

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18081

研究課題名(和文)電磁力による新たなトルク計測技術に関する研究

研究課題名(英文) A study of a torque measuring technique based on 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・工学計測標準研究部門・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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、微小なトルクを精密に計測する技術を確立するために、プランク定数の絶対測定に関する研究で用いられているワットバランス法の原理に基づいた、電磁力によるトルクの発生原理について検討し、電磁力によるトルク発生装置の開発に成功した。この装置において、力学的仕事率と電気的仕事率が等しいという関係から、矩形コイルに電流を流した際に発生するトルクを評価した。その結果、ワットバランス法の原理に基づいた電磁力による方法で、初めて国際単位系SIにトレーサブルな微小トルクの実現に成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to establish a micro torque measurement technique, I designed and developed a new torque generation machine based on the watt balance method. I carried out two different experiments by using this machine. First, I evaluated the magnetic passing through the rectangular coil by measuring the angular velocity and induced electromotive force when the rectangular coil installed in a homogeneous magnetic field was rotated by a motor. Second, I measured micro torque generated when the electric current flows through the rectangular coil by using the same machine. The uncertainty of torque realized by this machine was estimated as a trial calculation. As a result, SI-traceable micro torque was successfully realized for the first time using a method which does not rely on the gravitational force.

研究分野：機械工学

キーワード：トルク 力学量計測 電磁力 ワットバランス 精密計測

1. 研究開始当初の背景

トルクは、エンジンやモータの性能評価等において計測される重要な物理量である。また、航空機や自動車等のメンテナンス、様々な製品の製造ラインでは、ねじを使って部品を締結する際にトルクドライバやトルクレンチ等のトルク計測機器を使用し、ねじの締め付けトルクを適切に管理している。全てのねじが適切なトルクで締め付けられることで、はじめて製品の安全安心が達成されるため、トルク計測の信頼性確保は極めて重要である。従来、トルク計測機器の校正（または試験）は、長さ調整されたモーメントアームの先端に質量調整されたおもり（または分銅）を載荷する（重力を負荷する）ことによって既知のトルクを発生させる方法が用いられてきた。近年、さらに高度なトルク計測技術を確立するために、我が国をはじめドイツや中国、韓国など世界中の国家計量標準機関(National Metrology Institute, NMI)において、トルクの国家標準を実現するために、モーメントアームの先端に重力を負荷する方法（重力による方法）に基づいた極めて精密なトルクを発生させることができる実荷重式トルク標準機の研究開発が進められてきた。ただし、この重力による方法では、モーメントアームの長さを短くすることや質量を小さくすることに限界があるため、微小なトルクを発生させることが困難であった。そのため、微小なトルクを精密に計測するために、新たな方法によるトルク計測技術の確立が求められていた。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、重力による方法では計測が困難な微小なトルクを、精密に計測することができる新しいトルク計測技術を確立することである。重力によらない方法としてまず考えられるのは、自然界の4つの力のうちの一つである電磁力による方法である。ただし、この方法で精密なトルクを発生させるためには、磁束密度 B やコイルの形状（面積 A や巻数 N ）を精密に評価しなければならない。しかし、これらを厳密に評価することは極めて困難であったため、電磁力による方法でトルクを精密に発生できたという報告はなかった。そこで、この問題を克服するために、アメリカ国立標準技術研究所 (NIST) 等で行われているワットバランス法によるプランク定数の絶対測定に関する研究に着目した。この研究では、一様な磁束密度 B の中に置かれた長さ l の導線に電流 I を流した時に生じる力 $F = IBl$ [N]と、同じ磁場中を同じ導線が一定速度 v [m/s]で直線運動をする時に生じる誘導起電力 $U = Blv$ [V]の関係が、仕事率 $P = UI = Fv$ [W]となることを利用して B と I をキャンセルし、交流ジョセフソン効果と量子ホール効果を用いることで、プランク定数を求める。本研究では、このワットバランス法の原理に基づいた電磁力によるトルク発生装置を開発し、微小トルクの計測技術の

