

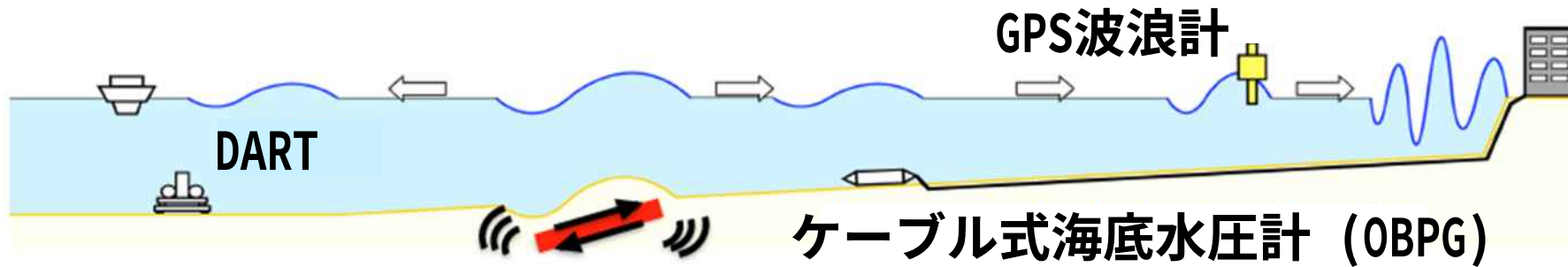
沖合津波観測データを活用した波源推定に 基づく津波即時予測手法の開発

気象研究所 地震火山研究部

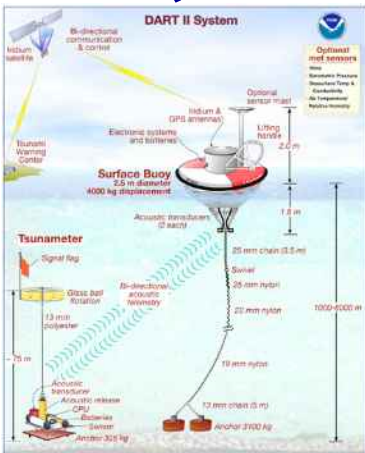
研究の目的：日本周辺で発生した津波(近地津波)の 第一波の予測精度の向上

- 研究の背景
- 沖合津波記録を活用した津波即時予測手法
- 過去の津波への適用例
- 沖合津波観測網増強による予測精度への寄与
- 実用化に向けた取り組み

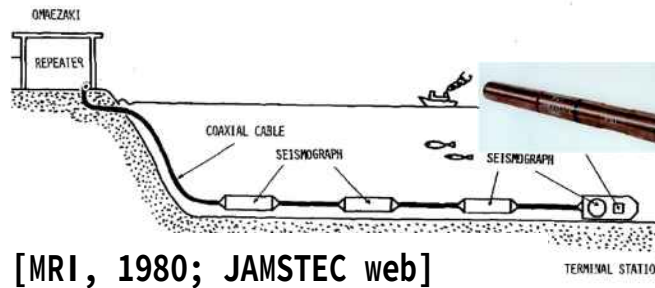
沖合における津波観測



DART (海底水圧計)

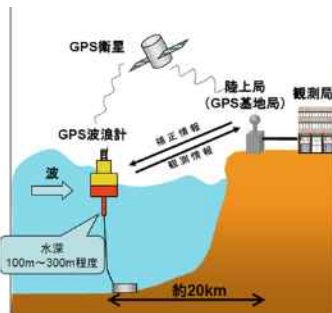


ケーブル式海底水圧計



[MRI, 1980; JAMSTEC web]

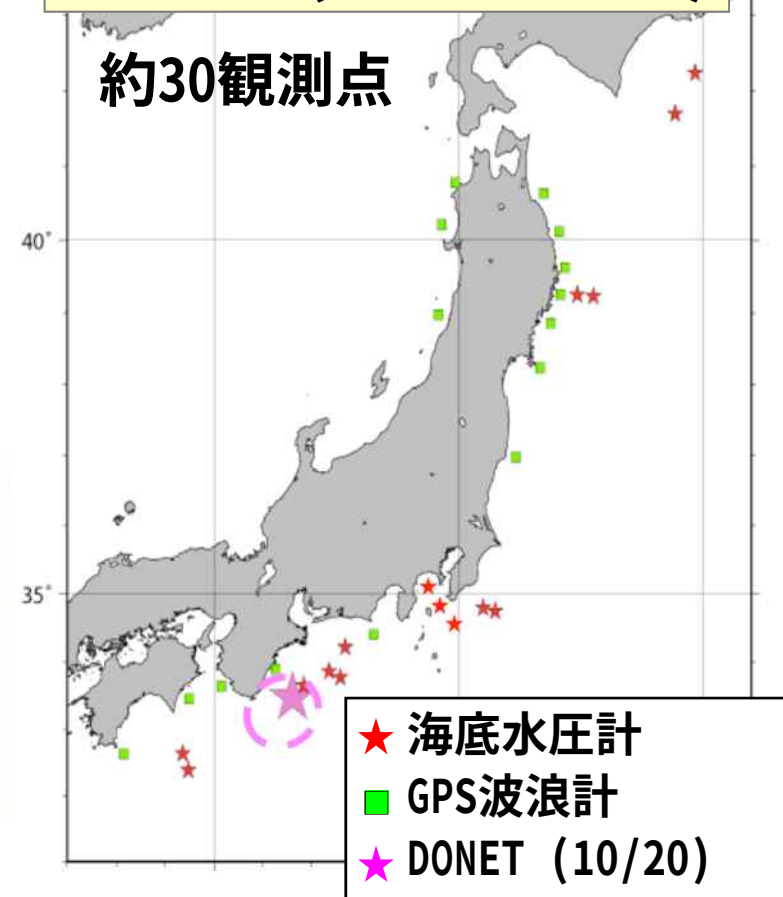
GPS波浪計



[MLIT]

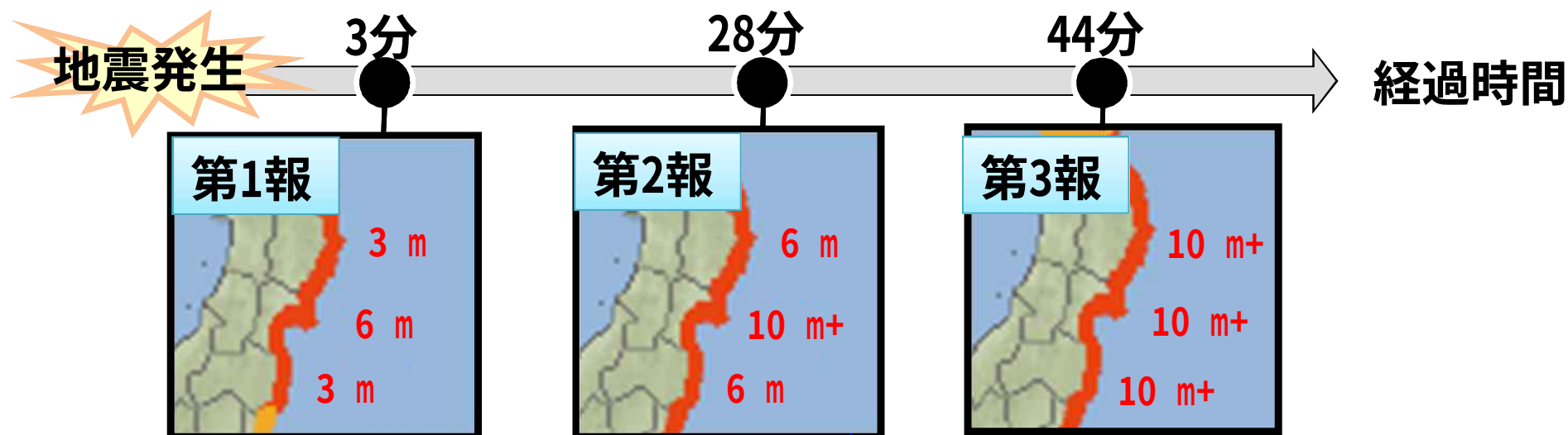
日本近海(東北沖地震時)

約30観測点



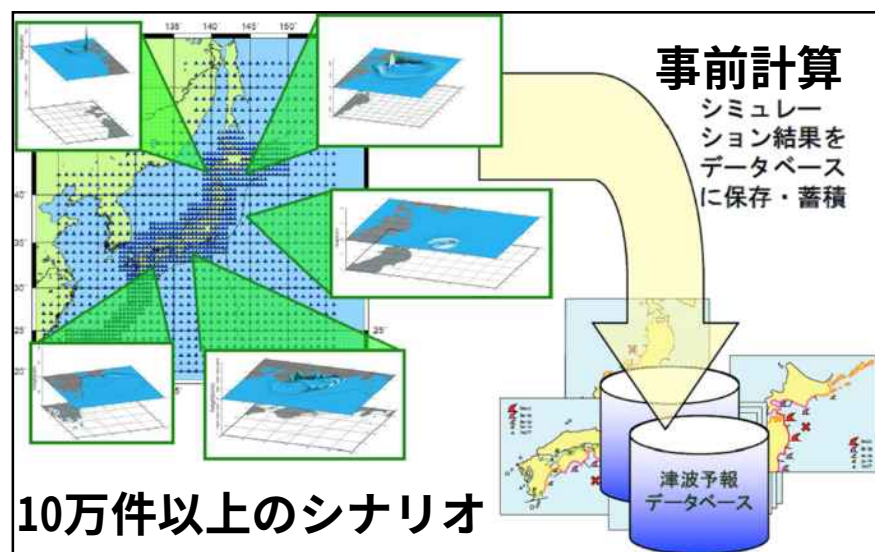
[NOAA web; NDBC web]

津波警報 -- 東北地方太平洋沖地震：地震発生～1時間以内

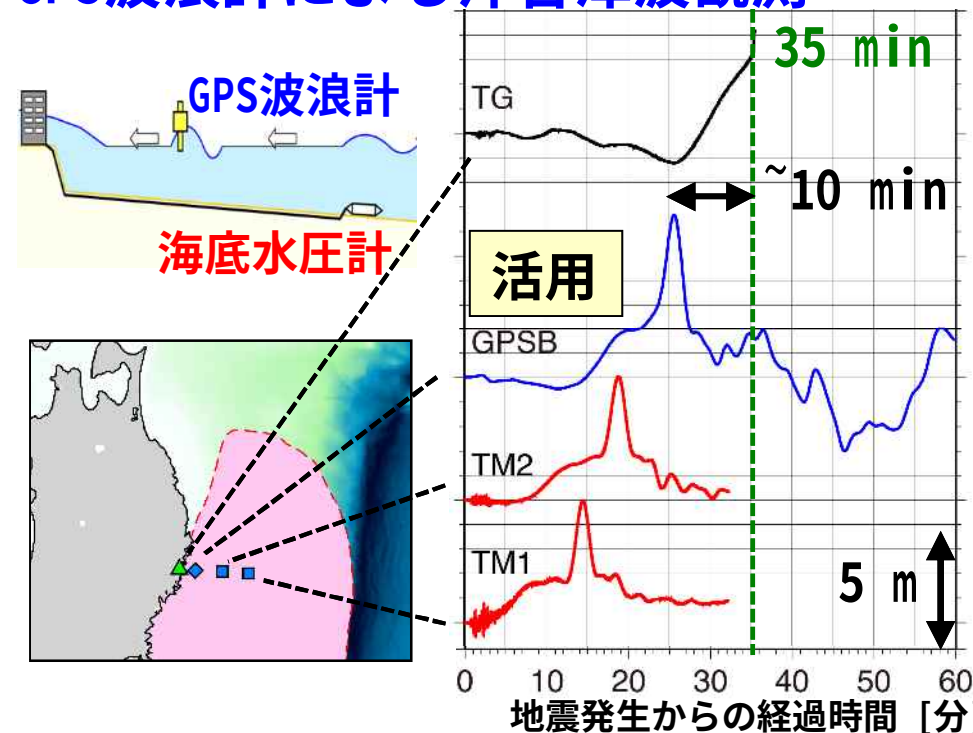


地震波解析&津波データベース
地震波の即時解析 → Mj 7.9

↓ 津波データベース検索



GPS波浪計による沖合津波観測

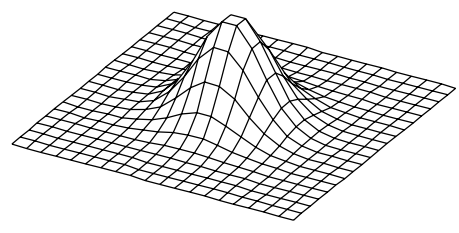


逐次逆解析による津波即時予測手法tFISH

tsunami Forecasting based on Inversion for initial sea-Surface Height [Tsushima *et al.*, 2009, JGR]

