

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26282101

研究課題名(和文) 海底電磁場データのリアルタイム転送による津波の早期警戒

研究課題名(英文) Tsunami early warning by realtime transfer of seafloor electromagnetic data

研究代表者

藤 浩明 (Toh, Hiroaki)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40207519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：津波は、甚大な被害を社会に与え得る恐ろしい自然災害である。本研究では、その防災/減災につながる地球電磁気学的研究を行った。即ち、津波に伴う良導的な海水の運動と地球主磁場とが結合して観測可能な電磁場が発生する事を津波早期警戒システムへ応用する事を目指した。その結果、津波の早期警戒を目的とした海底電磁場データのリアルタイム転送が可能である事、及び、既存の津波早期警戒システムに津波起源電磁場の情報が加われば、その能力を向上させられる事を実観測データと3次元数値シミュレーションを用いて示した。

研究成果の概要(英文)：The tsunami is a dreadful natural disaster that can give enormous damage to human society. In this research, we conducted a geomagnetic study that leads to their prevention / mitigation. We aimed to apply to the existing tsunami early warning system the fact that observable electromagnetic fields are generated by coupling of tsunami particle motions of the conductive seawater with the Earth's main magnetic field. As a result, the following two were proved probable by both actual observation and three-dimensional numerical simulation: (1) real-time transfer of seafloor electromagnetic data for tsunami early warning purpose, (2) improvement of the existing tsunami early warning system by adding information from the tsunami-generated electromagnetic fields.

研究分野：地球電磁気学

キーワード：津波 電磁場 ダイナモ作用 波高予測 伝搬予測

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始前の十年間は、2004年のインド洋大津波を皮切りに、2006年および2007年に千島海溝で発生した津波や2011年の東北地方太平洋沖地震に伴う津波など、多くの甚大な被害をもたらした津波が相次ぎ、新たな津波の早期警戒法が模索されている状況にあった。

津波が観測可能な電磁場を伴う事を、海底電磁場データを用い世界で初めて示したのは、研究代表者が率いる研究グループであった(Toh et al., 2011)。それ以来、津波起源電磁場を津波の早期警戒に応用する事が、世界各地で試みられる様になった(例えば、Manoj et al., 2011)。

こうして発見された津波起源電磁場を津波の早期警戒に応用する為には、海底における電磁場観測データを陸上まで転送しなければならないが、研究開始当初には海底圧力計をはじめとする従来型津波計のリアルタイムデータ転送は実現できていたものの(例えば米国大気海洋局 NOAA の DART システム)、多成分観測が基本となる電磁場データの転送例はまだなかった。

また、津波が持つ発電作用を模式化すれば、次の図の様になるが、

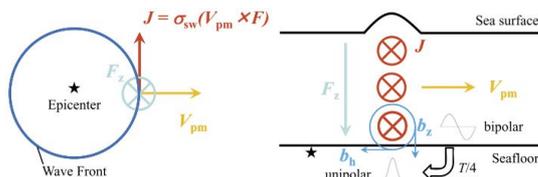


図1. 津波起源電磁場の模式図。平面図(左)と断面図(右)。津波の波面近傍には、図中赤で示した誘導電流(津波に伴う電流カーテン)が発生し、津波の伝搬と共に大洋中を伝わって行く。

この図には背景磁場として地球主磁場鉛直成分しか考慮されていない事に加え、津波に伴う良導的な海水の粒子運動が作り出す誘導起電力のみが記されている。実際には、津波が伝わる位相速度が深海では時速700kmを超えジェット機並みのスピードに達する為、良導的な海水が自己誘導効果を発揮して津波に伴う誘導電流を津波の伝搬方向とは反対方向に押しやる働きを持つ。また、背景磁場の空間分布や水平成分の寄与も検討する余地がある事に加え、模式図の様な平坦な海底ばかりではない為、実効的な津波起源電磁場の予測には、新たな三次元数値シミュレーション法を開発する必要があった。

## 2. 研究の目的

本研究では、新たに発見された津波に伴う観測可能な電磁場を津波の早期警戒に応用する事を目指し、以下の三つの研究目的を設

けた。

- (1) 津波起源電磁場を含む海底長期時系列の蓄積
- (2) 現有の海底電磁場観測ステーション(SeaFloor ElectroMagnetic Station; SFEMS)からのリアルタイムデータ転送
- (3) 津波起源電磁場の三次元数値シミュレーション

