

小容量トルクの計測技術と標準に関する調査研究

西野 敦洋*

(平成17年11月11日受理)

A Survey on Torque Measuring Techniques and Torque Standards in the Small Capacity

Atsuhiko NISHINO

1. はじめに

多くの産業分野の製品にねじが用いられている。全てのねじが適切なトルクで締付けられることで、はじめて製品の安全・品質が保たれる。ねじの締付け管理の多くにトルクレンチやトルクドライバ等のトルク計測機器が使用される。一方、自動車のエンジンをはじめ、回転駆動系の性能・品質評価のためには正しくトルクを計測する必要がある。回転駆動系の評価に必要とされるトルクの範囲は、数百kN・mの船舶のエンジンからハードディスクドライブやCD-ROMドライブ等に見られる数十mN・mの小型モータの回転トルクまで幅広い。特にOA機器やAV機器など家電・IT産業における製品には多機能化・軽量化・省電力化が求められており、より精密なトルク計測機器が必要となってきた。

従来トルク計測機器の校正は、既知の力を発生できる負荷機構（おもりと重力加速度または油圧ジャッキやハンドル等による負荷）と既知の長さのモーメントアームにより構成される校正装置を製造業者が独自に設定し、それらの校正装置を用いて行われてきた。しかし、前述のように近年の高精度なトルク計測機器へのニーズの高まりから、トルク単位での高精度な標準供給が望まれるようになってきている。これに対し、いち早く取り組みを開始したのはドイツ物理工学研究所（PTB）である。PTBでは、1993年より高精度な「純ねじり」のトルク（ねじることを目的とし、トルク成分に対して他の方向の力・モーメント成分を寄生分力とする計測）を実現することができるトルク標準機の研究開発を行っており、1990年代中頃からトルク標準の供給も行っている¹⁾。さらにトルク計測機器の校正方法に関する技術基準についても、

ドイツ工業規格 DIN 51309として整備している²⁾。一方独立行政法人産業技術総合研究所計量標準総合センター（NMIJ/AIST）では、1997年よりトルク標準機の研究開発を開始し³⁾、2004年までに5～20000 N・mの範囲でトルク標準供給を開始した。また、校正方法のガイドラインとして社団法人日本計量機器工業連合会規格 JMIF-015「トルクメータ校正事業者のためのガイドライン」⁴⁾およびJMIF-016「参照用トルクレンチ校正事業者のためのガイドライン」⁵⁾が定められている。このようなトルク標準に関する取り組みは、近年他国および他地域でも始められている。現在多くの国家計量標準機関（NMI）がターゲットとし研究開発を行っているのは1kN・mレンジが実現できるトルク標準機である。しかしながら前述のように、産業界ではより小容量（本論文では10 N・m以下を指す）の範囲までのトルクが使用されており、トルク標準の開発で先行してきた我が国としても産業界のニーズに対応するため、小容量トルク標準の整備が急務であると考えられる。

そこで、OA機器等の精密回転駆動部、トルクドライバ等の締付け工具兼計測機器に代表される10 N・m程度以下の小容量トルクの計測技術や標準の現状を調査し、小容量トルク標準を新たに整備するために必要な指針を得ることを目的として本調査研究を行った。

2. トルクおよびトルク計測機器

2.1 トルクの定義^{6),7)}

一端を固定した直径 D 、長さ L_1 の中実丸棒の他端に偶力のモーメントを与えれば、丸棒はねじられる（図1参照）。このような偶力のモーメントをトルクという。このとき、トルクとねじり角および主応力の関係は次式で与えられる。

* 計測標準研究部門 力学計測科

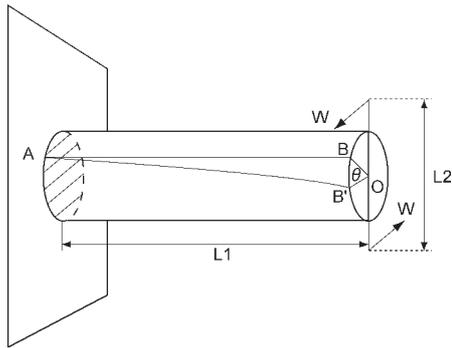


図1 端面を固定した中実丸軸に作用するトルク

$$\theta = \frac{32L_1}{\pi D^4 G} \cdot T \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma = \frac{16}{\pi D^3} \cdot T \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここでGはせん断弾性係数である。したがって、トルクは θ または σ に比例する量として変換されて検出される。

なお、ねじりによって仕事を伝達する役割を果たす伝動軸では仕事を伝える速度が問題となり、それらの能力を仕事率P(W)で表すことが多い。T(N・m)のトルクを毎分n回転(rpm)で伝える伝動軸の仕事率Pは、

$$P = T \cdot 2\pi n / 60 \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表される。

トルクは国際単位系(SI)⁸⁾では、力のモーメントとして組立単位に分類され、ニュートン・メートル(N・m)で表される。

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^{4),5)}。トルク計測機器には、トルクメータ・参照用トルクレンチ・トルクドライバチェッカ・トルクレンチチェッカ・参照用トルクドライバが含まれる。以下では各機器について簡単に説明する。

(1) トルクメータ⁴⁾

トルク計測機器のうち、レバーが付随するトルクレンチ形状以外のものを言い、純ねじりによりトルクを伝達するものをいう。トルク変換器、ケーブル、指示計器を含む。

(2) 参照用トルクレンチ⁵⁾

トルク計測機器のうち、レバーが付随するトルクレンチ形状のセンサ部(トルク変換器)を持つものを言い、必然的に横力や曲げモーメントを伴ってトルクを伝達する

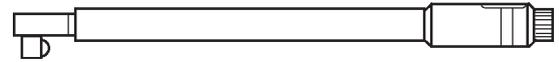


図2 セッティング式トルクレンチ(例)

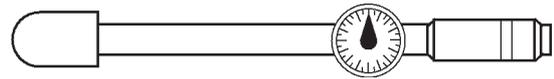


図3 指示式トルクレンチ(例)

