

## S-netプロジェクト：構築と地震津波観測システムについて

### S-net project: Deployment and its seismic and tsunami observation system

\*植平 賢司<sup>1</sup>、望月 将志<sup>1</sup>、金沢 敏彦<sup>1</sup>、眞保 敬<sup>1</sup>、汐見 勝彦<sup>1</sup>、功刀 卓<sup>1</sup>、青井 真<sup>1</sup>、松本 拓己<sup>1</sup>、関口 涉次<sup>1</sup>、高橋 成実<sup>1</sup>、山本 直孝<sup>1</sup>、篠原 雅尚<sup>2</sup>、山田 知朗<sup>2</sup>

\*Kenji Uehira<sup>1</sup>, Masashi Mochizuki<sup>1</sup>, Toshihiko Kanazawa<sup>1</sup>, Takashi Shimbo<sup>1</sup>, Katsuhiko Shiomi<sup>1</sup>, Takashi Kunugi<sup>1</sup>, Shin Aoi<sup>1</sup>, Takumi Matsumoto<sup>1</sup>, Shoji Sekiguchi<sup>1</sup>, Narumi Takahashi<sup>1</sup>, Naotaka YAMAMOTO<sup>1</sup>, Masanao Shinohara<sup>2</sup>, Tomoaki Yamada<sup>2</sup>

1. 防災科学技術研究所、2. 東京大学地震研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench (S-net) has 150 real-time monitoring observatories that cover the area about 1000km x 300 km from off-Hokkaido to off-Kanto. It is expected that early tsunami and earthquake warnings and earthquake researches will be enhanced. S-net consists of six segment networks of about 25 observatories and 800 km fiber optic cable (1,500 km fiber optic cable for the Japan Trench outer rise segment network). Each observatory has four sets of three-component seismometers for earthquake observation and two sets of pressure gauge for tsunami observation. Fiber-optic cable connects to landing station, and the data is transmitted from landing station to the data center via IP-VPN network.

S-net project has started in 2011. We have already finished deployment of all of the observatories and fiber-optic cables in 2016. Observatories and cables are installed by cable ship which conducts laying and installation of submarine fiber optic communication cables. We carried out installation by C/S Subaru (9,557 ton), C/S KDDI Pacific Link (7,960 ton), and C/S SEGERO (8,323 ton). In order to avoid influence of with fishery activity (for example, the trawling with using otter board), we buried the cables and observatories one meter or deeper below the seabed in the sea area where water depth is shallower than 1,500 meters using the plough and/or ROV (Remotely Operated Vehicle).

We have also constructed five landing stations; Minamiboso station in Minamiboso City, Chiba Pref., Kashima station in Kashima City, Ibaraki Pref., Watari station in Watari Town, Miyagi Pref., Miyako station in Miyako City, Iwate Pref., and Hachinohe station in Hachinohe City, Aomori Pref.. The Watari station is located on the third floor of reinforced concrete building, and other stations are container-type data centers. The S-net (except outer-rise segment) started to operate in May 2016, and the pressure gauge and accelerometer data have been transmit to Japan Metrological Agency (JMA) for monitoring purpose. The S-net detected many earthquakes. S-net also observed tsunamis like with the earthquake of the November 22, 2016 off Fukushima (M7.4).

キーワード：日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)

Keywords: S-net

# L1正則化項付き線形回帰による津波予測に適した観測点配置の検討

## Offshore tsunami observation array suitable for coastal tsunami prediction using multiple linear regression with L1 regularization

\*谷口 純一<sup>1</sup>、吉川 貴史<sup>2</sup>、村田 伸<sup>2</sup>、五十嵐 康彦<sup>2</sup>、堀 高峰<sup>3</sup>、岡田 真人<sup>2</sup>、馬場 俊孝<sup>1</sup>

\*Junichi Taniguchi<sup>1</sup>, Takashi Yoshikawa<sup>2</sup>, Shin Murata<sup>2</sup>, Yasuhiko Murata<sup>2</sup>, Takane Hori<sup>3</sup>, Masato Okada<sup>2</sup>, Toshitaka Baba<sup>1</sup>

1. 徳島大学、2. 東京大学、3. 海洋研究開発機構

1. Tokushima University, 2. Tokyo University, 3. JAMSTEC

近年、日本周辺の海域には高密度な沖合津波観測網が整備されつつあり、これらを用いた津波予測システムが注目されている。我々の研究グループではこれまで沖合と沿岸の最大津波高の回帰による津波予測手法について研究を実施してきた (Baba et al., 2014; Igarashi et al. 2016)。これらは既存の沖合観測点で得られた情報を最大限利用し、津波の予測を高精度化するものである。一方、この予測システムを沖合観測網の構築も含めて海外に展開することを考えると、どこに観測点を配置すれば予測が最も高精度化するかという問いにまずは答えなければならない。そこで本研究では、沖合で観測された最大津波高の線形回帰によって沿岸での津波を予測する際にL1正則化項(LASSO)を導入し各観測点の重要度を評価した。具体的には、南海トラフを震源とする地震を単純滑り1506ケース、大滑りを考慮した1116ケース、全部で2622ケースの断層モデルを作成し、非線形長波理論を用いて津波の伝播計算を行い津波データを生成した。徳島県浅川湾を対象とし、沖合のGPS波浪計とDONET海底水圧計の合わせて57観測点の最大津波高と湾内の最大津波高をL1正則化項付きで線形回帰した。その結果、浅川湾ではRMS残差で1m未満の予測精度を12観測点で実現可能であることが分かった。予測に用いる12観測点は、紀伊半島以西を中心に存在しており、これは浅川で津波高の予測をするにあたっては紀伊半島以東のデータはそれほど重要でないことを示唆している。

キーワード：津波予測、沖合観測、L1正則化項

Keywords: tsunami prediction, offshore observation, L1 regularization term

## 津波地震対策について

### Countermeasures against various types of tsunami earthquakes

\*勝間田 明男<sup>1</sup>、中田 健嗣<sup>1</sup>、藤田 健一<sup>1</sup>、田中 昌之<sup>1</sup>、溜淵 功史<sup>1</sup>、弘瀬 冬樹<sup>1</sup>、小林 昭夫<sup>1</sup>

\*Akio Katsumata<sup>1</sup>, Kenji Nakata<sup>1</sup>, Kenichi Fujita<sup>1</sup>, Masayuki Tanaka<sup>1</sup>, Koji Tamaribuchi<sup>1</sup>, Fuyuki Hirose<sup>1</sup>, Akio Kobayashi<sup>1</sup>

1. 気象庁気象研究所

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

津波地震は、地震のマグニチュードに比べて異常に高い津波が観測される現象である。津波地震には大きく分けて2つのタイプがある。一つはスロー地震と称されるもので、断層すべりがゆっくりと進むことにより津波はそのモーメントマグニチュード相当あるいはやや大きいものであるものの、地震波の励起が小さく振幅に基づくマグニチュードが小さくなる。このような地震はモーメントマグニチュード自体は適正に推定されるとみられるが、3分以内の津波予報に用いられている振幅マグニチュードは過小評価すると想像される。その対策としてより長周期の地震波の評価に基づくマグニチュードを検討していくこととしている。

一方断層すべりとは異なる津波源として、山体崩壊を含む海底地すべりがある。1792年の島原眉山崩壊による津波が山体崩壊の例である。そのような山体崩壊自体についてはあらかじめ予測することは難しいと考えられるが、可能性のある事例を事前に評価することは可能と考えられる。また、1998年のパプアニューギニアの津波のように地震の後に海底地すべりが発生し、その結果として津波が発生したとみられる例がある。このような事例について、地震波により海底地すべりを検知可能か検討してみたが、否定的な結果となった。そのような場合には沖合津波計しか対策がないと考えられる。沖合津波計として、GPS波浪計・海底水圧計などの他に津波レーダー・微気圧計などを用いることも考えられる。

キーワード：津波地震、スロー地震、海底地すべり、山体崩壊

Keywords: tsunami earthquake, slow earthquake, submarine landslide, volcanic debris avalanche

## 波形干渉法による深海水圧記録からの津波の抽出

### Retrieval of tsunamis by the interferometry of deep ocean pressure records

\*綿田 辰吾<sup>1</sup>、金子 りさ<sup>2</sup>、王 宇晨<sup>1</sup>、佐竹 健治<sup>1</sup>

\*Shingo Watada<sup>1</sup>, Lisa Kaneko<sup>2</sup>, Yuchen Wang<sup>1</sup>, Kenji Satake<sup>1</sup>

1. 東京大学地震研究所、2. 東京大学理学研究科地球惑星科学専攻

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

過去10年ほど、地震波干渉法が地下を調べる手法としてよく使われるようになった。地震波干渉法は、2地点の地動の連続記録の相互相関を重合することにより、地震がなくとも2地点間を伝播する仮想的な地震波を抽出することができる。津波波源がなくとも津波波形を抽出するため、波形干渉法を深海底の圧力連続記録に適応してみた。

深度5500-5900mに設置された太平洋西縁にある3 DART観測点(21418, 21413, 52401)の2011-2015年の連続記録を津波干渉法に用いた。観測点間距離は956-2265kmである。潮汐を除去した4時間ないし8時間の時間窓の波形に対し、それぞれ6次の多項式で長周期成分をと取り除き、時間領域でone-bit化し、周波数領域で振幅スペクトルのwhiteningを行った。時間窓の半分の重複を許し3年間分の相互相関を重合した。最終的に得られた波形は、2地点間を伝播する仮想的な津波の到達時刻に向けて徐々に振幅が増大している。そして到達時刻には振幅が正から負に急峻に変化するのが観測された。

この特徴的な波形は深海域の津波が広い周期帯でほぼ非分散であることを反映している。理論的には遠方から入射する2次元非分散波の相互相関は、2地点間を伝播する仮想的な波の走時の到着時刻前に振幅が増大し、到着時刻以後は急激に減少する。これは、2地点間を伝播する仮想的な波の伝播時間よりも平面波の到達時刻差が大きくなることはなく、斜めに入射する平面波の2地点への到達時刻の差は2地点間を伝播する仮想的な波の伝播時間よりも短いため、また、全方向から入射する平面波の干渉の結果2点を結ぶ方向からやってくる平面波の相互相関が最大になるためである。実際には分散性表面重力は長波の速度よりも遅く伝わり仮想的な津波の後に現れる。

抽出された仮想的津波の波形を使い、2地点間の津波の位相速度を解析した。2次元円筒波を仮定し測定された位相から初期位相を差し引き、仮想的津波の周期300秒から3000秒の位相速度を測定することができた。測定値は水深から予測される津波位相速度とよく一致していた。周期300秒付近では、表面重力波理論による位相速度低下に相当する、長波速度からの明瞭な減少も検出された。

キーワード：津波波形干渉法、DART、津波波形、津波位相速度、分散性津波、海底水圧計の相互相関波形

Keywords: tsunami waveform interferometry, DART, tsunami waveform, phase velocity of tsunami, dispersive tsunami, cross-correlation of ocean bottom pressure

## 南海トラフ、相模トラフ、日本海溝の3海域統合確率論的津波ハザード評価

### Integrated Probabilistic Tsunami Hazard Assessment contributed from possible tsunami sources along Nankai Trough, Sagami Trough, and Japan Trench

\*平田 賢治<sup>1</sup>、藤原 広行<sup>1</sup>、中村 洋光<sup>1</sup>、長田 正樹<sup>1</sup>、大角 恒雄<sup>1</sup>、森川 信之<sup>1</sup>、河合 伸一<sup>1</sup>、前田 宜浩<sup>1</sup>、松山 尚典<sup>2</sup>、遠山 信彦<sup>2</sup>、鬼頭 直<sup>2</sup>、村嶋 陽一<sup>3</sup>、村田 泰洋<sup>3</sup>、井上 拓也<sup>3</sup>、斉藤 龍<sup>3</sup>、秋山 伸一<sup>4</sup>、是永 真理子<sup>4</sup>、阿部 雄太<sup>4</sup>、橋本 紀彦<sup>4</sup>、袴田 智哉<sup>4</sup>

\*Kenji Hirata<sup>1</sup>, Hiroyuki Fujiwara<sup>1</sup>, Hiromitsu Nakamura<sup>1</sup>, Masaki Osada<sup>1</sup>, Tsuneo Ohsumi<sup>1</sup>, Nobuyuki Morikawa<sup>1</sup>, Shin'ichi Kawai<sup>1</sup>, Takahiro Maeda<sup>1</sup>, Hisanori Matsuyama<sup>2</sup>, Nobuhiko Toyama<sup>2</sup>, Tadashi Kito<sup>2</sup>, Yoichi Murashima<sup>3</sup>, Yasuhiro Murata<sup>3</sup>, Takuya Inoue<sup>3</sup>, Ryu Saito<sup>3</sup>, Shin'ichi Akiyama<sup>4</sup>, Mariko Korenaga<sup>4</sup>, Yuta Abe<sup>4</sup>, Norihiko Hashimoto<sup>4</sup>, Tomoya Hakamata<sup>4</sup>

1. 防災科学技術研究所、2. 応用地質、3. 国際航業、4. 伊藤忠テクノソリューション

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. OYO, 3. KKC, 4. CTC

Last years, we presented regional Probabilistic Tsunami Hazard Assessments (PTHAs) for three coastal zones along Nankai Trough, Sagami Trough, and Japan Trench (Hirata et al., 2014, 2015, AGU; Hirata et al., 2016, SSJ). In three PTHAs, our procedures are follows; (i) we consider all possible earthquakes in the future, including those that Earthquake Research Committee (ERC), the Headquarters for Earthquake Research Promotion (HERP) of Japanese Government already assessed. (ii) We construct a set of Characterized Earthquake Fault Models (CEFM), for all the possible earthquakes (Toyama et al., 2014, 2015, JpGU; Kito et al., 2016, JpGU). (iii) For all the CEFMs, we compute tsunamis by solving a nonlinear long wave equation, using FDM, including runup calculation, over a nesting grid system with a minimum grid size of 50 meters. (Saito et al., 2014, 2015, JpGU; Takayama et al., 2017, JpGU) (iv) Finally, we gather excess probabilities for variable tsunami heights, calculated from all the CEFMs, at every observation point along the coastal zone to get PTHA. We incorporated aleatory uncertainties inherent in tsunami simulation and earthquake fault slip heterogeneity in the integration process (Korenaga et al., 2014, JpGU; Abe et al., 2014, JpGU).

