

国際単位系 (SI)

富士原和宏

(東京大学 大学院農学生命科学研究科)

International System of Units

Kazuhiro FUJIWARA

(Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo)

1. はじめに

「農業気象」あるいは「生物と気象」に掲載された国際単位系 (Système international d'unités, SI) に関する解説記事を調べると、直近のものでも蔵田 (1986) にまで遡る。その内容は、掲載年から判断して SI 文書第 5 版に基づくものであろう。現時点の最新版は 2019 年に発行された第 9 版である。この第 9 版では定義定数が SI の根幹であることを明示するなど、第 8 版から広範囲に及ぶ改訂がなされている。SI に関する新しい解説記事が「生物と気象」に掲載されてもよい時機かもしれない。

本稿は、SI 文書第 9 版の原版 (Bureau International des Poids et Mesures, 2019) あるいはその日本語訳版 (国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター, 2020) を読み込まなくても、学術論文・総説等の執筆時に生じやすい単位 (記号) と量 (の値) の表記・表現に関する疑問の解消に役立つ SI の要点を短時間で把握できるように用意したものである。そのために、SI を理解する上での前提知識となる、量、単位および単位系に関する基礎的事項をまず簡単に解説し、続いて SI 文書第 9 版の要点を最小限の記述で解説している。

2. 量と単位

量 (quantity) とは、「現象、物体、または物質の属性 (property) で、その属性は数値 (number) と標準 (reference) によって表すことのできる大きさをもっているもの」と国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission, IEC) が Web 公開している国際電気標準用語 (IEC, 2020) の ref 112-01-01 (ref は参照番号の意) に定義されている。SI 文書第 9 版では、「量の値は、一般に数値と単位の積で表される。単位は、単に、ある量の特定の例であり、基準として使われる。数値は、その単位に対する量の値の比である」と説明している。「単位は、単に、ある量の特定の例であり」とは、単位とは、数値 1 と基準の量である単位の積として表される量であることを意味している。別の説明をすれば、時間の単位 [s] は、数値 1 と単位 1 s の積 $[1 \times 1 \text{ s}]$ として表される量 [1 s] の「1」の記載を省略したものである、ということになる。

なお、量を物理量 (physical quantity) に限定して用いる分野もあるが、国際電気標準用語 (IEC, 2020) の ref 112-01-01 では、量は一般に物理量、化学量、生物学的量などに分類できると注をつけている。また、物理量とは、物理学の体系の下で次元が確定し、定められた基準量 (単位) の倍数として表すことができる量であり、例えば、力学系の量方程式により次元が確定する「時間」、「長さ」、「質量」などである。

3. 基本量と組立量

国際電気標準用語 (IEC, 2020) の ref 112-01-08 によれば、基本量とは「慣習的に選択された任意の量体系の部分集合に含まれる量であって、その部分集合の中のいずれの量も、その部分集合内の他の量では表現できないもの」(日本規格協会, 2014) とされている。この主文が抽象的すぎるためか「基本量は、他の基本量のべき乗の積として表現することができないので、互いに独立であるとされる」という文が注として付されている。ここで、「基本量のべき乗の積として表現することができない」とは、一種類あるいは複数種類の基本量を乗除することによっては表現することができない、という意味であり、また「べき乗」は当然、負のべき乗をも含んでいる。

なお、基本量の選定にあたっては、(1) 理論的に基礎的な量であること、(2) これらを基に他の量 (後述する組立量) を表現する場合にその次元が複雑にならないこと、(3) その数はできるだけ少ないこと、(4) 概念として互いに独立であること、などが条件とされる。実際に選定される基本量は、定めようとする量体系によって異なり得る。

組立量とは、基本量のべき乗の積として表現することができる量である。一種類あるいは複数種類の基本量を乗除することにより組み立てられた量ともいえる。

4. 基本単位、組立単位および単位系

基本単位とは、基本量に対して定義された (測定) 単位であり、一貫性のある単位系 (coherent system of units) では、基本量ごとにただ一つの基本単位が存在する。ここで、「一貫性のある単位系」とは、その単位系を構成するすべての単位を、基本単位のべき乗の積として表現することができる単位系をいう。

組立単位とは、基本単位のべき乗の積として表現することができる単位である。「基本単位のべき乗の積」とは、一種類あるいは複数種類の基本単位のべき乗の積という意

表 1. SI の七つの定義定数とそれらによって定義される七つの単位 (国立研究開発法人 産業技術総合研究所計量標準総合センター, 2020)

