

法定計量における DX の実態と課題に関する調査研究

岡本隼一*

(2023年1月31日受理)

A survey on the current states and future work directions of DX in legal metrology

OKAMOTO Junichi

Abstract

Digital transformation (DX), which means that the existing products, services, processes, systems, organizations, etc., will be transformed by adopting digital technology, is expected. In the field of legal metrology, a basis of our society, some initiatives and studies aiming for DX are ongoing. However, they are not well known to the public. Therefore, we survey them and report the current states of them. Furthermore, we present some future work directions derived from the states.

1. はじめに

本稿は、法定計量におけるデジタルトランスフォーメーション (Digital transformation: DX) についての調査研究を報告したものである。

法定計量とは、取引や証明のために用いられ、法規制の対象となる計量器 (本稿では単に計量器と呼ぶ) の信頼性や計量[†]の結果の同等性を確保するための技術的かつ行政的な管理体系である¹⁾。

法定計量の主な目的は、適正な計量の実施を確保し、計量を伴う取引や証明において消費者が不利益を被らないように保護することである²⁾。そのために、計量器や計量標準 (基準器[‡]等) について、技術基準 (日本では、JIS 及び基準器検査規則に記された要件) が存在する。さらに、法令 (日本では、計量法及び計量法に関連する政令や府省令) によって計量器や計量標準が技術基準を満たす必要があるということが定められている^{3),4)}。

一方、近年では様々な分野、様々な文脈で DX という

言葉を目にする。DX という言葉の意味も、使う者により異なり、様々である。それらの様々な意味に共通しているのは、単にデジタル技術を活用するだけでなく、デジタル技術を用いることによって既存のものを変革する^{5),6)}点であろう。

法定計量においても DX に取り組むことで、適正な計量の実施を確保するためのプロセスの効率化を進め、法定計量に関係する組織 (計量器の製造事業者、規制当局等) にとってより良い環境を形成することが期待される。また、時代とともに法定計量やそれを取り巻く環境が変化したとしても、社会全体での適正な計量の実施を確保することができるだろう。

プロセスの効率化は、法定計量に関係する組織の負担を減らすことにつながる。これは、近年の人手不足の問題の解決策になり得る。また、法定計量に関係する組織には、計量器の試験や検査等を行うための技量が求められる。プロセスの負担が減ることで生じた時間を使って、技量の継承や法定計量のサービスの向上を図ることができる。

そして DX に取り組むことで、法定計量に関係する組織同士がスムーズに連携して適正な計量の実施を確保する環境を作り出すことができるだろう。このことによって、法定計量を取り巻くビジネスの在り方や法規制の変

* 工学計測標準研究部門 型式承認技術グループ

† 本稿では、「計量」を取引や証明において行われる測定行為を示す用語とする。

‡ 基準器とは、計量器の正確さを確認するための基準となるものである。例えば、質量計にあっては基準分銅が基準器となる。

化等に柔軟に対応することが可能になる。

適正な計量の実施が確保されていることは、社会の基本であり、時代の変化に合わせてこれを確保し続けることが重要である。DXによって適正な計量の実施を確保することは、人々の豊かで質の高い生活に寄与することになる。

このように社会全体で法定計量におけるDXに取り組むことには、メリットが多くある。しかし、法定計量におけるDXが何であるか、それに取り組むメリット、考えられる課題は、専門家を除き一般に認識されていないだろう。

そこで本稿では、法定計量におけるDXについて、その取り組みや研究と、それらを踏まえた今後の課題を取りまとめ報告する。なお取り組みや研究については、法定計量を取り巻く分野の話題も含めて報告する。

本稿の構成を以下に示す。第2章では、公的機関や企業による、法定計量におけるDXの取り組みを紹介する。第3章では、いくつかの技術的トピックを取り上げて、その技術と関係する法定計量における研究を紹介する。第4章では、法定計量におけるDXの取り組みと研究を、3つの項目に分けてまとめる。第5章では、それまでの内容を踏まえて、法定計量におけるDXの課題を考察し、4つ提示する。最後に第6章では、本稿全体のまとめを述べる。

2. 法定計量におけるDXの取り組み

本章では、法定計量に関係する組織等が、法定計量におけるDXをどのように認識し、どのような取り組みを進めているのかを示す。2.1では、法定計量と密接に関係する品質社会基盤（quality infrastructure: QI）の概念と、法定計量におけるDXの取り組みについて説明する。2.2では、ロシアの国家規模のプロジェクトの事例を紹介する。2.3では、その他海外の公的機関や国内メーカー等の取り組みを紹介する。

2.1 QIと法定計量におけるDXの取り組み

2.1.1 品質社会基盤（QI）

品質社会基盤（QI）とは、製品、サービス及びプロセスの品質、安全性、環境適合性を確認し推進するために必要な、（公的及び私的な）組織、政策、関連法令及

* QIの文脈における「品質」とは、製品、サービス又はプロセスが要求事項を満たすことである。つまり、これらが意図された目的に適合することを意味している⁸⁾。

び規制の枠組み、慣例で構成されるシステムのことである⁷⁾。

QIは製品、サービス及びプロセスの品質*を国家規模で向上させ、個々のビジネスや経済全体を活性化させる。QIは、主に「計測学」、「標準化」、「適合性評価」及び「認定」の仕組みが整備され、相互に連携して機能することで成立する。以下ではこれらの4つの仕組みを説明する^{8),9)}。

a. 計測学（Metrology）

計測学[†]は、“測定及びその応用の科学”と定義されており、測定の不確かさの大きさ、及び適用分野に関係なく、測定の全ての理論的及び実際の側面を含む^{10),11)}。

計測学は、社会を支える基盤であり、以下の3つの活動^{10),12)}が適切に行われることで、測定の信頼性が確保される。

- 測定単位を定義すること（メートルを定義する等）。
- 科学的方法によって実際に測定単位を実現すること（光周波数コム装置によってメートルの定義を実現する等）。
- 測定値とその不確かさを決定して文書化し、計量トレーサビリティを確立すること（精密部品の寸法の測定結果を、切れ目のない校正の連鎖によって長さの国家標準と関連付ける等）。

測定の信頼性は、健康、安全、環境及び消費者を守り、ビジネスや貿易、産業分野で重要な役割を担う。例えば、食品は質量を測定することで取引され、水、電気及びガスは測定された使用量を元に支払いがなされる。測定が信頼できない場合、公正な商取引は不可能であり、消費者は不利益を被ることになる。また、医療機器や自動車のブレーキ、航空機のエンジン及び発電所のタービン等の重要部品の製造やメンテナンスにおいて、誤った測定が行われると、部品同士がうまく組み上がらない、機械が正常に動作せず事故が発生する等の事態につながり、非常に問題である。

b. 標準化（Standardization）

標準化とは、“実在の問題又は起こる可能性がある問題に関して、与えられた状況において最適な秩序を得る

† 本稿では、“metrology”の訳語としてJIS Z 8103:2019「計測用語」の訳語である“計測学”を採用し、文献11)の定義を用いて説明しているが、QIの視点では、より広い意味である「計量制度」や「計量（行為）」のイメージが近いと思われる。

ことを目的として、共通に、かつ、繰り返して使用するための記述事項を確立する活動である”¹³⁾と JIS に定義されている。そして、この定義の注記には、“この活動は、特に規格を作成し、発行し、実施する過程からなる。”とある。また規格とは、“与えられた状況において最適な秩序を達成することを目的に、共通的に繰り返して使用するために、活動又はその結果に関する規則、指針又は特性を規定する文書であって、合意によって確立し、一般に認められている団体によって承認されているもの”¹³⁾と JIS に定義されている。すなわち、製品、サービス又はプロセスの望ましい特性を、寸法や形状、公差、重量、工程、システム、その他の要件を規格として文書化し、規格に従って製品、サービス又はプロセスの特性を統一、普及させることが標準化である¹³⁾⁻¹⁵⁾。

標準化がもたらす重要な利益は、“製品、プロセス及びサービスが意図した目的に適するように改善されること、貿易上の障害が取り払われること、及び技術協力が促進されること”¹³⁾である。企業は、規格を用いることで、品質を確保し、生産性の向上やコストダウンにつなげることができる¹⁶⁾。さらに、国際的な規格に従うことで、海外市場へ参入しやすくなる。一方、消費者は、互換性が確保されていることで、企業に限定されず好みの製品を選べるという選択の自由が与えられる。また、製品、サービス又はプロセスが規格に適合していることを確認することで、一定の品質や性能を満たすことも判断できる。その他にも、企業と消費者両方のメリットとして、標準化された異なる企業の製品同士がコンテンツを共有することが可能であり、魅力的な市場が創出されることが期待できる¹⁷⁾。

c. 適合性評価 (Conformity Assessment)

適合性評価とは、“製品、プロセス、システム、要員又は機関に関する規定要求事項が満たされていることの実証”¹⁸⁾と JIS に定義されている。ここでの規定要求事項とは、法令、規格、技術仕様書等の基準文書の中で明示されるニーズ又は期待である¹⁸⁾。

適合性評価のうち、主なものとして試験、認証及び検査が挙げられる。

試験 (Testing) とは、“手順に従った、適合性評価の対象の一つ以上の特性の確定”¹⁸⁾である。つまり、あらかじめ決められた方法に従って、特性 (特性として、物質的、感覚的又は行動的な種類等が挙げられる)¹⁹⁾を確かめることであるといえる。試験の内容としては、製品の適合性を評価するものがメインであるが、科学的な目的のデータ収集、医学的な予後、法執行に関係するも

の²⁰⁾もある。

認証 (Certification) とは、“製品、プロセス、システム又は要員に関する第三者証明”¹⁸⁾である。つまり、製品やプロセス等が特定の要件に適合していることを、第三者が書面で保証することである。よく知られている例は、製品がその製品に対応する ISO 規格に適合していることや、品質マネジメントシステムが ISO 9001 に適合していること、環境マネジメントシステムが ISO 14001 に適合していることを認証すること等であろう⁸⁾。

検査 (Inspection) とは、“製品設計、製品、プロセス又は据付けの調査、及びその特定要求事項に対する適合性の確定、又は一般要求事項に対する適合性の専門的判断に基づく確定”¹⁸⁾である。つまり調査対象が、ニーズ又は期待 (これらは、明示されている、暗黙の了解である、又は義務として要求されている)¹⁹⁾に適合していることを、専門家が自身の判断に基づいて確認することであるといえる。様々な製品、サービス又はプロセスを検査することで、数量、質及び安全性等を確認、検査対象物の所有者、ユーザー、消費者及び社会へのリスクを軽減できる。特に法規制に関わる検査に該当するものとして、市場投入前の又は既に市場に投入された製品が技術的な規制要件に準拠していることを監視すること及び安全目的のために設備の定期的なチェックを行うこと等が挙げられる²¹⁾。

検査は、試験と共通の特性があるため、その活動に重なる部分がある。しかしながら、次の重要な違いがある。試験は対象物の 1 つ以上の特性の確定にとどまるのに対し、多くの種類の検査では、専門的判断に基づき、一般要求事項に対する合否までが確定される。そのため検査では、その職務を遂行するために必要な能力が求められ、その結果には検査を担当する者の主観が含まれる^{20),22)}。

d. 認定 (Accreditation)

認定とは、“適合性評価機関に関し、特定の適合性評価業務を行う能力を公式に実証したことを伝える第三者証明”¹⁸⁾である。ここでいう適合性評価機関とは、前述した適合性評価のサービスを実施する機関 (試験所、認証機関又は検査機関等) である。つまり認定とは、これらの機関が行う適合性評価が不適格なものとならないように、適合性評価が国際的な基準に従い、公平、透明に行われていることを中立的な立場から審査し、公式に認めることであるといえる^{23),24)}。

認定機関が、試験所、認証機関又は検査機関等の組織を認定することは、これらの組織や組織の提供するサービスが信頼のおけるものであると示すことになる。

このように QI は上に述べた、計測学、標準化、適合性評価及び認定の仕組みが整備され、相互に連携して機能することで成立する。つまり、まず標準化によって製品、サービス及びプロセスの規格が定められる。次に規格が満たされていることが、認定を受けた適合性評価機関によって確認され、製品、サービス及びプロセスの品質保証がなされる。そしてこの中では、計測学によって、規格に用いる単位が実現され、適合性評価（そのうち試験や検査）における測定信頼性が担保されている、ということである。

QI は市場全体に対して次のような効果がある⁸⁾。QI は、製品、サービス及びプロセスに対する要求事項を定義、開発及び検証するために役立つ。さらに、要求事項とそこから生み出される製品、サービス及びプロセスが、貿易に参加するために不可欠な要求事項を満たしていることを保証する。これによって国内市場が効果的に運用され、国際市場へのアクセスが容易になる。

また、市場全体というマクロな視点ではなく、もっとミクロな視点で、顧客、企業及び規制当局に対して QI がもたらす以下のメリットが挙げられる⁸⁾。

- 顧客にとっては、購入する製品やサービス等が自身の目的に適合しているという保証が、適合性評価の仕組みによって提供される。
- 企業にとっては、国際規格を用いることで、自社の製品やサービス等が要求事項を満たし、ビジネスプロセスが国際的に認知されたマネジメントシステムに準拠していることを確認できる。また、そのことを内外に示すことができる。
- 規制当局にとっては、健康、安全及び環境等についての要件が満たされていることを保証するための規格や適合性評価を指定する上で役立つ。

2.1.2 法定計量と QI の関係

法定計量は、計測学の一分野である。法定計量の主な目的は、取引や証明に用いられる法規制の対象となる計量器の品質及び計量器による計量結果の信頼性を確保することである⁹⁾。品質及び信頼性の確保のために、法定計量では計量器に対して以下の適合性評価が行われている。

- 試験所による型式試験。計量器は、製造事業者が本格的な製造を開始する前に、その構造が法律で指定された技術基準に適合していることを確認する試験（試験内容としては、温度試験、電磁環境試験及びソフトウェア試験等）を受ける。この試験は型式試験と呼ばれる。
- 認証機関による型式承認等。型式試験の結果に基づき、計量器は型式の承認を受ける。また、製造の品質システムは認証機関の監視を受ける。
- 検査機関による検定。市場監視*の活動の一部として、個々の計量器が法律で定める基準に適合しているかどうかを検査することは検定と呼ばれる。検定は、市場投入前、市場投入後に定期的に、あるいは特定のイベント（修理やソフトウェアの更新）の後に行われる。

これらの法定計量のプロセス（型式試験、型式承認等、検定）は、図 1 に示すように計量器のライフサイクル（設計から廃棄までの一連の流れ）に付帯する。

前述の法定計量のプロセスのより具体的な例として、図 2 に日本国内における取引や証明用の非自動はかりのライフサイクルを示す。図 1 と図 2 の違いは次のようである。

- 検定を行う検査機関は、国内では“検定所”と呼ばれる。検定所は各都道府県に設置されている。
- 国内での市場投入後の“定期検査”とは、検定所や特定市²⁷⁾（都道府県の検定所に代わって一定の業務を行うことができる市町村）による、使用中の非自動はかりや皮革面積計に対する検査のことをいう。

ここまで述べたように、法定計量では、型式試験や検定を始めとした適合性評価によって計量器の品質が保証されている。また、法定計量でも、標準化や認定が重要である。法定計量は、計測学、標準化、適合性評価及び認定の仕組みを用いることで機能しているため、QI とは切り離せない関係にあるといえる。

法定計量と QI の関係を意識した法定計量における DX についての見解や取り組みがいくつか存在し、以降ではそれらを紹介する。

2.1.3 BIPM と OIML が設立した JTG の見解

国際度量衡局 (BIPM) と国際法定計量機関 (OIML) は、互いの協力関係を強化するグループである合同タスクグ

* 市場監視とは、市場に投入される製品が、関連する技術規制の要件にあらゆる点で準拠していることを確認すること⁹⁾である。法定計量においては、計量器が法律に規定された要件を満たしているかチェックすることが行われる²⁵⁾。

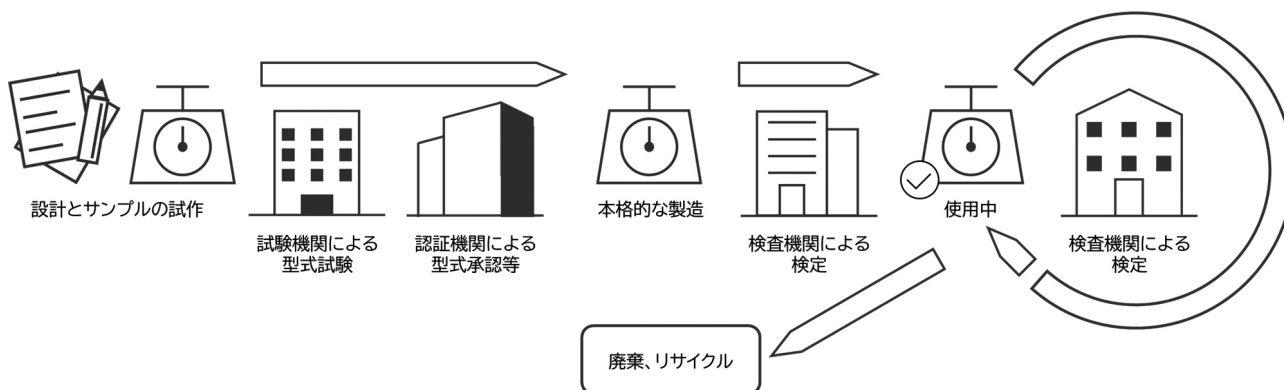


図1 計量器のライフサイクルとそれに付帯する法定計量のプロセス
(文献²⁶⁾を参考に作成。世界各国での様子を一般化して示したものであり、国内制度と完全には一致しない)

