

《第 2 回》

質量標準の現状とキログラム (kg) の定義改定をめぐる最新動向

藤井 賢一 (計測標準研究部門 力学計測科)

1. はじめに

質量は SI 基本単位^{1,2)}のひとつであるキログラム (kg) を単位として表される物理量であり、多くの力学関連量を計測する際に用いられる最も基本的な物理量のひとつである。力、トルク、密度、粘度、質量流量などの力学量に加えて比熱など単位質量あたりの物理量を求める場合にも用いられるので、その利用範囲は極めて広い。

キログラムの定義は元々 18 世紀末のフランスにおいて、水 1 リットルの質量が基準として用いられたことに由来するが、現在の定義は 1889 年に開催された第 1 回国際度量衡総会 (CGPM) に決められたものであり、国際キログラム原器 (international prototype of the kilogram: IPK) と呼ばれる白金イリジウム合金製の分銅が今でも世界で唯一の質量の基準として用いられている³⁾。

しかし、既に多くの文献^{4,5)}あるいは本特集第 1 回の解説⁶⁾にあるとおり、表面汚染などの影響により IPK の質量は過去 125 年間に変動してきたと考えられ、白金イリジウム合金製の分銅に頼る現在の定義の安定性は 5×10^{-8} (1 億分の 5) 程度が限界であると推定されている。このような理由から、基礎物理定数や原子の質量など普遍的な物理量を基準としてキログラムを再定義することが検討されるようになってきた⁷⁾。

キログラムを再定義する際の新たな基準として用いることができる普遍的な物理量には幾つかの候補があるが、最も小さい不確かさでキログラムを実現するためには、これまでの研究成果から、プランク定数 h を基準とするワットバランス (watt balance) 法あるいはアボガドロ定数 N_A を基準とする X 線結晶密度 (x-ray crystal density: XRDC) 法が最も有力な方法であると考えられている。本稿ではこれらの測定原理と最新の研究動向について述べる。

2. キログラム再定義の考え方

キログラムの再定義案には原子の数から質量を決めるアボガドロ定数 N_A に基づくものと、相対論と光電効果から光子のエネルギーと質量とを関係づけるプランク定数 h に基づくものがある^{8,9)}。前者は比較的古くからある考え方であり、相対原子質量の基準である ^{12}C の単原子あたりの質量を基準にすれば、

- 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}C の質量に等しい。

と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 $N_A = 6.022\cdots \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ の数値の部分を 1000/12 倍して求められる。この再定義方法を採用すると、現行の物質量の単位を「モルは $6.022\cdots \times 10^{23}$ 個の要素粒子を含む系の物質質量である」と書き改め、1 モルの要素粒子数を明示することができるようになる。

一方、プランク定数に基づく定義は比較的最近注目されるようになった考え方である。この定義はアインシュタインの相対論と光電効果からエネルギーを $E = mc^2 = h\nu$ と表すところから出発する。ここで、 m は物体の静止質量、 ν は光子 (電磁波) の周波数である。エネルギーと質量が等価であり、しかも光子の周波数を使ってそのエネルギーを表すことができることを考えれば、静止質量 m と等価なエネルギーをもつ光子の周波数は $\nu = mc^2/h$ と表される。真空中の光の速さ $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ は 1983 年に実施されたメートルの定義改定以来、既に定義になっているので、 m に 1 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、

- 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。

と定義することもできる。

キログラムを再定義する上で、アボガドロ定数とプランク定数の何れを用いて表現すべきなのかがしばしば議論されてきたが、両者の間には以下の厳密な関係が成立するので、何れの定数を用いてキログラムを定義しても、適切な実験さえ行えばどちらのルートからでもキログラムを実現することができる。

