

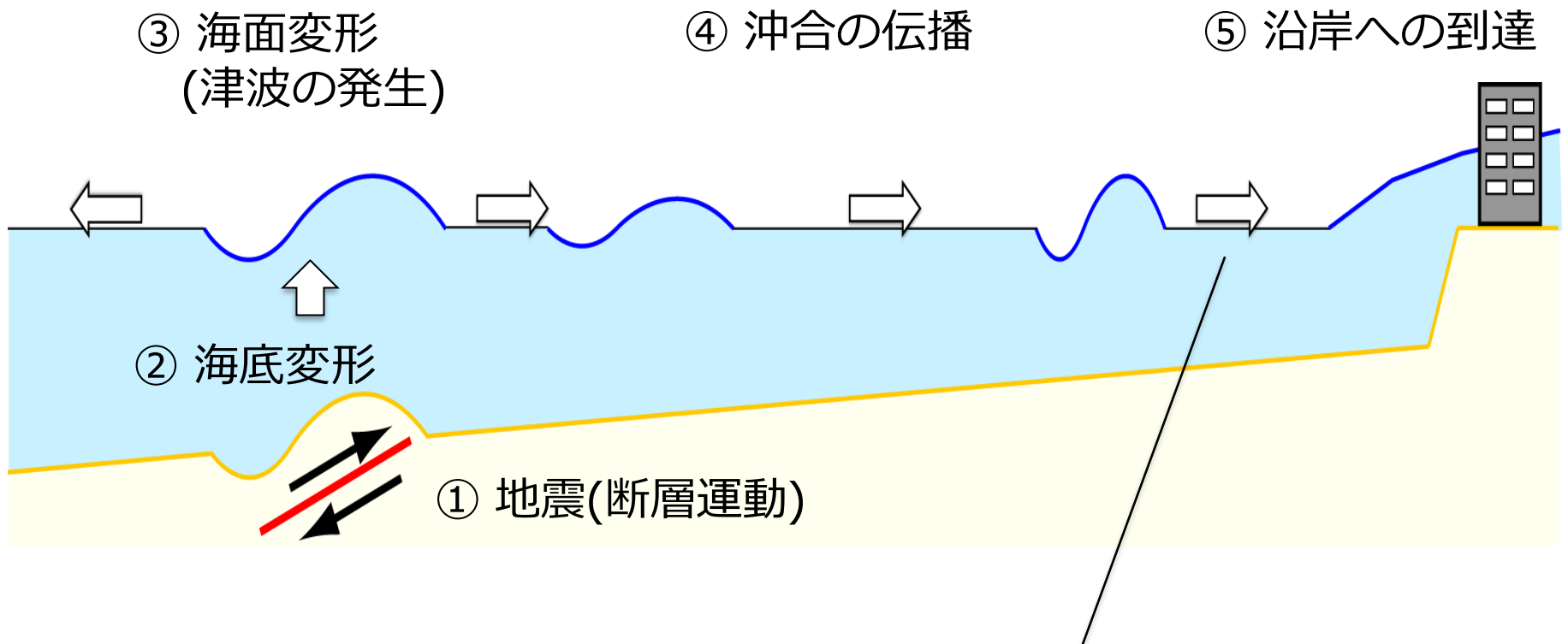
津波の即時予測技術の発展 － 東日本大震災から10年 －

対馬 弘晃
気象研究所 地震津波研究部

目次

- 2011年東北地方太平洋沖地震で浮き彫りになった津波の即時予測技術の課題
- 課題を解決するための技術開発
 - 地震波データを活用した予測技術
 - 津波データを活用した予測技術

津波の発生 ～ 沿岸への津波の到達



水深の深い沖合から、水深の浅い沿岸に近づくにつれて、津波の高さが高くなる

日本列島周辺で発生する津波

プレートの沈み込みに伴って多数の地震・津波が発生

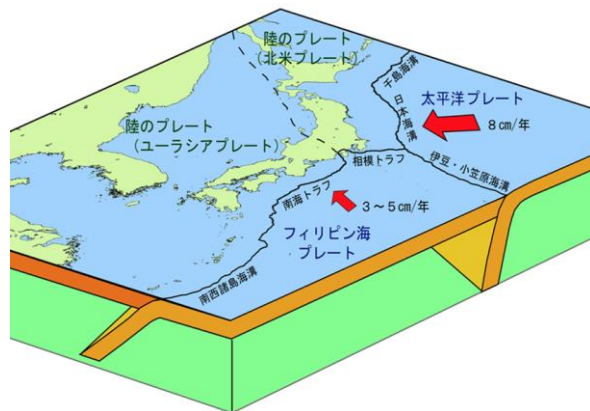


図: 気象庁ホームページより
(https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/jishin/about_eq.html)

例: プレート境界地震



(2011年東北地方太平洋沖地震はこのタイプ)

地震発生～津波の沿岸到達の時間が短い (津波波源域～岸が近いため)

およその時間

千島海溝・日本海溝で発生した津波	: 20-30分程度
南海トラフ沿いで発生した津波	: 5-10分程度
日本海で発生した津波	: 5-10分程度

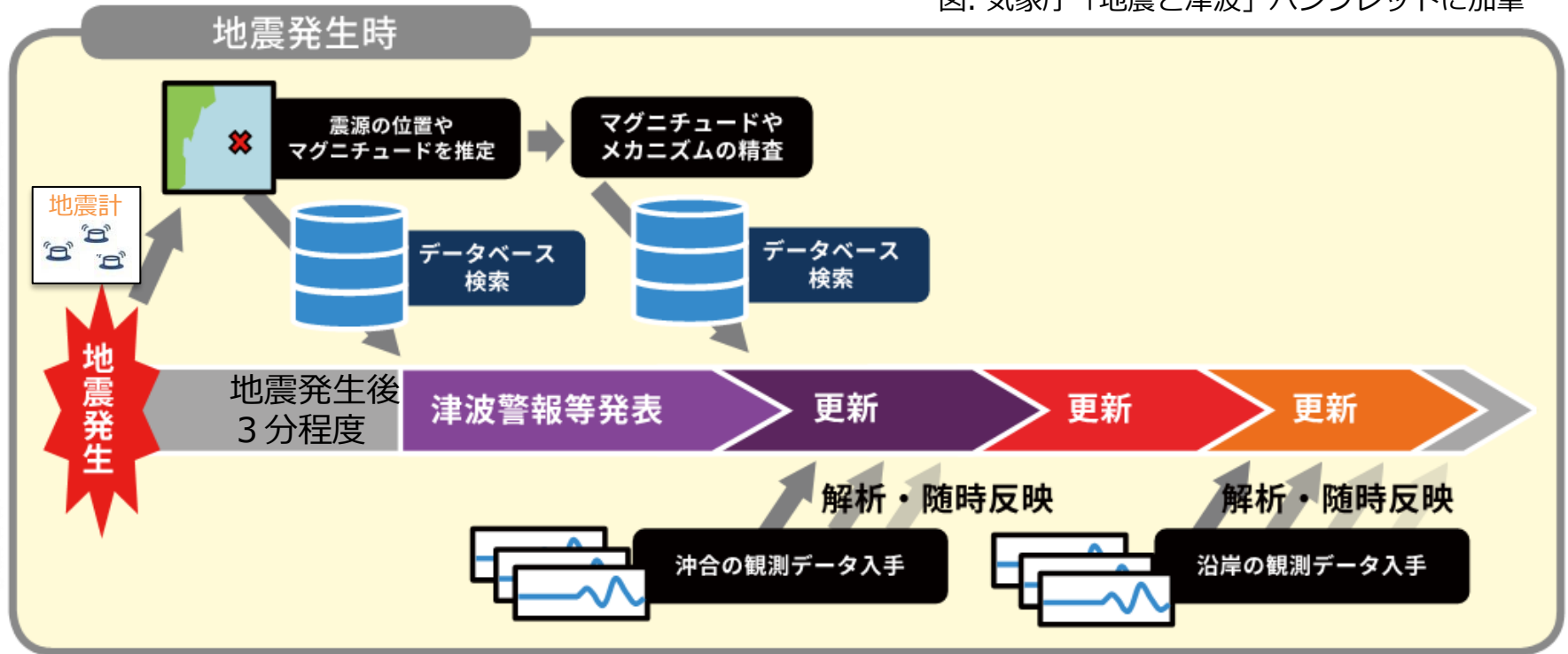
地震発生後の限られた時間内の津波予測(津波の即時予測)が重要

気象庁が発表する津波警報・注意報とそれに活用する予測技術

図: 気象庁「地震と津波」パンフレットに加筆

地震波

津波

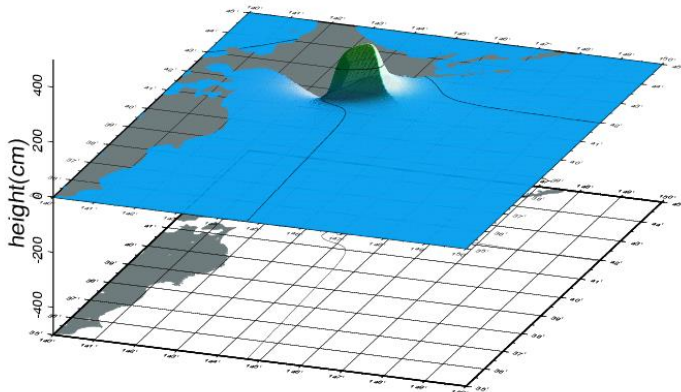
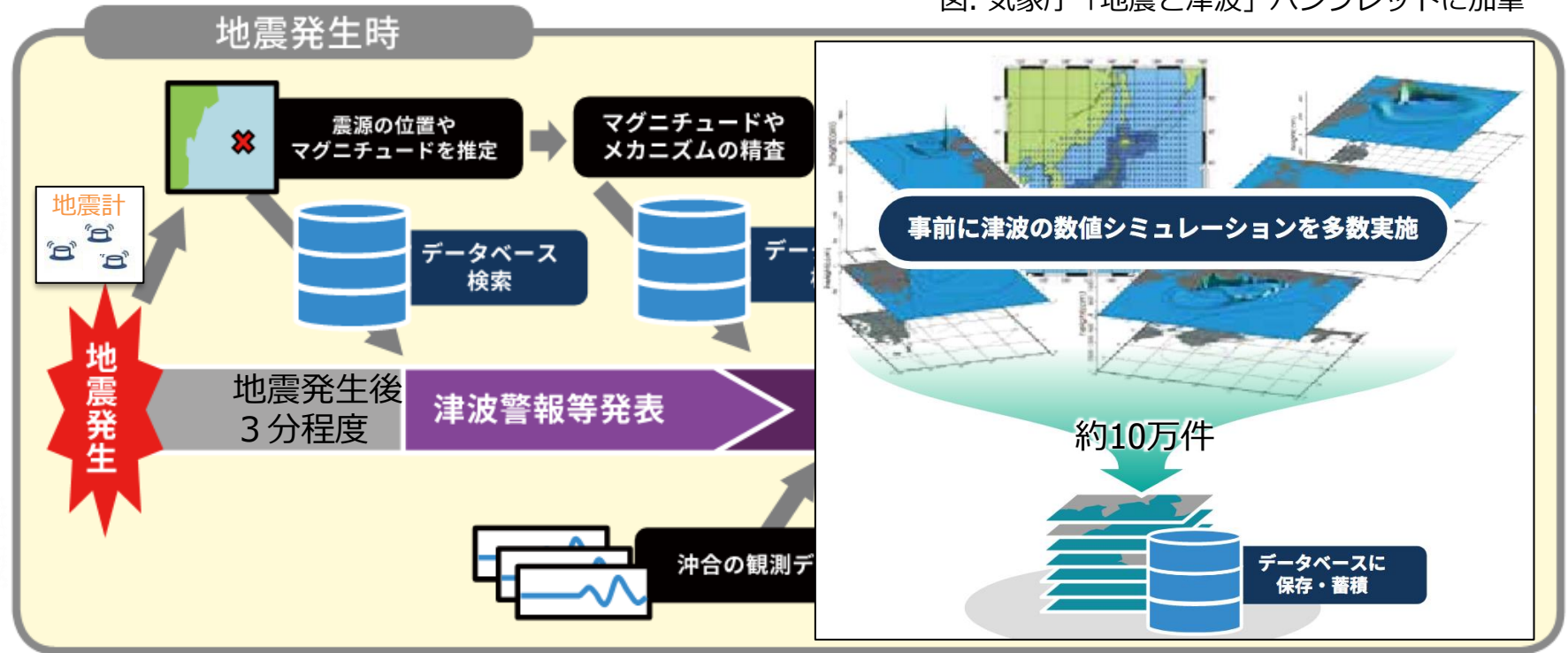


