

《第 1 回》

国際単位系 (SI) の体系紹介と最新動向 (概論)

臼田 孝 (計量標準管理センター長)

1. はじめに

「すべての時代に、すべての人々に」¹⁾をスローガンに、18 世紀末にフランスで産声を上げたメートル法は、その後 1875 年のメートル条約の成立を経て次第に世界に受け入れられ、電磁気や化学の計量も取り込みながら国際単位系・SI (1960 年) に体系化されて今日に至っている。日々の生活から先端科学に至るまで、現代社会で SI の恩恵を被らないものは無いと言って良いであろう。

かつて政治権力などによって左右された計量単位は、スローガン通り他者の干渉を排除し、万人にとって不変・普遍性を持つ SI となったわけであるが、代わりに科学の監視を受けるところとなった。SI の基本 7 単位 (長さ、時間、質量、温度、電流、光度、物質質量) のうち、最後に定義が改定されたのは「長さ」で、それは 1983 年の事である。つまりその後現代に至る 30 年間、基本 7 単位の定義は科学の監視に耐えて来たわけであるが、近い将来一部の基本単位の定義改定が予定されることとなった。つまり計測技術の向上などにより、これまでの定義では矛盾を生じる、あるいは精度の向上が望めない、などの限界が見えてきたのである。

そこでこの機会に定義改定の背景と、科学的根拠、定義に基づく計量標準の実現 (現示) 法、そして技術や社会に及ぼす影響などを解説するリレー記事を企画した。以下 7 回に渡ってそれぞれの基本単位の現状について、専門家による解説をお届けしたい。そして本稿ではその導入として、計量標準の成り立ちや国際的な取り組み体制、定義改定の背景と目指すところを解説する。なお、本稿では定義改定の全体像を俯瞰するために敢えて厳密な記述を避けた箇所がある。個々の科学的理論の詳細は後に続く各論に委ねたことをご理解願いたい。

2. 計量単位の定義と現示、そして SI

人類は有史以来、体の部位や身近な自然物を基準として計量単位を定めてきた。例えば古代エジプトの長さの単位、キュービットは王の「ひじ」の長さであったと言われる。またインチは大麥 3 粒分だったと言われる。そして実際の基準は石や木、後には金属によって実現した。古代エジプトではオリジナルのキュービットが花崗岩に刻まれ、ピラミッド建設に携わる作業者にはそれを基にした木のコピーが与えられたという。

このように計量標準は基準となる約束事と、その技術的実現によって成り立つ。ここで前者を「定義 (Definition)」、後者を「現示 (Realization)」と呼んでいる。キュービットの例での定義は王の体躯、現示は花崗岩の原器である。人類は社会生活を営み、量化が必要となったごく初期から、定義と現示を使い分けて実践してきたことになる。

さて、計測においてユーザが接するのは現示された量そのものであり、通常定義にまで遡る必要は無い。しかし、もし現示された原器が損耗や破壊で失われたときは、再び定義に従って現示する必要がある。このとき、もともとの定義に変動要因があると、二度と同じ標準は実現出来ない。時を経ても決して変わらない約束事を単位の定義とすべきである。そしてそのような定義は万人に受け入れられる科学的に合理的なものが望まれる。すなわち、冒頭に記したメートル法のスローガンの精神「すべての時代に、すべての人々に」である。

この哲学の基、18 世紀末にフランスを中心とした科学界で主として長さの定義に関わる検討が進められ、(1) 1 秒振子の長さ、(2) 地球子午線の 1/4 を定義とする方法、等が候補となった。(1) は当時の計時技術に限界があったことから (2) が採択され実際の測量が行なわれた。前述した定義と現示にあてはめれば、定義は地球という球体の大きさに帰され、現示は測量であり、地球が不変な存在なので再現可能な理想的計量標準と思われた。実際には地球は完全な球体でなく (当時も扁平率等は考慮された)、また測量も完全なものではなかった²⁾。すなわち定義も現示も問題をはらんでいたが、ここに近代的な定義と現示に基づく計量単位、メートルが生まれた。

