

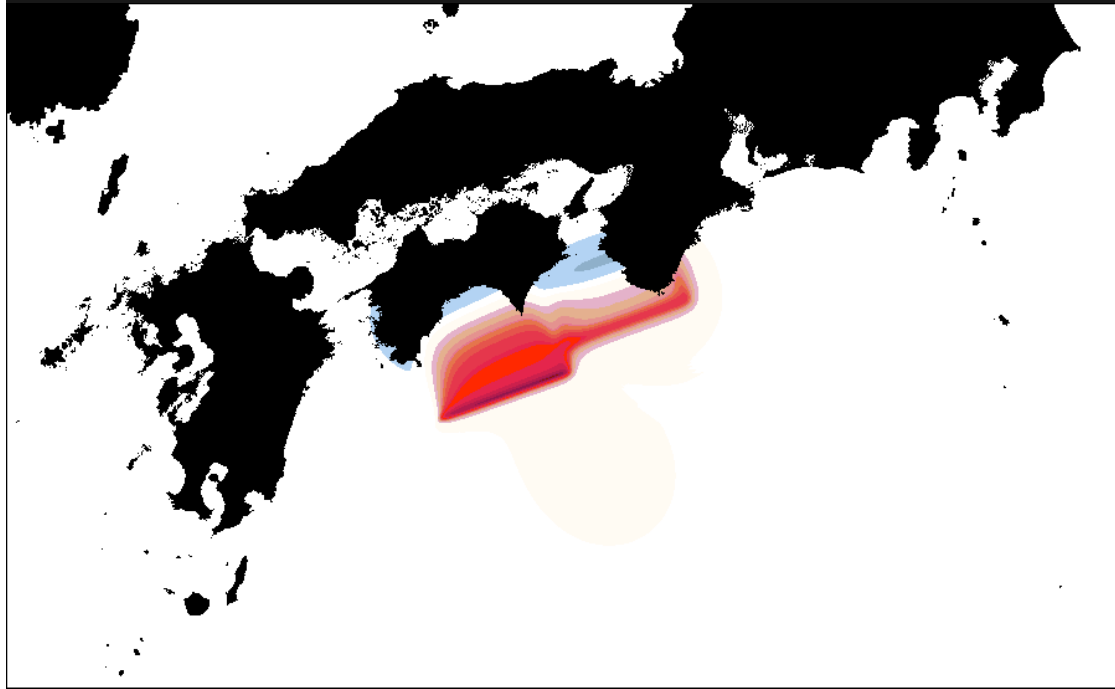
津波の数値シミュレーション

埼玉大学 理工学研究科

原田 賢治

南海地震：和歌山県西部

南海地震



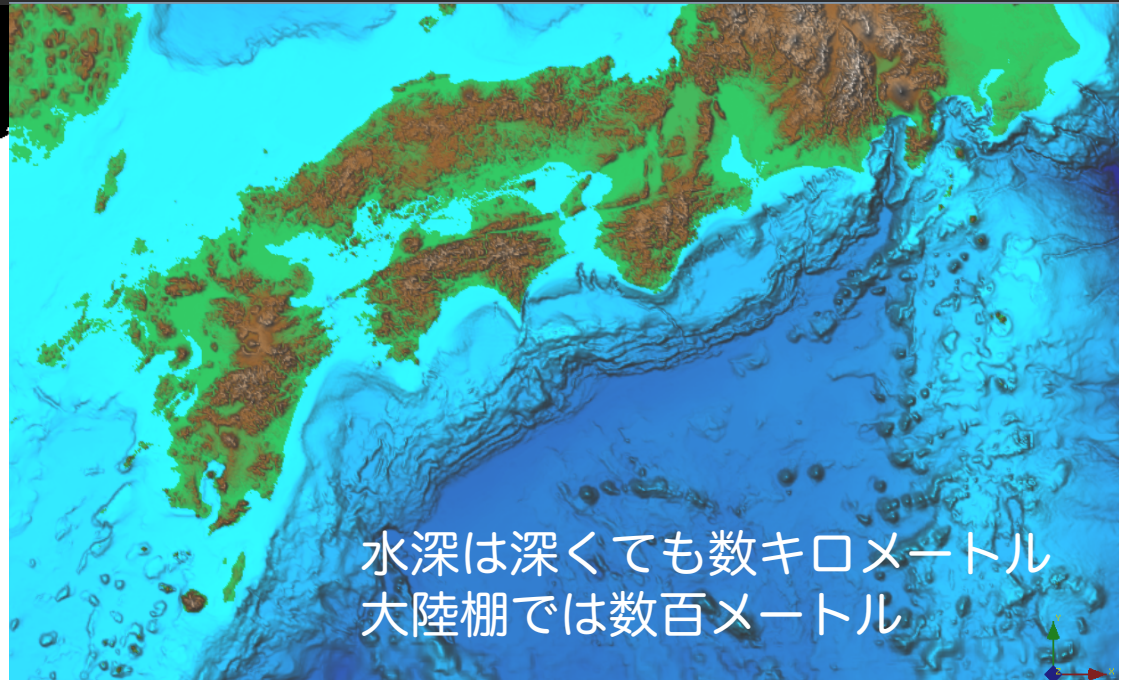
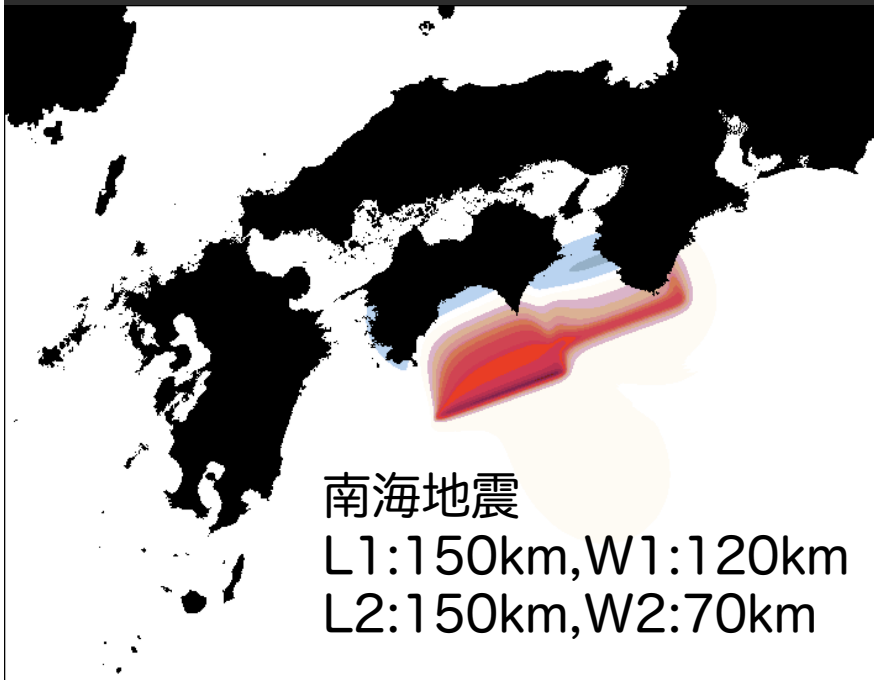
津波の数値シミュレーション



