

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¹、望月 将志¹、金沢 敏彦¹、眞保 敬¹、汐見 勝彦¹、功刀 卓¹、青井 真¹、松本 拓己¹、関口 涉次¹、高橋 成実¹、山本 直孝¹、篠原 雅尚²、山田 知朗²

*Kenji Uehira¹, Masashi Mochizuki¹, Toshihiko Kanazawa¹, Takashi Shimbo¹, Katsuhiko Shiomi¹, Takashi Kunugi¹, Shin Aoi¹, Takumi Matsumoto¹, Shoji Sekiguchi¹, Narumi Takahashi¹, Naotaka YAMAMOTO¹, Masanao Shinohara², Tomoaki Yamada²

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 純一¹、吉川 貴史²、村田 伸²、五十嵐 康彦²、堀 高峰³、岡田 真人²、馬場 俊孝¹

*Junichi Taniguchi¹, Takashi Yoshikawa², Shin Murata², Yasuhiko Murata², Takane Hori³, Masato Okada², Toshitaka Baba¹

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¹、中田 健嗣¹、藤田 健一¹、田中 昌之¹、溜淵 功史¹、弘瀬 冬樹¹、小林 昭夫¹

*Akio Katsumata¹, Kenji Nakata¹, Kenichi Fujita¹, Masayuki Tanaka¹, Koji Tamaribuchi¹, Fuyuki Hirose¹, Akio Kobayashi¹

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¹、金子 りさ²、王 宇晨¹、佐竹 健治¹

*Shingo Watada¹, Lisa Kaneko², Yuchen Wang¹, Kenji Satake¹

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

*Kenji Hirata¹, Hiroyuki Fujiwara¹, Hiromitsu Nakamura¹, Masaki Osada¹, Tsuneo Ohsumi¹, Nobuyuki Morikawa¹, Shin'ichi Kawai¹, Takahiro Maeda¹, Hisanori Matsuyama², Nobuhiko Toyama², Tadashi Kito², Yoichi Murashima³, Yasuhiro Murata³, Takuya Inoue³, Ryu Saito³, Shin'ichi Akiyama⁴, Mariko Korenaga⁴, Yuta Abe⁴, Norihiko Hashimoto⁴, Tomoya Hakamata⁴

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^{1,2}、根本 信³、高瀬 嗣郎³、吾妻 瞬一³、高田 幸司¹、池田 雅也¹

*Takashi YOKOTA^{1,2}, Makoto NEMOTO³, Shiro TAKASE³, Shunichi AZUMA³, Koji TAKATA¹,
Masaya IKEDA¹