気象庁が発表する津波警報・注意報とそれに活用する予測技術

図: 気象庁「地震と津波」パンフレットに加筆

地震波

津波



ある場所で、ある規模の地震が発生
→沿岸に来る津波は？(いつ到達？最大高さは？)

津波発生・伝播を記述する力学の方程式を
コンピュータで解くこと(数値シミュレーション)
によって算出できる

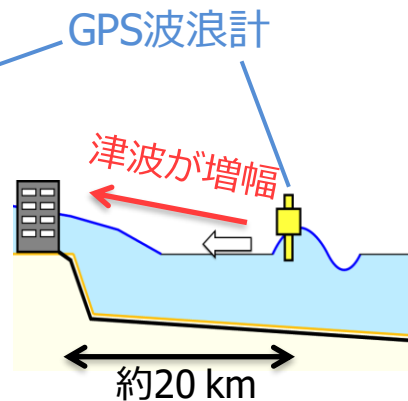
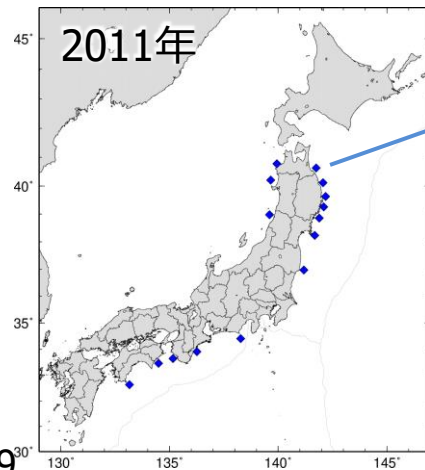
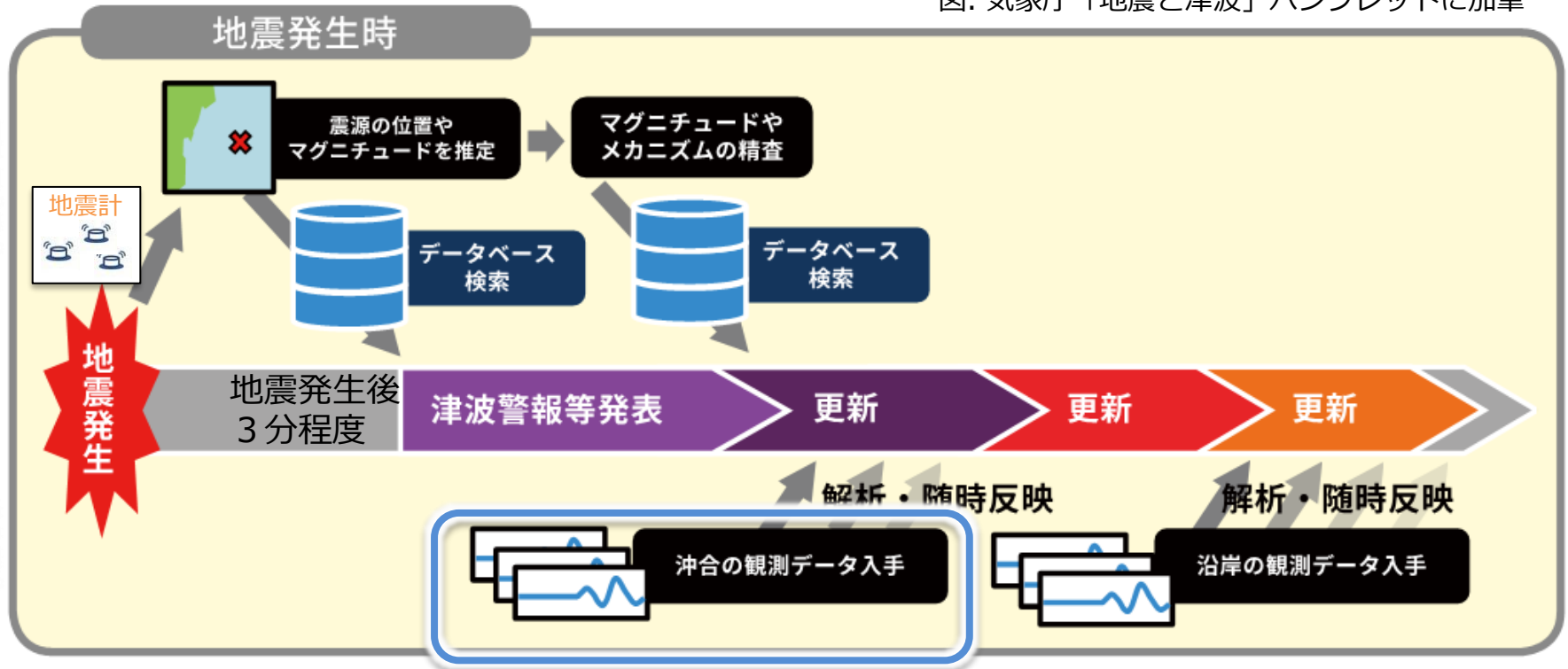
動画: 気象庁ホームページより(https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/tsunami/Tokachi_2003_3.gif)

気象庁が発表する津波警報・注意報とそれに活用する予測技術

図: 気象庁「地震と津波」パンフレットに加筆

地震波

津波



経験的に事前設定しておく

$$[\text{沿岸で予想される津波の高さ}] = [\text{沖合で観測した津波の高さ}] \times [\text{倍率}]$$

いち早く津波を直接キャッチ

2011年 (平成23年) 東北地方太平洋沖地震

2011年3月11日 14時46分 発生 マグニチュード9.0のプレート境界地震

津波波源域

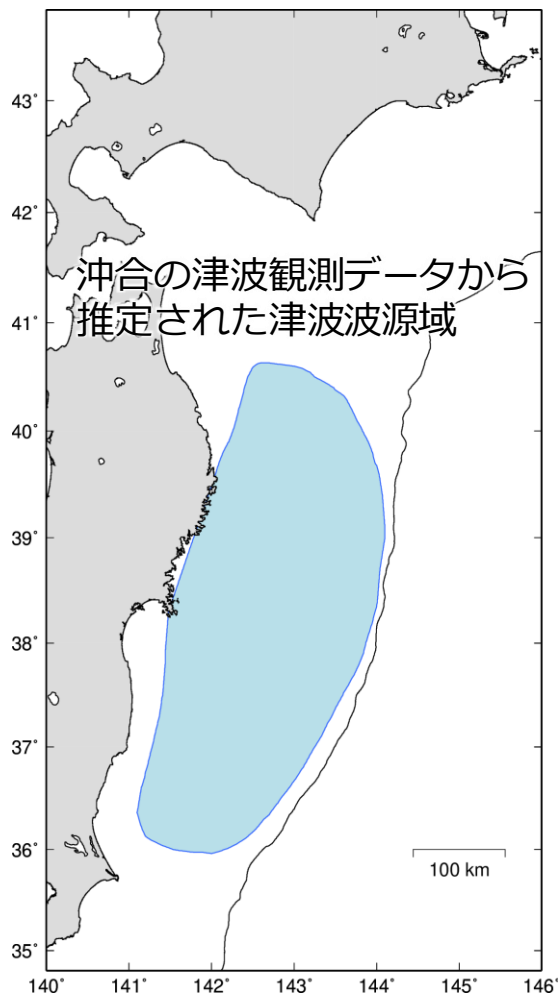


図: Hayashi et al. [2011, EPS]を基に加筆

津波の浸水高・遡上高^{そじょう}

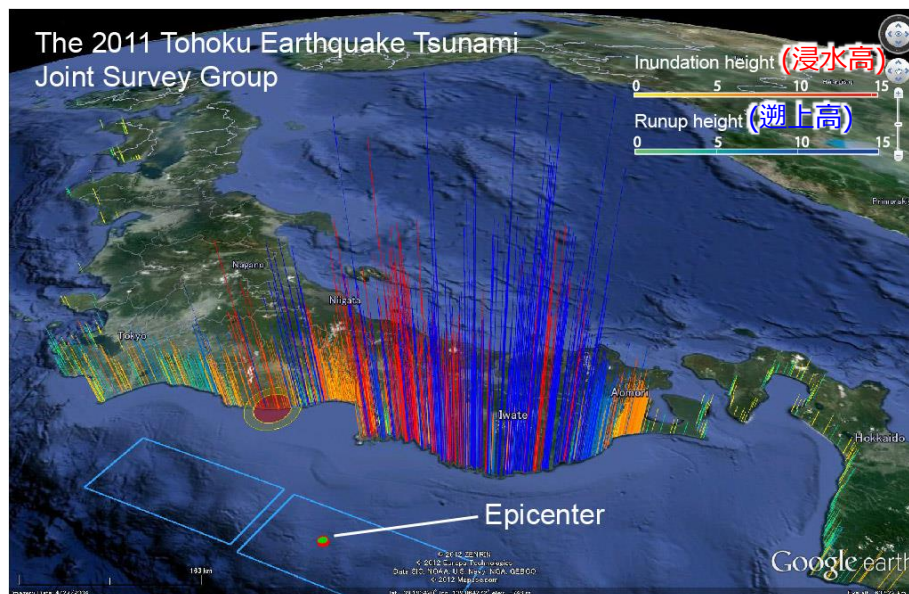


図: 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループのホームページより (一部加筆)
(<https://coastal.jp/tjtj/index.php?plugin=attach&refer=FrontPage&openfile=surveyge.jpg>)

