

“キログラム”がプランク定数に基づく 新たな基準に

齋藤 則生
Saito Norio

1. はじめに

質量の単位であるキログラムの定義は、2018年11月16日に、「キログラムは質量のSI^注単位であり、プランク定数 h を単位 J s ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ に等しい) で表わしたときに、その数値を $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ と定めることによって定義される」と改定され、2019年5月20日から施行された^{1,2)}。キログラムの従前定義は、1889年に定められた「国際キログラム原器の質量」であった。この時、キログラムの他に長さの単位であるメートルも定義され、「国際メートル原器の長さ」とされた。このように当初、キログラムとメートルは原器という人工物を用いて定義された。メートルは1960年に光の波長を基準とした定義に改定され原器を放棄したが、キログラムは2018年までの130年間に1度も定義改定がなされず、唯一人工物によって定義されていた。

本稿ではキログラムの定義改定の背景を含め、単位の制定、定義改定の必要性、キログラムの実現方法、定義改定までの活動について紹介する。

2. 単位の制定

そもそも、キログラムやメートル等の単位を、誰がどのようにして定めているのかを紹介する^{2,3)}。

単位は、メートル条約によって組織された最高決定機関である国際度量衡総会（CGPM）の決議を経て、定められている。メートル条約は、1875年に17か国の代表により締結され、2018年10月14日現在、加盟国数が59、準加盟国・経済圏数が42となっている。日本はメートル条約締結10年後の1885年にメートル条約に加盟した。このメートル条約を維

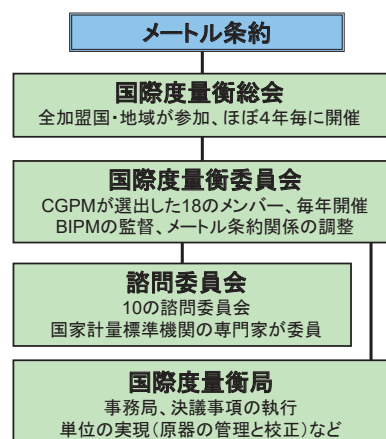


図1 メートル条約の組織

持する組織を図1に示す。国際度量衡総会は、加盟国、準加盟国である国や地域の全メンバーが参加し、例外を除き近年は4年ごとに開催されている。国際度量衡総会の直下にある国際度量衡委員会（CIPM）は、18名の委員から構成され、国際度量衡総会の決議事項に関する代執行機関となっている。日本からは、産業技術総合研究所（産総研）計量標準総合センター長の臼田が、2012年に国際度量衡委員会委員に着任し、2014年及び2018年の国際度量衡総会において再任された。また、臼田は2019年から国際度量衡委員会の幹事を務めている。国際度量衡委員会の下には、国家計量標準機関の専門家によって構成されている10の諮問委員会が設置され、標準に関する国際的な課題を分野ごとに検討する。これらの組織の事務局と国際的な研究課題を直接担っているのが国際度量衡局（BIPM）であり、国際度量衡委員会の監督下に置かれている。

単位の制定や改定は、専門家によって構成される諮問委員会が審議・提案し、その案を国際度量衡委員会が審議し、更に国際度量衡総会の決議を経る。今回、キログラムの定義改定については、質量諮問委員会と単位諮問委員会にて審議された。

注 SI とは、国際単位系（The International System of Units）のことをいう



写真1 日本国メートル原器（産総研 提供）



写真2 日本国キログラム原器（産総研 提供）

3. 定義改定の必要性

メートル条約が1875年に締結された後、1889年に第1回国際度量衡総会が開催され、メートルとキログラムの単位を、それぞれ、国際メートル原器、国際キログラム原器と定義することを決議した。日本国のメートル原器とキログラム原器は、1890年に日本に届き、両原器ともに産業技術総合研究所にて保管されている（写真1, 2を参照）。

原器による単位の定義は明快だが、いろいろな問題をはらんでいる。例えば、紛失、破損のほかに、経年変化、そして技術の発展と共に精度が十分でなくなる、等があげられる。このようなことから、単位の定義を、原器に頼らない定義に改定する研究が

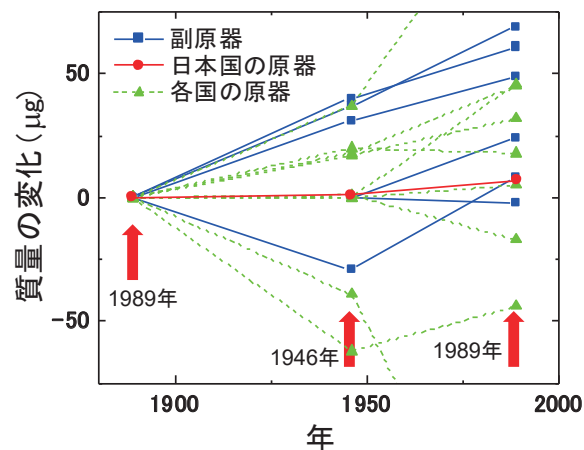


図2 国際キログラム原器に対する副原器（青四角）、日本国キログラム原器（赤丸）、及び各国のキログラム原器 No.2~24（緑三角）の質量の変化（参考文献5を元に筆者が作図）