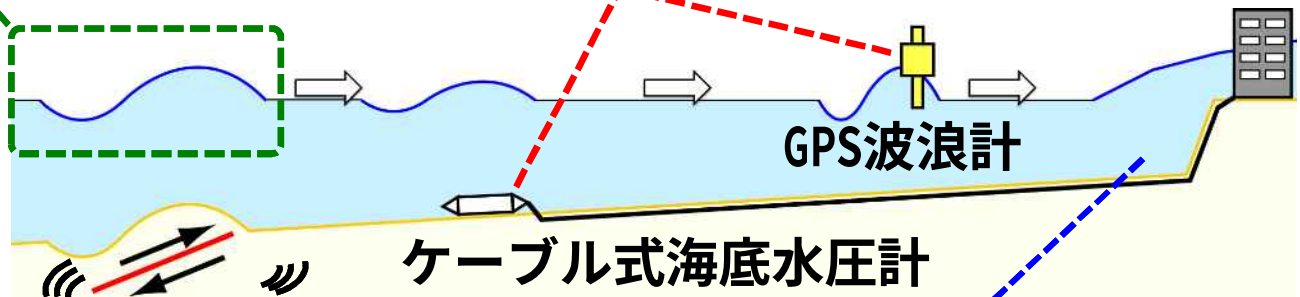
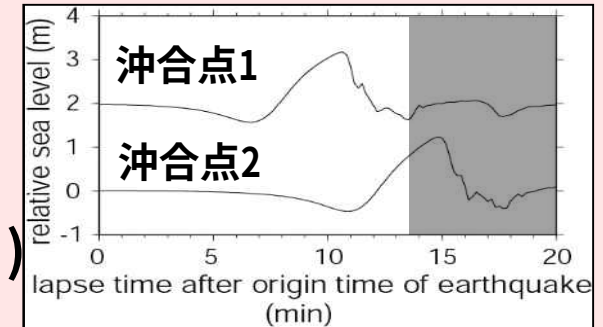
津波波形逆解析
(地震波解析による
震源時と震源位置を考慮)

初期水位分布

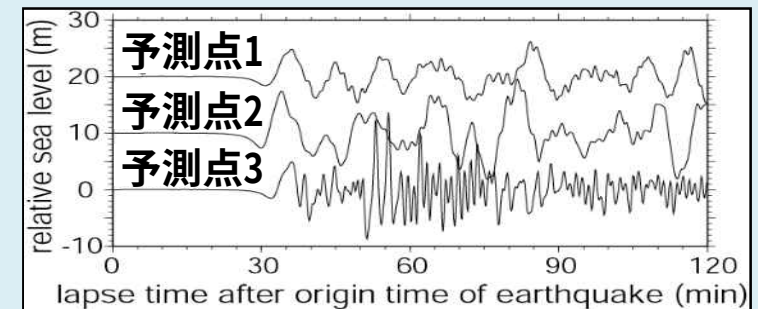


予測波形合成
(グリーン関数の
線形重ね合わせ)

沖合の
観測津波波形
(予測実施時刻まで)

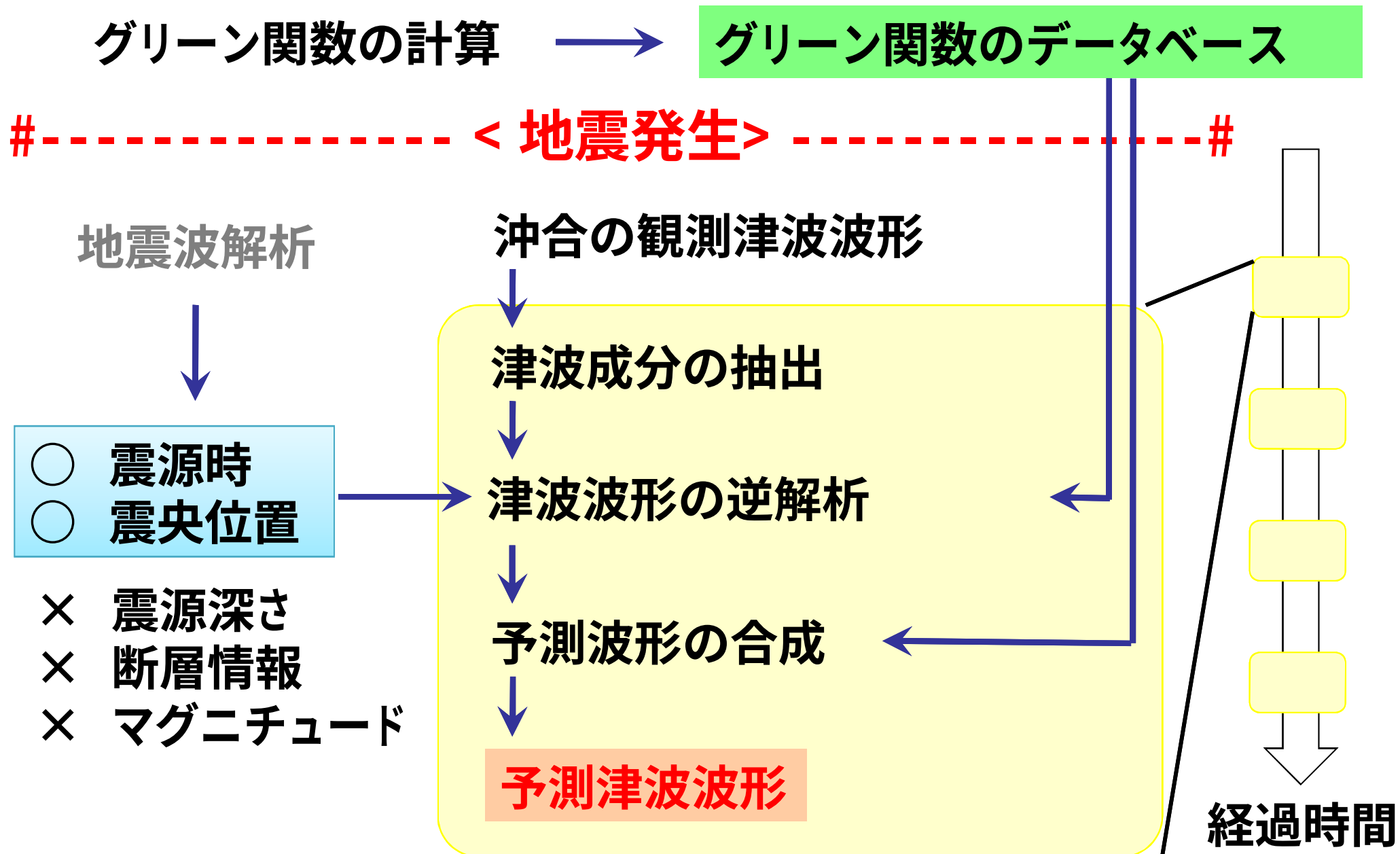


沿岸付近
の予測津波
波形



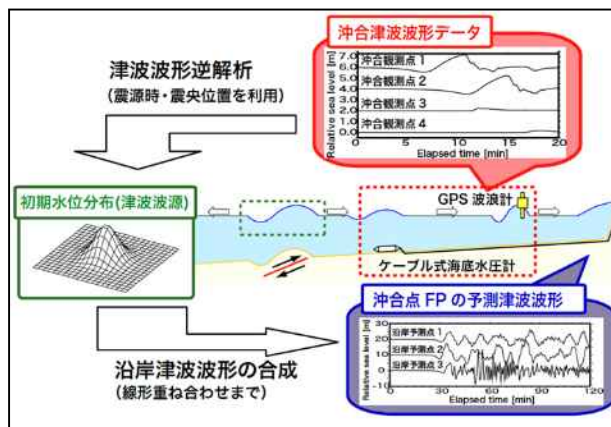
時間経過とともに逐次更新

tFISHによる予測解析



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

$a(\mathbf{x}_i)$

海面要素 i

各小領域からの津波波形

$G_{ij}(t) a(\mathbf{x}_i)$

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

$f^{\text{obs}}(\mathbf{x}_j, t)$

グリーン関数
(単位変位への応答)

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

波形逆解析

グリーン関数

沖合の観測
津波波形

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

初期水位
(未知量)

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

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

対象点の
予測津波波形

グリーン関数

グリーン関数の計算

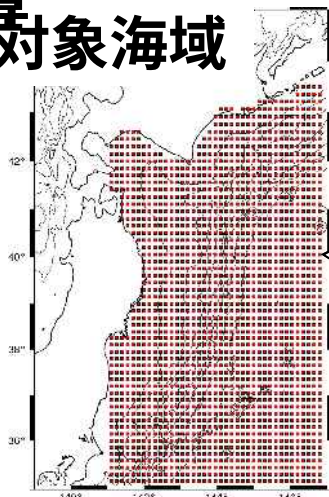
地震発生前に数値計算
& データベース化

(GPS波浪計) $G_{ij}(t) = G_{ij}^s(t)$

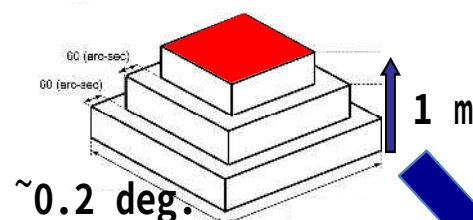
(海底水圧計) $G_{ij}(t) = G_{ij}^s(t) - D_i(\mathbf{x}_j; t)$

水面変化のグリーン関数の計算：流体方程式の差分計算

対象海域



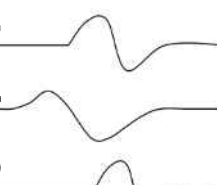
単位波源(海面要素)



