



津波シミュレーションと津波波源モデルの構築

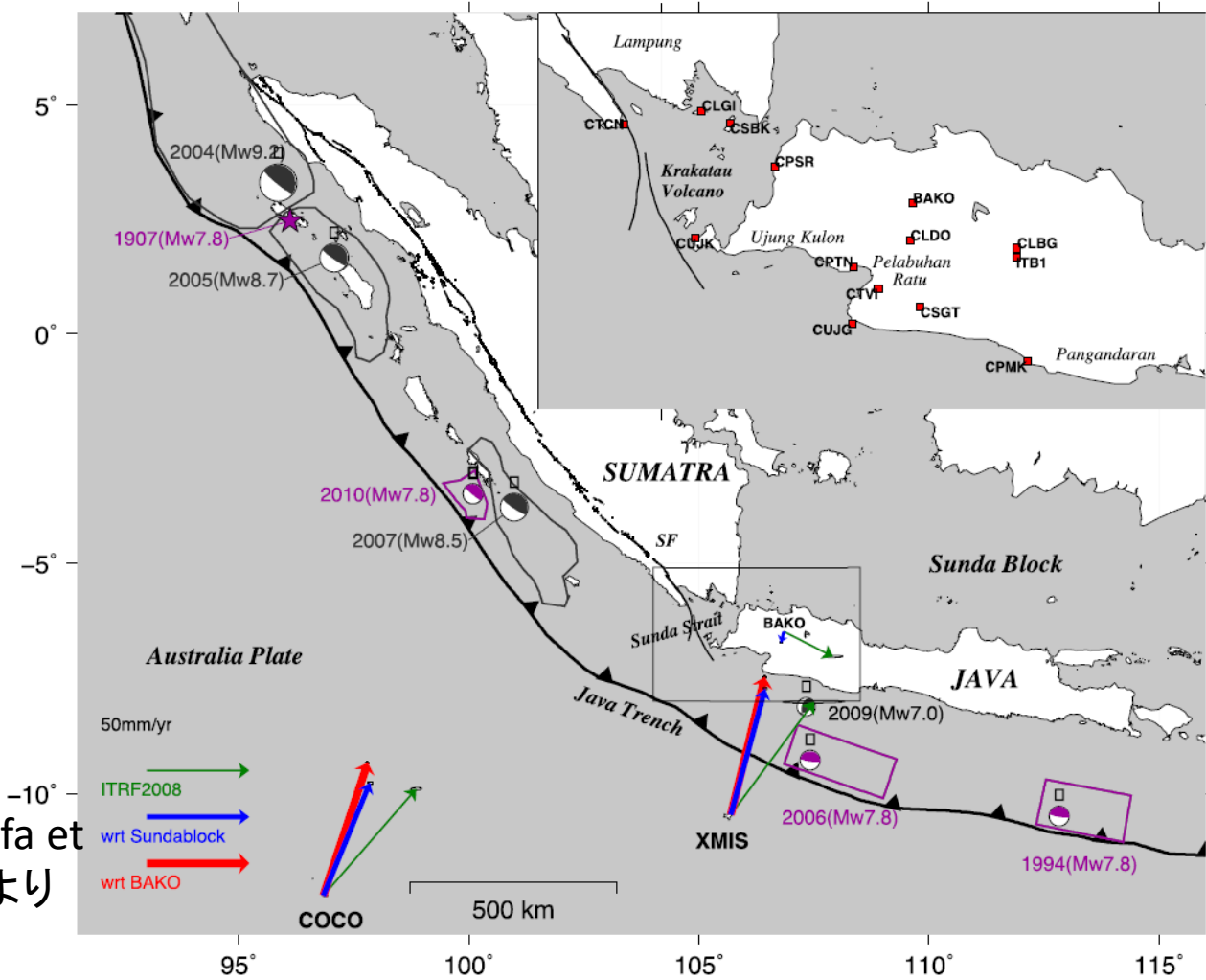
建築研究所 国際地震工学センター
藤井 雄士郎

令和5年度建築研究所講演会

発表内容

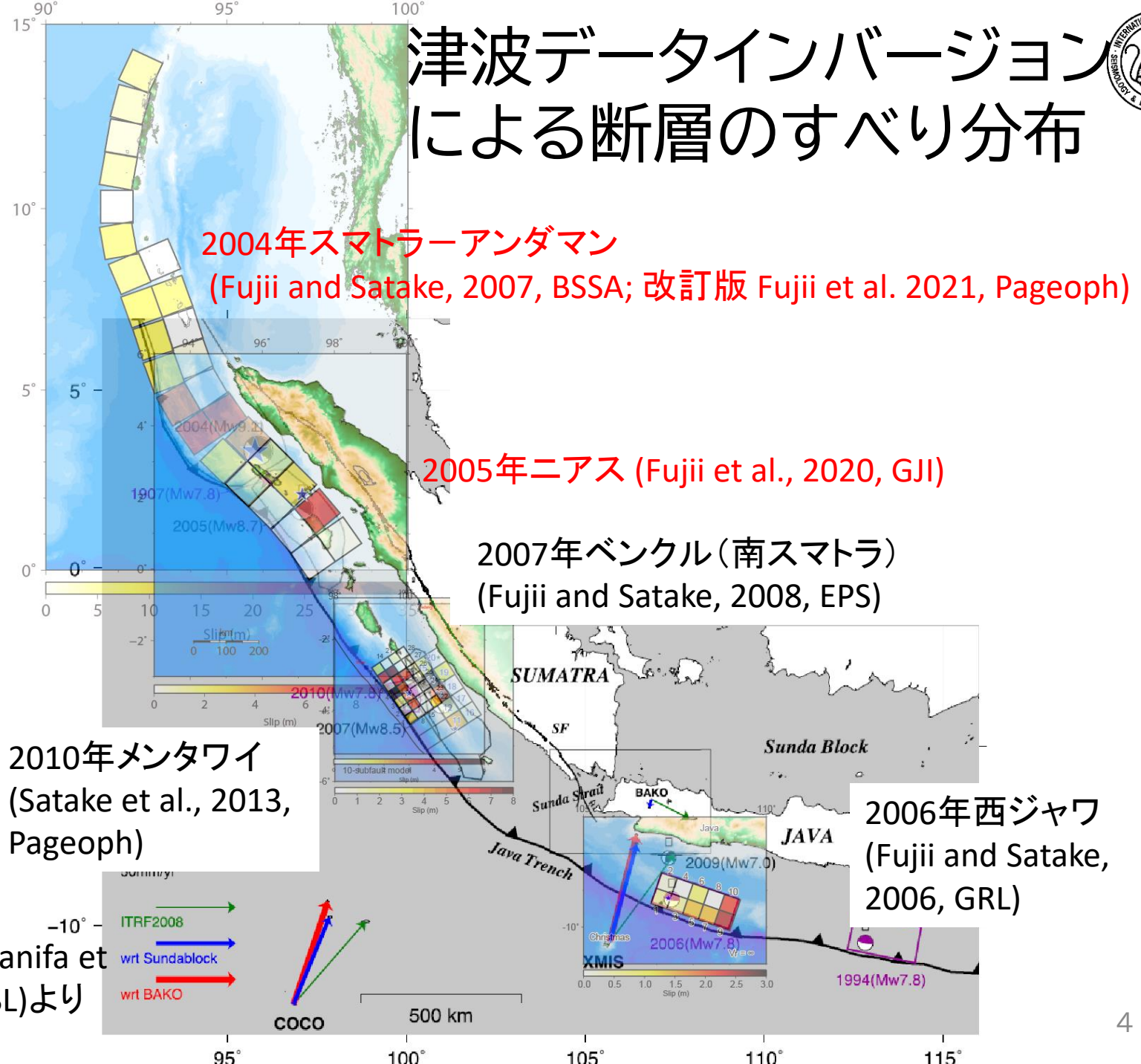
- インバージョンによる津波波源モデルの構築と意義
- 2004年スマトラ-アンダマン地震
- 2011年東北地方太平洋沖地震
- 2010年チリ地震による津波
- 2004年スマトラ-アンダマン地震(再解析)
- 2005年ニアス地震
- 2022年トンガ火山噴火による津波
- 国際地震工学研修における活用

津波データインバージョンによる断層のすべり分布

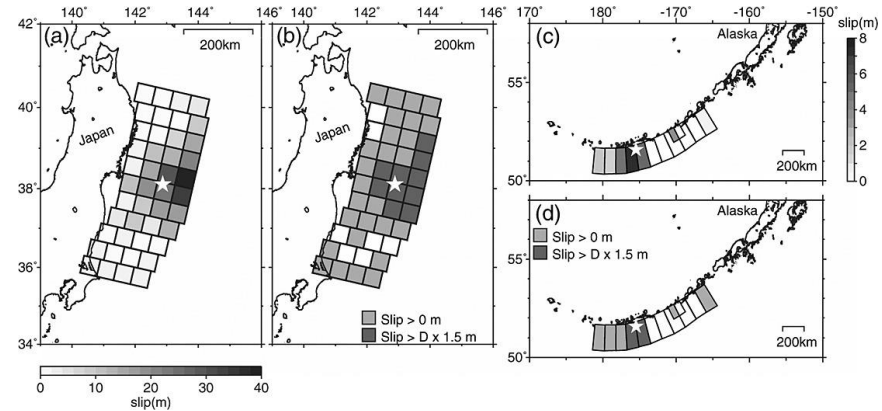
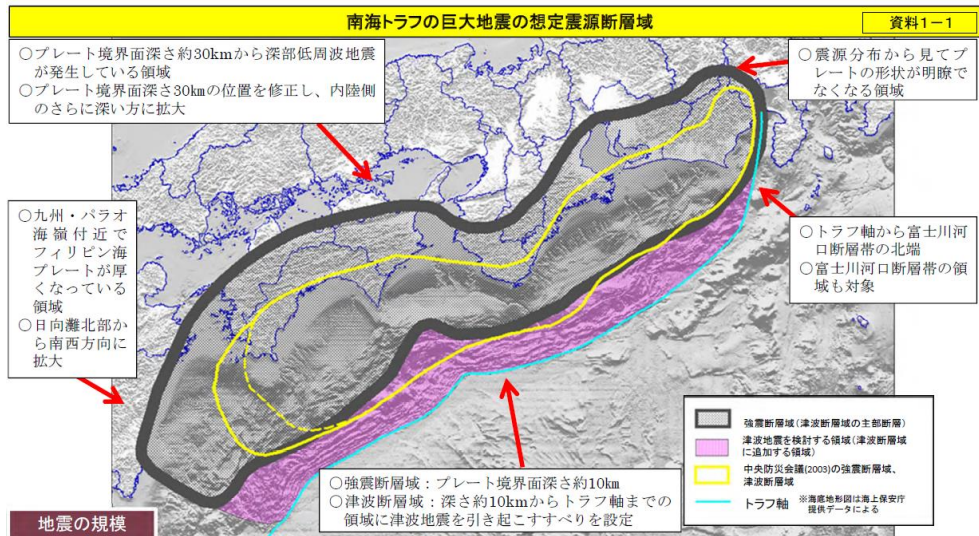


背景地図: Hanifa et al. (2014, EPSL)より
IISEE, BRI

津波データインバージョンによる断層のすべり分布



津波予測のための想定断層モデル 地震のスケーリング則



断層面積 $S = 1.34 \times 10^{-10} M_0^{2/3}$

すべり量 $D = 1.66 \times 10^{-7} M_0^{1/3}$

大すべり域 $S_a = 2.81 \times 10^{-11} M_0^{2/3}$

面積の比 $S_a/S = 0.2$

Mwの範囲 6.7-9.2

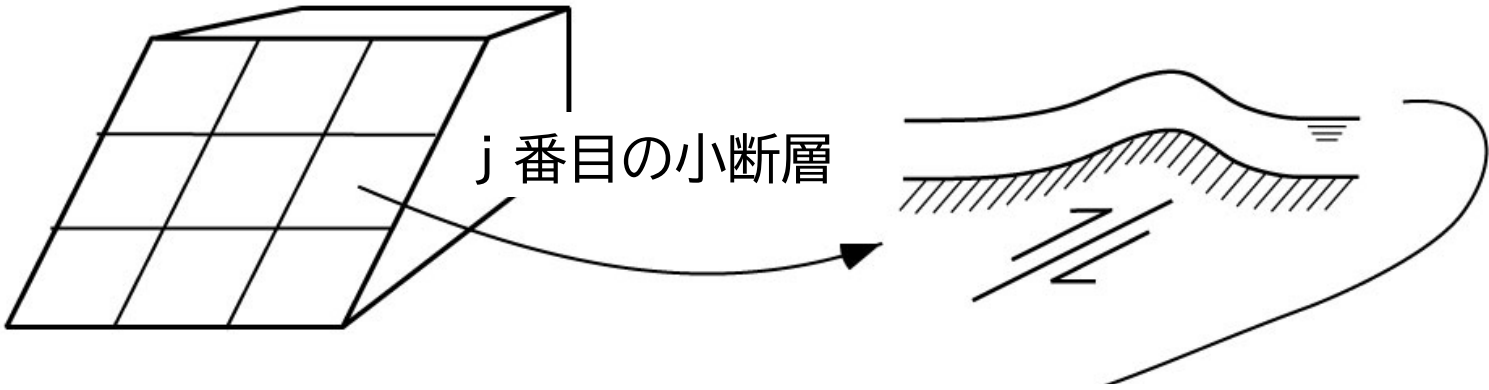
Murotani et al. (2013)

	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

南海トラフの巨大地震の想定震源域

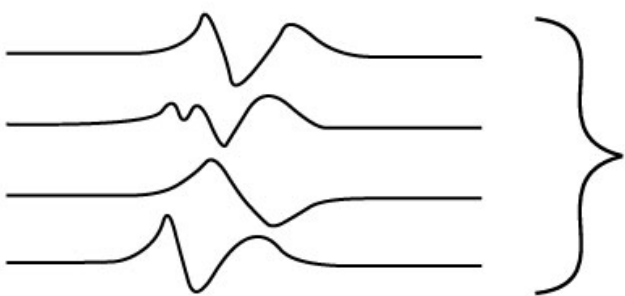
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html

津波波形インバージョン



実際の海底地形データを用いた
差分法による津波伝播計算

計算津波波形(グリーン関数)



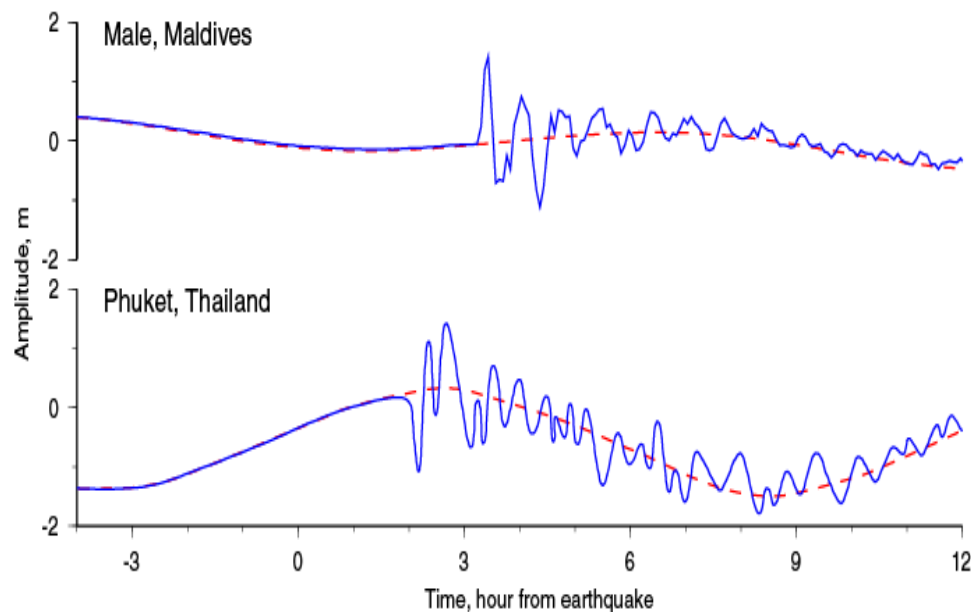
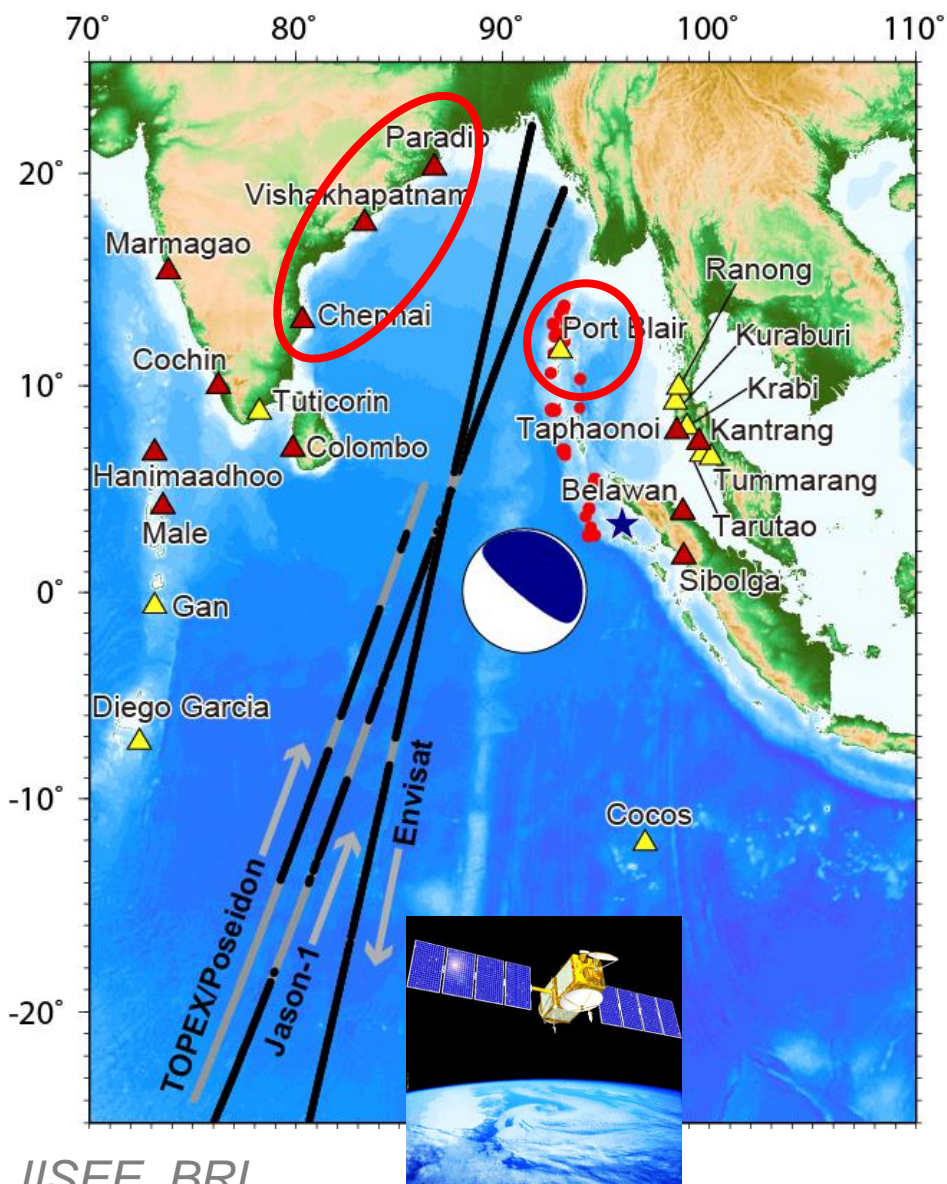
i番目の観測点



Satake (2002)

発表内容

- インバージョンによる津波波源モデルの構築と意義
- 2004年スマトラ-アンダマン地震
- 2011年東北地方太平洋沖地震
- 2010年チリ地震による津波
- 2004年スマトラ-アンダマン地震(再解析)
- 2005年ニアス地震
- 2022年トンガ火山噴火による津波
- 国際地震工学研修における活用

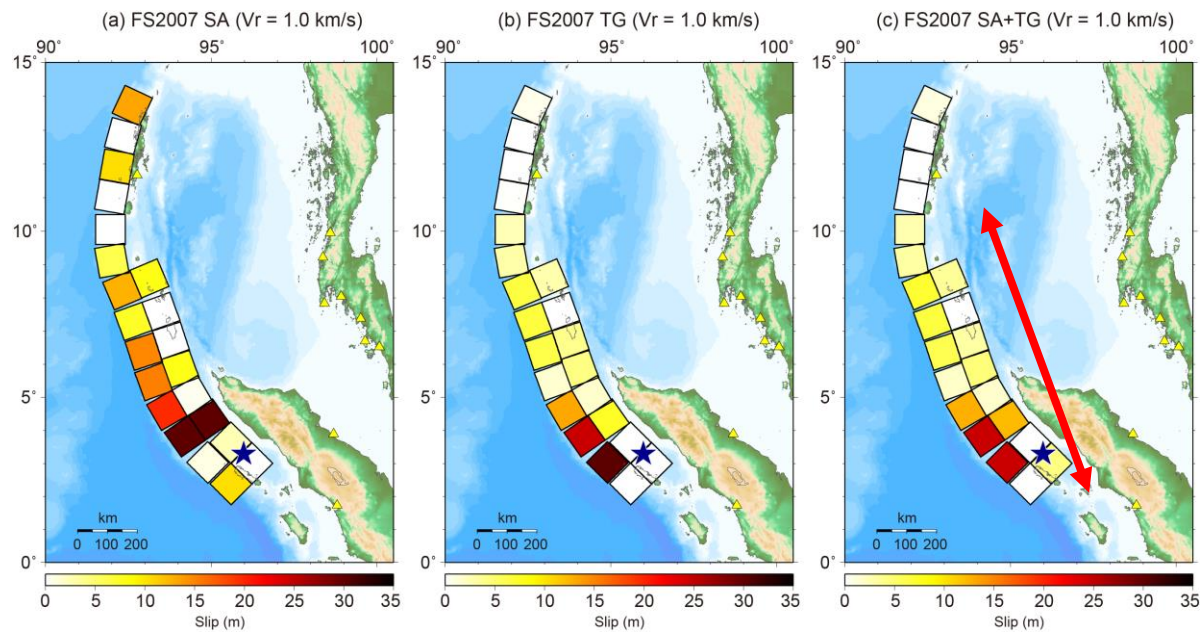


検潮記録: Univ. Hawaii Sea Level Center, Hydrographic Dept. Royal Thai Navy

Fujii and Satake (2007)

従来の津波波源モデル(FS2007)

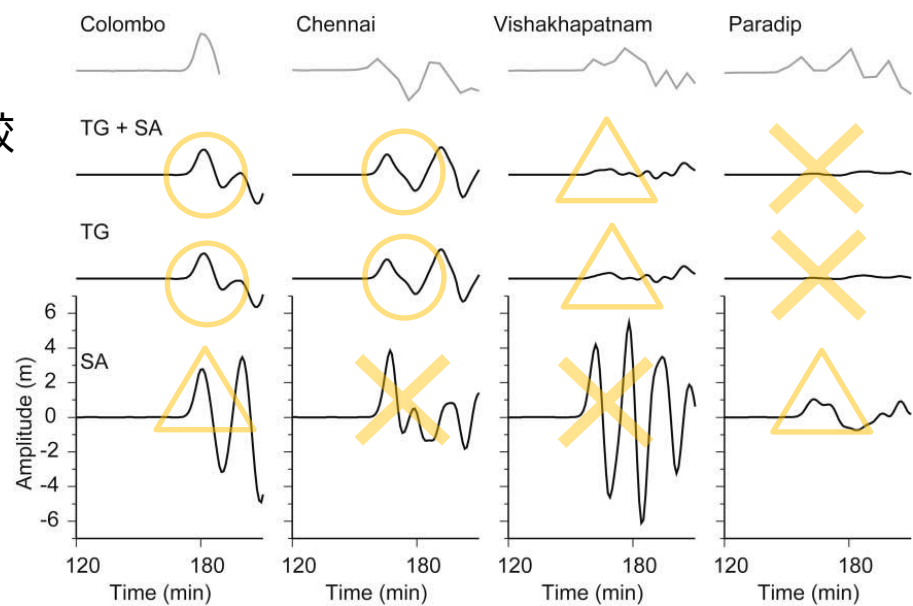
断層面上の
すべり分布



断層の長さ:
~900 km ?

