



粒子法型固液混相流モデルを用いた 大規模三次元解析による波打ち帯砂漣形成機構の解明

課題代表者：田崎 拓海 (京都大学, tazaki.takumi.2v@kyoto-u.ac.jp)

共同研究者：原田 英治, 後藤 仁志 (京都大学)

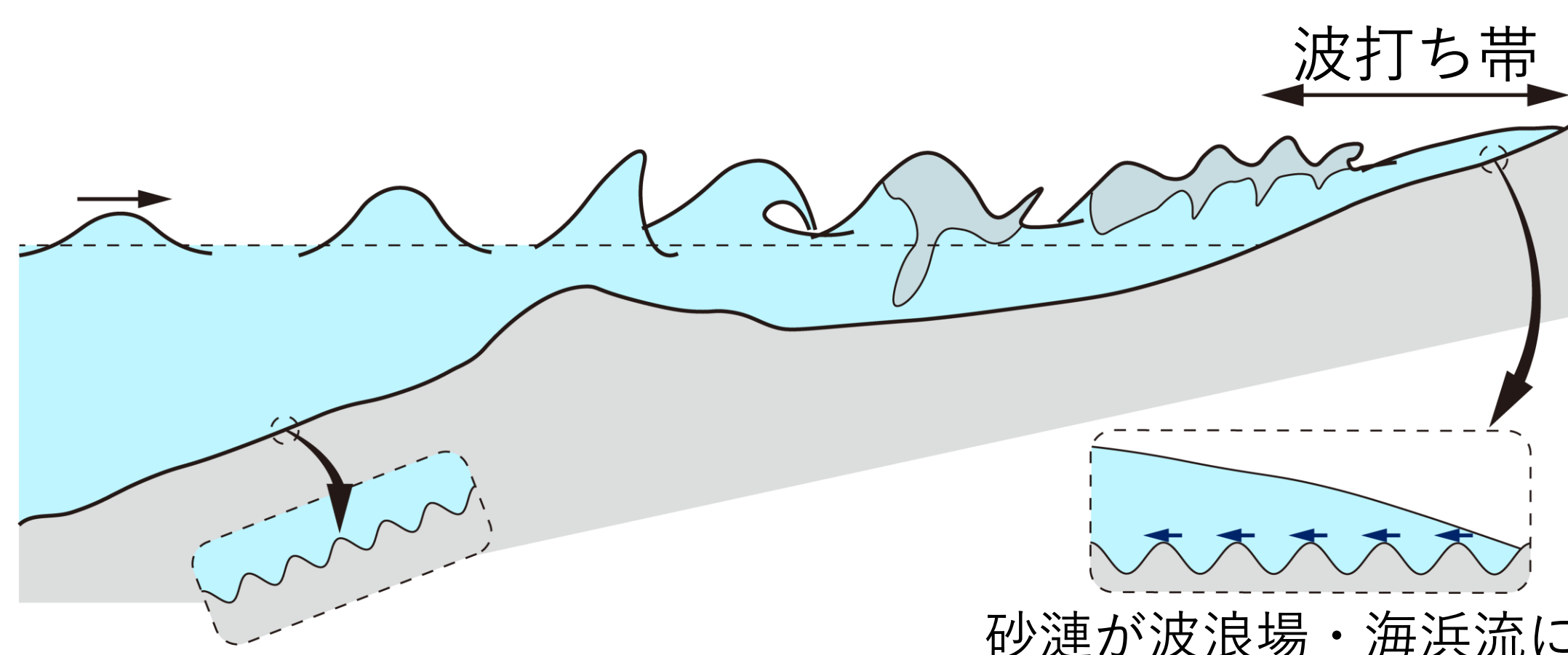
1. 研究背景・目的

波浪場・海浜流・漂砂量・海浜地形を時間発展的に解く海浜変形解析では海底の形状(=境界条件)が解析結果に影響するため、水理条件と海浜形状の関係を理解し、適切に予測する必要がある。

砂漣(海底の微小凹凸)は比較的底面せん断力の小さい沖波帯や波打ち帯で形成される。これまで沖波帯の砂漣形状の定式化や発達過程の検討が行われてきたが、計測が困難な波打ち帯の砂漣に関する知識の蓄積は浅い。

砂粒の転動を契機に形成される初期の砂漣の理解には、波浪下の個々の底質粒子(砂粒)を追跡する固液混相流モデルが有効であるが、従来の手法では砕波後の遡上波の再現性や計算負荷に問題があった。

本研究では、水面の追跡に長けた粒子法を用いて遡上波の三次元並列計算を行い、波打ち帯における砂漣の形成過程を検討する。



砂漣が波浪場・海浜流に影響
 <問い> 砂漣の形状は? どのように形成される? (本課題の対象)
 どのように移動・変形・消滅する?

