

優秀  
作品

あいまいをハカリにかけて  
気分スツキリ

茨城県 大山 萌さん

見る目聴く耳感じる手  
通う心で計量管理!

岡山県 貝吹 哲也さん

最優秀  
作品

はかる手で  
うみだす信頼  
重ねる信用

大阪府 増永 隆義さん

平成21年度の最優秀作品及び優秀作品

# 計量の ひろば

No.53

特集1 質量の単位の定義をめぐる  
最近の動き

特集2 標準物質が私たちの生活の  
安心・安全を守る

厳しい眼で、  
正確さを極めたい。

## 計量啓発標語とは

経済産業省・独立行政法人・行政機関・中央計量団体で構成される計量記念日組織委員会(事務局:社団法人日本計量振興協会)が、多くの方々に正確な計量への意識を高めていただくことを目的に、計量啓発標語の募集を、平成13年度から毎年実施しています。9年目にあたる昨年(平成21年度)は、全国から721点の応募がありました。

## 募集から受賞作品決定までのスケジュール

- |         |  |
|---------|--|
| 毎年4月15日 | 地方計量行政機関、計量関係団体、企業を通じて作品を募集します。                      |
| 9月10日   | 応募を締め切ります。   |
| 10月中旬   | 計量記念日実行委員会において応募作品を厳正に審査し、最優秀作品1点、優秀作品2点、佳作数点を選定します。 |
| 11月1日   | 計量記念日全国大会において、最優秀作品及び優秀作品を発表・表彰します。                  |

平成22年度のポスターは、計量も、計測も、厳しい眼で正確さを極めることが大切であることを、綿密な戦略とねらったところに正確なコントロールでストーンを投じるカーリング選手の真剣な眼差しで表現することを試み、キャラクターには2006年トリノ冬季五輪、2010年バンクーバー冬季五輪カーリング競技女子日本代表の本橋麻里さんを起用しました。

**オートレース**  
Auto Race

この印刷物は、  
オートレースの補助金を受けて  
制作したものです。

<http://autorace.jp/>

発行日 平成22年9月15日

発行所 **社団法人 日本計量振興協会**

〒162-0837 東京都新宿区納戸町25-1

TEL.03-3268-4920(代表)

<http://www.nikkeishin.or.jp/>

11月1日は計量記念日



# 質量の単位の定義をめぐる最近の動き 進展するキログラム再定義のための研究

## キログラムの由来は水の重さ

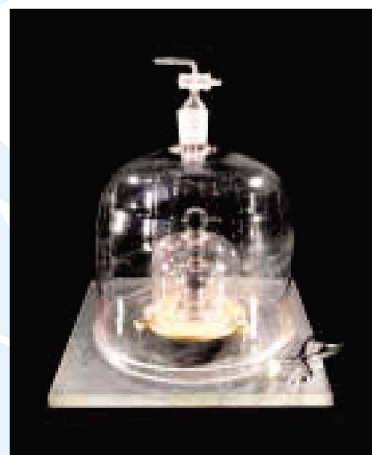
質量、長さ、時間、温度などの物理量を表すために、現在では世界共通の単位系として国際単位系(SI)が用いられています。SIは「科学のこぼれ」とも呼ばれることがあるように、SIのルールにしたがって物理量を書き表せば、世界中でその意味を互いに理解することができます。物理量は一般に[数値]×[単位]で表されるので、単位の定義とその表現方法を世界共通化しておけば、たとえ言語が異なっても物理量の大きさを正しく把握することができるのです。SIにはSI基本単位とSI組立単位があり、キログラム(kg)、メートル(m)、秒(s)、ケルビン(K)、アンペア(A)、モル(mol)、カンデラ(cd)からなる七つのSI基本単位と、それらの組み合わせからなるSI組立単位を用いれば、全ての物理量の単位を表すことができるようになっています。特にSI基本単位はSIの根幹をなすものなので、その定義はメートル条約にもとづいて組織された国際度量衡総会(CGPM)の決議によって決められています。

現在用いられているキログラムやメートルなどの基本単位の概念が明確になってきたのは、フランス革命のあった18世紀末に遡ります。この頃、欧州においてバルセロナとダンケルクの間の子午線の長さを測量するという一大事業が完了し、人類は地球という当時は普遍であると考えられていた天体の大きさを基準として、長さの単位を実現することに成功しました。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として定義されました。この定義にもとづいて作られたのが確定メートル原器です。長さの単位が定義できたので、物体の形状を測定すれば体積の単位を実現することができます。当時、4℃における水の最大密度は普遍であると考えられていたので、キログラムは最大密度にある水1リットルの質量として定義されました。この研究を行ったのが近代化学の父ラヴォアジエです。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ました。このように作られた確定メートル原器と、確定キログラム原器を基準とするメートル法は1799年にフランスで公布されました。これらの純白金製の確定原器は、現在でもフランスの国立公文書館に大切に保管されています。

