

■12 群（電子情報通信基礎）－ 6 編（測定）

1 章 測定と基礎標準

■12群 - 6編 - 1章

1-4 単位と次元

(執筆: 中野英俊) [2008年11月受領]

古くはピラミッドの建設で人間のひじから中指の先までの長さを単位とするキュービットが使われたように、単位は様々な社会活動に不可欠であるが、同時に日常生活で意識されることは少ない。ここでは、国際度量衡局 (BIPM) が 2006 年に発行した文書である “The International System of Unit 8th edition” を参照して、現在使用されている単位の体系について説明する¹⁾。当該文書は相当の分量であるため、基本的な情報のみを抽出し平易に整理することとした。なお、産総研計量標準総合センターより、翻訳も出ているため興味のある読者は参考にしていただきたい²⁾。関連して、上記の文書で用いられる用語は国際計量用語集 (VIM) を参照している。VIM も公開されているため、必要に応じて利用できる³⁾。

1-4-1 単位

物理現象を取り扱うときに長さや質量のような量 (quantity) の概念は不可欠であり、単位系を構築する際にも量の関係を起点として考えることが自然である。量の定義は VIM に示されているが³⁾、日常的に使用する物理量という概念で差し支えないであろう。量は値 (value) を持ち、その値は数字 (number) と単位 (unit) の積として関係づけられている。したがって、量と単位は以下の関係式で表現される。

$$\text{量の値 (value)} = \text{数字 (number)} \times \text{単位 (unit)}$$

この意味で、単位は量の基準となる特別な例であり、数字はこの単位に対する量の値の比を表す。例えば速さという量について、25 m/s で示される速さの値は 25 という数字とメートル毎秒 [m/s] という単位で表現される。

単位系を組み立てる際には最初に時間や長さのように、便宜上独立したものとして扱う少数の基本量を選択することが便利である。次に、自然法則や量を定義する方程式などを通じて、その他様々な量を基本量によって表現する。つまり基本量と、基本量によって表現または定義される組立量の二つの類型に分けて整理する。これにより、基本量に関係づけられた単位を基本単位、組立量については組立単位として単位系を構築する。したがって、量の間の関係式が単位の関係式を決めることになる。

さて、組立量は方程式を使って基本量により表記できるため、表現された量 Q の次元は、基本量 A, B, C, \dots の次元のべき乗の積で表記できる。

$$\dim Q = A^\alpha B^\beta C^\gamma \dots \quad (1 \cdot 1)$$

ここで、指数 $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ は、正か負かゼロである小さい整数で次元指数と呼ばれる。組立量の次元が基本量のべき乗の積で表現される関係は、その組立単位が基本単位のべき乗の積で表現される関係と同等である。例えば、距離 x と時間 t を基本量として選択し、速さ v を組立量として表現すると $v = dx/dt$ となる。ここで距離の単位メートルと時間の単位秒が基本単位となり、速さは組立単位であるメートル毎秒の次元をもつ。特別な例として、組立量の次元を与える方程式において、次元指数がすべてゼロとなるような組立量がある。特に同じ種類

の量の比として定義される物理量がそうである。例えば、屈折率や比誘電率が相当し、このような量は無次元、もしくは次元 1 の量と呼ばれる。

1-4-2 国際単位系

国際単位系は 1960 年の第 11 回国際度量衡総会 (CGPM) で、その略称となる SI (International System of Units) と共に採択された。ここでは、国際単位系における基本単位、及び組立単位、並びに非 SI 単位であるが日常生活に不可欠であるため、国際度量衡委員会 (CIPM) で使用を認めている単位について概説する⁴⁾。

SI の基本単位は七つであり、これら基本量は便宜的に独立とみなされているが、例えば長さの基本単位であるメートルの定義が秒を内在するように、いくつかの基本単位の定義は互いに依存している。基本単位の定義は国際度量衡総会によって承認され、最初は 1889 年に定義されたキログラムとメートルであり、新しい例は 1983 年のメートルの再定義である。科学の進歩と共に基本単位の定義も改定され、最近の話題としてこれまで困難であった kg の再定義も検討されている。他方、1-4-1 節で述べたように様々な組立単位は、基本量による代数的な関係に従って、基本単位のべき乗のかたちで表現される。このべき乗の積が 1 以外の係数を伴わないとき、その組立単位は一貫性のある組立単位と呼ばれる。この一貫性のある組立単位と基本単位と合わせて、一貫性のある SI 単位という集合を形成している。表 1・1 に基本単位と一貫性のある組立単位を例示した。

表 1・1 SI 単位の分類と例示 (括弧内の数字は個数)

			量の名称	単位の名称	単位の記号
S I 単 位	SI基本単位	基本単位(7)	長さ	メートル	m
	一貫性のある SI組立単位	基本単位を用いて表 される単位	面積	平方メートル	m ²
		固有の名称と記号を 持つ単位(22)	力	ニュートン	N
		単位の中に固有の名称 と記号を含む単位	力のモーメント	ニュートンメートル	N m
SI接頭語	10進の倍量及び 分量				

平面角の単位であるラジアン [rad] や力の単位であるニュートン [N] のように、頻繁に使用される組立量のなかで、利便性の観点から固有の名称と記号をもつ単位が 22 個ある。ここでラジアンは無次元量の単位であり、SI 単位として 1 をもつとも解釈できる。実際上は単位 1 を用いるよりは固有の記号である rad を用いて表現するほうが都合が良い。また、SI 単位に乗じられる 10 の整数乗倍の名称と記号は SI 接頭語として、10⁻²⁴ [y (ヨクト)] から 10²⁴ [Y (ヨタ)] の範囲で定められている。図 1・1 に、上記の説明を踏まえて SI 単位の全体集合を示す。全体集合は一貫性のある SI 単位と、それに SI 接頭語と組み合わせた単位の集合からなる。一般に、この集合のことを SI 単位と呼ぶ。

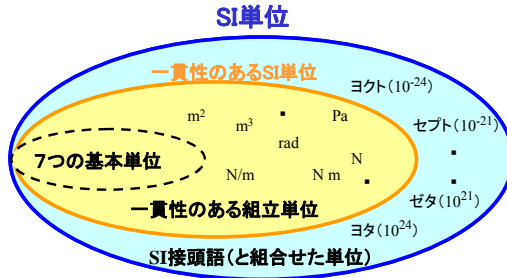


図 1・1 SI 単位の集合

さて、SI 単位以外の単位ではあるが日常的に使用され、実用的に重要であることから今後とも継続的に用いられる単位として、国際度量衡委員会で認められているいくつかの非 SI 単位がある。重要な非 SI 単位の例示を、単位の使用に関する CIPM の見解と共に表 1・2 に示す。原則的には、SI 単位を優先して使用したうえで、SI 単位と非 SI 単位の混在使用はできる限り避けることが望ましいとしている。この中で、SI 単位と併用して使用される非 SI 単位の例として、時間の単位である分 [min] や角度に用いられる度 [°] がある。また、数値が実験的に決定され、不確かさを伴う単位もある。電子ボルト [eV] や真空中の光の速さ [c₀] がこれに相当する。このほかにも、圧力を表すバール [bar] や比の対数であるデシベル [dB]、更に CGS 単位系に属する単位がある。以上の類型までが、非 SI 単位ではあるものの、社会の歴史や文化に深く根ざしているため、今後も使用される単位として位置づけられている。他方、これ以外にも多くの非 SI 単位が使用されている。石油分野で使用されるバレルや長さを表すインチやヤードが代表的である。国際度量衡委員会は、これらの単位は将来の科学や技術の分野において、継続的に使用されることはないと解釈している。現状では、特別な分野や特定の国で使用されていることを踏まえて、SI 単位との関係呼び起こすため国際度量衡局のウェブサイトには換算係数を示している⁵⁾。

