

# 粒子法による3次元津波シミュレーションの可視化とその応用

浅井光輝@九州大学大学院工学研究院社会基盤部門  
一色正晴@愛媛大学大学院理工学研究科

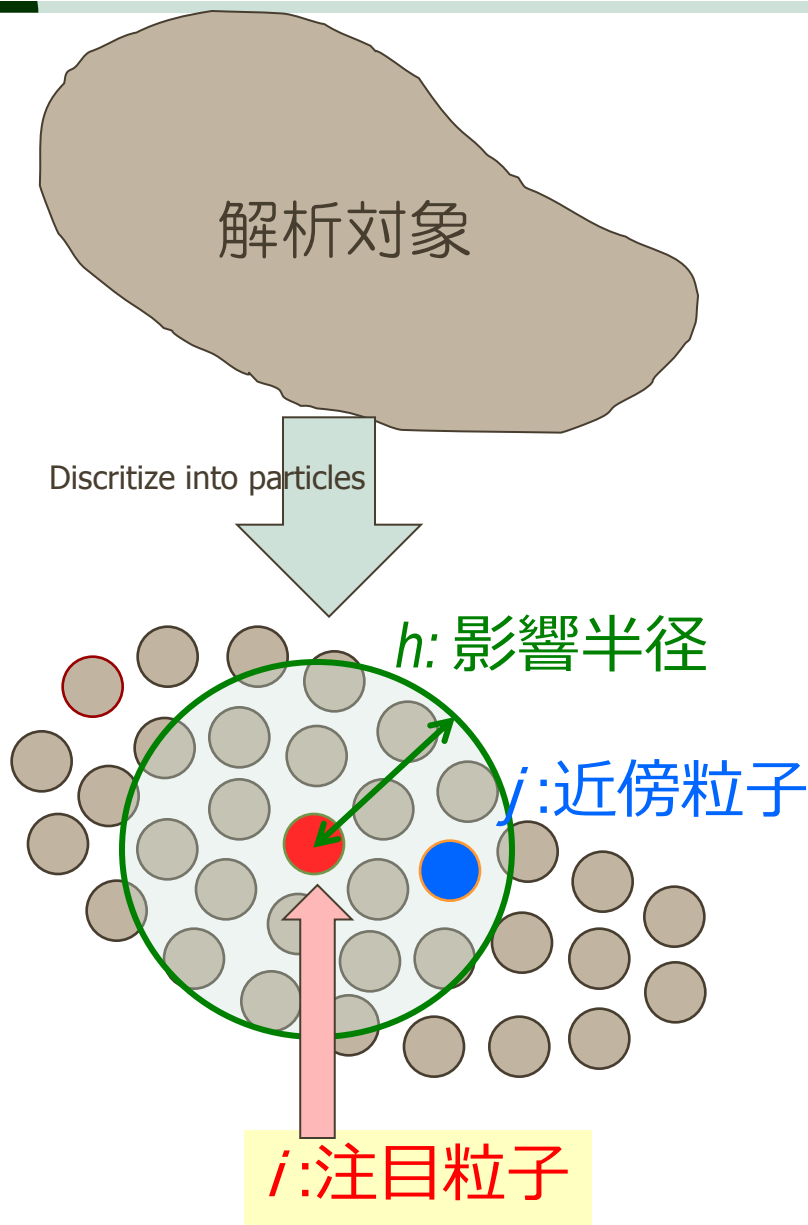
# 本日の話題

1. 粒子法についての紹介
2. 粒子解析結果のレンダリング処理など
3. 津波被害例
4. 津波解析モデルの作成手順
5. 津波遡上解析例
6. 今後

# 本日の話題

1. 粒子法についての紹介
2. 粒子解析結果のレンダリング処理など
3. 津波被害例
4. 津波解析モデルの作成手順
5. 津波遡上解析例
6. 今後

# 粒子法による関数近似の考え方



注目粒子上での物理量    近傍粒子上での物理量

粒子間の距離

$$f(x_i) = \int f(x_j) W(x_i - x_j, h) dx_j$$

重み関数  
(カーネル関数)

The equation is presented in a yellow box. The term  $f(x_i)$  is in a red box,  $f(x_j)$  is in a blue box, and  $W(x_i - x_j, h)$  is in a red box. A bracket above the  $W$  term indicates it is the '重み関数 (カーネル関数)' (Weighting Function / Kernel Function). A bracket below the  $W$  term indicates it is the '粒子間の距離' (Distance between particles).

# SPHとMPSの近似の違い

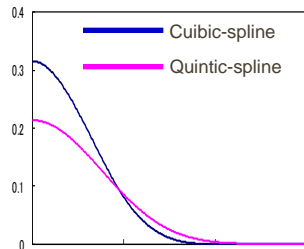
## SPH

## MPS

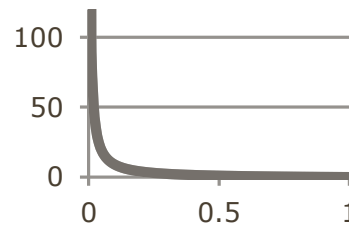
### ①関数 $f(x)$ の近似

$$f(\mathbf{x}^i) \approx \sum_{j=1}^N \frac{m^j}{\rho^j} f(\mathbf{x}^j) W(r)$$

$$W(r) = \begin{cases} c \left( 1 - \frac{3}{2} r^2 + \frac{3}{4} r^3 \right) \\ \frac{c}{4} (2-r)^2 \\ 0 \end{cases}$$



つりがね型



コーン型

$$W(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (0 < r < r_e) \\ 0 & (r > r_e) \end{cases}$$

### ②勾配・発散・ラプラシアンを導出

$$\nabla f(\mathbf{x}) \approx - \sum_{j=1}^N \frac{m^j}{\rho^j} f(\mathbf{x}^j) \nabla W(r)$$

### ①勾配・発散・ラプラシアンの近似

$$\nabla f(\mathbf{x}^i) \approx \frac{d}{n_0} \sum_{j=1}^N \frac{f^j - f^i}{|\mathbf{x}^j - \mathbf{x}^i|^2} (\mathbf{x}^j - \mathbf{x}^i) \quad \cancel{W(r)}$$

近傍粒子の差分の重み付き平均

# ナビエーストークス方程式の粒子離散化

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot \left( \frac{\mu}{\rho} \nabla \mathbf{v} \right) + \frac{1}{\rho} \mathbf{b}$$

前進差分

圧力勾配

速度のラプラシアン

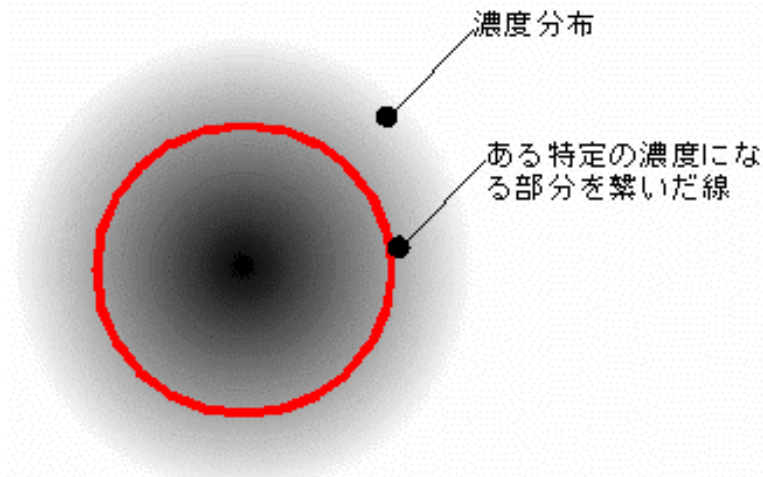
$$\frac{\mathbf{v}_i^{n+1} - \mathbf{v}_i^n}{\Delta t} = -\sum_j m_j \left( \frac{p_j}{\rho_j^2} + \frac{p_i}{\rho_i^2} \right) \nabla W(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) + \sum_j m_j \left( 8 \frac{v_i + v_j}{\rho_i + \rho_j} \frac{(\mathbf{v}_i^n - \mathbf{v}_j^n) \cdot (\mathbf{x}_i^n - \mathbf{x}_j^n)}{|\mathbf{x}_i^n - \mathbf{x}_j^n|^2} \right) \nabla W + \frac{1}{\rho} \mathbf{b}_i$$

