

# 国際的な質量標準の動向 —キログラムの合意値の改定とその影響—

倉本直樹\*・大串浩司\*\*・藤田佳孝\*\*・小島時彦\*\*

\*,\*\*産業技術総合研究所計量標準総合センター 茨城県つくば市梅園 1-1-1

\*,\*\* National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, Japan

\*E-mail: n.kuramoto@aist.go.jp

キーワード：メートル条約 (Meter convention), キログラム (Kilogram), 国際キログラム原器 (International Prototype of the Kilogram), 日本国キログラム原器 (National Prototype of the Kilogram of Japan), X線結晶密度法 (X-ray Crystal Density Method).

JL 0012/24/6312-0775 ©2024 SICE

## 1. はじめに

計測は科学の基本であり、私たち人類はさまざまな計測技術を開発し、この世界の神秘を解き明かそうとしている。物の質量を正確に測定する試みはその根幹であるが、開発した技術を用いて、世界中の研究者と手を取り合って未知の深淵をのぞきこむためには、世界共通の測定基準が必要となる。現在、国際単位系 (SI) の七つの基本単位の一つである質量の単位「キログラム」がその役割を担っている。

ただし、SI は単純な世界共通の「ものさし」ではない。各基本単位の定義には多くの分野の英知が結集され、その時代の最も高精度な技術が用いられてきた。つまり、SI は新たな技術革新を導くための高精度な人類共有の知的基盤と言える。キログラムも、1889 年以降は世界に一つしかない分銅「国際キログラム原器」(図 1) の質量として定義されていたが、2018 年 11 月に開催されたメートル条約の最高議決機関である国際度量衡総会 (General Conference on Weights and Measures: CGPM) での決議を受け、2019 年からは普遍的な物理定数であるプランク定数を基準として定義されている<sup>1), 2)</sup>。

キログラムの定義がプランク定数にもとづくものへと移行したことで、国際キログラム原器は完全に引退し、博物館などに展示されているとお考えの読者も多いかと思う。しかしながら、国際キログラム原器は、その質量は 1 kg ちょうどではないものの、いまだに世界的な質量の基準として重要な役割を果たしている。これは、以前の定義からの質量値の連続性を保ちながら、新しい定義にもとづく体制へとスムーズに移行するためのプロセスが慎重に進められているためである<sup>3)</sup>。このプロセスの技術的・学術的検証にあたっているのがメートル条約傘下の国際度量衡委員会 (International Committee for Weights and Measures: CIPM) の質量関連量諮問委員会 (Consultative Committee for Mass and Related Quantities: CCM) である<sup>4)</sup>。この CCM が 2023 年 5 月 25 日、26 日、フランス・パリ郊外の国際度量衡局 (Bureau International des Poids et Mesures: BIPM)



図 1 国際度量衡局が管理する国際キログラム原器 (Photograph courtesy of the BIPM)

19 世紀末、当時の最先端技術を駆使して製作された世界に一つしかない分銅<sup>5)</sup>。材質は白金イリジウム合金。その形状は円筒型であり、直径、高さともに 39 mm。

で 2 年ぶりに開催された。CCM には、筆者らを含め、世界各国の代表団が参加し、質量、力、密度、圧力などの質量関連量に関わる研究開発および国際整合性確保のための国際比較の最新動向が共有され、活発な協議・意見交換が行われた。本稿では、今回の CCM の主要議題であった、新しいキログラムの定義にもとづく国際キログラム原器の質量を決定するための国際基準値「キログラムの合意値」の改定について紹介する。

## 2. キログラムの定義にもとづく質量標準

2019 年までは、国際キログラム原器の質量が厳密に 1 kg であり、この世界に一つしかない分銅を基準として各国のキログラム原器の質量が定期的に測定されてきた。各国はキログラム原器を質量の国家標準として維持・管理し、それを基準として質量を値付けた分銅を、キログラムの定義にもとづく質量標準として社会に供給してきた。一方、現在、キログラムはプランク定数の値を  $6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J s}$  と定めることによって定義されている。このため、原理的には、各国が独自の方法を用いて、プランク定数の定義値を基準として国家標準の質量を決定することができる (図 2)。キログラムの定義にもとづく、実際の測定に使うことのできる質量の基準を作り出すプロセスをキログラムの実現と呼ぶ

