

新たな時代を迎えた国際単位系 (SI)
—基礎物理定数による基本単位の定義改定, さらばキログラム原器—

基礎物理定数に基づくキログラムとモルの新たな定義 —さらばキログラム原器—

倉本直樹*

*産業技術総合研究所 計量標準総合センター 質量標準研究グループ 茨城県つくば市梅園 1-1-1
*Mass Standards Group, National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, Japan
*E-mail: n.kuramoto@aist.go.jp

キーワード：キーワード：キログラム (kilogram), モル (mole), SI 基本単位 (SI base units), プランク定数 (Planck constant), アボガドロ定数 (Avogadro constant), 基礎物理定数 (Fundamental constants), 国際キログラム原器 (International Prototype of the Kilogram), キップルバランス (Kibble balance), X線結晶密度法 (X-ray Crystal Density Method).
JL 0005/19/5805-0330 ©2019 SICE

1. はじめに

計測は科学の基本であり, 私達人類はさまざまな計測技術を開発することで, この世界の現象を解き明かそうとしてきた。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こむためには, 共通の測定基準が必要である。現在, その役割を担っているのが世界共通の単位系「国際単位系 (SI)」である。また, より精度の高い測定基準を実現するために, SI を構成するさまざまな単位の定義には, その時代の最先端技術が結集されてきた。つまり, 単位の定義は永劫不変ではなく, 科学技術の発展とともに進化し続けているのである。

「キログラム (kg)」は SI における質量の単位であり, 長さの単位「メートル (m)」, 時間の単位「秒 (s)」などとともに, SI の基本骨格である「基本単位」の役割を担う。2019 年 5 月 20 日, このキログラムの定義が, プランク定数に基づく定義へと移行した。本稿では, 人類史上初となる普遍的な基礎物理定数に基づく質量の単位の定義を導いた計測技術, および連動して実施された物質の単位「モル」の定義改定について解説する。また, 定義改定の実現には, 産業技術総合研究所における原子レベルの精度でのシリコン単結晶球体直径測定が決定的な役割を果たした²⁾。この科学の歴史に残る貢献についても紹介する。

2. 質量の単位「キログラム」

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。さらに, 測定上の利便性から, 質量が水 1 リットルとほぼ等しい白金製の分銅「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, 白金よりも硬く摩耗しにくい白金イリジウム合金を用いて, 質量が確定キログラム原器とほぼ等しい分銅が製作された。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) において, その質量としてキ

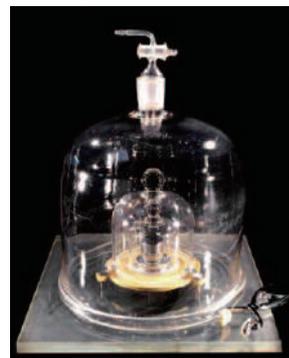


写真 1 フランスの国際度量衡局に保管されている国際キログラム原器 (Photograph courtesy of the BIPM)
直径, 高さともに 39 mm の円筒型白金イリジウム合金製分銅。

ログラムが定義された。国際キログラム原器は国際度量衡局で厳重に管理され, 2019 年までの 130 年間, 驚くべきことに同一の分銅が世界の質量の基準として使われ続けていた。

3. 物質の単位「モル」

一方, 「物質」は物質の量をその構成要素 (原子, 分子など) の個数に着目して表わす量である³⁾。「モル (mol)」は 1971 年の国際度量衡総会で承認された SI における物質の単位であり, キログラムと同様に基本単位の役割を担う。2019 年 5 月 20 日以前, モルは「0.012 kg の ^{12}C の中に存在する原子の数に等しい要素粒子を含む系の物質」として定義されていた。この 0.012 kg の ^{12}C に含まれる要素粒子の数をアボガドロ定数と呼び, その値は約 $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ である。つまり, われわれが実際に取り扱うスケールの物質中にはおよそ 1 兆の 1 兆倍のオーダーの個数の原子や分子が含まれている。モルを単位として用いれば, その莫大な個数をたとえば「1 mol の炭素」のように簡単に表わすことができる。ちょうど, 鉛筆の本数を, 12 本を 1 ダースとして表わすのに似ている。また, 「0.012 kg」という表現が定義中にあることからわかるように, 以前のモルの定義はキログラムの定義と連動していた。

