

国際単位系 (SI) の改定と物理教育

北野正雄

京都大学

2018 年に採択され、2019 年 5 月に施行される国際単位系 (SI) の改定¹⁾は、18 世紀以来のキログラム原器の廃止を含む本格的なものである。7 つの基本単位のうち、キログラム kg, アンペア A, ケルビン K, モル mol の定義が大きく変わる。そのために新たに 4 つの物理定数、すなわちプランク定数 h , 素電荷 e , ボルツマン定数 k_B , アボガドロ定数 N_A を表す数値の固定、すなわち定義値化が行われた (表 1)。この改定は、表面的には基本単位の大きさの決め方が変わっただけで、単位そのものや単位系の構造を変えるものではない。基本単位の大きさも、従来のものと不確かさの範囲で一致するように配慮されている。しかし、単位の大きさの決め方が人工物 (原器) から、物理定数の定義値化によるものに完全移行したという意味では歴史的転換点である。人工物の所有や管理、経年変化の問題から解放され、万人による「単位の共有」が実現されたのである。

一方、普遍性や再現性、正確さの代償として、定義自体が複雑化したことは否めない。日常現象のスケールからの乖離も著しい。教育上も定義値化された各物理定数の意味やそれが現れる物理現象、測定

原理などを説明する必要がある^{2, 3, 4)}。例えば、力学において質量の単位であるキログラムの説明において量子論のプランク定数に言及しなければならない。単位の理解のためには、多岐にわたる知識が前提とされるため、各分野の教育と関連させながら段階的に教えるといった工夫が必要である。

基本単位ごとにその大きさを示す基準を設定する場合に比べ、複数の基本単位に関する物理定数を定義値化する方法は分かりにくい。すでに、アンペアの定義における μ_0 , メートルの定義における c_0 は、それぞれ 1948 年、1983 年の改定時に定義値化されていたとはいえ、すべてがこの方式に移行した今、考えを整理しておくことが重要である。

例として、光速を定義値化することで、メートルの大きさがなぜ決まるかを確かめておこう。まず、SI 等で推奨されている記法を導入する。物理量 A の (基本または組立) 単位部分を $[A]$, 数値部分を $\{A\}$ とし、 $A = \{A\} \times [A]$ と表す。例えば、 $L = 1.25 \text{ m}$ では $\{L\} = 1.25$, $[L] = \text{m}$ である^{4, 5, 6)}。さて、セシウム遷移周波数 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ に相当する波長 $\lambda_{\text{Cs}} := c_0/\Delta\nu_{\text{Cs}} = \{c_0\}\{\Delta\nu_{\text{Cs}}\}^{-1} \text{ m}$ を用いて、メートルが

表 1: 新 SI で定義値化された物理定数 (* は今回新たに定義値化)。

物理定数	記号 A	定義値 $\{A\}$	単位 $[A]$
セシウム遷移周波数	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	$\text{Hz} = \text{s}^{-1}$
光速	c_0, c	299 792 458	m/s
プランク定数 *	h	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$	$\text{J s} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$
素電荷 *	e	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$	$\text{C} = \text{s A}$
ボルツマン定数 *	k_B	$1.380\,649 \times 10^{-23}$	$\text{J/K} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$
アボガドロ定数 *	N_A	$6.022\,140\,76 \times 10^{23}$	mol^{-1}
発光効率	K_{cd}	683	$\text{lm/W} = \text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{cd sr}$

$$1\text{ m} = \frac{\{\Delta\nu_{\text{Cs}}\}}{\{c_0\}} \lambda_{\text{Cs}} = 30.663\,3189\dots \times \lambda_{\text{Cs}}$$

と定義される。(1 m = (1/{c₀}) c₀ · 1 s と式変形して、光が 1 秒間に進む距離の 1/299 792 458 が 1 m と読むこともできる。) このように、各基本単位は定義値化された物理定数の組み合わせで定義されている(表 1 の最右列参照)。

定義値化されたからといって、その物理量が単なる定数になって測定できないものになるわけではない。例えば、光速 c₀ の測定は可能であるが、十分正確な測定結果が得られた場合、使用した物差しを校正していることになる。