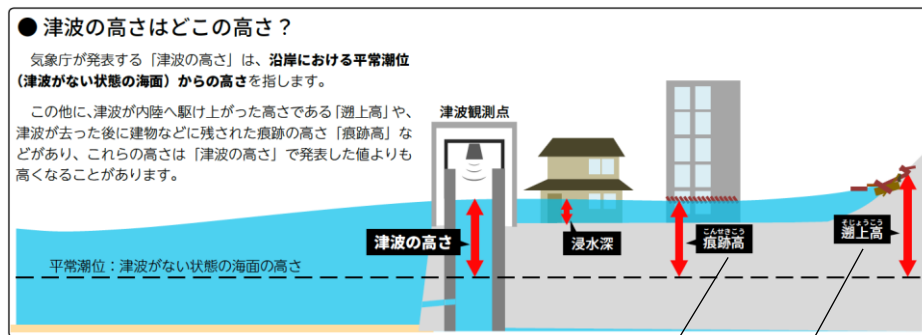
事後に行われた
津波痕跡調査
(東北地方太平洋沖地震
津波合同調査グループ
による)

↓
太平洋沿岸の
約290 kmに及ぶ
範囲において、
20 mを超える
遡上高

[Mori et al., 2011, GRL]

(参考)

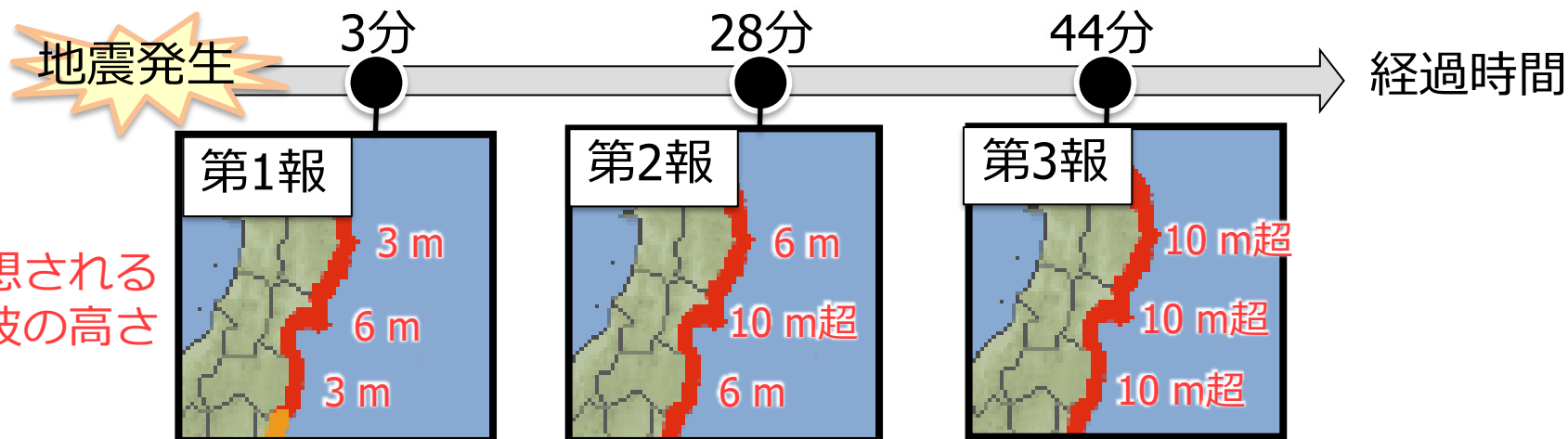
気象庁
「地震と津波」
パンフレット
(一部加筆)



上図では「浸水高」として描画

上図で描画

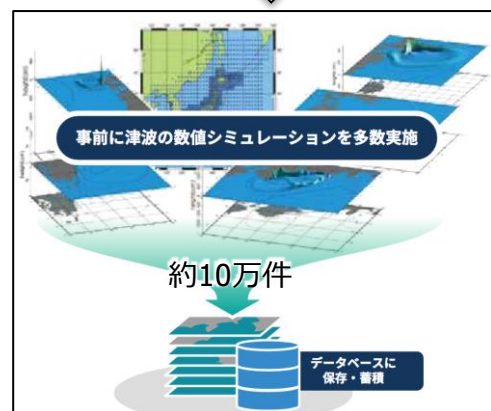
津波警報・注意報 -- 東北地方太平洋沖地震: 地震発生～1時間以内



地震波データ解析による警報発表

地震計 ⇒ マグニチュードの速報値: 7.9

津波予報データベース検索



マグニチュード
(後日の精査):
9.0

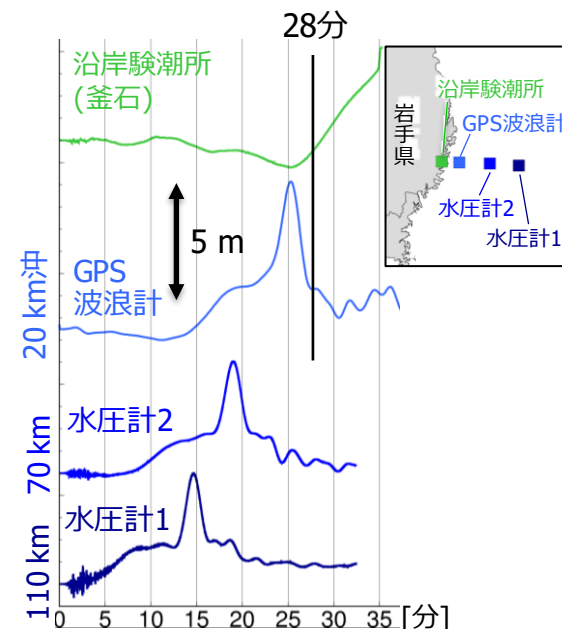
地震の規模を
過小評価
(エネルギー換算で
1/50倍に相当)

GPS波浪計の津波観測による警報更新



- ・ 警報の範囲拡大
- ・ 高さを約2倍に

より沖合のケーブル式海底水圧計のデータを警報更新に活用する手段が不十分



東日本大震災後10年間における津波の即時予測技術の改善

地震発生直後に推定したマグニチュードが過小評価であった

2013/03/07 マグニチュード過小評価判定手法の導入

気象研究所が開発した技術も導入

沖合のケーブル式海底水圧計のデータを活用する手段が不十分であった

2012/03/09 ケーブル式海底水圧計を津波警報に活用開始

2016/07/28 沖合の高密度な海底津波観測網を津波情報に活用開始
(一部の観測点は2017/11/16から)

2019/03/26 沖合の津波観測データを用いて津波波源を
即時に推定する手法を津波警報の更新に活用開始

気象研究所が開発した技術を導入

東日本大震災後10年間における津波の即時予測技術の改善

地震発生直後に推定したマグニチュードが過小評価であった

2013/03/07 マグニチュード過小評価判定手法の導入

気象研究所が開発した技術も導入

沖合のケーブル式海底水圧計のデータを活用する手段が不十分であった

2012/03/09 ケーブル式海底水圧計を津波警報に活用開始

2016/07/28 沖合の高密度な海底津波観測網を津波情報に活用開始
(一部の観測点は2017/11/16から)

2019/03/26 沖合の津波観測データを用いて津波波源を
即時に推定する手法を津波警報の更新に活用開始

気象研究所が開発した技術を導入

マグニチュードの速報値が過小になった原因

最大振幅をマグニチュードの速報値の算出に使用
(迅速性に優れる)

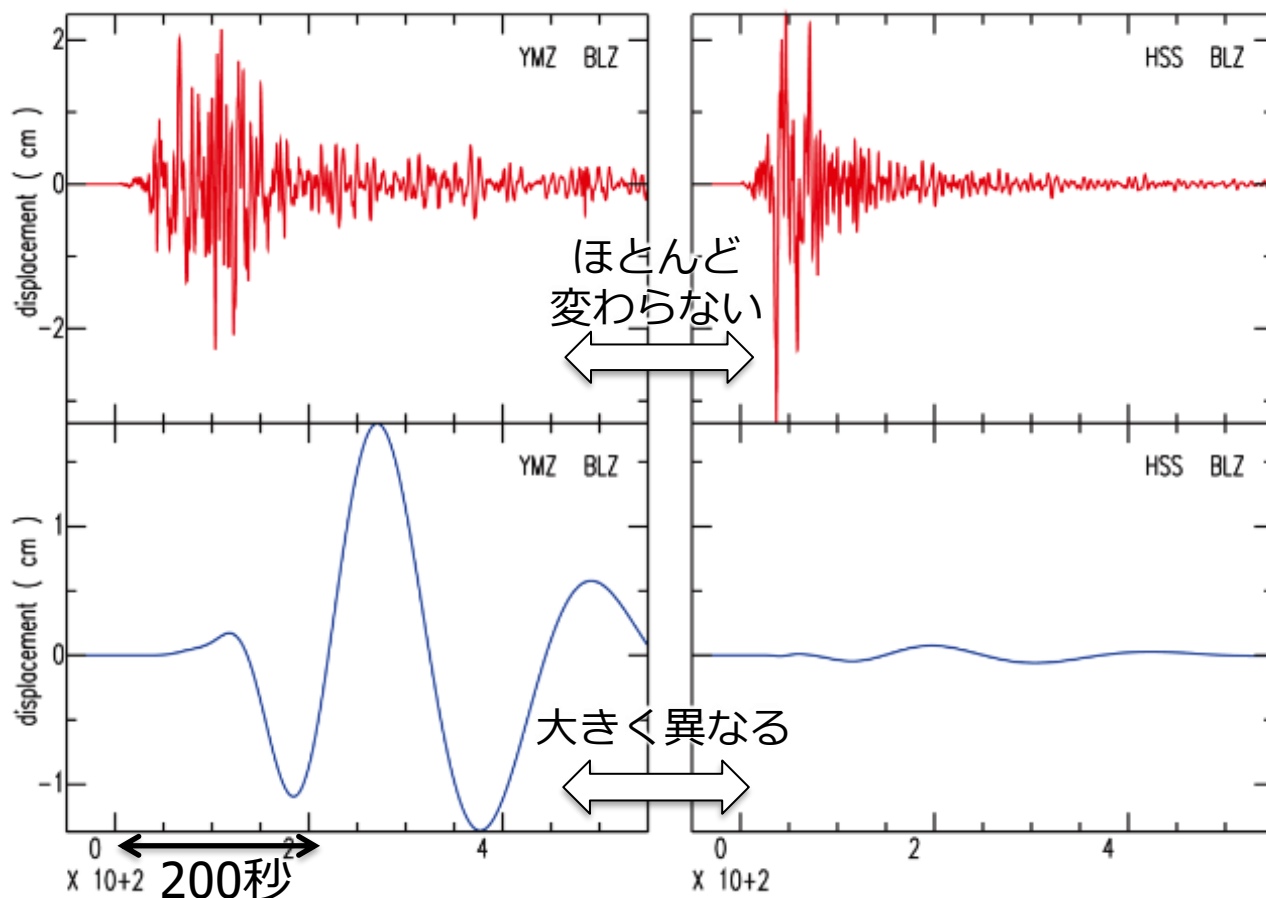
短周期の変位波形
(6秒よりも短い周期)

長周期の変位波形
(約200-1000秒の周期)

縦軸・横軸スケールを
揃えて作図

2011年東北地方太平洋沖地震
(マグニチュード9.0)

2003年十勝沖地震
(マグニチュード8.0)



巨大地震では、長周期の地震波が強く励起される

マグニチュードの速報値の過小を判定する手法 -- 気象研究所が開発

長周期(周期100秒)の地震波の
振幅から推定されるマグニチュード
勝間田 明男氏による(当時, 気象研究所に在籍)