同時に検討された質量では、当初 1 立方デシメートル (1 リットル) の水の重量を標準とする案が検討された。これは長さの測定手段を持てば質量の標準も現示できるという、洗練された考え方であったが、当時の測温精度や恒温技術では水の熱膨張の影響から一定の体積を安定して実現することが難しく、結局金属分銅の原器が作られた。こちらは定義に対して当時の現示技術が不十分だったことになる。

その後これらの計量単位はフランスを中心に普及が進み、メートル法は国際社会の注目を得て 1875 年に国際条約であるメートル条約に結実した。そして改めて国際メートル原器、国際キログラム原器が製作されることになったが、定義に従って再度現示する（測量等を行う）ので無く、それまでのメートル原器とキログラム原器の値を踏襲することになった。つまり「地球の大きさ」という定義は象徴的な意味に留め、それまでの測定結果との整合性を重視したのである。但し、原器の製作には当時の最先端の冶金工学などが導入され、また原器保管施設である国際度量衡局には、最新の精密天びんや線度器比較機などが導入され、科学による監視体制を整えた。そして 1889 年、メートルとキログラムの定義は次の通り定められた³⁾。

- ・メートルは国際メートル原器が水の融解しつつある温度における長さ
- ・キログラムは国際キログラム原器の質量

そして現示は定義と一体である。

当時既に、原器による精度の限界は認識され、また光の干渉などによる量子標準も予言されていた。後年科学的な新事実により定義や現示が改定される訳であるが、その際調整機能を果たす国際的な体制も、メートル条約を中心として構築されてきた。現在の体制は図 1 のようになる。

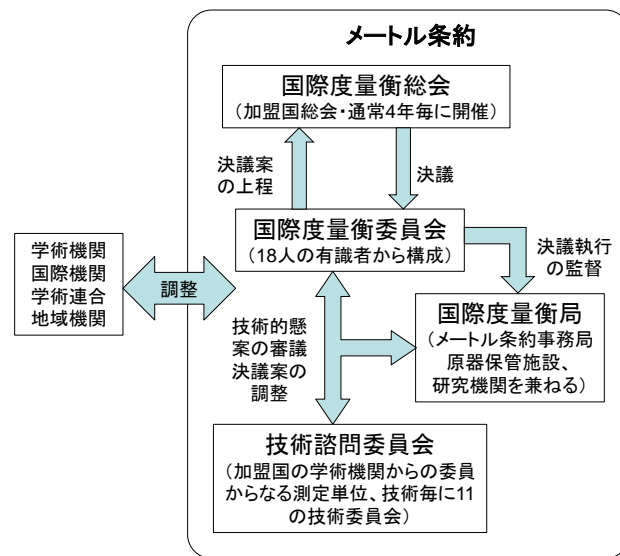


図 1. メートル条約を中心とした国際体制

各量目の諮問委員会では、委員であるメートル条約加盟国の計量標準研究機関の職員などから、研究や検証結果が報告される。そして単位の定義改定必要性などが議論され、国際度量衡委員会に報告される。国際度量衡委員会は科学的妥当性や社会的要請、他の学術機関との調整状況を踏まえ、決議案を起草し、メートル条約の加盟国総会である、国際度量衡総会に諮る。国際度量衡総会は通常 4 年に一度開催されており、決議された事項は国際度量衡局で執行される。また加盟国も批准・執行することが期待される。このような営みを経て現在合意されている基本 7 単位の定義と主な現示法を表 1 に示す⁴⁾。

表 1. 基本 7 単位の定義と主な現示法
但し定義は簡略に示している

量目	単位	定義	採択年
		現示	
長さ	m	単位時間に光が真空中を伝わる行程の長さ	1983 年
		波長安定化レーザ、光周波数コムなど	
質量	kg	国際キログラム原器の質量	1889 年
		キログラム原器	
時間	s	セシウム 133 原子が発する電磁波の固有の周期	1967-1968 年
		セシウム原子時計等	
電流	A	真空中に 1 メートルの間隔で平行に配置された無限に細く無限に長い二本の直線状導体	1948 年

