

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^{1*}, 青木 重樹¹, 吉田 康宏¹, 上野 寛¹, 甲斐田 康弘², 横田 崇¹
KATSUMATA, Akio^{1*}, AOKI, Shigeki¹, YOSHIDA, Yasuhiro¹, UENO, Hiroshi¹, Yasuhiro Kaida², Takashi Yokota¹

¹ 気象研究所, ² 応用地質

¹Meteorological Research Institute, JMA, ²OYO 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_w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^{1*}, 木村 尚紀¹

ASANO, Youichi^{1*}, KIMURA, Hisanori¹

¹ 独立行政法人防災科学技術研究所

¹ 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^{1*}, 富田孝史¹

TAKAGAWA, Tomohiro^{1*}, Takashi TOMITA¹

¹ 港湾空港技術研究所

¹Port 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^{1*}, 平田 賢治¹, 林 豊¹, 前田 憲二¹, 尾崎 友亮²

TSUSHIMA, Hiroaki^{1*}, HIRATA, Kenji¹, HAYASHI, Yutaka¹, MAEDA, Kenji¹, OZAKI, Tomoaki²

¹ 気象研究所, ² 気象庁

¹Meteorological Research Institute, ²Japan 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^{1*}, 対馬弘晃¹

HIRATA, Kenji^{1*}, Hiroaki TSUSHIMA¹

¹ 気象研究所

¹Meteorological 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 H₂O) 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 H₂O). 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 H₂O to an order of, at least, several tens of meters H₂O 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^{1*}, 柿並 義宏²

KAMOGAWA, Masashi^{1*}, KAKINAMI, Yoshihiro²

¹ 東京学芸大学物理学科, ² 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

¹Dpt. of Phys., Tokyo Gakugei Univ., ²Institute 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^{1*}, 浜野 洋三²
TATEHATA, Hideo^{1*}, Yozo Hamano²

¹ 気象庁, ² 海洋研究開発機構
¹JMA, ²IFREE 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がない、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ば、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^{1*}, 浜野 洋三¹, 馬場 聖至², 笠谷 貴史¹

ICHIHARA, Hiroshi^{1*}, HAMANO, Yozo¹, BABA, Kiyoshi², KASAYA, Takafumi¹

¹ 海洋研究開発機構, ² 東京大学地震研究所

¹ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ² 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^{1*}, Matthew D. Piggott², 前田 拓人³, Stephan C. Kramer², Gareth S. Collins², 対馬 弘晃⁴, 古村 孝志³
OISHI, Yusuke^{1*}, Matthew D. Piggott², MAEDA, Takuto³, Stephan C. Kramer², Gareth S. Collins², TSUSHIMA, Hiroaki⁴,
FURUMURA, Takashi³

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

¹ Fujitsu Laboratories of Europe Ltd., ² Imperial College London, ³ CIDIR/ERI, The University of Tokyo, ⁴ 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^{1*}, 齊藤 竜彦¹

MIYOSHI, Takayuki^{1*}, SAITO, Tatsuhiko¹

¹ 防災科研

¹ 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^{1*}, 今井健太郎², 堀江岳人³, 野々山浩介³, 岩淵洋子⁴, 今村文彦², 吉野真史³

TSUJI, Yoshinobu^{1*}, IMAI, Kentaro², Horie, Takehito³, NONOYAMA, Kosuke³, IWABUCHU, Yoko⁴, IMAMURA, Fumihiko², Yoshino, Masahumi³

¹ なし, ² 東北大学, ³ アルファ水工, ⁴ 原子力安全基盤機構

¹ none, ² Tohoku Univ., ³ Alfa Hydraulic Engineering Co., ⁴ 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兩三度程宛有之処、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、高浪平水より壱丈余相増候」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『見聞隨筆(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。

『見聞隨筆』(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。

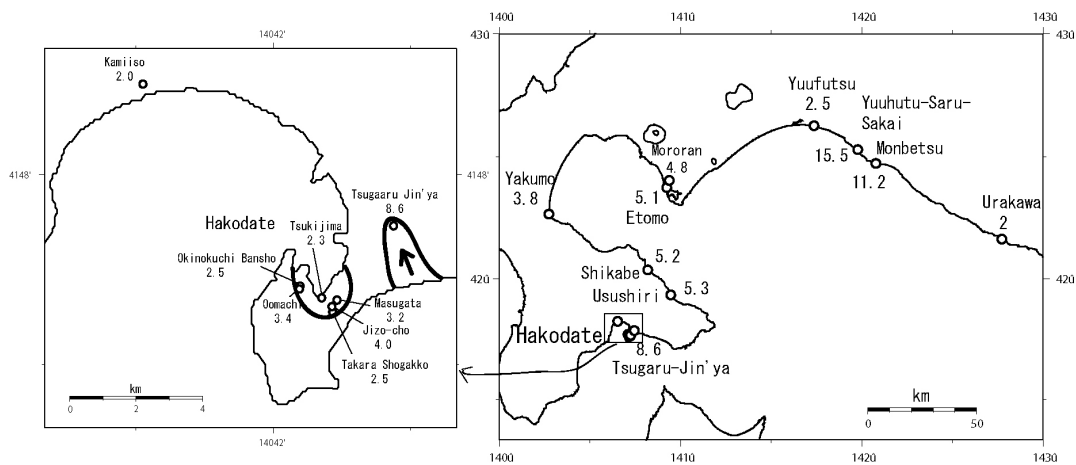
キーワード: 安政3年三陸北部沖地震, 歴史津波, 歴史地震, 北海道の津波, 函館の津波

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^{1*}, 新井 伸夫¹, 今西 祐一², 綿田 辰吾², 大井 拓磨³, 村山 貴彦¹, 野上 麻美¹

IWAKUNI, Makiko^{1*}, ARAI, Nobuo¹, IMANISHI, Yuichi², WATADA, Shingo², Takuma Oi³, MURAYAMA, Takahiko¹, NOGAMI, Mami¹

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

¹Japan Weather Association, ²Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ³Toho 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