

## キログラムの定義をめぐる最近の動き

産業技術総合研究所 計量標準総合センター 藤井 賢一

### キログラムの由来

私たちは時間、長さ、質量、温度など様々な物理量を測ることによって自然現象を理解し、科学技術を発展させてきました。物理量を測るときの基準のことを単位と呼びます。物理量は一般に[数値]×[単位]で表されるので、世界共通の単位を用いれば、たとえ言語が異なっても物理量の大きさをお互いに正しく理解することができるのです。人間は古くから様々な単位を用いてきましたが、現在、私たちは世界共通の単位として国際単位系（SI）を用いています。SIには基本単位と組立単位があり、キログラム（kg）、メートル（m）、秒（s）、アンペア（A）、ケルビン（K）、モル（mol）、カンデラ（cd）からなる七つの基本単位と、それらの組み合わせからなる組立単位を用いれば、全ての物理量を表すことができます。特に基本単位はSIの根幹をなすものなので、その定義はメートル条約にもとづいて組織された国際度量衡総会（CGPM）の決議によって決められています。

現在用いられているキログラムやメートルなどの概念が明確になってきたのはフランス革命の頃に遡ります。このとき、メートルは北極から赤道までの子午線の長さの1千万分の1として定義されました。この定義にもとづいて作製されたのが確定メートル原器です。長さの単位が定義できたので、物体の形状を測れば体積の単位を実現することができます。当時、4℃における純水の最大密度は一定であると考えられていたので、キログラムは最大密度にある純水1リットルの質量として定義されま



図1. 1799年にフランスのメートル法で採用された確定キログラム原器(左)と確定キログラム原器(右)

した。この研究を行ったのが近代化学の父ラヴォアジエです。しかし、質量を測る度に水の体積を測るのは大変なので、利便性の観点から分銅の質量に置き換えられました。このようにして作製された純粋な白金製の確定メートル原器と確定キログラム原器（図1参照）を基準として1799年にフランスでメートル法が公布されました。

19世紀に入るとメートル法の優位性は海外でも認められるようになり、1875年に欧州を中心とする17カ国によってメートル条約が締結されました。このとき原器の保管と単位実現のための国際機関として設立されたのがパリ郊外にある国際度量衡局（BIPM）です。純粋な白金は軟らかく磨耗に弱いのでその硬度を高めるために、イリジウムを10%混ぜた白金イリジウム合金製の国際メートル原器と国際キログラム原器（図2）が新たに作製され、1889年に開催された第1回国際度量衡総会におい

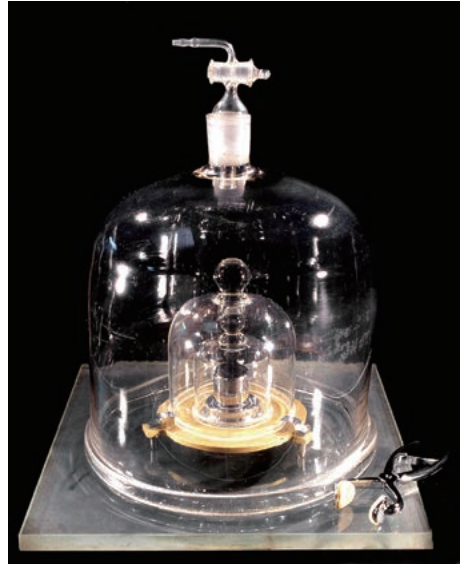


図2. 1889年に質量の単位の定義として採用された国際キログラム原器

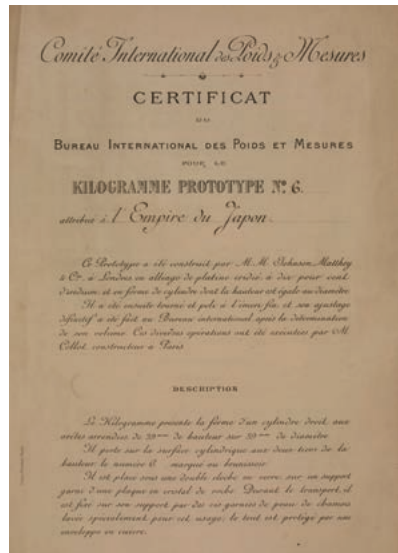


図3. 1889年に受領した日本国キログラム原器No.6(左)とその校正証明書(右)

