2013.12.2 地震調査研究推進本部政策委員会調査観測計画部会資料

「リアルタイム津波波源推定に関する研究」の概要

HPCI戦略プログラム 分野3防災・減災に資する地球変動予測
地震・津波の予測精度高度化に関する研究
「津波の予測精度の高度化に関する研究」グループ

目次

1 背景
1-1 沖合で津波を観測する様々な施設いろいろ
1-2 沖合の津波の観測を用いた様々な津波予測方法の研究
1-3 実装済・実用間近の予測方法の例

2 HPCIプログラムでの研究成果紹介
2-1 波源推定に用いる理論津波波形DB制作と高度化（気象研）
2-2 tFISHプロトタイプシステムを用いた予測実験の例（気象研）
2-3 京コンピュータ向けの津波数値計算コードの開発（JAMSTEC）
2-4 高解像度の浸水計算の例（JAMSTEC）

1 背景

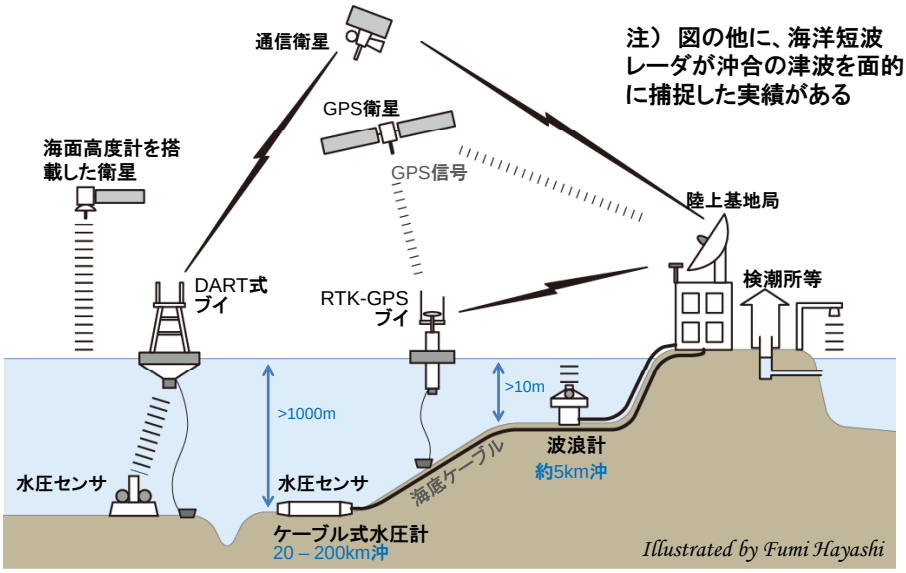
1-1 沖合で津波を観測する様々な施設いろいろ

1-2 沖合の津波の観測を用いた様々な津波予測方法の研究

1-3 実装済・実用間近の予測方法の例

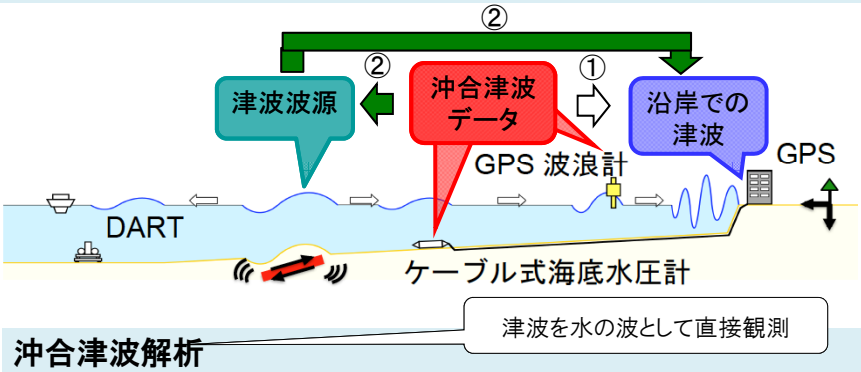
- 沖合からの津波増幅率を用いた海岸の津波の高さの予測（気象研・JAMSTEC）
- tFISHプロトタイプシステムの概要と予測実験例（気象研）
- GPS波浪計からの波源推定とGPGPUコンピューティングによるリアルタイム浸水域予測の概要（港空研）