ものを言う。「参照用」トルクレンチは、下位の校正装置や試験装置の校正の際に参照標準として使用される機器を指す。

(3) トルクドライバチェッカ⁹⁾

トルク計測機器のうち、トルクドライバを校正(または試験)するものを言い、トルク負荷機構を持たないためトルクドライバに手で負荷をかけて指示値を読み取る。

(4) トルクレンチチェッカ⁹⁾

トルク計測機器のうち、トルクレンチを校正(または試験)するものを言い、トルク負荷機構を持たないためトルクレンチに手で負荷をかけて指示値を読み取る。

(5) 参照用トルクドライバ⁹⁾

トルク計測機器のうち、トルクドライバテストを校正するための常用参照標準。機能的にはトルクメータと相違はなく、必ずしもドライバ形状ではない。

なお、主にエンドユーザが使用するトルク計測機器としてトルクツールが挙げられるが、これらは大きく手動式と電動式に分類される。手動式トルクツールに関しては、ISO 6789 "Assembly tools for screws and nuts - Hand torque tools - Requirements and test methods for deign conformance testing, quality conformance testing and recalibration procedure"¹⁰⁾ やJIS B 4650「手動式トルクレンチ」¹¹⁾ が技術基準として制定されている。ISO 6789では手動式トルクツールをセッティング式と指示式に大別している。セッティング式とは所定トルクに達するとトグルが動作音を発し、手に感触を与える方式である(図2参照)。指示式にはアームのたわみによってトルク値を直接メモリ板に読み取る直読式のものや、トーションバーの振りを拡大してトルク値をダイヤルメモリ上に指示するものがある(図3参照)。いずれの方式にもトルクレンチおよびトルクドライバがあり、トルクツールの

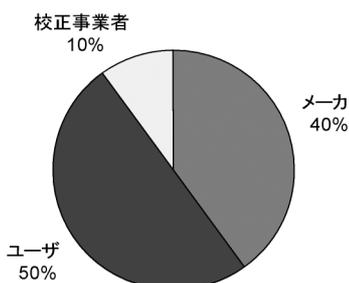


図4 トルク標準ニーズ調査 (1)
アンケート対象企業

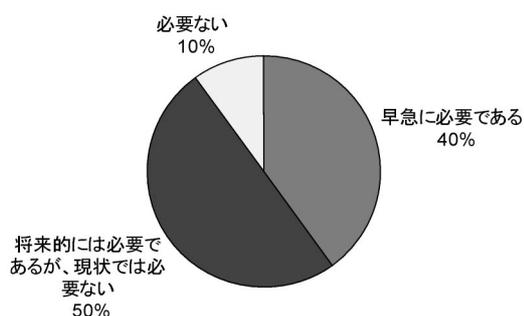


図5 トルク標準ニーズ調査 (2)
トルクのSIトレーサビリティは必要か

ユーザは用途に応じて選定し、使用している。

3. 国内におけるトルク標準に関するニーズ調査

2005年6月に日本国内におけるトルク標準に関するニーズ調査を実施した。アンケートの対象はトルク計測機器メーカー、ユーザ並びに校正事業者とし、31社中20社から回答をいただいた(図4参照)。アンケート項目は以下の通りである。

- (1) トルク標準のSIトレーサビリティは必要か。
- (2) 現在使用しているトルク範囲について。
- (3) 現在使用しているトルク範囲に対する要求不確かさについて。

図5に、項目1に対する回答結果を示す。なお、「トルク標準のSIトレーサビリティ」とは、質量、重力加速度及び長さ(または力及び長さ)によるトレーサビリティを確保し、校正事業者または使用者が自らトルク単位を組み立てることではなく、SIに基づく力のモーメントの単位(N・m)でもってトレーサビリティを確保することを意味する。図5より、「早急に必要である」という回答は全体の40%であり、「将来的には必要である」の回答50%と合わせておよそ90%の企業がトルク標準のSIトレーサビリティが必要であると回答しており、トルク標準に対する関心が高いことが示された。

図6に、項目2に対する回答結果を示す。縦軸は産業分野または使用目的を示す。図中に、NMIJが2004年までに設定し、供給を開始しているトルク標準の範囲(5~20000 N・m)を灰色で示す。図6より、すべての産業分野・使用目的において5~20000 N・mのトルクが使用されていることがわかる。一方、医療・航空・家電・一般産業機器・PC組み立て・複写機等では、5 N・m以下のトルク計測機器がより多く使用されている。これらの利用の内訳としては、製品の組み立てにおけるねじの締付けトルク管理や、電子機器等の調整、モータなどの性能試

験などが挙げられる。なお1~10 N・mのトルク範囲はすべての分野において使用されていることもわかる。以上より、従来から10 N・m以下の小容量トルク範囲が多く産業分野で使用されている点や、先のSIトレーサビリティへの関心が高まっていることから、小容量トルク標準供給への範囲拡大が急務であることが確認された。一方、20000 N・m以上の大容量トルク範囲に関しては、小容量に比べて重厚長大産業などに目的および用途が限られていて、使用範囲とした回答は少なかった。しかしながら、阪神大震災以後、建造物の耐震性や安全性についての関心が高まり、20000 N・m以上のトルク計測機器へのニーズも増加傾向にあると言われている。将来的には20000 N・mを超える大容量トルク標準への範囲拡大も必要であろう。さらに自動車産業では、部品の締結などに用いる静的なトルク計測機器に加えて、エンジンの燃焼時の爆発の影響を調べるための高応答性動的トルク計測機器にも関心が示されている¹²⁾。しかし動的トルクに関してはPTBにおいても100 N・mレンジの研究¹³⁾がなされているが標準供給には至っていない。動的トルクについては、標準供給に対するニーズが高いのは事実であるが、静的トルクのトルク標準・トレーサビリティ体系でさえ不十分である現在、今後の課題であると考えられる。

図7に、項目3に対する回答結果を示す。これより、多くのトルク範囲において求められている不確かさは1~5%であることがわかる。手動式トルクツールの校正(または試験)における最大許容偏差は、ISO 6789では±4%または6%、JIS B 4650では±3%となっている(これらの規格では、校正・試験の定義の仕方が曖昧である。またこれらの規格では不確かさに関する規定がなく、ここでは最大許容偏差を不確かさに代わる目安として考えた)。しかし10 N・m以下の小容量範囲に着目すると、中容量、大容量ではあまり見られなかった0.1~0.5%の不確かさが要求されている。小容量トルク標準では、従来のトルク標準よりも高精度な標準が必要とされているこ

