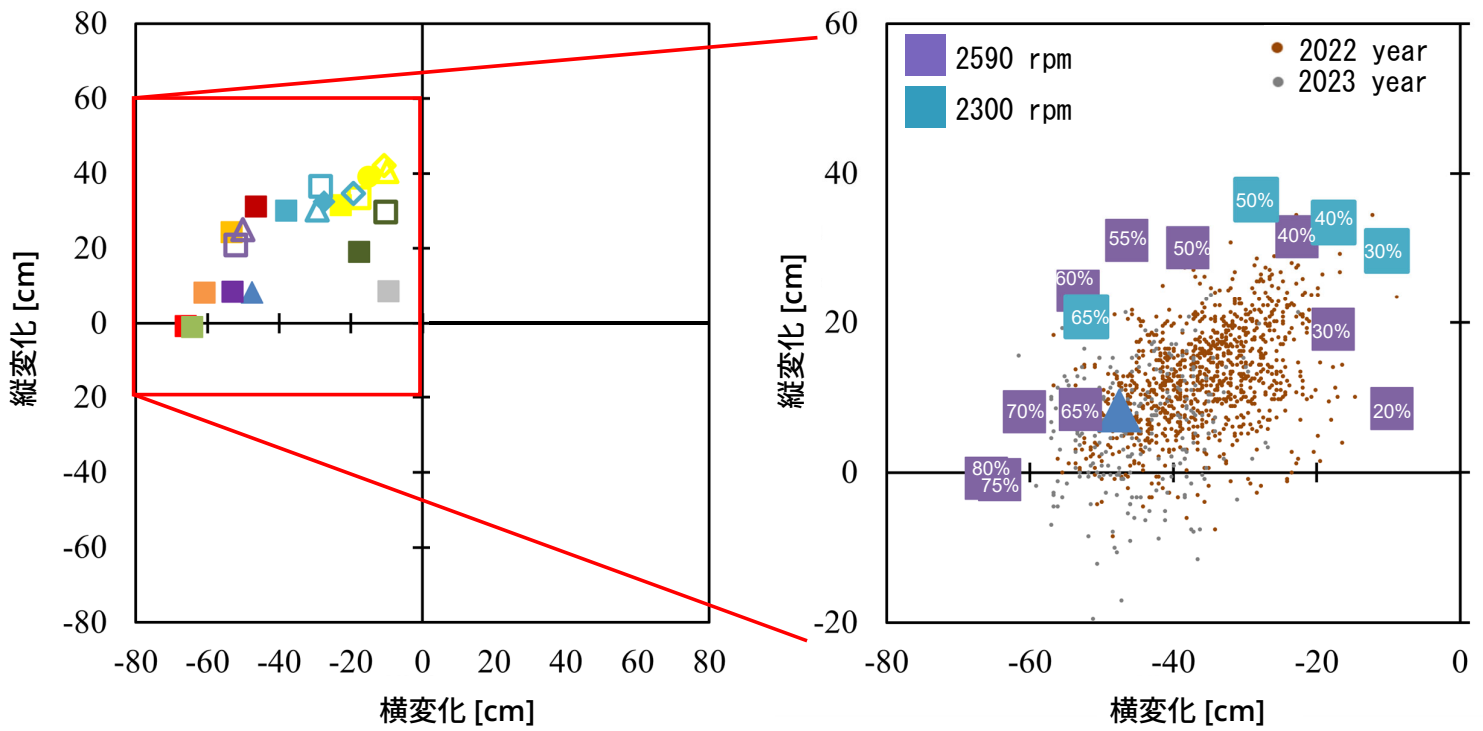


ボールの上面は縫い目で一度乱流化し、乱流状態で境界層剥離する。
境界層の内部が乱流になると、剥離し難くなる。

