

サイエンス・プラザ

## キログラムの再定義をめぐる最近の動き

産業技術総合研究所 計量標準研究部門  
物性統計科 流体標準研究室長

藤井 賢一

### 1. はじめに

質量 (mass) は国際キログラム原器 (International Prototype of the Kilogram) の質量を単位として表される物理量 (physical quantity) である。その単位の名称はキログラム (kilogram) であり、記号 kg で表される。周波数、長さ、電圧、抵抗といった物理量の単位の多くが恒久不変と考えられる自然現象あるいは物理法則を使って定義できるようになったのに対し、質量だけは依然として白金イリジウム合金製の分銅という人工物に頼る唯一の SI 基本単位として残ってしまった。この基本単位を、原子の質量や基礎物理定数などを基準とする新しい定義へと移行させることが 1970 年代から各国の計量標準機関で検討されるようになった。これらの研究成果のなかでも特に、X 線結晶密度法やワットバランス法などによるアボガドロ定数やプランク定数の測定精度が近年向上し、これらの基礎物理定数からキ

ログラムを再定義することが期待できるようになってきた。本資料ではアボガドロ定数とプランク定数の測定方法について概説し、現在提案されているキログラムの再定義方法について述べる。

### 2. 現行の定義

現行の国際単位系<sup>1)</sup> (SI: *Système International d'Unités*) において「キログラムは、質量の単位であって、それは国際キログラム原器の質量に等しい」と定義されている。この白金イリジウム合金製の分銅は、パリ郊外にある国際度量衡局 (BIPM: *Bureau International des Poids et Mesures*) に保管され、1889 年に開催された第 1 回国際度量衡総会 (CGPM: *Conférence Générale des Poids et Mesures*) において質量の単位として国際的に承認されて以来、100 年以上経過した現在でも当時の分銅が質量の単位として用いられている。国際キログラム原器を写真 1 に示した。各国のキログラム原器は、BIPM にある国際

### ◆ も く じ ◆

サイエンス・プラザ

キログラムの再定義をめぐる最近の動き …… 1

トピックス

アルツハイマー病を科学する …… 9

授業実践

魅力ある未知なる生物「ウミホタル」が引き出してくれたもの …… 17

高校生へ私が選んだ 1 冊の本

地球は火山がつくった …… 19



写真1 国際度量衡局 (BIPM) が保管する国際キログラム原器 (写真提供: BIPM)。

キログラム原器との定期的な比較によって校正され、これに基づいて各国の計量標準機関が質量標準の維持・管理を行っている。

キログラムという単位自体は元来、蒸留水1リットルに等しい質量として決められたので、自然の物性に準拠したものではあるが、再現性と利便性の観点から、合金の質量に置き換えられた。このため、現在の質量の単位の再現性は国際キログラム原器の質量の安定性に依存していると言ってよい。しかし、人工物である国際キログラム原器の質量は、表面吸着の影響などにより徐々に増加するので、その質量をできる限り一定に保つために、表面を定期的に洗浄する方法が用いられている。1980年代に行われた各国のキログラム原器の第3回校正<sup>2)</sup>の際に得られた知見によれば、42年ぶりにBIPMで洗浄された国際キログラム原器の質量は約 $60\mu\text{g}$ 減少した。これは相対量で約 $6 \times 10^{-8}$ の変動幅に相当する。このため、原子の質量や基礎物理定数などの普遍的な定数を基準として、約 $10^{-8}$ の相対合成標準不確かさ<sup>3, 4)</sup>(以下、単に不確かさとよぶ)で質量を再現する

ことができれば、現行のSI基本単位の定義を変更することが可能であると考えられている。

### 3. キログラムの再定義方法

現在、多くの標準は周波数で決まる量子効果によって実現されている。例えば、電圧(単位の名称はボルト、記号はV)は、交流ジョセフソン効果から $U_j(n) = nf/K_j$ として求められる。ここで $n$ は量子化の次数を表す整数、 $f$ はジョセフソン素子に照射するマイクロ波の周波数、 $K_j = 2e/h$ はジョセフソン定数であり、 $e$ および $h$ はそれぞれ電気素量およびプランク定数である。従って、マイクロ波の周波数 $f$ から電圧 $U_j(n)$ を決めることができる。

