

令和 3 年 8 月 25 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15008

研究課題名（和文）キップルバランス法の原理を応用した微小力の発生技術及び計測技術

研究課題名（英文）Generation and measurement technology of microforce applying the principle of Kibble balance method

研究代表者

Zhu Junfang（朱俊方）（Zhu, Junfang）

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・研究員

研究者番号：70805134

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）：本研究では微小力計測の信頼性を向上させるため、キップルバランス法の原理を応用した電磁力による精密な微小力発生技術・計測技術の開発を目的とする。2019年度は、キップルバランス法の原理に基づいて新たな手法を提案し、磁石の回転運動型の電磁力による微小力発生装置を開発した。2020年度は開発した装置と微小力計を用い、提案手法にある誘導起電力測定モードと力発生モードの二つの計測実験を行い、電磁力による精密な微小力を発生させ・計測することが可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、重力の利用が困難である微小力領域において、電磁相互作用で生じる電磁力により精密な力を発生・計測できることを検証した。その研究成果は、将来的に国内外での幅広い産業利用が期待できる。例えば、医療・食品、バイオテクノロジー、ナノ物質・材料等の幅広い分野で行われている微小力計測の信頼性向上ことに貢献できる。また、重力によらない微小力の発生ができるため、宇宙ステーションのような無重力状態でも力の発生・計測への応用が可能であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we aim to develop a precise microforce generation technology and measurement technology by electromagnetic force that applies the principle of the kibble balance method for improving the reliability of microforce measurement. In 2019, we proposed a new method based on the principle of the kibble balance and developed a microforce generating machine using the rotational motion type electromagnetic force of a pair of neodymium magnets. In 2020, using the developed machine and a microforce transducer, we conducted measurement experiments in the induced electromotive force measurement and the force generation modes, which are in the proposed method. We confirmed that it is possible to generate and measure precise microforce by electromagnetic force using our developed machine.

研究分野：計測工学

キーワード：微小力 微小力計 力計測 キップルバランス 電磁力 精密計測 力計測技術 力発生技術

1. 研究開始当初の背景

近年ではマイクロ・ナノ加工技術の発展により、計測対象が微小になり、医療・食品、バイオテクノロジー、ナノ物質・材料等の幅広い分野で微小力計測が行われるようになってきている。微小力計測は、材料の力学的特性評価や製品の品質管理等において極めて重要であり、その信頼性を確保する必要があるとされている。力計測の信頼性を確保するため、日本の国家計量標準機関として国立研究開発法人産業技術総合研究所の計量標準総合センター (NMIJ) では、力の国家計量標準の開発・高度化・維持・供給を行っている。現在は 10 N から 20 MN までの範囲の力の国家計量標準を維持しており、重力法による力の精密発生装置群を用いて力計を校正して力計測の信頼性を確保している。一方、10 N 未満の力計測に対してその信頼性の確保はまだ不十分である。現在申請者は重力法による精密力発生装置を開発しており、10 mN から 2 N までの範囲での力計を校正し、力計測の信頼性を確保しようとしている[1]。一方、ミリニュートンレベルよりさらに微小な力領域では、質量の国家標準の相対不確かさが大きくなる、質量標準の下限値に制限がある、力を実現するおもりが小さくなり過ぎて装置構成が上手くいかない、等の理由により、重力法による微小力の発生手法は限界がある。そこで、重力によらない手法により精密微小力発生装置を開発する必要があった。

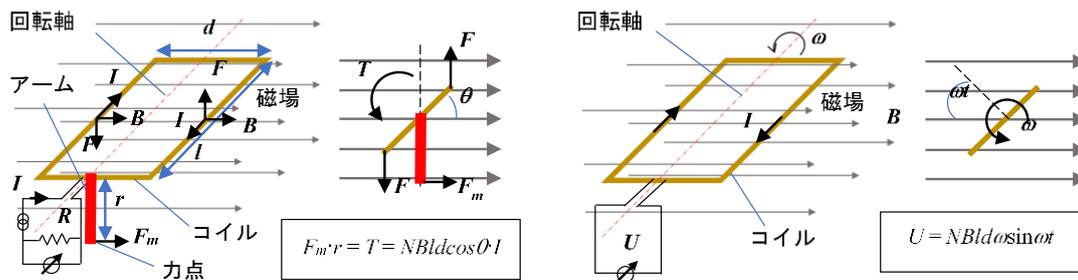
「重力法で実現できないような微小力領域において、どのように精密な力を発生させれば良いか」という学術的問いに対して、本研究では、重力によらない微小力の発生手法として電磁相互作用で生じる電磁力に着目した。しかし、精密に電磁力を発生させるには、磁束密度や導体の形状を精密に測定しなければならないが、現状としては困難である。この問題を解決するために、申請者はプランク定数の精密測定に用いるキップルバランス法 (従来法) の原理を参考にした。プランク定数は質量の単位であるキログラムの新定義となる予定がある。従来法は 1976 年に英国の国家計量標準機関である英国物理学研究 (NPL) によって提案されたものであり、磁場に置かれている導体に電流を流した際の電気的仕事率と、ある速度で導体を動かした際の力学的仕事率を釣り合わせる手法である[2, 3]。この手法では、測定困難な磁束密度及びコイルの形状の測定は不要になる。一方、磁石の形状や釣合い機構等の構造上の問題で、均一な磁場を形成することやコイルの軸方向の一定速度直線運動が困難であるという課題もある。そのため、まだ従来法を用いた微小力の発生技術・計測技術に関する研究は報告されていない。