新 SI は特に電磁気学の教育に大きい影響をもたらす⁴⁾。従来、アンペアは真空の透磁率の値を $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ に固定することで定義されてきた。この数値は、アンペアが CGS emu 単位系における電流単位 1 emu (= 1 $\sqrt{\text{dyn}}$) のちょうど 0.1 倍になるように設定された。古い単位系を継承して、アンペアは「力」を介して定義されてきたのである。今後の教科書には「アンペアは素電荷で定義される」、「 μ_0 は不確かさをもつ通常の物理量である」という記述が最低限必要となる。

實際上、力で電流の大きさを精度よく定めることはむずかしい。そこで 1990 年に、ジョゼフソン定数 $K_J = 2e/h$ (単位は Hz/V) とフォン・クリッツィング定数 (量子ホール効果) $R_K = h/e^2$ (単位は Ω) を定数化することで、電圧と抵抗に関する暫定の標準 (単位) が設定された。これらは巨視的量子的効果に基づくもので、精度よく定めることができる。質量を、これら電氣的定数を基準にして正確に測る技術であるキップル (Kibble) 天秤法⁹⁾ が確立されたことをうけて、今回キログラム原器が廃止されたのである。

電磁気学は歴史のなかで多くの単位系が併存したため、混乱状態にあったが、徐々に MKSA 単位系 (SI) に集約されてきた。しかし、これまでの真空の透磁率の定義値の奇妙な数値 $4\pi \times 10^{-7}$ は、 μ_0 が真正の物理量ではなく、辻褄合わせの係数に過ぎない

という誤解を生んだ。さらに、磁場を $\mathbf{B} (= \mu_0 \mathbf{H})$ だけで表わし、 $\mathbf{H}$ を補助場と呼んで付随的に扱う教科書も増えてきている。 $\mathbf{D}$ も同様に扱い、真空中では $\mathbf{E}$ と $\mathbf{B}$ だけでよいとする極端な流儀も目立ってきている¹⁰⁾。逆に、 $\mathbf{H}$ を重視する EH 対応に復古する動きもある。軸足を旧来のガウス単位系に置いたまま不承不承 MKSA で書かれた教科書¹¹⁾ が利用される場面も多く、混乱の終息を阻害している。電荷や電流を「力」によらず、その担い手である電子によって直接的に定義することが決まった今、本腰を入れて電磁気学の教程を見直す必要がある。

今回の SI の改定を契機に、量や単位、あるいは単位系についての正しい理解が深まるとともに、共通言語としての SI が物理教育のみならず科学教育全体に浸透定着してゆくことが期待される。

参考文献と注釈

- 1) BIPM, The 9th edition of the SI Brochure; 現時点ではドラフト版が公開されている。
<https://www.bipm.org/utils/en/pdf/si-revised-brochure/Draft-SI-Brochure-2018.pdf>
- 2) 白田孝『新しい 1 キログラムの測り方』講談社 (2018)。
- 3) 安田正美『単位は進化する』化学同人 (2018)。
- 4) 佐藤文隆, 北野正雄『新 SI 単位と電磁気学』岩波書店 (2018)。
- 5) これは、〈量〉 = 〈数〉 × 〈単位〉とする「量の計算」(quantity calculus) に整合した記法である。なお、 $A/[A] = \{A\}$, $A/\{A\} = [A]$, $[[A]] = [A]$, $\{\{A\}\} = \{A\}$, $[\{A\}] = \{[A]\} = 1$ などが成り立つ。 $[g] = [\text{kg}]$, $\{g\} = 10^{-3}$ であることに注意する。
- 6) 似て非なるものとして、 $c_0 [\text{m/s}]$, $3.0 \times 10^8 [\text{m/s}]$ のように、単位記号を (亀甲) 括弧で囲む記法がしばしば用いられる。これは量と単位の理解や扱いに混乱をもたらすものであり、避けるべきである^{7), 8)}。
- 7) 小牧研一郎, 大学の物理教育 **24** (2018) 117。
- 8) 有賀哲也, <http://hdl.handle.net/2433/235933>
- 9) L.S. Chao *et al.*, Am. J. Phys. **83** (2015) 913。
- 10) 北野正雄, 大学の物理教育 **21** (2015) 73。
- 11) 例えば, R.P. Feynman *et al.*, The Feynman Lectures on Physics, vol. 2 (Addison Wesley, 1971)。名著ではあるが、時代の制約から単位の扱いに混乱があり、そのままでは現在の学習者には勧められない。

連絡先 Email: kitano@kuee.kyoto-u.ac.jp