

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06482

研究課題名(和文) 電磁力によるトルク計測技術を用いた万有引力定数の精密測定に関する研究

研究課題名(英文) A study on precise measurement of the Newtonian constant of gravitation using a torque generating method using electromagnetic force

研究代表者

西野 敦洋 (Nishino, Atsuhiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：40415724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、電磁力による超微小トルクの計測技術によって、万有引力定数Gの精密測定を行うことが目的である。まず、電磁力による超微小トルクの計測技術を確立するために、一様な磁場を形成するためのヘルムホルツコイル内に設置された矩形コイルを一定の角速度で回転させた際に生じる誘導起電力と、その矩形コイルの角度位置を精密に評価するための電圧・カウンタ同時計測システム等を開発した。万有引力を発生させるための重力源として鋼球を製作し、質量と長さの国家標準にトレーサブルな評価を行うなどしてG評価の準備を進めることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国際単位系SIにトレーサブルな電磁力による超微小トルク計測技術の確立により、信頼性の高い新たな微小トルク計測機器や高精度粘度計の開発、MEMSデバイスなどの新製品への応用が可能であると考えられる。また、本研究で提案する電磁力による超微小トルク計測技術を用いたGの精密評価は、G評価における全く新しい方法であるので、既存のGの結果における未知の誤差要因の検証に有益であると考えられる。そしてGがより信頼性の高い値に到達することは、重力の逆二乗則の検証などへの貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to precisely measure the Newtonian constant of gravitation "G" by means of the measurement technique of ultra-microscopic torque by a torque generation method using electromagnetic force. In order to establish the measurement technique of ultra-microscopic torque by electromagnetic force, a simultaneous voltage and counter measurement system was developed to evaluate the induced electromotive force generated when the rectangular coil which installed in the Helmholtz coil was rotated, and the angular position of the rectangular coil. Stainless steel balls were used as a gravity source to generate the universal gravitation. They were evaluated their weights and diameters, and their results were traceable to national standards of mass and length. We have been proceeding with the preparation to evaluate the big G.

研究分野：計測工学

キーワード：力学量計測 超精密計測 キップルバランス 電磁力 万有引力定数 基礎物理定数

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、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

自然界の 4 つの力のなかでもっとも身近に感じられる重力は、ニュートンの万有引力の法則によれば、距離 r だけ離れた質量 M と質量 m の球体の間に働く力 F (万有引力) $F = G \cdot Mm/r^2$ で表される。ここで G は万有引力定数と呼ばれる基礎物理定数の一つである。 G は、H. Cavendish (1798 年) によって、ねじればかりの原理に基づいた装置による実験で初めて測定された[1]。ここで、ねじればかりとは、天びん棒などを支えるワイヤなどの弾性体のねじれ角が、天びん棒に加わる偶力の大きさに比例することを利用して、微小な力のモーメント(トルク)を測定する装置であり、現在も G の評価実験において、もっとも多く採用されている方法の一つである。ただし、ねじればかりは、擬弾性効果(弾性ひずみの時間依存性)による系統誤差が含まれるという問題が指摘されている[2]。この問題を回避するために、近年、単純な振り子による重力勾配計などを利用した、ねじればかりによらない方法で G を測定する研究も行われている。このように、ねじればかりによる方法やそれ以外の方法など、過去の様々な G の実験結果を反映し、国際科学会議(ICSU: International Council for Science)の科学技術データ委員会(CODATA: Committee on Data for Science and Technology)が発表した、2014 年の調整による最新の G の推奨値は $6.67408 \times 10^{-11} [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}]$ 、相対拡張不確かさは 4.7×10^{-5} であった。この G の相対拡張不確かさは、他のどの基礎物理定数よりも大きく、重力の精密測定が極めて難しいことを示している(例えばプランク定数 h の相対拡張不確かさは、 1.2×10^{-8} である。)。また、ねじればかりによらない方法で得られた実験結果の多くは、ねじればかりによる方法で得られた実験結果よりも大きな不確かさであることや、CODATA の推奨値よりも大きくずれていることなどが指摘されている。そのため、より信頼できる G に到達するために、新たな G の評価方法が求められている。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、従来計測が不可能であったねじればかりにおいて発生する極めて小さなトルクを、本研究の担当者が発明した電磁力によるトルク計測技術[3]を応用して直接計測し、新しい G の精密評価方法を確立することである。 G の先行研究において、国際度量衡局(BIPM: Bureau international des poids et mesures (仏)、International Bureau of Weights and Measures (英))では、ねじればかりの原理に基づいた G の実験装置で $3 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{m}$ のトルクの発生に成功している[4, 5]。本研究では、電磁力によるトルク計測技術に基づいた方法で、 $1 \times 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{m}$ よりも小さなトルクを精密に発生(計測)することのできる実験装置を開発する。また、万有引力を発生させるための重力源と試験体、試験体を両端に吊るす天びん棒(モーメントアーム)、位置決め装置等により構成される G の実験装置を開発する。そして、電磁力によるトルクの発生装置と万有引力による偶力の発生装置を、剛性の高いシャフトを介して直接接続し、モーメントアーム両端で生じる万有引力によって生じるシャフト周りのトルクを精密に計測することで、 G を評価する。

