

## 津波警報の改善について JMA's Tsunami Warning Improvement Plan

尾崎 友亮<sup>1\*</sup>, 永岡利彦<sup>1</sup>, 桑山辰夫<sup>1</sup>, 中田健嗣<sup>1</sup>, 川崎孝<sup>1</sup>, 久保剛太<sup>1</sup>

OZAKI, Tomoaki<sup>1\*</sup>, Toshihiko Nagaoka<sup>1</sup>, Tatsuo Kuwayama<sup>1</sup>, Kenji Nakata<sup>1</sup>, Takashi Kawasaki<sup>1</sup>, Gota Kubo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁地震火山部地震津波監視課

<sup>1</sup> Japan Meteorological Agency

東北地方太平洋沖地震における甚大な津波被害を受け、気象庁では、津波警報の改善策について検討するため、有識者等よりなる「東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえた津波警報改善に向けた勉強会」を開催（2011年6~9月）し、9月には「東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえた津波警報の改善の方向性について」（以下、「津波警報改善の方向性」）をとりまとめた。「津波警報改善の方向性」で示した津波警報の改善策のうち、別途検討するとして情報の伝え方、発表のありかたなど一部の事項について検討するため、有識者等よりなる「津波警報の発表基準等と情報文のあり方に関する検討会」を開催（10月~2012年1月）し、2月、「津波警報の発表基準等と情報文のあり方に関する提言」（以下、「提言」）をとりまとめた。以下、「津波警報改善の方向性」及び「提言」で示された具体的な改善策、今後の予定について述べる。

東北地方太平洋沖地震での津波警報では、地震発生3分後に発表した気象庁マグニチュード（Mj）7.9に基づく津波警報第1報での津波高さ予想が実際のものを大きく下回り、そのことが避難の遅れに繋がった例があったことが大きな課題であった。

この課題を受け、地震発生約3分後の津波警報第1報発表までにMjの過小評価の可能性を速やかに認識する監視・判定手法を導入し、Mjが過小評価していると判定されれば、地震が発生した海域で想定される最大マグニチュード等を適用して津波警報第1報を発表することとする。この場合の津波の高さの予想値は不確実性が高く、その値を参照して防災対応をとるだけの精度を有していないため、数字では発表せずに定性的表現とし、通常地震とは異なる非常事態であることを伝えることで避難行動を促すものとする。

東北地方太平洋沖地震では、通常では地震発生約15分後に計算するモーメントマグニチュードが、国内の広帯域地震計がほぼ全て振り切れたため求められず、また、沖合水圧計データの活用手段が不十分であったため、津波警報の更新に時間を要した。これらに対処するため、強震動でも振り切れない広帯域強震計を国内80箇所に整備することにより、Mwを確実に算出して津波警報の更新に活用するとともに、沖合水圧計の津波警報更新への活用を推進することとする。なお、モーメントマグニチュードで津波警報を更新する段階では予測の不確実性はかなり減じており、津波の高さ予想は数値で発表する。

津波の高さ予想の区分については、とりうる防災対応の段階や津波予測の誤差を踏まえ、現状の8段階（0.5m, 1m, 2m, 3m, 4m, 6m, 8m, 10m以上）から5段階（1m, 3m, 5m, 10m, 10m超）とし、発表する高さは、危機感の喚起のため、予想区分の幅の高いほうの数値とする。

これらの津波警報の改善については、気象庁や、津波警報を伝達・利用する関係機関等におけるシステム改修の計画等を踏まえ、平成24年中を目途に運用を開始する予定である。

キーワード: 津波警報, 改善

Keywords: Tsunami warning, Improvement plan

表1:津波警報等の発表基準と津波の高さ予想の区分

警報・注意報の分類		現行 発表される 津波の高さ	改善案		
			表現		津波高さ予想の 区分
			数値	定性的表現	
警報	大津波	10 m 以上、8 m、 6 m、4 m、3 m	10 m 超	巨大	10 m ~
			10 m		5 m ~ 10 m
			5 m		3 m ~ 5 m
	津波	2 m、1 m	3 m	高い	1 m ~ 3 m
注意報	津波注意報	0.5 m	1 m	(なし)	20 cm ~ 1 m

## 気象庁の津波警報改善のための研究開発 Research for Improvement of the JMA Tsunami Warning System

前田 憲二<sup>1\*</sup>, 対馬 弘晃<sup>1</sup>, 平田 賢治<sup>1</sup>, 勝間田 明男<sup>1</sup>, 吉田 康宏<sup>1</sup>, 青木 重樹<sup>1</sup>, 尾崎 友亮<sup>2</sup>, 横田 崇<sup>1</sup>  
MAEDA, Kenji<sup>1\*</sup>, TSUSHIMA, Hiroaki<sup>1</sup>, HIRATA, Kenji<sup>1</sup>, KATSUMATA, Akio<sup>1</sup>, YOSHIDA, Yasuhiro<sup>1</sup>, AOKI, Shigeki<sup>1</sup>,  
OZAKI, Tomoaki<sup>2</sup>, YOKOTA, Takashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 気象庁

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, <sup>2</sup>Japan Meteorological Agency

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」は、わが国の地震観測史上で最大規模(Mw9.0)の地震であり、地震に伴う巨大津波により、未曾有の人的被害が発生した。気象庁は地震発生から3分後に津波警報を発表するなど、地震による津波への警戒を呼び掛けた。しかし、津波被害が甚大であったことから、気象庁は有識者、防災関係機関による勉強会を開催し、津波警報の改善に向けた検討を進め、その結果を「東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえた津波警報の改善の方向性について」(気象庁:2011/9/12)としてまとめた。本発表では、その検討の結果指摘された改善すべき課題のうち、技術的な課題に関連して、現在取り組んでいる研究の全体像の概要を紹介する。なお、研究の詳細は、個別の発表を参照されたい。

### 2. 津波警報改善のための技術的課題

上記の取りまとめの中で指摘されている津波警報の主な技術的問題点とその改善に向けた課題は、以下の2点である。

(1) 地震発生3分後に発表した津波警報第1報で推定した地震規模(気象庁マグニチュード:Mj=7.9)は過小評価であった。また、評価が過小である可能性を認識できなかった。このため、今般の地震も含め、Mjが8を超える地震について、迅速にその規模を推定する手法を導入し第1報に活用することが課題である。

(2) 地震発生約15分後に計算されるべきモーメントマグニチュード(Mw)が、地震波が国内の広帯域地震計の測定範囲を超えたため計算できず、津波警報の続報が迅速に発表できなかった。また、沖合のケーブル式水圧計のデータを反映させた津波警報更新手段が不十分であった。このため、津波警報の続報において、津波の高さをより確度をもって予想するため、Mwを国内観測網でも迅速に求められるよう強震動まで測定できる広帯域地震計の活用とともに、沖合津波観測の強化とその利用技術の開発が課題である。

### 3. 課題解決のための取り組み

上の課題を解決するため、以下の研究開発などに取り組んでいる。

#### (1) 巨大地震の規模の即時推定手法の開発

マグニチュードが8を超えるような巨大地震についても迅速にその規模を推定、あるいは少なくとも8を超える地震であることを即座に判定するため、1)強震域の広がり(震度分布)により規模を推定する手法、2)P波の波形より規模(Mwp)を推定する手法、3)強震動の継続時間より規模を推定する手法、4)様々な周期帯域の記録を比較しながら規模を推定する手法、の開発を行っている。

#### (2) 沖合津波観測データを活用した沿岸津波予測手法の開発

沖合でいち早く観測される津波データを沿岸への予測に活用することは高精度な津波予測に有効である。そこで、沖合で観測される津波の時系列データ(津波波形)を用い、そのデータを適切に説明する初期水位変動分布を数値計算によって逆解析し、求めた初期水位変動分布に基づいて沿岸の津波波形を予測する手法の開発を行っている。この手法によれば、地震だけでなく海底地滑りによる津波など、地震波の解析からは予測が困難な津波の予測も可能となる。

気象庁は、沖合津波観測網の強化のため、平成24年秋以降にブイ式海底津波計を東北地方沖合3箇所に整備する予定である。なお、これらは文部科学省が計画中の日本海溝海底地震津波観測網(平成27年度より本格運用開始予定)に先立ち、緊急に整備されるものである。

#### (3) 海底水圧計の性能評価及び新型海底水圧計の開発・試作

沖合の観測データを用いた津波予測では、観測される津波の精度が問題となる。水晶式の水圧計を用いた近地津波観測の精度を高めるためには、1)大地震に伴って観測される急激な温度変化への応答解析、2)地震時の短周期・大振幅の動的な水圧変動の除去、といった処理を行う必要がある。そのため、海底水圧計の特性を評価するとともに、現在広く用いられている海底水圧計では必ずしも精度の高い観測が行えない可能性があるため、新型海底水圧計の開発を行っている。

#### (4) 広帯域強震計の整備

巨大地震に対しても地震発生後約15分後までにMwを求められるようにするため、長周期成分を含む大振幅の地震

# Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



HDS26-02

会場:102B

時間:5月21日 09:15-09:30

動を振り切れることなく測定できる広帯域強震計を全国で80カ所整備する。

キーワード: 津波警報, 気象庁, 規模の即時推定, 沖合津波計, 津波波形予測

Keywords: Tsunami Warning, JMA, Prompt Magnitude Estimation, Offshore Tsunami Gauge, Waveform Forecast

## 地震時永久変位即時推定手法の開発およびその2011年東北地方太平洋沖地震への適用 Rapid coseismic displacement detection/estimation algorithm and its application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake

小林 竜也<sup>1</sup>, 太田 雄策<sup>1\*</sup>, 日野 亮太<sup>1</sup>, 三浦 哲<sup>2</sup>, 藤本 博己<sup>1</sup>, 対馬 弘晃<sup>3</sup>, 出町 知嗣<sup>1</sup>, 立花 憲司<sup>1</sup>  
KOBAYASHI, Tatsuya<sup>1</sup>, OHTA, Yusaku<sup>1\*</sup>, HINO, Ryota<sup>1</sup>, MIURA, Satoshi<sup>2</sup>, FUJIMOTO, Hiromi<sup>1</sup>, TSUSHIMA, Hiroaki<sup>3</sup>,  
DEMACHI, Tomotsugu<sup>1</sup>, Kenji Tachibana<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院 地震噴火予知研究観測センター, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所, <sup>3</sup> 気象庁気象研究所

<sup>1</sup>RCPEVE, Tohoku University, <sup>2</sup>ERI, The University of Tokyo, <sup>3</sup>Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Real-time crustal deformation monitoring is extremely important for achieving rapid understanding of actual earthquake scales, because the measured permanent displacement directly gives us the true earthquake size (seismic moment,  $M_w$ ) information. We have developed an algorithm to detect/estimate static ground displacements due to earthquake faulting from real-time kinematic GPS time series. Our algorithm identifies permanent displacements by monitoring the difference of a short-term average to a long-term average of the GPS time series [1]. We applied the algorithm to data obtained in the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake ( $M_w$  9.0) to test the possibility of coseismic displacement detections, and further, we inverted the obtained displacement fields for a fault model. Estimated a fault model with  $M_w$  8.7, which is close to the actual  $M_w$  of 9.0. We also applied the algorithm to data of aftershocks of the 2011 M9 earthquake. We succeed in detecting the coseismic step caused by Iwate-oki earthquake (March 11, 15:08 (JST),  $M_w$  7.4) and Ibaraki-oki earthquake (March 11, 15:15 (JST),  $M_w$  7.7). For the Ibaraki-oki earthquake, we evaluated the coseismic fault model estimation. The inversion estimated a fault model with  $M_w$  7.7, which is same with the actual one determined by the seismic data [e.g. 2].

The false detection of the permanent displacement should avoid for reliable warning system. Based on the long-term varied baselines and different reference sites posterior processing, we estimated the false detection rate reached  $\sim 0.25\%$  with 4-sigma confidential limit in single baseline. This false detection rate is inadequate to work for practical use in dense GPS network (many baselines) such as GEONET. We improved permanent displacement detection algorithm for reduction of the false detection rate. In the improved algorithm, the earthquake occurrence is defined as all neighboring GPS sites must be detected the displacement including oneself. We applied the improved algorithm to actual data set. The false detection rate clearly decreases with our improved algorithm, which is little more than zero. When we can use the several reference sites for the RTK-GPS data processing and compared with each reference site result, the false detection rate will become almost zero. The improved algorithm is also useful for small displacement detection because the threshold value is possible to cut down to 2 or 3-sigma confidential limit.