2. 粒子法型固液混相流モデル

- 高精度MPS法 (enhanced moving particle semi-implicit method)
 projection法に基づく非圧縮性流体の解法(液相解析)
 粒子を用いた離散化による砕波波浪場の解析への高い適用性
- 個別要素法 (DEM, discrete element method)
 海底床を粒状体(砂粒の集合)として解析

表 数値モデルの適用性

		液相	
		Euler (水面△)	Lagrange (水面○)
固相	連続体(Euler/Lagrange)	△	△
	粒状体(Lagrange)	△	◎

→ 波浪下の漂砂過程解析には激しい水面変形化の移動床現象を素過程から追跡可能なLagrange型の固液混相流モデルが有効

3. 並列化による大規模三次元解析

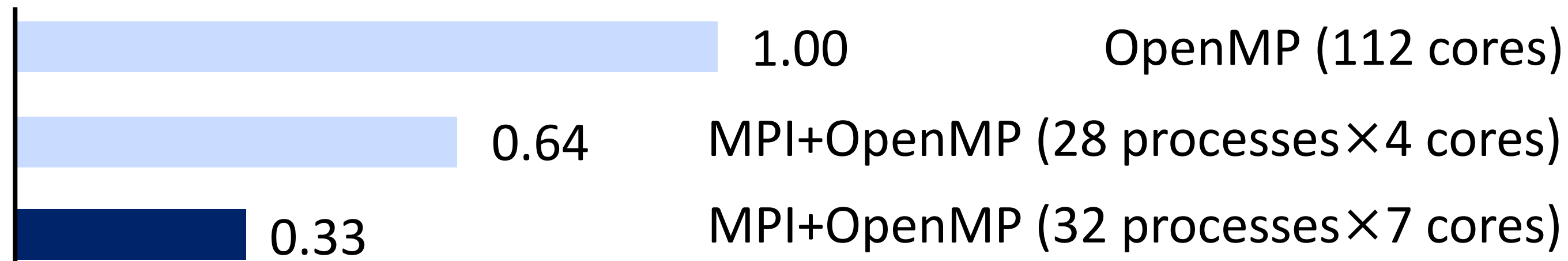
■ 計算環境

京都大学学術情報メディアセンタ所有のスーパーコンピュータ Laurel3
 <<課題で使用した計算資源>>

Intel Xeon Platinum 8480+ 2.0 GHz
 コア数: 112 cores × 2 nodes = 224 cores
 メモリ容量: 512 GiB × 2 nodes = 1024 GiB

■ 並列処理: Hybrid並列(MPI+OpenMP)

実行時間の比



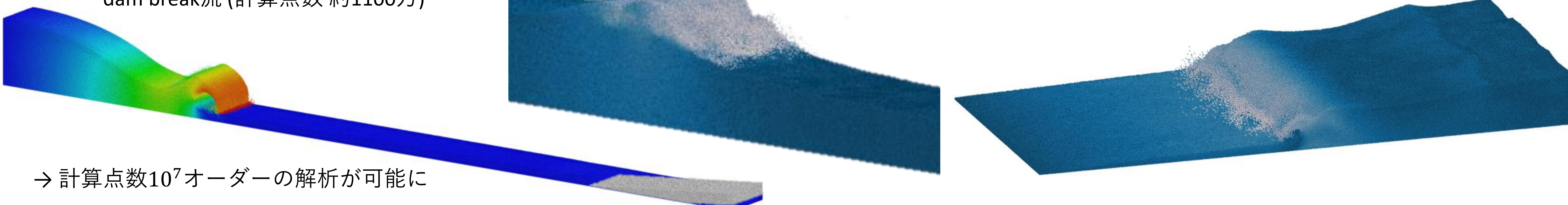
→ 高い並列性能、効率的な計算資源の活用

■ 計算例

計算例① 移動床斜面へ入射する dam break流 (計算点数 約1100万)