確立を図った。

3. 研究の方法

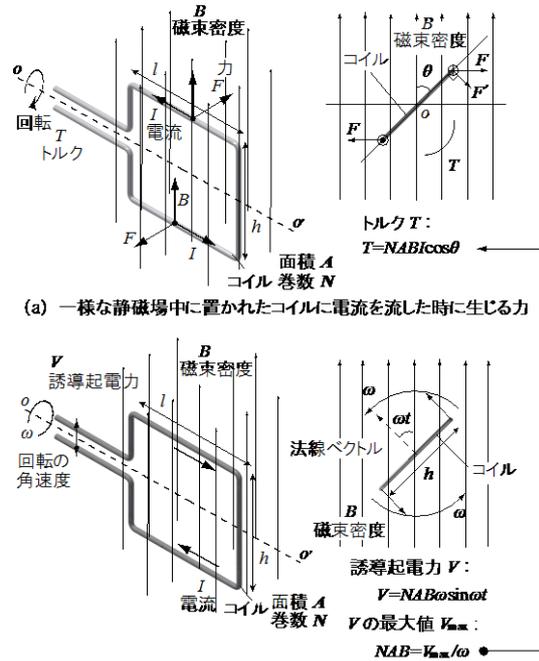


図1:ワットバランス法の原理に基づいた電磁力によるトルクの発生原理

図1に、ワットバランス法の原理に基づいた電磁力によるトルクの発生原理の概要について示す。図1(a)より、磁束密度 B の鉛直上向きの一様な磁場内に、水平軸 ($O-O'$) の周りに回転できる矩形コイル(長さ l 、高さ h 、面積 $A (=l \cdot h)$ 、 $O-O'$ に対して対称、巻数 N) を設置して電流 I を流すと、 B と直行する2つの辺が磁場から受ける力 F は、

$$F = IBl \text{ または } F = -IBl \quad (1)$$

となる。つまり、 B と直行する2つの辺に働く力は大きさが等しく、向きが逆なので、偶力が生じる。さらに、図1(a)の右図では、矩形コイルが磁力線の方角に対し、角度 θ 傾斜している状態を示している。この時、矩形コイルに働くトルク T は、

$$T = NABl \cos \theta \quad (2)$$

である。従って、 T の最大値 T_{\max} は、 $\cos \theta = 1$ の時に発生し、

$$T_{\max} = NABl \quad (3)$$

である。ここで、高度なトルクを実現するためには、矩形コイルを貫く全磁束 NAB を精密に評価する必要がある。しかし、先述の通り、 B や A を厳密に評価することは極めて難しい。そこで、図1(b)より、同じ B の一様な磁場内に置かれた同じ矩形コイルを、モータ等により一定の角速度 ω で回転させる。その時、矩形コイルには誘導起電力 V が発生し、 V は、

$$V = NABv \sin \cot \quad (4)$$

と表すことができる。ここで、 V の最大値 V_{\max} は、 $\sin \cot = 1$ の時であり、

$$NAB = V_{\max} / \omega \quad (5)$$

となる。つまり、 V_{\max} と ω 、さらに V_{\max} となる矩形コイルの角度位置を精密に計測することで、 NAB を評価することができる。従って、式(3)と式(5)より、

$$T_{\max} \omega = V_{\max} I \quad (6)$$

となり、力学的仕事率と電気的工作率が等しいことが示される。本研究課題では、このワットバランス法の原理に基づいた電磁力によるトルク発生装置の設計・開発を行った。また、この装置による微小トルクの発生実験及び不確かさ評価を行った。

4. 研究成果

本研究課題によって得られた成果は、(1)ワットバランス法の原理に基づいた電磁力によるトルク発生装置の開発に成功したこと、(2)その装置によって、重力による方法とは異なる方法で、はじめて国際単位系SIにトレーサブルなトルクの発生に成功したことである。

