

0:00:00

津波被害軽減に向けた グローバル津波モデリング

馬場俊孝（徳島大学大学院）

@H28年度ES報告会, 14:45-15:10, 2017.4.20

謝辞：本研究の実施において地球情報基盤センターに大変お世話になりました。特に上原GLと今任副主任には多大なサポートいただきました。記して感謝いたします。



目次

○Globalなコンセプト

高精度津波計算コードの開発
太平洋を横断する津波の予測

○Localなコンセプト

徳島県穴喰を襲った海底地すべり津波？
(中部電力との共同研究)

平面二次元津波計算モデル, JAGURS

Baba et al. (2015, PAGEOPH), Baba et al. (2016, HPCA),
Baba et al. (2017, Ocean Modelling)

- 非線形長波式をスタッガード格子リープフロッグ差分法で解く
- ネスティングアルゴリズム
- Bussinesq項の導入 (Peregrine, 1972)
- 地殻の弾性と海水の鉛直密度構造の考慮 (Allgeyer and Cummins, 2014)
- 初期水位計算における海底斜面の水平移動の考慮 (Tanioka et al., 1996)
- 初期水位計算におけるハイカットフィルタ (Kajiura, 1963)
- マルチシナリオ実行
- Fortran90で記述
- openMP and MPIによるハイブリッド並列
- GitHub上で公開 (<https://github.com/jagurs-admin/jagurs>)



JAGURS の名前の由来

Jamstec, Anu, Awa (Tokushima), Geoscience australia, URS corporation, Satake)

支配方程式（非線形浅水波式）

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{M^2}{d+h} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{MN}{d+h} \right) \\ &= - \frac{g(d+h)}{R \sin \theta} \frac{\partial h}{\partial \varphi} - fN - \frac{gn^2}{(d+h)^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{MN}{d+h} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{N^2}{d+h} \right) \\ &= - \frac{g(d+h)}{R} \frac{\partial h}{\partial \theta} + fM - \frac{gn^2}{(d+h)^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (2)$$

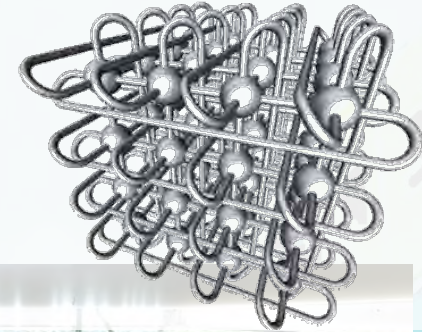
$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{1}{R \sin \theta} \left[\left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} + \frac{\partial (N \sin \theta)}{\partial \theta} \right) \right] \quad (3)$$

Symbol	Meaning
t	Time
R	Earth Radius
Φ	longitude
θ	co-latitude
M	Depth integrated velocity along Φ
N	Depth integrated velocity along θ
d	Water depth
h	Water deviation
g	Gravity acceleration
n	Manning's coefficient
f	Coriolis parameter
ρ_d	Sea water density at bottom
ρ_{ave}	Sea water density in average
ξ	Earth deformation due to tsunami load

Staggered grid, Leap-Frog method, 1st order upwind difference for advection terms, no breaking wave

大規模並列化

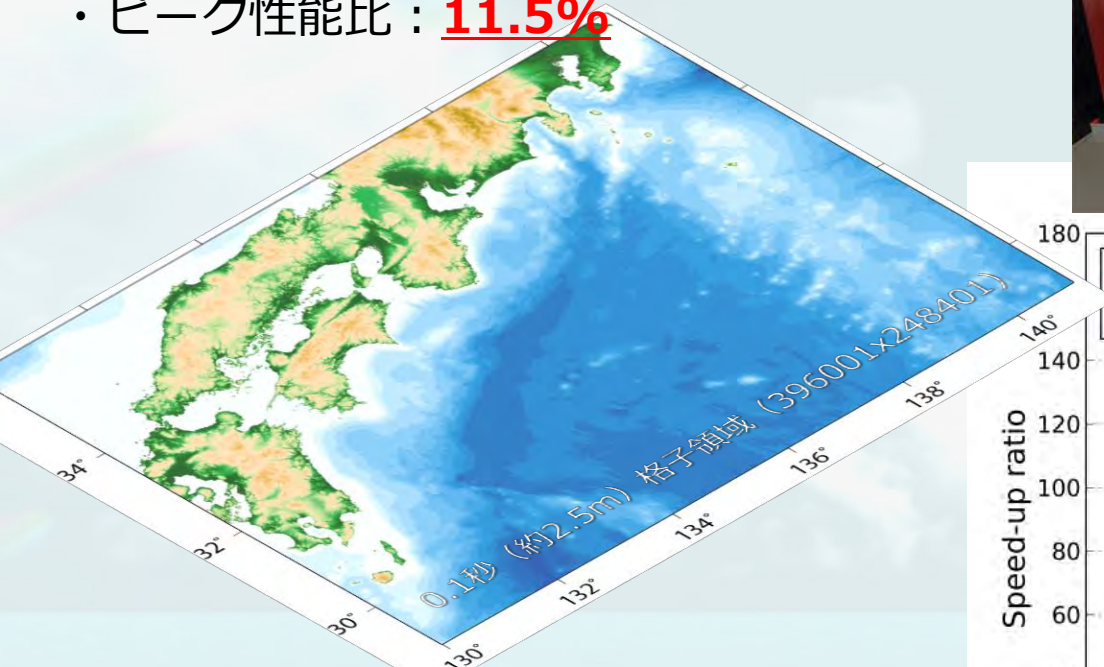
新開発のネットワーク: Tofu
(6次元 メッシュ/トラス結合)



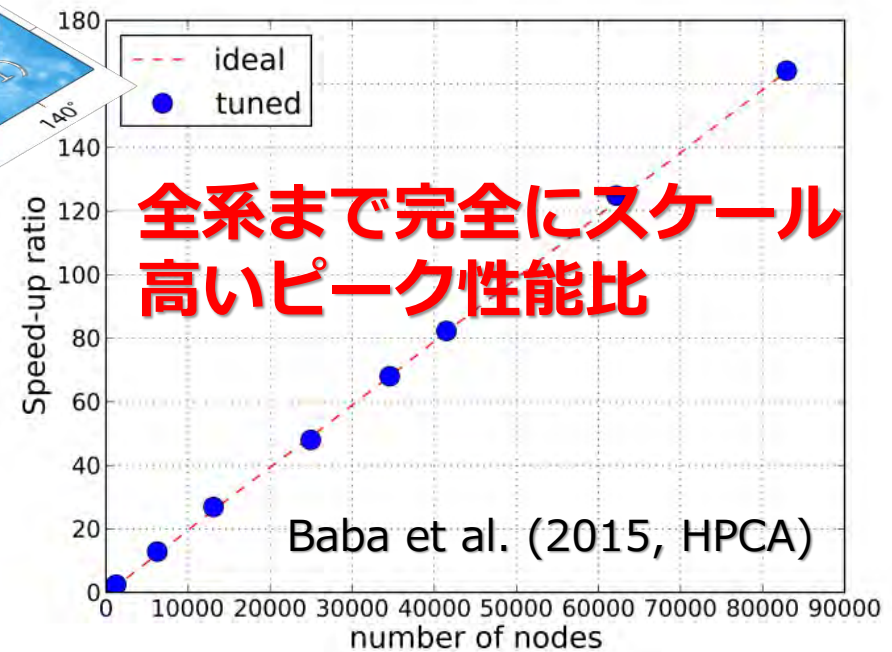
- ・南海トラフ全体の0.1秒格子（総格子数約1000億）
- ・ネスティングはなし，非線形長波計算
- ・実時間20秒分の計算
- ・使用ノード数：82,994ノード（フルノード）
- ・計算時間：82.11秒
- ・ピーク性能：1.22PFLOPS
- ・ピーク性能比：11.5%



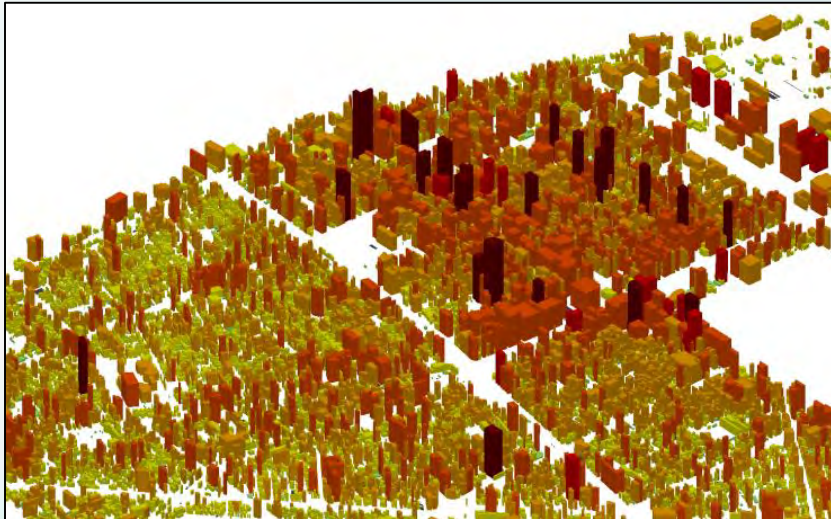
©RIKEN



0.4秒 (10m) 格子だったら、
格子数は1/16（約60億格子）、
計算ステップ数は1/4（dtが4倍）、
計算コストは1/64→実時間の1/16
→1時間分の津波伝搬を4分で計算