て、これらの国際原器がメートルとキログラムの単位として承認されました。このとき日本は確定原器にもとづいて値付けされた日本国メートル原器と日本国キログラム原器を受領しています（図3参照）。

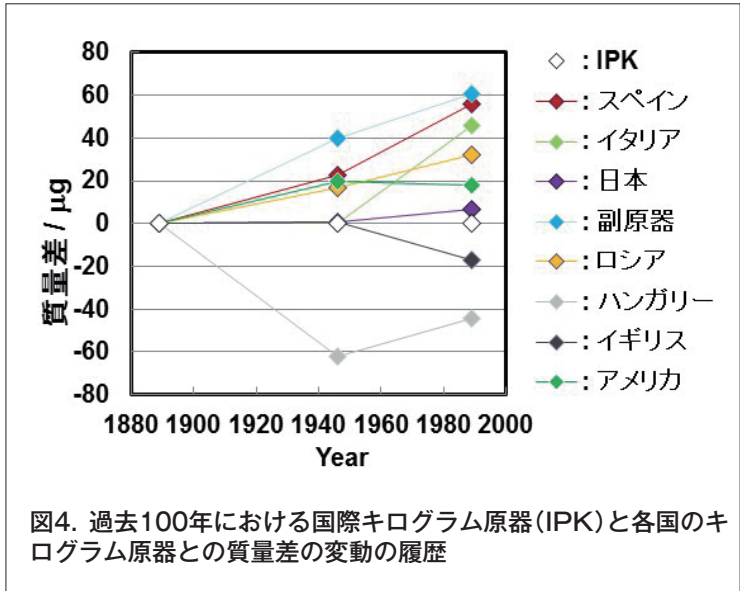


図4. 過去100年における国際キログラム原器 (IPK) と各国のキログラム原器との質量差の変動の履歴

20世紀に入ると科学技術の進歩によってメートル原器は不要となり、1983年には光の速さを基準とする定義に置き換えられました。しかし、キログラムだけは今でも原器という人工物によって定義される唯一の基本単位として残っています。このため世界の質量の基準は国際キログラム原器との比較によって維持されています。しかし、表面の汚染などによる影響のため、原器の質量の安定性は50マイクログラム程度が限界であると推定されています（図4参照）。これは1億分の5 ( $5 \times 10^{-8}$ ) の変動幅に相当します。このため、質量の単位についても新しい基準を開発することが検討されるようになりました。

## キログラムの定義についての新しい考え方

単位の定義には一定普遍の基準を用いなければなりません。18世紀末のフランス人がメートルとキログラムの基準に用いたのは地球の大きさと水の密度でした。21世紀の現代において最も一定普遍であると考えられているのは基礎物理定数です。その多くは20世紀に発見され、理論と実験技術の発展とともに高精度化してきました。

現在、キログラムの定義に用いることができると考えられている基礎物理定数はアボガドロ定数とプランク定数です。アボガドロ定数による定義は原子の数から質量を決めるという比較的古くからある考え方です。一方、プランク定数による定義は相対性理論と光子量子仮説によって光子（電磁波）のエネルギーと質量とを関連づけるという比較的新しい考え方にもとづくものです。これらの定数を用いたキログラムの新しい定義方法を表1に示しました。

表1. キログラムの新しい定義方法

基礎物理定数	記号	キログラムの新しい定義についての考え方
アボガドロ定数	$N_A$	キログラムは $5.018\cdots \times 10^{25}$ 個の炭素原子 $^{12}\text{C}$ の質量に等しい。
プランク定数	$h$	キログラムは周波数が $[(299\ 792\ 458)^2 / (6.626\cdots \times 10^{-34})]$ ヘルツの光子のエネルギーと等価な質量である。

量子力学などを用いると、アボガドロ定数とプランク定数との間には厳密な関係式が成立します。このため、何れの定数を用いてもキログラムを定義することができます。一方、電圧や電気抵抗などの電気量の基準を決めるためには、プランク定数を定義しておいたほうが便利です。このため、キログラムの定義にはプランク定数を採用することが検討されていますが、原子の数を正確に測る技術を使ってもプランク定数からキログラムを実現することが可能です。