表 1・2 非 SI 単位の分類と例示

		量の名称	単位の名称	単位の記号	備考
非 S I 単 位	SI単位と併用される単位	時間	分	min	日常的に、SI単位と併用して使用される
	基礎定数を拠り所とする単位	エネルギー	電子ボルト	eV	法律や特定の科学分野等、特別な状況で今後とも使用される
	その他の単位	圧力	バール	bar	
	CGS単位系	エネルギー	エルグ	erg	
	使用を推奨しない他の単位	長さ	ヤード	yd	

最後に、単位にかかわる国内法制度の観点から計量法と SI 単位のかかわりを紹介する。計量法は時代の要請に応じていくたびかの改正を経ているが、1954 年 (昭和 34 年) に尺貫法からメートル単位系に変わり、1992 年 (平成 4 年) に SI 単位を全面的に採用した。これに

より現在は SI 単位を基に法定計量単位を定めている。この定めによらない非法定計量単位は取引や証明では使用が禁止され、また非法定計量単位を付した計量器の販売も禁止されている。例えば、力の単位として使用されていた重量キログラム [kgf] は、現行の計量法では非法定計量単位となっている。ただし、いくつかの非 SI 単位については経済活動や国民生活での混乱を避けるため、法定計量単位として具体的に定めている⁹⁾。

■参考文献

- 1) 国際度量衡局 (International Bureau of Weights and Measures) : 国際度量衡委員会の事務局であり、研究機能もつ。当該文書は、http://www.bipm.org/en/si/si_brochure/ から入手できる。
- 2) 産業技術総合研究所 計量標準総合センター, “国際文書第 8 版 (2006) 国際単位系 (SI),” 日本規格協会, 2007. (翻訳は <http://www.nmij.jp/library/units/si/> より閲覧できる)
- 3) VIM (International vocabulary of metrology), ISO/IEC GUIDE99, 2007.
<http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html> から入手できる。
- 4) 国際度量衡総会 (CGPM: General Conference on Weights and Measures), メートル条約組織の最高機関, 4 年ごとに開催。
国際度量衡委員会 (CIPM: International Committee for Weights and Measures), 国際度量衡総会の決定事項に関する代執行機関, 事実上の理事機関。
- 5) www.bipm.org/en/si/si_brochure/chapter4/conversion_factors.html.
- 6) SI 単位等普及推進委員会, “新計量法と SI 化の進め方”, 通商産業省, 1999.

■12 群 - 6 編 - 1 章

1-5 トレーサビリティ

(執筆: 中野英俊) [2008 年 11 月 受領]

今日、トレーサビリティは計測の信頼性を確保するうえで不可欠の概念となりつつある。安心の証明や公正な取引を求める社会的な要請が高まるにつれて、トレーサビリティを確立できない計測結果をもって社会を納得させることはますます難しくなっている。また、ナノテクノロジーやエネルギーなどの技術開発においても、トレーサビリティは重要な課題として認識され、同時にそれ自身が研究開発の目的となることもある。ここでは計測の分野で求められるトレーサビリティの概念を、国際文書である国際計量用語集 (VIM) を基に概念の変遷も含めて説明する¹⁾。また、実社会でトレーサビリティを確保するために重要な役割を果たす校正機関の国内体制について説明し、更に校正機関や国家計量機関にとって重要であり共通の目標である計測結果の国際的な同等性について、国際相互承認の観点から説明する。

1-5-1 トレーサビリティ

日常生活の中で、トレーサビリティという用語は計測に限らず使用され、例えば牛肉のトレーサビリティは最も有名になった使用例であろう。ここで扱うのは正確には計量トレーサビリティ (Metrological Traceability) であり、牛肉などのトレーサビリティが、いわば時系列的な履歴管理 (水平方向) の意味で使用されるのに対して、計量トレーサビリティは、順次上位の計量標準によって信頼性が確保されるという階層的な連鎖 (垂直方向) を意味している。これ以降計量トレーサビリティをトレーサビリティとだけ記載する。このトレーサビリティのはじまりは古く、1960 年代に米国で宇宙開発における重要な政策として位置づけられた²⁾。これまで参考にされてきたトレーサビリティの表現は、1993 年に VIM2 で示された内容であり、和訳では「不確かさがすべて表記された、切れ目のない比較の連鎖を通じて、通常は国家標準または国際標準である決められた標準に関連づけられ得る測定結果または標準の値の性質」と表現されている³⁾。この表現は多くの試験所認定機関のトレーサビリティポリシーにも掲載されてきた。

最近になって、明確なトレーサビリティを要求する分野の急速な広がりにより、食品や生化学などの分野での最新の成果と要望を導入する必要性が高まり、また不確かさを中核概念として測定を議論する考えが普及したことも踏まえて、再度トレーサビリティを含めて計量の技術用語が VIM3 で整理された。結果は ISO/IEC Guide 99 として 2007 年 12 月に発行されている。図 1・2 に VIM3 によるトレーサビリティの概念を例示する。トレーサビリティは測定結果の性質であるが、視覚的には計測器の繋がりで表現した方が理解しやすい。VIM2 と VIM3 の違いについては後述する。

次に、これまでの VIM によるトレーサビリティの表現について変遷を概説する。VIM は 1984 年の初版から最近の 2007 年第 3 版まで 20 年以上の開きがある。トレーサビリティの表現も社会情勢や計量技術の進歩により見直されてきた。それぞれの時代の表現を表 1・3 にまとめた。

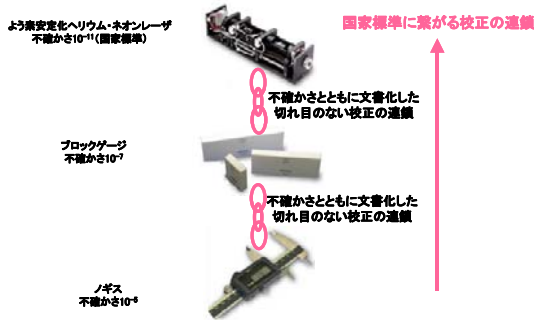


図 1・2 校正の階層とトレーサビリティのイメージ

表 1・3 VIM によるトレーサビリティの表現

改訂版	用語トレーサビリティの表現
VIM1(1984)	property of the result of a measurement whereby it can be related to appropriate standards, generally international or national standards, through an unbroken chain of comparisons.
VIM2(1993)	property of a measurement or the value of a standard whereby it can be related to stated references, usually national or international standards, through an unbroken chain of comparisons all having stated uncertainties.
VIM3(2007)	property of a measurement result whereby the result can be related to a reference through a documented unbroken chain of calibrations, each contributing to the stated measurement uncertainty.

