

国際単位系（SI）第 9 版（2019）要約 日本語版

SI

国際単位系(SI)文書の要約

計量学(Metrology)とは、測定の科学およびその応用である。計量学には、測定の不確かさおよび適用分野に関係なく、測定に関する全ての理論および実用が含まれる。



国際度量衡局（Bureau International des Poids et Mesures, BIPM）は、1875 年 5 月 20 日に締結されたメートル条約第 1 条により設立された。この BIPM は、全世界で使われる測定の単一で一貫性のあるシステムの基礎を提供することをその任務とし、国際度量衡委員会（CIPM）の権限下で活動している。十進法によるメートル法はフランス革命期に端を発し、1799 年にメートルとキログラムにもとづいて構築された。メートル条約の規定の下、新たなメートルとキログラムの国際原器が作成され、1889 年に開催された第 1 回国際度量衡総会（CGPM）において正式に採択された。1960 年の第 11 回国際度量衡総会では、国際単位系（SI）が正式に定義され、確立された。以来、SI は、科学技術の発展と新たな領域における測定のニーズを受けて、都度更新されてきた。直近の大幅改定は、第 26 回国際度量衡総会（2018 年）に採択されたもので、SI が七つの**定義定数**の固定された数値にもとづくことを定めた。この定義定数の数値から SI の七つの基本単位の定義が導かれる。国際度量衡局では、現在の SI の状況について詳細に説明した「**SI 文書**」を作成しており、本文書はその SI 文書を要約したものである。

SI では、七つの定義定数は次のように定義される。

- セシウム 133 原子の摂動を受けない基底状態の超微細構造遷移周波数 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ は、9 192 631 770 Hz
- 真空中の光の速さ c は、299 792 458 m/s
- プランク定数 h は、 $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s
- 電気素量 e は、 $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C
- ボルツマン定数 k は、 $1.380\,649 \times 10^{-23}$ J/K
- アボガドロ定数 N_{A} は、 $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol⁻¹
- 周波数 540×10^{12} Hz の単色放射の視感効果度 K_{cd} は、683 lm/W

ここで、Hz、J、C、lm、W をそれぞれ単位記号とするヘルツ、ジュール、クーロン、ルーメン、ワットは、s、m、kg、A、K、mol、cd をそれぞれ単位記号とする秒、メートル、キログラム、アンペア、ケルビン、モル、カンデラに、 $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ 、 $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ 、 $\text{C} = \text{A s}$ 、 $\text{lm} = \text{cd sr}$ 、 $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$ として関連づけられる。

上述の定義は、各定数の厳密な数値を規定したもので、その値は対応する SI 単位で表現されている。厳密な数値を固定することで、その単位が定義される。これは、**数値**と**単位**の積が不変量である定数の**値**と等しなくてはならないという関係にもとづく。

七つの定義定数は、それらの単位の組み合わせが SI の全単位を網羅するように選ばれている。一般に、定義値と SI 基本単位の間には 1 対 1 の関係はない。但し、セシウム周波数 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ とアボガドロ定数 N_{A} はこの例外である。全ての SI 単位が、七つの定義定数のべき乗と無次元の係数の積として表わされる。

例えば $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ を用いると、1 メートルは、光の速さ c とセシウム周波数 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ から導出できる。

$$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} \approx 30.663\,319 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

2018 年までは、SI を定義するために基本単位と組立単位という概念が使われていた。この 2 つの分類区分

は、SI において必須でなくなったが、その利便性が高いこと並びに広く普及していることから、引き続き保持される。七つの定義定数に関連づけられた SI の定義を踏まえた、基本単位の定義を表 1 に示す。