高分解能津波シミュレーション



Embedded the 3D shape of buildings in the topography

Grid interval is about 1 m

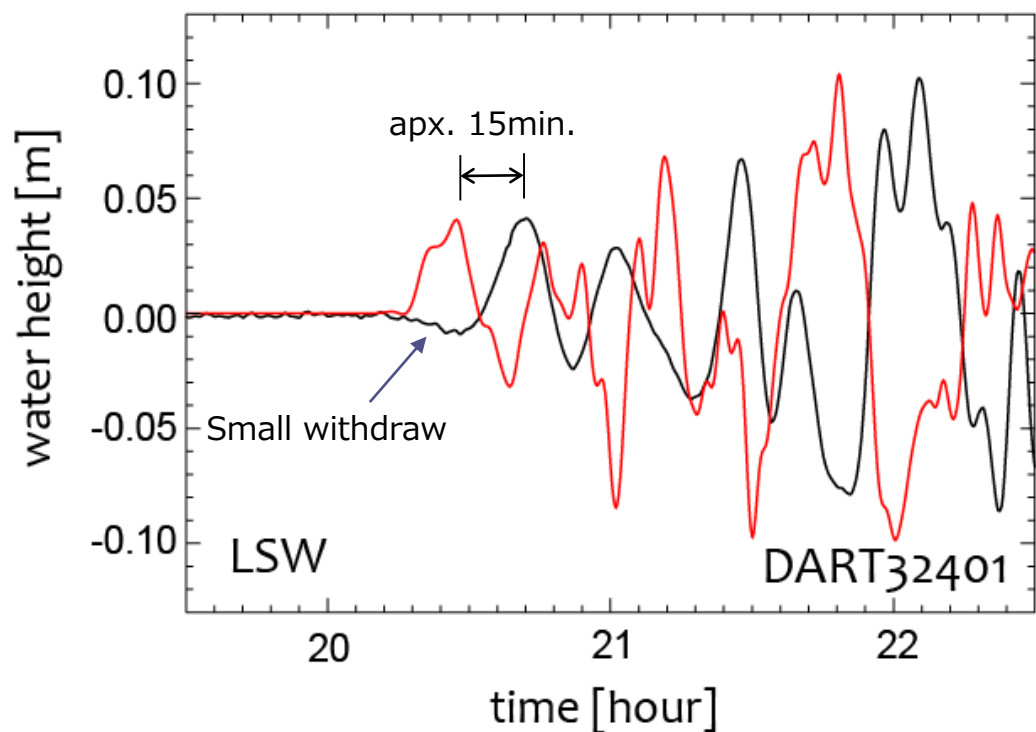
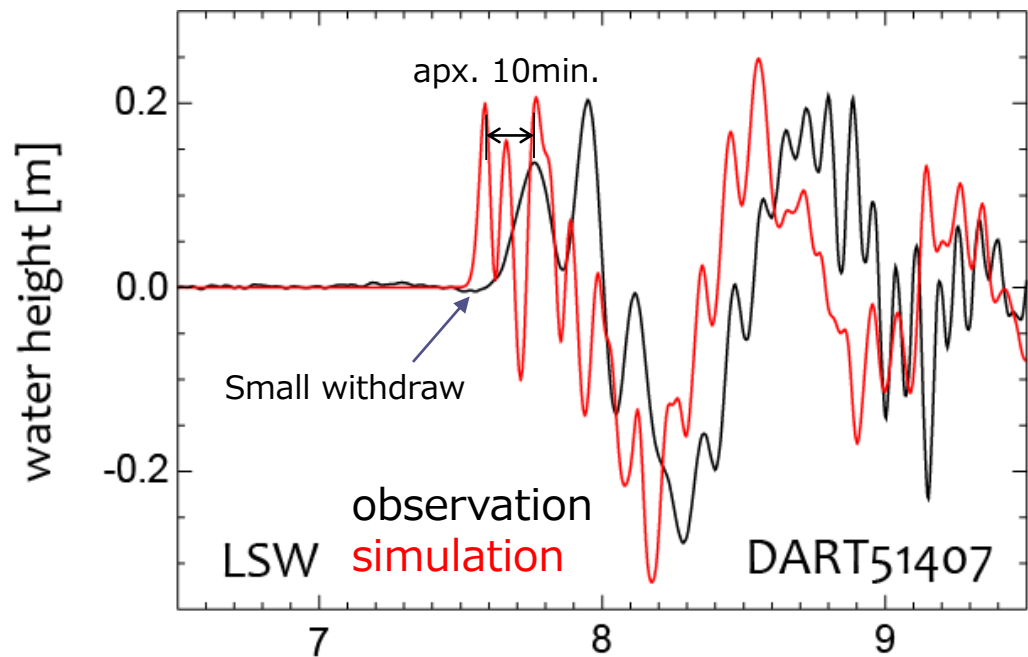
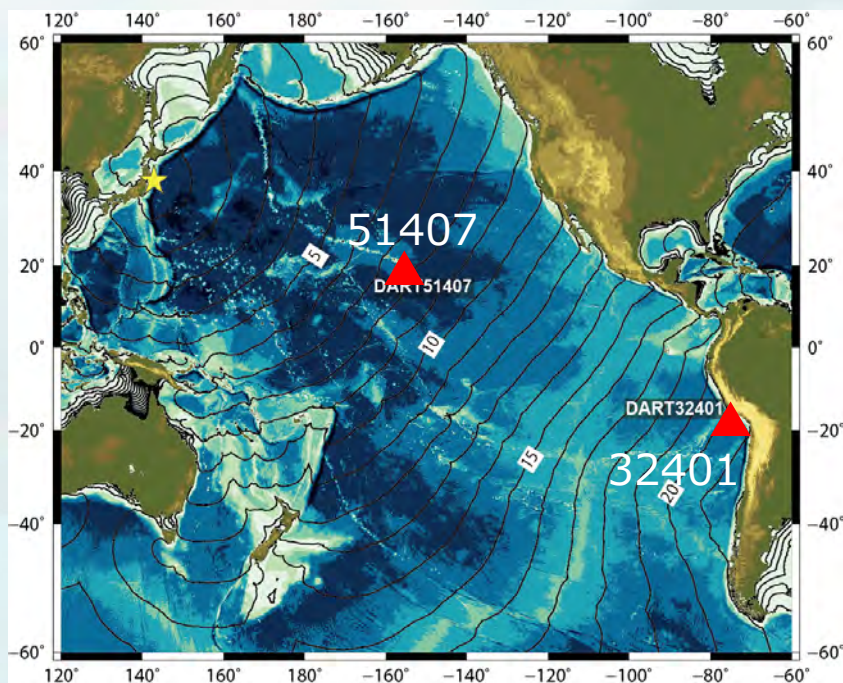
地震発生から 01:30:00



遠地津波モデリング

問題点

- 遠地における到着時刻のずれ
- 波の形が違う
- 第一波の押し波の前の弱い引き波の再現性



支配方程式（非線形分散波式）

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{M^2}{d+h} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{MN}{d+h} \right) \\ &= - \frac{g(d+h)}{R \sin \theta} \frac{\partial h}{\partial \phi} - fN - \frac{gn^2}{(d+h)^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{MN}{d+h} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{N^2}{d+h} \right) \\ &= - \frac{g(d+h)}{R} \frac{\partial h}{\partial \theta} + fM - \frac{gn^2}{(d+h)^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{1}{R \sin \theta} \left[\left(\frac{\partial M}{\partial \phi} + \frac{\partial (N \sin \theta)}{\partial \theta} \right) \right] \quad (3)$$

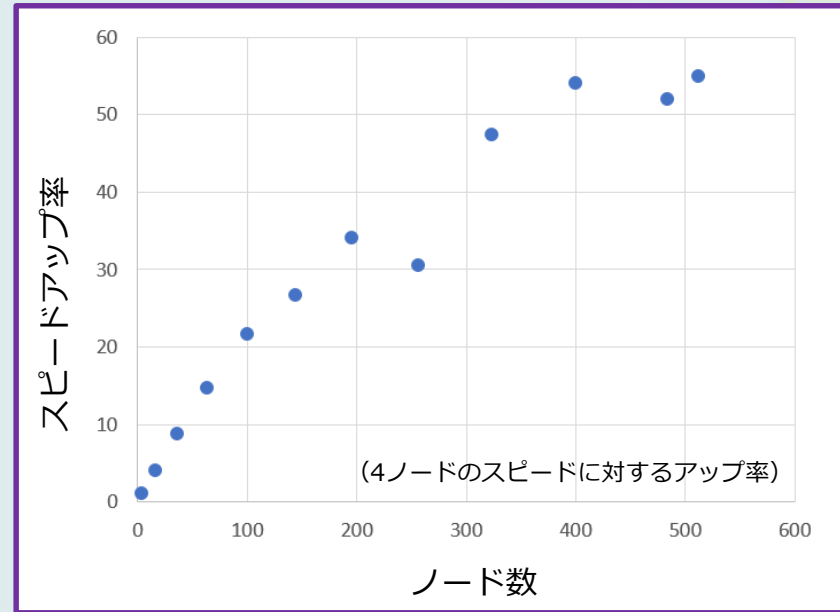
Symbol	Meaning
t	Time
R	Earth Radius
ϕ	longitude
θ	co-latitude
M	Depth integrated velocity along ϕ
N	Depth integrated velocity along θ
d	Water depth
h	Water deviation
g	Gravity acceleration
n	Manning's coefficient
f	Coriolis parameter
ρ_d	Sea water density at bottom
ρ_{ave}	Sea water density in average
ξ	Earth deformation due to tsunami load

Staggered grid, Leap-Frog implicit method, 1st order upwind difference for advection terms, no breaking wave

遠地津波モデリングの計算条件

- **Source model**: The 2011 Tohoku tsunami (Saito et al., 2011)
- **Region**: 120E-300E, 60S-60N (Spherical coordinate)
- **Bathymetric nesting** : 1 Layer, 30 arc-sec interval (GEBCO), 21601 x 14401 grids
- **Integral time** : 28 hours ■ **Time step** : 0.5 s
- **Computer** : 256 nodes of Earth Simulator
- **Wall time** : NBS, 31.5 hours
NBS+SD+EL, 37.6 hours

Earth Simulator consists of NEC SX-ACE, 5120 nodes.
(vector-type)

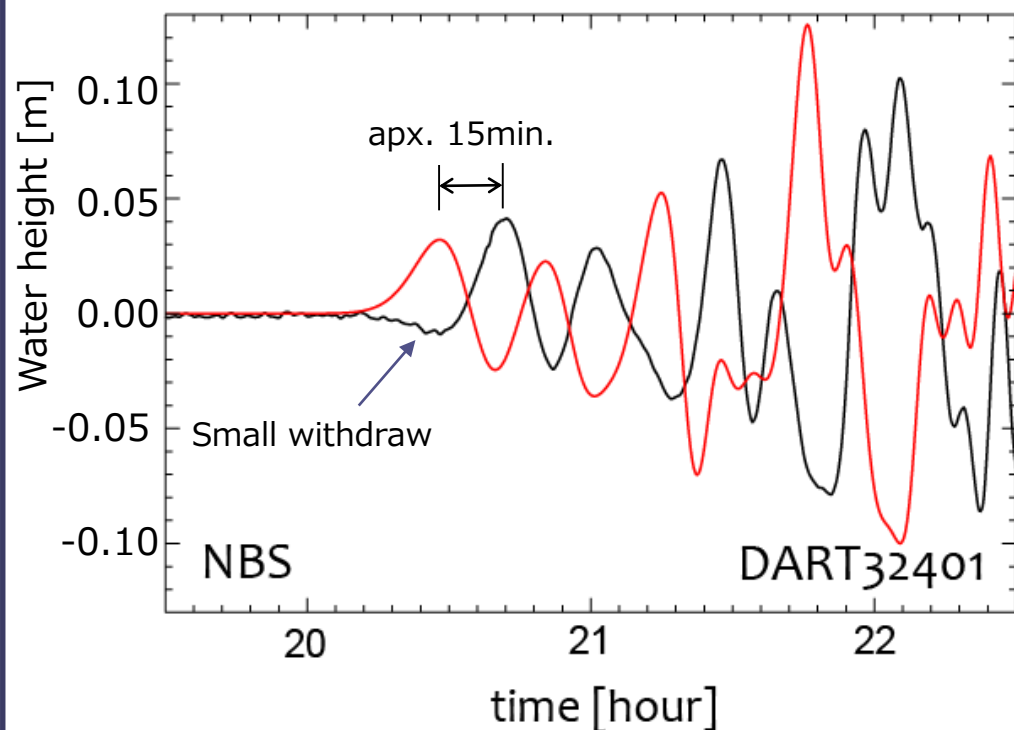
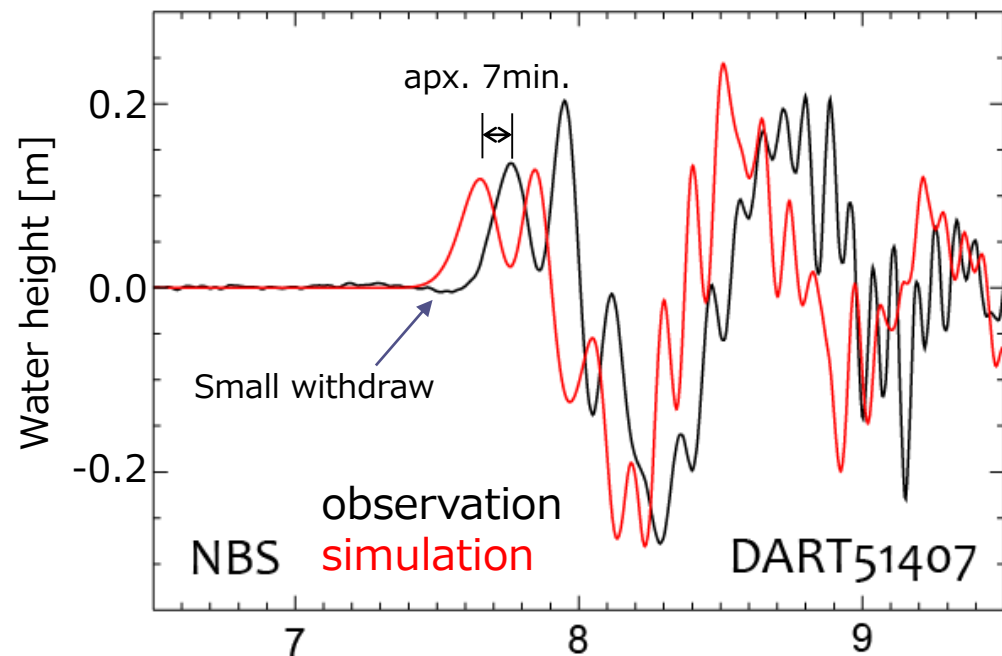
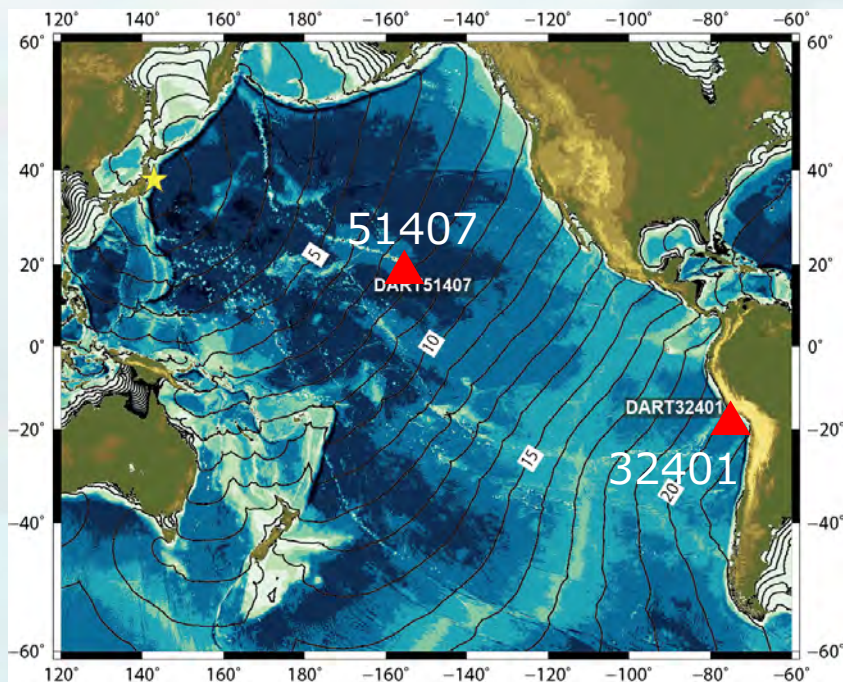


