

# 粒子法FLOSSに対する妥当性確認試験



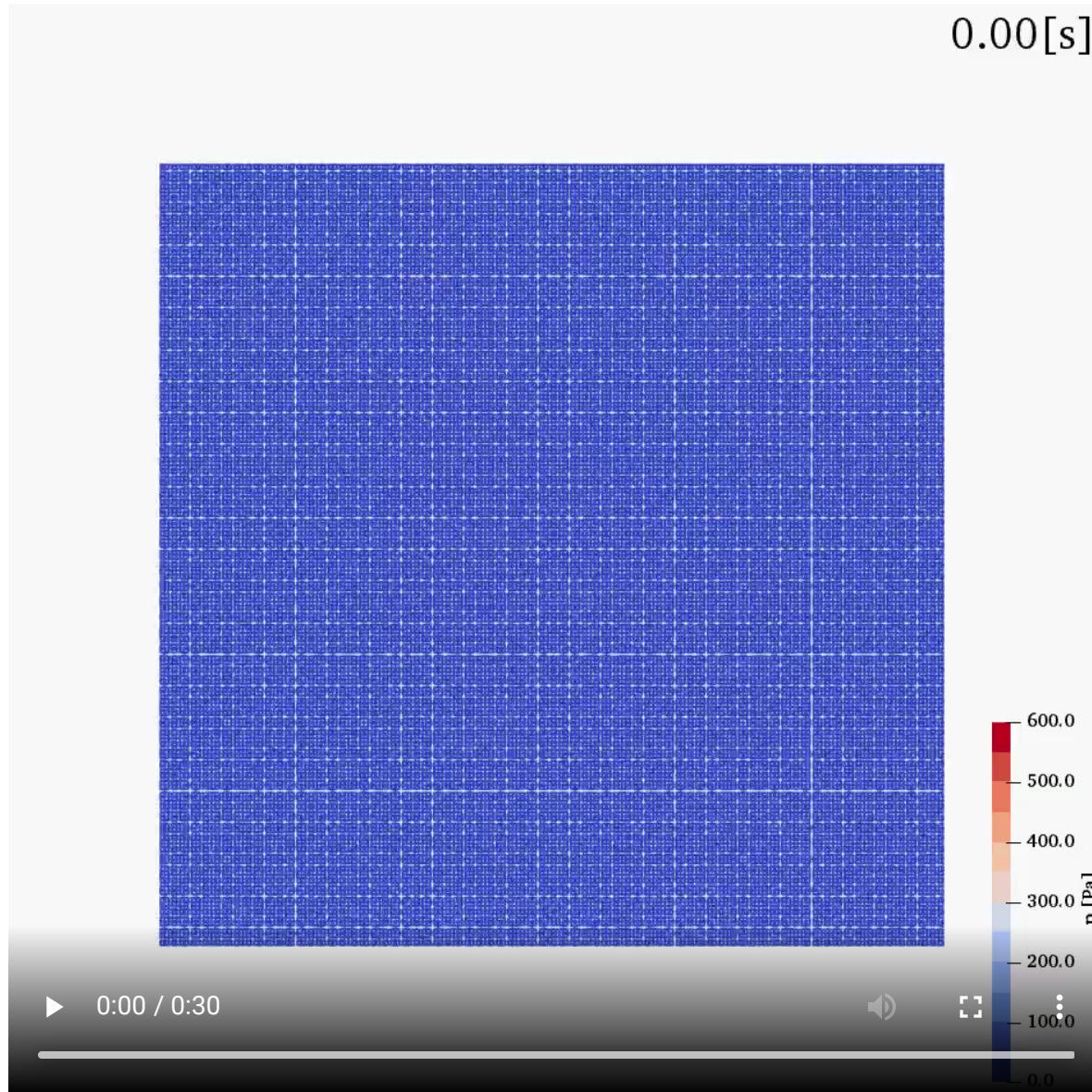
株式会社フィックススターズ  
ソリューション第二事業部  
吉藤尚生\*、大友広幸

2019-11-28

第33回数値流体力学シンポジウム



# 中心重力問題



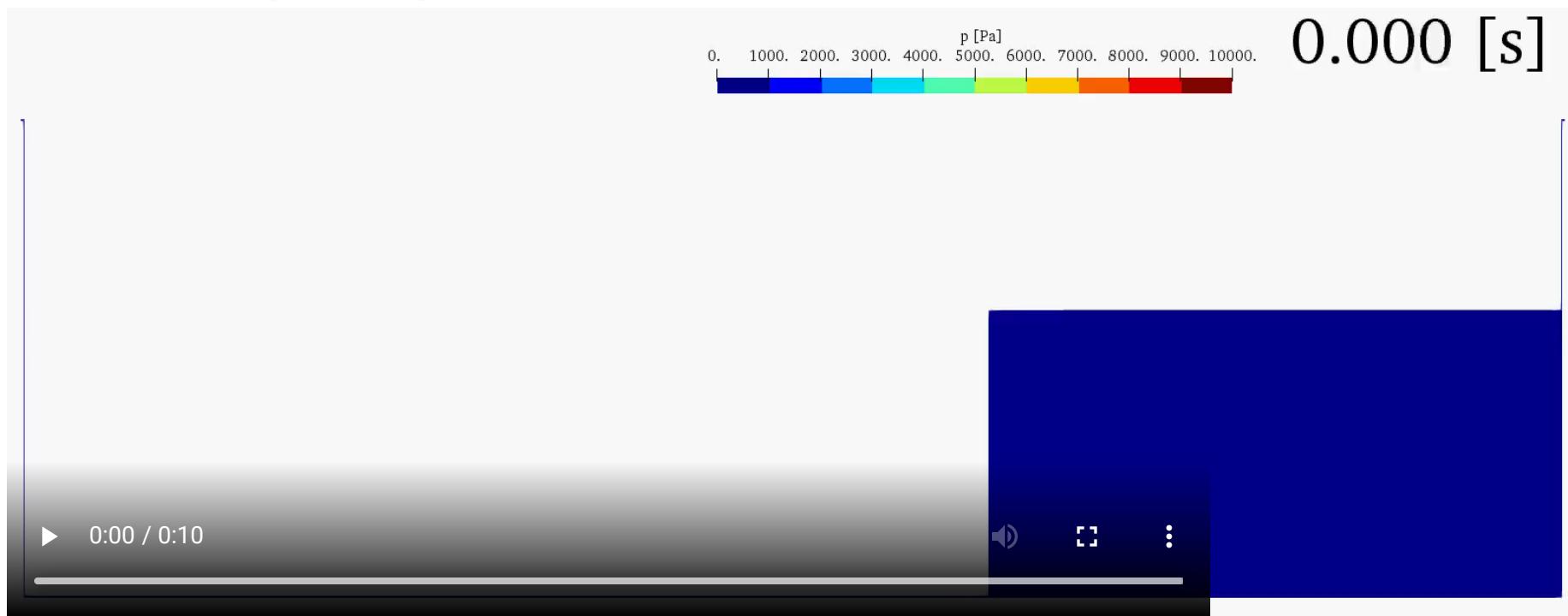


# 水柱崩壊問題

Zhou et al.(1999)の実験の再現



0.000 [s]





# 妥当性確認の結果

	DualSPHysics	OpenMps
静水圧	✗ 水深増大・圧力低下	△ GC法により不自然な運動
水柱波速	- (実施せず)	○ 良好に一致
衝撃波圧	- (実施せず)	△ SPP法なしでは強い擾乱



# まとめ

---

- DualSPHysicsでは  
静水圧問題が解けなかった
- OpenMpsのGC法が不自然な  
運動量生成をしていた
- OpenMpsにSPP法を導入することで  
圧力擾乱が抑制できた



# 目次

---

1. 概要
2. 背景・目的
3. 計算手法
4. 中心重力問題(DualSPHysics)
5. 中心重力問題(OpenMps)
6. 水柱崩壊問題 : Oka&Koshizuka(1996)
7. 水柱崩壊問題 : Zhou et al.(1999)
8. まとめ



# 目次

---

1. 概要
- 2. 背景・目的**
3. 計算手法
4. 中心重力問題(DualSPHysics)
5. 中心重力問題(OpenMps)
6. 水柱崩壊問題 : Oka&Koshizuka(1996)
7. 水柱崩壊問題 : Zhou et al.(1999)
8. まとめ



## 数値流体力学の応用範囲

---

- 理学的な理論検証
- 工学的な現象解明
- 実務もののづくりの設計などへの応用  
(**CAE**)