1-1 沖合で津波を観測する様々な施設



注） 図の他に、海洋短波レーダが沖合の津波を面的に捕捉した実績がある

1-2 沖合の津波の観測を用いる様々な津波予測研究



沖合津波解析

① **沖合と沿岸の津波高の関係式** (Baba et al., 2004; **林,** 2010; Baba et al., 2013)

② **津波波形逆解析** (Titov et al., 2005; **安田・他,** 2007; Tsushima et al., 2009; **辰巳・富田,** 2010; Takagawa & Tomita, 2012)

① **波動場の実況把握＆データ同化** (**前田・他,** 2012, **地震学会秋季大会**)

②' **GPSとの統合解析** (**対馬**, 2009; **対馬・他,** 2012, **地震学会秋季大会**)

赤字は当グループ所属研究者による研究成果

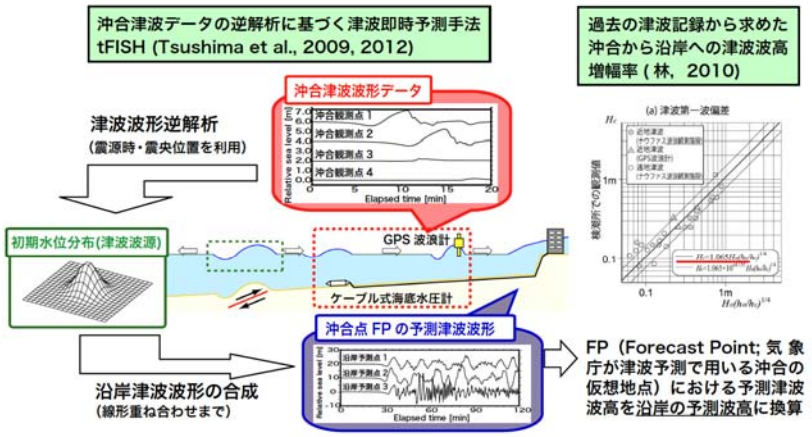
1-3 実装済or実装計画がある予測方法の例

- **沖合からの津波増幅率を用いた海岸の津波の高さの予測（気象研**, JAMSTEC）
- tFISHプロトタイプシステムの概要と予測実験例（気象研）
- GPS波浪計からの波源推定とGPGPUコンピューティングによるリアルタイム浸水域予測の概要（港空研）

沖合津波観測データ同化システムの開発

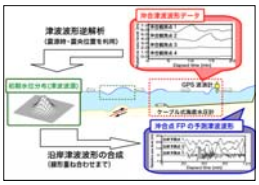
東北沖地震までに気象研で開発していた津波即時予測手法
→ 実用化に近づけるためにシステム化(試作版)

システムに組み込んだ津波即時予測手法



tFISH解析の主要部：波形逆解析と予測波形合成

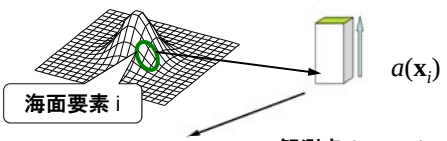
tFISH:
線形解析に
基づく



津波の線形モデル化

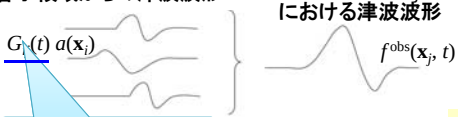
海面を小領域に分割

上下変位



各小領域からの津波波形

観測点 ($\mathbf{x} = \mathbf{x}_j$) における津波波形



グリーン関数
(単位変位への応答)

$$f^{obs}(\mathbf{x}_j;t)=\sum_i G_{ij}(t)a(\mathbf{x}_i)$$

波形逆解析

グリーン関数

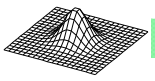
初期水位
(未知量)

沖合の観測
津波波形

$$\begin{pmatrix} \mathbf{f}^{obs}(t) \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{G}(t) \\ \alpha\mathbf{S} \\ \beta\mathbf{D} \end{pmatrix} \mathbf{a}$$