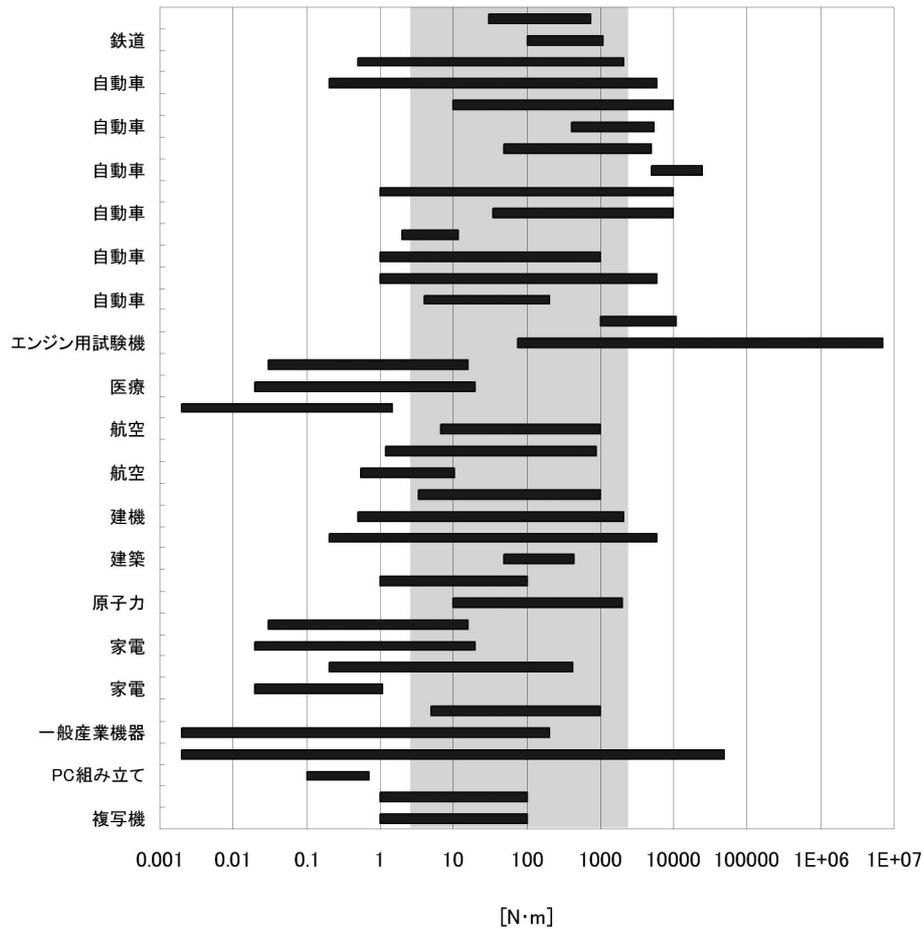


図6 トルク標準ニーズ調査 (3)
現在使用しているトルク範囲

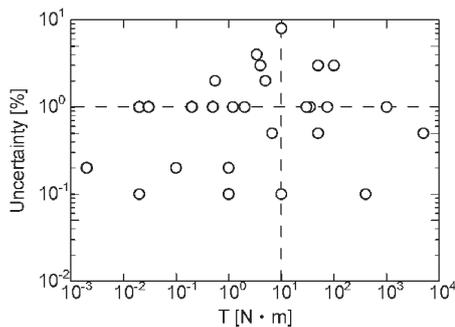


図7 トルク標準ニーズ調査 (4)
現在使用しているトルク範囲の要求不確かさ

とがわかる。

今回のアンケート結果より、産業界ではトルク標準についての関心が高く、さらに様々な分野で10 N・m以下のトルク範囲が使用されていることが明らかとなった。産業界のニーズに対応するためにも高精度なトルク標準の範囲拡大が急務である。

4. トルク標準のトレーサビリティ階層構造及び技術基準

4.1 国内におけるトルク標準トレーサビリティの階層構造

図8に、国内の産業界とNMIJ質量力標準研究室との議論に基づき提案されているトルク標準のトレーサビリティ階層構造について要約して示す¹⁴⁾。特定標準器としてNMIJが開発し維持するトルク標準機があり、第一階層の校正事業者が使用する特定二次標準器として参照用トルクメータ及び参照用トルクレンチがある。第一階層の校正事業者はそれらを参照してトルク基準機を内部校正し、校正サービスに用いる。第二階層の校正事業者は、常用参照標準としてトルクメータ・参照用トルクドライバ・参照用トルクレンチを使用して主に出張校正を行う。そして、第三階層の校正事業者あるいは試験事業者は、トルク試験機・トルクドライバチェッカ・トルクレンチ

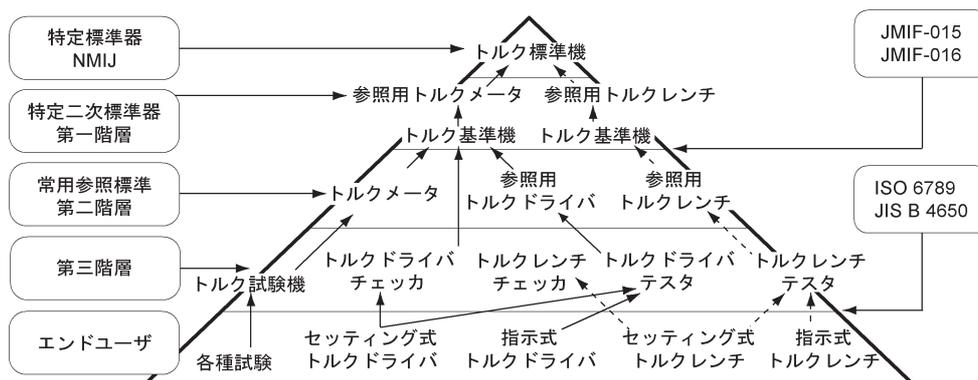


図8 日本国内におけるトルク標準トレーサビリティ階層構造 (案)