Node	
Number of CPU	1
Number of cores	4
Peak performance / core	64 GFLOPS
Main memory	64 GB
Memory band width	256 GB/s
System	
Total number of Processor nodes	5120
Total number of CPUs	5120
Total number of cores	20480
Total peak performance	1.3 PFLOPS
Total main memory	320 TB
Total memory band width	1.3 PB/s

分散波モデリング

問題点

- 遠地における到着時刻のずれ
- 波の形が違う
- 第一波の押し波の前の弱い引き波の再現性



地殻の弾性と海水鉛直密度構造を考慮した非線形分散波式

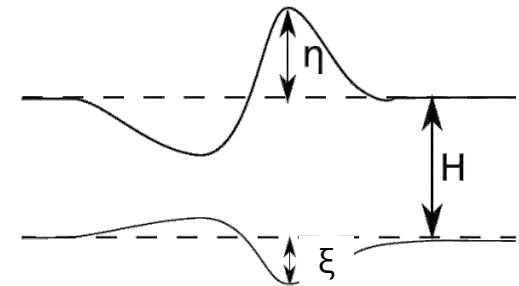
$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{M^2}{d+h} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{MN}{d+h} \right) \\
 &= - \frac{g(d+h)}{R \sin \theta} \frac{\partial h}{\partial \varphi} - fN - \frac{gn^2}{(d+h)^{7/3}}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

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{1}{R \sin \theta} \left[\left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} + \frac{\partial (N \sin \theta)}{\partial \theta} \right) \right] \quad (3)$$

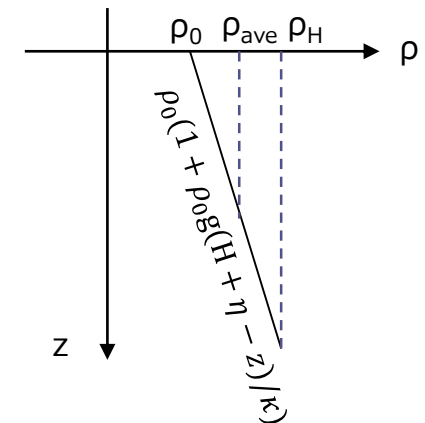
Staggered grid, Leap-Frog implicit method,
1st order upwind difference for advection
terms, no breaking wave

1. Elastic loading



ξ can be calculated using Green's function that describes the response to a unit mass load concentrated at a point on its surface.

2. seawater density stratification

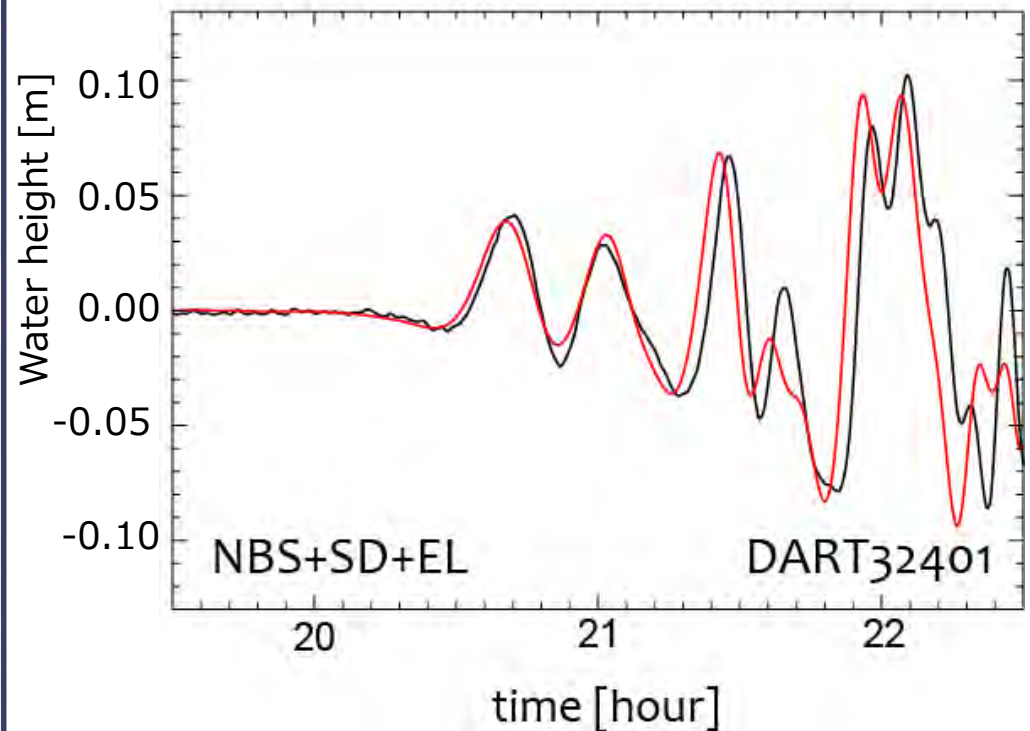
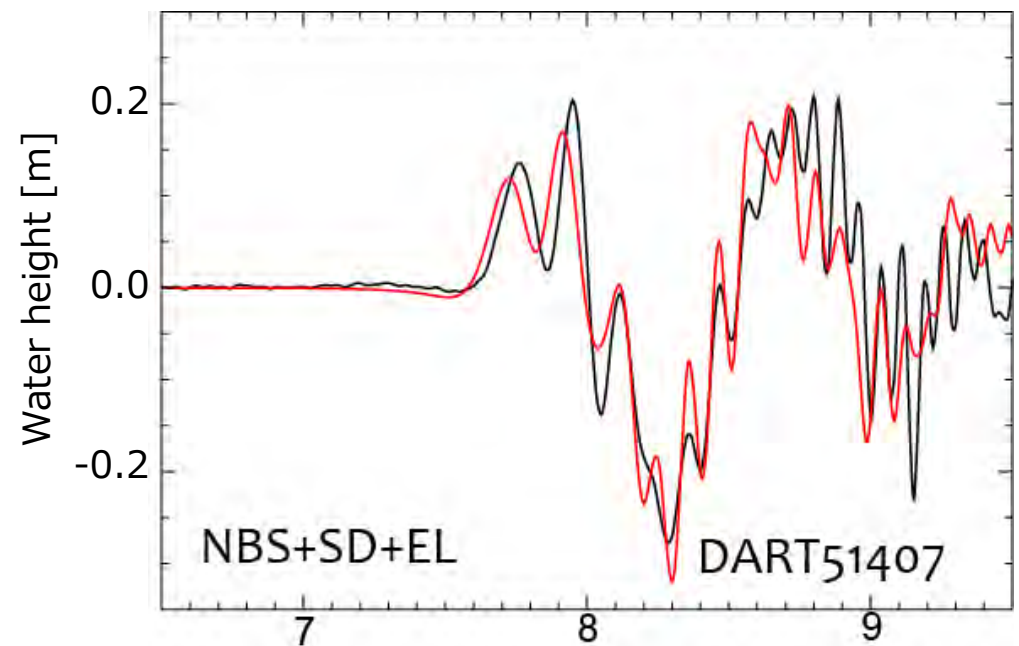
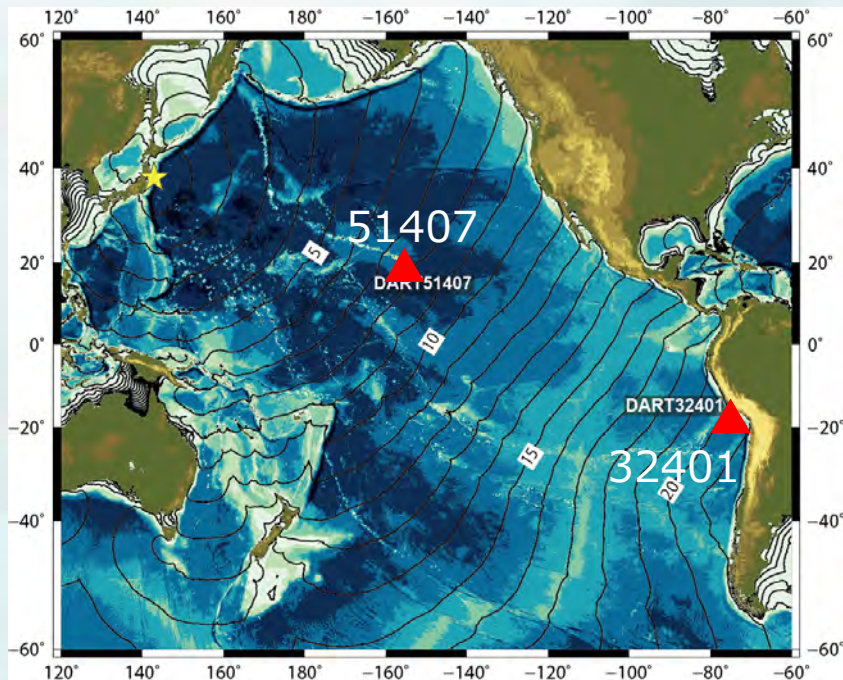


Allgeyer and Cummins (2014)

