

( 1 ) 実施機関名：

東北大学

( 2 ) 研究課題(または観測項目)名：

高精度リアルタイム津波予測システムの開発

( 3 ) 最も関連の深い建議の項目：

5. 超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進

( 2 ) 超巨大地震とそれに起因する現象の予測のための観測研究

ウ. 超巨大地震から発生する津波の予測

( 4 ) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

( 3 ) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

( 3-2 ) 地震破壊過程と強震動

イ. 強震動・津波の生成過程

( 5 ) 本課題の 5 か年の到達目標：

甚大な津波被害をもたらした 2011 年東北地方太平洋沖地震とそれに起因する東日本大震災が残した教訓の一つは、迅速かつ信頼される津波予測システムの必要性であった。従来の気象庁の津波予測情報は地震観測に基づいて推定される震源位置・深さと地震の規模に依存しているが、東北地方太平洋沖地震の発震直後には地震の規模の過小評価が津波予測の過小評価につながったことが指摘されている。この状況を改善するためには、地震波形以外の観測情報も活用して沿岸における津波の規模を予測することが有効と考えられる。本研究では、近年急速に整備が進んでいる沖合における津波観測システムならびに陸上の稠密 GPS 観測網で得られるリアルタイムデータを用いた津波予測手法の開発と精度評価を行う。予測手法のプロトタイプは、提案者グループによりすでに開発されたリアルタイム測地データによる地殻変動場の即時推定 (RAPiD) と津波データを用いた津波波源逆解析とそれに基づく津波波形計算 (tFISH) である。本研究では東北地方太平洋沖地震で得られた実データを用いて、RAPiD と tFISH それぞれの性能評価と改善点の洗い出しを行うとともに、これらの統合 (tFISH/RAPiD) を図ることにより津波予測の迅速性と信頼度の向上を図る。さらに、RAPiD の高度化・信頼性向上をめざして、巨大地震が発生した際のリアルタイム測地データ流通経路の確保に関する検証実験を行う。さらに、今後大きな津波被害を及ぼす可能性のある隣接域での津波地震や、アウトライズ巨大地震を想定したシナリオに基づいて、こうした地震津波に対する tFISH/RAPiD の有効性の評価を行う。

( 6 ) 本課題の 5 か年計画の概要：

津波予測システム開発は急務であることから、特に年次進行は想定せず、以下の課題について順次 (可能なものは並行して) 取り組む。本課題の当初計画では、高頻度で発生する中小津波の検知・予測精度の向上を通じて、予測システムに対する信頼度を積み上げる戦略を指向してきたが、東北地方太

平洋沖地震により状況は一変したため、巨大地震・津波の予測のための開発を最優先課題として取り上げることとした。

・巨大地震発生時における RAPID の可用性評価

迅速な津波予測を必要とするような巨大地震が発生した直後には、広域にわたって通信網が寸断される可能性がある。そこで、観測点 - データセンター間の代替通信手段として衛星通信を使用することによるリアルタイム測地データ流通のための基礎研究を実施する。

・ RTK-GPS データを取り入れた tFISH ( tFISH/RAPiD ) の開発

RTK-GPS のデータ解析から得られる断層モデルから津波を予測した場合の予測精度評価はすでに行ったが、津波観測波形データと併合して波源推定を行うことにより、予測精度を向上できると期待できる。ただし、津波観測データは RTK-GPS に比べて遅れて入手されるものであるため、モデルの逐次改善という方向となる。さらに、そうした逐次改善が予測精度にどのような影響を及ぼすかを評価することにより、地震発生後に津波予測情報はどのように更新し得るかを明らかにする。

・ RTK-GPS データによる震源断層モデル推定手法の高度化

巨大な震源断層上での滑り分布が不均質である場合、沿岸の津波波高の地域分布も大きな影響をうけることが想定される。そこで、津波データが十分に波源推定に寄与できない地震発生直後に、RTK-GPS データだけから波源の空間的な不均質性についてどの程度の情報を抽出できるかの検討を進める。これは tFISH/RAPiD 開発の要素技術を発展させるものであり、目的が立ち次第、上記で開発するシステムに取り込む。

・ tFISH/RAPiD の性能評価

上記の開発では予測津波の再現性を通じた性能評価が不可欠である。そのために、東北地方太平洋沖地震の際に得られた実データ（これまでに使用したデータに加えて、最近回収された自己浮上式のオフライン海底水圧計のデータが使用可能）を用いた retrospective な解析を行う。

