

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26610139

研究課題名(和文)反磁性体を用いた磁気浮上式重力計の開発

研究課題名(英文)Development of a gravimeter based on magnetic levitation with diamagnets

研究代表者

今西 祐一(Imanishi, Yuichi)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：30260516

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文):機械的なバネを用いた重力計の欠点を克服するため、反磁性体を利用した磁気浮上式重力計の開発を目指した。ネオジウム磁石と熱分解カーボンを組み合わせた系について、有限要素法による磁場解析を行い、系の力学的、電磁気学的な特性を調べた。その結果、重力センサーの基本デザインとして有望であることが確認された。また、完全反磁性体を用いた磁気浮上式重力計としてすでに実用化されている超伝導重力計について、水平加速度の入力に対する重力センサーの応答を詳細に調べ、水平方向の固有振動数が3Hz程度であることを示した。

研究成果の概要(英文):In order to overcome the difficulties in gravimeters based on mechanical spring suspension, possibilities of a gravimeter based on magnetic suspension using diamagnets are investigated. A finite element method analysis on the system consisting of Neodimium magnets and pyrolytic carbon was conducted for its mechanical and electromagnetic properties. As a result, it was found that this system can be a good candidate as the basic principle of gravity sensors using magnetic suspension. The superconducting gravimeter, as one of the realizations of magnetic-suspension-type gravimeters, was also studied for its response to horizontal acceleration. It was shown that the mechanical eigenfrequency of the superconducting gravimeter CT-36 in the horizontal direction is approximately 3 Hz.

研究分野：測地学

キーワード：磁気浮上 重力計

1. 研究開始当初の背景

絶対重力計を除き、「重力計」と呼ばれるもののほとんどは、基本的には同一の原理、つまり、バネでおもりをつるしてバランスさせ、その位置の変化を検出することで重力の時間/空間変化を測定するという原理に基づいている。しかし、機械的なバネにはさまざまな問題があり、高い精度と安定性を実現することは難しい。アメリカ GWR 社の超伝導重力計においては、磁場の中で超伝導体を浮上させることでスプリング重力計と力学的に等価な状態を実現し、非常に高い精度と安定性が達成されている。しかし超伝導重力計の動作には極低温の環境が必須であり、大掛かりな装置と電気代などのランニングコストが必要となる。磁気浮上を用いながら少しでも冷却の負荷を軽減できないだろうか、というのが本研究の動機である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超伝導体（完全反磁性）ではない通常の反磁性体を用いて、磁気浮上を利用した重力計を開発することである。スプリング式重力計に特有の欠点を克服し、なおかつ超伝導重力計の扱いにくさや高コストを改善したような新しい重力計を開発することができれば、重力観測の現場におけるインパクトは非常に大きいと考えられる。一般に、静的な磁場で永久磁石を安定して浮上させることは不可能であることが証明されている（アンショーの定理）が、これは反磁性体には適用されない。永久磁石の浮上を反磁性体によって安定化させることもできるし、反磁性体そのものを磁場中で安定して浮上させることもできる。いったん磁気浮上力と重力とが安定してつりあった状態が実現されれば、あとはそこに位置検出を組み合わせれば、非接触方式による重力計ができあがるわけである。さらに、浮上式のメリットを利用して、上下成分のみならず水平成分も測定する3成分加速度計にも発展できる可能性がある。

3. 研究の方法

反磁性体を用いた磁気浮上式重力計の基本設計を考察するため、シミュレーションソフトウェアによる有限要素法の数値計算を行った。シミュレーションでは、系の特性を自在に制御することができるので、実物に即して手探りの作り込むよりも効率的と考えられる。磁気浮上式重力計として有用となるために最低限必要な条件は、浮上体にかかる重力とちょうどバランスするような浮上力が得られることと、浮上体が中心軸から水平方向に変位したときに中心方向に向かって復元力がはたらくことである。浮上体にかかる力は、磁場のマックスウェル応力によるものであり、これは磁場の成分から計算することができる。重力計としての感度を高くするためには、系の固有周波数を低くするよう