In this study, we integrate three of the regional PTHAs calculated from all possible earthquakes along Nankai Trough, Sagami Trough, and Japan Trench to get a nationwide PTHA. We will make two kind of the probabilistic tsunami hazard maps; one is "Present-time hazard map" under an assumption that earthquake occurrence basically follows a renewal process based on BPT (Brownian Passage Time) distribution. The other is "Long-time averaged hazard map" under an assumption that earthquake occurrence follows a stationary Poisson process. The former is based on long-term assessments for the forthcoming large earthquakes in three subduction-zones. So it offers a probabilistic tsunami hazard map that naturally corresponds to a set of the long-term assessments of the forthcoming earthquakes, for three subduction-zones above, published by ERC/HERP. On the other hand, the latter is effective for us to make social/infrastructural preparations over hundreds year long.

A Present-time hazard map, showing the probability that the tsunami height will exceed 3 meters at coastal points in next 30 years (starting at 1st January, 2016), suggests high possibility over 60% in several coastal zones along the southern coasts of Shikoku to Tokai region, perhaps due to contribution from the next Nankai earthquake. Since the occurrence probability for the next 30 years, starting from 2013/01/01, is assessed 60% to 70% by ERC, this high possibility of 60% means that almost all the

tsunami heights in the several coastal zones will tend to be greater than 3 meters. However, a long-time averaged hazard map, showing the probability that the tsunami height will exceed 3 meters at coastal points in next 30 years, suggests a not-so high possibility less than 20-30% for coastal zones along the Pacific coast. This is because long-time averaged hazard maps do not present an impending danger but do give a long-term perspective over hundreds to thousands years.

キーワード：確率論的津波ハザード評価、確率、津波、南海トラフ、相模トラフ、日本海溝

Keywords: probabilistic tsunami hazard assessment, probability, tsunami, Nankai Trough, Sagami Trough, Japan Trench

# 北海道東部17世紀の巨大地震による津波断層モデルの検討

## Examination of tsunami fault model for the 17th century great earthquake in eastern part of Hokkaido.

\*横田 崇<sup>1,2</sup>、根本 信<sup>3</sup>、高瀬 嗣郎<sup>3</sup>、吾妻 瞬一<sup>3</sup>、高田 幸司<sup>1</sup>、池田 雅也<sup>1</sup>

\*Takashi YOKOTA<sup>1,2</sup>, Makoto NEMOTO<sup>3</sup>, Shiro TAKASE<sup>3</sup>, Shunichi AZUMA<sup>3</sup>, Koji TAKATA<sup>1</sup>, Masaya IKEDA<sup>1</sup>

1. 内閣府、2. 愛知工業大学、3. 応用地質株式会社

1. Cabinet Office, 2. AICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 3. OYO CORPORATION

内閣府では「日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会（2015年2月設置）」において、日本海溝および千島海溝で発生する最大クラスの地震の検討を実施しているところである。その一環として、横田ほか(2015)では2011年東北地方太平洋沖地震の津波断層モデルの見直しを行っており、現在は北海道東部太平洋沿岸での17世紀の巨大地震による津波断層モデルの検討を行っている。

南海トラフでの地震に比べ、北海道東部17世紀の巨大地震については津波による歴史資料は少ないが、海岸域のみでなく内陸部においても津波堆積物調査が精力的に行われている（例えば、七山ほか(2003)、平川ほか(2005)）。これらの調査から抽出される津波堆積物データにより推定された浸水範囲および沿岸での津波の高さを説明する津波断層モデルとしては、例えば佐竹ほか(2008)やIoki and Tanioka(2016)がある。これらの津波断層モデルは、数枚の矩形断層を設定し、浸水範囲や沿岸の津波の高さをフォワード計算により説明することを試みたものである。

これに対して本検討では、浸水範囲や沿岸の津波の高さをターゲットデータとして、プレート上に配置した断層セグメントのすべり量をインバージョン解析に基づいて推定し、津波断層モデルの推定を行った。ここで、断層すべりが海溝軸まで及んでいたかどうかの問題となる。そこで、本検討においては、モデルA（海溝軸まですべるモデル）とモデルB（海溝軸まですべらないモデル）の2パターンを想定してすべり量分布を求めた（暫定解）。モデルAとモデルBの主な特徴は以下のとおりである。

1) モデルA：Mw=9.2、Mt=9.1

最大すべり量68m、平均すべり量14m

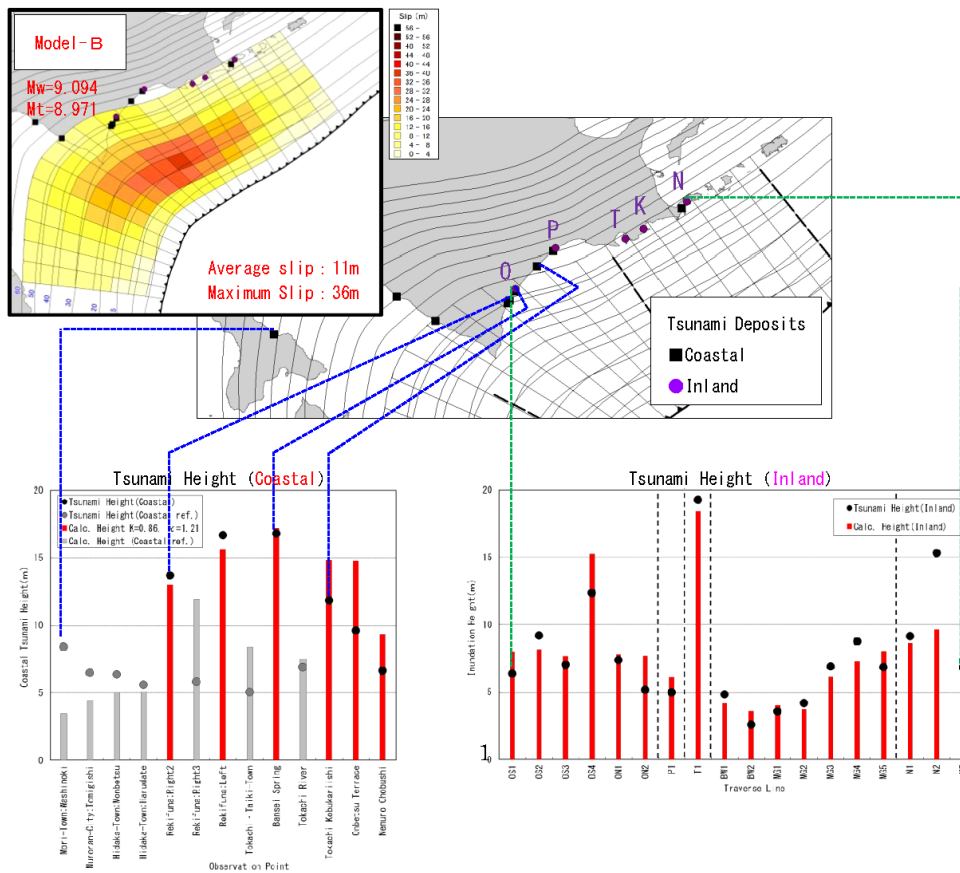
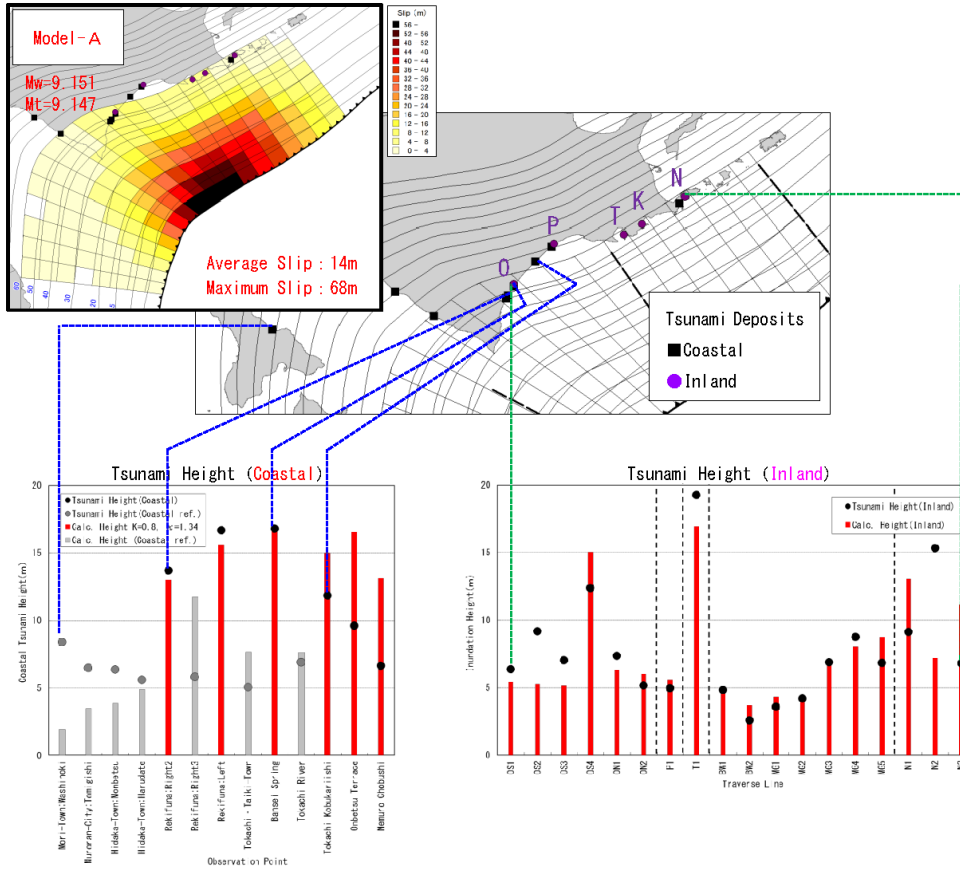
2) モデルB：Mw=9.1、Mt=9.0

最大すべり量36m、平均すべり量11m

浸水範囲や沿岸の津波の高さは、いずれのモデルにおいて同程度に再現できたが、モデルBに対してモデルAは、海溝軸近傍でのすべり量がより大きくなるモデルとなることが分かった。この原因としては、海溝軸近傍のプレート傾斜角が小さいため、大きな津波を発生させるためにはすべり量も大きくする必要があるのであると考えられる。

キーワード：津波断層モデル、津波堆積物、インバージョン、被害想定

Keywords: tsunami fault model, tsunami deposit, inversion, earthquake hazard assessment





## S-netを用いた津波遡上即時予測システムの開発

### Developmental status of real-time tsunami inundation forecast system using S-net

\*山本 直孝<sup>1</sup>、青井 真<sup>1</sup>、鈴木 亘<sup>1</sup>、高橋 成実<sup>1</sup>、中村 武史<sup>1</sup>、平田 賢治<sup>1</sup>、功刀 卓<sup>1</sup>、中村 洋光<sup>1</sup>

\*Naotaka YAMAMOTO<sup>1</sup>, Shin Aoi<sup>1</sup>, Wataru Suzuki<sup>1</sup>, Narumi Takahashi<sup>1</sup>, Takeshi Nakamura<sup>1</sup>, Kenji Hirata<sup>1</sup>, Takashi Kunugi<sup>1</sup>, Hiromitsu Nakamura<sup>1</sup>

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

防災科学技術研究所では、房総沖から北海道おきにかけての東日本太平洋沖に広域（1,000 x 300 km）かつ稠密（30～60 km間隔）なインライン式のリアルタイム地震・津波の観測網であるS-net（日本海溝海底地震津波観測網；Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench）を構築している（植平他、望月他、JpGU、2017）。そこで我々は、S-netで得られる津波（水圧変動）の観測データを用いて、津波の遡上までを即時に予測するためのシステムを開発中である（Aoi et al., Suzuki et al., JpGU, 2017）。本講演では、我々が開発した千葉県の上総・外房沿岸地域を対象とした津波遡上即時予測システムの現状と、S-netで得られた津波の観測事例を報告する。今後は、沿岸自治体の協力の下実証実験等を通じてシステムの改良を進めていく予定である（高橋、JpGU、2017）。本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理法人：JST）によって実施されました。

キーワード：S-net、日本海溝海底地震津波観測網、津波、即時予測

Keywords: S-net, Seafloor observation network, Tsunami, Real-time forecast

# べき乗則をもとにした津波高予測のための非線形パラメトリックモデル Nonlinear parametric model based on power law for tsunami height prediction

\*吉川 真史<sup>1</sup>、村田 伸<sup>1</sup>、五十嵐 康彦<sup>1</sup>、馬場 俊孝<sup>2</sup>、堀 高峰<sup>3</sup>、岡田 真人<sup>1</sup>

\*Masashi Yoshikawa<sup>1</sup>, Shin Murata<sup>1</sup>, Yasuhiko Igarashi<sup>1</sup>, Toshitaka Baba<sup>2</sup>, Takane Hori<sup>3</sup>, Masato Okada<sup>1</sup>

1. 東京大学大学院新領域創成科学研究科、2. 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部、3. 海洋研究開発機構地球津波海域観測研究開発センター

1. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 2. Institute of Technology and Science, The University of Tokushima, 3. Research and Development Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Dense Ocean-floor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET) was constructed in offshore Wakayama prefecture to cope with the damage of the Nankai Trough earthquakes accompanied by a large-scale disaster. In DONET1, ocean-bottom pressure gauges are installed at 20 points, and it is possible to detect the pressure change caused by tsunami immediately. Moreover, by using a super computer it has become possible to simulate tsunami in various scenarios precisely and get the observation value of ocean-bottom pressure gauges in DONET1 and the tsunami height along the coast (Baba et al. 2014).

Methods of predicting tsunami have been proposed in previous studies. These methods predict the tsunami height by learning the relation between the ocean-bottom pressure and the tsunami height. A method using linear regression (Baba et al. 2014) and a method using Gaussian process (Igarashi et al. 2016) were proposed. However, the former method is impossible to learn the nonlinear relationship and to predict with high accuracy. On the other hand, the latter method is based on nonparametric model which is difficult to correspond to the physical model.

In this study, we propose a nonlinear parametric model based on the assumption that there is a nonlinear relation based on power law between the ocean-bottom pressure and the tsunami height. In this model, the relationship is expressed by the formula  $d = a_1x_1^{b_1} + a_2x_2^{b_2} + \dots + a_{20}x_{20}^{b_{20}} + c$ , where  $d$  is the tsunami height,  $x_i$  is the observation value of ocean-bottom pressure gauge, and  $a_i$ ,  $b_i$ , and  $c$  are parameters.