また、表 1・4 に VIM のトレーサビリティ概念の変遷を示す。VIM2 では参照する上位標準は最終的に国家標準、または国際標準に繋がるイメージが読み取れたのに対して、VIM3 では上位標準が“a reference”として多様な標準の集合体となっている。具体的には、計量単位 (measurement unit)、測定手順 (measurement procedure)、測定標準 (measurement standard) が reference を構成する集合であり^{*}、各集合の個別要素が本文中で詳細に説明されている。これまで以上に、広い分野のトレーサビリティを扱うため、トレーサビリティを確保する様々な道筋に考慮した結果が伺える。また、不確かさの概念がある程度普及したことも踏まえて、VIM3 は比較の連鎖から校正の連鎖に変更し、更に本文で校正の用語を改定して不確かさを一層明確に位置づけている。

表 1・4 トレーサビリティ概念の変遷

	VIM1(1984)	VIM2(1993)	VIM3(2007)
定義の対象	測定結果の性質	測定結果又は標準の値の性質	測定結果の性質
上位標準への参照	通常は国家標準、又は国際標準	通常は国家標準、又は国際標準	a reference (多様な reference を VIM 本文で展開)
上位標準との連鎖	切れ目のない比較の連鎖	切れ目のない比較の連鎖	切れ目のない校正の連鎖
連鎖の要件	—	明示された不確かさ	明示された不確かさ

^{*} For this definition, a 'reference' can be a definition of a measurement unit through its practical realization, or a measurement procedure including the measurement unit for a non-ordinal quantity, or a measurement standard.

1-5-2 計量法校正事業者登録制度 (JCSS)

1990年代は加速する経済のグローバル化を背景に、国ごとに異なる技術基準が円滑な国際通商を妨げる障壁であることが認識され、様々な分野で技術基準の国際整合化と国内体制の整備が進められた。前述のトレーサビリティも、その学術的な意義より、むしろ製品やサービスの取引において計測の信頼性を保証する要請から、広範な計測の分野で不可欠の要素として位置づけられるようになった。このような背景から、我が国もトレーサビリティの透明性を格段に向上させる国内体制の整備が緊急の課題となり、1992年に計量法を大幅に改正して校正事業者登録制度 (JCSS : Japan Calibration Service System) を創設した。JCSS の骨子は以下の2点に集約される。

- ① 国の基準として国家計量標準を定め、それを用いて校正すること (jcss 校正証明書の発行)。
- ② 各計量器と国家計量標準を繋ぐ仕組みをつくり、公的に保証すること (JCSS 校正証明書の発行)。

前者の内容のうち、技術的な部分は産業技術総合研究所の計量標準総合センター (NMIJ) が主に担当する。一般のユーザに直接かかわるのは後者の仕組みであり、ここでは主に後者について説明する。

図 1・3 に JCSS の体系を示す。JCSS では校正を業務として行う事業者が国に届けを行う。届け出る先は直接国ではなく、製品評価技術基盤機構 (NITE) の認定センターとなっている。NITE は ISO/IEC 17025 「試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項」を登録審査の基準として用いる。NITE の審査では、申請者が構築した品質システム、校正方法、トレーサビリティの確立手順、設備環境などについて、ISO/IEC 17025 の基準に適合しているか、また定められたとおり品質システムが運営されているかを書類審査・現地審査により審査する。基準に適合して JCSS に登録された校正事業者は、計量法で定められた JCSS 標章を付けた校正証明書を発行できる。この標章により、当該事業者が国の基準として定めた国家計量標準へのトレーサビリティを確保し、更に国際基準に則して適切な校正能力をもつことを公的に示すことができる。従来より、国の標準への繋がりを示すトレーサビリティ体系図などを校正証明書とは別に準備していた事業者もあるが、JCSS 標章があれば体系図は必要ない。

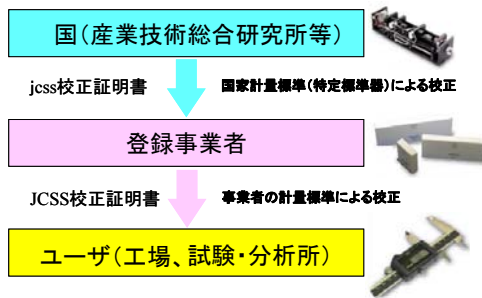


図 1・3 JCSS 制度

ところで、校正事業者の審査を行う機関の審査能力や公正な審査プロセスを保証するメカニズムは、国際通商において他国の校正機関の発行する証明書を受け入れるために、必要不可欠の要素である。このため、審査を行う機関の国際的な組織である国際試験所・校正機関認定協力機構 (ILAC) は相互承認の取り決めを構築し、この取り決めに参加した審査機関は審査 (peer review) により ILAC 基準を満たすことを確認している。同時に、このような信頼性の確保を土台として、ほかの加盟審査機関が認定した試験・校正機関が発行する試験・校正データの受け入れを行っている。この取り決めは計量法の枠外であるため、ILAC 国際相互承認の枠内でも校正証明書を発行したい事業者は、NITE と別の任意契約に基づき、いくつかの附帯的な要件を満足したうえで、ILAC 国際相互承認のシンボルと JCSS 標章の付いた校正証明書を発行できる。

1-5-3 計量標準の同等性

前項の JCSS で、計量法の定める国家計量標準へどるトレーサビリティが確保される道筋を示した。国家計量標準は、大臣が国の基準として定めることになっている。これにより国家計量標準は我が国の最上位の標準であり、トレーサビリティの終着点と位置づけられている。図 1-3 に示すように校正機関により一般ユーザと終着点を結ぶレールの役割が実現され、国内のトレーサビリティ確保の体制は整ったことになる。次に、終着点である国家計量標準の国際的な同等性を確保すれば、国内で確立したトレーサビリティは国際的にも有効であり、世界的に計測の同等性確保が大きく前進する。

さて、計量に関して国際的な取組みが不可欠であることは古くから認識され、1875 年にメートル条約が締結され、我が国も 1885 年に加盟の手続きを行った。これ以来、メートル条約下の活動は計量の同等性を確保する主体となり、単位の統一や基本的な単位であるメートルや秒を定義してきた。一方、これらの定義をどのように実現して供給するか、つまり測定器としての国家計量標準の性能や国家計量標準による校正の品質は各国の責任という考え方も成立する。そもそも最近になるまで、各国の計量機関は他国の標準供給に干渉せず、専ら単位の実現に切確琢磨するか、自国内のユーザを相手として閉じた環境で標準供給を行ってきた。ところが、前述したようなグローバル化により、国家計量標準を巻き込んだ国際的なトレーサビリティ体系を構築する必要性が顕在化してきた。

例えば、紙の輸出入では白色度の基準が異なるため円滑な取引が阻害されたり、海産物の汚染基準や計測法の違いにより輸入国で破棄されたりすることが起こった⁴⁾。また、我が国においても、一時期アメリカ連邦航空局が米国籍の航空機を我が国で整備する際、用いる計測器は米国標準技術研究所 (NIST) にトレーサブルであることを要求した。外国籍の航空機の整備は、国内の航空機にかかわる関係者にとって大きなビジネスであったため、関係者はその対応に追われた⁵⁾。前述の白色度に関しては、関係する国家計量機関での研究により解決に至り、航空機に関しても産総研と NIST の計量標準が同等であることを示し、我が国は免責されることとなった。

さて、このような問題を国家計量機関が個別問題として解決するのは限界があり、多国間で包括的に解決する枠組みが必要とされた。この様な背景からメートル条約に参加する国家計量機関の間で、「国家計量標準と国家計量機関が発行する校正・測定証明書の相互承認の取り決め」(CIPM/MRA) が 1999 年に結ばれた。この協定の目的は二つあり、一つ目は各国の

国家計量機関が管理する国家標準の同等性を確認すること、二つ目は各国の国家計量機関が発行する校正証明書を互いに承認することである。更に、この目的のため国際比較や相互評価などの技術的なエビデンスを効率的に積上げる仕組みを運営し、その結果を国際度量衡局のホームページに公開して周知と透明性を確保する画期的な仕組みが構築された⁶⁾。

