

微小トルク及び動的トルクの計測技術と標準に関する調査研究

濱地望早来*

(2021年6月22日受理)

A survey on measuring techniques and standard of small torque and dynamic torque

HAMAJI Misaki

Abstract

Torque measurement is crucial in evaluating performance and guaranteeing the quality of products in many fields, such as the automobile, aviation, and construction industries. Particularly in recent years, demand for the measurement of smaller and dynamic torques has been increasing. In order to ensure the reliability of such measurement, and to establish the traceability system of torque measurement in Japan, a survey was carried out at our institute. This paper reviews a novel torque measurement techniques, and conventional techniques to realized metrological standards employed by national metrology institutes (NMIs).

Besides, this paper describes the results of a questionnaire survey for industry and current research activities in National Metrology Institutes (NMIs) in the world, concerned with small and dynamic torque standard techniques.

1. はじめに

自動車、船舶、航空、建設、情報機器、医療機器など、我々の生活を支える様々な産業分野において、部品等を締結する際にねじが使用されることが多い。全てのねじが適正な軸力で締め付けられることにより、締結部の品質が保証される。ねじの軸力の管理にはいくつかの方法があるが、締付けトルクによる管理が圧倒的に多く、製品の品質を保证する上で、トルク計測機器による軸力管理が重要となっている¹⁾。一方、モータやエンジン等の回転駆動部を持つ機器の性能評価及び品質保証の観点から、回転中の変動トルクを正しく計測することが重要となってきている。図1に主なトルク計測分野と計測範囲を示す。これより、船用エンジンや、風力発電等の発電機で計測されるような非常に大きなトルク^{2),3)}から、MEMSセンサで計測されるような極めて小さなトルク⁴⁾

まで、様々な分野において幅広いトルク計測が必要とされていることがわかる。我が国のトルク計測の信頼性を確保するために、国家計量標準研究機関（National Metrology Institute; NMI）である、国立研究開発法人産業技術総合研究所（産総研）の計量標準総合センター（National Metrology Institute of Japan; NMIJ）では、定格容量 10 N・m、1 kN・m、及び 20 kN・m の 3 台の実荷重

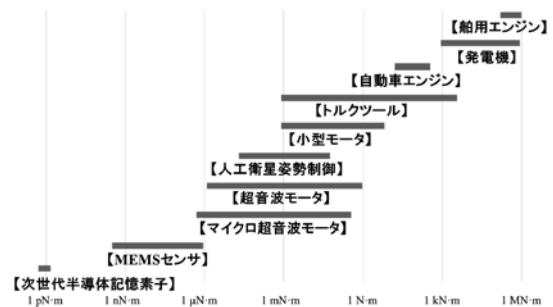


図1 トルク計測分野と計測範囲

* 工学計測標準研究部門力トルク標準研究グループ

式トルク標準機を開発し⁵⁾⁻⁷⁾、10 mN・m から 20 kN・m の範囲でトルクの標準供給を行っている。

近年では、機器の小型化・高性能化に伴い、これまでよりさらに微小なトルクの精密な計測や、時間と共に変化する動的トルクの正確な計測が益々求められてきている。例えば、医療技術⁸⁾、宇宙産業⁹⁾、情報機器¹⁰⁾等の次世代を担う技術の基盤として、1 mN・m 以下の微小トルクの精密な計測が必要になってきている。また、これまでは、様々な製造業者が製造するトルク計測機器は、実荷重式トルク標準機に代表されるトルク校正装置により静的な校正が行われてきたが、モータやエンジンの高性能化・省エネルギー化の要求に対応するために、動的トルクの校正手法の確立が強く望まれてきている。例えば、自動車業界において、自ら開発したエンジンやモータトルクの動的性能測定結果がトルク計測機器の型式によって異なるということがあり、標準となる動的トルク評価手法の確立を望む声が上がっている(図2)。

本調査研究では、このような背景を踏まえ、微小トルク及び動的トルクの計測技術の開発及び標準整備に向け、産業界におけるトルク計測の現状及びニーズ、世界各国の研究開発状況を調査した。第2章ではトルク及びトルク計測機器について述べる。第3章ではトルク校正

装置について紹介する。第4章ではトルクのトレーサビリティ体系について説明する。第5章では産業界に対して行ったアンケート調査について報告する。第6章では海外におけるトルク標準について紹介する。最後に本調査研究をまとめ、今後の展望について述べる。ここで、各国・地域 NMI の名称及び略称をまとめたものを表1に示す。以下本文中では略称のみ表記することとする。

2. トルクの定義及びトルク計測機器の分類

2.1 トルク

トルクは、力のベクトル F と半径方向ベクトル r の外積で作られるモーメントのベクトル T により表現される。図3において0点のまわりに働く力が F である¹¹⁾。

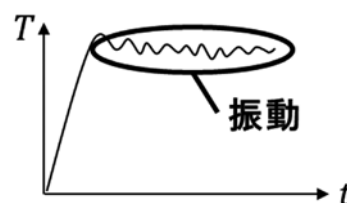


図2 動的トルク計測の例

表1 各国・地域 NMI の名称及び略称

略称	正式名称	正式名称 (和名)	国・地域
METAS	Swiss Federal Office of Metrology and Accreditation	スイス連邦計量・認定局	スイス
CEM	Centro Espanol de Metrologia	スペイン国家計量標準機関	スペイン
UNIIM	Ural Scientific Research Institute of Metrology	ウラル計量科学研究所	ロシア
CENAM	Centro Nacional de Metrología	メキシコ国立度量衡研究所	メキシコ
KRISS	Korea Research Institute of Standards and Science	韓国標準科学研究院	韓国
NMIJ	National Metrology Institute of Japan	計量標準総合センター	日本
NPLI	National Physical Laboratory of India	インド国立物理学研究所	インド
SCL	Standards and Calibration Laboratory	香港標準校正研究所	香港
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt	ドイツ物理工学研究所	ドイツ
LNE	Laboratoire national de métrologie et d'essais	フランス国立計量試験所	フランス
MIKES	Mittateknikan Keskus	フィンランド計量センター	フィンランド
CMI	Czech metrology institute	チェコ計量研究所	チェコ
NIM	National Institute of Metrology	中国計量科学研究院	中国
INMETRO	National Institute of Metrology, Quality and Technology	ブラジル国家度量衡・規格・工業品質院	ブラジル
NIS	National Institute for Standards	エジプト標準研究所	エジプト

トルクは数学的には式 (1) で与えられ、単位は N m 又は $\text{N}\cdot\text{m}$ で表記され (N と m の間にスペース又は中間ドットが必要)、読み方はいずれもニュートンメートルである¹²⁾。

$$T = r \times F = |r||F|\sin\theta \quad (1)$$

2.2 トルク計測機器

トルク計測機器とは、弾性体の弾性変形あるいはそれに比例する量を測定することによりトルクを決定する計測機器全般を指す。回転式／非回転式、ひずみゲージ式／磁歪式／位相差式等のトルクメータの他、産業現場で広く使用されている手動式トルクツール¹³⁾を試験するためのトルクレンチチェッカやトルクドライバチェッカ、そしてそれらチェッカを校正するための参照用トルクレンチ、参照用トルクドライバもトルク計測機器に含まれる¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。トルク計測機器とはトルク変換器からケーブル、指示計器まで含めた一体の機器として定義される。トルク計測機器には、相対拡張不確かさで0.2%から数%程度の産業用機器から、トルクの認定校正事業者の管理用機器あるいは仲介器として用いられるような0.01%程度の高精度機器もある。

