産総研
ともに挑む。つぎを創る。

質量の単位「キログラム」の最新動向

産業技術総合研究所　計量標準総合センター　首席研究員　倉本直樹

- 2019年5月20日：質量の単位「キログラム」が130年ぶりに新しくなりました
- 1 kgの決め方：「国際キログラム原器」→「プランク定数」

  → 皆さんがお使いの分銅は、元をたどればプランク定数にたどり着きます
  - 分銅とプランク定数はどのようにつながっているのか？
  - 産業技術総合研究所 計量標準総合センター（産総研）の役割
- 新しいキログラムを活用した新しい質量測定方法の開発が世界各国で進行中

  → 産総研で開発中の「電圧天びん」：分銅を用いずに微小な質量を正確に測定可能

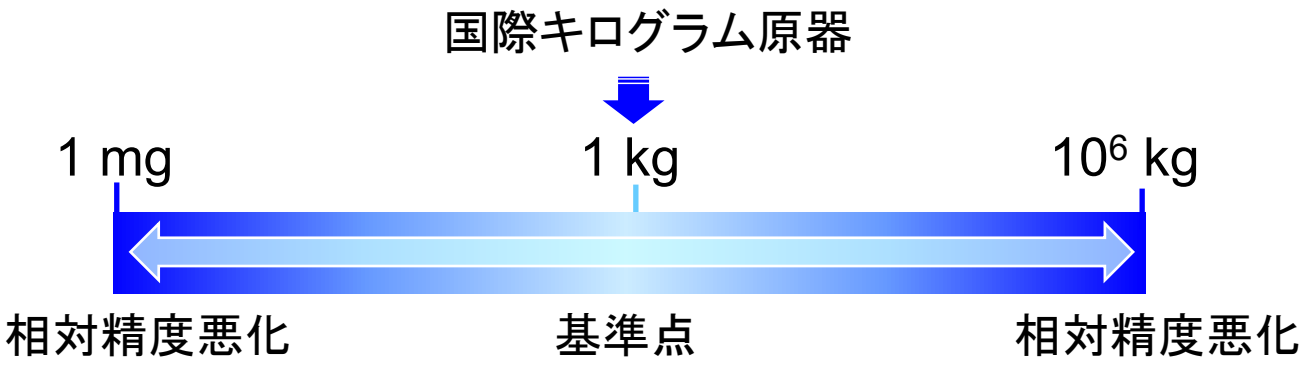
プランク定数

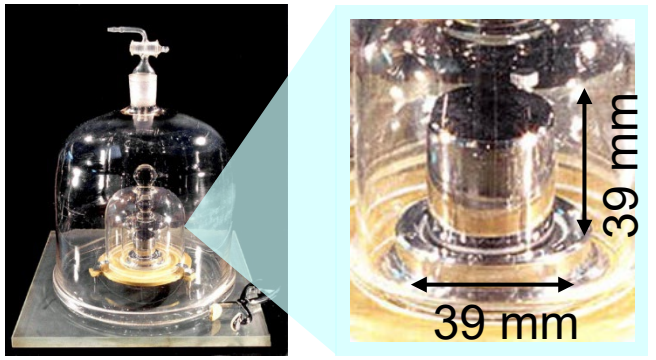


出典：村上衡器製作所HP

キログラムの実現

- キログラムの定義
  - 50 kg → 50 × 1 kg
    → 1 kgが具体的にどれくらいの質量か？
- キログラムの実現
  → キログラムの定義にもとづき実際の質量測定に用いることのできる質量の基準（質量標準）を作り出すこと
- 1889年から2019年までのキログラムの定義
  - 1 kg：国際キログラム原器の質量
    → 1 kgが質量スケールの絶対的な基準点
    → 1 kgから離れるほど、質量標準の相対精度は悪化





国際キログラム原器

- 世界に一つしかない分銅の質量が厳密に1 kg
- 絶対的な質量測定の基準
  → キログラムを定義・実現

プランク定数にもとづくキログラムの実現

- 2019年以降のキログラムの定義：プランク定数
  - プランク定数：
    - 世界中どこでも変わらず、また時間とともに変動しない普遍的な物理定数
      → 極めて安定な質量の基準
    - 直接見たり、触ることはできません！
      → プランク定数からキログラムを実現する必要
  - プランク定数と質量を結び付けることのできる技術であれば、どのようなものでも実現に用いることが可能