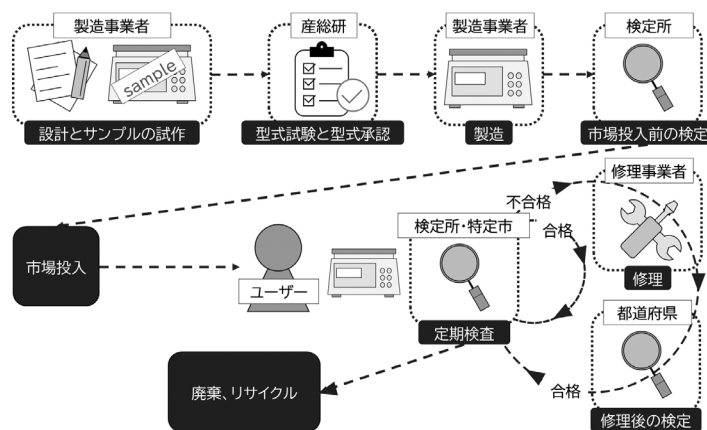


図2 日本国内における取引や証明用の非自動はかりのライフサイクル
(法定計量のプロセスを書き加えている)

グループ (Joint Task Group: JTG) を設立した^{28),29)}。

BIPM-OIML JTG (以下では、単に JTG と呼ぶ) の戦略的な目標は、QI を促進するための重要な要素として、計測学分野における共通の見解を示し、それらを推進することである^{1),9)}。

JTG の行動計画の中には、法定計量を含む計測学の DX を進めることが含まれている²⁶⁾。また、DX を進めるために、QI に携わる全ての関係者によるアプローチが必要であると述べられている²⁶⁾。

国際的な QI の一部としての計測学の DX について、JTG の見解を示した主旨書では、次の事項が宣言された²⁶⁾。

- 産業、貿易、法定計量及び科学分野における測定を支える国際単位系 (SI) の重要性を認識すること

* 機械可読については、3.1 で説明する。

と。

- QI の関係者と緊密に協力して、計測学の活動とプロセスの DX を行うことの必要性を認識すること。
- デジタル表現や物理的なデバイスは、産業、経済、社会及び研究開発における効率的なプロセスを促進するために、SI と FAIR+T 原則に基づき、強固で曖昧さがなく、機械で読み取り可能 (機械可読*) なデータに依存するべきであるという考えを支持すること。
- QI のデジタル化に向けて他の組織に参加を呼びかけること。

ここでいうデジタル表現とは、物理的なモノの情報が収集され、デジタル空間上において再現されたもの¹⁾である。また、FAIR+T とは、データ共有の原則であ

る FAIR³⁰⁾という言葉と、計測学の要素である SI トレーサブル (Traceable) の頭文字 T を組み合わせたものである。なお、FAIR とは、共有するデータの検索、アクセス、相互運用、再使用が可能 (それぞれ、Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) ということを示している。

2.1.4 Schwartz の見解

2021 年に Schwartz (当時の OIML の理事機関 CIML の委員長) は、製品のライフサイクルの中での様々なプロセスの DX が、法定計量の課題になるという見解を示している²⁶⁾。具体的には、将来的に個々の計量器はネットワークに接続され (IoT 化)、計量器のライフサイクルを通じた全てのデータはデジタル表現としてクラウドに保存されるようになる。その結果、以下のようなことが可能になる。

- 製造事業者による計量器から送信されるデータの継続的分析及び遠隔での管理とメンテナンスが行われる。
- 試験所が遠隔で型式試験を行い、デジタル形式の試験報告書を発行する。
- 認証機関が遠隔で、製造事業者の品質システムを認証し、デジタル形式の型式試験報告書を利用して型式承認を行う。また、それら認証結果を、デジタル形式の書類として発行する。
- 検査機関が遠隔で検定や検査を行う。このプロセスでは、検定や検査に合格した証として、デジタル形式の証印等が計量器のデジタル表現として保存される。

ここでのデジタル表現には、これらの法定計量のプロセスから得られるデータが含まれる。例えば、試験や認証、検定、検査及び市場監視のデータ、規格と法規制に関するデータ並びに製品や品質保証等のユーザーに信頼を与えるデータ等である。これらのデータが機械可読であればソフトウェアで処理することができ、スマートな品質保証が可能となる²⁸⁾。さらに、機械可読な文書と証明書を組み合わせ、それによって QI のプロセスの自動化が可能になる。

ここまでに述べたように計量器のライフサイクルには様々な者 (製造事業者、試験所、認証機関、検査機関、ユーザー等) が関係し、将来像の中ではデジタルデータのやり取りが頻繁にあることが想定される。Schwartz は、計量器のライフサイクルの中でのプロセスの DX に

は、関係者全てのニーズに対応した総合的なアプローチが必要になると述べている。また、デジタルデータは、FAIR+T に基づく必要があり、FAIR+T の中でも I の相互運用可能である (Interoperable) ことが重要だと指摘している。

2.1.5 欧州計測学クラウド

法定計量のプロセス (型式試験、型式承認及び検定等) は、複数の関係者 (計量器の製造事業者、試験所、認証機関、検査機関又は個人や企業といった計量器のユーザー等) 間の多くのデータ収集やデータ交換、コミュニケーションを必要とする。これまで、紙の書類や USB メモリーを郵送で送ったり、ファイルをメールで送ったり、ファイルホスティングサービスにデータをアップロードしたりと、様々な経路でデータがやり取りされてきた³¹⁾。

データそのものやデータのやり取りをデジタル化することで、法定計量のプロセスの支援及び合理化が可能であると考えられる。そのため組織、機能単位の個別のデジタル化はこれまでも行われてきた。例えば、各関係者は自前のデータベース等を持ち、データを既にデジタルな形式にしている。また、データのやり取りをデジタル化するインフラも、これまでにいくつか作成されている (市場監視のための情報通信システム³²⁾ 及び検定申請のためのシステム³³⁾ 等)。しかしながら、それらが各々独立しており、連携が取れていないという問題がある。

ドイツの国家計量標準機関である PTB は、全ての関係者がシームレスに対話し、データを共有し、法定計量のプロセスに関与できるプラットフォームを作成することを目指して、欧州計測学クラウド (European Metrology Cloud: EMC) という取り組みを行った³¹⁾。このプラットフォームの設計思想は、既存のインフラやデータベースを結合することで法定計量のプロセスを支援及び合理化し、全ての関係者に単一の窓口を提供することである³⁴⁾。

EMC は、2018 年頃から始まったものであり³⁵⁾、2022 年までにこのプラットフォームの研究用プロトタイプが作成され、それをういたデモンストレーションが行われた²⁸⁾。現在、EMC のアイデアが引き継がれた後継のプロジェクトが始まっている³⁶⁾ (後継のプロジェクトについては 2.1.7 で述べる)。

EMC で作成されたプラットフォーム (EMC ネットワーク)^{28),31)} は、図 3 のように、参加する関係者がそれぞれ 1 台ずつ所有するサーバー同士によって構成されるネットワークである。

各サーバーには、共通のソフトウェアである「EMC ノード」がインストールされている（以下では、これらのサーバーをノードと呼ぶ）。それぞれのノードは、各関係者の持つ既存のインフラやデータベースとローカルにデータの送受信を行う。

各関係者は、自身のノードを窓口 to 他の関係者のノードと接続し、データを受け取ったり、データを提供したりする。これらのデータは特定の関係者のノードだけに保持され、EMC ネットワーク全体ではデータが分散されている。また、データのバックアップ等はされず、EMC ネットワーク全体でのデータの管理は行われない。

EMC ネットワーク内のデータの中で中心的なものは、個々の計量器とその型式のデジタル表現である³¹⁾。このデジタル表現には、計量器の写真や設置場所、製造事業者、ユーザー、ユーザーマニュアル、デジタルな検定証印、最終校正日時、最終検定日時等のデータが含まれる²⁸⁾。

デジタル表現を使用して、各関係者は役割に応じてデータの参照や変更を行ったり、プロセスを開始したりできる。その例としては、製造事業者によるドキュメント（ユーザーマニュアル等）の更新、ユーザーによるファームウェアアップデートの開始及び認証機関が発行した証明書と計量器の型式との関連付けが挙げられる。

EMC ネットワークのようなプラットフォームで、型

式試験データ等の機密性が高いデータを共有する場合、データのセキュリティとプライバシーを担保する必要がある。EMC ネットワークでは、以下のような方法でセキュリティとプライバシーを担保している。ノード同士は、VPN を用いて保護された伝送経路を用いて通信を行う。また、データが分散して保持され集中的な管理を行わないため、ネットワークには悪意のある攻撃を受けやすい致命的な部分がない。さらに、関係者がログインし、それぞれの権限に基づいて、アクセスが認められているデータにだけアクセスできる認証システムが取り入れられている²⁸⁾。EMC ネットワーク上の処理は、ブロックチェーン*技術を用いた、書きかえ不可能なログに記録される。法定計量のプロセスが完了するたびに、結果がログに新しく記録され、法定計量のプロセスの進捗がその関係者のみに提供される。また、新しいノードの追加や削除等の、ネットワーク自体の変更も記録されている³¹⁾。

PTB は法定計量だけではなく、法定計量に関係する分野へ EMC ネットワークを適用することを視野に入れていた²⁸⁾。これまでに、PTB が提案している規格のデジタル校正証明書（Digital Calibration Certificate: DCC†³⁷⁾）をユーザーが EMC ネットワークにアップロードし、DCC から情報を抽出することを可能にするための研究開発が行われた。この応用として、測定や校正の際に使用する機器の不確かさを、新しい校正証明書に含めることが考えられる。同様に、適合性評価のためのデジタル適合証明書(Digital Certificate of Conformity: D-CoC)を、EMC ネットワークの計量器のデジタル表現に含める試みも検討された。

2.1.6 AnGeWaNt における計量プラットフォーム

AnGeWaNt³⁸⁾は、ビジネスモデルのハイブリッド化（稼働中の製品とその製品から得られたデータを用いたデジタルサービスを結びつけること³⁹⁾）、ワークデザインのさらなる発展及び計量のためのデジタル化を目的としたプロジェクトである⁴⁰⁾。このプロジェクトには、はかり及びその部品の製造事業者や研究所が参加している⁴¹⁾。

AnGeWaNt では、図 4 に示すような、計量のプラットフォーム（以下では、計量プラットフォームと呼ぶ）が PTB によってセットアップされた^{40),42),43)}。この計量プラットフォームの目的は、既存の様々なインフラのインターフェースを統一し⁴⁴⁾、関係者がインフラへ安全にアクセスすることを可能にすることで、法定計量のサービスを向上させることである⁴⁵⁾。

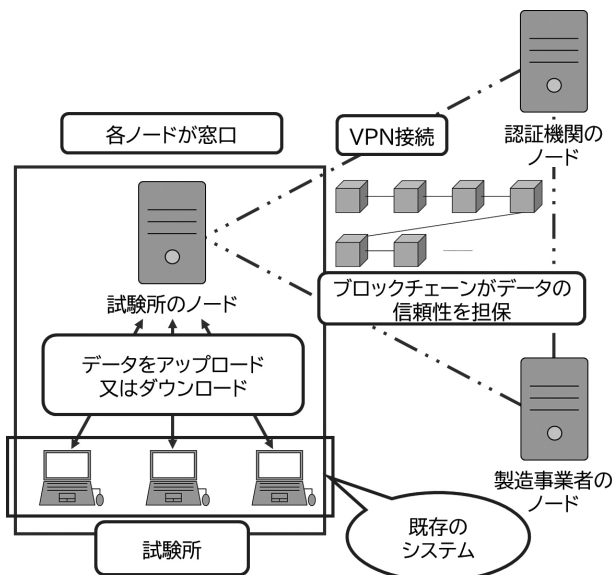


図 3 EMC ネットワークの概略図
(文献³¹⁾を元に作成)

* ブロックチェーン技術については、3.5 で説明する。

† PTB の提案している規格の DCC については、3.1 で説明する。

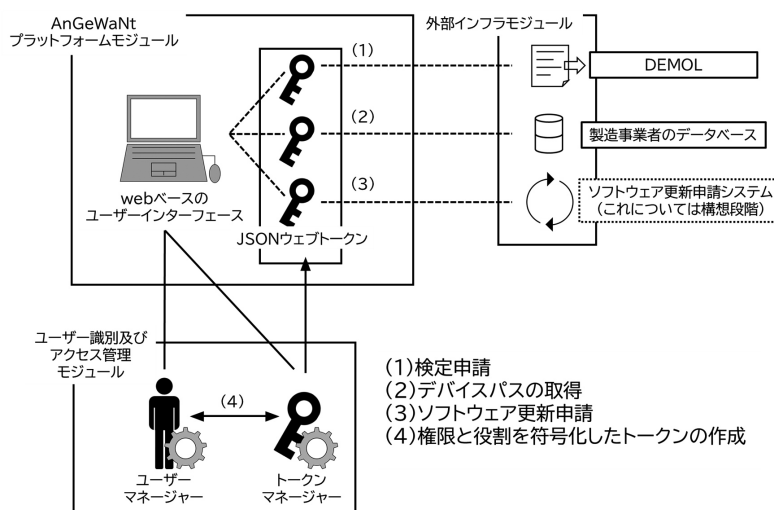


図4 AnGeWaNtにおける計量のプラットフォームの概略図(文献⁴²⁾を参考に作成)

計量プラットフォームは、「a. AnGeWaNt プラットフォームモジュール」、「b. ユーザー識別及びアクセス管理モジュール」、「c. 外部インフラモジュール」の3つから構成されている⁴²⁾。以下ではそれぞれについて説明する。

a. AnGeWaNt プラットフォームモジュール

AnGeWaNt プラットフォームモジュールは、計量プラットフォームのユーザーに対して、webベースのユーザーインターフェースとサービスを提供する⁴²⁾。このモジュールは、計量プラットフォームの基盤となるものであり、様々なインフラへとアクセスするための窓口である。

b. ユーザー識別及びアクセス管理モジュール

ユーザー識別及びアクセス管理モジュールは、ユーザーマネージャーとトークン*マネージャーで構成される。

ユーザーマネージャーは、ユーザー名、暗号化されたパスワード、付与された権限及びユーザーに割り当てられた役割等のデータを処理する。

トークンマネージャーは、AnGeWaNt プラットフォームモジュールに対して、特定のサービスへのアクセスを承認するためのデータであるJSONウェブトークン⁴⁶⁾を、ユーザーマネージャーと連携し、ユーザーの権限と役割に応じて提供する。ユーザーマネージャー及びト

*ここでのトークンは、webサービスにログインするための認証情報を意味している。

ークンマネージャーの全ての通信は、REST⁴⁷⁾と呼ばれる技術仕様を介して行われる。

c. 外部インフラモジュール

外部インフラモジュールは、AnGeWaNt プラットフォームモジュールと接続する様々な外部インフラを総称したものである。外部インフラには、公的機関によるものと民間によるものが存在し⁴²⁾、AnGeWaNt プラットフォームモジュール上のJSONウェブトークンを評価して、アクセスが許可されているユーザーであることを確認した上で、様々なサービスを提供する。

外部インフラを用いることで、従来の紙ベースのプロセスのデジタル化を行い、法定計量におけるタスクを改善することが目指されている^{42),44)}。

以下では外部インフラの例として、Digitaler Eichtantrag Melden Online (DEMOL)^{33),48)}、製造事業者のデータベース及びソフトウェア更新申請システムを取り上げ、それらが提供するサービスについて説明する。

DEMOLは、ドイツの計量法であるMessEG⁴⁹⁾に基づく検定申請用のシステムである。MessEGの規定では、計量器の検定時に、ユーザー又はユーザーの代理人(ユーザーの代わりに申請を行うことが公認されている者)の申請が必要である。計量器のユーザー又は代理人は、DEMOLを用いて、オンラインで市場投入後の計量器の検定を申請できる。申請内容はDEMOL内で自動的に検証され、内容が完全かつ正確であるかどうか確認される。その後、エラーのない検定申請だけが受け入れられ、自動的に送信される。送信が成功すると検定申請が

