プランク定数にもとづく質量標準供給の新しいフェーズのスタート

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質量標準研究グループ研究グループ長
倉本直樹

２０１９年５月20日、キログラムの定義が１３０年ぶりに改定され、定義の基準は、「国際キログラム原器」から、普遍的な物理定数「プランク定数」へと移行した。以前の定義の下では、国際度量衡局が管理する国際キログラム原器の質量が厳密に１キログラムであり、この世界に一つしかない分銅を基準として、メートル条約加盟国が保有するキログラム原器の質量が定期的に測定されていた。各国は、このキログラム原器を質量の国家標準として維持・管理し、これを基準として質量を測定した分銅を、キログラムの定義にトレーサブルな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6.626 070 15×10^{-34}ジュール秒と定めることによって定義されている。このプランク定数の定義値は、２０１７年７月１日までに、産業技術総合研究所（産総研）を含む５カ国の研究機関によって測定された８つのプランク定数から決定された（図１）。

このため、原理的には、各国がプランク定数の定義値を基準として、独自に１キログラムを実現する、つまり、国家標準の質量を測定し、質量標準供給の基準として用いることができる。ただし、図１に示すように、定義改定前に測定されたプランク定数は、不確かさを超えて異なる場合がある。この状態で各国がプランク定数の定義値から独自に国家標準の質量を測定した場合、それらの間で不整合が発生してしまう。

そこで、国際的な合意の下、以前の定義からの質量値の連続性を保ちながら、各国が独自に国際整合性の確保された１キログラムを実現することができる状態への移行するための、複数のフェーズからなる段階的な移行プロセスが進行中である。

国際度量衡局は、この移行プロセスの新しいフェーズが２０２１年２月１日から開始されたことをホームページで報告している（https://www.bipm.org/en/news/full-stories/2020-11-ccm-kc.html）。

本稿では、その報告内容に加えて、移行プロセスの詳細および国内の質量トレーサビリティ体系への影響について紹介したい。

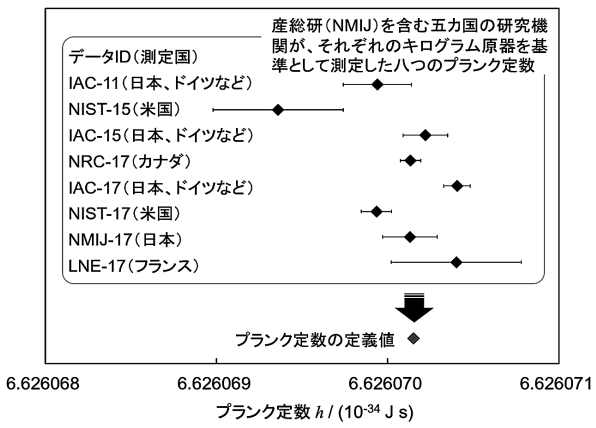


図１　2017年に実施された新たなキログラムの定義の基準であるプランク定数の定義値決定に貢献した測定データ

■各国独自の１キログラムの実現にむけた移行プロセス

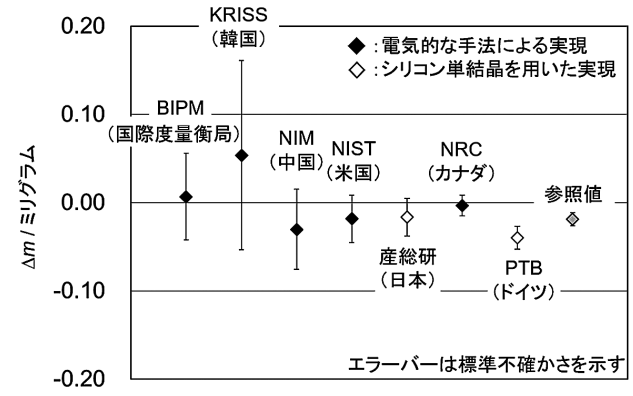
現在進行中の移行プロセスは、次の４つのフェーズからなる。

フェーズ０：国際キログラム原器による１キログラムの実現

定義改定前の状態であり、国際キログラム原器の質量は厳密に１キログラム（不確かさはゼロ）である。この国際キログラム原器との質量比較によって、各国のキログラム原器の質量が測定される。

フェーズ１：国際キログラム原器による暫定的な１キログラムの実現

キログラムの新たな定義が施行された時点から、フェーズ１がスタートする。定義の基準はプランク定数であるが、前述の国家標準レベルでの不整合を避けるために、暫定的に、国際キログラム原器を基準として各国のキログラム原器の質量が測定される。ただし、国際キログラム原器の質量は依然として１キログラムであるが、10マイクログラムの標準不確かさをもつ。この標準不確かさは、定義改定前のプランク定数の標準不確かさに等しい。また、このフェーズでは、各国がプランク定数にもとづき１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が実施される。この国際比較の結果にもとづき、キログラムの合意値（Consensus value）が決定される。この合意値は、各国の１キログラムを実現する能力を反映した、暫定的な質量標準供給のための国際基準値である。



$\Delta m = m\,(\mathrm{NMI}) - m\,(\mathrm{BIPM})$

- m (NMI)：参加機関が独自にプランク定数を基準として測定した仲介器の質量
- m (BIPM)：国際度量衡局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