時間の単位(名称は秒、記号はs)は、多くの計測標準のなかでも最も不確かさが小さい。セシウムの原子泉(atomic fountain)によって決められるマイクロ波の周波数の不確かさは $2 \times 10^{-15}$ に達している。したがって、単位の基準を周波数に結び付けて不確かさを減少させることが多くの研究で試みられてきた。

現在、質量の単位を物理標準に置き換えるための方法としては、2つの異なる方式<sup>5, 6)</sup>が最も有力であると考えられている。第1の方式は炭素 $^{12}\text{C}$ の単原子あたりの質量を基準として、シリコン単結晶の密度、モル質量、格子定数の測定からアボガドロ定数を決めるX線結晶密度(XRCD: X-ray crystal density)法であり、第2の方式はプランク定数を測定するワットバランス(watt balance)法である。これらの測定を周波数標準へと精度よく結びつけることができるかどうかキログラム再定義の鍵を握っている。

#### 3.1 アボガドロ定数による再定義方法

アボガドロ定数は、マクロな世界とミクロな世界を結びつける基礎物理定数であり、具体的には物質質量と質量を関連づける。現行のSI単位系において、物質質量の単位であるモル(呼号mol)は「 $0.012\text{ kg}$ の核種 $^{12}\text{C}$ の中に存在する原子の数と等しい数の要素粒子を含む系の物質質量である」と

定義されている。したがって、核種  $^{12}\text{C}$  のモル質量  $M(^{12}\text{C})$  は厳密に  $12 \text{ g/mol}$  であり、この系に含まれる原子の数はアボガドロ定数

$$N_A = M(^{12}\text{C})/m(^{12}\text{C}) = 6.022\cdots \times 10^{23}/\text{mol} \quad (1)$$

に等しい。ここで、 $m(^{12}\text{C})$  は  $^{12}\text{C}$  の単原子あたりの質量である。原子や素粒子の質量を記述する場合、一般に統一原子質量単位 (unified atomic mass unit)  $u$  が用いられる。定義により  $u = m(^{12}\text{C})/12$  なので、式(1)より次式が得られる。

$$u = (\text{g/mol})/N_A = 1.660\cdots \times 10^{-27} \text{ kg} \quad (2)$$

任意の核種  $X$  の相対原子質量 (relative atomic mass)  $A_r(X) = m(X)/u$  は、イオントラップによる質量比測定と量子電気力学 (QED: Quantum Electrodynamics) による補正から十分に小さい不確かさで既に求められている。例えば、水素原子の場合、 $A_r(^1\text{H}) = 1.007\ 825\ 032\ 14$  であり、その不確かさは  $3.5 \times 10^{-10}$  である。相対原子質量を用いると、任意の核種  $X$  の 1 原子あたりの質量  $m(X)$  は次式で表される。

$$m(X) = A_r(X)u = A_r(X) (\text{g/mol})/N_A \quad (3)$$

式(3)は質量の単位を再定義する上で重要な概念を表す。すなわち、アボガドロ定数  $N_A$  を定義してしまえば、炭素原子  $^{12}\text{C}$  の質量を基準として、任意の原子 1 個あたりの質量を相対原子質量から精度良く導くことができる。したがって、炭素原子  $^{12}\text{C}$  の質量を基準として、質量の単位を例えば

●キログラムは基底状態にある静止した  $5.018\cdots \times 10^{25}$  個の自由な炭素原子  $^{12}\text{C}$  の質量に等しい

と再定義することができる。ここで、 $5.018\cdots \times 10^{25}$  という数値はアボガドロ定数の数値を  $1000/12$  倍して決められる。この再定義方法が採用されると、現行の物質の単位は「モルは  $6.022\cdots \times 10^{23}$  個の要素粒子を含む系の物質量である」と書き改められるであろう。

