

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14176

研究課題名（和文）キップルバランス法の原理を応用した小型直動式微小力発生装置の開発

研究課題名（英文）Development of a compact linear-motion-type microforce generating machine applying the principle of the 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・主任研究員

研究者番号：70805134

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、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精密な直動型電磁力式微小力装置の開発を目指す。2021年度は、キップルバランス法の原理を応用できる新たな装置の構造を提案し、磁石の直線運動型の電磁力式微小力発生装置（機械システム）を構築した。2022年度は、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モードの計測制御システムの構築（計測制御プログラムの開発）や試運転・調整を進めた。

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、キップルバランス法の原理を応用した、直動型電磁力式微小力発生装置を開発した。電磁力により精密な力を発生・計測できるように進めた。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、微小力の国家計量標準の立上げに応用し、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、重力によらない電磁力の発生ができるため、宇宙開発分野で無重力状態で力発生・計測が必要な実験が可能になる。

研究成果の概要（英文）：In this research, to improve the reliability of microforce measurement applied in various fields such as medicine, food, biotechnology, nano-substances, and materials, we developed a precise linear-motion type microforce generating machine using electromagnetic force that applies the principle of the Kibble balance method. In FY 2021, we proposed the measurement method and structure of the new machine. We also constructed the mechanical system of the machine. In FY 2022, we proceeded with the construction (development of the measurement control program) of the measurement control systems for the two modes of the induced electromotive force measurement mode and the microforce generation mode in the proposed measurement method, as well as trial operation and adjustment.

研究分野：計測工学

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

1. 研究開始当初の背景

近年、マイクロ・ナノテクノロジーの進歩により、材料の力学的特性等の要評価対象が微小又は軟質になり、医療・食品、バイオテクノロジー、ナノ物質・材料等の分野では、マイクロニュートン( $\mu\text{N}$ )、ナノニュートン( $\text{nN}$ )レベルの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(NMI)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/AIST)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100 mN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。特に、申請者は重力法による精密力発生装置を開発し、100 mNから2 Nまでの範囲において定格容量1 N及び2 Nの力計の精密校正を実現し、力計測の信頼性を確保した<sup>1,2)</sup>。一方、100 mN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。10 mNから100 mNまでの範囲では、現在申請者は上記の重力法による精密力発生装置を用い、この範囲に適応する定格容量の力計の精密な校正を試みている。ミリニュートン( $\text{mN}$ )レベルよりさらに微小な $\mu\text{N}$ 、 $\text{nN}$ レベルの力領域では、質量の国家計量標準の相対不確かさが大きくなる、質量標準の下限値(10  $\mu\text{N}$ 程度)に制限がある、微小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な微小力発生装置を開発する必要がある。

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、精密な微小力の発生技術・計測技術の確立を目的とし、直線運動を容易に実現する小型直動式の新たな電磁式微小力発生装置を考案して開発する。

3. 研究の方法

「重力法で実現困難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、申請者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、申請者はキログラムの新たな定義の基準であるプランク定数の決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。従来法は1976年に英国のNMIである英国物理学研究所(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<sup>3,4)</sup>。図1に示すように、この手法では力発生モードと誘導起電力測定モードの二つのモードがある。力発生モードでは、磁束密度 $B$ の磁場中にある電流 $I$ を流した長さ $l$ のコイルに作用するローレンツ力 $F(=BIl)$ と支持枠に加えられた荷重 $W$ を釣り合わせ、荷重 $W$ と電流 $I$ の関係 $W=F=BIl$ を決定する。誘導起電力測定モードでは、コイルを一定の速度 $v$ で磁場に対して垂直に動かし、この時にコイルに発生した誘導起電力 $U$ と速度 $v$ の関係 $U=Blv$ を決定する。両モードにおいて、 $Bl$ を装置の固有値(不変量)と仮定すると、式 $W=F=UI/v$ が成り立つ。従来法を用いることで、測定困難な磁束密度及びコイルの長さの測定は不要になる。一方、釣り合い機構の支点到に生じる摩擦や、揺動運動による最大変位量の制約のため、微小力への応用や、高精度化に必要な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。

