

令和元年6月6日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18799

研究課題名(和文) 近接設置の海底局による精密GPS/Differential-Acoustic観測

研究課題名(英文) GPS/D-Acoustic survey using closely installed transponders

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) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：海底での局所変動が予想される場所で、海底間の測距が困難な地形に対し、海面からの測距で変動を計測する手法を考案し、実観測を通してその実用性を検証した。日本海溝沿いの逆断層地形での観測で、手法の精度的な妥当性が確認され、同時に観測期間中の変動が無かったことがわかった。一方、紀伊半島沖に設置した機器による詳細な温度計測により、海域によっては本手法を用いても必要な精度が得られない場合があることも判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、従来の手法が適用困難な海底地形が急峻な場所でも局所変形の計測が可能となる新手法を提案し、実観測で実用性を検証するものである。考案した手法を適用した日本海溝の観測点では、理論的な予測に従った計測精度で変形のモニタリングに成功し、今後同様の場所に適用することで、海溝型巨大地震の予測に役立つことが分かった。一方で、海底付近の海水の擾乱の激しい箇所では必要な計測精度を達成できないことも判明し、事前に擾乱の度合いを把握した上で、適切に観測点を選択する重要性が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：A new approach was proposed and verified that uses acoustic ranging from the sea surface at a site of localized strain of seafloor being expected, where traditional seafloor ranging has difficulty in acoustic paths not to be interfered by seafloor topography. During a sea trial at the reverse fault along the Japan trench, we confirmed that measured accuracy of strain is reasonable and the no significant strain was observed for the campaign period. On the contrary, during a sea trial off the Kii-peninsula, extremely complicated temperature perturbation was observed, which cannot adequately be corrected for. This indicated that the proposed approach is not always applicable to all the possible seafloor conditions and should be assessed beforehand.

研究分野：海底測地学

キーワード：海底測地 海底GPS 海底間音響測距 海中音速 海溝型巨大地震 海底断層

1. 研究開始当初の背景

東北地方太平洋沖地震を契機として、海溝型地震の震源域となる海底での地殻変動を陸域と同様に把握する必要性が強く認識され、海底地殻変動観測の技術開発が推し進められるとともに、日本海溝沿いと南海トラフ沿いを中心に観測点網も整備され、急速に普及するに至った。同時に海底ケーブルによる観測網も整備された。これらにより、海溝型巨大地震の予測に対し一定のモニタリングが可能となったが、詳細を見ていくと、広域変動を捉える GPS/A 観測や海底ケーブル接続の海底圧力計による上下変動検出などの従来の方法では計測できない種類の変動場も多く存在することがわかってきた。これは、特に海溝軸近くで変動が局在化する、あるいは断層運動する場であり、海溝型地震の規模を規定する上で極めて重要な情報が含まれる。このような場では、短基線の基線長変化をモニタリングできる海底間音響測距観測が有効であるが、観測形態の性質上設置場所の制限により、観測不能な箇所も多い。そこで、このような箇所でも観測可能な方法の検討が模索されていた。

2. 研究の目的

陸上の GPS 観測網の発達により、日本列島のひずみ蓄積過程や地震時の地殻変動が連続データとして高精度に得られるようになり、地震現象の理解が飛躍的に進んだ。一方、海溝型巨大地震の発生域である海域では、GPS の技術をそのまま利用することはできず、GPS を搭載した海上プラットフォームと海底に設置したトランスポンダの間を音響測距することにより、間接的に海底の絶対位置を把握する GPS/A 観測が利用される。東北地方太平洋沖地震により、海底で地殻変動を実測することの重要性が強く認識され、GPS/A 観測を軸とした海底地殻変動の観測点が、日本海溝や南海トラフなどの海溝型地震発生域に集中して整備されてきた。しかし、GPS/A 観測は観測点の絶対位置をプレート間の固着分布の違いによるひずみ蓄積の度合いとして広域に把握するもので、変動が局在化するような観測対象には精度的に向かない。局在化した変動が予想される場所には、海底に閉じて、変動帯を包含した基線の長さのみを繰り返し音響測距によりモニタリングする、海底間音響測距観測が用いられる。しかし、変動が局在化する海底の地形は急峻な場合が多く、装置の設置が困難であったり、地形に遮られて音響パスが通らないことも多い。そこで従来の観測機器を流用しコストを抑えつつも、両者の欠点を解消した新たな形態の観測手法を提案し、実用性や観測精度の実証試験をへて、実観測を開始できるようにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 図1に示したように、通常の GPS/A 観測は海底全体が一定方向に動くような広域の地殻変動を捉えるための観測手法である。海域の殆どは GPS/A 観測が適した変動場であるが、海溝軸近傍では断層等の局所変位が卓越する場所も多いと考えられる。そのような場所では海底間音響測距観測が適しているが、図1の右の断層崖のような地形の場合、崖の上(A)と下(B)では互いの機器の見通しが効かないため、海底間音響測距が使用できない。このような場合でも互いの位置関係を計測できる方法として、海底に設置した A と B 両方の海底局と音響パスが通るように、通常の GPS/A 観測と同じく海面から測距すれば良い。

