

第2回AVSユーザーフォーラム

粒子-流体-柔軟構造連成計算に向けた 基本解析技術の紹介

2017年8月25日

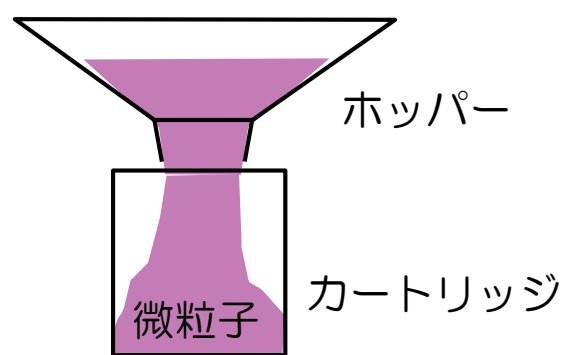
富士ゼロックス株式会社

研究技術開発本部 基盤技術研究所 廣岡信行

粉体の大規模流動解析

粉体の大規模流動解析

- 対象事例：カートリッジへの微粒子充填プロセス
- 重要メカニズム：振動などの外力により変化する粉体の流動特性
- モデル化のポイント：
 - ① 微粒子の凝集状態に合わせた粗視化サイズの決定
 - ② 粒子物性と嵩密度に応じた粉体の流動特性モデル



粒子の動きやすさ

振動

微粒子充填の効率化

流動性大

外力大

付着力小

摩擦小

嵩密度小

加速度

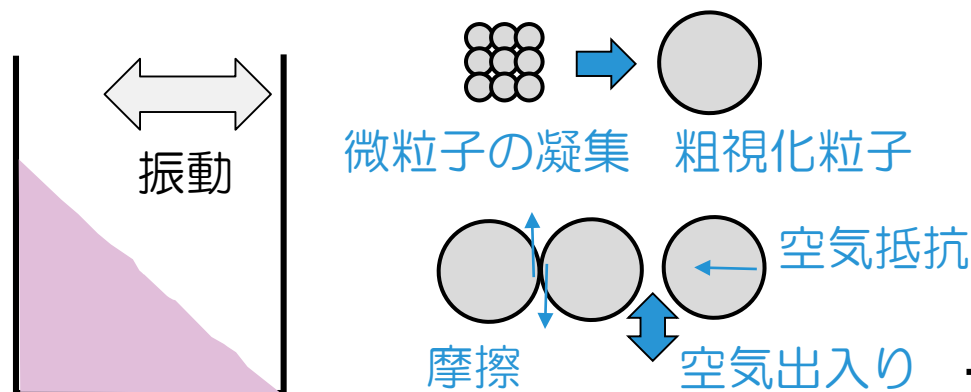
速度

変位

① 離散体モデル (Discrete Element Method)

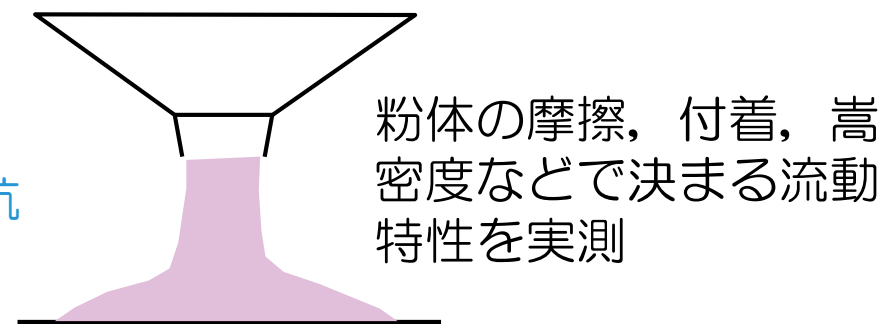
粗視化DEM

粒子個々の挙動を捉える



② 連続体モデル

粒子全体の流れ/堆積形状を捉える



離散体モデルの支配方程式

離散体モデル(DEM)により個々の粒子運動を計算

- 運動方程式

$$m \frac{dv_i}{dt} = fa_i + fc_i + fg_i$$

- 角運動量の方程式

$$I \frac{dw}{dt} = m_c$$

fa_i, fc_i, fg_i : 流体力, 接触力(粒子-粒子間, 粒子-壁間), 重力

I, w, m_c : 慣性モーメント, 角速度, 回転モーメント

- 粘性抵抗力

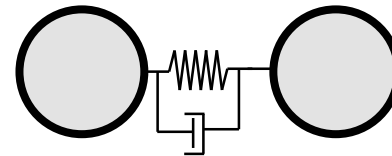
$$fa = 6\pi\mu r v$$

μ, r, v : 粘性係数, 粒子半径, 粒子速度

- 接触力(法線方向)