2. 研究の目的

本研究は微小力計測の信頼性を向上させるため、キップルバランス法の原理を応用した電磁力による精密な微小力の発生技術・計測技術の確立を目的とする。まずは、キップルバランス法の原理を参考にし、新たな手法を提案し、その手法に基づき、電磁力式の微小力発生装置を開発し、構築する。次に、電磁力による微小力発生装置を用いて、誘導起電力の測定実験や微小力計への負荷実験を実施し、測定結果を検討する。このようにして微小力の発生技術・計測技術を確立する。

3. 研究の方法

申請者は、同研究機関の研究者が開発した電磁力式トルク発生装置[4]の構造を参考に、図 1 に示すような手法を提案する。本手法には、二つのモードがあり、それぞれ力発生モードと誘導起電力測定モードと称す。力発生モードでは、図 1 (a) に示すように、磁束密度 B の磁場中にある巻数 N 、長さ l 、幅 d の矩形コイルに電流 I を流すと、電磁力 $F = NBI d \cos \theta$ が発生し、コイルの回転軸を中心にトルク $T = NBld \cos \theta \cdot I$ が働くことになる。微小力計への負荷 F_m の力点を作るため、矩形コイルの中心からアームを付け、中心から力点の距離 (有効半径) r を精密に測定する。力の釣合いにより、 $F_m \cdot r = T = NBld \cos \theta \cdot I$ が成り立つ。誘導起電力測定モードでは、図 1 (b) に示すように、矩形コイルを一定の角速度 ω で磁場を切るように回転すると、誘導起電力 $U (=NBld \omega \sin \theta)$ が発生する。両モードにおいて磁束線と矩形コイルを平行になるとき、最大の F_m と U が生じ、 $NBld$ を不変量としたら、 $F_m = UI / (\omega r)$ が成り立つ。す



(a) 力発生モード

(b) 誘導起電力測定モード

図 1 本提案の電磁力による微小力の発生原理

なわち、力 F_m は電圧 U 、電流 I 、角速度 ω 並びに有効半径 r から求められる。なお、矩形コイルの面積 $A(=ld)$ であるため、不変量を NBA としても用いる。このようにして、電磁力による微小力の発生技術・計測技術を開発していくことができる。

4. 研究成果

(1) 2019年度は、キップルバランス法の原理に基づいて新たな手法を提案し、磁石の回転運動型の電磁力による微小力発生装置を研究開発した。開発された電磁力式微小力発生装置の設計図を図2、装置の写真を図3に示す。本装置はサーボモータ、ロータリーエンコーダ、ネオジウム磁石、矩形コイル、アーム、エアベアリング、負荷枠、釣合いおもり、レーザ変位計、並びに昇降機構により構成されている。サーボモータ、ロータリーエンコーダ、ネオジウム磁石をシャフト等の部品を通じて一体化させている。矩形コイル、アーム、負荷枠と釣合いおもりが連結している。エアベアリングはアームの支点として使用している。レーザ変位計はアームの傾斜変位をモニターする。昇降機構は力計の設置に使用されている。誘導起電力測定モードでは、ネオジウム磁石がサーボモータにより回転させ、矩形コイルの磁場を切る相対運動を実現し、誘導起電力を発生させる。ロータリーエンコーダでネオジウム磁石の角度を計測する。測定結果より磁束密度 B 矩形コイルの巻数 N 、面積 $A(=ld)$ の積である不変量 NBA を評価する。コイル力発生モードでは、磁石と矩形コイルを図2に示す位置にし、力の大きさにより既知の電流を矩形コイルに流し、力を発生させ、力計に負荷する。この内容をまとめた論文が国際誌 ACTA IMEKO に掲載された[5]。

