

# 粒子法を用いた津波漂流物の衝突力解析

国際津波防災学会

津波シミュレーション分科会第3回会合

日時: 10月7日(月)

場所: 日大理工駿河台校舎1号館122中会議室

日本大学理工学部 相田 康洋

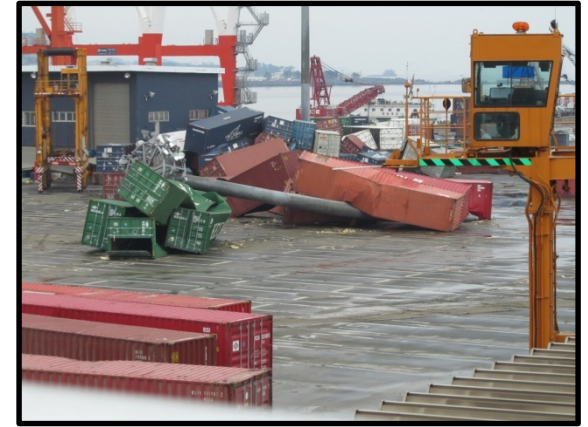
# 研究背景

津波被害から人命を守る

- 避難場所の確保
- 二次災害の防止

レベル2津波災害

- 人命の確保
- 一時津波避難場所の安全性確保
- 重要建築物の保護



出典: Google 朝日新聞デジタル, Google

# 研究背景 津波により建築物に作用する外力

## □ 流体力

- ・静水圧
- ・浮力
- ・動水圧

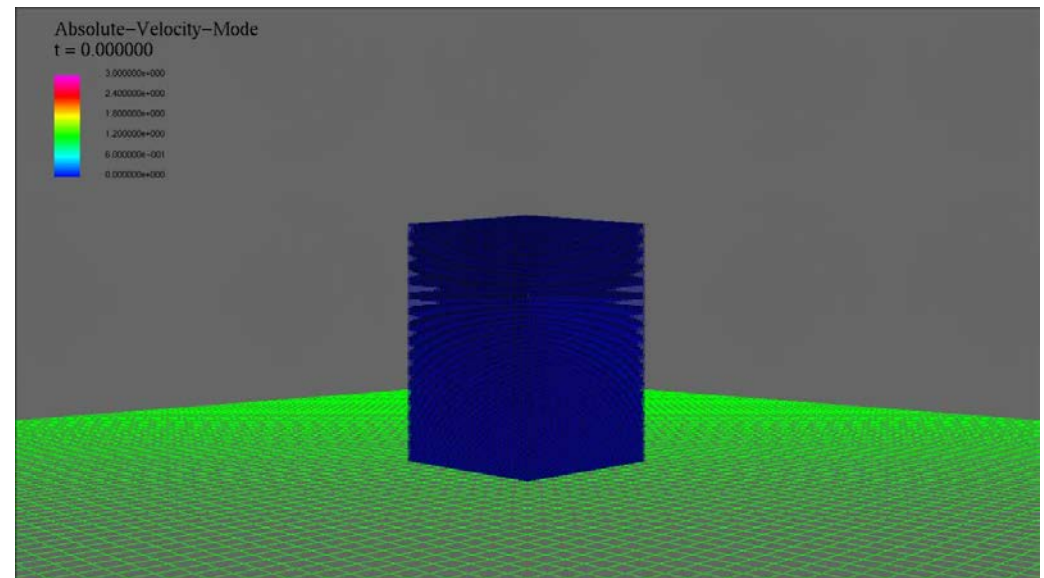
衝撃津波波力



## □ 漂流物の衝突力

- ・コンテナの衝突
- ・船舶の衝突

## MPS法(粒子法)



これらを統一的に解ける可能性が高い粒子法

## 既存の研究 MPS法での浮体挙動

増田ら; 3次元MPS法による岸壁近傍に設置された浮体式構造物の津波中挙動予測法に関する研究, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.67, 2011.

増田ら; MPS法を用いた津波中の浮体による衝突力に関する研究, 日本航海学会論文集, 第124号, pp329-336, 2011.

**浮体の回転までは評価していない**

## 既存の研究 MPS法での碎波、越流

後藤ら; 粒子法による巻き波型碎波を伴う斜面遡上過程の数値シミュレーション、海岸工学論文集、45、181-185(1998)

後藤ら; 粒子法による直立護岸前面の碎波・越波過程の数値解析、海岸工学論文集、46、46-50(2003)

**流体力までは評価していない**

# 既存の成果 MPS法での津波流体力

DEVELOPMENT OF THE INFLOW BOUNDARY WITH A FREE SURFACE TO APPLY THE MPS METHOD TO TSUNAMI ANALYSIS ON COASTAL AREAS (Koichi Masuda, Tomoki Ikoma, Yasuhiro Aida, Junpei Takayama) OMAE2012 CD-ROM

建築物に作用する津波遡上流による流体圧の評価法に関する研究 第1報 MPS法による数値シミュレーション法の適用性 (相田康洋, 増田光一, 居駒知樹) 日本建築学会環境系論文集 第78巻 第684号, pp223-229

沿岸域の建築物における津波荷重特性に関する研究 (増田光一, 大河原靖則, 相田康洋, 居駒知樹) 土木学会論文集B3(海洋開発) Vol.69(2013)No.2 p.l\_497-l\_502

## 衝撃津波波力の推定が可能

# 既存の成果 MPS法での浮体挙動

MPS法における津波作用時の浮体-流体連成解析手法 ーその1 3次元MPS法における慣性モーメントの取扱方法と基礎的検証ー (相田康洋, 増田光一, 居駒知樹, 惠藤浩朗) 日本建築学会大会(北海道)

MPS法における津波作用時の浮体 流体連成解析手法 ーその2 2次元MPS法におけるコンテナの挙動に関する数値実験ー (高山淳平, 増田光一, 居駒知樹, 惠藤浩朗, 相田康洋) 日本建築学会大会(北海道)

粒子法による津波作用時のコンテナ群の荷崩れと漂流シミュレーションに関する研究 (相田康洋, 星野智史, 増田光一, 居駒知樹, 惠藤浩朗) 日本船舶海洋工学会春季講演会

## 3次元漂流物の津波中運動を再現可能

# 漂流物の衝突力



## 既存の研究 漂流物の衝突力

- ・池野ら; 砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 48, pp846-850(2001).
- ・松富; 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No,621 II -47, pp111-127, 1999.
- ・池谷ら; 津波による漂流物の衝突力の実験と評価方法の提案, 海岸工学論文集第53巻, pp276-280(2006)

**実験ベースの研究、喫水が深いものも統一的に評価**

## 既存の研究 MPS法での衝突現象

- ・増田ら; 砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 48, pp846-850(2001).

**浮体の3次元回転運動まで考慮できるモデルではない  
弾性体への衝突と考えられるが、剛性等の情報不足**

# 既存の研究 衝突力 剛体 対 弾性体

石渡ら 日本大学理工学部修士論文集 平成25年度  
津波漂流物の衝突を想定したRC部材の挙動に関する実験的研究

$$F = V\sqrt{km} \quad (7)$$

解析解と実験値がよい精度で一致した  
衝突現象を式(7)で考えることができる

菅野ら 日本建築学会講演会2014  
津波漂流物の衝突を想定した部材の挙動に関する基礎的研究  
その2: 弾性梁部材を対象とした錘の衝突実験

$$F = V\sqrt{km} \quad (7)$$

解析解と実験値がよい精度で一致した  
衝突現象を式(7)で考えることができる

**衝突時の流体力の評価がなされていない**



# 既存の評価方法 津波漂流物の衝突

FEMA(アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁)

$$F_i = C_M v_{\max} \sqrt{km}$$

運動エネルギーとひずみエネルギーの関係

$C_M$  : 質量係数(= 2.0)

$v_{\max}$  : 最大流れ場流速

$k$  : 有効剛性

$m$  : 質量

(財)沿岸技術センター、(社)寒地港湾技術センター  
池谷ら(2006)

$$m\ddot{x} = \frac{1}{2} \rho A C_D |U - \dot{x}|(U - \dot{x}) - \rho C_M v_0 \ddot{x}$$

$$F = -\rho C_M v_0 \ddot{x}$$

ただし、 $U = \dot{x}$

船体の運動方程式

$m$  : 物体質量

$v_0$  : 基準体積 (物体の体積)

$A$  : 物体の水面下投影面積

$C_D$  : 抗力係数

$C_M$  : 質量係数

$U$  : 流れ場速度

$\rho$  : 海水の密度

# 既存の評価方法 漂流物の衝突

FEMA(アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁)

$$F_i = C_M v_{\max} \sqrt{km}$$

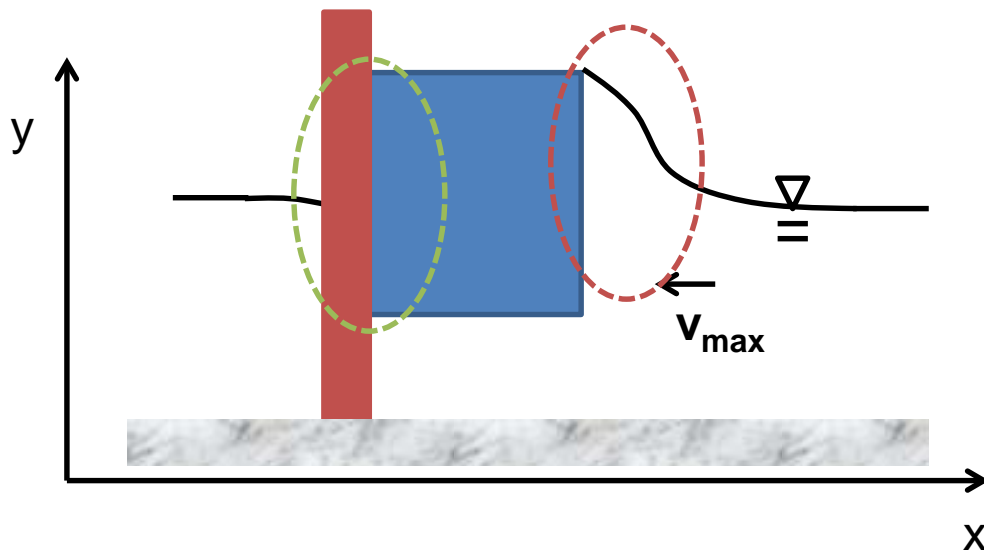
運動エネルギーとひずみエネルギーの関係

$C_M$  : 質量係数(= 2.0)

$v_{\max}$  : 最大流れ場流速

$k$  : 有効剛性

$m$  : 質量



流体力

+

浮体の衝突力

# 既存の評価方法 漂流物の衝突

FEMA(アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁)

$$F_i = C_M v_{\max} \sqrt{km}$$

運動エネルギーとひずみエネルギーの関係

$C_M$  : 質量係数(= 2.0)

$v_{\max}$  : 最大流れ場流速

$k$  : 有効剛性

$m$  : 質量

$$F_i = F_{\text{impact}} + F_{\text{fluid}}$$

$$F_{\text{impact}} = v_{\max} \sqrt{km}$$

$$F_i = v_{\max} \sqrt{km} + F_{\text{fluid}}$$



$$F_{\text{fluid}} = F_{\text{impact}}$$

$F_{\text{impact}}$  : 浮体の衝突力

$F_{\text{fluid}}$  : 衝突時流体力

流体力

+

浮体の衝突力

・衝突時流体力が衝突力と同じ大きさ

## 目的

津波漂流物が衝突した際の衝突力を明らかにする

## 期待される成果

構造設計の高精度化

## 実現するための手法

津波漂流物の衝突を考慮できる  
シミュレーションシステムを開発

# 漂流物となりえる沿岸域の大型物体

種別	質量[t]
自動車(乗用車)※1	0.8 ~ 3.0
自動車(トラック、バス等)※2	0.8 ~ 20.0
コンテナ※3	4.8 ~ 30.5
船舶(コンテナ船)	3000 ~ 60000

コンテナ、船舶は大質量かつ浅喫水  
避難施設の安全上の脅威となりうる

※1 国土交通省;車両重量区分別ベスト10, [www.mlit.go.jp/common/000111163.pdf](http://www.mlit.go.jp/common/000111163.pdf), (2014年10月29日アクセス確認)

※2 国土交通省;燃費基準値一覧, [www.mlit.go.jp/jidosha/sesaku/environment/ondan/mokuhyou.pdf](http://www.mlit.go.jp/jidosha/sesaku/environment/ondan/mokuhyou.pdf), (2014年10月29日アクセス確認)

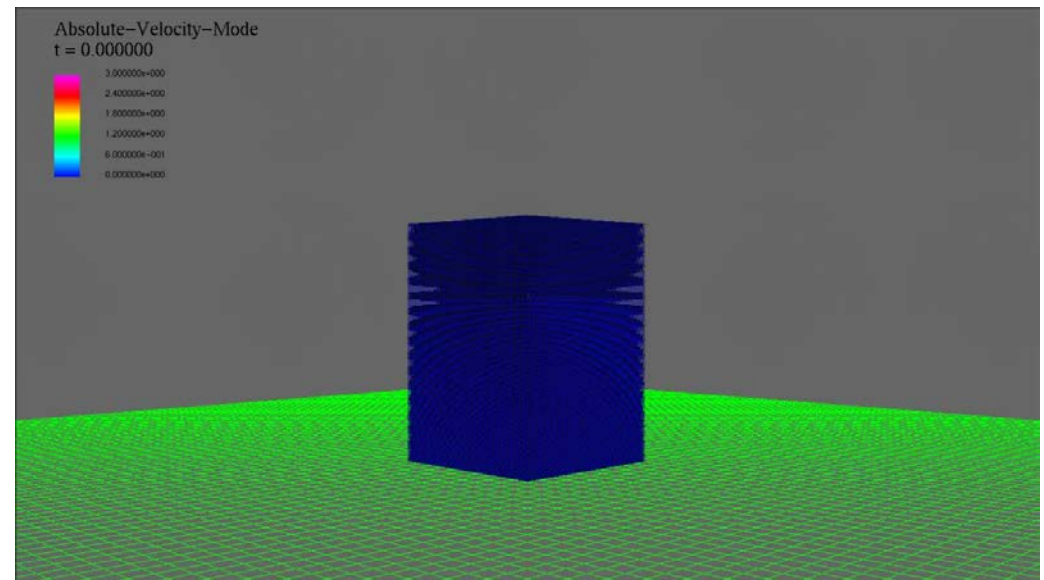
※3 国土技術政策総合研究所 高橋宏直;世界経済の動脈物流の実態-世界を駆けめぐる国際コンテナ貨物の最新事情-, [www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0482pdf/ks048212.pdf](http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0482pdf/ks048212.pdf), 2008年12月2日, (2014年10月29日アクセス確認)

# 手法 沿岸部, 陸域での津波とMPS法

- 砕波
- 越波、越流
- 建築物への津波の衝突
- 漂流物を伴う流れ場



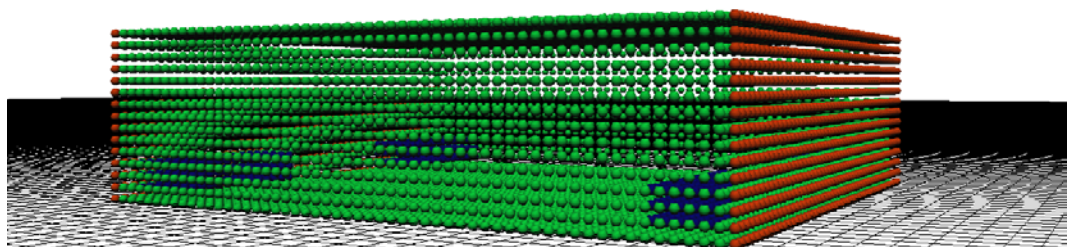
## MPS法(粒子法)