# 本日の話題

1. 粒子法についての紹介
2. **粒子解析結果のレンダリング処理など**
3. 津波被害例
4. 津波解析モデルの作成手順
5. 津波遡上解析例
6. 今後

# 流体の表面の表現方法

各粒子が濃度分布を持っていると考える



濃度分布の等高線(面)からメッシュを構成する

➡ マーチンキューブス法

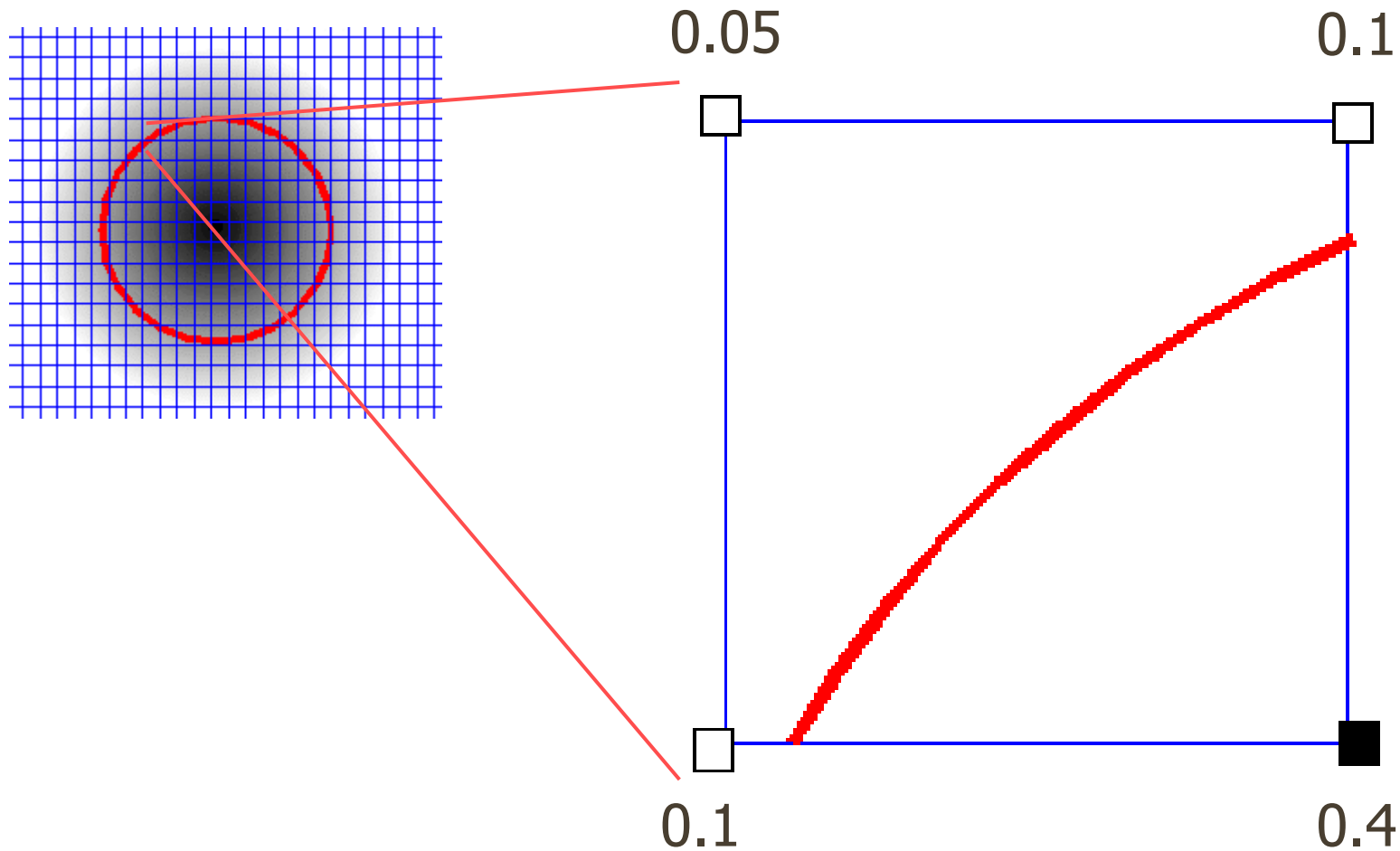
視点からレイを飛ばし濃度分布が閾値以上の表面座標を探索する

➡ レイトレーシング法



# マーチンキューブス法 (手順)

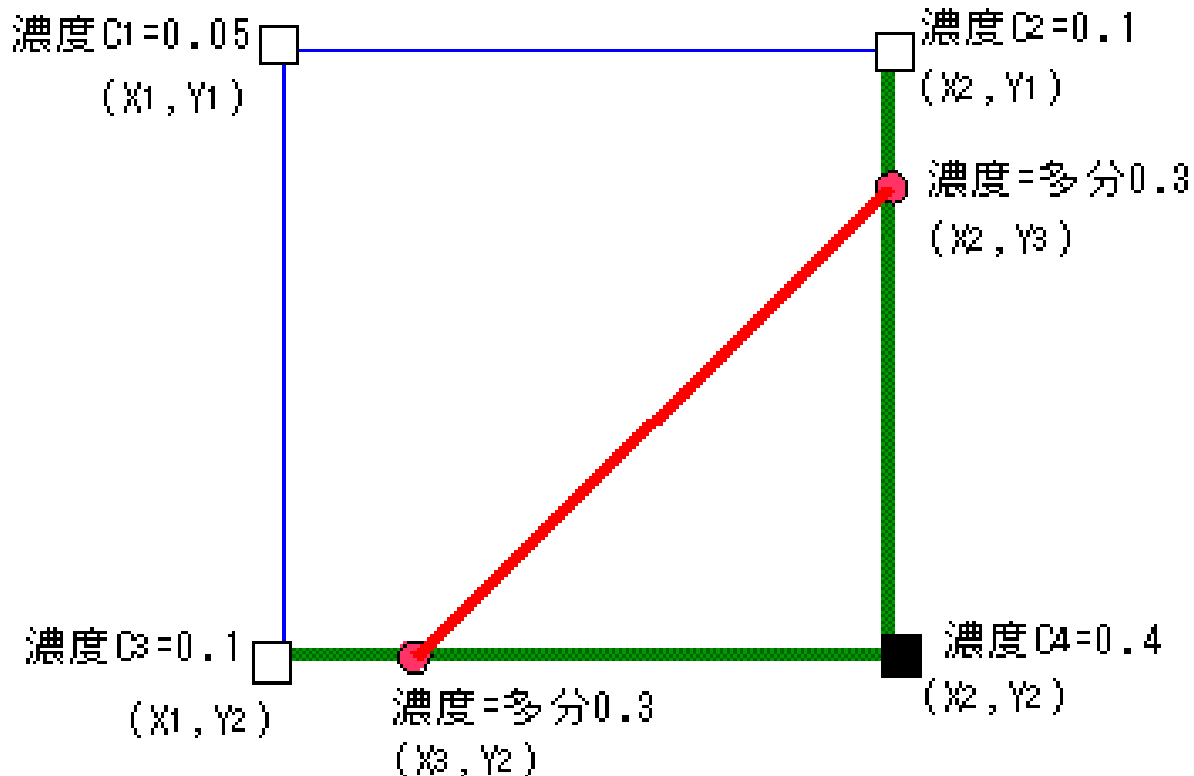
近傍粒子から格子点の濃度値を計算



# マーチンキューブス法（手順）

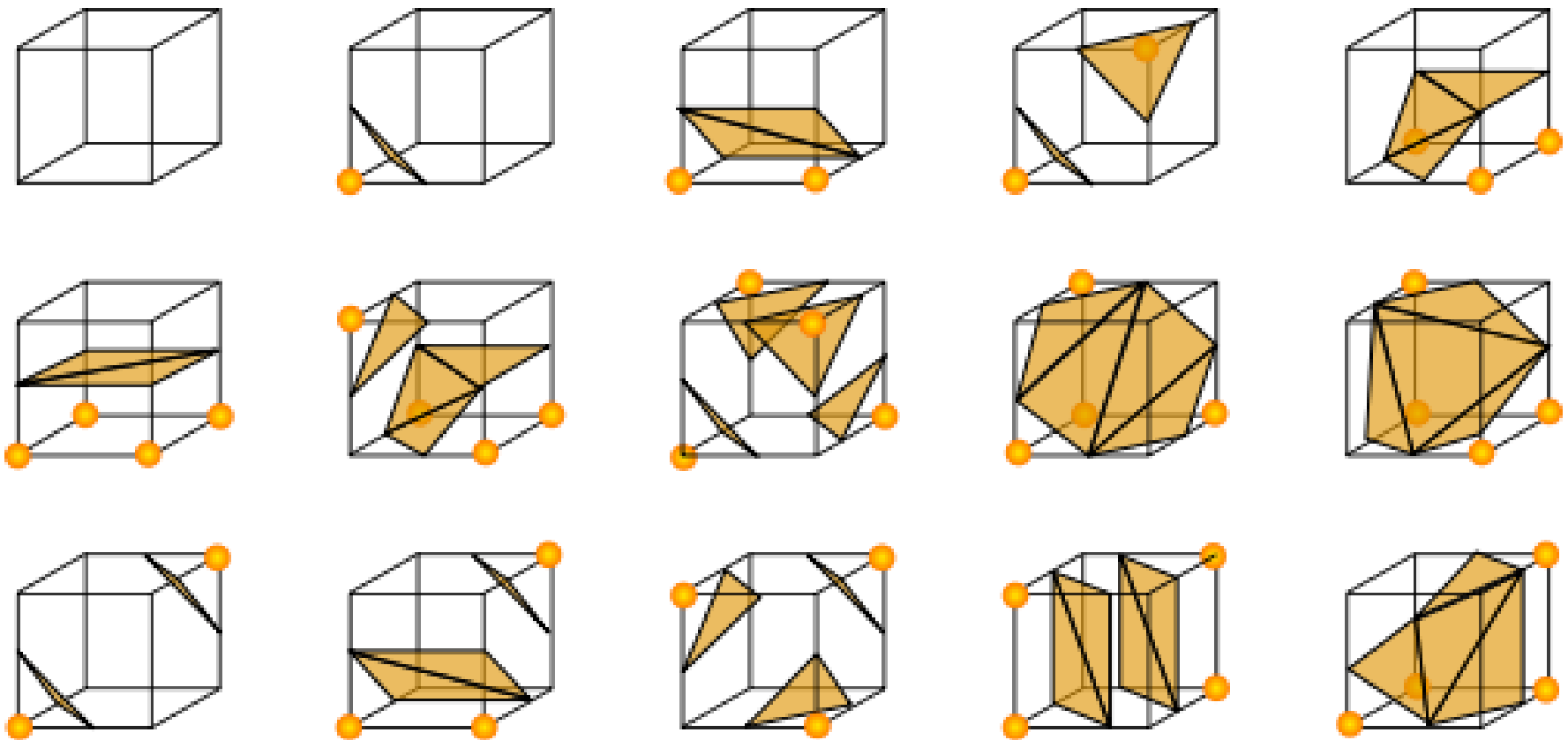
## 六面体の頂点8個の濃度値から面を構成

- ある閾値（図では0.3）の等値面にメッシュを作る



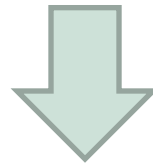
# マーチンキューブス法（手順）

- 頂点8個の濃度の関係は256通り
  - 対称等の重複を除くと15通り



# マーチンキューブ法での問題点

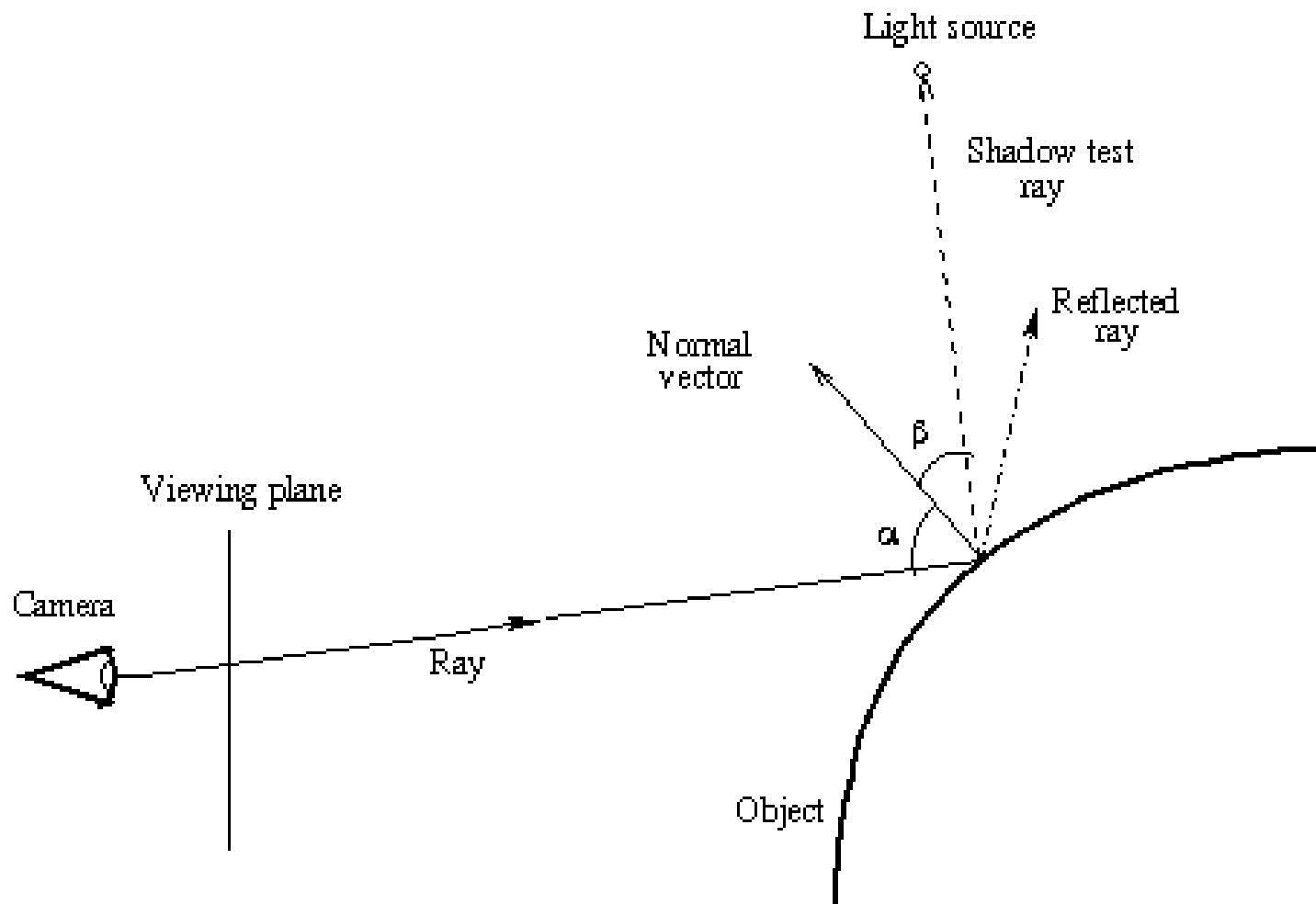
- 格子の細かさで結果が変わる
  - 線形近似でメッシュを生成
- 隣接したキューブの等値面によっては閉曲面とならない
- 体積が一定とならない
  - 濃度分布によっては消失や出現が発生



