

# じつきょう 理科資料

NO. 82

サイエンス・プラザ

## プランク定数に基づくキログラムの新しい定義

産業技術総合研究所 計量標準総合センター  
工学計測標準研究部門 首席研究員 藤井 賢一

### 1. はじめに

キログラムは国際キログラム原器 (international prototype of the kilogram: IPK) の質量を単位として表される物理量である。国際単位系 (SI)<sup>1, 2)</sup> の基本単位であるメートル (m) やキログラム (kg) などの概念が明確になってきたのは、18 世紀末のフランス革命の頃に遡る。このとき、メートルは北極から赤道までの子午線の長さの 1 千万分の 1 として定義された。長さの単位が定義できたので、物体の形状を測れば体積の単位を決めることもできる。そこで当時は 4℃ における純水の最大密度を基準として、キログラムは最大密度にある純水 1 リットルの質量として定義された。しかし、質量を測る度に水の体積を測るのは大変なので、利便性の観点から分銅の質量に置き換えられた。このようにして作製された純粋な白金製の確定メートル原器と確定キログラム原器 (図 1) を基準として、1799 年に世界で最初にフランスでメー

トル法が公布された。

その後、メートル法の優位性は海外でも認められるようになり、1889 年にメートル条約に基づいて開催された第 1 回国際度量衡総会 (CGPM) において、キログラムは白金にイリジウムを 10% 混ぜて硬度を高めた白金イリジウム合金製の IPK によって定義された (図 2)。この定義が、今日まで変わることなく用いられている。しかし、図 3 に示す通り、IPK は人工物であるため、表面汚染の影響などにより、その質量の長期安定性は 50  $\mu\text{g}$  (1 億分の 5) 程度が限界であると考えられている<sup>3)</sup>。

このため、基礎物理定数<sup>4)</sup> などの決して変わることのない普遍的な定数に基づき、キログラムの定義を改定することが検討されるようになり、1999 年に開催された第 21 回 CGPM では、IPK の質量変動を測定し、キログラムの新しい定義を実現するための研究に、各国の計量標準研究機関

### ◆ も く じ ◆

サイエンス・プラザ  
プランク定数に基づくキログラムの

新しい定義…………… 1

ヘリウム化合物の発見  
— 貴ガス化学の新展開 — …………… 10

深海のフロンティア：

海底に眠る巨大鉱床の発見…………… 15

南アフリカ共和国の科学教育…………… 20

高校生へ私が選んだ 1 冊の本

植物の形には意味がある…………… 24

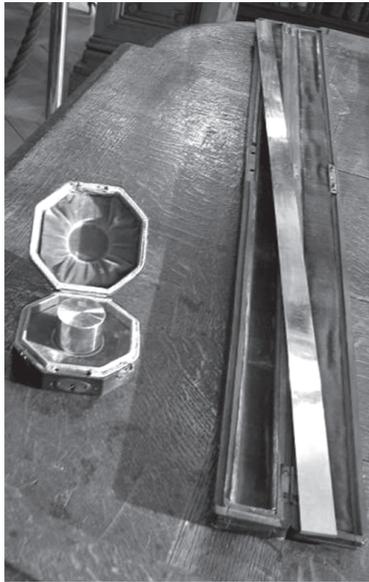


図1. 1799年にフランスのメートル法で採用された確定キログラム原器(左)と確定メートル原器(右)。いずれも純粋な白金製。

(NMI) が取り組むべきであることなどが勧告された。これを受けて単位諮問委員会 (CCU) では、キログラムだけではなくアンペア、ケルビン、モルを含む4つのSI基本単位をそれぞれプランク定数  $h$ 、電荷素量  $e$ 、ボルツマン定数  $k$ 、アボガドロ定数  $N_A$  を用いて再定義することを、早い段階から検討してきた<sup>5-7)</sup>。

このような議論を経て、2011年に開催された第24回CGPMにおいて、この4単位同時改定案が決議された。この決議では、定義を改定する時期と用いるべき基礎物理定数の値は決められなかったが、将来、これらの基礎物理定数の不確かさ(測定のばらつき)が十分に小さくなった段階で、科学技術データ委員会 (CODATA) の推奨値<sup>4)</sup>を用いて、これらのSI基本単位の定義を改定することが決議された。さらに2014年に開催された第25回CGPMでは、前回の決議を引き継ぐとともに、2018年に開催予定の第26回CGPMにおいて、これらの定義改定を実施するかどうかを審議することが決議されている。これが実現すると、キログラムについては130年ぶりの大改定となる。本稿では、このようなキログラムの定義改定をめぐる国際的な動きに触れながら、<sup>28</sup>Si 同位