にパラメタを最適化することが必要である。

これと並行して、超伝導重力計における磁気浮上の特性について詳しく調べた。超伝導重力計は、磁気浮上によるサスペンションを重力計として実現したものであり、本研究における開発にとっては一つのリファレンスとなるべきものである。国立天文台 VERA 石垣島観測局（沖縄県石垣島）に設置された超伝導重力計 CT-36 は、近傍にある VLBI アンテナが向きを変えるときに発生する水平振動の影響を受け、特徴的なノイズが発生する。これを、超伝導重力計の重力センサーに水平方向の加速度を与えるという一種の実験になっていると見なし、このデータから超伝導重力計における磁気浮上の特性を詳しく調べた。

4. 研究成果

(1) 重力計として実用化できそうな、反磁性体を用いた磁気浮上の方法として、2つの形態を考えた。その第一のものは、永久磁石が作る静的な磁場により、反磁性体を浮上させるというものである。このとき、反磁性体は「ダイナミックに磁石に反発する物体」としての機能を果たしており、永久磁石で永久磁石を安定して浮上させることが不可能だという制約（アンショーの定理）から逃れることができる。このような系の実際のサンプルとして、ネオジウム（ネオジミウム）磁石を複数個接合したものの上に、熱分解カーボンのシートを置いたものを用意した（図1）。ネオジウム磁石は、極性が互い違いになるような（チェッカーボードのような）形で4個を平面的に接合した。熱分解カーボンは円形および正方形の小さな切片に分割した。これを磁石の上ののせたところ、そのまま安定して浮上することが確認できた。熱分解カーボンの大きさ、厚さを何通か試したところ、かなり広い範囲で安定して浮上させることができることがわかった。安定して浮上する位置は必ず4個の磁石の境界の上であり、磁石上面からの浮上している高さは1mm程度であった。直接接触するか、全体を揺らすかして、熱分解カーボンに力を加えると、上下および水平方向に見えないバネで保持されたかの



図1 4個のネオジウム磁石の上で安定して浮上する熱分解カーボン。

ような挙動をした。また、正方形の熱分解カーボンを使った場合、その頂点が磁石の境界線のほうを向いた形で安定しようとすることもわかった。これは、反磁性体が磁石に反発し、磁力の強い部分からできるだけ離れようとするものの表れだと考えられる。以上の観察から、この系は上下および水平方向に力学的に安定した状態にあり、機械的なバネの代替として有効であることが推測された。

(2) (1)で述べた系の力学的な性質を詳しく調べるため、有限要素法による数値シミュレーションを実施した。計算には、有限要素法ソフトウェアであるANSYSを使用した。実物に合わせて系のジオメトリを構築し、ネオジム磁石の残留磁束密度および保磁力としては標準的な値を設定した。境界条件としては、十分に離れた位置に円筒または直方体の包含を置き、そこでの平行磁束という条件を課した。4個の磁石の境界の上に熱分解カーボンを置き、周辺（空気）部分の磁束密度か

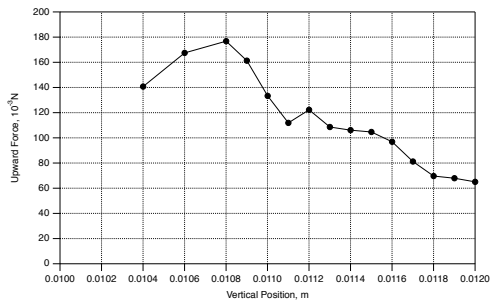


図2 反磁性体にかかる上下方向の力。横軸は磁石下面からの高さを示す。

ら Maxwell 応力を計算した。熱分解カーボンの位置は、上下および水平方向にさまざまに変化させ、それぞれの場合にかかる合力を計算した。

熱分解カーボンの透磁率は実際には -0.0004 程度であり、比透磁率にすれば 0.9996 程度である。この値を計算に入れると、浮上力がほとんど発生しないという結果となった。反磁性という性質は微弱な効果であり、ここで使用しているソフトウェア上でこれによる浮上力を再現するためには、磁化率を -0.05 程度と仮定しなければならないことがわかった。これは非現実的な仮定であるが、浮上力と復元力の定性的な特性を理解するためには有効であると考えられた。

このようにして計算された反磁性体にかかる力のうち、上下方向の成分を図2に示す。上下方向の力（浮上力）は、磁石に近いほど大きくなるのが推定されるが、ここでの計算では、磁石に近づけすぎるとかえって小さくなっている。これは、使用しているソフトウェアの制約により有限要素法のメッシュ数に上限があり、磁石と反磁性体の間の薄い空気の層での磁場を正確に再現できていな