[1] Ohta et al., JGR, 2012 [2] Hirose et al., EPS, 2011

キーワード: GPS, リアルタイムキネマティック, 即時地震規模推定

## リアルタイムシミュレータの開発を目指した地震 CMT 解からの全球津波計算 Global tsunami simulations from seismic CMT solutions: Developing a real time tsunami simulator

齊藤 竜彦<sup>1\*</sup>, 田中 佐千子<sup>1</sup>, 稲津 大祐<sup>2</sup>, 三好 崇之<sup>1</sup>

SAITO, Tatsuhiko<sup>1\*</sup>, TANAKA, Sachiko<sup>1</sup>, INAZU, Daisuke<sup>2</sup>, MIYOSHI, Takayuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 東北大・理・予知セ

<sup>1</sup>NIED, <sup>2</sup>RCPEV

必ずしも想定した規模で地震が発生するとは限らないので、地震発生直後の地震波解析によって推定される地震規模/発生様式を取り入れた津波予測は重要である。地震波解析による CMT 解推定と連動して稼働する、津波の発生/伝播を計算する津波シミュレータを開発した。シミュレータでは、全ての海域で発生する地震や、あらゆる海域の海底と海岸線からの津波散乱波に対応するため、全球で津波計算を行う。また、本シミュレータは非線形性の弱い沖合での津波の再現をターゲットとし、津波グリーン関数データベースを作成し、線形性を利用することで任意の津波波源形状に対する津波波形を高速に合成し、相反性を用いることで、保存すべきグリーン関数のデータ量を節約している。

2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) で発生した津波に適用した。日本列島に展開された速度型強震計で得られた地震波の解析から、CMT 解のモーメントマグニチュードは Mw 8.8 と推定された。これを、適当なスケールリング則を用いることで、断層サイズ 300 km x 150 km 上で一様なすべり量 15 m をもつ矩形断層へと置き換える。この断層運動による初期津波波高分布を計算し、津波シミュレーションを実施した。その結果、牡鹿半島沖で 4m 以上の津波が到来する特徴が再現出来た (観測値 ~5.8 m, 計算値 ~4.8 m)。しかし、単純なスケールリングに基づき導出した断層運動であるために、波形の詳細な特徴までは再現出来ない。

2006 年千島列島沖地震 Mw 8.3 では津波警報・注意報が発令され、地震発生からおよそ 5 時間後には、すべての警報・注意報が解除された。しかし、一部の地域では、天皇海山列からの津波散乱波 [Koshimura et al. 2008 GRL] のために、注意報解除後に、最大波高の津波が観測されている。例えば、相模湾に設置された海底水圧計では、地震発生からおよそ 2 時間後に津波初動が到達し、その 6 時間後 (地震発生から 8 時間後) に最大津波波高を観測している。本研究で開発したシミュレータは、地震発生からおよそ 8 時間後に、最大振幅となる津波波高が到達する様子を再現出来る。しかし、波形の振幅をおよそ 2 倍程度過大評価している。

キーワード: 津波, シミュレーション, CMT 解

Keywords: tsunami, simulation, CMT solution

## 地震動シミュレーションから得られる海底変位を用いた津波シミュレーション Tsunami simulation using submarine displacement calculated from simulation of ground motion due to seismic source model

秋山 伸一<sup>1\*</sup>, 河路 薫<sup>1</sup>, 是永 真理子<sup>1</sup>, 藤原 了<sup>1</sup>, 田宮 貴洋<sup>1</sup>

AKIYAMA, Shinichi<sup>1\*</sup>, KAWAJI, Kaoru<sup>1</sup>, KORENAGA, Mariko<sup>1</sup>, FUJIHARA, Satoru<sup>1</sup>, TAMIYA, Takahiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

<sup>1</sup> ITOCHU Techno-Solutions Corporation

海底下で断層運動が起こると地震の発生とともに、海底地盤の変動に伴う津波も発生する。すなわち、地震動や津波はひとつの断層運動に起因して発生する。したがって、ひとつの断層モデルから地震動と津波の双方を評価することは自然の姿と言える。しかしながら、実際には両者をひとつの断層モデルで評価するのは難しく、現状では地震動解析と津波解析に用いられる震源モデルは別々に設定されることが多い。

ところで、2011年東北地方太平洋沖地震では観測された地震動記録および津波観測記録から多くの震源モデルが提案されている。これらのモデルの多くは日本海溝沿いで大きなすべりが発生することで概ね一致している。すなわち、地震動の観測記録や津波の観測記録から求められた双方の震源モデルには共通する性質が見られる。このことは、ひとつの震源モデルから地震動と津波の双方が評価できる可能性を期待させる。

そこで、本研究では2011年東北地方太平洋沖地震を対象とした地震動シミュレーションを行うとともに、ここから得られる震源付近の海底変位を用いた津波シミュレーションを試みた。ここでは、まず気象庁が遠地実体波により設定した震源モデルを用いてボクセル型有限要素法により東日本全域にわたる大規模地震動シミュレーションを行った。シミュレーション結果はK-NETおよびKiK-netの観測記録に概ね整合することを確認した。つぎに、地震動シミュレーションから求められた震源域付近の海底地盤の鉛直変位を初期水位とする津波シミュレーションを行った。津波シミュレーションには浅水長波理論に基づく差分法を用いた。この結果を太平洋に展開されているGPS波浪計で観測された津波水位波形と比較した。その結果、シミュレーションによる波形は長時間に渡って観測された津波波形全体と概ね一致していた。ただし、最大波高を示す津波の第一波については、いずれの観測点においてもシミュレーション結果は観測記録に対し過小評価となった。

以上により、地震動観測記録から設定された震源モデルを用いても津波を評価できる可能性のあることが分かった。ただし、防災上最も重要な津波最大波高の評価には課題が残されている。

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 津波, 地震動, 震源モデル, シミュレーション

Keywords: the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, tsunami, ground motion, source model, simulation

## 日本海溝海底地震津波観測網について

### Ocean bottom seismic and tsunami network along the Japan Trench

金沢 敏彦<sup>1\*</sup>, 功刀 卓<sup>1</sup>, 野口 伸一<sup>1</sup>, 関口 涉次<sup>1</sup>, 汐見 勝彦<sup>1</sup>, 青井 真<sup>1</sup>, 岡田 義光<sup>1</sup>, 篠原 雅尚<sup>2</sup>, 山田 知朗<sup>2</sup>

KANAZAWA, Toshihiko<sup>1\*</sup>, KUNUGI, Takashi<sup>1</sup>, NOGUCHI, Shin-ichi<sup>1</sup>, SEKIGUCHI, Shoji<sup>1</sup>, SHIOMI, Katsuhiko<sup>1</sup>, AOI, Shin<sup>1</sup>, OKADA, Yoshimitsu<sup>1</sup>, SHINOHARA, Masanao<sup>2</sup>, YAMADA, Tomoaki<sup>2</sup>

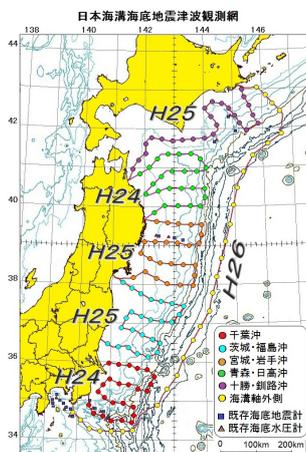
<sup>1</sup> 独立行政法人防災科学技術研究所, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Huge tsunami, which was generated by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake of M9 subduction zone earthquake, attacked the coastal areas in the north-eastern Japan and gave severe casualties and property damages in the areas. The present tsunami warning system, based on land seismic observation data, did not work effectively in the case of the M9 earthquake. It is strongly acknowledged that marine observation data is necessary to make tsunami height estimation more accurately. Therefore, new ocean bottom observation project has started in 2011 that advances the countermeasures against earthquake and tsunami disaster related to subduction zone earthquake and outer rise earthquake around Japan Trench and Chishima Trench. A large scale ocean bottom cabled observation network is scheduled to be deployed around Japan Trench and Chishima Trench by 2015. The network is consisted of 154 ocean bottom observation stations. Ocean bottom fiber optic cables, about 5100 km in total length, connect the stations to land. Observation stations with tsunami meters and seismometers will be placed on the seafloor off Hokkaido, off Tohoku and off Kanto, in a spacing of about 30 km almost in the direction of East-West (perpendicular to the trench axis) and in a spacing of about 50 - 60 km almost in the direction of North-South (parallel to the trench axis).

キーワード: 海底ケーブル, リアルタイム観測, 日本海溝, 津波モニタリング, 海底地震観測, 警報

Keywords: Ocean bottom cable, Realtime observation, the Japan Trench, Tsunami monitoring, Ocean bottom seismic observation, Warning



## 沖合 100km を目指した GPS 津波計の実証実験 An Offshore Experiment of Tsunami Monitoring System using GPS Buoy

寺田 幸博<sup>1\*</sup>, 加藤 照之<sup>2</sup>, 永井 紀彦<sup>3</sup>, 川口 浩二<sup>3</sup>, 越村 俊一<sup>4</sup>, 松下 泰弘<sup>5</sup>

TERADA, Yukihiko<sup>1\*</sup>, KATO, Teruyuki<sup>2</sup>, Toshihiko Nagai<sup>3</sup>, Koji Kawaguchi<sup>3</sup>, KOSHIMURA, Shunichi<sup>4</sup>, Yasuhiro Matsushita<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 高知高専, <sup>2</sup> 東大地震研, <sup>3</sup> 港湾空港技研, <sup>4</sup> 東北大・工, <sup>5</sup> 日立造船

<sup>1</sup>Kochi National College of Technology, <sup>2</sup>Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, <sup>3</sup>Port and Airport Research Institute, <sup>4</sup>Grad. Sch. Eng., Tohoku Univ, <sup>5</sup>Hitachi Zosen Corp.

GPS 津波計の開発では、相模湾で基礎実験、大船渡市沖で実用化実験、室戸市沖で実証実験を行ってきた。この一連の実験を通じて、これまでに 5 件の津波を観測し、cm オーダーで津波の計測が可能であることを示してきた。これらの成果を活用して、国土交通省港湾局は GPS 波浪計の全国配備を開始し、現在 15 基が設置されている。東北地方太平洋沖地震津波において、東北沿岸に設置した GPS 波浪計のリアルタイム観測データは、大津波警報のレベルを最大級へ引き上げる際に参照された。

一方、これまでの GPS ブイの沖合展開は、GPS 測位法として用いている RTK-GPS 法の適用が可能である基線長 20km が限界となっていた。これを克服する方法として、短周期の変位に対応できる単独高精度変位測定法の PVD 法及びアンビギュイティを解く精密単独測位法の PPP-AR 法の開発・改良を行い、適用性実験で良好な結果を得ることができた。また、オープンソースの超長基線対応の RTK-LIB 法も適用可能であることが確認できた。これらのことから、高知県の協力を得て、室戸岬沖 40km に浮魚礁として設置されている黒潮牧場のブイを借用して、沖合 100km を目指した GPS 津波計の実証実験を開始することとした。その概要は、次のとおりである。

黒潮牧場ブイには、GPS 津波計として必要とする GPS 受信機、データ収集解析装置、データ伝送のための無線機、海底地殻変動観測装置及びこれらを稼働するための太陽電池電源装置を搭載する。ブイで収集したデータは、400MHz 帯の無線機を用いて 50km 離れた陸上基地局に伝送する。これには、標高 250m の山中にある国立室戸青少年自然の家の上を借り受けて受信する。ブイの GPS データは Web の VPN 接続で高知高専に送り、これまでに適用の可能性を確認した単独測位法及び RTK 法を用いて解析を行う。RTK 解析においては、ブイから 40km の室戸岬灯台とブイから 80km の高知高専に陸上基準局を設置して収集する基準局データを用いる。これらの解析によって得られた波浪、津波、潮汐のデータは、インターネットでリアルタイムに公開する (<http://www.tsunamigps.com/>)。

