

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 11 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：15K13556

研究課題名(和文) 海底地殻変動連続観測のための高精度姿勢把握システムの構築

研究課題名(英文) Development of the high accuracy attitude determination system for the GNSS/Acoustic seafloor geodetic observation

研究代表者

太田 雄策 (Ohta, Yusaku)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：50451513

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：海域における地殻変動観測の高度化のためには、低消費電力で海上プラットフォームの位置・姿勢把握の実現が重要である。本研究では、単一GNSSアンテナと慣性航法装置を用いた、より消費電力の低いリアルタイム洋上部姿勢把握システムの開発を実施した。開発では(1)超低消費電力GNSS連続観測システムの開発と(2)単一アンテナと慣性航法装置による洋上部プラットフォームの姿勢把握アルゴリズムの開発を行った。その結果、(1)については3W以下の消費電力で必要な機能を提供できるシステムの開発に成功した。(2)については方位角で0.5度、ピッチ・ロール角で0.4度の精度で姿勢を把握できるアルゴリズムの開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：For the accuracy and precision improvement of the geodetic observation in the offshore region, low power consumption system for the position and attitude estimation is extremely important. This research achieved (1) development of the low power consumption GNSS continuous observation system for the moored buoy environment and (2) development of new algorithm for the precise and accurate estimation deduced from the 1 GNSS antenna and MEMS gyro. We succeeded to develop the low power consumption GNSS observation system which contain the real-time PPP processing and the GNSS phase data recording with less than 3 W power consumption. We also developed the new algorithm for the attitude determination based on the 1 GNSS antenna and MEMS gyro. Based on our algorithm, we succeeded to estimate the attitude with the accuracy of 0.5, 0.4, and 0.4 degree for the Yaw, Pitch and Roll angle, respectively.

研究分野：測地地震学

キーワード：GNSS MEMSジャイロ 姿勢把握 海底地殻変動 リアルタイムPPP 係留ブイ 津波 地殻変動

1. 研究開始当初の背景

海洋性プレートが沈み込むプレート境界においては地震間に長期間蓄積されたひずみがプレート境界型巨大地震によって解放され、地震後は余効変動が発生する。このような地震発生サイクルの全体像を把握するためには高い時間分解能での地殻変動観測が極めて重要である。例えば巨大地震直後の余効すべりがどのように地震時すべりから遷移して発生するのかを知ることは、プレート境界における摩擦特性の空間分布を考える上で極めて重要な観点である。また近年、超巨大地震の前には前震活動が存在する可能性が高いことが指摘されているが、それら前震活動と本震との間にプレート境界がどのような状態にあるのか、すなわち何らかの特徴的なプレート境界におけるすべり様式が存在するののかという点は、地震発生サイクルを理解する上で極めて重要な情報である。このように、プレート境界近傍における地殻変動場を高精度・高頻度に理解することは、プレート境界における状態遷移（地震時→地震後、地震間→地震時）を考える上で鍵となる観測と言える。

プレート境界近傍における地殻変動観測はこれまで、主として陸域を中心として行われてきた。例えば日本では国土地理院による GEONET 観測網がすでに 10 年以上の連続地殻変動記録を蓄積し、プレート間固着や地震時・地震後余効変動等に関して多くの知見を与えてきた。一方で海溝型巨大地震の震源域は主として海域であり、そうした領域では GPS/音響結合方式(以下、GPS/A)による海底地殻変動観測によって地殻変動場の把握が行われてきた。しかし GPS/A 観測はこれまで観測船が現場海域に行き、1~2 日間程度データを蓄積することで座標値を得る、いわばキャンペーン観測スタイルがその主流であった。そのため地殻変動場を連続記録として得ることが難しく、上で述べた「プレート境界近傍における地殻変動場を高精度・高頻度に理解する」という目的には必ずしも合致しないという問題点があった。

