



天 気

1986年2月
Vol. 33, No. 2

502 (気象の定数)

国際単位系 (SI) と気象の定数*

清水逸郎**

1. はしがき

国際単位系 (Le Système Internationale d'Unités, 略称は SI) は、計量単位を国際的に統一するために、MKS 単位系から発展して整備された実用単位系である。

国際的な交流が盛んになるにつれて、計量単位統一の必要性が各方面で痛感された。そこでまず各国が用いている単位を持ち寄り、それらの間の妥協点を求めることによって国際的統一をはかるうとして長い時間をかけたがうまくいかなかった。近年になって、国際的に合意された単位系を先に作り、採用できる国からこれをその国の規格にしてゆくという方法が取られるようになった。

SI はこの線に沿ったもので、1960年の第11回国際度量衡総会で採択され、国際的計量単位として認められた。

それから四半世紀の間に SI はよく普及した。これは、この単位を用いて計算すれば、どんな複雑な計算の結果も自然に SI 単位になるという合理的で使用に便利な単位系であることが理解されて、まず学会関係で歓迎され、一般にも急速に広まって行った。

わが国においては、もともと MKS 単位系を使用していたので、SI の導入にはそれほど大きな抵抗はなかった。気象学の論文もすでに大部分 SI 単位系で記述されているので、いまさら SI について書く必要もないかもしれないが、これまでの資料や文献を利用するための便も考えて、SI のあらましとそれによって変わる気象

の定数の主要なものをまとめてみた。

2. SI のあらまし

SI の内容については前にかなり詳しく解説してある (清水, 1976) が、ここでは使用の便を考えて SI のあらま시를再録することにする。

SI は、第1表に示すように、基本単位、補助単位、およびそれらから組み立てられる組立単位、ならびにそれらの10の整数乗倍を表す接頭語から成る。このうち、基本単位、補助単位、および組立単位をまとめて SI 単位という。

2.1. 基本単位

基本単位は、第2表に示すように、長さ、質量、時間、電流、熱力学温度、物質質量、光度の7個の量とし、それぞれについて定義が与えられている。前の解説の中に示してある定義のうち、メートルの定義は、1983年の第17回国際度量衡総会で、これまでの光の波長に基づくものから次のように改訂された。

1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とする。

第1表 SI の構成

SI	SI 単位	基本単位	固有の名称をもつ組立単位 その他の組立単位
		補助単位	
		組立単位	
SI 単位の10の整数乗倍を表す接頭語			

* The International System of Units and Meteorological Constants.

** Itsuro. Shimizu, 気象庁 OB.

第2表 基本単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

第3表 補助単位

量	名称	記号
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

第4表 固有の名称をもつ組立単位

量	名称	記号	定義
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$kg \cdot m/s^2$
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電圧, 電位	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg

これは光の速さの測定の精度が向上したことによる。

2.2. 補助単位

補助単位は、純粋に幾何学的な2つの単位、すなわち、平面角の単位と立体角の単位とより成る。その名称と記号は第3表に示す通りである。

2.3. 組立単位

組立単位は、7個の基本単位と2個の補助単位を組み

第5表 基本単位及び補助単位によって構成される組立単位の例

量	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度, 速さ	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
角速度	ラジアン毎秒	rad/s
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2
運動量	キログラムメートル毎秒	$kg \cdot m/s$
密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
拡散係数	平方メートル毎秒	m^2/s
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
物質量の濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3

第6表 固有の名称を持つ組立単位を含む組立単位の例

量	名称	記号
力のモーメント	ニュートンメートル	$N \cdot m$
粘性係数	パスカル秒	$Pa \cdot s$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	$W/(m \cdot K)$
熱容量	ジュール毎ケルビン	J/K
比熱	ジュール毎キログラム毎ケルビン	$J/(kg \cdot K)$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr

合わせて構成された単位である。このうちの17個の単位については、実用上の便宜のために、第4表に示すように、それぞれ固有の名称と記号を与えており、それらは基本単位や補助単位と同様にその他の組立単位を構成するのに用いることができる。基本単位と補助単位とより構成される組立単位の例を第5表に、固有の名称を持つ組立単位を含む組立単位の例を第6表に示してある。