これらを統一的に解ける可能性が高い粒子法を利用する

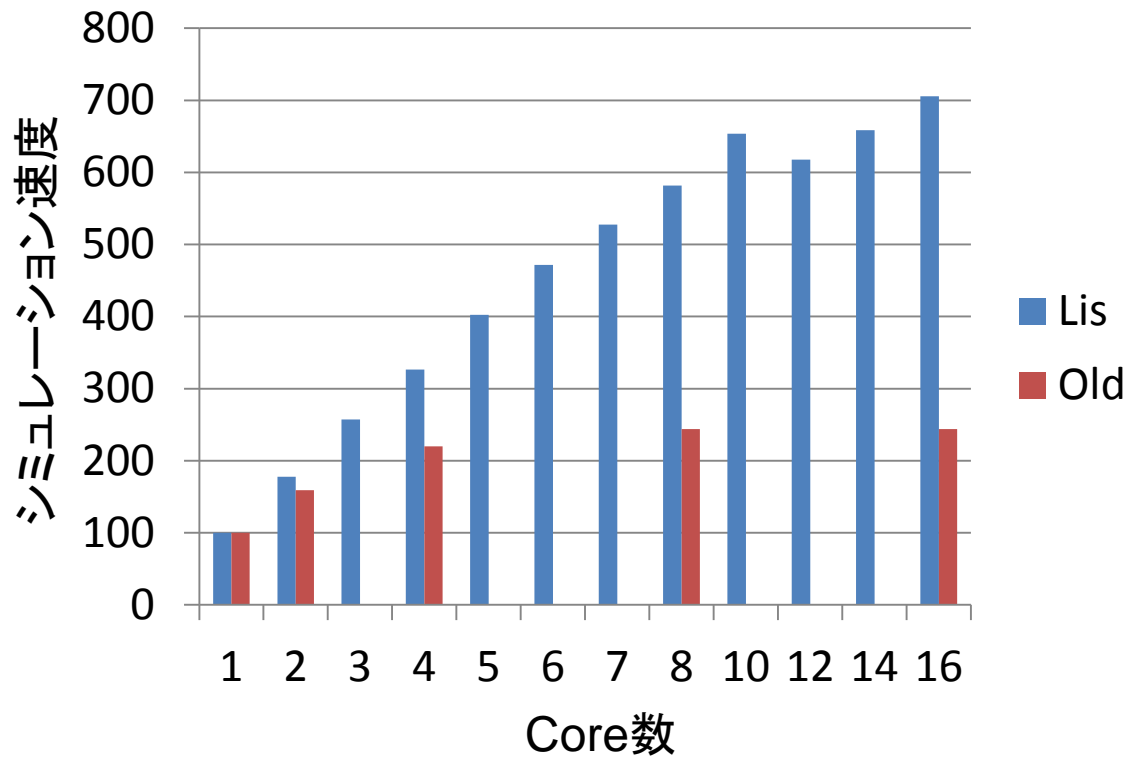
# 手法 高精度な浮体挙動再現のためのMPS法改良点

□ 異なる密度の粒子を統一  
的に解くことができる浮体  
のモデル化



□ 負圧の考慮ができるモ  
デル化

□ 並列処理による計算速  
度の向上





# 手法 技術的問題 衝突問題におけるMPS法の問題点

- ・壁境界では粒子間距離以上の変位は解くことができない
- ・**衝突面積によって結果が変わる** (有川の指摘PACON2014)
- ・角の衝突(片当たり)では漂流物が壁を貫通する

粒子で構造物をモデル化するには限界がある

以上の制限を受けない  
弾性境界を考える

# 弾性境界 理論 並進運動と回転運動

$$F = ku, \quad F = m \frac{D^2 dx}{Dt^2}$$

$$ku + m \frac{D^2 dx}{Dt^2} = 0 \quad \mathbf{r} \times ku + \mathbf{I} \frac{D^2 d\theta}{Dt^2} = 0$$

$u$ : 変位ベクトル

$dx$ : 浮体修正移動量ベクトル

$\mathbf{I}$ : 慣性モーメントテンソル

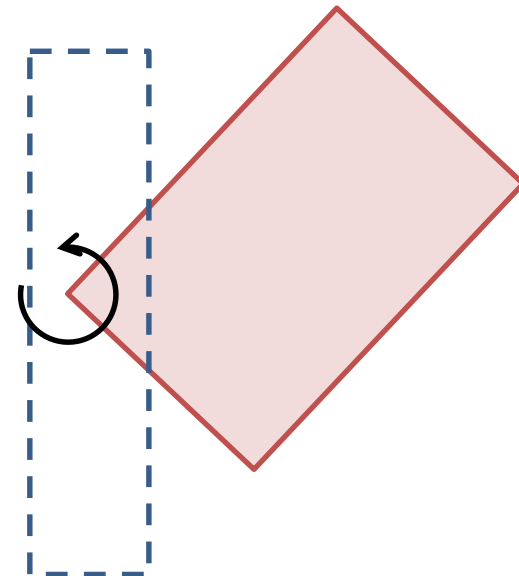
$d\theta$ : 浮体修正回転量ベクトル

$F$ : 力ベクトル

$k$ : 剛性

仮定

- ・弾性衝突を仮定
- ・片当たりを考慮
- ・衝突物は剛体
- ・弱連成問題として解く

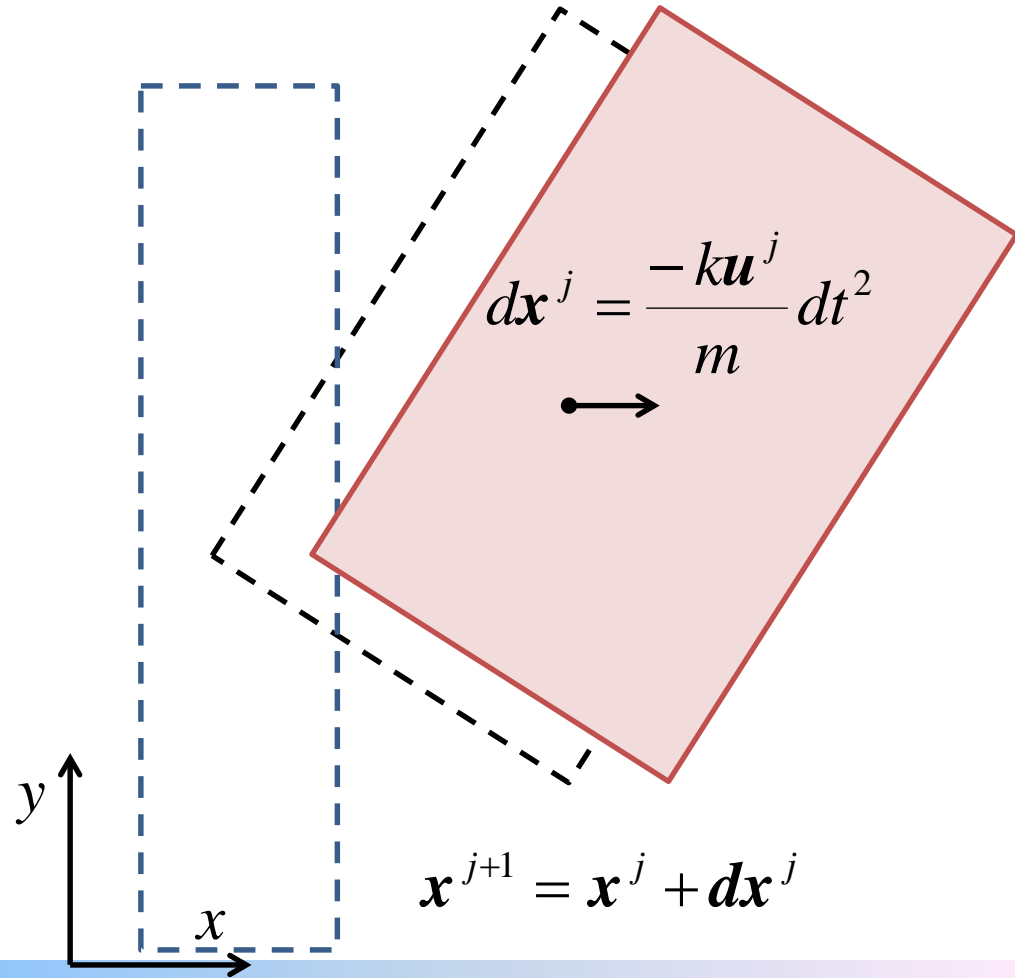
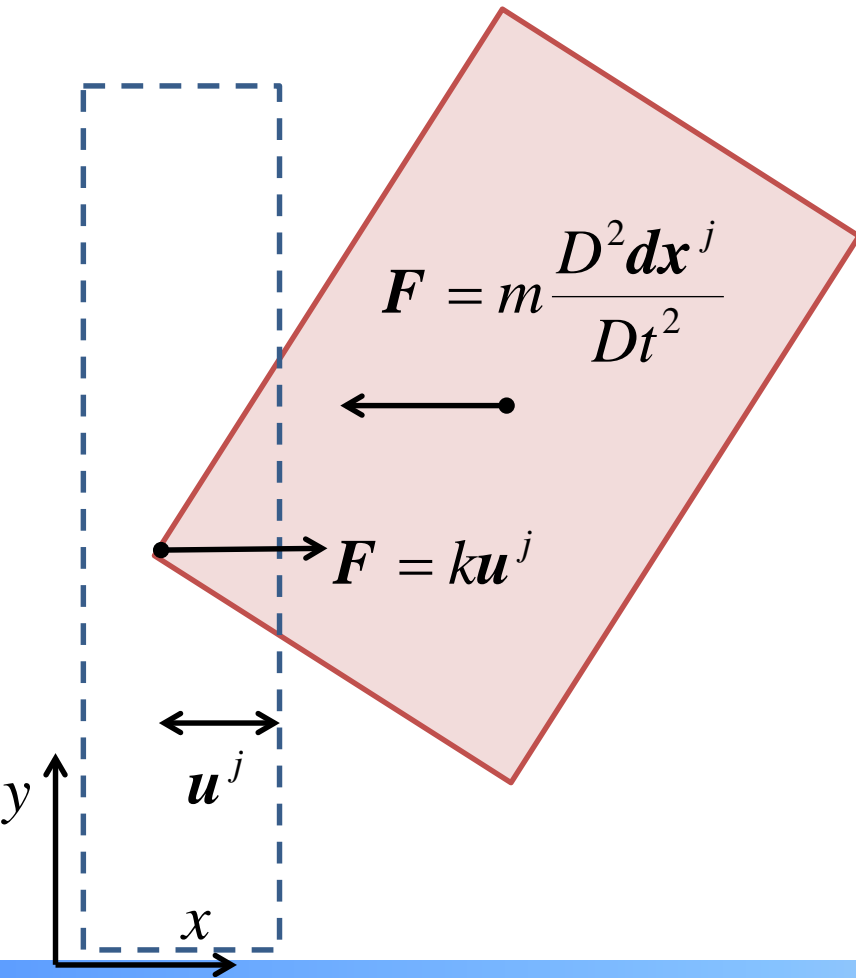