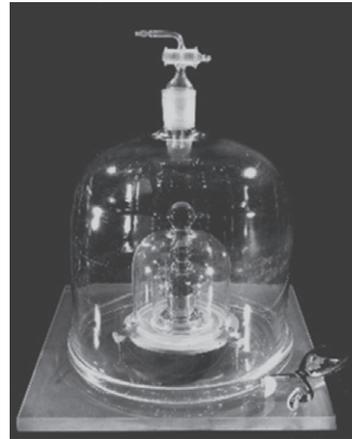


図2. 1889年にメートル条約に基づいて質量の単位の定義として採用された国際キログラム原器(直径、高さともに39mmの直円筒型の白金イリジウム合金製)。

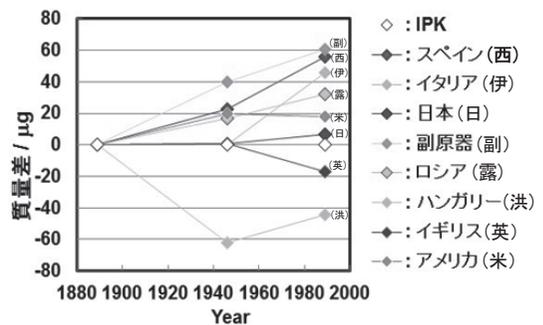


図3. 過去100年における国際キログラム原器 (IPK) と各国のキログラム原器との質量差の変動の履歴。

体濃縮結晶を用いた最新の測定結果や、定義改定がもたらす影響などについて紹介する。

## 2. キログラムの新しい定義についての考え方

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  $N_A$  に基づくものと、アインシュタインの関係式(特殊相対性理論と光子量子仮説)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  $h$  に基づくものだが、以前から検討されてきた。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 <sup>12</sup>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 <sup>12</sup>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  $N_A=6.022\cdots\times 10^{23}$  /mol の数値の部分に 1000/12 倍して求めることができる。

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。前述のアインシュタインの関係式を用いれば、エネルギーを  $E=mc^2=h\nu$  と表すことができる。ここで、 $m$  は物体の静止質量、 $\nu$  は光子の周波数（振動数）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によってそのエネルギーを表すことができるので、静止質量  $m$  と等価なエネルギーをもつ光子の周波数は、 $\nu=mc^2/h$  である。真空中の光の速さ  $c=299\,792\,458$  m/s は、1983 年の SI 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  $h=6.626\cdots\times 10^{-34}$  J $\cdot$ s を不確かさのない定数として定義してしまえば、

- 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。

キログラムの新しい定義を決める上で、アボガドロ定数とプランク定数のいずれを用いるべきであるかがしばしば議論されてきたが、両者の間には以下に示す厳密な関係式が成立する。

$$N_A = \frac{cM_e\alpha^2}{2R_\infty h} \quad (1)$$

ここで、 $c$  は光速、 $M_e$  は電子のモル質量、 $\alpha$  は微細構造定数、 $R_\infty$  はリュードベリ定数であり、式(1)右辺において  $h$  を除く基礎物理定数群は、 $4.5\times 10^{-10}$  の相対標準不確かさで既に求められている。この不確かさは  $h$  や  $N_A$  の現在の測定の不確かさよりも十分に小さいので、いずれの定数を用いてもキログラムを定義することが可能であることがわかる。

では、電気系の単位についてみる。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定義され、電気標準として広く用いられている。このため、プランク定数  $h$  をキログラムの定義に採用し、さらに電気素量  $e$  も定義してしまえば、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  $R_{K-90}$ )<sup>8)</sup> に頼ることなく、電圧や電気抵抗と同様に、SI としての電流の定義により交流ジョセフソン効果と量子ホール効果からアンペアを実現可能になる。よって、プランク定数によってキログラムを定義した方がアンペアの定義を改定する上でも便利である。このため、2011 年に開催された第 24 回 CGPM では、キログラムの定義として以下のように、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。

- キログラムは、 $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$  で表したときのプランク定数の値を正確に  $6.626\,06\cdots\times 10^{-34}$  J $\cdot$ s ( $=\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ ) と定めることによって設定される。

第 24 回 CGPM では同様にアンペア、ケルビン、モルの定義についても、電気素量  $e$ 、ボルツマン定数  $k$ 、アボガドロ定数  $N_A$  の値を明示する表現方法が採択されている。

