



わかりやすいSIの使い方 (その1)

— 一般論 —

三 井 清 人*

講座開設に当って

SI (国際単位系) は、他の分野ではすでに常識とされている。

私たちにはそれが、今まで親しんできた、そして私たちの仕事には便利な重力単位系と、一見根本的に異なった単位系であるがゆえに、何か生理的(?)にその導入に抵抗を感じているようである。しかしながら本来、CGS系を中心に用いてきた私たちには、この新しい単位系へのアプローチは、案外に簡単なもののはずである。事実、従来混同していた質量と重量(力)の概念さえ明確に区別できれば、それほど困難な問題は残っていないのである(この区別が私たちには意外に面倒なのであるが)。そしてあとは、ニュートン(N)とかパスカル(Pa)といった人の名前を単位の記号として理解すること、若干の接頭語を覚えればほとんど使用に問題のないことが判るであろう。一つでもよいから、日本人の名前を冠した単位記号、たとえば、ユカワ Yu なんていうのがあると、もっと身近に感じたことであろう。

農業土木学会がSIと本格的に取り組みを始めたのは昭和54年¹⁾²⁾、そして国際単位系(SI)導入委員会が設けられたのは昭和55年である。学会誌編集委員会と協力

し合いながら、学会員への周知と円滑な導入への努力がなされている³⁾⁴⁾⁵⁾。農業土木分野でよく用いられる単位記号と換算表について、近く第1次分が発表される予定である。

今回、「わかりやすいSIの使い方」講座が開設されたのは、単位系としては判っていても、いざ使用する場合には何となくまごまごすることが多いからである。実用性に主眼を置き、現場の方々に実例を中心に学んでいただくためである。

農業高校の教科書も昭和58年度からはSIに切替っていく。他の分野ではそれが10年も以前になされているのである。3年後に、高校を卒業して現場に入って来た後輩から質問されて、まごつかないためにも、SIに強くなろうではありませんか。(佐藤 晃一)

参考文献

- 1) 農業土木学会研究委員会国際単位系導入に関する小委員会：国際単位系〔SI〕とは？、(その1)、農土誌49(1)、pp.64~69 (1981)
- 2) 農業土木学会研究委員会国際単位系導入に関する小委員会：国際単位系〔SI〕とは？、(その2)、農土誌49(2)、pp.66~68 (1981)
- 3) 尾崎毅司：SIの導入について、農土誌 49 (2)、pp. 98~100、(1981)
- 4) 農業土木学会誌編集委員会：農業土木学会論文集における単位系について、農土誌49(5)、会告 (1981)
- 5) 佐藤晃一：国際単位系(SI)の導入に向けて、農土誌 50 (8)、pp.51~58 (1982)

I. ま え が き

SIという略称で呼ばれる「国際単位系」は、その名が誕生してから約20年になるが、最近になって次第にその真価が理解され利用分野が広がってきている。いうまでもなく、単位系というのは数量情報に関するコミュニケーションの手段であるから、その通用範囲が広いということが最大の要件であり、それには誰にとっても便利でかつ合理的であることが必要である。ところが、これは口でいうのは簡単だが、実際にその候補として理想的な単位系を選ぶとなると話は難しくなり、物理学の基本

にかかわる深遠な問題から規格の制定などの実際的な問題に至るまで、各国・各分野の代表の間で実にさまざまな議論が交されてきた。現在のSIはこのような議論の大勢によって形作られたものであるが、単位系というものの性格からみて必ずしもすべての人が満足できる結論とはいえないであろう。しかし、多数の英知を集めてできたこの単位系には多くの長所があり、ことに分野や領域の境を越えた交流や協力が重視される現在においては、その長所は従来の習慣を変えろという導入時の苦痛を補って余りあるものとなっている。

このたび本誌がSIに関する講座を企画されたことはまことに時宜を得たものであり、その執筆者の一員に加えていただいた光栄と責任とを痛感しているところであ

* 通産省工業技術院計量研究所第4部(みつゐ きよと)

国際規格、計測・単位

キーワード

るが、シリーズの冒頭に当るこの稿ではSIの概要と特徴を国際度量衡局（BIPM）発行の「SI文書」¹⁾をもとにして紹介することとし、あまり格式ばらずに時にはむだ話も交えて関連のお話をするをお許しいただきたい。

