

アメンボの水面走行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

共同研究体制

青木 尊之	東工大（研究代表者）	研究総括および計算手法からGPU実装に至る詳細な指示
今井 陽介	神戸大学（副代表者）	バイオメカニクスの観点からの解析
渡辺 勢也	九大	複数GPUのMPFに基づいた動的負荷分散
松下 真太郎	東工大	運動量保存型弱圧縮性気液二相流計算スキームの検証
杉原 健太	日本原子力研究開発機構	接触角の検証
Marlon Arce Acuna	東工大	計算結果の可視化
Yos Sitompul	東工大	表面張力ベンチマークの実施

他 9名

背景

アメンボの水面走行は、自然界における表面張力が強く影響する流体現象の代表例

- バイオミメティクスの観点から現象の解明が求められる
- 非定常性が強い複雑な現象であり、詳細なメカニズムは不明

研究目的

AMR法を用いることで計算格子数の大幅な削減を図り、アメンボの中脚だけに変位を与え、水面走行の直接シミュレーションを行うことで、現象のメカニズムを明らかにする。



Water strider on water surface.

弱圧縮性流体計算手法

等温過程の圧縮性NS方程式による流体運動の記述

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} (\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}) + \mathbf{F}$$

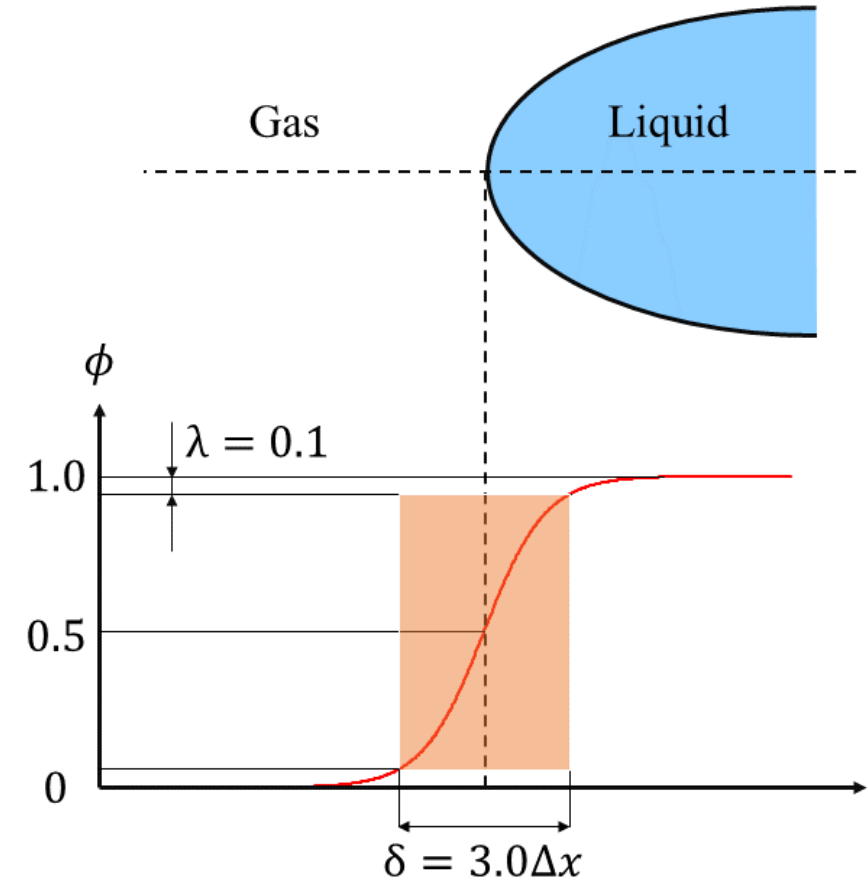
$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\rho c_s^2 \nabla \cdot \mathbf{u} \quad \boxed{c_s : \text{音速}}$$

保存形Allen-Cahn方程式による気液界面捕獲

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

$$\rho = \phi \rho_l + (1 - \phi) \rho_g, \mu = \phi \mu_l + (1 - \phi) \mu_g$$

ϕ : Phase field 関数, ψ : Level Set 関数



Relationship between phase field function and level set function

埋め込み境界法

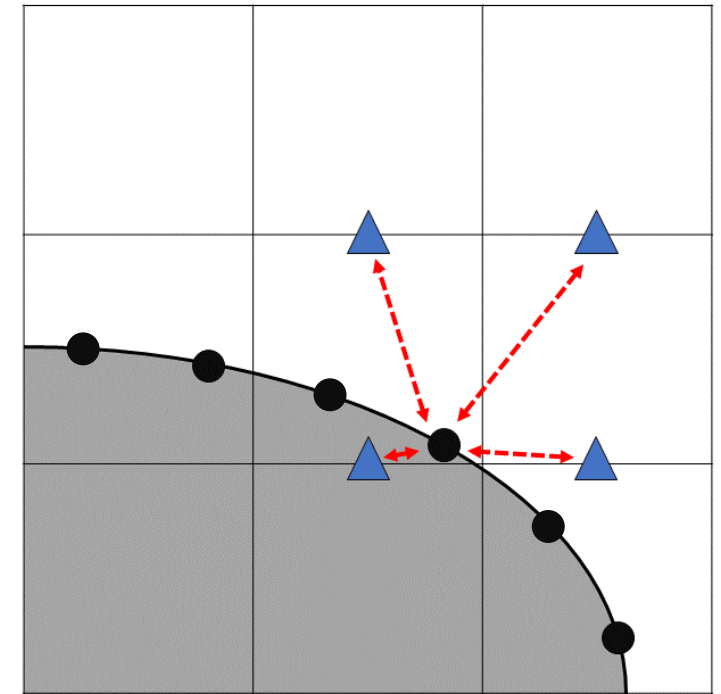
物体をラグランジュ的なマーカーで表現する埋め込み境界法を用いた物体連成計算

- マーカーにおける運動量変化

$$F_l(\mathbf{X}_k) = \rho_l(\mathbf{X}_k) \frac{\mathbf{U}_d(\mathbf{X}_k) - \mathbf{U}_l(\mathbf{X}_k)}{\Delta t}$$

- 物体に加わる流体力

$$\mathbf{F}_h = - \sum_k \mathbf{F}_l(\mathbf{X}_k) \Delta V_l(\mathbf{X}_k) + \frac{1}{\Delta t} \left[\int_{V_s} \rho_l \mathbf{u} \Delta V \right]_t^{t+\Delta t}$$



● Lagrangian markers

▲ Computational points of velocity

Illustration of Lagrangian marker

物体表面張力の評価

保存型Allen-Cahn方程式に適合した物体表面張力の導入

- Diffuse Interface Methodにおける表面張力の分布

$$\sigma = \sigma \delta \alpha \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \psi} \right)^2 \partial \psi$$

ϕ : Phase field 関数, ψ : Level Set 関数

- 保存型Allen-Cahn方程式における表面張力の分布

$$\sigma = \frac{6}{\varepsilon} \sigma \int_{-\infty}^{\infty} \phi^2 (1 - \phi)^2 \partial \psi$$

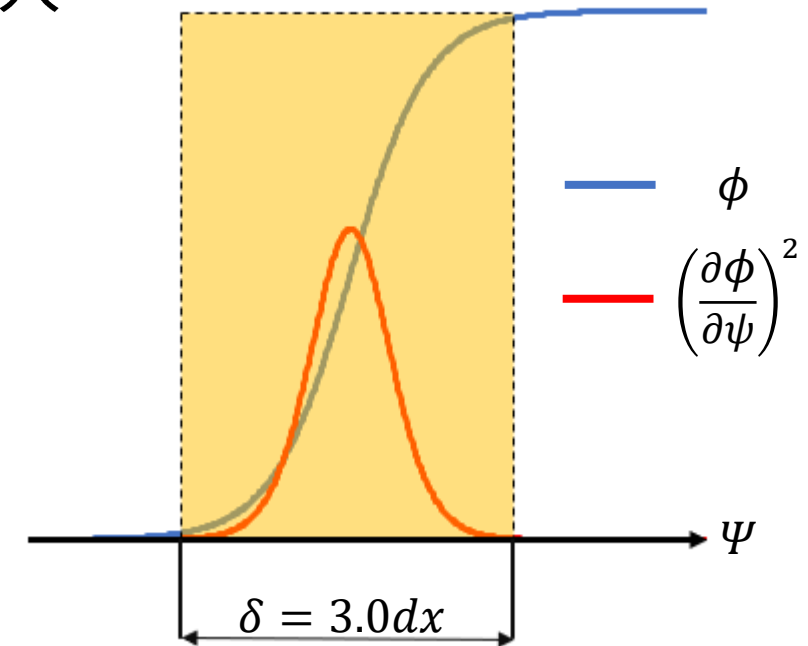


Fig.6 Relationship between Phase Field and Levelset

物体表面張力の評価

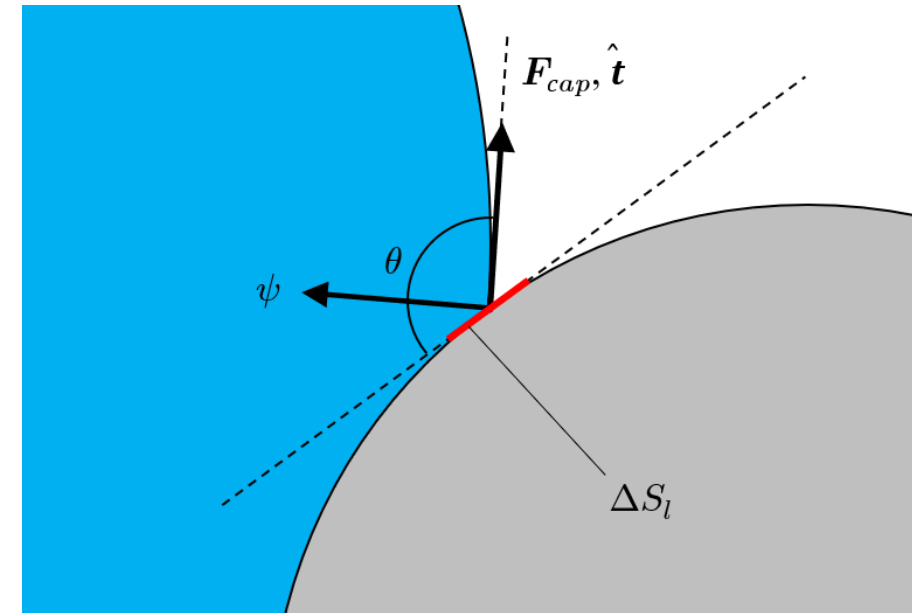
- 接触線長さ L_{cl} に対して \hat{t} 方向に加わる表面張力

$$\mathbf{F}_{cap} = \sigma L_{cl} \hat{t}$$

$$\mathbf{F}_{cap} = \frac{6}{\varepsilon} \sigma \int_{-\infty}^{\infty} \phi^2 (1 - \phi)^2 L_{cl} \hat{t} \partial \psi$$