4. 国際キログラム原器への引退勧告

高い普遍性と再現性を追求した結果、基本単位の定義は自然現象を記述する際に現れる基本的な定数「基礎物理定数」あるいは物質固有の物理的性質に基づくものへと変遷してきた。たとえば「メートル」は、1889年に白金イリジウム合金製のものさし「国際メートル原器」の長さとして定義された。ただし、国際メートル原器は1960年に引退しており、その役割は基礎物理定数の一つである「真空中の光の速さ」に引き継がれている。真空中の光の速さは世界中どこでも変わらず、時間と共に変化しない。このため、適切な技術さえあれば、国際メートル原器のような世界に一つしかない特別な人工物に頼ることなく、長さ測定のための基準を作り出すことができる⁴⁾。

一方、キログラムは、国際キログラム原器の質量として定義され続けてきた。ただし、表面汚染などのため、国際キログラム原器の質量が過去100年間で50 μg程度変動した可能性のあることが問題となっていた。これは1 kgに対して相対的に 5×10^{-8} の変動幅に相当し、近年の計測技術の進展においては無視しえない大きさとなりつつあった。そこで、約200ある基礎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⁵⁾。

その結果、2011年に開催された第24回国際度量衡総会において、将来、国際キログラム原器を廃止し、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。プランク定数はミクロな世界の現象を記述する物理定数の一つであり、原子の質量と関連づけられる。このため、1 kgをプランク定数によって表現することができる。そこで、 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ことが求められていた。

5. プランク定数測定

プランク定数は二通りの方法で求めることができる。一方がキップルバランス法(図1)である⁶⁾。測定は「力モード」と「速度モード」の二つのモードで行われる。力モードでは、磁束密度 B の磁場中の長さ L のコイルに電流を流し、力 F を発生させる。この F が、質量 m の分銅に作用する重力と釣り合うときの電流 I を測定する。一方、速度モードでは、コイルを速度 v で移動させ、発生する電圧 U を測定する。二つのモードでの測定量をまとめると $UI = mgv$ が得られる。ここで g は重力加速度である。 U と I はプランク定数を用いて記述することができる⁶⁾。このため、 m 、 g 、 v を質量、長さ、時間の標準に基づいて高精度に測定すれば、プランク定数を求めることができる。コイルの長さ L と磁束密度 B を精密に測定することは難しい。しかし、二つの測定モードを組み合わせることで、原理的には L と B を測定することなくプランク定数を高精度に測定できるのがこの

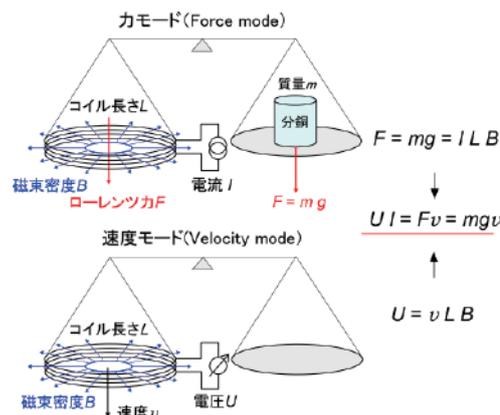


図1 キップルバランス法の原理

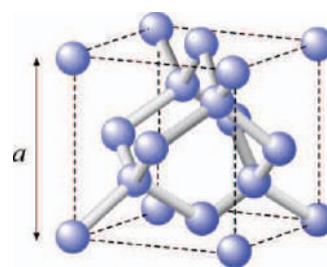


図2 シリコン結晶の単位格子

図中の18個の原子のうち、角の原子(8個)は隣接する8つの単位格子で共有されている。面の原子(6個)は隣接する2つの単位格子で共有されている。したがって1つの単位格子には8個(= $8 \times (1/8) + 6 \times (1/2) + 4$)のシリコン原子が含まれる。

