

目次

編者のまえがき

国際単位系 (SI) 基本単位の定義改定と計量標準 (総論) 1
白田 孝

国際単位系における長さの単位「メートル」の定義と実現 3
稲場 肇、平井 亜紀子、阿部 誠

プランク定数にもとづくキログラムの新しい定義とその実現方法 13
藤井 賢一

時間の単位「秒」についての基礎解説と最新動向 25
洪 鋒雷、安田 正美

改定国際単位系における電気標準 35
金子 晋久

熱力学温度の単位「ケルビン」の定義改定 43
山田 善郎、中野 享

物質量の単位「モル」の基礎解説とアボガドロ定数にもとづく新たな定義を導いた計測技術 55
倉本 直樹

光度の単位「カンデラ」および測光・放射標準 67
薮 洋司

編者のまえがき

計測は科学の基本であり、私たち人類は様々な計測技術を開発することで、この世界の現象を解き明かそうとしている。世界各国の研究者と手を取り合って未知の深淵をのぞきこむためには、共通の測定の基準が必要である。現在、その役割を担っているのが「国際単位系 (SI)」であり、その基盤となる基本単位の定義には、その時代の最先端技術が結集されてきた。つまり、単位の定義は永劫不変ではなく、科学技術の発展とともに進化し続けているのである。

2019年5月20日、SIにかかる大きな改定が実施された。七つの基本単位のうち、質量の単位「キログラム」、電流の単位「アンペア」、熱力学温度の単位「ケルビン」、物質量の単位「モル」の定義が改定されたのである。特に、キログラムに関しては、130年ぶりの改定であった。この改定によって、SIの基本単位は全て人工物から解放され、自然界の法則にもとづく定義へと進化したことになる。

定義の改定は、定義にもとづき様々な測定の基準を作りだす取り組みのみに影響を与えるのではない。中・長期的には、SI全体の整合性が向上する、様々な測定の精度が向上する、という産業界、社会への寄与が期待される。本冊子は、それらの定義改定にかかる情報を、学术界、産業界に向けて広く発信することを目的に、国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター (NMIJ) で企画・執筆された。包括的な情報発信のために、定義の改定された四つの単位だけでなく、七つの基本単位のそれぞれについての解説記事を本冊子に収録した。各記事では、各単位の概要、NMIJおよびその前身である各研究所における計量標準に関する技術開発の歴史、定義改定がもたらす影響、定義の実現方法と計量標準などについて解説している。さらに、国際度量衡局 (BIPM) が2019年に発行した「The International System of Units, 9th edition」の日本語版「SI文書第9版(2019)日本語版」

を、付録として収録した。本文書には、基本単位の新たな定義の詳細が掲載されており、各基本単位とそれらを定義する「定義定数」との厳密な関係を知ることができる。

なお、SI文書第9版(2019)日本語版は、著作権を保持しているBIPMから許可を得た後に作成された。BIPMは、翻訳で提供される情報および資料の関連性、正確性、完全性、または品質について一切の責任を負わない。また、SI文書第9版(2019)の唯一の公式版は、BIPMによって発行された文書のオリジナル版である。

2019年5月20日に実施された改定の結果、全ての基本単位が、人工物を使った標準および測定方法のいずれにも関連づけられないかたちで定義されている。これによって、定義定数を単位に結びつける物理式であれば、いかなるものでも、その単位の実現に使うことができる。つまり、今回の定義改定は、今後の科学技術の進展に伴って、単位の実現の精度が飛躍的に高められていく素地を整える大きな意義を持つ。本冊子が、この歴史的な定義改定にかかる情報を収集する際の包括的なリファレンスとなれば幸いである。

2019年2月

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
計量標準総合センター

「国際単位系 (SI) 基本単位の定義改定と計量標準」
出版委員会

委員長 藤井 賢一、幹事 倉本 直樹、事務局 越智 信昭、委員 稲場 肇、臼田 孝、金子 晋久、薮 洋司、高津 章子、中野 享、平井 亜紀子、堀内 竜三、安田 正美、山田 善郎、柚木 彰

国際単位系 (SI) 基本単位の定義改定と計量標準 (総論)

臼田 孝

産業技術総合研究所 計量標準総合センター長

1 はじめに

こんにちの計測基盤である、国際単位系、SI (エスアイ) は、18 世紀のフランスで生まれたメートル法を源流としている。メートル法はその後 1875 年のメートル条約の成立を経て次第に世界に受け入れられてきた。そして電磁気や化学の計量も取り込みながら基本 7 単位からなる国際単位系 SI (エスアイ) に体系化されて現在に至っている。

単位はその量を記述する「定義」と、技術的に実現する「実現」から成り立つ。かつては人工物である「メートル原器」のように、定義と実現が不可分であった単位が、今日ではメートルの場合定義は光の速さという、不変と思われる物理定数に委ねられ、その実現は波長安定化レーザや光周波数コムなどの最新技術によっている。その他の単位も科学技術の発展とともに、定義は自然の中にある不変の原理に倣い、その実現は量子効果デバイスなどの最新技術に置き換えられてきた。

単位の定義はメートル条約の最高議決機関、国際度量衡総会 (CGPM) における承認事項である。そして 2018 年 11 月に開催された第 26 回国際度量衡総会では、基本 4 単位の定義を変更する大規模な改定が決定され、2019 年 5 月 20 日から実施された。新しく施行される国際単位系では、唯一人工物によって定義されているキログラムを、プランク定数を使って定義するなど、基本単位は全て器物から解放され、自然界の法則にしたがった定義が完成したこととなる。

2 従来の国際単位系 (SI) とそれが抱える課題

国際単位系 (SI) は長さ、質量、時間、電流、熱力学温度、物質質量及び光度について明確に定義された単位、すなわち、メートル (m)、キログラム (kg)、秒 (s)、アンペア (A)、ケルビン (K)、モル (mol)、カンデラ (cd) を基礎として構築されている。これらの単位を基本単位 (base units) と呼び、変更となる 4 単位の定義は簡潔には下記の通りとなっていた。

質量・キログラム (kg) : 国際キログラム原器の質量

電流・アンペア (A) : 真空中に 1 メートルの間隔

で平行に配置された無限に細く無限に長い二本の直線状導体が一定の力を及ぼし合う電流 (実質的に磁気定数を規定)

熱力学温度・ケルビン (K) : 水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$

物質質量・モル (mol) : 0.012 キログラムの炭素 12 の中に存在する原子の数に等しい数の要素粒子を含む系の物質質量

以上のような従来の単位系は次のような課題を内包していた。

・質量が国際キログラム原器という器物に依存しているため、破損など長期的な安定性に課題があること。

・電流が電気量 (電圧、抵抗、等) における再現性を優先するため、ジョセフソン効果などの量子現象により実現されており、厳密には現在の定義に従っていないこと。また、量子現象に関わるジョセフソン定数、フォン・クリッツィング定数が 1990 年における協定値を採用しているため、最新の値と異なること。

・熱力学温度が水の三重点で定義されているため、将来的な超高温、極低温での温度測定の不確かさ低減の限界が危惧されること。

これらの関係を示したのが図 1 である。矢印が向かう単位は、元となる単位の影響を受けることを示している。定義から明らかなおとおり、長さは時間の測定精度に依存するが、時間は今日原子時計により十分な精度が確保されている。一方、質量からは多

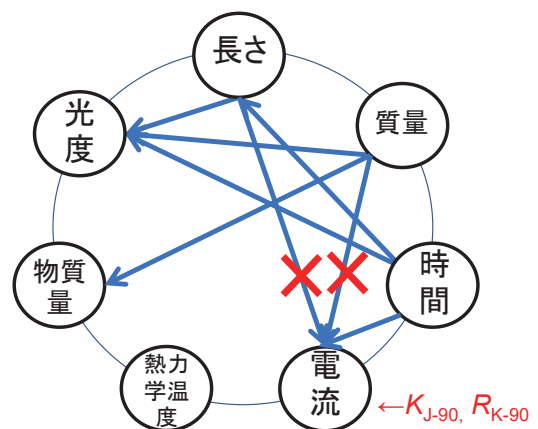


図 1 従来の基本単位の依存関係

くの矢印が伸びており、質量（国際キログラム原器）の安定性が多くの単位（すなわち組立量に kg が含まれるあらゆる測定結果）に影響を与えていることになる。さらに電流標準は 90 年に採択されたジョセフソン定数とフォン・クリッツィング定数の協定値に基づいて量子デバイスにより実現されており、他の単位との整合性を損なうリスクを帯びている。図 1 で長さから質量への矢印が×印で途切れているのは、このことを示す。

3 定義改定の方向性

これらの課題は、質量をキログラム原器という人工物ではなく、質量に関係する基礎物理定数で定義すること、また電流を改めて電磁気力を介して力学量と正確に関係づけること、などにより解決することができる。具体的にはキログラムをプランク定数で、アンペアを電気素量で定義し直す。またケルビンボルツマン定数で、モルをアボガドロ定数で定義し直し、前者は水、後者は炭素 12 という特定の物質に依存しない定義とする。なお、これら改定前後で十分小さい不確かさで各物理定数を決定するため、測定結果の連続性は確保される。

図 2 はこの新定義に基づく単位相互の関係を示している。各単位は普遍的な基礎物理定数で決定され、国際キログラム原器という器物への依存はなくなる。一方、質量はもはや単独では決定できず、長さ・時間の正確な測定（これらは原子時計や光波干渉計により十分正確な測定が可能である）技術によって得られる組立量となる。

4 改定がもたらす計量標準の将来

改定により原器という器物から単位の定義が解放される、すなわち原器という人工の器物の劣化や紛失の恐れが無くなる、というのは大変判りやすいメリットである。一方で基礎物理定数による定義、特

に質量の定義はこれまでに比べ難解であるが、計量学的見地からは今回の定義は将来の技術開発を阻害しない、普遍性を十分吟味した結果であると言える。例えばメートルの定義は、1960 年に原器に代わってクリプトンランプのスペクトルが採択されたが、同時期に出現したレーザの安定化が進むにつれ、波長安定化レーザによる定義が検討された。しかし将来より安定度の良い高精度のレーザ波長標準ができる可能性が十分あり得ることなどを考慮し、特定の安定化レーザよりは光の速さを基準にして定義した方がよいとの考えから、1983 年の光の速さによる定義に至った。この普遍的定義は今日光コムのようにレーザ周波数を直接測る技術が出現しても破綻せず、一次標準の改良が続いている。また光の飛行時間や、光波干渉など測定対象によって最適な技術で、定義に忠実な測定技術が確立している。これが天文学的長大な距離も、ナノテクノロジーに必要とされる微小なスケールの測定も高い精度で可能とした訳である。

今回の一連の定義改定により、将来の技術的進歩を阻害せずに測定精度の向上が期待できる。例えばナノテクに必要となる極微小な質量測定精度の向上や、MEMS など機電一体デバイスの効率向上などが想定できる。なお、1967 年に採択された時間(秒)の定義は、セシウム原子から発せられる電磁波を元にしてはいるが、より波長の短い（分解能の高い）光時計が今日開発されながら、この定義のためにセシウム原子時計以上の正確さで波長を決定することが原理的に出来ないという事態に陥っている。秒の定義改定は今回の大規模な改定の次に来る課題である。

さて、原器に頼らない計量標準が実現したいま、これまでの原器保管機関であった国際度量衡局や、その第一コピーを所有する立場にある各国の国家計量標準機関（NMI）の役割はどのように変容するだろうか。定義はいわば単位の仕様書である。実現はその仕様を満たす技術的設計、製作、および運用方法と言える。そしてその実現の精度は各国 NMI の技術的能力に掛かっており、その能力は相互比較によって担保されることになる。

既に多くの一次標準は、その同等性を評価する枠組みが出来上がっている。ただし、質量については現時点で一次標準を実現する能力を有する機関は限られている。当面は国際度量衡局が中心となって標準供給を行っていく体制が維持されるだろう。NMI としては現時点で数少ない質量の一次標準実現能力を持つ機関として、そのような国際的な枠組みを担う活動にもより一層注力することが期待されると認識している。

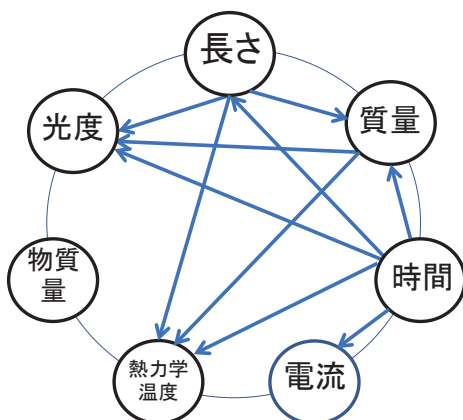


図 2 新しい定義における基本単位の依存関係

国際単位系における長さの単位「メートル」の定義と実現

稲場 肇*、平井 亜紀子**、阿部 誠***

*産業技術総合研究所 計量標準総合センター 物理計測標準研究部門 周波数計測研究グループ長

**産業技術総合研究所 計量標準総合センター 工学計測標準研究部門 ナノスケール標準研究グループ長

***株式会社ミツトヨ 執行役員 研究開発本部副本部長



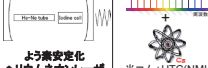
1 はじめに

長さの単位メートルは、国際単位系 (SI) において 7 つある基本単位のうちの 1 つである。計量標準に関する国際条約がメートル条約と呼ばれることからわかるように、メートルは基本単位の中でも長い歴史を持ち、特に重要な役割を担ってきた。現代においても、自動車や半導体をはじめとする多くの産業において必要であることはもちろん、科学・文化などにも深く浸透している。本稿では SI におけるメートルの定義と実現について、2019 年 5 月に実施された SI の定義改定にもふれながら解説する。また、長さ計測に関する最近のトピックについて解説する。

2 メートルの定義の変遷

SI によるメートル法は、単位の同等性、恒常性を保証し、いつでもどこでも誰でも同じように単位 (例えばメートル) を使えるようにすることを理念の一つとしている。その拠り所としては「不滅の自然物」がふさわしく、できるだけ高精度であることも理念の一つである。そして、実際にその量を実現し (現実のものとし)、計測に役立てていくための実用性を重視している。

