

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

超巨大地震により発生する巨大津波の即時予測に向けた津波解析手法開発

(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：

現在の津波解析及び津波波高予測は地震波データ等から推定される地震断層モデルを利用して行われる。しかし、海底地滑りや海底噴火等、津波の励起は地震波の励起から予測することが難しい場合がある。本研究では、地震断層モデルを用いるのではなく、観測された津波波形から直接海面変動を推定し、津波波高を予測する手法を開発する。さらに、リアルタイムで予測を行うために、観測津波波形の増加とともに再推定を行い、津波波高の予測精度を逐次に改善していく手法を開発する。最後に、巨大津波被害発生時には津波予測改善を目指し、国際協力研究として緊急津波調査研究を実施する場合がある。

北海道太平洋沿岸では津波堆積物調査研究等により、400-500年に一度、超巨大津波に襲われてきたことが明らかになってきた。最近では17世紀前半に発生したとされており、北海道太平洋沿岸では巨大津波に対する津波災害対策が緊急の課題となっている。本課題は、超巨大地震による津波予測の精度向上を目標として、リアルタイムで直接太平洋沿岸の津波の高さや浸水域を予測する手法の開発を行う。さらに即時予測の推定時間短縮と予測精度向上のため最も有効な海底津波観測点の検討も行う。また、最近、2011年東北地方太平洋沖地震による巨大津波の影響で震源域上空の電離圏が乱され、それがGPS連続観測網(GEONET)のデータから解析される全電子数(TEC)の時系列で捕らえられていたことが分かってきた。つまりTECの時系列解析により巨大津波が面的に捕らえることができる可能性がある。本課題では、TECの時系列データから津波波高分布を得るための解析手法の開発を実施する。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

21年度

近地津波に対し日本沿岸の観測津波波形から海面変動を予測し、沿岸での津波波高を予測する手法を開発する。

22 年度

開発された手法を 2003 年十勝沖地震により発生した津波に適用し、実際の津波予測が適切にできるよう改善する。

23 年度

遠地津波に対し太平洋での観測津波波形から海面変動を予測し、日本沿岸での津波波高を予測する手法を開発する。

24 年度

北海道太平洋沖で発生すると考えられる超巨大地震による巨大津波が発生した場合に、即時に推定された断層モデルから太平洋沿岸での津波を早期に予測するための研究を実施する。具体的には、想定されている北海道太平洋沖超巨大地震の断層モデルで計算される津波を実際に発生する津波と仮定し、津波波形の比較により、即時的に太平洋沿岸での津波の浸水予測を実施する手法を開発する。また、GPS 連続観測網 (GEONET) のデータから解析される TEC の時系列から津波波高を推定するための手法を開発する。

25 年度

北海道太平洋沖の超巨大地震に対して釧路沖の海底津波計を用いた手法開発を実施する。それに加えて、将来さらなる津波予測精度の向上と予測時間短縮のために海底津波計が増設されることを考え、それらを利用した手法を開発する。

(7) 計画期間中(平成 21 年度～25 年度)の成果の概要：

●超巨大地震により発生する巨大津波の即時浸水予測に向けた津波解析手法の開発

近地津波に対し日本沿岸の観測波形から海面変動を予測する手法を開発し、2009 年 8 月 11 日に発生した駿河湾地震 (M6.4) に適用し、海面変動予測を行った。駿河湾地震は深さ 20km で発生した逆断層型地震であったため、全体的に海面が上昇すると予想されていたにも関わらず、焼津検潮所の津波記録は大きな引き波から始まっていた。その原因を探るため、津波波形インバージョンにより海面変動を推定した。陸よりの海面上昇により津波波形が説明可能であることが分かった (図 1)。

上記海面変動を予測し沿岸での津波波高を予測する手法を 2005 年宮城沖地震に適用することを試みた。震源近傍の宮古・釜石・大船渡・鮎川の検潮記録、石巻・大船渡湾内・大船渡湾口・釜石に設置された港湾技術研究所ナウファスの海底設置式波浪計、釜石沖に設置された 2 台のケーブル式海底圧力計の津波波形データを使用して津波早期予測の実験を行う。図 2 に地震発生から 35 分の津波波形を用いて各観測点での予測を実施した結果を示す。津波の第 1 波が大船渡・鮎川に到達しているのが分かる。この時点になって津波波形を含めて全ての観測点で比較的良く予測できていることが分かる。以上より、ケーブル式津波計で津波の第 1 波のピークが捕らえられた時点で津波の高さや波形がある程度予測可能であることが分かった。

