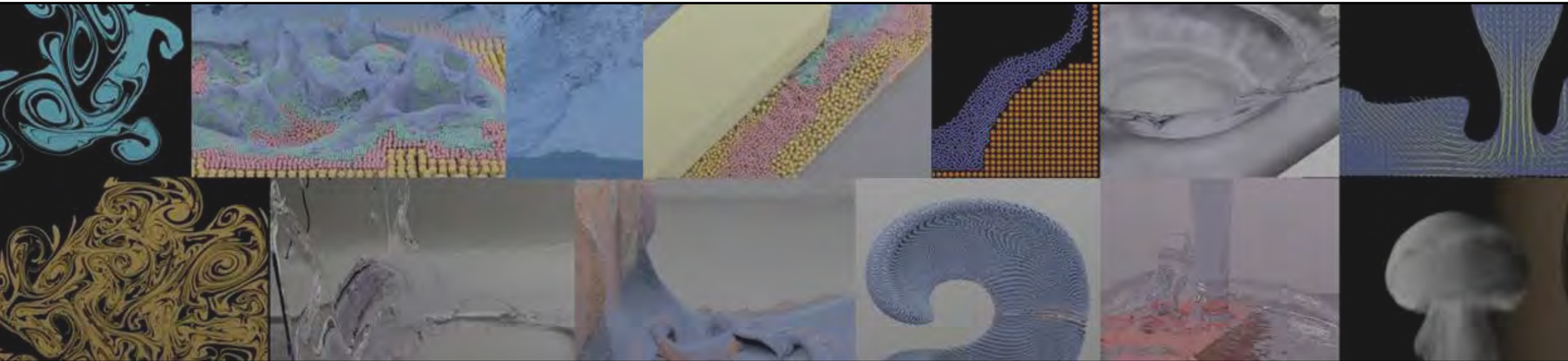


流体力学で描くデジタルアートの世界



国立情報学研究所
コンテンツ科学系
助教 安東遼一

2018. 9.13 国立情報学研究所 市民講座

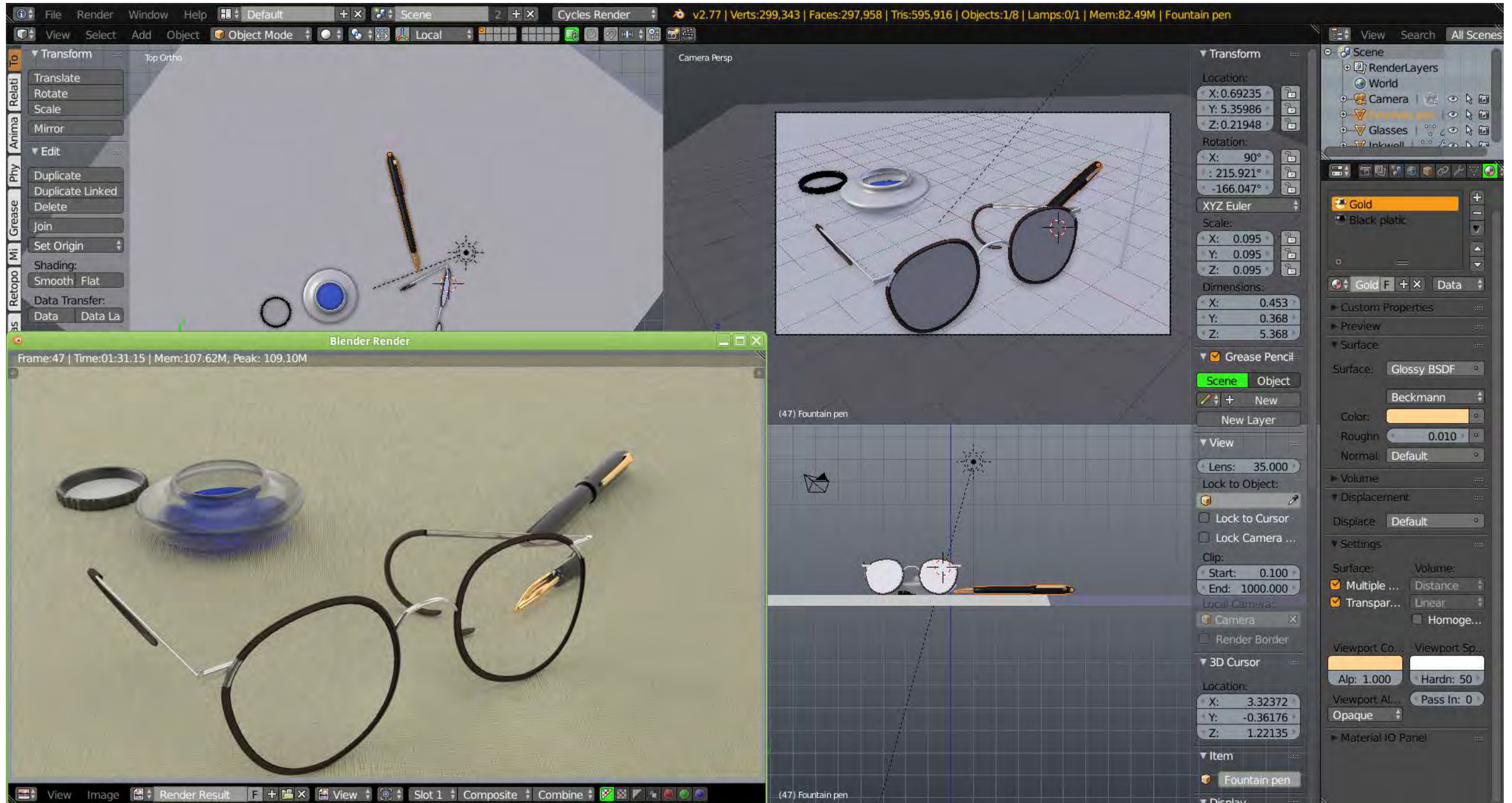






<https://flic.kr/p/24JgfZS>

3次元ソフトウェア



<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/01/Blender-Desktop-2-77.png>

自然現象を手作業で作るのは難しい



<https://flic.kr/p/ctQcCj>



<https://flic.kr/p/6ESjXj>



<https://flic.kr/p/rr1U33>



<https://flic.kr/p/azQqrk>

微分方程式

微分方程式

$$\frac{d^2}{dt^2} \boldsymbol{x} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}$$

微分方程式

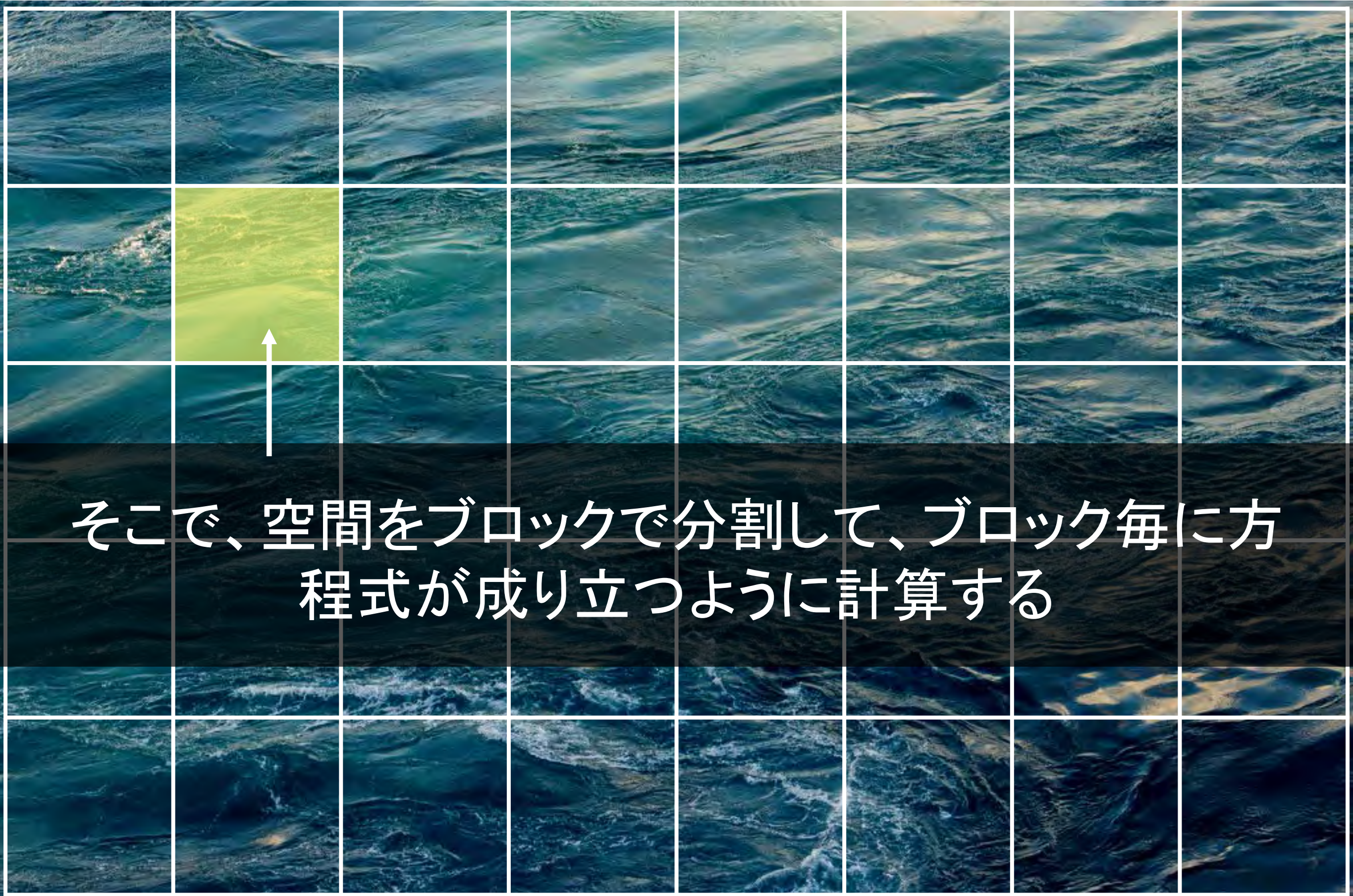
$$\frac{d^2}{dt^2} \boldsymbol{x} = - \frac{\partial E_C(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}$$

微分方程式

$$\frac{d^2}{dt^2} \boldsymbol{x} = -\frac{1}{\rho} \nabla p$$

An aerial photograph of the ocean's surface, showing complex wave patterns and eddies. A small yellow dot is placed on the water's surface, with a white arrow pointing upwards from below the text towards it. The text is overlaid on the lower half of the image.

微分方程式は、空間の微少な点で何か起きている
かを説明できるが、空間全体を説明できない

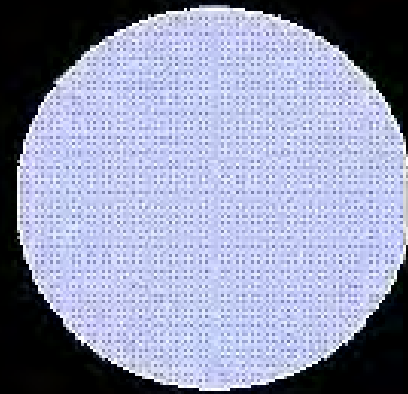


そこで、空間をブロックで分割して、ブロック毎に方程式が成り立つように計算する

計算の流れ

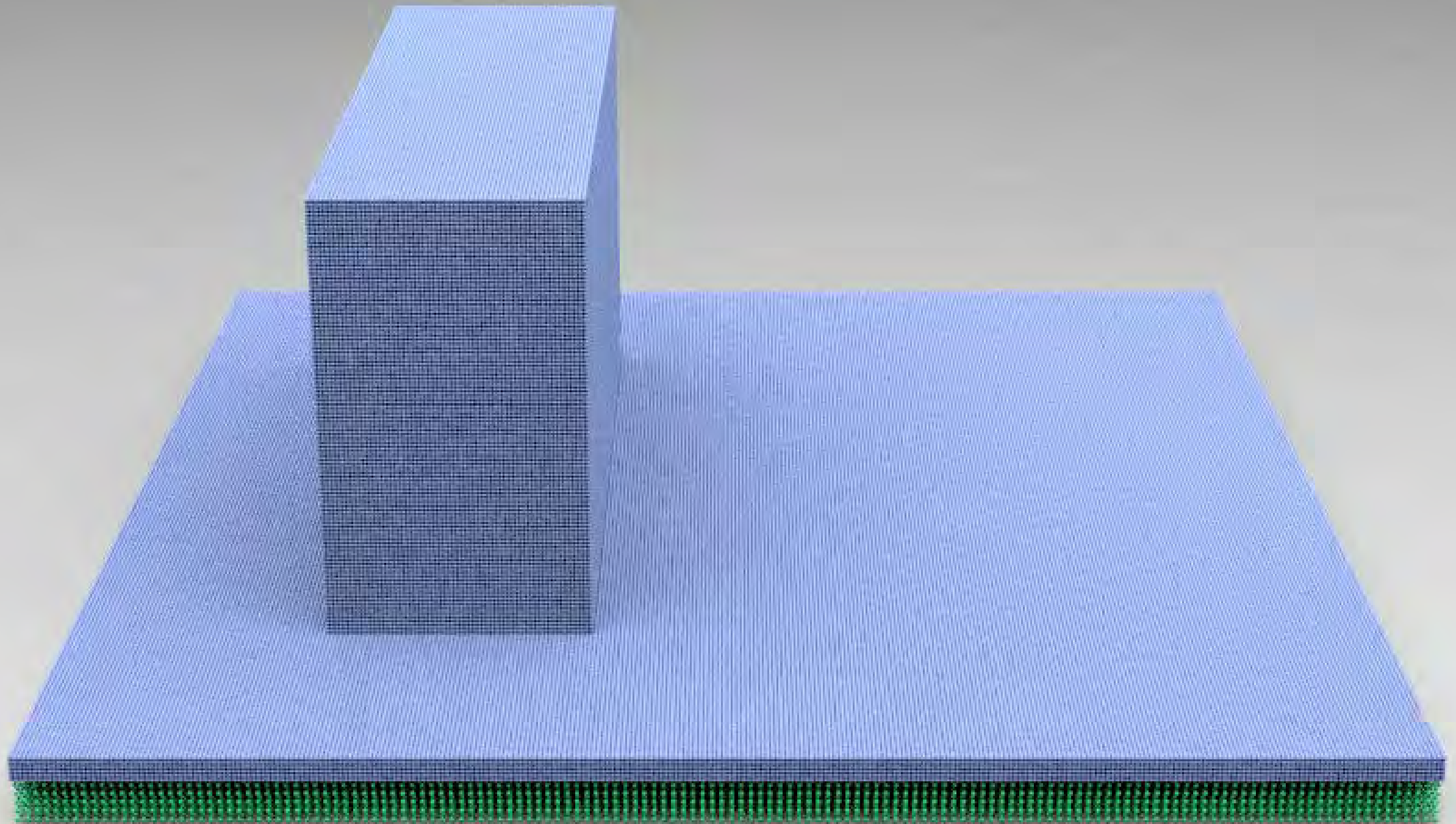
- 目標とする自然現象に対応する微分方程式を探す
- 微分方程式を、格子で計算できる形に数学的変形をする
- 数式を計算できるコンピュータアルゴリズムを考案する
- 実際に計算をする
- 計算結果を、可視化する（写真のような絵を作る）

計算結果例

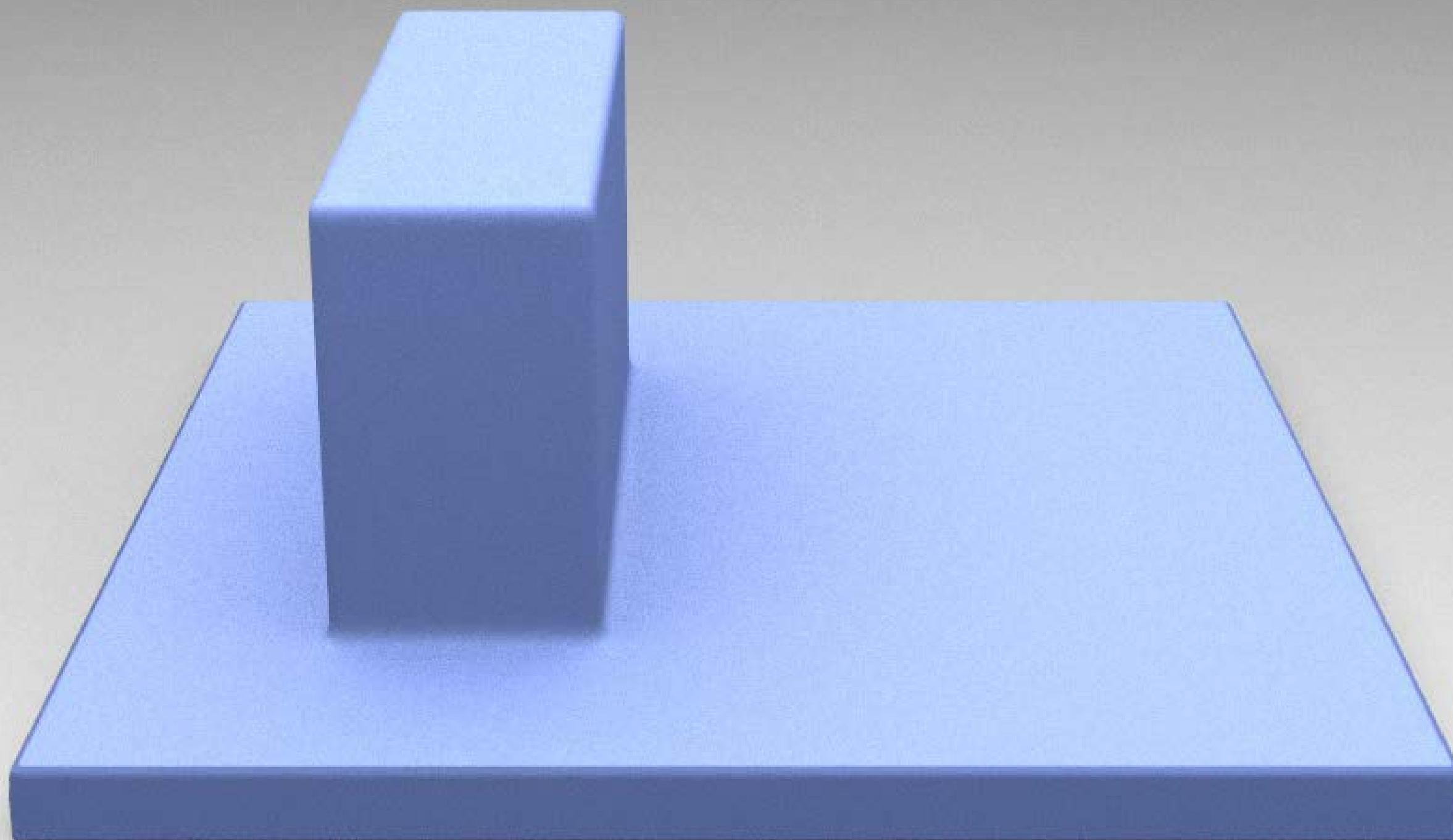


0042564128

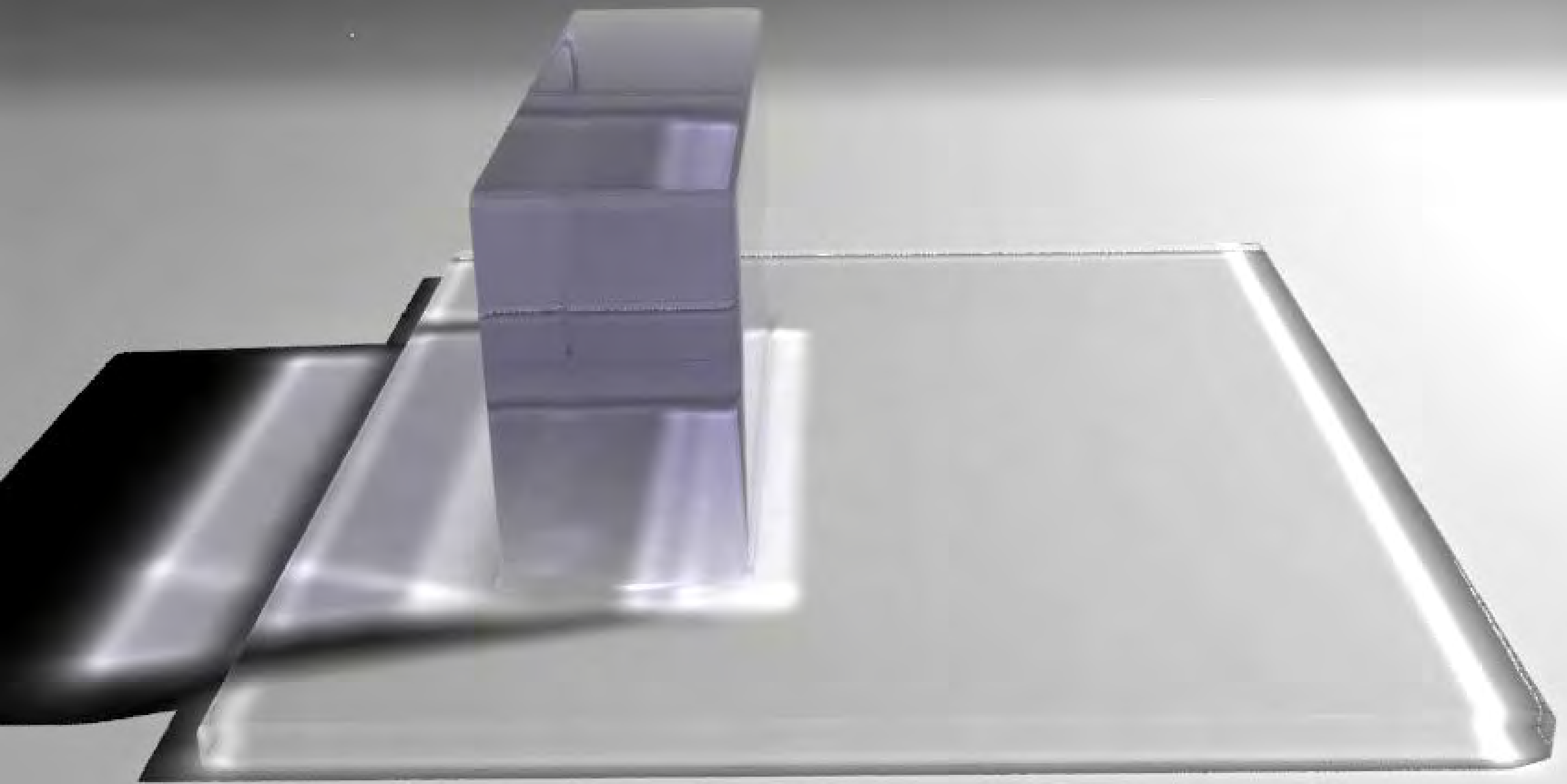
計算結果例



計算結果例



計算結果例 (可視化)



計算結果例



持ち帰りメッセージ

- 複雑な自然の情景をコンピューターだけで計算したい
- 手作業で形状を作るのは、複雑すぎて不可能
- 微分方程式は、自然の情景を理解する法則が記述される
- 微分方程式を計算で解けば、様々な自然現象を再現できる

本講義の流れ

- マーブルリング模様の生成に関する研究について紹介
- 液体の薄膜を保持する計算手法について紹介
- 液体の計算を高速化するための手法について紹介
- 複雑な液体形状と滑らかな液体形状を同時に効率良く計算するための手法について紹介