空間的に滑らか

震央付近の初期水位が大きい



初期水位分布 $\hat{\mathbf{a}}$ が求まる

予測波形合成

$$f^{pred}(\mathbf{x}_j;t)=\sum_i G_{ij}(t)\hat{a}(\mathbf{x}_i)$$

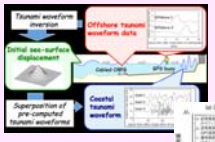
対象点の
予測津波波形

グリーン関数

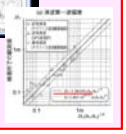
沖合津波観測データ同化システムの構成

沖合津波観測データ同化ソフトウェア

リアルタイム津波予測解析
- 観測波形からの津波成分の抽出
- 津波波形逆解析
- 予測波形合成
- 予測結果の画面表示



tFISH



経験的な津波高増幅率

理論津波波形データベース（DB）

津波波形逆解析及び予測波形合成の実施に必要な大量のグリーン関数群

千島・日本海溝沿い

南海トラフ沿い

処理装置

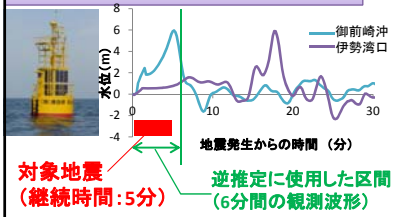
サーバ群
- リアルタイム津波予測解析の制御
- 理論津波波形DBの管理

大容量外部記憶装置
- 理論津波波形DBを収録

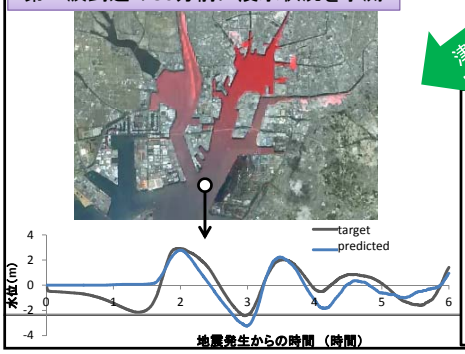
リアルタイム津波ハザードマップシステム

PARI

GPS波浪計による沖合での津波観測



第一波到達の80分前に浸水状況を予測



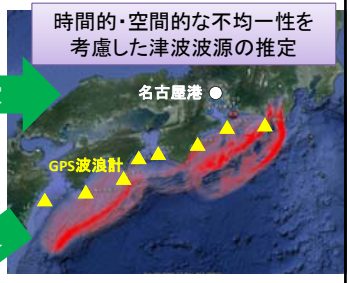
5秒

津波波源逆推定

線形近似

画像処理演算装置（GPU）による高速計算

時間的・空間的な不均一性を考慮した津波波源の推定



津波の伝播・浸水計算

75秒

波の非線形性浸水

シミュレーションによるシステムの検証
対象地震: 南海トラフ地震（M9.1、内閣府ケース①）
対象地点: 名古屋港
入力: 震央位置（地震波観測から推定されるものを利用）
8基のGPS波浪計による沖合での津波観測波形
出力: 津波浸水状況の時系列変化を推定（解像度30m）
出力のタイミング: 地震発生の8分後（地震収束の3分後）
（8分の内訳：津波観測6分、予測計算2分）
名古屋港における第1波押し波到達の80分前
精度: 第一波の高さの誤差は 4 % 到達時間の誤差は 2 %
※実際には観測誤差等の影響により精度が低下する可能性があります

2 HPCIプログラムでの研究成果紹介

2-1 波源推定に用いる理論津波波形DB制作と高度化 （気象研）

2-2 tFISHプロトタイプシステムを用いた予測実験の例 （気象研）

2-3 京コンピュータ向けの津波数値計算コードの開発 （JAMSTEC）

2-4 高解像度の浸水計算の例 （JAMSTEC）

理論津波波形DB (グリーン関数DB) 気象研＆国際航業

津波データ同化ソフトウェアによる線形解析(逆解析と波形合成)で使用

小波源(単位海面波源)：二次元ガウス関数
- 対象海域のうち地震に伴う津波の波源域になる可能性があると見込まれる範囲に配置
- 3つのサイズ：σ= 10, 20, 40 km (A, B, C)
- 隣の小波源とオーバーラップさせて配置

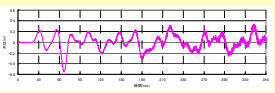
津波波源設定範囲	計算対象とした小波源数			計
	小波源A	小波源B	小波源C	
日本海溝・千島海溝周辺	1,740	437	109	2,286
南海トラフ周辺	810	199	50	1,059
計	2,550	636	159	**3,345**

津波伝播計算
- 線形長波式．差分法(TUNAMI-N2改良版)
- 海底地形：600, 200, 50 mネスティング
- 積分時間：3時間(A, B)，6時間(C)
- 品質管理(計算結果の点検)
  自動点検プログラム及び
  可視化した計算結果の目視

