

プランク定数にもとづくキログラムの新しい定義



藤井 賢一

産業技術総合研究所計量標準総合センター

fujii.kenichi@aist.go.jp

信頼性の高い物理量の計測は科学技術発展の基礎である。その基準として用いられているのが国際単位系 (SI) における7つのSI基本単位の定義である。それらのなかで、質量の単位であるキログラムだけは、1889年にメートル条約にもとづいて開催された第1回国際度量衡総会において国際キログラム原器によって定義されて以来、原器による定義が使われ続けてきた。例えば、長さの単位であるメートルは、1960年に国際メートル原器から光の波長による定義へ、さらに1983年に光の速さにもとづき定義へと移行した。これによって、光周波数の測定から長さの単位を実現することが可能になった。秒も以前は地球の自転周期や公転周期によって定義されていたが、1967年からはセシウム原子時計によって実現されるマイクロ波の周波数 (約9.2 GHz) が秒の基準として用いられるようになり、さらに光周波数コムや光格子時計などによって光周波数領域 (約500 THz) における新たな秒の定義に関する研究も行われている。電圧と電気抵抗についても1990年からはそれぞれジョセフソン効果と量子ホール効果にもとづく計測が実用化され、再現性の高い電気量の計測が可能になった。

このように、科学技術の発展とともに多くの単位の定義は変遷を重ね、より普遍的で再現性の高い定義へと移行してきたが、キログラムだけは19世紀末に定義されて以来、人工物による定義が使われ続けてきた。しかし、表面汚染などの影響があるため、その安定性は50 μg (相対的に1億分の5) 程度が限界である。このため、物理定数によってキログラムを定義するための研究が行われるようになり、21世紀に入ってからようやく原器の安定性を超える精度でプランク定数 h を測定することが可能になった。

このような経緯から、2018年11月にメートル条約にもとづいて開催された第26回国際度量衡総会において、キログラ

ム、ケルビン、アンペア、モルの定義にそれぞれ不確かさのない定数として定義されたプランク定数 h 、電気素量 e 、ボルツマン定数 k 、アボガドロ定数 N_A を用いることが採択され、新しい定義が2019年5月20日の世界計量記念日から施行された。特にキログラムについては130年ぶりにその定義が改定され、歴史上初めて人工物に頼らない単位系が誕生した。これを可能にしたのがキップルバランス法と呼ばれる電氣的に h を測る方法と、X線結晶密度法と呼ばれる結晶中の原子の数を測ることによって N_A を求める方法である。基礎物理定数の関係式を用いれば h を N_A から高精度に導くことが可能であり、この2つの独立した測定原理から得られたプランク定数が高い精度で一致したことも、今回の定義改定を後押しした。

科学技術データ委員会 (CODATA) では、SI基本単位の定義改定のために2017年10月に h 、 e 、 k 、 N_A についての特別調整を実施し、2017年7月1日までに受理された論文に報告されているデータの重み付け平均からこれらの基礎物理定数を決定した。特にプランク定数の決定においては、半数である4つのデータに産業技術総合研究所の計量標準総合センター (NMIJ) が貢献した。欧米以外の研究機関がSIの定義において決定的な役割を果たすのは歴史的にも今回が最初である。

SIの新しい定義では、磁気定数 μ_0 や炭素 ^{12}C のモル質量 $M(^{12}\text{C})$ などのように、これまで不確かさをゼロの定数として扱われてきたものが不確かさをもつ変数に変わるものもあるが、多くの基礎物理定数の不確かさは小さくなる。SIの新しい定義では、 h の不確かさがゼロになるので、原子や素粒子などの質量の不確かさも大幅に小さくなる。これまでは測定することが困難だった微小質量などをトレーサブルに計測することも可能になる。

—Keywords—

キップルバランス法：

従来はワットバランス法とも呼ばれていた。磁場中のコイルに電流 I を流した時に生じる電磁力 F と、同一磁場中でこのコイルを速度 v で移動させたときに生じる起電力 (電圧) U を測ったときに、電氣的仕事率 UI と力学的仕事率 Fv が厳密に等しくなる性質を利用した測定方法である。このときに生じる電磁力 F を、重力加速度 g のもとで質量 m の物体にはたらく重力 mg と天びん (balance) を用いてつり合わせれば、電氣的仕事率を $UI = mgv$ として求めることができる。電氣的仕事率 UI についてはジョセフソン効果と量子ホール効果を用いれば、プランク定数 h に関係づけることができるので、質量、重力加速度、速度などの力学量の計測から h を求めることができる。SIの新しい定義のもとでは、逆に、電氣的仕事率などの測定から、 h を基準として物体の質量を求めるのに用いられる。

X線結晶密度法：

従来はアボガドロ定数を単結晶の格子定数 a 、密度 ρ 、モル質量 M などの測定から求めるために用いられてきた。シリコン単結晶のような立方晶には単位胞 (単位格子) に原子が平均で8個含まれるので、その微視的な密度 $8M/(N_A a^3)$ が巨視的な密度 ρ に等しいと仮定すれば、アボガドロ定数は $N_A = 8M/(\rho a^3)$ として求められる。シリコン単結晶の球体を用いれば、巨視的な密度 ρ はその質量と体積の測定から求めることができる。SIの新しい定義のもとでは、逆に h を基準として球体の質量を求めるのに用いられる。



キログラムの新しい定義を実現するために用いられる直径約94 mmの単結晶シリコン球体。

本記事はキログラムの定義改定に伴い、会誌編集委員会として依頼したものです。