(1)は、津波起源電磁場の基本的性質を明らかにする為に必須であり、また、(3)で開発する新しい数値シミュレーション・コードで説明すべきデータを取得する、という意味でも重要である。

(2)は、津波起源電磁場を既存の津波早期警戒システムに組み込むする為には是非とも修得しておかなければならない基本的な技術である。

(3)は、津波起源電磁場を実効的な津波予測に応用する為に必要となるツールであり、「1. 研究開始当初の背景」欄で述べた様に、現実的な予測コードとする為には自己誘導効果を考慮する事や背景磁場と海底地形の三次元化など克服すべき問題が複数残されていた。

## 3. 研究の方法

研究目的(1)を達成する為、京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センターが、東京大学地震研究所や海洋開発機構などと協力して北西太平洋に展開している二点(NWP点及びWPB点; 図2参照)の海底長期電磁場観測点からデータ回収を行った。NWP点とWPB点には、現有設備であるSFEMS(図3)が稼働中であり、各地点の水深は5580m及び5690mである。

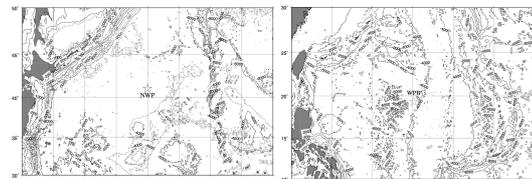


図2. 北西太平洋海盆海底長期電磁場観測点(NWP点; 左)と西フィリピン海盆海底長期電磁場観測点(WPB点; 右)の周辺図。等値線は水深(m)を表す。

これらのSFEMSは自己浮上型の海底観測装置である為、各年度海洋開発機構の深海調査研究課題公募に応募し、NWP点またはWPB点を調査するシブタイムを獲得してデータの回収を行った。具体的には、深海調査研究船「かいらい」によるKR15-03航海と、深海潜水調査船支援母船「よこすか」による

YK16-16 航海を実施した。

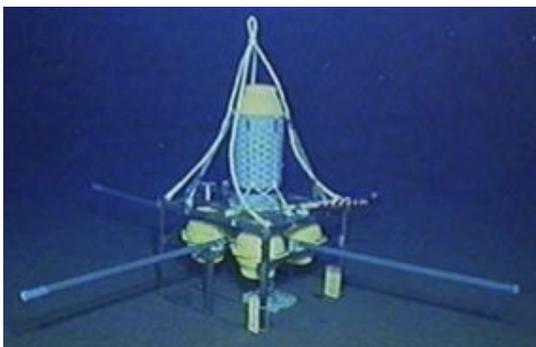


図3 . NWP 点で稼働中の SFEMS。全磁力絶対値を含む磁場四成分と電場水平二成分、及び、方位 / 傾斜 / 温度といった並行観測量の無人連続測定が年単位で可能な装置である。海洋研究開発機構の無人探査機「かいこう」により撮影。

研究目的(2)を達成する為に、既存のグローバル津波早期警戒システムである DART システムを運用している米国 NOAA の技術者から助言を受けながら、現有設備である SFEMS に DART システムと共通の音響モデムを付加する事を目指し、ATM966-LS2 型音響モデム(図4)の新規調達とその船上試験を実施した。



図4 調達した ATM966-LS2 型音響モデム(上)。左右の黒箱内の装置は、ATM966-LS2 の船上制御ユニット(右)とそれに附属のトランスジューサ(左)である。

研究目的(3)を達成する為に、津波起源電磁場の新たな三次元数値シミュレーション・コードの開発を、研究分担者と協力して行った。具体的には、四面体要素を用いた辺有限要素法により地球の曲率も考慮した津波起源電磁場の広域計算コードを開発した。図5に生成した有限要素メッシュの例を示す。この計算メッシュは、津波起源電磁場の元となる良導的な海水の津波に伴う粒子運動計算メッシュと一致させ、力学的・電磁気学的物理量双方の計算精度の向上を図るなどの工夫が加えてある。また、「1. 研究開始当初の背景」欄で述べた通り、これまで考慮されて来なかった背景磁場である地球主磁場の空間分布と水平成分も含んだ包括的なコードとなっている。更に、二次の後退オイラー法を用いた時間領域コードでもある為、従来の計算コード(例えば、Zhang et al.,

