

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K04653

研究課題名（和文）重力勾配移動観測と複数台同時観測技術の開発

研究課題名（英文）Development of Fundamental Technologies for Mobile and Multi-Station Gravity Gradient Observations

研究代表者

潮見 幸江（SHIOMI, Sachie）

群馬大学・大学院理工学府・助教

研究者番号：60584266

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：地震や火山、土砂災害、道路陥没などの災害を予測するには、地下構造を詳細に観測する必要がある。しかし従来の観測手法は、地質や地形、地面振動や電磁ノイズの影響を受けるため、市街地や火山地域、沿岸域等での高精度観測が困難であった。これらの問題点を解決する手法のひとつとして、我々は干渉計型重力勾配計の実地観測を検討した。干渉計型重力勾配計では二つの物体の自由落下加速度の差を直接干渉計で測定するため、測定値が重力以外の影響を受けないことから、実地での高精度観測が期待されている。本研究では実地観測の実現に向け、移動台車の開発、運搬体搭載試験、光学系の小型化開発、実地での作業効率の向上に取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の手法は前述の通り地形や地質、地面振動や電磁ノイズなどの影響を受けるため、実地での高精度観測が困難であった。干渉計型重力勾配計は、重力以外の影響を受けないことから、地形や地質、地面振動や電磁ノイズの影響を受けることなく、干渉計本来の精度を活かした測定が可能である。また時間分解能も高く、1秒間に5回以上の測定を行うことができる。そのため、実地での移動観測が可能になれば、これまでになく高精度で地下の物質分布に起因する重力勾配を測定できる。また複数台で同時連続観測を行うことで、地下の物質分布の変動を面的に捉えることができる。これらの観測データにより災害予測精度を向上できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：It is necessary to observe underground structures in detail to improve the accuracy of predicting disasters such as earthquakes, volcanoes, landslides, and road collapses. However, conventional observation methods are affected by various factors, such as ground vibrations, electromagnetic noise, geology, and topography. These factors make them difficult to perform high-precision observations in areas where disaster predictions are needed, such as urban areas and volcanic areas. To solve these problems, we have considered field observation using laser-interferometric gravity gradiometers (LIGGs). Using an interferometer, the LIGGs directly measure the difference in the free-fall acceleration of two test masses. Therefore, the measured values are not affected by anything other than gravity, allowing possible high-precision observations in the field. In this research, we have worked on the development of technologies to realise mobile and multi-station gravity gradient observations.

研究分野：重力物理学実験

キーワード：重力勾配 干渉計 自由落下 地下探査 マッピング

## 1. 研究開始当初の背景

日本は地震・火山大国として知られ、また近年は豪雨による土砂災害や都市部における地盤沈下や道路陥没も多く報告されている。このような地下に関連した災害の予測精度を向上するには、観測に基づいて地下構造を詳細に把握することが重要である。地下を検知する手法としては、重力探査、電気探査、電磁探査、地中レーダー探査等がある。また宇宙線ミュオンラジオグラフィによる内部構造探査も実施されている。これらの手法は、測地学や火山学、遺跡調査など様々な分野で成果をあげているが、下記のような問題点が指摘されている：(1) 重力測定は地面振動の影響を受けるため、活火山地域や沿岸域、人的活動の活発な都市部において、装置本来の精度を活かした高精度観測を行うことが困難である、(2) 電気・電磁探査は、高圧電線や変電所、工場などから発生する電磁ノイズの影響を受ける、(3) 電気・電磁探査では測定結果が地形や地質構造に大きく依存する、(4) 地中レーダー探査は塩分や水分の影響を受けるため沿岸域での高精度測定は困難である、(5) 宇宙線ミュオンラジオグラフィでは、統計的な誤差を削減するため数か月以上にわたる観測が必要であるため、時間変動の大きい観測対象の検知には適さない。

## 2. 研究の目的

本研究では、これらの問題点を解決する手法のひとつとして「干渉計型重力勾配計」の实地観測を検討した。ここで用いる干渉計型重力勾配計では、真空槽内の高低2カ所に設置した物体(落下体)を同時に投げ上げ、落下加速度の差をマイケルソン干渉計で測定することにより、重力(鉛直)勾配を求める[1]。落下加速度の差を直接測定することで、二つ落下体に共通する振動ノイズを大幅に削減することができる。また、測定値が重力以外の影響を受けないため、下記のような観測上の利点がある：(1) 地形や地質構造には依存しないため、形状の複雑な沿岸域や山体斜面でも良い精度で観測できる、(2) 塩分や水分の影響を受けることもないため、沿岸域でも良い精度で観測を行うことができる、(3) 地面振動の影響を受けにくく、火山活動の活発な地域や都市部、沿岸域、移動体上でも高精度観測が可能である。以上のことから、山体斜面や市街地、沿岸域、移動体上においても装置本来の精度を活かした観測が期待できる。そのため、従来の観測ではノイズに埋もれて検知できなかった局所的な地下の物質分布に起因する効果を検知できる可能性がある。また後述の通り、測定間隔を用途に応じて設定できるため、時間分解能の高い測定も可能である。2014年に実施した桜島火山における適用試験では1時間ごとの変化を捉えることができた。

