

令和 5 年 4 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03993

研究課題名(和文) 海底電磁場アレイデータに基づく津波伝搬過程の基礎的研究

研究課題名(英文) Basic research on tsunami propagation by seafloor array data of electromagnetic fields

研究代表者

藤 浩明 (Toh, Hiroaki)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40207519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の成果を短く要約すれば、「津波の波高と津波が作る磁場との位相関係を解明し、また、津波磁場成分を津波波高へ精度良く変換できる」ことを明らかにしたことに尽きる。今後は、磁場観測ならではの方位情報を津波伝播過程から抽出することが新たな津波磁場研究の指針となる。これらの研究成果は、本研究で取り上げた「海底における圧力・電磁場同時観測データ」によるものである。このデータは、別の研究目的の為に取得されたものであったが、二つの地震津波を明瞭に捉えており、この微小な変化に着目した事が本研究の成功につながったものと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、キーワードにも挙げた通り、あくまで「基礎研究」という位置づけであり、津波の防災・減災を直接意図したものではない。しかし、本研究で明らかにできた「津波磁場鉛直成分が、有意に津波波高のピークに先んじて変化する」という性質は、今後の津波早期警戒にも役立つものと考えられる。

さらに、津波によって発生した磁場成分を高精度で津波波高に変換できることを示せた為、今後の津波研究には、海底圧力や潮位変化だけでなく、磁場三成分データも使用できる場合がある事が分かった。これは、津波伝播の予測精度向上に今後つながって行くものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The results of this study can be summarized as follows: The phase relation between the tsunami wave height and the tsunami-generated magnetic field was clarified, and the magnetic field components were shown to be converted to the tsunami wave height with high accuracy. In the future, it will be a new direction for tsunami magnetic field research to extract azimuthal information for the sake of the tsunami propagation detection, which is very unique to the vector magnetic observation.

These research results are based on the "simultaneous observation data of both pressure and electromagnetic fields on the seafloor" analyzed by this study. Although the data were obtained for different research purposes, it clearly captured the two seismic tsunamis, and the focus on this small change has led to the success of this research.

研究分野：地球惑星電磁気学

キーワード：津波 電磁場 海底アレイデータ 伝播過程 基礎研究 磁場<=>波高変換

1. 研究開始当初の背景

海水は、固体地球の表層を形成する岩石と比べれば、遥かに高い電気伝導度を持つ良導体である。この良導体が、津波により地球主磁場の下で運動すると、海洋中に有意な電磁場が発生する。それを海底電磁場データで実証したのが、Toh et al. (2011)である。この発見以降、世界で津波電磁場の研究が進み、Wavelet 変換を用いた新たな津波電磁場検出法の開発 (Schnepf et al., 2016)や、津波電磁場を使えば現代地震学を以ってしても難しい津波地震の断層面傾斜が拘束できる (Kawashima and Toh, 2014)などの研究成果が公表された。しかし、津波電磁場と津波波高の位相および振幅関係は研究開始時にはまだ定量化されておらず、これら津波電磁場の持つ性質を定量的に明らかにし、津波電磁場が実際に津波の早期警戒に役立てられるのかを基礎研究の立場から検証する事も、本研究の目的の一つであった。

この他にも、波源における海面地形変化が中性大気波動の励起を促し、強い大気重力波共鳴を引き起こした場合には超高層大気における電流系(電離層ダイナモや沿磁力線電流)に擾乱を与え、陸上で観測可能な磁場を発生させ得るという一連の研究も存在する(Occhipinti et al., 2013; Kherani et al., 2016)。しかし、これらの研究を裏返せば、陸上電磁場データを用いて津波電磁場を研究しても上層大気の影響を免れ得ない事を意味しており、大気起源の電磁場擾乱を低減する意味でも、海底における電磁場と海底圧力等による津波波高の同時データを解析する事の必要性が高まっていた。さらに、前述した様に海水は良導体であるから、中性大気中とは異なり海底ではポロイダル磁場だけでなく、津波起源のトロイダル磁場も存在している可能性があり、両者の比の定量化も課題の一つに挙げられていた。

2. 研究の目的

導体の運動と背景磁場のカップリングにより、導体中には起電力が発生し電流が流れる。この所謂「ダイナモ作用」は、地球の海洋にも存在する。海洋中の様々な時空間スケールの流れがダイナモ作用を示すが、津波に伴う海水の粒子運動によるダイナモ作用は、本研究代表者の研究グループが海底観測により世界で初めてその存在を実証した。その後の研究代表者自身のグループによる成果を含めた研究の進展は、津波電磁場の様々な特性を明らかにして来たが、その時間領域における三次元インバージョンに基づく研究は未だ行われていなかった。

二次元津波電磁場の研究から、津波磁場鉛直成分が津波波高の近似値を与える可能性が示唆された他、海水の水平動と背景磁場である地球主磁場の鉛直成分とのカップリングだけでなく、鉛直動と地磁気水平成分のカップリングも有意である可能性がある為、主磁場鉛直成分が消失する赤道域でも検出可能な全球的な現象である事も推定はされていた。しかし、これらの指摘は推測の域を出ておらず、津波波高と電磁場の同時データの直接解析により、これらの定量化が強く求められていた。

これを踏まえ本研究では、以下の三つの問いに答える事を目指して研究に取り組んだ:

[1] 二次元で示唆された「津波波高」と「津波磁場鉛直成分」との相関や「赤道域での可用性」は、現実すなわち三次元でも果たして有意か?

