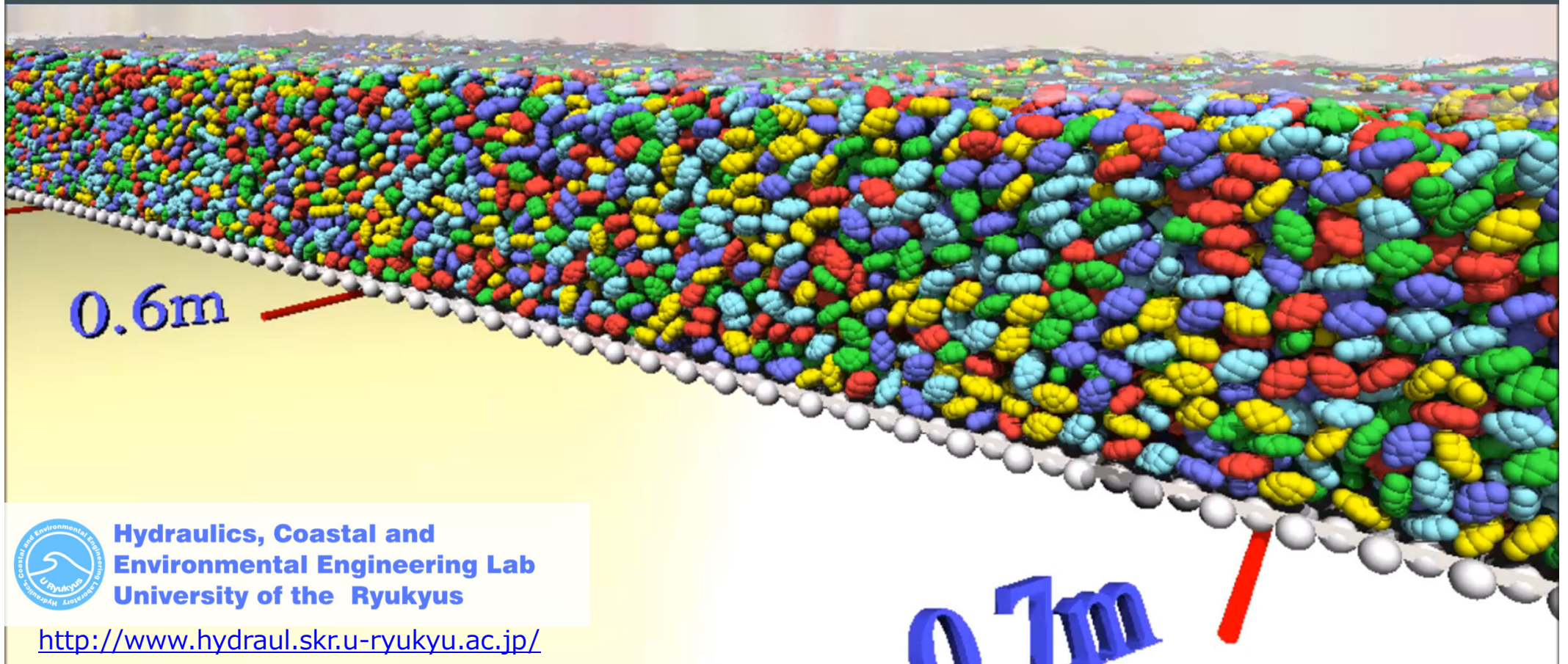


Interface-Resolved Simulation を活用した土砂流の力学機構の分析

Tomoo Fukuda

琉球大学 福田 朝生



Hydraulics, Coastal and
Environmental Engineering Lab
University of the Ryukyus

<http://www.hydraul.skr.u-ryukyu.ac.jp/>

1. シミュレーションモデルの特徴と解析法
2. 一様流中の球に作用する流体力の解析
3. 等流状態の平衡土砂濃度の解析
4. 球と礫形状粒子の運動と力の状態の違い
5. 現地土石流を対象としたシミュレーション
6. まとめ

連続体近似の混相流モデルや粒子法とのAPMの関係について

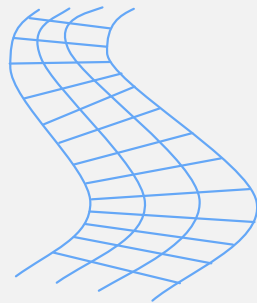
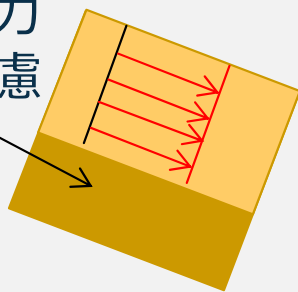
速度と平均的な衝突力（応力）の関係をモデル化して解析

土石流の氾濫解析などに用いられる平面二次元解析

土砂を連続体近似
混相流モデル



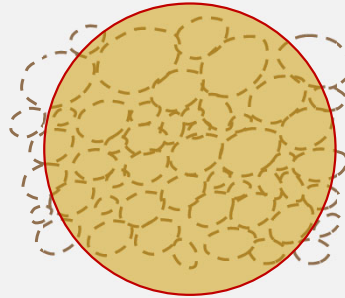
流動層底部の力と運動を未考慮



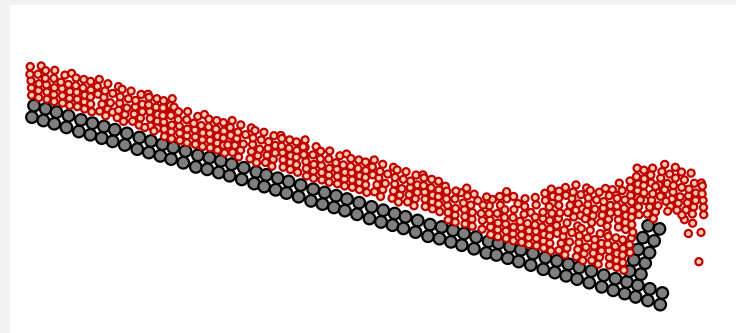
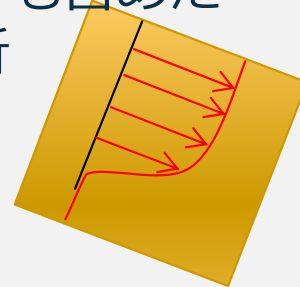
上から見たメッシュイメージ

粒子法(MPS,SPH)など

土砂を連続体近似
混相流モデル



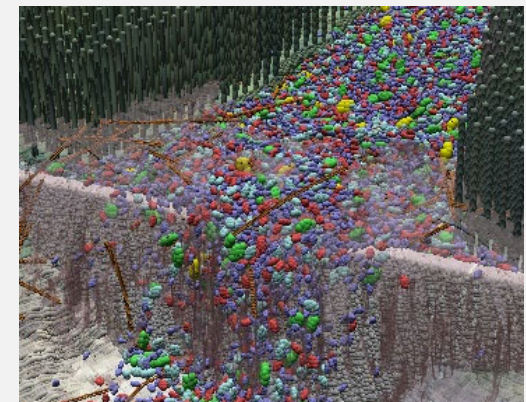
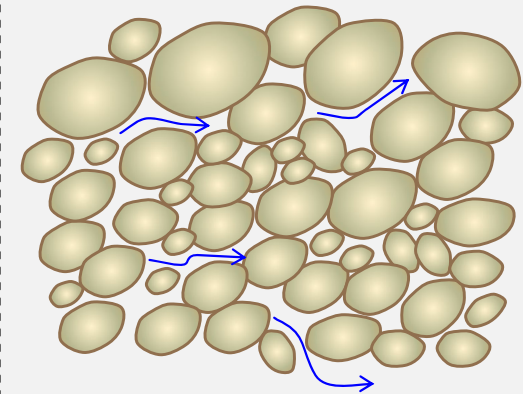
静止土砂も含めた
一体解析



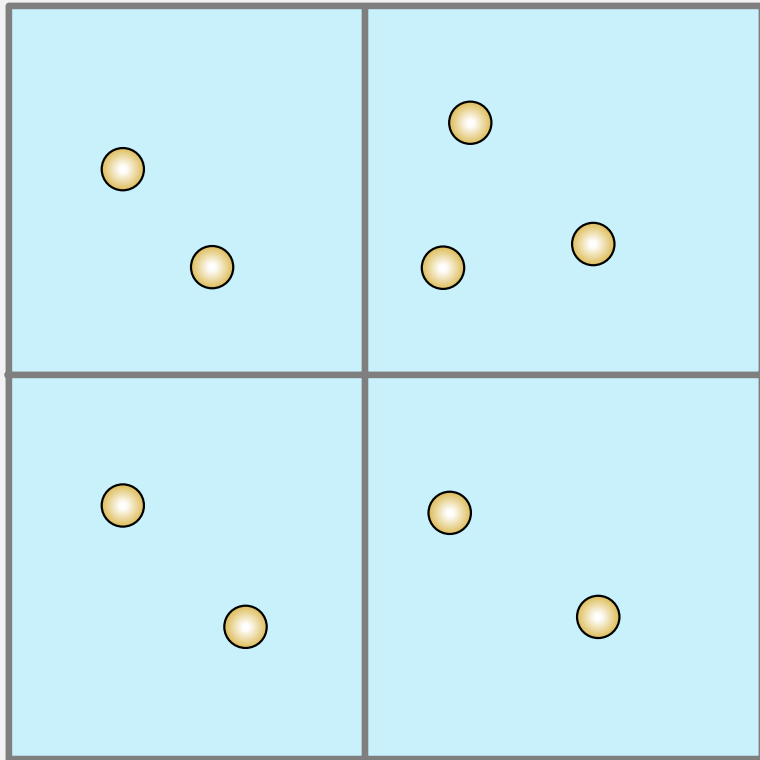
APM

(Arbitrary Particle Multiphase)

離散的な粒子の運動と衝突およびその周りの水の流れを**直接解析**



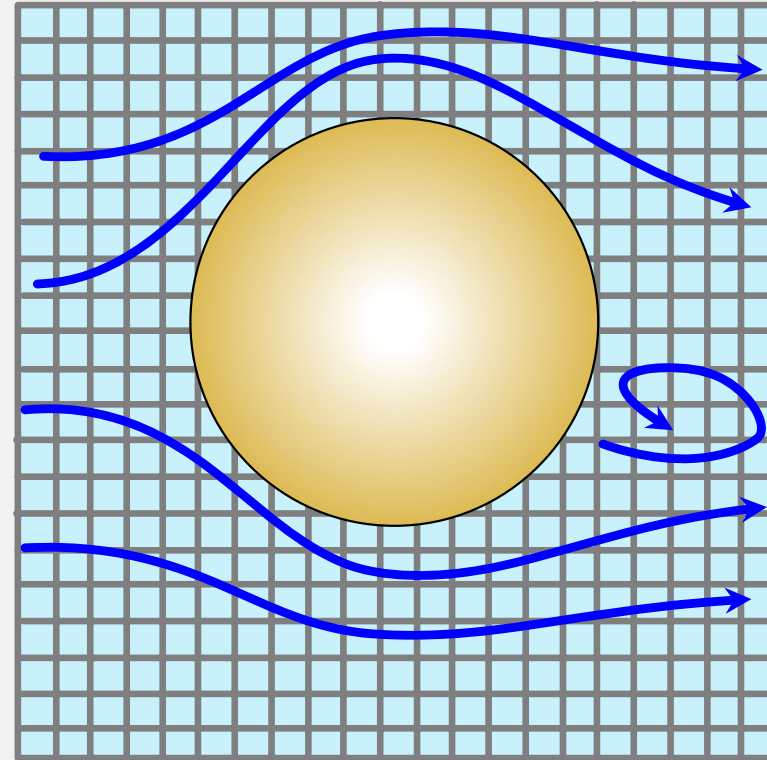
固体と流体の連成解析の種類 (解像度について)



流体解析の計算格子

粒子に作用する流体力は、抗力係数などを用いたモデル化によって推定

粒子群に作用する抗力係数を適切に与えることが困難



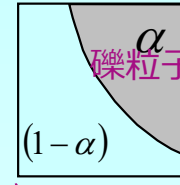
流体解析の計算格子

粒子周りの流れを詳細に解き、抗力係数を用いることなく、解かれた粒子周りの流れの応力場から、**流体力を直接求めることができる。**

APM (Arbitrary Particle Multiphase)

水の運動

水の運動は、固液混相流場の一流体モデルを用い、石礫粒子の位置、固相部分の速度を考慮して解析



流体計算セル

Euler的に解析

$$\rho = \alpha \rho_s + (1 - \alpha) \rho_f$$

$$u_i = (\alpha \rho_s u_{si} + (1 - \alpha) \rho_f u_{fi}) / \rho$$

α : 粒子の体積割合

添え字 f, s はそれぞれ、液相、固相を示す。

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \nu = \mu / \rho \quad \nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

u_i : 粒子部分を含んだセル平均流速

P : 圧力とSGS応力の等方応力との和

ρ : 密度

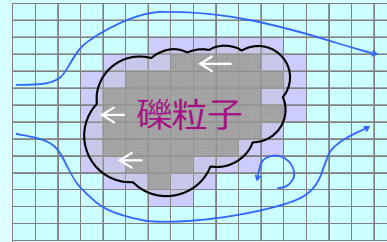
Δ : 流体計算セルサイズ

ν_t : SGS 乱流粘性係数

C_s : Smagorinsky 定数 (0.173)

連続式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$



流体計算セル

運動方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{ 2(\nu + \nu_t) S_{ij} \}$$

流体力の評価

$$F_{f,i} = \int_{\Omega} \left\{ -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \{ 2(\nu + \nu_t) S_{ij} \} \right\} d\Omega$$

F_f : 石礫粒子に作用する流体力

Ω : 石礫粒子内部の領域

Fukuda, T., Fukuoka, S.: Interface-resolved large eddy simulations of hyperconcentrated flows using spheres and gravel particles, Advances in Water Resources 2017.

礫粒子の運動

礫は、剛体として解析

並進の運動方程式

$$M \ddot{r}_i = M g_i + F_i^f + F_i^c$$

回転の運動方程式

$$\dot{\omega}_{i'} = I_{i'j'}^{-1} \left\{ R_{j'i} (T_i^f + T_i^c) - \varepsilon_{j'k'l'} \omega_{k'} I_{l'm'} \omega_{m'} \right\}$$

礫を構成する球を使って接触を判定し、接触力を計算



Lagrange的に解析

\ddot{r}_i : 重心

ω_i : 角速度

N_i : トルク

$I_{i'j'}$: 慣性テンソル

$R_{j'i}$: グローバル座標からローカル座標への座標変換行列

添え字 f, c : それぞれ流体力と石礫粒子間の接触力を示す。

ダッシュのついた指標はローカル座標成分を示す。

バネ ダッシュポット

$$F'_i = e_i + d_i$$

二球の重なり量 δ とおよぼし合う力の関係を弾性論から求めたHertzの式でバネ定数を設定

$$e_i(t + \Delta t) = e_i(t) + k_i \Delta \delta_i$$

$$k_n = \left\{ \frac{4}{9} \left(\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \right) \left(\frac{E}{1 - pos^2} \right)^2 e_n \right\}^{\frac{1}{3}}$$

非弾性衝突に伴うエネルギー散逸をダッシュポットでモデル化

$$d_i = c_i \frac{\Delta \delta_i}{\Delta t}$$



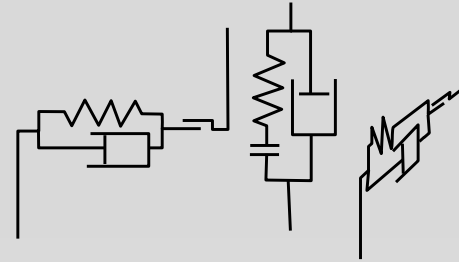
$$c_n = - \frac{2 \ln b}{\sqrt{\pi + (\ln b)^2}} \sqrt{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} k_n$$

川口寿裕, 田中敏嗣, 辻裕: 日本機械学会論文集, Vol.58, No.551B, pp.79-85,1992.

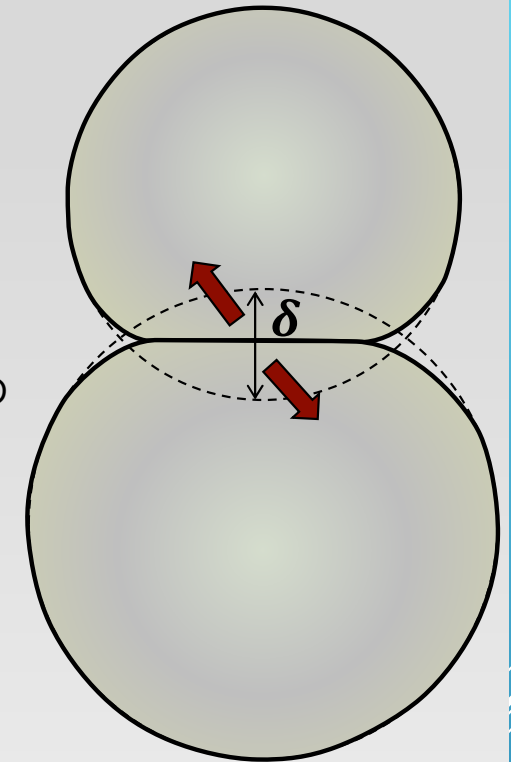


摩擦スライダー (接触平面の方向)

$$F_t = \text{Sign}\{F'_t\} \min\{|F'_t|, \tan \varphi_p |F'_n|\}$$



- δ : 接触開始からの変位
- i : 衝突平面の法線方向 n と 2つの接線方向(t 方向)の成分を示す
- r : 球の半径
- k : バネ定数
- E : 弾性係数
- pos : ポアソン比
- m : 球の質量
- b : 反発係数 (ダッシュポット)
- φ_p : 粒子間摩擦角 (摩擦スライダー)