マーブルリング模様の生成に関する研究



マーブリング模様の生成に関する研究



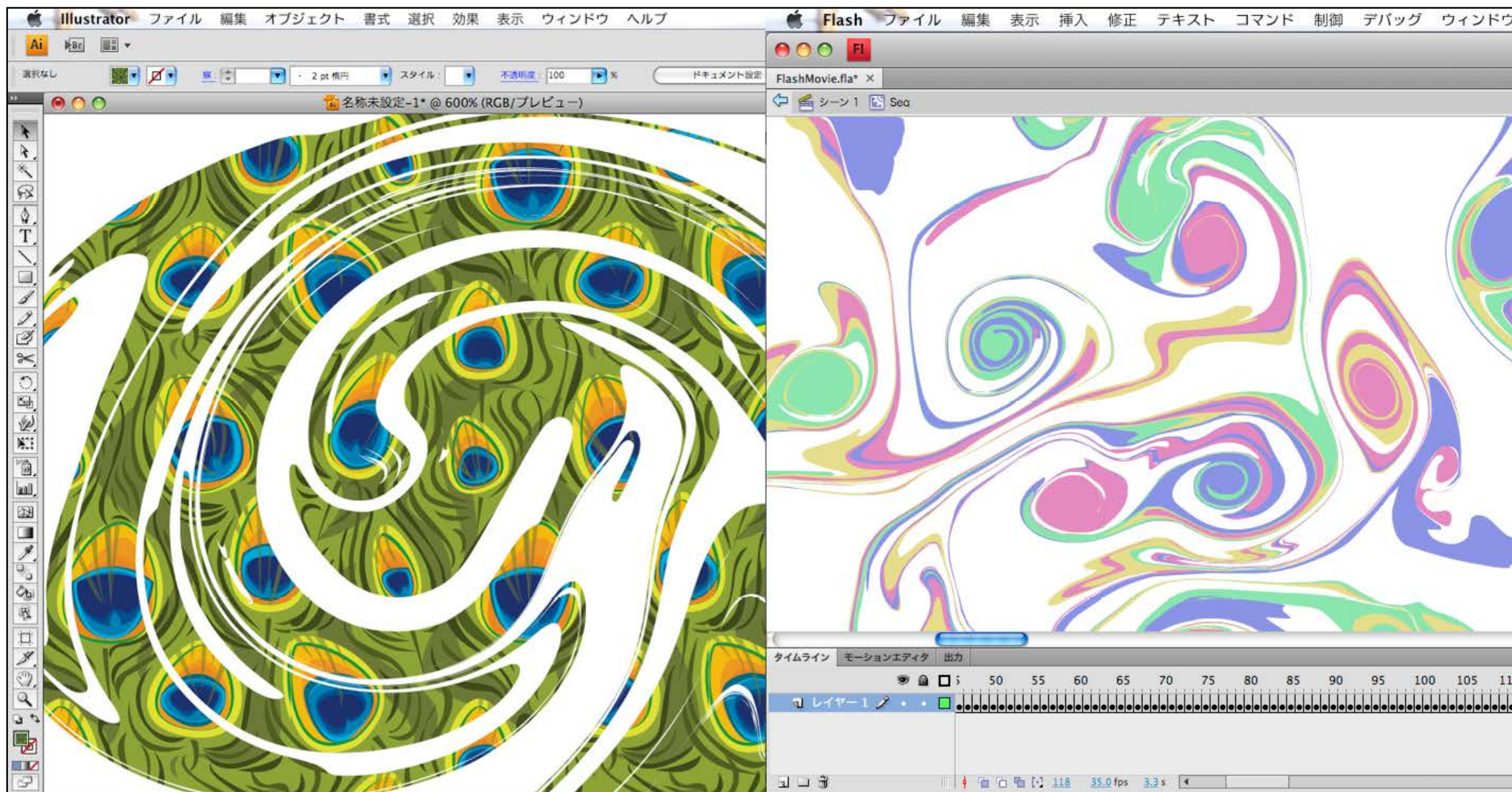
<https://flic.kr/p/hNaQTp>

マーブリング模様の生成に関する研究



手間がかかる

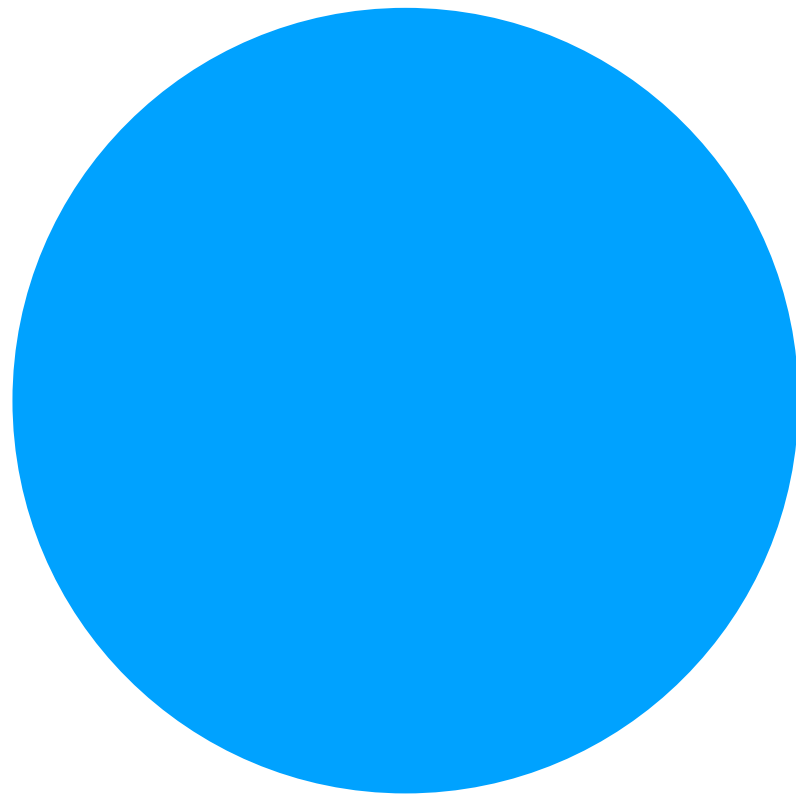
マーブリング模様の生成に関する研究



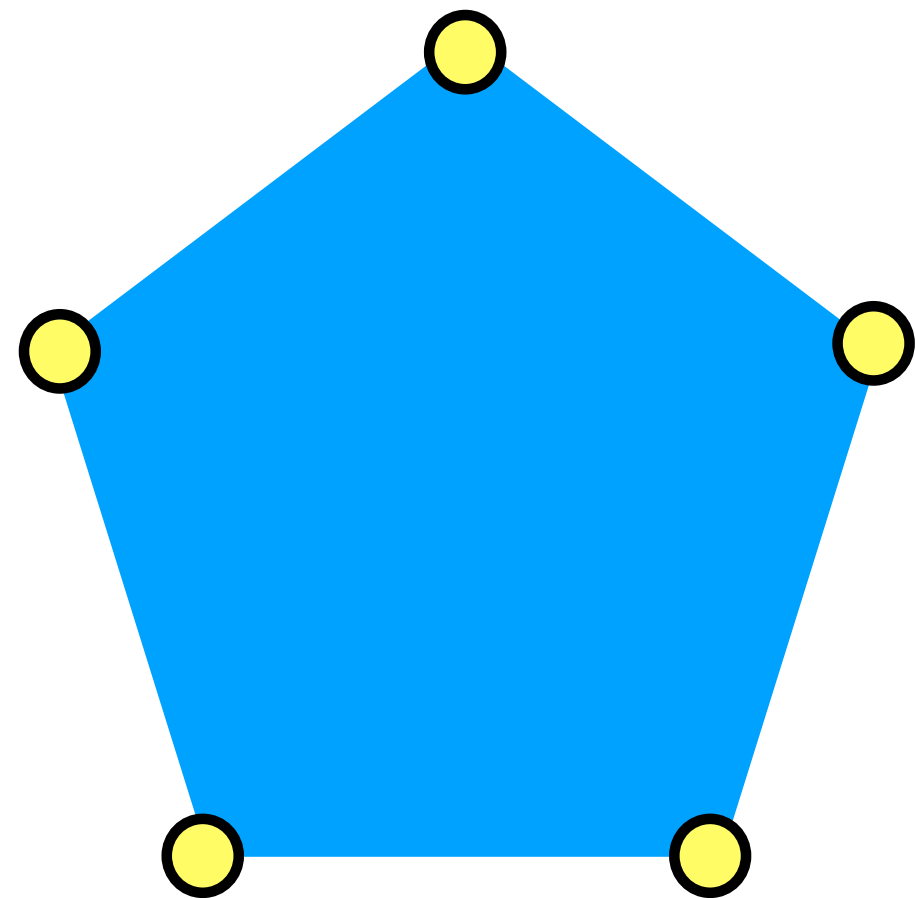
コンピュータを使えば、汚れない、やり直しが簡単出来る、そして準備も簡単

マーブリング模様の生成に関する研究

輪郭を頂点で追っていく



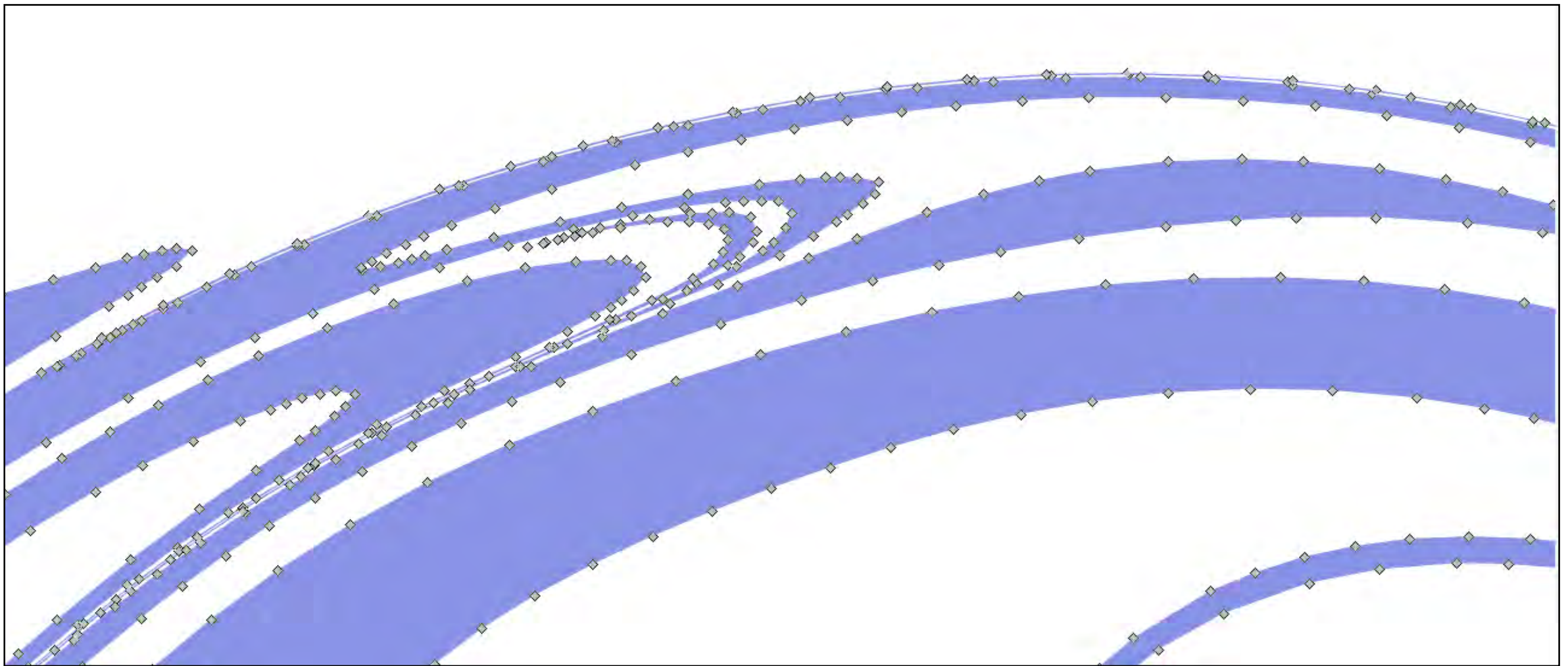
表現出来ない



表現出来る

マーブリング模様の生成に関する研究

輪郭を頂点で追っていく



滑らかな曲線はたくさんの頂点で表現

マーブルリング模様の生成に関する研究



マーブルリングの
線は、決して交
わることはない

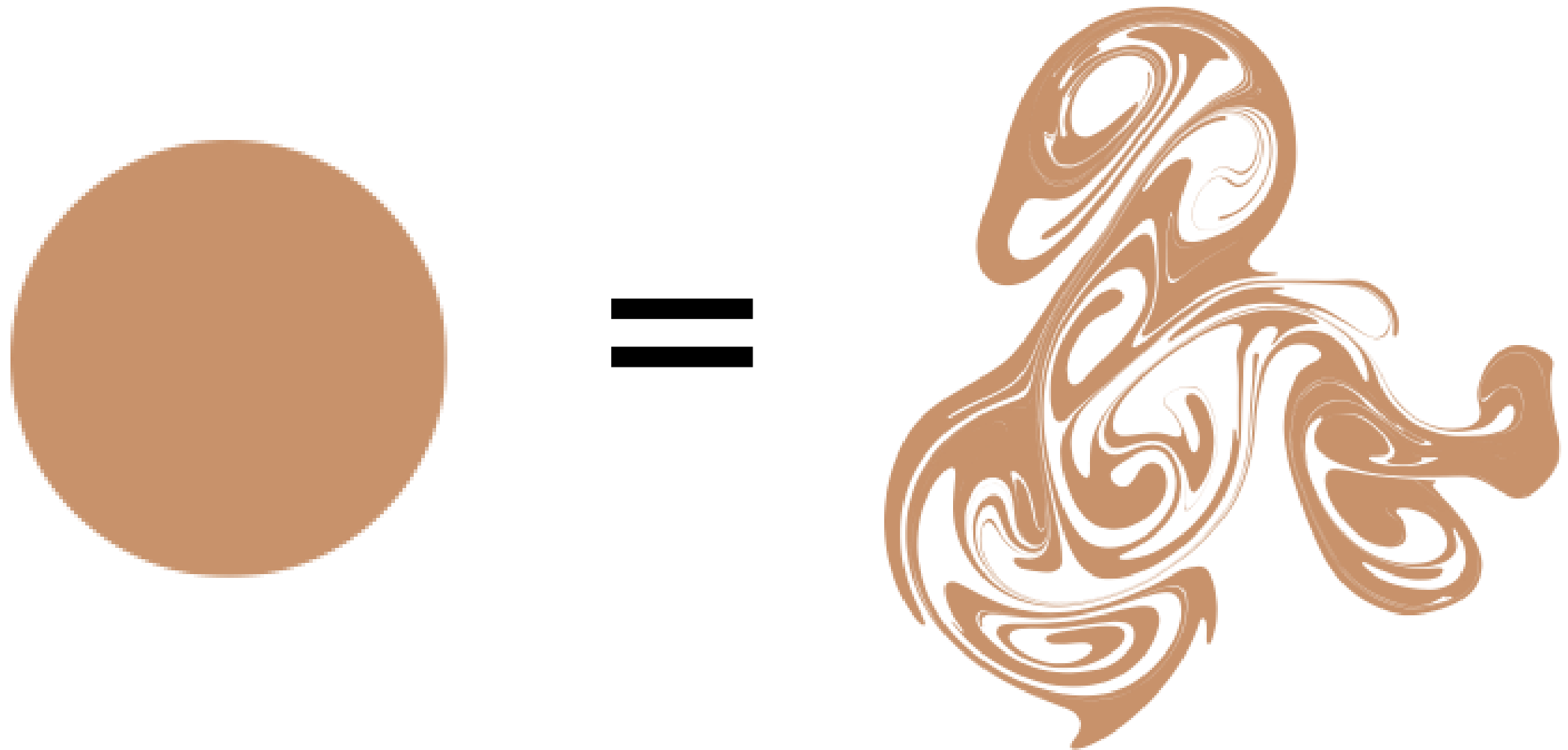
<https://flic.kr/p/aAF4uu>

マーブルリング模様の生成に関する研究



マーブルリングの
線は、決して交
わることはない

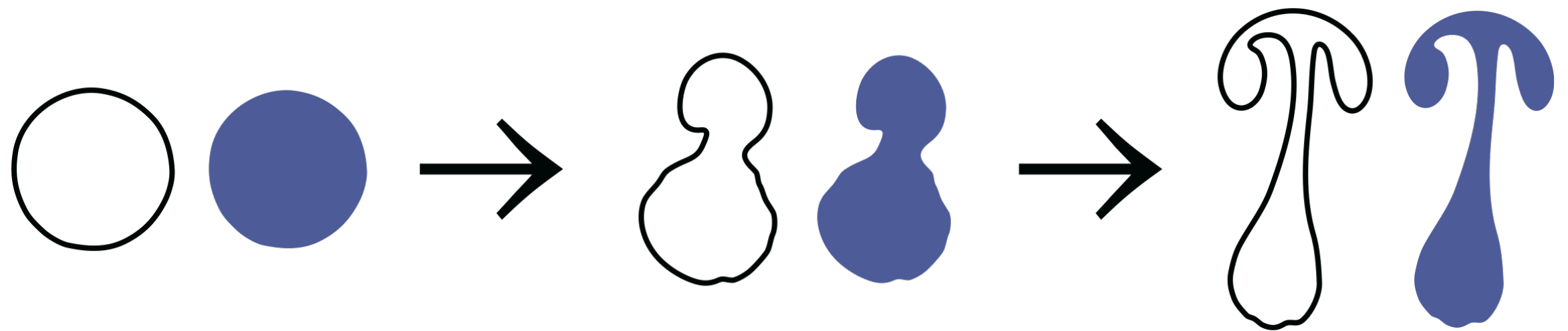
マーブルリング模様の生成に関する研究



つまり右の図形は、実は左の
円の変形で表現できる

マーブリング模様の生成に関する研究

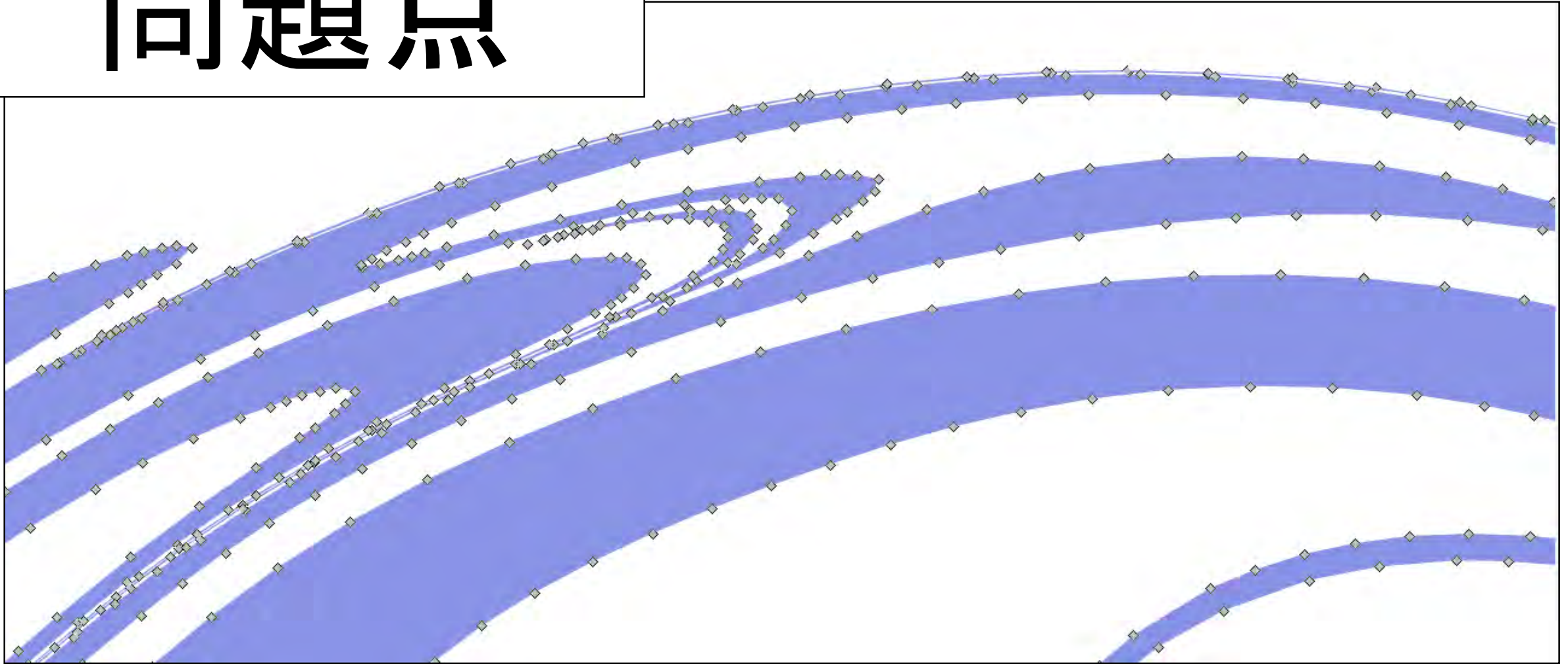
流れにあわせて



円を少しずつ変形していく

マーブリング模様の生成に関する研究

問題点

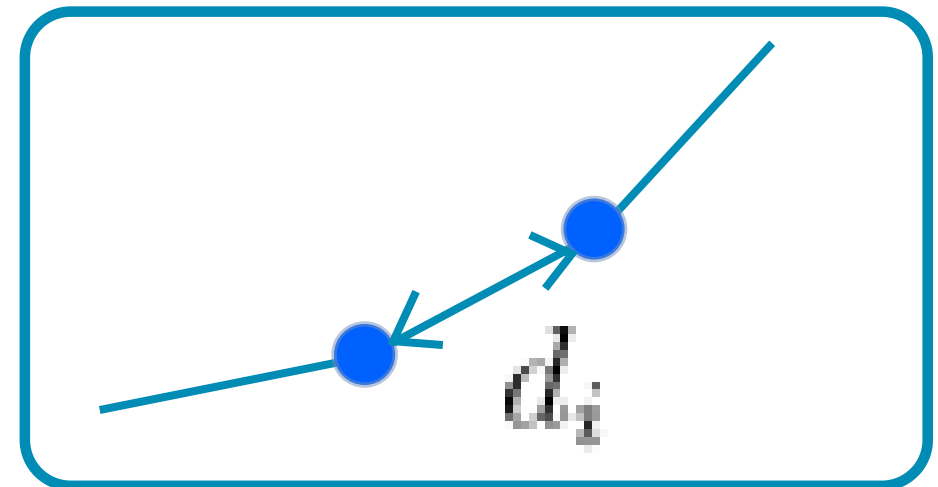


頂点が増えすぎると、計算時間が長
くなってしまふ

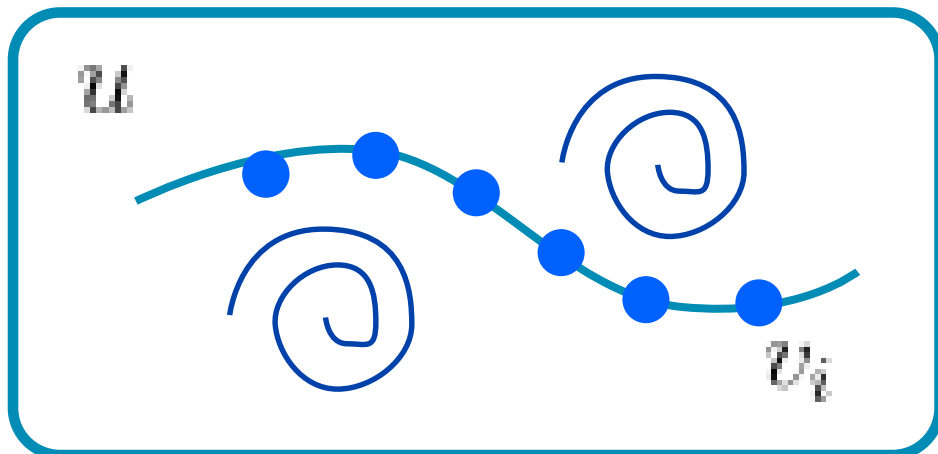
マーブリング模様の生成に関する研究



角度が急な箇所は、たくさんの頂点を追加



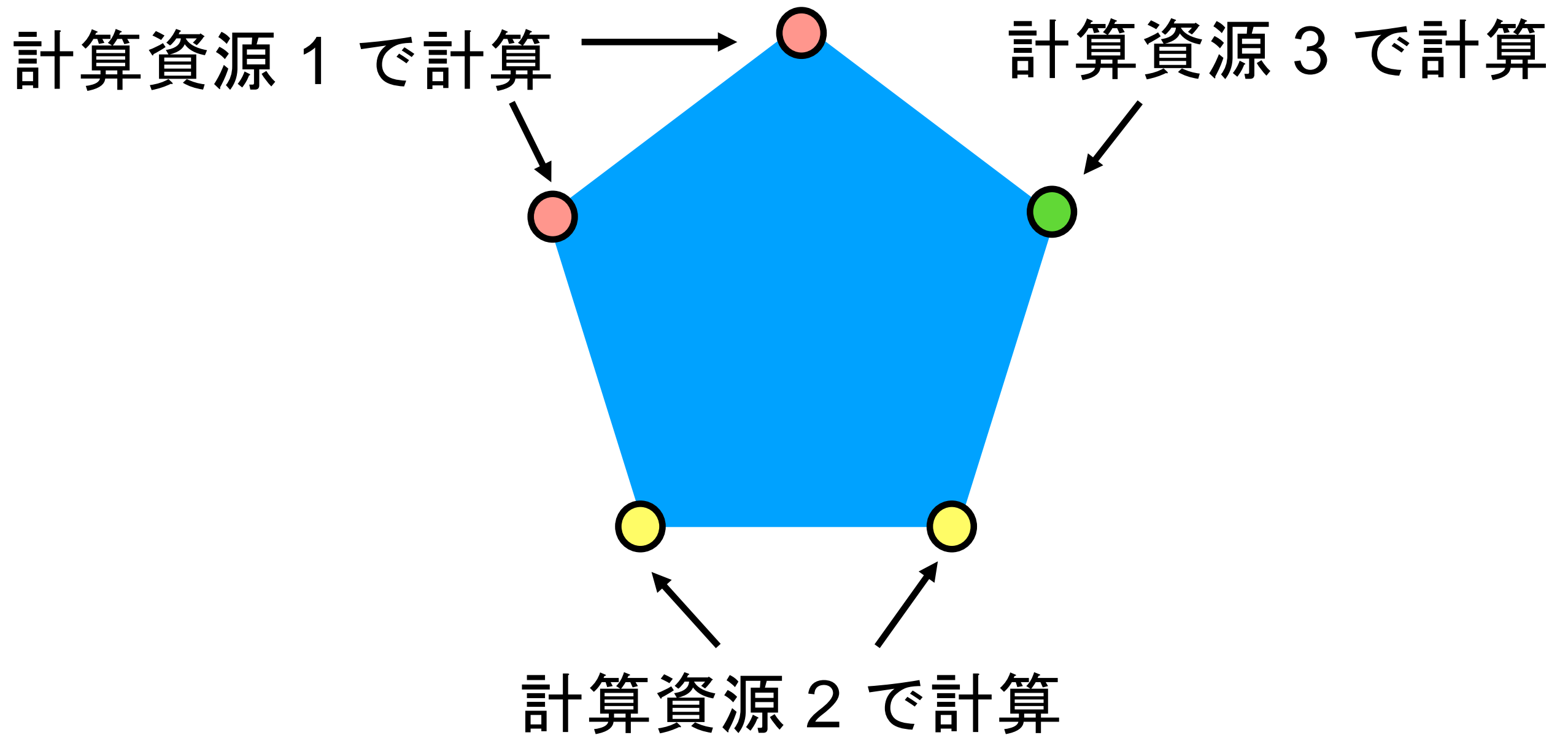
頂点間の距離は一定に



渦が発生している付近は、たくさんの頂点を追加

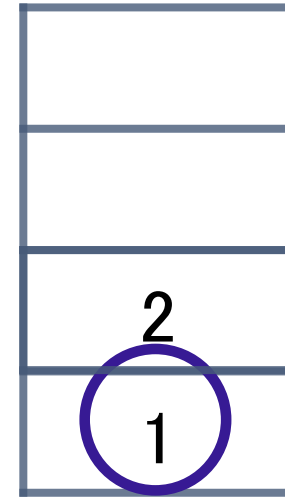
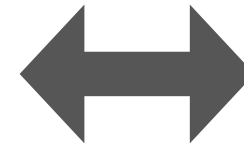
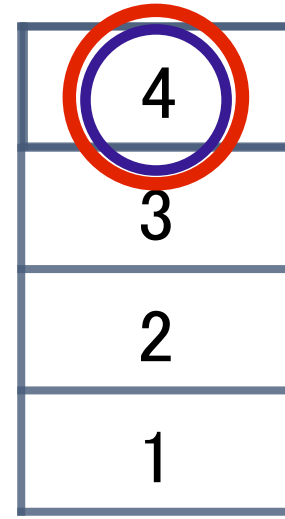
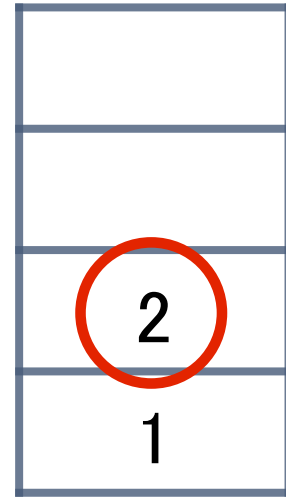
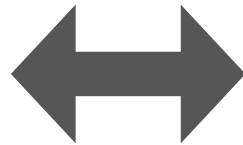
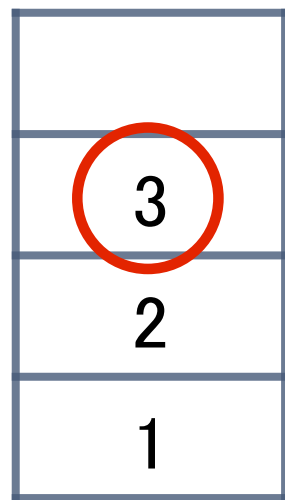
マーブリング模様の生成に関する研究

～ 計算の高速化 ～



マーブリング模様の生成に関する研究

～ 計算の高速化 ～

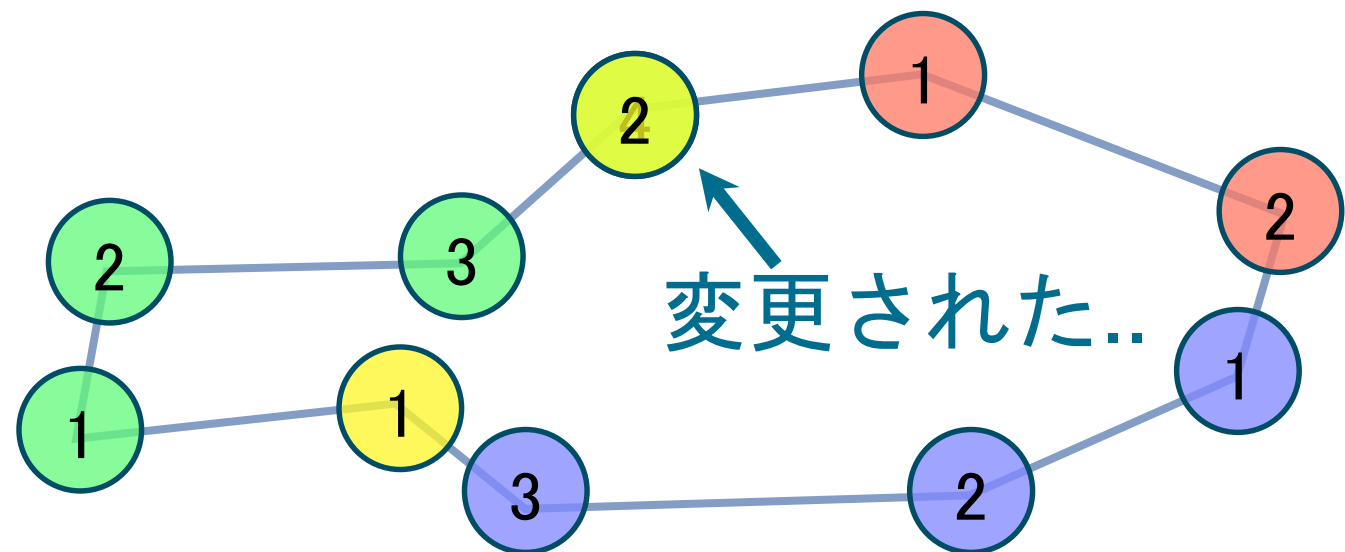


計算資源

計算資源

計算資源

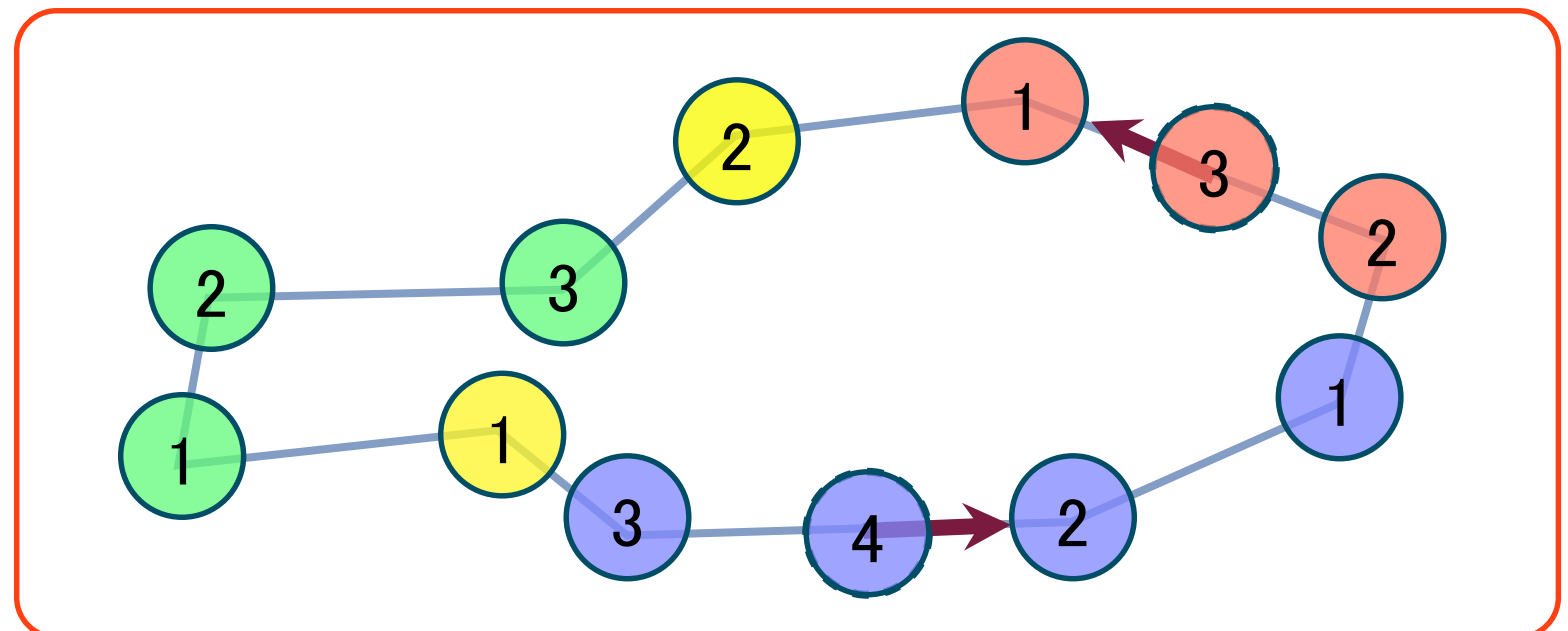
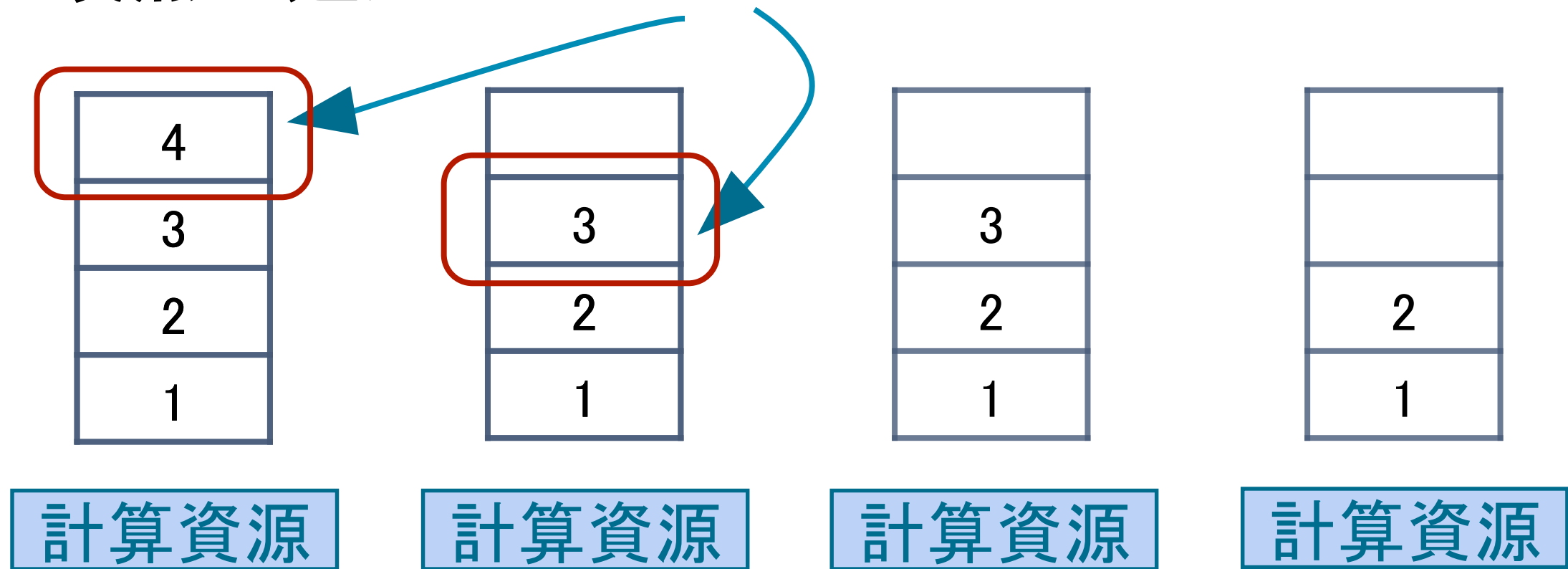
計算資源



マーブルリング模様の生成に関する研究

2. 頂点の追加

新しい頂点を追加



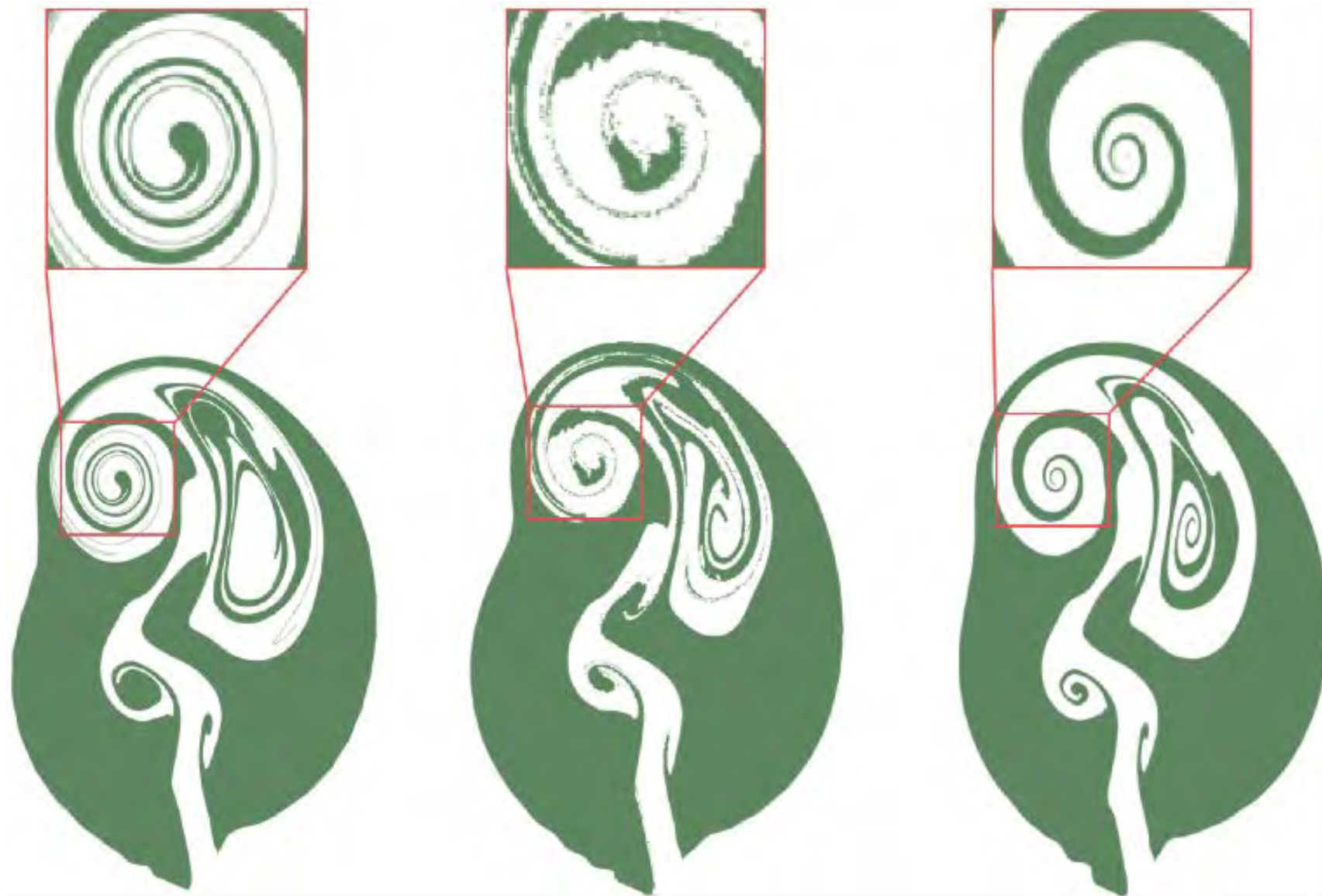
マーブリング模様の生成に関する研究 ～計算例～



マーブリング模様の生成に関する研究 ～計算例～



マーブリング模様の生成に関する研究 ～ 先行研究との比較 ～

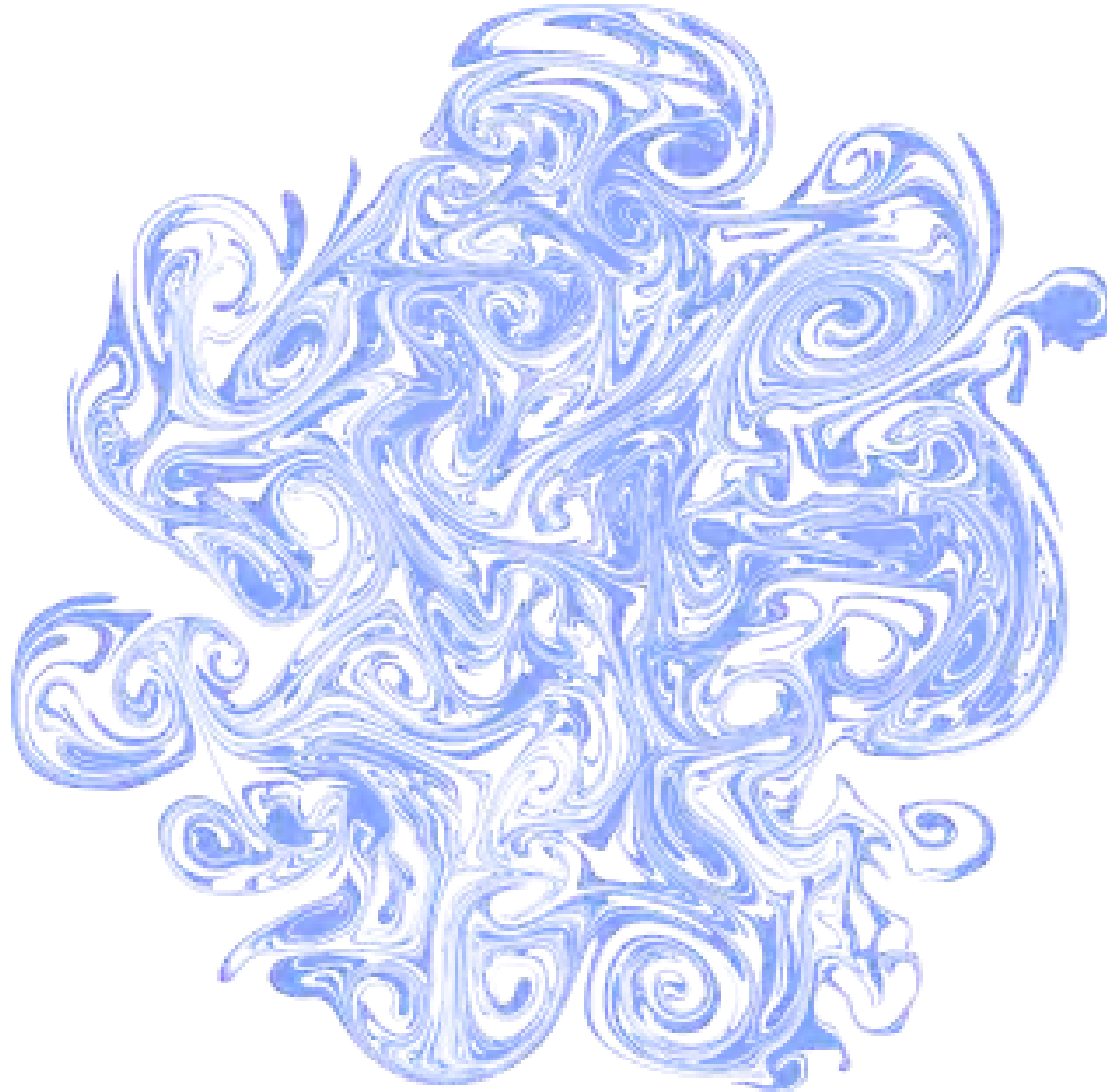


本研究

粒子を
使った方法

格子を
使った方法

マーブリング模様の生成に関する研究 ～計算例～



マーブリング模様の生成に関する研究 ～計算例～



液体の薄膜を保持に関する研究



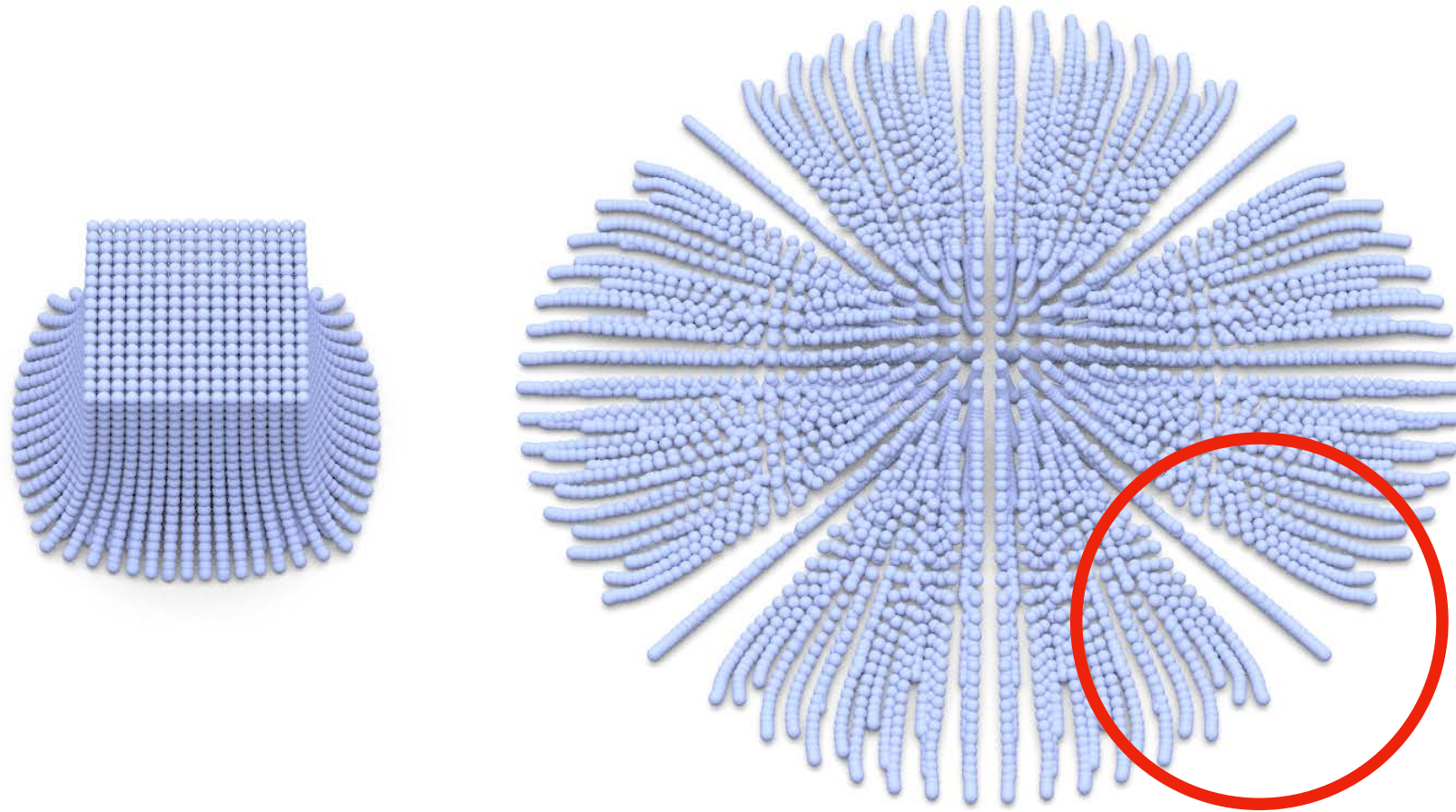
<http://www.flickr.com/photos/cayusa/2583501396/>