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

ここで、 M_e は電子のモル質量、 α は微細構造定数、 R_∞ はリュードベリ定数である。式(1)の右辺において h を除く基礎物理定数群 $cM_e\alpha^2/(2R_\infty)$ の値は科学技術データ委員会 (CODATA) による基礎物理定数の 2010 年推奨値¹⁰⁾において、既に 7.0×10^{-10} の相対標準不確かさで求められている。この不確かさは h や N_A の測定の不確かさよりも十分に小さいので、何れの定数を用いてもキログラムを再定義することが可能である。

しかし、後述するように電気標準における電圧と電気抵抗はそれぞれ交流ジョセフソン効果と量子ホール効果によって既に実現されているので、プランク定数 h をキログラムの定義に用い、更に電荷素量 e も定義してしまった方が、ジョセフソン定数 ($K_J = 2e/h$) とフォン・クリッツリン定数 ($R_K = h/e^2$) に関する 1990 年の協定値 (K_{J-90} と R_{K-90}) を用いる必要がなくなるので、アンペア (A) の再定義にとっても利便性が高い。このため、2011 年に開催された第 24 回 CGPM ではキログラムの定義にプランク定数 h の値を明示する表現方法が採択されている。

3. XRCD 法によるアボガドロ定数 N_A の測定原理と最新の研究動向

アボガドロ定数 N_A は現行のモルの定義によって定められる基礎物理定数なので、12 g の ^{12}C に含まれる原子の数を数えればよいと思われる読者も多いと思われるが、その数が膨大であるため、直接的に原子や分子の数を高精度に数えることはできない。このため、シリコン結晶などの完全性の高い結晶の原子間隔を測定して原子の数を求める方法が開発されてきた。

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 個の原子が含まれ、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。また、モルの定義からアボガドロ定数は $N_A = M(\text{Si})/m(\text{Si})$ と表される。

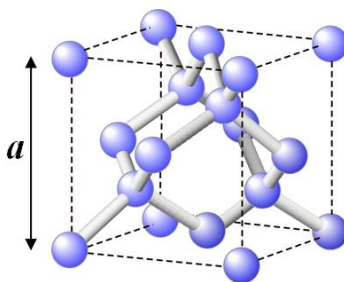


図 1. シリコンの結晶構造
この単位胞には 8 個のシリコン原子が含まれる。一辺の長さ a は格子定数を表す。

ここで、 $M(\text{Si})$ はシリコンのモル質量を表す。したがって、アボガドロ定数は次式で表される。

$$N_A = \frac{M(\text{Si})}{m(\text{Si})} = \frac{8M(\text{Si})}{\rho(\text{Si})a^3} \quad (2)$$

(2) 式において、面指数(lmn)の格子面間隔を d_{lmn} とすると $a = (l^2 + m^2 + n^2)^{1/2}d_{lmn}$ なので、例えば、面指数(220)の格子面間隔 d_{220} を X 線回折によって測定すれば格子定数は $a = 8^{1/2}d_{220}$ として求められる。

天然のシリコンには安定同位体 ^{28}Si 、 ^{29}Si 、 ^{30}Si が存在し、それらの存在比はそれぞれ約 92 %、5 %、3 % である。各同位体のモル質量 $M^i(\text{Si})$ は十分に小さい不確かさ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、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て、その評価技術も既に確立さ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測定において重要な役割を演じたのは、1965 年の Bonse ら¹¹⁾による X 線干渉計 (x-ray interferometer) の開発である。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光波干渉測定すれば、格子面間隔を絶対測定することができる。

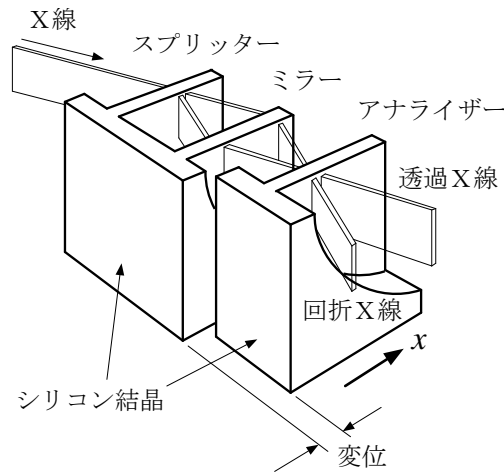


図2. X線干渉計による格子定数の測定原理

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光波干渉測定すれば、光の波長を基準として格子面間隔を絶対測定することができる。

