



非ニュートン流体解析に対する OpenFOAMとDualSPHysicsの比較検討



川崎 浩司 二村 昌樹 佐藤 兼太

株式会社ハイドロ総合技術研究所

研究背景

海岸工学・海洋開発分野における非ニュートン流体の例

- 地すべり型津波における土粒子の流動
- 地震時における地盤の流動化・液状化
- 船舶に対する噴霧塗装時における塗料の衝突

→ 固液の混合物かつ複雑な流れでその例が多く見られる

レオロジー特性を正確に把握・解明することは、防災・設計・製造・管理の観点から重要な課題

数値シミュレーションによるレオロジー評価

複雑な流れ場におけるレオロジー評価は、**数値シミュレーション**が有効

→ **オープンソースソフトウェア**の利活用が注目されている

研究目的

オープンソースソフトウェアのユーザー

自身が解きたい問題に対して、
最適なソルバーを選択することが非常に重要

問題点

多種多様なソフトウェアが日進月歩で開発される昨今
十分なモデル検証が行われないうまま、応用される傾向

本研究の目的

OpenFOAMとDualSPHysicsに着目し、
非ニュートン流体解析への適用性の検証、相互検証

OpenFOAMとDualSPHysicsの概要

本研究で着目するオープンソースソフトウェア

- OpenFOAM-v1912
- DualSPHysics v5.0

海岸工学・海洋開発分野における適用例も多い

(Rauter et al. 2021, Honarmand et al. 2020, Canelas et al. 2018)

OpenFOAMの概要

- **非構造格子**に基づく数値流体力学ソフトウェア
- メッシュ生成から流体, 熱などの多くのソルバー群, 可視化と多岐に渡る
- 多種多様なソルバーの中から**適したソルバーを選択**して使用

DualSPHysicsの概要

- Smoothed Particle Hydrodynamics (**SPH法**) に基づくソフトウェア
- **GPUを用いた高速な計算**が容易に
- DualSPHysics v5.0より非ニュートン流体モデルが実装

非ニュートン流体モデルの概要

Herschel-Bulkleyモデル (Herschel & Bulkley 1926)

- 非ニュートン流体に対する**構成則**の一つ
- 降伏応力 τ_0 を持つ**Power-lawモデル**とされる
- OpenFOAM, DualSPHysicsともにHerschel-Bulkleyモデルを実装

Herschel-Bulkleyモデルによる構成則

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n, & \tau \geq \tau_0, \\ \dot{\gamma} = 0, & \tau < \tau_0, \end{cases} \quad \begin{array}{l} \tau : \text{せん断応力}, \tau_0 : \text{降伏応力} \\ k : \text{塑性粘度}, \dot{\gamma} : \text{せん断速度} \\ n : \text{Power-lawインデックス} \end{array}$$

近似曲線の必要性

上式は, $\tau < \tau_0$, つまり $\dot{\gamma}=0$ で塑性粘度 $k(=(\tau - \tau_0)/\dot{\gamma}^n)$ が無
無限大となり, 数値的に不安定

→ 近似曲線を導き, **数値不安定性を回避**

OpenFOAMにおける近似曲線

bi-viscosityモデル

- 流動の開始を高粘度のニュートン流体として模擬
- 流体を2つの粘性係数で表現して近似曲線を導く
- OpenFOAMは、動粘性係数 ν として直接モデル定数を与える