<https://www.flickr.com/photos/fcaf/2189211958/>

液体の薄膜を保持に関する研究

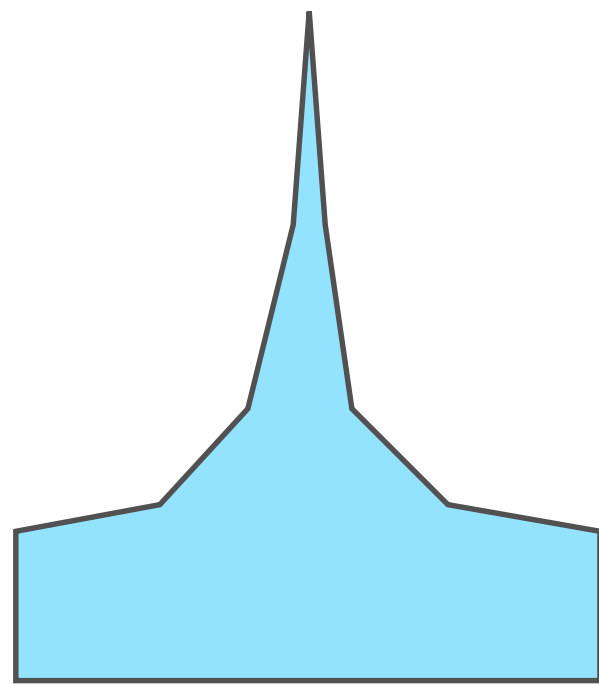
～粒子法を使った問題～



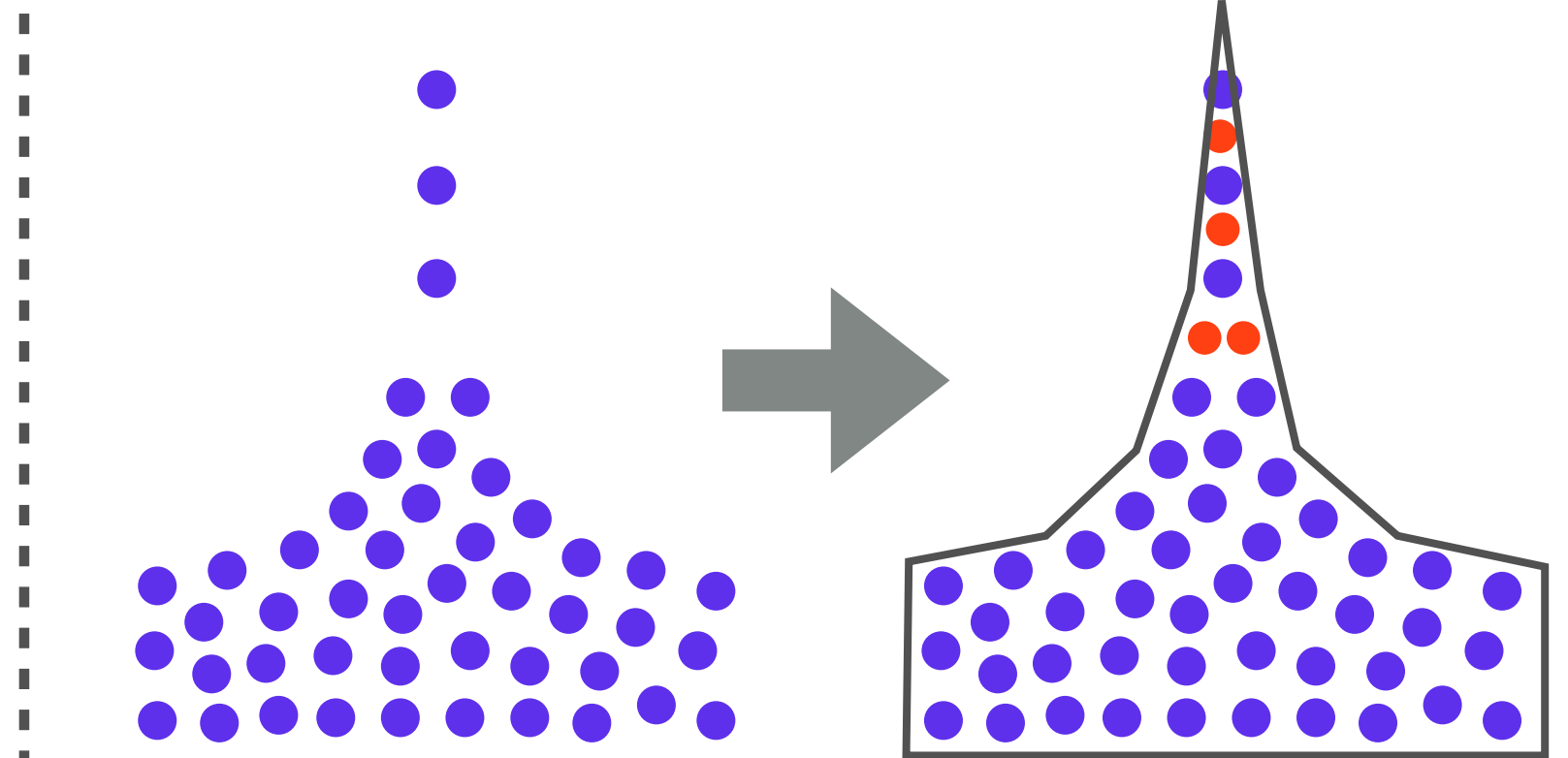
粒子を使うと、薄い薄膜は簡単にちぎれてしまう

液体の薄膜を保持に関する研究

～解決法の概要～



理想の飛沫



粒子の計算

粒子の挿入

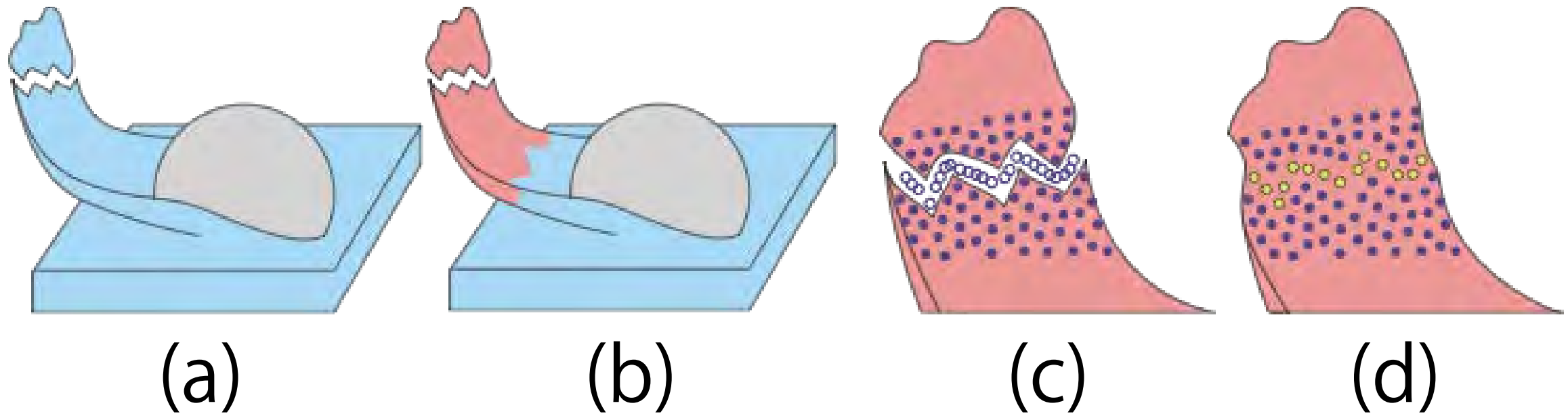
液体の薄膜を保持に関する研究

(a) 入力のスимуレーション

(b) 薄い液体部分を検出

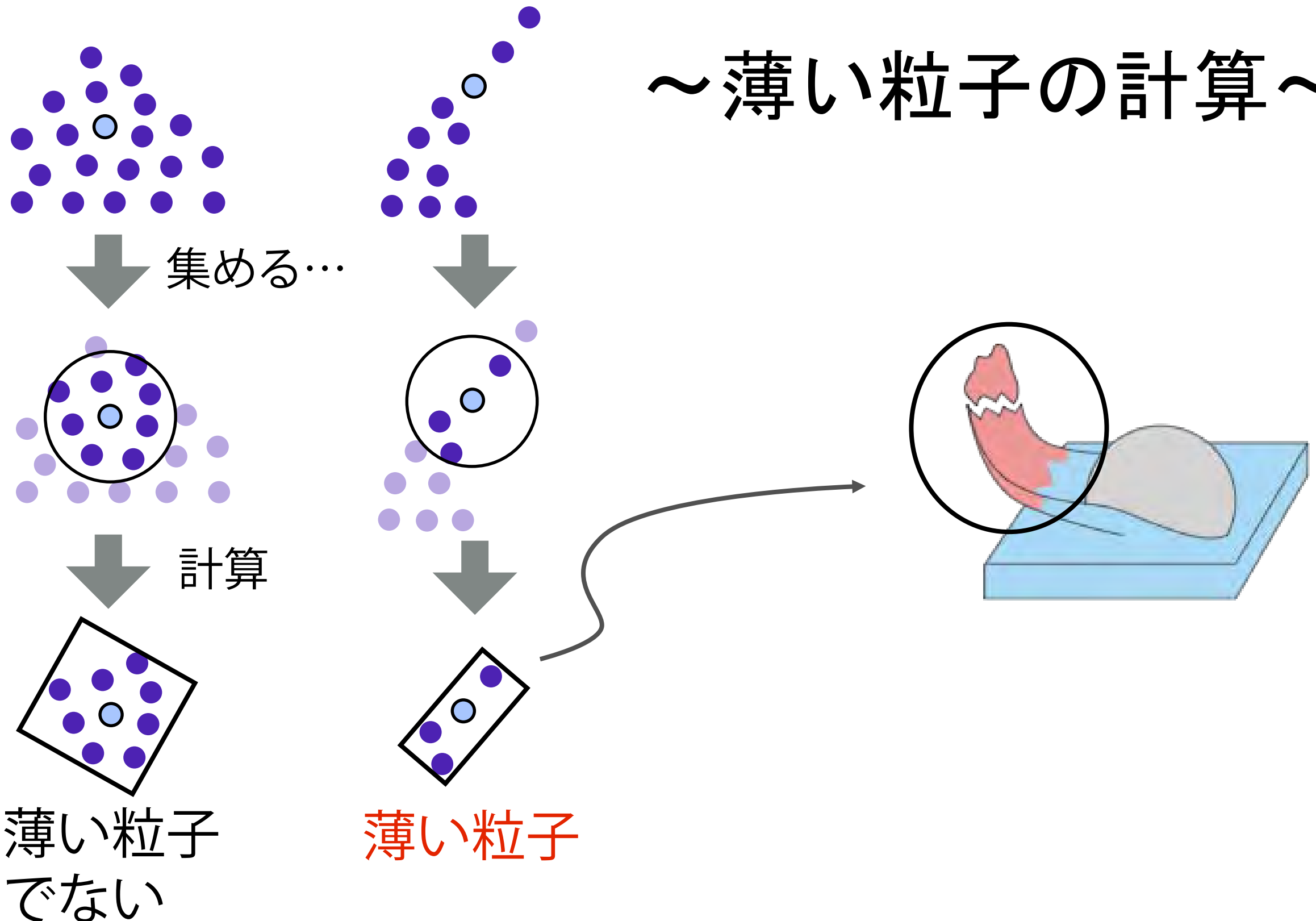
(c) 挿入粒子の候補を計算する

(d) 最終粒子を計算し、挿入する

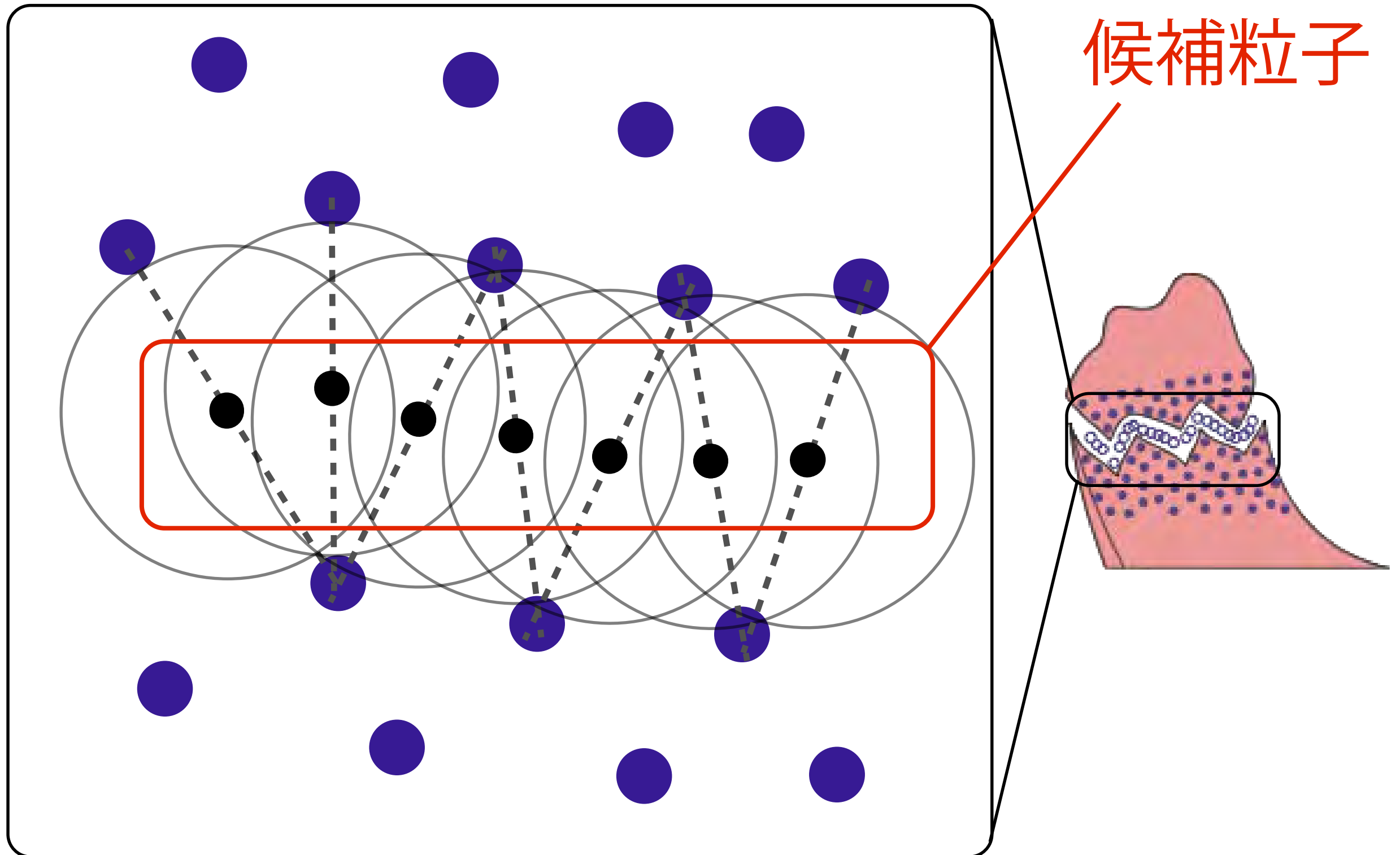


液体の薄膜を保持に関する研究

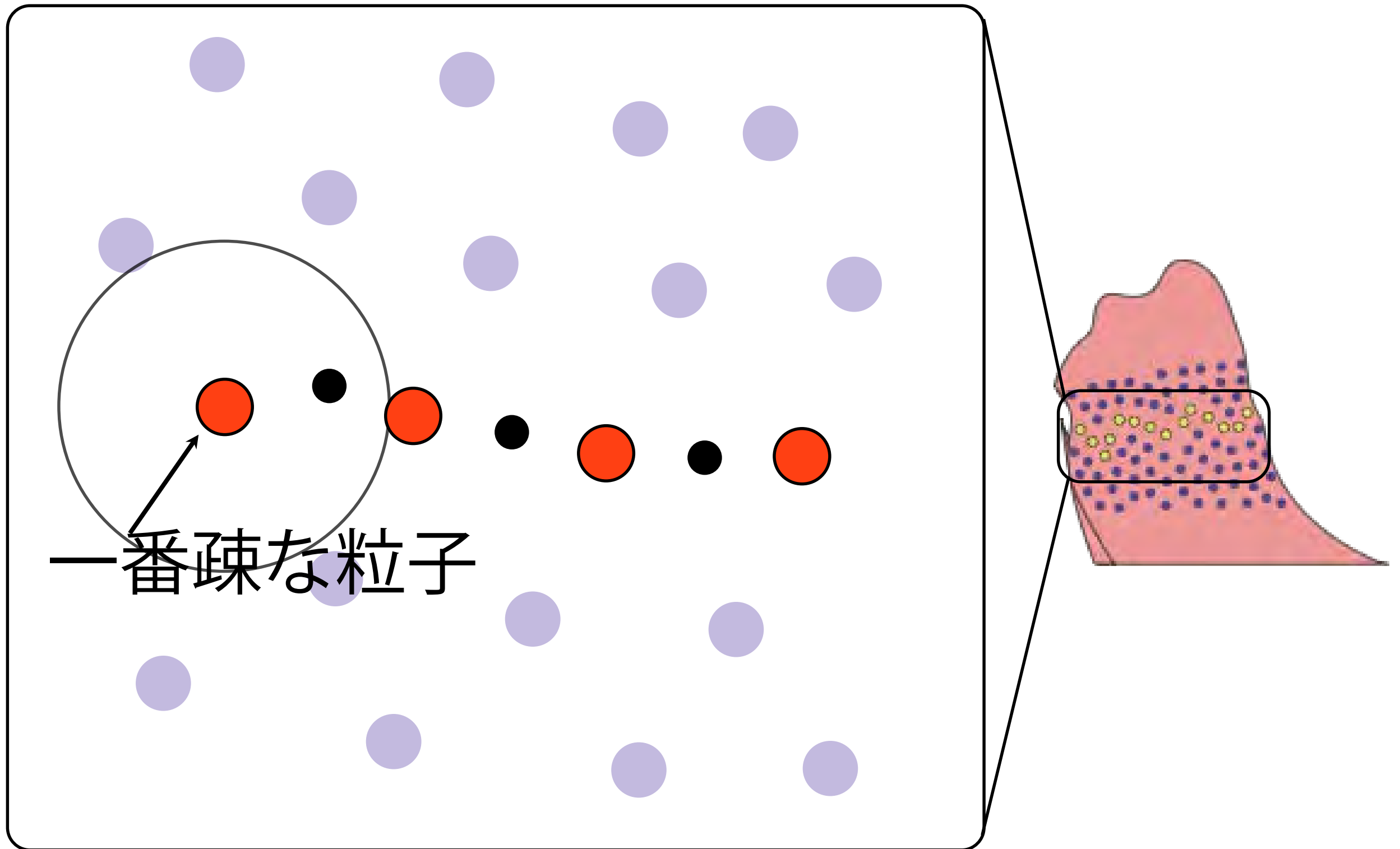
～薄い粒子の計算～



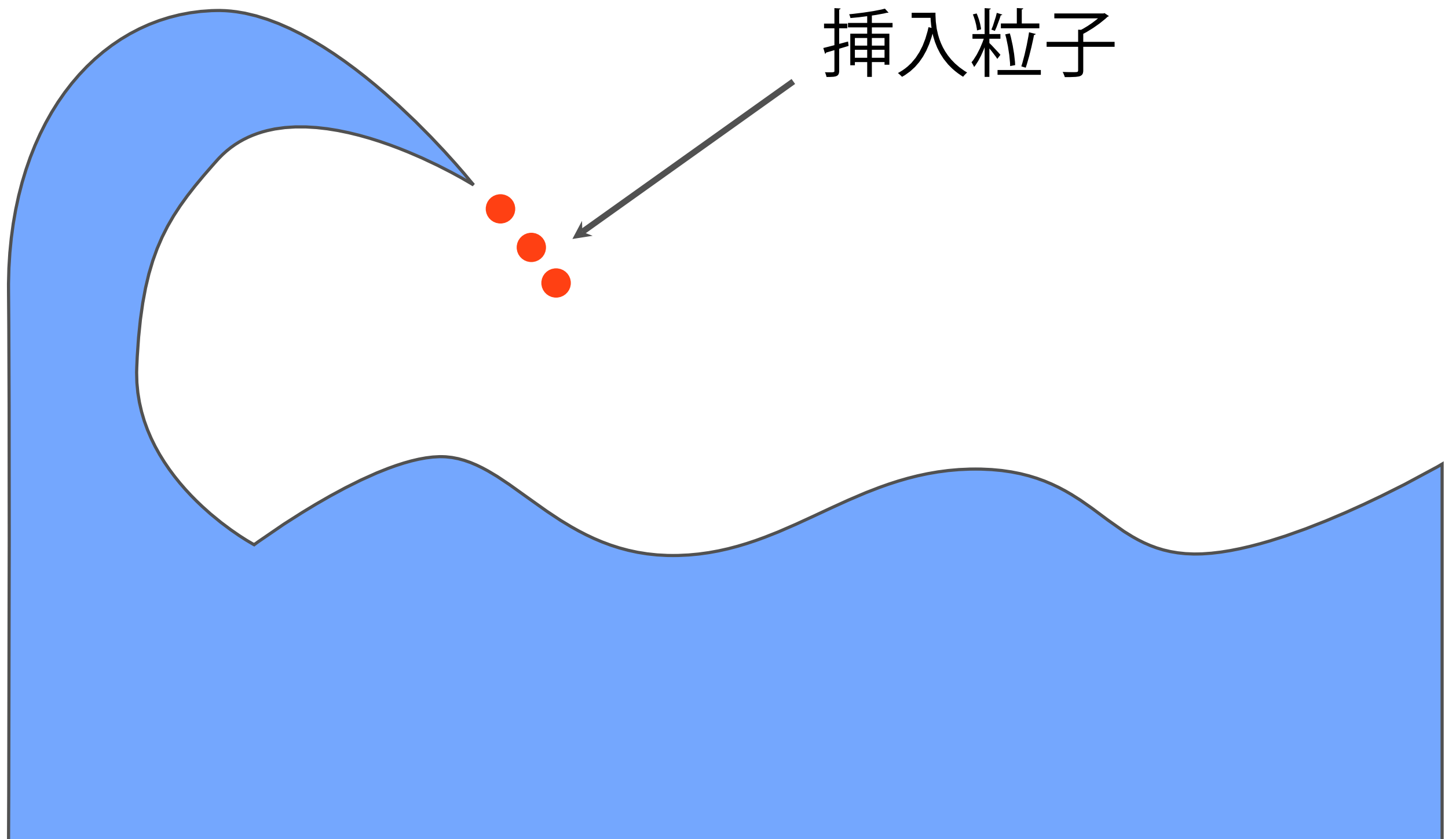
液体の薄膜を保持に関する研究



液体の薄膜を保持に関する研究



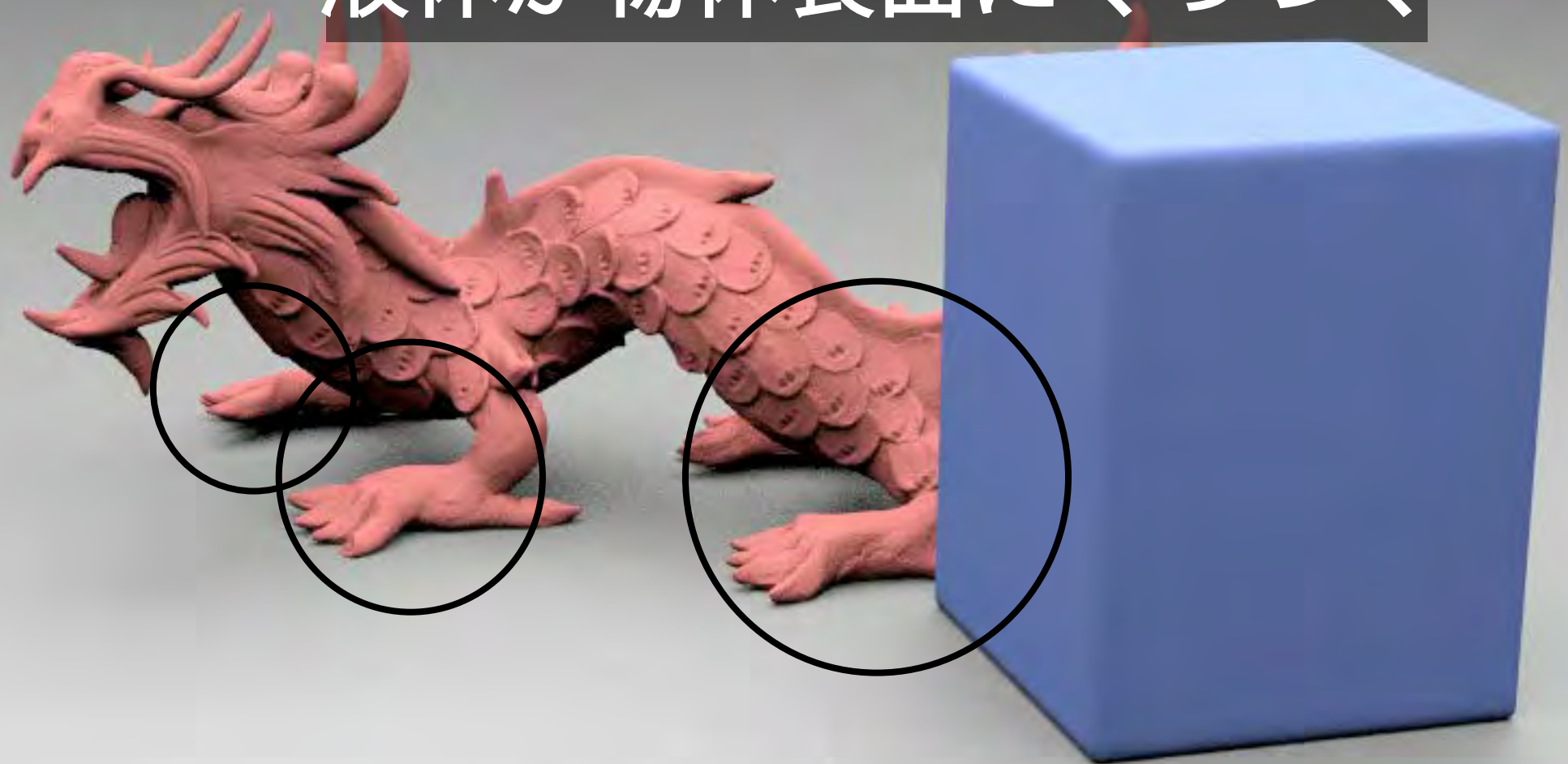
液体の薄膜を保持に関する研究



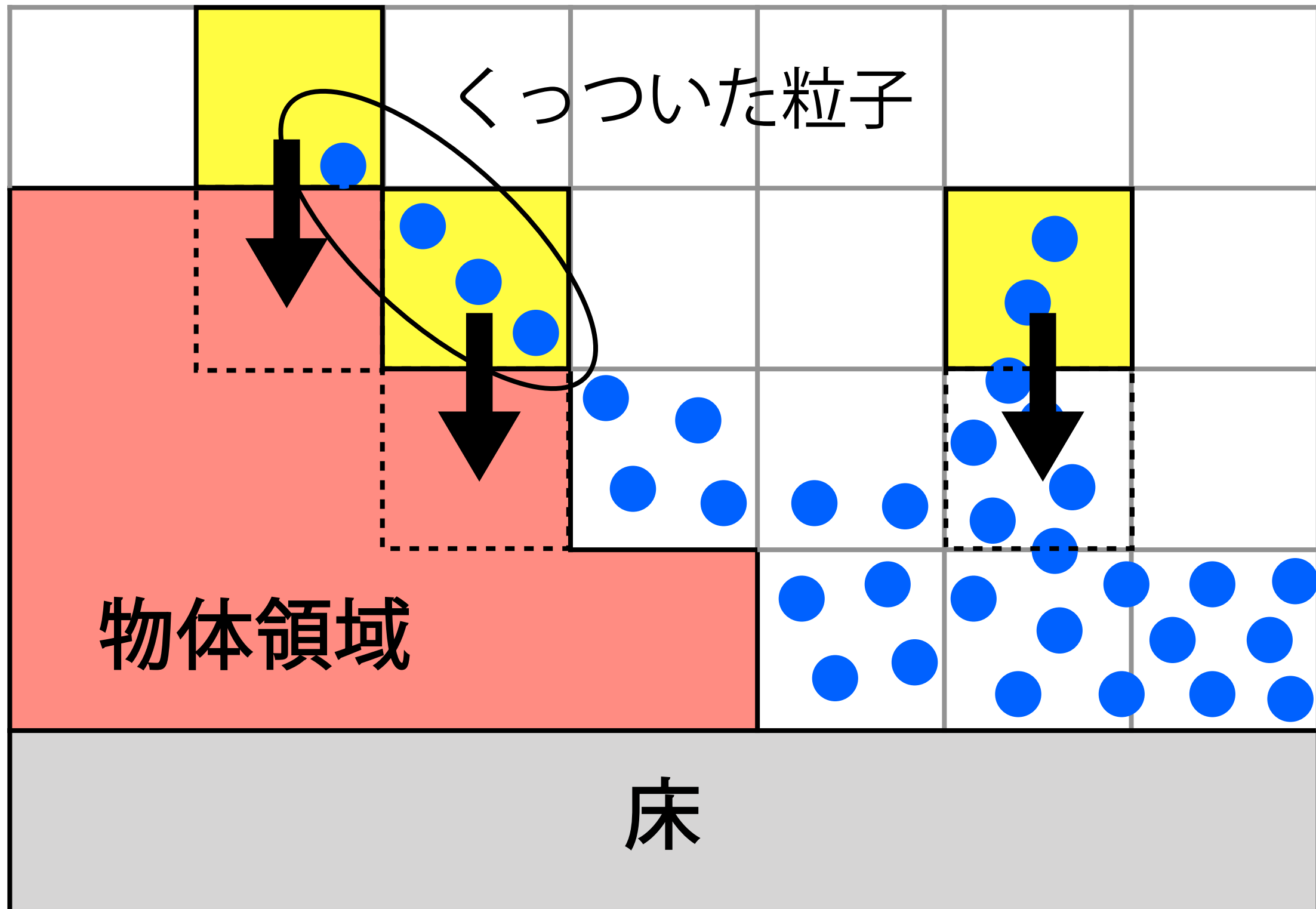
液体の薄膜を保持に関する研究

問題点

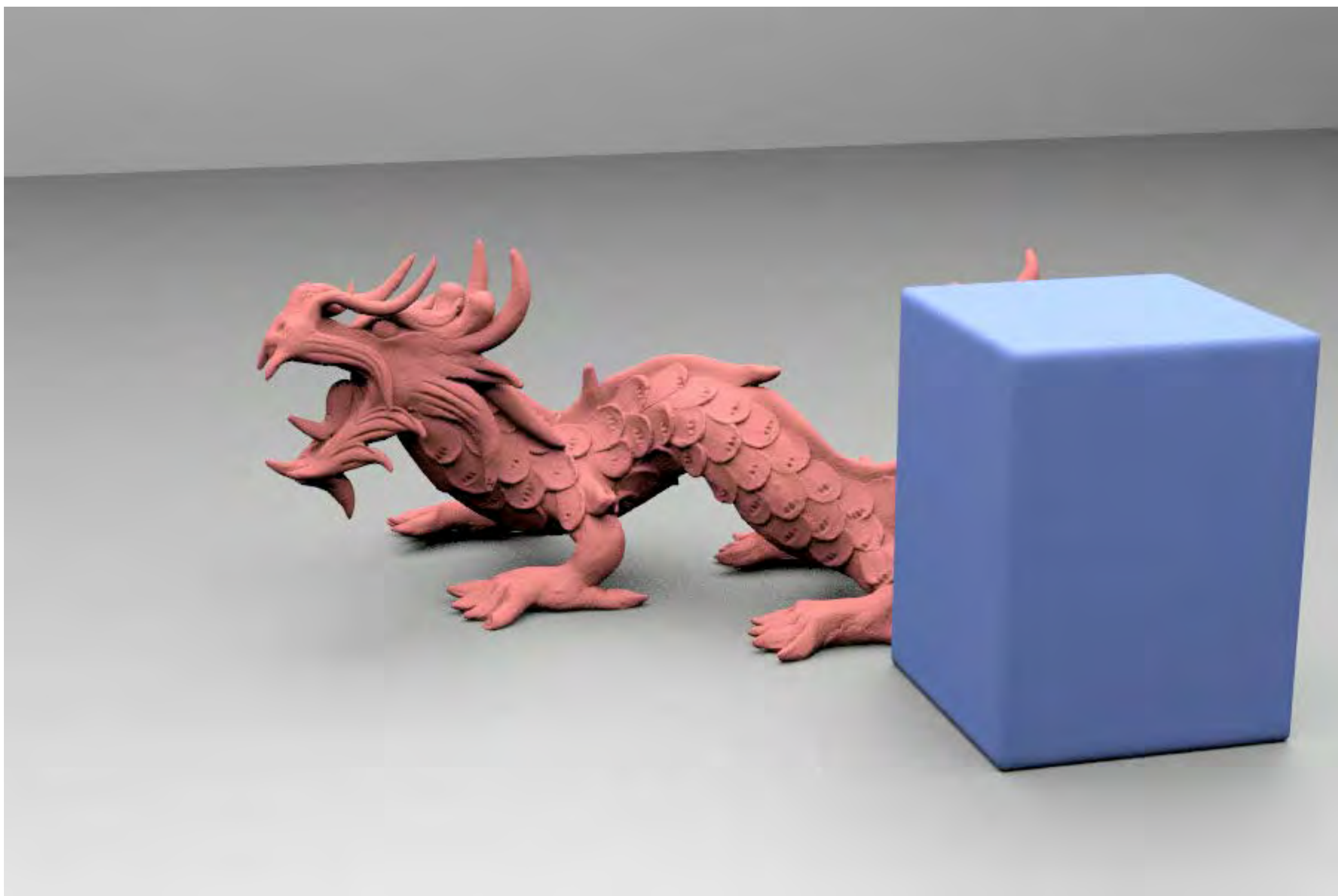
液体が物体表面にくっつく



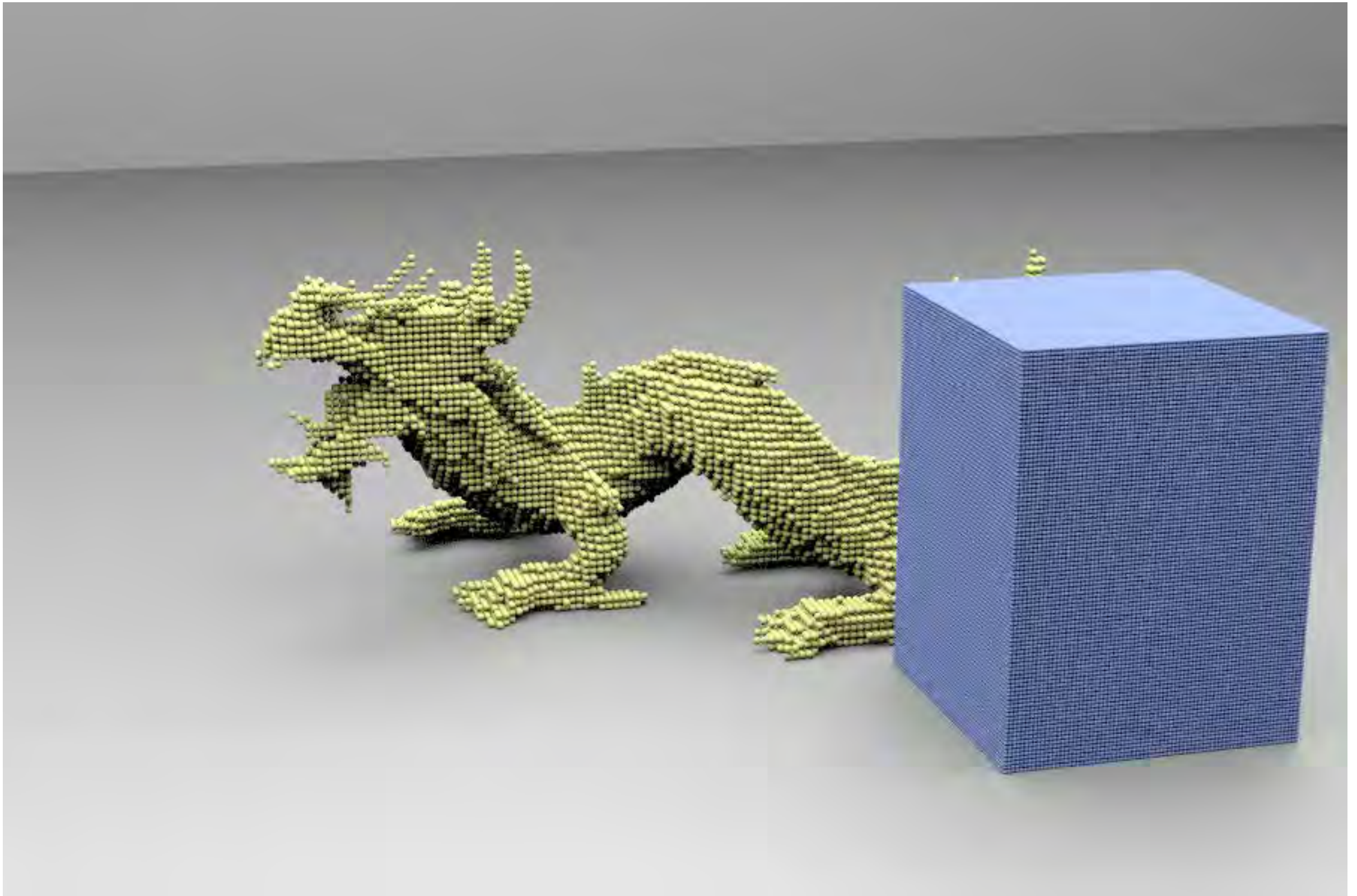
液体の薄膜を保持に関する研究



液体の薄膜を保持に関する研究

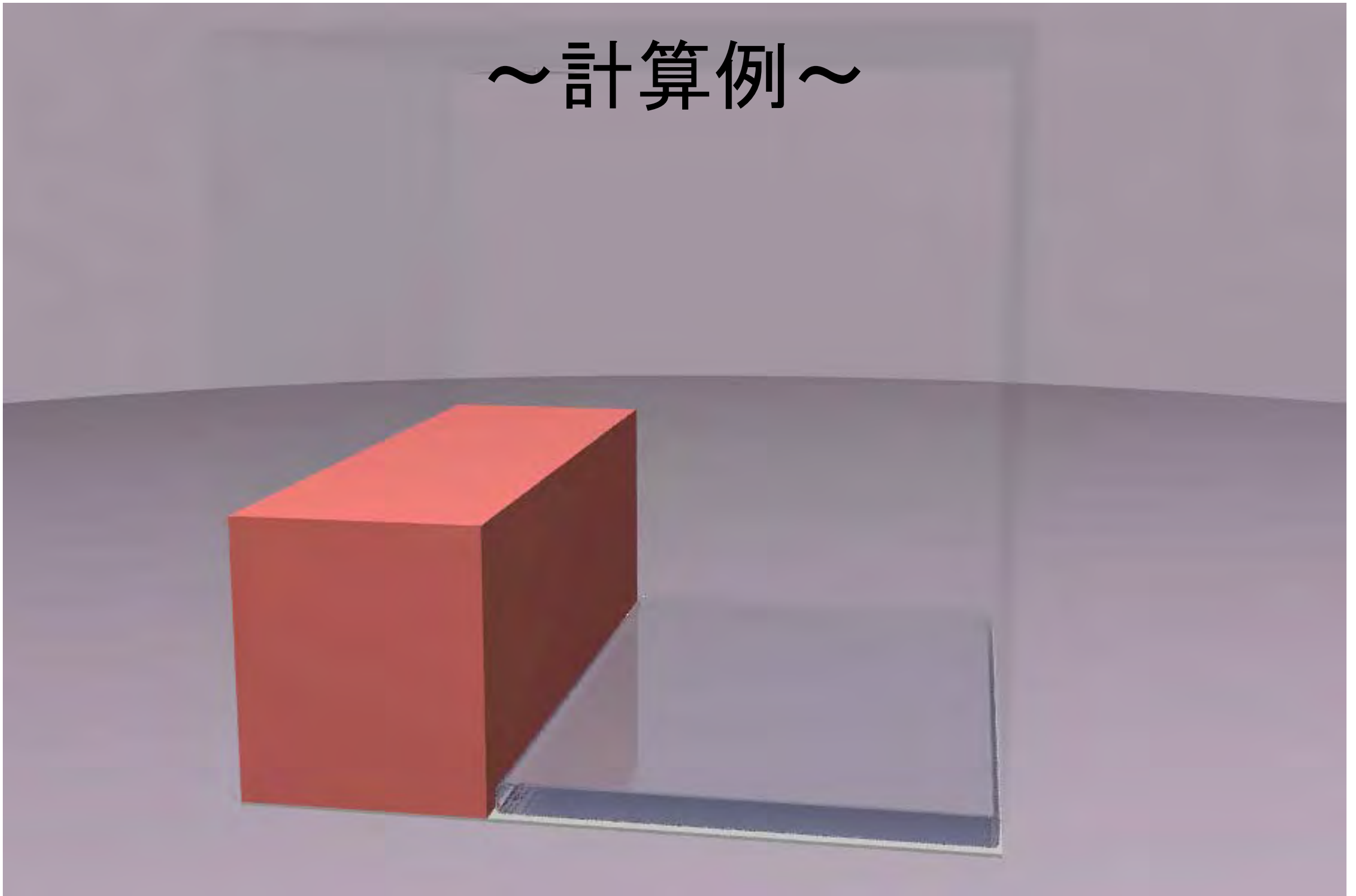


液体の薄膜を保持に関する研究



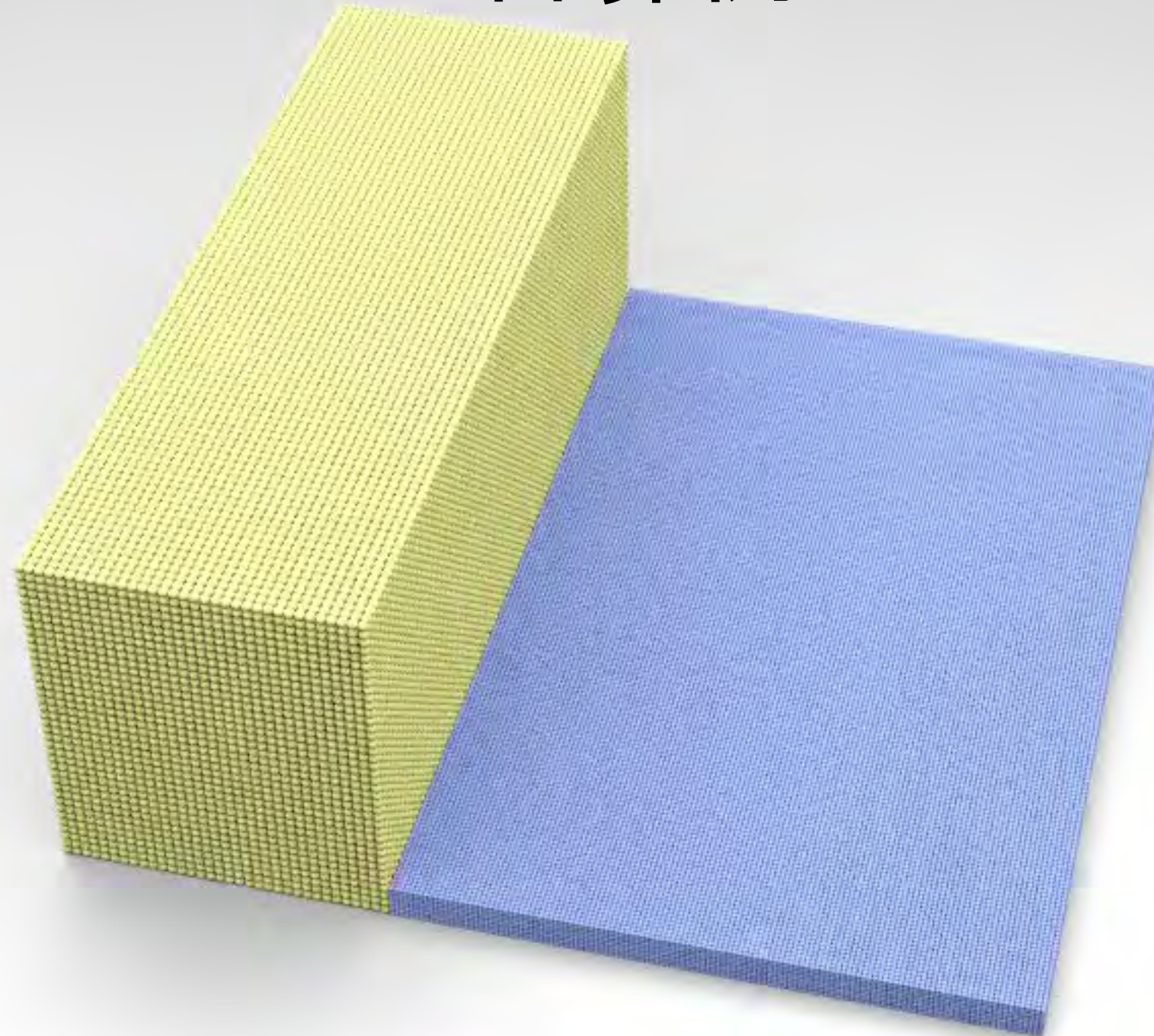
