

キログラムとモルの新しい定義

—キログラム原器から物理定数へ—

質量の単位「キログラム」は、130年前に製作された世界に一つしかない分銅「国際キログラム原器」の質量として定義されている。ただし、表面の汚染などが原因で、国際キログラム原器の質量が変動している可能性があることが問題となってきた。この問題を根本的に克服するために、2019年5月20日、プランク定数を基準とする定義への移行が実施される。本稿では、人類史上初となる普遍的な物理定数にもとづく質量の単位の定義が実現した経緯、および連動して実施される物質の単位「モル」の定義改定について解説する。

倉本直樹

1 はじめに

質量を測定する技術は分析化学における最も基礎的で不可欠な要素技術の一つである。混合試料の調製、重量分析などにおいて天びんの使用が必須の操作であるばかりでなく、日頃何気なく使っている様々な元素の原子量も高精度な質量測定にもとづき求められてきたものである。また最近では、質量分析計による生体高分子の質量測定が医薬品開発などの分野で必須の分析手法となっている。

質量測定の結果を世界各国の研究者とシームレスに共有するためには、共通の測定基準が必要となる。その役割を果たすのが世界共通の単位であり、「キログラム」やキログラムの千分の一として定義されている「グラム」が用いられている。「1キログラム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り、定義が高い普遍性と再現性を兼ね備えることが正確な情報共有の鍵となる。このため、キログラムに限らず、単位の定義にはその時代の最先端技術が用いられ、科学技術の発展とともに進化してきている。

2 質量の単位「キログラム」

国際単位系は現在、世界で最も広く用いられている単位系であり、そのフランス語 (Système International d'Unités) の頭文字をとって SI と呼ばれている¹⁾。キログラムは SI における質量の単位であり、その記号は kg である。SI は基本単位と呼ばれる七つの単位を基盤として構築されているが、キログラムは、メートル (長さ)、秒 (時間)、アンペア (電流)、ケルビン (温度)、カンデラ (光度)、モル (物質質量) とともに基本単位の役割を担う。

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 (Antoine

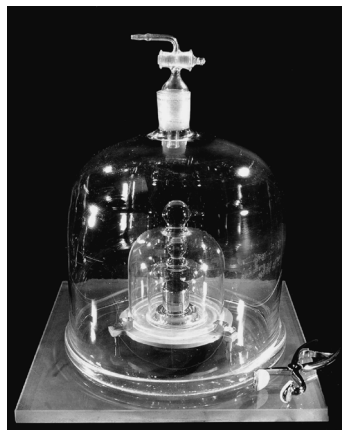


写真1 フランス・パリ郊外の国際度量衡局 (BIPM) に保管されている国際キログラム原器 (Photograph courtesy of the BIPM, 直径、高さともに 39 mm の円筒型白金イリジウム合金製分銅)

Laurent de Lavoisier 1743~1794) 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、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、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) において、その質量としてキログラムが定義された。驚くべきことに、130 年たった現在でも当時と同一の分銅が世界の質量の基準として使われている。

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) によって、質量の国家標準「日本国キログラム原器」 (写真 2) として管理されている²⁾³⁾。

New Definitions of the Kilogram and the Mole.



写真2 茨城県つくば市の産業技術総合研究所で保管されている日本国キログラム原器（写真提供：産業技術総合研究所。国際キログラム原器の複製の一つであり、我が国の質量の国家標準として維持・管理されている²⁾。）

3 物質量の単位「モル」

一方、「物質量」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す量である⁴⁾。「モル」は1971年の国際度量衡総会で承認された物質量の単位であり、「0.012 kgの¹²C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量であり、単位の記号はmolである」と定義されている。この12 gの¹²C、つまり1 molあたりに含まれる要素粒子の数をアボガドロ定数と呼び、そのおおよその値は $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ である。つまり、我々が実際に取り扱うスケールの物質中にはおよそ一兆の一兆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、その莫大な個数を例えば「1 molの炭素」のように簡単に表すことができる。また、現行のモルの定義の重要な点は、アボガドロ定数という言葉やその値が定義に含まれていないことである⁴⁾。「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、モルはキログラムの定義と連動して定義されているのである。