An experiment to compare the accuracy of tsunami height predicting methods was carried out. As a result, we observe that the prediction error of the proposed method is 0.81m, where that of the linear regression is 1.28m. It decreased by 37%. Moreover, the prediction error of the proposed method is as low as that of the Gaussian process, 0.77m. According to the proposed method, it is possible to create an interpretable and highly accurate model that predict the tsunami height by learning the relation between the observation value of ocean-bottom pressure gauge and the maximum value of the tsunami height.

キーワード：津波高予測、非線形パラメトリックモデル、DONET

Keywords: Tsunami height prediction, Nonlinear parametric model, DONET

## 平均スペクトルを用いた島の津波応答関数の導出

### Extraction of tsunami response functions at small islands by averaging four tsunami spectra

\*阿部 邦昭<sup>1</sup>

\*Kuniaki Abe<sup>1</sup>

1. なし

1. none

ウエーキ、ジョンストン、ミッドウエイの3島に対して、そこで得られた1952年カムチャッカ、1960年チリ、1964年アラスカ、2011年東北の4津波の各パワースペクトルのスペクトル成分の和をとって平均することで、平均スペクトルを求め、これを各島の津波応答関数とした。これと元のスペクトルとの間で対数差をとって差スペクトルとし、ウエーキ島の2011年東北津波の差スペクトルを同じ津波のDART21413のスペクトルと比較し、整合性を確認した (Fig.1)。

キーワード：応答関数、島、津波スペクトル

Keywords: response function, island, tsunami spectra

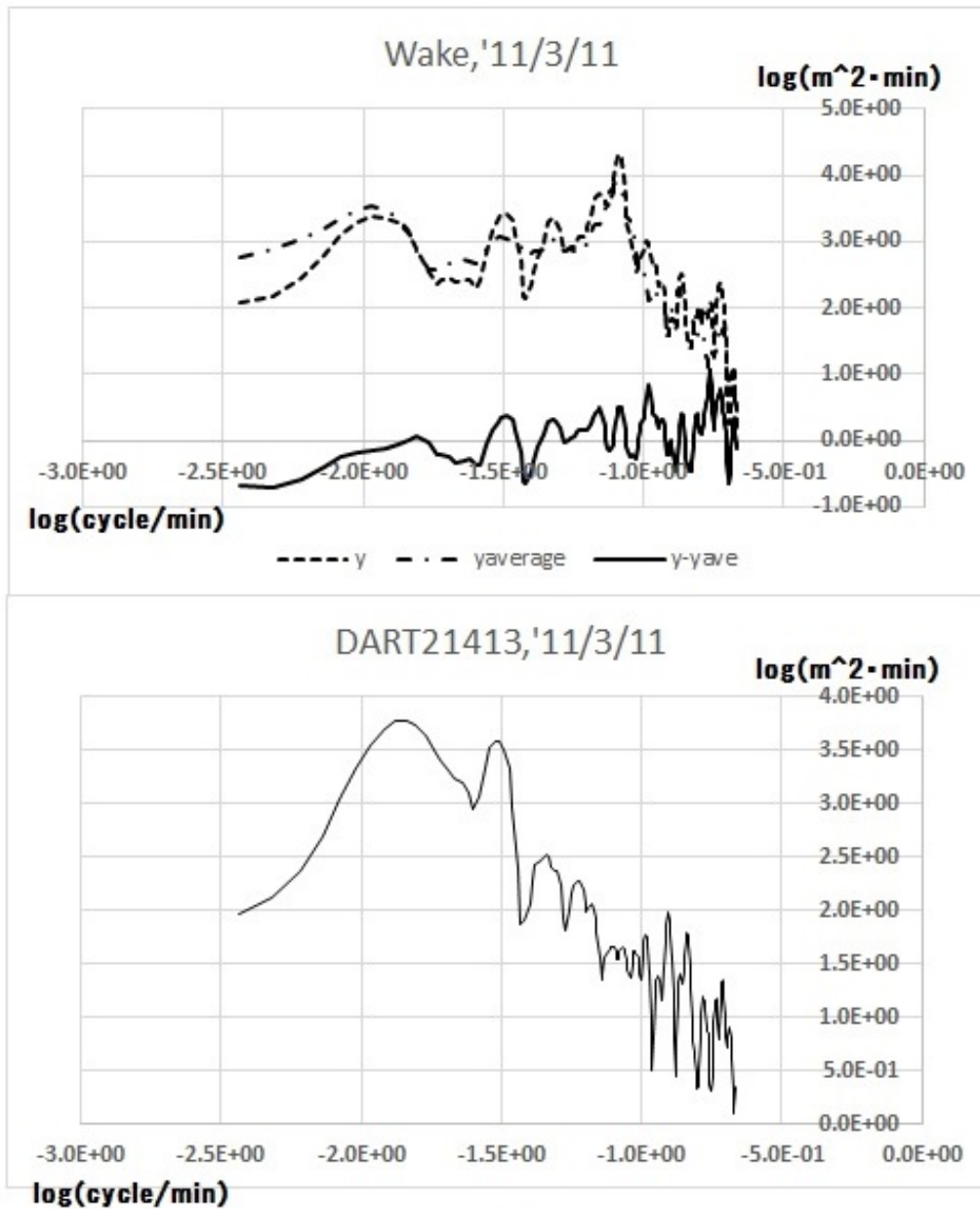


Fig.1

# 歴史津波史料をデータとし津波遡上計算により推定された1611年慶長三陸津波地震の震源モデル

## Fault model of the 1611 Keicho Tsunami earthquake (Mw9.0) estimated from historical documents using tsunami inundation simulation

福原 紘太<sup>1</sup>、\*谷岡 勇市郎<sup>1</sup>

Genta Fukuhara<sup>1</sup>, \*Yuichiro Tanioka<sup>1</sup>

1. 北海道大学大学院理学研究科地震火山研究観測センター

1. Hokkaido University, Institute of Seismology and Volcanology

1611年慶長津波地震は、1896年明治三陸津波地震の1つ前の津波地震として知られている。この地震の震度は4程度であり、津波の高さが高い所で30m程度あったとの歴史史料から津波地震であったとされている。さらに津波は本震の4時間程度後に襲っており、大きな津波は余震（最大震度3程度）により発生したとされている。

しかし、この津波被害を記述した歴史史料の中には信頼性が低いとされているものも多く存在するとされてきた。最近になり、蝦名・高橋（2014）や蝦名・今井（2014）により歴史史料が精査され、信頼度の高い歴史史料のデータセットが作成された。そこで本研究では、蝦名・今井（2014）の歴史史料データを全て説明できる1611年慶長三陸津波地震の最適断層モデルの推定を試みる。

まず、1611年の歴史史料データと2011年東北地方太平洋沖地震津波で調査された浸水域を比較すると1611年慶長津波の浸水域は2011年東北地方太平洋沖津波の浸水域と同程度または上回っていることが分かった。特に岩手県宮古や岩手県小谷島、宮城県岩沼では1611年の方が内陸まで浸水していることがわかった。このことから1611年慶長津波地震は2011年東北地方太平洋沖地震と同程度またはそれ以上の規模であったと考えられる。

次に断層モデルによる津波遡上計算を実施し、歴史史料の記述との整合性を比較する。断層の傾斜角とすべり角はプレート境界型地震を仮定し、10度および90度とした。また、津波地震であったことを考え断層は日本海溝まで達するとした。津波の数値計算は震源域を含む広域では線形長波近似を用いて水平方向30秒格子間隔で実施した。さらに、歴史史料（蝦名・今井2014）の存在する地点を全て含む6つの地域では津波遡上計算を実施した。遡上計算実施地域は30m格子間隔を用いた。津波痕跡分布から断層の位置と長さを推定するために1枚の矩形断層を仮定し、津波の線形長波計算を行いおよそその断層位置と長さを推定した。その後、津波痕跡データがある6つの地域において津波浸水計算を行い、用いたデータすべてを説明できるモデルを推定した。その結果、長さ250km、幅100km、すべり量80mが必要であることが分かった（Mw9.1）。しかし、この断層モデルでは仙台平野において、浸水範囲が過大評価になっていることが分かった。そこで、断層を長さ100kmの北部と150kmの南部の2枚の矩形断層に分け、最適のすべり量を推定した。その結果、北部のすべり量は80mのまま、南部の断層のすべり量は40m程度で歴史史料と整合的な結果を得ることができた。その結果から推定された1611年慶長三陸津波地震のMwは9.0となった。

上記の結果を2011年東北地方太平洋沖地震のすべり量分布と比較すると、今回80mの大すべりが推定された北部の断層は2011年東北地震ではすべっていないことが分かった。しかし、今回40mのすべりが推定された南部の断層は、2011年東北地震により大きくすべった場所と一致することが分かった。つまり、1611年慶長三陸津波地震で大きくすべった場所が2011年東北地方太平洋沖地震で再びすべったこととなる。さらに、869年貞観地震によりすべった場所が742年後に1611年慶長三陸津波地震ですべり、400年後に2011年東北地方太平洋沖地震によりすべったこととなる。太平洋プレートのこの地域での収束速度は1年間に約9cmであることを考えると742年後に60m程度すべる巨大地震が発生することは可能であり、1611年慶長三陸津波地震での40mのすべりは十分可能と思われる。さらに400年後には36mすべることが可能となるが

2011年東地方太平洋沖地震の最大すべりは50m程度であり、少し大きすぎる。しかし、1611年慶長地震は津波地震であることなどから2つの巨大地震の詳細なすべり量分布が違っていると考えれば説明可能かもしれない。

#### 参考文献

蝦名裕一・今井健太郎, 2014, 史料や伝承に基づく1611年慶長奥州地震の津波痕跡調査, 津波工学研究報告, 第31号, p139-148

蝦名裕一・高橋裕史, 2014, 『ビスカイノ報告』における1611年慶長奥州地震津波の記述について, 歴史地震, 第29号, p195-207

キーワード : 1611年慶長三陸津波地震、津波遡上計算、2011年東北地方太平洋沖地震

Keywords: 1611 Keicho Tsunami Earthquake, Tsunami inundation simulation, 2011 Tohoku-oki Earthquake

# 1741年渡島大島での山体崩壊と津波遡上域の数値シミュレーションによる再現

## Tsunami and landslide model due to the 1741 Oshima-Oshima eruption in Hokkaido, Japan

\*伊尾木 圭衣<sup>1</sup>、柳澤 英明<sup>2</sup>、谷岡 勇市郎<sup>3</sup>、川上 源太郎<sup>4</sup>、加瀬 善洋<sup>4</sup>、仁科 健二<sup>4</sup>、廣瀬 亘<sup>4</sup>、石丸 聡<sup>4</sup>

\*Kei Ioki<sup>1</sup>, Hideaki Yanagisawa<sup>2</sup>, Yuichiro Tanioka<sup>3</sup>, Gentaro Kawakami<sup>4</sup>, Yoshihiro Kase<sup>4</sup>, Kenji Nishina<sup>4</sup>, Wataru Hirose<sup>4</sup>, Satoshi Ishimaru<sup>4</sup>

1. 産業技術総合研究所、2. 東北学院大学教養学部地域構想学科、3. 北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センター、4. 北海道立総合研究機構 地質研究所

1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2. Department of regional Management, Faculty of Liberal Arts, Tohoku Gakuin University, 3. Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University, 4. Geological Survey of Hokkaido, Hokkaido Research Organization

1741年北海道渡島大島での山体崩壊により津波が発生した。この津波は、渡島半島や津軽半島の日本海沿岸に大きな被害をもたらした。津波堆積物調査より、北海道奥尻島沿岸と檜山沿岸において、この津波による津波堆積物が確認された。渡島大島噴火による地すべりと、それに伴う津波のシミュレーションをおこない、地すべりの崩壊堆積物の分布、歴史記録による津波の高さ、津波堆積物の分布、すべてを説明することができるモデルを構築した。まず渡島大島北側の範囲において海底地形調査データ(Satake and Kato, 2001)を用い、地形判読による山体崩壊の崩壊範囲、堆積範囲の推定をおこなった。さらに山体崩壊前の地形復元、崩壊土量の再見積もりをおこなった結果、崩壊土量は $2.2 \text{ km}^3$ と見積もられた。これらをもとに、土塊と水塊を考慮した二層流モデル(地すべり・津波統合モデル:柳澤他, 2014)を用いて、地すべり・津波シミュレーションをおこなった。その結果、地すべりのふるまいは、海底斜面をゆっくりすべり15分程度で停止する。一方津波のふるまいは、土塊が斜面をすべり1分程度で最大波となる第一波が発生する。計算された崩壊堆積物の分布は、地形判読による崩壊堆積物の分布と概ね調和している。また北海道奥尻島沿岸と檜山沿岸における計算された津波の高さは、歴史記録による津波の高さと概ね調和的である。計算された津波浸水範囲は、津波堆積物調査より確認された津波堆積物の分布範囲を若干超える範囲まで到達した。

キーワード：津波、地すべり、北海道

Keywords: tsunami, landslide, Hokkaido

## 分散性を考慮した津波波線追跡と初期海面変動の推定：2015年スミスカルデラ地震への適用

### Ray tracing for dispersive tsunamis and estimation of initial sea-surface displacement: Application to the 2015 Smith Caldera earthquake

\*三反畑 修<sup>1</sup>、綿田 辰吾<sup>1</sup>、佐竹 健治<sup>1</sup>、深尾 良夫<sup>2</sup>、杉岡 裕子<sup>3</sup>、伊藤 亜妃<sup>2</sup>、塩原 肇<sup>1</sup>

\*Osamu Sandanbata<sup>1</sup>, Shingo Watada<sup>1</sup>, Kenji Satake<sup>1</sup>, Yoshio Fukao<sup>2</sup>, Hiroko Sugioka<sup>3</sup>, Aki Ito<sup>2</sup>, Hajime Shiobara<sup>1</sup>

1. 東京大学地震研究所、2. 海洋研究開発機構、3. 神戸大学大学院理学研究科

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science & Technology, 3. Department of Planetology, Kobe University

Ray tracing method based on the optics theory has been applied to tsunamis in order to calculate travel times and refractions due to bathymetry variations. Previous methods are applicable to linear long-waves [e.g. *Satake, 1988, PAGEOPH; Woods and Okal, 1987, GRL*]. However, real tsunamis are dispersive, that is, have frequency-dependent propagation speeds so that the method needs to be extended to dispersive tsunamis.

The method is also used for estimation of the initial sea-surface displacement in combination of Green's law, that is based on the conservation law of the potential energy of linear long-waves [e.g. *Abe, 1973, PEPI; Satake, 1988, PAGEOPH*]. By using the law, previous studies estimated the height of the initial sea-surface displacement assuming that the peak amplitudes of the initial displacement and outgoing waves from a source region are the same. However, this assumption might lead to an underestimation of the initial wave height, because tsunami waves behave differently inside the source region.