チェッカ・トルクドライバテスト・トルクレンチテストを用いて、ユーザのトルク計測機器を校正あるいは試験する。このように、トルクのトレーサビリティ体系は、トルクメータとトルクレンチで分岐された後、ユーザに至るまで複雑な経路を辿る。なお、上記の特定標準器及び特定二次標準器、並びに第一、第二階層の校正事業者の校正対象となる校正器物にのみ関して言えば、これらは2005年3月及び6月の経済産業省官報告示、並びに2005年7月の独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センターによる計量法校正事業者登録制度 (JCSS) の登録事業者の登録に係る規定によりすでに指定を受けている¹⁵⁾。

4.2 トルク計測機器に関する技術基準

表1に、トルク計測機器に関する各階層の主な国と地域の技術基準について示す。ドイツ工業規格 DIN 51309 は、トルク計測機器の校正方法のみならず、不確かさの評価方法について規定しており、静的トルク校正方法に関する有名な国内規格として他国でも広く参考にされている。また、EA-10/14¹⁶⁾ は、DIN 51309 を基本として欧州認定機関協力機構が定めたガイドラインで、純ねじりトルク計測のためのトルクメータの校正方法を定めた欧州地域の技術基準として利用されている。

我が国ではこれらの階層構造に関する技術基準として、第一階層校正事業者のために、JMIF-015、JMIF-016が業界団体により策定されており、第三階層の校正事業者向けにはISO 6789とJIS B 4650がある。

このような国および地域の技術基準が制定されている中で、純ねじりトルク計測のためのトルク計測機器の校正方法に関する国際規格 (ISO) は定められていない。国際的整合性をとるためにも早期のISOの制定が必要である。

表1 トルク計測機器の校正方法に関する技術基準

階層	規格番号	技術基準
第一階層	DIN 51309_1998 ²⁾	静的トルク計測機器の校正方法
	EA-10/14_2000 ¹⁶⁾	静的トルク計測機器の校正方法
	DKD-R 3-7_2003 ¹⁷⁾	参照用トルクレンチの静的校正方法
	JMIF-015_2004 ⁴⁾	トルクメータ校正事業者のためのガイドライン
第二階層	JMIF-016_2004 ⁵⁾	参照用トルクレンチ校正事業者のためのガイドライン
	BS 7882_1997 ¹⁸⁾	トルク計測機器の校正方法及び等級分類
	DKD-R 3-8_2003 ¹⁹⁾	トルクレンチテストの校正方法
第三階層	ASME B107.29M_1998 ²⁰⁾	トルクレンチテスト、トルクドライバテスト、トルクレンチチェッカ、トルクドライバチェッカ
	ISO 6789_2003 ¹⁰⁾	手動式トルクツールの検査方法
	JIS B 4650_2002 ¹¹⁾	手動式トルクレンチ
	ASME B107.14M_1994 ²¹⁾	手動式トルクツール
	ASME B107.28M_1997 ²²⁾	電気指示式トルクツール

5. 世界のトルク標準

5.1 CIPM MRA Appendix C への登録状況

世界のトルク標準供給状況について、国際度量衡局 (BIPM) のホームページに掲載されている国家計量標準に関する国際相互承認協約 (CIPM MRA) の附属書 C "Calibration and Measurement Capabilities Mass and related quantities"¹²³⁾ に登録されている各NMIのトルク標準の供給可能範囲を示す。登録しているNMIは世界で10の機関であり、多くの産業分野で使われている5~2000 N・mの範囲の供給は可能であるとしている。特にPTBで

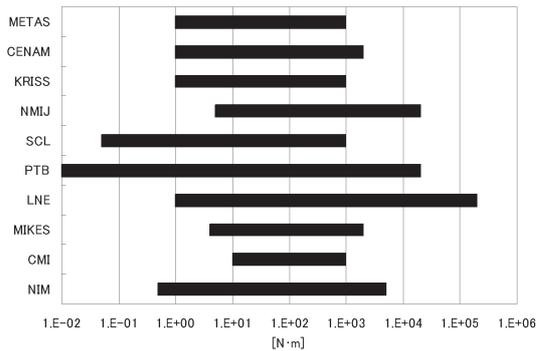


図9 CIPM_MRA 付属書Cに登録されている各NMIのトルク標準供給範囲²³⁾

は0.01 N·mと非常に小さいトルク範囲まで供給可能であると宣言している。しかしこれらのCMCは各NMIがある不確かさでトルク計測機器の校正サービスをできることを示しているだけであり、一般のユーザにまで産業界のニーズにあった高精度な標準供給がなされているかどうかは不明である。また、各NMIからの申請がCMC表に反映されるまでに通常1年以上の時間を要することにも留意する必要がある。

5.2 トルク分野の基幹比較参加機関

2004年の質量関連量諮問委員会の力作業部会 (CCM WG Force) の議事録の資料²⁴⁾ をもとに、トルク分野の基幹比較参加機関についてまとめた結果を表2に示す。ここでは、計画されている基幹比較のトルク範囲に基づいて、1 kN·mと20 kN·mを実現することができるトルク標準機を所有しているNMIにそれぞれ分類する。なお、dead-weight (実荷重式) およびreference (ビルドアップ式) は、トルク校正装置の種類であり、実荷重式の方がより高精度なトルクを実現することができる。1 kN·mのレンジには、米州で1ヶ国、欧州で4ヶ国、アジア太平洋で2ヶ国と、全部で7ヶ国が参加を表明している。このように高精度なトルク標準機を所有しているNMIは非常に少ない。また、20 kN·mレンジでは、高精度な実荷重式トルク標準機を所有しているのはPTBとNMIJのみである。このことから、現時点では高精度なトルク標準の供給が行える国・地域は少なく、トルク標準は世界的に見ても研究・開発途上であると言える。

6. トルク校正装置

現在研究開発されているトルク校正装置は大きく3つのタイプに分類される。以下に各校正装置の概要をまと

表2 トルク分野の基幹比較参加機関²⁴⁾

	CCM.T·K1		CCM.T·K2	
		1 kN·m dead-weight	20 kN·m dead-weight	20 kN·m reference
SIM	CENAM (Mexico)			CENAM (Mexico)
EUROMET	CEN (Spain) NPL (UK) METAS (Switzerland) PTB (Germany)	PTB (Germany)		BLM·LNE (France) MIKES (Finland)
APMP	NMIJ (Japan) KRISS (Korea)	NMIJ (Japan)		(SMERI (China))