## 白金イリジウム製のキログラム原器

19世紀に入ると欧州においてメートル法の優位性が徐々に認められるようになり、1875年に欧州17カ国によってメートル条約が締結されました。このとき原器の保管と単位実現のための研究を行う国際機関として設立されたのが、パリ近郊のセーブルにある国際度量衡局(BIPM)です。確定メートル原器と確定キログラム原器は純粋な白金から作られていましたが、白金は軟らかく磨耗に弱いので、硬度を高めるためにイリジウムを10%混ぜた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新たに作られ、1889年に開催された第1回CGPMにおいて、これらの国際原器がメートルとキログラムの単位として承認されました。メートル条約に既に加盟していた日本は、国際原器との比較によって値付けされた日本国キログラム原器と日本国メートル原器をこのとき受領しています。

20世紀に入ると科学技術の進歩によりメートル原器は不要となり、長さの単位は1960年にクリプトンランプの波長に置き換えられました。さらに光周波数計測技術の進歩により1983年には、光速を基準とする定義に置き換えられ、現在では光周波数を測定することができれば、誰もが長さの単位を実現することができます。しかし、七つのSI基本単位のなかで、キログラムだけは今でも原器によって定義される唯一の単位として残っています。このため世界各国の質量標準は、国際キログラム原器との比較による定期校正により値付けされたキログラム原器を用いて維持・管理されています。しかし、1988年から1992年に実施された定期校正で得られた知見によれば、白金イリジウム合金製の分銅の質量の長期安定性は50マイクログラム程度であると推定されています。これは1キログラムに対して相対的に $5 \times 10^{-8}$ の変動幅に相当するので、より普遍的な基準を使ってキログラムを再定義することが世界の幾つかの計量標準研究機関で研究されています。



国際キログラム原器  
(写真提供:BIPM)

## 基礎物理定数でキログラムを再定義

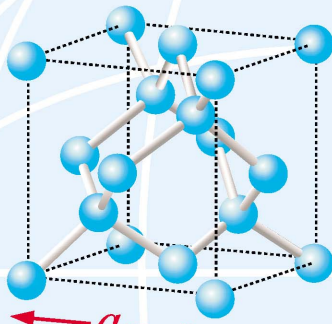
単位の定義には一定普遍の基準を用いなければなりません。18世紀末のフランス人が、メートルとキログラムの基準に用いたのは地球の大きさと水の密度でした。21世紀の現代科学において我々が最も一定普遍であると考えているのは基礎物理定数です。基礎物理定数の多くは20世紀に発見され、理論と計測技術の発展とともに高精度化されてきました。現在、国際度量衡委員会(CIPM)の単位諮問委員会(CCU)、質量関連量諮問委員会(CCM)、電気・磁気諮問委員会(CCEM)などで検討されているキログラムの再定義案に用いられている基礎物理定数は、アボガドロ定数とプランク定数です。アボガドロ定数による定義は、原子の数から質量を決めるという比較的古くからある考え方です。一方、プランク定数による定義は、相対性理論と光電効果によって光子(電磁波)のエネルギーと質量とを関係づけるという、比較的新しい考え方に基づいています。

基礎物理定数	記号	再定義案
アボガドロ定数	$N_A$	キログラムは $5.018 \dots \times 10^{25}$ 個の炭素原子 $^{12}\text{C}$ の質量に等しい。
プランク定数	$h$	キログラムは周波数が $[(299\,792\,458)^2 / (6.626 \dots \times 10^{-34})]$ ヘルツの光子のエネルギーと等価な質量である。

## シリコンでアボガドロ定数を測定

アボガドロ定数の測定には通常、シリコン単結晶が用いられます。これはシリコンからは大寸法、高純度、無欠陥の単結晶が比較的容易に得られ、半導体産業などにおいてその物理的性質が既に良く知られているからです。シリコン結晶の最小単位は一辺の長さが $a$ の立方体です。 $a$ は格子定数と呼ばれます。この立方体には平均で8つの原子が含まれ、その体積は $a^3$ です。結晶の原子レベルの密度が巨視的な密度 $\rho$ に等しいと仮定すると、シリコン原子1個あたりの質量 $m$ は $\rho a^3/8$ に等しくなります。したがって、シリコンのモル質量を $M$ とするとアボガドロ定数は $N_A = 8M/(\rho a^3)$ として求められます。自然界のシリコンには安定同位体 $^{28}\text{Si}$ 、 $^{29}\text{Si}$ 、 $^{30}\text{Si}$ がそれぞれ約92%、5%、3%の割合で存在しますが、各同位体(核種)のモル質量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、シリコンのモル質量 $M$ を求めることができます。