東北地方太平洋沖巨大地震の発生を受けて、巨大津波の予測は、地震発生から津波遡上高の予測までリアルタイムで予測する手法を開発することが重要であることが明らかになった。東北地方太平洋沖地震による津波遡上高分布を見ても明らかなように津波高はローカルな地形の影響を受け大きくばらつく。本研究では巨大地震の震源が決まってからリアルタイムで津波遡上高と遡上域を推定する手法の研究開発を実施した。本手法は超巨大地震の震源が決まると同時に 1) W フェーズを利用したインバージョンを実施し地震メカニズム・地震モーメント・セントロイドを推定、2) それを基に Hanks and Bakun(2001) の式を用いて断層幅 W と断層長 $L = 2W$ を決め矩形断層モデルを作成、3) 推定断層モデルを用いて津波数値計算を実施し、津波遡上域・津波遡上高を予測することとした。まず、東北地方太平洋巨大地震に適用し、その有効性を評価した。地震発生後 5 分間に F-Net で観測された W フェーズの地震波形 10 観測点を用いて地震メカニズム・地震モーメント・セントロイドを推定し、断層モデルを推定した (図 3 黄緑)。走行が 221 度と少し実際の走行からずれて推定されたが M_w は 9.0 と良好に推定された。次に地震発生後 10 分間の地震波形 (18 観測点) を用いて同様に地震メカニズム・断層モデルを推定した (図 3 青)。走行 207 度、 M_w は 9.0 と比較的良好な結果が得られた。図 3

には遠地波形を含めた 69 観測点の地震波形を用いた解析結果も赤で示す。図 4 には図 3 で推定された断層モデルから南三陸町で計算された津波遡上域と津波高を示す。走行のずれから地震発生後 5 分間の地震波形を用いた解析では津波高は少し過小評価になっているが津波遡上域は十分再現されている。地震発生後 10 分間の地震波形を用いた結果では津波遡上域・津波高とも良く予測できていることが分かる。田老・陸前高田・仙台平野での結果も同様であった。つまり、今回の地震においても地震発生後 5 分から 10 分間の地震波形を用いることで地域の津波遡上を比較的上手く再現できることが分かった。

しかし、上記のように南三陸等での津波浸水域を精度よく予想するためには、50m 以下の細かい格子間隔で津波遡上数値計算を実施する必要があるが、地震が発生してから津波数値計算を実施しては、沿岸の津波を予測することができない。

平成 25 年度の研究では、あらかじめ多くの断層モデルに対して津波遡上数値計算を実施しておき、それをデータベース化することで、リアルタイムで津波浸水域を予測する手法を開発し、その手法を東北地方太平洋巨大地震に適用し手法の有効性を評価した。

データベースの作成は様々な大きさ・規模の断層モデルをプレート境界上に仮定して実施する（図 5）。本研究では Mw8.0-Mw9.0 のプレート境界型断層モデルを図 5 のように配置した（532 モデル）。各断層モデルに対して、移動境界条件のもとで、海底摩擦を考慮した非線形長波近似式を用いた津波遡上数値計算を実施する。津波遡上を計算する格子間隔は 1.1 秒とした。さらに、津波遡上計算を実施する地域の沖で水深 50m 程度の地点でかつ津波第 1 波が非線形の効果をほとんど受けないと予想される場所を、津波遡上計算地域を囲むように数か所抽出する（図 6）。それら数か所での津波数値計算結果の時系列（津波波形）を最適の津波浸水結果を抽出するための指標津波波形としてデータベースに保存する。本研究では、北から宮古・山田・大槌・釜石・吉浜・三陸綾里・大船渡・陸前高田・気仙沼・本吉・追波・石巻・仙台に対しデータベースを作成し津波浸水域・津波高の予測を試みる。

まず、上記地震発生後 5 分間に F-Net で観測された W フェーズの地震波形を用いた結果から推定された断層モデルを用いて線形長波近似式を用いた津波数値計算を実施し、データベースの保存された指標津波波形計算地点での予測津波波形を推定する。この津波数値計算は、通常のパソコンでも 1-3 分程度で完了するため、十分に津波予測に利用することができる。この予測津波計算波形をデータベースに格納された計算津波波形と比較する。予測津波波形を最も良く説明できる最適モデルを抽出する（図 7 には陸前高田の場合を示す）。この最適モデルの津波浸水域・津波高がリアルタイム津波浸水予測となる。図 8 には陸前高田のリアルタイム津波浸水予測が実際の津波浸水高を良く説明できていることを示す。陸前高田の場合、計算時間は 3 分で、地震後 5 分の地震波形データから断層モデルを推定していることから、地震後 10 分程度でリアルタイム津波浸水予測ができることが検証された。図 9, 10, 11 には宮古・山田・大槌・釜石・吉浜・三陸綾里・大船渡・気仙沼・本吉・追波・石巻・仙台のすべての地域でリアルタイム津波浸水予測が実際の津波浸水高を説明できていることを示す。本研究で開発されたリアルタイム津波浸水予測手法の有効性が検証され、実装可能な津波浸水予測手法の開発に成功した画期的な成果である。