なされてきた。メートルの定義は、1960年にクリプトンの波長に基づく定義に、また1983年には光の速さに基づく定義に改定された。定義の改定とともに長さの精度はメートル原器の場合に7桁程度であったものが13桁程度と格段に向上した⁴⁾。

キログラムについては、国際キログラム原器より安定な基準を実現できなかったことにより、130年の間、国際キログラム原器を定義としてきた。国際度量衡局で保管されている副原器や各国のキログラム原器と国際キログラム原器とは数10年に1度比較を行っており、1989~1992年に比較したときには、前回の比較より国際キログラム原器との差が更に大きくなり、100年の間に国際キログラム原器は50 μg 軽くなったのではないかと、憂慮された（図2）^{5, 6)}。このため、各国がキログラムを実現する研究を加速した。

4. キログラムの実現方法

キログラムを実現するには、キップルバランス法とシリコン球を用いる方法が考案されている^{7, 8)}。

キップルバランス法は、分銅に作用する重力と釣り合う電磁力の大きさを測定することによって、質量を決めるものである。電磁力の大きさはジョセフソン効果による電圧標準と量子ホール効果による抵抗標準に基づいて測定されるため、プランク定数が基準となる。したがって、プランク定数を定めれば分銅の質量を評価でき、逆に、分銅の質量を国際キログラム原器に基づいて定めるとプランク定数を得



写真3 シリコン球（産総研 提供）

る関係になる。

一方、シリコン球を用いる方法は、質量数 28 のシリコン単結晶により製作された球体に含まれる原子数とアボガドロ定数を用いることにより、シリコン球の質量を評価する^{9,10)}。天然のシリコンには、3 種類の安定同位体があり、その同位体比率は、²⁸Si (92.22 %), ²⁹Si (4.69 %), ³⁰Si (3.09 %) である¹¹⁾。同位体があると質量を正確に評価することが困難になるため、²⁸Si を 99.99% まで濃縮した ²⁸Si 単結晶を用いて製作した球体を用いる。このシリコン球に対して、①シリコン結晶の格子定数、②シリコン球の直径、③シリコン表面分析、を高精度で行うことにより、球体の原子数を評価する。原子数は測定により決定できるため、アボガドロ定数を与えるとシリコン球の質量を評価でき、キログラム原器を用いてシリコン球の質量を決めるとアボガドロ定数を評価できる。ここで、アボガドロ定数とプランク定数の間には厳密な関係式があり、2 つの定数の測定精度よりも高精度で互いに換算できる¹²⁾。したがって、キログラムの定義改定に向けて、関係機関はプランク定数又はアボガドロ定数を小さい不確かさで評価することが求められた。

産総研はシリコン球（写真3）を用いる手法を採用し、アボガドロ定数を評価した。この時、シリコンの直径約 93.7 mm を 0.6 nm の不確かさで評価する。0.6 nm はシリコンの格子定数程度の大きさであり、非常に高精度な測定が要求される。

5. キログラムの定義改定までの活動

キログラムを含む SI 単位の定義改定に向けた重

表1 CODATA による 2017 年特別調整値¹³⁾

量	2017 年特別調整値	SI 定義改定に提案する値
プランク定数	$6.626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J s}$	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$
電気素量	$1.602\,176\,634\,1(83) \times 10^{-19} \text{ C}$	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$
ボルツマン定数	$1.380\,649\,03(51) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	$1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
アボガドロ定数	$6.022\,140\,758(62) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

要な活動を時系列にて紹介する。

【2017 年 7 月】この期日までに科学技術データ委員会（CODATA）に報告された基礎物理定数の測定結果が、最終的な基礎物理定数の決定に寄与することがあらかじめ明示されていた。そのため、各国の関係機関が可能な限り小さな不確かさで測定結果を 2017 年 7 月までに報告できるように努力がなされた。

【2017 年 9 月】CODATA 会議が開催され、2017 年 7 月までに報告されたデータに基づいて基礎物理定数の 2017 年特別調整値が勧告された（表1）¹³⁾。2017 年特別調整値は、プランク定数の他に、電気素量、ボルツマン定数、アボガドロ定数が報告され、それぞれ、質量、電流、熱力学温度、モルの定義に用いられる。プランク定数の特別調整値決定に採用された実験データは 8 件あり、その内 1 件が産総研単独の結果、3 件が他国との共同結果であり、半分のデータに産総研が関与した。