水素や酸素ではなく「炭素」の、1 gや10 g等のきりの良い質量ではなく「12 g」がモルの定義に用いられている理由には、原子量測定の影響が関与している。原子1個あたりの質量は非常に小さく、実際の質量を用いて原子の質量を表記するのは不便である。そこで、ある特定の原子の質量を基準とした比として、原子の質量を表す考え方が導入された。この原子の相対質量のことを原子量と呼ぶ。ドルトン（John Dalton 1766～1844）は水素を基準とし $H=1$ とする原子量表を発表したが、その値はあまり精密ではなかった。その後、ベルセリウス（Joens Berzelius 1779～1848）は、それまでに知られていた元素の原子量をそれらの酸素化合物の分析により測定し、酸素を基準とし $O=100$ とする精度の高い原子量表を発表している。しかし、 $O=100$ とすると原子量

1000以上の元素がでてきてしまう。これを防ぎ、さらに、最も軽い水素の原子量を1に近づけるために、 $O=16$ としたスタス（Jean Servais Stas 1813～1891）による原子量表が国際的に使用されるようになった。

その後の素粒子物理の発展により、自然界の多くの元素には同位体が存在することが明らかになった。すなわち同じ元素でも、質量の異なる原子が存在する。酸素にも¹⁶O、¹⁷O、¹⁸Oの三種類の安定同位体が存在する。これをうけ、物理学の分野では¹⁶O=16を基準とした。一方、化学の分野では三種類の同位体の混合物である天然の酸素の原子量を16とした。物理学と化学の分野で異なる原子量が用いられているのは非常に不便であり、共通の基準を利用するための協議が実施された。フッ素¹⁹F=19を基準とする案などが検討されたが、最終的には¹²C=12を基準とする新たな共通の基準が採用された。質量分析計を用いた様々な原子の原子量測定における¹²Cの優位性がその主な理由である⁵⁾⁶⁾。現行のモルの定義にはこの¹²C=12を基準とする国際的な合意がそのまま反映されている。

また、様々な原子のモル質量（1モルあたりの質量）は、モル質量定数 M_u を用いて原子量から求められる。例えば¹²Cについては次式が成立する。

$$M(^{12}\text{C}) = A_r(^{12}\text{C}) \times M_u \dots\dots\dots(1)$$

ここで $M(^{12}\text{C})$ は¹²Cのモル質量であり、現行のモルの定義の下では厳密に12 gである（不確かさはゼロ）。 $A_r(^{12}\text{C})$ は¹²Cの原子量であり、厳密に12である。従って M_u は厳密に1 g/molとなる。

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、基本単位の定義は普遍的な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。例えば長さの単位「メートル」は、以前は「国際メートル原器」の長さとして定義されていた。国際メートル原器は、国際キログラム原器と同時期に作成された白金イリジウム合金製のものさしであるが、すでにその役割は普遍的な物理定数の一つである真空中の光の速さ c に引き継がれている。 c を厳密に $299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ と定義し、メートルを「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」とするのが現在の定義である。この定義に基づきメートルを実現する、つまり長さ測定の基準をつくりだすためにはレーザーを用いれば良い。レーザーの光周波数 ν を測定し、 $\lambda=c/\nu$ から波長 λ を求めれば、光の波長レベルの目盛りのついたものさしとしてレーザーを用いることができる。国際メートル原器を用いた場合と比較すると飛躍的にメートル実現の精度が向上しており、またレーザーを製作し、その光周波数を測定する技術があれば誰でもメートルを実現できるのが大きな特徴であ

る。

一方、キログラムは依然として人工物である国際キログラム原器の質量として定義されている。何らかの理由で国際キログラム原器の質量が変化しても、それを厳密に1 kg とするのが現在の定義である。ただし、表面汚染などのため、国際キログラム原器の質量の過去100年間にわたる長期安定性は約50 μg であると推定されている。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る。そこで、約200ある普遍的な物理定数のうちいずれかを 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。

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、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⁷⁾。プランク定数は量子論における最も重要な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。ただし、2011年の時点ではプランク定数が十分な確からしき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ことが求められていた⁷⁾。

