

MPS法を用いた水と空気膜耐水害シェルターにおける人の重量を考慮した2Dシミュレーション

Simulation of air-inflated membrane shelter for fluid disaster using MPS method

■ 研究の背景

- 水害時避難先の最終選択肢としての空気膜シェルターの提案と試作・簡易実験

水災害時には高所への迅速な避難が推奨されているが、高齢者や病院患者などのいわゆる災害弱者と呼ばれる方々にとっては必ずしも容易ではない。(→例えば2020年熊本球磨川氾濫時の千寿園の被害) 一方で坪井らによる調査(坪井2021)によると、水害マップにおいて浸水深のランクが2(0.5m-3.0m)以上の地域に多くの特別養護老人ホームが存在していることが分かっている。

猪口は充填式空気膜構造による個人用の津波シェルターを提案、試作及び簡易的な実験を行った。(猪口2019)

このシェルターは以下のような特徴が挙げられる

- ・通常畳まれており、平時における生活の利便性に配慮されている
- ・水害時には空気を入れて膨らませることによってシェルターとして展開される
- ・中に人が1人入り、水がきても室内を浮力で漂い、時に漂流物やシェルター自体が壁と衝突しながら水が引くのを待つことができる

このシェルターの安全性検証をシミュレーションによって行うためには、

- ・自由水面流れの数値計算
- ・膜の大変形による空気膜の内圧の変化
- ・水圧や衝突力などの外圧と、膜の張力及び空気内圧との釣り合い

を考慮できる数値計算手法が必要となる。

→本研究の目的はそのような水・膜・空気の影響を計算する手法を提案することである。

本発表では2次元の場合について提案する

表 特別養護老人ホームの浸水深毎の存在割合 (総データ数8311, 坪井2021)から抜粋)

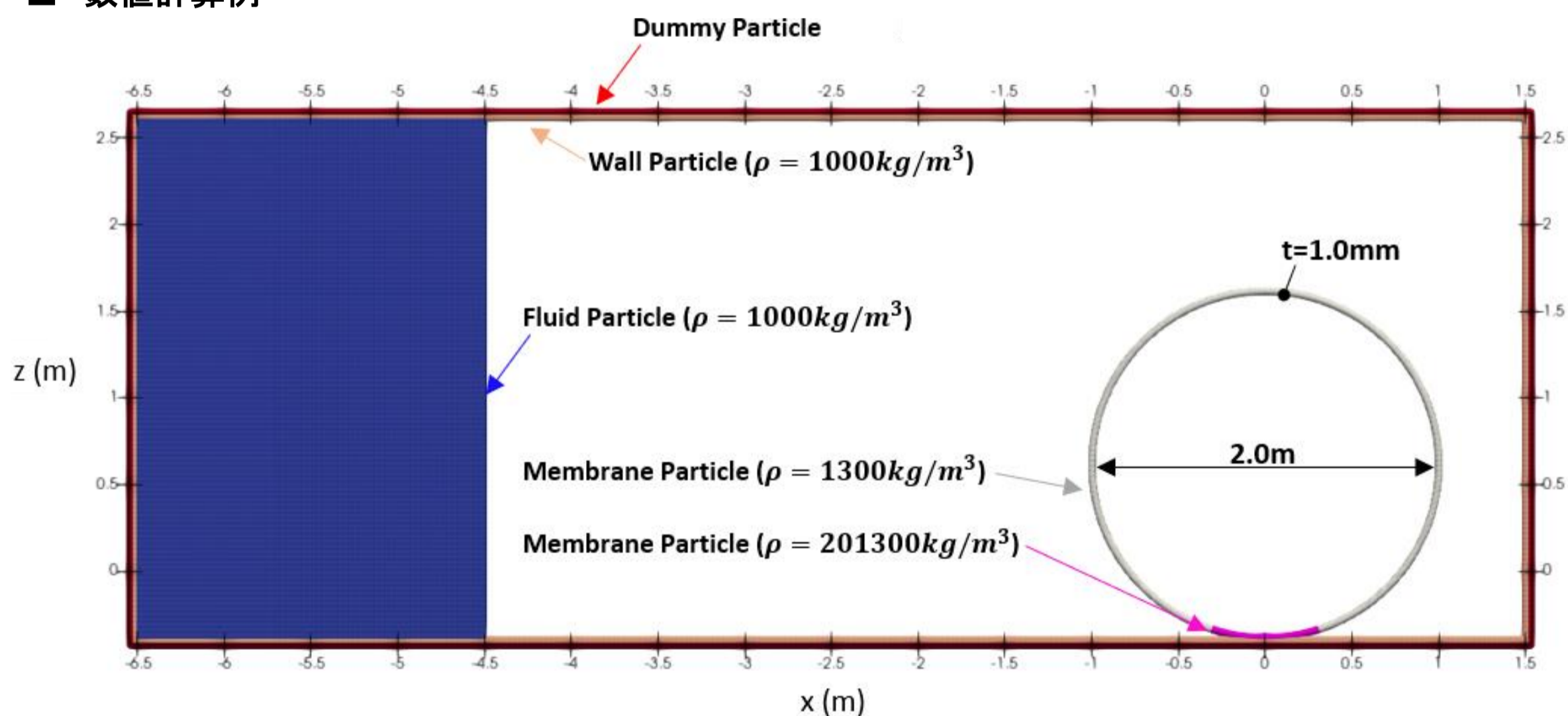
浸水深ランク	浸水深 (m)	割合 (%)
なし	0	82.4
1	0-0.5	2.7
2	0.5-3.0	10.2
3	3.0-5.0	2.9
4	5.0-10.0	1.7
5	10.0-20.0	0.1
6	20.0-	0