表 1 SI の七つの基本単位

量	SI 単位
時間	秒 （記号は s）は、時間の SI 単位であり、セシウム周波数 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 、すなわち、セシウム 133 原子の摂動を受けない基底状態の超微細構造遷移周波数を単位 Hz (s^{-1} に等しい) で表わしたときに、その数値を 9 192 631 770 と定めることによって定義される。
長さ	メートル （記号は m）は長さの SI 単位であり、真空中の光の速さ c を単位 m s^{-1} で表わしたときに、その数値を 299 792 458 と定めることによって定義される。ここで、秒は $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ によって定義される。
質量	キログラム （記号は kg）は質量の SI 単位であり、プランク定数 h を単位 J s ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ に等しい) で表わしたときに、その数値を $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ と定めることによって定義される。ここで、メートルおよび秒は c および $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ に関連して定義される。
電流	アンペア （記号は A）は、電流の SI 単位であり、電気素量 e を単位 C (A s に等しい) で表わしたときに、その数値を $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ と定めることによって定義される。ここで、秒は $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ によって定義される。
熱力学温度	ケルビン （記号は K）は、熱力学温度の SI 単位であり、ボルツマン定数 k を単位 J K^{-1} ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ に等しい) で表わしたときに、その数値を $1.380\,649 \times 10^{-23}$ と定めることによって定義される。ここで、キログラム、メートルおよび秒は h 、 c および $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ に関連して定義される。
物質質量	モル （記号は mol）は、物質質量の SI 単位であり、1 モルには、厳密に $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ の構成要素が含まれる。この数は、アボガドロ定数 N_{A} を単位 mol^{-1} で表わしたときの数値であり、アボガドロ数と呼ばれる。 系の物質質量（記号は n ）は、特定された構成要素の数の尺度である。構成要素は、原子、分子、イオン、電子、その他の粒子、あるいは、粒子の集合体のいずれであつてもよい。
光度	カンデラ （記号は cd）は、所定の方向における光度の SI 単位であり、周波数 540×10^{12} Hz の単色放射の視感効果度 K_{cd} を単位 lm W^{-1} (cd sr W^{-1} あるいは $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ に等しい) で表わしたときに、その数値を 683 と定めることによって定義される。ここで、キログラム、メートルおよび秒は h 、 c および $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ に関連して定義される。

上述以外の量は全て「組立量」と呼ばれることもあり、組立単位を使って表される。この組立単位は、基本単位のべき乗の積で表わされる。表 2 に示すように、22 個の組立単位には、固有の名称が与えられている。

表 2 固有の名称を持つ SI 組立単位

組立量	組立単位の名称	単位記号	他の単位を用いた表現
平面角	ラジアン	rad	1
立体角	ステラジアン	sr	1
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$kg\ m\ s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	$N/m^2 = kg\ m^{-1}\ s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N\ m = kg\ m^2\ s^{-2}$
仕事率、放射束	ワット	W	$J/s = kg\ m^2\ s^{-3}$
電荷	クーロン	C	$A\ s$
電位差	ボルト	V	$W/A = kg\ m^2\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	$C/V = kg^{-1}\ m^{-2}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	$V/A = kg\ m^2\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンズ	S	$A/V = kg^{-1}\ m^{-2}\ s^3\ A^2$
磁束	ウェーバ	Wb	$V\ s = kg\ m^2\ s^{-2}\ A^{-1}$
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	$Wb/A = kg\ m^2\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度	$^{\circ}C$	K
光束	ルーメン	lm	$cd\ sr$
照度	ルクス	lx	$lm/m^2 = cd\ sr\ m^{-2}$
放射性核種の放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量、カーマ	グレイ	Gy	$J/kg = m^2\ s^{-2}$
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	$mol\ s^{-1}$

ヘルツとベクレルはどちらも毎秒に等しいが、ヘルツは周期現象にのみ使用し、ベクレルは放射性壊変における確率過程にのみ使用する。

セルシウス温度の単位はセルシウス度 ($^{\circ}C$) で、これは、熱力学温度の単位であるケルビン (K) の大きさと等しい。セルシウス温度 (t) という量と熱力学温度 (T) は、 $t/^{\circ}C = T/K - 273.15$ という式で関連づけられる。

シーベルトは、「方向性線量当量」および「個人線量当量」という量にも用いられる。

量は単位よりもはるかに多い。それぞれの量について、SI 単位は一つのみである (SI 単位が固有の名称を使って様々なかたちで表現されることはしばしばあるが)。一方、いくつかの異なる量の値を表わす際に同じ SI 単位が使われることがある (例: SI 単位である J/K は、熱容量とエントロピーの何れの値を表わす場合にも使われる)。このため、単位のみを使った量の特定は避けることが重要である。このことは、科学的な文章と、測定機器の双方に当てはまる (例えば、測定機器が示す値は、関連する量と単位の双方を表示する必要がある)。