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

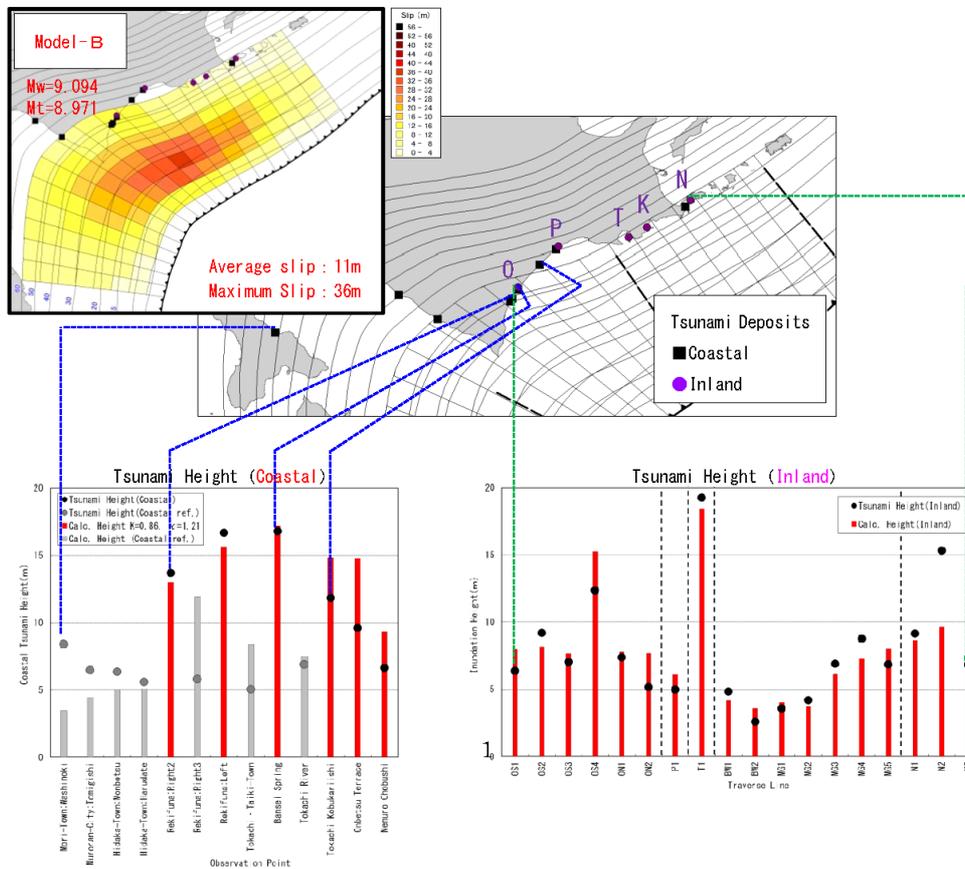
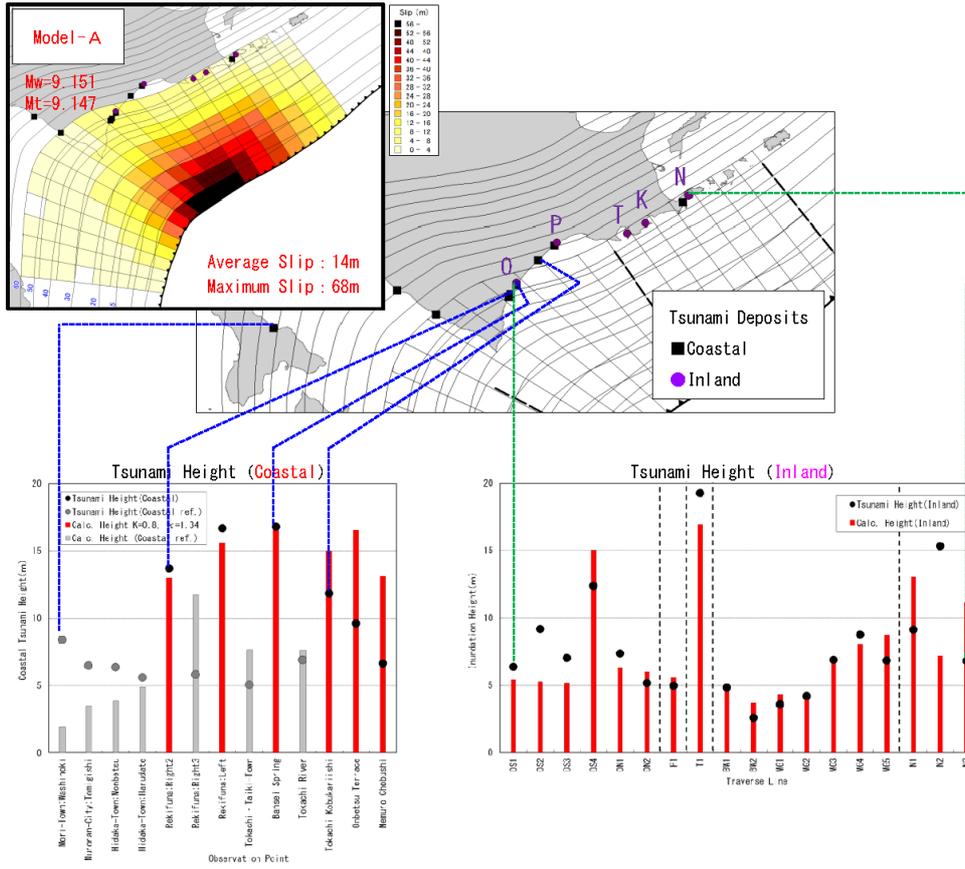
2) モデルB：Mw=9.1、Mt=9.0