スリランカとインド東岸
における津波波形の比較

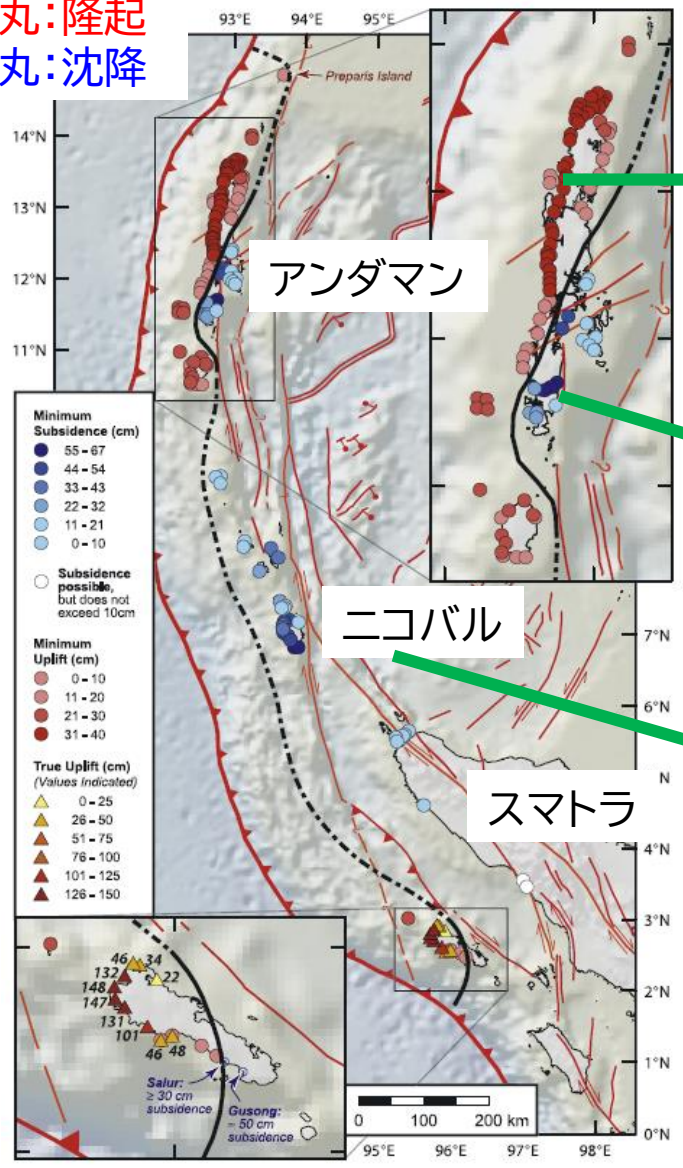
灰色線: 観測
黒線: 計算



Fujii and Satake (2007)
(以降, FS2007と呼ぶ)

地震後の地殻変動

赤丸:隆起
青丸:沈降



サンゴの隆起



沈降による浸水 (Port Blair)

茅根・他 (2005)



約3 m 沈降した
灯台

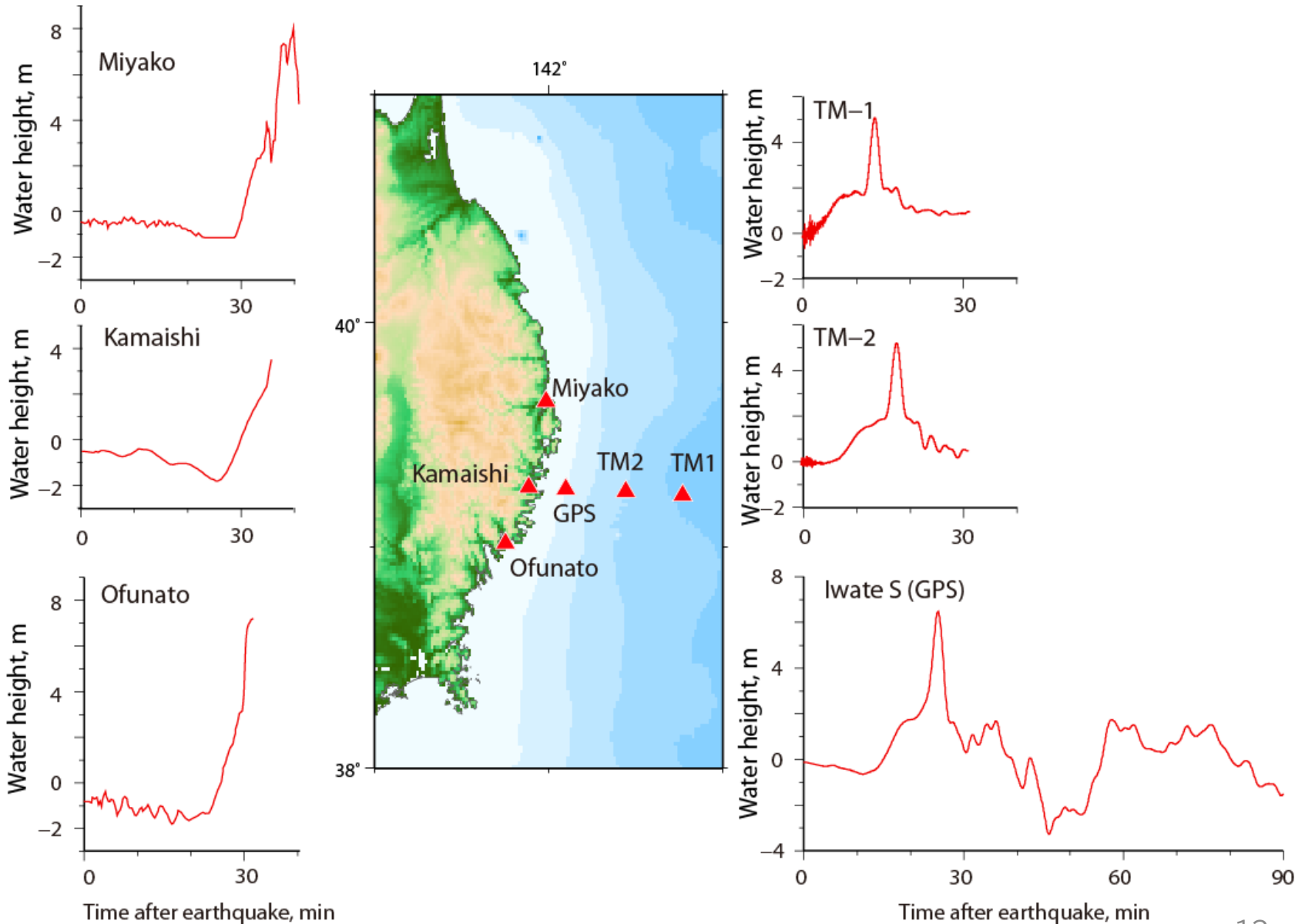
Malik and Murty (2005)

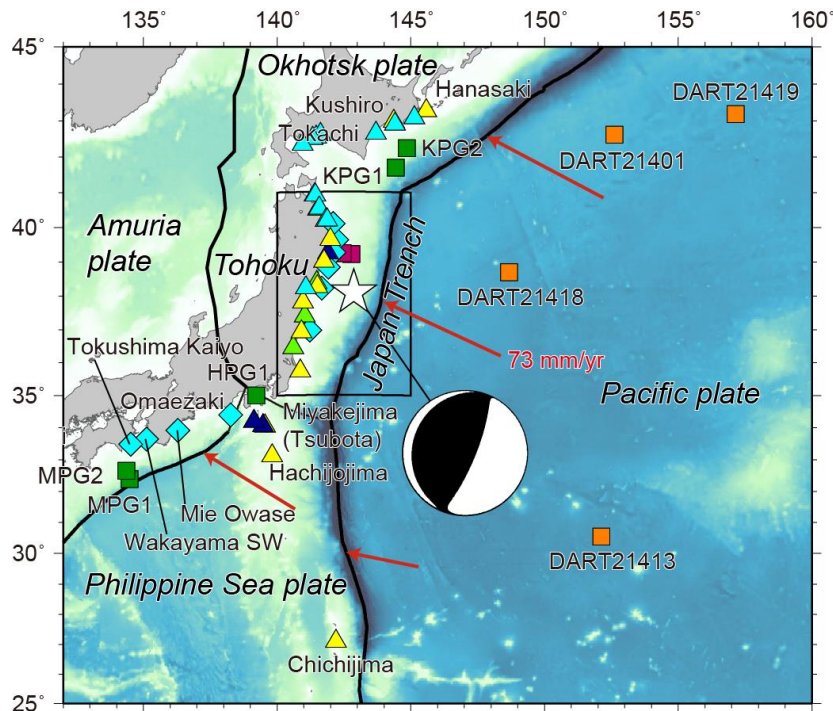
Meltzner et al. (2006)

発表内容

- インバージョンによる津波波源モデルの構築と意義
- 2004年スマトラ-アンダマン地震
- **2011年東北地方太平洋沖地震**
- 2010年チリ地震による津波
- 2004年スマトラ-アンダマン地震(再解析)
- 2005年ニアス地震
- 2022年トンガ火山噴火による津波
- 国際地震工学研修における活用

津波波形データ(震源域, 高サンプリング)

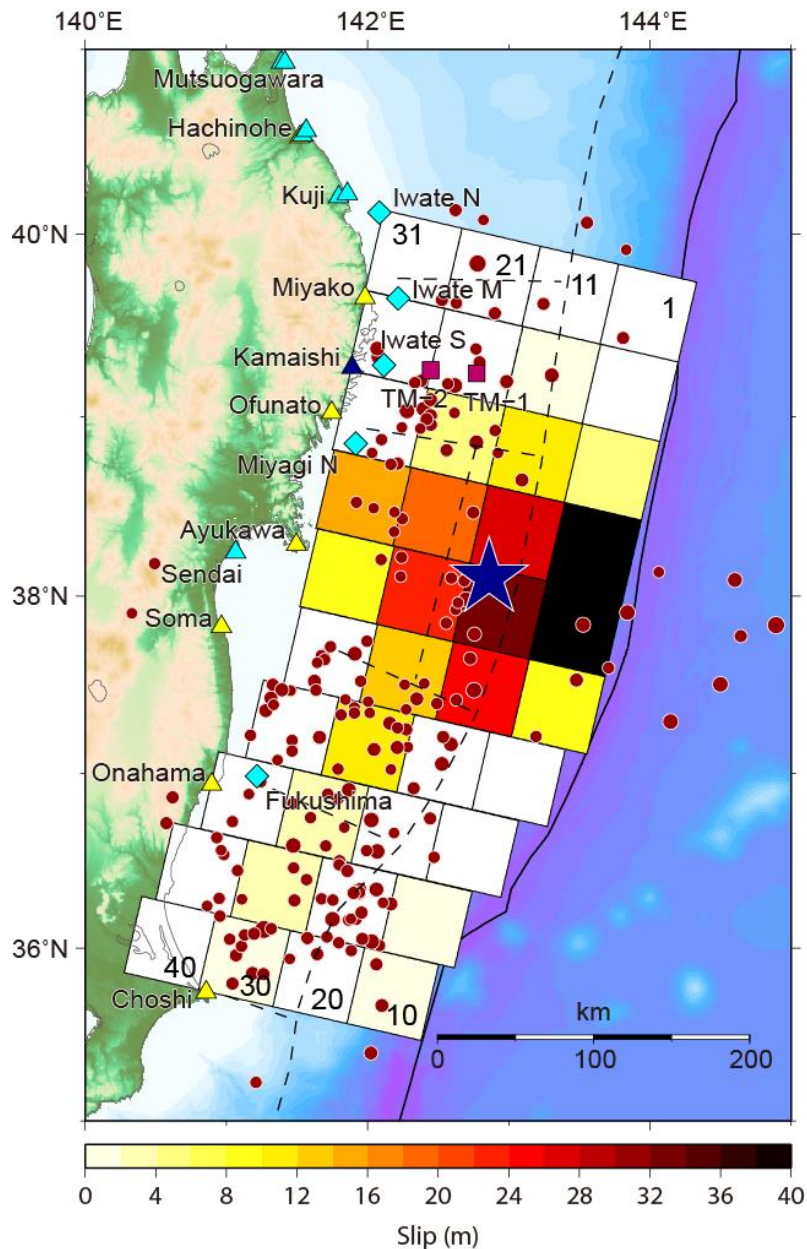




- : 海底水圧計
ケーブル式と DART
- ◇: GPS波浪計
- △: 検潮所または波浪計
- ☆: 震央(気象庁より)

タイプ	#	観測機関	水深	データ間隔
海底津波計	7	ERI, JAMSTEC	1000-2300 m	0.1-1 s
DART	4	NOAA	5300-5800 m	15s/1min
GPS波浪計	10	NOWPHAS	125 – 430 m	5 s
波浪計	8	NOWPHAS, TEPCO	20 – 50 m	0.5- 5 s
検潮所	24	JMA, JCC, THEP, JAPG	coast	0.5 – 60 s

破壊伝播効果を考慮しない震源モデル



断層面: 500 km x 200 km
分割した各領域: 50 km x 50 km

最大すべり量: 34 m

地震モーメント: 3.2×10^{22} Nm
($M_w = 8.9$)

青星: 気象庁の震央

赤丸: 気象庁の余震
(M_5 以上, 本震後約1日間)

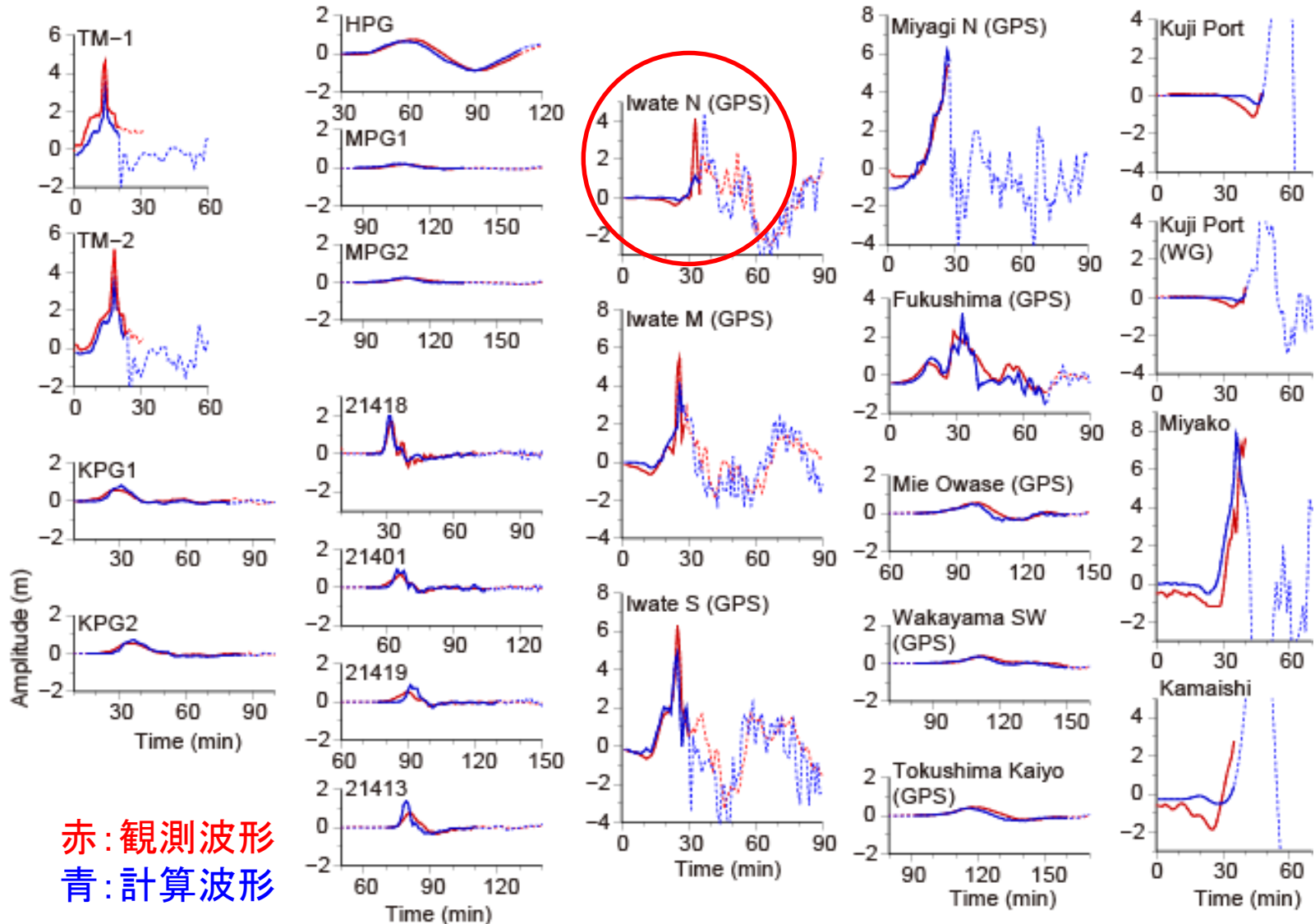
Ver. 4.2: Fujii et al. (2011, EPS)

津波波形の比較

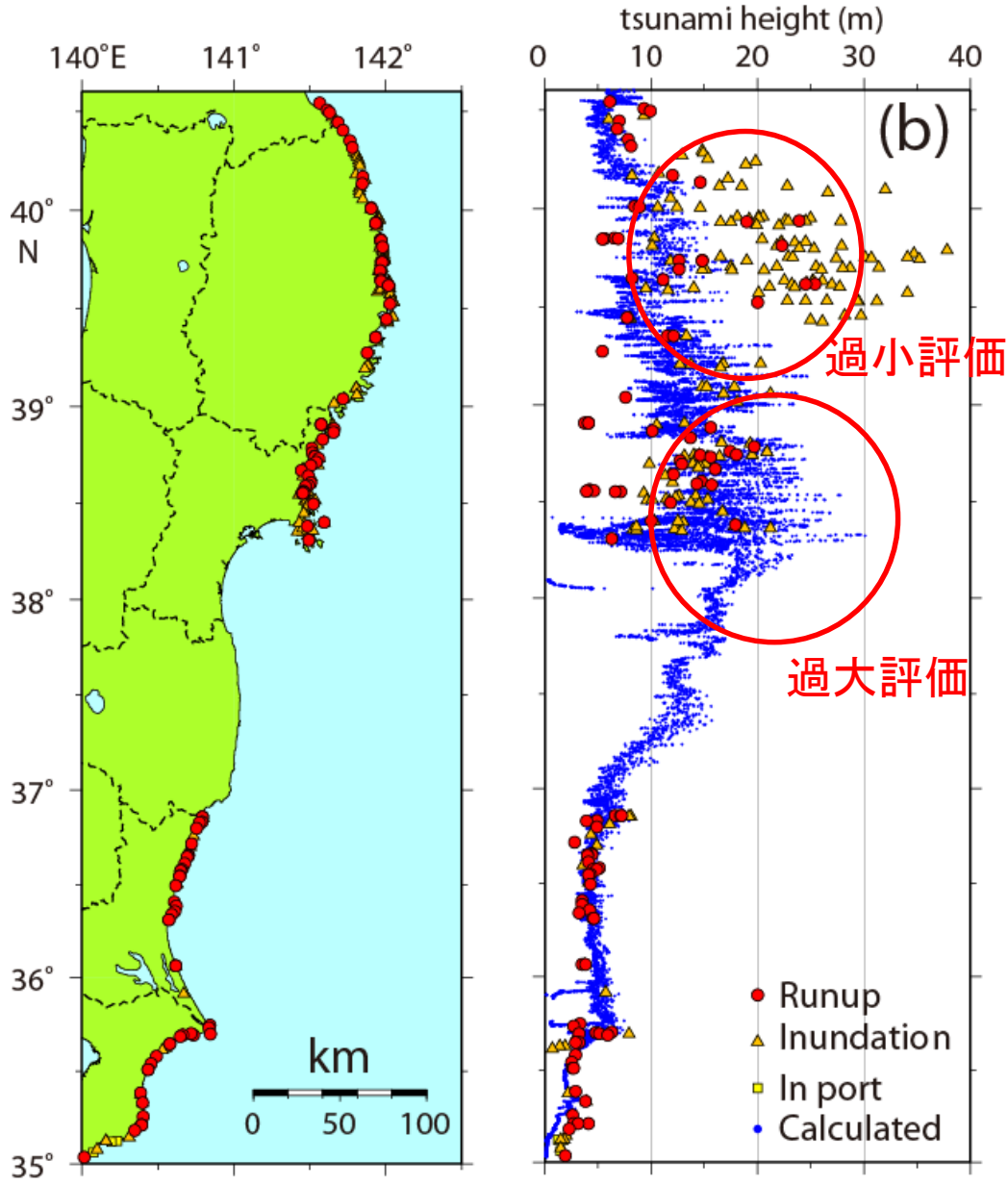
海底水圧計

GPS波浪計

検潮所

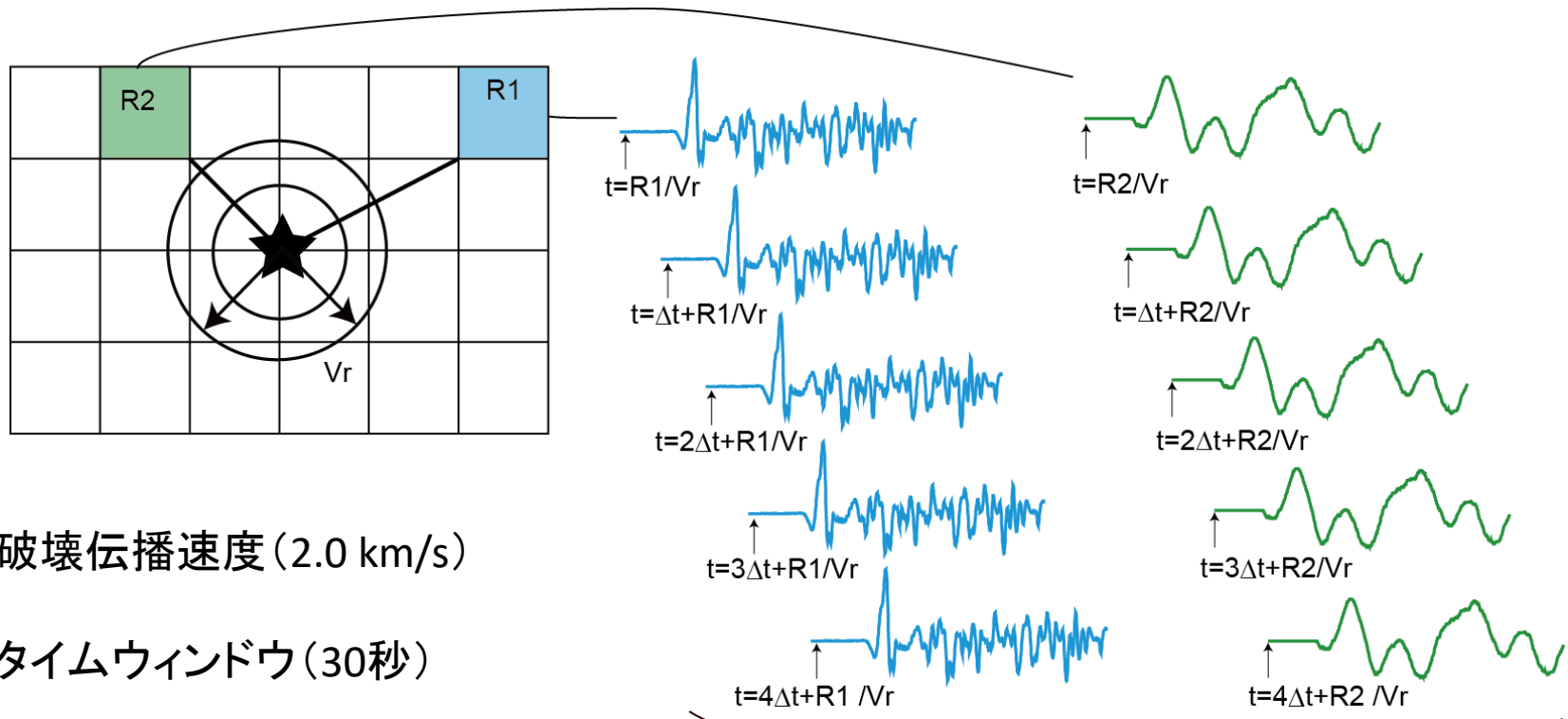


現地調査による津波高との比較



津波の高さ
都司・他 (2011)

すべり遅れを考慮したインバージョン



V_r : 破壊伝播速度 (2.0 km/s)

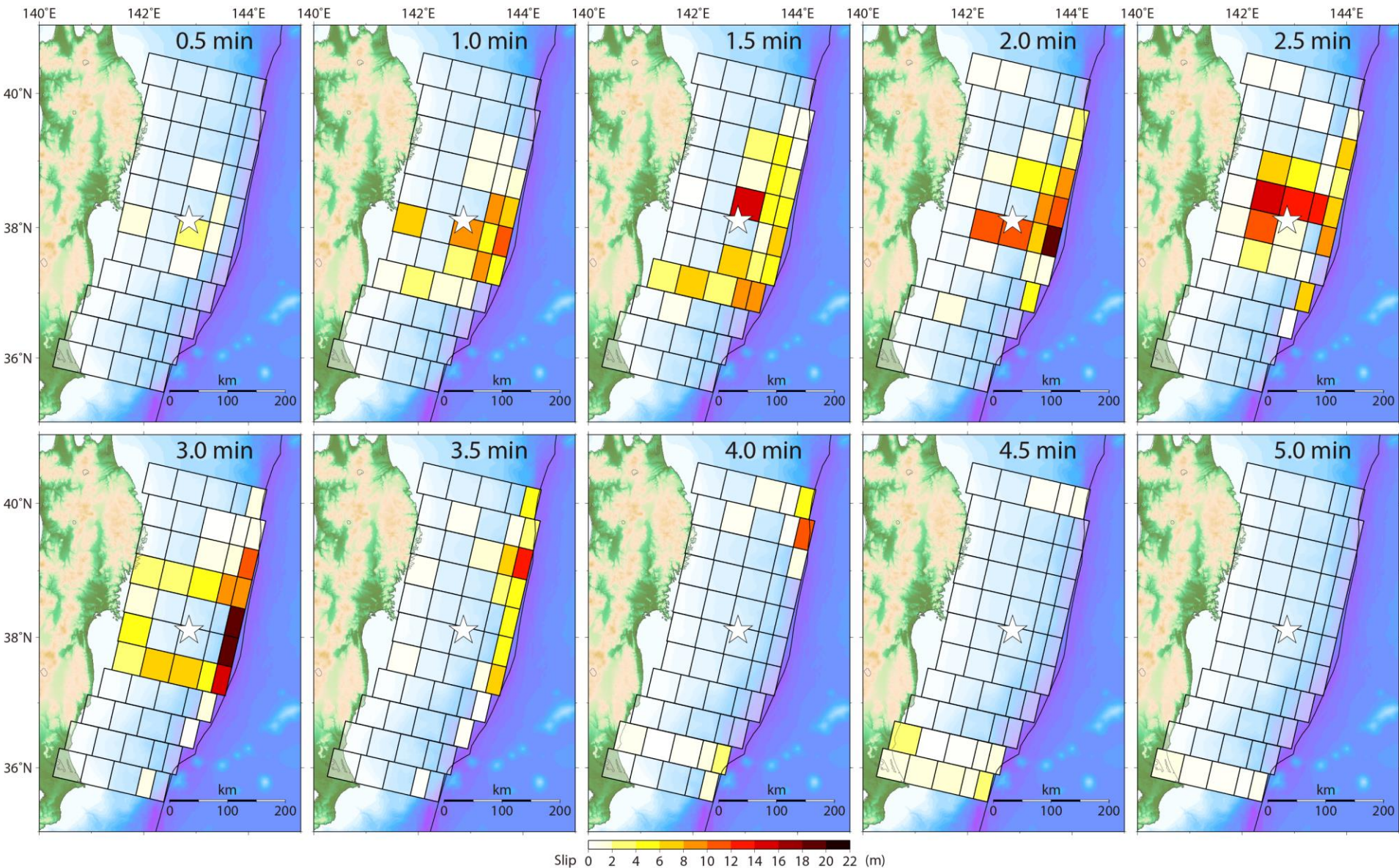
Δt : タイムウィンドウ (30秒)