### 3.2 プランク定数による再定義方法

プランク定数は原子や素粒子などミクロな世界を記述する量子力学に現れる基礎物理定数である。相対論と光電効果からエネルギーは  $E = mc^2 =$

$h\nu$  と表される。ここで、 $m$  は物体の静止質量、 $c$  は光速、 $\nu$  は光子(電磁波)の周波数である。この関係式から、静止質量  $m$  に等価なエネルギーをもつ光子の周波数は

$$\nu = mc^2/h \quad (4)$$

と表される。ここで、光速  $c = 299\ 792\ 458 \text{ m/s}$  は 1983 年に行われた SI 単位の改訂以来、既に定義になっているので、 $m$  に  $1 \text{ kg}$  を代入して、プランク定数  $h = 6.626\cdots \times 10^{-34} \text{ J s}$  を定義してしまえば、以下のようにキログラムを再定義することができる。

●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に等価な質量である

この再定義方法を理解するためには、相対論と光電効果を知っていることが前提となるので、「原子の数」という化学的概念に基づく前者の定義の方が理解しやすいのではないかという意見もある。しかし、宇宙論や相対論の観点から、プランク定数によるキログラムの再定義案を支持する物理学関係者も多い。現在、国際度量衡委員会 (CIPM) の単位諮問委員会 (CCU) では、異なる分野の専門家を集め、キログラム再定義の検討が行われている。

### 3.3 アボガドロ定数とプランク定数との関係

これら 2 つの異なる基礎物理定数を基準とするキログラムの再定義方法は、互いに独立したものであるかのように思われるかもしれないが、実はそうではない。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するからである。式(1)を電子に適用し、陽子と電子のモル質量比  $M_p/M_e$  はそれらの質量比  $m_p/m_e$  に等しく、リュードベリ定数は量子力学の関係式から  $R_\infty = m_e c \alpha^2 / (2h)$  と表されることを考慮すると、アボガドロ定数は次式で表される。

$$N_A = \frac{M_e}{m_e} = \frac{M_p}{m_e (m_p/m_e)} = \frac{c M_p \alpha^2}{2 R_\infty (m_p/m_e) h} \quad (5)$$

ここで、 $\alpha$  は微細構造定数である。式(5)右辺において、プランク定数  $h$  を除く基礎物理定数

群  $cM_p a^2 / [2R_\infty (m_p / m_e)]$  の相対標準不確かさは  $6.7 \times 10^{-9}$  である。したがって、X線結晶密度法あるいはワットバランス法によって  $N_A$  か  $h$  の何れか一方を小さい不確かさで測定することができれば、式(5)から他方を導くことができる。キログラムの再定義に際しては高い信頼性が要求されるので、アボガドロ定数とプランク定数をそれぞれ異なる原理で独立して測定し、その測定結果が不確かさの範囲内で一致するのかどうかを確かめることが重要となる。

#### 4. X線結晶密度法

図1に示すようにシリコン結晶は立方晶であり、格子定数  $a$  の単位胞 (unit cell) には平均で8つの原子が含まれ、その体積は  $a^3$  である。シリコン結晶の単位胞の密度、すなわち、微視的な密度が巨視的な密度  $\rho(\text{Si})$  に等しいものと仮定すると、シリコン原子1個あたりの質量  $m(\text{Si})$  は  $\rho(\text{Si}) a^3 / 8$  に等しい。したがって、式(1)よりアボガドロ定数は次式で表される。

$$N_A = \frac{M(\text{Si})}{m(\text{Si})} = \frac{8M(\text{Si})}{\rho(\text{Si}) a^3} \quad (6)$$

式(6)において、面指数  $(lmn)$  の格子面間隔を  $d_{lmn}$  とすると  $a = (l^2 + m^2 + n^2)^{1/2} d_{lmn}$  となる。例えば、面指数  $(220)$  の格子面間隔  $d_{220}$  を測定すれば、格子定数は  $a = \sqrt{8} d_{220}$  として求められる。

天然のシリコンには安定同位体  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$  が存在するが、各同位体のモル質量  $M(\text{Si})$  は  $1.5 \times 10^{-9}$  よりも小さい不確かさで既に求められて

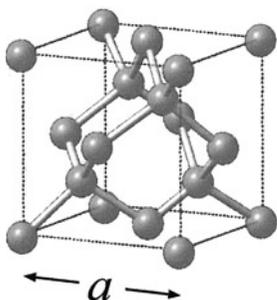


図1 シリコンの結晶構造。平均で8個の原子が単位胞に含まれる。

いるので、同位体の存在比を質量分析計で測定すれば、平均モル質量  $M(\text{Si})$  を求めることができる。X線結晶密度法では通常、シリコン結晶が用いられる。これは、現在得られる結晶のなかでシリコン結晶の完全性が最も

