

国際単位系(SI)の要約

日本語版

この文書は国際度量衡委員会 (CIPM) の下部組織である単位諮問委員会 (CCU) が作成し、国際度量衡局 (BIPM) が 2006 年 5 月に公表した国際単位系 (SI) 第 8 版の要約版 (A concise summary of the International System of Units, the SI) を、独立行政法人 産業技術総合研究所 計量標準総合センター 国際単位系 (SI) 日本語版刊行委員会が翻訳したものである。

計量学とは人類のあらゆる活動にともなって行われる、不確かさの範囲をも明らかにしたすべての測定・計量にかかわる科学である。

国際度量衡局 (BIPM) は 1875 年 5 月 20 日、メートル条約の条項 1 に基づいて設立された機関であり、全世界で共通に使用される測定にかかわる唯一の一貫性のあるシステムの基礎を提示するという責を負っている(訳注:「一貫性のあるシステム」(coherent system)とは、単位間の換算を必要としない単位系のことであり、SI 基本単位、そのべき乗の積からなる SI 組立単位、固有の名称と記号を与えられた SI 組立単位、及び、SI 基本単位と SI 組立単位のべき乗の積からなる SI 組立単位のことを「一貫性のある SI 単位」と呼ぶ。SI 接頭語を付した単位は、SI 単位であってはあが一貫性のある単位ではない)。フランス革命の時代にまでさかのぼる 10 進のメートル法は、メートルとキログラムを基礎として構築されている。1875 年総会の時期にメートルおよびキログラムの新しい国際原器がつくられ、これらは 1889 年の第 1 回国際度量衡総会 (CGPM) で公認された。時代とともに単位系は発達し、現在この単位系は 7 つの基本的な単位を有している。1960 年、第 11 回 CGPM でこの単位系は SI 国際単位系 (Système International d'Unités, The International System of Units) と呼称されることになった。SI 単位系は不変なものではなく、常に進展している。これは科学、工学そのほか人類のあらゆる活動の領域でさまざまな精度での測定技術についての要請が生じているからである。この文書は SI 単位系の現状を説明する SI 文書第 8 版の要約である。



SI 基本単位の定義に用いられている唯一の人工物である国際キログラム原器 κ

表 1 七つの SI 基本単位 (量, 単位, 記号, 及び定義)

長さ: メートル, m

メートルは、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である。

この定義の結果、真空中の光の速さは正確に 299 792 458 m/s である。

質量: キログラム, kg

キログラムは質量の単位であって、単位の大きさは国際キログラム原器の質量に等しい。

この定義の結果、国際キログラム原器の質量 $m(\kappa)$ は正確に 1 kg である。

時間: 秒, s

秒は、セシウム 133 の原子の基底状態の二つの超微細構造準位の間の遷移に対応する放射の周期の 9 192 631 770 倍の継続時間である。

この定義の結果、セシウム 133 原子の基底状態の超微細構造準位の分裂の周波数は正確に 9 192 631 770 Hz である。

電流: アンペア, A

アンペアは、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二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 2×10^{-7} ニュートンの力を及ぼし合う一定の電流である。

この定義の結果、磁気定数または真空の透磁率 μ_0 の値は正確に $4\pi \times 10^{-7}$ H/m である。

熱力学温度: ケルビン, K

熱力学温度の単位、ケルビンは、水の三重点の熱力学温度の 1/273.16 である。

この定義の結果、水の三重点における熱力学温度 T_{tpw} は正確に 273.16 K である。

物質質量: モル, mol

1. モルは、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であり、単位の記号は mol である。

2. モルを用いるとき、要素粒子が指定されなければならないが、それは原子、分子、イオン、電子、その他の粒子又はこの種の粒子の特定の集合体であってよい。

この定義の結果、炭素 12 のモル質量 $M(^{12}\text{C})$ は正確に 12 g/mol である。

光度: カンデラ, cd

カンデラは、周波数 540×10^{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である。

この定義の結果、人の目の分光感度は 540×10^{12} Hz の単色放射に対して正確に 683 lm/W である。

SI の七つの基本単位に対応する七つの基本量は長さ、質量、時間、電流、熱力学温度、物質質量、光度である。基本量と基本単位およびそれらの記号を表 2 に示す。

表 2 基本（物理）量と SI 基本単位との関係

基本量	記号	SI 基本単位	記号
長さ	l, x, r など	メートル	m
質量	m	キログラム	kg
時間	t	秒	s
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

