

計測は科学の基本であり、私たち人類は様々な計測技術を開発することで、この世界の様々な現象を解き明かそうとしている。世界各国の研究者と手を取り合って未知の深淵をのぞき込むためには、共通の測定基準が必要である。その役割を果たすのが世界共通の単位であり、質量の単位としては「キログラム (kg)」が用いられている。例えば、「体重が 50 kg」とは、体重が 1 kg の 50 倍であることを表し、世界中の人々と質量測定の結果を共有できる。1 kg が具体的にどのくらいの質量であるかがキログラムの定義であるが、より普遍的な質量の基準を実現するために、科学技術の発展とともにキログラムの定義は進化し続けている。本稿ではまず、現在のキログラムの定義がどのように導かれたかを紹介する。さらに、2019 年 5 月 20 日に予定されている、プランク定数に基づく新たな定義への改定についても解説する。

キログラムの定義の変遷

キログラムの起源は 18 世紀末のフランスにさかのぼる。フランス革命のさなか、ラボアジェらによって水の密度が測定され、水 1 リットルの質量としてキログラムは定義された。ただし、実際の測定での利便性から、上記の定義に合わせた白金製の分銅「確定キログラム原器」が製作され、基準として用いられた。

その後、質量が確定キログラム原器とほぼ等しく、白金よりも硬くて摩耗に強い白金イリジウム合金で分銅が製作された。これが国際キログラム原器 (写真 1) であり、1889 年に開催された第 1 回国際度量衡総会 (メートル条約の最高議決機関) で、その質量としてキログラムが定義された。国際キログラム原器はパリ郊外の国際度量衡局で厳重に保管され、その複製がメートル条約加盟国に各国の原器として配布されている。日本にも 1889 年に原器が配布され、産業技術総合研究所 (産総研) で、質量の国家標準「日本



写真 1 国際キログラム原器：直径、高さともに 39 mm の白金イリジウム製円筒形分銅 (Photograph courtesy of the BIPM)

国キログラム原器」として管理されている¹⁾。

国際キログラム原器と同時期に長さの単位「メートル」を定義するための国際メートル原器も製作されたが、その後の科学技術の進歩によって 1960 年にその役目を終えている。現在では、普遍的な物理定数である真空中の光の速さによってメートルは定義され、適切な技術さえあれば、定義に基づき長さの基準を誰でも作りだすことができる。一方、キログラムは依然として約 130 年前に製作された国際キログラム原器によって定義されている。ただし、表面汚染などの影響によって国際キログラム原器の質量の長期安定性は約 50 μg と推定されている (1 μg は 100 万分の 1 グラム)。これは 1 kg に対して相対的に 5×10^{-8} (1 億分の 5) のわずかな変動幅であるが、近年の計測技術の進展においては無視し得ない大きさとなりつつある。そこで、約 200 ある普遍的な物理定数のいずれかを 5×10^{-8} を凌ぐ精度で決定し、その値を基準としてキログラムの定義を改定する試みに、世界各国の研究所が取り組んできた²⁾。その結果、2011 年に開催された第 24 回国

際度量衡総会で、将来、国際キログラム原器を廃止し、普遍的な物理定数であるプランク定数を基準とする定義に移行する方針が決議された。ただし、この時点ではプランク定数が十分な精度で求められておらず、複数の異なる方法を用いて 5×10^{-8} を凌ぐ精度でプランク定数を測定し、新たな定義の基準となる値を定める必要があった。

プランク定数精密測定

プランク定数は量子論における最も重要な物理定数の 1 つであり、電子の質量と関連づけられる。このため、現行の 1 kg をプランク定数によって表現することができる。

プランク定数は二通りの方法で測定できる²⁾。一方は、キップルバランス法と呼ばれ、分銅に作用する重力と釣り合う電磁力の大きさを電氣的に測定し、プランク定数を求める。もう一方が、X 線結晶密度法であり、シリコン単結晶の密度、モル質量、格子定数を測定し、アボガドロ定数を求める。プランク定数とアボガドロ定数の間には厳密な関係式が成り立つため、アボガドロ定数の測定値からプランク定数を算出できる。産総研では、この後者の方法を用いてプランク定数を精密に測定した。

自然界のシリコンには 3 種類の安定同位体 (^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si) が存在するので、モル質量を求めるためにはこれらの同位体の存在比を測定する必要がある。2003 年に産総研が実施したプランク定数の測定では、このモル質量測定がボトルネックとなり、プランク定数の測定精度は 30×10^{-8} (1 億分の 30) が限界であった。そこで、国際研究協力「アボガドロ国際ブ



写真2 ^{28}Si 単結晶球体：1個あたりの製作費用は約1億円

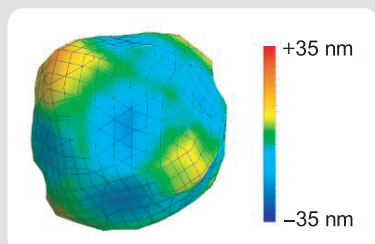


図1 様々な方位からの直径測定値を平均直径からの偏差を強調してプロットした球体形状三次元図：最小直径と最大直径の差は70 nm

プロジェクト」に参画し、 ^{28}Si だけを99.99%まで濃縮した ^{28}Si 単結晶を製作した。密度測定には ^{28}Si 単結晶から研磨された二つの球体を用いた(写真2)。球体の質量と直径はそれぞれ約1 kgと約94 mmであり、その質量と体積を精密に測定し、密度を決定した。体積測定には倉本らが独自に開発したレーザー干渉計を用いた³⁾。約2000方位から球体の直径を0.6 nm (1 nmは10億分の1メートル)の精度で測定し、平均直径から 2×10^{-8} の精度で体積を決定した。図1は様々な方位からの直径測定値を、平均直径からの偏差を強調してプロットした球体形状の三次元図である。球体の質量は日本国キログラム原器を基準として測定した。