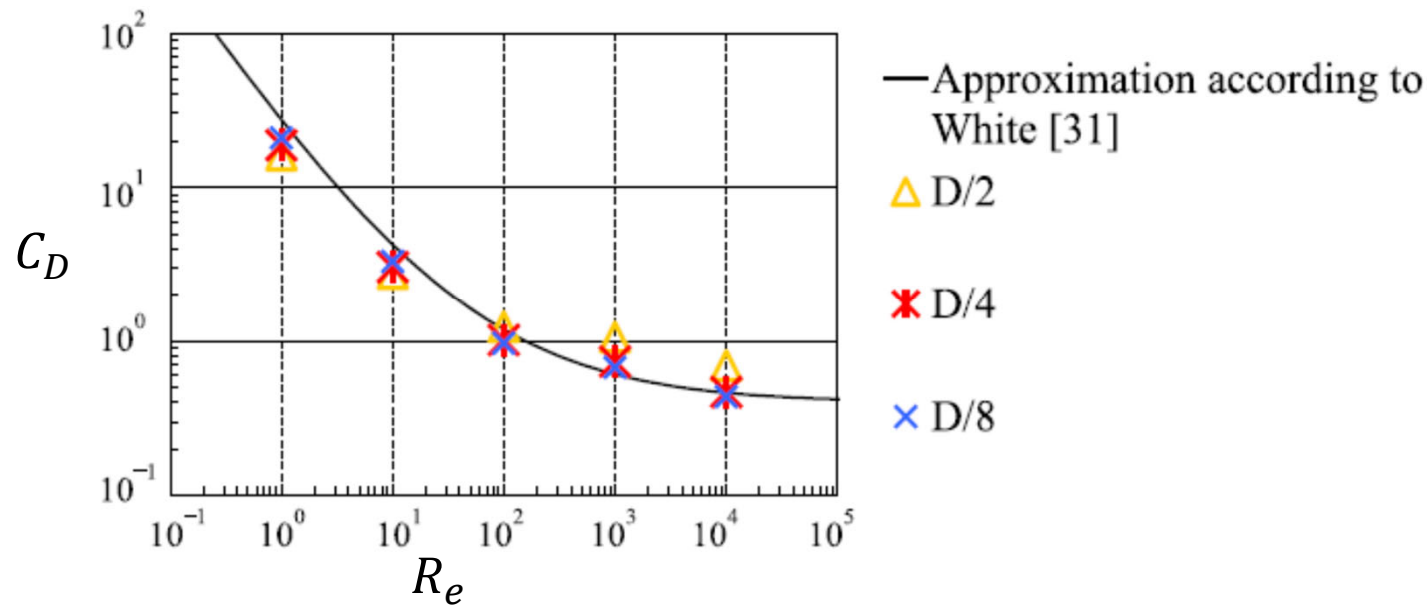
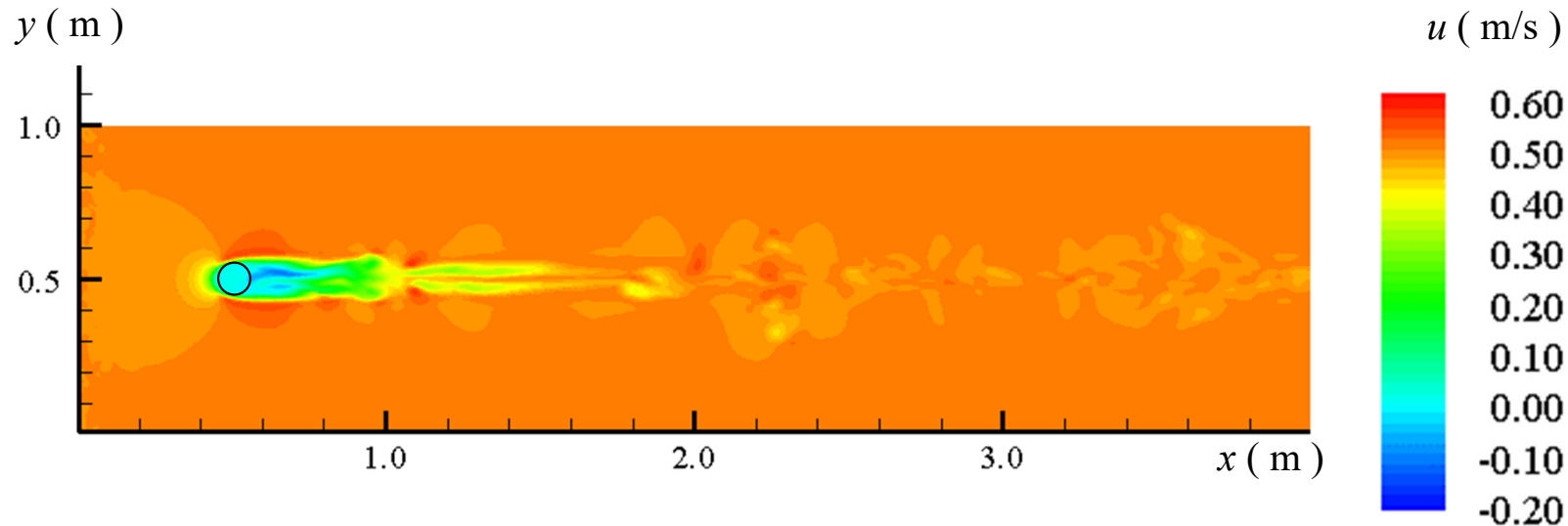


1. シミュレーションモデルの特徴と解析法
2. 一様流中の球に作用する流体力の解析
3. 等流状態の平衡土砂濃度の解析
4. 球と礫形状粒子の運動と力の状態の違い
5. 現地土石流を対象としたシミュレーション
6. まとめ

抗力係数の検証



粒径の1/4程度の格子を用いることで、球に作用する抗力を適切に説明できることが確認できた。



1. シミュレーションモデルの特徴と解析法
2. 一様流中の球に作用する流体力の解析
3. 等流状態の平衡土砂濃度の解析
4. 球と礫形状粒子の運動と力の状態の違い
5. 現地土石流を対象としたシミュレーション
6. まとめ

駆動力 (重力の流下方向成分)

$$F_G = \int_0^{h_t} (c\rho^p + (1-c)\rho^w)g \sin \theta dz$$

底面の垂直抗力

$$F_N = \int_0^{h_t} \{c(\rho^p - \rho^w)\}g \cos \theta dz$$

抵抗力

$$F_R = \tan \varphi F_N$$

c : 体積濃度

力のつり合い

φ : 摩擦角

$$F_R = F_G$$

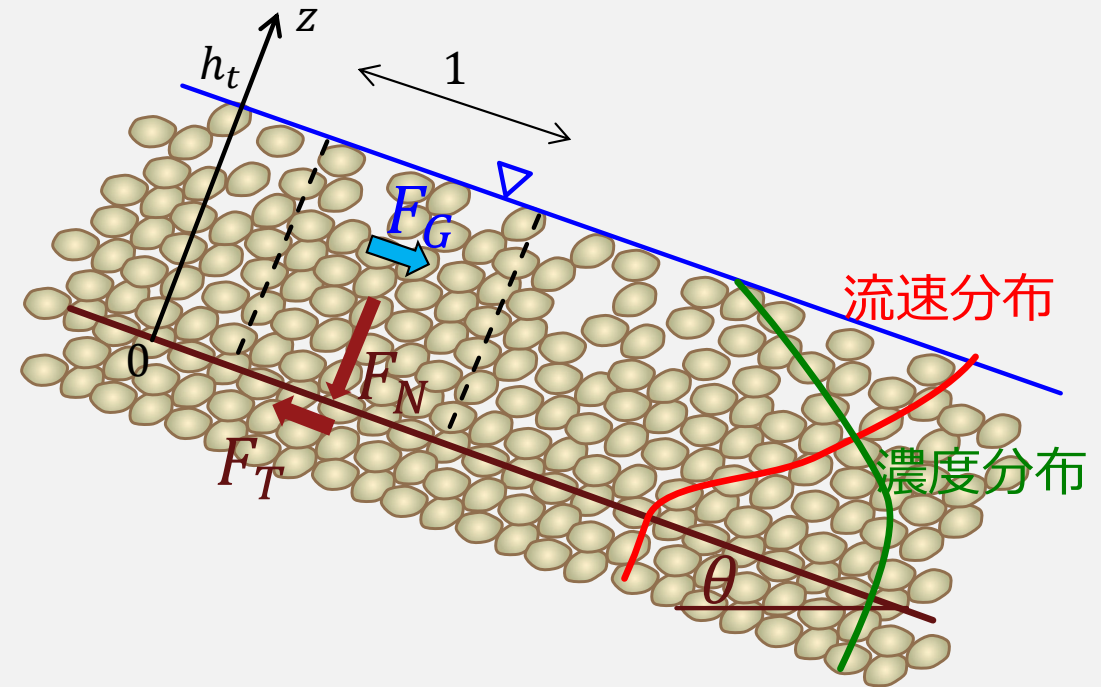
$$\tan \varphi \int_0^{h_t} c(\rho^p - \rho^w)g \cos \theta dz = \int_0^{h_t} (c\rho^p + (1-c)\rho^w)g \sin \theta dz$$

$$\Leftrightarrow \tan \varphi \cos \theta \int_0^{h_t} cdz = (\rho^p - \rho^w) \sin \theta \int_0^{h_t} cdz + \rho^w \sin \theta \int_0^{h_t} dz$$

$$\Leftrightarrow \{\tan \varphi \cos \theta (\rho^p - \rho^w) - \sin \theta\} \int_0^{h_t} cdz = \rho^w \sin \theta \int_0^{h_t} dz$$

平衡土砂濃度

$$\bar{c} = \frac{\int_0^{h_t} cdz}{h_t} = \frac{\tan \theta}{\left(\frac{\rho^p}{\rho^w} - 1\right) (\tan \varphi - \tan \theta)}$$



土砂流の濃度は水路勾配によって変化⇒勾配の異なる3ケースについて考察

粒径 d	2.18 mm
内部摩擦角 ¹⁾ φ	38.7 deg
粒子の密度 ρ_s	2,620 kg/m ³
計算格子サイズ	0.000545 m
水路長	0.1m
水路幅	0.1m
周期境界	縦断方向

長径: a $a/d = 1.49$ 中径: b $b/d = 1.00$
短径: c $c/d = 0.72$ Shape Factor $c/\sqrt{ab} = 0.590$

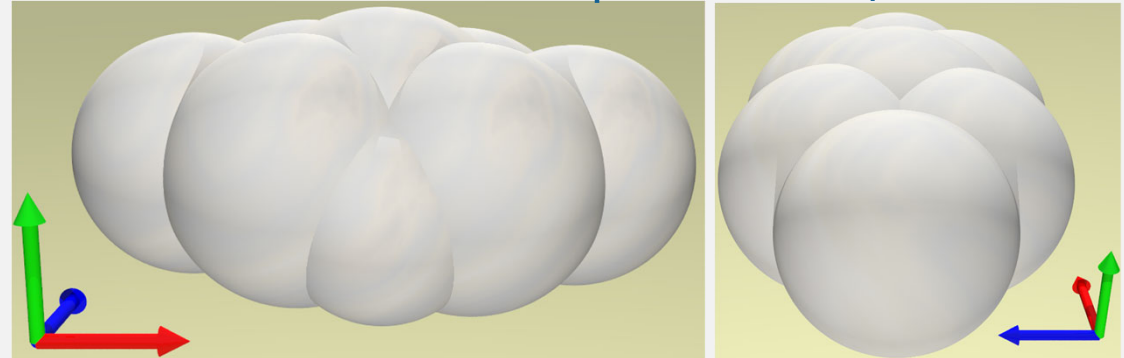


図 解析に用いた石のモデル

各ケースで異なる解析条件

実験値	水路勾配 θ	6.4deg	10.5deg	14.4deg
	流動層の水深 h_t	0.0188m	0.0193m	0.0284m
	¹⁾ 輸送濃度 c_f	0.0423	0.140	0.33
解条件	初期粒子投入量 V_s	$5.61 \times 10^{-5} \text{ m}^3$	$7.64 \times 10^{-5} \text{ m}^3$	$1.66 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

$$\text{輸送濃度 } c_f = \frac{\int_0^{h_t} c u dz}{\int_0^{h_t} u dz}$$

$$\text{初期粒子投入量 } V_s = (0.5 c_* h_t + c_f h_t) a$$

c : 混相流の粒子の体積濃度

u : 混相流の流速 a : 水路底面の面積

c_* : 静止堆積層の濃度(0.512¹⁾)

1) 伊藤隆郭：土石流の構成則およびその適用に関する研究，立命館大学博士論文，2000

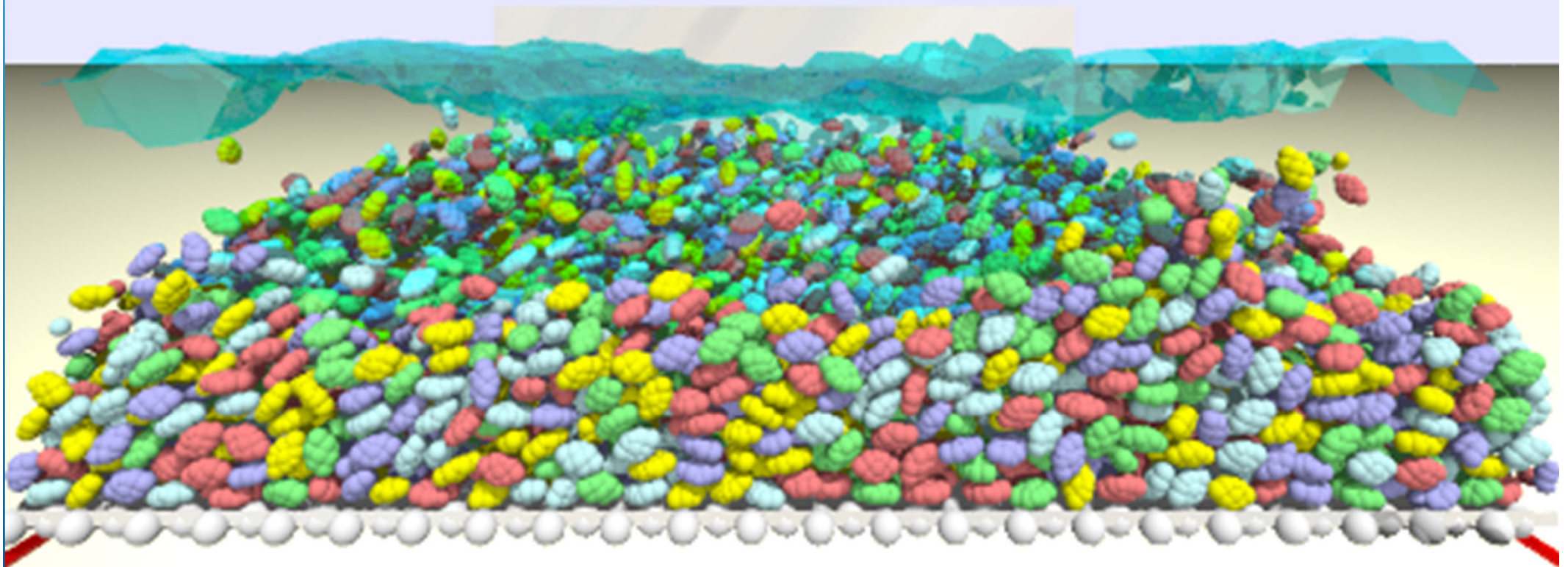
2) 山口栄治, 福田朝生, 岩切航：固体群と流体の三次元連成数値シミュレーションを用いた単一粒径粒子群の土砂流の乱れ構造に関する研究 土木学会論文集B1(水工学), Vol.78, pp.I_895-I_900, No.2, 2022.11 DOI:https://doi.org/10.2208/jscejhe.78.2_I_895

