

# 電磁力による微小トルク計測技術の開発



西野 敦洋

にしの あつひろ  
a.nishino@aist.go.jp  
産業技術総合研究所  
計量標準総合センター  
工学計測標準研究部門  
力トルク標準研究グループ  
主任研究員

2005年3月、名古屋大学大学院博士後期課程単位取得退学。同年4月、産業技術総合研究所入所。博士（工学）。入所以来、トルク標準に関する研究に従事し、主に小容量実荷重式トルク標準機及び高精度小容量トルク変換器に関する研究開発、トルク変換器の校正方法に関する研究等に携わっている。現在は、微小トルク標準を開発するために、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計測技術に関する研究に従事している。

共同研究者  
藤井 賢一（産総研）

1 mN・m 以下の微小なトルクを精密に計測する技術を確認するために、私たちは、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、電磁力式トルク標準機を開発しました。そして、世界で初めて電磁力による方法で国際単位系 SI にトレーサブルなトルクの実現に成功しました。これにより、高性能小型モータの性能評価やトルク計測機器の校正方法に関する研究開発への貢献、プランク定数に基づいた質量の定義改定後におけるトルク計測の高度化等が期待されます。

トルクは、エンジンやモータ等の性能評価において計測される物理量です。近年、エンジンの燃費向上や電気自動車に搭載されるモータの高度化により、精密なトルクの計測技術が求められています。また、小型電子機器から橋梁、航空機や自動車の整備に至るまで、部品を締結する際にねじを使用する場合、トルクレンチやトルクドライバ等によって、適切なトルクでねじを締め付けます。全てのねじが適切なトルクで締め付けられることで、はじめて製品の品質や安全安心が達成されるため、トルク計測の信頼性確保が求められています。

NMIJ では、国内の産業界との議論に基づいて提案されているトルク単位 (N・m または Nm) によるトレーサビリティ体系を構築するため、実荷重式トルク標準機を開発し、トルク標準の供給を行っています[1]。実荷重式トルク標準機は、長さの国家標準にトレーサブルなモーメントアームの先端に、質量の国家標準にトレーサブルな分銅（またはおもり）を負荷することで、精密なトルクを実現することができます（重力による方法）。他の国家計量標準機関（NMI）でも同様にトルク標準に関する研究が行われており、開発された世界中のトルク標準機は、全て重力による方法に基づいています。現在、この重力による方法で実現できる最も小さなトルク標準は 1 mN・m です[2]。重力による方法では、モーメントアームの長さや分銅の質量を小さくするのに限界があるため、微小なトルクを実現することが困難でした。そこで、私たちは、重力によらない、電磁力による方法で、微小なトルクを実現することを検討しました。図1に電磁力によるトルクの発生原理を示します。図1(a)より、一様な磁場中に置かれたコイルに電流  $I$  を流すことでトルク  $T$  が発生します（電流測定モード）。その  $T$  を精密に評価するためには、磁束密度  $B$  とコイルの形状（面積  $A$  と巻数  $N$ ）を厳密に評価しなければなりません。しかし、これらを厳密に評価することは非常に難

