

有限要素法を用いた津波電磁場変動の三次元時間領域シミュレーションと 2011 年東北地方太平洋沖地震津波への応用

南拓人¹・藤浩明²・川嶋一生³・市原寛⁴

1 東京大学地震研究所

2 京都大学大学院理学研究科

3 Japan Manned Space Systems Corporation

4 神戸大学海洋底探査センター

Three-dimensional time-domain simulations of tsunami-generated electromagnetic variations by the finite element method and application to the case of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake tsunami

Takuto Minami¹・Hiroaki Toh²・Issei Kawashima³・Hiroshi Ichihara⁴

1 Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

2 Graduate School of Science, Kyoto University

3 Japan Manned Space Systems Corporation

4 Kobe Ocean-Bottom Exploration Center

Abstract

While there were many reports of tsunami-generated electromagnetic (TGEM) variations during the last decade (e.g., Toh et al., 2011; Ichihara et al., 2013), it was theoretically proved that TGEM fields are useful not for exploring the Earth's conductivity structure beneath the seafloor but for revealing tsunami dynamic properties (e.g., Shimizu and Utada, 2015; Minami et al., 2015). We can see some studies constraining dynamic properties of earthquakes and tsunamis from TGEM fields (e.g., Ichihara et al., 2013; Kawashima and Toh, 2016). However, all the previous studies using TGEM fields were conducted in the frequency domain except for Minami and Toh (2013), although conventional tsunami simulations adopted the time-domain approaches (e.g., Maeda et al., 2011; Oishi et al., 2013). Simulations of TGEM fields in the frequency domain require additional computational complexity associated with Fourier Transform and Inverse Fourier Transform for utilizing the time-domain tsunami dynamic simulation results. This additional costs have been one of obstacles to understanding temporal and spatial characteristics of TGEM variations and to corroborating with the conventional time-domain tsunami studies.

We developed a new time-domain three-dimensional simulation code for TGEM fields and applied the method to the case of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake tsunami. We compared the simulation results with the seafloor geomagnetic data at B14 and NWP, the seafloor sites ~100 km and ~1500 km east-northeast of the epicentre, respectively. Adopting the tsunami source model of Satake et al. (2013) and the tsunami simulation method by Kawashima and Toh (2016), we conducted two types of tsunami simulations: the linear long wave (LLW) and the linear Boussinesq wave (LBW) simulations. Comparison of the simulation results with the observed geomagnetic data showed that the LLW tsunami simulation explained the magnetic data at B14 well, while the LBW simulation did those at NWP better, which clearly indicates the dispersive features of the tsunami at NWP. On the other hand, in both LLW and LBW simulation results, discrepancy of a few nT in the baseline of the magnetic variations between the observations and the simulation results were found in the eastward and the vertical components at B14 after the leading tsunami wave passed the site. This was possibly caused by the ionospheric current due to tsunami-generated acoustic gravity waves (Tsugawa et al., 2011). To clarify this problem, we plan to compare our simulation results with on-land geomagnetic data in the near future.

In this presentation, we are going to share our new time-domain approach for simulations of the TGEM fields and to show the results of the application of our method to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake tsunami.

Abstract

津波に起因する電磁場変動は、近年多くの報告事例があり(e.g. Toh et al., 2011; Ichihara et al., 2013)、海底下の構造探査よりも、津波伝播特性の解明に対して応用可能性が高いことが明らかになってきた(e.g. Shimizu and Utada, 2015; Minami et al., 2015)。実際に、電磁場観測から地震・津波の力学特性を拘束できた研究例も近年報告されている(Ichihara et al., 2013; Kawashima and Toh, 2016)。しかしながら、従来の津波力学シミュレーションが時間領域で行われているのに対し(e.g. Maeda et al., 2011; Oishi et al., 2013)、実地形を考慮できる津波電磁場現象のシミュレーションは Minami and Toh (2013) の例を除き、その全てが周波数領域で行われてきた(e.g. Zhang et al., 2014; Kawashima and Toh, 2016)。周波数領域の津波電磁場シミュレーションでは、入力となる時間領域の海水速度場を、フーリエ変換により周波数領域に変換して計算を行い、さらに電磁場の元時系列データと比較するためには、再度逆フーリエ変換を行う必要がある。これらの追加計算は、津波電磁場現象の時間発展をスナップショットとして捉えることを妨げると同時に、津波波源インバージョンなどの津波研究に電磁場観測が参加する上で、一つの障害となってきた。

