

計測標準の国際的動向

今井秀孝

Global Trend in the Field of Measurement Standards

Hidetaka IMAI

Measurement standard and its worldwide traceability system are considered to be indispensable fundamental infrastructures for our advanced society. Recent major targets in the field of metrology are to protect global environment and human health and safety and to show reliable evidence of measurement results for quality assurance, thereby to reduce technical barrier in trade.

Key words: International System of Units (SI), measurement traceability, conformity assessment, calibration certificate, measurement uncertainty

科学と技術が急接近しているということが語られ始めてから久しい。技術立国を自認するわが国においてはこのことが顕著に感じられる。半導体物性研究とその製造プロセス、多次元情報伝達のメカニズムと具体的アルゴリズムの構築、脳機能解析と三次元映像化技術などと、いくつもの事例を見いだすことができるであろう。一方、日常生活においても電子化、情報化的流れの中で、地球環境の問題から人間生活の健康・安全の問題まで、科学と技術の接点はきわめて多い。

さて、このような状況下において、生活と技術あるいは科学とを結びつけるものは、具現化された映像と定量化された数値データであろう。この数値化の典型は、定められた尺度に基づいた、「はかる」という行為である。この「はかる」ということは科学・産業の基本であるにもかかわらず、従来は必ずしも重要視されていなかったと思われる。しかしながら、最近では、国際的な基準認証の立場からの基盤技術として、はかられた結果の整合性を確保することの必要性に注目が集まっている。

本稿では、社会あるいは科学の基盤としての計測（ある目的をもってはかることと、その結果を活用することを含

めて計測とよぶことにする）の需要の広がりと、その結果の信頼性を保証する計測標準の構築に関する最近の動きを、国際的ならびに地域内の組織的活動を中心に紹介する。

1. 計測の役割の広がりとその標準の必要性

私たちが日常の生活を健康かつ安全に営んでいくうえでは、朝起きたときから、家庭内、職場、学校あるいは公共の場において、多くの量に関した「はかる」という行為に直面しており、そのたびに整備された計測標準の恩恵を受けているはずであるが、このことはあまり認識されていないよう感じている。家庭内での食事の用意、健康管理、交通機関の利用、気象通報等々、さまざまな場面においていろいろな量をはかることが、きわめて自然に当然のように実行されているようにみえる。しかしながら、これらはすべておおもとの計測標準が、国際的にも国内的にも一定のルールのもとに、要求に見合う範囲の精度において適度に管理・維持されていることに依存している点を再認識する必要がある。

「はかる」という行為は、われわれ人間が集團生活を開始してから必要に迫られて発展したとも考えられるが、人間

が真理を探究するうえからも判断基準の指標が求められて、はかり比べる目安としての「目盛」づくりがほとんどすべての分野で必要不可欠なものとなってきている。この目盛をつくるためには、基準（拠り所）となる「定義」あるいは「定点」を決める必要があり、それは信頼性が高く、「いつでも」「どこでも」「だれでも」が、比較的簡便に実現できるものであることが望ましい。

計測分野の発展の歴史は、はかるための手法からのアプローチ（機械的、電磁気的、光学的など）と、はかりたい対象である「量」（長さ、質量、電圧、温度、時間、分子量など）を求めるためのアプローチとに大別できるが、これら双方からの連携があつてはじめて目的が達成されることが多い。学術分野での計測の役割は、現象をいかに厳格に説明できるかの支援をすると同時に、その数値自体が大きな意味をもつことがある。一方、社会生活や産業の分野では、健康や安全を確保するためや取引証明の内容を保証するために正しい計測結果と製品や装置などの信頼性を確認するための量的ならびに質的管理が必須である。

従来は、メートル条約のもとに制定された国際単位系(SI: International System of Units)の基本単位と主な組立単位に関する標準の設定と供給が中心であった。しかし、最近ではこれらの枠を広げて、金属の硬さのような工業量から三次元座標、ナノスケールの寸法設定などの幾何学量、さらには各種の混合ガスや重金属標準液などの化学標準が求められてきている。さらに、環境問題から極微量の分析や医学的臨床検査に必要な試薬の標準に至るまで、その要求は急速に分野を広げていく傾向にある。