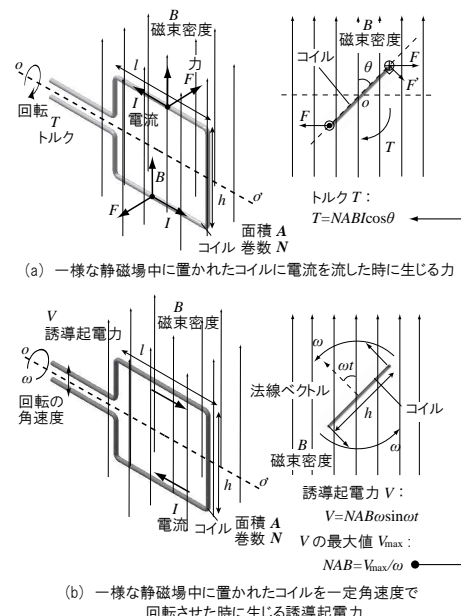


図1 電磁力によるトルクの発生原理

しいため、過去に電磁力によって精密なトルクを実現できたという報告はありませんでした。私たちはこの問題を解決するために、プランク定数の絶対測定の研究で用いられているワットバランス法の原理に着目しました[3]。この研究では、電気的仕事率と力学的仕事率が等しい関係にあることから、磁束密度とその磁場中を一定速度で移動する導線の長さをキャンセルし、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ます。本研究では、図1(b)で示すように、磁場中をコイルが一定の角速度  $\omega$  で回転する際に発生する誘導起電力  $V$  と、その  $\omega$  を精密に評価し、 $A$ 、 $N$  及び  $B$  の関係を明らかにします（電圧測定モード）。そして、先述のワットバランス法の原理に基づいて  $A$ 、 $N$  及び  $B$  をキャンセルし、 $T\omega = VI$  の関係から  $T$  を評価します。私たちは、この電磁力によるトルクの発生原理に基づいた、新しいトルク標準機的设计・開発を行いました。

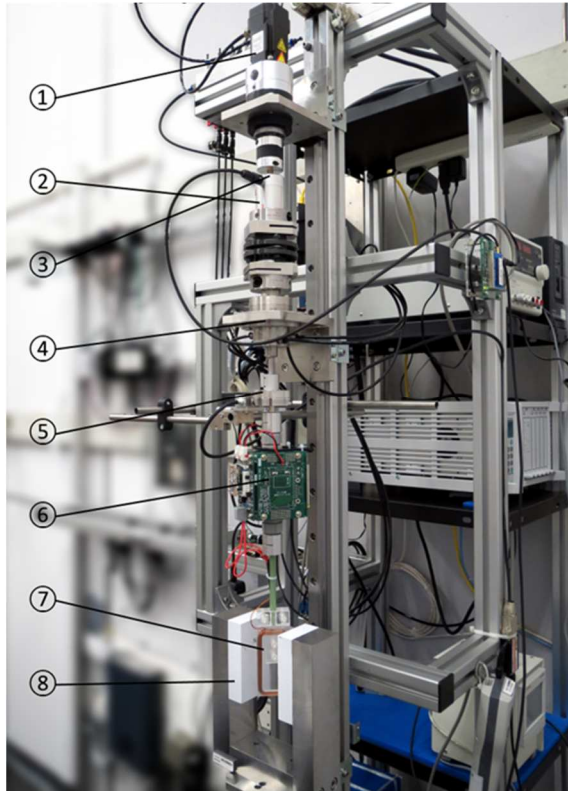


図2 ワットバランス法の原理に基づいた  
電磁力式トルク標準機の写真

図2に、本研究で開発したワットバランス法の原理に基づいた電磁力式トルク標準機を示します[4]。この電磁力式トルク標準機は、①サーボモータ、②過負荷防止機能付カップリング（内径8 mmのハイドロ方式によるブシュと金属ばね式カップリング等で構成）、③トルク変換器（被校正対象）、④複合型静圧空気軸受、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で構成されています。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の複合型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デジタル電磁弁、レーザ変位計、熱電対等も含まれます。電磁力式トルク標準機は、原理的に重力の影響を受けないため、任意の方向に設置することができるという特徴があります。本研究では、この標準機の設置方向について、小容量トルク変換器の設置に適している鉛直方向としました。

図3に、電圧測定モード実験における角速度 $\omega$ と誘導起電力の最大値 $V_{\max}$ の関係を示します[4]。図より、 $\omega$ と $V_{\max}$ の測定結果から最小二乗法で直線の傾きを評価し、 $A$ 、 $N$ 及び $B$ の関係を明らかにしました。次に、電流測定モードの実験を行いました。図4に、電流 $I$ と発生したトルク $T$ の関係を示します[4, 5]。図には、電磁力式トルク標準機で発生したトルク $T_e$ 、トルクメータで計測したトルク $T_{TMD}$ 、理論式より求めたトルク $T_l$ を示しています。この実験では、まず、電圧測定モードにおいて $V_{\max}$ となった角度位置 $\rho_0$ で矩形コイルを保持します。そして、精密可変電流源または無線型電流・電圧計測装置に搭載されたバッテリーより微小な電流を矩形コイルに供給します。矩形コイルにはトルクが発生して回転しようとするため、サーボモータによってトルク変換器を介して矩形コイルが $\rho_0$ となるようフィー