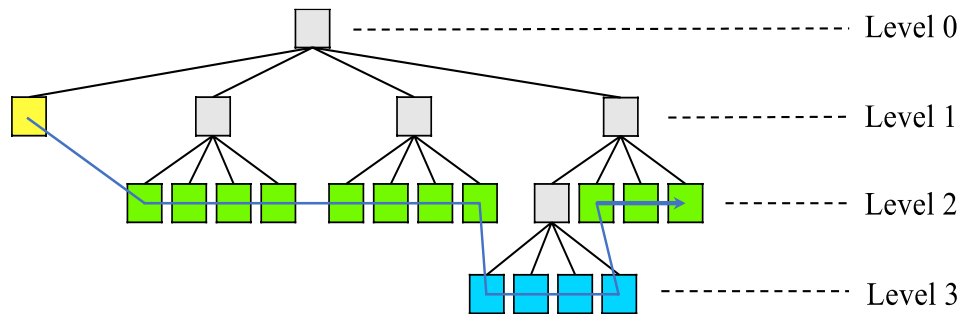
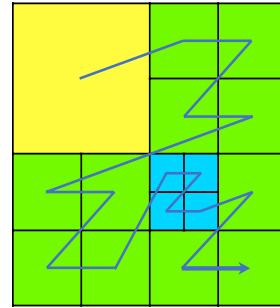
- ラグランジュ的なマーカー上に加わる表面張力

$$\mathbf{F}_{cap} = \sum_l \left(\frac{6}{\varepsilon} \sigma \phi^2 (1 - \phi)^2 \hat{t} \sin \theta \Delta s \right)_l$$

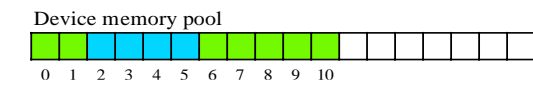
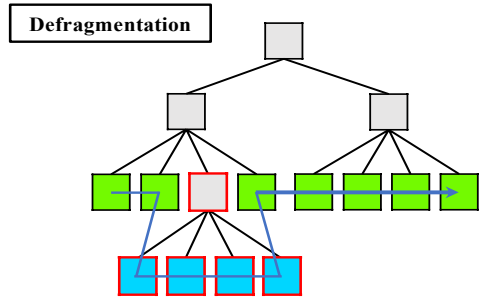
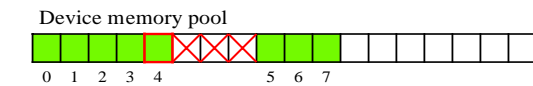
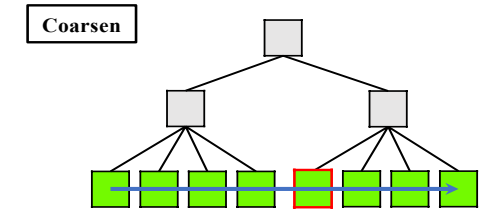
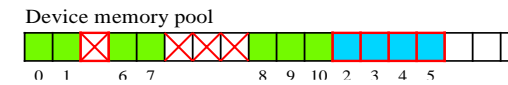
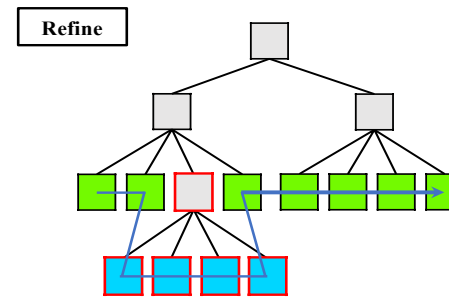
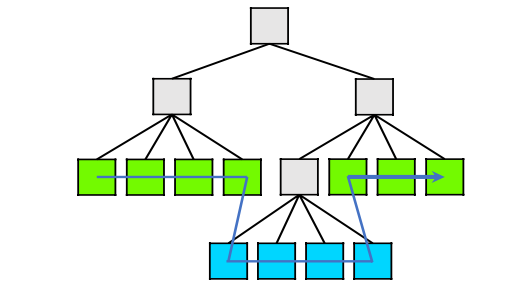


Capillary force acting on the object Surface.

AMR法のGPU実装



- ✓ リーフを空間充填曲線で結び、GPU上で並列計算を実行
- ✓ メモリ・プールを自分で用意し、動的にリーフの管理 (デ・フラグメンテーション)



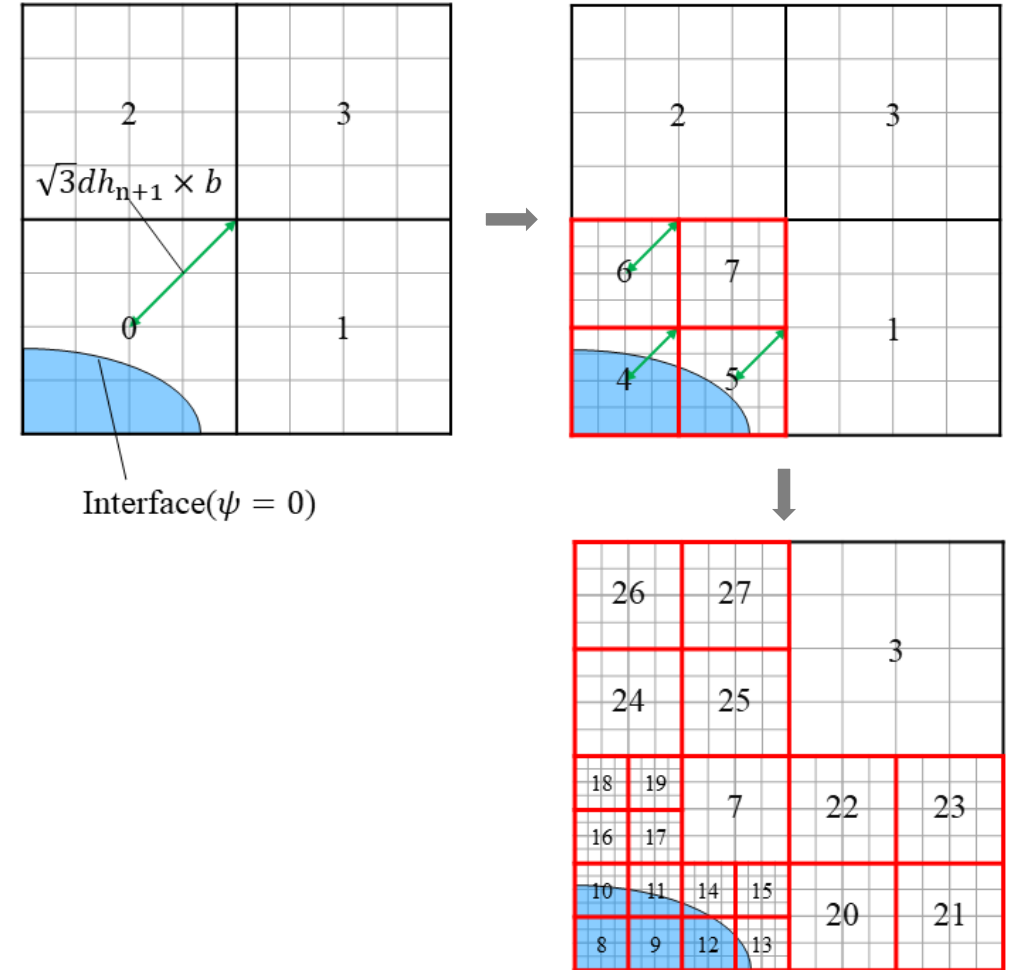
格子の細分化

格子細分化に使用する基準式

$$\begin{cases} \min(|\psi|) < \sqrt{3} \times \Delta x_{n+1} \times b \\ \min(|\psi_{obj}|) < L \times (n_{max} - n) \end{cases}$$

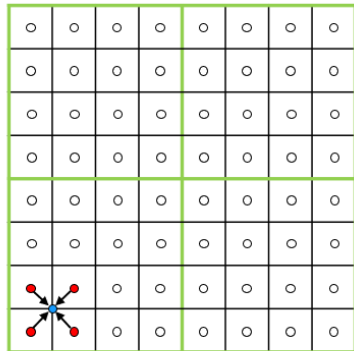
$$\begin{cases} \min(|\psi|) < \sqrt{3} \times \Delta x_{n+1} \times b \\ n < n_{min_gl} \end{cases}$$

ψ : 気液界面を表すLevel Set 関数
 ψ_{obj} : 物体境界を表すLevel Set 関数
 b : 1リーフ当たりの格子数
 $L(= 50 \times \Delta x_{n_{max}})$: 格子粗大化の基準距離
 $n_{min_gl}(= n_{max} - 3)$: 気液界面の最小レベル

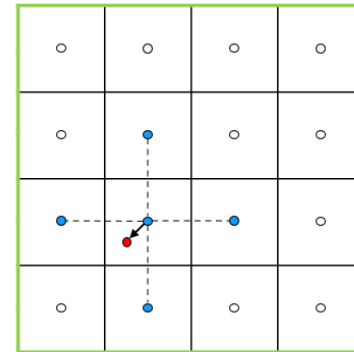
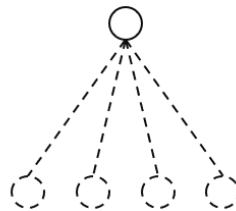
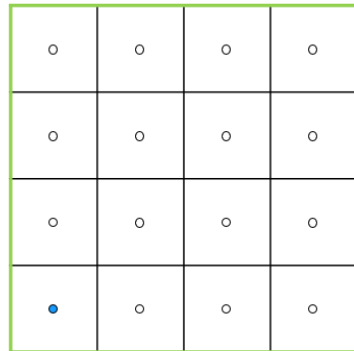


Mesh refinement based on Level Set function.