表 1 メートルの定義、日本の国家標準の変遷

メートルの定義	国際メートル原器の目盛線の距離	⁸⁶ Krの準位 2p10 と 5d5 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	光が真空中を 1 / 299 792 458 秒間に伝わる行程の長さ
日本の国家標準	 メートル原器 (1889~1960) 精度: 10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁷	 クリプトンランプ (1960~1983) 精度: 10 ⁻⁸ ~10 ⁻⁹	 よう素安定化ヘリウムネオンレーザー (1983~2009) 不確かさ: 2.1 × 10 ⁻¹¹ 光コム+UTC(NMIJ) (2009~) 不確かさ: 6.8 × 10 ⁻¹⁴

長さの定義は、時代の流れに伴って高精度なものへと変遷してきた。古くは人体、物、感覚により定義されていたが¹⁾、これらは時間的空間的に局所的であった。いつでもどこでも使える長さの定義が現れたのは、1875 年にメートル条約が 17 カ国間で締結さ

れたのが始まりである²⁾。表 1 にメートル条約締結後の長さ標準、および日本の国家標準¹⁾の変遷を示す。

メートル法が運用されはじめる時、メートルは子午線長の測量結果に基づき製作された「メートル原器」を用いて定義された。これは白金 90% とイリジウム 10% の合金であり、0 °C において間隔 1 m となる目盛線が引かれたものであった³⁾。子午線長の測量はメートル条約締結から遡ること約 100 年、フランス科学アカデミーにより行われている⁴⁾。当時測定された赤道から北極に至る子午線長を 10000 km として、その 1000 万分の 1 を 1 m と定義したのだが、現在、子午線長は 10001.966 km となっている⁵⁾。この差は当時の測量技術などの限界による誤差である。

日本がメートル条約に加入したのは 1885 年 (明治 18 年) である。これにより日本でもメートル法が適用されるようになり、度量衡法を 1891 年 (明治 24 年) に制定、1903 年 (明治 36 年) に中央度量衡器検定所が設置された。これはその後計量研究所となり、現在の産業技術総合研究所 計量標準総合センターの一部となっている。1890 年には「日本国メートル原器」(No. 22) が国際度量衡局 (BIPM) から日本に到着、使用されるようになっていく。

メートル原器は、精度が 10⁻⁷ 程度と低いことも問題であったが、そのことよりもむしろ、壊れたり経年変化したりするリスクのある「原器」であることが問題であり、メートル法の理念 (不滅の自然物に依る標準) に沿ったものでないことが当時から意識されていた。

「光の波長」は早くから長さの標準候補として注目されていた。電磁気学を確立したマクスウェルは 1873 年には高精度²⁾な光源の波長をメートルの単位とすべきと著書の中で既に主張している⁶⁾。エーテルの測定実験で有名なマイケルソンは、1892 年にはメートル原器を基準に光の波長を実験的に測定し、その標準としての可能性を指摘している²⁾。

1960 年、長さの基準は不滅の自然物であるクリプトン 86 原子を使うよう変更され、「クリプトン 86 原子の

て表記した。

2) 現在、標準の値の曖昧さを指して「不確かさ」と呼び、「精度」はやや曖昧な用語である。また、不確かさの概念が導入されたのは最近 20 年ほどである。本稿では明らかに不確かさと言えるもの以外は「精度」とした。

1 「国家標準」は「当該の量の種類について、他の測定標準に量の値を付与するための根拠として、ある国又は経済圏で用いるように国家当局が承認した測定標準。」であり⁴⁾、国によって位置づけが異なる。現在の日本では、「特定標準器」が、計量法に基づき経済産業大臣に指定される国家標準といえる。本稿では、これらを使い分け

準位 $2p^{10}$ と $5d^5$ 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」と定義された⁷⁾。

クリプトン 86 原子の放射光 (波長 606 nm) が定義として選ばれた理由は、この遷移に基づく放射光が多くのランプのスペクトル線の中で最も狭いスペクトル線幅を持つからであった。動作条件であった窒素の三重点 (約 -210°C) における線幅は約 400 MHz であり、これが標準としての精度を $10^{-7} \sim 10^{-8}$ に制約していた。

定義改定があった 1960 年に、ルビーレーザーとヘリウムネオン (HeNe) レーザーの発振が相次いで報告されたことは興味深い因縁である。レーザーのスペクトル線幅は狭く、長さの定義とすれば $10^{-10} \sim 10^{-11}$ の精度が期待できる。特に連続発振し、スペクトル線幅が 100 kHz 程度の HeNe レーザーなどの気体レーザーは標準候補として注目された。

そして、波長 (または周波数) 安定化レーザー (以下単に安定化レーザーと呼ぶ)、および光周波数計測法の出現が、長さの定義改定に決定的な影響を与えた。ここでは、波の速さの公式

$$c = \nu \lambda \quad (1)$$

を考えるとわかりやすい。 c は光の速さ、 ν は光の周波数、そして λ は光の波長である。(1) 式から、波長 (周波数) が安定化されたレーザーの波長及び周波数を測定すれば、光の速さが求められることがわかる。これは「光速 (度) 測定」などと呼ばれ、1960 ~ 70 年代には、レーザーの波長をクリプトン 86 原子の放射光波長に基づいて測定するとともに、光の周波数を「時間標準」に基づいて測り、光の速さを求める研究が多く行われている。この頃から、長さとは時間とは密接に関係するようになる。

周波数は時間の逆数であり、時間の単位「秒」はメートル同様 SI の基本単位である。秒の定義は、1967 年にそれまでの地球の公転による定義から、不滅の自然物であるセシウム 133 原子を用いた定義「秒は、セシウム 133 の原子の基底状態の二つの超微細構造準位の間の遷移に対応する放射の周期の 9 192 631 770 倍の継続時間である。」に改定されている。装置としての時間標準は、一次周波数標準器と呼ばれ、様々な擾乱が管理され、擾乱ゼロ環境におけるセシウム 133 原子の共鳴周波数を推測できる装置により実現されている。最新の一次周波数標準器は、原子泉型 (ファウンテン) と呼ばれる装置で、その不確かさは 10^{-16} 台に達する一方、定常的に運用することは難しく、世界に 10 台程度しかない。時間標準には定常的連続的な運用が必要であることから、実用的な周波数標準は、世界中のたくさんの原子時計を用い、一

次周波数標準器により校正される時系である「協定世界時 (UTC)」として運用され、各国の標準研でもこれに同期した時系 (例えば産総研では UTC(NMIJ)) が時間標準として利用されている。

長さに話を戻すと、1970 年頃にはメタンの飽和吸収スペクトルを基準とした安定化レーザーが 10^{-13} に達する周波数安定度を持つようになり、1973 年にはその絶対周波数を「周波数チェーン」という技術を用いて 10^{-10} 程度の精度で測定できるようになってきた^{8,9)}。1973 年のメートルの定義に関する諮問委員会 (CCDM) は、これらの測定値などから光の速さの暫定値を $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ とすることを決めた。その後もメタン、よう素分子に安定化されたレーザーの波長と周波数が国際的に比較されたり測られたりするようになり、整合性が得られるようになった。複数の波長で整合性が得られる状況になると、レーザーの波長で長さを定義するよりは、 c を定数として定義し、例えば (1) 式中のレーザーの周波数 ν から λ を算出して長さの基準とするのが良いと考えられるようになってきた。その理由は主に以下の 3 つである。①各国から報告された c はクリプトン 86 の精度に制限されており、 c 自体の精度はそれより高いと思われたこと。②クリプトンの波長 606 nm 帯の遷移を用いた定義を廃止でき、かつクリプトンランプを使った標準器を継続使用することが可能なこと。③安定化レーザーは定義とするのにふさわしくない面があったこと。

③の具体例としては、安定化レーザーには様々な使用条件があり、時間標準のように擾乱ゼロの環境下にある分子の吸収線波長/周波数を推測することは難しかったこと、および安定化レーザーの進歩はめざましく、どの吸収線とレーザーの組み合わせを定義とすべきかを定めることは難しかったこと、がある。

一方で、 c を定数とするには懸念もあった。経年変化がないのか、地球あるいは天球に対する光の進行方向によって差がないのか、そして電磁波の波長によって差がないのかなど、実際にどのくらいの不確かさがあるのか、その時点では確認できず、定義改定のためには特殊相対論の光速不変の原理を信じる必要があった^{6,8)}。

様々な議論を経て、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とする。」との定義に改定された。メートルの定義を素直に読めば、長さを l 、光の飛行時間を t としたとき、 $l = ct$ により距離を実現するような定義に見えるが、実際には「光の速さを 299 792 458 m/s と定義する。」という意味であり、実現方法は他にもある。これについて

は次章で述べる。また、2019年に実施されたSIの定義改定では、 c を定義するということがより明確に記述された。これについては4章で述べる。

このような定義改定の過程は、キログラムおよびケルビンの定義改定においても同様に採られている。つまり、複数の基本単位を結ぶ基礎物理定数を、基本単位の定義に基づいて精密測定した後、逆にその定数を定義（固定値）として、基本単位とするように変更するのである。

3 メートルの実現

3.1 長さの定義の実現方法

1983年に改定されたメートルの定義では、国際度量衡委員会（CIPM）から、定義の具体的な実現方法（*Mise en Pratique: MeP*、英語では *Practical realizations of the definitions*）が勧告されている¹⁰⁾。MePは、やや漠然とした感のある定義を踏まえ、それを具現化するための手段を示す重要なものである。その内容は以下の通りである。

- 真空中の伝播距離 l は、測定された平面電磁波の伝わる時間 t を用い $l = ct$ の関係式から求める。
- 周波数 ν の平面電磁波の真空中の波長 λ は、 $\lambda = c/\nu$ の関係式から求める。
- あるいは、真空中の波長および周波数が与えられている、国際度量衡委員会（CIPM）が勧告する放射リストにある一つの放射。

方法 a) は、光パルスや変調光を用い、その飛行時間（*time of flight: TOF*）から距離を求めるものである。 c が定義となったことにより、波長とは関係なく長さを決めることが可能となった。例えば、アポロ 11 号などが月に置いてきた光反射板に向け、地球上からパルスレーザーを発射し、約 38 万キロメートルの距離が現在は 1 mm (3×10^{-9}) 程度の不確かさで測定されている¹¹⁾。クリプトン 86 原子に基づく波長標準の時代には、波長標準に起因する c の精度 (3×10^{-8}) を被らなくてはならなかったが、定義改定により、一桁の精度向上を果たした。他にも、この方法を使って長さを測定する装置に、測量などに用いられる距離計がある。光の強度を変調して出射光と反射光の位相差を検出する方式が現在の主流である。光コム距離計¹²⁾もこの原理に基づいている。この方法は比較的長い距離の測定に適している。

方法 b) では、時間標準に基づいてレーザーの周波数 ν を測り、レーザー波長 $\lambda (= c/\nu)$ を求める。そして、波長が決定されたレーザーをマイケルソン干渉計等の基準レーザーとして用いて長さ測定を行う。現在、長さの精密な計測にはレーザー干渉計が使われることが多く、メートルの実現方法として最も一般的な

ものといえる。この実現方法が勧告されていることから、メートルの定義では c を定義しただけであることがわかる。この方法も a) 同様、時間標準に基づいた長さ測定である。

方法 c) は、定義とは別に放射のリストを作成し、それを用いて長さを実現するものである。リストには基準となる原子分子の遷移とその勧告周波数値、必要に応じてレーザーの種類や動作条件が記されている¹³⁾。ある程度技術が確立し、周波数が測られて不確かさの検証がなされた波長安定化レーザーはこのリストに載り、誰が作っても同じ値が得られる *intrinsic standard* として、学術的には長さの標準として使うことができる¹⁴⁾。

干渉計測にもっともよく使われるのは波長 633 nm の HeNe（ヘリウムネオン）レーザーである。現在は、このリストに「不安定化 HeNe レーザー」が掲載されている¹⁵⁾。不安定化 HeNe レーザーの真空波長の勧告値は 632.9908 nm、不確かさは 95 % 信頼区間で 3.0×10^{-6} （相対値）となっており、学術的には HeNe レーザーは光ってさえいけば校正せずとも 5、6 桁の精度があることになっている（厳密には、633 nm 以外の波長が混ざっていない必要があるが、現在製造されている出力が 3 mW-4 mW 以下の HeNe レーザーではそのようなことはほとんどない）。

3.2 日本の国家標準 1 よう素安定化ヘリウムネオンレーザー

日本をはじめ、多くの国で長さのトレーサビリティに組み込まれている、波長 633 nm よう素安定化ヘリウムネオンレーザーは、上述した長さの実現方法 c) の放射リストに記載されているレーザーの代表である。このリストには多くの遷移、およびレーザーが記載されているが、「よう素 127 の R (127) 11-5 ブランチの f 線」に安定化された「波長 633 nm よう素安定化ヘリウムネオンレーザー（以下 I_2/HeNe レーザー）」が、ほぼ唯一、長さの国家標準として各国で利用されている吸収線、およびレーザーである。国際的に見れば、今でもこのレーザーを国家標準として利用している国が大多数である。日本でも、2009 年までは「長さ用六百三十三ナノメートルよう素分子吸収線波長安定化ヘリウムネオンレーザー装置であって、独立行政法人産業技術総合研究所が保管するもの」が国家標準であると経済産業省告示によって指定されていた。現在でも特定標準器により直接校正される「特定二次標準器」という役割を果たし続けている¹⁶⁾。

前述した MeP 中にある方法 c) の放射のリスト (2003 年) によると、 I_2/HeNe レーザーは、個体差による再

現性を含む標準不確かさが 2.1×10^{-11} であり、長さでいえば、月までの距離に対して $10 \mu\text{m}$ 以下の精度に相当する。現在、干渉計測における空気の屈折率補正は 10^{-9} が限界であり、 I_2/HeNe レーザーの精度は問題になっていない。