津波の特徴に合わせて
水の運動を数値的に解く

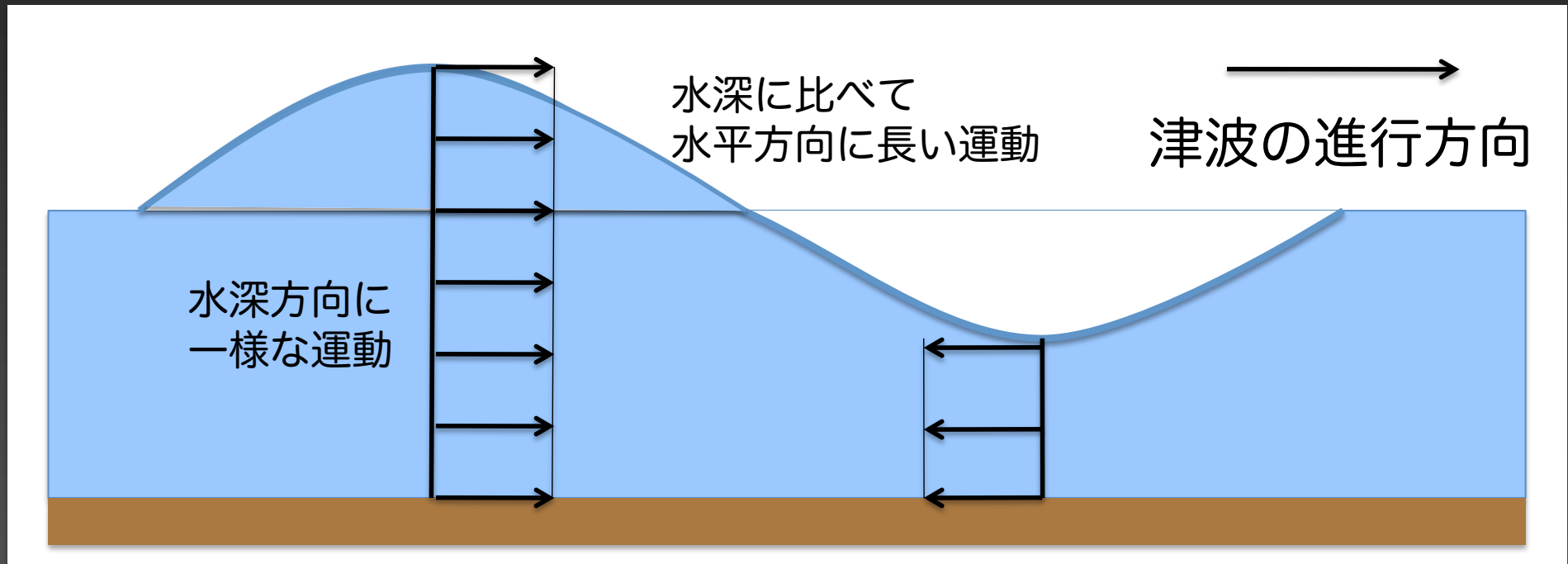
津波の特徴

- 津波は、水平方向に非常に長い
 - 海底の巨大地震により発生
 - 広範囲にわたる海底の地殻変動
 - 津波初期波形は数十～数百キロメートル
 - 海の水深は深くても数キロメートル



津波計算の支配方程式

- (水平方向の運動) \gg (鉛直方向の運動)
 - 深さ方向に変化の無い水平運動
- 浅水方程式
 - 水深方向に一様な運動を仮定した運動方程式
 - 洪水氾濫の運動方程式と考え方は同じ



