

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654158

研究課題名（和文） 海底観測所のリアルタイム化

研究課題名（英文） Toward real-time seafloor observatories

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

研究成果の概要（和文）：

本研究では、まず研究期間を通じて複数回の海域実験を実施し、現有の海底観測所に高感度差圧計を付加する事に成功した。これにより本観測所は、海底津波早期警戒システムのクライアント・センサーとしての性能を有するに至った。また、海底観測所データの陸上へのリアルタイム転送に関しては、海底観測所に音響モデムを増設し敷設点直上に衛星とリンクした定点ブイを設置する方法が、従来の方法よりはるかに安価で実効的である事が分かった。

研究成果の概要（英文）：

In this study, several sea experiments were conducted throughout the research period, which led to success in installing high-precision differential pressure gauges to existing seafloor electromagnetic stations. This implies that the stations can now serve as client sensors of seafloor tsunami early warning systems. In addition, it was found that a method to attach acoustic telemetry modems to the seafloor stations and to place sea-surface buoys with satellite links just above the stations is superior to existing methods in terms of its efficiency and cost.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地震災害・予測，津波，地磁気

## 1. 研究開始当初の背景

地球物理学分野のリアルタイム海底観測所は以前からその必要性が叫ばれ、世界各国で様々な構想が打ち出されてきた。特に、1990年代以降にオンライン海底観測実現へ向けた具体的な動きが見られる様になり、欧州の GEOSTAR (Beranzoli et al., 1998) や現在の OOI/ORION に繋がる北米の NEPTUNE/DEOS 計画といったプロジェクトが実施された。しかし、ケーブル展張が比較的容易な沿岸部の海底観測所はさておき、大洋横断ケーブルに地球物理学的な測器群を接続する事は技術的にも経済的にも極めて困

難であり、今日に至っても外洋におけるリアルタイム地球物理観測所は未だ実現されていないのが実状である。「空間的な偏りが無い観測網で地球を覆う」という観点からすれば、沿岸の海底観測所より外洋の観測所の方が遥かに重要かつ必要性が高い事は言うまでもない。

本研究代表者は、世界各国と同様の経緯で1990年代半ばから実施された日本の「海半球計画（科学研究費補助金創成的基礎研究費）」で海底地磁気観測所の開発を手掛け、図1の様な現在も西太平洋の二点で稼働している海底長期電磁場観測ステーション

(SeaFloor ElectroMagnetic Station: SFEMS) の実用化に成功した (Toh et al., 2004; 2006)。SFEMS はスタンドアロン型の海底観測所であり、データの回収と観測の継続には、1~2年毎の海域観測 (装置の交換) が必須である。しかし、海洋研究開発機構等の研究船運航機関の協力もあり、2001年8月以降は北西太平洋海盆のNWP点で、2006年6月以降は西フィリピン海盆のWPB点において海底電磁場観測を維持し続けている。これら二点のSFEMSは、海底孔内地震計が停止してしまった現在では、外洋における地球物理学的な海底観測所としては世界唯一の例となっている。さらに、2006年から2007年にかけて観測した海底電磁場連続データからは、千島海溝の両側で相次いで発生した二つの地震による津波が地球主磁場とのカップリングで作り出した津波電磁場変動を世界で初めて検出する事に成功している (Toh et al., 2011)。

一方、壊滅的な被害を沿岸諸国にもたらした2004年のインド洋大津波以後、全球的な津波監視網を早急に整備する必要性が叫ばれ、それまでどちらかと言えば北東太平洋に限定されていた米国NOAAのDARTシステムも、太平洋だけでなくインド洋にも展開拡充されるようになった。

