



国際単位系4基本単位の定義改定について



産業技術総合研究所 計量標準総合センター長/国際度量衡委員

うすだ たかし
臼田 孝

1. はじめに

今日の計測基盤である、国際単位系、SI（エスアイ）は、18世紀のフランスで生まれたメートル法を源流としています。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てきました。そして電磁気や化学の計量も取り込みながら国際単位系SIに体系化されて今日に至っています。

単位はその量を記述する「定義」と、技術的に実現する「現示」から成り立ちます。かつては人工物である「メートル原器」のように、定義と現示が不可分であった単位が、今日ではメートルの場合定義は光の速さという物理定数に委ねられ、現示は波長安定化レーザーなどのテクノロジーによって実現されるに至っています。その他の単位も科学技術の発展とともに、定義は自然の中にある原理を使ったものに、その現示は量子効果デバイスなどの最新技術に置き換えられてきました。しかし、質量については今でも「国際キログラム原器」という人工物が定義であり現示でもあり続けています。

単位の定義は国際度量衡総会において、国際的な取り決めによって決められています。そして2018年11月に開催される第26回国際度量衡総会では、単位についての取り決めを大きく変更する改定が決定される予定です。新しく施行される国際単位系では、唯一人工物によって定義されているキログラムを、自然界を支配するいくつかの「定数」を使って定義します。これによって、国際単位系SIの基本単位は全て器物から解放され、自然界の法則にしたがった定義が完成します。

本稿ではこの定義改定の概要について解説します。なお、定義にかかわる解説という性格上、本稿のための書下ろしではない、既出文書、引用文書が部分的にあることをご理解ください。また、後半にはメートル条約事務局である、国際度量衡局がとりまとめた定義改定に関わる広報文書（和訳）をそのまま掲載しています。

2. 現在の国際単位系（SI）とそれが抱える課題

国際単位系（SI）は長さ、質量、時間、電流、熱力学温度、物質質量及び光度について明確に定義された単位、すなわち、メートル（m）、キログラム（kg）、秒（s）、アンペア（A）、

ケルビン（K）、モル（mol）、カンデラ（cd）を基礎として構築されています。これらの単位を基本単位（base units）と呼び、現在（後述する2018年11月開催の国際度量衡総会まで）の定義は簡潔には下記のとおりとなっています。

長さ・メートル（m）：ある一定の時間に光が真空中を伝わる行程の長さ

質量・キログラム（kg）：国際キログラム原器の質量

時間・秒（s）：セシウム133原子が発する電磁波の固有の周期の9 192 631 770倍の時間

電流・アンペア（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が一定の力を及ぼし合う電流（実質的に磁気定数を規定）