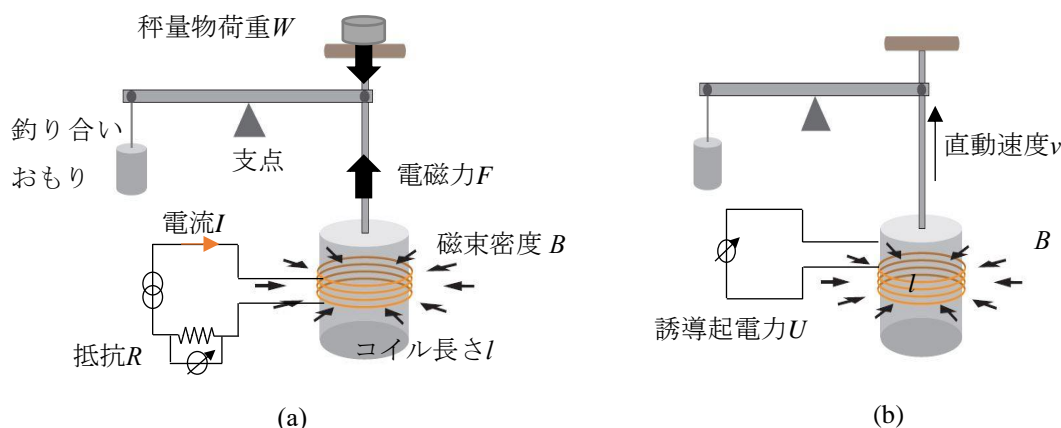


図1 キップルバランス法(従来法)概念図 (a)力発生モード、(b)誘導起電力測定モード

上記の課題である直線運動を容易に実現する小型直動式の新たな構造を提案する。本提案の概略図と装置設計図を図2に示す。釣り合い機構として、負荷枠、コイルジグ、コイル等の自重  $W$  を液体中に浮力体の浮力  $F_{\text{buoy}}$  により打ち消す。粘度標準液のような低粘度ニュートン流体(水)を使用することで、従来法の支点による摩擦を極めて低減することから、 $\mu\text{N}$  レベルの力発生に適用する高感度を実現できる。力発生モードでは、コイルに発生する電磁力を負荷枠より微小力計に負荷する。高精度なリニアエンコーダを用い、負荷枠の変位をモニタし、位置決め機構によりコイルの位置を制御する。接触式のリニアガイドによる摩擦力をなくし精密に負荷するため、無接触のリニアエアガイドを導入する。また、自重と浮力が完全に釣り合わない場合には、天秤のゼロリセット機能のように、コイルに微小電流を流し、測定系の初期オフセットを行う。誘導起電力測定モードでは、クランプ機構でコイルを固定させ、リニアモータにより磁石の軸方向の一定速度直線運動を実現する。高精度なリニアエンコーダで永久磁石の位置を計測する。本提案では、従来法でのコイルの運動の代わりに、永久磁石を運動させることにより、精密測定ためのストロークを確保し、装置の固有値  $BI$  の決定に必要な一定速度直線運動実現が容易になる。