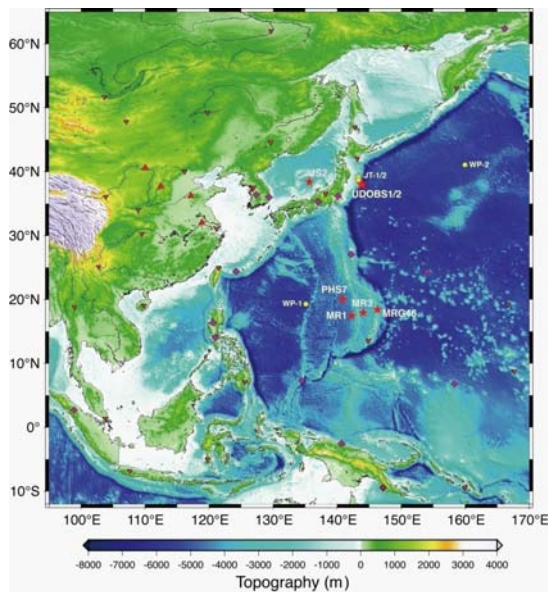


図1. 西太平洋の海底観測点分布。北西太平洋海盆のWP-2点及び西フィリピン海盆のWP-1点が、それぞれSFEMSが稼働しているNWP点とWPB点に等しい。

## 2. 研究の目的

前節で述べた状況を踏まえ本研究では、津波計としても充分実用に耐える性能を有し、

従来の津波計にはなかった新しい特性を持つ事が明らかとなったSFEMSを既存、或いは、新たな津波早期警戒システムへ接続し、海底地磁気観測所のリアルタイム化を図る事を主たる研究目的とする。

本研究が成功すれば、本格的なリアルタイム地球物理観測所が、世界で初めて外洋に設置される事になる。これにより、地磁気以外の測地・地殻変動・海洋変動といった分野でも、リアルタイム海底観測所への道が拓ける。地球電磁気学分野では、地表の地磁気観測網の一部を海底へ移設でき、現在の北半球の陸上部分に偏った観測点分布を是正できる。また、津波計として従来センサーを補完する能力を持つSFEMSの参加により、全球津波早期警戒システムの性能が向上させられる等の波及効果が期待できる。

## 3. 研究の方法

本研究では、まずSFEMSを津波早期警戒システム用のクライアント・センサー化する事に取り組んだ。それには、SFEMSに海底圧力測定機能を持たせると共に、SFEMSと津波早期警戒システム間の音響リンクが必要である為、高感度差圧計 (Cox et al., 1984) をSFEMSに付加し、音響モデムを開発した。これらの機器の作動確認の為に、本研究では研究船の利用公募に別途応募し、研究全期間を通して海域での試験観測を実施した。具体的には、2011年度に海洋研究開発機構の研究船「かいらい」のKR11-07航海で北西太平洋海盆NWP点からSFEMSを回収すると共に、高感度差圧計付きSFEMS (図2) を新たに設置した。また翌2012年度には、西フィリピン海盆WPB点から高感度差圧計付きSFEMSを回収し、海底における電磁場と圧力の同時記録を取得した。また、海底設置機器の位置決定やデータ転送試験の目的で、音響実験を毎回実施した。

さらに、海外のリアルタイムデータ転送技術を導入する目的で、米国は気象海洋局

(NOAA) の、欧州はイタリア地球物理・火山研究所 (INGV) の研究者との交流・共同研究を推進した。

## 4. 研究成果

本研究の成果の一つは、高感度差圧計を搭載したSFEMSが完成した事である。これにより、津波の力学的観測と電磁気学的観測が同時に行える様になり、両者の比較から波高や到来時刻・卓越周期および位相速度などの津波要素の定量的基礎研究が可能になった。これは、最後に述べる欧米との研究者交流と相俟って、SFEMSを日本周辺の西太平洋域だけでなく、東太平洋やインド洋、ひいては地中海の津波早期警戒システムに組み込む事を可能にしたという意味で、その意義は大きい。

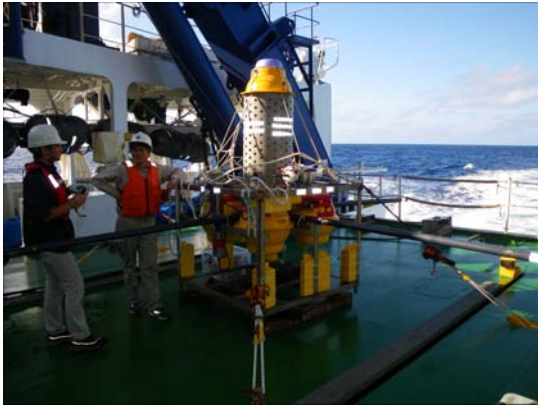


図2. 西太平洋に展開中の高感度差圧計付き SFEMS。

すなわち、本研究の結果、リアルタイム転送機能を持つ津波早期警戒システムのクライアント・センサーとしての性能を有するに至った SFEMS をグローバルに展開する道が開けた、と言う事ができる。