### アボガドロ定数を用いたキログラムの実現方法

アボガドロ定数の測定にはシリコンの単結晶が用いられます。これは大寸法、高純度、無欠陥の単結晶が比較的容易に得られるからです。シリコン単結晶の最小単位は一辺の長さが $a$ の立方体です（図5参照）。 $a$ は格子定数と呼ばれます。この立方体には平均で8つの原子が含まれ、その体積は $a^3$ です。結晶の原子レベルの密度が巨視的な密度 $\rho$ に等しいと仮定すると、シリコン原子1個あたりの質量 $m$ は $\rho a^3 / 8$ に等しくなります。したがって、シリコンのモル質量（1モルあたりの質量）を $M$ とするとアボガドロ定数は $N_A = 8M / (\rho a^3)$ として求められます。自然界のシリコンには安定同位体 $^{28}\text{Si}$ 、 $^{29}\text{Si}$ 、 $^{30}\text{Si}$ がそれぞれ約92%、5%、3%の割合で存在しますが、各同位体のモル質量は十分に高い精度で既に求められているので、同位体の存在比を質量分析計で測定すれば、シリコンのモル質量 $M$ を求めることができます。

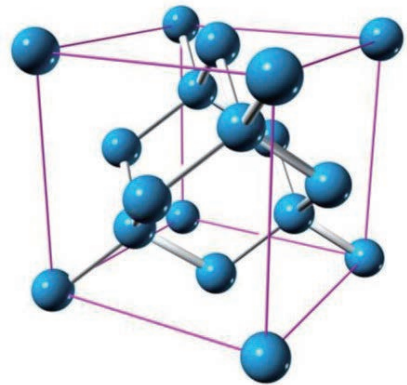


図5. シリコンの結晶構造

しかし、自然界に存在するシリコンを用いると、モル質量を1千万分の2( $2 \times 10^{-7}$ )よりもよい精度で測定することができません。このことが原因でキログラム原器の質量安定性を超えることができませんでした。

### アボガドロ国際プロジェクトによるシリコンの同位体濃縮

この問題を解決するために、世界の幾つかの研究機関が協力し、質量数28

のシリコンの同位体 ( $^{28}\text{Si}$ ) を濃縮してアボガドロ定数の測定精度を向上させるためのプロジェクトが2004年から始まりました。このプロジェクトに参加しているのは産業技術総合研究所の計量標準総合センター (NMIJ)、ドイツ物理工学研究所 (PTB)、イタリア計量研究所 (INRIM)、国際度量衡局 (BIPM) などです。それまでのアボガドロ定数は自然界のシリコンを原料とする単結晶から求めていたので、モル質量の測定精度に限界がありました。アボガドロ国際プロジェクトでは $^{28}\text{Si}$ 同位体を99.99%まで濃縮し、モル質量の測定精度を従来よりも1桁以上高い10億分の5 ( $5 \times 10^{-9}$ ) まで向上させることに成功しました。遠心分離技術による同位体濃縮、化学精製、単結晶化などを経て2007年に図6に示すような5kgの $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮単結晶が完成しました。



図6.  $^{28}\text{Si}$ を99.99%まで濃縮して引き上げられた5kgの単結晶

この結晶から直径94mm、真球度7nm、質量約1kgの球体を研磨し、NMIJ、PTB、NMI、BIPMにおいてその直径や体積、質量、格子定数、モル質量などの測定を行いました。特にNMIJではシリコン球体の直径を1原子間距離(約0.5ナノメートル)の精度で測定するレーザー干渉計(図7)などを開発し、結晶密度の測定精度の

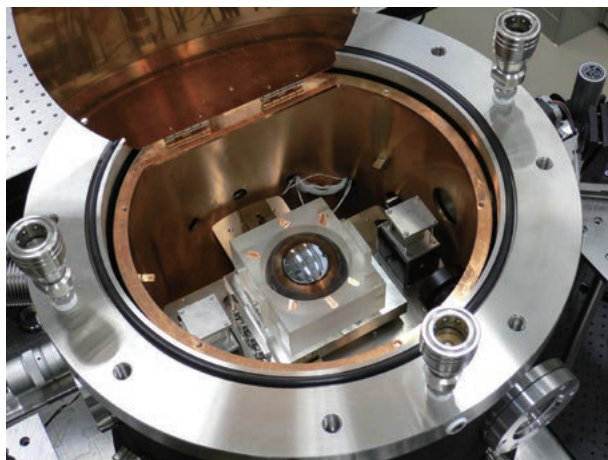


図7. 1kgの $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮単結晶球体の直径をサブナノメートルの精度で測るレーザー干渉計