6.4deg



Hydraulics, Coastal and
Environmental Engineering Lab
University of the Ryukyus

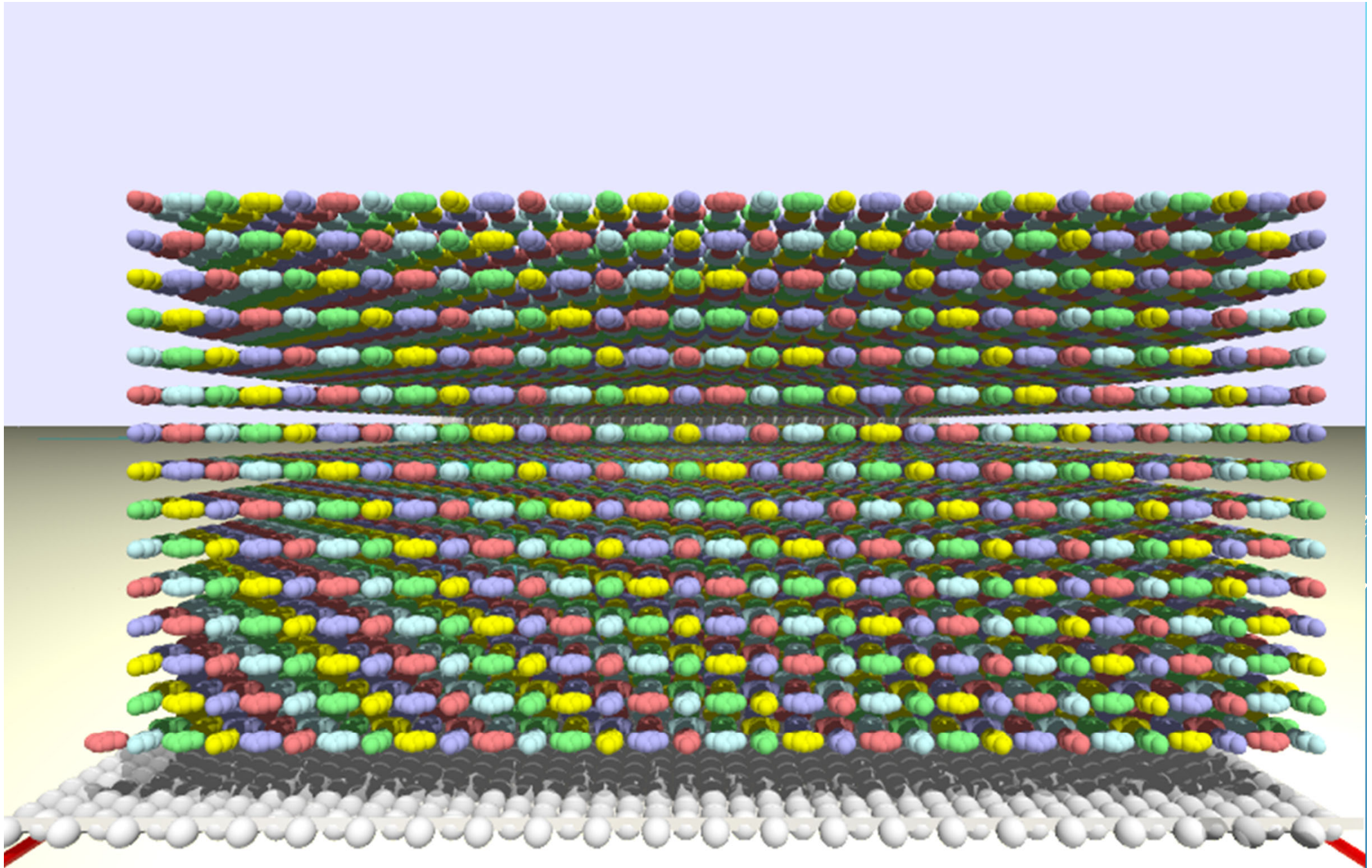
01.500s



10.5 deg



Hydraulics, Coastal and
Environmental Engineering Lab
University of the Ryukyus



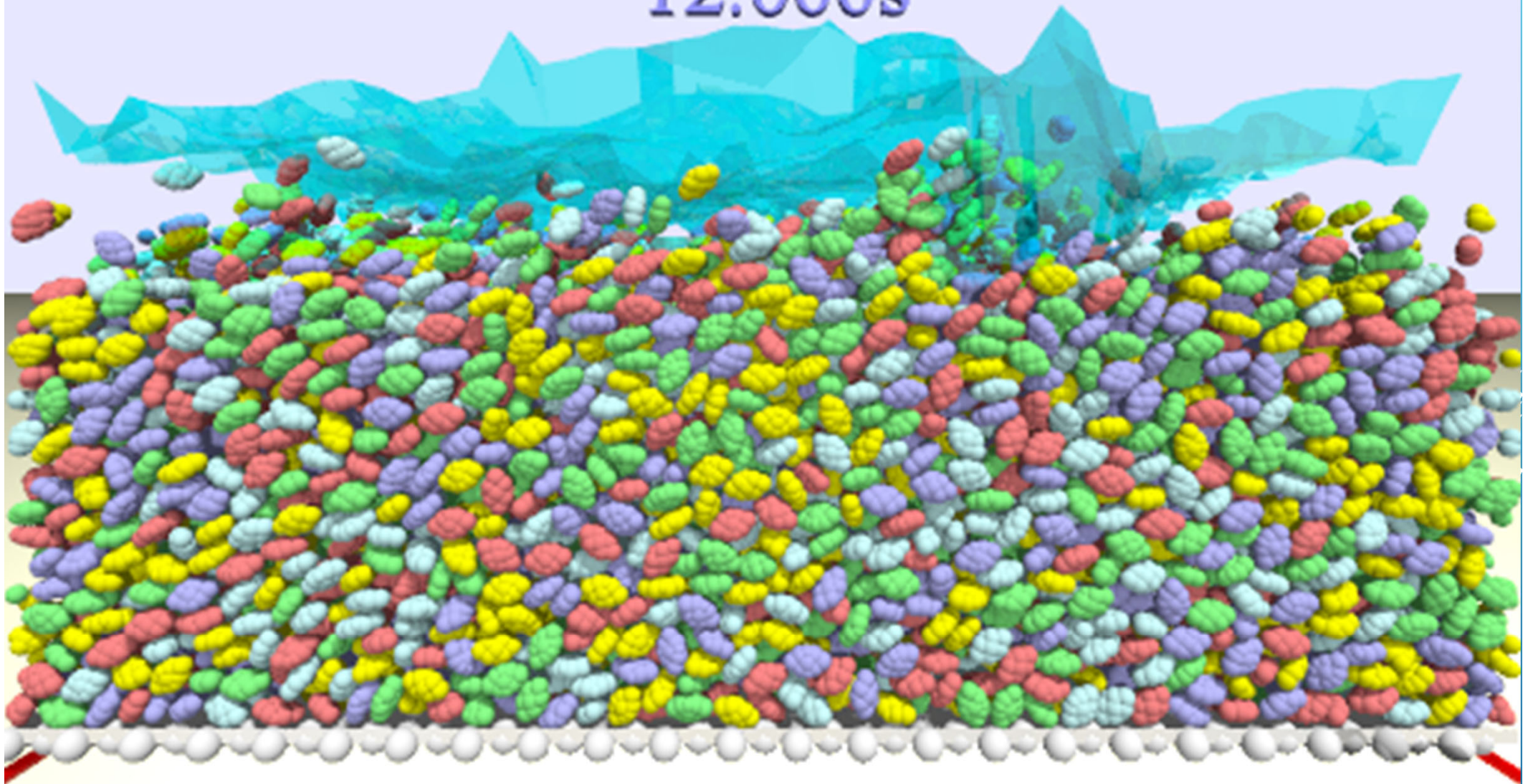
山口栄治, 福田朝生, 岩切航 : 固体群と流体の三次元連成数値シミュレーションを用いた単一粒径粒子群の土砂流の乱れ構造に関する研究
土木学会論文集B1(水工学), Vol.78, pp.I_895-I_900, No.2, 2022.11 DOI:https://doi.org/10.2208/jscejhe.78.2_I_895

14.4deg



Hydraulics, Coastal and
Environmental Engineering Lab
University of the Ryukyus

12.000s



解析の混相流の流速と実験結果¹⁾の粒子速度との比較

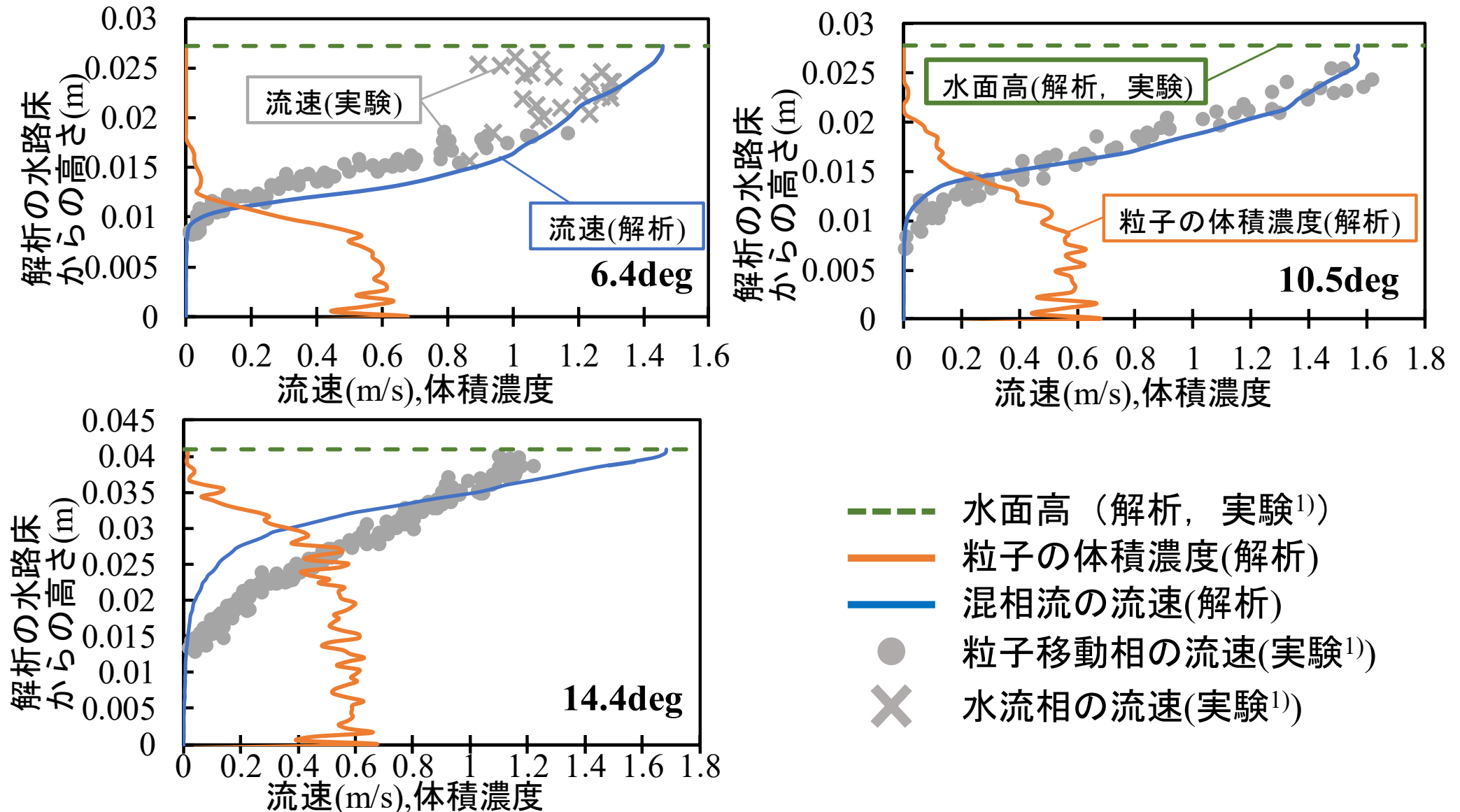


図 混相流の実験値および解析結果の流速と粒子の体積濃度の鉛直分布

1) 伊藤隆郭：土石流の構成則およびその適用に関する研究，立命館大学博士論文，2000

2) 山口栄治, 福田朝生, 岩切航：固体群と流体の三次元連成数値シミュレーションを用いた単一粒径粒子群の土砂流の乱れ構造に関する研究 土木学会論文集B1(水工学), Vol.78, pp.I_895-I_900, No.2, 2022.11 DOI:https://doi.org/10.2208/jscejhe.78.2_I_895

平衡土砂濃度の比較

平衡土砂濃度式

$$\bar{c} = \frac{\tan \theta}{\left(\frac{\rho^p}{\rho^w} - 1\right) (\tan \varphi - \tan \theta)}$$

ρ_w : 水の密度, ρ_s : 粒子の密度,
 θ : 水路勾配,
 φ : 粒子群の内部摩擦角(38.7 deg) ,
 \bar{c} : 水深平均の粒子の体積濃度

表 平衡濃度の解析結果と
平衡濃度式から求める計算値の比較

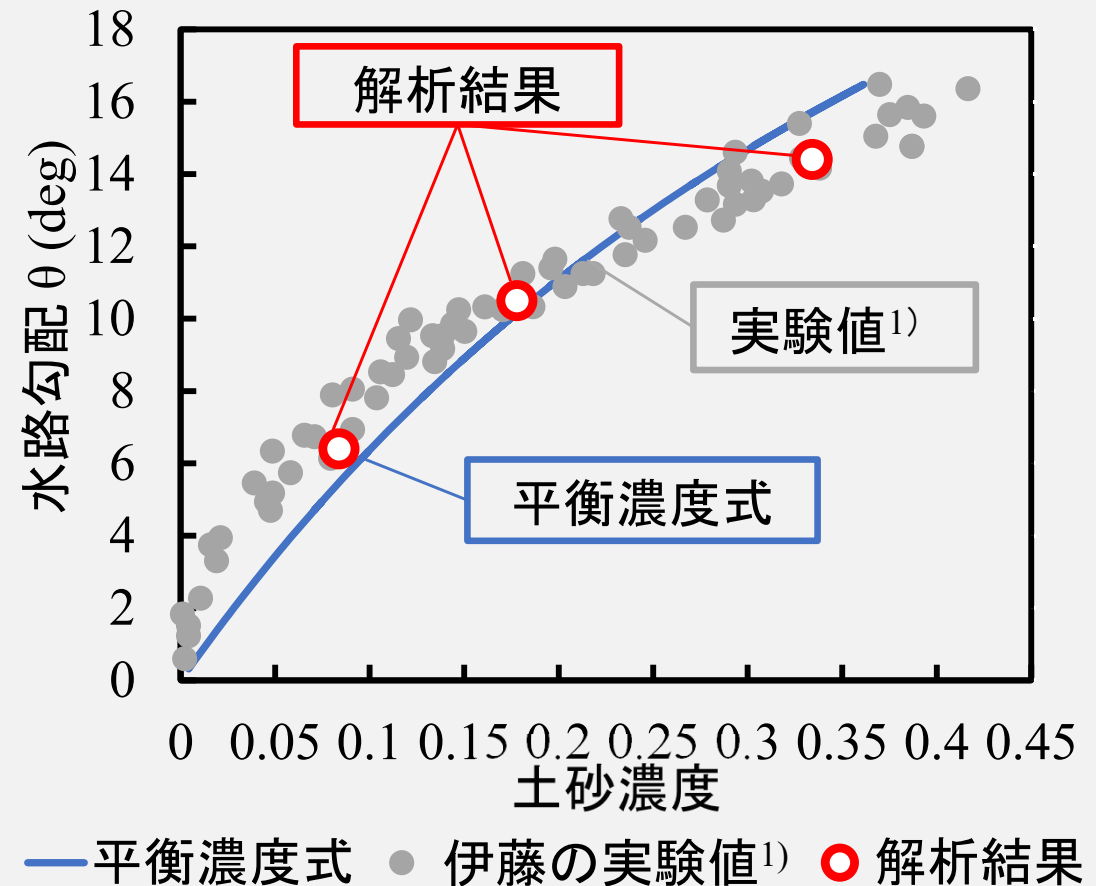
θ (deg)	6.4	10.5	14.4
h_t (m)	0.017	0.017	0.026
平衡濃度 (解析)	0.084	0.18	0.33
平衡濃度 (式)	0.10	0.19	0.29

解析で求めた平衡濃度

$$\bar{c} = \frac{1}{h_t} \int_0^{h_t} c dz$$

h_t : 流動層の水深, c : 粒子の体積濃度

※底面高は最大流速の1%の速度となる高さで定義



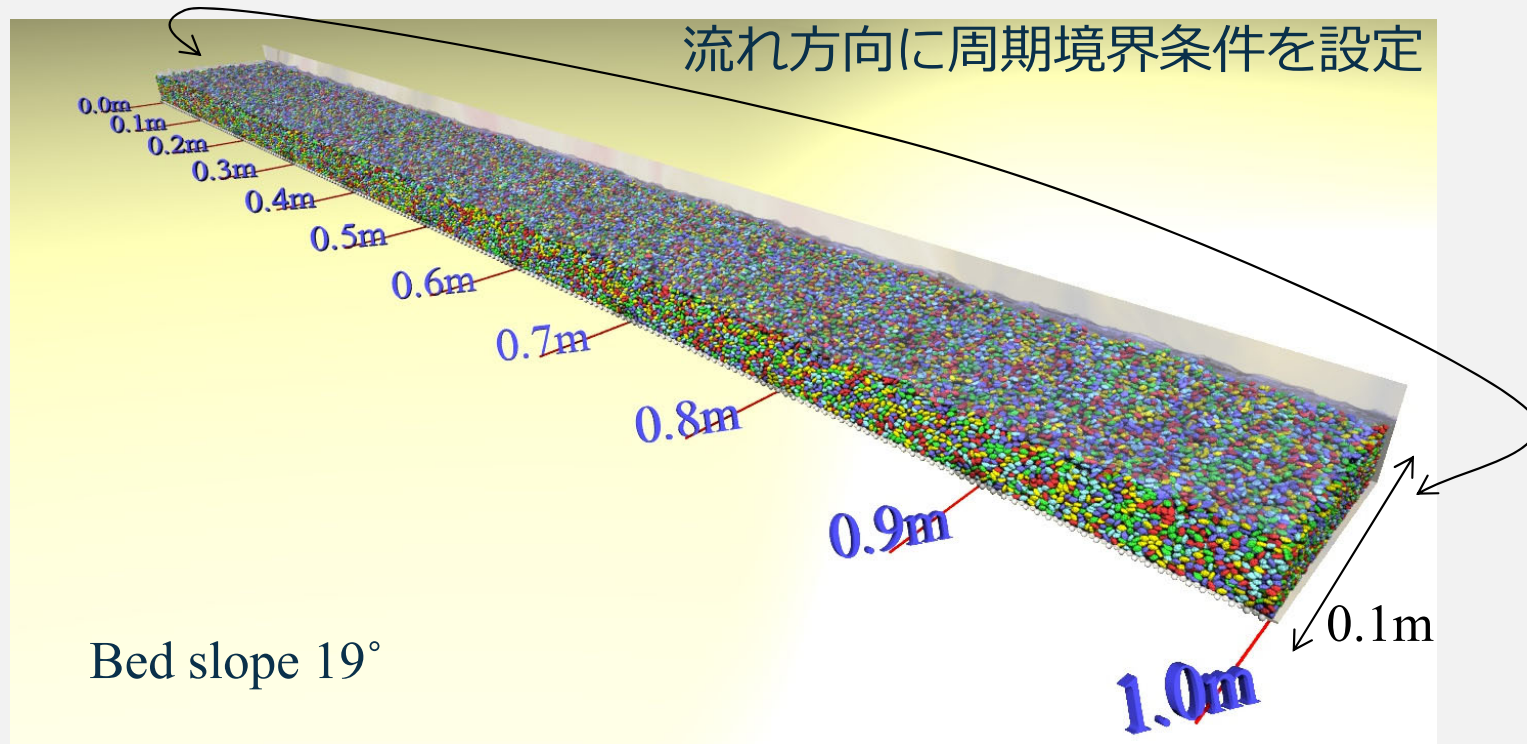
水路勾配と土砂輸送濃度の関係

1) 伊藤隆郭：土石流の構成則およびその適用に関する研究，立命館大学博士論文，2000

2) 山口栄治, 福田朝生, 岩切航：固体群と流体の三次元連成数値シミュレーションを用いた単一粒径粒子群の土砂流の乱れ構造に関する研究
土木学会論文集B1(水工学), Vol.78, pp.I_895-I_900, No.2, 2022.11 DOI:https://doi.org/10.2208/jscejhe.78.2_I_895

- 等流状態の土砂を解析した結果，流速分布をかなりの程度説明できた。
- 平衡土砂濃度式の関係も良好に再現することができAPMの水と土砂の相互作用は概ね妥当と判断される。

1. シミュレーションモデルの特徴と解析法
2. 一様流中の球に作用する流体力の解析
3. 等流状態の平衡土砂濃度の解析
4. 球と礫形状粒子の運動と力の状態の違い
5. 現地土石流を対象としたシミュレーション
6. まとめ