$$fc_n = (-k_n d_n - \eta_n (v_p - v_q) \cdot n) n$$

d, k, η : オーバーラップ量, バネ定数, 粘性減衰係数



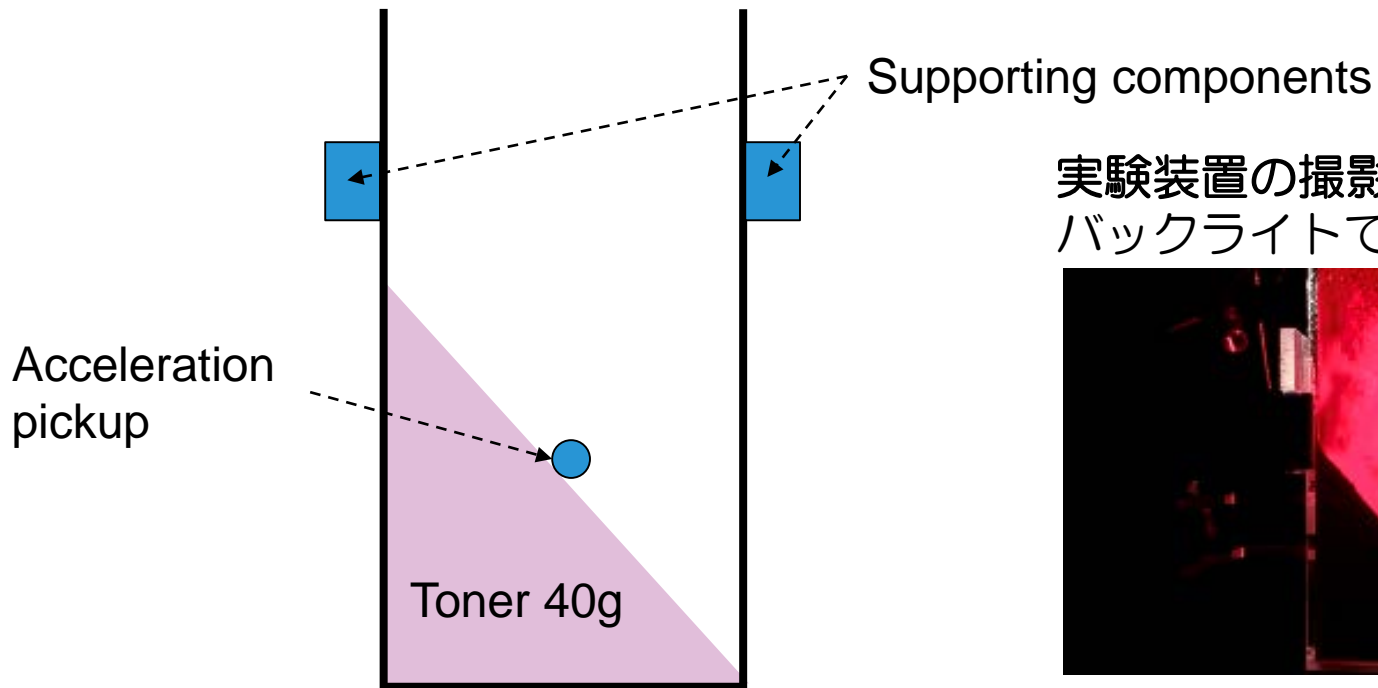
実験装置と実験方法

実験装置

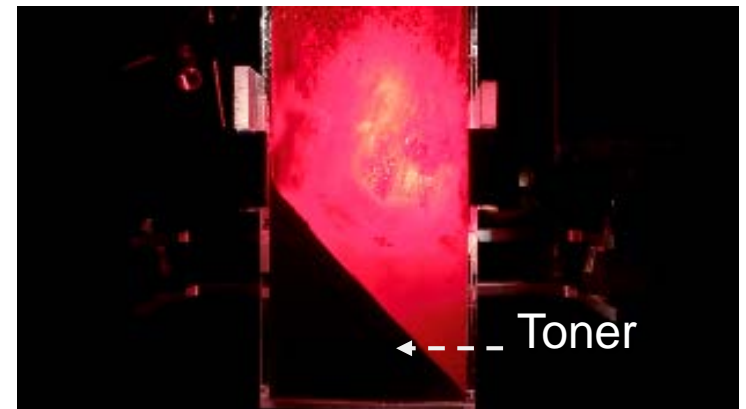
- 透明アクリル板で直方体の容器を製作
- 幅80 mm ×高さ260 mm ×奥行き30 mm, 板厚3 mm

