

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04510

研究課題名（和文）電磁力によるトルク計測技術を用いた回転トルクの精密測定に関する研究

研究課題名（英文）A study on the precise measurement of rotational torque using electromagnetic force

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・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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、信頼性の高い回転トルク計測技術を確立することが目的である。まず、先行研究で開発した電磁力によるトルク発生装置を基に、磁気回路側及び矩形コイル側（回転式トルク変換器を含む）の両方が、同期して回転することができる回転式トルク発生装置を開発した。また、仮想軸を参照することで異なる2つの軸の回転速度を同期させることができる制御システムや、電圧・カウンタ等の同時計測システムを構築した。さらに、中空シャフトを採用した新しいトルク変換器の開発も行った。これらの成果により、回転速度の変化が回転式トルク変換器のトルク計測に及ぼす影響を評価するため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

本研究の成果は、より信頼性の高い回転トルク計測技術の確立に寄与する。回転トルク計測技術は、IT機器や自動車など、様々な分野で使用されているモータの性能評価において極めて重要である。そのため、信頼性の高い回転トルク計測技術の確立は、モータの高度化に貢献することが期待できる。本研究の学術的意義は、回転速度の変化がトルク計測に及ぼす影響の解明につながり、モータの動作特性や効率に関する新たな知見が得られ、モータの設計や制御の最適化に役立つことが期待できる。また、社会的意義としては、高効率なモータの実現により、エネルギー効率の向上や環境への負荷低減など、持続可能な社会の実現に向けた重要な一歩となる。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to establish a reliable rotary torque measurement technique. First, based on the torque-generating machine by an electromagnetic force developed in the previous research, a rotary torque-generating machine was developed in which both the magnetic circuit side and the rectangular coil side (including a rotary torque transducer) can rotate synchronously. In addition, a control system that can synchronize the rotational speeds of two different shafts by referring to a virtual axis and a simultaneous measurement system for voltage, counter, etc. were developed. Furthermore, a new torque transducer adopted a hollow shaft was developed. These results have enabled preparations to be made for the evaluation of the effect of changes in rotational speed on the torque measurement of rotary torque transducers.

研究分野：計測工学

キーワード：力学量計測 トルク 超精密計測 電磁力 回転速度 キップルバランス

1. 研究開始当初の背景

モータは、家電、IT 機器、自動車、ロボット、医療用機器など、あらゆる場面で活用されている。近年では、この電氣的エネルギーを機械的エネルギーに変換するモータについて、高出力化・高効率化・小型化などを目的とした研究開発が盛んに行われている。図 1 に、一般的なモータ試験装置とモータの特性評価の概要について示す。新たに開発されたモータは、モータ試験装置を用いて、「トルク-回転速度曲線 (T-S カーブ)」や「効率 (= 機械出力÷入力電力×100)」などの特性が評価される。一般的なモータ試験装置は、評価されるモータ、カップリング、回転トルク計測機器、回転計、負荷装置等で構成されている。回転計は、回転トルク計測機器にオプションとして含まれる製品もある。回転トルク計測機器は、モータと共に負荷装置と回転し、回転中のトルクを計測する。より高性能なモータを開発するためには、より精密な特性評価が必要である。そのため、回転トルク計測機器には、信頼性の高いトルク計測が求められている。トルク計測の信頼性を確保するためには、国際単位系 SI におけるトルク単位である「ニュートン・メートル (「N・m」または「Nm」)」にトレーサブルな評価をする必要がある。トルクの SI 単位にトレーサブルな評価方法はいくつかあるが、いずれの方法でも最終的には、精密に長さの調整をしたモーメントアーム (長さ: l) の先端におもり (質量: m) を載せる (重力: g を負荷する) ことで発生するトルク $T (=mgl)$ と比較する方法 (重力による方法) につながる。この重力による方法に基づいたトルク発生装置は、実荷重式トルク発生装置と呼ばれ、 $mN\cdot m$ から $kN\cdot m$ の範囲で極めて精密なトルクを発生することができる。そのため、日本をはじめ[1]、ドイツ[2]、韓国[3]など、世界中の国家計量標準機関 (NMI) において、トルクの国家標準を維持・供給するために、実荷重式トルク発生装置に関する研究開発が行われている。ただし、この重力による方法に基づいた評価は、トルク計測機器に対して回転しない状態で、静的にトルク負荷を与えるという条件のみ実施可能である。従って、重力による方法では、回転トルク計測機器であっても、回転しながらトルクを負荷し評価することが不可能であったため、これまで回転速度がトルク計測に与える影響について検証されたことはなかった。