め、またJMIF-015で計算事例として挙げられているトルク校正装置による実現トルクの不確かさ評価方法を紹介する。なお、ここで紹介する計算事例はあくまでも典型例であり、トルク校正装置の構造・機能・能力に応じて必要な不確かさ成分を入れ替えまたは追加することが望ましいと考えられる。

6.1 実荷重式

図10に実荷重式トルク校正装置の概略を示す。この校正装置では、一般にモーメントアームの長さは長さの国家標準にトレーサビリティをとって測定され、おもりの質量は質量の国家標準にトレーサビリティをとって測定され調整されている。また設置場所の重力加速度も時間と長さの国家標準にトレーサビリティをとって測定されている。水平姿勢を維持するよう制御されたモーメントアームの先端におもりを吊るして垂直方向に負荷をかけることにより、既知のトルクを発生させ校正を行う。この校正装置では、高精度な純ねじりのトルクを発生させることができ、5.2で述べた基幹比較に参加予定のNMIの多くはこのタイプの標準機を開発している。特にPTBとNMIJでは、1 kN·m及び20 kN·mの実荷重式トルク標準機を保有しており、発生できるトルクの相対拡張不確かさは、PTBでは両標準機ともに 2.0×10^{-5} ²⁵⁾、NMIJではそれぞれ 4.9×10^{-5} ²⁶⁾と 6.6×10^{-5} ²⁷⁾と評価されている。PTBで開発された実荷重式トルク標準機の特徴は、アームの支点部にエアベアリング方式を採用していることである。エアベアリング方式は、高精度なトルク標準機開発には極めて重要な技術である。同様に、NMIJで開発された1 kN·m及び20 kN·mの実荷重式トルク標準機にもエアベアリング方式が用いられているが、PTBでは支点部に1つのエアベアリングを用いているのに対し、

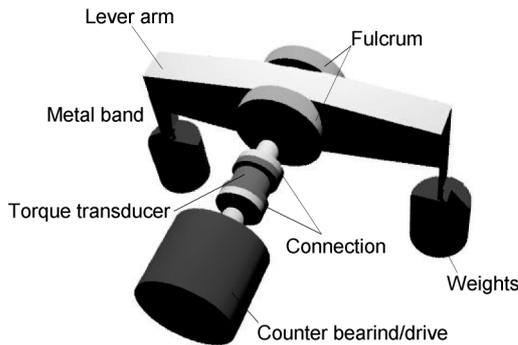


図10 実荷重式トルク校正装置

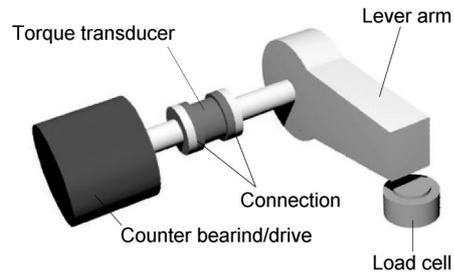


図11 ロードセル式トルク校正装置

NMIJでは2つのエアベアリングを用いている点が大きく異なる^{28), 29)}。2つのエアベアリングを用いることにより、曲げに対する剛性を高める効果があり、NMIJではPTBよりも定格容量のより大きな参照用トルクレンチを精密に校正することができる。

実荷重式トルク校正装置で実現されるトルクの相対合成標準不確かさは次式で評価される。

$$u_{c_lcm}^2 = u_{mass}^2 + u_{grav}^2 + u_{buoy}^2 + u_{act_lgt}^2 + u_{fix_lgt}^2 + u_{sr}^2 + u_{ssv}^2 + u_{ind_stb}^2 \quad (4)$$

ここで各相対標準不確かさは下記の影響を考慮している。

- u_{mass}^2 : おもりの質量
- u_{grav}^2 : トルク校正装置の設置場所における重力加速度
- u_{buoy}^2 : おもりに及ぼす空気浮力の影響
- $u_{act_lgt}^2$: モーメントアーム長さ (温度補正も含む)
- $u_{fix_lgt}^2$: モーメントアーム長さのたわみ補正
- u_{sr}^2 : 支点感度限界
- u_{ssv}^2 : 支点感度の再現性
- $u_{ind_stb}^2$: 指示安定性

特にモーメントアーム長さの相対合成標準不確かさや軸受の支点感度限界に基づく相対標準不確かさが、実荷重式トルク校正装置で実現されるトルクの不確かさに対して支配的となる場合が多い。これら不確かさ要素を低減することでより高精度なトルクを実現することが可能となる。

6.2 ロードセル式

図11にロードセル式トルク校正装置の概略を示す。力の国家標準にトレーサブルな校正がなされた力計(ロードセル)と既知の長さのアームにより基準となるトルクを実現する。このタイプは、トルク計測機器メーカーが従来から使用している場合が多い。

ロードセル式トルク校正装置で実現されるトルクの相対合成標準不確かさは、次式で評価される。

$$u_{c_lcm}^2 = u_{frc_cal}^2 + u_{frc_mnt}^2 + u_{frc_lgtstb}^2 + u_{act_lgt}^2 + u_{fix_lgt}^2 + u_{sr}^2 + u_{ssv}^2 + u_{ind_stb}^2 \quad (5)$$

- ここで各相対標準不確かさは下記の影響を考慮している。
- $u_{frc_cal}^2$: 基準力計の校正の相対合成標準不確かさ
- $u_{frc_mnt}^2$: 基準力計の設置再現性
- $u_{frc_lgtstb}^2$: 基準力計の長期安定性に基づく相対標準不確かさ

6.3 ビルドアップ式

図12にビルドアップ式トルク校正装置の概略を示す。この校正装置では、実荷重式トルク標準機やトルクの国家標準にトレーサビリティをとった他のトルク校正装置により校正された基準トルクメータと、校正器物とを直列につないで比較し校正を行う。ビルドアップ式トルク校正装置で実現されるトルクの相対合成標準不確かさは次式で評価される。

$$u_{c_lcm}^2 = u_{trq_cal}^2 + u_{trq_mnt}^2 + u_{trq_lgtstb}^2 + u_{sr}^2 + u_{ssv}^2 + u_{ind_stb}^2 \quad (6)$$