実験方法

- トナー40gを斜面形状に初期配置。加振条件で流動性が変化する状態を観測



実験装置の撮影画像
バックライトでトナーの影を撮影



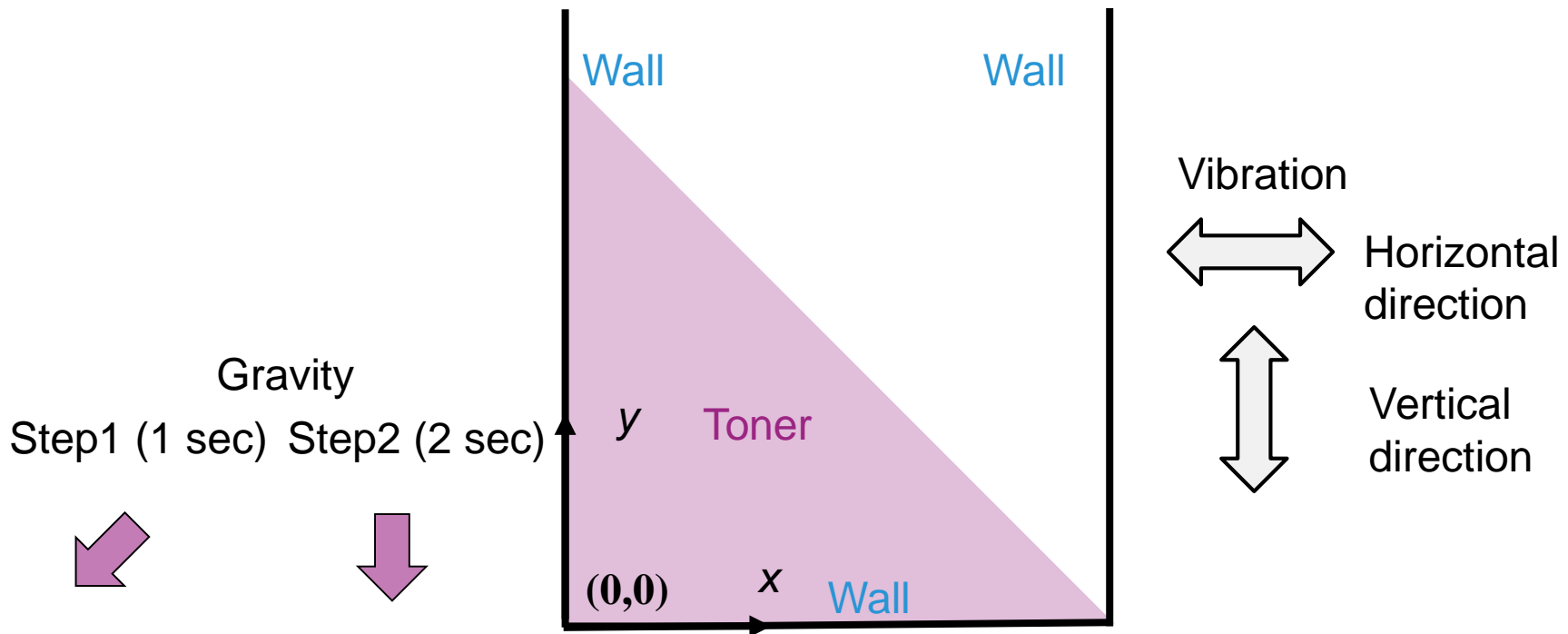
離散体モデルの計算条件

計算パラメータ

- 粒子径 $232 \mu\text{m}$, 粒子密度 1200 kg/m^3
- 粒子数 49079個
- 粒子間摩擦 1.0, 粒子-壁面摩擦 0.8, 転がり摩擦 0.02