このように、キログラムの定義にはプランク定数を採用することが検討されているが、プランク定数とアボガドロ定数の間には式(1)に示す厳密な関係が成立するので、原子の数を正確に測る技術を使ってもプランク定数からキログラムの定義を実現することができる。

### 3. X線結晶密度法によるキログラムの実現方法

アボガドロ定数  $N_A$  はモルの定義から求められる基礎物理定数なので、12 g の  $^{12}\text{C}$  に含まれる原子の数を数えればよいと思われるかもしれない。しかし、その数が膨大であるため、直接的に原子や分子の数を測るには天文学的に膨大な時間を要

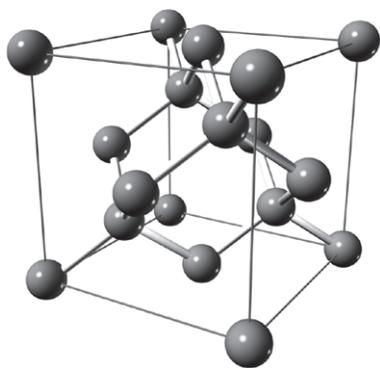


図4. シリコンの結晶構造。単位胞には平均で8個のシリコン原子が含まれる。格子定数  $a$  はこの立方体の一辺の長さを表す。

する。そこで、シリコン結晶などの完全性の高い結晶の格子面間隔を測定して原子の数を求める、X線結晶密度(x-ray crystal density: XRDC)法<sup>3, 9)</sup>と呼ばれる測定原理が開発されてきた。

図4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、アボガドロ定数は原子のモル質量をその原子1個あたりの質量で割った値に等しいので、 $N_A = M(\text{Si})/m(\text{Si})$  と表される。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。

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

式(2)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  $a = (2^2 + 2^2 + 0^2)^{1/2} d_{220} = 8^{1/2} d_{220}$  として求められる。

自然界のシリコンには安定同位体  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$  が存在し、それらの存在比はそれぞれ約92%, 5%, 3%である。これらの核種の相対原子質量  $A_r(^i\text{Si})$  は、 $10^{-9}$  よりも小さい相対標準不確か



図5. FZ(浮遊帯域)法で引き上げられた濃縮度99.99%, 質量5kgの $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶<sup>11, 12)</sup>。

さで既に求められているので、それぞれの核種の存在比  $f(^i\text{Si})$  を質量分析計などで測定すれば、その平均モル質量を次式から求めることができる。

$$M(\text{Si}) = f(^{28}\text{Si})M(^{28}\text{Si}) + f(^{29}\text{Si})M(^{29}\text{Si}) + f(^{30}\text{Si})M(^{30}\text{Si}) \quad (3)$$

ただし、各核種のモル質量は  $M(^i\text{Si}) = A_r(^i\text{Si})$  g/mol として求められる。

X線結晶密度法による従来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、同位体比  $f(^i\text{Si})$  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の相対標準不確かさは最も小さい場合でも  $2.4 \times 10^{-7}$  程度だった<sup>10)</sup>。

### 3.1 シリコンの同位体濃縮

この問題を解決するために、 $^{28}\text{Si}$  を同位体濃縮した単結晶を作製し、 $N_A$  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 Project: IAC Project) が2004年から始まった<sup>11, 12)</sup>。このプロジェクトには現在、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), 国際度量衡局 (BIPM) が参加している。遠心分離法による同位体濃縮<sup>13)</sup> などを経て 99.99% まで同位体濃縮された 5 kg の <sup>28</sup>Si 同位体濃縮結晶が 2007 年に完成した (図 5)。このようなシリコンの大規模な同位体濃縮とその結晶化を行ったのは, この国際プロジェクトが世界で最初である。

### 3.2 X線干渉計による格子定数の測定

結晶の格子定数は, 通常はブラッグ回折によって X 線の波長とその回折角から求められるが, これらをキログラムの定義改定に必要とされる精度で測定することは, 困難である。このため, 光の波長を基準として格子定数を測定することが可能な, X 線干渉計が開発されてきた。その測定原理を図 6 に示す。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 (ここでは 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, X 線の強度変化をアナライザーの移動距離の関数として測定すれば, X 線の波