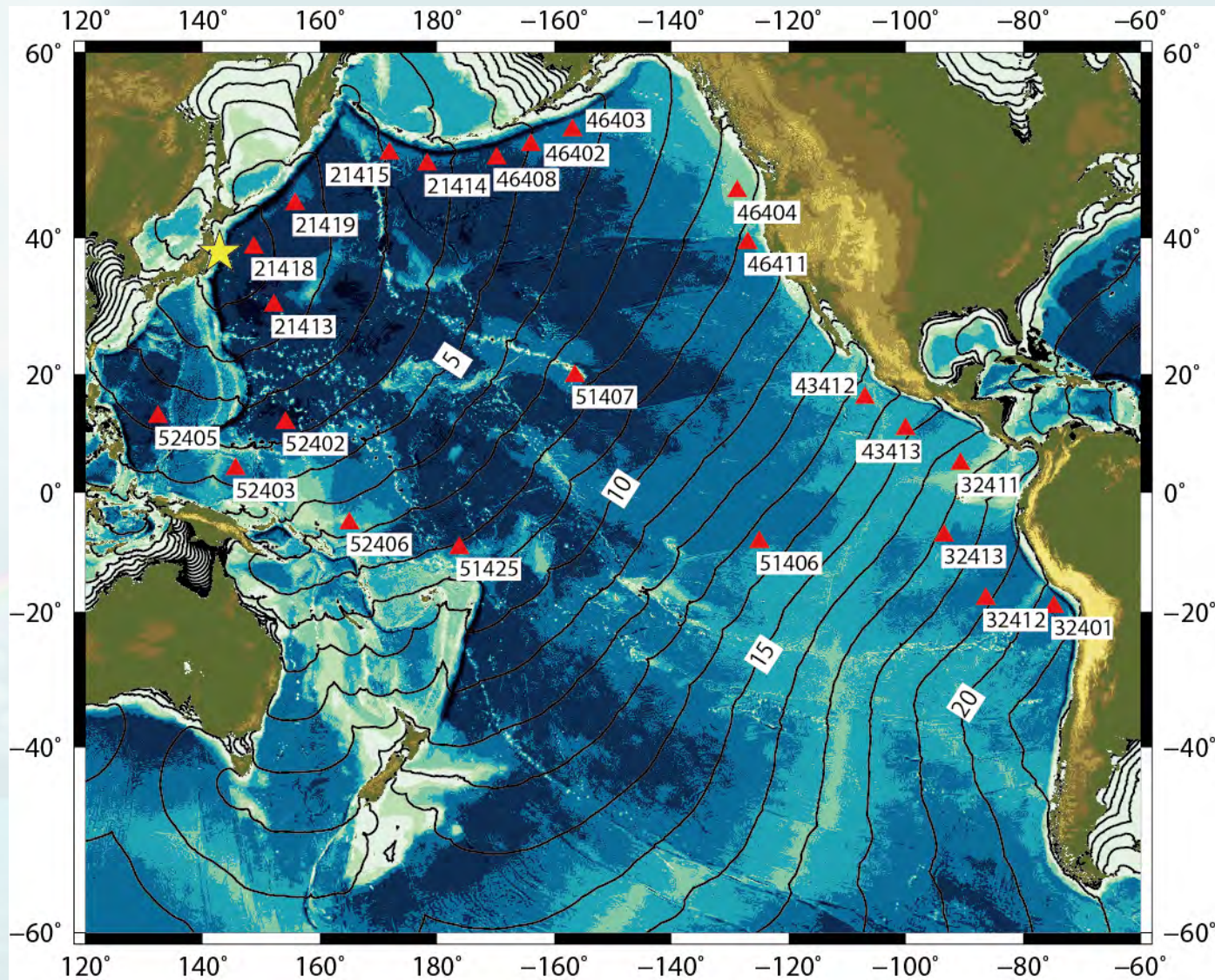
海水密度成層＋地殻 の弾性

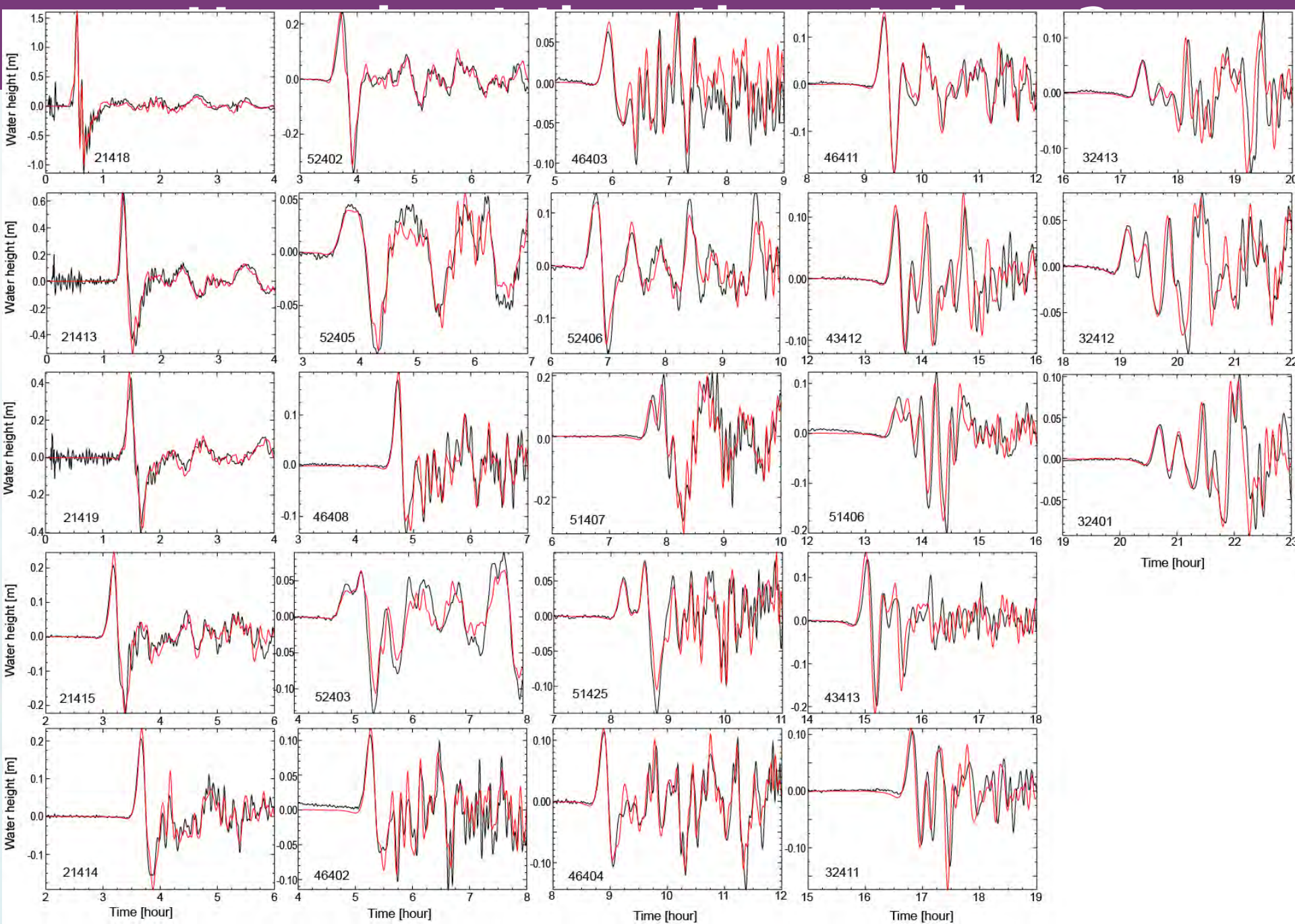
問題点

- 遠地における到着時刻のずれ
- 波の形が違う
- 第一波の押し波の前の弱い引き波の再現性



他の観測点での比較





ここまでのまとめ

- 計算負荷が高い分散波式の計算も近年の計算機の進歩により高分解能な実地形を用いたとしても現実的な時間で解くことができるようになってきた.
- 津波荷重による地球の微小な変形と海水密度の鉛直分布の効果を数値計算に取り入れることによって, 遠地津波の計算精度が向上.
- ソースコードは公開中 (<https://github.com/jagurs-admin/jagurs>)

参考文献

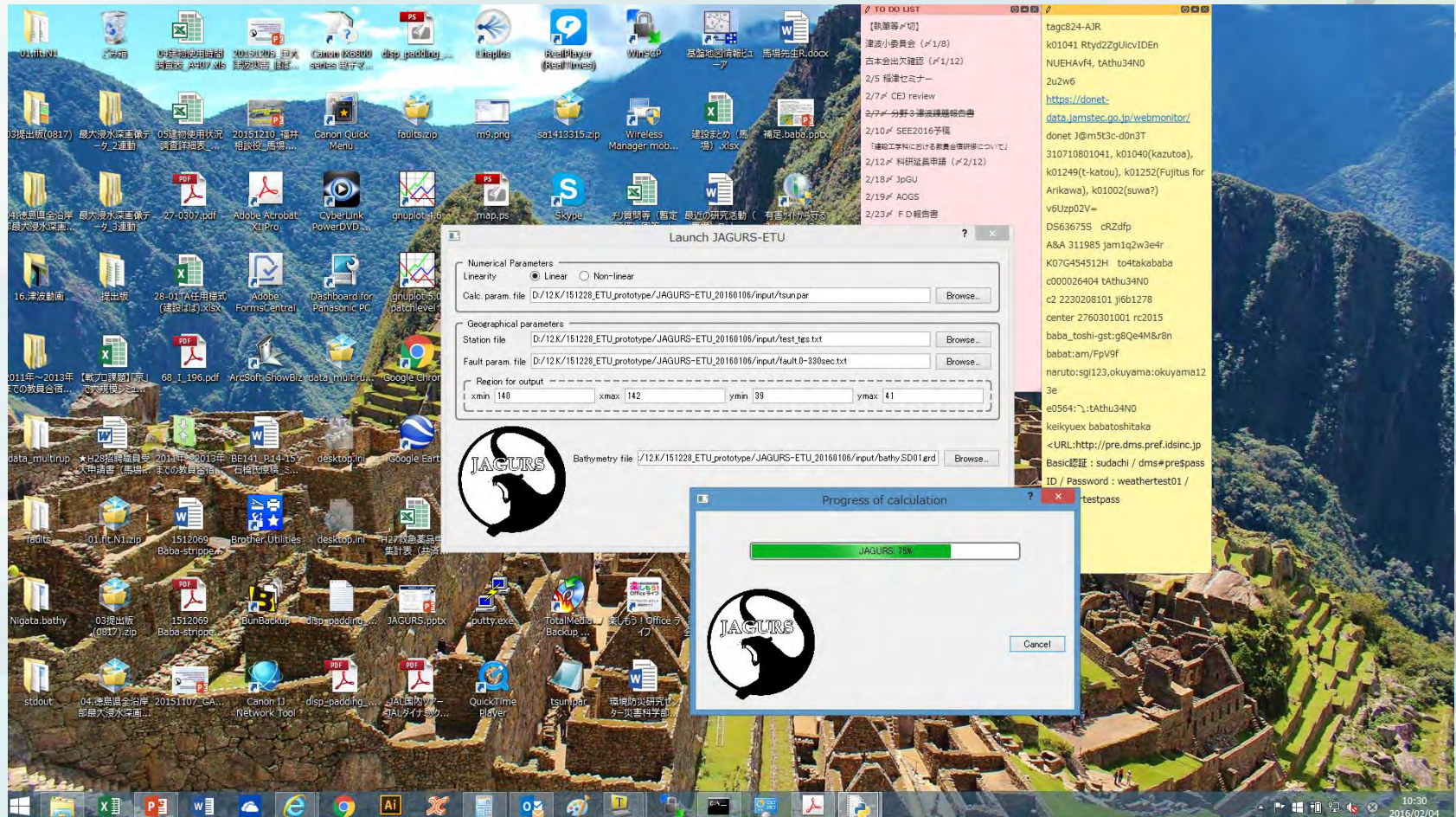
Baba, T., et al., Parallel implementation of dispersive tsunami wave modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami, Pure appl. Geophys., 172, 3455–3472, doi:10.1007/s00024-015-1049-2, 2015.12.