3.3 日本の国家標準 2 光周波数コム

メートルの定義改定から 20 年近く経った 2000 年頃、光周波数コム（光コム）によるレーザーの（絶対）周波数計測が報告された¹⁷⁾。レーザーの周波数計測に必要な装置の規模は、部屋一杯の装置群だった「周波数チェーン」から、光学定盤一台に十分に収まるものになった。さらに光コムは進化し、ファイバレーザーによる光コムの実現により、光周波数計測は、実用的で、定常的に運用可能な課題となった。そして、日本における長さの実現方法を、方法 c) から b) へ変更すること、すなわち光コムを長さの特定標準器にする可能性が浮上してきた。

3.3.1 光コムによるレーザーの周波数計測

光コムによるレーザーの周波数計測について簡単に述べる。光コムは時間軸上では超短光パルス列であり、周波数軸上で観察すると、図 1 に示すような等しい周波数間隔で並んだモード（コムモード）群となる。そして、これら周波数軸上のコムモード一本一本は連続発振レーザーとして扱うことができる¹⁸⁾。

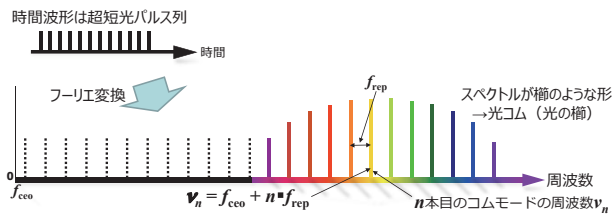


図 1 光コムの特スペクトル（概念図）

光コムのもっと重要な性質の 1 つは、周波数軸上におけるモード間隔が波長に依らず一定なことである。そのため、図 1 に示すように、ゼロから数えて n 番目のコムモードの周波数 $\nu(n)$ は次式のように表される。

$$\nu(n) = f_{\text{ceo}} + n f_{\text{rep}} \quad (2)$$

ここで n は整数である。 f_{ceo} はキャリアエンベロープオフセット周波数と呼ばれ、コムモードを f_{rep} 間隔で仮想的にゼロまで延伸した時の余りの周波数である。 f_{rep} と f_{ceo} は RF 領域であり、これらを観測または制御することで、光領域の $\nu(n)$ を一意に決めることができる。

(1) 式を元に、周波数 ν_0 の CW レーザーと光コムとの n 番目のモードとのビート周波数が f_{beat} であるとき、

$$\nu_0 = f_{\text{ceo}} + n f_{\text{rep}} + f_{\text{beat}} \quad (3)$$

の関係が成り立つ。 f_{ceo} および f_{rep} を周波数標準である UTC(NMIJ) に位相同期し、 f_{beat} を計測することにより、 ν_0 を求める（絶対周波数を計測する）ことができる。

3.3.2 国家標準「光周波数コム装置」

光コムは I_2/HeNe レーザーと異なり超短光パルス列である。これは、長さの標準として違和感があるかもしれない。実際、光コムを既存の長さ測定用光干渉計にそのまま適用することはできない。しかし、特定標準器の役割は図 2 に示すようにレーザー一周波数の校正であり、干渉計に直接使えなくても問題はない。

特定標準器を光コムにすることには以下のようなメリットがある。

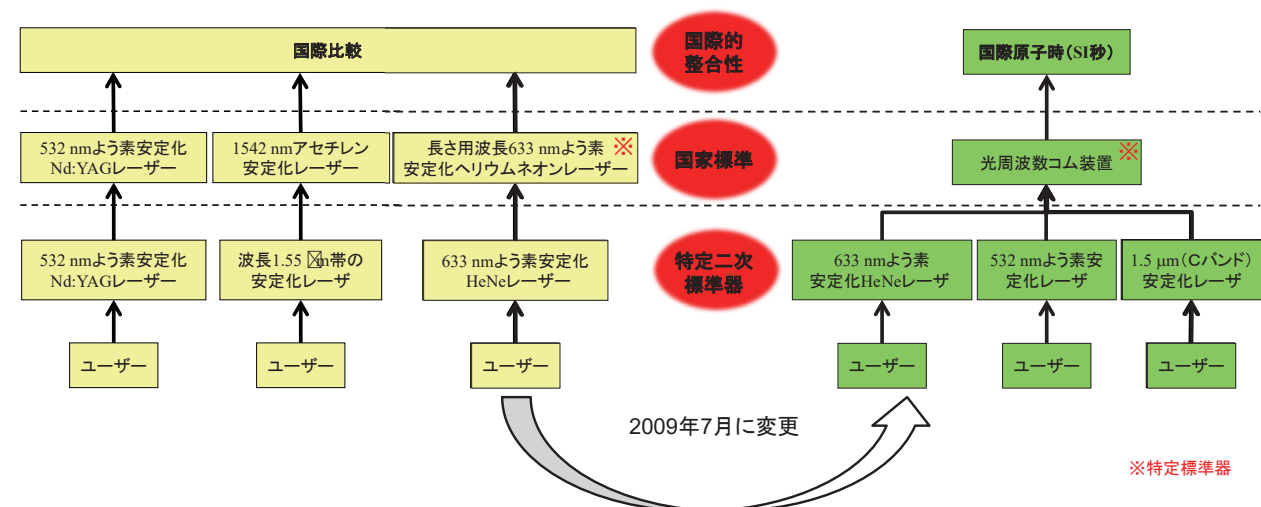


図 2 日本の長さのトレーサビリティ体系（特定標準器に近いところのみ）

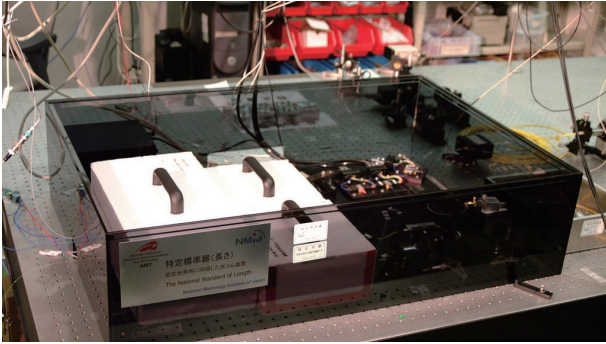


図3 産総研が保有する長さの特定標準器・光コム

① 周波数の不確かさが小さい。

光コムの測定不確かさは、多くの場合、ほぼ基準周波数のそれで決まる。光コム自体が持つ光とマイクロ波周波数の比較能力は、平均時間 1000 秒において $10^{-14} \sim 10^{-17}$ であり、産総研の時間標準 UTC(NMIJ) の不確かさ（平均時間 1000 秒において 6.7×10^{-14} ）よりも十分に高い。すなわち、UTC(NMIJ) の精度での光周波数計測が可能である。不確かさが小さいだけでなく、アライメントなどによって値が狂うことがないため、信頼性が高い。

② 広い波長帯の光周波数を 1 つの光コムで測定できる。

波長 633 nm の $I_2/HeNe$ が波長 633 nm のレーザーしか校正できないのに対し、エルビウム添加光ファイバを用いたモード同期ファイバレーザーを基にすれば、波長 500-2000 nm において光コムを発生させることができ、この波長範囲では同じ不確かさでの周波数計測が可能である。近年は大容量光通信で光通信における波長管理が厳しくなり、波長 1.55 μm 帯のレーザー周波数校正が求められるようになってきている。このような 633 nm 以外のレーザーとのトレーサビリティを確保する上で、特定標準器が光コムであれば、全ての校正を特定標準器によるものとでき、シンプルである。

③ 国際的な承認を得るための運用が容易。

光コム自体は周波数変換・比較装置なので、基本的には、その基準である UTC(NMIJ) の値さえ国際的に承認されていれば、測定結果は国際的に承認される。UTC(NMIJ) は GPS 衛星を介して常時国際的に比較されており、よう素安定化ヘリウムネオンレーザーのように海外に持ち出して比較する必要がなくなる。実際には、光コムの周波数変換・比較能力を、二つの光コムを比較するなどして評価しておく必要があるが、これはその場でできる作業である。

そして 2009 年、光コムは特定標準器「光周波数コム装置であって、独立行政法人産業技術総合研究所が保管するもの」として指定されるに至った¹⁹⁾²¹⁾。

これをもって日本では、メートルを実現する方法が c) から b) に変わったといえる。

トレーサビリティ体系も図 2 に示すように変わったが、ユーザーから見ると、レーザー周波数の校正を受ける先が変わったのみで、ユーザーの設備を変更する必要はなかった。また、産業界の長さ標準を支えている 633 nm $I_2/HeNe$ レーザーについては、特定標準器が 633 nm $I_2/HeNe$ レーザーであった時代は、校正において被測定器物が特定標準器と同等であることを確かめる手続きとなっていたが、特定標準器が光コムとなつてからは、測定値とその不確かさを校正証明書に明記できるようになった。

余談だが、他にも光コムを特定標準器とするメリットがある。光コムは次世代の時間標準である光時計にも必須の技術であるとともに、他にも多くの先端的研究テーマや産業応用があり、当面は研究開発において活躍が想定される装置である。また、 $I_2/HeNe$ レーザーには産業的に大きな需要がなく、レーザーチューブやガスセルの供給に若干の不安を抱えている。一方で我々が利用している光コムは、エルビウム添加光ファイバや励起用半導体レーザーなど、光通信で使われる部品でほとんど組み立てることができ、供給に不安がない。

4 新しい SI におけるメートル

2019 年、メートルを含む全ての基本単位の定義が改定された。メートルについては「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、秒はセシウム周波数 $\Delta\nu_{Cs}$ によって定義される。」と改定された。

メートルに関しては、実質的に何も変わらない。光の速さ c を定義し、時間標準を基に長さを決めるということをもより明確に示すように文章が変更されているのみである。 c の単位は $[m/s]$ であり、時間 $[s]$ と長さ $[m]$ を繋ぐ定数という解釈もしやすい。

一緒に定義が改定される質量 (キログラム)、電流 (アンペア)、温度 (ケルビン) については実質的に大きく変わり、メートル同様、時間標準を基に、いくつかの定義された基礎物理定数で定義されるように改定される。長さ (メートル) に関しては、1983 年時点で既に、2019 年の改定を先取りしていたことになる。

メートルは、基礎物理定数を使って単位を定義することにより実現方法を定義から切り離せることを、実例として示してきた。例えば光コムの出現のように技術が進化しても、定義を改定すること無しに、新しく優れたメートルの実現方法を開発できる。

少しだけ注意したいのは、学術的に、光の速さが本当に無限に高精度なのかどうかは別の問題だということである。将来、極めて精度の高い時間基準と波長基準が現れ、これらを基に光の速さを $c = \nu \lambda$ から算出したら、 c の不確かさが観察できるようになるかもしれない。その場合、SI では ν または λ の不確かさとして辻褃を合わせることになる。筆者にはそのような状況は想像できないが、例えそのような不確かさが存在したとしても、(恐らく極めて小さいので、) それをゼロとすることによる SI の歪みは長期間発生しないように思える。

5 長さ計測におけるトピック

日本国内の長さ・幾何学量の標準供給体系の一部を図4に示す。図2にあるように、特定二次標準器は三つの波長帯のレーザーであるが、長さ・幾何学量分野では、633 nm HeNe レーザーを用いることがほとんどである。これらのうち、上位標準や近年、産業的重要性が増してきている標準について最近のトピックを紹介する。

5.1 レーザー干渉測長器

レーザー干渉測長器は一般的に高価であり、またトレーサビリティ体系の上位に位置しているという認識も影響して、測定精度が過大評価されていることが多い。もちろん適切かつ注意深く使えば非常に高い精度が得られる装置であるが、様々な誤差要因があり、カタログ通りの精度を達成することは容易ではない。

通常レーザー干渉計に利用される周波数安定化レーザー自体の相対周波数安定度は9桁程度であるが、実際の長さ測定においては空気の乱れに大きな影響を受け、理想的な測定環境においても得られる

測長精度はせいぜい7桁である²²⁾。工場などの悪環境下では5桁程度、つまり1 mに対して10 μmに落ちると思った方が安全である。

測定長さが長くない場合には、周波数(波長)の安定度以外の要因が支配的な誤差になる。測定された光信号の位相を電氣的に分割読み取りするので、干渉計の見かけの分解能はいくらでも上げられる。しかしながら、ヘテロダイン方式の場合には光学系の不完全さに起因する偏光のクロストークなどにより、またホモダイン方式の場合には光検出器のゲインのばらつきなどにより、本来きれいな正弦波を描くはずの干渉信号に歪みが生じる²³⁾。この誤差は干渉計の測定単位である2分の1波長毎に周期的に表れるためサイクリックエラーと呼ばれ、装置による大きいものでは数 nm ある。最近、測定光の空間分離及び光学素子の一体化によりサイクリックエラーを抑えたヘテロダイン干渉計が開発され、これと、干渉信号のリサージュ図形をデジタル信号処理により補正してサイクリックエラーを補正したホモダイン干渉計を比較して、どちらもサイクリックエラーが数 pm であることを確認した例がある²⁴⁾。

5.2 ブロックゲージ

レーザー干渉測長器は長さの「測定器」である。それに対して、長さなどの量そのものを示す実体物を「実量器」というが、なじみのない用語であり、通常はゲージと呼ばれている。長さの世界で代表的なものに、直方体の端面間隔で長さを表すブロックゲージがある。