一方、重力勾配値は、重力源からの距離の3乗に反比例するため、重力計よりも観測できる範囲は狭い。そこで、本研究では複数台同時連続観測を検討した。山体斜面など比較的狭い観測対象地域に複数台設置し、連続観測を行うことで、地下の局所的な物質分布の変動を面的に捉えることができる可能性がある。

干渉計型重力勾配計の基本原理は1972年にStoneによって提案された[2]。Stone自身は実機の製作を行ってはいないが、1990年代後半から2000年頃、Brownらが市販の(干渉計型)絶対重力計(FG5[3])の真空槽を上下に2台設置し、重力の鉛直勾配の測定を試みた[4, 5]。その後、潮見(本研究代表)らが一つの真空槽内で二つの落下体の落下加速度の差を直接干渉計で計測する干渉計型重力勾配計を試作し[1]、熊本県阿蘇火山と鹿児島県桜島火山で实地適用試験を行った。

潮見らが開発した装置の特徴は独自に開発した「投げ上げ法」を用いることで、装置の可搬化と高精度高速反復測定を実現している点である。従来の自由落下法では、①落下体を落下させ、落下前の位置に戻すための落下・復帰機構[6]が複雑で装置が大型となる、②落下・復帰の工程に時間がかかり反復測定が容易ではない[7, 8]、などの課題があり、実用化されていなかった。一方、この装置で用いている「投げ上げ法」は、衛星自由落下実験(Satellite Test of the Equivalence Principle[9])で利用する落下体の検証のために潮見が開発したマウント法を応用したもので、複雑な機構を用いることなく落下体を繰り返し精度よく投げ上げることができる。投げ上げの頻度も用途に応じて高く(1秒間に5回以上)設定することができる。本研究では、これらの特徴を活かして、移動観測と複数台同時連続観測の実現に向けた開発を行った。

## 3. 研究の方法

複数台同時観測技術と装置の可搬性を活かした移動観測技術の確立を目指し、以下のような方法で研究を行った。複数台同時観測技術の開発としては、上述の阿蘇・桜島火山での適用試験に利用した干渉計型重力勾配計(第1機)と、適用試験の経験をもとに改良した装置(第2機)を同時に運用して連続観測を行えるように、装置の復旧作業とデータ収集・通信環境の整備を行った。

移動観測に関しては、移動用のプラットフォームとして、まず手始めに凹凸のある路面でも比較的安定して走行できるキャタピラを装備した市販の農業用ミニクローラを選定した。このミニクローラに、第2機を搭載し、投げ上げ試験を行った。その結果、搭載作業の安全性の向上や効率化など、様々な課題が明らかとなったため、これらを解決する新たな走行方法を考案・試作・試験した。また、移動観測と実地での利用に対応できるように光学系等の小型化開発を行った。

#### 4. 研究成果

主な成果は下記の通りである。

##### (1) 移動プラットフォームの開発と運搬体搭載試験

火山地域など路面が滑らかではない場所での移動観測を想定し、キャタピラを装備した移動台車の開発に取り組んだ。最初に第2機を搭載することができる性能をもつ市販の農業用ミニクローラを購入し、荷台に第2機を搭載して投げ上げ試験を行った。その結果、ミニクローラ上でも地上とほぼ同程度の精度での測定が可能であることがわかった[10]。このことから、前述した装置の利点が、運搬体上でも機能していることがわかった。

しかし、搭載実験後に投げ上げ駆動機構の駆動部（アクチュエータ）に不調が生じた。作業中に駆動部に何らかの負荷がかかり不具合を生じた可能性がある。装置は重さ約80 kg 高さ約150 cmで、搭載作業は6名程の人員で手動クレーンや携帯用スロープを用いて行った。作業人員が多く作業工程も複雑であったことから、作業効率の向上が必要である。

以上から、装置の小型化と搭載作業効率の向上（作業時間と作業人員数の削減）が今後の課題であることがわかった。また、安全に走行するには、重心位置を下げた構造にし、ミニクローラのエンジンの振動による光学素子の破損や固定ねじのゆるみに対する対策が必要であることがわかった。