2.4. SI 単位の10の整数乗倍を表す接頭語

SI 単位は、完全な一貫性を保つように構成されているため、量によっては常用の大きさを表すのに適当でないものもある。そこで、10の整数乗倍を表す接頭語を定め、これを SI 単位につけることにすれば、極めて大きい量や小さい量を表すのに便利になる。これらを第7表に示す。

第7表 10の整数乗倍を表す接頭語

倍数	名称	記号
10 ¹⁸	エクサ (exa)	E
10 ¹⁵	ペタ (peta)	P
10 ¹²	テラ (tera)	T
10 ⁹	ギガ (giga)	G
10 ⁶	メガ (mega)	M
10 ³	キロ (kilo)	k
10 ²	ヘクト (hecto)	h
10	デカ (deca)	da
10 ⁻¹	デシ (deci)	d
10 ⁻²	センチ (centi)	c
10 ⁻³	ミリ (milli)	m
10 ⁻⁶	マイクロ (micro)	μ
10 ⁻⁹	ナノ (nano)	n
10 ⁻¹²	ピコ (pico)	p
10 ⁻¹⁵	フェムト (femto)	f
10 ⁻¹⁸	アト (atto)	a

この接頭語の記号は、これまでの MKS 単位系などにおける使用方法と同様に、すぐ後につける単位記号と一体になったものとして取り扱う。SI では接頭語を重ねることは禁じられている。質量の単位 kg には接頭語 k が含まれているので、質量の単位に限っては、g に接頭語を付けて構成する。例えば、μkg ではなくて mg とする。この点は SI の持つ弱点である。通常の10の整数乗倍の数値をつけるとき、例えば、 $4 \times 10^3 \text{kg}$ とするときには問題はない。

2.5. SI に含まれない単位の取扱い

SI は一貫性のある単位系であるから、これに含まれない単位は使用すべきでないということになるが、第8表に示すような実用上重要な単位は SI と併用することになっている。これによって身近な速さの単位 km/h は普通に使うことができる。また、第9表には SI と共に使用することが暫定的に許容されている単位を示してある。

3. SI による気象の数値

これまで気象関係で用いられていた数値は主として MKS 単位系または CGS 単位系によるものであるから、SI に移行するには、10の整数乗倍をすればすむものが大部分であり、大きな問題はない。ただ熱量の単位には主としてカロリーが用いられてきたので、熱量を SI の単位ジュール (J) に移行するには換算が必要で

第8表 SI と併用される単位

量	名称	記号	SI 単位での値
時間	分	min	1 min = 60 s
	時	h	1 h = 60 min = 3,600 s
	日	d	1 d = 24 h = 86,400 s
平面角	度	°	1° = (π/180) rad
	分	'	1' = (1/60)° = (π/10,800) rad
	秒	"	1'' = (1/60)' = (π/648,000) rad
体積	リットル	l	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
質量	トン	t	1 t = 10 ³ kg

第9表 SI と共に暫定的に許容される単位

名称	記号	SI 単位での値
海里		1 海里 = 1,852 m
ノット		1 ノット = 1 海里毎時
オングストローム	Å	1 Å = 0.1 nm = 10 ⁻¹⁰ m
アール	a	1 a = 1 dam ² = 10 ² m ²
バイン*	b	1 b = 100 fm ² = 10 ⁻²³ m ²
バル	bar	1 bar = 10 ⁵ Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101,325 Pa
ガール	Gal	1 Gal = 1 cm/s ² = 10 ⁻² m/s ²
キュリー	Ci	1 Ci = 3.7 × 10 ¹⁰ s ⁻¹

* 有効断面積の単位で、原子核の断面積程度の量である。

ある。

気圧の SI 単位パスカル (Pa) は、現在用いられている単位 mb の 1/100 の量であるから、WMO では現在の数値を変更しないですむように、100 倍の hPa を用いることにした (WMO, 1983) が、学会などでは、1000 倍の kPa を用いているところもある。