計算例② 斜面上の崩れ波砕波 (計算点数 約1000万)

計算例③ 水槽内の巻き波砕波 (計算点数 約200万)



→ 計算点数 10^7 オーダーの解析が可能に

4. 遡上波下漂砂過程のシミュレーション

■ 計算条件

dam break流による遡上波が形成する砂漣の初期形成過程に注目

計算領域はO'Donoghue et al. (Coast. Eng., 2016)に対応

液相解像度 $d_l = 5 \text{ mm}$,

液相計算点数 $N_p = 3 \times 10^6$

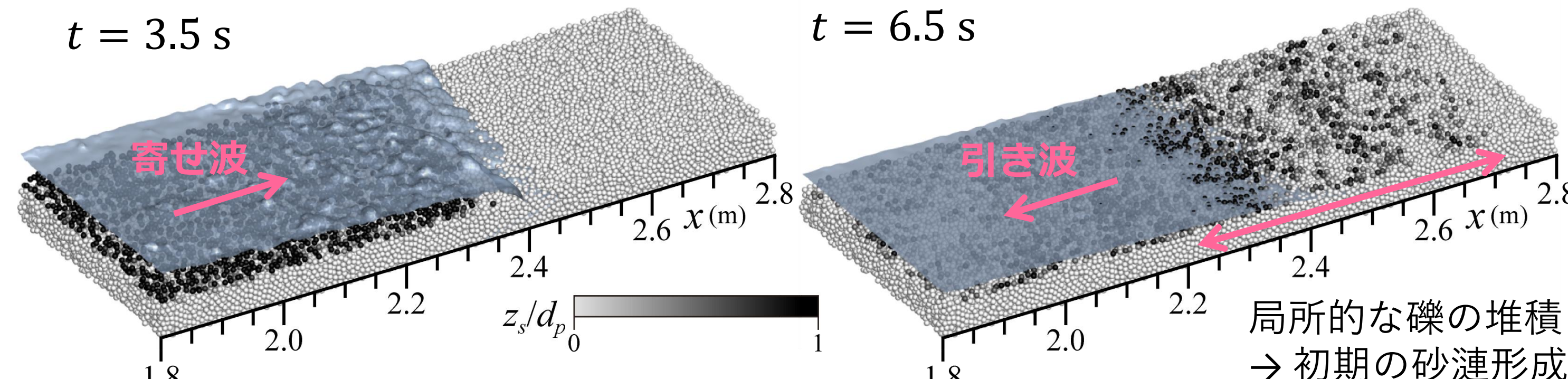
固相粒径 $d_p = 8.4 \text{ mm}$,