[2] 津波電磁場のトロイダル / ポロイダル比はどの程度か?

[3] 津波電磁場は、波源パラメータをどの程度拘束できるか?

本研究の目的は、上に掲げた三つの問いに答えつつ、津波電磁場を用いて津波波源の推定精度を向上させる事にあった。

3. 研究の方法

今年度は主に、世界で唯一津波通過時に海底電磁場5成分と海底圧力が同時に観測されているタヒチ周辺海域のSOC8観測点のデータ解析を行い、それと並行してタヒチ周辺海域で観測された複数の津波事例の内、2010年のチリ地震津波の三次元時間領域数値シミュレーションに着手した。

データ解析では、海底圧力データが表わす津波の波高と地磁気の鉛直成分の位相差に着目して研究を進めた。これまでの津波電磁場に関する二次元 / 三次元の解析解 / 数値シミュレーションでは、津波に先行して津波起源の磁場鉛直成分が現れる事が示唆されている。これを実測で直接検証できるのが、SOC8における同時観測データであった。

Wavelet 変換その他を駆使した周波数解析により、(1) 磁場鉛直成分の変化は、津波波高のそれに先だって現れる、(2) 磁場水平成分の位相は、磁場鉛直成分のそれより約90度遅れている、こと等が明らかにできた。

数値シミュレーションでは、既存の三次元時間領域コードを研究室のサーバーに移植してベンチマークテストを実施し、計算の再現性や速度の向上を図った。

成果発表は、今年度実施した米コロラド大・NOAA・NASA/GSFC との国際共同研究で渡米した際、ボルダー市で口頭発表を行ったのに加え、国内では秋に熊本で開催された地球電磁気・地球惑星圏学会でもポスター発表を行った。

前年度に引き続き二年目は、世界で唯一津波通過時に海底電磁場 5 成分と海底圧力が同時に観測されたタヒチ周辺海域の SOC8 観測点を含む海底アレイデータの解析を行い、それと並行してタヒチ周辺海域で観測された複数の津波事例の内、2010 年のチリ地震津波に加えて 2009 年のサモア地震津波の三次元時間領域数値シミュレーションを行なった。

データ解析においては、SOC8 における津波波高は海底差圧計で観測されているため、原記録に正しく逆畳み込みを施さないと位相関係を復元できないが、データ提供者の逆畳み込み法に誤りがあったため時間を要したが、位相関係の復元と電磁場データとの直接比較が行えるようにした。

その結果、磁場鉛直成分の変化は、理論で予想された通り、津波波高のそれに先だって現れ、磁場水平成分の位相は、磁場鉛直成分のそれより約 90 度遅れていることが改めて確認された。これは、津波に伴う電磁場を津波の早期警戒に応用する際には非常に有用な性質となると考えられる結果であった。また、津波磁場成分のピークを各アレイ観測点で追跡することにより、二つの津波事例についてその伝播方向および過程を明らかにすることもできた。

数値シミュレーションでは、地震津波の速度場にオープンソースコードである JAGURS を採用し、その速度場に基づく電磁場計算には研究分担者が開発した三次元時間領域コードを用い、サモア・チリ両津波の大震央距離数値シミュレーションに成功した。その結果、既存の波源モデルは津波電磁場データを説明するには極めて不十分であることが明らかになった。

これらの成果は、秋にオンライン開催された地球電磁気・地球惑星圏学会で研究分担者らと口頭発表すると共に、査読付きオープンアクセス誌に国際共著論文としてその一部を掲載することができた。

三年目の今年度は、特にデータ解析で磁場成分の津波の波高への変換に着目した研究を進めた。2009 年サモア / 2010 年チリ地震津波共に、タヒチ周辺海域では遠地津波として観測され、使用した海底アレイの空間スケールでは二次元伝播とみなせることが分かった。そこで、昨年度の研究成果でもある二次元線形分散波に対する解析解 (Minami, Schnepf and Toh, 2021) を用い、観測された津波磁場成分を波高へ変換して SOC8 における海底圧力データと照合した所、両者は高い精度で一致することを新たに明らかにすることができた。これは、昨年度発見した磁場各成分と津波波高との位相関係と並び、津波に伴う電磁場を津波の早期警戒に応用する際には非常に有用な性質となると考えられる。SOC8 の波高・電磁場同時データの詳細比較により、津波磁場⇔波高の精密変換が可能になったので、この変換を残る海底アレイ全観測点にも適用した。これらの成果は、既に米国地球物理学連合 (AGU) の国際誌上で公表し (Lin, Toh and Minami, 2021)、2021 年 12 月に AGU から Press Release、その翌日には、神戸大学の研究分担者と協議の上、京都大学からも記者発表を行なった。また成果の一部は、日本地球惑星科学連合オンライン大会でも研究協力者らと口頭発表も行なった。