Baba, T., et al., Large-scale, high-speed tsunami prediction for the great Nankai trough earthquake on the K computer, Inter. Jour. of High Per. Comp. App., 30, 71-84, doi:10.1177/1094342015584090, 2016.02.

Baba, T., et al., Accurate numerical simulation of the far-field tsunami caused by the 2011 Tohoku earthquake, including the effects of Boussinesq dispersion, seawater density stratification, elastic loading, and gravitational potential change, Ocean Modelling, 111, 46-54, doi:10.1016/j.ocemod.2017.01.002, 2017.03.

グローバルコンセプト

Windows上で、しかもGUI付で動くようになっています。



目次

○Globalなコンセプト

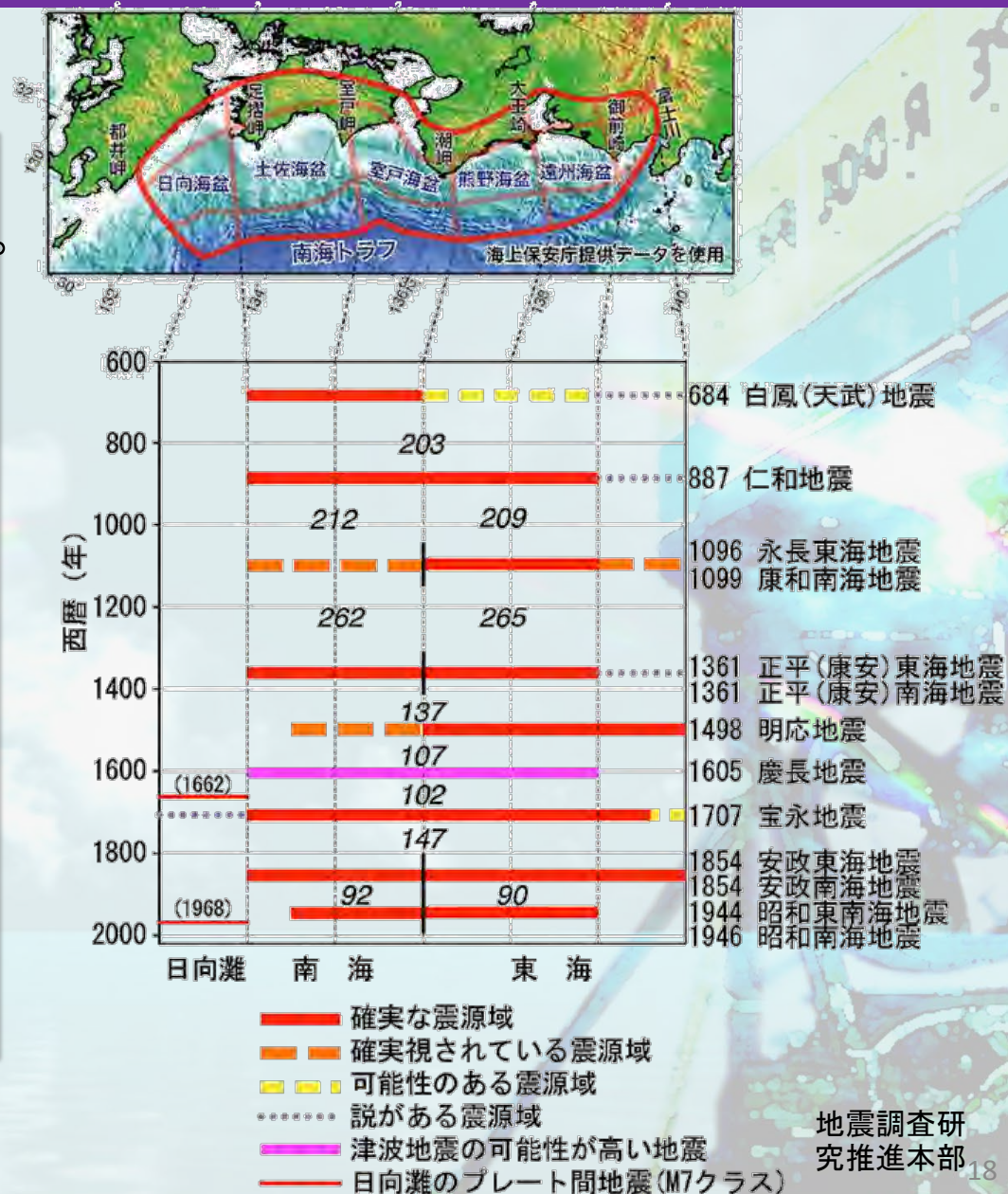
高精度津波計算コードの開発
太平洋を横断する津波の予測

○Localなコンセプト

徳島県穴喰を襲った海底地すべり津波？
(中部電力との共同研究)

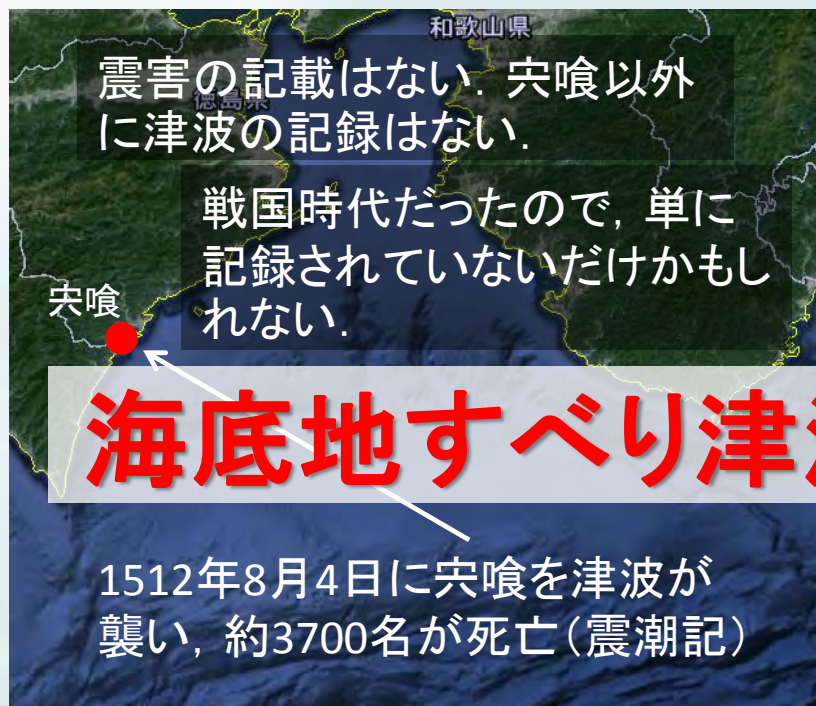
南海トラフ巨大地震の歴史

- 100年から150年周期で繰り返しM8クラスの地震が発生している。
- 1707年には、東海・東南海・南海地震が同時に発生したこともある。
- 1605年は、津波地震(ゆれのわりには津波が大きい地震)だったかもしれない。
- この履歴を基に将来の発生確率を算出。
- ただし、主に古文書の調査によるため、年代が古くなるほど信頼性が低くなる。



調査対象海域 徳島穴喰沖

幻の1512年の永正津波



海底地すべり津波ではないだろうか？

※高潮の可能性もあるが、1934年の室戸台風の時でさえ、高々3m、3700人も命を落とすとは考えにくい。



海底地すべり津波とは

地震性津波

津波の発生

伝播

遡上

元の地形

断層

地震波

海底地すべり津波

津波の発生

伝播

遡上

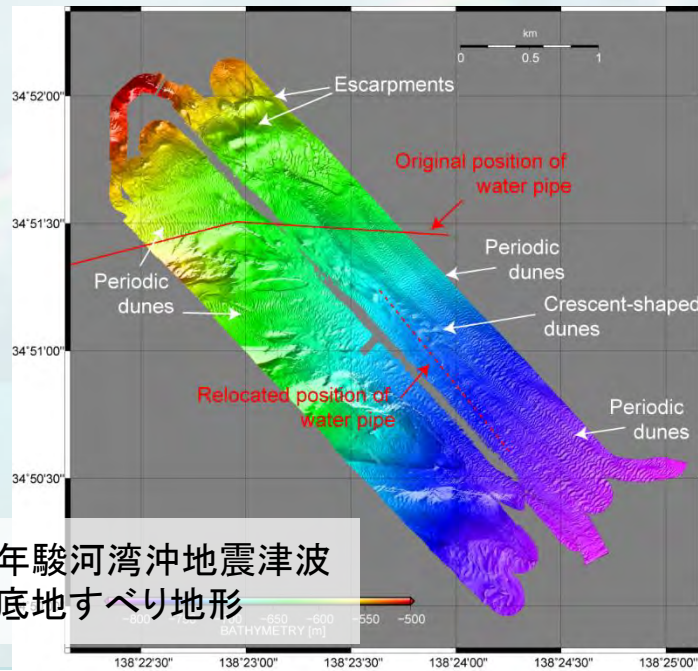
海底地すべり

元の地形

1. 海底地すべりにより発生
2. 局所的で高い津波
≡波長の短い波, 分散性
3. 地震波を伴わない

過去の海底地すべり津波

- ✓ 1741年渡島大島の津波※ (15m) 括弧内の数字は最大津波高さ
※は山体崩壊
- ✓ 1771年八重山津波 (85m)
- ✓ 1792年島原大変肥後迷惑※ (9m)
- ✓ 1946年アリューシャン地震 (35m, M8.1)
- ✓ 1998年パプアニューギニア地震 (15m, M7.1)
- ✓ 2009年駿河湾沖の地震 (0.7m, M6.5)



2009年駿河湾沖地震津波
の海底地すべり地形



宮古諸島下地島の帯岩。八重山地震
の津波で打ち上げられたとされる。

南海トラフ巨大地震の想定震源域

- プレート境界面深さ約30kmから深部低周波地震が発生している領域
- プレート境界面深さ30kmの位置を修正し、内陸側のさらに深い方に拡大

- 震源分布から見てプレートの形状が明瞭でなくなる領域

- 九州・パラオ海嶺付近でフィリピン海プレートが厚くなっている領域
- 日向灘北部から南西方向に拡大

- トラフ軸から富士川河口断層帯の北端
- 富士川河口断層帯の領域も対象

しかし、海底地すべり津波の危険性は考慮されていない

- 強震断層域：プレート境界面深さ約10km
- 津波断層域：深さ約10kmからトラフ軸までの領域に津波地震を引き起こすすべりを設定

- 強震断層域(津波断層域の主部断層)
- 津波地震を検討する領域(津波断層域に追加する領域)
- 中央防災会議(2003)の強震断層域、津波断層域
- トラフ軸
- ※海底地形図は海上保安庁提供データによる

地震の規模

	南海トラフの巨大地震		参考			
	(津波断層モデル)	(強震断層モデル)	2011年 東北地方太平洋沖地震	2004年 スマトラ島沖地震	2010年 チリ中部地震	中央防災会議(2003) 強震断層域
面積	約14万km ²	約11万km ²	約10万km ² (約500km×約200km)	約18万km ² (約1200km×約150km)	約6万km ² (約400km×約140km)	約6.1万km ²
モーメント マグニチュード Mw	9.1	9.0	9.0 (気象庁)	9.1 (Ammon et al., 2005) [9.0 (理科年表)]	8.7 (Pulido et al., in press) [8.8 (理科年表)]	8.7