計算結果の例　配置例(東日本, A)

DBの収録内容（大容量記憶装置） … 数十TB

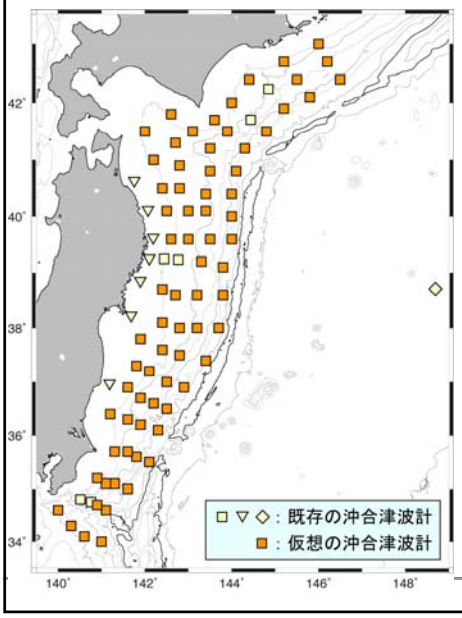
- 観測点の水位時系列(沖合，沿岸，FP)



東・西日本で計664点

- 10メッシュ間隔毎の地点の水位時系列
  → 将来新たな観測点が追加された際，そこでのグリーン関数を，内挿等によって合成可能にするため

ケース：広範囲な稠密沖合津波観測網



東北地方太平洋沖地震を指す

1) 本震時配置

東北地方太平洋沖地震の発生時
に設置されていた沖合津波計：14

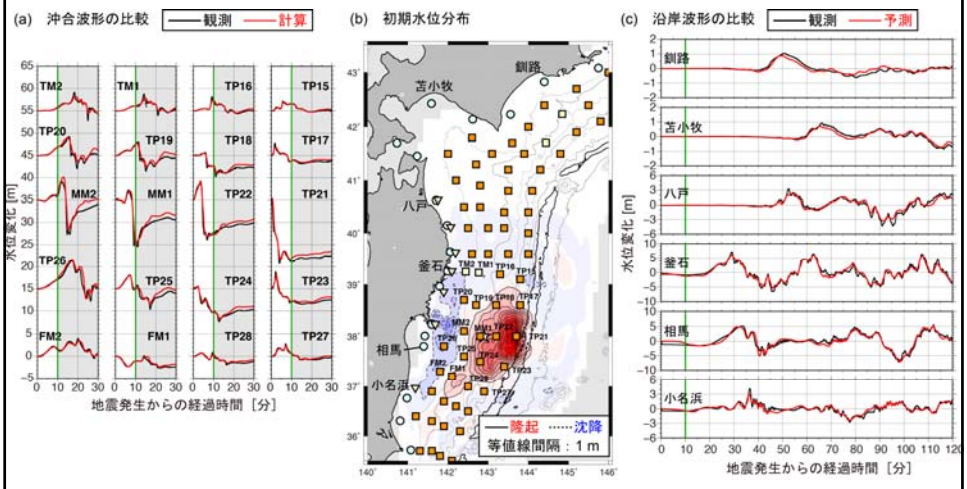
2) 稠密配置

本震時配置＋74観測点(50 km間隔)