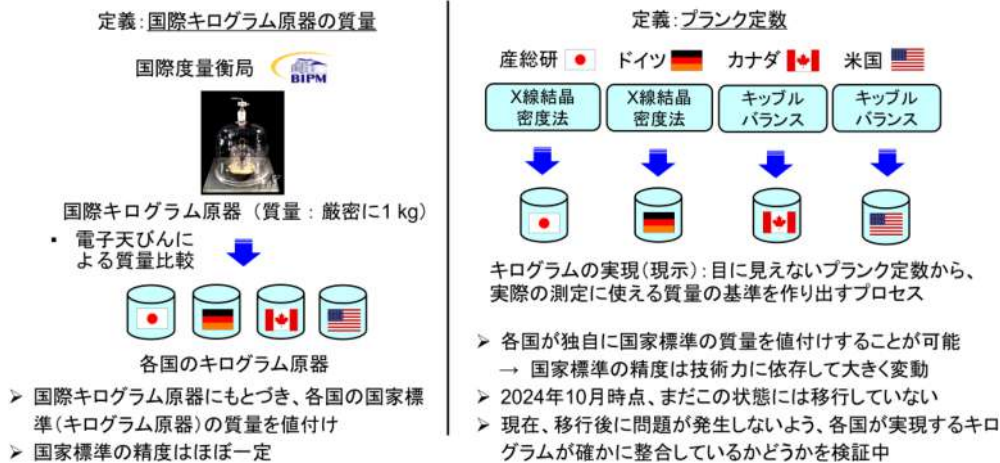


図2 キログラムの定義と各国キログラム原器の関係

（左）2019年に実施されたキログラムの定義改定前のスキーム，（右）定義改定後に実現可能となるスキーム。

が、2024年10月時点、各国が独自にキログラムを実現し、質量の国家標準を設定することはまだ国際的に認められていない。これはキログラムのような計量単位の改定は多方面に大きな影響を与えるため、国際的な合意の下、新しいスキームへと移行するためのプロセスが慎重に進められているためである。

この移行プロセスは複数のフェーズからなる<sup>3)</sup>。定義改定直後に始まったフェーズ1では、暫定的に国際キログラム原器の質量を1kgとし、各国の質量標準が設定されていた。また、このフェーズでは、各国の国家計量標準機関によって新しいキログラムの定義から作り出される1kgと、国際キログラム原器を基準とする1kgとの差が検証され、新しいキログラムの定義にもとづき国際キログラム原器の質量を決定するための国際基準値「キログラムの合意値（Consensus Value for the Kilogram, 以後「合意値」と記す）」が決定された<sup>6)</sup>。

合意値の決定をうけて、フェーズ2が2021年2月から開始された。現在も続いているこのフェーズでも、依然として各国の質量標準は国際キログラム原器に結び付けられている。ただし、国際キログラム原器の質量は、合意値を基準にして決定されており、もはや1kgちょうどではない（図3）。さらにフェーズ2では、各国のキログラム実現能力の整合性の確認が定期的に行われ、その結果をもとに合意値が見直される。キログラム実現能力の十分な国際整合性が確認され次第、移行プロセスが完了し、各国が独自のキログラム実現および質量の国家標準設定が国際的に認められる。直近の合意値見直しは2023年2月に実施されており、次章でこの見直しについて紹介する。

### 3. キログラムの合意値の改定

2021年、各国のキログラムを実現する能力の整合性を確認する国際比較（CCM.M-K8.2021）が実施され



図3 新しいキログラムの定義にもとづく国際キログラム原器の質量を決定するための国際基準値「キログラムの合意値」にもとづく質量標準供給体系

た<sup>7)</sup>。この国際比較には、著者らが所属する産業技術総合研究所計量標準総合センター（National Metrology Institute of Japan: NMIJ）を含む八カ国の研究機関とBIPMが参加した。参加機関は、まず、プランク定数の定義値にもとづきキログラムをそれぞれ独自に実現した。

