

3. 3 津波及び強震動の予測

3. 3. 1 津波予測

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 8か年の年次実施計画
 - 1) 平成25年度
 - 2) 平成26年度
 - 3) 平成27年度
 - 4) 平成28年度
 - 5) 平成29年度
 - 6) 平成30年度
 - 7) 平成31年度
 - 8) 平成32年度
- (e) 平成25年度業務目的

(2) 平成25年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
 - 1) 2011年東北地方太平洋沖地震の津波波形を用いた日本海沿岸での津波波形の再現
 - 2) 地形データ・計算コードの整備と過去の津波痕跡高を用いた検証
 - 3) 津波断層モデルの検討
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 平成26年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

3.1 津波予測

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京大学地震研究所	教授	佐竹健治
	特任研究員	室谷智子

(c) 業務の目的

陸域・海域での構造調査や古地震・古津波・活構造調査などに基づいて得られた断層モデルから日本海沿岸における津波シミュレーションにより日本沿岸での津波波高を予測する。個々の断層モデルに基づく確定論的シナリオモデルの他に、各地に影響を及ぼす可能性のある断層からのシナリオを組み合わせた確率論的な津波予測も行う。

(d) 8か年の年次実施計画

1) 平成25年度：

日本海東縁部における既知の断層や津波波源モデルなどを収集・検討し、本プロジェクトで津波危険度評価の対象とする海底活断層・沿岸伏在断層などを選定する。また、確定論的なシナリオ型シミュレーション、それを総合して断層ごとに発生確率を与えて総合する確率論的津波予測を行うための準備を行う。

2) 平成26年度：

北陸沖海域を中心とする海底活断層・沿岸伏在断層について、シナリオ型津波シミュレーションを実施する。また、当該沿岸に影響を及ぼす断層をリストアップし、確率論的津波予測のための準備を進める。

3) 平成27年度：

北陸沖海域を中心とする海底活断層・沿岸伏在断層について、海域構造調査や海陸統合構造調査により得られた断層モデルに基づき、引き続きシナリオ型津波シミュレーションを実施する。また、当該沿岸に影響を及ぼす断層について、津波発生確率の推定を行い、確率論的な津波波高予測を行う。

4) 平成28年度：

山陰-九州沖海域を中心とする海底活断層・沿岸伏在断層について、海域構造調査や海陸統合構造調査により得られた断層モデルに基づき、シナリオ型津波シミュレーションを行う。また、当該沿岸に影響を及ぼす断層をリストアップする。

5) 平成29年度：

山陰・九州沖海域を中心とする海底活断層・沿岸伏在断層について、海域構造調査や海陸統合構造調査により得られた断層モデルに基づき、引き続きシナリオ型津波シミュレーションを実施する。また、当該沿岸に影響を及ぼす断層について、津波発生確率の推定を行い、確率論的な津波波高予測を行う。

6) 平成30年度：

北海道・東北北部海域を中心とする海底活断層・沿岸伏在断層について、海域構造調査や海陸統合構造調査により得られた断層モデルに基づき、シナリオ型津波シミュレーションを行う。また、当該沿岸に影響を及ぼす断層をリストアップする。

7) 平成31年度：

北海道・東北北部海域を中心とする海底活断層・沿岸伏在断層について、海域構造調査や海陸統合構造調査により得られた断層モデルに基づき、引き続きシナリオ型津波シミュレーションを実施する。また、当該沿岸に影響を及ぼす断層について、津波発生確率の推定を行い、確率論的な津波波高予測を行う。

8) 平成32年度：

本プロジェクトで再検討した断層モデルを用いて、近接する海底活断層あるいは沿岸伏在断層の連動破壊を想定した津波シミュレーションを行い、低頻度の巨大地震も想定した沿岸津波高の評価を行う。

(e) 平成25年度業務目的

他業務等との連携により日本海東縁部における既知の断層や津波波源モデルなどを収集・検討し、本プロジェクトで津波危険度評価の対象とする海底活断層・沿岸伏在断層などを選定し、日本海沿岸域での津波高等を予測するための津波シミュレーションに用いる津波波源モデルを設定する。また、断層やそのパラメーターを特定した確定論的なシナリオ型シミュレーションや、断層ごとに発生確率を与えて総合する確率論的津波予測を行うための準備として、平成25年度は日本海全域を含む30秒(900m)メッシュ、日本周辺の領域を10秒(300m)メッシュ、日本沿岸域を2秒(60m)メッシュ、1秒メッシュ(30m)とする海底地形データと、それらを接続して利用するための計算コードの整備を行い、過去に日本海沿岸域で観測された津波波形や調査された津波痕跡高との比較、検証を行う。

(2) 平成25年度の成果

(a) 業務の要約

1) 2011年東北地方太平洋沖地震による日本海で観測された津波波形を用いて、日本海沿岸での津波波形の再現を行い、日本海側での津波シミュレーションを行う上での解析手法

や地形データの検証を行った。

2) 津波予測シミュレーションを行うため、日本海全域は 30 秒 (900m) メッシュ、M7000 シリーズの海底地形データが存在する日本周辺の領域は 10 秒 (300m) メッシュ、日本沿岸域は 2 秒 (60m) メッシュと 1 秒メッシュ (30m) とする海底地形データの整備と 1 秒メッシュの陸域地形データの整備と、これらのデータを用いるための計算コードの整備を行った。以上の地形データと計算コードを用いて、1983 年日本海中部地震と 1993 年北海道南西沖地震の日本海沿岸の津波痕跡高とシミュレーション値との比較、検証を行った。

3) 他業務等との連携を図り、日本海東縁部における既知の断層や津波波源モデルなどを収集・検討し、本プロジェクトで津波危険度評価の対象とする海底活断層・沿岸伏在断層などを選定し、津波波源モデルの検討を開始した。

(b) 業務の成果

1) 2011 年東北地方太平洋沖地震の津波波形を用いた日本海沿岸での津波波形の再現

2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9) の発生時に、日本やロシアの日本海沿岸域での検潮記録は、地震発生数分後から微小変動を記録した。特に顕著であったのは、深浦・佐渡・富山・能登(気象庁)や粟島(海上保安庁)、ロシア沿岸の Rudnaya Pristan、Preobrazhenie、Nakhodka¹⁾であった。しかし、この地震によって太平洋側で発生した津波が津軽海峡を抜けて日本海沿岸域で観測されるまでには、約 2~3 時間かかる。これらの検潮所の津波波形を再現するため、Satake et al. (2013)²⁾の断層モデルから Okada(1985)³⁾の式によって地殻変動を求めたものを初期条件として津波波形を計算し、観測波形との比較を試みた。

JTOPO30 による 30 秒グリッド (900m) の海底地形データを用いて地殻変動の鉛直成分のみから計算した津波波形は、地震による日本海での上下変動自体が小さかったため(図 1(a))、ほとんど変動を示さなかった(図 1(b))。そこで日本周辺の検潮所に関しては、M7000 シリーズからさらに細かい 5 秒グリッド (150m) の海底地形データを作成し(図 2(a))、さらに水平成分の変動による鉛直方向への変動の寄与⁴⁾を考慮したところ、地震発生直後からの微小変動が計算された(図 2(b))。30 秒グリッドデータによる上下動のみの地殻変動から計算された津波波形よりは波形の再現は良くなったが、地震発生直後から約 10 分間続く周期約 1~2 分の短周期の変動は再現できなかった。さらに細かい地形データを用いることで再現性は向上する可能性はあるが、この周期約 1~2 分の短周期の変動は、検潮儀が地震波を捉えていると考えられる。そこで、ローパスフィルターによって観測水位変動の短周期成分を落として比較すると、観測波形と計算波形は良く一致した(図 2(c))。

ロシア沿岸域の検潮所は、震源域からの距離が 500km 以上とかなり離れているため、半無限媒質を用いて直交座標系³⁾(図 3(a))で計算するのではなく、層構造を考慮して球座標系で求めた地殻変動⁵⁾(図 3(b))を用いて津波波形を計算し、観測波形との比較を試みた。しかし、半無限媒質による計算波形と大差はなかった(図 3(c))。ロシア沿岸での波形の再現には、細かいグリッドの海底地形や、検潮儀が設置されている湾等の形状などを考慮する必要があると考えられる。