2.3 トルク変換器の種類

トルク変換器の伝達軸に加えられたトルクにより、伝達軸に弾性変形が生じる。トルク変換器は、その弾性変形を電圧、周波数等に変換し、トルクを検出するセンサ部を有する。検出感度を向上させるためには、変換器の剛性を下げる必要がある。なお、センサ部とアンプ、指示計器が一体化になった機種もある。次節ではトルク変換器の主な種類について説明する。

(a) 位相差式

位相差式は、トルク伝達軸（トーションバー）に加え

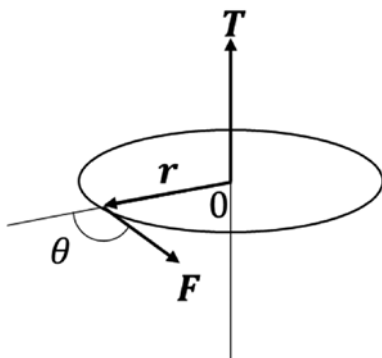


図3 トルクのベクトル表示

られるトルクに比例したねじれ角を、入力軸及び出力軸にそれぞれ配置した歯車などにより検出される信号の位相差で検出し、トルクに換算する方式である^{17),18)}。ねじれ角の検出法には、動力伝達軸の間にトルク検出器を挿入する方法と、実動軸に検出器をつけて直接検出する方法がある。より精度を高めるために、ねじれ角検出に歯車の代わりに位相差板（磁気遮蔽板）を、歯車が発生させる正弦波の代わりに外部キャリア信号を使用して計測する電磁誘導位相差方式という方式も開発されている。位相差式は、信号を回転軸と非接触で検出でき、高精度な時間基準により位相差を測定できるという利点がある一方、価格が高価であるという課題がある。本方式で50 mN·mに至る微小トルクを計測できるトルク変換器が市販されている。また最大5 kHzのトルク変動を計測可能という変換器も市販されている。

(b) ひずみゲージ式

ひずみゲージ式は、従来から広く実用されてきた計測方式である。軸にトルクを加えた際、軸表面にはせん断ひずみが生じる。これは軸に対して45°方向に圧縮ひずみと引張ひずみが生じるとの等価である。トルク伝達部の表面に抵抗線を配したひずみゲージを貼り付け、トルクの入力により発生したひずみを抵抗の変化、すなわち電圧変化により測定し、トルクに換算する¹⁷⁾⁻²⁰⁾。ひずみゲージ式は、軸表面に直接ひずみゲージを貼り付けるための面積を一定以上必要とするため小型化が難しく、微小トルクの計測にも限界がある。またゲージを貼り付ける接着剤や表面保護コーティング剤の粘弾性の影響を受ける（クリープ特性の改善に限界がある）、などの課題がある。一方で、トルク伝達軸のねじれに対する検出感度が高く、位相差式に比べ、ねじり剛性を高くすることができるため、速い応答性を得ることができるという利点があり、1 kHz から5 kHz 程度の変換器も市販されている。

(c) 磁歪式

強磁性体を磁化すると変形を起こし、逆に変形を与えると磁化状態が変わる、すなわち透磁率が変わる。その現象を利用したトルク計測方式が磁歪式である²¹⁾⁻²³⁾。強磁性体の棒をねじると、はじめの磁化状態によって磁束を生じるが、初めの磁化の大きさが十分大きいとき、トルクとそれによって生じる磁束の変化がほぼ比例する。そのため、逆にこの磁束変化を計測することでトルクを求めることができる。この方式についても、非接触でトルク計測ができるという利点がある一方で、衝撃や振動、温度変化の影響を受けやすいなどの課題がある。測定コイル等の検出素子の小型化が難しく、微小トルク

の計測事例はほとんどない。また、動的トルク計測についての優位性については、10 ms 間隔のパルス状のトルク検出例がある²³⁾。

(d) 圧電式

圧電体に力が加わると電荷が発生する現象を利用する²⁴⁾方式で、トルクの計測ではせん断方向に力を加えた場合に電荷が発生する圧電厚みすべり効果を利用することが多い。一般的に圧電式は電荷出力であることから、時間とともに出力が減少してしまうため、静的な測定には不向きである。一方、ひずみゲージ式に比べて極めて高剛性であることから、動的トルクの計測に向いている。小型化も容易で微小トルクの計測用途でも使用可能であるが、ノイズを受けやすく、高精度化が課題である。

なお、それぞれのトルク変換器には一長一短があり、静的測定／動的測定、回転の有無など計測の用途に応じて適切な種類の変換器が選択され、用いられている。特に $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ レンジの微小トルク計測では、上記の方法をそのまま適応することは困難であり、新たな概念のトルク計測機器の開発も必要になると考えられる。特に $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ レンジの微小トルク計測に上記で紹介した方法を適用することは困難であり、新たな概念の計測機器（センサ）の開発が必要になると考えられる。

3. トルク校正装置

トルク校正装置とは、トルクを精密に実現し、トルク計測機器を校正するための上位標準となる装置である。トルク校正装置には、基本量からトルクを組み立てる一次標準であるトルク標準機 (Torque Standard Machine: TSM)、トルク標準機から高精度トルクメータを仲介器として比較校正により値付けされる、二次標準であるトルク基準機 (Torque Calibration Machine: TCM) とがある。現在、トルク計測器の動的な校正に関して、技術標準や一般的な手法はなく、トルク計測器の校正は静的に行われている。ここでは静的な校正装置について記述する。

トルク校正装置をトルクの実現方法から分類すると、①実荷重式、②ロードセル式、③ビルドアップ式、④電磁力式の4つが挙げられる。以下にそれぞれの校正装置の特徴をまとめる。

3.1 実荷重式

図4に実荷重式トルク校正装置の概略図を示す。実荷重式トルク校正装置は、長さの国家標準にトレーサブル

な長さの測定を行った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校正を行ったおもり（又は分銅）を載荷する（重力を負荷する）ことで、精密な純ねじりのトルクを発生させることができる。必要に応じてその場所の重力加速度を精密に計測するか、国土地理院の重力加速度基準網²⁵⁾を利用して算出する。また、おもりに作用する空気浮力の影響も考慮する。相対拡張不確かさで 10^{-5} から 10^{-4} 程度の高精度なトルクの標準供給が可能であり、各国でトルクの国家標準を実現する方法として採用されている²⁶⁾⁻²⁸⁾。一方で、おもりを負荷した後にモーメントアームの振動やおもりの揺動によりトルクが安定するまで時間を要する。加えて、トルクを時間的に急激に変化させることができず、静的な校正にのみ利用可能である。また、おもりで微小トルク（微小力）を実現するには限界があり、現在の技術では $1\text{ mN}\cdot\text{m}$ から $10\text{ mN}\cdot\text{m}$ 程度が下限界であると考えられる。