記号 1 で表される単位 1 の量、同じ種類の二つの量の比という量もある。例えば、屈折率は二つの速さの比であり、比誘電率は誘電媒質の誘電率の自由空間の誘電率に対する比である。また、例えば細胞や生体分子の数など、構成要素の数といった量もある。このような量も単位 1 である。単位 1 は、あらゆる単位系のニュートラルな要素となっている。従って、単位 1 の量は、SI へのトレーサブルであると見なされる。しかし、単位 1 の量を表わす際には、単位記号 1 は記載しない。

SI 単位の十進の倍量および分量

SI 単位と併用することができる一連の接頭語の使用が認められている。これは、接頭語を付けない単独の SI 単位で表わすと桁違いに大きくなるまたは桁違いに小さくなるような量の値を表現する時に便利である。接頭語は、あらゆる SI 単位と併用できる。表 3 に SI 接頭語を示す。

表 3 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}	zepto	z
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-24}	ヨクト	y
10^{27}	ロナ	R	10^{-27}	ロント	r
10^{30}	クエタ	Q	10^{-30}	クエクト	q

接頭語を使う場合は、接頭語の名称と単位の名称を結合して一語とする。同様に、接頭語記号と単位記号もその間に空白を挟まず一つの記号として示し、結合した状態でべき乗することも可とする。例：キロメートル (km)、マイクロボルト (μV)、フェムト秒 (fs)。

接頭語無しで複数の SI 単位を使うと、それらの量の数値間の関係式が、量間の関係式と同じになる。それらの単位は一貫性があるという。一貫性のある単位の使用は、例えば代数演算 (algebraic calculus) において、技術的メリットをもたらす (「SI 文書」参照)。

キログラム (kg) は取扱いの難しい単位である。歴史的経緯から、その名称に既に接頭語が含まれているためである。キログラムの倍量および分量は、グラムに接頭語を結合して記載する。このため、例えば、マイクロキログラム (μkg) ではなく、ミリグラム (mg) と表記する。

SI に属さない単位

SI は、全世界で認められている単位系であり、このため、SI には国際的な対話を進めるうえで明らかなメリットがある。SI を基準となる単位系として使用することで、科学の教育が平易になる。このような理由により、SI 単位を使うことが、科学技術のあらゆる分野で推奨されている。その他の単位、すなわち、非 SI 単位は、一般に、変換係数を使って、SI 単位に関連づけて定義されている。

とは言え、非 SI 単位の中には未だに広く使用されているものもある。また、時間の単位としての分、時、日など、いくつかの非 SI 単位は、私たちの文化の一部となっているため、今後も常に使われ続けていく。また、従来からの経緯のため、特定の集団 (special interest groups) のニーズを満たすため、あるいは、それに代わる便利な SI がないため、などの理由で使われている非 SI 単位もある。目的に対して最適と考えられる単位を使うことは、これからも常に研究者の特権であり続けることは確かであるが、非 SI 単位を使う場合は、対応する SI を常に引用しなければならない。表 4 に、いくつかの非 SI 単位とその SI への変換係数を示す。

「SI 文書」にはさらに数多くの非 SI 単位が記載されている。

表 4 よく用いられる非 SI 単位

量	単位	記号	SI との関係
時間	分	min	1 min = 60 s
時間	時	h	1 h = 3600 s
時間	日	d	1 d = 86 400 s
体積	リットル	L または l	1 L = 1 dm ³
質量	トン	t	1 t = 1000 kg
エネルギー	電子ボルト	eV	1 eV = (e/C) J = 1.602 176 634 × 10 ⁻¹⁹ J

リットルの記号は、その単位が人名に由来する場合にのみ記号の頭文字を大文字にするという一般規則の例外である。リットルの記号には小文字の「l」も大文字の「L」も使ってよい。大文字の L は、小文字の l (エル) と数字の 1 (いち) を間違えるリスクを回避するためにその使用が認められている。

科学の“ことば”(the language of science): 量の値を SI によって表わすには

量の値は、数字と単位の積で表わす。単位に掛かる数字が、その単位によるその量の数値である。数字と単位の間には、必ず半角分の空白を入れる。数値は、どの単位を選択するかによって変わってくるため、ある量の同じ値が、異なる単位で表記されると異なる数値となることもある。その例を次に示す。

自転車の速さは概ね

$$v = 5.0 \text{ m/s} = 18 \text{ km/h}$$

である。

ナトリウム二重項の黄色線の一つの波長は、

$$\lambda = 5.896 \times 10^{-7} \text{ m} = 589.6 \text{ nm}$$

である。

量の記号はイタリック体(斜体)で表記し、通常は、ラテン語またはギリシャ語のアルファベット 1 文字である。大文字と小文字の何れも使ってよい。量に関する追加情報は、下付きもしくは上付き文字、または、丸括弧の中に入れて、加えることができる。