固相密度 $\rho_p = 2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

■ 解析結果: 移動床高さ z_s の分布

$t = 3.5 \text{ s}$

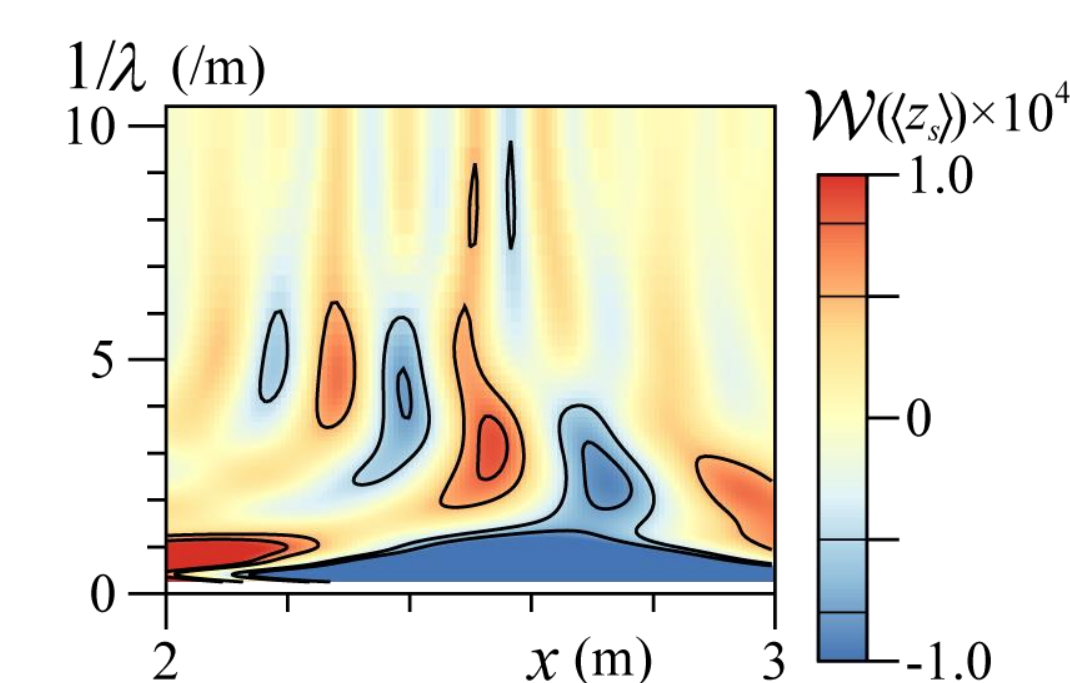
$t = 6.5 \text{ s}$



wavelet解析による砂漣(凹凸)の定量的評価

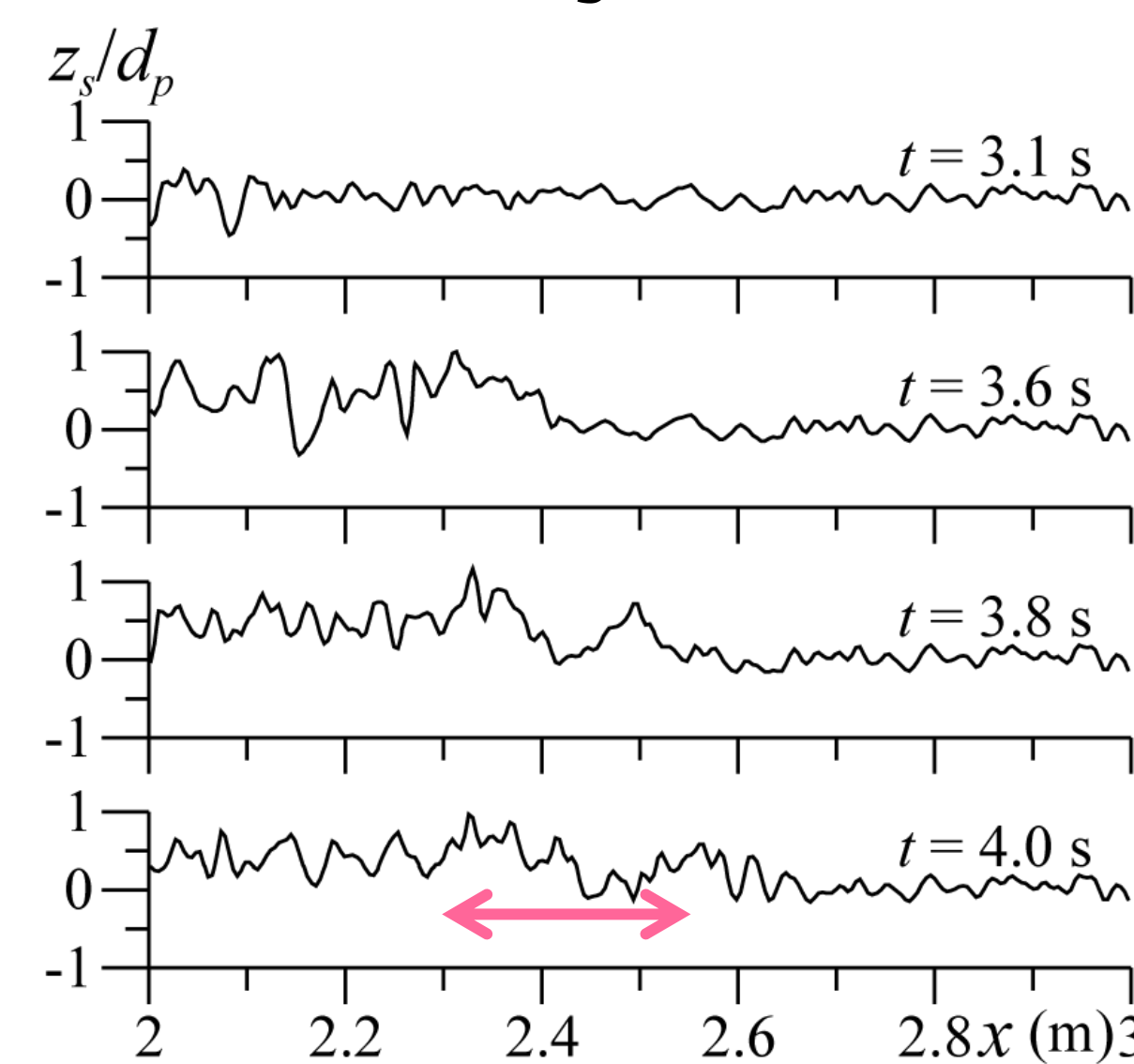
$$W_\phi(x, \lambda) = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\xi) \psi^* \left(\frac{\xi - x}{\lambda} \right) d\xi$$