優れているからである。

X線結晶密度法によるアボガドロ定数の決定において重要な役割を演じたのは、1965年のBonseらによるX線干渉計 (X-ray interferometer) の開発である<sup>7)</sup>。それまで、結晶の格子定数はX線の波長を基準としてX線回折から求められていたが、基準となるX線波長の不確かさが大きかったため、それよりも小さい不確かさで格子定数を測定できなかった。X線干渉計の出現により、光の波長を基準にして格子定数を測定することが可能となり、不確かさが飛躍的に減少した。その測定原理を図2に示した。一塊のシリコン結晶を加工してマッハ・ツェンダー型のX線干渉計を製作し、アナライザーを切断して逆格子ベクトルの方向( $x$ 方向)に走査すると、回折X線と透過X線は干渉し格子面間隔に等しい周期で明滅する。したがって、アナライザーの移動距離をX線の強度変化の関数としてレーザ干渉測定すれば、格子面間隔を測定することができる。

#### 4.1 産業技術総合研究所での測定結果

写真2に、アボガドロ定数を測るために産業技術総合研究所 (AIST) 計量標準総合センター

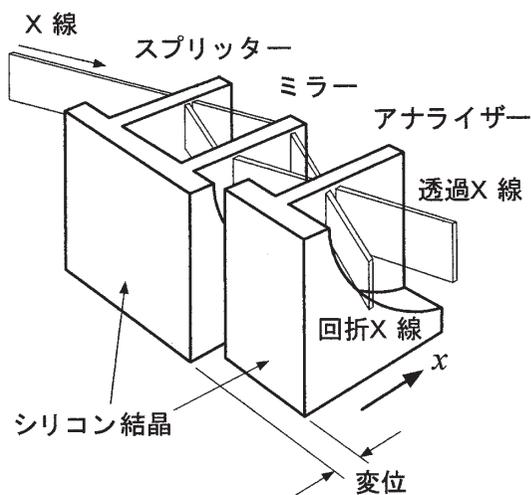


図2 X線干渉計による格子定数の測定原理。アナライザーを逆格子ベクトルの方向( $x$ 方向)に走査すると、回折X線と透過X線は干渉し格子面間隔に等しい周期で明滅する。アナライザーの移動距離をX線の強度変化の関数としてレーザ干渉測定すれば、光の波長を基準として格子面間隔を測定することができる。

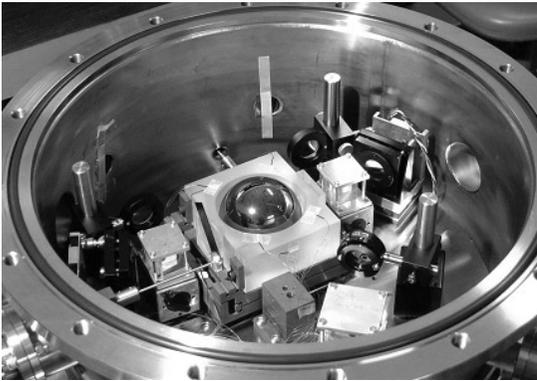


写真2 単結晶シリコン球体の直径を測るレーザ干渉計。約 93.6 mm の直径を 1 ナノメートルの不確かさで測定することができる。ほぼ均一に分布する 70 方位から直径を測って球体の体積を求める。

(NMIJ, 以前の計量研究所)が開発したシリコン球の直径を測るレーザ干渉計を示す<sup>8)</sup>。この単結晶シリコン球体は、質量が約 1 kg になる大きさに研磨されているので、キログラム原器との比較により、質量を正確に測ることができる。直径は約 93.6 mm であり、真球度(平均直径からのずれの最大値)は 83 nm である。真球度の高い球体の体積は、その直径を多方位から光の波長を基準として測定して、平均直径を求めれば、十分に小さい不確かさで求めることができる。