沖合・沿岸の
グリーン関数
(海面変化)

$$G_{ij}^s(t)$$

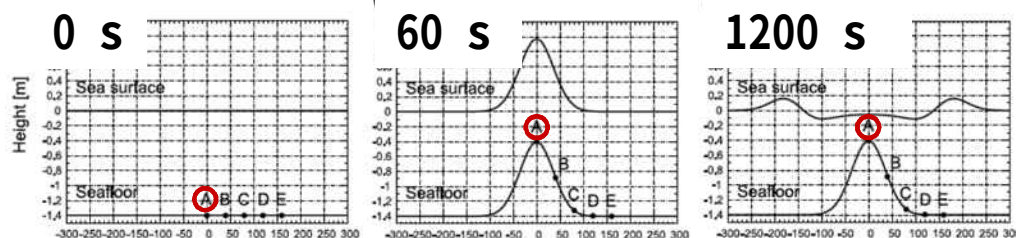
地点1
地点2
地点3



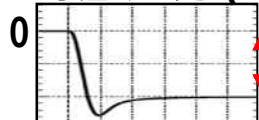
津波伝播の数値計算（線形長波方程式を差分法で解く）

グリーン関数の補正：海面変化 → 海底圧力

[Tsushima *et al.*, 2012, JGR]



海底圧力(A)



