

DONETによる津波検知・予測

金田義行

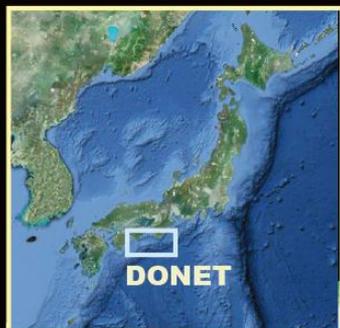
海洋研究開発機構

地震津波・防災研究プロジェクトリーダー

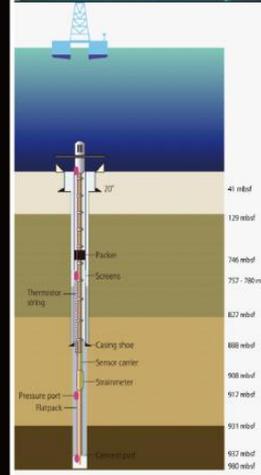
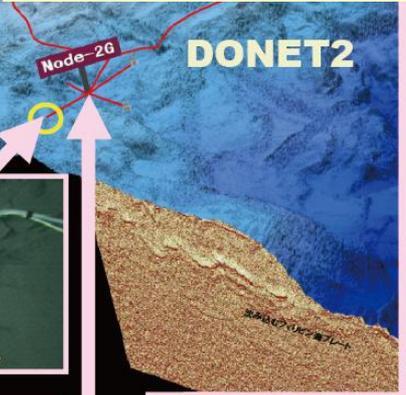
調査観測計画部会@2013.12.02

DONET 地震・津波観測監視システム

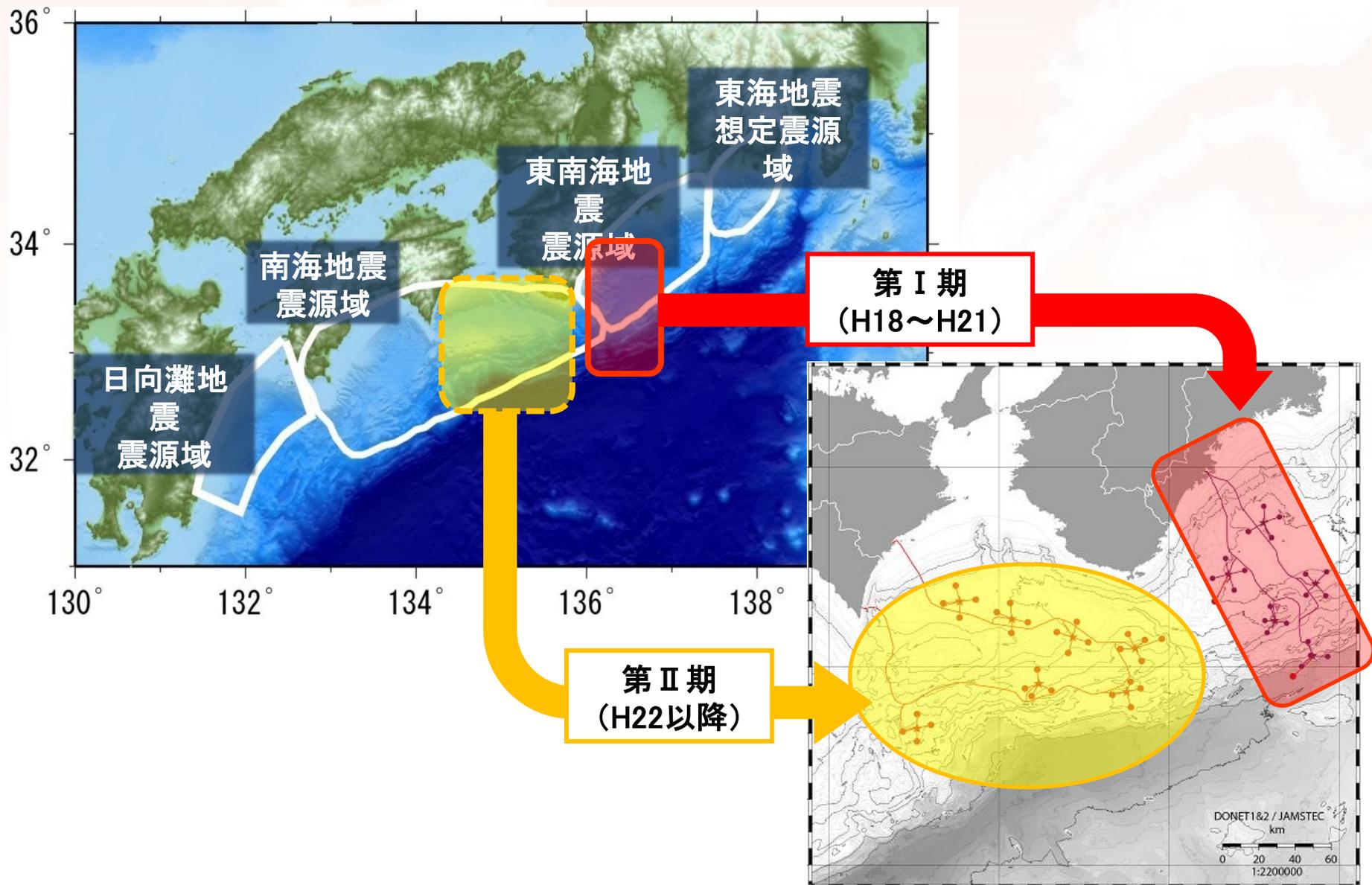
Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis



科学・技術の統合



観測ネットワーク設置海域



地震・津波観測監視システムのコンセプト

高信頼性:

20年程度の定常連続観測を実現可能なシステムデザイン

基幹ケーブルシステムには、高信頼設計を基本とする商用海底通信技術を用いるとともに、必要に応じて、高信頼性コンポーネントの新規開発を実施。(給電岐路ケーブル、制御回路の高信頼性IC等)

冗長構成:

外的要因による障害、もしくは想定外の内因による部分的な障害の発生に対して耐力のあるシステムデザイン

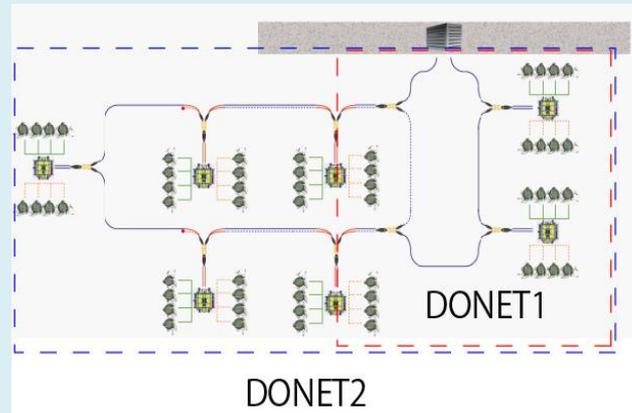
基幹ケーブルの両端を陸揚げし、それぞれの端から直流定電流給電をかけ、時計回り、反時計回りの2経路の伝送路を確保することにより冗長構成を実現。

置換機能:

障害を起こしたり老朽化したコンポーネントについて適宜、交換・整備・アップグレード等の置換が可能なシステムデザイン

ノードや観測装置はそのインターフェースに水中着脱式コネクタを搭載することで海中で着脱を可能にする。

広域展開のためのシステム高度化



中電圧システム
(DONET1)

さらに開発

高電圧システム
(DONET2)