いためであると考えられる。磁石の上面 1mm 程度よりも上方においてはそうした問題はなく、重力とつりあうだけの十分な浮上力が得られることがわかる。

次に、水平方向の力を図3に示す。この系が重力計におけるサスペンションとして実用になるためには、上下方向にバランスするだけでなく、水平方向にも安定点が存在することが必要である。反磁性体の水平位置をさまざまに変えて計算を行ったところ、中心点に向かって復元力が働くことが確認された。この力の大きさからポテンシャルの係数を推定し、水平方向の特性周波数を計算したところ、数 Hz 程度となった。これは、非現実的な透磁率の値にもかかわらず、実際の熱分解カーボンを観察した結果ともオーダーでは一致している。このように水平方向にも復元力が働く状態になっていることは、この系が上下方向のみならず水平方向の加速度センサーとしても応用可能であることを意味しており、それは機械的なバネによる従来の加速度計では実現不可能である。

このようにして、永久磁石の上に反磁性体を浮上させるという系は、加速度センサーを製作するためのベースとしては力学的に理想的であることが、数値シミュレーションによって確認された。超伝導重力計の重力センサーも、超伝導コイルが作る磁場によって超伝導体（完全反磁性体）が浮上しているという意味で、このような系の範疇に属するとみなすことができる。ただし、超伝導重力計の場合は上下成分のみを利用しており、構造上、水平方向の加速度を計測することは困難であると考えられる。

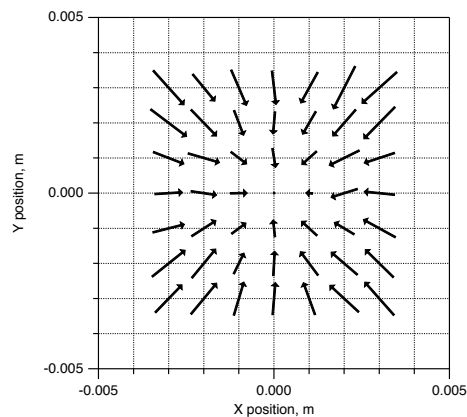


図3 反磁性体にかかる水平方向の復元力。原点は4つの磁石の境界線に対応する。

(3) 反磁性体を用いた磁気浮上の第二の方法は、永久磁石によって永久磁石を浮上させ、それを反磁性体によって安定化するというものである。このような系も比較的容易に実現でき、本研究では当初、このデザインを追求していた。しかし、数値シミュレーション

において技術的な困難に直面したため、途中から第一の方法にきりかえたという経緯がある。デザインの自由度という点ではむしろこちらのほうが高いので、数値シミュレーションの方法を見直し、今後再検討したいと考えている。

(4) 反磁性（完全反磁性）を利用した磁気浮上式重力計としてすでに実用化されている超伝導重力計について、水平加速度が入力されたときの応答を詳しく調べた。具体的には、超伝導重力計 CT-36（国立天文台 VERA 石垣島観測局）の横に地震計を設置し、VLBI アンテナの動きにともなう水平振動の効果を、磁気浮上する球のポテンシャルという観点から定量的に議論した。その結果、VLBI アンテナの動きによる重力信号のノイズは、上下方向と水平方向のカップリングによって発生していることが証明された。さらに、いくつかの仮定のもとで、浮上している超伝導球の水平方向の固有振動数は 3Hz 程度であることがわかった。これらの成果は論文として Imanishi et al. (2018) に発表されている。

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 1 件）

① Imanishi, Y., Nawa, K., Tamura, Y., Ikeda, H., Effects of horizontal acceleration on the superconducting gravimeter CT #036 at Ishigakijima, Japan, Earth Planets Space, 70:9, 2018. (査読あり)

〔学会発表〕（計 3 件）

① 今西祐一, 高森昭光, 反磁性体を用いた相対重力計のデザインについて, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 東京, 2018.

② 今西祐一, 名和一成, 田村良明, 池田博, 石垣島における水平加速度の超伝導重力計観測への影響, 日本測地学会講演会, 瑞浪, 2017.

③ 今西祐一, 名和一成, 田村良明, 池田博, 宮地竹史, 石垣島における水平加速度の超伝導重力計への影響, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 東京, 2015.

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 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 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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今西 祐一 (IMANISHI, Yuichi)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号：30260516

(2) 研究分担者

高森 昭光 (TAKAMORI, Akiteru)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号：00372425

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()