II. SIの誕生とその背景

SIの構想の一端が初めて国際会議に現われたのは、第二次大戦後もない1948年の第9回国際度量衡総会（CGPM）でのことであり、ここで各国・各分野の人々が共通に使える一つの実用計量単位系を確立するために公的な調査を開始することが決議された。この決議の背景には、創設以来約1世紀を経たメートル単位系が、その普及とともにさまざまな分化を遂げ、MKS系・CGS系、重力系、静電系・電磁系・ガウス系、有理系・非有理系などのいろいろな単位系を派生したという事情がある。そこから生じる不便や誤解は予想以上に重大なものであり、国際間・分野間の協力が重視される局面を迎えた今、早急に解決しなければならないという指摘が各方面からなされていた。

このような背景事情は、18世紀末にフランス国民議会においてメートル制の提言がなされた時と類似している。ここで再びメートル条約のモットーである「すべての時代に！すべての人々に！」を改めて掲げ直し、メートル制の合理化と近代化を図るために、各国の機関を通じて、また、各分野の国際機関を通じて事情や意見を調査することから新単位系の検討が始められた。

上記の第9回CGPMでの決議を受けて、国際度量衡委員会（CIPM）およびその事務局をつかさどる国際度量衡局（BIPM）では国際学術機関などとの連携のもとに活動を始めた。1954年には、CIPMのもとに単位系小委員会が設置され、新単位系の基本構想が次第に具体化された。同年の第10回CGPMでは早くも基本単位の選定に関する決議を行っている。1960年の第11回CGPMは新単位系に対して「国際単位系（略称SI）」という名称を採用し、単位系のまとまった規則を確立させた。

III. SI単位の階級

単位系の体系化は、まず基礎となる幾つかの量の単位を定め、これらの組合せによって他の量の単位を表現するという階級図式の選定から始まる。前者の階級に属するものは基本単位（base units）と呼ばれ、後者のものは組立単位または誘導単位（derived units）と呼ばれるが、この階級分けにおける最大の論点は何を基本単位に選ぶかという問題である。基本単位の数を幾つにする

か、また、何を選ぶべきかという問題は物理学によって一意的に決まるというものではなく、主として実用上の利便によって決めるべき問題であるが故に、いろいろな考え方があって従来から議論が絶えなかった。

ところで、基本単位にとっての最大の要件は、それぞれが互いに独立であることを意味するものではなく、次元解析に当って独立次元をもつ物理量として扱うという意味である。また一方、あらゆる物理量（いわゆる化学量も含めて）の定義は、「測定」という操作を完全に規定することによって初めて明確にされるものであり、そして測定とは、物理量の二つの状態の比（すなわち単なる数）を決定することである。基本単位の意味するところは、この操作の共通の基礎となるべき再現可能な状態である。したがってその定義は、最も明確かつ厳密なものでなければならない。

さて、基本単位の数に話を戻すと、上述の単位系小委員会は次元解析における便宜、計測技術上の得失、在来の単位系との関係などを考慮に入れて、新しい実用計量単位系には少なくとも6個の基本単位をおく必要があると判断した。これを受けて1954年の第10回CGPMは、メートル、キログラム、秒、アンペア、ケルビンおよびカンデラを基本単位とする決議を行っている。ちなみに、このうち前4者（m, kg, s, A）は、力学と電磁気学の分野の単位を統一するために構成された「MKSA非有理絶対単位系」の基本単位を受け継いだものである。その後、「物理量」をめぐる物理学者と化学者の長い論争に結論が出た1971年に、第14回CGPMは「モル」を基本単位に追加することを決議し、現在のSIの体系ができ上がった。

単位の階級に関するもう一つの大きな論点は無次元量の単位をどう扱うかという問題である。中でも、他の組立単位を作る上で重要な働きをする平面角および立体角の単位、ラジアンおよびステラジアンについては、これらを基本単位とみなすべきだという考えと、組立単位の一つとみなすべきだという考えとの対立が長く続いており、CIPMは今もこの問題の結論は出さないままでおり、つまり基本単位と考えても組立単位と考えてもよい、という態度を保っている。「すべての人々」に使ってもらうには、この両論が併立する必要があるという現実的な判断が大勢を制したわけで、このため現在のSIは無次元量のために第三の階級を設け、これに属するものを補助単位（supplementary units）と呼んでいる。

IV. SI単位の一貫性

これまで慣れ親しんできた単位系からSIに切替える

ことは多くの人にとって大変苦痛である。それをあえて実行するにはSIによほどのメリットがなければならぬが、その最大のものは「1量1単位」の原則に則るSI単位が「一貫性のある coherent」集合を構成していることであろう。単位というところに換算という面倒な、そして間違いやすい手続きが連想されるが、SI単位に関してはこの悩みはない。すなわち、上記の各階級のSI単位はすべて数値係数なしの乗除算の規則で互いに結ばれている。したがって、SI単位だけを使っていることを確かめておけば、どのように複雑な式を計算する場合にも途中換算係数の心配をする必要はなく、最終結果の数値はその次元のSI単位で表わした量を示している。