液体の薄膜を保持に関する研究

～計算例～



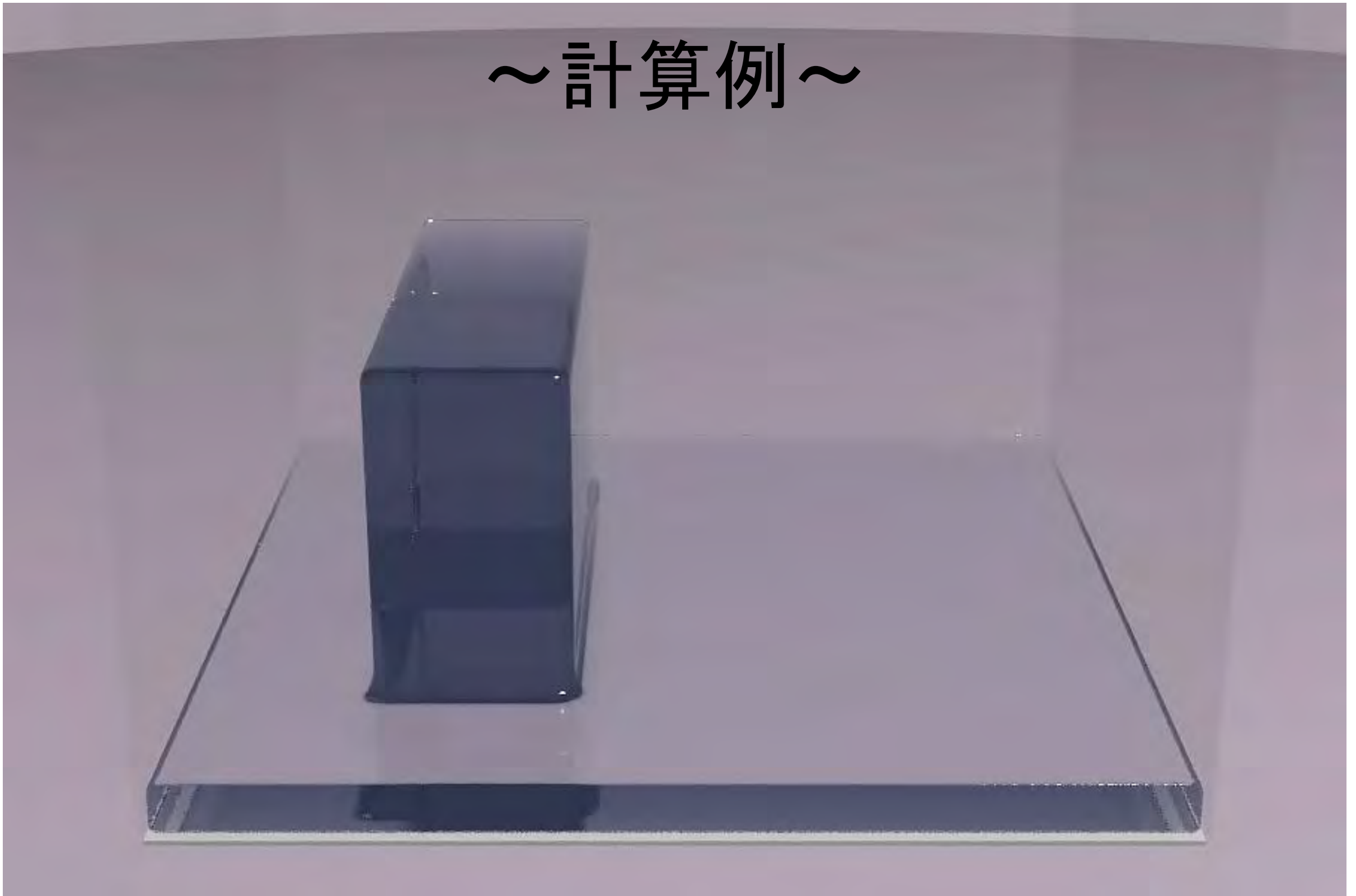
液体の薄膜を保持に関する研究

～計算例～



液体の薄膜を保持に関する研究

～計算例～



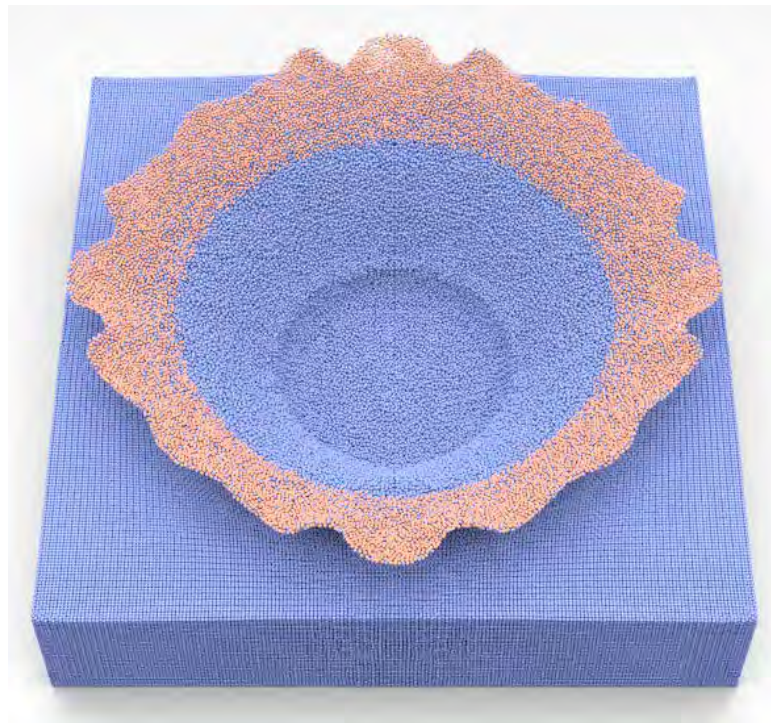
液体の薄膜を保持に関する研究

～計算例～

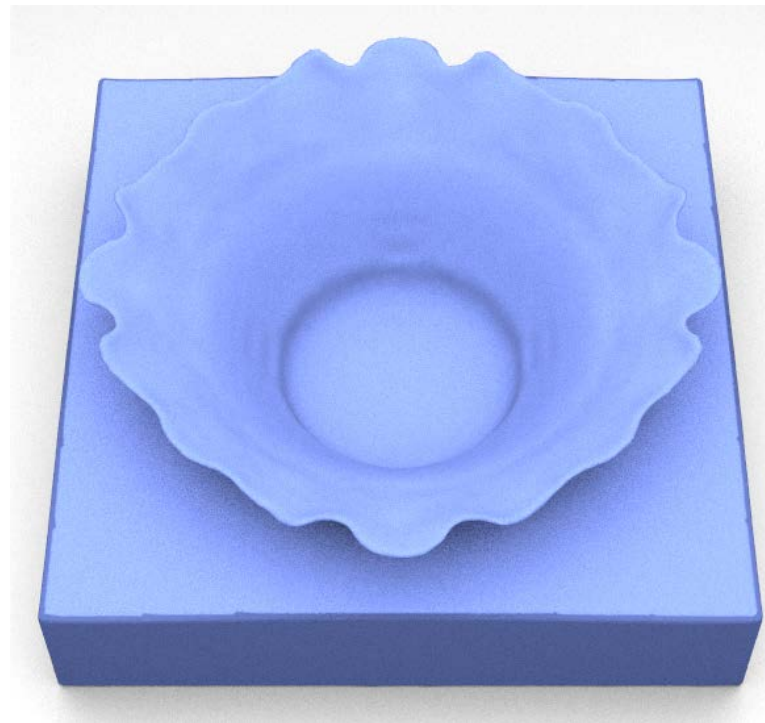


液体の薄膜を保持に関する研究

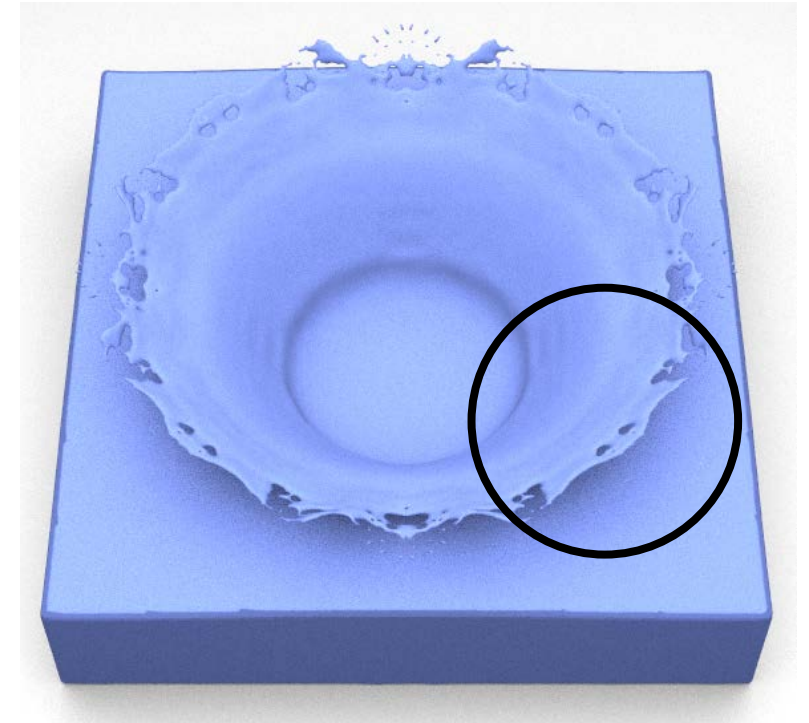
～計算例～



提案手法 (赤色
は挿入粒子)



提案手法 (可視化)



従来手法

液体の薄膜を保持に関する研究

～計算例～

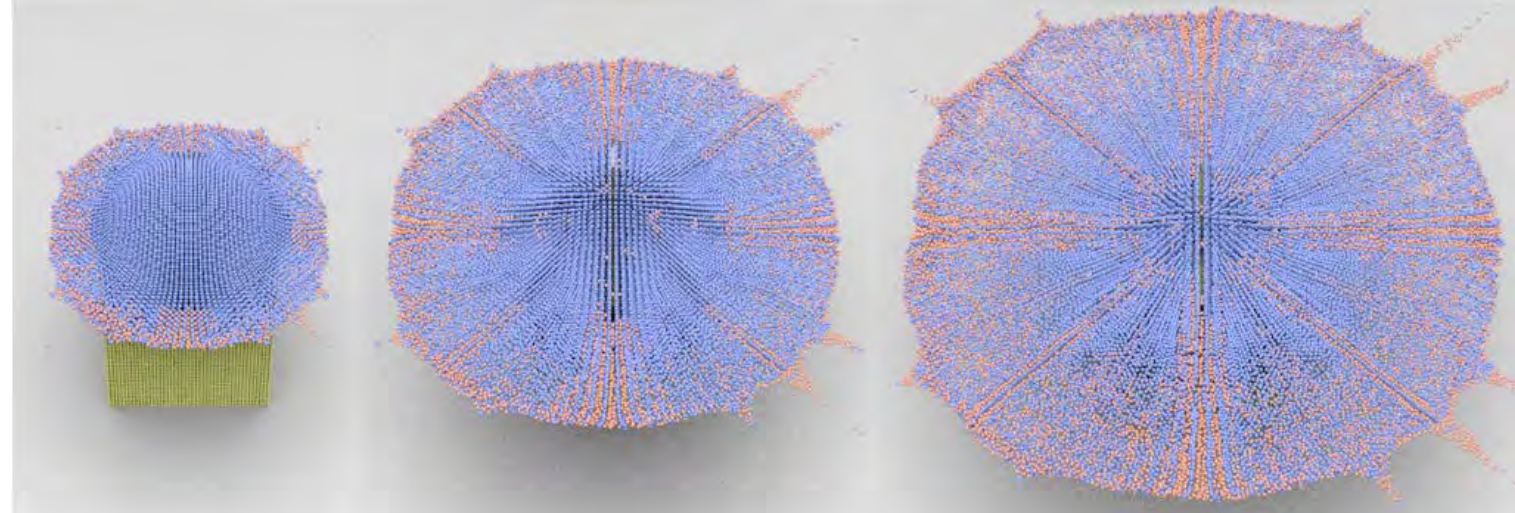
従来手法



提案手法
(可視化)

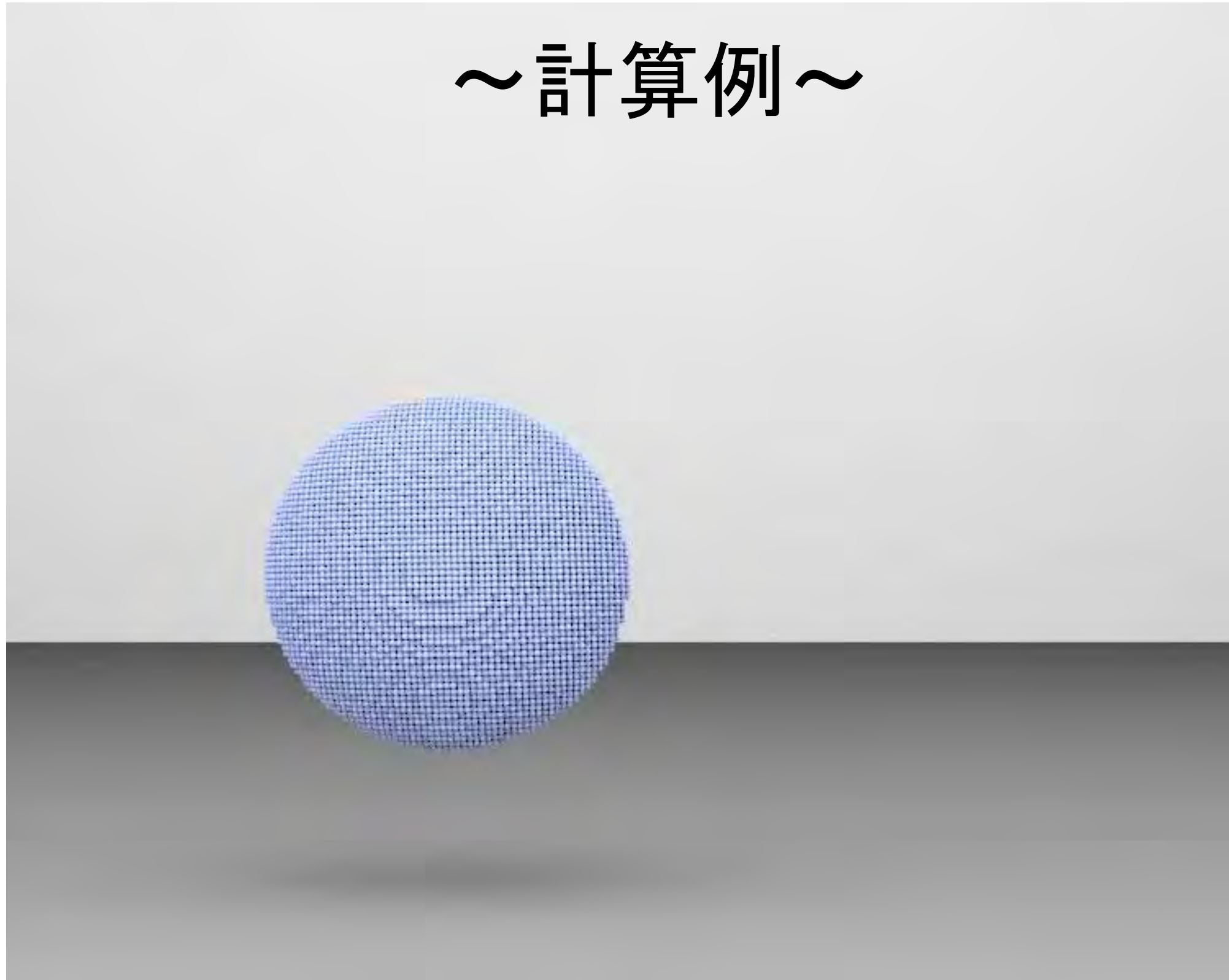


提案手法
(粒子)




液体の薄膜を保持に関する研究

～計算例～

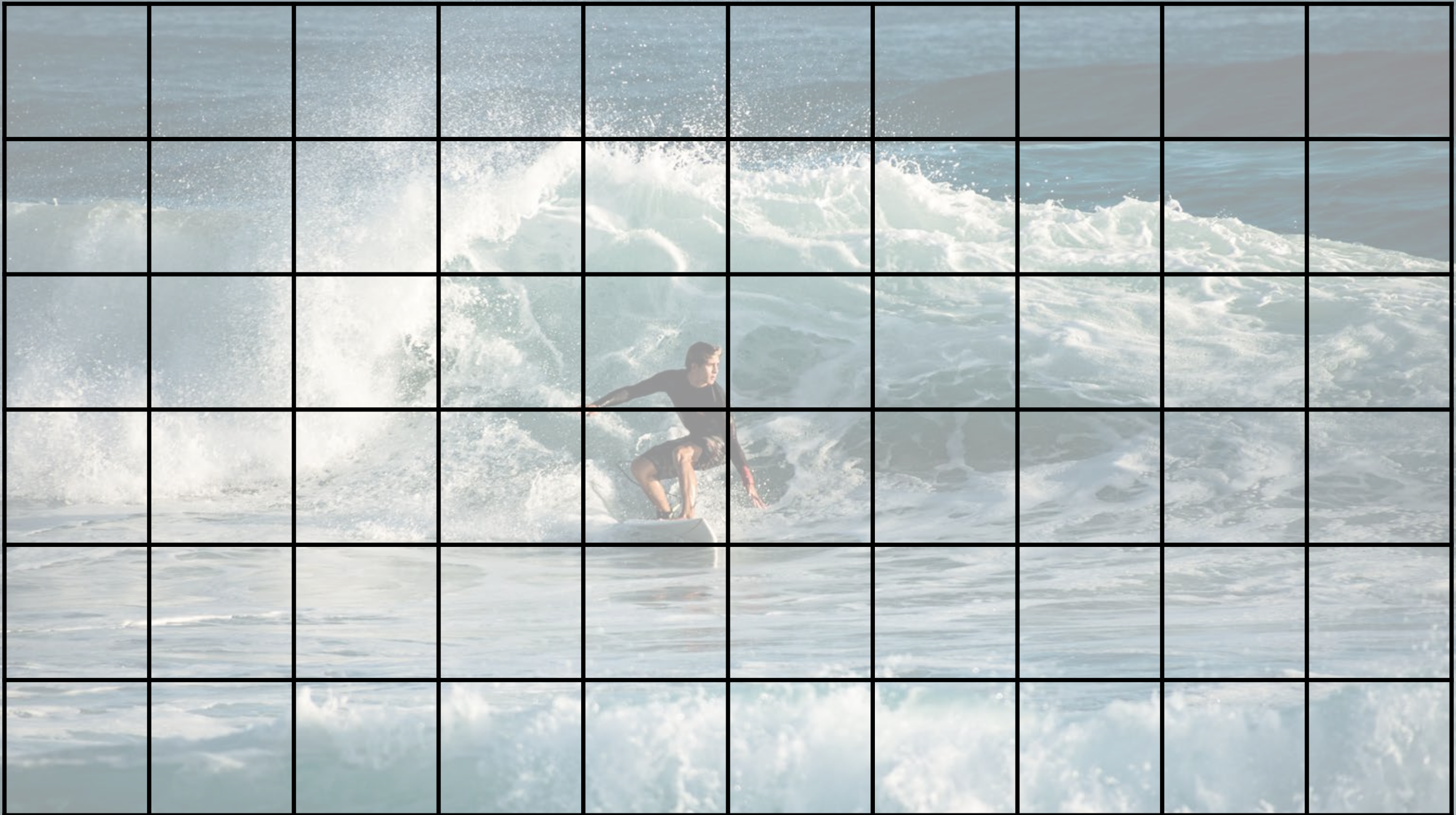


計算を高速化するための手法

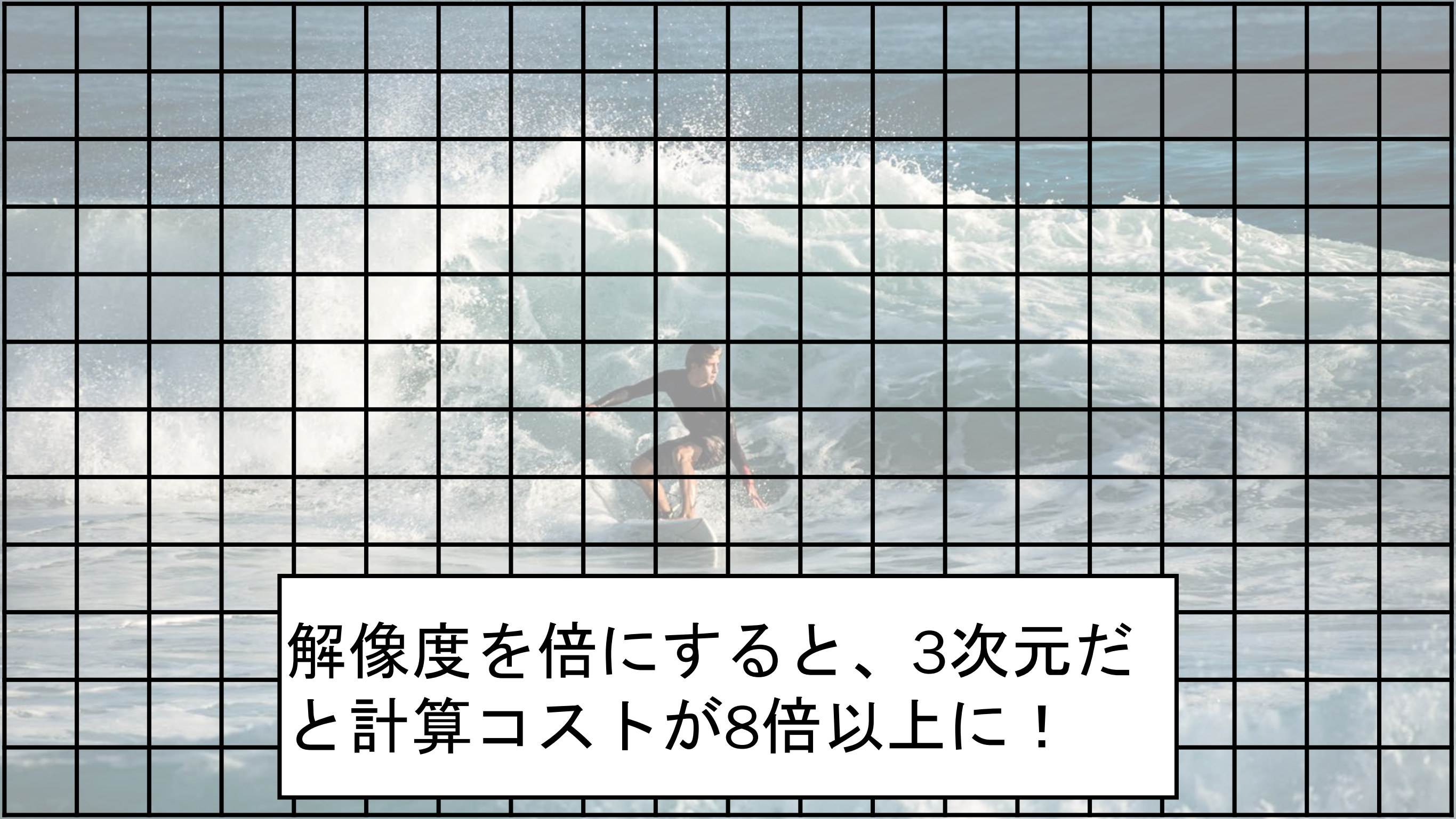
A photograph of a surfer in a black wetsuit riding a wave. The surfer is positioned in the center of the frame, leaning forward with arms outstretched for balance. The wave is breaking, creating a large splash of white water behind the surfer. The water is a deep blue color. The background shows the ocean extending to the horizon under a clear sky.