電圧システム: 3千V → 1万V
ケーブル長: 300km → 1000km
DONETタイプノード:
5式 → 10式



海底で設置作業を行うROV

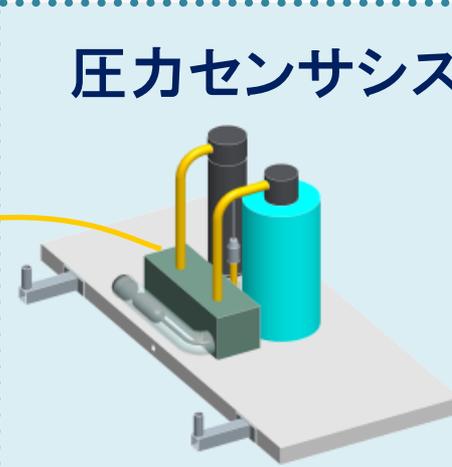


観測装置の構成

地動センサシステム



圧力センサシステム



地動センサシステム



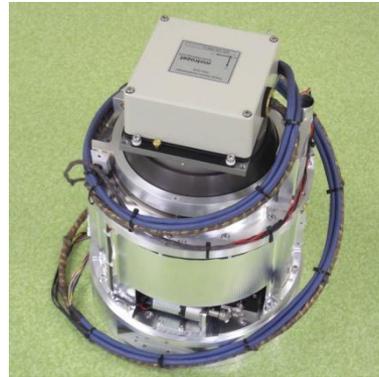
広帯域地震計



強震計



ADコンバーター/観測装置
伝送部等周辺装置



ジンバル上にセンサーを組み
付け

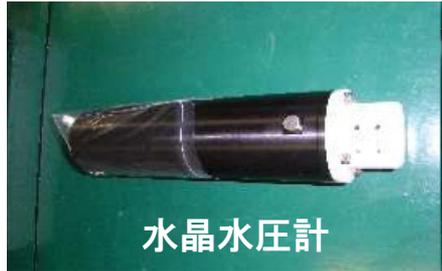


耐圧容器にパッケージング



地動センサーシステム完成

圧力センサシステム



水晶水圧計



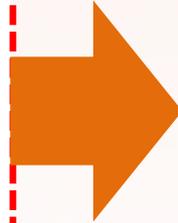
ハイドロフォン



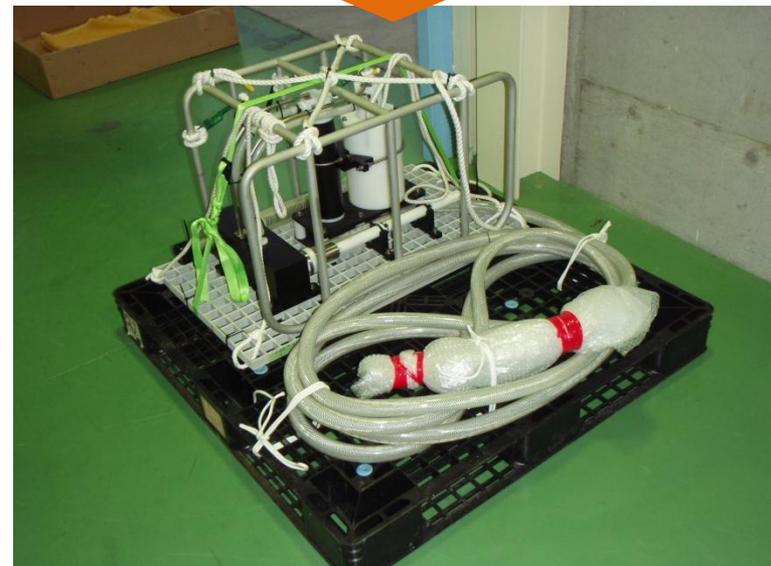
微差圧計



精密温度計



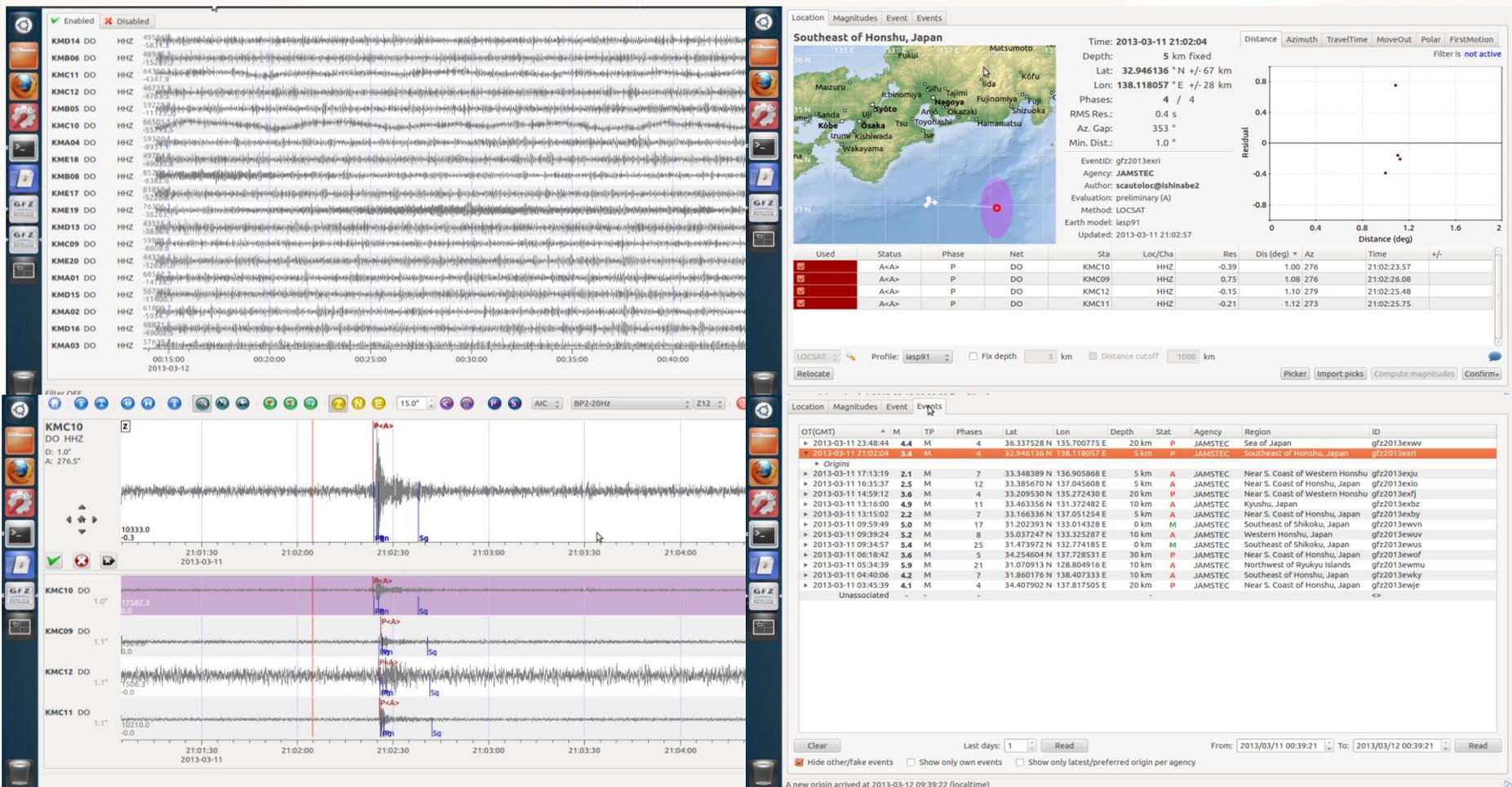
すべてのセンサを油漬けにし、脱気を行う



フレームに組み込み水圧センサーシステム完成

統合データベースアプリケーション

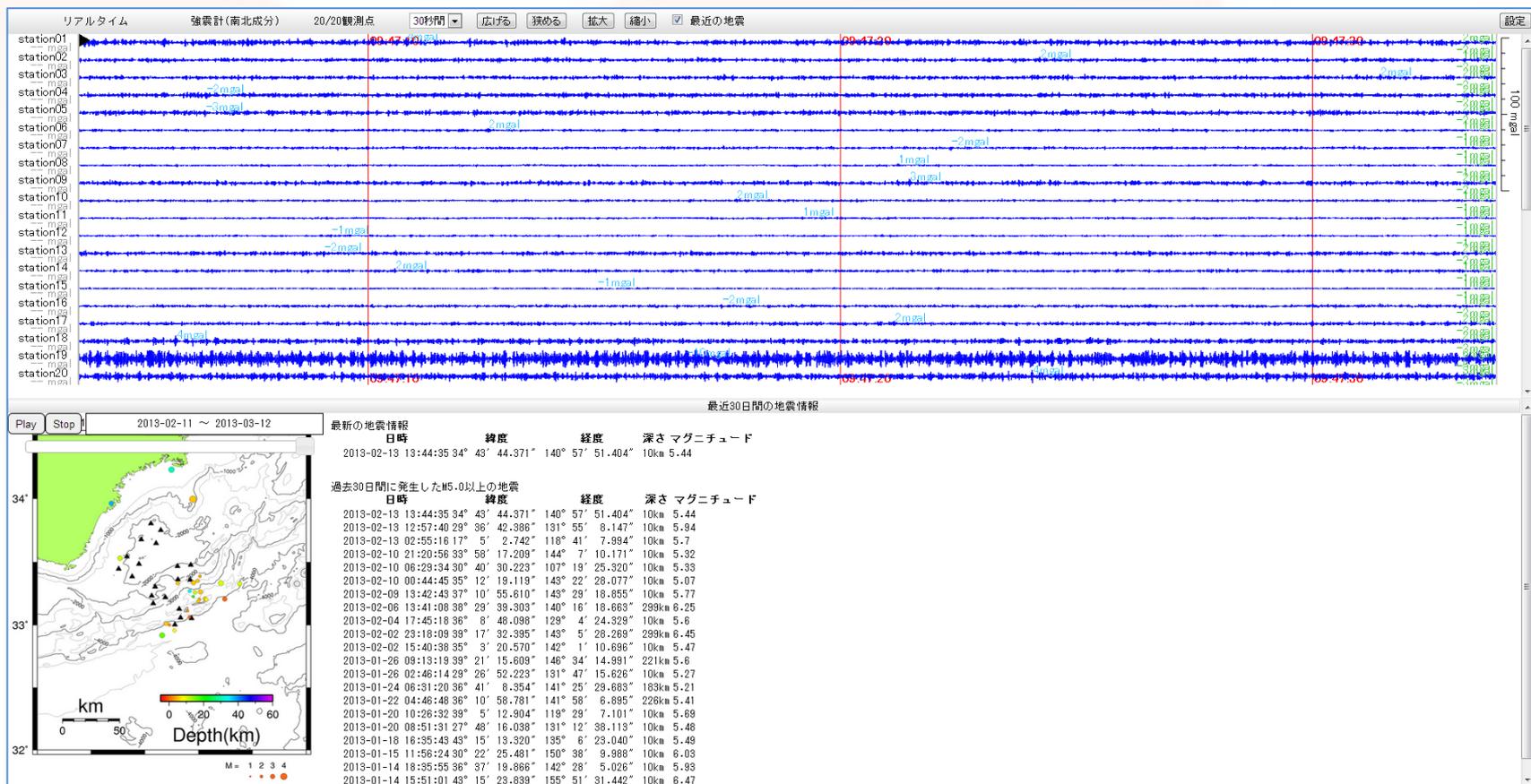
- seiscomp3の導入 -



リアルタイムで地震を検出、震源決定、マグニチュード評価

統合データベースアプリケーション

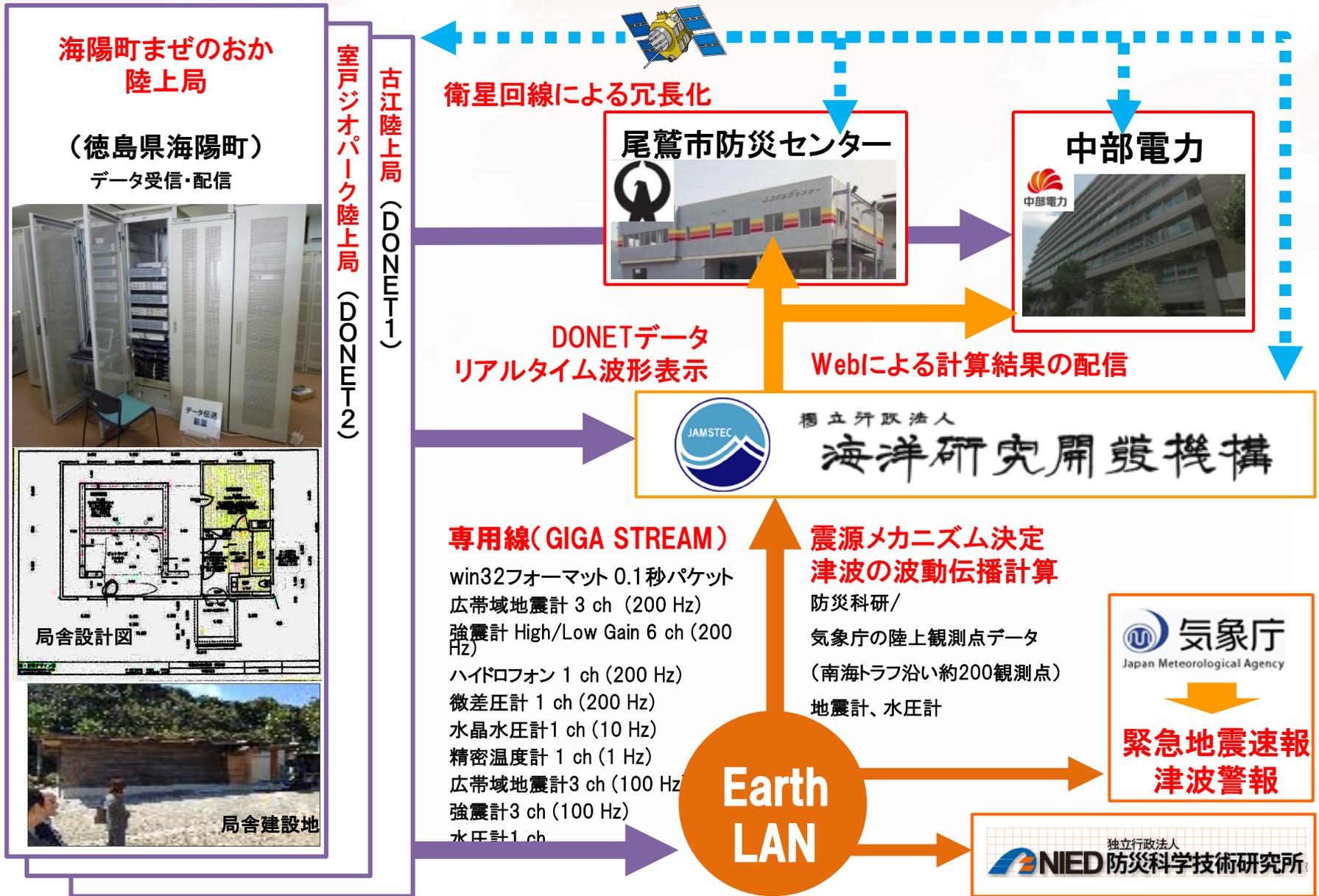
- 自治体向けデータ表示システム開発 -



- リアルタイムで確実に地震計と水圧計の記録が見えること
- 最新の震源情報が受け取れること
- 振幅値が読み取れること(津波増幅率の導入に向けて)
- JAMSTECのセキュリティに損害を与えないこと

