

質量：特定標準器等の指定及び指定の取消し並びに当該特定標準器等による校正等の実施及び取りやめ

1. 背景

質量の単位「キログラム」は、1889年に白金イリジウム合金製の分銅である国際キログラム原器(図1)の質量として定義された。現在でもその定義は変わっておらず、130年間、同一の分銅が世界中の質量の基準として用いられてきた。この国際キログラム原器の複製がメートル条約加盟国に配布され、各国の質量の国家標準として用いられている。産業技術総合研究所(以後「産総研」と略す)が保管する日本国キログラム原器(告示の上では「キログラム原器」)もそれらの複製の一つであり、約40年おきにフランス・パリ郊外の国際度量衡局に移送され、国際キログラム原器を基準としてその質量が校正されている。

現在、この日本国キログラム原器が質量の特定標準器に指定されている。さらにステンレス鋼組分銅(告示の上では「標準分銅」)が特定副標準器に指定され、特定二次標準器の校正に用いられている。



図1 国際度量衡局に保管されている国際キログラム原器

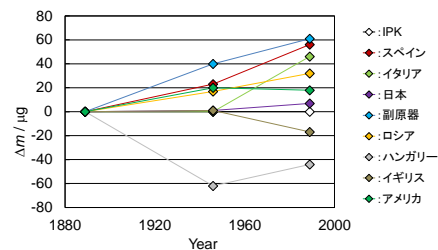


図2 過去100年間の国際キログラム原器と各国原器との質量比較(縦軸は国際キログラム原器(IPK)を基準としたときの各国原器の質量変動を μg で示す)

近年、表面の汚染などによって、国際キログラム原器の質量が変動している可能性のあることがわかってきた。図2は過去100年間の国際キログラム原器と各国原器の質量の比較結果である。この結果などから、国際キログラム原器の質量の長期安定性は $50\ \mu\text{g}$ とされている。この問題を根本的に解決すべく、2018年に開催された国際度量衡総会において普遍的な物理定数であるプランク定数にもとづく定義への移行案が承認された。これをうけて、2019年5月20日より、新たなキログラムの定義が施行される。

この定義改定に対応するために、産総研における質量標準の実現・管理体制が変更される。さらに、これに連動して、特定標準器等の指定にも変更が必要となっている。

2. 定義改定のトレーサビリティ体系におよぼす影響

図3に現行の質量のトレーサビリティ体系を示す。特定標準器である日本国キログラム原器の質量は、国際キログラム原器を基準として校正されている。5年毎に、日本国キログラム原器の質量を、他の3つの白金イリジウム合金分銅(No.30、E59、No.94)および1kgステンレス鋼分銅の質量と比較することで、日本国キログラム原器の質量変動を監視するとともに、1kgステンレス鋼分銅を校正する。この1kgステンレス鋼分銅を基準として、特定副標準器であるステンレス鋼組分銅の質量が校正される。特定二次標準器の校正には、この特定副標準器が用いられている。