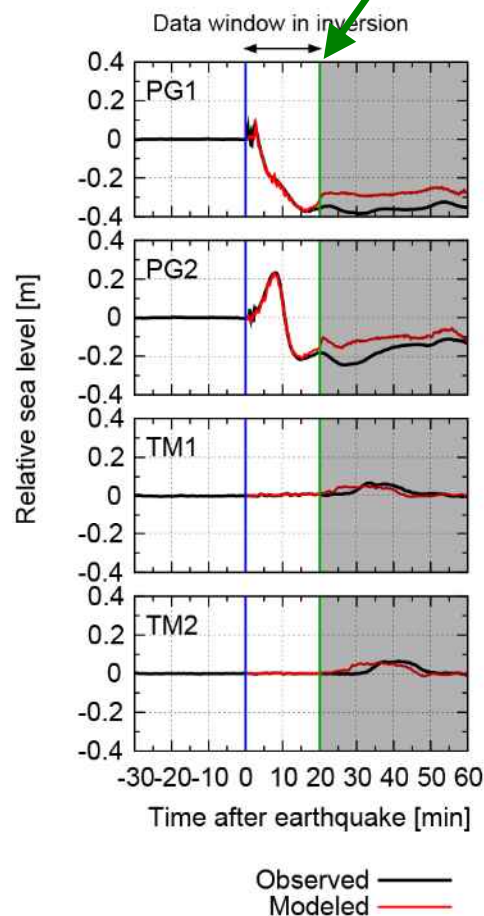
海底圧力への寄与
海面変化
海底永年変動

$$G_{ij}^s(t) - D_i(\mathbf{x}_j; t)$$

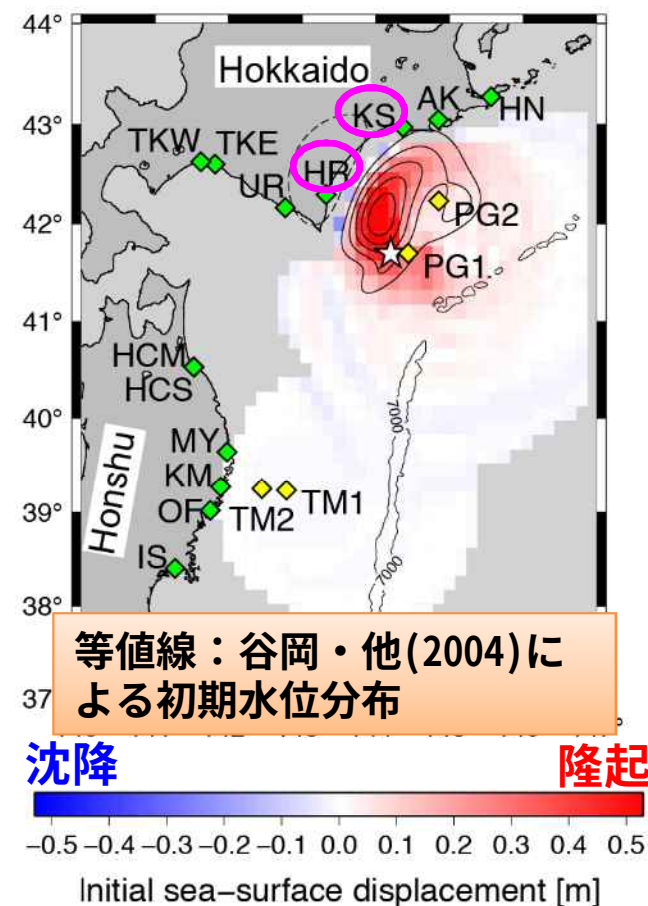
2003年十勝沖地震(Mw 8.3)への適用

地震発生後20分

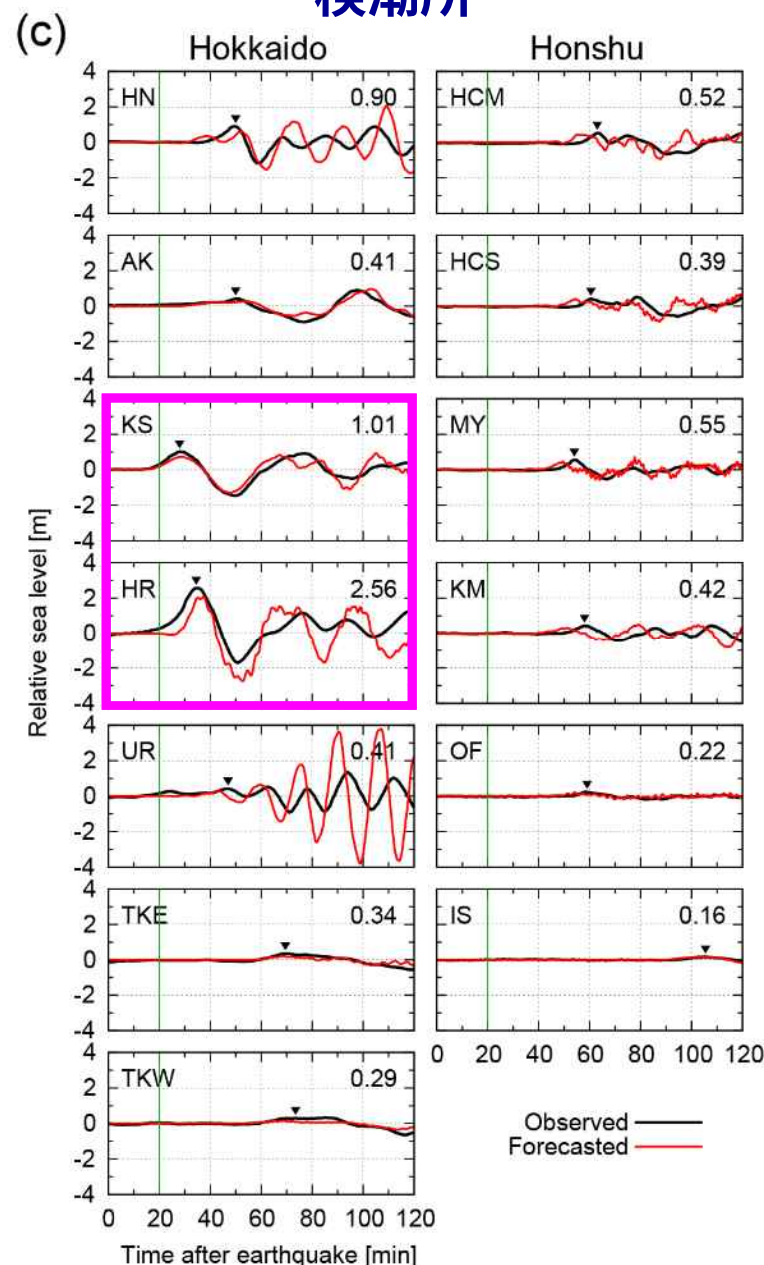
(a) 沖合津波計



(b) 初期水位分布



検潮所

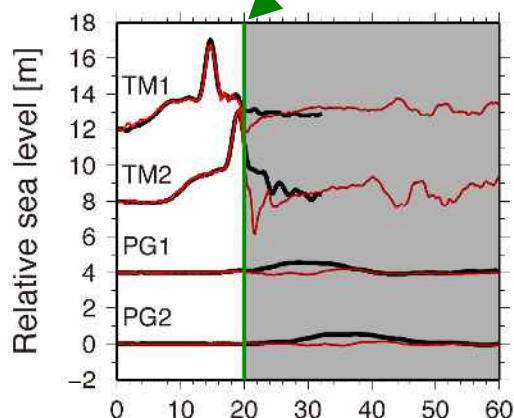


沿岸に津波第一波ピークが到着する
10分前に第一波を精度良く予測

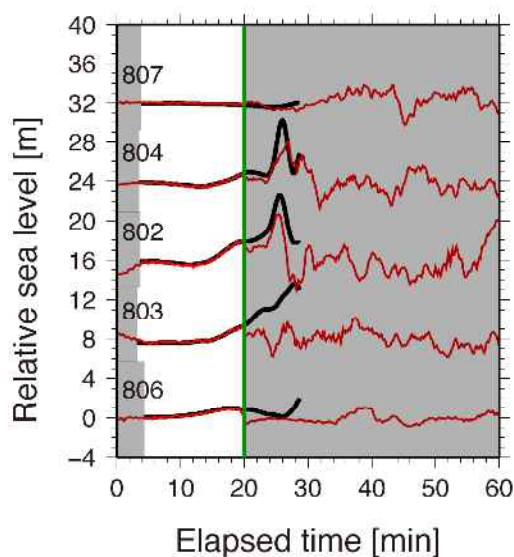
2011年東北沖地震(Mw 9.0)への適用

地震発生後20分

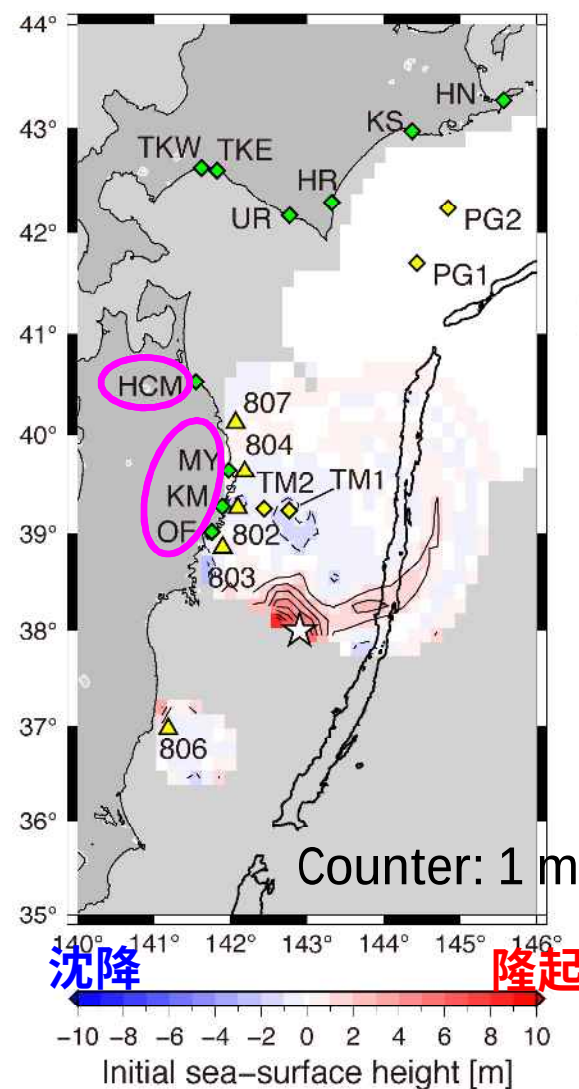
(a) OBPG



(b) GPS buoy

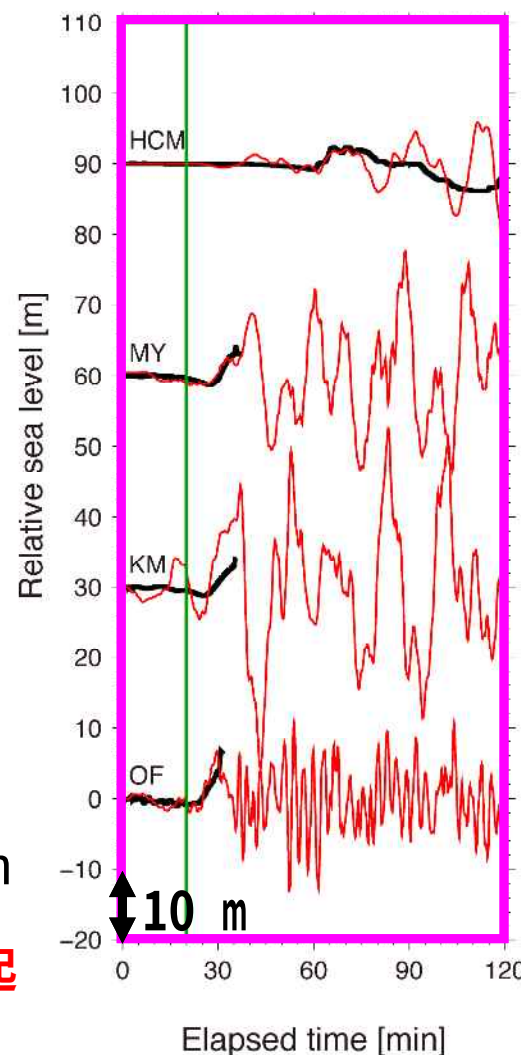


初期水位分布

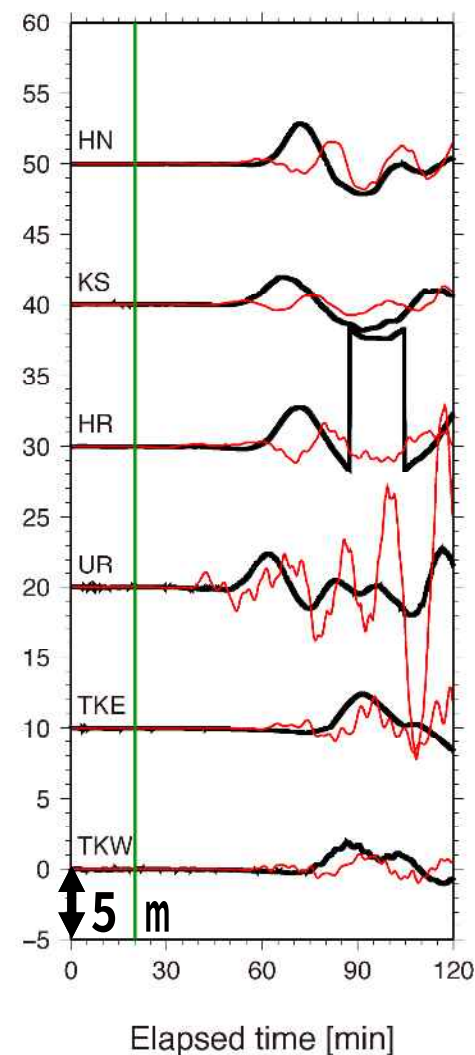


検潮所

Tohoku



Hokkaido



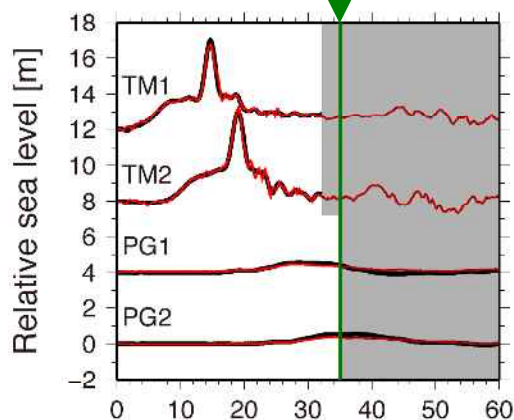
三陸沿岸に5 m-10 m+の津波を予測(猶予時間5分)

— Observation
— Forecast

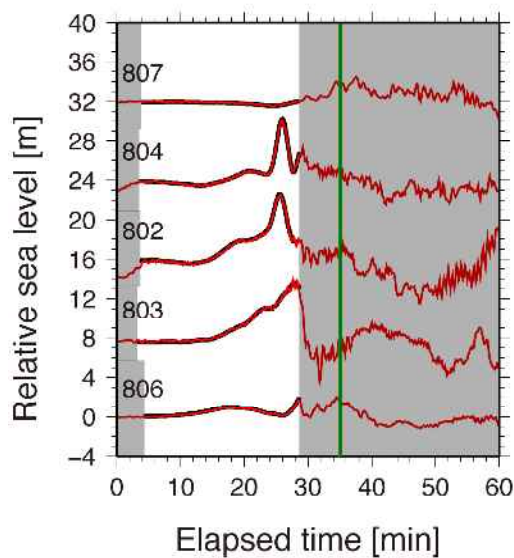
2011年東北沖地震(Mw 9.0)への適用

地震発生後35分

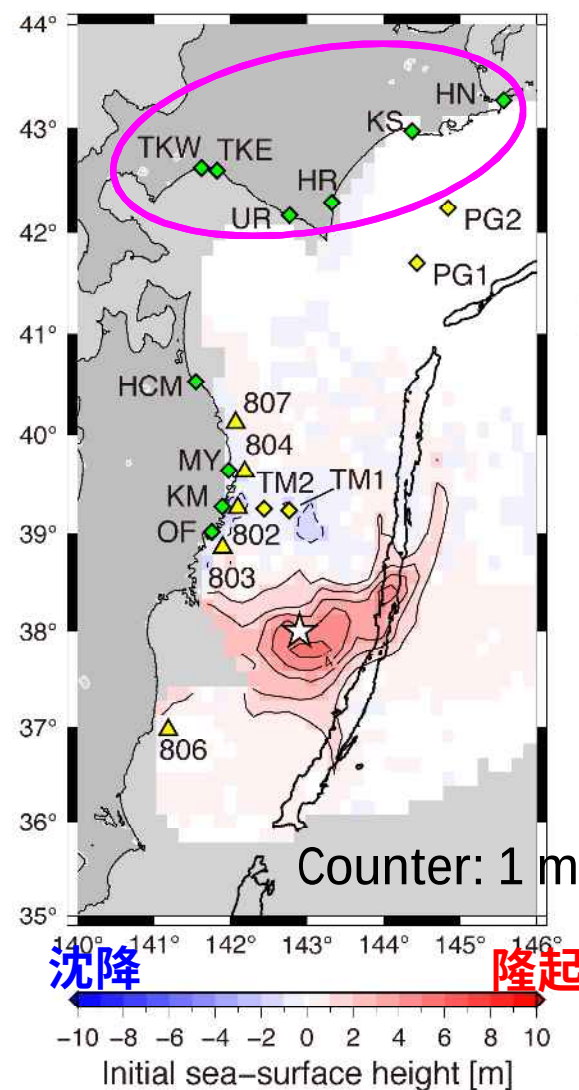
(a) OBPG



(b) GPS buoy

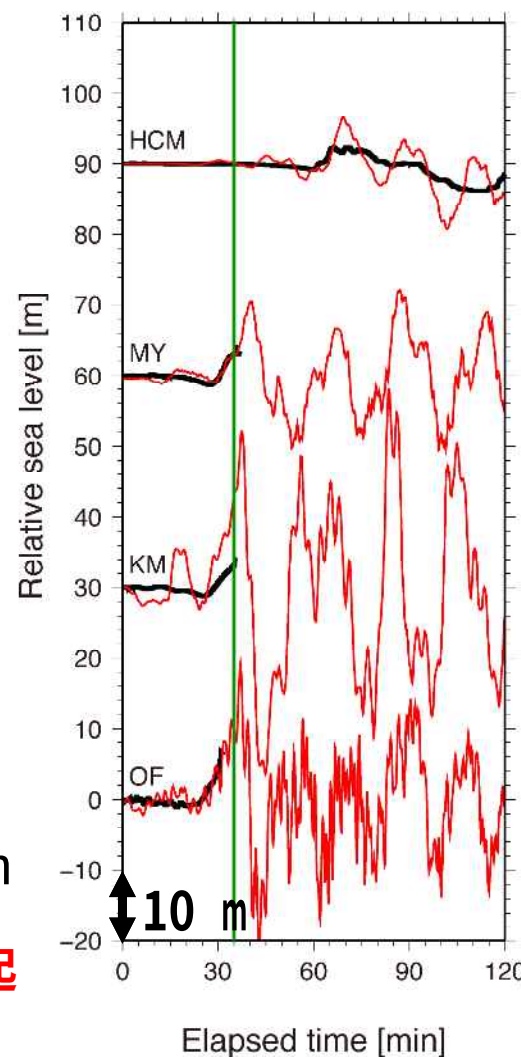


初期水位分布

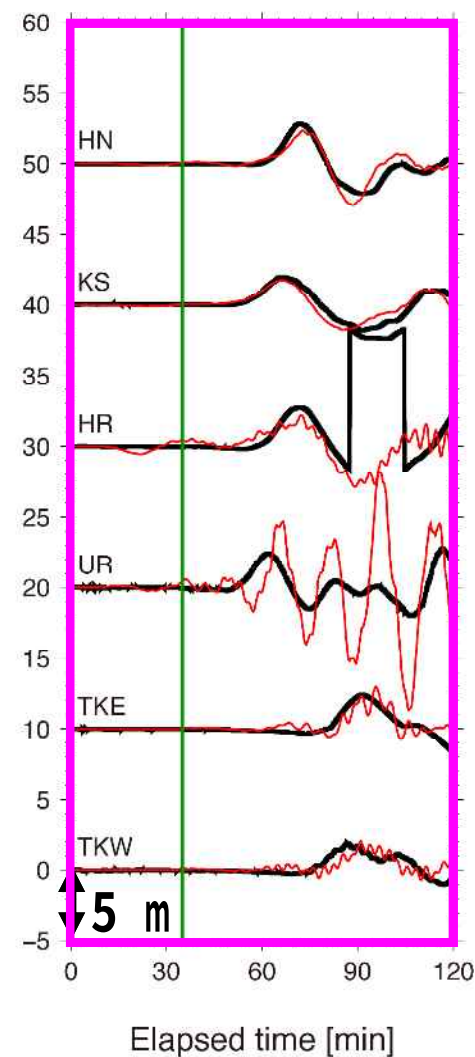


検潮所

Tohoku



Hokkaido



— Observation
— Forecast

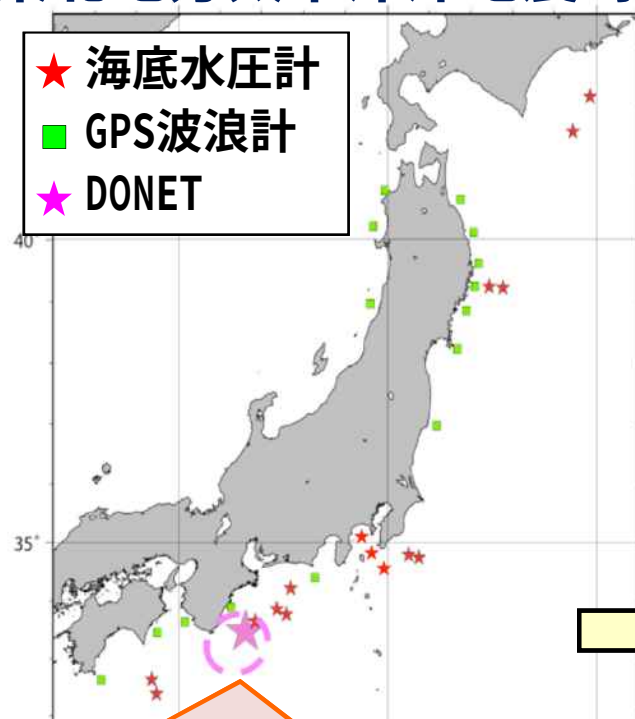
北海道沿岸の予測が改善(猶予時間10分以上)