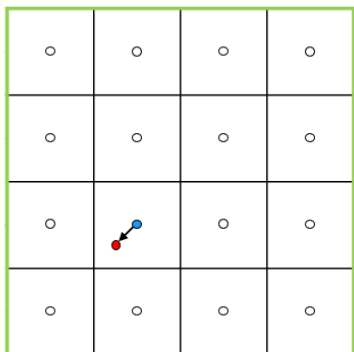
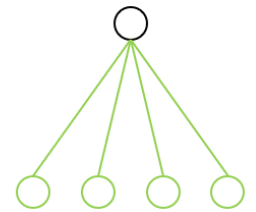
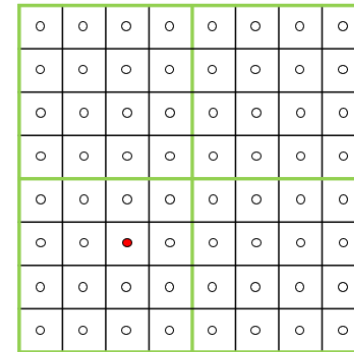
レベル差補間



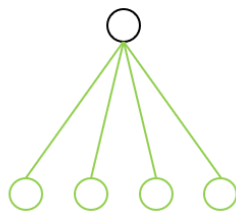
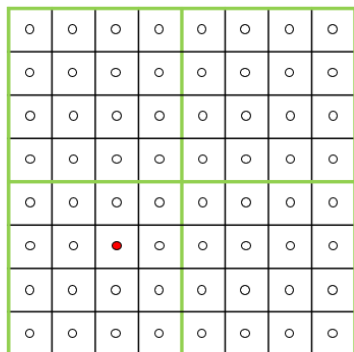
Coarsen



Refine



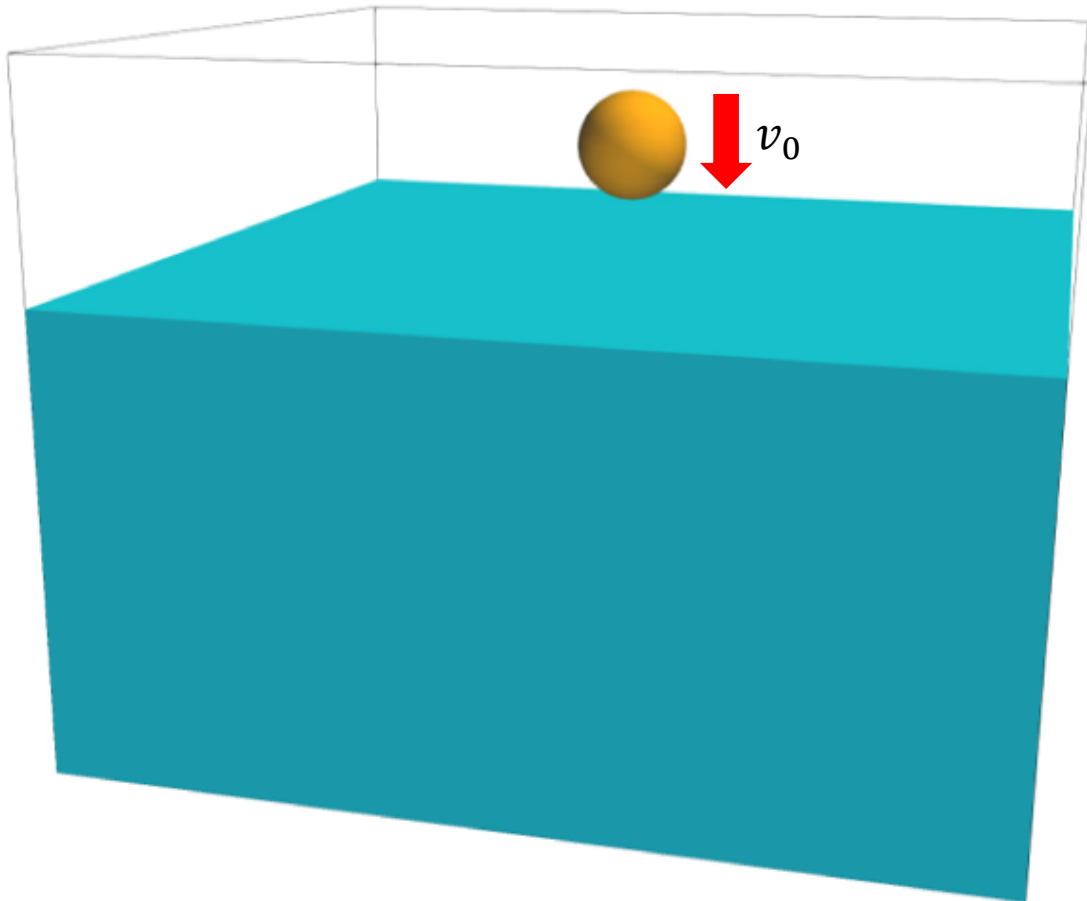
Refine



Interpolation between level difference.
Upper left: Interpolate for fine grid.
Upper right: Interpolate for coarse grid.
Lower left: Direct copy for coarse grid.

超撥水性球の水面への衝突

Time: 0.000000[s]

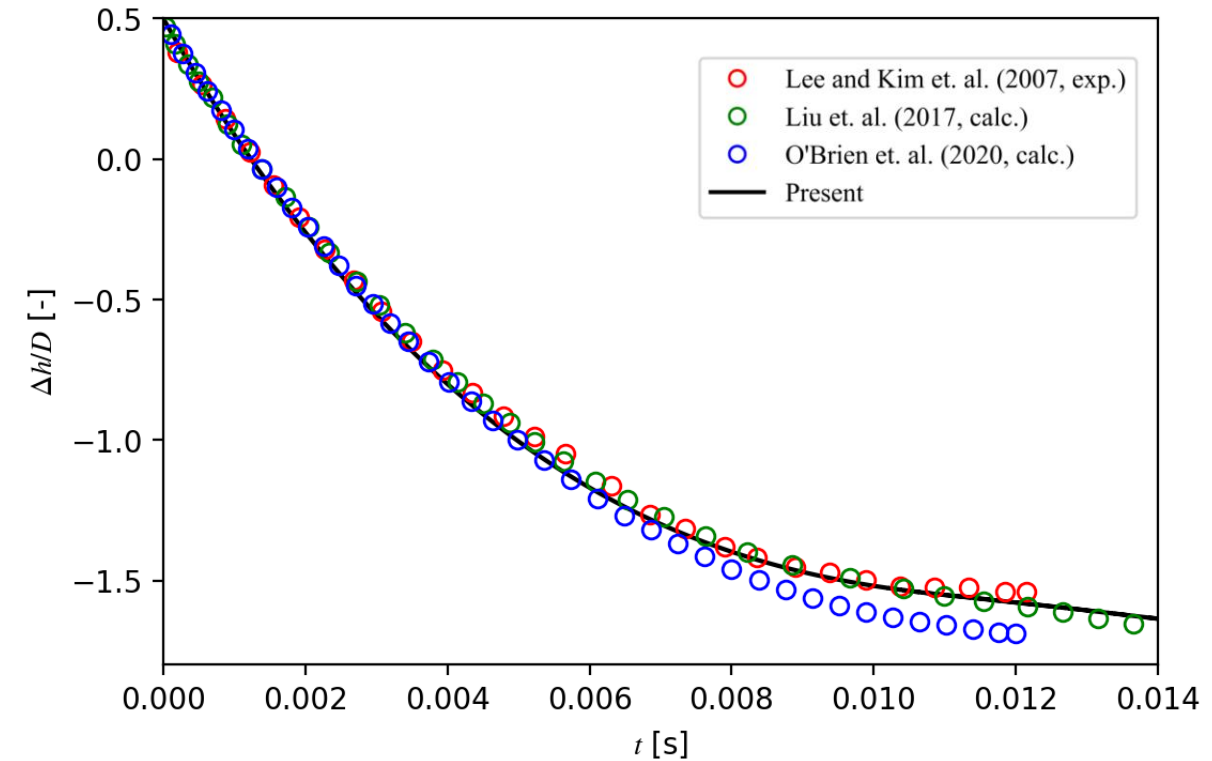
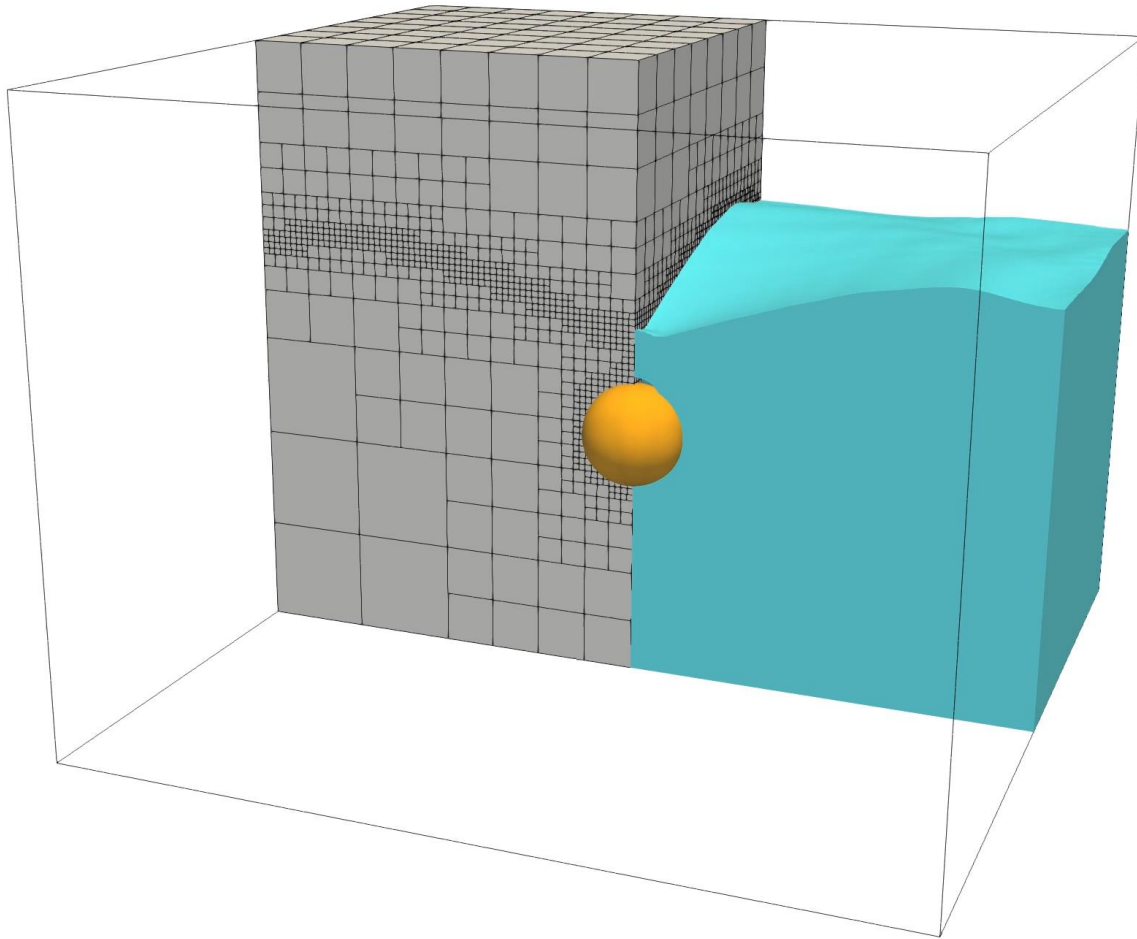