大規模な流体計算は時間がかかる

計算を高速化するための手法



計算を高速化するための手法



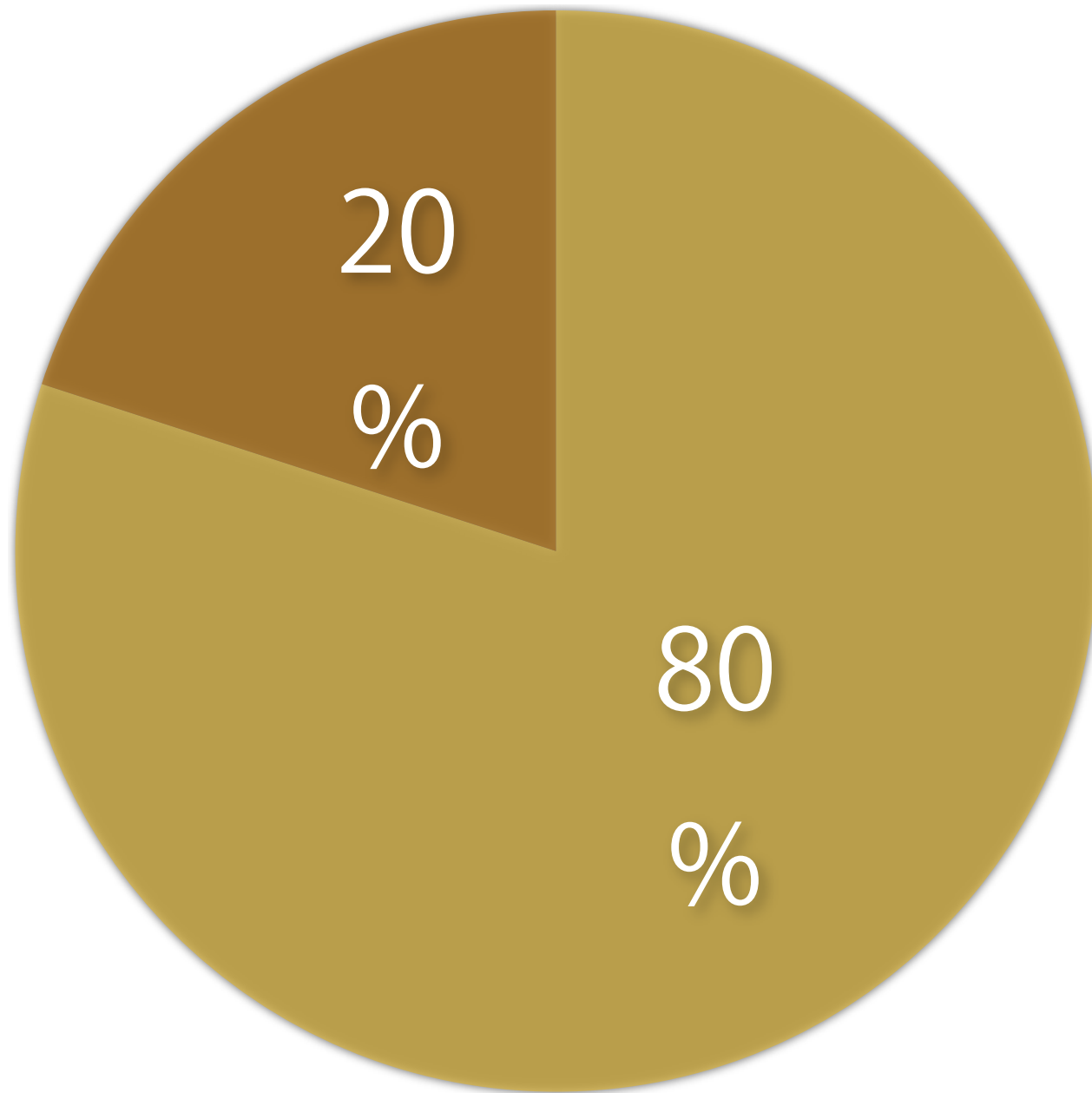
解像度を倍にすると、3次元だと計算コストが8倍以上に！

計算を高速化するための手法



高解像度計算 (512³)