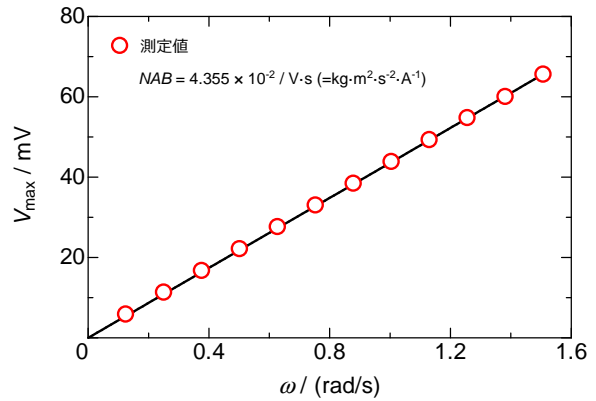


図3 角速度 $\omega$ と誘導起電力の最大値 $V_{\max}$ の関係

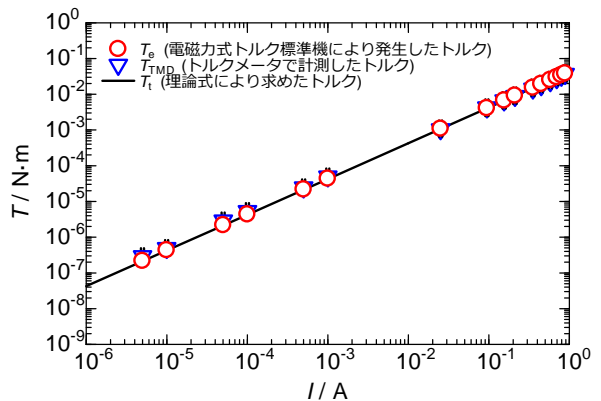


図4 電流 $I$ と発生したトルク $T$ の関係

ドバック制御を行い、 $\rho_0$ で保持された状態において $T_e$ および $T_{TDM}$ を評価します。その結果、約 $0.3 \mu\text{N}\cdot\text{m}$ から $50 \text{mN}\cdot\text{m}$ の範囲において、 $T_e$ 、 $T_{TDM}$ 、 $T_l$ の良い一致が示されました。また、電磁力式トルク標準機による実現トルクの不確かさの評価も行っており[4, 5]、世界で初めてワットバランス法の原理に基づいた国際単位系SIにトレーサブルなトルクの実現に成功しました。

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の計測技術により、高性能小型モータの開発や、トルク計測機器の新しい校正方法の研究開発等への貢献が期待できます。また、2018年、国際度量衡委員会(CIPM)でプランク定数に基づいた質量の定義改定について審議される予定です。この新しい原理に基づくトルクの計測技術は、分銅に頼らずに電気計測に置き換えられるので、微小なトルクの計測が可能となります。今後、 $\text{nN}\cdot\text{m}$ への範囲拡大や不確かさの低減等に関する研究を行う予定です。

本研究は JSPS 科研費 JP15K18081、17K06482 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] A. Nishino, *et al.*, *Measurement* **49** (2014) 77–90.  
 [2] D. Röske, *et al.*, *Metrologia* **51** (2014) 87–96.  
 [3] E. R. Williams, *et al.*, *Physical Review Letters* **81** (1998) 2404–2407.  
 [4] A. Nishino, *et al.*, *Measurement Science and Technology*, **28** (2016), 025005.  
 [5] A. Nishino, *Proc. IMEKO TC3, TC5, TC22 Joint Conference*, ID-789, Helsinki, Finland, May 30<sup>th</sup>-June 1<sup>st</sup>, 2017.