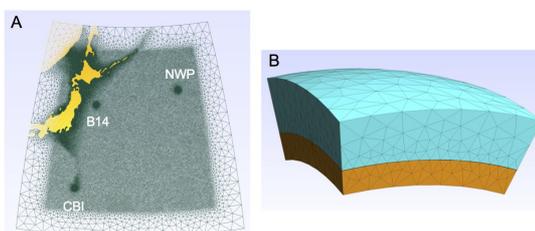


図5 .2011年3月に甚大な被害をもたらした東北地方太平洋沖地震に伴う津波および津波起源電磁場のシミュレーション用に生成したメッシュ。左は平面図、右が立体図。

2014; Kawashima and Toh, 2016) の様に周波数領域での計算結果を逆フーリエ変換して時間領域に戻す必要がなく、観測結果と計算結果の直接比較が可能になる等の長所を持つ。

#### 4. 研究成果

研究目的(1)については、深海調査研究船あるいは深海潜水調査船支援母船を用いた海底電磁場データの回収航海を実施し、NWP 点からは2016年7月までの、WPB 点からは2016年10月までの海底電磁場長期時系列を取得できた。これらの時系列は、例えば2014年から2016年にかけてソロモン諸島周辺で複数回発生した Mw7.5 前後の地震津波や、2014年と2015年にチリで発生したいずれも Mw8.2 を超える地震津波を含んでおり、今後の、特に後述する研究目的(3)の成果と有機的に結合させた解析により、津波起源電磁場の物理的性質を解明する貴重なデータとなると期待されている。実際、このデータに興味を示した米国 NOAA 及びコロラド大の研究者との共同研究により、津波起源磁場の検出には Wavelet による解析が有効である事などが明らかになって来ている (Schnepf et al., 2016)。さらに、新たに取得した観測時系列の一つの特長に、海底電磁場だけでなく圧力変化の同時測定にも成功している事があり、これにより津波による電磁場変動と力学的変動の詳細な比較検討が初めて可能になった。

これらの時系列のもう一つの特長は、ベクトル場である電磁場の無人連続観測でありながら基線変化が極めて安定しており、津波起源電磁場のみならず地磁気永年変化といった地球磁場の長周期変動の検出も可能(例えば Toh et al., 2010) な長期データとなっている事である。実際、この時系列データを海洋潮汐に応用した米コロラド大学との共同研究も、本研究の研究期間内に実現している (Schnepf et al., 2014)。さらに、今後このデータを熱収支と関係付けて海洋の長期変動予測に役立てようという新たな研究提案を、米国科学基金(NSF)に対してNASAのゴッダード宇宙飛行センターの研究者と共同で出す事もできた。

本研究費の交付によって津波起源磁場の観測面に起きた新たな進展は、陸上磁場観測でも津波到来の直前予測の可能性が示された事が挙げられる。具体的には、海岸線近傍の磁場観測点と海岸から離れた磁場参照点とのリアルタイム・ベクトル差を取る事によって、陸上磁場観測では常に問題となる津波とは無関係な外部磁場擾乱の影響を受けない津波起源磁場データを抽出できる可能性が出て来た事で、本研究では高知県の室戸市と馬路村間のベクトル差を取得する事ができた。このデータは、来るべき南海、東南海、あるいは両者が連動した際想定される巨大地震津波の直前予測の為に重要な基礎データとなる可能性がある。

研究目的(2)については、「3. 研究の方法」欄に記載した通り、現有設備であるSFEMSに本研究費により既存のグローバル津波早期警戒システムと互換性のある音響モデムを付加する事ができ、海底の電磁場観測データをリアルタイム転送する態勢が整った。しかし、研究期間内に「海底電磁場データのリアルタイム転送による津波の早期警戒」に成功した、とまでは言えず、その点では課題が残った。この大きな原因の一つに、海域観測には必須の研究船のシフトタイムが思う様に取れなかった事が挙げられる。本研究の場合、2014年度は研究船共同利用の内諾が本研究の新規申請前に得られていたにも関わらず、研究船運用元の運航予算削減によって予定されていた研究航海が年度当初に取り消されたという経緯がある。また、最終年度は申請そのものは認められたものの、実際に割り当てられた観測点滞在時間は僅か12時間であった為、NWP点から新たな海底電磁場データをSFEMSごと回収するのが精一杯であった。今後は、米国NSFで既に実践されている様な研究費と連動したシフトタイムの割当が日本でも強く望まれる。