北海道太平洋沿岸は、津波堆積物調査結果より、最近の M8 クラスの巨大地震による津波よりもはるかに大きな津波が太平洋沿岸を襲っていたことも明らかになっている。このようなプレート境界型超巨大地震が発生すると、大津波を引き起こし北海道太平洋沿岸の自治体で甚大な被害が予想されている。被害を最小限に抑えるためには、この様な大津波に対応し上記リアルタイム津波浸水予測手法を早急に適用する必要がある。上記手法を用いて、釧路市での津波浸水域をどの程度予測可能であるか実験した。まず、釧路市近傍の津波遡上数値計算を様々な断層モデル（約 300 モデル）を用いて実施しデータベースとして保存した。次に、北海道太平洋沖で 17 世紀の巨大地震と同じ地震が発生したとして、その地震の最新の断層モデル（課題 1002）より津波遡上数値計算を実施し、その津波浸水域が実際に発生したとする（図 12）。つまり図 1 2 が答えとなる。データベースに保存されている津波波形は釧路近傍の 5 点である。この地点での最新の断層モデルから計算される津波波形とデータベースに保存されている津波波形を比較して最適の予測津波浸水域を抽出した。答え（図 12）に近い浸水が予測できていることが分かる（図 13）。釧路市でのリアルタイムの津波浸水予測が可能であること

が示す画期的な結果である。

● GPS 連続観測網 (GEONET) の全電子数 (TEC) データによる津波検知

2011 年東北地方太平洋沖地震による影響で震源域上空の電離圏が乱され、それが GPS 連続観測網 (GEONET) のデータから解析される全電子数 (TEC) の時系列で捕らえられた。2011 年東北地方太平洋沖地震による津波の伝播と TEC の変化を比較すると 9 分程度遅れで TEC が変化しておいたことが分かった。超巨大地震による津波は GPS 連続観測網の TEC 解析によって検知できることが明らかになった。

● 国際共同研究による日本海での津波調査研究

1983 年日本海中部地震、1993 年北海道南西沖地震、1940 年積丹沖地震の発生を見てわかる通り、日本海東縁部では津波による被害が伴う地震が発生している。しかし北海道日本海側では上記津波の痕跡がほとんど残されていないことから推測できるように、痕跡調査には適さない場所が多い。そこで我々は、日本海を挟んで対岸にあるロシア沿海州で、北海道大学とロシア科学アカデミー極東支部との共同研究として津波堆積物調査を実施してきた。1900 年代の津波は、沿海州では 3m から 5m の高さであり、沿岸で被害があったことも記録されている。これらの近年の津波によると思われる堆積物は、手つかずの自然が広がる沿海州の沿岸湿地に砂層として検出される。また、ウラジオストックの北にあるキットベイでは、10 世紀に降下した B-Tm テフラが見つかっており、その下位にも 2 層の砂層が検出された。これらが津波堆積物だとすると、津波は日本海東縁部を震源とする地震で起きたものである可能性が高く、20 世紀の被害地震を超える規模の津波が日本海で繰り返し起きていたことを示す物証が見つかったことになる。

他にも 2009 年サモア巨大地震の緊急津波現地調査、2010 年チリ巨大地震の国際共同現地地震津波調査、2010 年スマトラ・ムンタワイ津波地震のインドネシアとの共同現地津波調査を実施し、津波被害を及ぼす津波の挙動を明らかにした。

(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) :

Gusman, A.R. and Y. Tanioka, 2013, W phase inversion and tsunami inundation modeling for tsunami early warning: Case study for the 2011 Tohoku event, Pure Appl. Geophys., doi:10.1007/s00024-013-0680-z

Gusman, A. R., Y. Tanioka, B. T. MacInnes, and H. Tsushima, 2014, A Methodology for Near-field Tsunami Inundation Forecasting: Application to the 2011 Tohoku Tsunami, JGR, submitted.

Tanioka, Y., A.R. Gusman, and K. Ioki, 2014, Real-time tsunami inundation forecast for a recurrence of 17 century great Hokkaido earthquake, J. of Disaster Research, submitted.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

谷岡勇市郎・西村裕一

他機関との共同研究の有無 : 有

東京大学地震研究所

(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 : 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

