

令和 6 年 4 月 1 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04587

研究課題名（和文）超小型衛星を用いた防災・減災に資する新方式の海底地殻変動データ送信の実証実験

研究課題名（英文）Demonstration experiment of a new seafloor crustal deformation data transmission method using a nano-satellite for disaster prevention and mitigation

研究代表者

田所 敬一（Tadokoro, Keiichi）

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：70324390

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：GNSS測位と海中音響測距を組み合わせた海底地殻変動観測におけるリアルタイム・連続観測技術の確立のため、データの送受信にかかる衛星通信コストの削減のための開発研究を行った。データ容量の縮減プログラムの作成、陸上でのLoRa通信の実験、陸上・離島・洋上でのリアルタイム高精度GNSS測位実験、実海域での海底地殻変動観測による一連のシステムの動作試験、衛星通信を介した長期間にわたるデータ通信の試験を経て、当初目的のための要素技術が完成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本開発研究の実施によって、海底地殻変動観測のリアルタイム・連続観測化を比較的低コストで行うための要素技術が確立した。この技術が実戦投入されれば、南海トラフ地震臨時情報の発表への海底地殻変動観測結果の活用や、海域での地震による地殻変動の早期把握が可能となり、防災・減災にとって重要なデータの取得が可能になる。

研究成果の概要（英文）：In order to establish real-time and continuous observation technology for seafloor crustal deformation observation by combining GNSS positioning and ocean acoustic ranging, development research was performed to reduce the cost of satellite communications for data transmission and reception. After coding a program for data size reduction, conducting experiments of LoRa communications on land, real-time high-precision GNSS positioning experiments on land, remote islands, and at sea, testing the operation of a series of systems by observing seafloor crustal movement in actual sea areas, and testing long-term data communications via satellite communications, the elemental technologies for the initial purpose were completed. The elemental technologies for the initial purpose have been completed.

研究分野：地震学

キーワード：海底地殻変動観測 プレート境界地震 防災・減災 キューブサット 衛星通信

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

GNSS 測位と海中音響測距を組み合わせた海底地殻変動観測において、現在の観測方式では船舶を用いることが必須であるため、観測頻度(時間分解能)が低く、連続観測を行うことができない。また、地震発生時のような緊急時にはリアルタイムでのデータ取得が不可欠である。したがって、海底地殻変動のリアルタイム・連続観測技術の確立が急務である。

この問題を解決するには、無人の洋上プラットフォームを用いた新方式の観測を行う必要がある。この方式でリアルタイム観測を行うためには、観測データを衛星通信で陸上の研究室等へ常時送信する必要がある。これを商用の通信サービスを用いて行った場合、コストが嵩むという問題点がある。そこで、海底地殻変動観測データの送受信にかかる衛星通信コストの削減が必須である。

2. 研究の目的

本研究では、研究用の人工衛星を用いた海底地殻変動観測データの送受信の実証を行う。用いる人工衛星は、我が国の高等専門学校が連携して開発・打ち上げを行う「キューブサット」とよばれる一辺 10cm の立方体の形状をした超小型衛星である。この衛星では、IoT 技術で用いられている LoRaWAN を用いて通信することとなり、この通信方式で送信できる容量にデータサイズを縮減することと、そのデータの送受信実験を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 海底地殻変動観測で得られる音響測距の波形生データから音響信号の直達波の走時を求め、さらにそのデータ容量を縮減するプログラムを作成する。
- (2) 陸上において LoRaWAN を介してデータを送信する実験を行う。
- (3) 海底地殻変動観測では、音響測距データのほかに GNSS 測位結果も必要である。そのため、離島および洋上にリアルタイム高精度 GNSS 測位実験を行い、その有効性を評価する。
- (4) 実海域にて海底地殻変動観測を実際に行い、得られたデータから音響信号の直達波の走時を求め、さらにそのデータ容量を縮減するまでの一連の試験を行う。
- (5) 衛星通信を介して長期間にわたって音響測距データを陸上へ送信し、その受信結果からシステム全体の動作確認を行う。