そのため近年、GPS/A 観測を係留ブイや無人船舶等を用いて連続的に観測することで、高頻度な海底地殻変動情報を得る試みが開始されている。例えば Takahashi et al.,(MGR, 2014)では係留ブイを用いた海底地殻変動・津波監視ブイシステムのプロトタイプ(以下、プロトタイプブイ)について報告をしている。一方で、このような洋上プラットフォームは陸上観測点と異なり、電力供給や通信帯域等が極めて限られており、できる限り低消費電力・低通信レートの装置構成が必要とされる。また、GPS/A 観測では洋上プラットフォームの波浪による動揺を極めて正確(音響観測のための素子位置精度で 30mm 以下)に把握する必要があるが、上記プロトタイプブイでは、4 つの GPS アンテナによる 2Hz の姿勢把握(絶対値の把握)と、より高頻度の

慣性航法装置による姿勢把握(相対値の把握)を組み合わせることでその目的を達成していた。しかし、4 つの GPS アンテナを駆動する受信システムはその消費電力が極めて大きく(~8W)、慣性航法装置と合わせると 10W を超える消費電力となり、長期連続観測を実施する上での問題となっている。

2. 研究の目的

プレート境界型の巨大地震発生メカニズムを理解するためには、震源域近傍における精密な海底地殻変動観測が極めて重要である。一方で海域では陸上のように日毎に連続した観測を実施することがその環境特性上難しい。そのため現在、係留ブイや小型無人水上艇等を用いた海底地殻変動の連続化の試みが開始されつつある。海域では波浪によって洋上観測部が動揺するため、それらを複数の GNSS アンテナや高精度な慣性航法装置で補正することで精密地殻変動観測を実現している。しかし、そうした連続観測用テストベッドは極めて限られた電力・通信設備しか持たないため、より長期間観測可能な低消費電力の姿勢把握システムが必要である。そのため本研究では、単一 GNSS アンテナと慣性航法装置を用いた、より消費電力の低いリアルタイム洋上部姿勢把握システムを開発し、より長期間安定した海底地殻変動観測を実施可能とすることを目的とする。

3. 研究の方法

研究目的である単一 GNSS アンテナと慣性航法装置を用いた、より消費電力の低いリアルタイム洋上部姿勢把握システムを開発のために、本研究では以下の 2 項目について特に研究を進めた。

(1) 超低消費電力 GNSS 連続観測システムの開発

洋上部において、低消費電力状態で安定して測位およびデータの記録を可能にするシステムの開発は本研究の目的を達成する上できわめて重要である。そのため超低消費電力の GNSS データロガーを開発し、それらと既存の GNSS ボードを組み合わせることによって、太陽光発電のみで長期間安定可動するリアルタイム GNSS システムを構築した。さらに当該システムを用いて静止衛星からの補正情報を受けて高精度なリアルタイム精密単独測位方式 (PPP) による測位解を取得できるシステム構成とすることで、低消費電力にも関わらず、リアルタイム測位解取得、GNSS 生データ取得を可能にするための技術開発を行った。

(2) 単一アンテナと慣性航法装置による洋上部プラットフォームの姿勢把握

目的とする単一 GNSS アンテナと慣性航法装置を用いた、より消費電力の低いリアルタイム洋上部姿勢把握システムを開発のため

の手法開発を行った。

4. 研究成果

(1) 超低消費電力 GNSS 連続観測システムの開発

実際の地殻変動観測用係留ブイに搭載することを念頭におき、超低消費電力 GNSS 連続観測システムの開発を行った。2周波 GNSS 受信ボードおよび新規開発した超低消費電力 GNSS データロガーを組み合わせることで当該システムを構築した。開発したデータロガーには64GBのSDカードを複数枚搭載することが可能であり、2Hz サンプリングの間隔で1年以上の搬送波位相データおよびコード擬似距離データを記録可能である。また採用した2周波 GNSS 受信ボードでは静止衛星からの補正情報を用いたリアルタイム PPP (Trimble RTX) の解析が可能であり、高い精度の座標値を実時間で得ることができる。開発したシステム全体の消費電力は、リアルタイム PPP 解析を含めて3W以下であり、従来機材と比べて消費電力低減を実現することができた。

開発した超低消費電力 GNSS 連続観測システムは、2015年12月～2016年12月の期間、熊野灘沖に設置された地殻変動・津波観測用ブイに搭載された。観測中は連続して2Hzデータのオフライン収録を行うとともに、リアルタイム PPP 解析による座標値取得も併せて行った。2016年12月のブイ回収後にオフライン収録したデータの確認を行い、全期間に対して99.97%以上の取得率でデータを記録されていることを確認した。