In this study, we first propose a new ray-tracing method extended to dispersive tsunamis. We create frequency-dependent velocity maps from 2-D bathymetry data by solving iteratively the formula of dispersion relation of the linear gravity wave by a recursive algorithm. Then ray paths at different fixed frequencies are traced on the frequency-dependent velocity fields by integrating ray equations for seismic surface waves [e.g. *Yomogida and Aki, 1985, JGR*].

For more precise modeling of the initial sea-surface displacement, we investigate tsunami behaviors near the source region by waveform simulations to confirm that outgoing waves from the source region have a wave height less than a half of the height for various initial sea-surface displacement models. We propose an alternative way to estimate the initial sea-surface displacement. First, the source region is estimated by means of the back-projection using arrival times of tsunami signals at stations. Secondly, the wave height of outgoing waves from the source region is derived from an observed height by using Green's law. Finally, we obtain the height of the initial sea-surface displacement by using the ratio of the peak amplitudes of the initial static displacement models and simulated outgoing waves from the source region.

These two methods are applied to a real tsunami event that was caused by an abnormal volcanic earthquake near Smith Caldera with a diameter of about 7 km on the Izu-Bonin arc. The earthquake had a CLVD-type focal mechanism and generated larger tsunami waves compared to its magnitude (M5.7), and therefore the earthquake may be regarded as a "volcanic tsunami earthquake." Dispersive tsunamis were recorded by a dense array of ocean bottom pressure (OBP) gauges, 100 km to the NNE from the epicenter



[*Fukao et al.*, 2016, JpGU]. It is notable that the measured slowness direction of wavefront deviates from the great circle path and varies as a function of frequency.

Our new ray tracing for dispersive tsunamis shows that ray paths are significantly dependent on its frequency, particularly at deep oceans. Simulated slowness direction and arrival time at the array change as a function of frequency, which is consistent with the observations by *Fukao et al.* [2016, JpGU]. By minimizing the misfit between observation and ray tracing, the peak point of the tsunami source can be constrained within Smith Caldera. In addition, we model the initial sea-surface displacement using our new method with the tsunami data at the OBP array. The boundary of the source region is located close to the inner-wall of Smith Caldera. By assuming a column-shaped displacement with the size of Smith Caldera, we obtain the initial wave height of at least 30 cm. Although some uncertainties remain, these results imply that these methods are very powerful to preliminarily estimate the initial sea-surface displacement.

キーワード：波線追跡、分散性津波、津波解析、火山性地震、津波地震

Keywords: ray tracing, dispersive tsunamis, tsunami analysis, volcanic earthquake, tsunami earthquake

## 海底観測網と即時津波予測システム

### Oceanfloor network system and real-time tsunami prediction system

\*高橋 成実<sup>1</sup>

\*Narumi Takahashi<sup>1</sup>

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

2011年の東北地方太平洋沖地震では、特に津波による被害が甚大であった。この津波に対する対策が被害軽減には重要である。被害軽減のためには、啓発活動を視野に入れた対策が必要で、津波発生時の現実的な対応シナリオが求められる。そのためには津波の早期検知と津波発生から到達、浸水までの一連の状況把握が欠かせない。

将来の巨大地震発生が懸念される南海トラフでは、地震・津波観測監視システム（DONET）が整備され運用されている。このDONETを用いた即時津波システムは海洋研究開発機構によって開発され、防災科学技術研究所と連携して高度化が進められている。ここで構築された即時津波予測システムは、データベースを抱えて、断層モデルの特定よりも津波伝播による振幅の増幅に着目したものである。DONET観測点における水圧値と沿岸の予測地点の津波高の相関性に着目し、入力されるDONETの水圧値に応じて予測地点の津波高や到達時間、浸水エリアを推定する。DONETの空間的な広がりを利用し、1500ケースを超える断層モデルからDONETで観測された地震と津波を検知し、その時間差から断層モデルを絞り込むとともに、ある予測地点にとって最適なDONET観測点の組み合わせを、津波を検知した観測点の中から逐次求め、それらの水圧値を入力情報とすることで、予測の精度の向上を図った。このシステムは、DONET1を利用したシステムが和歌山県、三重県、中部電力、尾鷲市に実装済みで、現在、DONET2を用いた新しいシステムを検証している。このシステムは断層モデルを特定せず、津波伝播の状況から最もその予測地点にとって可能性のある最悪のシナリオを抜き出すことになる。つまり、すべりの不均質や海底地すべりのような局所的な影響を反映させやすいシステムである。また、啓発活動のために、事前に計算した断層モデルを用いた予測評価も可能である。

このようなシステムの実装には観測データの品質評価が欠かせない。そのデータ品質を踏まえ、自治体での運用を考え、欠測の可能性を含めた様々な事象に対応できる柔軟性と、運用上のわかりやすさも必要になる。予測手法や可視化手法は、その目的や地域性によって変わるだろう。複数の予測値が利用者を混乱させないような工夫は必要であるが、予想手法や可視化手法において、ハイブリッドなシステムを目指す予定である。

キーワード：津波、即時予測、DONET

Keywords: Tsunami, real-time prediction, DONET

# 千葉県をフィールドとした津波情報の利活用に関する研究

## Application of Tsunami Information to Disaster Mitigation in Chiba Pref.

\*久保 智弘<sup>1</sup>、大井 昌弘<sup>1</sup>、鈴木 亘<sup>1</sup>

\*Tomohiro Kubo<sup>1</sup>, Masahiro Ooi<sup>1</sup>, Wataru Suzuki<sup>1</sup>

1. 防災科学技術研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

津波災害は低頻度大災害であるため、自治体の防災担当者は十分な災害対応の知識や経験を有していないことが多い。しかし、こういった現状を克服するため、自治体などでは定期的に図上演習や避難訓練などを実施している。一方、和歌山県は気象業務法における津波予報業務許可を取得し、JAMSTECとの共同研究によって開発した津波即時予測システムを活用した津波防災を進めている。防災科研では、内閣府のSIP戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）レジリエントな防災・減災機能の強化 津波被害軽減のための基盤的研究において、上述のような取り組みも踏まえてS-netによる津波即時予測情報を活用した津波防災に関する研究開発を実施している。この研究開発では、津波即時予測技術の開発に加えて、千葉県と連携した津波即時予測情報の利活用に関する研究も実施している。利活用に関する研究開発では、自治体の防災担当者が津波即時予測情報を活用し、迅速な初動対応ができるようにするため、自治体の防災担当者を対象にした津波情報に関する周知啓発活動を実施している。さらに、自治体の防災担当者の情報が適切かつ効果的に避難につながるようにするため、その情報の受け手である地域住民を対象とした周知啓発活動を実施している。本研究では、この周知啓発活動において効果的に人に伝えることに主眼を置いていることから、マーケティング手法のAIDMAを活用し、津波防災の周知啓発活動に適用を試みている。本発表ではこれまで3年間実施してきた活動の報告を行う。

キーワード：津波情報、防災教育、AIDMA

Keywords: Tsunami Information, Education for Disaster Mitigation, AIDMA

# 慶長9年12月16日（1605-II-3）地震による房総半島沿岸での津波高さ分布

## Height Distribution of the tsunami of the Keicho Earthquake of February 3, 1605 on the coast of the Boso Peninsula

\*都司 嘉宣<sup>1</sup>、畔柳 陽介<sup>2</sup>、木南 孝博<sup>3</sup>、佐藤 雅美<sup>4</sup>、芳賀 弥生<sup>4</sup>、今村 文彦<sup>4</sup>

\*Yoshinobu Tsuji<sup>1</sup>, Yosuke Kuroyanagi<sup>2</sup>, Takahiro Kinami<sup>3</sup>, Masami Sato<sup>4</sup>, Yayoi Haga<sup>4</sup>, Fumihiko Imamura<sup>4</sup>

1. 公益財団法人深田地質研究所、2. パシフィックコンサルタンツ（株）、3. 頸城技研、4. 東北大学災害科学国際研究所  
1. Fukada Geological Institute, 2. Pacific Consultants Co. Ltd., 3. Kubiki Engineering Co. Ltd., 4. IRIDeS, Tohoku Univ.

慶長9年12月16日の地震による津波の記録は、千葉県房総半島から、伊豆、浜名湖地方、四国南岸、さらに大分県米水津にまで分布している。本研究では千葉県房総半島の津波分布を解明した。『房総治乱記』には「潮大山ノ如クニ巻上テ、浪村山ノ七分ニ打カクル、（中略）先潮災ニ逢シハ」という文に続けて、外房海岸に沿った35個の集落名が列挙されている。この35個の集落の位置を図中に「○」印で示した。記載の順序は、現在の勝浦市の辺原（部原）に始まって西に向かって被災集落名を挙げていき、房総半島最南端付近の横渚（よこすか）まで達する。このあとは、勝浦の東隣の御宿から順次東に向かって列挙し、最後は現在の九十九里町の片貝と不動堂まで達して終わる。浸水範囲、家屋や人間の被害の状況などの記載は全くなく、ひたすら地名が列挙されているのである。ここに挙げられた集落を現代の地図にプロットすると、勝浦から西、誕生寺のある小湊までの、約12kmの海岸線区間内の集落名が一つもないことが分かる。この間では「潮災ニ逢シハ」に挙げるほどの津波被害は生じていなかった事を示している。この無被害海岸区間内の興津の集落に、1264年に開基された妙覚寺があり、津波による近隣集落の被災を記録した古文書を所持している。この寺自身や興津集落の被害には言及していないので、これらは無事であった、と理解される。今回の調査で、この寺の境内の標高は5.1mで有ることが判明した。ここでは津波はこの高さには達して居らず、興津集落にも津波被害は出なかったと推定される。江戸時代初期の基本史料である『当代記』には、「上總國小田喜領海邊取分大波来テ、人馬數百人死、中ニモ七村ハ跡ナシト云々」と書かれている。この「小田喜領」は大多喜城本多氏の支配する範囲であって、伊藤(2005)によると、これは現在のいすみ市域の海岸線に並ぶ旧7ヶ村であることが、最近発見された古文書で確認された。この「跡ナシ」となった7ヶ村のうち4ヶ村が『房総治乱記』の挙げられた35ヶ村のなかに挙げられている。また、鴨川市天面（あまつら）の西徳寺所蔵の『西徳寺縁起』には、天面も一戸残らず流失したと記されているが、天面もこの被災35ヶ村の一つに挙げられている。『房総治乱記』は軍記物語であって、一般的には信憑性は高くないとされるが、上述のように3件の信憑性の高い他の古文書の被災集落に関する記録と符合していることから、『房総治乱記』の被災集落の記述は信頼のおけるものと考えべきであろう。『房総治乱記』の「潮災ニ逢シハ」の表現は、「人家屋は無被害、田畑だけ被害の場合にも該当するではないか？」という疑問に答えておこう。被災35ヶ村のうち、いすみ市内4ヶ村、および鴨川市天面の1ヶ村の合計5ヶ村は、他史料によってすべて「跡なし」、あるいは「全戸流失」であることがわかった。「全戸流失」を白い玉、「半数程度流失」を赤い玉、「少数家屋の流失」を黄色い玉、「家屋流失はなく破損のみ」を緑の玉、「家屋被害はなく田畑のみ被害」を青い玉とし、この5種類の玉35個が入った袋があったとする。この袋から無作為に取り出した5個の玉の色がすべて白（全戸流失）であったとき、この袋の中の玉の色別個数分布に関して何が言えるであろうか？統計的検定の危険率5%の判断で、袋の中の35個のうち19個以上が白い玉でないとうちはならないことがわかる。すなわち、『房総治乱記』に記されて35ヶ村のうち少なくとも19ヶ村が全戸流失、残り16ヶ村も半数近い家屋が流失した、と判断するのが妥当であろう。

そこで我々は、この35個の村に『当代記』にだけ記録された3ヶ村、および後世に分村された村など5ヶ所を加えて、合計43個の集落の地盤標高を測定した。測定は明治期の五万分の一地形図に表記された集落に付

き、集落の代表的中心点P、および集落市街地内の標高最高点Qの2点について測定した。「全戸流失」、あるいは「過半流失」は地上冠水3.0m以上の場合に発生する。また、「全戸流失」の場合には、市街地の最高所の家屋も流失したはずである。そこで、Pに3.0mを加えた値とQの値とを比較し、全戸流失が明らかな8ヶ村では、この両数値の大きい方、それ以外の村では両数値のうち小さい方をそこでの津波浸水高さとして推定して図の津波高さ分布図を得た。図中「◆」印、およびグラフの太線は『当代記』に「跡なし」と書かれた7ヶ村である。図中「△」印の2点は津波被害がなかった2ヶ村である。房総半島で10mを超える浸水高を記録した場所が複数存在する。この津波高分布から推定して、この地震は東海地震ではあり得ないであろう。

謝辞：この研究は原子力規制庁からの受託業務「平成28年度原子力施設等防災対策等委託費（太平洋沿岸の歴史津波記録の調査）事業」（代表：東北大学 今村文彦）の成果の一部をとりまとめたものである。

キーワード：1605年慶長地震津波、歴史地震、歴史津波、房総半島、日本海溝

Keywords: the 1605 Keicho Earthquake-Tsunami, Historical Earthquake, Historical Tsunami, Boso Peninsula, Japan Trench