キーワード: GPS, 津波計, PVD, PPP-AR

Keywords: GPS, Tsunami-meter, PVD, PPP-AR

## 津波直前警報のための超低電力無線潮位観測実験

### Sea-level observation with ultra-low power radio telemetry for the last minutes tsunami warning

井上 公<sup>1\*</sup>

INOUE, Hiroshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 防災科学技術研究所

<sup>1</sup>NIED

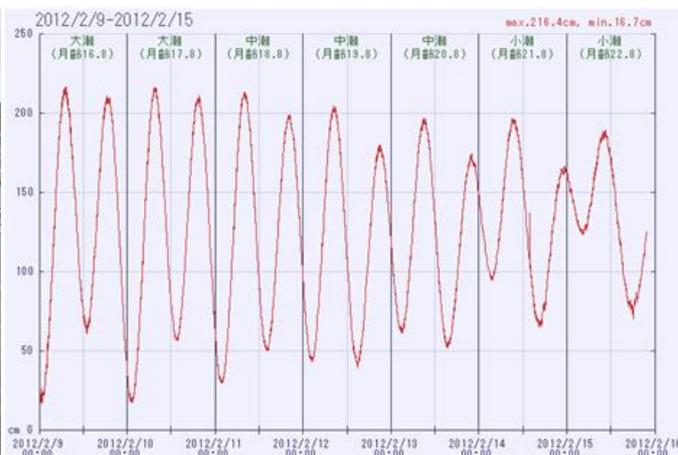
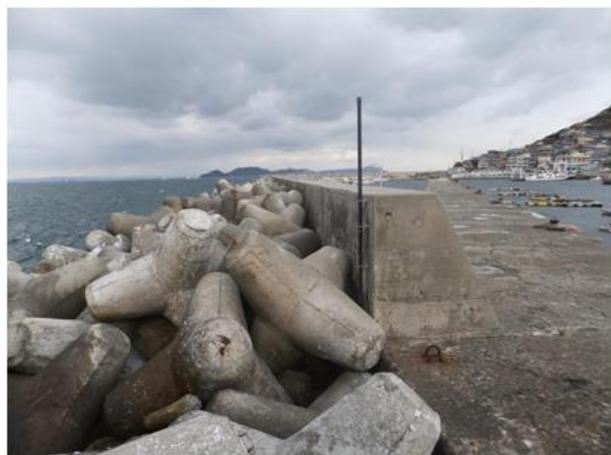
東日本大震災で多くの犠牲者が出た理由の一つは、目前に迫る巨大な津波の情報がさまざまな原因で住民に正しく伝わらなかったことである。もし正確な情報が津波到達のたとえ数分前にも伝わっていたら、救えたであろう命の数は少なくない。より正確な津波の情報を得るために我が国では沖合で津波を直接測定するGPS波浪計や海底ケーブル水圧計が今後強化され警報の精度が向上するであろう。一方津波がさらに海岸に近づき、湾内に侵入して街を襲うまでの最後の数十分から数分の間の情報を、昼夜を問わず正確に住民に伝えることができれば、より適切な住民の避難行動を促すことができるはずである。

そのためには沖合の小島や岬の先端、湾岸地域の多数点での潮位観測を行う必要がある。我々は(株)数理設計研究所が開発した超低電力スペクトラム拡散無線通信MAD-SSを用いて、そのような多点観測を可能にする潮位計を製作した。MAD-SSは送信速度は毎秒1バイトと極めて遅いが、そのかわりに僅か10mWのVHFで、見通しがあれば100キロメートルを超える通信を可能とする。従来の無線モデムと異なり極めて低電力なため小さな太陽電池または乾電池での数カ月の運用が可能である。また無線なので災害時に強く、通信料もかからない。この潮位計は一本の塩ビパイプに水圧センサー、デジタイザー、MAD-SSモデム、アンテナ、電池がすべて仕込まれており設置が容易である。

我々はこのシステムを伊勢湾口の神島(写真)と、茨城県神栖市の港湾航空技術研究所波崎海洋実験施設に設置して観測実験を行った。前者は潮位計を防波堤のテトラポットの隙間に設置し、データは45km離れた津市の三重大学工学部に伝送している。観測は成功しデータが順調に蓄積されている。一方波崎では多点観測を想定した砂浜での潮位観測の可能性を調べる実験をおこなっている。最初の設置ではセンサーが浅すぎて低い潮位が記録できなかった。今後センサーの最適の位置と深さおよび埋設方法を試行錯誤で調べてゆく。

国内での実験と並行してフィリピンのアルバイ湾とマニラ湾、およびインドネシアの西スマトラにシステムを設置して実用化を目指す。このような潮位計を太平洋の多くの島々に設置すれば当該国のみならず環太平洋諸国全ての遠地津波警報の精度の向上に貢献できる。

(施設利用の便宜をいただきました三重大工学部の花里利一氏、港湾航空技研の中村聡志氏・柳嶋慎一氏に感謝いたします)



## GPS 全電子数観測により捉えられた東北地方太平洋沖地震後の津波に伴う電離圏変動

### Tsunami induced ionospheric disturbances detected by GPS-TEC observation after the 2011 Tohoku earthquake

津川 卓也<sup>1\*</sup>, 西岡 未知<sup>1</sup>, 品川 裕之<sup>1</sup>, 丸山 隆<sup>1</sup>, 小川 忠彦<sup>1</sup>, 齊藤 昭則<sup>2</sup>, 大塚 雄一<sup>3</sup>, 松村 充<sup>4</sup>, 長妻 努<sup>1</sup>, 村田 健史<sup>1</sup>  
TSUGAWA, Takuya<sup>1\*</sup>, NISHIOKA, Michi<sup>1</sup>, SHINAGAWA, Hiroyuki<sup>1</sup>, MARUYAMA, Takashi<sup>1</sup>, OGAWA, Tadahiko<sup>1</sup>, SAITO, Akinori<sup>2</sup>, OTSUKA, Yuichi<sup>3</sup>, MATSUMURA, Mitsuru<sup>4</sup>, NAGATSUMA, Tsutomu<sup>1</sup>, MURATA, Ken T.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 情報通信研究機構, <sup>2</sup> 京都大学理学研究科地球物理学教室, <sup>3</sup> 名古屋大学太陽地球環境研究所, <sup>4</sup> 電気通信大学宇宙・電磁環境センター

<sup>1</sup>NICT, <sup>2</sup>SPEL, Kyoto Univ., <sup>3</sup>STEL, Nagoya Univ., <sup>4</sup>University of Electro-Communications

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震後の津波に伴って発生した電離圏擾乱現象の発生と時間発展について、高解像度 GPS 全電子数 (TEC) 観測を用いて詳細に明らかにした。日本上空の最初の TEC 変動は、震央付近、地震から約 7 分後の 05:54UT、0.5-1TECU 程度のインパルスな TEC 増大後、05:56UT から急激な TEC 減少 (背景に対して 20%) が見られた。この TEC 減少は 30 - 1 時間程度続き、徐々に定常レベルに戻っていった。この TEC 減少領域の中心 (以下、「電離圏震央」) は USGS 発表の震央からは 170km 南東にずれており、海底津波計等で推定された津波波源とほぼ一致していた。日本上空では 06:00UT 以降 3 時間以上の間、電離圏震央から同心円状の波が波紋状に広がっていった。この同心円状の波の第一波は約 3.5km/s の伝搬速度を持ち、レイリー波の伝搬速度と同程度であった。第二波以降の波は数 100m/s で、時間と共に遅い波が観測された。また、これらの波動現象とは別に、震源付近では、06:00 UT の TEC 減少と共に、約 4 分周期の短周期変動が見られた。この短周期振動は 3 時間以上続いていた。非静水圧中性大気モデルを用いたシミュレーションとの比較から、電離圏震央付近の TEC 減少は音波モードの大気波動による電離圏内のプラズマ輸送が主要因であることが示唆された。また、同心円状の波の第一波はレイリー波が励起した音波によるもの、第二波以降の波は電離圏震央上空に伝播した音波が電離圏下部で励起した大気重力波によるものと考えられる。また、北米及び欧州上空の高解像度 GPS-TEC 観測を用いて、震源から離れた地域における地震・津波に伴う電離圏変動を調べた。北米上空では地震の約 10 時間後から西海岸上空に南北方向に伸びた波面を持つ波長数 100km、伝搬速度数 100m/s で東進する波が数時間観測された。一方、欧州上空では地震に伴うような電離圏変動は観測されないなど、震源近傍と震源から数 1,000km 離れた場所では電離圏変動に違いが見られた。本発表では、これらの電離圏擾乱の全体像を報告すると共に、その生成機構を議論する。また、リアルタイム GPS-TEC 観測を利用した津波到達予報の可能性についても触れる。

キーワード: 電離圏, 地震, 津波, 音波, 大気重力波, 波紋

Keywords: ionosphere, earthquake, tsunami, acoustic wave, atmospheric gravity wave, concentric wave

## 北西太平洋に展開された海底磁力計群から推定される2011年東北地震津波の発生と伝播

### Generation and propagation of the 2011 Tohoku earthquake tsunami inferred from the OBEM array in the North-West Pacific

浜野 洋三<sup>1\*</sup>, 杉岡 裕子<sup>1</sup>, 市原 寛<sup>1</sup>, 多田 訓子<sup>1</sup>, 藤 浩明<sup>2</sup>

HAMANO, Yozo<sup>1\*</sup>, SUGIOKA, Hiroko<sup>1</sup>, ICHIHARA, Hiroshi<sup>1</sup>, TADA, Noriko<sup>1</sup>, TOH, Hiroaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 京都大学

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Kyoto University

The 2011 Tohoku earthquake tsunami caused a destructive damage along the shoreline from the Tohoku to Kanto districts. Because many of the tide gauge stations along the Tohoku coast were damaged by the tsunami, source process of the tsunami has not been well determined yet. After the Tohoku earthquake, several cruises of JAMSTEC research vessels recovered Ocean Bottom ElectroMagnetometers (OBEMs) from the seafloor sites in the North-West Pacific area, where the OBEMs had been installed before the earthquake. These sites are BM14 (39.058N, 144.808E, 5830m; recovered by NT11-08), NWP (41.103N, 159.952E, 5816m; recovered by KR11-07), and NM04 (38.211N, 154.190E, 5940m; recovered by KR11-10). OBEMs from these sites clearly recorded the ElectroMagnetic(EM) tsunami signals.

Seafloor measurement of the EM signals due to tsunamis had not been attained until very recently (Toh et al., 2011) because of their low signal levels. However, recent advances in technology enabled the seafloor measurements of the tsunami EM signals by using OBEMs. First simultaneous measurements of EM signals and bottom pressure during the passage of 2010 Chile earthquake tsunami in the French-Polynesia region (Hamano et al., 2011), proved that seafloor observation of EM signals is powerful tool to investigate the generation and propagation of tsunamis in the open sea, in which temporal variations of the vertical magnetic field,  $B_z$ , reproduce the variations of the sea level change due to the passage of tsunami wave, and two horizontal magnetic fields,  $B_x$  and  $B_y$ , indicate the propagation direction of tsunamis. As for the Tohoku earthquake, combination of the three OBEM stations with the tsunami monitoring stations ST2418 (38.718N, 148.698E, 5500m), ST21413 (30.528N, 152.123E, 5874m), and ST21419 (44.455N, 155.735E, 5285m) operated by NOAA, comprises an observational network for the tsunami located in the east of the fault plane of the Tohoku earthquake, which provides valuable information on the generation and propagation of the 2011 Tohoku earthquake tsunami. Among the network stations, the OBEM at site BM14 recorded the tsunami arrival after 4 minutes of the origin time of the Tohoku earthquake. This early observation at the closest place to the tsunami source enable reliable estimate of the source process of the tsunami (Ichihara et al., 2011). Here, we report the propagation process of the tsunami inferred from this tsunami observational network. By taking cross-spectra of the 24 hours signals of sea level change from each station correspond to the signals from BM14 (closest site to the tsunami source), dispersion relations of the tsunami wave across the network were calculated. The result indicates that the tsunami generated just west to site BM14 propagates across the line from BM14 through ST21418 to NM14. This west to east propagated tsunami wave shows a dispersion relation consistent with the theoretical estimate of gravity waves corresponding to the water depth of 5500 m. The dispersion shows that the decrease of phase velocity by about 15 % from the period of 20 minutes to 3 minutes. Cross-spectra of the records from ST21413 and ST21418 to that from BM14 indicate that the tsunami arrived at these sites propagate along west-east direction, suggesting the sources for the tsunami passing through these two stations are different from the source responsible for the tsunami propagated along the BM14-ST21418-NM14 line.