3.2 ロードセル式

図5にロードセル式トルク校正装置の概略図を示す。ロードセル式トルク校正装置は、長さの国家標準にトレーサブルな長さの測定を行ったモーメントアームと、力の国家標準にトレーサブルな校正を行ったロードセル（指示計器と組み合わせた力計）から構成されている。

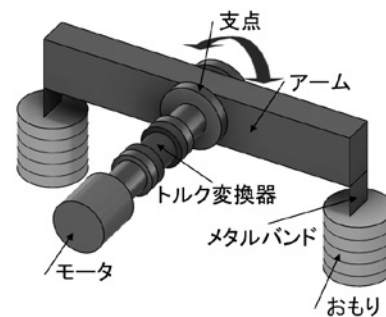


図4 実荷重式トルク校正装置

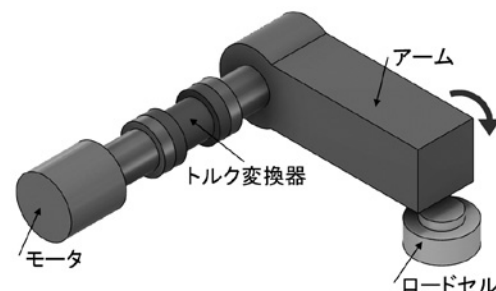


図5 ロードセル式トルク校正装置

この方法は、国家標準にトレーサブルな校正が可能な力計の校正範囲が1 N から 20 MN と広範囲なことから、比較的容易にトルクの校正範囲を拡大することができるが、モーメントアーム長さ（測定軸からロードセルの荷重点までの距離）を決定することが難しく、またロードセルの校正の不確かさにトルク校正装置のそれも依存するため、供給できる相対拡張不確かさは 10^{-3} 程度になる²⁹⁾。本方式により微小トルク、並びに動的トルクが実現できるかどうかは、使用するロードセルの微小力範囲、並びに動特性が評価されたロードセルが必要である。しかし、現在、ロードセルの動的力校正を行えるのはドイツのPTBのみで、校正できる力の範囲も周波数も限定的である。

3.3 ビルドアップ式

図6にビルドアップ式トルク校正装置の概略図を示す。ビルドアップ式トルク校正装置では、予め校正された基準トルクメータと、校正対象であるトルクメータを直列に接続し、比較をすることで校正を行う。上位標準により校正された基準トルクメータが必要となることから、一次標準にはなり得ず、トルク基準機に分類される。基準トルクメータの校正の不確かさに依存するため、相対拡張不確かさが 10^{-4} から 10^{-3} 程度に大きくなる。他方、実荷重式トルク校正装置に比べて精密なおもりの質量管理、モーメントアームの長さの管理が不要であり、低コストで開発、維持することが可能である。また、トルクを連続的に負荷しても校正が可能であることから、比較的短時間で校正を行うことができる。そのような特

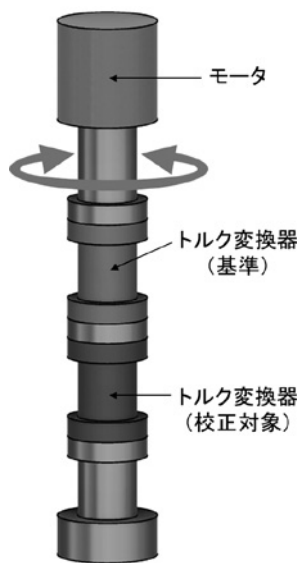


図6 ビルドアップ式トルク校正装置

性から、この方式を採用する民間校正事業者が多い^{30),31)}。NMIJでは、実荷重式トルク標準機では著しく校正に時間がかかる小容量域において、定格容量10 N・mの小容量ビルドアップ式トルク基準機の開発を行っている³²⁾。本方式により微小トルクが実現できるかどうかは、トルク変換器がどこまで微小レンジに対応できるかによる。また、本方式により動的トルクが実現できるかどうかは、動特性が評価されたトルク変換器が参照標準として使用できるかどうかによる。

3.4 電磁方式

図7に電磁方式トルク校正装置の概略図を示す。電磁方式トルク校正装置は世界に先駆けてNMIJで開発された方式である³³⁾⁻³⁵⁾。重力によりトルクを実現してきたこれまでのトルク校正装置とは異なり、キップルバランスの原理を利用して、電磁力によりトルクを実現する。このキップルバランスの原理を用いたトルクの発生は以前から検討されてきた^{36),37)}。一様な磁場 B の中に置かれた面積 A 、巻き数 N の矩形コイルが一定の角速度 ω で回転する際に発生する誘起起電力 V は次式で表される。

$$V = NAB\omega \sin \omega t \quad (2)$$

その最大値 V_{\max} は、 $V_{\max} = NAB\omega$ である。また、同じ磁場の中に置かれた同じ矩形コイルに既知の電流 I を流した際に生じるトルク T は次式で表される。

$$T = NAB I \cos \theta \quad (3)$$

その最大値 T_{\max} は、 $T_{\max} = NABI$ である。これらの関係

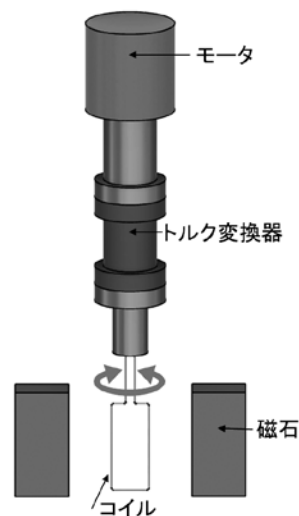


図7 電磁方式トルク校正装置

より、矩形コイルを貫く全磁束 NAB を消去して、

$$T_{\max} \omega = V_{\max} I \quad (4)$$

の関係が得られる。 V 及び T は、いずれも磁束線と矩形コイルが平行になる際に最大値となる。この原理では、精密な測定が困難な N, A, B を評価することなく、 V, I, ω 及び矩形コイルの角度位置を測定することにより、発生したトルクを求めることができる。

電磁力式トルク校正装置の原理は 10 mN・m を下回る微小トルクの実現に向いている。むしろ実荷重式トルク校正装置で実現できている N・m から kN・m のレンジについては大電流による過熱等の問題があり、実現が難しい。動的トルクについては、正弦波電流の導入により比較的容易に動的トルクを実現できる可能性があるが、微小トルクレンジに限られる。

4. トルク計測のトレーサビリティ体系

我が国では、計量法に基づく計量法トレーサビリティ制度（Japan Calibration Service System, 以下 JCSS と称す）により計測のトレーサビリティが確保されている。JCSS は、「計量標準供給制度」と「校正事業者登録制度」の 2 本柱から成り、前者については NMIJ が産業界に対して標準供給を行っており、後者については独立行政法人製品評価技術基盤機構（National Institute for Testing

and Evaluation, 以下 NITE と称す）が運営している。

図 7 に日本国内におけるトルク計測のトレーサビリティ体系^{38),39)}を示す。NMIJ におけるトルクの標準供給範囲は 10 mN・m から 20 kN・m であり、前述の通り、定格容量 10 N・m, 1 kN・m, 及び 20 kN・m の 3 台の実荷重式トルク標準機群により校正サービスが行われている⁵⁾⁻⁷⁾。一方、現在、JCSS 校正事業者によるトルクの校正範囲は 500 mN・m から 5 kN・m となっている。500 mN・m より小さい微小トルク範囲並びに 5 kN・m を超える大トルクの範囲については産業界ニーズがあるものの、技術的、コスト的課題が多く、JCSS 校正事業の拡大には NMIJ や大学・研究機関による技術先導、技術協力が必要と考えられる。