- (1) 図2に、本研究課題で開発したワットバランス法の原理に基づく電磁力による微小トルク発生装置の写真を示す。電磁力によって精密なトルクを発生させるためには、同じ装置で、(a)一様な磁場中に置かれた矩形コイルを一定の角速度で回転させて生じる誘導起電力を計測し、誘導起電力の最大値と角速度の関係から、矩形コイルを貫く全磁束を評価する実験（電圧測定モード）と、(b) 同じ一様な磁場中に置かれた同じ矩形コイルに電流を流してトルクを発生させる実験（電流測定モード）の、2つの異なる実験を実施する必要がある。図より、本研究課題で開発した電磁力によるトルク発生装置は、①サーボモータ、②過負荷防止機能を備えたカップリング（内径8 mmの hidro方式によるブシュと金属バネ式カップリングにより構成される）、③小容量トルク変換器、④複合型静圧空気軸受（図3参照）、⑤光学式ロータリーエンコーダ、⑥無線型電流・電圧計測装置、⑦矩形コイル、⑧異極対向型磁気回路により構成されている。電磁力でトルクを発生させる場合、重力による方法と異なり、任意の方向に装置を設置することができるという特徴がある。本研究課題では、装置の設置方向を、小容量トルク変換器の設置方向に適している鉛直方向とした。この他、トルク変換器用の指示計器、精密可変電流源として用いられる直流安定化電源、差圧計、④の静圧空気軸受に供給する圧縮空気の流量を調整するための3台のデジタル電磁弁、レーザ変位計、熱電対、制御用PC等も含まれる。この装置でトルクを発生させるためには、矩形コイルに電流を流すために、無線型電流・電圧計測装置に搭載されたバッテリー、または外部精密可変電流源を使用する。

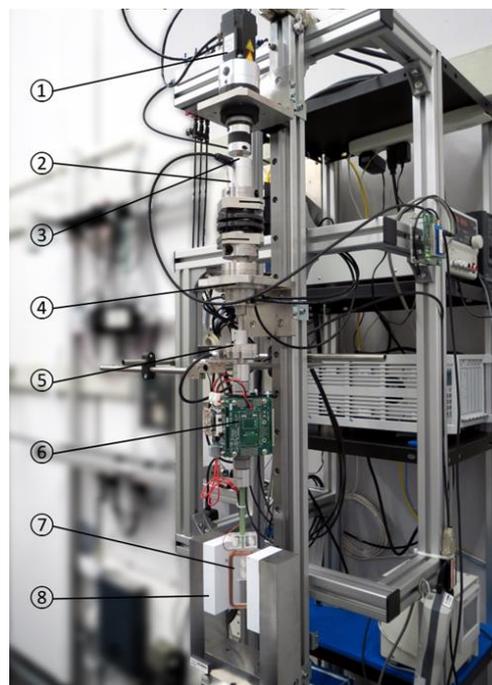


図2 ワットバランス法の原理に基づいた電磁力によるトルク発生装置（鉛直方向に各構成要素が接続されている。）



図3 複合型静圧空気軸受（ラジアル方向に2箇所、スラスト方向に1箇所に多孔質金属焼結体を嵌合し、それぞれに供給する圧縮空気をデジタル電磁弁によって調整する。それにより、空気の流れによって生じる軸の回転を抑制する機能を備える。）

- (2) (1)で開発したワットバランス法の原理に基づいた電磁力によるトルク発生装置において、まずは矩形コイルを貫く全磁束 NAB の評価（電圧測定モード）の実験を行った。図4に角速度 ω と誘導起電力の最大値 V_{\max} の関係を示す。最小二乗法により求めた傾きが矩形コイルを貫く全磁束 NAB であり、その値は $NAB = 4.355 \times 10^{-2} [\text{V} \cdot \text{s} (= \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1})]$ と評価された。なお、磁気回路の磁束密度及び矩形コイルの面積や巻数をそれぞれ実測により評価した場合の矩形コイルを貫く全磁束の値は、 $4.253 \times 10^{-2} [\text{V} \cdot \text{s}]$ であった。次に、サーボモータによって矩形コイルを誘導起電力が最大値となった角度位置で保持し、無線型電流・電圧計測装置