電話 : 011-706-3591

e-mail : isv-web@mail.sci.hokudai.ac.jp

URL : <http://www.sci.hokudai.ac.jp/grp/isv/isv-web/>

(11) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 谷岡勇市郎

所属 : 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

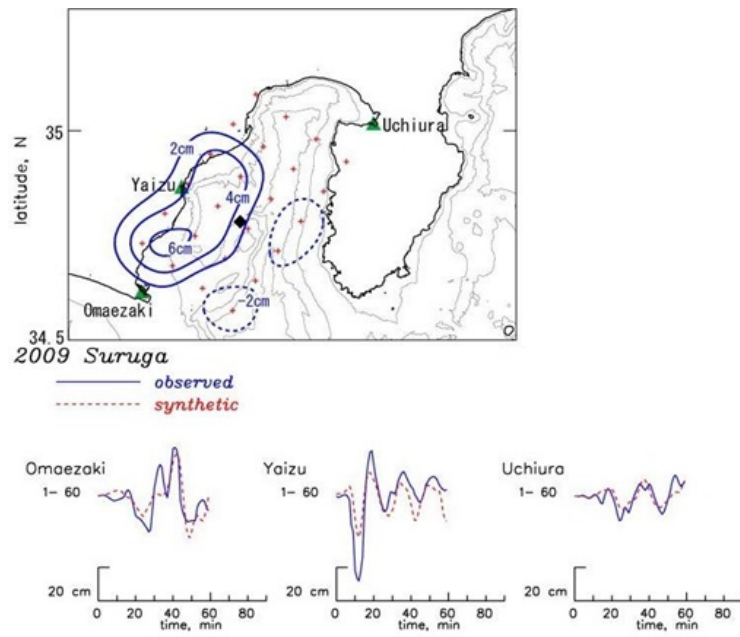


図 1

上) 2009 年駿河湾地震の津波波形解析から推定された海面変動
 下) 観測津波波形 (青) と計算津波波形 (赤) の比較

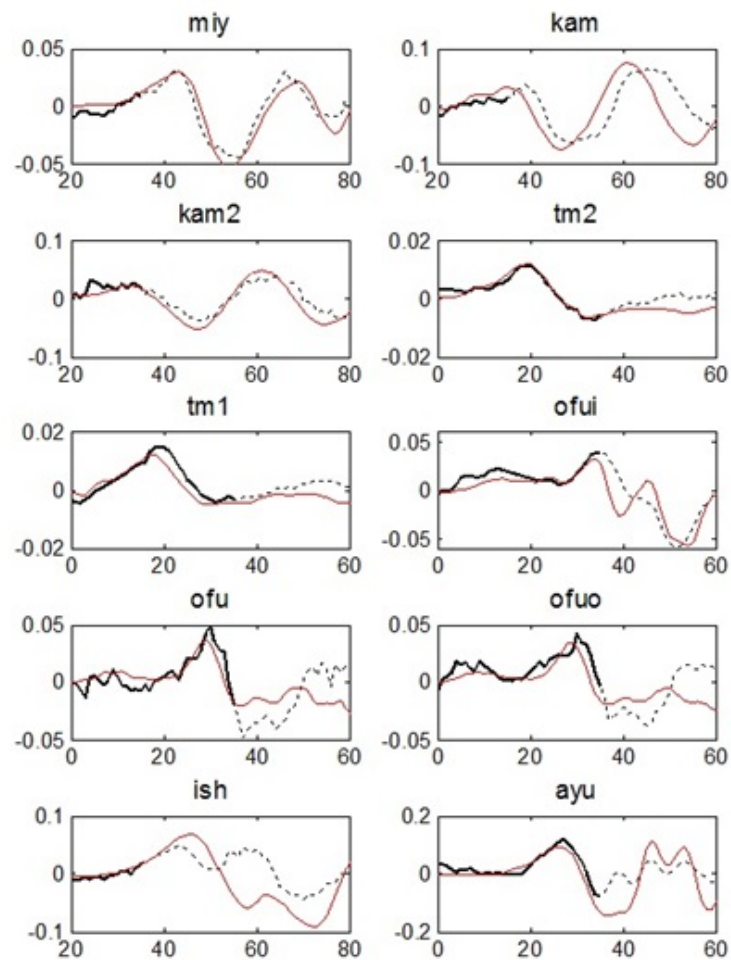


図 2

地震発生から 35 分後までの津波波形を使用した津波波形予測（赤）。

点線（黒）が実際の観測波形。実線（黒）が津波波形予測（逐次津波波形インバージョン）に用いた波形。宮古 (miy)・釜石 (kam)・大船渡 (ofu)・鮎川 (ayu) の検潮記録，石巻 (ish)・大船渡湾内 (ofui)・大船渡湾口 (ofuo)・釜石 (kam2) に設置された港湾技術研究所ナウファスの海底設置式波浪計，釜石沖に設置された 2 台のケーブル式海底圧力計 (tm1,tm2) の津波波形データ