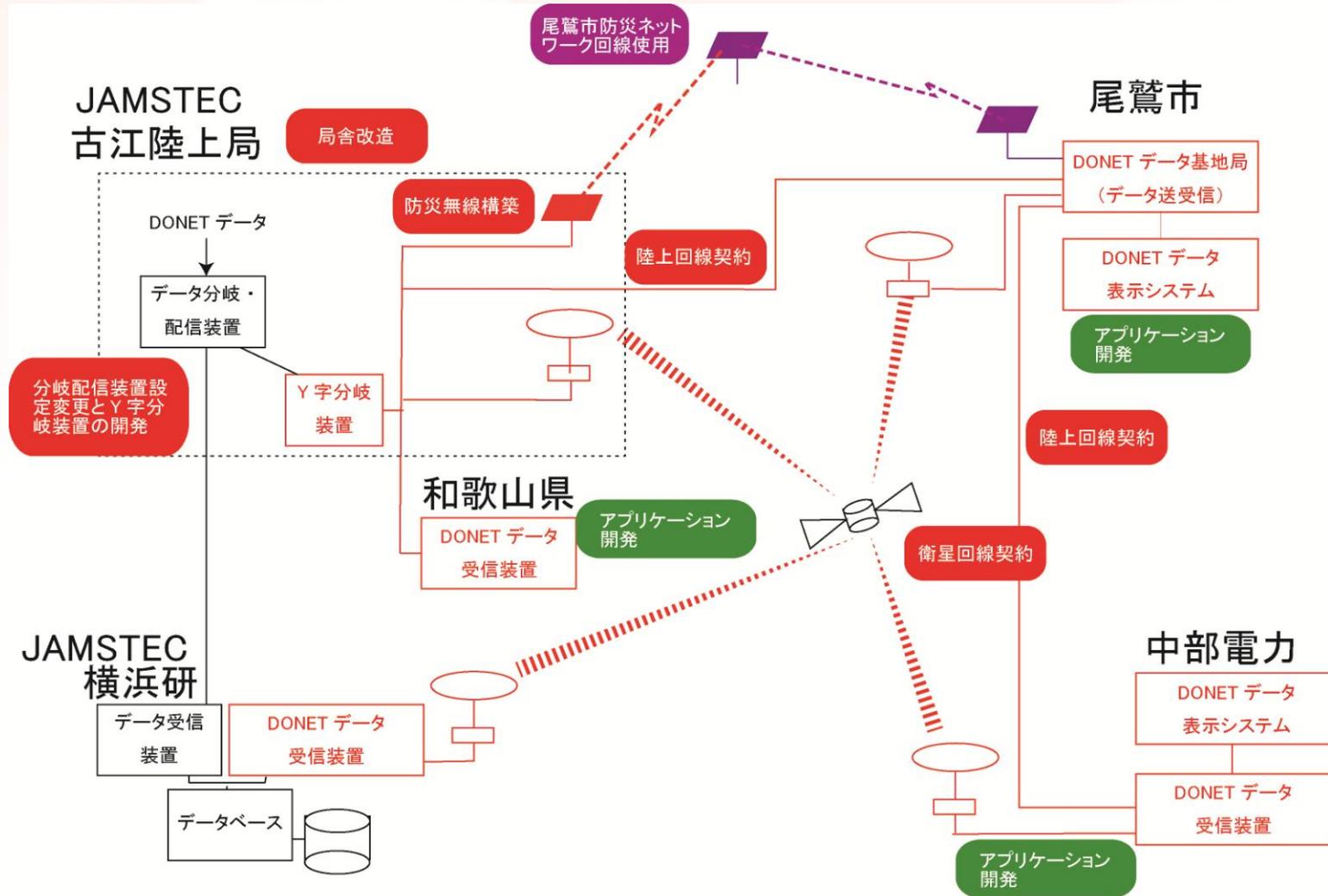
防災・減災に向けたDONETデータ活用

- 地域に特化したシステム構築実現に向けて DONETリアルタイム伝送構想 -



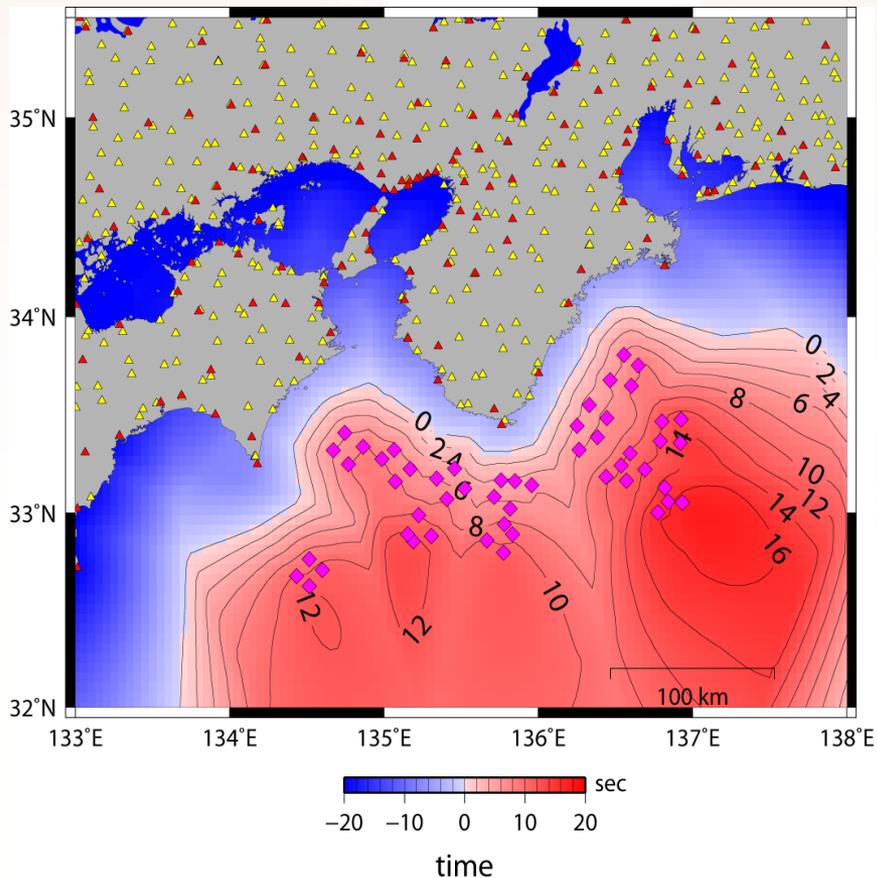
中部電力・尾鷲市/和歌山県との共同事業計画

- DONETデータ利用と通信網の冗長化 -

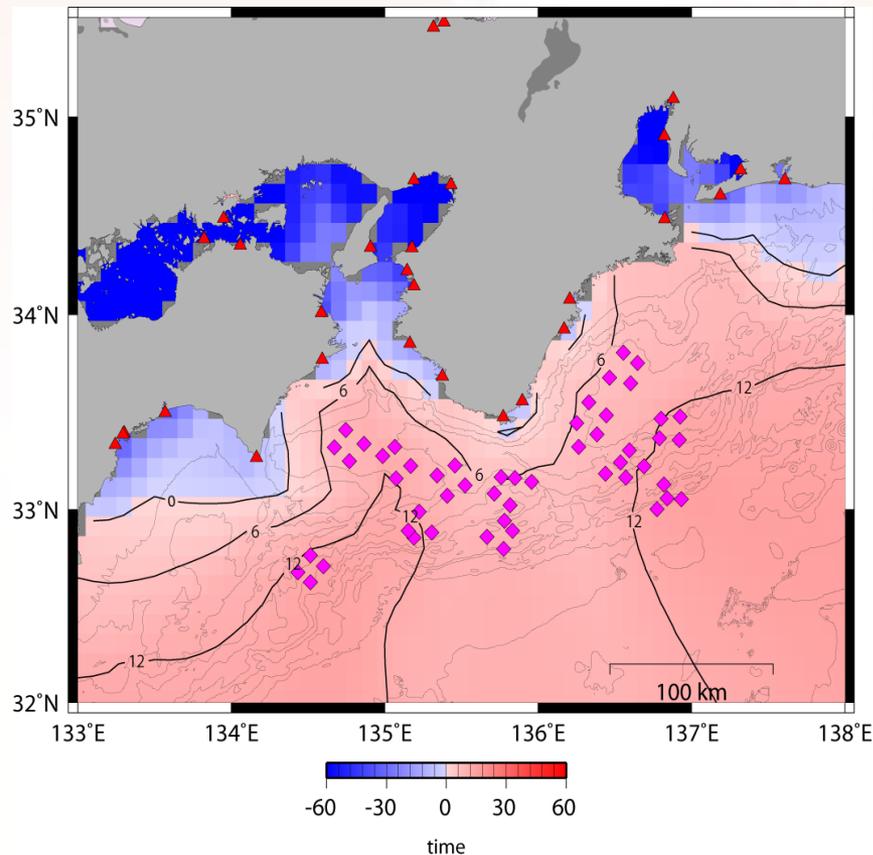


尾鷲市防災ネットワーク回線、衛星利用で通信網冗長化実現へ
和歌山県へのリアルタイムデータ伝送も計画

地震及び津波の即時検知能力の向上



赤色の領域で地震が発生した場合、
陸域観測網よりも早くP波を検知する

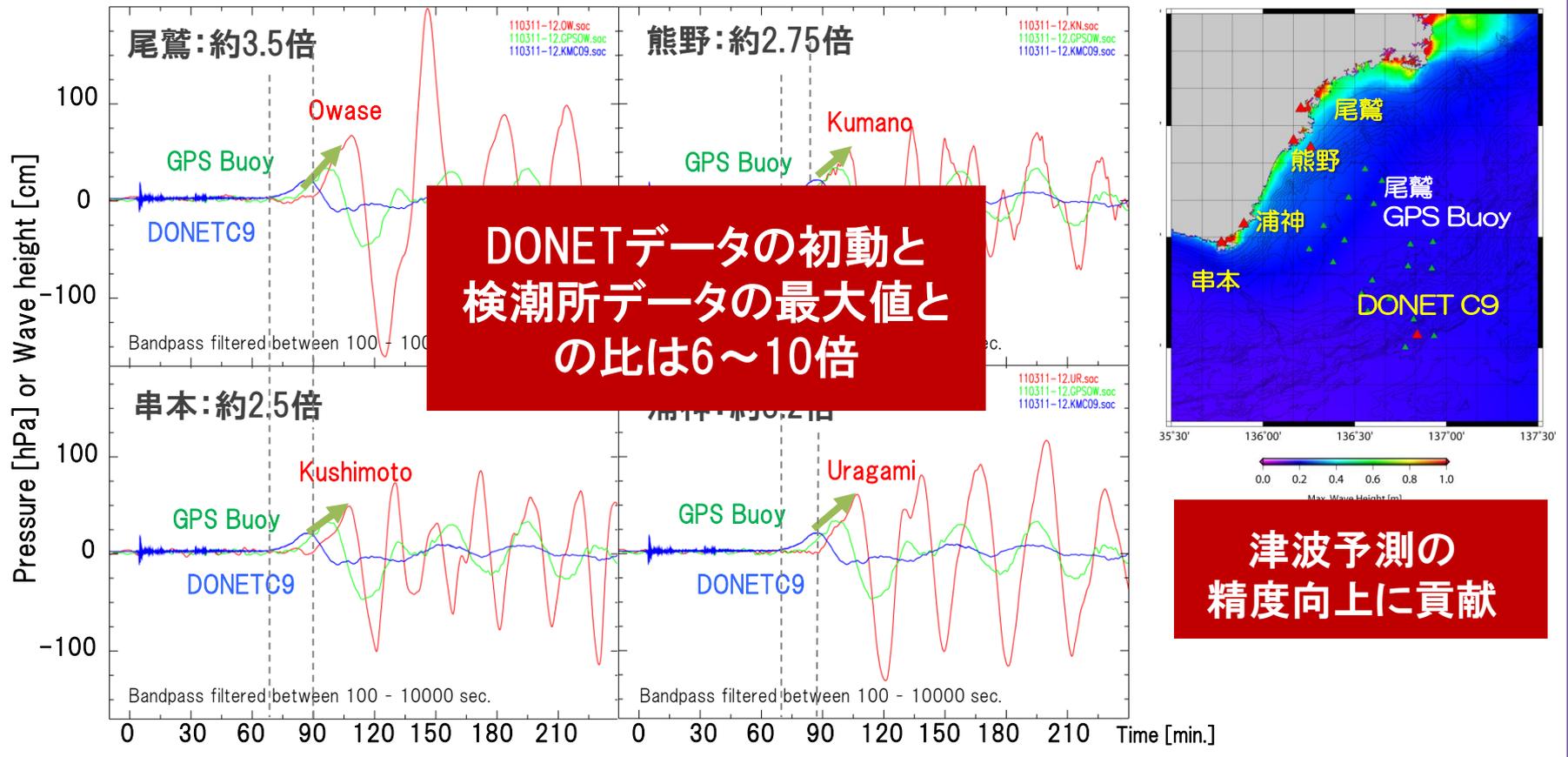


赤色の領域で津波が発生した場合、
沿岸の検潮所よりも早く津波を検知する

沖合津波波形と沿岸波高

- ◆ 沿岸の検潮所より早く沖合津波波形を検知
- ◆ 沿岸での津波波高 = 増幅率 × DONETデータ

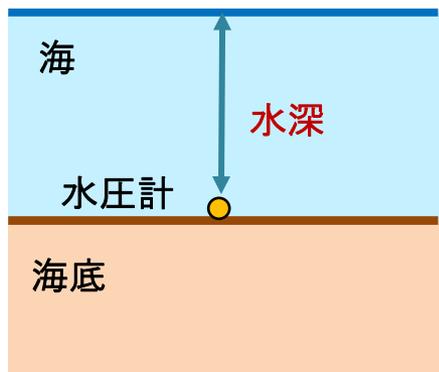
2011年 東北地震津波の例 DONET/GPSブイ/検潮記録の津波比較



津波増幅率は、津波の入射方向や震源距離、地域によって異なる

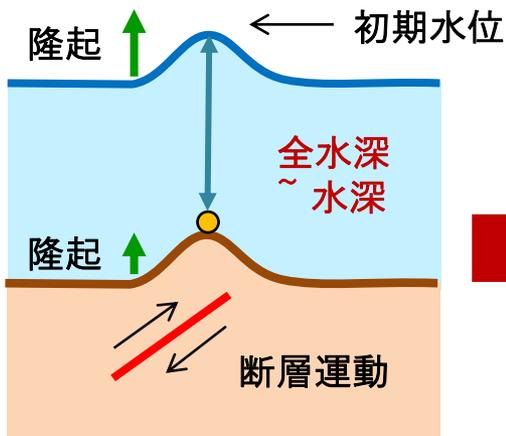