# 弾性境界 理論 並進運動

$$ku + m \frac{D^2 dx}{Dt^2} = 0$$

$j$ ステップ

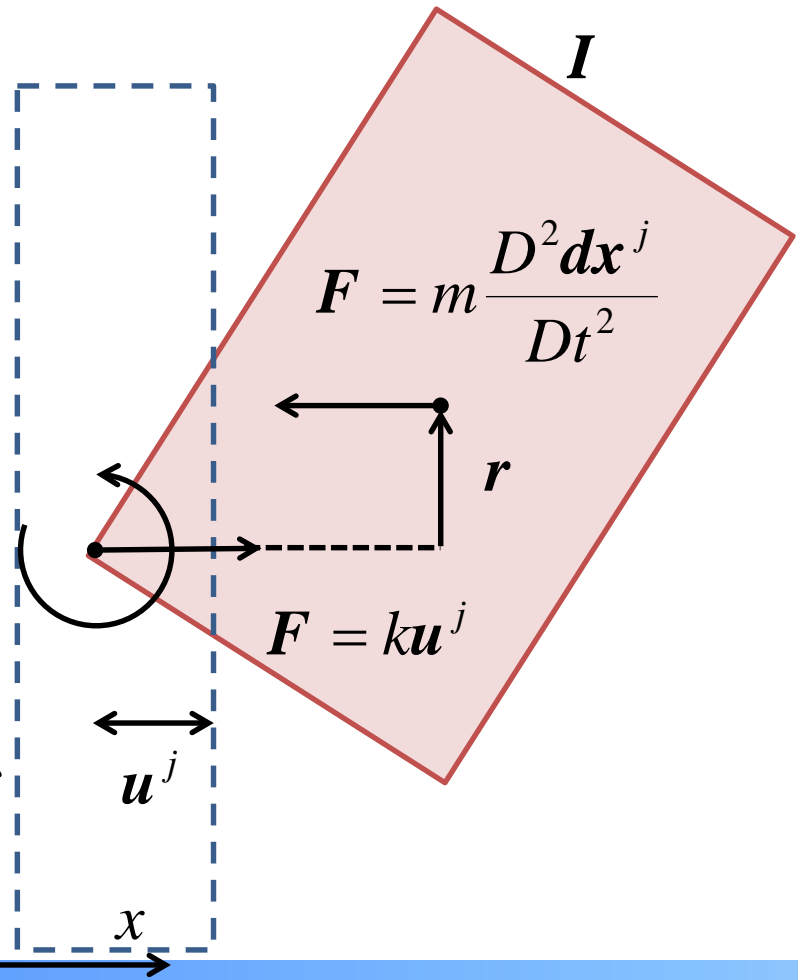
$j+1$ ステップ



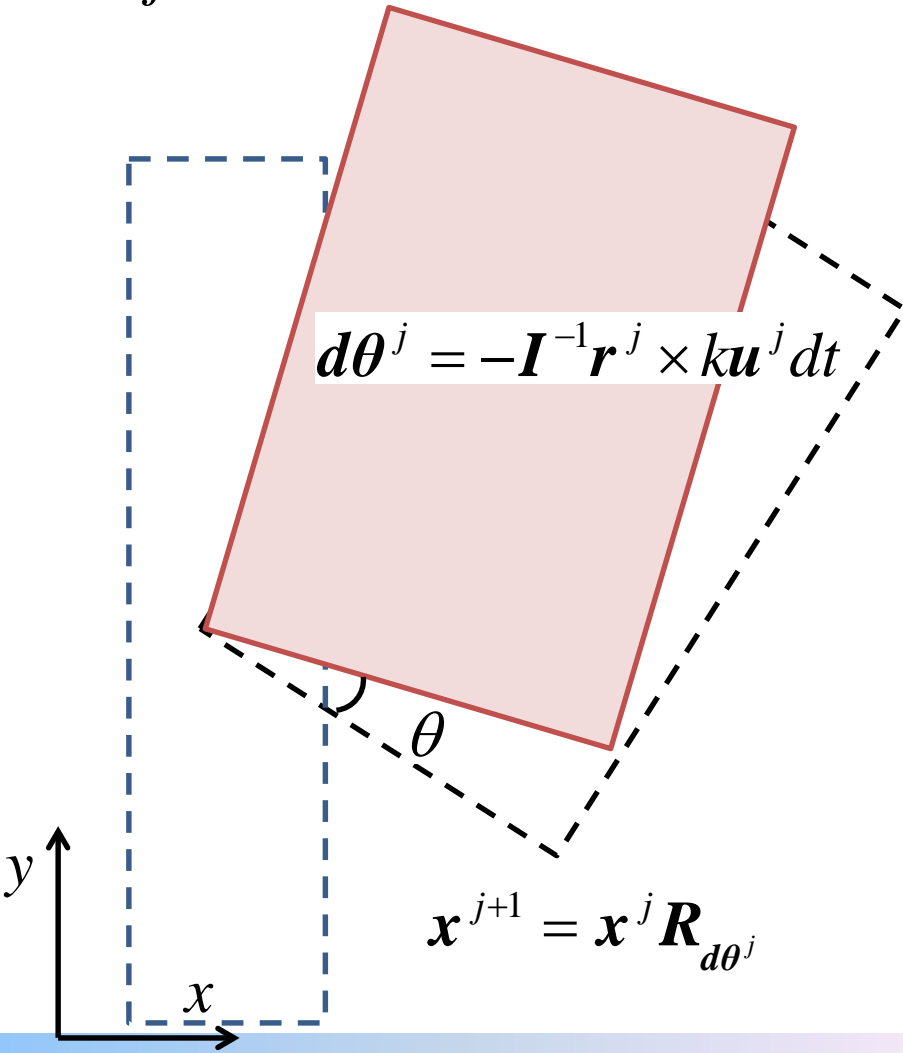
# 弾性境界 理論 回転運動

$$\mathbf{r} \times k\mathbf{u} + \mathbf{I} \frac{D^2 d\theta}{Dt^2} = 0$$

$j$ ステップ



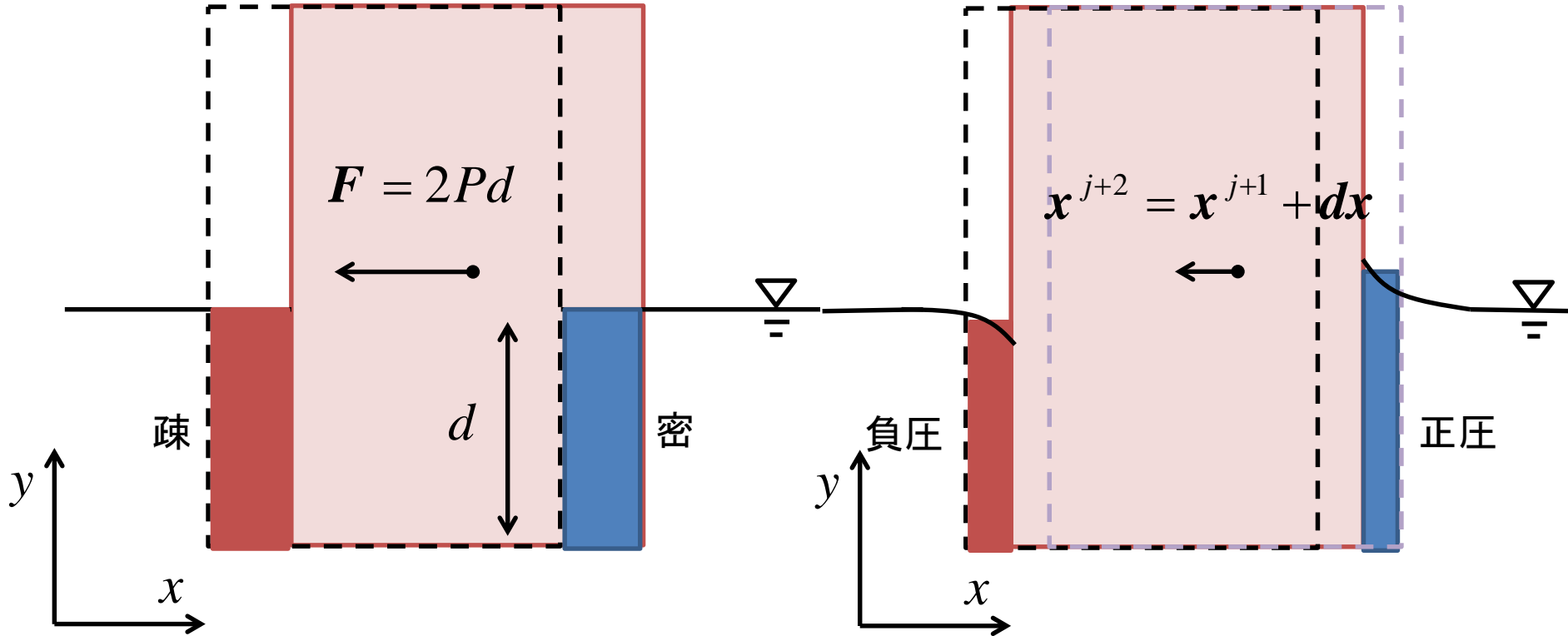
$j+1$ ステップ



# 弾性境界 理論 流体との連成イメージ

$j+1$ ステップ

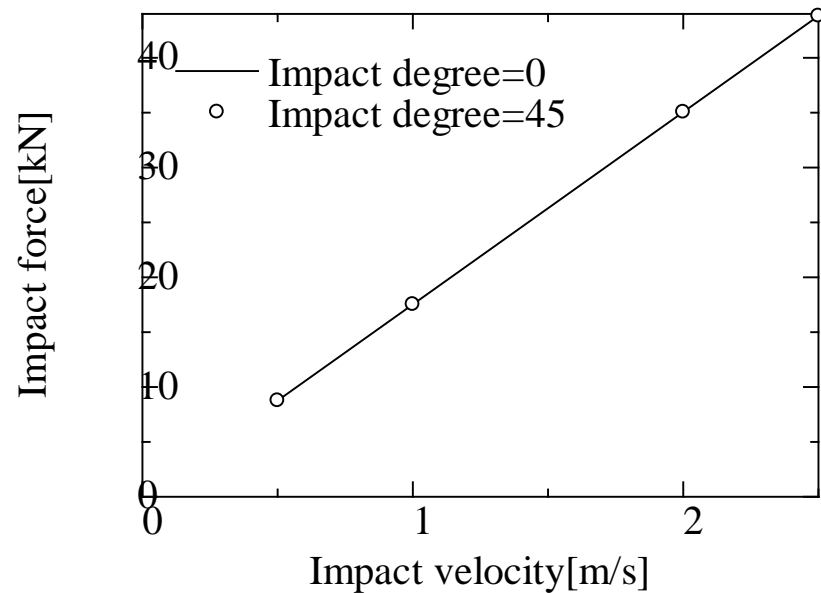
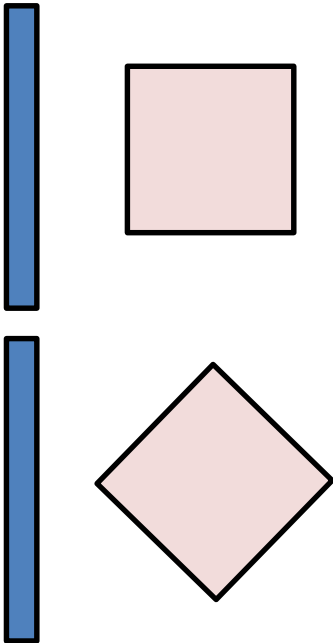
$j+2$ ステップ



# 弾性境界 衝突面積変化 結果

Impact degree

Stiffness[kN/mm]	22.8			
Mass[kg]	60.0			
Particle size[m]	0.01			
Impact velocity[m/s]	0.5	1.0	2.0	2.5
Impact degree[deg]	0.0		45.0	



衝突角度(衝突面積)によらず衝突力が完全に一致  
※回転運動量が発生しない衝突角度の場合において

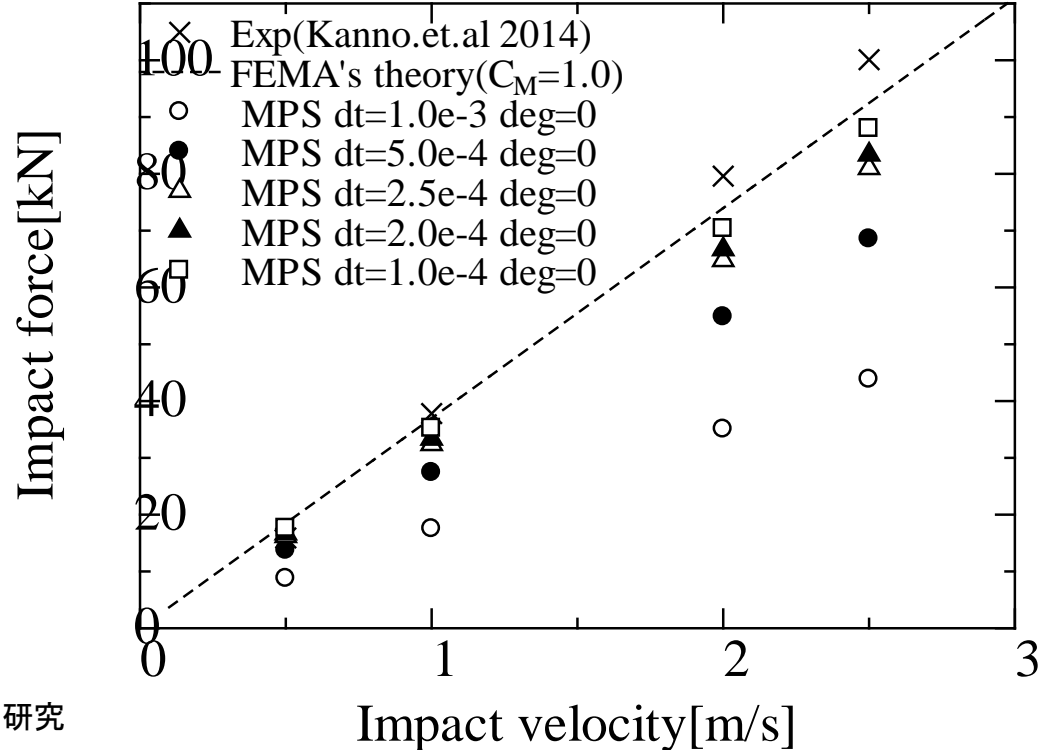
# 弾性境界 結果 衝突力の最大値

Stiffness[kN/mm]	22.8				
Mass[kg]	60.0				
Particle size[m]	0.01				
Impact velocity[m/s]	0.5	1.0	2.0	2.5	
Dt[sec]	1.0e-3	5.0e-4	2.5e-4	2.0e-4	1.0e-4

*FEMA's theory*

$$F_i = C_M v_{\max} \sqrt{km}$$

時間刻みによって  
精度が変化



菅野ら 日本建築学会講演会2014  
津波漂流物の衝突を想定した部材の挙動に関する基礎的研究  
その2: 弾性梁部材を対象とした錘の衝突実験

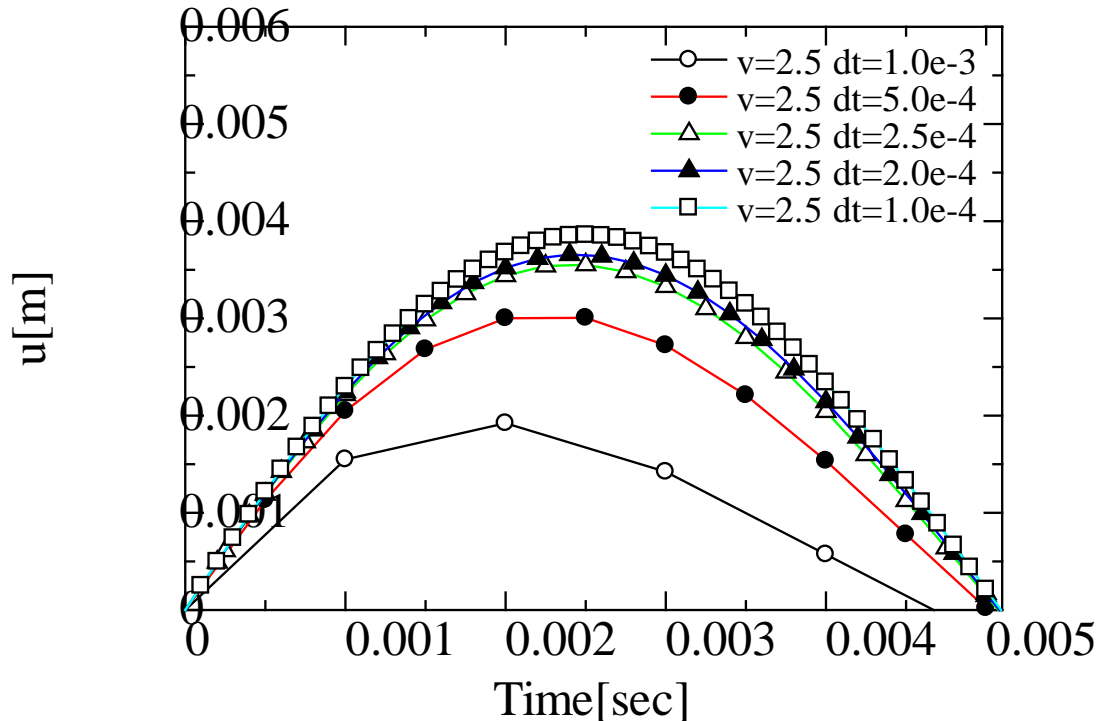


# 弾性境界 衝突時間

Stiffness[kN/mm]	22.8				
Mass[kg]	60.0				
Particle size[m]	0.01				
Impact velocity[m/s]	2.5				
Dt[sec]	1.0e-3	5.0e-4	2.5e-4	2.0e-4	1.0e-4

$$\frac{T}{2} = \pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 0.0051[\text{sec}]$$

衝突時間も一致する



# 弾性境界条件 時間刻みをどう決めるか？

$$ku + m \frac{D^2 x}{Dt^2} = 0$$

完全弾性衝突を仮定  
衝突時波形の一般解  
から衝突時間を求める

$$\frac{T}{2} = \pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$M = \frac{\pi \sqrt{\frac{m}{k}}}{dt}$$

$T$  : sin 波周期

$m$  : 質量

$k$  : 剛性

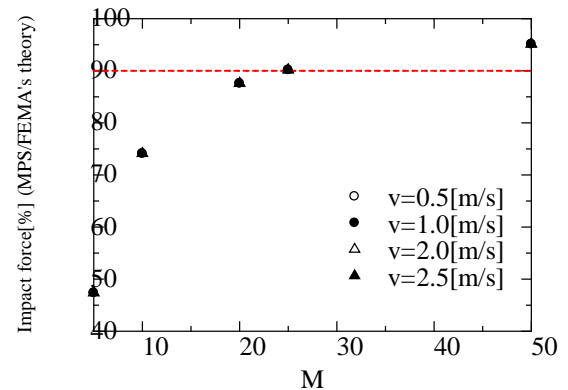
$dt$  : 時間刻み

$M$  : 無次元時間

$M$ : 衝突波形の分割数(無次元時間)  
精度を無次元時間  $M$  で評価する

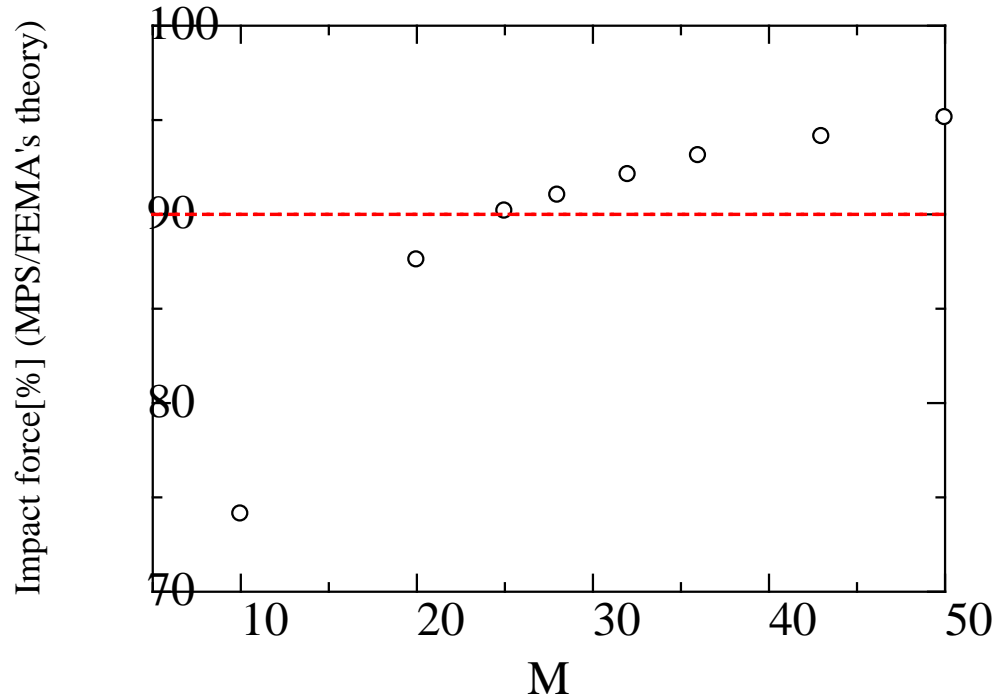
# 弾性境界条件 最大衝突力の精度と時間刻み

Stiffness[kN/mm]	22.8				
Mass[kg]	60.0				
Particle size[m]	0.01				
Impact velocity[m/s]	2.5				
Dt[sec]	1.0e-3	5.0e-4	2.5e-4	2.0e-4	1.0e-4



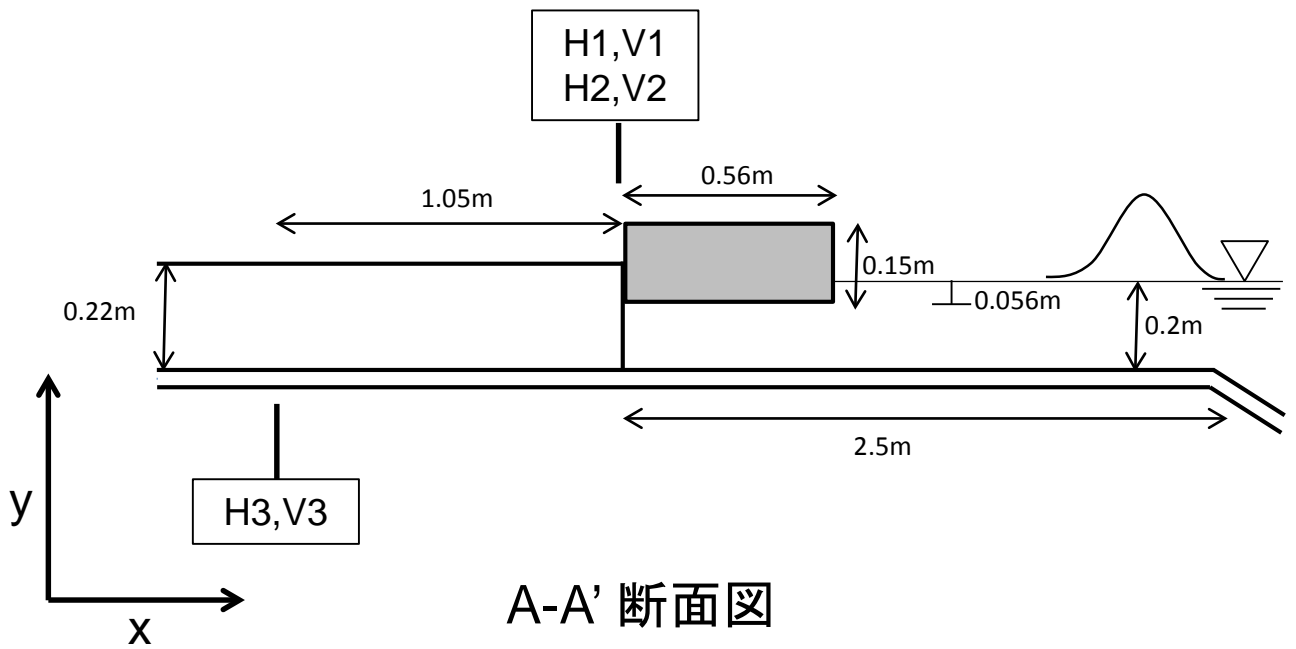
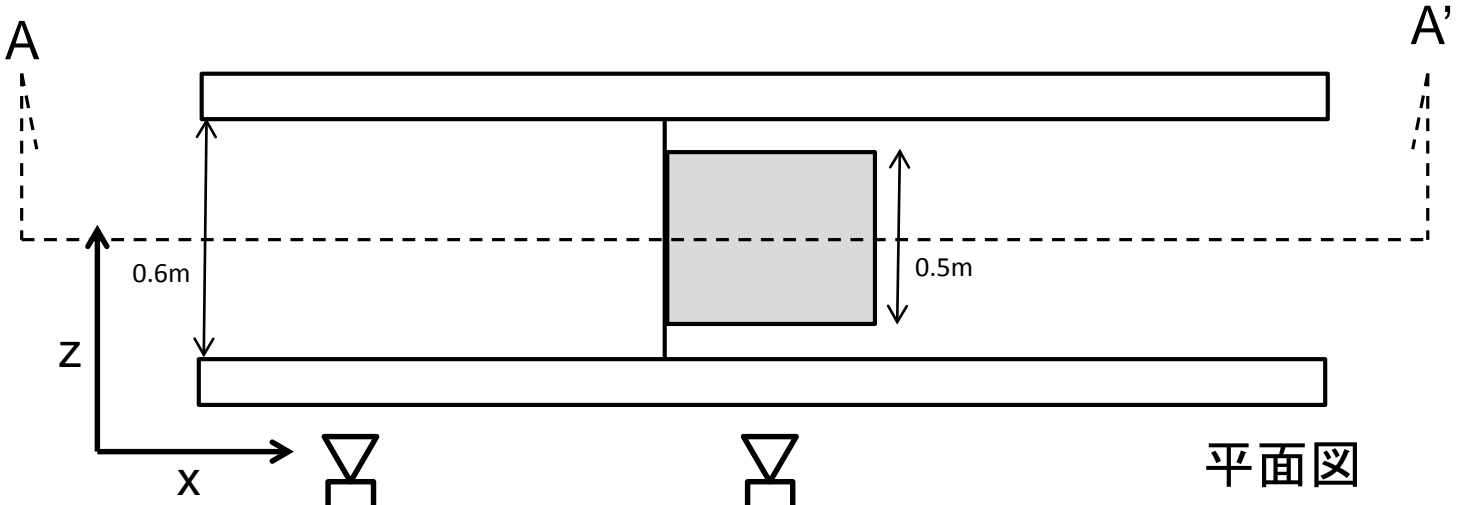
分割数25以上で  
90%以上の精度  
衝突速度には依存しない

