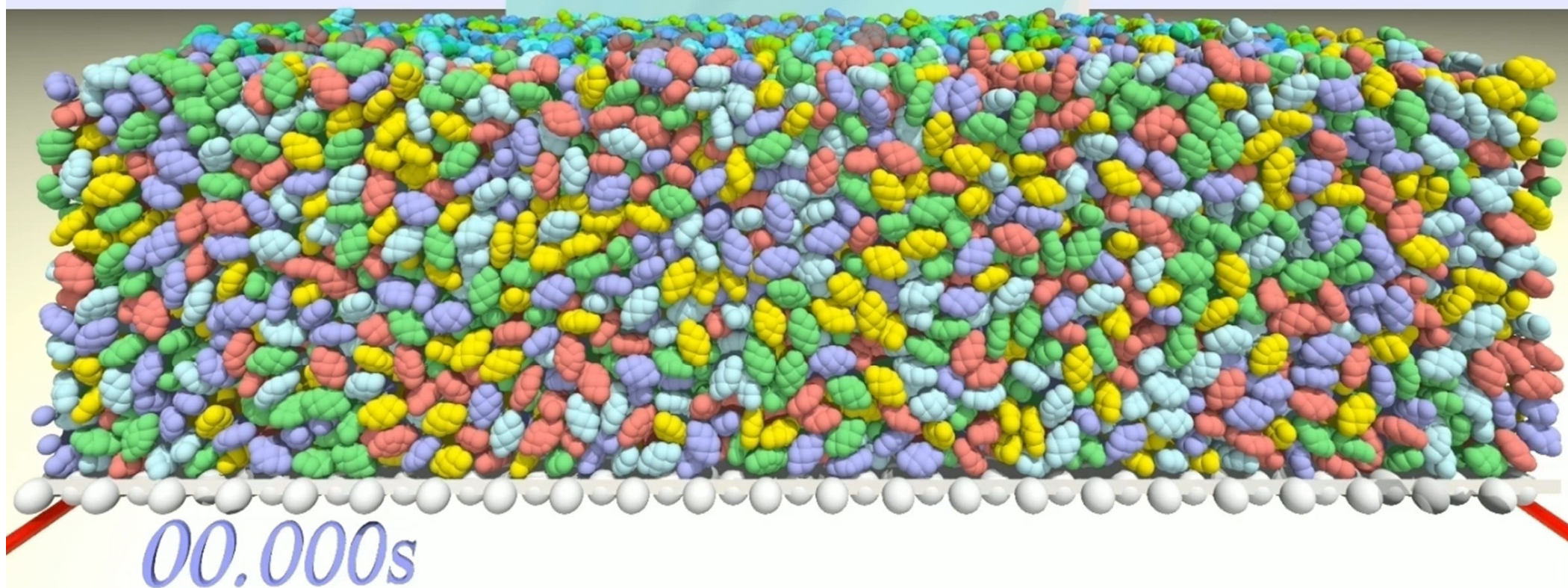


2025年度萌芽型研究課題

固液混相流解析による 土砂流の乱れ構造の分析

琉球大学工学部

福田 朝生
山口 栄治

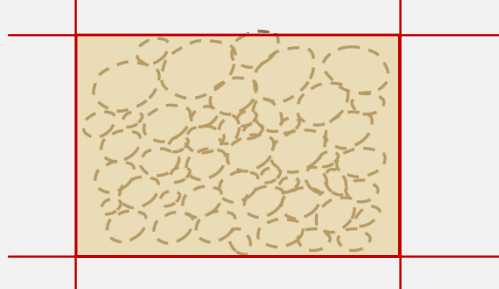


連続体近似の混相流モデルや粒子法とのAPMの関係について

粒子群の平均的な速度と衝突力（応力）の関係をモデル化した**連続体モデル**

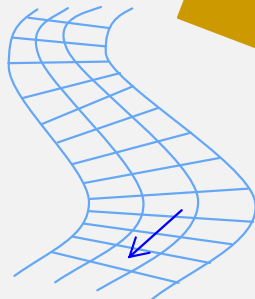
土石流の氾濫解析などに用いられる格子法

連続体近似混相流モデル



土石流の氾濫解析などでは、しばしば平面二次元解析が行われる

流動層底部の力と運動を未考慮

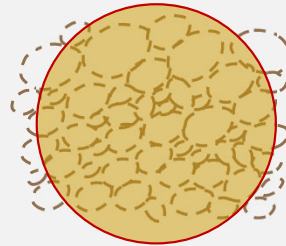


上から見たメッシュイメージ

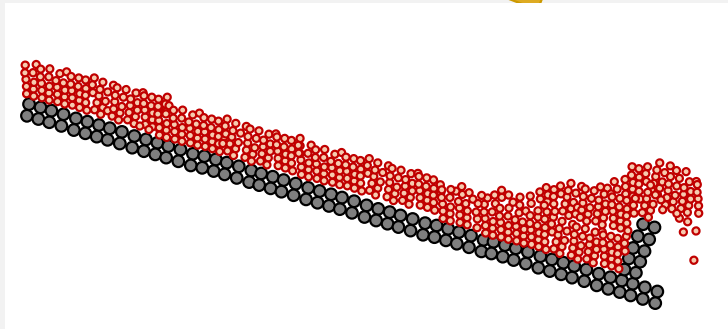
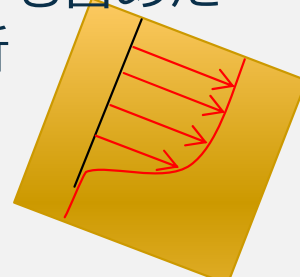
粒子法