津波発生時における静水圧変動

(a) 発生前



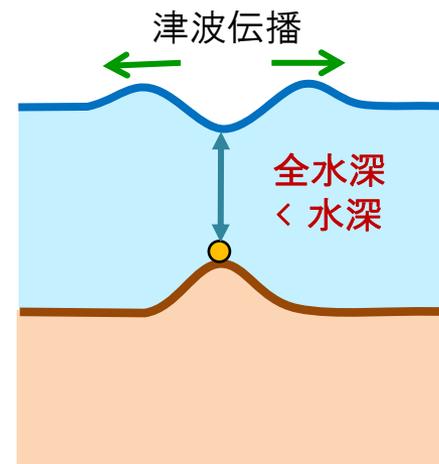
海底水圧と水深は比例関係

(b) 発生中

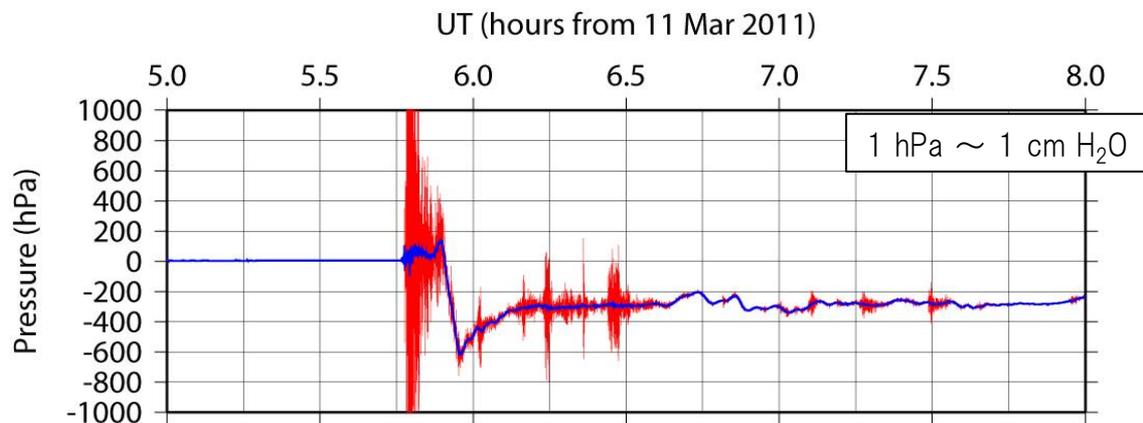


津波発生中は海底水圧(静的)な変動はない

(c) 発生後

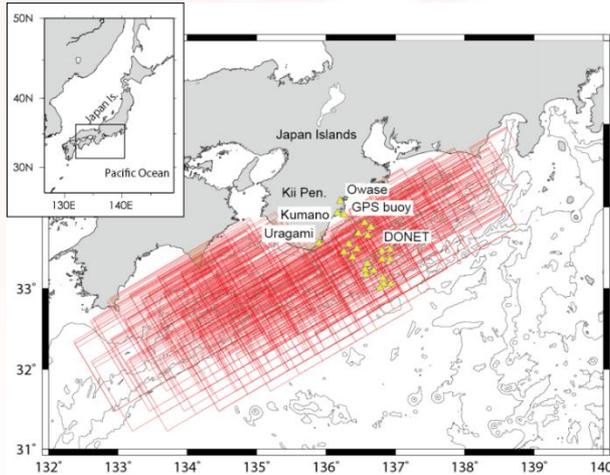


全水深が減少するため、海底水圧も減少



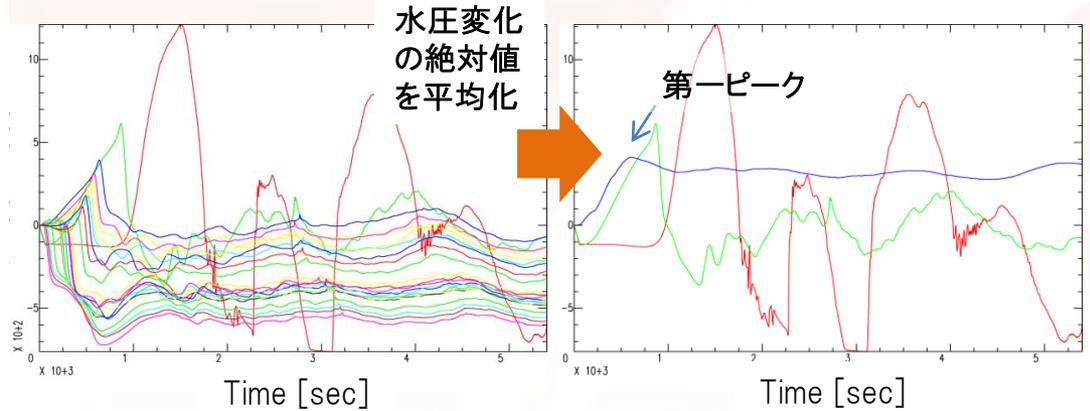
東北地方太平洋沖地震時に観測された海底水圧変動(東北大学)

DONETと沿岸の間の津波増幅率の推定

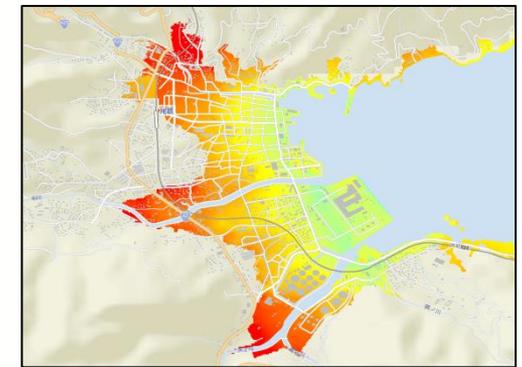
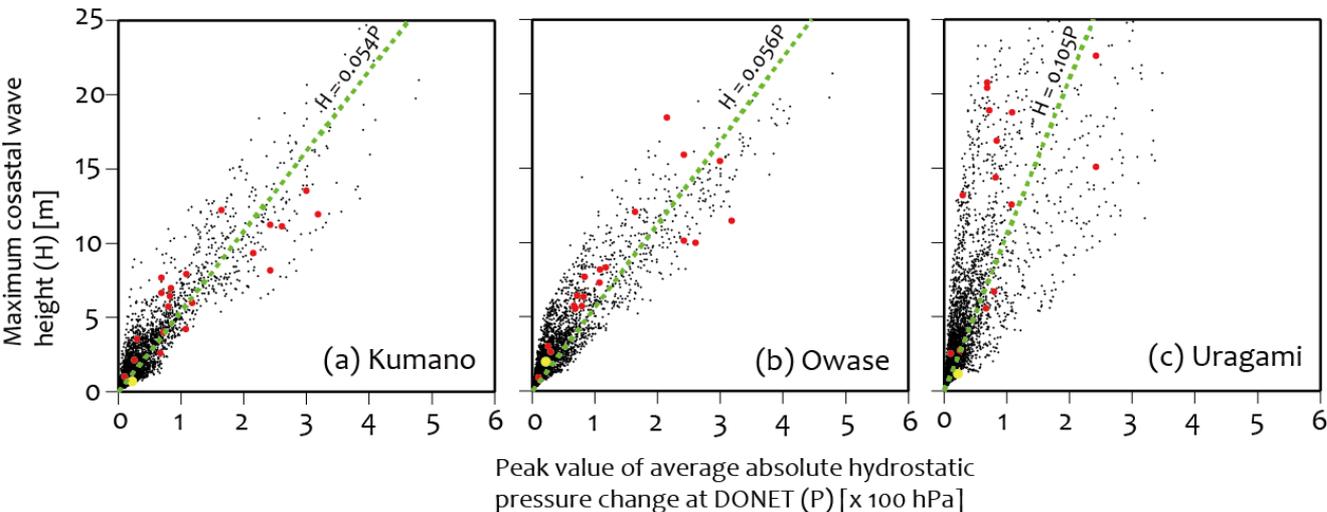


DONET観測点と海岸の間の津波増幅率推定のために用いた小断層。これらを組み合わせることによって、M7.2からM8.4の地震を発生させ、繰り返し津波を計算した。

Pressure [hPa] or Wave height [cm]



あるモデルから計算されたDONET観測点での海底水圧波形と、GPS波浪計、検潮所での津波波形(左)。右図においては海底水圧波形の絶対値をとって平均化した波形を青色で示している。この第一ピークと海岸での最大津波高の相関を調べた。