→ 1 kg だけでなく任意の質量をプランク定数から直接実現することが原理的には可能



→ 1 kgは質量スケールの絶対的な基準点ではない

- ただし現時点では1 kg以外の質量を直接実現する技術がまだ成熟していない
  → 各国の質量の最上位の基準「国家計量標準」は1 kgのまま

定義改定の質量の国家標準への影響

1889年から2019年

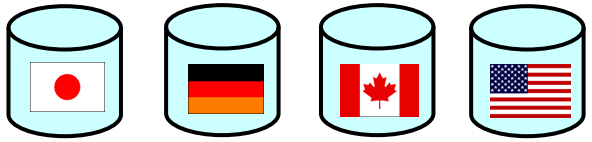
定義：国際キログラム原器の質量

国際度量衡局（フランス）



国際キログラム原器（質量：厳密に1 kg）

- 電子天びんによる質量比較



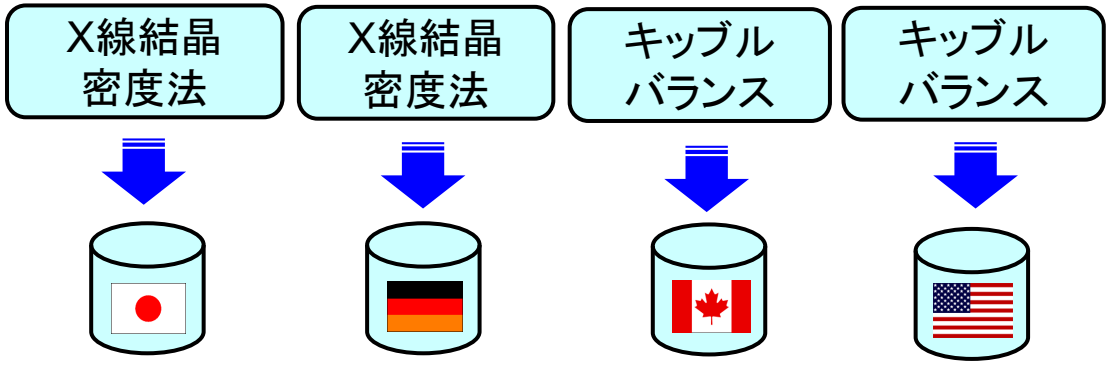
各国のキログラム原器

- 国際キログラム原器にもとづき、各国の国家標準（キログラム原器）の質量を値付け
- 国家標準の精度はほぼ一緒

2019年以降

定義：プランク定数

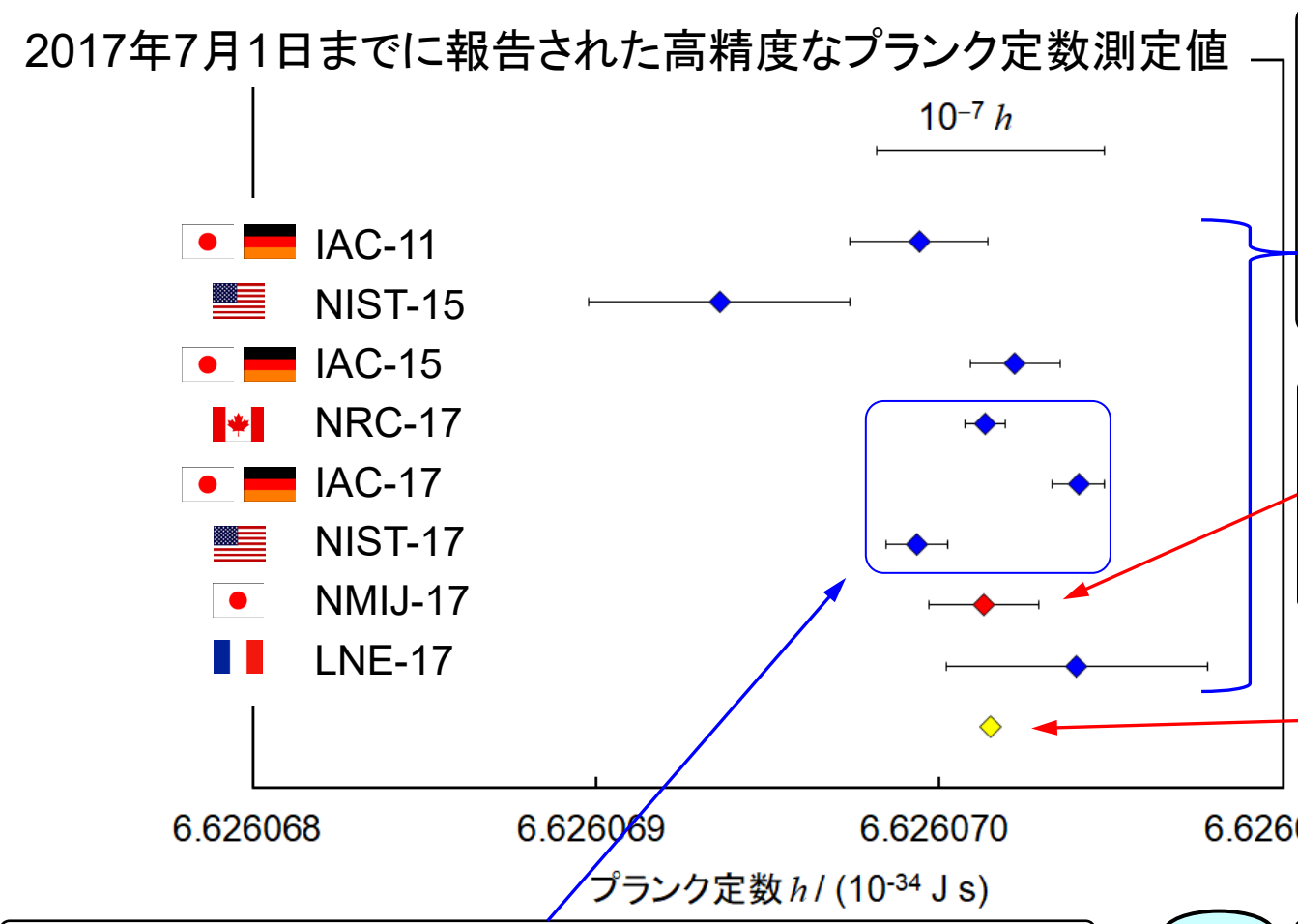
産総研　ドイツ　カナダ　米国



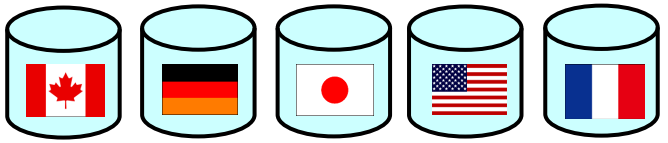
各国のキログラム原器

- 原理的には、各国が独自の方法でキログラムを実現し、国家標準の質量を値付けすることが可能
  - 各国独自のキログラム実現（Individual realization）
  - 国家標準の精度はその国の技術力によって変動
- 2026年9月時点、まだこの状態には完全には移行していない
  - 各国のキログラム実現能力の整合性を確認するための国際比較を定期的に実施
    → 各国が作り出す1 kgがずれていないかどうかの確認