4. 研究成果

(1) 海底地殻変動観測で得られる音響測距の波形生データから音響信号の直達波の走時を求め、そのデータ容量を縮減するプログラムを作成した。まず、走時の情報を ASCII 形式で得ることとし、これにより、測距 1 回あたりのデータサイズが 64KB から 58 バイトに縮減された。最終的には、更なるデータサイズの縮減を行った。送信する走時データは数字のみであるため、シフト演算とビット演算を組み合わせることで 1 つの数字を 4 ビットで表現することとし、これにより 1 回の測距結果を 16 バイト(終端コード含む)にまで縮減することに成功した。

(2) 過去に取得した音響測距波形とキューブサットへの送信時に使用する処理用 PC を用いて、陸上において 3 回の送信実験を行った。1 回目の実験は、2021 年 5 月 1 日～10 日に研究室にて行った。この実験では、3 分毎に音響測距の疑似波形を模擬音響装置から処理用 PC に送信し、その都度上記のプログラムで処理を行って処理用 PC 内にデータを蓄積した。その処理済みデータを毎朝 9 時に 1 日分を一括してキューブサットを模した PC へ USB ケーブルを介して直接送信した。実験の結果、データ送信プログラムでの処理および一括送信に問題がないことを確認した。2 回目の実験は、2021 年 6 月 21 日に研究室において行った(図 1)。この実験では、PC への直接送信ではなく、キューブサットでの送信に使用する LoRaWAN を介して 2m 程度の短距離での送受信を行った。これにより、LoRaWAN での通信にも問題がないことを確認した。3 回目の実験は、2021 年 9 月 7 日に名古屋大学と約 2.7km 離れた平和公園ア

クタワー展望室との間で LoRaWAN を介した送受信を行った(図 2)。音響測距の疑似波形を 1 分毎に処理して送信し、長距離でも問題なく送受信ができることを確認した(図 3)。

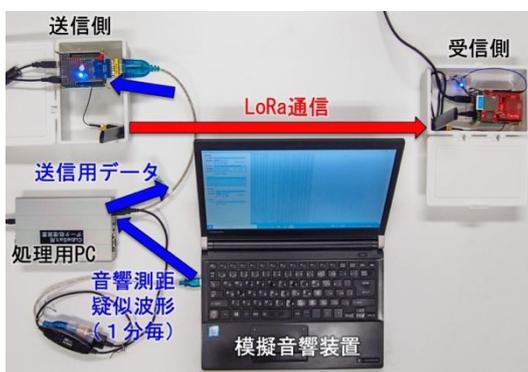


図 1 2 回目の陸上実験の様子。模擬音響装置から過去の取得した音響測距波形を処理用 PC に送信し、処理用 PC において直達波の走時を求め、LoRa によって受信側の装置に送信する。受信されたデータは受信側装置内の SD カードに保存される。



図2 3回目の陸上実験。送受信点の位置関係と送信側（名古屋大学）の様子を示す。

```

210907111114110233602748071843
210907111217110233602748071843
210907111317110233602748071843
210907111417110233602748071843
210907111517110233602748071843
  
```

```

>> radio_rx 210907111114110233602748071843 -100 6.75
>> radio_rx 210907111217110233602748071843 -100 6.50
>> radio_rx 210907111317110233602748071843 -100 6.25
>> radio_rx 210907111417110233602748071843 -100 6.00
>> radio_rx 210907111517110233602748071843 -101 6.00
  
```

図3 3回目の陸上実験による（上）送信データと（下）受信データ。青字で示した音響測距波形の処理時刻（時分秒）が赤字で示したとおり2.7km先で正しく受信されている。

(3) 海域においてリアルタイム海底地殻変動観測を行う際に必須となるリアルタイム高精度GNSS測位試験を行った。精度評価のためのリファレンスの測位解としては、RTKLibによる後処理PPPの測位結果を用いた。この測位のために必要となる補強情報はTrimble社のサービスであるCenterPoint RTXを用いた。まず、陸上での静止体の試験を2022年6月16日12:32~7月7日12:30 (JST)に名古屋大学屋上で実施した。サンプリング間隔は1秒、測位に用いた衛星はGPSとGLONASSである（以下同じ）。その結果、測位結果が安定している期間はmmオーダーでの測位が可能であり、測位解に一時的なステップが生じる事があるが、その大きさは水平1.5cm、上下4.6cm（最大）であり、測位解の1の値によってステップ/再収束の判断が可能であることが確認された（図4）。

