

プランク定数の決定 130年ぶりのキログラムの定義改定へ

SATテクノロジー・ショーケース2019

■ はじめに

質量の単位であるキログラムは1889年にメートル条約にもとづいて開催された第1回国際度量衡総会(CGPM)で定義されました。このとき白金イリジウム合金製の国際キログラム原器(図1)が質量の単位として承認され、この定義が現在に至るまで用いられてきました。しかし、人工物であるため、表面汚染による質量変動が避けられません。当時、同じ材質でつくられた幾つかの副原器との100年間にわたる質量比較などの結果から、原器の質量の安定性は50 μg (1億分の5)程度が限界であると考えられています。このため、メートルの定義が1983年に光の速さという基礎物理定数に置き換えられたのと同様に、キログラムについてもアボガドロ定数やプランク定数などの基礎物理定数によって再定義することが検討されてきました。

産業技術総合研究所(以下、産総研と呼ぶ。)の計量標準総合センター(NMIJ)では、海外の研究機関と協力しながら、シリコン結晶に含まれる原子の数を正確に数えることによって、キログラムの定義を改定するための研究を行ってきました。この研究成果にもとづいて、2019年5月20日の世界計量記念日から、不確かさのない定数として定義されたプランク定数 h 、電荷素量 e 、ボルツマン定数 k 、アボガドロ定数 N_A を用いて、キログラム(kg)、アンペア(A)、ケルビン(K)、モル(mol)の定義がそれぞれ改定されることになりました。キログラムについては130年ぶりにその定義が改定されることとなります。

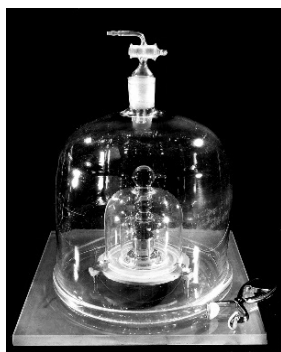


図1 1889年に質量の単位の定義として承認された国際キログラム原器(直径、高さともに39 mmの直円筒型の白金イリジウム合金製)

■ キログラムの新しい定義

キログラムの定義を改定するための方法としては、原子の数から質量を決めるアボガドロ定数 N_A にもとづくものと、相対論と量子力学から光子のエネルギーと質量とを関連づけるプランク定数 h にもとづくものが検討されてきました。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が、ジョセフソン定数 $K_J = 2e/h$ とフォークリッツィング定数 $R_K = h/e^2$ にもとづく高精度な電気標準が既に実用化されているので、プランク定数 h によってキログラムを定義しておいた方が電気標準にとっても便利です。このため、プランク定数 h にもとづいてキログラムが再定義されることになりましたが、 N_A と h の間には以下に示す厳密な関係式が成立します。

$$N_A = cM_e \alpha^2 / (2R_K h) \quad (1)$$

ここで、 M_e は電子のモル質量、 α は微細構造定数、 R_K はリュドベリ定数です。上式右辺において h を除く基礎物理定数群の相対標準不確かさは 4.5×10^{-10} です。これは N_A や h の測定の不確かさよりも十分に小さいので、式(1)は N_A を高精度に測る計測技術を使っても、 h を基準としてキログラムの新しい定義を実現することが可能であることを表します。

■ アボガドロ定数の測定方法

産総研の計量標準総合センター(NMIJ)、ドイツ物理工学会研究所(PTB)、イタリア計量研究所(INRIM)などが中心となり、5 kgの ^{28}Si 同位体濃縮単結晶を作製して N_A を高精度化するためのアボガドロ国際プロジェクトを2004年から開始しました。このシリコン単結晶の格子定数 a 、密度 ρ 、モル質量 M の精密計測などから以下の式によってアボガドロ定数 N_A を導くことができます。

$$N_A = 8M/(a^3) \quad (2)$$

X線によって格子定数を測るので、この測定方法のことをX線結晶密度法と呼びます。自然界のシリコンの同位体 ^{28}Si 、 ^{29}Si 、 ^{30}Si の存在比はそれぞれ約92%、5%、3%なので、そのモル質量を高精度に測ることは困難です。アボガドロ国際プロジェクトでは ^{28}Si の同位体存在比を99.99%まで高め、モル質量 M の測定精度の向上を図りました。

代表発表者 藤井 賢一(ふじい けんいち)
所 属 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
計量標準総合センター
問合せ先 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第3
TEL: 029-861-4316 FAX: 029-861-4399
E-mail: fujii.kenichi@aist.go.jp

■キーワード: (1)プランク定数
(2)アボガドロ定数
(3)キログラム

■共同研究者: 倉本直樹、水島茂喜、張ルウルウ、成川知弘、(国立研究開発法人 産業技術総合研究所 計量標準総合センター)