$$M \geq 50$$



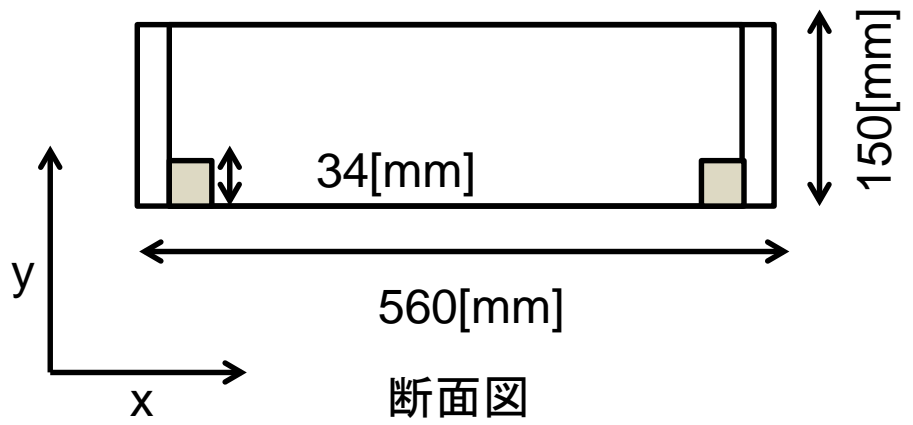
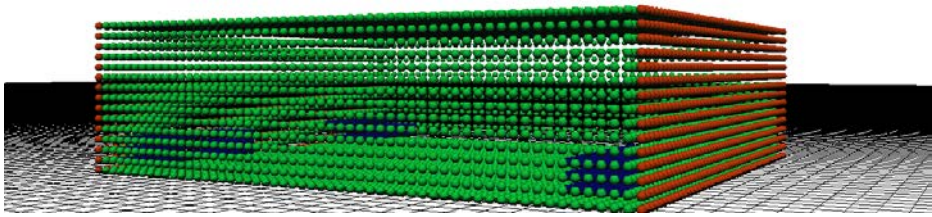
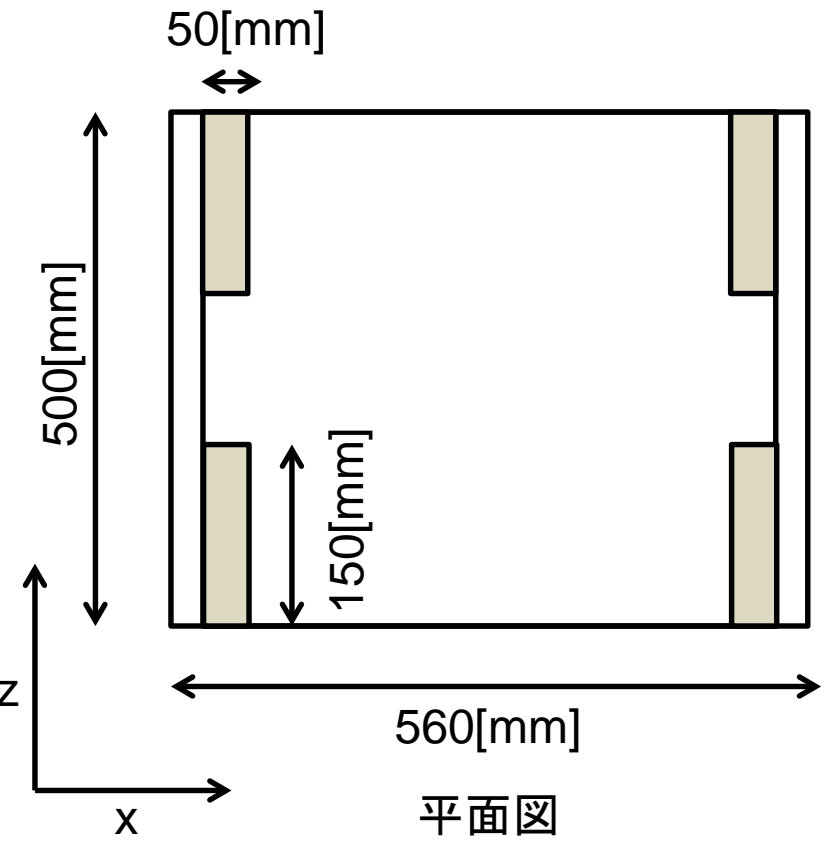
Mは50以上を目安に(95%以上の精度)

# 津波漂流物の漂流挙動のための水槽実験概要



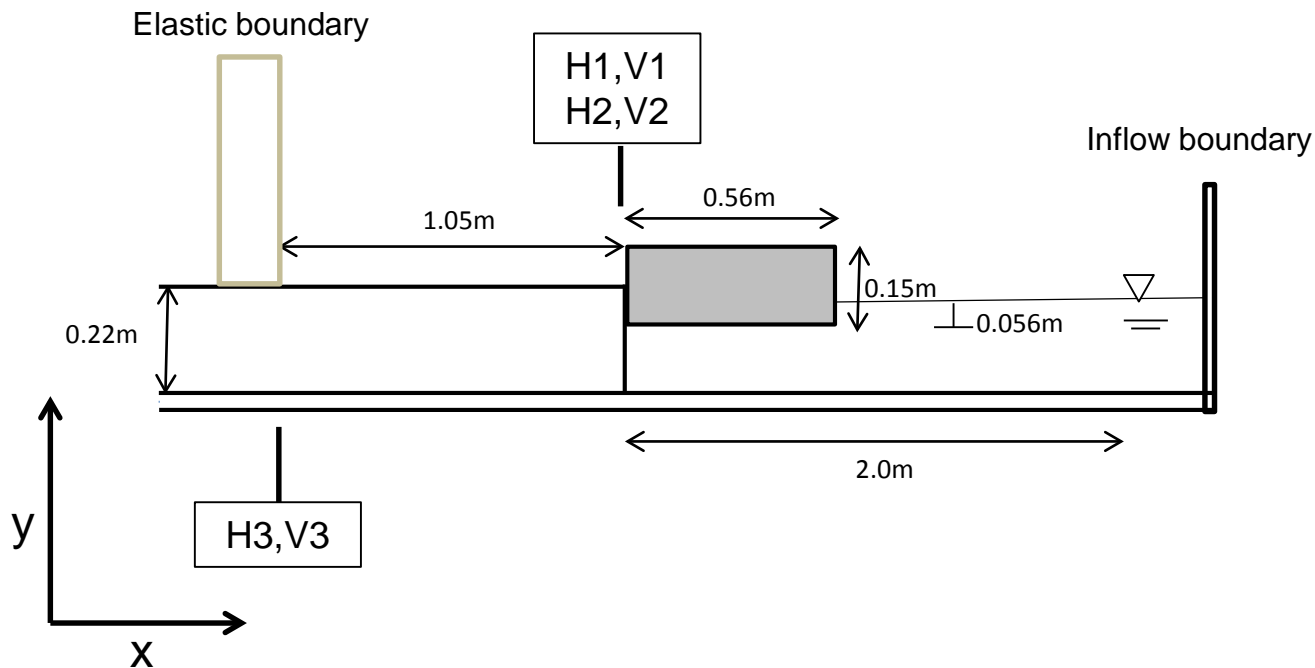
# 浮体図面3D $d=0.01[m]$

	質量[kg]	重心高さ[mm]	喫水[mm]	慣性モーメント[kgm <sup>2</sup> ]
実験模型	15.4	47.47	56.0	
MPS法	15.4	45.0	56.2	

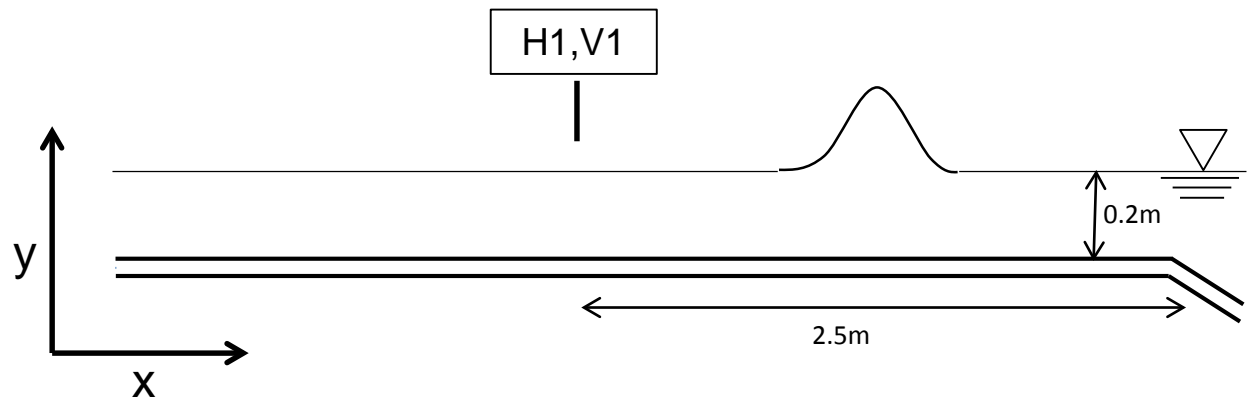


# シミュレーション条件

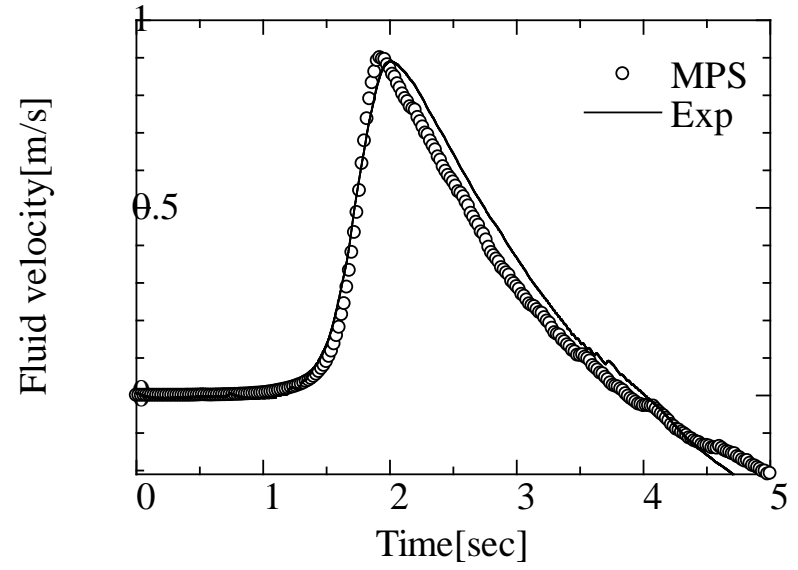
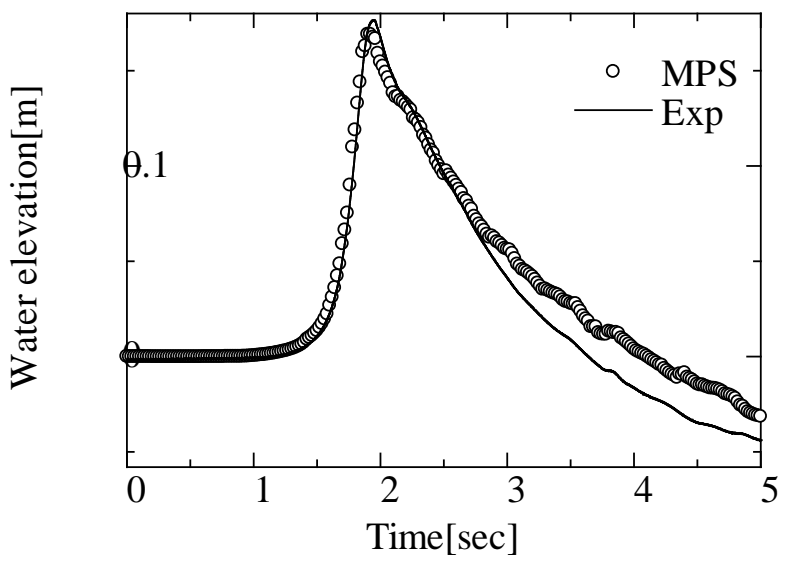
Simulation time[sec]	4.0
dt[sec]	5.0e-4
Particle number[million]	0.64
Stiffness[N/m]	1.34e+5
M(無次元衝突時間)	66



# 水槽特性 岸壁なしでの岸壁先端位置 H1,V1

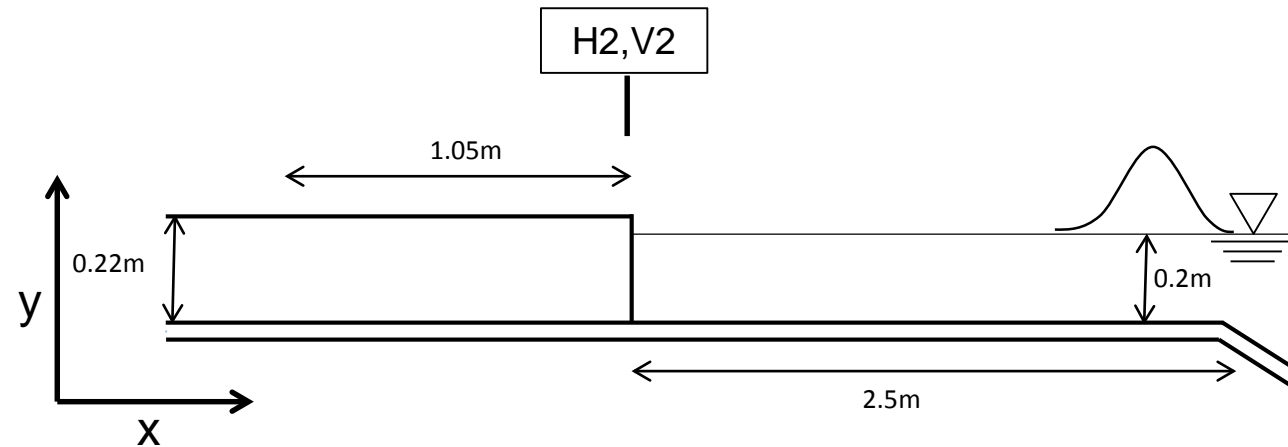


よい一致を示している

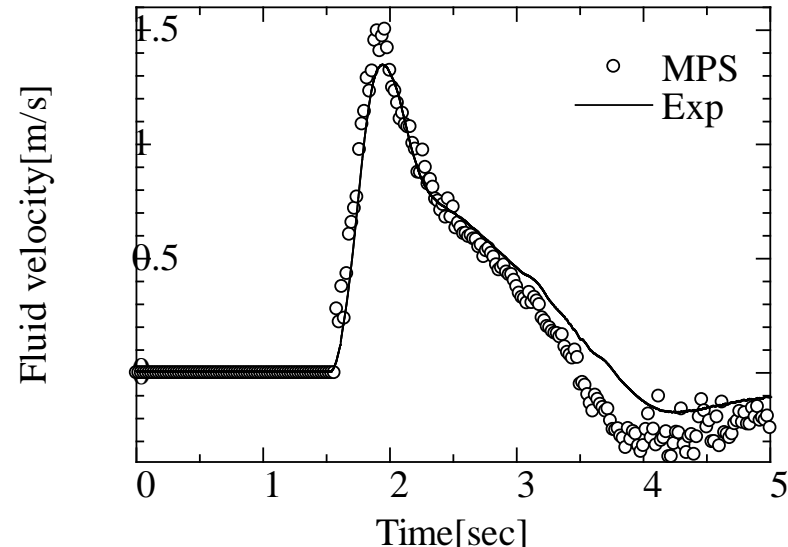
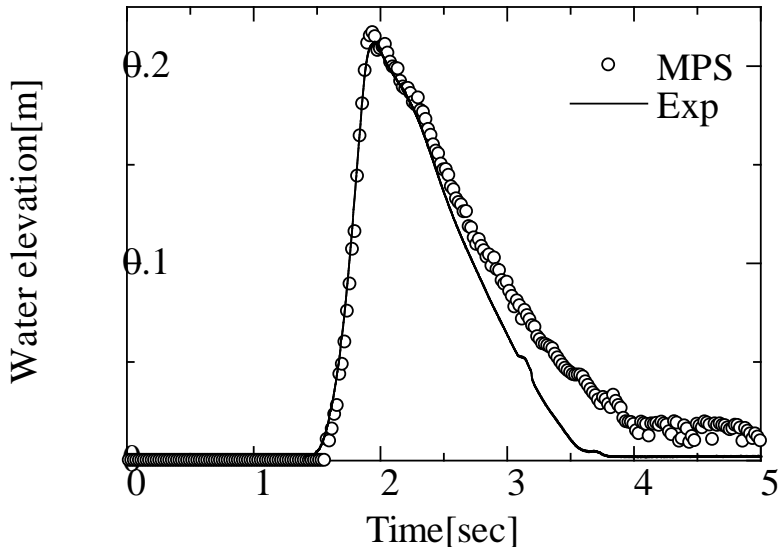