キーワード: 津波, 電磁気観測, 海底観測, 海洋ダイナモ効果, 2011 東北地震

Keywords: tsunami, electromagnetic observation, sea floor observation, ocean dynamo effect, 2011 Tohoku earthquake

## 2003年11月, 2011年6月アリューシャン地震津波の規模 – 太平洋各地の波高偏差 Magnitudes of the Aleutian Tsunamis in Nov. 2003 and Jun. 2011 – Deviation of Tsunami Heights on the Pacific Region

羽鳥 徳太郎<sup>1\*</sup>

HATORI, Tokutaro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 元東大地震研究所

<sup>1</sup>ex. Earthquake Research Institute

2003年11月17日06時43分(UTC),アリューシャン列島のラット島沖で中規模な地震が発生した(震央:51.40N, 178.60E, Mw 7.7, USGS)。津波を伴い,セーミヤ島で全振幅値 52cm,ハワイや南米など太平洋条地で観測された(WC/ATWC)。地震は低角逆断層型であった(中山,2003)。一方,2011年6月24日列島東部のアトカ島沖地震(52.008N, 171.860W, Mw7.2)は小津波を伴った。津波の逆伝播図と余震分布を参照すると,2003年津波の波源域は水深3000mの等深線に拾いに長さ130km,2011年津波は南北方向に60kmと推定され,それぞれ大規模な1965年,1957年津波( $m=3$ )の波源域内に位置する。震央距離-波高関係図によると,津波マグニチュードは2003年津波 $m=1$ ,2011年津波 $m=0$ と判定される。両津波とも,ハワイの波高値が大きい。なお,2007年8月2日のアムチカ島沖地震(Mw6.7)も小津波を伴った。

1946年アリューシャン津波で,ハワイ諸島が大災害に見舞われたことは知られている。ここでは5例のアリューシャン,アラスカ津波について,平均マグニチュードからの波高偏差の地域性を整理してみる。その結果,マグニチュード偏差は米国カリフォルニアと南米チリで2-3階級(波高にして5,10倍)大きい。ハワイ諸島では,3階級以上に突出した。日本ではI階線上回った地点(鮎川,串本)もあるが,多くは平均値またはそれ以下であった。各地域の波高偏差値は,指向性により震央の位置で差がある。

キーワード: アリューシャン地震津波, 津波マグニチュード, 津波の方向性

Keywords: Aleutian-Alaska tsunamis, Tsunami magnitude, Directivity of tsunamis

## 延宝5年10月9日(1677年11月4日)房総沖地震津波の浸水標高について Heights of the tsunami of the Empo Boso-Oki earthquake of November 4th, 1677

都司 嘉宣<sup>1\*</sup>, 今井健太郎<sup>2</sup>, 矢沼 隆<sup>3</sup>, 馬淵幸雄<sup>3</sup>, 大家隆行<sup>4</sup>, 岡田清宏<sup>4</sup>, 岩淵洋子<sup>5</sup>, 今村文彦<sup>2</sup>

TSUJI, Yoshinobu<sup>1\*</sup>, KENTARO, Imai<sup>2</sup>, YANUMA, Takashi<sup>3</sup>, MABUCHI, Yukio<sup>3</sup>, OOIE, Takayuki<sup>4</sup>, OKADA, Kiyohiro<sup>4</sup>, IWABUCHI, Yoko<sup>5</sup>, IMAMURA, Fumihiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> なし, <sup>2</sup> 東北大, <sup>3</sup> パスコ, <sup>4</sup> パシフィック・コンサルタンツ, <sup>5</sup> 原子力安全基盤機構

<sup>1</sup> none, <sup>2</sup> Tohoku U., <sup>3</sup> Pasco, <sup>4</sup> Pacific Consultants, <sup>5</sup> JNES

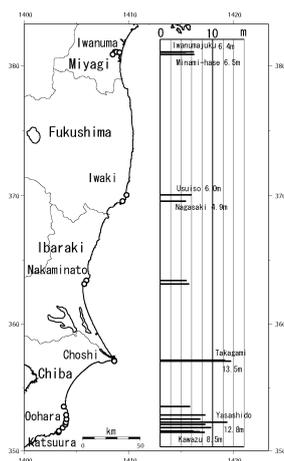
延宝5年10月9日(1677年11月14日)の房総沖地震津波については、羽鳥(1975、1979、2003)、都司(1994)、および、竹内ら(2007)がある。本研究では、房総半島、および福島県のいわき市、および宮城県岩沼市において新たな津波浸水点を加えることができた。津波浸水標高の測定に当たっては、江戸時代の村の被害数記載に対してはできるだけ平凡社『日本歴史地名大系』によって総戸数とその村の被災当時の支配関係を確認すること。江戸期の集落の様子を推定しうる明治期の5万分の一地図上に中心集落を確認すること。必ず古文書の記載点の現地を訪問し、測量器械で測量した数値を基礎とすること、以上3点の手順により決定した。そのさい、30%以下の家屋の流失があったときには敷地上2mの冠水があった、半数近い家屋の流失した村は敷地上2.5mの冠水があった、大部分の家が流失した場所は敷地上3mの冠水があったと推定した。

このうち宮城県岩沼市については、『萬天日録』(武者,1946,第1巻 p881)に「奥州岩沼領被害民屋四百九十軒余流、男女百二十三人、馬二十七匹溺死」とあったが、房総沖の震源から遠すぎることから、「岩沼」は「岩城(福島県いわき市)」の誤ではないかと判定されたせいか、これまで宮城県岩沼市の現地で測定されたことがなかった。しかし、『巖有院実記』に記された「陸奥の田村右京亮建顕も此の害にかかり」の田村右京が岩沼藩の領主であることが判明し、宮城県岩沼にも被害があったことが確認された。

千葉県大原町矢指戸で12.8m、外洋から銚子市高神の小畑池に至る鞍部で13.5m、いわき市薄磯で6.0m、宮城県岩沼宿で6.4m、旧早股村熊野神社で5.7mの浸水高さがあったと推定される。

キーワード: 歴史地震, 歴史津波, 房総沖地震, 津波地震

Keywords: historical earthquake, historical tsunami, Boso-oki earthquake, tsunami earthquake



## 2011年東北地方太平洋沖地震津波の検潮記録に現れた卓越周期の方位角による変化 Observation of azimuth dependence in dominant periods of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami

阿部 邦昭<sup>1\*</sup>

ABE, Kuniaki<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 日本歯科大学新潟短期大学

<sup>1</sup>Nippon Dental University College at Niigata

### はじめに

海岸にある検潮所で観測される津波には波源のサイズなどを反映した周期成分よりも、検潮所近傍で励起された固有振動の周期成分が強く表れる。著者は津波の検潮記録の中で地域固有の振動を見極めるため、市販の圧力センサーを使って津波がないときの水位変動を測定し、卓越周期を調べてきた。そんな折 2011 年 3 月 11 日に発生した Mw9.0 の東北地方太平洋沖地震の津波は太平洋全体に広がり、沿岸各地の検潮所で観測された。国内の波源近傍では振幅が大きすぎて測定不能になったが遠方や海外の検潮所ではオーバースケールする事なく記録が取れている。方位角が種々に異なる検潮所の水位記録からスペクトルの卓越周期を求め、波源と観測点近傍で励起された周期成分を分析した。

### 方法

使用する検潮記録は気象庁、米国海洋大気局 (NOAA) がインターネットのサイトに公表しているもので、津波の到達時刻直前の正時から 6 時間の記録である。全て一分間隔の水位とした後、潮位を除いてから、従来使用してきた方法でスペクトルを求めた。そしてその最大振幅の周期成分を卓越周期とする。対象検潮所は国内では花咲、父島の 2 点、海外ではアダック島、クレセントシティ、ラホヤ、カワイハエ、ミッドウエー島、ウエーキ島、パゴパゴ (米国)、アカプルコ (メキシコ)、カヤオ (ペルー)、バルパライソ (チリ) の 10 点、計 12 点である。花咲だけは導水管方式である事がわかっているので応答の補正を行っている。これらの記録は同じ場所で観測された静振の卓越周期と比較される。花咲、父島に関しては静振の測定結果から卓越周期が 33、17 分であるのでこれを使用し、海外の検潮所の卓越周期は、同じサイトで公表されている同じ場所での水位で津波が来る直前または 1 年前のチリ津波の直前の水位を使って静振の卓越周期を求めた。これにより津波の卓越周期と静振の卓越周期を比較する事が出来る。

### 結果

津波の卓越周期は一分台が 1、10 分台が 2、20 分台が 2、30 分台が 3、40 分台が 3、60 分台が 1 となった。最短の 9.9 分はミッドウエー島、最長の 69 分は花咲の値である。静振の卓越周期との比較では 5 分以内で一致する物が 5 カ所であった。一致が良いのはパゴパゴやアカプルコのように検潮所が湾内にある所である。この事は津波が湾のように閉じた所で固有振動を励起した事を意味する。しかし同時に一致しない所も過半数あるので、波源の影響を反映している事も指摘出来る。図 1 は横軸に震央からみた検潮所の方位角をとって、縦軸に津波及び静振の卓越周期をとってプロットしたものである。実線であらわした曲線は Yamashita and Sato(1974) による津波振幅の最大値が得られる周期成分の方位による変化を示したものである。計算にあたり波源断層の走向を N20E として、断層パラメータは長さ 450km、幅 200km、傾斜角 9 度、滑り角 81 度を仮定して、距離 2000km で振幅が最大になる周期を求めて、方位角の関数として表示したものである。この式は水深が一定の場合に限られているので水深を 6000m にした場合がこの曲線にあたる。走向と直交する方向で周期が短くなる事が理論から予測されるが、観測結果もそうになっている事から明らかに方位変化が観測されたといえる。津波の来襲によって卓越周期が静振の卓越周期から津波の卓越周期に変化した所は理論曲線に近づくように変化した例が多い。ただし例外もある。波源域の平均的な水深は約 3000m なので、この結果は水深がかなり深い場合に対応する事を示すものである。卓越周期を 1 個の数値で代表させているが波源にも測定サイトにも実際は幅があるので、幅を持ったものどうしの重なりで卓越周期が実現されたと考えればその違いは説明出来そうである。

キーワード: 方位角変化, 2011 年東北地方太平洋沖地震津波, 卓越周期, 検潮記録

Keywords: azimuth dependence, 2011 Tohoku Earthquake Tsunami, dominant period, tide gage records

HDS26-13

会場:102B

時間:5月21日 14:15-14:30

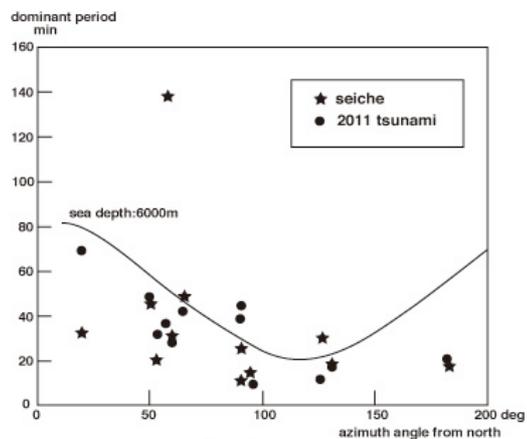


Figure 1

## 遠地津波の反転した初期振幅の起源 Origin of the reversed initial amplitude of distant tsunami

綿田 辰吾<sup>1\*</sup>, 藤井 雄士郎<sup>2</sup>, 佐竹 健治<sup>1</sup>  
WATADA, Shingo<sup>1\*</sup>, FUJII, Yushiro<sup>2</sup>, SATAKE, Kenji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所, <sup>2</sup> 建築研究所  
<sup>1</sup>ERI, University of Tokyo, <sup>2</sup>Building research Institute

Distant tsunami waveforms recorded at deep open sea from the 2010 Chile earthquake and the 2011 Tohoku-Oki earthquake show a reversed prolonged small initial tsunami phase arrival, which is easily identified by the reversed polarity of the large amplitude tsunami arrival following the small-amplitude initial phase arrival. The small reversed polarity before the main peak is visible in the original tidal pressure data and not introduced during the de-tide process. Thanks to the low noise DART data from large earthquakes, the arrival of the small initial phases at distant buoys are identified as early as 1 hour before the arrival of large amplitude tsunami with a reversed polarity. The small initial amplitude is as large as 10 % of the amplitude of the main phase at largest distances. Such an initial phase is not observed at buoys near the earthquakes.