		が一定の力を及ぼし合う電流（真空の透磁率を規定） 電圧（ジョセフソン効果電圧標準装置）と抵抗（量子ホール効果抵抗標準装置）	
温度	K	熱力学温度の単位、ケルビン、水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ 水の三重点セル	1967-1968 年
物質質量	mol	0.012 キログラムの炭素 12 の中に存在する原子の数に等しい数の要素粒子を含む系の物質質量 同位体希釈質量分析法、電量分析法、重量分析法、滴定法、凝固点降下法、等	1971 年
光度	cd	周波数 540×10^{12} ヘルツの単色放射を放出し、所定の方向におけるその放射強度が $1/683$ ワット毎ステラジアンである光源の、その方向における光度 極低温電力置換放射計、標準電球、分光視感効率近似受光器、等	1979 年

表中、採択年は国際度量衡総会で決議された年を示している。科学的発見によって旧定義は新しい定義で上書きされるが、改定前後の測定に矛盾が生じぬよう、慎重に調整が行われてきた。また現示法は、科学技術の進展によって最新の、但し十分信頼性が検証されたものが推奨されている。これらは図1に示した国際的な取り組みの成果である。最後に基本単位の定義が改定された1983年以降も、現示法などが順次SI文書としてまとめられ、現在2006年第8版を数えている⁴⁾。

メートル法が生まれて200年、またメートル条約が結ばれて科学的な監視が国際的に行われるようになって100年、20世紀の後半には基本単位の殆どは基礎物理定数などによる普遍的な定義となり、レーザや原子時計によって、かつてとは桁違いに正確な標準が身近で現示出来るようになった。その中であって「質量」は依然として定義と現示が一体である。今日でも国際キログラム原器は国際度量衡局の原器庫に厳重に保管されている。その第一コピーである各国副原器も、損耗などのリスクを抑えるため、極度に利用を制限しながら校正に供されている。



図2. 国際度量衡局に保管される国際キログラム原器
(中央の大きなガラスベルジャーの中にあるのが原器で、他は副原器。筆者撮影)

3. 現在の SI が抱える課題

SI の基本 7 単位は、便宜上次元的に独立であるとみなしているが、実際はいくつかの単位は相関（依存）関係がある。その関係を図 3 に示す。定義からも明らかなどおり、モルはキログラムに依存している。またカンデラはエネルギーに帰着されるため、キログラム・メートル・秒に依存している。さらにアンペアも空中線に働く力で定義されており、キログラム・メートル・秒に依存する。但し、後述するが電圧・抵抗・電流の電気量は現在ジョセフソン効果などの量子デバイスで相互に再現性良く現示されており、実質的にアンペアと力学量の依存関係は無い。

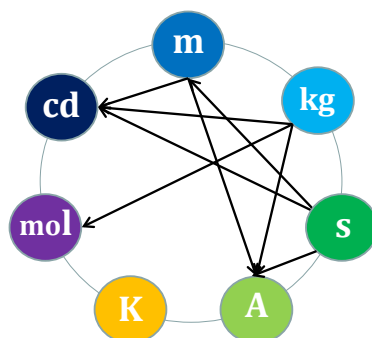


図3. 基本 7 単位の現在の依存関係

このような依存、あるいは冗長性は実現された単位に相互監視機能が働き、信頼性を高める、という利点もある。しかし、キログラムにはそのような依存関係は無く、相互にチェックすることが不可能である。このためモルも相互に検証する手段が無い。

メートル条約の加盟国に配布されたキログラム副原器は、配布当初の校正も含めこれまで 3 回国際度量衡局に戻され、校正が行われてきた。図 4 はその結果⁵⁾を、国際キログラム原器からの偏差として示したものである。縦軸の一目盛は $25\mu\text{g}$ に相当する。これらの副原器群は国際キログラム原器と同じ合金のインゴットから同時期に製作されたが、明らかに多数の副原器がプラス方向に偏差している。この事から国際キログラム原器が製作後 100 年ほどの間に $50\mu\text{g}$ 程度軽くなっているのではないかと推測されるに至った。現在の SI が抱えている第一の課題は、このように質量の定義を原器に求めているあやうさにある。