ブロックゲージを高精度に校正するには干渉計が使われる。ブロックゲージの一方の測定面を平面基板に密着し、平面基板の表面とブロックゲージの

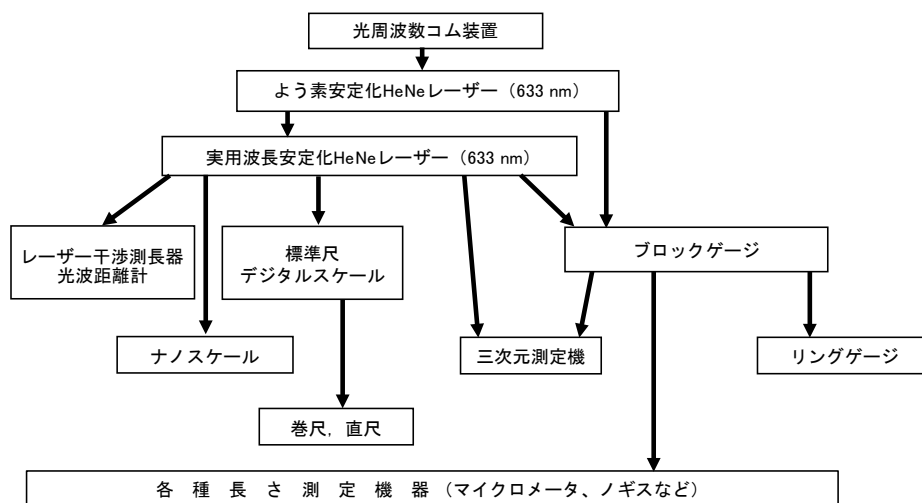


図4 長さ・幾何学量の標準供給体系 (一部)

もう一方の測定面との間隔を干渉計により測定する。その際、レーザー干渉測長器のように干渉縞の数を数える「計数法」ではなく、「合致法」が用いられる²⁵⁾。あまり高精度でないブロックゲージの校正では、電気マイクロメータを使って、光波干渉によって校正されたブロックゲージとの機械的な比較測定が行われる。

ブロックゲージは長さの実量器としてもっとも高精度なため、様々な測定器の校正に利用されてきた。しかしながら、最近の超高精度三次元測定機の校正に用いるのには十分な精度とは言えなくなってきた。その最大の原因はブロックゲージの熱膨張係数 (CTE) の不確かさである。一般に三次元測定機で測定する空間は広く、また、設置環境を長さの標準温度である 20 °C に保つのも難しいため、ブロックゲージの熱膨張による不確かさの影響が大きい。鋼製のブロックゲージの CTE は ISO, JIS により $(11.5 \pm 1.0) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 程度とあるが、実際には、この範囲内ではあるが期待値が $11.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ より小さいブロックゲージも多いし、範囲が $\pm 1.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ しか保証されていないのでは不確かさが大きくなる。最近では CTE を実測して CTE の不確かさを小さくしたブロックゲージも市販されている。CTE の不確かさを小さくするもう一つの方法は、CTE 自体を小さくする方法であり、比例して CTE の不確かさも小さくなる。CTE がほぼゼロの低熱膨張ガラスやセラミックを使ったブロックゲージも市販されている。

ブロックゲージの長さは、経年変化することがあり、多くの場合製作直後の変化が大きく、時間と共にその変化量は小さくなる。低熱膨張材料製のブロックゲージは歴史が浅いためその振る舞いが未知であり、定期的に再校正するなど注意を要する²⁶⁾。

また、最近のトピックとして、ブロックゲージを 2 台の干渉計で両側から測定する技術開発がある。ブロックゲージを平面基板に密着するには技術が必要であり、ブロックゲージや平面基板を傷つけるおそれがあるし、手間がかかる。また、上記の熱膨張や経年変化を評価する際には、変化量だけがわかれば良いが、変化量が小さい場合が多く、測定毎の密着によるばらつきが無視できない。そのため、ブロックゲージを密着せず、両側の測定面を光波干渉により測定する干渉計が開発されている²⁷⁻²⁹⁾。ただし、ISO や JIS におけるブロックゲージの寸法の定義は、平面基板に密着したときの平面基板表面とブロックゲージ測定面との間隔なので、この干渉計でブロックゲージの絶対寸法を求める場合には、光の表面反射における位相変化や表面粗さによる補正が両面分必要なため、従来の平面基板に密

着する方法より小さな不確かさを達成するのはまだ困難である。

5.3 座標測定システム

工業製品・部品の設計形状は、高性能化や高付加価値化などの要請に応じて複雑化しており、三次元離散座標の組み合わせによって形状や寸法の測定を行う座標測定システム (Coordinate Measuring System : CMS) の普及が進んでいる³⁰⁾。CMS の基本的な構成は、測定対象物の表面について、三次元座標を特定するための測定フレーム、および測定対象物の表面を検知するためのプロービングシステムのふたつからなる。

CMS は複数の離散的な測定点を組み合わせ、複雑な図面指示や幾何公差に対応した測定を実現できるが、測定のトレーサビリティを実用的に確保する観点から、長さ・形状測定に関する性能評価法を受入検査等として実施する。具体的には ISO 10360 シリーズおよび対応する JIS B7440 シリーズが広く用いられている。

接触子を機械的に接触させて測定対象物の表面の座標を取得する伝統的な CMS は 1 m あたり $1.5 \mu\text{m}$ よりも良好な長さ測定誤差を少数の離散点測定により実現できる一方、原理的に測定のスループットの低い課題がある。近年注目されるのは圧倒的にスループットの高い、可視光や X 線を用いた非接触 CMS である。

5.4 光学式座標測定システム

測定対象物に縞模様などのパターンを投影し、異なる角度からカメラ撮像したときの投影パターンの歪みから測定対象物の三次元形状を三角測量により復元する光学式 CMS が多用されている (図 5)。光学式 CMS の高速化・高分解能化により、測定に要する数秒間に 1000

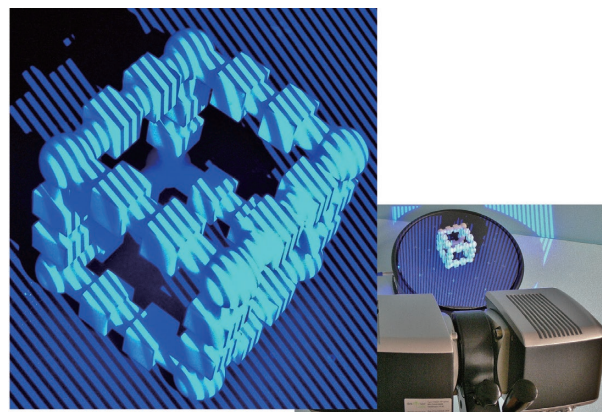


図 5 光学式 CMS の測定例

万点を越える測定点を出力し、測定対象の寸法・形状を「面」の情報として得られるようになってきている。また、例えば 500 mm 程度の測定視野において 20 μm よりも良好な長さ測定誤差を多数点群により実現するものも実用化されている。

多数点群による座標測定システムの性能評価法としては、直交型の測定フレームをもつものに限定して ISO 10360-8³¹⁾ およびこれに対応する JIS B7440-8³²⁾ が産総研のリーダーシップにより整備済みである。これ以外の形式の測定フレームをもつか、または測定フレームを明確な形式ではもたない CMS（以下、非直交光学式 CMS）の国際的な性能評価法も産総研のリードにより ISO 10360-13 として開発が始まった。その過程で、既存のガイドライン³³⁾ が記載する 2 球間距離による評価法は、非直交光学式 CMS の系統誤差の分布によっては、測定誤差を十分には捕捉できないことがわかってきた。そこで従来は補完的な評価項目と位置づけられた平面形状を参照する評価項目を強化することにより、この懸案を解消することを目指している。

5.5 計測用 X 線 CT

X 線 CT は医療用の断層撮影装置として発明・実用化された。その後、主として非破壊検査を主な用途として産業用の X 線 CT 装置が普及した。さらに X 線 CT の 3D スキャンイメージと 3D-CAD イメージとを重ね合わせ、例えば製品・部品の形状が設計通りにできているかどうかを検証するための計測手段として期待が集まっている。

近年になって、例えば光学式座標測定システムと同程度の測定精度を実現する計測用 X 線 CT 装置の開発および製品化が進められている。

X 線 CT は、複数の異なる方向から撮像した X 線透過画像（レントゲン写真）をもとに、計算機上で再構成計算を行って測定対象物の三次元形状を復元する。そのため、測定対象の内部の密度分布や内部の形状に依存して測定性能が変わる。X 線が物体内部を透過することによる長さ測定誤差への影響について、計算機シミュレーションや実験によって検証する試みも報告³⁴⁾ されている。

約 50 mm 角の矩形の輪郭をもつアルミ合金の基板に複数の円筒穴を開けたホールプレートを計測用 X 線 CT により撮像（図 6）して得た断面形状の例を図 7 に示す。この例の場合、X 線がホールプレートを透過する距離はホールプレートの回転方向の角度位置によって $\sqrt{2}$ 倍の変動となる。図 7 には計測用 X 線 CT による測定値について、最小二乗あてはめ円からの偏差を 10 倍に拡大して可視化している。ホールプ

レートの矩形の輪郭形状と相関する形状偏差が円筒穴に現れていることがわかる。

計測用 X 線 CT の性能評価法については産総研のリードによって ISO 10360-11 として開発が始まっている。測定対象物の外部だけでなく内部についての形状・寸法の測定を実現できる特徴と付随する誤差要因とを考慮した、客観的な性能評価法を確立することを目指している。

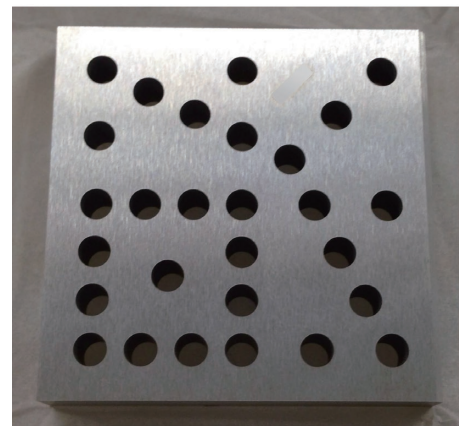
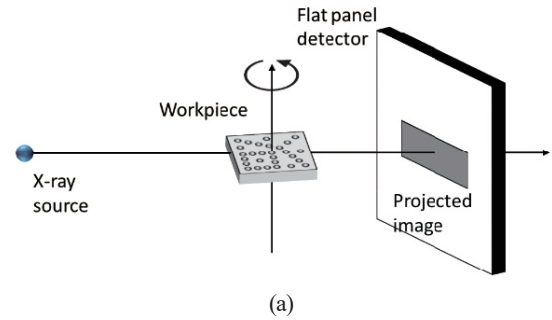


図 6 計測用 X 線 CT によるホールプレートの撮像 (a) 配置 (b) ホールプレート

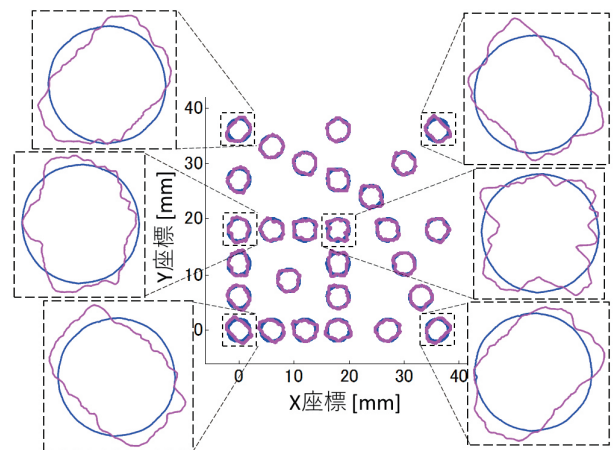


図 7 測定されたホールプレートの断面形状例

5.6 ナノ長さ標準

ナノテク産業で必要な標準は数多くあり、長さ計測も例外ではない。例えば、半導体製造における品質管理には計測性能が保証された走査型電子顕微鏡 CD-SEM が不可欠である。半導体の製造がアジアの諸外国に押される中で、CD-SEM に関して日本は優位を保っておりその世界シェアも非常に高い。

CD-SEM の試料チャンバー内には校正済みのマイクロスケールが搭載されており、それを定期的に測定することにより正確な長さ測定が行える。現在 100 nm の周期構造を持つマイクロスケールが市販されており、計量法登録事業者制度に基づいてその値を校正する業者も存在する。その校正原理は波長 193 nm の紫外線を試料表面に照射して、スケールにより回折された光の回折角を測定するものである。さらに 50 nm のマイクロスケールも市販されているが、これだけ小さいピッチになると光を使っての測定は不可能であるため、X線の回折を使って測定を行っている。

ここで 100 nm のスケールの校正だけが計量法に基づいて行われると記したのは、X線の波長は、先に述べた特定標準器である光コムより短く、トレーサビリティが確立できないことによる。MeP に載っている光の波長はいずれも、現在のナノテク技術にとっては長すぎて使えない。そこでもっと短い長さ標準を確立する研究と、並行してそれらを計量標準として確立する努力が続けられている。

国際度量衡委員会 (CIPM) 長さ諮問委員会 (CCL) で提案されているナノ長さ標準は、校正を必要とせずに自然現象に基づいて長さ標準が実現される *intrinsic standard* である。具体的には、シリコンの結晶格子間隔が検討されている。

ナノ計測における他の重要な話題は、*method divergence*、つまり測定原理により測定値が異なる現象である。ナノメートルスケールの線幅や粒径測定には、原子間力顕微鏡や電子顕微鏡、光学的方法など、複数の測定方法が使われているが、探針、電子線、光などのプローブと被測定対象との相互作用が異なるため、測定結果も異なる。測定値そのものや個々の方法の不確かさに対して、方法間の結果の差が大きい。標準試料が産業界で装置校正に使用される際や異なる手法の結果比較の際には、*method divergence* に留意しなければいけない。

6. まとめ

国際単位系 (SI) における長さ (メートル: m) の定義の歴史、実現方法、および長さ計測に関する最近の動向について述べた。19 世紀末のメートル原器に

よる最初の定義から始まり、不滅の自然物であるクリプトンランプによる定義、そして基礎物理定数による定義のさきがけとなった、光の速さによる定義改定と、長さ標準の歴史にも語るべきことは多い。

技術的な進歩がこれらの改定を推し進めてきた。一見地味に見える計量標準の世界であるが、長さ標準に関わるだけでも、レーザーの発明による干渉計測や飛行時間測定、エレクトロニクスとコンピュータの発達によるデータ収集・解析、光コムの発明など、多くのノーベル賞にも関わる革新が起こってきた。