飛躍的向上に貢献しました。格子定数やモル質量の測定にも多くの改良を加え、最近ではアボガドロ定数を1億分の1.8( $1.8 \times 10^{-8}$ )の精度で測定することが可能になってきました。これは、アボガドロ定数の測定精度がようやくキログラム原器の質量安定性を超えるようになってきたことを表します。

## 測定結果の比較

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成立するので、他の異なる原理で測定されたプランク定数の値と、アボガドロ国際プロジェクトで得られた値とを比較することができます。図8に2015年までに報告されたプランク定数の主な測定結果を示しました。この図においてNIST（米）2015は米国標準技術研究所（NIST）が2015年にワットバランス法という電気的な方法で測ったプランク定数の値を表します。NRC（カナダ）2015はカナダ国立研究機構が2015年に同じくワットバランス法で測った値を表します。IAC（2011 and 2015）はアボガドロ国際プロジェクトで2011年と2015年に測った値を平均し、それをプランク定数に換算したものです。この図が示すように、アボガドロ国際プロジェクトとカナダのデータは、測定原理が全く違うのにもかかわらず、非常に良く一致しています。これは、両者のデータの信頼性が極めて高いことを表します。NISTのワットバランス法によるデータの不確かさはやや大きいですが、これら三つのデータは統計的には整合しているので、

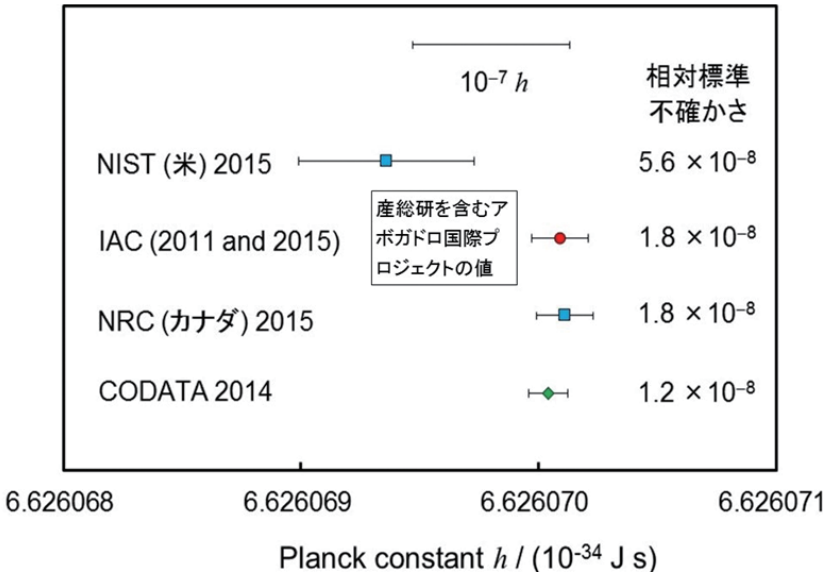


図8. プランク定数の主な測定結果の比較

# REDEFINITION OF THE KILOGRAM

これら三つのデータの重み付け平均から、プランク定数の推奨値が科学技術データ委員会 (CODATA) によって以下のように決められました。

$$h=6.626\ 070\ 040(81) \times 10^{-34} \text{ Js}$$

ここで、括弧内の数値は最後の桁の標準不確かさを表します。その相対標準不確かさは $1.2 \times 10^{-8}$  (1億分の1.2) です。これはプランク定数やアボガドロ定数の不確かさがIPKの質量安定性 (1億分の5) よりも十分に小さくなってきたことを表します。

このような研究成果が得られたことによって、2018年に開催される予定の第26回国際度量衡総会において、キログラムの定義を130年ぶりに改定するかどうかが審議されることになりました。現在、キログラム原器の質量安定性を超える精度でプランク定数やアボガドロ定数を測ることができるのは日、独、米、カナダの四つの研究機関に限られています。将来は欧州やアジアなど他の研究機関からも高精度なデータが得られるようになるでしょう。

## キログラムの新しい定義がもたらすもの

キログラムの基準が原器から基礎物理定数に移行すると、BIPMに保管されている国際キログラム原器に頼ることなく、技術さえあれば誰もがプランク定数を基準として質量を測ることができるようになります。これは1983年に長さの定義が光の速さに移行したことによって、光の周波数さえ測ることができれば誰もが長さの基準を持つことができるようになったのと同じです。基礎物理定数という物理法則に現れる普遍的な定数を質量の基準にすることによって、将来はより優れた測定原理が誕生することになるでしょう。