R : 震央から小断層までの距離 (km)

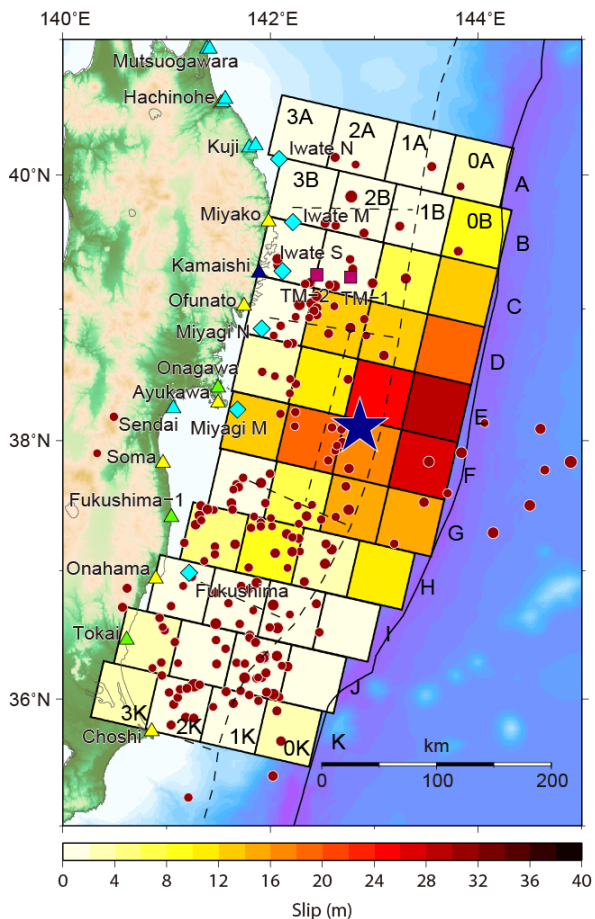
データサンプリング: 0.2 分 (12 秒)

「マルチタイムウィンドウ (MTW) 津波波形インバージョン」

すべりの時空間分布

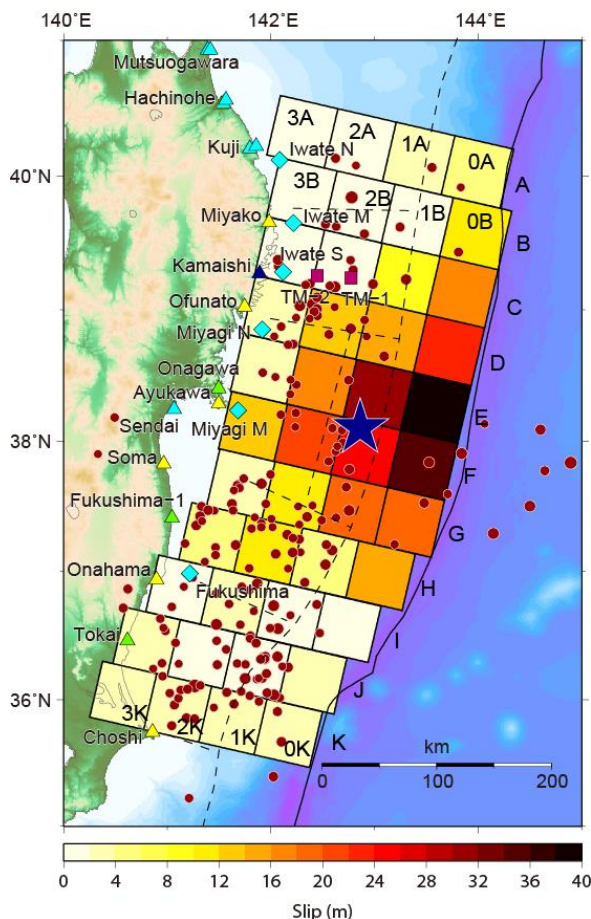


Ver 6.3 (44小断層)



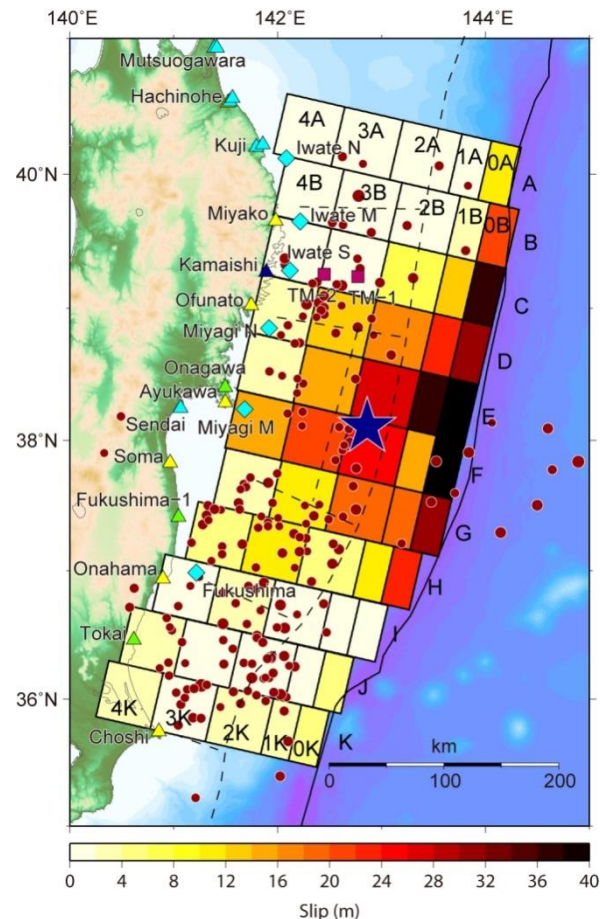
dip: 14°
width: 50 km

Ver 7.0 (44小断層)



dip: 16°
width: 50 km

Ver 8.0 (55小断層)

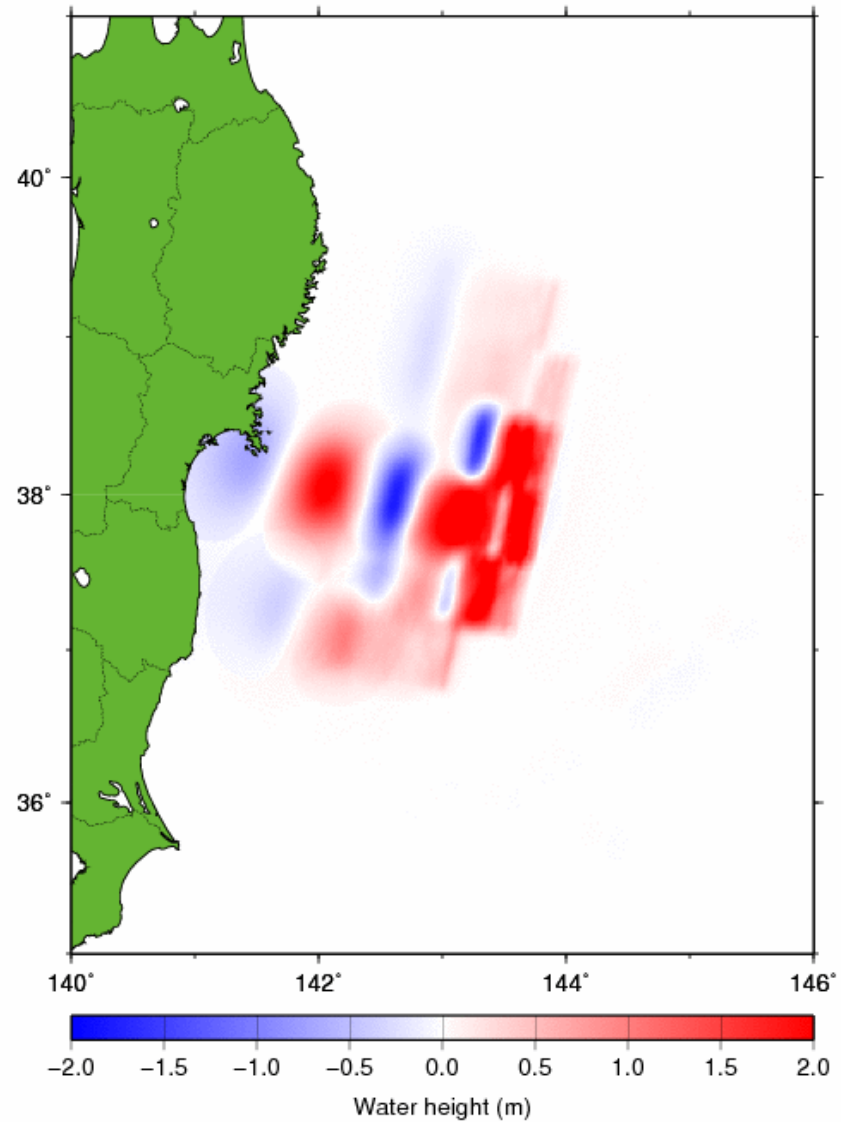
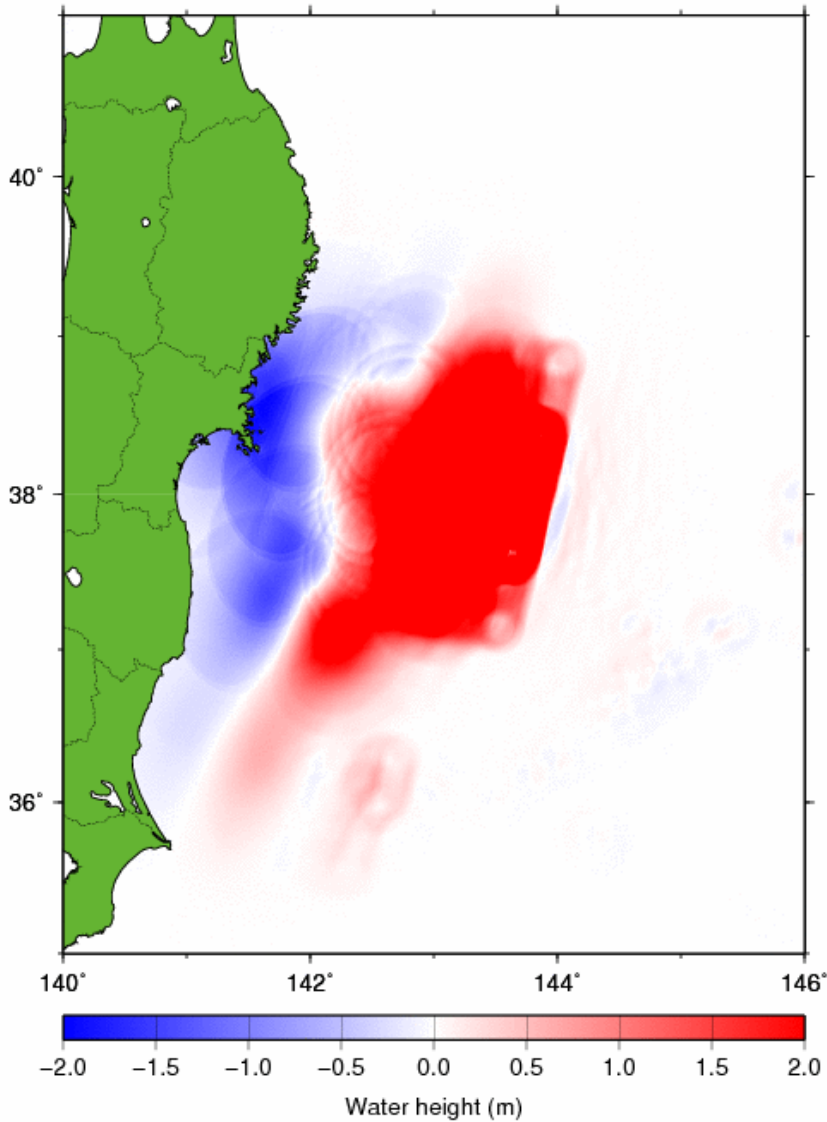


dip: 16°
width: 50 km

津波伝播のシミュレーション

2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake 0001 min

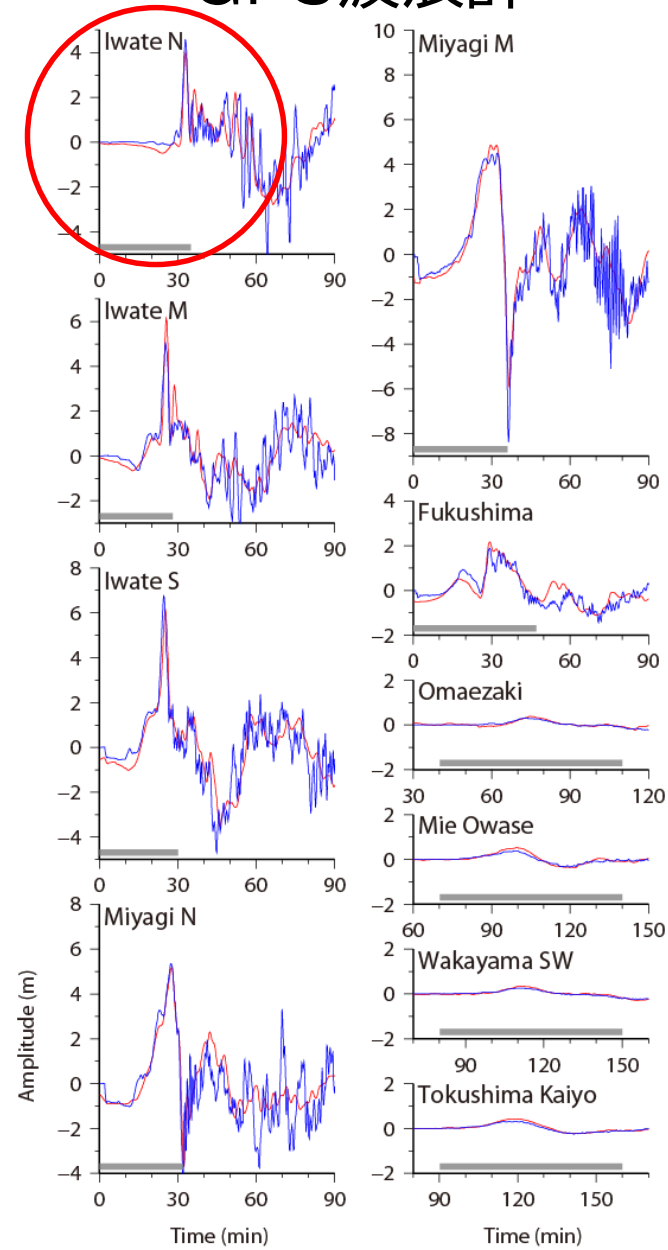
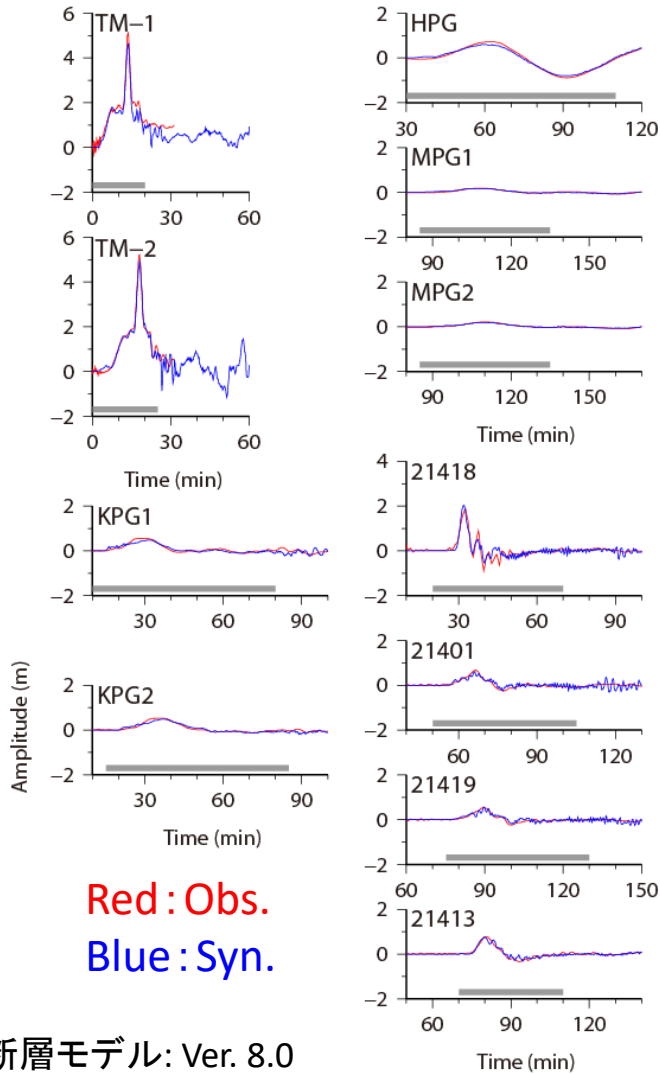
2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake 0001 min



津波波形の比較

海底水圧計

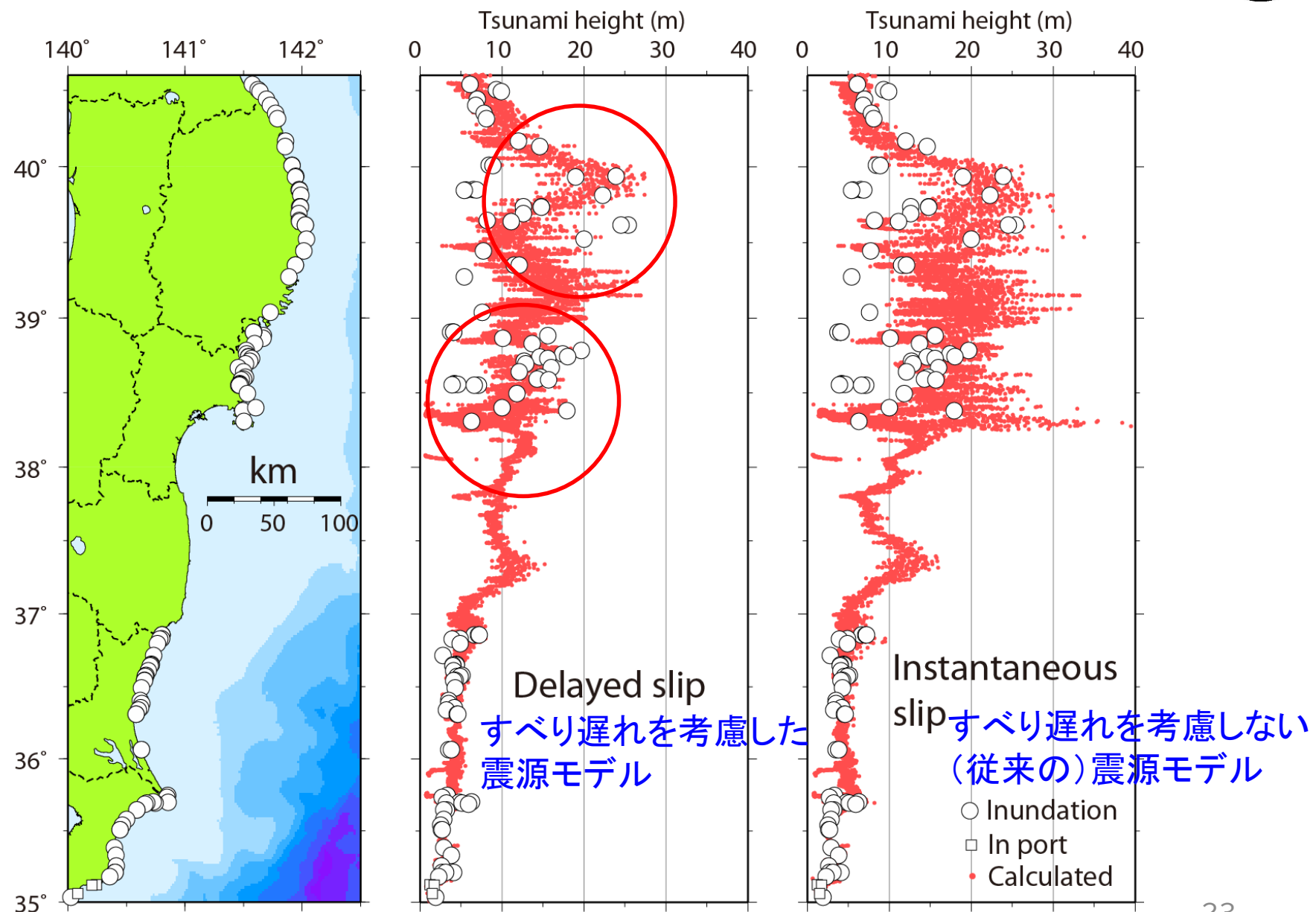
GPS波浪計



55小断層モデル: Ver. 8.0

Satake et al. (2013, BSSA)

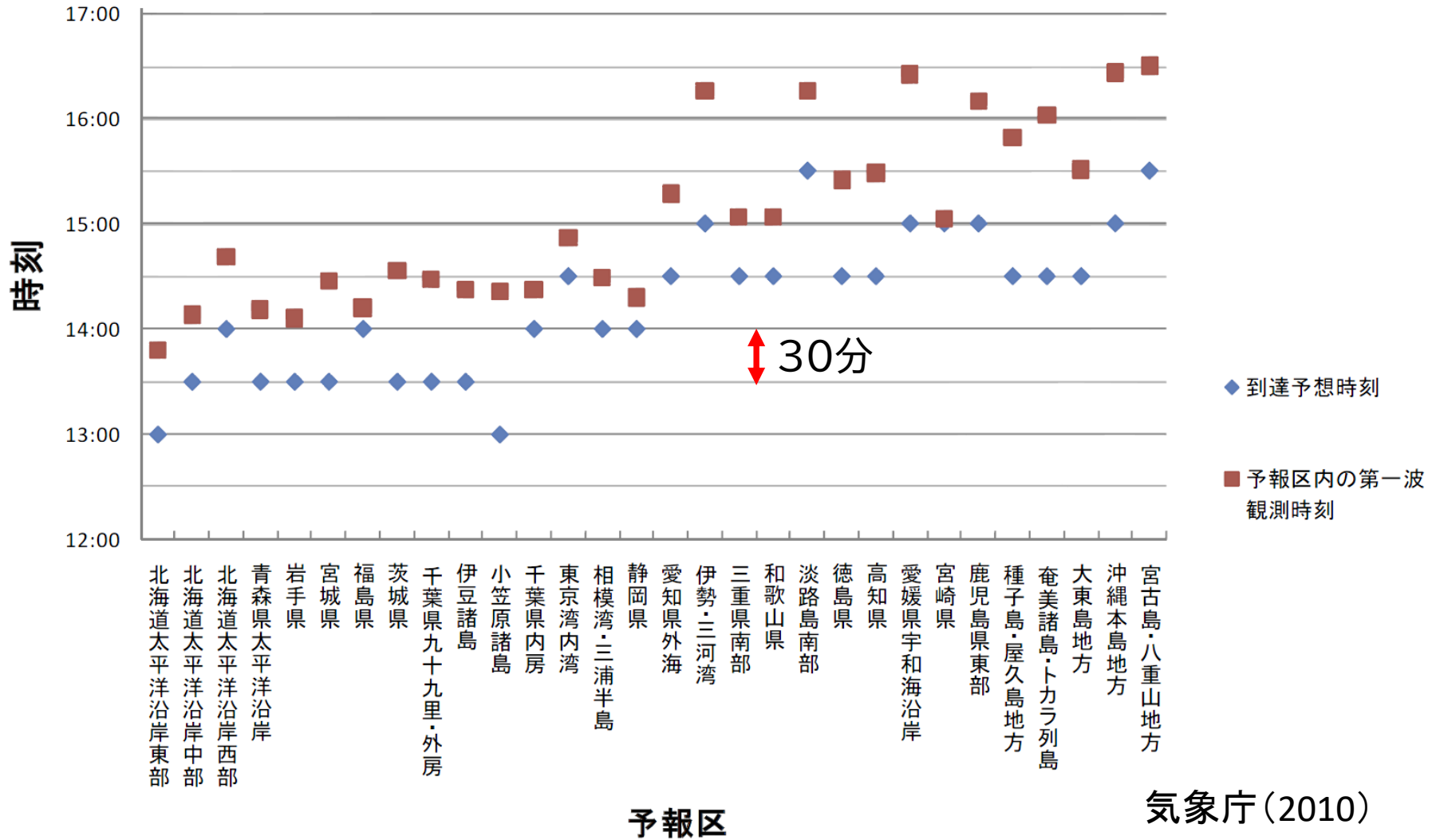
沿岸での津波高との比較



発表内容

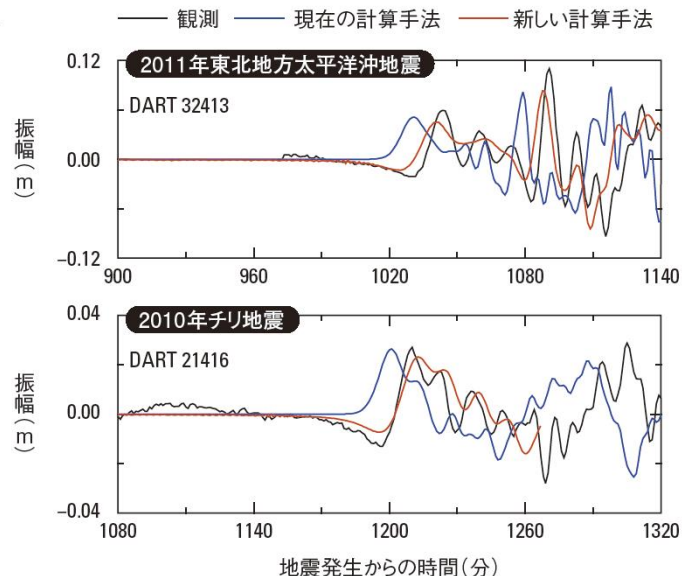
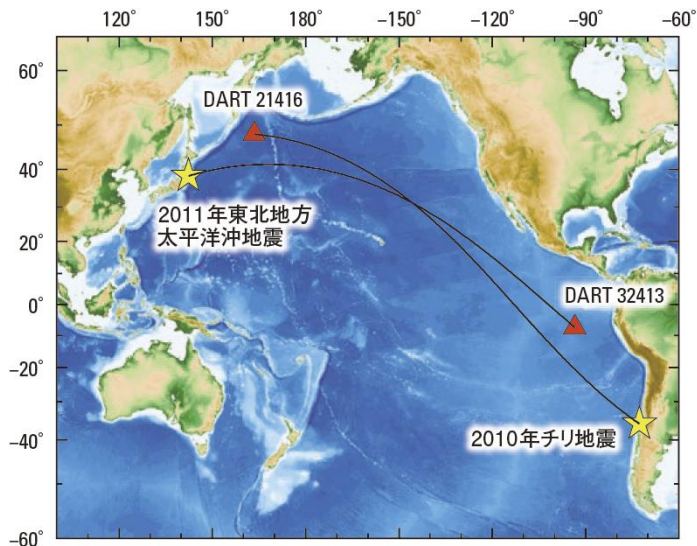
- インバージョンによる津波波源モデルの構築と意義
- 2004年スマトラ-アンダマン地震
- 2011年東北地方太平洋沖地震
- 2010年チリ地震による津波
- 2004年スマトラ-アンダマン地震(再解析)
- 2005年ニアス地震
- 2022年トンガ火山噴火による津波
- 国際地震工学研修における活用