図 充填式空気膜構造による個人用津波シェルター (球形の外膜と円環型のアチュープによって構成, 猪口2019)から抜粋)

坪井2021:坪井洗太, 川口健一, 大塚陽汰 “高齢者福祉施設の洪水危険度調査と浮力を利用した建築的水害対策の提案に関する基礎的研究”, 日本建築学会学術講演梗概集, 2021, 9
猪口2019:猪口隆大, “空気膜構造を用いた個人用津波避難シェルターの試作に関する基礎的研究”, 東京大学修士論文, 2019, 3

■ 数値計算例



上に示す計算モデルに対して、人を考慮する場合としない場合のシミュレーションを行った結果を下に示す。人を考慮しない場合は一度目の水の衝突直後に膜シェルターが右方へ弾き飛ばされるような挙動を示したのち、跳ね返り着水する。その後、右方の壁に当たって上方へ打ち上げられた水が床へ着水し再び上方への流れが生まれるが、膜シェルターもこの流れとともに上方へ打ち上げられるような挙動を示している。一方で人を考慮する場合には①人の重量によって膜シェルターが激しく動かされにくい点、②人の重量による膜の変形によって膜下面を通過する右方向の水流の流れを膜シェルターが強く受けることによって左方向へ跳ね返されにくい点 などの理由によって人を考慮しない場合と比べて左方への跳ね返り方が緩やかである。その結果上方へ打ち上げられる水流の付近に膜シェルターがいないためにその影響を受けず、シミュレーション時間を通して、人を考慮しない場合よりも膜シェルターが受ける加速度は少ない。

このように膜シェルターの内部条件(人の考慮の有無、人と膜シェルターとの固定条件、膜に与える初期内圧等)や外部条件(漂流物の存在の有無、室の形状、水の流速や水量等)によって膜シェルターの運動の仕方は大きく異なるため、実験と比べて容易に条件を変更できるシミュレーション技術は安全性検証のための有効な手段であるといえる。また、内部の人間をモデル化することができれば、その人間にかかる各部の加速度から怪我の有無などの人体耐性の検証への応用も考えられ、今後の課題である。

■ 数値計算手法の概要

- MPS法

ベースとなる数値計算手法にはMPS法による流体構造連成計算を選択した。

MPS法は非圧縮性流体の数値計算のために開発された粒子法である。水や壁は粒子によって離散化され、粒子が水の流速に沿って移動しながら計算が進んでいく点に特徴がある。自由水面は粒子数密度が相対的に低い粒子の集合として表現されるため、複雑に変形する自由水面を含む流れに対しても適用可能である。構造計算においては弾性体も粒子によって離散化される。粒子で離散化された弾性体は、変位ベクトルを剛体回転成分を除去するように計算するため大変形時にも精度よく計算することができる。

流体・弾性体の両方をMPS法で離散化するMPS-MPS法による流体構造連成計算(MPS-MPS-FSI)は目的とする水・膜・空気の数値計算との相性がいいと判断し、選定に至った。以下にMPS-MPS-FSIの支配方程式と概略の計算フロー図を示す。既往のMPS法の計算手法については教科書等(越塚2005, 越塚2014, 後藤2018)等を参考にされたい。