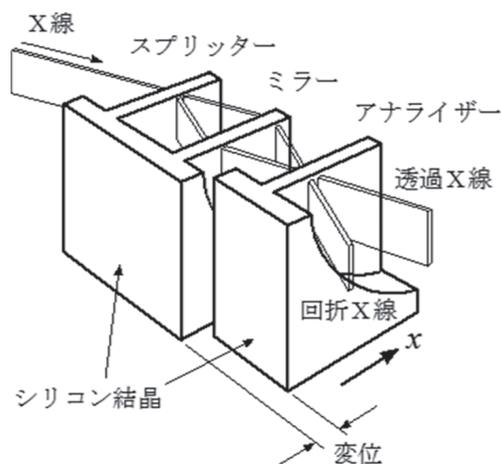


図 6. X 線干渉計による格子定数の測定原理<sup>3,9)</sup>。アナライザーを走査すると, 回折 X 線と透過 X 線は干渉し格子面間隔に等しい周期で明滅する。X 線の強度変化をアナライザーの移動距離の関数として測定すれば, 光の波長を基準として格子面間隔を絶対測定することができる。

長や回折角の測定に頼ることなく, 結晶の格子面間隔を測定することができる。

X 線の明滅を観測するためには極めて高い精度でアナライザーを並進運動させる必要があり, そのためには数ナノラジアン ( $\text{nrad}=10^{-9}\text{rad}$ ) の変動幅でアナライザーの角度を一定に保つ必要がある。このため, 従来の X 線干渉計では一体切り欠き型の弾性ヒンジを用いた移動ステージなどが用いられてきたが, その変位は最大でも 0.1 mm 程度に限られていた。このため, 格子定数の測定精度を向上させることが困難だった。

この問題を解決するために INRIM の Massa ら<sup>14)</sup> は図 7 に示すように, 移動距離 50 mm のステージ上に設置された 3 個の圧電素子 (PZT) を用いてアナライザーの動きを制御し, 極めて高い精度での並進運動を実現しながら, 約 50 mm にも及ぶ大きな移動距離を確保することに成功した。この開発によって格子面間隔  $d_{220}$  の測定の不確かさは従来の約 1/10 程度に低減され, 2015 年には  $1.8 \times 10^{-9}$  の相対標準不確かさで測定できるようになった。

### 3.3 球体を用いた密度測定

アボガドロ国際プロジェクトでは, 密度の測定精度を極限まで向上させるために, 質量 1 kg, 直径約 94 mm の球体 2 個を <sup>28</sup>Si 同位体濃縮結晶から切り出して研磨し, それらの直径測定, 表面計測, 質量測定などから密度を直接測る方法を採用した。

球体はオーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO) で研磨され, 直径の凹凸の最大値約 70 nm, 標準偏差約 7 nm の球体を得られた。真球度の高い球体の体積は, その平均直径からより精密に求めることができる。NMIJ の倉本ら<sup>15)</sup> は, 図 8 に示す直径測定用レーザー干渉計を開発し, 約 1000 方位からの直径測定によってその体積を求めた。

CSIRO で研磨された 2 個の同位体濃縮シリコン球体の表面は, 厚さ約 1 nm ~ 2 nm の自然酸化膜だけではなく, 研磨過程で生じた厚さ約

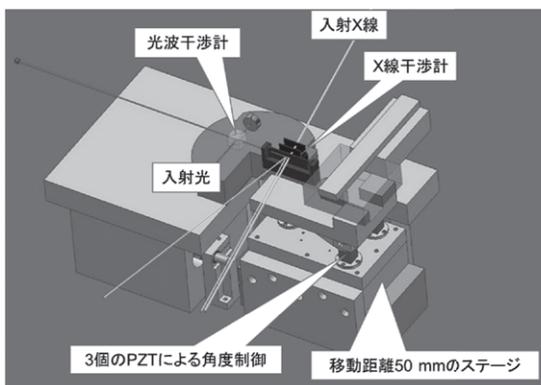


図7. Massaら<sup>14)</sup>が開発したX線干渉計。移動距離50 mmのステージ上に設置された3個のPZTIによって、アナライザーの変位拡大と並進運動の両立を実現している。

0.3 nmのNiやCuなどの金属不純物でも覆われている。このため、アボガドロ国際プロジェクトでは、純粋なシリコン単結晶の部分の体積と質量から密度を求めるために、分光エリブソメトリー(SE)、X線反射率法(XRR)、X光電子分光法(XPS)、X線蛍光分析法(XRF)など、複数の表面計測技術を用いて球体表面に存在する物質の種類、化学組成、厚さ、質量などを評価し、直径測定における表面の影響の標準不確かさを0.4 nm ( $4 \times 10^{-9}$ )まで低減させた<sup>16)</sup>。

