

見学会資料 2018年8月21日@産総研つくば中央第三事業所

「キログラム」のプランク定数に基づく 新たな定義を導いた計測技術

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長 倉本 直樹 (n.kuramoto@aist.go.jp)

- シリコン球体体積測定用レーザー干渉計
 - レーザーを「光の物差し」として、球体の直径・体積を測定
- シリコン球体質量測定用天びん
 - 日本国キログラム原器を基準として、球体の質量を測定



シリコン球体



日本国キログラム原器

プランク定数とキログラム

プランク定数 $h = 6.626 \dots \times 10^{-34} \text{ J s}$

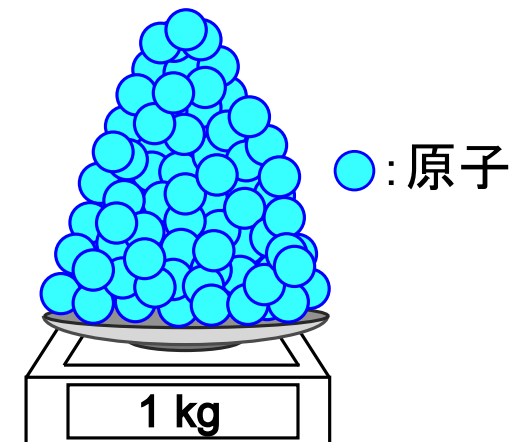
- $E = h\nu$ 、 E : 光のエネルギー、 ν : 光の振動数
- 光の持つエネルギーの最小単位

プランク定数を基準として電子一個あたりの質量 $m(e)$ を高精度に導出可能

$$m(e) = \frac{2R_{\infty}h}{c\alpha^2}$$

c : 真空中の光速度
 α : 微細構造定数
 R_{∞} : リュードベリ定数

- 電子の質量と任意の原子の質量との比は高い精度で分かっている
- プランク定数を基準として、非常に多数の原子の質量として1 kg を表現できる



将来の定義改定の方針

第24回国際度量衡総会決議(2011年)

キログラムの大きさは、プランク定数の値を正確に
 $6.626\ 06XX \times 10^{-34} \text{ J s}$ と定めることによって設定される

- XX: 定義改定の時点の最も信頼できる測定値から決定
 - 世界各国の研究機関でのプランク定数測定
 - ターゲット: $50 \mu\text{g}$ (国際キログラム原器の長期安定性)を凌ぐ精度

プランク定数測定方法

- キップルバランス法(米国、カナダ、フランス、スイス、中国、韓国)
 - 電気的手法によってプランク定数 h を測定
- X線結晶密度法(日本、ドイツなど)
 - アボガドロ定数 N_A を測定 → プランク定数 h を導出