国際比較による1 kgの整合性確認が必要な理由



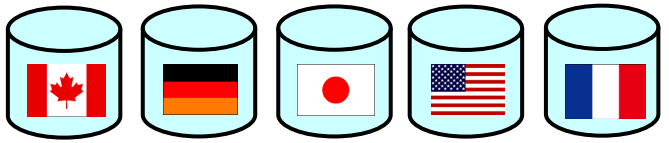
プランク定数の測定値が不確かさを超えて異なる場合がある
- 例えばNRC-17、IAC17、NIST-17



国家計量標準機関が、それぞれのキログラム原器を基準として独自の方法で測定した8つのプランク定数

NMIJ-17：産総研 計量標準総合センター（NMIJ）が報告
- N. Kuramoto *et al.*, *Metrologia*, **54**, 716 (2017)
- 科学の歴史に残る130年ぶりとなるキログラムの定義改定に直接貢献

8つのプランク定数の平均値：h = 6.626 070 15 × 10^{-34} J s
- プランク定数の定義値（2019年5月20日以降）



各国のキログラム原器

各国独自の1 kg実現
→ 国家標準間の不整合
→ 各国が実現する1 kgの整合性を確認

各国が実現した1 kgの整合性を確認するための国際比較 CCM.M-K8.2024

STEP 1:

- 参加機関：独自の方法で1 kgを実現
  → 実現結果にもとづき、それぞれが準備する1 kg分銅（仲介器）の質量を測定
- 国際度量衡局：各仲介器の質量を国際キログラム原器を基準として測定

STEP 2:

- 国際度量衡局：各仲介器についてΔmを算出

独自に実現した1 kgにもとづく質量 ⟺ Δm ⟺ 国際キログラム原器にもとづく質量

例えば

産総研が1 kgを実現する能力 ⟺ 整合 ⟺ ドイツ物理工学研究所（PTB）が1 kgを実現する能力

↑ $\Delta m_{産総研}$　　整合　　↑ Δm_{PTB}



トルコ計量研究所
- キッブル天びん

ドイツ物理工学研究所
- X線結晶密度法

スイス計量研究所
- キッブル天びん

産総研
- X線結晶密度法

台湾工業技術研究院
- X線結晶密度法

フランス計量研究所
- キッブル天びん

国際度量衡局
- キッブル天びん

国際度量衡局（フランス）

米国標準技術研究所
- キッブル天びん

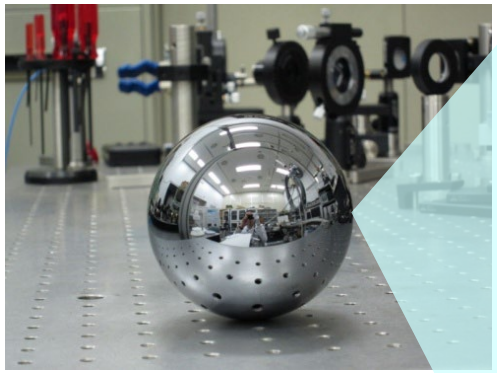
中国計量科学研究院
- ジュール天びん

カナダ国立研究機構
- キッブル天びん

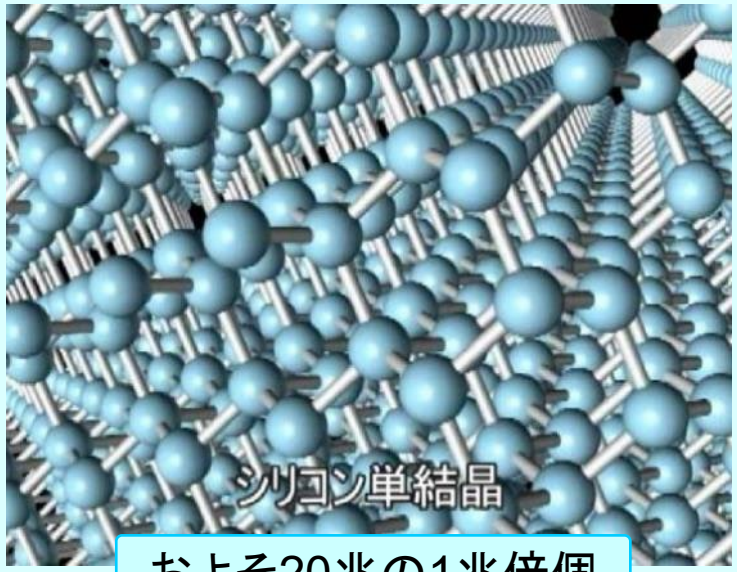
X線結晶密度法：シリコン単結晶中の原子数を計測
キッブル天びん・ジュール天びん：電気量を精密測定
→ 1 kgを実現