- ここで各相対標準不確かさは下記の影響を考慮している。
- $u_{trq_cal}^2$: 基準トルクメータの校正の相対合成標準不確かさ
- $u_{trq_mnt}^2$: 基準トルクメータの設置の再現性
- $u_{trq_lgtstb}^2$: 基準トルクメータの長期安定性に基づく相対標準不確かさ

この校正装置では、縦型や横型といった配置の選択や、また基準トルクメータとのカップリング方法などが技術課題となる。

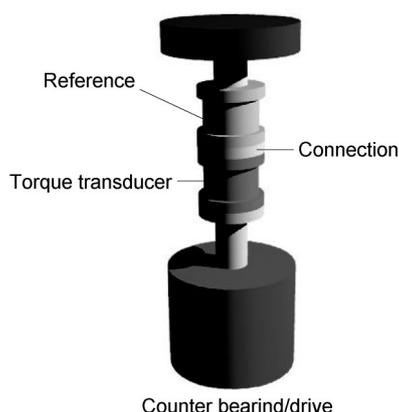


図12 ビルドアップ式

7. 小容量トルク標準機開発における技術課題

小容量トルクに関する産業界のニーズを受け、PTBでは2006年の完成を目標に小容量の実荷重式トルク標準機の開発が進められている。PTBでは、小容量トルク標準機の開発において、周囲環境からの温度、風等の外乱と、地盤からの振動、またおもり載せ変え時に発生する振動の除去が重要ではないかと示唆しているが、小容量トルク標準機に関する議論や研究発表はこれまでほとんどなされていない。NMIJでも小容量トルク標準機の形式に実荷重式を採用する計画であるが、高精度な小容量トルク標準機を開発するためには6.1で示した不確かさ要因を低減する必要がある。さらに小容量の装置に固有の問題を解決する必要がある。大容量トルク標準機では、おもりを吊るす際に生じるモーメントアームのたわみ³⁰⁾やメタルバンドの変位に関する研究がなされているが、小容量トルク標準機の場合はそれらの影響は相対的に小さくなるのではないかと考えられる。しかしながら、1 kN・mや20 kN・mの実荷重式トルク標準機よりも、支点部の影響、おもりの負荷形式の影響、おもりを吊るす際に生じる振動の影響や周囲環境の影響等が顕著になると考えられる。特に小容量トルク範囲では、中容量・大容量よりも要求不確かさが小さくなっているため、より高精度な標準供給が必要である。以下に、実荷重式トルク標準機開発における現状と技術課題を示す。

7.1 支点部

支点部は、実荷重式トルク標準機における最も重要な構成要素の一つである。小容量トルク標準機に最も適した支点の方法を検討するために、まず現在各NMIJが保有している標準機に採用されている手法について調べた。

7.1.1 エアベアリング方式

エアベアリング方式(Aerostatic bearing type)は、PTB、NMIJ、KRIS³¹⁾、UME³²⁾等の実荷重式トルク標準機に採用されている。この方法は摩擦の影響を極めて小さくすることができる。PTBとNMIJはこの方式を採用してそれぞれ2台のトルク標準機を開発しており、いずれも相対不確かさは 10^{-5} のオーダーで、実荷重式トルク標準機の中でも極めて高精度なトルクを実現している。摩擦の低減以外にもエアベアリングの長所としては、剛性が高いことや油などの潤滑剤を使用しないため周囲を汚染しないことなどがあげられる。現在もエアベアリングに関する研究開発は盛んに行われており、H型やキャロット(calotte)型エアベアリングなど曲げ剛性を高めるための形状の工夫³³⁾や、外乱振動への弱さを改善するための多孔質材を用いたエアベアリングの開発などが提案されている³⁴⁾。

エアベアリング方式を小容量の実荷重式トルク標準機に用いる場合、モーメントアームも積載するおもりも従来のトルク標準機に比べ軽くなるため、エアベアリングに供給する空気の脈動がトルク発生に影響を与える可能性がある。したがって、脈動防止装置の設置や、フィードバック機構をもったコントローラの開発が必要ではないかと考えられる。また、供給する空気の塵埃や湿度の影響も顕著となる可能性が高い。NMIJの1 kN・m及び20 kN・mトルク標準機では、コンプレッサで圧縮した空気をトルク標準機に供給する際に複数のフィルタによって塵埃や湿気を除去している。より高精度なトルク標準機を開発するためには、乾燥空気や窒素ガスのガスボンベからの供給方法など、従来とは異なるガスの供給方法も検討する必要があると考えられる。

7.1.2 ナイフエッジ方式

ナイフエッジ方式(Knife-edge type)は、中国のNIMが所有しているトルク標準機³⁵⁾に採用されており、その原理は天秤と同様である。NIMのトルク標準機の相対不確かさは 10^{-4} であり、一般にナイフエッジ方式はエアベアリング方式に比べ性能が劣る。ナイフエッジ方式では、トルク計測機器の回転中心とナイフエッジの先端を一致させるのが大変困難であること、また摩擦や摩擦の低減などの技術課題がある。

7.1.3 弾性ヒンジ方式

弾性ヒンジ方式(Elastic-hinge type)は、近年ブラジルのINMETRO³⁶⁾やスイスのMETAS等のトルク標準機に採用されている方法で、ドイツのGTM社が開発した手法

である³⁷⁾。弾性ヒンジは小容量の電子天秤等に用いられる技術であるが、電子天びんがてこ比を相対的に維持すれば良いのに対してトルク校正装置ではヒンジの厚さで決まる絶対長さが直接トルクに影響を及ぼす点異なる。この方法では、ヒンジの厚さが不確かさに影響を与えるため、大容量トルク標準機では不利だと考えられるが、METASでは1 kN・mレンジのトルク標準機の相対不確かさが 5×10^{-5} であると宣言している。GTMは、弾性ヒンジを支点機構に用いる利点は高価なエアベアリングを使用せずとも 10^{-4} 未満の不確かさを実現できることであるとしている³⁶⁾が、ヒンジ部と回転軸部の接続方法など技術課題がある。また弾性ヒンジを用いた場合の実現トルクの不確かさ評価には疑問点も多い。