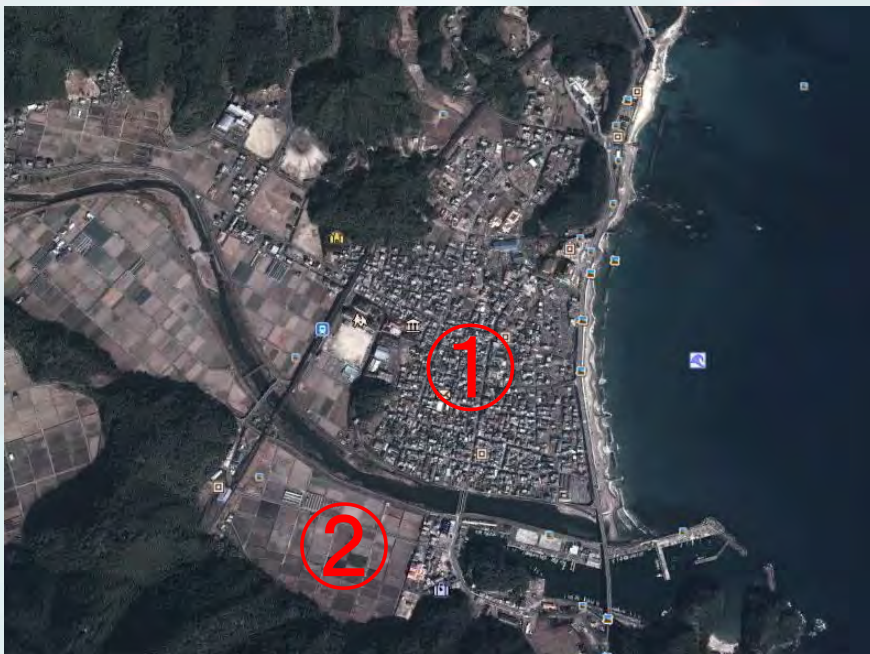
震潮記の記載内容

穴喰浦は、永正9年8月に大津波の襲来で、穴喰浦中が残らず流出した。その時、城山(愛宕山)へ逃げのぼった者は数十人であった。南橋より向こうの町分は残らず流出してしまった。しかし、このところは山が近いので人命の被害は少なかった。橋より北の町家は、家の被害は多くは無かったが、死者が多く出た。およそ、その時南北両町の老若男女合わせて死者3700余人助かったものは1500余人であった。橋より向こう(正梶)の町家は、残らず流失し、土地はことごとく掘れて、一面の川となってしまった。



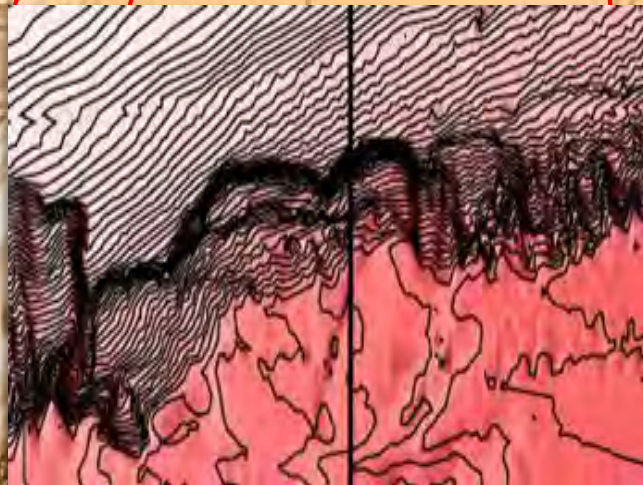
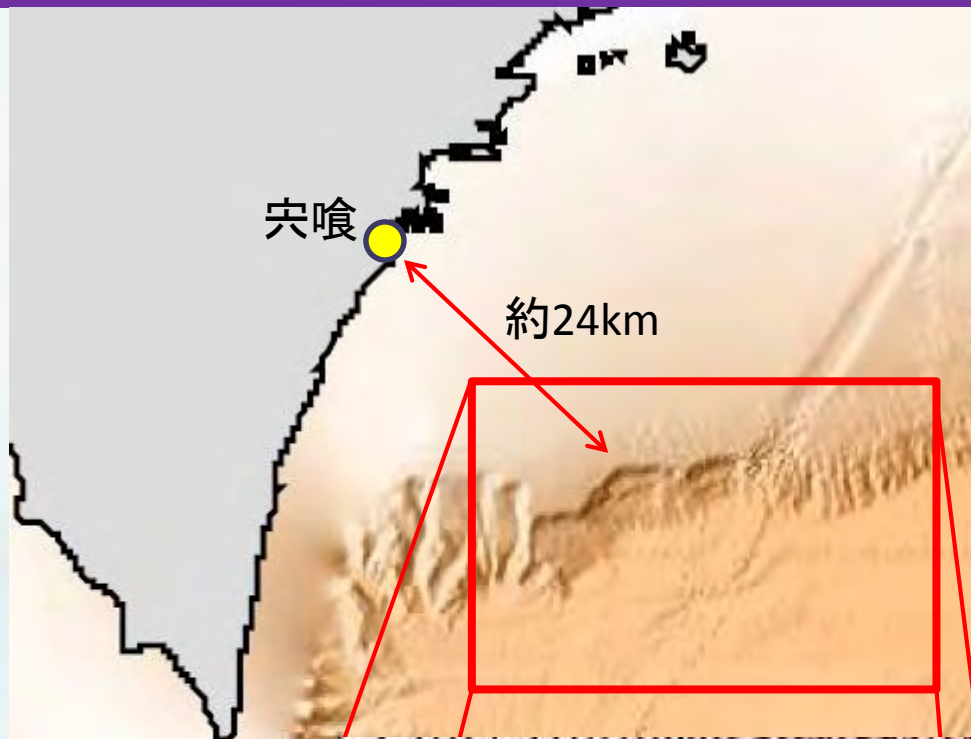
Point

- ① 橋より北の町家は、
家の被害は多くは無かったが、
死者が多く出た。
→ 浸水深 < 2m
- ② 橋より向こう(正梶)の町家は
残らず流失し、土地はことごとく
掘れて、一面の川に
→ 2m < 浸水深



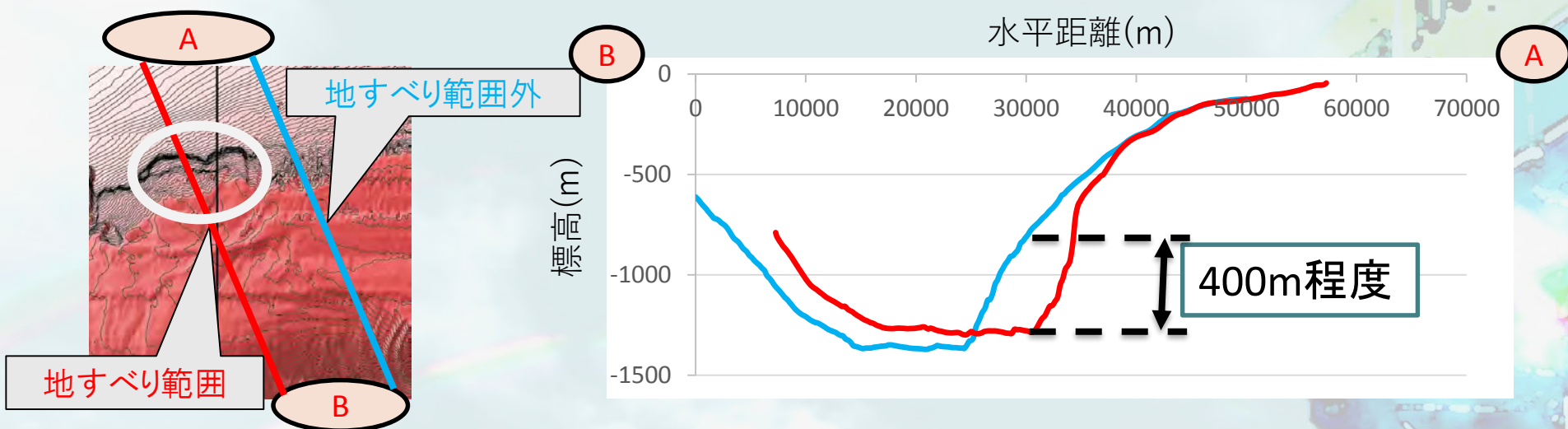
穴喰浦の衛星写真 (google earth)

海底地すべりの痕跡？



海底地すべりによる初期水位のモデル化

Watts et al. (2005)のSlump modelに必要なパラメタ設定



Watts et al.(2005)の初期水位推定式に用いる値

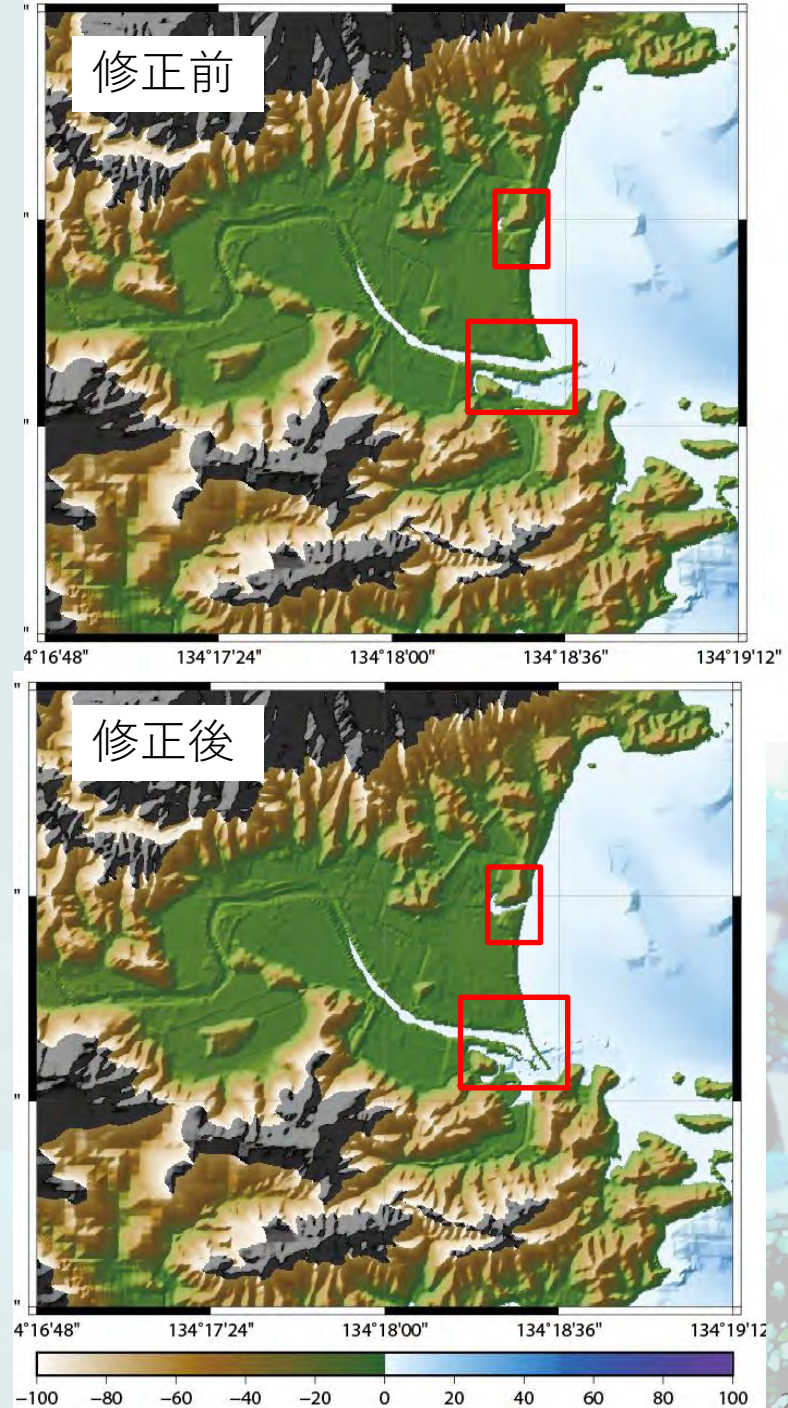
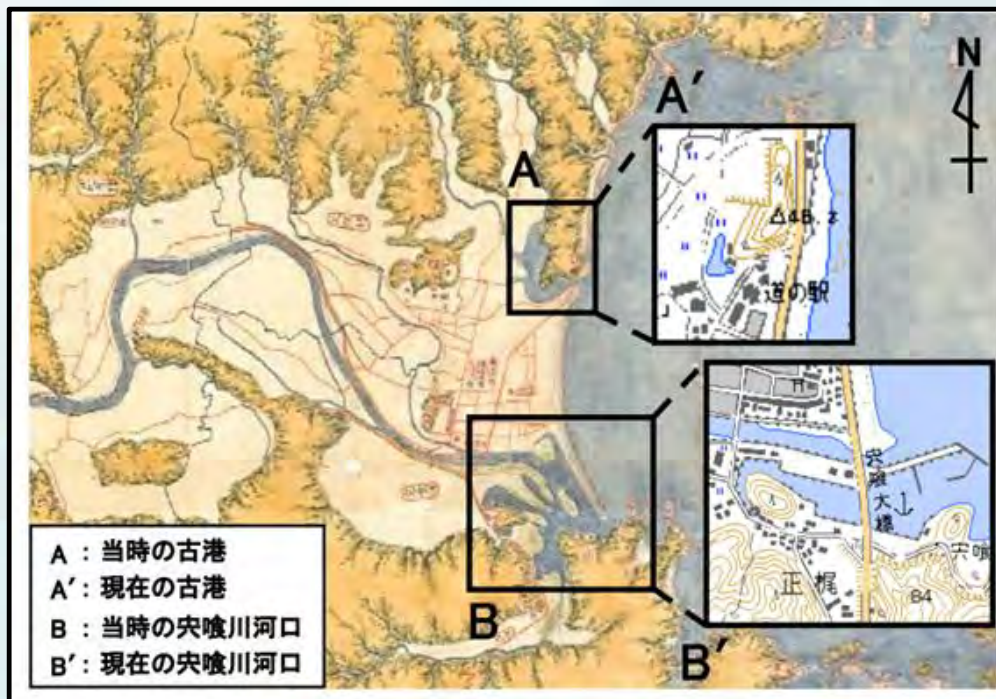
	土の 水中比重	地すべりの 厚さ	地すべりの 長さ	地すべりの 奥行き	地すべり土塊 の 移動量	水深	斜面の 角度
	r	T(m)	B(m)	W(m)	So(m)	d(m)	$\theta(^{\circ})$
地すべり仮定 (央喰浦から 南東方面24km程度)	1.85	400	7715	2850	800-3000	816.9	6.19