決定した球体の密度を、アボガドロ国際プロジェクトによって過去に測定されている格子定数とモル質量と組み合わせ、 2.4×10^{-8} (1億分の2.4)の世界最高レベルの精度でプランク定数を決定した⁴⁾。この精度は、1 kgに換算すると24 μg であり、国際キログラム原器の質量安定性である50 μg を凌ぐ。

キログラムの新たな基準の決定

図2に、2017年7月1日までに世界各

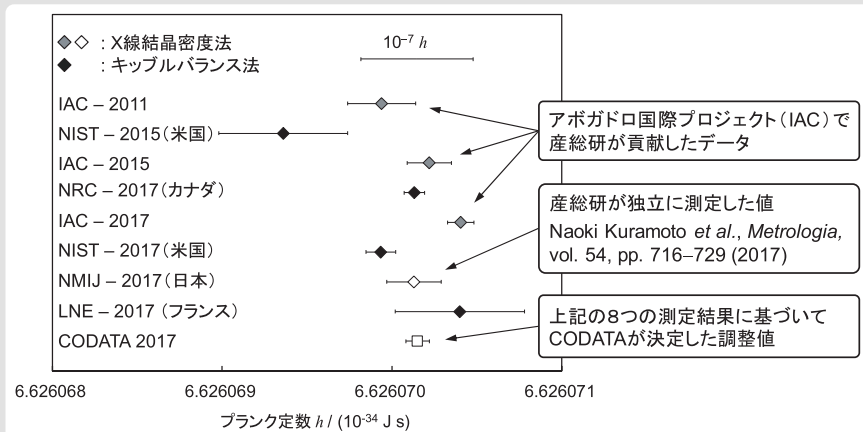


図2 新たなキログラムの定義の基準となるプランク定数の値の決定に貢献した測定値

国の研究機関によって測定されたプランク定数を示す。NMIJ-2017が、前章で紹介した産総研が測定した値である。この値はアボガドロ国際プロジェクトの測定値(IAC-2011, IAC-2015, IAC-2017)と良く一致した。また、米国標準技術研究所(NIST)、カナダ国立研究機構(NRC)、フランス国立計量研究所(LNE)がキップルバランス法で測定した値(NIST-2011, NIST-2015, NRC-2017, LNE-2017)とも良く一致した。2017年10月、科学技術データ委員会(CODATA)は、上記の8つの高精度な測定値に基づき次のプランク定数 h の調整値(CODATA 2017)を報告した⁵⁾。

$$h = 6.626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

括弧内の数値は最後の桁の不確かさを表す。CODATA 2017の精度は 1.0×10^{-8} (1億分の1)である。この精度は、1 kgに換算すると10 μg であり、国際キログラム原器の質量安定性である50 μg を大きく凌ぐ。2018年11月13～16日にパリ郊外のヴェルサイユで開催された第26回国際度量衡総会では、この調整値の不確かさをゼロとする定義値を基準とする新たな定義への移行が審議された。メートル条約加盟国代表団による投票の結果、130年ぶりにキログラムの定義を改定する歴史的な決議が採択された。これを受けて、2019年5月20日の世界計量記念日からプランク定数に基づく新たな定義が施行される¹⁾。

130年ぶりとなる定義改定への我が国の歴史的な貢献

CODATA 2017の決定に採用された8つのデータのうち、産総研は4つの値の測定に貢献し、またそのうちの1つは産総研で独立に測定したものである。科学技術分野の根底を支える単位のほとんどは、欧米を中心にこれまで構築されてきた。欧米以外の国が、世界共通の単位の改定に決定的な役割を果たすのは、長い度量衡の歴史の中でも初めてのことであり、産総研の貢献は、我が国の科学技術力が世界最高水準にあることを明確に裏付けるものである。また、歴史上初めて人工物ではなく普遍的な物理定数によって質量の単位が定義されることになり、産総研による130年ぶりのキログラムの定義改定への貢献は、正に科学の歴史に残る大きな成果であると言える。

- 1) 産総研 質量標準研究グループ HP, <https://unit.aist.go.jp/riem/mass-std/>
- 2) 倉本直樹ら, ぶんせき, **2015**, 229.
- 3) N. Kuramoto et al., *Metrologia* **2017**, 54, 193.
- 4) N. Kuramoto et al., *Metrologia* **2017**, 54, 716.
- 5) D. Newell et al., *Metrologia* **2018**, 55, L13.

くらもと・なおき

〔経歴〕1998年佐賀大学大学院工学系研究科博士後期課程エネルギー物質科学専攻修了(理学博士)。99年通商産業省工業技術院計量研究所入所。中央省庁再編にかかる組織改編を経て2001年より産業技術総合研究所計測標準研究部門研究員、18年より現職。

E-mail: n.kuramoto@aist.go.jp

© 2019 The Chemical Society of Japan