日本における沖合津波観測網の増強のうごき

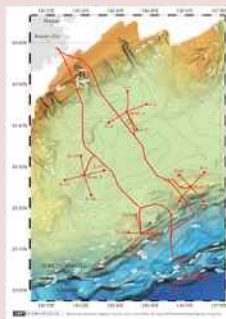
東北地方太平洋沖地震時：早期の警報更新に活用（地震発生後28分）

→ 現在，広範囲かつ稠密な海底津波観測網の整備が進行中

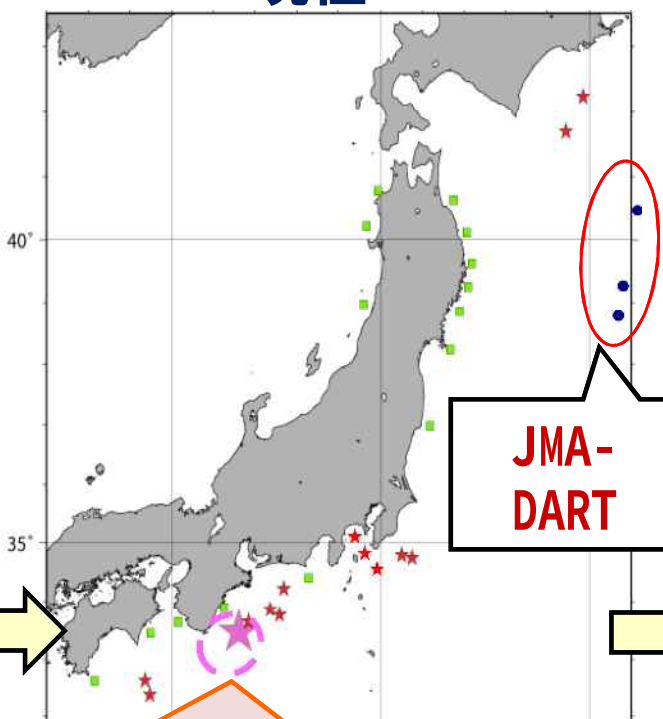
東北地方太平洋沖地震時



DONET1
海底地震
津波観測網
10 / 20地点
[JAMSTEC]



現在



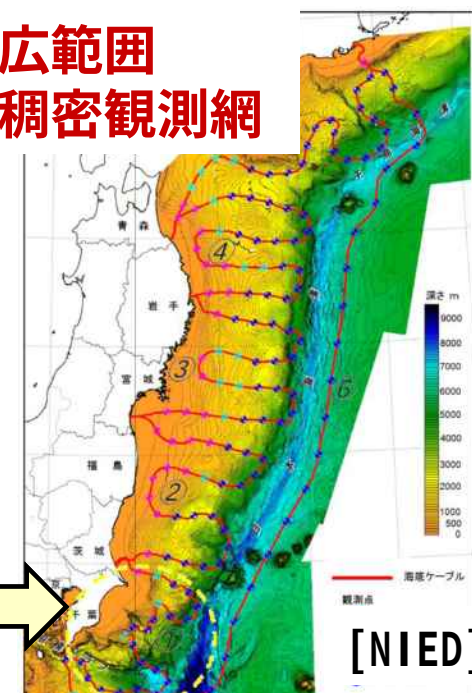
JMA-
DART

DONET1
海底地震
津波観測網
20 / 20地点
[JAMSTEC]



H27年度（予定）

広範囲
稠密観測網



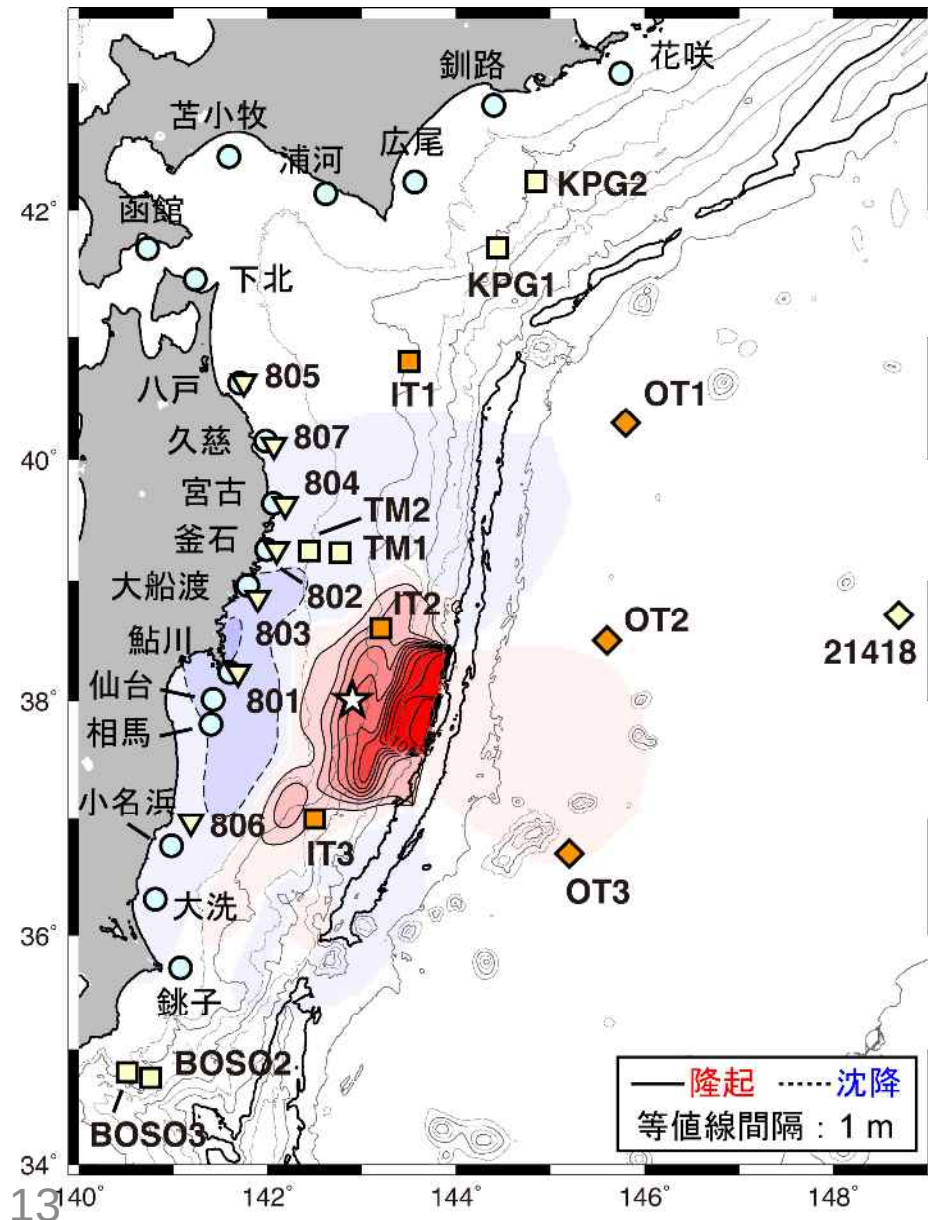
[NIED]

DONET2

[JAMSTEC]

仮想地震の津波予測実験：実験手順

Fujii et al. [2011, EPS]モデル
から計算した上下海底変動分布



1. 仮想観測データ生成

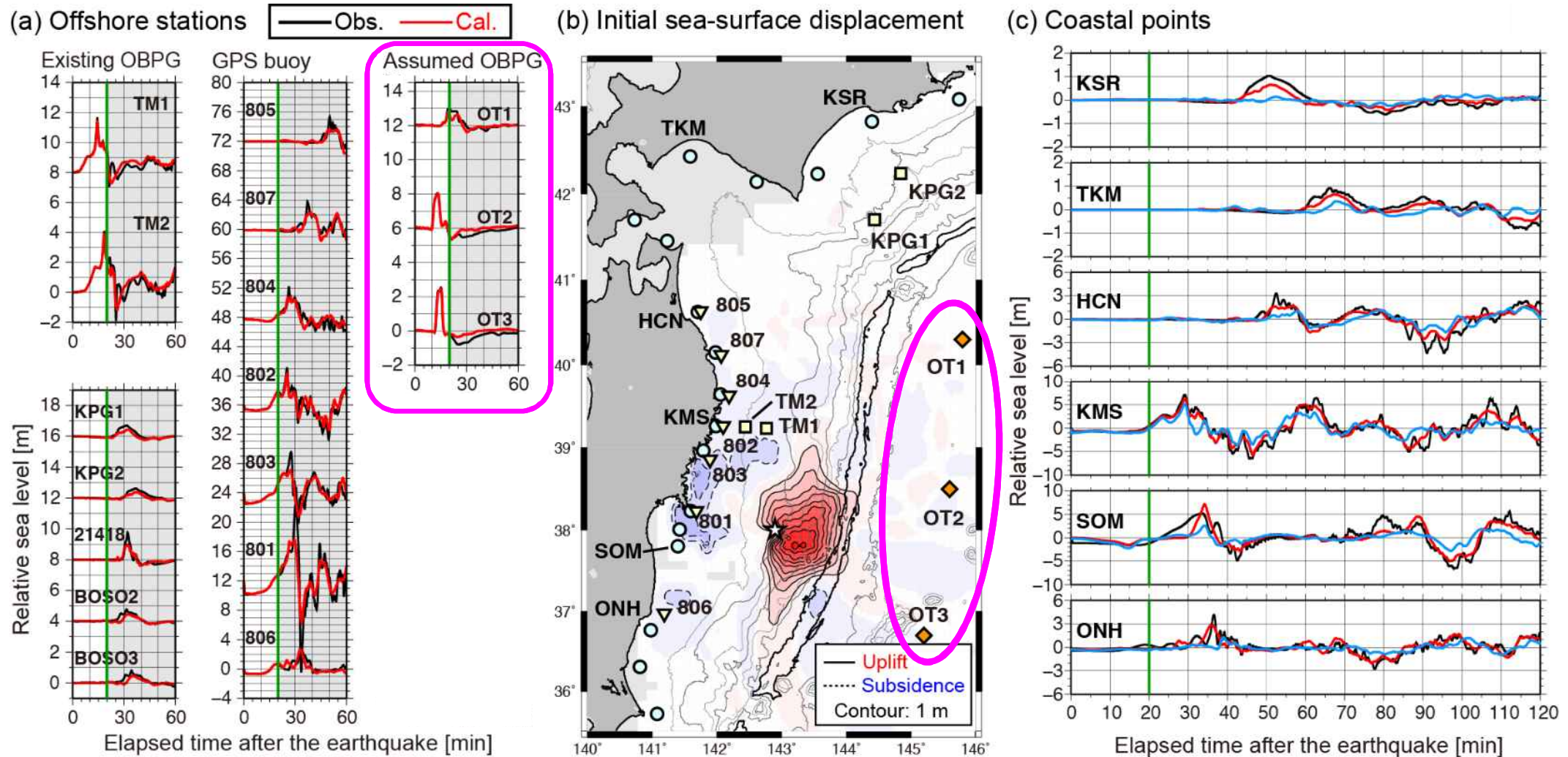
- 震源断層モデル(東北沖地震)
 - Fujii et al. [2011, EPS]
 - 不均質すべり分布
 - ライズタイム：30秒
- 津波計算（線形長波近似）