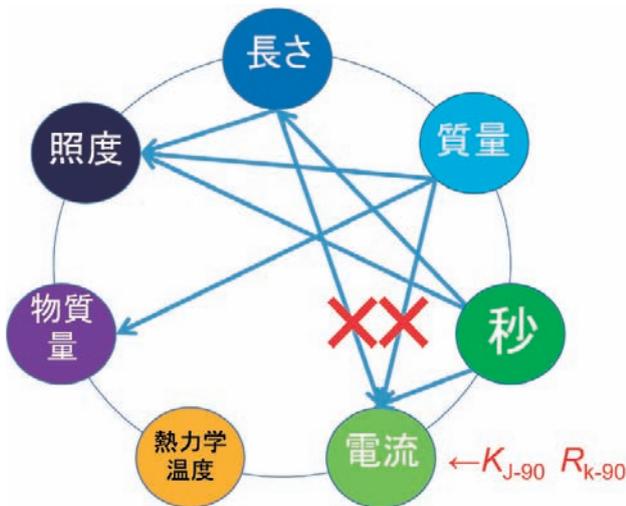
熱力学温度・ケルビン（K）：水の三重点の熱力学温度の1/273.16

物質質量・モル（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

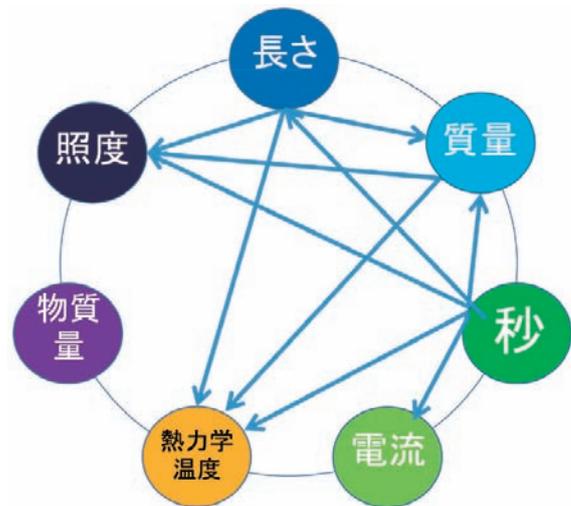
光度・カンデラ（cd）：周波数 540×10^{12} ヘルツの単色放射を放出し、所定の方向におけるその放射強度が1/683ワット毎ステラジアンである光源の、その方向における光度

以上のような現在の単位系は次のような課題を内包しています。

- ・質量が国際キログラム原器という器物に依存しているため、破損など長期的な安定性に課題があること。
- ・電流が電気量（電圧、抵抗、等）における再現性を優先するため、ジョセフソン効果などの量子現象により現示されており、厳密には現在の定義に従っていないこと。また、量子現象に関わるジョセフソン定数、フォン・クリッツィング定数が1990年における協定値を採用しているため、最新の値と異なること。
- ・熱力学温度が水の三重点で定義されているため、将来的な極高温、極低温での温度測定の不確かさ低減の限界



■図1. 国際単位系 (SI) の基本単位と、現状の定義における関連性



■図2. 新定義における基本単位間の関連性

が危惧されること。

これらの関係を示したのが図1です。矢印が向かう単位は、元となる単位の影響を受けることを示しています。定義から明らかとなり、長さは時間の測定精度に依存していますが、時間は原子時計により十分な精度が確保されています。一方、質量からは多くの矢印が伸びており、質量（国際キログラム原器）の安定性が多くの単位（すなわち組立量にkgが含まれるあらゆる測定結果）に影響を与えていることとなります。さらに電流標準は、90年に採択されたジョセフソン定数とフォン・クリッツィング定数の協定値に基づいて量子デバイスにより実現されており、他の単位との整合性を損なうリスクを帯びています。図1で長さや質量からの矢印が×印で途切れているのは、このことを示しています。

これらの課題を解消するために、質量（キログラム）、電流（アンペア）、物質質量（モル）及び熱力学温度（ケルビン）4単位の定義が改定されようとしています。

3. 定義改定の方向性

これらの課題は、質量をキログラム原器という人工物ではなく、質量に関する基礎物理定数で定義すること、また電流を改めて電磁気力を介して他の単位と正確に関係付ける、などにより解決することができます。具体的にはキログラムをプランク定数で、アンペアを電気素量で、ケルビンをボルツマン定数で、モルをアボガドロ定数で定義し直します。そのために定義の改定前後で単位の連続性を確保し得る、十分小さい不確かさで各物理定数を決定しました。

この結果を受けて質量、電流、物質質量及び熱力学温度

は国際度量衡総会において下記のような定義として採択する見込みです。

- ・キログラムはプランク定数の値を正確に $6.62607015 \times 10^{-34}$ ジュール・秒 (J s, これはまた $\text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$ とも表せる) と定めることによって設定される。
- ・アンペアは、電気素量の値を正確に $1.602176634 \times 10^{-19}$ クーロン (C, これはまた s A とも表せる) と定めることによって設定される。
- ・ケルビンは、ボルツマン定数の値を正確に 1.380649×10^{-23} ジュール毎ケルビン (J K⁻¹, これはまた $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ とも表せる) と定めることによって設定される。
- ・1モルは正確に $6.02214076 \times 10^{23}$ 個の要素粒子を含む。この数値はアボガドロ定数である。

図2はこの新定義に基づく単位相互の関係を示しています。各単位は普遍的な基礎物理定数で決定され、国際キログラム原器という器物への依存はなくなります。一方、質量はもはや単独では決定できず、時間・長さの正確な測定（これらは原子時計や光波干渉計により十分正確な測定が可能である）技術によって得られる組立量になります。同時に、各物理定数は現在の定義と乖離を生じないよう、慎重に決定されているので、定義改定の前後で測定結果の不連続は生じません。もちろん、測定器も引き続き利用できます。