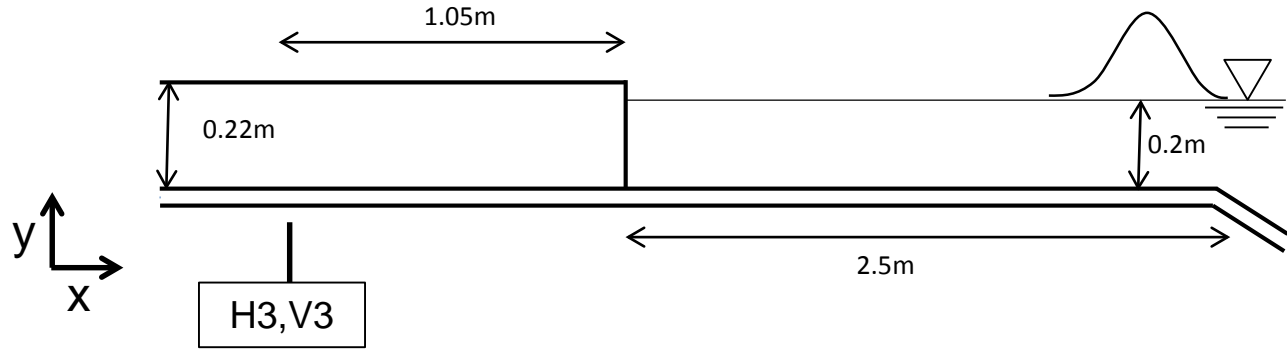
# 水槽特性 岸壁先端位置



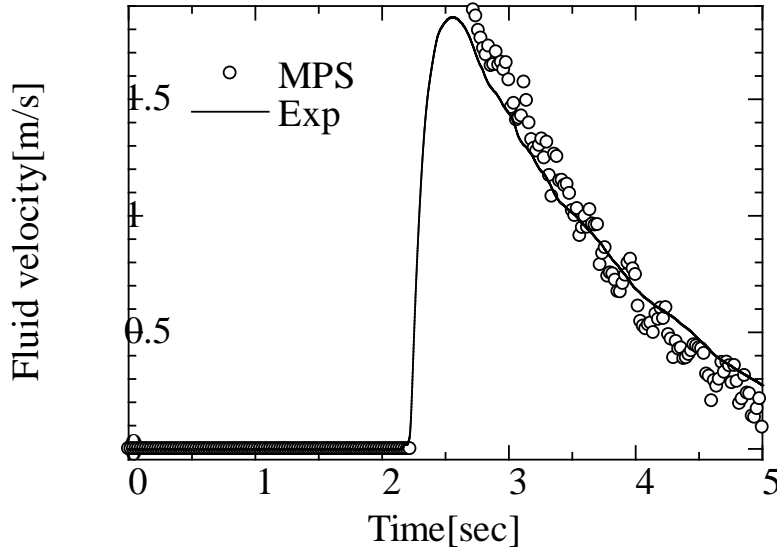
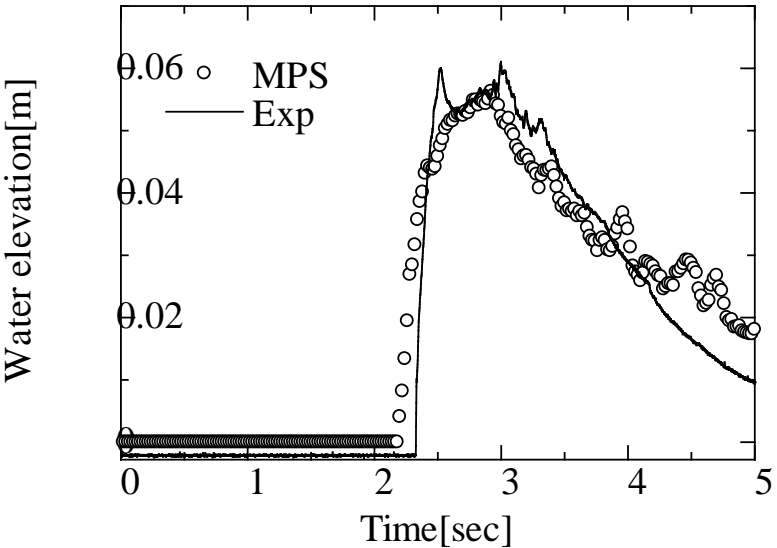
よい一致を示している



# 水槽特性 岸壁先端から1.0m

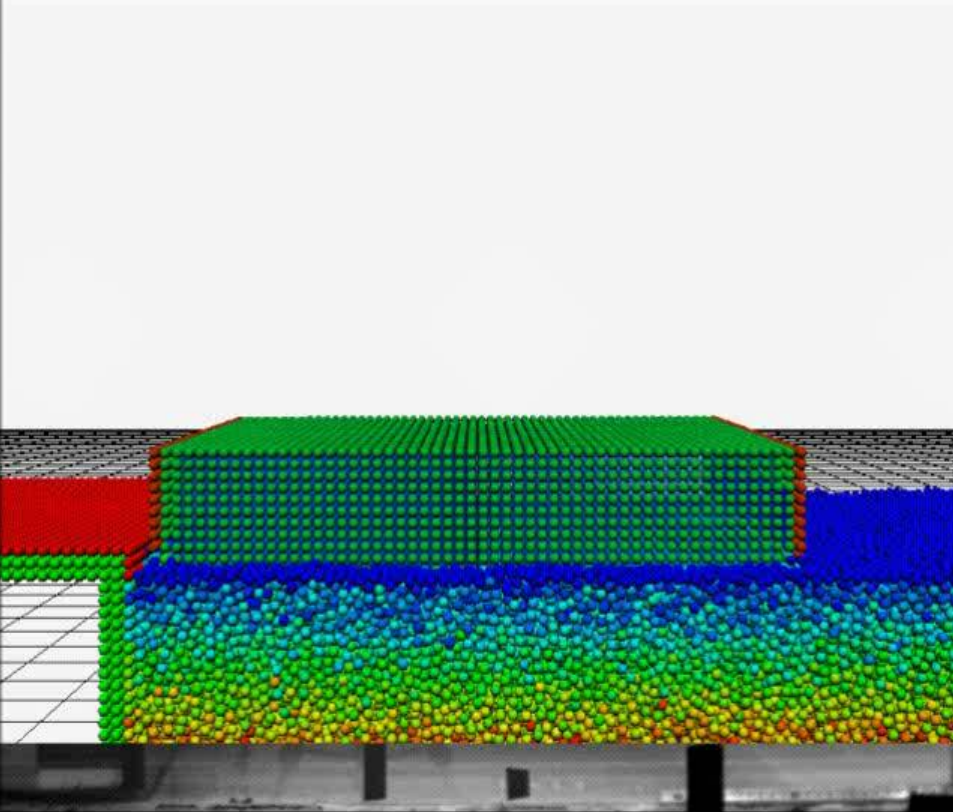


良い一致を示している

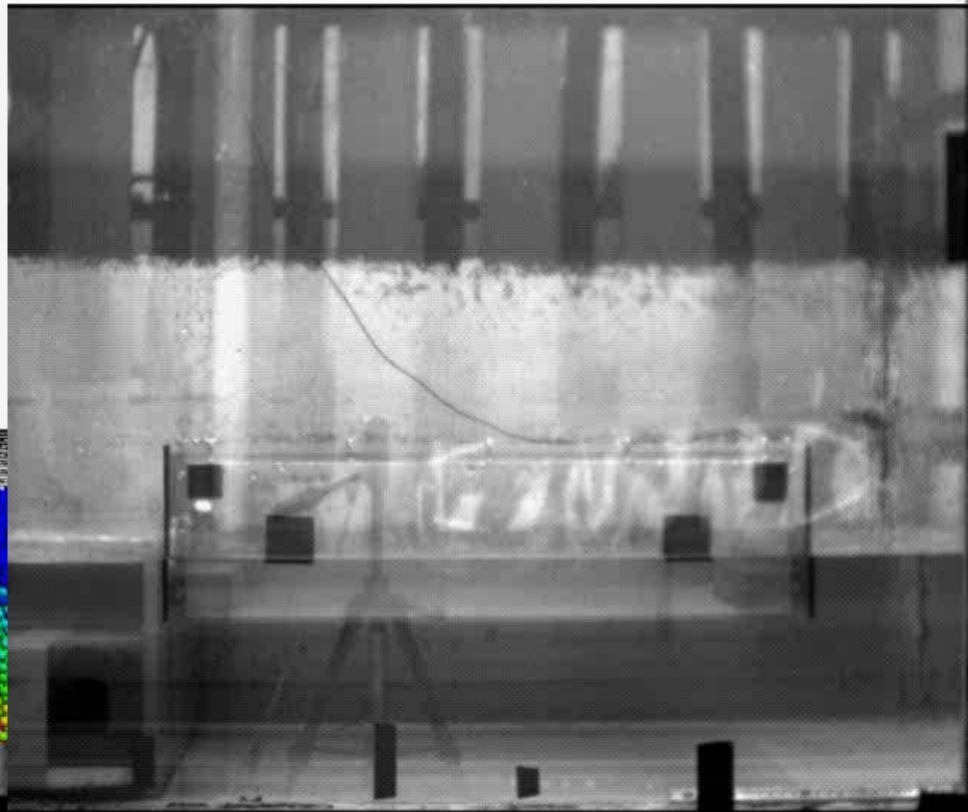


# 乗りあがり挙動 実験とシミュレーション

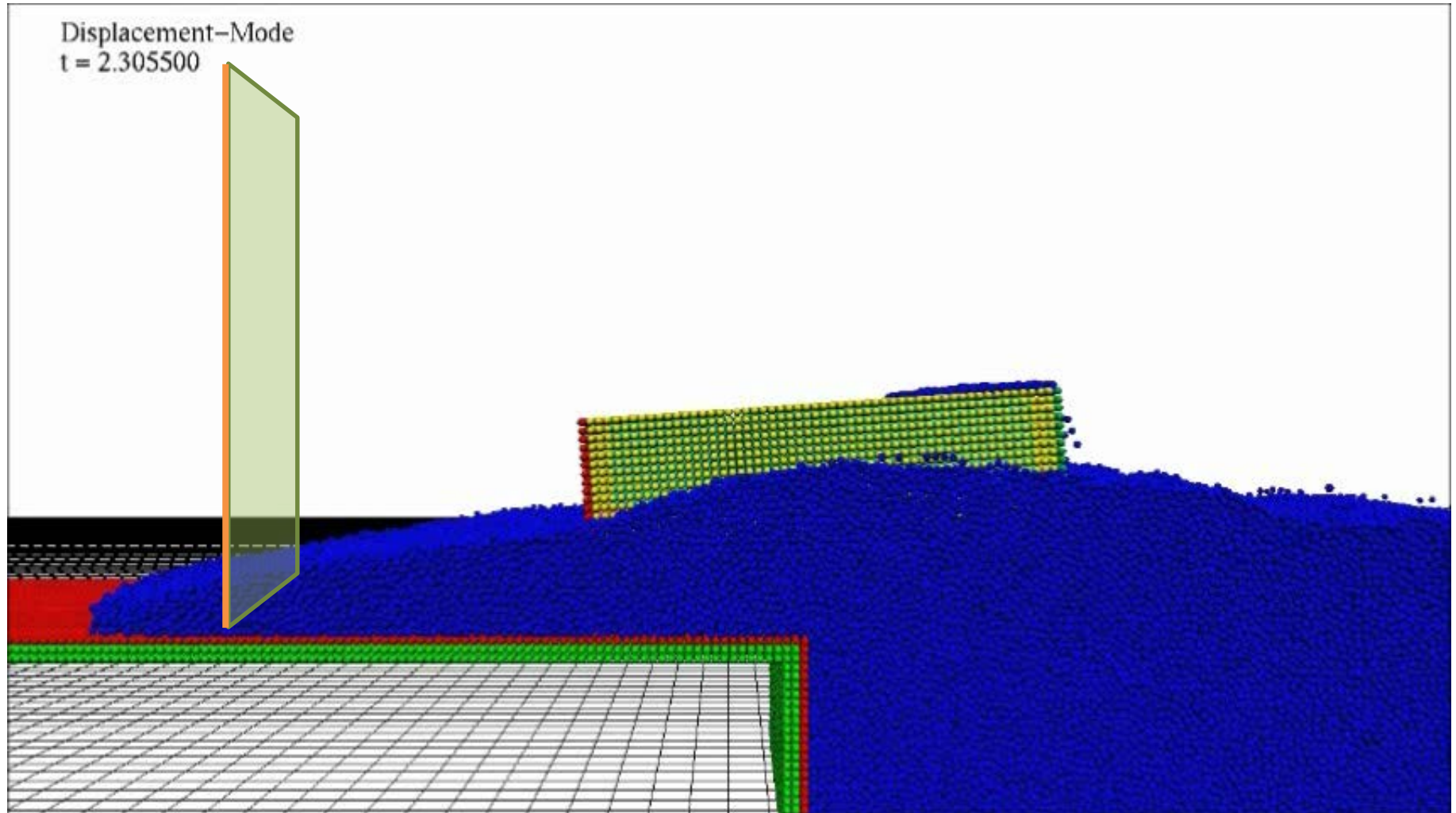
MPS



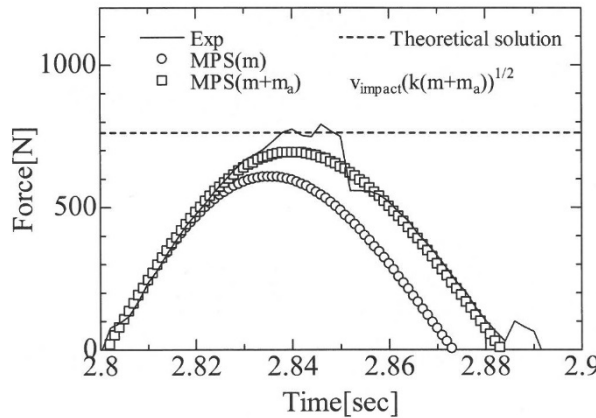
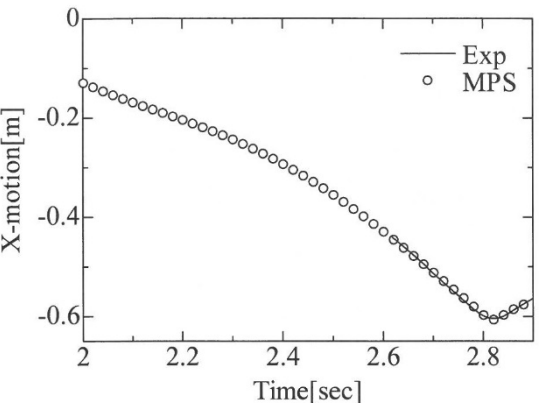
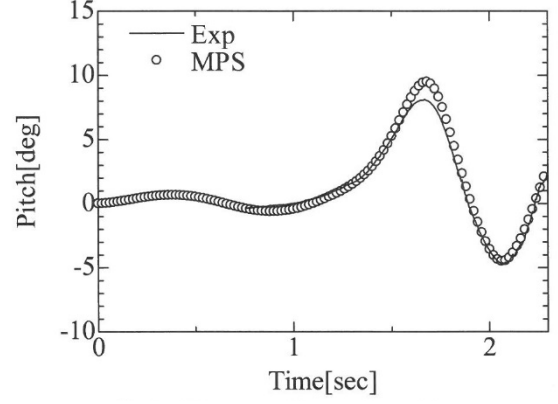
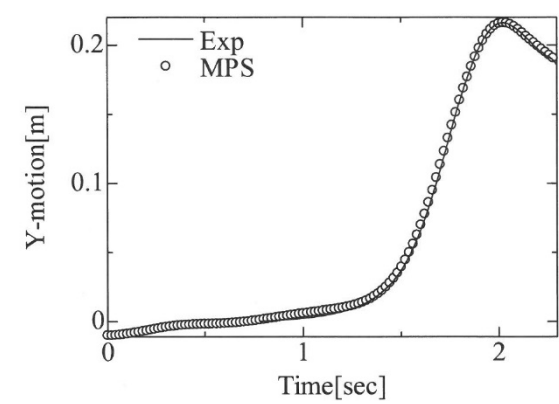
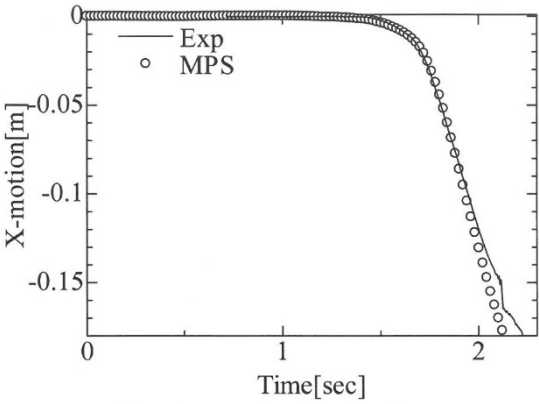
Exp