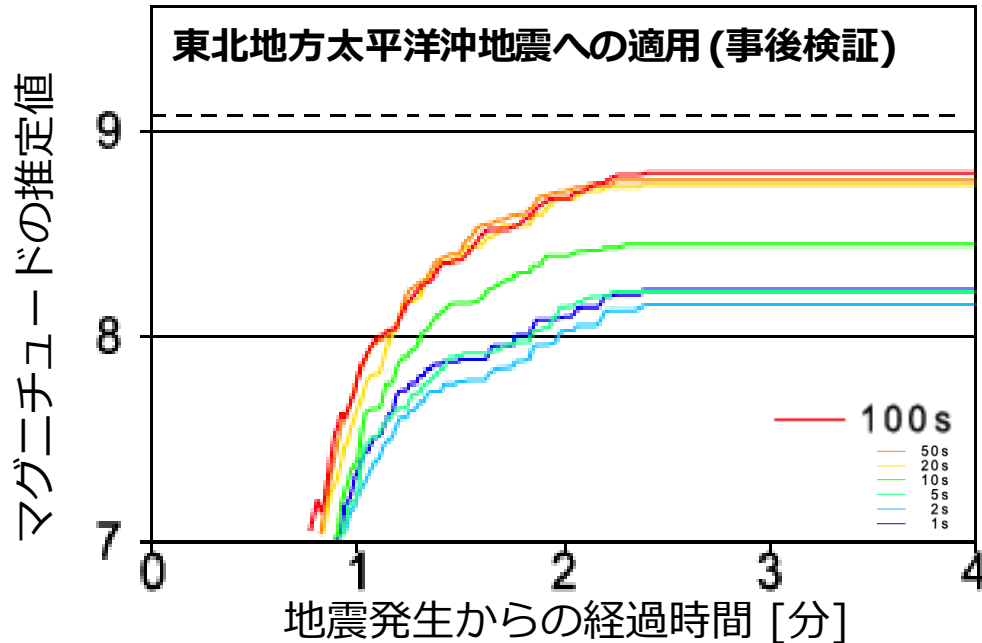
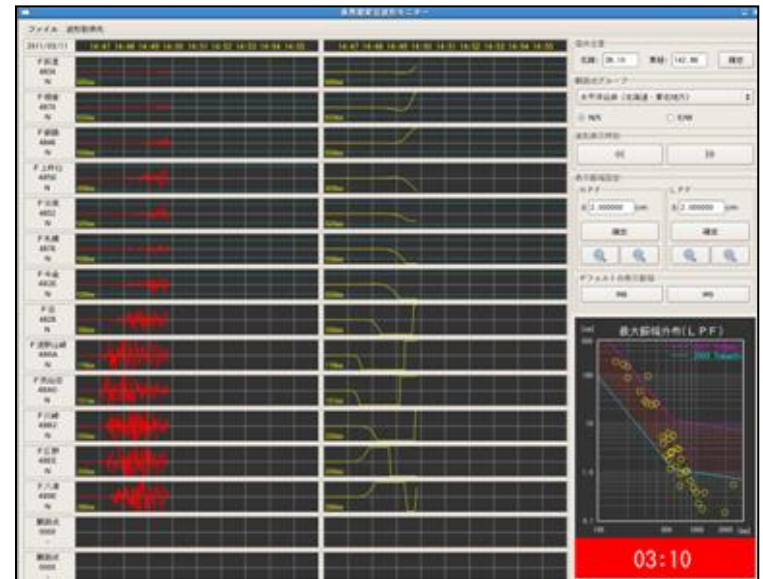


図: Katsumata et al. [2013, EPS]に加筆

長周期モニタ
(周期100-500秒の地震波の監視)
吉田 康宏氏による(当時, 気象研究所に在籍)



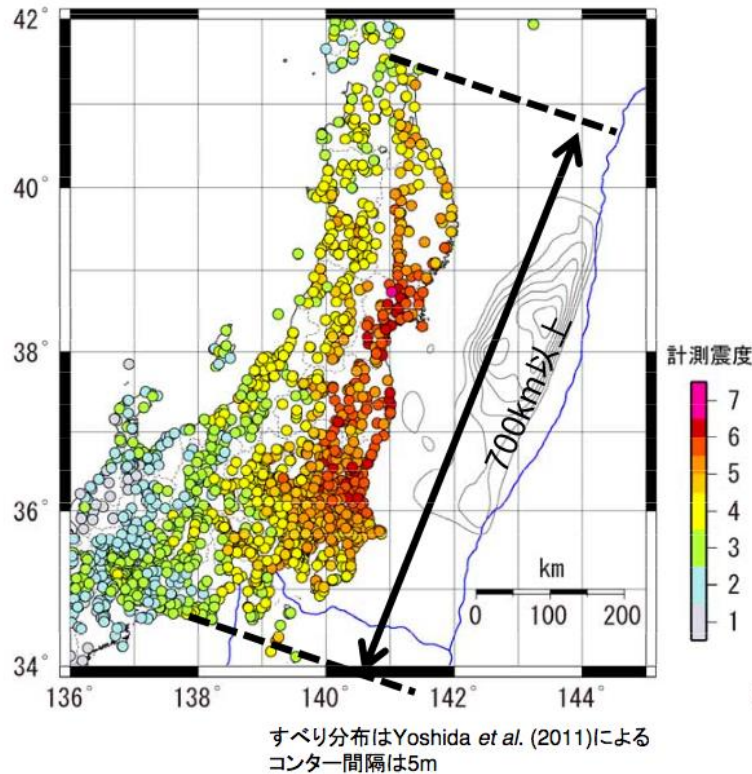
長周期地震波を用いて, マグニチュードの速報値の過小評価の可能性を速やかに認識できるようにするための手法を開発した

2013年3月7日 気象庁で活用開始

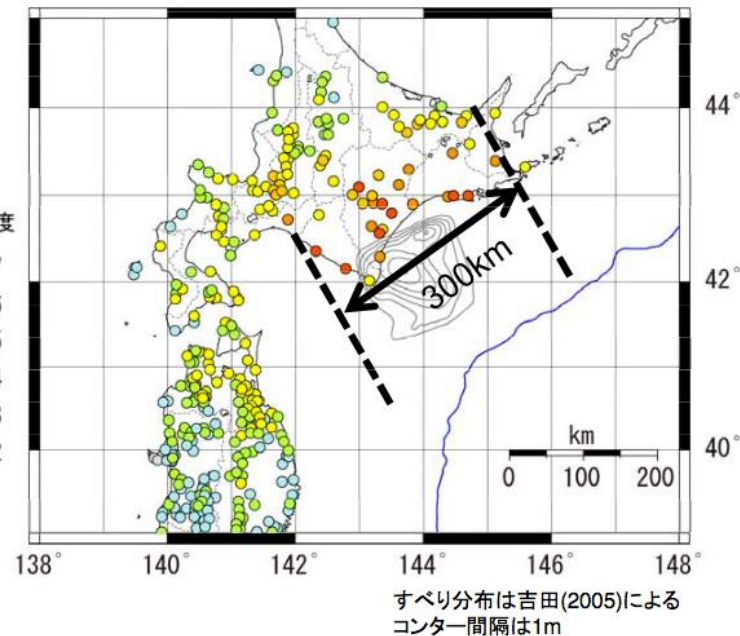
マグニチュードの速報値の過小を判定する手法 -- 気象研究所が開発

強震域の広がり 横田 崇氏による(当時, 気象研究所に在籍)

2011年東北地方太平洋沖地震($M_W 9.0$)



2003年十勝沖地震($M 8.0$)



震度5弱の範囲の広がりから巨大地震の可能性を推定

2013年3月7日 気象庁で活用開始

東日本大震災後10年間における津波の即時予測技術の改善

地震発生直後に推定したマグニチュードが過小評価であった

2013/03/07 マグニチュード過小評価判定手法の導入

気象研究所が開発した技術も導入

沖合のケーブル式海底水圧計のデータを活用する手段が不十分であった

2012/03/09 ケーブル式海底水圧計を津波警報に活用開始

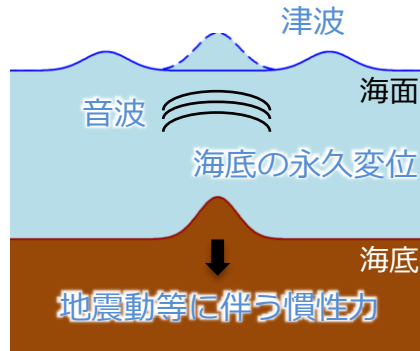
2016/07/28 沖合の高密度な海底津波観測網を津波情報に活用開始
(一部の観測点は2017/11/16から)

2019/03/26 沖合の津波観測データを用いて津波波源を
即時に推定する手法を津波警報の更新に活用開始

気象研究所が開発した技術を導入

ケーブル式海底水圧計を津波警報に活用 (2012/03/09～)

課題1: 津波以外の水圧変化の除去手法が未確立



[図: Saito & Tsushima 2016, JGRを参考に作成]

地震発生時の海底水圧計は、津波だけでなく海底の地震動や海中音波等による圧力変化も計測する

地震発生時の海底圧力変化に寄与する現象

観測された時系列データにフィルター(信号処理)を適用して、津波以外の成分(ノイズ成分)を低減できるようにした

課題2: 沖合での明瞭な津波の観測事例が少なく、沖合の津波から沿岸での津波の高さを経験的に予測することが難しかった

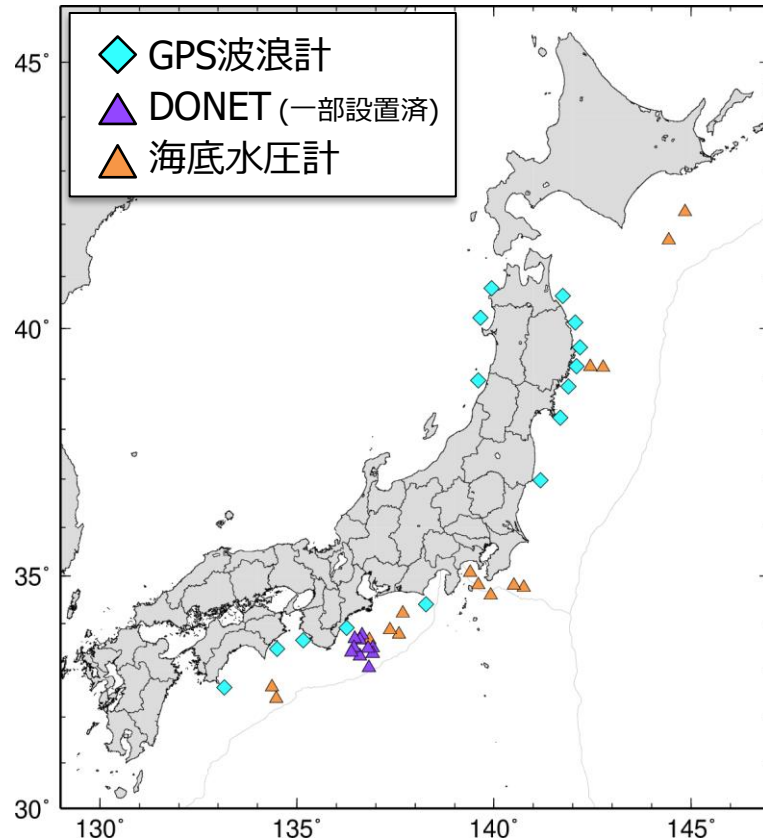
$$[\text{沿岸で予想される津波の高さ}] = [\text{沖合で観測した津波の高さ}] \times [\text{倍率}]$$