振動条件

- Case1 : 周波数 144 Hz, 水平振幅 $65 \mu\text{m}$, 垂直振幅 $38 \mu\text{m}$
- Case2 : 周波数 233 Hz, 水平振幅 $10 \mu\text{m}$, 垂直振幅 $2 \mu\text{m}$

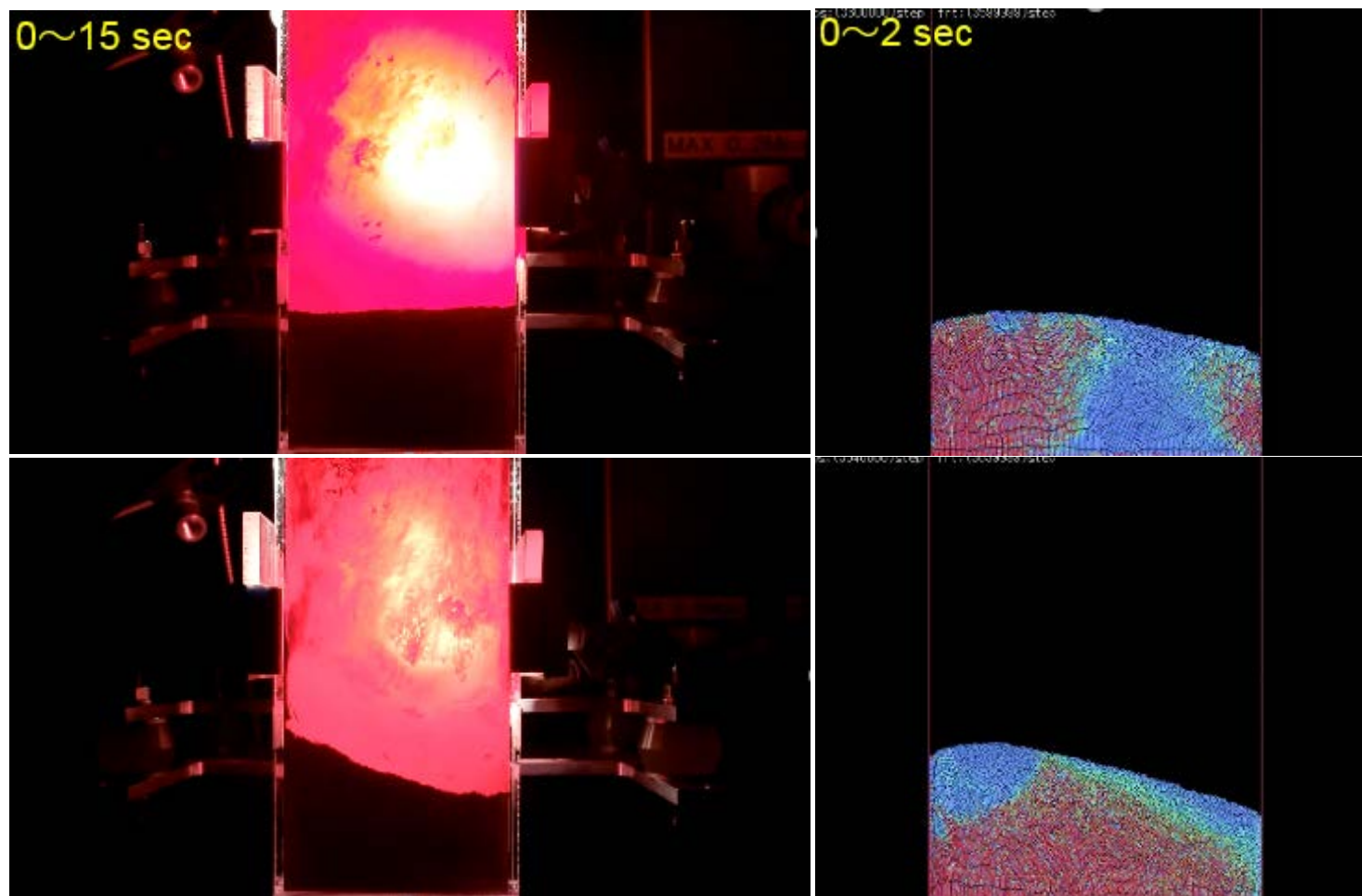


実験結果と計算結果の比較

- 粉体が均される程度や時間(流動性の大/小)の傾向を再現
- 流動状態の変化を評価するために力の作用範囲を可視化

Case1 (良)