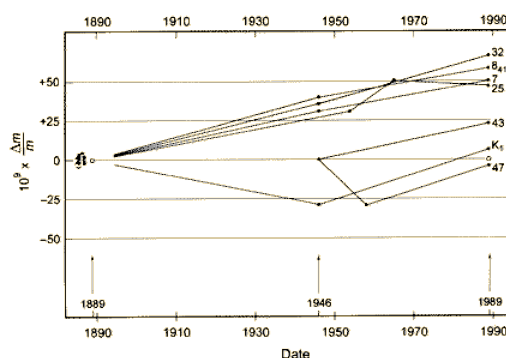


図4. 過去3回の副原器の校正結果⁵⁾

図は国際度量衡局のホームページから

第二の課題は、電気量が力学量と依存関係が無い、ということである。表 1 の定義を見ると、間隔 r の平行電線間に電流 I が流れる際に発生する力 F をあたかも実際に測定して電流を現示しているように読める。しかし現在の現示法を踏まえると、この定義は平行電流に生じる下記の関係から、真空の透磁率 μ_0 を定義していると見なすのが適当なのである。

$$F = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi r} \quad (1)$$

というのも、アンペアが定義されて以後に、周波数に対して電圧が量子的に発生するジョセフソン効果、磁場

に対して抵抗が量子的に変化する量子ホール効果が発見され、定義へ整合させるよりも、電気量の整合性を優先して、現示はこれらの量子効果デバイスによって行われているからである⁶⁾。具体的にはジョセフソン効果に関わる周波数-電圧変換係数に相当する、ジョセフソン定数と、量子ホール効果に関わる磁場-伝導度変換係数に相当するフォン・クリッツィング定数を協定値として定め⁷⁾、得られる電圧、抵抗からオームの法則により電流が与えられている。結果的に力学量への依存関係は(1)式における μ_0 を介して関係づけられるが、その力学量と電気量との間には、それぞれの測定結果が μ_0 の不確かさ以上に生じる可能性がある。別の言い方をすれば、量子効果による電気量の整合性を優先した代わり、力学量との不整合が存在するリスクが生じているのである。この関係の概念を図5に示す。

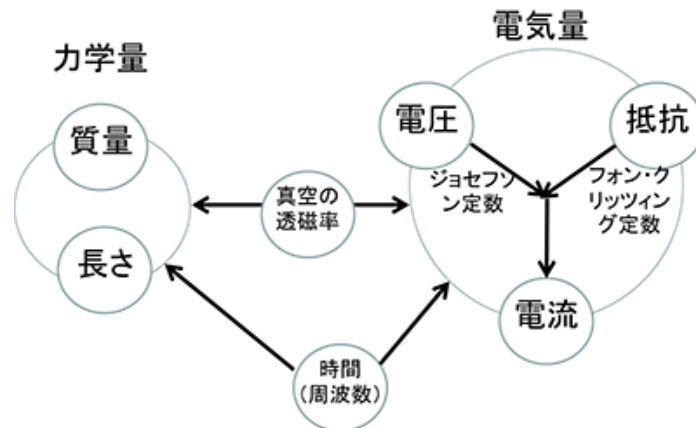


図5. 現在の定義の元での電気量と力学量の関係

第三の課題は、熱力学温度について、現在の定義は水の固有特性による自然の不変量ではあるが、実際は使用される水の純度および同位体組成によって左右される、という点である。このことはまた、熱学量が力学量や電気量とも整合しないリスクを負っているという事を示している。