計算を高速化するための手法

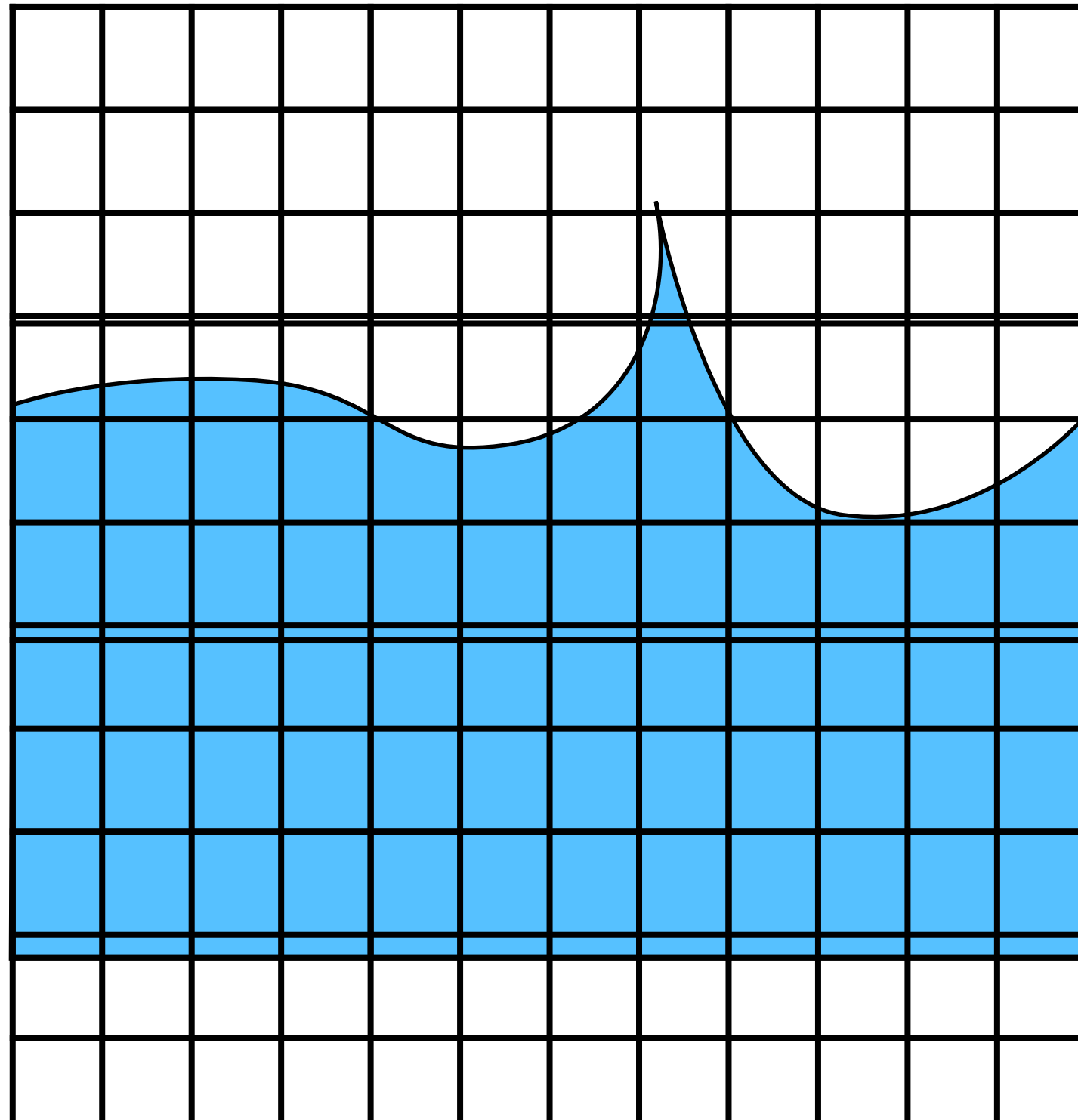


512^3 解像度

- その他の処理の時間
- 圧力計算の時間

計算を高速化するための手法

～圧力計算の時だけ、荒い格子を使う～



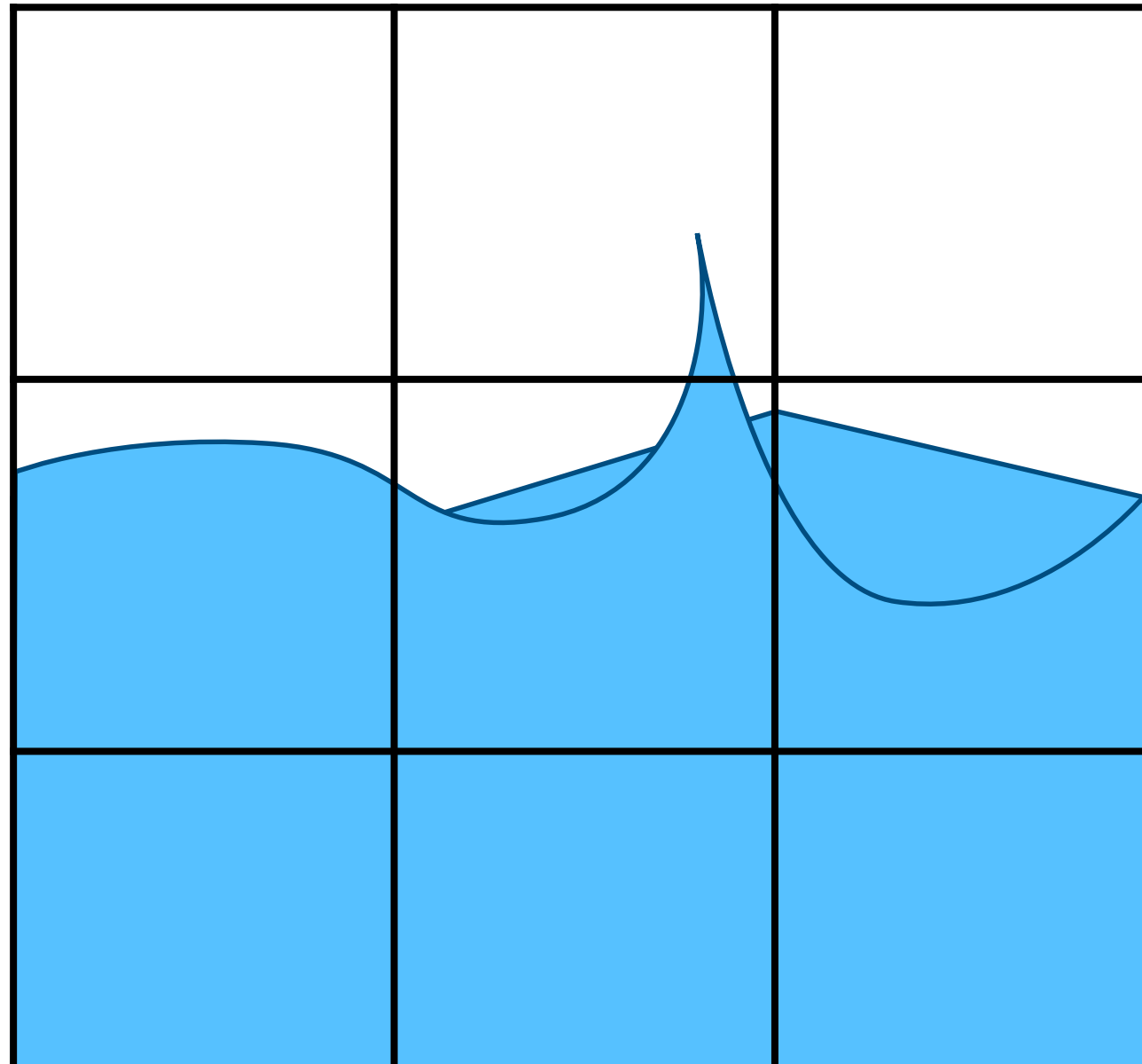
計算を高速化するための手法 ～圧力計算の時だけ、荒い格子を使う～



単純に荒い格子を使っただけではうまくいかない

計算を高速化するための手法

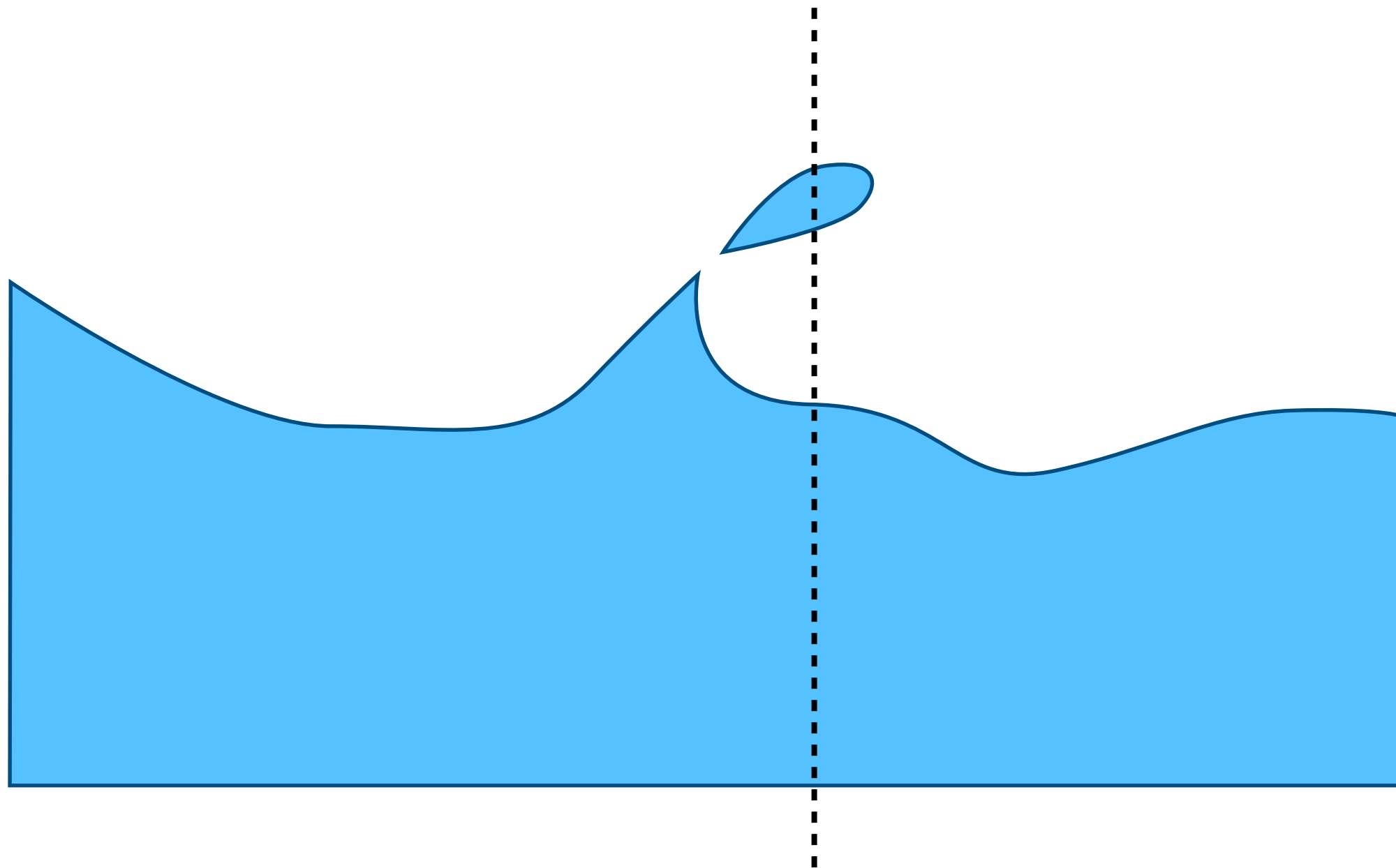
～圧力計算の時だけ、荒い格子を使う～



単純に荒い格子を使っただけではうまくいかない

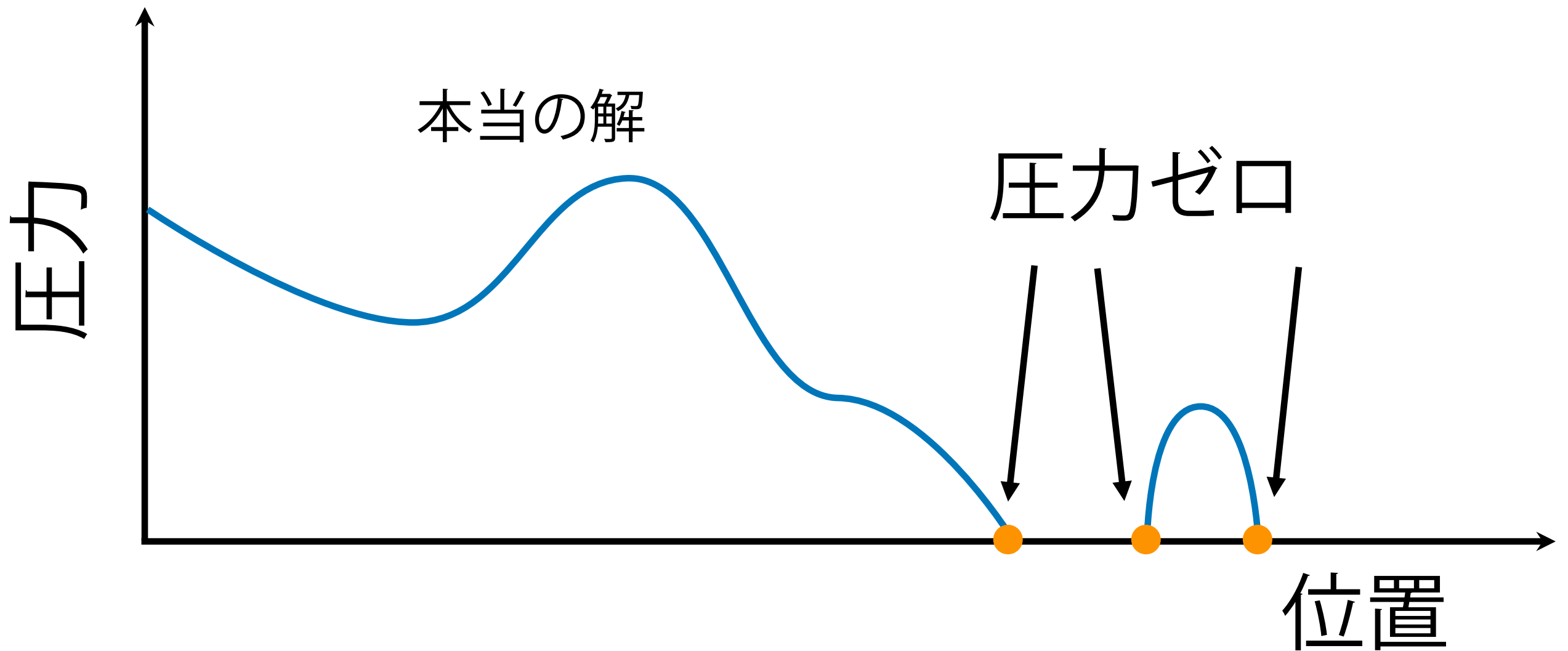
計算を高速化するための手法

～圧力計算の時だけ、荒い格子を使う～



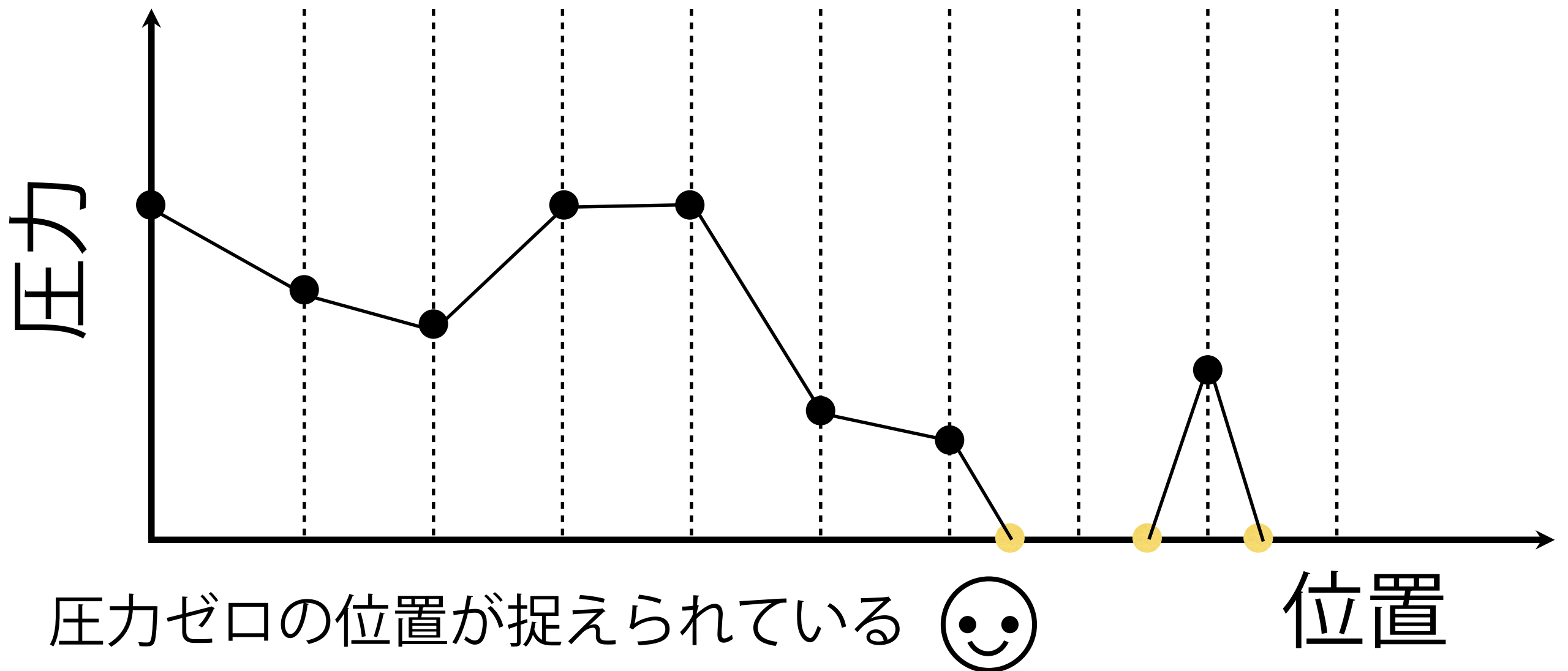
計算を高速化するための手法

～圧力計算の時だけ、荒い格子を使う～



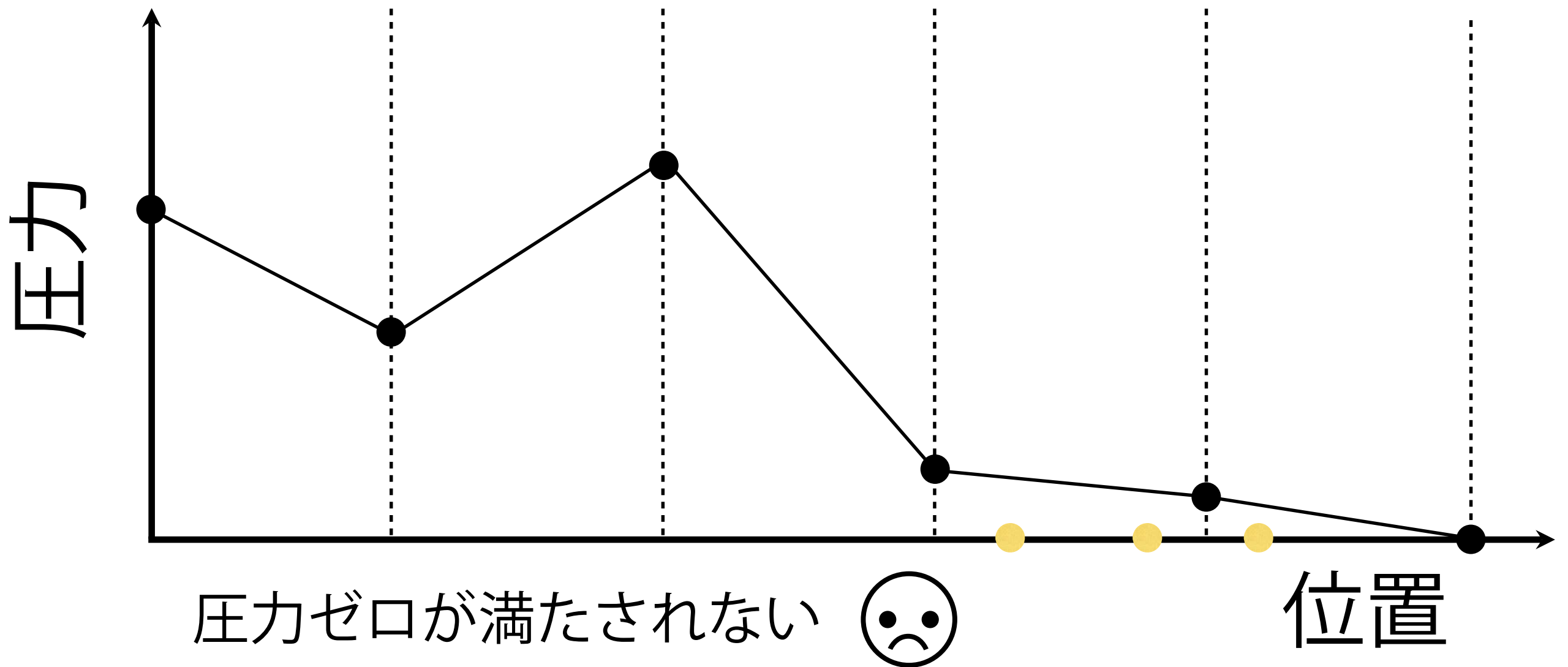
計算を高速化するための手法

～圧力計算の時だけ、荒い格子を使う～



計算を高速化するための手法

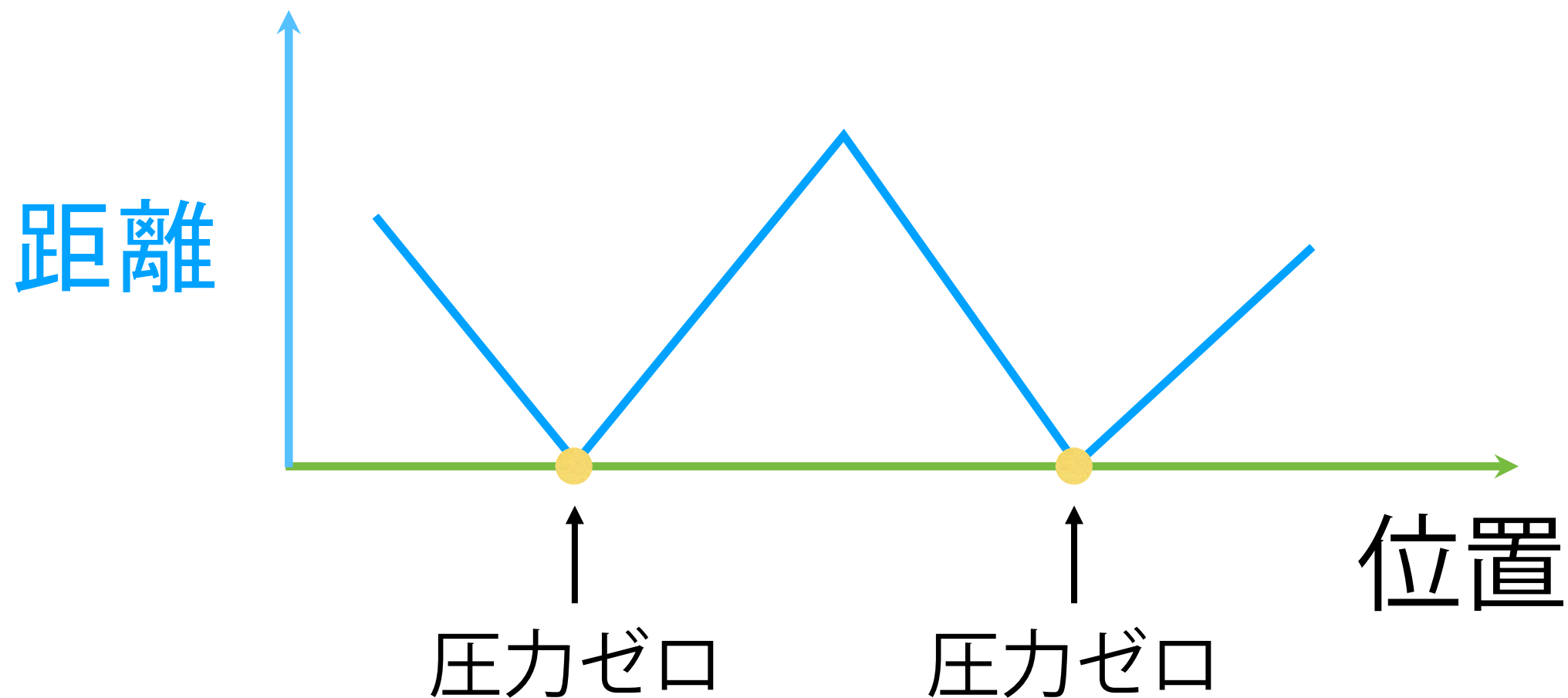
～圧力計算の時だけ、荒い格子を使う～



計算を高速化するための手法

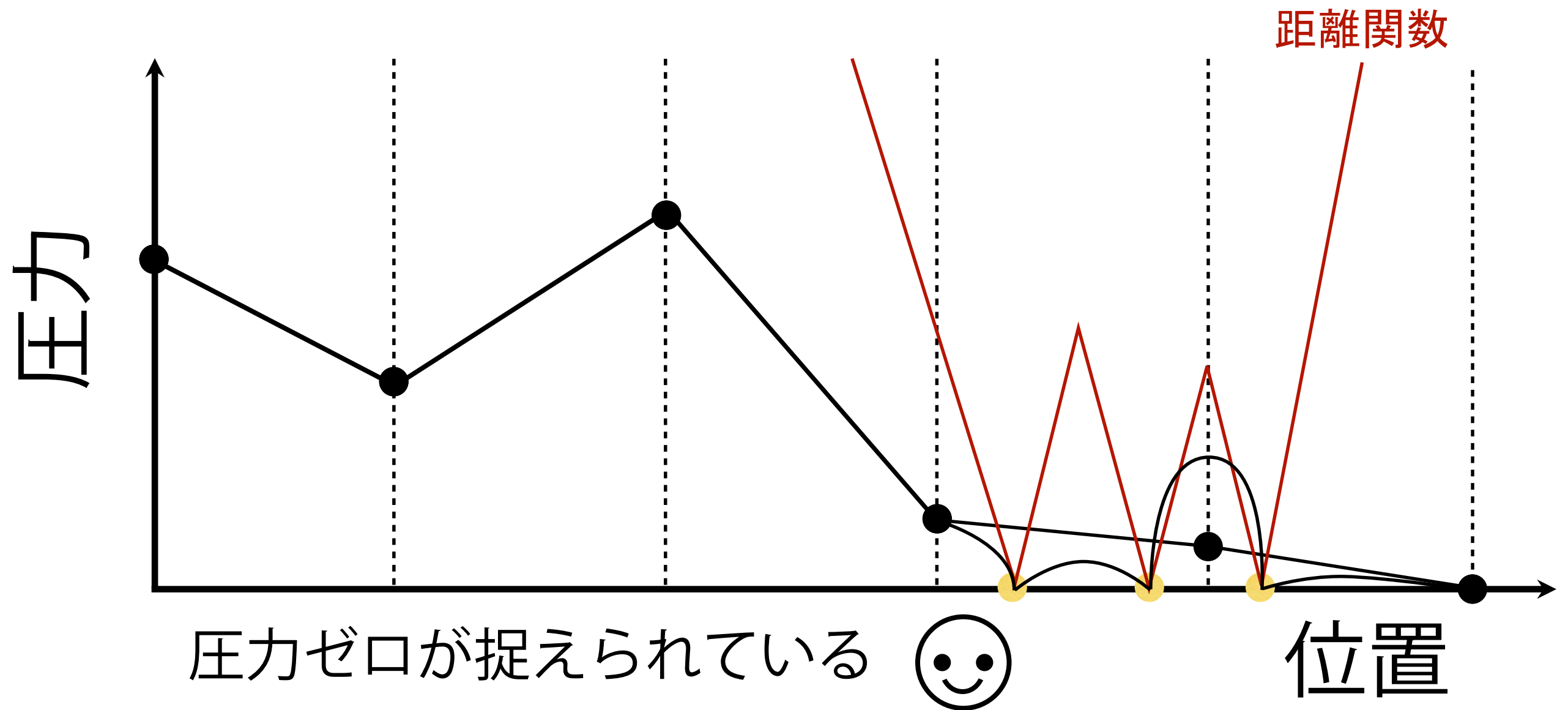
～圧力計算の時だけ、荒い格子を使う～

$$\text{圧力} = \text{距離} \times \text{荒い格子の圧力}$$



計算を高速化するための手法

～圧力計算の時だけ、荒い格子を使う～



計算を高速化するための手法

～計算例～

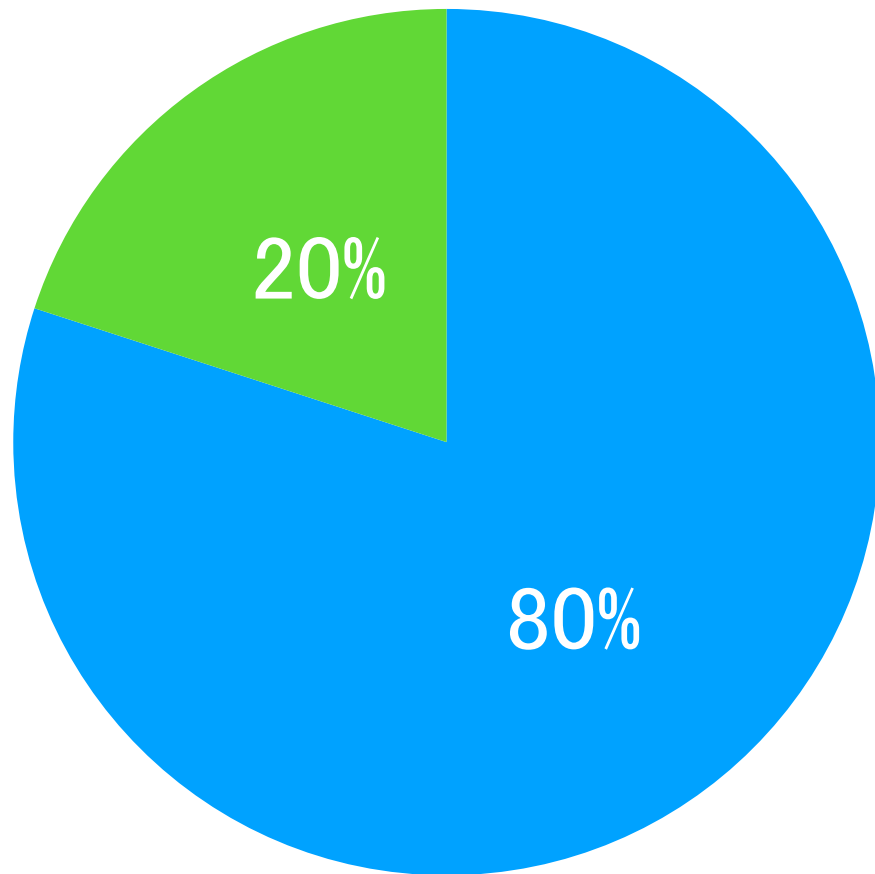


16^3 の格子・圧力計算が11倍高速に

計算を高速化するための手法

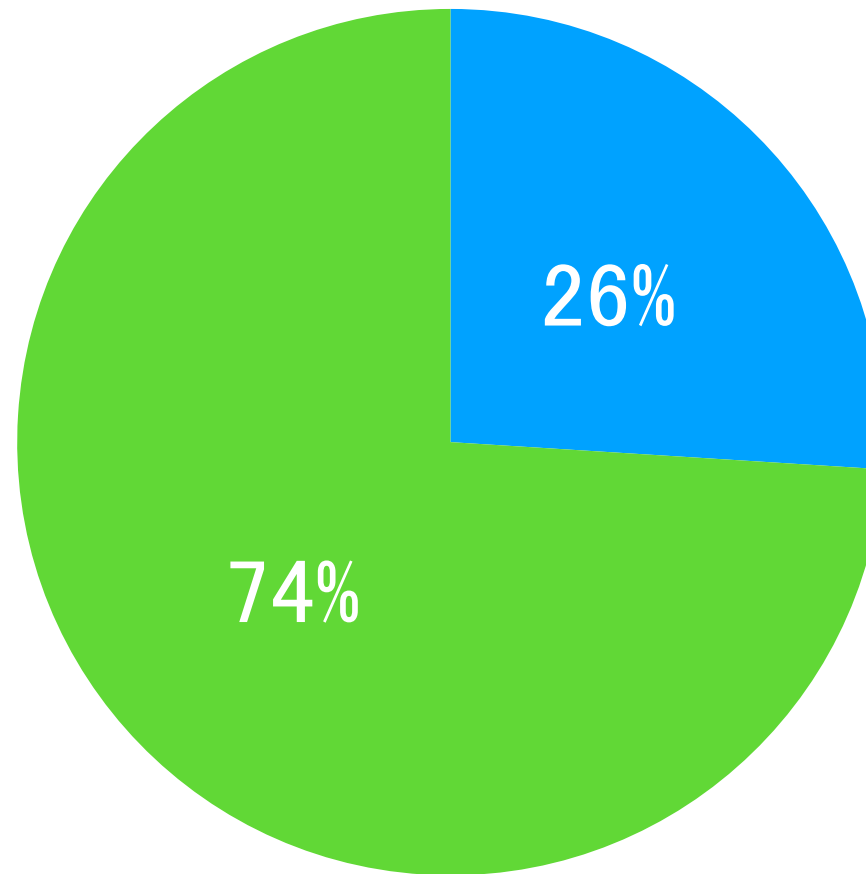
～計算例～

6分

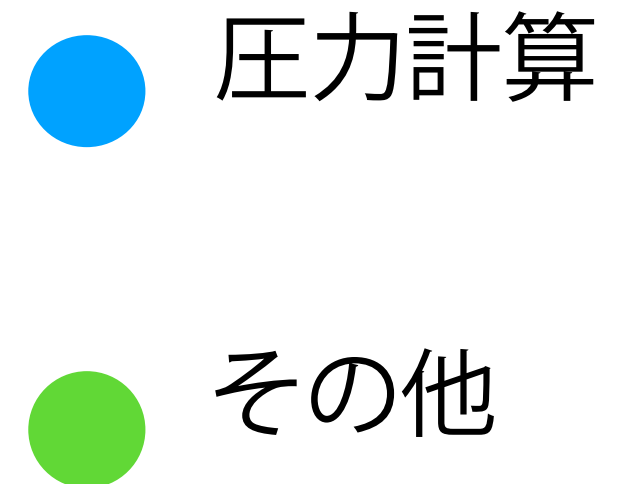


従来手法

1.4分



提案手法



計算を高速化するための手法

～計算例～



Factor of 2^3



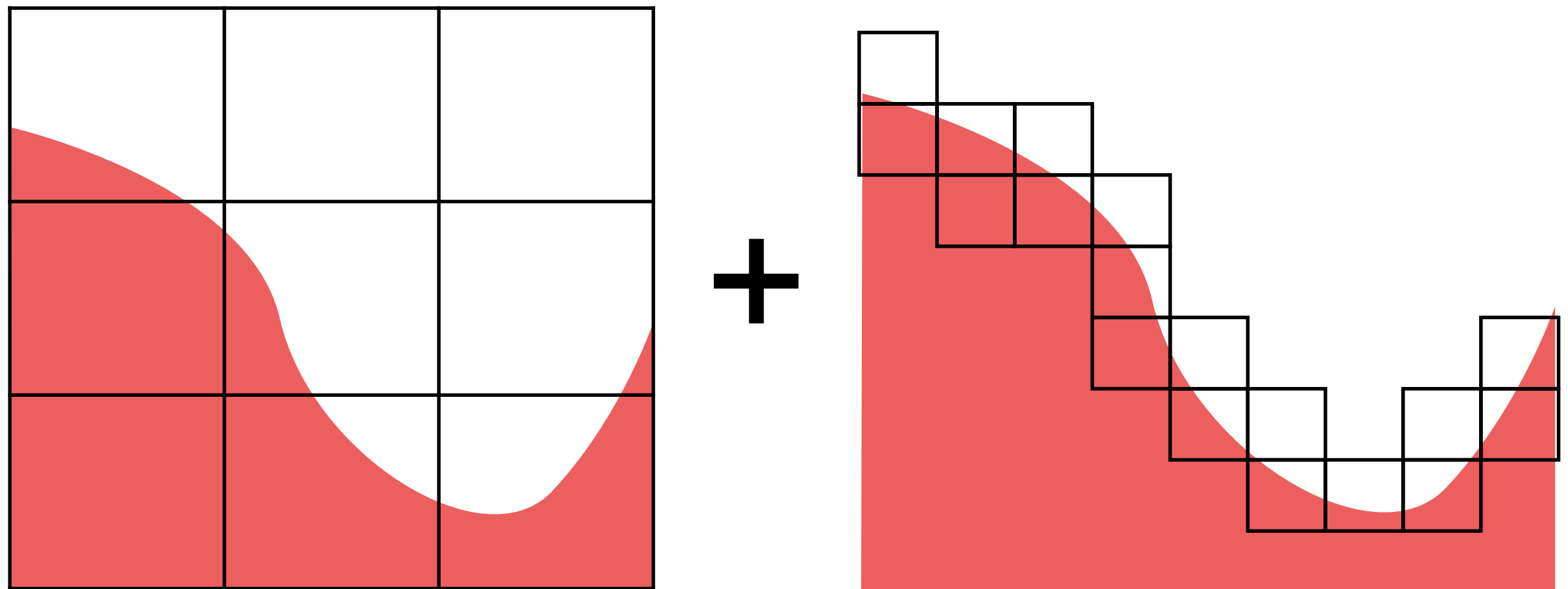
Factor of 8^3



Factor of 32^3

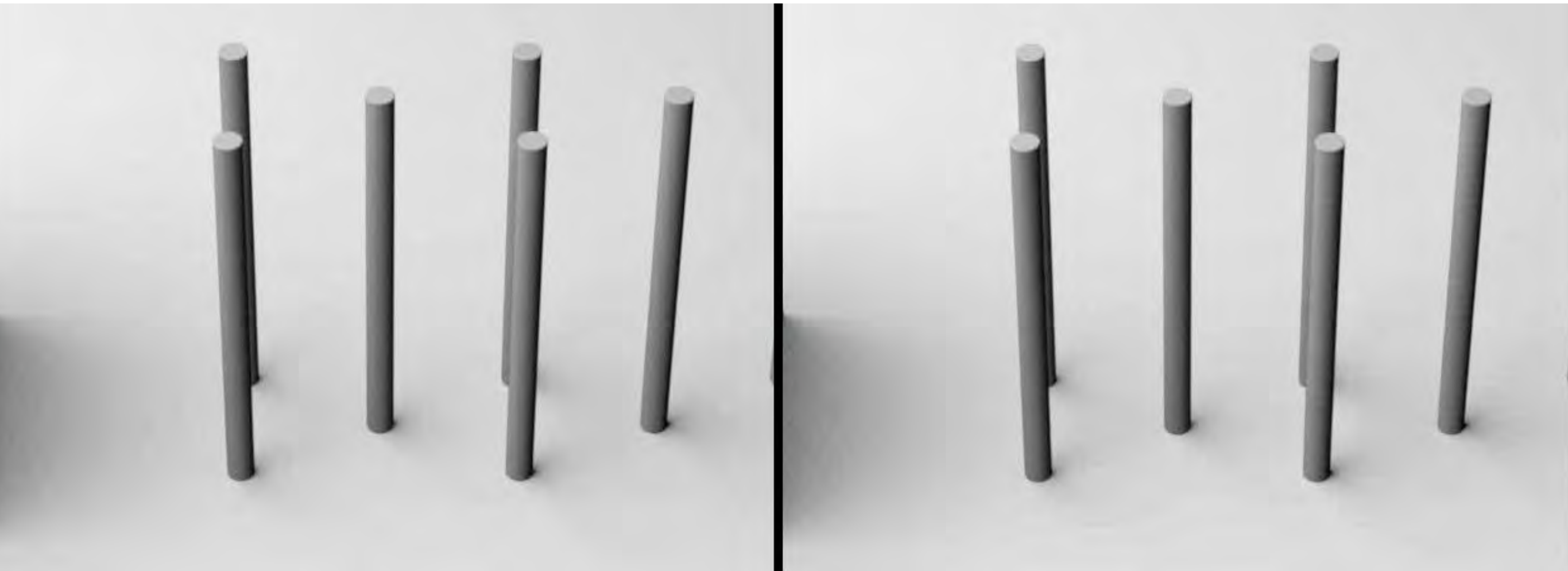
計算を高速化するための手法

～部分的に精度を上げる～



計算を高速化するための手法

～部分的に精度を上げる～



粗い格子のみ

物体付近のみ精度を
上げたもの

水の形状をもっと自然に再現する研究

水の形状をもっと自然に再現する研究



複雑で細かな形状

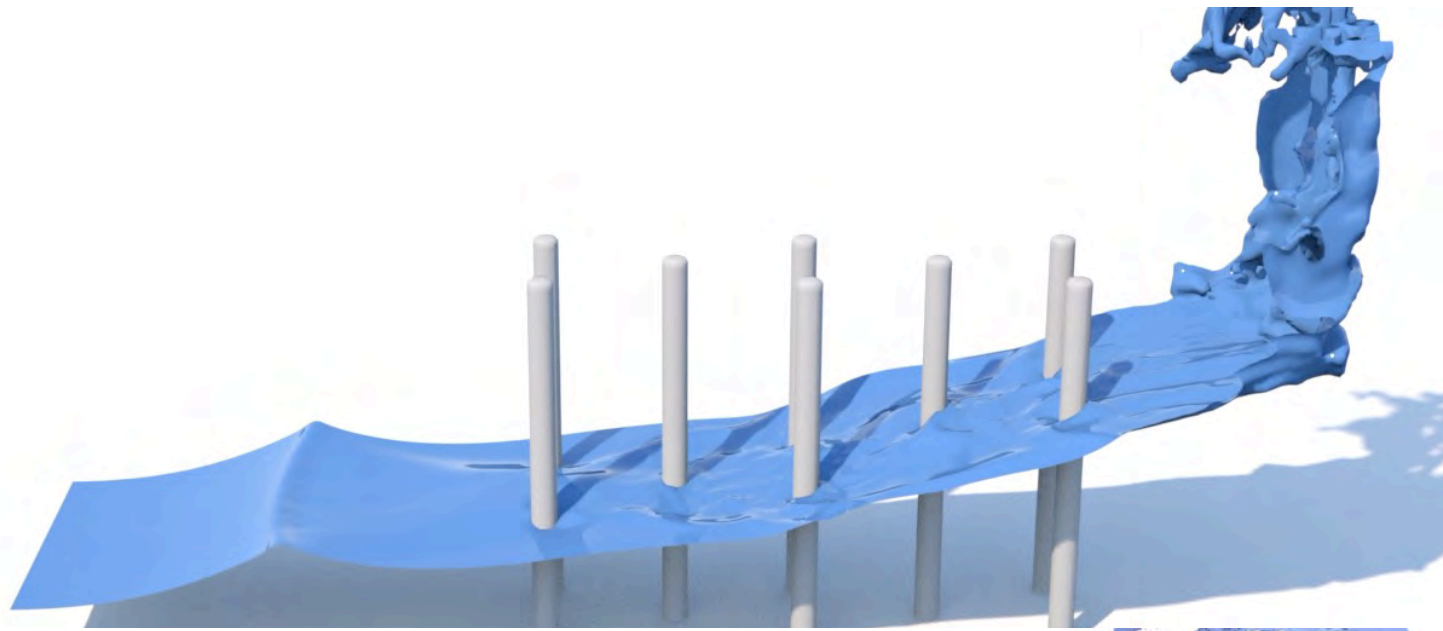
<https://www.flickr.com/photos/javmorcas/6326542870/>