このようなメリットを十分に活用するには、SIとともに用いる「量の体系」を整備しておく必要があるが、この問題については1955年以来国際標準化機構 (ISO) の第12技術委員会が検討を行っており、すでに、量と単位に関する一連の国際規格を刊行している。わが国では、これに対応する国内規格として JIS Z 8202 (量記号, 単位記号および化学記号)²⁾ および 8203 (国際単位系 (SI) およびその使い方)³⁾ が制定されていて、SI化の指針となっていることはご存じの方も多いであろう。これらの規格においては、SIの基本単位に対応する七つの基本量、長さ、質量、時間、電流、熱力学温度、物理量および光度に基づく物理量の体系を採用し、他の量、つまり組立量は七つの基本量の関数として定義される。すなわち、組立量と基本量との関係は方程式の体系によって表現され、上述のように、SI単位だけが使われている場合にはこれらの方程式は数値係数を含まない。

なお念のために付け加えると、この場合、物理量はつねに「数値×単位」の形で表現される。長さや質量などのような加算的な量については単位の何倍という表現に異論はないとしても、温度のような加算できない量に関してはこの表現に抵抗を感じる向きもあるが、温度 $T = 273 \text{ K}$ という表現は「 T は単位ケルビンの273倍の温度である」ことを意味するという考え方を統一的に採用することによって、初めて上記のような量の体系化のメリットが得られることをご理解いただきたい。もう一つの注意点として、たとえ単位が異なった形で表現されることがあるとしても、それぞれの物理量は唯一つのSI単位をもっている (1量1単位)。しかし、その逆は真ではなく、同じSI単位が多くの異なった物理量に対応することがある。したがって、単位の名称だけでは量を知らせるのに十分ではないので、計測器などに単位だけでなく計測される量の表記も必要である。

V. SI接頭語

現在の科学・技術の多様な発展と分野間の交流は、SIの構想が練られていたところの予想をはるかに上回るもののように思われる。当時いささか理想的すぎると思われた単位系の総合的体系化は、今では現実的な必要性に迫られるものであり、とくにエネルギーと資源に関する科学・技術の総合化において一貫性のあるSIがもたらす利益は極めて大きい。

ところが一方では、従来それぞれの分野において、または特定の共同体において用いられてきた諸単位は、それらの分野ではごく便利で使いやすいものであったのに対して、1量1単位の原則にしばられたSI単位は、目的によっては大きすぎたり小さすぎたりして不便だという例がしばしばある。この問題の解決の一助となりうるのが「SI接頭語」であり、後に述べるようにこれを用いてSI単位の10の整数乗倍の単位を作ることができる。おなじみの cm や km がこの整数乗倍単位の例であるが、これらを使うに当っては上述の一貫および量の体系に関して次の注意が必要である。まず、これら c, k などの記号は10の整数乗の数そのものではなく、新単位を作るための接頭語であること、そして、接頭語付きの新単位は正確にはSI単位ではないということである。常識的にはSI単位といってもよい場合も多いが、一貫性のあるSI単位の集合には属してないことが問題になる場合には、めんどくさくても「SI単位の10の整数乗倍」という正式名称で呼ばなければならない。この場合一つの例外はキログラム (kg) で、従来からの経緯によってこの基本単位には初めからkという接頭語が付いている。この形式上の難点を回避しようと、キログラムの新名称がこれまでに何十も提案されたが、結局のところ改名できないまま現在に至っている。そのせいで、質量の場合だけは接頭語の意味する10の整数乗倍は基本単位に対するものではなく、基本単位の 10^{-3} 倍のグラム (g) に対するものとなっている。

VI. SI基本単位 (表-1)

本稿の主旨からして、ここでは基本単位それぞれの定義や実現方法を説明することは割愛して、最近の改訂や注意点だけを述べることにする。なお、わが国では基本単位の実現は計量法に基づき通商産業大臣が行うことになっており、工業技術院計量研究所および電子技術総合研究所がその実務を担当している。

1. 長さの単位 (メートル)

現行のメートルの定義はクリプトン86の原子が発する

表-1 S I 基本単位

量	名 称	記 号
長	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 量	モ ル	mol
光 度	カ ン デ ラ	cd