メートルは、30 年以上前から時間標準と光の速さ c によって定義されてきたこともあって、時間・周波数分野との融合が一番進んでいる基本単位である。そのため、長さ標準や長さ計測は、光コムの発明にスムーズに対応することができた。そして、このようなメートルの成功が 2019 年の SI の定義大改定を後押ししたと言えよう。

新しい SI の定義はやや取っつきにくい感もあるかもしれないが、基本的には洗練された美しい体系になっており、将来にわたり長期間使っていくのにふさわしいものであると考えている。メートルは最も単純なモデルとして、理解のきっかけにしやすい単位であろう。本稿が読者の計量標準に対する理解の一助となれば幸甚である。

謝辞 本稿の執筆にあたっては、計量研究所 OB であり、元産業技術総合研究所国際部門総括主幹の秋元義明博士に有益なご助言を頂いた。

参考文献

- 1) (独) 産業技術総合研究所 計量標準総合センター、(独) 製品評価技術基盤機構 認定センター 訳編 第 3 版 (EURAMET 文書の翻訳) 「計量学 - 早わかり」 (2009 年)
- 2) 「2003 年「計量標準 100 周年」を迎えて」 AIST Today, 26 (2003)
- 3) 「メートル原器の重要文化財指定」計量のひろば No.55 (2012)
- 4) 万物の尺度を求めて—メートル法を定めた子午線大計測, ケンオールダー著, 吉田三知世翻訳, 早川書房, 2006 年.
- 5) 例えば、平成 25 年理科年表 地 2(578) の、地球の大きさに関する表
- 6) 市口恒雄: 電磁気学における混乱と CPT 対称性の意義 - 対称性に結びつく単位系 -, 科学技術動向, **99**, 22/35 (2009)
- 7) 瀬田勝男: 長さ標準の不確かさ, 計測と制御, **37**, 318/321 (1998)
- 8) 秋元義明, 盛永篤郎, 桜井慧雄 「長さ標準と周波数安定化レーザ」産工会, 革新的研究成果誕生秘話, **33** (2016)
- 9) K. M. Evenson, J. S. Wells, Danielso.BI, G. W. Day and

- F. R. Petersen: Speed of light from direct frequency and wavelength measurements of methane-stabilized laser, *Phys. Rev. Lett.*, **29**, 1346/1349 (1972)
- 10) Documents concerning the new definition of the meter, *Metrologia*, **19**, 163/177 (1984)
 - 11) 自然科学研究機構 国立天文台 編 理科年表オフィシャルサイト https://www.rikanenpyo.jp/FAQ/tenmon/faq_ten_005.html
 - 12) K. Minoshima and H. Matsumoto: High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser, *Appl. Opt.* **39**, 5512/5517 (2000)
 - 13) Practical realizations of the definitions of some important units, BIPM ホーム ページ <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies.html>
 - 14) 高辻 利之: 長さ (m) についての基礎解説と最新動向, 計測と制御, **53**, 523/528 (2014)
 - 15) J. Stone *et al.*: Advice from the CCL on the use of unstabilized lasers as standards of wavelength: the helium-neon laser at 633 nm, *Metrologia*, **46**, 11/18 (2009)
 - 16) 石川純: 誰でも作れて携行できる長さの国家標準器, シンセシオロジー, **2**, 276/287 (2009)
 - 17) ヘンシュ教授とホール博士は, 光周波数コムなど精密分光学の発展への貢献により 2005 年度のノーベル物理学賞を受賞された: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2005/index.html
 - 18) 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*, **288**, 635 (2000)
 - 19) 稲場肇, 大苗敦, 中嶋善品, 洪鋒雷: 特集 特定標準器 光周波数コムと長さの特定標準器, 計測標準と計量管理, **59**, 2/8 (2009)
 - 20) 大苗敦, 稲場肇, 洪鋒雷: 光周波数コムによる長さの国家標準, 光アライアンス, **21**, 52/56 (2010)
 - 21) 稲場肇: メトロロジーにおけるファイバコム, 分光研究, **62**, 238/245 (2013)
 - 22) P. E. Ciddor: Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared, *Appl. Opt.*, **35**, 1566/1573 (1996)
 - 23) T. Kim *et al.*: Simple, real-time method for removing the cyclic error of a homodyne interferometer with a quadrature detector system, *Appl. Opt.*, **44**, 3492/3498 (2005)
 - 24) S. Yokoyama *et al.*: A heterodyne interferometer constructed in an integrated optics and its metrological evaluation of a picometre-order periodic error, *Precision Engineering*, **54**, 206/211 (2018)
 - 25) 尾藤洋一, 平井亜紀子, 吉森秀明, 洪鋒雷, 大苗敦, 岩崎茂雄, 瀬田勝男: 3本の安定化レーザを用いた長尺ブロックゲージ干渉計の開発, 精密工学会誌, **68**, 542/547 (2002)
 - 26) A. Hirai *et al.*: Evaluation of long-term stability of low thermal expansion coefficient materials using gauge block interferometers, *Meas. Sci. Technol.*, **29**, 064014 (2018)
 - 27) 横山雄一郎, 栗山豊, 境久嘉, 鳴海達也, 山中誠: 両端面光波干渉測定システムの開発とその実用化, 精密工学会誌, **80**, 142/145 (2014)
 - 28) Y. Kuriyama *et al.*: Development of a new interferometric measurement system for determining the main characteristics of gauge blocks, *Annals of CIRP*, **55**, 563/566 (2010).
 - 29) A. Abdelaty *et al.*: Challenges on double ended gauge block interferometry unveiled by the study of a prototype at PTB, *Metrologia*, **49**, 307/314 (2012).
 - 30) 大澤尊光, 高辻利之, 佐藤理: ものづくり産業を支える高精度三次元形状測定, 一計量トレーサビリティ体系の構築と標準化一, シンセシオロジー, **2**, 101/112 (2009)
 - 31) ISO 10360-8: Geometrical product specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) -- Part 8: CMMs with optical distance sensors, (2013)
 - 32) JIS B7440-8: 製品の幾何特性仕様 (GPS) 一座標測定システム (CMS) の受入検査及び定期検査—第8部: 光学式距離センサ付き座標測定機 (2015)
 - 33) VDI/VDE 2634 Part6.2: Optical 3-D measuring systems, Optical systems based on area scanning (2002)
 - 34) K. Matsuzaki, O. Sato, H. Fujimoto, M. Abe and T. Takatsuji: A study of mechanism of bi-directional measurement influenced by material on dimensional measurement using X-ray CT, *Int. J. Automation Tech.*, **11**, 707/715 (2017)

プランク定数にもとづくキログラムの新しい定義とその実現方法

藤井 賢一

産業技術総合研究所 工学計測標準研究部門 首席研究員

1 はじめに

キログラムは質量の SI 基本単位であり、多くの力学関連量を表す際に用いられる最も基本的な単位のひとつである。力、トルク、密度、粘度、質量流量などの力学量に加えて比熱などのように単位質量あたりの物理量を表すときにも用いられる。また、原子や素粒子の質量やその相対論的エネルギーを求める場合にも用いられるので、その利用範囲は極めて広い。

現在、SI 基本単位として用いられているメートル (m) とキログラム (kg) の概念が明確になってきたのは 18 世紀末のフランス革命の頃に遡る。このとき、メートルは北極から赤道までの子午線の長さの 1 千万分の 1 として定義された。長さの単位が定義できたので、物体の形状を測れば長さの定義から体積の単位をつくることができる。当時、4°C における純水の最大密度は一定であると考えられていたので、キログラムは最大密度にある純水 1 リットルの質量として定義された。しかし、質量を測る度に水の体積を測るのは大変なので、利便性の観点から分

銅の質量に置き換えられた。このような考え方にもとづいてつくられた純粋な白金製の確定メートル原器と確定キログラム原器 (図 1 参照) を基準として、1799 年に世界で最初にフランスでメートル法が公布された。

その後、メートル法の優位性は海外でも認められるようになり、1875 年にメートル条約が締結されると国際度量衡局 (BIPM) が設立され、1889 年にメートル条約にもとづいて第 1 回国際度量衡総会 (CGPM) が開催された。このとき、キログラムは白金にイリジウムを 10 % 混ぜて硬度を高めた白金イリジウム合金製の国際キログラム原器 (International Prototype of the Kilogram: IPK) によって定義された (図 2 参照)。当時、IPK と同じ材料でつくられた複製品が 40 個つくられ、IPK との質量比較によってそれぞれ質量が値づけされたキログラム原器がメートル条約加盟国に配布された。世界の質量標準は IPK とキログラム原器によって維持されてきた。キログラムは、この IPK という 130 年前につくられた人工物の質量によって維持されてきた非常に珍しい単位である。7 つの SI 基本単位のなかで最後まで人工物によって定義されてきたのがキログラムだった。

しかし、図 3 に示すとおり、IPK やその複製品は人



図 1 1799 年にフランスのメートル法で採用された確定キログラム原器 (左) と確定メートル原器 (右) : 何れも純粋な白金製。写真提供 : Terence J. Quinn 元 BIPM 局長



図 2 1889 年にメートル条約にもとづいて質量の単位の定義として採用された国際キログラム原器 : 直径、高さともに 39 mm の直円筒型。白金イリジウム合金製。写真提供 : BIPM

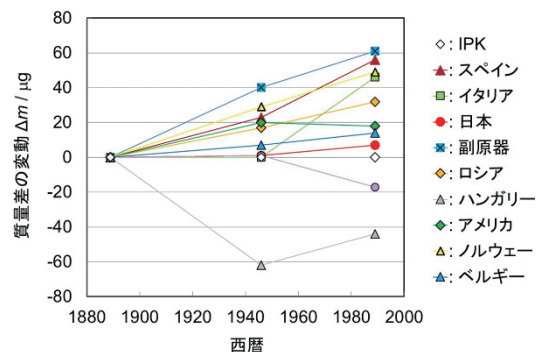


図 3 100 年間における各国のキログラム原器と国際キログラム原器 (IPK) との質量差の変動 Δm の履歴 : 副原器は BIPM に保管されている IPK の複製品。多くのキログラム原器の質量は IPK に対して増加してきたかのようにみえるが、IPK そのものの質量が減少してきた可能性もある。

工物なので、表面汚染などによる質量変動が避けられない。このため、これらの質量の安定性は 50 μg (1 億分の 5) 程度が限界であると考えられている¹⁾³⁾。

このため基礎物理定数⁴⁾など自然界に存在する決して変わることのない普遍的な定数にもとづいてキログラムの定義を改定することがかなり以前から提案されてきた。しかし、これまでは IPK の質量安定性を超える精度でアボガドロ定数やプランク定数などの基礎物理定数を測定することができなかつたため、キログラムの定義改定は長い間実現しなかつた。2012 年の科学誌ネイチャー⁵⁾によれば、キログラムの定義改定は重力波検出などと並び、物理学において解決できていない 5 つの重要課題の 1 つに挙げられていた。

しかし今世紀に入ってからようやく、これを上まわる精度での測定が可能になり、国際度量衡委員会 (CIPM) の単位諮問委員会 (CCU) では、キログラムだけではなくアンペア、ケルビン、モルを含む 4 つの SI 基本単位をそれぞれプランク定数 h 、電気素量 e 、ボルツマン定数 k 、アボガドロ定数 N_A を用いて定義し直すことを提案してきた^{6,7)}。

2011 年に開催された第 24 回 CGPM では、上記の 4 つの SI 基本単位の定義を将来同時に改定するという基本方針を採択した。この時点では定義を改定する時期と、用いるべき基礎物理定数の値は決められなかつたが、将来、これらの基礎物理定数の不確かさが十分に小さくなった段階で、科学技術データ委員会 (CODATA) の基礎定数作業部会 (Task Group on Fundamental Constants: TGFC)⁴⁾ が決定する値を用いてこれらの SI 基本単位の定義を改定することが採択された。さらに 2014 年に開催された第 25 回 CGPM では、前回の決議を引き継ぐとともに、2018 年に開催される第 26 回 CGPM において、これらの定義改定を実施するかどうかを審議することが決議された。そのために、CODATA の基礎定数作業部会 (TGFC) では 2017 年 7 月 1 日までに受理された論文に報告されているデータにもとづいて、SI の新しい定義で用いられるプランク定数 h 、電気素量 e 、ボルツマン定数 k 、アボガドロ定数 N_A の特別調整値を決定した^{8,9)}。

2018 年 11 月に開催された第 26 回 CGPM では、CODATA の TGFC が決定した特別調整値を用いて新しい定義に移行することが、メートル条約加盟国の賛成多数で採択された。その結果、2019 年 5 月 20 日の世界計量記念日 (World Metrology Day) から新しい定義が施行され、130 年ぶりにキログラムの定義が改定された。

本稿ではキログラムの定義改定をめぐる最新の動向について解説するとともに、プランク定数にもと

づく新しい定義がもたらす影響などについて述べる。

2 新しい定義についての考え方

キログラムの新しい定義としては、原子の数から質量を決めるアボガドロ定数 N_A にもとづくものと、アインシュタインの関係式 (特殊相対性理論と光量子仮説) から光子のエネルギーと質量とを関係づけるプランク定数 h にもとづくものが提案されてきた¹⁰⁻¹⁹⁾。前者は比較的古くからある考え方であり、相対原子質量の基準である ^{12}C の 1 原子あたりの質量を基準にすれば、

- ◆ キログラムは基底状態にある静止した $5.018\cdots \times 10^{25}$ 個の自由な炭素原子 ^{12}C の質量に等しい。

と定義することができる。ここで、 $5.018\cdots \times 10^{25}$ という数値はアボガドロ定数 $N_A = 6.022\cdots \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ の数値の部分に 1000/12 倍して求めることができる。