2010年チリ地震の津波到達予想時刻



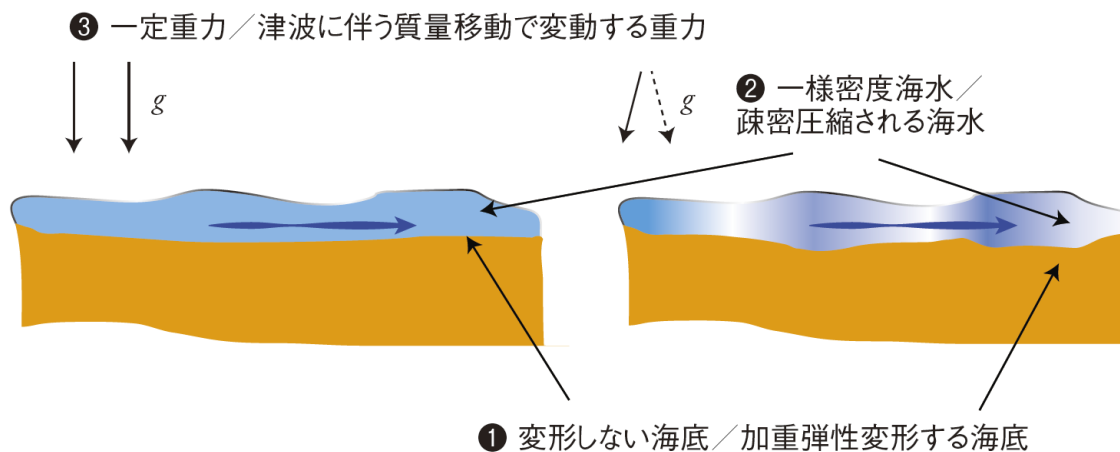
観測された津波の到達時刻が予想時刻より30分程度遅い。

遠地津波の走時遅れと初期反転位相



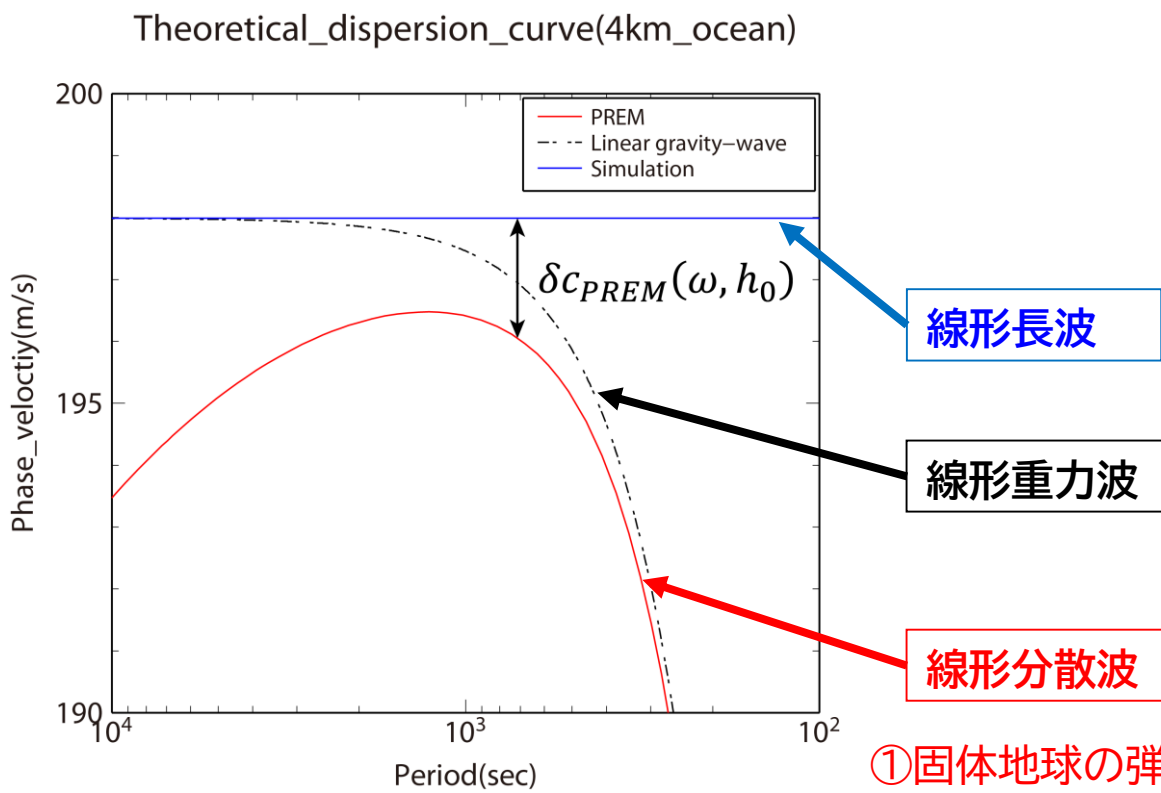
①固体地球の弾性, ②海水の圧縮性, ③重力ポテンシャルの変化を考慮することによりWatada et al. (2014, JGR)でほぼ説明された。

津波伝播の
概念図



計算津波波形の位相補正

線形長波による津波を計算→FFT, 位相スペクトルを補正→逆FFT



Watada et al. (2014, JGR)

- ① 固体地球の弾性
- +
- ② 海水の圧縮性
- +
- ③ 重力ポテンシャルの変化

$$\frac{\Delta c(\omega)}{D} = \frac{\Delta c_o(\omega)}{D_o} \quad (1)$$

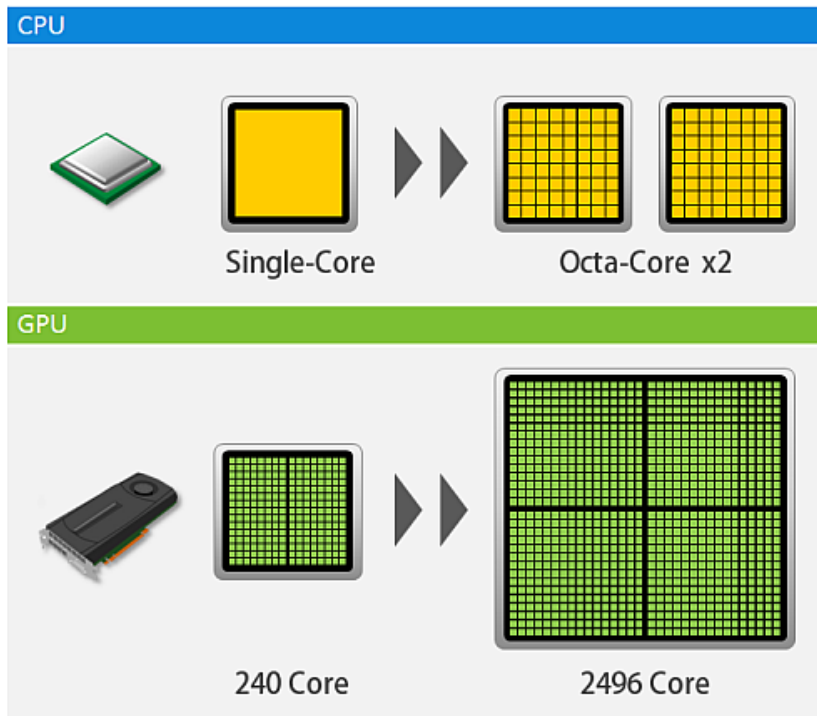
$$\Delta c(\omega) \equiv \sqrt{gD} - c_D(\omega) \quad (2)$$

$$\Delta \Psi(x, \omega) = \frac{\Delta c_o(\omega)\omega}{gD_o} L \quad (3)$$

$\Delta \Psi$: 位相差 D : 海の深さ [m]
 Δc : 位相速度差 [ms^{-1}]
 D_o : 平均の海の深さ [m]
 Δc_o : D_o で規格化した位相速度 差 [ms^{-1}]
 ω : 周波数 [s^{-1}] x : 観測点位置 [m]
 L : 伝播経路の長さ [m]
 g : 重力加速度 [ms^{-2}]

GPGPUによる津波シミュレーション

- **General-Purpose computing on Graphics Processing Units** の略
- GPUの演算資源を汎用の計算に応用する技術
- NVIDIA社が提供するGPGPU専用の統合開発環境「CUDA」を使用
- 単純なデータの大量処理に非常に高いパフォーマンスを発揮



Intel Xeon

Gold 6326 2.90 GHz

コア数: 16

最大メモリ容量: 6,144 GB

メモリ帯域幅: 51.2 GB/秒

NVIDIA Quadro RTX A6000

GPUコア数: 10,752

メモリ容量: 48 GB

メモリ帯域幅: 768 GB/秒

単精度演算性能: 38.7 TFLOPS

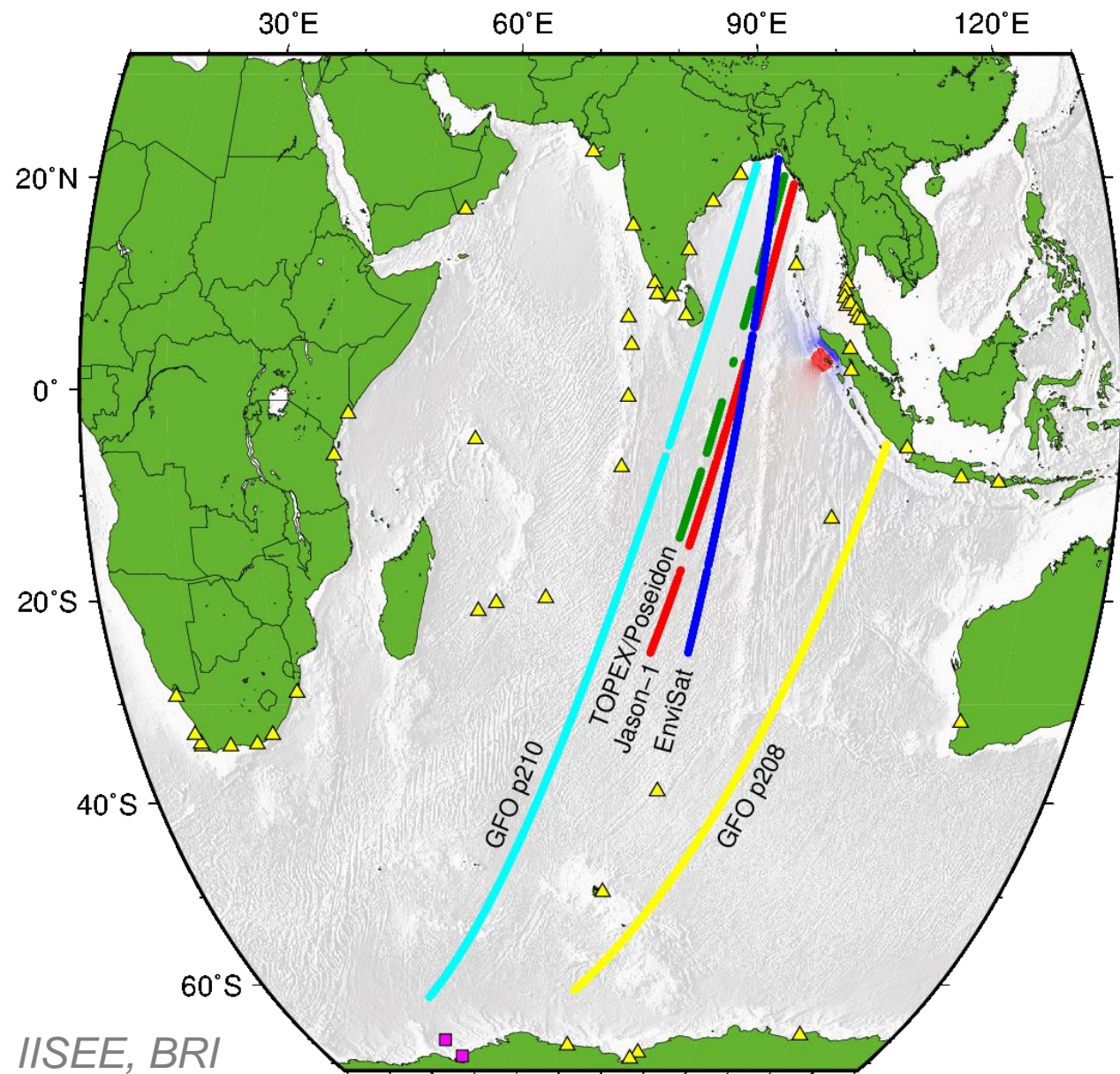
http://www.hpc.co.jp/gpu_solution.html

発表内容

- インバージョンによる津波波源モデルの構築と意義
- 2004年スマトラ-アンダマン地震
- 2011年東北地方太平洋沖地震
- 2010年チリ地震による津波
- 2004年スマトラ-アンダマン地震(再解析)
- 2005年ニアス地震
- 2022年トンガ火山噴火による津波
- 国際地震工学研修における活用

人工衛星(SA)データ:時空間分布

2004 Sumatra-Andaman Earthquake 00 hr 01 min

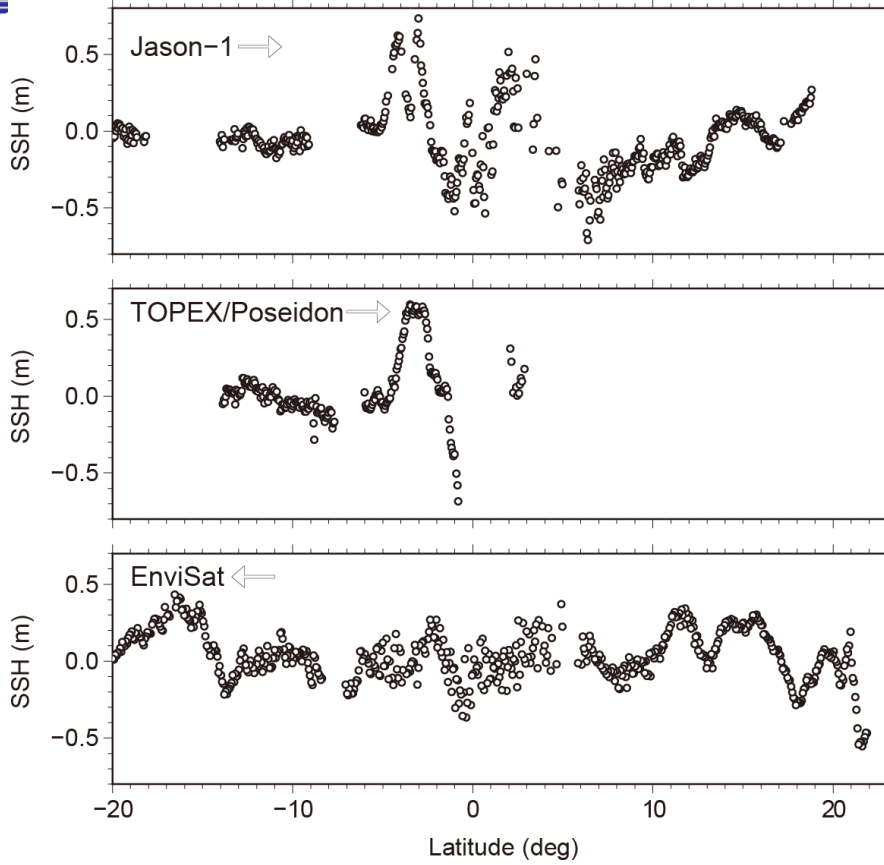


記録点の総数:
4,426

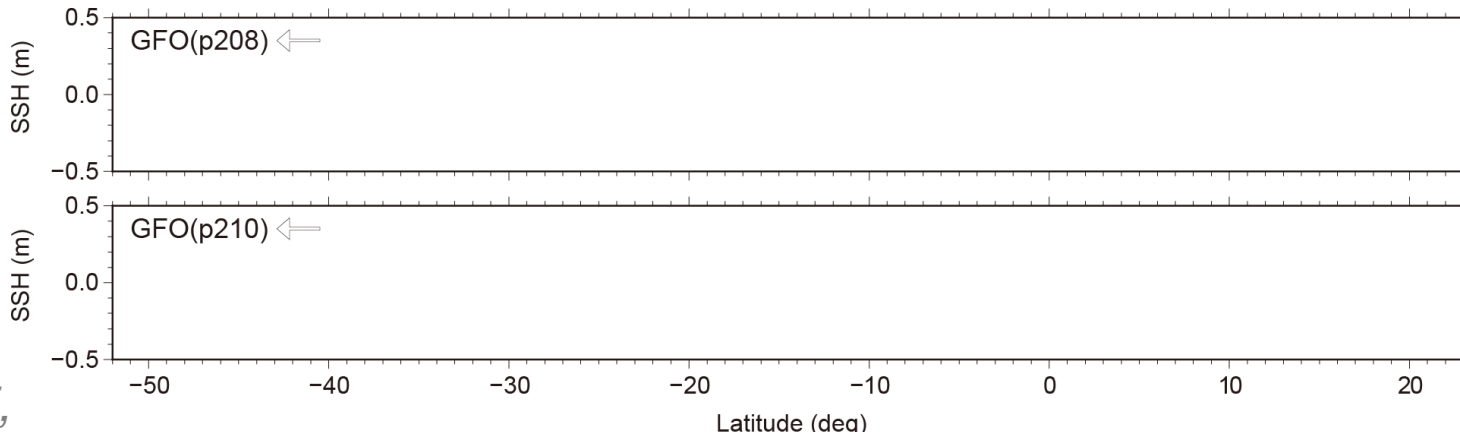
記録時間間隔:
約1 s

SAデータ:
Hayashi (2008, JGR:O)

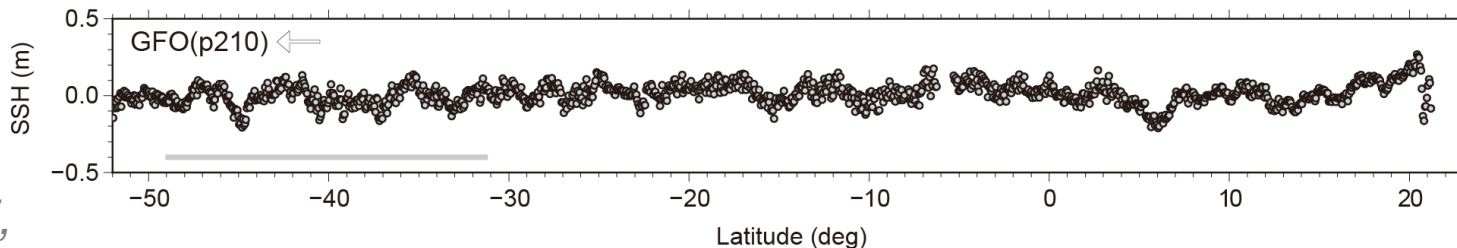
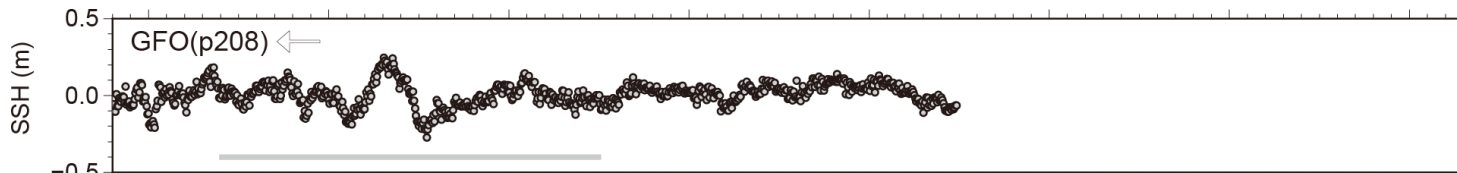
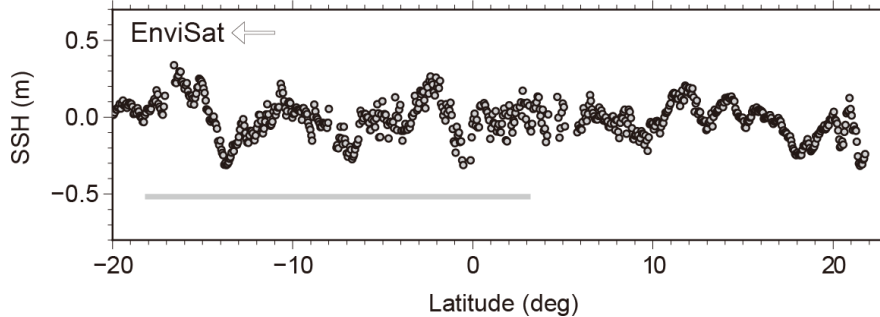
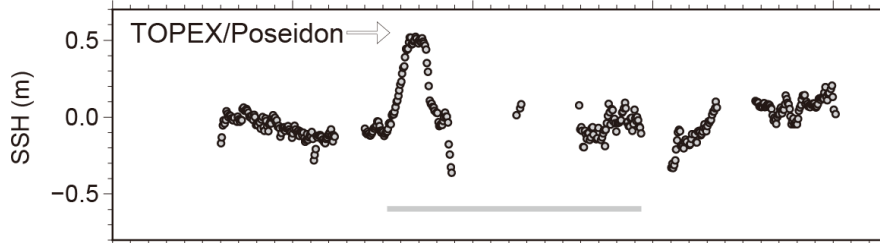
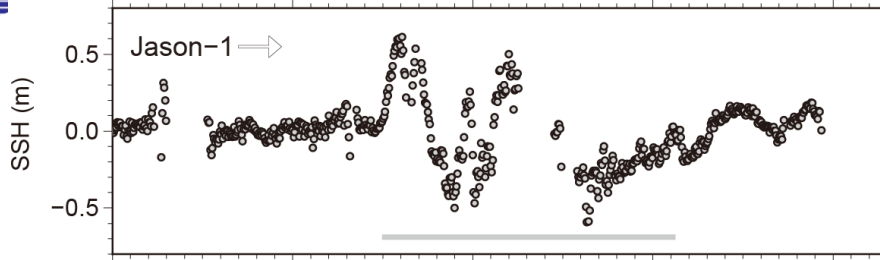
人工衛星(SA)データ(FS2007)



○ FS2007でを使用したSAデータ



人工衛星(SA)データ(改訂版)

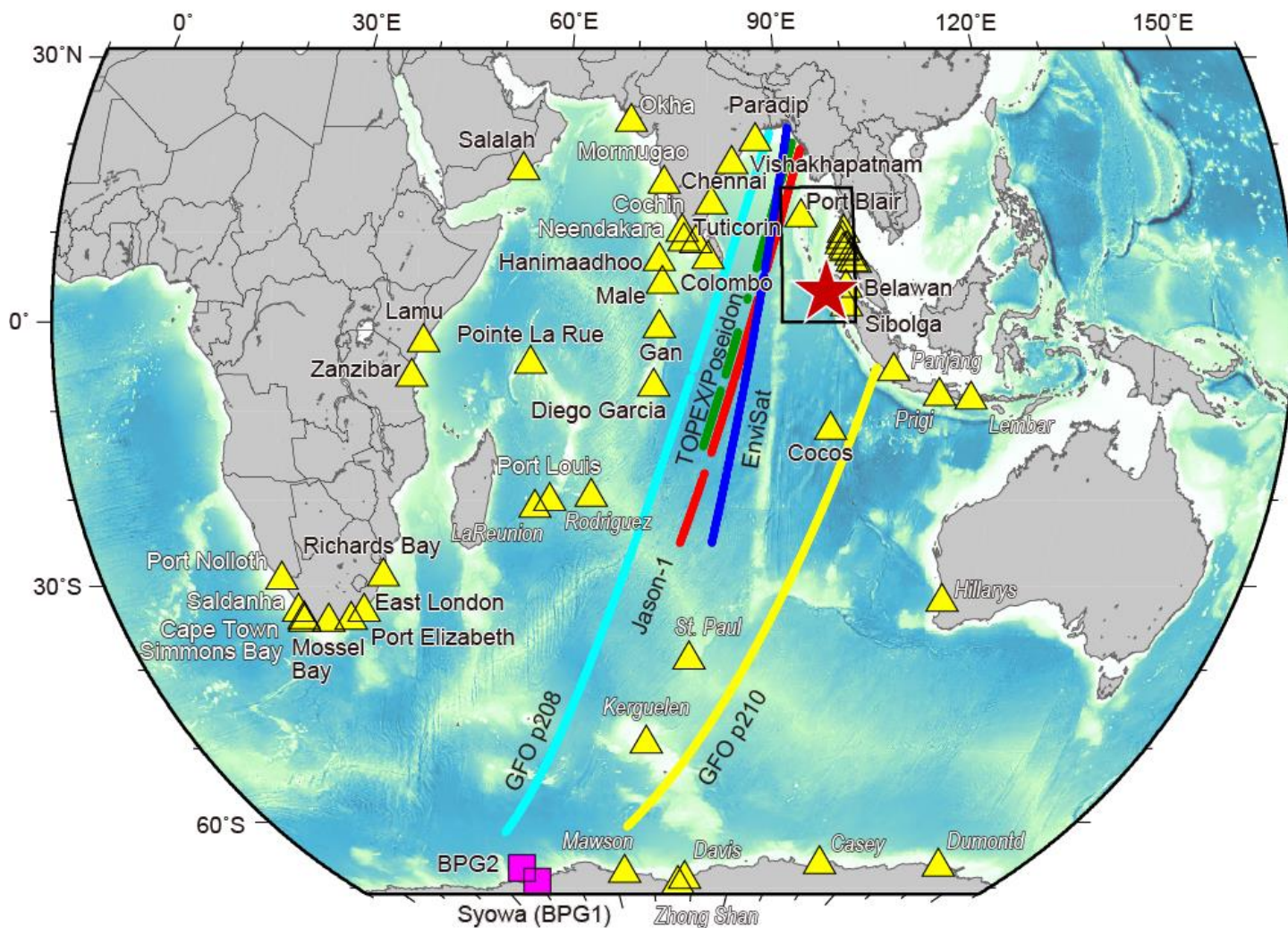


● Hayashi (2008): 再解析で使用

ノイズレベルが低く, 振幅が抑えられた
→
求まるすべり量は小さくなる?