定義定数	記号	数値	単位
セシウムの超微細遷移周波数	$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770	Hz
真空中の光の速さ	c	299 792 458	$m s^{-1}$
プランク定数	h	$6.626 070 15 \times 10^{-34}$	J s
電気素量	e	$1.602 176 634 \times 10^{-19}$	C
ボルツマン定数	k	$1.380 649 \times 10^{-23}$	$J K^{-1}$
アボガドロ定数	N_A	$6.022 140 76 \times 10^{23}$	mol^{-1}
視感効果度	K_{cd}	683	$lm W^{-1}$

表 2. SI 基本単位 (国立研究開発法人産業技術総合研究所 計量標準総合センター, 2020)

基本量		基本単位	
名称	代表的な記号	名称	記号
時間	t	秒	s
長さ	l, x, r など	メートル	m
質量	m	キログラム	kg
電流	I, i	アンペア	A
熱力学温度	T	ケルビン	K
物質質量	n	モル	mol
光度	I_v	カンデラ	cd

味である。

単位系とは、基本単位と組立単位を併せた体系である。

5. 国際単位系 (SI)

SI は、1960 年の第 11 回国際度量衡総会 (Conférence Générale des Poids et Mesures) において定義され確立された一貫性のある単位系である。以来、科学技術、工業技術、産業技術、国際商取引などにおいて使用することが推奨される単位系として世界中で使用されてきた。2019 年には、第 26 回国際度量衡総会における広範囲に及ぶ前版からの改定を受けて編纂された SI 文書第 9 版 (原版はフランス語・英語) が国際度量衡局 (Bureau International des Poids et Mesures) により発行された。

5.1 SI 基本単位

第 11 回国際度量衡総会以降、SI では、七つの基本量である、時間、長さ、質量、電流、熱力学温度、物質質量、および光度に対する SI 基本単位の名称と記号を、それぞれ秒 [s]、メートル [m]、キログラム [kg]、アンペア [A]、ケルビン [K]、モル [mol]、およびカンデラ [cd] としてきた。SI 文書第 9 版では、定義定数 (表 1)こそ SI の根幹をなすものであるとして SI 基本単位の前に定義定数が記載され、それに続いて SI 基本単位 (表 2) を七つの定義定数を用いて定義している。

なお、カンデラは、生物学的な (人の視覚に関する光生物学的な) 重み係数である分光視感効率を用いることで、物理量である放射強度と関係づけられているという点で、SI 基本単位の中では特徴のある単位であるといえる。

5.2 SI 組立単位

SI 組立単位は、SI 基本単位のべき乗 (負のべき乗も含む) の積として定義される。換言すれば、SI 基本単位を乗除することにより組み立てられた単位である。SI 基本単位のべき乗の積として表現される SI 組立単位は、一貫性のある SI 組立単位と呼ばれることがあり、これと SI 基本単位を併せたものを一貫性のある SI 単位と呼ぶ。また、一貫性のある SI 単位と SI 接頭語 (後述する) を用いて作られる倍量 SI 単位および分量 SI 単位を併せたものを SI 単位全体と呼んでいる。

(1) SI 基本単位を用いて表される一貫性のある SI 組立単位

SI 基本単位を用いて表される一貫性のある SI 組立単位の例としては、 $[m^2]$ (面積), $[m s^{-1}]$ (速さ, 速度), $[A m^{-1}]$ (磁界強度), $[mol m^{-3}]$ (物質濃度), $[cd m^{-2}]$ (輝度) などがある。

(2) 固有の名称と記号を持つ SI 組立単位

一貫性のある SI 組立単位の中には、固有の名称と記号を持つものが 22 ある。固有の名称と記号の例としては、ラジアン [rad] (平面角), ステラジアン [sr] (立体角), ヘルツ [Hz] (周波数), ニュートン [N] (力), パスカル [Pa] (圧力), ジュール [J] (エネルギー), ワット [W] (仕事率, 放射束), ボルト [V] (電位差), ジーメンス [S] (電気コンダクタンス), セルシウス度 $[^{\circ}C]$ (セルシウス温度), ルーメン [lm] (光束), ルクス [lx] (照度) などがある。なお, () 内の語は、それぞれの単位に対応する量の名称である。