この装置開発により著者らは最も小さい不確かさ  $7 \times 10^{-8}$  で球体の体積を真空中で測定することに成功した。球体の質量、格子定数、欧州連合(EU)の標準物質計測研究所(IRMM)でのモル質量の測定結果などと合わせ、NMIJ では 2003 年にアボガドロ定数の測定結果を論文発表した<sup>9)</sup>。その値は

$$N_A = 6.022\,1375(12) \times 10^{23} / \text{mol} \quad (7)$$

である。括弧内の数値は最後の桁の標準不確かさを表す。その相対標準不確かさは  $2.0 \times 10^{-7}$  である。X線結晶密度法によるアボガドロ定数の測定としては最も小さい不確かさが得られた。

#### 4.2 同位体濃縮結晶による新たな挑戦

現在、シリコン単結晶からアボガドロ定数を測定するうえで、最も大きな不確かさの要因となっているのは、シリコンの平均モル質量の評価であ

る。天然のシリコンには質量数 28, 29, 30 の 3 種類の安定同位体があり、<sup>28</sup>Si が約 92 % の比率を占める。これを 99.99 % 以上に濃縮したシリコン単結晶を用いて、各パラメータを再測定し、アボガドロ定数を  $2.0 \times 10^{-8}$  の不確かさで測定するための国際プロジェクトが、2004 年 4 月から 6 年間の計画で始まった。このプロジェクトにはわが国の NMIJ をはじめ、独、伊、豪、米、英、EU の計量標準研究機関と BIPM など合計で 8 研究機関が参加している。同位体の濃縮にはロシアの遠心分離技術が用いられている。そのための資金を NMIJ とドイツ物理学研究所(PTB)がそれぞれ 1/3 ずつ負担することになった。この国際プロジェクトが成功すれば、アボガドロ定数からキログラムを再定義する案が一挙に有力になるものと予想される。

#### 5. ワットバランス法

ワットバランスは電流天びんともよばれ、当初は、SI 基本単位であるアンペア(単位記号 A)の定義を実現するために考案された。しかしその後、電圧はジョセフソン効果、電気抵抗は量子ホール効果によって飛躍的に高い再現性で測定することができるようになったので、これらの電気標準を基準として、逆にキログラムを再定義することが試みられている。

図 3 に示すように、磁束密度  $B$  の磁場中にお

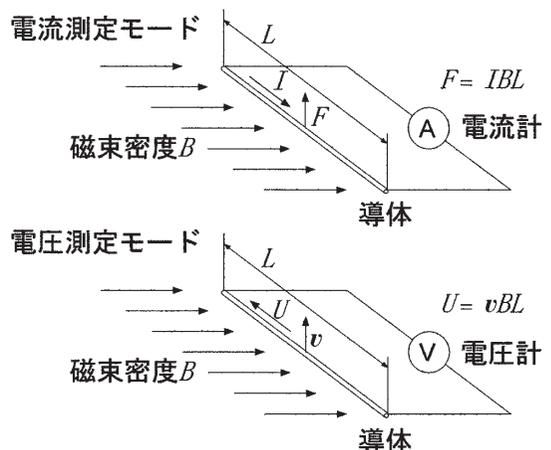


図 3 ワットバランスによる仕事率の測定原理。力  $F$  と速度  $v$  の積は電圧  $U$  と電流  $I$  の積に等しい。

いて、長さ  $L$  の導体に電流  $I$  を流したときに導体に働くローレンツ力  $F$  を測定する。次に、同一磁場中において同一導体を速度  $v$  で移動させたときに生じる起電力 (electromotive force)  $U$  を測定する。このときの電氣的仕事率  $UI$  は力学的仕事率  $Fv$  に等しい。この方法がワットバランス法とよばれる由縁である。起電力  $U$  は、ジョセフソン電圧  $U_j(n) = nf/K_j$  として測定することができる。また、量子化ホール抵抗は  $R_H(i) = R_K/i$  で表される。ここで、 $R_K = h/e^2$  はフォン・クリッツィング定数、 $i$  は整数を表す。量子化ホール抵抗によって校正された標準抵抗器の電気抵抗を  $R = bR_H$ 、 $b$  を校正係数として、この標準抵抗に電流  $I$  を流し、標準抵抗の両端に生じる電位差をジョセフソン電圧  $U_j'(n) = nf'/K_j$  として測定すれば、電気標準を基準として電流  $I$  を計測することができる。このときの電氣的仕事率は次式で表される。