これらの標準への期待は、国際的な通商・貿易における技術的障壁を取り除くために、適合性評価（conformity assessment）という視点から、試験・検査を共通のルールのうえに立って実施するという、いわゆるワンストップ・テスティング（ある国のしかるべき機関で受け入れられた試験・検査結果を、他の国においても同様な試験・検査をすることなく受け入れることを前提とした相互承認制度）の思想が一番大きな原動力となっている。すなわち、適合性評価の基本となる要求事項が、計測された結果の信頼性評価を中心に、一定のルールのもとで満たされるということで、公平性と透明性が確保されるという考え方である。そして、これらの根底には、国際的な整合性のとれた計測標準のトレーサビリティ一体系が構築されていなければならぬ。

さて、計測・計量の標準が公的に求められて、従来以上にクローズアップされてきた契機は、前述したように一定の技術能力を相互に認め合うという適合性評価の視点であ

るが、ここで得られる計測結果の定量的な信頼性評価（計測の不確かさ評価といいかえてもよい）の方法論は、多くの科学・技術の領域に適用することが可能である。例えば、近年のわが国の科学・技術政策の中心として総合科学技術会議が提起する重点4分野とされるライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテクノロジー・材料の分野においても計測の役割は重要である。特に、ナノテクノロジー・材料分野では、微細化された領域での計測の方法論やその結果の信頼性がきわめて重要であり、技術開発とともに計測とその標準の重要性が指摘されているところである。

2. 計測標準における国際整合性の確保（メートル条約を中心に）

1875年に締結されたメートル条約は、現在では世界共通の計量単位を科学的に定義してそれを社会に普及させる役割を担っている。そして、当初の目的であった基本量（7つの基本量：長さ、質量、温度、時間、電流、光度、物質量）を中心とする正確な単位の実現およびその維持・管理・普及から、地球環境の保護、人間の健康・安全の確保、さらには貿易における技術障壁の低減といった人類共通の社会活動全般にわたる範囲にまで広がってきてている。特に、125年以上の歴史の中で、ここ数年の活動は、国際度量衡委員会(CIPM)内に諮問委員会やワーキング・グループがいくつも新設されたことや、他の国際組織との協力関係の増大にみられるように、きわめて活発化してきている。

その顕著な発端は、1999年のグローバルMRA(Mutual Recognition Arrangement、通常はCIPM MRAとよばれる)への署名（現在は51か国・機関が署名済み）であり、そこでは次の2つの大きな目標を定めている。

(1) 各国の国家計量標準が一定の水準以上の技術的同等性を有することの確認

(2) 上記の国家計量標準を有する機関が発行する校正証明書を相互に承認し合うこと

これらの目標を達成するためには、国際比較などの結果をもとにして量ごとの技術能力を証明するためのCMC(calibration and measurement capability)を整備し、BIPM(Bureau International des Poids et Mesures)のデータベースに登録する必要がある。このとき同時に校正機関としての品質システムの整備が求められる。

計測標準に関連する国際組織は、それぞれの目的に応じて順次設立されたものであるが、大きく分けて、校正（メートル条約、最高議決機関は国際度量衡総会：CGPM）、試験所認定（ILAC：国際試験所認定協議会）、法定計量(OIML：国際法定計量機関)、品質システム審査（IAF：

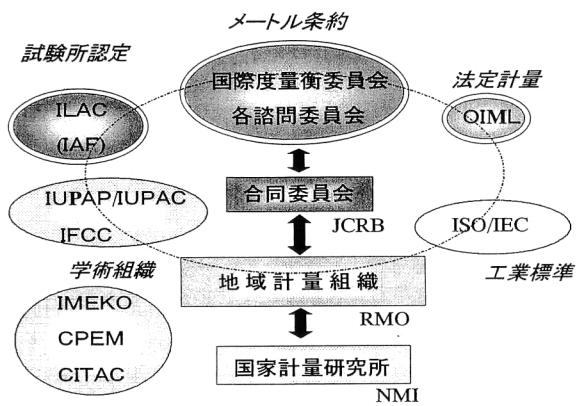


図1 計測計量分野の国際連携。

国際認定フォーラム), 工業標準化 (ISO: 国際標準化機構, IEC: 国際電気標準会議) となる。これらの組織の根底には、各技術水準 (レベル) の計量標準があり、そのトレーサビリティー (現場の計測結果のつながり) が、順次上位の標準を介して国際的に最高位の標準にたどり着くという遡及性を意味する。最近では、製品や食品の素材のルートを順次たどるという意味のトレーサビリティーも重要視されている。