東北地方太平洋沖地震の津波観測データを使って暫定的な倍率を求めることで、海底水圧計のデータから予測できるようにした

沖合の高密度な海底観測網を津波情報に活用 (2016/07/28～)

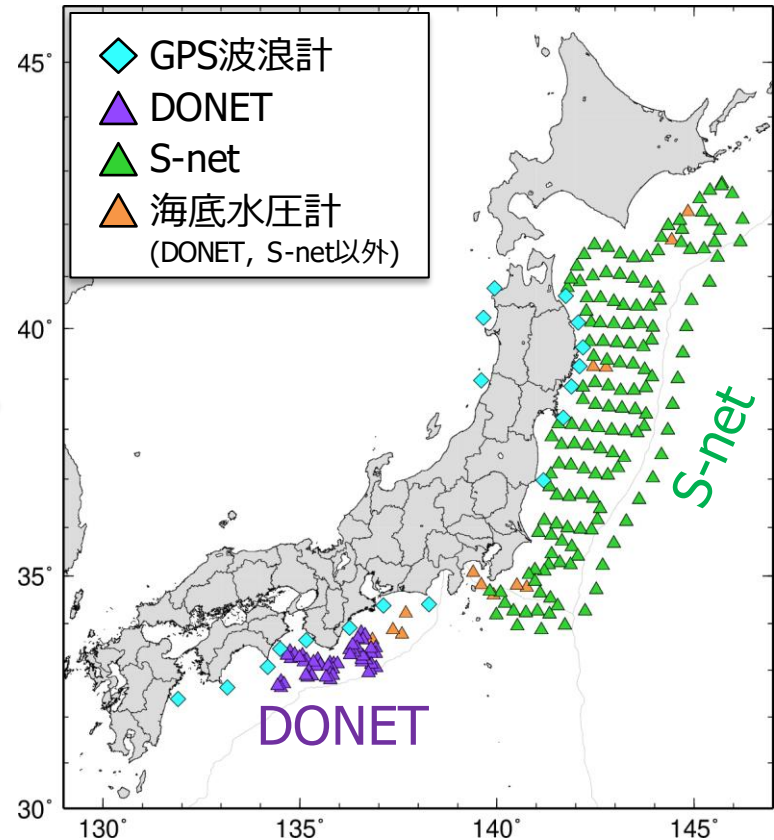
2011年当時

約40地点

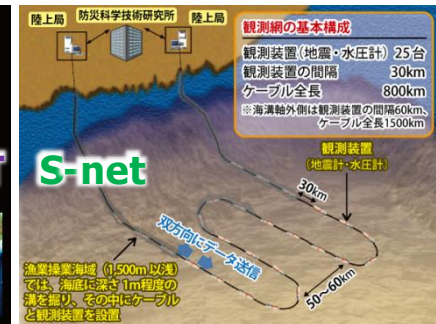


現在

約230地点

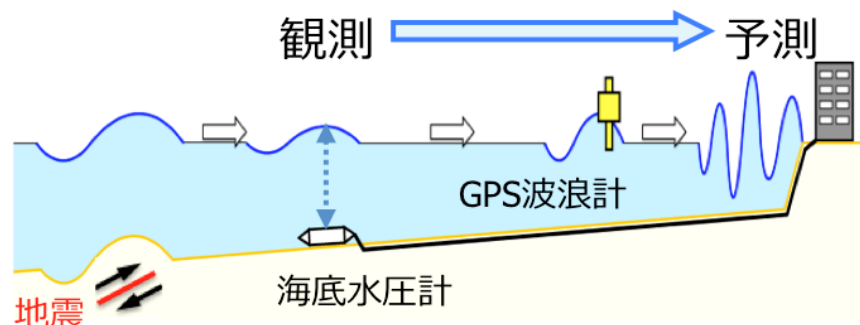


震災後に、防災科学技術研究所と海洋研究開発機構によって、北海道から高知県東部にかけての太平洋側の沖合に、高密度な海底地震津波観測網が構築された



観測システムの図：防災科学技術研究所ホームページより
(<http://www.seafloor.bosai.go.jp>)

特徴：「沖合と沿岸の津波の高さの関係」を利用した手法



沖合の各津波観測点において
観測された津波の高さに
経験則による倍率を乗じ、
沿岸での津波の高さを予測

△ ~~→~~ ?
まだ予測できない

△ → 予測
△ → 予測
海 陸

【特徴】

- 1 地点での津波観測から即座に予測可能
- 観測した直近の津波予報区を更新
- 津波の沿岸への直進を仮定

東日本大震災後10年間における津波の即時予測技術の改善

地震発生直後に推定したマグニチュードが過小評価であった

2013/03/07 マグニチュード過小評価判定手法の導入

気象研究所が開発した技術も導入

沖合のケーブル式海底水圧計のデータを活用する手段が不十分であった

2012/03/09 ケーブル式海底水圧計を津波警報に活用開始

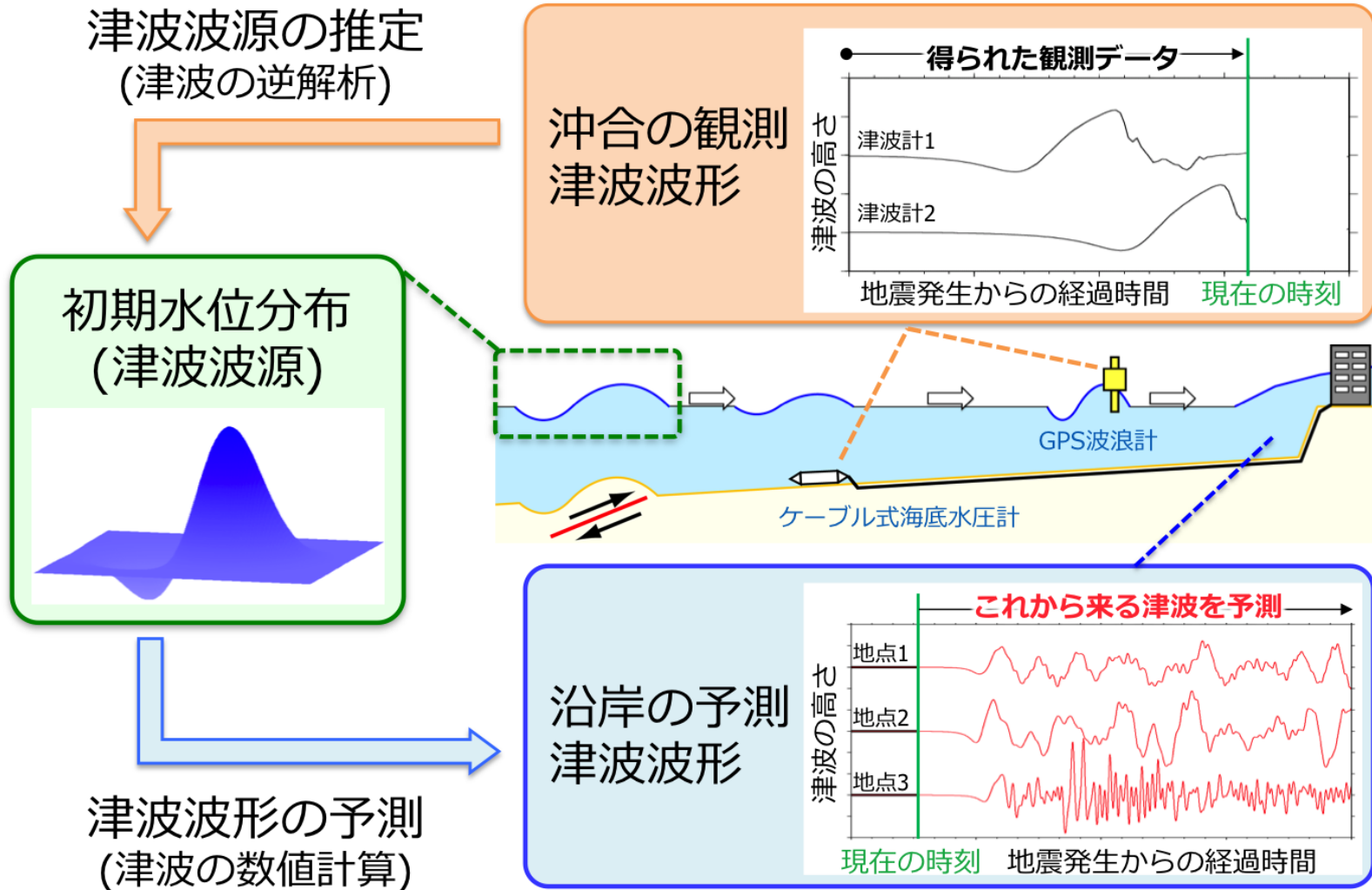
2016/07/28 沖合の高密度な海底津波観測網を津波情報に活用開始
(一部の観測点は2017/11/16から)

2019/03/26 沖合の津波観測データを用いて津波波源を
即時に推定する手法を津波警報の更新に活用開始

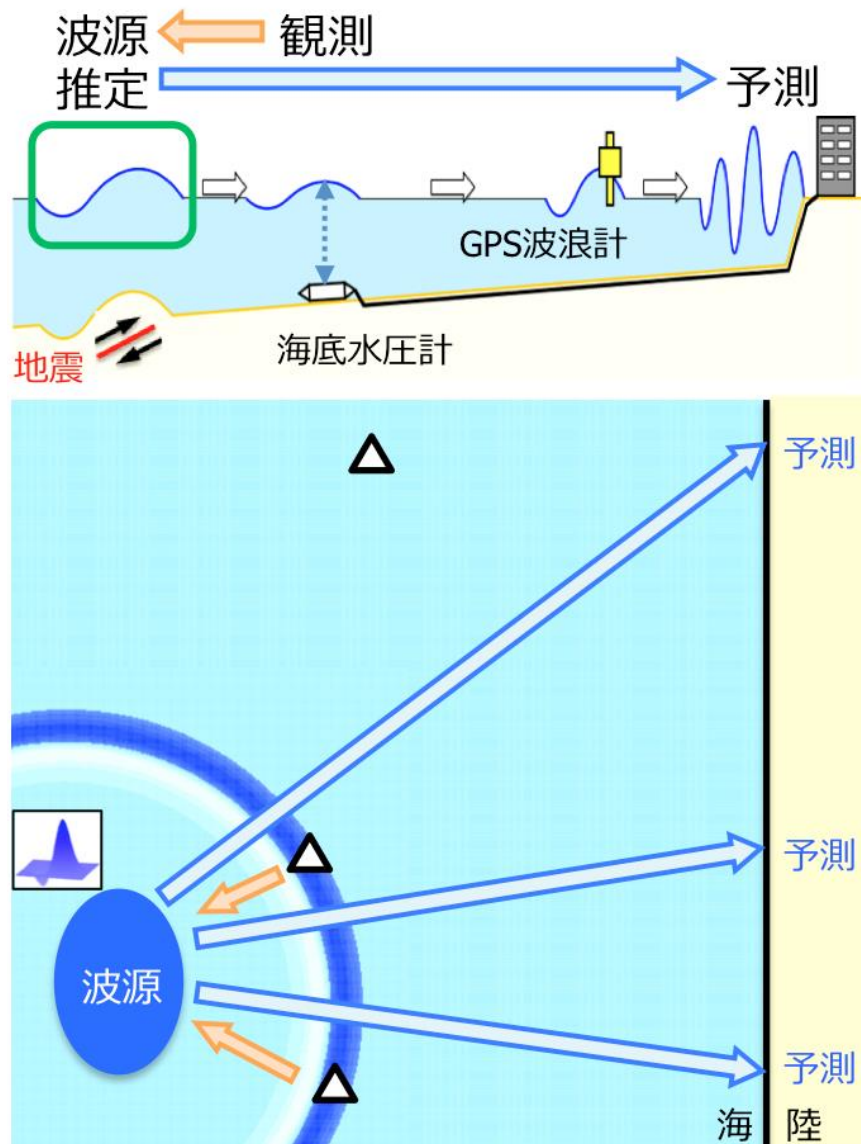
気象研究所が開発した技術を導入

津波波源推定に基づく津波の即時予測手法-- 気象研究所が開発

tFISH tsunami Forecasting based on Inversion for initial sea-Surface Height



特徴：新しい予測手法 (tFISH)