$$UI = U_j U_j' / R = infn'f' / (bK_j^2 R_K) = infn'f'h / (4b) \quad (8)$$

式(8)で表される電氣的仕事率  $UI$  は力学的仕事率  $Fv$  に等しいので次式が得られる。

$$h = 4 / (K_j^2 R_K) = 4bFv / (inf n'f') \quad (9)$$

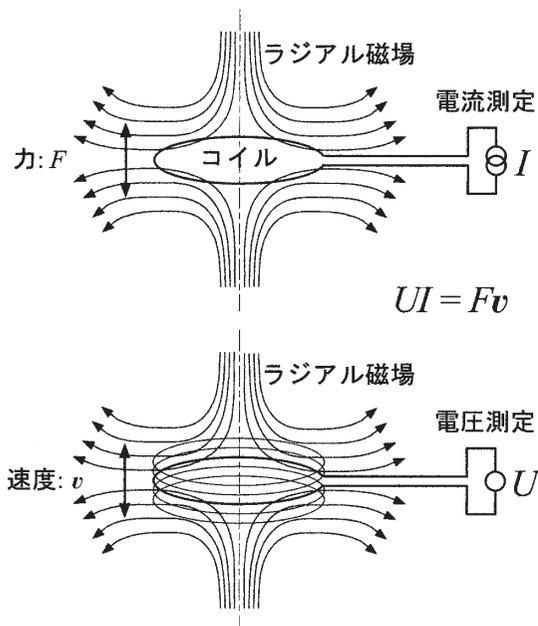


図4 ラジアル磁場による仕事率の測定原理。コイルの形状が変化しても、コイルを通過する全磁束をほぼ一定に保つことができる。

式(9)において、力  $F$  と速度  $v$  は、質量、時間、長さの測定から求められる。したがって、ジョセフソン効果と量子ホール効果を用いることにより、プランク定数  $h$  を測定することができる。

図4に米国標準技術研究所(NIST)が開発したラジアル磁場による測定原理を示す。ラジアル磁場を用いると、移動コイル(導体)の全移動範囲にわたってほぼ均一な磁場を得ることができ、また、移動コイルを通過する全磁束を、コイルの大きさや形によらずにほぼ一定に保つことができる。

図5にNISTが開発したワットバランスを示した。ラジアル磁場は、対抗する双極子をもつ1組の超伝導マグネットが発生する。中心における磁場の強度は約1 T、移動コイルの位置で約0.1 Tである。ホイールの中央にはナイフエッジがあり、

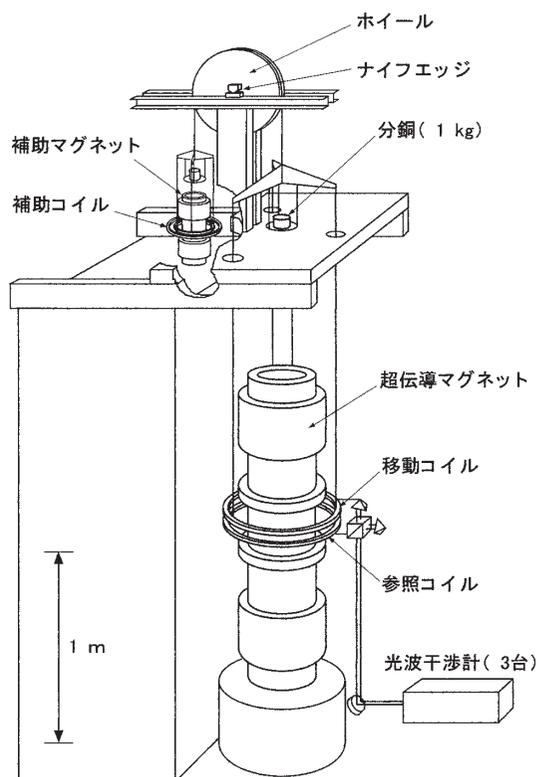


図5 米国標準技術研究所(NIST)のワットバランス。電圧測定モードでは、移動コイルが一定速度で移動するよう補助コイルの電流を制御し、移動コイルの鉛直方向の動きを3台のレーザ干渉計で測定し、そのとき発生する電圧を測定する。電流測定モードでは、1 kgの純金製の分銅を乗せたときにホイールを静止させるのに必要な電流を移動コイルに流し、その電流を測定する。