水の形状をもっと自然に再現する研究

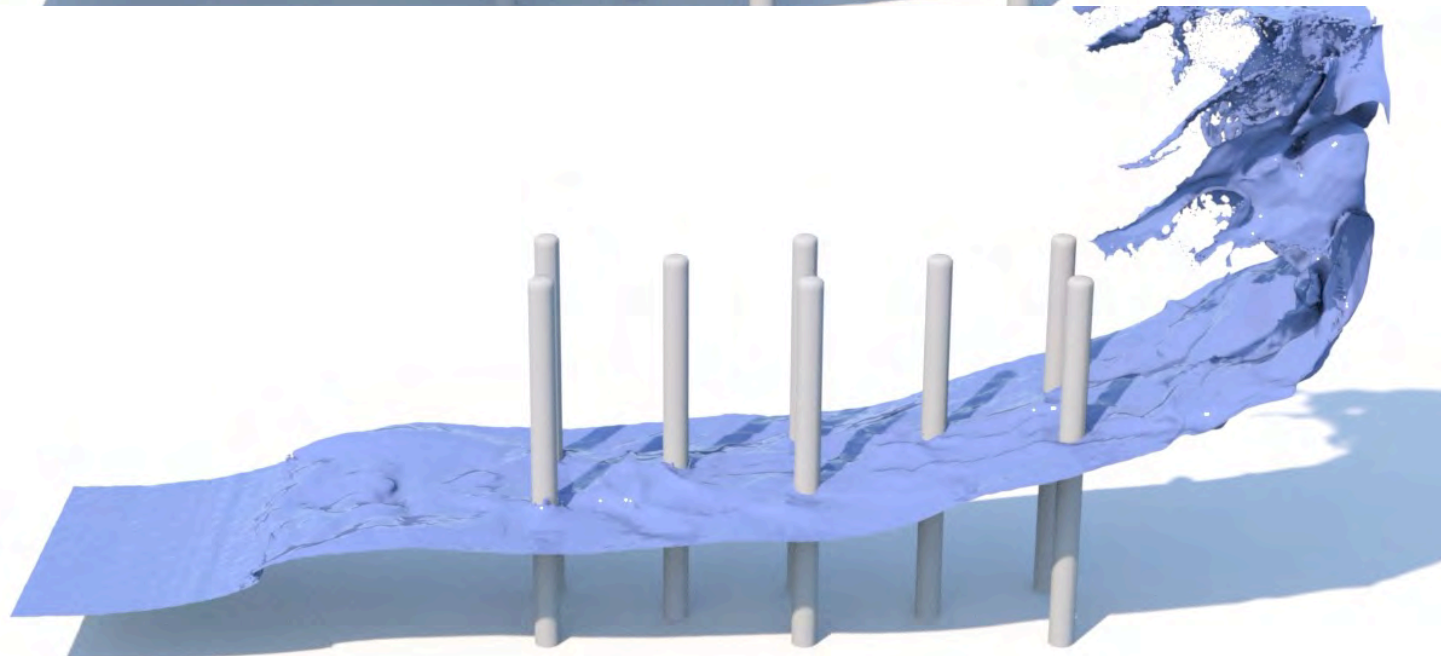
滑らかな形状

<https://www.flickr.com/photos/javmorcas/6326542870/>

水の形状をもっと自然に再現する研究



格子を用いた手法

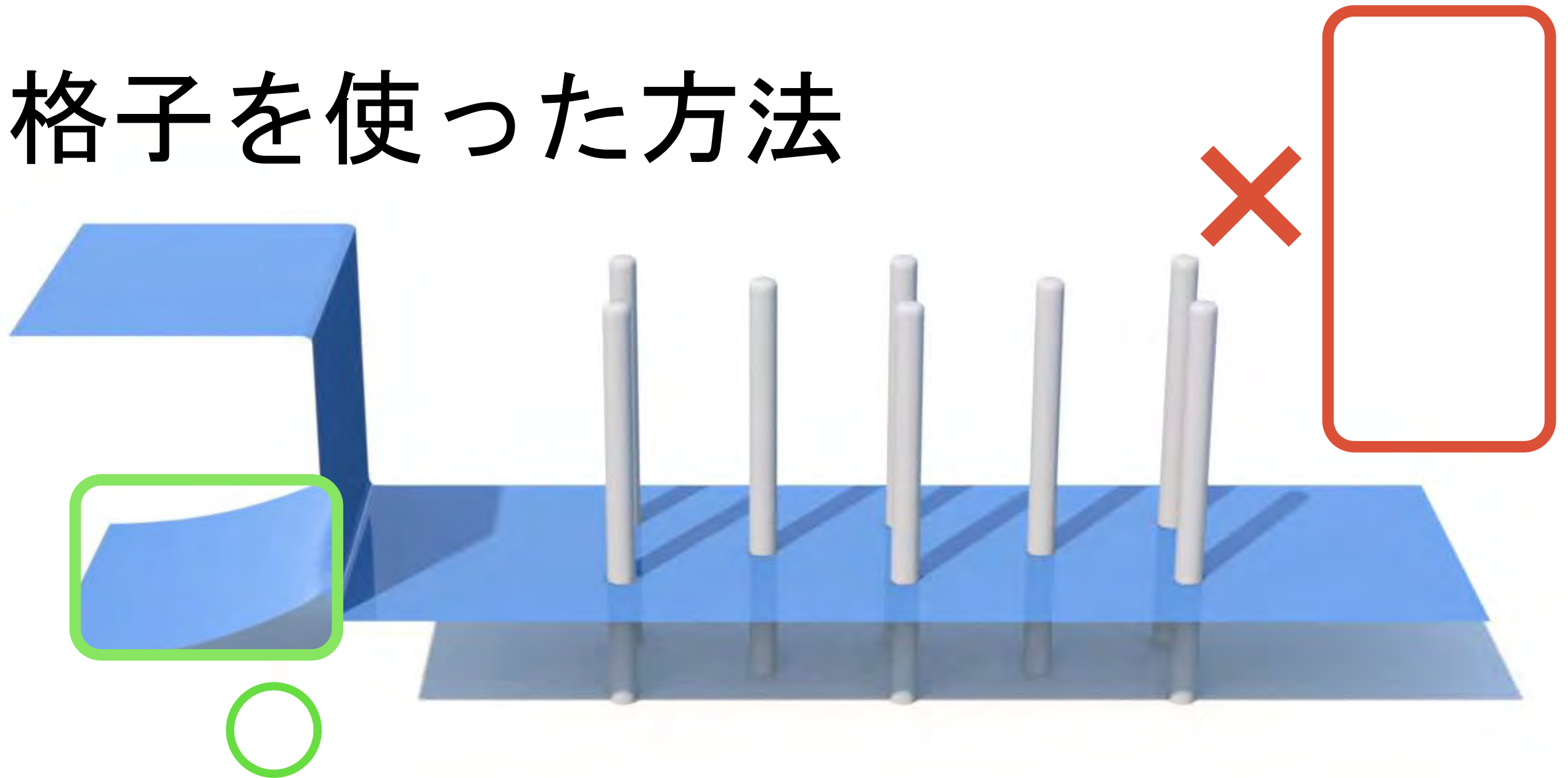


粒子を用いた手法

それぞれ一長一短がある

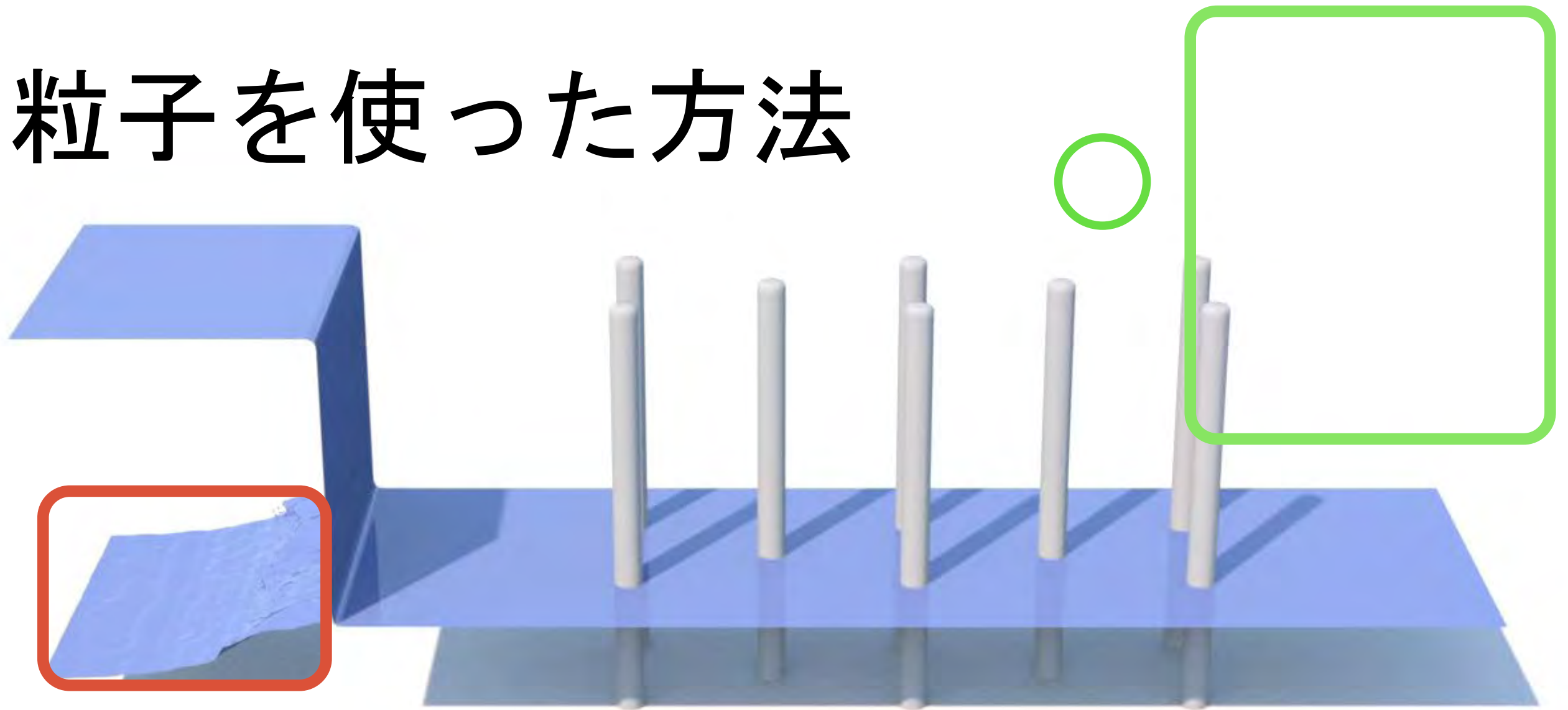
水の形状をもっと自然に再現する研究

格子を使った方法



水の形状をもっと自然に再現する研究

粒子を使った方法



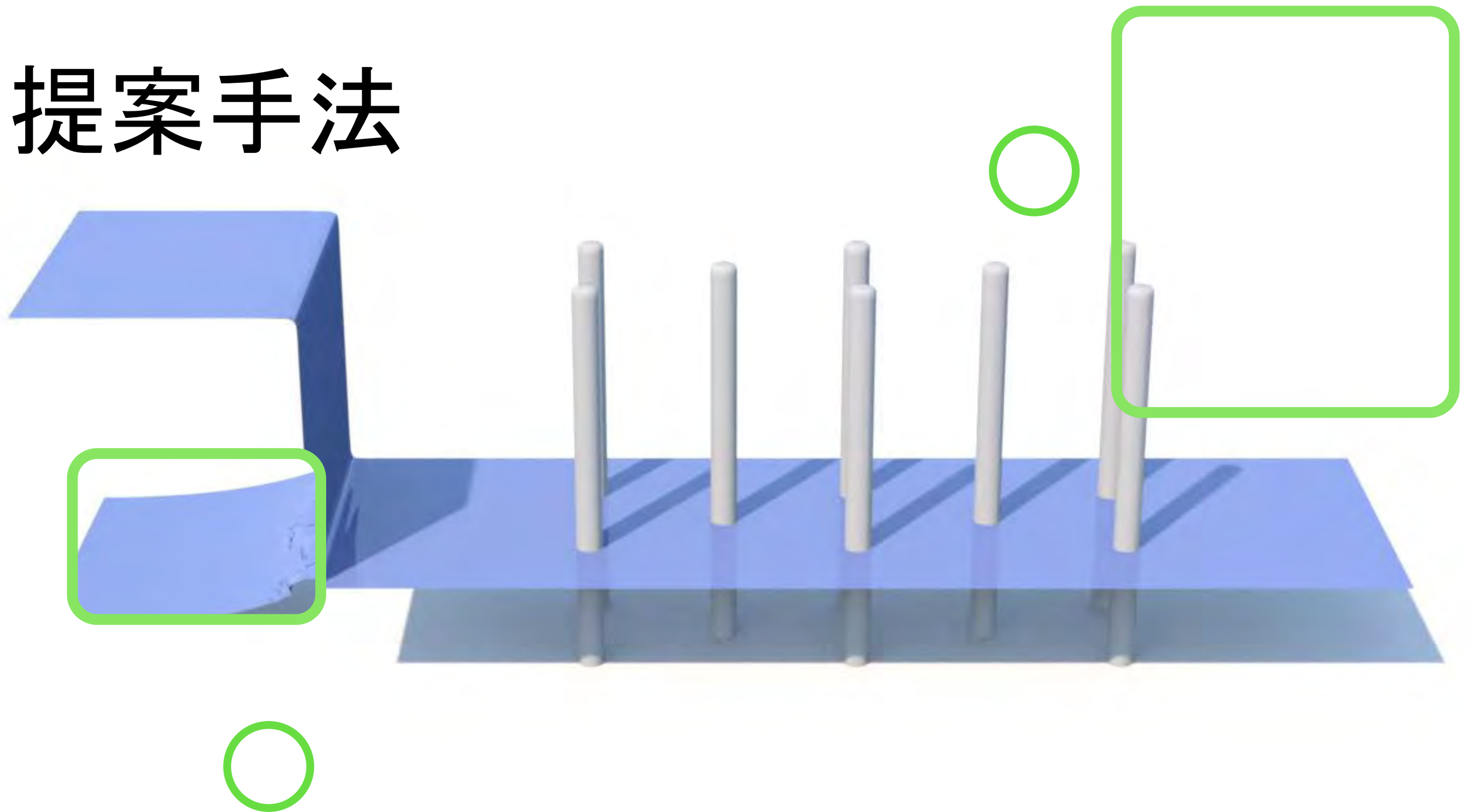
水の形状をもっと自然に再現する研究

	水しぶき	滑らかさ
格子法	✗	✓
粒子法	✓ ↓	✗
提案手法	✓	✓

<https://www.flickr.com/photos/javmorcas/6326542870/>

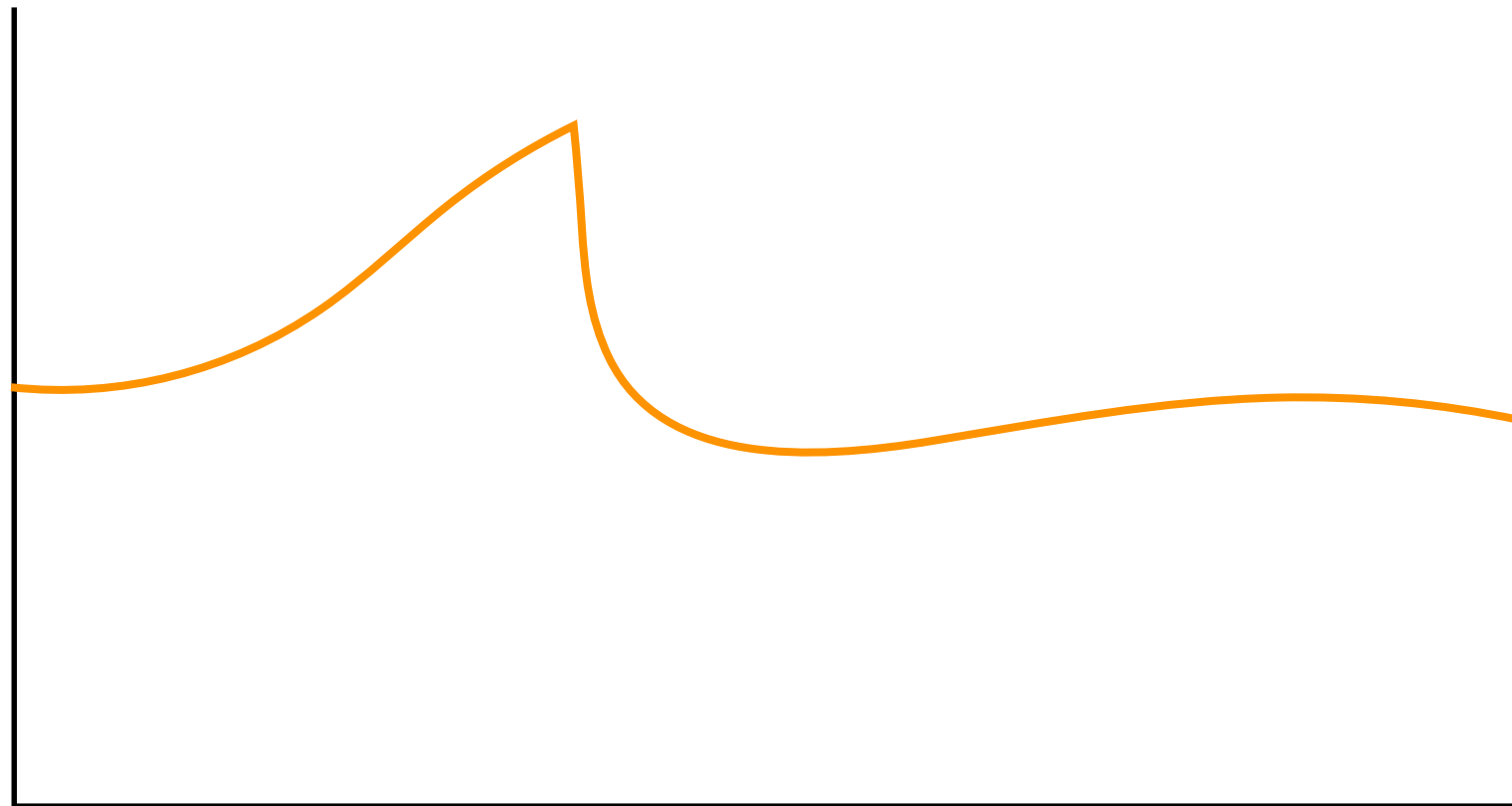
水の形状をもっと自然に再現する研究

提案手法



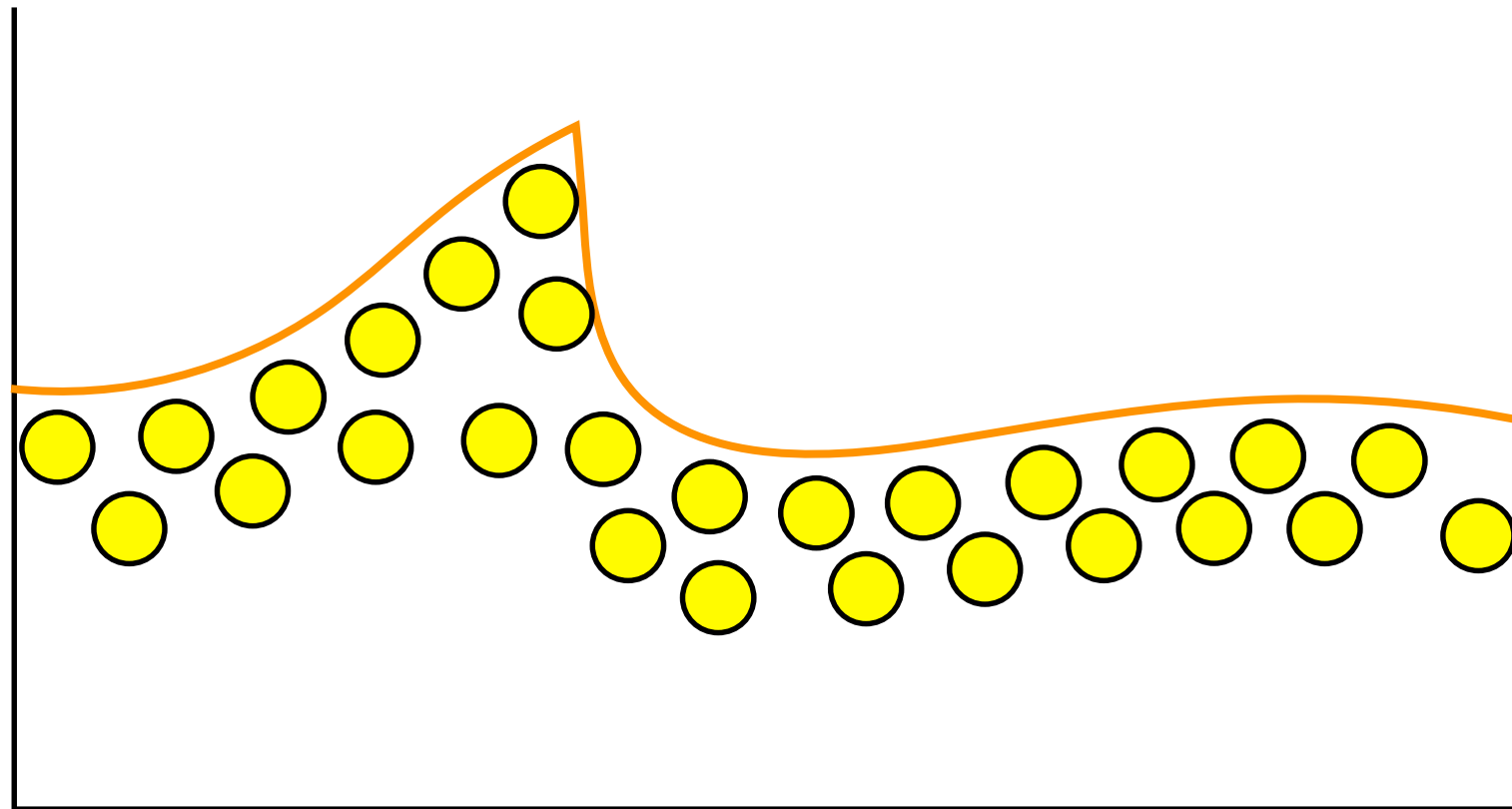
水の形状をもっと自然に再現する研究 ～従来手法の問題～

格子法を用いて、おおまかな水の形状
を計算する



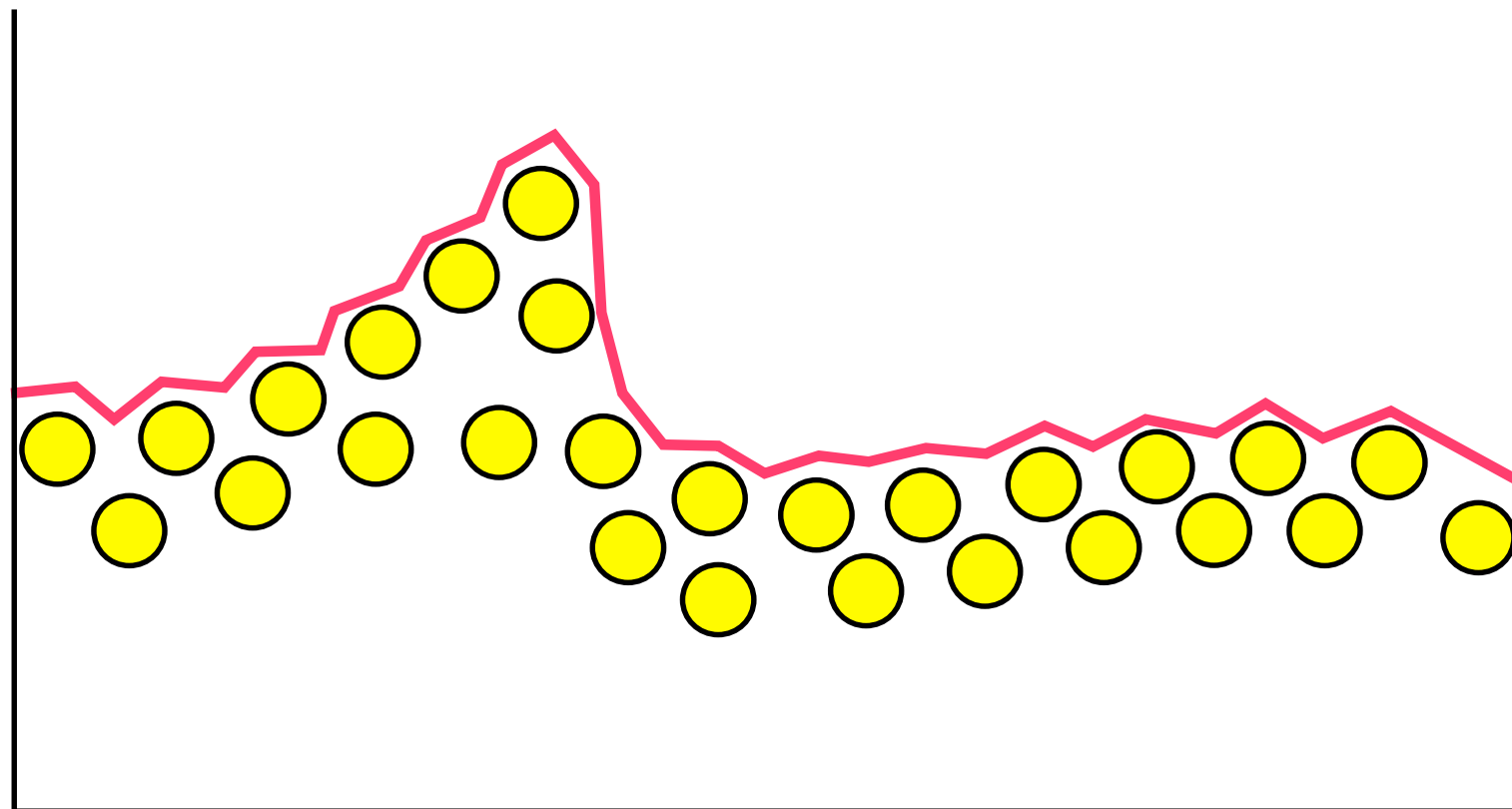
水の形状をもっと自然に再現する研究 ～従来手法の問題～

液体の表面に粒子を配置する



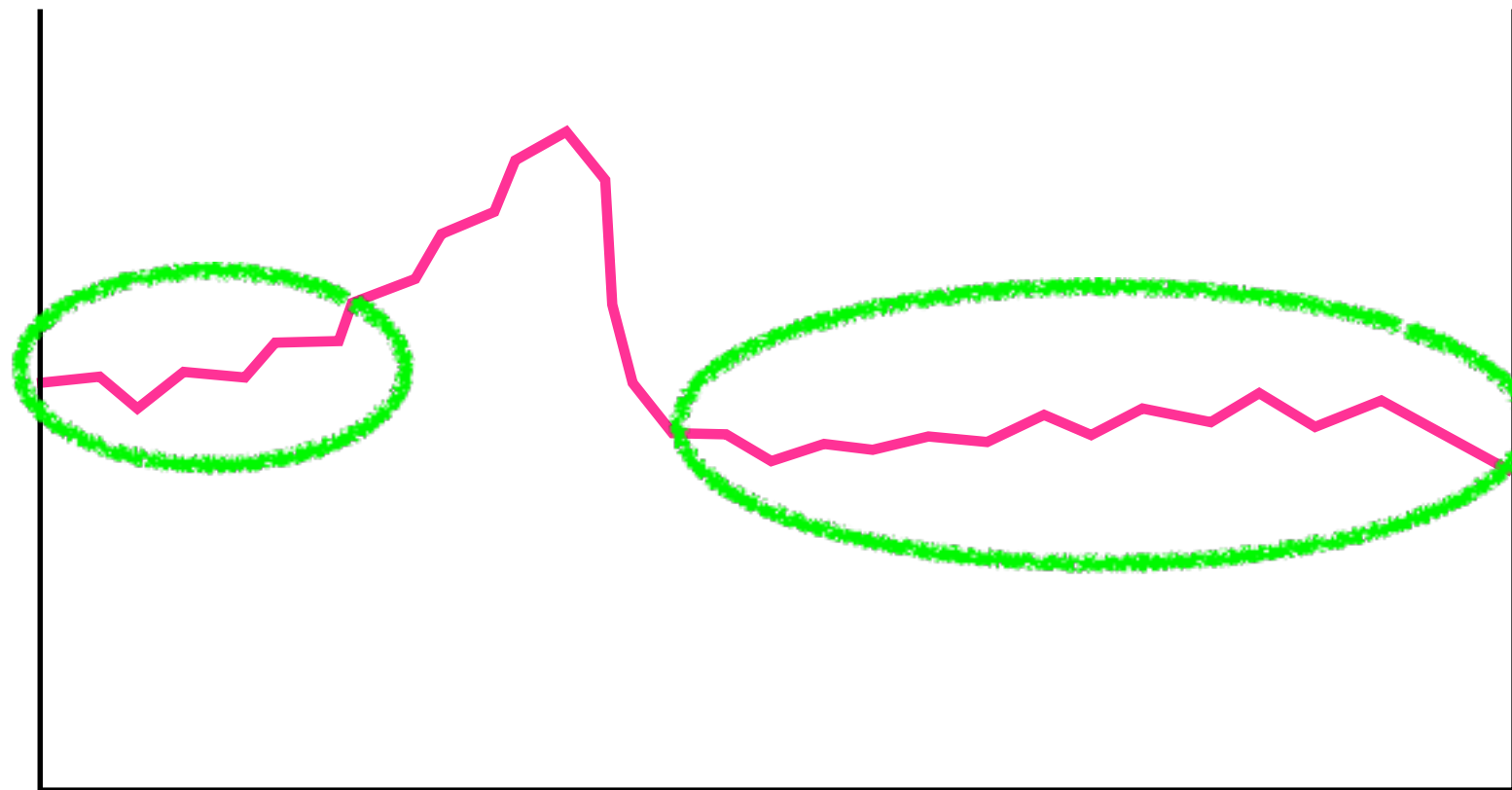
水の形状をもっと自然に再現する研究 ～従来手法の問題～

粒子の形状を計算して、それを水の
形状とする

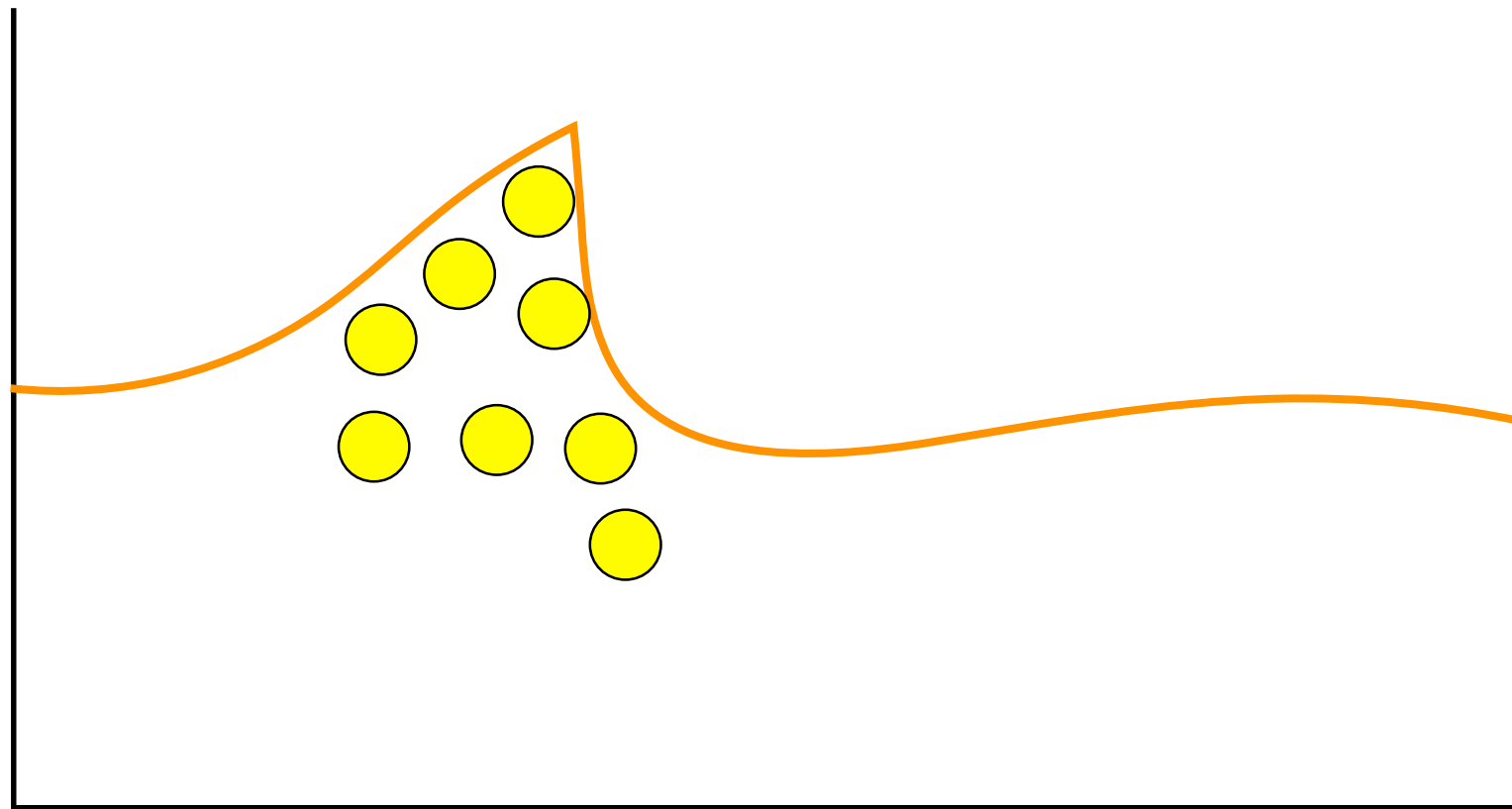


水の形状をもっと自然に再現する研究 ～従来手法の問題～

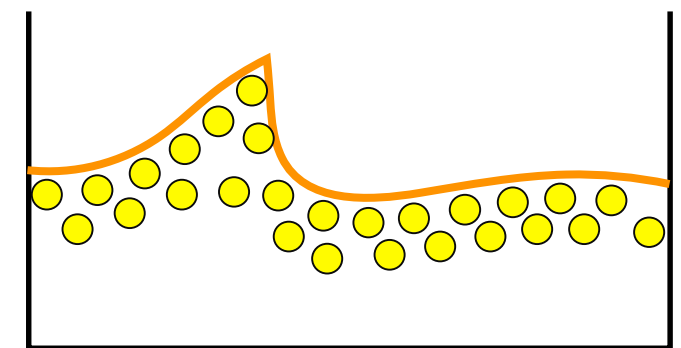
滑らかになって欲しい場所にノイズが発生してしまう



水の形状をもっと自然に再現する研究 ～提案手法～



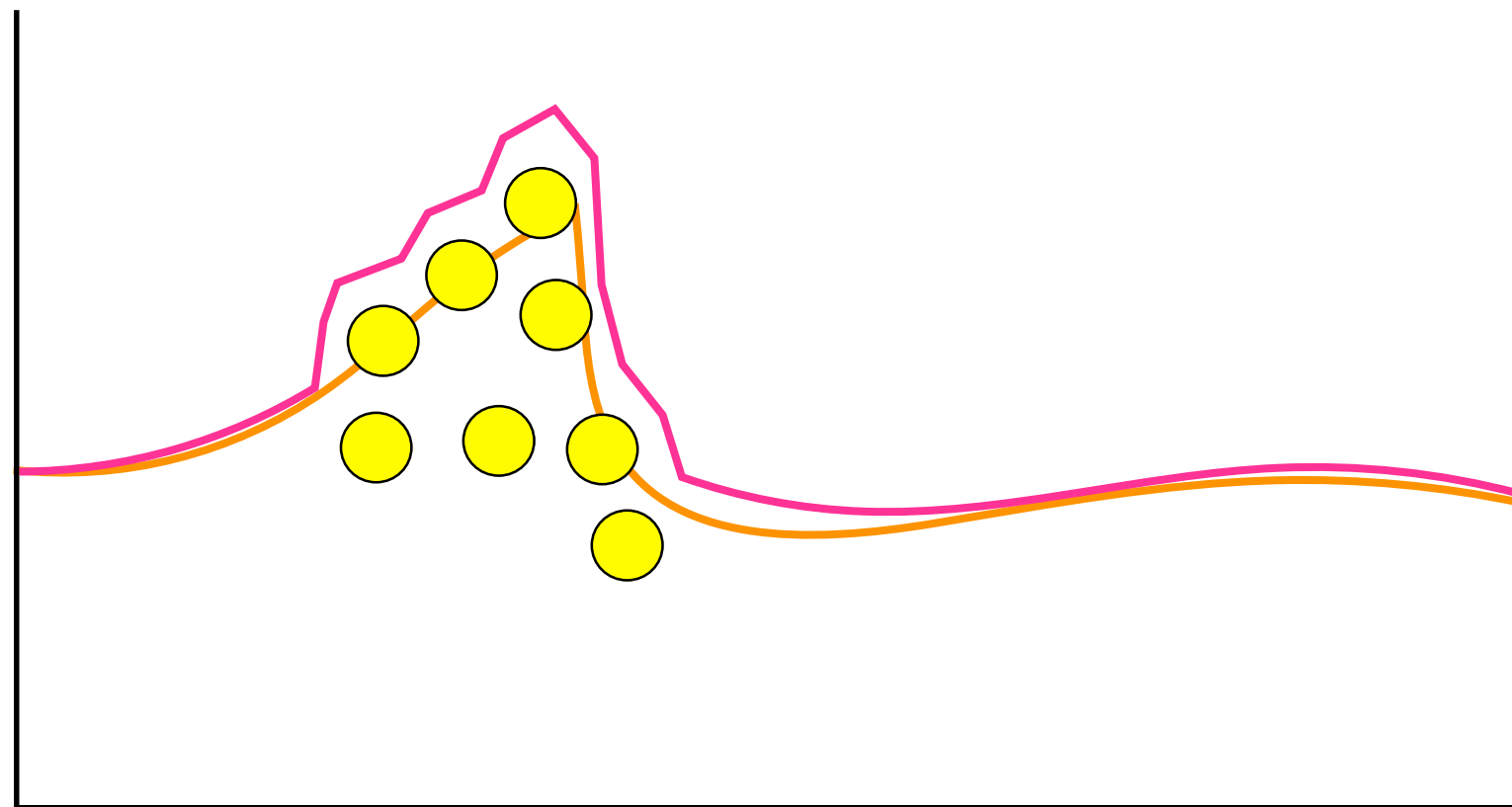
提案手法



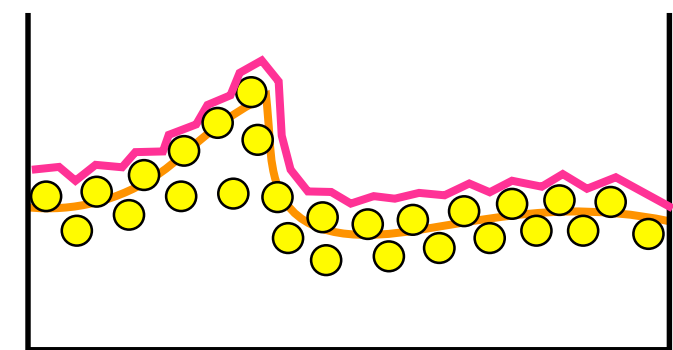
従来手法

水の形状をもっと自然に再現する研究

～提案手法～



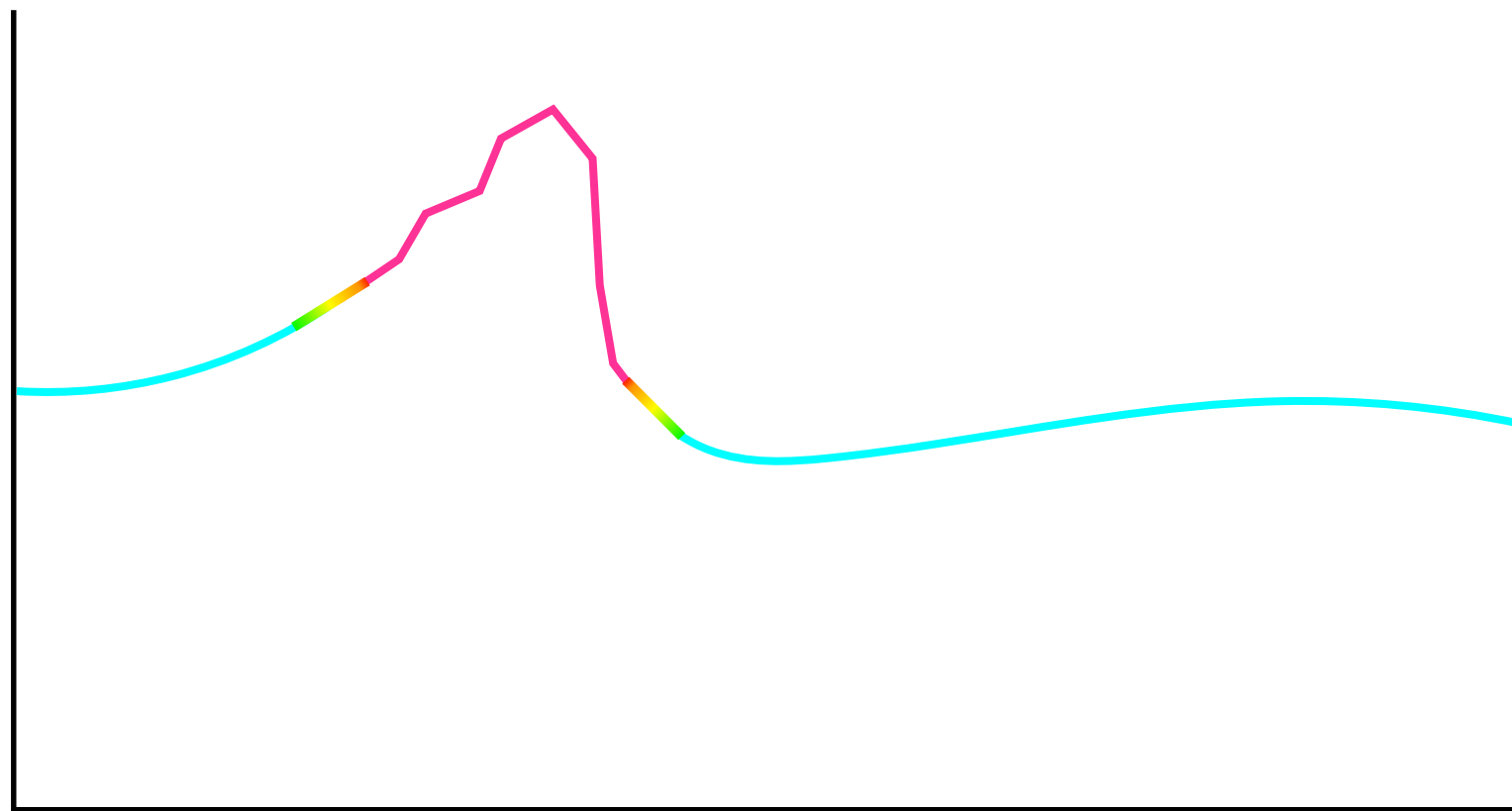
提案手法



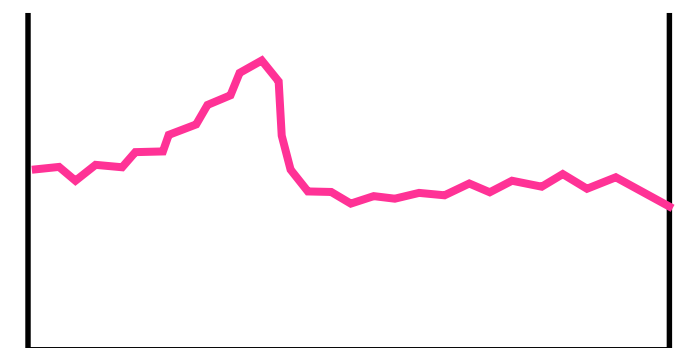
従来手法

水の形状をもっと自然に再現する研究 ～提案手法～

水しぶきと滑らかな界面を同時に表現できる

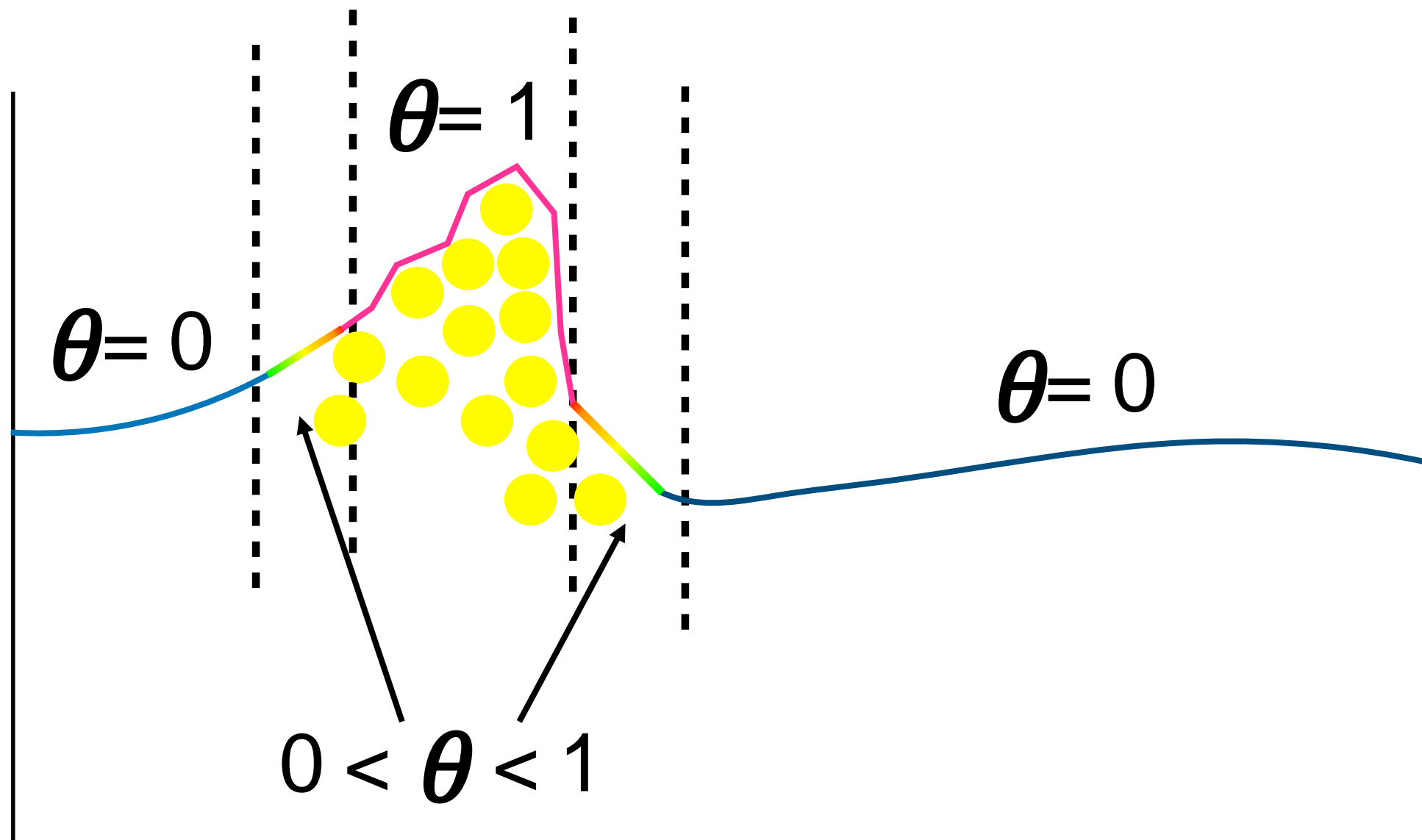


提案手法



従来手法

水の形状をもっと自然に再現する研究 ～提案手法～



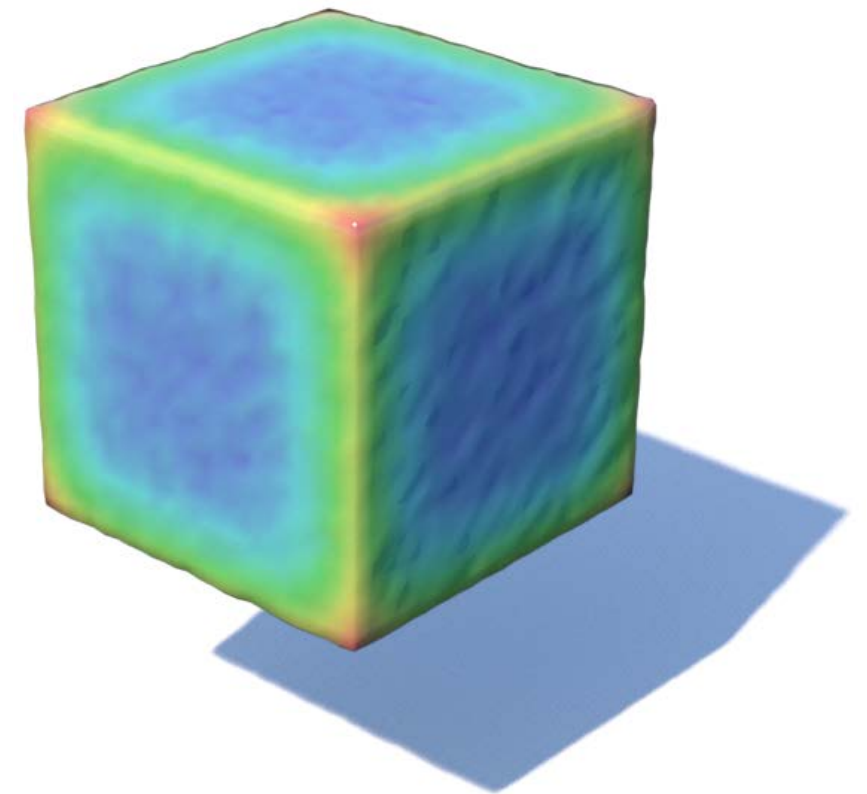
境界を滑らかにして、繋ぎ目が目立たないようにする

水の形状をもっと自然に再現する研究

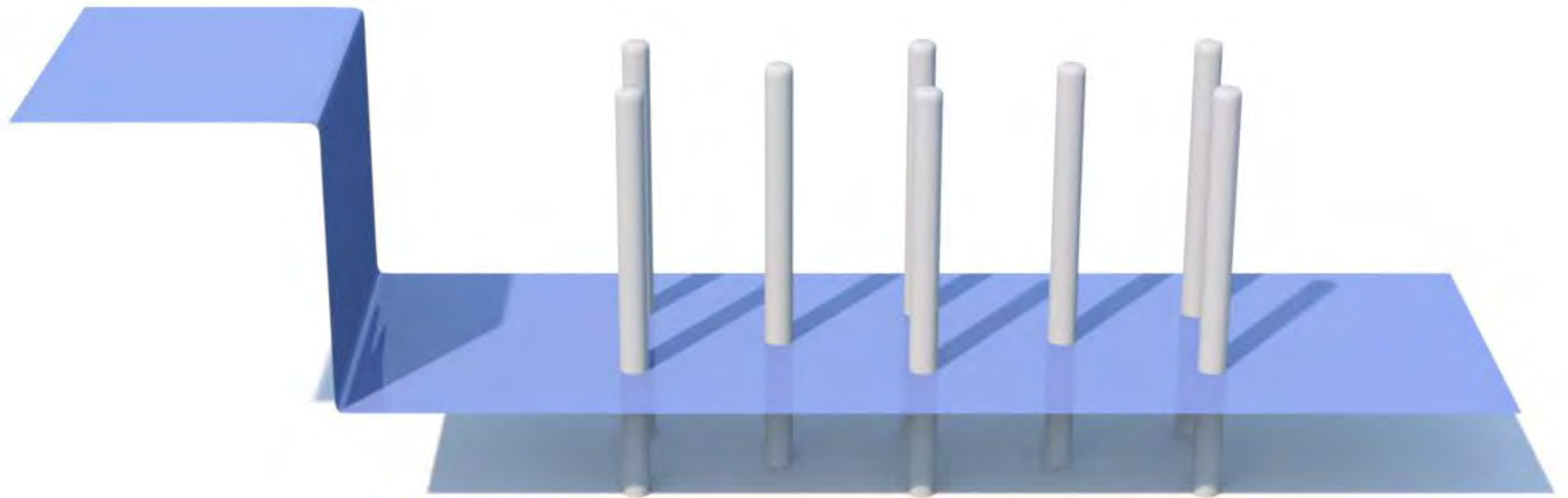
～提案手法～

どこに粒子を撒くか？

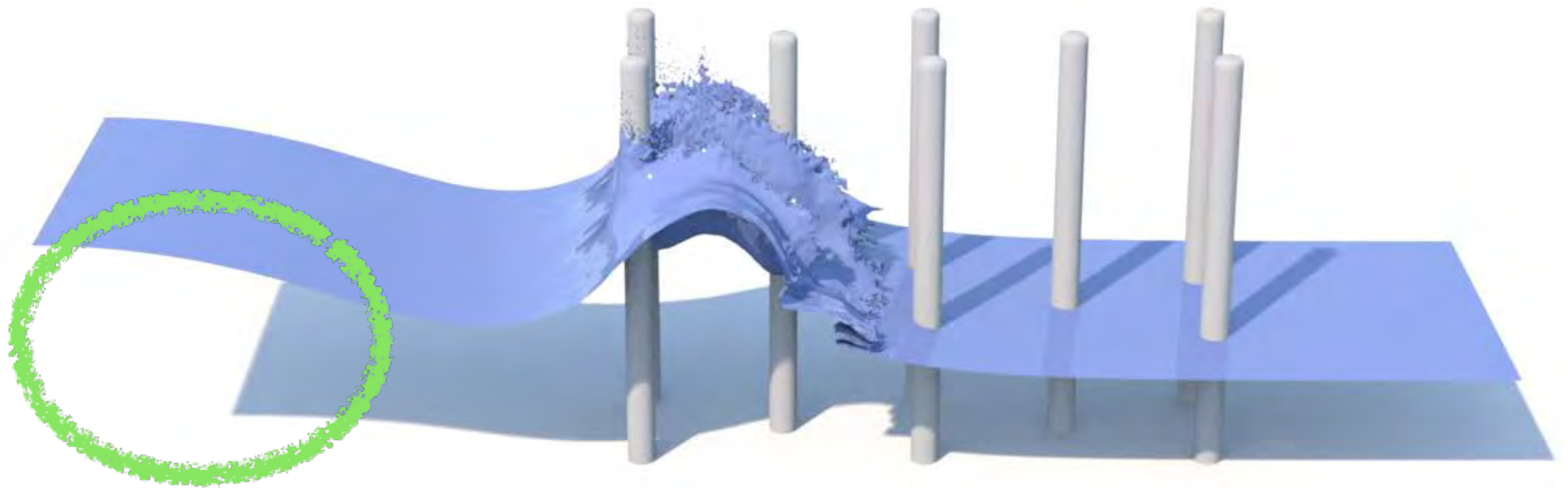
- 形状が尖っている部分
- 流速が激しく変化している部分



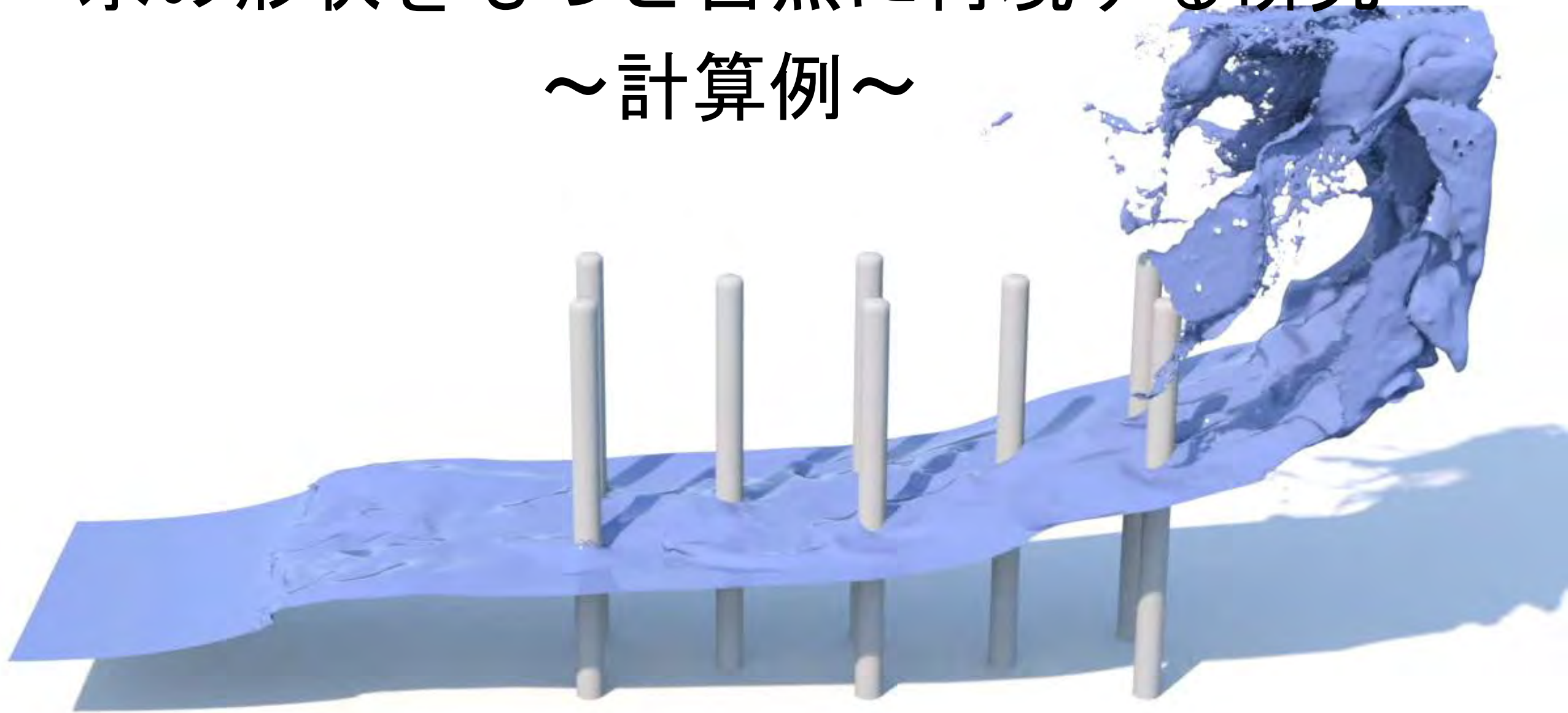
水の形状をもっと自然に再現する研究 ～計算例～