2. tFISHで津波予測計算

3. 予測結果の評価

- 水深100 m点の観測値と
予測値の比較
(線形近似の妥当性を考慮)

仮想地震の津波予測実験：海溝沖側の3観測点



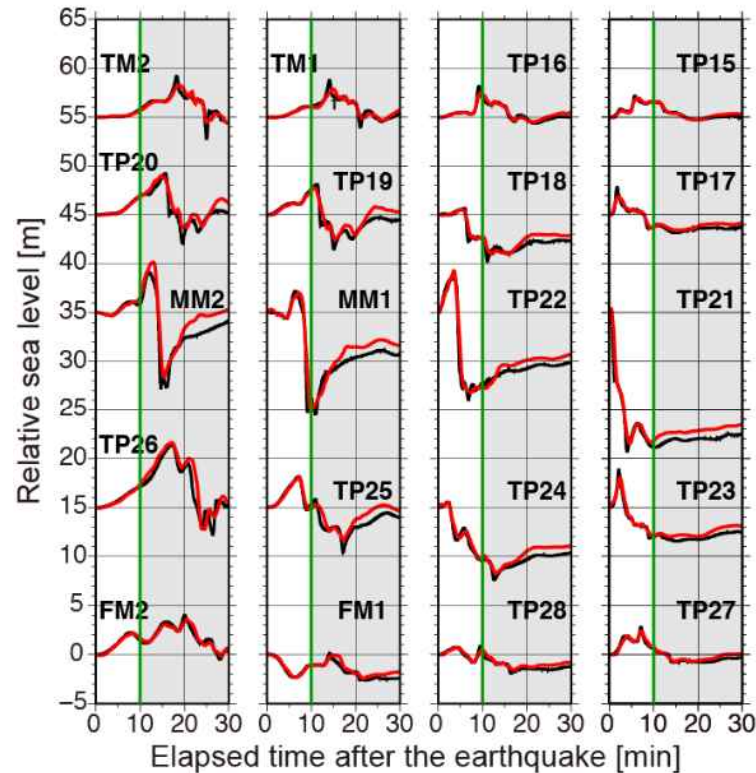
※厳密には気象庁DARTの
配置とは異なる

既存観測点(□△)
仮想観測点(◇)
仮想地震：Fujii et al.
(2011)

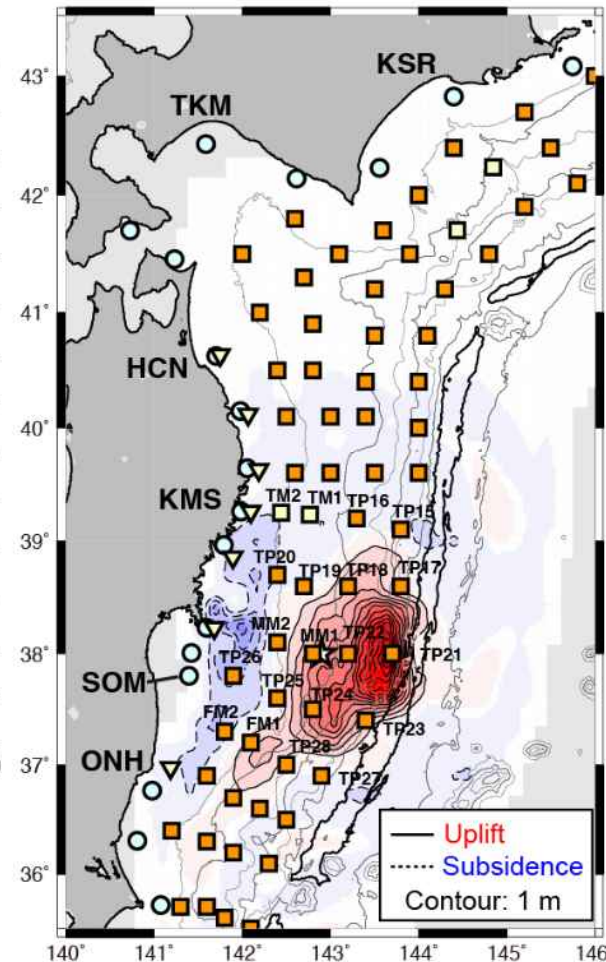
北海道～千葉県の予測点：第一波の波高予測精度が向上

仮想地震の津波予測実験：広範囲の稠密観測網

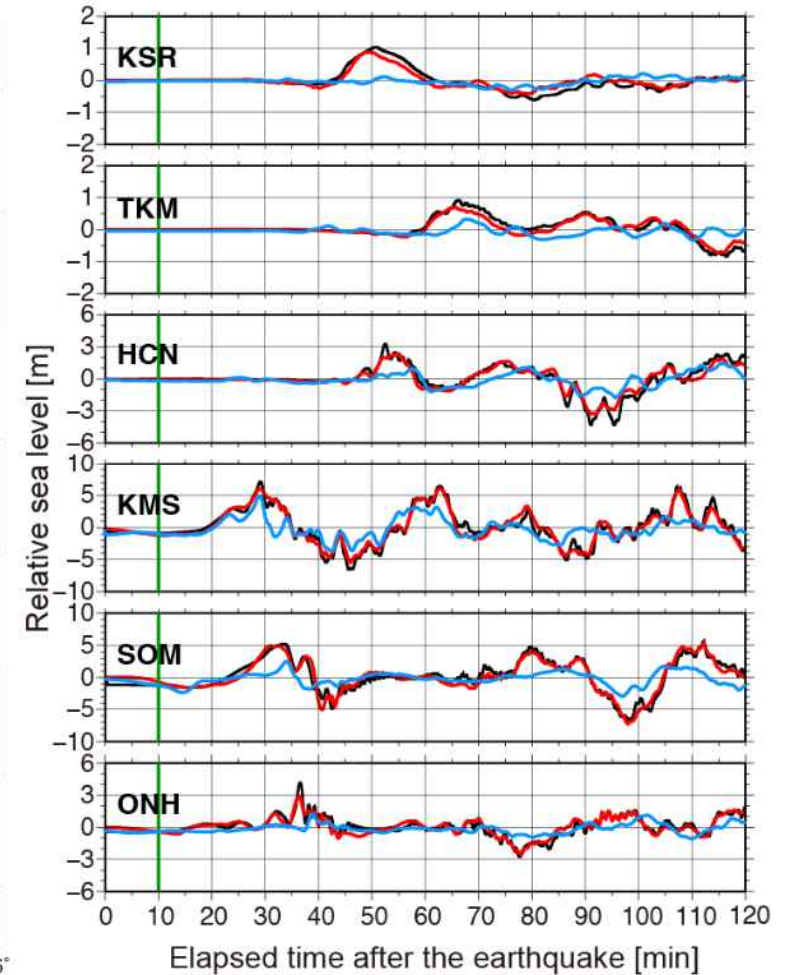
(a) Offshore stations — Obs. — Cal.



(b) Initial sea-surface displacement



(c) Coastal points



※厳密には計画中の稠密
観測網の配置とは異なる

既存観測点(□△)
仮想観測点(■)
仮想地震：Fujii et al.
(2011)

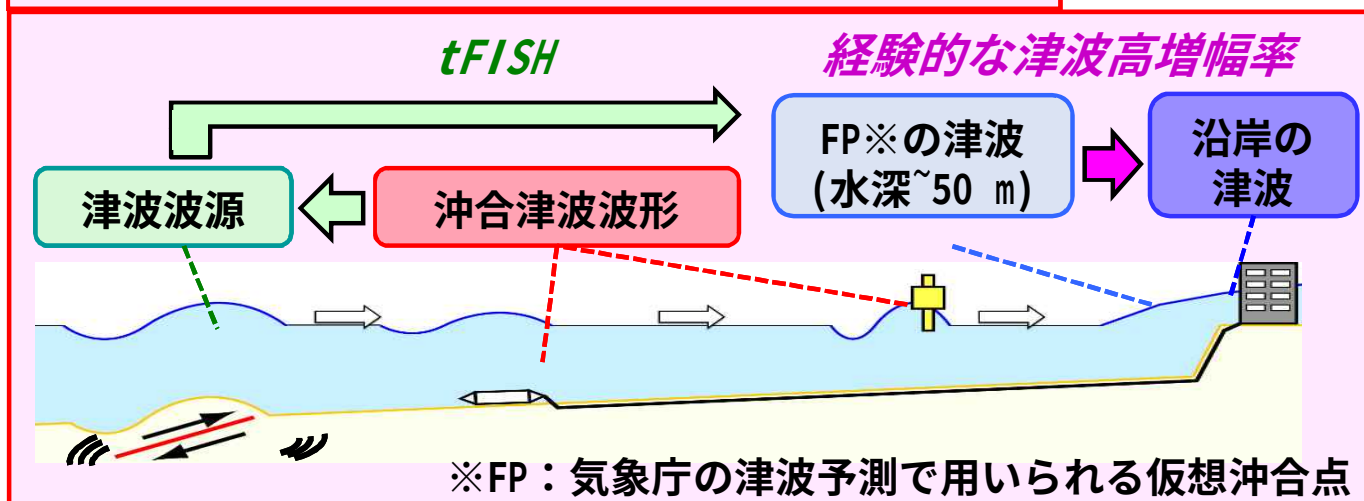
observed
without dense (20 min)
with dense (10 min)

北海道～千葉県の予測点：第一波の波高予測精度が早期に向上

沖合津波観測データ同化システム

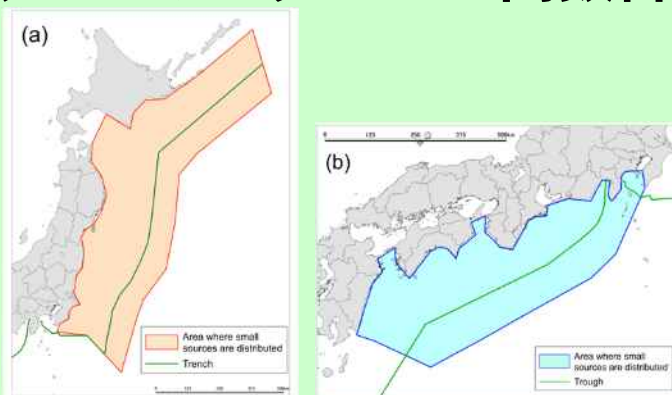
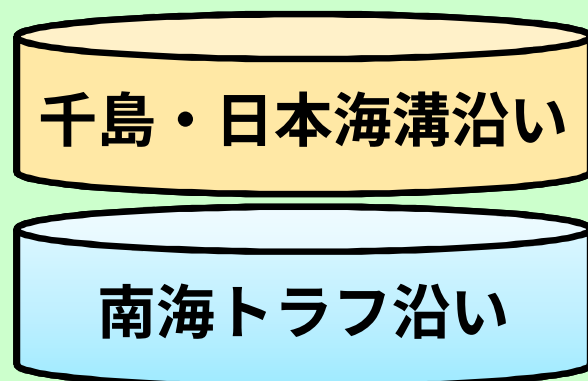
実用化に向けた試作システム．予測対象は津波第一波