##### (2) 光学系の小型化及び作業効率の向上

実験室内で第2機の投げ上げ試験を行い、光てこを用いて自由落下中の落下体の角速度を測定したところ、角速度の平均値は目標値よりも大幅に小さいことがわかった[11]。しかし、光学定盤の一定方向ではその垂直方向よりも大きな値をとる傾向があった。その原因が光学定盤の重心位置に起因することを実験的に確認した[12]。これを改善する小型の光学系の開発を行ったところ、方向による相違は半減した。

また、これまでの光学系では人員2名で約3時間かけて光学調整を行っていたが、活火山近郊など危険が伴う環境においては、少数の人員に限られた時間の中で設置作業を行う必要があるため、作業効率の向上を考慮した改良を行った。その結果、作業人員は2名から1名へ、作業時間はこれまでの約10分の1（15分程度）に短縮することができた。

##### (3) 組み立て式移動台車の考案

火山観測所など天井走行クレーンの利用が難しい実地において、クレーンを使用せずに作業人員2名で第2機を搭載することができる組み立て式移動台車を考案した。

##### (4) 屋内移動キャスターの考案と試作

キャタピラ装備のクローラは屋内での移動には適していないため、建物内での移動をスムーズに行い、観測点で固定できる固定兼用キャスターの開発を行った。

##### (5) 野外観測用のロボットの検討

これまでの移動プラットフォームの開発と搭載試験により、キャタピラを装備した移動台車では、エンジンの振動が光学素子等に与える影響が懸念される。そのため火山地域や舗装されていない路面など通常のキャスターでは円滑な移動ができない状況では、歩行ロボットを用いて実地観測を行うことが有用であると考えた。そこで、市販の四足歩行ロボットを購入し、歩行に伴う振動と傾きの測定を行った。

##### (6) 回転ノイズの理論式の導出と評価

落下体は投げ上げられた後、わずかではあるが回転するため、光路長に変化が生じる。この回転による誤差は市販の絶対重力計（FG5）でも主なノイズ要因のひとつと考えられ、理論・実験の両面から様々な研究が行われている。一方、干渉計型重力勾配計に関しては、回転ノイズを評価する理論体系が確立されていなかった。そこで、第1機と第2機の光学系に対応した回転ノイズの計算式を導出し[13]、これまでに実施した投げ上げ試験の結果[10, 11]と重心測定の結果[14]を適用することで、回転ノイズの大きさを評価した。その結果、第2機の二つの落下体が回転することによって生じる加速度ノイズは、 $0.07 \mu\text{Gal}$ 以下であることがわかった[13]。これは、重力鉛直勾配値に換算すると $0.1 \mu\text{Gal/m}$ 以下であることを示す。この評価は、落下体の重心位置を調整する前の重心測定の結果[14]を用いたものであるため、重心調整を行った後の上限値

はさらに小さい値となる。このことから、第2機の回転ノイズは設計時の目標値 (0.1  $\mu\text{Gal}/\text{m}$ ) を十分下回ることがわかった。

#### (7) 落下体の重心測定

回転ノイズを最小化するには、落下体の重心と光学中心を可能な限り一致させる必要がある[13]。そこで、国際度量衡局にてキログラム原器の重心測定に利用された Weighbridge 法[15]の原理を用いた重心測定装置を作製し、落下体の重心測定を行った[14, 16]。

以上の成果に加え、移動観測に向けた真空排気系の小型化、実地でのメンテナンスを容易にするための機械要素を用いた投げ上げ駆動機構の製作、複数台同時観測に向けたデータ収集・データ解析システムの構築にも取り組んだ。