粘性係数 μ の定義

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{n-1},$$

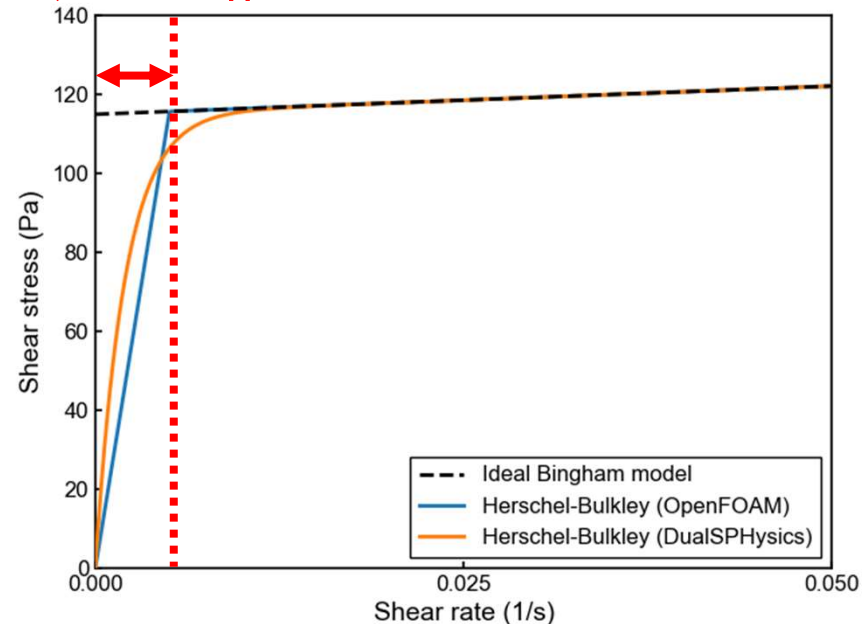
を動粘性係数 ν の単位に修正

$$\nu = \min \left(\nu_0, \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{n-1} \right),$$

この値を可能な限り

大きくすることが重要

ν_0 で決まる幅



理想的なビンガム流体と、近似曲線の模式図
ここでは、**青線**と破線の関係に注目

DualSPHysicsにおける近似曲線

Papanastasiouモデル (Papanastasiou 1987)

- 成長係数 m を新たにパラメータとして導入
- 理想の構成則に緩やかに近づくように近似曲線を導く
- DualSPHysicsは、粘性係数 μ としてモデル定数を与える

Papanastasiouモデルによる曲線

$$\tau = \tau_0 [1 - \exp(-m\dot{\gamma})] + k\dot{\gamma}^n,$$

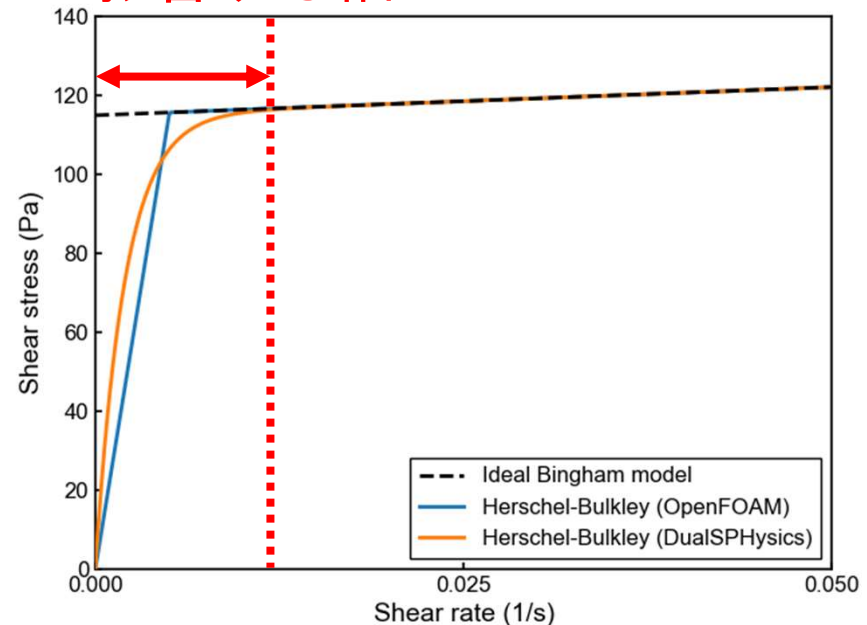
緩やかに近づけるための項
から粘性係数 μ を算出

$$\mu = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} [1 - \exp(-m\dot{\gamma})] + k\dot{\gamma}^{n-1},$$