レイトレーシング法

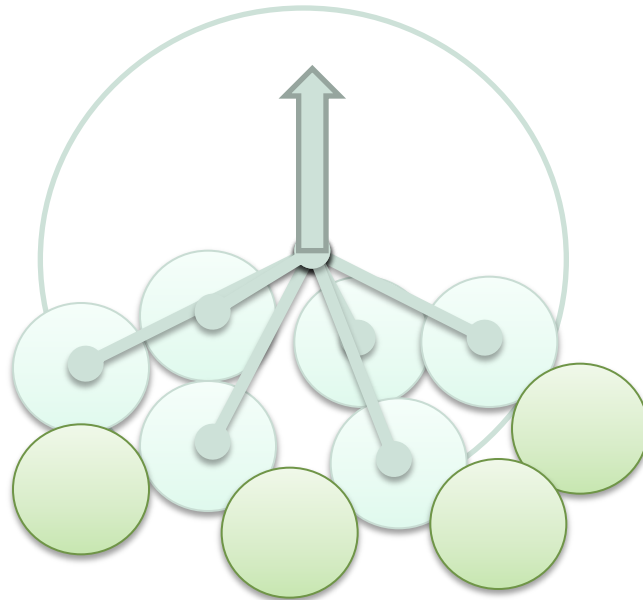
# レイトレーシング法

視点からスクリーンにレイを飛ばし物体表面の色を計算



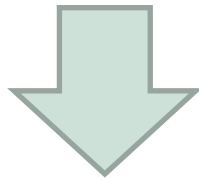
# レイトレーシング法

1. 空間を格子で分割し近傍粒子のリストを作成
2. レイトレーシングを行い近傍粒子から濃度値を計算し閾値以上の座標を計算
3. 同時に濃度値から法線ベクトルや色を計算



# 半透明物体のレンダリング

- 水のような半透明物体をレンダリングするためにはどうすれば良いか？
  - 表面の色だけを計算したのでは不透明
  - 現実の光のように反射／屈折を繰り返し計算して色を決める必要あり



- レイトレーシング法
- ラジオシティ法
- フォトンマッピング法

# レイトレーシング法

光線追跡法：光線がたどる経路を逆にたどる方法



(c) ExpressionTools, Inc.



# ラジオシティ法

光源から出た光線が複数の物体間で相互に拡散反射を繰り返すことをシミュレートしながら輝度計算を行う方法



(c) ExpressionTools, Inc. and Masanori Kasahara/STILL LIFE

# フォトンマッピング法

- 双方向レイトレーシング
- 光源からフォトンをばら撒いてマッピングデータを作成
- 視点からレイトレーシングを行い色を計算
- コースティクス（集光現象）を表現可能



# 粒子そのままの出力例



# 粒子レンダリング例



# 本日の話題

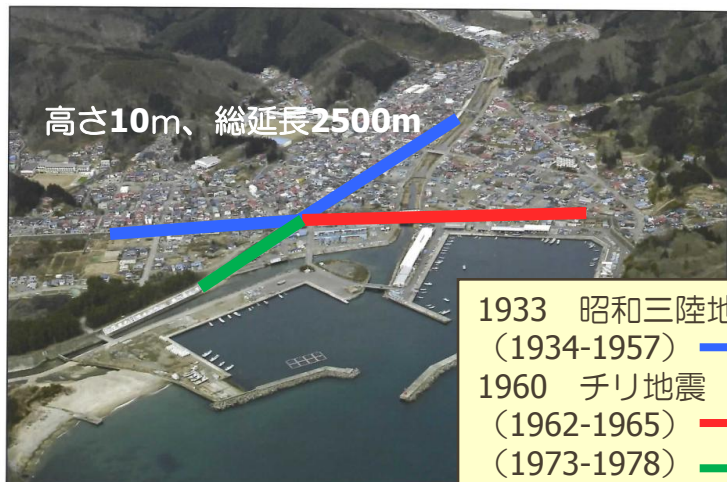
1. 粒子法についての紹介
2. 粒子解析結果のレンダリング処理など
- 3. 津波被害例**
- 4. 津波解析モデルの作成手順**
5. 津波遡上解析例
6. 今後