ϕ_μ : 内部摩擦角

c_* : 静止堆積層の体積濃度

実験で用いた
礫粒子

38.7°

0.512



Sphere

29.7°

0.60



Gravel

38.9°

0.62

Case 1: 土砂輸送濃度 0.196

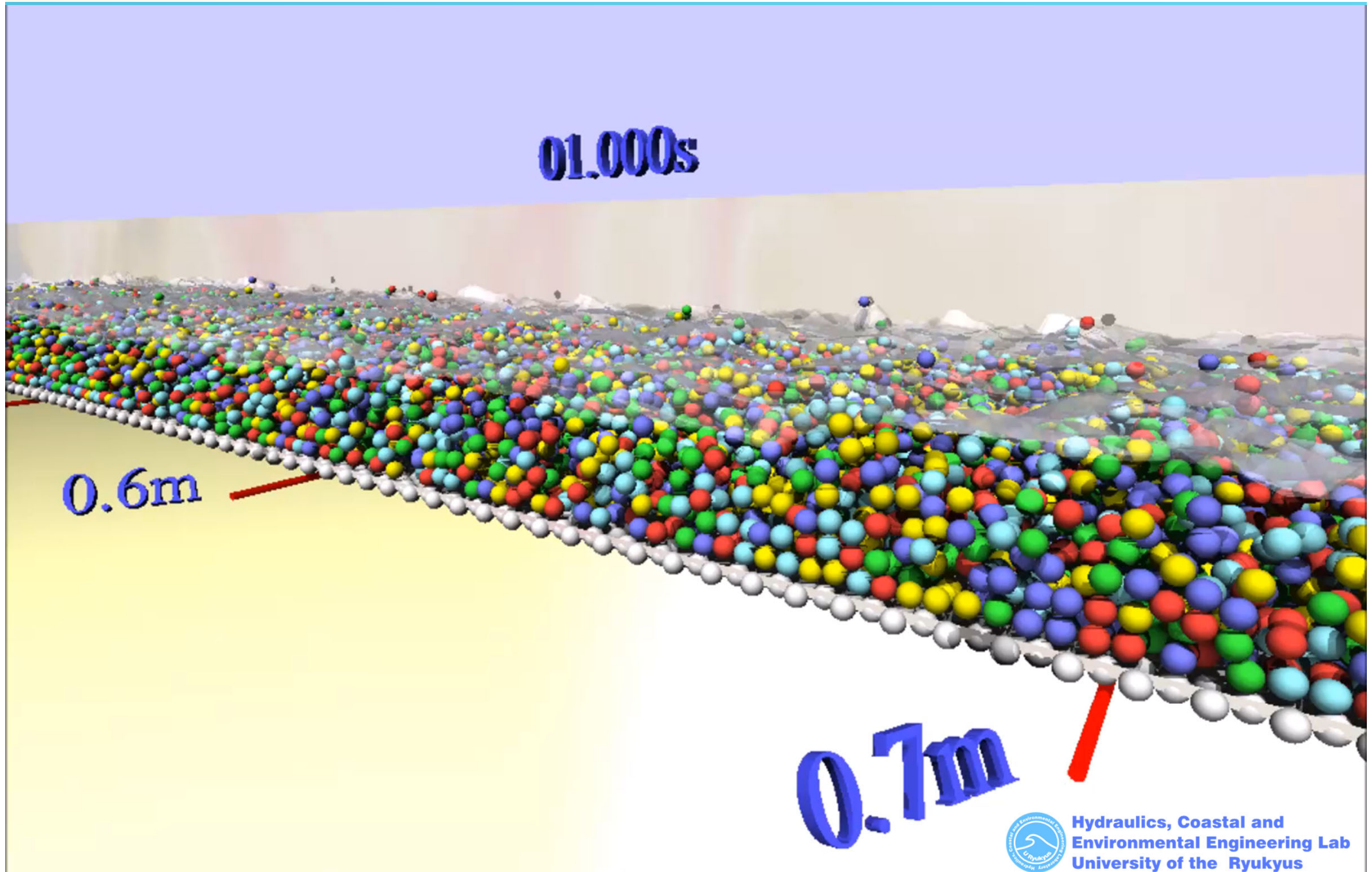
Case 2: 土砂輸送濃度 0.444

粒径 : 2.18 mm

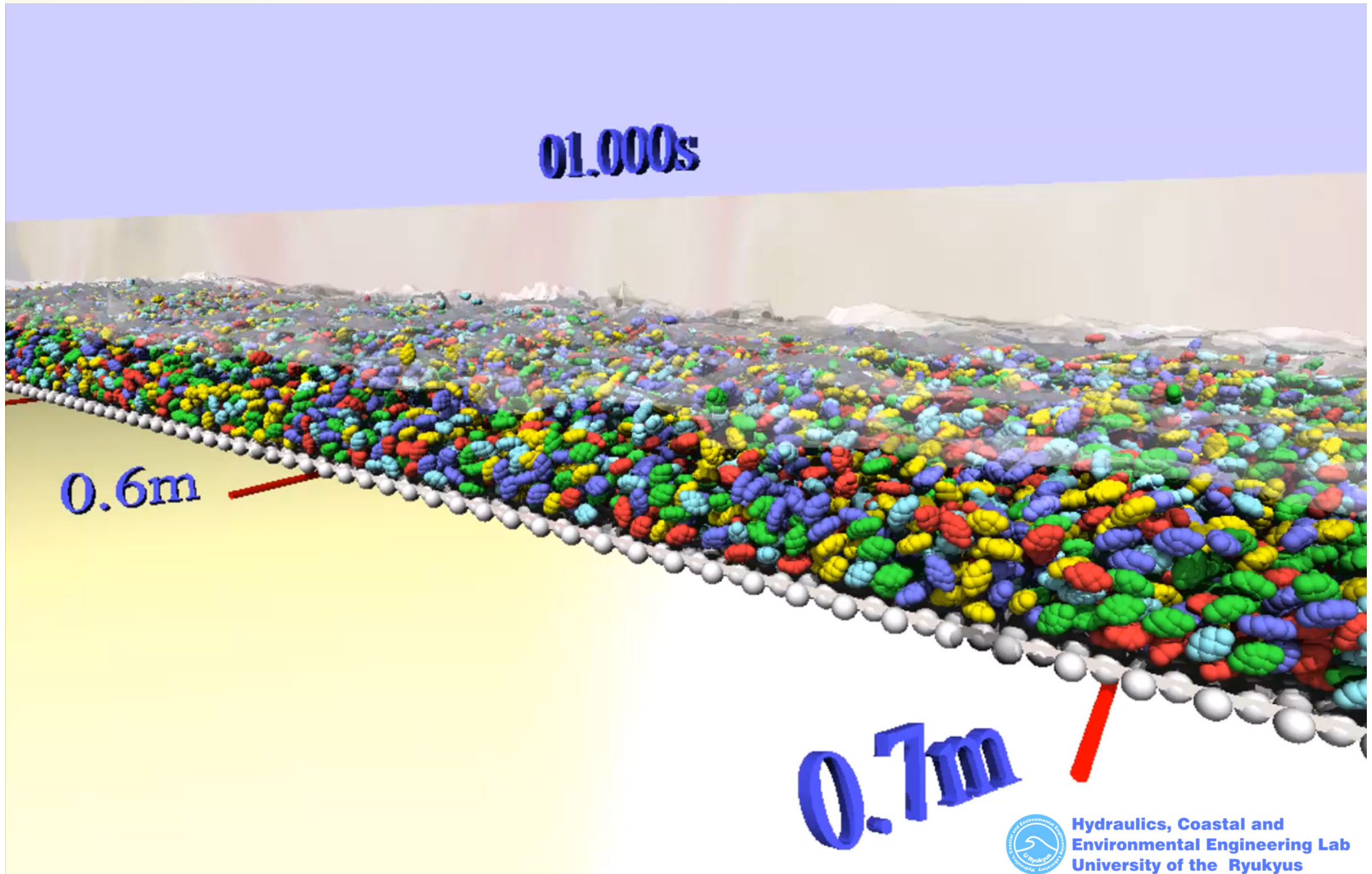
格子サイズ : 粒径の1/4

解析対象とした実験 : 伊藤隆郭, 江頭進治, 宮本邦明, 竹内宏隆 : 土石流の固定床から移動床流れへの遷移過程に関する研究, 水工学論文集, 第43巻, 1999年