これらの関係は、メートル条約を中心として、図1のように示すことができる。ここでは、関連する国際学術組織も同時に示してある。メートル条約では、4年に1回開催される国際度量衡総会 (CGPM) が最高議決機関であるが、毎年開催される国際度量衡委員会 (CIPM) やその傘下の専門分野別諮問委員会が重要な役割を担っている。

さて、計測における標準の役割は、明確な定義のもとに量の基準を定めてそれを合理的に実現することであるが、常に最高の技術水準を確保しておくためには、自然界の法則に基づいた科学的で安定・普遍なトレーサビリティーの体系を築いておくことが重要となる。

図2は、最高位の標準からの供給の流れを図式化したものであるが、トレーサビリティ一体系の構築にあたっては、大きく分けて2つの流れが存在する。その1つは長さや時間などの物理標準の多くにみられるように、定義に基づいた標準がそれぞれの機関で実現可能な場合である。この場合には、SIの定義に基づいて、一次標準 (器) ならびに二次標準 (器) が実現できて、それが末端の現場の測定機器にまでつながる体系を構築することを可能とする。

もう1つの方法は、定義に基づいた標準を実際に多くの機関で実現することが困難であり、仲介となる機器や物質を通して標準の値を移し換える方法である。力や圧力のような組立量の標準においては、それらを実現するために原理的には基本量から直接導くことも可能であるが、これら

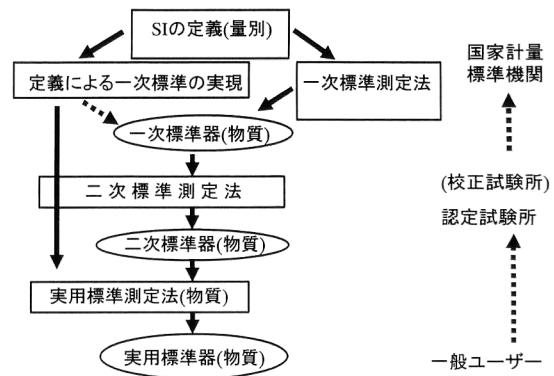


図2 標準の実現方法とトレーサビリティーの流れ。

の組立量を直接実現する標準器を構築するほうが精度や利便性の観点から有利な場合が多い。また、多くの化学標準においては、分析機器の目盛を定めるための標準物質を仲介標準として設定する方法が多くとられている。いずれの場合にも、下位の実用機や実用標準物質から上位の標準へとさかのぼるというトレーサビリティ一体系の構築には、国際的に通用する透明性と公平性の確保が重要である。

3. 計測における信頼性評価の重要性

前述したように、その活動範囲の広がりと同時に世界の各経済圏を中心とする地域別の活動の重要性が増してきたおり、欧州、全米大陸州、アジア太平洋地域などの地域ごとに計量組織 (RMO: Regional Metrology Organization) が結成されて、各国の計量標準研究機関 (NMI: National Metrology Institute) が加入している。さらに、RMOとメートル条約の事務局である国際度量衡局 (BIPM) との合同委員会 (JCRB: Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM) の役割が重要視され、最近では年に2回この合同会議が開かれている。そして、メートル条約におけるグローバル MRA の実施に向けて、上記の(1) NMI の同等性を確保するための国際比較の実施や(2) NMI が発行する校正証明書の内容のあり方などに関する具体的活動を実践している。

最近の RMO ならびに JCRB の活動の中心は、CIPM および RMO が主催する量 (長さ、質量など) ごとの国際比較の充実化と国際比較の結果を共通のルールに基づいて BIPM データベースに登録することであるが、その中身は、前述した技術能力を証明するための CMC の整備と NMI の品質システムの構築であり、これには量に応じた表現様式の統一と技術レベルの表明が重要となる。近年では、計測された結果の信頼性を表現するために、従来からの誤差評価や精度評価にかわって、不確かさ評価が実践されるようになってきている。