# 田老地区での被災状況

## 被災前後の写真

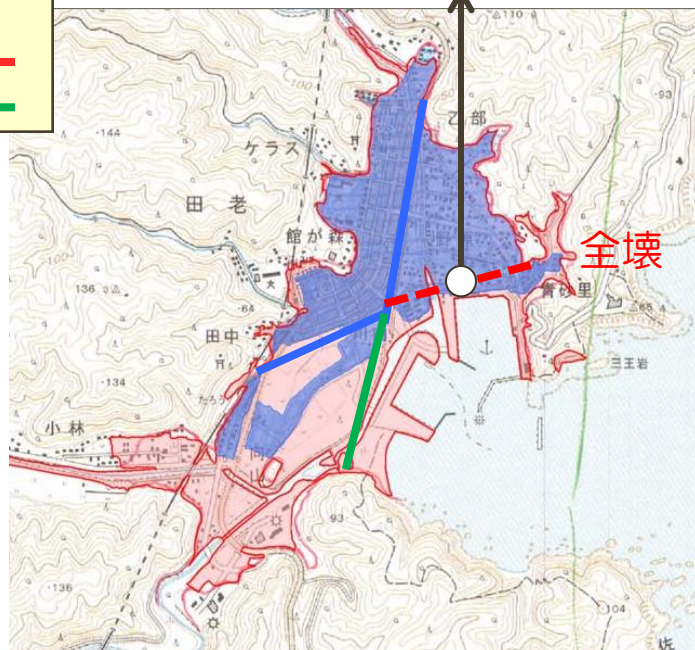
岩手県

<宮古市田老>



- 1933 昭和三陸地震 (1934-1957) —
- 1960 チリ地震 (1962-1965) —
- (1973-1978) —

2010年3月撮影

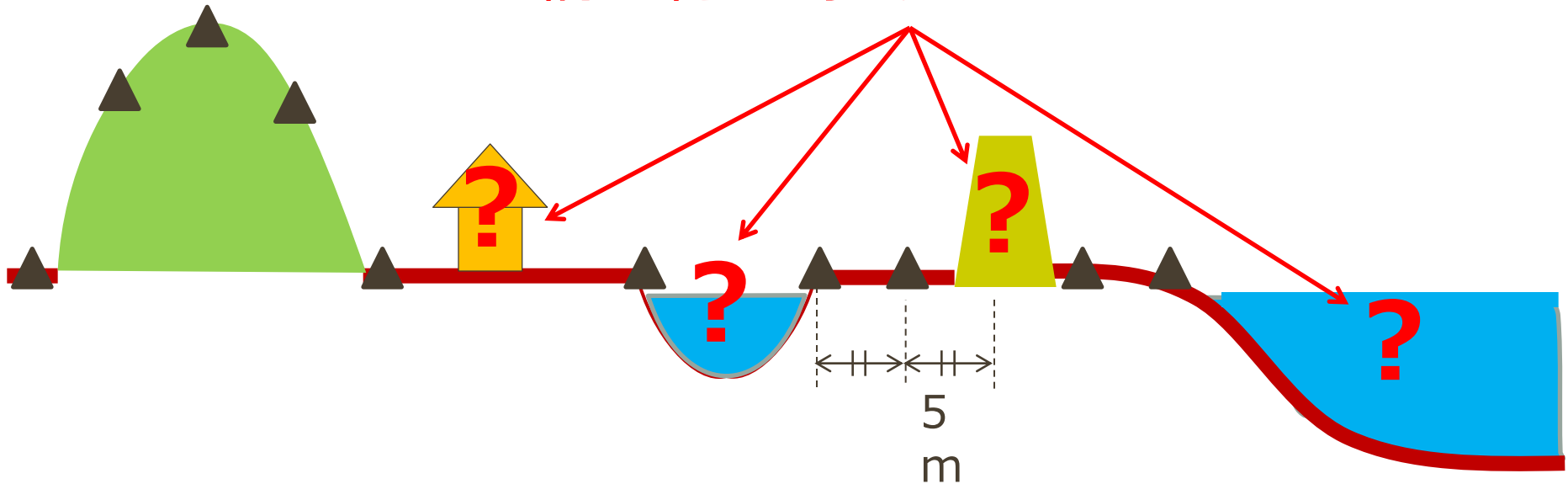


# 地形の復元（従来の技術）

市販されている標高数値データ

国土地理院5mメッシュ標高数値データ

構造物・海底のデータはない



# 高精度な地形の復元（開発技術）

<手順>

- ①航空測量データ
- ②平面データ作成
- ③粒子発生

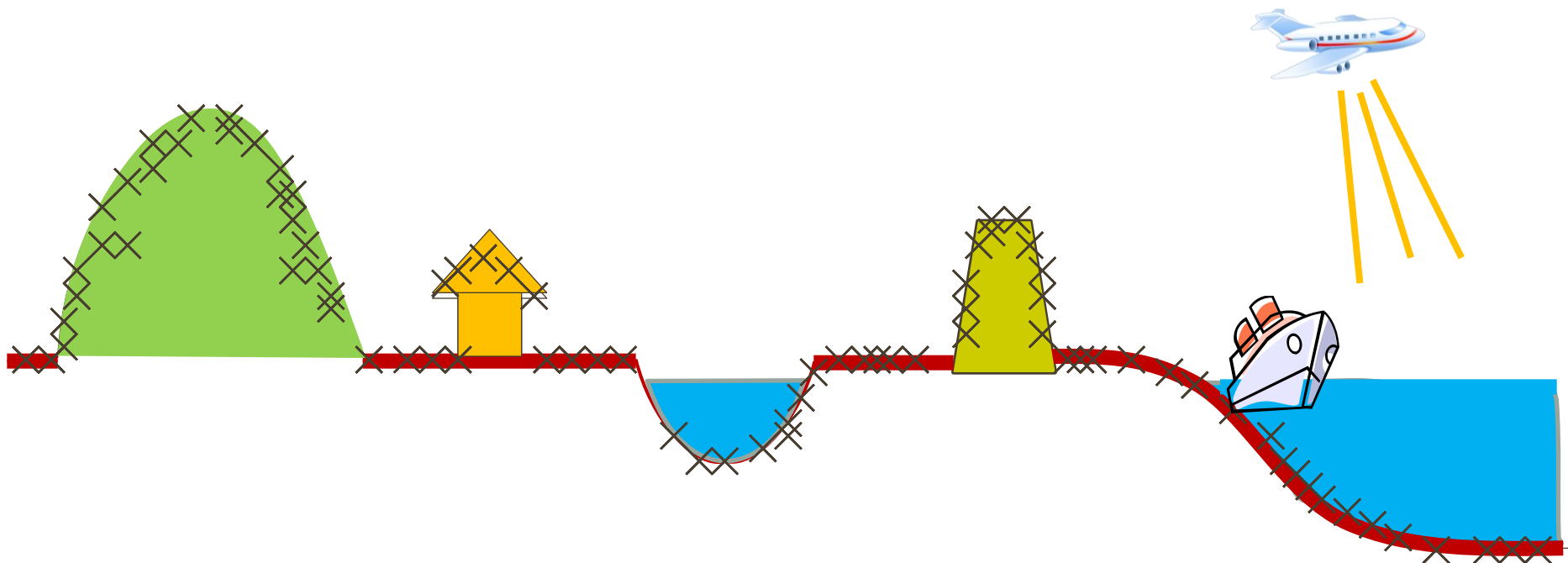
岩手県県土整備部河川課  
株)防災技術コンサルタント よりデータ提供

## 航空レーザー測量 + 深淺測量

地上のデータ（約1m間隔）

海底のデータ

航空機から地上にレーザーを照射し、反射波を観測

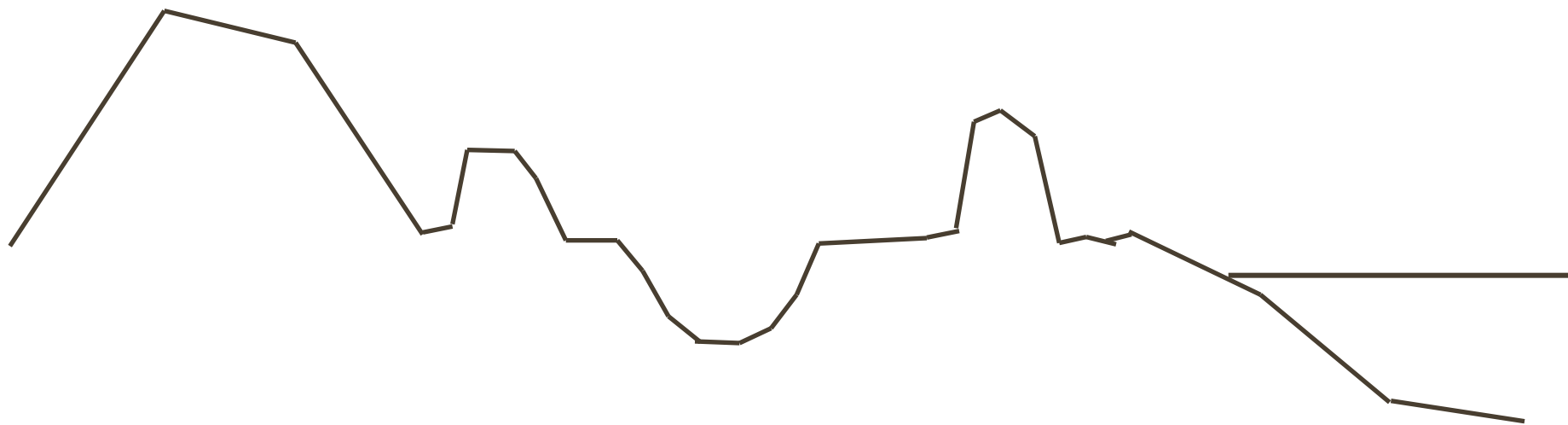




## <手順>

- ①航空測量データ
- ②平面データ作成
- ③
- ④
- ⑤粒子発生

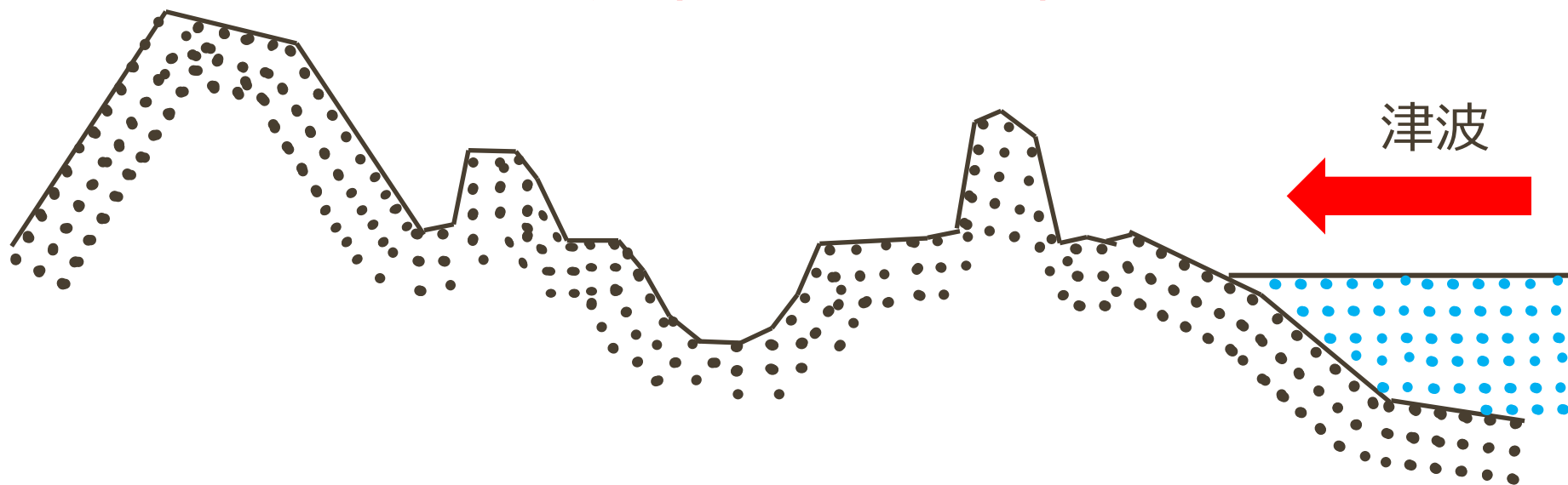
測量データを基に高精度に地形を復元



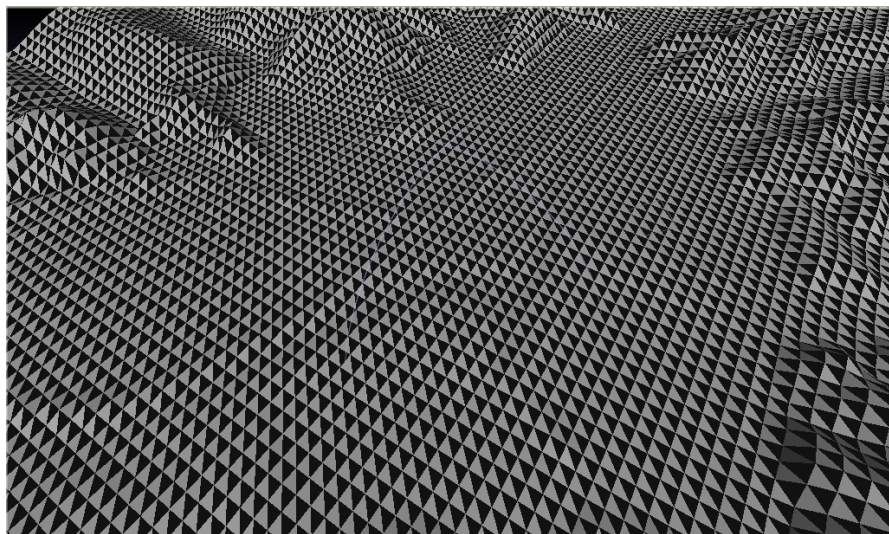
<手順>

- ①航空測量データ
- ②スムージング
- ③粒子発生

解析のための粒子を発生



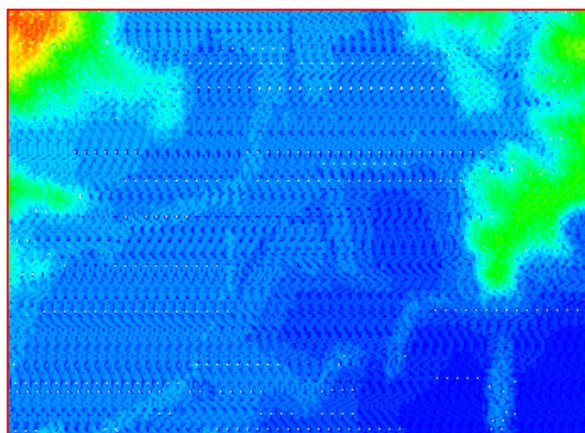
# 地形復元精度の改善



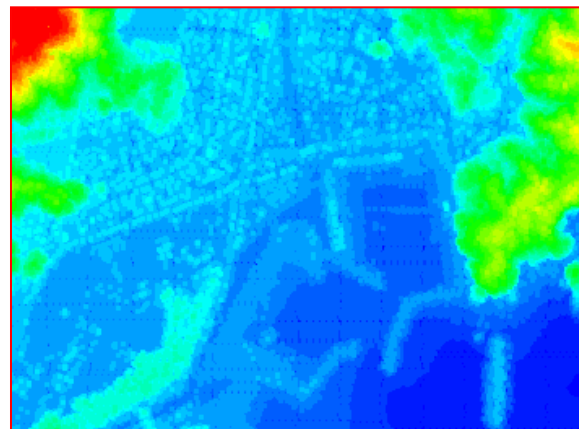
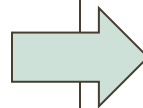
これまでのデータ



