

SI 単位の再定義

—キログラム原器はどうなるの?—

千葉 光 一*

今年、もっとも重要な SI 単位であるキログラム（質量）が、130 年ぶりに再定義される。新定義は 2019 年 5 月 20 日（世界計量記念日；1875 年のこの日にメートル条約が締結された。日本は 1885 年に加盟。）に発効する。

現在、キログラムはパリ（仏）にある国際度量衡局（*Bureau international des poids et mesures*; BIPM）に保管される「国際キログラム原器（International Prototype Kilogram; IPK）」を 1 kg（拡張標準不確かさ $U = 0$ ）と定義することで定められている。すなわち、IPK の質量は 1.000 000 …… kg ということになる。IPK は白金－イリジウム（Pt 90% - Ir 10%）の合金で作られた分銅（直径も高さも約 39 mm の円柱；球以外の形状で表面積をできるだけ小さくするため）であり、現在も活動する英国の貴金属会社ジョンソン・マッセイにより 1879 年に製造され、1889 年の第 1 回国際度量衡総会においてキログラムの原器に定められた。さらに 40 個の複製が作られて、

メートル条約の加盟国に各国のキログラム原器として頒布された。日本には No. 6, No. 30, No. 39 の複製が割り当てられ、No. 6 が今日まで「日本国キログラム原器」として日本の質量の基準に用いられている。日本国キログラム原器の質量は 1.000 000 167 kg（拡張標準不確かさ $U = 0.000\ 000\ 002\ 3$ kg）であり、IPK より 167 μ g だけ重い。各国のキログラム原器は概ね 40 年ごとに国際度量衡局に持ち寄られ、IPK によって校正されることになっている。

これに対して、2019 年 5 月 20 日以降に適用される新たな質量の定義では、キログラムはプランク定数 h で定義されることになる。質量をプランク定数で定義するとは、いったいどういうことか？静止エネルギーと質量に関するアインシュタインの関係式を用いると、ある振動数の光子のエネルギーと等しい静止エネルギーを持つ物体の質量は次式で表される。

$$E = hv = mc^2$$

h はプランク定数、 v は光周波数、 m は質量、 c は光速

そこで、新たな定義では、キログラムを「周波数が c^2/h Hz の光子のエネルギーに等価な質量である」とすることが決められた。光速 c は既に物理量として $c = 2.997\ 924\ 58 \times 10^8$ m s⁻¹ ($U = 0$) と定義されている。今回、新たに、プランク定数を現時点で最も信頼できる値、 $h = 6.626\ 069\ 57 \times 10^{-34}$ J s ($U = 0$) と定義することで、キログラムも普遍的な物理量（定義定数）に基づいて定義でき



図 1. 国際度量衡局（パリ，セーブル）
（著者 撮影）

*関西学院大学理工学部環境・応用化学科教授



図2. 日本国キログラム原器（レプリカ）

ることになる。すなわち、キログラムは「周波数が $(2.997\ 924\ 58 \times 10^8)^2 / (6.626\ 069\ 57 \times 10^{-34})$ Hz の光子のエネルギーに等価な質量である」と定義される。これにより、定義定数となったプランク定数の不確かさはゼロになり、これまで不確かさが無かった IPK に 4.4×10^{-8} の相対標準不確かさが付くことになる。

キログラム原器の誕生

ここで、キログラム原器について考えてみよう。現在まで続く SI 単位系は、地球の“大きさ”を基に構成されている。長さの単位であるメートルは、1791 年、革命直後のフランス国民議会で、子午線における北極点と赤道の距離を基準に、その 1,000 万分の 1 を 1 m として定義することが決められた。あわせて、キログラムも「水 1 L (= 1 dm³) の質量（当初は氷点）」として定義された。1875 年に、これらの定義を基にメートル条約が締結されて、国際単位系 (SI 単位系) が誕生した。1879 年に、その定義を具現化するものとして Pt-Ir 合金製のメートル原器とキログラム原器が作製され、グローバルスタンダードとしての SI 単位系は現在まで発展を続けてきた。

ところで、18 世紀の科学者たちはどうやって子午線における北極点と赤道の距離を測定したのだろうか？当然、北極点と赤道の距離を直接計測することはできない。国民会議の命を受けたフラ

ンス人科学者 Jean-Baptiste Delambre と Pierre Méchain は、1792 年から 6 年の歳月をかけて、パリを起点にダンケルクとバルセロナまでの距離および両都市の緯度・経度を測量して、子午線の長さを求めた。その偉業と苦悩、冒険に満ちた測量の旅は、成書「万物の尺度を求めて」¹⁾ に詳細かつスリリングに描かれている。ちなみに、現在の最先端技術を用いて北極から赤道までの子午線の長さを測定すると 10 001.97 km になる。