方法の大きな特徴である。

もう一方がX線結晶密度法である³⁾。この方法では、まず3章で解説したアボガドロ定数を測定する。シリコン単結晶は一辺の長さが格子定数 a の単位格子(図2)から構成されている。単位格子の体積は a^3 であり、8つの原子が含まれる。したがって、ある程度の大きさのシリコン単結晶試料の体積を V 、質量を m とすると、試料に含まれるシリコン原子の数は $8V/a^3$ である。シリコンのモル質量(1 molあたりの質量)を $M(\text{Si})$ とすれば1 molあたりの原子数であるアボガドロ定数 N_A は、

$$N_A = \frac{8V M(\text{Si})}{a^3 m} \quad (1)$$

として求められる。この方法の根本的な原理は、単結晶試料中の原子数計測である。このため、高純度で無転位な単結晶が入手可能なシリコン単結晶を用いる。また、体積測定に好都合な試料の形状としては、立方体あるいは球体が考えられる。立方体の場合、角やエッジの部分の欠落が体積に及ぼす影響を小さな不確かさで測定することは容易でない。一方、真球度の高い球体の体積は、さまざまな方位から測定した直径の平均値から小さな不確かさで決定できる⁷⁾。さらに、試料の質量が約1 kgの場合、キログラム原器との比較によってその質量を正確に測定することができる。このため、測定用試料としては、質量が約

1 kg のシリコン単結晶球体が用いられる。また、自然界のシリコンには三つの同位体 ^{28}Si 、 ^{29}Si 、 ^{30}Si がそれぞれ約 92%、5%、3% の割合で存在する。各同位体のモル質量は十分に小さい不確かさですでに求められているので、シリコン単結晶試料中の同位体の存在比を質量分析計で測定すれば、モル質量 $M(\text{Si})$ を求めることができる⁸⁾。格子定数 a は X 線干渉計を用いて高精度に決定できる⁹⁾。

アボガドロ定数 N_A とプランク定数 h の間には、つぎの厳密な関係式が成立する。

$$h = \frac{cM(e)\alpha^2}{2R_\infty} \frac{1}{N_A} \quad (2)$$

ここで、 $M(e)$ は電子のモル質量、 α は微細構造定数、 R_∞ はリュードベリ定数、 c は真空中の光の速さである。(2) 式右辺の物理定数群 $(cM(e)\alpha^2/(2R_\infty))$ の不確かさは十分小さい。このため、アボガドロ定数の測定値から精度を落とすことなくプランク定数を導出することができる。

2003 年、産総研は X 線結晶密度法を用い、アボガドロ定数およびプランク定数を当時の世界最高精度である 20×10^{-8} で測定することに成功した¹⁰⁾。ただし、この精度は国際キログラム原器の質量の長期安定性より一桁大きいものであった。ボトルネックとなったのはモル質量測定であり、その精度を飛躍的に高めるためには、それまで用いてきた自然界に存在するシリコン結晶ではなく、人工的に ^{28}Si だけを濃縮したシリコン結晶を用いる必要があった。そこで、海外の 7 つの研究機関と協力して、 ^{28}Si 同位体濃縮シリコン単結晶からアボガドロ定数およびプランク定数を定めるための国際研究協力「アボガドロ国際プロジェクト」を 2004 年から開始した。このプロジェクトには産総研のほか、国際度量衡局、イタリア計量研究所、オーストラリア計測研究所、英国物理研究所、米国標準技術研究所、ドイツ物理工学研究所、欧州連合標準物質計測研究所が参加した。

アボガドロ国際プロジェクトでは、まず ^{28}Si の存在割合を 99.99% にまで高めた ^{28}Si 単結晶を 5 kg 作成した。さらに、この結晶から直径約 94 mm、質量約 1 kg の球体を 2 個研磨し (写真 2)、それらの体積と質量を、産総研、ドイツ物理工学研究所、国際度量衡局で測定した。