光の波長に基づくものであり、それまでの「メートル原器」に基づく定義にかえて1960年に採択された。この定義を実現する精度は約2億分の1であるが、近年のレーザー技術の進歩に伴う測距精度の向上はこの定義の改善を迫るに至った。ちなみに、米国のアポロ宇宙船が月面に設置してきた鏡を利用して月と地球との距離（約40万km）をレーザー光によって測定する実験が行われているが、この測定の分解能はcmの桁である。一方、現行のメートルの定義を実現する際の不確かさはこの場合にはmの桁になるわけで、より厳密な基準がないとせっかくのデータが活きないことになる。この問題をめぐる10年来の議論に最近ようやく結論が出たので、おそらく今年の秋のCGPMにおいてメートルの新定義が採択されることになろう。この新定義案の本質は、光の速さの値を299 792 458 m/sに固定し、これに基づいてメートルを定義するものである。もちろん、現行の定義とは不確かさの範囲内で一致している。

2. 質量の単位（キログラム）

「自然」に準拠した標準を志し、器物による標準から次第に無形の標準へと移行しつつある国際標準の中で、質量の標準だけはメートル条約発効当初（1875年）の姿を保っている。すなわち、キログラムの定義は、パリの郊外セーブルにあるBIPM（ブルトイユ館）の地下3階の保管庫内に鎮座している「国際キログラム原器」の質量なのである。そしてこの定義の値を各国へ伝達し、さらに一般のユーザーへ伝達するのにも、5千年以上の歴史をもつ天秤と分銅という道具が今も使われている。もちろん、近代技術によってその精度は格段に改良され、今では1億分の1の精度で質量標準が伝達されている。一方で、原子や量子現象に基づく質量または力の標準が研究されているが、精度の点でこの古典的方法をしのごようになるにはまだかなりの時日を要しそうである。

3. 時間の単位（秒）

最近の30年ほどの間で精度向上と定義の変遷が最も顕著であったのが時間の標準である。かつて「秒」は平均太陽日の1/86 400と決められ、その定義は天文学者にまかされるべき事柄であった。その後、計時技術の進歩に

よって平均太陽日には地球自転の不整による変動がかなりあることがわかり、1960年には太陽年に基づく秒の定義へと改訂された。ところがこの定義は短寿命であって、1967年には早くも現行の原子周波数に基づく定義へと移行した。平均太陽日による定義のころには 10^{-8} が覚つかなかった精度は今や 10^{-14} に迫ろうとしており、秒は現在あらゆる単位の中で最も精度よく実現されている。

4. 電流の単位（アンペア）

電流と電気抵抗の単位の国際統一は、1893年にシカゴで開かれた国際電気会議によって導入された「国際」電気単位（S Iとは別物）が始まりであるが、これは1948年の第9回CGPMで正式に廃止が決定されて、この時、電流の単位に対して電磁力に基づく現行のアンペアの定義が採択された。この定義方法そのものはS Iのはるか以前からあって、これに基づくものは「絶対」単位と呼ばれていた。上記の「国際」単位との二本立が十数年も続いて不便を生じていたが、1948年に至ってようやく一本化され、これがS I基本単位の一つとして採用された。

5. 熱力学温度の単位（ケルビン）

温度の標準が確固たる学問的基礎をもったのは1854年にケルビンが「熱力学温度目盛」を提案した時と考えられるが、奇しくもそれからちょうど百年後の1954年の第10回CGPMにおいて、彼の提案に基づく方法で「熱力学温度の単位」が定義された。従来、温度の標準については「目盛」という言葉が用いられ、ケルビンの提案以前には二つの「温度定点」の間を規定の方法で分割して「標準目盛」を作るという方法が行われていた。ケルビンは、本質的に定点は一つあればよいこと、および最も合理的な目盛分割方法は熱力学の法則によるものであることを主張した。S I基本単位「ケルビン」は、今や万人が認めるこの主張に基づくものであり、量の体系を整備する上で、目盛ではなく単位概念を用いてその内容を表現している。

なお、温度については今も広く用いられている「セルシウス温度」による表現、つまりケルビン温度から273.15Kを差引いた量で表わす方法とS Iとの関係が実用上重要である。S Iの考え方では、温度と温度差（または温度間隔）とは全く同等の量であり、この両者に対して記号やその使い方を区別しない。現行の定義によれば、温度差を表わす場合には「ケルビン(K)」と「セルシウス度(°C)」とは同等であり、この意味ではセルシウス度もS I単位と考えてよい。しかし、絶対温度を表わす場合には当然両者は基本的に異なるわけだから、正確には、セルシウス度は後述の「S Iと併用する単位」