支配方程式

η : 水位変化
 M : 流量 (x方向)
 N : 流量 (y方向)
 n : Manning'sの粗度係数
 g : 重力加速度

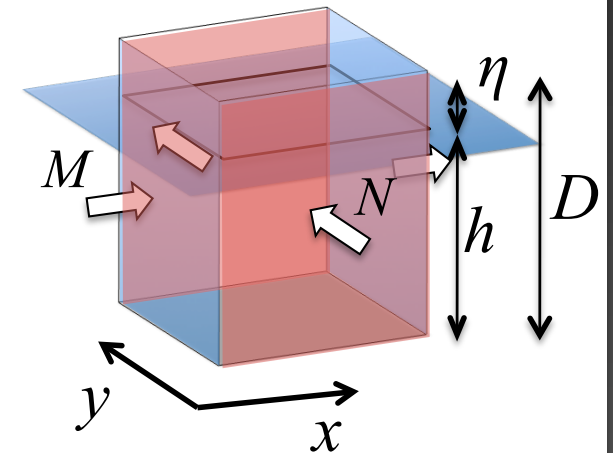
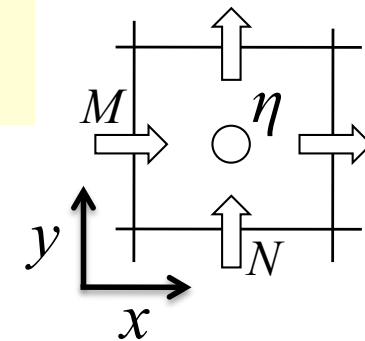
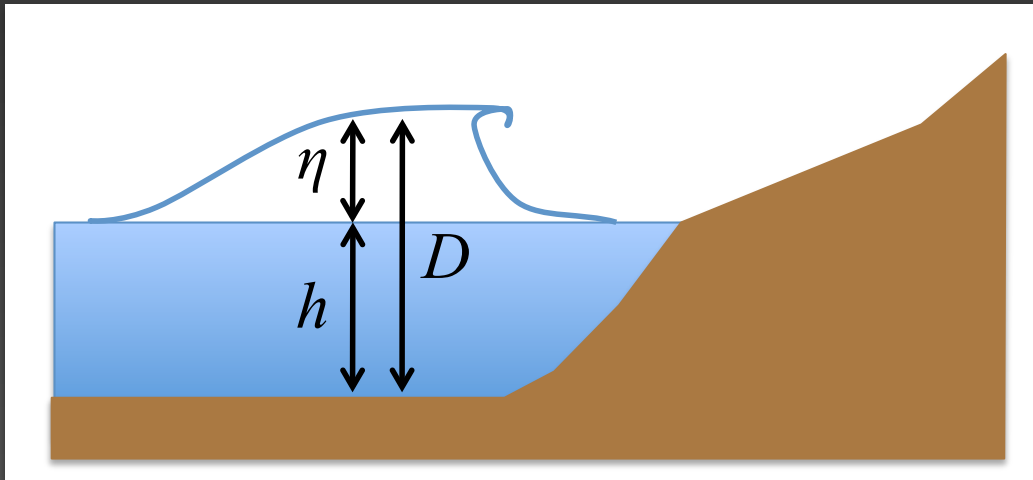
Momentum Equation : 運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{7/3}} = 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2 N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{7/3}} = 0$$

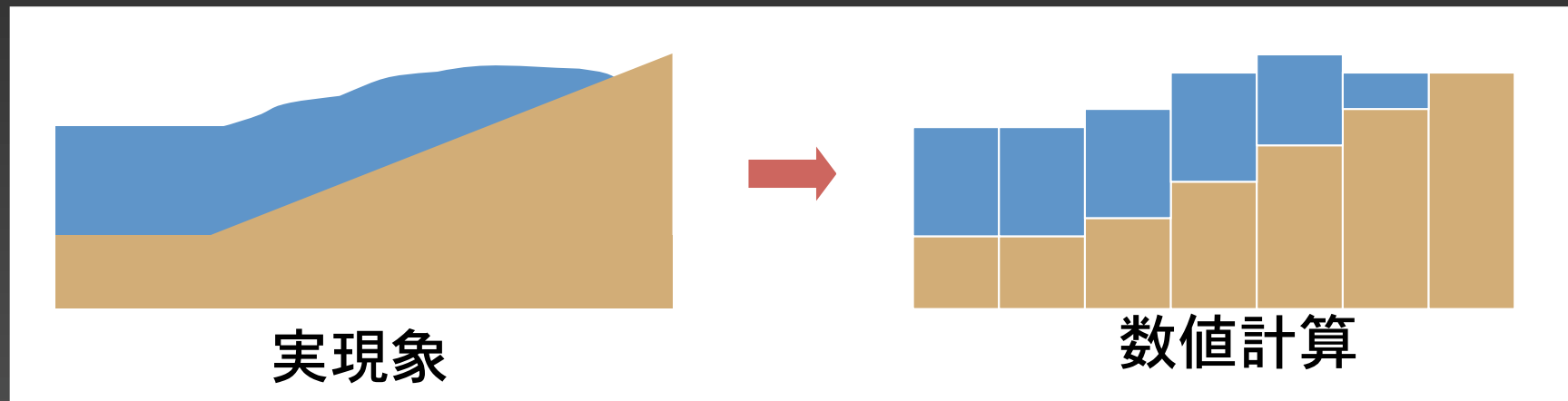
Continuity Equation : 質量保存則

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$



空間の離散化

- 方程式を数値的に解くために
 - 均質な微小空間について考える
 - 空間を分割する（離散化）
 - この空間内では、平均化された均一の値を取る
 - 分割された空間よりも小さな物の影響は空間平均
 - 必要に応じて空間を細かく分割する