この値を可能な限り

大きくすることが重要

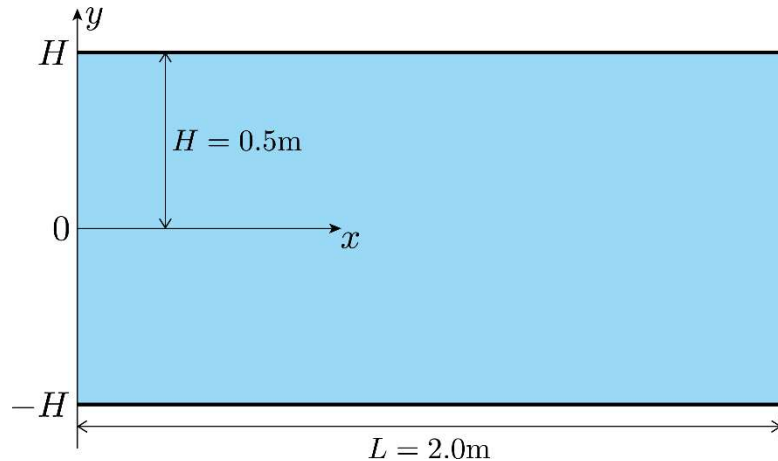
m が影響する幅



理想的なビンガム流体と、近似曲線の模式図
ここでは、**オレンジ線**と破線の関係に注目

計算例1: 平行平板間の流れ

非ニュートン流体解析の基礎的な精度検証を実施



平行平板間流れの模式図

流れの誘起方法の違い

OpenFOAM

- 左右端に200Paの圧力差で誘起

DualSPHysics

- 一定加速度 $F_x = 0.1\text{m/s}^2$ で誘起

流速の解析解 (加速度 F_x の形で表記)

$$u_x = \begin{cases} \frac{\rho F_x}{2k} (H - y_0)^2, & (0 \leq |y| \leq y_0), \\ \frac{\rho F_x}{2k} (H^2 - |y|^2) - \frac{\tau_0}{k} (H - |y|), & (y_0 < |y| \leq H). \end{cases}$$

ここで, $y_0 = \tau_0 / (\rho F_x)$ は降伏領域・未降伏領域の境界

計算例1: 平行平板間の流れ

ソルバー・パラメータ設定

- OpenFOAMのソルバーは, **nonNewtonianIcoFoam**を選択
- DualSPHysicsのスムージング長さは, 1.2で十分なことを予備調査で確認
- 両者で同等の近似曲線が得られるように ν_0 と m を調整

OpenFOAMのパラメータ設定

Parameter	Value
Mesh size	1.0cm
Fluid density ρ	1000kg/m ³
Consistency k	10Pa·s
Yield stress τ_0	5 - 35Pa
Power-law index n	1.0
ν_0	4.0m ² /s