として分類しておくべきだという主張もある（現在は組立単位の中に記載されている）。要は、使い方に注意して「セルシウス度」も併用しようというのが現在の常識である。

6. 物質量の単位（モル）

質量とは別に「物質量」の単位がどうして必要なのか、とはよくきかれる質問である。この質問に本格的に答えるにはかなりこみ入った話をしなければならないので、ここでは「SI文書」に簡潔に記された経緯を以下に引用して読者のご理解を得たい。なお、計測技術の面から一言付け加えると、分子の数にして何個分という「物理量」は正確に表わさなければならないが、一方、これを直接測定することは容易でないという事情がある。

「化学の基本的な諸法則の発見以来、各種の化学元素または化合物の量を表示するために、たとえば「グラム原子」、「グラム分子」という名称をもつ物質量の単位がか用いられてきた。これらの単位は、相対的な質量にはならない「原子量」、「分子量」に直接結びつけられていた。「原子量」は、初め化学元素としての酸素の原子量（取り決めにより16）に関係づけられた。しかし、物理学者が、質量分析器によって同位元素を分離し、酸素の同位元素の一つに16という値を付与する一方で、化学者は、それ自体天然の酸素である同位元素16, 17, 18の（わずかに変化することのある）混合体に同じ値を与えていた。国際純粋・応用物理学連合（IUPAP）と国際純粋・応用化学連合（IUPAC）との間の合意が、1959—1960年にこの二重性に終止符を打った。その時以来、物理学者と化学者は炭素の同位元素12に12という値を与えることに取り決めた。」

7. 光度の単位（カンデラ）

光度とは、人間の眼に感じる明るさに対応する量であり、「生物学的因子」を含む量であるだけに議論が多く、その標準についてもいろいろと変遷があった。結論からいうと、現行のSI基本単位カンデラ（cd）の定義（1979年、第16回CGPM決議）は、単色光の放射束という物理量だけで決まるものとなっており、単位そのものは生物学的因子を含んでいない。この単位を用いて「明るさ」を合理的に表わすには、人間の眼の波長特性を代表する「比視感度」（関数）を取決めておく必要があるが、国際照明委員会（CIE）によって採用されたこの関数はCIPMによって承認されており、各国で統一的に用いられている。

VI. SI組立単位

組立単位は、乗法と除法の数学記号を用いて基本単位

表-2 基本単位を用いて表現されるSI組立単位の例

量		SI 単 位	
		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	さ	メートル毎秒	m/s
加	速	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波	数	毎メートル	m ⁻¹
密	度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
比	体	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電	流	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁	界	アンペア毎メートル	A/m
（物質量の）	濃	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝	度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²

から作られる代表的表現によって与えられる（表-2の例参照）。幾つかの組立単位には表-3, 3' に示すような固有の名称と記号が与えられており、他の組立単位を表わすためにこれらを用いてもよい（表-4の例参照）。つまり、組立単位は等価である幾つかの形式で表現されてよい。

表-3 固有の名称をもつSI組立単位

量	SI 単 位			
	名 称	記号	他のSI単位による表現	SI基本単位による表現
周	波	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧	力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率、放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
電気量、電荷	クーロン	C		s・A
電位、電圧、起電力	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	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	°C		K
光束	ルーメン	lm		cd・sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² ・cd・sr

表-3' 人の健康保護のために認められた固有の名称をもつSI組立単位

量	SI 単 位			
	名 称	記号	他のSI単位による表現	SI基本単位による表現
（放射性核種の）放射能吸収線量、質量エネルギー分与、カーマ、吸収線量指標	ベクレル	Bq		s ⁻¹
線量当量、線量当量指標	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

VIII. SI補助単位

この階級には表-5 に示す二つの単位が含まれる。上

表-4 固有の名称を用いて表現される S I 組立単位の例

量	S I 単 位		
	名 称	記 号	S I 基本単位による表現
粘 度	パスカル秒	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
比熱, 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
質量エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立法メートル	J/m^3	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立法メートル	C/m^3	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$
モルエントロピー, モル比熱	ジュール毎モル毎ケルビン	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}$
(X線およびγ線) 照射線量	クーロン毎キログラム	C/kg	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
吸収線量率	グレイ毎秒	Cy/s	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$

表-5 S I 補助単位

量	S I 単 位	
	名 称	記 号
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

述のように補助単位の性格に関する議論は未だ結論されていないが, S I を使う上では, 平面角と立体角という量は次元をもたない組立量と考えるのが適当である。これを他の組立単位の表現形式の中で用いても, また用いなくてもよいが, 用いた場合の例が 表-6 に示されている。

表-6 補助単位を用いて表現される S I 組立単位の例

量	S I 単 位	
	名 称	記 号
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
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$