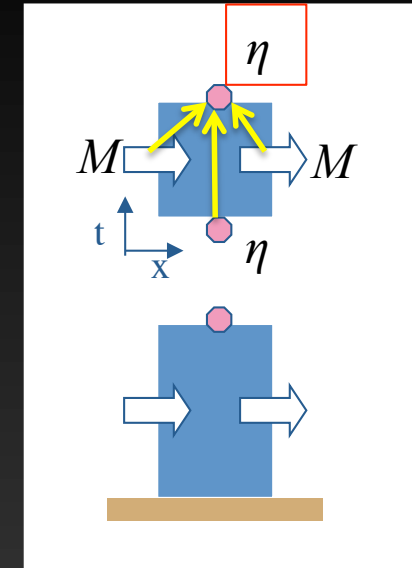
数值解析手法 (差分法)

Continuity Eq. : 質量保存則 (1次元線形)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\eta^{t+\Delta t} - \eta^t}{\Delta t} + \frac{M_{x+\Delta x/2} - M_{x-\Delta x/2}}{\Delta x} + O(\Delta x^2) = 0$$

$$\eta^{t+\Delta t} \cong \eta^t - \frac{\Delta t}{\Delta x} (M_{x+\Delta x/2} - M_{x-\Delta x/2})$$

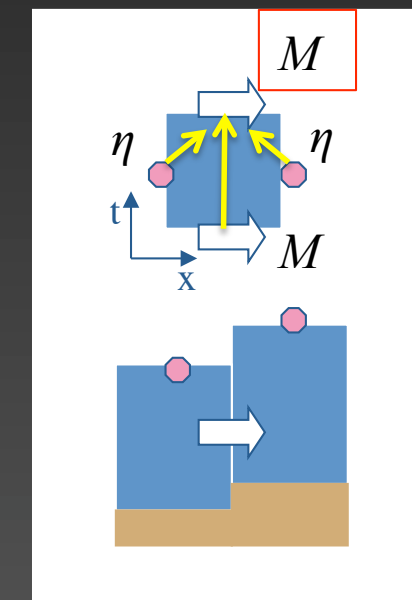


Momentum Eq. : 運動量保存則 (1次元線形)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$$

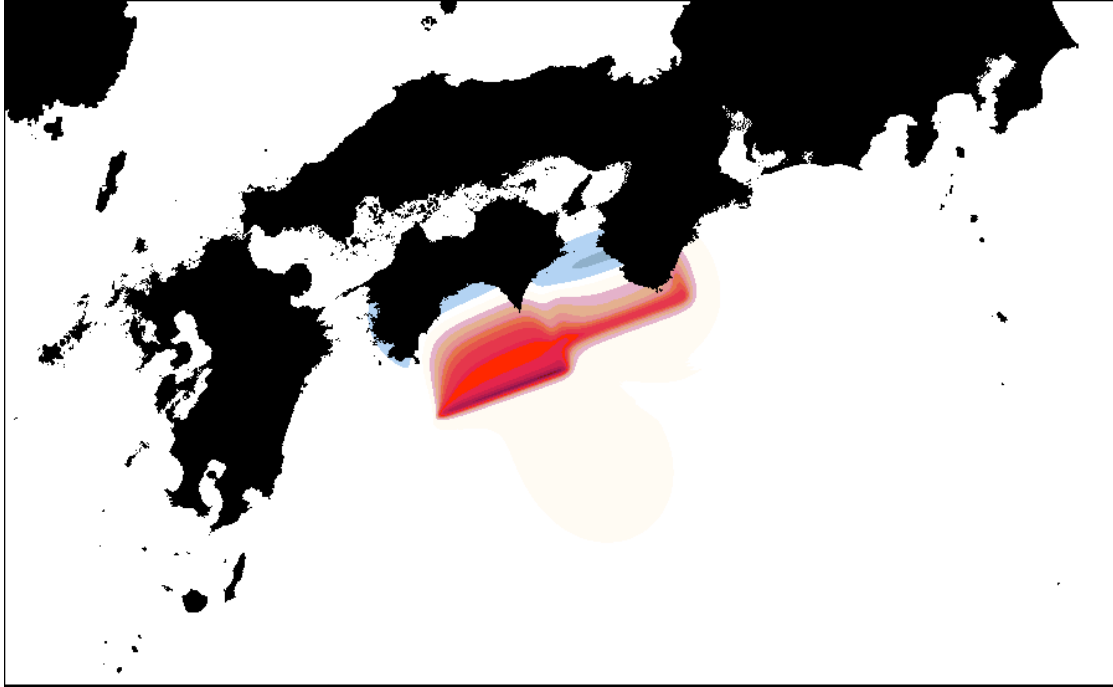
$$\frac{M_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t/2} - M_{x+\Delta x/2}^{t-\Delta t/2}}{\Delta t} + g \frac{D_{x+\Delta x}^t + D_{x-\Delta x}^t}{2} \frac{\eta_{x+\Delta x}^t - \eta_{x-\Delta x}^t}{\Delta x} + O(\Delta x^2) = 0$$

$$M_{x+\Delta x/2}^{t+\Delta t/2} \cong M_{x+\Delta x/2}^{t-\Delta t/2} - \frac{g}{2} (D_{x+\Delta x}^t + D_{x-\Delta x}^t) \frac{\Delta t}{\Delta x} (\eta_{x+\Delta x}^t - \eta_{x-\Delta x}^t)$$