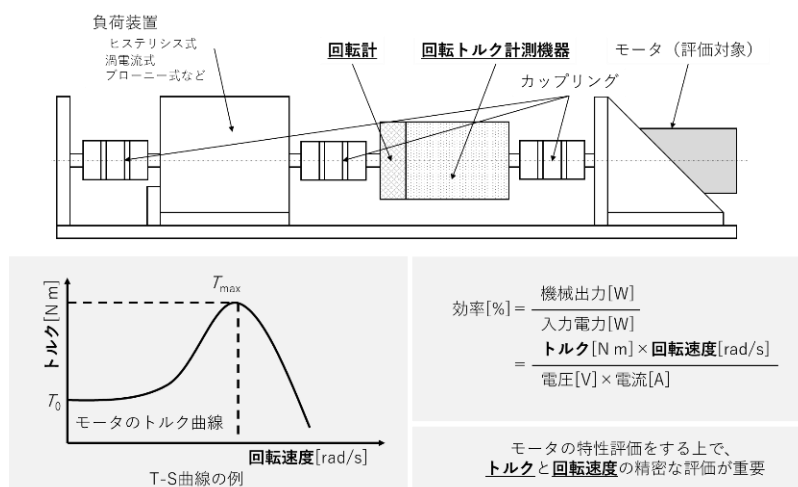


図 1 モータ試験装置及びモータの基本特性評価の概要

2. 研究の目的

本研究の目的は、回転中のトルク計測において、回転速度がトルク計測にどのような影響を及ぼすか、実験的に検証することである。この目的を達成するために、申請者が先行研究 (JSPS 科研費 15K18081) で発明した「電磁力を利用したトルク校正装置及びトルク校正方法 (特許第 6479605 号)」を応用し、新しい電磁力による回転式トルク発生装置を開発する。図 2 に電磁力によるトルクの発生原理について示す。この原理は、(a)トルク発生モードと、(b)回転モードの 2 つのモードから構成される。そして、電氣的仕事率と力学的仕事率が等しいという関係から、一様な磁場中 (磁束密度: B) に設置された矩形コイル (面積: A 、巻数: N) を一定の角速度 ω で回転させたときに生じる誘導起電力 V と、矩形コイルに供給する電流 I をそれぞれ精密に計測することでトルク $T (=VI/\omega)$ を評価することができる。申請者は、先行研究で開発した電磁力によるトルク発生装置を用いて、世界で初めて重力による方法以外で SI 単位系にトレーサブルなトルクの発生に成功した。この装置では、(b)回転モードにおいて、矩形コイル側にモータを取り付け、矩形コイルを回転させて、誘導起電力を計測した。本研究では、新たに磁気回路側も回転できるようにモータを取り付け、矩形コイルと磁気回路の両方を同期回転できるように改良する。このように、電磁力による方法を採用することで、重力による方法では実現が不可能であった、回転しながら SI 単位系にトレーサブルなトルクを発生させることのできる、独創的なトルクの発生装置を開発し、信頼性の高い回転トルク計測技術の確立を目指す。