5 プランク定数測定

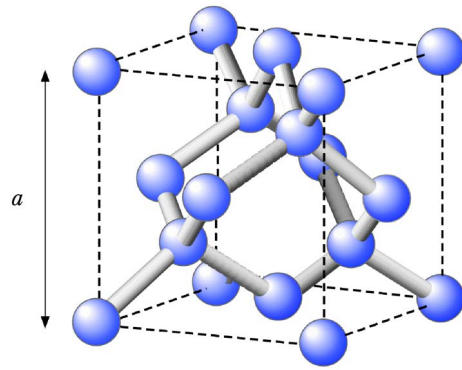
プランク定数は二通りの方法で求めることができる。一方はキップルバランス法と呼ばれ、質量既知の分銅に作用する重力と釣り合う電磁力の大きさを電気的に測定し、プランク定数を求める⁸⁾。以前、この方法はワットバランス法と呼ばれていたが、測定原理を開発したキップル(Bryan Kibble 1938~2016)の功績をたたえ、キップルバランス法に名称変更された。

もう一方がX線結晶密度法である⁴⁾。この方法では、まずアボガドロ定数を測定する。図1に示すようにシリコン単結晶は一辺の長さが格子定数 a の単格子から構成されている。単格子の体積は a^3 であり、8個の原子が含まれる。従って、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 $8V/a^3$ で与えられる。シリコンのモル質量を $M(\text{Si})$ 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、

$$N_A = \frac{8V M(\text{Si})}{a^3 m} \dots \dots \dots (2)$$

として求められる。

X線結晶密度法の根本的な原理は、単結晶試料に含まれる原子数の計測である。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、体積測定に都合の良い試料の形状としては、立方体あるい



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つの単格子で共有されている。従って1つの単格子には8個(=8×(1/8)+6×(1/2)+4)のシリコン原子が含まれる。

図1 シリコン結晶の単格子

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様々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⁹⁾¹⁰⁾。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いられる。また、自然界のシリコンには同位体²⁸Si, ²⁹Si, ³⁰Si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、モル質量を求めることができる¹¹⁾¹²⁾。格子定数はX線干渉計を用いて高精度に決定できる¹³⁾。

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

$$h = \frac{cM(e)\alpha^2}{2R_\infty} \frac{1}{N_A} \dots \dots \dots (3)$$

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。式(3)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、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が当時の世界最高精度である 20×10^{-8} で測定された¹⁴⁾。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



写真3 ^{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。)

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、海外の七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決めるための国際研究協力「アボガドロ国際プロジェクト」が2004年から開始された。このプロジェクトには産総研のほかに、国際度量衡局、イタリア計量研究所、オーストラリア計量研究所、英国物理研究所、米国家標準技術研究所、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、それぞれの機関が得意とする分野を担当する国際分業によりプロジェクトを遂行した。

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5kg作成した¹⁵⁾。さらに、この結晶から直径約94mm、質量約1kgの球体を2個研磨し(写真3)、それらの体積と質量が、産総研、ドイツ物理工学研究所、国際度量衡局で測定された。測定の例として、産総研で実施された球体の体積および質量の測定について次節以降に紹介する。

5・1 球体体積測定

図2は、この球体の体積を精密測定するために倉本らによって開発された、シリコン球体の形状を測定するレーザー干渉計である¹⁶⁾¹⁷⁾。球体は真空容器内に設置された二枚のガラス製のエタロン板の間にセットされる。レーザー光は球体の両側からエタロン板を介して球体に照射され、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ギャップ 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、光源であるダイオード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相シフト法が用いられた¹⁶⁾。また、球体下方に格納された機構によって球