沖合津波観測データ同化ソフトウェア



理論津波波形データベース (DB)

波形逆解析及び予測波形のためのグリーン関数群



处理装置



サーバ群

- リアルタイム津波予測解析の制御
 - DBの管理
- 大容量外部記憶装置
- DBを収録

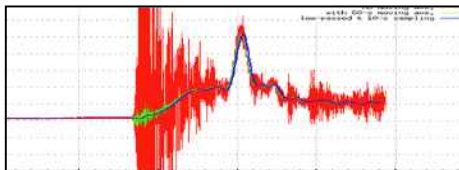
沖合津波観測データ同化システムの機能

- ✓ 予測計算のトリガー：外部入力される震源情報のマグニチュード
- ✓ 一定時間おきに，最新の観測波形を用いて予測計算を繰り返し実行

震源情報
沖合の観測津波波形



津波同化システム
ノイズ除去



津波予測計算
波形逆解析&波形合成



予測結果表示画面
の生成

津波予測結果はウェブブラウザで閲覧可能

予測結果表示画面

トップページ

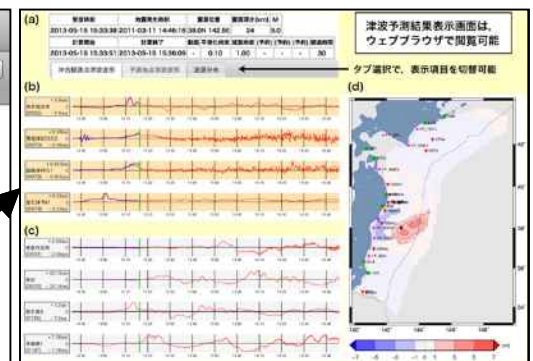
最新の予測結果

津波予測計算結果表示画面(検索結果)

検索時刻範囲指定
2013 年 5 月 1 日 00 時 00 分 ~ 2013 年 5 月 31 日 00 時 00 分

1行=1イベントの予測結果

受信時刻	地震発生時刻	震源位置	震源深さ	M	最新経過時間	経過時間選択
2013-05-15 15:33:38	2011-03-11 14:46:18	38.0N 142.9E	24km	9.0	50分	5件
2013-05-14 21:10:51	2011-03-11 14:46:18	38.0N 142.9E	24km	9.0	50分	5件
2013-05-14 16:22:16	2011-03-11 14:46:18	38.0N 142.9E	24km	9.0	50分	5件
2013-05-14 16:14:06	2011-03-11 14:46:18	38.0N 142.9E	24km	9.0	50分	5件
2013-05-14 15:45:43	2011-03-11 14:46:18	38.0N 142.9E	24km	9.0	50分	5件
2013-05-14 15:10:20	2011-03-11 14:46:18	38.0N 142.9E	24km	9.0	50分	5件
2013-05-14 00:32:48	2011-03-11 14:46:18	38.0N 142.9E	24km	9.0	50分	5件
2013-05-13 19:22:20	2011-03-11 14:46:18	38.0N 142.9E	24km	9.0	50分	5件
2013-05-13 18:33:59	2011-03-11 14:46:18	38.0N 142.9E	24km	9.0	50分	1件
2013-05-13 17:32:17	2011-03-11 14:46:18	38.0N 142.9E	24km	9.0	40分	1件
2013-05-13 17:11:41	2011-03-11 14:46:18	38.0N 142.9E	24km	9.0	30分	1件
2013-05-13 17:06:17	2011-03-11 14:46:18	38.0N 142.9E	24km	9.0	20分	1件
2013-05-13 15:15:55	2011-03-11 14:46:18	38.0N 142.9E	24km	9.0	30分	1件
2013-05-13 14:38:56	2011-03-11 14:46:18	38.0N 142.9E	24km	9.0	20分	1件



津波予測計算結果表示画面(選択)

受信時刻:2013-05-15 15:33:38
地震発生時刻:2011-03-11 14:46:18
震源位置:38.0N 142.9E
震源深さ:24km
マグニチュード:9.0

計算開始	計算終了	観測 平均化処理	減衰処理	(予測)	(予測)	(予測)	経過時間
2013-05-15 15:36:01	2013-05-15 15:38:04	-	0.10	1.00	-	-	50
2013-05-15 15:39:41	2013-05-15 15:37:46	-	0.10	1.00	-	-	40
2013-05-15 15:33:51	2013-05-15 15:36:09	-	0.10	1.00	-	-	30
2013-05-15 15:33:46	2013-05-15 15:35:56	-	0.10	1.00	-	-	20
2013-05-15 15:33:41	2013-05-15 15:35:37	-	0.10	1.00	-	-	10

リアルタイム自動解析

地震毎の予測結果履歴

予測結果表示画面の例

(a)

受信時刻	地震発生時刻	震源位置	震源深さ(km)	M				
2013-05-15 15:33:38	2011-03-11 14:46:18	38.ON 142.9E	24	9.0				
計算開始	計算終了	動画	平滑化拘束	減衰拘束	(予約)	(予約)	(予約)	経過時間
2013-05-15 15:33:51	2013-05-15 15:36:09	-	0.10	1.00	-	-	-	30

沖合観測点津波波形

予測地点津波波形

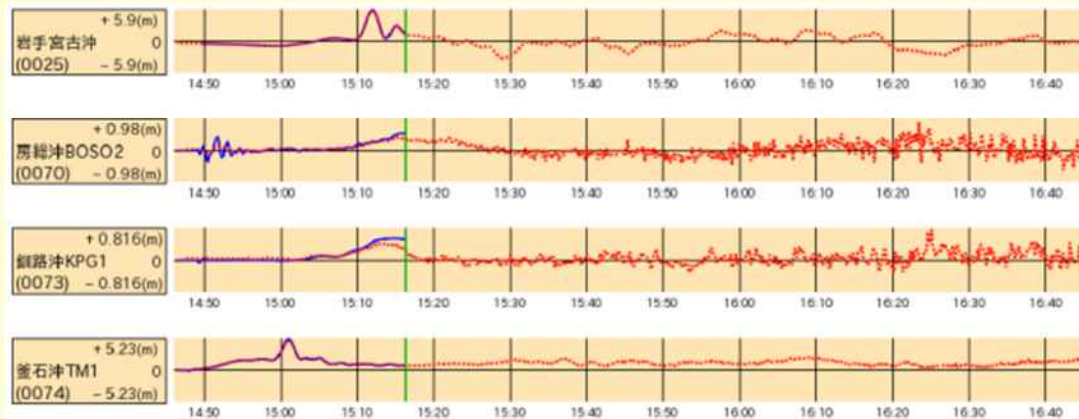
波源分布



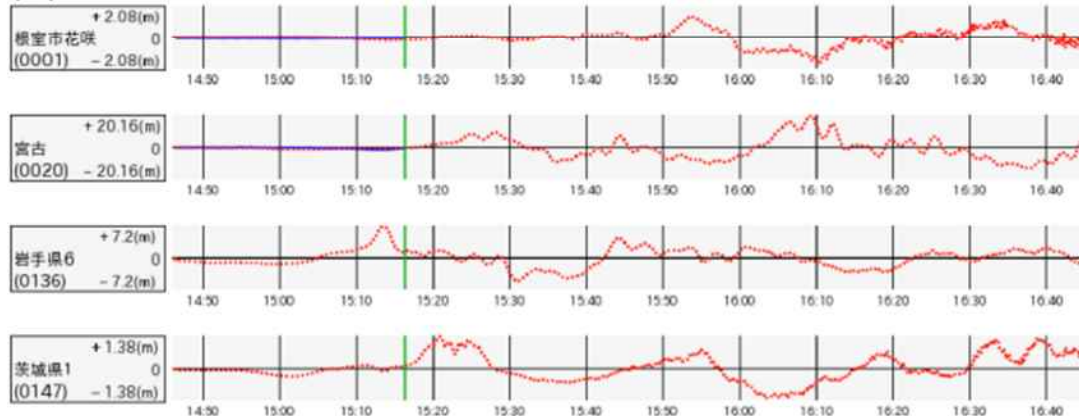
津波予測結果表示画面は、
ウェブブラウザで閲覧可能

タブ選択で、表示項目を切替可能

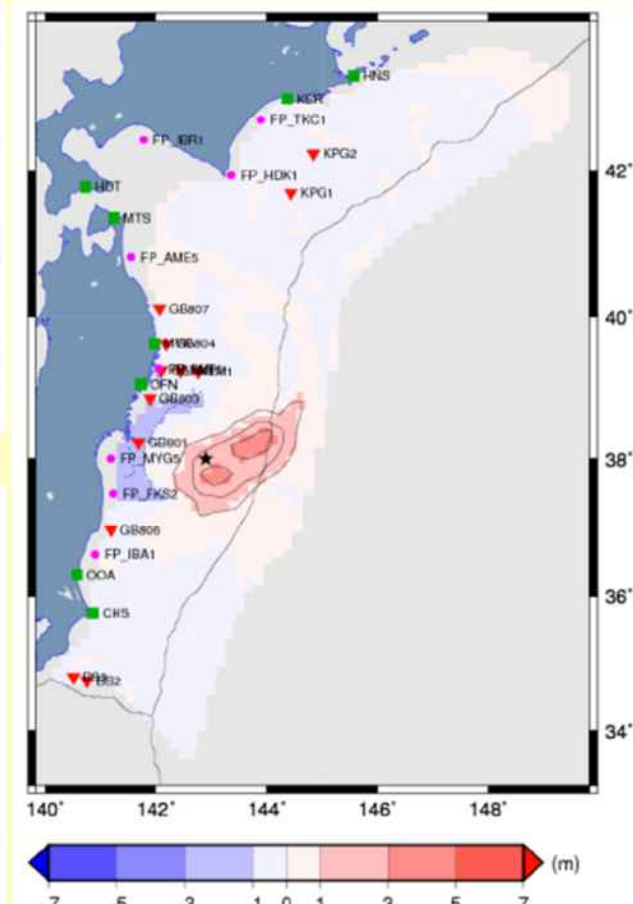
(b)



(c)



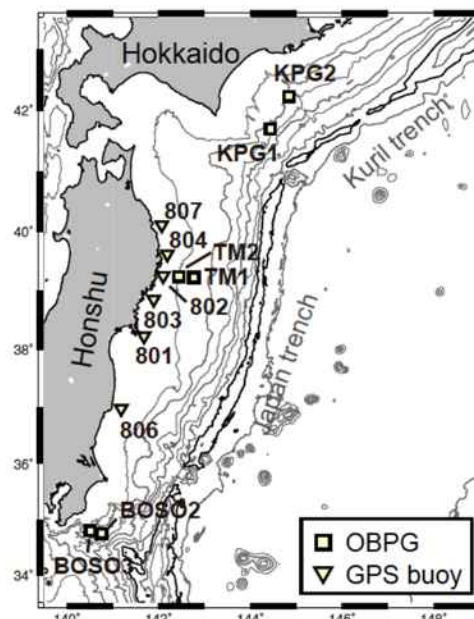
(d)