# 乗りあがり挙動 実験とシミュレーション



# 乗りあがり挙動 実験とシミュレーション

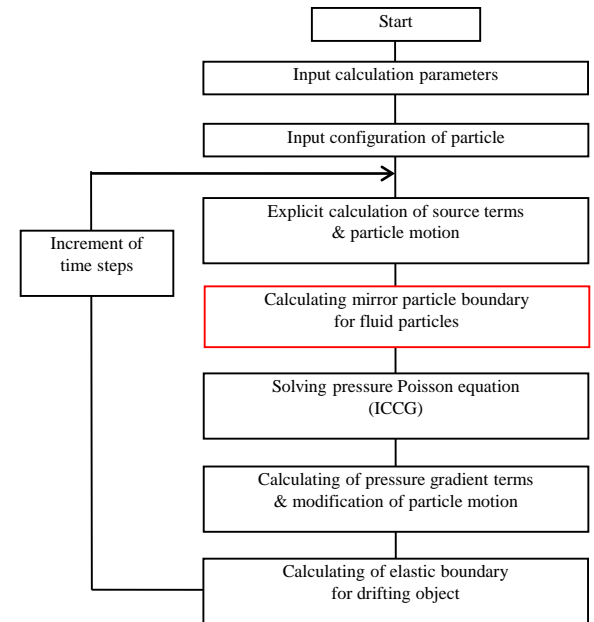
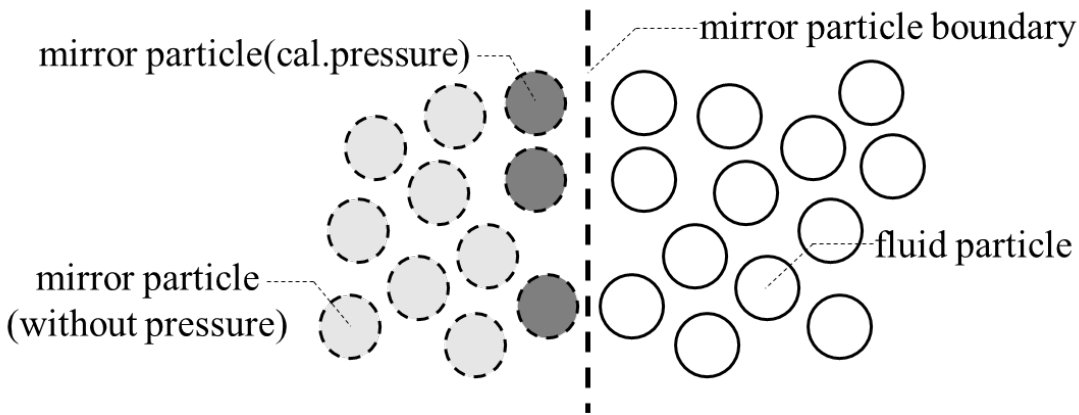


衝突力は再現できた

衝突時の流体による影響は今後の研究テーマ



# Virtual Elastic Boundary with Mirror particle boundary

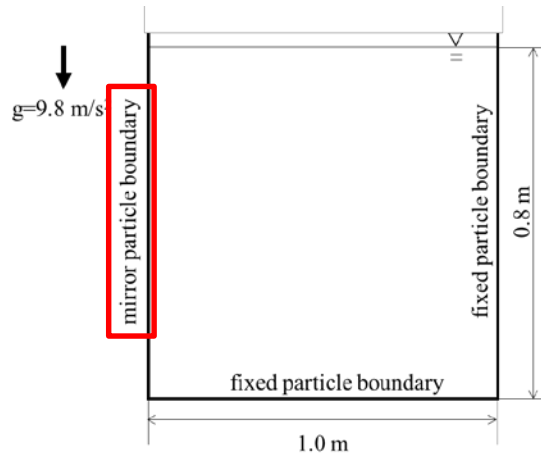


Calculating mirror particle boundary  
for only fluid particles  
not for drifting object particles

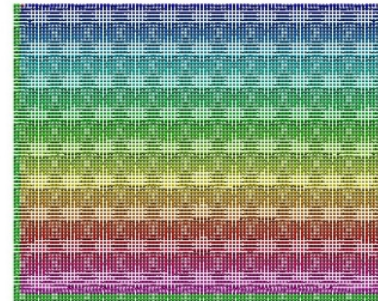
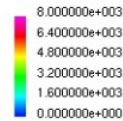


# Virtual Elastic Boundary with Mirror particle boundary

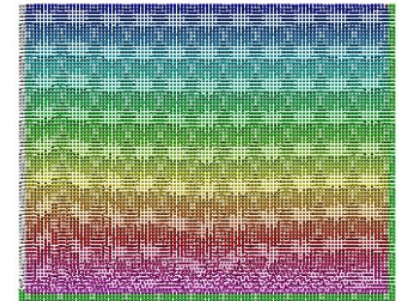
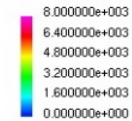
Fluid density[kg/m <sup>3</sup> ]	1000
Particle distance[m]	0.01
Particle number (with fixed wall particles)	9475 (9715)
$r_e$	2.1
Simulation time[s]	1.0
$\Delta t$ [s]	1.00E-03



Pressure-Mode  
 $t = 1.000500$



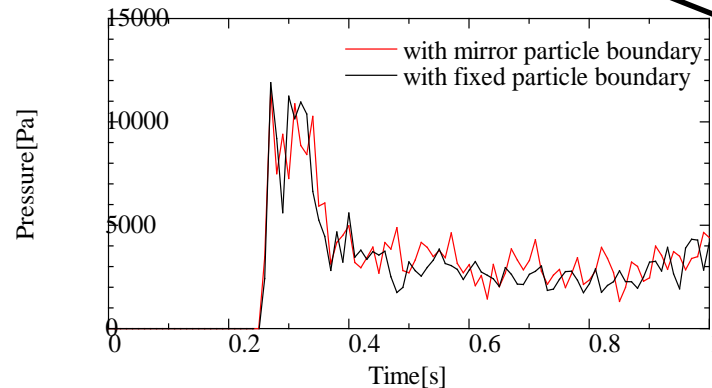
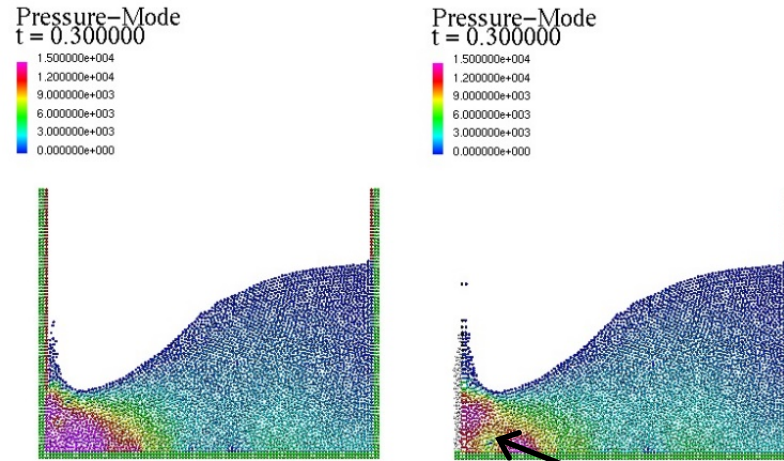
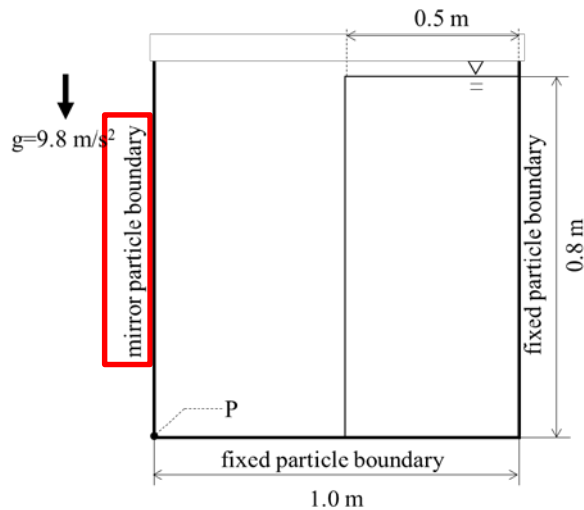
Pressure-Mode  
 $t = 1.000500$



Hydrostatic pressure can be calculated correctly

# Virtual Elastic Boundary with Mirror particle boundary

Fluid density[kg/m <sup>3</sup> ]	1000
Particle distance[m]	0.01
Particle number (with fixed wall particles)	5475 (5715)
$r_e$	2.1
Simulation time[s]	1.0
$\Delta t$ [s]	5.00E-04

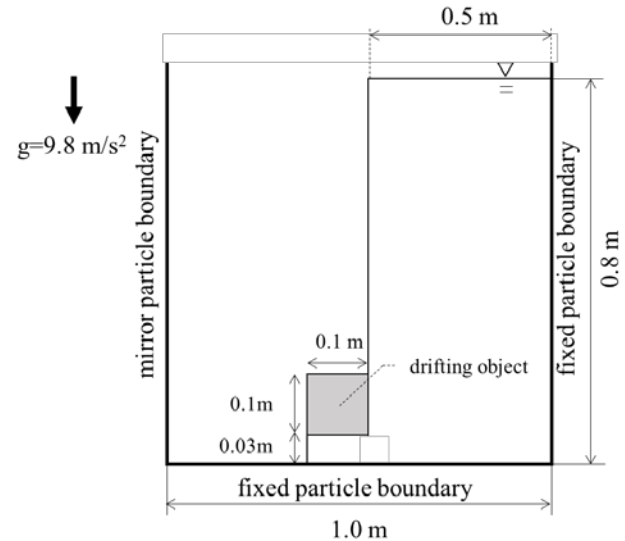


Because of miss detection of free surface particle

Fluid impact pressure can be calculated

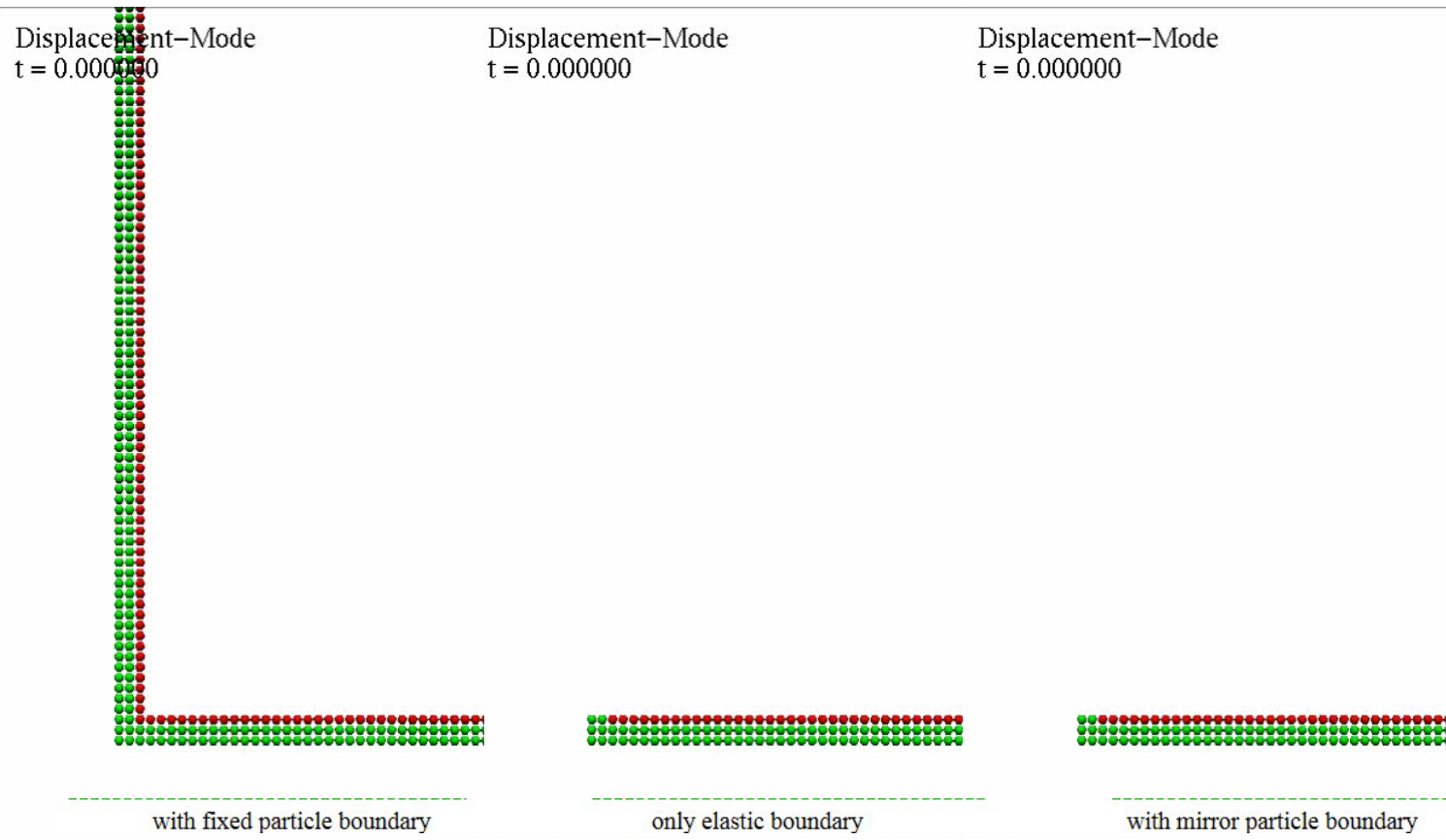
# Virtual Elastic Boundary with Mirror particle boundary

Fluid density[kg/m <sup>3</sup> ]	1000
Particle distance[m]	0.01
Particle number (with fixed wall particles) {with elastic boundary}	4625 (4865) {4625}
$r_e$	2.1
Simulation time[s]	1.0
$\Delta t$ [s]	5.00E-04
Stiffness[N/m]※Only elastic boundary	1.00E+05

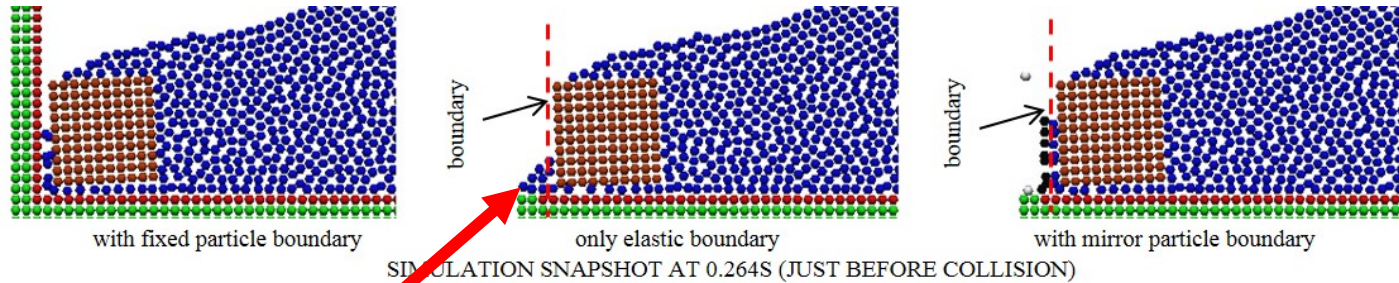


	Impact force	Fluid force
Only elastic boundary	back calculation from displacement	-
Elastic boundary with mirror particle boundary	back calculation from displacement	pressure integral
Fixed particle boundary	pressure integral	pressure integral