XRCD法による従来の測定では自然界のシリコンから作製された結晶が用いられてきたので、モル質量 $M(\text{Si})$ の測定精度に限界があり、質量分析計によるシリコンのモル質量測定相対標準不確かさは 2.4×10^{-7} だった¹²⁾。これではIPKの質量安定性を上まわることはできない。

この課題を解決するために、 ^{28}Si 同位体濃縮単結晶を用いて 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 (International Avogadro Coordination (IAC) Project) が2004年から実施された^{13,14)}。このプロジェクトに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)、オーストラリア連邦計量研究所 (NMIA)、欧州標準物質計測研究所 (IRMM)、国際度量衡局 (BIPM)、米国標準技術研究所 (NIST)、英国物理研究所 (NPL) などが参加し、遠心分離法による同位体濃縮¹⁵⁾、化学精製、多結晶化などを経て99.99%まで同位体濃縮された5kgの ^{28}Si 同位体濃縮単結晶 (写真1) が得られた。この結晶の同位体測定には誘導結合プラズマ質量分析計 (CIP-MS) を用いた希釈同位体分析法が採用された¹⁶⁾。その結果、シリコンのモル質量測定相対標準不確かさを 8.2×10^{-9} まで減少させることに成功した。また、密度の精密測定のために、この結晶から直径94mm、直径の最大偏差70nm、質量1kgの球体を2個研磨し、NMIJとPTBのレーザ干渉計を使ったサブナノメートルの精度での直径測定などが行われた^{17,18)}。この結晶の格子定数、密度、モル質量などの測定から求められた N_A の相対標準不確かさは 3.0×10^{-8} である。

このアボガドロ定数の値からは式(1)を用いてプランク定数 h を求めることが可能であり、この値は現在までに報告されている N_A および h の測定値のなかで最も高精度な値として、CODATAによる基礎物理定数の2010年推奨値の決定に用いられている¹⁰⁾。



写真1. 浮遊帯域 (FZ) 法で引き上げられた同位体濃縮度99.99%、質量5kgの ^{28}Si 同位体濃縮単結晶^{13,14)}。

4. ワットバランス法によるプランク定数 h の測定原理と最新の研究動向

ワットバランスは電流天びんとも呼ばれ、当初はアンペア(A)を実現するために考案された実験装置であるが、電圧は交流ジョセフソン効果、電気抵抗は量子ホール効果によって実現できるようになった現在では、電気標準の再現性が飛躍的に高まった。このため、電気標準を基準として、逆にキログラムを実現することが試みられている^{8,9)}。

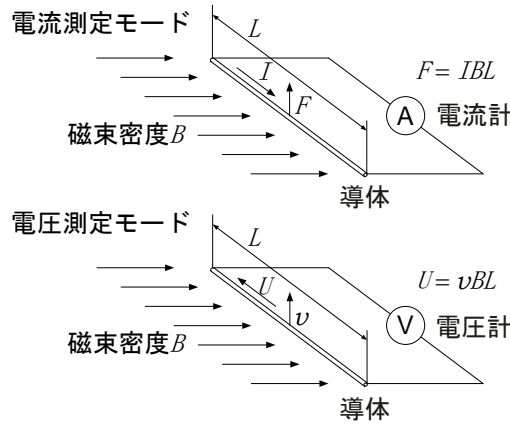


図3. ワットバランスによる仕事率の測定原理。
力 F と速度 v の積は電圧 U と電流 I の積に等しい^{8,9)}。

図3に示すように、磁束密度 B の磁場中で長さ L の導体に電流 I を流したときに導体に働く力 F を測定し、次に、同一磁場中における同一導体を速度 v で移動し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 (仕事率) バランス法と呼ばれる由縁である。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。ここで、 n はシャピローステップの数を表す整数、 f はジョセフソン接合素子に照射するマイクロ波の周波数を表す。また、量子化ホール抵抗 $R_H(i) = R_K/i$ (i はプラトーの番号を現す整数) によって校正された標準抵抗の抵抗値を $R = bR_H$ (b は校正係数) として、この標準抵抗に電流 I を流し、この標準抵抗に生ずる電位差をジョセフソン電圧 $U_J'(n) = n'f/K_J$ 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。