Properties

	Case1	Case2
Particle diameter[mm]	1.74	1.92
Particle density[kg/m ³]	1990	1320
Initial velocity[m/s]	0.90	0.78
Contact angle[deg]	154	
Liquid	Water	
Gas	Air	
Domain size[-]	$4D \times 4D \times 6D$	
AMR tree[-]	$2 \times 2 \times 3$	
Max AMR level[-]	5	
Resolution[mm]	$D/64$	

超撥水性球の水面への衝突

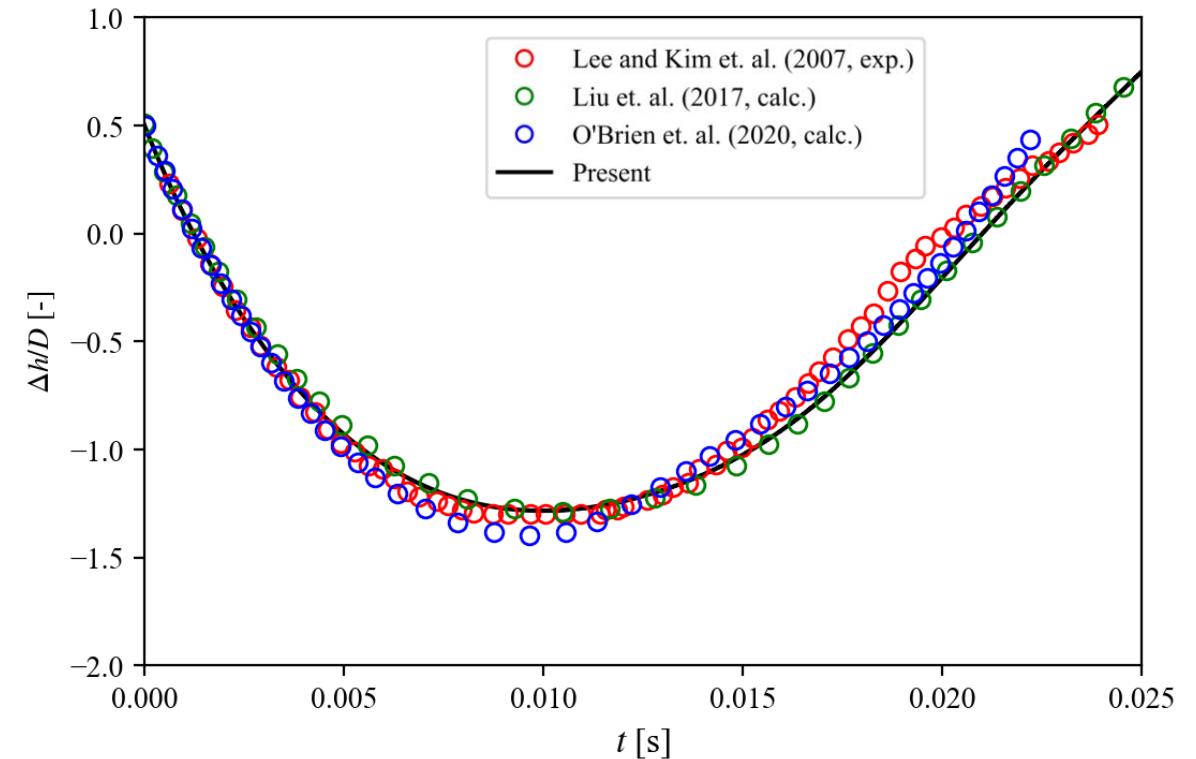
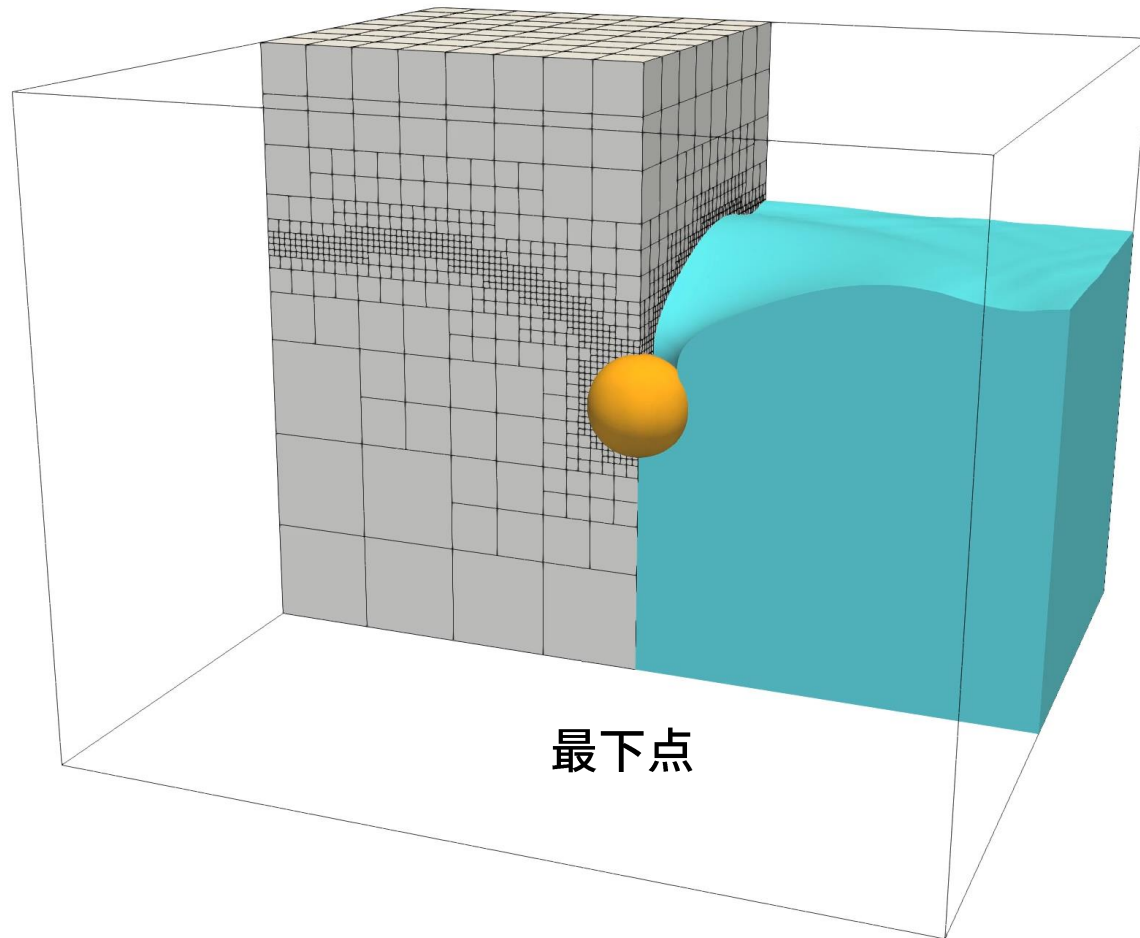
Case1($D = 1.74 \text{ mm}$, $\rho = 1990 \text{ kg/m}^3$, $U_0 = 0.90 \text{ m/s}$)



