

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 4 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13557

研究課題名(和文)海中音速不均質推定による海底地殻変動観測精度の向上

研究課題名(英文)Improvement in seafloor geodetic measurements by means of evaluation of sound speed variation in ocean

研究代表者

木戸 元之(Kido, Motoyuki)

東北大学・災害科学国際研究所・教授

研究者番号：10400235

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：海底地殻変動観測の精度向上には海中音速場の擾乱の推定が欠かせない。的確なモデルを構築するために、投げ入れ式の温度センサーであるXBTを用いて海中の温度プロファイルを連続的に集中観測した。それらの時系列解析から短周期擾乱の原因を海中の重力波であることを突き止めた。重力波をモデルとして音速の補正方法を確立することで、海底地殻変動観測の水平変位の検出精度が向上すると同時に、上下変動の推定も可能となった。

研究成果の概要(英文)：It is crucial for improvement in seafloor geodetic measurement to evaluate sound speed variation in ocean. In order to construct a proper ocean model, we conducted intensive continuous measurement of temperature profile in ocean using XBT, which is an expandable thermistor. Based on its obtained data, we proved that short-period variation is mainly caused by internal gravity waves. Using internal wave model, we construct correction method for sound speed, which leads improvement in detecting horizontal movement and even vertical one.

研究分野：海底測地学

キーワード：海中音速場 海底地殻変動観測 GPS-A 内部重力波 XBT CTD

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 現在の陸上における GPS 観測網は、日本列島の面的な地殻変動を連続的にとらえることを可能にし、地震の要因となる地殻の歪蓄積過程の理解に決定的な情報をもたらした。一方、日本列島に壊滅的な被害をもたらした得る、海溝型巨大地震の発生域は海底にあり、陸上の GPS 観測からだけでは、正確な発生過程をモニタリングすることは困難である。近年の技術革新により、海上 GPS 測位と、海面・海底間の音響測距とを組み合わせた GPS/音響結合方式の海底地殻変動観測技術が米国で実用化され、日本においても最近の 10 年間で急速に普及してきた。また、2011 年の東北地方太平洋沖地震時においても、地震により、海底が数 10m も変位したことを捉えるなど、その必要性が国際的にも強く認識されるようになった。実際に 2011 年の地震後に日本周辺に海底地殻変動観測網が整備されつつあり、観測の規模も大きくなってきた。一方で、観測規模が大きくなるにつれ、観測効率の向上が不可避の問題になってきており、短時間で必要な精度の観測を実施する工夫が求められている。現在では、数 cm の繰り返し精度を確保するためには、各観測点上で 1 日程度の連続観測が必要であり、多数の観測点を十分な頻度で観測することを妨げている。これらの現状を打開するためのブレークスルーとなる新たな観測形態が模索されている。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究は、GPS/音響結合方式による海底地殻変動観測において、その計測精度を飛躍的に向上させる新たな観測形態、および解析方法を提示、実証し、沈み込み帯での海底の歪蓄積過程をこれまでに無い精度で面的に捉えることを可能にし、現在普及しつつある海上での海底地殻変動観測に革新をもたらすことを目指すものである。また、新たに提示した観測方法を広く普及させ、地震発生予測に資することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 日本海溝沿いに構築された海底地殻変動観測網での繰り返し観測、および南海トラフ熊野灘での係留ブイサイトでの GPS-A 観測を実施する。日本海溝の観測点網のうち数点、および熊野灘の観測サイトでは、6 海底局配置が実現されており、必要なデータの取得が可能である。具体的には日本海溝沿いにある 20 点の観測サイトのうち、海中音速の推定が可能と予想される 6 海底局から成る観測点 5 点で年 1~2 回の観測をそれぞれ 1 日程度行う。その際、推定を容易にするために他の誤差要因を最小にするために、船底に音響素子が装備された調査船を利用する。これにより従来の曳航ブイ方式に比べ、姿勢が安定するため GPS の測位精度が安定する。また、推定する音速モデルの検証用に XBT と呼ばれる音速を直接計測する観測の 2 時間程度の連続集中観測

を並行して行う。さらに、精度の高い音速が計測可能な CTD の併行観測も可能な限り実施する。

(2) 取得したデータは、各観測後ただちに解析を行い、音速の時空間変化および地殻変動量を同時に推定する。より信頼できる推定をするために、音響波形からの走時読み取り、GPS 測位による音響素子の精密位置の計算において、アルゴリズムを工夫し、目的外の誤差要因をなるべく排除する。具体的には、現アルゴリズムで不十分である、走時相関ピークの取違いの自動補正およびアンテナ位置とジャイロとを組み合わせた船体の動揺の正確な表現法の開発である。最終的にインバージョン時のモデルフィットの残差から、音速推定の確度について検証する。