周波数 144 Hz
水平振幅 $65 \mu\text{m}$
鉛直振幅 $38 \mu\text{m}$



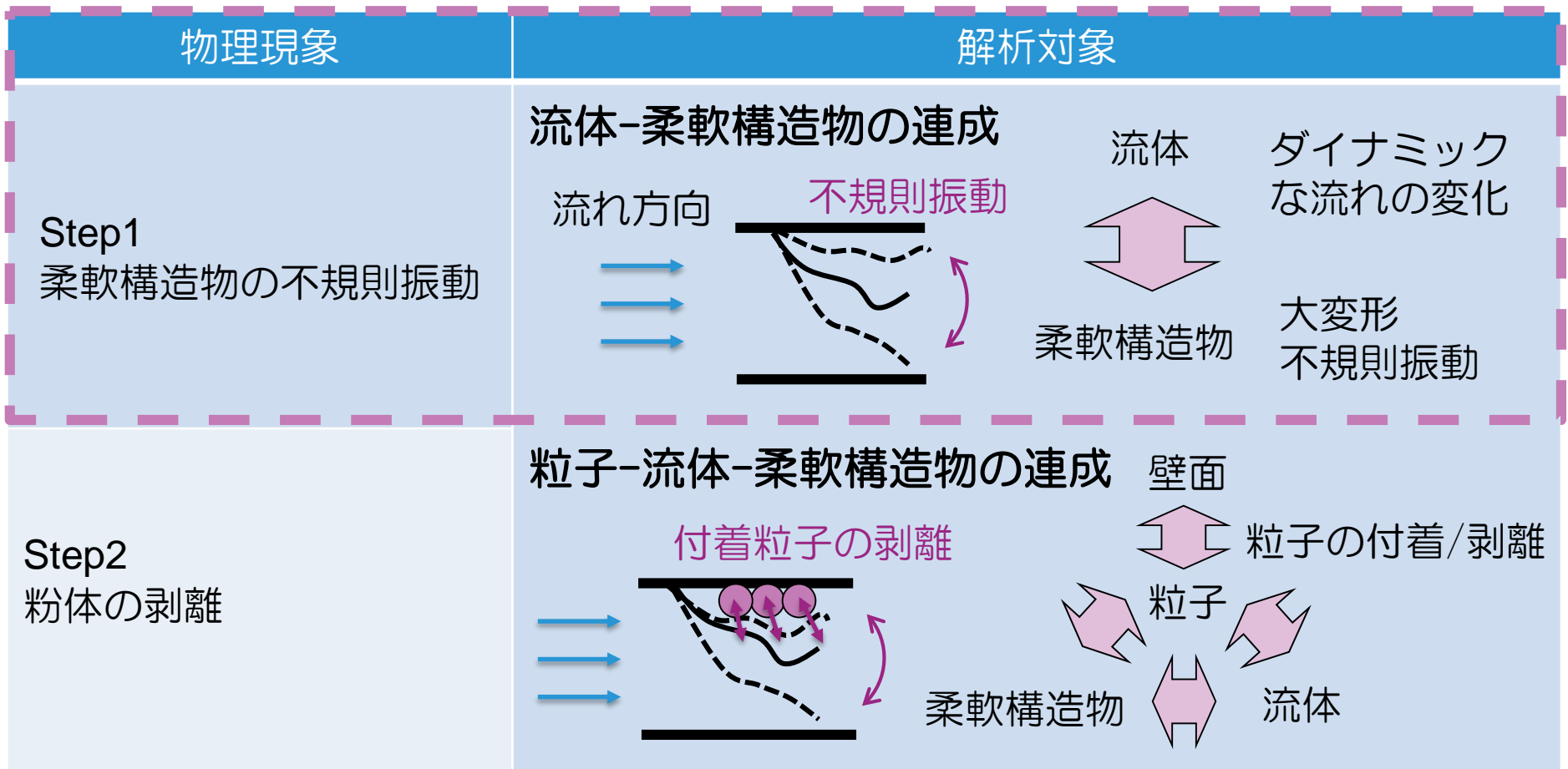
Experiment

Simulation

流体-柔軟構造物の連成解析

流体-柔軟構造物の連成解析

- 対象事例：布のはためきによる配管壁面の粉体洗浄プロセス
- 重要メカニズム：気流によって変化する布の挙動特性(速さ, 振れ幅)
- モデル化のポイント：流体と柔軟構造物の相互作用を考慮した連成解析



多相流場の支配方程式

- 運動方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) \\ = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

u_i, x_i, f_i : 速度, 座標, 外力加速度の成分
 t, ρ, μ, p : 時間, 密度, 粘性係数, 圧力

- 質量保存則