温度測定の不確かさなど、全ての影響を考慮した直径測定の標準不確かさは0.9 nmであり、球体の質量測定<sup>17)</sup>や表面多層膜の質量評価<sup>16)</sup>の不確かさなどを含めると、 $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶の密度測定の相対標準不確かさは約 $2.0 \times 10^{-8}$ である。

### 3.4 同位体希釈分析法によるモル質量の測定

シリコンの同位体比を測定するために従来は気体質量分析法<sup>10)</sup>が用いられてきたが、ドイツのPTBでは $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶の測定に適した同位体希釈分析法を新たに開発した。この方法の特徴は、 $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶の主要成分である $f(^{28}\text{Si})$ を直接測定するのではなく、微量成分である $f(^{29}\text{Si})$ と $f(^{30}\text{Si})$ の測定から $f(^{28}\text{Si}) = 1 - f(^{29}\text{Si}) - f(^{30}\text{Si})$ として式(3)からモル質量を導くことにある。また、シリコン結晶を溶媒(NaOH、水酸化ナトリウム水溶液など)に溶かすだけでよ

いので、自然同位体比のシリコンが混入するリスクも低い。この方法によってPTBは $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶のモル質量測定の相対標準不確かさを $8.2 \times 10^{-9}$ まで向上させることに成功した<sup>18)</sup>。

同位体希釈分析法による $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶のモル質量の測定は、日本のNMIJの成川ら<sup>19)</sup>によっても行われ、溶媒にはイオン電流の測定におけるノイズを低減させるためにTMAH(tetramethylammonium hydroxide)が用いられた。その結果、 $^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶のモル質量測定の相対標準不確かさを $5.2 \times 10^{-9}$ まで低減することに成功した。この測定結果は、前述のPTBの測定結果と不確かさの範囲内でよく一致する。

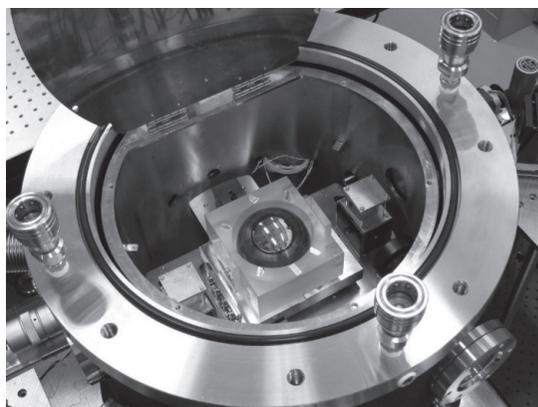


図8. シリコン球体の直径(約94 mm)をサブナノメートルの精度で測るレーザー干渉計。

## 4. 測定結果

$^{28}\text{Si}$ 同位体濃縮結晶の格子定数、密度、モル質量などの測定から求められたアボガドロ定数の値は

$$N_A = 6.022\,140\,82(11) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (4)$$

であり、その相対標準不確かさは $1.8 \times 10^{-8}$ である(1億分の1.8)<sup>11, 12, 20, 21)</sup>。

図9に2015年までに得られたプランク定数の主な値の比較を示す。この図からわかるように、アボガドロ国際プロジェクトで得られた式(4)の値とカナダの研究機関(NRC)のワットバランス<sup>3)</sup>で2015年に得られた値は非常によく一致し、両者の不確かさはほぼ同じである。一方、米国標準技術研究所(NIST)のワットバランスで得られ

た2015年の値の不確かさはやや大きい。しかし、これら3つの値は統計的に整合しているので、これらの値の重み付け平均から、科学技術データ委員会による基礎物理定数の2014年の推奨値が決められた。このようにして導かれたプランク定数の2014年の推奨値 (CODATA 2014) は

$$h = 6.626\,070\,040\,(81) \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \quad (5)$$

であり、その相対標準不確かさは  $1.2 \times 10^{-8}$  (1億分の1.2) である。これはプランク定数の相対標準不確かさがIPKの質量の長期安定性である  $5 \times 10^{-8}$  (1億分の5) よりも十分に小さくなってきたことを表す。

### 5. キログラムの実現

キログラムの定義を改定する前に、共通のプランク定数を用いて各国の計量標準研究機関(NMI)が独立して測定し得られた質量が、不確かさの範囲内で整合するかどうかを確かめておくことも重要である。そこで、質量関連量諮問委員会(CCM)では2015年からキログラムの定義の実現(realization)に関する先導研究(Pilot Study)を開始した。現在、ワットバランス法<sup>3)</sup>やX線結晶密度法でキログラムの定義を実現することができるNMIJ, PTB, NRC, NISTなどでは、共通のプランク定数の値(CODATAの2014年の推奨値)を使って、各NMIが独立してキログラムの定義を実現し、その整合性を確認するための実験が進行中である。