4. 改定のメリットと今後の予定

基礎物理定数による定義、特に質量の定義はこれまでに比べ難解です。考え方としては「既知の周波数の光子のエネルギー（これはプランク定数と光の周波数で決定できる）と



等価な質量である（質量とエネルギーの等価原理から）」と捉えられるし、また「1キログラムの物体に光子が衝突したときの運動量変化（速度）から求められ、それは光子の周波数から正確に決定できる」とも捉えられます。重要なことは、定義と完全に等価な、複数の技術的な表現が可能となることです。かつて長さが光の速さで定義されたことで、現在は光の飛翔時間や、光波干渉など測定対象によって最適な技術で、定義に忠実な測定技術が確立しています。これが天文学的長大な距離も、ナノテクノロジーに必要とされる微小なスケールの測定も高い精度で可能としています。

今回予定される定義改定により、将来の技術的進歩を阻害せずに測定精度の向上が期待できます。例えばナノテクに必要となる極微小な質量測定精度の向上や、MEMSなど機電一体デバイスの効率向上などが想定できます。今回の定義改定は前述のとおり2018年11月の国際度量衡委員会で審議されます。採択されれば周知期間をとって2019年5月20日に世界で一斉に施行される予定です。また、関連する規格（ISO/IEC8000シリーズQuantities and unitsやその翻訳規格であるJIS Z 8000シリーズ量及び単位、など）や工学の教科書の関連部分も順次書き換えられることになります。これらの情報の最新版は産業技術総合研究所計量標準総合センターのホームページに特設ページを設けて掲載しています。

<https://www.nmij.jp/transport.html>

また定義改定の全体像、意義については筆者が一般向けに解説を試みています（白田孝：新しい1キログラムの測り方科学が変われば単位も変わる、講談社ブルーバックス、ISBN-10:4065020565、ISBN-13:978-4065020562）。機会があれば参照ください。

5. SIの定義改定案に関する広報文書

（原文は国際度量衡局、和訳は産業技術総合研究所計量標準総合センターによる）

国際単位系^[1]、SI、は、秒、メートル、キログラム、アンペア、ケルビン、モル及びカンデラ（基本単位）に基づいています。これらの単位のうち4つの定義を最新のものにするため改定されようとしています。2018年11月には、キログラム、アンペア、ケルビン及びモルの新しい定義が、測定の国際的な相互比較性に責任を持つ国際組織である国際度量衡総会（CGPM）により、承認される見込みです。この改定された定義は2019年5月20日に発効する見込みです。

その定義改定は7つの物理定数（例えば、光の速さ、プランク定数やアボガドロ定数）に基づくことになり、それゆえ、

本質的に安定です。それらの物理定数は、改定された定義が、それらを現示するための技術の将来の進歩に適応させるために修正する必要がないよう、選ばれました。このような方法でのSI改定は、2011年及び2014年^[2, 3]に採択されたCGPMの決議においてすでに認識されていました。これらの決議に含まれていた追加要求により、4つの定義改定への円滑な移行が確実なものになります。ほとんどのユーザーはその変化に気付かないでしょう。新版SI小冊子はユーザーへ必須の情報を提供するものであり、定義改定が公式に採択された後に利用可能となります。また、単位の現示に関する手引が利用可能になります^[4-8]。