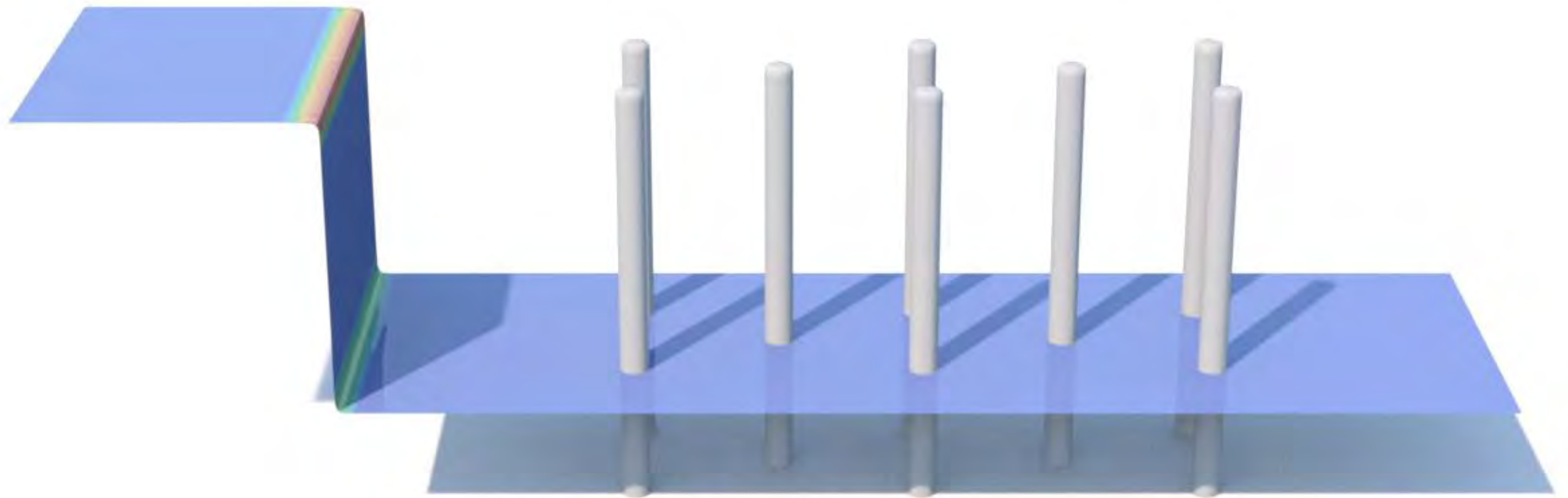
水の形状をもっと自然に再現する研究 ～計算例～



水の形状をもっと自然に再現する研究 ～計算例～



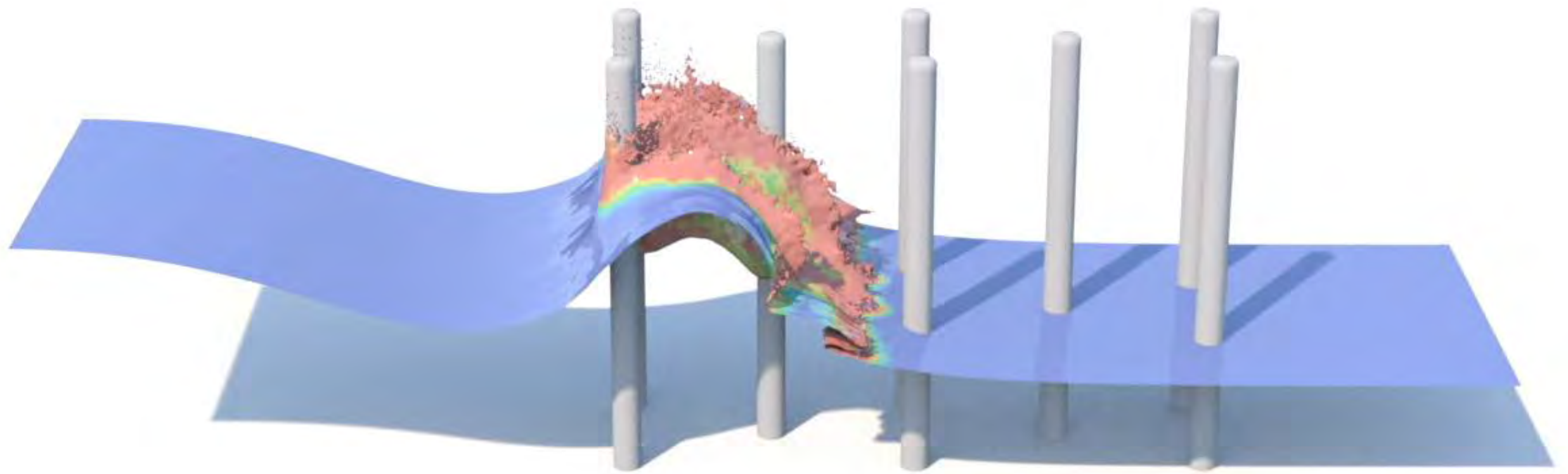
水の形状をもっと自然に再現する研究 ～計算例～



0% (格子法)

100%(粒子法)

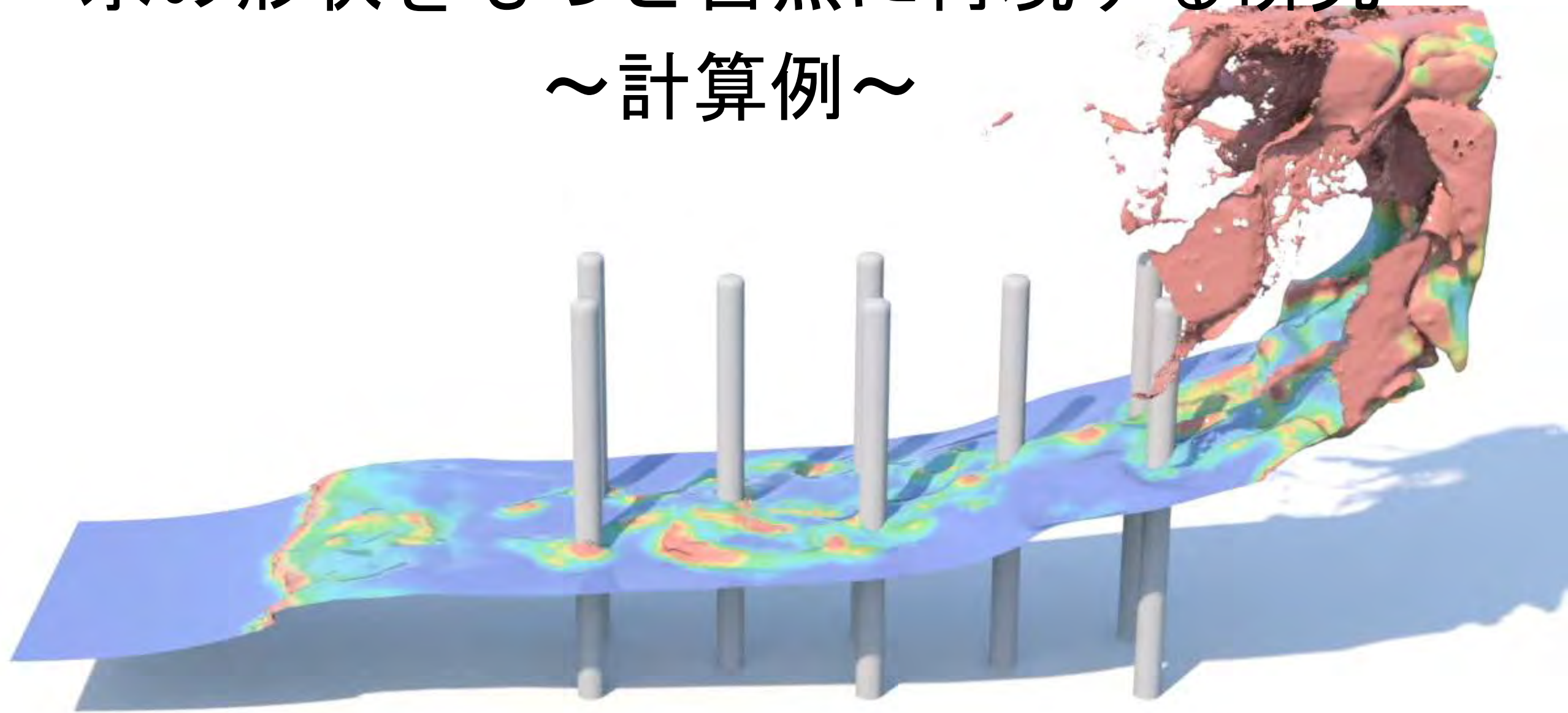
水の形状をもっと自然に再現する研究 ～計算例～



0% (格子法)

100%(粒子法)

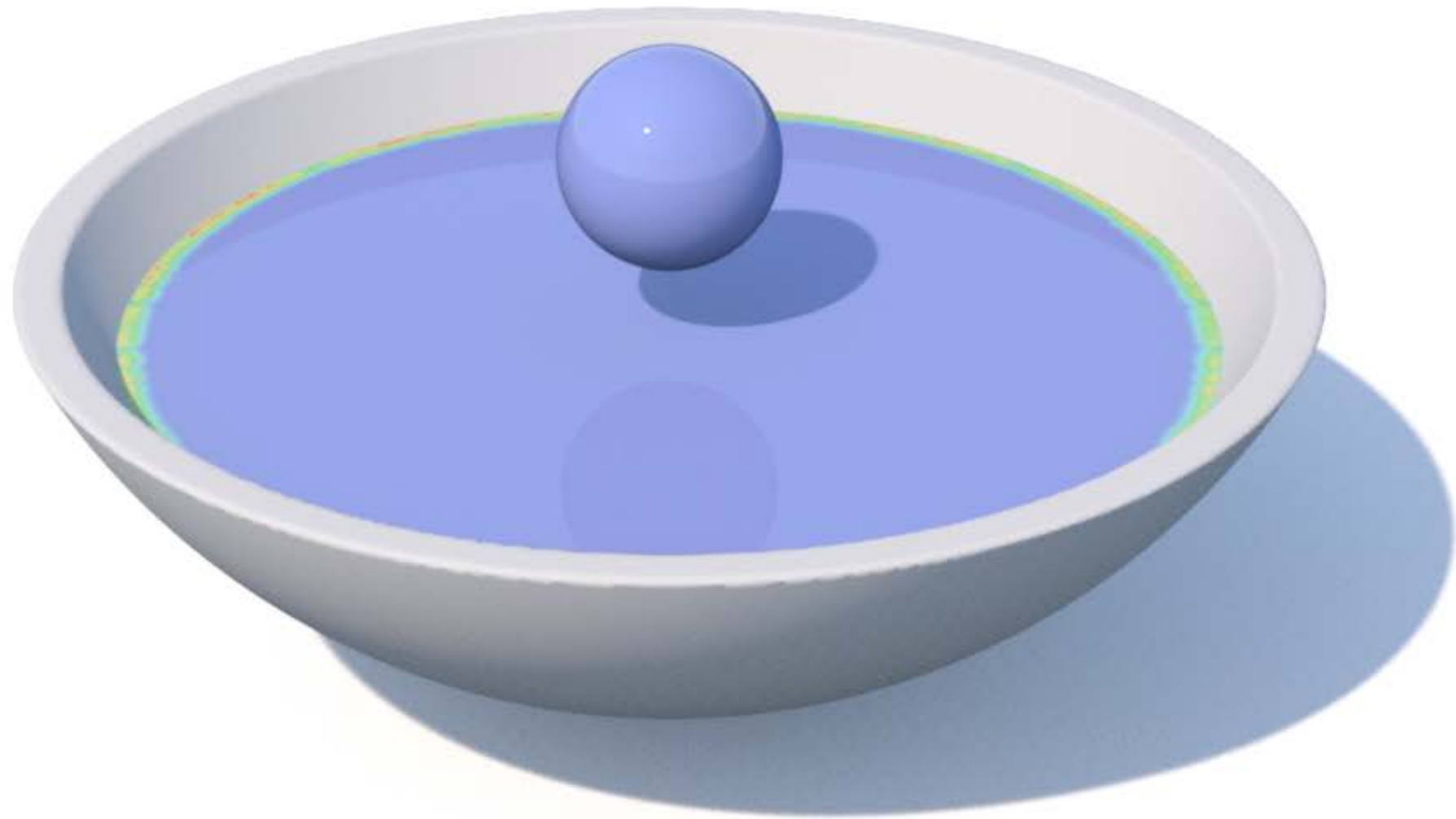
水の形状をもっと自然に再現する研究 ～計算例～



0% (格子法)

100%(粒子法)

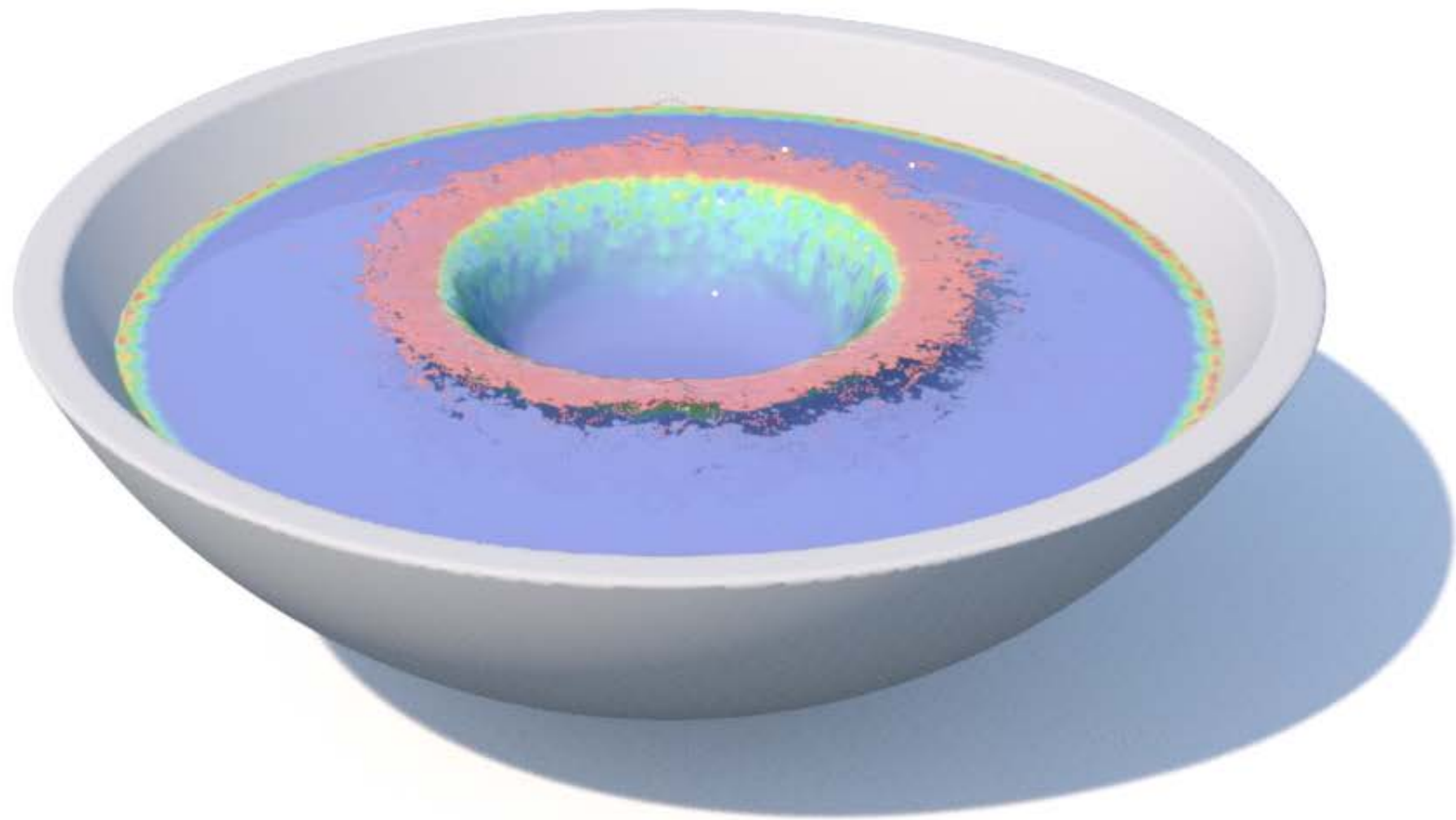
水の形状をもっと自然に再現する研究 ～計算例～



0% (格子法)

100%(粒子法)

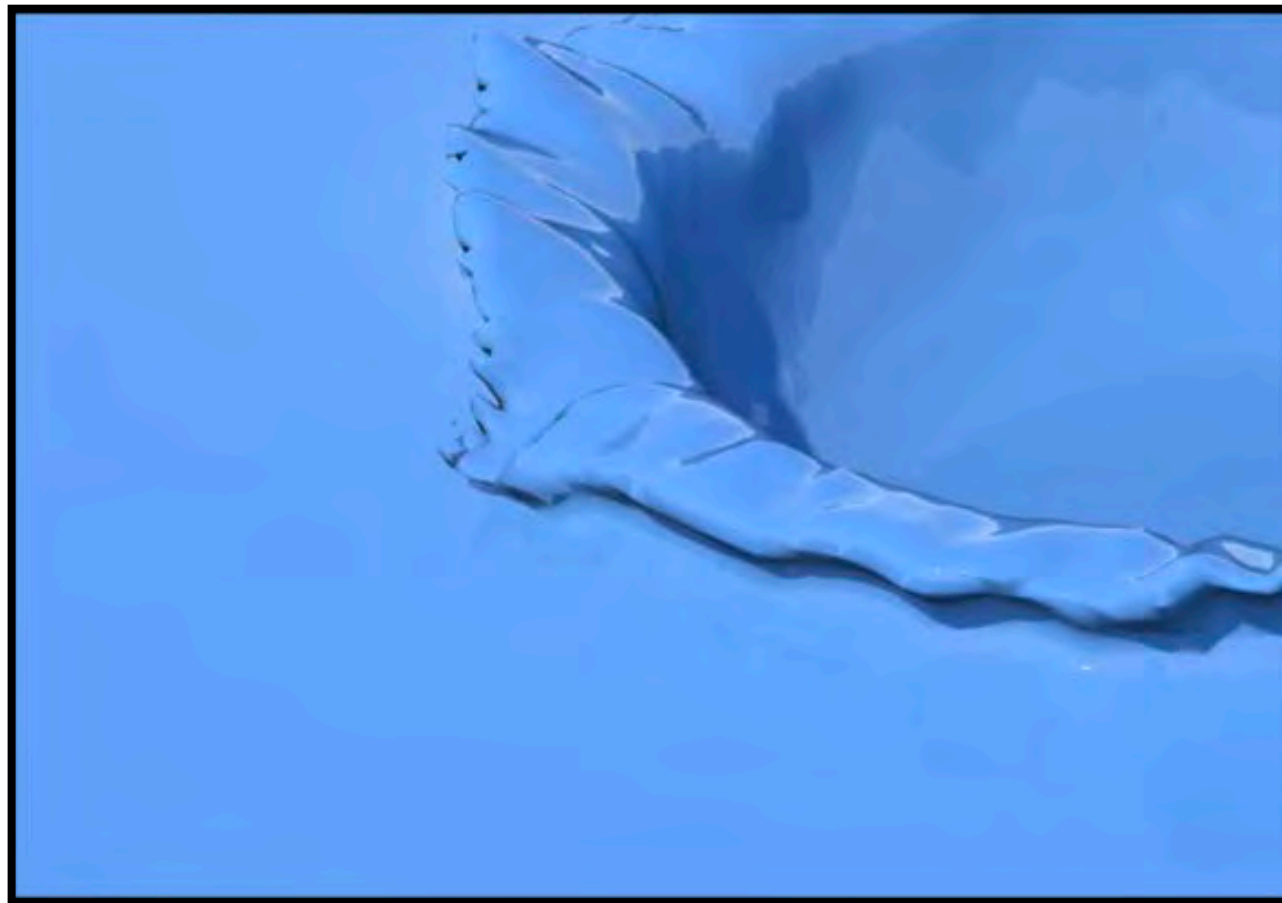
水の形状をもっと自然に再現する研究 ～計算例～



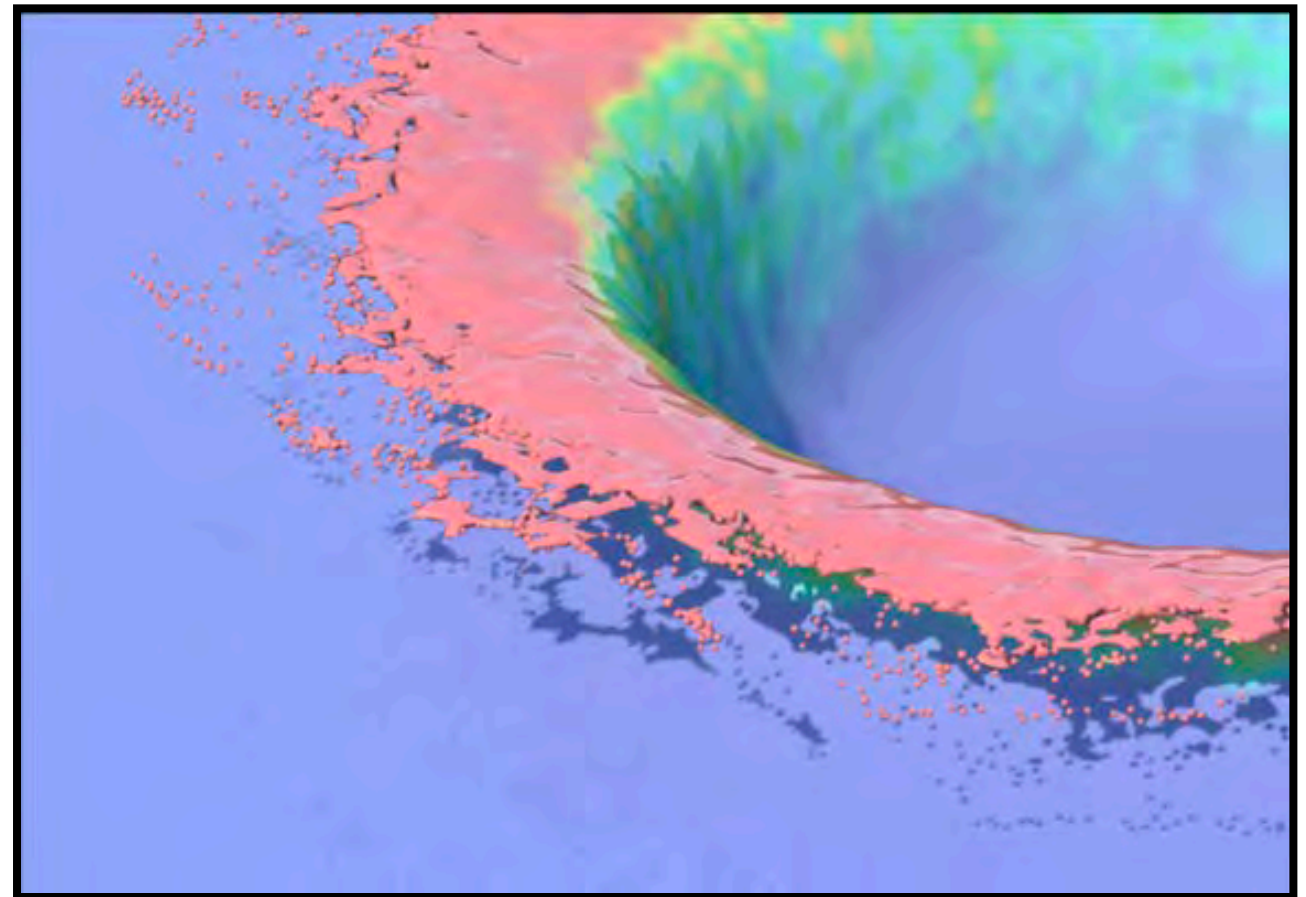
0% (格子法)

100%(粒子法)

水の形状をもっと自然に再現する研究 ～計算例～



格子法

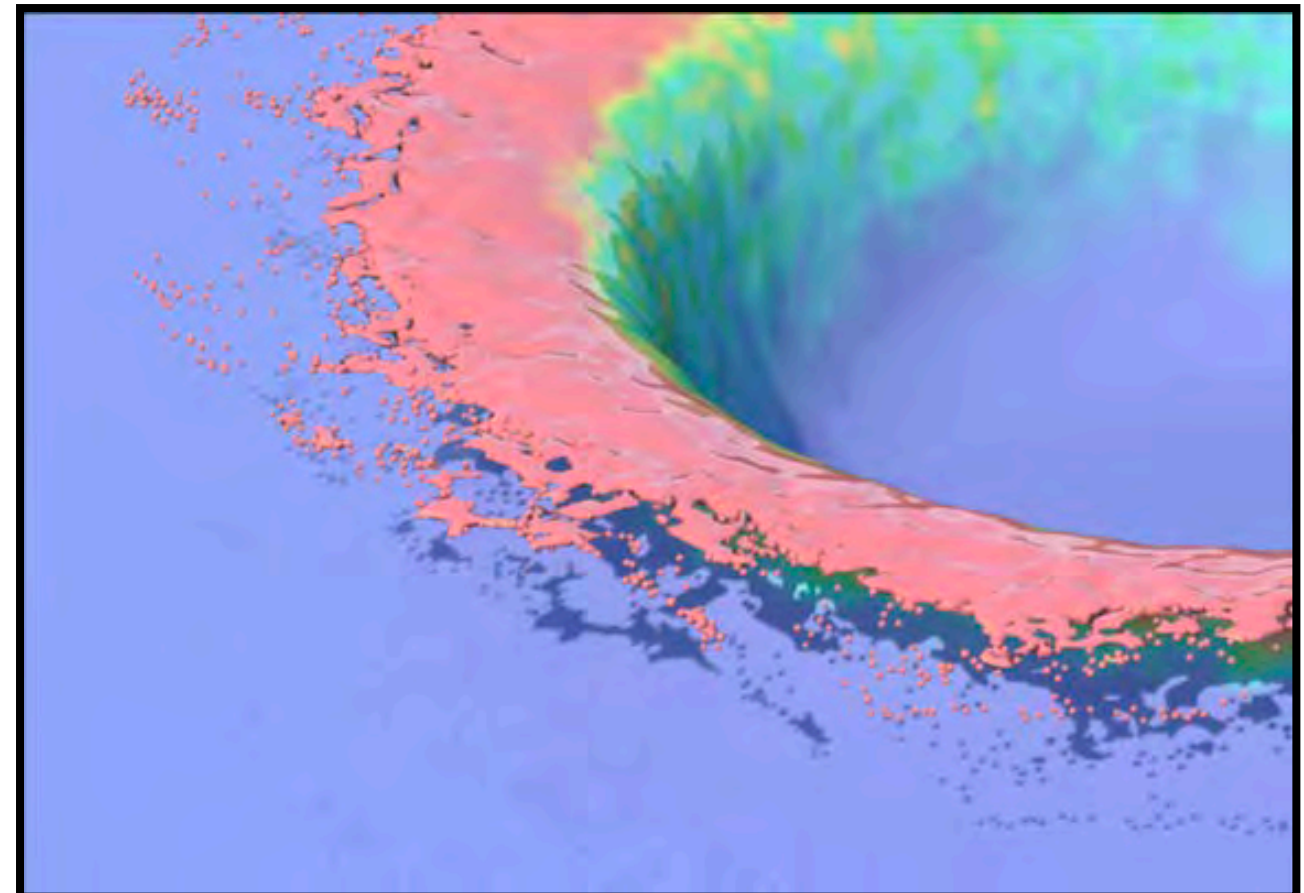


提案手法

水の形状をもっと自然に再現する研究 ～計算例～

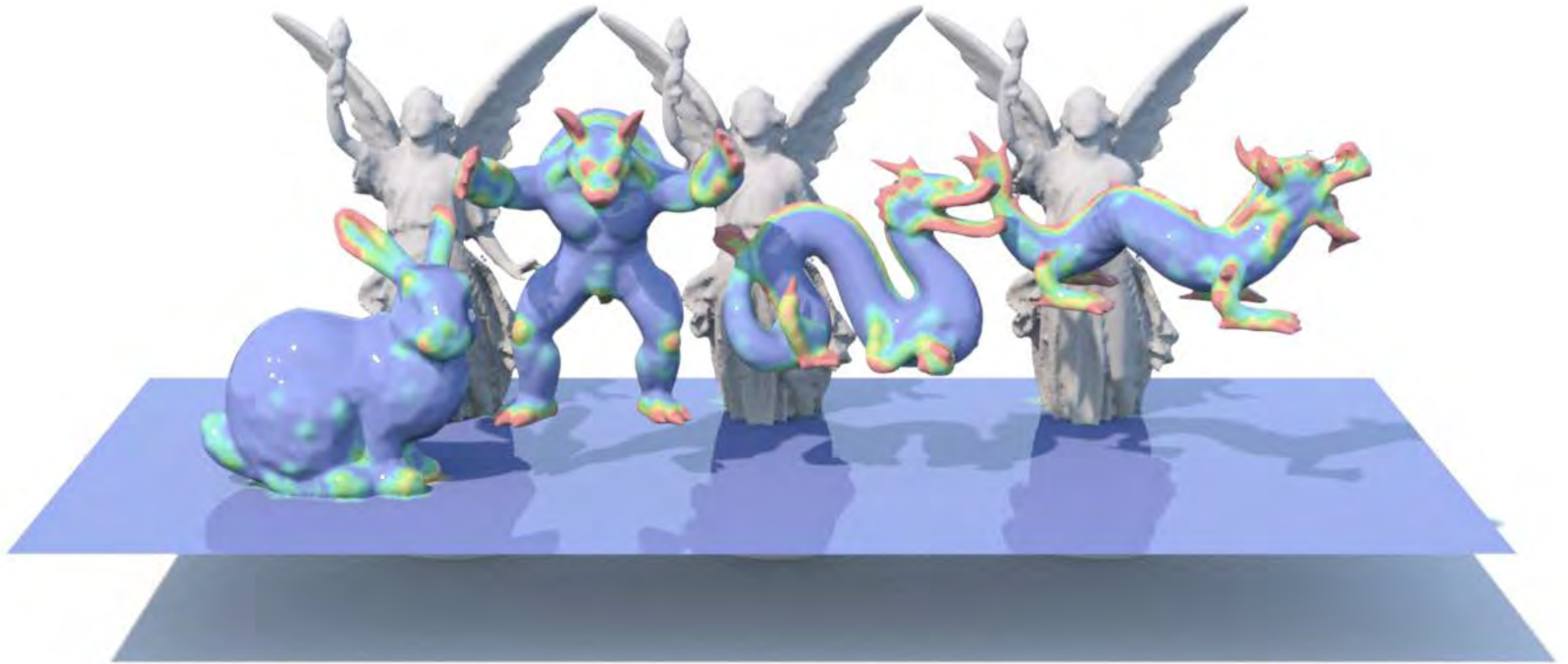


粒子法

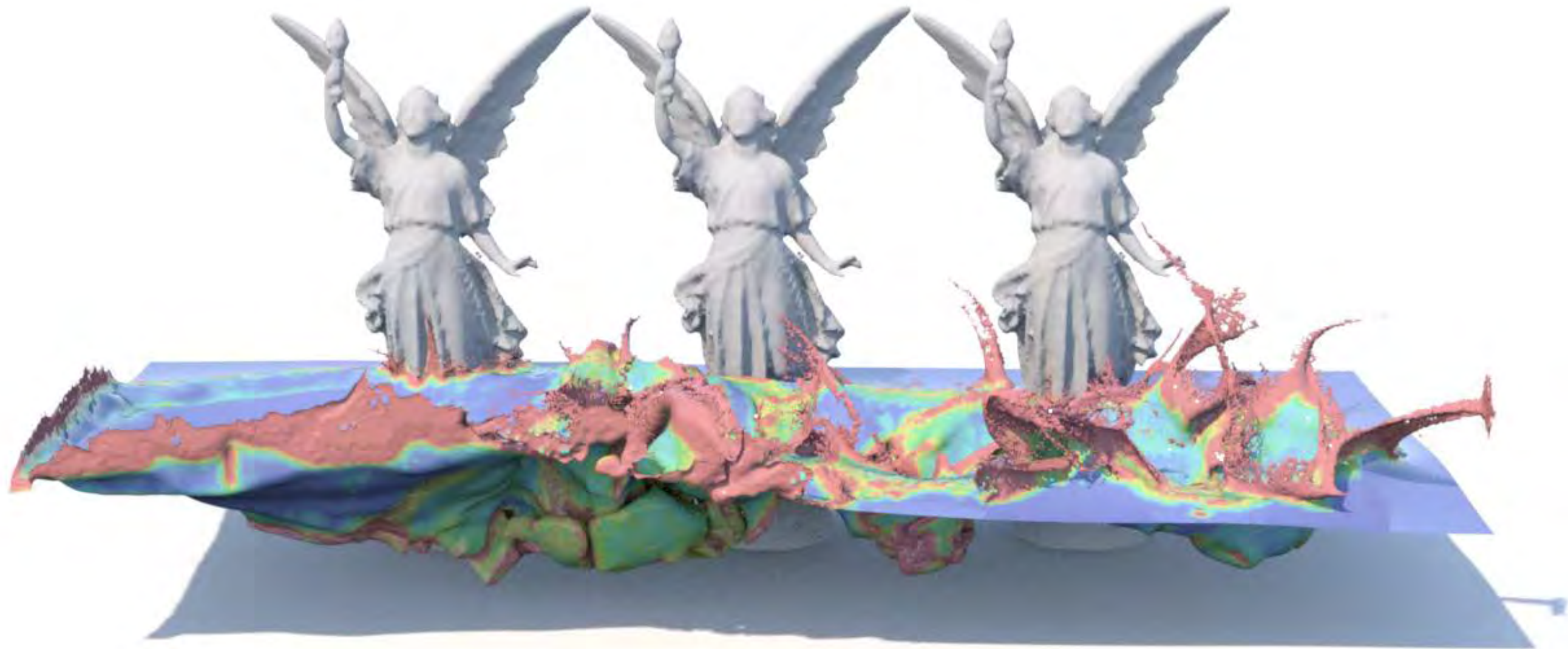


提案手法

水の形状をもっと自然に再現する研究 ～計算例～



水の形状をもっと自然に再現する研究 ～計算例～



～参考文献～

— Fluid Simulation for Computer Graphics, Second Edition
Robert Bridson, <http://amzn.asia/d/b5xGMZi>

- Vector Fluid: A Vector Graphics Depiction of Surface Flow
Ryoichi Ando and Reiji Tsuruno.
Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR), 2010.

- Preserving Fluid Sheets with Adaptively Sampled Anisotropic Particles
Ryoichi Ando, [Nils Thuerey](#) and Reiji Tsuruno.
IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG), 2012.

- A Dimension-reduced Pressure Solver for Liquid Simulations
Ryoichi Ando, [Nils Thuerey](#) and [Chris Wojtan](#).
Computer Graphics Forum (Eurographics) 2015.

- Extended Narrow Band FLIP for Liquid Simulations
[Takahiro Sato](#), [Chris Wojtan](#), [Nils Thuerey](#), [Takeo Igarashi](#) and Ryoichi Ando.
Computer Graphics Forum (Eurographics) 2018.