(MPS(Moving Particle Semiimplicit Method), SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics Method))など

連続体近似混相流モデル

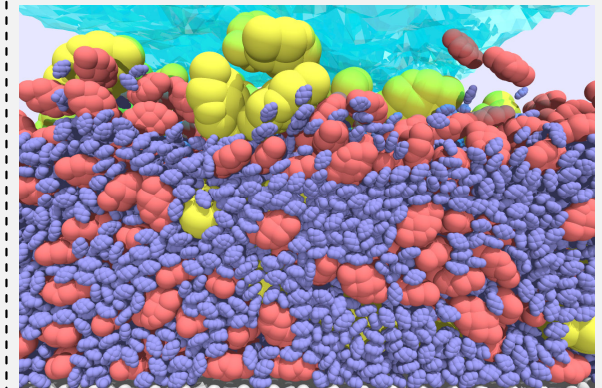
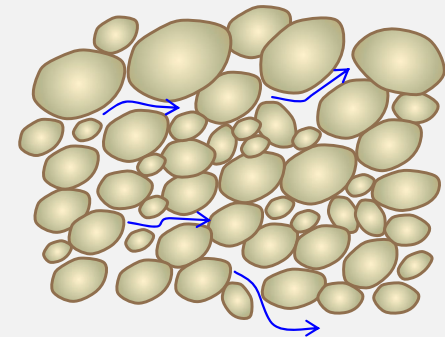


静止土砂も含めた一体解析



Interface-Resolved Simulation (IRS)

離散的な粒子の運動と粒子の衝突、および粒子の間の水の流れを**直接解析**



開発したIRSのコード名

APM

(Arbitrary Particle Multiphase)

固液混相流モデルの解析法

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

連続式

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

運動方程式

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

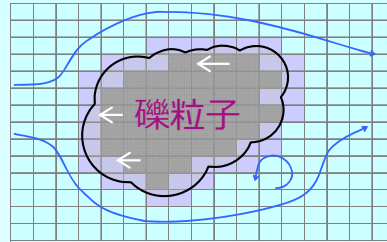
流体力の評価

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

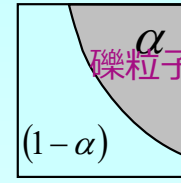
F_f : 石礫粒子に作用する流体力

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.



流体計算セル



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.

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

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

μ : 粘性係数

C_s : Smagorinsky 定数 (0.173)

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



$\ddot{r}_i$: 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.

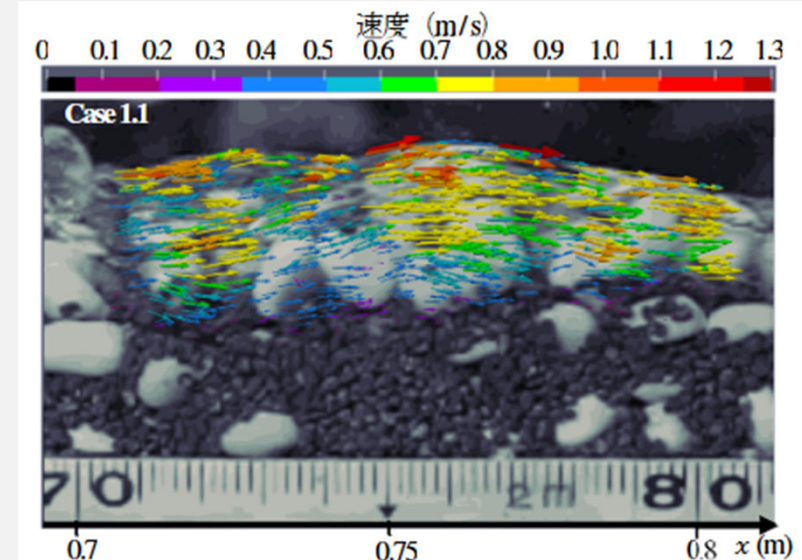
Lagrange的に解析

IRSを活用した土砂流の力学機構の検討

現地スケールの土砂流のシミュレーションでは、計算負荷の問題でIRSの実施は難しく、依然として連続体モデルが必要である。

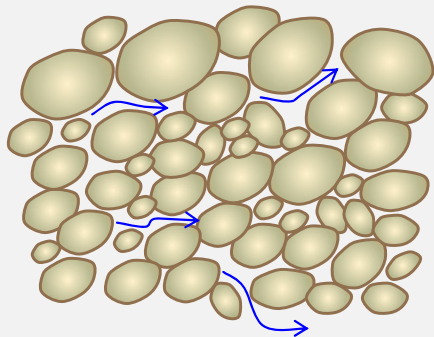
水理実験では、側壁からしか粒子運動を調べることができない。

土砂流内部の運動や、粒子や水に作用する力を計測することは困難である。

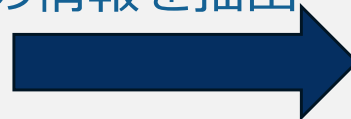


土砂流の先頭部大粒子集積に及ぼす無次元流動深の効果
山口栄治, 福田朝生
土木学会論文集特集号(水工学), Vol.80, No.16, 24-16089, 2023.12
DOI: <https://doi.org/10.2208/jscej.23-16089>