津波による海底圧力変化と電磁場変化の同時記録から、深海底では津波起源磁場の鉛直成分が海底圧力と全く同位相で変化する事が明らかになった。つまり、海底で磁場を測定すれば、その鉛直成分が津波波高の良い近似値を与える事が分かった。これは、図3に示す通り、津波の波面と直交する海水の粒子運動の水平成分が地球主磁場の鉛直成分とカップリングして津波の直下にソース電流  $J$  を誘導するが、津波の位相速度が海水中の磁場の拡散速度より速い為に自己誘導現象が起き、その結果津波前面ではソース電流と逆向きの、津波後面では同じ向きの局所的な誘導電流が生ずる為である、と考えられる。この事は、電磁場センサーが従来型の津波センサーと全く等価な側面を持つ事を意味するだけでなく、本質的にベクトル観測である電磁場観測からは従来型の津波センサーではけして分からなかった点観測による津波の「動き（到来方向や粒子運動速度など）」が分かる、すなわち、電磁場センサーは従来型センサーと比較して数多くの利点を持っている事も意味している。これらは海底圧力と電磁場の同時観測によって初めて明らかになった事柄であり、その意味でも本研究の意義は大きい。

図4に、NWP 点に展開していた SFEMS が記録した東北地方太平洋沖地震時の津波起源磁場の記録を示す。NWP 点は震央から約 1200km 離れていたが、観測された磁場鉛直成分の振幅は約 3nT もある。これを NWP 点における水深と地球主磁場の鉛直成分を用いて波高に換算すると約 46cm となり、2011 年 3 月 11 日に発生した津波が如何に巨大であったを示している。

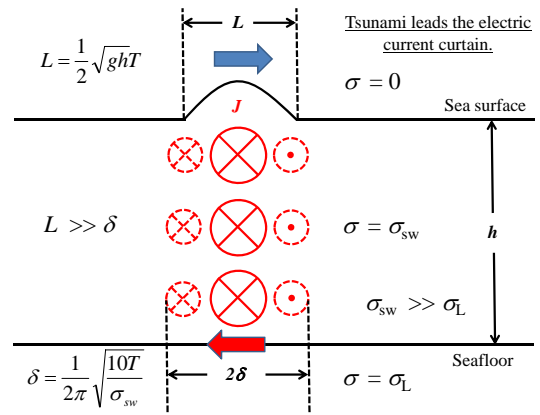


図3. 津波起源の磁場鉛直成分と津波の波高が同期する理由の模式図。今、深さ  $h$  の平坦な海底を青矢印方向へ伝播する津波ソリトンを考える。この津波は直下にソース電流  $J$  を発生させるが、伝播速度が速いため  $J$  は電気伝導度  $\sigma_{sw}$  を持つ良導的な海水により電磁気的な抵抗を受ける。すなわち、津波の前面と後面に赤点線で示した様な誘導電流が流れ、結果として津波に伴う全電流は赤矢印で示した様に津波より少し遅れて津波を追い掛ける事になる。従って、全電流より四分の一周期だけ位相が進んでいる磁場の鉛直成分が波高と同期する。電磁気的な抵抗が存在する水平スケールは、海水中の電磁場の浸透深さ  $\delta$  で表され、 $\delta$  は津波自身の水平スケール  $L$  よりもずっと小さい。

本研究では、SFEMS を既存の津波早期警戒システムに組み込む所までは至らなかったが、試作した音響モデムと定点ブイの組み合わせにより、海底電磁場と圧力変化の比較的安価かつ実効的なリアルタイムデータ転送が自力で実現できる事を明らかにできた。すなわち、海底から海面まで垂直音響伝送により定点ブイまでデータを転送し、衛星とリンクした定点ブイから陸上の研究室までデータを送れば、海底観測所のリアルタイム化が実現可能である。定点ブイとして米国 Liquid Robotics 社製の Wave Glider を採用すれば、海面での水平移動には自然の波浪エネルギーが利用できるので定点保持には新たにエ