観測点数が増加
→
インバージョン解析の解像度が向上

計算津波波形の位相補正による 広範囲のTG及びSAデータの利用(改訂版)



計算グリッド: 24秒

海底地形データ:
GEBCO_2014

時間ステップ: 1 s

津波伝播の時間:
20 hr

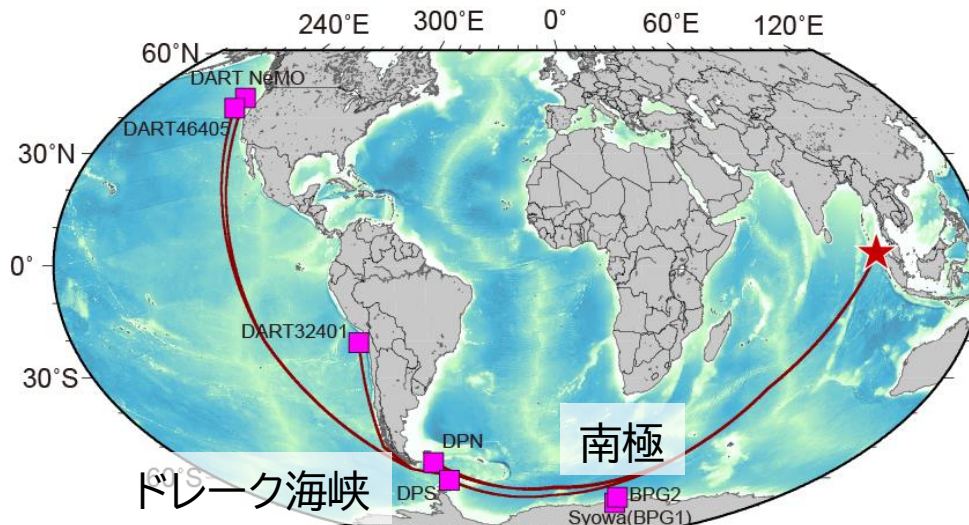
GPGPUによる
計算時間:
2 hr 50 min

TGデータ: ハワイ大学Sea-Level Center (UHSLC), Tsuji et al. (2005, EPS)
SAデータ: Hayashi (2008, JGR:O)がバックグラウンドノイズを除去

遠地の海底水圧計(OBPG)データ

津波の波線:

西周り

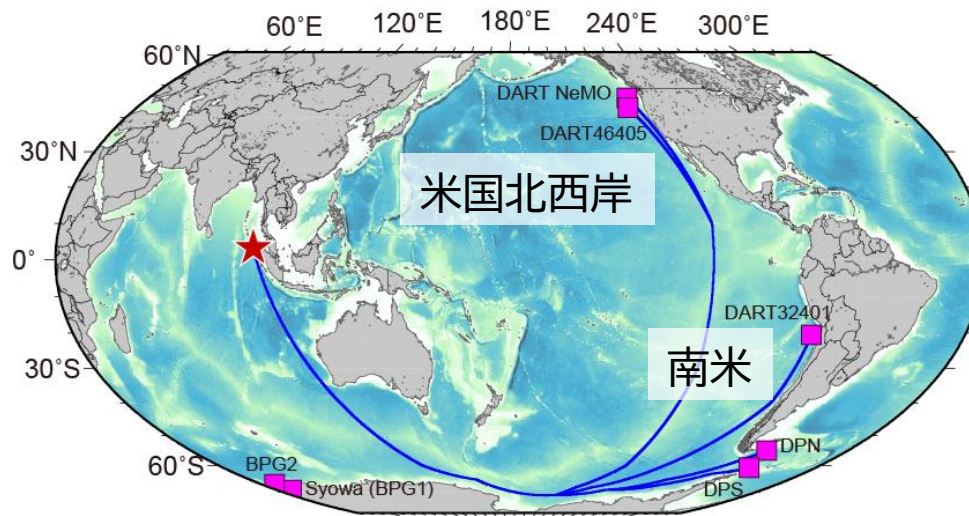


計算グリッド: 2分

海底地形データ:
GEBCO_2014

時間ステップ: 3 s

東周り



津波伝播の時間:
48 hr

GPGPUによる
計算時間:
41 min

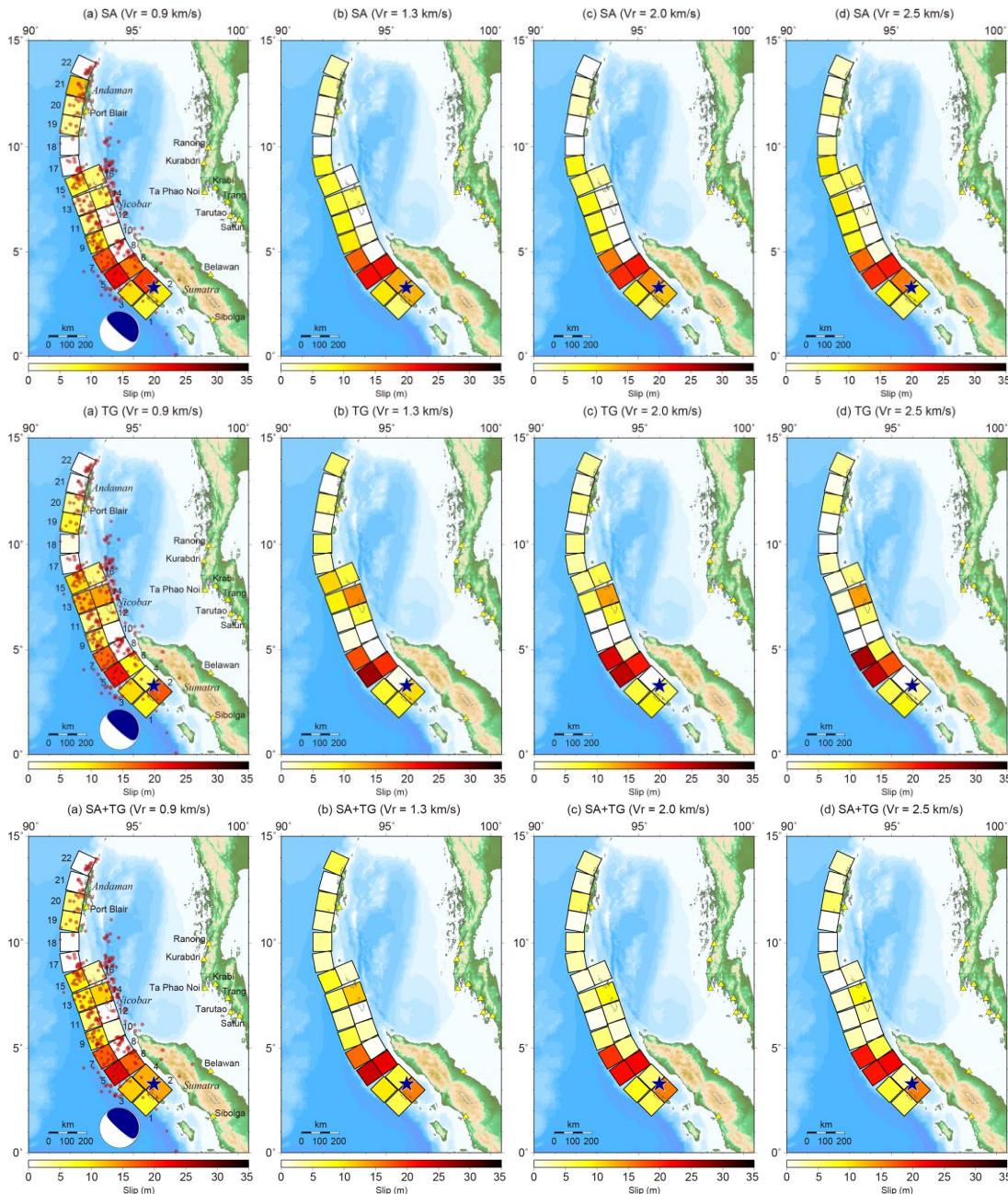
OBPGデータ: 海上保安庁, 極地研, Rabinovich et al. (2011, GRL),
NOAA, Rabinovich et al. (2017, JGR:O)

断層の破壊伝播速度 (V_r)
を仮定

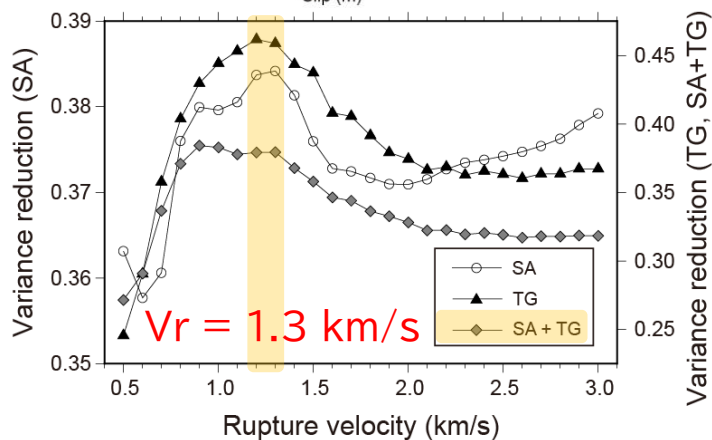
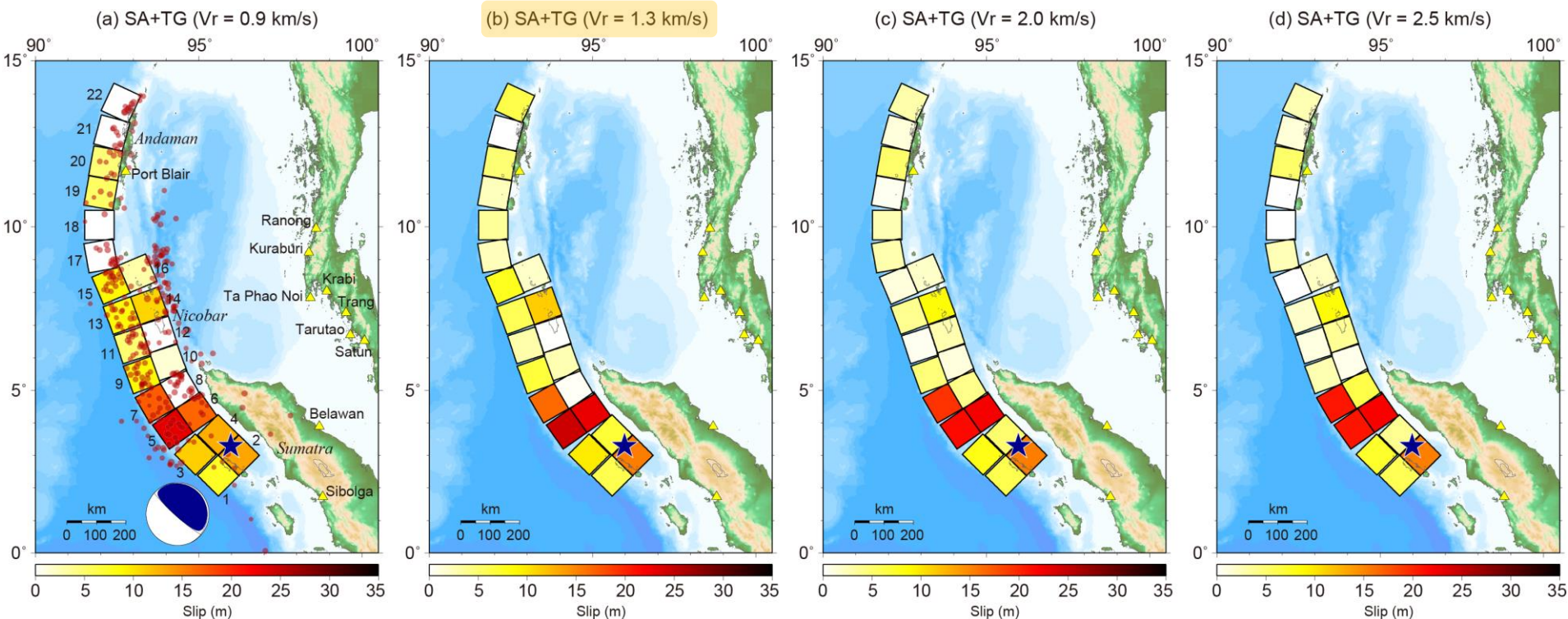
SAデータのみ

TGデータのみ

SA+TGデータ



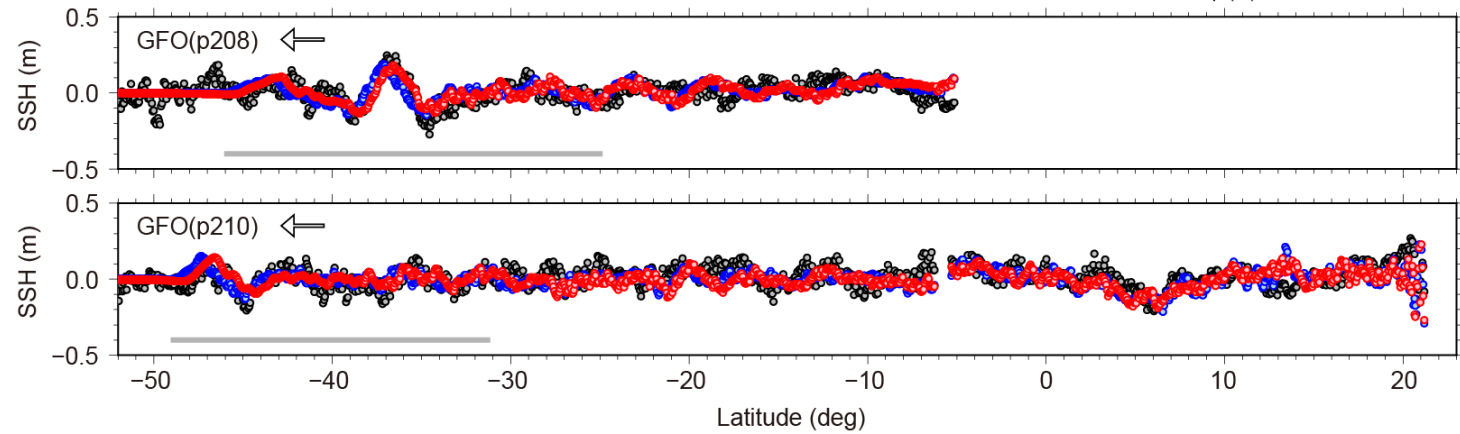
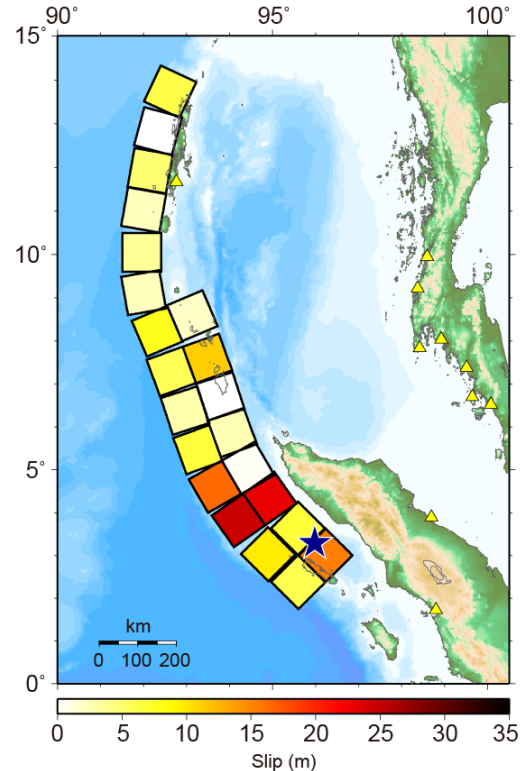
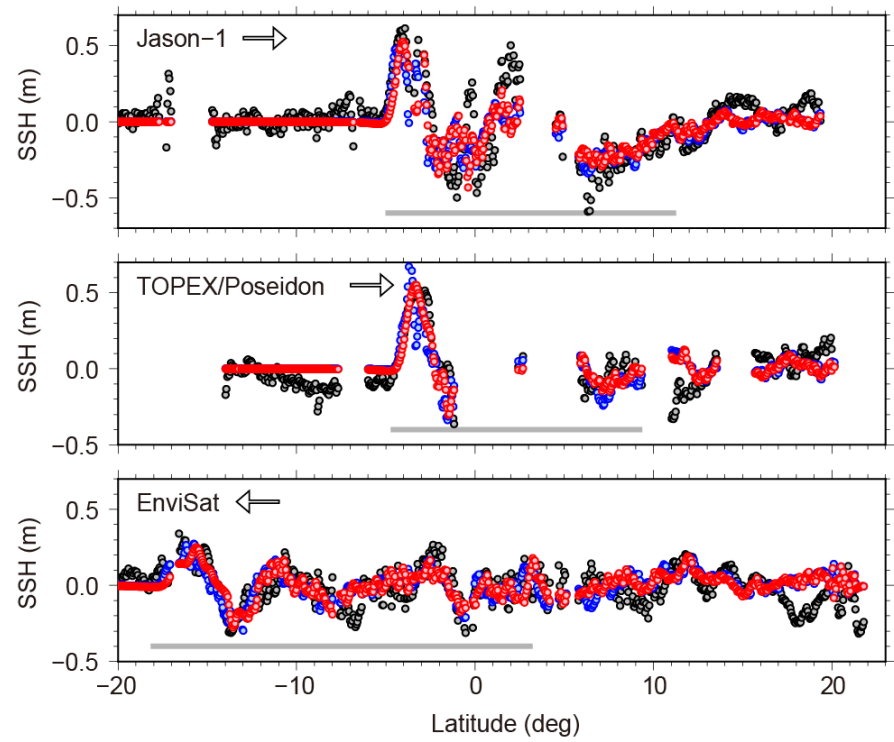
断層の破壊伝播速度 (V_r)を仮定



Variance Reduction:
 観測と計算の一致度を示す

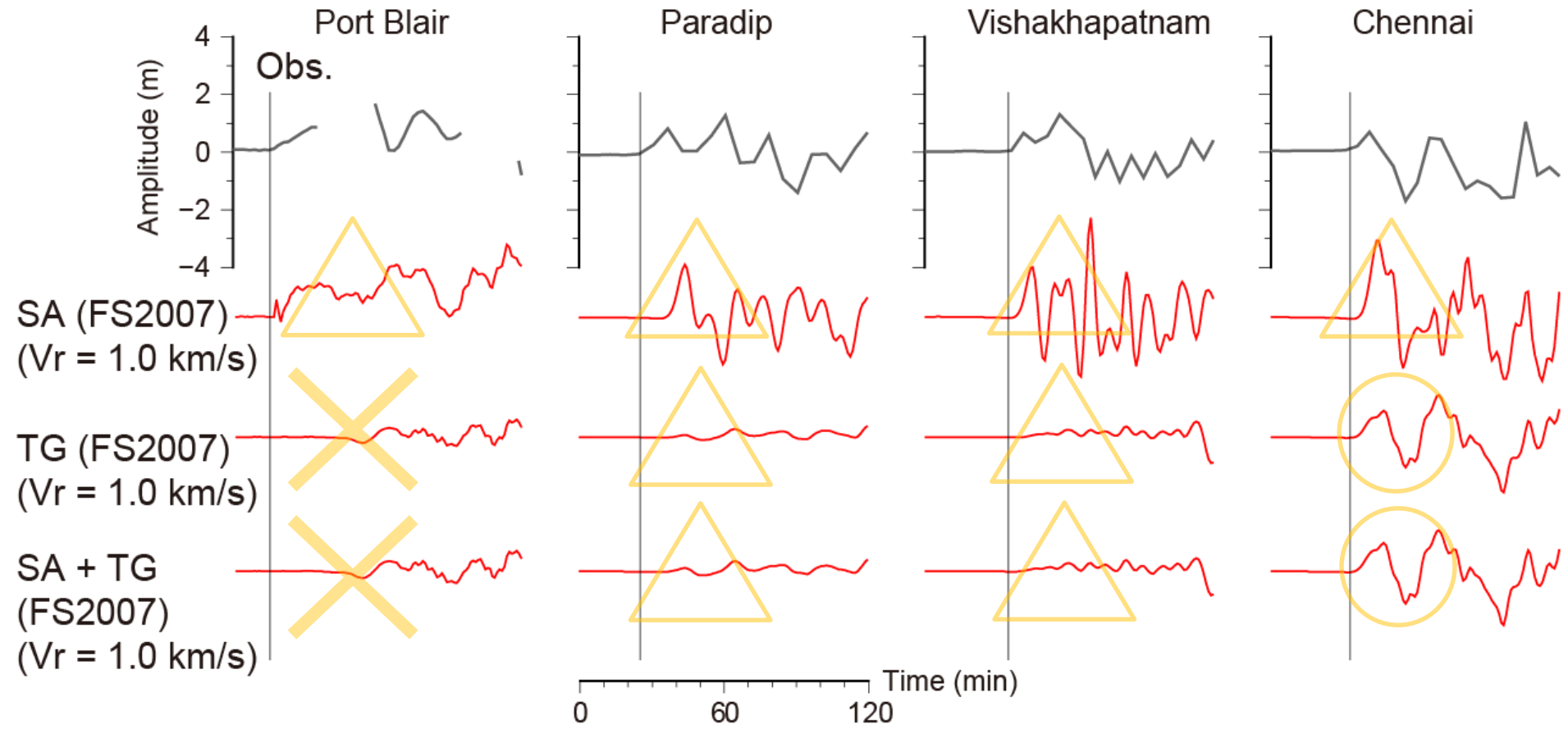
SAデータの比較

$V_r = 1.3 \text{ km/s}$



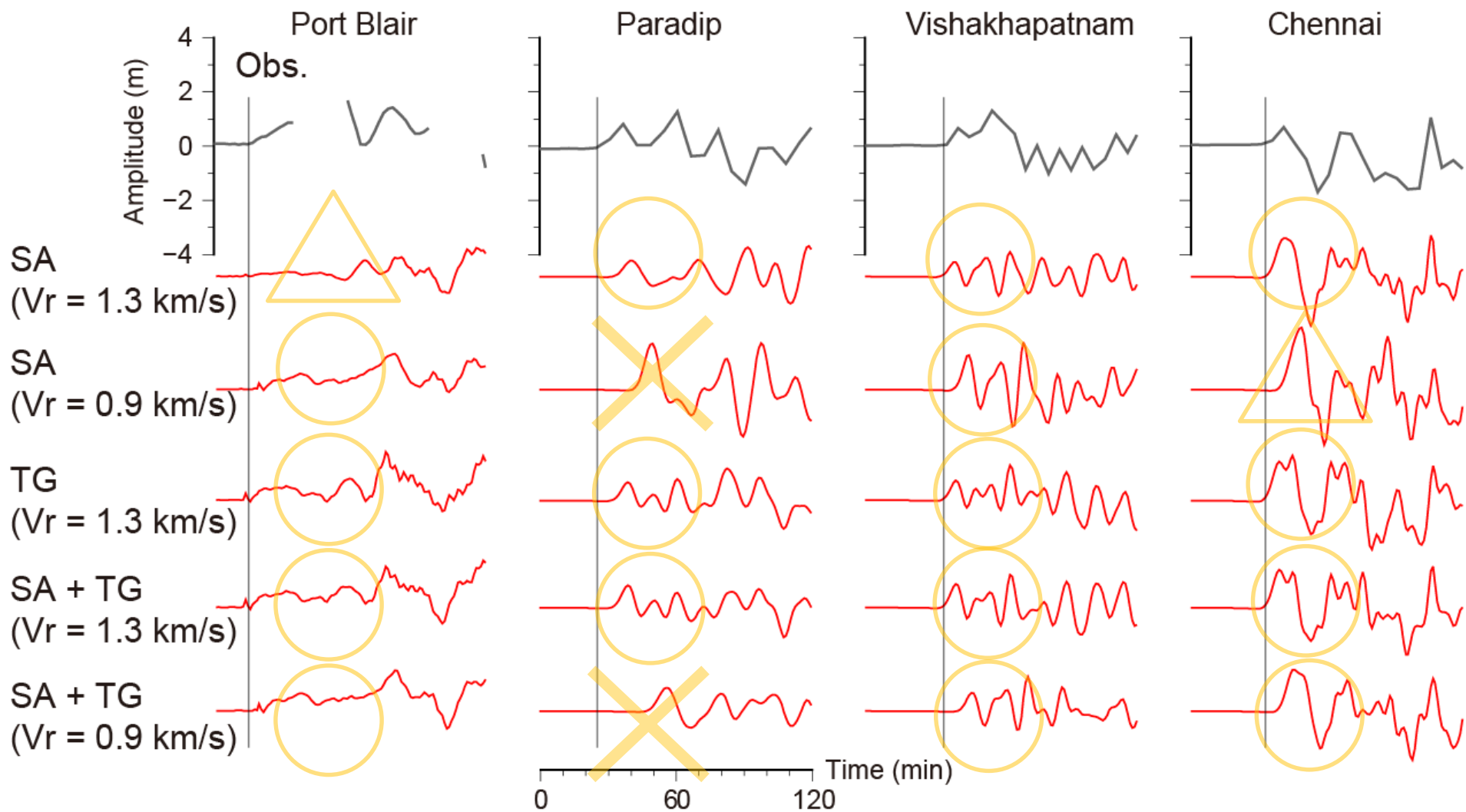
観測, 計算(位相補正なし), 計算(位相補正あり)