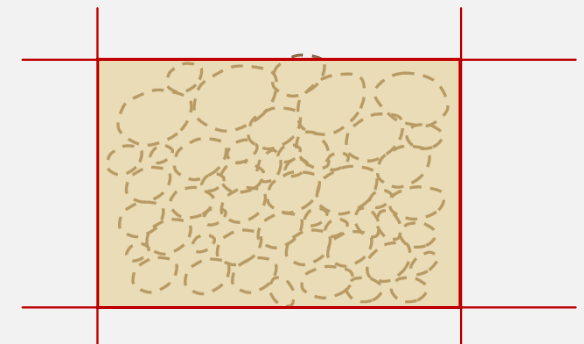
IRSシミュレーション結果をもとに、土砂流の連続体モデルに必要な粒子や水に作用する力を明らかにし、土砂流の連続体モデルの精度向上を図ることが重要。



平均流や乱れなどの
運動の情報や
力の情報を抽出

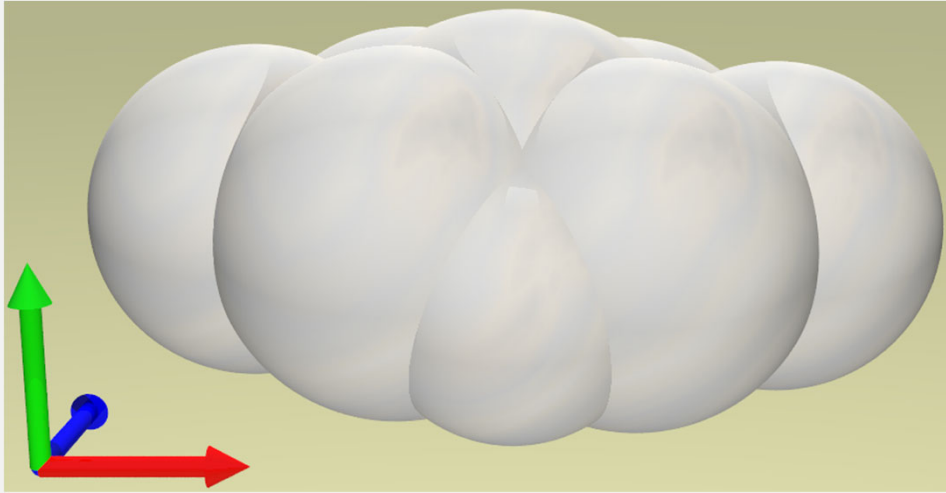


本研究では当座、**乱れ構造**を明らかにすることを目的としている。



土砂流の連続体モデル 4

解析条件 粒子の条件



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

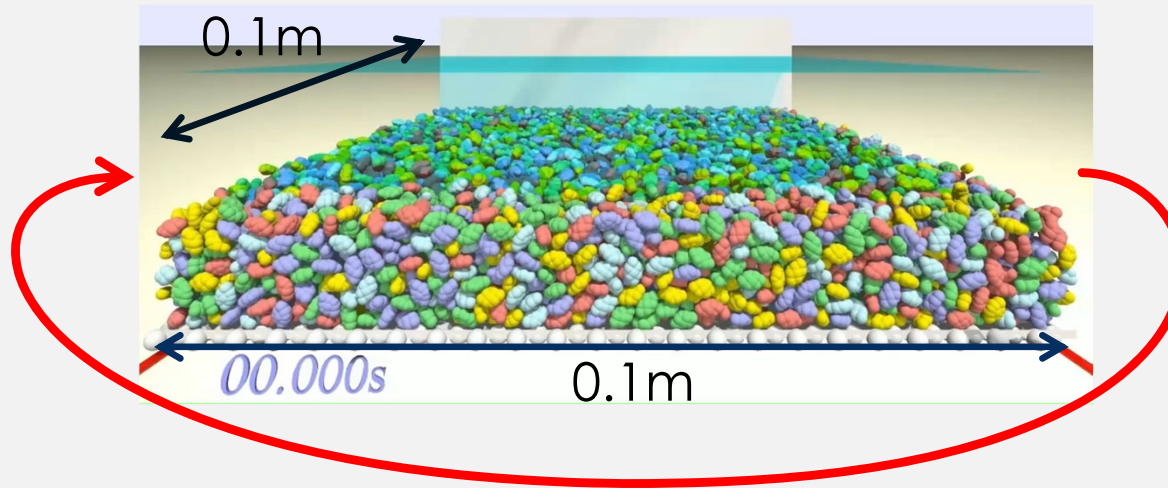
表 解析粒子の条件と特性

粒径 $d^{1)}$	2.18 mm
内部摩擦角 ϕ	39.2°
粒子密度 ρ_s	$2,620 \text{ kg/m}^3$

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.

解析条件・ケース

縦断方向に
周期境界条件



APMによる単一粒径土砂流の解析結果
(勾配10.5°)

水路勾配 θ^1	ケース	
6.4°	土砂流 $\Delta = D/8$	水のみ $\Delta = D/8$
10.5°	土砂流 $\Delta = D/8$	
14.4°	土砂流 $\Delta = D/8, \Delta = D/12$	

(参考)