→ 波長 $\lambda \approx 0.2 \sim 0.25 \text{ m}$



5. 砂漣の形成機構

■ 移動床高さ z_s の時間変化



$t = 3.6 \text{ s}$ から 4.0 s にかけて砂漣が形成

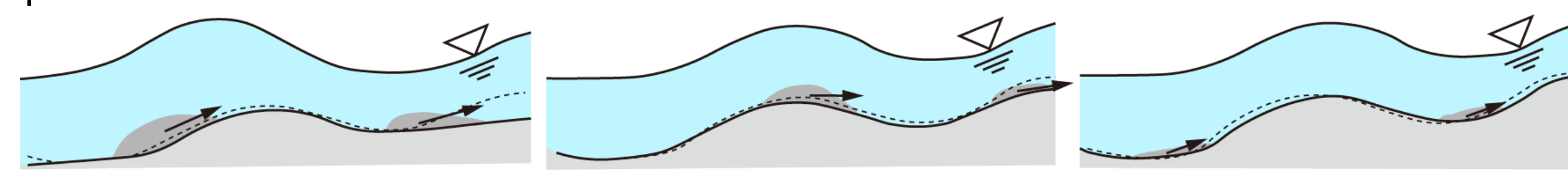
→ 移動床高さ z_s , 土砂輸送量 q_s , 水深 h の位相差 φ から砂漣(凹凸)の発達機構を検討 ($\lambda = 0.2 \text{ m}$)

$$W_{\phi_1 \phi_2}(x, \lambda) = W_{\phi_1}(x, \lambda) W_{\phi_2}^*(x, \lambda)$$

$$\varphi_{\phi_1 \phi_2}(x, \lambda) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(W_{\phi_1 \phi_2}(x, \lambda))}{\text{Re}(W_{\phi_1 \phi_2}(x, \lambda))}$$

■ 砂漣発達と水面・土砂輸送量との空間位相差

t	3.6 s	3.8 s	4.0 s
$\varphi_{z_s q_s}$	1.66 rad	-0.01 rad	-2.07 rad
$\varphi_{z_s h}$	1.75 rad	-0.86 rad	-0.50 rad



水面と砂漣形状の空間位相差が解消される過程で砂漣が発達
 連続波下における継続的な砂漣発達の可能性を示唆

6. 結論・今後の展望

本課題では、高精度MPS法と個別要素法(DEM)の連成手法(粒子法型固液混相流モデル)を用いて、MPI+OpenMPの並列計算により従来よりも大規模な漂砂過程の解析(計算点数 $10^6 \sim 10^7$)を実施し、10 m程度の水路内の波打ち帯における砂漣の初期形成過程を検討した。

今後、本モデルを用いて連続波下の砂漣発達機構の検討を進める。また、更なる液相の高解像度化に向けたモデルの構築や大規模並列解析の実施も目指す。