南海地震：和歌山県西部

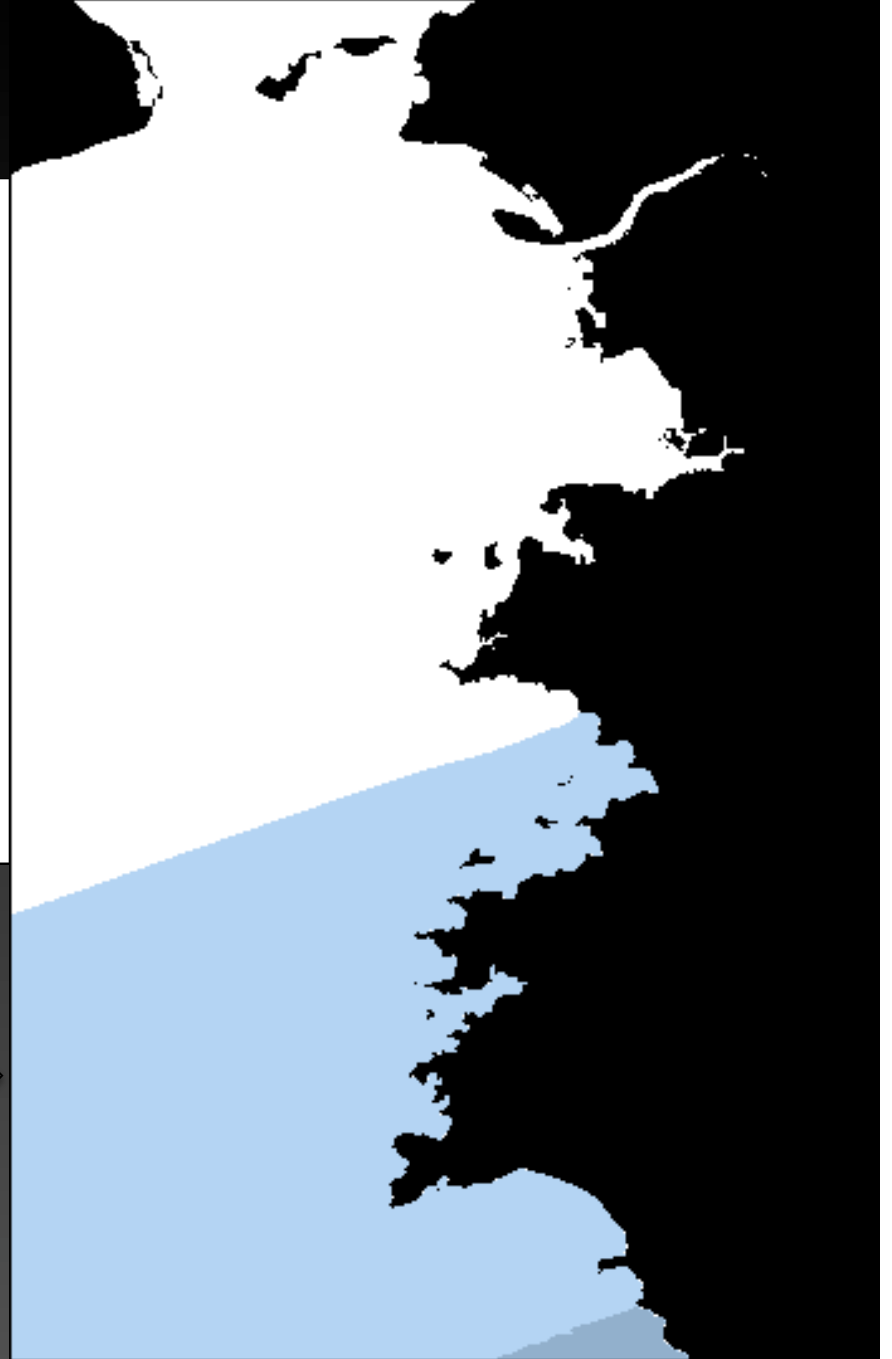
南海地震



計算格子：1350m

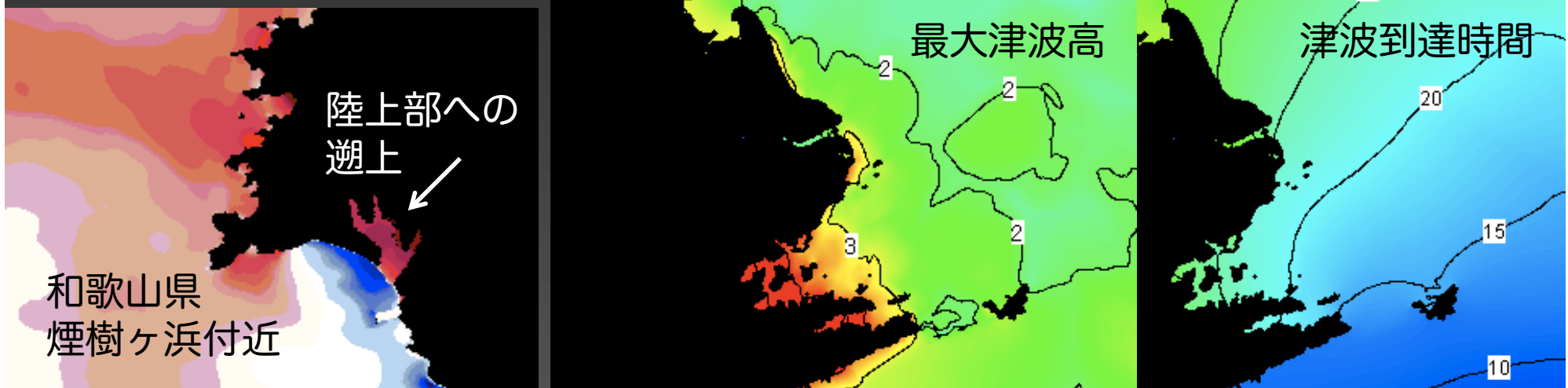


計算格子：50m



津波数値計算の結果出力

- 津波数値計算
 - 時々刻々の水位と流量（流速←流量/水深）を計算
 - 水深方向に流速の変化は無い
- 計算結果（Output）
 - 各時刻ごとの水位、流量（流速）分布
 - 水位、流速の最大値分布 →ハザードマップ
 - 指定したポイントの水位、流量の時系列変化
 - 津波到達時刻の分布



津波数値計算結果の応用

首藤(1992)

- 津波による被害想定
浸水深と被害の関係

– 過去の事例解析

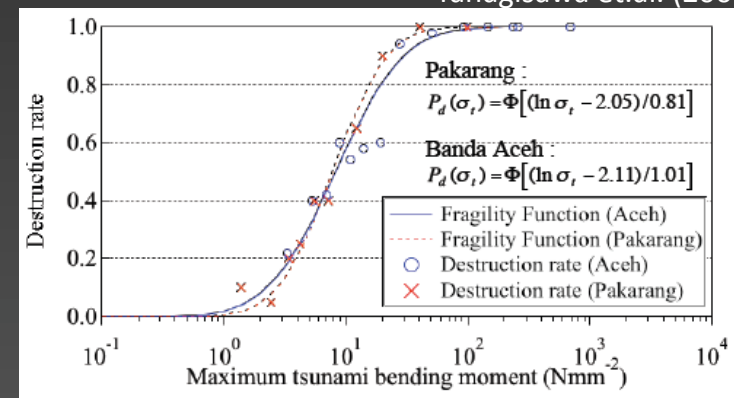
- 建物被害 (人的被害)
- 防潮林被害 など

– 津波被害関数

- 建物被害関数
- マングローブ被害関数

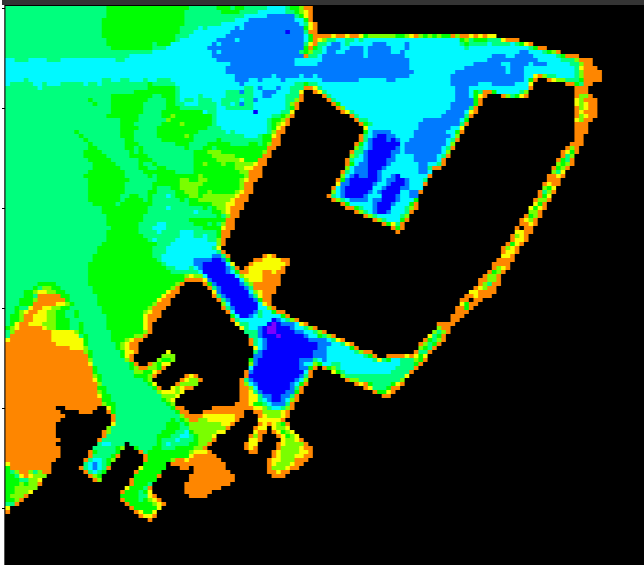
津波強度	0	1	2	3	4	5
津波高(m)	1	2	4	8	16	32
津波形態	緩斜面 急斜面	岸で盛上がる 速い潮汐	沖でも水の壁 第二波砕波 速い	先端に 砕波を伴う ものが増える。	第一波でも 巻き波砕波を 起こす。	
音	前面砕波による連続音 (海鳴り, 暴風雨)			浜での巻き波砕波による大音響 (雷鳴, 遠方では認識されない)		崖に衝突する大音響 (遠雷, 発破, かなり遠くまで聞こえる)
木造家屋	部分的破壊	全面破壊				
石造家屋	持ちこたえる		(資料無し)	全面破壊		
鉄・コン・ビル	持ちこたえる			(資料無し)	全面破壊	
漁船		被害発生	被害率50%	被害率100%		
防潮林被害 防潮林効果	被害軽微 津波軽減	漂流物阻止	部分的被害 漂流物阻止	全面的被害 無効果		
養殖筏	被害発生					
沿岸集落		被害発生	被害率50%	被害率100%		
打上高(m)		2	4	8	16	32

Yanagisawa et.al. (2008)



