

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04012

研究課題名(和文)反磁性体磁気浮上を応用した地球観測用慣性センサーの開発

研究課題名(英文) Study of magnetic levitation with a diamagnetic material for development of geophysical sensors

研究代表者

高森 昭光 (Takamori, Akiteru)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：00372425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：地震計や傾斜計、重力計などの地球観測機器で広く用いられている機械式振り子に代わる新しい技術としての磁気浮上式振り子を開発することが本研究の目的である。反磁性体と永久磁石の組み合わせによる受動的な方式について調査した。半解析的なモデルを作り、永久磁石の作る磁場中に浮上する反磁性体の力学特性を予測した。その結果に基づき磁気浮上による長周期振り子を設計して傾斜計を試作した。試作傾斜計ではアクティブ制御方式を採用し、短時間ではあるが浮上体の位置を制御することに成功した。また、磁気浮上式重力計である超伝導重力計に関する有限要素シミュレーションを行い、実測と比較して手法の有効性を示すことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、反磁性体と永久磁石の組み合わせを利用した磁気浮上方式について、その設計手法の確立と実際の装置(傾斜計)開発を通じてその実用性を示した点である。この手法の利点は、制御や超伝導状態を保つための冷却などを必要としない完全受動システムであることである。これは、消費電力やメンテナンスの観点から地球観測機器への応用として有利な特徴であるといえる。また、製作にかかるコストが低いため、観測機器を多点展開して稠密観測を行い新しい知見を得るといった学術的意義だけでなく、防災に活用するという社会的意義にもつながる成果といえる。

研究成果の概要(英文)： We studied magnetic levitation technique as an alternative method to conventional mechanical suspensions widely used in geophysical instruments such as seismometer, tiltmeter and gravimeters. We focused on the passive magnetic levitation that is realized by the combination of a diamagnetic material and permanent magnets. A semi-analytical model was constructed to predict dynamic behavior of levitated mass made of diamagnetic material. Based on the model, a prototype tiltmeter was designed and fabricated. The prototype tiltmeter adopted an active feedback system and the position of the levitated test mass was stabilized in a short period. Numerical simulations of magnetic suspension in a superconducting gravimeter (SG) was performed by making a finite element model. The effectiveness of the model was successfully demonstrated by comparing its results to the observation with an existing SG.

研究分野：固体地球科学

キーワード：磁気浮上 反磁性体 傾斜計 有限要素モデル 重力計 地球観測機器

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

新しい観測技術の登場は固体地球科学の発展の原動力となってきた。観測技術の進歩の方向性は、(a)新しい観測原理を用いて従来に不可能だった観測を可能にする、(b)観測精度を向上させる、(c)観測の規模を拡大して従来とは質的に異なる観測を可能にする、というように分類することが可能である。近年における例としては、(a)人工衛星を用いた宇宙からの観測(SAR、VLBIなど)、宇宙線を用いた透視による火山活動の観測(ミュオグラフィ)、(b)高安定化レーザーや超伝導重力計によるひずみや重力の超精密観測、(c)陸域、海域での地震計による稠密観測、GPS観測網による連続観測(GEONETなど)があげられる。

また、データの処理方法も進展を続けており、IoT(The Internet of Things)やAI(機械学習)による大規模データの取得・処理技術などの応用も進められている。上記のような背景のもと、従来の手法ではアプローチの難しかった場所に多点展開することができる高精度なセンサーを開発して(a)から(c)の性質を同時に高度化するための技術を研究することが本研究の動機である。

2. 研究の目的

地球観測に用いられる地震計や重力計に共通する基本原理は、観測点である地面と参照マスの相対運動を精密に測定して観測点の運動状態を記録することである。観測の精度を向上させるためには参照マスはできるだけ外部の運動の影響を受けない事が求められる。参照振り子が完全に観測点から切り離された慣性座標に静止する状態が理想的である。ほとんどの機器で参照マスは機械的な振り子で支持されており、上記の理想状態に近づけるために振り子を長周期化するなどの工夫がなされてきたが、そのために装置が複雑化し、消費エネルギーが増大することなどが問題となってきた。