MPS法の基本離散化式

$$w_{ij} = \frac{r_e}{|r_j - r_i|} - 1 \quad \langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{D}{n_0} \sum_{j \in \Omega_i} \frac{(\phi_j - \phi_i)(r_j - r_i)}{|r_j - r_i|^2} w_{ij} \quad \langle \nabla \cdot \mathbf{u} \rangle_i = \frac{D}{n_0} \sum_{j \in \Omega_j} \frac{(u_j - u_i) \cdot (r_j - r_i)}{|r_j - r_i|^2} w_{ij}$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2D}{n_0 \lambda} \sum_{j \in \Omega_j} (\phi_j - \phi_i) w_{ij}$$

流体計算の支配方程式・圧力のPoisson方程式

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$-\nabla^2 P = \frac{\rho}{\Delta t} \left(\frac{Dn}{Dt} \right)^p$$

弾性体の支配方程式

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{g}$$

$$\frac{D}{Dt} (I\omega) = \frac{D}{Dt} |r \times 2\boldsymbol{\mu}\boldsymbol{\varepsilon}|$$

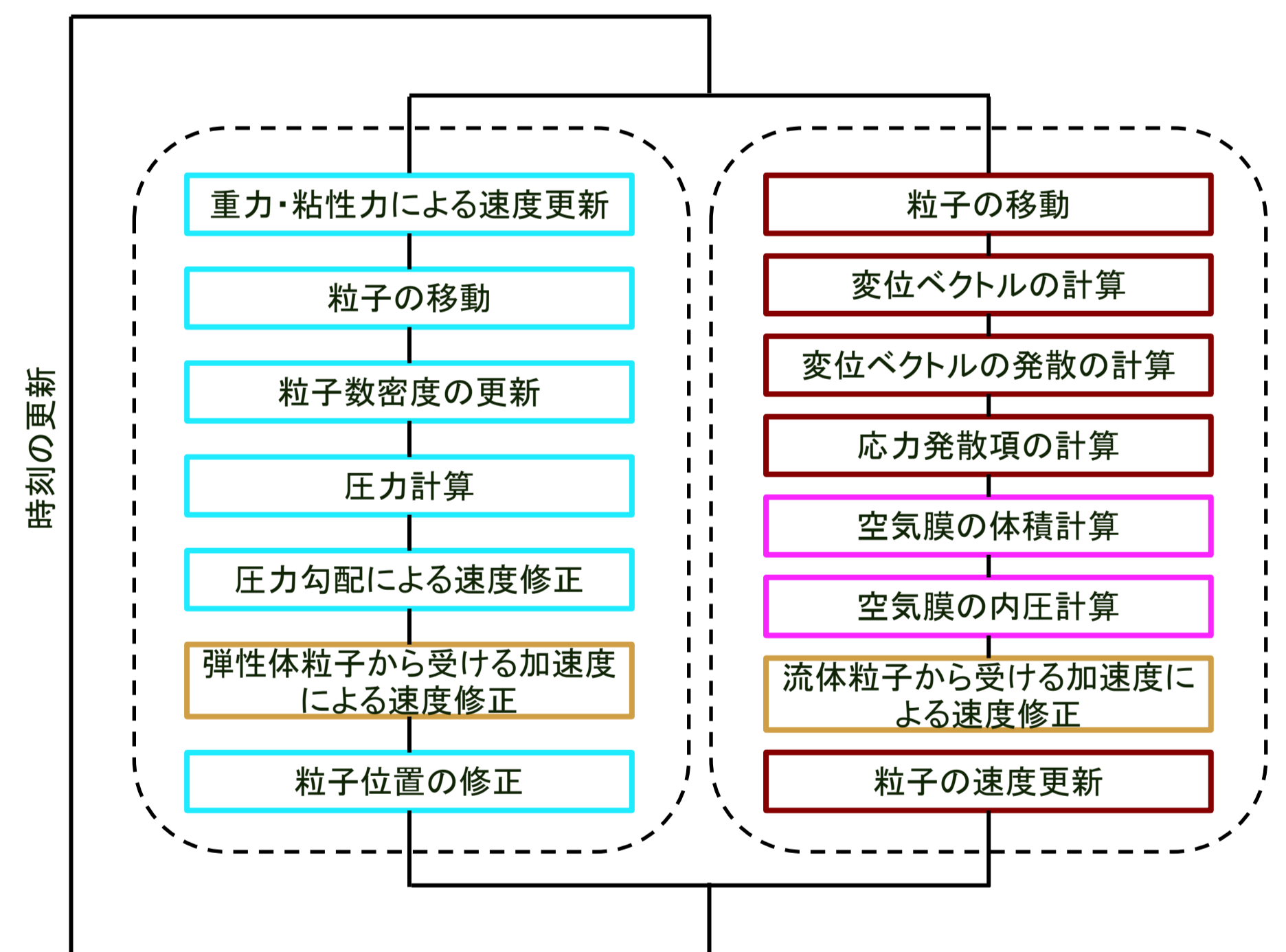
$$\langle \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \rangle_i = \frac{D}{n_0} \sum_{j \in \Omega_i} \lambda \frac{(\nabla \cdot \mathbf{s})_{ij} r_{ij}}{|r_{ij}| |r_{ij}|} w_{ij}^0 + 2\mu \frac{s_{ij}}{|r_{ij}|^2} w_{ij}^0$$