$$UI = U_J U_J' / R = infn'f / (bK_J^2 R_K) = infn'f h / (4b) \quad (3)$$

(3) 式において電氣的仕事率 UI は力学的仕事率 Fv に等しいので次式が得られる。

$$h = 4(K_J^2 R_K) = 4bFv / (infn'f) \quad (4)$$

(4) 式において、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、交流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、ワットバランス法から、SI 単位の定義に準拠したかたちで、プランク定数 h を絶対測定することができる。キログラム再定義後は、逆に定義されたプランク定数 h の値を用いて式(4)から力 F を求め、重力加速度 g のもとで質量 m の物体に加わる重力 mg が F と等しくなるときの質量としてキログラムを実現することができる。

図4に NIST が開発したラジアル磁場を用いたワットバランスを示した¹⁹⁾。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発生させることができ、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一定に保つことができる。ラジアル磁場は、対向する双極子をもつ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。NIST のワットバランスはホイール型である。ホイールの中央にはナイフエッジがあり、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とを併せ持つ。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、約 2 mm/s の速度で移動コイルを移動させる。この時発生する約 1 V の起電力をジョセフソン電圧標準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速度 v を求める。電流測定モードでは質量 1 kg の分銅を乗せたときの重力と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 $1\ \text{V}$ の電位差として測定する。

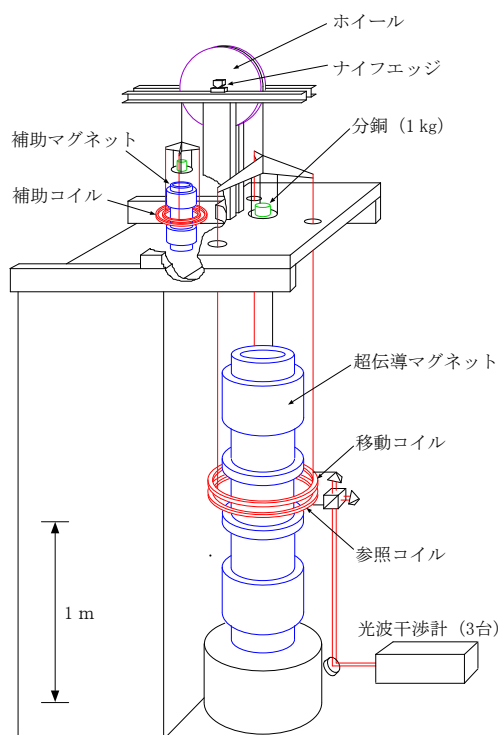


図4. NIST が開発したワットバランス^{8,9,19)}

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、1kg 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。

2007 年、NIST の Steiner ら¹⁹⁾ はこの方法によりプランク定数 h を 3.6×10^{-8} の相対標準不確かさで測定した。この測定値が現在までに報告されているワットバランス法による測定としては最も不確かさが小さい。最近ではカナダやスイスなど多くの計量標準研究機関 (NMI) でワットバランスの開発が進められ、新しい値も報告されつつある²⁰⁾。これらの新しいワットバランスではラジアル磁場を発生させるために永久磁石が用いられている。超伝導マグネットでは液体ヘリウムを補給する必要があり、実験のコストと労力を考え、永久磁石が用いられるようになってきた。