Transition of central position

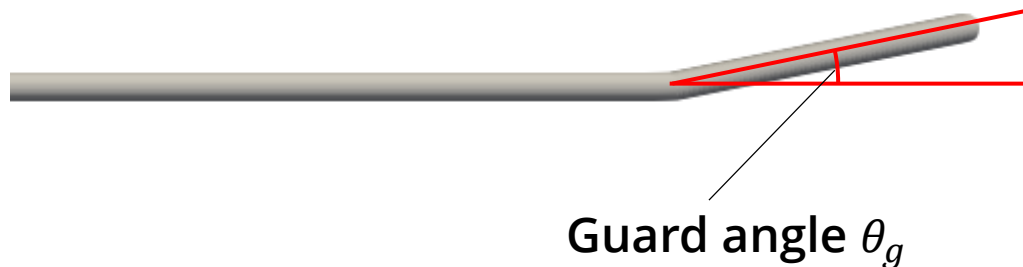
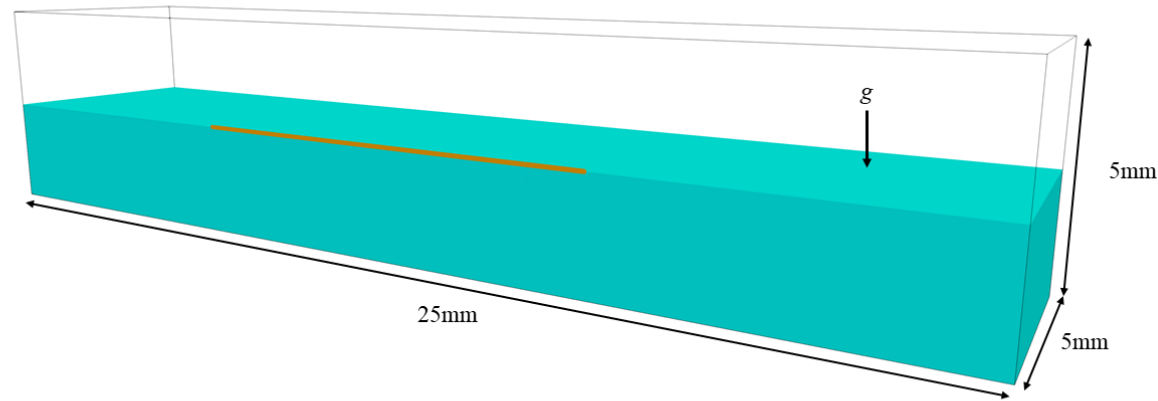
超撥水性球の水面への衝突

Case2($D= 1.90$ mm, $\rho= 1320$ kg/m³, $V_0 = 0.78$ m/s)



Transition of central position

アメンボ後脚の浮上試験

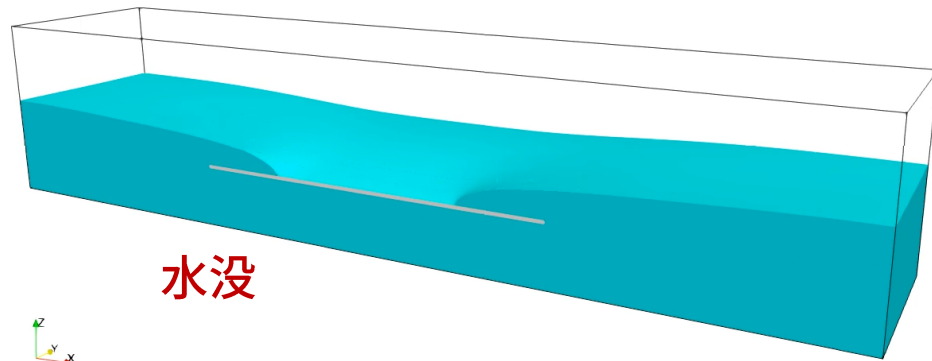


Properties

Leg length[mm]	10.0
Leg diameter[mm]	0.1
Load[g]	2.0e-5
Contact angle[deg]	120
Guard angle[deg]	0, 10, 20, 30
Liquid	Water
Gas	Air
Domain size[mm]	25 × 5 × 5
AMR tree[-]	5 × 1 × 1
Max AMR level[-]	7
Max Resolution[mm]	9.76562e-3