配置2の有用性の判断
・・配置1による予測結果と比較

予測結果 -- 稠密配置 --

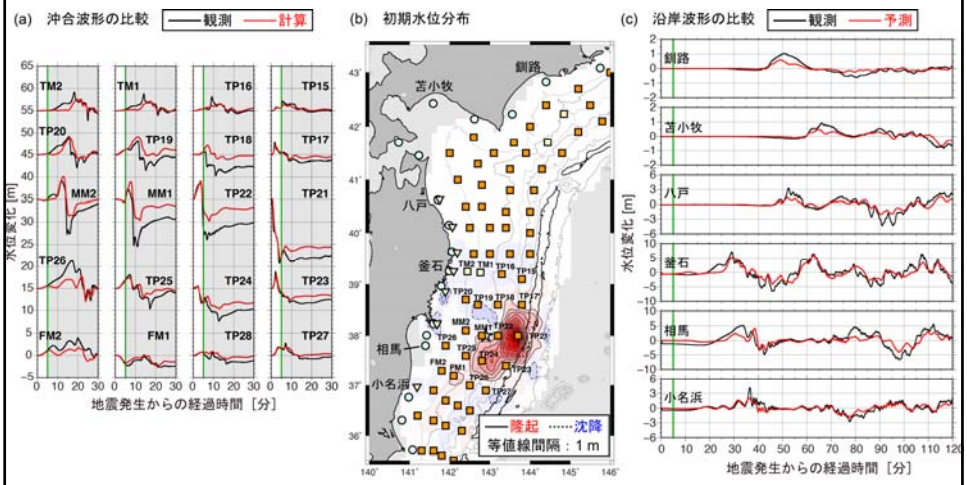
地震後10分



北海道から千葉県にかけての予測点全てにおいて，
予測波高が観測波高に非常に近くなる．

予測結果 -- 稠密配置 --

地震後5分

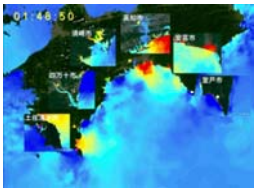


地震後20分の本震時配置の結果よりも
予測精度の高い予測点もある.

京向け高速津波シミュレータの開発

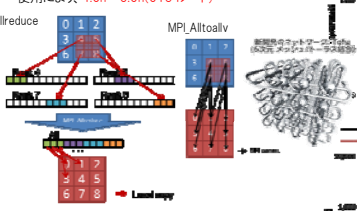
大規模並列津波コード（JAGURS）

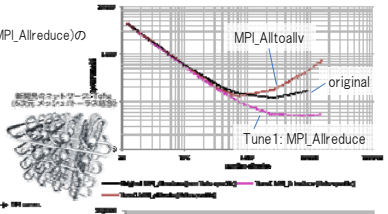
■非線形長波近似の式（平面二次元の差分法）
■使用グリッド（高知県全域5m格子）
・2秒グリッド　2億5千万格子、2/3秒グリッド　6千万格子、2/9秒グリッド　3億7千万　計6.8億格子
■計算結果
・京5,184ノード使用、5時間のシミュレーション
・dt = 0.015秒
・計算時間は4:28:20（チューニング前）
→ 1:27:42（チューニング後）



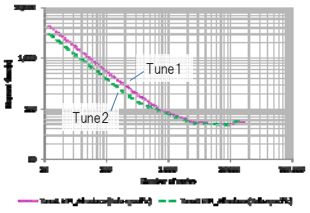
高知県全域5m格子計算

Tune 1. 論理トーラス形状の指定
・Tofu構造の指定と適したネスト間通信(MPI_Allreduce)の使用により、4.5h→3.5h(5184ノード)

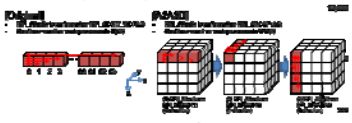


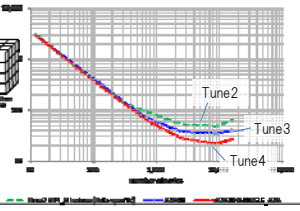


Tune 2. 流速更新ループの最適化
SIMD化、ハイプライニングによる最適化
ループブロッキング、ループ分割、if文の削除
→1000ノードぐらいまでは効果が確認できるが、それ以上のノード数ではあまり効果的でない



Tune 3. ネスト間通信の最適化①
Tofu構造に合うようにMPI_Alltoallvを3方向に分割
3.5h→2.6h(5184ノード)





Tune 4. ネスト間通信の最適化②
まとめられるMPI_Alltoallv通信はひとつにまとめる。
2.6h→1.8h(5184ノード)
Tune4によってさらに多くのノードでも性能が向上
1.8h(5184ノード)→1.5h(8748ノード)

馬場俊孝（JAMSTEC）

京向け高速津波シミュレータの開発

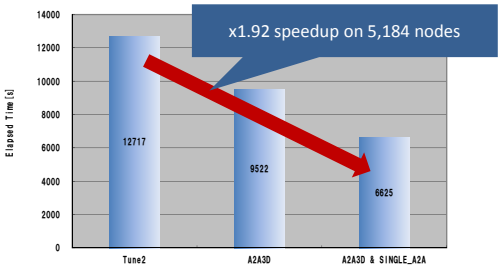
JAGURSモデル

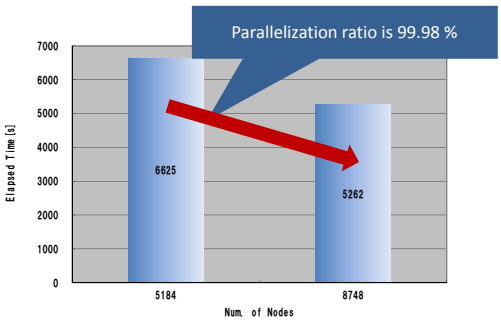
- 底面摩擦を考慮した非線形長波式理論に基づく平面2次元モデル (Satake 1995)
- ネスティンググリッド化 (Jakeman et al., 2010)
- OpenMP&MPI並列化(本研究)
- 高速化チューニング(本研究)