5. データの比較

XRCD 法やワットバランス法から得られたプランク定数の値の比較を図 5 に示した。NIST が 2007 年にワットバランスから求めた値と、アボガドロ国際プロジェクトによって 2011 年に ^{28}Si 同位体濃縮単結晶から得られた値の不確かさが最も小さいが、両者の間には 1.8×10^{-7} の相対的な隔りがある。このため CODATA の基礎定数作業部会 (Task Group on Fundamental Constants) では統計的な整合性が得られるまでこれらのデータの不確かさを拡張し、重み付き最小二乗法によってプランク定数の推奨値を求めた¹⁰⁾。このようにして求められた CODATA による基礎物理定数の 2010 年推奨値は

$$h = 6.626\ 069\ 57(29) \times 10^{-34}\ \text{J s} \quad (5)$$

であり、その相対標準不確かさは 4.4×10^{-8} である。括弧内の数値は最後の桁の標準不確かさを表す。

プランク定数 h の推奨値の相対標準不確かさが IPK の質量の安定性である 5×10^{-8} よりも小さくなってきたことは、キログラムの再定義が技術的に可能なレベルに到達しつつあることを表すが、上記のようにデータの整合性が十分ではないという問題も残されている。このため、質量関連量諮問委員会 (CCM) では、より多くの独立した整合性のある高精度なデータが得られた段階でキログラムの再定義を実施するよう勧告している。

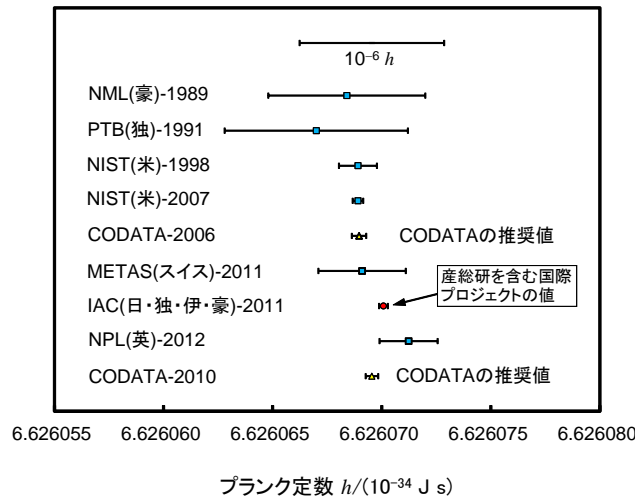


図5. 異なる原理で測定されたプランク定数 h の値の比較

NML (豪)-1989: 水銀柱電圧計による測定結果。PTB (独)-1991: 電圧天びんによる測定結果。NIST (米)-1998: ワットバランスによる空気中での測定結果。NIST (米)-2007: ワットバランスによる真空中での測定結果。METAS (スイス)-2011: ワットバランスによる測定結果。IAC (日・独・伊・豪)-2011: ^{28}Si 同位体濃縮結晶を用いたアボガドロ国際プロジェクトによる測定結果。NPL (英)-2012: ワットバランスによる測定結果(カナダに異動後の評価結果)。

6. キログラムの再定義が実施された場合の新たな質量標準体系

CCM では 2018 年に開催予定の第 26 回 CGPM までに、IPK に代わる新しいキログラムの基準をプランク定数 h に移行できるよう準備を開始した。現在、国際度量衡局 (BIPM) ではプランク定数あるいはアボガドロ定数をそれぞれワットバランス法あるいは XRCD 法で測定できる能力をもつ NMI のキログラム原器を IPK に基づいて校正し、最新の校正結果に基づいてこれらの基礎物理定数を決定することができるよう準備が進められている。