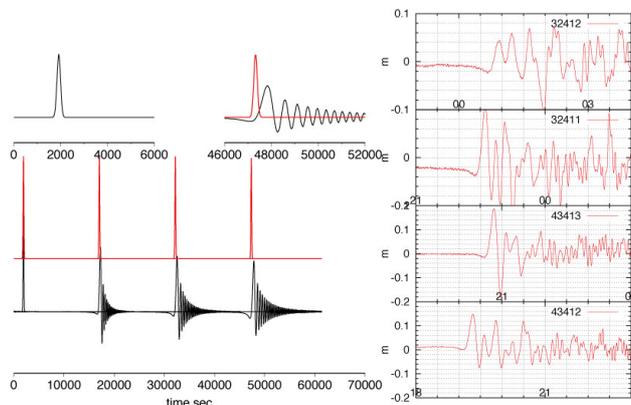
The synthetic tsunami for 1D PREM earth model including the effect of the elastic crust, mantle, and core of the earth, and the effect of the compressibility of the ocean water, and the effect of the gravity potential change caused by the motion of the mass of the water and the solid earth during the tsunami propagation, has been computed. Compared with the tsunami synthetics waveforms computed based on a conventional non-dispersive long-wavelength water waves, the tsunami for 1D earth shows a delayed arrival of the main amplitude peak of the tsunami, in addition to a prolonged small initial amplitude phase with reversed polarity before the main peak.

Two features, delayed arrival of the main amplitude peak and the small amplitude initial phase with a reversed polarity, are successfully re-produced by the tsunami computation for 1D PREM earth model.

The small initial tsunami with a reversed polarity observed at distant locations is caused by the dispersion of the long-wavelength tsunami, and should not be misinterpreted as an evidence of a precursory crustal movement prior to the large earthquakes.

Figure Left: shows synthetic tsunami waveforms of dispersed tsunami and non-dispersive tsunami. Right: observed tsunami waveform at DART buoys after the 2011 Tohoku-Oki earthquake.

キーワード: 津波伝搬, 初期振幅異常, 東北太平洋沖地震, チリ地震, GPS 津波計, 海底圧力計  
Keywords: tsunami propagation, initial amplitude anomalies, Tohoku-oki earthquake, Chile earthquake, GPS wave gauge, ocean bottom pressure gauge



## 数値モデルを用いた釜石湾港防波堤による東北地方太平洋沖地震津波の軽減効果 Numerical modeling of Kamaishi offshore tsunami barrier against Tohoku earthquake tsunami

森 信人<sup>1\*</sup>, 米山 望<sup>1</sup>, 三輪真揮<sup>1</sup>

MORI, Nobuhito<sup>1\*</sup>, Nozomu Yoneyama<sup>1</sup>, Masaki Miwa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

### 1. はじめに

3月11日に起こった東北地方太平洋沖地震津波は、これまでにない甚大な津波被害を東北地方中心に与え、その影響範囲は北海道から九州にまで及ぶ広範囲なものであった。被害の中でも来襲した津波によるものがかなりの割合を占めることが報告されている。

岩手県釜石市の釜石港付近の被害調査結果から、周辺の地域に比べて、湾奥の被害が軽微であるという特徴が見られた。釜石湾の湾口には、波浪と津波防止のための釜石港湾口防波堤が水深63mに設置されており、痕跡調査結果から湾口防波堤内の痕跡高が3~4割程度小さくなっていることが報告されている。

本研究では、釜石湾を対象に局所的な津波のシミュレーションを行い、湾内の津波挙動および湾口防波堤の効果について数値実験を行う。得られた結果について、痕跡調査結果と比較し、その妥当性について検討を行う。

### 2. 研究手法の概略

数値計算は、静水圧を仮定した準3次元モデルと3次元Navier-Stokes方程式を用いて2種類行った。水平方向には直交座標、鉛直方向には座標を用い、解像度は水平25-50m、鉛直10層とした。沖の境界条件には、GPS波浪計等のデータを元に逆解析した結果を用いて、釜石湾沖における時系列として用いた。

### 3. 主な結論

現況（沖防波堤有）における計算を行い、陸上の痕跡高と比較を行った。その結果、計算結果はやや過大であるものの、観測結果に対して概ね良好な一致を見せた。浸水範囲についても計算結果は、観測結果に近い分布を示した。

さらに、沖防波堤がない場合の計算を行い、構造物の有用性について数値実験を行った。図1に示すのはその結果であり、沖防波堤により、釜石港内の陸上では約30~40%浸水高が小さくなっていることがわかった。

キーワード: 東北地方太平洋沖地震津波, 釜石湾, 防波堤, 数値モデル, 流速分布

Keywords: The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami, Kamaishi bay, Wave barrier, Numerical modeling, Velocity profile

## 津波警報のための巨大地震の早期規模推定法 Rapid magnitude estimation of great earthquakes for tsunami warning

勝間田 明男<sup>1\*</sup>, 青木 重樹<sup>1</sup>, 吉田 康宏<sup>1</sup>, 上野 寛<sup>1</sup>, 甲斐田 康弘<sup>2</sup>, 横田 崇<sup>1</sup>  
KATSUMATA, Akio<sup>1\*</sup>, AOKI, Shigeki<sup>1</sup>, YOSHIDA, Yasuhiro<sup>1</sup>, UENO, Hiroshi<sup>1</sup>, Yasuhiro Kaida<sup>2</sup>, Takashi Yokota<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 応用地質

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, JMA, <sup>2</sup>OYO Corporation

2011年東北地方太平洋沖地震が発生した際の津波予報上の問題点として地震発生直後にその規模を適切に把握できていなかったという点がある。初期の津波予報に用いられる変位振幅マグニチュードはその遮断周期が6秒と十分ではなく、東北地方太平洋沖地震のような規模が大きく破壊継続時間の長い地震の規模を適正に評価できなかった。国内の広帯域地震計の多くが振り切ったために地震モーメントの推定がすぐにはできず、国外のデータを用いて地震モーメントを推定するのに時間がかかった。このような問題点を解決し地震発生直後におよその規模を推定するため、いくつかの手法を開発している。

規模の大きな地震は広い範囲に強い地震動を引き起こす。その広さからおよそのマグニチュードを推定可能である。東北地方太平洋沖地震において震度5弱以上の範囲の差し渡しの距離はおよそ700kmになっている。一方2003年十勝沖地震の場合には約300kmになっている。この違いからおよその規模が推定される。

また、震源域に近いところでは強震動が観測される。逆に震度が小さいところでは震源域から離れている。震度の値から震源域までの最大の距離が推定可能である。プレート境界で地震発生したと仮定すると、プレート境界上の震源域を震度の分布から推定することができる。

強震動の継続時間は断層破壊の継続時間に直接的に関係してくる。強震動の継続時間とM<sub>w</sub>の間にはよい相関が認められ、強震動継続時間からおよその規模が推定可能である。東北地方太平洋沖地震の場合には、強震動の継続時間は80秒にもなり、日本周辺で発生した他のどの地震に比べても非常に大きな値であった。

長い破壊継続時間は同時に長周期の地震波を励起する。長周期成分を用いることにより大きな地震の規模を適正に推定できると考えられる。長周期成分を監視することにより規模の大きな地震の発生を早期に把握できると考えられる。更に、様々な遮断周期の地震波を用いてマグニチュードを推定する手法を開発した。東北地方太平洋沖地震に適用したところ、3分以内にマグニチュードをほぼ9と推定可能であった。

これらの手法を組み合わせることにより、次に規模の大きな地震が発生するときには早期に地震の規模を適正に評価可能となると期待される。

キーワード: マグニチュード決定, 巨大地震, 強震度域, 強震動継続時間

Keywords: magnitude determination, great earthquakes, area of strong motion, strong-motion duration

## 巨大地震に対するモーメントテンソル解析の高速化に関する検討 Rapid estimation of moment tensors for large earthquakes

浅野 陽一<sup>1\*</sup>, 木村 尚紀<sup>1</sup>

ASANO, Youichi<sup>1\*</sup>, KIMURA, Hisanori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人防災科学技術研究所

<sup>1</sup> National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

地震発生後の早い段階で精度の高い津波警報を出すためには、地震波解析による断層パラメタの迅速な推定が有効と考えられる。防災科学技術研究所（防災科研）による AQUA システムは、M4 から 7 クラスの地震のモーメントテンソル (MT) 解やセントロイド・モーメントテンソル (CMT) 解を地震発生後約 3 ~ 8 分で推定することが可能である [松村・他 (2006)]。しかしながら、このシステムでは点震源におけるインパルス型震源時間関数を仮定しているために、断層サイズが問題にならない程度に比較的離れた観測点の記録を解析するとともに、破壊継続時間を無視できるほど長い周期帯に着目した解析を行っている。特に後者は、破壊継続時間の長い巨大地震を解析するためには長時間の記録を解析しなければならないことを意味し、迅速な解析を目指す上では障害となる。そこで、我々は、震源時間関数を考慮した MT 解、CMT 解の推定を行い、例えば平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震について、どの程度まで短時間の記録から断層パラメタの推定が可能であるかを検討した。

解析には、防災科研の広帯域地震観測網 (F-net) のうち、震央距離 600km に以内に位置する観測点の速度型強震計の記録を使用した。まず初めに、気象庁による震源時である 2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分 17 秒を含む 8 分間 (14 時 44 分から 52 分) を切り出してバンドパスフィルタ (通過周期帯 50-200 秒) によって処理した後に、震源時から 300 秒間の観測波形を説明するような MT 解、CMT 解を AQUA とほぼ同様のアルゴリズムによって推定した。その際に、二等辺三角形型の震源時間関数を導入し、震源時間関数がピークをとる時刻、および破壊継続時間をグリッドサーチによって推定するよう拡張した。15 観測点の記録を解析した結果、インパルス型震源時間関数を仮定した場合には残差減少率 (VR) が 63 % であったのが、ピーク時刻を 14 時 47 分 33 秒とする破壊継続時間 60 秒の震源時間関数を仮定した場合には 75 % と改善し、推定されたモーメント・マグニチュード (Mw) も 8.6 から 8.8 へと大きくなった。既往研究と比べると依然として過小評価ではあるが、震源時間関数の導入によってその傾向は改善されたといえる。

次に、解析する記録の時間長を 5 分間 (14 時 44 分から 49 分) と短くし、震源時から 120 秒間の観測波形を説明するような解を同様に推定した。その結果、震央距離 140 から 310km に位置する 6 観測点の記録から Mw はインパルス型震源時間関数の場合で 8.6、破壊継続時間 60 秒の震源時間関数の場合で 8.8 と推定された。解析に使用した観測点の震央距離が断層サイズと比べて近く、震源時間関数を導入しても波形のモデリングが不十分なためか、両者の VR は 75 % 程度と大差なかった。このように、解には任意性が残るものの、震源時から 120 秒の記録の解析においても 300 秒間の記録の解析に近い結果が得られることが分かった。Yagi and Fukahata (2011) によれば、震源時間関数のピークは震源時から約 70 秒後であったと推定されている。この時間帯に励起された S 波や表面波が約 200km 離れた観測点に到達するのは更にその約 40 から 50 秒後、すなわち震源時から約 120 秒後である。すなわち、震央距離 200km よりも近い観測点においては、震源時から 120 秒間の記録中に震源時間関数がピークを過ぎて減少に転じる情報が含まれている筈である。このような情報が Mw の推定値の拘束に貢献しているものと推察される。