一方で、機械的な振り子構造を利用しない手法も考案され、超伝導重力計として実現されている。超伝導重力計では支持材料の機械的物性特性の影響を排除して、高安定で高精度の観測を行うことが可能となっている。しかしながら、超伝導状態を維持するために装置の大型化、消費電力の増大は避けられない。加えて運用面でもメンテナンスに要する時間的、経済的なコストが大きく、観測点の多点展開への障害となっている。

高精度な観測機器を多点展開することを可能にするため、機械式に比べて有利な力学特性を持つ磁気浮上を簡易かつ低コストな方法で実現するための技術を研究開発することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

前段の末尾で述べたような磁気浮上方式として、本研究では永久磁石と反磁性体を組み合わせた方式に着目した。この方式では外部からの制御等を行うことなく、完全に受動的に(エネルギー消費なしに)安定して物体を浮上させることができる。本研究ではこの性質を応用して、磁気浮上させた反磁性体を用いて支持体の物性の影響を受けない参照マスを実現し、エネルギー消費やコストの高いメンテナンスを必要としない独自で新しい地震計や傾斜計、重力計等の慣性センサーを創り出すための技術を研究する。具体的な研究方法としては比較的实现が容易な並進1自由度の超長周期(無定位)振り子を実際に製作して傾斜計を試作することをひとつの柱とする(図1)。そのために(i)反磁性体とそれを浮上させるために適切な永久磁石の形状や配置を設計する手法の開発、(ii)浮上体の位置を測定するセンサー、(iii)必要に応じて浮上体の水平位置を維持するための傾斜補正機構の開発を行う。(i)については半解析的モデルの構築と市販の有限要素シミュレータ(ANSYS)を用いた解析を行い、基礎的な実験と比較してモデルの精度を高めた上で設計を行う。(ii)については非接触測定的手法として、光を利用した位置センサーを製作する。高精度の観測を行うためには参照マスはほぼ無定位の状態にしてその位置を一定に保つための制御を行うのが有利である。そのためにマスを支持する永久磁石の傾きを補正するための手段としてピエゾ圧電素子等を用いたアクチュエータと、それにより駆動される傾斜プラットフォームを開発する(iii)。これらの要素を用いて傾斜計を試作し、傾斜の観測を試みる。

傾斜計は水平方向の加速度計と見なすこともできるため、これが実現できれば水平地震計への応用も可能である。他方で、浮上体を鉛直方向や回転自由度の参照マスとして、重力計や鉛直地震計、回転地震計といった観測装置に用いる事も可能である。これらは水平方向に比較して技術的難易度が高いと予想されるが、磁気浮上体の鉛直方向の運動を検出する(すなわち、鉛直方

向の加速度計や重力計を実現するための)磁石形状や配置を設計するため(i)と同様に数値モデルを開発する。適度な周期を実現するための条件をモデルから割り出し、それに基づいた重力計の特性をシミュレートする。本研究では特に実測と比較してモデルの妥当性を検証するために、実在する超伝導重力計(完全反磁性体)についてのシミュレーションを行う。このようなシミュレーション手法を確立して、磁気浮上を用いた傾斜以外の自由度の慣性センサーを将来的に展開するための基礎技術を検証することが本研究の二つ目の柱である。

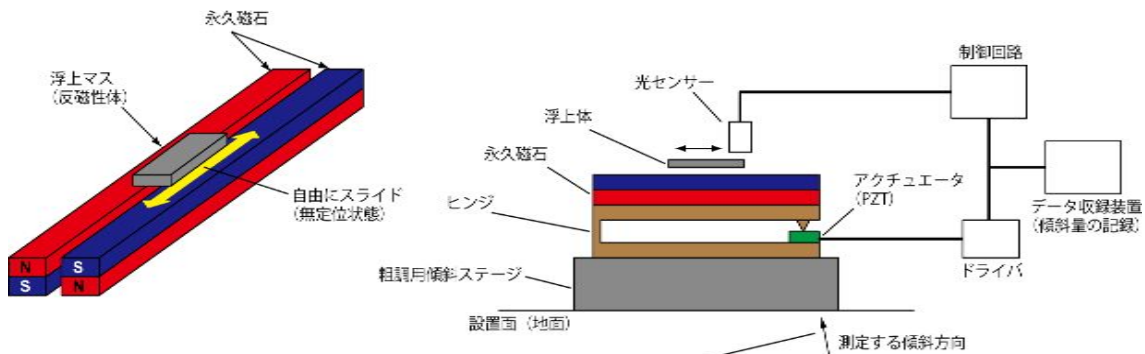


図1 反磁性体を用いた長周期振り子(左)と、それを応用した傾斜計(右)の概念図
永久磁石による「レール」上に反磁性体を浮上させる。計測レンジの確保と高感度化のために浮上体の位置制御を行う。