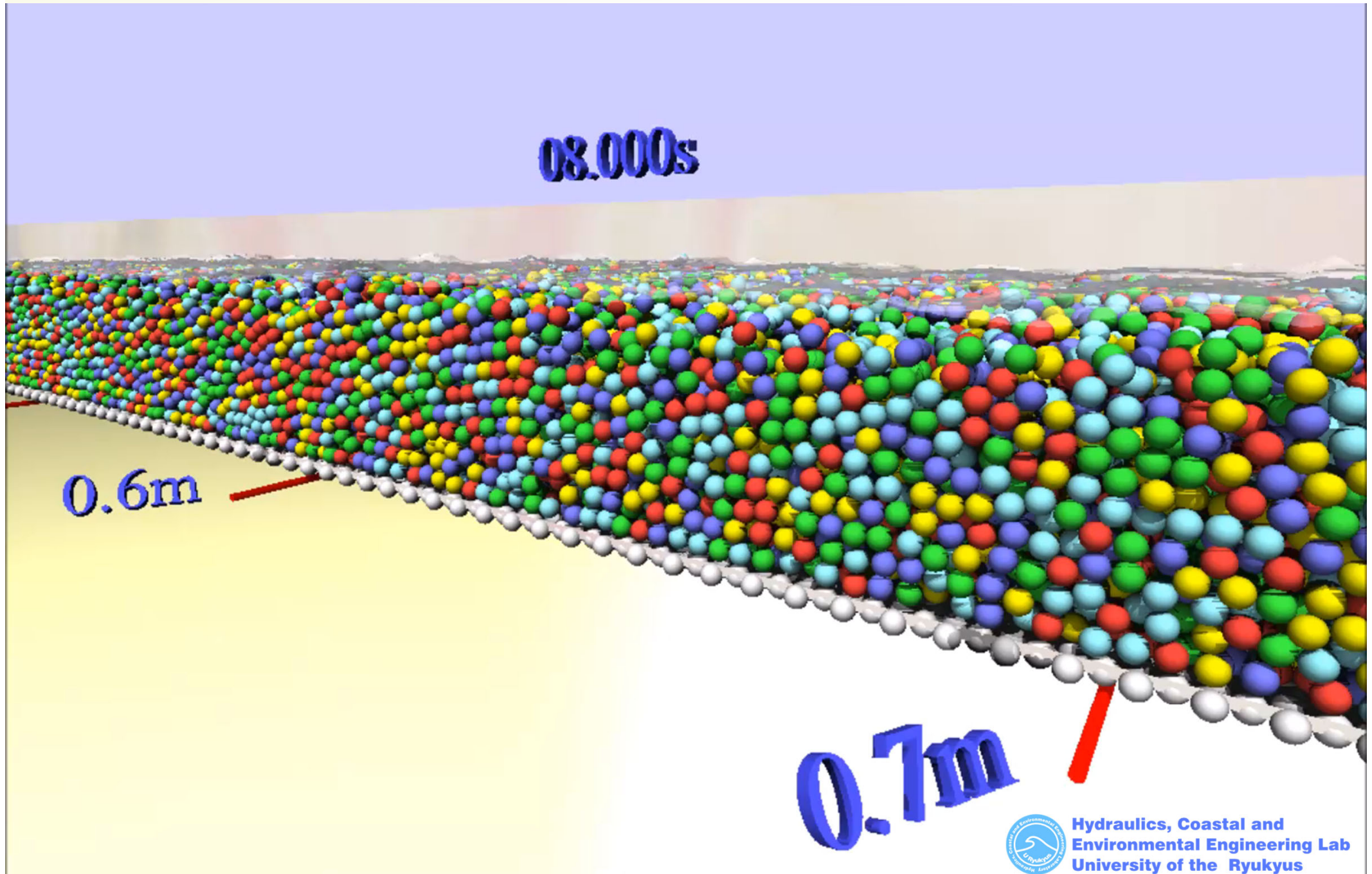
球を用いた土砂輸送濃度 $C_f = 0.196$ の解析結果



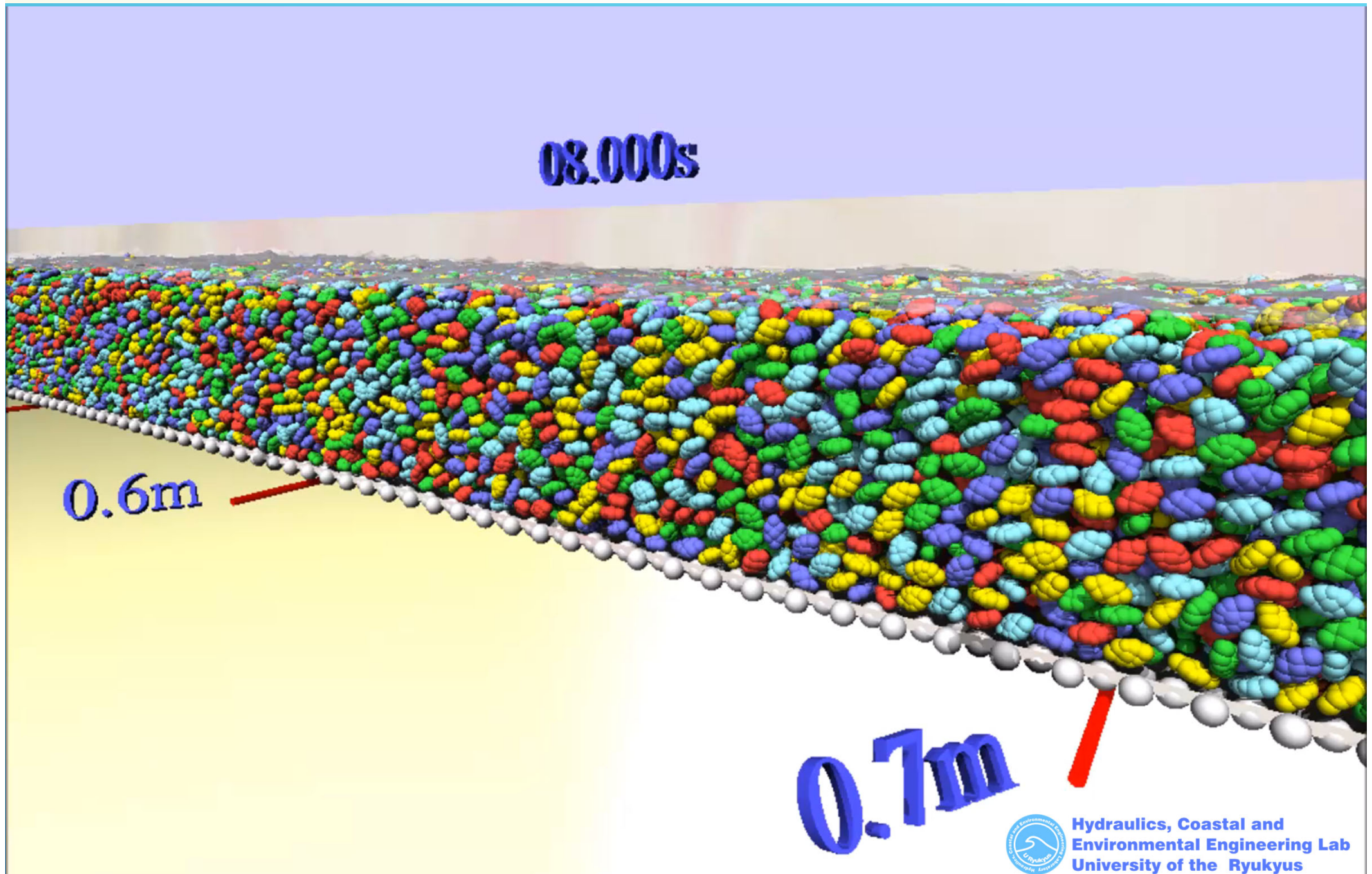
礫を用いた土砂輸送濃度 $C_f = 0.196$ の解析結果



球を用いた土砂輸送濃度 $C_f = 0.444$ の解析結果

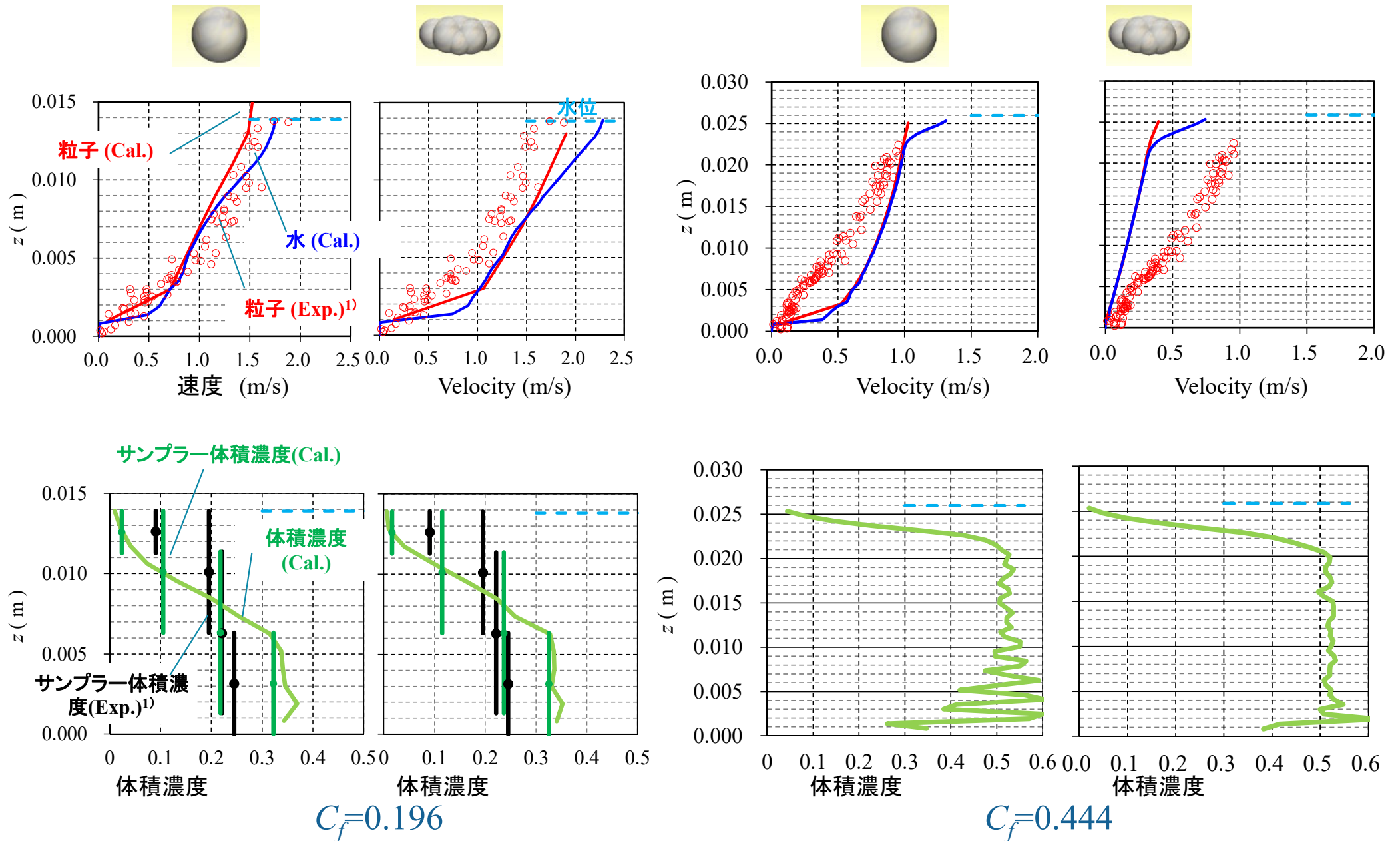


礫を用いた土砂輸送濃度 $C_f = 0.444$ の解析結果



粒子と水の速度と体積濃度の鉛直分布²⁾

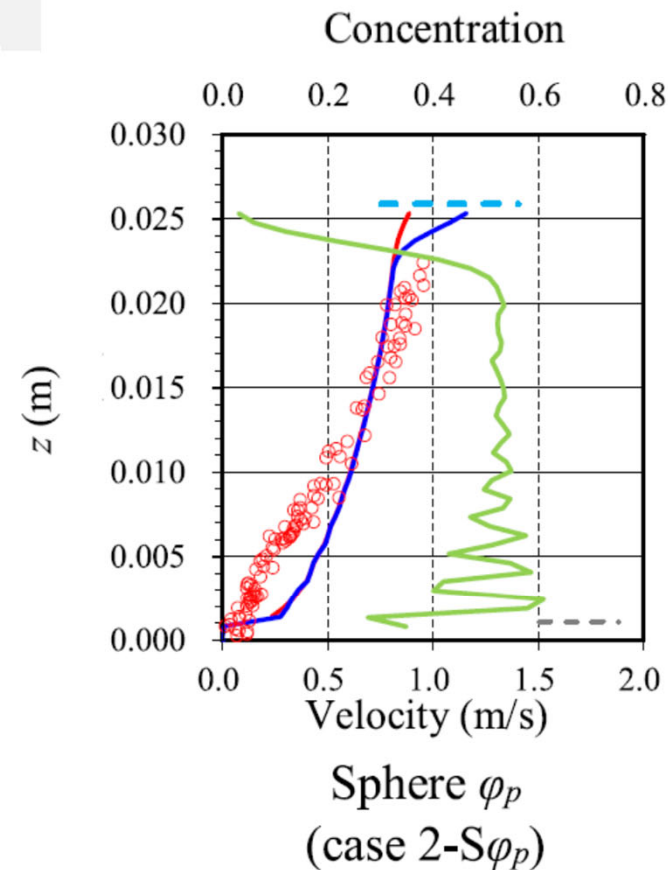
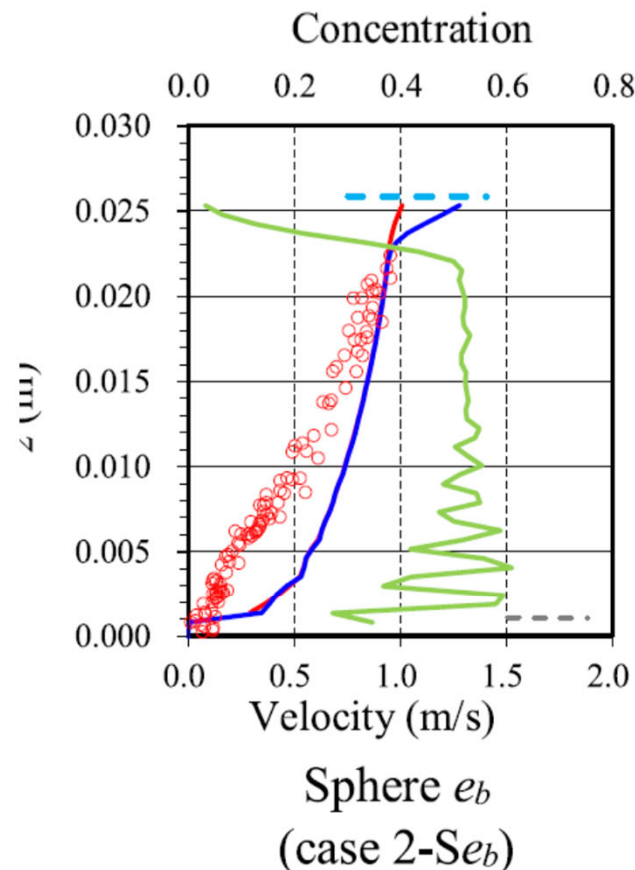
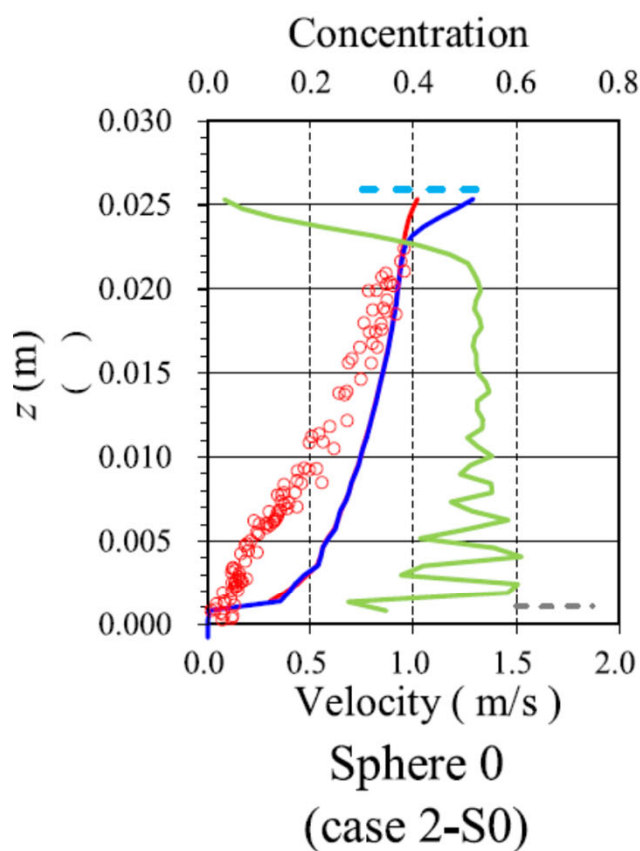
粒子形状を調整することで，高濃度の土砂流を概ね説明できることが確認された。



1) 伊藤隆郭, 江頭進治, 宮本邦明, 竹内宏隆: 土石流の固定床から移動床流れへの遷移過程に関する研究, 水工学論文集, 第43巻, 1999年

2) Fukuda, T., Fukuoka, S.: Interface-resolved large eddy simulations of hyperconcentrated flows using spheres and gravel particles, Advances in Water Resources 2017.

球を用い反発係数および摩擦角を変更した解析結果²⁾



反発係数

$$b = 0.7$$

粒子表面の
摩擦角

$$\phi_p = 26.6^\circ$$

反発係数

$$b = 0$$

粒子表面の
摩擦角

$$\phi_p = 26.6^\circ$$

反発係数

$$b = 0.7$$

粒子表面の
摩擦角

$$\phi_p = 90.0^\circ$$

- Particle velocity (exp.) 1)
- Particle velocity (cal.)
- Water velocity (cal.)
- Concentration (cal.)
- - Water surface (cal.)
- - Crest of resting particles (Cal.)

1) 伊藤隆郭, 江頭進治, 宮本邦明, 竹内宏隆: 土石流の固定床から移動床流れへの遷移過程に関する研究, 水工学論文集, 第43巻, 1999年

2) Fukuda, T., Fukuoka, S.: Interface-resolved large eddy simulations of hyperconcentrated flows using spheres and gravel particles, Advances in Water Resources 2017.

二相流の式と解析結果から求める流体力

二相流モデル

$$\alpha_w + \alpha_g = 1$$

α : 体積割合

水相

$$\frac{\partial \alpha^w}{\partial t} + \frac{\partial \alpha^w u_i^w}{\partial x_i} = 0$$

添え字 : w 水相
p 粒子相

$$\frac{\partial \rho^w \alpha^w u_i^w}{\partial t} + \frac{\partial \rho^w \alpha^w u_i^w u_j^w}{\partial x_j} = \rho^w \alpha^w g_i + \frac{\partial \sigma_{ij}^w}{\partial x_j} + f_i^w$$

粒子相

$$\frac{\partial \alpha^p}{\partial t} + \frac{\partial \alpha^p u_i^p}{\partial x_i} = 0$$

相互作用力 (流体力)

$$f_i^p = -f_i^w$$

$$\frac{\partial \rho^p \alpha^p u_i^p}{\partial t} + \frac{\partial \rho^p \alpha^p u_i^p u_j^p}{\partial x_j} = \rho^p \alpha^p g_i + \frac{\partial \sigma_{ij}^p}{\partial x_j} + f_i^p$$



二相流の構成則と応力の鉛直分布の求め方

二相流モデル

$$\frac{\partial \alpha^\beta}{\partial t} + \frac{\partial \alpha^\beta u_i^\beta}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \rho^\beta \alpha^\beta u_i^\beta}{\partial t} + \frac{\partial \rho^\beta \alpha^\beta u_i^\beta u_j^\beta}{\partial x_j} = \rho^\beta \alpha^\beta g_i + \frac{\partial \sigma_{ij}^\beta}{\partial x_j} + f_i^\beta$$

: 相互作用力(流体力)

$$f_i^p = -f_i^w$$

$$\sigma_{33}^\beta = \int_{x_3}^{x_3^s} (\rho^\beta \alpha^\beta g_3 + f_3^\beta) dx_3$$

$$\sigma_{31}^\beta = \int_{x_3}^{x_3^s} (\rho^\beta \alpha^\beta g_1 + f_1^\beta) dx_3$$

β : 水相 w 粒子相 p

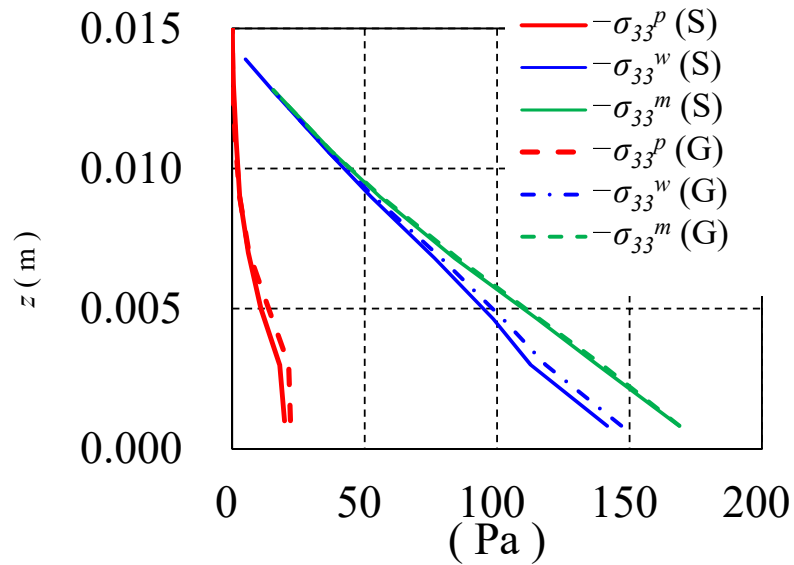
m : 混相流



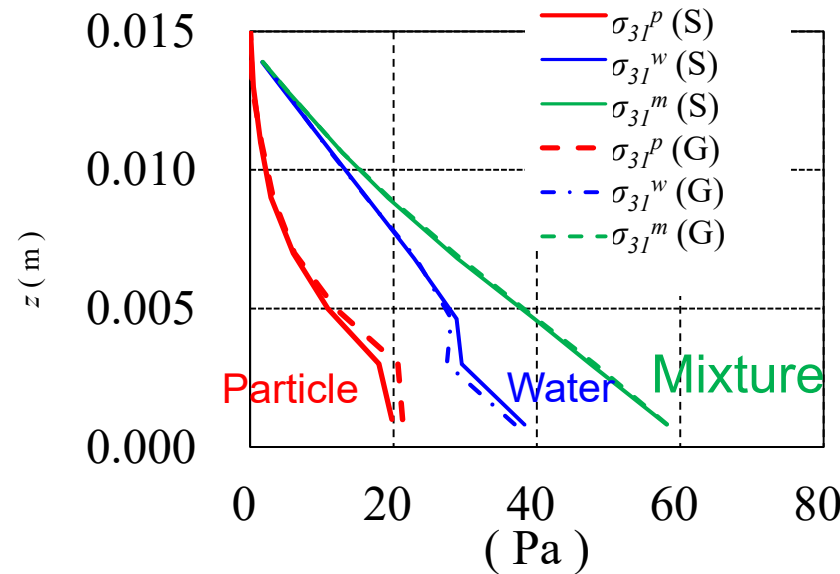
応力の鉛直分布

$C_f=0.196$

Normal stress $-\sigma_{33}$



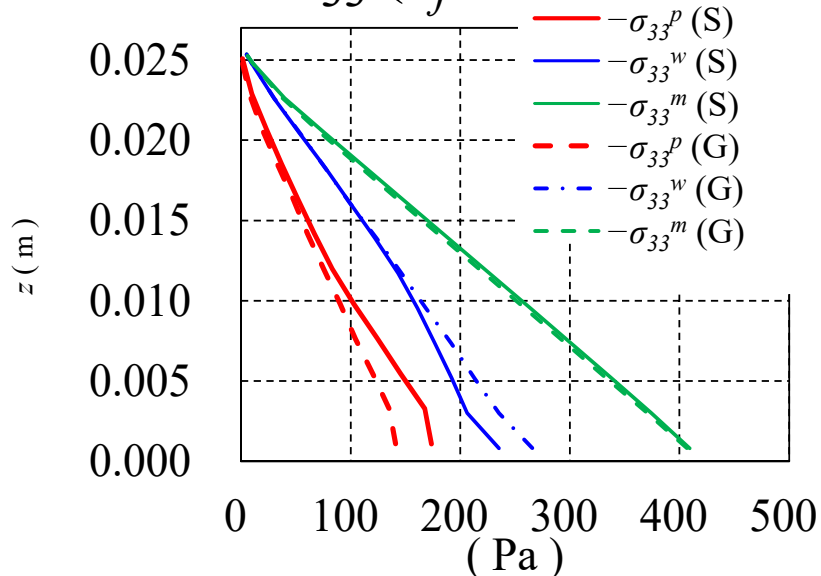
Shear stress σ_{31}



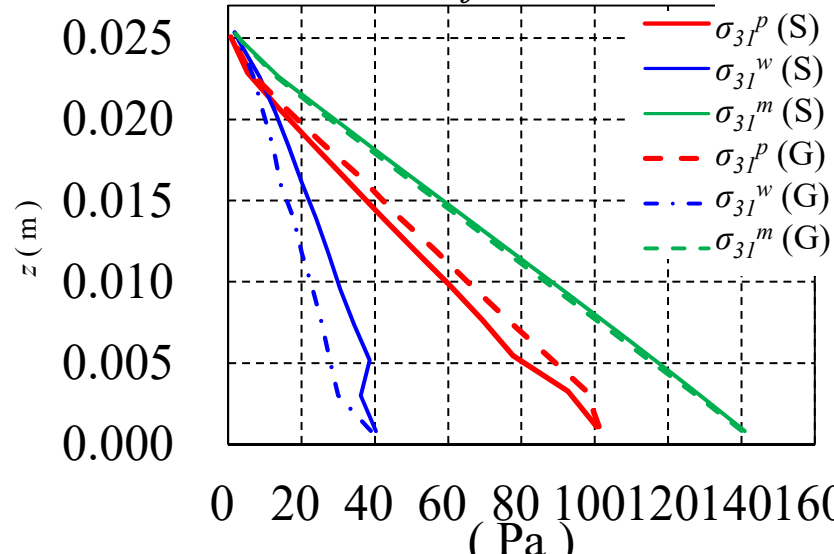
実線：球
破線：礫

$C_f=0.444$

$-\sigma_{33} (c_f = 0.196)$



$\sigma_{31} (c_f = 0.196)$



$-\sigma_{33} (c_f = 0.444)$

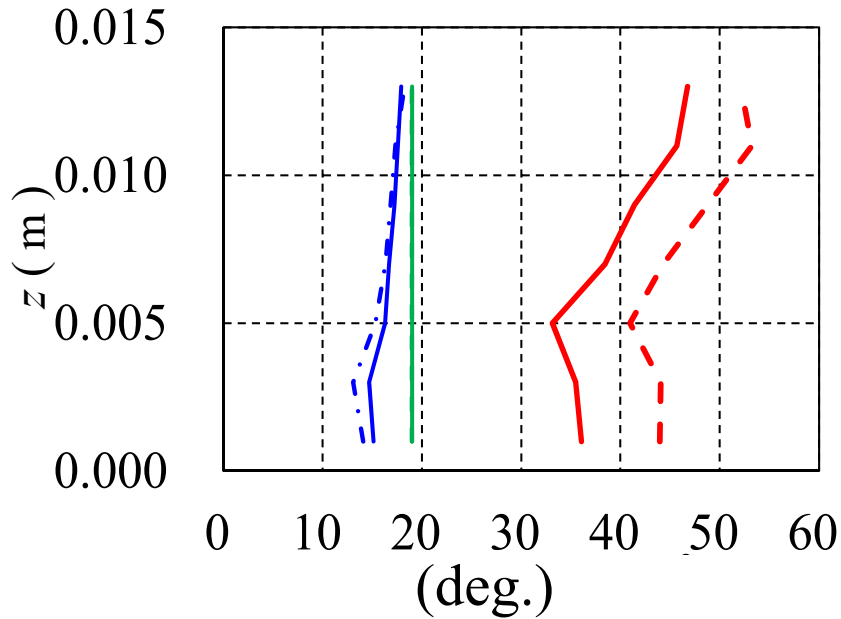
$\sigma_{31} (c_f = 0.444)$

- Particle (Sphere Case)
- Water (Sphere Case)
- Mixture (Sphere Case)
- - - Particle (Gravel Case)
- · - Water (Gravel Case)
- · - Mixture (Gravel Case)

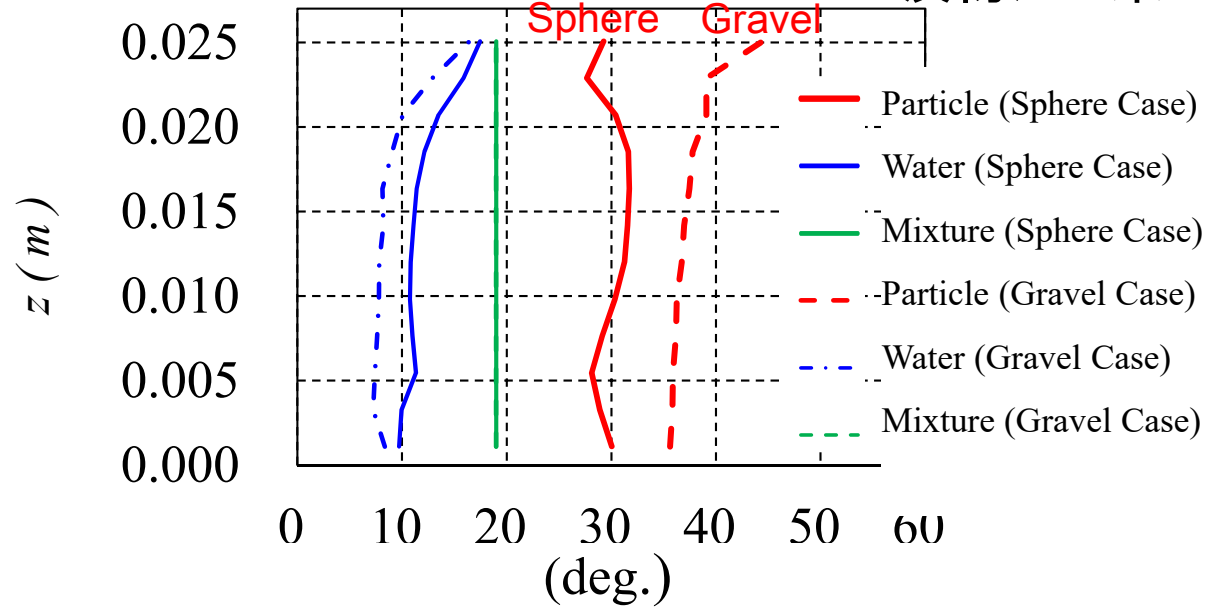
粒子の直応力とせん断応力の比率の鉛直分布 (粒子内部の摩擦角)