本研究：CAEにおける数値流体力学を想定



# 数値流体でCAEしたい！となつた時

---

## どんな方法？

- 格子法
- 粒子法

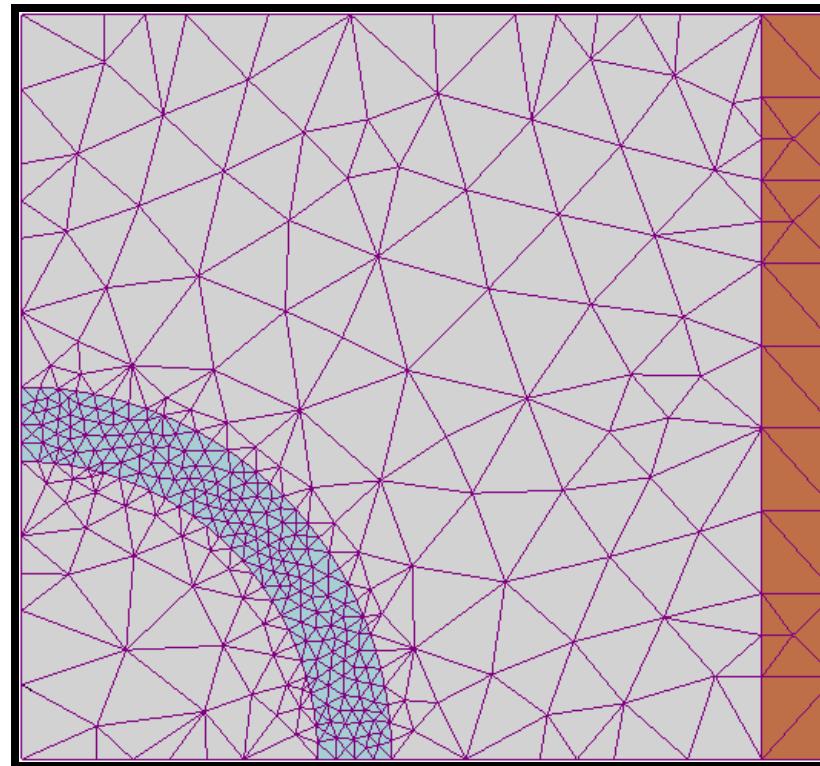
## どこから入手？

- 商用
- オープンCAE(FLOSS)



## 従来、よく用いられてきた

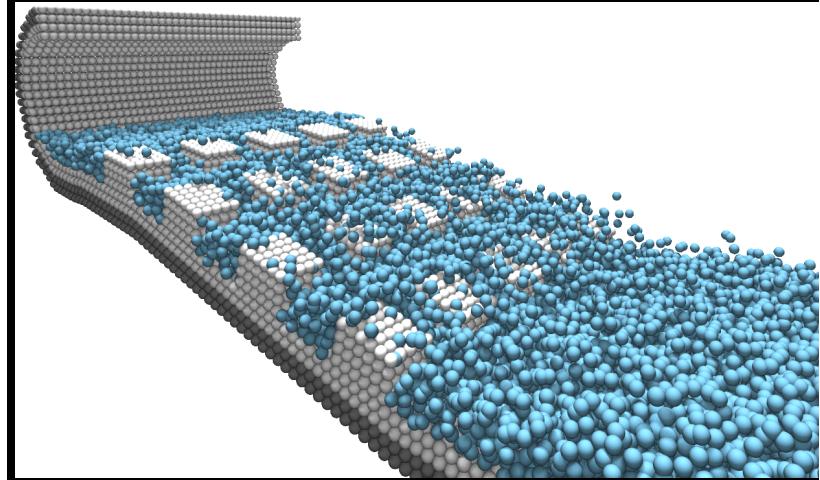
- 相互作用の相手が初期に固定
- 計算点が空間に固定されてい  
ることが多い (**オイラー法**)
- 研究事例が豊富
- 計算負荷は低い
- 数学的展開が容易



 粒子法

近年、用いられるようになってきた

- 相互作用の相手が毎回変化
- 計算点が空間に固定されていない (**ラグランジュ法**)
- 移流項による誤差拡大がない
- 境界の大変形に追従しやすい
- 一般的に計算負荷は高い





# 粒子法をCAEで使いたい場合

## 自作ソルバー

一部の熟練者でないと困難なため避けたい

## 商用ソルバー

- Particleworks (プロメテック・ソフトウェア)
- MPS-RYUJIN (富士テクニカルリサーチ)
- Abaqus/Explicit (Dassault Systmes)

## オープンCAE (FLOSS)

- DualSPHysics
- OpenMps



## オープンCAEとは

---

オープンCAE学会などが推進

- Free/Libre Open Source Software (FLOSS)でCAEする
- ソフトウェア開発を  
利用者コミュニティーも一緒に進める



# 商用 vs オープンCAE

種類	商用	オープンCAE(FLOSS)
サポート	手厚い	あまりない
費用	高い	無料
機能追加・改修	開発の気分	自分たちも可能
コード検証	開発を全信頼	自分で可能
妥当性確認	開発側が責任	可能（だが少ない）



## 本研究の目標

---

- 粒子法のための妥当性確認試験を**整備**
- 粒子法FLOSSに対して妥当性確認を**実施**
- (結果を元にして、事業化の参考)

# 本研究の動機



顧客のソフトウェアを高速化することが主力事業

(組み込みSoCからスパコンまで、応用分野を問わず)

1. 高速化の知見を活かした**自社事業**ができるいか？
2. 計算負荷が高い粒子法を題材にすると良さそう
3. 応用分野は海岸・海洋工学（**土木工学**）が良さそう
4. 元にする実装はどれがいいか？を知りたい



## 対象にしたいソフトウェアの特徴

---

- 海岸・海洋工学向きである
- ニュートン流体の重力下における自由表面大変形を伴う非圧縮性流れが解ける
- FLOSSである
- 既往研究が極端に少なくてない

→**DualSPHysics**と**OpenMPS**



## 実施したいベンチマークの特徴

---

- 海岸・海洋工学で重要な物理量を計測する
- ≈水深・波圧など
- (まずは) あまり大規模・複雑ではない
- ≈基礎的な理論・実験など

→**中心重力問題と水柱崩壊問題**



# 目次

---

1. 概要
2. 背景・目的
- 3. 計算手法**
4. 中心重力問題(DualSPHysics)
5. 中心重力問題(OpenMps)
6. 水柱崩壊問題 : Oka&Koshizuka(1996)
7. 水柱崩壊問題 : Zhou et al.(1999)
8. まとめ



## DualSPHysics

- 既に多くの利用事例がある
- CUDA(GPU)対応されている（が、高速化が不十分）
- 弱圧縮SPH法**なので、精度が心配

## OpenMps

- 利用者が少ない（ほぼ皆無）
- 素直なC++なので分かりやすい
- 高精度MPS法**が実装されているので、計算負荷が高そう

時間の都合上、詳細は割愛

(概要の第2章を参照してください)



1. 概要

2. 背景・目的

3. 計算手法

## 4. 中心重力問題(DualSPHysics)

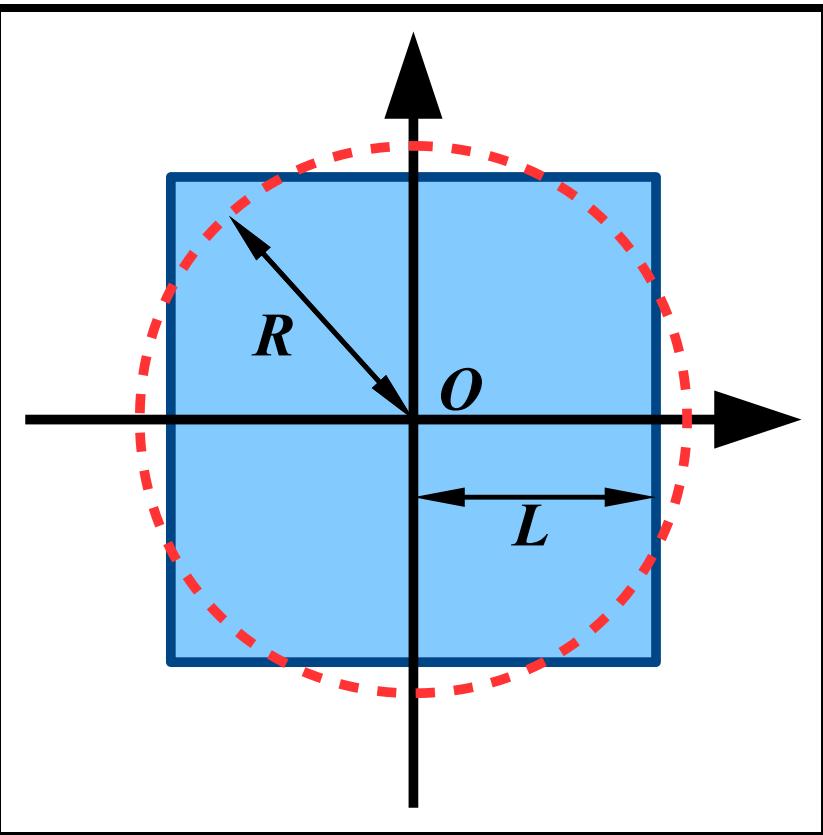
5. 中心重力問題(OpenMps)

6. 水柱崩壊問題 : Oka&Koshizuka(1996)

7. 水柱崩壊問題 : Zhou et al.(1999)

8. まとめ

# 中心重力問題とは？



- 重力が**原点向き**

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = -g_z \frac{\mathbf{x}}{|\mathbf{x}|}$$