NMIJは、質量がほぼ1kgのシリコン単結晶製の球体（図4）を用いたX線結晶密度法によってキログラムを実現した。この球体中には多数のシリコン原子が含まれるが、その個数は、球体体積をレーザー干渉計によって計測することなどによって数えることができる。一方、シリコン原子の質量はプランク定数の定義値から精密に計算することができる。原子の個数と質量をかけあわせれば球体質量を求めることができ、プランク定数から質量測定の基準を作り出す、つまり、キログラムを実現することができる<sup>8), 9)</sup>。

各参加機関は、実現結果にもとづき、それぞれが準備



図4 NMIJでキログラムを実現するために用いられたシリコン単結晶球体（写真提供：産業技術総合研究所）

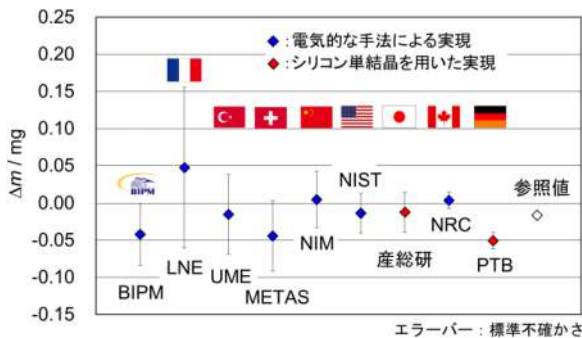


図5 キログラムを実現する能力の整合性を確認するための国際比較 (CCM.M-K8.2021) の結果

する仲介器（質量約1kgの分銅）の質量を測定した。仲介器は国際度量衡局へ輸送され、その質量が国際キログラム原器を基準として測定された。図5は、各国が独自にプランク定数の定義値を基準として測定した仲介器の質量と、BIPMが国際キログラム原器を基準として測定した仲介器の質量との差を示す。この質量差が、新しいキログラムの定義から作り出される1kgと、国際キログラム原器を基準とする1kgとの差に相当する。各データのエラーバーは、キログラム実現の標準不確かさであるが、不確かさの非常に小さなドイツとカナダの研究機関のデータはそれぞれの不確かさを超えてわずかにずれている。移行プロセスの完了には、この不整合の解消および他の研究機関のキログラム実現精度の向上が必要とされている。なお、NMIJのキログラム実現精度は、ドイツ、カナダの研究機関に続き世界で三番目に高く、世界トップレベルにある。

図5中の「参照値」は各国の測定値の平均値であり、参加研究機関が協力して決定した新しいキログラムの定義から作り出される1kgと、国際キログラム原器を基準とする1kgとの差と言える。この参照値をもとに、合意値の見直しが2023年に行われた。

見直しには、2021年に実施された国際比較に加えて、2016年および2019年に実施された国際比較の結果が用いられた。図6は三つの国際比較の参照値を示

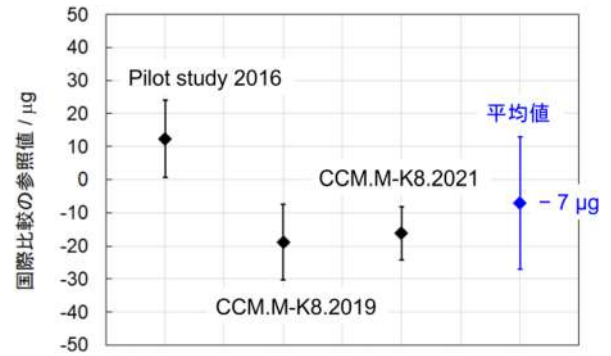


図6 2023年に実施されたキログラムの合意値改定の基礎データとなった三つの国際比較の参照値

す。三つの参照値の平均値は $-7\mu\text{g}$ であり、合意値は $(1\text{kg}-7\mu\text{g})$ と決定された。この合意値は「2023年の合意値」と呼ばれ、2023年3月1日から施行されている。この合意値にもとづき、国際キログラム原器の質量も $(1\text{kg}-7\mu\text{g})$ と決定されている。つまり、定義改定前と比較して国際的な質量スケールが $7\mu\text{g}$  マイナス方向にシフトしたことになる。