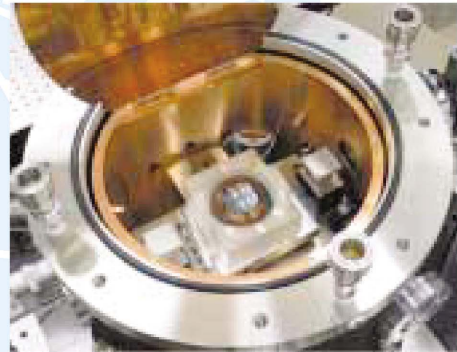
キログラムの再定義を実現するうえで技術的に大きな問題となっていたのは、アボガドロ定数 $N_A$ とプランク定数 $h$ の測定結果に大きな食い違いがあったということです。 $N_A$ はシリコン単結晶の格子定数、密度、モル質量などの精密測定から求められ、さらに基礎物理定数の間の関係式を使うと $h$ へと変換することができます。このようにして求めた $h$ は、ジョセフソン効果と量子ホール効果を使ってワットバランス法から求めた $h$ と相対的に約 $1 \times 10^{-6}$ もの隔たりがあり、異なる測定原理で測定したプランク定数が測定の不確かさの範囲内で一致しないというのが、2003年までに得られていた実験結果でした。国際キログラム原器の質量の長期的安定性は約 $5 \times 10^{-8}$ であると推定されているので、基礎物理定数の一致度がそれよりも良くならなければキログラムを再定義することは難しいと考えられていたのです。



シリコンの結晶構造

です。それまでのアボガドロ定数は自然界のシリコンを原料とする単結晶から求められていたので、モル質量の測定に $1 \times 10^{-7}$ 程度の相対標準不確かさがあり、これがアボガドロ定数を決める上でのボトルネックとなっていました。この問題を解決するために、この国際プロジェクトでは $^{28}\text{Si}$ 同位体を99.99%まで濃縮し、モル質量の測定精度を従来よりも一桁高い $1 \times 10^{-8}$ まで向上させることを目指しています。遠心分離技術による同位体濃縮、化学精製、多結晶化などを経て2007年5月に5kgの $^{28}\text{Si}$ 単結晶が完成しました。

この結晶から直径94mm、真球度7nm、質量約1kgの球体を2個研磨し、NMIJ、PTB、NMI、BIPMにおいて直径や体積、質量の国際比較を行ってきました。特にNMIJではシリコン球体の直径をサブナノメートルの精度で測定するためのレーザ干渉計などを新たに開発し、直径や体積の高精度化を図りました。格子定数やモル質量の測定にも多くの改良が加えられ、最近ではアボガドロ定数を $3 \times 10^{-8}$ の相対標準不確かさで測定することが可能になってきています。これは、計測技術の精度がようやくキログラム原器の質量安定性を上回るようになってきたことを表します。



シリコン球体の直径をサブナノメートルの精度で測定するレーザ干渉計

シリコンの同位体を濃縮した結晶から得られたアボガドロ定数は、ワットバランス法など他の測定原理から求められた値とも比較的良く一致するようになってきたので、最近ではキログラムの再定義案が国際的にも支持されるようになってきています。研究課題はまだ残っていますが、この国際プロジェクトが終了する2011年3月までには最終的な測定結果が得られる予定です。これらの研究成果は、基礎物理定数という人類共通の科学技術データの整備に加えて、人工物で定義されている最後のSI基本単位の再定義に道を拓くものとなるでしょう。新しい定義が実現すれば、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ります。【NMIJ 藤井賢一】

## アボガドロ定数の国際プロジェクト

このような背景から、アボガドロ定数を測定するための研究を行ってきた世界の計量標準研究機関が協力して、質量数28のシリコン同位体を濃縮してアボガドロ定数の測定精度を $2 \times 10^{-8}$ 程度まで向上させるための国際共同研究が2004年から始まりました。この国際プロジェクトに参加しているの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)、米国国立標準技術研究所(NIST)、英国物理研究所(NPL)など



浮遊帯域(FZ)法によって引き上げられた濃縮度99.99%、質量5kgの $^{28}\text{Si}$ 単結晶



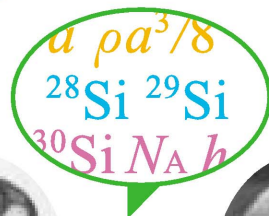
アメデオ・アボガドロ  
(1776~1856)

<http://www.bulldog.u-net.com/avogadro/avoga.html>



マックス・プランク  
(1858~1947)

[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1918/planck.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1918/planck.html)