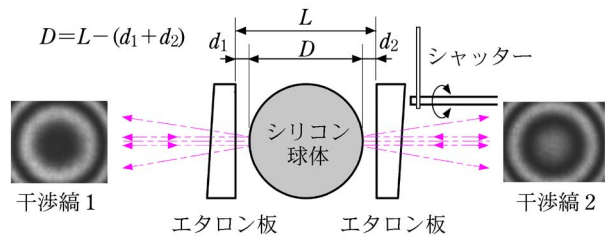
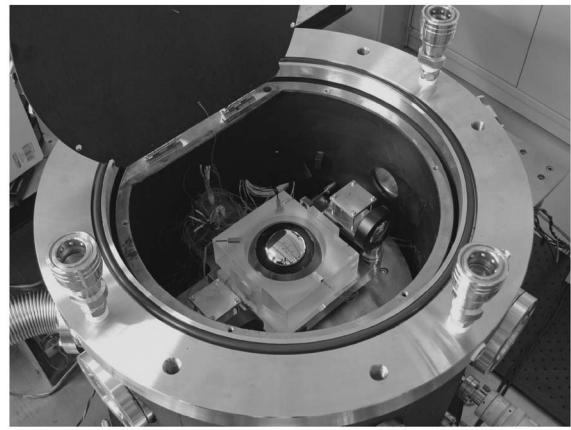
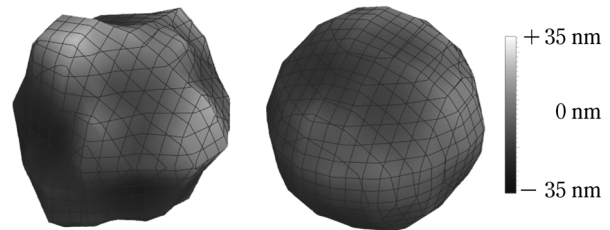


図2 シリコン球体の直径をサブナノメートルの精度で計測するレーザー干渉計(上図(写真提供: 産業技術総合研究所))とその原理図(下図)。



平均直径は約94mm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69nm、もう一方の球体(右)では39nm。

図3 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

体を持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。

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、球体の温度を $0.0006\text{ }^\circ\text{C}$ の精度で測定した¹⁶⁾。

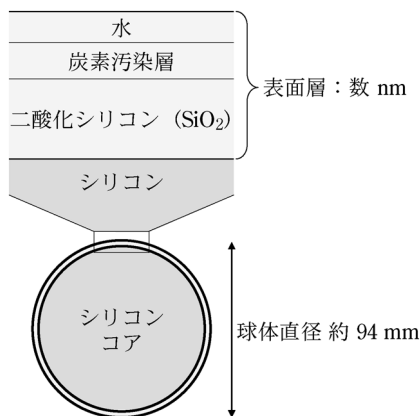
球体直径測定の精度は 0.6 nm であり、この精度は図

1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。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。

図3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様々な方位からの直径測定の結果を示す。約2000方位からの測定結果に基づく平均直径から、 2×10^{-8} の精度で体積を決定した¹⁷⁾。

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。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 μg (100万分の6グラム)の精度で決定した¹⁸⁾。



表面層は化学吸着水層、炭素汚染層、SiO₂層などからなる。

図4 真空中での²⁸Si単結晶球体表面層モデル

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4)¹⁹⁾²⁰⁾。そこで、X線光電子分光法と分光エリプソメトリーを用い、表面層の物質の化学組成、厚さ、質量などを評価した²¹⁾。これらの結果を5.1および5.2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ている格子定数およびモル質量と組み合わせ、式(2)を用いてアボガドロ定数を決定した。さらに式(3)を用いてプランク定数を導出した²¹⁾。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 μg 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 μg 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5に、2017年7月1日まで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。NMIJ-2017²¹⁾が、5章で紹介した産総研によって測定された値である。この値はアボガドロ国際プロジェクト(IAC)の測定値(IAC-2011²²⁾, IAC-2015²²⁾, IAC-2017²⁰⁾)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-2015²³⁾, NIST-2017²⁴⁾, NRC-2017²⁵⁾, LNE-2017²⁶⁾)とも良く一致した。2017年10月、科学技術データ委員会(CODATA)は、上記の八つの高精度な測定値に基