高速化チューニングの内容

1. SIMD化、パイプライニング
2. 適切な論理トーラス形状の使用
3. 論理トーラス形状にノード間通信をフィットするように変更

当初、4時間半かかっていた大規模計算が、1時間半に短縮

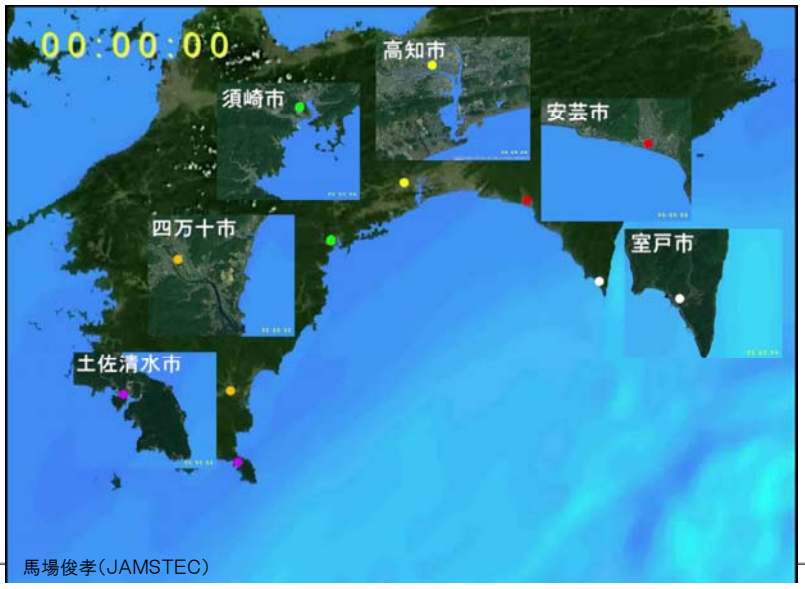




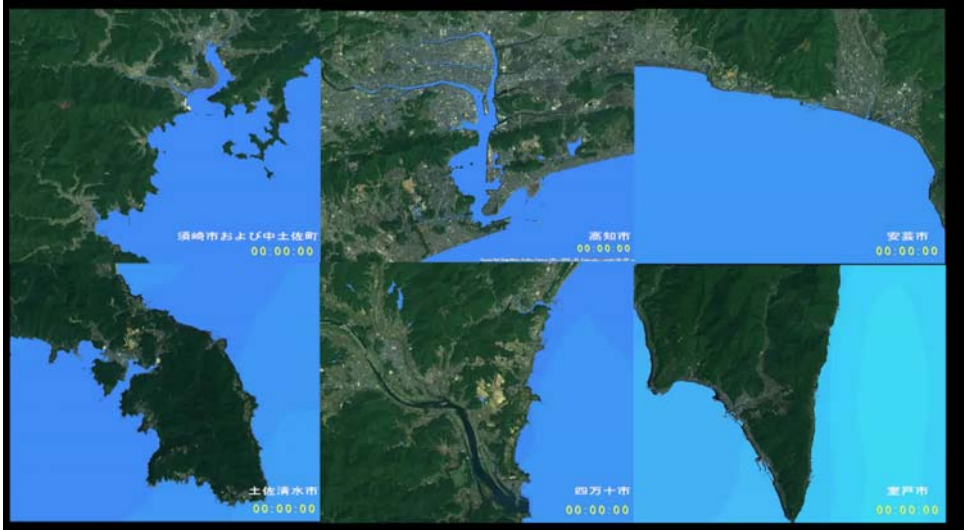
京コンピュータによる大規模実時間津波計算

(高知県全域5m分解能、計6.8億格子)

京8,748ノード使用　5時間の伝搬計算　(dt=0.015s)　計算時間は1.5時間



高知県全域5m格子津波計算



馬場俊孝(JAMSTEC)