さらに、今後発生が危惧される、隣接域（千島海溝と日本海溝北部、あるいは日本海溝南部）でのプレート境界型巨大地震（津波地震を含む）やアウトライズ巨大地震について、シナリオを設定して、GPS 及び津波波形データを合成した上で、これに tFISH/RAPiD を適用した場合の予測性能評価シミュレーションを行う。これまでに蓄積された観測データにより GPS や津波観測データに含まれるノイズ特性の解明が進んでいることから、こうした影響を考慮に入れた現実的な評価を実施する。

（ 7 ） 計画期間中（平成 21 年度～25 年度）の成果の概要：

1 ) 巨大地震発生時における RAPID の可用性評価

GPS データを用いてリアルタイムに変位を得る手法として基線解析を用いる場合、安定した精度を確保しやすい反面、解析時には移動・基準両局のデータが必須であるため、巨大地震発生時に通信経路が遮断された場合、測位解が得られなくなる可能性がある。そこで、災害時の冗長系通信経路として衛星携帯電話回線を用いた場合の通信テスト及び測位解精度試験を行った。衛星携帯電話ネットワークには NTT DoCoMo によるワイドスターサービスを使用した。長期間のデータ安定性を確認するために、衛星携帯電話網を常時使用可能な状態（帯域占有サービス）で、それ以外のデータ通信を介在させない環境で、RTK-GPS 解析を行った。テストは、(1) 短基線 (8.9m) 静止状態での解析 (2012 DOY340-349)、(2) 長基線 (178.5km) 静止状態での解析 (2012 年 DOY352-355)、(3) 長基線移動状態での解析 (2012 年 DOY326-335)、の 3 種類について実施した。

(1) の短基線静止状態での解析で 10 日間にわたってほぼデータ欠落無く解析を継続することに成功し、データ欠落率は全データエポック中、0.003%となった。測位解精度も水平成分 7-10mm、上下成分 50-60mm (標準偏差) となり、衛星携帯電話を使ったネットワークのみを用いた RTK-GPS 解析が実用可能レベルにあることが分かった。(2) の長基線解析においてもデータ欠落率は 0.003%と低い状態にあるが、測位解精度は水平、上下成分でそれぞれ 50-90mm、170mm (標準偏差) と低くなったが、外部から超速報暦を取得することにより改善できる可能性がある。(3) の長基線移動状態では移動局を船舶として実験を行った。船の航路が安定している際には連続して RTK-GPS 解析時系列が得られるもの

の、比較的短い時間で船首方向が変わるような場合に通信経路が切断され、RTK-GPS 解析が不可能になる事象が頻発した。衛星携帯電話用のアンテナには静止衛星を追尾する仕様のものを用いたが、追隨が間に合わなかったか、通信アンテナが船上の遮蔽物に覆われたためと考えられる。

以上の実験の結果、RTK-GPS 解析を行うための通信網として衛星携帯電話ネットワークを基本的には利用可能なことが分かった。これは冗長系通信網として衛星携帯電話が利用可能であり、災害時に堅牢な通信システムを構築可能なことを意味する。一方で、通信コストが高額になること、帯域占有サービスが終了すること、など解決すべき課題も明らかとなり、リアルタイム PPP 等の別手段による地殻変動監視手段の確立が必要となろう。

## 2) RTK-GPS データによる震源断層モデル推定手法の高度化

震源断層即時推定時の初期情報(震源メカニズム)を RTK-GPS データのみで得ることを目的とし、本研究で開発を進めている RAPID アルゴリズムで得られた変位データを、Melagar et al. (2012) によって開発された GPS による永久変位から地震メカニズム及び規模を即時推定する手法 (fastCMT) に入力する(以下、RAPiD/fastCMT)ことを試みた。対象とした地震は、2011 年東北地方太平洋沖地震後に発生した茨城県沖地震 (M7.8) 及び、2011 年東北地方太平洋沖地震そのものである。fastCMT は任意のグリッドにおける最適な CMT 解を推定するアルゴリズムである。今回はプレート境界面上にグリッドを 0.2 度間隔で配置し、グリッド毎に最適な CMT 解を推定した。