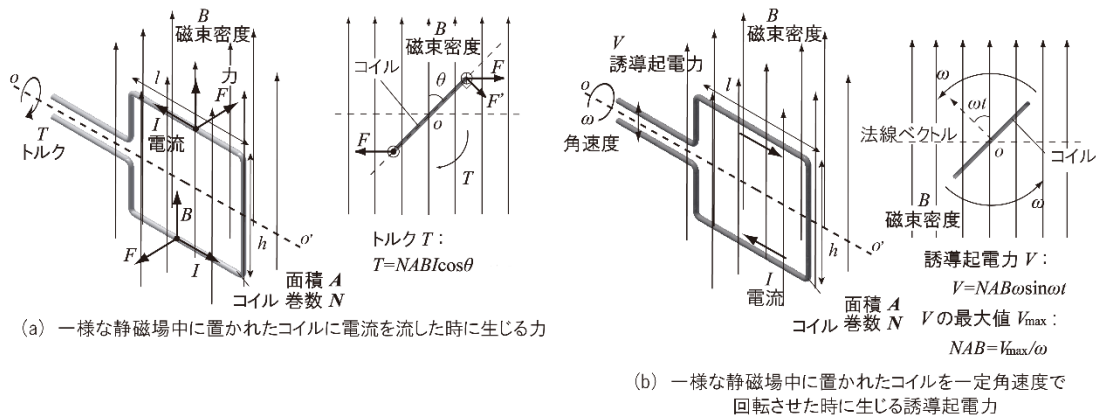


図2 電磁力によるトルクの発生原理

3. 研究の方法

図3に、本研究で開発をする電磁力による回転式トルク発生装置の概要を示す。本研究では、磁気回路側にモータ1（第1軸）を、矩形コイル側にモータ2（第2軸）をそれぞれ配置し、両方の軸が回転可能な装置を開発する。第1軸と第2軸は同期回転が可能であり、モータの回転速度は、Programmable Logic Controller (PLC) を使用して制御される。また、第3の仮想軸を設定し、第1軸と第2軸はその第3軸をリファレンスとして追従制御することが可能である。

本研究では、まず、第3軸の回転速度を複数の設定値に変更し、設定された速度の違いによって、第1軸と第2軸の回転速度のずれの程度を実験的に評価する。第1軸と第2軸の回転速度は、それぞれの軸に取り付けられたロータリーエンコーダ1および2によって測定する。

次に、先述の図2(b)に示されているように、磁気回路を一定の回転速度で回転させて矩形コイルに生じる誘導起電力を測定し、矩形コイルを貫く全磁束(NAB)を評価する。この実験では、誘導起電力の最大値と、誘導起電力が最大となるときの矩形コイルと磁気回路の相対角度位置を精密に評価する必要がある。そこで、本研究では、電圧と角度位置の同時計測が可能なPCI eXtensions for Instrumentation (PXI) 計測システムを導入する。矩形コイルを貫く全磁束の評価の後、図2(a)に示すように、矩形コイルに電流を供給してトルクを発生させる。そして、そのトルクが発生している状態で、第1軸と第2軸を同期回転させ、第1軸と第2軸の回転速度が変化することで、トルク変換器の出力にどのような影響が生じるかを検証する。