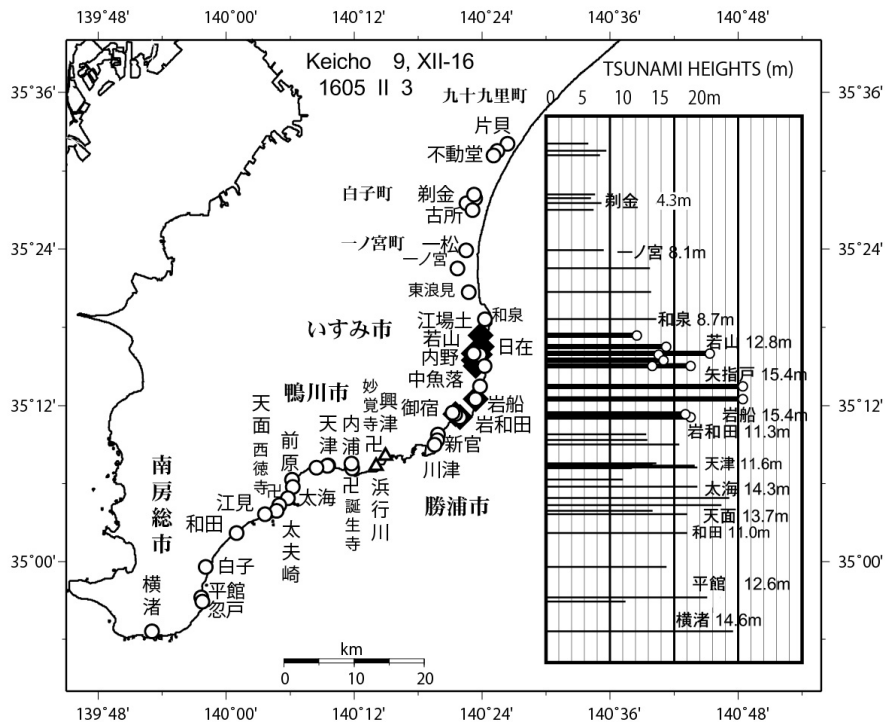


図 慶長9年12月16日（1605年2月3日）関東南方沖地震による房総半島の津波高さ  
 ◆ 『当代記』によって、小多喜領七ヶ村が「中二モ七村は跡形モナシ」と記された集落。  
 ○ 『房総治乱記』に「先潮災二逢シハ」で始まる文章で記された35ヶ村。4ヶ村は『当代記』に「あとかたもなし」と記された村と重複している。勝浦市川津以西、鴨川市内浦までの約13kmの間にある集落は被災した村が無く、この間は無事であったらしい。

## 最大初期津波高と津波電離圏ホール発生時における電離圏全電子数減少率の関係について

### Maximum initial tsunami height estimation 10 min after large earthquake using initial total electron content pulse observation

\*鶴田 拓真<sup>1</sup>、富田 悠登<sup>1</sup>、石川 智也<sup>1</sup>、Gusman Aditya<sup>2</sup>、鴨川 仁<sup>1</sup>

\*Takuma Tsuruda<sup>1</sup>, Yuto Tomida<sup>1</sup>, Tomoya Ishikawa<sup>1</sup>, Aditya Gusman<sup>2</sup>, Masashi Kamogawa<sup>1</sup>

1. 東京学芸大学教育学部物理学科、2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1. Department of Physics, Tokyo Gakugei University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

M7以上クラスの地震に伴う津波発生後約9分以降に津波源の赤道方向にTEC上昇が見られたのち、津波電離圏ホールと呼ばれるTEC減少がおきる。2011年M9東北地方退避栄養沖の場合、23分後に津波電離圏ホールが最大規模となった。津波電離圏ホールにおけるTEC最大減少率は最大初期津波高と相関があることが知られている [Kamogawa et al., Scientific Reports, 2016]。津波電離圏ホールは津波発生領域をおおまかに示していることから、TECのリアルタイム空間観測で早期津波予測が期待できる。一方、TIHの前には、津波発生領域の赤道方向に、TEC上昇がみられる。本研究では、この初期TEC上昇率と最大初期津波高には相関がみられることを示した。この初期TEC上昇はマグニチュードに関わらず約10分で最大に達することから電離圏ホール検知前の情報でも簡易的な早期津波予測が可能とみられる。

キーワード：電離圏擾乱、電離圏全電子数密度、津波

Keywords: Ionospheric disturbance, Total electron content, Tsunami

## Inversion of the perturbation GPS-TEC data induced by tsunamis in order to estimate the sea level anomaly.

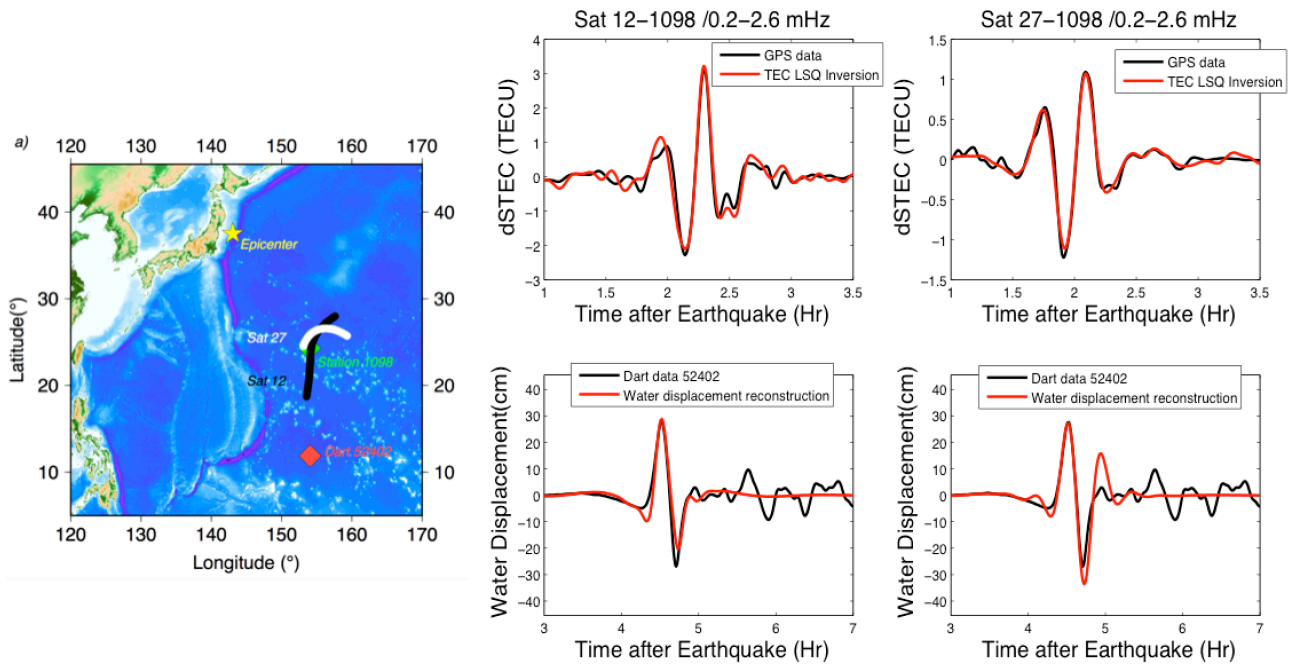
\*Virgile Rakoto<sup>1</sup>, Philippe Lognonné<sup>1</sup>, Lucie Rolland<sup>2</sup>

1. Institut de Physique du Globe de Paris, 2. Université Côte d Azur, OCA, CNRS, IRD, Géoazur, Valbonne, France

Large underwater earthquakes ( $M_w > 7$ ) can transmit part of their energy to the surrounding ocean through large sea-floor motions, generating tsunamis that propagate over long distances. The forcing effect of tsunami waves on the atmosphere generate internal gravity waves which produce detectable ionospheric perturbations when they reach the upper atmosphere. These perturbations are frequently observed in the total electron content (TEC) measured by the multi-frequency Global navigation Satellite systems (GNSS) data (e.g., GPS, GLONASS). In this paper, we performed for the first time an inversion of the sea level anomaly using the GPS TEC data using a least square inversion (LSQ) through a normal modes summation modeling technique. Using the tsunami of the 2012 Haida Gwaii in far field as a test case, we showed that the amplitude peak to peak of the sea level anomaly inverted using this method is below 10 % error. Nevertheless, we cannot invert the second wave arriving 20 minutes later. This second wave is generally explain by the coastal reflection which the normal modeling does not take into account. Our technique is then applied to two other tsunamis : the 2006 Kuril Islands tsunami in far field, and the 2011 Tohoku tsunami in closer field. This demonstrates that the inversion using a normal mode approach is able to estimate fairly well the amplitude of the first arrivals of the tsunami.

Keywords: tsunami modes, gravity waves, inversion, Total Electron Content (TEC)

# Tohoku Earthquake and tsunami occurred the 11/03/2011



**-15.4 min. shift applied**

**Error on max. tsunami height estimation: 12.5%**



## The effectiveness of Green's Function based Time Reverse Imaging method for tsunami source estimate

\*Md Jakir Hossen<sup>1</sup>, Phil Cummins<sup>2</sup>, Kenji Satake<sup>3</sup>

1. Earth Research Institute, University of Tokyo, Japan; BRAC University, Bangladesh, 2. Australian National University, Australia, 3. Earth Research Institute, University of Tokyo, Japan

We developed a Green's Function based Time Reverse Imaging (GFTRI) method in order to recover the initial sea surface displacement associated with tsunami generated by undersea earthquake, submarine landslide etc. This method has the same source representation as the least square (LSQ) source inversion method. In GFTRI method, the source region is divided into a number of source patches and Green's functions (GF) are computed using a unit point source located over each source patch. Instead of using LSQ method, this method uses time reverse imaging method to estimate tsunami source by convolving GFs with time-reversed observed waveforms. This method was implemented in the 2011 Tohoku-Oki earthquake tsunami. In this work, we implemented the method to the 2009 Samoa tsunami whose source mechanism is believed to be complex. For this event, only few observations are available and many of them are located quite far way from the source and contain reflected, refracted, or even scattered waves. So, it is an ideal event to examine whether the method is capable of reconstructing a source model associated with earthquake source having double-couple feature using only the first wave (FW) or the first wave with later arrivals (FL). We carried out several experiments with synthetic waveforms and results indicate that the method is able to extract complex features of the earthquake. We, then, applied this method with actual tsunami waveforms of the Samoa 2009 tsunami (both FW and FL) and our results suggest that this tsunami occurs due to both normal and thrust faulting. Our finding is very consistent with previous studies of seismic waveforms for this earthquake that have suggested the event is a doublet, consisting of both an outer rise normal fault and megathrust rupture.

Keywords: Tsunami , time reverse imaging, source inversion

## DASテクノロジーを使ったリアルタイム津波観測の可能性

### Potential for real-time Tsunami Monitoring using DAS Technology

\*木村 恒久<sup>1</sup>

\*Tsunehisa KIMURA<sup>1</sup>

1. シュルンベルジェ

1. Schlumberger

DASテクノロジーは、パイプラインのモニタリングや侵入者を感知するために、2011年頃から石油・ガス産業で使われている。最新の光ファイバーセンシング技術によって、近年、DASシステムを使って、VSPを含むサイズミックデータを記録することができるようになった。また、井戸内の流体の流れを、流体が流れる時に発生する振動を観測することによって、定性的に把握し、井戸内の生産状況をモニタリングする試みも行われている。我々はこのシステムのことを、‘hDVS’と呼んでいる。

hDVSは、通常用いられるジオフォン、ハイドロフォン、圧力ゲージ等の電気・磁気的なセンサーでなく、光ファイバーを振動計測のセンサーとして使う。実際には、光ファイバーの振動に対するダイナミックストレインを計測しており、シングルモードファイバー、マルチモードファイバーの両者に使うことができ、つなげたファイバーの全長、もしくはパラメータで決めた長さだけをセンサーとして使うことができる。

通常の電気・磁気的な津波センサーは、特に2011年の東日本大震災後、東北沖の太平洋、または日本沿岸各地に地震計とともに設置されてきた。しかし、通常のセンサーは、点としてのデータしか収集することができなく、しかも設置にかかるコストや、センサーの設置環境の制限により、設置される数と場所に限りがある。そのため、センサー間の距離が長いのが現状で、そのセンサー間を通り過ぎる津波をモニタリングすることはできない。

2011年の東日本大震災の際、限られた津波センサーと、地震計での観測により、到達時の津波の高さと、到達予想時間が割り出された。NHK等の番組およびメディアの報道によれば、その情報の不確かさが、避難する人々の行動を遅らせたり、不適切な場所への避難を促した原因の一つだという見解がある。非常に限られた数のセンサーから得られるデータを使って、想定外の巨大な津波を観測し、その行動を予測することは不可能である。

hDVSシステムの場合、既存の、主にデータ通信用の目的で設置してある海底光ファイバーケーブルを、線状の海水の流れを計測するセンサーとして扱うことができ、センサーの設置コストと設置にかかる時間を低く抑える事ができる。特に、国際海底光ファイバーケーブルは、地震が起きやすいプレート同士が重なる領域から一直線に地上局へと引き込まれているので、その間の海水の流れを連続して観測することができる。そのような海底光ケーブルを用いた流れのデータが、数十kmの長い距離において連続して観測されれば、巨大な津波が再び押し寄せた際、その津波の状況を把握する確かなデータとなる可能性がある。津波の高さが増すに従って、津波が起因の振動が大きくなると予想されるので、hDVSのデータを用いて、津波の高さを予測することも可能だと思われる。2011年の東日本大震災の際、幾つかの海底光ファイバーケーブルが切れたと報告されているが、そのことで光通信は途絶えるが、hDVSを用いた地震・津波観測は、切れた箇所までのファイバーを用いて、観測を継続することができる。

hDVSテクノロジーを使えば、海岸から数十km沖合から、津波が発達して押し寄せる様子を連続して観測し、その情報が、より確かな津波警報をもたらす、近未来に起こると予想されている巨大津波災害から、より多くの人命を救えることを確信している。

キーワード : DAS、hDVS、光ファイバー、津波、リアルタイム観測、流れ

Keywords: DAS, hDVS, optical fiber, tsunami, real-time monitoring, flow

# 日本海溝、南海トラフ及び相模トラフ沿いを対象とした確率論的津波ハザード評価のための津波予測解析

## Tsunami simulations for probabilistic tsunami hazard assessment in the Japan Trench, the Nankai Trough and the Sagami Trough

\*齊藤 龍<sup>1</sup>、鬼頭 直<sup>2</sup>、橋本 紀彦<sup>3</sup>、村田 泰洋<sup>1</sup>、井上 拓也<sup>1</sup>、高山 淳平<sup>1</sup>、村嶋 陽一<sup>1</sup>、松山 尚典<sup>2</sup>、秋山 伸一<sup>3</sup>、中村 洋光<sup>4</sup>、平田 賢治<sup>4</sup>、藤原 広行<sup>4</sup>

\*Ryu Saito<sup>1</sup>, Tadashi Kitou<sup>2</sup>, Norihiko Hashimoto<sup>3</sup>, Yasuhiro Murata<sup>1</sup>, Takuya Inoue<sup>1</sup>, Jyumpei Takayama<sup>1</sup>, Yoichi Murashima<sup>1</sup>, Hisanori Matsuyama<sup>2</sup>, Shinichi Akiyama<sup>3</sup>, Hiromitsu Nakamura<sup>4</sup>, Kenji Hirata<sup>4</sup>, Hiroyuki Fujiwara<sup>4</sup>

1. 国際航業株式会社、2. 応用地質株式会社、3. 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社、4. 防災科学技術研究所