以上に述べた震源時から 120 秒後までの記録解析における処理時間は、波形の切り出しを含めても約 2 から 3 分程度であり、解析に必要な記録の蓄積を待つ時間を考慮しても震源時の約 5 から 6 分後には解が得ることが可能である。このように、震源時間関数の導入によって処理に必要な記録の時間長が短くなり、結果として迅速な解の推定が可能になった。

キーワード: モーメントテンソル, セントロイドモーメントテンソル, 断層パラメタ, 津波警報, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: moment tensor, centroid moment tensor

## 2011年東北地方太平洋沖地震津波の波源逆解析における断層破壊過程の影響 Effects of rupture process in the source inversion of 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake Tsunami

高川 智博<sup>1\*</sup>, 富田孝史<sup>1</sup>  
TAKAGAWA, Tomohiro<sup>1\*</sup>, Takashi TOMITA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 港湾空港技術研究所

<sup>1</sup>Port and Airport Research Institute

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0) and Tsunamis attacked and severely damaged the east coast of Japan. Inverse analysis on the tsunami source was conducted on the basis of sea-level observation of GPS buoys and water pressure gauges located near the source area. Observed data are inverted to determine the initial sea-surface height distribution and its time development that are generated by the rupture motion of inter-plate faults and the related sea-floor deformations. We use an inversion method of synthesizing tsunami Green's functions. To compute the Green's functions, tsunami wave propagation was calculated on the basis of the finite-difference approximation of linear long-wave equations in a spherical coordinate system. Such inversions are usually ill-posed problem mainly because of limited observation. To avoid the ill-posedness, smoothing and rupture constrains are imposed. The rupture constraint is based on a priori information about the tsunami source region. The region at a given time is estimated by the distance from epicenter and a rupture velocity. According to the seismic wave analysis by Japan Meteorology Agency, epicenter is located at N38°6.2', E142°51.6', 24 km deep and the rupture velocity and the rupture duration is assumed as 2.0 km/sec and 3 minutes respectively. The inversion result shows that the peak of surface elevation moved eastward from epicenter for first 1 minute to reach close to the Japan Trench and moved northward along the trench axis for next two minutes. The maximum elevation of tsunami source is +6.9 m in total and is located at northeast of epicenter in the west side of the trench axis. The crest of initial wave form is distributed in the west side of the trench. To investigate the effect of rupture process, we perform another inversion with the assumption of rupture velocity as infinity. A major difference between the two inversions is the location of the wave form crest. In the infinite rupture velocity case, the crest penetrates into east side of the trench. The tsunami source model of finite rupture velocity show a better accuracy for the prediction of waveforms which were temporally and/or spatially different from waveforms used in the source inversion. Therefore, it is concluded that the effect of rupture time lag is not negligible in the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Tsunami case and the effect should be included in the validation of inundation or damage on the coastal area and the assessment for future risk.

キーワード: 2011年東北地方太平洋沖地震, 津波, 波源逆解析, 断層破壊過程

Keywords: 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, tsunami source inversion, rupture process

## 沖合津波観測点配置の違いが近地津波の予測精度に与える影響の評価 Effect of offshore tsunami station array configuration on accuracy of near-field tsunami forecast

対馬 弘晃<sup>1\*</sup>, 平田 賢治<sup>1</sup>, 林 豊<sup>1</sup>, 前田 憲二<sup>1</sup>, 尾崎 友亮<sup>2</sup>

TSUSHIMA, Hiroaki<sup>1\*</sup>, HIRATA, Kenji<sup>1</sup>, HAYASHI, Yutaka<sup>1</sup>, MAEDA, Kenji<sup>1</sup>, OZAKI, Tomoaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 気象庁

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, <sup>2</sup>Japan Meteorological Agency

### 1. はじめに

2011年(平成23年)東北地方太平洋沖地震(Mw=9.0)では, 沖合のGPS波浪計(Kato et al., 2005)で早期検知された津波観測情報に基づき, 津波警報が上方修正された(気象庁, 2011a). 一方, より沖合のケーブル式海底水圧計ではさらに早く津波が検知されており, こうした記録を活用すれば, より迅速に警報を更新できる可能性がある. 近年, 多くの研究が, 沖合津波観測値から沿岸の津波を予測するための手法を提案している(例えば, Baba et al., 2004; Titov et al., 2005; 安田・他, 2007; 高山, 2008; 辰巳・富田, 2008; Tsushima et al., 2009; 林, 2010). Tsushima et al. (2011)は, 沖合津波波形の逆解析に基づく津波予測手法 tFISH (Tsushima et al., 2009)を東北地方太平洋沖地震の実記録に適用し, 沖合津波観測点の密度が比較的高い三陸海岸について, 沿岸での津波高さを早期予測するのに有効である可能性を示した. 一方, 波源から見て沖合観測点の少ない方位にある沿岸においては, 予測精度が低下しうることが指摘された. 本研究では, 沖合津波観測点の数や配置の違いが, tFISHによる近地津波の予測精度向上にどのように影響するのかを調べる.

### 2. 津波予測実験の設定

2011年東北地方太平洋沖地震を想定した数値実験を行った. 実験手順は以下の通りである: (1) 震源断層モデルを仮定して海底の上下地殻変動を計算し, それを初期条件として各地の仮想津波波形を数値計算する. (2) 沖合観測点の仮想観測波形を用いて, 沿岸付近における予測津波波形を計算する. (3) 沿岸付近での仮想観測波形と比較し, 津波第一波の波高および到来時刻の予測精度を評価する.

震源断層モデルとして, Fujii et al. (2011)による不均質すべり分布を用いた. Okada (1985)で計算した上下地殻変動を津波計算の初期条件とした. 海底の変動時間は30秒とし, 震源断層全体での同時破壊を仮定した. 津波の伝播は, 線形長波理論に基づく支配方程式を差分法で計算した(Satake, 1995). 沿岸の波形予測にはtFISHを用いた. 即ち, 沖合津波波形データの逆解析により初期水位分布を推定し, その分布と沿岸津波波形のグリーン関数との線形重ね合わせで予測津波波形を求めた. 海底水圧計直下における海底地殻変動が水圧記録に与える静的な水圧変動の寄与は, Tsushima et al. (in press)の手法を適用することで考慮した. 予測結果の評価は, 北海道から関東地方にかけての各沿岸観測点付近の水深100m地点での観測波形と予測波形の第一波の比較により行った.

ここでは, 3種類の沖合観測点配置を仮定した. 1つめが, 東北地方太平洋沖地震時に設置されていたケーブル式海底水圧計及びGPS波浪計からなる配置である(本震時配置). 2つめは, その配置に, 日本海溝の陸側斜面に3台の海底水圧計を追加したものである(陸側追加配置). 3台は青森県沖から福島県沖にかけて南北に約200km間隔で配置した. これらは, 既存のどの沖合観測点よりも海溝に近い(海溝の西側約80km). 3つめは, 先とは逆に海溝より沖側に3台の水圧計を加えたものである(沖側追加配置). 南北方向の分布は陸側追加配置のものとはほぼ同じで, 海溝から約120km東側に離れた.

### 3. 結果と考察

地震発生後20分以内に得られる仮想波形を用いて予測実験を実施した. 本震時配置では, 釜石沖水圧計2点で第一波のピークが観測され, これに伴い沿岸の宮古や釜石における第一波の予測波形は観測波形と概ね一致した. それ以外の沿岸では, 第一波の予測波高は観測波高の半分程度である. それに対し, 陸側追加配置では, 同時刻における予測精度が沿岸地点すべてで格段に向上した. 追加した水圧計のうちの2点は震源域直上に位置しており, 予測実施時点では, 水圧計直上の初期津波が周囲へ行き去り海底変動に伴うオフセット変化が記録上に現れる. これにより隆起域の広がりや変位量に強く拘束がかかり, 沿岸予測波高の過小評価が改善したと考えられる. 一方, 沖側追加配置でも, 陸側追加配置と同程度の改善が見られた. 海溝沖側に追加した観測点は波源域の東端から100km近く離れているが, 深海域では津波が速く伝わるため, この時点では, 追加した水圧計のうちの2点で波源域東端の大隆起域からの津波がほぼ観測される. これによって沿岸の波高予測精度が改善したと考えられる. こうした結果は, 波源域と予測対象の沿岸地点との間でなくとも, 津波エネルギー輻射の強い方位で津波を早期検知できれば, 津波の即時予測には有効である可能性を示しており, 将来の沖合観測点の配置を考える上での参考情報の1つになりうる. 今後は, 波源位置を含む震源パラメータ及び沖合観測点配置を変えた実験を進める.

# Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



HDS26-P04

会場:コンベンションホール

時間:5月21日 17:15-18:30

謝辞 北海道大学の谷岡勇市郎教授の津波計算プログラムを使用させていただきました。記して感謝申し上げます。

キーワード: 津波即時予測, 近地津波, 海底水圧計, GPS 波浪計, DART

Keywords: real-time tsunami forecasting, near-field tsunami, ocean bottom pressure gauge, GPS buoy, DART

## 近地津波の沖合観測における諸問題

### Issues specific to offshore tsunami observation in near-field

平田 賢治<sup>1\*</sup>, 対馬弘晃<sup>1</sup>

HIRATA, Kenji<sup>1\*</sup>, Hiroaki TSUSHIMA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute

The March 11 Tohoku earthquake (M9.0) destroyed vast coastal zone of the northern Japan together with many coastal tide gauges. It also did offshore tsunami observation stations off Tohoku. A part of them, like GPS tsunami buoys, was already recovered but the others are not. In 2011, JMA and MEXT started their plans to construct new offshore tsunami observation networks off Tohoku. When these networks will be built up once, it is possible that the offshore data, which will be transmitted to the land on real-time base, may improve the reliability of the regional forecast for near-field tsunamis. However, there seem to be issues to overcome for achieving precise near-field tsunami forecast. We would like to discuss two of them below.

First issue is pressure resolution in ocean-bottom pressure gauge (OBPG). When a large earthquake occurs, offshore ocean-bottom pressure gauges (OBPG) usually record tsunami and preceding pressure fluctuations with frequencies much shorter than the period of the tsunami. The pressure fluctuations are primarily attributed to seismic Rayleigh waves traveling through oceanic lithosphere from a distant earthquake (Fillioux, 1982). In some cases, such pressure fluctuation masks tsunami signals for nearby earthquakes (Okada, 1995; Tsushima et al., 2009). In the 2003 Tokachi-oki earthquake (Mw8.0), however, a pressure signal with an amplitude of a few hundreds of kPa (equivalent to several tens of meters H<sub>2</sub>O) was observed with the near-field OBPGs, while tsunami amplitude was estimated only an order of a few kPa (equivalent to only a few tens of centimeters H<sub>2</sub>O). The period of the main energy of the observed pressure signals was several seconds that are much shorter than tsunami period. In addition, the tsunami and pressure signals were completely overlapped. The large pressure signals observed is considered mostly low-frequency hydroacoustic waves reverberating between the sea surface and ocean bottom through water layer, which was theoretically predicted by Kajiura (1970), and these are closely related to ocean-bottom vertical motion due to an earthquake (Matsumoto and Mikada, 2005; Nosov et al., 2007) and remain mostly in the source region (Nosov, 2000). The near-field experience in 2003 suggests that to extract tsunami information precisely from OBPG records for coastal tsunami forecast, we will have to observe ocean-bottom pressure in much wider range of amplitude from an order of millimeters H<sub>2</sub>O to an order of, at least, several tens of meters H<sub>2</sub>O and in much broader frequency range from an order of 0.1 seconds to an hour. Pressure resolution of OBPGs attached on the existing Japanese cabled observatories is not so fine to satisfy the above conditions. In near-future, near-field OBPG measurement will require finer pressure resolution than the present.

Second issue is sudden temperature change on deep ocean floor. In the 2003 Tokachi-oki earthquake, we found that the temperature within OBPGs in the source region suddenly decreased by an order of 0.1 degree C per ten minutes, which was much rapid change in the deep ocean floor environment off Tokachi (Hirata et al., 2003). Such sudden change in temperature caused artificial pressure signal that distort tsunami waveforms owing to a transient thermal response of OBPGs (Takahashi, 1983; Hirata and Baba, 2006). The mechanism of such sudden temperature change remains unresolved so that we cannot decide whether this is local phenomena or not. Any near-field tsunami forecast based on records monitored with OBPGs, experienced a sudden temperature change, may include not small prediction error unless the transient thermal effect of OBPGs is properly corrected.