4. 研究成果

傾斜計の試作を目標にした技術開発については、前段(i)の取り組みとして、半解析的な磁場モデルを作成した。モデルの妥当性については、実際に0.5 Hz程度の水平共振周波数を持つ磁気浮上系を作成して浮上高さ等を計算と比較することや、磁束密度を実測することにより検証した(図2)。このモデルを用いて、反磁性体(熱分解カーボン)の形状や永久磁石(ネオジム磁石)の形状、配置等の組み合わせを変えたときの浮上体の力学特性の見積もりを行い、試作傾斜計の磁気浮上部分の設計を行った。また、系の安定性等の温度依存性を簡単に見積もり、数程度の温度変化では浮上体の特性は大きく変わらないことを示した。ただし、この計算は反磁性体の磁気特性の温度依存性が不明であったため、類似する物体から推定した適当な仮定に基づいている。(ii)については、LEDとフォトトランジスタを用いた簡易なシャドーセンサーを作成して性能評価を行い、試作傾斜計に用いるには十分な $10e-8$ m/rHz程度の分解能があることを確認した。また、将来的に分解能を向上させるために、レーザーまたはSLD光源とフォトダイオードの組み合わせによる位置センサーについても検討した。(iii)については、(i)のモデル計算に基づいて磁気浮上系を製作した。その際、非着磁性が求められる永久磁石周辺には、3Dプリンタを用いて製作したプラスチック(ABSなど)製の部品を使用した。また、その他の機械系も設計して市販の piezoelectric actuator と組み合わせることにより傾斜プラットフォームを製作し、磁気浮上部分と組み合わせることにより傾斜計を試作した(図3)。試作傾斜計の応答や制御特性について測定とモデルに基づく推定を行った。それを受けて適当なアナログ制御回路を作製して制御を試みた結果、数十秒の短時間の制御には成功した。しかし時間経過に伴い制御系が発振する問題が生じた。これについては研究期間中に完全には解決できなかったが、問題が生じた原因としては以下のような可能性が推定される。(a)浮上体が制御系の設計にあたって仮定した調和振動子とは異なる周波数応答をしている(モデル精度の問題)、(b)制御ゲインが不足しているか外乱(空気の流れなど)の影響が予想よりも大きい。(c)静電気等、想定していない要素の影響など。研究期間終了後もこれらの原因を検証して問題解決に引き続き取り組み、長期安定な制御を実現して傾斜測定を行う予定である。

有限要素モデルを用いたシミュレーションについては、すでに実用化された磁気浮上式重力計である超伝導重力計に関するシミュレーションを行い、実測と比較することによってその精度を評価して手法の有効性を検証した。具体的には、石垣島で稼働していたCT型036号機に見られる特徴的な挙動を解釈するために、有限要素法による磁気浮上の数値シミュレーションを行った。汎用の有限要素法ソフトウェアであるANSYSを用い、実際の重力センサーになるべく近い系を再現することにより、浮上している超伝導球が感じるポテンシャルの展開係数を計算した(図4)。その結果、石垣島の重力計に対して実際に測定された値とよく一致する結果が得られた。このことは、実測結果の正しさを示すだけでなく、磁気浮上式センサーの開発における有限要素法によるシミュレーションの有効性を示していると考えられ、今後の装置開発に応用できる手法の確率に成功したといえる。