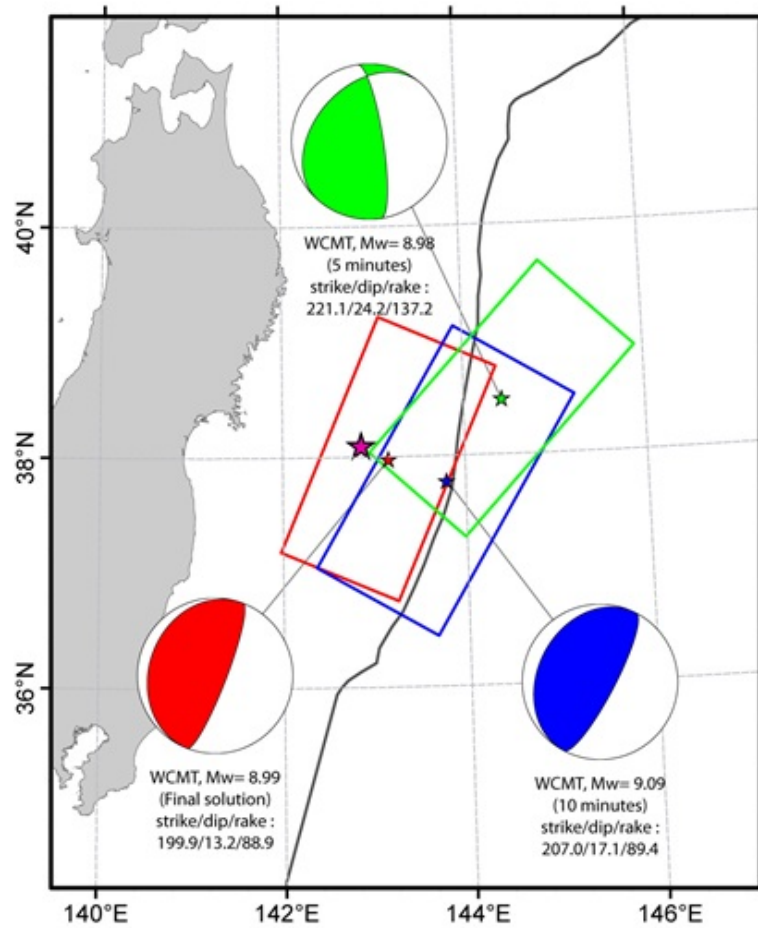


図 3

W フェーズを用いた地震波形インバージョンの結果と推定された断層モデル。黄緑は地震発生から 5 分間の地震波形を用いて推定。青は地震発生から 10 分間の地震波形を用いて推定。赤は遠地地震波形を含めて推定。

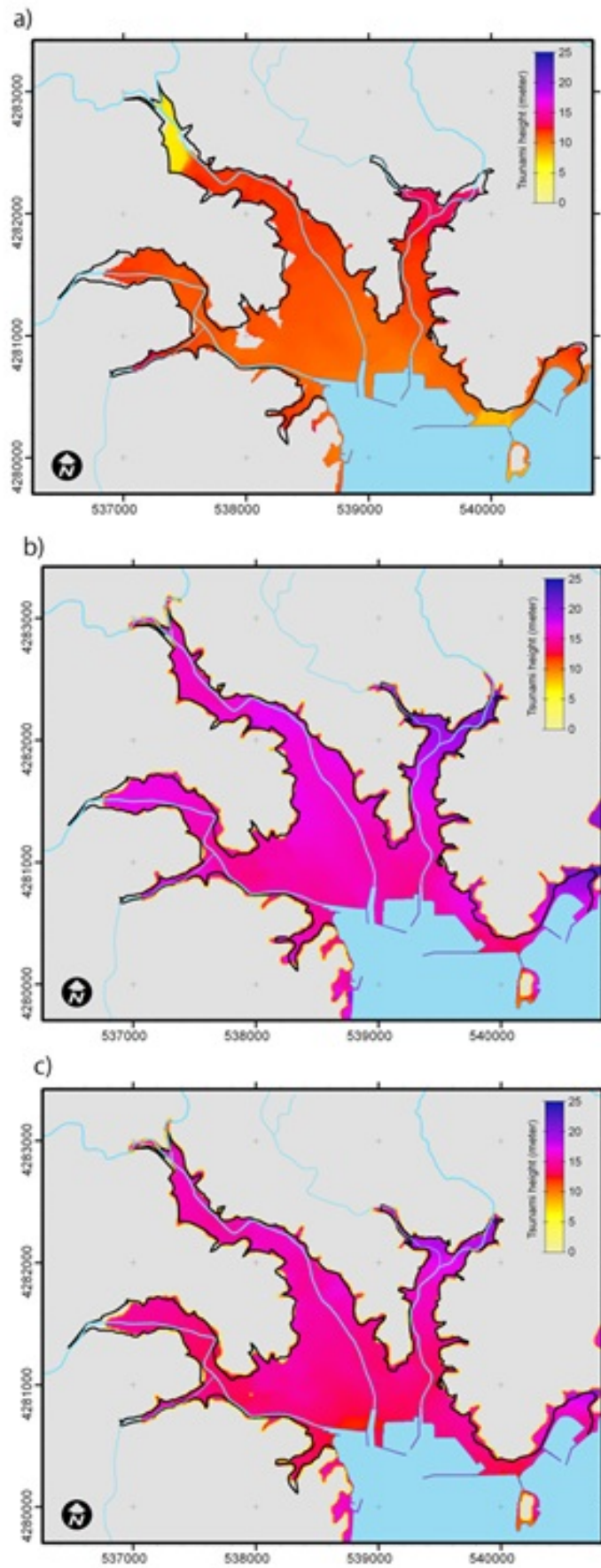


図 4

南三陸町での津波遡上予測結果。a) 地震発生から 5 分間の地震波形から推定された断層モデルから計算された津波遡上域と津波高。b) 地震発生から 10 分間の地震波形から推定された断層モデルから計算された津波遡上域と津波高。c) 遠地波形も含めた断層モデルから計算された津波遡上域と津波高。太線は東北地方太平洋沖地震の津波遡上域。