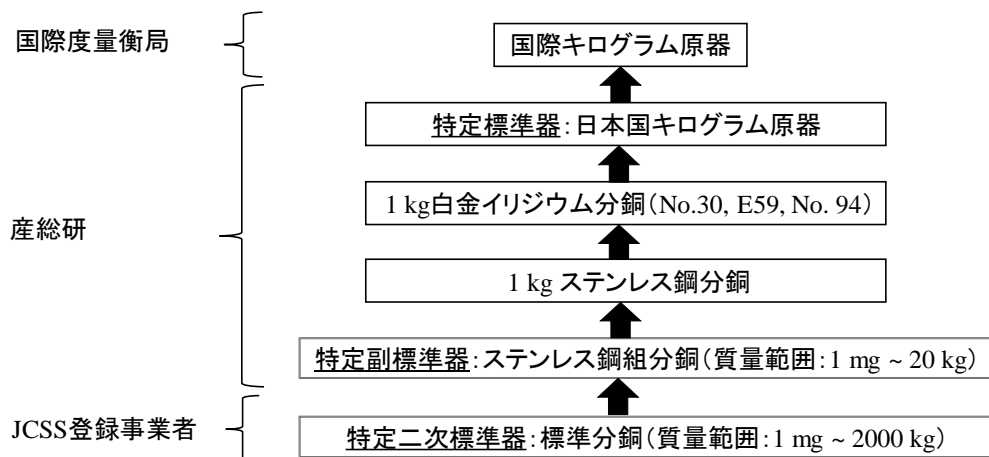


図3 現行のトレーサビリティ体系

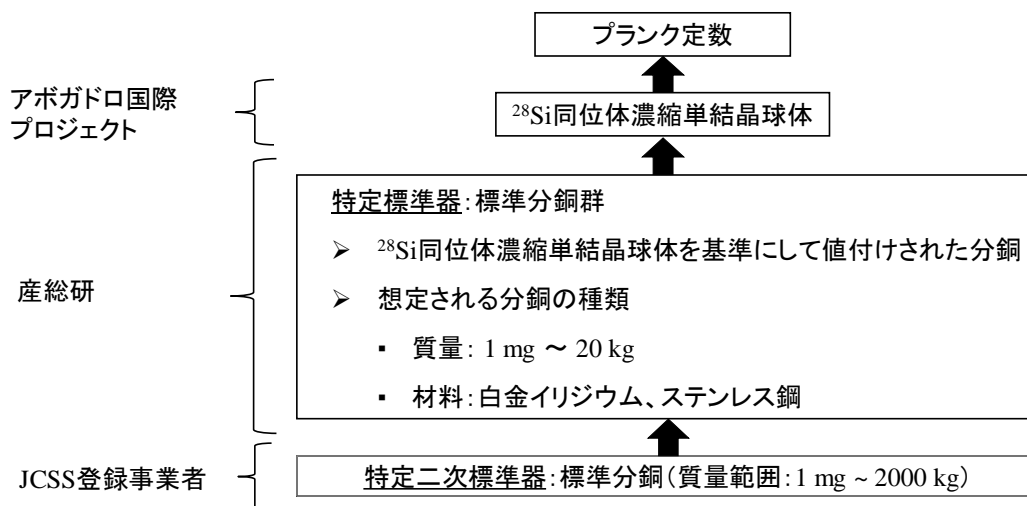


図4 定義改定後のトレーサビリティ体系

一方、2019年5月20日から次の新たなキログラムの定義が施行される。

キログラムは質量の単位であり、プランク定数を単位 $J s$ で表したときに、その数値を $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ と定めることによって定義される。

新たな定義への移行によって、キログラム原器に頼ることなく、各国で質量の国家標準をプランク定数に基づき実現することが可能となる。図4に定義改定後のトレーサビリティ体系を示す。産総研での新たな定義にもとづく質量標準の実現には、質量が約1 kgの ^{28}Si 同位体濃縮単結晶球体(図5、以後「シリコン単結晶球体」と略す)が用いられる。シリコン単結晶球体中には単位格子(図6)が多数含まれ、一つの単位格子には8個のシリコン原子が含まれる。単位格子の一辺の長さ a は格子定数とよばれ、単位格子の体積は a^3 で与えられる。このシリコン単結晶球体の質量 m はプランク定数 h を用いて次のように記



図5 シリコン単結晶球体

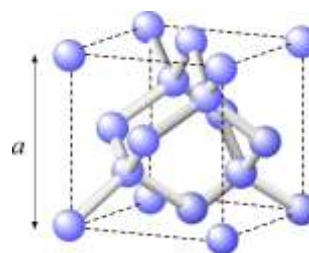


図6 シリコン結晶の単位格子

述できる。

$$m = \frac{2hR_{\infty}}{c\alpha^2} \frac{M(\text{Si})}{M(\text{e})} \frac{8V_{\text{core}}}{a^3} + m_{\text{SL}} \quad (1)$$

ここで、 $M(\text{e})$ は電子のモル質量、 $M(\text{Si})$ はSiのモル質量、 a は微細構造定数、 R_{∞} はリュードベリ定数、 c は真空中の光の速さ、 m_{SL} は主に SiO_2 からなるシリコン単結晶球体表面層の質量である。(1)式右辺の $2hR_{\infty}/(c\alpha^2)$ は電子1個の質量、 $M(\text{Si})/M(\text{e})$ は電子とシリコン原子の質量比、 $8V_{\text{core}}/a^3$ はシリコン単結晶球体中のシリコン原子の数を表す。従って、これら三項の積は、シリコン単結晶球体の表面層を除いた部分の質量に相当する。この質量に、表面分析から求められる表面層質量 m_{SL} を加えれば、シリコン単結晶球体の質量をプランク定数を基準として絶対測定できる。

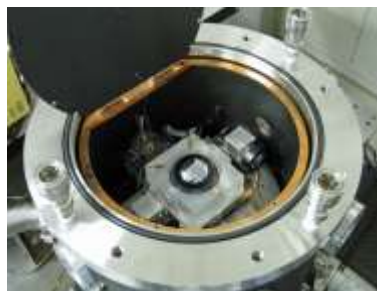


図7 シリコン単結晶球体体積測定用レーザー干渉計

(1)式中の $M(\text{e})$ 、 a 、 R_{∞} はすでに極めて高い精度で測定されている。また、シリコン単結晶球体の $M(\text{Si})$ および a もすでに測定されており、その値は変動しないと考えられている。従って、シリコン単結晶球体の V_{core} および m_{SL} をシリコン球体体積測定用レーザー干渉計(図7)などで測定することで、シリコン単結晶球体の質量をプランク定数を基準として絶対測定することができる。つまり、シリコン単結晶球体は、その質量を絶対測定できる特別な分銅である。なお、現時点での産総研におけるプランク定数にもとづくシリコン単結晶球体質量測定の標準不確かさは $24 \mu\text{g}$ である。このシリコン単結晶球体の質量を基準として、特定標準器である標準分銅群が校正される。