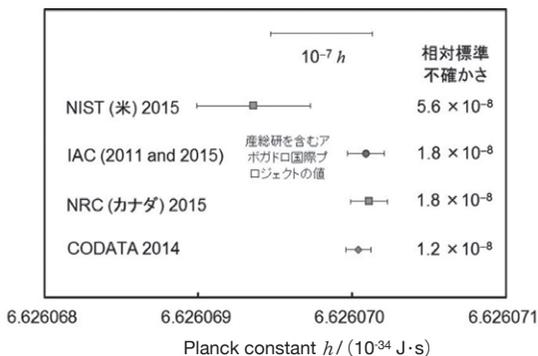


図9. 2015年までに報告されたプランク定数の主な値の比較

日本においても、NMIJが<sup>28</sup>Si同位体濃縮結晶球体を用いて確認実験を行っている。<sup>28</sup>Si同位体濃縮結晶の格子定数  $a$  とモル質量  $M$  は、一度測定してしまえば変化しないと考えられるので、その球体の直径、体積、表面層の詳細な測定から、質量を求めようとしている。

しかし現実には、図10のように、球体表面に酸化膜 ( $\text{SiO}_2$ ) などのいくつかの層が存在する。これらの層の厚さは数ナノメートル、質量は約  $100 \mu\text{g}$  に及ぶので、キログラムの定義を実現する上では無視できない。このため分光エリプソメトリー (SE) や X 光電子分光法 (XPS) などを用いて表面層の厚さと質量を測定しておく。表面層の質量  $m_{\text{SL}}$  を除いた結晶部分の質量  $m_{\text{core}}$  は、基礎物理定数の関係式 (1) 及び (2) から以下の式で表される。

$$m_{\text{core}} = \frac{2hR_{\infty}}{ca^2} \cdot \frac{\sum_i f(^i\text{Si})A_i(^i\text{Si})}{A_r(\text{e})} \cdot \frac{8V_{\text{core}}}{a^3} - m_{\text{deficit}} \quad (6)$$

ここで、 $V_{\text{core}}$  はレーザー干渉測定と表面分析

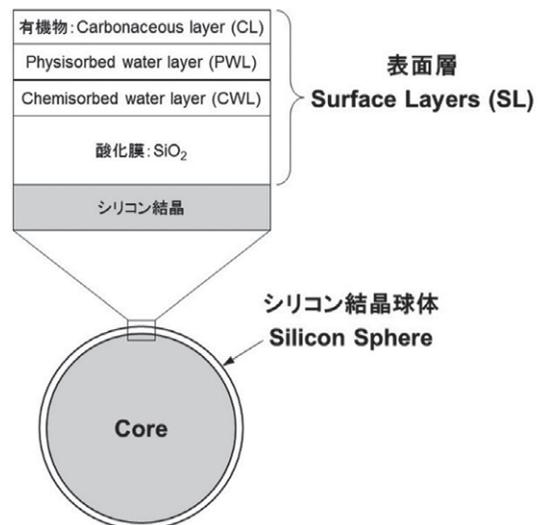


図10. シリコン結晶球体の表面には酸化膜 ( $\text{SiO}_2$ ) など厚さの合計が  $1 \text{ nm} \sim 2 \text{ nm}$  の層 (surface layer: SL) が存在する。表面分析によってこれらの層の厚さと質量を評価し、結晶の部分 (core) の体積と質量からアボガドロ定数を導く。キログラムを実現する場合には、X線結晶密度法によって core の部分の質量  $m_{\text{core}}$  を求め、それに表面層の質量  $m_{\text{SL}}$  を加えて、シリコン結晶球体全体の質量  $m_{\text{sphere}}$  を求める。

から求められる<sup>28</sup>Si 同位体濃縮結晶球体の結晶部分の体積,  $A_r(^i\text{Si})$  はシリコン同位体<sup>i</sup>Siの相対原子質量,  $A_r(e)$  は電子の相対原子質量,  $m_{\text{deficit}}$  は不純物や原子空孔などの点欠陥の影響を表す。実際の球体の質量は,  $m_{\text{core}}$  に表面酸化膜や表面汚染層の質量  $m_{\text{SL}}$  を加えて求められる。この Pilot Study の結果が得られるのは 2017 年秋の予定であり, キログラムの定義改定を実施するかどうかを判断する上での重要な指標になるだろう。