なお、図 8 はトルクの校正の連鎖によるトレーサビリティ体系を示しているが、校正事業者が、質量、長さ、電流などの基本量からのトレーサビリティを確保し、自らトルクを組み立てて実現する方法（自己組立法）もある。自己組立法によれば、校正の不確かさを低減できる可能性があるが、一方でこちらも技術的、コスト的課題が多く、自己組立法はあまり用いられていない。

ところで、3 章で述べたように、実荷重式トルク標準機群は静的な校正のみ可能であるため、現状の計測のトレーサビリティは全て静的な校正により確保されている。一方で、産業界においては、トルク値が時間と共に変化する動的なトルク計測に関してのトレーサブルな校

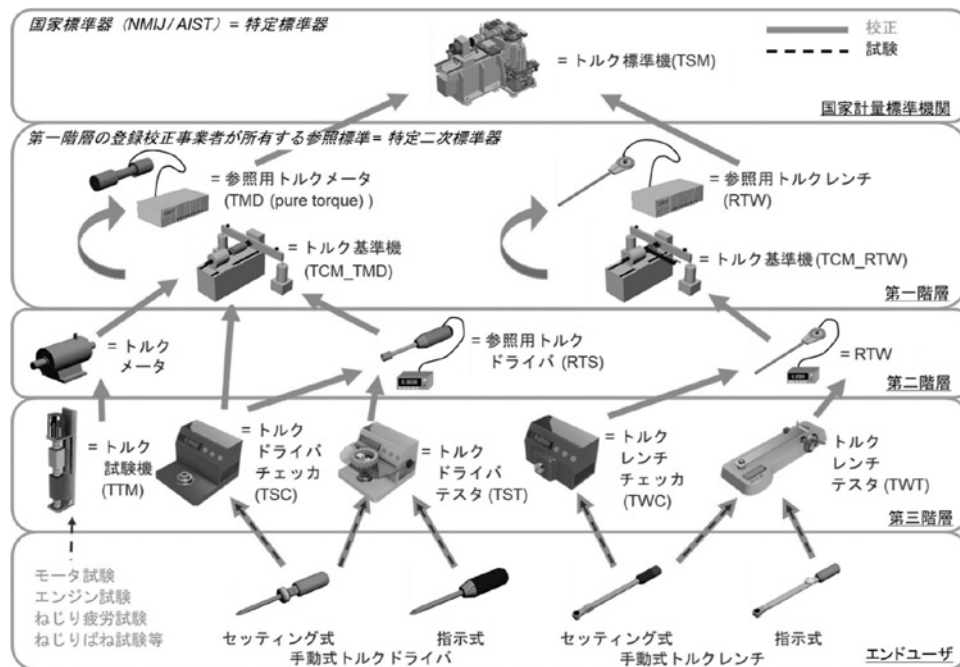


図 8 国内におけるトルク計測のトレーサビリティ体系

正の需要も高い。

5. トルク計測の産業利用に関する調査

本調査研究では、産業界におけるトルク計測の現状を把握するため、NMIJ 力・トルク計測クラブ⁴⁰⁾会員にアンケート調査への協力を仰ぎ、18社から回答を得た。その18社の事業の内訳は、3社が校正事業者、8社がメーカー、7社がユーザであった(図9参照)。

まず設問1として、トルク計測の用途について尋ねた。その結果、ねじの締め付けトルクの管理、モータの諸性能計測、エンジンの諸性能計測、ねじりせん断試験に伴うトルク計測、粘度計測等の回答が得られた。また、近年、小型モータ等これまでより微小なトルクの利用が進んでいるとのことであった。

次に設問2として、トルク計測を行っているトルク範囲について尋ねた。その結果を図10に示す。図10より、

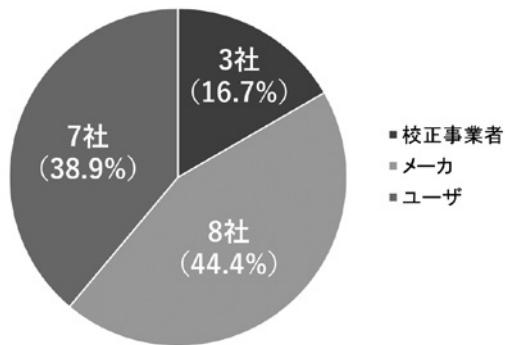


図9 アンケート調査回答数

既にNMIJで標準供給を行っている範囲(10 mN・mから20 kN・m)に需要が集中していることがわかる。その一方で、さらに小さな範囲のトルクについて、トルク計測の需要が高まっていることがわかる。

次に設問3として、トルクの計測範囲ごとに要求される精度について尋ねた。その結果を図11に示す。図11より、大きいトルク範囲になるほど、高い精度が要求される傾向にあることがわかる。また、ユーザに比べ、メーカーの方が高い精度を要求する傾向があることがわかる。加えて、微小トルクとしての要求精度はおおむね0.1%程度であることがわかる。

次に設問4として、動的トルク計測の用途について尋ねた。その結果、モータ、エンジン、ホイールの諸性能計測、ねじり疲労試験に伴うトルク計測、金属切削加工に伴うトルク計測、歯車のかみ合いトルク変動計測等の回答が得られた。また、動的トルクの種類としてはエンジンの爆発のような瞬間的なトルク変動や、モータのリプルトルクのような一定の周期で増減するトルクを計測したいという要望も強かった。

次に設問5として、動的トルク計測の範囲と必要な応答周波数について尋ねた。その結果を図12に示す。設問が適切ではなく、また回答の仕方にもばらつきが見られ、一つのグラフにまとめることは困難であった。そこで、回答から類推されるトルクの大きさの範囲と計測するトルク変動の周波数範囲を“コ”の字で示すこととした。“コ”の字における右側の縦線が希望する応答周波数である。図16より、産業界のニーズとして、自動車産業で良く計測される1 N・mから1 kN・m程度の範囲のトルクについて、100 Hzから1 kHz程度の周波数での