IX. 単位記号の表記と使用に関する規則

第9回 CGPM (1948年) が決めた単位記号の表記に関する一般原則は次のとおりである。

- 1) 単位記号はロマン体 (立体) で印刷され, 一般には小文字である。しかし, 単位の名称が固有名詞に由来する場合は記号の最初の文字は大文字である。
- 2) 単位記号は複数の場合も形を変えない。
- 3) 単位記号にピリオドを付けない。

このほかに, ISO の国際規格は SI 単位記号の使用形

式を統一するために次のように勧告している。

- a) 2 個以上の単位の積は次の形式のうちの一つで表わしてよい。

例 $\text{N} \cdot \text{m}$, N.m または Nm

- b) 組立単位が一つの単位を他の単位で除して作られる場合には, 斜線 (/), 水平の線または負の指数を用いてよい。

例 m/s , $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ または $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

- c) 不明確さを避けるために, 括弧付きで用いるのではない限り同じ行の中で斜線は 1 回だけしか用いてはならない。複雑な場合には, 負の指数か括弧を用いる。

例 $\left\{ \begin{array}{l} \text{m/s}^2 \quad \text{または} \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \\ \text{m} \cdot \text{kg}/(\text{s}^3 \cdot \text{A}) \quad \text{または} \quad \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1} \end{array} \right.$

不適例 $\left\{ \begin{array}{l} \text{m/s/s} \\ \text{m} \cdot \text{kg/s}^3/\text{A} \end{array} \right.$

X. S I 単位の10の整数乗倍

S I 接頭語の名称と記号を 表-7 に示す。このうち, フェムトとアトは1964年に, ペタとエクサは1975年に追加されたものである。

ISO が採択した一般原則を受けて, CIPM は S I 接頭語の使用について次の規則に従うよう勧告している。

- 1) 接頭語の記号はロマン体 (立体) で印刷し, 接頭語の記号と単位記号の間にはスペースを置かない。
- 2) 接頭語の記号と単位記号とを結合して作られた全体は不可分な新記号 (その単位の10の整数乗倍の記

表-7 S I 接頭語

倍数	接頭語	記号	倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E	10^{-1}	デシ	d
10^{15}	ペタ	P	10^{-2}	センチ	c
10^{12}	テラ	T	10^{-3}	ミリ	m
10^9	ギガ	G	10^{-6}	マイクロ	μ
10^6	メガ	M	10^{-9}	ナノ	n
10^3	キロ	k	10^{-12}	ピコ	p
10^2	ヘクト	h	10^{-15}	フェムト	f
10^1	デカ	da	10^{-18}	アト	a

号)を構成し、これに正または負の累乗を行ったり、合成単位記号を作るために他の単位記号と組合せたりすることができる。

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

$$1 \text{ cm}^{-1} = (10^{-2} \text{ m})^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1}$$

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

$$1 \text{ V/cm} = (1 \text{ V}) / (10^{-2} \text{ m}) = 10^2 \text{ V/m}$$

3) 多くの接頭語を並べて作られる合成接頭語を用いてはならない。

$$\text{例 } 1 \text{ nm} \quad \text{不適例 } 1 \text{ m}\mu\text{m}$$

4) 接頭語は決して単独で用いてはならない。

$$\text{例 } 10^6/\text{m}^3 \quad \text{不適例 } \text{M}/\text{m}^3$$

なお、前述のように質量の場合だけは特例的な接頭語の扱いをし、「グラム」という語に接頭語を付けて整数乗倍単位を構成する。

$$\text{例 } 10^{-6} \text{ kg} = 1 \text{ ミリグラム (1 mg)}$$

$$\text{不適例 } 1 \text{ マイクロキログラム (1 }\mu\text{kg)}$$

XI. S I 以外の単位

計量制度は、言語、貨幣制度と並んで社会秩序の基盤をなすものであり、いろいろな意味で社会に深い根をもっている。S Iを統一的に用いることの利益がいかに大きくとも、導入に際して反発や混乱を招くようではかえってマイナスであることも、CIPMや単位諮問委員会(CCU)での議論においてしばしば語られている。そこでCIPMは、S Iへの切換えをできるだけスムーズに行うため、現在慣用されている「S I以外の単位」とS Iとの関係を整理し、次のような分類を行って「S I文書」にそれらの取扱い方を示している。

1. S Iと併用される単位

たとえば時間を表わすのにS I単位の「秒」だけでは極めて不便であることは明らかであり、分、時間、日などは今後も長く社会生活において用いられるであろう。このように、いわば半永久的にS Iと共存し併用される単位として1969年にCIPMが認めたものが表-8に示すものである。このうち、リットルについては最近