図1にブイ回収後に記録された搬送波位相データを解析した時系列(2016年7月18日、上下変動)およびリアルタイム PPP (Trimble RTX) によって得られた座標値とその移動平均(5分)、および理論潮汐を示す。図1を見ると、後処理解析およびリアルタイム PPP 解析結果は理論潮汐結果と良い一致を示すことが分かる。

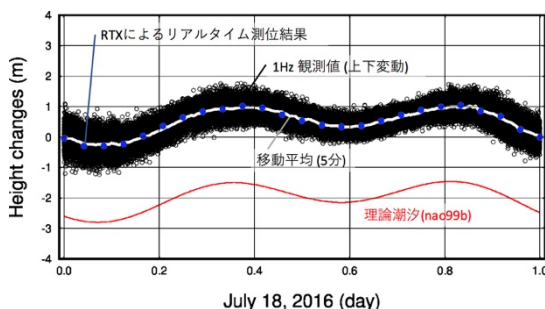


図1. 熊野灘に設置された地殻変動・津波観測用係留ブイの2016年7月18日の上下変動時系列。黒丸時系列が1Hz毎に後処理解析を行った時系列、白線がその移動平均時系列、青丸時系列がリアルタイム PPP による測位結果をそれぞれ示す。赤線は理論潮汐によって期待される上下変動時系列を示す。

図2に、リアルタイム PPP によるより長期の

上下変動時系列を理論潮汐および同時観測していた気圧時系列と共に示す。また両者の残差時系列も示す。図2を見ると、リアルタイム PPP による時系列と理論潮汐の時系列は両者ともよく一致し、さらに残差時系列の変化は気圧変化時系列の変化と、きわめて良い一致を示すことが分かる。このように、開発した超低消費電力 GNSS 連続観測システムによって、リアルタイムおよび後処理のそれぞれにおいて、高い精度でブイの動揺にともなう変動を捉えることに成功した。

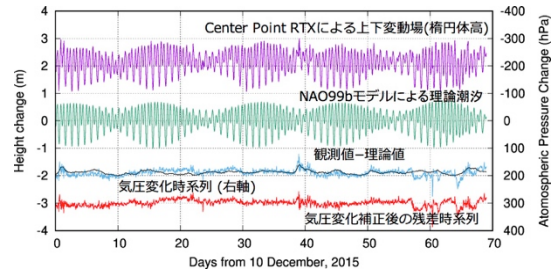


図2. 熊野灘に設置された地殻変動・津波観測用係留ブイの2015年12月10日からの長期上下変動時系列。リアルタイム PPP (Center Point RTX) および理論潮汐および両者の残差時系列を示す。さらに気圧変化時系列(黒実線、右縦軸を使用)とそれを用いて補正した気圧変化補正後の残差時系列も合わせて示す。

(2) 単一アンテナと慣性航法装置による洋上部プラットフォームの姿勢把握アルゴリズムの開発

解析に用いる観測方程式は、(1) 3軸角速度と姿勢角(方位角・ピッチ角・ロール角)変化率の関係式、(2) GPS アンテナ速度の変化量が、加速度の積分量と回転による速度の変化量の和に等しいという関係式の2つである。各姿勢角の時間変動を3次B-スプライン関数で基底展開し、展開係数を非線形最小二乗法で解くことで、姿勢を得た。

用いたデータは、MEMS ジャイロ(Xsens社 MTi-G)による加速度・角速度データ(10 Hz)と、キネマティック PPP により解析した GPS アンテナ位置データ(1 Hz)を時間微分して得たアンテナ速度である。2014年に紀伊半島沖で実施した試験係留時のデータを用いた。また、真値として、GPS ジャイロデータの値を用いて、それとのずれを誤差として結果の精度を検証した。これは、GPS ジャイロデータ(2.5 Hz)の単なる補間に対して、MEMS ジャイロの角速度データを併用することで、GPS ジャイロデータの誤差を考慮した姿勢角時間変動の推定を行ったものである。この解析によって推定された GPS ジャイロデータの誤差は公称精度とほぼ等しい0.2°であった。