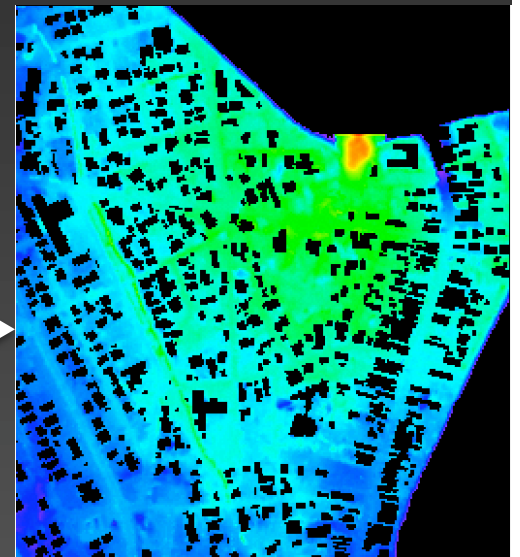
数値計算の空間解像度について

- 計算に用いる空間データ
 - 平面2次元の地形（水深）データ
 - 中央防災会議：50m格子の計算を実施
 - 必要に応じて格子サイズを細かくして検討
- 地形データモデル（DEM）
 - 全球モデル → ETOPO2: 2min, GEBCO: 1min
 - ハザードマップ → 50m格子以下、場所によって異なる。
 - レーザープロファイラ
 - 2m間隔のDEMデータ、大型構造物は地形として考慮できる。



← 計算格子50m
大阪港の人工島周辺
での水路などが考慮

計算格子2m →
レーザープロファイラの
データよりDEMを作成
建物は地形として考慮



陸上部における障害物の影響

陸上の建物や森林などのさまざまな障害物の影響をどのように津波計算に取り込むか？

1. 粗度指定モデル

- 土地利用状況に応じた粗度係数を固定指定
- 水没しない抵抗物でも、浸水深で変化なし
- 多数の抵抗物を含む、比較的大きな計算格子サイズ

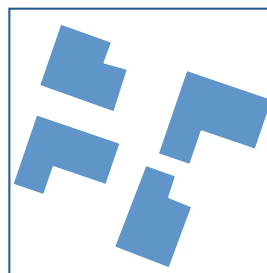
2. 抵抗力モデル

- 抵抗物ごとの抵抗力モデルが必要
- 浸水深や抵抗物の形状により抵抗力が変化
- 抵抗物の分布を考慮できる格子サイズ

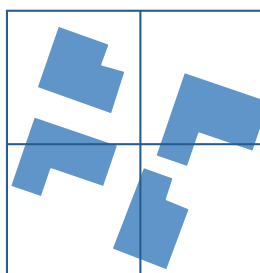
3. 地形モデル

- 大型施設などの抵抗物は、流体通過ができない地盤高を与える
- 高解像度の詳細な地形データが必要
- 抵抗物よりも小さな、詳細な格子サイズ

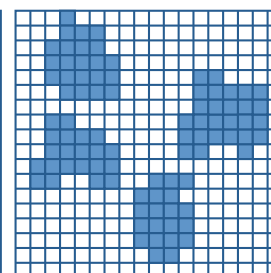
粗度指定モデル



抵抗モデル



地形モデル



土地利用状況に基づいた粗度係数, 小谷ら(1998)

	基準	粗度係数
高密度居住区	家屋占有率50-80%	0.080
中密度居住区	家屋占有率20-50%	0.060
低密度居住区	家屋占有率10-20%	0.040
森林域	-	0.030
田畑域	-	0.020
海域・河川域	-	0.025

抵抗力モデル

非定常な流体運動中にある物体に働く**流体抵抗力**

抵抗力 慣性力

$$F = F_D + F_M = \frac{\rho}{2} C_D A u^2 + \rho C_M V \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{Morison式}$$

ρ : 流体の密度

u : 流速

C_D : 抵抗力係数、 A : 投影面積

C_M : 慣性力係数、 V : 物体の水中体積

➡ 物体の抵抗力を津波の運動方程式に抵抗として導入することで影響を考慮

津波の周期は
数十分から1時間
津波の先端部分を
のぞけば、流体は
準定常運動（加速度小）

➡ 流体抵抗は抵抗力が
主要な抵抗力となる

➡ 津波の流体運動の抵抗として考慮

➡ 樹木へ与える衝撃的な流体力は津波先端部の慣性力による

➡ 津波による、樹木破壊への影響

樹木の抵抗モデル

$$F_D = \frac{\rho}{2} C_D A u^2$$



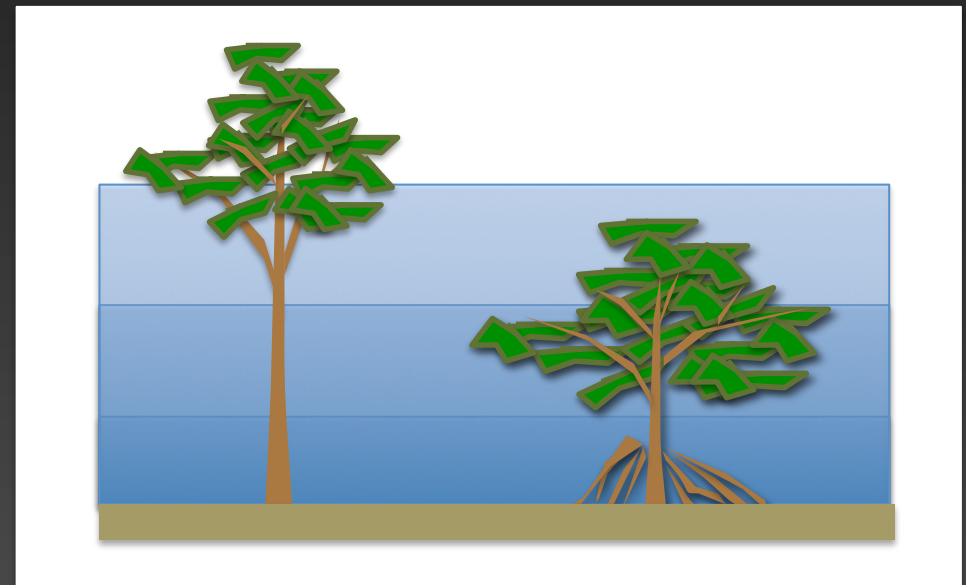
樹木形状や浸水深により
投影面積： A 、抗力係数： C_D
は変化し、抵抗力が変動する