勾配14.4°の計算

粒子数：30,684

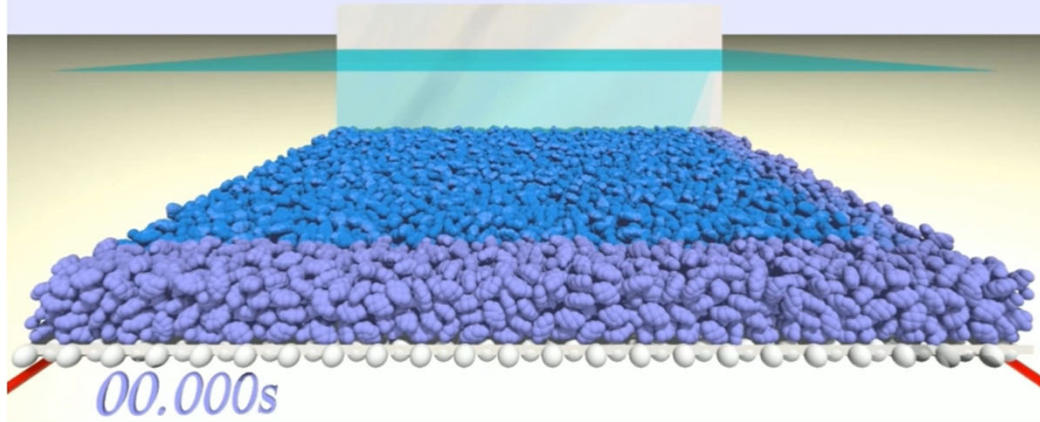
格子数：37,647,872 ($D/8$) , 127,061,568 ($12/D$)

※ Δ : 格子サイズ

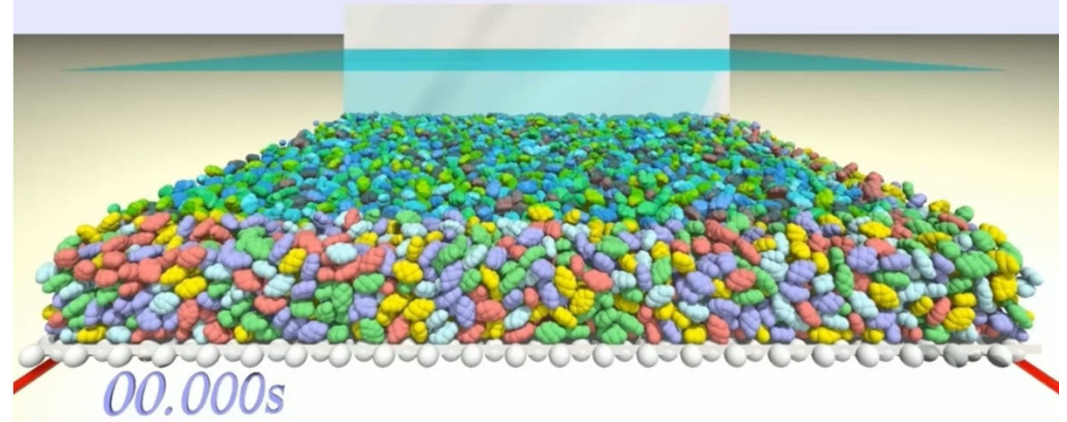
1)伊藤隆郭: 土石流の構成則およびその適用に関する研究, 立命館大学博士論文, 2000.