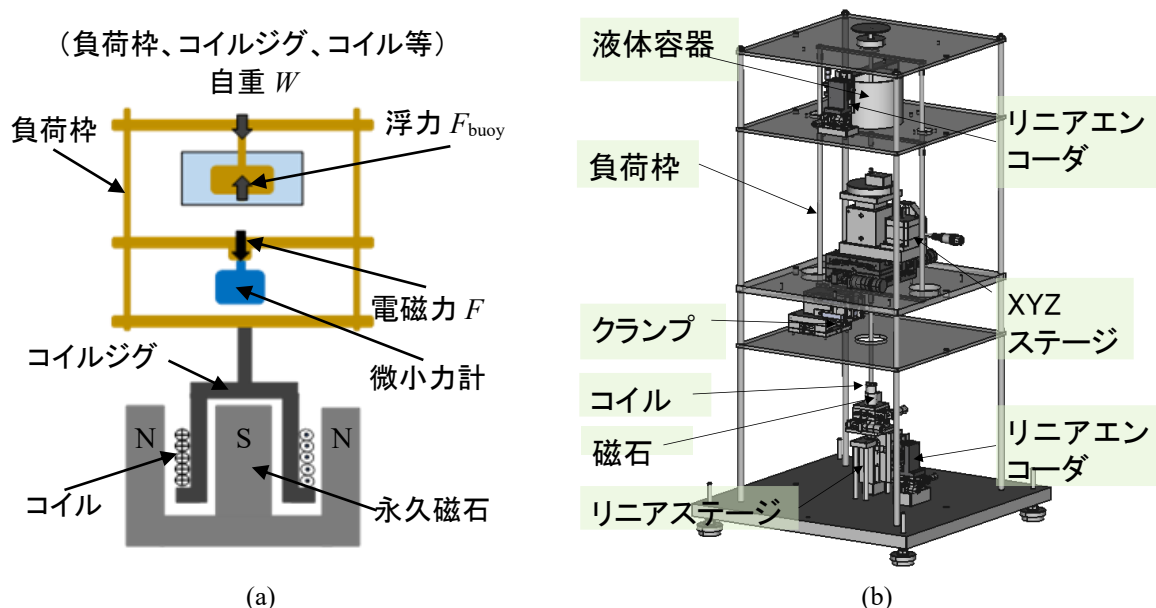


図2 本提案の微小力の発生装置 (a) 概略図、(b) 設計図

#### 4. 研究成果

本研究は、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、磁石の直線運動型の電磁力による微小力発生装置を研究開発した。上記の研究方法に記述した案で研究を進めた。図2に示されている装置(機械システム)を設計した。実際に開発された直動型電磁式微小力発生装置を図3に示す。機械システムと制御システム(計測制御プログラム)を構築した。本装置は主に負荷枠、液体容器、コイルジグ、コイル、永久磁石、XYZステージなどにより構成される。リニアステージ、下部のリニアエンコーダ、磁石を治具等の部品を通じて連動させている。コイルと負荷枠が連結している。上部のリニアエンコーダで負荷枠及びコイルの変位量をモニタする。微小力計をXYZステージの上に設置され、負荷力の軸合わせや前出の変位量のフィードバック制御をする。誘導起電力測定モードでは、磁石がリニアステージにより直線運動させ、コイルの磁場を切る相對運動を実現し、誘導起電力を発生させる。リニアエンコーダで磁石の位置を計測する。測定結果より磁束密度  $B$  とコイルの長さ  $l$  の積である不変量  $BI$  を評価する。力発生モードでは、磁石を固定し、力の大きさにより既知の電流  $I$  をコイルに流し、微小力を発生させ、微小力計に負荷する。両モードの  $BI$  が共通なので、組み合わせで力の大きさを電気量の標準から精密に決定できる( $F=UI/v$ )。また、上記の式から、微小力決定時の不確かさによる要因(電圧測定、電流測定、位置測定、液体による支点感度限界等)を検討した。

この内容をまとめて、国際研究集会 IMEKO 24th TC3, 14th TC5, 6th TC16 and 5th TC22 International Conference にて発表し、その内容は後で本国際研究集会のプロシーディングに収録され、国際計測連合 IMEKO の WEB に掲載された<sup>5)</sup>。また、アジア太平洋地域の力学量計測研究集会 23rd Meeting of the Technical Committee for Mass and Related Quantities (APMP)にて発表も行った。今後は、別途の資金で調達した高精度な測定システムにより測定実験を実施して高精度な微小力発生・計測を可能にする。