#### <引用文献>

- [1] Shiomi S, Kuroda K, Telada S, Tsubokawa T and Nishimura J 2012 Journal of the Geodetic Society of Japan 58, No. 4, 131-139
- [2] Stone R S 1972 United States Patent, No. 3,704,626 (1972)
- [3] Micro-g Solutions, Inc. (n. d.). 2024 FG5-X ABSOLUTE GRAVITY METERS. Retrieved from <http://microglacoste.com/product/fg5-x-fgl-absolute-gravimeter/>
- [4] Brown J M, Niebauer T M and Klopping F J, 1999 Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata 40, N. 3-4, pp. 487-496; SEP.-DEC. 1999
- [5] Brown J M, Niebauer T M, Klopping F J and Herring AT 2000 Geophysical Research Letters 27, NO. 1, 33-36
- [6] 黒田和明, 西村純 2012 特開 2009-115525, 2012-12-19
- [7] Kuroda K and Mio N 1989 Phys. Rev. Lett. 62 No. 171941-1944
- [8] Kuroda K and Mio N 1990 Phys. Rev. D 42 3903-3907
- [9] Stanford University 2024 General Information. Retrieved from <https://einstein.stanford.edu/STEP/information/data/general.html>
- [10] Matsuda Y, Shiomi S, Yamamoto T, Hikosaka T, Watanabe S, Chiku H, Sasaki M, Xue K and Yamada K 2019 “Development of a platform for gravity gradient mapping”, Proceedings of International Conference on Technology and Social Science 2019, Kiryu, Japan, Invited paper, I02-01
- [11] Seto K, Shiomi S, Kimura Y, Xue K, Hikosaka T, Watanabe S and Yamada K 2017 “Performance evaluation of a toss-up mechanism for free-fall interferometers”, Proceedings of International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System 2017, Kiryu, Japan, Invited paper, I10-01
- [12] Watanabe S, Shiomi S, Hikosaka T, Xue K, Yamamoto T, Matsuda Y and Yamada K 2018 “Reducing acceleration disturbance in a free-fall interferometer by adjusting the location of the center of mass of its optical table”, Proceedings of International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System 2018, Kiryu, Japan, IPS5-02
- [13] Shiomi S 2024 Physica Scripta 99, 065015, 1-16
- [14] Shiomi S, Watanabe S, Hikosaka T, Yamamoto T, Chiku H, Sasaki M and Yamada K 2020 Journal of Technology and Social Science 4, No.3 15-23
- [15] Davis R S 1995 Meas. Sci. Technol. 6, 227-229
- [16] Shiomi S 2018 “Measurement of the centres of mass of test masses for free-fall interferometry”, Proceedings of International Conference on Technology and Social Science 2018, Kiryu, Japan, Invited paper, I02-01

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sachie Shiomi	4. 巻 99 065015
2. 論文標題 Rotational disturbance in laser-interferometric gravity gradiometry	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physica Scripta	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1402-4896/ad3021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sachie Shiomi, Shunsuke Watanabe, Taichi Hikosaka, Tatsunori Yamamoto, Hiroki Chiku, Masaru Sasaki and Kou Yamada	4. 巻 4
2. 論文標題 Test Mass Verification for Free Fall Interferometers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Technology and Social Science	6. 最初と最後の頁 15-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Sachie Shiomi	4. 巻 なし
2. 論文標題 Measurement of the centres of mass of test masses for free-fall interferometry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of International Conference on Technology and Social Science 2018	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Sachie Shiomi	4. 巻 なし
2. 論文標題 Performance tests of a weighbridge method to locate the centre of mass of a test mass for free-fall interferometry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System 2018	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 S. Watanabe, S. Shiomi, T. Hikosaka, K. Xue, T. Yamamoto, Y. Matsuda, and K. Yamada	4. 巻 なし
2. 論文標題 Reducing acceleration disturbance in a free-fall interferometer by adjusting the location of the center of mass of its optical table	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System 2018	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y. Matsuda, S. Shiomi, T. Yamamoto, T. Hikosaka, S. Watanabe, H. Chiku, M. Sasaki, K. Xue and K. Yamada	4. 巻 なし
2. 論文標題 Development of a platform for gravity gradient mapping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of International Conference on Technology and Social Science 2019	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 吉永海斗, 潮見 幸江, 佐々木大, ヴーマンクオン, 都丸朔, 山田功
2. 発表標題 干渉計型重力勾配計の機械的投げ上げ駆動機構の開発
3. 学会等名 日本機械学会関東支部群馬ブロック 研究・技術交流会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Matsuda, S. Shiomi, T. Yamamoto, T. Hikosaka, S. Watanabe, H. Chiku, M. Sasaki, K. Xue and K. Yamada
2. 発表標題 Development of a platform for gravity gradient mapping
3. 学会等名 International Conference on Technology and Social Science 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊駿介, 潮見幸江, 彦坂太一, 山本竜典, 佐々木大, 知久拓希, XUE Kailun, 山田功
2. 発表標題 可搬型重力勾配計の光学系の開発と性能試験
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 彦坂 太一、潮見 幸江、渡邊 駿介、松田 耀旬、山本 竜典、薛 凱倫、山田 功
2. 発表標題 可搬型重力勾配計のためのデータ収集系の開発
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Watanabe, S. Shiomi, T. Hikosaka, K. Xue, T. Yamamoto, Y. Matsuda, and K. Yamada,
2. 発表標題 Reducing acceleration disturbance in a free-fall interferometer by adjusting the location of the center of mass of its optical table
3. 学会等名 Proceedings of International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Shiomi
2. 発表標題 Performance tests of a weighbridge method to locate the centre of mass of a test mass for free-fall interferometry
3. 学会等名 Proceedings of International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Shiomi
2. 発表標題 Measurement of the centres of mass of test masses for free-fall interferometry
3. 学会等名 Proceedings of International Conference on Technology and Social Science 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018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