X線結晶密度法



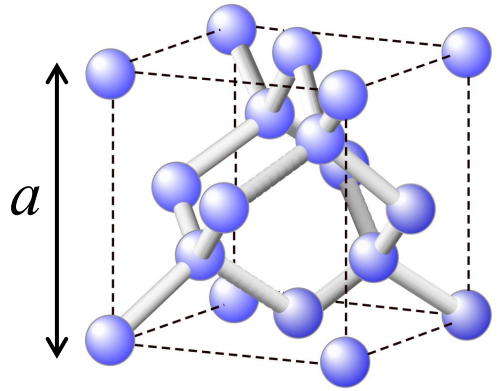


シリコン単結晶球体
- 質量：約1 kg
- 体積：約430 cm^3



およそ20兆の1兆倍個

シリコン原子



シリコン結晶単位格子
- 8個のSi原子を含む

シリコン単結晶球体の体積を測定

単位格子の体積 a^3を測定

$$\text{シリコン単結晶球体中の原子数} = \frac{\text{球体体積}}{\text{単位格子体積}} \times 8$$

シリコン単結晶球体の質量 = シリコン原子数 × シリコン原子一個の質量 ← プランク定数

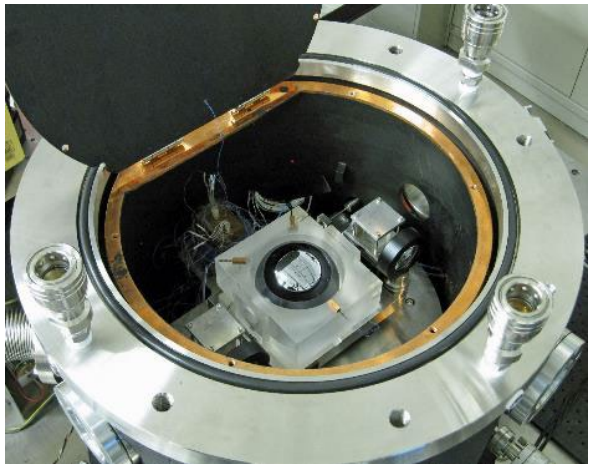


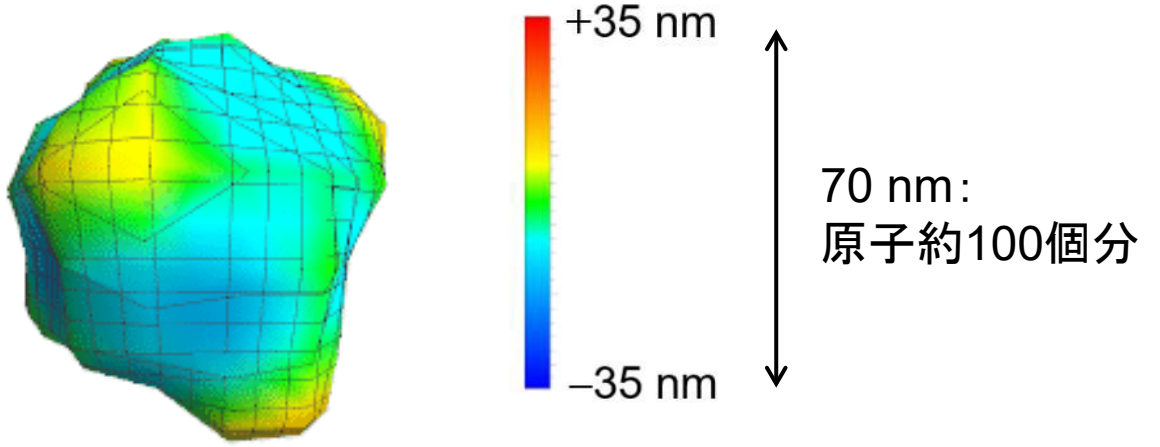
電子天びんによる
質量比較

国際度量衡局へ送る分銅（仲介器）の質量

N. Kuramoto, *Nat. Phys.* **18**, 720 (2022)

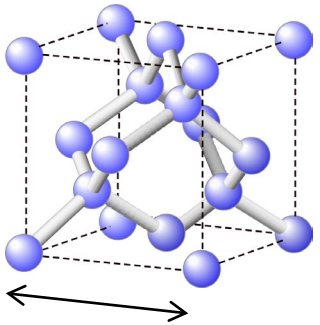
シリコン単結晶球体体積測定





シリコン球体の体積を測定するために産総研で開発されたレーザー干渉計

- 光の物差し(レーザー)を使って球体直径を多方位から測定し、平均直径から体積を決定
- 直径測定精度:0.6 nm(100億分の6メートル)
- 球体体積測定精度:2.0×10^{-8}(1億分の2)
- N. Kuramoto et al., *Metrologia*, **62**, 035001 (2025)



0.5 nm(100億分の5メートル)

- 球体直径:約10 cm

表面層分析



シリコン球体表面モデル

表面層

- 表面分析

  → 表面層質量 m_{SL}

球体質量 $m_{sphere} = m_{core} + m_{SL}$

コア（表面層を除いた部分）

- レーザー干渉計による体積測定

  → コア体積 V_{core}

  → コア中のシリコン原子数

  → シリコン原子数×シリコン原子質量

  = コア質量 m_{core}

表面層の球体質量への影響

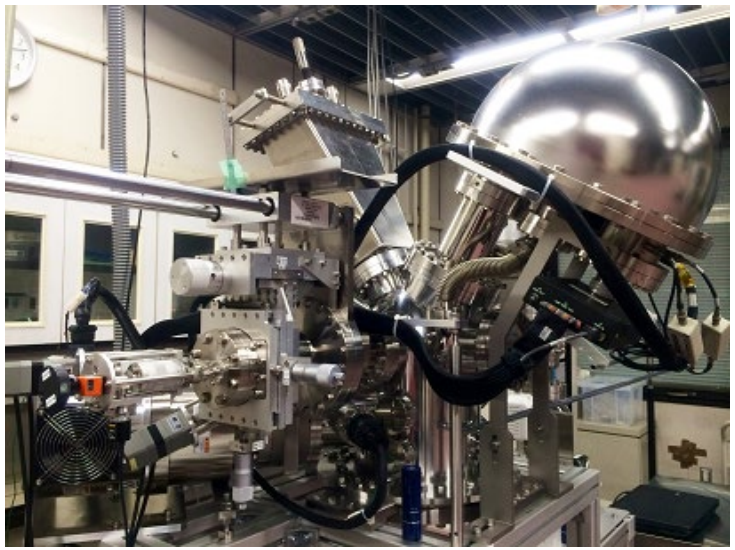
- 表面層厚さ：約 2 nm（原子約10個分）
- 表面層質量 m_{SL} = 約 100 μg
  - m_{core} = 約 1 kg