$$N_A = \frac{M_e}{m_e} = \frac{cM_e\alpha^2}{2R_\infty h}$$

c : 真空中の光速度
 α : 微細構造定数
 R_∞ : リュードベリ定数

二つの実験装置の定義改定における役割

アボガドロ定数 N_A

➤ N_A : 物質 1 mol に含まれる原子の数

- ^{12}C 12 g 中の ^{12}C の数

質量測定

原子数の計測



➤ シリコン球体の質量測定

- 天びん



➤ シリコン球体中のシリコン原子数の計測

- 体積測定用レーザー干渉計

→ シリコン球体の体積: V

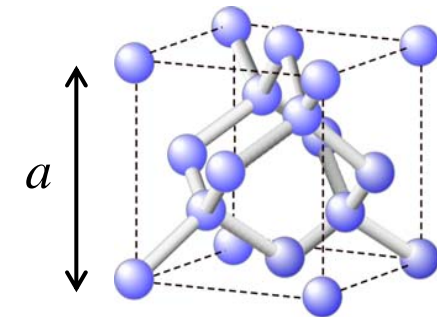
→ 単位格子の体積: a^3

→ 球体中の原子数: $\frac{8V}{a^3}$



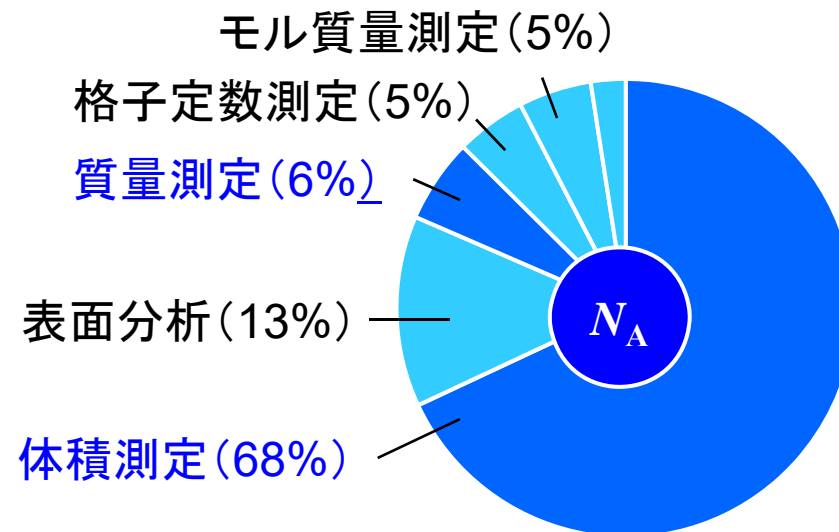
シリコン単結晶球体

- 質量: 約 1 kg



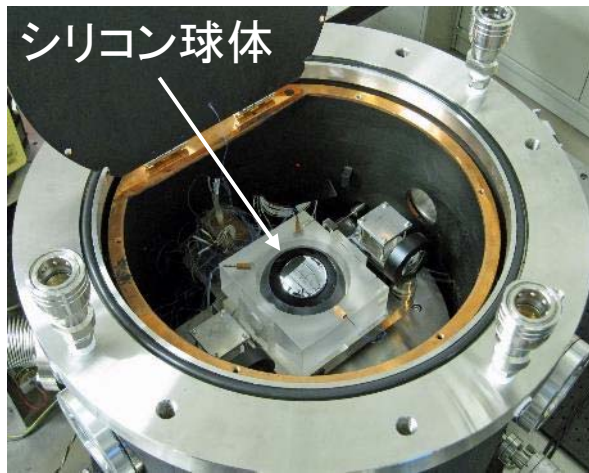
シリコン結晶単位格子

- 8個のSi原子を含む

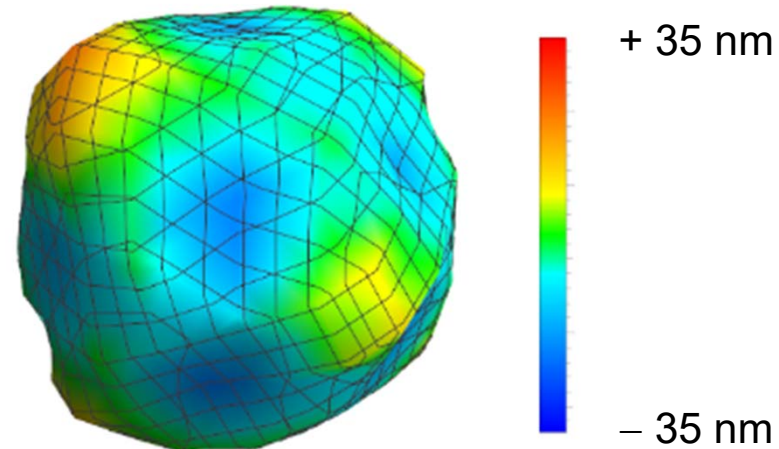


アボガドロ定数測定の不確かさへの各測定の寄与

シリコン球体体積測定

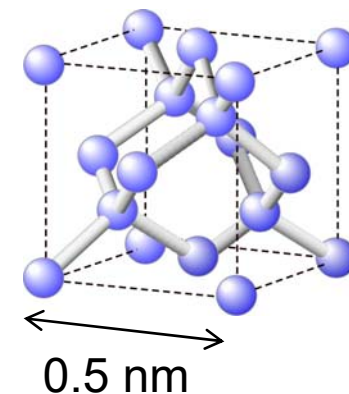


球体体積測定用レーザー干渉計



球体形状三次元図

- 光の物差しである「レーザー」を使って球体の直径を測定
- 直径測定精度: 0.6 nm (原子間距離に相当)
- 直径測定方位数: 2175
- 球体体積測定精度: 2.0×10^{-8} (1億分の2)
 - 産総研、ドイツ物理工学研究所のみで実現可能