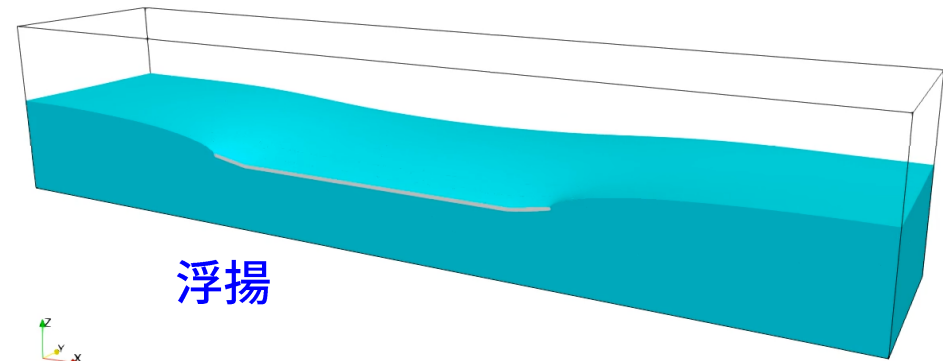
アメンボ後脚の浮上試験

Time: 0.008400 s



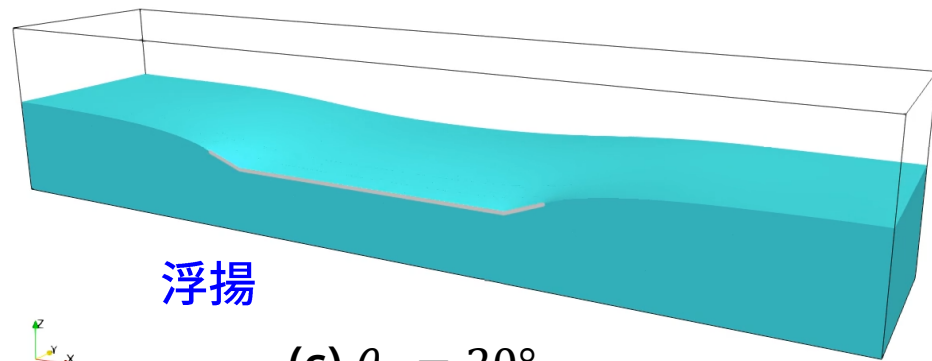
水没

(a) $\theta_g = 0^\circ$



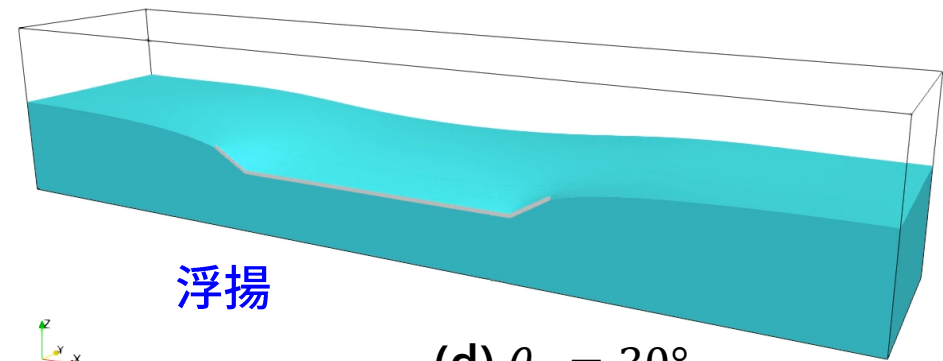
浮揚

(b) $\theta_g = 10^\circ$



浮揚

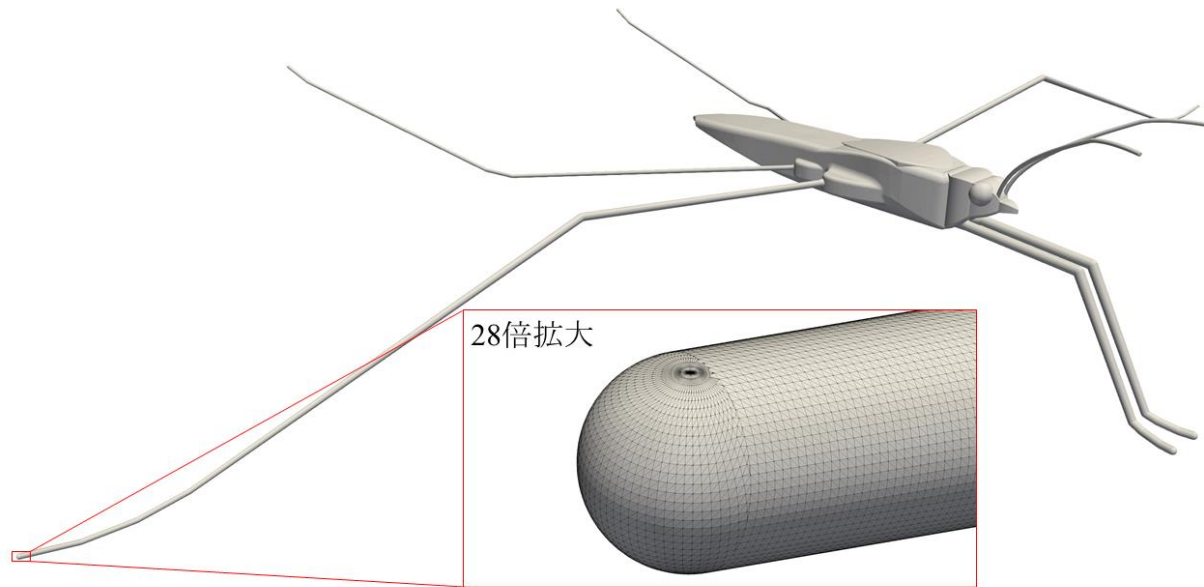
(c) $\theta_g = 20^\circ$



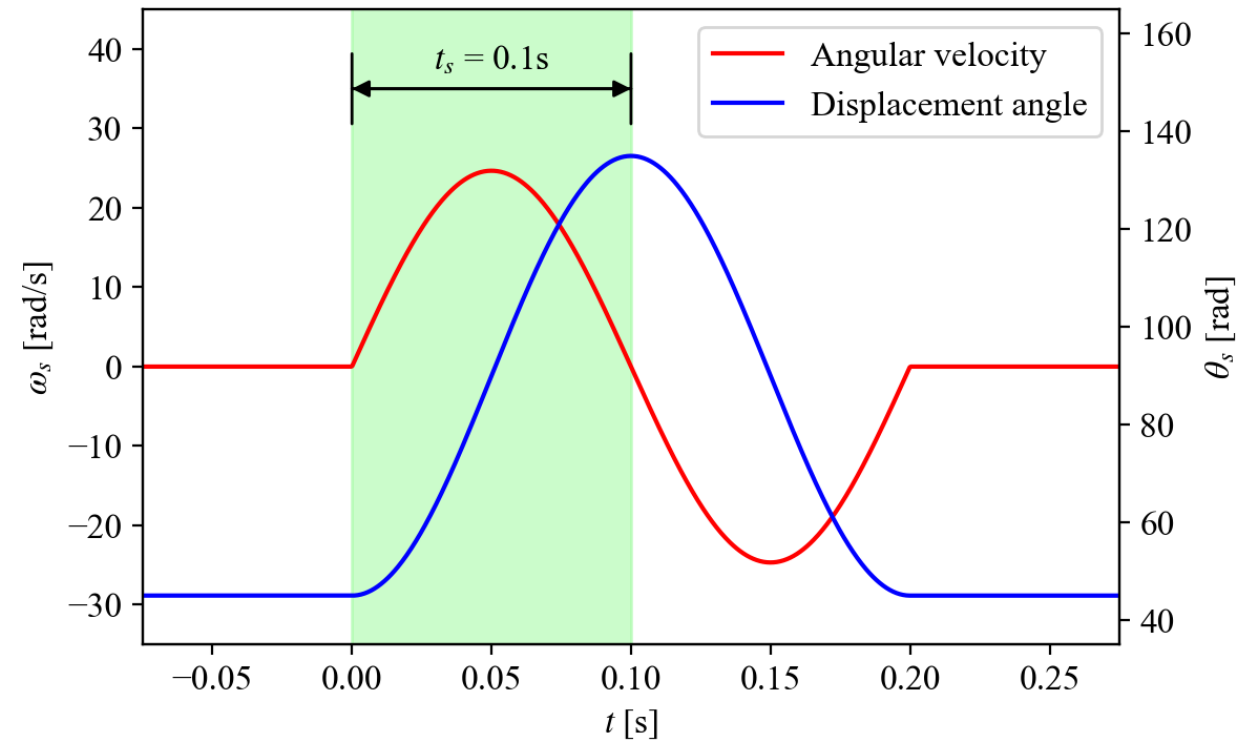
浮揚

(d) $\theta_g = 30^\circ$

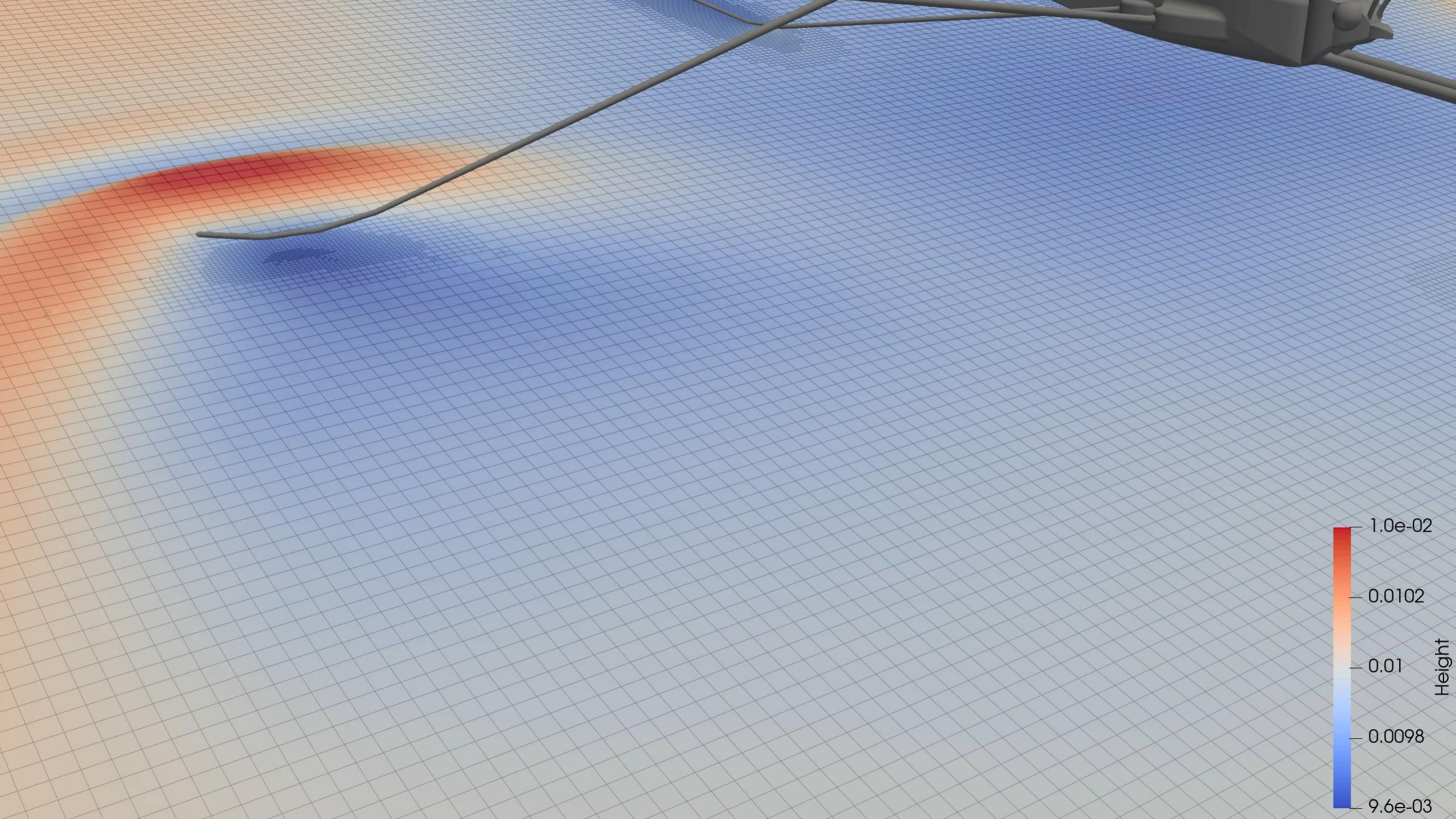
アメンボの形状モデルとストローク



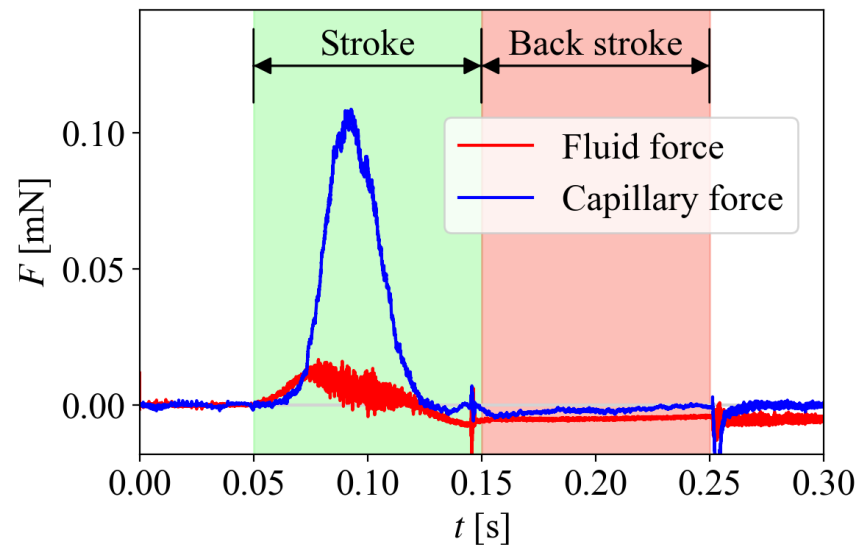
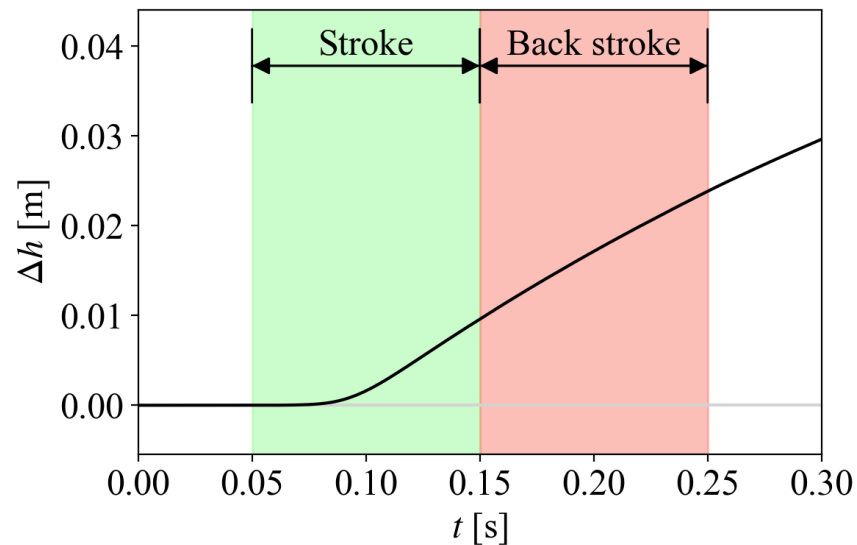
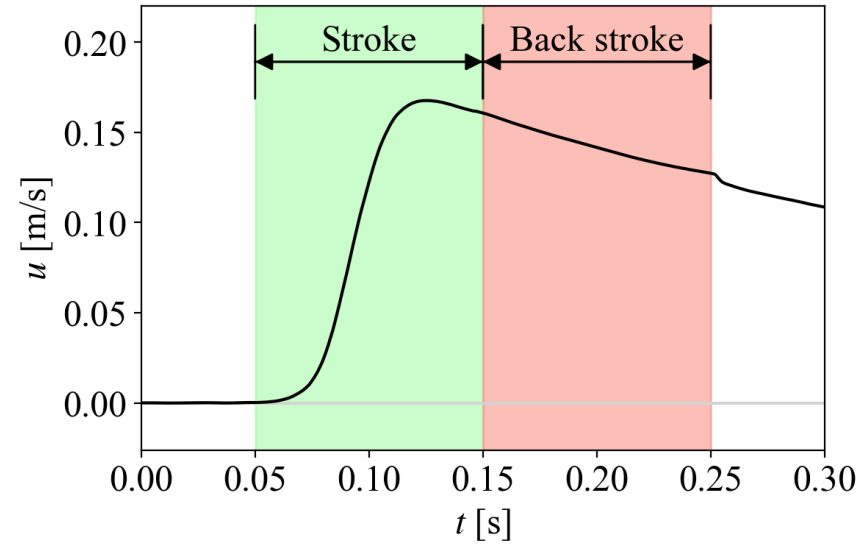
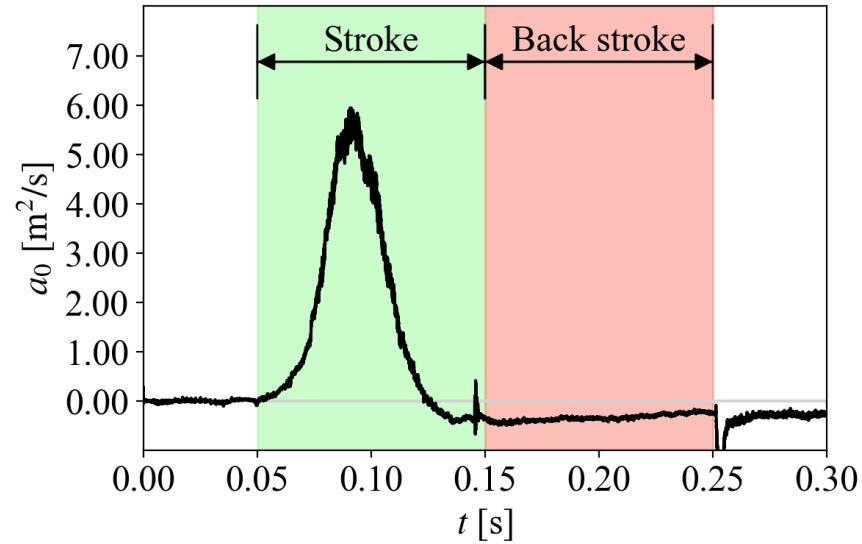
3D model of water strider.