開発した手法で得られた姿勢角の誤差は、全8回各19分間のデータのRMSで、方位

角(YAW) 1.1 度, ピッチ角 1.3 度, ロール角 1.0 度であった. 図 3 に 2014 年 1 月 20 日の例を示す. これは現状の GNSS アンテナと海底地殻変動用トランスデューサーの間の配置 (水平距離 1.5m, 鉛直距離 5.5m) では水平方向に約 90mm, 鉛直方向に約 30mm のトランスデューサー位置誤差に相当し, 十分な精度とは言えない. そのため, これら誤差要因の検討を行った結果, 全 8 回の観測に共通して現れるバイアス誤差が見出され, それが MEMS ジャイロの取り付け角度のオフセットに起因することを明らかにした. これらのオフセット量を補正することによって, RMS エラーを, 方位角(YAW) 0.5 度, ピッチ角 0.4 度, ロール角 0.4 度へと大幅に現象させることができた (図 4).

ここで現れる, ピッチ角, ロール角の誤差のほとんどは MEMS ジャイロによって計測される角速度データの誤差に起因する. そのため, 角速度の計測精度が 1 桁良い上位機種種の MEMS ジャイロ (Xsens 社 MTi-G710) を用いて船舶による同等な観測を行い, 本手法に依る姿勢角補正を行ったところ, GPS ジャイロによるピッチ角・ロール角との差が RMS で 0.03 度というきわめて高い精度の結果を得た.

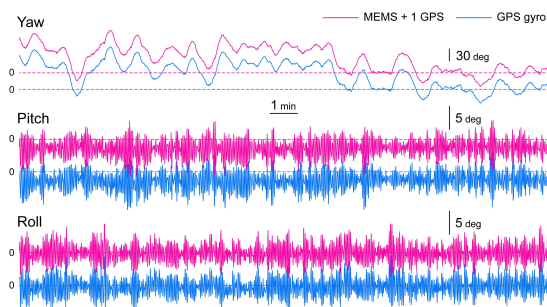


図 3. 2014 年 1 月 20 日のある 19 分間における係留ブイの 3 成分姿勢時系列. 方位角 (Yaw), ピッチ角 (Pitch), ロール角 (Roll) をそれぞれ示す. ピンク色が本研究で開発した手法によって推定された MEMS ジャイロ+1 GPS アンテナによる姿勢, 青色が複数 GPS アンテナを用いた GPS ジャイロによる姿勢をそれぞれ示す.

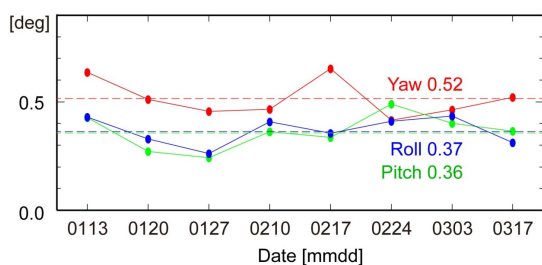


図 4. MEM ジャイロの取り付け角を補正した後の, 8 回の観測における GPS ジャイロに対する本手法で開発した MEMS+1 GPS アンテナによる姿勢の RMS. 方位角 (Yaw) で 0.5 度, ピ

ッチ角 (Pitch), ロール角 (Roll) で 0.4 度の精度で姿勢の決定ができていることが分かる.

このように, 超低消費電力 GNSS 連続観測システムの開発および, 単一アンテナと慣性航法装置による洋上部プラットフォームの姿勢把握アルゴリズムの開発を通じて, 目的である, より消費電力の低いリアルタイム洋上部姿勢把握システムの実現に一定の目処が付き, より長期間安定した海底地殻変動観測の実現可能性が大きく高まったと考えられる.

今後は開発したアルゴリズムを実際に計算資源が乏しい洋上プラットフォームにどのように実装していくか等の技術的な課題を克服することが必要であると考えられる.