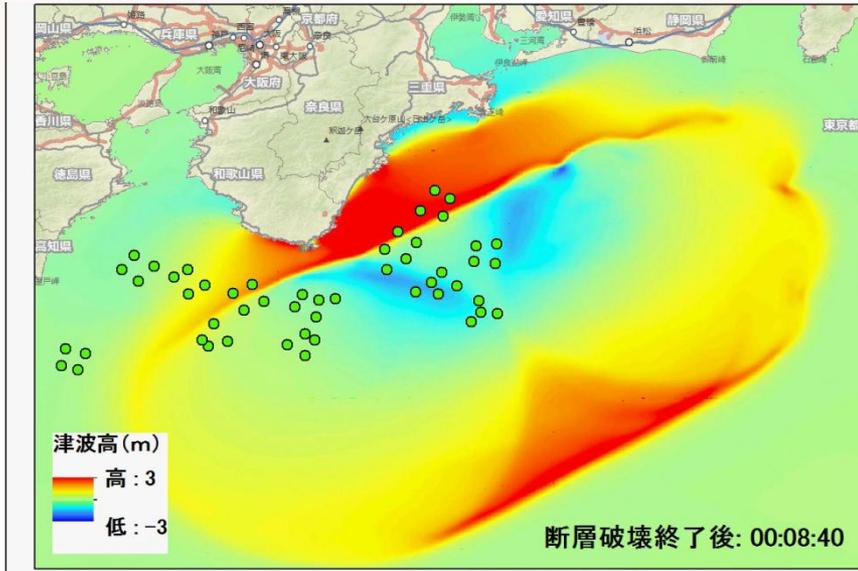


予め浸水域を計算し、DB化しておくことによって、地震発生後10分程度で、高精度に浸水域も予測可能である。

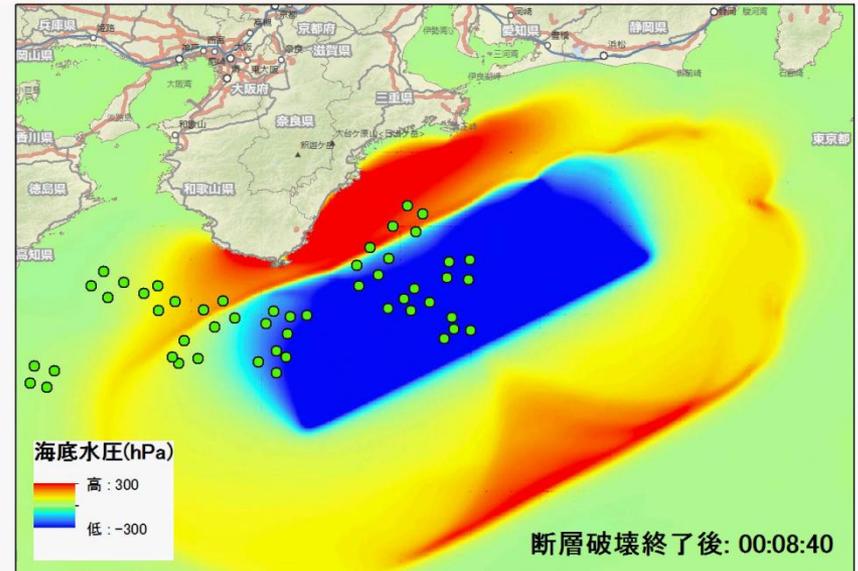
DONET観測点での水圧の絶対値の平均波形の第一ピークと沿岸での最大津波高さの相関図。

近地津波の海面変動と水圧変動

海面変動



海底水圧変動

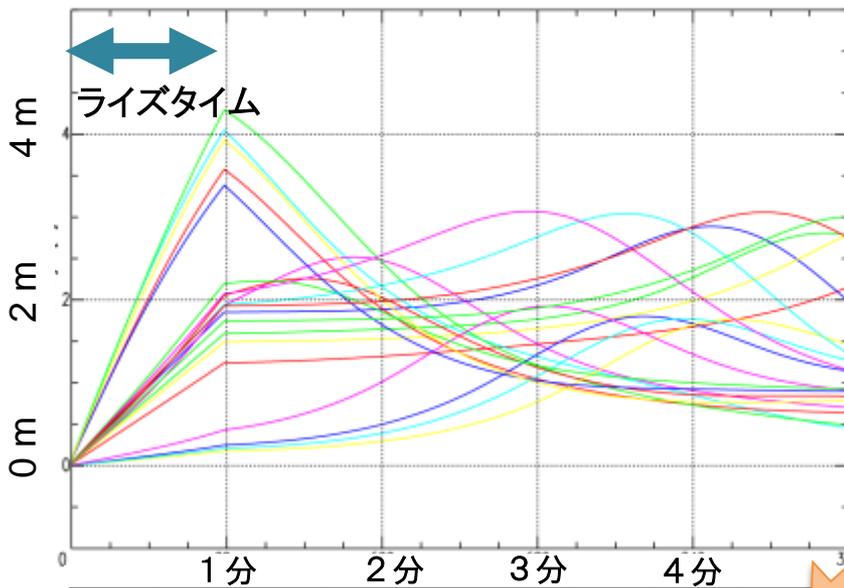


Assumed fault parameters used in the calculation are Magnitude 8.4, Fault Length: 223.87 km, Fault Width: 112.2 km, Fault strike: 240 degrees, Fault dip: 25 degrees, Depths of upper edge of the fault: 5 km, Rake: 90 degrees, Slip amount: 12.59 m.

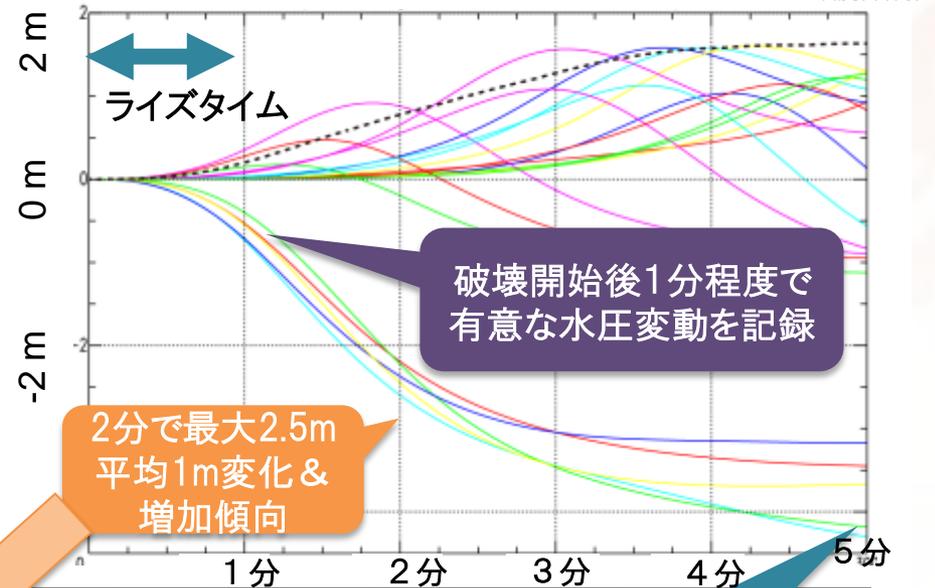
- 震源域では津波発生後数分のうちに 200 - 300 hPa 程度の急激な水圧低下が発生する。
- 水圧が急激に低下している領域をマッピングできれば、断層長(地震の規模)を大まかに推定できる可能性がある。

海面変動と海底水圧変動(DONET1波形)