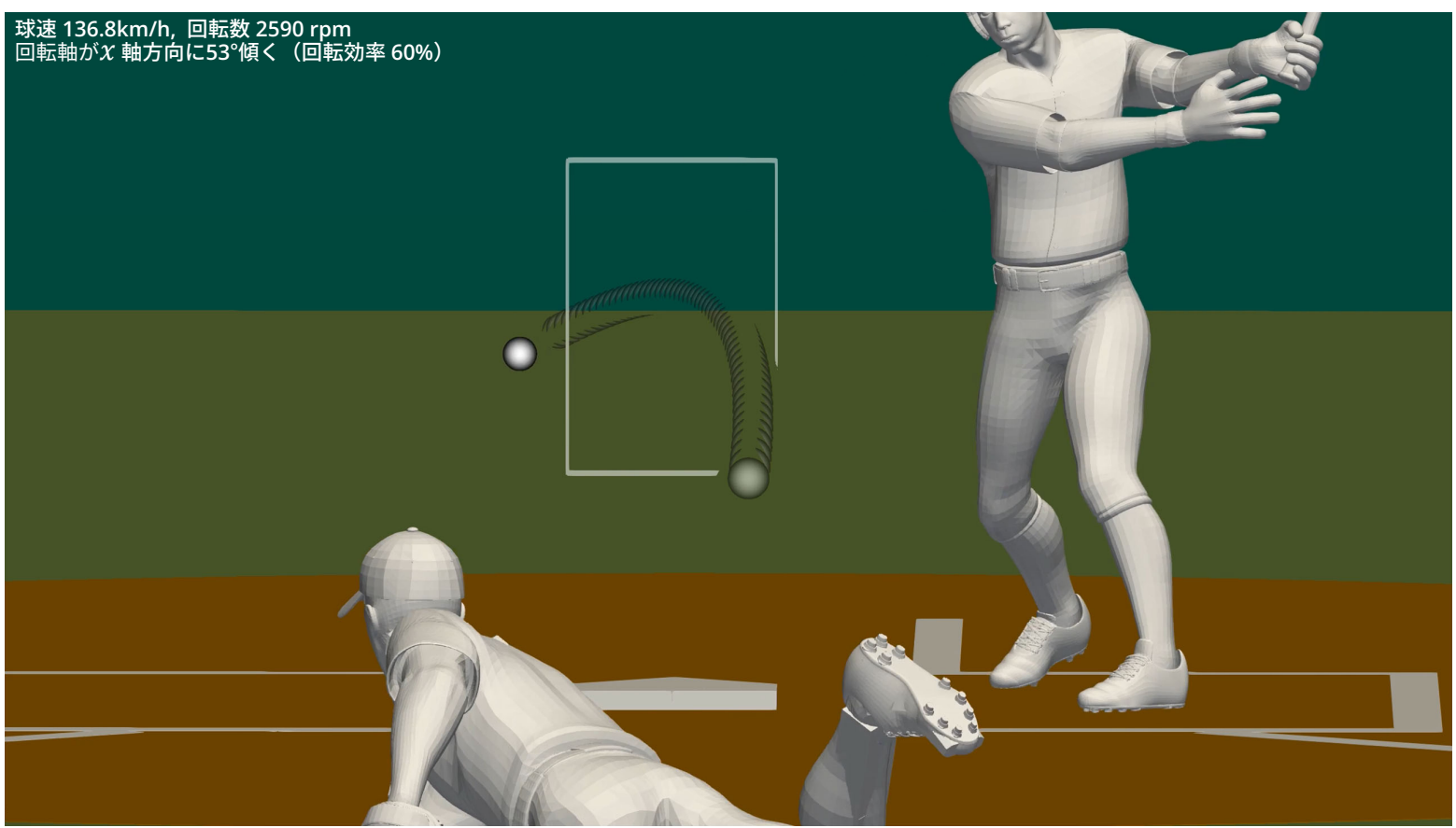
ボールの下面は層流が縫い目で境界層剥離する。
比較的上流側で、縫い目が剥離点を固定化している。