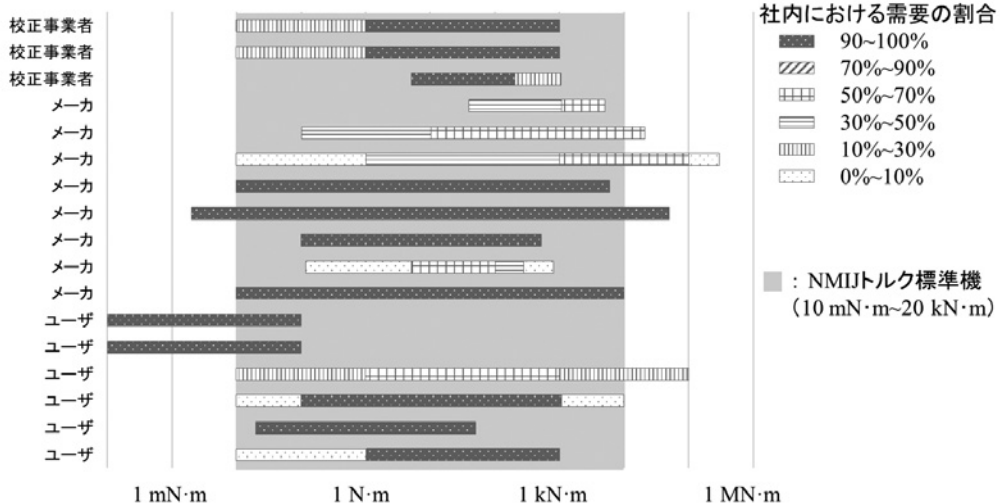


図10 使用トルク範囲と需要

計測需要が高いことがわかる。加えて、さらに小さな範囲の動的トルク計測の需要があることもわかる。

次に設問6として、動的トルクの計測範囲ごとに要求される精度について尋ねた。その結果を図13に示す。図13より、設問5と同様に、自動車産業で良く計測される1 N・m から1 kN・m 程度の範囲のトルクに需要が集中していることがわかる。また、ユーザに比べ、メーカーの方が高い精度を要求する傾向があることがわかる。

次に設問7として、使用しているトルク計測装置が国家標準にトレーサブルである必要があるか尋ねた。87.5%にあたる14社から必要であるという回答が得られ、産業界においてトレーサビリティが重要であるということがわかった。ユーザからの計測のトレーサビリティの要求、校正証明書による技術的裏付け等が理由であると考えられる。

以上のアンケート結果より、これまで標準整備を行ってきた範囲に加え、さらに小さな範囲のトルク及び動的トルク計測の需要の高まりが確認できた。加えて、微小トルク計測並びに動的トルク計測が国家標準にトレーサブルであることが求められているということがわかった。

6. 海外におけるトルク標準

6.1 微小トルク

海外におけるトルク標準及び計測技術の研究動向を探るため、海外のNMIについて調査を行った。国際度量衡委員会CIPMの国際相互承認MRAに基づく国際度量衡局BIPMの基幹比較データベースKCDBにおける付属書C(校正測定能力(CMC)とその範囲)に掲載さ

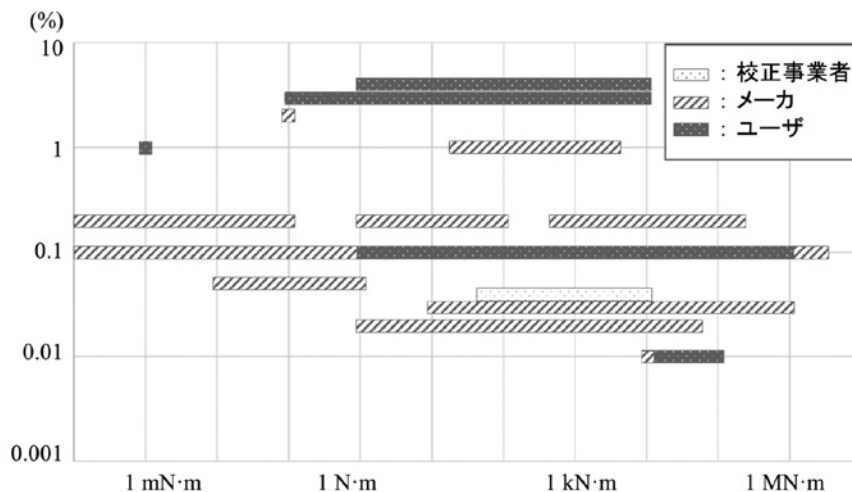


図11 トルク計測範囲と要求される精度

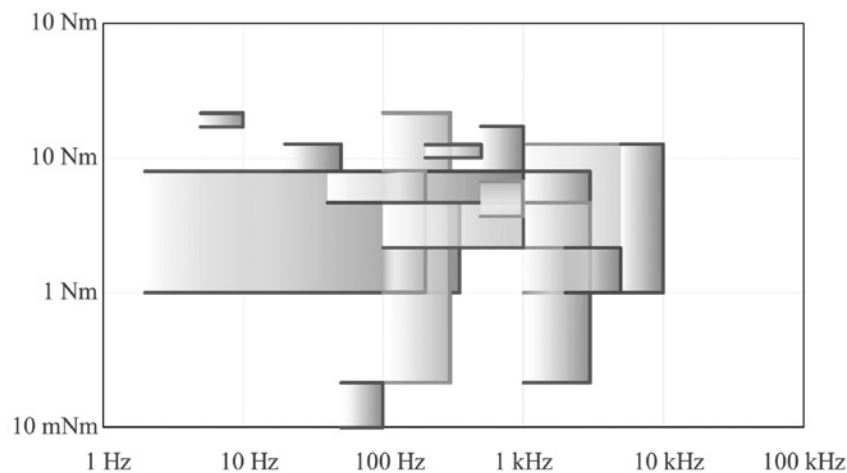


図12 動的トルク計測範囲と要求される応答周波数

れている各国のトルク標準供給可能範囲をまとめたものを図14に示す。

CMCを登録しているNMIは世界で15機関であり、その多くが日本国内でも産業界からのニーズが高い1 N・mから20 kN・mの範囲の標準供給を行っていることがわかる。さらにこれより小さな範囲のトルクの標準供給を行っているNMIとして、韓国のKRISS、香港のSCL、ドイツのPTB、中国のNIMが挙げられる。これらNMIの微小トルク標準機はいずれも実荷重式を採用しており、校正可能範囲の下限はKRISS、SCL、PTB、NIMにおいてそれぞれ100 mN・m、500 mN・m、1 mN・m、10 mN・mである^{42)~45)}。現時点においてCIPM MRA付属書Cに登録されている最小トルクは、PTBの定格容量

1 N・mの実荷重式トルク標準機により発生される1 mN・mである。我が国においては、これまで小容量トルク標準として、定格容量10 N・mの実荷重式トルク標準機を開発し10 mN・mまでの標準供給を行ってきた^{7) 46)}。実荷重式トルク校正装置を用いてさらに微小なトルクを実現するためには、モーメントアームの長さを短くする、あるいは負荷するおもりの質量を小さくすることが考えられるが、いずれも加工上の技術的制約が多い。今後さらに小さな範囲の微小トルクの標準整備を行うには実荷重式とは異なる原理のトルク実現方法を検討する必要がある。NMIJでは先行開発した電磁式トルク標準機により0.3 μN・mから10 mN・m程度の範囲で10⁻³レベルの相対拡張不確かさの微小トルクの実現に