いろいろな測定分野にこれらの変更がどのように影響を与えるかについての情報が以下に示されています。

- ・キログラムはプランク定数を使って定義され、SIに基づく質量目盛の長期安定性を保証します。そしてキログラムは任意の適切な方法で実現する事ができます（例えばキップル（ワット）バランス法やアボガドロ（エックス線結晶密度）法）。ユーザーはSIへのトレーサビリティを現在と同じ機関から得ることが出来ます（BIPM、国家計量標準機関（NMI）、及び認定ラボラトリー）。国際比較はそれらの整合性を確実なものにします。プランク定数の値は、改定時にSIにおけるキログラムに変化を起ささないことを確実にするように選ばれます。NMIから校正顧客に提供される不確かさも、ほとんど影響がありません。
- ・アンペアと他の電気単位は、実質的に最も高い計測レベルで実現されていますが、これらの単位の定義と完全に一致することになります。1990年協定から改定SIへの移行により、普及しているすべての電気単位に小さな変更が生じます。ボルトは100万分の0.1しか変化せず、オームは更に少なくしか変化しないため、大多数の計測ユーザーにとっては、何ら対策を行なう必要はないでしょう。最も高精度で仕事を行なっている方々は、所有している標準器の値を調整し、測定の不確かさ見積りを見直す必要があるかも知れません。
- ・ケルビンは温度測定の実務や温度測定のトレーサビリティへ直接の影響なく再定義され、多くのユーザーは定義改定に気付かれないでしょう。再定義は未来の進歩への基礎を築きます。物質的あるいは技術的な制約に縛られない定義によって、温度測定をSIにトレーサブルにするための新しくそしてより正確な技術の開発が、特に極限温度において、可能になるでしょう。再定義後は、ケルビンの現示についての手引が、熱力学温度測定の一次的方法と



もに、十分同程度に、定義目盛ITS-90やPLTS-2000について記述することで、その世界的普及を支えるでしょう。

- ・モルは構成要素（典型的には原子や分子）の明示された数について再定義され、もはや質量の単位、キログラムに依存しません。モルへのトレーサビリティは今までどおり、原子量表及びモル質量定数 M_0 と併せて質量測定を利用する方法を含む、以前に使用されていたすべての取り組み方で確立することが可能ですが、しかし、それらに制限されることはありません。原子量はこの定義上の変更によって影響を受けませんし、 M_0 は今までどおり 1g/mol ですが、今後は測定の不確かさを伴います。この不確かさは非常に小さいので、モルの定義改定は一般的に行なわれていることに対して何の変化も要求しません。

キログラム、アンペア、ケルビン及びモルの定義改定は、秒、メートル及びカンデラには何の影響も与えません。

- ・秒は引き続きセシウム133原子の超微細構造遷移周波数によって定義されます。秒へのトレーサビリティは影響を受けません。時間・周波数計測は影響を受けません。
- ・改定SIにおけるメートルは引き続き基本物理定数の一つである光の速さによって定義されます。幾何測定の実務には何等変更の必要はない上、単位系の長期安定性が改善されることによる恩恵を受けるでしょう。
- ・カンデラは引き続き測光のための技術的定数である K_{cd} によって定義され、したがってこれまでどおりワットと結びつけられます。カンデラへのトレーサビリティは、今までどおり絶対校正された検出器を用いた放射測定法を通して同じ測定不確かさをもって確立されます。

SIは1960年のCGPMにより公式に採択されて以来、数回改定されています。しかしながら、4つの基本単位を一度に再定義することは先例がなく、様々な計測分野において世界中で同時に協力することが必要です。過去と同様に、一般生活への影響が気付かれないようなものであり、以前の単位の定義を用いてなされた測定が、測定の不確かさの範囲内で有効なままであることが確実になるように注意が払われています。国家計量標準機関以外では、その変化に気付くユーザーはほとんどいないでしょう。CGPMの決議で要求された実験精度を達成し、条件を満足したことは素晴らしい成果であり、これによりSIは最も要求の厳しいユーザーの要求にも確実に答え続けることでしょう。

参考

- [1] <http://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>
- [2] <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/24/1/>
- [3] <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/25/1/>
- [4] <http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/>
- [5] http://www.bipm.org/cc/CCM/Allowed/15/02A_MeP_kg_141022_v-9.0_clean.pdf
- [6] <http://www.bipm.org/cc/CCEM/Allowed/26/CCEM-09-05.pdf>
- [7] http://www.bipm.org/cc/CCT/.../MeP-K-14_DRAFT_Dec_2015.pdf
訳注) 現在は下記文書に更新
https://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/28/MeP-K-19_June_2017_DRAFT.pdf
- [8] http://www.bipm.org/cc/CCQM/Allowed/22/CCQM16-04_Mole_m_en_p_draft.pdf