5.1 球体体積測定

この球体の体積を精密測定するために、シリコン球体の形状を測定するレーザー干渉計が倉本らによって開発された (図 3)^{11), 12)}。球体は真空容器中の二枚のガラス製エタロン板の間に置かれ、半導体レーザーからのビームが、球体の両側からエタロン板を介して球体に照射される。球体表面からの反射光とエタロン板からの反射光の干渉によって、同心円状の干渉縞が観測される。球体の両側で観測される二つの干渉縞 (干渉縞 1、干渉縞 2) を解析することで、球体とエタロン板との間隔 d_1 および d_2 をそれぞれ決定できる。干渉縞の解析には、半導体レーザーの光周波数の高精度な計測・制御技術に基づく位



写真 2 ^{28}Si 単結晶球体 (写真提供：産業技術総合研究所)
アボガドロ定数高精度測定のためにアボガドロ国際プロジェクトにより製作された。1 個あたりの製造費用は約 1 億円である。

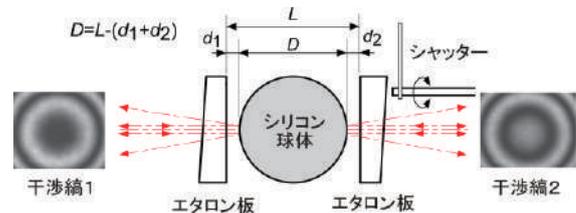
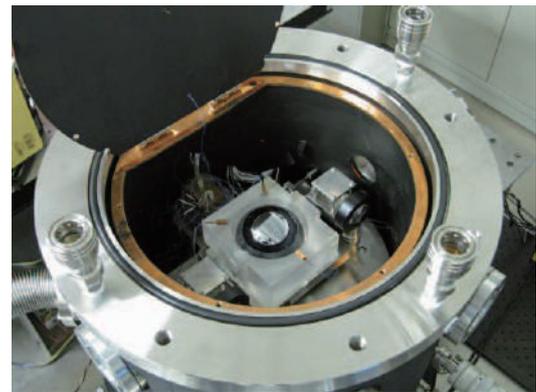


図 3 産総研で開発したシリコン球体の直径をサブナノメートルの精度で計測するレーザー干渉計^{11), 12)} (上図 (写真提供：産業技術総合研究所) とその原理図 (下図))

相シフト法を用いた^{11), 12)}。また、球体下方に格納された機構によって球体をもち上げ光路から取り除き、一方のレーザー光をシャッターによって遮ることで、二枚のエタロン板からの反射光によって干渉縞が形成される。この干渉縞を位相シフト法で解析することで、エタロン板間の間隔 L を決定できる。球体の直径は $D = L - (d_1 + d_2)$ として求められる。

また、球体は温度の変動によって膨張・収縮する。このため、高精度な直径測定には、球体温度の精密な制御・計測が欠かせない。そこで真空容器内に、ふく射熱を利用した球体温度制御機構を設置した。さらに、産総研が保持する温度の国家標準に基づき校正された白金抵抗温度計を備えた球体温度測定機構を用いることで、球体温度を 0.0006°C の精度で測定することに成功した¹²⁾。

球体直径測定の精度は 0.6 nm であり、この精度は図 2 に示した単位格子の一辺の長さ、つまりシリコン原子同士の間隔 (約 0.5 nm) に匹敵する¹²⁾。シリコン単結晶球

体直径測定には、ドイツ、イタリア、米国、オーストラリア、韓国、中国の研究機関も取り組んできたが、原子レベルの精度での測定に成功したのは産総研とドイツ物理工学研究所のみであった。この直径測定がいかに困難な課題であったかがおわかりいただけると思う。

図4に真空容器内に設置した球体回転機構を用いて実施したさまざまな方位からの直径測定の結果を示す。約2000方位からの測定に基づく平均直径から、 2×10^{-8} の精度で体積を決定した¹³⁾。

5.2 球体質量測定

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。日本国キログラム原器は国際キログラム原器の複製の一つであり、1889年以来、質量の国家標準として産総研で管理されている。測定には真空中での質量比較が可能な特殊な天びんを用い、球体の質量を6 μ g(100万分の6グラム)の精度で決定した¹³⁾。