## 6. キログラムの新しい定義がもたらすもの

キログラムの定義改定がもたらす恩恵として最も大きなものは, 国際度量衡局 (BIPM) に保管されている国際キログラム原器 (IPK) に頼ることなく, 技術さえあれば誰もがプランク定数に基づいて質量の基準を持つことができるようになるということである。これは, 1983 年に長さの定義が光の速さに移行し, 光周波数さえ測れば, 誰もが長さの基準を持てるようになったのと同じである。

キログラム, アンペア, ケルビン, モルの基準がそれぞれプランク定数  $h$ , 電気素量  $e$ , ボルツマン定数  $k$ , アボガドロ定数  $N_A$  に移行すると, 注意を要する点も幾つかある。現行の定義では, 2本の導体間に電流を流したときに導体間に生じる単位長さあたりの力によってアンペアが定義されているので, 磁気定数 (真空の透磁率) はアンペールの法則から厳密に  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$  となる。定義改定を実施して電気素量  $e$  を不確かさのない定数として定義した場合でも, 以下の関係式を満足する必要がある。

$$\mu_0 = \frac{2ah}{ce^2} \quad (7)$$

式(7)において定義改定後に  $h$ ,  $c$ ,  $e$  は不確かさのない定数として扱われることになるが, 無次元量である微細構造定数  $\alpha$  の値を人為的に定めることはできないので,  $\mu_0$  は  $\alpha$  の値に応じて変化する測定量 (measurand) となる。同様に電気定数 (真空の誘電率)  $\epsilon_0$  の値も測定量となる。

COADTA の 2014 年推奨値によれば微細構造定数  $\alpha$  の値は  $2.3 \times 10^{-10}$  の相対標準不確かさで既に求められているので,  $\mu_0$  の値に大きな変化はないが, 今後の実験と理論の改良によって  $\alpha$  の値は変化する。これまで  $\mu_0$  と  $\epsilon_0$  は不確かさのない定数として扱われてきたので定義改定後は注意を要する。

同様に現行のモルの定義から炭素 <sup>12</sup>C のモル質量  $M(^{12}\text{C})$  は厳密に 12 g/mol であるが, 炭素原子 <sup>12</sup>C と電子とのモル質量比  $M(^{12}\text{C})/Me$  はそれらの相対原子質量比  $A_r(^{12}\text{C})/A_r(e) = 12/A_r(e)$  に厳密に等しいので,  $M(^{12}\text{C}) = 12Me/A_r(e)$  となる。この  $Me$  に式 (1) を代入すると以下の関係式が成立する。

$$M(^{12}\text{C}) = \frac{24N_A h R_\infty}{c\alpha^2 A_r(e)} \quad (8)$$

式(8)において定義改定後に  $N_A$ ,  $h$ ,  $c$  は不確かさのない定数として扱われることになるが, リュードベリ定数  $R_\infty$ , 微細構造定数  $\alpha$  の値を人為的に定めることはできない。このため, 炭素 <sup>12</sup>C のモル質量  $M(^{12}\text{C})$  もこれらの値に応じて変化する測定量となる。化学の分野でも永年  $M(^{12}\text{C})$  は不確かさのない定数として扱われてきたので, 定義改定後はその扱いに注意を要する。

現在の SI ではキログラムだけが人工物に頼る最後の単位として残っているが, 最近の計測技術の進歩によって早ければメートル条約に基づいて 2018 年に開催される第 26 回 CGPM において, 130 年ぶりにその定義が改定されることになるものと予想される。これによって単位系の定義は人工物から解放され, 物理量の単位の基準は全て基礎物理定数によって置き換えられることになる。これは物理量の概念におけるパラダイムシフトをもたらすものである。新しい定義はこれまで測定することが困難だった微小な質量や力を精度よくプランク定数に関係づける新しい測定原理の登場を促すことになるだろう。