① 沖合の津波観測網において
観測された津波波形から
津波波源を推定

② 推定した津波波源に基づき
津波の数値計算を行い
沿岸での津波の高さを予測

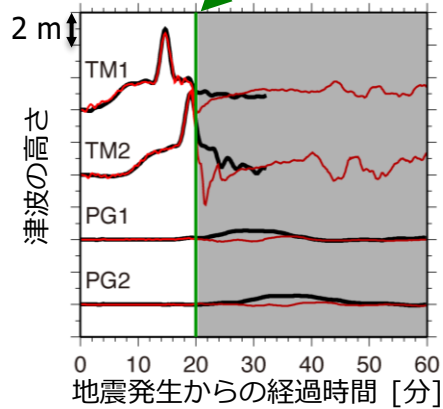
【特徴】

- ・ 複数地点の津波観測から精度良く予測
- ・ 遠方の津波予報区の更新にも活用可能
- ・ 津波の進む向きを考慮

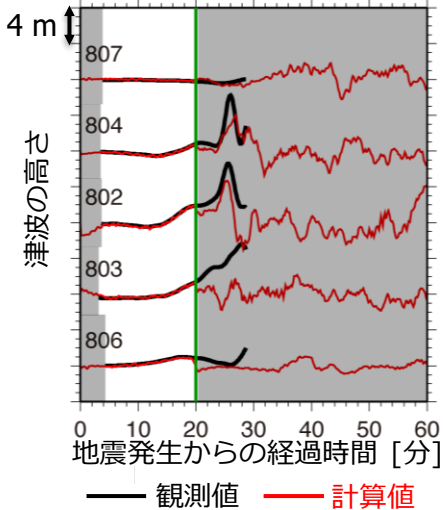
事後検証: tFISHによる東北地方太平洋沖地震の津波即時予測

地震発生後20分

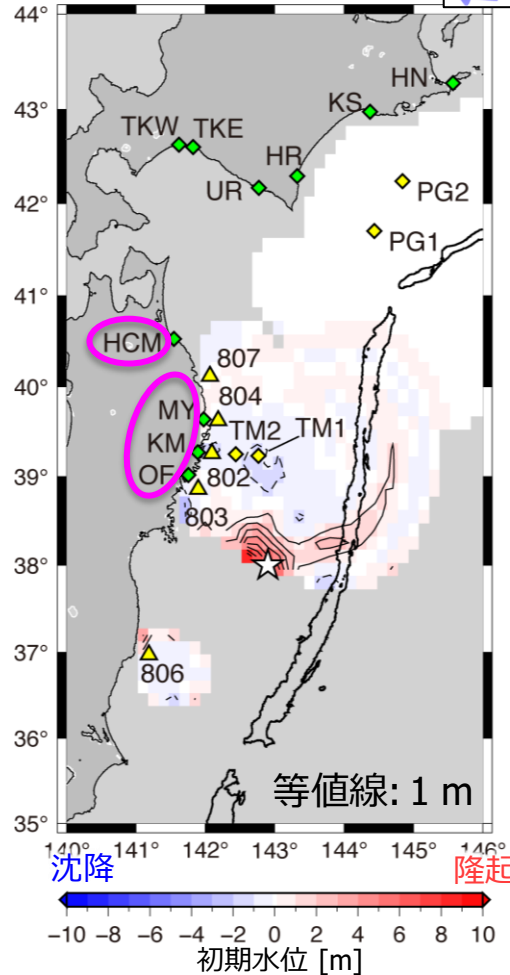
海底水圧計



GPS波浪計



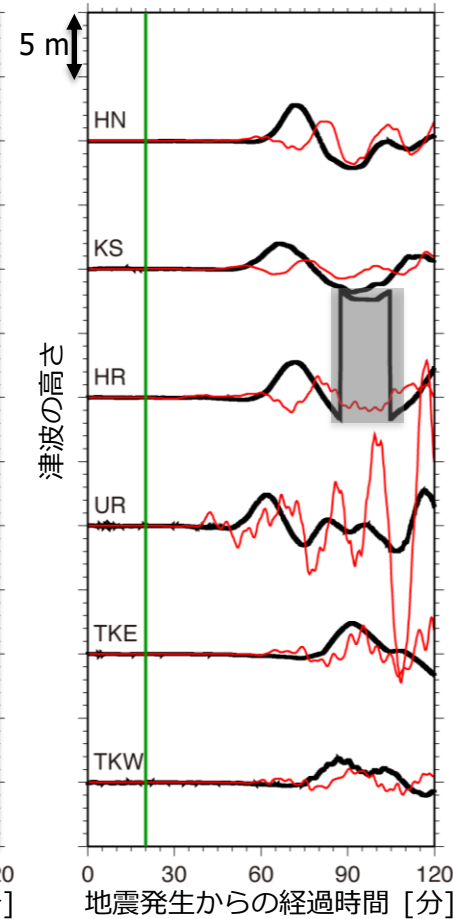
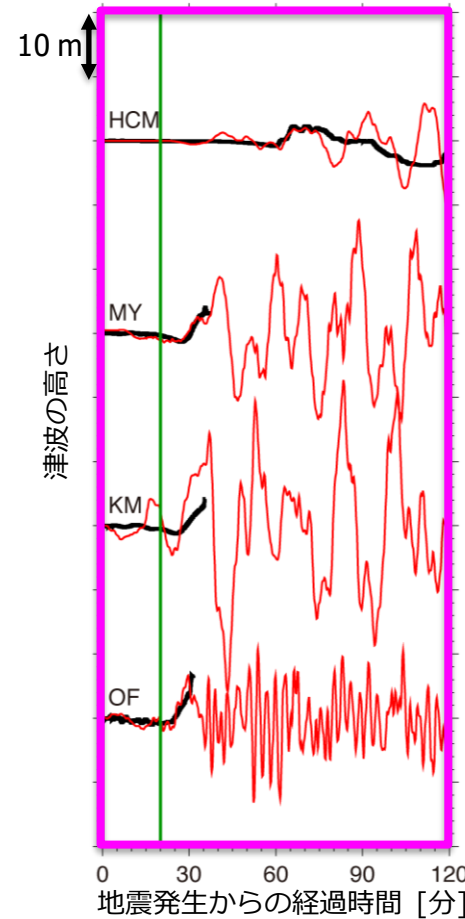
推定した初期水位分布



津波予測結果 (沿岸の潮位観測点)

三陸沿岸

北海道沿岸



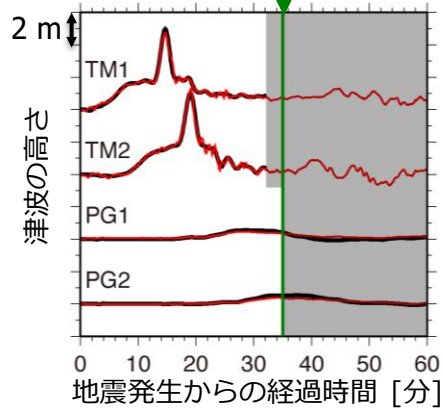
三陸沿岸に5-10 mの津波を予測 (猶予時間5分)

— 観測値 — 予測値
(MY, KM, OFの観測値: 途中から欠測)
(HRの の観測値: 本研究では欠測と判断)