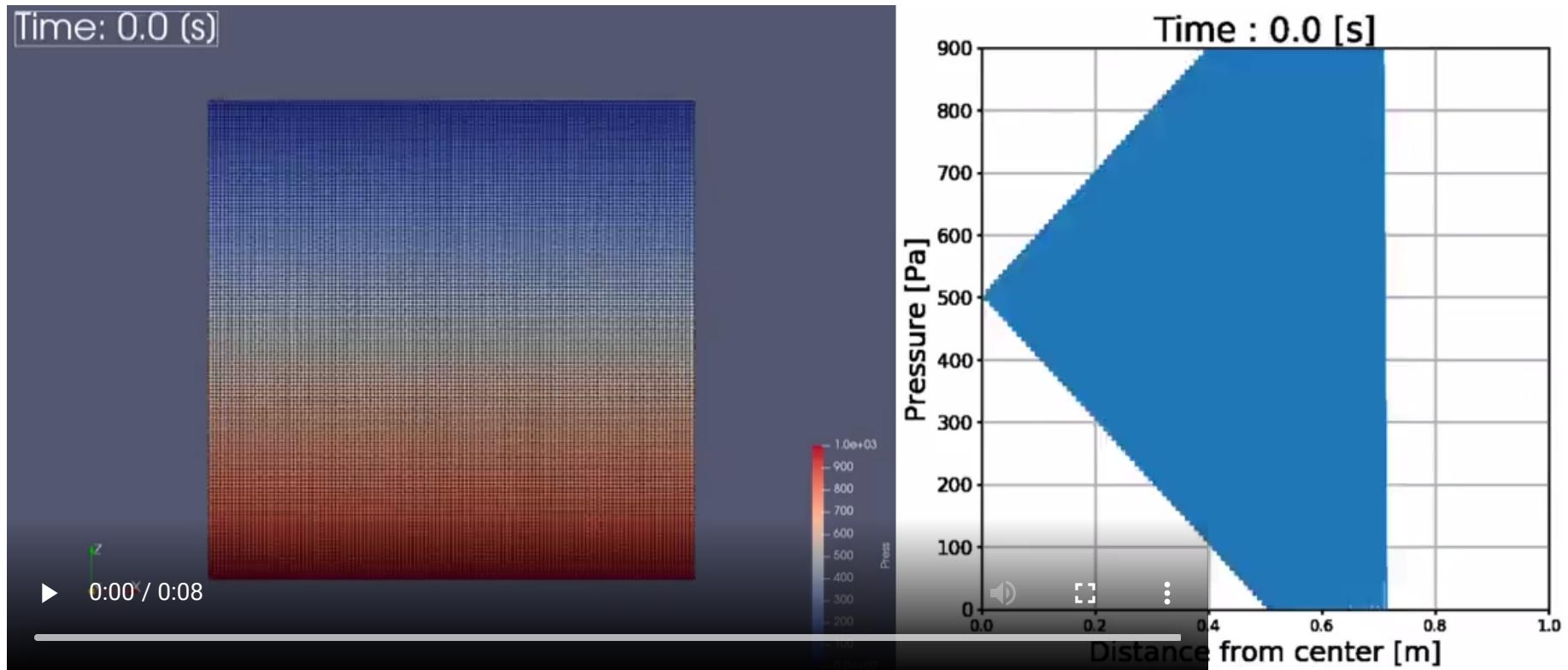
- 半径Rで定常になる
- 原点から半径方向に静水圧になる

$$p = \rho g_z (R - |\mathbf{x}|)$$

Fig.1

**壁面境界が不要なので純粋な流体ソルバーの確認向き**

# DualSPHysicsの結果



時間が経過すると自由表面が膨張？し、圧力が低下



# 原因

---

駆動力（圧力）が依存している**密度計算法**の違いに起因  
**通常のSPH法（カーネル和型）**

$$\rho_i = m \sum_{j \neq i} W_{ji}$$

**DualSPHysics/WCSPH（時間発展型）**

$$\frac{D\rho}{Dt} = m \sum_{j \neq i} (\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i) \cdot \nabla W_{ji}$$



# 水深の時間発展

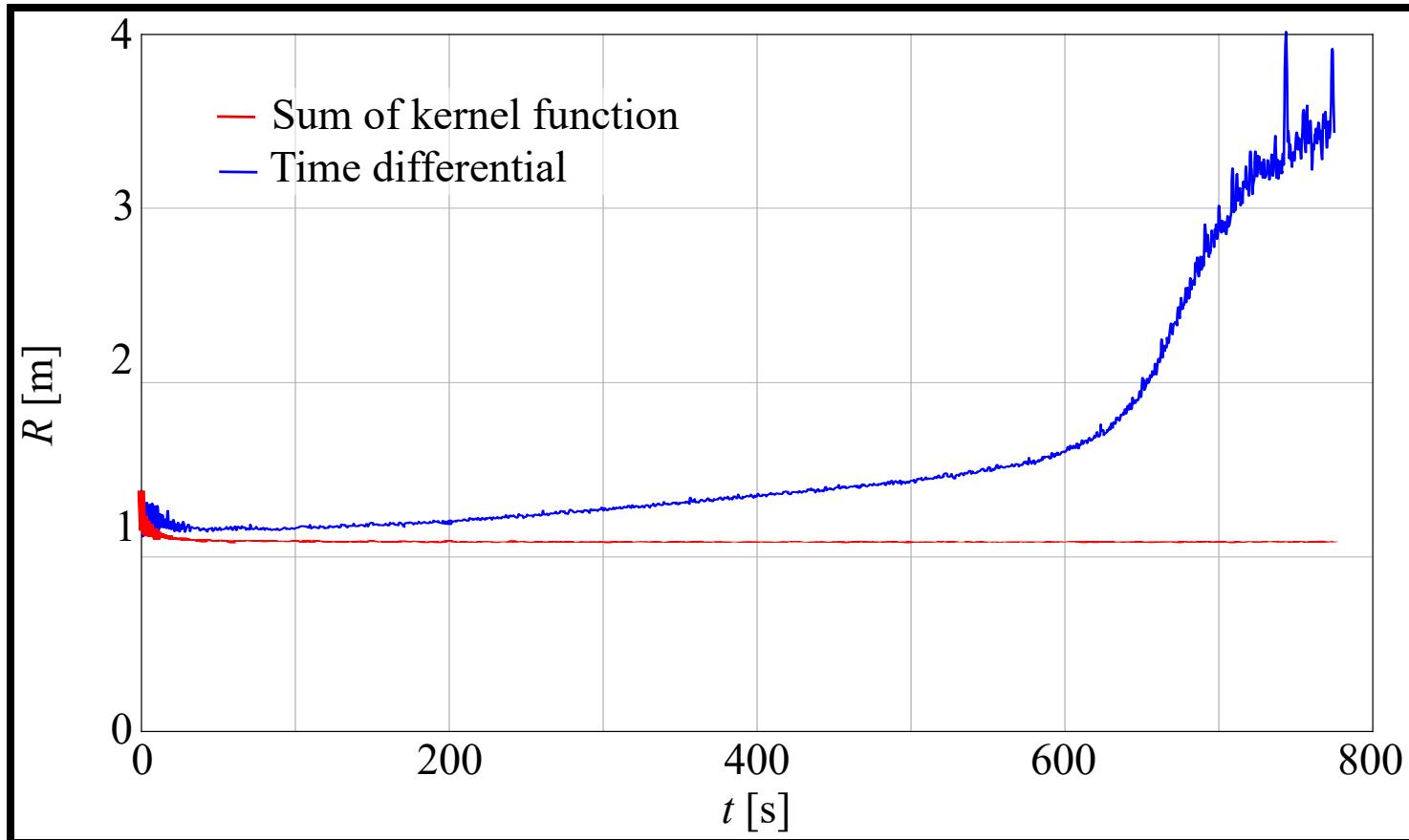


Fig.5

※DualSPHysicsではなく自作の簡易実装で試した結果



## 結論

---

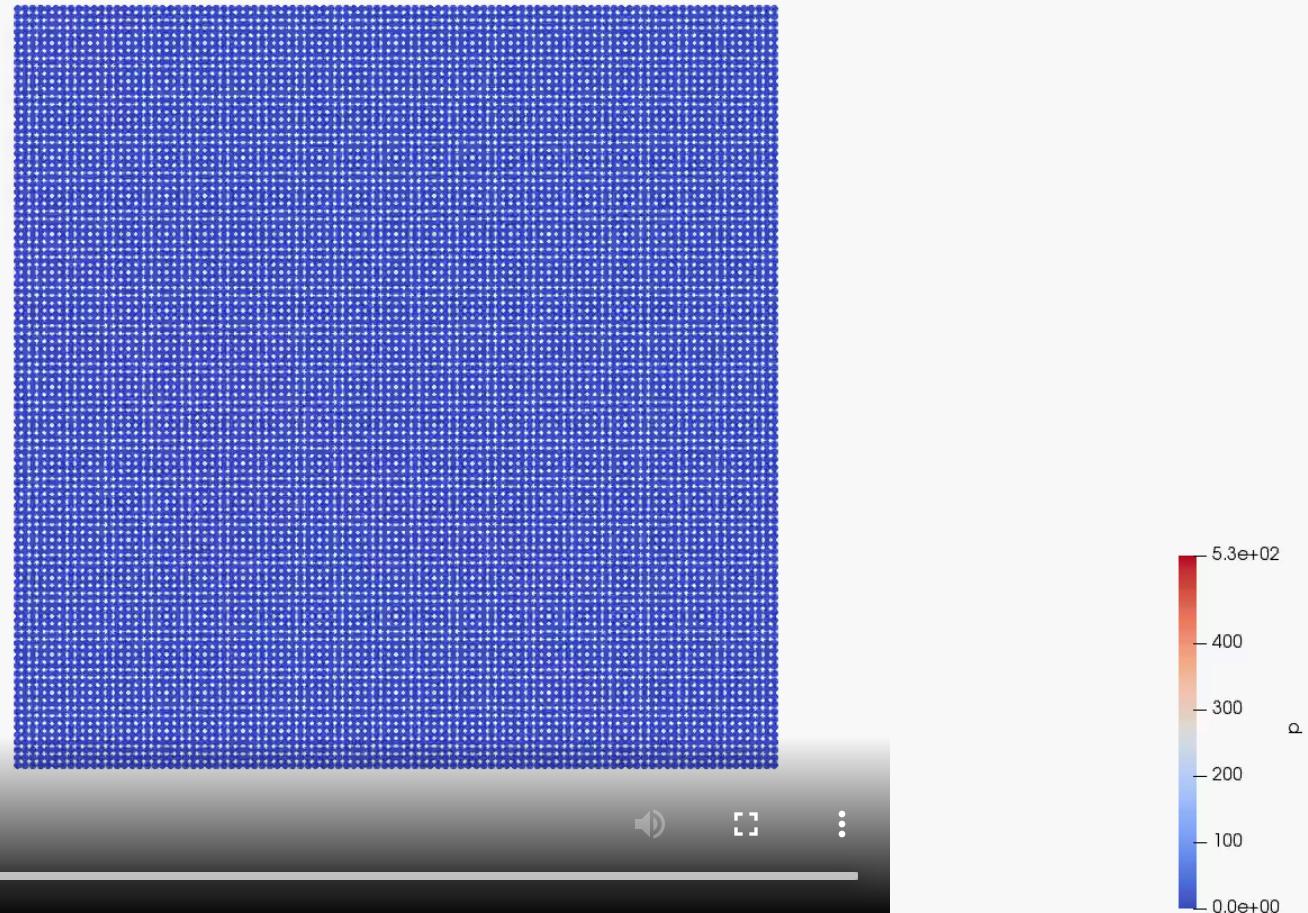
- DualSPHysicsは静水圧問題が解けないよう見える
  - →浮体問題などで**致命的**
  - 解決にはDualISPHysicsの修正が必要
  - →高難易度  
(**コードがあまりきれいではない**ので)
- ∴以降は、DualSPHysicsの妥当性確認は実施しない