しかし、一般に海面付近は海中音速構造の擾乱が大きく音響測距精度が低下することが知られている。そのため、通常の GPS/A 観測と同じ解析方法を適用すると、GPS/A 測位と同等な 10cm 程度の繰り返し観測精度の相対位置となり、海底間音響測距と同等の 1cm の精度達成は不可能である。ところが、海面から A・B への音響パスがほとんど同じ場所を通る、つまり同じ音速擾乱を受けることから、その走時差のみをデータとして扱うことで、海面付近の音速擾乱の影響はキャンセルされ、A・B の相対位置が正確に決まると見込まれる。さらに、射出角がほぼ等しいことから音響波形の歪みも似ており相対走時は正確に検出できる。音波の送信は同時に行うので、GPS の測位誤差もキャンセルさせるという非常に有利な条件が揃うこととなる。この手法を GPS/差分音響測距 (GPS/DA) と呼ぶことにする。

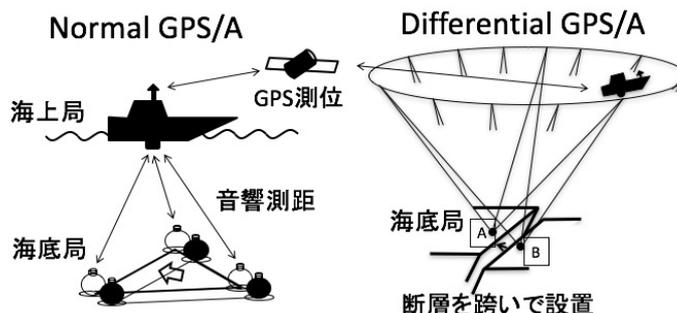


図1

(2) 研究の手順として、まず、本提案手法による観測精度を理論的に予測する。次に日本海溝の **back thrust** と考えられる急崖に近接設置してある 3 台の海底局を組み合わせ使用して実測データを取得し、3 局の相対位置の検出精度を確認する。最後に、海底の温度擾乱が大きいと考えられる紀伊半島沖で温度データを取得し、どの程度の精度劣化の可能性があるかを検討する。

4. 研究成果

(1) 想定される断層運動の検出精度 (=近接海底局の相対位置の計測精度) を次のように予測した。海上の船から近接海底局までの音響パスは殆ど共通なため、途中の音速場の不確定性は相殺され、パスが異なる部分は海底近傍に限定される。よって音速場の不確定性による精度劣化は海底付近の「音速変化量×パス長の違い」および「音速の空間勾配×パスの位置の違い」となり、いずれも近接設置間隔に比例する。近接設置間隔を 100m として日本海溝軸近傍の極めて安定した温度場の典型的な値 (温度変化量 $\sim 0.003^{\circ}\text{C}$ 、空間勾配 $\sim 0.005^{\circ}\text{C}/7\text{km}$) を代入すると、それぞれ $\sim 1.3\text{mm}$ および $\sim 0.8\text{mm}$ となる。一方、比較的擾乱の大きい水深の浅い場所の値 (温度変化量 $\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ & XCTD 補正 $\sim 0.02^{\circ}\text{C}$ 、空間勾配 $\sim 0.1^{\circ}\text{C}/1\text{km}$) では、それぞれ $\sim 5.7\text{mm}$ および $\sim 12\text{mm}$ となった。