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0$$

- 粒子に作用する流体力

$$fa_i = \sum_k \alpha_k \Delta V \sigma_k \left[-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

$\alpha_k, \Delta V, \sigma_k$: 計算セル k に占める粒子の体積割合, 計算セルの体積, 粒子の密度

柔軟構造物挙動の解析方法

- 柔軟構造物を粒子でモデル化

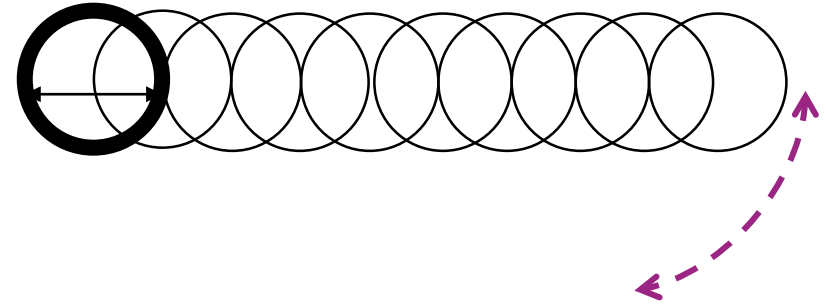
粒子の運動方程式

$$m \frac{dv_i}{dt} = ft_i + fb_i + fa_i + fg_i$$

流体力 重力

⇒流体との連成計算から算出

固定粒子



並進運動

- 伸縮力 (d_n : オーバーラップ量, η_n : 粘性減衰係数, k_n : バネ定数)