アンダマン諸島とインド東岸における津波波形の比較 (FS2007)



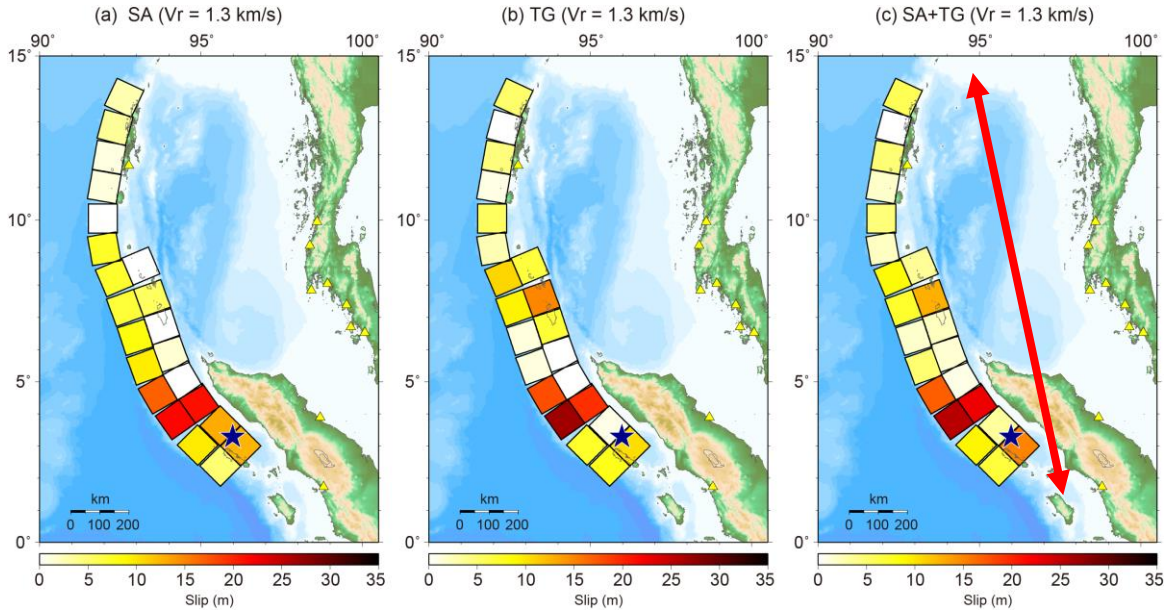
観測, 計算(位相補正あり)

アンダマン諸島とインド東岸における津波波形の比較(改訂後)



津波波源モデル(改訂版)

断層面上の
すべり分布

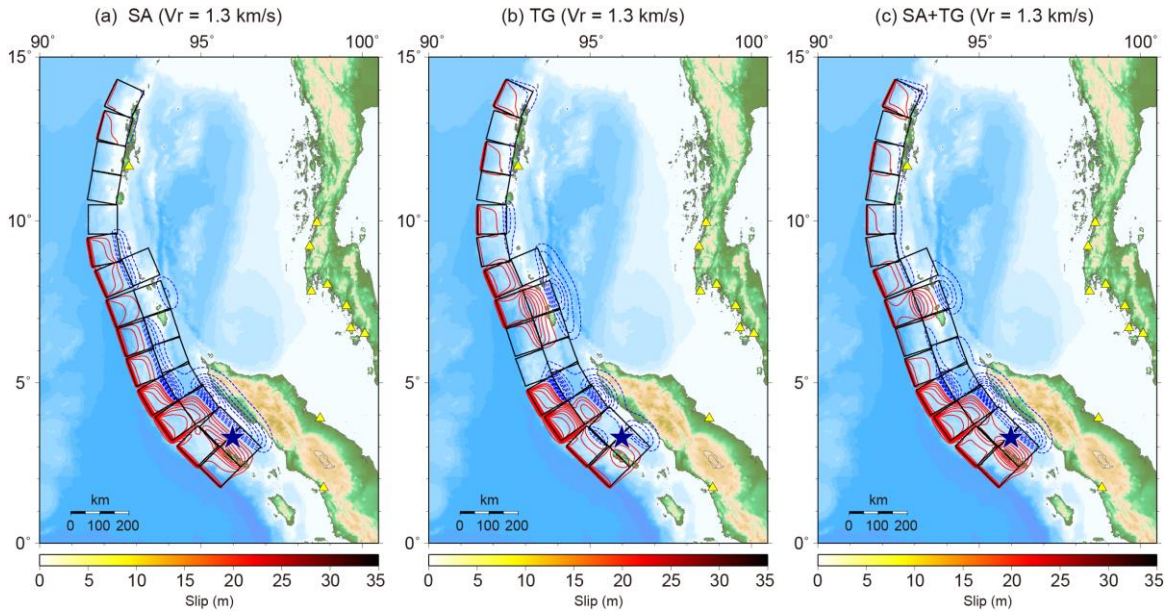


断層の長さ:
~1,400 km

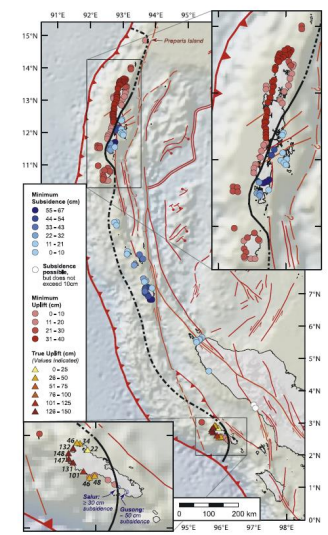
計算した
地殻変動

赤線: 隆起
青波線: 沈降

コンター間隔:
0.5 m



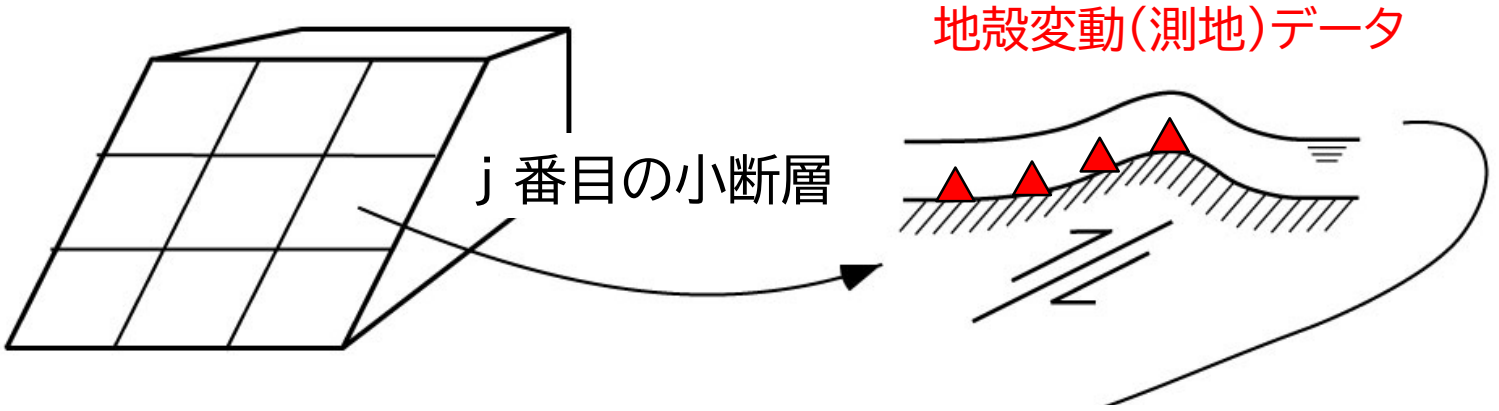
Meltzner et al.
(2006)



発表内容

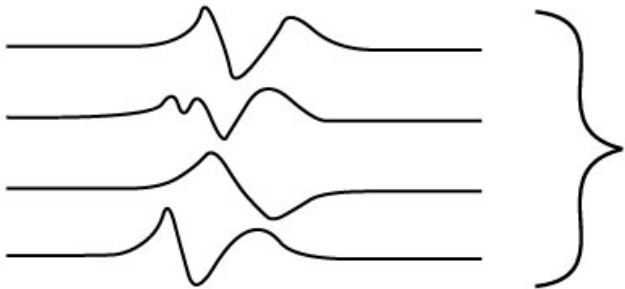
- インバージョンによる津波波源モデルの構築と意義
- 2004年スマトラ-アンダマン地震
- 2011年東北地方太平洋沖地震
- 2010年チリ地震による津波
- 2004年スマトラ-アンダマン地震(再解析)
- 2005年ニアス地震
- 2022年トンガ火山噴火による津波
- 国際地震工学研修における活用

地殻変動データと津波データの 同時インバージョン



実際の海底地形データを用いた
差分法による津波伝播計算

計算津波波形(グリーン関数)



i 番目の観測点

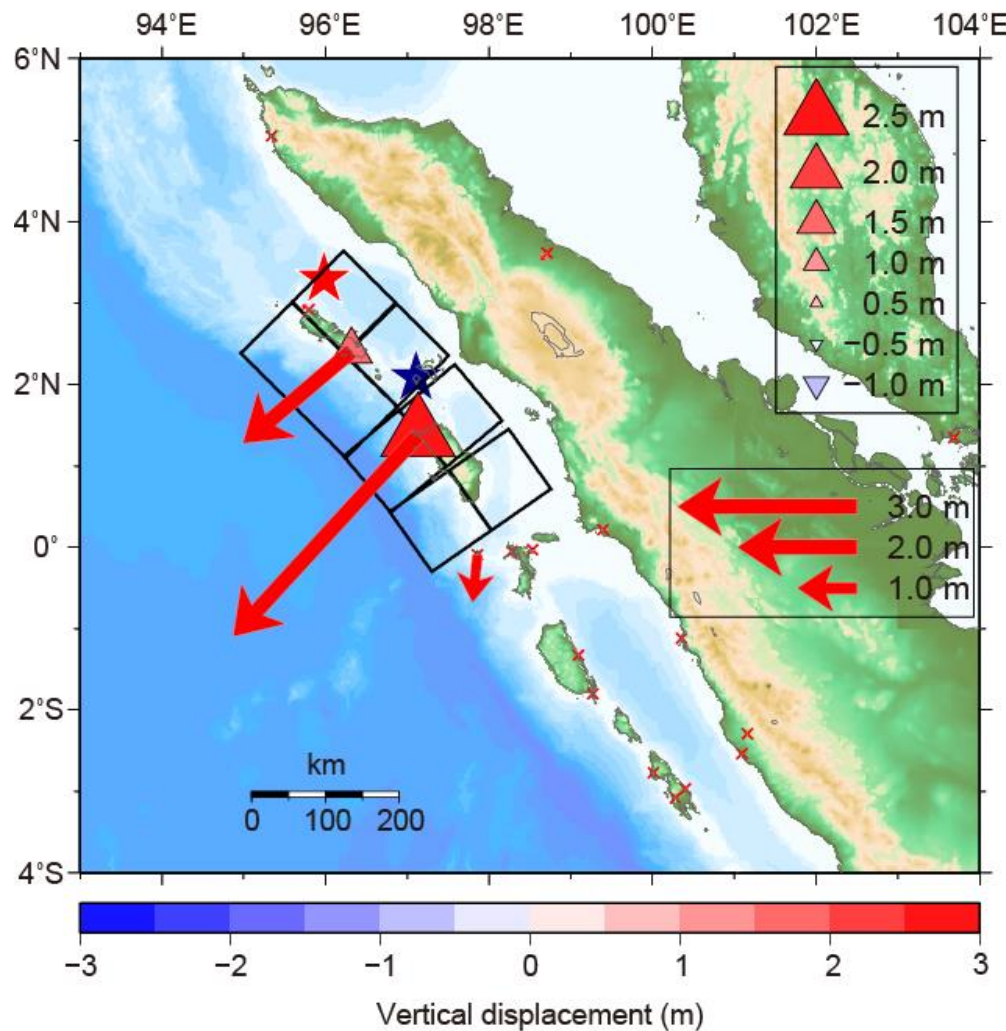
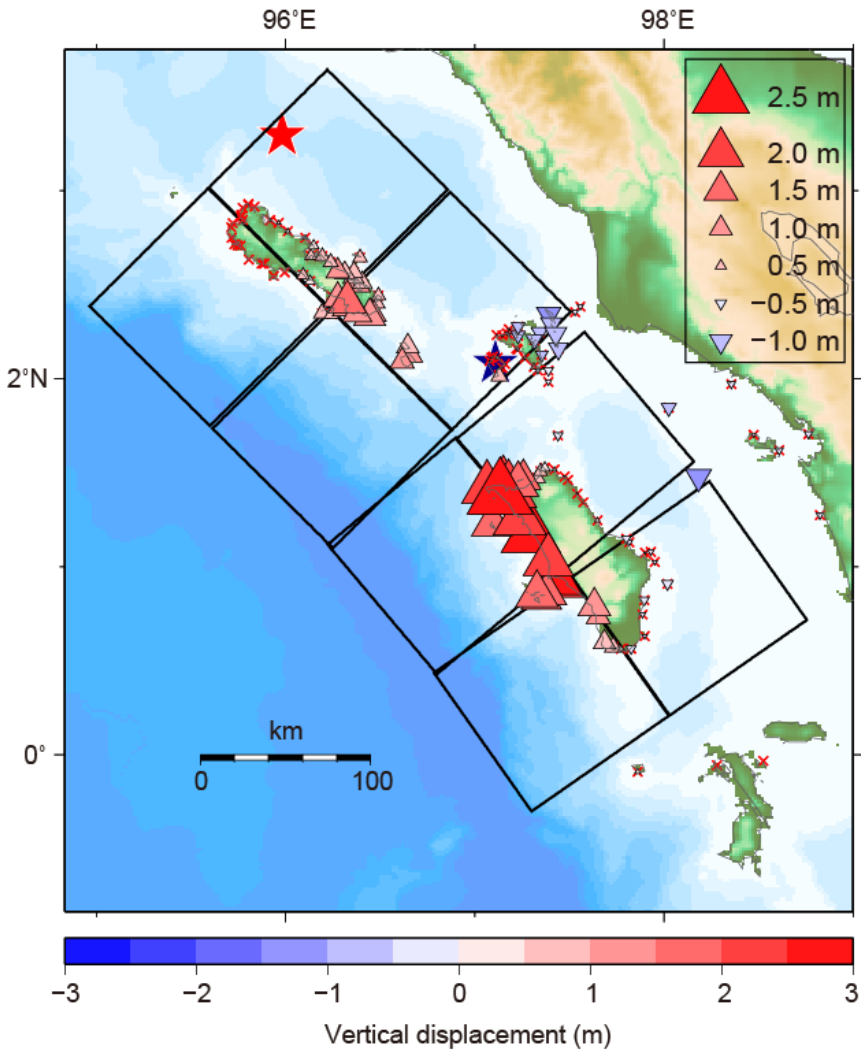


Satake (2002)

地殻変動(測地)データ

ASTER, 珊瑚(マイクロアトール):
Briggs et al. (2006)

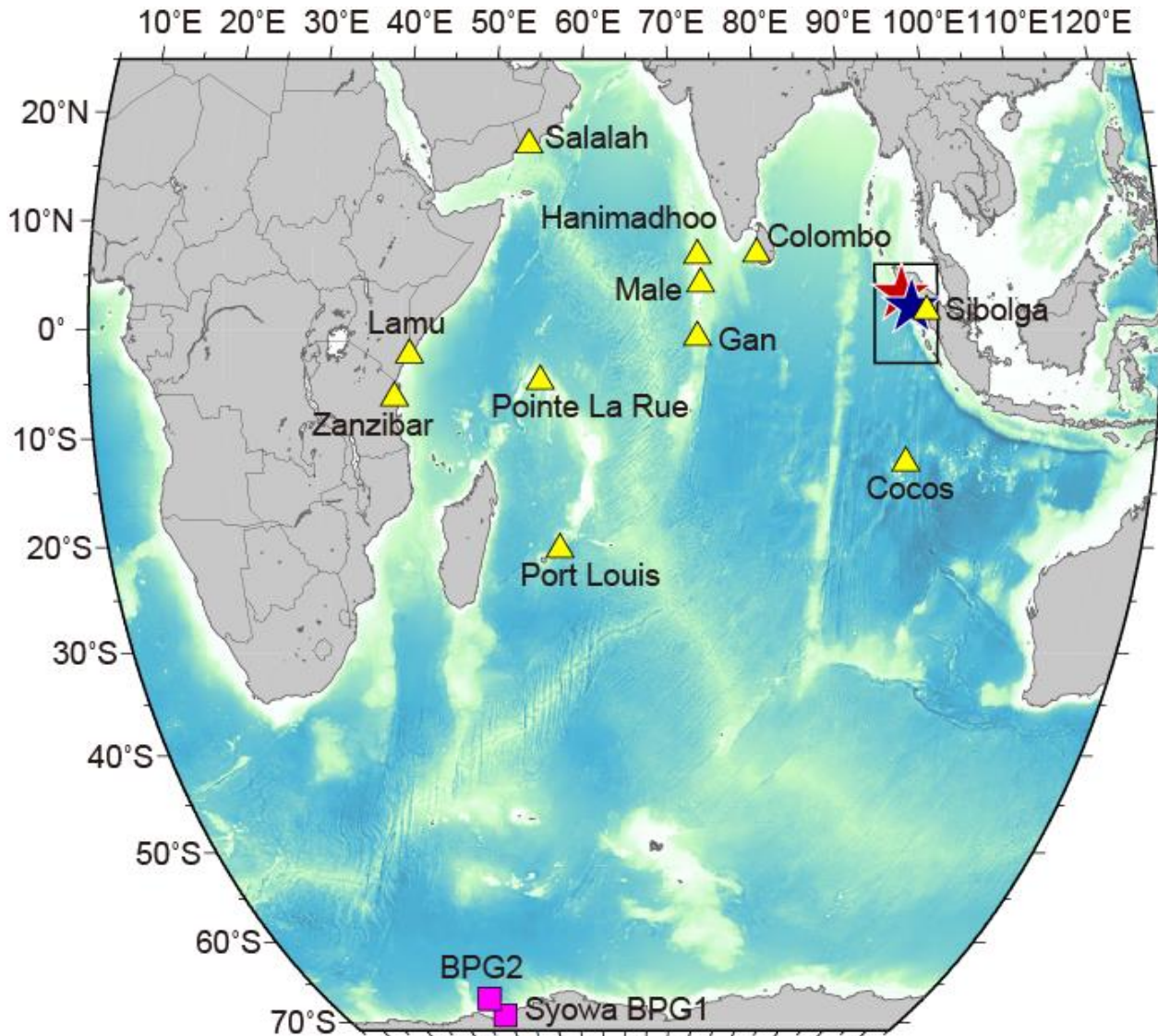
GPS: Kreemer et al. (2006)



ASTER: 18地点, 珊瑚: 96地点

54成分(18観測点の3成分) 48

津波データ: 検潮所と遠地の海底水圧計



計算グリッド: 24秒
(18,000 x 14,400)

海底地形データ:
GEBCO2014

時間ステップ: 1 s

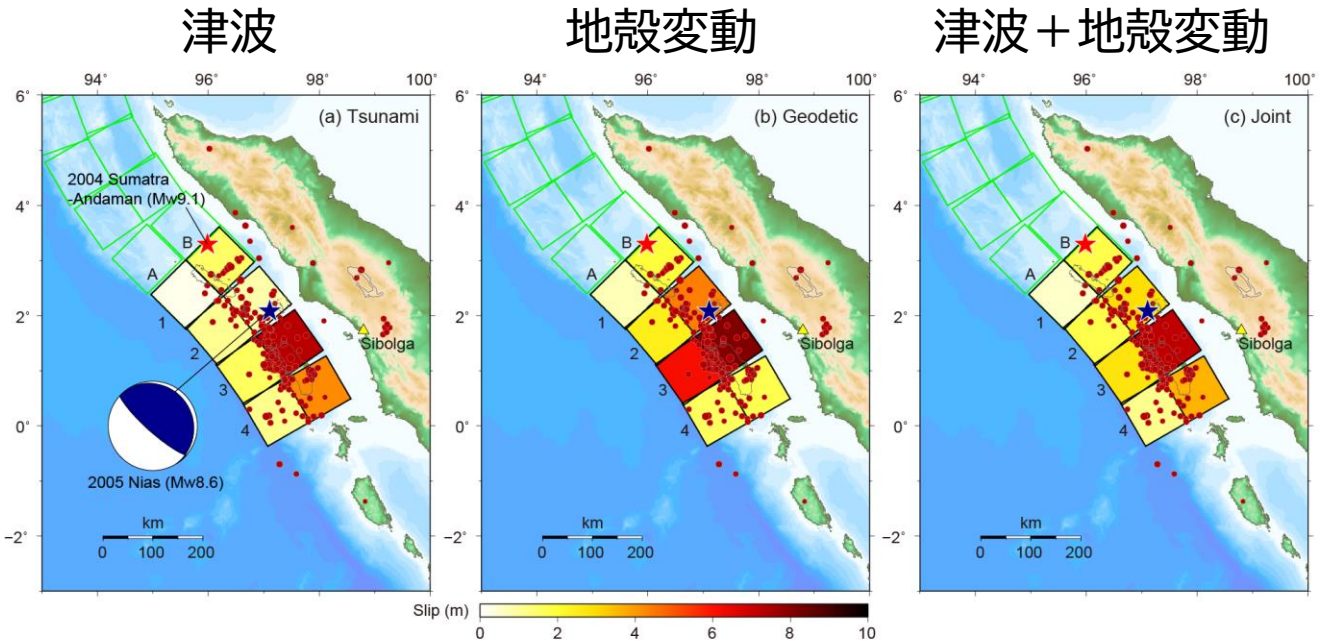
津波伝播の時間:
20 hr

GPGPUによる
計算時間: 約2 hr

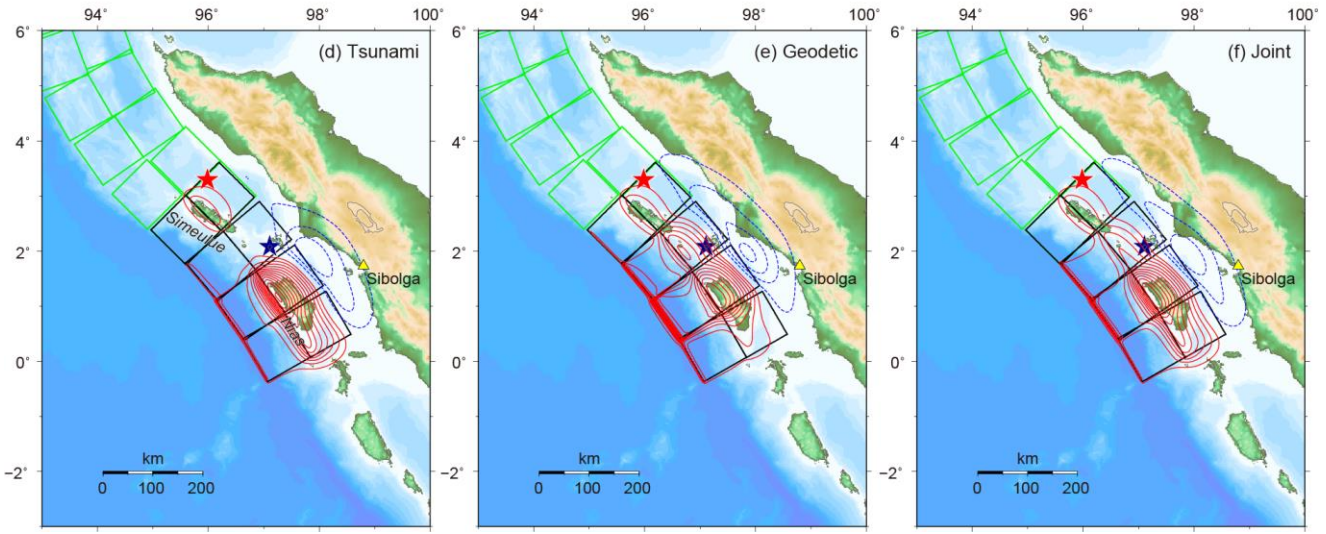
TGデータ: ハワイ大学Sea-Level Center (UHSLC), Aydan et al. (2005)
OBPGデータ: 極地研究所, 海上保安庁