DONET全観測点の真の海面変動



DONET全観測点での水圧変動

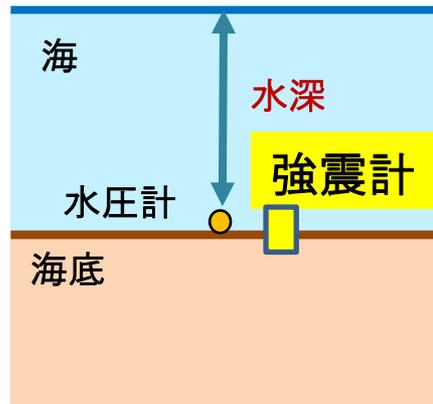


1分以内検知 & 5分以内津波高予測可能

6分位までいずれも50cm未満

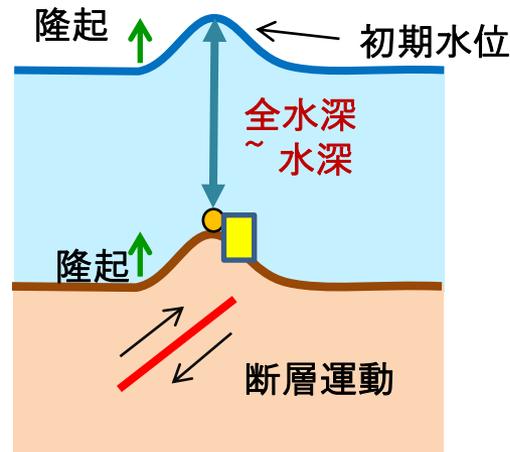
強震計記録から、海底の変位を即時検知できないか？

(1) 発生前



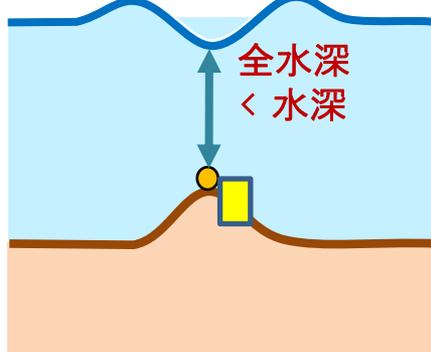
水深分の海底水圧

(2) 発生中



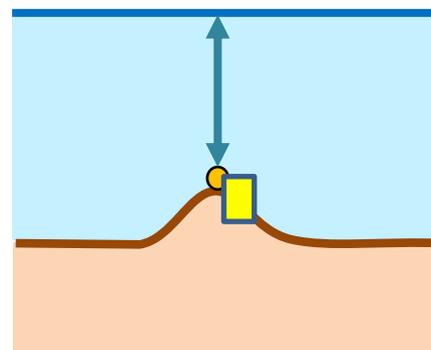
津波発生中は静水圧変動はほぼゼロ

(3) 津波伝搬中
津波伝播



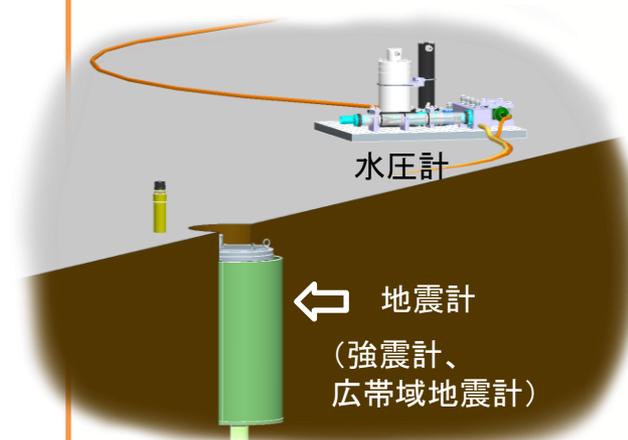
全水深が減少するため、静水圧も減少

(4) 発生後

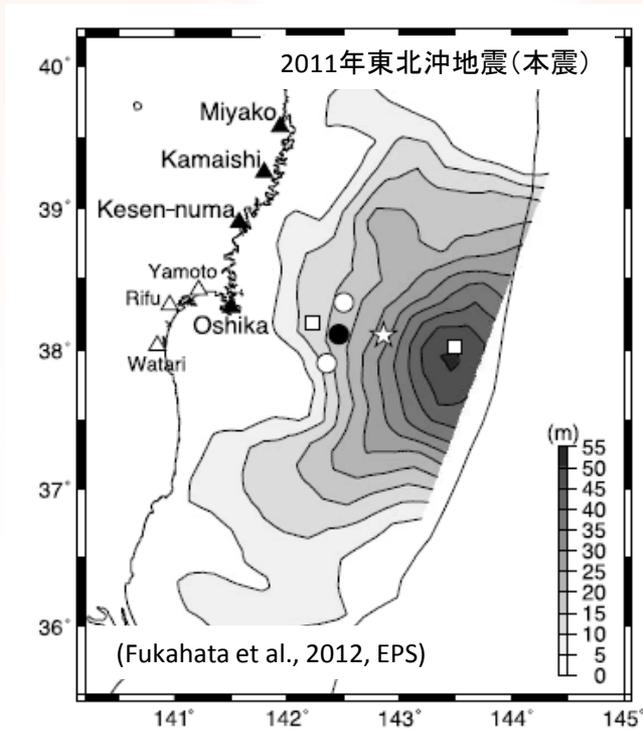


地殻変動分の水圧が減少

強震計の上下動加速度記録を積分し、地震による海底の永久変位を推定できるはず。



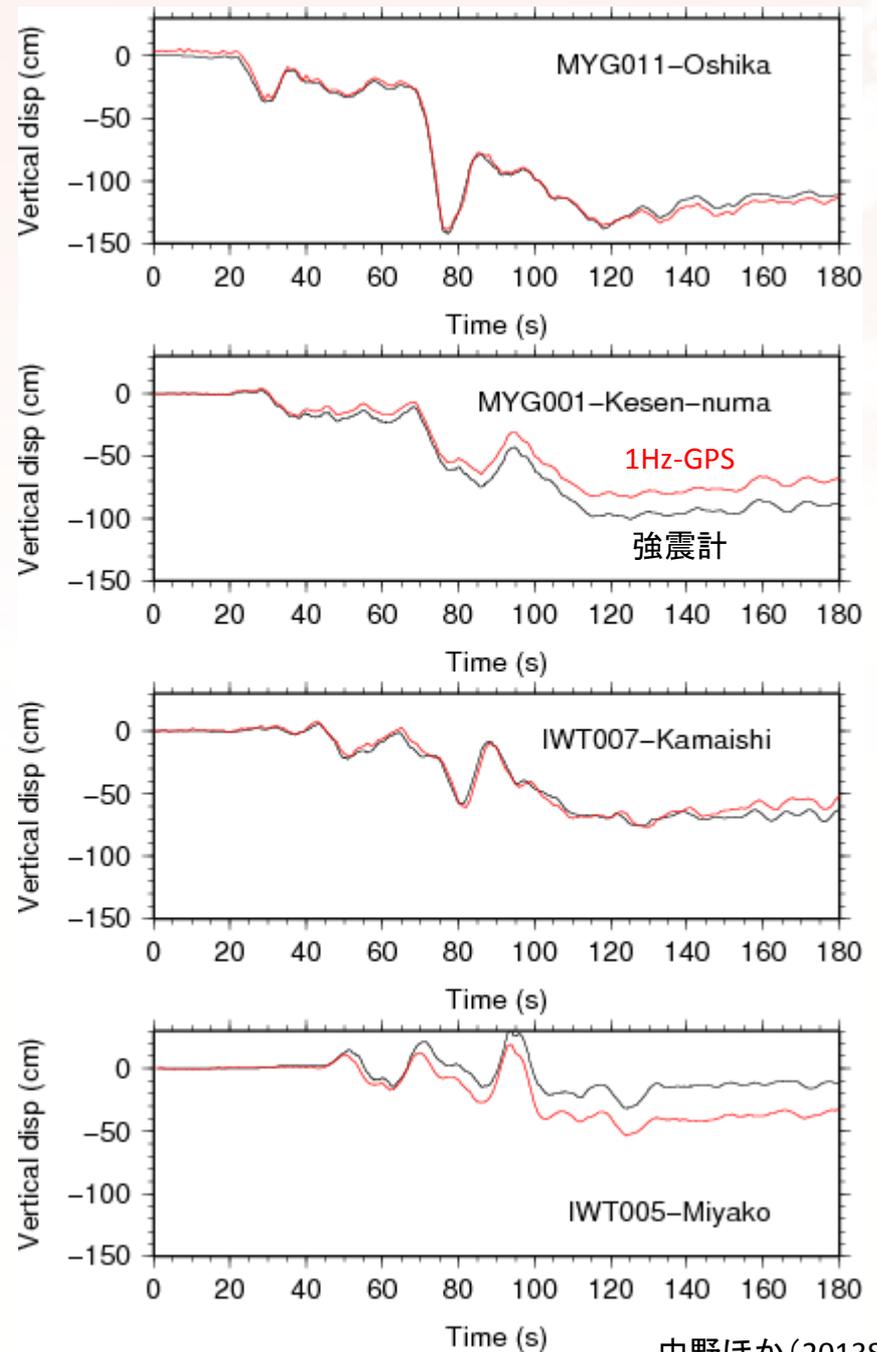
K-netから推定した変位記録とGPSの変位記録との比較



加速度記録に混入するオフセットを適切に補正することにより、地震による永久変位を即時に推定することが可能に



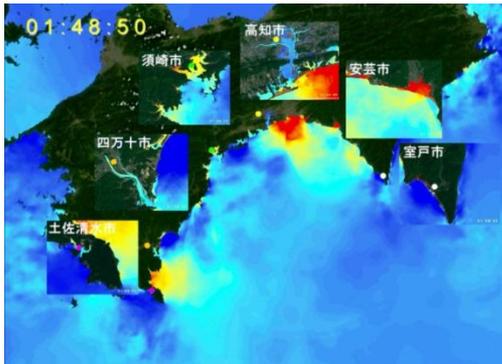
津波の波源推定に有効な手法



高速津波シミュレータの開発

大規模並列津波コード (JAGURS)

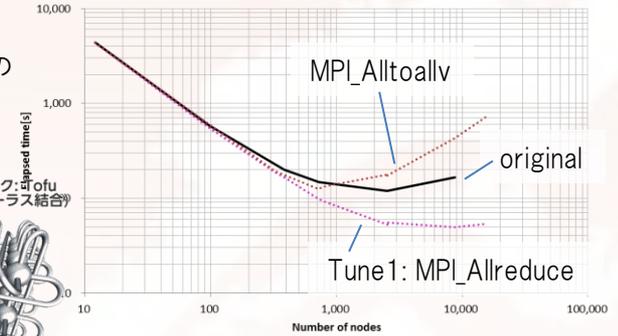
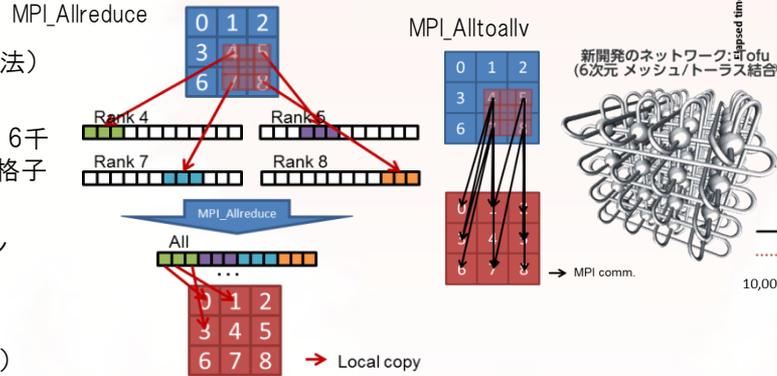
- 非線形長波近似の式(平面二次元の差分法)
- 使用グリッド(高知県全域5m格子)
 - ・2秒グリッド 2億5千万格子、2/3秒グリッド 6千万格子、2/9秒グリッド 3億7千万 計6.8億格子
- 計算結果
 - ・京5,184ノード使用、5時間のシミュレーション
 - ・dt = 0.015秒
 - ・計算時間は4:28:20(チューニング前)
 - 1:27:42(チューニング後)



高知県全域5m格子計算

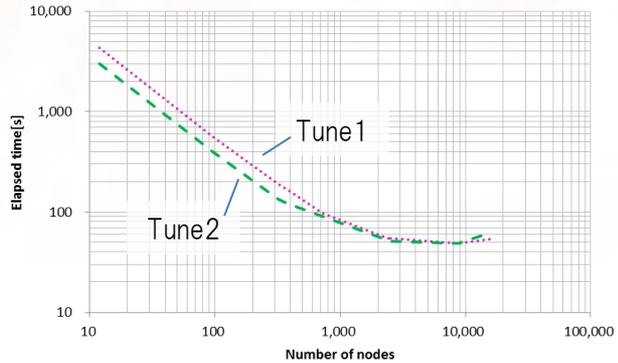
Tune 1. 論理トラス形状の指定

・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)



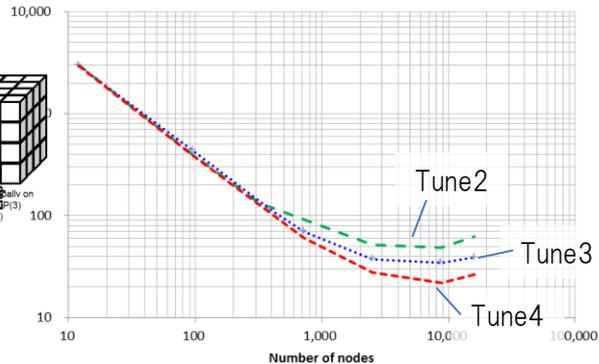
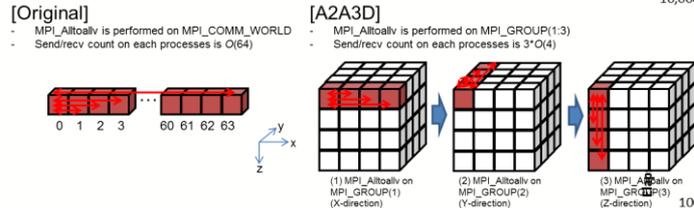
Tune 2. 流速更新ループの最適化

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)



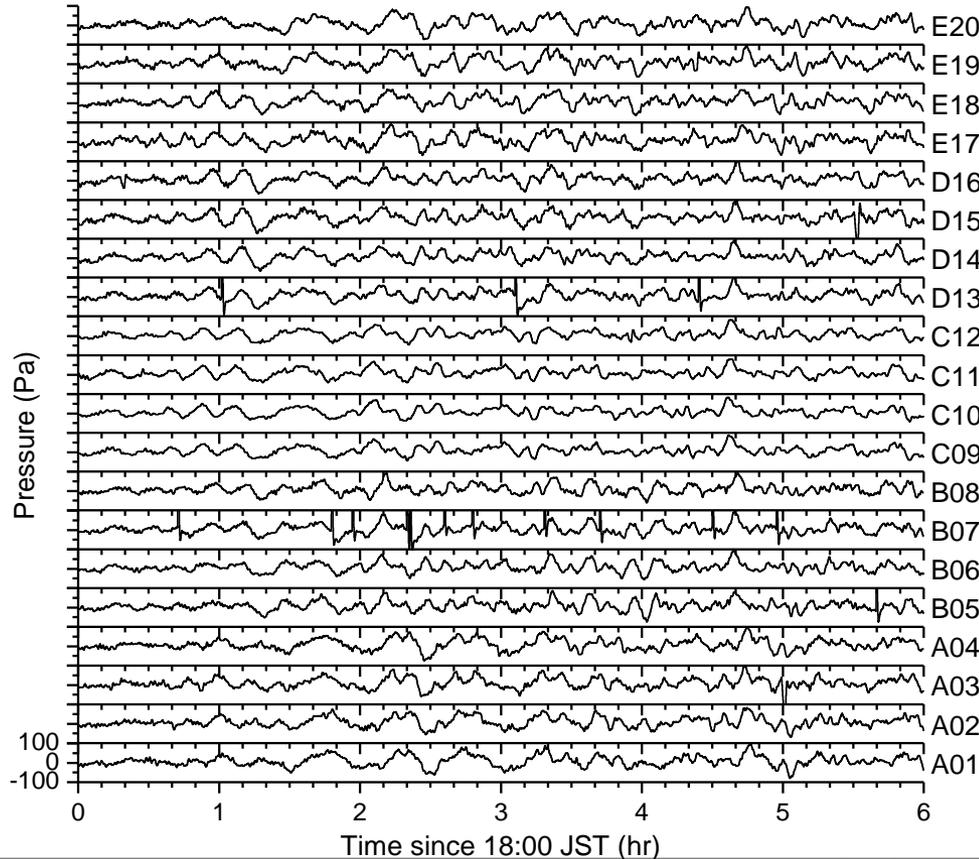
Tune 4. ネスト間通信の最適化②

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)

