国際単位系 SI について

小 岩 昌 宏*

最近発行される学術書や雑誌には N/m^2 , kJ/mol など新しい計量単位が目立つようになってきた。金属材料の強さは kg/mm^2 , 活性化エネルギーは kcal/mol (または eV) で…という具合に長年なじんできた身には少なからず違和感を覚えるけれど、国際単位系 SI (Système International d'Unités の公式略称, 英文名: International System of Units) の採用は今や世界の大勢であり、いずれ金属学会も移行措置を検討することになると思われる。最近必要にせまられて 2, 3 の SI に関するパンフレットに眼を通したので、以下にその概要を紹介してみたい。

はじめに、本稿を執筆する際に参照した資料を挙げておく。

- [1] 「これからの単位——SI とは——」, 日本規格協会・標準化原理委員会・SI 分科会, 1974 年 10 月, 200 円
- [2] 「測定単位をめぐるいくつかの話題」高田誠二, (金属 臨時増刊号, p.96 アグネ) 1975 年 7 月。
- [3] “The Royal Society Conference of Editors, Metrication in Scientific Journals”, The Royal Society, 1968 年 (英)。
- [4] “NBS Guidelines for Use of the Metric System” U. S. Department of Commerce/National Bureau of Standards, 1974 年 11 月 (米)。
- [5] “The International System of Units for Metallurgical Transactions”, Metallurgical Transactions, 3 (1972), 355~358 (米)。

1. 国際単位系 SI とは？

これまで世界で用いられてきた単位系にはヤード・ポンド系とメートル系があり、そのメートル系の中にも長さ、時間、重さを基本単位とする重力系、重さのかわりに質量を基本単位にした MKS 系、CGS 系などがある。このように種々の計量単位が共存しているために生ずる不便をなくし混乱を整理するため、1960 年の国際度量衡総会はメートル系、MKS(A) 系、絶対単位系 (その基本単位の一定性が厳密に保証されていて、他の単位はこれをもとにして理論により誘導される単位系、例えば

キログラム原器[†]により定めた質量はその原器が唯一のものであるという意味で一定であり絶対単位である) の長所を基盤とし整合性の高い単位系として国際単位系 SI を定めた。この単位系の採用にもっとも熱心なイギリスは 1965 年から SI への切換えを始め 1975 年までに完了を目指してきた。ドイツ、フランスその他世界中のメートル系諸国も次第に移行しつつあり、1980 年頃までに世界の主要国はそれぞれの国内規格で使う単位の SI への切換えを完了することになっている (日本の対応については後で述べる)。

2. 国際単位系 (SI) の概要

(1) 基本単位・補助単位・組立単位

SI は、長さ (m), 質量 (kg), 時間 (s), 電流 (A), 熱力学温度 (K), 物質質量 (mol), 光度 (cd) の 7 個の基本単位 (表 1), 平面角 (rad), 立体角 (sr) の 2 個の補助単位 (表 2) をもとに構成されている。この基本単位と補助単位から各種の組立単位がつくり出されるが、そのとき、基本単位を掛けたり割ったりした組合せのほかに、1 以外の数字係数を含むことはなく、各種の量の単位間の相互関係が明快で合理的である。

組立単位の中から従来の慣用からしてやや違和感を覚えるもの (要注意のものというべきか?) を拾ってみると

密度	kg/m^3
比熱	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
モル質量	kg/mol
モル体積	m^3/mol
モル濃度	mol/m^3
拡散係数	m^2/s

などがある。

比熱は全く違った数値になるし、その他の量も 10 の整数乗倍だけ変わってくるので注意する必要がある。

上記の組立単位は固有の単位記号を持たないが、振動数 (Hz), 力 (N) など固有の単位記号を有する組立単位が 15 個ある。表 3 にこれらを示した。

(2) 接頭語 (prefixes)

基準の単位より大きな量、または小さな量を表すため

* 東北大学助教授; 金属材料研究所
Essentials of the International System of Units, SI;
Masahiro Koiwa (The Research Institute for Iron, Steel
and Other Metals, Tohoku University, Sendai)
1975 年 10 月 23 日 受理

† 白金 90%, イリジウム 10% の合金で直径、高さとも 39 mm の円筒形。1885 年に製作され、パリの国際度量衡局に保管。

表1 基 本 単 位.