- 
1. 概要
  2. 背景・目的
  3. 計算手法
  4. 中心重力問題(DualSPHysics)
  - 5. 中心重力問題(OpenMps)**
  6. 水柱崩壊問題 : Oka&Koshizuka(1996)
  7. 水柱崩壊問題 : Zhou et al.(1999)
  8. まとめ

# OpenMPSでの結果

0.00[s]



自由表面の振動が増大？



# 原因

---

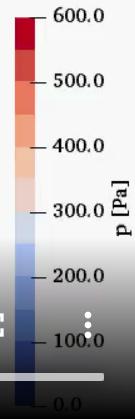
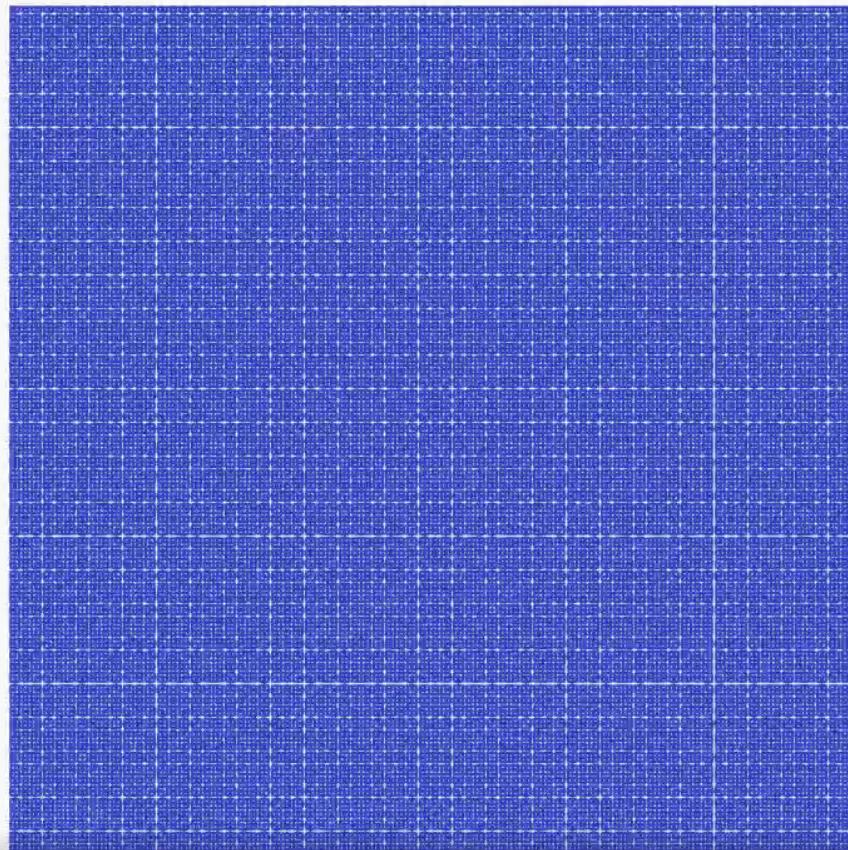
勾配修正法（GC法、高精度粒子法の1つ）が原因

- $\nabla \phi_i = \frac{D}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{\phi_j - \phi_i}{|\mathbf{r}_{ji}|} \frac{{C_i}^{-1} \mathbf{r}_{ji}}{|\mathbf{r}_{ji}|} w_{ji}$
- $C_i = \frac{D}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{\mathbf{r}_{ji} \otimes \mathbf{r}_{ji}}{|\mathbf{r}_{ji}|^2} w_{ji}$

$C_i$ が異なるため、i-jの相互作用力が非対称

 GC法なし

0.00[s]

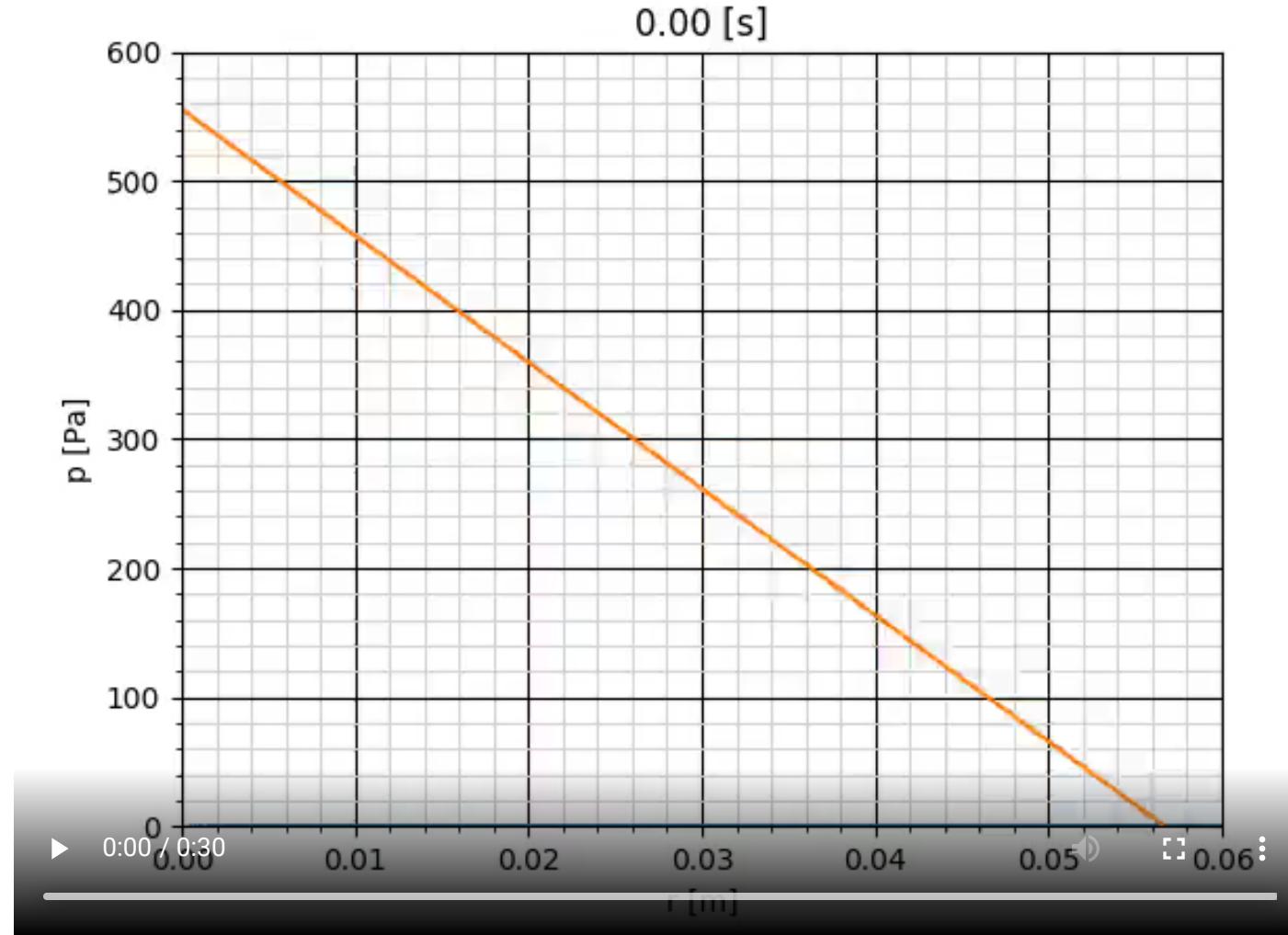


▶ 0:00 / 0:30





# GC法なし (圧力)





## 結論

---

- GC法のせいで静水圧にならない
- 理由は、実装か理論かはまだ区別できていない

以降ではGC法を切って続行した



- 
1. 概要
  2. 背景・目的
  3. 計算手法
  4. 中心重力問題(DualSPHysics)
  5. 中心重力問題(OpenMps)
  - 6. 水柱崩壊問題 : Oka&Koshizuka(1996)**
  7. 水柱崩壊問題 : Zhou et al.(1999)
  8. まとめ

