

# キログラムの定義改定に向けた質量標準の開発動向



藤井 賢一

産業技術総合研究所計量標準総合センター

質量の単位であるキログラム (kg) は、メートル条約に基づいて 1889 年に開催された第 1 回国際度量衡総会で定義された。このとき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がそれぞれ長さや質量の単位として承認されたが、長さは 1960 年に光の波長による定義へと移行し、国際メートル原器は不要となった。更に 1983 年に光速を不確かさのない定数として定義することによって、光周波数の測定から誰もが長さの単位を実現することができるようになった。

誰もが単位を実現することができるということは、特定の国や組織が所有する標準器への依存性から開放されるという点で、科学技術の進歩にとっては重要な要素である。しかし、キログラムだけは 1889 年以来、人工物によって定義される唯一の SI 基本単位として残り現在に至っている。

このため、質量を正しく測るためには国際キログラム原器への校正の連鎖が必要であるが、表面汚染の影響などにより、分銅の質量に頼る限りキログラムの安定性は  $50 \mu\text{g}$  (相対的に  $5 \times 10^{-8}$ ) 程度が限界であると考えられている。

このような経緯から、2011 年に開催された第 24 回国際度量衡総会ではプランク定数  $h$ 、電荷素量  $e$ 、ボルツマン定数  $k$ 、アボガドロ定数  $N_A$  を不確かさのない定数として定義し、キログラム、ケルビン、アンペア、モルの定義を将来、同時に改定することが決議された。これは、基礎物理定数を基準として SI 基本単位の定義を世界的な合意のもとで改定するという方針を示したものであり、歴史的にも極めて画期的である。

キログラムの定義を改定するためには、国際キログラム原器の質量の長期安定性を超える精度でプランク定数を測定することが必要である。従来はワットバランス法と呼ばれる電気的な方法だけがこの精度を超えることに成功していた。プランク定数はアボガドロ定数からも精度よく導くことができるので、従来は X 線結晶密度法と呼ばれる結晶を用いる方法でアボガドロ定数が測定されてきた。しかし、この測定には自然同位体比のシリコン結晶が用いられていたため、その同位体比の測定精度に限界があり、国際キログラム原器の質量安定性を超える精度でアボガドロ定数を測ることができなかった。

この問題を解決するために、 $^{28}\text{Si}$  を遠心分離法によって 99.99% まで濃縮し、その結晶の格子定数、密度、モル質量の測定からアボガドロ定数やプランク定数の精度を高めるための国際プロジェクトが実施され、ワットバランス法を超える  $3 \times 10^{-8}$  の精度での測定結果が得られるようになった。本稿では、この精度向上をもたらした幾つかの実験技術を中心に紹介し、キログラムの定義改定をめぐる研究開発の動向について解説する。

定義改定後は磁気定数や電気定数 (真空の透磁率や誘電率)、炭素  $^{12}\text{C}$  のモル質量など、これまでは不確かさのない定数として扱われてきたものが、微細構造定数などの値に応じて変化する測定量 (変数) になる。本稿では、国際単位系の定義改定が与える影響についても考察し、キログラムの定義改定がもたらす新たな可能性について述べる。

## —Keywords—

### ワットバランス法：

磁場中のコイルを速度  $v$  で移動させたときに生じる電圧  $U$  と、このコイルに同一磁場中で電流  $I$  を流した時に生じる力  $F$  とを測定すると、電気的仕事率  $UI$  と力学的仕事率  $Fv$  は厳密に等しくなる。この性質を利用し、重力加速度  $g$  のもとで質量  $m$  の物体にはたらく重力  $mg$  として力  $F$  を発生させれば、 $UI = mgv$  として電気的仕事率を求めることができる。更に  $UI$  はジョセフソン効果と量子ホール効果を通じてプランク定数  $h$  に関係づけられるので、結果的に力学量の測定から  $h$  を求めることができる。

### X 線結晶密度法：

結晶の格子定数  $a$ 、密度  $\rho$ 、モル質量  $M$  の測定からアボガドロ定数  $N_A$  を求める方法。シリコン結晶のような立方晶は単位胞 (単位格子) に 8 個の原子が含まれるので  $N_A = 8M/(\rho a^3)$  としてアボガドロ定数が求められる。