3. 新たな特定標準器

シリコン単結晶球体は国際研究協力「アボガドロ国際プロジェクト」の共有財産であり、海外の研究機関での使用のために日本から持ち出されることも多い。このため、特定標準器としては、図4に示すようにプランク定数にもとづいて値付けされた標準分銅から構成される標準分銅群を用いる。標準分銅の材質は白金イリジウム合金およびステンレス鋼であり、質量範囲は1 mg から 20 kg である。各分銅の質量は、シリコン単結晶球体の質量を基準にして校正されており、多数の標準分銅を群管理することによって質量の基準を保持する。群管理では標準分銅間の質量比較によって各分銅の質量の変更を高精度に検出する。1 kg 以外の分銅が特定標準器に含まれることで、1 kg 分銅同士の比較(1 : 1 の等量比較)だけでなく、2 : 1 + 1(例えば 2 kg : 1 kg + 1 kg)や 5 : 2 + 2 + 1(例えば 5 kg : 2 kg + 2 kg + 1 kg)などの異なる質量の分銅間の比較が特定標準器内で可能となる。多数の標準分銅間の関係を網の目のような形で相互に

関連づけることで、等量比較のみにもとづく群管理よりも堅牢な基準の維持・管理が実現できる。

なお、日本国キログラム原器は、定義改定後も新たな特定標準器を構成する標準分銅の一つとして、定義改定後も質量の基準としての役割を担う。また、これまで特定副標準器であったステンレス鋼分銅も、新たな特定標準器である標準分銅群に含まれる。履歴が管理されている標準分銅群を特定標準器として、継続的に維持・管理する。

以下に、特定標準器について情報をまとめた。

- 名称:標準分銅群
- 材質:白金イリジウム、ステンレス鋼
- 質量範囲:1 mg ~ 20 kg
- 標準分銅群の内訳(括弧内は現時点での群管理の計画に含まれる予定の個数)
 - 白金イリジウム分銅:1 kg(4)
 - ステンレス鋼分銅:1 mg(2)、2 mg(2)、5 mg(2)、10 mg(2)、50 mg(2)、100 mg(2)、200 mg(2)、500 mg(2)、1 g(8)、2 g(8)、5 g(8)、10 g(8)、20 g(8)、50 g(8)、100 g(8)、200 g(8)、500 g(8)、1 kg(16)、2 kg(10)、5 kg(8)、10 kg(8)、20 kg(11)

4. 新たな特定標準器を用いた特定二次標準器の校正

図 4 に示すように、特定標準器との等量比較によって、特定二次標準器である標準分銅(質量範囲:1 mg ~ 20 kg)が校正される。特定標準器による校正の周期は 3 年である。

特定標準器を基準とする特定二次標準器の校正の不確かさを表 1 にまとめた。「2. 定義改定のトレーサビリティ体系におよぼす影響」で記述したように、キログラムの定義が改定されることによって、トレーサビリティ体系に変化が生ずる。もっとも大きな変更点は、シリコン単結晶球体を用いたキログラムの定義を実現するプロセスが組み込まれることである。プランク定数にもとづくシリコン単結晶球体の質量測定の標準不確かさは 24 μg である。これは、現行の特定標準器である日本国キログラム原器の質量の標準不確かさ(約 6 μg :この不確かさは国際キログラム原器の質量の長期安定性である 50 μg を考慮していない)と比較して大きい。しかし、例えば、1 kg の特定二次標準器の校正の標準不確かさは 75 μg であり、プランク定数にもとづくシリコン単結晶球体の質量測定の不確かさと比較して十分大きい。このため、特定二次標準器の校正の不確かさに変更はない。

以下に、新たな特定標準器による特定二次標準器の校正についての情報をまとめた。

- 校正周期:3 年(現行と変わらず)
- 校正実施機関:産総研(現行と変わらず)
- 校正対象:標準分銅(現行と変わらず)
- 特定二次標準器の質量範囲:1 mg ~ 20 kg(現行と変わらず)
- 校正の不確かさ:表 1 参照(現行と変わらず)

表 1 特定標準器による特定二次標準器の校正の不確かさ

標準分銅(特定二次標準器)の質量	校正の拡張不確かさ($k=2$)/mg
20 kg	3.0
10 kg	1.5
5 kg	0.75
2 kg	0.3
1 kg	0.15
500 g	0.075
200 g	0.030
100 g	0.015
50 g	0.010
20 g	0.0080
10 g	0.0060
5 g	0.0050
2 g	0.0040
1 g	0.0030
500 mg	0.0025
200 mg	0.0020
100 mg	0.0015
50 mg	0.0012
20 mg	0.0010
10 mg	0.0008
5 mg	0.0006
2 mg	0.0006
1 mg	0.0006

以上