DualSPHysicsのパラメータ設定

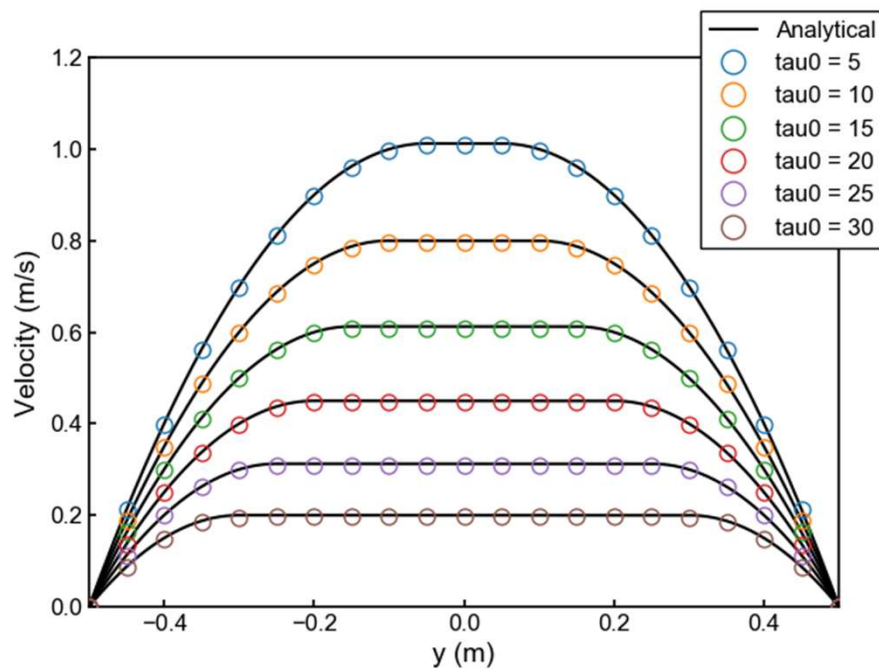
Parameter	Value
Particle size	1.0cm
Smoothing length h	1.2
Fluid density ρ	1000kg/m ³
Consistency k	10Pa·s
Yield stress τ_0	5 - 35Pa
Power-law index n	1.0
m	100

τ_0 の違いによる流速分布を検証する

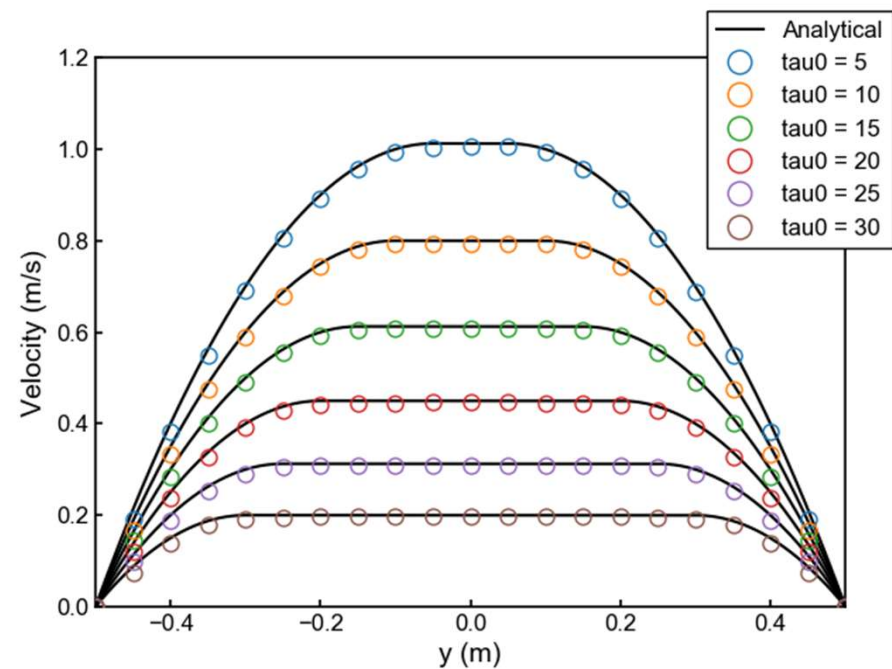
計算例1: 平行平板間の流れ

流速の計算結果

- OpenFOAM, DualSPHysicsともに**解析解とよく一致**
- ビンガム流体の挙動をよく再現している
- **幅広い降伏応力の範囲**で精度よくビンガム流体の解析が可能