移動コイルに加わる力を測定する機能とコイルを一定速度で直線運動させる機能を併せ持つ。電圧測定モードでは、ホイールの回転を補助コイルで制御し、移動コイルを約 2 mm/s の一定速度で移動させる。この時発生する約 1 V の起電力をジョセフソン電圧を基準として測定する。同時に、3 台のレーザ干渉計で移動コイルの移動量を計測して速度  $v$  を求める。電流測定モードでは質量 1 kg の純金の分銅を乗せたときの重力に釣り合う力を発生させるために、移動コイルに約 10 mA の制御された電流を流し、この電流を量子化ホール抵抗標準で校正された 100  $\Omega$  の電気抵抗に流した時に生じる約 1 V の電位差として測定する。

1998 年、NIST ではこの方法によりプランク定数を  $8.7 \times 10^{-8}$  の不確かさで測定することに成功した<sup>10)</sup>。

## 6. CODATA が推奨する基礎物理定数

アボガドロ定数やプランク定数などの基礎物理定数の値は学術的に重要であり波及効果も極めて大きいので、これらの定数決定は、個人的な研究グループではなく、専門家から成る世界的にオーソライズされた組織によって実施されている。パリに本部をおく科学技術データ委員会 (CODATA: Committee on Data for Science and Technology) に基礎定数作業部会が設置されたのは 1969 年であり、1973 年に最初の基礎物理定数の推奨値が公表されて以来これまでに 1986 年、1998 年、2002 年の 4 回にわたって推奨値が公表されてきた<sup>11, 12)</sup>。

図 6 は、最も新しい 2002 年の推奨値を決める際に、プランク定数の決定に使われた主な基礎データを示したものである。2003 年に NMIJ が測定結果を発表した直後に、ドイツの研究グループ (PTB) もシリコン結晶を使ってアボガドロ定数を測定した結果を発表し、産総研とほぼ同じ値を報告した。このため、NMIJ と PTB が報告したアボガドロ定数は信頼性の高いデータであると判断され、基礎データとして採用された。

今回、CODATA がプランク定数の推奨値を決

めるにあたっては、ジョセフソン効果や量子ホール効果に基づく電気標準から得られたプランク定数と、シリコン結晶から得られたアボガドロ定数を介して導かれたプランク定数などが主な基礎データとなった。これら 2 つのグループのそれぞれの測定の不確かさは  $10^{-7}$  のオーダーであるが、2 つのグループ間には約  $1 \times 10^{-6}$  の相違があり、理論的には一致するはずのこれらのデータがグループ間では一致しないという矛盾が観測された。CODATA では、これらの測定に用いられた実験や理論などをあらゆる観点から検討したが、矛盾の原因は見出されなかった。このため CODATA では、現在の物理学では解明されていない未知の物理現象や不確かさが存在するものと判断し、統計的な整合性が得られるまで全ての測定結果の不確かさを拡張して、それらの重み付け平均値からプランク定数を決定した。