実際に国家計量標準の同等性を証明するために、CIPM/MRA では二つの仕組みを導入している。第一は国際比較の実施である。この場合、すべての参加機関に対して逐次的に国際比較を進めることは現実的でない。そのため、図 1・4 に示すように世界の中核的な計量機関がグローバルな国際比較を行い、次にグローバル比較に参加した数機関（リンク機関）を含む地域の比較を実施して、世界全体の国際比較を効率的に進めるスキームが採用されている。この国際比較において、測定の結果が不確かさの範囲で一致していれば、それらの国家標準は互いに同等であると認め合う。一方、これらの国際比較は特定の校正に関するピンポイントの比較であり、各機関が行う様々な標準供給や継続的な供給能力の適格性を十分に立証できるものではない。そこで、第二の仕組みとして各計量機関は自身が行う標準供給の範囲と能力（不確かさ）を宣言し、この宣言に対して他国の専門家が審査を行い信頼感の醸成を図っている。この際、それぞれの機関は各量ごとに ISO/IEC 17025 に基づく品質システムを構築し、分野の専門家は品質システムに則して判断する統一的なルールを採用している。

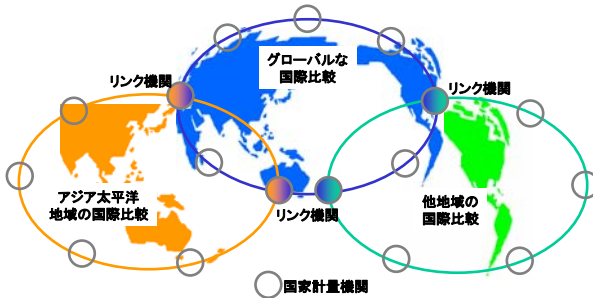


図 1・4 国際比較の仕組み

最後に、前節で述べた校正機関の国際相互承認の枠組みを含めて、計測の同等性を確保する世界の枠組みを図 1・5 に示す。トレーサビリティ体系の各段階で互いの計測に関する信頼を醸成し、他国の校正・試験データを本国でもそのまま受け入れることを可能にする試みである。ところでこれらの相互承認は、あくまで ILA/CMRA や CIPM/MRA に署名した機関が、それぞれの MRA に基づいてデータや校正証明書を受け入れることを意味するものであり、各々の規制当局に対して何らかの拘束力をもつ取り決めではない。国際相互承認の結果をどのように利用するかは規制当局の判断であるが、最近では相互承認を規制当局が利用する場合も散見される。

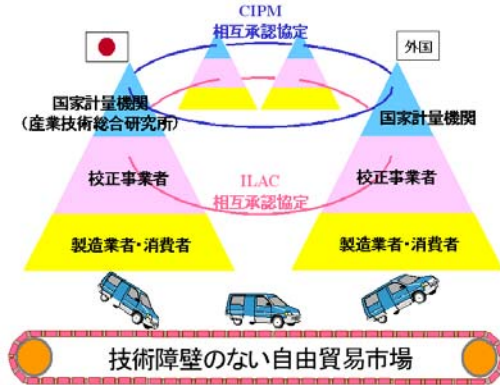


図 1・5 国際相互承認の枠組み

■参考文献

- 1) VIM (International vocabulary of metrology), Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) による国際文書。現在の参加機関は BIPM, IFCC, IEC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML。最新版 (VIM3) は <http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html> から入手できる。
- 2) 通産省機械情報産業局計量行政室, “新計量法の概要,” 第一法規出版, p161, 1994.
- 3) 飯塚幸三 監修, “計測における不確かさの表現のガイド, 付録II,” 日本規格協会, 1996.
- 4) Fiona Redgrave, Andy Henson, Diane Beauvais, “METROLOGY FOR IMPROVED MEASUREMENTS IN INTERNATIONAL REGULATION AND TRADE,” Proceedings, XVII IMEKO World Congress, pp.1581-1584, 2003.
- 5) 社会を支える計量標準, AIST Today, vol.10, 2004.
- 6) BIPM HP, The BIPM key comparison database, <http://kcdb.bipm.org/>.

■12 群 - 6 編 - 1 章

1-6 基礎標準とその実現方法

1-6-1 長さ

(執筆: 洪 鋒雷) [2009 年 1 月 受領]

1983 年の第 17 回国際度量衡総会において、「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」と再定義された。長さの単位「メートル」は光の速さ (c) という基礎物理定数によって定義され、時間の単位「秒」の定義と結びつくようになった。このメートル定義の改訂に伴い、国際度量衡委員会 (CIPM) はメートルの定義を実際に実現するために、以下の 3 通りのいずれかによることを勧告した。

- ① 距離 $= ct$ の関係から、時間 t を測定する方法
- ② $\lambda = c/f$ の関係から、周波数 f を測定する方法
- ③ CIPM 勧告の周波数安定化レーザを用いる方法

現在の GPS ナビゲーションシステムでは、①の方法を利用している。精密機械産業などでは②及び③の方法によって、安定化レーザの真空波長を基に干渉測定により精密な長さを測定している。真空波長を求めるために光周波数計測を行う必要があるが、そのための装置が非常に複雑で干渉測定のためごとに光周波数計測をすることは現実的ではなかった。そこで、実用的なメートル定義の実現方法として、③の CIPM 勧告の周波数安定化レーザを用いる方法があげられている。表 1・5 に、最新版の CIPM 勧告安定化レーザリストを示す。メートルの定義を所掌する産業技術総合研究所では、ヨウ素安定化 He-Ne レーザ、ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザ及びアセチレン安定化レーザなどの CIPM 勧告レーザの研究・開発を行っている¹⁾。

表 1・5 CIPM 勧告の周波数安定化レーザ (2007 年)

波長	レーザ及び安定化基準	周波数	不確かさ
237 nm	$^{115}\text{In}^+, 5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^3P_0$	1267402452899.92 kHz	3.6×10^{-13}
243 nm	$^1\text{H}, 1S-2S, 2$ 光子遷移	1233030706593.55 kHz	2.0×10^{-13}
282 nm	$^{199}\text{Hg}^+, 5d^{10}6s^2S^{1/2} - 5d^96s^2D_{3/2} (F=2) \Delta m_F=0$	1064721609899145 Hz	3×10^{-15}
436 nm	$^{171}\text{Yb}^+, 6s^2S_{1/2} - 5d^2D_{3/2} (F=2, m_F=0)$	688358979309308 Hz	9×10^{-15}
467 nm	$^{171}\text{Yb}^+, ^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) - ^2F_{7/2} (F=3, m_F=0)$	642121496772.3 kHz	1.6×10^{-12}
532 nm	Nd:YAG レーザ, $^{127}\text{I}_2, R(56)32-0:a_{10}$	563260223513 kHz	8.9×10^{-12}
543 nm	He-Ne レーザ, $^{127}\text{I}_2, R(106)28-0:b_{10}$	551580162400 kHz	4.5×10^{-11}
633 nm	He-Ne レーザ, $^{127}\text{I}_2, R(127)11-5:a_{16}$	473612353604 kHz	2.1×10^{-11}
657 nm	$^{40}\text{Ca}, ^1S_0 - ^3P_1, \Delta m_J = 0$	455986240494140 Hz	1.8×10^{-14}
674 nm	$^{88}\text{Sr}^+, S^2S_{1/2} - 4^2D_{5/2}$	444779044095484 Hz	7×10^{-15}
698 nm	$^{87}\text{Sr}, ^1S_0 - ^3P_0$	429228004229877 Hz	1.5×10^{-14}
778 nm	$^{85}\text{Rb}, 5S_{1/2} (F=3) - 5D_{5/2} (F=5), 2$ 光子遷移	385285142375 kHz	1.3×10^{-11}
1.54 μm	$^{13}\text{C}_2\text{H}_2, P(16)(v_1 + v_3)$	194369569384 kHz	2.6×10^{-11}
3.39 μm	He-Ne レーザ, $\text{CH}_4, v_3, P(7), F_2^{(2)}$, 分解された超微細構造の中央成分(7-6)	88376181600.18 kHz	3×10^{-12}