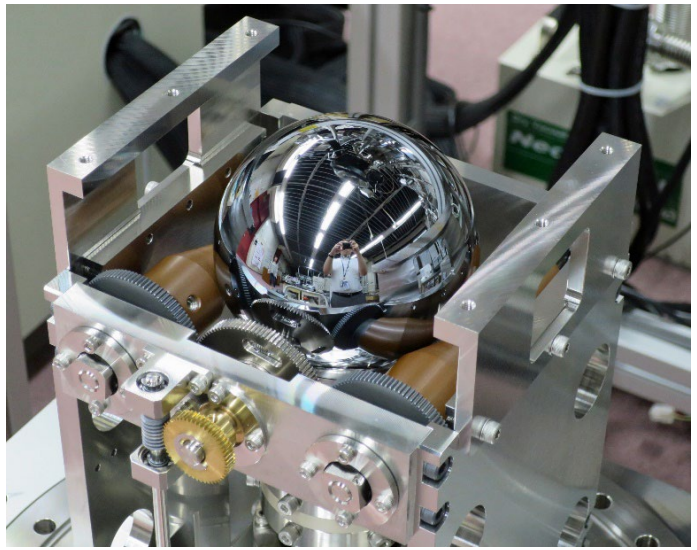
    → m_{SL} の m_{core} への相対寄与：1×10^{-7}（1億分の10）
  - 質量の国家標準設定に必要な精度
    - 2×10^{-8}（1億分の2）

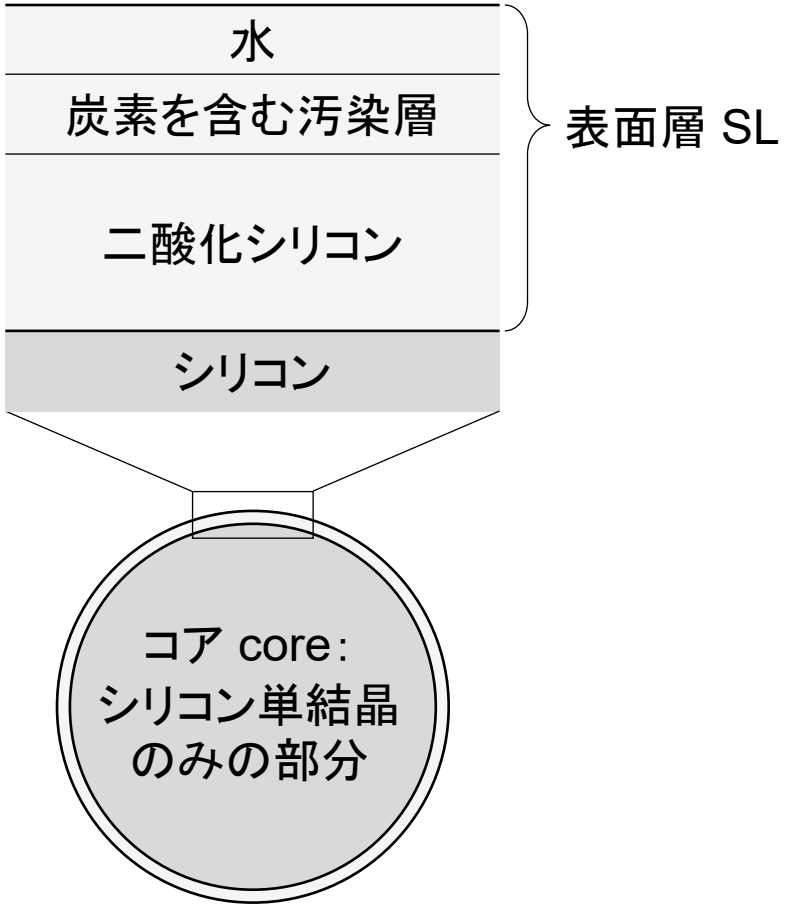
      → 表面層の影響は無視できない

      → 正確に表面層質量を求めるための表面分析が不可欠

^{28}Si 球体表面分析







産総研が開発した球体表面分析用X線光電子分光法システム

- L. Zhang, N. Kuramoto *et al.*, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 66, 1297 (2017)
- 球体方位制御機構によって、表面全体にわたる分析が可能
- 分析の基準：ナノメートル膜厚測定用標準物質