完了したことが申請者に通知される。DEMOL では申請者は、標準化された XML⁵⁰⁾形式のファイルを用いることで、一度に大量の申請を半自動的に行うことができる。

製造事業者のデータベースは、計量器のユーザーに対して、個々の計量器に固有のデータを提供する。このデータに基づいて、デジタルタイププレートが作成され、その中に EC 型式試験証明書⁵¹⁾(EC 加盟国全体で通用する型式試験証明書)の番号やはかりの精度クラス等のデータが保存される。

ソフトウェア更新申請システムは、計量器のソフトウェアの更新申請の処理を行う。MessEG によると、計量器のソフトウェアを更新する際に、その更新が計量器の計量特性に影響を及ぼす可能性がある場合、ユーザーはどの計量器のソフトウェアを更新するかについて検定を実施する機関に通知し、承認を受ける必要がある。ソフトウェア更新申請システムは、これらのプロセスをオンライン上で行うことを可能にする。

上で紹介した3つの外部インフラのサービスのうち、DEMOL による検定申請と製造事業者のデータベースからのデータの提供は実現しているが、ソフトウェア更新の申請については実現されておらず、構想段階である⁴²⁾。

計量プラットフォームでは、REST や XML, JSON⁵³⁾等の一般的な技術仕様が用いられている。これによって、既存のインフラの高度に専門化したアプリケーションとワークフローを維持したまま、様々なインフラを AnGeWaNt プラットフォームモジュールに接続してスムーズに統合できる。そのため、AnGeWaNt プラットフォームモジュールがユーザーの窓口となる、新しいサービスを開発する取り組みや研究が行われてい

る⁴⁴⁾。例えば、PTB の真空測定グループの校正のワークフローのシステムと AnGeWaNt プラットフォームモジュールを接続して真空計の DCC を発行する取り組みが紹介されている。また、AnGeWaNt プラットフォームモジュールを通じて、EU 適合宣言書* (declaration of conformity: DoC) を発行する方法を検討し、DoC のデジタル化が技術的に可能であることを示した研究がある。

これまでに、計量プラットフォームにおける様々なサービスを紹介した。表1にこれらのサービスの段階(稼働中、研究段階等)を示す。

計量プラットフォームに組み込まれたモジュールや個々のインフラは簡単に分離させて他のプロジェクトに組み込むことができる。その具体例として、ユーザー識別及びアクセス管理モジュールを 2.1.5 の EMC ネットワークに統合することが挙げられており⁴²⁾、将来的にこのような他のプロジェクトの発展に貢献することが考えられている。

2.1.7 QI-Digital

全ての QI のプロセスを完全にデジタル化することで、製品だけでなく製造及び経済における DX に対応し、デジタル化された社会でより良い品質保証を行うことができるとされている⁵⁵⁾。それを実現するために、QI の関係者はネットワークでつながり、お互いの持つデータを相互運用可能にすることが目指されている⁵⁵⁾。

QI のプロセスをデジタル化する取り組みとして、ドイツでは、標準物質の供給や法的規制の策定に関わる BAM、標準化団体の DIN 及び DKE、認定機関の DAkkS、国家計量標準機関の PTB が協力して、QI-Digital と呼ばれるプロジェクトを行っている⁵⁶⁾。

表1 ドイツにおける計量のプラットフォームに関連するサービスの段階

サービス	サービスの段階
DEMOL を用いた検定申請	稼働中
製造事業者のデータベースからの情報の受け取り	稼働中
ソフトウェアの更新申請	構想段階
真空計の DCC の発行	稼働中
デジタル化された DoC の発行	研究段階

* EU 適合宣言書とは、EU が製品に課している要件に適合することを、製品の製造事業者やその代理人が自己宣言する文書である⁵²⁾。

QI-Digitalの主なアイデアは、QIとそのプロセスやサービスを発展させ、デジタル技術を効率的かつ効果的に処理及び利用できるようにすることである⁵⁷⁾。QIのデジタル化に必要な基盤として、データ及びメタデータの共通規格の定義、プロセスと通信のデジタル化のためのクラウドインフラ並びに規格や証明書の機械可読化が挙げられている⁵⁷⁾。さらに一部の分野では、デジタル技術の使用を可能にし、デジタル時代の製品とサービスを効果的に扱うために、規制を適応させる必要があるとされている⁵⁷⁾。

これらの基盤がどのように用いられるかという構想を以下で説明する⁵⁷⁾。それぞれの製品には、デジタルな形式の製品情報が関連付けられ、ライフサイクルの各ステップでそのデジタルな形式の製品情報が更新、修正される。例えば、このデジタルな形式の製品情報には、製品に関する証明書、文書、ログファイル及び他のデータベースへの参照等の、QIに関連する情報が含まれる。また機械可読な規格や証明書は、このようなデジタルな形式の製品情報を利用するシステムに直接統合できる。例えば、デジタルな形式の製品情報から提供される適合証明書の関連情報をソフトウェアで読み取り、ユーザーの管理するコンピューターシステム等のITシステムに統合することが可能である。さらに適合性評価に使用された規格は、規格の中の対応する部分を機械可読な形で参照できる。このように、ソフトウェアが製品の規格や規制への適合性を自動的に評価することが可能である。これら全てをクラウドインフラを利用して組み合わせることで、QIにおける既存のプロセスを合理化することが可能になる。

PTBは、QI-Digitalの中で、QIクラウドと呼ばれるクラウドインフラや機械可読なデジタル証明書の開発を行っている⁵⁵⁾。QIクラウドは、2.1.5で紹介したEMCの成果が引き継がれたもので、データ交換を可能にし、デジタルプロセスを実行するためのものである^{36),58)}。また、2.1.5でも述べたように、PTBはQI-Digitalの以前から、XML形式のDCCの開発を行っており、これに基づいてD-CoCを開発中である⁵⁵⁾。これらのクラウドインフラとデジタル証明書を組み合わせることで、計測学のサービスをデジタルな形式で提供できる⁵⁷⁾。

2.2 ロシアでのデジタルプラットフォームの構築

ロシアでは、法定計量の全ての関係者が利用できる社会基盤の構築が、法定計量におけるDXの実用的な成果であると理解されている^{28),58)}。これを踏まえて、ロシアでは法定計量に関する様々なデータを記録し、法定計

量の業務を進めることができるデジタルプラットフォーム（以下では、単にプラットフォームと呼ぶ）を構築し、法定計量の業務に関係するデータや事務処理をプラットフォームに移行する取り組み（以下では、単に取り組みと呼ぶ）が行われた^{28),58)}。ここでいう法定計量の業務とは、検定、基準器の校正、型式承認及び標準物質の認証等である。

2.2.1 デジタルプラットフォーム構築の過程

この取り組みの中で大きな役割を果たしたのは、ロシアの政府機関であるRosstandartと国家計量標準機関であるVNIIMSである。Rosstandartは法定計量制度を管轄しており、Rosstandartの下に7つの国家計量標準機関が存在する。VNIIMSは7つの国家計量標準機関のうちの1つである。

この取り組みの特徴的な点は、法律が重要な要素であると位置付けられ、プラットフォームそのものの構築と、その運用に関わる法律の改正という2つの作業が並行して行われたところにある。表2にプロジェクトのスケジュールを示す。2つの作業を並行して進めることで、DXが素早く推進され、実際の法律の内容がプラットフォームに反映されたと報告されている。結果として、約4年でプラットフォームが構築され、法定計量の業務を行う関係者（公的機関や企業等）は、構築されたプラットフォームを用いることが法律で義務付けられた。

プラットフォームを構築する作業では、最初ソフトウェアやサーバー機能の開発を専門の企業に外部委託した。こういった企業はデジタル技術について高い専門性を有し、開発コストも抑えられるだろうという考えからである。しかし計量制度が非常に複雑であることから、外部委託先が対応しきれず、開発コストが予想外に大きくなったため、結局VNIIMSがソフトウェアやサーバー機能の開発を担当することになった。

プラットフォームの利用を義務化する法律が施行される以前の法定計量の業務の記録をプラットフォームに移行することは、作業量が膨大で、企業等にとっては大きな負担になる。そのため、法律の中では要求されていない。しかしながら、Rosstandartは国家計量標準機関や検定機関等の公的機関に対して、法律施行の10年前からの情報を登録することを要求している。そのため、プラットフォームの実装段階では、これらの機関によって、過去の関連する情報をプラットフォームに移し、デジタル化するための膨大な作業が行われた。この作業がこの取り組みの中で最も労力を必要とした作業であったことが報告されている。

表2 ロシアにおける法律の改正とプラットフォーム構築のスケジュール（文献⁵⁸⁾を参考に作成）

時期	法律の改正	プラットフォームの構築
2016年から2017年		プラットフォーム構築の外部委託
2017年中ごろ	法案の第一ドラフトの作成	
2017年から2018年	関連企業と専門家との会議	Rosstandartによるプラットフォームの試用
2018年	連邦機関と政府との会議	国家計量標準機関による プラットフォーム構築の継続
2018年から2019年		実際のタスクに向けたプラットフォームの最適化
2019年		Rosstandartによるプラットフォームの統合が成功
2019年12月27日	大統領による署名	
2020年1月30日		全ユーザーに向けたプラットフォームの展開
2020年	法律施行に向けた18の文書を作成	
2020年9月24日	法律施行	構築したプラットフォームが法定計量分野における 唯一のワークスペースとなる
それ以降		プラットフォームの改善

2.2.2 プラットフォームの概要

取り組みの中で構築されたプラットフォームは、ロシア国内の法定計量の業務システム及びポータルサイトと考えることができる。このプラットフォームによって、法定計量の業務に関わる事務処理のデジタル化、データの収集及び市場監視の高度化が実現されている。

このプラットフォーム上には、法定計量の業務（検定、基準器の校正、型式承認及び標準物質の認証等）に関するデータが記録されており、記録されたデータはデジタル署名によって改ざんから保護されている。プラットフォームは、公開されたポータル（オープンポータル）と保護された非公開のポータル（クローズドポータル）で構成されている。オープンポータルでは全ての人々が、OIML 国際勧告等の国際文書や計量器のシリアル番号に紐づいた検定記録等の、法定計量に関する情報を閲覧できる。クローズドポータルでは、あらかじめ登録されたロシア国内の機関と企業が、法定計量の業務やデータの処理を行うことができる。

このプラットフォームを通して、法定計量の技術、法律、計量器及び基準器等に関するデータの収集が行われており、国家標準につながった様々な計量器のトレーサビリティの情報といった、重要なデータを得ることが可能である。

そしてこのプラットフォームから得られるデータを利用して、市場監視に役立てることができる。例えば、検定の有効期間が過ぎても新しい検定情報が入力されていない計量器を見つけ出すことや、疑わしいほど大量の法定計量の業務を行っている機関を特定することが可能である。また、このプラットフォームから得られるデータ

を利用できるモバイルアプリ⁵⁹⁾が一般市民に提供されている。このモバイルアプリは、商店のはかり、水道メーターやガソリンスタンドの給油メーターの検定結果を確認できるものであり、一般市民が市場監視に参加することを可能にする。

2.3 その他の取り組み

この節では、各国の公的機関や国内製造事業者による、デジタル技術に関する以下の5つの取り組みの事例を紹介する。

- NMIによる製造事業者等への技術的アナウンス
- INMETROによるQRコードを市場監視に活用する例
- SLMが研究及び実用化した検定業務システム
- 株式会社タツノの取り組み
- 株式会社イシダの取り組み

2.3.1 NMIによる製造事業者等への技術的アナウンス

法定計量が関係する領域でのDXを進める場合には、それが既存の法令と整合するように対応しなければならない。その事例として、スーパーマーケット等で用いられるはかりの製造事業者に対して、オランダの国家計量標準機関であるNMIがアナウンスを行ったケースを取り上げる⁶⁰⁾。以下では、オランダの小売業の形態、デジタル端末の普及で実現可能になった新しいスーパーマーケットのコンセプト、そのコンセプトについての法令上の問題及びNMIが製造事業者に対して出したアナウンスについて紹介する。

オランダのスーパーマーケットでは、農産物や畜産物等が量り売りされている。買い物客は、ラベル印刷機能を持つはかりによって商品の質量を測り、計量結果と価格が印刷されたラベルを商品に貼り付けて、レジカウンターで会計を行う。

近年のデジタル端末の普及により、買い物客が自分のスマートフォンのモバイルアプリを介して取引を行うことで、レジカウンターでの会計を必要としない新しいコンセプトのスーパーマーケットが実現可能である。このスーパーマーケットでは、ラベルを印刷せず、QRコードをディスプレイに表示するはかりを導入することが考えられる。買い物客は、表示されたQRコードをアプリで読み取ることで、商品のデータを取得できる。

しかしながら、このコンセプトのスーパーマーケットのはかりには、法令上の問題がある。具体的には、商品のデータを取得する際に、アプリに計量結果を表示することが問題となる。商品のラベルが印刷されず、かつアプリで計量結果を表示する場合、現在の法令では、アプリ又はアプリの入った買い物客のスマートフォンが計量器の一部と見なされる。そのため、少なくともアプリは認証を受けなければならないだろう。また法令上は、計量結果が書かれたラベルが印刷された時点で計量のプロセスが終了する。ラベルが印刷されないシステムだと、計量のプロセスがいつまでも終了しないことになり、法令上の計量器に当てはまっていない。

法令の改正によって問題を解決することは、手続きのために多くの時間が必要である。そのためNMIは、商品名と価格のデータのみをはかりからアプリに送信することが最も実用的な方法であるとアナウンスしている。これによって、計量を行うシステムの範囲がはかりに限定され、アプリ又は買い物客のスマートフォンが認証の対象となることが回避される。

2.3.2 INMETRO による QR コードを市場監視に活用する例

ブラジルの国家計量標準機関である INMETRO は、QR コードを用いて、市場監視を高度化することを目指している。以下では、ブラジルで違法な計量器が流通している現状と考えられる対策、QR コードを用いた市場監視の利点について述べる。

近年、ブラジルでは型式承認を受けていない違法な計量器が使われていることが問題になっており、違法な計量器を摘発する効率的な市場監視の方法が求められている。対策として、認証局による計量器へのデジタル署名が考えられるが、この方法には信頼性が高い反面、高コ

ストであるという欠点がある。

前述の問題を踏まえて、INMETRO は低コストで市場監視を行うために、計量器に QR コードを貼付し、計量器の情報を取得できるようにする取り組みを行っている⁶¹⁾。

QR コードの利点として、一般市民がスマートフォンで簡単に読み取れること、情報量が多く web ページへの完全な URL を入れることができること、汚れ等のダメージに強いことが挙げられている。INMETRO は、この取り組みを通して、一般市民が計量器の情報をチェックし、市場監視に参加してもらうことを目指している。

2.3.3 SLM が研究及び実用化した検定業務システム

スロバキアの法定計量機関である SLM は国内の大学と協力して、給油メーターを対象とした検定業務にデジタル技術を適用し、効率化する研究を行った⁶²⁾。以下では、研究の成果である MCoFD (metrological control of fuel station dispensers) というシステムについて述べる。

MCoFD は、燃料ステーションにある給油メーターを検定するためのシステムであり、センサー、タンク、基準容器、ポンプ、ホースシステム及びそれらを電子的に制御するシステム等で構成される。このシステムはバン等の一般的な商用車に搭載できるサイズにまとめられている。

MCoFD の特長として、いくつかのデジタル技術によって検定のプロセスの自動化と効率化を実現している点が挙げられる。

MCoFD では、基準容器内の液体量と給油メーターの指示値の読み取りに、画像処理や画像認識が使用され、結果の取得がデジタル化及び自動化されている。この検定システムでの検定作業員の役割は、認識された値を確認することだけである。またシステムには通信機能があり、指示値の読み取り結果を検定機関が管理するクラウドストレージに送信できる。

MCoFD は、デジタル技術によって検定のプロセスの一部を自動化すると共に、プロセス全体を効率化している。また操作方法が容易であり、検定作業員がトレーニングする時間を短縮できることも、メリットとして挙げられている。

2.3.4 株式会社タツノの取り組み

株式会社タツノ（以下、タツノと呼ぶ）は、石油用各種機器の製造販売を行うメーカーである。タツノでは、ガソリンスタンド等で使用される、主力商品である自動車等給油メーターを中心に、DX の取り組みを進めつつ

ある⁶³⁾。

タツノが販売している自動車等給油メーターは、ネットワークに接続しており、既に計量器のIoT化が行われている。自動車等給油メーターからの情報（エラー情報や機器の内部情報）は、インターネットを介して、専用サーバーに送信される。タツノは専用サーバーを管理しており、サーバー上の情報を元に自動車等給油メーター1台1台の稼働状況や異常をユーザーに知らせるサービスを提供している。このサービスには、ガソリンスタンドの経営者にとって、自分が現地にいない場合でもリアルタイムで状況を把握することができ、トラブルに迅速に対応できるというメリットが存在する。