3. 研究の方法

図 1 に、電磁力によるトルクの発生原理について示す。図 1(a)より、磁束密度 B の一様な磁場内に直交する軸($O-O'$)の周りに回転できる矩形コイル(面積 A 、巻数 N)を設置して、電流 I を供給すると、 $O-O'$ 周りにトルク T_e が発生する。このとき、 T_e は、

$$T_e = NAB I \cos\theta \quad (1)$$

で、表される。 T_e は、矩形コイルの法線ベクトルと B が直交、すなわち $\theta = 90^\circ$ のとき最大となる。

$$T_{e, \max} = NAB I \quad (2)$$

一方、同じ B の一様な磁場内に置かれた同じ矩形コイルを、 $O-O'$ 周りに一定の角速度 ω で回転させたとき、矩形コイルに誘導起電力 V が発生する。このとき、 V は、

$$V = NAB \omega \sin\omega t \quad (3)$$

で、表される。 V は、矩形コイルの法線ベクトルと B が垂直に交わるとき、すなわち $\sin\omega t = 1$ のとき最大となる。

$$V_{\max} = NAB \omega \quad (4)$$

したがって、矩形コイルを貫く全磁束 NAB は、誘導起電力と角速度を測定することで評価できる。そして、(2)、(4)より、回転座標系における力

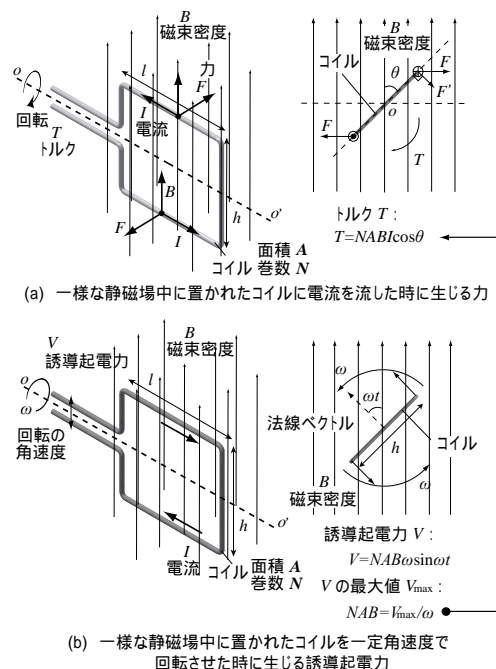


図 1 電磁力によるトルクの発生原理

学的仕事率と電気的工作率の関係は、

$$T_{e_max} \omega = IV_{max} \quad (5)$$

で、表すことができ、電流、電圧、角度位置(角速度)を精密に評価することで、 $O-O'$ 周りのトルクを評価することができる。

図2に、ねじればかりの原理に基づいた万有引力による微小トルク発生装置の概要を示す。本装置は、重力源(質量 M 、直径 d_1)、試験体(質量 m 、直径 d_2)、モーメントアーム(全長 l)、シャフト等により構成されている。2個の試験体は、細いワイヤを用いて、それぞれモーメントアームの両端から吊るされている。モーメントアームは、中心でシャフトに固定されている。重力源は、試験体と重心位置を合わせるために、高さ方向に微調整可能な z 軸ステージ上に設置されている。ここで、重力源と試験体が距離 d だけ離れている場合、その重心間距離 r は、