# Virtual Elastic Boundary with Mirror particle boundary

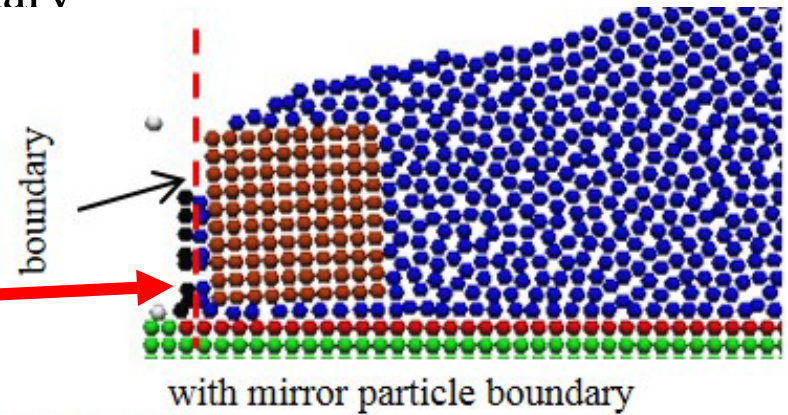


# Virtual Elastic Boundary with Mirror particle boundary

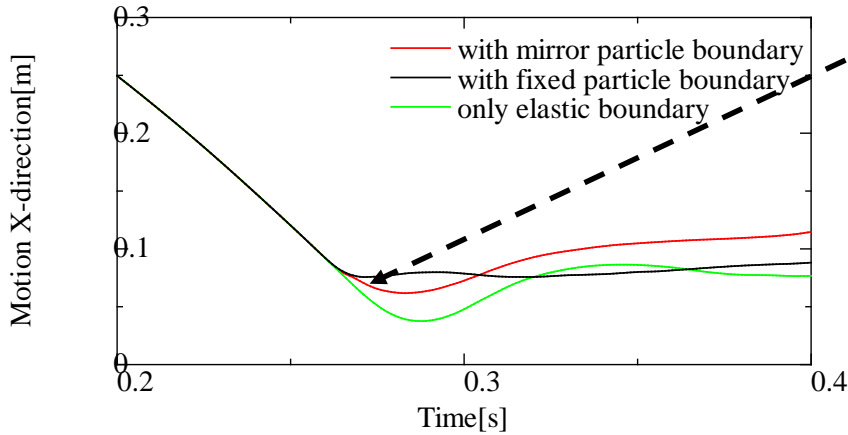


Fluid particles pass through the virtual boundary

Fluid particles don't pass through because of mirror boundary particle exist



# Virtual Elastic Boundary with Mirror particle boundary



Approaching speed is decrease

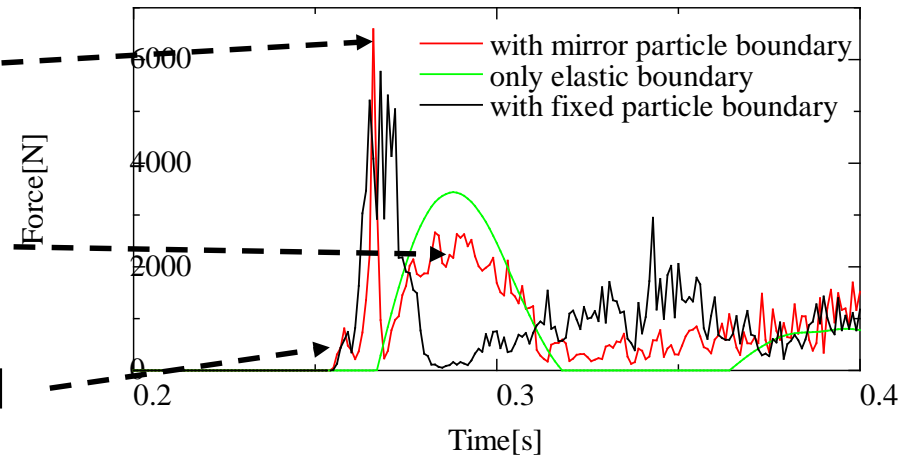


Fluid particles play the role of a kind of cushioning material

Spike pressure is generated by the trapped fluid particles...

Driftage impact force can be reproduced

Fluid impact force can be reproduced





# Objective

We develop an analysis method that introduces the elastic body model of the MPS method and show the applicability to fluid-floating body-structure coupled problems.

1. Taking static load acting on a cantilever as an example, clarifying the characteristics of MPS method elastic body model
2. Compare collision experiments and numerical calculation and clarify the validity of the calculation method



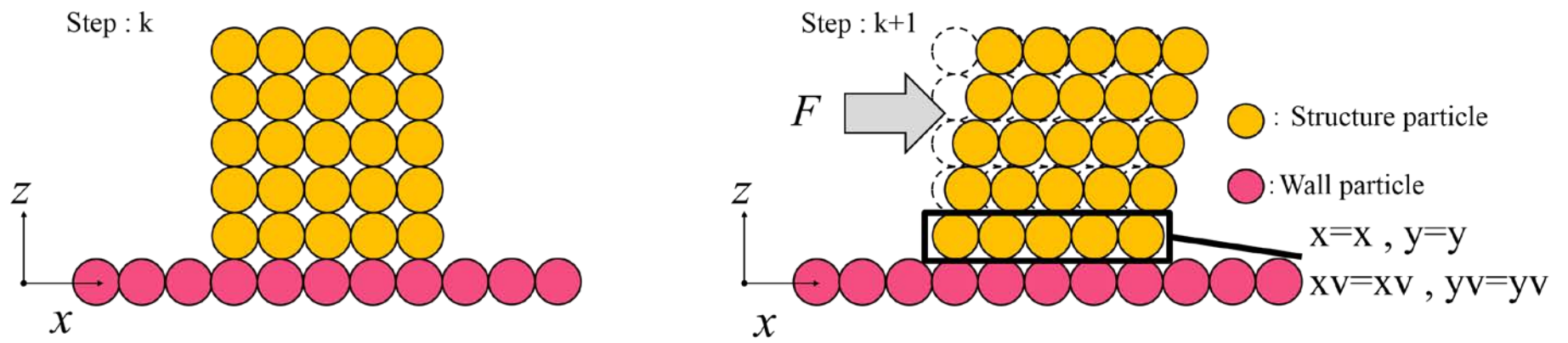
# Method

Dominant equation for the velocity  $v^a$  of an elastic body

$$\rho \frac{Dv^\alpha}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x^\beta} \left( \lambda_{els} \varepsilon^{\gamma\gamma} \delta^{\alpha\beta} + 2\mu_{els} \varepsilon^{\alpha\beta} \right)$$

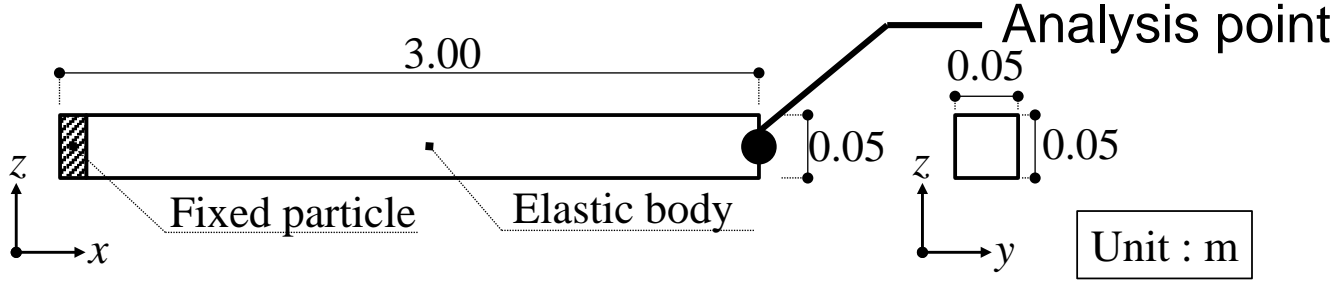
$\rho$ : density,  $\varepsilon^{\gamma\gamma}$ : Volume strain  
 $\delta^{\alpha\beta}$ : Kronecker symbol  
 $\lambda_{els}, \mu_{els}$ : Lamé parameters

$$\mu_{els} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \lambda_{els} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1+2\nu)}$$



Fixed end condition introduced

# Validation test 1 –Cantilever test- static load

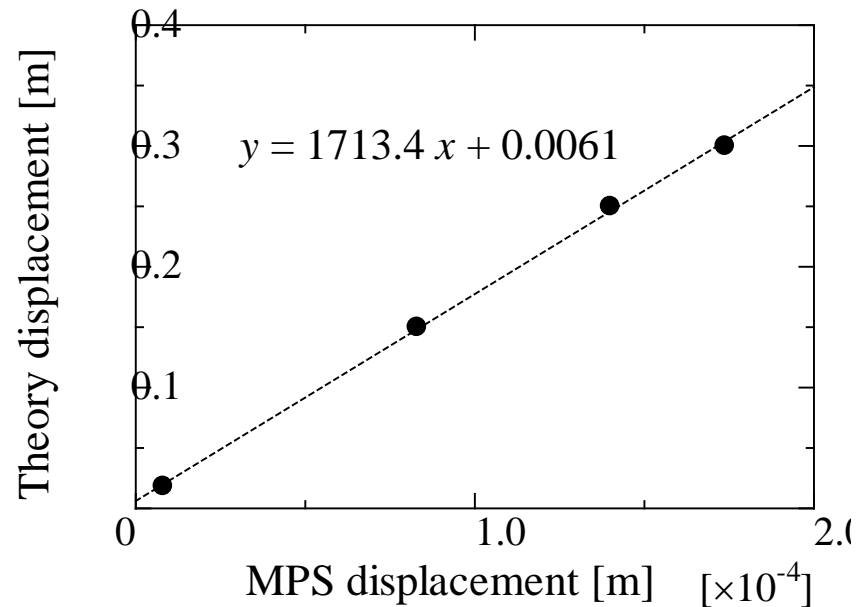


Theoretical value 
$$\delta = \frac{mgL^3}{8EI}$$

$\delta$ : displacement ,  
 $L$ : length,  
 $I$ : Sectional moment of inertia

	Density(kg/m3)	Young's modulus(Pa)	Poisson's ratio	$\Delta t$ (s)	Calculated value	Theoretical value	Material type
Case5-01	7900	2.06e+11	0.30	1.0e-6	8.1e-6	0.02	Steel(SS400)
Case5-02	1040	3.30e+9	0.34		8.3e-5	0.15	Polystyrene (general)
Case5-03	1050	2.00e+9	0.34		1.4e-4	0.25	Polystyrene (Shock resistance)
Case5-04	960	1.50e+9	0.37		1.7e-4	0.30	Polystyrene (High density)

# Validation test 1 –Cantilever test- static load

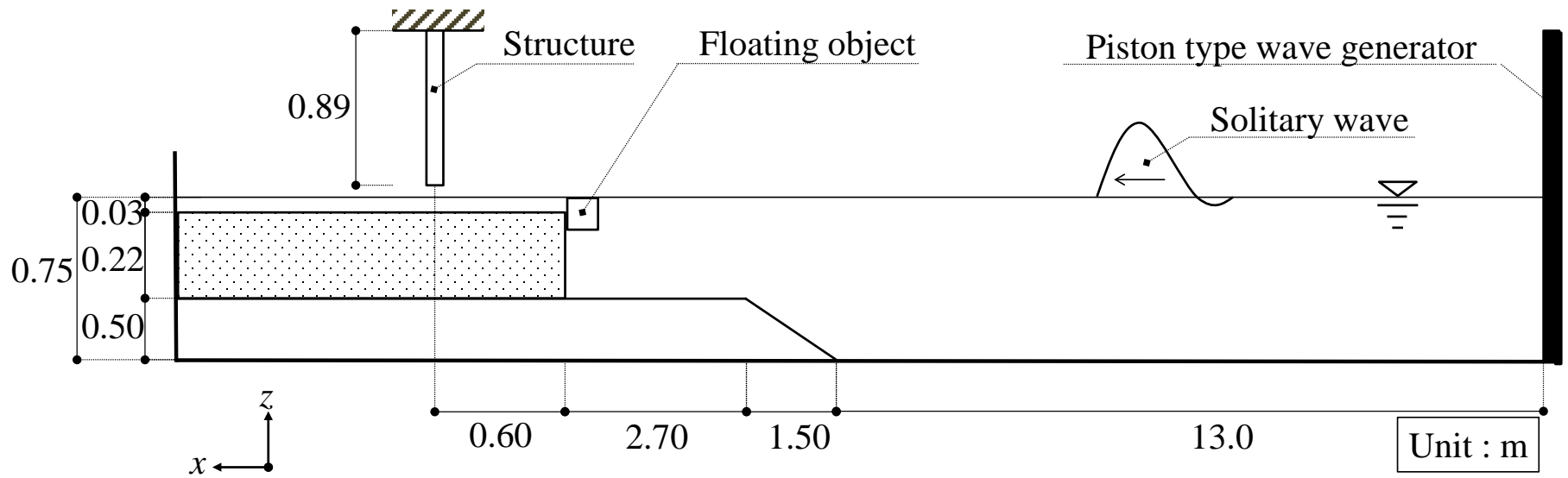


Displacement of the MPS method was much lower than the theoretical value

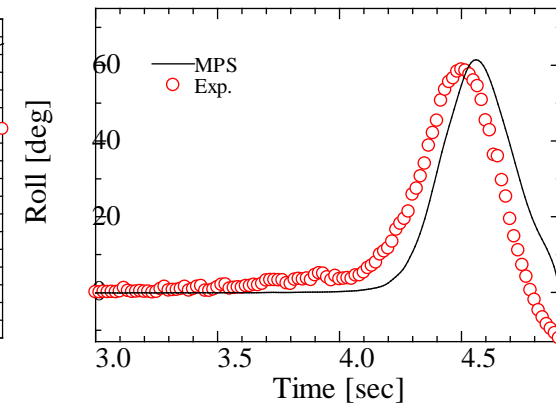
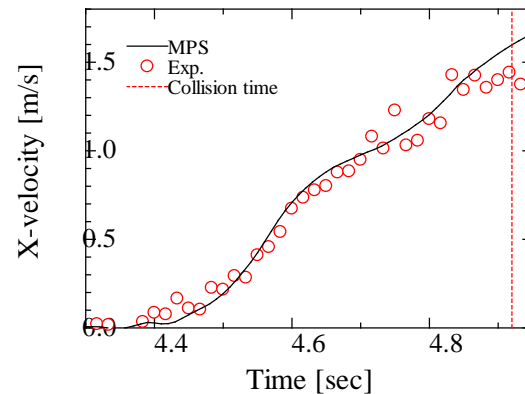
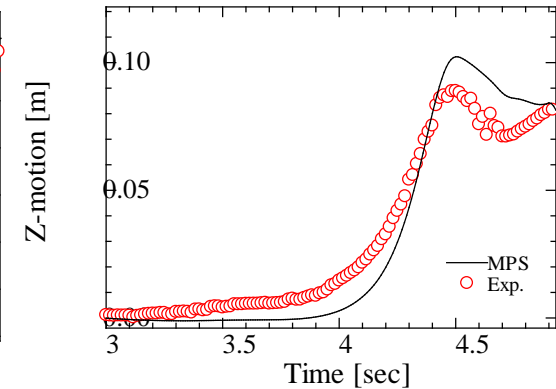
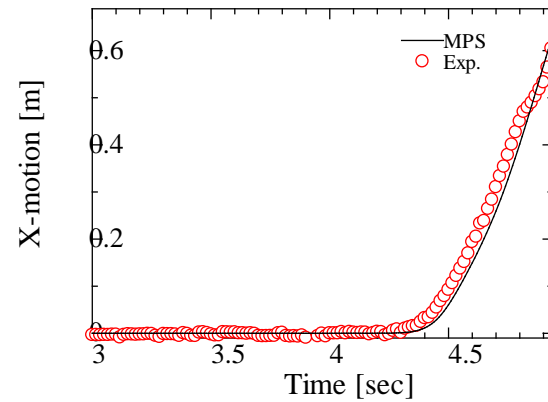
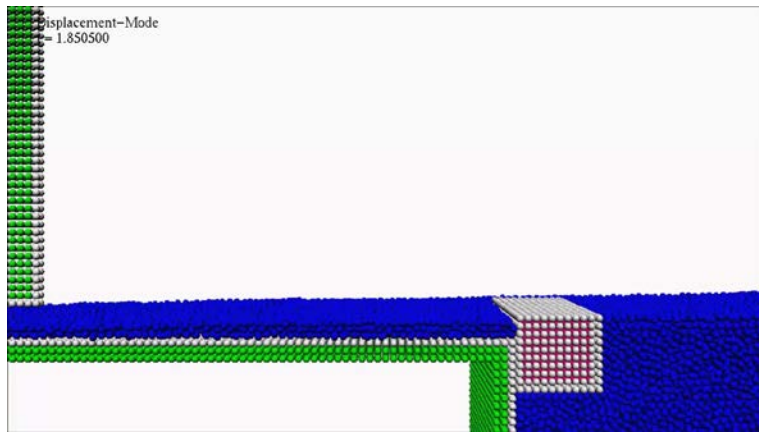
→If the same rigidity is input, the MPS method is harder