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¹、青井 真¹、鈴木 亘¹、高橋 成実¹、中村 武史¹、平田 賢治¹、功刀 卓¹、中村 洋光¹

*Naotaka YAMAMOTO¹, Shin Aoi¹, Wataru Suzuki¹, Narumi Takahashi¹, Takeshi Nakamura¹, Kenji Hirata¹, Takashi Kunugi¹, Hiromitsu Nakamura¹

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¹、村田 伸¹、五十嵐 康彦¹、馬場 俊孝²、堀 高峰³、岡田 真人¹

*Masashi Yoshikawa¹, Shin Murata¹, Yasuhiko Igarashi¹, Toshitaka Baba², Takane Hori³, Masato Okada¹

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¹

*Kuniaki Abe¹

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

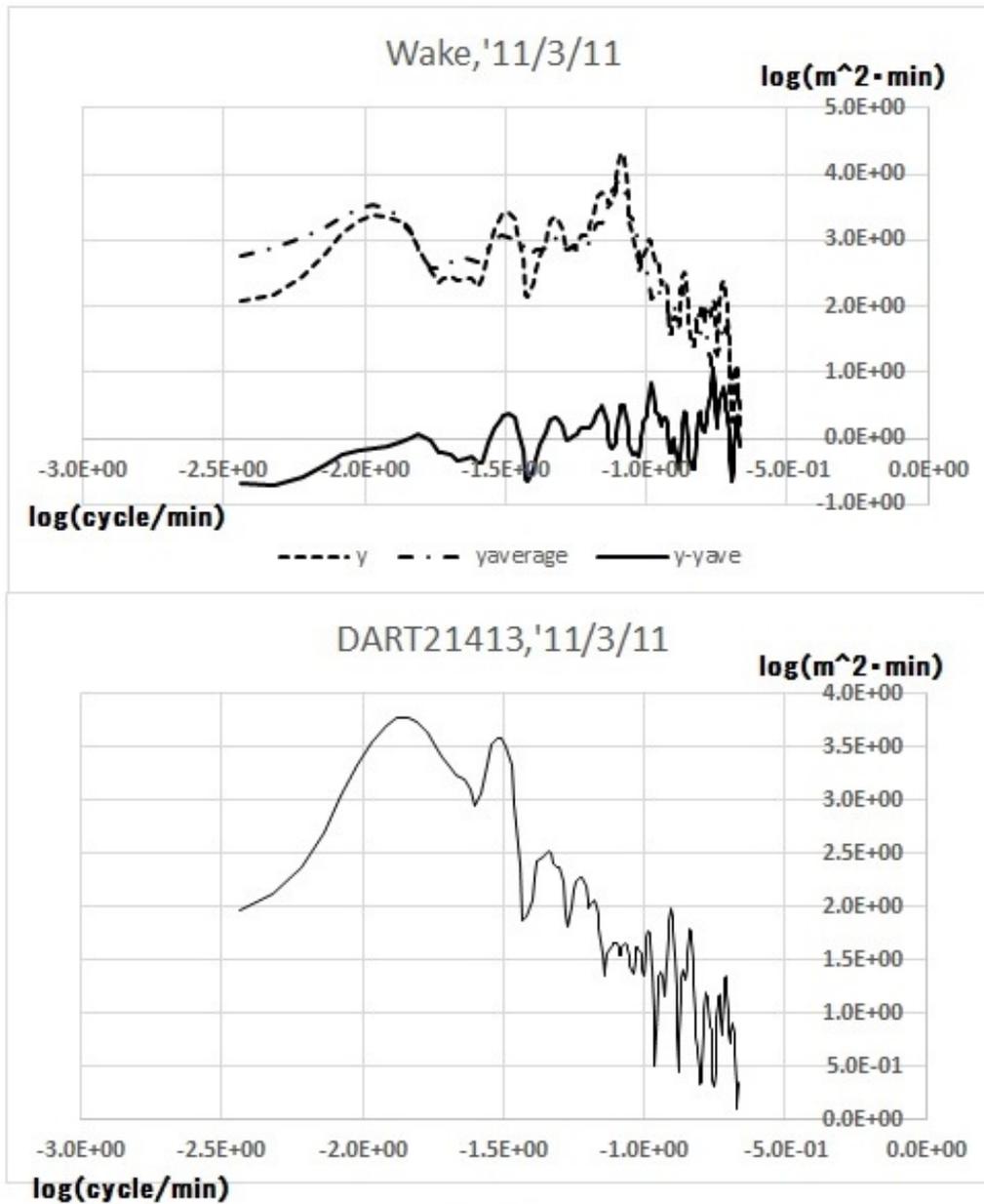


Fig.1

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¹、*谷岡 勇市郎¹

Genta Fukuhara¹, *Yuichiro Tanioka¹

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¹、柳澤 英明²、谷岡 勇市郎³、川上 源太郎⁴、加瀬 善洋⁴、仁科 健二⁴、廣瀬 亘⁴、石丸 聡⁴

*Kei Ioki¹, Hideaki Yanagisawa², Yuichiro Tanioka³, Gentaro Kawakami⁴, Yoshihiro Kase⁴, Kenji Nishina⁴, Wataru Hirose⁴, Satoshi Ishimaru⁴

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 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¹、綿田 辰吾¹、佐竹 健治¹、深尾 良夫²、杉岡 裕子³、伊藤 亜妃²、塩原 肇¹

*Osamu Sandanbata¹, Shingo Watada¹, Kenji Satake¹, Yoshio Fukao², Hiroko Sugioka³, Aki Ito², Hajime Shiobara¹

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¹

*Narumi Takahashi¹

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¹、大井 昌弘¹、鈴木 亘¹

*Tomohiro Kubo¹, Masahiro Ooi¹, Wataru Suzuki¹

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¹、畔柳 陽介²、木南 孝博³、佐藤 雅美⁴、芳賀 弥生⁴、今村 文彦⁴

*Yoshinobu Tsuji¹, Yosuke Kuroyanagi², Takahiro Kinami³, Masami Sato⁴, Yayoi Haga⁴, Fumihiko Imamura⁴