この他にも、ガソリンスタンドの協力を得て、自動車等給油メーターに新しくセンサーを取り付け、給油量や機器の電気パルス中断回数等のデータから、故障を予知する取り組みを行っている。データの分析には、機械学習の手法が用いられ、データから機器の異常度を定義しようとしている。故障予知はテスト段階の取り組みであるが、これを元に新しいビジネスチャンスにつなげることが目指されている。

さらにタツノは、DXの取り組みとして、自動車等給油メーターのソフトウェアの法定計量に関連しない部分*をアップデート可能なものにすることを検討している。現在のソフトウェアは、装置に組み込まれた専用のものであり、製品出荷後のネットワークを通じたアップデート等には対応していない。しかしながら、自動車等給油メーターのユーザーには、製品を購入した後に、ソフトウェアを柔軟にアップデートしたいという要望がある。そのニーズに応えるためにアップデートが可能なソフトウェアを開発し、自動車等給油メーターに導入することが考えられている。

以上のように、タツノは、現時点でデジタル技術を活用した新しいサービスを提供しており、更なる取り組みを進めようとしている。

2.3.5 株式会社イシダの取り組み

株式会社イシダ（以下、イシダと呼ぶ）は、はかりの製造販売を行うメーカーである。イシダでは、はかり等の機器とデジタル技術を組み合わせたサービスや、電子記録や電子署名に関する規則に準拠するための機能を備えたはかりを提供している⁶⁶⁾。

イシダが製造販売している、食品工場等の生産ラインで用いられる自動はかり等の機器は、IoT化されてお

* 法定計量に関連しない部分とは、計量結果に影響する可能性がない要素⁶⁴⁾⁶⁵⁾である。

り、稼働中の情報をクラウドへと送信することが可能である。イシダは、クラウド上で機器の稼働状況や生産計画に対する進捗及び生産ラインにおける不良前後の動画を確認することのできるサービスを、機器のユーザーに対して提供している。ユーザーは、その場にいたとしても生産ライン全体の状況を把握し、不良が起こっている場合には原因を究明できる。さらにイシダは、ネットワーク接続機能を持たない過去の自社の機器について、外部端末を後付けし、外部端末からクラウドへ情報を送信する方法を提案している。ユーザーにとってこの方法には、新しい機器を導入するコストを抑えつつ、クラウドサービスを使うことができるというメリットがある。一方で、イシダにとってはクラウドサービスを利用するハードルを下げ、より多くのユーザーを呼び込めるというメリットがある。

また、イシダは製薬会社向けに、FDA（米国食品医薬品局）が発行した規則である21 CFR Part11（以下、単にPart11と呼ぶ）の要件を満たす機能を備えた自動はかりを販売している。Part11は、医薬品製造における電子記録が、紙媒体での記録と同等の信頼性を持つための要件を定めたものである。医薬品製造における電子記録の要件については、欧州⁶⁷⁾や日本⁶⁸⁾でもPart11と同様のものが定められている。この自動はかりは、作業員のID、機器の設定、ソフトウェアの変更者を記録する機能を持つ。また、データをPDF形式で外部に出力する際に、PDFの改ざんを防止するためにハッシュ値[†]を出力する機能が備わっている。これらの機能を持つことで、自動はかりの電子記録はPart11の要件に準拠し、信頼性が担保される。

以上のように、イシダでは、デジタル技術の活用や、デジタル技術に関する規則への対応を進めている。

3. 法定計量における DX の研究

本章では、いくつかのデジタル技術に関するトピックに焦点を当てる。さらに、そのデジタル技術と関係する法定計量における研究を紹介する。

3.1 機械可読なデータ

機械可読なデータとは、“ソフトウェアによるコンテンツ処理が可能”⁶⁹⁾なデータのことである。ソフトウェアによるコンテンツ処理を行うためには、データは構造化されている必要がある⁷⁰⁾。構造化とはすなわち、デー

† ハッシュ値は、データを元に計算される一定の桁数の値であり、元データが少しでも異なると全く異なるハッシュ値が得られる。

タを構成する要素が明確に定義及び分類され⁷¹⁾、要素ごとの関係が明示されている⁷²⁾、ことである。

機械可読なデータ形式の概略を理解するための例として、図5にDigital SI*に基づいて記述されたXML形式の温度測定データ（このデータには測定値や単位、不確かさ、確率分布等の情報が含まれる）を示す⁷⁵⁾。XML形式では、データにタグを付けることによって要素と構造をソフトウェアに認識させる。例えば、図5にある、<si:label>というような<>で囲まれた文字列がタグである。これをソフトウェアで処理した場合、例えば、<si:label>と</si:label>の間にある文字列が、測定の種類及び/又は測定した量の名前であり、<si:value>と</si:value>の間にある数値が測定値であることが、明確にソフトウェアに認識される⁷⁵⁾。