# Oka&Koshizuka(1996)の実験

水柱崩壊（ダムブレーク）問題

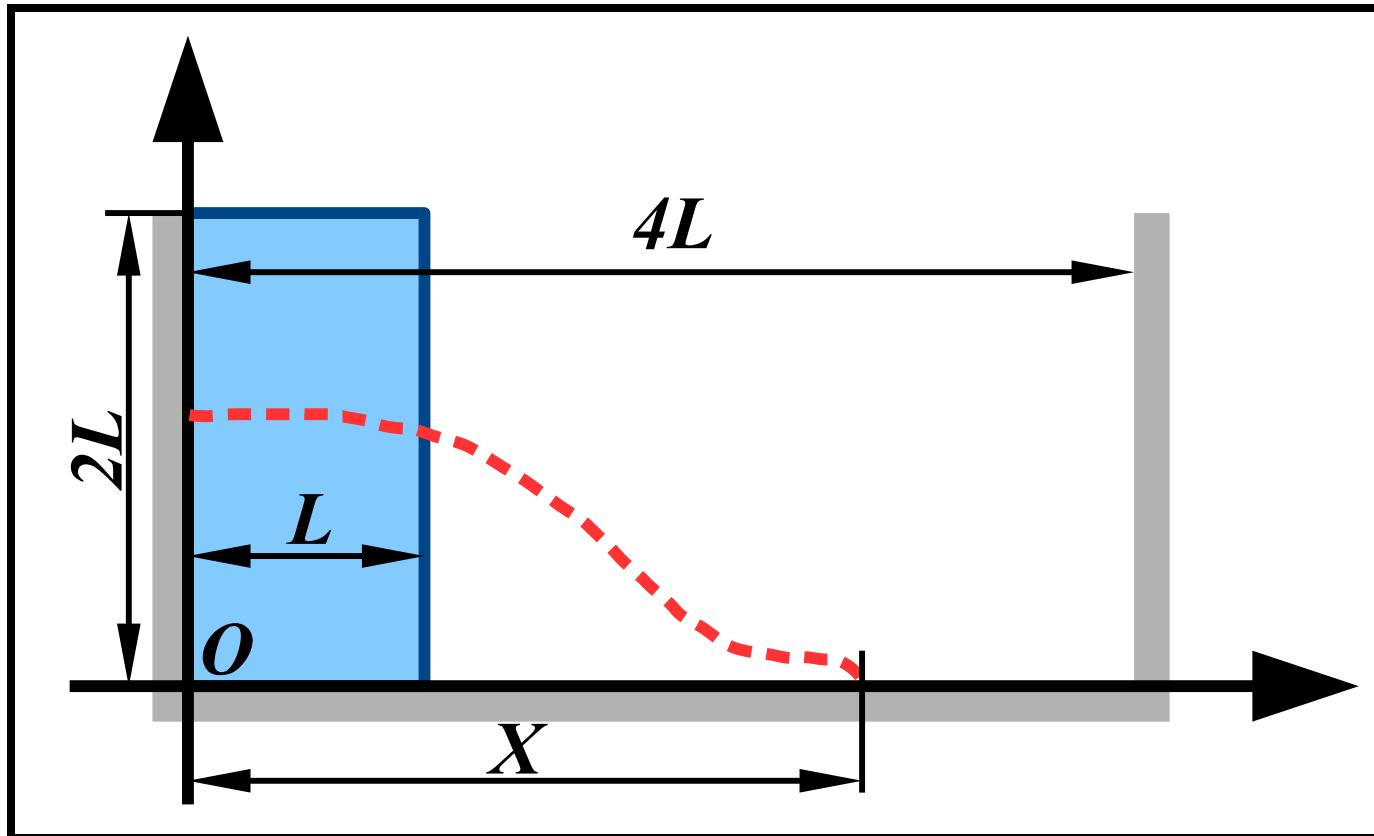


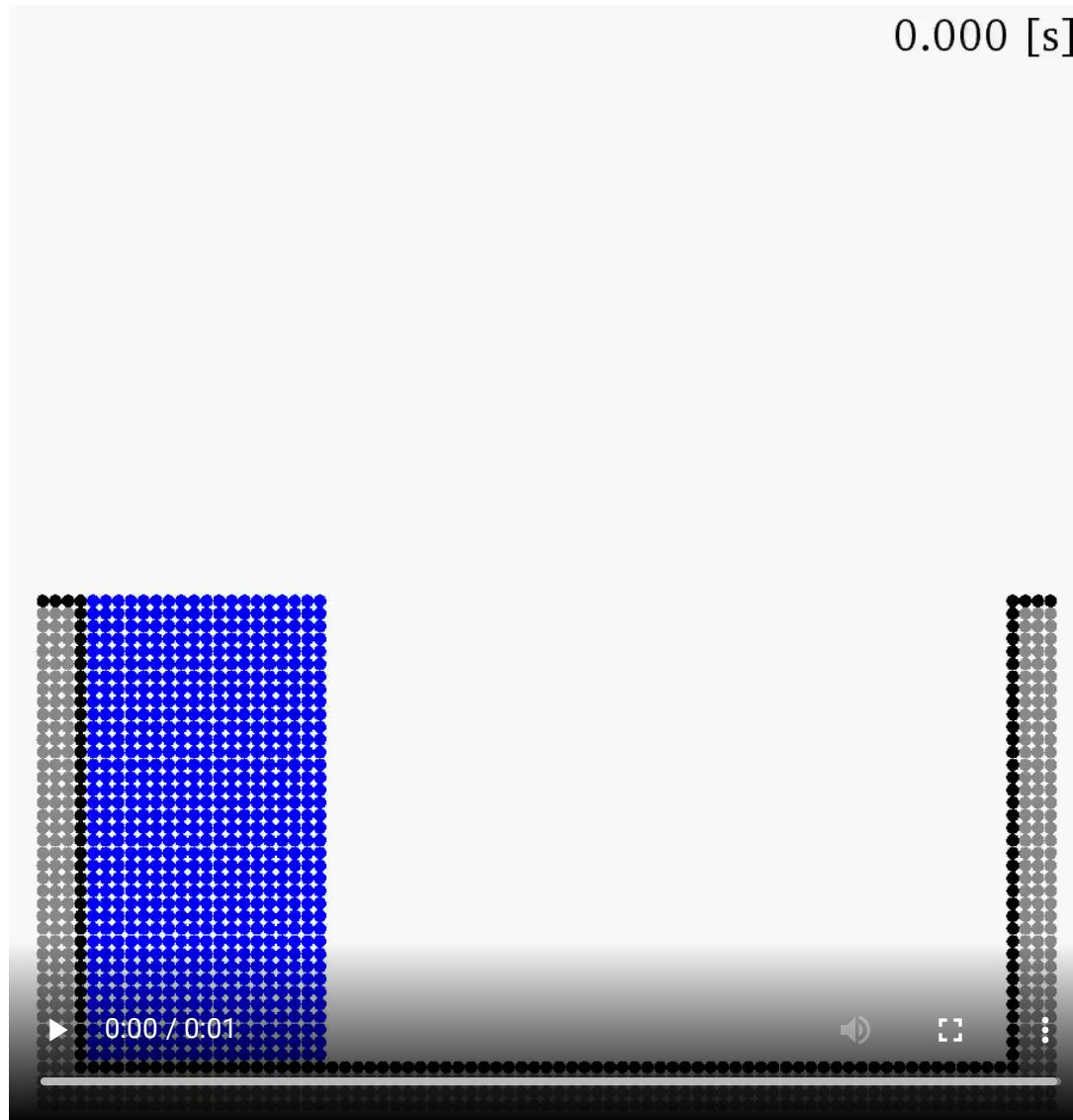
Fig.2

原始MPS法での妥当性確認に使用されたもの



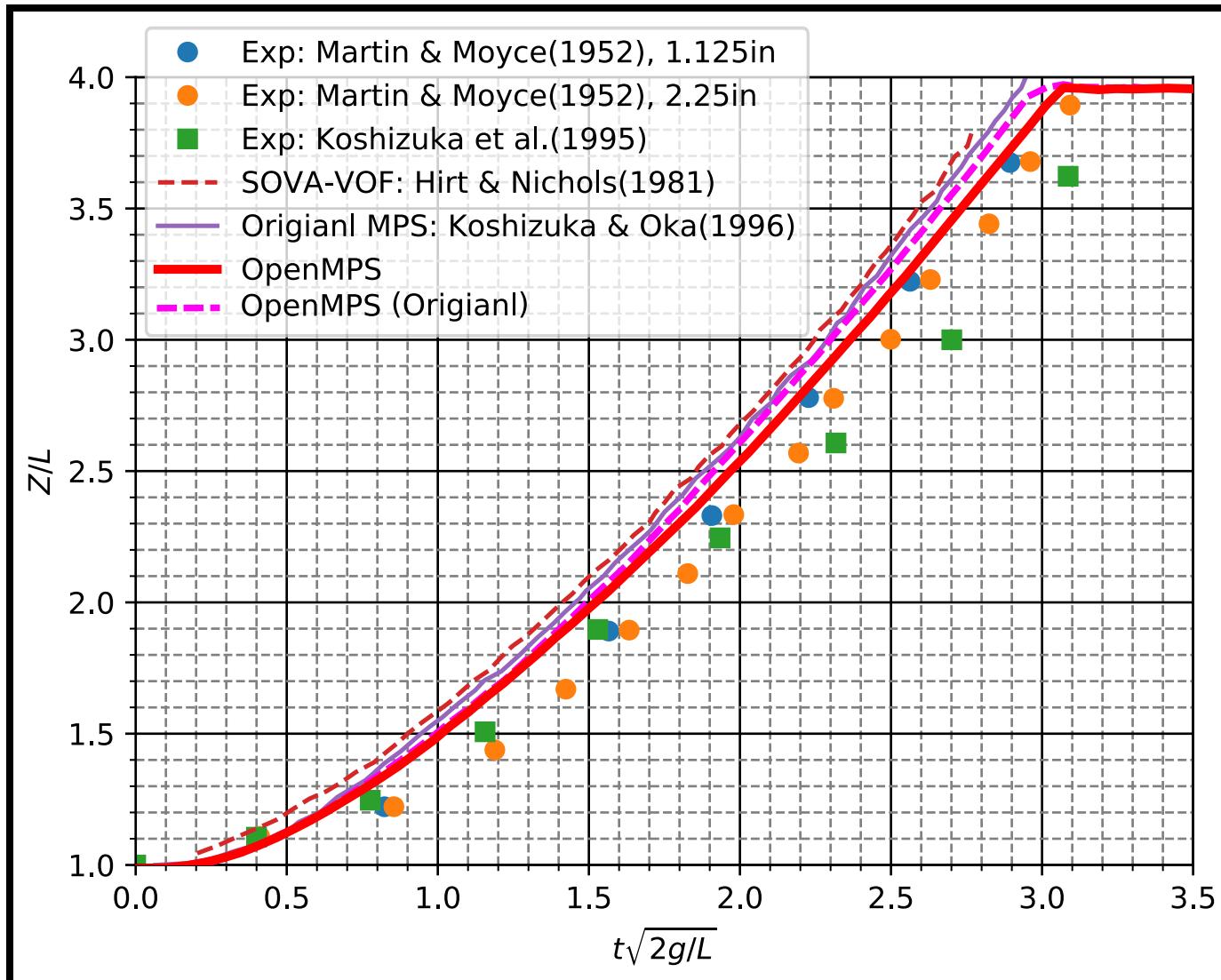
# 計算結果

0.000 [s]





# 崩壊波先端の位置





## 結論

---

- 波先端位置は実験に近い結果
- $\div$ 自由表面の形状は良好に再現
- 原始MPS法に比べて良い結果
- →高精度粒子法による改善



# 目次

---

1. 概要
2. 背景・目的
3. 計算手法
4. 中心重力問題(DualSPHysics)
5. 中心重力問題(OpenMps)
6. 水柱崩壊問題 : Oka&Koshizuka(1996)
- 7. 水柱崩壊問題 : Zhou et al.(1999)**
8. まとめ