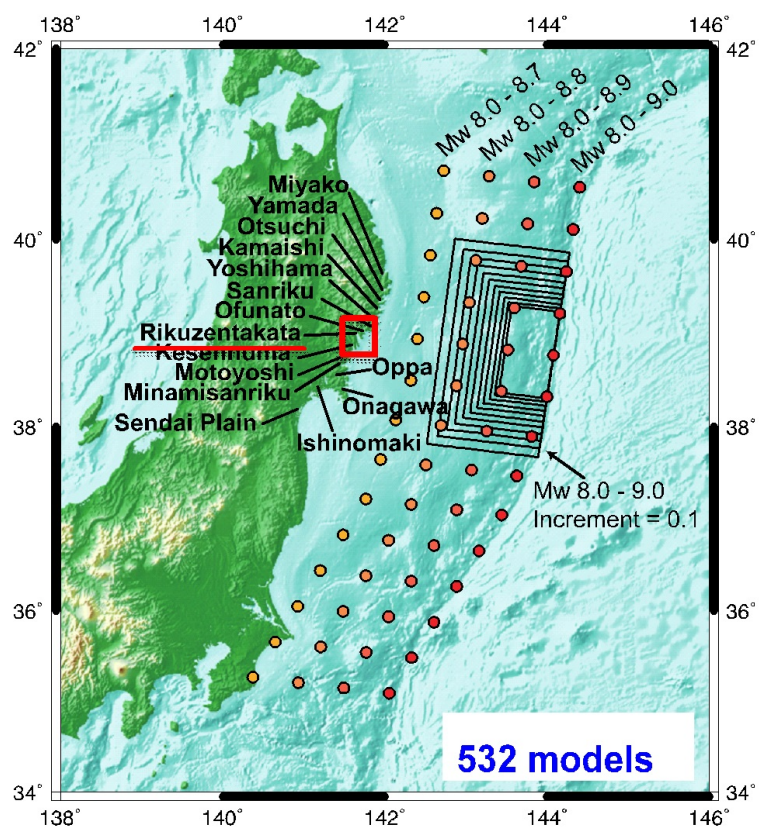


図 5

リアルタイム津波浸水予測のためのデータベースに登録するための 532 個の断層モデル。

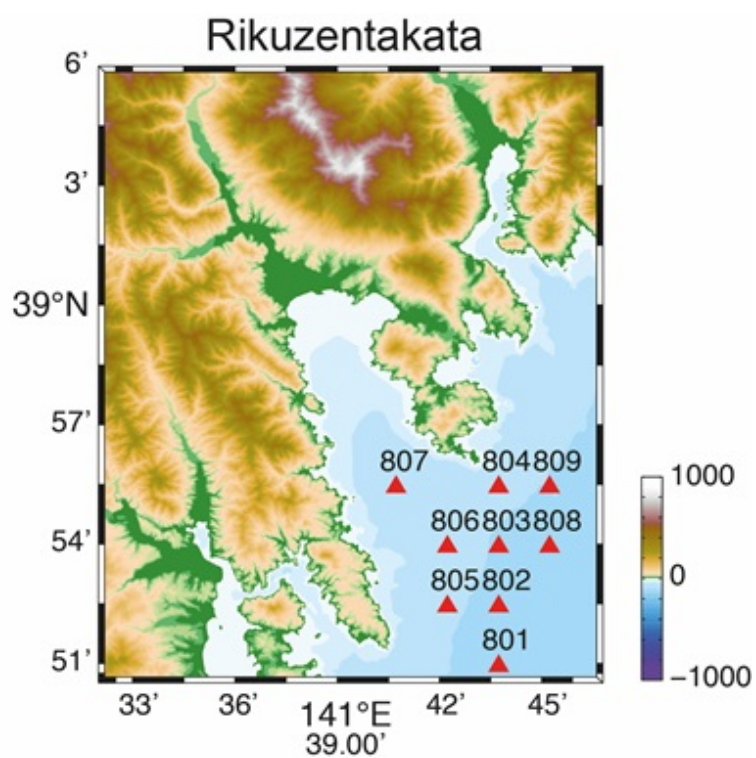


図 6

陸前高田でのリアルタイム津波浸水予測のための指標津波波形を計算し、比較する津波計算比較地点（▲）

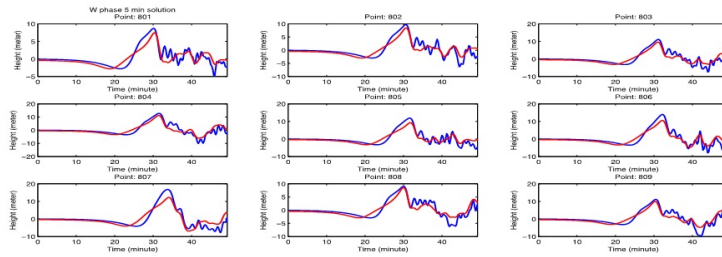


図 7

図 6 の津波計算比較地点で、地震後 5 分の地震波形から推定された断層モデルから線形長波理論で計算された津波波形（青）とデータベースから抽出された最適津波波形（赤）の比較