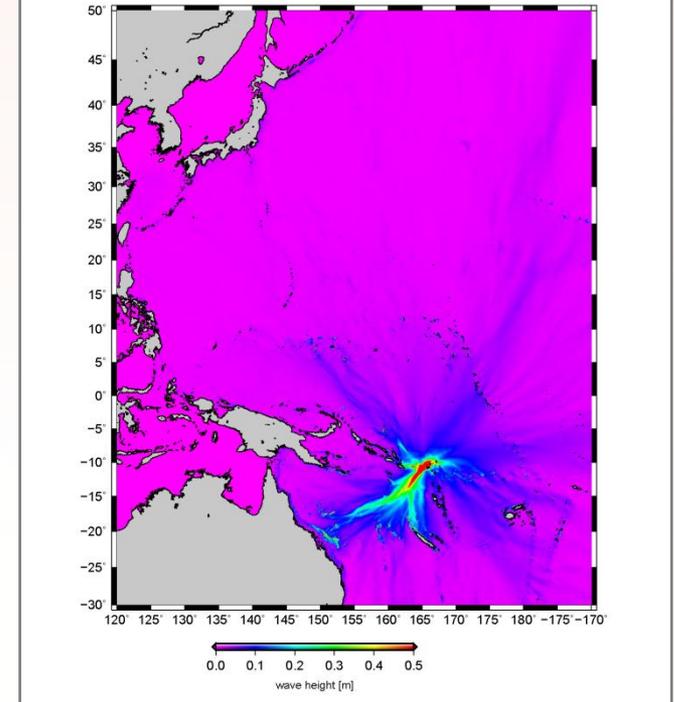
Tune4によってさらに多くのノードでも性能が向上
 1.8h(5184ノード)→1.5h(8748ノード)

準リアルタイム津波解析 (ソロモン諸島:M8.0)

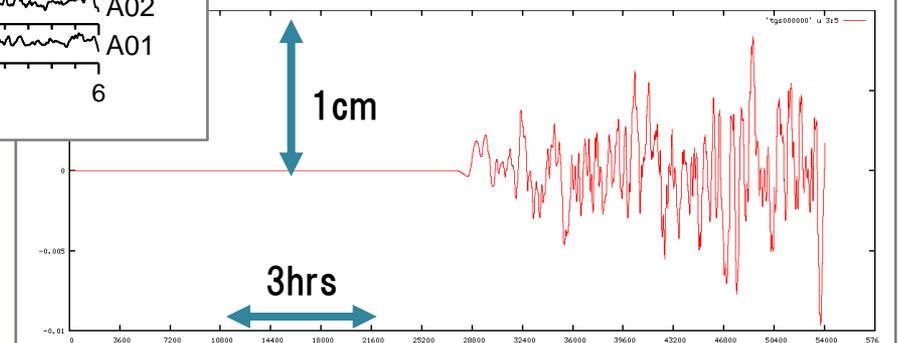
Observed tsunamis from M8.0 - 76km W of Lata,
Solomon Islands 2013-02-06 10:12:27 JST



Maximum tsunami height



Simulated tsunami waveform at DONET



津波到達前に津波解析を完了。
予測値とほぼ同程度の約1cmの津波をDONETで観測。

非線形分散波モデルの開発

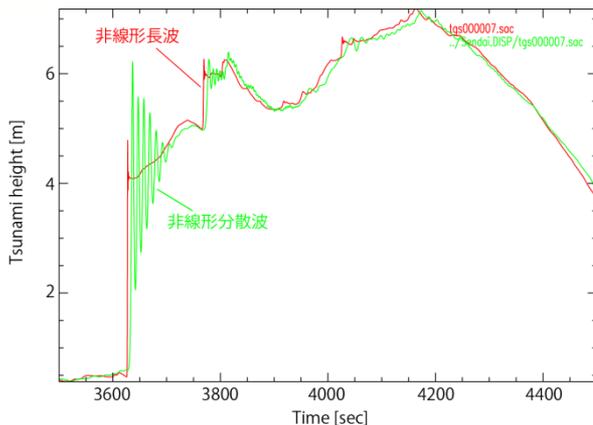
東北地方太平洋沖地震津波の仙 台湾におけるソリトン分裂波を再現

- 計算モデル: 非線形分散波理論の式
- 波源モデル: Saito et al. (2011)
- 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

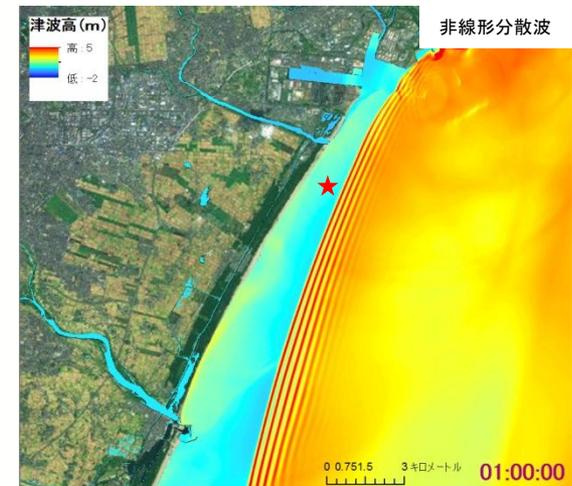
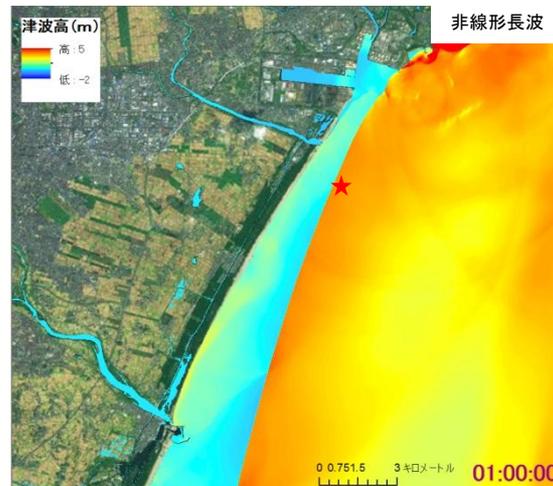
$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{1}{R \sin \theta} \left[\left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} + \frac{\partial (N \sin \theta)}{\partial \theta} \right) \right] \quad (1)$$

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

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

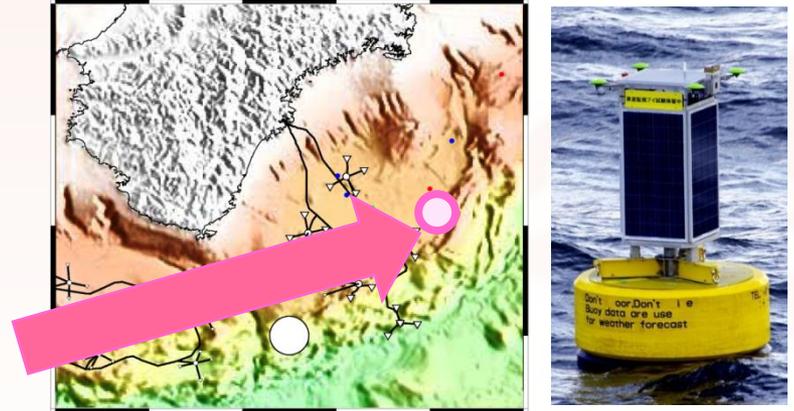
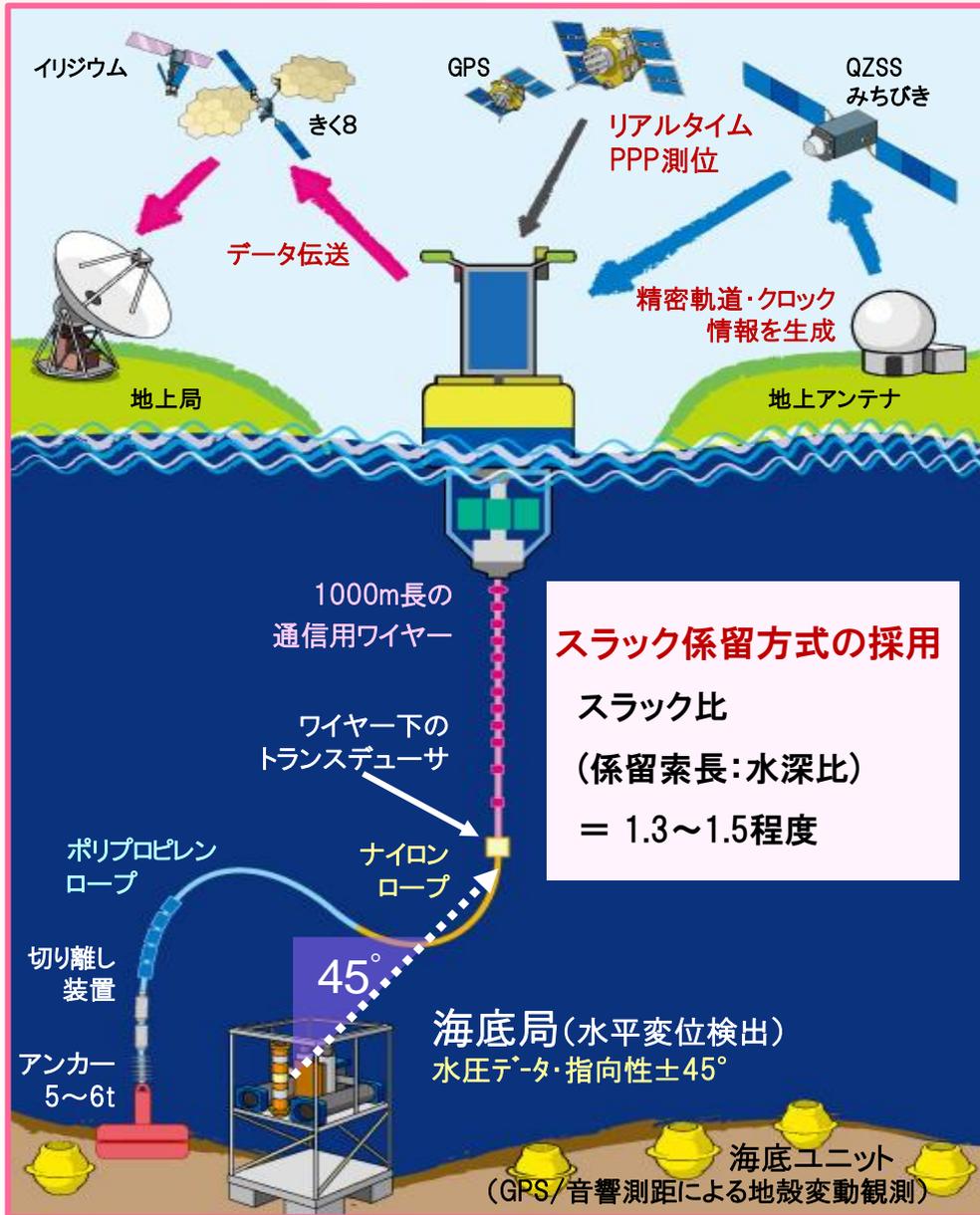