すべての量（物理量）は基本（物理）量を組み合わせた組立量として記述でき、組立単位を単位として計量される。その組立単位は基本単位の積で定義される。組立量、組立単位の例を表 3 に示す。

表 3 組立量と組立単位の例

組立量	記号	組立単位	記号
面積	A	平方メートル	m^2
体積	V	立方メートル	m^3
速さ、速度	v	メートル毎秒	m/s
加速度	a	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	$\sigma, \tilde{\nu}$	毎メートル	m^{-1}
質量密度	ρ	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	ρ_A	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	v	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	j	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	H	アンペア毎メートル	A/m
濃度	c	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	ρ, γ	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	L_v	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率	n	(数字の) 1	1
比透磁率	μ_r	(数字の) 1	1

ここで、屈折率と比透磁率は無次元の量の例であるが、その SI 単位は数字の 1 である。しかし、この単位記号は書かない。

SI は 22 の組立量に対してその単位の固有の名称と単位記号を認めている。これらは使用頻度が高い量の単位で基本単位の組み合わせによる表現よりはるかに簡単になる。たとえばエネルギーの組立単位 $m^2 kg s^{-2}$ は一つの単位記号 J で記述できる。SI で認められた単位と単位記号を表 4 に示す。

表 4 固有の名称をもつ SI 組立単位

組立量	組立単位の名称	単位記号	他の単位による表し方
平面角	ラジアン	rad	$m/m = 1$
立体角	ステラジアン	sr	$m^2/m^2 = 1$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m kg s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	$N/m^2 = m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N m = m^2 kg s^{-2}$
仕事率、放射束	ワット	W	$J/s = m^2 kg s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C	$s A$
電位差（電圧）	ボルト	V	$W/A = m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	$C/V = m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	$V/A = m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンズ	S	$A/V = m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁束	ウェーバ	Wb	$V s = m^2 kg s^{-2} A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2 = kg s^{-2} A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	$Wb/A = m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度	$^{\circ}C$	K
光束	ルーメン	lm	$cd sr = cd$
照度	ルクス	lx	$lm/m^2 = m^{-2} cd$
放射性核種の放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量、比エネルギー分与、カーマ	グレイ	Gy	$J/kg = m^2 s^{-2}$
線量当量、周辺線量当量	シーベルト	Sv	$J/kg = m^2 s^{-2}$
酵素活性	カタール	kat	$s^{-1} mol$

ヘルツとベクレルはともに秒の逆数の単位 s^{-1} であるが、ヘルツは周期現象に、ベクレルは放射性核種の壊変の統計的過程にのみ用いられる。

セルシウス温度の単位はセルシウス度 ($^{\circ}C$) であるが、この単位の大きさは熱力学温度 K に等しい。セルシウス温度 t と熱力学温度 T との関係は $t/^{\circ}C = T/K - 273.15$ である。

シーベルトは放射線の人体に与える影響を表現する線量等量の単位である。

これをふくめて、4 表の最後の四つの単位は人の健康に関係した量の安全基準をあたえるために SI に特別に採用された単位である。

いかなる量もただ一つの SI 単位をもつ（ただし固有の

単位記号をもつ組立単位を使うと幾通りにかの表現はありうる)。一方、同じ SI 単位が二つの異なる量の単位となることがある(たとえば J/K は熱容量の単位でもあるし、エントロピーの単位でもある)。したがって教科書や測定器の表示において、量を表すのに単位だけ単独に使うことは避けなければならない(測定器の指示器には量の名称とともにその単位も示しておくべきである)。

同じ次元の二つの量の比で表される無次元の量は、次元 1 の量ともよばれる(たとえば、屈折率は二つの速さの比であり、比誘電率は媒質の誘電率と真空の誘電率との比である)。したがって、その単位は同じ SI 単位の比となるので常に 1 である。しかし無次元量の単位を表す 1 を書くことはない。

SI 単位における 10 進の倍量および分量

単独の SI 単位の大きさにくらべて、はるかに大きい量や小さい量を表す際に、SI 単位と併用される一組の接頭語が決められている。これを 5 表に示す。これらは SI の基本単位とでも、組立単位とでも任意に組み合わせることが認められている。