# Zhou et al.(1999)の実験

水柱崩壊（ダムブレーク）問題の別バージョン

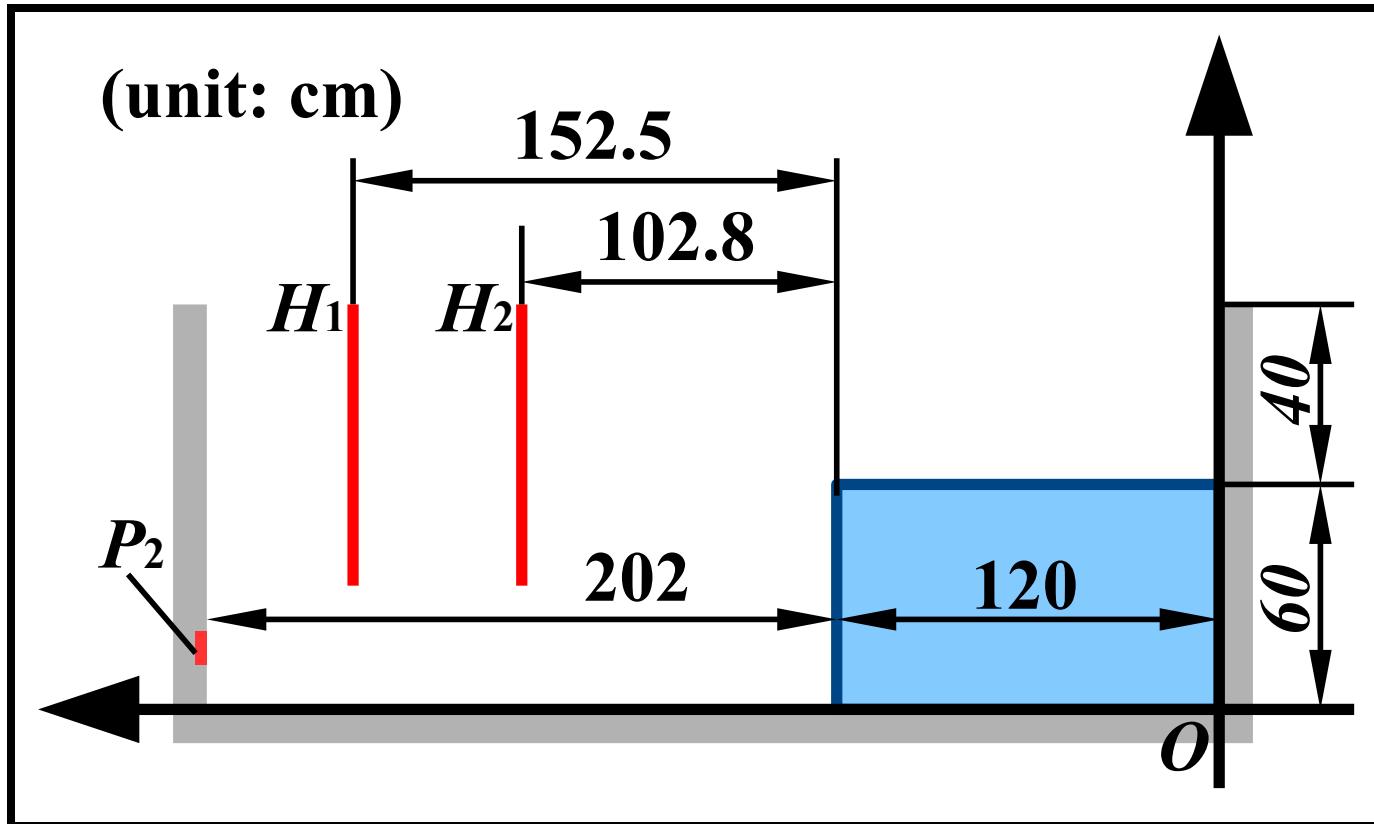


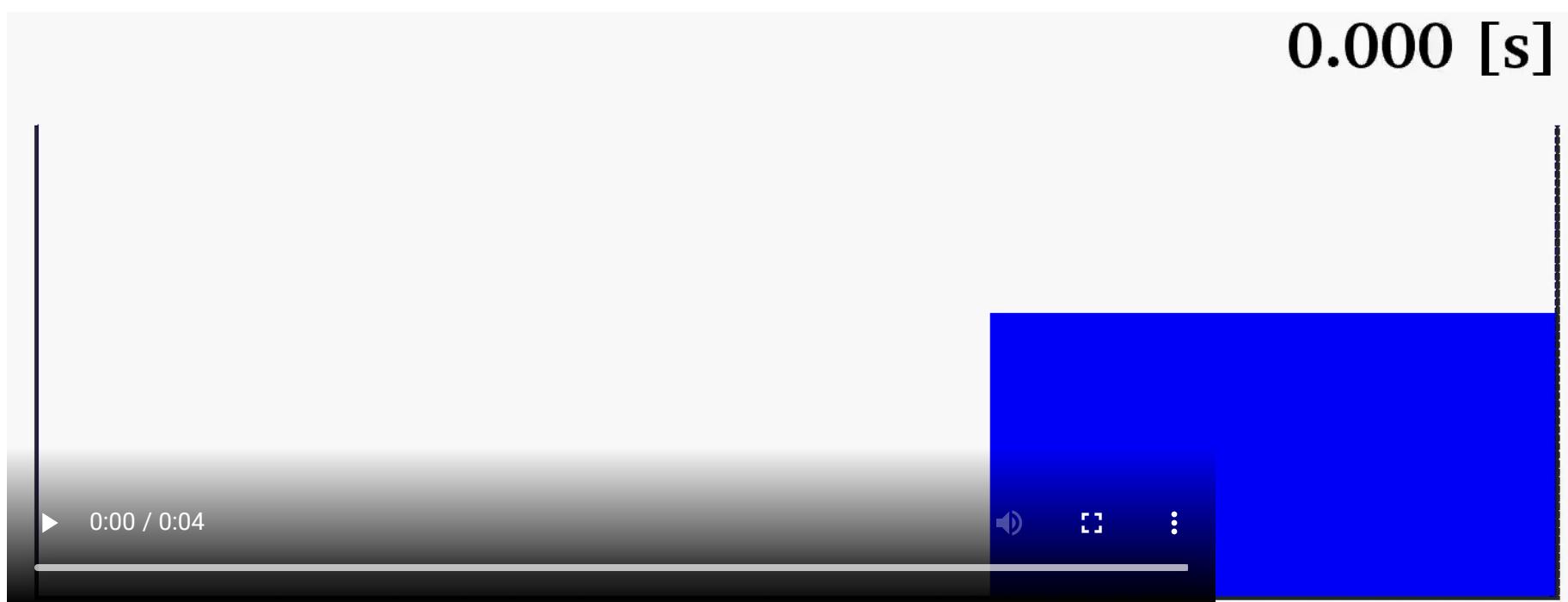
Fig.3

定点の水深( $H_1$ ,  $H_2$ )・圧力( $P_2$ )を比較できる



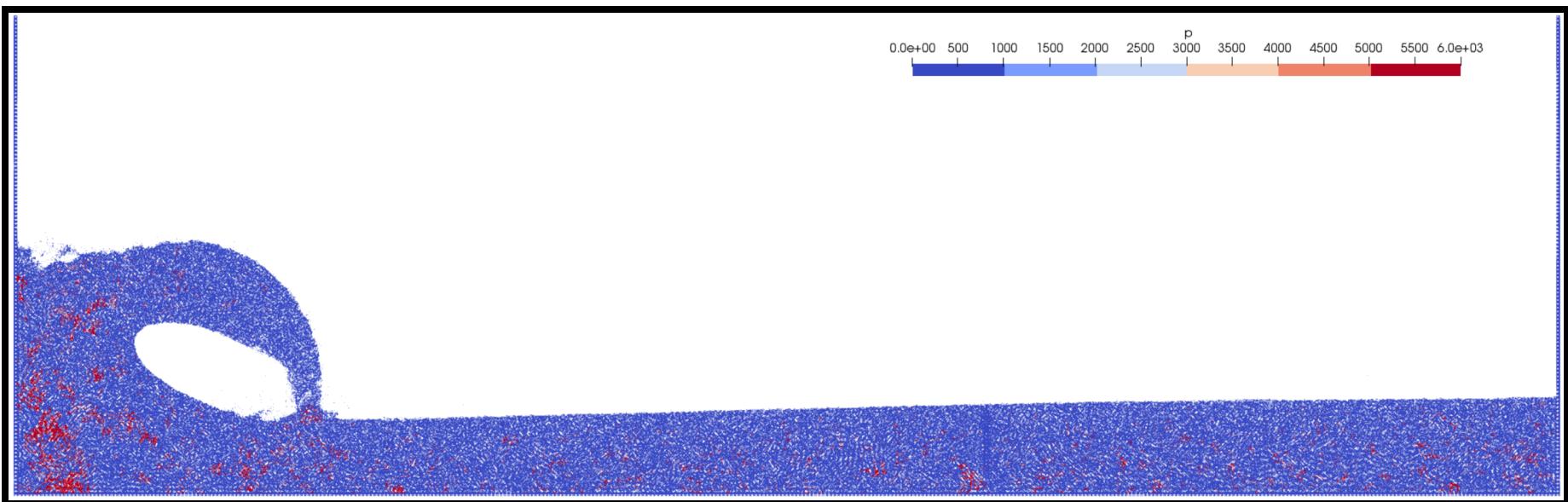
# 計算結果

0.000 [s]