1. KOKUSAI KOGYO CO., LTD, 2. OYO Corporation, 3. ITOCHU Techno-Solutions Corporation, 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

防災科研は、日本全国の沿岸において想定される津波ハザードの確率論的な評価を行うための手法の検討に着手し（藤原・他、2013）、すでに日本周辺のいくつかの海域における検討内容及び評価結果を報告してきた（平田・他、2014、2015、2016、JpGU）。また、評価作業の一環として実施した津波予測解析の結果についても、それぞれの海域毎に報告してきた（高山、2016、JpGU；齊藤、2016、地震学会）。今回は、これまで報告してきた日本海溝沿い、南海トラフ沿い及び相模トラフ沿いで発生する地震を対象に実施した津波予測解析の内容をとりまとめ、計算で得られた太平洋沿岸の津波高さの特徴について考察する。津波予測解析の対象になる地震は、津波を起こし得る地震が対象であるため、海溝及びトラフから沈み込むプレート境界に沿って発生する地震並びにその近くで発生する地震とした。ただし海域断層の地震については、その断層の正確な位置や過去の活動が調べられていないものが少なくないため本発表では取り扱わないこととした。日本海溝沿いの震源域は、「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（第二版）（地震調査委員会、2011）」に示されている領域区分に基づき、本検討で評価領域を13分割した領域の組み合わせおよそ40パターンとした。設定する特性化波源断層モデルは「震源を特定して設定する地震」が571個と「震源を特定しにくい地震」が1319個である（遠山・他、2014、JpGU）。南海トラフ沿いの震源域は、「南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）（地震調査委員会、2013）」に示されている18分割された領域区分に基づき、長期評価によって示されている組み合わせ15パターン及び長期評価に示されていない組み合わせおよそ210パターンとした。設定する特性化波源断層モデルは「震源を特定して設定する地震」が3897個と「震源を特定しにくい地震」が48個である（遠山・他、2015、JpGU）。相模トラフ沿いで設定する震源域は、「全国地震動予測地図2014年版（付録-1）（地震調査委員会、2014）」に示されている5分割された領域区分に基づく組み合わせ12パターンとした。設定する特性化波源断層モデルは「震源を特定して設定する地震」が135個と「震源を特定しにくい地震」が928個である（鬼頭・他、2016、JpGU）。これらの計約6900個の特性化波源断層モデルを使い、確率論的津波ハザード評価に必要な津波予測解析を鹿児島県から北海道までの太平洋沿岸を対象に実施した。沿岸付近の計算格子サイズを50mで設定し、震源域から沿岸域までを一括して津波高さを予測するため、外洋から沿岸へ順に1350m、450m、150m、50mで計算格子サイズを細分化し接続した。陸域では遡上境界条件、外洋の計算領域外縁では無反射透過境界条件をそれぞれ課した。それぞれの評価地点における津波は、海底摩擦及び移流を考慮した二次元非線形長波理論による支配方程式をStaggered grid, Leap-frog法で差分化し解くことによって求めた。初期水位分布については、特性化波源断層モデルによって計算される海底地殻変動量をOkada（1992）の手法で求め、その鉛直変位に、地殻変動量の水平変位からの鉛直方向への寄与分を考慮することで算出した。今後、これらの津波予測解析の結果を太平洋沿岸の最大水位上昇量のデータセットとして整備しつつ、幅広い利用促進に向けたデータベース化にも取り組む。本研究は、防災科研の研究プロジェクト「自然災害に対するハザード・リスク評価に関する研究」の一環として実施した。

キーワード：津波ハザード、津波予測解析、日本海溝、南海トラフ、相模トラフ

Keywords: Tsunami hazard, Tsunami simulation, the Japan Trench, the Nankai Trough, the Sagami Trough

# 日本海溝・南海トラフ・相模トラフ沿いにおける確率論的津波ハザード評価の統合方法

## Integration of Probabilistic Tsunami Hazard Assessments along Japan Trench, Nankai Trough and Sagami Trough

\*阿部 雄太<sup>1</sup>、是永 真理子<sup>1</sup>、秋山 伸一<sup>1</sup>、松山 尚典<sup>2</sup>、村田 泰洋<sup>3</sup>、平田 賢治<sup>4</sup>、藤原 広行<sup>4</sup>

\*Yuta Abe<sup>1</sup>, Mariko Korenaga<sup>1</sup>, Shinichi Akiyama<sup>1</sup>, Hisanori Matsuyama<sup>2</sup>, Yasuhiro Murata<sup>3</sup>, Kenji Hirata<sup>4</sup>, Hiroyuki Fujiwara<sup>4</sup>

1. 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社、2. 応用地質株式会社、3. 国際航業株式会社、4. 防災科学技術研究所

1. ITOCHU Techno-Solutions Corporation, 2. OYO Corporation, 3. KOKUSAI KOGYO Co., Ltd., 4. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

防災科研において2012年度から開始した「全国を対象とした津波ハザード評価」では、これまでに日本海溝沿い（平田他, 2015）、南海トラフ沿い（阿部他, 2016a）、相模トラフ沿い（阿部他, 2016b）の3つの海域において発生する地震について、震源の多様性などの様々な不確かさを考慮した確率論的津波ハザード評価を実施してきた。本研究では、複数の海域で発生する津波の危険性を総合的に評価するため、上記の3海域での確率論的津波ハザード評価の統合を試みた。

各海域における波源断層モデルは、基本的に地震調査委員会による長期評価に準拠して震源域を作成し、不均質すべりの分布の不確かさを考慮するため各震源域に対してすべり分布の異なる複数個の波源断層モデルを設定した。長期評価がされていない地震、例えば震源域が海域全体に渡る最大クラスの地震や、規模が小さく震源を予め特定するのが困難な地震については、先行研究（平田他, 2015; 阿部他, 2016a; 阿部他, 2016b）において独自に震源域及び波源断層モデルを作成した。なお、規模の小さい地震は不均質すべりによる津波高さへの影響が小さいと考え、一つの震源域に対して波源断層モデルを一個設定し、不均質すべりの影響はバラツキによって評価した。

地震の発生確率の算出方法として、現時点から今後30年間の津波の危険度を評価するための「現時点でのハザード」と、数千年から数万年に1回程度の低頻度で発生する非常に大きな津波の危険度を評価するための「長期間平均ハザード」の2条件で確率を算出し、それぞれの条件でハザード評価を行った。長期評価において平均発生間隔などの情報が示されている地震については、現時点でのハザードでは長期評価での発生確率算出方法と同様の方法を用いて、BPT分布を用いた更新過程あるいは定常ポアソン過程によって30年発生確率を算出し、長期間平均ハザードでは定常ポアソン過程によって30年発生確率を算出した。長期評価されていない地震については、2条件共に過去の対象海域の地震活動からマグニチュードと発生頻度に関するG-Rモデルを作成して、30年発生確率を算出した。一つの震源域に対して複数個の波源断層モデルが設定されている場合には、各波源断層モデルに対して発生確率を均等に分配した。

沿岸評価地点において各海域のハザードカーブを計算し、各海域での地震発生を独立事象と考えてハザードカーブの統合を行った。また全ての沿岸評価地点で求めたハザードカーブに対して、任意の最大水位上昇量を超過する確率を参照し、その超過確率の空間的分布を示すハザードマップを作成した。ハザードマップの傾向としては、東日本の太平洋側沿岸では日本海溝が、西日本の太平洋側沿岸では南海トラフが支配的であり、相模トラフ沿いの地震は発生確率が他の海域に比べて低いことから、3海域を統合したハザード評価への寄与が小さかった。

キーワード：確率論的津波ハザード評価、確率、長期評価、津波解析

Keywords: probabilistic tsunami hazard assessment, probability, long-term evaluation, tsunami analysis

## 建物スケールの陸域遡上津波の再現計算

## Simulation of Tsunami Inundation in City Scale Model

\*宮下 卓也<sup>1</sup>、森 信人<sup>2</sup>

\*Takuya Miyashita<sup>1</sup>, Nobuhito Mori<sup>2</sup>

1. (株) 建設技術研究所、2. 京都大学防災研究所

1. CTI Eng. Co., Ltd., 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

1. 研究の目的 2011年の東北地方太平洋沖地震による津波は、遡上後、市街地において複雑な挙動を示した。津波の被害評価には最大浸水深を用いることが多いものの、実際の被害状況は最大浸水深の分布と必ずしも一致しないことが確認され、市街地スケールにおける被害評価に関する見直しが求められている。このため、今後の沿岸都市域での津波被害予測には、土地利用を粗度で表現するモデルから建物スケールでの詳細な解析モデルが必要となる。本研究では、2次元と準3次元海洋(Q3D)モデルを用いて、市街地を対象とした津波変形実験の再現計算を行い、遡上後の津波伝播特性について評価を行う。

2. 研究内容 (1) Q3Dモデルによる津波実験の再現計算：遡上波の水位時系列や流速などの詳細な比較を行うため、Park et al.(2013)による実際の市街地を1/50スケールで模擬した津波遡上実験を検証対象とした。市街地モデルは、長さ48.8m、幅26.5mの矩形型平面水槽に設置され、計算は、準3次元海洋モデルであるROMSを用いて行った。ROMSの基礎方程式は静水圧近似を用いたEuler方程式である。水平方向には直交座標系、鉛直方向には $\sigma$ 座標系を用い、空間解像度は4cmである。地形データは、市街地モデルをレーザプロファイラで1mmの精度で計測したものをそのまま数値計算に用いた。鉛直混合には $k-\epsilon$ モデル、水平混合にはSmagorinskyモデルを用いた。遡上前の砕波減衰については、波高水深比を用いた砕波帯のエネルギー減衰を付加し評価した。合計31地点における実験結果を比較対象にQ3Dモデルの精度検証を行った。測点が汀線から伝播する波向に平行な建物間に設置された地点では、砕波による大規模渦によるエネルギー散逸を考慮していないことから、水位についてはやや過大評価となったが、流速と質量フラックスは全体的に実験値とよく整合した。一方で、構造物の背後にあたる点では、波の回折や干渉が大きく影響し、十分な精度を得られなかった。(2) 渦動粘性の変化による質量輸送の検証：水平渦動粘性係数 $\nu_t$ を、時間・空間ともに一定とし、0.000、0.005、0.010 [m<sup>2</sup>/sec]の3条件で計算し、差異を検証した。 $\nu_t$ を0.010としたケースでは、 $\nu_t$ を0.000としたケースに対して、最大流速が計算領域の陸域部の中間で30%程度、最も内陸の地点では50~70%程度減少した。特に水平渦動粘性係数が影響する渦スケールの違いにより、建物間の幅が狭く流れが速い領域における進行速度に大きな差異が現れた。(3) Q3Dモデルと2Dの比較：Q3Dモデルに加えて、鉛直層を1層に落とした2Dモデルを用いて実験の再現計算を行った。2Dモデルによる最大浸水深分布は、内陸部において、Q3Dモデルに比べて小さくなる傾向がある。さらに底面摩擦係数を変化させて比較した結果、2Dモデルは、水位の大きさに関係なく、底面摩擦や渦による散逸を鉛直方向一様に受けるため、流速の鉛直分布を考慮できるQ3Dモデルよりも結果が摩擦係数に鋭敏に反応し、またエネルギー散逸が大きくなる傾向があることを明らかにした。

3. 主要な結論 (1) Q3Dモデルを用いて、市街地のモデルを設置した津波実験の再現計算を行い、実験値と比較した。数値モデルは、遡上波に平行な構造物列間では良好な結果を示すが、構造物の背後での計算精度は不十分であった。(2) 大きさの異なる水平渦動粘性を用いた解析により、市街地のように波の進行幅が変わりやすい地形では、渦粘性係数の値が波の進行する速度に大きく影響することが確認された。(3) さらにQ3Dモデルと2Dモデルの解析結果の比較により、浸水深が減少する内陸部においては、2つのモデル間の差異が大きくなり、2Dモデルでは底面摩擦係数の影響が大きくなることを確認した。

キーワード：津波、準3次元

Keywords: tsunami, quasi-3D

## 三次元海洋・津波・粒子追跡結合シミュレーションに基づいた巨大津波による底泥巻き上げと重金属輸送の推定

### Transportation of sediment and heavy metal resuspended by a giant tsunami based on three dimensional, tsunami, ocean, and particle tracking coupled simulations

\*中田 聡史<sup>1</sup>、林 美鶴<sup>2</sup>、越村 俊一<sup>3</sup>

\*Satoshi Nakada<sup>1</sup>, Mitsuru Hayashi<sup>2</sup>, Shunichi Koshimura<sup>3</sup>

1. 神戸大学海事科学研究科、2. 神戸大学内海域環境教育研究センター、3. 東北大学災害科学国際研究所

1. Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, 2. Research Centre for Inland Seas, Kobe University, 3. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

南海トラフ巨大地震はマグニチュード8~9程度で、将来30年以内に70%の確率で発生するとされており、巨大津波が発生し海洋環境も甚大な被害を受ける可能性が高い。例えば、津波によって海底では底質の巻き上げが発生し、底質中の重金属等の有害物質や赤潮の原因となる植物プランクトンのシストが海水中に放出される可能性がある。特に、大都市に面した沿岸海域、例えば大阪湾奥部においては、底質中にシストや重金属が高濃度で存在しており、津波によってこれらも巻き上がると、水環境が富栄養化・重金属汚染される可能性も考えられる。そこで本研究では、内閣府が新想定(平成24年)した南海トラフ津波断層モデルに基づいて三次元津波・海洋結合シミュレーションを実施し、底泥重金属の代表としての亜鉛がどのようにして巻き上げられ、移流・拡散されるのかを粒子追跡シミュレーションに基づいて調べた。巻き上げの指標となる無次元せん断応力を計算し、海域周辺において津波後に海水中の亜鉛濃度がどの程度高くなるのかを推定した。粒子シミュレーションから次の結果が得られた。大阪湾の東湾では巻き上げが発生し、湾奥ではそれが顕著となる“ホットスポット”が形成され、そこから海洋中に放出された底泥・重金属(亜鉛)は、主に河口循環によって一旦海洋上層へと鉛直的に運ばれた後、沖向きへと輸送される。亜鉛を含んだ海水は、潮流や風によって湾内に広範囲に広がっていき輸送される。亜鉛が粒子に吸着せず再堆積しない場合は、亜鉛は紀淡海峡および紀伊水道を通過して、次第に南向きに輸送されると考えられる。その結果、津波襲来後のホットスポットは、海底泥内の高い亜鉛濃度が低下し、底質環境および生態系は改善される可能性が示唆された。

キーワード：巨大津波、重金属、粒子追跡シミュレーション、南海トラフ巨大地震、大阪湾

Keywords: Giant tsunami, Heavy metal, Particle tracking simulation, Mega-earthquake along Nankai trough, Osaka Bay



## 和歌山県田辺市・串本町間の海岸での宝永地震(1707)および安政南海地震(1854)の津波高分布

### Distribution of the heights of the tsunamis of the 1707 Hōei and the 1854 Ansei-Nankai Earthquakes on the coast between Tanabe City and Kushimoto Town, Wakayama Prefecture

\*矢沼 隆<sup>1</sup>、都司 嘉宣<sup>2</sup>、石塚 伸太郎<sup>1</sup>、上野 操子<sup>1</sup>、松岡 祐也<sup>3</sup>、小田桐 (白石) 睦弥<sup>4</sup>、佐藤 雅美<sup>5</sup>、芳賀 弥生<sup>5</sup>、今村 文彦<sup>5</sup>

\*Takashi Yanuma<sup>1</sup>, Yoshinobu Tsuji<sup>2</sup>, Shintaro Ishizuka<sup>1</sup>, Misako Ueno<sup>1</sup>, Yuya Matsuoka<sup>3</sup>, Mutsumi Odagiri(Shiraishi)<sup>4</sup>, Masami Sato<sup>5</sup>, Yayoi Haga<sup>5</sup>, Fumihiko Imamura<sup>5</sup>

1. 株式会社パスコ、2. 公益財団法人 深田地質研究所、3. 東北大学、4. 花巻市博物館、5. 東北大学災害科学国際研究所  
1. PASCOCO Co.Ltd., 2. Fukada Geological Institute, 3. Tohoku, 4. Hanamaki City Museum, 5. IRIDeS, Tohoku Univ.