(3) さらに、並行して実測した XBT による音速値と音響解析で推定した音速を比較する。基本的に潮汐でエイリアジングを起こさない数時間以内の頻度で XBT 計測を実施し、各位置での音速の時間変化を追う。温度プロファイルの変動の様子から、短時間擾乱の原因を特定し、補正に必要なモデル化を行う。さらに、XBT のデータ精度を上げるため、XCTD との比較において、線形補正できる方法を検討する。

(4) 海底地殻変動の上下動成分を検出するための基礎データとして、高精度で音速計測が可能な CTD の併行観測も随時実施し、その有用性を確かめる解析を十分な数の観測データを用いて行う。

## 4. 研究成果

(1) 2015 年 11 月に実施した GPS 音響結合方式の海底地殻変動観測の際に、日本海溝の観測点で連続観測を実施し、特徴的な温度変化のパターンを把握するための基礎データを得た。その様子は海水自体の音速が変化するのではなく、内部重力波によると思われる周期的な、特に上下に海水が運動していることによる変化が卓越することを示唆するものであった。その海面から海底までの平均音速をとると、あたかも海水自体が速度変化するように見えるが、実際にはプロファイル形状が内部重力波により歪むことが要因であると言える。その時間変化は、地殻変動観測時に推定されるパターンと調和的な傾向が見られた。本研究の最終目標は、実測するのが困難な海中音速の「空間」変化を海底地殻変動観測のみで推定し補正することで、地殻変動の計測精度を飛躍的に向上させることである。今回平均音速に関して実測値と推定値が調和したことから、現在の海底地殻変動観測の計測精度で、音速場の空間変化の推定が原理的には可能であることの確証を得たといえる。一方で、さらに細かい 1 時間程度の時間変化に着目すると食い違いも見られ、これが XBT 温度センサーの精度の限界であるのか海底地殻変動観測の精度の影響なのかを判別するには至らなかった。

(2) 2016年5月に日本海溝の20余りのGPS-A観測点のほとんどすべてでCTD観測をする機会を得て(図1)、GPS-Aで推定した走時残差の精度を多くの点について定量的に評価することができた。その結果、音響信号の波形読み取りを正確にすることにより海底の上下変位に換算して10-15cm程度の精度が達成可能であることがわかり、今後GPS-A観測とCTD観測を併用することで、従来の定点観測の形態のまま水平変動のみならず10cmレベルでの上下変動の計測への道を開いた。

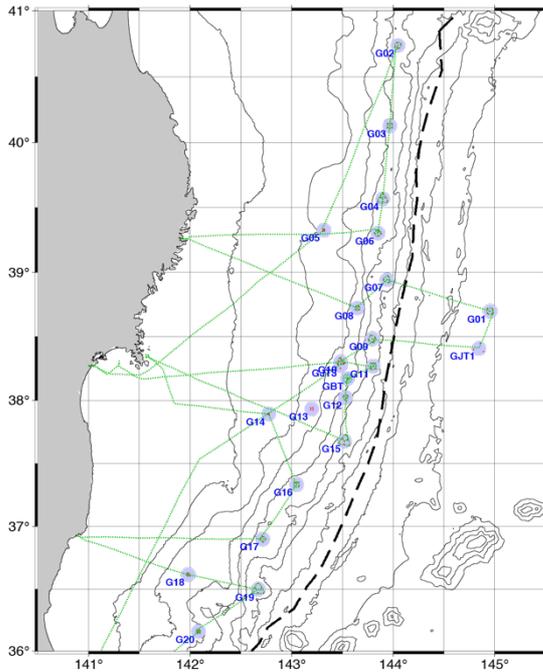


図1 日本海溝の観測点配置図

(3) 2016年12月には紀伊半島沖の海域にあるGPS-A観測点において、初年度に購入したXBT計測装置を用いたXBTの連続集中観測を実施する機会を得た。水深約2000mまでの温度プロファイルを2時間で12本連続的に取得した。得られたプロファイルを時系列で解析したところ、水深100-500mの比較的浅い領域で水塊が20mほどの振幅で上下運動する様子が明瞭に捉えられ(図2)、短時間の海中音速場の擾乱の要因が内部重力波であることを実測により証明でき、その前提に基づいて音速補正することの妥当性を担保できた。また、通常精度が低いとされるXBTのプロファイルをより精度の高いXCTDの深部のデータとの併用により補正する方法を考案し、XBT計測値を実用に耐えるデータに補正・変換することに成功した。実際に振動する温度プロファイルから計算した平均音速の時間推移と、GPS-A観測で推定したそれとが十分高い精度で一致したことから(図3)、短時間の擾乱の原因が内部重力波であると特定され、前年度達成できなかった短周期の海中音速変動の擾乱の補正を的確にできるようになった。