以下では、機械可読に関係する3つのトピック（計量器のデジタル表現の機械可読化、DCCの機械可読化、SMART規格）を紹介する。

3.1.1 計量器のデジタル表現の機械可読化

2.1.4で紹介した将来像の中では、法定計量のプロセスから得られたデータは全て機械可読なデジタル表現として保存される。これらの機械可読なデータをソフトウェ

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<si:real>
  <si:label>temperature</si:label>
  <si:value>20.10</si:value>
  <si:unit>degrecelsius</si:unit>
  <si:expandedUnc>
    <si:uncertainty>0.50</si:uncertainty>
    <si:coverageFactor>2</si:coverageFactor>
    <si:coverageProbability>0.95</si:coverageProbability>
    <si:distribution>normal</si:distribution>
  </si:expandedUnc>
</si:real>
```

図5 XML形式の温度測定データの例
(文献⁷⁵⁾を参考に作成)

* Digital SIは、測定データを機械可読な形式で伝達するためのデータ形式⁷³⁾である。国際度量衡委員会がその形式等を定義し、BIPM及び各国の国家計量標準機関がこれを用いてサービスを提供する⁷⁴⁾という構想が進められている。

アで処理することによって、QIにおけるプロセスの自動化²⁸⁾を達成することが期待されている。

計量器のデジタル表現の一部を機械可読な形式にする提案の例として、機械可読な計量のデジタル適合性証明書(Digital Certificate of Conformity in Metrology: D-CoCM)がある⁷⁶⁾。D-CoCMには、計量器の性能や仕様、型式試験報告書、検定証印等のデータが含まれ、これらをソフトウェアで処理することによって、法律で定められた全てのプロセスをデジタル化することが期待されている⁷⁶⁾。

3.1.2 DCCの機械可読化

PTBとスイスの国家計量標準機関であるMETASでは、機械可読な形式のDCCの開発がそれぞれ行われている。以下ではその内容を紹介する。

PTBは、国際的に認められるDCCの規格として、デジタル署名によってデータの完全性[†]と真正性[‡]を保証し、ファイル形式をXMLベースにすることで、機械可読性を実現するものを提案した⁷⁷⁾。機械可読であるため、ソフトウェアがDCCの中の情報を自動的に読み出して使用できる⁷⁸⁾。既に2.1.6で紹介した計量プラットフォームでは、ユーザーがPTBの規格に沿ったXML形式で校正証明書をアップロードすることで、システムは証明書が有効なものかどうか検証し、検証成功時にアーカイブすることが可能になっている⁴⁴⁾。

METASは、校正の際のデータ（生の測定データやその付帯データ）が埋め込まれ、デジタル署名によって完全性と真正性が保証された、PDF形式のDCCを提案した⁷⁹⁾。PDF形式を用いることは、従来の校正証明書に慣れたユーザーに配慮した現実的なアプローチであるといえるだろう。実際に、このDCCはMETASに属するいくつかの試験所の校正サービスに適用されている。METASでは、測定データ、メタデータのフォーマット及び表現の更なる標準化の議論を行い、様々な処理（結果の可視化、外部へのデータの提供等）を自動化できるDCCを実現することが目指されている。

3.1.3 SMART規格

ISO/IEC規格は、人間が読むことを前提としていて、現在紙媒体又はPDF形式で発行されているが、以下のような問題が報告されている⁸⁰⁾。ISO/IEC規格のユー

† データが改ざんされていないこと。

‡ データの作成者や送信者に偽りや誤りがないこと。

ザーは、規格の内容を製品やプロセスに適用するために、PDF 等からテキストをコピーして、規格の要求事項を管理するシステムに貼り付けることに、かなりの時間と労力を費やしている。さらに、規格の曖昧な部分を解釈し、自分たちが使いやすいように内容を再構築する必要がある。

このような人的労力の問題を解決するためには、ソフトウェアで自動的に規格の内容を処理することが求められる。そのために、ソフトウェアが規格の内容を解釈して利用できるようになることを目指して、機械可読な規格である SMART 規格の開発が行われている⁸¹⁾。

SMART 規格では、規格の内容（例えば、部品の幅は 3 cm 以上であること等）が機械可読化され、規格のユーザーがそれらをシステムにインポートし、あらゆる種類の技術的なことを行えるようになることと述べられている⁸²⁾。これによって、規格のユーザーが時間を節約し、作業ミスや誤った解釈によるエラーを減らすことにつながると期待されている。

3.2 法定計量分野での人工知能や機械学習の利用

近年、注目されているデジタル技術のトピックとして、人工知能（Artificial Intelligence: AI）や機械学習が挙げられる。AI の定義については完全に確立されていないのが現状であるが、「人間が知的であると感じる情報処理や情報技術」⁸³⁾であると一般的には理解されている。AI の中でも、人間の「学習」に相当する仕組みを持ち、データからパターンやルールを発見するものが機械学習である。

計測学分野においても、AI や機械学習の技術が注目を集めており、表 3 のようにこうした技術を取り入れた研究が数多く行われている。

しかしながら計測学分野全体と比較すると、法定計量分野での AI や機械学習を取り入れた研究は、あまり数が多いように思われる。以降では、それらの研究についていくつか紹介する。

3.2.1 OIML D31 における法定計量に関連するソフトウェアの動的モジュール

将来的に、計量器の計算アルゴリズム等に AI や機械学習を利用するための要求事項が必要になる可能性が高い。

そのため現在、OIML D31 「ソフトウェア制御計量器のための一般要件」⁶⁴⁾（以下では、単に D31 と呼ぶ）の改定作業において、要求事項を開発中である。

まず、AI や機械学習を利用した法定計量に関連するソフトウェアモジュールを取り扱えるように「法定計量に関連するソフトウェアの動的モジュール」という用語が D31 に新たに導入された。動的モジュールとは、使用中に変化する可能性がある装置固有のパラメーターによって挙動が左右されるモジュールである。このような動的モジュールは、機械学習や AI の特性を取り入れたり、利用したりすることが考えられる。

さらに D31 では、計量器の法定計量に関連するソフトウェアが動的モジュールを組み込んでいる場合の要件が導入された。それらの要件を以下にいくつか例示する⁶⁴⁾。

表 3 測定に AI や機械学習の技術を取り入れた研究の一例

著者	年	内容
K. Yamamoto, et al.	2017	機械学習を用いて環境データ（湿度、日射量、方位角、標高等）により安価な温度センサーの測定値を校正する研究 ⁸⁴⁾
B. Kim, et al.	2018	超音波画像における胎児腹囲の自動判別に機械学習を用いる研究 ⁸⁵⁾
A. C. Just, et al.	2018	人工衛星によるエアロゾル光学的深さの測定値補正を機械学習モデルによって行う研究 ⁸⁶⁾
T. Rymarczyk, et al.	2019	電気インピーダンスの違いを利用して試験対象物の内部構造を可視化する際に機械学習アルゴリズムを用いる研究 ⁸⁷⁾
Gao, et al.	2019	AI の画像認識による非接触でのベルトコンベア速度測定の研究 ⁸⁸⁾
A. R. Kavsaoglu, et al.	2015	皮膚反射光から得られるシグナルの特徴から機械学習アルゴリズムによって
C. El-Hajj and P. A. Kyriacou.	2020	非侵襲的にヘモグロビン値や血圧を測定する研究 ^{89),90)}

- 動的モジュールにおけるパラメーター変更は監査証跡*に記録されなければならない。
- 計量器が動的モジュールを組み込んでいるという情報を、計量結果に関心を持つ関係者に表示しなければならない。
- 計量器に計量結果のデータが保存される場合や計量結果のデータが伝送される場合において、動的モジュールのアルゴリズムの結果として生成された計量結果のデータは、その旨を表示しなければならない。
- 製造事業者は、動的モジュールの検定や評価の方法、パラメーターが変化する中でも適合性を確認する手段、動的モジュールの学習過程や学習に使用したデータセット、アルゴリズムの説明等を型式評価のソフトウェア文書内に記さなければならない。

このように現在 OIML では、AI や機械学習を利用した計量器への対応が進められている。現在改定作業中の D31 は、改定作業を行う委員会によって内容が十分であると判断された後に、CIML 委員会による投票にかけられる。その後、CIML 委員会による承認を経て、文書が公開される。

3.2.2 基準容器の目盛りの読み取りを自動化する研究

ここでは、AI を用いた画像認識によって、液体量の測定を自動化するシステムの研究⁹¹⁾を紹介する。

体積計に分類される計量器（自動車等給油メーター等）の検査では、一般的に計量器の計量結果と基準容器による測定結果を比較する方法が用いられる。しかし、容器の目盛りを目視して液体量を測定することは、測定を行う環境や液体の性質のために、しばしば困難になる可能性がある。

この問題に対処するために、この研究では、画像認識を使用した測定システムによって、液体量の読み取りを自動化することに焦点を当てている。この測定システムは、画像取得用の web カメラと画像認識用のソフトウェアを含む PC で構成されている。この測定システムでの測定の流れは以下のようになっている。カメラは、液体メニスカスの目盛りの画像を取得する。画像の前処理、目盛りと液面レベルの検出、レンズの歪みと視差効果の補正及び最終的な単位変換が、プログラミングによってユーザーが作成したソフトウェアによって行われ、目盛りの読み取り値が得られる。

* 監査証跡については、3.3 で説明する。

この研究では、液体量の測定システムによる自動測定結果を、目視によって得られた結果と比較することによって検証して、測定システムが適切な結果を出力していることが示された。ちなみに、同様の機能を持った測定システムは、2.3 で紹介したスロバキアの SLM の取り組みの中でも用いられている。

3.2.3 合成データによる機械学習モデルの作成

機械学習の手法を用いると学習の結果として、具体的な計算式又は計算方法である機械学習モデルが構築される。この機械学習モデルにデータの識別を行わせる方法がある。

法定計量における市場監視の活動の1つとして、計量の際の不正行為の検出がある。不正行為を検出するために機械学習モデルを利用する方法が考えられるが、機械学習モデルを構築する際には、不正行為の影響を受けたデータとそうでないデータの両方を含むデータセットが必要となる。

しかしながら、データを取るだけのためであっても、実際に計量の際に不正行為を行うのは違法となる場合がある。また各種の要因を制御して、不正行為が行われた状況を実験的に再現するには限界がある。

この問題に対して、不正行為の影響を受けたデータを、アルゴリズムによって人工的に作成することが考えられる。人工的に作成されたデータは合成データと呼ばれ、合成データによって機械学習モデルを構築するためのデータセットを補強するという方法が存在する⁹²⁾。

市場監視で不正検知を自動化するために、合成データによってデータセットを補強して、船舶への燃料移送中の不正行為を検出するための機械学習モデルを構築した研究⁹³⁾がある。

船舶への燃料移送には、コリオリ式流量計が広く用いられている。近年、コリオリ式流量計の外側に磁石を取り付けることで、機器の動作に影響を与え、計量結果を損なわせる不正行為が増加している。燃料移送には、プロセスの様々な段階で起こる物理的な流体の相互作用による、複雑な変動がある（例えば、配管内に閉じ込められた空気、同伴ガス、燃料タンクが空になったときの移送の最終段階におけるタンクストリップングが影響を与える）。したがって、計量の際に得られるデータのプロファイルは、複雑で、1回の計量ごとに固有のものとなる。不正行為を正確に検出することのできる機械学習モデルを構築するためには、磁石を取り付けたコリオリ式流量計を用いて、繰り返しデータを取得する必要があると考えられ、これには時間と手間がかかる。

この研究では、流量を実際に計量した時系列のデータ（実データ）に、磁石によって引き起こされる一時的な変動とランダムなノイズを加えることで、合成データが生成された。さらに、実データと合成データをまとめて機械学習のための1つのデータセットにして、不正行為検出用の機械学習モデルが構築された。

さらにこの機械学習モデルを、データセットには含まれない実際のデータで検証した。検証に用いた実際のデータは、磁石が付けられた場合とそうでない場合の両方を含む。検証の結果、構築された機械学習モデルは、90%以上の正解率でデータを分類できることが確認され、研究手法の有効性が示された。

3.3 ランタイム検証による監査証跡のチェック

ソフトウェアで制御される計量器には、外部からの介入の証拠を残すために、監査証跡が用いられている。監査証跡とは、ソフトウェアで発生するイベントのタイムスタンプ付き情報記録を含む連続データファイルである⁹⁴⁾。イベントとして、例えば、装置のパラメーター値の変更、ソフトウェアの更新、法定計量に関連し、計量特性に影響を与える可能性のあるその他の活動が挙げられる⁹⁴⁾。

現在の検定では監査証跡のチェックは行われていないが、D31⁶⁴⁾では、監査証跡のチェックを検定時に行うことが記されている。そのため、今後検定時に、監査証跡のチェックが実際に行われる可能性がある。その場合、検定担当者の負担が増えないような対策を講じることが求められる。特に機械学習を用いる動的モジュールを含む計量器が実現する場合、パラメーター値の変更が何度も行われ、監査証跡のデータ量が膨大になることが予想される。その場合、人手による監査証跡のチェックは現実的ではない。このことから、何らかのツールによる支援が不可欠である。

そのため、監査証跡のチェックを自動化する目的で、ランタイム検証 (runtime verification: RV) 技術を用いる研究が行われている⁹⁵⁾。RVは、トレース（記録されたイベントの有限列）が、所定の仕様を満たすかどうかを記号的に検査する検証技法である。RVでは、仕様が線形時相論理 (linear temporal logic: LTL) 式で記述されることが多い。例として、表4に基本的なLTL式、図6にその概略を示す。

この研究ではまず、D31に記載されている監査証跡の要件が、監査証跡に記録すべきイベント、検定時のテスト項目及びその他の要件に分類された。表5にこれらの内容を記載する。以下では、表5を補足するために、追

跡可能更新について説明する。通常、法定計量に関連するソフトウェア（ここでは、単にソフトウェアと呼ぶ）を更新した後に、計量器は検定（後続検定）される必要がある。しかし、既存のパラメーターに影響を与えないソフトウェア更新は後続検定を省くことができ、その場合更新が適切に行われたことを十分に確認可能（追跡可能）にする必要がある。このような後続検定を必要としないソフトウェア更新を追跡可能更新と呼ぶ。追跡可能更新では監査証跡にイベントを記録して追跡可能性を担保することが求められている。

さらにこの研究では、表5に示した要件を元にLTL式での仕様が得られた（表6に元となった要件と要件に対応するLTL式をいくつか示す）。

監査証跡のチェックに、RVを用いる利点は、拡張性であり、様々な要件についてLTL式を変更するだけで、枠組みはそのままにチェックを行えることである。

3.4 Distributed Measuring System (DMS)

3.4.1 DMSの概要

近年のインターネット通信技術やクラウドコンピューティングの発展にともない、これらの技術を用いたDistributed Measuring System (DMS) が提案されている^{96),97)}。

表4 基本的なLTL式

LTL式	意味
P	Pが真
¬P	Pが偽
F P	後続するトレースのどこかでPが真
G P	後続するトレース全体でPが真
P U Q	Qが真となるまではPが真

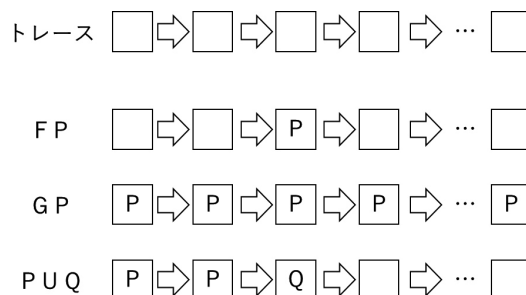


図6 LTL式の概略

表5 D31での監査証跡の要件

分類	内容
記録すべきイベント	<ul style="list-style-type: none"> ・ 法定計量に関連するパラメーター値の変化 ・ 法定計量に関連するソフトウェアの修正や更新（特に成功や失敗の情報を含む追跡可能更新の記録） ・ 法定計量に関連し、計量データや計量特性に影響を与える可能性のあるその他の活動（動的モジュールの特定のパラメーターの全ての変更、法定計量に関連するファイルのアクセス権限の変更、OSの構成に対する変更等）
検定時のテスト項目	<ul style="list-style-type: none"> ・ 監査証跡への入力を見ることで完全性が求められるパラメーターをチェックすること ・ 設定可能なパラメーター値が許容範囲にあること ・ ソフトウェアの識別における、監査証跡に記録された追跡可能更新に関わる項目
その他の要件 (主に追跡可能更新に関係する)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 追跡可能更新の手続きが図7に示すフローチャートどおりであること ・ 国内法に従って、追跡可能更新を進める前に利用者又は所有者の同意が必要 ・ 追跡可能更新を行うために計量器の保護手段がオフになっている場合、更新の終了後、その結果に関わらずオンとなる ・ 完全性や真正性のテストに失敗した場合、操作不能モードに切り替わる

表6 D31での監査証跡の要件の仕様⁶⁴⁾
(ここでは要件を表現するために抽象的なプロパティを用いている)

要件 (その由来)	LTL 式での仕様
法定計量に関連するファイルのアクセス権限が不正に変更されない (記録すべきイベントに由来)	$G\neg\text{changePermissionUnauthorized}$
完全性が求められるパラメーターが変化しない (検定時のテスト項目に由来)	$G\neg\text{changeParameterRequiringIntegrity}$
ソフトウェアの保護手段は「更新直後」を表すイベントの前にオンになる (その他の要件に由来)	$F\text{turnOffProtectionMeasure} \rightarrow G((\text{installActivate} \vee \text{discardFilesKeepOld} \vee \text{switchInoperableMode}) \rightarrow (\neg\text{immediatelyAfterUpdate} \vee \text{turnOnProtectionMeasure}))$

計量器は、計量する対象である物理量を検出するコンポーネント、データ処理を行うコンポーネント及び計量結果を表示するコンポーネントから構成される（以下では、この3つをそれぞれ計量部、データ処理部及び表示部と呼ぶ）。DMSは、図8に示すように、計量器を構成するこれらのコンポーネントが、別々のハードウェアに分離されているシステムである。DMSでは次の流れで計量のプロセスが進む。まず、計量を行う現場にある計量部*がデータを取得し、取得したデータをデータ処理部に送信する。データを受け取ったデータ処理部は、データを処理して計量結果を計算してから表示部に送信

*ここでは計量部がセンサー、A/Dコンバーター及び通信ユニットで構成されるとする。

する。計量結果を受け取った表示部はそれを表示する。DMSの一例として、データ処理部にクラウドコンピューティング、表示部にタブレットやスマートフォンなどの表示デバイスを充てる構成が考えられる。

DMSの利点は、構築及び運用が低コストであること、拡張性が高いこと、データ処理部が物理的に保護されていることにあると考えられる。以下では、それぞれについて取り上げて説明する。

様々な場所に計量器を配置して計量を行い、広域的にデータを取得及び利用するシステムを構築することを考えた場合（例えば、電力スマートグリッド⁹⁶⁾又はスピードメーターによる交通取り締まり用システム⁹⁷⁾等）、様々な場所に設置するハードウェア自体のコストやハード

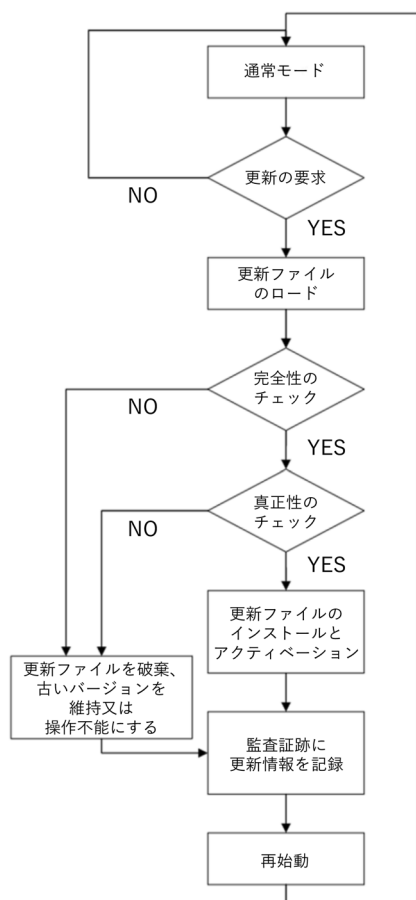


図7 追跡可能更新のフローチャート
(文献⁶⁴⁾を元に作成)

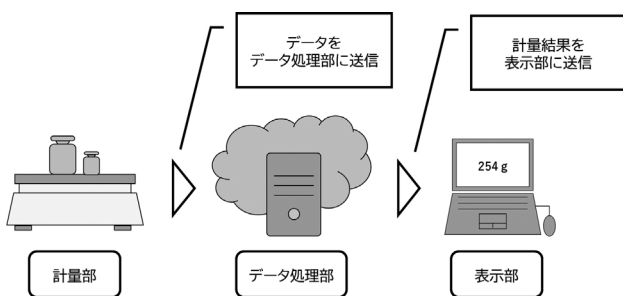


図8 DMSの模式図

ウェアのメンテナンスコストが大きくなるという問題がある。そこで、計量を行う現場に設置された複数の計量部、計量部から得られたデータを処理する1つのデータ処理部及び任意の数の表示部（用途に合わせて数を決め

* 封印とは、“部品やソフトウェア等の不正な変更、再調整及び取り外しから計量器を保護することを目的とした手段”⁹⁴⁾である。

ればよい) から構成される DMS を作り、広域的なシステムを構築するということが考えられるだろう。この場合、データ処理部と表示部を計量部と同数用意する必要はない。そのため、ハードウェア自体のコストの問題を軽減できるだろう。また、計量部は基本的にソフトウェアが入っていないハードウェアのみからなる単純な装置であるため、メンテナンスコストが小さいと考えられる。

DMS において、機能を修正及び改善するためにソフトウェアやハードウェアを変更する場合を考える。ソフトウェアの変更を行う場合、たった1つのデータ処理部に対してソフトウェアの変更を行えばよい。また、ハードウェアの更新も簡単である。計量部、データ処理部及び表示部が一体となっている場合、システム全体の変更を行わなければならないが、DMS ならばデータ処理部だけを新しいハードウェアに変更すればよい。

DMS では、データ処理部を部外者の立ち入ることのできない場所に設置できる（データセンター等）。その場合、システムへの攻撃者は、データ処理部に物理的にアクセスして解析や改変を行うことができず、攻撃への耐性が向上する。

将来的に DMS が実現した場合、従来の計量器と比較してコンパクトな計量部だけを現場に設置すればよく⁹⁶⁾、クラウドコンピューティングによってデータ処理を請け負うことで収益を得る新しいビジネスが可能になる⁹⁷⁾とされている。

3.4.2 法定計量で DMS を用いる利点

法定計量で DMS を用いた場合、全てのコンポーネントが一体となった計量器と比較して、複雑さが軽減されるため、型式の審査や計量器の検査のコストを減らせる利点を持つ。

型式を審査する場合のコストをまず考えてみると、計量部には単純なハードウェア部品しか含まれないため、審査が容易である。またデータ処理部のソフトウェアを審査する必要があるが、DMS ではソフトウェアを法定計量に関連する部分と法定計量に関連しない部分に分けること（ソフトウェア分離^{64),98)}が比較的簡単にできる⁹⁷⁾。ソフトウェア分離が行われている場合、審査の対象範囲を法定計量に関連する部分だけに限定できる。