これに対し研究目的(3)については、幾つかのブレイクスルーがあった。

まず取り組んだのが、周波数領域における津波起源電磁場の求解であった。波面方向に同じ波形が無限に連なる平面波が平坦な海を伝わって行く場合の数値解は既に得られていたが(Minami and Toh, 2013)、速度場が解析的に与えられる津波に対して背景磁場の水平成分を考慮した解析解は未だ得られていなかった。そこで本研究では線形分散波に対する解析解を新たに求め、地球主磁場の水平成分由来の津波起源電磁場は鉛直成分由来のそれと比べ確かに小さいものの十分観測可能な大きさを持つ事、及び、津波の最大波高に対する位相が鉛直成分由来のものより90度程度進んでいる事を明らかにした(図6)。これは、背景磁場の鉛直成分が失われる磁気赤道域においても津波起源磁場を用いた津波の早期警戒が可能である事、及び、津波起源磁場には、振幅は小さいものの津波の最大波高より四分の一周期

以上早く到達する背景磁場の水平成分由来の磁場と、振幅が大きく津波の直前に到達する鉛直成分由来の磁場、の二つが存在する事を意味している。本研究では、地震波に擬えこれら二つの磁場を「津波起源磁場のP成分とS成分」と呼ぶ事にし、特にP成分を今後の津波予測に活用する必要性を強く示唆した。

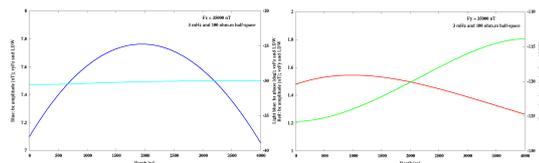


図6. 津波起源磁場の解析解。鉛直成分由来(左)と水平成分由来(右)の振幅(濃青と赤)及び位相(空色と緑)。

さらに、津波起源電磁場の三次元周波数領域数値解として非一様薄層導体近似により海底地形を表現する方法を新たに定式化し、津波に伴う粒子運動速度も既存の津波力学計算コードを改良して周波数分散を取り入れる事に成功した。これらの計算コードを駆使して、2006年と2007年に千島海溝で相次いで発生した被害津波の作る磁場を再現し、地震学的データだけでなく津波起源磁場も併用すれば津波地震の震源パラメータの推定精度を向上させられる事を、NWP点で実際に観測された津波起源磁場とそれを非一様薄層導体近似を用いて再現した磁場とを比較照合する事により示した(Kawashima and Toh, 2016; 図7)。

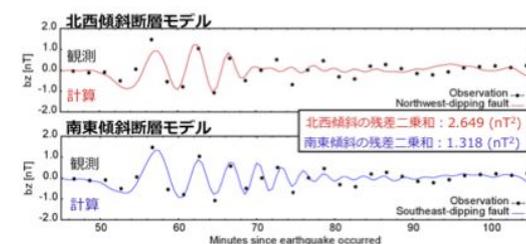


図7. 黒い点はいずれもNWP点で観測された津波起源磁場の鉛直成分。上図赤線は北西傾斜断層が作る津波起源磁場、下図青線は南東傾斜断層が作る津波起源磁場。南東傾斜断層の方が、津波起源磁場の観測値に良く一致する事が分かる。

これらの成果は、Nature Publishing Groupが発行するオープンアクセス誌であるScientific Reportsに掲載され、研究代表者が所属する大学から記者発表された。

研究目的(3)では、最後に津波起源電磁場の時間領域解を求める事に取り組んだ。その結果、「3. 研究の方法」に記した様な手法を用い、新たな津波電磁場の三次元時間領域数値シミュレーション・コードの開発に成功した。これにより、従来の様に周波数領域