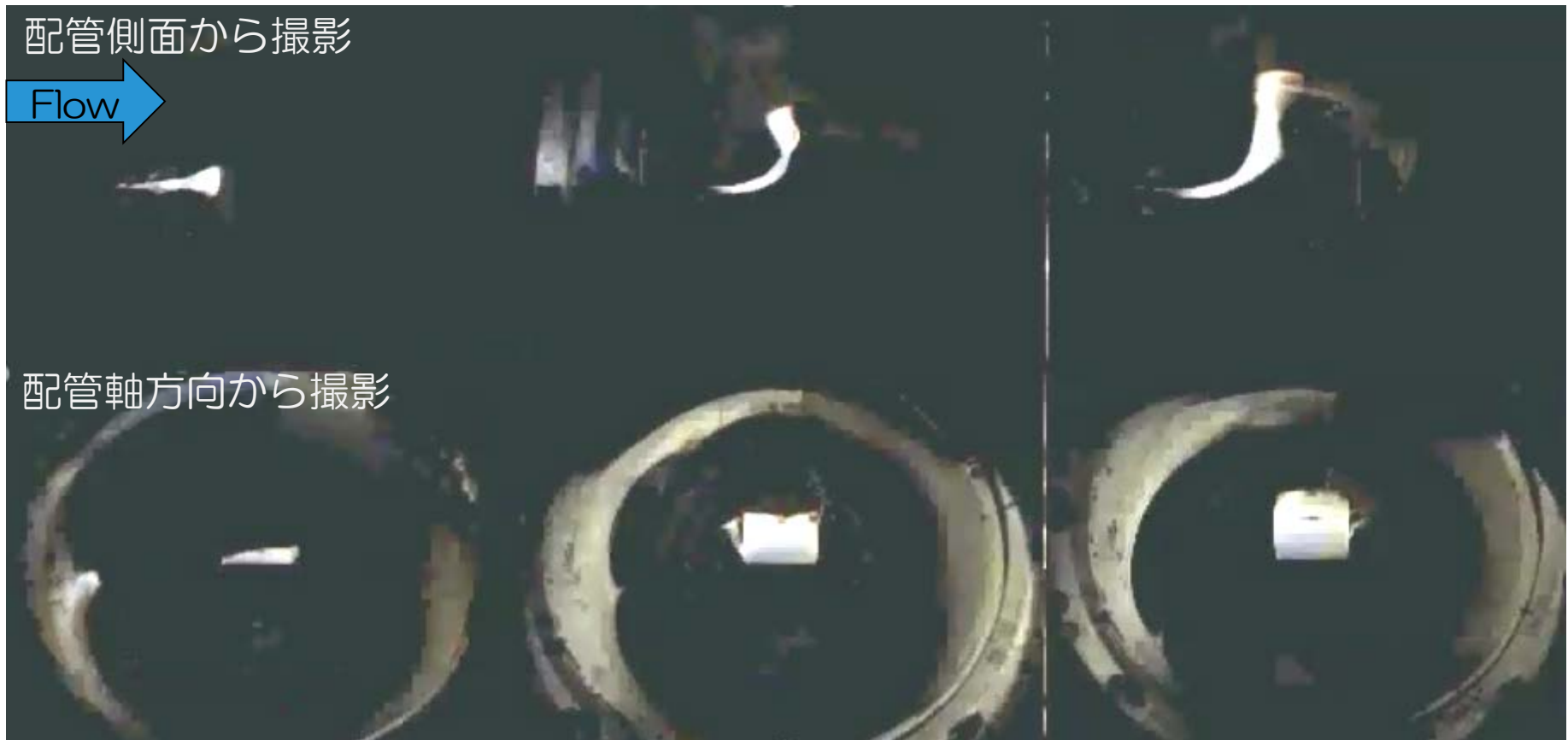
$$ft_n = (-k_n d_n - \eta_n (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_q) \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}$$

- 面外曲げ力 ($M(K)$:モーメント, K : 曲率, l : 粒子間距離, w : 幅)