自然に基づく定義から物理定数へ

SI 単位系の 7 つの基本単位（長さ、質量、時間、温度、電流、光度、物質質量）も、はじめは自然（現象）を基に定義されていた。しかし、計測技術の進歩とともに、これらの定義では十分な精度が得られなくなり、定数として定義することのできる物理量に置き換えられていった。例えば、もっとも基本となるメートル原器に関しても、19 世紀末には、マイケルソン干渉計で有名な Albert Michelson は、光速度の研究において、彼が考案した干渉計で測定されるフリンジの間隔が、各国のメートル原器によって異なる値になることを報告している。その後の科学技術の進歩によって、1960 年にメートル原器は廃止され、⁸⁶Kr の 2p¹⁰ と 5d⁵ 間の遷移に対応する真空中の橙色の光を基準に再定義された。さらに、1983 年には「メートルは、1 秒の 299 792 458 分の 1 の時間に光が真空中を伝わる行程の長さ」というように、「光速」と「時間（秒）」とで定義されるようになった。そのような中でも、質量だけが採用から 130 年が経った今日でも、人工物である「キログラム原器」が単位の定義として用いられていた。その理由の一つには、天秤測定における相対標準不確かさが 10⁻¹⁰ 程度と極めて測定精度が高く、他の測定法の追随を許さなかったことも強く影響している。

先に述べたように、各国のキログラム原器は概ね 40 年ごとにパリの国際度量衡局に持ち寄られ、IPK によって校正される。定義から 130 年が経過したが、キログラム原器の校正はこれまで 3 回し

各国のキログラム原器は30~40年毎に国際キログラムによって校正される。

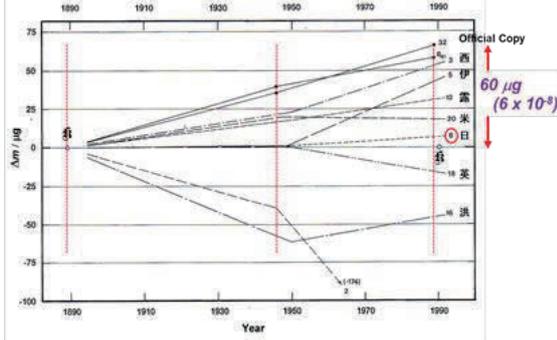


図3. キログラム原器の校正 (BIPM ホームページから)

か行われていない。1988年～1992年にかけて行われた直近の校正において、IPKを基準として各国のキログラム原器の質量を測定し、1889年の値で規格化したところ、図3のような結果となった。各国のキログラム原器の質量は、100年の歳月を経て、それぞれに変化していることがわかる。皆さんもお気づきだろうが、これらの変化はすべて相対的な変化の結果であり、どの原器が真に不変の基準であったかを明らかにすることはできない。さらに、42年ぶりにIPKを洗浄したところ、洗浄前に比べて50 μg程度の質量が減少したことが報告された。ちなみに、50 μgの質量変化は概ね指紋1つ分の質量に相当するようである。

このような結果を踏まえて、質量においても、キログラムの定義を、経年変化が懸念される「人工物」から普遍的な「物理量」に改めるべきだと言う議論が活発になった。その実現には、質量を相対標準不確かさ 10^{-8} レベルで基準を決定できるような方法の開発も不可欠であった。

プランク定数の測定

「新たなキログラム」はプランク定数によって定義される。では、プランク定数はどのような原理に基づき、どのような手法を用いて測定するのであろうか。

プランク定数の高精度測定法の一つに、Watt Balance (ワット・バランス) 法がある。フレミングの左手の法則と右手の法則を思いだしてほしい(図4)。磁場Bの中に置かれた電線に、電流(I)

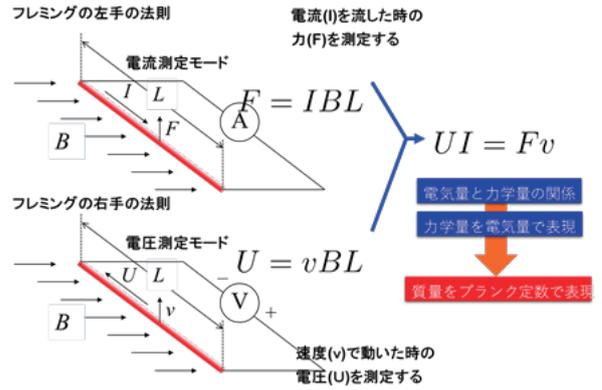


図4. プラン定数の決定 —ワット・バランス—

を流した時に生じる力(F)と、電線が速度(v)で動いた時発生する電圧(U)を、量子ホール効果とジョセフソン効果を利用して測定し、力学量を電気量で表すことで、プランク定数を決定することができる。測定装置としては、電磁コイルと分銅が天秤で釣り合った構造を基本として、電磁コイルに電流を流したときに釣り合う質量と電流、およびコイルと分銅が釣り合った状態から動き出したときに発生する電圧と速度を測定する。この方法は、BIPMをはじめ、米、加、仏、スイス、中国などの標準研究所で研究されている。