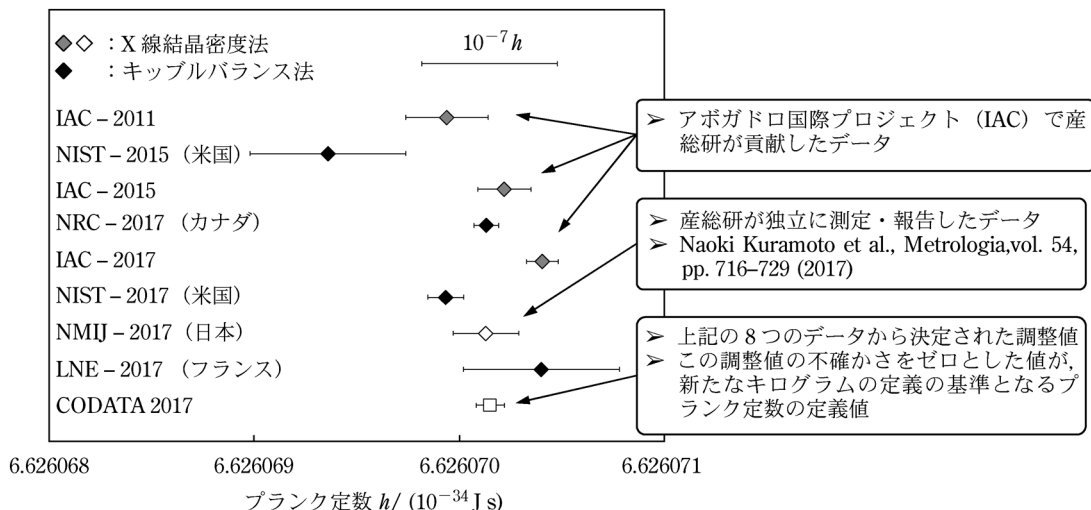


図5 新たなキログラムの定義の基準となるプランク定数の値の決定に採用された測定値

づき次のプランク定数 h の調整値 (CODATA 2017) を報告した²⁷⁾。

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

括弧内の数値は最後の二桁の不確かさを表す。CODATA 2017 の精度は 1.0×10^{-8} であり、この精度は、1 kg に換算すると 10 μg である。2018 年 11 月 13 日～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した値を定義値とする次の新たな定義への移行が審議された。

「キログラムは、プランク定数を $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ 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。これをうけて、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。これによって、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。

6・2 新たなモルの定義

キログラムの定義改定と同時に、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る。

「1 モルには厳密に $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ 個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。」

アボガドロ定数の定義値はキログラムの新たな定義中のプランク定数の値から式(3)を用い導出されたものである。この改定によって、モルの定義はキログラム原器および ^{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る。

7 定義改定の影響

7・1 質量の値の連続性

現行の定義の下では、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持ち込まれ、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る。日本では、日本国キログラム原器を基準として他の分銅の質量が測定され、世界的な整合性が確保された質量標準が日本国内へ供給されている。

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。

7・2 プランク定数を基準とするキログラムの実現

我が国では、 ^{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キログラムを実現する予定である²⁸⁾。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。

$$m = \frac{2hR_{\infty}}{c\alpha^2} \frac{M(\text{Si})}{M(\text{e})} \frac{8V_{\text{core}}}{a^3} + m_{\text{SL}} \dots\dots\dots(4)$$

この式は、式(2)と式(3)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。5章で紹介した ^{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 $M(\text{Si})$ の測定結果をプランク定数 h の定義値と組み合わせることで、球体質量 m を決定することで、キログラムを実現できる²⁸⁾。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様々な分銅の質量が測定され、質量標準として日本国内に供給される。

^{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い現状と比べると非常に大きな進展である。

定義改定により大きな恩恵をうけると考えられているのが、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である。現行の定義の下では、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る。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な状態にある。定義改定後は、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、微小な質量をプランク定数に結びつける新たな測定原理の開発が活性化されることが期待されている。

7・3 モルの将来

3章で記述したように、様々な原子の質量を表す場合、 ^{12}C 原子の質量を 12 としたときの相対質量である原子量が用いられる。原子量は今回のモルの定義改定の影響を受けず、その値は変動しない。例えば ^{12}C の原子量は定義改定後も 12 である。ただし、式(1)中の、原子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る。現行の定義の下では、 M_u は厳密に1 g/molと定義され、 ^{12}C のモル質量 $M(^{12}\text{C})$ は厳密に12 g/molである。つまり M_u および $M(^{12}\text{C})$ の不確かさはゼロである。一方、式(3)から、定義改定後の M_u は次式で与えられる。

$$M_u = \frac{2N_A h}{c} \frac{R_\infty}{\alpha^2 A_r(e)} \dots\dots\dots (5)$$

定義の改定後、 h および N_A は、 c と同様に不確かさのない定義値となる。一方、微細構造定数 α 、リュードベリ定数 R_∞ 、電子の原子量 $A_r(e)$ は実験的に測定される量である。従って、それらの測定値に応じて M_u も変化する。定義改定直後は、その値は依然として1 g/molであるが、不確かさを持つ。このため、 $M(^{12}\text{C})$ も厳密に12 g/molではなく、不確かさを持つ。長年にわたって厳密に12 g/molとされてきた $M(^{12}\text{C})$ や厳密に1 g/molとされてきた M_u が不確かさを持つ測定量となることには注意が必要である。ただし、その相対不確かさは 4.5×10^{-10} であり、ほとんどの計測において無視できる²⁹⁾。