インバージョンの結果

すべり分布



計算した地殻変動



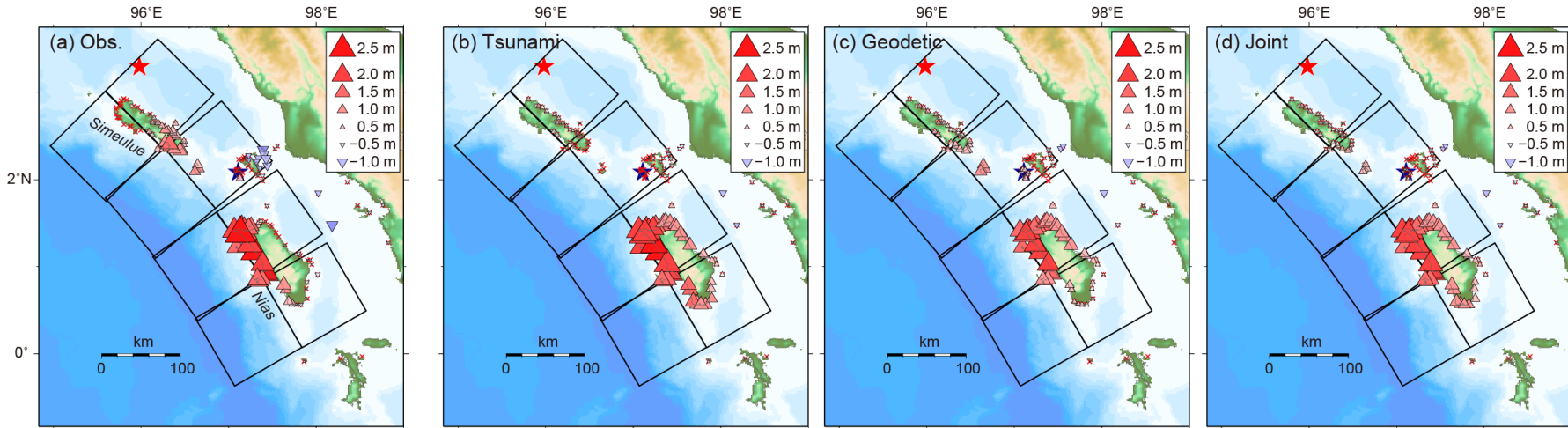
赤線：隆起，青点線：沈降，等高線の間隔：0.5 m

ASTER, 珊瑚(マイクロアトール):
Briggs et al. (2006)

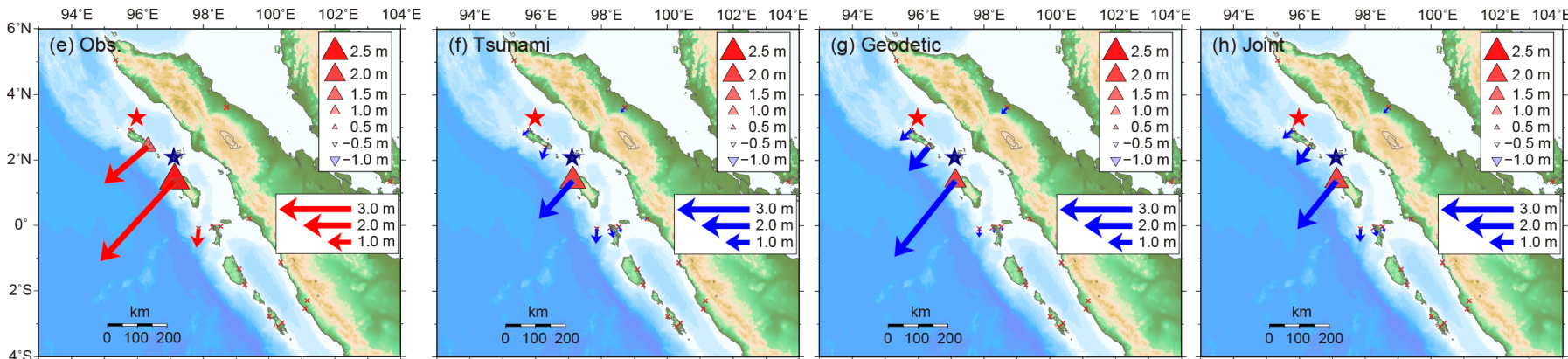
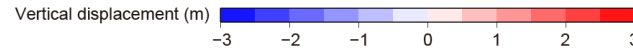
津波

地殻変動

津波+地殻変動



観測データ

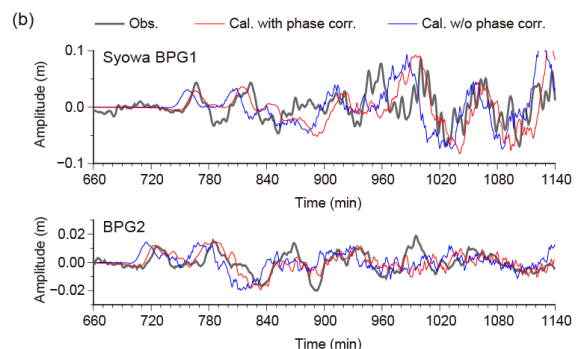
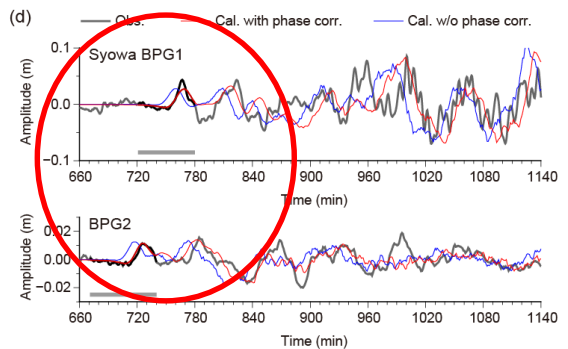
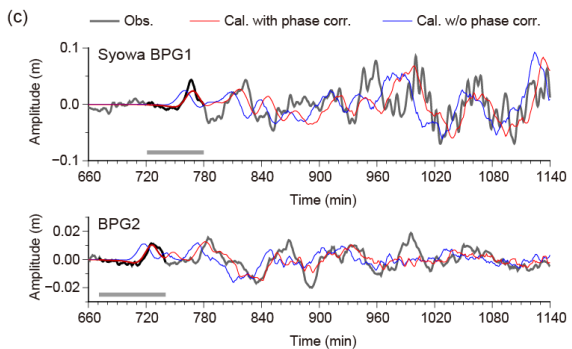
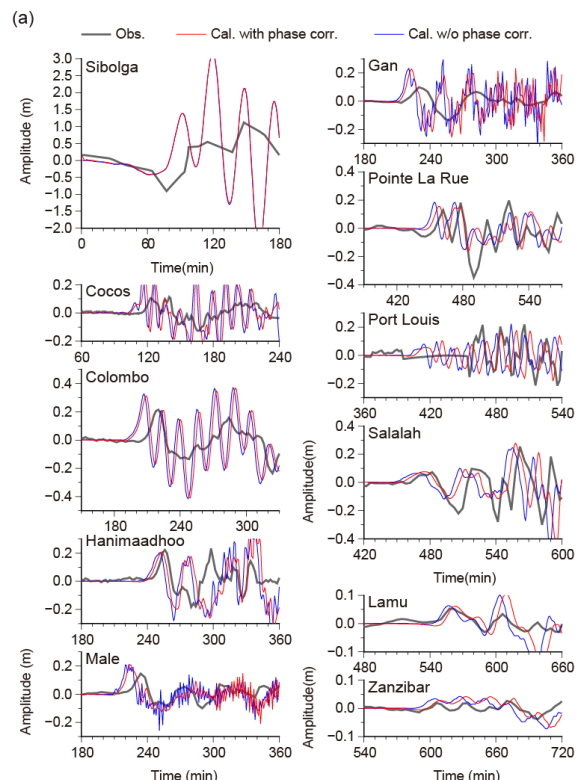
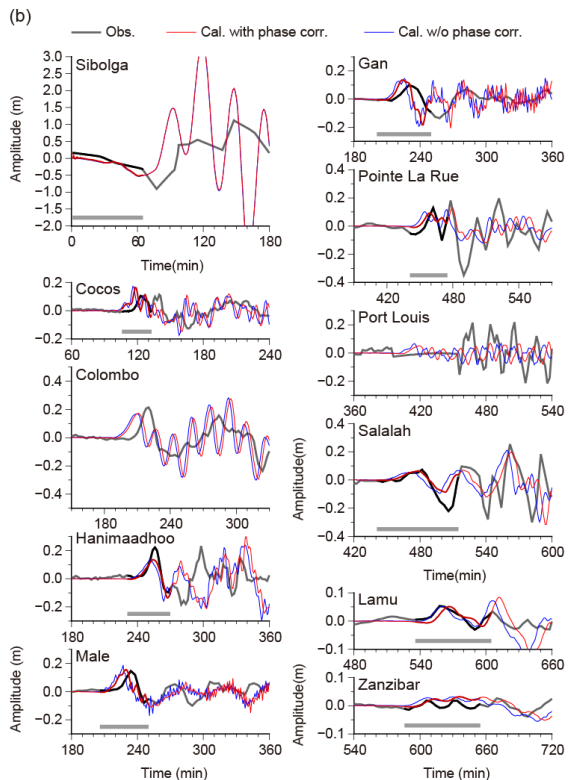
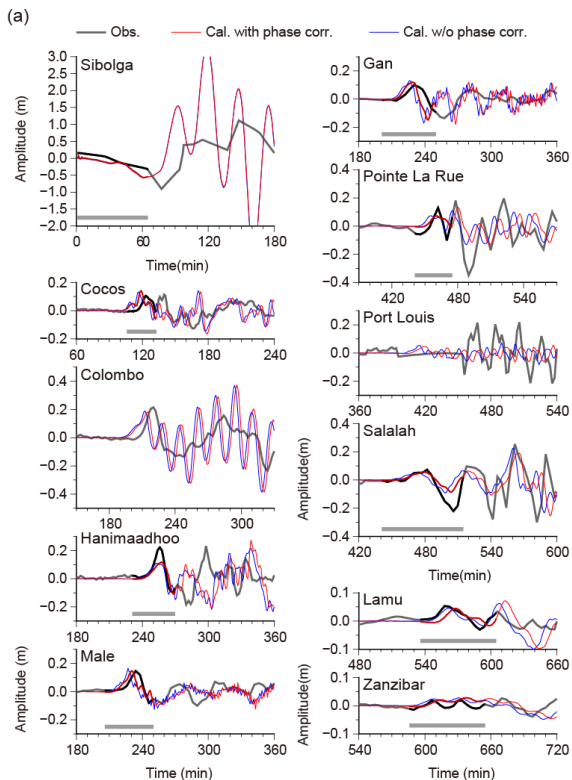


GPS: Kreemer et al. (2006)

津波

津波 + 地殻変動

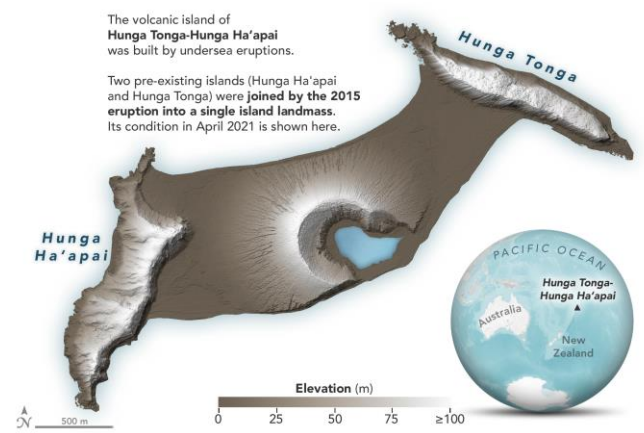
地殻変動



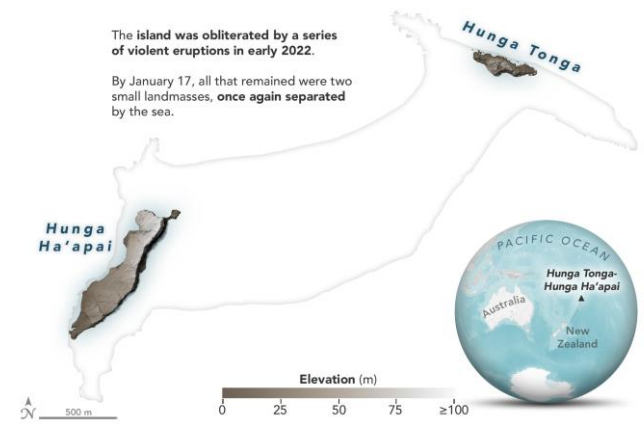
発表内容

- インバージョンによる津波波源モデルの構築と意義
- 2004年スマトラ-アンダマン地震
- 2011年東北地方太平洋沖地震
- 2010年チリ地震による津波
- 2004年スマトラ-アンダマン地震(再解析)
- 2005年ニアス地震
- 2022年トンガ火山噴火による津波
- 国際地震工学研修における活用

2022年トンガ火山噴火による津波のモデリング

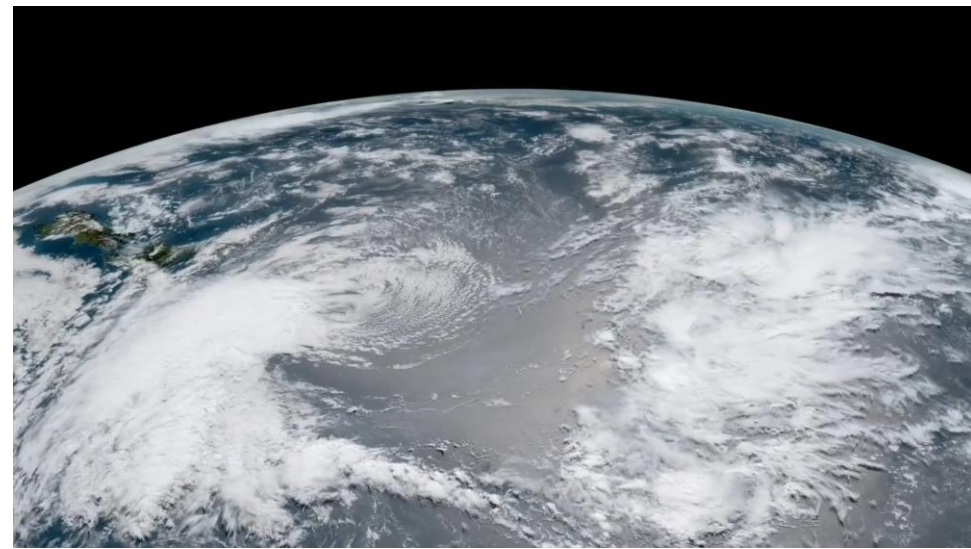


April 10, 2021



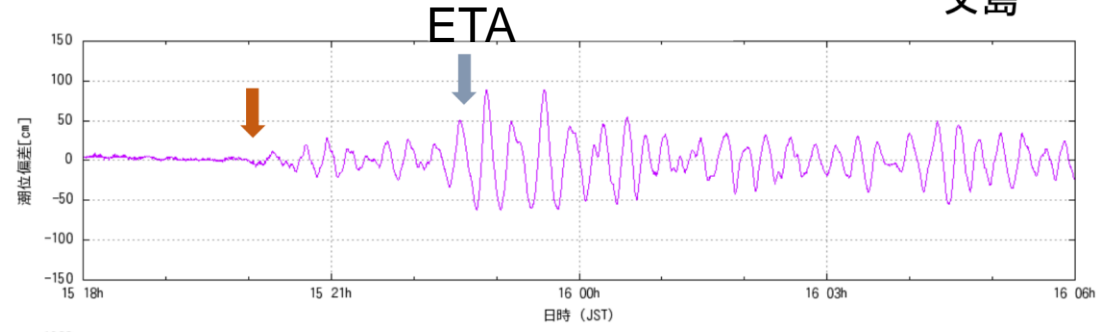
January 17, 2022

NASA, <https://earthobservatory.nasa.gov/images/149367/dramatic-changes-at-hunga-tonga-hunga-haapai>

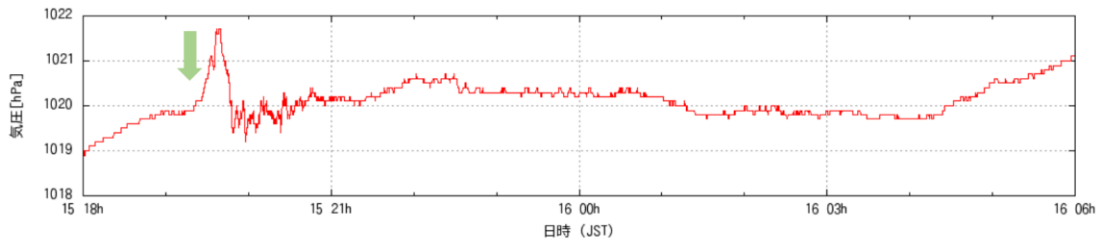


気圧と海面水位

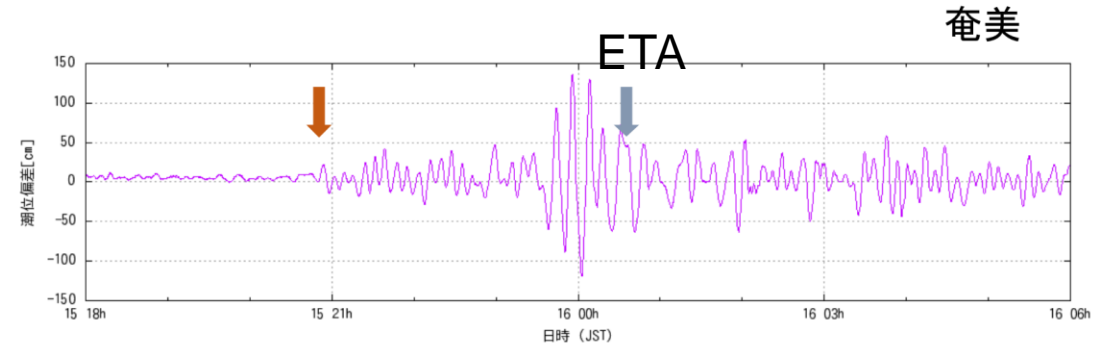
海面水位 (cm)
(天文潮汐は除去)



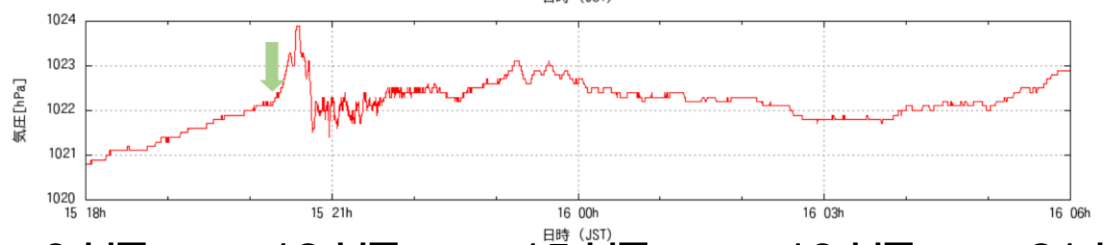
気圧 (hPa)



海面水位 (cm)



気圧 (hPa)



9 UT 12 UT 15 UT 18 UT 21 UT

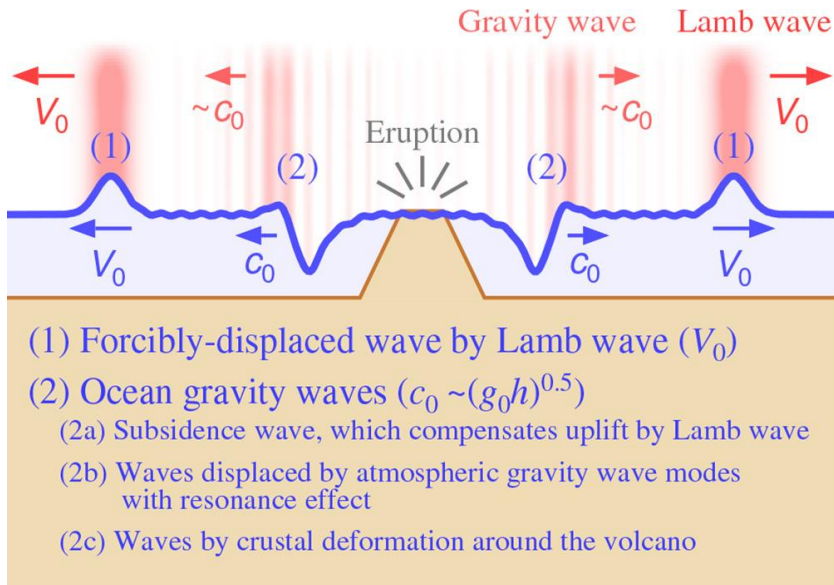
ETA: 津波の
到達予測時刻

気圧波による津波の生成

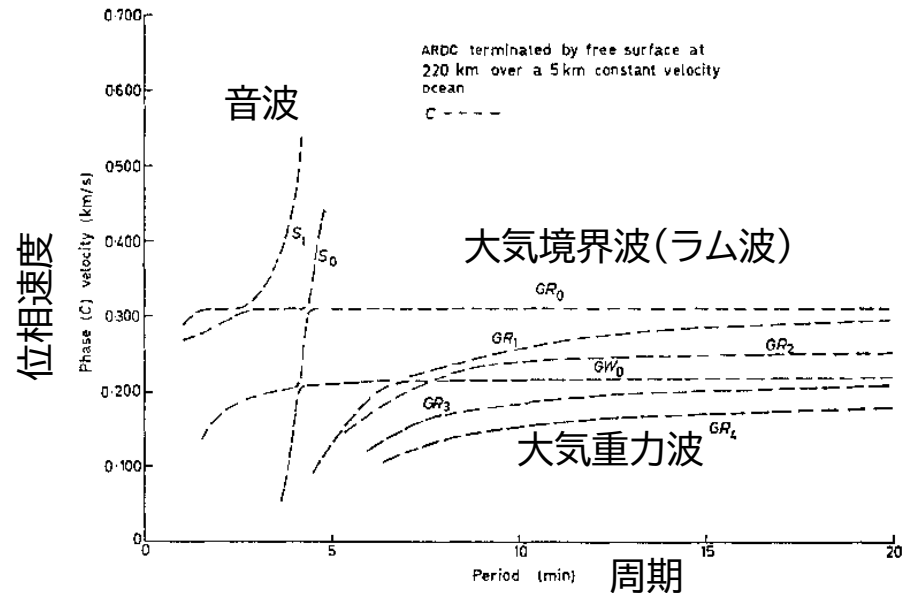
大気境界波(ラム波)及び大気重力波による強制波

強制波の速度 \approx 津波の伝播速度 \rightarrow 増幅(プラウドマン共鳴)

1883年クラカタウ火山噴火による遠地津波:
大気・海洋結合系の先行研究
(Harkrider and Press, 1967)



(Kubota et al., 2022)

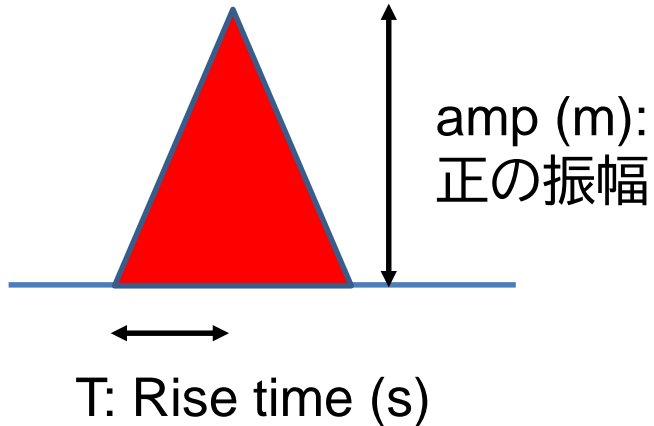


(Harkrider and Press, 1967)