②の光周波数計測の方法においては、1999 年ごろから、ドイツ²⁾とアメリカ³⁾のグループがモード同期超短パルスレーザーによる「光コム」を用いた光周波数の絶対測定を実証し、この分野で極めて大きな技術革新を起こした。「光コム」の誕生による光周波数計測の発展は、更に光周波数標準の研究にも大きな弾みをつけている⁴⁾。今では、「光コム」は市販され、安定化レーザーの周波数計測はかなり容易になってきている。

■参考文献

- 1) 洪鋒雷, 石川純, 大苗敦, “標準用安定化レーザーの現状と将来,” 光学, vol.31, no.2, pp.856-863, 2002.
- 2) Th. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T.W. Hänsch, “Absolute optical frequency measurement of the Cesium D1 line with a mode-locked laser,” Phys. Rev. Lett., vol.82, pp.3568-3571, 1999.
- 3) D.J. Jones, S.A. Diddams, J.K. Ranka, A. Stentz, R.S. Windeler, J.L. Hall, and S.T. Cundiff, “Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis,” Science, vol.288, pp.635-639, 2000.
- 4) 洪鋒雷, “光コムによる光周波数メトロロジー,” 光学, vol.36, no.2, pp.60-67, 2007.

1-6-2 質量

(執筆者:水島茂喜) [2008年11月受領]

質量の単位「キログラム」は、1889年の第1回国際度量衡総会において国際キログラム原器の質量として定義され、1世紀以上経った現在まで変わらず続いている。国際キログラム原器は、白金90%、イリジウム10%の鍛造合金から削り出された、直径と高さが共に約39mmの円柱で、パリ郊外の国際度量衡局において厳重に保管されている。質量の単位「キログラム」は、国際単位系の七つの基本単位のうち、現在も人工物によって定義されている唯一の基本単位である。

メートル条約加盟国には、国際キログラム原器との質量比較によって値付けされた同材料・同形状の原器が配布され、各国キログラム原器として利用されている。日本には日本国キログラム原器 No.6 を含む3個の原器が配布され、現在、産業技術総合研究所 (AIST) に保管されている。産業技術総合研究所では、これらの原器を用いて、実用分銅であるステンレス鋼製の1kg分銅の質量校正を行っている。更に、分量・倍量によって1mgから5000kgまでのステンレス鋼製分銅が校正され、質量の国家計量標準が設定されている。一般ユーザは、計量法校正事業者認定制度 (JCSS) で認定された校正機関 (認定事業者) によって、1mgから1000kgまでの標準分銅の校正サービスを受けることができる (2008年8月末時点)。こうした認定事業者による校正サービスは、国家計量標準にトレーサブルであることが証明されている。

質量標準の実現には、天秤を用いた置換秤量法が利用される。置換秤量法では、名目質量が等しい参照分銅と試験分銅が、同一の秤量皿に交互に載せられ、微小な天秤の表示差が計測される。秤量は繰り返し行われ、天秤の表示におけるドリフトの影響は取り除かれる。秤量に必要な天秤の感度は、既知の質量をもった分銅を用いて決定される。試験分銅の質量は、参照分銅の質量に参照分銅と試験分銅の間の測定された質量差を加えることで得られる。この質量差は、秤量差、空気浮力補正、重心高さ補正の和で与えられる。空気浮力補正に必要な空気密度は、通常、圧力、温度、湿度、二酸化炭素濃度の計測値からCIPM式によって計算される¹⁾。

前述したように、質量の単位「キログラム」の定義を国際キログラム原器という人工物に

頼っているため、質量標準には表面の汚染や破損による変化という問題が残されている。こうした問題の解決のため、国際キログラム原器の質量をアボガドロ定数やプランク定数に関係付けて再定義しようとする実験が続けられている。この再定義の実現には 2×10^{-8} の相対標準不確かさの達成が必要であると考えられている。

■参考文献

- 1) A Picard, et al., "Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)," *Metrologia*, vol.45, pp.149-155, 2008.

1-6-3 時間

(執筆者：今江理人) [2009年9月 受領]

(1) 秒の定義と一次周波数標準器

時間周波数標準は、最も不確かさの小さい分野であるとともに、ほかの標準と様々なかたちで関係し、ほとんどの組立量に関与している最も基本的な標準である。

20世紀中頃までは、1秒の定義は、地球の自転速度(1日の長さ)や地球が太陽の周りを回る公転周期(1年の長さ)に基づいた天文時で定義づけられていた¹⁾。一方、量子論に基づいた原子標準の目覚ましい発展に伴い、1967年の国際度量衡総会(CGPM)において、「セシウム133原子の基底状態の二つの超微細準位間の遷移に対応する放射の9 192 631 770周期の継続時間」と規定された²⁻³⁾。

同定義の物理的実現のため、各国の計量標準研究機関などで一次周波数標準器の研究開発が現在にいたるまで続けられ、ほぼ10年に1桁の割合で不確かさ向上が図られてきている。標準器のタイプも、

- ① 原子ビーム型—磁石による準位選別方式
- ② 原子ビーム型—光ポンピング及び光検出方式
- ③ 原子線型

と変遷し、①の方式では、 1×10^{-13} 程度、②の方式で、 1×10^{-14} 程度、③の方式で 1×10^{-15} 程度の不確かさのものが実現されている。最近では③の方式の原子線型が主力となっており、更なる不確かさ向上に向けた努力がなされている⁴⁻⁵⁾。

一次周波数標準器を完成させ、BIPM(国際度量衡局)が決定するTAI(国際原子時)に寄与している機関は、米国(NIST)、フランス(SYLTE)、ドイツ(PTB)、イタリア(InRim)、英国(NPL)、日本(NMIJ/AIST, NICT)、韓国(KRISS)の8機関で、不定期に実施される各機関での評価結果が、BIPMへ報告され、次項で記すTAI生成のための周波数調整に利用される。

(2) 時間周波数標準の国際的枠組み⁶⁾

時間周波数標準は、不確かさが小さいと同時にその変動が時々刻々高精度に測定できるという特徴を有している。また、時間周波数標準は、日常生活の基準である時刻と密接に関連しており、時刻の基準が時間・周波数の基準として用いられる。このため、時刻が連続して途切れのなく安定に生成するための国際的な枠組みが構成され運用されている。

図1-6にその枠組みを記すが、各国の標準研究機関で連続的に運用されている商用セシウム原子時計や水素メーザ型周波数標準器と各機関で維持されているUTC(k)との相互比較結

果(図中で clock data と記したもの)が毎月月初めに各機関から BIPM へ報告される。それに加えて各標準機関の UTC(k)の機関間の相互比較結果あるいはそのための基礎データが BIPM に報告され、BIPM ではこれらのデータを用いてすべての原子時計相互間の比較データを準備する。この比較データを各原子時計の性能に応じた重みをつけて平均した時系(フリータイムスケール EAL と称される)が計算され、この EAL に前項で記した一次周波数標準器の評価結果を用いて周波数調整を行い、最終的な TAI を算出され、この TAI にうるう秒調整がなされたものが協定世界時(UTC)である。