7.1.4 転がり軸受方式

転がり軸受を用いる方式 (Roller-bearing type) で、トルク計測機器との回転軸を一致させるのは容易であるが、エアベアリングに比べて摩擦の影響が大きい。これによる不確かさの影響を低減するため、フィンランドのMIKESが所有する2 kN・mトルク標準機では、内部ベアリングと外部ベアリングの2つの転がり軸受を重ねて使用することで、 10^{-4} のオーダの相対不確かさを実現できたとしている³⁸⁾。

7.2 おもりの負荷形式

実荷重式トルク標準機に用いられているおもりの負荷形式は2つに分類することが出来る。ひとつは連鎖式おもりスタック (図13参照) であり、もうひとつは交換式おもりスタック (図14参照) である。

PTB, NMIJ, NPL³⁹⁾などのトルク標準機では、連鎖式おもりスタックを採用している。この方法は、荷重の増加及び減少においてトルク変換器に常に増加または減少の方向に負荷を与えることができる。また、連鎖式おもりが設置されているステージを上下することによって校正シーケンスを実現することができるので、より簡易なシステムで自動化することができる。しかし、通常連鎖式おもりは個々のおもりが吊り部、蓋、胴体の三つのパーツから構成されているため、質量が小さくなるほどパーツの製作はより困難になる。

一方、交換式おもりスタックを採用しているのはMETASやKRISSE, PTBなどである。任意のおもりを載せ替えることにより、所定のトルクを発生させる。また、交換式おもりスタックでは、OIML R111に規定された規格分銅の組⁴⁰⁾を用いる方法も考えられる。但し、交換式おもりスタックではおもりを吊るし変える時に、一度

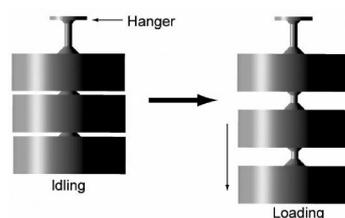


図13 連鎖式おもりスタック

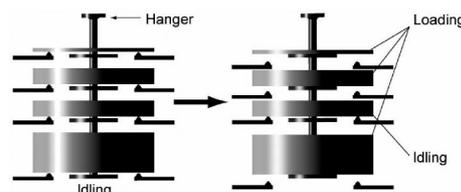


図14 交換式おもりスタック

モーメントアームを保持しなければならない。そのモーメントアームの保持・解除の瞬間にトルクリップルが生じるため、連鎖式おもりスタックのように常にトルク変換器に増加または減少の方向に負荷を与えることができない。交換式おもりスタックの場合はこのトルクリップルが技術課題になると考えられる。

7.3 振動および環境の影響

その他の課題としては、振動と環境の影響の評価が考えられる。振動の原因としては、地盤からの外乱と、モーメントアームにおもりを積載する際に発生する振動が考えられる。振動対策としては除振台の利用が一般的であり、ゴム式、コイル式、空気式、アクティブ式などがある。これらはフロアからの外乱を除去することには大変優れているが、テーブルに不均一に荷重が作用すると水平性が失われる可能性が有る。トルク標準機では、水平性も重要なパラメータであるため、除振方法として質量の大きな台を用いる方法が適切ではないかと考えられる。

環境の影響としては、周囲空気の対流による擾乱が考えられる。現在NMIJではモーメントアームやおもり周辺に風防を設置しているが、小容量トルク標準機の場合は校正器物も含めた標準機全体を風防内に設置する必要があると考える。一方で、風防内の温度変動を抑える工夫も必要となる。

この他にも、現状では高精度な小容量トルク変換器が開発されていないことも問題で、標準供給体制全体で精度を保つためには、標準機の開発と平行して伸介器となる小容量のトルク変換器の開発も行う必要がある。

8. まとめ

本調査研究では、10 N・m以下の小容量トルク標準を整備する際の指針を得るため、産業界のニーズ調査と国内外でのトルク計測に関する技術基準の整備状況について、さらに各国NMIでのトルク標準機の研究開発の状況を調査し、小容量トルク標準機開発のための技術課題についてまとめた。

ニーズ調査では、多くの企業がトルクのトレーサビリティに関心を示した。また、ほとんどの企業が1～10 N・mのトルク範囲でもトルク計測を行っており、特に家電、OA機器、航空、医療分野において、5 N・m以下のより小さなトルク範囲でのトルク計測を必要としていることが明らかとなった。さらに不確かさについては、小容量トルク範囲において、中容量・大容量には見られなかった0.1～0.5%と、より高精度なトルク計測機器が求められていることがわかった。

トルク計測のトレーサビリティ体制の確立に関し、国際規格、国、地域の技術基準の整備状況を調査した。トルク計測機器の校正方法に関しては未だISOが制定されておらず、各国、地域でそれぞれ工業規格やガイドラインを制定している状況である。

トルク標準機の研究開発については、トルク校正装置の種類を調査し、それぞれの特徴をまとめた。特に高精度な純ねじりトルクを実現することができる実荷重式については、その技術課題として支点部、おもり、振動および周囲環境の影響について考察した。支点部に関しては、エアベアリング方式、ナイフエッジ方式、弾性ヒンジ方式、転がり軸受方式に分類し、それぞれの特徴をまとめた。おもりについては連鎖式おもりスタックと交換式おもりスタックに分類し、小容量トルク標準機で用いる際に検討しなければならない技術課題をまとめた。