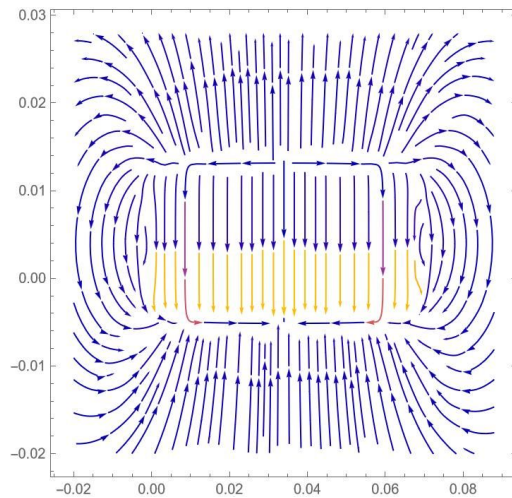


図2 半解析モデルによる永久磁石の作る磁場の計算結果

実際に試作傾斜計に用いたネオジウム磁石（中央に配置）による磁場（断面図）。磁石表面の磁場分布はガウスメーターによる計測とほぼ一致することを確認した。

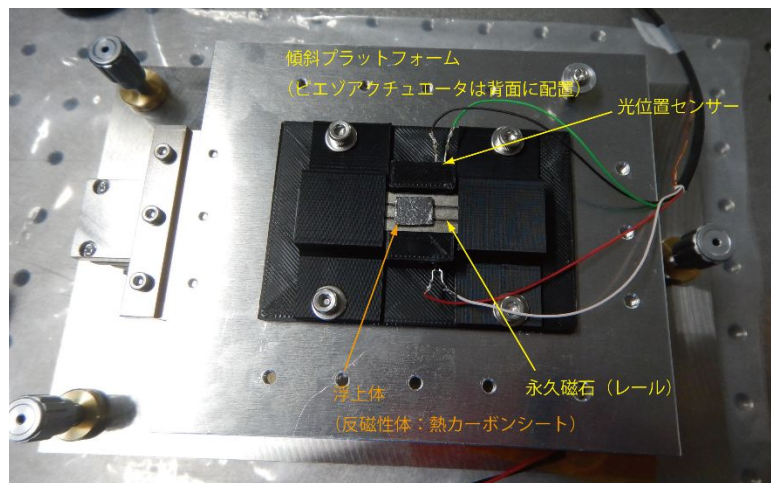


図3 傾斜計試作機

中央の磁気浮上部分の黒い部品は磁場を乱さないよう 3D プリンタを用いて樹脂で製作した。

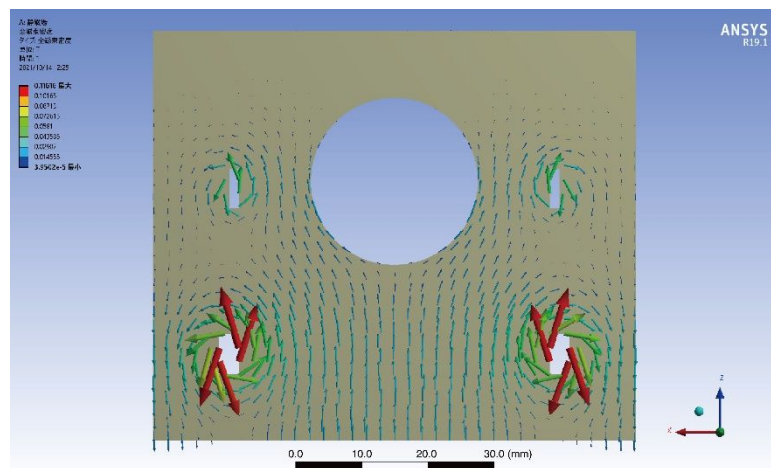


図4 超伝導重力計の重力センサーの断面図

ANSYS によって計算された、全磁束密度を示している。コイルの電流が生み出す磁場が超伝導球の内部に入ることができず、球の表面に沿って磁束が伸びている様子が再現されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 今西祐一、高森昭光	4. 巻 96
2. 論文標題 超伝導重力計における磁気浮上の有限要素法によるシミュレーション	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 東京大学地震研究所彙報	6. 最初と最後の頁 29-37
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15083/0002003430	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 Imanishi, Y., Nawa, K., Tamura, Y., and Ikeda, H.	4. 巻 74
2. 論文標題 Effects of vertical nonlinearity on the superconducting gravimeter CT #036 at Ishigakijima, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth Planets Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-022-01609-2	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 今西 祐一、名和 一成、田村 良明、池田 博
2. 発表標題 超伝導重力計の重力センサーにおける高次項の効果について
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今西 祐一、高森昭光
2. 発表標題 超伝導重力計における磁気浮上の有限要素法によるシミュレーション
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022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
研究 分担 者	今西 祐一 (Imanishi Yuichi) (30260516)	東京大学・地震研究所・准教授 (12601)	

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