$$fb_t = M(K) \frac{w}{l} t$$

布のはためき挙動の観測例

観測条件：幅50 mm，布長さ3条件(43, 68, 93 mm)，流入風速10 m/s



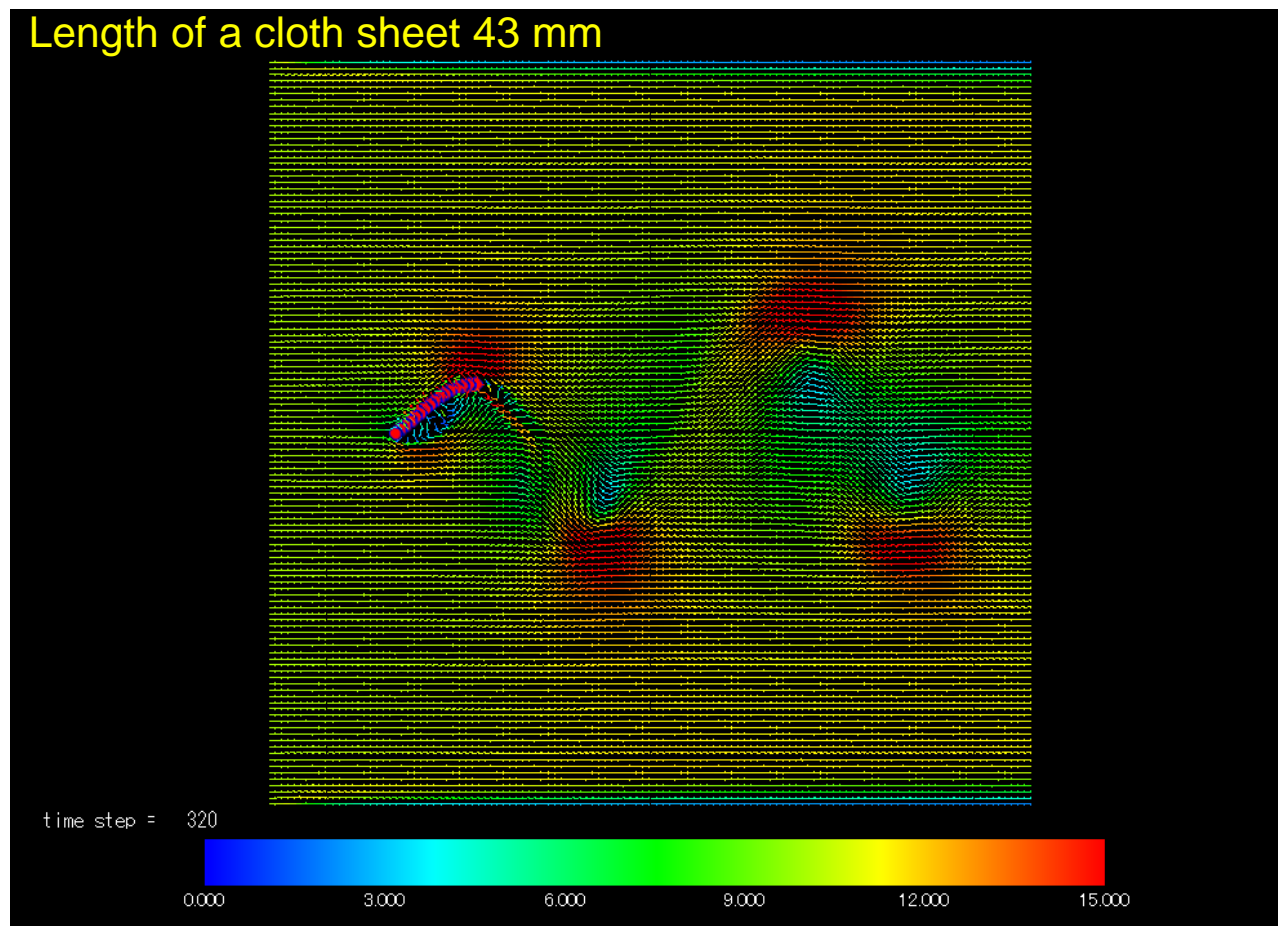
(a) Length 43 mm

(b) Length 68 mm

(c) Length 93 mm

布のはためき拳動の解析結果

- 周期的にはためきが継続する拳動を再現
- 時々刻々変化する流れと布の拳動を同時に可視化し布のはためくことを確認



まとめ

凝集した微細粒子群をひとつの代表粒子として計算する粗視化DEMおよび連続体モデルによる粉粒体の大規模流動解析と、非圧縮性多相流場解法を拡張した流体-柔軟構造連成解析の結果を可視化した事例を紹介した。

サイバネットシステムズ社のMicroAVSやAVS/Expressを用いることで効率的に計算結果を可視化でき、メカニズム解明の鍵となる粉体・流れ・柔軟構造体の動的な挙動を捉えられた。

参考文献

- 廣岡信行，牛島省，多質点モデルと多相流解法による流体-柔軟構造物の連成計算，日本計算工学会，第21回計算工学講演会，講演論文集，2016。
- 廣岡信行，牛島省，離散体および連続体モデルによるトナー微細粒子群の流動解析，日本流体力学会，第30回数値流体シンポジウム，講演論文集，2016
- 廣岡信行，牛島省，振動状態におけるトナー微細粒子群の流動解析，日本計算工学会，第22回計算工学講演会，講演論文集，2017