図２　１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-K8.2019）の結果

フェーズ２：合意値を基準とする１キログラムの実現

フェーズ２では、合意値にもとづき、国際キログラム原器の質量が決定される。この国際キログラム原器の質量の合意値を基準として、各国のキログラム原器の質量が決定される。また、このフェーズでも、各国がプランク定数にもとづき１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が定期的に実施される。最新の国際比較の結果を考慮し、合意値は更新される。さらに、各国の実現結果が、それぞれの不確かさの範囲内で一致し、十分な整合性が確認され、合意値を用いる必要がないと判断された時点で、フェーズ３へ移行する。

フェーズ３：各国独自の１キログラムの実現

各国が独自にプランク定数の定義値から１キログラムを実現し、その実現結果にもとづく質量標準の供給が国際的に認められる。

■１キログラムを実現する能力の整合性評価

２０１９年５月20日に実施されたキログラムの定義改定をうけて、フェーズ０が終了し、フェーズ１に移行した。さらに、今回、国際度量衡局は、２０２１年２月１日からフェーズ２に移行したことを報告している。

フェーズ２での１キログラムの実現に必要な合意値を決定するために、各国の１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-K8.2019）が、２０１９年から２０２０年にかけて実施された。この国際比較には、産総研を含む６カ国の研究機関と国際度量衡局が参加した。

参加機関は、まず、独自にプランク定数にもとづき１キログラムを実現した。実現には、X線結晶密度法、キッブル天びん、ジュール天びんの３通りの方法が用いられた。産総研やドイツの研究機関が用いたのがX線結晶密度法であり、シリコン単結晶を用い１キログラムを実現する。一方、キッブル天びんおよびジュール天びんは、電気的な手法で１キログラムを実現する。

さらに、各機関は、実現の結果にもとづき、それぞれが準備する仲介器（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２は、各国が独自にプランク定数を基準として測定した仲介器の質量から、国際度量衡局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。エラーバーは、各機関での１キログラム実現の標準不確かさにほぼ等しい。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が、データ全体としての整合性が統計的に確認された。

また、産総研の実現精度は、ドイツ、カナダの研究機関に続き世界で３番目に高く、世界トップレベルにある。

■キログラムの合意値の決定

各参加機関の測定値の加重平均として求められるこの国際比較の参照値および２０１６年に実施された国際整合性確認のためのパイロットスタディの参照値などから、合意値（２０２０年合意値）が決定され、２０２１年２月１日にフェーズ２がスタートした。産総研は、世界トップレベルの精度で１キログラムを実現可能な研究機関として、合意値の決定および移行プロセスの進展に大きな役割を果たした。

合意値を基準として、国際キログラム原器の質量は0.999 999 998キログラム、その標準不確かさは20マイクログラムと決定された。

フェーズ２への移行に伴う国際キログラム原器の質量値のシフトは２マイクログラムと極めて小さく、定義改定に伴う質量トレーサビリティ体系の改定はスムーズに進展している。また、決定された国際キログラム原器の質量の合意値は、１キログラムと標準不確かさの範囲内で一致する。

このため、フェーズ２の開始に伴い、フェーズ０およびフェーズ１において国際キログラム原器の質量を１キログラムとして構築されてきた国際的な質量の目盛りを変更する必要のないことが、国際度量衡局によって表明されている。

一方、国際キログラム原器の質量の不確かさが10マイクログラムから20マイクログラムに増加したことをうけ、各国のキログラム原器の質量の不確かさも同様に10マイクログラム増加する。

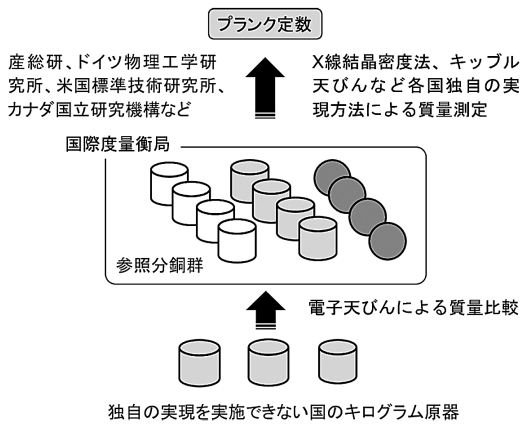


図３　１キログラムを独自に実現することができない国のキログラム原器の校正（国際度量衡局が将来実施予定）

■国内トレーサビリティへの影響

産総研が管理する「日本国キログラム原器」は、計量法に基づく計量法トレーサビリティ制度（JCSS）登録事業者が保有する特定二次標準器を校正するための特定標準器「標準分銅群」の一部である。

フェーズ２の開始に伴い、日本国キログラム原器の質量の値は変動しないが、その標準不確かさは10マイクログラム増加する。ただし、この不確かさの増加は、特定二次標準器校正の不確かさと比較して十分小さい。このため、フェーズ２へと移行しても、特定二次標準器校正の不確かさは変更されず、一般ユーザーへの影響はない。

■今後の展望

今後、２年ごとに、１キログラム実現能力の整合性評価のための国際比較が実施される予定である。産総研は１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。

各国独自の１キログラムの実現が可能となるフェーズ３への移行には、さらに数回の国際比較による整合性の評価が必要であると筆者は考えている。

また、フェーズ３に移行したとしても、ほとんどの国は独自の実現が技術的に難しい。このため、国際度量衡局が、そういった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。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３）。

参照分銅群を構成する分銅の質量測定は、産総研などの１キログラムの実現が技術的に可能な研究機関が共同で実施し、プランク定数へのトレーサビリティを確保する。

つまり、各国独自の１キログラムの実現が可能な状態に移行したとしても、産総研は、引き続き、世界の質量の基準の維持に大きな責任を持つ。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。