解析結果 D/8

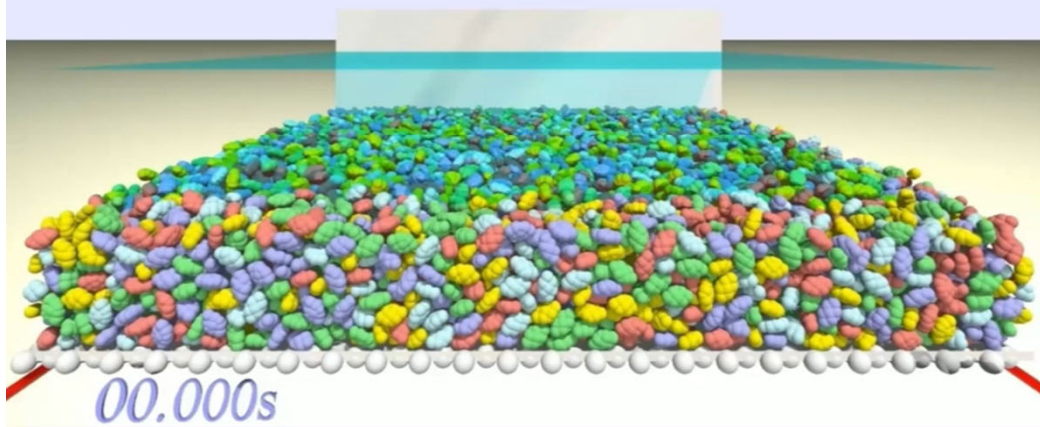
勾配 6.4°



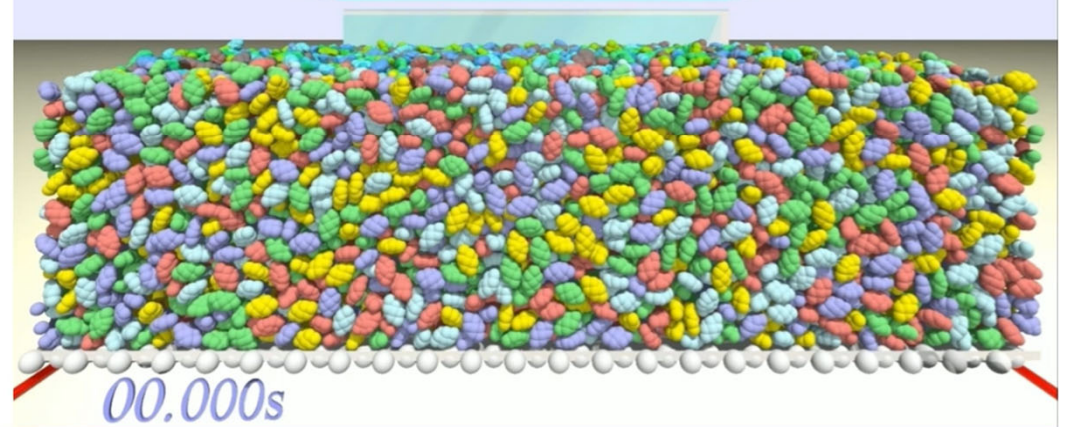
勾配 6.4°



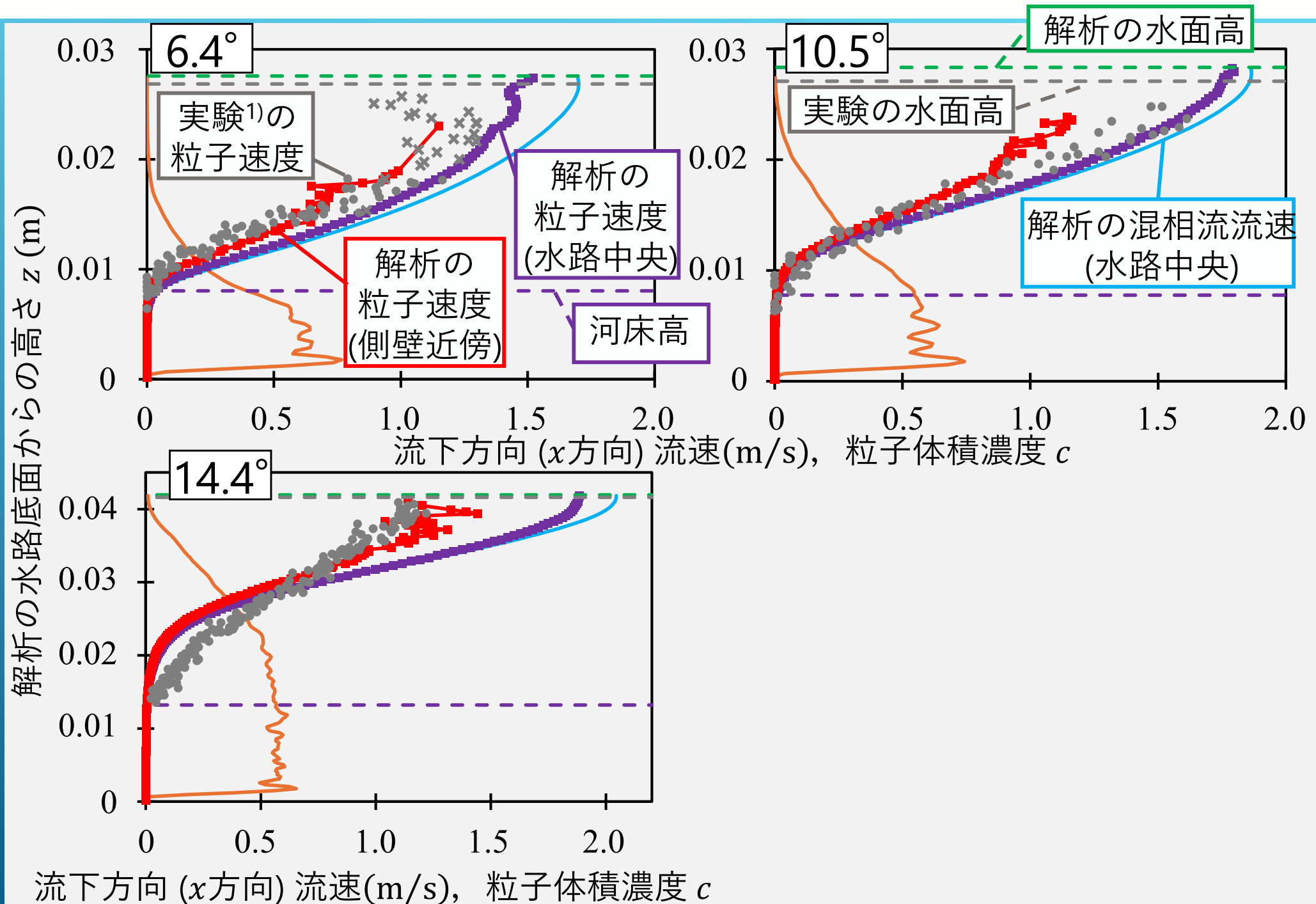