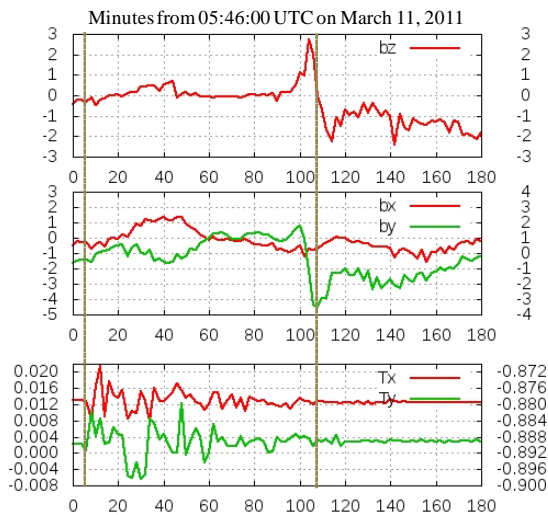


図4. NWP 点で観測された 2011 年 3 月 11 日の津波起源磁場の三成分。二つの縦線は、地震波（左）と津波（右）の到来時刻を各々示す。図は、上から順に磁場鉛直成分、磁場水平二成分、傾斜水平二成分である。傾斜変化が地震波の到来を明瞭に捉えているのに対して、磁場三成分は津波到来時に大きく変化している。磁場の水平成分を見ると、北向き成分 ( $b_x$ ) は殆ど変化せず、東向き成分 ( $b_y$ ) の変化が顕著なので、津波がほぼ西から NWP 点に到達した事が分かる。

エネルギーを必要とせず、海底からの音響データ受信部・位置情報を得る為の GPS 受信機・イリジウム衛星へのデータ送信用の三つのエネルギーだけを定点ブイに装備したソーラーパネルで賄えばよい事が明らかにできた。これにより海底観測所のリアルタイム化を実現する目途が立った、と言える。

最後に、本研究中に行った欧米の研究者との交流について述べる。米国とは主に NOAA の研究者と共同研究を行った。本研究の結果明らかになった電磁場センサーと従来型津波センサーの等価性は、将来的に SFEMS を NOAA が運用するグローバルなリアルタイム東南早期警戒システム (DART) に組み込むにあたって非常に重要な成果となった。また、本研究の成果発表を行った国際学会 (豪州メルボルンで開催された IUGG2011) において、イタリア INGV の研究者と接点を作る事ができ、欧州では地中海にリアルタイム海底観測システム (SN-1) を開発中である、また、海底地滑りや火山噴火による津波発生監視目的で電磁場センサーの SN-1 システムへの組み込みを日欧で開始する等の成果が得られた。これらの国際的研究交流は、今後本研究の成果をグローバルに展開してゆく為の貴重な資産となった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

(1) Toh, H., K. Satake, Y. Hamano, Y. Fujii, and T. Goto, Tsunami signals from the 2006 and 2007 Kuril earthquakes detected at a seafloor geomagnetic observatory. *J. Geophys. Res.*, Vol. 116 B02104, 2011, doi:10.1029/2010JB007873, 査読有。

〔学会発表〕 (計 4 件)

(1) Toh, H., T. Minami, Y. Hamano and H. Sugioka, Seafloor Electromagnetic Station with Differential Pressure Gauge. SGEPPS Fall Meeting, October 22, 2012, Sapporo Convention Centre.

(2) Toh, H., The oceanic dynamo process - An overview. Japan-Italy Joint Workshop on "Seafloor Observatories: Cutting-edge Technology and Science, June 26, 2012, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Rome, Italy.

(3) Toh, H., Lessons learned from the past Japanese Ocean Hemisphere Project and the outlook for the future tsunami early warning system. Japan-Italy Joint Workshop on "Seafloor Observatories: Cutting-edge Technology and Science, June 25, 2012, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Rome, Italy.

(4) Toh, H., K. Satake, Y. Hamano, Y. Fujii and T. Goto, High potential of seafloor geomagnetic observatories in application to tsunami early warning. 2011 International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly, July 4, 2011, Melbourne Convention & Exhibition Centre, Melbourne, Australia.

〔図書〕 (計 3 件)

(1) H. Toh and A. DeSantis, Springer, Seafloor Observatories - A New Vision of the Earth from the Abyss. 2013, 500.

(2) Rasson, J.L., H. Toh and D. Yang, Springer, Geomagnetic Observations and Models. 2011, 1-25.

## 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) 連携研究者

浜野 洋三 (HAMANO YOZO)

海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・上席研究員

研究者番号：90011709