5.3 球体表面分析

アボガドロ定数を正確に決定するためには、球体中のシリコン原子のみを数える必要がある。しかし、シリコン単結晶球体は厚さ数ナノメートルの自然酸化膜などからなる表面層で覆われている(図5)。そこで、産総研ではX線光電子分光法と分光エリプソメトリーを用い、表面層の化学組成、厚さ、質量などを評価した¹³⁾。これら

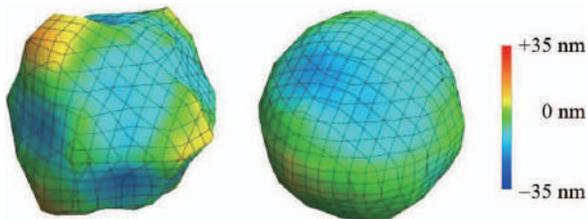


図4 さまざまな方位からの直径測定値を、平均直径からの偏差を強調してプロットした球体形状三次元図
平均直径は約94 mmであり、直径の最大値と最小値の差は、最小直径と最大直径の差は一方の球体(左)では69 nm、もう一方の球体(右)では39 nm¹²⁾。

の評価結果を5.1節および5.2節で記述した球体の体積・質量測定の結果と組み合わせ、純粋なシリコン部分(シリコンコア)の質量と体積を決定した。

5.4 アボガドロ定数・プランク定数の決定

決定したシリコンコアの質量と体積を、アボガドロ国際プロジェクトによって過去に測定された格子定数とモル質量と組み合わせ、(1)式を用いてアボガドロ定数を決定した。さらに(2)式を用いてプランク定数を導出した¹³⁾。プランク定数の測定精度は 2.4×10^{-8} であり、1 kgに換算すると24 μ gである。これは国際キログラム原器の質量安定性である50 μ gを凌ぐ。

6. キログラムとモルの新たな定義

6.1 新たなキログラムの定義

図6に、世界各国の研究機関によって測定されたプランク定数を示す¹⁴⁾。NMIJ-2017が、5章で紹介した産総研が2017年に測定・報告した値である¹³⁾。この値はアボガドロ国際プロジェクト(IAC)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