その結果はBIPMより Circular-T と呼ばれるレポートで毎月1回前月分の結果が報告される。

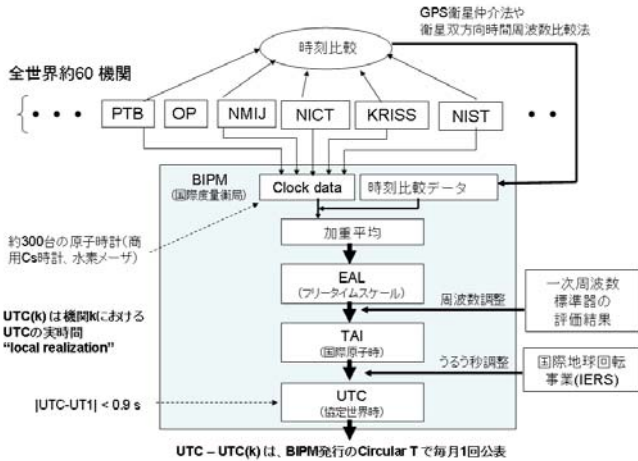


図 1・6 TAI, UTC 決定の仕組み

同レポートには、各国の計量標準研究機関で維持決定されている UTC(k)と UTC との差の情報、一次周波数標準器の評価結果等が掲載される。

UTC(k)は、通常実時間で商用セシウム原子時計や水素メーザ型周波数標準器を原振として生成され、各国の標準時の基準として用いられ、また、時間周波数分野の校正サービスの原振として産業界などに提供される。

(3) 秒の定義の変更に向けた動向

1967年の国際度量衡総会において(1)項で記した秒の定義がなされて40年程度を経過している。その間にセシウム一次周波数標準器の性能向上は目覚ましいが、光周波数領域における周波数標準器の開発の進展度は、マイクロ波帯の標準を凌ぐ早さで進められており、また、フェムト秒コムによるマイクロ波帯と光周波数帯のリンクが高精度で可能になったことなどに基づき、国際度量衡委員会(CIPM)傘下の時間周波数諮問委員会(CCTF)並びに長さ諮問委員会(CCL)は、SI単位の秒の定義を所掌している時間周波数諮問委員会の下に「秒の二次表現」共同作業部会を設置し、秒の再定義を視野に入れて、検討を開始している。

■参考文献

- 1) 青木信仰, “時と暦,” 京大出版会, 1982.
- 2) 第13回CGPM決議1, 1967.
- 3) BIPM 編, “SI brochure - 8th Edition,” 2006.
- 4) Michael A. Lombardi, Thomas P. Heavner and Steven R. Jefferts, “NIST Primary Frequency Standards and the Realization of the SI Second,” the Journal of Measurement Science, vol.2, no.4, pp.74-89, 2007.
- 5) F. Riehle, “Frequency Standards,” Wiley-VCH, 2004.
- 6) Guinot B., Arias E.F., “Atomic time-keeping from 1955 to the present,” Metrologia, vol.42, no.3, 2005.

1-6-4 温度

(執筆: 田村 收) [2011年4月受領]

(1) 熱力学温度の単位¹⁾

国際単位系において熱力学温度 T の単位ケルビン (記号は K) は, 水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ 倍と定義されている. セルシウス温度 t の単位はセルシウス度 (記号は $^{\circ}\text{C}$) であり, t は $t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15$ により定義される.

(2) 一次温度計と二次温度計

一次温度計は, ほかの温度計による T の測定結果に依存せずに T を測定できる. ある物理量と T の関係 (温度特性) が物理法則から十分な精度で分かる場合, その物理量を測れば一次温度計になる. 気体温度計, 放射温度計, 雑音温度計などがある. 二次温度計 (一次温度計以外の温度計) も, 温度特性が, ほかの温度計による T の測定値から求まれば, 正確な温度測定に使える. 二次温度計には, 蒸気圧温度計のように, 同一種の温度計間で温度特性の差 (個体差) が小さく温度計を個々に校正する必要がないものと, 抵抗温度計・熱電温度計のように, 個体差が大きく正確な温度測定のためには個々の温度計の校正が必要なものがある.

(3) 温度の定点

温度の再現性が良い熱平衡状態で, 温度の単位の定義や温度計の校正などのために, 温度の基準として用いるものを温度の定点と呼ぶ. 三重点や凝固点などの純物質の相転移点がよく用いられる. 超伝導転移点や超流動転移点, 金属と炭素の共晶点なども利用されている.

(4) 温度の標準

ケルビンの定義に基づく温度標準の実現方法を記した国際文書 *Mise en pratique for the definition of the kelvin (MeP-K)*²⁾ には, 1990年国際温度目盛と $0.9\text{ mK} \sim 1\text{ K}$ 暫定低温度目盛が挙げられている. 両目盛は, 特定の種類の温度計の温度特性を表す数式により定義され, その温度特性は, 一次温度計による T の測定値に基づき国際的に合意されたものである. とともに, 定義に用いる温度計の個体差・再現性や根拠となった T の測定値の不確かさを合成して得られる不確かさ程度で T に一致し, 再現性・分解能は一次温度計より良いと期待できる.

(5) 1990年国際温度目盛 (ITS-90)³⁾

T と t の近似としてそれぞれ国際ケルビン温度 T_{90} と国際セルシウス温度 t_{90} を定義し, $t_{90}/^{\circ}\text{C} = T_{90}/\text{K} - 273.15$ である. T_{90} は, 次の各温度範囲でその右に記す物理量との間の関係式により定義される. 蒸気圧温度計以外は定点で校正して関係式の中の係数を定める.

0.65 K~3.2 K:	ヘリウム3の蒸気圧 (蒸気圧温度計)
1.25 K~5 K:	ヘリウム4の蒸気圧 (蒸気圧温度計)
3 K~24.5561 K:	ヘリウム3またはヘリウム4の定積気体温度計の気体の圧力
13.8033 K~961.78 °C:	特定の条件 ³⁾ をみたす白金抵抗温度計の抵抗
961.78 °C 以上:	ある波長での黒体放射の分光放射輝度 (放射温度計)

気体温度計と放射温度計は一次温度計としても使えるが、ITS-90では定点で校正してそれぞれ内挿計器と外挿計器として用い、測定手順が軽減されている。蒸気圧温度計や白金抵抗温度計が用いられている理由は、一次温度計よりも測定手順が簡単で再現性・分解能が良いためであるが、白金抵抗温度計は個体差の影響を低減するために定点で校正する必要がある。校正に使う定点は、気体温度計は表1・6の番号1, 2, 5の3点、白金抵抗温度計は温度範囲に応じて2~15の中から2~8点、放射温度計は15~17の中の1点である。番号が3と4の定点は2通りの実現方法がある。

表1・6 ITS-90の定義定点³⁾

e-H₂は平衡水素を表す。状態の欄のVは蒸気圧により決まる定点、Gは気体温度計により決まる定点、Tは三重点、Fは101325 Paでの凝固点、Mは101325 Paでの融解点を表す。