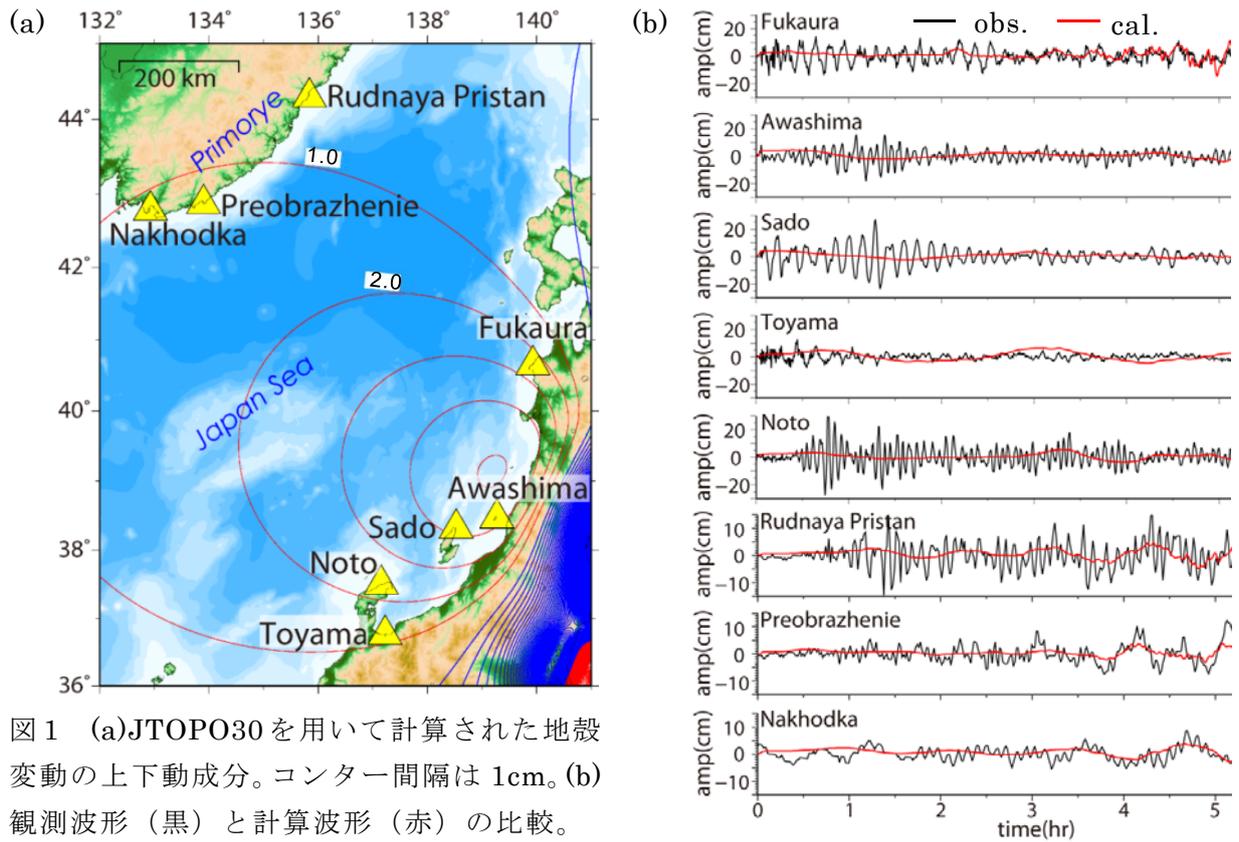


図1 (a)JTOPO30を用いて計算された地殻変動の上下動成分。コンター間隔は1cm。(b)観測波形(黒)と計算波形(赤)の比較。

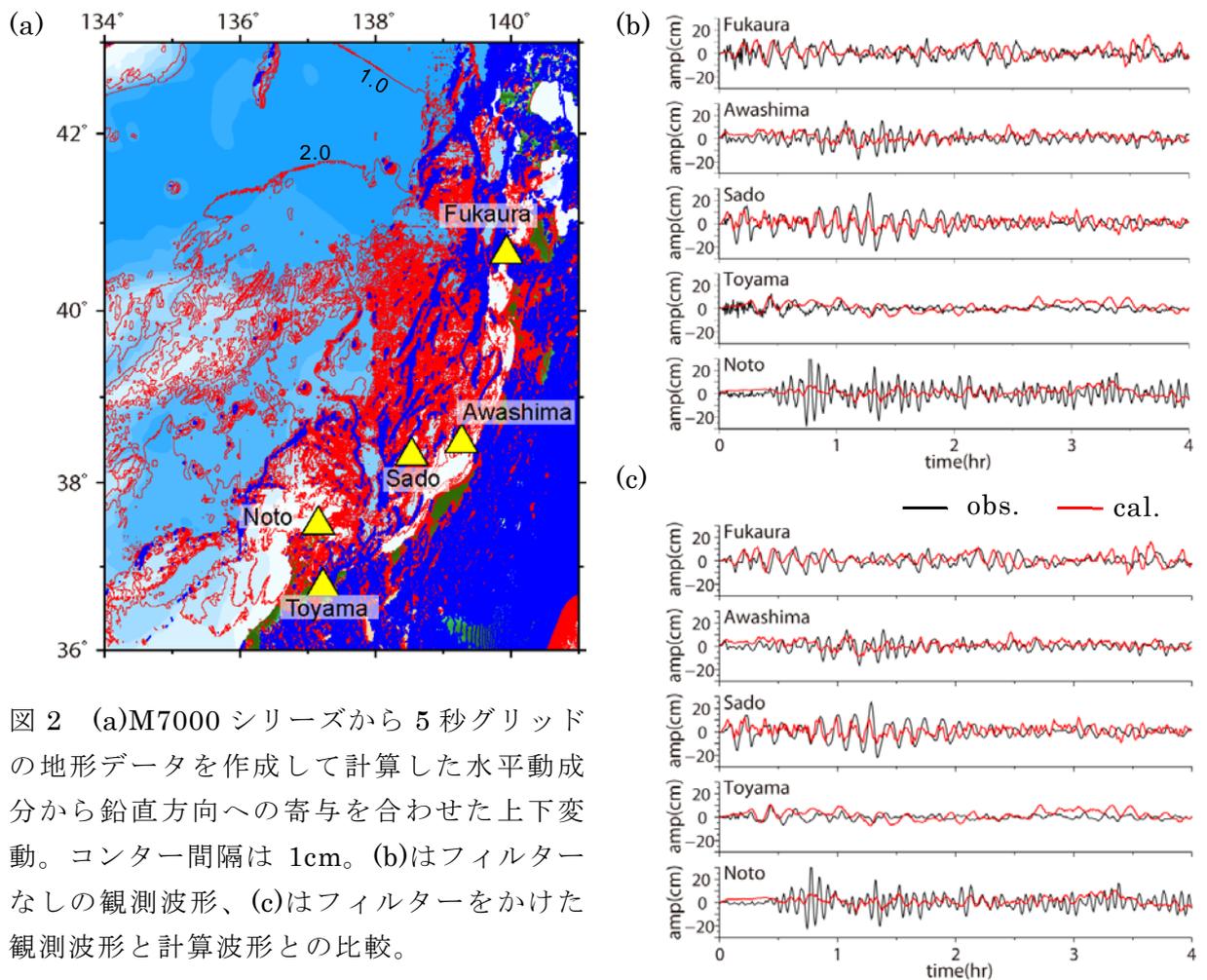


図2 (a)M7000シリーズから5秒グリッドの地形データを作成して計算した水平動成分から鉛直方向への寄与を合わせた上下変動。コンター間隔は1cm。(b)はフィルターなしの観測波形、(c)はフィルターをかけた観測波形と計算波形との比較。

