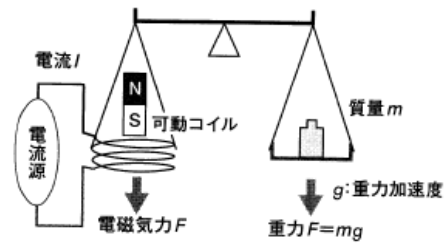


## 単位の定義が 2019 年 5 月 20 日に量子標準に大きく変わった！

質量の定義を国際キログラム原器基準ではなく、相対論の式  $E = mc^2$  と量子力学の式  $E = hv$  を組み合わせて  $m = hv/c^2$  とし、プランク定数  $h$  を9桁で測定して定義し、プランク定数から質量を決めるというものである! (光速  $c$  は確定値をもち、振動数  $\nu$  も例えば電子遷移に対して正確に測定できる)

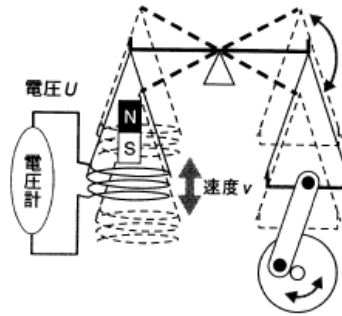
プランク定数を決めるキップルバランスは、電磁天秤でまずある物質の重量  $mg$  を測定する。静磁場中のコイルに流した電流  $I$  は磁場と相互作用して物質を支える力を発生する。同装置の静磁場内でコイルを実際に移動させ、移動速度  $v$ 、加速度  $g$  を測定すると同時にコイルに発生する電圧  $V$  を測定する。質量は  $m = IV/vg$  で与えられるが、この式にはプランク定数はでてこないし、一見ポーラロ学会にあまり関係なさそうな話である。

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{l}
 \text{重力} \downarrow \\
 mg = IBL \dots \text{式 8} \cdot 3 \\
 \uparrow \\
 \text{誘導起電力} \\
 U = vBL \dots \text{式 8} \cdot 4
 \end{array}
 \end{array}
 \rightarrow
 \begin{array}{l}
 mgv = IU \dots \text{式 8} \cdot 5 \\
 m = \frac{IU}{gv}
 \end{array}$$



力発生モード

既知の電流を磁界中のコイルに流し、校正対象の質量と釣り合う電磁気力を発生 (電流  $I$  と重力  $F$  の測定)



速度発生モード

コイルに既知の速度を与え、磁界中のコイルに発生する電圧を測定 (電圧  $U$  と速度  $v$  の測定)

図 8・1 キップル・バランスの原理

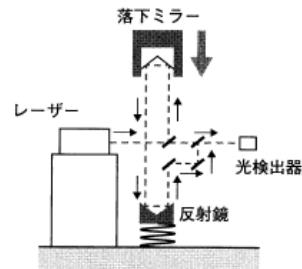


図 8・2 重力加速度を測定する装置の模式図

実は、このキップルバランスでは、正確な電圧、電流基準が必要となっており、2019年5月20日の単位の大幅変更でも基準が変わる。

これまで、電流基準は1 m離れた電線に働く力が  $10^{-7}$  N のとき 1 A として定義されたが、電気素量  $e$  の値で定義されることになる。電圧基準は、薄い絶縁体を超伝導体で挟んだジョセフソン素子という量子素子を使用する。振動数  $\nu$  のマイクロ波を照射すると電流は  $nh\nu/(2e)$ , ( $n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) の電圧ごとに階段状に変化する。すなわち、電圧の量子化 (プランク定数  $h$  と電気素量  $e$  から目盛りの確定がなされる) がおこるわけである。電圧の量子化で登場したプランク定数  $h$  が、キップルバランスでの質量  $m$  とプランク定数  $h$  の関係を与える。