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)」, 訳編者: 産業技術総合研究所計量標準総合センター (日本規格協会, 2007).
  - 3) 藤井賢一: キログラムの定義改定に向けた質量標準の開発動向, 日本物理学会誌, 2014, Vol. 69, No. 9, pp. 604-612.
  - 4) P. J. Mohr, B. N. Taylor, D. B. Newell: CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014, *Rev. Mod. Phys.*, 2016, Vol. 88, 035009.
  - 5) Ian M. Mills, Peter J. Mohr, Terry J. Quinn, Barry N. Taylor, Edwin R. Williams: Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005), *Metrologia*, 2006, Vol. 43, pp. 227-246.
  - 6) P. Becker, P. De Bièvre, K. Fujii, M. Gläser, B. Inglis, H. Luebbig, G. Mana: Considerations on future redefinitions of the kilogram, the mole and of other units, *Metrologia*, 2007, Vol. 44, pp. 1-14.
  - 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, 2013, 第51巻, 第5号, No. 599, pp. 16-21.
  - 8) 遠藤忠: 新しい電気の量子基準—ジョセフソン効果電圧標準と量子ホール効果抵抗標準—, 応用物理, 1990, Vol. 59, No. 6, pp. 712-724.
  - 9) K. Fujii, H. Bettin, P. Becker, E. Massa, O. Rienitz, A. Pramann, A. Nicolaus, N. Kuramoto, I. Busch, M. Borys: Realization of the kilogram by the XRCD method, *Metrologia*, 2016, Vol. 53, No. 5, A19-A45.
  - 10) S. Valkiers, G. Mana, K. Fujii, P. Becker: Si primary standards for the calibration of ion-current ratios in the molar-mass measurement of natural Si single crystals, *Metrologia*, 2011, Vol. 48, No. 2, pp. S26-S31.
  - 11) 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, A. Waseda: Determination of the Avogadro Constant by Counting the Atoms in a  $^{28}\text{Si}$  Crystal, *Phys. Rev. Lett.*, 2011, Vol. 106, 030801.
  - 12) 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, S. Zakel: Counting the atoms in a  $^{28}\text{Si}$  crystal for a new kilogram definition, *Metrologia*, 2011, Vol. 48, No. 2, pp. S1-S13.
  - 13) 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, E. M. Dianov: Large-scale production of highly enriched  $^{28}\text{Si}$  for the precise determination of the Avogadro constant, *Meas. Sci. Technol.*, 2006, Vol. 17, pp. 1854-1860.
  - 14) E. Massa, G. Mana, U. Kuetgens, L. Ferroglio: Measurement of the  $\{2\ 2\ 0\}$  lattice-plane spacing of a  $^{28}\text{Si}$  x-ray interferometer, *Metrologia*, 2011, Vol. 48, No. 2, pp. S37-S43.
  - 15) N. Kuramoto, K. Fujii, K. Yamazawa: Volume measurements of  $^{28}\text{Si}$  spheres using an interferometer with a flat etalon to determine the Avogadro constant, *Metrologia*, 2011, Vol. 48, No. 3, pp. S83-S95.
  - 16) I. Busch, Y. Azuma, H. Bettin, L. Cibik, P. Fuchs, K. Fujii, M. Krumrey, U. Kuetgens, N. Kuramoto, S. Mizushima: Surface layer determination for the Si spheres of the Avogadro project, *Metrologia*, 2011, Vol. 48, No. 2, pp. S62-S82.
  - 17) A. Picard, P. Barat, M. Borys, M. Firlus, S. Mizushima: State-of-the-art mass determination of  $^{28}\text{Si}$  spheres for the Avogadro project, *Metrologia*, 2011, Vol. 48, No. 2, pp. S112-S119.
  - 18) A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, J. Schlote, B. Güttler, S. Valkiers: Molar mass of silicon highly enriched in  $^{28}\text{Si}$  determined by IDMS, *Metrologia*, 2011, Vol. 48, No. 2, pp. S20-S25.
  - 19) T. Narukawa, A. Hioki, N. Kuramoto, K. Fujii: Molar-mass measurement of a  $^{28}\text{Si}$ -enriched silicon crystal for determination of the Avogadro constant, *Metrologia*, 2014, Vol. 51, No. 2, pp. 161-168.
  - 20) Y. Azuma, P. Barat, G. Bartl, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, L. Cibik, G. Agostino, K. Fujii, H. Fujimoto, A. Hioki, M. Krumrey, U. Kuetgens, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, R. Meess, S. Mizushima, T. Narukawa, A. Nicolaus, A. Parmann, S. Rabb, O. Rienitz, C. Sasso, M. Stock, R. Vocke, A. Waseda, S. Wundrack, S. Zakel: Improved measurement results for the Avogadro constant using a  $^{28}\text{Si}$ -enriched crystal, *Metrologia*, 2015, Vol. 52, No. 2, pp. 360-375.
  - 21) G. Mana, E. Massa, C. P. Sasso, M. Stock, K. Fujii, N. Kuramoto, S. Mizushima, T. Narukawa, M. Borys, I. Busch, A. Nicolaus, A. Pramann: The Correlation of the NA Measurements by Counting  $^{28}\text{Si}$  Atoms, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2015, Vol. 44, No. 3, 031209.