図 6 に現在の IPK に基づく質量標準の体系と再定義後の体系とを比較した。これまでは IPK を用いて約 30~40 年の周期で各国の白金イリジウム合金製のキログラム原器を値付けし、世界の質量標準を維持してきたが、再定義後は定義されたプランク定数を用いてワットバランス法および XRCD 法からキログラムを実現し、移送標準器 (T) の質量を決める。そして、この移送標準器を用いて BIPM のアンサンプルと呼ばれる参照標準器群 (reference standards) の質量を校正する。この参照標準器群は複数の白金イリジウム合金、ステンレス鋼、シリコン単結晶球体などから成り、材質の異なる複数の分銅を用いて管理することにより、IPK という唯一の分銅の質量変動に全体が影響されるようなリスクを排除することが検討されている。このような参照標準器群によって質量標準を維持・管理することは既に幾つかの NMI でも準備が進められている。また、メートル条約に加盟している全ての国の NMI がワットバランス法あるいは X 線結晶密度法によってキログラムを実現することができる状況にはないので、実現する能力を持たない NMI に対しては、BIPM の参照標準器群の平均値を用いて加盟国のキログラム原器を値付けすることが現実的な方法として検討されている。

現時点では XRCD 法もワットバランス法も大掛かりな実験が必要であるため、キログラムを短時間で実現できるような状況にはない。このため、図 6 に示した XRCD 法やワットバランス法によるキログラムの実現は、能力を有する限られた研究機関において当面の間は 5 年~10 年の周期で実施することになるものと予想される。このような研究機関は BIPM の参照標準器群に依存することなく、自らの技術レベルに応じた不確かさで質量標準を実現し、他機関あるいは他国の一次標準を校正することができるようになる。今後は、技術革新や研究開発によって、より高精度で便利な計測技術が開発されることになるものと予想される。

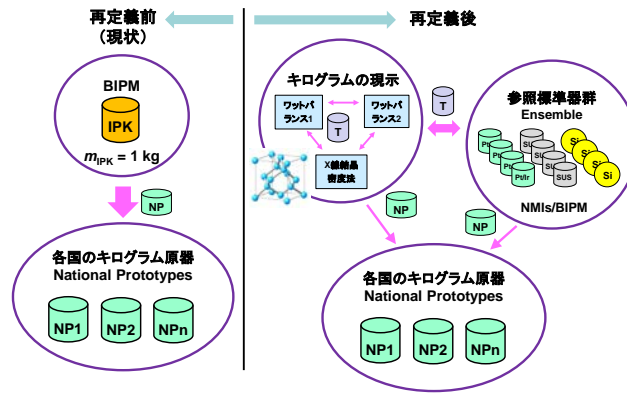


図6. キログラムの再定義前(左)と再定義後(右)における質量標準体系の比較
 再定義後はワットバランス法あるいはXRCD法によって定義されたプランク定数からキログラムを実現し移送標準器(T)の質量を決め、BIPMの参照標準器群の質量を値付けすることが検討されている。

7. 新たな定義がもたらすもの

このようにして実現される新しいキログラムの定義がもたらす恩恵として最も大きなものは、BIPMに保管されているIPKに頼ることなく、能力さえあれば誰もがプランク定数を基準としてキログラムを実現することができるようになることである。これは1983年に長さの定義が光速に移行し、光周波数さえ測れば誰もが長さ標準を実現できるようになったのと同じである。

また、従来の定義では1 kgという値に縛られ、そこからの分量あるいは倍量によって質量の範囲を拡張してきたが、新しい定義では任意の質量を実現することが可能になる。従って、新しい計測技術さえ開発すれば、現在の質量標準で実用化されている最も小さい分銅である1 mgよりも更に小さい質量を分銅に頼らずに実現することも可能になるであろう。このような微小質量計測技術は例えば創薬や環境計測、薄膜計測、ナノテクノロジーなどにも寄与するものと期待されている。

(2013年11月5日受付)