ここで、1 rad は、円の半径に等しい長さの弧が円の中心に対して作る角度である (全平面角 $360^{\circ} = 2\pi$ rad)。他方、1 sr は、球の半径の 2 乗に等しい面積を持つ球表面が球の中心に対して作る立体角である (全立体角 $= 4\pi$ sr)。平面角の単位 $[rad] = [m m^{-1}]$, 立体角の単位 $[sr] = [m^2 m^{-2}]$ であるので、平面角と立体角の単位は 1 であるといえることができる。ただし、単位記号の 1 は明示されることはない。

また、セルシウス温度 $t [^{\circ}C]$ と熱力学温度 $T [K]$ の関係は、 $t [^{\circ}C] = T [K] - 273.15 [K]$ であるので、セルシウス度とケルビンのいずれで表しても、温度差または温度間隔を表す数値は同じとなる。なお、273.15 K は水の氷点の温度で、熱力学温度の単位である 1 K は水の三重重点 (一成分系で気相・液相・固相が平衡にある点) (273.16 K) の温度の $1/273.16$ である。

5.3 SI 単位の十進の倍量および分量

SI 単位の 10^{24} から 10^{-24} までの十進の倍量および分量を

表すために用意された接頭語を SI 接頭語という。農業気象に関する分野では、 10^{15} から 10^{-15} までの十進の倍量および分量を表す SI 接頭語があれば十分であろう (表 3)。

接頭語記号は、単位記号の前に空白を空けずに直立体で記し、その接頭語記号と単位記号を結合したものは、元の単位の倍量または分量を表す新しい不可分な単位記号を形成することとなる。それらを正または負の指数でべき乗する場合は、その不可分な単位記号を一体としてべき乗することになる。例えば、 $1.5 \text{ cm}^2 = 1.5 (\text{cm})^2 = 1.5 (10^{-2} \text{ m})^2 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ということである。

一貫性のある SI 単位の中でキログラム [kg] だけは、その名称と記号に接頭語が含まれている。質量の単位の十進の倍量および分量を表す場合には、質量の名称および単位であるグラム [g] にそれぞれ接頭語の名称およびその記号を付すことになる。例えば、 10^{-9} kg を接頭語を用いて表す場合は、マイクログラム [μg] となる。複数の接頭語記号を並置した合成接頭語記号を使用してはならないため、ナノキログラム [nkg] とはしない。

5.4 SI 単位と併用できる非 SI 単位

国際度量衡委員会 (Comité International des Poids et Mesures) は、一部の非 SI 単位を SI 単位と併用することを認めている。農業気象関係で広く用いられているそれらの非 SI 単位の名称と記号の例としては、分 [min] (時間)、時 [h] (時間)、日 [d] (時間)、度 [$^\circ$] (平面角)、ヘクタール [ha] (面積)、リットル [l] または [L] (体積)、トン [t] (質量) などがある。なおこれらのうち、リットル以外の単位には SI 接頭語を用いることはできない。例えば、 0.015 h を 15 mh と表すことはできない。そのような場合は、単位の SI 単位の秒 [s] を用いて 54 s とするか、あるいは非 SI 単位の分 [min] を用いて 0.90 min とすることになる。

6. 単位記号の表記および量の値の表現方法

本章は、SI 文書第 9 版の「5. 単位の記号と名称の表記および量の値の表現」から、「単位記号の表記」および「量の値の表現方法」に関する部分についてのみ要点をまとめたものである。SI 文書第 9 版の「5.3 単位の名称」および「5.4 量の値の表現方法に関する規則と様式の慣例」の多くの部分の説明を割愛している。

表 3. SI 接頭語 (国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター (2020) より 10^{-15} から 10^{15} までを抜粋)

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^1	デカ	da	10^{-1}	デシ	d
10^2	ヘクト	h	10^{-2}	センチ	c
10^3	キロ	k	10^{-3}	ミリ	m
10^6	メガ	M	10^{-6}	マイクロ	μ
10^9	ギガ	G	10^{-9}	ナノ	n
10^{12}	テラ	T	10^{-12}	ピコ	p
10^{15}	ペタ	P	10^{-15}	フェムト	f

6.1 単位記号の表記

(1) 字体

直立体、小文字で表記する。単位記号が固有名詞に由来する場合にのみ、最初の文字を大文字にする。ただし、リットルの単位記号 L は固有名詞ではないが大文字を用いることが認められている。