(1979年)の変更があるので注釈しておく、従来から用いられてきた記号lは数字の1と混同される危険があるという苦情がしばしばもち込まれるので、異例のことではあるが当分の間lと並んで記号Lをも用いてよいこととした。動向をみた上で将来は一本化することが宿題となっている。

表-8 国際単位系と併用される単位

名称	記号	S I 単位による値
分	min	1 min = 60 s
時	h	1 h = 60 min = 3 600 s
日	d	1 d = 24 h = 86 400 s
度	°	1° = ($\pi/180$) rad
分	'	1' = (1/60)° = ($\pi/10\,800$) rad
秒	"	1" = (1/60)' = ($\pi/648\,000$) rad
リットル	l, L	1 l = 1 dm³ = 10⁻³ m³
トン	t	1 t = 10³ kg

表-8のもののほど一般的ではないが、特殊な分野で役立つS I以外の単位として表-9のものの併用が認められている。S I単位で表現したこれらの単位の値は実験的に求められるべきであり、したがって、厳密には知り得ないし換算できないというのが併用の理由である。

表-9 国際単位系と併用される単位で、S I単位による値が実験的に得られるもの

名称	記号	定義
電子ボルト	eV	(a)
(統一)原子質量単位	u	(b)

(a) 1電子ボルトは、真空中において1ボルトの電位差を横切ることによって電子が得る運動エネルギーである。近似的に $1 \text{ eV} = 1.602\,19 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。

(b) (統一)原子質量単位は、核種 ^{12}C の一つの原子の質量の1/12に等しい。近似的に $1 \text{ u} = 1.660\,57 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。

2. 暫定的に維持される単位

表-10に示されるもので、最も問題の多いカテゴリーである。たまたま筆者に出席の機会が与えられた1978年のCCUにおいてもこのカテゴリーへの出し入れをめぐる議題がたくさんあって、「暫定とはいつまでか?」、「維持とはいかなる意味か?」など基本に帰っての議論が交された。参考までに上記の質問への主な答を示すと、暫定とは、特定の時期までをいうのではなく、(S Iの普及によって)もはや必要でないと考えられる時期まで、また、維持とは、積極的に守るのではなく、フランス語 *maintenir* の原義どおり「手に持っている」に過ぎない。こういうわけで、表-10の単位はこれまで用いられていない分野や国で新たに用いてはならないという注意が付いている。

3. CGS単位

センチメートル、グラムおよび秒を基本単位とする

表-10 国際単位系と共に暫定的に維持される単位

名 称	記 号	S I 単 位 に よ る 値
海 里(a)		1 海里 = 1 852m
ノ ッ ト		1 ノット = 1海里毎時 = (1 852/3 600)m/s
オングストローム	Å	1 Å = 0.1nm = 10 ⁻¹⁰ m
ア - ル(b)	a	1 a = 1 dam ² = 10 ² m ²
ヘ ク タ - ル(b)	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
バ - ン(c)	b	1 b = 100 fm ² = 10 ⁻²⁸ m ²
バ - ル(d)	bar	1 bar = 0.1MPa = 10 ⁵ Pa
ガ ル(e)	cal	1 Gal = 1 cm/s ² = 10 ⁻² m/s ²
キ ュ リ - (f)	ci	1 Ci = 3.7 × 10 ¹⁰ Bq
レントゲン(g)	R	1 R = 2.58 × 10 ⁻⁴ C/kg
ラ ド(h)	rad	1 rad = 1 cGy = 10 ⁻² Gy
レ ム(i)	rem	1 rem = 1 cSv = 10 ⁻² Sv

- (a) 海里は、航海および航空において距離を表わすのに用いられる特別な単位である。
- (b) この単位とその記号は、1879年の国際度量衡委員会により採択された。
- (c) バーンは、核物理学において有効断面積を表わすのに用いられる特別な単位である。
- (d) この単位とその記号は、第9回CGPM (1948年)の決議7 (単位記号の勧告)に含まれている。
- (e) ガルは、測地学および地球物理学において重力加速度を表わすのに用いられる特別な単位である。
- (f) キュリーは、核物理学において放射性核種の放射能を表わすのに用いられる特別な単位である。
- (g) レントゲンは、X線またはγ線の照射線量を表わすのに用いられる特別な単位である。
- (h) ラドは、電離性放射線の吸収線量を表わすのに用いられる特別な単位である。ラドという語がランジンの記号と混同をひき起こすおそれのある場合には、ラドの記号としてrdを用いてもよい。
- (i) レムは、放射線防護の分野で線量当量を表わすのに用いられる特別な単位である。