また、市場監視や点検を全数検査で行う際は、計量部については正しく封印*されているかということをチェックするだけで良い。データ処理部については、1台だけをチェック対象とすれば良く、複数の一体型計量器よりもチェックのコストが低くなる。

3.4.3 DMS でデータの盗聴や改ざんを防ぐ方法の研究

DMS は通常インターネットに接続しているため、サイバー攻撃によってデータの盗聴や改ざんを防がなければならない。そのため、特に DMS を法定計量分野で用いるためには、データ処理部とその前後で行われるデータ通信を保護する必要がある。

そのための手法として、DMS に完全準同型暗号 (Fully Homomorphic Encryption: FHE) を適用することを提案した研究がある⁹⁶⁾。FHE とは、暗号化された数値データに対して加算、乗算等の任意の計算が可能になる暗号化方式である。図 9 にその概略を示す。FHE を用いることで、データの秘匿性を確保したまま、計算を行うことができる。

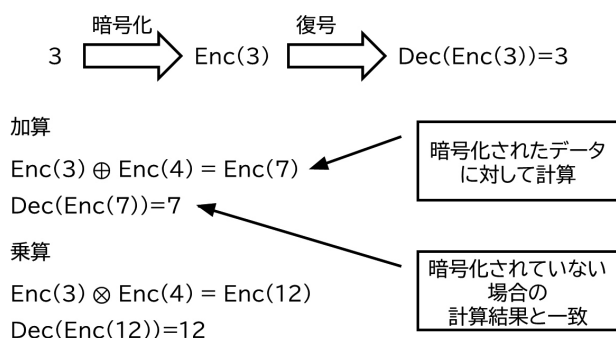


図 9 FHE を適用した計算の概略
 (Enc は暗号化, Dec は復号, \oplus は加算に対応する演算子, \otimes は乗算に対応する演算子を表す)

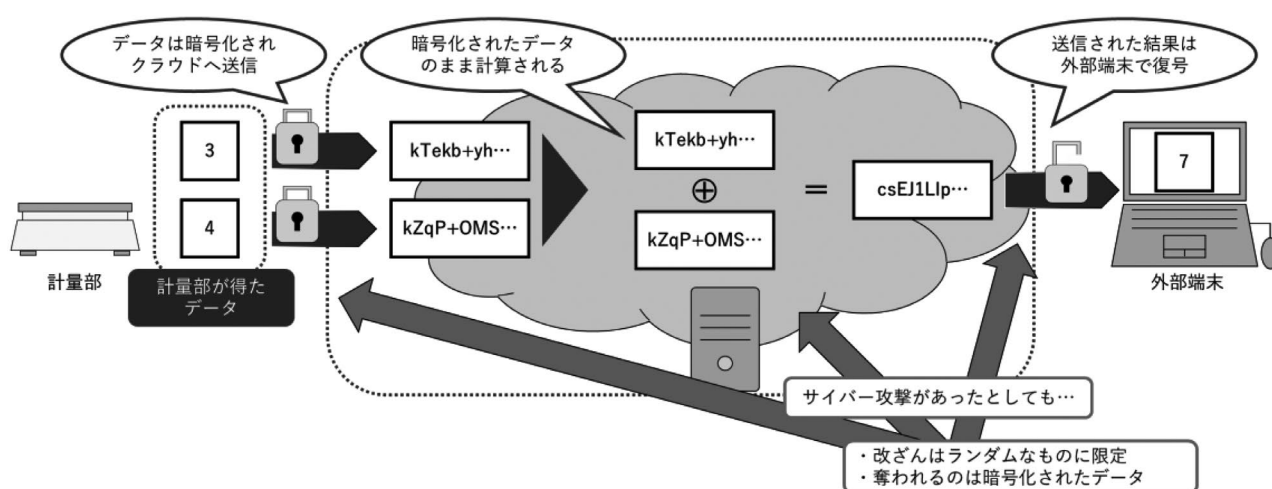


図 10 クラウドコンピューティングと FHE を用いる DMS の模式図

* 特定の管理者がおらず、複数の主体が持つコンピューターが互いに通信する通信形態のネットワーク。

図 10 に示すように、DMS での通信の際に、FHE を用いた暗号化を行うことで、盗聴者がデータの中身を知ること及び攻撃者が計量結果を改ざんすることを防止する。

この研究では DMS に FHE を適用する手法の提案だけでなく、手法の評価も行われた。スマートメーターと電力会社を接続する通信ユニットであるスマートメーターゲートウェイでの料金計算を、FHE を適用し、並列化して実行した。その結果、計算速度が実用に耐えるものであることが分かった。

3.5 法定計量とブロックチェーン

ブロックチェーンは、記録したいデータをブロックの中に格納し、ブロックを次々とチェーン状に連結させて、ブロックのリストとして保存するデータベース技術である^{99),100)}。個々のブロックの中には、記録したいデータ、タイムスタンプ及び前のブロックから計算されたハッシュ値等が含まれる。ブロックチェーンでは、P2P ネットワーク*による管理が行われ、ネットワークに参加する各ノード (通信を行う各サーバー) が同じブロックのリストを共有し、必要に応じてブロックを追加する。なお本稿では、データベース技術としてのブロックチェーンに焦点を当てて説明しており、暗号資産の文脈で語られる Proof of Work やマイニングといった用語については説明しない。

ブロックチェーンには、改ざん困難性、耐故障性及び透明性という 3 つの利点がある。以下では、それぞれに

ついて取り上げて説明する。

ブロックチェーンでは、保存されたデータが改ざんされていないことが、ブロックの中に格納されたハッシュ値によって保証されている。仮に、あるブロックの中のデータを変更した場合、そのブロックから計算されるハッシュ値が変化してしまい、その後のブロックとの整合性が保てなくなる。検知されずに改ざんを行うためには、改ざんしたいデータがあるブロックだけでなく、そのブロック以降の全てのブロックのハッシュ値を変更する必要がある。これには、大きな計算コストがかかるため、ブロックチェーンは改ざんが非常に困難である（改ざん困難性）という特長を持つ。そのため、データを悪意のある改ざんや意図しない変更から保護できる。

またブロックチェーンでは、P2P ネットワークが利用されており、複数のノードが同じブロックのリストを持つ。そのため、1つのノードで障害が起こったとしても、他のノードは稼働し続けるため、ネットワーク全体のシステムダウンが起こらない（耐故障性）。

さらに、P2P ネットワークの中で全てのノードが同じブロックのリストを持つため、ブロックチェーンのデータには全てのノードがアクセスできる（透明性）。

ブロックチェーンは、データを保存する方法としてだけでなく、スマートコントラクト*の枠組みを用いたサービスを提供するプラットフォームにもなる^{100),101)}。スマートコントラクトでは、ブロックチェーン上でのワークフロー等の任意の処理をプログラミング言語で記述できる。そのため、スマートコントラクトを利用して、ブロックチェーン上でサービスを提供できる。

ブロックチェーンは、その利点である改ざん困難性、耐故障性及び透明性によって、信頼性を確保するための方法として、現在多くの興味や関心を持たれているトピックであり、様々な分野で応用例が考えられている。法定計量分野でもブロックチェーンを適用するいくつかのアイデアがあり、それらについて以下で紹介する^{102),103)}。

3.5.1 法定計量に関連するデータの保存

法定計量に関連するデータ（計量器の校正証明書、計量器の法定計量に関連するパラメーターの値、法定計量のプロセスの記録等）の保存にブロックチェーンを用いるアイデアがある。

例として、2.1.5 で紹介した EMC ネットワークでは、ブロックチェーンを用いてネットワーク上のデータの履

* スマートコントラクトとは、あらかじめ設定された条件に基づき自動的に処理が実行されるプログラムである。

歴を改ざん不可能なものとして記録することが提案されている³¹⁾。

3.5.2 ブロックチェーンを用いた計量器の公開鍵暗号基盤 (Public Key Infrastructure: PKI)

計量器の計量結果や法定計量に関連するデータの完全性や真正性を検証できるようにするために、計量器が出力する計量値に秘密鍵を使用してデータにデジタル署名する方法が考えられる。

このデジタル署名を検証する者は通常 PKI というシステムを用いて、秘密鍵と数学的にリンクした公開鍵を入手し、公開鍵を使って署名を検証する。従来の PKI は、信頼できる第三者による公開鍵の証明書の発行、管理、失効が必要なため、高コストである。

ブロックチェーンベースの PKI では、製造事業者、規制当局及びユーザー等が参加し、計量器の公開鍵がブロックチェーンに記録される（検定担当者が初めて検定を行うときに公開鍵を登録することが提案されている²⁸⁾）。ブロックチェーンにアクセスできる者は誰であれ、計量器が提供するデータのデジタル署名が適切であるか検証が可能である。

ブロックチェーンに記録された公開鍵の改ざんが困難であることから、ブロックチェーンベースの PKI は、信頼できる第三者への依存を必要とせず、証明書の管理コストを減らし、システムの信頼性を確保できる。

3.5.3 DMS

3.4 で紹介した DMS は、計量器のコンポーネントが分離されたものであり、ソフトウェアによる処理をリモートで実行できる。このソフトウェアによる処理にブロックチェーン上のスマートコントラクトを利用するアイデアがあり、研究がなされている。

道路上に設置される交通取り締まり用のスピードメーターの DMS に、ブロックチェーンを用いる研究⁹⁷⁾について紹介する。この研究では、車両の磁気プロファイルセンサーで補足し、デジタル署名された生データから、ブロックチェーン上でスマートコントラクトとして実装されたソフトウェアが車両の速度を計算することで、スピードメーターの DMS を構築するアイデアが示された。

DMS のソフトウェア処理にブロックチェーン上のスマートコントラクトを用いることには、以下の利点がある。ソフトウェアの脆弱性やシステムダウンの可能性が低下する（改ざん困難性、耐故障性由来）。また、法定計量に関連するソフトウェアの検査のための作業が減少する。例えば、スマートコントラクトで実装されたソ

ソフトウェアは特定のテンプレートを埋めた単純なコードであるため、ソフトウェアの型式審査が容易である。

研究の中では、企業から提供されたスピードメーターの実データとブラジルのサンパウロの道路システムの管理会社の報告書のデータを用いて検証が行われ、ブロックチェーンを用いて交通取り締まりに十分な性能を持つスピードメーターのDMSが実装可能であることが確認された。

3.5.4 計量器の市場監視

市場監視の活動には、消費者を保護するために、不当な利益を得る目的で改造された計量器を取り締まることが含まれる。市場監視の活動を効率化、高度化するために、ブロックチェーンをベースとしたシステムを構築することが考えられる。ブロックチェーンを用いることで、詐欺行為を取り締まる第三者機関が十分に信頼できない（賄賂を受け取った市場監視の担当者が、詐欺行為に手を貸す等）場合でも、市場監視を行うことができる。他にも、システムの耐故障性、スマートコントラクトを実装することで市場監視を自動化できることが利点として挙げられる。

例えば、ブラジルでは、ガソリンスタンドに設置される給油メーターでの不正行為という問題があり、ブロックチェーンベースの市場監視のシステムが研究されている¹⁰⁴⁾。

このシステムでは、給油メーターでの計量値と車載メーターの計量値をブロックチェーン上で比較することで市場監視を行う。つまり、給油が行われるたびに、給油メーターの計量値と自動車から得られる車載メーターの計量値がブロックチェーン上に記録され、ある程度のデータが集まった段階で、それらが比較されることで、疑わしい給油メーターを発見できるとされている。

さらに研究では、ブロックチェーンベースのシステムが、ブラジルのサンパウロにおける過去の市場監視データを用いたシミュレーションによって評価された。その結果、市場監視に必要な性能要求を満たすことが確認された。

3.5.5 技能試験の管理

技能試験 (Proficiency Testing: PT)¹⁰⁵⁾とは、“試験所間比較による、事前に決めた基準に照らしての参加者のパフォーマンスの評価”¹⁰⁶⁾であるとJISに定義されている。つまり、複数の試験所が同一の物や類似の物に対して試験や測定を行い、結果をお互いに比較することで各試験所の能力を評価することである。

ブロックチェーンを用いることで記録の完全性が保たれ、評価プロセスが自動化された、測定を行う試験所に対するPT用のプラットフォームを構築するアイデアがある¹⁰³⁾。

このアイデアの概要は以下の通りである。PTを管理する責任を持つ組織（技能試験提供者）は、公開鍵をブロックチェーン上で公開する。PTに参加する各試験所は、その公開鍵を用いてそれぞれの測定結果を暗号化し、ブロックチェーン上に書き込む（一度書き込んだ測定結果は、後から変更することができない）。PTに参加する全ての試験所が結果を書き込んだ後、技能試験提供者は暗号化された測定結果を復号するための鍵を公開する。この行為によって、各試験所の測定結果を復号し、PTの結果を処理するスマートコントラクトがトリガーされる。このPTの結果とそれに関係するデータは、ブロックチェーンに永久に保存され、変更は不可能であるため、任意のタイミングで検証を行うことができる。

3.5.6 ビリングシステム

ブロックチェーンを用いて、計量が行われる取引や証明のための管理システムを実現するアイデアがある¹⁰³⁾。例えば、電力計での管理システムにブロックチェーンを用いれば、データを改ざんできず、システムダウンが起りにくく、透明性の高いシステムを構築できる。このシステムでは、電力料金の請求、支払い、電力使用の許可、電力会社の変更、データの管理が行われることが想定されている。さらに、スマートコントラクトによって、電力価格の決定や消費者への電力の分配を行い、システムを自動化することが可能だと考えられている。

既にブロックチェーンを用いた、個人が発電した電力をやり取りするためのプラットフォームを実験運用し、マイクログリッド（一定のエリア内でエネルギーの自給自足を行う仕組み）市場を作成するプロジェクトがある^{107),108)}。他にも例として、電気自動車の充電インフラ、再生可能エネルギーの証明書を作成するシステムが提案されている¹⁰³⁾。

3.6 ゼロ知識証明を用いたソフトウェアのチェック

計量器の市場投入後に、詐欺行為によって不当な利益を得るため又は意図しない原因で、ソフトウェアが書き換えられる可能性がある。こうしたソフトウェアの改ざんを発見及び防止し、消費者を保護するための手法として、検証者（ここでは、規制当局や消費者自身を想定している）が定期的あるいは抜き打ちで、計量器のソフトウェアが認証されたものであることをチェックすること

が考えられる。

通常このようなソフトウェアのチェックでは、検証者は、オリジナルのソフトウェアと計量器に内蔵された改ざんされたかもしれないソフトウェアを比較するために、オリジナルのソフトウェアを手に入れる必要がある。しかし計量器のソフトウェアは本来、製造事業者の知的財産及び所有物である。さらに、検証者がオリジナルのソフトウェアを手に入れることは、不注意による漏えい及び盗難のリスクや、悪意のある検証者が計量器のソフトウェアを改ざんするリスクを高める。検証者が製造事業者と秘密保持契約を結ぶことでこれらのリスクを軽減できるが、その場合、検証者が秘密保持契約を結ぶことのできる者に限定されることになる。

これらの問題を踏まえて、製造事業者の知的財産を保護しつつ、検証者がソフトウェアをチェックすることを可能にする目的で、ゼロ知識証明 (Zero-Knowledge Proof: ZKP) を用いる研究が行われている¹⁰⁹⁾。ZKP は、ある命題の証明者が検証者に対して、証明に関する情報を一切明かすことなく、命題が正しいことを証明できる暗号技術である¹¹⁰⁾。

前述の研究では、ZKP に基づいて計量器がオリジナルのソフトウェアを内蔵しているかどうかをチェックするアイデア (ZKP-based Attestation of Software Possession for Measuring Instruments: ZKASP) が提案されている。ZKASP では、計量器が証明者として、オリジナルのソフトウェアを内蔵している場合のみ、作り出すことのできるデータを検証者に送信する。検証者は、そのデータを評価して真偽を判定する関数を用いて、証明を検証する。

またこの研究では、悪意のある攻撃者が取るアプローチを想定し、それらに対して ZKASP が機能する範囲及びしない範囲を考察している。

ZKASP の適用先として給油メーター、穀物水分計、ユーティリティーメーター及び非自動はかりで採用されることが予想されている。また、2.1.5 で説明した EMC

ネットワークのような法定計量のプラットフォームと連携することや、モバイルアプリを使って消費者がソフトウェアのチェックと結果の報告を行うことが想像できる展開として述べられている。

4. 法定計量における DX の取り組みや研究のまとめ

第2章では、様々な組織がどのような取り組みを行っているかという点に着目した。第3章では、用いられているデジタル技術に着目した。本章では、DX によって何が変革されるのかということに着眼点を移し、2章や3章で紹介した取り組みや研究を以下の3つの実態にまとめる。

- 新しい計量器のアイデアや研究
- 個別のプロセスのデジタル化
- デジタルシステムの構築

以下では、それぞれの項目について説明する。

4.1 新しい計量器のアイデアや研究

デジタル技術を用いたこれまでにないコンセプトの計量器 (以下では、単に新しい計量器と呼ぶ) のアイデアが提案されたり、新しい計量器を法定計量に導入するための研究が行われたりしている。該当する取り組みや研究を表7に示す。

新しい計量器は、性能、機能、コスト及び使いやすさ等の面で、従来のもより魅力的だろう。また、新しい計量器が法定計量に導入されることで、革新的なサービスやビジネスモデルが可能になる¹¹¹⁾だろう。

4.2 個別のプロセスのデジタル化

1つ1つの個別の法定計量のプロセス (型式試験及び型式承認、検定並びに市場監視等) のデジタル化が行われつつある。該当する取り組みや研究を表8に示す。個

表7 新しい計量器のアイデアや研究

該当箇所	内容
2.1.4	IoT 化されライフサイクルでのデータがクラウドに保存される計量器
2.3.1	計量結果のラベルを印刷しないはかりに対するアナウンス
3.2	人工知能や機械学習アルゴリズムを導入した計量器
3.4	Distributed Measuring System
3.5.3	データ処理にスマートコントラクトを用いる計量システム

別の法定計量のプロセスをデジタル化することで、プロセスを効率化及び高度化することができ、法定計量に係る組織の負担を軽減することができる。

国内においては、図 11 に示すように、都道府県検定所の職員数が減少しているという状況¹¹³⁾がある。さらに、新しい特定計量器*（近年の例としては自動はかりや水素メーター¹¹¹⁾）が導入されることや、計量器のソフトウェアの頻繁な更新に対する更新後の検定受検による、業務量の増加が予想される。法定計量のプロセスのデジタル化による効率化は、これらの人員面、業務量の問題の解決策になり得る。

4.3 デジタルシステムの構築

計量器の品質保証を行う仕組み全体をデジタル化するためのシステムを構築することが目指されている。該当する取り組みや研究を表 9 に示す。計量器の品質保証は、2.1.2 で示したように様々な関係者が、互いに連携することで成り立っている。関係者全員が使用することのできるデジタルシステムを構築し、そこでやり取りを行うことで、スムーズで効率的な連携が可能になるだろう。やり取りをデジタルシステム上で完結させることで、これまでならば人間の関与が必要だった部分を機械に処理さ

せ、自動化することが可能になる。さらに、デジタルシステムから、量や性質の点で人間には扱いきれないデータを取得し、機械に処理させることができる。こうしたデータを収集し、役立てることは、品質保証の仕組みを高度化することにつながり得る。法定計量のデジタルシステムを構築し、4.2 のような個別の法定計量のプロセスのデジタル化を行うことで、スピーディーな品質保証が可能になる。これは、計量器の製造事業者にとってビジネスの助けになるだろう。

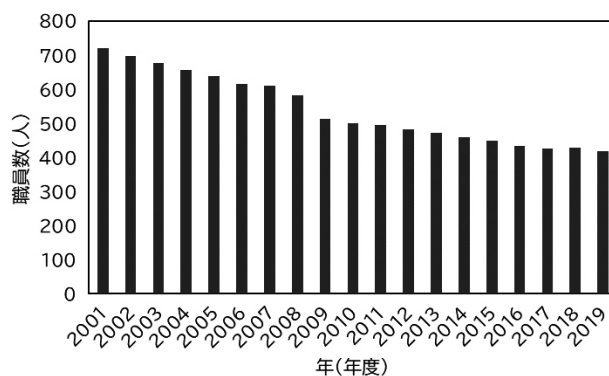


図 11 都道府県検定所の正規職員数の推移 (データ¹¹²⁾を元に作成)

表 8 個別のプロセスのデジタル化

該当箇所	内容
2.3.2	INMETRO による QR コードを市場監視に役立てる取り組み
2.3.3	SLM が研究及び実用化した給油メーター検定用の装置
3.1	機械可読な証明書や規格
3.2.2	AI による基準タンクの見盛りの読み取り
3.2.3	合成データを用いた不正検出用の機械学習モデルの構築
3.3	ランタイム検証を用いた監査証跡のチェック
3.5.4	IoT とブロックチェーンを用いた給油メーターの市場監視
3.6	ゼロ知識証明によるソフトウェアのチェック

表 9 デジタルシステムの構築

該当箇所	内容
2.1.5	欧州計測学クラウドネットワーク
2.1.6	AnGeWaNt プロジェクトにおける計量のプラットフォーム
2.1.7	QI デジタル
2.2	ロシアにおける法定計量のデジタルプラットフォーム

* 日本では、適正な計量の実施を確保するため一定の基準を定める必要があるものとして政令で定められたものが、特定計量器と呼ばれている。

また、デジタルシステムを構築し、品質保証の仕組み全体をデジタル化することは、法定計量にとどまらず、あらゆる製品、サービス及びプロセスを対象としている QI 全体に適用範囲を広げることが可能である。

5. 法定計量における DX の課題

第 4 章でまとめたように、デジタル技術によって、法定計量に関係する計量器、個別のプロセス、品質保証の仕組み等が変化しようとしている。本章では、第 4 章で述べた法定計量における DX の実態を元に、法定計量における DX の課題について説明する。

5.1 新しい計量器と法令の整合性

4.1 で述べた新しい計量器は、法令で想定されている枠組みに当てはまらない場合がある。

計量器に関わる国内の法令として、特定計量器検定検査規則（以下では、検則と呼ぶ）があり、検則の中では、JIS を引用することで、計量器の要求事項や検査方法を定めている。例えば、検則では、図 12.a に示すように、非自動はかり等の特定計量器は、基本的に検出部と構造上一体となった表示機構（計量結果を示す部分）を持つという規定がある¹¹⁴⁾。この規定の例外も存在するが、それでも検出部と表示機構の位置関係には制限が設けられている（両者は同一の事業所内にあること等¹¹⁵⁾。また、図 12.b に示すように、複数の表示機構を有する特定計量器は、いずれの表示機構も検定に合格している必要がある¹¹⁶⁾。

検則の内容は 30 年ほど前に定められたものであり、発展を続けるデジタル技術に必ずしも対応していない。例えば、3.4 で述べた DMS は、計量部と表示部が分離さ

れており、検出部と構造上一体となった表示機構を持たない。また、個人のスマートフォンに計量結果を送信する計量器を実現させる場合、検則の規定に則れば、個人のスマートフォンを検定の対象とすることになり、非現実的である。

新しい計量器を実現するためには、法令との整合性を考慮しなければならない。2.3.1 で説明したように、規制当局のアナウンスによって、新しい計量器が法令と不整合とならないように注意喚起することも可能ではある。しかし、技術発展と法令の乖離があまりに大きくなると、国内の法令を改正しなければならないだろう。それに先行して、JIS の改定を行うことも課題である。

技術革新、社会環境変化に対応することは、法定計量制度の課題として認識されており、国内の審議会で検討されている¹¹¹⁾。この審議会の答申では、検出部と表示機構が構造上一体であるという原則について、ユーティリティーメーター（電力量計、ガスメーター、水道メーター等）は、消費者の利便性と信頼性の観点からは、必ずしもその必然性はないと報告されており、見直しが行われているようである。

5.2 新しい計量器に対する技術的要件や適合性評価方法

4.1 で述べた新しい計量器が、世の中で使えるようになるには、法令との整合性を保つこと（5.1 で言及した）だけでは十分でない。

適正な計量が実施されることは、使用される計量器が技術的要件を満足していることで担保される。その確認方法が適合性評価である。新しい計量器を導入する際はまず、従来の方法で評価できるか検討しなければならない。従来の方法で評価できなければ、技術的要件を定め、新しい適合性評価方法を開発しなければならない。

新しい計量器に対する技術的要件や適合性評価方法の課題の具体例として、「機械学習アルゴリズムを導入した計量器への対応」と「汎用デバイスを用いる計量器への対応」について説明する。

5.2.1 機械学習アルゴリズムを導入した計量器への対応

今後、機械学習アルゴリズムが導入された計量器が実際に現れる可能性がある。そのことを見越して、3.2 で述べたように改訂作業中の D31⁶⁴⁾では、ソフトウェアアルゴリズムに機械学習を用いる計量器のソフトウェア要件が検討されている。

機械学習アルゴリズムが導入された計量器は、ソフトウェアのパラメーターが使用中に変化する点で、従来の計量器とは全く異なるものである。そのため、現在の適

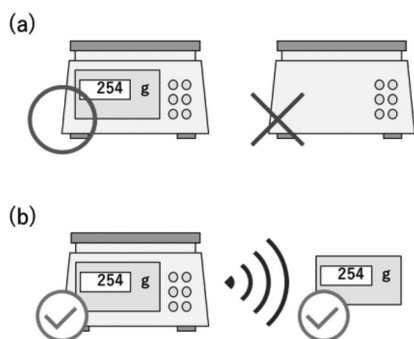


図 12 特定計量器検定検査規則の規定

- 検出部と構造上一体となった表示機構を持つこと
- 複数の表示機構はいずれも検定に合格していること

合性評価方法を用いることができない可能性がある。