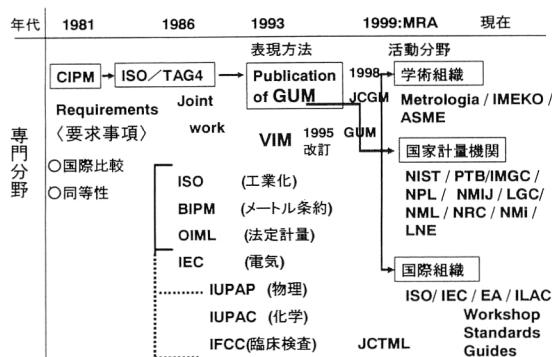


図3 國際組織における計測の不確かさの扱い。

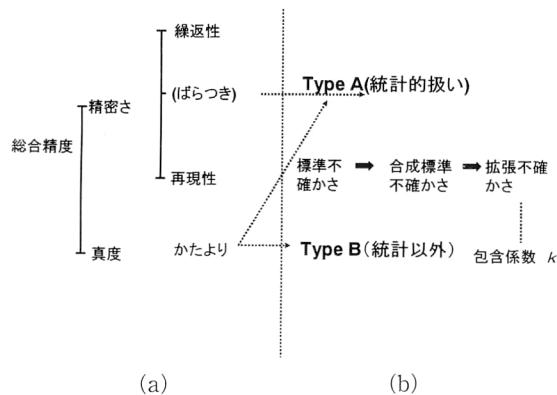


図4 不確かさ表現の概念. (a) 従来の精度・誤差評価, (b) 不確かさ表現の概念.

不確かさ評価・表現がクローズアップされてきた背景には、以前にCIPMが中心となって実施した国際比較の結果をまとめる段になって、その表現が不統一であり、用語や認識に問題があることが指摘された。そこで、計測結果の信頼性を表現するために、関連する7つの国際機関が中心となって整合化が図られた。

図3はその歴史的流れを示したものであり、前述のBIPM、OIML、ISO、IECのほかに、IFCC(国際臨床化学連合)、IUPAC(国際純粋応用科学連合)およびIUPAP(国際純正応用物理学連合)が加わって、新たな統一概念としての不確かさ表現の指針を作成してISOから1993年に通称GUMとして発行した(Guide to the expression of Uncertainty in Measurement; 1995年に修正版を再発行)。その後、この概念は、物理や機械、電気の分野はもとより、品質システム管理、試験所認定制度や分析化学の分野にも広く普及して、現在では、計測結果の信頼性評価には不確かさ表現の概念が不可欠となってきており、多くの学術集会やセミナーにおける主要テーマとして取り上げられ、多くの解説書も刊行されている。なお、GUMと同時に

表1 計測のトレーサビリティを要求する分野。

分 野	国際組織	規約文書など
校正機関の認定	CIPM BIPM, APMP	GUM VIM
試験所の認定	ILAC, APLAC	ISO/IEC Guide 43, 58 ISO/IEC 17025
品質システムの管理	ISO/IEC	ISO9000
環境の監査	ISO	ISO14000
工業標準化	ISO/IEC	ISO-TR, IEC
法定計量/取引・証明	OIML, APLMF	OIML
標準物質の認証	ISO, IAEA, ILAC	ISO Guide 30~35

1) GUM: 測定結果の不確かさを総合評価するための指針として7国際機関共同発行の文書。

2) VIM: 計量分野に共通する基本用語集で、GUMと同様に7国際機関共同発行の文書。

BIPM: The Bureau International des Poids et Mesures.
APMP: Asia Pacific Metrology Programme. ILAC: International Laboratory Accreditation Cooperation. APLAC: Asia Pacific Laboratory Accreditation Cooperation. APLMF: Asia Pacific Legal Metrology Forum. IAEA: International Atomic Energy Agency.

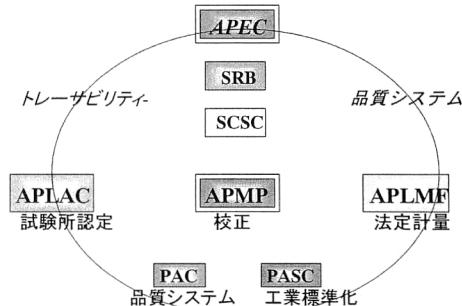


図5 APEC傘下の組織(計測計量関連). SRB: specialist regional body. SCSC: sub-committee on standards and conformance.