次に、沖合での静止体の試験を2022年7月22日08:16~11:29 (JST)に銭洲岩礁で実施した。その結果、上下成分も含めて2cmへの収束には測位開始から20分程度は必要であるが、沖合においてもmmオーダーでの測位が可能であることが確認された（図5）。

最後に海上での移動体の試験を2022年8月16日14:18~8月24日14:04 (JST)に那覇~宮古海峡沖~新宮~紀伊半島沖を航行する船舶にて行った（図6）。この試験では測位精度は平均で2~3cm程度、95%点では水平7cm、上下±10cm程度であることが確認され（図7）、CenterPoint RTXが海底地殻変動観測にも有効であるとの結論に至った。

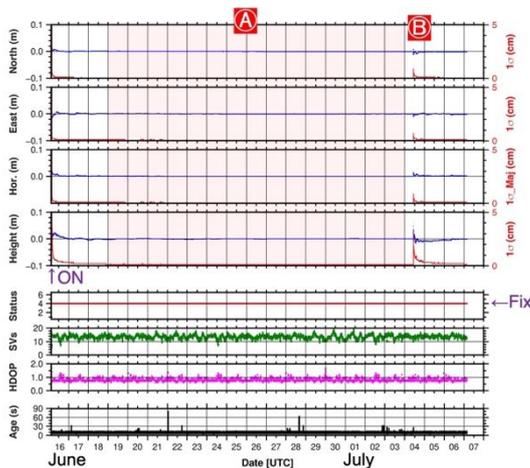


図4 陸上での静止体の試験の結果。①で示した期間は測位結果が安定しており、②で示した時刻に一時的なステップが生じている。

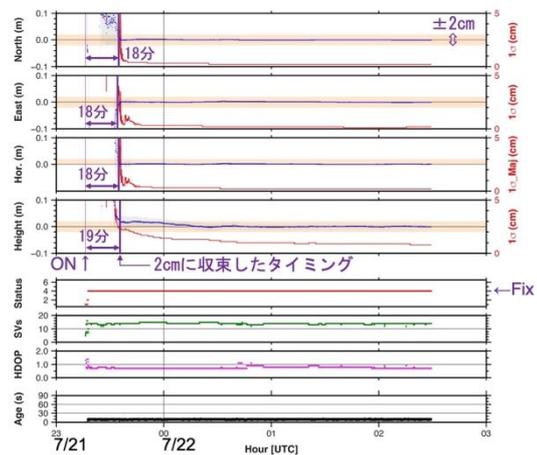


図5 沖合での静止体の試験の結果。



図6 海上での移動体の試験の様子。GNSS 受信機 (Trimble NetR9) には生データが保存され、これを用いて RTKLib による後処理 PPP 解析を行い、これをリファレンスとした。CenterPoint RTX による測位結果は NMEA 形式で出力され、自作の NMEA ロガーに保存される。

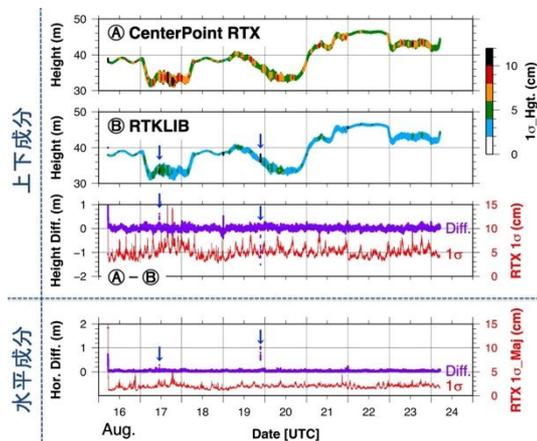


図7 海上での移動体の試験の結果。青矢印で示した時刻では、リファレンスとした RTKLib による後処理 PPP の測位結果にステップが見られる。

(4) 実海域で一連のプログラムの動作試験を 2023 年 9 月 6~8 日に実施した (図 8)。海域は、名古屋大学が海底地殻変動観測のために設置している沖縄本島南方である。その結果、一連のプログラムは問題なく動作し、さらに生波形と到達時刻のファイルが処理 PC 内に保存できていることが確認された。