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

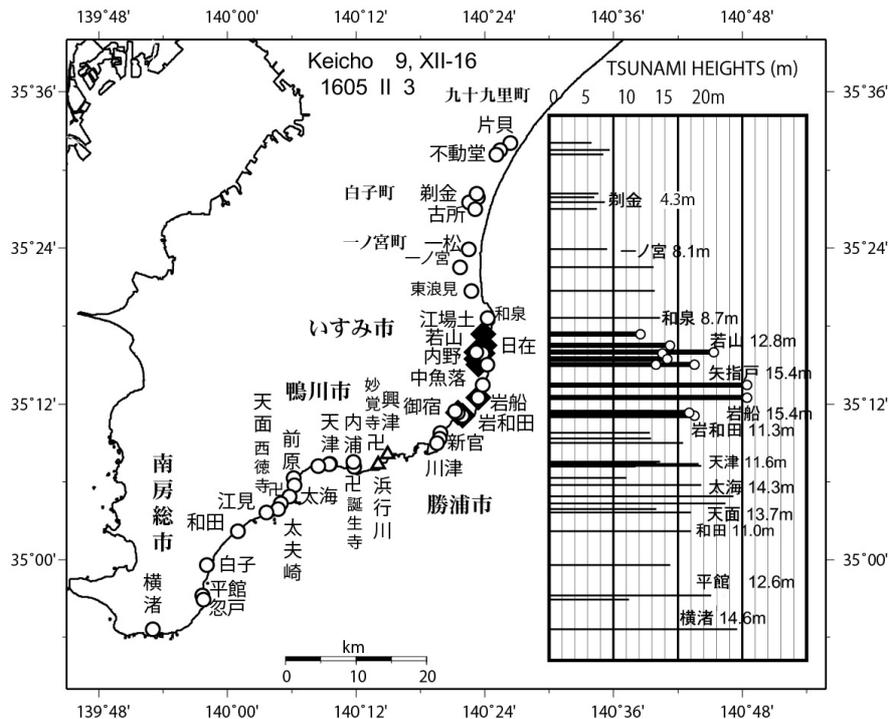


図 慶長9年12月16日（1605年2月3日）関東南方沖地震による房総半島の津波高さ
 ◆ 『当代記』によって、小多喜領七ヶ村が「中二モ七村は跡形モナシ」と記された集落。
 ○ 『房総治乱記』に「先潮災二逢シハ」で始まる文章で記された35ヶ村。4ヶ村は『当代記』に「あとかたもなし」と記された村と重複している。勝浦市川津以西、鴨川市内浦までの約13kmの間にある集落は被災した村が無く、この間は無事であったらしい。

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¹、富田 悠登¹、石川 智也¹、Gusman Aditya²、鴨川 仁¹

*Takuma Tsuruda¹, Yuto Tomida¹, Tomoya Ishikawa¹, Aditya Gusman², Masashi Kamogawa¹

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最大減少率の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.

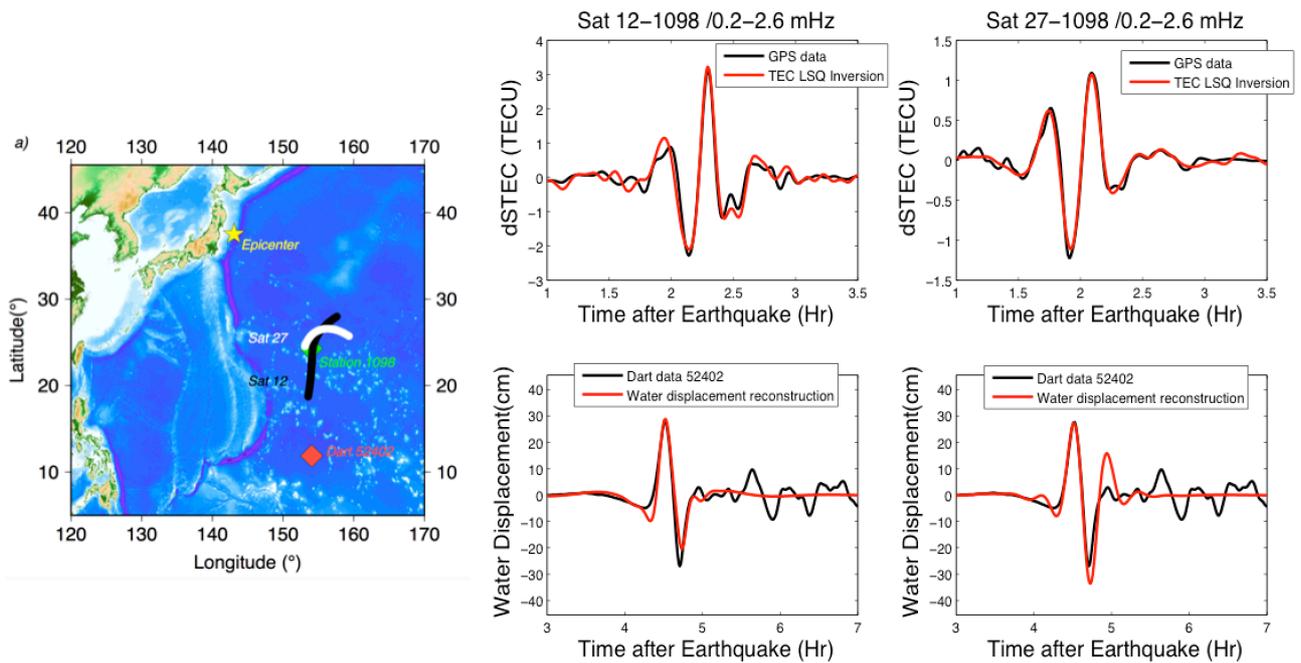
*Virgile Rakoto¹, Philippe Lognonné¹, Lucie Rolland²

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 Hossen¹, Phil Cummins², Kenji Satake³

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