CODATA 会議を受け、単位諮問委員会において、SI 単位の定義を改定するために必要な条件が満たされているかを確認し、CODATA の値を用いた SI 単位の定義改定を国際度量衡委員会に答申することを決定した。

【2017 年 10 月】第 106 回国際度量衡委員会が開催され、SI 単位の定義改定を国際度量衡総会に決議案として上程することを決定し、決議案を策定することとなった。

【2018 年 11 月】第 26 回国際度量衡総会が、2018 年 11 月 13～16 日の 4 日間、フランス・パリ郊外のベルサイユ宮殿近くにあるベルサイユ国際会議場にて開催された（写真4）。最終日 16 日午前には質量の単位であるキログラムを含む 4 つの SI 基本単位を



写真4 第26回国際度量衡総会

同時に定義改定する決議を採択し、すべての計量単位が原器という人工物から解放される、歴史的節目となった。新定義は2019年5月20日から適用されることも併せて決議された^{1, 14)}。

7つのSI基本単位は、7つの定数の定義値を用いて定義された。時間、長さ、光度の定義は、従前定義と新定義で表現は異なるが、本質的には同等である。一方、キログラムの定義は国際キログラム原器からプランク定数に、アンペアの定義は2本の直線状導体間の力から電気素量に、ケルビンの定義は水の3重点からボルツマン定数に、モルの定義は炭素12g中の原子の数からアボガドロ定数に基づく定義に改定された。すなわち、これらの量の定義が普遍的な基礎物理定数に基づく定義に改定された。この中でキログラムの定義は過去130年もの間、1度も改定されず、国際キログラム原器という唯一の人工物によって質量の単位が実現されてきた。キログラムを基礎物理定数に基づく定義に改定することで、すべての計量単位がどこでも実現可能な普遍的な定義となった。これはまさしく、「メートル法の理念である「すべての時代に、すべての人々に」をもたらしものである。この決議に関わる審議は、オープンセッションで行われ、更にネット配信されるというこれまでにない手法で、全世界に公開された¹⁵⁾。

6. おわりに

キログラムの定義が改定されたが、2018年の段階で、新しい定義でキログラムを実現することに成功しているのは、日本、ドイツ、アメリカ、カナダ

の4か国である。キログラムの実現には、それほど高度な技術が必要とされる。多くの計量標準機関でキログラムの実現に取り組んでおり、今後これらの機関が上記4機関に続くことが期待されている。

キログラムの定義改定により、一般のユーザには目に見える変化は何も起きない。それは定義改定の前後で、1kgの目盛りが変わらないように、定義を改定したからである。しかし、新しいキログラムの定義は、例えばナノテクノロジー分野では、今まで標準がなかった微小な質量が正確に測定できるようになる等の貢献が期待され、イノベーションの創出に向けた新たな幕開けとなるであろう。

参考文献

- 1) 第26回国際度量衡総会の決議1
<https://www.bipm.org/en/cgpm-2018/>
日本語訳は国際度量衡局の許可のもとに訳したものである。決議の著作権は国際度量衡局が保有している。
- 2) 「メートル条約に基づく組織と活動のあらまし」2019, 計量標準総合センター発行
https://www.nmij.jp/~imco/metric/aramashi_2019.pdf
- 3) 「国際文書第8版(2006)/日本語版 国際単位系(SI)」2007, 日本規格協会, 産業技術総合研究所計量標準総合センター (翻訳)
<https://www.nmij.jp/library/units/si/R8/SI8J.pdf>
- 4) <https://www.nmij.jp/library/units/length/>
- 5) G. Girard, *Metrologia.*, **31**, 317 (1994)
- 6) M. Stock, *et al.*, *Metrologia.*, **52**, 310 (2015)
- 7) 藤井賢一, 計測と制御, **53**, 144 (2014)
- 8) SI Brochure – 9th edition (2019) – Appendix 2,
<https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/SI-App2-kilogram.pdf>
- 9) 産総研プレスリリース, 「質量の単位「キログラム」の新たな基準となるプランク定数の決定に貢献」2017/10/24
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2017/pr20171024/pr20171024.html
- 10) N. Kuramoto, *et al.*, *Metrologia.*, **54**, 716 (2017)
- 11) NIST Atomic Weights and Isotopic Compositions for All Elements
https://physics.nist.gov/cgi-bin/Compositions/stand_alone.pl?ele=&all=all&ascii=html&isotype=some
- 12) P. J. Mohr, *et al.*, *Rev. Mod. Phys.*, **88**, 035009 (2016)
- 13) D. B. Newell, *et al.*, *Metrologia.*, **55**, L13 (2018)
- 14) 齋藤則生, 「第26回国際度量衡総会にて新定義採択される」, 計量標準と計量管理, **68**, 32 (2019)
- 15) <https://www.youtube.com/watch?v=qA67T7FPBME>
(国際度量衡局)