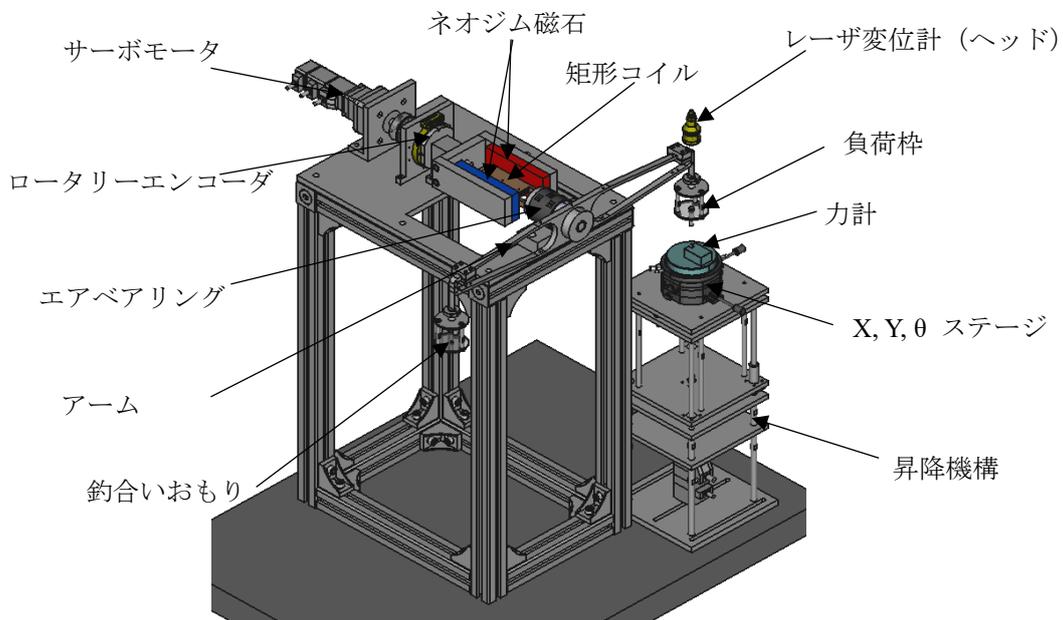


図2 電磁力式微小力発生装置の設計図

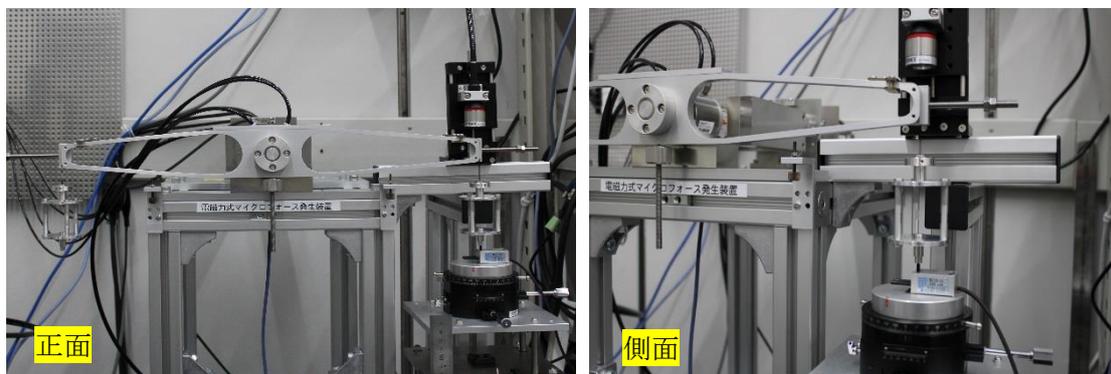


図3 電磁力式微小力発生装置の写真

(2) 2020年度は開発した装置と微小力計を用い、提案手法にある誘導起電力測定モードと力発生モードの二つの計測実験を行い、電磁力による精密な微小力を発生させ・計測することが可能にした。まずは誘導起電力測定モードでは、別途整備の誘導起電力とロータリーエンコーダの角度を同期計測できるシステムを用い、実験を行った。その結果を図4に示す。別途整備の誘導起電力、ロータリーエンコ

ーダの角度と運動経過時間の測定結果を解析し、誘導起電力の最大値、磁石の角速度を求め、図4に示す誘導起電力と角速度の関係より不変量である NBA を評価した。その勾配を NBA の代表値として使用する。各測定点よりの相対偏差は約 $\pm 6.0 \times 10^{-5}$ 以内であると算出した。また、 NBA の温度、磁石回転方向やアームの傾斜位置により影響を評価した。不変量である NBA の温度による影響が他より大きいと分かった。力発生モードの直前に、不変量である NBA を評価する必要があると考えられる。次に、力発生モードでは、10 mN、20 mN の力を発生させ、微小力計に負荷し、測定を行った。測定結果より力計の設置変更による再現性 b と力計の設置変更しない繰返し性 b' を評価し、良好な結果 (10^{-4}) を得た。図5に示す。これらの測定結果をまとめ、国際学術論文誌に投稿した。