  → 表面層質量：120.6 (8.9) μg

  ⇓ + コア質量

- 球体質量決定、標準不確かさ 21 μg （相対標準不確かさ 2.1×10^{-8}）

  → 質量の国家標準設定に求められる精度を満たす

シリコン球体表面モデル

球体質量 $m_{\mathrm{sphere}} = m_{\mathrm{core}} + m_{\mathrm{SL}}$

国際比較用仲介器の質量測定



No. 6
日本国キログラム原器



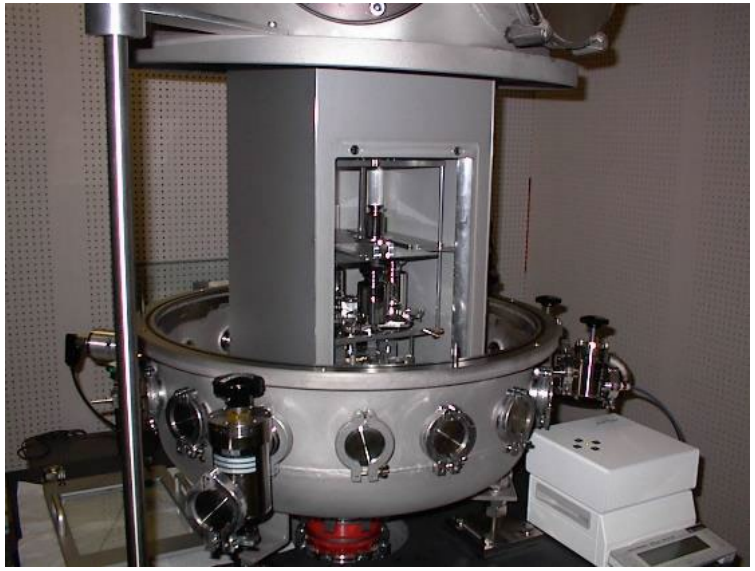
No. 30
副原器



No. 94



E59



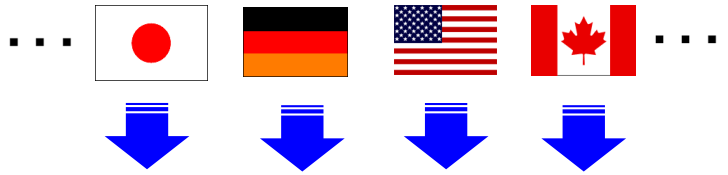
シリコン球体と仲介器の質量比較に用いた真空天びん

- メトラー・トレド社　M_one
- 分解能：0.1 μg
- 質量比較の不確かさ：2.6 μg
  - 10億分の2.6 g

- 産総研は四つの白金イリジウム合金製1 kg分銅を所有
  - No. 94、E59を仲介器として使用
- No. 94とE59の質量
  - シリコン球体との質量比較によって測定
    → 国際度量衡局へ手荷物として輸送