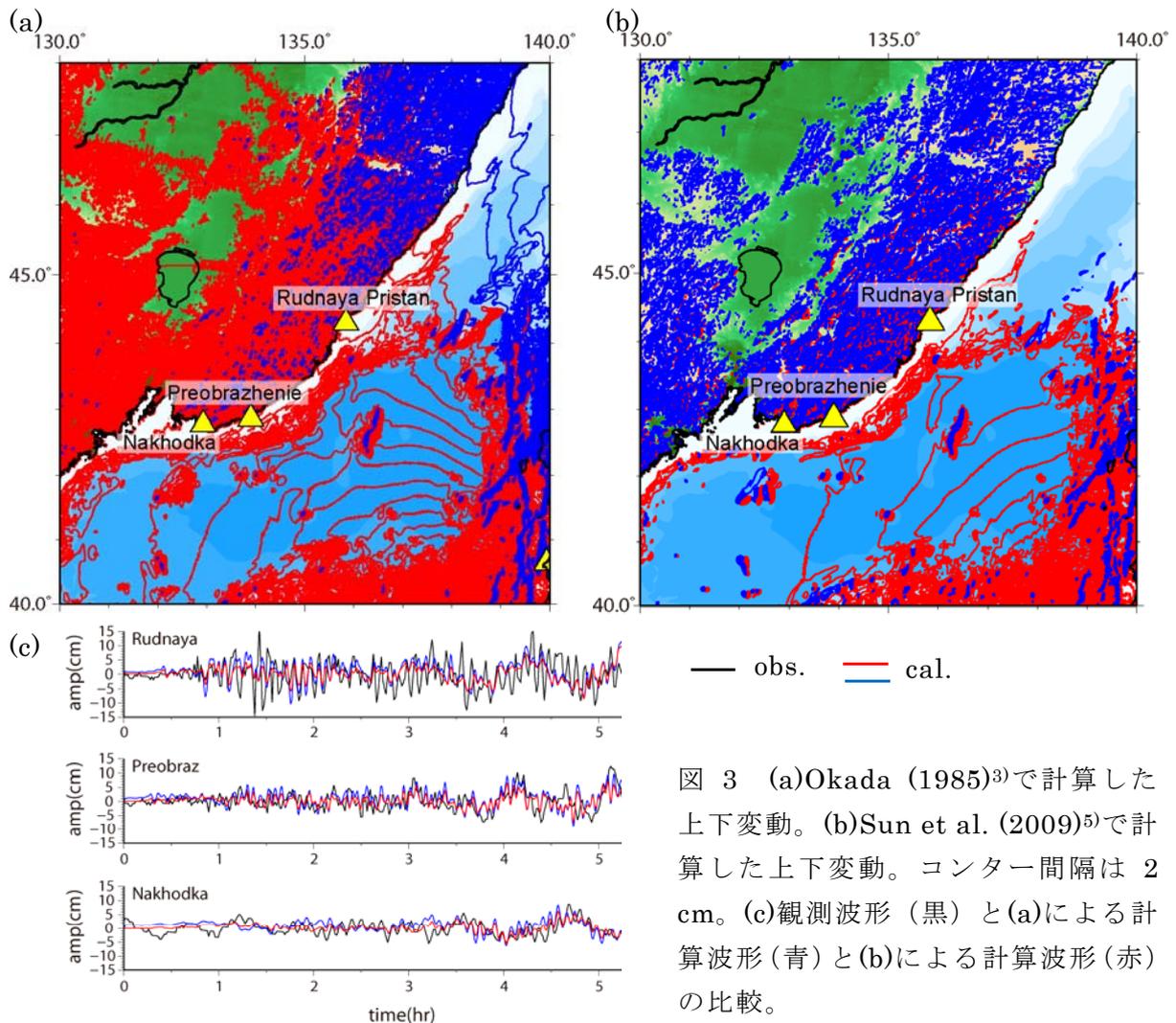


図 3 (a)Okada (1985)³⁾で計算した上下変動。(b)Sun et al. (2009)⁵⁾で計算した上下変動。コンター間隔は 2 cm。(c)観測波形(黒)と(a)による計算波形(青)と(b)による計算波形(赤)の比較。

2) 地形データ・計算コードの整備と過去の津波痕跡高を用いた検証

日本海では太平洋側に比べて大地震の発生頻度は低いため、過去の津波被害から将来発生する地震による津波被害を想定することは情報が少ないため難しい。そのため、断層やそのパラメーターを特定した確定論的なシナリオ型シミュレーションによる津波予測だけでなく、それらを総合して断層ごとに発生確率を与えて総合する確率論的津波予測が期待される。そのための準備として、平成 25 年度は地形データと計算コードの整備とその検証を行った。作成した地形データは、日本水路協会や国土地理院などから公表されているデジタルデータや国土地理院の基盤地図情報による海岸線データを用いた次の A~D の 4 つの領域である (図 4)。

(A) 30 秒メッシュ領域：900m メッシュ領域。JTOPO30v2 および GEBCO_08 を用いた日本海を囲む東経 125°~145°、北緯 32°~53° を最外側の領域とした。

(B) 10 秒メッシュ領域：300m メッシュ領域。M7000 シリーズの日本海沿岸域を含む 10 領域に対して、データ密度が小さい箇所は JTOPO30v2 によって補間した。

(C) 2 秒メッシュ領域：60m メッシュ領域。日本海やや沖合と沿岸域に対して、1 秒メ

メッシュを囲むように約 $0.4^\circ \times 0.4^\circ$ 範囲を設定し、遡上対象とするために陸域データも国土地理院による 10m 標高の基盤地図データを用いてモデル化した。

(D) 1 秒メッシュ領域：30m メッシュ領域。日本海沿岸域に対して、約 $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ 領域を設定した。遡上対象領域とするために陸域データもモデル化し、海岸防波堤などの構造物はメッシュ間を隔てる壁（高さ無限大）として表現し、地形データからは削除した。

奥尻島、富山湾、平戸島を例に、作成した各領域に対する地形モデルの 2 次元コンター図と 1 秒メッシュでの三次元的鳥瞰図を図 5~7 に示す。各色の枠線は、(緑) 10 秒メッシュ作成領域、(黄) 2 秒メッシュ作成領域、(赤) 1 秒メッシュ作成領域を示す。

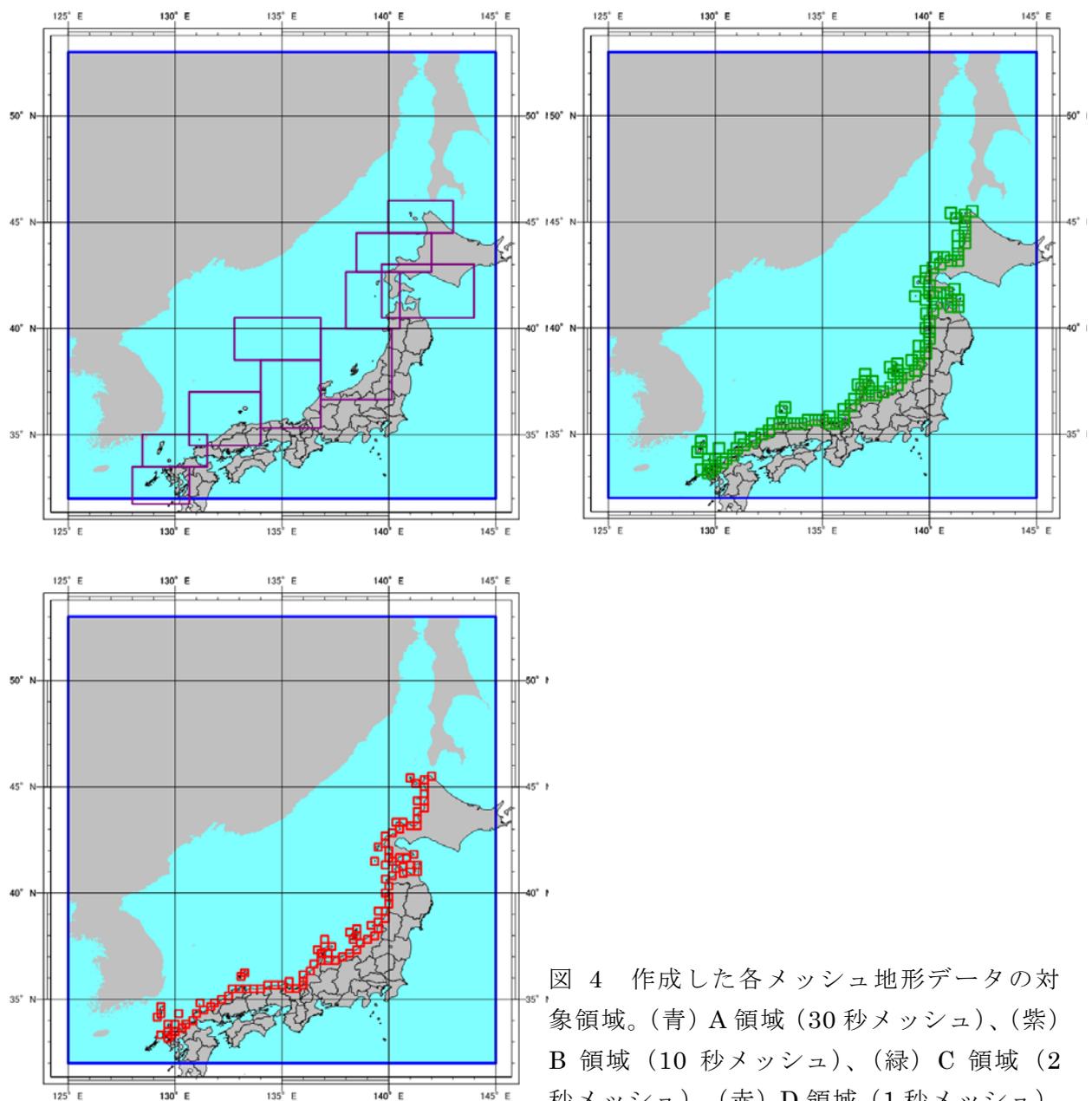


図 4 作成した各メッシュ地形データの対象領域。(青) A 領域 (30 秒メッシュ)、(紫) B 領域 (10 秒メッシュ)、(緑) C 領域 (2 秒メッシュ)、(赤) D 領域 (1 秒メッシュ)。