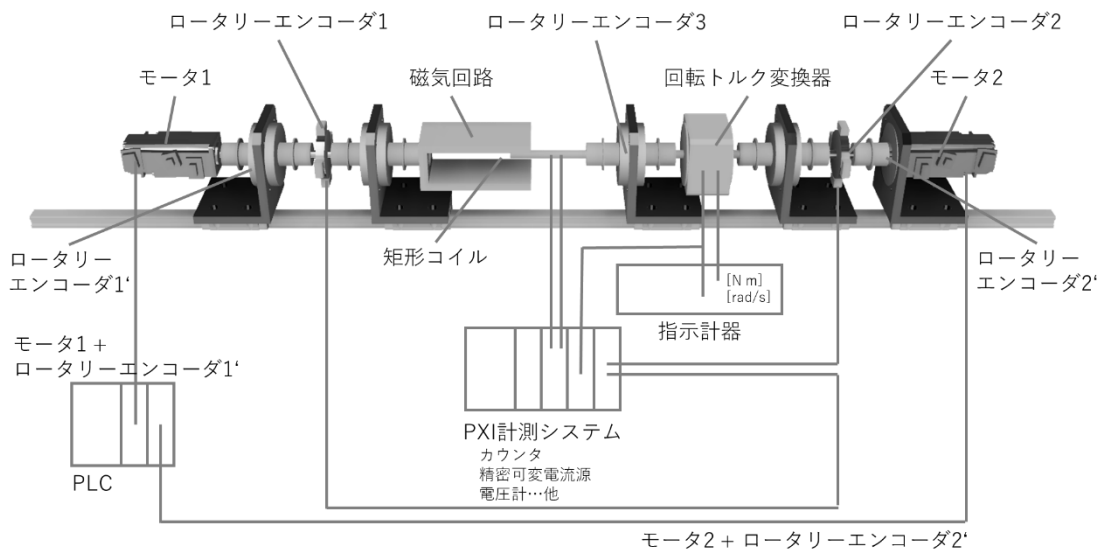


図3 電磁力による回転式トルク発生装置の概要

4. 研究成果

図4に、本研究で開発した電磁力による回転式トルク発生装置を示す。本装置の主な構成要素は、①モータ1（第1軸）、②ロータリーエンコーダ1、③磁気回路、④矩形コイル、⑤スリップリング、⑥ロータリーエンコーダ3、⑦空気軸受、⑧トルク変換器設置部、⑨ロータリーエンコーダ2、⑩モータ2（第2軸）である。設計段階では、測定軸を水平方向で検討していたが、重力の影響を考慮して、測定軸を鉛直方向に変更した。図4(b)に示されるタッチパネルを搭載した制御BOXには、モータを制御するためのPLCが格納されている。この制御BOXを使用することで、各モータに対して3つのモードを実行することが可能である。1つ目は、第1軸と第2軸をそれぞれ別々に回転させるモードである。2つ目は、第1軸と第2軸の相対角度位置が設

定範囲内になるよう制御することができるモードである。3つ目は、第3の仮想軸を設定し、それをリファレンスとして第1軸と第2軸を同期回転させることができるモードである。図4(c)は、慣性モーメントの影響を小さくするために、中空タイプのシャフトを採用して開発した回転式トルク変換器である。

本研究では、まず、第3の仮想軸で設定した回転速度に対して、第1軸と第2軸の回転のずれがどの程度生じるかについて評価を行った。次に、磁気回路を一定の回転速度で回転させ、矩形コイルに生じる誘導起電力と角度位置について PXI を用いて測定し、誘導起電力の最大値と角速度から矩形コイルを貫く全磁束の評価を行った。これにより、矩形コイルに電流を供給した際に生じるトルクを見積もることができるようになった。また、事前に実荷重式トルク発生装置によってトルク変換器を評価することで、それを仲介器として電磁力により実現したトルクと重力により実現したトルクの比較を行った。矩形コイルに供給する電流について、定電流だけでなく、正弦波に基づいて電流を変化させることができるよう、計測制御ソフトウェアの開発を行った[4]。回転中の測定軸の振れを評価するために、レーザ変位計を導入した。

このように、機械的要素及び計測制御システムを構築し、さらに新しいセンサの開発を行うことで、回転速度の変化がトルク計測に及ぼす影響を評価するための準備を進めることができた。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する予定である。