改善した地形モデル



10mの解像度



1mの解像度

カラーコンター：標高



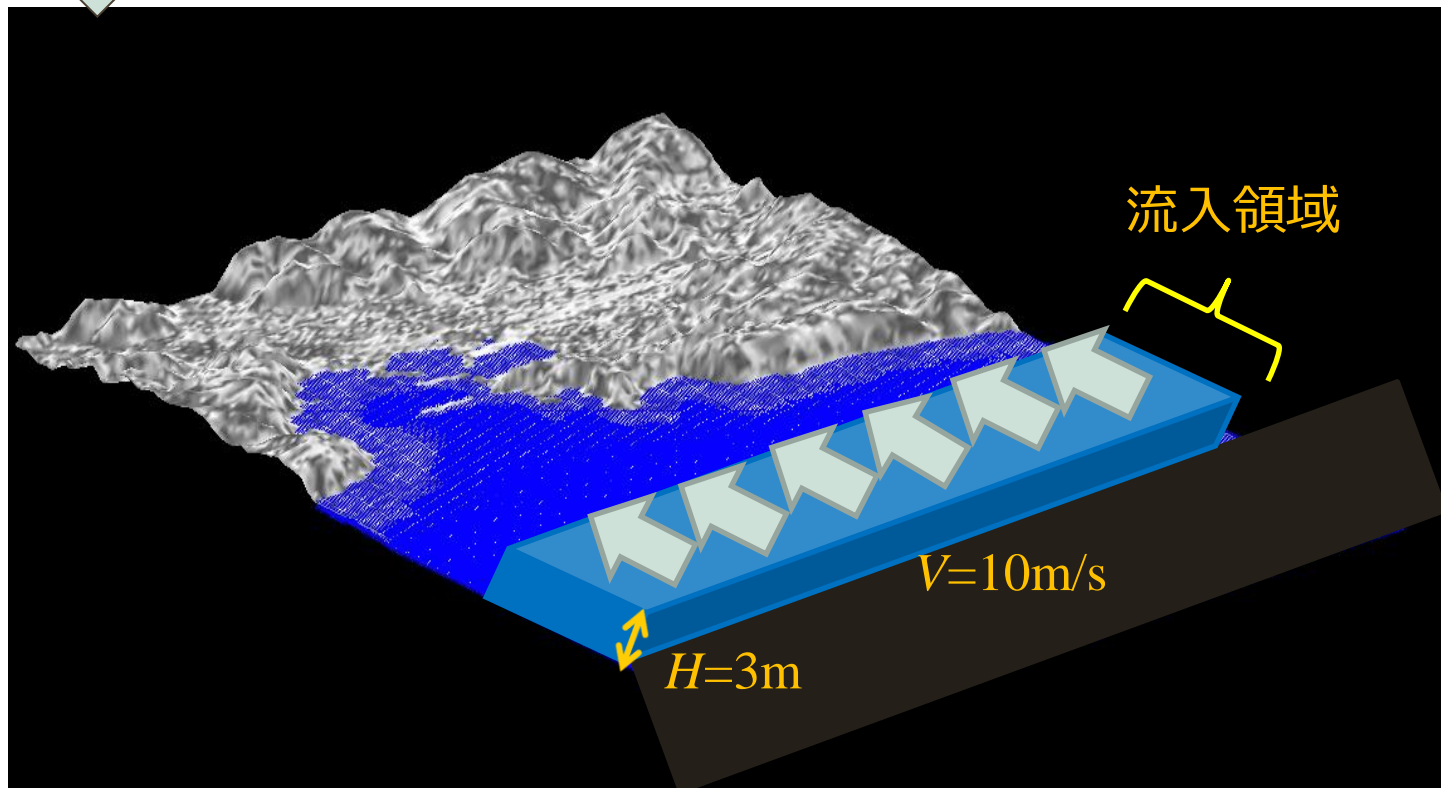
# 本日の話題

1. 粒子法についての紹介
2. 粒子解析結果のレンダリング処理など
3. 津波被害例
4. 津波解析モデルの作成手順
5. **津波遡上解析例**
6. 今後

# 田老町の津波遡上解析例(3D-粒子法)

岩手県・(株)防災技術コンサルタント  
→航空測量データを提供

4m間隔で粒子を発生=1000万粒子



# 津波遡上解析結果？



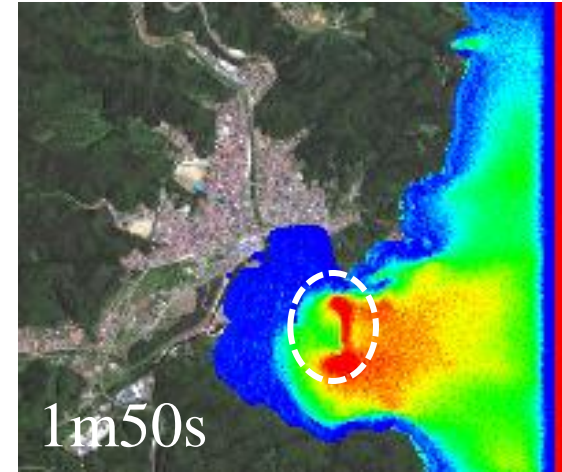
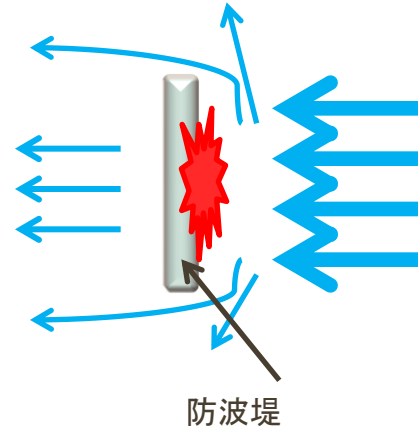
# 津波遡上解析結果！



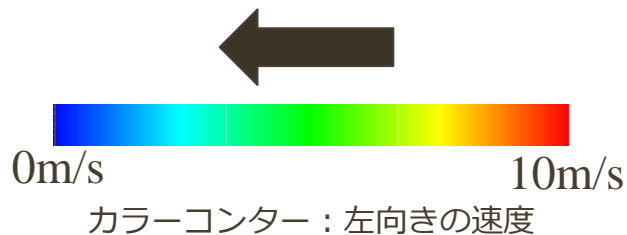
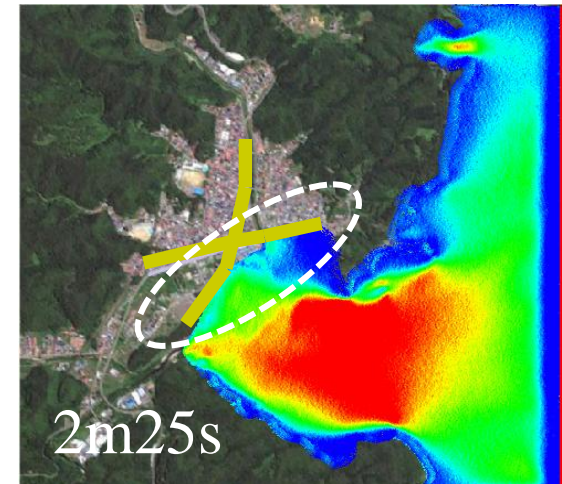
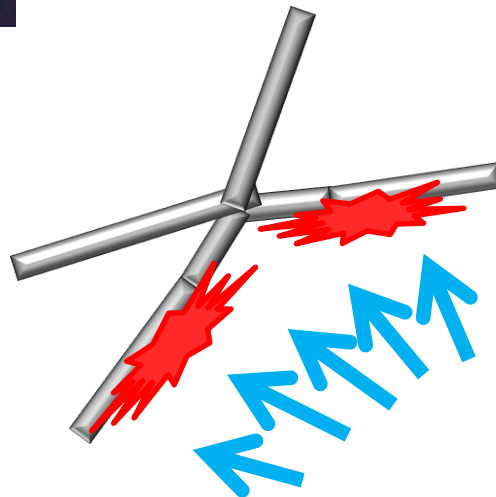
# 解析結果の考察



①防波堤によって、左向き速度が減少している



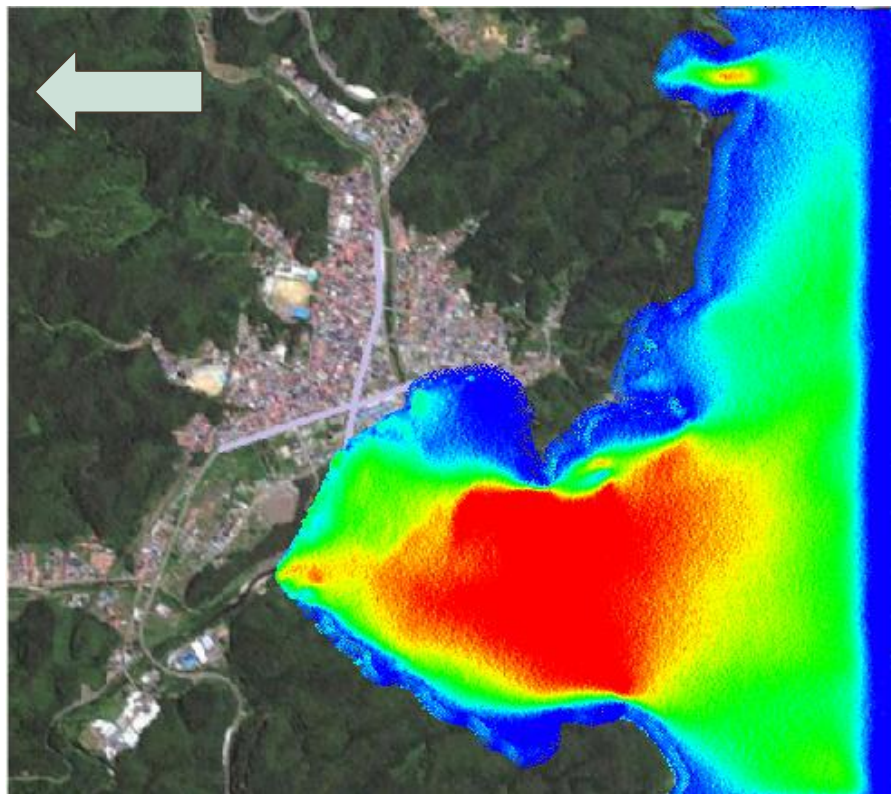
②防波堤により浸水が一時的にせき止められている



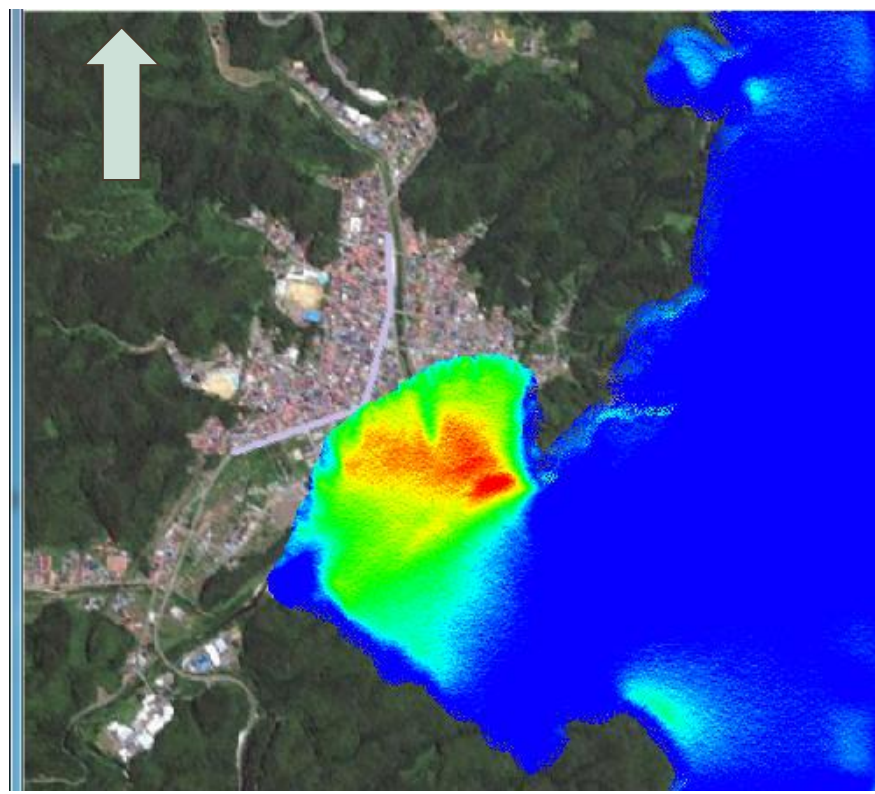


# 北側の第1線堤の破壊の原因

左向きの流速



上向きの流速



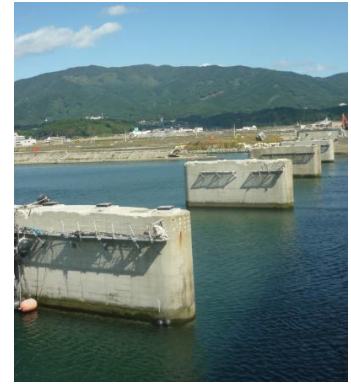
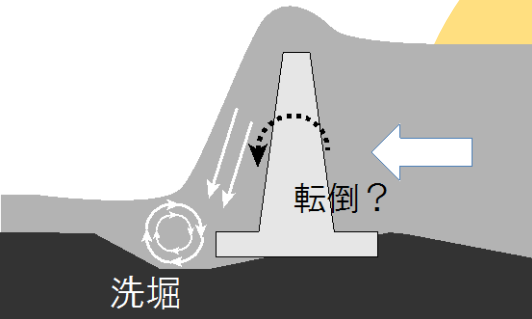
# 本日の話題