#### 4. 日本国内で供給されている質量標準への影響

現在、わが国の質量の国家標準は「日本国キログラム原器」を含む複数の分銅からなる「標準分銅群」である<sup>10)</sup>。NMIJはこの標準分銅群を維持・管理し、「計量法に基づく計量法トレーサビリティ制度(JCSS)」の登録事業者が保有する最上位の標準「特定二次標準器」を校正している。JCSS登録事業者は、この特定二次標準器を基準として値付けした分銅を一般ユーザへ供給している。

2023年の合意値の改定をうけ、標準分銅群を構成する分銅の質量も、1kgあたり $7\mu\text{g}$ 小さくなった<sup>11)</sup>。ただし、NMIJが実施する1kg分銅校正の不確かさは $150\mu\text{g}$ であり、合意値改定の校正值への影響は、十分小さく無視できる。他の質量の分銅の校正值の変化も、同様に、不確かさと比べて十分小さい。したがって、合意値改定に伴う一般ユーザへの影響は全くない。

#### 5. 今後の展望

今後も、3年ごとに、キログラム実現の国際比較が実施される予定である。2024年10月現在、新たな国際比較CCM.M-K8.2024が実施されている。NMIJも参加しており、結果の詳細は2025年に公開され、合意値の見直しが行われる。NMIJはキログラムの実現の精度をさらに高めるための研究を実施しつつ、国際比較に継続的に参加し、信頼性の高い国際整合性の確認および合意値の更新に貢献していく。

また、移行プロセスが完了したとしても、ほとんどの

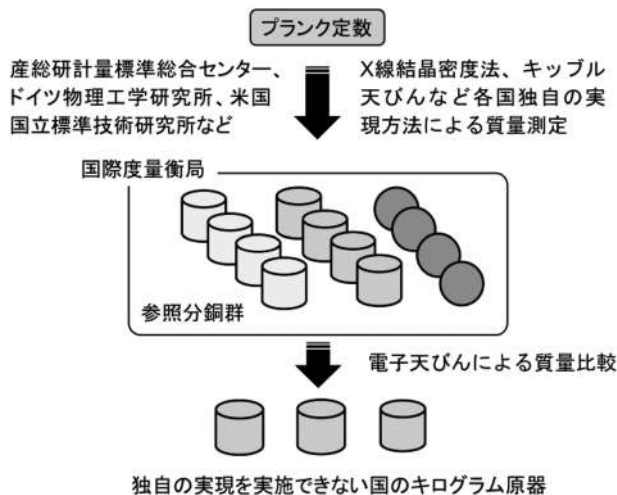


図7 キログラムを独自に実現することができない国のキログラム原器の校正<sup>3)</sup>

国は独自の実現が技術的に難しい。現時点で十分な精度でキログラムを実現できるのはNMIJを含む四つの国家計量標準機関のみである。このため、国際度量衡局が、独自にはキログラムを実現できない国のキログラム原器の質量を測定する役割を引き続き担う予定である。質量測定の基準は、複数の分銅からなる参照分銅群である(図7)。参照分銅群を構成する分銅の質量測定は、NMIJなどの研究機関が共同で実施する。つまり、各国独自のキログラムの実現が可能な状態に移行したとしても、NMIJは、引き続き、世界の質量の基準の維持に大きな責任をもつ。実現に必要な設備や技術を保ち続けるのは容易ではないが、世界トップレベルの国家計量標準機関が果たすべき責務として、取り組んでいきたい。

(2024年10月30日受付)