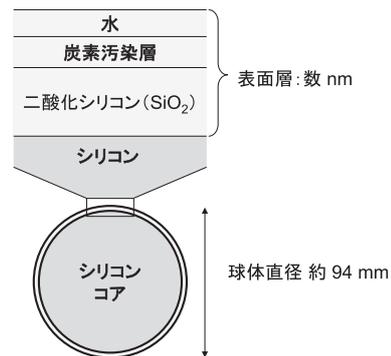


図5 真空中での²⁸Si単結晶球体表面層モデル
表面層は化学吸着水層、炭素汚染層、SiO₂層からなる¹³⁾。

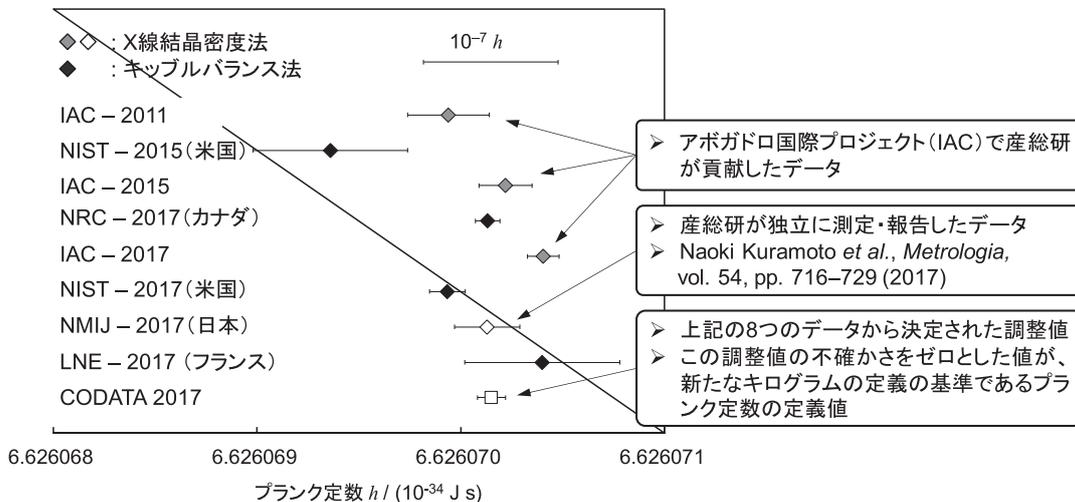


図6 新たなキログラムの定義の基準となるプランク定数の値の決定に採用された測定値

した値 (NIST-2015, NIST-2017, 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つぎのプランク定数 h の調整値 (CODATA 2017) を報告した¹⁴⁾。

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

括弧内の数値は最後の桁の不確かさを表わす。CODATA 2017の精度は 1.0×10^{-8} であり, この精度は1kgに換算すると10 μg である。世界各国の研究者の長年にわたる努力の結果, ついに国際キログラム原器の質量安定性である50 μg を大きく凌ぐ精度でプランク定数が決定されたのである。これを受けて, 2018年11月13日~16日に開催された第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した値を定義値とするつぎの新たなキログラムの定義への移行が審議された。

「キログラムは質量のSI単位であり, プランク定数 h を単位 J s で表したときに, その数値を $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ J s}$ と定めることによって定義される。」

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た。

6.2 130年ぶりの定義改定へのわが国の歴史的貢献

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, そのうちの1つは産総研でほぼ独立に測定したものである^{13), 14)}。科学技術分野の根底を支える単位のひとつは, 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, 今回が初めてのことであった。特に, 5.1節で紹介したシリコン単結晶球体直径測定には, 世界各国の研究機関が取り組んできたが, 原子レベルの精度での測定に成功し, 歴史上初めてとなる, 人工物ではなく普遍的な基礎物理定数に基づくキログラムの定義の実現に決定的な役割を果たすことができたのは産総研とドイツ物理工学研究所のみであった。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。

6.3 新たなモルの定義

キログラムの定義改定と連動して, モルの定義はアボガドロ定数に基づく以下の定義へと改定された。

「モルは物質量のSI単位であり, 1モルには厳密に $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ の要素粒子が含まれる。この数は, アボガドロ定数を単位 mol^{-1} で表したときの数値であり, アボガドロ数と呼ばれる。」

定義中のアボガドロ定数の値は, キログラムの定義中のプランク定数の値から(2)式を用い導出されたものである。

定義改定によって, モルの定義はキログラム原器や ^{12}C

という特定の核種から切り離され, 要素粒子の個数に基づく直接的でわかりやすいものとなった。

7. 定義改定の影響

7.1 質量の値の連続性

以前のキログラムの定義の下では, 各国のキログラム原器が約30~40年の周期で国際度量衡局にもち込まれ, その質量が国際キログラム原器を基準として測定されていた。産総研は日本国キログラム原器を基準として他の分銅の質量を測定し, 世界的な整合性が確保された質量標準を日本国内へ供給していた。

新たな定義の下では, 各国が独自にプランク定数の定義値から質量測定の基準を作り出すこと, つまり, キログラムを実現することが原理的には可能となる。なお, プランク定数の定義値は, 定義改定直前の国際キログラム原器の質量を基準として決定されている。このため定義改定の影響で, 一般に使用されているはかりの指示値が正しくなくなったり, 分銅の質量が変動することはない。なお, 現時点で, プランク定数に基づいて十分な精度で独自にキログラムを実現できる国は, 日本, 米国, カナダ, ドイツのみである。しばらくは, 上記の国が新定義に基づいて値付けした分銅を用いて, 国際度量衡局が他の国の国家標準の値付けを行う予定である。

7.2 プランク定数を基準とするキログラムの実現

新たな定義の下, 産総研はX線結晶密度法によって ^{28}Si 同位体濃縮球体の質量をプランク定数を基準にして決定することで, 質量測定の基準を独自に作り出す予定である¹⁵⁾。プランク定数 h と ^{28}Si 同位体濃縮球体の質量 m との関係は次式で与えられる。

$$m = \frac{2hR_{\infty}}{ca^2} \frac{M(\text{Si})}{M(\text{e})} \frac{8V_{\text{core}}}{a^3} + m_{\text{SL}} \quad (3)$$