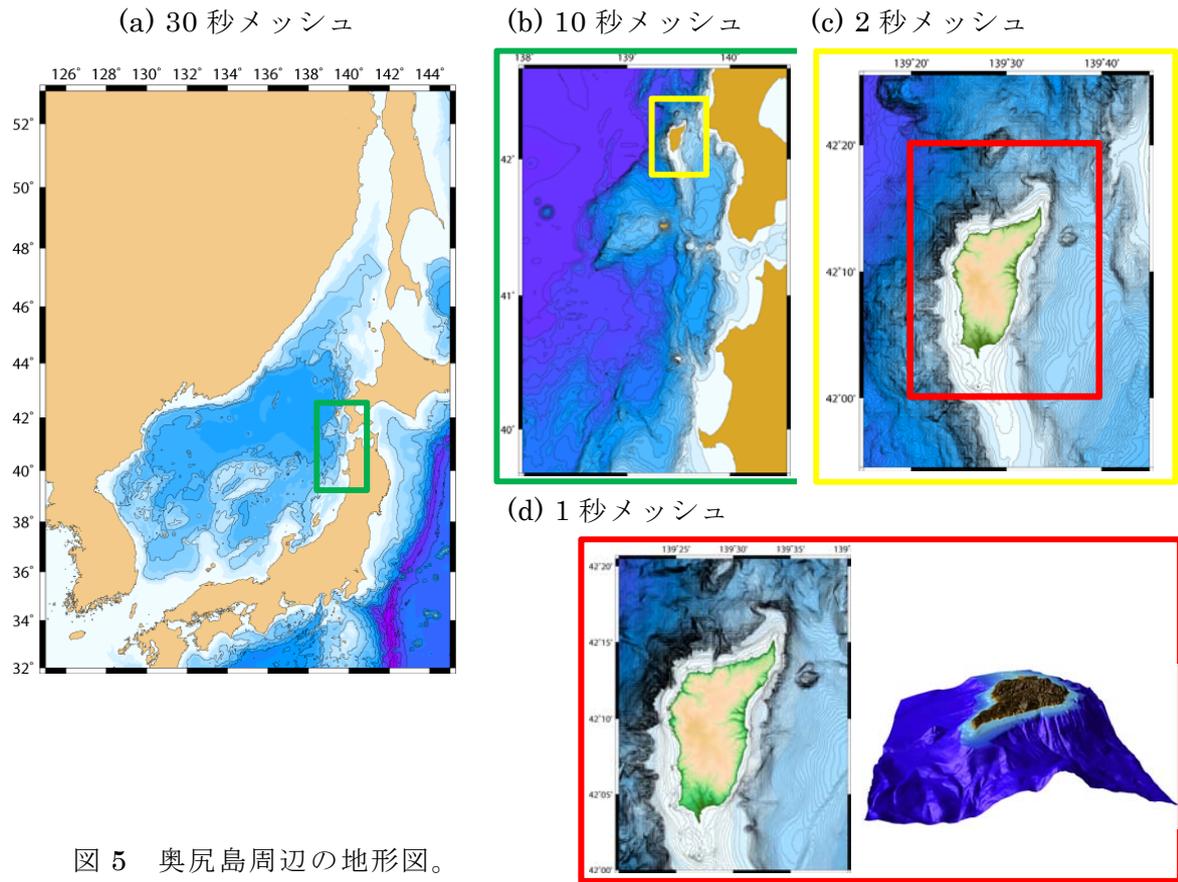


図 5 奥尻島周辺の地形図。

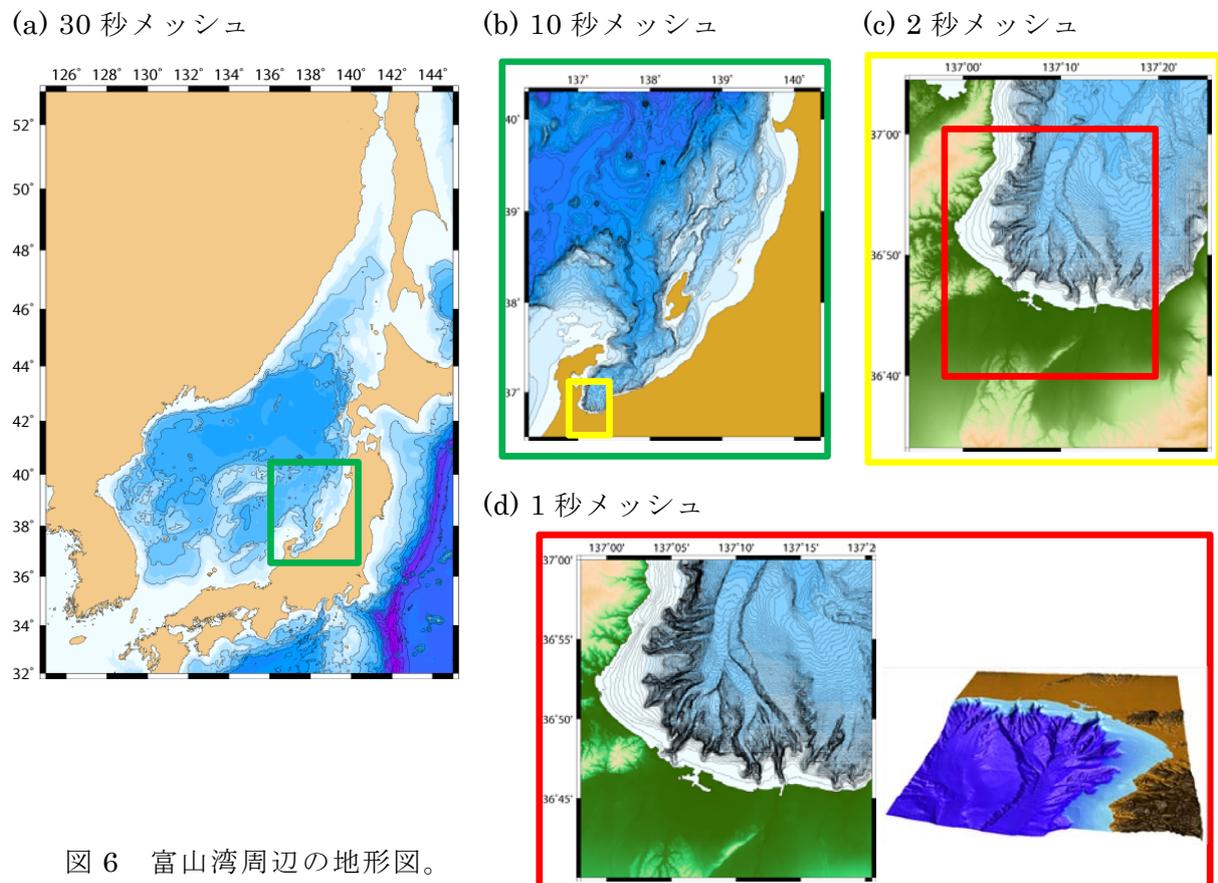
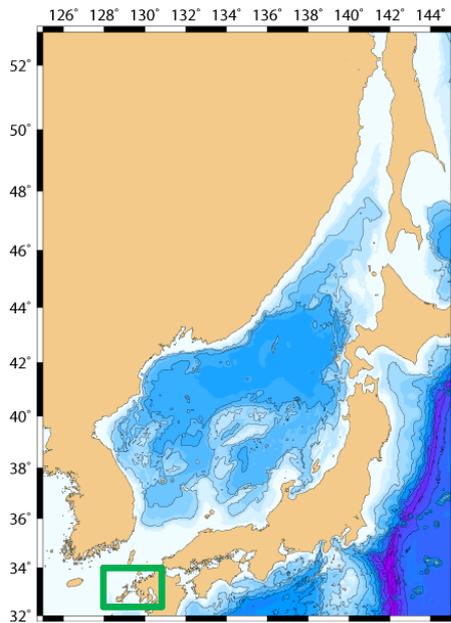
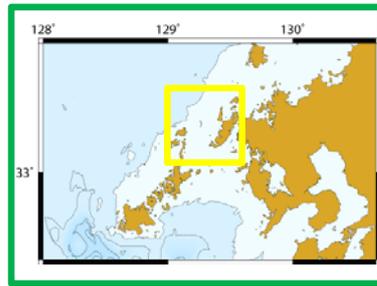