また、電流の測定は、量子ホール効果で量子化された抵抗  $R = h/(ne^2)$ , ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) が求められるので ( $h$  と  $e$  から目盛りの確定がなされる), このジョセフソン素子で量子化された電圧をこの量子化された抵抗でわれば電流の目盛りを求めることができる。

このような量子基準がポーラロ業界で最も使用されている電圧、電流の基準に2019年5月になるのである。ジョセフソン素子や量子ホール効果は、固体物理と量子力学の産物であり電気分析化学者には理解が難しいが、単位の基準がどこにあるのかはしておく必要があるように思う。キップルバランスでの測定は、世界で2,3カ所しか測定できるところがない。その信頼性をあげるためにロシアの同位体濃縮用超遠心分離装置で同位体を99.99%まで濃縮したシリコン28を用いたアボガドロ数の正確測定がなされており、物質質量もアボガドロ数で来年の5月の新たに定義される。

産総研計量標準総合センター長白田孝氏「新しい1キログラムの測り方：科学が進めば単位が変わる」

(講談社・ブルーバックス2018年) より一部転載

# 単位

新しいSIの施行日は2019年5月20日  
(メートル条約が締結された日であり世界計量記念日 [world metrology day](#))  
である。

## 古典から量子基準へ (量子以前を古典という)

x

新定義：新たに以下の4つの物理定数を**定義値**とする。  
したがって、これらの数値には**不確かさ**はない。

- プランク定数  $h = 6.62607015 \times 10^{-34}$  ジュール秒(J·s)
- 電気素量  $e = 1.602176634 \times 10^{-19}$  クーロン(C)
- ボルツマン定数  $k = 1.380649 \times 10^{-23}$  ジュール毎ケルビン(J·K<sup>-1</sup>)
- アボガドロ定数  $N_A = 6.02214076 \times 10^{23}$  毎モル(mol<sup>-1</sup>)

x

質量の定義を国際キログラム原器基準ではなく、相対論の式 $E = mc^2$ と量子力学の式 $E = h\nu$ を組み合わせると  $m = h\nu / c^2$  とし、定義されたプランク定数 $h$ (9桁で測定)と定義された光速 $c$ から質量を決めるというものである。振動数 $\nu$ は例えば電子遷移に対して正確に測定できる。

$$m = h\nu / c^2$$

赤字は定義値  
周波数は15-16桁の  
精度で測定できる  
質量は不確定に！

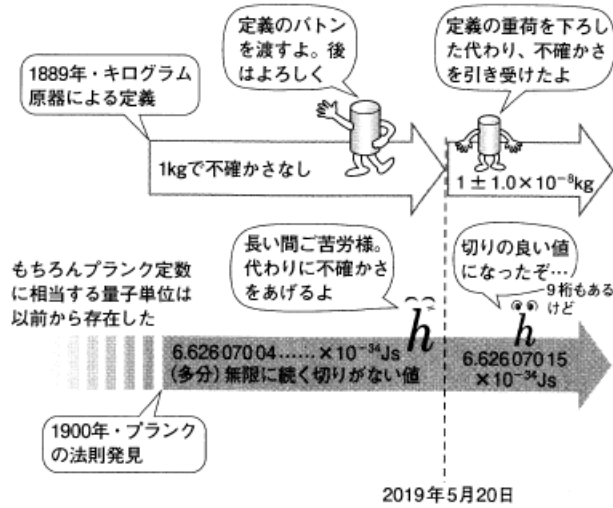


図10・4 定義改定前後のイメージ

産総研計量標準総合センター長白田孝氏「新しい1キログラムの測り方：科学が進めば単位が変わる」  
(講談社・ブルーバックス2018年) より一部転載

# SI units 国際単位系

Le Système International D'Unités

量	基本単位		定義
	名称	記号	
長さ	<u>メートル</u>	m	1 秒の 299 792 458 分の1の時間に光が真空中を伝わる行程の長さ。
質量	<u>キログラム</u>	kg	国際キログラム原器 (プラチナ 90 %、イリジウム 10 % からなる合金で直径・高さともに 39 ミリメートルの円柱) の質量。 <b>2019/5/20古い定義となる</b>
時間	<u>秒</u>	s	セシウム133原子の基底状態の2つの超微細構造準位 (F = 4, M = 0 および F = 3, M = 0) 間の遷移に対応する放射の周期の 9 192 631 770 倍の継続時間。