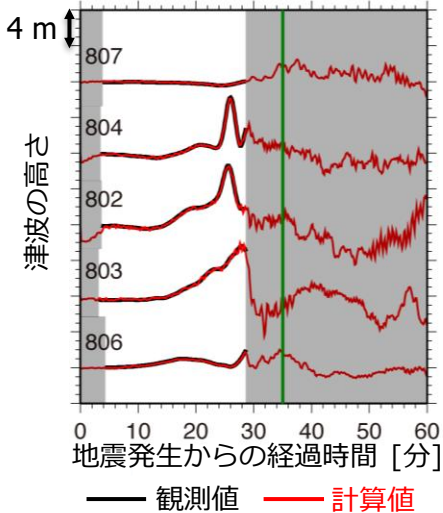
事後検証: tFISHによる東北地方太平洋沖地震の津波即時予測

地震発生後35分

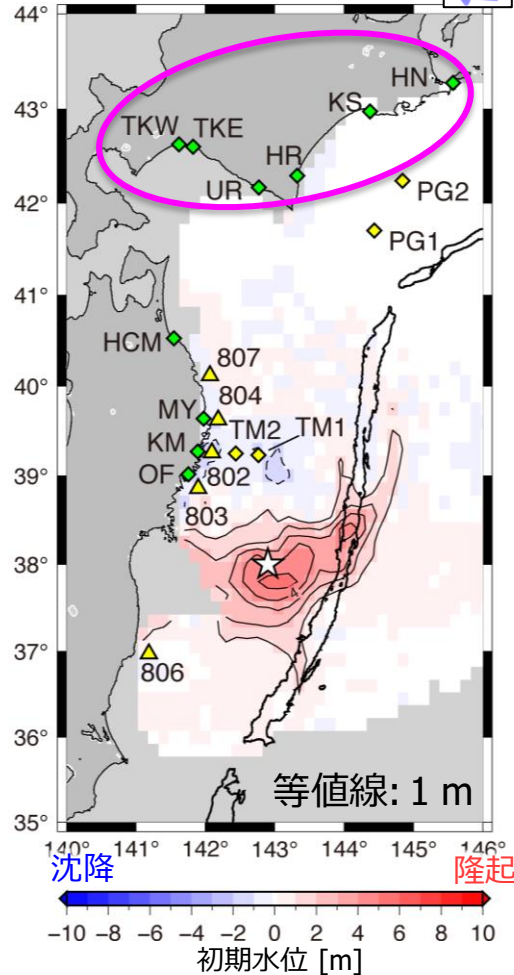
海底水圧計



GPS波浪計



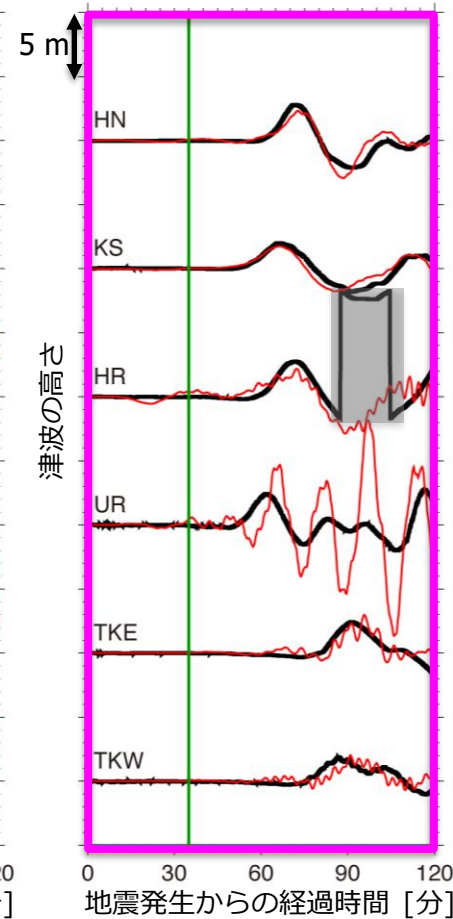
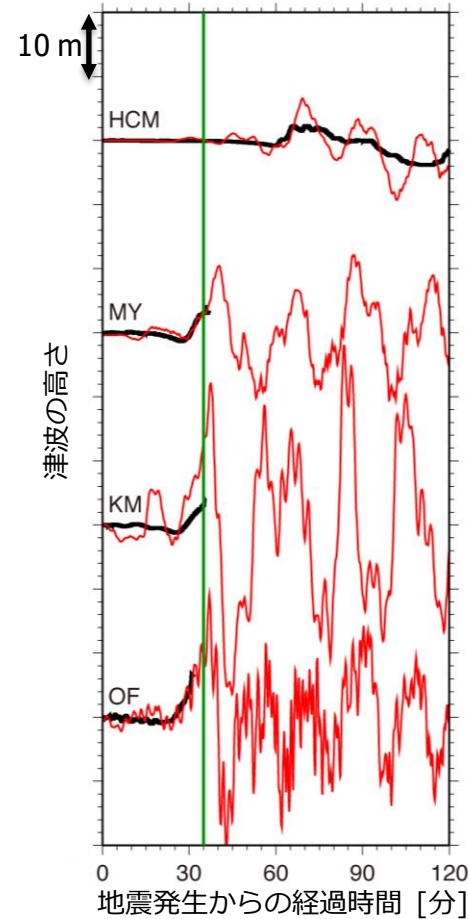
推定した初期水位分布



津波予測結果 (沿岸の潮位観測点)

三陸沿岸

北海道沿岸



北海道沿岸の予測が改善 (猶予時間10分以上)

— 観測値 — 予測値

(MY, KM, OFの観測値: 途中から欠測)

(HRの  の観測値: 本研究では欠測と判断)

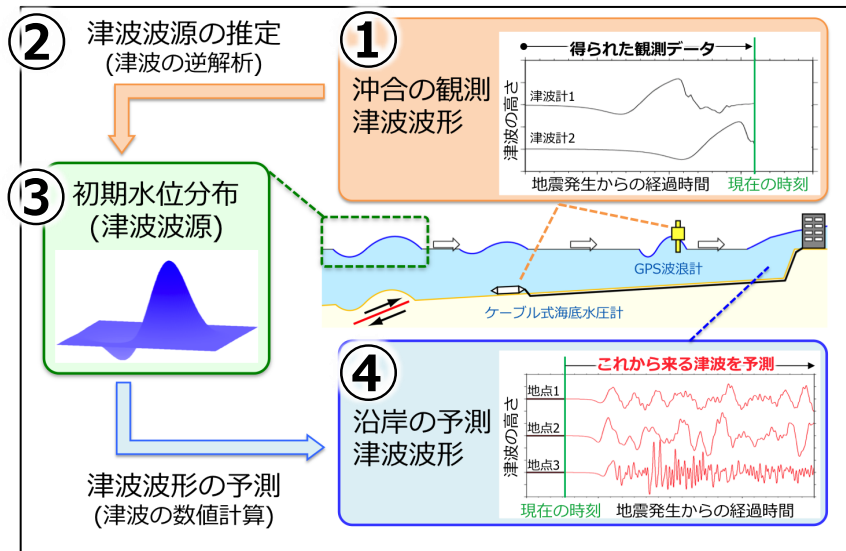
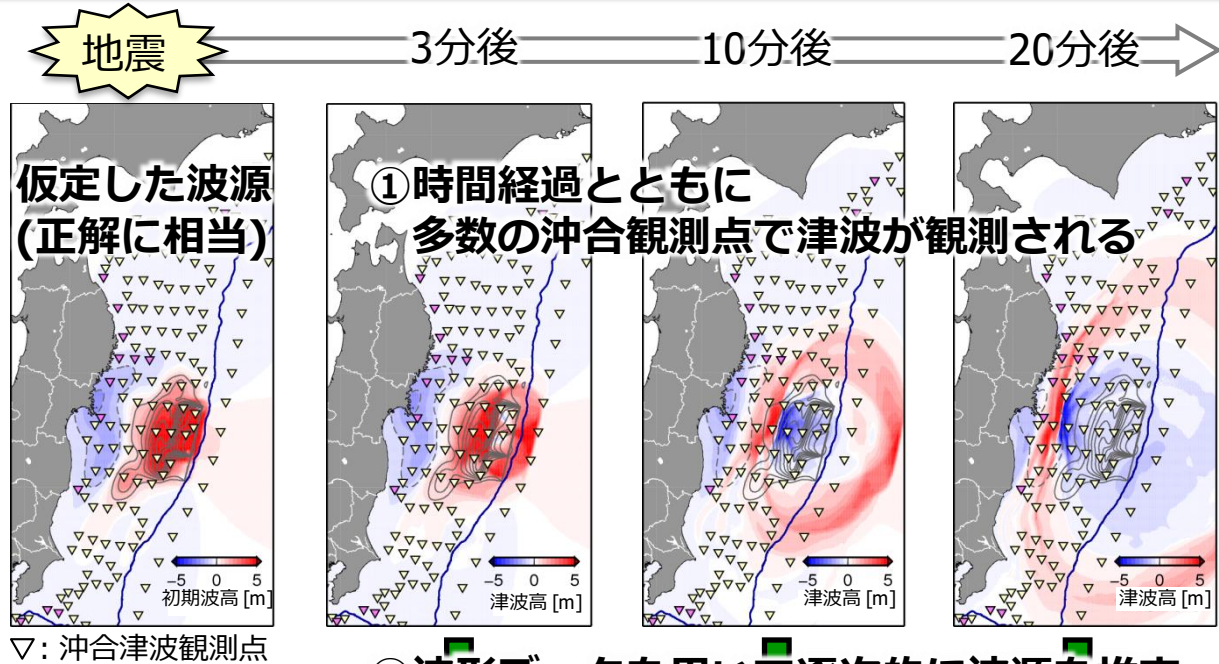
理想実験: 2011年東北地方太平洋沖地震を想定した予測実験

2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波を現在の
沖合津波観測網で観測し、
tFISHで予測すると?

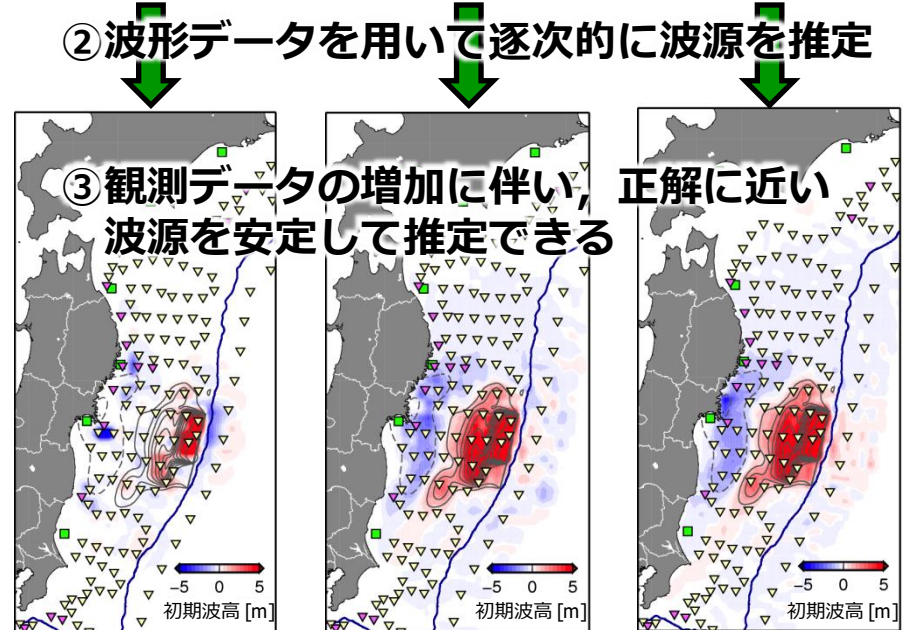


津波数値シミュレーション
で模擬的な観測データを作り、
tFISHを適用して予測
(観測データにはノイズが
含まれない理想的な状況)