#### 参考文献

- 1) 臼田 孝: 新たな時代を迎えた国際単位系(SI)—基礎物理定数による基本単位の定義—, 計測と制御, **58**-5, 325/329 (2019)
- 2) 倉本 直樹: 基礎物理定数に基づくキログラムとモルの新たな定義—さらばキログラム原器—, 計測と制御, **58**-5, 330/335 (2019)
- 3) 倉本, 大串, 藤田, 小島: 新たなキログラムの定義にもとづく質量標準—質量関連量諮問委員会(CCM)報告, 計測と制御, **60**-11, 801/805 (2021)
- 4) 産業技術総合研究所計量標準総合センターウェブサイト, メートル条約に基づく組織と活動のあらまし, [https://unit.aist.go.jp/qualmanmet/nmijico/Metre\\_OIML/Metre/doc/rev\\_aramashi\\_2023.pdf](https://unit.aist.go.jp/qualmanmet/nmijico/Metre_OIML/Metre/doc/rev_aramashi_2023.pdf) (2021年7月14日最終確認)
- 5) 倉本 直樹: 質量の単位「キログラム」の新しい定義, 精密工学会誌, **86**, 151/154 (2020)
- 6) S. Davidson and M. Stock: Beginning of a New Phase of the Dissemination of the Kilogram, *Metrologia*, **58**, 033002 (2021)
- 7) M. Stock et al: Final Report on the CCM Key Comparison of Kilogram Realizations CCM.M-K8.2021, *Metrologia*, **60**, 07003 (2023)
- 8) N. Kuramoto et al: Reproducibility of the Realization of the Kilogram Based on the Planck Constant by the XRCD Method at NMIJ, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **70**, 1005609 (2021)

- 9) 産業技術総合研究所質量標準研究グループウェブサイト, <https://unit.aist.go.jp/riem/mass-std/> (2024年10月27日最終確認)
- 10) 産業技術総合研究所計量標準総合センターウェブサイト, 質量の特定標準器の変更について, <https://unit.aist.go.jp/nmij/news/2019/20190520/> (2024年10月27日最終確認)
- 11) 産業技術総合研究所計量標準総合センターウェブサイト, キログラムの合意値改定とその影響について, [https://unit.aist.go.jp/nmij/news/2022/pdf/kilogram-gouiti\\_230301.pdf](https://unit.aist.go.jp/nmij/news/2022/pdf/kilogram-gouiti_230301.pdf) (2024年10月27日最終確認)

#### [著者紹介]

倉本 直樹 君 (正会員)



1995年から1998年まで日本学術振興会特別研究員(DC1)。1998年佐賀大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(理学)。1999年通商産業省工業技術院計量研究所入所。2001年の中央省庁再編を経て、現在、産業技術総合研究所工学計測標準研究部門首席研究員。約20年間からアボガドロ定数の測定に取り組み、筆頭・責任著者として論文発表したアボガドロ定数から導出したプランク定数は、新たなキログラムの定義の基準であるプランク定数の定義値の決定に採用され、定義改定の実現に決定的な役割を果たした。

大串 浩司 君 (正会員)



1997年、電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。同年4月より工業技術院計量研究所において、トルク標準の確立並びに供給技術の開発に関する研究に従事。2001年4月より産業技術総合研究所計測標準研究部門力学計測科質量力標準研究室。同所計量標準総合センター工学計測標準研究部門力トルク標準研究グループ長を経て、2024年4月より工学計測標準研究部門上級主任研究員、日本機械学会の会員。

藤田 佳孝 君



1994年北海道大学大学院理学研究科博士課程修了。博士(理学)。同年に通商産業省工業技術院計量研究所に入所。以来、高圧物性計測、粘度標準の開発と供給に従事。現在、産業技術総合研究所計量標準総合センター計量標準普及センター標準供給保証室長代理。2019年より質量関連量諮問委員会密度粘度作業部会主査。

小島 時彦 君 (正会員)



1995年筑波大学大学院工学研究科物理学専攻修了。博士(工学)。同年通商産業省工業技術院計量研究所入所。以来、圧力標準・計測の研究に従事。2001年産業技術総合研究所計測標準研究部門力学計測科圧力真空標準研究室主任研究員。2011年同室室長。2015年同所計量標準総合センター工学計測標準研究部門副部門長。2018年同総合センター計量標準普及センター長。2022年同総合センター副総合センター長。2013年-2015年計測自動制御学会理事。