5 表 SI 接頭語

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
10^{18}	エクサ	E	10^{-18}	アト	a
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-21}	セプト	z
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-24}	ヨクト	y

接頭語と単位を組み合わせた場合、単位名称と単位記号はそれぞれ合わせて一語、一記号を形成し、間に空白などを入れない。また、合成された記号に任意の指数をつけることができる。たとえば、キロメートル(kilometer)を km、マイクロボルト(microvolt)を μV 、フェムト秒(femtosecond)を fs、 $50 \text{ V/cm} = 50 \text{ V}(10^{-2}\text{m})^{-1} = 5000 \text{ V/m}$ のように記述する。

接頭語のつかない基本単位および組立単位は一貫性のある単位系を構成する。一貫性のある単位系には種々の技術的な長所があるが(SI 文書参照)、一方で接頭語を使うと、大きい量、小さい量をあらわす際に 10^n の項を使わなくてすむ。たとえば化学結合の長さはメートル(m)で表すよりも、ナノメートル(nm)で表す方が都合がよく、ロンドン・パリ間の距離はメートル(m)で表すよりキ

ロメートル(km)で表す方が便利である。

ここで、kg だけは例外である。歴史的な事情により質量の場合、基本単位に k の接頭語がはじめからついている。キログラムの 10 進の倍量及び分量を表わす場合、これに接頭語をつけてはならない。接頭語をつける場合には、グラム(g)にただ一つだけ接頭語をつける。たとえば、マイクロキログラム(μkg)とはせず、ミリグラム(mg)としなくてはならない。

SI 以外の単位

SI は世界的に承認された唯一の単位系なので、国際的な情報交換においてはこれを使用することが際立って有利となる。非 SI 単位は SI 単位をつかって定義される。科学教育も SI の使用によって簡素化できる。これまでのべた多くの理由から、科学技術の分野では SI の使用が強く求められている。

しかしながら現状では非 SI 単位もまだ広く使われている。時間の単位である「分」や「時」はわれわれの文化に深く根ざしているのでこれからも使われることになる。そのほかにも、歴史的な理由、あるいは特別な分野での必要性、あるいは SI のなかに便利で適当な単位がないという理由から、非 SI 単位が使われている。ある科学者が、自分の目的にはこの単位を使うことが最も適していると主張したとしても、それを完全に否定することはできない。しかし非 SI 単位を使うときには、その単位と SI 単位との換算をつねに示すべきである。いくつかの非 SI 単位の例を換算値とともに表 6 に示す。これ以外の非 SI 単位については SI 文書または BIPM の website を参照されたい。

表 6 非 SI 単位の例

量	単位	記号	SI との関係
時間	分	min	1 min = 60 s
	時	h	1 h = 60 min = 3600 s
	日	d	1 d = 24 h = 86 400 s
体積	リットル	L 又は l	1 L = 1 l = 1 dm ³
質量	トン	t	1 t = 10 ³ kg
エネルギー	電子ボルト	eV	1 eV \approx 1.602 \times 10 ⁻¹⁹ J
	エルグ	erg	1 erg = 10 ⁻⁷ J
圧力	バール	bar	1 bar = 100 kPa
	水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg \approx 133.3 Pa
長さ	オングストローム	Å	1 Å = 10 ⁻¹⁰ m
	海里	M	1 M = 1852 m
力	ダイン	dyne	1 dyn = 10 ⁻⁵ N

単位の名称が人名に由来している場合は、単位記号は大文字または大文字からはじめて書く(例えばアンペアは A、ケルビン K、ヘルツ Hz、クーロン C)。そのほかの単位は常に小文字または小文字ではじまる(例えばメートルは m、秒は s、モルは mol)。リットルの記号 L は例外であり、これは小文字の l が数字の 1 と間違いやすいので特別に使用が認められている。

海里の単位記号としてここでは M を使用したが、この記号についてはまだ国際的な合意が成立していない。

科学の言語: 量の値を表すのに SI を用いる

量の値は数値と単位の積で表され、単位に乘ぜられる数値は、量のその単位における量的な大きさを表わす。数値と単位の間には通常 1 字分の空白(スペース)を挿入する。無次元の量の単位記号は 1 であるが、この記号は省かれる。単位の選び方により数値は変わる。したがって以下に例を示すように、同じ量が異なる単位によって、異なる数値で表わされる。