8 おわりに

19世紀末に当時の最高の科学技術を結集して製作された国際キログラム原器もようやくその役割を終える歴史的な瞬間が近づいてきた。また、2019年5月20日には電流の単位「アンペア」、温度の単位「ケルビン」の定義もそれぞれ普遍的な物理定数である電気素量、ボルツマン定数による定義に移行する。この歴史的な四つの基本単位の定義の同時改定は、SIの普遍性と再現性を大幅に高めると考えられている。

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、新たな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。例えば、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。一般的な化学計測では、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質量測定が可能となる。このため今回の定義改定は、多くの分野での新たな科学技術開発のトリガーとなることが期待されている。(2019年1月10日受付)

文 献

- 1) 日置昭治：ぶんせき，**2011**，66.
- 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4月7日確認).
- 3) 倉本直樹：化学と工業，**72**，32 (2019).
- 4) 倉本直樹，東 康史，藤井賢一：ぶんせき，**2015**，229.

- 5) 横山祐之：化学の領域，**13**，45 (1959).
- 6) 斎藤信房：化学教育，**15**，376 (1967).
- 7) 倉本直樹：産業技術総合研究所プレスリリース
https://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2012/nr20120227/nr20120227.html (2019年4月7日確認).
- 8) I. Robinson and S. Schlamminger：*Metrologia*，**53**，A46 (2016).
- 9) 倉本直樹，藤井賢一：光アライアンス，**50**，45 (2006).
- 10) 倉本直樹，藤井賢一：光学，**39**，141 (2010).
- 11) T. Narukawa, A. Hioki, N. Kuramoto, K. Fujii：*Metrologia*，**51**，161 (2014).
- 12) 野々瀬菜穂子：ぶんせき，**2014**，663.
- 13) 中山 貫，藤井賢一：応用物理，**62**，245 (1993).
- 14) K. Fujii, A. Waseda, N. Kuramoto, S. Mizushima, M. Tanaka, S. Valkiers, P. Taylor, R. Kessel, P. De Bièvre：*IEEE Trans. Instrum. Meas.*，**52**，646 (2003).
- 15) B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl, P. Becker, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, P. Fuchs, K. Fujii, H. Fujimoto, E. Kessler, M. Krumrey, U. Kuetsgens, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, S. Mizushima, A. Nicolaus, A. Picard, A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, S. Valkiers, A. Waseda, S. Zakel：*Metrologia*，**48**，S1 (2011).
- 16) N. Kuramoto, K. Fujii, K. Yamazawa：*Metrologia*，**48**，S83 (2011).
- 17) N. Kuramoto, Y. Azuma, H. Inaba, K. Fujii：*Metrologia*，**54**，193 (2017).
- 18) S. Mizushima, N. Kuramoto, L. Zhang, K. Fujii：*IEEE Trans. Instrum. Meas.*，**66**，1275 (2017).
- 19) I. Busch, Y. Azuma, H. Bettin, L. Cibik, P. Fuchs, K. Fujii, M. Krumrey, U. Kuetsgens, N. Kuramoto, S. Mizushima：*Metrologia*，**48**，S62 (2011).
- 20) G. Bartl, P. Becker, B. Beckhoff, H. Bettin, E. Beyer, M. Borys, I. Busch, L. Cibik, G. D'Agostino, E. Darlatt, M. Di Luzio, K. Fujii, H. Fujimoto, K. Fujita, M. Kolbe, M. Krumrey, N. Kuramoto, E. Massa, M. Mecke, S. Mizushima, M. Müller, T. Narukawa, A. Nicolaus, A. Pramann, D. Rauch, O. Rienitz, C. P. Sasso, A. Stopic, R. Stosch, A. Waseda, S. Wundrack, L. Zhang, X. W. Zhang：*Metrologia*，**54**，693 (2017).
- 21) N. Kuramoto, S. Mizushima, L. Zhang, K. Fujita, Y. Azuma, A. Kurokawa, S. Okubo, H. Inaba, K. Fujii：*Metrologia*，**54**，716 (2017).
- 22) Y. Azuma, P. Barat, G. Bartl, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, L. Cibik, G. D'Agostino, K. Fujii, H. Fujimoto, A. Hioki, M. Krumrey, U. Kuetsgens, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, R. Meeß, S. Mizushima, T. Narukawa, A. Nicolaus, A. Pramann, S. A. Rabb, O. Rienitz, C. Sasso, M. Stock, R. D. Vocke Jr, A. Waseda, S. Wundrack, S. Zakel：*Metrologia*，**52**，360 (2015).
- 23) S. Schlamminger, R. L. Stiner, D. Haddad, D. B. Newell, F. Seifert, L. S. Chao, R. Liu, E. R. Williams, J. R. Pratt：*Metrologia*，**52**，L5 (2015).
- 24) D. Haddad, F. Seifert, L. S. Chao, A. Possolo, D. B. Newell, J. R. Pratt, C. J. Williams, S. Schlamminger：*Metrologia*，**54**，633 (2017).
- 25) B. Wood, C. A. Sanchez, R. G. Green, J. O. Liard：*Metrologia*，**54**，399 (2017).
- 26) M. Thomas, D. Ziane, P. Pinot, R. Karcher, A. Imanaliev, F. Pereira Dos Santos, S. Merlet, F. Piquemal, P. Espel：*Metrologia*，**54**，468 (2017).
- 27) D. B. Newell, F. Cabiati, J. Fischer, K. Fujii, S. G.