温度の単位ケルビン (K) は、水の三重点の熱力学温度の 1/273.16 である。これは、水の三重点のほうが氷点よりよい精度で設定できることから、水の三重点に対して 273.16 K という温度を与え、これを定点とする熱力学温度が定義された結果である。そして、氷点は水の三重点の温度より 0.01 K だけ低い温度と定義されている。これによって、セルシウス温度 (°C) の数値 *t* と熱力学温度 (K) の数値 *T* との関係は次の通りである。

$$t = T - 273.15$$

温度差を表すのに、deg が用いられたこともあったが、SI では K または °C を使用し、deg は使用しない

第10表 熱力学の基礎定数

量	SI	SMT
水の三重点の熱力学温度 T_1	273.16 K	—
氷点の熱力学温度 T_0	273.15 K	273.16 K
1モルの気体定数 R^*	8.31432 Jmol ⁻¹ K ⁻¹	1.98583 cal _{IT} ・mol ⁻¹ K ⁻¹
乾燥空気の分子量 M	28.9644	28.966
乾燥空気の気体定数 R	287.05 J kg ⁻¹ K ⁻¹	0.068557 cal _{IT} ・g ⁻¹ K ⁻¹
水蒸気の分子量 M_w	18.0153	18.016
水蒸気の気体定数 R_w	461.51 J kg ⁻¹ K ⁻¹	0.110226 cal _{IT} ・g ⁻¹ K ⁻¹

ことになっている。また、SI の温度記号の使用に当たってはセルシウス度は °C とするがケルビンは K と書き、°K とは書かないことに注意する必要がある。これは、記号 C は電荷の単位クーロンとして使用されているので、これとの混同を避けるために、昔から使用している °C は残されたがケルビンについてはこのようなことがないので単に K としている。

熱量の単位は、仕事またはエネルギーの単位と同じであることから、SI では J が用いられる。

これまで広く用いられていた熱量の単位カロリーは、最初 1 グラムの水の温度を 1°C 上げるに要する熱量として定義されたが、測定の精度が向上するにつれて、この量は温度が変わるとわずかながら変化することがわかってきたので、カロリーには温度を指定することになった。

現在用いられているカロリー (理科年表, 1985) は

- (1) 1 グラムの水の温度を 14.5°C から 15.5°C まで上げるに要する熱量をとった 15°C カロリー (cal₁₅),
- (2) 1 グラムの水の温度を 0°C から 100°C まで上げるに要する熱量の 1/100 と定義される平均カロリーに最も近い国際蒸気表 (International Steam Table) カロリー (cal_{IT}),
- (3) 温度を指定しないカロリー (cal)。これは 1 ワット時の 860 分の 1 に等しい

などであり、これらと J との対応は次の通りである。

- 1 cal₁₅ = 4.1855 J
- 1 cal_{IT} = 4.1868 J
- 1 cal = 4.1860 J

第11表 比熱

量	SI (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	SMT (cal _{IT} ・g ⁻¹ K ⁻¹)
乾燥空気		
定圧比熱 C_p	1.005 × 10 ³	0.240
定容比熱 C_v	0.718 × 10 ³	0.171
水蒸気		
定圧比熱 C_{pv}	1.85 × 10 ³	0.441
定容比熱 C_{vv}	1.39 × 10 ³	0.331
水の比熱 C_w	4.19 × 10 ³	1.000
氷の比熱 C_i	2.09 × 10 ³	0.5

第12表 0°C における水の相変化に伴う潜熱

量	SI (J kg ⁻¹)	SMT (cal _{IT} g ⁻¹)
蒸発熱 L_v	2.501 × 10 ⁶	597.3
融解熱 L_f	0.334 × 10 ⁶	79.7
昇華熱 L_s	2.835 × 10 ⁶	677.0

4. 熱量を含む気象の定数

気象で用いられる定数のなかで熱量に関係のあるものをまとめてみた。

第10表は熱力学の基礎定数の表で、SI としては WMO の資料 (WMO, 1966) によることとし、対応するカロリーを含む資料は Smithsonian Meteorological Tables (1958) (SMT と略す) から引用した。この中の R と R_w の値については、SI は毎キログラムの値であり、SMT は毎グラム の値であるので、SI の数値は SMT の数値の 1000 倍になっている。これを別にして、有効数字にわずかの差があるのは、分子量の定義の変更や、測定技術の進歩によるもので、以下の表についても同様である。