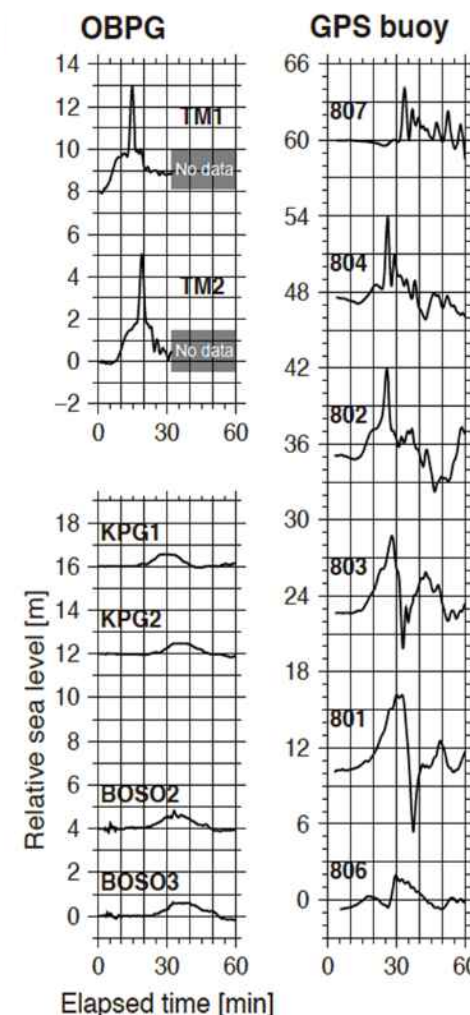
動作試験：2011年東北沖地震への適用

- 逆解析で用いる沖合観測点：12 →
 - GPS波浪計のみかけ変位(河合ほか, 2011)
→ Ohta et al. (2012)のGNSS即時解(地震発生後5分で推定可能)で補正
- 予測波形計算
 - 地点：211点(沖合・沿岸観測点, FP)
 - 再現時間：地震発生から3時間後まで
 - 予測対象：沿岸の津波第一波

地震発生後50分まで10分おきに予測計算を実施

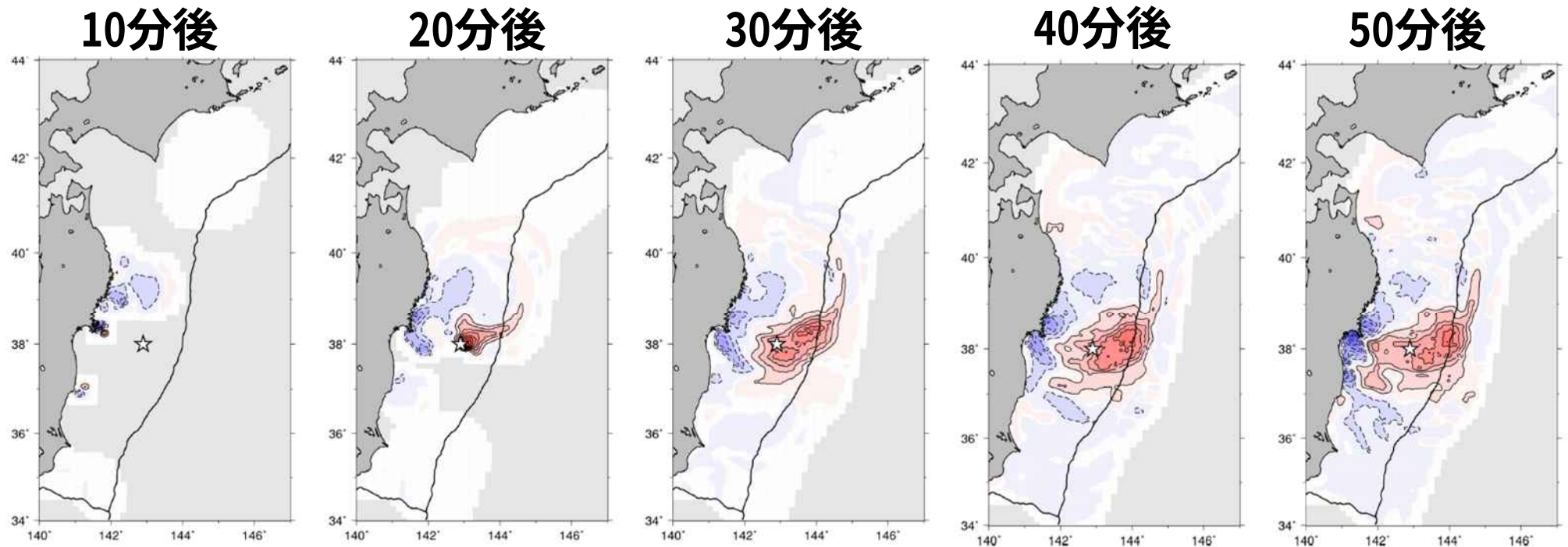


*入力波形はノイズを含むが、ここではノイズ除去後の波形を示した。



- ✓ 各時刻における一連の予測解析は2分程度で完了
- ✓ 欠測を含むデータを入力 → システムが自動判別し予測解析が正常に完了

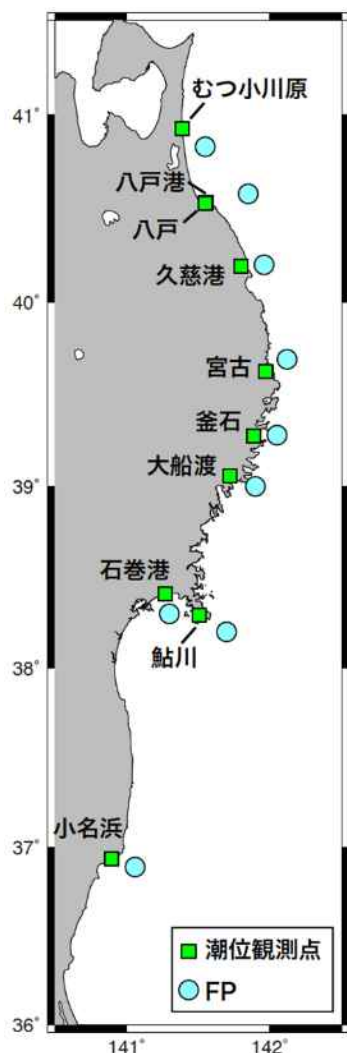
津波波源（初期水位分布）の推定値



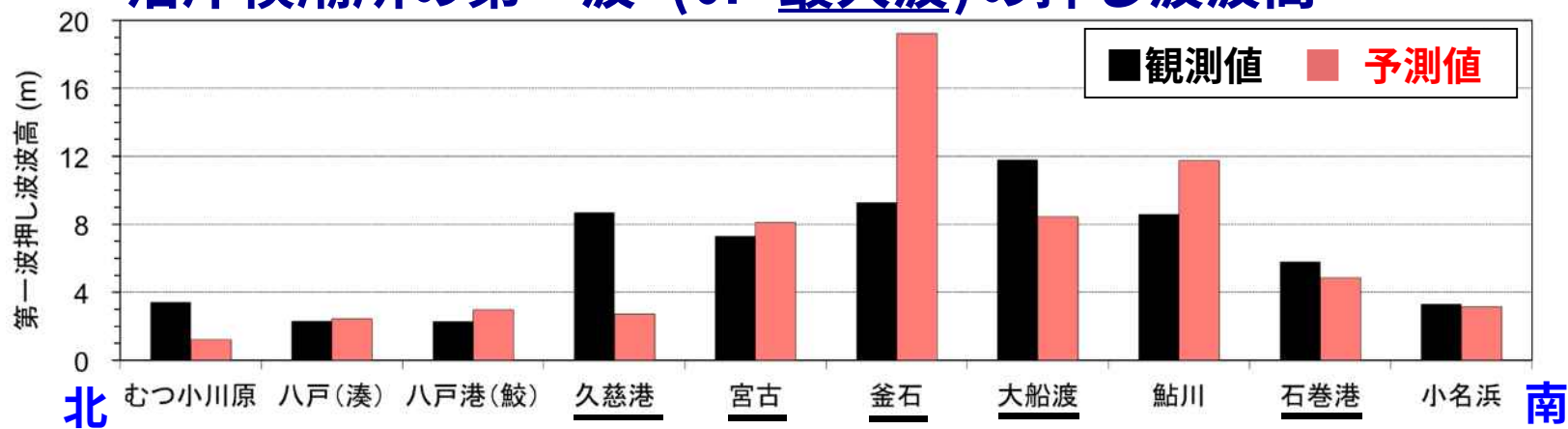
隆起／沈降

沿岸検潮所における津波波高の予測

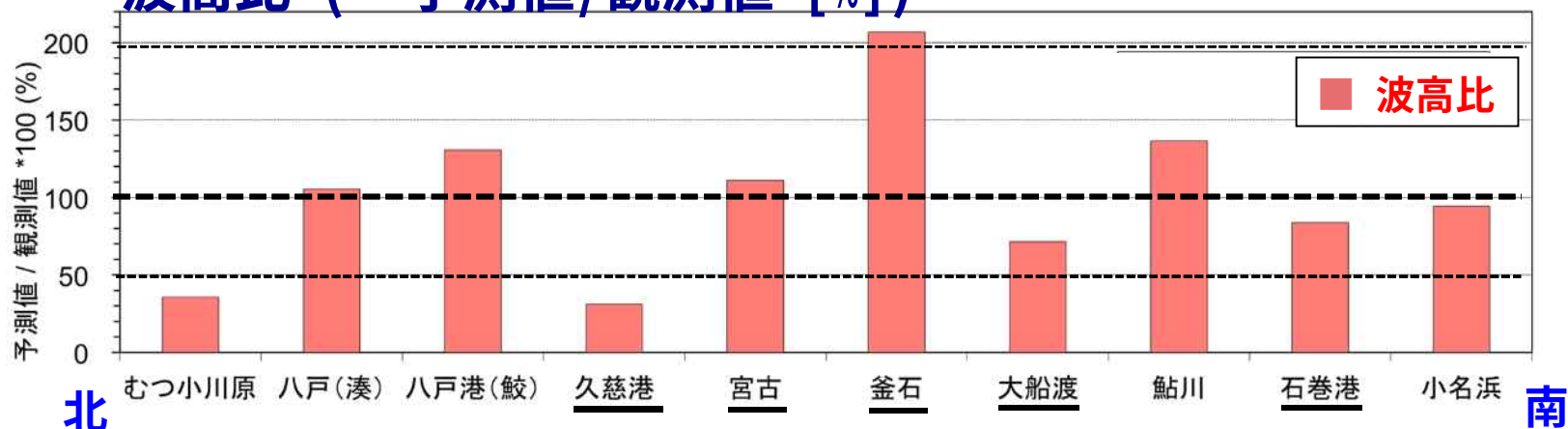
地震発生後20分 (+計算時間3分)



沿岸検潮所の第一波 (or 最大波)の押し波波高



波高比 (= 予測値/観測値 [%])



東北地方北部の多くの沿岸検潮所において，観測波高の倍半分の精度で第一波を予測できる可能性

まとめ

- 沖合津波記録を活用した波源推定に基づいて，沿岸での津波を即時予測する手法を開発した．
- 津波予測手法を過去の地震の実記録に適用し，その有効性を示した．
- 仮想地震への適用により，現在整備中の沖合津波観測網の完成後は，津波予測精度のさらなる向上が見込まれることを示した．
- 実用化を目指して試作システムを開発し，その有効性を確認した．

本システムは，東日本大震災復興関連事業のための平成23年第三次補正予算を用いて開発しました．本研究で使用したケーブル式海底水圧計の記録は気象庁，東京大学地震研究所，海洋研究開発機構から，GPS波浪計の記録は国土交通省港湾局から，それぞれ提供を受けました．検潮所の潮位記録は，気象庁から提供を受けました．陸上GPSの即時解析結果は，東北大学の太田雄策博士に提供いただきました．感謝申し上げます．