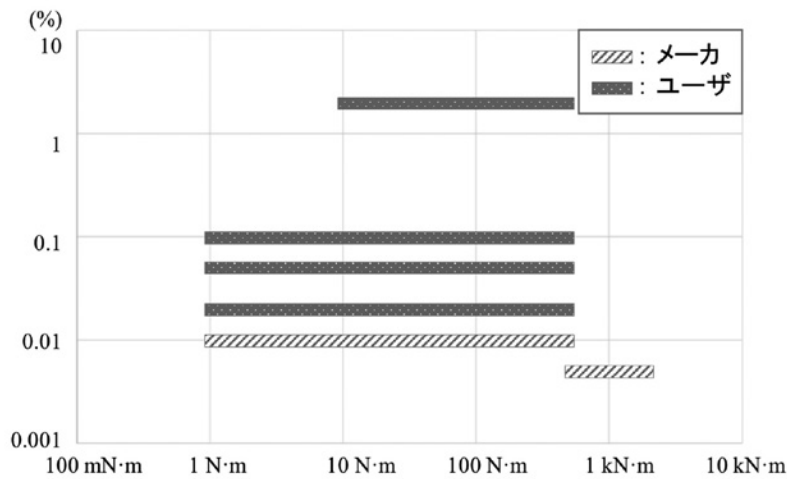


図13 動的トルク計測範囲と要求される精度

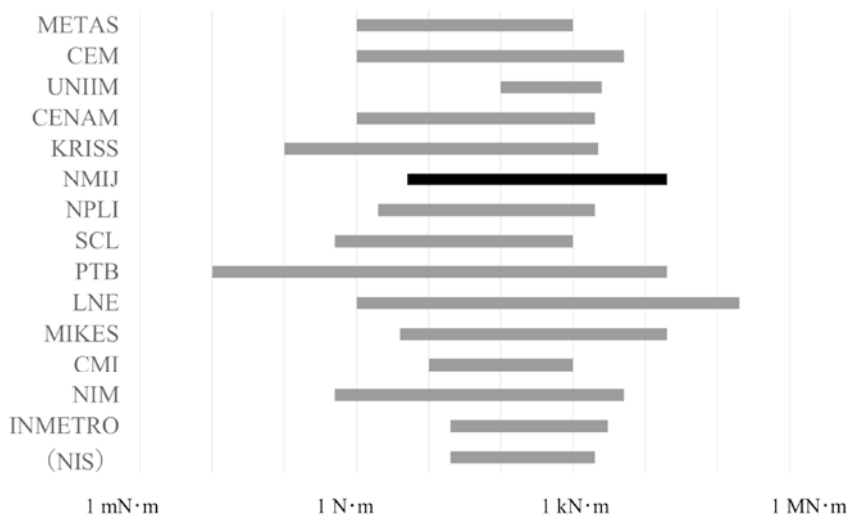


図14 CIPM MRA付属書Cに登録されている各NMIのトルク標準供給範囲⁴¹⁾

成功している^{34),35)}。また、KRISSEでは、超電導リングを通る磁束の量子化を利用して、一定間隔で離散的なサブフェムトニュートンメートルのトルクステップを生成する方法を提案している⁴⁷⁾。

6.2 動的トルク

動的トルク計測については、5章で述べた通り、産業界からの、精密計測や計測のトレーサビリティに対する要求が高い。動的トルク実現装置・評価装置の開発・技術移転により、動的トルクの精密な計測が可能になり、その結果センサの動特性の比較やエンジン、モータ等の回転体の性能の向上による燃費、環境負荷の改善等が可能になる⁴⁸⁾。動的トルク実現装置・評価装置の研究に着手しているNMIとしては、PTB、INMETRO、NIM、KRISSEが挙げられる。それぞれの機関の評価方法について、以下に述べる。

PTBで開発されている動的トルク実現装置⁴⁹⁾⁻⁵²⁾の概略図を図15に示す。この装置では、振動式ねじり加振機と同軸上にトルク変換器を取り付け、加振機によりねじり振動した際の角速度変化をグレーティングディスクを通してレーザー振動計により測定する。予め実験的に求めておいた全ての機械要素のモデルパラメータ（慣性モーメント、減衰粘性係数など）と合わせてトルクを算出することができる。最も簡単には、角加速度と慣性モーメントの関係から、以下の式(5)に従い、トルクを求めることができる。

$$T(t) = J_0 \cdot \ddot{\varphi}(t) \quad (5)$$

ここで J_0 は慣性モーメント、 $\ddot{\varphi}$ は角加速度である。式(5)により算出したトルクと、トルク変換器からの出力トルクを比較することで校正を行う。

また、PTBだけでなく、欧州の地域計量機関（Regional Metrology Organization; RMO）である欧州国家計量標準機関連合（European Association of National Metrology Institutes; EURAMET）として欧州諸国のNMIが共同で、力学量の動的計測をトレーサブルに行うことを目的として研究開発が進められている⁵³⁾。ブラジルのINMETROにおいては、ドイツのTechnische Universität Ilmenauとの共同研究で、慣性モーメントが既知のディスクに繋がれた回転軸を回転させ、そこにブレーキの作用をする加速度パルスを与えることにより、慣性モーメントと加速度からトルクを求めるという手法で動的トルクの精密な計測を目指している⁵⁴⁾⁻⁵⁶⁾。NIM等においては、予めある量のトルクを負荷しておき、そこに逆方向のトルクを作用させることにより、動的トルクの計測を行う定格容量100 N・mの装置の開発を行っている^{57),58)}。KRISSEにおいては、電磁力を用い、モードを使い分けることで同じ装置で静的トルクと動的トルクの校正ができる標準機の開発が始められたところである⁵⁹⁾。

7. 今後のNMIJの研究展開

7.1 微小トルク

6章で述べた海外NMIの取り組みに対し、我が国では、NMIJで初めて開発された電磁力式トルク校正装置の原理を利用し、微小トルク及び動的トルクの実現装置の開発に取り組んでいる^{32),34)}。我が国におけるトルクの標準供給の下限は10 mN・mであり、それ以下の範囲のトルク標準は整備されていない。しかし5章で示したとおり、10 mN・mよりさらに小さなトルク標準の開発、供給が望まれており、10 mN・m以下のトルク標準の整備が必要である。電磁力式トルク校正装置は、精密かつ

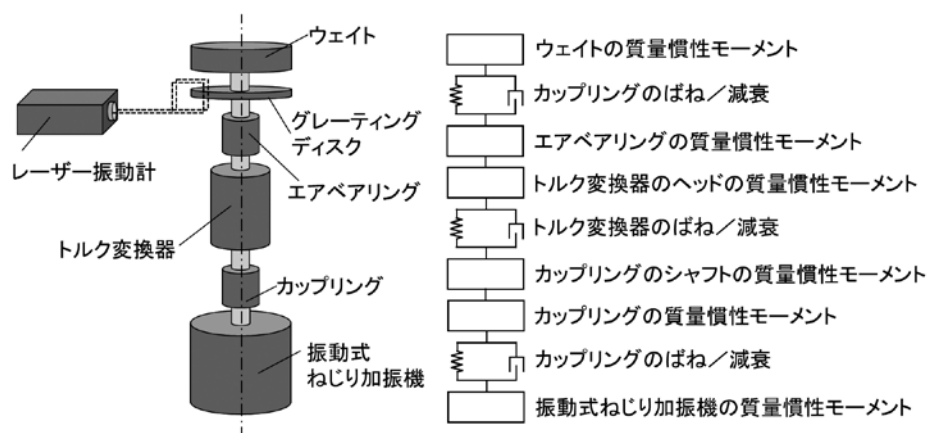


図15 PTBにおける振動式動的トルク実現装置概略図

微弱な電流を流すことにより、比較的小さいトルクを精密に実現できるため、微小トルクの標準・計測に適している。一方で、大電流を流すと熱損失が大きいため、実荷重式トルク校正装置で精密に実現できるような N・m オーダ、kN・m オーダのトルクの実現には不向きである。今後、この電磁力式トルク校正装置の高度化を行い微小トルクの標準整備を行っていく上で課題の一つとなるのは、角加速度の不確かさの低減である。現在の装置構成においては、角加速度の不確かさが支配的である。解決策の一つとして、NMIJ が開発した自己校正型ロータリーエンコーダを活用することを検討している。角加速度の不確かさを低減することにより総合的に 10^{-5} のオーダの相対不確かさを達成し、産業界への技術移転を推進することを目指している。