OpenFOAMによる計算結果



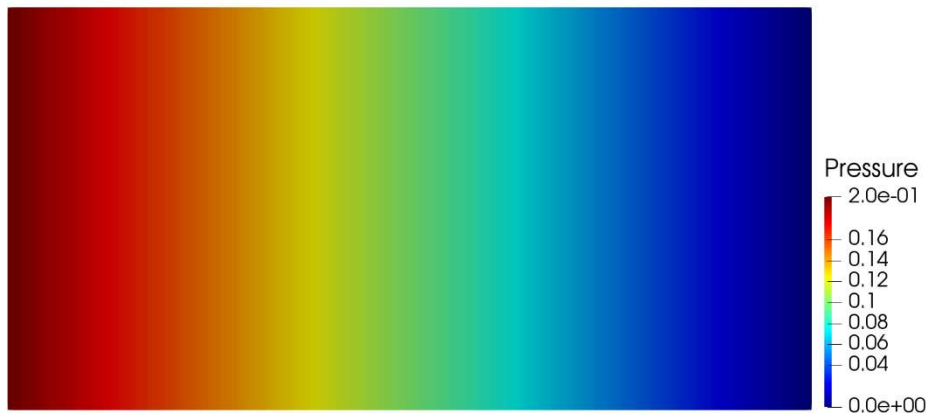
DualSPHysicsによる計算結果

計算例1: 平行平板間の流れ

圧力の計算結果

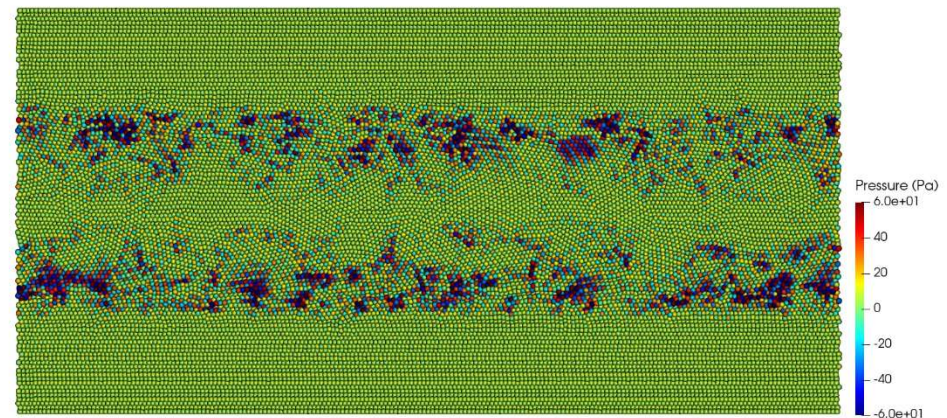
- OpenFOAMは、与えた圧力勾配から**圧力分布をよく再現**
- DualSPHysicsは、内部圧が一定とならず**攪乱**が見られる
- DualSPHysicsを、高精度な圧力計算が要求される問題に対して適用する場合は、注意が必要

Time: 60s



OpenFOAMによる結果
(圧力勾配で励起しているので、
一定の勾配で正解)