数値シミュレーションでは、前年度明らかになった既存の波源モデルの限界を改善するため、タヒチ周辺海域における津波磁場データを最も良く説明する初期水位分布を求めることに成功した。尚、感染症拡大の影響を受け、予定していた対面国際交流が予定通り行えなかった為、研究期間の一年延長を願い出、認められた。

最終年度は、主にこれまでの研究成果の公表に注力した。まず、5 月に幕張で開催された日本地球惑星科学連合 JpGU2022 年大会では共著論文の発表を、また海外共同研究者であるフランス津波警報センター (CENALT; BRUYERES-LE-CHATEL) のイレーヌ・イペール博士らが主催した同センター創立十周年記念国際研究集会では口頭発表を行なった。さらに、津波電磁場と海洋潮汐電磁場の比較研究を神戸大学と共同で行なった結果、津波電磁場はその基となる速度場が渦無しであることから、海洋潮汐とは違って海洋中にトロイダル磁場を生成する能力が非常に低いことも明らかにできた。

4. 研究成果

本研究の成果発表の場は、各年度国内学会・国際学会・査読付き国際誌の三つであり、こうした成果発表に加えて感染症の影響も軽減された最終年度には、対面形式の国内及び海外研究交流を推進することもできた。さらに、本研究費により博士後期課程の学生の指導も容易に行なえた為、研究協力者でもあった海外からの留学生の博士 (理学) の学位につなげる事もでき、教育的効果も同時に上がったと評価できる。2021 年度の実績報告書にも記載した通り、2021 年 12 月に米国地球物理学連合から Press Release された為、その翌日には京都大学からも記者発表を行なった津波電磁場の研究成果は、この学位論文の基礎になった成果でもあった。

本研究の成果を短く要約すれば、「津波の波高と津波が作る磁場との位相関係を解明し、また、津波磁場成分を津波波高へ精度良く変換できる」ことを明らかにしたことに尽きる。津波磁場の位相の進みと、高精度磁場⇔波高変換法は、現行の津波早期警戒の改良に役立つ基礎研究結果と解釈することができる。これは、これまで顧みられなかった「津波波高と海底電磁場の同時データの精密解析」に本研究で取り組んだ結果だと考えられる。さらに、アレイデータを取り上げた利点を生かし、津波の伝播方向と過程を津波磁場成分を使って追跡することにも成功した。また、津波電磁場は渦無しの流れによって発生する為、磁場凍結により流れに引きずられてトロイダ

ル磁場がほとんど作られないので、ポロイダル磁場とトロイダル電場が津波電磁場の主成分となることも分かった。が今後は、磁場観測ならではの方位情報を津波伝播過程から抽出することが新たな目標となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Lin, Z., Toh, H. and Minami, T.	4. 巻 126
2. 論文標題 Direct Comparison of the Tsunami-Generated Magnetic Field With Sea Level Change for the 2009 Samoa and 2010 Chile Tsunamis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2021JB022760
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JB022760	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Minami Takuto, Schnepf Neesha R., Toh Hiroaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Tsunami-generated magnetic fields have primary and secondary arrivals like seismic waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2287
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-81820-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Zhiheng Lin, Hiroaki TOH, Takuto Minami
2. 発表標題 How about using the magnetic field for the tsunami early warning Comparison of the tsunami magnetic field with the sea level change?
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会（JpGU2021）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuto Minami, Masashi Kamogawa, Tsutomu Ogawa, Makoto Uyeshima, Toru Mogi, Hiroshi Ichihara
2. 発表標題 Ionospheric ring current system accounting for ground-level magnetic observations during the 2011 Tohoku earthquake tsunami
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会（JpGU2021）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林 智恒, 藤 浩明, 南 拓人
2. 発表標題 Simulation of tsunami-generated electromagnetic fields for the 2009 Samoa and 2010 Chile earthquakes
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toh, H., Minami, T. and Lin, Z
2. 発表標題 On the tsunami-generated EM fields: Its 2-D properties and 3-D simulation
3. 学会等名 Invited lecture at Geophysical Sciences Program at Univ. Colorado, Boulder (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林 智恒, 藤 浩明
2. 発表標題 Does the tsunami-generated magnetic field arrive earlier than the sealevel change?
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	南 拓人 (Minami Takuto) (90756496)	神戸大学・理学研究科・助教 (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	NOAA	Colorado Univ.	NASA/GSFC	
フランス	CENALT			