右図の星印ポイントでの波形の比較



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

新たな津波ブイシステム



水圧計と海底局を用いて
地殻変動観測

+

衛星を用いたPPP観測

||

海底における地殻変動を
リアルタイムで検出へ

即時展開性に優れたブイ形式
の津波警報システムを展開

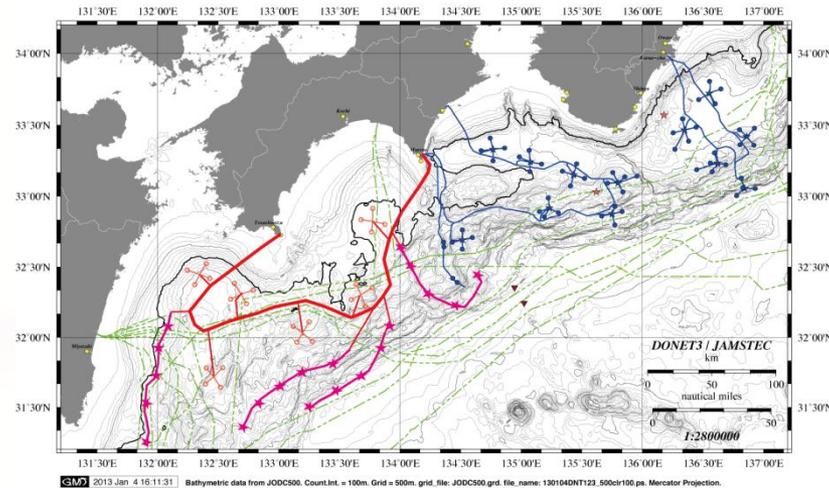
- ① 海底に設置した水圧計によりデータ検出
- ② GPS/音響測距による地殻変動観測
- ③ 陸上インフラに左右されない衛星を通じて津波・地殻変動データをリアルタイム通信

今後の課題

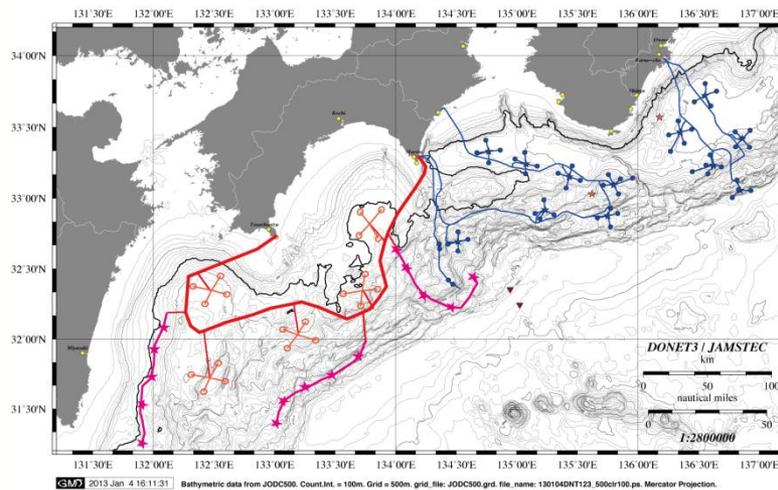
- 海域観測網のさらなる拡充
- 他機関データとの統合処理による波源の高精度推定
- 沖合津波データを用いた予測の逐次更新

海域観測網のさらなる拡充 -DONET3プランニング-

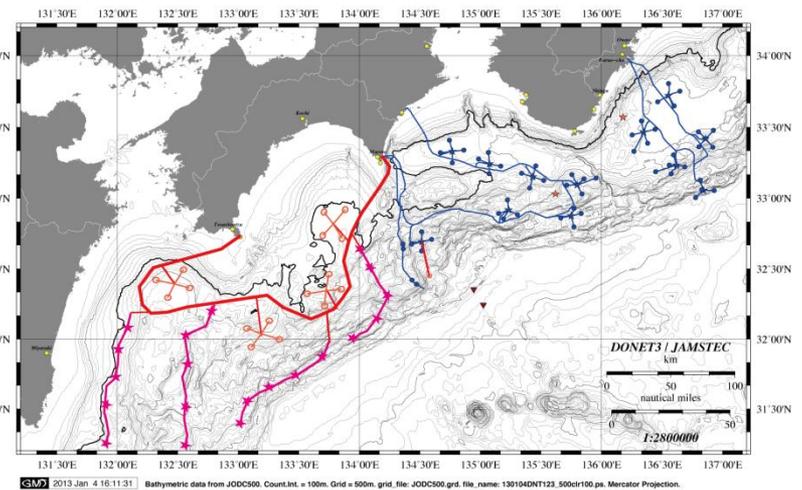
Bathymetric map for Nankai Trough, DONET3



Bathymetric map for Nankai Trough, DONET3 案B



Bathymetric map for Nankai Trough, DONET3 案C



他機関データとの統合処理による波源の高精度推定

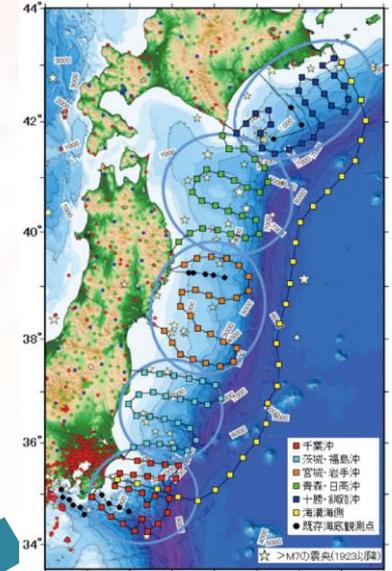
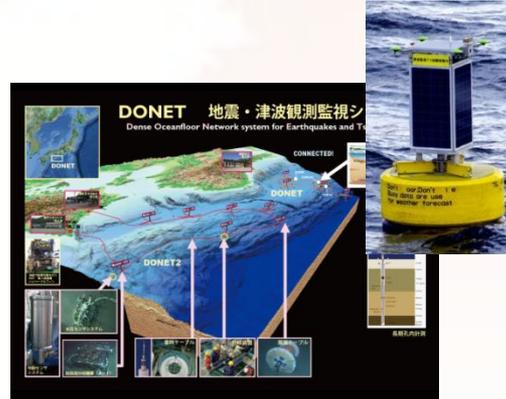
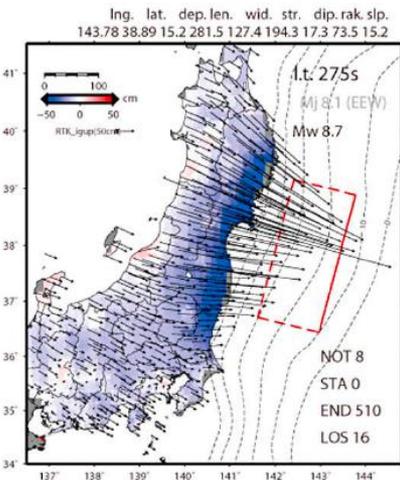


図1 日本海溝海底地震津波観測網観測点配置図

気象庁の震源要素



1HzGPS
データの即
時解

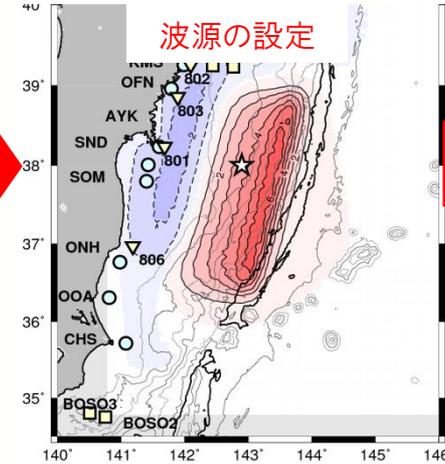
DONET・
津波ブイデータ

GPS波浪計
(国交省)

東北ケーブルデータ
(防災科研)



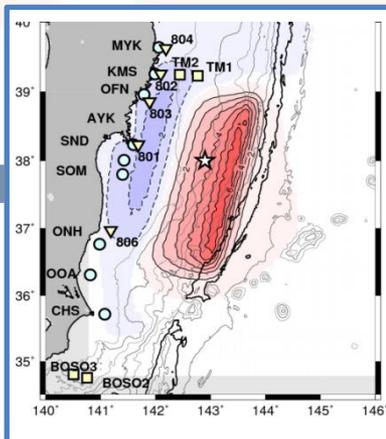
統合処理システム
幅広いデータに基づき断層
(波源)を設定



次ページへ

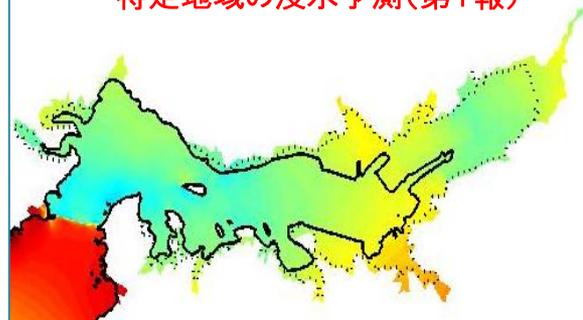
沖合津波データを用いた予測の逐次更新

1. 高速津波計算もしくはDB検索(第1報)



1回約2分

特定地域の浸水予測(第1報)



2. 沖合津波データの結合処理による波源の更新(第2報以降)

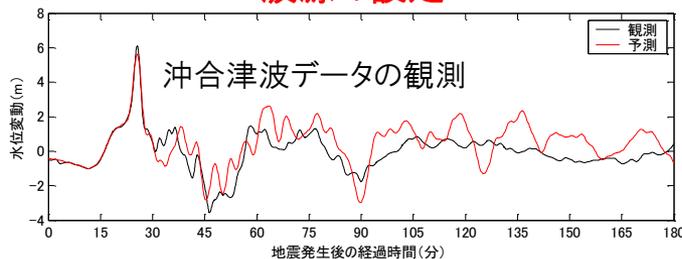
時間の流れ

逆解析

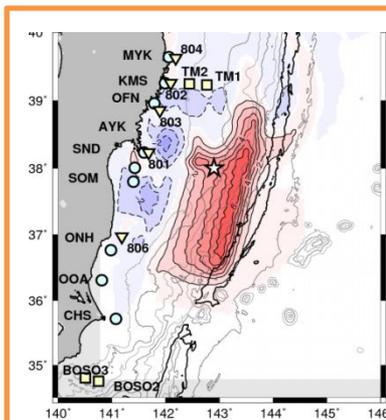
高精度で波源が求まるまで観測データを増やして繰り返す



波源の設定

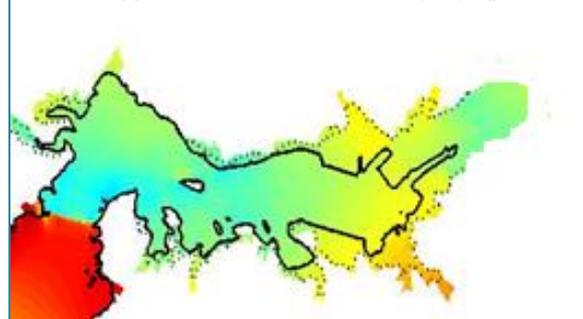


GPS波浪計



1回約2分

特定地域の浸水予測(更新後)



その都度浸水予測も改定

波源の更新

**ご清聴
ありがとうございました。**



**Earthquake and Tsunami Research Project for
Disaster Prevention**