7.2 動的トルク

動的トルク標準の開発にあたっては、実現トルクと校正対象の計測トルクの同期を取るのが困難であること、高周波であるほど大きなトルクの実現が困難であること、校正対象物に依存してねじり振動系が変わり、モデル化を毎回考え直さなければならないこと、ねじりばね定数、ねじり粘性減衰係数等、考慮しなければならないパラメータが多く、一つの校正対象物に対して著しくコストがかかることなど多くの課題がある。NMIJ では、6.2 節で述べた課題を踏まえ、電磁力式トルク校正装置を応用し、まずはプロトタイプとしての動的トルク実現装置の開発を目指す。電磁力式トルク校正装置では、コイルが回転できることや、電流値を変化させることで発生するトルクを時間的に変化させることができることなどから、回転しながらの動的トルク計測が比較的容易である。高周波の周期的トルクを発生させることも可能である。一方で、動的トルク実現装置と校正対象のトルク計測機器との同期が取れた角度位置を精密に求めることが難しいという課題がある。まずは電磁力式トルク校正装置で実現できる $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ オーダから $\text{mN}\cdot\text{m}$ オーダの精密な動的トルク実現を目指す。最終的には電磁力式を含めた様々な原理の応用を検討しつつ、自動車産業で必要とされるような $1\text{ N}\cdot\text{m}$ から $1\text{ kN}\cdot\text{m}$ 程度の大きさのトルク範囲における、数百 Hz から 1 kHz 程度の周波数の動的トルク評価ができるような装置開発を進めていく。

8. おわりに

本調査研究を通じて、トルクの計測技術及び標準に関する産業界の実情やニーズ、世界的な取り組みについて

調査を行った。その結果、これまで標準整備がなされてきた範囲に加え、さらに小さなトルクの使用が増加しており、微小トルク範囲でのトレーサブルな校正の需要の高まり、標準整備の必要性を確認するに至った。また、これまで、動的トルク計測に使用されるような機器についても、静的な校正を行うことで対応してきたが、国内外の産業発展のためには、動的トルク標準の整備についても急務であることを強く認識した。トルク計測機器の動特性が評価できなければ産業界ニーズは満たされない。このような需要に対して、トレーサビリティをどのように確保していくかが重要な課題の一つである。本調査研究を通じて得られた知見を元に、微小トルク及び動的トルクの計測技術と標準に関する研究を推進し、産業界や学術界の発展に貢献したい。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、大串浩司研究グループ長、西野敦洋主任研究員をはじめ、多大なるご指導・ご助言をいただきました力トルク標準研究グループの皆様深く御礼申し上げます。また、アンケート調査にご協力いただきました企業の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 米谷俊一：ねじ締結と摩擦係数, YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW (2004).
- 2) C. Schlegel, H. Kahmann and R. Kümme: MN·m torque calibration for nacelle test benches using transfer standards, Proc. of ACTA IMEKO 5-4 (2016) 12-18.
- 3) G. Foyer, S. Kock and P. Weidinger: Influences on torque measurement in nacelle test benches and their effect on the measurement uncertainty and consequences of a torque calibration, Proc. of ACTA IMEKO 8-3 (2019) 59-68.
- 4) F. Beyeler, S. Muntwyler, Z. Nagy, M. Moser and B. J. Nelson: A Multi-Axis MEMS Force-Torque Sensor for Measuring the Load on a Microrobot Actuated by Magnetic Fields, Proc. of 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2007) 3803-3808.
- 5) K. Ohgushi, T. Tojo and A. Furuta: Development of the 1 kN m torque standard machine, Proc. of XVI IMEKO World Congress (2000) 25-28.
- 6) K. Ohgushi, T. Ota, K. Ueda and E. Furuta: Design

- and development of 20 kN·m deadweight torque standard machine, VDI-BERICHT 1685(2002)327-332.
- 7) A. Nishino, K. Ogushi and K. Ueda: Uncertainty evaluation of a 10 N·m dead weight torque standard machine and comparison with a 1 kN·m dead weight torque standard machine, *Measurement* 49 (2014) 77-90.
 - 8) P. Gomes: *Medical Robotics*, Woodhead Publishing, 51 (2012).
 - 9) R. Dechao, S. Tao, C. Lu, C. Xiaoqian and Z. Yong: Attitude control system design and on-orbit performance analysis of nano-satellite—“Tian Tuo 1”, *Chinese Journal of Aeronautics*, 27-3 (2014) 593-601.
 - 10) H. Kubota, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nagahama, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe and Y. Suzuki : Quantitative measurement of voltage dependence of spin-transfer torque in MgO-based magnetic tunnel junctions, *nature physics*, 4 (2008) 37-41.
 - 11) 日野太郎, 直江正彦, 山下 健, 金子双男: エンジニアのための計測技術, 朝倉書店 (1981) 285-305.
 - 12) (独) 産業技術総合研究所 計量標準総合センター: 国際単位系 (SI), 国際文書第 8 版 (翻訳版) (2006).
 - 13) ISO 6789-1:2017: Assembly tools for screws and nuts — Hand torque tools — Part 1: Requirements and methods for design conformance testing and quality conformance testing: minimum requirements for declaration of conformance(2017). JMIF-015 日本計量機器工業連合会規格 トルクメータ校正事業者のためのガイドライン, 社団法人 日本計量機器工業連合会 (2004).
 - 14) JMIF-016 日本計量機器工業連合会規格 参照用トルクレンチ校正事業者のためのガイドライン, 社団法人 日本計量機器工業連合会 (2004).
 - 15) JMIF-019 日本計量機器工業連合会規格 トルク試験機/トルクレンチテスト校正事業者のためのガイドライン, 社団法人 日本計量機器工業連合会 (2007).
 - 16) 小野測器: デジタルトルクメータ・モータ計測システムセレクションガイド (1997).
 - 17) 公益社団法人 日本冷凍空調学会: 日本冷凍空調学会専門書シリーズ測定器の取扱方法 (2015) 195-213.
 - 18) 改訂 計量技術ハンドブック 工業技術院計量研究所 計量技術ハンドブック編集委員会編 (1973) 1105-1121.
 - 19) 荻原修一: ひずみゲージとトルク変換 (1983) 39-42.
 - 20) GRAPHTEC: ひずみの豆知識 (2013) 初頁-終頁.
 - 21) 原田耕介, 笹田一郎: 磁気を用いたトルクセンサ, (1983) 47-49.
 - 22) 水野正志, 小島勝洋: 磁歪式トルクセンサの開発, *電気製鋼* 62-3 (1991) 167-174.
 - 23) 西部祐司, 野々村裕, 塚田厚志, 竹内正治, 奥村猛: 自動車エンジン用磁歪式トルクセンサ, *豊田中央研究所 R&D レビュー* 31-2 (1996) 61-71.
 - 24) 古谷克司: 圧電効果を用いたセンサ, *計測と制御* 第 45 巻第 4 号 (2006) 296-301.
 - 25) 国土交通省 国土地理院, <https://www.gsi.go.jp/top.html>.
 - 26) J. A. R. Carbonell, J. L. R. Verdecia and A. L. Robledo: Torque standard machines at CEM, *Proc. of XVIII IMEKO World Congress* (2006).
 - 27) P. Averlant, A. Gosset: Development of the new LNE 50 N·m deadweight torque standard machine, *Proc. of IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference* (2007).
 - 28) Y. Park, M. Kim and D. Kang: Development of a small capacity deadweight torque standard machine, *Measurement Science and Technology*, 18-11 (2007).
 - 29) D. Peschel, D. Mauersberger, D. Schwind and U. Kolwinski: The new 1.1 MN·m torque standard machine of the PTB Braunschweig/Germany, *Proc. of IMEKO 19th TC3 International Conference* (2005).
 - 30) H. J. Fraiss, L. Stenner and D. Röske : Development of a new 400 kN·m torque calibration machine, *Proc. of XXI IMEKO World Congress* (2015).
 - 31) Y. Toda, T. Kurokawa, H. Teshigawara and K. Ogushi: Calibration of torque measuring devices using the reference type torque calibration machine in JQA, *Proc. of APMF2019* (2019) T-1.
 - 32) A. Nishino, M. Kiuchi and K. Ogushi: Development of a low nominal capacity reference torque calibration machine, *Proc. of APMF2019* (2019) T-3.
 - 33) A. Nishino, K. Ueda, K. Fujii: Design of a new torque standard machine based on a torque generation method using electromagnetic force, *Measurement Science and Technology*, Vol. 28 (2017) 025005.
 - 34) 一般社団法人 日本計量機器工業連合会: 計量計測