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。

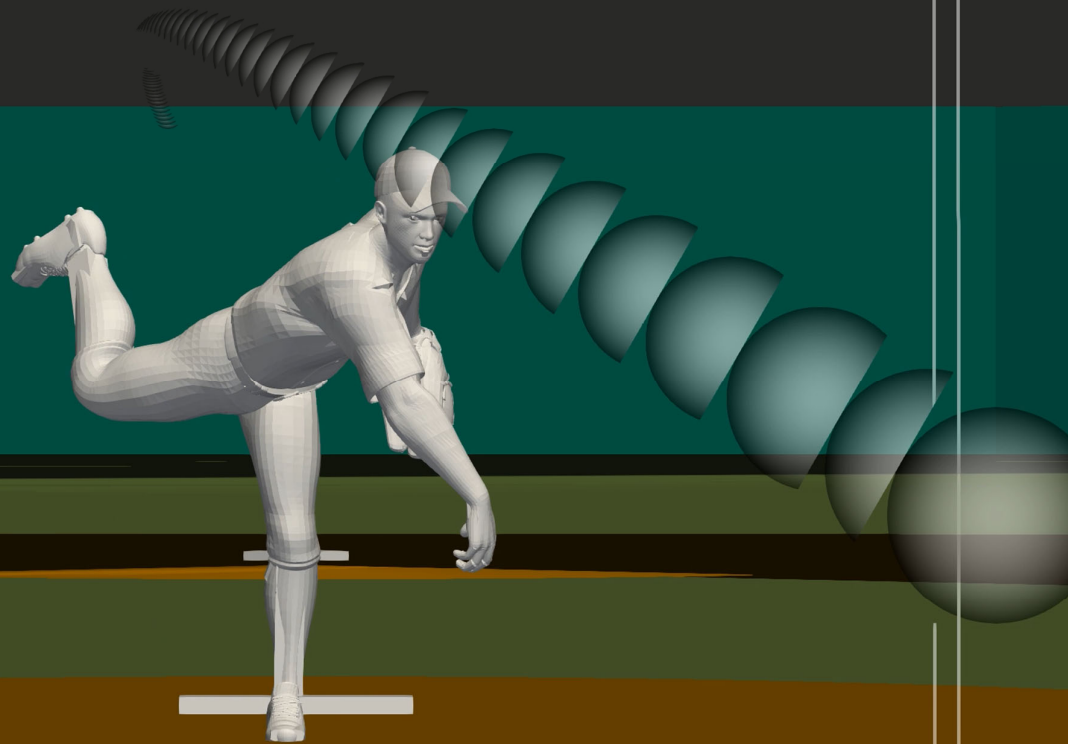
スライパーの縦・横変化



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

- 非圧縮性の混相流（気相・液相・固相）に対し、弱圧縮性流体計算手法（弱圧縮性流体NS解法, LBM）を導入してシミュレーションが可能になった。
- 気液界面や移動物体近傍に高解像格子を動的に配置する AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法は計算効率を飛躍的に向上させる。
- 流体構造連成計算も同じ枠組みで可能である。
- GPUコンピューティングは、混相流シミュレーションおよび流体構造連成計算に対しても有効性ある。

アドバンスソフト
からの情報提供

1. 今後のセミナー予定
2. セミナー資料のダウンロード
3. アーカイブ動画のご案内

Copyright ©2023 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

アドバンスシミュレーション・セミナー2023 開催予定一覧

No.	開催日	講師の先生方	テーマ
第5回	8月3日(木)	「原子力安全に必要となる計算科学技術への期待」 東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授 笠原 直人 様	原子力安全
第6回	8月28日(月)	「フェイクニュースと生成 AI」 東京工業大学 環境・社会理工学院 准教授 笹原 和俊 様	生成 AI
第7回	9月14日(木)	「量子コンピュータと量子アニーリングマシン ：基礎から最先端まで」 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 新原理コンピューティング研究センター 副研究センター長 川畑 史郎 様	量子コンピュータ
第8回	10月6日(金)	「爆轟から見える CAE の方向性」 青山学院大学 理工学部 名誉教授 林 光一 様	爆轟
第9回	11月10日(金)	「都市のデジタルツイン」 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 デジタルアーキテクチャ研究センター 総括研究主幹 中村 良介 様	デジタルツイン