この式は, (1)式と(2)式を組み合わせ, さらに, 球体表面層の影響を考慮することで導出される。 ^{28}Si 同位体濃縮球体の純粋なシリコン部分の体積 V_{core} , 表面層の質量 m_{SL} , 格子定数 a , モル質量 $M(\text{Si})$ を測定し, プランク定数 h の定義値と組み合わせることで, 球体質量 m を決定することができる¹⁵⁾。産総研では, このように決定した ^{28}Si 同位体濃縮球体の質量を基準としてさまざまな分銅の質量を測定し, 質量標準を日本国内へ供給する。

^{28}Si 同位体濃縮球体も国際キログラム原器と同様に人工物であるため, その質量は表面の汚染などによって変動する可能性がある。ただし, その変動は普遍的な物理定数であるプランク定数を基準として厳密に測定できる。これは, 国際キログラム原器の質量変動を, 国際キログラム原器自身がキログラムの定義であるために厳密に測定できなかった以前の状況と比べると非常に大きな進展である。

また, 以前の定義の下では, 高精度な質量測定には国際キログラム原器を基準として質量が値付けされた分銅が必要であった。しかし, 無限に小さな分銅は物理的に

作ることができず、ナノグラム・マイクログラムレベルの試料に関しては、高精度な質量測定が実現困難であった。新たな定義の下では、分銅を介することなく、プランク定数を基準として任意の質量を直接高精度に測定することが原理的には可能となる。このため、特に創薬や環境計測などの分野で強く求められている微小な質量を高精度測定するための技術開発が活性化されることが期待されている。

7.3 モルの定義改定の影響

さまざまな原子の質量を表わす場合、通常、 ^{12}C 原子の質量を 12 としたときの相対質量「相対原子質量（原子量）」が用いられる³⁾。相対原子質量は、多くの分野で使われる人類共有の知的基盤であるが、今回のモルの定義改定の影響を受けておらず、その値は変動していない。たとえば、 ^{12}C の相対原子質量は、現在でも厳密に 12 である。ただし、相対原子質量からモル質量を算出する際の変換係数「モル質量定数 M_{u} 」は定義改定の影響を受けたことに注意してほしい。以前の定義の下では、 M_{u} は厳密に 1 g mol^{-1} と定義され、 ^{12}C のモル質量 $M(^{12}\text{C})$ は厳密に 12 g mol^{-1} であった。一方、(2) 式から、現行の定義における M_{u} は次式で与えられる。

$$M_{\text{u}} = \frac{2N_{\text{A}}h}{c} \frac{R_{\infty}}{\alpha^2 A_{\text{r}}(\text{e})} \quad (4)$$

微細構造定数 α 、リュードベリ定数 R_{∞} 、電子の相対原子質量 $A_{\text{r}}(\text{e})$ は実験的に測定される量であり、それらの測定値に応じて M_{u} も変化する。定義改定直後の現時点では、その値は依然として 1 g mol^{-1} であるが、 4.5×10^{-10} の相対不確かさをもつ¹⁶⁾。このため、 $M(^{12}\text{C})$ は定義改定前のように厳密に 12 g mol^{-1} ではなく、 4.5×10^{-10} の相対不確かさをもつ。他の多くの原子の相対原子量は 10^{-11} レベルの相対不確かさで求められており、それらのモル質量の不確かさも、僅かではあるが定義改定のために増大した。ただし、各原子のモル質量の増大は非常に小さく、ほとんどの化学計測やモルの実現においては無視できる¹⁷⁾。

8. おわりに

科学の歴史を振り返ってみると、SI は単純な世界共通の「ものさし」ではなく、技術革新を導くための高精度な人類共有の知的基盤としての役割を果たしてきた。たとえば、光の速さを基準とするメートルの定義はナノメートルオーダーでの正確な長さ測定を可能とし、ナノテクノロジーの土台を築いた。一般的な計測では、今回のキログラムとモルの定義改定の影響を感ずることはすぐにはないだろう。しかし、新たな定義の下では、原理的には、原子レベルでの正確な質量や物質量の測定が可能となる。定義改定がトリガーとなって開発された新たな科学技術が、産業技術や日常生活に飛躍的な進歩をもたらすのをまのあたりにするのはそれほど遠い未来ではないかもしれない。