空気膜粒子のモデル化式(本研究の提案式)

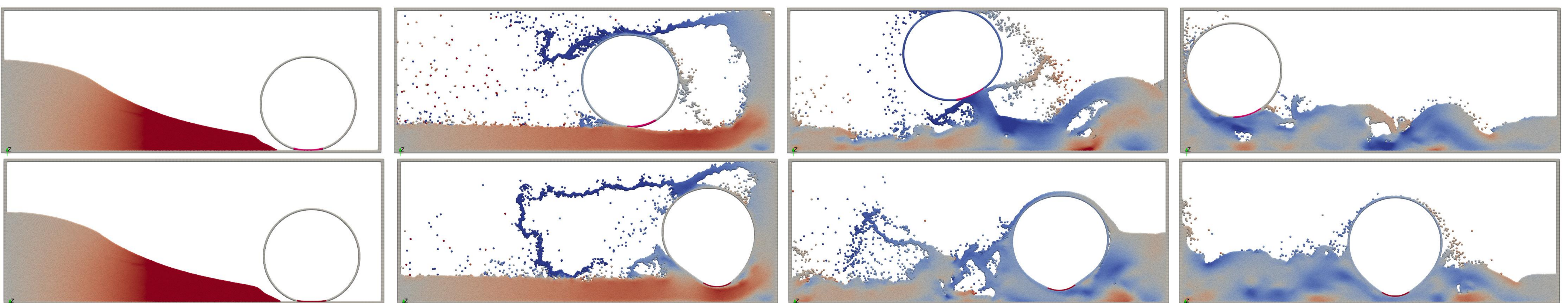
$$\mathbf{a}_{air} = \frac{1}{\rho} \frac{P_{in} - P_{out}}{t} \mathbf{n}_i \quad \mathbf{n}_i = \text{sign}(r_{ig} \cdot (e_y \times r_{i,i+1})) \frac{r_{ig}}{|r_{ig}|}; \quad r_{ig} = \sum_{j \in \Omega_i} r_{ij} w_{ij} \quad P_{in}^{k+1} = P_{in}^k \frac{A^k}{A^{k+1}}$$

$$\mathbf{a}_i = -\frac{1}{\rho} \langle \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \rangle_i + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho} \frac{P_{in} - P_{out}}{t} \mathbf{n}_i$$

(上段左から、空気膜粒子が空気から受ける加速度の定義式, 空気膜面の法線方向の定義式, 空気膜内圧の更新式(Boyleの法則), 下段: 空気膜粒子の速度更新用加速度の計算式)



越塚2005:越塚誠一 “計算力学レクチャーシリーズ5 粒子法”, 丸善出版, 2005
越塚2014:越塚誠一, 柴田和也, 室谷浩平 “粒子法入門 流体シミュレーションの基礎から並列化と可視化まで”, 丸善出版, 2014
後藤2018:後藤仁志 “粒子法 連続体・混相流・粒状体のための計算科学”, 森北出版株式会社, 2018



計算結果図 (各時刻におけるモデルのスナップショット, コントラは粒子の速度のx方向成分(赤:右側の速度成分を持つ粒子, 青:左側の速度成分を持つ粒子), 上段が人を考慮しない場合, 下段がする場合)