番号	物質	状態	T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}C$
1	³ He または ⁴ He	V	3 ~ 5	-270.15 ~ -268.15
2	e-H ₂	T	13.8033	-259.3467
3	e-H ₂	V	≈17	≈-256.15
	または ³ He または ⁴ He	G	≈17	≈-256.15
4	e-H ₂	V	≈20.3	≈-252.85
	または ³ He または ⁴ He	G	≈20.3	≈-252.85
5	Ne	T	24.5561	-248.5939
6	O ₂	T	54.3584	-218.7916
7	Ar	T	83.8058	-189.3442
8	Hg	T	234.3156	-38.8344
9	H ₂ O	T	273.16	0.01
10	Ga	M	302.9146	29.7646
11	In	F	429.7485	156.5985
12	Sn	F	505.078	231.928
13	Zn	F	692.677	419.527
14	Al	F	933.473	660.323
15	Ag	F	1234.93	961.78
16	Au	F	1337.33	1064.18
17	Cu	F	1357.77	1084.62

(6) 0.9 mK~1 K 暫定低温度目盛 (PLTS-2000) ⁴⁾

0.9 mK~1 K の温度範囲で、ヘリウム 3 の融解圧 (固相と液相の熱平衡状態の圧力) と温度の関係式により定義されている。

(7) ケルビンの定義と温度標準の国際的動向

次の二つの改訂に向けて動きつつある。光速の値を定義してメートルを定義したように、ボルツマン定数の値を定義してケルビンを定義すること ⁵⁾。ITS-90 と PLTS-2000 だけでなく、 $T-T_{90}$ とその不確かさのデータ、及び一次温度計による T の測定も *MeP-K* に記載すること ⁶⁾。

■参考文献

- 1) 産業技術総合研究所計量標準総合センター訳編, “熱力学温度の単位 (ケルビン)” in 国際文書第 8 版 (2006) 国際単位系(SI), 日本規格協会, pp. 24-25, 2007.
- 2) Consultative Committee for Thermometry, *Mise en pratique for the definition of the kelvin*, International Bureau of Weights and Measures, 2006, http://www.bipm.org/utills/en/pdf/MeP_K.pdf
- 3) 計量研究所, “1990 年国際温度目盛(ITS-90)[日本語訳],” 計量研究所報告, vol.40, no.4, pp.308-317, 1991. 及び 櫻井弘久, 田村収, 新井優, “1990 年国際温度目盛に関する補足情報,” 計量研究所報告, vol.41, no.4, p.358, 1992, <http://www.nmij.jp/~nmijclub/ondo/download/its-90/ITS-90J.pdf>
- 4) 島崎毅, “低温標準における最近の動向-暫定低温度目盛 PLTS-2000 について-,” 計測と制御, vol.42, no.11, pp.894-899, 2003.
- 5) J. Fischer *et al.*, “Preparative Steps Towards the New Definition of the Kelvin in Terms of the Boltzmann Constant,” *Int. J. Thermophys.*, vol.28, no.6, pp.1753-1765, 2007.
- 6) D.C. Ripple *et al.*, “The Roles of the *Mise en Pratique* for the Definition of the Kelvin,” *Int. J. Thermophys.*, vol.31, no.8-9, pp.1795-1808, 2010.

1-6-5 電気

(1) ジョセフソン電圧標準

(執筆者: 浦野千春) [2008 年 9 月 受領]

ジョセフソン効果は 1962 年に Josephson によって予言され、その後、実験的に検証された。二つの超伝導体を超伝導性の弱い領域で結合した素子をジョセフソン接合と呼ぶ。図 1・7 はジョセフソン接合アレーの構造を模式的に示したものである。超伝導体でできた上部電極と下部電極、及び弱結合領域がトンネル接合を形成している。弱結合領域の部分は絶縁体や常伝導金属が用いられる。現在、国家標準として用いられている電圧標準素子の場合、上部・下部電極はニオブ (Nb)、弱結合領域は酸化アルミ膜 (Al_2O_3) が用いられている。「絶縁層」と書かれた部分の厚さは通常数百ナノメートルであり弱結合領域の厚さと比較して一桁程度大きくこの層を介したトンネル電流は無視できる。ジョセフソン電圧標準素子の出力電圧の大きさはジョセフソン接合の数に比例するため、複数のジョセフソン接合を図 1・7 に示すように直列に接続している。

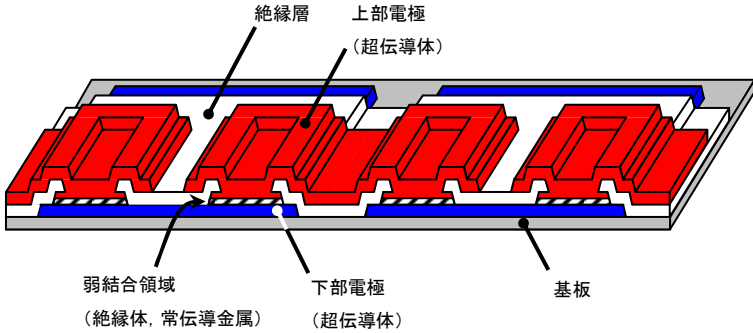


図 1・7 ジョセフソン電圧標準素子の構造の模式図 (断面を含む)
高周波導入に必要なグラウンド部分は省略されている。

ジョセフソン接合に周波数 f の電磁波を照射すると、電流—電圧特性には次式で表される間隔で量子化電圧ステップが発生する。

$$V_n = n(h/2e)f \quad (1 \cdot 2)$$

ここで、 h はプランク定数、 e は電子の素電荷である。 n は整数であり、ジョセフソン接合の直流バイアス電流を制御することによって選択することが可能である。周波数 f の不確かさは極めて小さいので、この関係を電圧標準に利用することができる。この関係式は、ジョセフソン接合に用いられる材料、ジョセフソン接合の形状といった、構造上の条件にかかわらず成立する。また、温度、圧力、実験を行う場所、時刻といった実験の条件にも依存しない。

式(1・2)において $(2e/h)$ はジョセフソン定数 K_J と呼ばれる。式(1・2)からジョセフソン電圧標準素子の出力電圧を計算する際には、1988 年に CIPM (Comité International des Poids et Mesures) によって勧告されたジョセフソン定数の協定値

$$K_{J,90} = 483597.9 \text{ GHz/V}$$

が 1990 年 1 月 1 日以来利用されている。この値は CODATA (Committee on Data for Science and Technology, International Council of Scientific Unions, 国際科学連合会議, 科学技術データ委員会の略称) によって調整される基礎物理定数から計算されるジョセフソン定数と異なる値であることに注意が必要である。

(2) 量子抵抗標準

(執筆者: 金子晋久) [2008 年 11 月 受領]

電気抵抗は量子ホール効果により量子力学的に決定される。量子ホール効果は 2 次元電子気体に垂直に磁場を印加したとき、ホール抵抗が量子化される現象である。量子化ホール抵抗素子の概略図を図 1・8 に示す。2 次元電子気体の電子のエネルギー状態は、磁場によりランダウ分裂し、そのホール抵抗は、