本研究では、この問題を受け、津波計算結果を直接入力として利用できる、時間領域の津波電磁場三次元シミュレーションコードを開発した。本コードでは、時間差分に二次の後退 Euler 法(e.g. Um et al., 2010)を採用し、空間差分に非構造四面体要素と磁場のベクトルポテンシャルを変数として用いる辺要素法(A法; e.g. Yoshimura and Oshiman, 2002)を採用した。本コードでは四面体を採用することにより、海底地形の滑らかな表現に加え、観測点付近その他の領域における適切なメッシュ解像度を実現しており、計算コストの削減による広域の津波電磁場計算を可能にしている。

本研究では、開発したコードの精度を解析解との比較で確認した後、2011年東北地方太平洋沖地震津波に応用し、震源域東縁から東に100kmほどの海底観測点(B14)と北西太平洋海盆の海底観測点(NWP)において、計算結果を磁場データと比較した。津波シミュレーションは、線形長波近似で得られた波源モデル(Satake et al., 2013)と Kawashima and Toh (2016)による修正 COMCOT コードを用いて、線形長波計算と線形 Boussinesq 計算の2計算を行った。比較の結果、NWP 観測点では、分散を考慮した Boussinesq 計算がより海底電磁場データを説明した。この結果は、NWP 点において津波の分散特性が強く現れていることを示唆している。一方、B14 観測点では、線形長波の津波計算がより磁場データを説明しているように見えるものの、線形長波と Boussinesq 近似の両計算で、津波第一波以降の変動において約30分の間、磁場鉛直成分に数 nT ほどの基線のズレを生じた。この変化では、津波起因の大気重力波が起こした電離層擾乱(e.g. Tsugawa et al., 2011)が原因である可能性があり、今後、地上磁場データとの比較を行うなど、より詳細な検討が必要である。

本発表では、新たに開発した津波電磁場シミュレーションコードについて、その手法を紹介するとともに、上で述べた2011年東北地方太平洋沖地震津波への応用結果について報告する予定である。

参考文献

Ichihara, H., Y. Hamano, K. Baba, and T. Kasaya (2013), Tsunami source of the 2011 Tohoku earthquake detected by an ocean-bottom magnetometer, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 382, 117-124, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.09.015>.

Kawashima, I. and H. Toh (2016). Tsunami-generated magnetic fields may constrain focal mechanisms of earthquakes, *Scientific Reports* 6, Article number: 28603, doi:10.1038/srep28603.

Maeda, T., T. Furumura, S. Sakai, and M. Shinohara (2011), Significant tsunami observed at ocean-bottom pressure gauges during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 803-808.

Minami, T. and H. Toh (2013), Two-dimensional simulations of the tsunami dynamo effect using the finite element method, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4560–4564, doi:10.1002/grl.50823.

Minami, T., Toh, H., & Tyler, R. H. (2015). Properties of electromagnetic fields generated by tsunami first arrivals: Classification based on the ocean depth. *Geophysical Research Letters*, 42(7), 2171-2178.

Oishi, Y., Piggott, M. D., Maeda, T., Kramer, S. C., Collins, G. S., Tsushima, H., & Furumura, T. (2013). Three-dimensional tsunami propagation simulations using an unstructured mesh finite element model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(6), 2998-3018.

Satake, K., Fujii, Y., Harada, T., & Namegaya, Y. (2013). Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data. *Bulletin of the seismological society of America*, 103(2B), 1473-1492.

Shimizu, H., & Utada, H. (2015). Motional magnetotellurics by long oceanic waves. *Geophysical Journal International*, 201(1), 390-405.

Toh, H., Satake, K., Hamano, Y., Fujii, Y., & Goto, T. (2011). Tsunami signals from the 2006 and 2007 Kuril earthquakes detected at a seafloor geomagnetic observatory. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B2).

Tsugawa, T., et al. (2011). Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, planets and space*, 63(7), 875-879.

Um, E. S., Harris, J. M., & Alumbaugh, D. L. (2010). 3D time-domain simulation of electromagnetic diffusion phenomena: A finite-element electric-field approach. *Geophysics*, 75(4), F115-F126.

Yoshimura, R., & Oshiman, N. (2002). Edge-based finite element approach to the simulation of geoelectromagnetic induction in a 3-D sphere. *Geophysical Research Letters*, 29(3).

Zhang, L., Utada, H., Shimizu, H., Baba, K., & Maeda, T. (2014). Three-dimensional simulation of the electromagnetic fields induced by the 2011 Tohoku tsunami. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *119*(1), 150-168.