図 6 富山湾周辺の地形図。

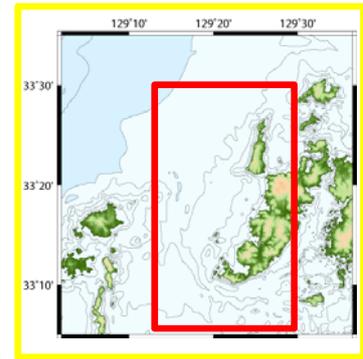
(a) 30 秒メッシュ



(b) 10 秒メッシュ



(c) 2 秒メッシュ



(d) 1 秒メッシュ

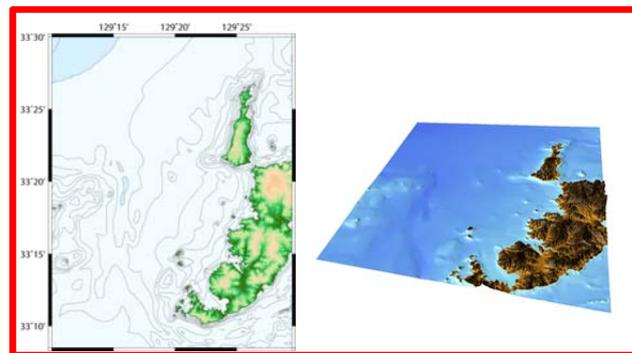


図 7 平戸島周辺の地形図。

ここで整備した地形モデルは最も格子間隔が小さい領域で 1 秒間隔である。防波堤など 1 秒間隔の計算格子では表現することが困難な海岸線近傍の人工構造物については、計算格子境界で越流判定を行い、高さ無限大の壁として表現して流速を制御することで海岸構造物をモデル化した。海岸構造物の設定の流れを図 8 に示す。地形モデル作成時の元データに人工構造物は含まれているため、図 8(a)の左図のように陸海が不連続な箇所が生じる。今後防波堤等の高さの情報が得られた際、高精度の津波高・浸水予測のため越流計算も実施可能となるよう、この陸域データを一度除去し（図 8(a)右）、計算格子境界に入力データとして別ファイルに整備することとした（図 8(b)）。

(a)



(b)

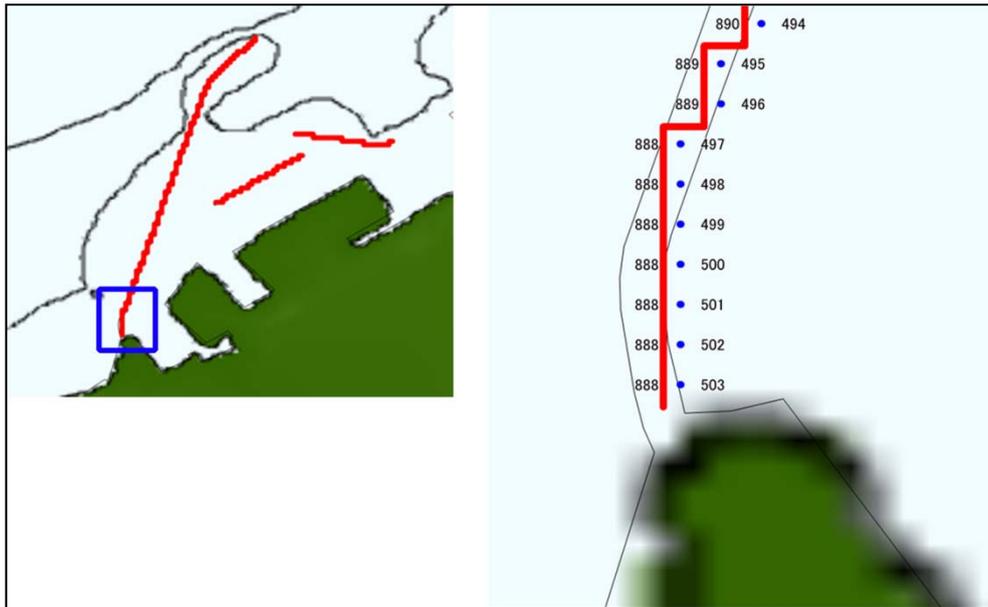


図 8 海岸構造物の設定例。

また、これらのデータを用いるための計算コードの整備を行い、1983年日本海中部地震と1993年北海道南西沖地震を対象として津波高のシミュレーションを実施して日本海沿岸での津波痕跡値と比較することにより、地形データと計算コードの検証を行った。使用する津波の痕跡記録については東北大学・原子力安全基盤機構による津波痕跡データベース(<http://tsunami-db.irides.tohoku.ac.jp/tsunami/kiyaku.php>)よりダウンロードし、痕跡の種別、位置、精度(信頼度)により分類した。図9に各地震の津波波源に対応する日本全域の痕跡地点、図10に奥尻島における両地震の津波痕跡地点を示す。1983年日本海中部地震の津波波源モデルは相田(1984)⁶⁾のモデル10、1993年北海道南西沖地震の波源モデルはTanioka et al. (1995)⁷⁾を採用した。各モデルのパラメーターを表1、2、モデル位置とその初期水位分布を図11、12にそれぞれ示す