紀伊半島の和歌山県側の田辺市と最南端の串本町の海岸は、歴代の南海地震の震源域の近傍に位置する海岸であって、常に大きな津波被害を生じてきた。この海岸をおそった昭和21年(1946)昭和南海地震の記念碑は、数多く見つけることができる。江戸時代にもこの海岸は、宝永地震(1707)、および安政南海地震(1854)の津波による被災記録が数多く残されている。これらの歴史記録に基づく現地調査と津波浸水、あるいは遡上高さの推定は、羽鳥(1980)によって概略の調査が行われた。しかし、その後37年もの年月が経過して新たな地震史料集の刊行、あるいはGPSを応用した測定技術の進歩によって、より細密な調査が可能となってきた。本研究では主として、田辺市から串本町までの海岸を対象として、武者(1941, 1951)の「増訂大日本地震史料」、および地震研究所から刊行された「新収 日本地震史料 III、V別巻5-2、補遺、続補遺」(1983,1987,1989,1994)に掲載された古文書から集落の津波被害、浸水範囲、および津波到達点の情報を含む記録を抽出してデータベースを作成し、集落ごとに集計して調査指針ノートを作成し、2017年1月17日から20日まで、3泊4日の現地調査および標高測量を行った。

古文書記録に、津波到達点がピンポイントで示されている場合には、その記載に従って現地で標高測定を行いその数値を津波高さとした。集落での浸水、破損、全壊、あるいは流失家屋数の記録のみが残っている場合には、当時の全戸数に対する比率を算出し、地上冠水厚さを推定し、これを集落の代表点の標高に加えることによって浸水高を推定した。江戸時代の各津波被災集落の市街地の広がり具合を知るため、現代の二万五千分の一地形図とともに明治期の五万分の一地形図を入手しておいた。江戸期の集落の形状は、明治期のそれと大差ないのが通常である。今回の調査点の大部分は旧熊野街道(大辺路)沿いに市街地が存在するため、原則として旧熊野街道上の集落代表点を一点選択してその標高を測定し、越村ら(2009)を参照して、①大多数の家屋の流失、または全潰の場合は地上冠水厚さは3mかそれ以上とする、②10%~70%程度の家屋流失、又は全潰の場合は地上冠水厚さは2mとする、③数軒の流失は冠水厚さは1.5m、④ただ1軒の流失全壊、あるいは破損、浸水にとどまる場合には、地上冠水厚さは1mとして、集落の代表点の標高に加えることとした。

田辺市新庄地区は、すでに同地区の公民館によって、津波到達位置の調査と、石碑の建立、測定が行われているので、今回の調査では、新庄地区での測定は東光寺門前峠点(ドウの坂)のただ1点だけ調査を行うにとどめた。

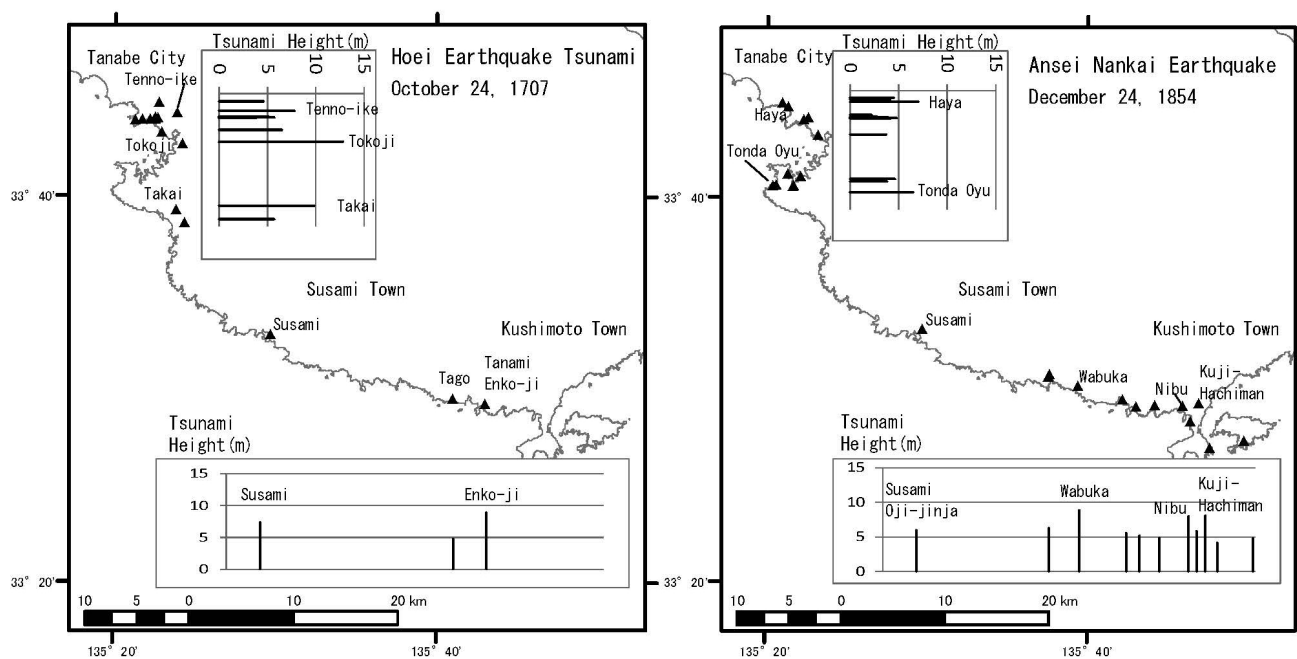
得られた宝永地震(1707、左図)、および安政南海地震(1854、右図)の津波浸水高分布を図に示す。宝永地震の津波では、田辺の中心市街地を構成する本町、紺屋町、片町では総家数411軒で、流失154軒、潰家158軒、大破119軒を出した(田所氏記録)。この3町の標高は2.0~2.2mであるため、地上冠水3mとして、ここでは浸水高5.1mとする。田辺市街地背後の天王池の際(きわ)まで浸水したとされ、その遡上高は

7.8mと推定される。新庄地区では、新庄の谷筋と、その南隣の跡ノ浦の谷筋をさかのぼった海水が、その東光寺門前下の峠点で合流したと伝えられ、ここでは海水は標高12.8mに達したことが確認できた。さらに白浜町富田（とんだ）の高井集落は、全体が標高6.8mの高所にありながら、周辺の集落とともに「一軒も残らず」と記録されている。さらに、すさみ町周参見の万福寺の宝篋印塔は、宝永地震の16年後の1723年に建てられたものであるが、これには宝永津波によって134人の死者があったことを示している。この死者数は当時の周参見の総人口の何割という死者率であったはずである。周参見の市街地の大部分の家屋の流失、あるいは全潰を伴っていたことは必然的である。周参見を縦貫する熊野古道の集落の中心付近の標高は、4.4mであったが、地上冠水厚さを3mと推定して、ここでの浸水高さは7.3mと推定する。宝永津波では、田辺から周参見付近まで、津波高さはおしなべて7~13mであったことは注目すべきである。安政南海地震(1854)の津波は、田辺市・白浜町では4~6m程度であったが、串本町に近づくにつれて津波高さが高くなる傾向が見られる。

謝辞：この研究は原子力規制庁からの受託業務「平成28年度原子力施設等防災対策等委託費（太平洋沿岸の歴史津波記録の調査）事業」（代表：東北大学 今村文彦）の成果の一部をとりまとめたものである。

キーワード：宝永地震、安政南海地震、歴史地震、津波災害

Keywords: Hoei Earthquake-Tsunami, Ansei Nankai Earthquake-Tsunami, Historical earthquakes, Tsunami disaster



## 2003年十勝沖地震の津波痕跡高から推定した特性化波源断層モデル（再現モデル）

### A Characterized Fault Model estimated from the Tsunami height of the 2003 Tokachi-oki earthquake

\*鬼頭 直<sup>1</sup>、平田 賢治<sup>2</sup>、藤原 広行<sup>2</sup>、長田 正樹<sup>2</sup>、根本 信<sup>1</sup>、松山 尚典<sup>1</sup>、村田 泰洋<sup>3</sup>、秋山 伸一<sup>4</sup>  
\*Kito Tadashi<sup>1</sup>, Kenji Hirata<sup>2</sup>, Hiroyuki Fujiwara<sup>2</sup>, Masaki Osada<sup>2</sup>, Nemoto Makoto<sup>1</sup>, Hisanori Matsuyama<sup>1</sup>, Yasuhiro Murata<sup>3</sup>, Shin'ichi Akiyama<sup>4</sup>

1. 応用地質株式会社、2. 防災科学技術研究所、3. 国際航業株式会社、4. 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社  
1. OYO Corporation, 2. NIED, 3. KOKUSAIKOGYO CO., LTD, 4. CTC (ITOCHU Techno-Solutions Corporation)

#### 1. 再現モデル作成の目的

防災科学技術研究所では、東北地方太平洋沖地震を契機として、日本全国の沿岸を対象とした確率論的津波ハザード評価の研究を進めている（藤原・他, 2013, JpGU）。平成24年度から開始され、日本海溝沿い、南海トラフ沿い及び相模トラフ沿いの海域において断層すべりの不均質性を簡略化した「特性化波源断層モデル」を設定し、津波伝播計算による沿岸の津波高から確率論的に津波ハザードを評価している。現在、千島海溝沿いの海域において特性化波源断層モデルを設定し、確率論的津波ハザード評価を実施している。そのような評価をおこなう上で「特性化」の枠組みが有効であることが求められるが、これは、適当にチューニングを加えた、1つの特性化波源断層モデルが過去の地震津波をある程度良好に再現することをもって確認することが可能である。今回、千島海溝沿いの地震津波波源に対する確率論的な津波ハザード評価をおこなうに際し、特性化波源断層モデルの妥当性・有効性を検証するため、2003年十勝沖地震の津波痕跡高をある程度再現する特性化波源断層モデルを、地震調査委員会 (2017) の津波レシピに基づき作成したので、その結果について報告する。

#### 2. 再現モデルの作成方法

曲面的なプレート面上の断層すべりを表現するため、千島海溝から沈み込んでいる太平洋プレートの上面に約5km x 5kmの要素断層を配置した。すべり角は太平洋プレートの北米プレートに対する相対運動方向に基づき設定した。地震調査委員会 (2004) の長期評価で示されている2003年十勝沖地震の震源域を四角形で近似して断層面とし、この断層面内に大すべり域（平均すべり量の2倍のすべり量を持つ領域）を1個設定した。地震規模は同長期評価で認定されているMw8.3とし、この地震規模に相当する地震モーメントから、 $M_0 = mDS$ を用いて、断層の平均すべり量を計算した。これらの断層パラメタを固定し、大すべり域の位置、アスペクト比及び断層全体に対する大すべり域の面積比率を未知パラメタとして、グリッドサーチ法によって最も再現性の高いモデルを求めた。未知パラメタは以下のように定義した。

①大すべり域の位置に関して、既往研究(Tanioka et al.2004, Yamanaka and Kikuchi 2003)ですべり量が大きいと推定された領域周辺に海溝軸と平行方向に3通り、直交方向に3通りの合計9パターン設定した。

②既往研究のすべり量分布に基づき、大すべり域のアスペクト比（海溝軸に平行方向の長さ/海溝軸と直交方向の長さ）を3パターン（0.9,1.0,1.1）設定した。

③既往研究のすべり量分布に基づき、断層全体に対する面積比率を3パターン(25%,30%,35%)設定した。これらの合計81の特性化波源断層モデルに対してフォワード・モデリングを実施した。

#### 3. 再現性の評価

モデルの再現性を評価する指標として、残差二乗和を用いた。痕跡データとしては東北大学の「津波痕跡データベース」(<http://irides.tohoku.ac.jp/project/tsunami-db.html>)から、是永・他(2013)の条件に合致するように選別した2003年十勝沖地震の津波痕跡高を用いた。残差二乗和が最小値を示すモデルは、震源域の西端に大すべり域が位置し、大すべり域の断層全体に対する面積比率が25%、大すべり域のアスペクト比が

0.9のモデルとなった。選定したモデルに関して、相田(1977)の幾何平均 $K$ と幾何標準偏差 $\kappa$ を計算したところ、それぞれ $K=0.98$ 、 $\kappa=1.48$ を示し、この観点においても、2003年十勝沖地震の津波痕跡高を概ね再現する特性化波源断層モデルを求めることができたと考えられる。今後、特性化波源断層モデルの妥当性・有効性を担保するために、過去の地震の津波痕跡高を、特性化の枠組みの中で、ある程度説明する特性化波源断層モデルを各海域で求めていく予定である。

本研究は防災科研の研究プロジェクト「自然災害に対するハザード・リスク評価に関する研究」の一環として実施している。

キーワード：2003年十勝沖地震、特性化波源断層モデル、長期評価

Keywords: 2003 Tokachi-oki earthquake, Characterized fault model, Long-term evaluation