キログラム実現能力の国際比較 CCM.M-K8.2024

Δm



独自に実現した1 kgにもとづく質量

Δm

国際キログラム原器にもとづく質量

参照値

すべての参加機関によって決定された新しい定義にもとづく1 kg

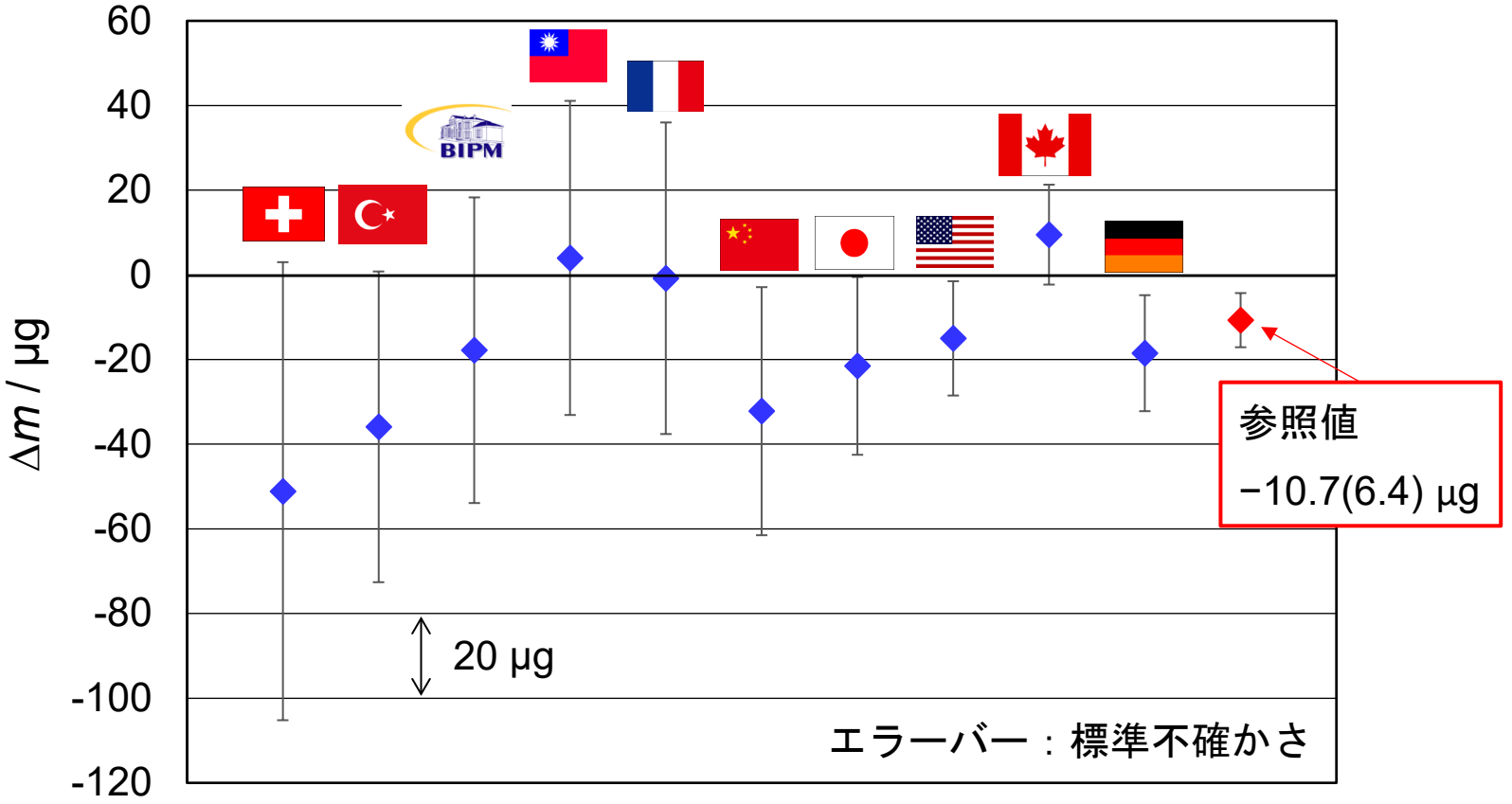
参照値

以前の定義にもとづく1 kg

新旧二つの定義から実現した1 kgのずれ

→ キログラムの合意値

- 現行の国際的な質量標準設定に利用

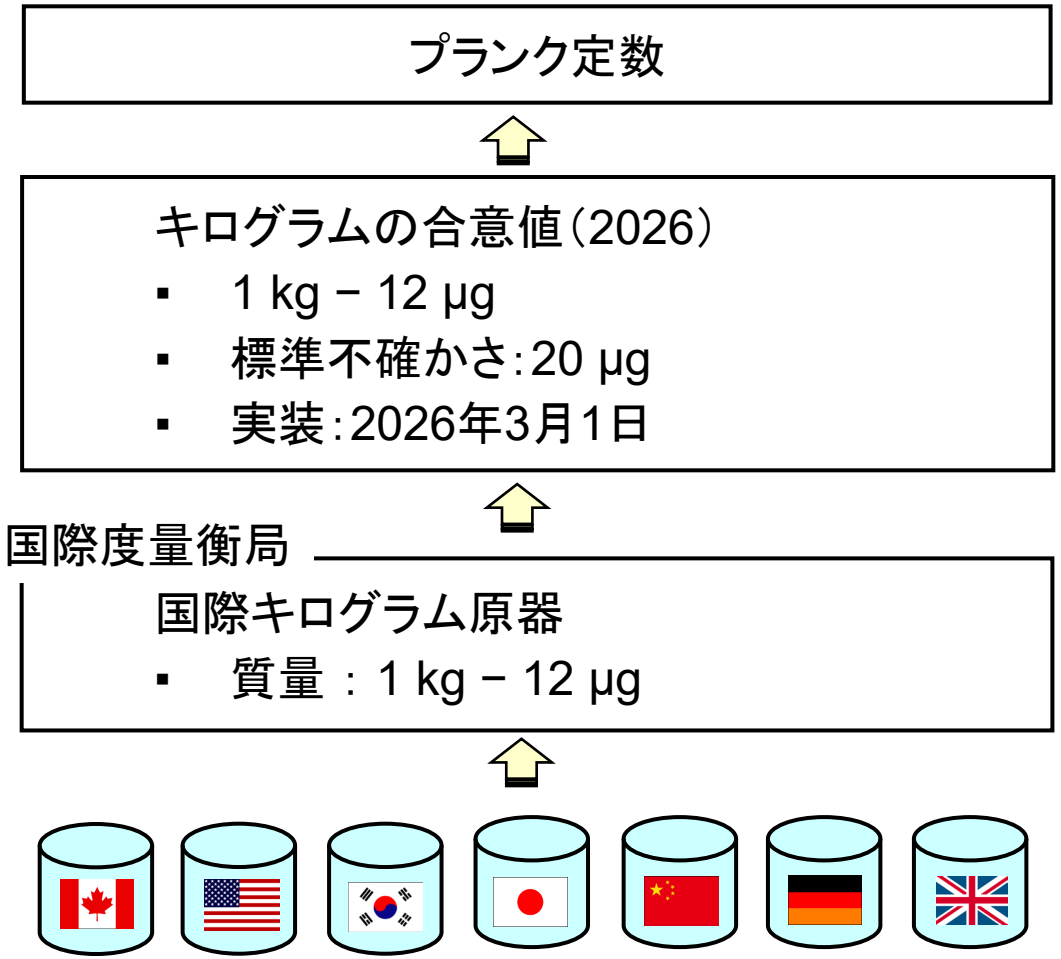


- NRC（カナダ）とPTB（ドイツ）の実現結果の整合性があまり良くない
  - 過去の国際比較（2019年、2021年）と比較すれば、ずれは大幅に減少
    → 国際研究協力などによって、不整合の原因が究明されつつあるため
- 次回の国際比較（2027年）の実施後に、各国独自のキログラム実現体制（Individual realization）への移行を検討

キログラムの合意値：国際的な質量スケールの暫定的な基準点

キログラムの合意値

- 現行の合意値：「2026年の合意値」
  - 1 kg − 12 µg
  - 直近の3つの国際比較の参照値から決定
  - 実装：2026年3月1日
- 定義の改定前と比較して、国際的な質量スケールが1 kgあたり12 µgシフト
- 合意値の決定・運用は、国際度量衡委員会質量関連量諮問委員会のタスクグループ（CCM-TGPfD-kg）が実施
  - CCM-TGPfD-kg：キログラム実現にかかるエキスパート8名から構成
  - S. Davidson (NPL, GB), H. Fang (BIPM), R. Green (NRC, CA), D. Knopf (PTB, DE), N. Kuramoto (NMIJ, JP), M. Stock (BIPM), D. Newell (NIST, US), L. Nielsen (DFM, DK)