$$R_{\text{QHR}} = \frac{R_K}{i}$$

$$R_K = \frac{h}{e^2} \approx 25812.8 \Omega$$

のかたちで量子化される。つまり量子化抵抗は理論的にはプランク定数 h と電気素量 (素電荷) e で表現できる。ここで、 i はフィリングファクタでホール抵抗が量子化される場合、自然数である。また、 R_K はこの現象を 1980 年に発表した発見者の名にちなみ、フォン・クリッツィング定数と呼ばれており、多くの理論、実験でその値が h/e^2 を示すことが確かめられている。現在一次標準を実現するために、2 次元電子気体として急峻な電子井戸構造をもつ GaAs/AlGaAs などの半導体ヘテロ構造の界面に 2 次元的に束縛された電子気体を用いるのが通例である。この量子化抵抗のユニバーサル性は、理想的な 2 次元電子系を形成できると国際的に認められた品質以上の試料、及び測定手法を用いる限りにおいて、試料の材料、大きさ、電子易動度、占有率、測定場所、測定時間などに依存せず、 10^{-10} レベル以下の整合性が確認されている。実際の量子ホール素子のホール抵抗の磁場依存性を図 1・9 に示す。標準供給には $i=2$ の、プラトーと呼ばれる量子化されたホール抵抗の平坦部分の中央の値を用いる。校正対象器物は温度安定性に優れ、経年変化の小さな標準抵抗器である。このような抵抗器に対し量子化ホール抵抗を基準に直流電流比較器や極低温電流比較器 (超伝導電流比較器) を用いて校正が行われる。ここで、科学技術データ委員会 (CODATA) により発表された基礎物理定数の推奨値に基づいたフォン・クリッツィング定数を用いた場合、CODATA の発表のたびに基準となる値と不確かさが変化する。量子ホール効果の高い普遍性を電気の分野で最大限に利用するため、校正業務には 1988 年に国際度量衡総会によって勧告されたフォン・クリッツィング定数の不確かさのない協定値、

$$R_{K-90} = 25812.807 \Omega$$

が 1990 年 1 月 1 日以来利用されている。つまり通常の校正の結果は厳密には SI トレーサブルとはなっていないことに注意が必要である。

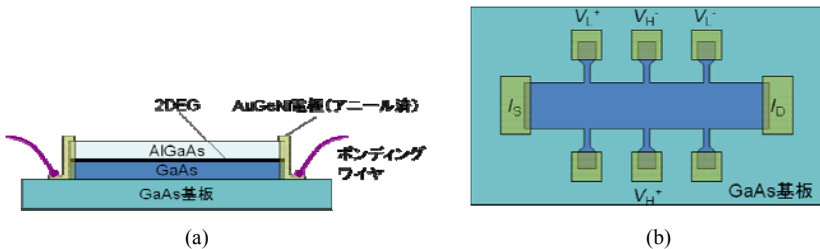


図 1・8 量子化ホール抵抗素子の断面(a)及び上面から(b)の概略図

GaAs 基板上にエピタキシャル成長させた GaAs/AlGaAs ヘテロ構造のヘテロ接合界面に生ずる 2 次元電子気体 (2DEG) を利用する。ホールバーの形状はウエットエッチングで形成する。通常数百マイクロメートル×数ミリメートルの大きさのホールバーを用いることが多い。2DEG 層へのオーミックコンタクトは AuGeNi 合金をコンタクト部分に蒸着しそれをアニール処理することで得られる。量子ホール効果は I_S 、 I_D 間に電流を流したとき、その電流と V_{H+} と V_{H-} の間に現れるホール電圧の比つまりホール抵抗がある磁場範囲で量子化される (一定になる) 現象である。同時に V_{L+} と V_{L-} の 4 端子抵抗 (縦抵抗) は無散逸状態となりほぼゼロの値を示す (図 1・8 参照)。

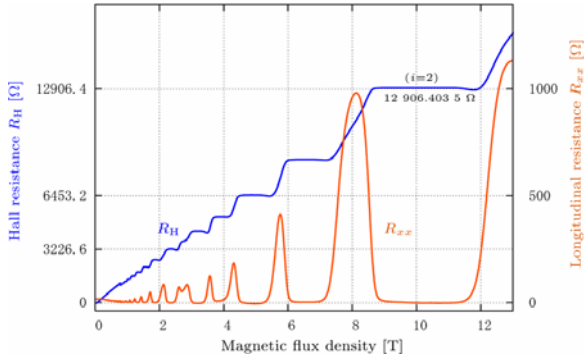


図 1・9 量子ホール効果素子のホール抵抗と縦抵抗の磁場依存性

この素子では 10 T 付近に現れる $i=2$ のプラトー中心の量子化ホール抵抗を用いて直流の一次標準が実現される。赤線は縦抵抗を示す。

1-6-6 光度

(執筆者：市野善朗) [2009年12月 受領]

現在の光度の単位カンデラ [cd] の定義は「周波数 540×10^{12} Hz の単色放射を放出し、所定の方向におけるその放射強度 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」とされている。すなわち光度は、電気（電力）の単位であるワットを源流にもつ量であり、国際照明委員会（CIE）が定めた明所視における人間の眼の分光感度に基づいた分光視感効率 $V(\lambda)$ によって重み付けられた測光量である（本編 4 章 4-1 節参照）。したがって光度単位を実現するためには、電力 [W] に基づいて光パワー [W] を決定するためのコンバータと、 $V(\lambda)$ によく近似した感度特性を持つ光検出器が必要である。

電力置換型放射計は、入射光を高効率に吸収する黒色の受光部と温度測定素子、電熱用抵抗体から構成される光パワー測定装置であり、入射した光が受光部に吸収されることによる温度上昇と、抵抗体に通電した際に発生するジュール熱による温度上昇とを精密比較し、これらが等しくなるよう印加電力 [W] を調整することにより、入射光パワー [W] を求める仕組みをもつ。この電力と光パワーの置換等価性を確保するためには、入射光に対する受光部の吸収率を限りなく 1 に近づけることと、発生した熱を損失しないよう、電力置換部を熱的に絶縁することが必要である。受光部の吸収率は、低反射率の黒色塗装面または金属黒化処理面によってキャビティ構造とし、一次入射面の反射光をも筒状部で吸収させることによって、可視域においてほぼ 1 とすることができる。そこで産業技術総合研究所を含む各国標準研究機関においては、このキャビティ型電力置換ユニットを極低温 (10 K 以下、通常 2~5 K) に冷却し、超伝導配線材を併用することにより極めて高い置換等価性を実現する電力置換型放射計が運用されている。なおこの装置は内部を真空に保つ必要があるため、透明入射窓を有しているが、この窓材の透過率を補正係数として考慮する必要がある。

電球などの光源の光度 [cd] は、逆二乗則の関係（本編 4 章 4-1-3 節参照）を用いて照度応答度 [A/lx] 既知の分光視感効率近似受光器の出力値 [A] と測光距離 [m] とから求めら

れる。照度応答度 $s_v(T)$ は、分布温度 T [K] のプランク分布 $P(\lambda, T)$ を示す光源に対して、最大視感度 K_m ($= 683 \text{ lm/W}$) を用いて以下の式で定義される。

$$s_v(T) = \frac{A \times \int_{360\text{nm}}^{830\text{nm}} P(\lambda, T) s(\lambda) d\lambda}{K_m \times \int_{360\text{nm}}^{830\text{nm}} P(\lambda, T) V(\lambda) d\lambda}$$

すなわち、照度応答度は、受光器の開口面積 A [m^2] と可視域の分光応答度 $s(\lambda)$ [A/W] (本編 4 章 4-1-5 参照)、及び分布温度 T [K] から求められる。

分光視感効率近似受光器の分光応答度は、波長可変単色光を用いて、分光応答度既知のシリコンフォトダイオード (PD) との比較測定により求められる。PD の分光応答度は、前述の電力置換型極低温放射計との置き換え測定により可視域波長数点において絶対値が決定されたのち、モデル計算などを用いて内外挿することにより、可視全域の値が得られる。

光度値は、定期的開催される国際度量衡委員会 (CIPM) 測光放射測定諮問委員会 (CCPR) 主催の基幹国際比較を通して、国際整合性が確保されている。

1-6-7 物質量 (※執筆中)