※Soは幅を持たせて検討する

穴喰の地形の再現

- 津波の陸上への浸水は地形の影響を大きく受ける.
- 古地図などを参考にして, 可能な限り過去の地形を再現した.

穴喰浦絵図



海底地すべり津波モデリング

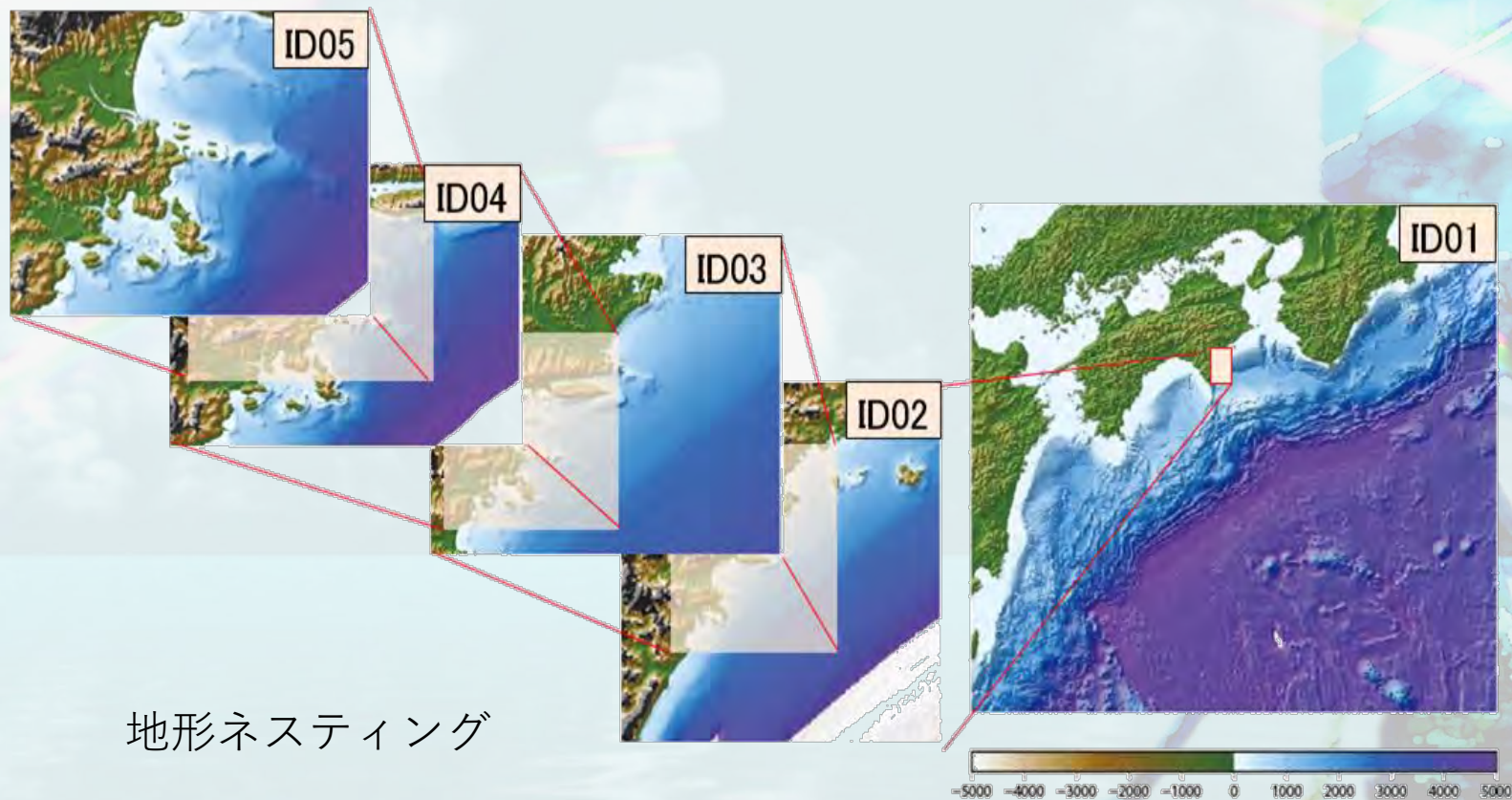
支配方程式：非線形長波式

数値解法：スタッガード格子のリープフロク差分法

地形ネスティング：5層（18秒－6秒－2秒－2/3秒－2/9秒）

地形データ：徳島県データを利用（2/9秒格子は過去の地形を再現）

潮位：T.P.=0.0m 積分時間：3時間

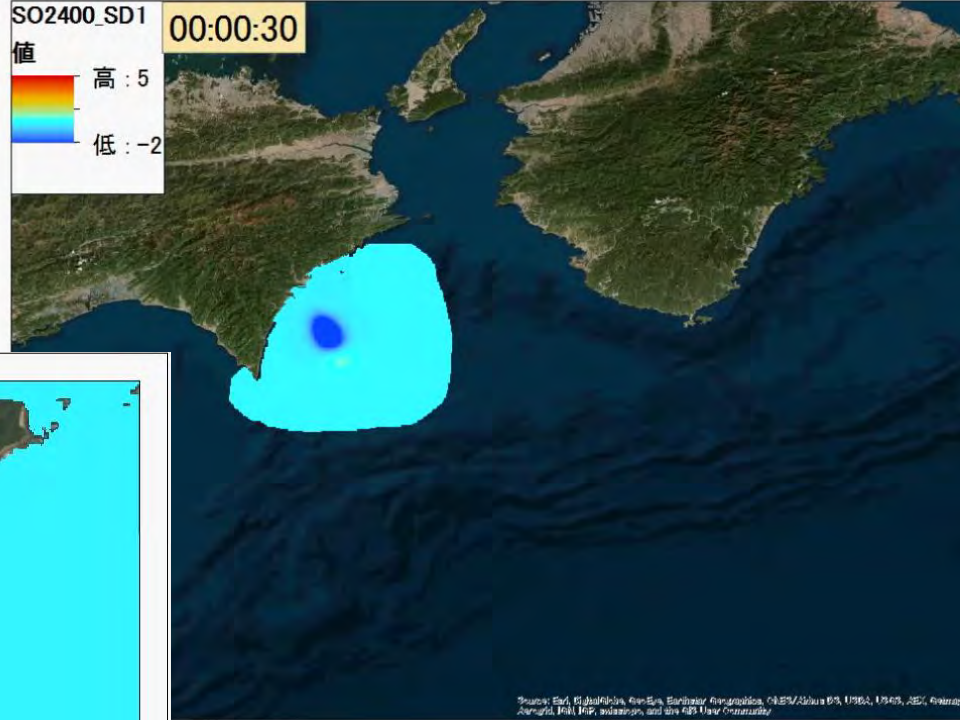


津波シミュレーションの結果 (So=2400m)

イベント発生後約15分で
穴喰に到達
最大津波高さ約9m

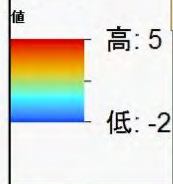


00:00:30

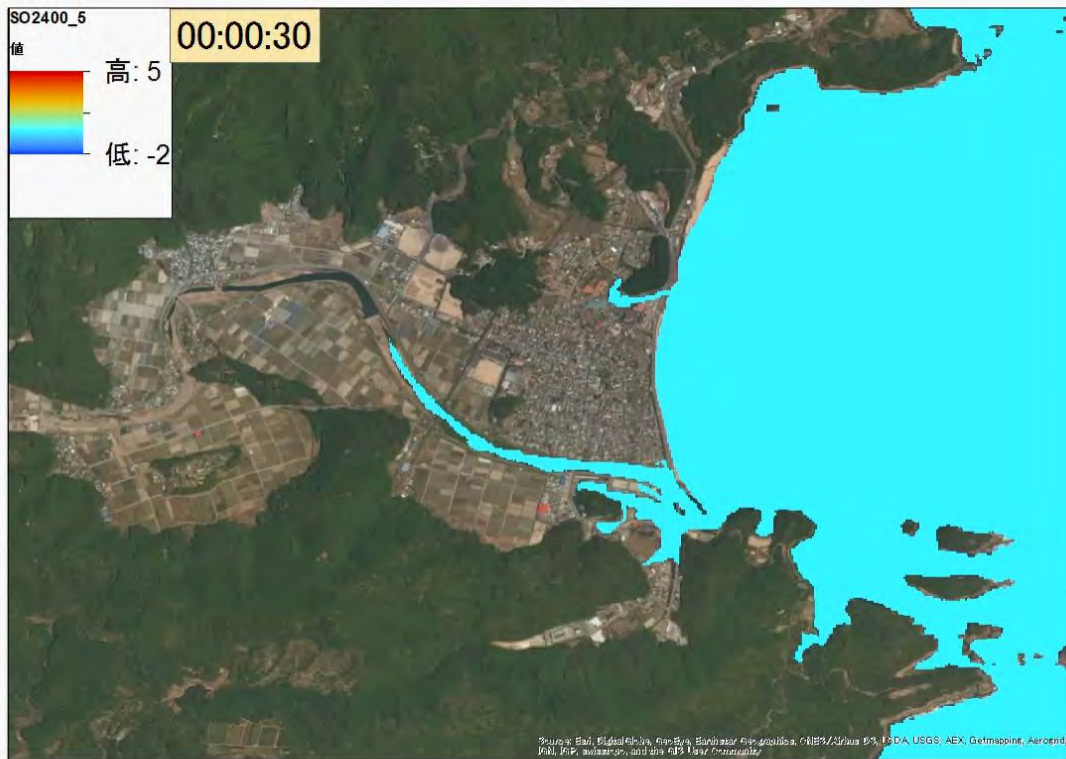


Source: Earthquake Data, Earthquake Catalog, OREDA/Alaska DPA, USGS, AEX, Getmapping, Aeroid, PBL, RFP, and the GPS User Community