各国のキログラム原器（質量の国家標準）

キログラムの合意値を用いた質量のトレーサビリティ体系

日本国内での質量標準供給体制

プランク定数 ← キログラムの合意値 ← 国際キログラム原器

産総研

質量の国家標準：標準分銅群

- 質量：1 mg～20 kg
- 材質：白金イリジウム合金、ステンレス鋼
- 日本国キログラム原器も標準分銅群の一部





校正 ↑

JCSS校正事業者

標準分銅

- 質量：1 mg～20 kg
- 材質：ステンレス鋼

校正 ↑

- 用途：精度管理など

基準器検査 ↑

都道府県計量検定所など

特級基準分銅

- 質量：1 mg～20 kg
- 材質：ステンレス鋼

検定・定期検査 ↑

- 用途：取引または証明（法定計量）

ユーザー

様々な分銅、はかり









出典：ザルトリウスジャパン株式会社HP、株式会社エー・アンド・デイHP、鎌長製衡株式会社HP、田中衡機工業所HP

新たなキログラムを活用した微小質量測定技術の開発

国際キログラム原器



1 kg

1 g

1 mg（1千分の1 g）

1 μg（100万分の1 g）

1 ng（10億分の1 g）

1 pg（1兆分の1 g）



分銅

1千万分の1 g（0.1 μg）

1兆分の1 g（1 pg）

新しいキログラムの定義

キログラムは、プランク定数を6.626 070 15 × 10^{-34} J sと定めることによって定義される

→ キログラムとプランク定数を結び付ける方法は定められていない

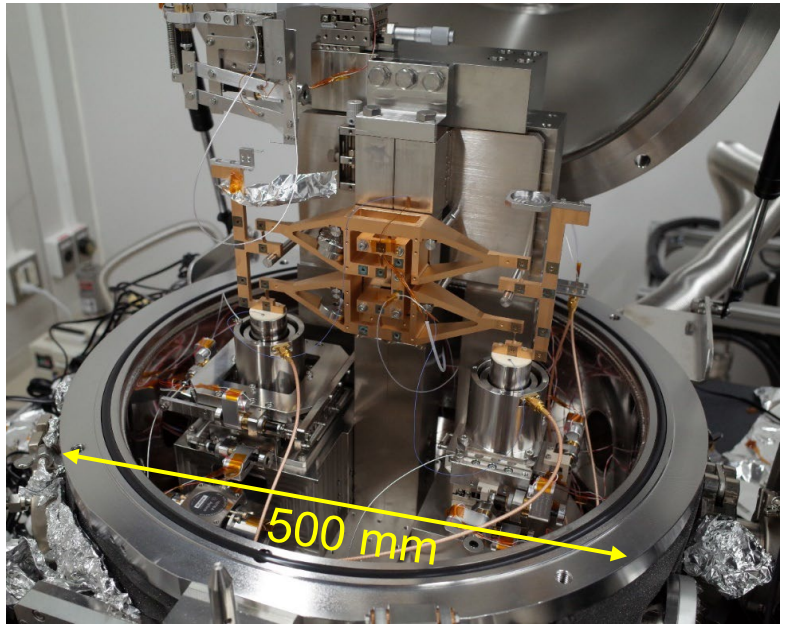
→ どんな方法を使っても大丈夫！

プランク定数 ⇔

- 原子の質量
- 光のエネルギー
- 電気的なエネルギー

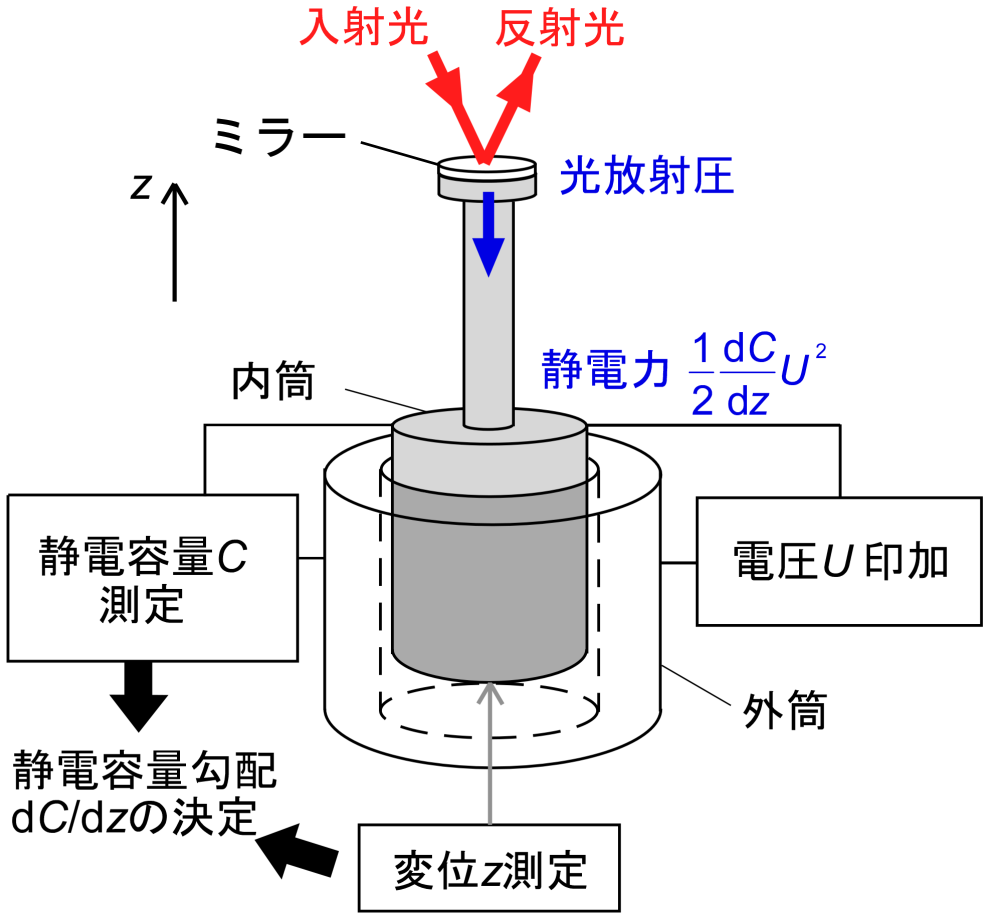
→ 新しい定義の下では、光や電気などを利用した様々な技術を用いて、分銅を用いずに、正確な質量測定が可能に

微小質量測定実現のための電圧天びん



開発中の電圧天びん

- 光放射圧と釣り合う静電力を発生
- 静電力をプランク定数にもとづく電圧測定などによって求める
  → 光放射圧の決定
- 光放射圧 ÷ 重力加速度 = 光放射圧に相当する質量
  - 分銅は必要ありません
- ターゲット：pNオーダーの光放射圧測定
  - 質量換算：ナノグラム（10億分の1グラム）オーダー



電圧天びんの原理

- K. Fujita, N. Kuramoto *et al.*, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 74, 1007811 (2025)

まとめ

- 皆さんがお使いの分銅は、元をたどればプランク定数にたどり着きます
  - 一方、依然として国際キログラム原器が、プランク定数と各国のキログラム原器をつなぐ重要な役割を果たしています
    - その質量は、1 kgちょうどではなく、プランク定数にもとづいて実験的に決定されています
  - 産総研は、シリコン単結晶球体を用いた計測によって、国際キログラム原器の質量の決定に大きく貢献しています
- 2030年頃までには、各国が独自にキログラムを実現し、それぞれの質量の国家標準を設定することが可能になりそうです
- キログラムに関するより詳しい情報は、下記のウェブサイトをご参照下さい
  - https://staff.aist.go.jp/n.kuramoto/

ご清聴ありがとうございました