Time: 60s

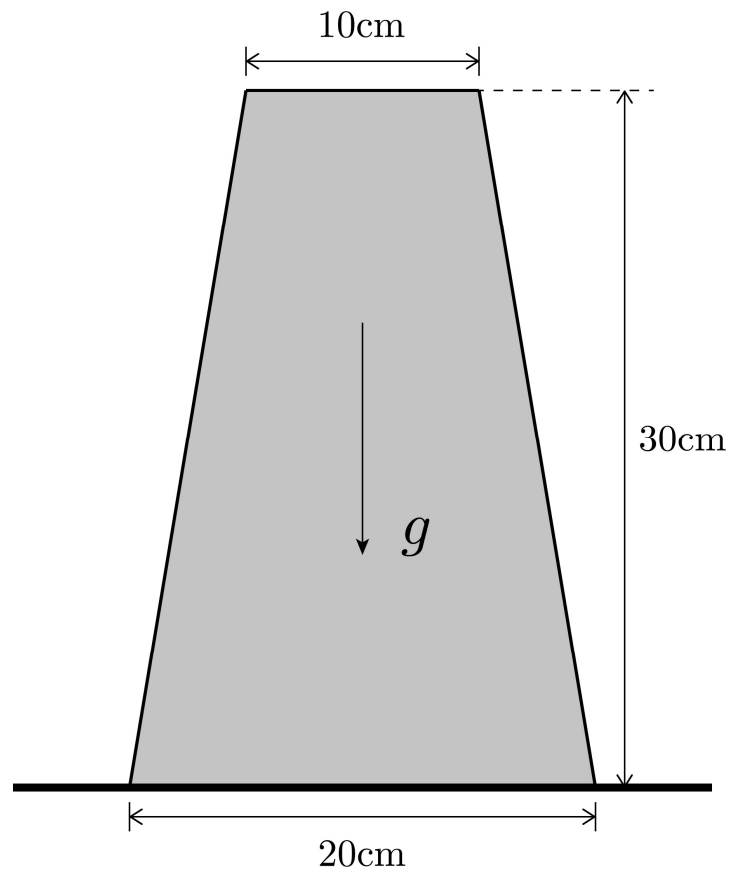


DualSPHysicsによる結果
(一定加速度で励起しているので、
全領域で $p = 0$ が正解)

計算例2: スランプ試験

自由表面を有する非ニュートン流体の解析を実施

スランプ試験: フレッシュコンクリートのワーカビリティを調べる試験



スランプ試験の模式図

- 計算時間は2.0sとし、実験のスランプ値との比較を行う
- スランプ値は降伏応力 τ_0 で決まることが知られている
- 流体はビンガム流体とする

設定したコンクリートの物性

Parameter	Value
Fluid density ρ	2300kg/m ³
Consistency k	143Pa·s
Yield stress τ_0	115Pa
Power-law index n	1.0

計算例2: スランプ試験

パラメータ設定

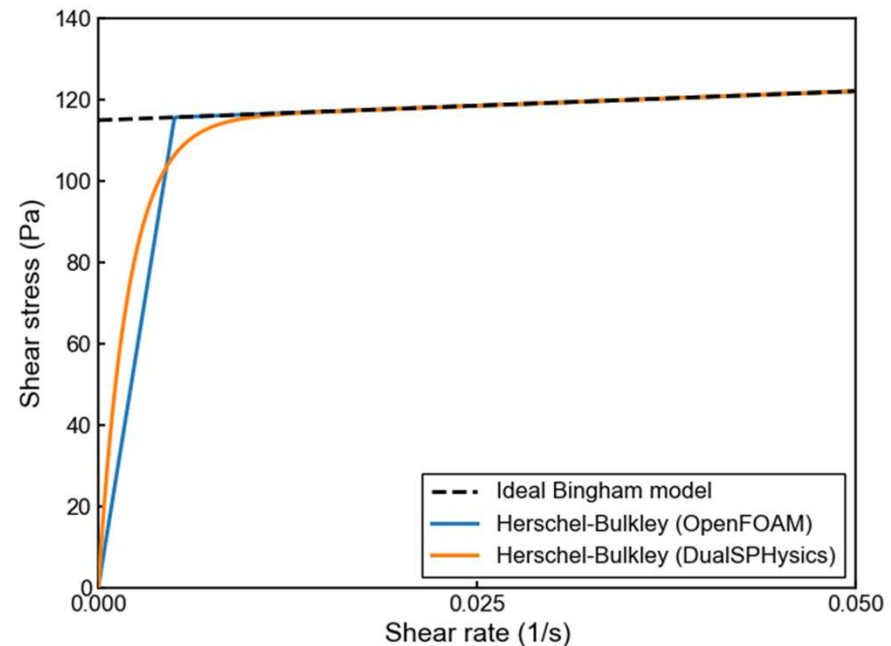
- OpenFOAMはinterFoamソルバーを使用. 気液二相流モデルとなるため, 計算コストが大きく, メッシュサイズ1.0cmでの計算は困難
- OpenFOAMの $\nu_0 = 10\text{m}^2/\text{s}$ に近い曲線が得られるように, DualSPHysicsの成長係数を $m = 500$ と設定