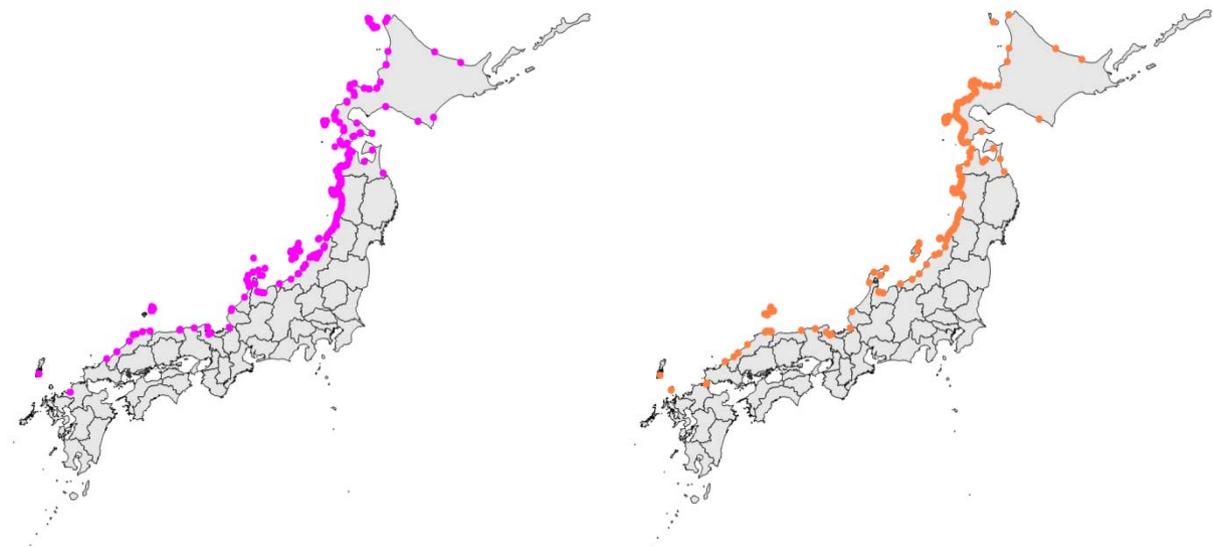


図 9 1983年日本海中部地震(左)と1993年北海道南西沖地震(右)の津波痕跡地点。

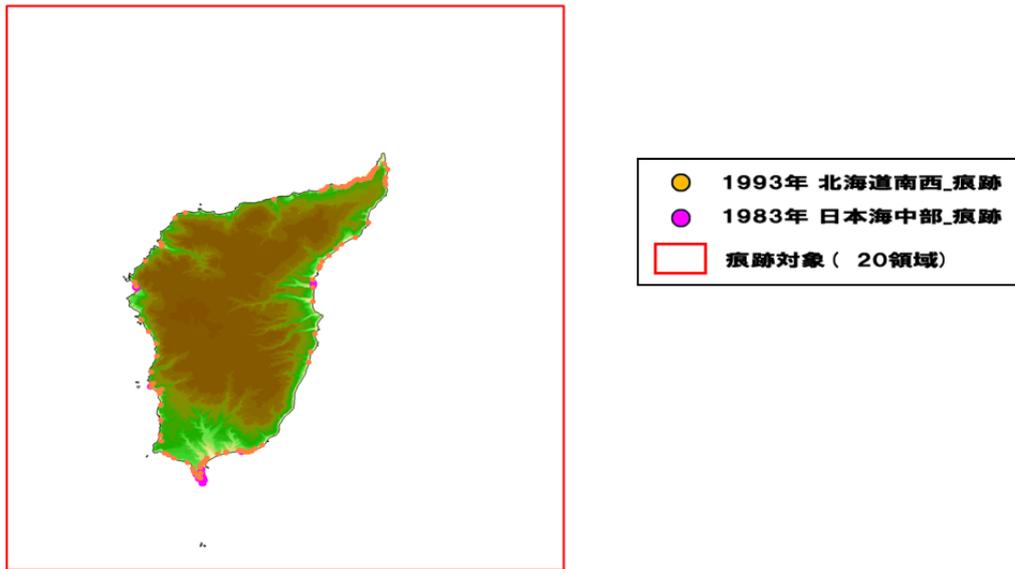


図 10 奥尻島における 1983 年日本海中部地震(26 地点)と 1993 年北海道南西沖地震(105 点) の津波痕跡地点。

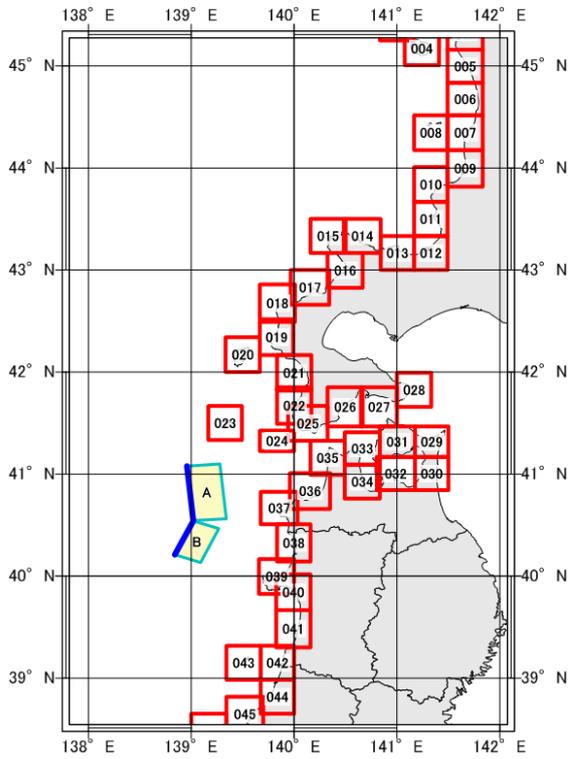
表 1 1983 年日本海中部地震の津波波源断層パラメーター

Name	Length (km)	Width (km)	Depth (km)	Strike (°)	Dip (°)	Us (m)	Ud (m)
A	60	30	3	355	25	0.54	3.0
B	40	30	2	22	40	0	7.6

表 2 1993 年北海道南西沖地震の津波波源断層パラメーター

Name	Length (km)	Width (km)	Depth (km)	Strike (°)	Dip (°)	Us (m)	Ud (m)
A	27	40	0	334.25	30	0	2.26
B	25	30	0	207.25	30	0	0.52
C	25	30	0	207.08	30	0	6.07
D	27	30	0	154.66	60	0	3.10
E	35	30	0	154.85	60	0	3.79

(a)



(b)

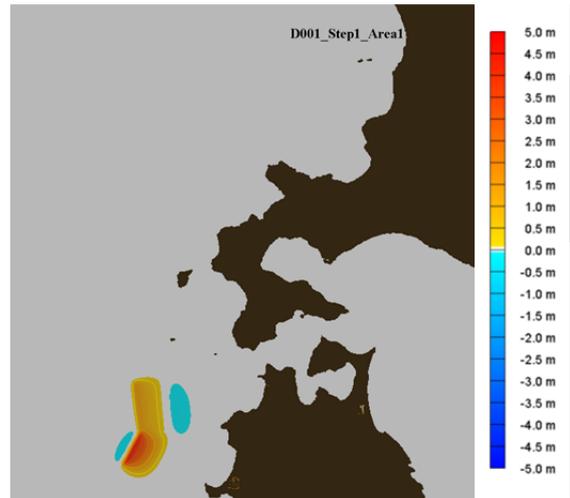
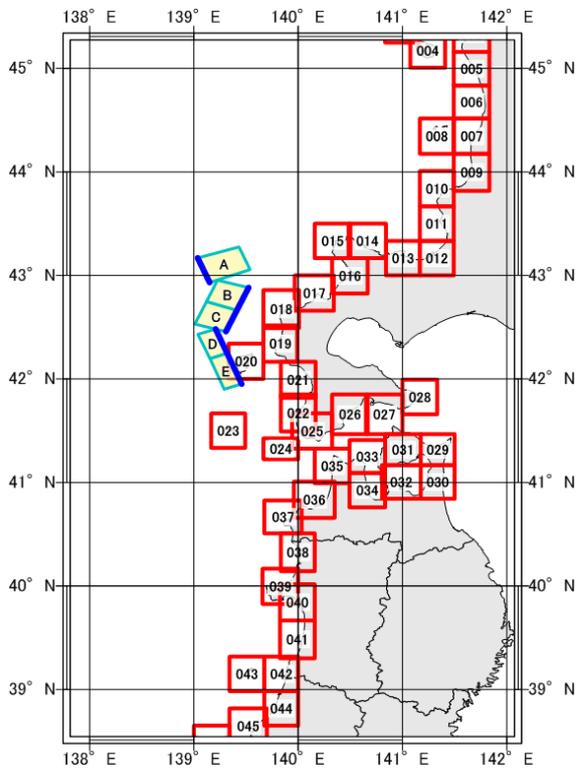


図 11 1983 年日本海中部地震の(a)波源断層位置と(b)初期水位分布。

(a)



(b)

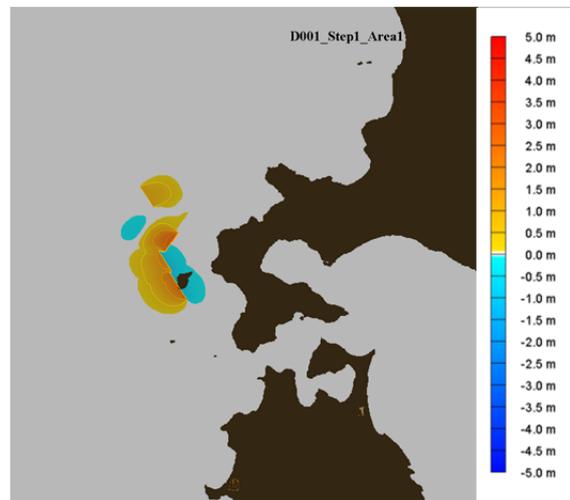


図 12 1993 年北海道南西沖地震の(a)波源断層位置と(b)初期水位分布。

日本海沿岸の津波高を再現するための津波シミュレーションは、30秒メッシュ、10秒メッシュ、2秒メッシュ、1秒メッシュの地形データを組み合わせて解析を行った。表3に各解析領域での解析条件を示す。領域間の接続が正しく設定されていることを確認するため、奥尻島（図13）と能代沖（図14）で計算した1983年日本海中部地震、1993年北海道南西沖地震の津波水位時系列変化を示す。津波到達直後数十分程度はどのメッシュでの計算結果も良く一致している。しかし、時間が経つほど細かい地形データの影響が水位に影響してくることが分かった。メッシュサイズが大きいまま計算すると、かなり過大評価となる可能性がある。

各地震に対して得られた日本海全域の最大水位分布と奥尻島、能代周辺の拡大図を図15に示す。また、地形データと計算コードの妥当性を確認するため、収集した痕跡データ位置での最大水位を抽出して以下に示す幾何平均、幾何標準偏差 κ を算出し、痕跡高と計算値を比較した結果を図16、17にそれぞれまとめた。ここで比較対象とした痕跡記録は、信頼度A以上の水位0.5m以上の記録とした。また、緯度経度が全く同じ痕跡記録が複数ある場合は1点に絞って評価を行った。その結果、幾何平均値Kは1983年日本海中部地震と1993年北海道南西沖地震でそれぞれ1.06、1.50、幾何標準偏差 κ はそれぞれ1.57、1.66となり、1993年北海道南西沖地震の奥尻島での一致があまり良くはないが、全体的には津波シミュレーションによって痕跡高の傾向を再現できた。

$$K_i = (\text{地点}i\text{の痕跡高}) / (\text{地点}i\text{の計算値})$$

$$\log K = \frac{1}{n} \sum \log K_i$$

$$\log \kappa = \left[\frac{1}{n} \sum (\log K_i - \log K)^2 \right]^{1/2}$$

K:幾何平均値

κ :幾何標準偏差

表3 各メッシュ領域での解析条件

項目		値
津波波源立ち上がり時間[sec]		0.2
マニングの粗度係数[m ^{1/3} ・sec]		0.025
支配方程式	格子間隔 30 秒領域	線形長波方程式
	格子間隔 10 秒領域	線形長波方程式
	格子間隔 2 秒領域	非線形長波方程式(海底摩擦項含む)
	格子間隔 1 秒領域	非線形長波方程式(海底摩擦項含む)
最小水深[m]	格子間隔 30 秒領域	10.0
	格子間隔 10 秒領域	10.0
	格子間隔 2 秒領域	0.1
	格子間隔 1 秒領域	0.1