茨城県沖地震 (Mw=7.8) による地震時変動データに適用した場合、地震後 166 秒後の段階 (RAPiD アルゴリズムで変位量推定が完了した段階) で Mw=8.0 という地震規模と低角逆断層型の地震メカニズムを推定することが可能であることが分かった。推定された地震規模は実際のそれよりも過大であるが、これは fastCMT アルゴリズムが点震源の仮定に基づいているためと考えられる。震源断層の有限性が無視できない場合、観測された地震時変位の空間パターンを説明するためにセントロイド位置が実際の位置より遠く沖合に決定され、その分規模が過大に求められていると解釈される。2011 年東北地方太平洋沖地震時のデータに RAPiD/fastCMT アルゴリズムを適用した場合、地震発生後 275 秒で CMT 解は推定可能であるが、この場合も、規模が Mw=9.5 と実際より大幅に過大評価されてしまう。しかし、両地震とも、メカニズム解の節面の方向についての推定結果はおおむね良好で、有限断層推定の初期情報として利用可能であると考えられる。

非プレート境界型地震の震源断層モデルを RTK-GPS データによって推定できるか検証するために、1933 年昭和三陸地震を対象とした数値実験を行った(図 1)。まず、相田(1977, BERI)による断層モデル (Mw8.1) から期待される GEONET 観測点における地震時変位を水平・上下の 3 成分で計算し、それらに対して RAPiD アルゴリズムで検知が可能と考えられる変位量(水平 60mm, 上下 130mm)に基づいたランダムノイズを加えることで地表変位データを作成した。そして、それら変位データから先験情報付きの非線形インバージョン (Matsu'ura and Hasegawa, 1987) によって震源断層を再推定した。この時、インバージョンの際の初期値による結果のばらつきを見るために震源断層の位置、深さ、断層の長さ、幅、傾斜角、滑り量の各初期値に対して大きなランダム誤差を与え、それら初期値にもとづくインバージョンを 300 回試行した。その結果、推定された断層面の内、観測値をよく説明するグループの多くが真の断層位置よりも陸側に系統的にずれた場所に推定されていることが分かった。一方で推定されたマグニチュードは観測値をよく説明した上位 130 モデルの平均値で Mw8.2 となり、おおむねその地震規模を再現できることが分かった。これらは Mw8.0 を超えるようなイベントであれば、アウターライズ域でもリアルタイム GPS データと RAPiD アルゴリズムによって変位を検知し、その震源断層の不確実性はあるものの推定可能であることを示す結果である。

## 3) RTK-GPS データを取り入れた tFISH (tFISH/RAPiD) の開発

今年度は、RAPiD により得られる広域の地震時変位データから推定された震源モデルを、津波波源の初期モデルとして採用し、沖合津波観測データを用いてこれを逐次的に改善する手法の開発を進めた。具体的には、時間経過とともに沖合観測点で得られる観測津波波形と、初期モデルから期待される計算津波波形との差を最も小さくするように、波形逆解析を用いて初期モデルを修正し、新たなモデルをもとに津波波形を計算して沿岸の津波予測を逐次更新する、というものである。このうち、津

波解析に関連する部分は tFISH アルゴリズムを活用した。

統合解析アルゴリズム ( tFISH/RAPiD ) の性能を調べるため、東北地方太平洋沖地震を対象として、仮想的な観測津波波形を用いた津波予測実験を行った。実記録を用いなかったのは、東北地方の太平洋沿岸の検潮所が巨大な津波に被災して津波記録が途切れており、tFISH/RAPiD で求めた予測津波波形の精度評価を行う際の比較対象となる観測波形が無いからである。まず、Satake et al. (2013) が滑りの時空間発展を考慮した津波波形逆解析で求めた震源過程を用いて津波波形を線形長波近似で数値計算し、それを仮想的な観測津波波形とみなした。この実験では、地震発生直後に得られる初期水位分布の初期モデルとしては、Ohta et al. (2012) が同地震の実記録に RAPiD を適用して求めた Mw 8.7 の矩形断層モデルを採用した。津波波形逆解析には、東北地方太平洋沖地震発生時に設置されていた沖合津波観測点 14 点での波形データを用いることが可能であるとした。予測精度の評価は、沿岸潮位観測点に直近する水深 100 m 地点における仮想的な観測津波波形と逆解析から得られた波源モデルから計算される予測津波波形を、その第一波部分で比較することを行った。