国際標準化機構 (ISO) などの権威ある機関、並びに、国際純粋・応用物理学連合 (IUPAP) や国際純正・応用化学連合 (IUPAC) などの国際的な科学連合組織では、さまざまな量について推奨する記号を規定している。その例を次に示す。

T	熱力学温度
C_p	定圧熱容量
x_i	化学種 i のモル分率 (物質質量分率)
μ_r	比透磁率

単位記号は、その前後の文章で使われている書体に拘わらず、ローマン体(直立体)で表記する。単位記号は、数式の一部であって、略語ではない。つまり、単位記号の後には、(単位記号が文末に来る場合以外は)省略符としての記号(ピリオド)は打たず、また、複数形の「s」も付けない。単位記号の正しいかたちを使用することは必須事項であり、これについては「SI 文書」で例を示して説明している。単位記号は複数の文字で作られていることもある。単位記号には小文字を使うが(例: m (メートル)、s (秒)、mol (モル))、人の名前にちなんだ単位の場合は、例外として最初の文字は大文字になる(例: A (アンペア)、K (ケルビン)、Hz (ヘルツ)、C (クーロン))。しかし、単位の名称を略さずに綴るときには、人名と単位名とを区別するために、(文頭でない限り)最初の文字から小文字で表記する(例えば、熱力学温度の単位の名称である kelvin は固有名詞の Kelvin に由来する)。

数値と単位との積として量の値を表現する場合、数値と単位は共に通常の代数演算の規則に従う。例えば、 $T = 293 \text{ K}$ という式は $T/\text{K} = 293$ とも書ける。この記述方法のことを量の四則演算 (quantity calculus) または

量の代数演算 (algebra of quantities) と呼ぶ。表中の見出し欄、あるいは、図の軸の見出しを量と単位の比で表わせば、表の内容や軸の目盛線のラベルを数値だけで表わすことができるので便利である。次の例 (表 5) では、圧力に対する速度の 2 乗の表を示しているが、上述のようなかたちで各欄の見出しが記載されている。

表 5 速度の 2 乗対圧力を示す表の欄の見出しの例

p/kPa	$v^2/(\text{m/s})^2$
48.73	94 766
72.87	94 771
135.42	94 784

単位記号の積と商については、通常の代数で使われる掛け算や割り算の規則が適用される。単位記号の積を作る際は、単位と単位の間には半角分の空白を入れる (または、掛け算記号として中黒を使うことも出来る)。この空白の重要性について留意する必要がある。つまり、メートルと秒の積は m s (間に空白有り) で表わすが、 ms (間に空白無し) はミリ秒を意味する。さらに、単位の複雑な積を表わすには、括弧や負の指数を使って曖昧さを回避する必要がある。例えば、モル気体定数 R は次式で与えられる。

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

ここで p は圧力、 V_{m} はモル体積、 T は熱力学温度を表わす。数字の書式としては、小数点は、状況に応じて、ピリオド (.) またはカンマ (,) の何れかを使う。英語の文書では、ピリオドを使うことが多いが、カンマが一般的に使われる言語や国も多い。

数字の桁数が多い場合は、読み易くするために、小数点から 3 桁ごとにグループ分けすることが習慣化している。これは必須ではないが、このようにされることが多く、一般的に分かり易い。この書式を使う場合、グループ間のスペースには、ピリオドおよびカンマを加えてはならない。量の数値の不確かさは、数字の後の括弧の中に、最下位の桁の不確かさを与えることで便宜的に示すことが多い。

例えば、2014 年の CODATA 基礎定数一覧では、電子質量の値を次のように示している。

$$m_{\text{e}} = 9.109\,383\,56\,(11) \times 10^{-31} \text{ kg}$$

ここで、括弧内の 11 は、引用された数値の最後の 2 桁の標準不確かさを表わす。

さらに詳細な情報については、国際度量衡局 (BIPM) のホームページまたは **SI 文書** 第 9 版 (<http://www.bipm.org> に掲載) を参照のこと。

この要約は、国際度量衡委員会 (CIPM) の単位諮問委員会 (CCU) が作成したものを、国際度量衡局 (BIPM) が発行している。