さらに第四の課題として、これは第一の課題と表裏であるが、モルがキログラムに依存しており、相互に検証できないという事があげられる。

4. 定義改定の方向性

2011年の第24回国際度量衡総会は、プランク定数、電気素量(電荷)、ボルツマン定数などによって単位を定義する方向性を採択した^{8,9)}。これは上記の基礎定数が所定の精度に達したときに、キログラム、アンペア、ケルビン、モルの4単位をこれら基礎定数による定義に改定することを促す、というものである。おおざっぱに言うと、従来単位の定義によって基礎定数を定めていたところ、基礎定数の測定精度があがったので、基礎定数によって単位を定義しよう、というものである。

4.1 質量の定義

プランク定数 h は振動数 ν の光子とエネルギーとの比例定数で、次元はJsである。これはまた $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ という事であり、長さ l と時間 t から質量 m を決定できることを示している。時間は7基本単位の中で最も現示の不確かさが小さく、安定的に14桁以上の精度が得られる。また、長さも十分小さい不確かさが実現できる。従ってプランク定数が十分小さい不確かさで決定されれば、プランク定数を用いてキログラムを現示することが出来る。その方法としては、ワットバランスと呼ばれる、電気量と機械量の等価変換による装置が検討されている¹⁰⁾。また、プランク定数は正確にアボガドロ定数から導けるため、アボガドロ数を基にして、均一なシリコン結晶などからなる物体の中に含まれる原子数を正確に規定して、モル質量からその物体の質量を決定する事も等価な現示方法として検討されている¹¹⁾。

4.2 電流の定義

電気素量は電子の電荷で、単位はクーロンである。そしてクーロンの定義はアンペアに基づくもので、1秒間に1アンペアの電流によって運ばれる電荷(電気量)が1クーロンである。この逆を行う事で電気素量により電流を定義出来る。すなわち電気素量が正確に決定されれば、その逆数に等しい電子を1秒間に発生させればそれが1アンペアの現示となる。このようなデバイスは単電子ポンプとして現在研究が進められている。

ところでジョセフソン定数、フォン・クリッツィング定数は、プランク定数と電気素量から算出される。従って、4.1 に示した質量の定義と同時に電流の定義を改定することで、電気量と機械量が SI の元で整合することも意味する。

4.3 熱力学温度の定義

ボルツマン定数は温度とエネルギーを関係付ける物理定数であって、単位は J/K である。これはまた $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$ ということであり、長さ、時間、質量から熱力学温度が定義できることになる。この結果水という物質の特性によらない定義が可能となる。なお、ボルツマン定数はまた気体定数とアボガドロ定数の比であって、ケルビンは先の質量の定義の関係からと併せて、アボガドロ定数、プランク定数とも関係づけられる。現示には音響気体温度計、熱雑音（ジョンソンノイズ）温度計、等が検討されている。

4.4 物質量の定義

モルはアボガドロ定数が正確に求められた際、その逆数として定義される¹²⁾。

4.5 改定後の定義の依存関係

これらの定義改定によって基本 7 単位の相互関係は図 6 のようになる。

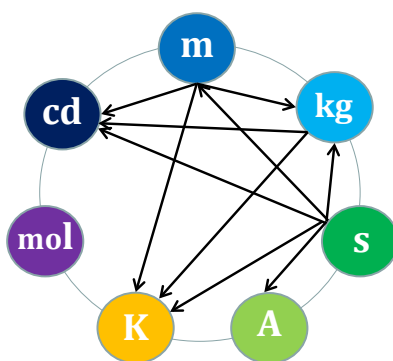


図6. 改定後の依存関係

「秒」はキログラム、メートル、カンデラ、ケルビン、アンペアの定義に関与する。時間は最も定義の現示不確かさが小さい基本単位であり、関与する単位の現示においても、不確かさへの寄与は無視しうるかごく僅かである。また、プランク定数という量子レベルの振る舞いとエネルギーを結びつける基礎定数を導入することで、力学、電磁気、熱力学を SI の元で矛盾無く扱えることが期待出来る。極めて洗練された体系とすることが出来る。表 2 は改定前後の定義の主な特徴をまとめたものである。

表2. 定義の主な特徴
(下線で示した単位が改定対象である)