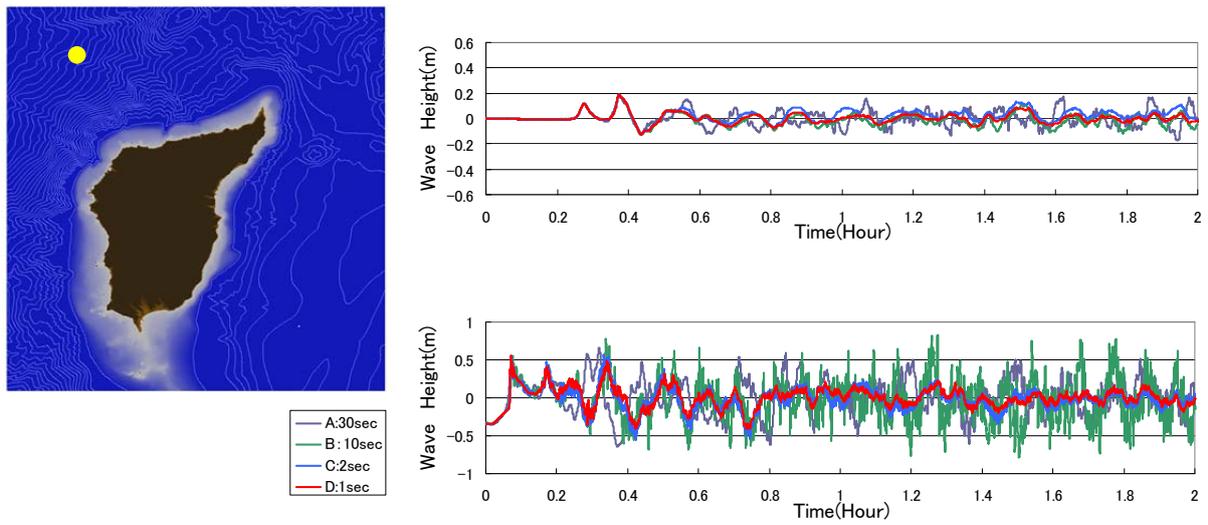


図 13 各メッシュデータを用いて計算した 1983 年日本海中部地震（上）と 1993 年北海道南西沖地震（下）による奥尻島沖（黄色丸）での津波水位時系列。

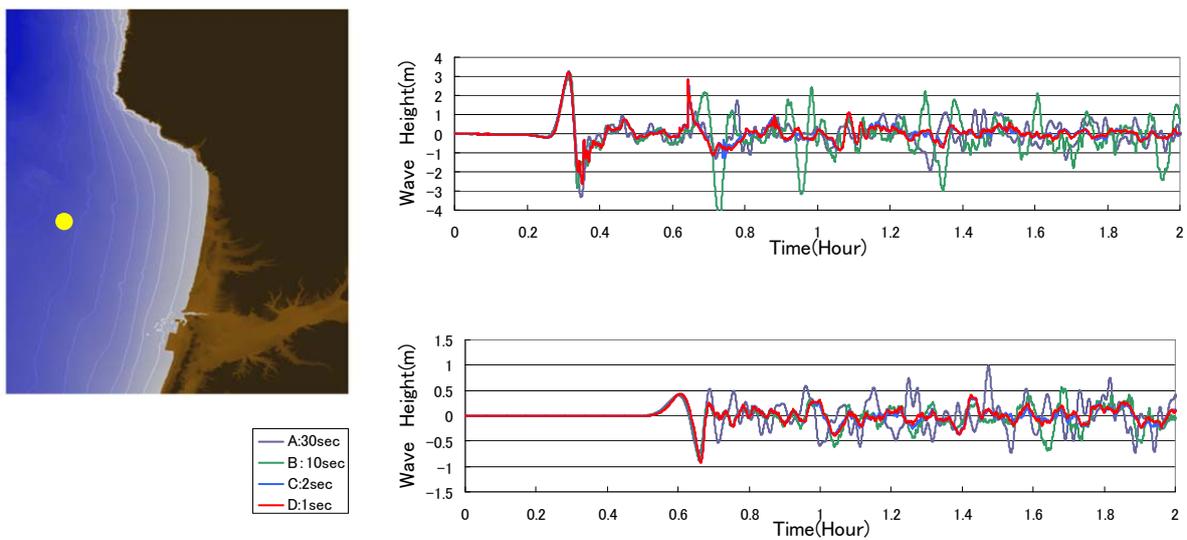


図 14 各メッシュデータを用いて計算した 1983 年日本海中部地震（上）と 1993 年北海道南西沖地震（下）による能代沖（黄色丸）での津波水位時系列。

1983 年日本海中部地震

1993 年北海道南西沖地震

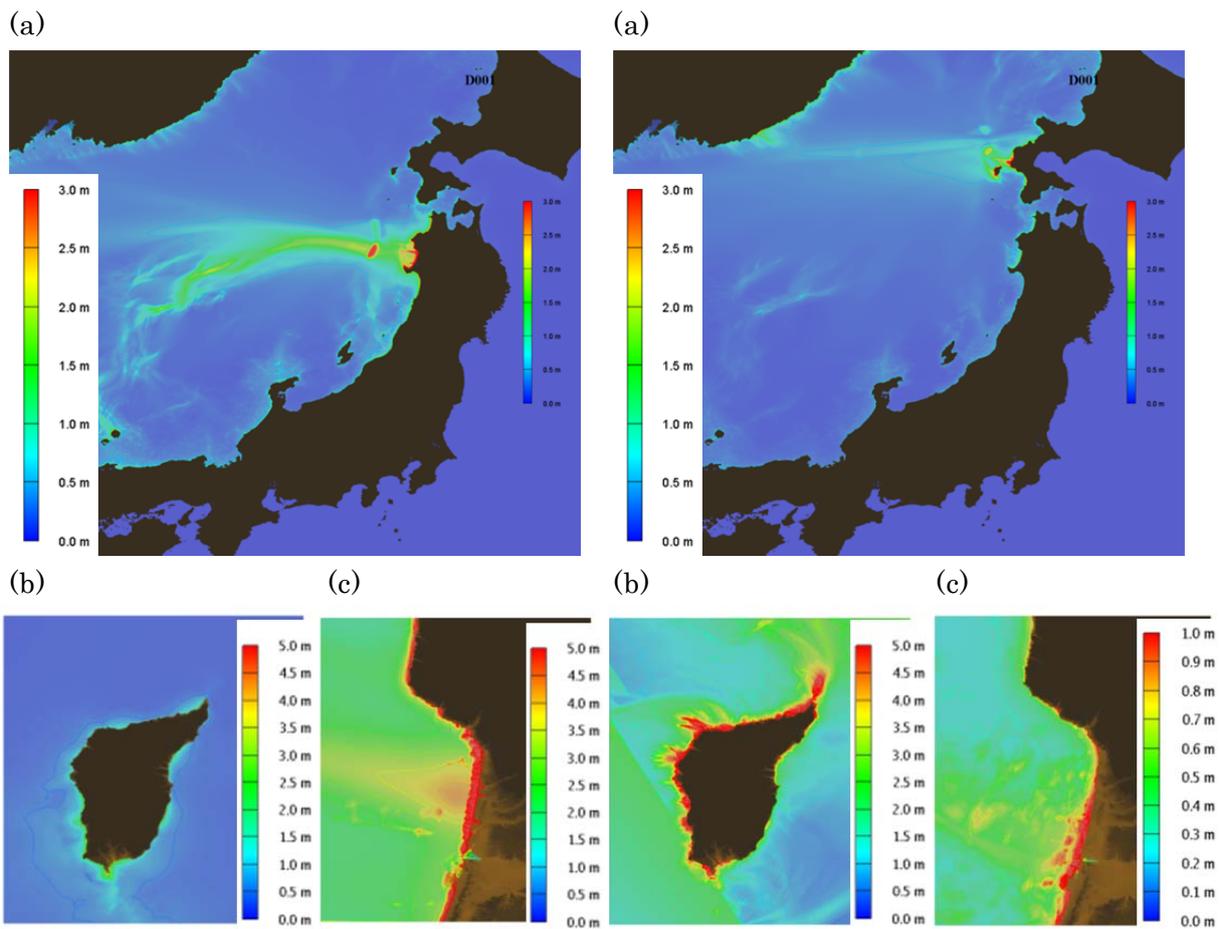


図 15 (a)日本海全域と(b)奥尻島周辺、(c)能代沖周辺の最大水位上昇分布 (左：1983 年日本海中部地震津波，右：1993 年北海道南西沖地震津波)。

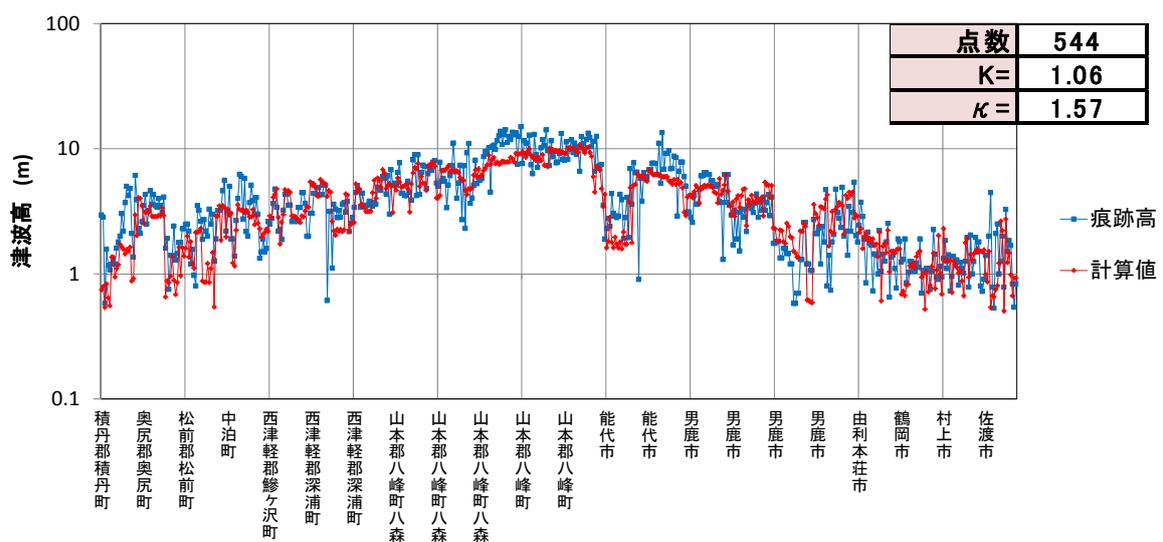


図 16 1983 年日本海中部地震の津波痕跡高と計算高の比較。

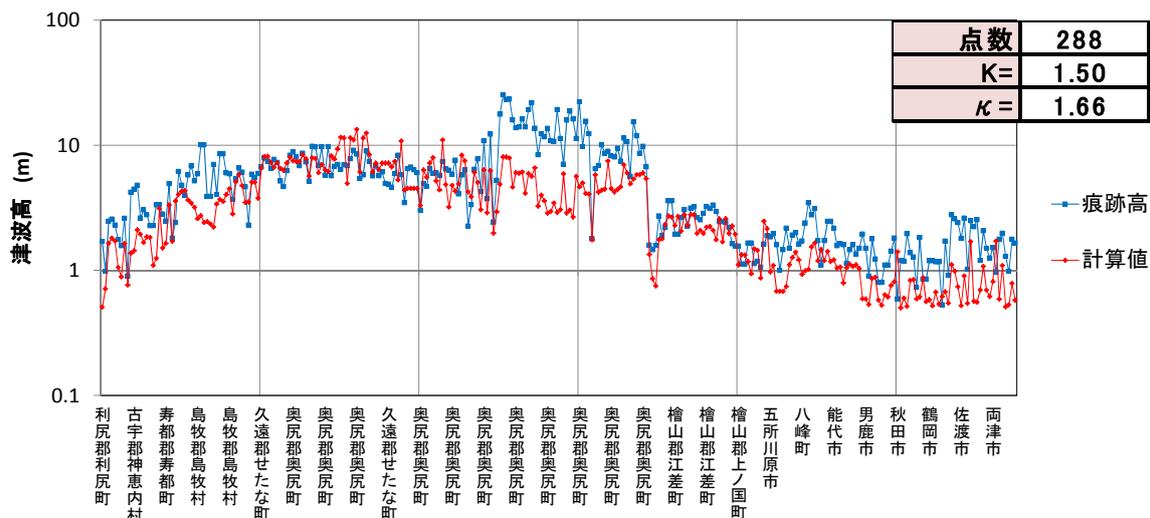


図 17 1993 年北海道南西沖地震の津波痕跡高と計算高の比較。

3) 津波断層モデルの検討

日本海で過去に発生した既知の大地震の数は少ないが、日本海域には海底活断層が多く存在するため、新たな場所で大地震が発生する可能性がある。断層ごとに発生確率を与えて総合する確率論的津波予測を行うためには、日本海沿岸域に津波被害を及ぼすと考えられる断層モデルを設定する必要がある。そこで、他業務等との連携を図り、日本海東縁部における既知の断層や津波波源モデルなどを収集・検討し、津波危険度評価の対象とする海底活断層・沿岸伏在断層などを選定し、津波波源モデルの検討を行っているところである。

(c) 結論ならびに今後の課題

2011 年東北地方太平洋沖地震によって日本海沿岸で観測された地震発生直後の海面微小変動の再現を行った。この海面の微小変動は、地震発生後から約 2 時間に渡る約 10 分の卓越周期と、地震発生直後の約 10 分間に渡る約 1~2 分の卓越周期を持っている。この卓越周期約 10 分程度の変動は、日本海域において傾斜を有する海底地形が地震時に変動した際、水平成分の変動が鉛直方向へ影響を及ぼす変動を考慮することによって、説明が可能であった。日本海側で津波シミュレーション等を行う場合は、できるだけ精度の良い海底地形データを用い、地殻変動の上下動成分だけでなく水平成分が鉛直方向へ及ぼす寄与分を考慮する必要がある。また、波源域から 1000km 程度の距離であれば、層構造を考慮した球座標系ではなく、半無限媒質を仮定した直交座標系で計算した地殻変動で津波波形を計算することが可能であると考えられる。

確定論的なシナリオ型シミュレーションや、断層ごとに発生確率を与えて総合する確率論的津波予測を行うための準備段階として、30 秒メッシュ、10 秒メッシュ、2 秒メッシュ、1 秒メッシュと 4 領域の海底地形データと 2 秒メッシュ、1 秒メッシュの陸域地形データ、異なるメッシュ間を接続可能とするための計算コードの整備を実施し、それらの

検証のために1983年日本海中部地震と1993年北海道南西沖地震の日本沿岸での津波高を計算し、実際の津波痕跡高との比較を行った。その結果、全体的には津波シミュレーションによって痕跡高の傾向を再現でき、地形データと計算コードの妥当性が確認された。しかし、1993年北海道南西沖地震の奥尻島での津波高の再現が不十分などまだ問題はある。また、防波堤等の海岸構造物は壁として表現しているため、越流を考慮するには構造物の高さ情報を収集する必要がある。