一方、プランク定数にもとづく定義は比較的最近提案されるようになってきた考え方である。前述のアインシュタインの関係式を用いればエネルギーを $E = mc^2 = h\nu$ と表すことができる。ここで、 m は物体の静止質量、 ν は光子の周波数を表す。エネルギーと質量が等価であり、しかも光子の周波数によってそのエネルギーを表すことができるので、静止質量 m と等価なエネルギーをもつ光子の周波数は $\nu = mc^2/h$ として表すことができる。真空中の光の速さ $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ は 1983 年のメートルの定義改定以来、既に不確かさのない定数になっているので、 m に 1 kg を代入して、プランク定数 $h = 6.626\cdots \times 10^{-34} \text{ J s}$ を不確かさのない定数として定義してしまえば、

- ◆ キログラムは周波数が $(299\,792\,458)^2/(6.626\cdots \times 10^{-34})$ ヘルツ (Hz) の光子のエネルギーと等価な質量である。

と定義することもできる。

キログラムの定義を改定する上で、アボガドロ定数とプランク定数の何れを基準にすべきであるのかがしばしば議論されてきたが、キログラムだけに着目すれば、何れの定数を用いても定義することが可能である。ここで重要なことは N_A と h の間に厳密な関係が成立するということである。 M_e を電子のモル質量、 α を微細構造定数、 R_∞ をリュードベリ定数とすると、電子の質量は $m_e = 2h R_\infty / (c \alpha^2)$ で表され、定義から $N_A = M_e / m_e$ であることから、 N_A は以下の式によって h に関連づけられる。

$$N_A = \frac{cM_e\alpha^2}{2R_\infty h} \quad (1)$$

上式において、 h を除く基礎物理定数群 $N_A h = c M_e \alpha^2 / (2 R_\infty)$ はモルプランク定数 (molar Planck constant) と呼ばれ、その値は 4.5×10^{-10} の相対標準不確かさで既に求められている⁴⁾。この不確かさは N_A や h についての最新の測定の不確かさよりも十分に小さいので、何れの定数を用いてもキログラムを定義することが原理的には可能である。

しかし、電圧と電気抵抗についてはそれぞれ交流ジョセフソン効果と量子ホール効果を用いた電気標準が既に実用化され、高い再現性で維持されている。このため、プランク定数 h をキログラムの定義に採用し、さらに電気素量 e も不確かさのない定数として定義してしまえば、ジョセフソン定数 ($K_J = 2e/h$) とフォンクリッツィング定数 ($R_K = h/e^2$) に関する 1990 年の協定値 ($K_{J,90}$ と $R_{K,90}$)^{20), 21)} に頼ることなく、SI の定義として交流ジョセフソン効果と量子ホール効果からアンペアの定義を実現することが可能になる。このような考え方から、2011 年に開催された第 24 回 CGPM では、キログラムの定義として以下のようにプランク定数 h の値を明示する表現方法が採択された。

- ◆ 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 $J \cdot s$ ($kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ に等しい) で表したときに、その数値を $6.626 \dots \times 10^{-34}$ と定めることによって定義される。

今回の定義改定ではアンペア、ケルビン、モルの定義についても同様にそれぞれ電気素量 e 、ボルツマン定数 k 、アボガドロ定数 N_A の値を明示する表現方法が採択された。

3 アボガドロ定数の測定方法

従来用いられてきた SI の定義^{22, 23)} では、アボガドロ定数 N_A はモルの定義から測定によって求められる基礎物理定数だったので、12 g の ^{12}C に含まれる原子の数を数えればよいと思われるかもしれない。しかし、その数が膨大であるため、直接的に原子や分子の数を測るには天文学的に長い時間を要する。そこで、シリコン結晶などの完全性の高い結晶の格子面間距離を測定して原子の数を求める X 線結晶密度 (X-ray crystal density: XRCD) 法²³⁾ と呼ばれる測定原理が開発されてきた。

図 4 に示すようにシリコン結晶などは立方晶系に属する結晶であり、格子定数 a の単位胞 (unit cell) には平均で 8 個の原子が含まれ、その体積は a^3 である。シリコン結晶の単位胞の密度、すなわち、微視的な密度が巨視的な密度 $\rho(\text{Si})$ に等しいものと仮定すると、シリコン原子 1 個あたりの質量 $m(\text{Si})$ は $\rho(\text{Si})a^3/8$ に等しい。また、モルの定義

から、アボガドロ定数は $N_A = M(\text{Si})/m(\text{Si})$ として求められる。ここで、 $M(\text{Si})$ はシリコンのモル質量 (1 モル当たりの質量) を表す。したがって、アボガドロ定数は次式で与えられる。

$$N_A = \frac{M(\text{Si})}{m(\text{Si})} = \frac{8M(\text{Si})}{\rho(\text{Si})a^3} \quad (2)$$

上式において、面指数 (lmn) の格子面間隔を d_{lmn} とすると格子定数は $a = (l^2 + m^2 + n^2)^{1/2} d_{lmn}$ として与えられるので、例えば、面指数 (2 2 0) の格子面間隔 d_{220} を X 線回折によって測定すれば格子定数は $a = 8^{1/2} d_{220}$ として求められる。

モル質量は同位体存在比の測定から求められる。自然界に存在するシリコンには 3 種類の安定同位体 ^{28}Si 、 ^{29}Si 、 ^{30}Si があり、それらの存在比はそれぞれ約 92 %、5 %、3 % である。これらの核種の相対原子質量 $A_r(^i\text{Si})$ は 10^{-10} よりも小さい相対標準不確かさで既に求められているので、それぞれの核種の存在比 $x(^i\text{Si})$ を質量分析計によって測定すれば、その平均モル質量は次式から求められる。

$$M(\text{Si}) = \sum_{i=28}^{30} x(^i\text{Si})M(^i\text{Si}) \quad (3)$$

ここで、 $\sum_{i=28}^{30} x(^i\text{Si}) = 1$ であり、従来の SI の定義において各核種のモル質量は $M(^i\text{Si}) = A_r(^i\text{Si}) \text{ g/mol}$ として与えられる。

X 線結晶密度法によるアボガドロ定数の測定において重要な役割を果たしたのは、1965 年の Bonse ら²⁵⁾ による X 線干渉計 (x-ray interferometer) の開発である。それまで、結晶の格子定数は X 線の波長を基準として X 線回折から求められていたが、基準となる X 線波長の不確かさが大きかったため、それよりも小さい不確かさで格子定数を測定できなかった。X 線干渉計が開発されたことによって、光の波長を基準にして格子定数を測定することが可能となり、不確かさが飛躍的に減少した。

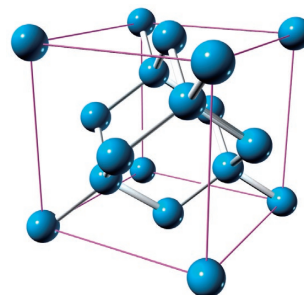


図 4 シリコンの結晶構造：一辺の長さはを格子定数 a とする立方晶系の単位胞には平均で 8 個のシリコン原子が含まれる。

その後、この測定には様々な改良が施され、NMIJの成川ら³¹⁾は、シリコン結晶の溶媒として、従来よく用いられてきた水酸化ナトリウム (NaOH) に代わり、水酸化テトラメチルアンモニウム (TMAH) を用いた。これによって、ICP-MS によるイオン電流測定ノイズ (background) を減らすことができるようになり、²⁸Si 同位体濃縮結晶のモル質量測定の相対標準不確かさを 5.2×10^{-9} まで低減させることが可能になった。

3.2 球体を用いた結晶密度の測定

従来、シリコン単結晶の密度測定にはアルキメデスの原理を用いた浮力測定が用いられてきたが、シリコン単結晶球体を用いれば、浮力測定を介すことなく、その質量と形状計測からシリコン単結晶の密度を直接求め、密度測定の精度を極限まで向上させることができる。このため、アボガドロ国際プロジェクトでは²⁸Si 同位体濃縮単結晶から質量約 1 kg、直径約 94 mm の球体 2 個を切り出して研磨した。

アボガドロ国際プロジェクトを開始した当初、球体はオーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO)³²⁾ で研磨されていたが、その後、金属による表面汚染が少ない研磨技術が PTB で開発され、直径の凹凸の最大値が約 70 nm、標準偏差が約 7 nm の球体が得られるようになった。凹凸の小さい球体の体積はその平均直径から小さい不確かさで求めることができるという幾何学的な解析結果³³⁾があるので、NMIJ では球体の表面にほぼ均一に分布した 2320 方位からその直径を測定した。直径測定のために倉本ら^{34), 35)} 開発したレーザー干渉計を図 7 に示した。

直径測定においては球体の温度測定も重要な要素である。X 線結晶密度法において結晶試料の熱力学温度の絶対値は必要ではないが、シリコン結晶の線

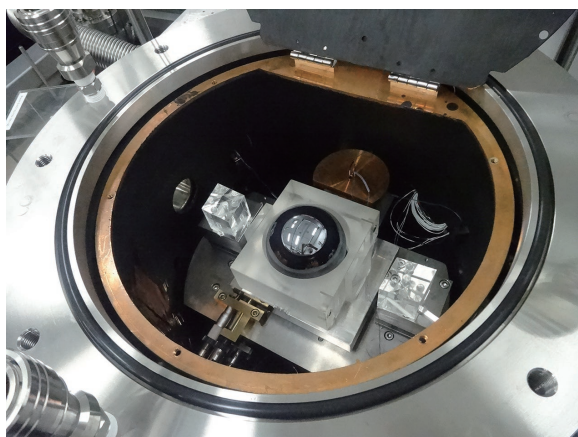


図 7 中央に見えるシリコン球体の直径 (約 94 mm) をサブナノメートルの精度で測るレーザー干渉計^{34), 35)}。

膨張係数は室温において約 $2.56 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ なので、X 線干渉計によって格子定数を測ったときの温度と球体の直径を測った時の温度が高い精度で整合している必要がある。このため、図 7 に示す真空容器の側面と上下面に恒温水を循環させて真空槽そのものの温度を一定に保ち、さらに真空容器の内部に銅の放射シールドを設け、放射シールドの外側に面状に貼りつけたヒーターによって、放射シールドの温度を制御する。放射シールドの内面には黒体塗装が施してあるので、黒体放射によって球体の温度を一定に保つ。このようにして得られる球体の温度の安定性は約 0.3 mK であり、ITS-90 にもとづく温度測定の標準不確かさは 0.6 mK である³⁴⁾。

²⁸Si 同位体濃縮単結晶球体の表面は厚さ数ナノメートルの酸化膜などの表面層で覆われている。このため、NMIJ では精密な密度測定を行うために、藤田ら³⁶⁾ による分光エリプソメトリー (SE) と張ら³⁷⁾ による X 線光電子分光法 (XPS) など複数の表面計測技術によって、球体表面に存在する物質の種類、化学組成、化学的結合状態、厚さなどを評価し、シリコン単結晶の部分 (core) の体積と質量からその密度を求める方法を開発した。これらの表面分析技術を導入することによって、表面層が直径測定に与える影響の標準不確かさを 0.2 nm 程度にまで低減させることに成功した³⁵⁾。温度測定や表面分析などの不確かさを考慮した直径測定の標準不確かさは 0.6 nm であり、水島ら³⁸⁾ による球体の質量測定や表面層の質量測定^{35), 37)} の不確かさなど、全ての不確かさを含めると、²⁸Si 同位体濃縮単結晶の密度測定の相対標準不確かさは約 2.3×10^{-8} である。

3.3 格子定数の測定とその均一性の評価

X 線干渉計によって X 線の明滅を観測するためには、数ナノラジアン ($\text{nrad} = 10^{-9} \text{ rad}$) の精度でアナライザーの角度を制御し、かつ、その移動距離を数ピコメートル (pm) の精度で測定する必要がある。このため、従来の X 線干渉計では、精度の高い並行移動を実現するために金属の弾性変形を使ったヒンジメカニズム¹⁰⁾ を用いていた。しかし、その移動距離は最も大きい場合でも 0.1 mm 程度だったので、格子定数の測定精度を向上させることは困難だった。

この問題を解決するために、INRiM の Massa ら³⁹⁾ は移動距離 50 mm の移動台の上に置かれた 3 個の圧電素子 (PZT) を利用し、アナライザーの動きを原子レベルの精度でセンシングして制御し、極めて高い精度での並行移動を実現しながら長い移動距離を得ることに成功した。これによって格子面間距離 d_{220} の測定精度が大幅に向上し、 1.7×10^{-9} の相対標準不確

かさで格子定数を測定することが可能になった。

結晶内の格子定数は必ずしも一様ではなく、不純物濃度などの影響によって格子定数は変化する。このため、X線干渉計の部分の測定だけから結晶全体の格子定数を評価することはできない。NMIJの早稲田ら⁴⁰⁾は高エネルギー加速器研究機構(KEK)で得られる放射光を利用し、自己参照型格子比較器を開発した。これによって、高い分解能で板状の結晶試料の格子定数の2次元分布を短時間で評価することが可能になった。その結果、格子定数の2次元分布の標準偏差は 5.5×10^{-9} であることが確かめられた。また、この評価技術は、異なる結晶試料間の格子比較にも利用されている。

4 プランク定数の測定方法

ワットバランス (watt balance)^{41), 42)}は電流天びんとも呼ばれ、当初はアンペアの定義を実現するために考案された実験装置であるが、電圧は交流ジョセフソン効果、電気抵抗は量子ホール効果によって実現できるようになった現在では、電気標準の再現性が飛躍的に高まった。このため、電気標準を基準として、逆にキログラムの定義を実現することが試みられている。最近では原理発明者の名前に因んでキップルバランス (Kibble balance) と呼ばれることも多い。

その測定原理を図8に示した。磁束密度 B の磁場中で長さ L の導体に電流 I を流したときに導体に働く電磁力 F を測定し、次に、同一磁場中における同一導体を速度 v で移動したときに生じる電圧(起電力) U を測定する。このときの電氣的仕事率 UI は力学的仕事率 Fv に厳密に等しくなる。この測定方法がワットバランス(仕事率天びん)法と呼ばれる由縁である。電圧 U は、ジョセフソン電圧 $U_{J1} = n_1 f_1 / K_J$ として測定することができる。ここで、 n_1 はシャピローステップの数を表す整数、 f_1 はジョセフソン接合素子に