- Karshenboim, H. S. Margolis, E. de Mirandés, P. J. Mohr, F. Nez, K. Pachucki, T. J. Quinn, B. N. Taylor, M. Wang, B. M. Wood, Z. Zhang : *Metrologia*, **55**, L13 (2018).
- 28) N. Kuramoto, L. Zhang, S. Mizushima, K. Fujita, Y. Azuma, A. Kurokawa, K. Fujii : *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **66**, 1267 (2017).
- 29) M. Stock, R. Davis, E. de Mirandés, M. Milton : The revision of the SI—the results of three decades of progress in metrology, *Metrologia*, **56**, 022001 (2019).



倉本直樹 (Naoki KURAMOTO)

国立研究開発法人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(〒305-8563 茨城県つくば市梅園1-1-1)。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。博士(理学)。《現在の研究テーマ》シリコン単結晶球体体積測定用レーザー干渉計の開発・プランク定数に基づく質量の国家標準の構築。《趣味》スポーツジムでの運動。
E-mail : n.kuramoto@aist.go.jp



新刊紹介

【図解】研究開発テーマの価値評価
—イノベーション時代の費用対効果の実践的な考え方—

出川 通・大澤良隆 著

日本企業の多くは、社内に「研究開発部門」を有することで、将来の売上げに貢献できる新製品の創出を行っている。研究開発へは投資額の着実な回収管理が求められており、研究者はテーマの価値を客観的に評価して開発の実施や中止などを適時判断しなくてはならない。本書では、研究開発テーマを「目的」(ロー、ミドル、ハイリスク)と「ステージ」(研究、開発、事業化)の九つに区別し、それぞれに適した評価法を理解して

選択できるように、序章と基礎編2章、応用編4章、実践編3章、総括編1章の構成で解説している。序章ではその区分けの考え方と分類、基礎編では費用対効果の考え方、MOT (Management of Technology) の方法論、価値評価の進め方について詳細に教えてくれる。さらに、応用編ではテーマの進行度に即した評価法や事業化評価でベースとなるDCF (Discounted cash flow) 法に加え、不確実性が高い中での評価法としてモンテカルロ DCF 法やリアルオプション法の説明があり、実践編ではより新規性の高い革新的なテーマに対応できる三つの評価法とその活用事例を取り上げている。総括編では各々の評価法の特徴が図表などでよく整理されているため、実践する上で大いに活用できる。各章末にはQ&Aがあり、研究開発の投資に興味のある方や複数のテーマの実施判断を担当される方にとって有用な入門書となるであろう。

(ISBN 978-4-86565-133-1・A5判・217ページ・1,800円+税・2018年刊・言視舎)