また、本装置の精度をより高度化するため、磁石の磁束密度の温度特性、不変量である NBA の温度特性を定量的に評価した。磁石の温度が高くなると、磁石の磁束密度、不変量である NBA が小さくなることを確認した。本装置の精度に影響する主な要因である測定中の器物温度を安定させるため、温度制御システムを開発した。今後は温度制御システムを稼働し、本装置の精度の高度化を図りたい。この内容を国際研究集会にて発表した[6]。

さらに、微小力計測の信頼性を確保するため、精密な微小力を発生させる微小力発生装置と共に、精密な微小力計が必要である。別途に金属箔ひずみゲージ式力計と比して高感度となるピエゾ抵抗式力計（微小力計）を試作した。本装置を用い、ピエゾ抵抗式力計の無負荷における温度感度、クリープ、非直線性、設置変更しない繰返し性と設置変更に伴う再現性の評価を試みた。同様の金属箔ひずみゲージ式力計と比べ、試作したピエゾ抵抗式力計の性能は優れなかったが、今後は要因を検討して性能改善につなげたい。この内容を国内学会にて発表した[7]。

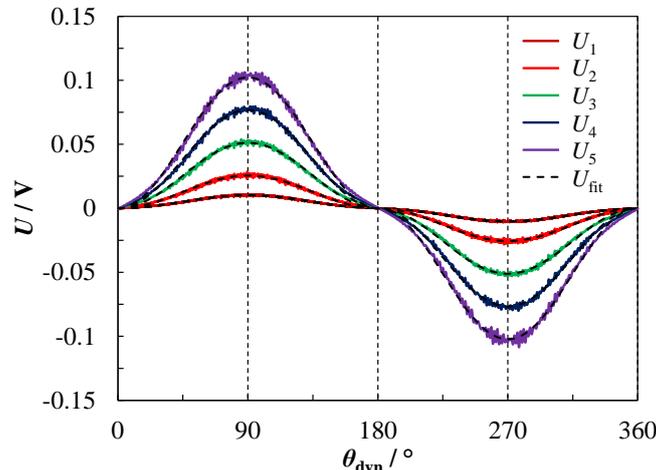


図4 誘導起電力と磁石角度の同時計測結果

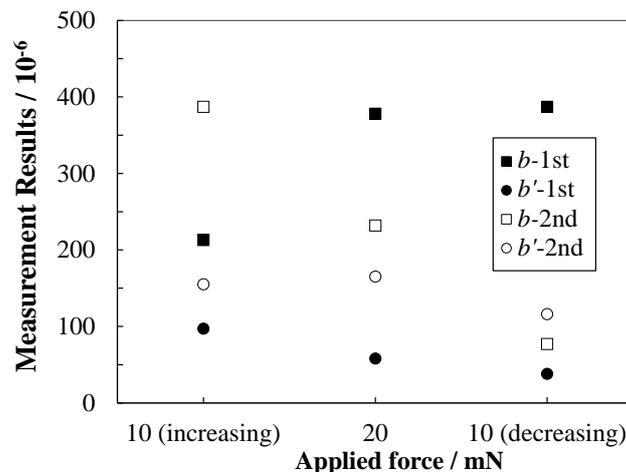


図5 再現性 b と繰返し性 b' の評価結果

<引用文献>

- [1]朱俊方、林敏行、西野敦洋、大串浩司: 第35回センシングフォーラム (2018.08).
- [2] B. P. Kibble: Atomic Masses and Fundamental Constants 5 (1976) 545-551.

- [3] B. P. Kibble, et.al.: Metrologia 27 -4 (1990) 173-192.
- [4] A. Nishino, et.al.: Measurement Science and Technology, 28 -2 (2017), 025005.
- [5] J.F. Zhu, et.al.: ACTA IMEKO, 9 -5 (2020), 109-112.
- [6] J.F. Zhu, et.al.: XXIII IMEKO World Congress (IMEKO2021) (2021.08~2021.09).
- [7] 朱俊方、林敏行、大串浩司: 第 38 回センシングフォーラム (2021.09).

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 1件）

1. 著者名 Zhu Junfang, Hayashi Toshiyuki, Nishino Atsuhiko, and Ogushi Koji	4. 巻 9
2. 論文標題 New microforce generating machine using electromagnetic force	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACTA IMEKO	6. 最初と最後の頁 109 ~ 112
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21014/acta_imeko.v9i5.950	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 1件）

1. 発表者名 Zhu Junfang, Hayashi Toshiyuki, and Ogushi Koji
2. 発表標題 Temperature dependence for improving the accuracy of an electromagnetic microforce generating machine
3. 学会等名 XXIII IMEKO World Congress (IMEKO2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朱俊方, 林敏行, 大串浩司
2. 発表標題 電磁力式微小力発生装置によるピエゾ抵抗式力計の評価
3. 学会等名 第38回センシングフォーラム
4. 発表年 2021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
---------	---------