SO2400_5

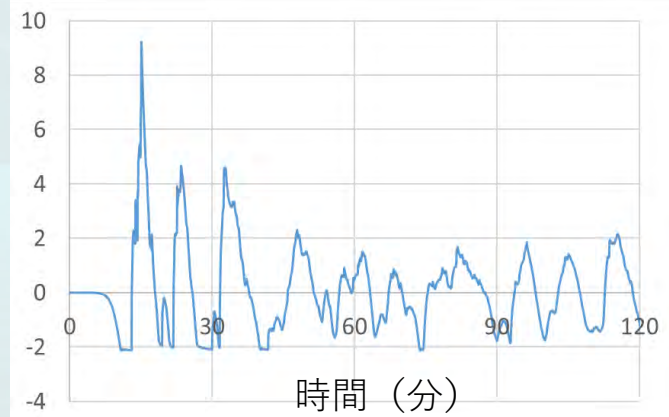


00:00:30

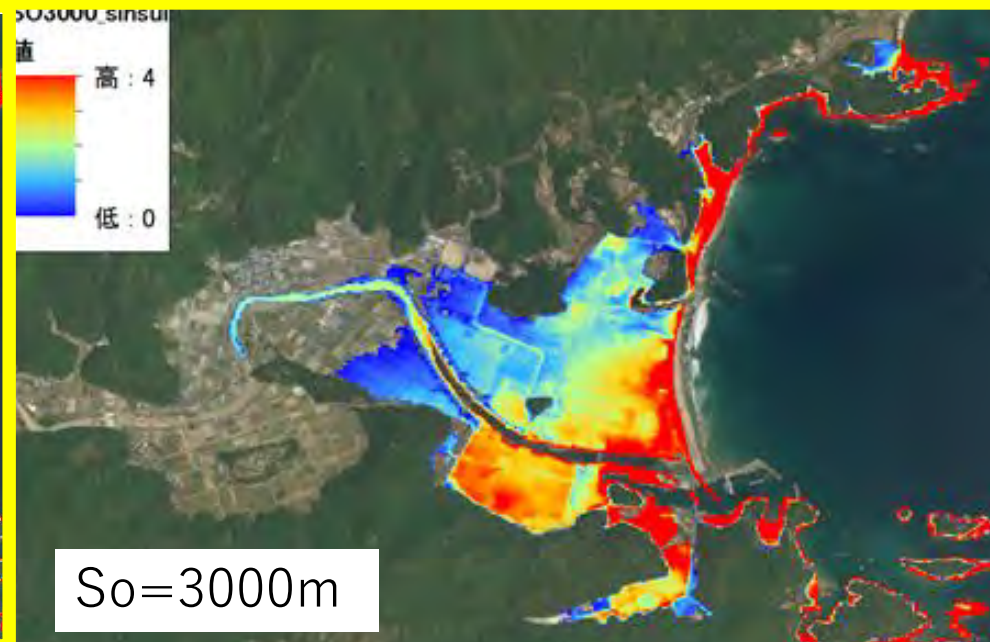
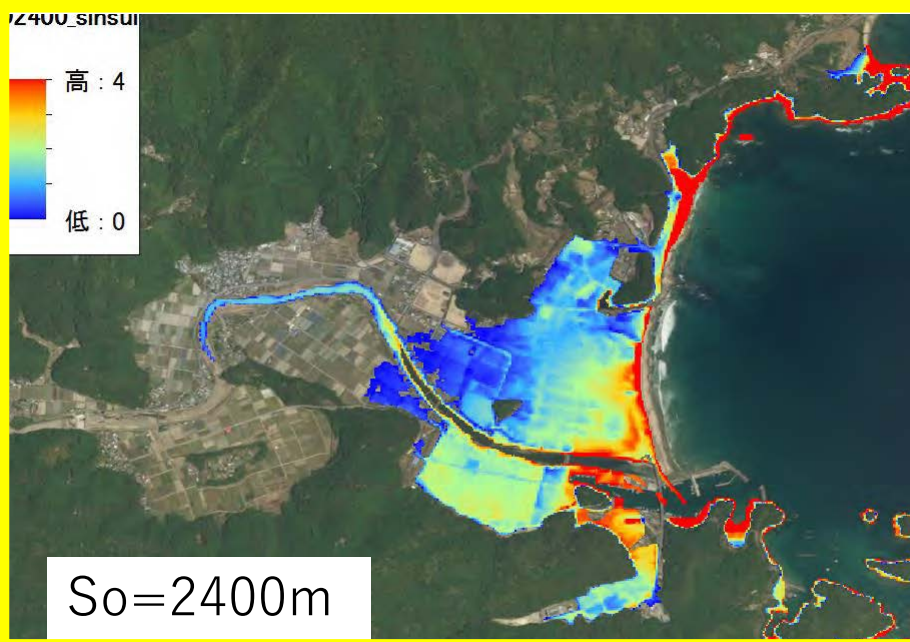
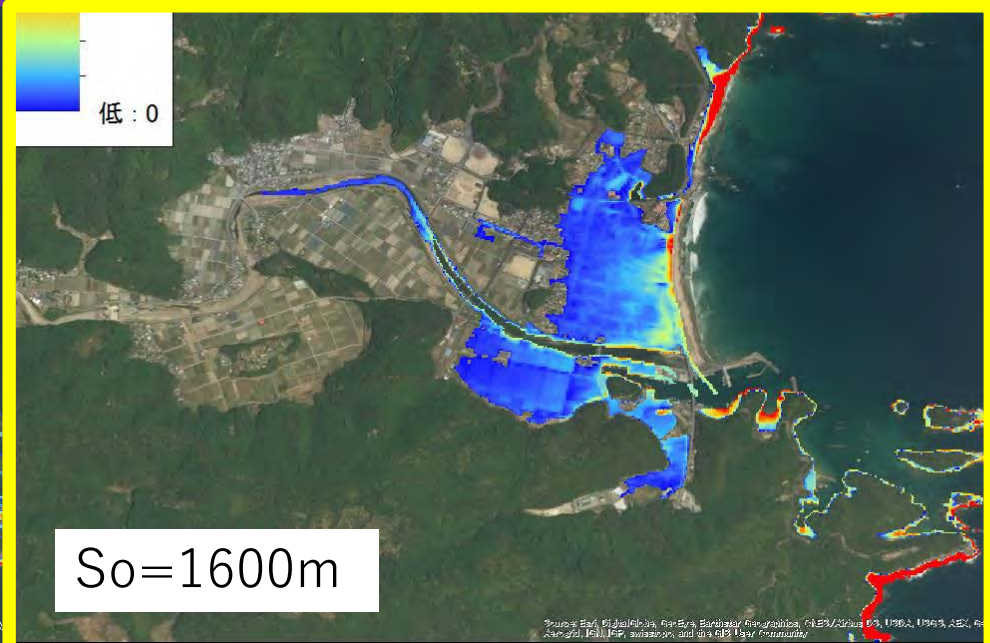


Source: Earthquake Data, Earthquake Catalog, OREDA/Alaska DPA, USGS, AEX, Getmapping, Aeroid, PBL, RFP, and the GPS User Community

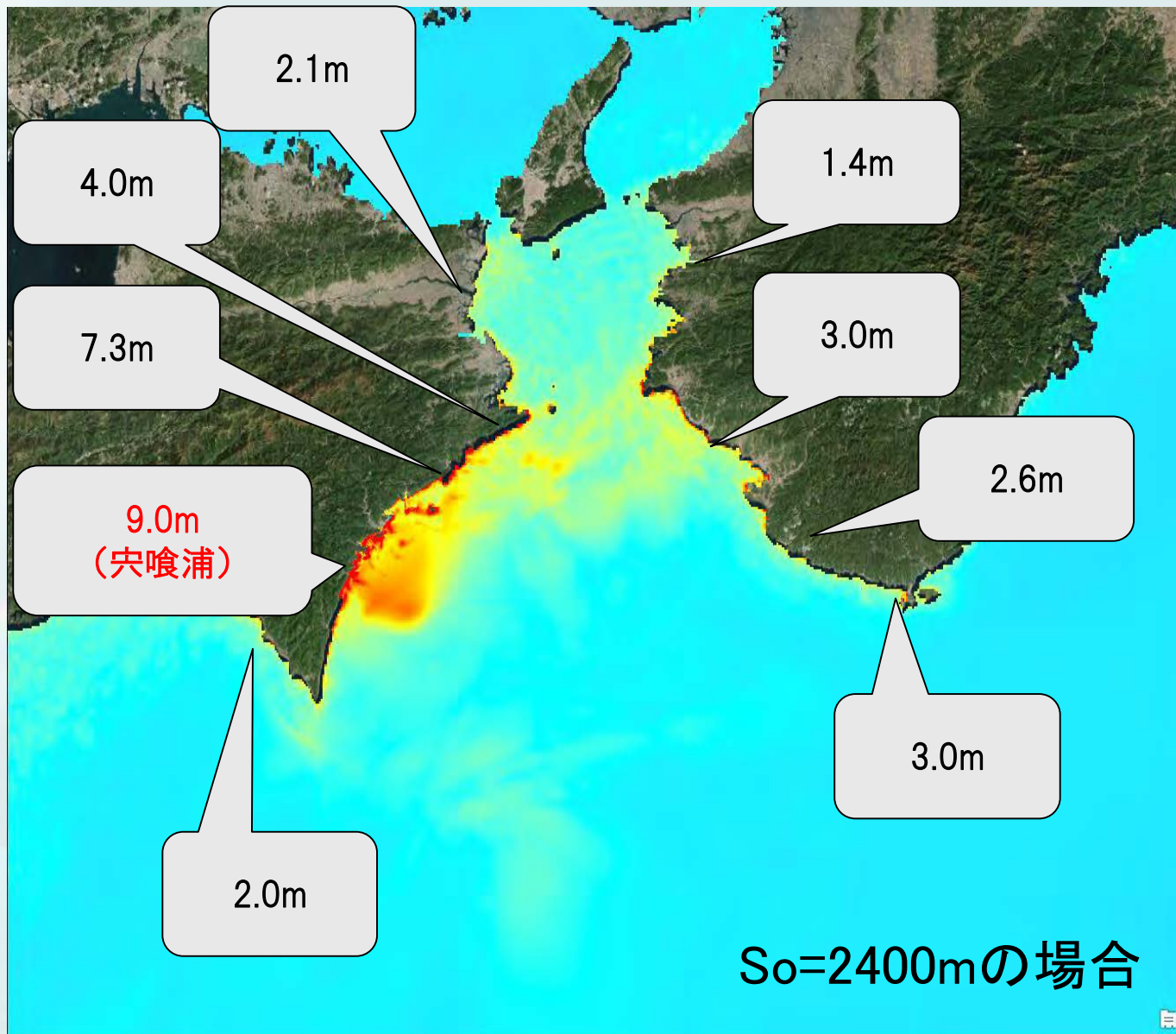
津波高さ (m)



浸水深分布の比較



広域での最大津波高



ローカル津波モデリングのまとめ

- 古文書調査，海底地形調査により1512年永正津波の波源である可能性の高い海底地すべりの痕跡を特定
- 1512年永正津波の海底地すべり津波シミュレーションの実施
- 地すべり移動量 ($S_0=1600\sim2400\text{m}$) であれば古文書に記載された浸水状況を再現できることがわかった。

最後に : Let's Act Glocally!

Glocalな研究を実施することによって、
成果やその効果が加速するように思います。

地球シミュレータ ⇔ PC

全地球津波モデリング ⇔ 集落の津波浸水計算

国立研究所 ⇔ 地方大学

今後ともどうぞよろしくお願いします。