見かけの摩擦角 $\theta_f = \tan^{-1}\{\sigma_{31}/(-\sigma_{33})\}$

実線：球
破線：礫



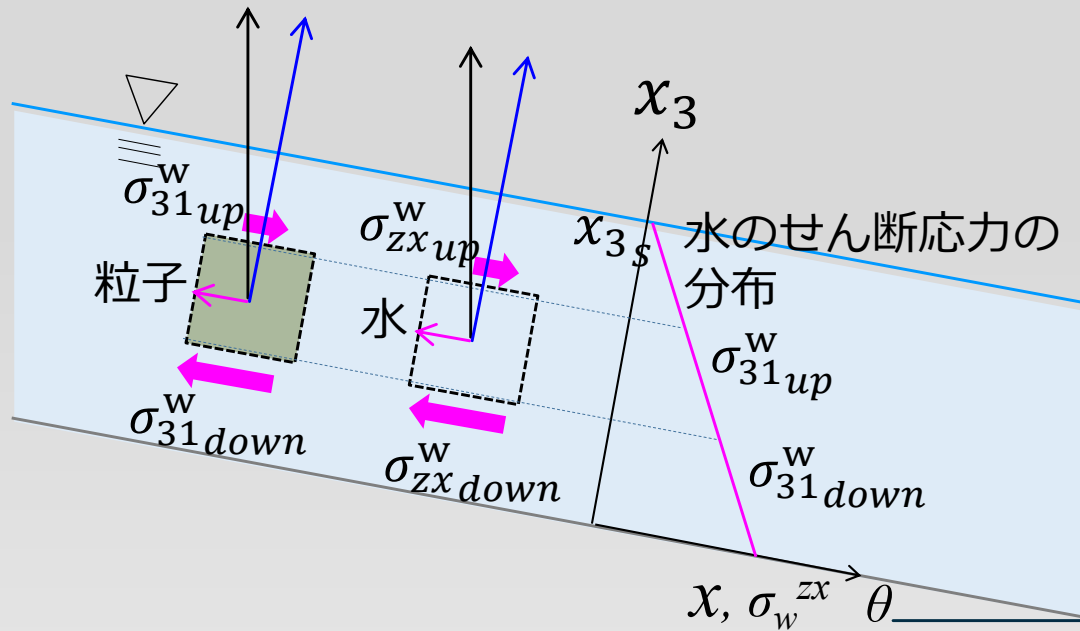
$c_f = 0.196$



$c_f = 0.444$

- 見かけの摩擦角は $c_f=0.444$ のケースよりも $c_f= 0.196$ のケースの方が大きくなっており、見かけの摩擦角は、水と粒子の運動の影響を受ける。
- 球と礫形状の見かけの摩擦角は 10° ほど異なっている。

流体力の鉛直分布



$$\sigma_{zxup}^w - \sigma_{zxdown}^w < 0 \text{ のとき}$$

$$f_x^b < 0$$

粒子に作用する水のせん断応力の模式図

粒子と同一領域内の水塊が、
水のせん断力から受ける力

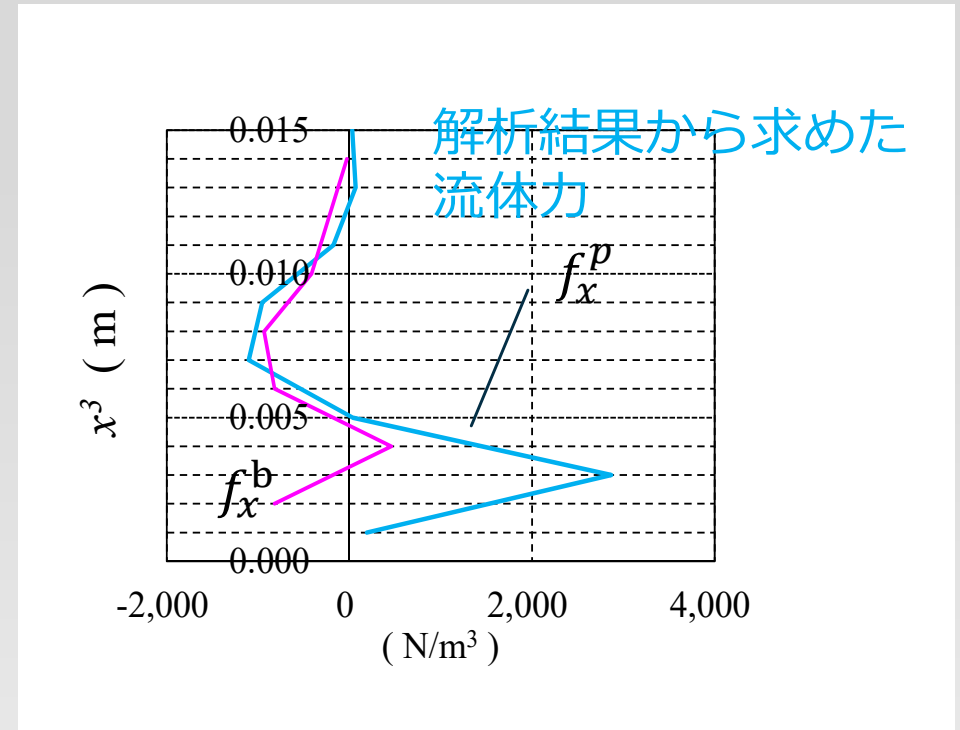
せん断応力差による流体力

一般的な浮力

$$f_x^b = \alpha^p \frac{\partial \sigma_{31}^w}{\partial x_3}$$

$$f_x^b = \alpha^p \frac{\partial \sigma_{33}^w}{\partial x_3}$$

α : 体積割合



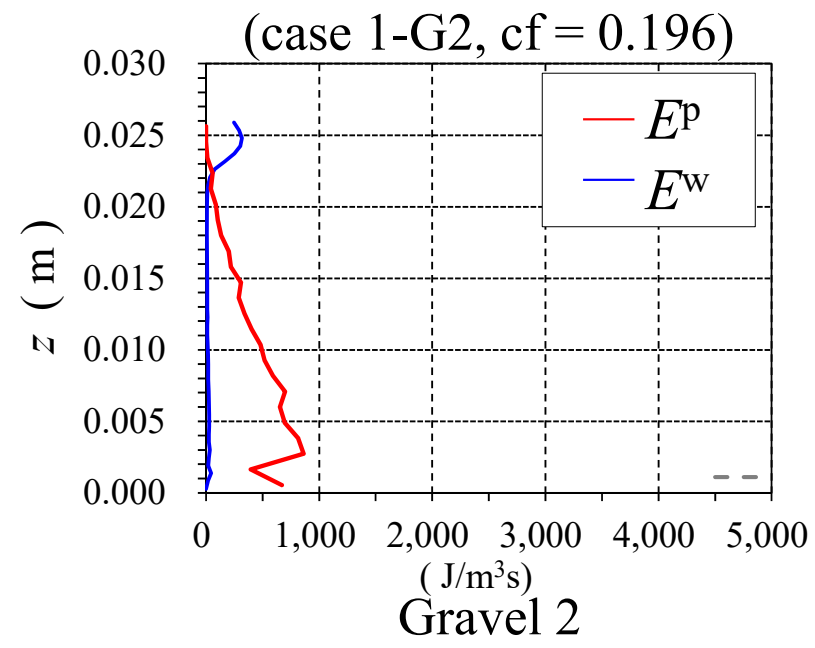
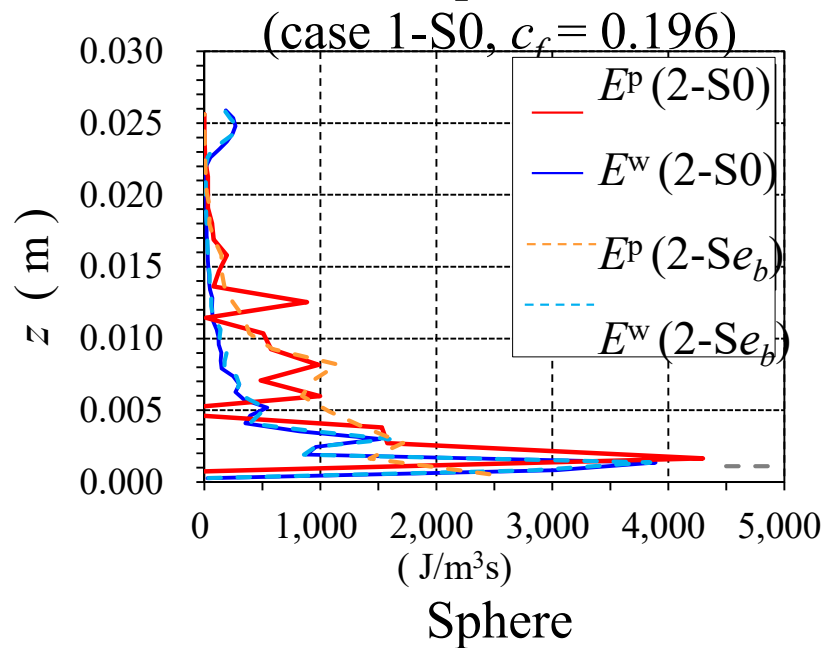
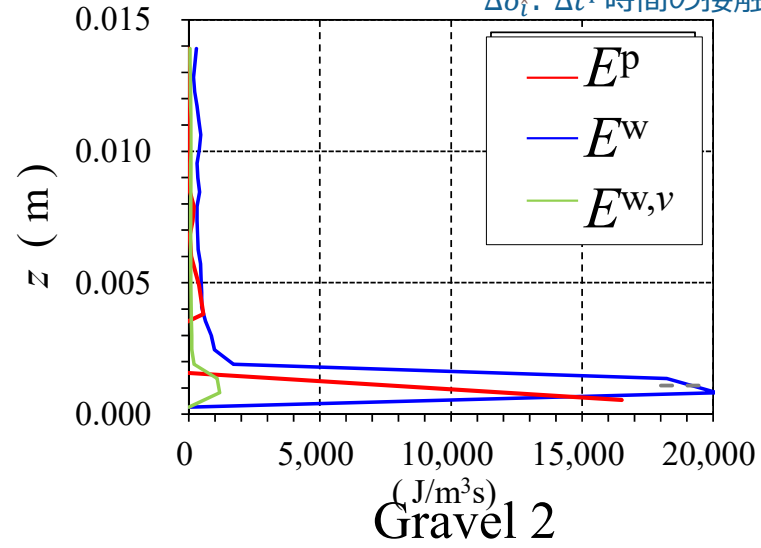
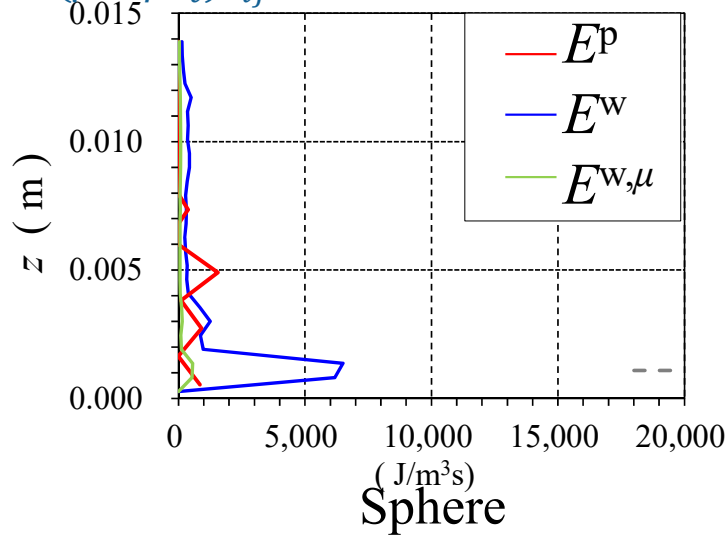
$$E^w = \frac{\int_{V_\Omega} \tau_{ij} S_{ij} dV}{V_\Omega}$$

$$E^{w,\mu} = \frac{\int_{V_\Omega} 2\mu S_{ij} S_{ij} dV}{V_\Omega}$$

$$\tau_{ij} = 2(\mu + \rho \nu_t) S_{ij}$$

$$E^p = \frac{\sum_{V_\Omega, I} \Delta \delta_i / \Delta t^p}{V_\Omega}$$

F_i^c : 接触力
 $\Delta \delta_i$: Δt^p 時間の接触点の相対変位



- 体積濃度が大きくなると（40%ほど）、球と礫形状の粒子の運動の違いが顕著に表れる。
- 反発係数や、粒子表面の摩擦角を変化させても、球では、礫の運動を説明できない。
- 体積濃度が小さいと（20%ほど）、粒子に作用する流下方向の流体力は、その場の同体積の水粒子が受ける力と同様になる。

1. シミュレーションモデルの特徴と解析法
2. 一様流中の球に作用する流体力の解析
3. 等流状態の平衡土砂濃度の解析
4. 球と礫形状粒子の運動と力の状態の違い
5. 現地土石流を対象としたシミュレーション
6. まとめ

平成26年8月 307渓流で発生した土石流による被災状況



写真出典：国土交通省太田川河川事務所

広島県広島市安佐南区八木四丁目 死者 10名
出典：平成26年発生8.20土砂災害広島県土木局砂防課



Hydraulics, Coastal and
Environmental Engineering Lab
University of the Ryukyus

砂防堰堤の粘り強さを発揮させるためには、越流時に対する耐性が必要であるが、従来の砂防堰堤の設計では、越流時の外力を十分想定したものとなっていない。

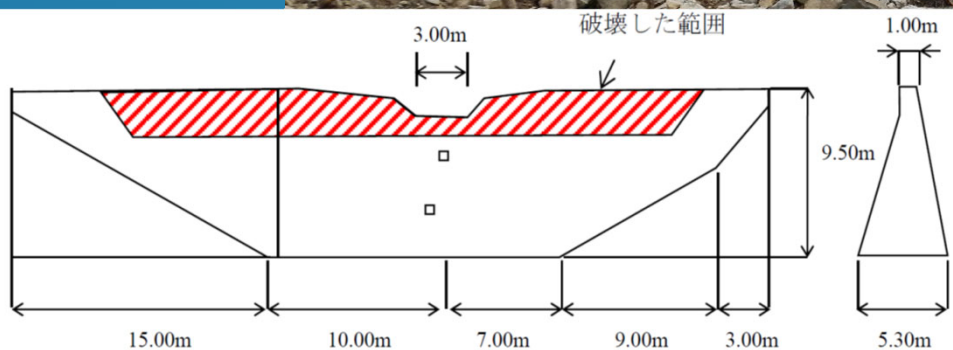


図 12 治山堰堤の寸法(広島県森林保全課提供の資料を基に作図)

出典：土田孝，森脇武夫，熊本直樹，一井康二，加納誠二，中井真司：
2014年広島豪雨災害において土石流が発生した溪流の状況と被害に関する調査，
地盤工学ジャーナル，Vol.11，No.1，33-52

写真出典：国土交通省太田川河川事務所

土石流

長野県・焼岳上々堀沢

1999. 7. 3

撮影 国土交通省 松本砂防事務所

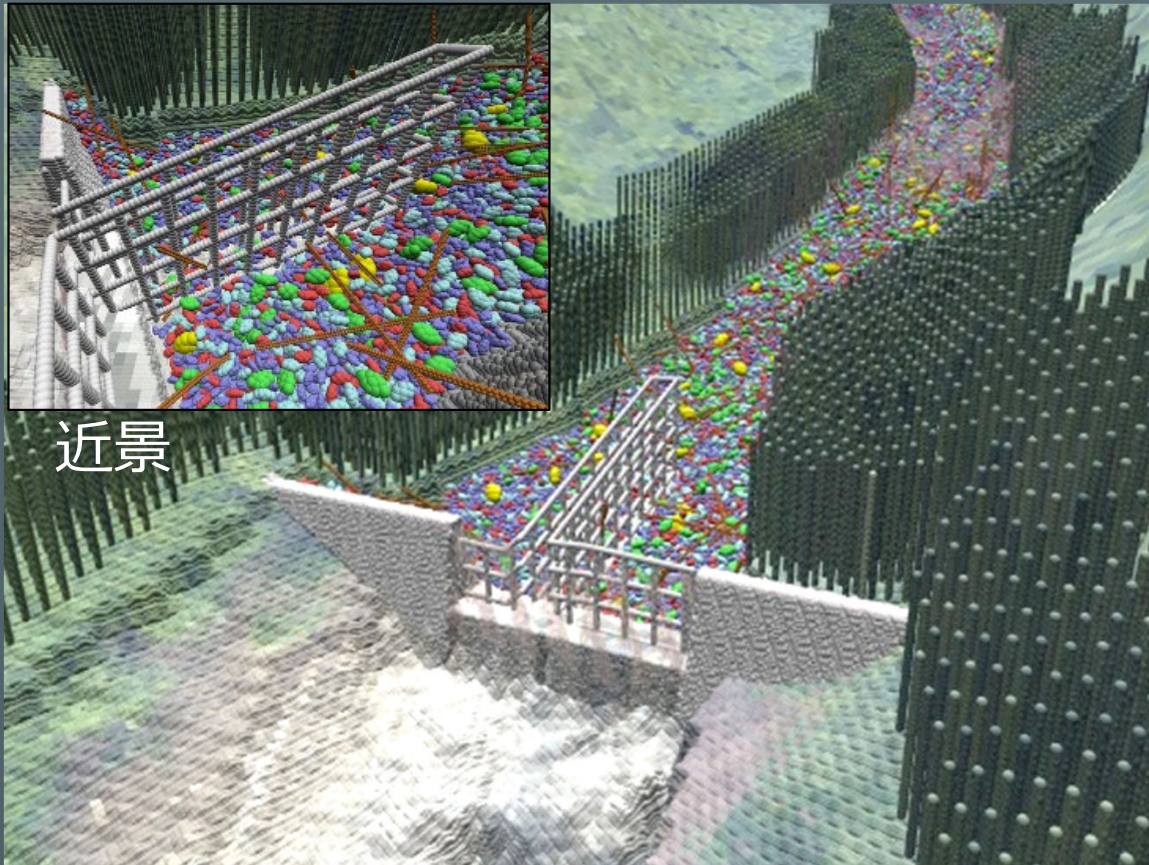
提供 国土交通省 砂防部

従来の堤軸上に鋼製フレームが並ぶ形式（**直線フレーム**）の透過型砂防堰堤では、透過部が容易に閉塞し、透過にしたことによる堰堤上流の水位低下効果は限定的であり、すぐに不透過型と同様な状態になる。



透過型砂防堰堤による流木の捕捉状況(熊本県小国町)

出典：今後の流木対策の進め方 国土交通省HP (H29)