1. 粒子法についての紹介
2. 粒子解析結果のレンダリング処理など
3. 津波被害例
4. 津波解析モデルの作成手順
5. 津波遡上解析例
6. 今後

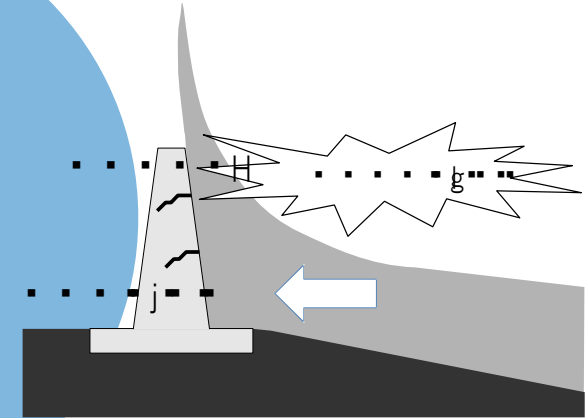
# 防災に向けたマルチフィジックスシミュレーション



洗掘＋液状化による  
構造物の不安定化



流体力を受ける構造

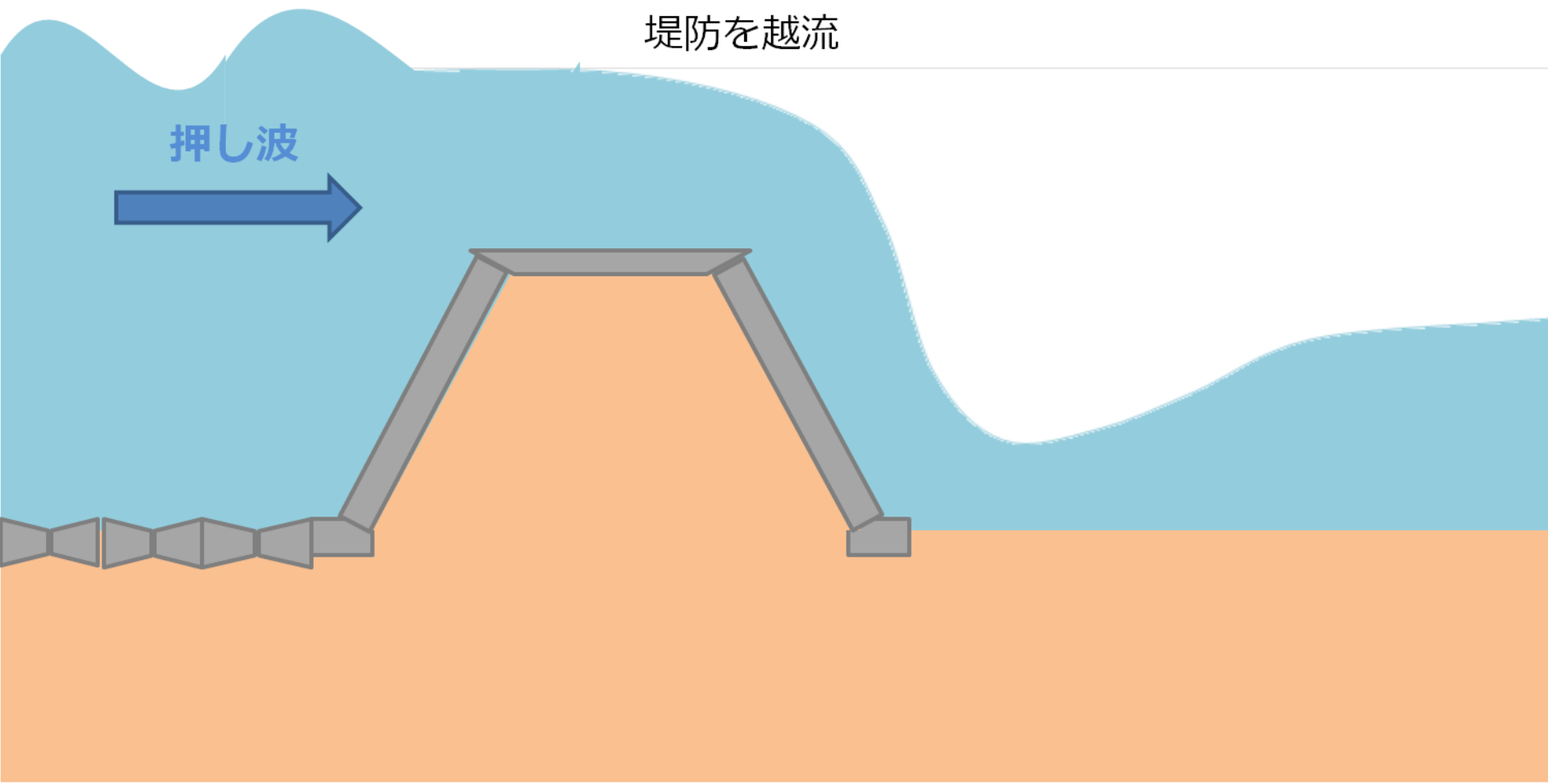
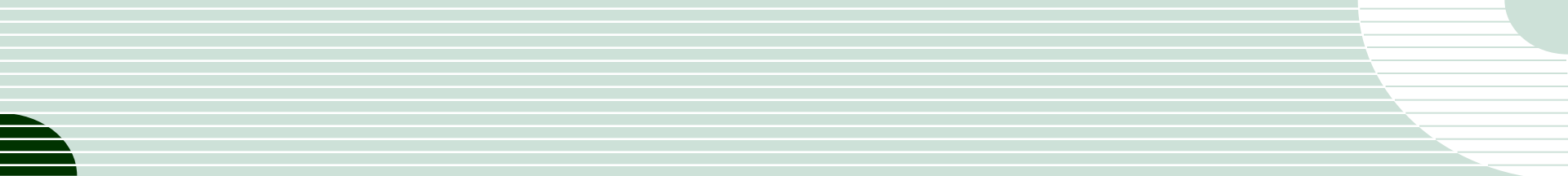


基礎地盤の洗掘

構造

地盤

水理



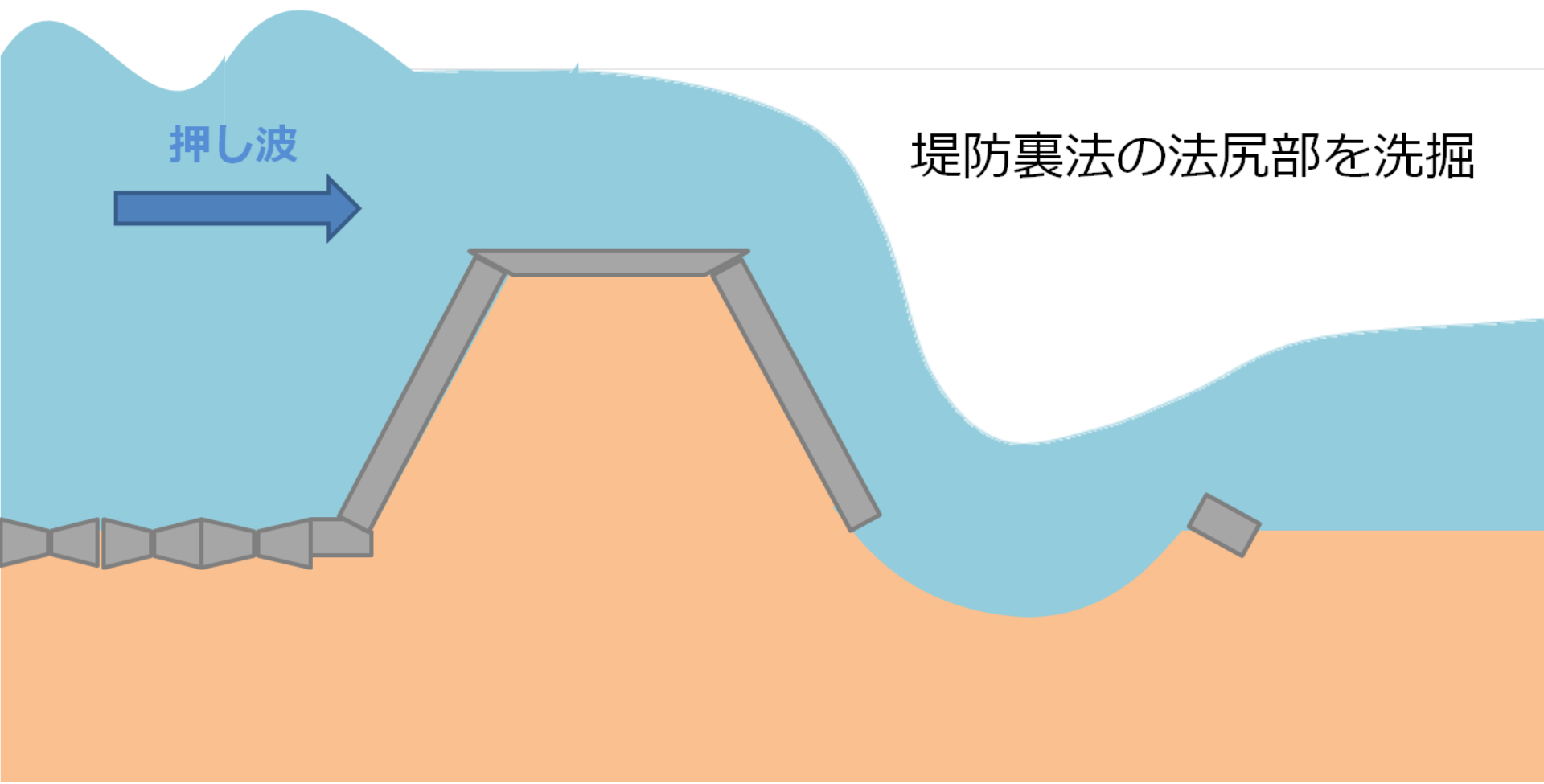
堤防を越流

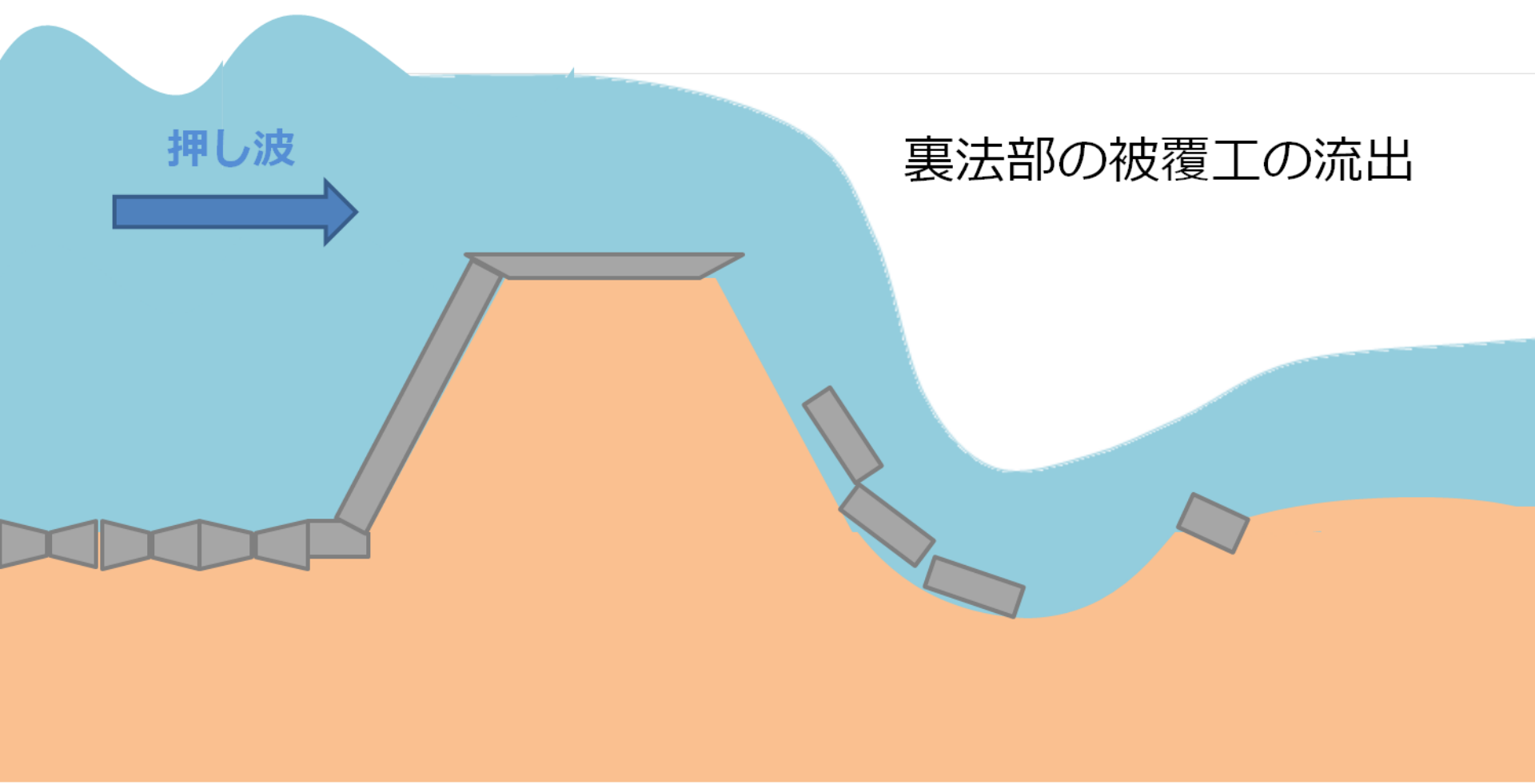
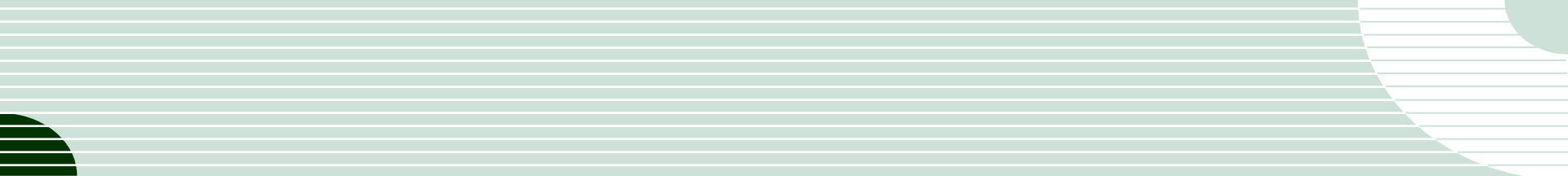
押し波