$$r = d_1/2 + d_2/2 + d \quad (6)$$

である。このとき、重力源と試験体に生じる万有引力 F は、

$$F = G \cdot Mm/r^2 \quad (7)$$

である。 F はモーメントアームの両端において、大きさが同じで向きが反対に作用するため、モーメントアームを支えるシャフトには、力のモーメント(トルク) T_G が生じる。 T_G は、

$$T_G = Fl \quad (8)$$

で表される。この万有引力によって発生する T_G は、極めて小さい。本研究では、電磁力によるトルク計測技術によって 1×10^{-9} N·mよりも小さなトルクを精密に計測する技術を確認し、 T_{e_max} と T_G を釣り合わせることで G を評価するという、新しい G の評価方法を検討する。

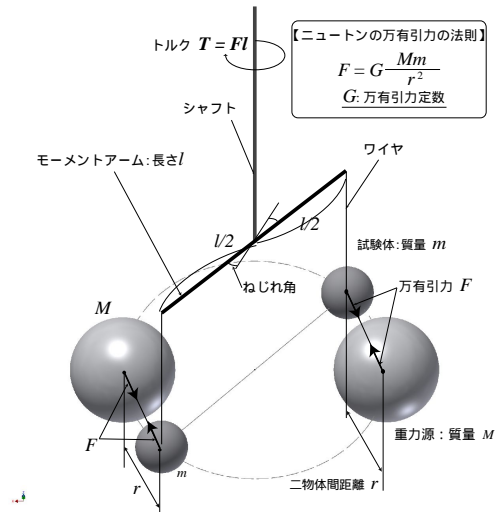


図2 ねじればかりの原理に基づいた万有引力による微小トルク発生装置の概略図

4. 研究成果

図3に、電磁力による超微小トルクの発生装置を示す。本装置は、上部よりステッピングモータ、光学式リードヘッドを等角度分割位置に複数配置した角度計測システム、ヘルムホルツコイル、矩形コイル、スラスト-ラジアル空気軸受、カップリング、トルク変換器、リニアガイド、筐体等で構成されている。

電磁力によるトルクの発生方法では、矩形コイルを貫く全磁束 NAB (N : 矩形コイルの巻数、 A : 矩形コイルの面積、 B : 磁束密度)を評価するために、一様な磁場中で回転する矩形コイルの角速度を評価する必要がある(式(4)参照)。角速度の計測は、「角度」と「時間」からなるため、それぞれ角度標準と時間標準にトレーサブルである必要がある。本研究では、角度の国家標準に採用されている等分割平均法という自己校正方法の原理に基づいた角度計測システムを開発した[6, 7]。図4に自己校正方法の原理に基づいた角度計測システムの概略図(上)及び写真(下)を示す。一般に、円盤状目盛りスケールの回転に対応するパルス信号が示す角度は、軸偏心やエンコーダスケールの問題など様々な理由により真の角度からずれが生じる(角度偏差)。一方、図4に示す自己校正型ロータリーエンコーダの原理では、一つの円盤状目盛りスケールに対して、複数の光学式リードヘッドを等角度分割位置に配置し、それぞれの光学式リードヘッドから出力される信号を解析することによって角度偏差の算出及び補正をすることが可能となる。さらに、角速度 ω で回転する矩形コイルに生じる誘導起電力 V の最大値 V_{max} とその時の角度位置を精密に計測するために、高精度カウンタモジュール及びアナログ入力モジュールで構成されたPXI(PCI eXtensions for Instrumentation)規格に基づいた計測システムを導入し、周波数標準に