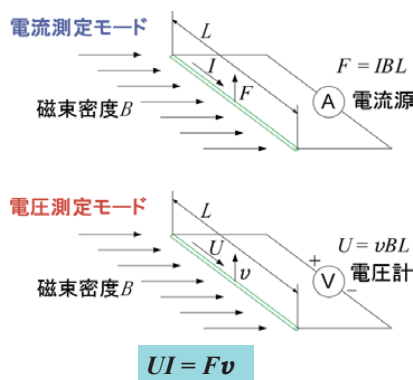


図8 キップルバランス法による仕事率の測定原理: 電磁力 F と速度 v の積は電圧 U と電流 I の積に厳密に等しくなる。

照射するマイクロ波の周波数を表す。また、量子化ホール抵抗 $R_H(i) = R_K/i$ (i は整数)によって校正された標準抵抗の抵抗値を $R = bR_H$ (b は校正係数)として、この標準抵抗に電流 I を流し、この標準抵抗に生ずる電位差をジョセフソン電圧 $U_{J2} = n_2 f_2 / K_J$ として測定すれば、電気標準を基準として電流 I を計測することができる。このとき電氣的仕事率は次式で表される。

$$UI = \frac{U_{J1} U_{J2}}{R} = \frac{i n_1 n_2 f_1 f_2}{b K_J^2 R_K} = h \frac{i n_1 n_2 f_1 f_2}{4b} \quad (4)$$

式(4)において電氣的仕事率 UI は力学的仕事率 Fv に等しいので、重力加速度 g のもとで質量 m の物体に加わる重力 mg と釣り合うように電磁力 F を制御すれば、プランク定数 h は次式から求められる。

$$h = \frac{4}{K_J^2 R_K} = \frac{4bFv}{i n_1 n_2 f_1 f_2} = mgv \frac{4b}{i n_1 n_2 f_1 f_2} \quad (5)$$

式(5)において、電磁力 F と速度 v は、質量、長さ、時間の測定から求められる。したがって、交流ジョセフソン効果と量子ホール効果を用いることにより、キップルバランス法からSI単位の定義にしたがってプランク定数 h を絶対測定することができる。キログラムの定義改定後には、逆にプランク定数 h を基準として式(5)から物体の質量 m を求め、キログラムの新しい定義を実現する。

図9にラジアル磁場(中心から周囲に湧き出る磁場)を用いた測定原理を示した。ラジアル磁場を用いると、ムービングコイルの移動範囲にわたってほぼ均一な磁場が得られ、また、移動コイルを通過する全磁束が、コイルの大きさや形によらずにほぼ一定に保たれるので、安定性の高い測定が可能になる。ムービングコイルとラジアル磁場を用いても $UI = Fv$ という関係が保たれる。(a)の電流測定モードではコイルに電流 I を流し、ムービングコイルが発生する電磁力 F と重力 mg が釣り合うように電流 I を制御する。この時、ムービングコイル側(左)に1kgの分銅を置き、補助コイル側(右)に500gの分銅を置いた状態で、1kgの分銅を加除すると、電流 I の向きを変えることで1kgの質量差に相当する電磁力差を発生させることができるので、より少ない電流での測定が可能になり、コイルでの発熱を抑えることができる。また、電流 I の向きを変えることで、電圧測定に伴うオフセットなどを相殺することができる。キップルバランス法では絶対重力加速度計を用いた g の精密測定も必要である。(b)の電圧測定モードでは、ムービングコイルが一定の速度 v で移動するように補助コイルに流す電流を制御し、ムービングコイルの変位を時間の関数としてレーザー干渉計で測定しながら、

ムービングコイルに生じる電圧 U を測定する。

米国国立標準技術研究所 (NIST) の Steiner ら⁴³⁾ はこの方法によって 3.6×10^{-8} の相対標準不確かさで h を測定し、IPK の質量安定性 (5×10^{-8}) を超える精度で h を測定することに世界で初めて成功した。その後、後述するように、カナダ国立研究機構 (NRC) やフランス国立標準研究所 (LNE) でもキップルバランス法による高精度なデータが得られている。

5 プランク定数の決定

アボガドロ国際プロジェクトでは、²⁸Si 同位体濃縮結晶の格子定数、密度、モル質量などの精密測定を行い、2011年から2017年かけて改良を施しながら、合計で4つの測定結果を発表した^{28), 44)-46)}。筆者ら⁴⁷⁾

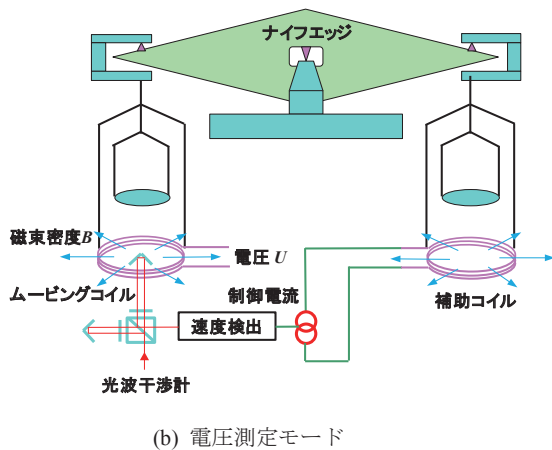
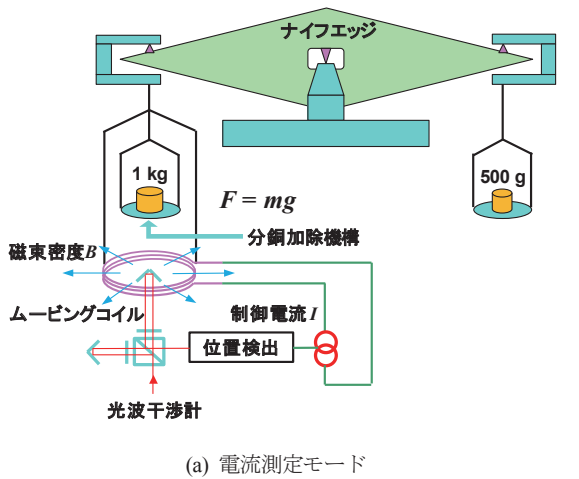


図9 ラジアル磁場を用いたキップルバランス法による仕事率の測定原理: (a) 磁束密度 B の磁場中にあるムービングコイルに流す電流 I を制御し、1 kg の物体に働く重力 mg と電磁力 F とを釣り合わせる。(b) このムービングコイルが同一の磁場中において一定速度 v で移動するよう補助コイルの電流を制御し、ムービングコイルに生じる電圧 (誘導起電力) U を測定する。

はこれらのデータの共分散を評価し、アボガドロ国際プロジェクトで得られた N_A の値を最終的に以下のように評価した。

$$N_A = 6.022\,140\,588(65) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (6)$$

ここで、括弧内の数値は最後の桁における標準不確かさを表す。その相対標準不確かさは 1.1×10^{-8} である。

CODATA では2017年7月1日までに受理された論文に報告されているデータにもとづいて、 h 、 e 、 k 、 N_A の値を決定した。これをCODATAによる2017年特別調整と呼んでいる。プランク定数 h については図10に示す8つのデータからキログラムの新しい定義に用いられる h の値が決定された^{8), 9)}。筆者もCODATA基礎定数作業部会の委員の一人として今回のプランク定数の値と不確かさの評価を行った。これら8つのデータのうち、4つはキップルバランス法⁴⁸⁾⁻⁵¹⁾によって測定され、残りの4つはアボガドロ国際プロジェクト (IAC) においてXRCD法^{28), 44)-46)}によって測定されたものあり、そのうちの1つはNMIJ単独⁴⁶⁾での測定結果である。CODATAでは、これら8つのデータの共分散を評価し、それらの重み付け平均から h の特別調整値を決定した。

さらにCODATAでは音響気体温度計 (acoustic gas thermometer: AGT)⁵²⁾によるモル気体定数 R の測定結果など合計で11のデータからボルツマン定数 k の特別調整値を決定した。電気素量 e の特別調整値は以下の式

$$e = \sqrt{\frac{2ah}{\mu_0 c}} \quad (7)$$

を用いて、アボガドロ定数 N_A の特別調整値は式(1)を用いて h の特別調整値から決定された。

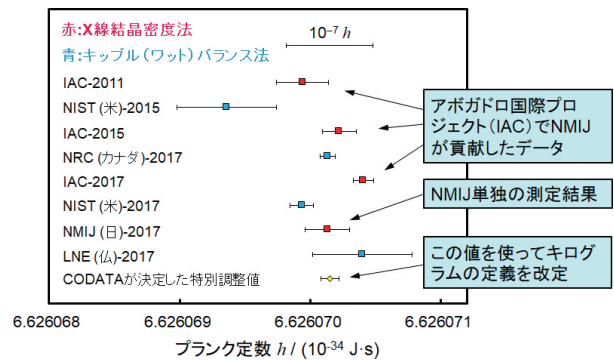


図10 2017年7月1日までに報告されたプランク定数の測定結果とCODATAが決定したプランク定数の特別調整値: エラーバーは標準不確かさを表す。

表 1 に CODATA による h , e , k , N_A についての 2017 年特別調整の結果を示した。プランク定数の特別調整値の相対標準不確かさは 1.0×10^{-8} (1 億分の 1.0) である。これはプランク定数の測定の不確かさが IPK の質量の安定性である 5×10^{-8} (1 億分の 5) よりも十分に小さいことを表す。SI の新しい定義ではこれらの値は表 2 に示す通り、不確かさのない定数として定義された。今回のプランク定数の決定において、NMIJ は半数である 4 つのデータに貢献した。1889 年に IPK によって質量の単位が定義されて以来 130 年ぶりとなるキログラムの定義改定に、日本が大きく貢献する成果を残すことができた。

6 キログラムの新しい定義の実現方法

キップルバランス法によってキログラムの新しい定義の実現する方法については 4 章で既に解説した。X 線結晶密度法によってキログラムの新しい定義を実現する場合、 ^{28}Si 同位体濃縮結晶の格子定数とモル質量は一度測定してしまえば、その結晶については、それらの値は変化しないので、NMIJ では ^{28}Si 同位体濃縮結晶球体の直径、体積、表面の測定からキログラムの定義を精度よく実現するための研究を行っている。

図 11 に示すように、球体の表面には酸化膜 (SiO_2) などの幾つかの層が存在する。これらの層の厚さは数ナノメートル、質量は約 $100 \mu\text{g}$ に及ぶので、キログラムの定義を実現する上では無視できない。このため SE^{36} や XPS^{37} などによって表面層の厚さと質量を評価することが必要である。表面層の質量を m_{SL} 、結晶部分の質量を m_{core} とすると、球全体の質量 m_{sphere} は式 (1) と (2) から次のように表される^{17), 19), 24)}。

表 1 CODATA による 2017 年特別調整

基礎物理定数	値	相対標準不確かさ
プランク定数 h	$6.626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J s}$	1.0×10^{-8}
電気素量 e	$1.602\,176\,6341(83) \times 10^{-19} \text{ C}$	5.2×10^{-9}
ボルツマン定数 k	$1.380\,649\,03(51) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	3.7×10^{-7}
アボガドロ定数 N_A	$6.022\,140\,758(62) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	1.0×10^{-8}

括弧内の数値は最後の標準不確かさを表す。

表 2 SI の新しい定義で用いられる基礎物理定数

単位	記号	基礎物理定数	値
キログラム	kg	プランク定数 h	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$
アンペア	A	電気素量 e	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$
ケルビン	K	ボルツマン定数 k	$1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
モル	mol	アボガドロ定数 N_A	$6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

$$m_{\text{sphere}} = m_{\text{core}} + m_{\text{SL}}$$

$$= \frac{2hR_{\infty}}{ca^2} \frac{\sum_{i=28}^{30} x(^i\text{Si})M(^i\text{Si})}{A_r(e)} \frac{8V_{\text{core}}}{a^3} - m_{\text{deficit}} + m_{\text{SL}} \quad (8)$$

ここで、 V_{core} は光波干渉測定と表面分析から得られる ^{28}Si 同位体濃縮結晶球体の結晶部分の体積、 $A_r(e)$ は電子の相対原子質量、 m_{deficit} は不純物や原子空孔などの点欠陥の影響を表す。式 (8) において $2hR_{\infty}/(ca^2)$ は電子の質量 m_e を表すので、この方法がプランク定数にトレーサブルであることを示す。今のところ、NMIJ では $24 \mu\text{g}$ の標準不確かさでプランク定数からキログラムの新しい定義を実現することに成功している³⁵⁾。

7 キログラムの新しい定義がもたらすもの

キログラムの新しい定義がもたらす恩恵として最も大きなものは、BIPM に保管されている IPK に頼ることなく、技術さえあれば誰もがプランク定数を基準として質量の基準をもつことができるようになることである。これは 1983 年に長さの定義が光速に移行し、光周波数さえ測れば誰もが長さの基準をもつことができるようになったのと同じである。

キログラム、アンペア、ケルビン、モルの定義が改定されると、 h , e , k , N_A は不確かさのない定数に

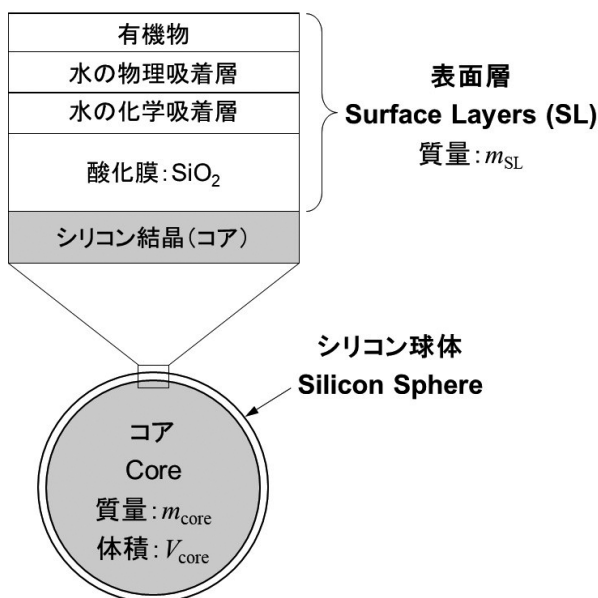


図 11 シリコン単結晶球体の表面には酸化膜 (SiO_2) など厚さの合計が $1 \text{ nm} \sim 2 \text{ nm}$ の層 (surface layer: SL) が存在する: 表面分析によってこれらの厚さと質量を評価し、結晶部分 (core) の体積 V_{core} から X 線結晶密度法によって core の部分の質量 m_{core} を求め、それに表面層の質量 m_{SL} を加えて、シリコン結晶球体全体の質量 m_{sphere} が求められる。