Give a **correction** amount to the rigidity value to be input data

# Validation test 2 –Collision test-

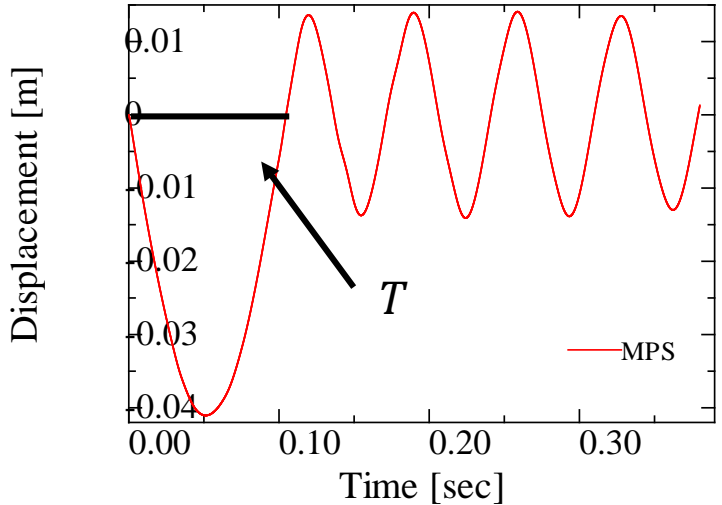
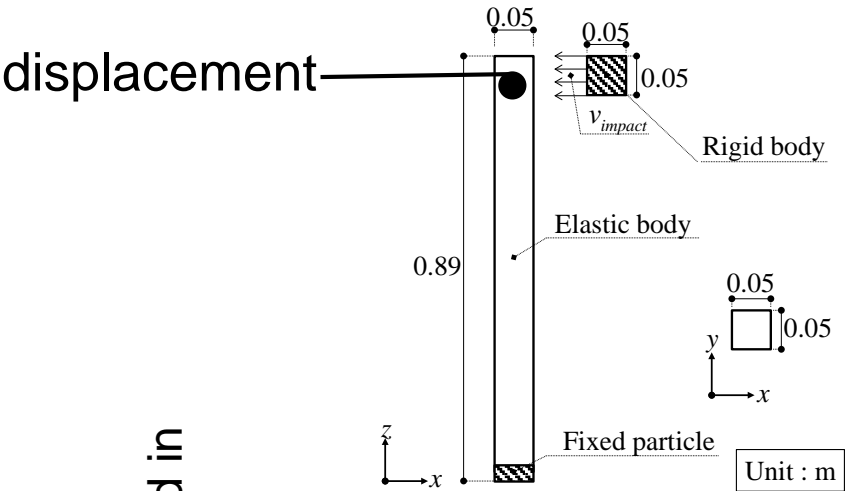


# Validation test 2 –Collision test-

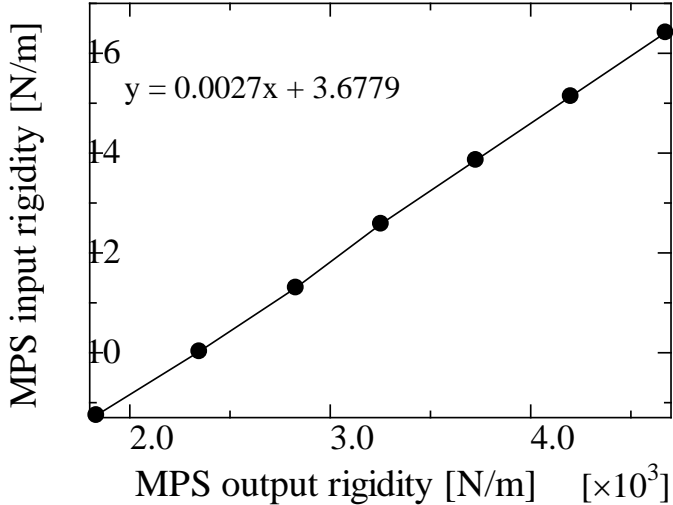


Some differences in motion  
but they are in good agreement

# Validation test 2 –Collision test-



Rigidity of the structure used in the experiment :2350N/m

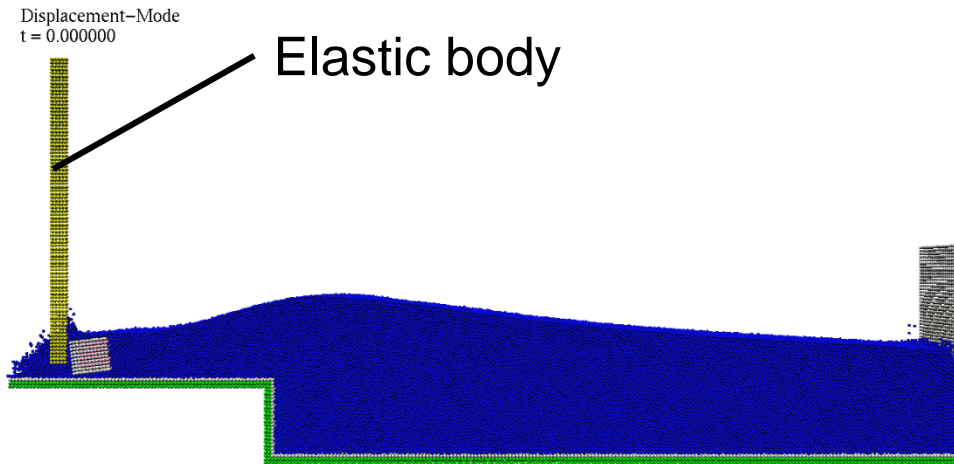


$$k = m \left( \frac{\pi}{T} \right)^2$$

*k* : Measured stiffness  
*T* : Impact time



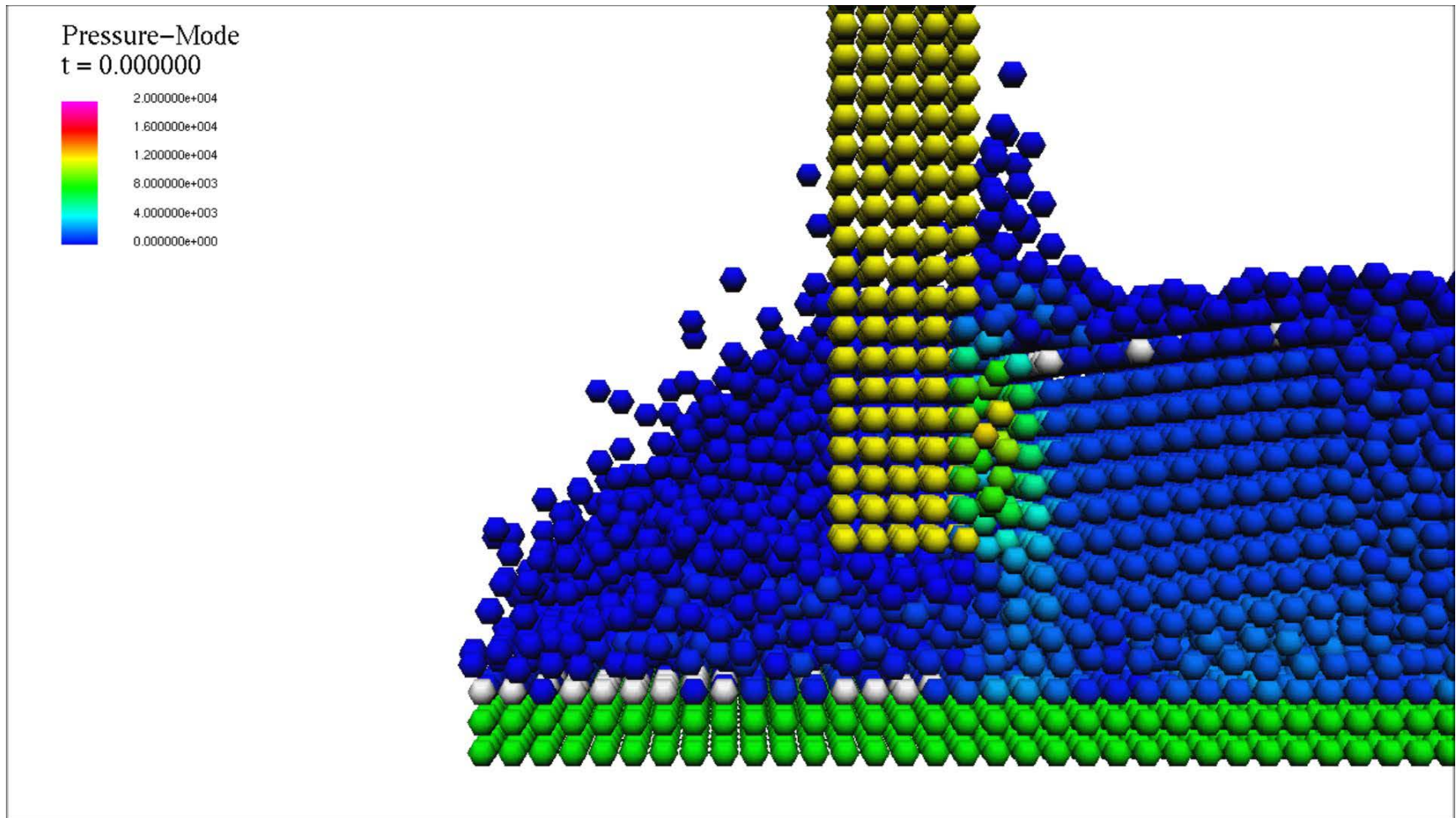
# Validation test 2 –Collision test-



Simulation time [sec]	0.38
$\Delta t$ [sec]	$5.0 \times 10^{-5}$
Particle spacing[m]	0.01
Input stiffness [N/m]	10.03

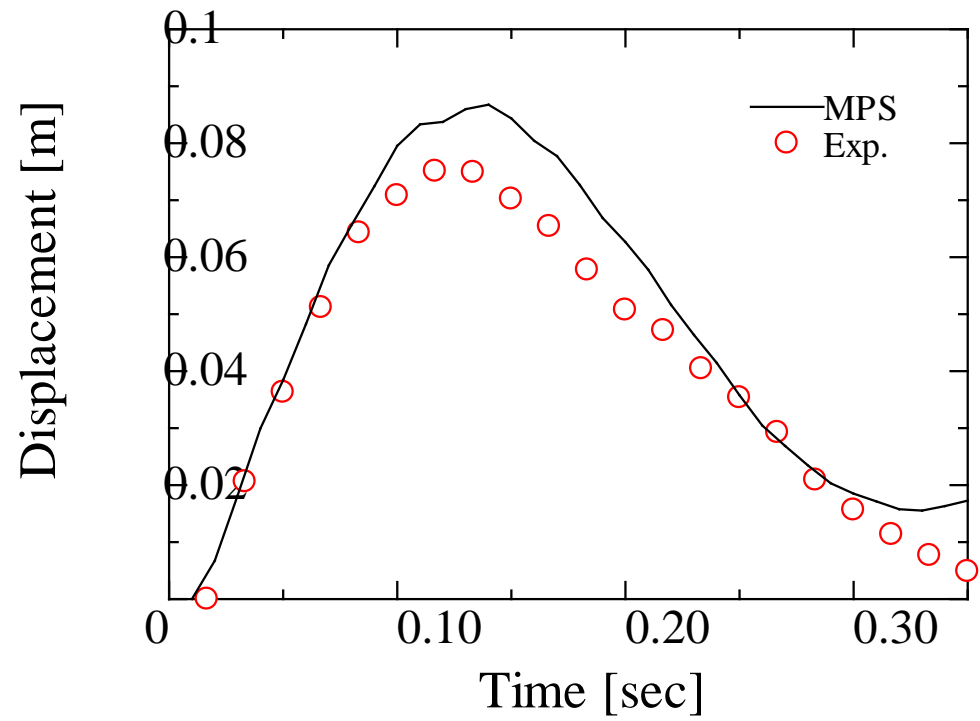
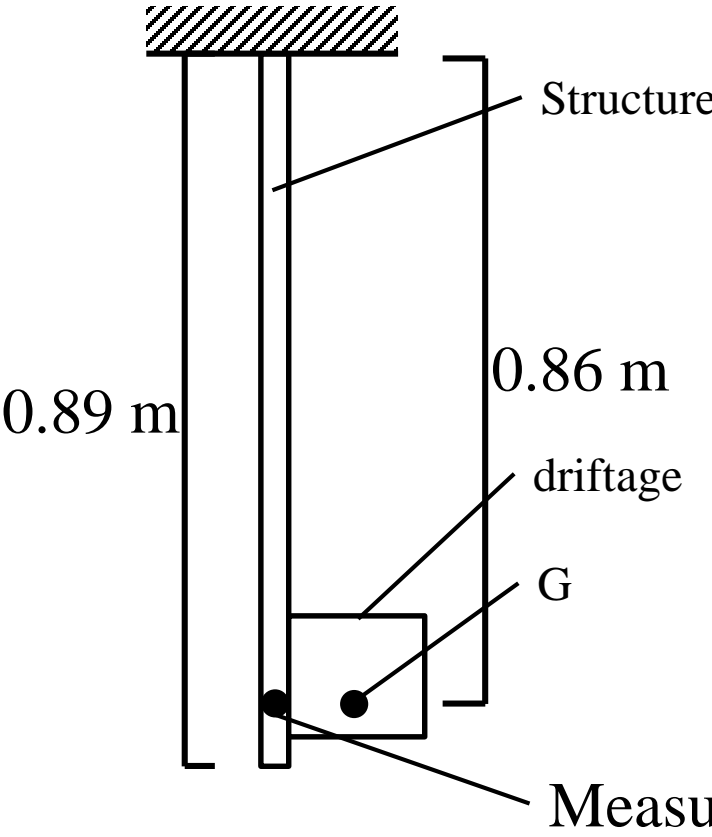


# Validation test 2 –Collision test-





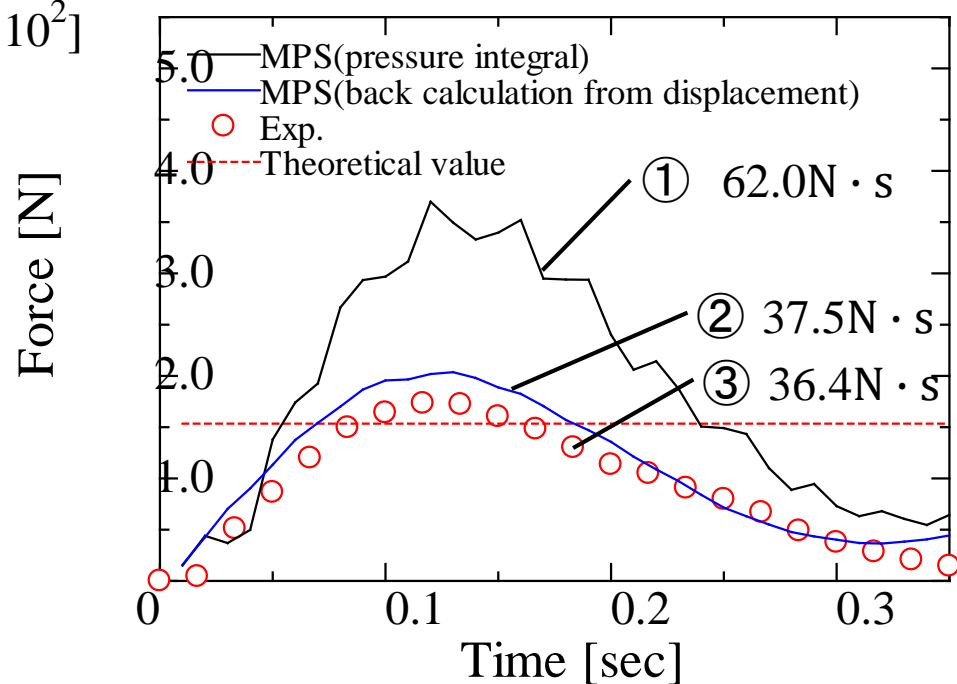
# Validation test 2 –Collision test-



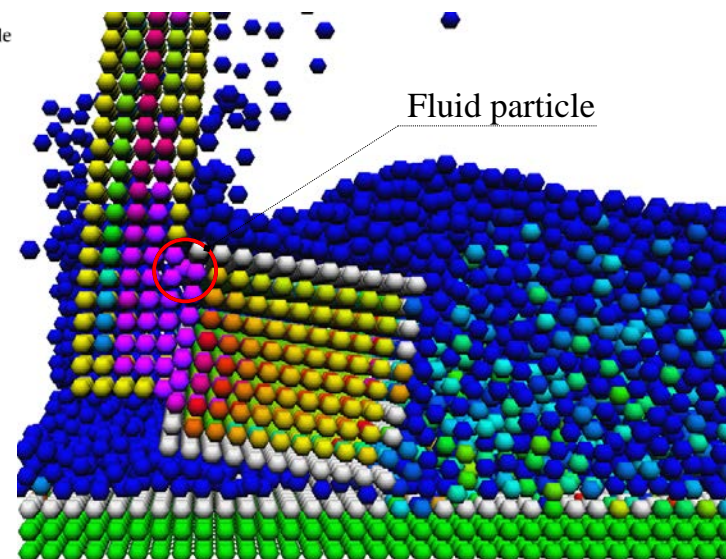
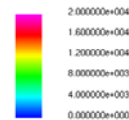
**Displacement can be reproduced with high accuracy**

# Validation test 2 –Collision test-

$[\times 10^2]$



Pressure-Mode  
t = 0.100050



Collision force back-calculation from the displacement can be reproduced with high accuracy

# Conclusion

We developed the MPS method that can realize fluid-floating body-structure interaction and show that it can be applied to the collision phenomenon of tsunami driftage.

1. The characteristics of the MPS elastic body model were clarified using the static load acting on the cantilever as an example, and it was shown that although it is necessary to introduce a correction amount, quantitative evaluation of the load is possible.
2. It was shown that a reasonable impact force could be calculated if back-calculated from the displacement.

ご清聴ありがとうございました