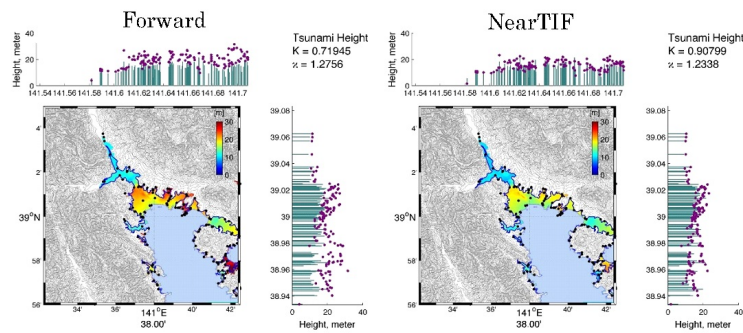


図 8

陸前高田での津波浸水計算．左）断層モデルから直接津波遡上域を計算した結果と調査データ（棒グラフ）の比較（計算時間約 2 時間），右）リアルタイム津波浸水予測手法により抽出された最適モデルと調査データの比較（計算時間 3 分）．

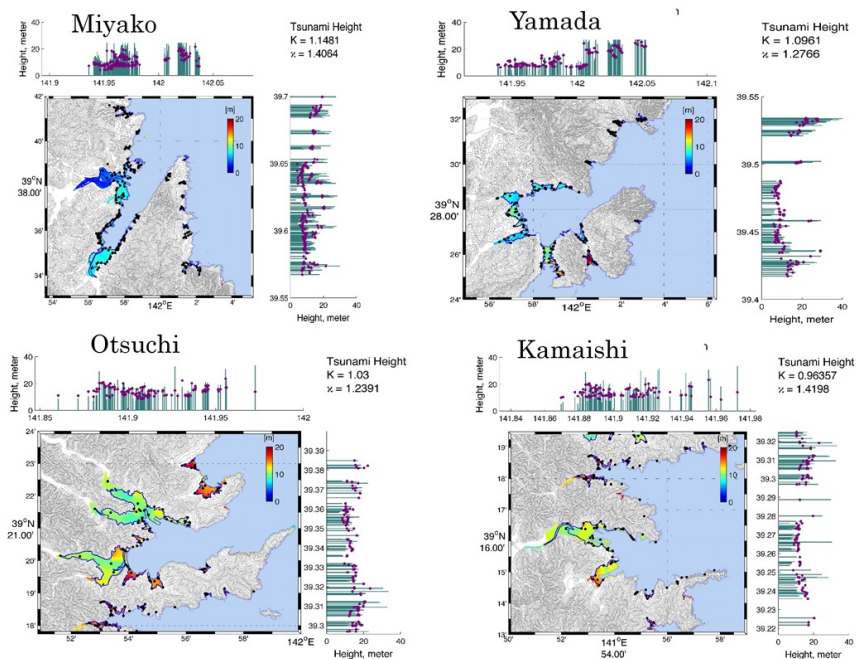


図 9

宮古・山田・大槌・釜石でのリアルタイム津波浸水予測結果と実際の調査結果の比較．

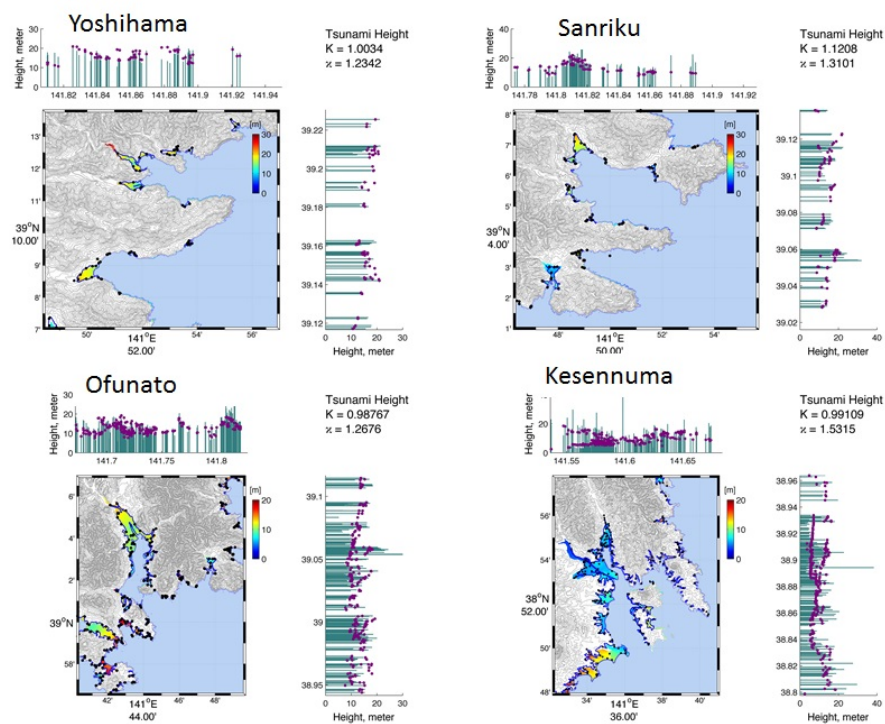