量	単位の名称	単位記号	定 義
長 さ	メートル (metre)	m	メートルは、クリプトン 86 の原子の準位 $2p_{10}$ と $5d_5$ との間の遷移に対応する光の、真空中における波長の 1 650 763.73 倍に等しい長さである。
質 量	キログラム (kilogram)	kg	キログラムは(重量でも力でもない)質量の単位であって、それは国際キログラム原器の質量に等しい。
時 間	秒 (second)	s	秒は、セシウム 133 の原子の基底状態の二つの超微細準位の間の遷移に対応する放射の 9 192 631 770 周期の継続時間である。
電 流	アンペア (ampere)	A	アンペアは、真空中に 1 メートルの間隔で平行に置かれた、無限に小さい円形断面積を有する無限に長い 2 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 メートルごとに 2×10^{-7} ニュートンの力を及ぼし合う一定の電流である。
熱力学温度*	ケルビン (kelvin)	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 $\frac{1}{273.16}$ である。
物 質 量	モル (mole)	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と等しい数の構成要素を含む系の物質質量である。 2. モルを使用するときは、構成要素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、その他の粒子またはこの種の粒子の特定の集合体であってよい。
光 度	カンデラ (candela)	cd	カンデラは、101 325 パスカルの圧力のもとで白金の凝固点の温度にある黒体の、 $\left(\frac{1}{600\,000}\right)$ 平方メートルの表面の垂直方向の光度である。

注*：“セルシウス温度”も用いてよい。

表2 補 助 単 位.

量	単位の名称	単位記号	定 義
平 面 角	ラジアン (radian)	rad	ラジアンは、円の周上でその半径の長さに等しい長さの弧を切り取る 2 本の半径の間に含まれる平面角である。
立 体 角	ステラジアン (steradian)	sr	ステラジアンは、球の中心を頂点とし、その球の半径を 1 辺とする正方形の面積と等しい面積をその球の表面上で切り取る立体角である。

表3 固有単位記号・名称を持つ組立単位.

量	単 位 の 名 称	単 位 記 号	他 の 単 位 を 用 いた 表 現	SI 基 本 単 位 に よ る 表 示
振 動 数	ヘルツ(hertz)	Hz		s^{-1}
力	ニュートン(newton)	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧 力	パスカル(pascal)	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー・熱量	ジュール(joule)	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
電力・熱流	ワット(watt)	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷・電気量	クーロン(coulomb)	C	$A \cdot s$	
電位・電位差 (電圧)・起電力	ボルト(volt)	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド(farad)	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム(ohm)	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンズ(siemens)	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束	ウェーバ(weber)	Wb	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ(tesla)	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー(henry)	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
光 束 度	ルーメン(lumen)	lm		$cd \cdot sr$
照 度	ルクス(lux)	lx		$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$

表4 接頭語.

単位に乘ぜられる倍数	接頭語の名称	接頭語の記号
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 (deka)	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

に 14 個の接頭語(表4)が定められ, その使用法が次のようにきめられている.

〈SI 単位の 10 の整数乗倍の構成および使い方〉

(1) 接頭語の記号は, すぐ後に付けて示す単位記号と一体になったものとして扱う.

$$\text{例: } 1 \text{ cm}^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \mu\text{s}^{-1} = (10^{-6} \text{ s})^{-1} = 10^6 \text{ s}^{-1}$$

(2) 合成した接頭語は用いてはならない. なお, 質量の単位の 10 の整数乗倍の名称は "グラム" という語に接頭語を付けて構成する.

例: マイクロキログラム(μkg)ではなくミリグラム(mg)とする.

(3) 整数乗倍は, 数が実用的範囲に入るような, 便利な大きさのものを選ぶ. 原則として, 数が 0.1 と 1000 の間に入るように選ぶとよい.

例: $1.2 \times 10^4 \text{ N}$ は 12 kN と書く

0.00394 m は 3.94 mm と書く

(4) 合成された SI 単位では接頭語は 1 つだけ用いる.

なお, イギリスでは「接頭語の使用はできるかぎり $10^{\pm 3n}$ のものに限るべきである」として d(デシ, 10^{-1}), c(センチ, 10^{-2}), da(デカ, 10), h(ヘクト, 10^2)の使用を極力さけるように勧告している(資料[3]による). このために転位密度を 10^8 cm^{-2} と表すかわりに 10^6 mm^{-2} としている例を見かけた(J.W.Martin: *Strong Materials*, Wykeham Publications Ltd., (1971)).