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 8 件)

- ① Kawamoto S., Y. Ohta, Y. Hiyama, M. Todoroki, T. Nishimura, T. Furuya, Y. Sato, T. Yahagi, and K. Miyagawa, REGARD, A new GNSS based real-time finite fault modeling system on GEONET, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/2016JB013485, 2017. (査読有)
- ② Hirata Y. and Y. Ohta, Spatial and temporal characteristics of optimum process noise values of tropospheric parameters for kinematic analysis of Global Navigation Satellite System (GNSS) sites in Japan, *Earth, Planets Space*, 68:203, doi: 10.1186/s40623-016-0578-y, 2016. (査読有)
- ③ Ohta, Y., and M. Iguchi, Advective diffusion of volcanic plume captured by dense GNSS network around Sakurajima volcano: a case study of the vulcanian eruption on July 24, 2012, *Earth, Planets and Space*, 67(1), 157, doi:10.1186/s40623-015-0324-x, 2015. (査読有)
- ④ Inazu, D., T. Waseda, T. Hibiya and Y. Ohta, Assessment of GNSS-based height data of multiple ships for measuring and forecasting great tsunamis, *Geosci. Lett.*, 3(25), doi:10.1186/s40562-016-0059-y, 2016. (査読有)
- ⑤ 太田雄策, リアルタイム・キネマティック GNSS データ解析の高度化およびそれにもとづく巨大地震の震源断層即時推定手法に関する研究, *測地学会誌*, 62(1), 1-19, 2016. (査読有)
- ⑥ Tomita F., M. Kido, Y. Osada, R. Hino, Y. Ohta, and T. Iinuma, First measurement of the displacement rate of the Pacific Plate

near the Japan Trench after the 2011 Tohoku-Oki earthquake using GPS/Acoustic Technique, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2015GL065746, 2015. (査読有)

- ⑦ Takahashi N., Y. Ishihara, T. Fukuda, H. Ochi, J. Tahara, T. Mori, M. Deguchi, M. Kido, Y. Ohta, R. Hino, K. Mutoh, G. Hashimoto, O. Motohashi, and Y. Kaneda, Buoy Platform Development for Observation of Tsunami and Crustal deformation, *International Association of Geodesy Symposia*, doi: 10.1007/1345_2015_114, 2015. (査読有)
- ⑧ Imano M., M. Kido, Y. Ohta, T. Fukuda, H. Ochi, N. 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, *International Association of Geodesy Symposia*, doi: 10.1007/1345_2015_192, 2015. (査読有)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 太田雄策, キネマティック GNSS 解析精度評価のための 3 軸精密可動台の開発, 日本測地学会 126 回講演会, 2016 年 10 月 20 日, 岩手県奥州市文化会館 Z ホール (岩手県・奥州市)
- ② 今野美冴, 太田雄策, 木戸元之, 本荘千枝, 3 軸可動台を用いた海上移動体のキネマティック GNSS 測位精度評価, 日本測地学会 126 回講演会, 2016 年 10 月 20 日, 岩手県奥州市文化会館 Z ホール (岩手県・奥州市)
- ③ 本荘千枝, 木戸元之, 太田雄策, 今野美冴, 単一 GPS アンテナと MEMS ジャイロによる地殻変動観測ブイの姿勢モニタリング, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月 23 日, 幕張メッセ (千葉県・幕張市)
- ④ Hirata Y., and Y. Ohta, Verification of the optimum tropospheric parameters setting for the kinematic PPP analysis, AGU Fall Meeting 2015, 2015 年 12 月 18 日, San Francisco, (アメリカ合衆国)
- ⑤ Imano M., M. Kido, Y. Ohta, N. Takahashi, T. Fukuda, H. Ochi, and R. Hino, Accuracy in GPS/Acoustic positioning on a moored buoy moving around far from the optimal position, AGU Fall Meeting 2015, 2015 年 12 月 17 日, San Francisco, (アメリカ合衆国)
- ⑥ 本荘千枝, 木戸元之, 太田雄策, 今野美冴, 単一 GPS アンテナと MEMS ジャイロによる係留ブイの姿勢モニタリング, 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
なし.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 雄策 (OHTA, Yusaku)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号 : 5 0 4 5 1 5 1 3

(2) 研究分担者

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 : 1 0 4 0 0 2 3 5

(3) 連携研究者

なし.

(4) 研究協力者

なし.