一次標準を決定するためには、原理の異なる別の方法でもプランク定数を測定し、両値が不確かさの範囲で一致することを確認し、値の妥当性を検証することが必須条件である。プランク定数のもう1つの求め方は、アボガドロ定数(N_A)からプランク定数(h)を導き出すものである。プランク定数(h)とアボガドロ定数(N_A)の間には、リュードベリ定数を介して、以下の関係がある。

$$N_A = \frac{M_e}{m_e} = \frac{c M_p \alpha^2}{2 R_\infty (m_p / m_e) h}$$

黒字で示した N_A と h の係数部分は、相対標準不確かさ 4.5×10^{-10} で決定することができる。この関係を用いれば、 N_A と h は 10^{-9} レベルで相互に比較・検証することが可能である。

アボガドロ定数は、国際共同研究「アボガドロプロジェクト」(EU, 独, 米, 日, 豪, 英, 伊)で測定された。アボガドロプロジェクトでは、まず、同位体濃縮技術を適用して ^{28}Si を99.994%ま

で濃縮した高純度 Si を製造し、直径 94 mm、1 kg のシリコン球を製造した。レーザ干渉計により球の直径を約 1,000 方向から測定して体積を求め、質量を測定してシリコン球の密度 (ρ) を求める。また、X線干渉計により ^{28}Si の結晶格子 (a) を決定し、以下の関係から、 N_A を求めた。

$$N_A = 8M/\rho a^3$$

この時、モル質量 M の決定に威力を発揮したのが、マルチコレクター型 ICP 質量分析装置を用いた同位体希釈分析法であった。これらの成果の集大成として、アボガドロ数は相対標準不確かさ 2×10^{-8} で測定することが可能となった。

プランク定数による質量の定義

2015 年、ワット・バランス法とアボガドロプロジェクトで得られたプランク定数が公開された。その値は 2.0×10^{-8} レベルの不確かさで一致した。その後、何回かの再実験と科学的な議論が繰り返されて、プランク定数の値が決められた。2018 年 11 月 13-15 日ベルサイユ国際会議場で開催された第 26 回国際度量衡総会で、キログラムの新定義が採択された。これによって、すべての単位が「原器」という人工物から解放され、物理量を基に定義されることになった。キログラムも唯一無二の基準であった IPK から解放され、さまざまな手法で 1 kg の質量を現示することができるようになった。さらに、必ずしも 1 kg を定義する必要はなく、計測技術が進歩してゆけば、ミリグラムやマイクログラムの単位も新定義に基づいて現示することが可能になるであろう。

今後の質量標準の供給体系は、図 5 に示すように、プランク定数を用いてワット・バランス法でキログラムを実現し、移送標準器の質量を決定する。その値で BIPM にある参照標準群の質量を

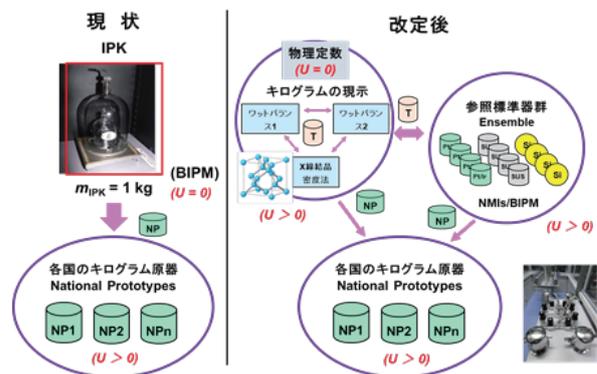


図 5. 質量標準供給体系
(藤井賢一；計測と制御, 53, 2014)

校正し、これを介して各国のキログラム原器に値を付けることになる。これによって、BIPM の参照標準群には不確かさが付くことになるが、実際に社会で使われる基準分銅の不確かさ ($U = 83 \mu\text{g}$ 以下) には何らかの不都合が生じることはない。もちろん、我々が日々利用する質量測定において、測定の不確かさやトレーサビリティに影響が現れることもない。

終わりに

130 年ぶりの SI 単位の再定義により、2019 年 5 月 20 日からは、キログラムとともに、温度 (ケルビン)、電気 (アンペア)、物質質量 (モル) の単位が改定される。ケルビンはボルツマン定数、アンペアは電気素量、モルはアボガドロ数に基づいて新たに定義される。詳細は、国立研究法人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から、「新時代を迎える計量基本単 — 国際単位系 (SI) 定義改定 —」をご一読下さい。
(<https://www.nmij.jp/transport.html>)

註

- 1) 万物の尺度を求めて：ケン・オールダー著
吉田三知世 訳 (早川書房)