図 10

吉浜・三陸綾里・大船渡・気仙沼でのリアルタイム津波浸水予測結果と実際の調査結果の比較。

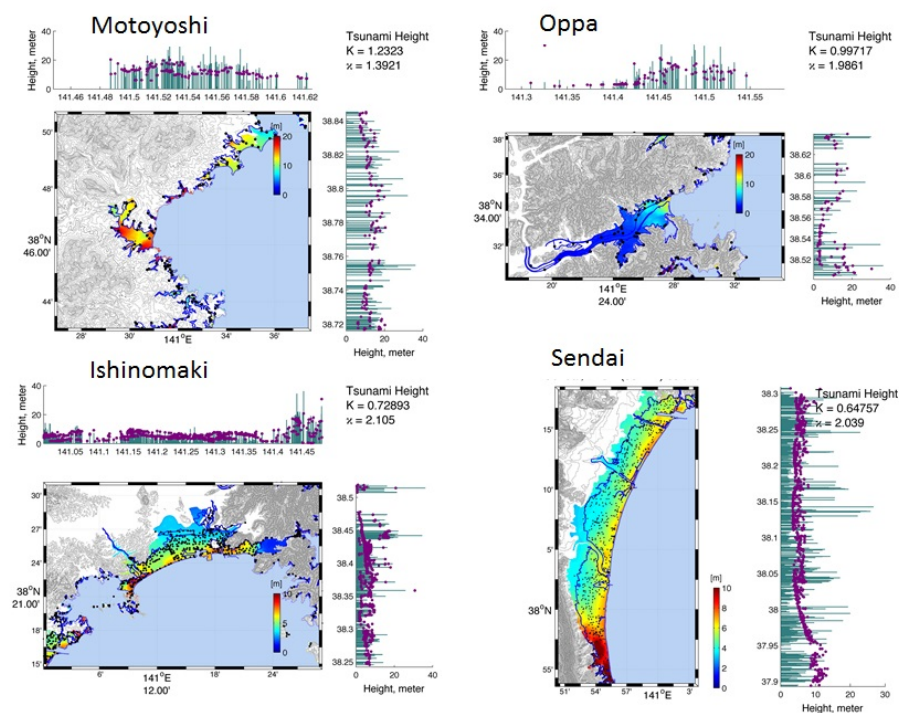


図 11

本吉・追波・石巻・仙台でのリアルタイム津波浸水予測結果と実際の調査結果の比較。

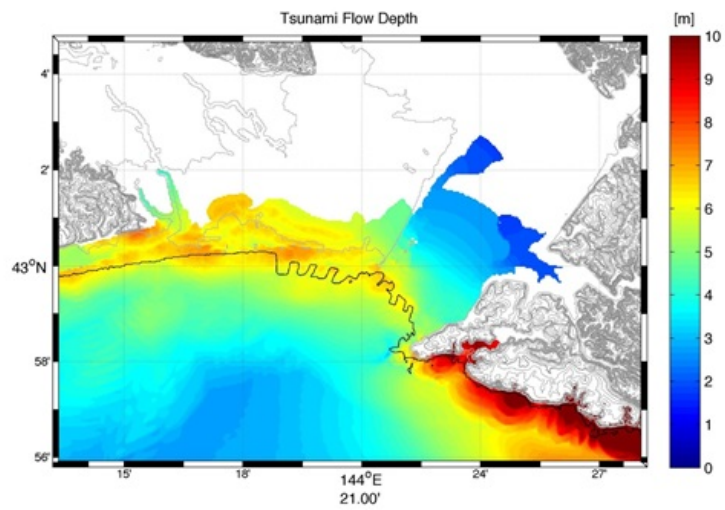


図 12
17 世紀の巨大地震の断層モデルから計算された釧路市の津波浸水域と浸水高

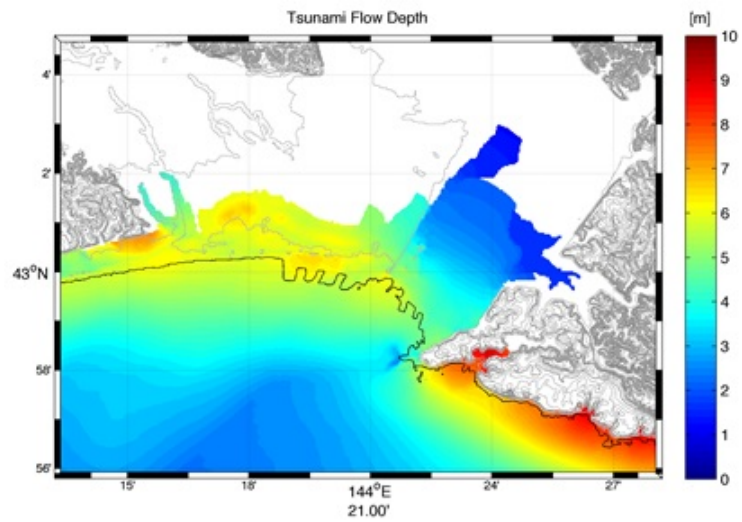


図 13
データベースから抽出された予想津波浸水予測図