参 考 文 献

- 1) The International System of Units, 8th edition, Bureau International des Poids et Mesures (2006)
- 2) 「国際文書第 8 版(2006)/日本語版, 国際単位系(SI)」, 安心・安全を支える世界共通のものさし, 訳編者:産業技術総合研究所 計量標準総合センター, 第 1 版, 日本規格協会 (2007)
- 3) 藤井賢一: キログラムの再定義—単位の普遍性をめざして, 〈はかる〉科学, 第 2 章, 中公新書, 坂上孝・後藤武編著 (2007)
- 4) G. Girard: The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988-1992), *Metrologia*, 31, 317/336 (1994)
- 5) T. Quinn: The Kilogram: The Present State of Our Knowledge, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 40-2, 81/85 (1991)
- 6) 臼田孝: 「特集: 国際単位系 (SI) の体系紹介と最新動向について (概論)」, 計測と制御, 53-1, 74/79 (2014)
- 7) 藤井賢一: 国際単位系 SI—普遍定数に基づく再定義の動き, 数理科学, 599-5, 16/21 (2013)
- 8) 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, 68-6, 656/662 (1999)
- 9) 藤井賢一, 大苗敦: 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, 57-4, 239/246 (2002)
- 10) P. J. Mohr, B. N. Taylor and D. B. Newell: CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010, *Rev. Mod. Phys.*, 84-4, 1527/1605 (2012)
- 11) U. Bonse and M. Hart: Principles and Design of Laue-Case X-Ray Interferometers, *Z. Phys.*, 188, 154/164 (1965)
- 12) S. Valkiers, G. Mana, K. Fujii and P. Becker: Si primary standards for the calibration of ion-current ratios in the molar-mass measurement of natural Si single crystals, *Metrologia*, 48, S26/S31 (2011)
- 13) B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl, P. Becker, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, M. Gray, P. Fuchs, K. Fujii, H. Fujimoto, E. Kessler, M. Krumrey, U. Kuetgens, N. Kuramoto, G. Mana, P. Manson, E. Massa, S. Mizushima, A. Nicolaus, A. Picard, A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, S. Valkiers and A. Waseda: Determination of the Avogadro Constant by Counting the Atoms in a ^{28}Si Crystal, *Phys. Rev. Lett.*, 106 030801 (2011)
- 14) B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl, P. Becker, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, P. Fuchs, K. Fujii, H. Fujimoto, E. Kessler, M. Krumrey, U. Kuetgens, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, S. Mizushima, A. Nicolaus, A. Picard, A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, S. Valkiers, A. Waseda and S. Zakel: Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition, *Metrologia*, 48, S1/S13 (2011)
- 15) P. Becker, D. Schiel, H.-J. Pohl, A. K. Kaliteevski, O. N. Godisov, M. F. Churbanov, G. G. Devyatykh, A. V. Gusev, A. D. Bulanov, S. A. Adamchik, V. A. Gavva, I. D. Kovalev, N. V. Abrosimov, B. Hallmann-Seiffert, H. Riemann, S. Valkiers, P. Taylor, P. De Bièvre and E. Dianov: Large-scale production of highly enriched ^{28}Si for the precise determination of the Avogadro constant, *Meas. Sci. Technol.*, 17, 1854/1860 (2006)
- 16) A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, J. Schlote, B. Güttler and S. Valkiers: Molar mass of silicon highly enriched in ^{28}Si determined by IDMS, *Metrologia*, 48, S20/S25 (2011)
- 17) N. Kuramoto, K. Fujii, and K. Yamazawa: Volume measurements of ^{28}Si spheres using an interferometer with a flat etalon to determine the Avogadro constant, *Metrologia*, 48, S85/S95 (2011)
- 18) G. Bartl, H. Bettin, M. Lrystek, T. Mai, A. Nicolaus and A. Peter: Volume determination of the Avogadro spheres of highly enriched ^{28}Si with a spherical Fizeau interferometer, 48, S96/S103 (2011)
- 19) R. L. Steiner, E. R. Williams, R. Liu and D. B. Newell: Uncertainty improvements of the NIST electronic kilogram, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 56, 592/596 (2007)
- 20) M. Stock: Watt balance experiments for the determination of the Planck constant and the redefinition of the kilogram, *Metrologia*, 50, R1/R6 (2013)–