(3) 単位記号および量を表す数の書き方

これについても次のような詳細な規定がある(資料[1]による).

〈単位記号および量を表す数の書き方〉

(1) 単位記号を印刷する場合は, 本文の他の文字とは無関係に直立体(ローマン)文字とし, 複数形を用いず, 終止符号(ピリオド)を付けない.

(2) 量を表す全数字の後には, その数字と単位との間に, 活字の幅の $\frac{1}{2}$ だけ間をあける.

(3) 量を表す数のけた数が多い場合には, 3 けたごとに区切って活字の幅の $\frac{1}{4}$ だけ間をあけて記載し, コンマをつけない方がよい.

$$\text{例: } 1 \text{ kgf/m}^2 = 9.806\,65 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ d} = 24 \text{ h} = 86\,400 \text{ s}$$

(4) 組立単位が 2 つ以上の単位の積で構成される場合には, 次のいずれかの方法で書くのがよい.

$$\text{例: } \text{N} \cdot \text{m} \quad \text{N} \cdot \text{m} \quad \text{N m}$$

なお, 接頭語の記号と同一の単位記号を用いる場合には, 混同を避けるために注意する必要がある.

$$\text{例: ミリニュートン mN とニュートンメートル N} \cdot \text{m}$$

(5) 組立単位が 1 つの単位を他の単位で除して構成される場合には, つぎのいずれかの方法で書く.

$$\text{例: } \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{m/s} \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

また, かっこを付けることなしに (m/s のような) 斜線を同一の行に 2 つ以上重ねてはならない. 複雑な場合には, 負の整数乗倍またはかっこを用いる.

(4) SI に含まれないが併用してよい単位

SI に含まれない単位であるが, 実用上の重要さから併用できる単位がいくつかある. 以下にそれらを挙げる(資料[1]による).

$$\text{平面角} \quad 1^\circ (\text{度}) = \frac{\pi}{180} \text{ rad}, 1' (\text{分}), 1'' (\text{秒})$$

$$\text{体 積} \quad 1 \text{ l (リットル)} = 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{時 間} \quad 1 \text{ min (分)} = 60 \text{ s}, 1 \text{ h (時)}, 1 \text{ d (日)}$$

$$\text{質 量} \quad 1 \text{ t (トン)} = 10^3 \text{ kg}$$

$$\text{圧 力} \quad 1 \text{ bar (バール)} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{エネルギー} \quad 1 \text{ eV (電子ボルト)} = 1.602\,189\,2 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{セルシウス温度} \quad t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15$$

3. 国際単位系(SI)への切換えの要点

上にみたように SI は従来の単位と全く違ったものではなく, MKS 単位系の発展したものであるが, とくに注意を要する点を以下に整理してみる.

(1) キログラム(kg)は質量の単位であり, 重量の単位ではない

地球上では物体にはその質量に比例した重力が働くので, その力すなわち重量によってわれわれは質量の大きさを感じとっている. このため, 質量 1 kg に対する重量キログラムを基本単位とする重力単位系が広く用いられ, その単位記号に質量と同じ kg を使ってきた. このために生ずる混乱を防ぐため, 重量キログラムに対し kgw , kgf などの記号も一部で用いられるようになった.

ところで, 重力の強さ g はところによって差があるため, 1 kg に対する重量は一定値ではない. これでは単位

としてまずいので $g=g_n=9.806\,65\text{ N/kg}(=m/s^2)$ を国際的基準にすることが取り決められ、日本もこの値を採用するようになった。

重力単位系における力の単位が重量キログラム(kgf)であったのに対し、SI での力の単位はニュートン(N)である(1 kg の質量に 1 m/s^2 の加速度を与える力が 1 N である)。

(2) 圧力の単位はパスカル(Pa)である

圧力の単位としては $\text{kg/cm}^2(\text{kgf/cm}^2)$ が広く常用されてきたが、これは 1 kg/cm^2 が大気圧に近似($\approx 0.968\text{ atm}$)しているからである。