地震発生後 20 分には、釜石沖の海底水圧計 TM1 と TM2 で、短周期で大振幅の津波が観測される。これが予測に反映されることにより RAPiD 解析から得られた初期モデルに基づく津波予測が改善される。ただし、この時点では東北地方南部～関東地方の太平洋沿岸においては、十分に沖合津波観測情報が得られておらず、沖合津波記録だけを用いた従来の tFISH による津波予測では、福島県の相馬 ( SOM ) 付近に及ぶ南部にまで 5 m 近い大津波が襲来する危険性があることを把握できていない。このように、tFISH/RAPiD を適用することで、沖合津波計と陸上 GPS データの情報の双方を有効に活用した津波即時予測が可能になることが示された。

#### 4 ) tFISH/RAPiD の性能評価

東北地方太平洋沖地震時に宮城県沖に展開されていた自己浮上式海底圧力計 ( OBP ) で得られた波形データを加えて tFISH による津波予測を試行した。震源域内での海底圧力データは地震に伴う海底の永久変位の影響を受け、東北地方太平洋沖地震の際にはその影響が顕著であるため、波源推定に基づく津波即時予測に有効な情報をもたらすことが期待される。

地震発生後 15 分には、複数の OBP で津波第一波の押し波ピークもしくは永久変位に伴う波形オフセットを観測される。これらに tFISH を適用することで、常時沖合観測点のみを用いた場合 ( 前節参照 ) よりも約 5 分早く、波源推定と津波予測が大幅に改善される。特に、地震後 25-30 分で巨大津波が押し寄せた三陸海岸については、波高 10 m を超えるような巨大津波の到来を猶予時間 10 分で予測できている。また、tFISH/RAPiD を適用すると、前節の数値実験と同様、こうした特長を保持しつつ、沖合津波観測点のほとんど無い東北地方南部～関東地方の太平洋沿岸にも巨大津波の恐れがあることを把握できるようになる。このように、tFISH および tFISH/RAPiD は、多数の沖合津波観測点がある場合も、それらのデータを有効活用して、津波予測の早期改善を実現できる性能を持つことが示された。

一方で、海底面の傾斜が急峻な地域では、水平方向の海底変位によっても海水面変位が生じうる。東北地方太平洋沖地震による津波の生成過程には、そうした影響が無視できないことが既に指摘されている ( たとえば、Satake et al., 2013 )。現状の tFISH では、海底圧力は海水面変位と海底面の鉛直変位だけに依存する定式化をとっているため、急峻な海底傾斜に設置された OBP のデータを tFISH による予測に活用すると、それに起因する波源モデルにバイアスが生じることが明らかとなった。広域に展開される海底ケーブルシステムのデータを tFISH に活用するためには克服すべき重要な課題であり、今後継続した検討が必要である。

#### 5 ) 移行前・旧課題での成果

・2003 年十勝沖地震に伴う津波について、陸上 GPS 観測から震源断層モデルを推定し、それをもとに津波波形を計算することで津波予測を行える可能性があることを示した。さらに、それを初期値とし、沖合津波観測波形を使った差分逆解析を行うと、予測結果を逐次改善可能であることが示された ( 平成 21 年度 )。

・tFISH における沖合津波波形解析に GPS 波浪計で得られるデータを加えた場合の効果を、1896 年明治三陸地震津波を模した数値実験により検討し、GPS 波浪計のデータを用いることで沿岸での津波の

予測精度の向上に有効であることが確かめられた。tFISHでは、波浪計のデータが波源モデルの改善に寄与するため、津波予測精度の向上は、波浪計の設置地点近傍だけでなく広範囲にわたる（平成22年度）。

・ケーブル式海底津波計で得られる海底圧力時系列のノイズ特性に関する検討を行った。小振幅津波と紛らわしい圧力変化が、海底での温度変化に起因して生じうることと、それを経験的手法により補償・低減することが可能であることを示した（平成22年度）。

・東北地方太平洋沖地震時の津波を対象とした retrospective な解析により、RAPiD による地表変位の即時検知とそれによる断層モデルの推定から、高い再現性で津波予測が地震発生後6分後に提供できたことが示された（平成23年度）。

(8) 平成25年度の成果に関連の深いもので、平成25年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

川元智司, 宮川康平, 山口和典, 西村卓也, 宮原伐折羅, 古屋智秋, 酒井和紀, 畑中雄樹, 根本悟, 辻宏道, 太田雄策, 日野亮太, 木戸元之, 飯沼卓史, 藤本博己, 三浦哲, 2013 新しいGEONETリアルタイム解析システムの開発, 日本地球惑星科学連合2013.