# 圧力表示



圧力の擾乱がひどく、まともに評価できていない！



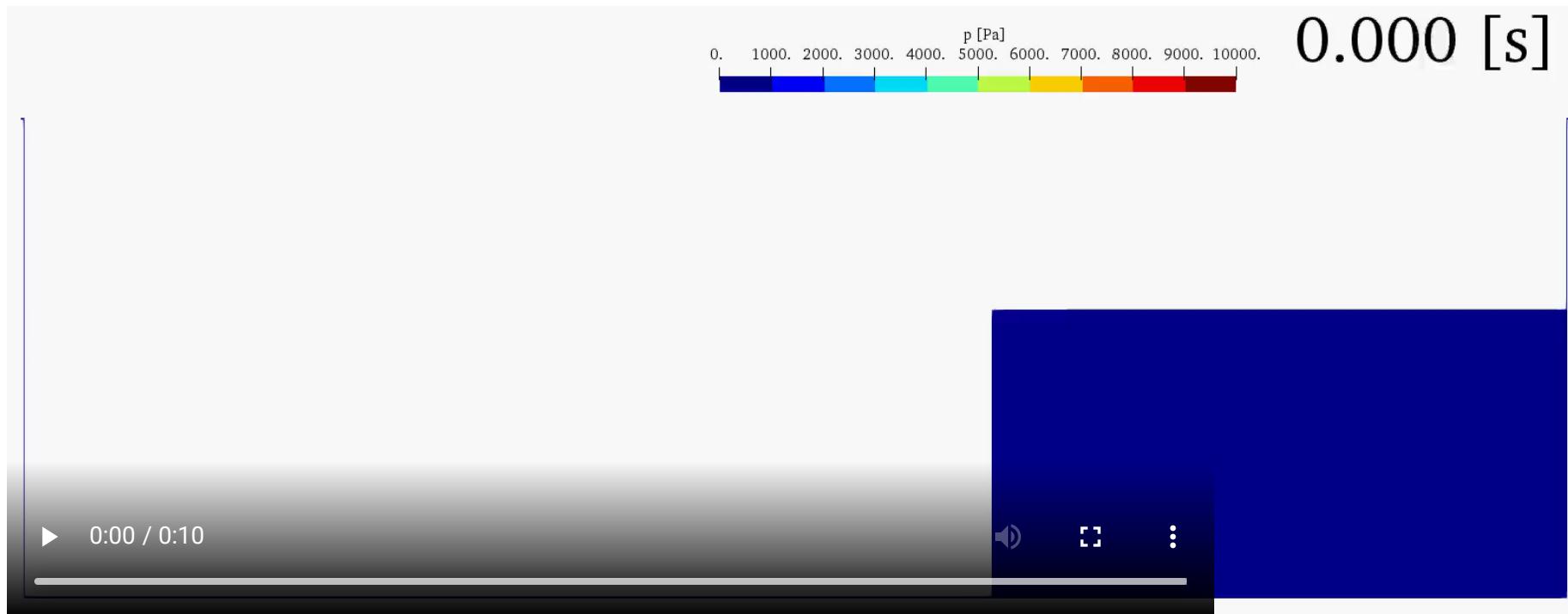
# 原因と解決策

---

1. 粒子が移動する
2. わずかに空隙が発生する
3. 自由表面だと判定される
4. 圧力がゼロの境界条件が設定される

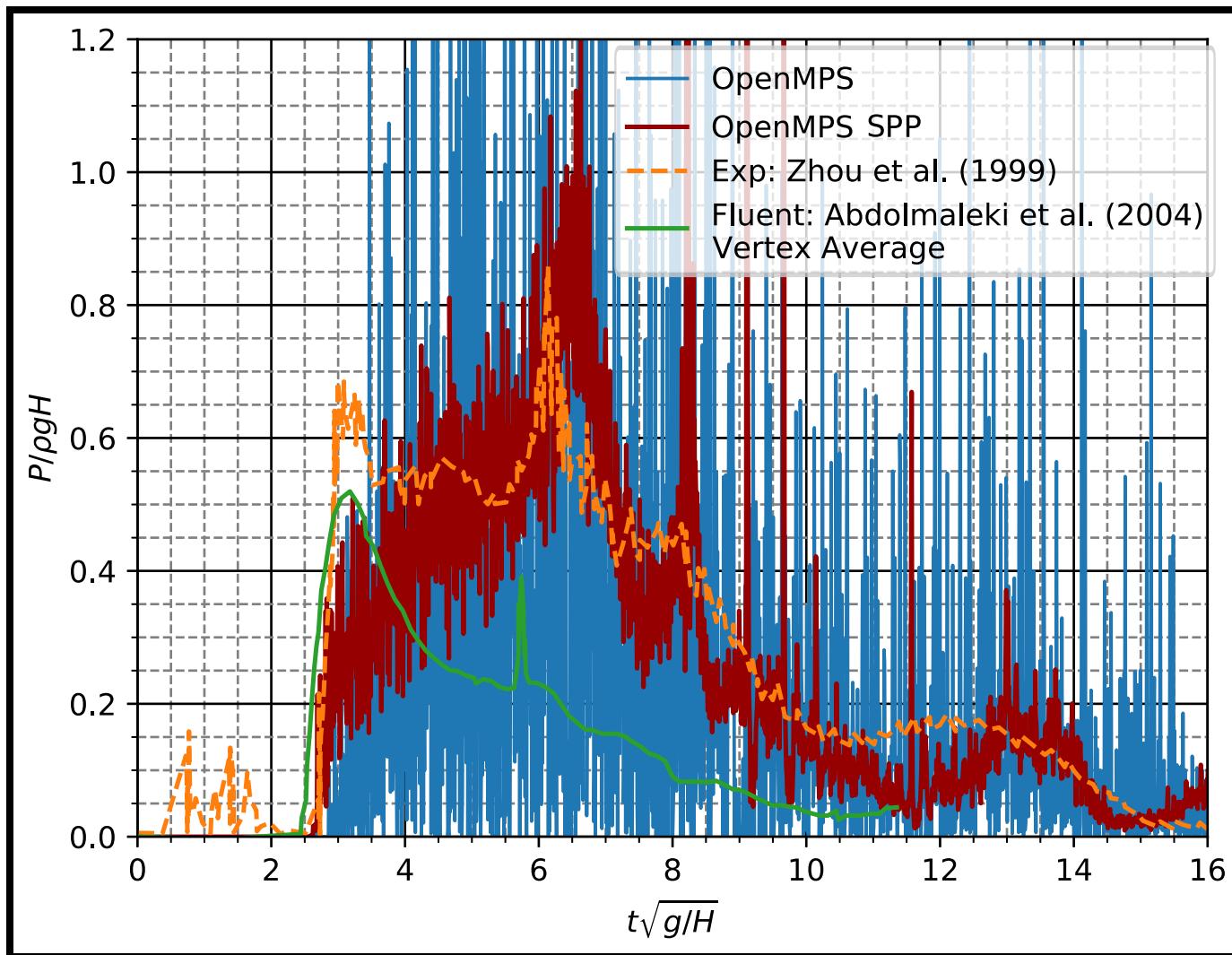
空隙を埋める**SPP法**を導入すれば解決するはず

# ☆圧力表示（SPP法あり）



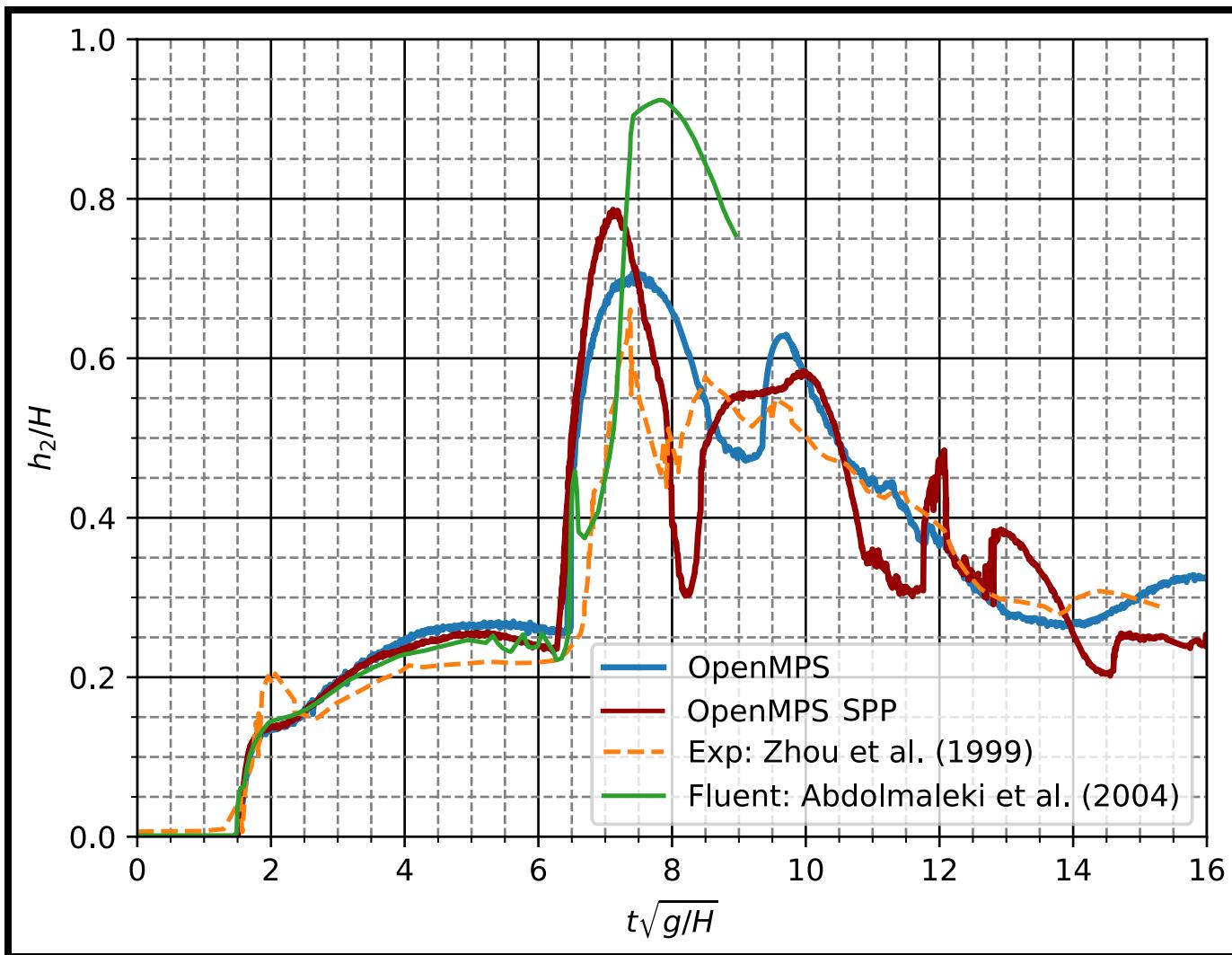


# 压力(P2)時系列



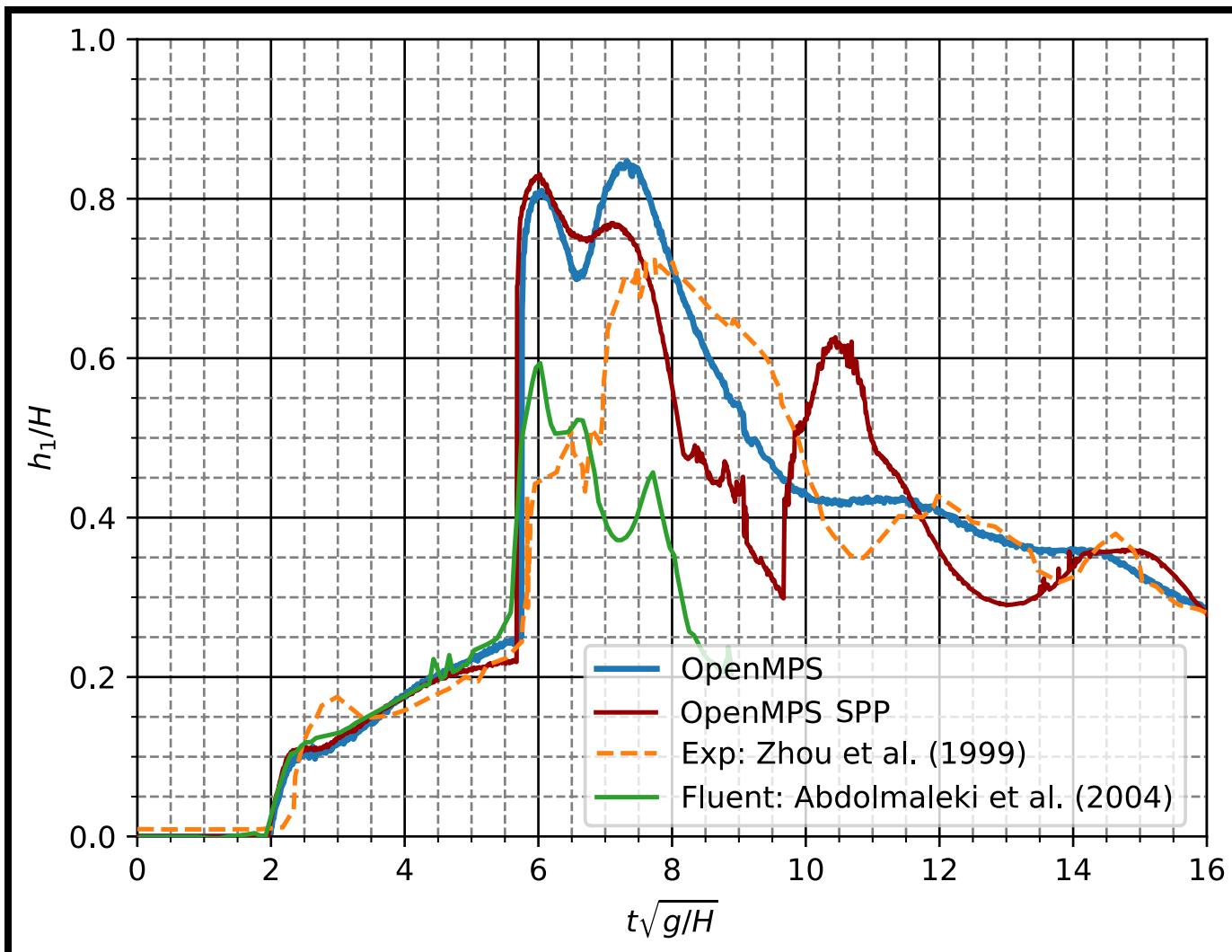


# 水深(H2)時系列





# 水深(H1)時系列





## 結論

---

- SPP法を導入しないと、圧力擾乱が酷く使い物にならなかつた
- 導入後も多少圧力擾乱があるため、引き継ぎ改善を試みたい



- 
1. 概要
  2. 背景・目的
  3. 計算手法
  4. 中心重力問題(DualSPHysics)
  5. 中心重力問題(OpenMps)
  6. 水柱崩壊問題 : Oka&Koshizuka(1996)
  7. 水柱崩壊問題 : Zhou et al.(1999)
  - 8. まとめ**



# まとめ

---

1. 粒子法FLOSSの妥当性確認試験を整備した

- 中心重力問題
- 水柱崩壊問題 : Oka&Koshizuka(1996)
- 水柱崩壊問題 : Zhou et al.(1999)

2. DualSPHysicsとOpenMpsに対して妥当性確認をした

- DualSPHysicsでは静水圧問題が解けなかつた
- OpenMpsのGC法には問題があった
- OpenMpsにSPP法を導入することで圧力擾乱が抑制できた



## 今後の課題

---

- DualSPHysicsにカーネル和型密度計算の実装
- OpenMpsのGC法の問題改善
- より現実的なベンチマークの追加
  - 強制液面振動（スロッシング）
  - 造波
  - 消波
  - などなど・・・



**return 0;**