(4) これらの得られた基礎データ、およびその解析結果から重力波をモデルとして音速の

補正方法を確立することで、海底地殻変動観測の水平変位の検出精度が向上すると同時に、上下変動の推定も可能となった。

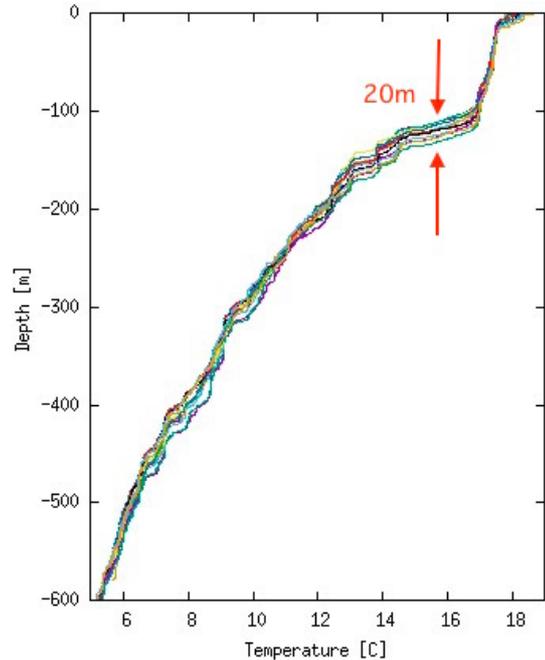


図2 XBT連続観測による温度プロファイル

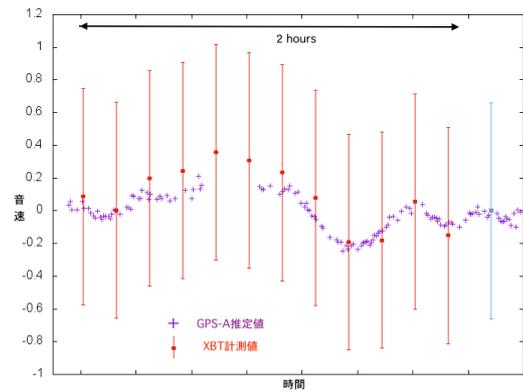


図3 GPS-AとXBTによる音速推定比較

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 2 件)

- ① Azuma, R., F. Tomita, T. Inuma, M. Kido, and R. Hino, Development and examination of new algorithms of traveltime detection in GPS/acoustic geodetic data for precise and automated analysis, Earth, Planets and Space, 査読有, 68, 2016, 1-13, DOI: 10.1186/s40623-016-0521-2.
- ② Imano, M., M. Kido, Y. Ohta, T. Fukuda, H. Ochi, M. Takahashi, and R. Hino, Improvement in the Accuracy of Real-time GPS/Acoustic Measurements Using a Multi-purpose Moored Buoy System by Removal of Acoustic Multipath, Int'l Association of Geodesy Symposia, 査読有, 145, 2015, 1-7, doi: 10.1007/1345\_2015\_192.

[学会発表] (計 6 件)

- ① Kido, M., Intensive sound speed monitoring in ocean and its impact on the GPS/acoustic seafloor geodetic measurement, EGU General Assembly 2016, 21 Apl., 2016, Austria Center Vienna (Vienna, Austria).
- ② Kido, M., Seafloor geodesy at present, KIOST International Seminar 2016, 30 Nov., 2016, KIOST (Seoul, Korea).
- ③ 富田史章・木戸元之・本荘千枝, GPS 音響結合海底地殻変動観測における初期海中音速構造の影響, 日本測地学会第 126 回講演会, 2016 年 10 月 19 日, 奥州市文化会館 (岩手県奥州市)。
- ④ 本荘千枝・木戸元之, 鉛直走時遅延を用いた海底局位置解析, 日本測地学会第 126 回講演会, 2016 年 10 月 19 日, 奥州市文化会館 (岩手県奥州市)。
- ⑤ 山本龍典・木戸元之・長田幸仁, 測距基線沿いの温度場の時空間推定による海底間音測距精度向上の試み, 日本地球惑星科学連合大会 2015 年大会, 2015 年 5 月 28 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県千葉市)。
- ⑥ 山本龍典・木戸元之・長田幸仁, 海底間音響測距における潮汐流に起因する温度場の時空間変化を考慮した音速補正, 日本測地学会第 124 回講演会, 2015 年 10 月 16 日, 九州大学・西新プラザ (福岡県福岡市)。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木戸 元之 (KIDO, Motoyuki)  
東北大学・災害科学国際研究所・教授  
研究者番号: 10400235

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号:

(4) 研究協力者

( )