(2019 年 2 月 4 日受付)

参考文献

- 1) 白田 孝：国際単位系 (SI) の体系紹介と最新動向（概論），計測と制御，**53**, 74/79 (2014)
- 2) 産業技術総合研究所 質量標準研究グループ HP, <https://unit.aist.go.jp/riem/mass-std/> (2019 年 3 月 29 日最終確認)
- 3) 倉本直樹：物質 (mol) についての基礎解説と最新動向，計測と制御，**53**, 368/373 (2014)
- 4) 高辻利之：長さ (m) についての基礎解説と最新動向，計測と制御，**53**, 523/528 (2014)
- 5) 藤井賢一：質量標準の現状とキログラム (kg) の定義改定をめぐる最新動向，計測と制御，**53**, 144/149 (2014)
- 6) L. Chao et al.: A LEGO Watt Balance: An Apparatus to Determine a Mass Based on the New SI, *Am. J. Phys.*, **83**, 913/922 (2014)
- 7) 倉本, 藤井：キログラムの再定義における光技術の応用，光アイアンス，**50**, 45/51 (2006)
- 8) T. Narukawa et al.: Molar Mass Measurement of a ^{28}Si -Enriched Silicon Crystal for Determination of the Avogadro Constant, *Metrologia*, **51**, 161/168 (2014)
- 9) 中山, 藤井：シリコン格子定数の絶対測定とアボガドロ定数の決定，応用物理，**62**, 245/252 (1993)
- 10) K. Fujii et al.: Evaluation of the Molar Volume of Silicon Crystals for a Determination of the Avogadro Constant, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **52**, 646/651 (2003)
- 11) N. Kuramoto et al.: Volume Measurement of ^{28}Si -Enriched Spheres Using an Interferometer with a Flat Etalon to Determine the Avogadro Constant, *Metrologia*, **48**, S83/S95 (2011)
- 12) N. Kuramoto et al.: Volume Measurement of ^{28}Si -Enriched Spheres Using an Improved Optical Interferometer for the Determination of the Avogadro Constant, *Metrologia*, **54**, 193/203 (2017)
- 13) N. Kuramoto et al.: Determination of the Avogadro Constant by the XRCM Method Using a ^{28}Si -Enriched Sphere, *Metrologia*, **54**, 716/729 (2017)
- 14) D. Newell et al.: The CODATA 2017 Values of h , e , k , and N_{A} for the Revision of the SI, *Metrologia*, **55**, L13/L16 (2017)
- 15) N. Kuramoto et al.: Realization of the Kilogram Based on the Planck Constant at NMIJ, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **66**, 1267/1274 (2017)
- 16) P. Mohr et al.: Data and Analysis for the CODATA 2017 Special Fundamental Constants Adjustment, *Metrologia*, **55**, 125/146 (2018)
- 17) Consultative Committee for Amount of Substance – Metrology in Chemistry and Biology (CCQM): Mise en Pratique for the Definition of the Mole in the SI, https://www.bipm.org/cc/CCQM/Allowed/22/CCQM16-04_Mole_m_en_p_draft_2018.pdf (2019 年 3 月 29 日最終確認)

[著者紹介]

倉本直樹君 (正会員)



1995 年から 1998 年まで日本学術振興会特別研究員 (DC1)。1998 年佐賀大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士 (理学)。1999 年通商産業省工業技術院計量研究所入所。2001 年の中央省庁再編を経て、現在、産業技術総合研究所工学計測標準研究部門 質量標準研究グループ長。130 年ぶりとなるキログラムの定義改定を導いたシリコン単結晶球体積測定用レーザー干渉計の開発を担当。質量標準研究グループ長として、プランク定数を基準とする新たな質量の国家標準の構築にも取り組んでいる。