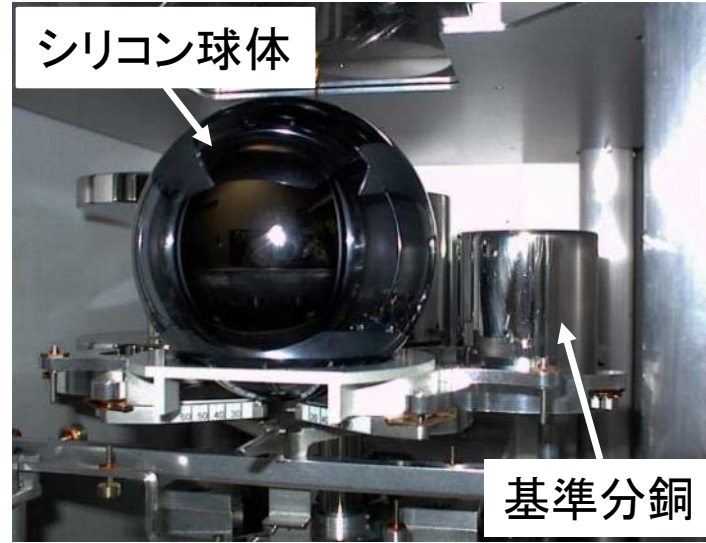


シリコン結晶単位格子

シリコン球体質量測定



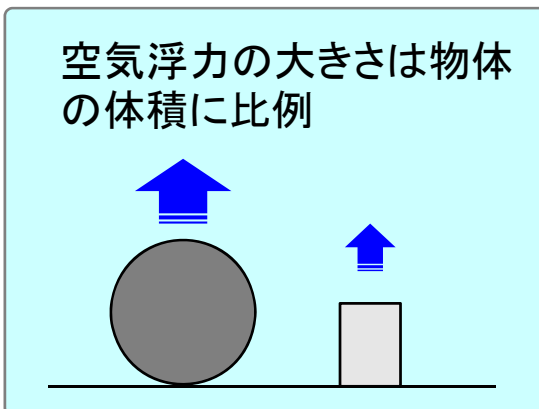
球体質量測定用真空天びん



基準分銅とシリコン球体の質量比較の様子



日本国キログラム原器



真空中での質量比較が可能

→ 空気浮力の影響の評価が不要

球体質量測定精度: 0.000 006 g (100万分の6 g)

→ $0.000\ 006\ \text{g} / 1000\ \text{g} = 0.000\ 000\ 006$ (10億分の6)