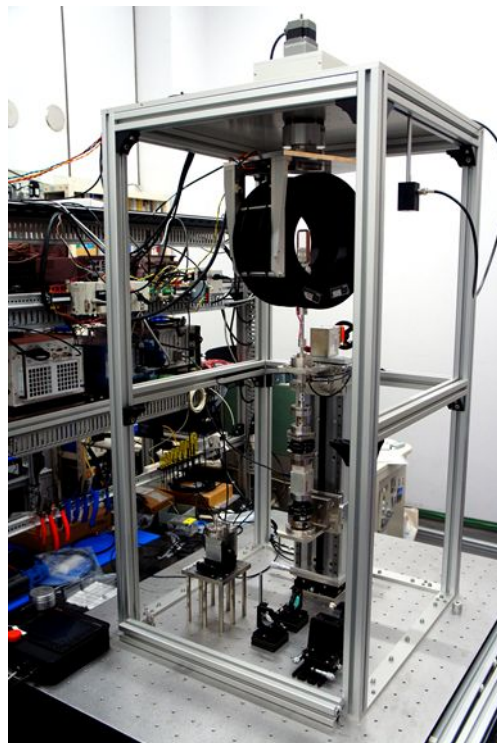


図3 電磁力式トルク発生装置

トレーサブルなルビジウム周波数発振器をリファレンスとしたカウンタ - 電圧の同期計測システムを構築した。

次に、一様な磁場を形成するためにヘルムホルツコイルの設計・製作を行った。開発したヘルムホルツコイルの発生磁場は約 10 mT である。一方、装置が設置されている実験室の地磁気の大さは、おおよそ 50 μ T であり、より精密な一様な磁場を形成するためには、地磁気の影響を低減する必要がある。そこで、本研究では、地磁気の影響を調べるために、半導体レーザ、プログラマブル信号発生器、セシウム蒸気セル等を用い、ゼーマン効果による磁気測定システムを構築した [8]。そして、地磁気の影響をキャンセルするために、装置周りに三軸のヘルムホルツコイルを開発した。これらにより、矩形コイル設置部における地磁気の影響が低減されていることを確認した。

図 5 に重力源 (鋼球) の写真を示す。万有引力を発生させるための重力源及び試験体は、ボールベアリングを元に設計・製作をし、それぞれ質量及び直径について、質量の国家標準及び長さの国家標準にトレーサブルな測定及び不確かさ評価をした。試験体を吊るすためのモーメントアームは、温度変化による長さの変化を低減するために低膨張材を選定して設計・製作し、長さの国家標準にトレーサブルな評価を行った。モーメントアームは中央で直径 8 mm の SUS 製シャフトを用いて固定し、スラスト - ラジアル空気軸受を介して、微小トルク発生装置と接続した。

これら機械的要素及び計測システム等の構築により、万有引力定数を評価するための準備を進めた。今後、得られたデータや評価結果について、学術論文や学会等で発表予定である。

参考文献：

- [1] H. Cavendish, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **88** (1798) 469-526.
- [2] K. Kuroda, *Phys. Rev. Lett.* **75** (1995) 2796.
- [3] 特許第 6479605 号
- [4] T. J. Quinn *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **87** (2011) 111101.
- [5] T. J. Quinn *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **111** (2013) 101102.
- [6] T. Watanabe *et al.*, *Journal of Physics: Conference Series* **13** (2005) 240-245.
- [7] T. Watanabe *et al.*, *Measurement Science and Technology* **25** (2014) 065002.
- [8] M. Kinoshita *et al.*, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **68** (2019) 2274-2279.

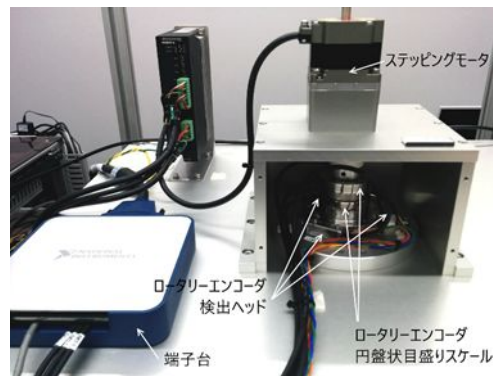
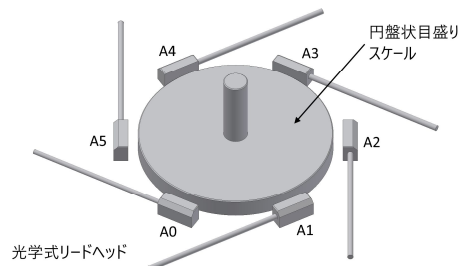