## 2019/5/20古い定義となる

電 流	アン ペ ア A	真空中に 1 メートルの間隔で平行に配置された無限に小さい円形断面積を有する無限に長い 2 本の直線状導体のそれぞれを流れ、これらの導体の長さ 1 メートルにつき $2 \times 10^{-7}$ ニュートンの力を及ぼし合う一定の電流。
熱力 学温 度	ケ ル ビ ン K	水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ 。 <div style="text-align: center;">2019/5/20古い定義となる</div>
物 質 量	モ ル m ol	0.012 キログラムの炭素12の中に存在する原子の数に等しい数の要素粒子を含む系の物質質量。 <div style="text-align: center;">2019/5/20古い定義となる</div> モルを使うときは、要素粒子 (entités élémentaires) が指定されなければな
光 度	カ ン デ ラ cd	周波数 $540 \times 10^{12}$ ヘルツの単色放射を放出し、所定の方向におけるその放射強度が $1/683$ ワット毎ステラジアンである光源の、その方向における光度。

長さ：光速不変（相対論）

時間：Csの核スピンと電子の磁気モーメント（スピン・軌道）の相互作用でエネルギー準位が分裂 9192631770 Hzに相当（量子力学）

温度： $k_B T$  エネルギー方程式  $= h \nu$

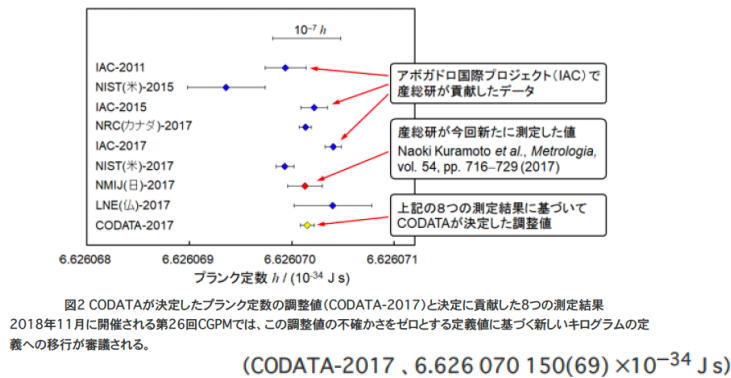
ボルツマン定数 $k_B$ は確定値 $1.3806490 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ をもつ。

水素原子の量子力学

$$m_e = \frac{2hR_\infty}{\alpha^2 c}$$

$m_e$ : electron mass これを求める  
 $h$ : Planck constant ?? 下図のように精度をあげる必要あり  
 $R_\infty$ : Rydberg constant  $10973731.568508(65) \text{ m}^{-1}$  14桁  
 $\alpha$ : fine structure constant  $7.2973525664(17) \times 10^{-3}$  11桁  
 $c$ : 光速  $299792458 \text{ m s}^{-1}$  (exact)

より基本的な量であるプランク定数がもとめられれば電子の質量が決まる  
 電子の質量がわかれば $^{12}\text{C}$ の質量がわかる kgの定義が明らかとなる。



- 物質量の新定義：1 molは正確に $6.02214076 \times 10^{23}$ 個の要素粒子を含む。この値はアボガドロ定数である。
- アボガドロ定数  $N_A = 6.02214076 \times 10^{23}$  毎モル (mol<sup>-1</sup>)

炭素 $^{12}\text{C}$  1 molは0.012 kg(exact 旧定義)ではなく、 $\pm 10^{-10}$  kgの不確かさをもつ。1 kgが $1 \pm 1.0 \times 10^{-8}$  kgとなるからである。