Copyright ©2023 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

下記のURLから、過去のセミナー資料をダウンロード可能です。
<https://www.advancesoft.jp/download/>



シミュレーション図書館 (資料ダウンロード) について

- 初めてご利用いただくお客さまは、「新規メンバー登録 (フォーラム会員登録)」をお願いいたします。ご登録いただきますと、いただいたメールアドレスあてにダウンロード用のログインパスワードをお知らせいたします。
- ログインパスワードをお持ちのお客さまは、お客さまのご登録されたメールアドレスと、こちらからお知らせしましたパスワードで、ログインしてください。ログイン中はどの資料もダウンロードいただけます。
- 会社案内、会社概要、開発実績は、ログイン不要でダウンロードいただけます。
- ご登録いただいたメールアドレスあてに、メールマガジンやアドバンスソフトからのご案内をお送りさせていただきます場合がございますので、ご了承ください。
- 資料に含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。

資料カテゴリー一覧

パッケージソフトウェア▷ ナノ・バイオ 半導体 流体 管路系 二相流 防災 構造 統合環境
 解析・コンサルティング▷ 防災・地震 二相流 2次電池 その他



半導体

【半導体】> セミナー資料 (アドバンスソフトの半導体デバイス、電磁波解析のご紹介 ~DX、グリーンイノベーションを加速する数値解析シミュレーション~) 20221117_all 【全体】

カテゴリー: 半導体 パッケージソフトウェア

【半導体】> セミナー資料 (半導体デバイス3次元TCADシステム Advance/TCAD 最新動向セミナー) 20181225_all 【全体】

カテゴリー: 半導体 パッケージソフトウェア

【半導体】> セミナー資料 (半導体デバイス3次元TCADシステム Advance/TCAD 製品紹介セミナー) 20190828_all 【全体】

カテゴリー: 半導体 パッケージソフトウェア

【半導体】 Advance/TCAD > セミナー資料 (オンラインセミナー「アドバンスソフトの電磁波、半導体デバイス解析のご紹介 ~IoTを支える数値解析シミュレーション~」) 20200825_all 【全体】

カテゴリー: 半導体 パッケージソフトウェア

【半導体】 Advance/TCAD > セミナー資料 (半導体デバイス3次元TCADシステム発売のご紹介セミナー)

Copyright ©2023 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

YouTubeにて、セミナーのアーカイブ動画を配信中
<https://www.youtube.com/user/advancesoft>



- 【セミナー動画】第1回 アドバンス・シミュレーション・セミナー 2023年4月21日 (金) 開催 [防災・インフラ分野でのシミュレーション] advancesoft • 0 回視聴 • 35分前
- 【セミナー動画】第10回 アドバンス・シミュレーション・セミナー 2023年1月20日 (金) 開催 [環境対策を身近に感じることができる...] advancesoft • 34 回視聴 • 2 か月前
- 【セミナー動画】第9回 アドバンス・シミュレーション・セミナー 2022年12月23日 (金) 開催 [「JAMSTECの最先端地球科学」回] advancesoft • 98 回視聴 • 3 か月前
- 【セミナー動画】第6回 アドバンス・シミュレーション・セミナー 2022年11月11日 (金) 開催 (動的破壊進展解析と大規模粒子シ...



- 【セミナー動画】 NanoLabo/NeuralMD 新機能紹介セミナー 2023年4月20日 (木) 開催 advancesoft • 2 回視聴 • 6 時間前
- 【セミナー動画】 OpenModelica 活用セミナー 2022年11月30日 (水) 開催 advancesoft • 166 回視聴 • 4 か月前
- 【セミナー動画】 アドバンスソフトの半導体デバイス、電磁波解析のご紹介 ~DX、グリーンイノベーションを加速する数... advancesoft • 70 回視聴 • 4 か月前
- 【セミナー動画】 NanoLabo 新機能、新製品 NeuralMD Pro ご紹介セミナー 2022年11月10日 (木) 開催

Copyright ©2023 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.



警告

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立つ用途に限定して無料配布しています。このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。