■ プランク定数の決定

NMIJではシリコン単結晶の密度 ρ の測定精度を極限まで向上させるために、 ^{28}Si 同位体濃縮単結晶を研磨して得られた直径約94 mm、質量約1 kgのシリコン単結晶球体の直径をサブナノメートル(0.6 nm)の精度で測るレーザ干渉計(図2)やシリコン単結晶球体の表面をX光電子分光法(XPS)で分析するための装置などを開発しました。また、ICP-MSを用いた同位体希釈分析法によるモル質量 M の高精度測定なども行いました。

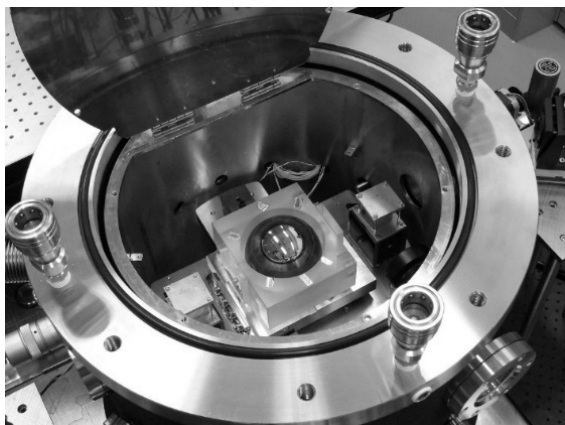


図2 シリコン単結晶球体の直径(約94 mm)をサブナノメートルの精度で測るレーザ干渉計

その結果、NMIJでは国際キログラム原器の質量安定性を超える 2.4×10^{-8} の相対標準不確かさ(1億分の2.4)で N_A を測ることに成功しました。この計測技術を用いると、プランク定数 h を基準として同位体濃縮シリコン単結晶球体の質量をほぼ同じ不確かさで測定し、キログラムの新しい定義を実現することができます。

X線結晶密度法とキップルバランス法(ワットバランス法)によるプランク定数 h の最新の測定値にもとづいて、科学技術データ委員会(CODATA)の基礎定数作業部会では、国際単位系(SI)の新しい定義で用いられる h 、 e 、 k 、 N_A の特別調整値を決定し、2017年10月に公表しました。図3にCODATAで採用されたプランク定数の測定値と特別調整の結果を示しました。

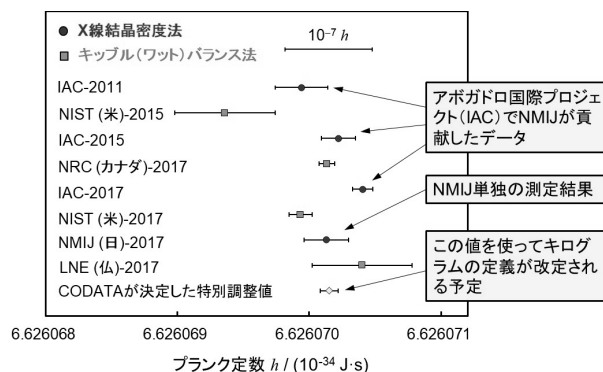


図3 CODATAで採用されたプランク定数の測定値と、これらの重み付け平均から求められた特別調整値

■ 新しい定義がもたらすもの

これまでのキログラムの定義では1 kgという特定の分銅の質量が基準になっていたので、分量技術によって値付けすることができる最小分銅の質量は1 mg程度でした。この分銅を用いて校正される電子天びんの不確かさは最も小さい場合でも0.1 μg です。これに対して、新しい定義では h を基準として電気的な方法で微小質量を直接的に測ることが可能になります(図4)。この新しい測定方法はプランク定数 h にトレーサブルなので、ナノグラムオーダーの微小質量を測ることができます。このような計測技術は新薬の開発、インクジェット技術、薄膜評価、分子間力の計測など、ナノテクノロジーの分野で広く応用できるものと期待されています。

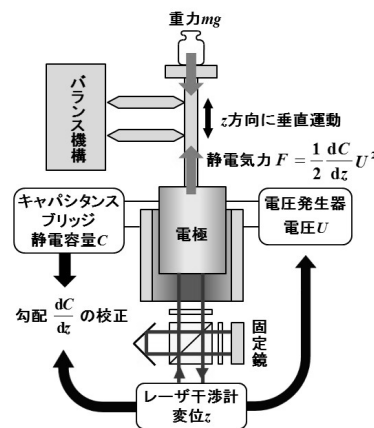


図4 電圧天びんによる微小質量測定