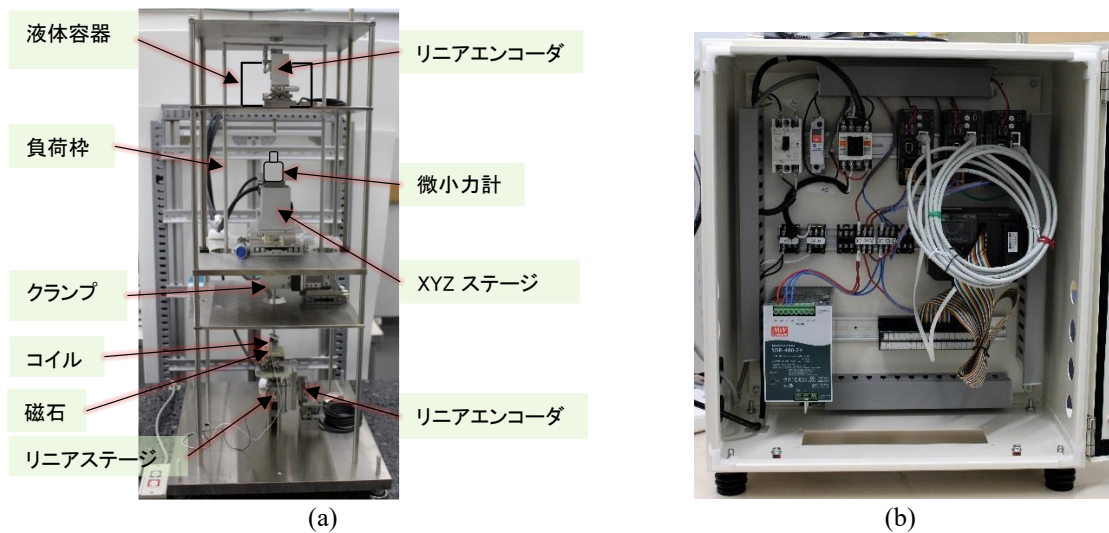


図3 直動型電磁力式微小力発生装置 (a) 機械システム (b)制御システム

参考文献

- 1) J. F. Zhu, et.al.: Measurement, Volume 154, 107463, 2020.
- 2) J. F. Zhu, et.al.: SICE JCMSI, Volume 14, Issue 1, pp.12-19,2021.
- 3) B. P. Kibble: Atomic Masses and Fundamental Constants 5, 545-551, 1976.
- 4) B. P. Kibble, et.al.: Metrologia, 27-4, 173-192, 1990.
- 5) J. F. Zhu, et.al.: Proceedings of IMEKO 24th TC3, 14th TC5, 6th TC16 and 5th TC22 International Conference, 2022. DOI:10.21014/tc3-2022.059

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 J. F., Hayashi T., Ogushi K.	4. 巻 1
2. 論文標題 DESIGN OF A LINEAR-MOTION TYPE MICROFORCE GENERATING MACHINE USING ELECTROMAGNETIC FORCE	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of IMEKO 24th TC3, 14th TC5, 6th TC16 and 5th TC22 International Conference	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21014/tc3-2022.059	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 2件）

1. 発表者名 Junfang Zhu, Toshiyuki Hayashi, Koji Ogushi
2. 発表標題 DESIGN OF A LINEAR-MOTION TYPE MICROFORCE GENERATING MACHINE USING ELECTROMAGNETIC FORCE
3. 学会等名 Joint IMEKO TC3, T5, TC16 and TC22 International Conference (24th IMEKO TC3, 14th IMEKO TC5, 6th IMEKO TC16 and 5th IMEKO TC22 Conference) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junfang Zhu, Toshiyuki Hayashi, Atsuhiko Nishino, Koji Ogushi
2. 発表標題 Development of Microforce-Generating Machines based on a Force Generation Method Using Electromagnetic Force
3. 学会等名 23rd Meeting of the Technical Committee for Mass and Related Quantities (APMP) (国際学会)
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
---------------------------	-----------------------	----

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