Stroke property of middle leg



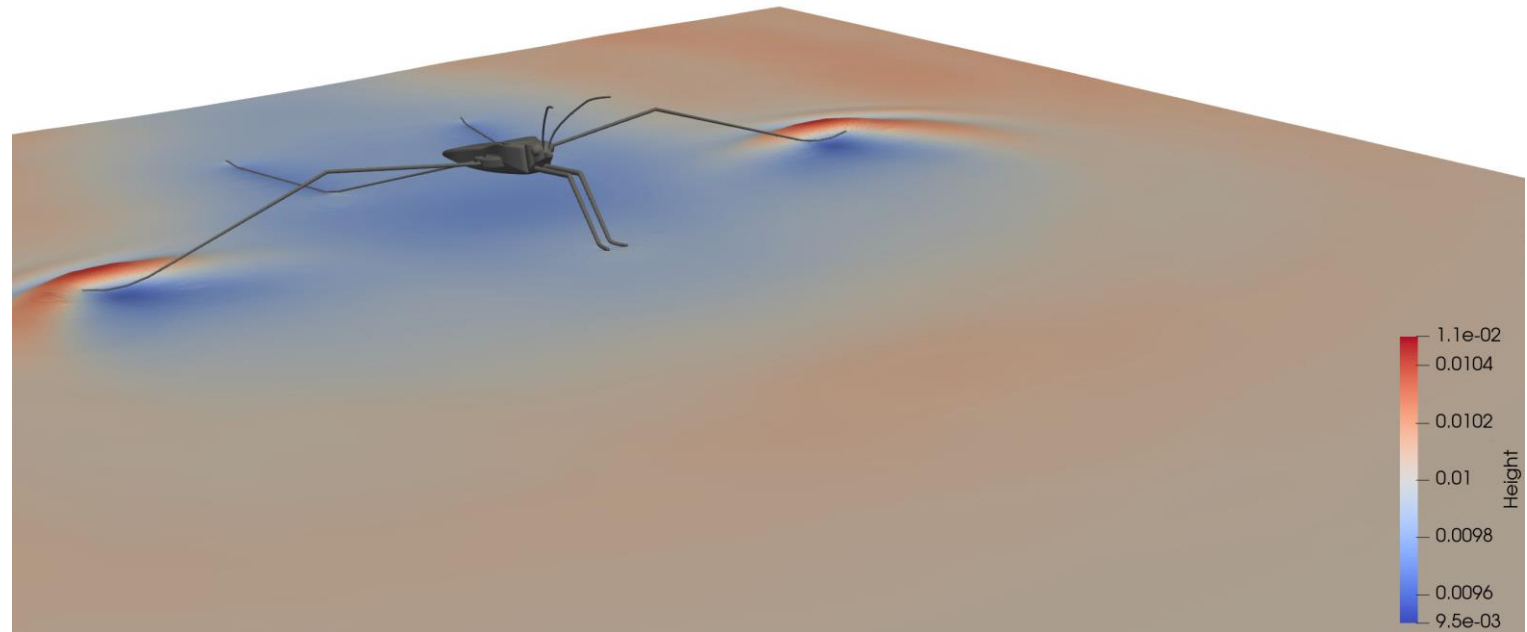
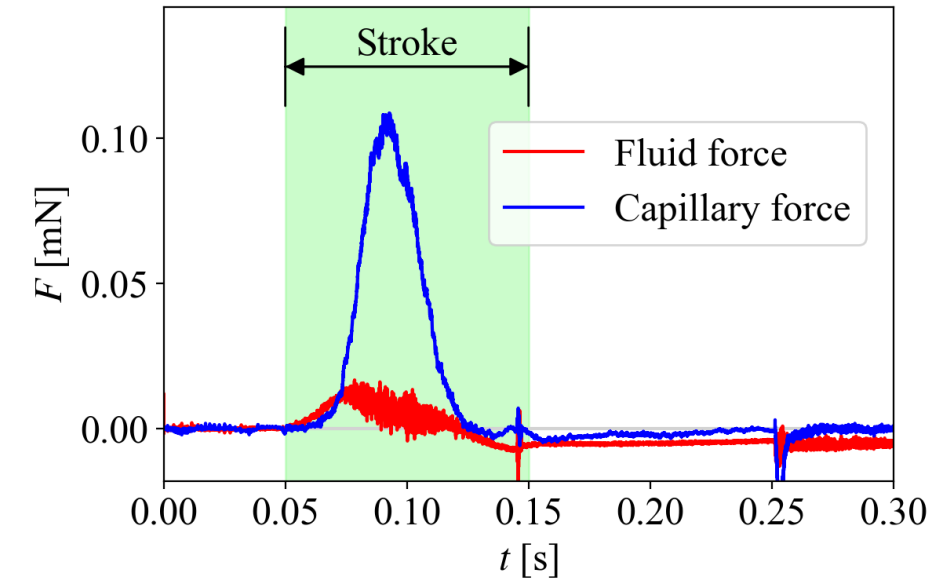
アメンボの水面走行計算



Transition of water strider swimming
Upper left: Acceleration.
Upper right: Velocity.
Lower left: Displacement.
Lower right: Propulsion.

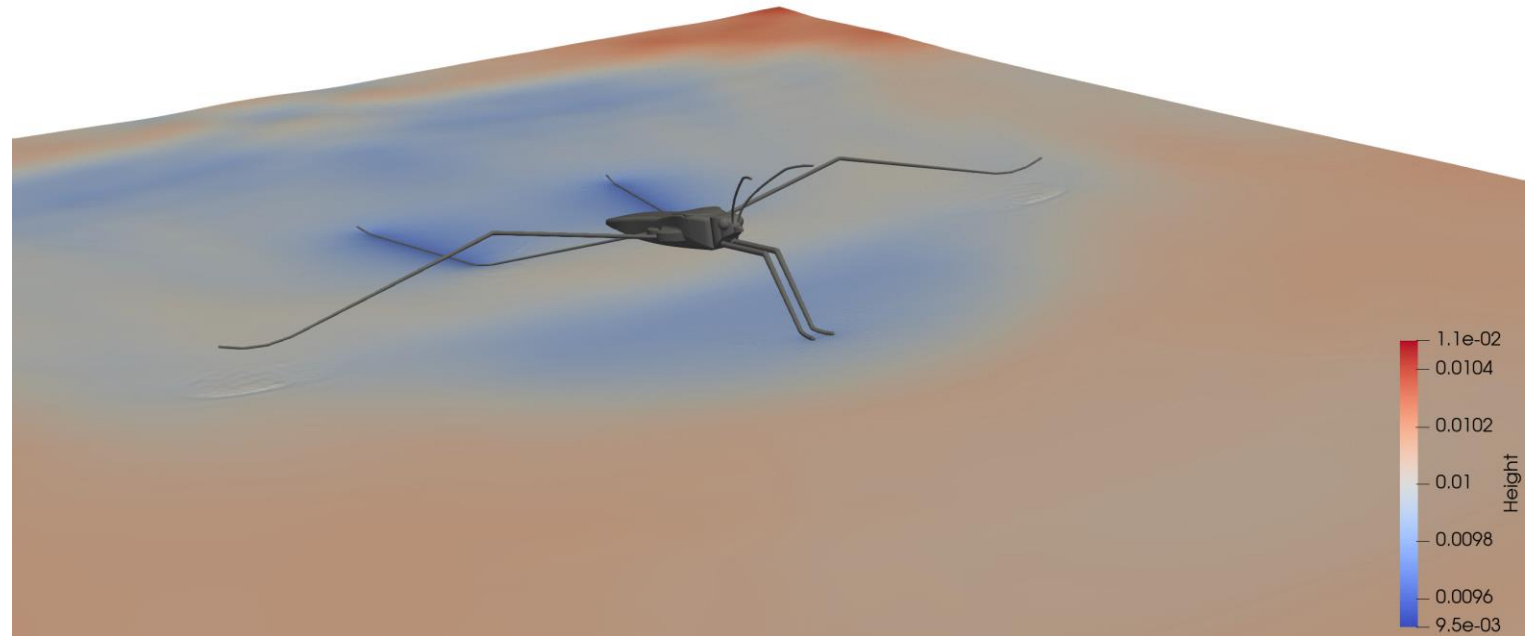
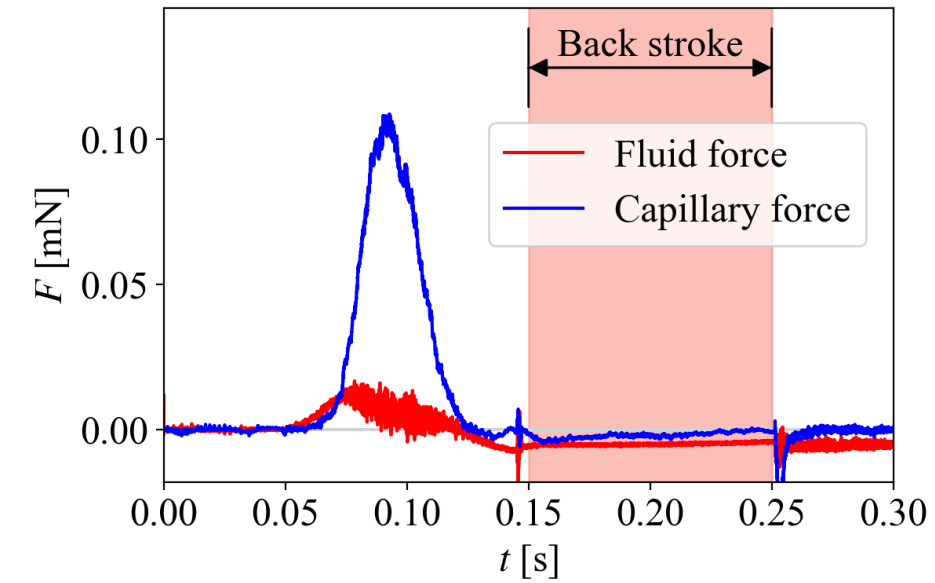
アメンボの水面走行計算