キーワード: 津波, 沖合, 観測, 津波予測

Keywords: tsunami, offshore, observation, tsunami forecast

## 電離圏観測による津波速報 Early warning system with GPS-TEC observation

鴨川 仁<sup>1\*</sup>, 柿並 義宏<sup>2</sup>

KAMOGAWA, Masashi<sup>1\*</sup>, KAKINAMI, Yoshihiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京学芸大学物理学科, <sup>2</sup> 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

<sup>1</sup>Dpt. of Phys., Tokyo Gakugei Univ., <sup>2</sup>Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

Traveling ionospheric disturbances generated by an epicentral ground/sea surface motion, ionospheric disturbances associated with Rayleigh-waves as well as post-seismic 4-minute monoperiodic atmospheric resonances and other-period atmospheric oscillations have been observed in large earthquakes. In addition, a giant tsunami after the subduction earthquake produces an ionospheric hole which is widely a sudden depletion of ionospheric total electron content (TEC) in the hundred kilometer scale and lasts for a few tens of minutes. The tsunamigenic ionospheric hole detected by the TEC measurement with Global Position System (GPS) was found only in huge subduction earthquakes. This occurs because plasma is descending at the lower thermosphere where the recombination of ions and electrons is high through the meter-scale downwelling of sea surface at the tsunami source area, and is highly depleted due to the chemical processes. The results imply that magnitude of the tsunamigenic ionospheric hole is related to that of the tsunami. It means that we can directly observe the tsunami several minutes after the subduction earthquake occurs.

キーワード: 津波速報, 津波電離圏ホール, GPS

Keywords: Early warning system, Tsunamigenic ionospheric disturbance, GPS

## 父島で観測された2011年東北地方太平洋沖地震津波による磁場変動の数値モデルを用いた定量的解析(その2) Quantitative Analysis of Magnetic Signals induced by the 2011 Tohoku Tsunami Flow around Chichijima Island(Part 2).

舘畑 秀衛<sup>1\*</sup>, 浜野 洋三<sup>2</sup>  
TATEHATA, Hideo<sup>1\*</sup>, Yozo Hamano<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象庁, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup>JMA, <sup>2</sup>IFREE JAMSTEC

地球磁場が貫く海水が流動する時、ファラデー効果によって意外にも津波が起電力を持つという事実は、良く考えれば当然のことである。さらに新しく流れる電流が微弱な磁場を励起して、これが感度の高い地磁気観測用センサーに捉えられている。大津波の場合は、センサーが海水中(浜野, 2007)、軌道衛星上(Tyler, 2003)に在っても観測されている。父島には気象庁の地磁気観測点(CBI)と検潮所(二見港)が1程の距離にあり、津波の記録と陸上観測点ながら磁場変動の記録とが同時に得られる。2011年3月11日の東北太平洋沖地震津波では、津波の検潮記録と、地磁気観測点で津波による磁場変動の両方が観測された。これらを比較すると、磁場変動の初動が20分程度、津波の初動に対して先行する興味深い現象が見られた。

今回は、島の周囲100四方に10×10個の格子点を設け、各点における海水の流動を数値モデルによって求め、さらに津波の高さを励起磁場に変換する定式(Hamano et al., 2011)を用いて吟味したところ、磁場変動が先行した原因は、比較的早く津波が到達する父島北東側の海域から励起された磁場が最初に記録されたためと結論した(Tatehata and Hamano, 2011)。つまり検潮儀が直近の津波を計測するのに対し、地磁気センサーには励起された磁場が広い範囲でインテグレートされて観測される性質を持つことを示していた。

しかし、父島地磁気観測点での観測磁場変動と、津波の数値モデルから得られた理論磁場変動との調和は十分とは言えなかった。原因は格子点が10×10個と少なかったことである。また基礎データとなる津波の数値モデルの分解能が低かったことも原因の一つである。今回は磁場計算格子点を100×100個、2間隔と稠密化した計算結果を報告する。

また、父島のような地磁気観測点で、東北太平洋沖地震津波で大きな被害を受けた岩手県・宮城県の海岸近くに設置されていたなら、どのような磁場変動が記録されたのかは、興味のあるところであろう。磁場変動による津波の観測は、周辺の水深が深いほど原理的に感度が上がるため、深海に設置する沖合津波計としてのアドバンテージがあるが、逆に海岸での観測には不利である。しかし、高台の上に設置しても津波が観測できる可能性があり、観測装置が破壊されるような巨大な津波の場合には利点も考えられる。この計算結果も合わせて報告する。

キーワード: 東北太平洋沖地震津波, 津波, 地球磁場, 父島, 海洋ダイナモ, ファラデー効果  
Keywords: tsunami, geomagnetic field, motional induction, Chichijima, Kakioka, Faraday's Law

## 海底磁場データによる2011年東北沖地震本震(M9.0)および前震(M7.3)の波源推定

### Tsunami source estimation of the 2011 Tohoku-oki earthquake (M9.0) and its foreshock (M7.3) using ocean bottom magnetic

市原 寛<sup>1\*</sup>, 浜野 洋三<sup>1</sup>, 馬場 聖至<sup>2</sup>, 笠谷 貴史<sup>1</sup>

ICHIHARA, Hiroshi<sup>1\*</sup>, HAMANO, Yozo<sup>1</sup>, BABA, Kiyoshi<sup>2</sup>, KASAYA, Takafumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <sup>2</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo

The electromagnetic induction theory predicts that motion of conductive seawater in the geomagnetic field induces variation of electromagnetic fields as known as dynamo effect. Thus electromagnetic observation is expected to be a novel tsunami meter that can detect propagated direction of tsunamis in addition to the sea level change (e.g. Toh et al., 2011). When the 2011 Tohoku-oki earthquake (M9.0, March 11) occurred, an ocean bottom electromagnetometer (here after OBEM) settled near the Japan Trench (39.0N latitude, 144.8E longitude, 5830m deep) clearly recorded tsunami induced magnetic signals.

The variations in the magnetic field after the main shock show a unipolar impulsive wave for a short duration (about 4 min) in all three components. The vertical magnetic field indicates the tsunami travel time to the OBEM station (4 minutes from the initial rupture). Amplitude of the vertical impulse (15 nT) corresponds to 2.3 m of sea level change. In addition, the horizontal magnetic field components indicate propagated direction of tsunami to the OBEM station (WNW). Based on this information, the tsunami source of the main shock was determined along the Japan Trench but at about 100 km north from main rupture zone of the main shock (around 39.0-39.5N latitude, 144.8E longitude). Joint analysis of OBEM data and offshore sea-level gage data (GPS gages and deep pressure gages) supports this location and constrained the tsunami source to a narrow east-west area (<30 km in width). On the other hand, the tsunami induced vertical magnetic signal associated with the foreshock was detected after 10 minutes from the rupture initiation. Based on the back propagation curves of the arrival time of tsunami to the OBEM station and the offshore sea-level stations, the tsunami source of the fore shock was determined around 38.4N latitude and about 80km west from the Japan trench, almost same location of the epicenter. Thus the estimated tsunami sources of the fore and main shocks are quite different although the epicenters of main and fore shocks are determined in the almost same location. In addition, elastic fault models are hard to explain observed tsunami waveforms by the main shock including OBEM data although it can explain observed tsunami waveforms by the fore shock. They imply different source mechanism of these tsunamis and thus detailed study of the tsunami source model is required especially for the main shock.

Keywords: tsunami electromagnetism, OBEM, 2011 Tohoku-oki earthquake

## 非構造格子有限要素法による3次元津波生成シミュレーション: 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波生成過程の検討 3-D simulations of tsunami generation using an unstructured mesh FEM: investigation of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake

大石 裕介<sup>1\*</sup>, Matthew D. Piggott<sup>2</sup>, 前田 拓人<sup>3</sup>, Stephan C. Kramer<sup>2</sup>, Gareth S. Collins<sup>2</sup>, 対馬 弘晃<sup>4</sup>, 古村 孝志<sup>3</sup>  
OISHI, Yusuke<sup>1\*</sup>, Matthew D. Piggott<sup>2</sup>, MAEDA, Takuto<sup>3</sup>, Stephan C. Kramer<sup>2</sup>, Gareth S. Collins<sup>2</sup>, TSUSHIMA, Hiroaki<sup>4</sup>,  
FURUMURA, Takashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 欧州富士通研究所, <sup>2</sup> Imperial College London, <sup>3</sup> 東大総合防災情報研究センター / 地震研究所, <sup>4</sup> 気象研究所

<sup>1</sup> Fujitsu Laboratories of Europe Ltd., <sup>2</sup> Imperial College London, <sup>3</sup> CIDIR/ERI, The University of Tokyo, <sup>4</sup> Meteorological Research Institute

複雑な海底下での大地震の断層運動による津波の生成過程を詳しく評価するために、非構造格子有限要素法に基づく3次元非圧縮ナビエ・ストークス方程式計算による、効率の良い津波発生伝播シミュレーションを提案する。本手法を2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)における津波の生成過程シミュレーションに適用し、その有効性を検証する。

断層破壊による海底の地殻変動によって引き起こされる津波の一般的な津波シミュレーションにおいては、断層パラメータから Okada (1985) の式等により算出される海底地殻変動量を津波シミュレーションの初期条件として与えるのが一般的である。その際、海底変動領域が広域に及ぶことを考慮して、海底地殻変動量をそのまま水面での波高分布として与える近似が用いられることが多い。しかしながら、この近似は必ずしも成り立たず、ライズタイムが長い場合、地殻変動の水平スケールが小さい場合、水深が深い場合には、水面での波高は海底の変動量に比べ小さくなる傾向がある。例えば、Saito and Furumura (2009) ではこのフィルタリング効果について定量的な評価を行い、例えばライズタイムが短い際には、変動の水平スケールが水深の約10倍よりも短い場合にフィルタリング効果が見られることを示している。

2011年東北地方太平洋沖地震においては、海溝付近の浅い部分での大きな断層滑りが短波長の津波を引き起こしたことが知られている (e.g. Fujii et al., 2011; Maeda et al., 2011)。このような深海での短波長の津波生成を適切にシミュレーションに取り込むためには、フィルタリング効果の考慮は必須である。

フィルタリング効果を考慮した、海底地殻変動から水面での波高分布の算出方法としては、線形ポテンシャル理論等による近似に基づく解析解を用いる方法 (e.g. Takahashi, 1942; Kajiura, 1963) と、近似を用いずに3次元方程式を解く、より現実的な方法 (e.g. Takahashi and Furumura, 2009) とがある。しかしながら、3次元計算を行う場合、特に2011年東北地方太平洋沖地震のように震源域が広範囲に及ぶケースにおいては、その計算コストは非常に大きくなる。そこで、本研究では非構造格子有限要素法を用いて3次元非圧縮ナビエ・ストークス方程式を解くことで、効率的に津波の生成過程の3次元計算を行う。非構造格子を用いることにより、均一な構造格子を用いる従来の方法に比べて、計算時間とメモリが大幅に節約できるほか、さらに、海溝付近の複雑な海底地形を高精度に評価することができる。津波シミュレーションの入力となる海底地殻変動については、Saito and Furumura (2009) による3次元差分計算同様、海底面で速度場に対する流入境界条件として課し、地震による海底地殻変動の時間変化により、海底直上の海水移動による流速の変化として計算に組み込む。その際、計算を効率化するように節点を配置する。鉛直方向には、海底面の境界層を含め、鉛直方向の速度・圧力構造を効率よく表現するように節点を配置する。

本発表では、本手法と線形ポテンシャル理論による解析解との比較による本手法の精度の検証、2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)における津波の生成過程への本手法の適用結果、本モデルの並列計算効率について報告する。

キーワード: 非構造格子, 有限要素法, 津波, シミュレーション, 東北地方太平洋沖地震

Keywords: unstructured mesh, finite element method, tsunami, simulation, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