図 4 光学式リードヘッドを等角度分割位置に複数配置した角度計測システム (上) 概略図、(下) 写真



図 5 重力源 (鋼球)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 AtsuhikoNishino, KenichiFujii | 4. 巻 147 |
| 2. 論文標題 Calibration of a torque measuring device using an electromagnetic force torque standard machine | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Measurement | 6. 最初と最後の頁 106821 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.measurement.2019.07.049 | 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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 西野 敦洋 |
| 2. 発表標題 電磁力式トルク標準機における高精度回転位置決め制御システムの開発 |
| 3. 学会等名 第35回センシングフォーラム 計測部門大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Atsuhiko Nishino |
| 2. 発表標題 REALIZATION OF A MICROTORQUE STANDARD BY USING AN ELECTROMAGNETIC FORCE TYPE TORQUE STANDARD MACHINE |
| 3. 学会等名 IMEKO TC3, TC5 and TC22 International Conferences 2017 (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 西野 敦洋, 大串 浩司, 藤井 賢一 |
| 2. 発表標題 電磁力式トルク標準機を用いたJMIF015(TTSG-T102)によるトルクメータ校正方法に関する研究 |
| 3. 学会等名 第34回センシングフォーラム 計測部門大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 西野 敦洋, 藤井 賢一 |
| 2. 発表標題 電磁力式トルク標準機によるJMIF015(TTSG-T102)によるトルクメータ校正方法に関する研究 |
| 3. 学会等名 2017年度計量標準総合センター成果発表会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 西野 敦洋 |
| 2. 発表標題 電磁力式トルク標準機における高精度回転位置決め制御システムの開発 |
| 3. 学会等名 2018年度計量標準総合センター成果発表会 |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計2件

| | |
|-----------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 西野 敦洋 (分担) | 4. 発行年 2017年 |
| 2. 出版社 一般社団法人日本計量機器工業連合会 | 5. 総ページ数 21 |
| 3. 書名 はかる | |

| | |
|---------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 西野 敦洋 (分担) | 4. 発行年 2017年 |
| 2. 出版社 一般社団法人 日本計量振興協会 | 5. 総ページ数 64 |
| 3. 書名 計測標準と計量管理 | |

〔出願〕 計1件

| | | |
|------------------------------------|--------------|--------------------------|
| 産業財産権の名称 電磁力を利用した回転式トルク変換器の校正装置 | 発明者 西野 敦洋 | 権利者 国立研究開発法人産業技術総合研究所 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-126102 | 出願年 2019年 | 国内・外国の別 国内 |

〔取得〕 計1件

| | | |
|---------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 産業財産権の名称 トルク検出機構 | 発明者 西野 敦洋、三上 浩、益子 岳央 | 権利者 国立研究開発法 人産業技術総合 研究所 他 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、6587323 | 取得年 2019年 | 国内・外国の別 国内 |

〔その他〕

| |
|---|
| <p>日刊工業新聞社「技術で未来拓く - 産総研の挑戦 - 電磁力活用 微小トルク計測」 https://www.nikkan.co.jp/articles/view/505403 https://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/research/nikkanko_rensai/pdf/20190207_27_065.pdf</p> <p>計量標準総合センター（NMIJ）：電磁力による微小トルク計測技術の開発 https://unit.aist.go.jp/nmij/public/report/NMIJ_topics/pdf/2017_07_No4.pdf</p> <p>産総研-工学計測標準研究部門-カトルク標準研究グループ https://unit.aist.go.jp/riem/ja/teams/ft-std/index.html</p> <p>カトルク標準研究グループ https://unit.aist.go.jp/riem/ft-std/</p> <p>計量標準総合センター（NMIJ）：カトルク標準研究グループ https://unit.aist.go.jp/riem/ft-std/</p> |
|---|

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 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|