非線形分散波モデルの開発

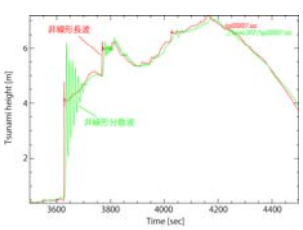
東北地方太平洋沖地震津波の仙台湾におけるソリトン分裂波を再現

- ■計算モデル:非線形分散波理論の式
- ■波源モデル:高川・富田(2012)
- ■地形ネスティング数:5層
- ■グリッド数:計2119万 18秒格子(360万)→6秒(103万)→2秒(385万)→2/3秒(323万)→2/9秒(約5m、948万)
- ■積分時間:3時間
- ■時間ステップ:0.1秒

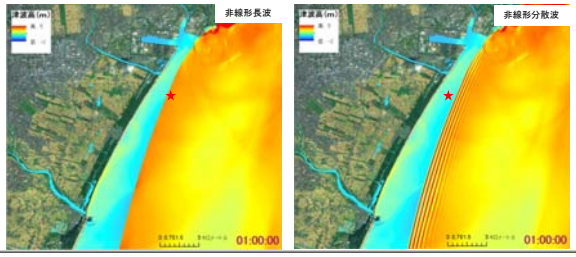
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{1}{R\sin\vartheta}\left[\left(\frac{\partial M}{\partial \varphi}+\frac{\partial (N\sin\vartheta)}{\partial \vartheta}\right)\right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{1}{R\sin\vartheta}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\frac{M^2}{d+h}\right)+\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial \vartheta}\left(\frac{MN}{d+h}\right) = -\frac{g(d+h)}{R\sin\vartheta}\frac{\partial \eta}{\partial \varphi}-fN-\frac{gn^2}{(d+h)^{7/3}}M\sqrt{M^2+N^2} + \frac{d^2}{3R\sin\vartheta}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left[\frac{1}{R\sin\vartheta}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial \varphi \partial t}+\frac{\partial^2 (N\sin\vartheta)}{\partial \vartheta \partial t}\right)\right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{1}{R\sin\vartheta}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\frac{MN}{d+h}\right)+\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial \vartheta}\left(\frac{N^2}{d+h}\right) = -\frac{g(d+h)}{R}\frac{\partial \eta}{\partial \vartheta}+fM-\frac{gn^2}{(d+h)^{7/3}}N\sqrt{M^2+N^2} + \frac{d^2}{3R}\frac{\partial}{\partial \vartheta}\left[\frac{1}{R\sin\vartheta}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial \varphi \partial t}+\frac{\partial^2 (N\sin\vartheta)}{\partial \vartheta \partial t}\right)\right] \quad (3)$$



右図の星印ポイントでの波形の比較



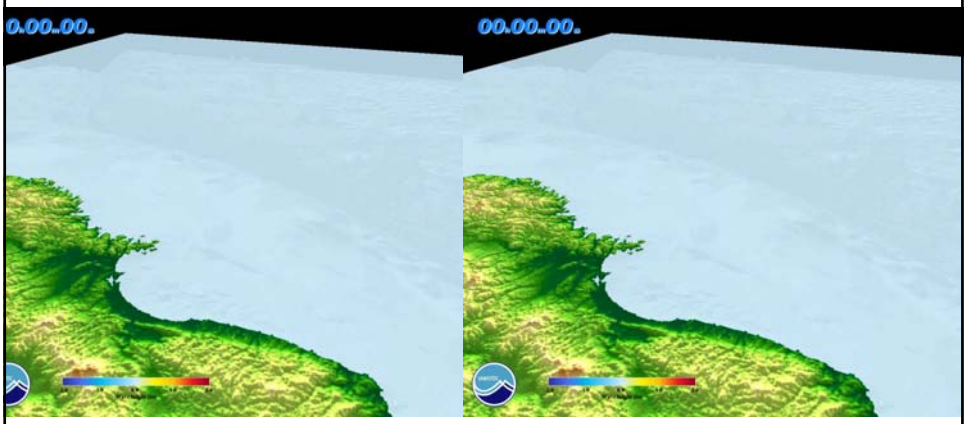
東北地方太平洋沖地震津波の非線形長波(左)、非線形分散波(右)シミュレーション

馬場俊孝(JAMSTEC)

非線形分散波モデルによる東北地方太平洋沖地震津波シミュレーション

非線形長波モデル

非線形分散波モデル



馬場俊孝(JAMSTEC)