CGS 単位系はかつて力学の分野で広く用いられ、また、電磁気学の分野でもこの三つの基本単位の関数として諸単位が表されていた。このような CGS 系の単位 (表-11 参照) は、多くの場合 S I とは異なった量の体系をもっているもので、S I と併用するのは一般的には好ましくない、というのが CIPM の判断である。裏がえせば、特殊な分野ではその使用が正当化される場合もありうることを暗に認め、表-11 を設けているともいえる。

表-11 固有の名称をもつ CGS 単位

名 称	記 号	S I 単 位 に よ る 値
エ ル グ	erg	1 erg = 10 ⁻⁷ J
ダ イ ン	dyn	1 dyn = 10 ⁻⁵ N
ポ ア ズ	P	1 P = 1 dyn · s / cm ² = 0.1 Pa · s
ス ト - ク ス	St	1 St = 1 cm ² = 10 ⁻⁴ m ² / s
ガ ウ ス*	Gs, G	1 Gs は 10 ⁻⁴ T に相当する
エルステッド*	Oe	1 Oe は (1000/4π) A/m に相当する
マクスウェル*	Mx	1 Mx は 10 ⁻⁸ Wb に相当する
ス チ ル ブ	sb	1 sb = 1 cd / cm ² = 10 ⁴ cd / m ²
フ ォ ト	ph	1 ph = 10 ⁴ lx

* この単位は、3 元の CGS 「電磁系」に属するものであり、力学的および電気的な諸量に限って言えば、4 元系である国際単位系の対応単位と厳密に比較することはできない。

4. その他の単位

いよいよ最後のカテゴリーにきたわけで、表-12 に例示されているような S I 以外の諸単位は、それらを避けて S I 単位に置換えるのが一般に望ましい、というのが CIPM の判断である。これらの慣用の度合は国により、また分野によりまちまちなので、S I への切換えについて分野間の調整と協調が必要である。わが国では JIS の S I 化などを軸として関係者間で現在その努力がなされている。

表-12 その他の一般的には推奨しがたい単位

名 称	S I 単 位 に よ る 値
フ ェ ル ミ	1 フェルミ = 1 fm = 10 ⁻¹⁵ m
メ - ト ル 系 カ ラ ッ ト	1 メートル系カラット = 200mg = 2 × 10 ⁻⁴ kg
トル (torr)	1 torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧 (atm)	1 atm = 101 325 Pa
重量キログラム (kgf)	1 kgf = 9.806 65 N
カロリ - (cal) *	
ミ ク ロ ン (μ)	1 μ = 1 μm = 10 ⁻⁶ m
X 線 単 位	
ス テ - ル (st)	1 st = 1 m ³
ガ ン マ (γ)	1 γ = 1 nT = 10 ⁻⁹ T
γ	1 γ = 1 μg = 10 ⁻⁹ kg
λ	1 λ = 1 μl = 10 ⁻⁶ l = 10 ⁻⁹ m ³

* 多くのカロリ - が使用されている。
 ーいわゆる「15°C」カロリ - : 1 cal₁₅ = 4.185 5 J (1950年の CI PM が採択した値 (Procès-Verbaux C I P M, 22, 1950, p. 79~80))
 ーいわゆる「I T」(国際表)カロリ - : 1 cal_{IT} = 4.186 8 J (第 5 回国際蒸気性質会議, ロンドン, 1956年)
 ーいわゆる「熱化学」カロリ - : 1 cal_{th} = 4.184 J

XII. む す び

国際的にみて S I の普及は必ずしも速いとはいえないかもしれないが、着実な歩みを示している。S I は既にかんがりの効果を挙げているともいえるが、S I の真価が広範に発揮されるに至るにはまだまだ多くの時日を要するであろう。S I 普及の理想的な形は、教育の過程から浸透し、S I のよさが一般に理解されて、次第に従来単位と置換わってゆくのがよい、とは CCU 議長ドボア氏の見解である。ただし、国や分野によって切換えの時期や方法がばらばらでは困るので、境界を越えてのコミュニケーションを今後強めてゆかなければならない。この一文がそのきっかけになれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 「国際単位系」第4版 (1981年) 日本語版、工業技術院計量研究所訳編、(社)日本計量協会発行 (1982)
- 2) 日本工業規格、JIS Z 8202 (量記号、単位記号および化学記号)、日本規格協会
- 3) 日本工業規格、JIS Z 8203 (国際単位系 (SI) およびその使い方)、日本規格協会

[1983. 3. 18. 受稿]