- はかる 128 (2018) 10-13.
- 35) A. Nishino, K. Fujii: Calibration of a torque measuring device using an electromagnetic force torque standard machine, *Measurement* 147 (2019) 106821.
- 36) B. P. Kibble and I. A. Robinson: Principles of a new generation of simplified and accurate watt balances, *Metrologia*, Vol. 51 (2014) S132-S139.
- 37) Steiner R L, Gillespie A D, Fujii K, Williams E R, Newell D B, Picard A, Stenbakken G N and Olsen P T: The NIST Watt balance: progress toward monitoring the Kilogram, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* Vol. 46, (1997) 601-4.
- 38) JCT20901 技術的要求事項適用指針 (トルクメータ及び参照用トルクレンチ), 独立行政法人 製品評価技術基盤機構 (2017) 7.
- 39) JCT20903 技術的要求事項適用指針 (手動式トルクツール), 独立行政法人 製品評価技術基盤機構 (2017).
- 40) 力・トルク計測クラブ, <https://unit.aist.go.jp/riem/club/chikara/chikara.html>.
- 41) BIPM, <http://kcdb.bipm.org/>
- 42) P. Yon-Kyu, K. Min-Seok, K. Jong-Ho, C. Jae-Hyuk, K. Dae-Im: Establishment of torque standards in KRISS of Korea, *IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference* (2007).
- 43) D. Röske: Metrological characterization of a 1 N m torque standard machine at PTB, Germany, *Metrologia* 51 (2014)87-96.
- 44) L. Tao, D. Ming, L. Jing, Z. Yue, Z. Zhimin: The torque standard machines in China, *Proc. of XIX IMEKO World Congress* (2009) 347-350.
- 45) Z. Zhimin, Z. Yue, M. Feng, Z. Wei, H. Gang, L. Tao, J. Honglei: The establishment of a 1 N·m torque standard machine at NIM, *Proc. of ACTA IMEKO* (2017) 50-53.
- 46) A. Nishino and K. Ogushi, Re-evaluation of a relative expanded uncertainty of torque realized by a 10 N·m deadweight torque standard machine, *Proc. APMF 2017* (2017) TS1-2.
- 47) J. Choi, S. Lee: Fluxoid-based digitized mechanical torque in subfemtonewton-meter range, *Journal of applied physics*, 109, (2011) 014311.
- 48) 大串浩司, 上田和永: トルク試験装置の動特性評価法に関する提案, 第31回センシングフォーラム予稿集 (計測自動制御学会, 2014) 294-299.
- 49) T. Bruns: Sinusoidal torque calibration: A design for traceability in dynamic torque calibration, *Proc. of XVII IMEKO World Congress* (2003) 282-285.
- 50) L. Klaus, T. Bruns, M. Kobusch: Determination of model parameters for a dynamic torque calibration device, *Proc. of XX IMEKO World Congress* (2012).
- 51) L. Klaus: Dynamic torque calibration, *PTB-Mitteilungen* 125-2 (2015) 12-17.
- 52) L. Klaus: Model parameter identification from measurement data as a prerequisite for dynamic torque calibration - Measurement results and validation, *Proc. of ACTA IMEKO* 5-3(2016)55-63.
- 53) C. Bartoli, M. F. Beug, T. Bruns, S. Eichstädt, T. Esward, L. Klaus, A. Knott, M. Kobusch, C. Schlegel: Dynamic calibration of force, torque and pressure sensors, *Proc. of IMEKO 22nd TC3, 12th TC5 and 3rd TC22 International Conference* (2014).
- 54) R. S. Oliveira, H. A. Lepikson, S. Winter, R. Theska, T. Fröhlich, A. C. P. Bitencourt, R. R. Machado: New proposals for the dynamic tests of torque transducers, *Proc. of 58th ILMENAU SCIENTIFIC COLLOQUIUM* (2014).
- 55) R. Oliveira, R. Claudino, R. Kalid, T. Fröhlich, L. Gusmão and H. Lepikson: Estimate of the inertial torque in rotating shafts - a metrological approach to signal processing, *Journal of physics: Conference Series* 648(2015)012019.
- 56) R. S. Oliveira, R. R. Machado, H. Lepikson, T. Fröhlich, R. Theska: A method for the evaluation of the response of torque transducers to dynamic load profiles, *Proc. of ACTA IMEKO* 8-1 (2019) 13-18.
- 57) L. Tao, D. Ming, L. Jing, Z. Yue and Z. Zhimin: The torque standard machines in China, *Proc. of XIX IMEKO World Congress* (2009).
- 58) A. T. Li, B. X. Ma, Z. Qiao: Negative step dynamic torque calibration machine, *Proc. of IMEKO 23rd TC3, 13th TC5 and 4th TC22 International Conference* (2017).
- 59) M. Kim: Design of the new dual-mode torque standard machine, *Proc. of ESW2018* (2018) P-6.