## 日本列島の津波到来予測：数値シミュレーションによる検討 Tsunami prediction of Japanese Island based on numerical simulations

三好 崇之<sup>1\*</sup>, 齊藤 竜彦<sup>1</sup>

MIYOSHI, Takayuki<sup>1\*</sup>, SAITO, Tatsuhiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 防災科研

<sup>1</sup> NIED

プレート収束帯に位置する日本列島では、地震・津波などによって自然災害が生ずるが、居住地など特定の場所における自然現象の種類・規模について、あらゆる可能性を認識しておくことは基本的な防災対策となる。本研究では、日本列島周辺で発生する津波の到来予測について、数値シミュレーションを用いて検討した。

津波シミュレーションは、日本列島を含む南北方向 5400km、東西方向 3800km を計算対象領域として、線形長波方程式の差分方程式を用いて、水位と線流量を求めた。初期条件は、長軸 100km、短軸 50km の楕円体型の波高分布を採用した。楕円の長軸方向は、海溝・トラフや主要な海底活断層に平行な方向とした。波源は、千島海溝から伊豆・小笠原海溝、相模トラフから南西諸島海溝、日本海沿岸に 200 箇所想定し、観測点は沿岸に約 20km ごとに配置した。

上記想定のもと数値シミュレーションを行い、津波の初動と最大津波高の到達時間を評価するため、三種類の地図を作成した(1)各波源からの津波伝播図(2)各観測点における津波到達時間マップ(3)津波検知最短時間マップである。これらを用いれば、海域で大地震が発生した際に、その震央位置から瞬時に津波の初動と最大津波高が到達するまでの時間の目安を知ることができる。おおまかな特徴としては、日本列島周辺で発生する津波は、30 分以内には陸地に初動が到達することが示されたほか、千島海溝や伊豆・小笠原海溝沿いで津波が発生した場合には、最大津波高は初動よりも 5 分以上遅れて到達することが示され、おおむね観測事実と反しない。また、2011 年東北地方太平洋沖地震津波の観測データを用いて、本研究の結果を吟味した。Saito et al.(2011) の初期水位分布を参考に、牡鹿半島の東方沖約 200km の位置に波源を置き、2 時間以内に観測された最大津波高走時を評価したところ、シミュレーションで得られた最大津波高走時や初動走時におおむね一致しており、計算結果は妥当だと言える。今後、基本的防災情報として適切な津波情報を提示するための各種パラメータの検討や観測記録との対比を行いたい。

謝辞：本研究の一部に、気象庁の地震・火山月報(防災編)で報告された津波観測値を使用しました。記して感謝いたします。

キーワード: 津波, シミュレーション, 走時, 初動, 最大津波高

Keywords: tsunami, numerical simulation, travel time, initial tsunami height, maximum tsunami height

## 安政3年7月23日(1856年8月23日)三陸北部地震による北海道沿岸での津波の高さ

### Tsunami heights of the North Sanriku-Oki earthquake of August 23rd, 1856

都司 嘉宣<sup>1\*</sup>, 今井健太郎<sup>2</sup>, 堀江岳人<sup>3</sup>, 野々山浩介<sup>3</sup>, 岩淵洋子<sup>4</sup>, 今村文彦<sup>2</sup>, 吉野真史<sup>3</sup>

TSUJI, Yoshinobu<sup>1\*</sup>, IMAI, Kentaro<sup>2</sup>, Horie, Takehito<sup>3</sup>, NONOYAMA, Kosuke<sup>3</sup>, IWABUCHU, Yoko<sup>4</sup>, IMAMURA, Fumihiko<sup>2</sup>, Yoshino, Masahumi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> なし, <sup>2</sup> 東北大学, <sup>3</sup> アルファ水工, <sup>4</sup> 原子力安全基盤機構

<sup>1</sup> none, <sup>2</sup> Tohoku Univ., <sup>3</sup> Alfa Hydraulic Engineering Co., <sup>4</sup> JNES

幕末の安政3年7月23日三陸地方北部沖合を震源としてM7.5と見積もられる地震が起きた。この地震による津波は三陸海岸北部にかなりの津波被害をもたらし、三陸海岸全体で約30人ほどの溺死者を生じたと推定される。1968年の十勝沖地震と震度分布、津波の分布が似ており、震源域はほぼこれと同じであったかと推定される。本研究では、この津波の記録の多く残る函館市をはじめ、北海道渡島半島、室蘭、および日高海岸で記録の残っている各地点を訪問し、津波の遡上高さを測定した。

津波発生当時、日米和親条約によって、下田とともに日本でただ2個所の開港場であった函館では、ロシア領事館が設置されすでに繁栄した港町であった。市内の浸水の様子は『時風録』(武者史料、p668)に詳しく記録されている。それによると、「廿日頃より地震日々両三度程宛有之処、同廿三日午の下刻地震強、其後も昼夜少し宛震申候。尤潰家、怪我人等無之処、同日未之下刻、高浪平水より壹丈余相増候」とあり、津波を伴った本震は23日の13時頃(午の下刻)に起きたが、前震がこの3日前の20日から毎日2、3回の有感地震としては感じられていた。この地震による被害はなかった。津波が来たのは「未の下刻」(15時)というのであるから、地震が起きてから津波の最大波がくるまで2時間もかかっている。津波は「平水より一丈余」とあるので、3m余りというのである。浸水到達点については「地藏町、并榭形内外建家、床上水冠四五尺におよび候」とある。

今も函館の名所になっている「沖の口番所は、ここまで浸水はしたが無事であった。このような記載から函館市内の浸水高さを測定すると、西側(港側)海岸から約400mの現在市電が走っている通りまで浸水したことになる。おのおの図のような浸水高さであったことになる。函館市中心街から北にはずれた津軽陣屋では、「裏石垣水の高さこと五、六尺」とあり、この石垣はいまも残っていて、その最下端の標高は6.8mであって、これに六尺(1.8m)を加えると、津波浸水高さはここでは8.6mにも達していたことになる。現地の地形を調べると、この海水は半島の東の太平洋側の海岸から上がってきたものと了解される。

噴火湾(内浦湾)内では、八雲で「海水平水より四十五間(約81m)浸水した(八雲村戸長報告、武者, p668)」の記載に忠実に現地・旧遊楽部村で測量するとここでの斜面遡上高さは3.8mであったことになる。鹿部では『見聞随筆(新収, p243)』に「少なからず流失」とあり、旧鹿部稲荷神社の標高3.2mに冠水2mとみてここでの浸水標高は5.2mとする。白尻は『白尻村戸長役場記録』に「街路に打ちあげし波はおよそ6尺なり」とあり、中心地にある覚王寺門前街路の標高3.5mに六尺(1.8m)を加えて5.3mと推定する。

『見聞随筆』(新収, p243)に「モロラン会所付近で流死者を生じ」とあり、『時風録』に「エトモ辺も余程高潮押し入り」の記載を元に現地測量して、浸水高をそれぞれ4.8m、5.1mと推定した。『時風録』に「(勇弘領と)沙流塚は余程崩れ所出来」とあり、当時の街道の上、両領の境界地点を測定して15.5mという大きな遡上高数値を得た。また「沙流会所前は高潮強」の記載から現在の日高町門別の会所跡の敷地を測定してやはり11.2mという大きな数値を得た。

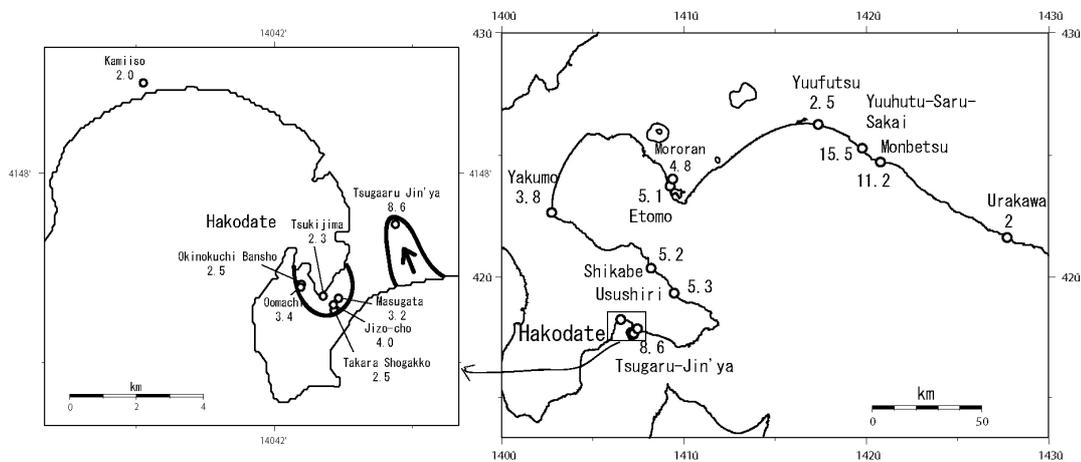
キーワード: 安政3年三陸北部沖地震, 歴史津波, 歴史地震, 北海道の津波, 函館の津波

Keywords: the 1856 North Sanriku Earthquake, historical tsunami, historical earthquake, tsunami in Hokkaido, tsunami at Hakodate

HDS26-P11

会場:コンベンションホール

時間:5月21日 17:15-18:30



## 津波の波源生成にともなって励起された大気境界波 - 事例: 2004年スマトラ島沖の地震 -

### Atmospheric boundary waves excited by the tsunami generation - the great Sumatra-Andaman Islands Earthquake in 2004 -

岩國 真紀子<sup>1\*</sup>, 新井 伸夫<sup>1</sup>, 今西 祐一<sup>2</sup>, 綿田 辰吾<sup>2</sup>, 大井 拓磨<sup>3</sup>, 村山 貴彦<sup>1</sup>, 野上 麻美<sup>1</sup>

IWAKUNI, Makiko<sup>1\*</sup>, ARAI, Nobuo<sup>1</sup>, IMANISHI, Yuichi<sup>2</sup>, WATADA, Shingo<sup>2</sup>, Takuma Oi<sup>3</sup>, MURAYAMA, Takahiko<sup>1</sup>, NOGAMI, Mami<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 日本気象協会, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所, <sup>3</sup> 東邦マーカンタイル株式会社

<sup>1</sup>Japan Weather Association, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>3</sup>Toho Mercantile CO., LTD

The sudden and strong vertical displacements of ocean surface are known to be the source of the long-period acoustic-gravity waves including the boundary waves in the atmosphere. Arai et al. (2011) observed atmospheric pressure changes caused by the tsunami generation of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake, and identified them as "atmospheric boundary waves" on the basis of the waveform characteristics. The sudden and strong vertical displacements of ocean surface caused by the Sumatra-Andaman earthquake in 2004 also had produced long-period acoustic-gravity waves (Mikumo et al. 2008).

We re-explore barograph data observed around the source region of the Sumatra earthquake in 2004. Atmospheric pressure changes caused by the ocean uplift and subsidence were detected at 4 IMS (International Monitoring System for CTBT verification regime) stations. IMS stations provide two kinds of data, one is the band pass filtered (0.02-4Hz) output and the other is the absolute pressure output. Band pass filtered data are archived and used for CTBT's monitoring purpose. Absolute pressure data are not archived at all IMS stations. If the absolute data is not available, the band pass filtered data have been corrected by deconvolving the filter response and original records have been restored.

Long-period atmospheric pressure disturbance signals which were excited by uplift and subsidence related to the tsunami generation were observed at IS52 (Diego Garcia), IS33 (Madagascar), IS32 (Kenya) and IS35 (Namibia). The pressure signals were identified as atmospheric boundary waves based on their characteristics.

Earth orbiter "Jason-1" measures ocean surface topography. When the tsunami caused by the earthquake had been propagating through the Indian Ocean, Jason-1 flew over the propagating area. Jason-1 detected the two propagating tsunami wave fronts as the elevated ocean surface topography which indicates two isolated peaks. Detected atmospheric boundary waves also have the same characteristics. Atmospheric boundary waves retain the initial shape of the tsunami, because they are little dispersive. Observed signals suggest the Sumatra-Andaman earthquake had two isolated tsunami source regions.

キーワード: 大気境界波, 津波波源, 国際監視観測網

Keywords: Atmospheric boundary wave, Tsunami source, International Monitoring System