SI での圧力の単位は N/m^2 となるが、1971 年これにパスカル(記号 Pa)の名が与えられた。1 Pa は工業的に扱われる圧力に対して小さすぎる量なので、常用されるのは MPa とか kPa となる($1\text{ kg/cm}^2 \approx 0.1\text{ MPa}$)。

水銀柱や水柱で圧力を表す場合も多いが、これらも切換えることになる。bar($1\text{ bar}=10^5\text{ N/m}^2$)、mbar も正統論からすれば除外すべき単位であるが、存続論者も少なくないため当面専門分野での使用が認められている(ISO 1000「国際単位系(SI)の使い方」)。結局、圧力関係で切換えを要する従来単位は次の通りである。

$\text{kg/cm}^2(\text{kgf/cm}^2)$, mHg, mH_2O , atm, Torr

(3) 応力の単位は N/m^2 またはパスカル(Pa)へ

応力および弾性係数の単位は基本的には圧力の単位と同じであり、金属の分野では kg/mm^2 , kg/cm^2 が用いられてきた。これらの SI への切換えとして N/mm^2 , N/m^2 がかなり多く用いられてきているが、これはパスカル(Pa)が決められてから日が浅い(1971 年)という事情によるものと思われる[†]。

ところで

$$\begin{aligned} 1\text{ kg/mm}^2 &= 9.806\,65\text{ N/mm}^2 \\ &= 9.806\,65\text{ MN/m}^2 \\ &= 9.806\,65\text{ MPa} \end{aligned}$$

という関係がある。大ざっぱには

$$1\text{ kg/mm}^2 \approx 10\text{ MN/m}^2$$

となるから、「 kg/mm^2 で表した数値を 1 ケタずらせば MN/m^2 になる」と覚えておくことと便利である。降伏応力が「 100 kg/mm^2 」以上の材料は「 1 GN/m^2 」または「 1 GPa 」となり、強い材料は「ギガ級」と言えるから覚えやすい。注意すべきことは、「合成された SI 単位では接頭語は 1 つだけ用いる」(前出)ことになっているの

[†] 資料[1]では「呼びやすさ、書きやすさの点から、今後は MPa が普及すると思われる」とあるが、パスカルには何となく「気圧」を思わせるニュアンスがあり、応力、弾性係数の単位は N/m^2 どまりにした方が良い……と感ずるのは小生だけだろうか？

で、「鋼の弾性係数は 220 kN/mm^2 」といった表現はできない^{††} ことである。

$$\text{kN/mm}^2 \rightarrow \text{GN/m}^2 \equiv \text{GPa}$$

(4) カロリー(cal)は使えない

カロリーは SI にはない、熱関係などでカロリーが広く使われてきたが、cal および cal を含む諸単位は、ジュール(J)またはワット(W)を使った単位に切換えることになる。

カロリーは、水に関するかぎりは有利であるが、それでも 1 g の水の温度を 1°C を上げるために要するエネルギーは、温度によって変化するため、表 5 のようにいろいろの定義による値が使われてきた。これらのことから J で 1 本化すれば、相互の換算の必要もなく、むしろ便利だということで、SI からカロリーは除外された。

表 5

1 cal ₁₅	= 4.185 5 J (15°C カロリーともいう)
1 cal _{IT}	= 4.186 8 J (正確に) (IT カロリー、または国際表カロリーともいい、工学では世界的に広く使われている)
1 Mcal _{IT}	= 1.163 kW·h (正確に)
1 cal (thermochem.)	= 4.184 0 J (熱化学カロリーともいう)
1 cal	= 4.186 05 J = 1/860 W·h (計量法による)

(5) そ の 他

- ミクロン(μ)は SI では μm と表すことになっており、読み方としてはマイクロメートルが正しい。
- オングストローム($\text{\AA}$)は当面使用が認められているが、つとめて切換えること($1\text{ \AA}=0.1\text{ nm}=10^{-10}\text{ m}$)が望ましい。
- 資料[5]ではここ当分(for limited time)に限って使用を認めるものとして $\text{\AA}$ の他に
バーン(b), バール(bar), 気圧(atm),
キュリー(Ci), レントゲン(R), ラド(rad)
などを挙げている。
- 表 6 に使用を避けるべき CGS 単位を示した(資料[1]および資料[5]とも同じ表を掲げている)。

4. 国際単位系(SI)と日本の対応

系統的に調べてみてはいないが、欧米で発行されている金属関係の学術雑誌には SI を使用するものが増えつつあるように思われる。図書館に行き、2, 3 眺めてみたら、Materials Science and Engineering は投稿規定に SI の使用を明記しているし、Metallurgical Transactions は 1972 年 4 月 30 日以降の論文は「SI 単独」または「SI 併記」と定めている。日本の各学協会の方針に

^{††} 分母に接頭語 m が含まれている。

表6 切換えを要する CGS 系単位.