(2) 接頭語と単位記号の間

接頭語は、空白を空けずに単位記号の直前におく。

(3) ピリオドと複数形の使用

単位記号の後にはピリオドをつけない。また、単位記号の複数形を使って (単位記号の後ろに “s” を付して) はならない。

(4) 単位記号の積

単位記号の積は、1 字分の空白もしくは中黒 (\cdot) で示す。筆者は半角英数字 1 字分の空白の使用を勧める。

(5) 単位記号の商

単位記号の商は、水平の線、斜線 (/), または負の指数で示す。ただし、斜線を一つの単位記号の中で複数回使用することは避ける。筆者は、 $\mu\text{mol}/(\text{m}\cdot\text{s})$ より $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のように、負の指数で示すことを勧める。このとき、負符号には、ハイフン [-] ではなく正しい負符号「-」(Unicode: U+2212) を用いるよう注意されたい。また、正しい上付き負符号は「 $\overset{-}{}$ 」(Unicode: U+207B) である。

6.2 量の値の表現方法

(1) 量の値の形式

量の値は、数字の後ろに 1 字分の空白を空けて単位記号を記すことで表わされる。筆者は半角英数字 1 字分の空白の使用を勧める。この空白は積の記号とみなされる。例外は、平面角の度 [$^\circ$]、分 [$'$]、秒 [$''$] である。この三つについては、数値と単位記号の間に空白は入れない。

なお、SI 文書第 9 版には明示されていないが、数値の後ろの単位記号を [] や () で囲む必要はない。18 m, 32 kg などと記せばよい。他方、量記号の後ろに単位記号を記す場合には、 Q [kJ] のように [] あるいは () で囲むことが望ましいと筆者は考える。ちなみに、筆者の印象では、物理学・工学系の文書では [] が多く用いられ、化学・

表 4. 頻繁に認められる単位記号、接頭語、および数量の値の誤った表現

誤	正	本稿での該当節等
sec	s	5.1
Kg	kg	5.1, 5.3
lux	lx	5.2
hr	h	5.4
day	d	5.4
$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	5.3, 表 3
Wm^{-2}	W m^{-2} or $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	6.1 (4)
$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	6.1 (5)
12m	12 m	6.2 (1)
34°C	34 $^\circ\text{C}$	6.2 (1)
56L or 56 l	56 L	6.2 (1)

生物学系のそれでは () が多く用いられていると感じている。

(2) 同じ種類の量の比である量

同じ種類の量の比である量は、単位 1 (unit one) の量であるため、単純に数字で表現される。これらの量については、表記されている量を分かりやすくするために、単位とともに表記する (例えば, rad, mol/mol など) こともできる。可能な限り単位とともに表記するのが望ましいと筆者は考える。

6.3 頻繁に認められる単位記号, 接頭語, および量の値の不適切な表現

単位記号, 接頭語, および量の値の不適切な表現は, 査読付き学術論文の中にも時折認められる。そこで, それらの中でもとくに頻繁に認められる不適切な表現の例を, 正誤表形式で表 4 に示した。なお, 本節および表 4 は筆者が作成したものであり, SI 文書には対応する節も表もない。

7. おわりに

学術論文・総説等に, 単位と量の表記・表現に関する誤りがあると, その文書全体に対する信頼性まで損なわれかねない。本稿に記載されている内容を知っていれば, それらの誤りをほぼ避けることができる。単位と量を正しく表記・表現することを意識している読者にとって, 本稿が有益な資料となることを願っている。

なお, 本稿では, SI 文書第 9 版の要点を最小限の記述で解説することを目的としたため, 学術論文・総説等の執筆時に必要となる内容であっても, 筆者の優先度判断により割愛したものが少なくない。それらの内容が気になる読者には, SI 文書第 9 版の日本語訳版を入手していただきたい。引用文献に示すとおり, 「国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター」のホームページから PDF で入手できる。

引用文献

- International Electrotechnical Commission (IEC), 2020: International Electrotechnical Vocabulary (IEV) ref 112-01-01.
- Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 2019: Le Système international d'unités/The International System of Units. <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9.pdf>, 216pp (2020/12/23).
- 国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター, 2020: 国際単位系 (SI) 第 9 版 (2019) 日本語版, p.85-186, 国際単位系 (SI) 基本単位の定義改定と計量標準, 同出版委員会. https://unit.aist.go.jp/nmij/public/report/SI_9th/pdf/SI_9th_日本語版_r.pdf, 103pp (2020/12/24).
- 蔵田憲次, 1986: 国際単位系 (SI) による物理量の表示, 農業気象 **42**, 145-147. DOI <https://doi.org/10.2480/agrmet.42.145>
- 日本規格協会, 2014: JIS Z8000-1:2014 量及び単位 - 第 1 部: 一般.