自転車の速さはおよそ
 $v = 5.0 \text{ m/s} = 18 \text{ km/h}$
 である。

ナトリウム原子の黄色のスペクトル線のうちの 1 本の波長は
 $\lambda = 5.896 \times 10^{-7} \text{ m} = 589.6 \text{ nm}$
 である。

量の記号はイタリック体(斜体)で、通常ローマ字またはギリシャ字のアルファベットの 1 文字を用いる。大文字、小文字どちらも用いられるが、量についての説明をさらに加える場合には下つき文字で表すか、または括弧のなかに文字を挿入する。

多くの量について ISO (International Organization for Standardization)、IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics)、IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) などの国際機関が推奨している記号がある。以下に例を示す。

T 温度
 C_p 定圧熱容量
 x_i 物質 i のモル分率
 μ_r 比透磁率
 $m(\kappa)$ 国際キログラム原器の質量

本文中でどのような活字が使われていても、単位の記号はローマン体(立体)で印刷する。これらは数学的実体として意味を持つ語であって、省略記号ではない。したがって記号が文末に来るとき以外は終止符(ピリオド)を付けないし、また複数を表わす s を付けない。単位記号に決められた正しい記号をつかうことは、強制的に要請されている。その例は SI 文書に示されている。単位記号は 2 字以上でつくられているものもある。人名に因んだ単位以外は小文字を使う。しかし単位名称を文章のなかで綴る場合は

人名と区別するため、文頭以外では小文字から綴る。

量の値を数値と単位の積で表わす場合、数値と単位記号は通常の代数の規則にしたがって扱う。例えば $T = 293 \text{ K}$ という式がある場合、両辺を K で除して $T/K = 293$ という式を導くことができる。このような操作を量の四則演算(quantity calculus)あるいは量の代数(algebra of quantities)という。表の見出し欄やグラフの縦軸・横軸に書く単位は、量を単位で除した比を使うのが望ましい。こうすると表の中に並ぶ数字や図の軸に目盛る数字が単に無次元の数になるからである。次の例はこのような表記法で、蒸気圧を温度の関数として、蒸気圧の対数を温度の逆数の関数として表したものである。

T/K	$10^3 \text{ K}/T$	p/MPa	$\ln(p/\text{MPa})$
216.55	4.6179	0.5180	-0.6578
273.15	3.6610	3.4853	1.2486
304.19	3.2874	7.3815	1.9990

$10^3 \text{ K}/T$ の代わりにこれと代数的に等価な kK/T または $10^3(T/\text{K})^{-1}$ を使ってもよい。

単位の積や商をつくるのにも代数の通常の規則がそのまま適用できる。単位の積の表記では間に空白(スペース)をいれるか、あるいは掛け算を意味する中点を入れる。例えば m s はメートルと秒との積を表わすが、 ms はミリ秒を表わすので、空白をいれるかいれないかで意味が大きく異なる。複雑な積を表わす式の場合は、あいまいさをさけるため、括弧や負のべき指数を使う。例えばモル気体定数は次のように書ける。

$$pV_m/T = R = 8.314 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\ = 8.314 \text{ Pa m}^3/(\text{mol K})$$

数字列のなかの少数点の記号は終止符(ピリオド)かコンマのいずれかを状況に応じて使い分ける。英語系の文書ではピリオド、ヨーロッパ大陸諸国の言語の場合にはコンマをつかうのがふつうである。

数字の桁数が大きい場合には、少数点を基準にして数字を三桁づつグループにして、その間にスペースを入れると読みやすくなる。ただし数字の間にピリオドやコンマを入れてはいけない。数値に不確かさがあるときは、数字列の最後に括弧をつけてそのなかに最後の桁の不確かさを挿入する。例えば 2002 年の CODATA 基礎定数表のなかで電気素量は

$$e = 1.602\,176\,53(14) \times 10^{-19} \text{ C}$$

と与えられている。これはこの量の標準不確かさが、引用されている数値の最後の 2 桁において 14 であるという意味である。

さらに詳しい情報については、計量標準総合センターのホームページ(<http://www.nmij.jp/chishiki/si.html>)にある国際単位系(SI)についての文書を参照していただきたい。