勾配 10.5°



勾配 14.4°



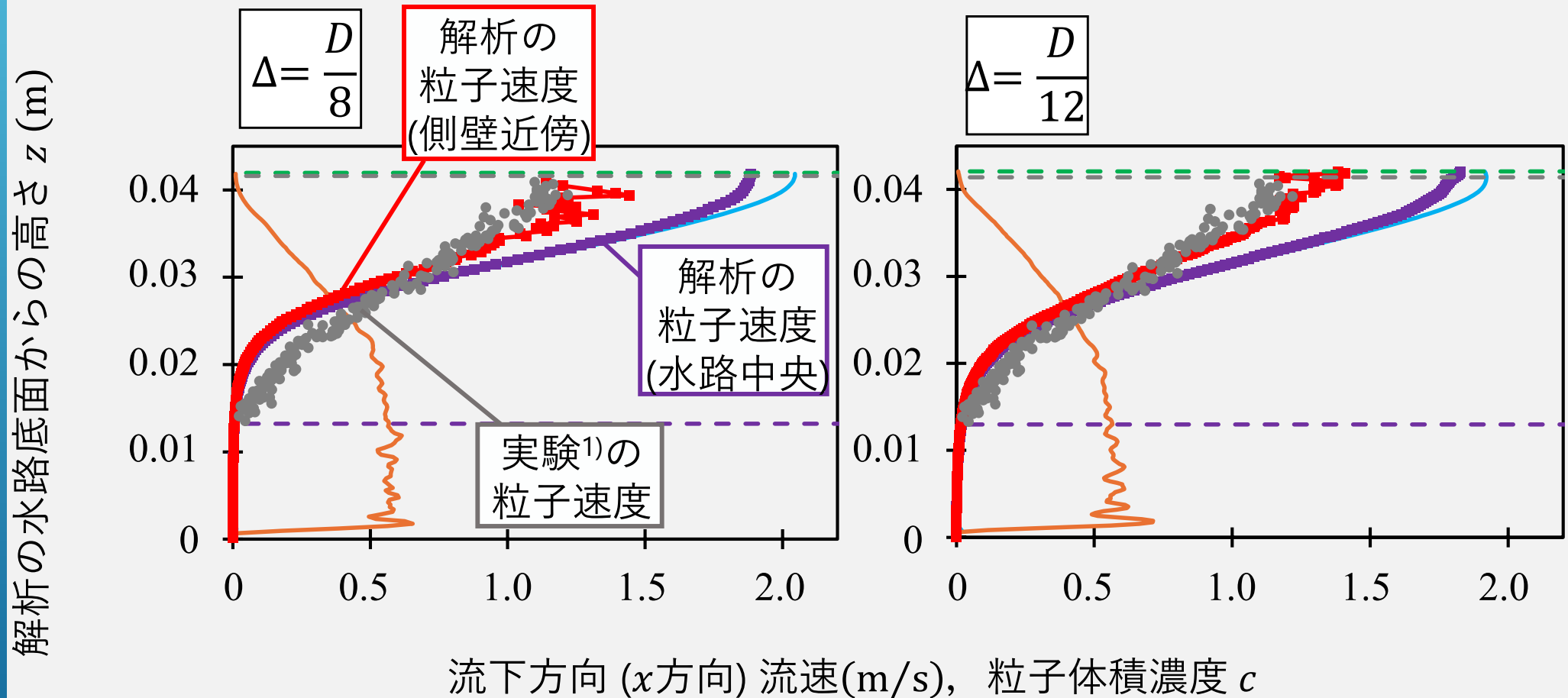
実験結果の流速分布に対する再現性 D/8



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.