に搭載されたバッテリーまたは外部の精密可変電流源より、矩形コイルに電流を流し、トルクを発生させる実験（電流計測モード）を行った。その結果を図5に示す。図には電磁力によるトルク発生装置で発生したトルク T_e 、トルク変換器で計測した値 T_{TMD} 、矩形コイルを貫く全磁束を実測により評価して式(3)より求めたトルク T_t を示しており、それぞれ良い一致が示された。次に、電磁力によるトルク発生装置で発生させたトルクの不確かさについて検討し、試算した。考慮した主な不確かさ要因は、電圧、電流、角速度、角度位置である。その結果、無線型電流・電圧計測装置を使用した場合の相対拡張不確かさは、 $W=1.6 \times 10^{-3}$ （包含係数 $k=2$ ）であった。また、精密可変電流源を使用した場合の相対拡張不確かさは、 $W=1.7 \times 10^{-3}$ （ $k=2$ ）であった。以上より、本研究課題では、重力によらない方法で、はじめて国際単位系 SI にトレーサブルなトルクの発生に成功した。

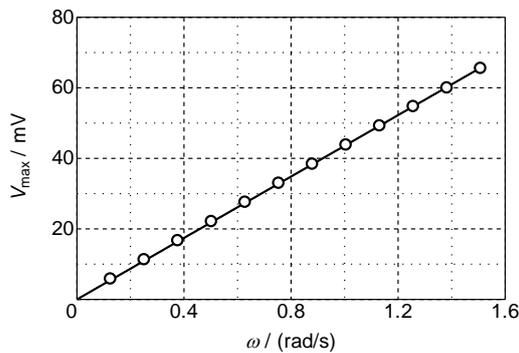


図4: 角速度 ω と誘導起電力の最大値 V_{max} の関係（このグラフの傾きが矩形コイルを貫く全磁束 NAB となる。）

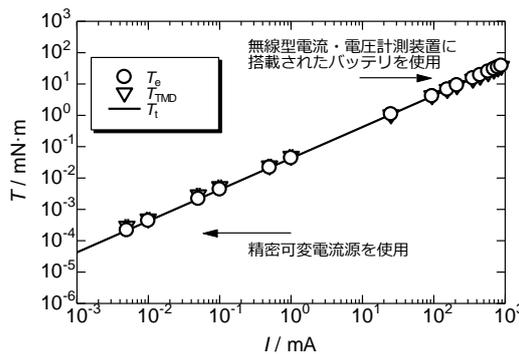


図5: 電流 I とトルク T の関係 (T_e : 電磁力によるトルク発生装置で発生したトルク、 T_{TMD} : トルク変換器で計測した値、 T_t : 矩形コイルを貫く全磁束を実測により評価し、式(3)より求めたトルク。)

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 Atsuhiko Nishino, Kazunaga Ueda and Kenichi Fujii, Design of a new torque standard machine based on a torque generation method using electromagnetic force, Measurement Science and Technology, 28(2), 査読有, 2016, doi:10.1088/1361-6501/28/2/025005

[学会発表] (計 3 件)

- ① Atsuhiko Nishino, Kazunaga Ueda and Kenichi Fujii, Design of a new torque standard machine based on the torque generating method using electro-magnetic force, Proc. XXI IMEKO World Congress, 査読有, Prague, Czech Republic, August 30 – September 4, 2015.
- ② 西野敦洋、上田和永、微小トルク校正装置の支点部の開発、第32回センシングフォーラム計測部門大会、査読無、2015年9月11日、大阪電気通信大学寝屋川キャンパス（大阪府寝屋川市）
- ③ 西野敦洋、藤井賢一、電磁力による微小トルク標準機の開発、第33回センシングフォーラム計測部門大会、査読無、2016年9月2日、近畿大学和歌山キャンパス（和歌山県紀の川市）

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 電磁力を利用したトルク校正装置及びトルク校正方法

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

種類: 特許権

番号: 特願 2015-159968

出願年月日: 平成 27 年 8 月 13 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

産総研・工学計測標準研究部門・力トルク標準研究グループ

<https://unit.aist.go.jp/riem/ft-std/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

西野 敦洋 (NISHINO ATSUHIRO)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・工学計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号: 40415724