D31では、製造事業者が機械学習アルゴリズムを導入した計量器の適合性評価方法を提示することが求められており、今後、適合性評価方法の研究開発が必要であると考えられる。

5.2.2 汎用デバイスを用いる計量器への対応

3.4で述べたように、計量器は、計量する対象である物理量を検出するコンポーネント、データ処理を行うコンポーネント及び計量結果を表示するコンポーネントから構成される。

専用のセンサーを物理量の検出を行うコンポーネントにし、アプリをインストールした汎用デバイス（スマートフォン、タブレット端末、PC等）をデータ処理及び計量結果の表示を行うコンポーネントにして、計量器を成立させるアイデアが考えられる。ここでは、汎用デバイスはユーザーが用意する任意のものであり、ユーザー自身がアプリをインストールすることを想定している。この計量器では、センサーからデータが汎用デバイスに送信され、汎用デバイスのアプリ内でデータ処理と計量結果の表示が行われる。

この計量器では、ユーザーが用意する汎用デバイスを特定できず、汎用デバイスそのものを規制の対象とすることができないが、適正な計量が行われることを確保するために何らかの規制が必要である。そのための方法として、センサーとアプリのみを規制の対象とする方法が考えられる。しかしながら、ハードウェアを特定できず、アプリを規制の対象とするような、計量器の技術的要件は考えられていない。したがって、適合性評価方法も決まっておらず、新しく開発する必要があるのかも不明である。このような計量器を取引や証明に使えるようにするには、技術的要件と適合性評価方法について検討する必要がある。

5.3 個別の法定計量のプロセスをデジタル化する方法の研究開発や手順、ガイドラインの決定

4.2で述べた個別の法定計量のプロセスのデジタル化を行うためには、2つの段階を踏む必要があると考えられる。1つ目の段階は、個別の法定計量のプロセスをデジタル化する技術的な方法を研究開発することである。2つ目の段階は、その方法を実際に法定計量の枠組みに組み込むために、デジタル化された個別の法定計量のプロセスの手順やガイドラインを定めることである。

個別の法定計量のプロセスをデジタル化する方法や手順の開発の課題の具体例として、「RVによる監査証跡

のチェック」、「ZKASPによるソフトウェアのチェック」と「遠隔検定」というトピックでの課題を説明する。

5.3.1 RVによる監査証跡のチェック

3.3では、RVを検定時の監査証跡のチェックに用いることを提案した研究を紹介した。実際に、このアイデアを実現するためには以下の課題があると考えられる。

まず、他の類似する技術と比較することも含めて、RV技術が監査証跡のチェックに相当であることを検証する必要がある。具体的には、RVを行うツールの選定、監査証跡のサンプルの用意及び3.3で述べたような抽象的な仕様に基づき具体的な仕様を設定することが求められる。

次に、検定の現場でRVを適用できるようにしなければならない。具体的には、統一的な監査証跡の様式、チェックの手順、ガイドラインを決めることが必要である。

5.3.2 ZKASP

3.6で説明した研究の中では、ZKASPを計量器のソフトウェアのチェックに実際に用いるにあたって、以下の技術的な課題があげられている。

計量器の計算リソースが限定されている場合、ZKASPでの処理を効率的に行うことができないという問題を解決しなければならない。また、具体的にZKASPを実装する方法についても研究が必要である。

5.3.3 遠隔検定

現在の検定では、検定担当者が計量器の実物を確認して検定を行っている。そのため、計量器本体又は検定担当者の移動というコストがかかる。しかし、近年の通信技術の発展によって遠隔検定の可能性が拓かれた。

遠隔検定は、アイデアとしていくつかの資料で提示されているが、遠隔検定そのものの取り組みや研究が報告されたものは見当たらない。

遠隔検定を実現するためには、技術的な方法を開発し、遠隔検定の手順やガイドラインを定めることが課題となる。

5.4 デジタルシステムの検討、要件のリストアップ、体制の整備

4.3で述べた計量器の品質保証を行うためのデジタルシステムを導入して、品質保証の仕組みをデジタル化する場合、以下の課題がある。

まず、現状を踏まえてデジタルシステムを導入するメ

表 10 実態、目標及び課題

実態	目標	課題
新しい計量器のアイデアや研究 (4.1)	新しい計量器の導入	法令との整合性の確保 (5.1) 技術的要件や適合性評価方法の開発 (5.2)
個別のプロセスのデジタル化 (4.2)	個別のプロセスの効率化や高度化	方法の研究開発、手順やガイドラインの決定 (5.3)
デジタルシステムの構築 (4.3)	関係者の効率的な連携 スピーディーな品質保証 データの収集や活用	検討、要件のリストアップ、体制の整備 (5.4)

リット、コスト及び計画を検討することが求められる。次に、デジタルシステムの機能や性質等の要件をリストアップする必要がある。さらに、デジタルシステムを構築及び運用を行う主体を決める。その上で、デジタルシステムの構築及び運用を行い、品質保証の仕組みをデジタルに移行する。これらが円滑に行われるように関係者の協力体制を整えなければならない。

品質保証の仕組みをデジタルに移行する際に、デジタルシステムを用いない過去のやり方と併用することは望ましいことではないだろう。仮に併用した場合、新旧2つのやり方を使い分けることになり、関係者の負担が増えることや混乱を招くことにつながると考えられるからである。

6 まとめ

本稿では、法定計量における DX について、組織の取り組みや技術的な研究トピックを紹介した。それらの内容を、DX によって何が変化するのかに着目して、以下の3つの実態にまとめた。

- デジタル技術を用いたこれまでにないコンセプトの計量器（新しい計量器）のアイデアが提案されたり、それを法定計量に導入するための研究が行われたりしている (4.1).
- 1つ1つの個別の法定計量のプロセス（型式試験及び型式承認、検定並びに市場監視等）のデジタル化が行われつつある (4.2).
- 計量器の品質保証を行う仕組み全体をデジタル化するためのシステムを構築することが目指されている (4.3).

次に本稿では、これらに基づいて、今後取り組むべき

だと考えられる以下の4つの課題を提示した。

- 新しい計量器と法令との整合性を確保する (5.1).
- 新しい計量器に対する技術的要件や適合性評価方法を検討、開発する (5.2).
- 個別の法定計量のプロセスをデジタル化する方法を研究開発し、手順やガイドラインを決定する (5.3).
- 品質保証を行うためのデジタルシステムを検討し、要件のリストアップ及び体制を整備する (5.4).

本稿で述べた法定計量における DX の実態、目標及び課題は表 10 にまとめられる。また、計量器及び計量器に対して行われる法定計量のプロセス（型式試験及び型

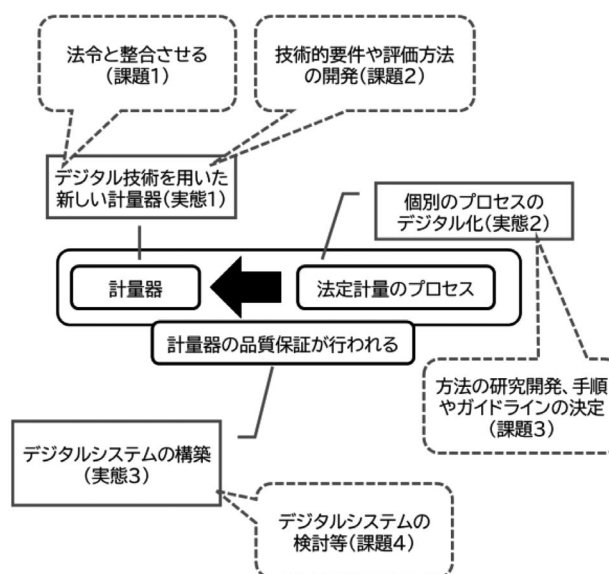


図 13 法定計量における実態と課題の関係

式承認、検定並びに市場監視等)と、以上で述べた実態と課題は図13のように図示できる。

今後は、これらの課題に取り組み、社会が変化する中でも適正な計量の実施が確保されることに寄与したい。

謝辞

本調査研究を進めるにあたっては、型式承認技術グループの長野智博研究グループ長、データサイエンス研究グループの渡邊宏主任研究員及び田中秀幸研究グループ長から多大なるご指導、ご支援を賜りました。お忙しい中、懇切丁寧にご指導いただいたことに深く感謝申し上げます。また、型式承認技術グループの皆様、データサイエンス研究グループの皆様、インタビューをさせていただいた企業の皆様、国内の法定計量に関する統計データを提供して下さった皆様にこの場をお借りしてお礼申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- 1) 計量標準総合センター．“国際法定計量機関（OIML）の組織と活動のあらまし 2021年”．<https://unit.aist.go.jp/qualmanmet/nmijico/OIML/OIML2021.pdf>, (accessed 2022-12-15).
- 2) 松本毅．海外の法定計量制度の動向．計測標準と計量管理．2020, Vol. 70, No. 3, p. 2-18.
- 3) 経済産業省．“計量制度の最近の動向と概要”．https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/keiryoseido/pdf/001_02_00.pdf, (accessed 2022-12-15).
- 4) 高原隆．“計量法の読み方”．<https://keiryou-keisoku.co.jp/yomikata/ver.4-101022/yomikata-zenfile20170421.pdf>, (accessed 2022-12-15).
- 5) 経済産業省．“デジタルガバナンス・コード 2.0”．https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/investment/dgc/dgc2.pdf, (accessed 2023-1-10).
- 6) 情報処理推進機構．“DX 白書 2021 日米比較調査にみる DX の戦略、人材、技術”．<https://www.ipa.go.jp/files/000093699.pdf>, (accessed 2022-12-15).
- 7) INETQI．“Quality Infrastructure Definition”．<https://www.inetqi.net/documentation/quality-infrastructure-definition/>, (accessed 2022-12-15).
- 8) 国際連合工業開発機構，“QUALITY INFRASTRUCTURE BUILDING TRUST FOR TRADE”．https://www.unido.org/sites/default/files/2016-05/UNIDO_Quality_system_0.pdf, (accessed 2022-12-15).
- 9) 世界銀行．“Technical Regulation”．<https://thedocs.worldbank.org/en/doc/907541553265335870-0090022019/original/Part2.Module7TechnicalRegulation.pdf>, (accessed 2022-12-15).
- 10) JIS Z8103：2019. 計測用語．
- 11) 製品評価技術基盤機構．“計量学 - 早わかり”．<https://www.nite.go.jp/data/000001516.pdf>, (accessed 2022-12-15).
- 12) EURAMET．“METROLOGY - IN SHORT”．http://resource.npl.co.uk/international_office/metrologyinshort.pdf#:~:text=metrology%20%E2%80%93%20in%20short%20.%203rd%20edition.%20Mankind, (accessed 2022-12-15).
- 13) JIS Z8002：2006. 標準化及び関連活動—一般的な用語
- 14) 滋賀県．“わたしたちの生活から見た「計量」”．<https://www.pref.shiga.lg.jp/keiryou/keiryou/103603.html>, (accessed 2022-12-15).
- 15) 日本規格協会．“標準化とは”．https://webdesk.jsa.or.jp/common/W10K0500/index/dev/glossary_1/, (accessed 2022-12-15).
- 16) 株式会社日立ハイテク．“標準化とは？ メリット・デメリットから国内外の動向、制定プロセスまでわかりやすく解説”．<https://minsaku.com/articles/post882/>, (accessed 2022-12-15).
- 17) 福岡則子．標準化における協調と競争．日本知財学会誌．2017, Vol. 4, No. 1, p. 20-26.
- 18) JIS Q17000：2005. 適合性評価—用語及び一般原則
- 19) JIS Q9000：2015. 品質マネジメントシステム—基本及び用語
- 20) 世界銀行．“Conformity Assessment”．<https://thedocs.worldbank.org/en/doc/106831553265334313-0090022019/original/Part2.Module6ConformityAssessment.pdf>, (accessed 2022-12-15).
- 21) 世界銀行．“Inspection”．<https://thedocs.worldbank.org/en/doc/735641553266058843-0090022019/original/Section6Inspection.pdf>, (accessed 2022-12-15).
- 22) JIS Q17020：2012. 適合性評価—検査を実施する各種機関の運営に関する要求事項
- 23) 日本適合性認定協会．“適合性評価の仕組みと認定”．<https://www.jab.or.jp/accreditation/14629783684fe9728738dee20120626172751/> (accessed 2022-12-15).
- 24) 日本適合性認定協会．“認定と認証はどう違うのですか”．<https://www.jab.or.jp/contact/faq/q14.html>, (accessed 2022-12-15).

- 25) Physikalisch-Technische Bundesanstalt. “Market Surveillance”. <https://www.eastern-partnership.ptb.de/de/about-the-project/market-surveillance/#:~:text=Market%20surveillance%20is%2C%20next%20to%20Accreditation%2C%20one%20of,steps%20to%20ensure%20that%20these%20requirements%20are%20me>, (accessed 2022-12-15).
- 26) R. Schwartz. Digital Transformation in (Legal) Metrology – The View of the BIPM-OIML Joint Task Group. OIML Bull. 2021, vol. 62, no 3, p. 5-9.
- 27) 経済産業省. “特定市一覧”. https://www.meti.go.jp/policy/economy/hyojun/techno_infra/62_kankeikikan_tokuteishi.html, (accessed 2022-12-15).
- 28) 日本計量機器工業連合会. “令和3年度産業標準化推進事業委託費 戦略的国際標準化加速事業：我が国の国際標準化戦略を強化するための体制構築 O I M L (国際法定計量機関) 対応 報告書”. http://www.keikoren.or.jp/oiml/R3_houkoku3.16.pdf, (accessed 2022-12-15).
- 29) 松本毅. 第55回 CIML 委員会及び第27回 APLMF 総会の報告. 計測標準と計量管理. 2021, Vol. 70, No. 4, p. 44-53.
- 30) NBDC. “FAIR原則(「THE FAIR DATA PRINCIPLES」和訳)”. <https://biosciencedbc.jp/about-us/report/fair-data-principle/>, (accessed 2022-12-15).
- 31) Nordholz, Jan. et al. Evolution of the European Metrology Cloud. OIML Bull. 2021, vol. 62, no 3, p. 27-34.
- 32) 欧州委員会. “ICSMS”. <https://webgate.ec.europa.eu/icsms/>, (accessed 2022-12-15).
- 33) Arbeitsgemeinschaft Mess- und Eichwesen. “Digitaler Eichantrag Melden Online.” <https://www.evp-service.de/DEMOL/>, (accessed 2022-12-15).
- 34) Thiel, Florian. Digital transformation of legal metrology – The European Metrology Cloud. OIML Bull. 2018, vol. 59, no 1, p. 10-21.
- 35) Thiel, Florian. et al. “The European Metrology Cloud”. https://cfmetrologie.edpsciences.org/articles/metrology/abs/2017/01/metrology_metr2017_09001/metrology_metr2017_09001.html, (accessed 2022-12-15).
- 36) Qi-Digital. “Qi-Cloud”. <https://www.qi-digital.de/en/qi-cloud>, (accessed 2022-12-15).
- 37) Physikalisch-Technische Bundesanstalt. “Digital Calibration Certificate - DCC”. <https://www.ptb.de/cms/en/research-development/into-the-future-with-metrology/the-challenges-of-digital-transformation/kernzielvereinheitlichkeitim/digital-calibration-certificate-dcc.html>, (accessed 2022-12-15).
- 38) Angewant. “Angewant”. <https://www.angewant.de>, (accessed 2022-12-15).
- 39) Ottersböck, Nicole; Jeske, Tim. Potential of Cross-Operational Cooperation for Implementing Hybrid, Data-Driven Business Models. Procedia Comput. Sci. 2022, vol. 200, p. 852-857.
- 40) Physikalisch-Technische Bundesanstalt. “Embedded Metrological Systems”. <https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt8/fb-85/ag-852.html>, (accessed 2022-12-15).
- 41) AnGeWaNt. “Verbundpartner”. <https://www.angewant.de/projektpartner/>, (accessed 2022-12-15).
- 42) Oppermann, Alexander. et al. Toward Digital Transformation of Processes in Legal Metrology for Weighing Instruments. Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems. 2020, Vol. 21, p. 559-562.
- 43) Oppermann, Alexander. “AnGeWaNt auf der digitalen Hannover Messe”. https://www.angewant.de/hmi_2021/, (accessed 2022-12-15).
- 44) Oppermann, Alexander. et al. Digital Transformation in Metrology: Building a Metrological Service Ecosystem. Procedia Comput. Sci. 2022, vol. 200, p. 308-317.
- 45) Angewant. “Herausforderungen der Digitalisierung im gesetzlichen Messwesen”. <https://www.angewant.de/messwesen/>, (accessed 2022-12-15).
- 46) Internet Engineering Task Force “JWT.IO - JSON Web Tokens introduction”. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7519>, (accessed 2022-12-15).
- 47) Nguyen, H. V.; Iacono, L. Lo. “RESTful IoT Authentication Protocols”. <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/representational-state-transfer>, (accessed 2022-12-15).
- 48) Maaß, Torsten. “Digitaler Eichantrag – Pilotprojekt DEMOL”. https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/dienstleistungen/vollversammlung/VV2019/05_DEMOL.pdf, (accessed 2022-12-15).
- 49) Bundesamt für Justiz “Gesetz über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt, ihre Verwendung und Eichung sowie

- über Fertigpackungen". <https://www.gesetze-im-internet.de/messeg/>, (accessed 2022-12-15).
- 50) W3C. "XML ESSENTIALS". <https://www.w3.org/standards/xml/core> (accessed 2022-12-15).
- 51) Law Insider "EC type-examination certificate definition". <https://www.lawinsider.com/dictionary/ec-type-examination-certificate>, (accessed 2022-12-15).