また、海上局である船の位置の測位誤差の影響については次のように予測される。音波送信時は各海底局同時なので、測位誤差の影響は完全に相殺される。音波受信時は各局で異なり、比較的短時間に累積する GNSS およびジャイロ誤差として $\sim 2\text{cm}$ が見込まれるが、長期的にランダム誤差と考えれば時間平均効果で $\sim 2\text{mm}$ 程度に低減できる。また、走時差が小さいことも考慮すると、更に精度劣化は小さくなる。

音響信号の走時の読み取りに関しては、海底局が水平に設置されていれば近接設置のため射角がほぼ等しくなり、音響素子の特性による波形の歪みが同じになることで、相対読み取り誤差は無視し得る値になると期待される。

(2) 実際の精度劣化を検証するため、日本海溝沿い宮城県沖の **back thrust** 断層と考えられる急崖をまたぐように近接設置した観測サイト GBT (図 2) において繰り返し観測を行った。読み取り波形 (図 3) をみると A*B の組み合わせではほぼ同じ相関波形が得られており、理論的な予測通り相対読み取り誤差がほとんど無視できた。一方、B*C の組み合わせでは、波形に相違が見られた。これは C の海底局の設置状況が水平でなかったためと考えられる。A*B 間の相対走時残差をプロットすると $\sim 0.02\text{ms}$ 程度の観測位置からの方位角依存性が見られた (図 4)。これは、空間勾配によるものと解釈でき、一周 360 度から測ることで、最終的に 2mm 程度の精度で相対位置が検出できると判断した。3 台の海底局は 2018 年 8 月に回収した。