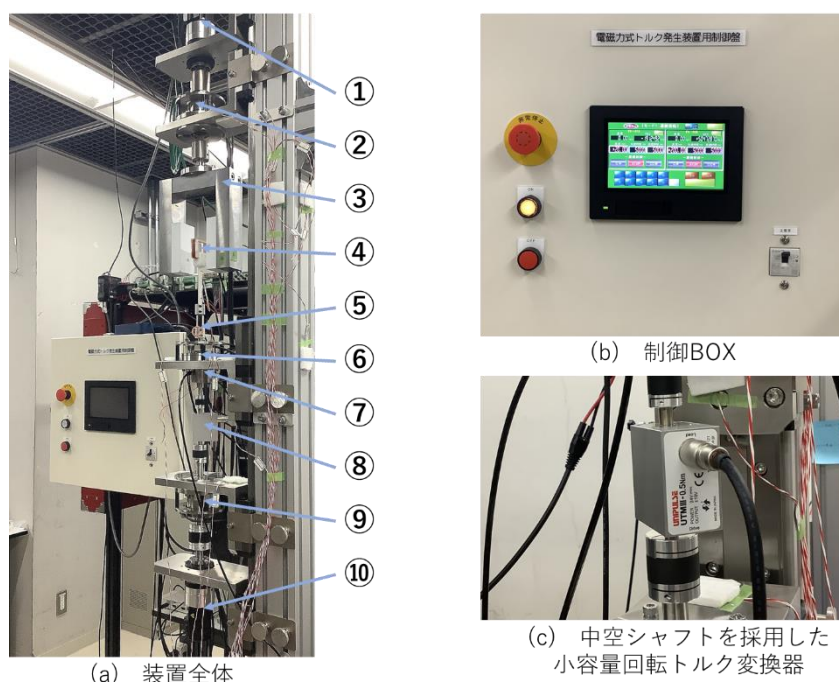


図4 電磁力による回転式トルク発生装置

<引用文献>

- [1] A Nishino *et al.*, Evaluation of moment arm length and fulcrum sensitivity limit in a 10 N·m dead weight torque standard machine, *Measurement*, **Vol. 43**, 2010, 1318–1326.
- [2] D Röske, Metrological characterization of a 1 N m torque standard machine at PTB, Germany, *Metrologia*, **Vol. 51**, 2014, 87–96.
- [3] Park Y K *et al.*, Establishment of torque standards in KRISS of Korea, *Proc. 20th IMEKO TC3 Conf.*, 2007, ID-102.
- [4] M Hamaji *et al.*, Development of a novel dynamic torque generation machine based on the principle of a Kibble balance, *Meas. Sci. Technol.*, **Vol. 33**, 2022, 115901.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Hamaji Misaki, Nishino Atsuhiko, Ogushi Koji	4. 巻 33
2. 論文標題 Development of a novel dynamic torque generation machine based on the principle of a Kibble balance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 115901 ~ 115901
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6501/ac8441	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 -

1. 著者名 Nishino Atsuhiko, Kinoshita Moto	4. 巻 194
2. 論文標題 Development of a nano-torque generating machine using electromagnetic force based on the principle of the Kibble balance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Measurement	6. 最初と最後の頁 111081 ~ 111081
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.measurement.2022.111081	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6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Atsuhiko Nishino
2. 発表標題 DESIGN OF A NEWTON ' S CONSTANT G MEASUREMENT SYSTEM USING A TORQUE GENERATION MACHINE BASED ON THE PRINCIPLE OF KIBBLE BALANCE
3. 学会等名 IMEKO 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Misaki Hamaji, Atsuhiko Nishino, Koji Ogushi
2. 発表標題 UNCERTAINTY EVALUATION METHOD OF A DYNAMIC TORQUE GENERATION MACHINE USING ELECTROMAGNETIC FORCE
3. 学会等名 IMEKO 24th TC3, 14th TC5, 6th TC16 and 5th TC22 International Conference（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱地 望早来, 西野 敦洋, 大串 浩司
2. 発表標題 電磁力を用いた動的トルク発生装置の開発
3. 学会等名 日本機械学会 関東支部 第29期総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 倉本 直樹, 西野 敦洋, 濱地 望早来, 大串 浩司
2. 発表標題 Torque generating machine based on the principle of the Kibble balance at NMIJ
3. 学会等名 CPEM2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西野 敦洋, 木下 基
2. 発表標題 セシウム蒸気セルを用いたゼーマン効果による磁気測定システムの構築
3. 学会等名 第38回センシングフォーラム 計測部門大会講演集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Misaki Hamaji, Atsuhiko Nishino, Koji Ogushi
2. 発表標題 Design of a new dynamic torque generation machine based on the principle of Kibble balance
3. 学会等名 XXIII IMEKO World Congress (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Koji OGUSHI, Atsuhiko NISHINO, Marc-Antoine Drouin, Antoine Tahan, Battal Singh, Mansi, Harish Kumar, A. K. S. Singholi, Mansi, Harish Kumar, A. K. S. Singholi, Girija Moona, N. Garg, V. Ramnath, S. Yadav, Sushil Chandra, Abhinav Choudhury, Shadab Ahmad, Shanay Rab, Hargovind Soni, 他	4. 発行年 2023年
2. 出版社 Springer Verlag, Singapore	5. 総ページ数 2212
3. 書名 Handbook of Metrology and Applications	

〔産業財産権〕

〔その他〕

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
--

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