押し波



堤防裏法の法尻部を洗掘

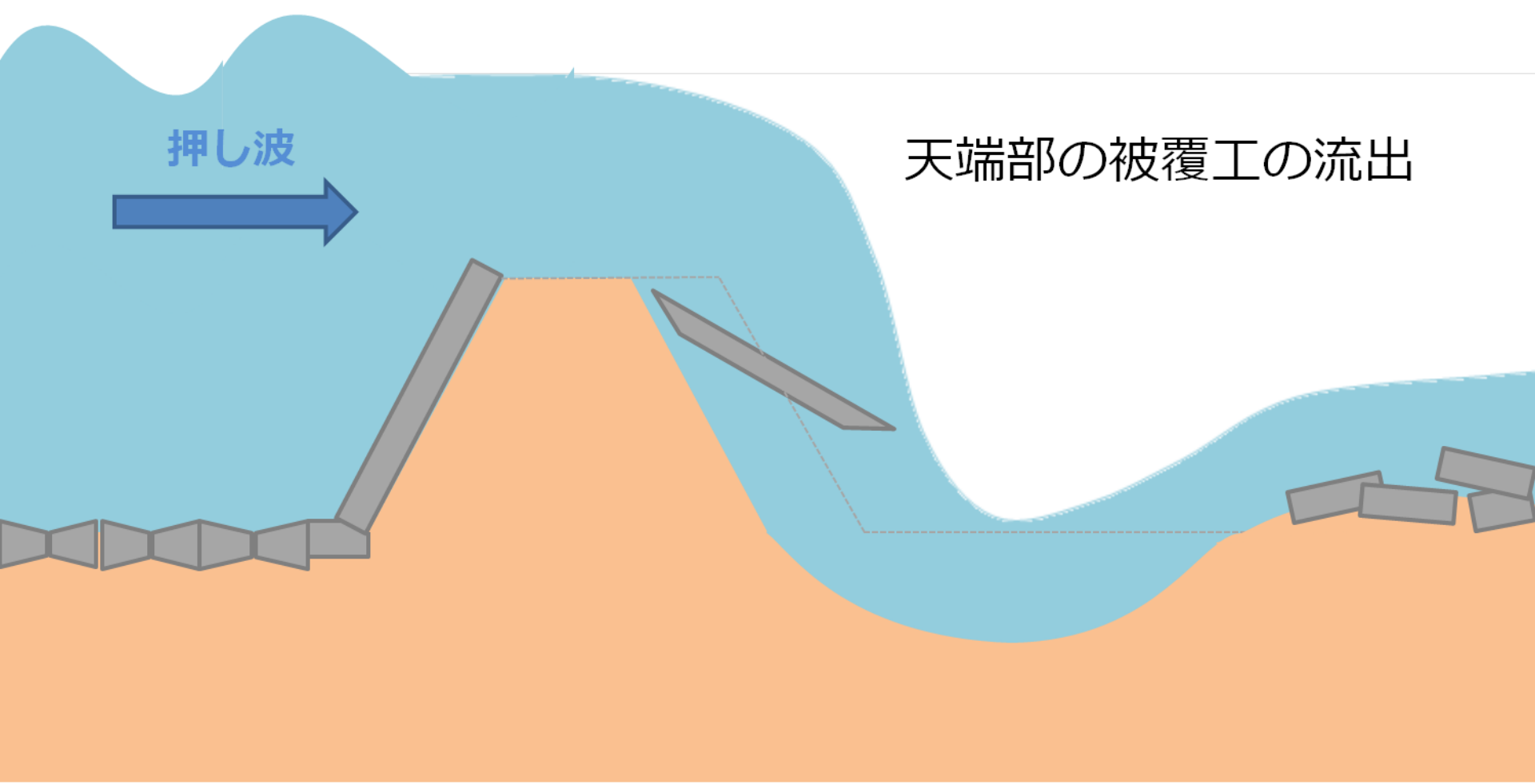
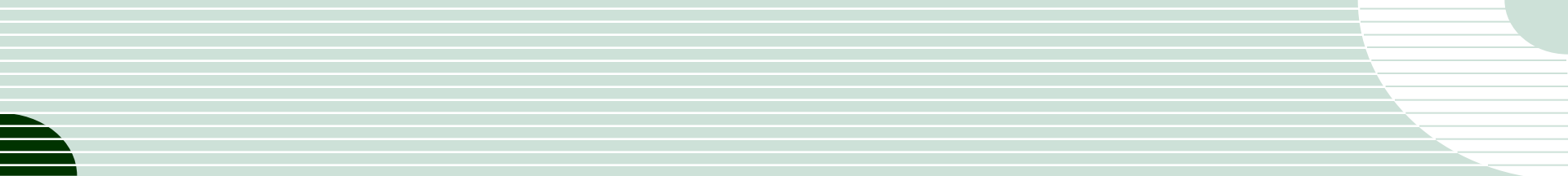




押し波



裏法部の被覆工の流出

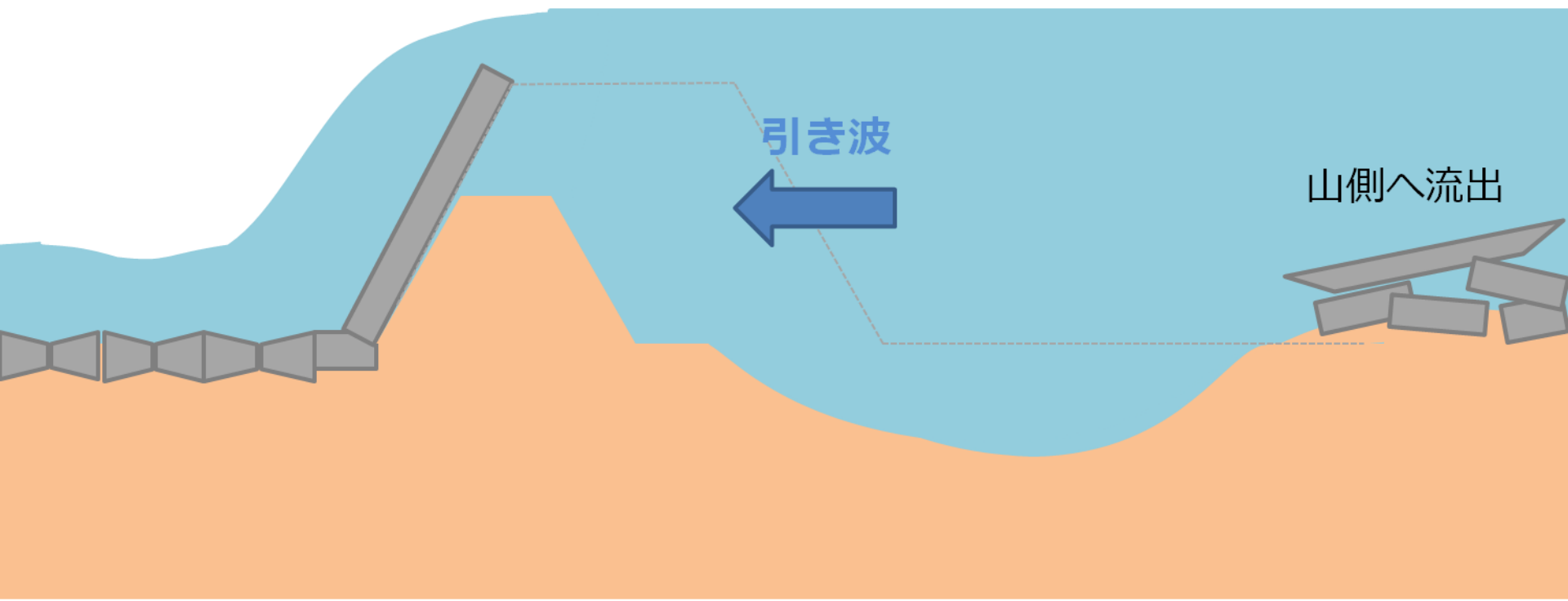
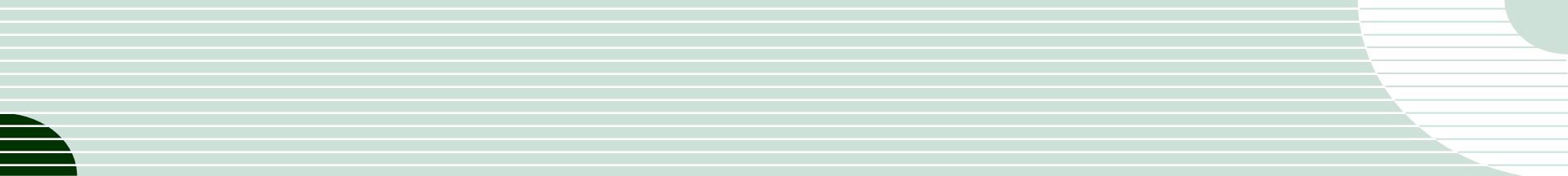


