

# 国際単位系 (SI) 基本単位の定義改定と計量標準 (総論)

臼田 孝

産業技術総合研究所 計量標準総合センター長

## 1 はじめに

こんにちの計測基盤である、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る。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た。そして電磁気や化学の計量も取り込みながら基本 7 単位からなる国際単位系 SI (エスアイ) に体系化されて現在に至っている。

単位はその量を記述する「定義」と、技術的に実現する「実現」から成り立つ。かつては人工物である「メートル原器」のように、定義と実現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、不変と思われる物理定数に委ねられ、その実現は波長安定化レーザや光周波数コムなどの最新技術によっている。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不変の原理に倣い、その実現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た。

単位の定義はメートル条約の最高議決機関、国際度量衡総会 (CGPM) における承認事項である。そして 2018 年 11 月に開催された第 26 回国際度量衡総会では、基本 4 単位の定義を変更する大規模な改定が決定され、2019 年 5 月 20 日から実施された。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、プランク定数を使って定義するなど、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たこととなる。

## 2 従来の国際単位系 (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る。これらの単位を基本単位 (base units) と呼び、変更となる 4 単位の定義は簡潔には下記の通りとなっていた。

質量・キログラム (kg) : 国際キログラム原器の質量

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

以上のような従来の単位系は次のような課題を内包していた。

- ・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実現されており、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、将来的な超高温、極低温での温度測定の不確かさ低減の限界が危惧されること。

これらの関係を示したのが図 1 である。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る。定義から明らかなおとおり、長さは時間の測定精度に依存するが、時間は今日原子時計により十分な精度が確保されている。一方、質量からは多

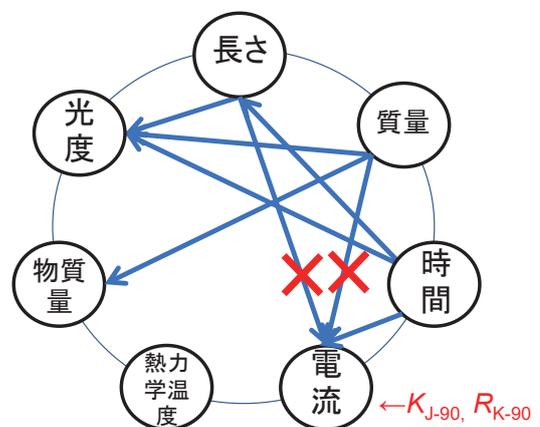


図 1 従来の基本単位の依存関係

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になる。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る。図 1 で長さから質量への矢印が×印で途切れているのは、このことを示す。

### 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、質量に関係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力学量と正確に関係づけること、などにより解決することができる。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定義し直す。またケルビンボルツマン定数で、モルをアボガドロ定数で定義し直し、前者は水、後者は炭素 12 という特定の物質に依存しない定義とする。なお、これら改定前後で十分小さい不確かさで各物理定数を決定するため、測定結果の連続性は確保される。

図 2 はこの新定義に基づく単位相互の関係を示している。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る。一方、質量はもはや単独では決定できず、長さ・時間の正確な測定（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となる。

### 4 改定がもたらす計量標準の将来

改定により原器という器物から単位の定義が解放される、すなわち原器という人工の器物の劣化や紛失の恐れが無くなる、というのは大変判りやすいメリットである。一方で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あるが、計量学的見地からは今回の定義は将来の技術開発を阻害しない、普遍性を十分吟味した結果であると言える。例えばメートルの定義は、1960 年に原器に代わってクリプトンランプのスペクトルが採択されたが、同時期に出現したレーザの安定化が進むにつれ、波長安定化レーザによる定義が検討された。しかし将来より安定度の良い高精度のレーザ波長標準ができる可能性が十分あり得ることなどを考慮し、特定の安定化レーザよりは光の速さを基準にして定義した方がよいとの考えから、1983 年の光の速さによる定義に至った。この普遍的定義は今日光コムのようにレーザ周波数を直接測る技術が出現しても破綻せず、一次標準の改良が続いている。また光の飛行時間や、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る。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た訳である。

今回の一連の定義改定により、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る。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る。なお、1967 年に採択された時間(秒)の定義は、セシウム原子から発せられる電磁波を元にしてはいるが、より波長の短い（分解能の高い）光時計が今日開発されながら、この定義のためにセシウム原子時計以上の正確さで波長を決定することが原理的に出来ないという事態に陥っている。秒の定義改定は今回の大規模な改定の次に来る課題である。

さて、原器に頼らない計量標準が実現したいま、これまでの原器保管機関であった国際度量衡局や、その第一コピーを所有する立場にある各国の国家計量標準機関（NMI）の役割はどのように変容するだろうか。定義はいわば単位の仕様書である。実現はその仕様を満たす技術的設計、製作、および運用方法と言える。そしてその実現の精度は各国 NMI の技術的能力に掛かっており、その能力は相互比較によって担保されることになる。

既に多くの一次標準は、その同等性を評価する枠組みが出来上がっている。ただし、質量については現時点で一次標準を実現する能力を有する機関は限られている。当面は国際度量衡局が中心となって標準供給を行っていく体制が維持されるだろう。NMI としては現時点で数少ない質量の一次標準実現能力を持つ機関として、そのような国際的な枠組みを担う活動にもより一層注力することが期待されると認識している。

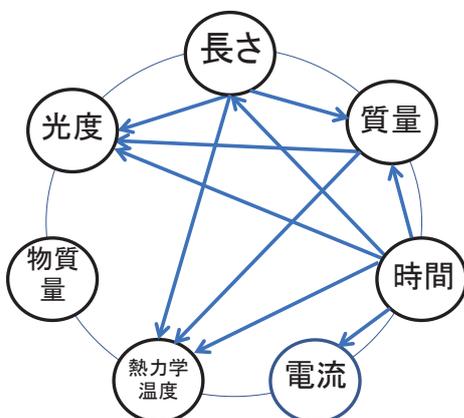


図 2 新しい定義における基本単位の依存関係