- 樹種ごとに鉛直方向の枝葉、幹、根の構造や形状について、樹木形状モデルにより考慮

- 代表直径を規準とした投影面積、抗力係数の鉛直変化

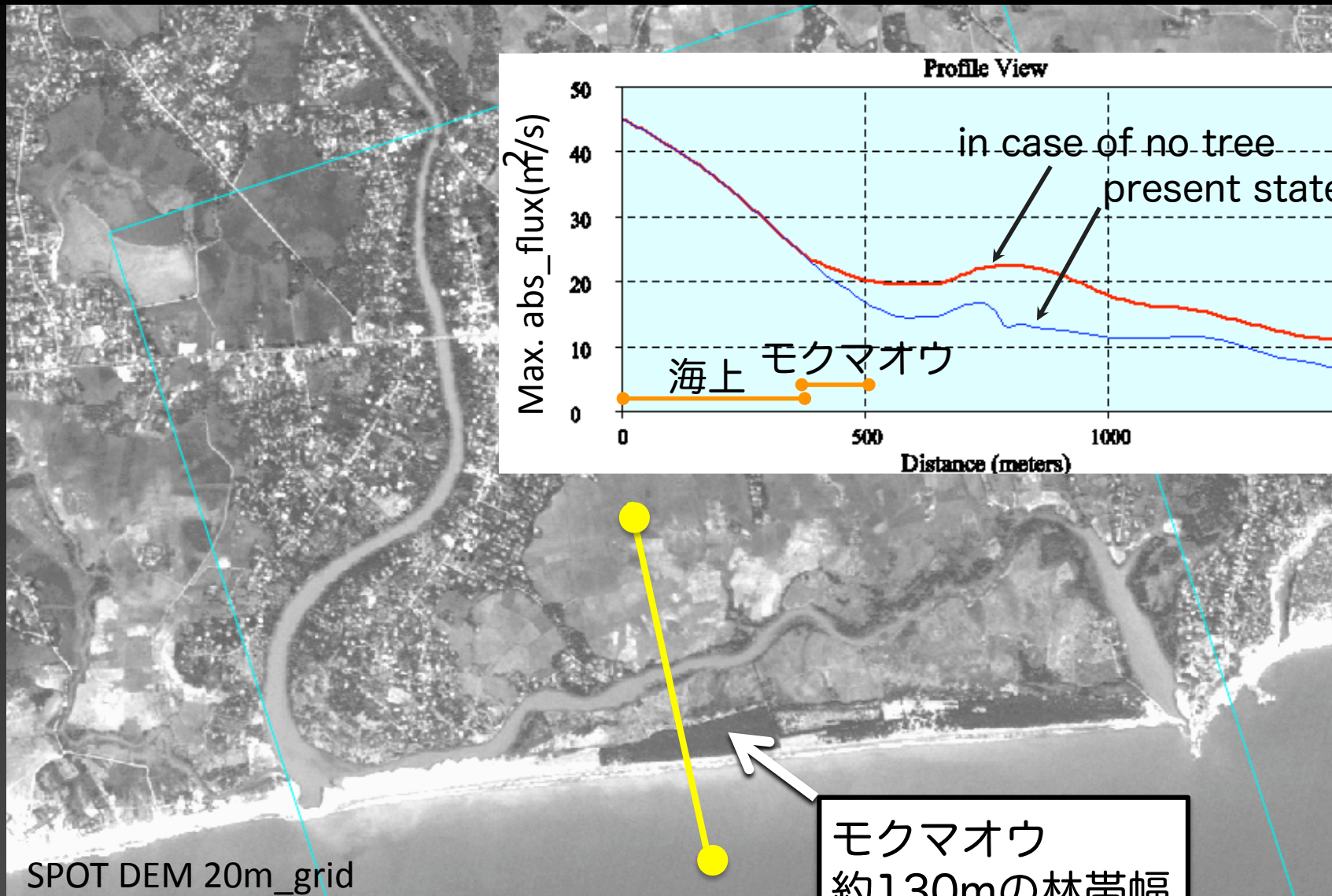
- 一般的な津波数値計算手法は水深積分型の方程式

- 鉛直方向に平均化された計算
 - 水平流速の鉛直分布が十分考慮されていない



数値計算による海岸林の効果の検討例

現状の土地被覆と樹木が無い場合のFluxの比較



SPOT DEM 20m_grid

モクマオウ
約130mの林帯幅

現状の津波数値解析モデルの課題

- 水深積分モデル
 - 水平流速の鉛直分布を十分に考慮できない
 - 樹木の鉛直方向の形状の変化による流れの変化を十分に考慮できていない
- 樹木の抵抗
 - 樹木形状についてのデータ蓄積が不十分
 - 樹木の抵抗係数についての知見が不十分
 - 樹木間の相互影響を十分に考慮できていない
 - 樹木の空間分布の情報収集について