今後、これら技術課題について検討し、産業界のニーズに答えるためにもトルク標準の早期範囲拡大が急務である。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、ご指導頂いた大岩彰力学計測科長、上田和永質量力標準研究室長、大申浩司主任研究員に厚くお礼を申し上げます。また、質量標準や力標準に関してご指導やご助言を頂いた質量力標準研究室の皆様にも深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) D. Peschel: MAIN FOCUS IN THE DEVELOPMENT OF METROLOGY IN THE FIELD OF TORQUE MEASUREMENT IN GERMANY, Proc. APMF 2003 / IMEKO TC3, (2003), 3-10.
- 2) DIN 51309_1998 Calibration of Static Torque Measuring Devices, Deutsches Institut fuer Normung e. V. (1998).
- 3) 大申浩司: トルク標準及び計測技術に関する調査研究, 産総研計量標準報告, 47-2 (1998), 61-73.
- 4) 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).
- 5) 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).
- 6) 宮本博, 菊池正紀: 材料力学, (裳華房, 1996), 126-129.
- 7) 日野太郎, 直江正彦, 山下建, 金子双男: エンジニアのための計測技術, (朝倉書店, 1981), 285-305.
- 8) 工業技術院計量研究所編, 国際文書第7版 国際単位系 (SI), (日本規格協会, 1998), 25-26.
- 9) 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認定センター (2005).
- 10) ISO 6789_2003 Assembly tools for screws and nuts - Hand torque tools- Requirements and test methods for design conformance testing, quality conformance testing and recalibration procedure, International Organization for Standardization (2003).
- 11) JIS B 4650_2002 手動式トルクレンチ, 日本規格協会 (2002).
- 12) G. Wegener and T. Bruns: Use of Reference Torque Transducers for the On-Site Calibration of Rotating Torque Transducers in Power Test Stands, Proc. IMEKO TC3/TC5/TC20, (2002), CD-ROM.
- 13) T. Bruns: Sinusoidal Torque Calibration: A Design for Traceability in Dynamic Torque Calibration, Proc. XVII IMEKO World Cong., (2003), 282-285.
- 14) K. Ohgushi, T. Ota and K. Ueda: Technical Report on Calibration Training for Torque Measuring Devices and Inter-comparisons between the Torque Standard Machine and Torque Calibration Machine 産総研計量標準報告, 4-1 (2005), 27-44.

- 15) JCSS, <http://www.jcsslabo.or.jp/index.htm>
- 16) EA-10/14_2000 EA Guidelines on the Calibration of Static Torque Measuring Devices, European co-operation for Accreditation (2000).
- 17) DKD-R 3-7_2003 Static calibration of reference torque wrenches, Wirtschaftsverlage NW, Verlag fuer Neue Wissenschaft GmbH (2003).
- 18) BS 7882_1997 Method for Calibration and Classification of Torque Measuring Devices, British Standard Institution (1997).
- 19) DKD-R 3-8_1998 Static calibration of torque wrench calibration devices, Wirtschaftsverlage NW, Verlag fuer Neue Wissenschaft GmbH (1998).
- 20) ASME B107.29M_1998 Electronic Tester, Hand Torque Tools, The American Society of Mechanical Engineers (1998).
- 21) ASME B107.14M_1994 Hand Torque Tools, The American Society of Mechanical Engineers (1994).
- 22) ASME B107.28M_1997 Electronic Torque Instruments, The American Society of Mechanical Engineers (1997).
- 23) BIPM, <http://kcdb.bipm.org/>
- 24) CCM Force Working Group Meeting Minutes of the Meeting held from 22nd to 24th March 2004 at CSIR, Pretoria, South Africa (2004).
- 25) K. Adolf, D. Mauersberger and D. Peschel: Specifications and uncertainty of Measurement of the PTB's 1 kN·m Torque Standard Machine, Proc. XIV IMEKO TC3 Conf., (1995), 174-176.
- 26) K. Ohgushi, T. Ota and K. Ueda: Load Dependency of the Moment-Arm Length in the Torque Standard Machine, Proc. XVII IMEKO World Cong., (2003), 383-388.
- 27) K. Ohgushi, T. Ota and K. Ueda: Uncertainty Evaluation of the 20 kN·m Dead Weight Torque Standard Machine, the 19th Int. Conf. on Force, Mass & Torque IMEKO TC3, (2005), CD-ROM.
- 28) K. Ohgushi, T. Tojo and A. Furuta: Development of the 1kNm Torque Standard Machine, Proc. IMEKO-XVI World Cong., III (2000), 217-223.
- 29) K. Ohgushi, T. Ota, K. Ueda and E. Furuta: Design and Development of 20 kN·m Deadweight Torque Standard Machine, VDI-Berichte, (2002), 327-332.
- 30) D. Roeske: Some problems concerning the lever arm length in torque metrology, Measurement, 20-1 (1997), 23-32.
- 31) K. Ohgushi, T. Ota, K. Ueda, Y. K. Park and M. S. Kim: International Comparison of Torque Standards between the National Metrology Institute of Japan (NMIJ) and Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Proc. APMF, (2005), CD-ROM.
- 32) C. Dogan, O. Akkoyunlu and C. Kuzu : Development of the 1 kN·m Static Torque Standard Machine at UME, IMEKO TC3/TC5/TC20, (2002), CD-ROM.
- 33) P. Hohmann: Air Bearing Developed for Torque Calibration to Protect Disturbing Effects Reference Transducers, Proc. XVII IMEKO World Cong., (2003), 413-414.
- 34) 崎野茂夫：多孔質型静圧空気軸受け，日本機械学会機素潤滑設計部門ニューズレター，No.21 (2000)，2.
- 35) Shang Wei Lu, Li Tao, ChenYong Pei, Wang Yana and Qian Zhao Jun: 50kNm TORQUE STANDARD MACHINE, the 19th Int. Conf. on Force, Mass & Torque IMEKO TC3, (2005), CD-ROM.
- 36) R. Oliveira, L. Cabral, U. Kolwinski and D. Schwind: Performance of the New Primary Torque Standard Machine of INMETRO, Brazil, the 19th Int. Conf. on Force, Mass & Torque IMEKO TC3, (2005), CD-ROM.
- 37) H. Gassmann, T. Allgeier and U. Kolwinski: A New Design of Primary Torque Standard Machines, Proc. 16th IMEKO World Cong., (2000), CD-ROM.
- 38) A. Pusa and M. Sachs: Influence of Counter Rotating Bearings in Torque Calibration Devices, the 19th Int. Conf. on Force, Mass & Torque IMEKO TC3, (2005), CD-ROM.
- 39) F. A. Davis: Development of the UK National Standard Static Torque Calibration Facility, Proc. IMEKO-XV World Cong., (1999), 25-31.
- 40) OIML R111 Weights of Class E1, E2, F1, F2, M1, M2, M3 (1994).