第11表は、乾燥空気、水蒸気、水および氷の比熱について比較したものであり、第12表は、0°C における水の相の変化に伴う潜熱について比較したものである。

放射で用いられるステファンボルツマン定数 σ は、SI (WMO, 1966) では

$$\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ J m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ s}^{-1} (\text{Wm}^{-2} \text{ K}^{-4})$$

であるが、SMT では

$$\sigma = 8.132 \times 10^{-11} \text{ cal cm}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ min}^{-1}$$

となっている。

5. 結び

以上、SI の簡単なまとめとそれによる気象の定数の

値を集めてみた。SI のまとめには日本規格協会の“国際単位系 (SI) の手引”を主に参考にした。記して感謝の意を表したい。SI についてさらに詳しく知るためにはこの書を参考にすることをおすすめする。

文 献

国際単位系の手引編集委員会, 1981: 国際単位系 (SI) の手引, 日本規格協会, vi+250 頁。
理科学年表, 1985: 単位, 物 8 頁, 丸善。

清水逸郎, 1976: 国際単位系 (SI) について, 天気, 23, 117-121。
Smithsonian Meteorological Tables, 1958: Thermodynamic Tables, 289-343, Smithsonian Institution。
WMO, 1966: International Meteorological Tables, WMO-No. 188, Table 4, Thermodynamics。
WMO, 1983: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO No. 8, p. 1. 8.

学会刊行物等の値上げの実施について (昭61.2.1 日気字第23-110号)

日本気象学会理事長 山元龍三郎

当学会員の皆様には、益々ご健勝の程お喜び申し上げます。当学会の運営は、会費、文部省助成金、投稿料などによって賅われております。このうち会費につきましては昨年1月から値上げを実施し、さらに、会員の増加に努め、機関誌の内容の充実等を図ってきました。

今後、役員一同会員の増加に努める所存ではありますが、一方ではここ3・4年は会員の大幅な減少が避けられない状況も予想され、学会運営が困難な事態になるおそれがあります。このような状況の中で、学会の公約でもある機関誌の維持・拡充等学会活動のいっそうの充実を果さなければなりません。

このような事情のため、昭和61年4月1日から、右記のとおり、刊行物等の値上げを実施いたしますので、ご承知下さるよう願います。

会員各位には、諸事情をご賢察のうえ、深いご理解と

ご協力を賜りますよう、よろしく願い申し上げます。

記

	(改訂)	(現行)
日本気象学会春・秋季大会予稿集	2,000円	1,500円
夏季大学「新しい気象学」	1,500円	1,300円
別刷代(天気, 気象集誌共)1頁当 気象研究ノート共)たり	15円	10円
投稿料(気象集誌)1頁~12頁	5,000円	4,000円
天気(会員外単価)	1,050円	920円
天気(書店扱単価)	790円	660円
気象集誌(会員外単価)	2,320円	1,640円
気象集誌(書店扱単価)	2,000円	1,320円
広告料	別途	
		以上

日本気象学会および関連学会行事予定

行 事 名	開 催 年 月 日	主 催 団 体 等	場 所
昭和61年度日本気象学会 春季大会	昭和61年5月21日~23日	日本気象学会	気象庁
第23回理工学における同 位体元素研究発表会	昭和61年7月1日~3日	共同主催	国立教育会館
短期・中期数値予報の国 際シンポジウム	昭和61年8月4日~8日	WMO(気象庁)・IUGG	東京, 気象庁
第4回エアロゾル科学・ 技術研究討論会	昭和61年8月21日~22日	エアロゾル研究協議会	愛知県産業貿易館 (名古屋市)
第3回アジア流体力学会議	昭和61年9月1日~5日	アジア流体力学会議委員会	日本都市センター
Beijing International Radiation Symposium	1986年9月2日~6日	Chinese Meteorological Society & American Meteorological Society	Beijing
International Union of Geodesy and Geophysics, XIX General Assembly	1987年8月9日~22日		カナダ, バンクーバー