近景

凸フレームのねらい

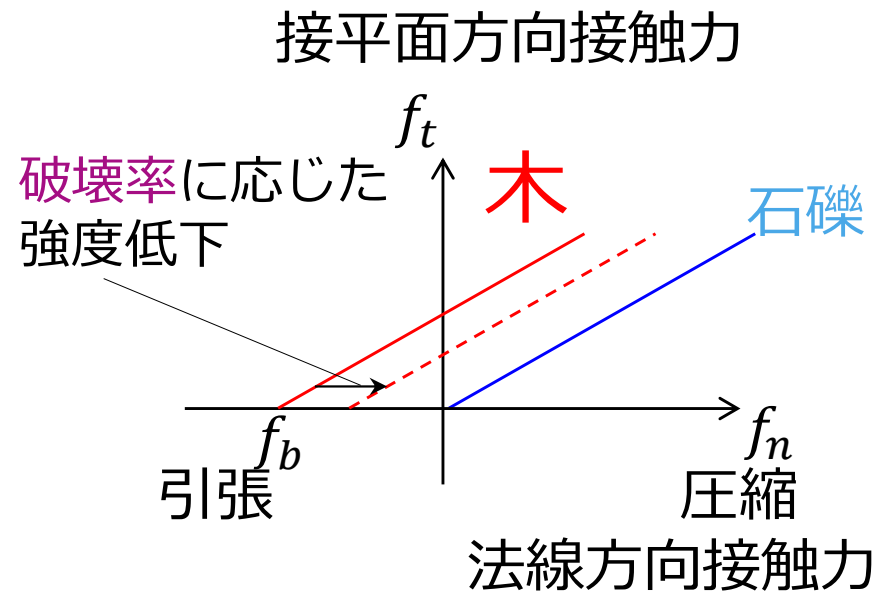
土砂流を積極的に排出し、流出時に被害を増大させる、巨石や流木の捕捉量を増加させる。

本研究

変形・破壊を説明できる流木のモデルを開発し、APMに導入することで土砂と流木、水流および鋼製フレームの相互作用を、現地の土石流を対象に考察することができる新しい数値解析技術を開発する。

開発した数値解析技術を用いて、提案する凸フレームの砂防堰堤の土砂と流木の捕捉効果を確認する。

◆ 降伏条件



引張力の上限值

$$f_b = A \frac{\sigma_{t,max,i} + \sigma_{t,max,j}}{2}$$

$$A = d^2$$

$\sigma_{t,max,i}$ 粒子の引張強度

$\sigma_{t,max,j}$ 粒子の引張強度

d : 木の小球直径

◆ 破壊に伴う引張強度の変化式

破壊率 ($0 \leq \gamma_f \leq 1$)

初期引張強度

引張強度

$$\sigma_{t,max} = (1 - \gamma_f) \sigma_{t,max}^{(0)}$$

構造物を構成する球粒子に作用するエネルギー (粒子が衝突によって失う力学的エネルギー)

$$\gamma_f = \frac{\sum \Delta E_{nm}}{V_{\Omega} C_{nm}}$$

分母：構造物を構成する球粒子を破壊させるために必要なエネルギー

構造物を構成する粒子体積

単位体積の構造物を破壊するために要するエネルギー C_{nm} (J/m³)

構築した木のモデルを用いた曲げ試験の解析



曲げ試験結果出典：浅葉将之，西村尚，圧縮木材の曲げ強度に及ぼす加工条件の影響，日本機械学会論文集（A編），67巻，654号，2001.

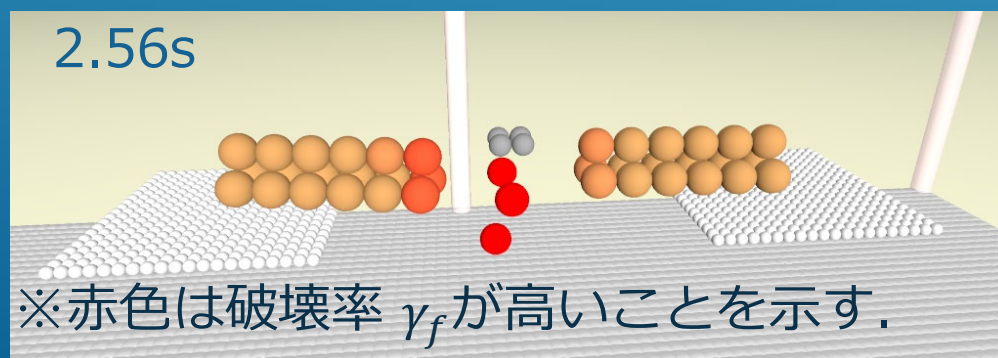
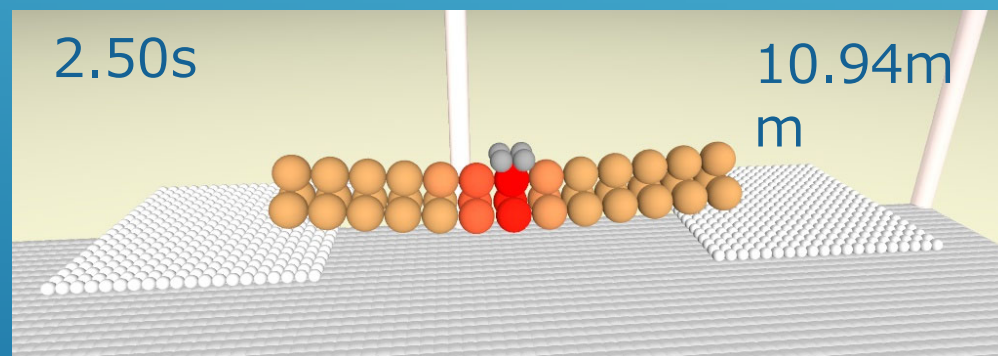
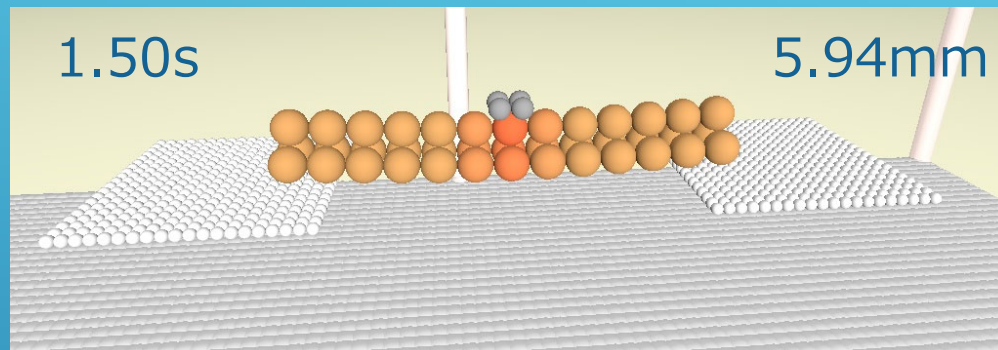
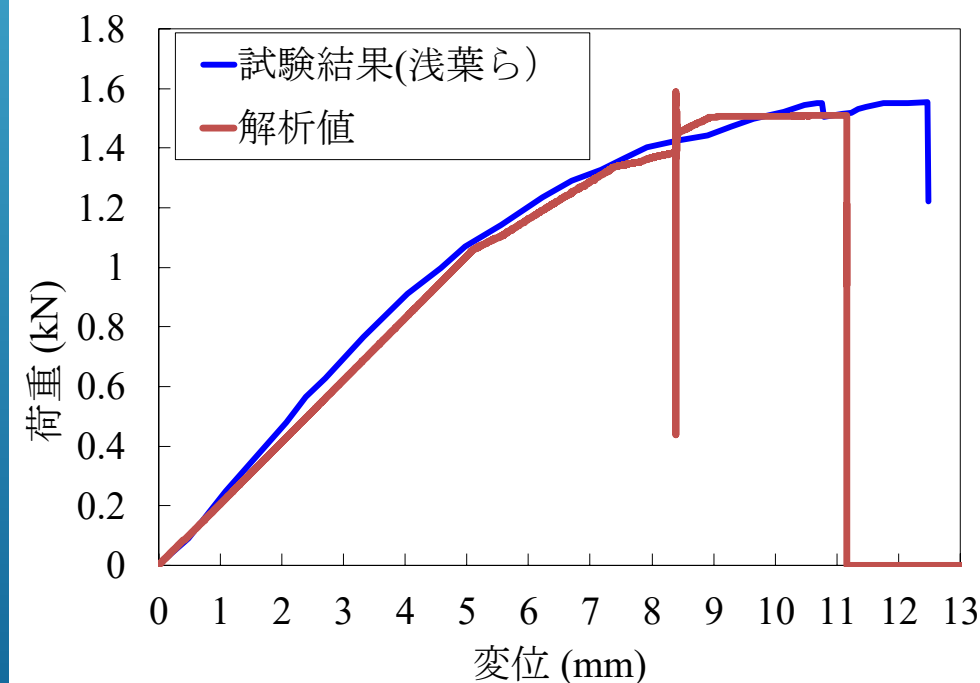


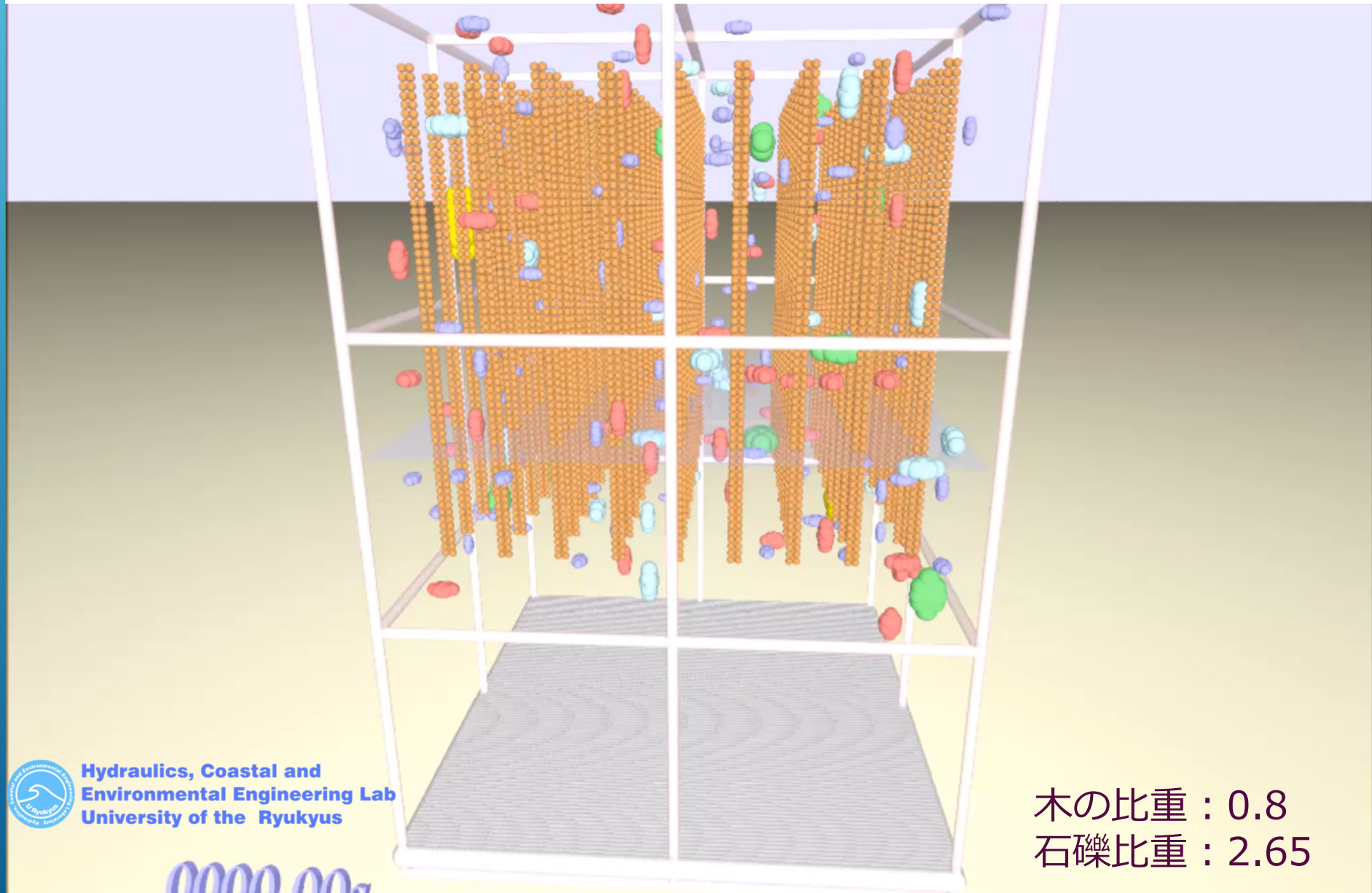
Table1 Condition of 3-point bending test


l / mm	410	
L_s / mm	300	
R_d / mm	10	
R_p / mm	30	
V / $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	10	



水, 礫石礫, 流木, 気相の4相の混相現象のシミュレーション

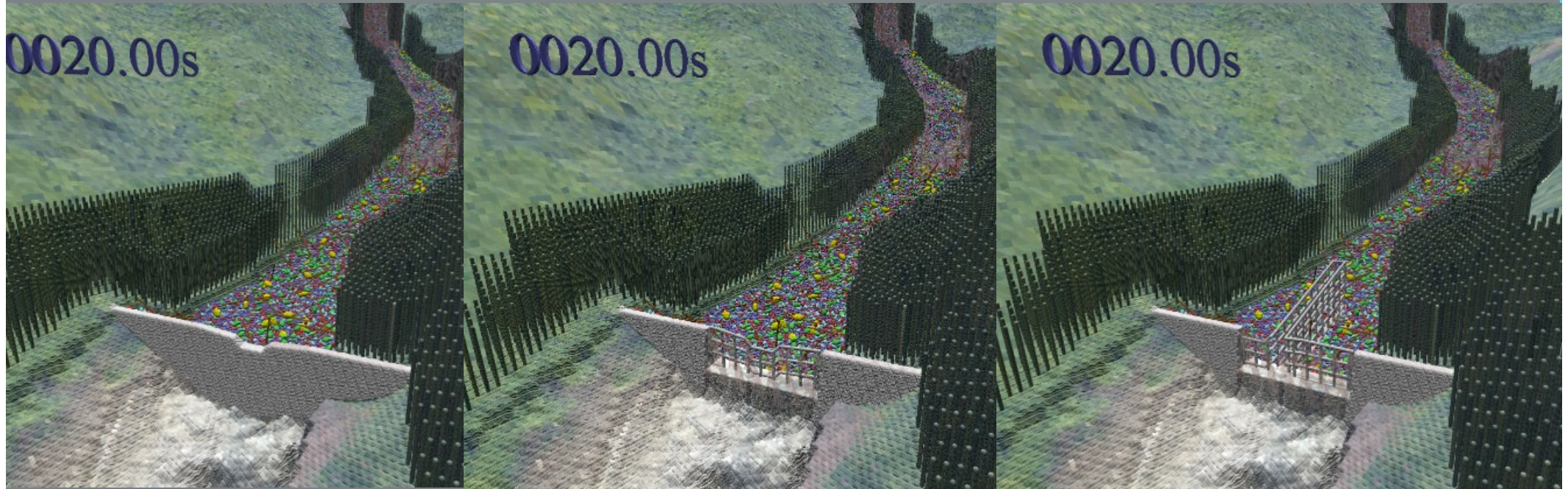
比重0.8の木のモデルを用い解析し, 解析結果では木の2割程度が水面上に存在していることから, 木に作用する流体力は概ね説明できていると考えられる.



 Hydraulics, Coastal and
Environmental Engineering Lab
University of the Ryukyus

0000.00s

木の比重 : 0.8
石礫比重 : 2.65



不透過

(再現計算)

直線フレーム

凸フレーム

堤軸上のコンクリートや鋼製フレームの天端高はすべてのケース統一

凸フレーム 諸元

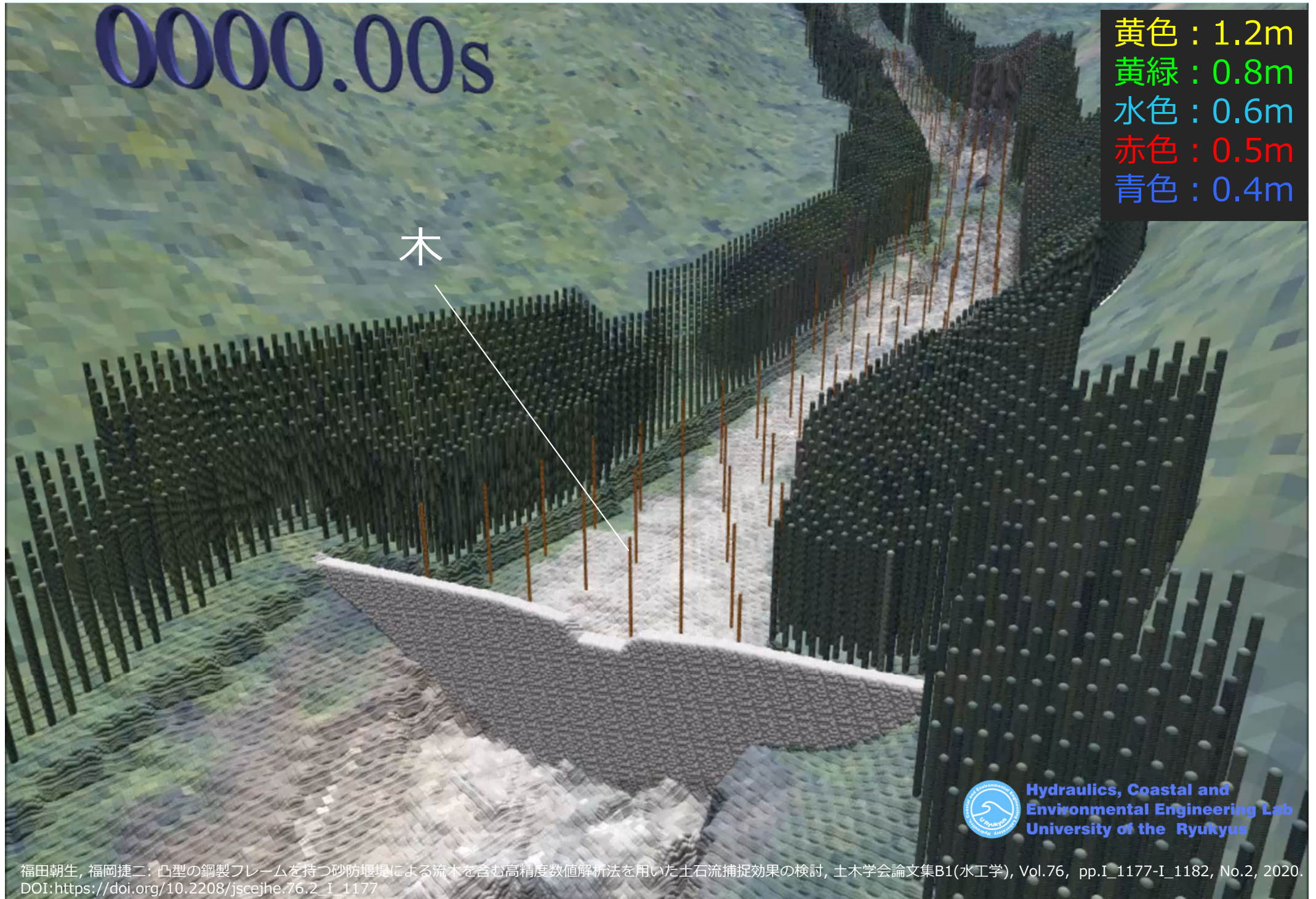
- 凸部の縦断長さ：15m
- 凸部の幅：2m
- 凸フレーム上端の水平に対する角度
15°