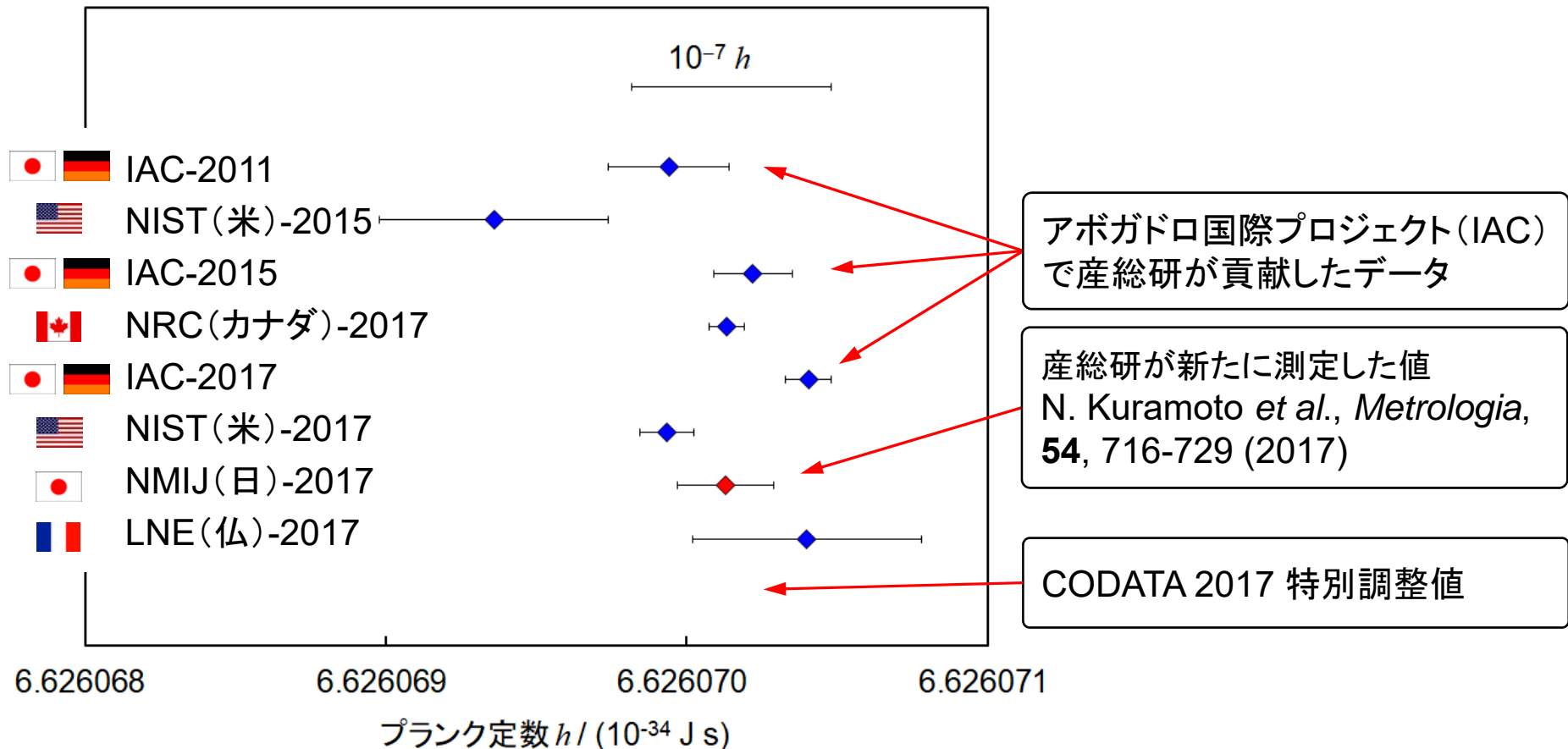
アボガドロ定数測定結果

- $N_A = 6.022\,140\,84(15) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, 測定精度 : 2.4×10^{-8} (1億分の2.4)
 - N. Kuramoto *et al.*, *Metrologia*, **54**, 716-729 (2017)
- プランク定数導出精度: 1億分の2.4
 - 1 kgに換算すると 24 μg
 - 国際キログラム原器の長期安定性(50 μg)を凌ぐ
- 日本、ドイツ、カナダ、アメリカ、フランスの研究機関が高精度なプランク定数測定に成功

科学技術データ委員会(CODATA)

- 2017年10月: 新たなキログラムの定義の基準となるプランク定数の値「[特別調整値](#)」を決定

新たなキログラムの基準となるプランク定数の決定



- 8つの測定結果(日本、ドイツ、アメリカ、カナダ、フランス)に基づき特別調整値を決定
- 産総研: 4つのデータの測定に貢献、そのうち1つは産総研がほぼ独立に測定

新たなキログラムの基準となるプランク定数の決定

Table 1 in D. Newell, *Metrologia*, **55**, L13, 2018

Source	Identification ^a	Value
Schlamminger <i>et al</i> (2015)	NIST-15	h $6.626\,069\,36(38) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Wood <i>et al</i> (2017)	NRC-17	h $6.626\,070\,133(60) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Haddad <i>et al</i> (2017)	NIST-17	h $6.626\,069\,934(88) \times 10^{-34} \text{ J s}$
Thomas <i>et al</i> (2017)		$\approx 10^{-34} \text{ J s}$
Azuma <i>et al</i> (2015)		$\approx 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Azuma <i>et al</i> (2015)		$\approx 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Bartl <i>et al</i> (2017)		$\times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Kuramoto <i>et al</i> (2017)	NMIJ-17	N_A $6.022\,140\,78(15) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

産総研 計量標準総合センター
National Metrology Institute of Japan



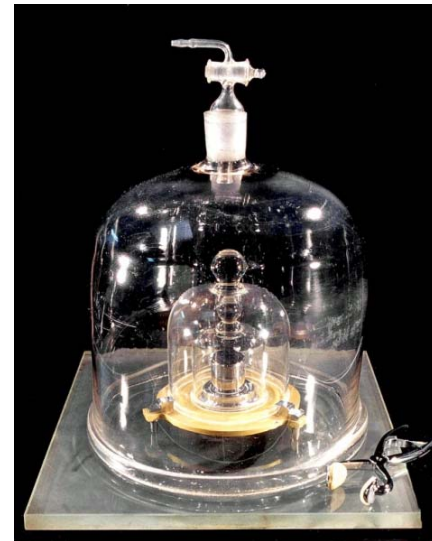
新たなキログラムの基準 (CODATA 特別調整値): $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$

- 1889年(明治22年)以来、約130年ぶりとなるキログラムの定義改定
- 近代度量衡の歴史上初となる、普遍的な物理定数を基準とする質量標準の確立
- 科学の歴史に残る値の決定に、ドイツ、アメリカ、カナダ、フランスと共に貢献

日本国キログラム原器



日本国キログラム原器



国際キログラム原器

(提供: BIPM)

<https://www.bipm.org/en/bipm/mass/ipk/>

- 国際キログラム原器のコピーの一つ
 - 同じ材質(白金イリジウム)、サイズ(高さ 39 mm、直径 39 mmの円筒)
- 1889年: パリから日本に輸送
- 約40年おきにパリに里帰りし、国際キログラム原器を基準として質量を決定
- 我が国の質量の国家標準として産総研で厳重に保管
- 撮影の機会を設定させていただく予定 → アンケートへのご回答をお願い致します