津波が伝わる様子



推定した波源

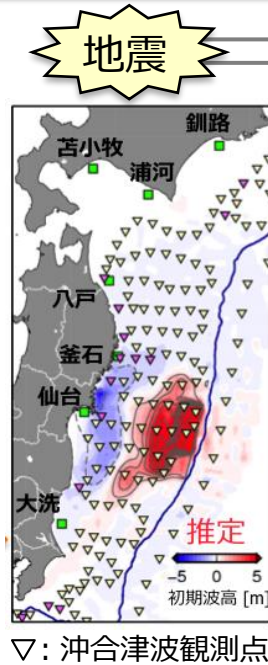


理想実験: 2011年東北地方太平洋沖地震を想定した予測実験

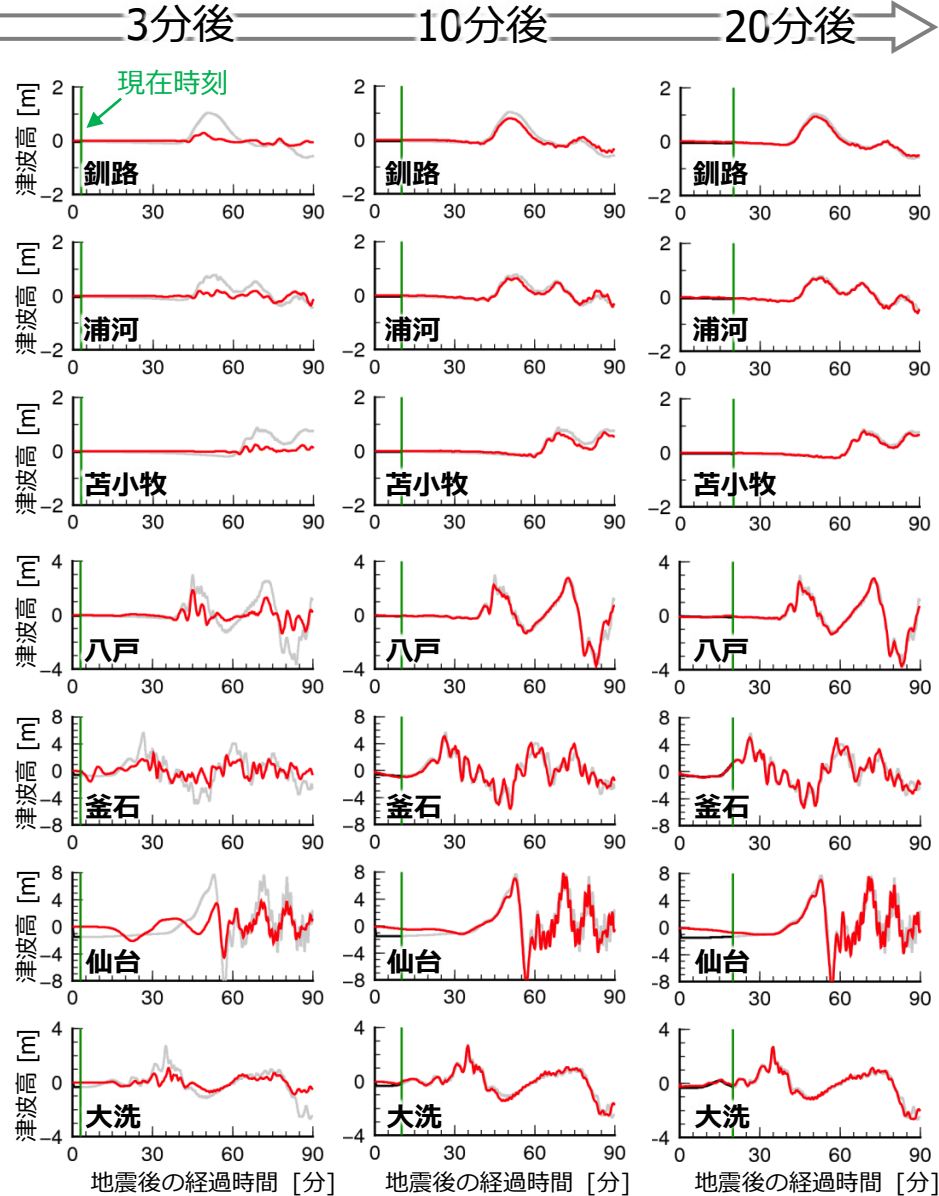
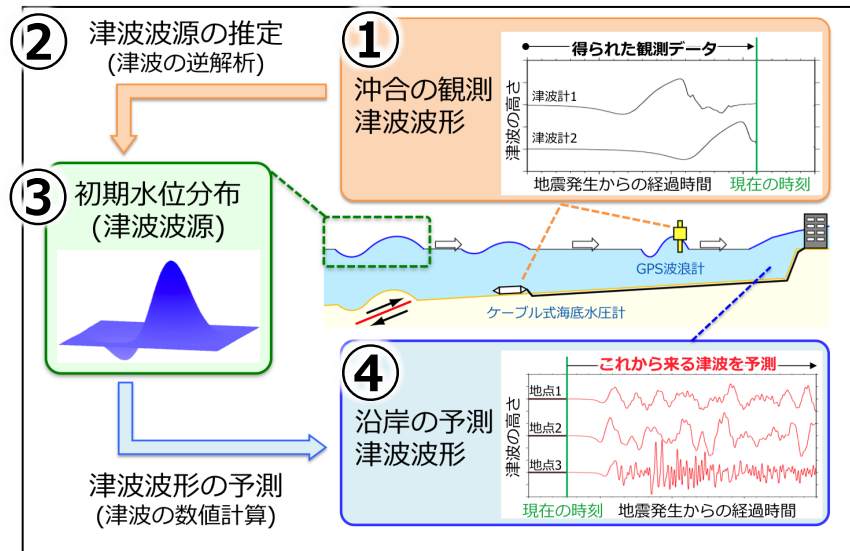
④波源推定精度の向上に伴い 沿岸の津波の予測精度も向上

この実験では、地震発生
10分後までの観測データ
を用いることにより、北
海道から関東地方にかけ
ての太平洋沿岸の津波高
を精度よく予測できた

2019年3月26日
気象庁で活用開始



▽: 沖合津波観測点

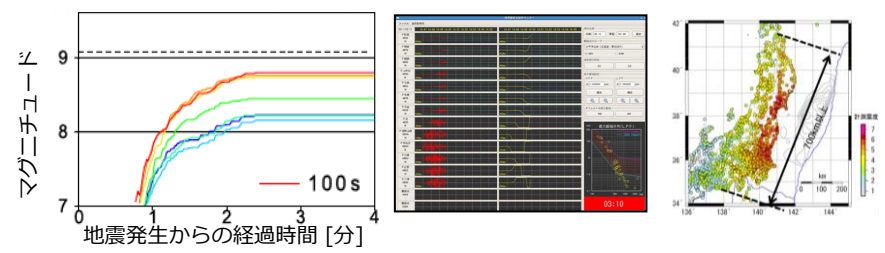


一 正解値 一 正解値(未来) 一 予測値

津波予報業務での活用が開始した気象研開発の津波即時予測技術

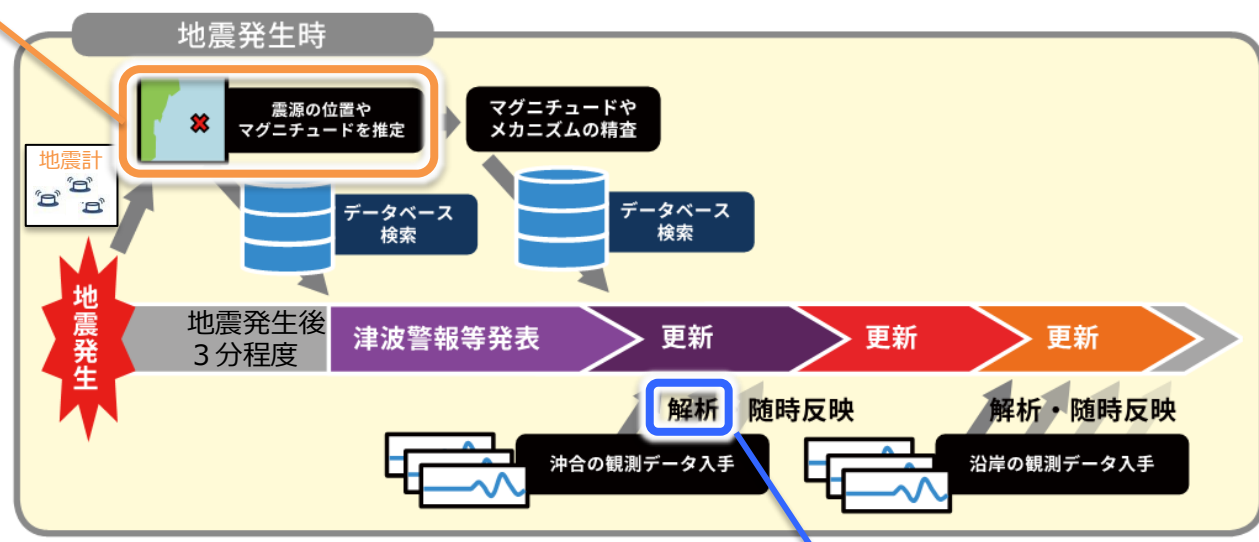
東日本大震災
からの10年間

マグニチュード速報値の
過小評価の可能性を速や
かに判定するための手法
(長周期地震波等の活用)



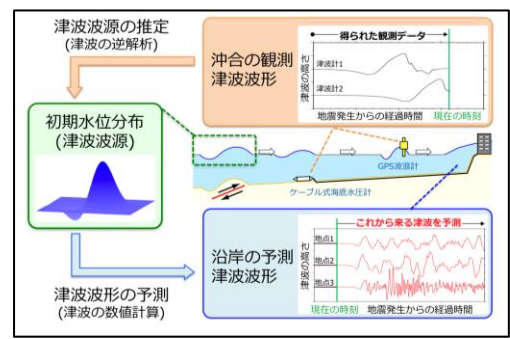
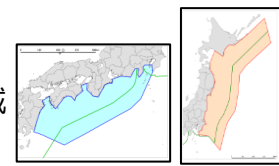
地震波
津波

気象庁
津波注意報や
津波警報の
発表と更新



津波波源の推定による
津波の即時予測手法tFISH
(沖合津波波形の活用)

対象にする
地震発生領域



- 気象研究所は、東日本大震災でみられた津波警報の技術的課題を解決するための津波の即時予測技術を開発した
 - 長周期地震波や強震域の広がりを用いて、マグニチュード速報値の過小評価の可能性を判定するための手法を開発した
 - 沖合のケーブル式海底水圧計等を用いて、波源を推定して沿岸での津波を精度よく即時に予測する手法を開発した
- 開発した予測技術は、気象庁の津波予報業務に導入されて活用がはじまっている
- 今後も、津波の即時予測技術の開発・改良に努めていく

- 本資料の作成では、東京大学地震研究所のケーブル式海底水圧計、国土交通省港湾局のGPS波浪計、海上保安庁の験潮所の観測データを使用しました。
- 津波数値計算には、徳島大学の馬場俊孝教授の津波数値モデル JAGURS [Baba et al., 2015, PAGEOPH] (<https://github.com/jagurs-admin/jagurs>)を使用しました。
- 一部の図の作成には、Generic Mapping Tools [Wessel and Smith, 1998, EOS] を使用しました。

- Baba, T., N. Takahashi, Y. Kaneda, K. Ando, D. Matsuoka, and T. Kato (2015), *Pure Appl. Geophys.*, **172**, 3455-3472, doi:10.1007/s00024-015-1049-2.
- Hayashi, Y., H. Tsushima, K. Hirata, K. Kimura, and K. Maeda (2011), *Earth Planets Space*, **63**, 809-813, doi:10.5047/eps.2011.06.042
- Katsumata, A., H. Ueno, S. Aoki, Y. Yoshida, and S. Barrientos (2013), *Earth Planets Space*, **65**, 843-853, doi:10.5047/eps.2013.03.006.
- Mori, N., T. Takahashi, T. Yasuda, and H. Yanagisawa (2011), *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G14, doi:10.1029/2011GL049210.
- Saito, T., and H. Tsushima (2016), *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **121**, 8175–8195, doi:10.1002/2016JB013195.
- Tsushima, H., R. Hino, H. Fujimoto, Y. Tanioka, and F. Imamura (2009), *J. Geophys. Res.*, **114**, B06309, doi:10.1029/2008JB005988.
- Tsushima, H., K. Hirata, Y. Hayashi, Y. Tanioka, K. Kimura, S. Sakai, M. Shinohara, T. Kanazawa, R. Hino, and K. Maeda (2011), *Earth Planets Space*, **63**, 821-826, doi:10.5047/eps.2011.06.052.
- Tsushima, H., R. Hino, Y. Tanioka, F. Imamura, and H. Fujimoto (2012), *J. Geophys. Res.*, **117**, B03311, doi:10.1029/2011JB008877.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith (1998), *Eos Trans. AGU*, **79(47)**, 579, doi:10.1029/98EO00426.