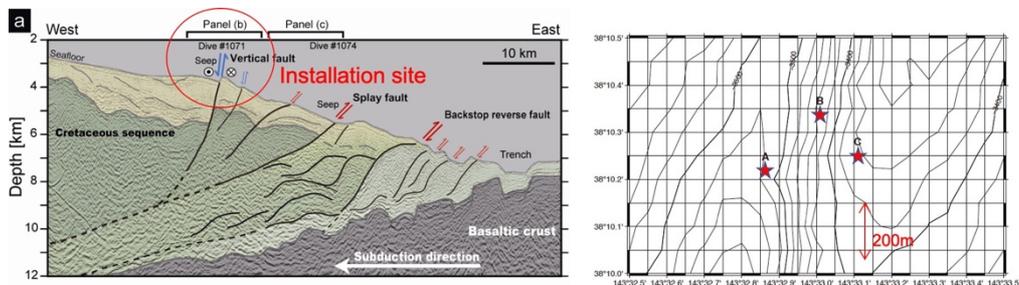


図 2

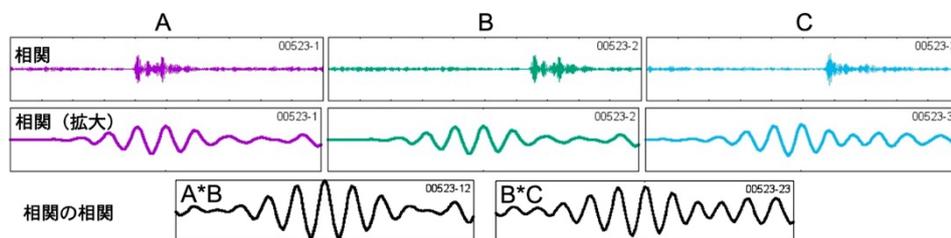


図 3

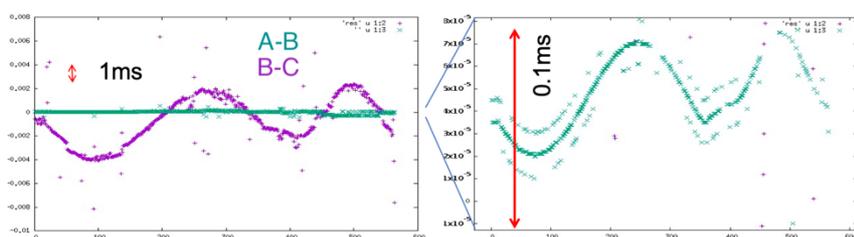


図 4

(3) 次に、温度擾乱が極めて大きいと予想される紀伊半島沖の潮岬溪谷と熊野灘外縁体の wedge boundary strike-slip fault が交わる箇所 (図 5) で地殻変動観測を行った際の温度データを検証した。図 6 は近接設置された 3 海底局の温度変化を 10 日間程拡大表示したものである。日本海溝と比べ温度擾乱が極めて大きく、しかも日周期の変動に対しては 3 局が同期しておらず、強い空間変化が生じていることがわかる。このような日周期・半日周期の変動は潮汐を駆動力とする内部重力波により、水塊が潮汐周期で複雑に振動するためと考えられており、GPS/差分音響測距を利用して十分な計測精度を達成できない場合が存在することが判明した。このような場所は、regional な内部潮汐波の強度分布と、地形的特徴からある程度予測可能であり、観測点を設ける際に避けることが望ましい。3 台の観測機器は、2019 年 1 月に回収した。

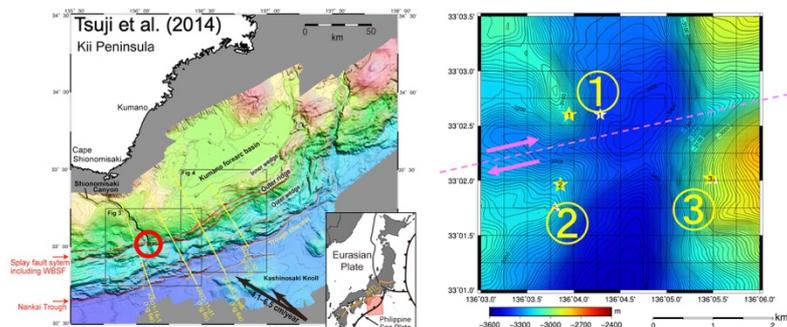


図 5

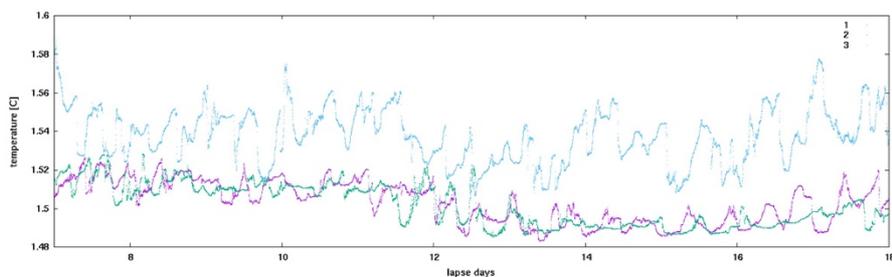


図 6

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Kido, M., et al. (著者 11 人中筆頭), Onboard realtime processing of GPS-acoustic data for moored buoy-based observation, *J. Disaster Res.*, 13, 471-488, 2018, doi:10.20965/jdr.2018.p0472. [査読あり]
- ② Honsho, C., and M. Kido, Comprehensive Analysis of Traveltime Data Collected Through GPS-Acoustic Observation of Seafloor Crustal Movements, *J. Geophys. Res.*, 122, 1-17, 2017, doi:10.1002/2017JB014733. [査読あり]

[学会発表] (計 8 件)

- ① 木戸元之・松井凌・本荘千枝, GPS-音響測距観測の短周期変動と海中内部重力波について, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.
- ② Kido, M., R. Matsui, M. Imano, C. Honsho, Short period sound speed oscillation measured by intensive XBT survey and its role on GNSS/acoustic positioning, AGU Fall meeting, 2017.
- ③ Kido, M., R. Matsui, M. Imano, C. Honsho, Short-period ocean fluctuation induced by internal wave and its effect on GNSS/acoustic analysis, IAG-IASPEI, 2017.
- ④ 木戸元之・松井凌・今野美冴・本荘千枝, XBT 集中観測で見られた短周期内部重力波と GPS 音響測距観測に与える影響, JpGU-AGU Joint Meeting, 2017.

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。