実験結果の流速分布に対する再現性

- 14.4° の解析に対する、流体計算格子の影響を分析するため、流体力の推定精度が向上する、より細かい流体計算格子で解析を実施した。



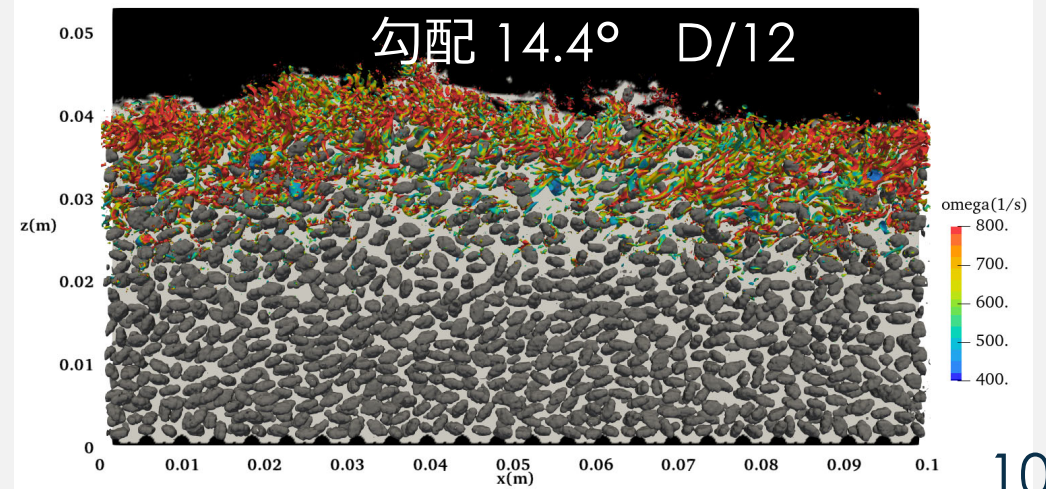
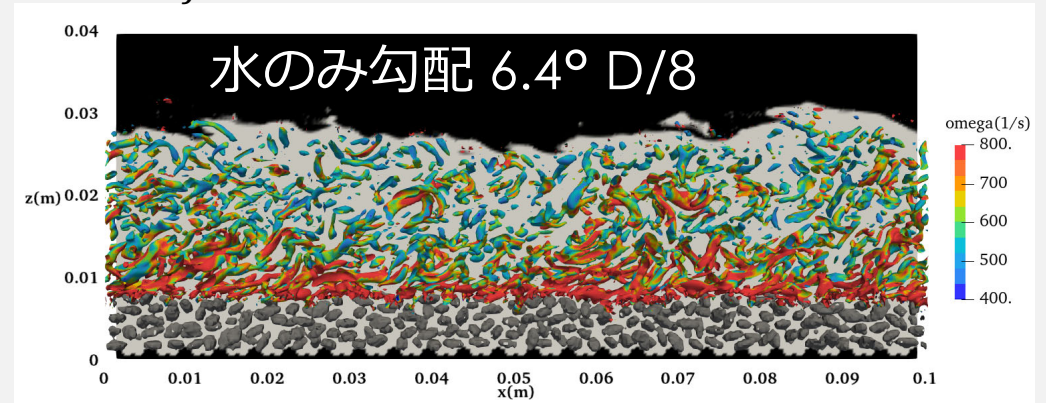
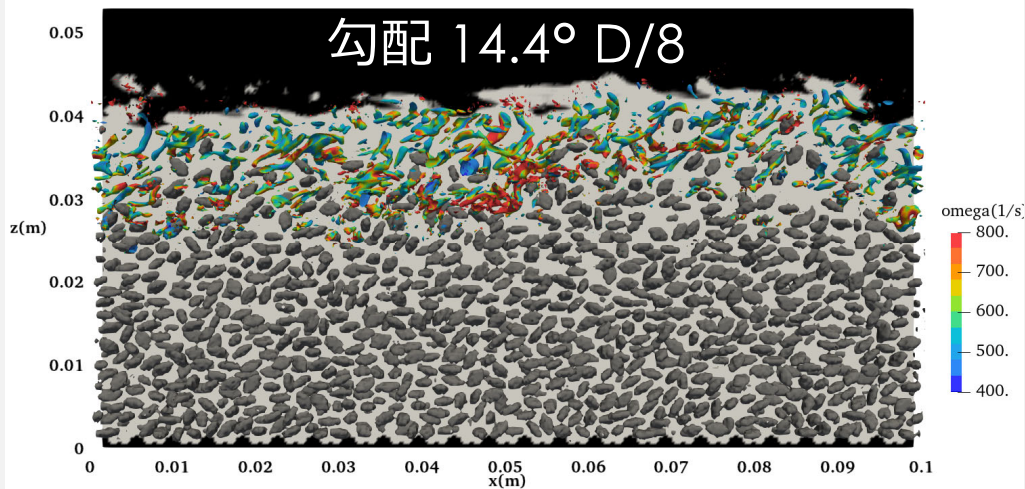
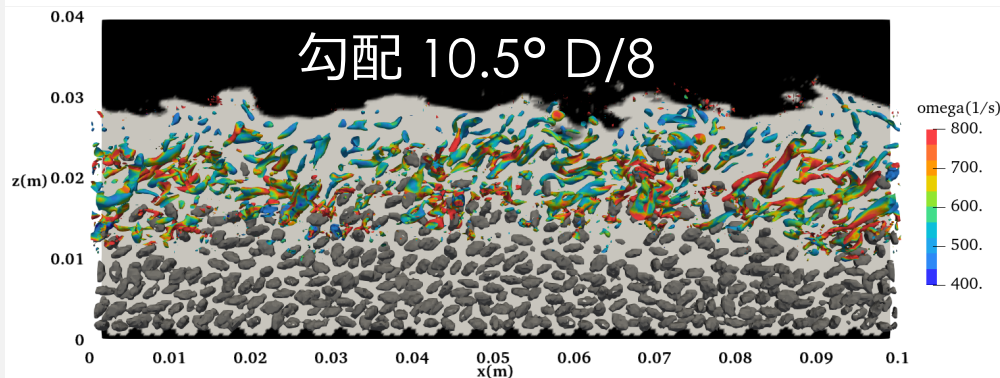
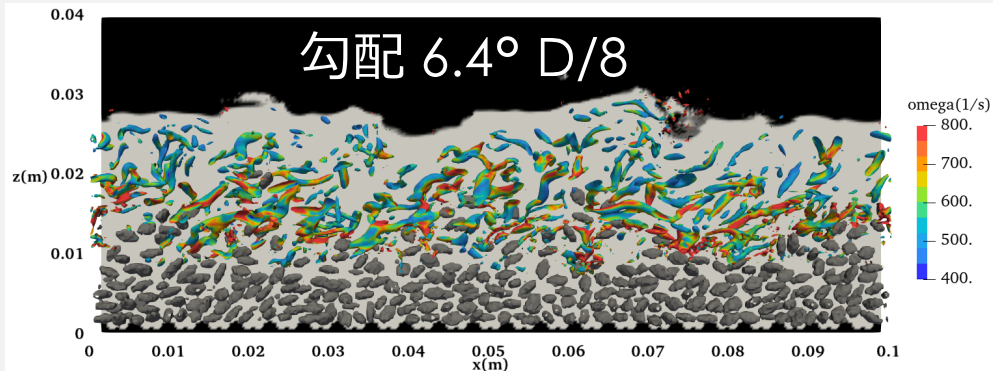
渦構造 (Q値)