現行定義	改訂案
基礎定数または常用定数に基づく定義: ・メートル (光速) ・アンペア (真空の透磁率) ・カンデラ (視感効率)	基礎定数または常用定数に基づく定義: ・メートル (光速) ・カンデラ (視感効率) ・ <u>キログラム(プランク定数)</u> ・ <u>アンペア (電気素量)</u> ・ <u>ケルビン(ボルツマン定数)</u> ・ <u>モル(アボガドロ定数)</u>
物質定数に基づく定義: ・秒 (セシウム原子) ・ケルビン(水) ・モル(炭素原子)	物質定数に基づく定義: ・秒 (セシウム原子)
原器に基づく定義: ・キログラム (国際原器)	原器に基づく定義: ・該当無し

4.6 定義改定へのロードマップ

以上の基礎定数による計量単位の再定義は、以前から検討されていた。それがここに来て急速に現実味を帯びたのは、基礎定数の測定精度、特にプランク定数（またはアボガドロ定数）の測定報告が近年相次ぎ、再定義に必要な十分な精度がここ数年のうちに実現できると期待されてきたためである。

現在プランク定数測定（またはアボガドロ定数の測定結果から導かれたプランク定数）結果は複数報告されているが、CODATA（科学技術委員会）¹³⁾で合意された不確かさレベルは 4.4×10^{-8} である。仮にこの値をもって質量の定義を改定すると、その定義の実現方法、つまり現示の不確かさが相対値で 4.4×10^{-8} 、すなわち 1 kg において $44 \mu\text{g}$ 生じることになる。これに対して現在各国の質量一次標準は $20 \mu\text{g}$ 程度の不確かさの元で運営されており、このまま移行しては大きな混乱を引き起こすことになる。従って、現在の不確かさをさらに半分以下に向上させる必要がある。これは容易なことではないが、各国の計量標準機関を中心に精密測定技術の開発が加速しており、ここ数年のうちには実現するのでは無いか、と考えられている。またその間に、現示方法の技術開発も進み、国際度量衡総会において改定が採択された後、実際にその提議に基づいた現示によって計量標準が供給されることが期待されているのである。

5. 定義改定がもたらす恩恵と課題

定義改定に耐えうる精度の基礎定数の測定には、世界で莫大な研究資源が投入されている。科学的探求という価値観は絶対であるにしても、既に 30 年以上定着している基本単位の定義と現示方法を変える恩恵には何があるだろうか。

まず質量については、原器の 1 kg という定点に縛られていた定義から解放されることで、微小質量などの精度が向上することが考えられる。先に各国の質量一次標準は $20 \mu\text{g}$ 程度の不確かさの元で運営されている、と述べたが、これはあくまで 1 kg における値である。分量・倍量という手続を経てより小さい・大きい質量を測定する現在の体系では、不確かさが累積され、1 kg より離れるほど不正確になる。例えばこれまで希釈などによっていた微量物質の取扱がより定量化され、創薬やバイオテクノロジーに大きく寄与すると期待出来る。

また、力学量と電磁気量が SI の元で統一的に扱えることから、MEMS などの機電一体デバイスにおいて、性能評価や特性評価において新たな展開が期待出来るだろう。熱流体や化学物質の測定がより整合化することも、MEMS の応用例である流体デバイスやバイオデバイスの開発に寄与することが期待出来るだろう。

他方、課題としてはまず、関連する基礎定数を十分な精度（小さな不確かさ）で求められるか、という点があげられる。チャンピオンデータだけでなく、十分再現性あるデータが得られ、かつ複数の機関で独立に得られた結果がそれぞれ整合している事が重要である。この点で図 1 に示した各委員会、委員の所属する各国計量標準機関などの責任は重大である。自らが開発主体であると共に、その結果を科学的に監視する能力が問われているのである。