押し波



天端部の被覆工の流出





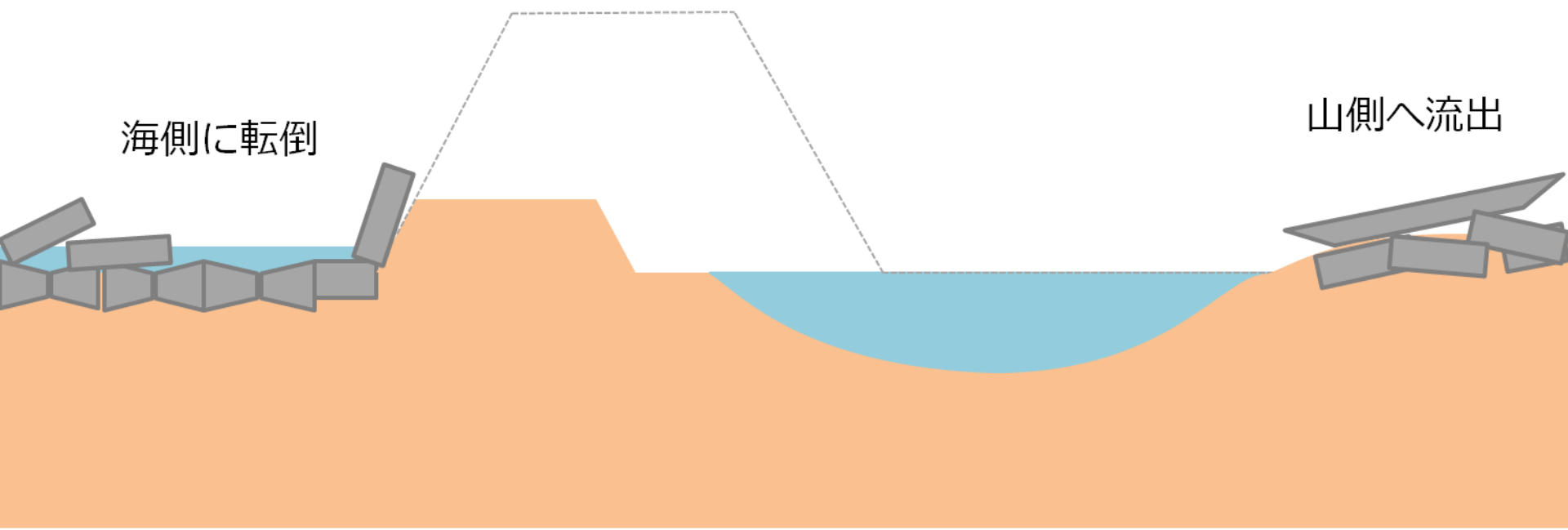
引き波

山側へ流出

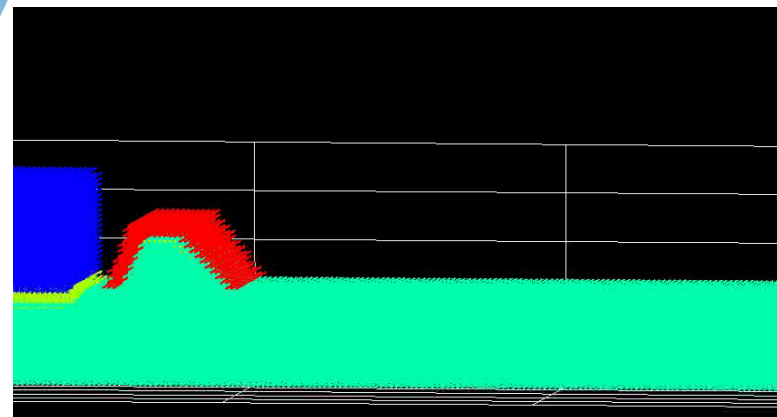
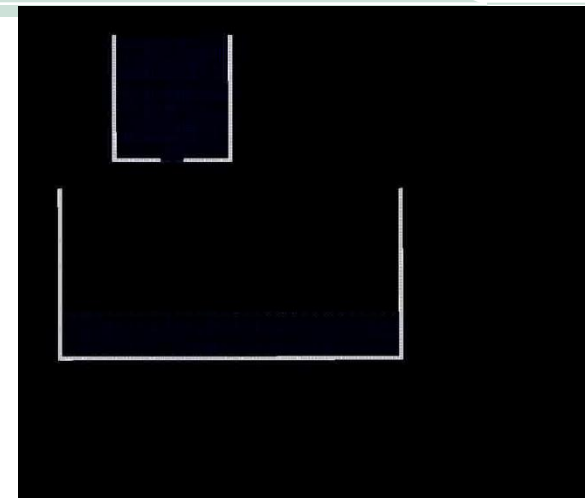
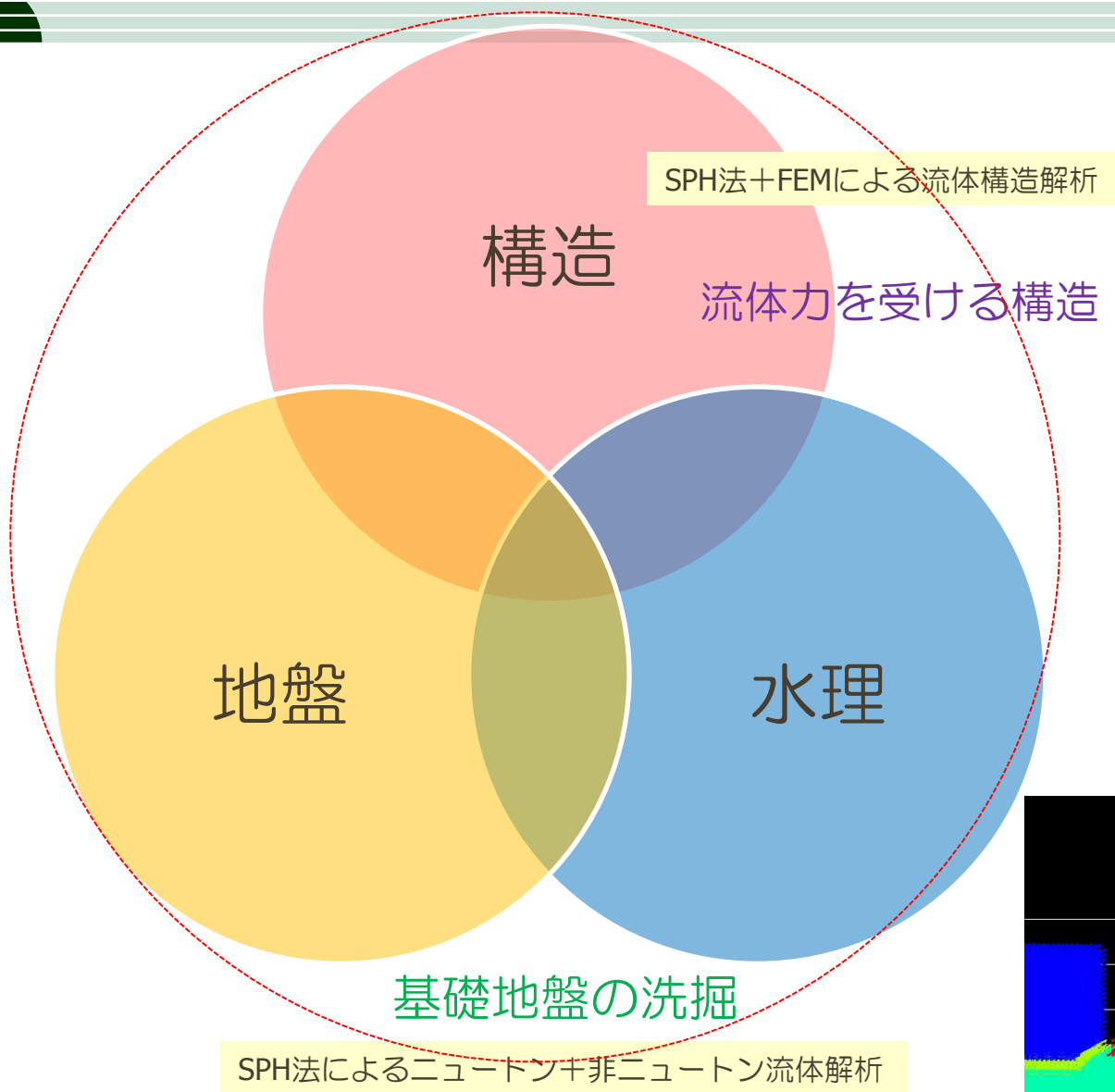


海側に転倒

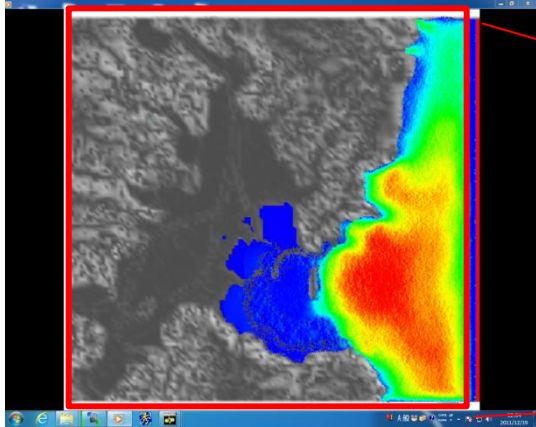
山側へ流出



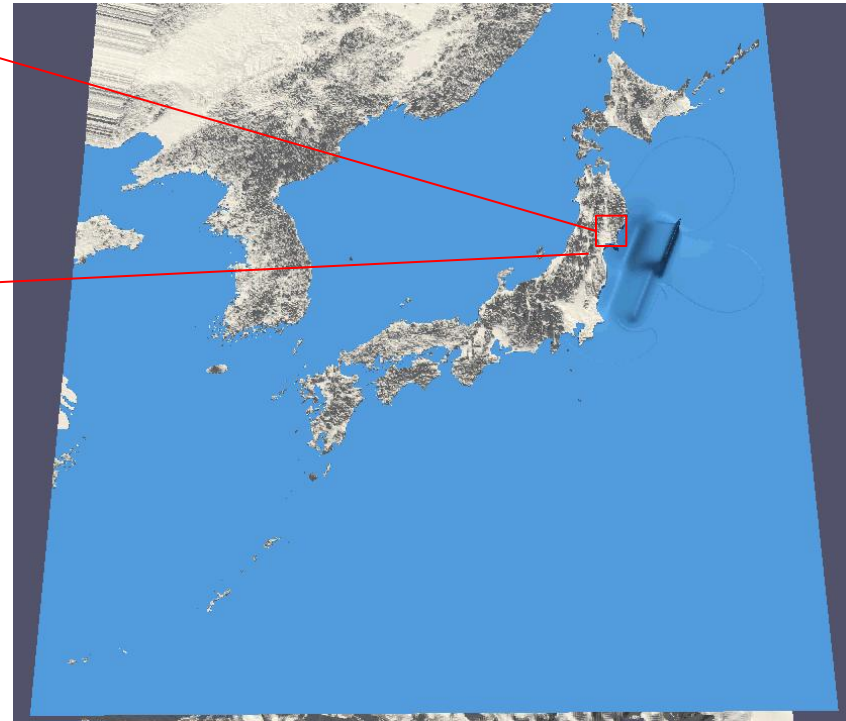
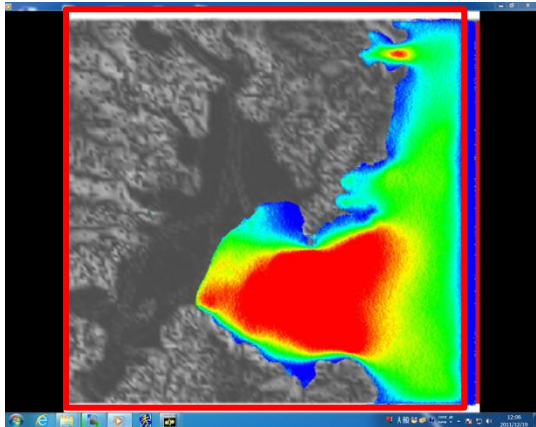
# 防災に向けたマルチフィジックスシミュレーション



# 防災に向けたマルチスケールシミュレーション



初期条件、流入条件



日本工営・桜庭氏より借用

湾内・地上への氾濫シミュレーション  
3次元解析

広域の津波伝搬シミュレーション  
擬似3次元解析  
(実際は平面2次元解析)

＋ハイパフォーマンスコンピューティング