解析条件

- ◆ 堰堤上流200mを解析
- ◆ 上流端流入条件は2Dの土石流計算結果より設定
- ◆ 粒径0.4~1.2mの5粒径
- ◆ 格子サイズ0.1m
- ◆ 流体の密度は1,600kg/m³

流体計算格子数 約2.5億

土石流前の地形に一致するように初期堆積土砂を設定



再現計算結果

0010.00s

流木が先端に集積して流下しており、
現地土石流で見られる流木の分級
の様子を良く説明している。

黄色 : 1.2m
黄緑 : 0.8m
水色 : 0.6m
赤色 : 0.5m
青色 : 0.4m

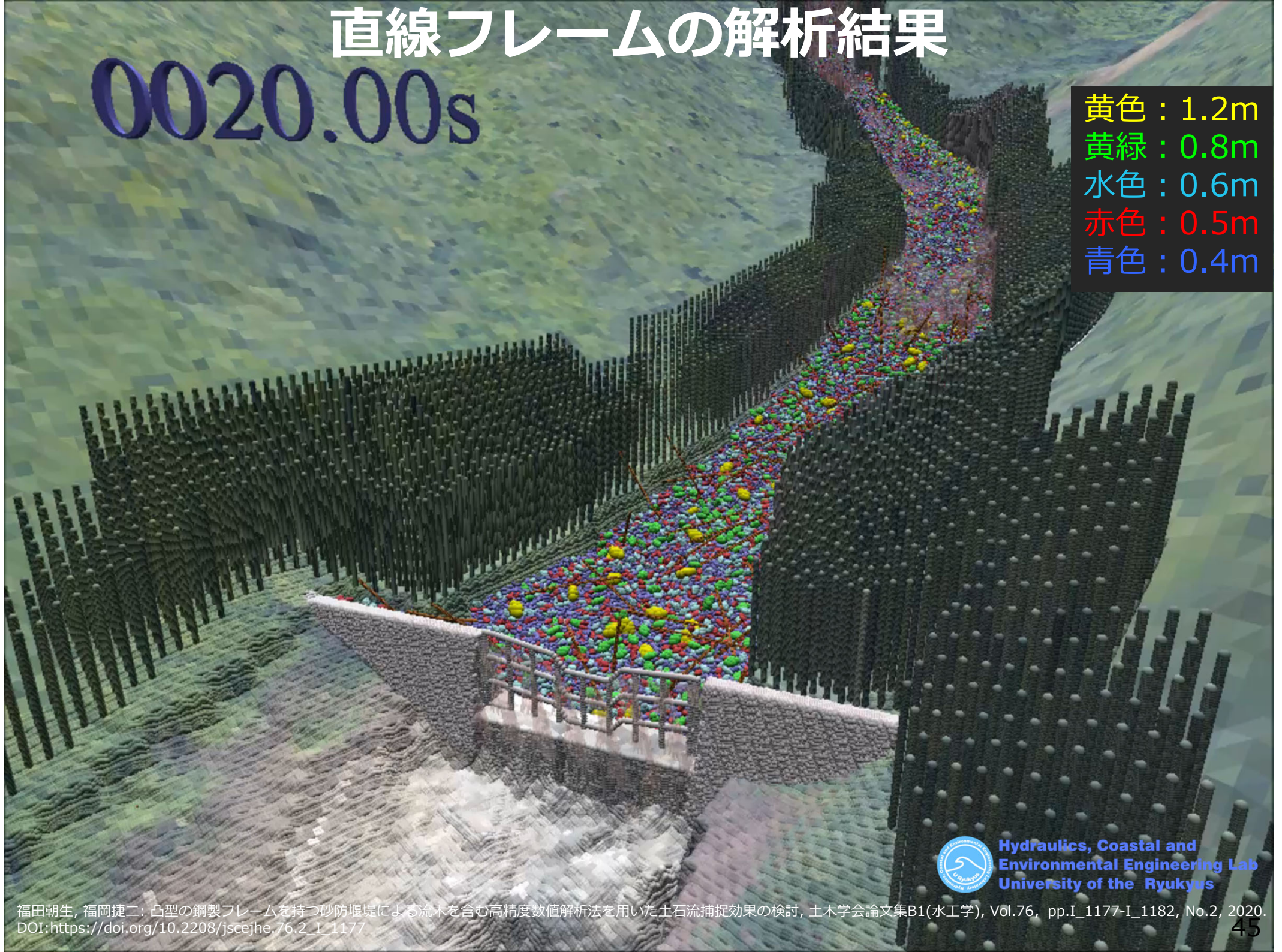


Hydraulics, Coastal and
Environmental Engineering Lab
University of the Ryukyus

直線フレームの解析結果

0020.00s

黄色 : 1.2m
黄緑 : 0.8m
水色 : 0.6m
赤色 : 0.5m
青色 : 0.4m

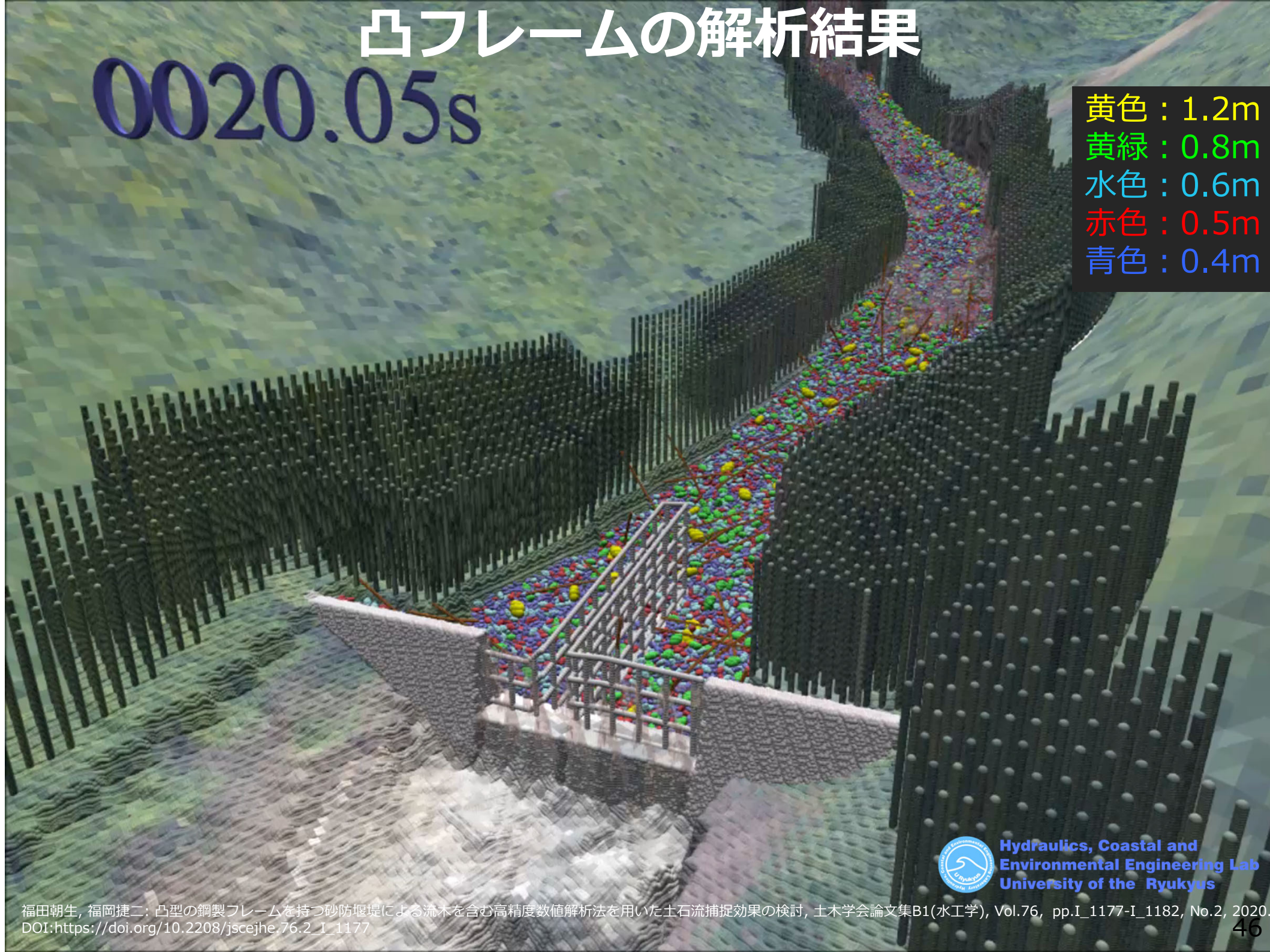


Hydraulics, Coastal and
Environmental Engineering Lab
University of the Ryukyus

凸フレームの解析結果

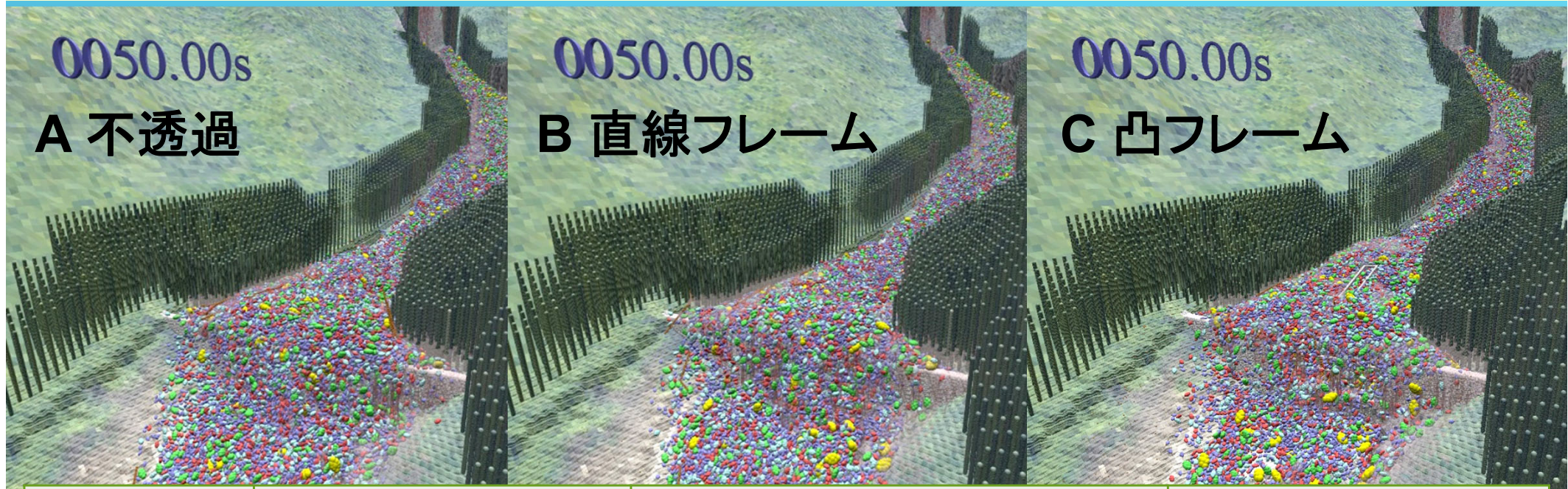
0020.05s

黄色 : 1.2m
黄緑 : 0.8m
水色 : 0.6m
赤色 : 0.5m
青色 : 0.4m

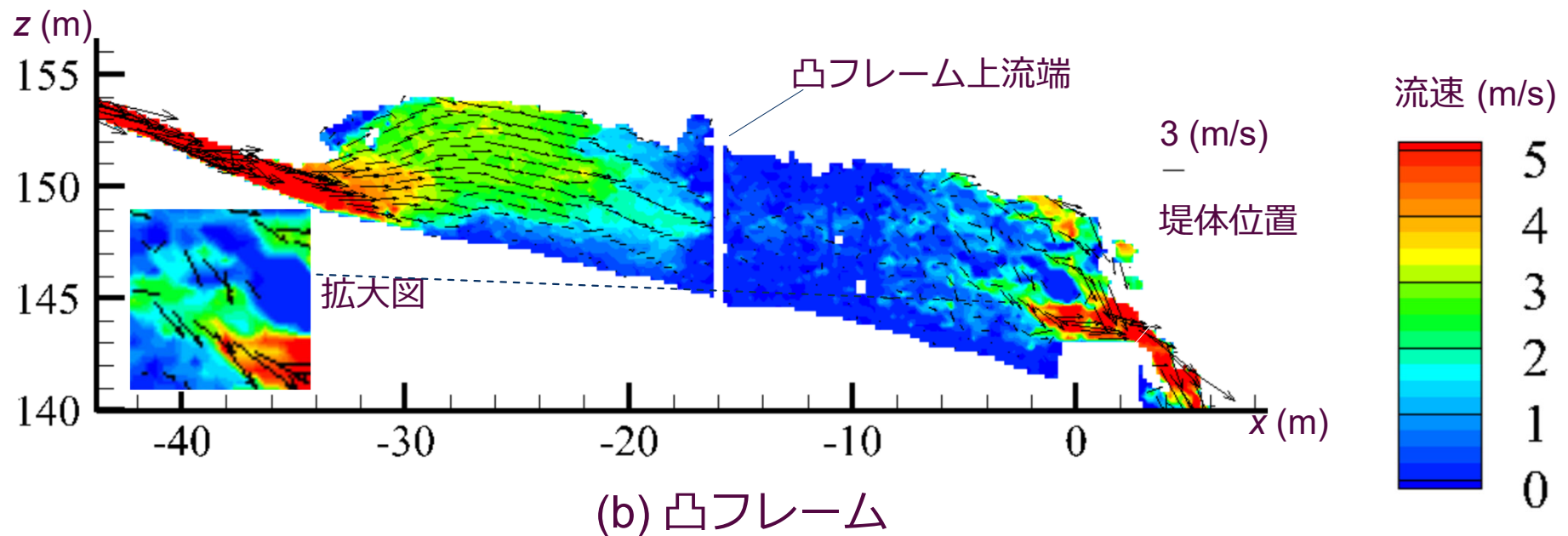
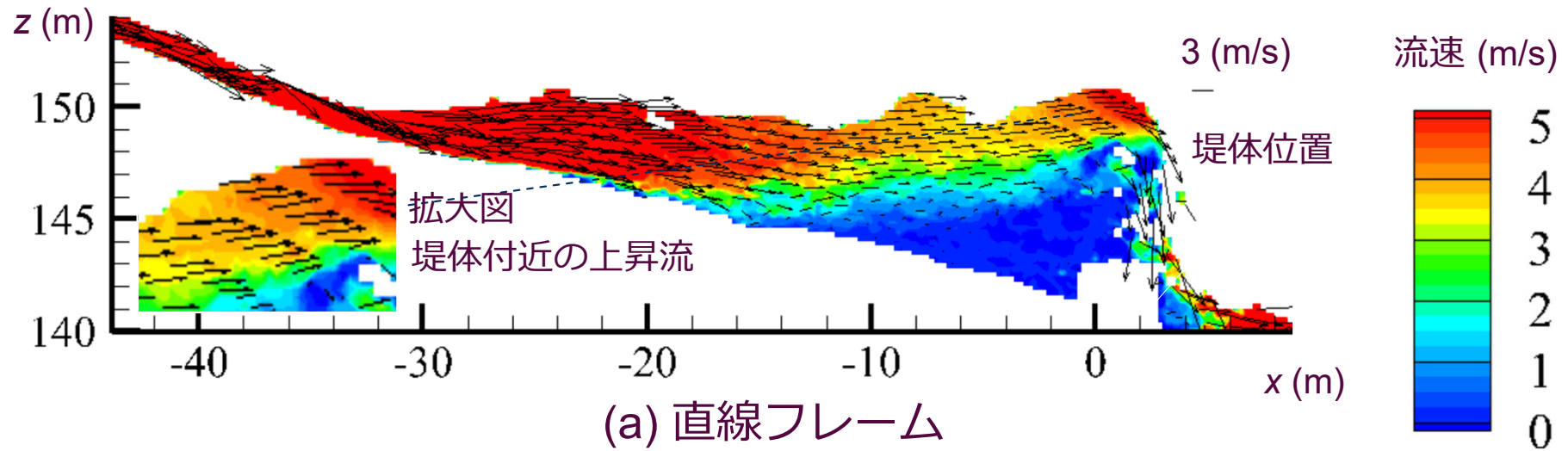


Hydraulics, Coastal and
Environmental Engineering Lab
University of the Ryukyus

各ケースの土砂と流木の捕捉量の比較



	不透過 A	直線フレーム B	凸フレーム C
堆砂容量	3,260 m ³	3,033 m ³	4,284 m ³
差分		B-A - 227 m ³	C-A 1,024 m ³
		(B-A)/A -7%	(C-A)/A +31%
流木捕捉量	9.3 m ³	9.3 m ³	13.1 m ³
差分		B-A 0 m ³	C-A 3.8 m ³
		(B-A)/A 0%	(C-A)/A +41%



- 石礫と、変形・破壊する流木、および水の三相の三次元運動を推定しさらに実際の溪流の土石流を対象として鋼製フレームの効果进行考察することができる新しい数值解析技術を開発した.
- 今回の検討では、凸フレームは直線フレームに対して、堆砂量が30%も多く、凸フレームは土石流の捕捉に関して有効な構造であると判断される.
- 構築した木のモデルは、実際の木の曲げ試験の変形破壊特性を良く説明きており、鋼製フレームとの相互作用を考察する上で、有効な木のモデルといえる.

1. シミュレーションモデルの特徴と解析法
2. 一様流中の球に作用する流体力の解析
3. 等流状態の平衡土砂濃度の解析
4. 球と礫形状粒子の運動と力の状態の違い
5. 現地土石流を対象としたシミュレーション
6. まとめ

- APMによるIRLESは、土砂流の運動をかなり説明することが確認できた。
- 土砂流の力学機構の分析においてAPMの活用は有効な手段である。