名 称	記 号	SI 単位による値
エ ル グ (erg)	erg	1 erg = 10^{-7} J
ダ イ ン (dyne)	dyn	1 dyn = 10^{-5} N
ポ ア ズ (poise)	P	1 P = 1 dyn·s/cm ² = 0.1 Pa·s
ス ト ーク ス (stokes)	St	1 St = 1 cm ² /s = 10^{-4} m ² /s
ガ ウ ス (gauss)	Gs, G	1 Gs は 10^{-4} T に相当
エルステッド (oersted)	Oe	1 Oe は $\frac{1000}{4\pi}$ A/m に相当
マクスウェル (maxwell)	Mx	1 Mx は 10^{-8} Wb に相当
ス チ ル ブ (stilb)	sb	1 sb = 1 cd/cm ² = 10^4 cd/m ²
フ ォ ト (phot)	ph	1 ph = 10^4 lx

については特に調査してみなかったが「1974年4月の全国大学機械工学系教育研究集會で行なわれたアンケートの結果によると、SIへの移行が圧倒的多数(90%)で支持されており、またこの集會に出席した大学教師で教科書を書くときにSIを採用する予定の人は、同じく圧倒的に多い」(資料[1]),「ハンドブックや便覧の編集・改訂に際してSIを基本とする方針を採用する例も多くなった(機械工学,化学,その他)」(資料[2])とのことである。

一方、日本工業規格(JIS)の審議に当たっている日本工業調査会(政府諮問機関)では、その最高機関である標準會議において、1972年12月21日にJISにおける切換え方針をつぎのように定めている(表7)。

この方針に基づいて、“国際単位系(SI)およびその使い方”(JIS Z 8203)をはじめとし、換算表等のJISの整備が終り、すでに第1段階に入り、改正JIS,新規JISにおいて、SIの採用が始まっているが、表現や解釈の混乱を避けるため、標準會議は、1974年7月18日、換算値の併記方法、換算の際の有効数字など具体的な取扱いの指針を定め、各部会に傳達している。

表7 日本工業調査会標準會議における切換方針.

<国際単位系を日本工業規格に採用する件について>

国際単位系を日本工業規格に採用する件につき各部会で慎重審議した結果、基本的な反対はなかったので、国際単位系を日本工業規格に次の段階で取り入れる。

準備段階：国際単位系でない単位系と、国際単位系との間の換算表を、基本部会でJIS化する。

第1段階：各JISにおいて、国際単位系でない単位による数値のあとに国際単位系による数値をカッコ書きする(昭和49年4月から52年3月まで各規格の見直しの都度)。

以下の段階への移行時期は、前の段階の結果等をみきわめて標準會議で決定する。

第2段階：各JISにおいて、国際単位系でない単位による数値を国際単位系によるものに替え国際単位系でない単位によるものはあとにかっこ書きする。

第3段階：各JISにおいて、国際単位系のみで表示する。

JIS規格や学術書、雑誌のSI採用はさしあたっては文書上のことにすぎないが、これに伴って計測器、試験機(とくに圧力計、材料試験機)の目盛をSIに切換える必要が生ずるなど難しい問題も少なくない。

5. お わ り に

本稿は前掲資料[1]～[5]より適宜抜粋再配列して構成したものである。SIは本来国際的統一を目指して制定されたものであるから、国ごとの差異は無いはずであるが、cmの使用制限や“SIと併用してよい単位”についてイギリスの規定(資料[3])は他とやや異なる点が見受けられた。これは参照した資料が1968年のもので他に比しやや古いためかも知れない。筆者は計量単位等について特にくわしい知識を持っている訳ではないので、誤解や誤りがあるかも知れない。疑問の点については原資料を参照して確かめていただきたい。