$Q = 50 [1/s^2]$ 等値面

$$Q = \frac{1}{2} (\Omega_{ij} \Omega_{ij} - S_{ij} S_{ij})$$

Ω_{ij} : 回転テンソル

S_{ij} : ひずみ速度テンソル



エネルギースペクトル

無次元スペクトル $\tilde{A} = \frac{2\pi \bar{A}}{L \bar{K}}$

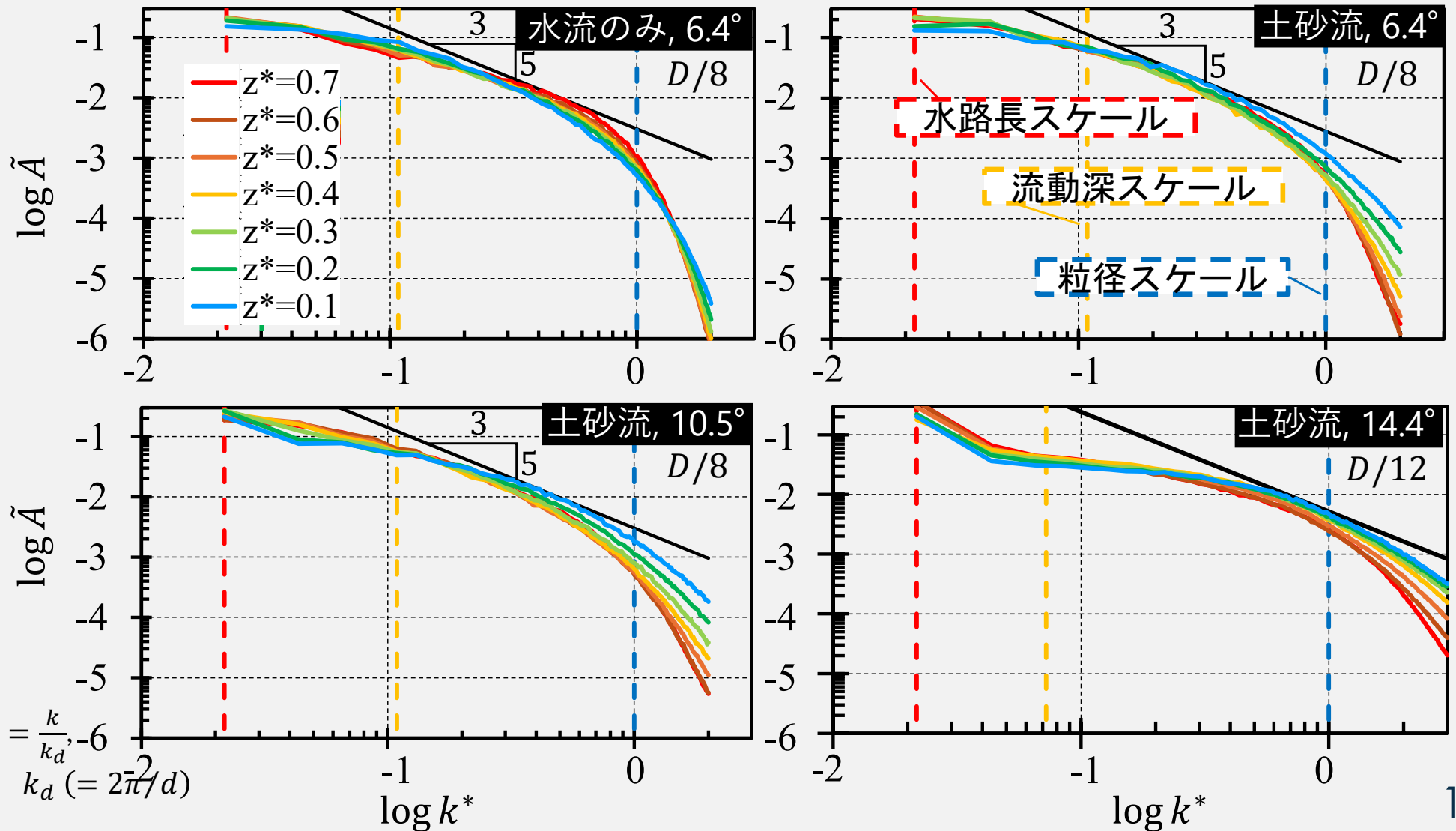
乱れエネルギー

$$K = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{u_i'(x)u_i'(x)}{2} dx = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\pi}{L} A(k_n)$$

$A(k_n)$: 乱れエネルギースペクトル

無次元化した乱れエネルギーのスペクトル $\tilde{A}$

$$k^* = \frac{k}{k_d}, \quad k_d (= 2\pi/d)$$



プログラム言語 Fortran

並列計算 MPIとOpenMPのハイブリッド計算

利用システム 玄海ノードグループA CPUのみ利用

使用ノード数：3ノード

ノードあたりのプロセス数：8プロセス/ノード

総プロセス数：24プロセス ($=8 \times 3$)

ループ内のプロセスあたりのOpenMPスレッド数：15スレッド/プロセス

総スレッド数 360スレッド ($=15 \times 24$)

利用ノード時間：約 6,293ノード時間($=188,796/30$)

利用ポイント：約 188,796

解析やデータ整理等を含む全体の利用状況

利用ポイント：390,018

ノード時間：推定13,000ノード時間($=390,018/30$)

まとめ

- APMを用いて、D/8サイズの格子を用いることで、20%程度の濃度（勾配 6.4° 、 10.5° ）までの土砂流を適切に解析できることが確認された。
- さらに高濃度の35%程度の濃度（ 14.4° ）の土砂流に対しては、D/12程度の格子サイズを用いることで土砂流を適切に解析できることが確認された。
- 乱れエネルギーが減衰しコルモゴロフスケールに乗る波数は、高濃度ほど高波数側となることが確認された。また、高濃度の土砂流は、低濃度の土砂流と比較し、小さなスケールの乱れ強度が相対的に大きくなることが確認された。
- APMのさらなる活用により土砂流の力学機構を調べていくことが重要である。

玄海ノードグループAを利用させていただき実施した、今回の発表した内容の一部が、Journal of Hydraulic Engineering の論文に掲載されることが決定しました。

利用させていただき、ありがとうございました。