Time: 0.100000 s

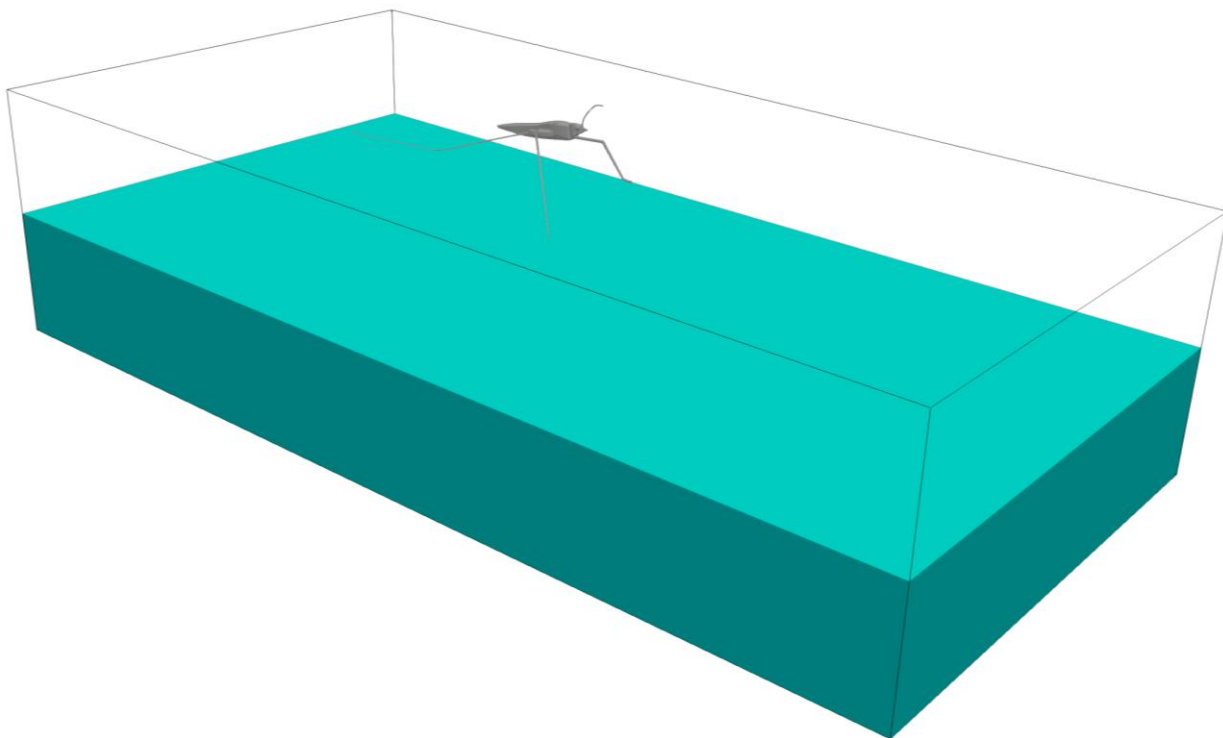


アメンボの水面走行計算

Time: 0.200000 s

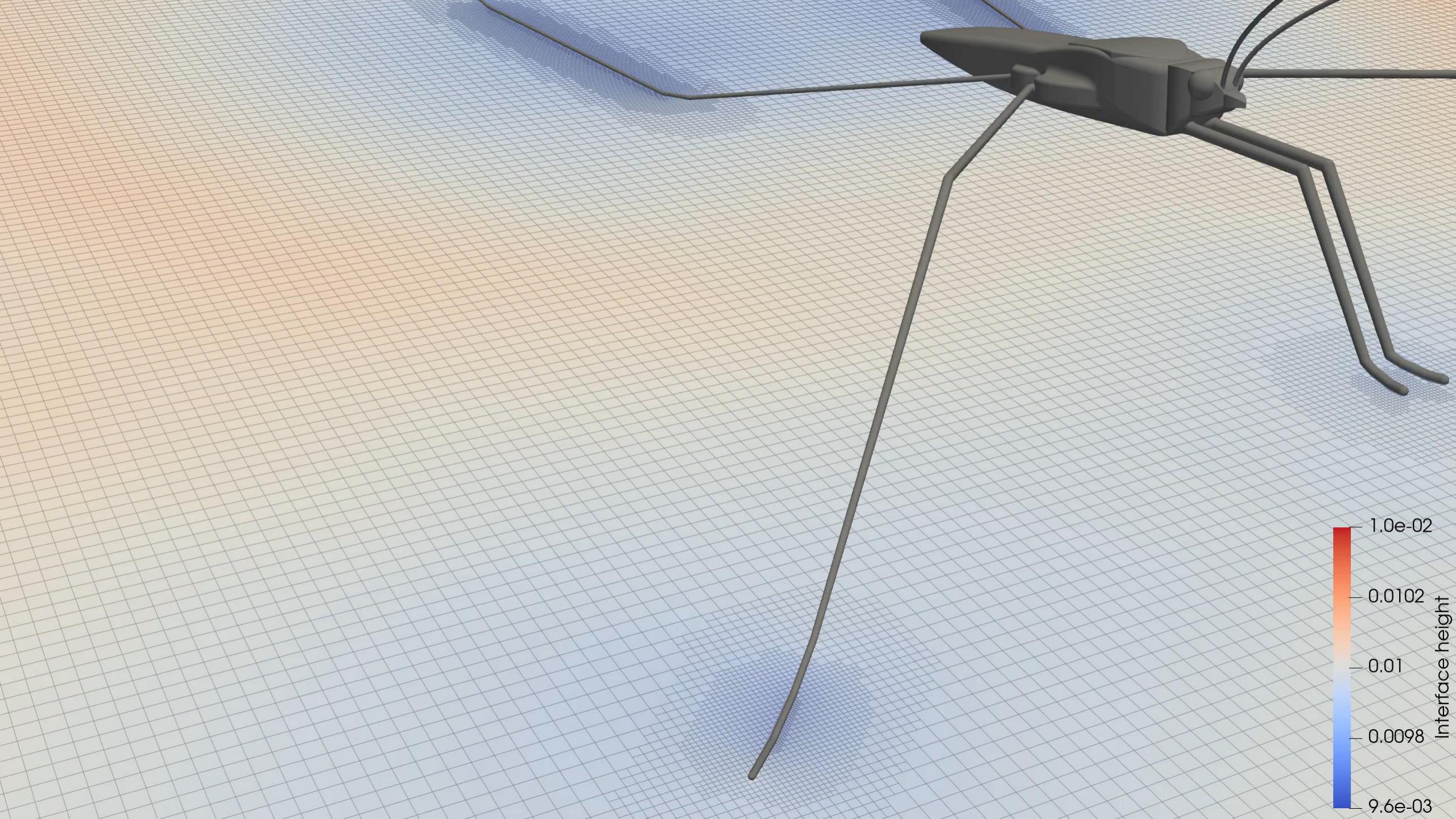


アメンボの水面走行計算



Properties

Body length[mm]	11.0
Leg diameter[mm]	0.1(0.19)
Body weight[g]	2.0e-5
Contact angle[deg]	120
Liquid	Water
Gas	Air
Domain size[mm]	120 × 40 × 20
AMR tree[-]	6 × 2 × 1
Max AMR level[-]	9
Max Resolution[mm]	9.76562e-3







今後の研究計画

- 全ての気液界面に最細格子を割り当てると、アメンボから遠方の気液界面にまで最細格子を割り当てる必要があり、AMR法の有効性が大きく低減する。
 - アメンボの脚から遠方の気液界面には、粗い格子を配置。
 - 気液界面において格子細分化のレベル差があるときの補間の扱い。
- 長時間積分の必要性
 - 最細格子 Δx は $10\mu\text{m}$ である一方、アメンボの移動距離は数 10cm であり、時間刻み Δt は最細格子 Δx で決まるため、どうしても長時間積分が必要。