また、十分な信頼性、再現性、経済性をもって定義を実現（現示）する手段があるか、ということも問題である。現示出来なければ、どんな洗練された定義も文字通り画餅である。例えば質量に関しては、定義改定後も一般には引き続き分銅による標準供給が行われると考えられる。その際、プランク定数による定義から現示した質量標準を、分銅にコピーし、従来の供給体系を大きく変えずに定義改定の恩恵を得られるような体制が国際度量衡局などを中心に検討されている。

なお、光度については定義改定に関わる議論は無いが、光子数測定による定義・現示可能性の模索や近年の固体照明普及に伴う課題など話題は尽きない。これらは続くリレー解説の各論に譲りたい。

6. 終わりに

以上駆け足で計量標準の成り立ちや国際的な取り組み体制、定義改定の背景と目指すところを解説した。改定が予定される 4 単位の新定義については、筆者の説明能力不足を割り引いても、判りにくいと感じた読者が多かったのではないだろうか。実は今回の定義改定案の最大の懸念のひとつが、この判りにくさにある。新定義は科学的には大変洗練されているが、プランク定数という一般になじみが薄い基礎定数を導入しているため、量子力学の知識が無いと真に理解することは難しい。（本稿ではそのような懸念もあり、次元解析だけで済ませた）

また、対象となる基礎定数の測定及び定義の現示には極めて高度な技術を必要とし、それらが実施可能な機関は世界でごく少数である。この事は基礎定数の決定において、関与できる機関に限られる事を意味する。従事する機関は自らの研究成果を挙げるために努力することはもちろんであるが、情報を積極的に公開し、データの相互検証など信頼性の向上に傾注すべきである。

本リレー企画はこのような背景から、判りやすさの向上をはかり、広く科学界・産業界からの意見を募る意図も込めている。リレー解説の各論で触れられる日本の取り組みも含め、ぜひご意見、ご質問を頂き、メートル法・SI が今後も「すべての時代に、すべての人々に」受け入れられるよう、お力添え願いたい。

(2000年1月31日受付)

参 考 文 献

- 1) “à tous les temps, à tous les peuples=すべての時代に、すべての人々に”, 1799年にメートル法がフランスで公布された際の宣言
- 2) ケン・オールダー (吉田訳): 万物の尺度を求めて—メートル法を定めた子午線大計測, 早川書房(2006)
- 3) 第1回国際度量衡総会決議文: (1889)
<http://www.bipm.org/en/CGPM/db/1/1/>
- 4) 第8版 SI 文書の日本語訳: (2006)
<https://www.nmij.jp/library/units/si/R8/SI8J.pdf>
- 5) G Girard: The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988-1992), Metrologia Vol. 31, p.317(1994)
- 6) 第18回国際度量衡総会決議文・Forthcoming adjustment to the representations of the volt and of the ohm: (1987)
<http://www.bipm.org/en/CGPM/db/18/6/>
- 7) 第19回国際度量衡総会決議文・The Josephson and quantum-Hall effects: (1991)
<http://www.bipm.org/en/CGPM/db/19/2/>
- 8) 第24回国際度量衡総会決議文・On the possible future revision of the International System of Units, the SI: (2011)
<http://www.bipm.org/en/CGPM/db/24/1/>
- 9) 田中: 国際単位系 (SI) 改定の方向性, 産総研 Today Vol.12-1, p23 (2012)
https://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/aist_today/vol12_01/infra/p23/p23.html
- 10) M. Stock: Watt balance experiments for the determination of the Planck constant and the redefinition of the kilogram, Metrologia 50, R1-R6(2013)
- 11) J. Stenger and E. O Göbel: The silicon route to a primary realization of the new kilogram, Metrologia, Vol. 49, L25-L27(2012)
- 12) M. J T Milton: The mole, amount of substance and primary methods, Metrologia 50, p.158-163(2013)
- 13) 科学技術データ委員会 (CODATA: Committee on Data for Science and Technology) 基礎物理定数作業部会 (Task Group on Fundamental Physical Constants)が発表した値による。この調整は2010年までに報告された実験データを考慮したもので、“2010年の調整”と呼ばれている。最新の調整値は以下のURLで提供されている。
<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>