OpenFOAMのパラメータ設定

Parameter	Value
Mesh size	2.0cm
ν_0	10.0m ² /s

DualSPHysicsのパラメータ設定

Parameter	Value
Particle size	1.0cm
m	500

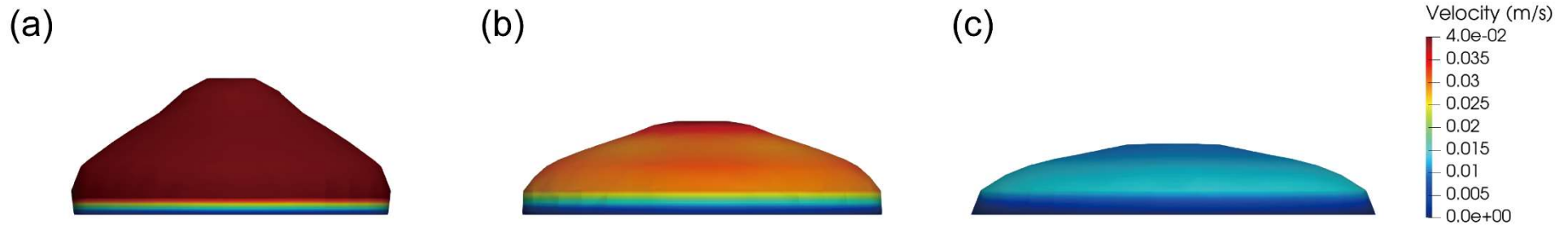


理想的なビンガム流体と, 近似曲線の模式図
([青線, OpenFOAM](#), [オレンジ線, DualSPHysics](#))

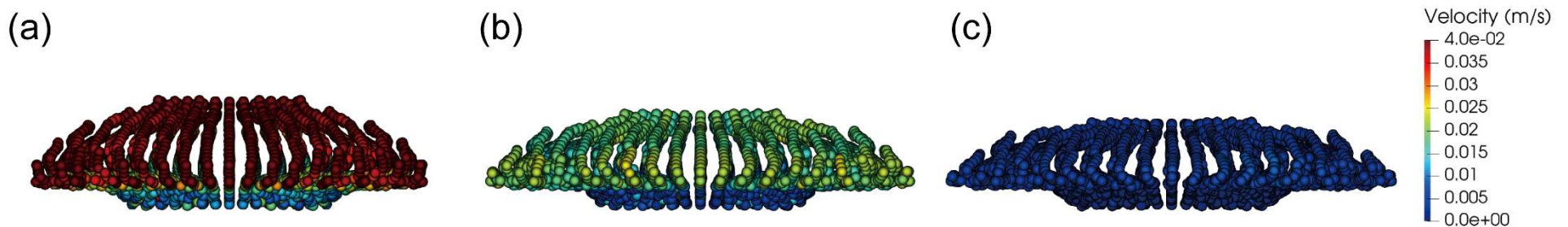
計算例2: スランプ試験

計算結果

- OpenFOAM, DualSPHysicsともにコンクリートの**流動・固着**という様子を、よく再現している
- OpenFOAM, DualSPHysicsともに2.0s時におけるスランプ値は、24cm. 水口らの実験によると23cmから28cmが範囲であるので、本計算は、実験結果に入り、**自由表面を有するビンガム流体の挙動をよく再現**できた