現在検討されている定義改定後の状況を図9に示しました。今は国際キログラム原器 (IPK) が

世界で唯一の質量の基準なので、これを基準として30年~40年の周期でメートル条約加盟各国のキログラム原器の質量がBIPMで校正されてきました。定義改定後はプランク定数を基準としてNMIJなどでキログラムを実現し、これにもとづ

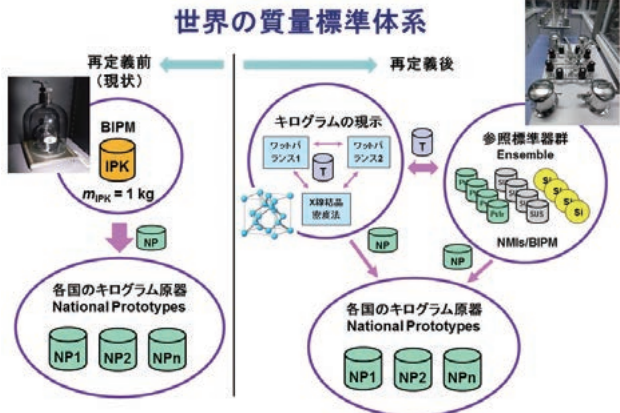


図9. キログラムの定義改定前後の状況

いて世界の質量の基準を維持することが検討されています。BIPMでは一つの分銅に頼るのではなく、複数の分銅群 (ensemble) を準備し、それらの平均質量によって各国のキログラム原器の質量を値付けすることが検討されています。こうすることによって、分銅の質量変動によるリスクを低減することができます。また、NMIJの場合であれば、 $^{28}\text{Si}$  同位体濃縮結晶球体を用いて実現したキログラムを基準として、他国のキログラム原器の質量を値付けすることも可能になります。このように、キログラムを実現する技術さえあれば、BIPM以外の研究機関でも質量の基準をもつことができるようになるというのが、定義改定の大きな利点の一つです。

また、現在は1kgという特定の質量によって単位が定義されているため、1kgから遠ざかるにつれて分銅の質量の不確かさは増大します。このため、実用化されている最小分銅の質量は1mgです。この最小分銅を用いて校正される天びんによる質量測定の限界は0.1マイクログラム (1万分の1mg) までです。しかし、定義が変われば、例えばプランク定数を基準とする電気的な方法によって、ナノグラム (千分の1マイクログラム) やピコグラム (千分の1ナノグラム) の領域の微小質量を測ることが可能になります。NMIJではこのような微小質量計測技術の開発にも既に取り組んでいます。

新薬の開発段階では極めて微量で高価な物質を扱うことが多いので、より少ない量で薬の効果を試すことができれば開発コストを抑え、開発期間を短縮することができます。新たに合成された物質は毒性をもつこともあるので、より少ない試料で評価できればリスクを低減することもできます。インクジェット技術ではインク一粒 (約1ナノグラム) の質量を直接測定することができるようになるので、その量を制御し、均一化や微細化に役立てることが可能になります。このように微小質量計測技術はナノテクノロジーなどに広く応用することが可能です。質量の単位の基準がキログラム原器からプランク定数に移行することによって、新しい原理にもとづくより多くの革新的な計測技術が誕生することになるでしょう。

## 著者紹介 藤井 賢一(ふじい けんいち)



1984年、工業技術院計量研究所に入所。1994年～1996年、米国標準技術研究所(NIST)の客員研究員としてプランク定数の測定に関する研究に従事。2001年、「アボガドロ定数の精密計測に関する研究」により文部科学大臣賞受賞。2004年からはアボガドロ国際プロジェクトのコーディネーターとして同位体濃縮シリコン結晶によるアボガドロ定数の高精度化に関する研究に着手。2011年、内閣官房知的財産戦略推進事務局の政策参与として国家戦略の立案にも貢献。現在、産総研の計量標準総合センター(NMIJ)工学計測標準研究部門の首席研究員としてキログラムの定義改定のための研究を行っています。科学技術データ委員会(CODATA)や国際度量衡委員会(CIPM)単位諮問委員会(CCU)などの国際委員会の委員。博士(工学)。