- 52) Your Europa. "Technical documentation and EU declaration of conformity". https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/compliance/technical-documentation-conformity/index_en.htm, (accessed 2022-12-15).
- 53) Ecma International. "The JSON Data Interchange Syntax". https://www.ecma-international.org/wp-content/uploads/ECMA-404_2nd_edition_december_2017.pdf, (accessed 2022-12-15).
- 54) Physikalisch-Technische Bundesanstalt. "Digitalisation in metrology for a QI Digital". <https://www.ptb.de/cms/en/research-development/into-the-future-with-metrology/the-challenges-of-digital-transformation/digitalisation-in-metrology-for-a-QI-Digital.html>, (accessed 2022-12-15).
- 55) Qi-Digital. "QI-Digital". <https://www.QI-Digital.de/en/>, (accessed 2022-12-15).
- 56) Eichstädt, Sascha. Digital Transformation in the Quality Infrastructure - Challenges and Opportunities. OIML Bull. 2022, vol. 63, no 3, p. 21-24.
- 57) BAM NETZWERKE "QI-Digital". <https://netzwerke.bam.de/Netzwerke/Navigation/EN/Networks/QI-Digital/qi-digital.html>, (accessed 2022-12-15).
- 58) Golubev, S.; Kuzin, A. National metrology law as a driver for digital transformation. OIML Bull. 2021, vol. 62, no. 3, p. 21-26.
- 59) ФГУП ВНИИМС. "ФГИС АРШИН". <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.vniims.arshin&gl=US>, (accessed 2022-12-15).
- 60) NMI. "NMI'S GUIDE TO CERTIFYING LABEL-LESS SCALES". <https://nmi.nl/nmis-guide-to-certifying-label-less-scales/>, (accessed 2022-12-15).
- 61) Erthal de Abreul, Bruno. "QR Code for Legal Metrology applications". <https://www.youtube.com/watch?v=D86HgQweLZ8>, (accessed 2022-12-15).
- 62) Markovič, JAROMÍR. et al. New generation of system for the metrological control of fuel dispensers. OIML Bull. 2021, vol. 62, no 3, p. 38-46.
- 63) 株式会社タツノ 2022/6/27 インタビュー
- 64) 国際法定計量機関. "General requirements for software controlled measuring instruments". https://www.oiml.org/en/files/pdf_d/d031-e19.pdf, (accessed 2022-12-15).
- 65) WELMEC. "Software Guide (Measuring Instruments Directive 2014/32/EU)". https://www.welmec.org/welmec/documents/guides/7.2/2020/WELMEC_Guide_7.2_v2020.pdf, (accessed 2022-12-16).
- 66) 株式会社インダ 2022/8/31 インタビュー
- 67) 欧州委員会. "EudraLex The Rules Governing Medicinal Products in the European Union Volume 4 Good Manufacturing Practice Medicinal Products for Human and Veterinary Use Annex 11: Computerised Systems". https://health.ec.europa.eu/system/files/2016-11/annex11_01-2011_en_0.pdf, (accessed 2022-12-15).
- 68) 厚生労働省. "医薬品等の承認又は許可等に係る申請等における電磁的記録及び電子署名の利用について". https://www.mhlw.go.jp/web/t_doc?dataId=00ta8216&dataType=1&pageNo=1, (accessed 2022-12-15).
- 69) 日本規格協会. "SMART". https://webdesk.jsa.or.jp/pdf/dev/md_5614_03.pdf, (accessed 2022-12-15).
- 70) Open Knowledge Foundation. "機械可読". <http://opendatahandbook.org/glossary/ja/terms/machine-readable/>, (accessed 2022-12-15).
- 71) 中西秀彦. 人間可読性から機械可読性の時代へ XML 組版への製作現場からの提言. 情報管理. 2014, vol. 57, no. 3, p. 149-156.
- 72) Open Knowledge Foundation. "構造化データ". <http://opendatahandbook.org/glossary/ja/terms/structured-data/>, (accessed 2022-12-15).
- 73) Hutzschenreuter, Daniel. et al. "SmartCom Digital-SI (D-SI) XML exchange format for metrological data version 2.0.0". <https://zenodo.org/record/4709001#.Y9HOW8nP3b0>, (accessed 2023-01-26).
- 74) CIPM Task Group on the "Digital-SI". "Draft of the Grand Vision Transforming the International System of Units for a Digital World." https://www.bipm.org/documents/20126/46590079/WIP+Grand_Vision_v3.4.pdf/aeccfe3-0abf-1aaf-ea05-25b1fb2819f, (accessed 2023-01-26).
- 75) Acko, B. et al. Communication and validation of metrological smart data in IoT-networks. Adv. Prod. Eng. Manage. 2020, vol. 15, no. 1, p.107-117.

- 76) 国際法定計量機関. “Digital Transformation in Legal Metrology”. <https://www.oiml.org/en/news-meetings/oiml-seminars/digital-transformation/docs/oiml-digital-transformation-webinar-presentations-2021-05-05.pdf>, (accessed 2022-12-15).
- 77) Hackel, Siegfried. et al. “The Digital Calibration Certificate”. <https://oar.ptb.de/files/download/5a9803864c91840b9b2a3ce5>, (accessed 2022-12-15).
- 78) Physikalisch-Technische Bundesanstalt. “Digitalisation - Core Objective 1 Also in a digitalized world will PTB be committed to ensuring uniformity in metrology”. <https://www.ptb.de/cms/en/research-development/into-the-future-with-metrology/the-challenges-of-digital-transformation/kernziel-einheitlichkeit-im.html>, (accessed 2022-12-15).
- 79) Boschung, Gregor. et al. PDF/A-3 solution for digital calibration certificates. *Measurement: Sensors*. 2021, vol. 18, no. 100282.
- 80) CEN; CENELEC. “Call for Participation Standards of the Future (machine readable standards)”. <https://experts.cenelec.eu/media/Experts/CEN-CENELEC%20digital%20transformation/Standards%20of%20the%20Future/call-for-participation.pdf>, (accessed 2022-12-15).
- 81) 日本規格協会. “SMART 規格とは?”. <https://webdesk.jsa.or.jp/common/W10K0500/index/dev/smart/>, (accessed 2022-12-15).
- 82) CEN. “Smart Standards”. <https://experts.cen.eu/key-initiatives/smart-standards/>, (accessed 2022-12-15).
- 83) 総務省. “第1部 特集 進化するデジタル経済とその先にある Society 5.0”. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r01/html/nd113210.html>, (accessed 2022-12-16).
- 84) Yamamoto, Kyosuke. et al. Machine Learning-Based Calibration of Low-Cost Air Temperature Sensors Using Environmental Data. *Sensors*. 2017, vol. 17, no. 6, p. 1290.
- 85) Kim, Bokweon. et al. Machine-learning-based automatic identification of fetal abdominal circumference from ultrasound images. *Physiol. Meas.* 2018, vol. 39, no. 105007.
- 86) Allan, Just. et al. Correcting Measurement Error in Satellite Aerosol Optical Depth with Machine Learning for Modeling PM2.5 in the Northeastern USA. *Remote Sens.* 2018, vol. 10, no. 5, p. 803.
- 87) Rymarczyk, Tomasz. et al. Comparison of Selected Machine Learning Algorithms for Industrial Electrical Tomography. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 7, p. 1521.
- 88) Yuan, Gao et al. A contactless measuring speed system of belt conveyor based on machine vision and machine learning. *Measurement*. 2019, vol. 139, p. 127–133.
- 89) Kavsaoglu, A. Reşit. et al. Non-invasive prediction of hemoglobin level using machine learning techniques with the PPG signal’s characteristics feature. *Appl. Soft Comput.* 2015, vol. 37, Issue C, p. 983–991.
- 90) El-Hajj, C.; Kyriacou, P. A. A review of machine learning techniques in photoplethysmography for the non-invasive cuff-less measurement of blood pressure. *Biomed. Signal Process. Control.* 2020, vol. 58, p. 101870.
- 91) Gregor, Bobovnik. et al. Liquid Level Detection in Standard Capacity Measures with Machine Vision. *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 8, p. 2676.
- 92) Abufadda, Mohammad; Mansour, Khalid. “A Survey of Synthetic Data Generation for Machine Learning”. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9677302>, (accessed 2023-01-12).
- 93) Liang, Yanfeng. et al. The application of synthetic data generation and data-driven modelling in the development of a fraud detection system for fuel bunkering. *Meas.: Sens.* 2021, vol. 18, no. 100225.
- 94) 国際法定計量機関. “International vocabulary of terms in legal metrology (VIML)”. https://www.oiml.org/en/files/pdf_v/v001-ef13.pdf, (accessed 2022-12-16).
- 95) Watanabe, Hiroshi. “SPECIFICATION FOR AUDIT TRAIL IN OIML D31: TOWARD RUNTIME VERIFICATION”. <https://www.m4dconf2022.ptb.de/fileadmin/documents/m4dconf2022/Material/Paper/IMEKOTC6-M4Dconf-2022-P36-WATANABE-et-al.pdf>, (accessed 2022-12-16).
- 96) Oppermann, Alexander. et al. Secure cloud computing: Reference architecture for measuring instrument under legal control. *Secur. Priv.* 2018, vol. 1, no. 3, p. e18.
- 97) Melo, S. Wilson. et al. Using blockchains to implement distributed measuring systems. *IEEE Trans. Instrum.*

- Meas. 2019, vol. 68, no. 5, p. 1503-1514.
- 98) Peters, Daniel. et al. A Secure System Architecture for Measuring Instruments in Legal Metrology. Computers. 2015, vol. 4, no. 2, p. 61-86.
- 99) 野村総合研究所. “平成27年度 我が国経済社会の情報化・サービス化に係る基盤整備（ブロックチェーン技術を利用したサービスに関する国内外動向調査）報告書”. <https://warp.dandl.go.jp/info:ndljp/pid/10310120/www.meti.go.jp/press/2016/04/20160428003/20160428003-2.pdf>, (accessed 2022-12-16).
- 100) 中島真志. “ブロックチェーンの将来性と応用分野” https://www.soumu.go.jp/main_content/000550975.pdf, (accessed 2022-12-16).
- 101) Christidis, Konstantinos; Devetsikiotis, Michael. Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things. IEEE Access. 2016, vol. 4, pp. 2292-2303.
- 102) Melo, S. Wilson. Blockchains and legal metrology: applications and possibilities. OIML Bull. 2021, vol. 62, no 3, p. 10-19.
- 103) Peters, Daniel. et al. “Blockchain applications for legal metrology”. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8409668>, (accessed 2022-12-16).
- 104) Melo, S. Wilson. et al. Field surveillance of fuel dispensers using IoT-based metering and blockchains. Journal of Network and Computer Applications. 2021, vol. 175, no. 102914.
- 105) 製品評価技術基盤機構. “技能試験”. <https://www.nite.go.jp/iajapan/aboutus/gijutsu/ginou.html>, (accessed 2022-12-16).
- 106) JIS Q17043 : 2011. 適合性評価 - 技能試験に対する一般要求事項.
- 107) インプレス SmartGrid ニュースレター編集部. “丸
- 紅, 「Brooklyn Microgrid」を作り上げた LO3 Energy と日本国内で電力取引の実証実験へ”. <https://sgforum.impress.co.jp/news/4831>, (accessed 2022-12-16).
- 108) 平野淳也. “LO3 Energy 概要 電力を P2P 取引にブロックチェーンを利用するパイオニア企業”. <https://hashhub-research.com/articles/2020-01-23-lo3-energy>, (accessed 2022-12-16).
- 109) Luís, T.A.N. Brandão. et al. ZKP-based attestation of software possession for measuring instruments. OIML Bull. 2021, vol. 62, no 3, p. 47-53.
- 110) ZKPROOF. “About ZKProof”. <https://zkproof.org/about/>, (accessed 2022-12-16).
- 111) 計量行政審議会, “今後の計量行政の在り方 - 次なる10年に向けて - 答申”. https://www.meti.go.jp/shingikai/keiryogyoseishin/pdf/report001_01.pdf, (accessed 2022-12-16).
- 112) 計量行政室調べ
- 113) 村松徳治. “地方自治体における最近の計量行政”. http://nikkeishin.or.jp/new_members/tihou_keigyosei.html, (accessed 2022-12-16).
- 114) 経済産業省. “特定計量器検定検査規則（平成五年通商産業省令第七十号）第十一条”. <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=405M50000400070>, (accessed 2022-12-16).
- 115) 経済産業省. “特定計量器検定検査規則の規定に基づき経済産業大臣が別に定める特定計量器等について二条.”
- 116) 経済産業省. “特定計量器検定検査規則（平成五年通商産業省令第七十号）第十三条” <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=405M50000400070>, (accessed 2022-12-16).