発行された計量に関する基本用語集VIM(International Vocabulary on basic and general terms in Metrology)もこの分野では重要な国際文書として位置づけられている。

図4は、従来からの誤差評価や精度評価の概念と新しい不確かさ表現の比較を示したものである。両者の根本的な違いは、従来の誤差評価では「真の値」の存在を仮定していた(誤差=測定値-真の値)のに対して、現実には真の値を求めるに困難さがあるために、すべての測定結果をばらつきとして表現するという前提に立ったことである。そして、このばらつきは、統計的なモデルを仮定した実験結果から推定できるもの(タイプAとよぶ)と、それ以外の方法で求めるもの(タイプBとよび、過去の経験などから得られるとしている)に分けている。ここでは、タ

イプ A とタイプ B の詳細な紹介と意味づけを省略するが、いずれのタイプの場合にも、統計的な標準偏差 (standard deviation) に相当する標準不確かさ (standard uncertainty) を何らかの形で推定して、最終的には個々の要因によって生ずる標準不確かさを総合的に合成した合成標準不確かさ (combined uncertainty) を求め、それに一定の信頼率を付与した拡張不確かさ (expanded uncertainty) で信頼性を表現すべきであるとしている。

このような考え方は、従来の誤差評価において、かたよりとばらつきを総合した内容で評価すべきとする概念と同等といえる。この総合的な不確かさによる信頼性の評価の手法は、標準に限らず一般の計測の信頼性評価にも有効であることを改めて強調しておきたい。

4. 国際組織間の有機的連携を目指した活動の展開

すでに、図 1 や図 3 においても説明したように、計測標準の分野では、メートル条約を中心に関連する組織がそれぞれ独自の活動を展開していたが、基準認証、品質システム管理、環境監査などに關した適合性評価の必要性や計測結果の信頼性評価の観点からも、国際組織間相互の協力関係の必要性が強く認識されるようになってきている。GUM や VIM の編集はその基本であったが、標準という観点からは、多くの国際組織が共通の概念やルールを導入することがきわめて効果的・効率的である。表 1 は主要な国際組織が関連する分野と関連文書をまとめて示したものであるが、計測のトレーサビリティーや信頼性評価の視点では文書類の中身に共通するところが多くみられる。

メートル条約の組織においても、関連する OIML や ILAC とは親密な協力関係にあり、最近では年に 1 回、中枢レベルでの定期的な会合をもっている。また、IFCC とも合同委員会 (Joint Committee on the Traceability for Laboratory Medicine) を設置し、世界保健機構 (WHO) とも MoU (Memory of Understanding) を結んだばかりである。さらに、各地域ごとの途上国対応の支援策を国際組織における共有の課題として取り組もうとする強い動きも感じられる。いずれにも共通する内容としては、校正機関や試験所の技術レベルの同等性を確認するための技能試

験の実施や機関内の品質システムの管理が十分であるか否かの判定基準が必要となる。

図 5 は、APEC という経済圏の中に組織された計測・計量関連の組織を示したものであり、そのひとつがメートル条約と直結する RMO としてのアジア太平洋計量計画 (APMP: Asia Pacific Metrology Programme、現在は日本が事務局ならびに議長の役割を担っている) である。アジア太平洋地域においては、図 1 に示したグローバルな活動を集約したように、リージョナル (地域的) な活動組織が APEC の傘下に構築されている。このような状況は、ヨーロッパや全米大陸州などにおいても同様であり、組織活動を展開している。

前述したメートル条約の JCRB では、APMP、SIM (全米州)、EUROMET (ヨーロッパ)、COOMET (旧ソ連圏)、SADCMET (南アフリカ地域) などが参画して、国際比較の実践や各国標準機関の技術能力の同等性の確保、その品質システムのあり方などを討議・審査しているところである。APMP ではメートル条約における諮問委員会に相当する 11 の技術委員会 (TC) を構成するとともに、MRA 対応の委員会、さらには途上国対応の委員会を設置して、地域内の技術力の向上と教育・啓発に努めている。

技術的にみれば、標準校正機関の技術能力を示す指標となる CMC の内容を統一的に評価する方法論が必要であり、そのためには地域組織 (RMO) 内での審査 (intra-regional review) を充実させて、それと地域組織間での審査 (inter-regional review) との整合化を図ることが重要となる。また、同時に、標準校正機関の品質システムについての審査の整合化も大事である。JCRB では、MRA におけるこれらの登録の暫定期限を 2003 年末として、目下そのための準備を鋭意進めているところである。

近年、その役割が急速に高まっている国際的な計測標準の動向を、グローバルならびにリージョナルな立場から眺めてその概要を述べた。肝心なことは、国際的に共通なルールづくりをして、それを効果的に活用し、科学や産業のさらなる発展に寄与することである。

(2002 年 10 月 23 日受理)