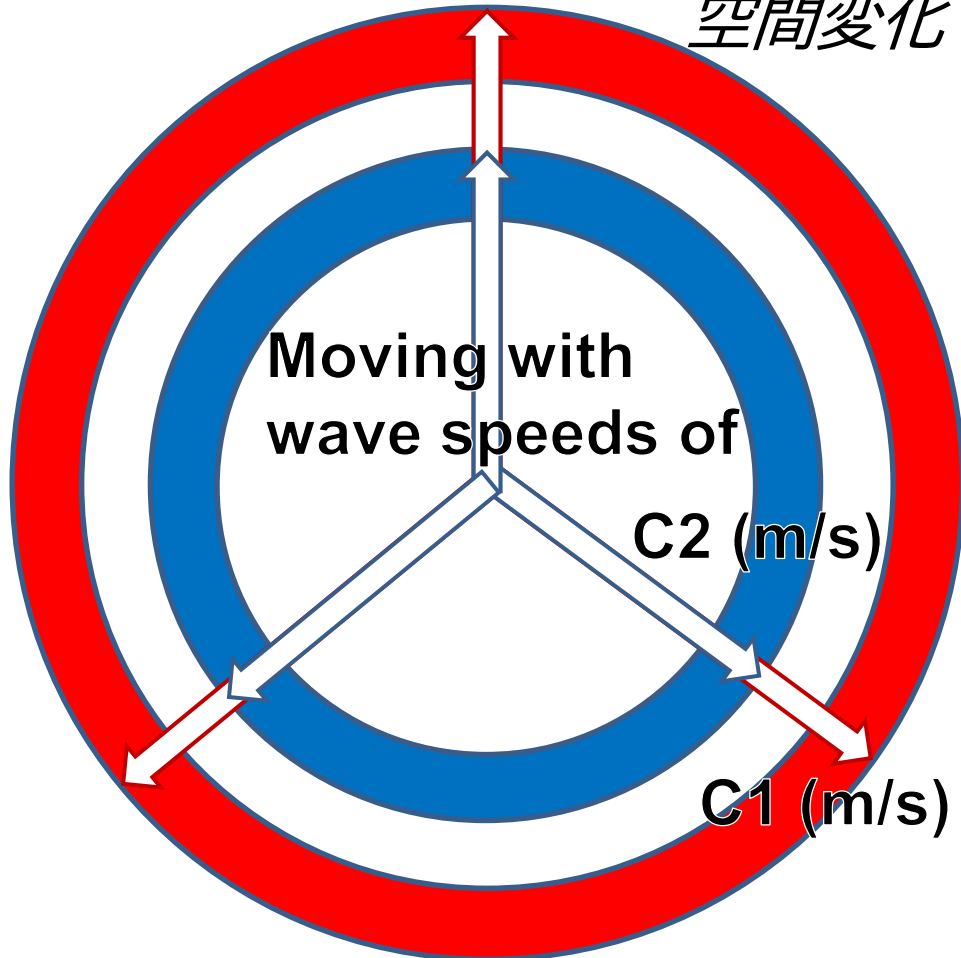
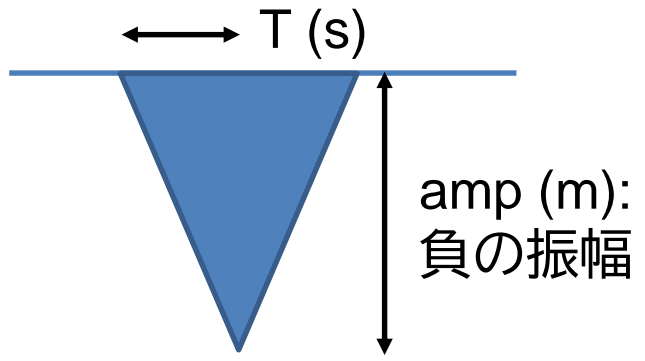
時間変化

空間変化

ラム波: $C1 = \sim 310 \text{ m/s}$



大気重力波:
 $C2 = \sim 200 - 250 \text{ m/s}$



$\text{amp} \sim \text{amp}_0 * 1/\sqrt{R * \sin \Delta}$

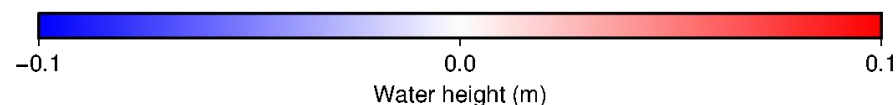
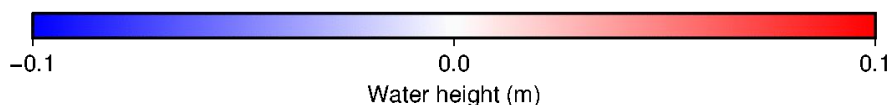
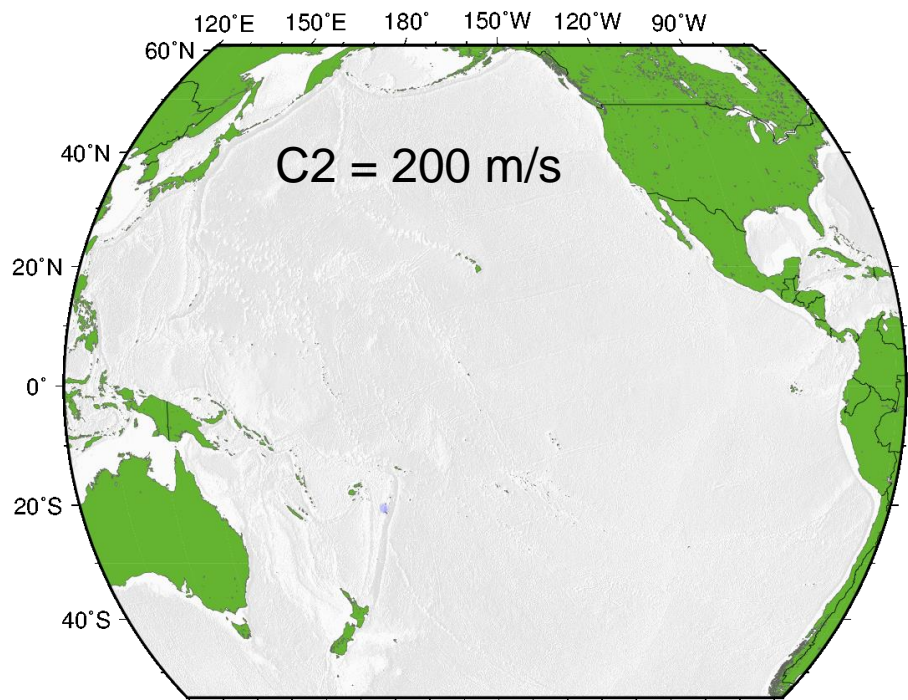
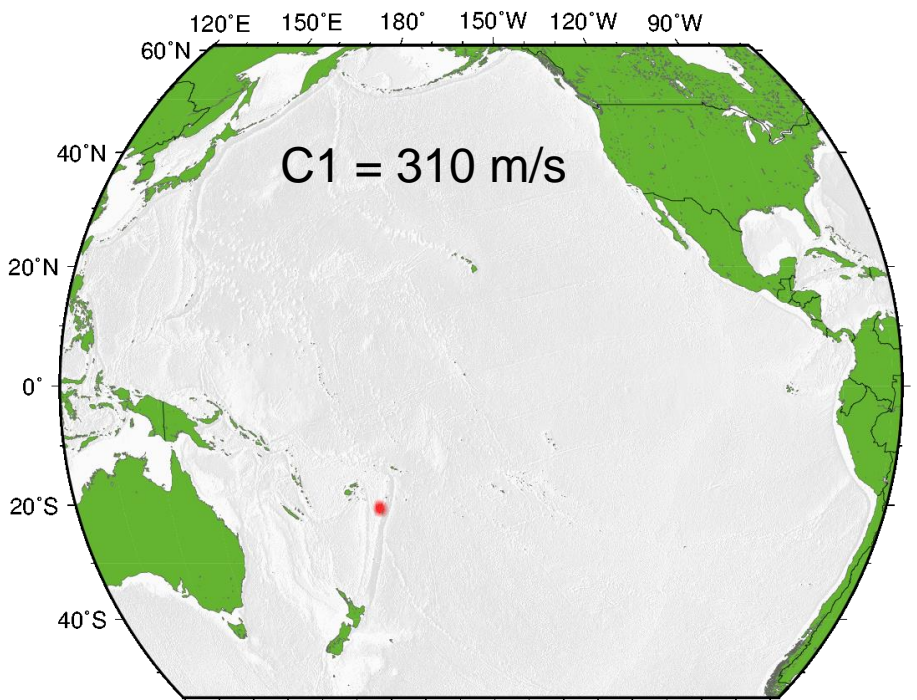
R: 地球半径, Δ : 震源距離 (angle)

ラム波

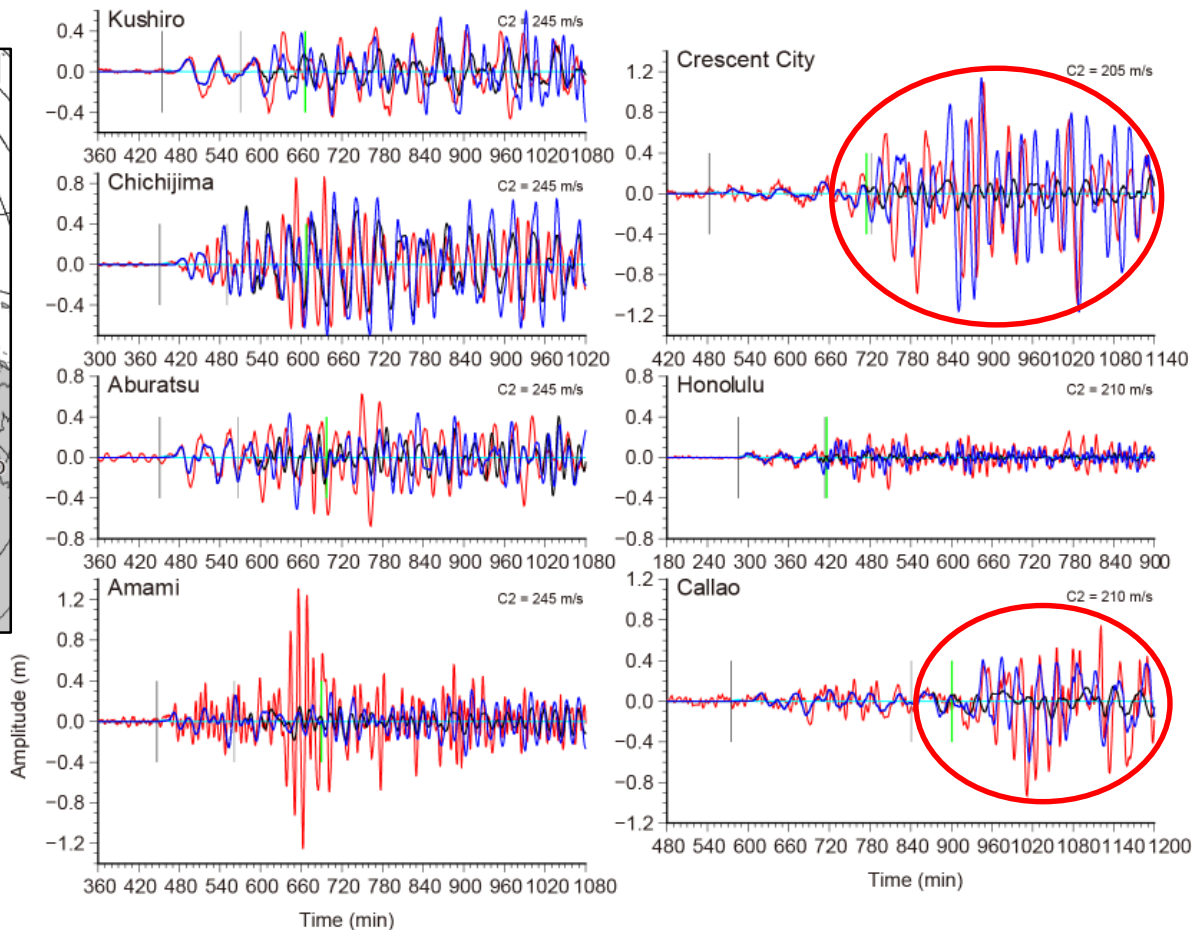
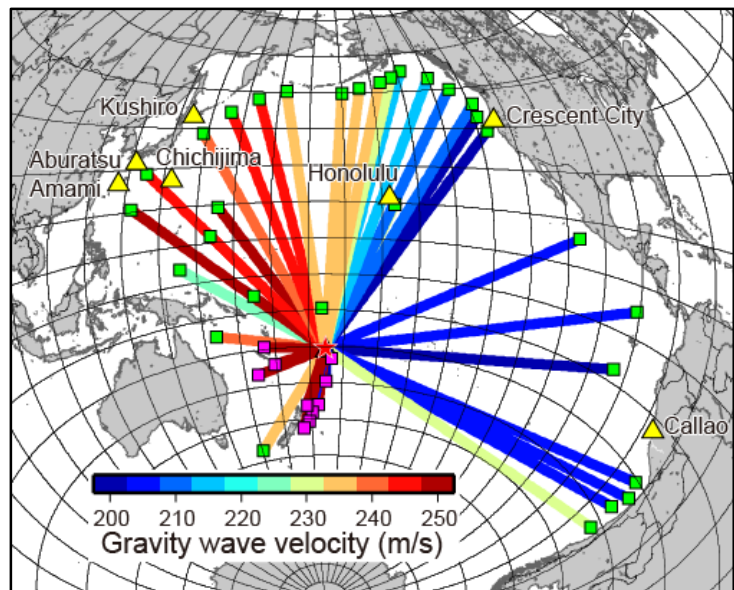
大気重力波

2022 Tonga Tsunami 00010 min

2022 Tonga Tsunami 00010 min



<https://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/Tonga2022/tsunami.html>



(Fujii and Satake, 2023, revised)

— 観測
— 計算(ラム波のみ)
— 計算(ラム波+大気重力波)

発表内容

- インバージョンによる津波波源モデルの構築と意義
- 2004年スマトラ-アンダマン地震
- 2011年東北地方太平洋沖地震
- 2010年チリ地震による津波
- 2004年スマトラ-アンダマン地震(再解析)
- 2005年ニアス地震
- 2022年トンガ火山噴火による津波
- 国際地震工学研修における活用

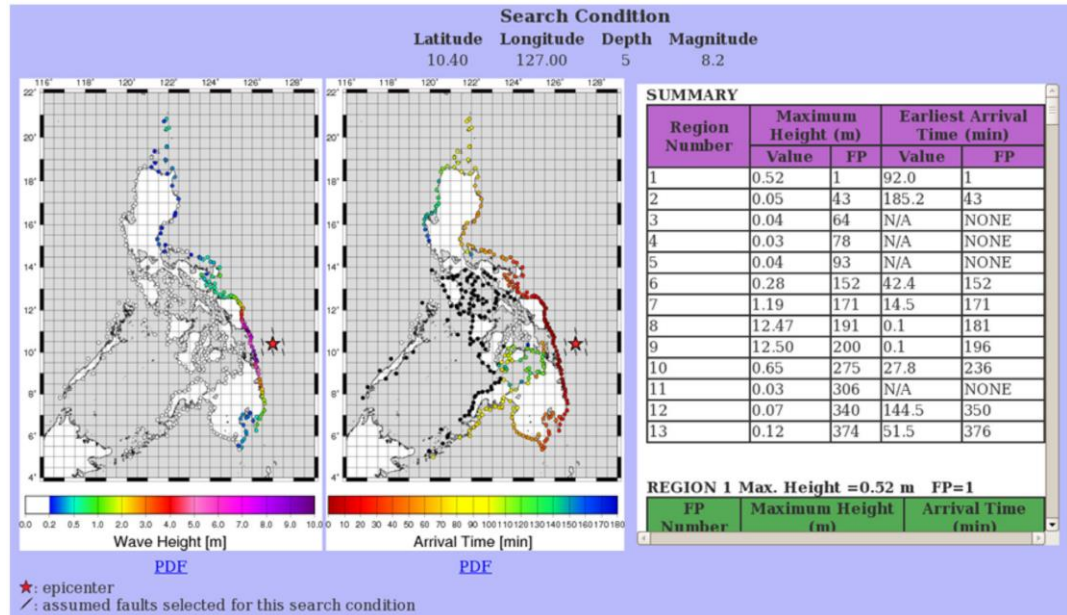
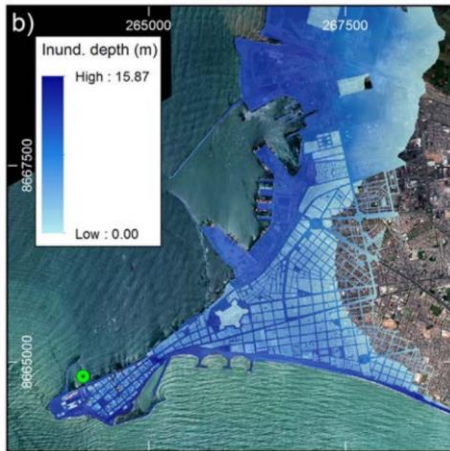
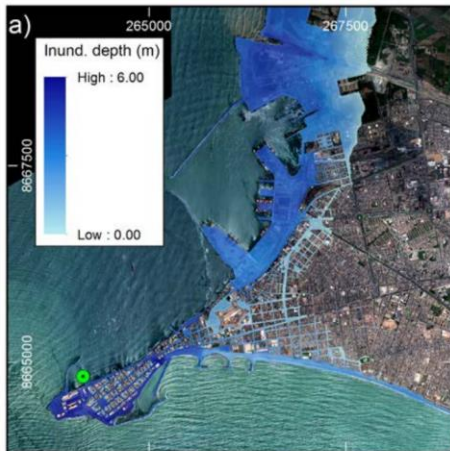


国際地震工学研修の津波防災コース



1960 1968 1980 1995 2005 2006 2009 2012 2014

International Training in Seismology and Earthquake Engineering	Annual Courses (Regular Courses)	Seismology Course	1960 ~	2005 Master Degree Course
		Earthquake Engineering Course	1960 ~	2005 Master Degree Course
		Tsunami Disaster Mitigation Course		2006 ~ Master Degree Course
	Seminar Courses	China Seismic Building Course		2009 ~ 2012
		Latin American Earthquake Engineering Course		2014 ~
		Others	1980 ~	
	Global Seismological Observation Course		1995 ~	
Individual Courses		1968 ~		

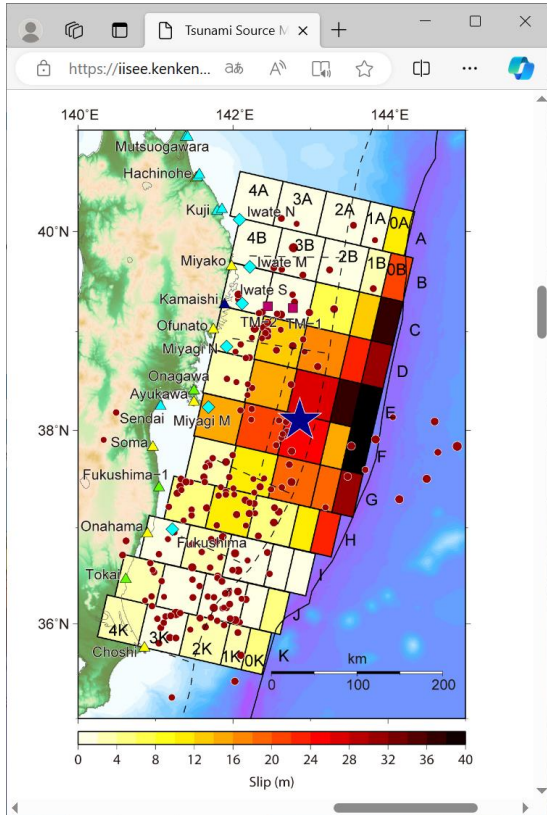


フィリピン: 量的津波警報のための津波データベースの構築 (Igarashi et al., 2015, JDR)

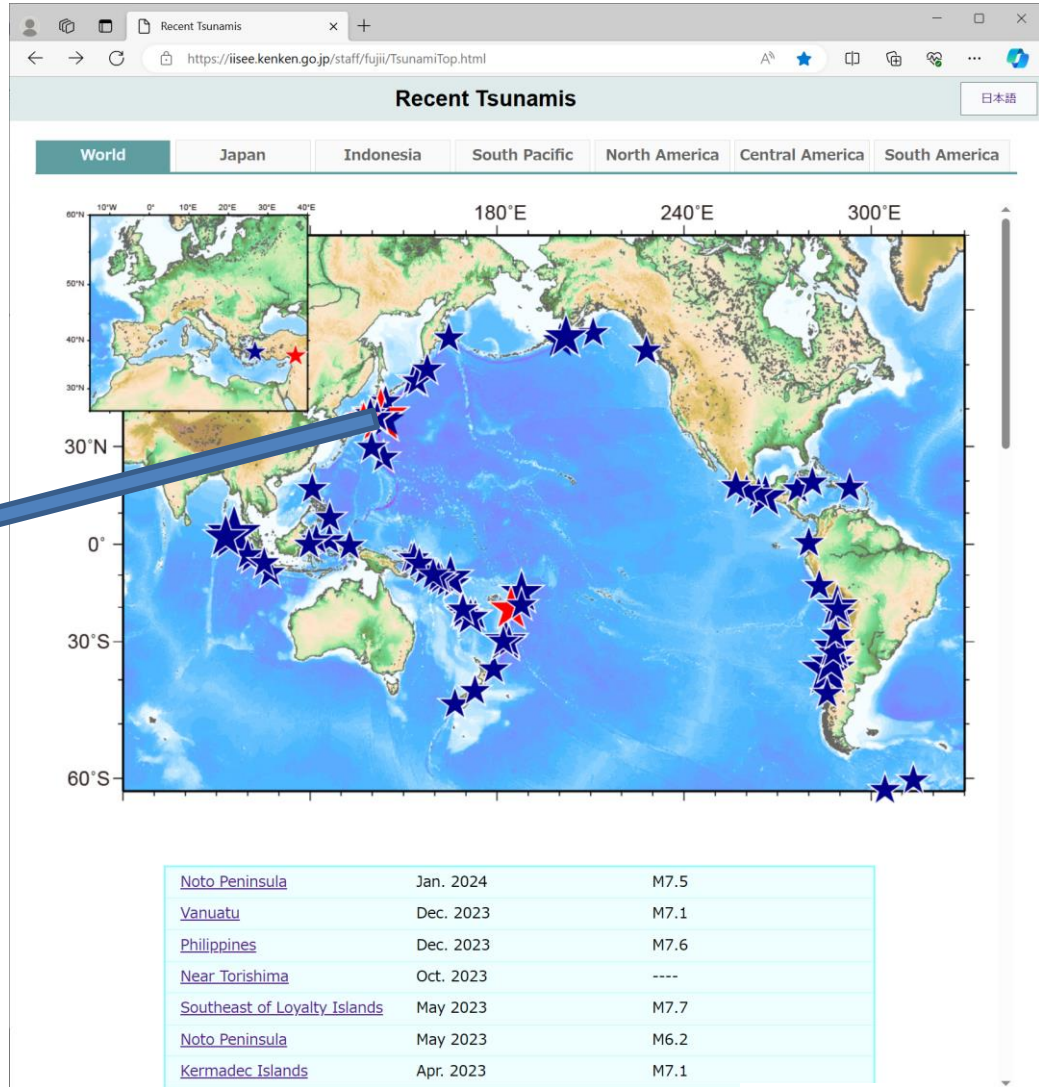
ニカラグア: 2016年から2019年に実施されたJICAプロジェクト「中米津波警報センター能力強化プロジェクト(CATAC)」のカウンターパートとして中心的役割. 津波警報システムの構築と運用. (Emilio Talavera氏・他5名)

ペルー: リマにおける津波浸水予測図 (Adriano et al., 2013, JDR)

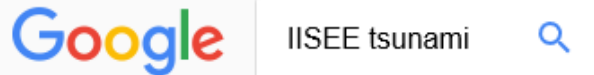
最近発生した津波のシミュレーション



2011年東北地震



<http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/TsunamiTop.html>



まとめと今後の課題

- インバージョンによる津波波源モデルの構築と意義
- 2004年スマトラ-アンダマン地震： 検潮記録と人工衛星データ
- 2011年東北地方太平洋沖地震：
震源域内の沖合データによる時空間すべり分布
- 2010年チリ地震による津波：
遠地津波の到達遅れ, 理論的方法論的解決(Watada et al., 2014)
- 2004年スマトラ-アンダマン地震(再解析):
以降, 遠地(広範囲)の検潮記録と人工衛星データの利用
- 2005年ニアス地震:
遠地を含む津波データと地殻変動データの同時インバージョン
- 2022年トンガ火山噴火による津波:
気圧波による津波の生成(海洋全体に津波波源が伝播, 津波も伝播)
- 国際地震工学研修における活用: 元研修生の津波防災対策への貢献
- 今後の課題: 津波地震(1896年明治三陸地震, 2006年西ジャワ地震)や, 海底地すべり(2024年能登半島地震)による津波の予測