# 海洋レーダを用いた伊勢湾・三河湾における連結副振動の観測

## Observation of Coupled Seiche System in Ise Bay and Mikawa Bay by HF Radar

\*渡久地 優<sup>1</sup>、藤井 智史<sup>2</sup>、日向 博文<sup>3</sup>

\*Yu Toguchi<sup>1</sup>, Satoshi Fujii<sup>2</sup>, Hirofumi Hinata<sup>3</sup>

1. 琉球大学大学院 理工学研究科、2. 琉球大学 工学部 電気電子工学科、3. 愛媛大学大学院 理工学研究科

1. Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyus, 2. Department of Electrical and Electronics Engineering, University of the Ryukyus, 3. Department of Civil and Environmental Engineering, Ehime University

2011年に東北沖で発生した地震による津波・副振動を、伊勢湾および三河湾に設置されていた海洋レーダが観測していた。従来の津波観測機器は定点観測が主流であるが、海面の表層流速を観測可能な海洋レーダは、津波の到来や副振動の観測に有用なものとなる。副振動とは、沿岸域での湾水の共振現象であり、津波などの外力で励起され、異常潮位や急流を発生・継続させる。したがって、沿岸域での防災を考慮するうえで、その観測は非常に重要なものとなる。

本研究では、伊勢湾・三河湾にそれぞれ2局設置されていた海洋レーダおよび湾内に設置された潮位観測点を用いて、津波の到来・副振動の観測を行った。副振動については、伊勢湾での海洋レーダ観測流速場にEOF解析を行い、Loomisの方法と比較することで振動モードを求めた。伊勢湾内では30-40分、60-80分そして120-140分の周期帯で顕著に副振動が発達しており、このうち60-80分そして120-140分は伊勢湾で広域に振動、30-40分の周期帯では局所的な振動の増幅が見られた。

また、津波到来時、三河湾湾奥での水位変動は伊勢湾奥と交互に振動していた。伊勢湾と三河湾は湾口付近で接続しており、それらの振動モードは密接な関係があると考えられる。本発表では、伊勢湾に設置された海洋レーダ観測に加え、三河湾に設置された海洋レーダによって観測された流速場も併せて副振動の解析を行う予定である。

キーワード：副振動、伊勢湾、海洋レーダ

Keywords: Seiche, Ise Bay, HF Radar

# 震源過程解析のすべり分布を使用した、2016年11月福島県沖の地震の津波解析

## Analysis of the November 2016 Fukushima tsunami using the slip distribution of the seismic source process analysis

\*中田 健嗣<sup>1</sup>、藤田 健一<sup>1</sup>、吉田 康宏<sup>2</sup>、林 豊<sup>1</sup>、対馬 弘晃<sup>1</sup>、勝間田 明男<sup>1</sup>

\*Kenji Nakata<sup>1</sup>, Kenichi Fujita<sup>1</sup>, Yasuhiro Yoshida<sup>2</sup>, Yutaka Hayashi<sup>1</sup>, Hiroaki Tsushima<sup>1</sup>, Akio Katsumata<sup>1</sup>

1. 気象庁気象研究所地震津波研究部、2. 気象庁気象大学校

1. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological College, Japan Meteorological Agency

2016年11月22日に福島県沖でMw6.9の地震が発生した。この地震により、仙台港で1.4mなど、北海道から和歌山までの広い範囲で津波が観測された（気象庁, 2016）。

この津波を再現するため、まず一様すべりの矩形断層（一枚断層）を仮定して津波数値シミュレーションを行った。断層のパラメーターは、CMT解析のメカニズムとマグニチュードのスケールリング則で与えた断層サイズ・すべり量を用いた。この結果では、沿岸の仙台港等の観測記録の第一波でみられるような短周期の津波に比べて、波長が長くなり合わない。このため、より小さな波源の断層サイズであった可能性が考えられた。

そこで本研究では、短波長のすべり不均質を推定する震源過程解析の結果を津波の評価に用いた。まず、震源過程解析で小断層上のすべり分布を求める。ここで、震源過程解析に与えた破壊開始点は、一元化震源（気象庁, 2016, 地震・火山月報（防災編））を参考に、北緯37.353度、東経141.603度、深さ10kmとした。断層面は、複数試した結果、観測波形との一致が良いF-netのCMT解析解を採用し、走向：47度、傾斜：38度、初期すべり角：-90度、で与えた。その後、その個々の小断層による海底面の地殻変動を計算した。その地殻変動を足し合せたものを海面水位として与え、津波を計算した。ここで、海面水位は震源時に瞬間的に与えられるとした。地形データは、最小で50mメッシュ（内閣府中央防災会議, 2003）を用いた。小断層による地震モーメントを足し合わせた結果のMwは7.2(剛性率30GPa)、7.0(剛性率15GPa)であった。

計算で求めた沿岸の津波波形は、観測された津波の短周期の波の形状や振幅を良く表した。計算で得られた第一波と反射波の位相を観測のそれに合わせるため、初期水位を南西方向に平行移動させた。その結果、津波の波源は余震分布により近くなるとともに、沿岸の津波観測記録と非常に良く合う結果が得られた。最終的に、西へ0.07度、南へ0.12度だけ平行移動した場合がもっとも観測記録に合った。震源過程解析の結果は、破壊開始点の位置により左右される場合がある。今回の事例の場合、破壊開始点を緯度経度で0.1度程度平行移動させても、結果として得られるすべり分布には大きな影響がなかった。

さらに、最適な初期水位に合うような断層を一枚断層で与えるとどうなるかを調べた。予備的な解析の結果、Mw6.9に対して断層長さ20km、幅15km、すべり量6.3mという、Mw 6.9のスケールリング則からはかなり外れた断層を設定する必要があることが分かった。ただし、ここで剛性率は15GPaを仮定した。このような大きなすべり量は、局所的には震源過程解析のすべり分布でも表れており、妥当な範囲にあると考えられる。

今回のようなマグニチュードによる断層サイズやすべり量のスケールリング則から外れた地震の場合、震源過程解析による小断層のすべり分布の情報をういた津波の波源が効果的である。また、解析を即時的に行う場合、水平位置の不確実性に対応するため、グリッドサーチである程度の誤差を許容した計算を複数行い、結果を取り出すという方法が考えられる。謝辞： 津波数値解析にはTUNAMI-N2を用いました。

キーワード：2016年11月の福島県沖の地震の津波、震源過程解析

Keywords: November 2016 Fukushima tsunami, source process analysis

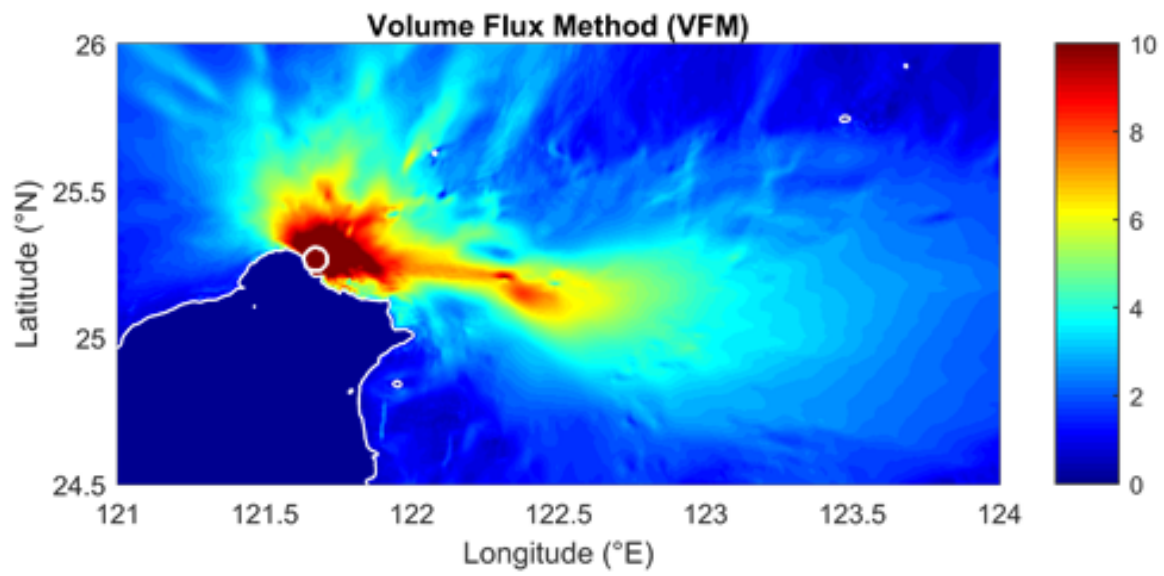
# The Development of Volume Flux Method and the Application on the 1661 Luermen event

\*Tso-Ren Wu<sup>1</sup>, Han Wu<sup>1</sup>, Shun-Kai Hu<sup>1</sup>, Yu-Lin Tsai<sup>1</sup>

1. National Central University

In 1661, Chinese navy led by General Koxinga at the end of Ming Dynasty had a naval battle against the Netherlands. This battle was not only the first official sea warfare that China confronted the Western world, but also the only naval battle won by Chinese Navy so far. This case was significant because it altered the fate of Taiwan until today. One of the critical points that General Zheng won the battle was entering Lakjemuysse bay unexpectedly. Luermen bay was and is an extremely shallow bay with a 2.1 m maximum water depth during the high tide, which was not possible for a fleet of 20,000 marines to cross. Hence, no defense was deployed from the Netherlands side. However, plenty of historical literatures mentioned a strange phenomenon that helped Chinese warships entered the Luermen bay, the rise of water level. In this study, we will discuss the possible causes that might rise the water level, e.g. Tsunami, storm surge, and high tide. We analyzed it based on the knowledge of hydrodynamics. We performed the newly developed Volume Flux Method (VFM) for finding the potential tsunami sources, and the COMCOT tsunami model was adopted for the nonlinear scenario simulations, associated with the high resolution bathymetry data. Both earthquake and mudslide tsunamis were inspected. Other than that, we also collected the information of tide and weather for identifying the effects from high tide and storm surge. After the thorough study, a scenario that satisfies most of the descriptions in the historical literatures will be presented. The results will explain the cause of mysterious event that changed the destiny of Taiwan.

Keywords: Mudslide Tsunami, Storm Suge, volume flux method (VFM), COMCOT, 1661 Luermen naval battle





## Processing Real Time Tsunami Potential of Earthquakes using Early-est

\*Mehmet YILMAZER<sup>1</sup>, Fatih TURHAN<sup>1</sup>, Ocal NECMIOGLU<sup>1</sup>, Aysegul KOSEOGLU<sup>1</sup>

1. Bogazici University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute

In this study current status and results of the Processing Real Time Tsunami Potential of Earthquakes Project (Supported by the Research Fund of the Bogazici University, PN12002) will be presented. Bogazici University - Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute –Regional Earthquake and Tsunami Monitoring Center (KOERI-RETMC) is providing tsunami-warning services in the Eastern Mediterranean, Aegean and Black Seas since 1 July 2012 and has been accredited as a Tsunami Service Provider of ICG/NEAMTWS at its 13<sup>th</sup> session during 26-28 September 2016 in Bucharest, Romania. The main purpose of the this project is evaluation of usefulness of the Early-Est method (Lomax and Michelini) by the RETMC for the rapid and robust assessment of the tsunami potential of an earthquake for early warning and emergency response depending both on moment magnitude and rupture duration of the earthquake based on  $T_d T_0$  and  $T_d T_{50} E_x$  discriminants. Both real time data and the off-line earthquake waveform data are being processed using Early-est software package. In the initial phase of the project, the waveform data belonging earthquakes that have M6.5 available from all over the world are being archived and processed. So far, approximately 1000 events have been processed and prepared for statistical analysis. Next step would be the analysis of the relation between theoretical assumptions and processing results in terms of moment magnitude and tsunami potential. At the end of the study, performance of the method will be investigated using real time processing results are collected during the project period. We would like to thank Dr. Anthony Lomax for his cooperation and support in the operationalization of Early-Est in RETMC.

Keywords: Tsunami, Rupture Duration, Early-Est, Tsunami Potential Discriminant

## Beamforming detection of possible tsunami forerunners at the Korean coast

\*Satbyul Kim<sup>1</sup>, Emile Okal<sup>2</sup>, Tae-Seob Kang<sup>1</sup>

1. Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, 2. Department of Earth and Planetary Sciences, Northwestern University

Korea is mostly surrounded by sea and the west and south offshore have shallow depth which is 51 m and 71 m of the average depth respectively. The eastern sea of Korea has relatively deeper average depth (about 1,497 m) as well as it increases rapidly along the coast, so the sea between the eastern Korean Peninsula and the Japanese Arc is such as a huge bath. When the 2011 Tohoku earthquake occurred, it not only generated a devastating tsunami in the Sanriku region, but also caused small waves in the back-arc region of Japan. They were recorded at several tidal gauges along the coast of the East Sea (Japan Sea) (e.g. Shevchenko et al., 2014; Murotani et al., 2015), and Murotani et al. referred to them as “tsunami forerunner”. The Nankai Trough, which is located to the southeast of Japan, is one of the regions capable of producing a large M9 earthquake in the future (Parsons et al. 2012). Therefore, there is a reason to believe that a potential earthquake may cause sea waves originating in southeastern Japan to reach the Korean Peninsula. In this study, we explore whether a large Nankai earthquake will produce a tsunami forerunner in the back-arc region of Japan observable on the Korean coast. We conducted a numerical tsunami simulation to obtain synthetic waveforms using a 1707 Hiei earthquake model proposed by Furumura et al. (2011). We created two virtual arrays, AR01 and AR02, to obtain synthetic waveforms. Array AR01 is located to the southeast of Korea to detect the tsunami forerunner and array AR02 is between southern Korea and Kyushu Island to record the main tsunami coming from the Nankai Trough. We then used beamforming analysis to verify the direction of tsunami arrivals using simulated waveforms at the two arrays. We determine the direction of a tsunami forerunner using waveforms from array AR01. Because the wave front of the tsunami forerunner is parallel to the array, waves generated in the northwest region of Japan show a back-azimuth angle that points in the north and north-northwestern directions. The distribution of beam-energy at array AR02 clearly shows that the main tsunami generated in the Nankai trough comes from the southeast. The beam-forming technique using tsunami waveforms is not able to accurately determine the direction of tsunami forerunner arrivals because the amplitude of the waves is small and the region has strongly varying bathymetry.

Keywords: tsunami, beamforming detection, Korean coast