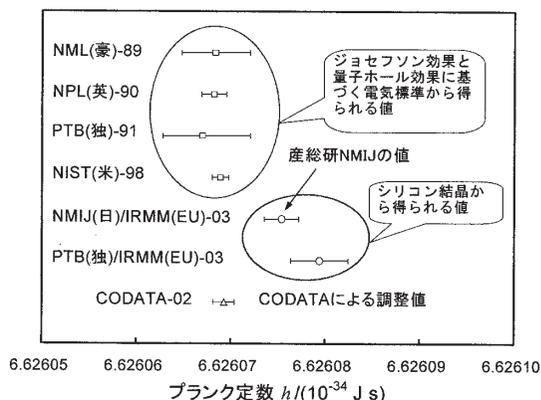


図 6 プランク定数の決定に貢献した主な実験データ。バーは実験データの標準不確かさを表す。NML(豪)-89: オーストラリア連邦科学産業研究機構の水銀電圧計によるジョセフソン定数の測定(1989年), NPL(英)-90: 英国物理研究所のワットバランスによるプランク定数の測定(1990年), PTB(独)-91: ドイツ物理工学研究所の電圧天びんによるジョセフソン定数の測定(1991年), NIST(米)-98: 米国標準技術研究所のワットバランスによるプランク定数の測定(1998年), NMIJ(日)/IRMM(EU)-03: 産総研 NMIJ と EU の標準物質計測研究所によるアボガドロ定数の測定(2003年), PTB(独)/IRMM(EU)-03: ドイツ物理工学研究所と EU の標準物質計測研究所によるアボガドロ定数の測定(2003年)。従来はワットバランスなど電気標準に基づいて測定されたプランク定数(□)のみからプランク定数が決められていたが、シリコン結晶から信頼性の高いアボガドロ定数(○)が得られたことにより新しい推奨値(△)が決定された。

電気標準を使って導かれたプランク定数とシリコン結晶から得られるアボガドロ定数を介して導かれたプランク定数とが一致しない理由は今のところ解明されていない。ジョセフソン効果や量子ホール効果の理論を疑う意見もあるが、今のところ明確な結論は得られていない。今後、アボガドロ定数とプランク定数のより正しい値については理論と実験の両面から検討を進めることが必要になるだろう。

## 7. 今後の展望

現在到達できるアボガドロ定数あるいはプランク定数の測定精度は約  $10^{-7}$  であるが、あと一桁向上すれば、原子の数あるいは基礎物理定数を基本として質量の単位を決めることが可能となる。これらの研究成果は、基礎物理定数という人類共通の知的基盤の整備に加え、人工物で定義されている最後のSI基本単位であるキログラムの再定義に道を拓くものである。新しい定義が実現すれば、現在の国際キログラム原器は不要となり、歴史上初めて質量の定義が人工物から切り離され、普遍的な定数と結びつくことになる。X線結晶密度法については、精度の限界となっているモル質量の不確かさを減少させるために、濃縮された $^{28}\text{Si}$ の結晶を用いる国際プロジェクトが始まった。また、ワットバランス法についても、測定装置を真空中に設置し、不確かさを極限まで更に減少させるための研究が進められている。これらの研究成果に支えられながら、近い将来、メトロロジスト(metrologist)の永年の夢であるキログラム再定義が実現されるものと予想される。

## 参考文献

- 1) 国際文書第7版(1998), 国際単位系(SI), グローバル化社会の共通ルール, 日本語版, 訳・監修: 工業技術院計量研究所, 日本規格協会, 1999.
- 2) T. J. Quinn, "The kilogram: The present

state of our knowledge," IEEE Trans. Instrum. Meas., 40 (1991), pp. 81-85.

- 3) *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, International Organization for Standardization, Genève, 1995.
- 4) 計測における不確かさの表現のガイド, 監修: 飯塚幸三, 日本規格協会, 1996.
- 5) 藤井賢一, 「質量標準と基礎物理定数, 質量の単位の定義をめぐる最近の動き」, 応用物理, 68(1999). pp. 657-662.
- 6) 藤井賢一, 「基礎物理定数の新しい推奨値, アボガドロ定数とプランク定数の決定をめぐる最近の動き」, 日本物理学会誌, 57 (2002), pp. 239-246.
- 7) 中山貫, 藤井賢一, 「シリコン格子定数の絶対測定とアボガドロ定数の決定」, 応用物理, 62(1993), pp. 245-252.
- 8) K. Fujii *et al.*, "Determination of the Avogadro constant by accurate measurement of the molar volume of a silicon crystal," Metrologia, 36(1999), pp. 455-464.
- 9) K. Fujii *et al.*, "Evaluation of the molar volume of silicon crystals for a determination of the Avogadro constant," IEEE Trans. Instrum. Meas., 52(2003), pp. 646-651.
- 10) E. R. Williams *et al.*, "Accurate measurement of the Planck constant," Phys. Rev. Lett., 81(1998), pp. 2404-2407.
- 11) P. J. Mohr and B. N. Taylor, "CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998," J. Phys. Chem. Ref. Data 28(1999), pp. 1713-1852.
- 12) P. J. Mohr and B. N. Taylor, "CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2002," Rev. Mod. Phys., 76(2004), to be published.