OpenFOAMによる計算結果, (a) 0.5s時, (b)1.0s時, (c)2.0s時

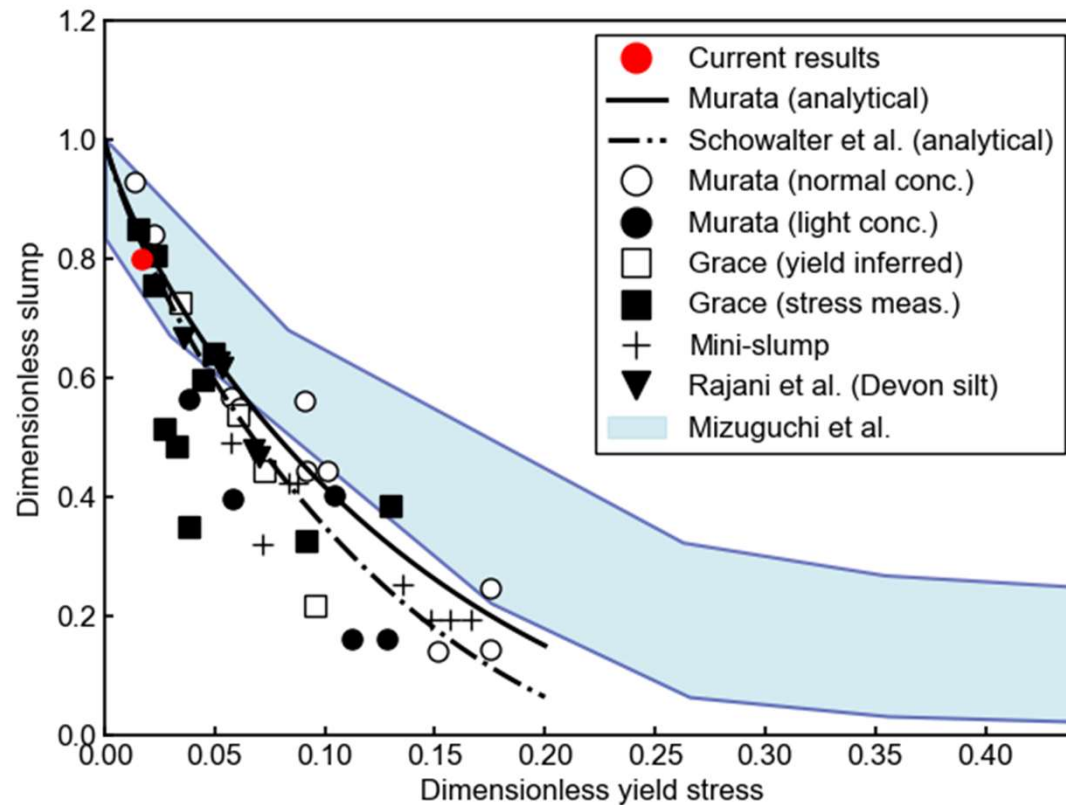


DualSPHysicsによる計算結果, (a) 0.5s時, (b)1.0s時, (c)2.0s時

既往のスランプ試験の研究と本計算結果

スランプ値の比較

- 既往のスランプ試験に関する研究(実験・理論)との比較
- 本計算結果は, 既往の実験および理論とよく整合する結果



本計算結果と既往のスランプ値に関する研究結果の比較

まとめと今後の展望

まとめ

- OpenFOAMとDualSPHysicsの**非ニュートン流体解析への適用性**について、比較検討を実施
- OpenFOAMは、ビンガム流体の**流速・圧力場ともに精度よく計算**できるが、計算コストが非常に大きい
- DualSPHysicsは、OpenFOAMと比べて圧力場の再現性に難がある一方、GPU計算により**計算パフォーマンスの観点では有利**
- 粘性計算の陰解法化は、ソースコードレベルでの修正が必要
- 要求される圧力計算の精度と計算コストのトレードオフから、OpenFOAMとDualSPHysicsを**使い分けるのが有効**

今後の展望

- **Shear thinning流体**解析への適用性の検証・比較研究
- 水と泥土が混在する流れ場など、**複数のレオロジー特性**を有する複雑な流れ場への適用性の検討



株式会社 ハイドロ総合技術研究所