Ohta, Y., S. Miura, R. Hino, T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Kawamoto, K. Miyagawa, T. Yahagi, K. Yamaguchi, and H. Tsuji, and T. Nishimura, 2013, Real-time crustal deformation monitoring based on RTK-GPS: Application to 2011 Tohoku earthquake and its improvement for implementation to actual GPS network, IAG Scientific Assembly 2013.

山本淳平, 長田幸仁, 太田雄策, 平原 聡, 出町知嗣, 中山貴史, 立花憲司, 佐藤俊也, 木戸元之, 藤本博己, 日野亮太, 三浦 哲, 内田雅之, 2013, 衛星通信を活用したリアルタイムGPS解析 - 地上通信障害時に地殻変動を実時間で把握するために -, 測地学会誌 (受理済)。

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

日野亮太・木戸元之・太田雄策・飯沼卓史  
他機関との共同研究の有無：有  
対馬弘晃（気象研）

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター  
電話：022-225-1950  
e-mail：zisin-yoti@aob.gp.tohoku.ac.jp  
URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

(11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：日野亮太  
所属：東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

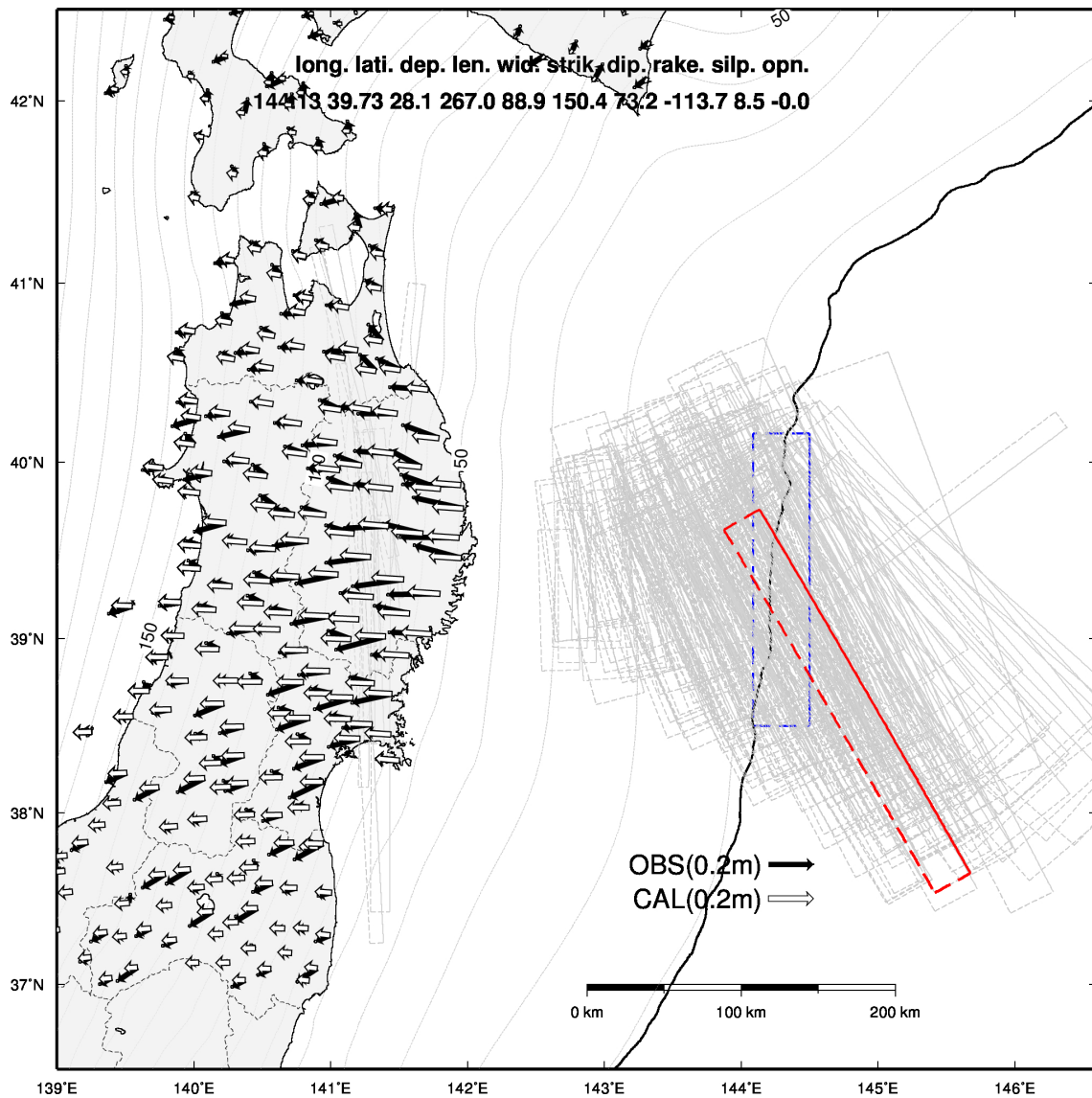


図1 . 1933年昭和三陸地震を模した断層モデルによる地表変位場の逆解析の結果

1933年昭和三陸地震から期待される地表面変位を相田(1977, BERI)の断層モデル(図中青い矩形)から計算し、それにランダムノイズを加えたものを黒矢印で示し、それらから初期値を様々に変化させて推定した断層モデルを灰色の矩形で示す。赤い句形断層は、全てのモデルの中でもっとも観測値をよく説明したモデルを示す。

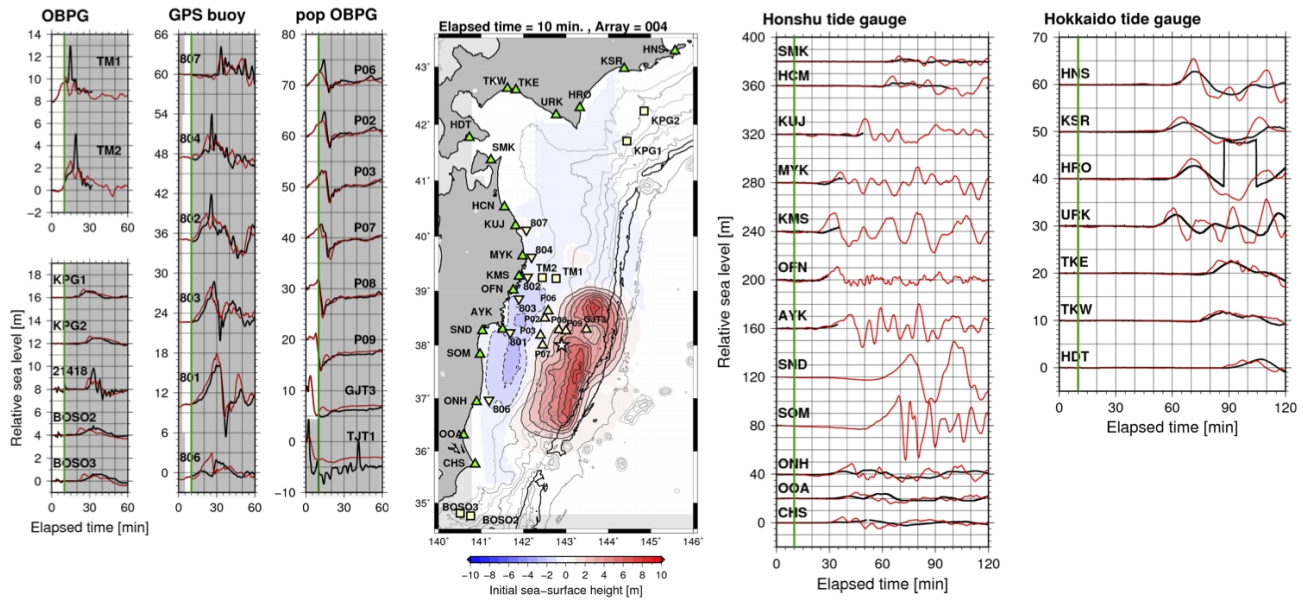


図2．自己浮上式海底圧力計のデータを加えて tFISH/RAPiD による津波予測を行った結果（地震発生後10分）．東北沖地震発生時に震源域の海底に展開されていた自己浮上式海底圧力計で捉えられた津波波形を，ケーブル式津波計，GPS 波浪計データとともに用いて，tFISH/RAPiD 津波予測アルゴリズムに活用した場合の津波予測結果．左側に津波波形記録を示し，中央の地図はその逆解析から推定された初期海面高分布．右側は本州および北海道の沿岸観測点での観測波形（黒）と予測波形（赤）．