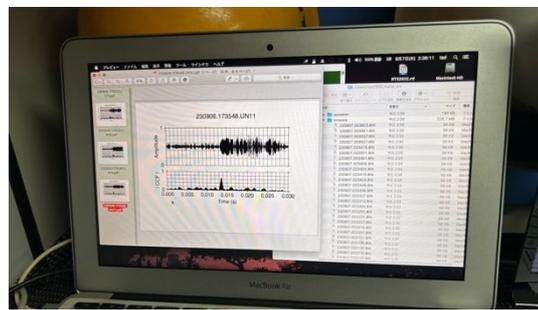


図8 実海域で一連のプログラムの動作試験の様子。音響装置から送られて来た音響測距波形を保存したファイルが画面の右側に順次表示され、処理結果が視覚的に分かるように左側に波形と相関処理結果が表示されている。

(5) 本研究で使用予定であった通信衛星は打ち上げ失敗によって使用できなくなったため、やむなく別の通信衛星システム StarLink を用いて実験を行った (図 9)。衛星への送信には当初 ESP32 を使用していたが、StarLink のモデムとの接続が途切れることが多かったことから Raspberry Pi 4 を用いることにした。StarLink を介して送信されたデータは UDP 通信によって研究室内に設置したモバイルルータ経由で収録した。実験は 2023 年 8 月 10 日から 2024 年 1 月 24 日に実施した。その結果、全 239,867 個のデータのうち 224,027 個が受信され、UDP 通信に伴うパケット落ちは約 7% であった (図 10)。パケット落ちが生じるのは UDP 通信の特性上、やむを得ない。



図9 StarLink を用いた送受信実験の模式図

以上の結果から、実海域での海底地殻変動観測データから自動で信号到達時刻を読み取り、人工衛星経由でデータを陸上に送信するまでの要素技術が確立した。

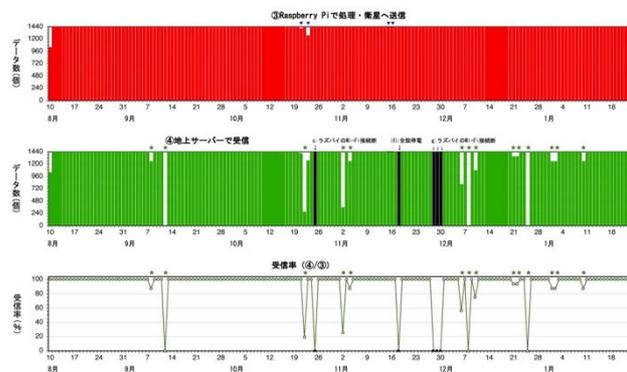


図10 StarLink を用いた送受信実験の結果。(上)送信したデータ数、(中)衛星経由で受信されたデータ数、(下)受信されたデータの割合。停電等で実験を中断した期間を黒で示した。緑の星を付けた日にパケット落ちが生じている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田所敬一, 小池遥之, 松廣健二郎
2. 発表標題 CenterPoint RTXによるGNSS測位試験
3. 学会等名 日本測地学会第138回講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村上幸一, 徳光政弘, 今井雅文, 梶村好宏, 伊達勇介, 今井一雅, 高田拓, 入江博樹, 前田恵介, 田所敬一
2. 発表標題 LPWA (LoRa) モジュール搭載2Uキューブサットによる山間および洋上防災データの収集技術実証
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田所 敬一、中村 衛、小池 遥之、松廣 健二郎
2. 発表標題 南海トラフ軸および南西諸島海溝軸付近のプレート間固着状態
3. 学会等名 地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 徳光 政弘・今井 一雅・平社 信人・今井 雅文・中谷 淳・田所 敬一・北村 健太郎・高田 拓・村上 幸一・辻 正敏・西尾 正則
2. 発表標題 高専連携技術実証衛星3号機「KOSEN-2R」の軌道上実証と宇宙工学技術者育成 (1)
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------