# 標準物質が私たちの生活の安心・安全を守る

## 子供たちを汚染物質から守るために

化学分野における「計量・計測」では通常、「分析」という言葉が用いられています。今回のテーマである「標準物質」は、熱物性や密度・粘度等、物理分野でも利用されますが、分析化学で広く用いられている「標準物質」<sup>注</sup>の範囲や役割について簡単にご紹介したいと思います。私たちの生活環境を取り巻く状況は、産業の発展に伴って「生活の豊かさ」という恩恵に預かる一方で、さまざまな社会問題が顕在化し、決して良い方向に向かっていとは言えません。環境問題で見れば、古くは水俣病やイタイイタイ病、近年ではダイオキシン類や環境ホルモン等、さまざまな汚染物質が身近に及び寄り、「生活の安心・安全」が脅かされていると感じずにはいられません。次世代を担う子供たちを汚染物質から守るために、今、我々ができること。グローバルな課題であり、一言ではとても説明しきれませんが、これら汚染物質の除去法を開発するのはもとより、分析化学者の立場からは、「除去法の効果を汚染物質の濃度の尺度から正確に評価すること」、「評価した結果を世界各国で共有できるシステムを確立すること」も重要な責務の一つと捉えています。すなわち「信頼性の高い濃度の尺度」となる標準物質の開発であり「その標準物質の分析結果を通じて、分析値の国際的整合性を確保すること」になります。

## 化学分析における信頼性を確保

濃度の尺度を表す際に、物質質量(mol)という単位が用いられます。分析化学と関係の深いmolは、7つあるSI基本単位の1つです。他のSI基本単位、長さ(m)、質量(kg)、熱力学的温度(K)などに関係する物理計測の多くは、「計量器」を国家標準としたトレーサビリティ体系が構築されています。「標準物質」の中でも特に「認証標準物質」と呼ばれるものは、計量学的なトレーサビリティのお墨付きが付けられたもので、mol計測における「計量器」ということができます。ただし物理計測の場合とは異なり、「標準物質」は、分析・校正等に用いると消費されて無くなってしまいうため、他の「計量器」に比べて取り扱いが難しくなっています。

「標準物質」を通しての分析値の国際的整合性は、次のような体系のもとで確保されています。図1に示すように、まず国家間の化学分析能力の同等性が、国家計量研究所(NMI)が参加する国際比較によって評価されます。NMIの供給する「認証標準物質」＝「計量器」と、試験所等で用いている「実用標準物質」がトレーサビリティ体系のもとで繋がっていれば、試験所等の分析結果が信頼性の高いものとして国際的に認められることとなります(ただしその試験所は、ISO/IEC17025に基づいた試験所認定を受けていることが必要です)。



図1 「標準物質」を通しての分析値の国際的整合性の確保

## 標準物質の種類と開発の歴史

「標準物質」は、物質の形態にもとづいて、高純度無機・有機物質、無機・有機標準液、ガス、水、金属・合金、先端材料、生体、食品、燃料、底質・土壌・鉱石・粒子、その他に分類され、非常に多岐に及んでいます。用途は、分析用の測定装置の校正(キャリブレーション)や、試験室等で開発した測定法の評価(バリデーション)、製品の製造工程における品質(精度)管理、他の物質の特性値の値付けなどがあり、さまざまな局面において「生活の安心・安全」を守る役割を果たしています。開発の歴史は米国が先行していて、NBS(現・米国国立標準技術研究所NIST)が産業界の要請に応じ、20世紀初頭から精力的に整備を進めてきました。いわゆるSRMブランドと呼ばれる標準物質です。日本でも鉄鋼産業の発展に追従した形で、鉄鋼・非鉄標準物質から整備が進められてきましたが、その種類・数において欧米に大きく遅れをとっていました。そのため経済産業省は2001年に、向こう10年間で約250種類の標準物質を整備する計画を開始させました。(独)産業技術総合研究所(AIST)／計量標準総合センター(NMIJ)を中心に各業界の協力を得て、開発が行われ、10年を待たずに整備計画の目標を達成することができました(図2はNMIJが開発した認証標準物質の一部)。現在もNMIJでは、食品の安全確保や、次世代エネルギーなど、社会ニーズ性の高い物質を中心に標準物質開発が進められています。

なお、現在どのような標準物質が利用できるかについては、国際標準物質データベース(COMAR)や、標準物質総合情報システム(RMinfo)などからWEBで検索・調査することが可能になっています。

【NMIJ 野々瀬菜穂子】

### 参考文献

久保田正明編,「化学分析・試験に役立つ標準物質活用ガイド」,丸善(2009).

### <sup>注</sup>標準物質とは

国際標準化機構(ISO)が作成したISO Guide35:2006という国際規格の中で「一つ以上の規定特性について、十分均質、かつ、安定であり、測定プロセスでの使用目的に適するように作製された物質」と定義づけされている。



図2 NMIJの認証標準物質