で求めた津波起源電磁場をフーリエ変換により時間領域に戻す必要が無くなったばかりでなく、周波数領域解では表せなかった津波の過渡的な性質も扱える様になり、背景磁場の水平成分を考慮した事と相俟って、現在の所この新しいコードは津波起源電磁場に関する最も包括的な三次元コードとなっている。今後は、このシミュレーション・コードを駆使した過去の被害津波時の津波起源磁場の再現や、将来想定されている南海/東南海地震津波などの被害予想、また、津波起源電磁場の観測データに基づく新しい津波早期警戒法への応用が期待される。尚、このコード開発結果については、現在投稿準備中である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

Schnepf, N.R., C. Manoj, A. Kuvshinov, H. Toh, and S. Maus, Tidal signals in ocean bottom magnetic measurements of the Northwestern Pacific: Observation versus prediction, *Geophys. J. Int.* 198 (2): 1096-1110. doi: 10.1093/gji/ggu190, 2014, 査読有.

Minami, T., H. Toh and R.H. Tyler, Properties of electromagnetic fields generated by tsunami first arrivals: Classification based on the ocean depth, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2015GL063055, 2015, 査読有.

Schnepf, N.R., Manoj, C., An, C., Sugioka, H. and Toh, H., Time-Frequency Characteristics of Tsunami Magnetic Signals from Four Pacific Ocean Events. *Pure Appl. Geophys.* (2016) 173: 3935. doi:10.1007/s00024-016-1345-5, 査読有.

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

[学会発表](計6件)

Kawashima, I. and Toh, H., 3D numerical simulation of the tsunami-generated electromagnetic field using non-uniform thin-sheet approximation, JpGU, Makuhari, May 27, 2015, Oral Presentation.

Toh, H., Seafloor magnetic observatories, Colloquium on Geomagnetism, Niemegk, Germany, June 17, 2015, Invited Oral Presentation.

Toh, H., T. Minami and I. Kawashima, On the tsunami-generated electromagnetic fields: Its properties and application to tsunami early warning, IUGG General Assembly, Prague, Czech Republic, June 29, 2015, Oral Presentation.

Toh, H., T. Minami and I. Kawashima, Tsunami-generated magnetic fields on oceanic islands in equatorial regions, SGEPS Fall Meeting, Tokyo, November 1, 2015, Oral Presentation.

藤 浩明, 「津波電磁場研究の最近の進展～海洋島磁場観測の重要性」, 地磁気観測所談話会(柿岡), 2016年12月21日, Invited Oral Presentation.

Toh, H., T. Minami and I. Kawashima, On the tsunami-generated EM fields: Its potential for global tsunami early warning, Earth Science Department Colloquium at ETH, Zurich, Switzerland, February 17, 2017, Oral Presentation.

[図書](計2件)

Toh, H. and Y. Hamano, The two seafloor geomagnetic observatories operating in the western Pacific, in *Seafloor Observatories - A New Vision of the Earth from the Abyss*, Favali, P., A. De Santis and L. Beranzoli (Eds.), Springer, ISBN 978-3642113734, pp.307-323, doi:10.1007/978-3-642-11374-1\_12, 2015, 査読有.

Toh, H. and A. De Santis, Modelling of regional geomagnetic field based on ground observation network including seafloor geomagnetic observatories, in *Seafloor Observatories - A New Vision of the Earth from the Abyss*, Favali, P., A. De Santis and L. Beranzoli (Eds.), Springer, ISBN 978-3642113734, pp.585-599, doi:10.1007/978-3-642-11374-1\_22, 2015, 査読有.

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

藤 浩明 (TOH, Hiroaki)  
京都大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 40207519

(2)研究分担者

後藤 忠徳 (GOTO, Tadanori)

京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号： 9 0 3 0 3 6 8 5

南 拓人 (MINAMI, Takuto)  
東京大学・地震研究所・学振特別研究員  
研究者番号： 9 0 7 5 6 4 9 6

(4)研究協力者

今井 一雅 (IMAI, Kazumasa)

大槻 圭史 (OHTSUKI, Keiji)

中道 晶香 (NAKAMICHI, Akika)

山崎 明 (YAMAZAKI, Akira)

川嶋 一生 (KAWASHIMA, Issei)

岩下 耕大 (IWASHITA, Kohdai)