日本海沿岸域に津波被害を及ぼすと考えられる津波波源モデル設定のための検討を開始した。第一次モデルの設定は現在検討中であるが、設定が終わり次第、まずは確定論的津波シミュレーションを行っていく。

(d) 引用文献

- 1) Shevchenko, G., Ivelskaya, T., and Loskutov, A.: Characteristics of the 2011 great Tohoku tsunami on the Russian far east coast: deep-water and coastal observations, *Pure Appl. Geophys.*, doi10.1007/s00024-013-0727-1, 2013.
- 2) Satake, K., Fujii, Y., Harada, T., and Namegaya, Y.: Time and space of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 103, 1473-1492, 2013.
- 3) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1135-1154, 1985.
- 4) Tanioka, Y., and Satake, K.: Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 861-864, 1996.
- 5) Sun, W., Okubo, S., Fu, Guangyu, and Araya, A.: General formulations of global co-seismic deformations caused by an arbitrary dislocation in a spherically symmetric earth model – applicable to deformed earth surface and space-fixed point, *Geophys. J. Int.*, 177, 817-833, 2009.
- 6) 相田 勇: 1983年日本海中部地震津波の波源数値モデル, 東京大学地震研究所彙報, 59, 93-104, 1984.
- 7) Tanioka, Y., Satake, K., and Ruff, L.: Total analysis of the 1993 Hokkaido Nansei-Oki Earthquake using seismic wave, tsunami, and geodetic data, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 9-12, 1995.
- 8) 相田 勇: 三陸沖の古い津波のシミュレーション, 東京大学地震研究所彙報, 52, 71-101, 1977.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Murotani, S., and K. Satake	Tsunami forerunner observed in the Japan Sea following the 2011 Tohoku earthquake	AGU Fall Meeting, 2013 (San Francisco, California, USA)	December 10, 2013

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(g) 平成26年度業務計画案

北陸沖海域を中心とする海底活断層・沿岸伏在断層について、シナリオ型津波シミュレーションを実施する。また、当該沿岸に影響を及ぼす断層をリストアップし、確率論的津波予測のための準備を進める。