なり、これに応じて他の多くの基礎物理定数の値と不確かさも変化する。表3に代表的な基礎物理定数の不確かさをまとめた。今回のSI定義改定によって K_J や R_K のように不確かさがゼロになるものや、電子質量 m_e のように不確かさが大幅に小さくなるものもあるが、磁気定数（真空の透磁率） μ_0 や炭素 ^{12}C のモル質量 $M(^{12}\text{C})$ のように、これまで不確かさのない定数として扱われてきたものが測定量（measurand）になり、微細構造定数 α やリュードベリ定数 R_∞ などの値に応じて変化する変数になるものもある¹⁶⁾⁻¹⁹⁾。

従来のキログラムの定義では1 kgという特定の基準に縛られていたので、そこからの拡張として質量の測定範囲を広げる必要があったが、その基準がプランク定数に移行したので、任意の質量を実現することが可能になる。現在の質量標準で実用化されている最も小さい分銅は50 μg であり、質量が小さくなるほど分銅の質量校正の相対不確かさは増大するので、この分銅を使って校正される天びんの目盛りの最小不確かさは100 ng程度である。新しい定義では分銅に頼る必要がないので、プランク定数にトレーサブルな計測技術さえ開発すれば、さらに小さい領域の質量を測ることも可能になる。このような研究事例としては、電圧天びん（voltage balance）を使ったナノグラム領域での質量計測^{17), 53)-55)}や微小トルク計測⁵⁶⁾などが挙げられる。これらの測定方法は h と e を頂点とする電気標準にトレーサブルなので、プランク定数にもとづく微量の計測技術として用いることができる。このような計測技術は例えば新薬の開発や環境中の微粒子の質量計測、インクジェット技術、半導体デバイスなどの薄膜の質量評価などを

通じてナノテクノロジーなどに広く貢献するものと期待されている⁵⁷⁾。

参考文献

- 1) T. Quinn: The Kilogram: The Present State of Our Knowledge, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **40**, 81/85 (1991)
- 2) G. Girard: The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988-1992), *Metrologia*, **31**, 317/336 (1994)
- 3) Michael Stock, Pauline Barat, Richard S. Davis, Alain Picard and Martin J. T. Milton: Calibration campaign against the international prototype of the kilogram in anticipation of the redefinition of the kilogram part I: comparison of the international prototype with its official copies, *Metrologia*, **52**, 310/316 (2015)
- 4) P. J. Mohr, B. N. Taylor and D. B. Newell: CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014, *Rev. Mod. Phys.*, **88**, 035009 (2016)
- 5) N. Jones: Five experiments as hard as finding the Higgs, *Nature*, **481**, 14/17 (2012)
- 6) I. Mills, P. Mohr, T. Quinn, B. Taylor and E. Williams: Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005), *Metrologia*, **43**, 227/246 (2006)
- 7) P. Becker, P. De Bièvre, K. Fujii, M. Gläser, B. Inglis, H. Luebbig and G. Mana: Considerations on future redefinitions of the kilogram, the mole and of other units, *Metrologia*, **44**, 1/14 (2007)
- 8) D. Newell, F. Cabiati, J. Fischer, K. Fujii, S. Karshenboim, H. S. Margolis, E. de Mirandes, P. J. Mohr, F. Nez, K. Pachucki, T. J. Quinn, B. N. Taylor, M. Wang, B. M. Wood and Z. Zhang: The CODATA 2017 Values of h , e , k , and NA for the Revision of the SI, *Metrologia*, **55**, L13/L16 (2018)
- 9) P. Mohr, D. Newell, B. Taylor and E. Tiesinga: Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental

表3 SIの定義改定が基礎物理定数の不確かさに与える影響

基礎物理定数	記号	(a) 従来の定義	(b) $u_r \times 10^9$	(c) 新しい定義	(b) $u_r \times 10^9$
ジョセフソン定数	K_J	$2e/h$	5.2		0
フォンクリツティング定数	R_K	h/e^2	0.23		0
モル気体定数	R	$N_A k$	370		0
ファラデー定数	F	$N_A e$	370		0
シュテファン-ボルツマン定数	σ	$2\pi^5 k^4 / (15 h^3 c^2)$	1500		0
電子質量	m_e	$2hR_\infty / (c\alpha^2)$	10		0.45
^{12}C の原子質量	$m(^{12}\text{C})$	$12m_u = M(^{12}\text{C})/N_A$	10		0.45
統一原子質量定数	m_u	$m(^{12}\text{C})/12$	10		0.45
微細構造定数	α	$\mu_0 c e^2 / (2h)$	0.23		0.23
国際キログラム原器の質量	$m(\mathcal{K})$	1 kg	0		10
磁気定数（真空の透磁率）	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$	0	$2ah/(ce^2)$	0.23
電気定数（真空の誘電率）	ϵ_0	$1/(\mu_0 c^2)$	0		0.23
水の三重点における熱力学温度	T_{TPW}	273.16 K	0		370
^{12}C のモル質量	$M(^{12}\text{C})$	12 g/mol	0	$2N_A h R_\infty [m(^{12}\text{C})/m_e] / (c\alpha^2)$	0.45

(a) CODATAが2017年特別調整を実施した時点での状態

(b) u_r は相対標準不確かさを表す。

(c) 2019年5月20日にSIの定義が改定された時点での状態。(a)に示した定義から変更のある場合のみ新しい定義を示した。

- constants adjustment, *Metrologia*, **55**, 125/146 (2018).
- 10) 中山貫, 藤井賢一: シリコン格子定数の絶対測定とアボガドロ定数の決定, *応用物理*, **62**, 245/252 (1993)
 - 11) 藤井賢一: 質量標準と基礎物理定数—質量の単位の定義をめぐる最近の動き, *応用物理*, **68**, 656/662 (1999)
 - 12) 藤井賢一, 大苗敦: 基礎物理定数の新しい推奨値—アボガドロ定数とプランク定数の決定をめぐる最近の動き, *日本物理学会誌*, **57**, 239/246 (2002)
 - 13) 藤井賢一: キログラムの再定義—単位の普遍性をめざして—, 〈はかる〉科学, 第2章, 中公新書, 坂上孝・後藤武編著 (2007)
 - 14) 藤井賢一: 国際単位系 SI—普遍定数に基づく再定義の動き, *数理科学*, **599**, 16/21 (2013)
 - 15) 藤井賢一: 質量標準の現状とキログラム (kg) の定義改定をめぐる最新動向, *計測と制御*, **53**, 144/149 (2014)
 - 16) 藤井賢一: キログラムの定義改定に向けた質量標準の開発動向, *日本物理学会誌*, **69**, 604/612 (2014)
 - 17) 藤井賢一: プランク定数を決める!—キログラムの定義改定へ—, *応用物理*, **87**, 774/779 (2018)
 - 18) 藤井賢一, 島岡一博: 進化する単位—物理定数にもとづくキログラムとモルの新しい定義—, *現代化学*, **576**, 29/36 (2019)
 - 19) 藤井賢一: プランク定数にもとづくキログラムの新しい定義, *日本物理学会誌*, **74**, 700/708 (2019)
 - 20) 遠藤忠: 新しい電気量子基準—ジョセフソン効果電圧標準と量子ホール効果抵抗標準—, *応用物理*, **59**, 712/724 (1990)
 - 21) 金子晋久: 超伝導技術を用いた量子電気標準の進展, *応用物理*, **81**, 102/108 (2012)
 - 22) The International System of Units, 8th edition, Bureau International des Poids et Mesures (2006)
 - 23) 「国際文書第8版 (2006)/ 日本語版, 国際単位系 (SI)」, 安心・安全を支える世界共通のものさし, 訳編者: 産業技術総合研究所計量標準総合センター, 第1版, 日本規格協会 (2007)
 - 24) K. Fujii, H. Bettin, P. Becker, E. Massa, O. Rienitz, A. Pramann, A. Nicolaus, N. Kuramoto, I. Busch, M. Borys: Realization of the kilogram by the XRCD method, *Metrologia*, **53**, A19/A45 (2016)
 - 25) U. Bonse and M. Hart: Principles and Design of Laue-Case X-Ray Interferometers, *Z. Phys.*, **188**, 154/164 (1965)
 - 26) S. Valkiers, G. Mana, K. Fujii and P. Becker: Si primary standards for the calibration of ion-current ratios in the molar-mass measurement of natural Si single crystals, *Metrologia*, **48**, S26/S31 (2011)
 - 27) B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl, P. Becker, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, M. Gray, P. Fuchs, K. Fujii, H. Fujimoto, E. Kessler, M. Krumrey, U. Kuettgens, N. Kuramoto, G. Mana, P. Manson, E. Massa, S. Mizushima, A. Nicolaus, A. Picard, A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, S. Valkiers and A. Waseda: Determination of the Avogadro Constant by Counting the Atoms in a ^{28}Si Crystal, *Phys. Rev. Lett.*, **106** 030801 (2011)
 - 28) B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl, P. Becker, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, P. Fuchs, K. Fujii, H. Fujimoto, E. Kessler, M. Krumrey, U. Kuettgens, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, S. Mizushima, A. Nicolaus, A. Picard, A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, S. Valkiers, A. Waseda and S. Zake: Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition, *Metrologia*, **48**, S1/S13 (2011)
 - 29) P. Becker, D. Schiel, H.-J. Pohl, A. K. Kaliteevski, O. N. Godisov, M. F. Churbanov, G. G. Devyatykh, A. V. Gusev, A. D. Bulanov, S. A. Adamchik, V. A. Gavva, I. D. Kovalev, N. V. Abrosimov, B. Hallmann-Seiffert, H. Riemann, S. Valkiers, P. Taylor, P. De Bièvre and E. Dianov: Large-scale production of highly enriched ^{28}Si for the precise determination of the Avogadro constant, *Meas. Sci. Technol.*, **17**, 1854/1860 (2006)
 - 30) A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, J. Schlote, B. Güttler and S. Valkiers: Molar mass of silicon highly enriched in ^{28}Si determined by IDMS, *Metrologia*, **48**, S20/S25 (2011)
 - 31) T. Narukawa, A. Hioki, N. Kuramoto and K. Fujii: Molar-mass measurement of a ^{28}Si -enriched silicon crystal for determination of the Avogadro constant, *Metrologia*, **51**, 161/168 (2014)
 - 32) A. Leistner and W. Giardini: Fabrication and sphericity measurements of single-crystal silicon spheres”, *Metrologia*, **31**, 231/243 (1994)
 - 33) D. Johnson: Geometrical considerations in the measurement of the volume of an approximate sphere,” *J. Res. Natl. Bur. Stand. Sect. A*, **78**, 41/48 (1974).
 - 34) N. Kuramoto, K. Fujii, and K. Yamazawa: Volume measurements of ^{28}Si spheres using an interferometer with a flat etalon to determine the Avogadro constant, *Metrologia*, **48**, S83/S95 (2011)
 - 35) N. Kuramoto, L. Zhang, S. Mizushima, K. Fujita, Y. Azuma, A. Kurokawa and K. Fujii: Realization of the kilogram based on the Planck constant at NMIJ, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **66**, 1267/1274 (2017)
 - 36) K. Fujita, N. Kuramoto, Y. Azuma, S. Mizushima and K. Fujii: Surface layer analysis of a ^{28}Si -enriched sphere both in vacuum and in air by ellipsometry, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **66**, 1283/1288 (2017)
 - 37) L. Zhang, Y. Azuma, A. Kurokawa and K. Fujii: Thickness measurement of oxide and carbonaceous layers on a ^{28}Si sphere by XPS, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **66**, 1297/1303 (2017)
 - 38) S. Mizushima, N. Kuramoto, L. Zhang and K. Fujii: Mass measurement of ^{28}Si -enriched spheres at NMIJ for the determination of the Avogadro constant, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **66**, 1275/1282 (2017)
 - 39) E. Massa, G. Mana, U. Kuettgens and L. Ferroglio: Measurement of the $\{220\}$ lattice-plane spacing of a ^{28}Si x-ray interferometer, *Metrologia*, **48**, S37/S43 (2011)
 - 40) A. Waseda H. Fujimoto, X. Zhang, N. Kuramoto and K. Fujii: Uniformity evaluation of lattice spacing of ^{28}Si single crystals, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **66**, 1304/1308 (2017)
 - 41) M. Stock: Watt balance experiments for the determination of the Planck constant and the redefinition of the kilogram, *Metrologia*, **50**, R1/R6 (2013)
 - 42) I. Robinson and S. Schlamminger: The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass, *Metrologia*, **53**, A46/A74 (2016)
 - 43) R. L. Steiner, E. R. Williams, R. Liu and D. B. Newell: Uncertainty improvements of the NIST electronic

- kilogram, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **56**, 592/596 (2007)
- 44) Y. Azuma, P. Barat, G. Bartl, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, L. Cibik, G. Agostino, K. Fujii, H. Fujimoto, A. Hioki, M. Krumrey, U. Kuetgens, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, R. Meess, S. Mizushima, T. Narukawa, A. Nicolaus, A. Parmann, S. Rabb, O. Rientiz, C. Sasso, M. Stock, R. Vocke, A. Waseda, S. Wundrack, S. Zakel: Improved measurement results for the Avogadro constant using a ^{28}Si -enriched crystal, *Metrologia*, **52**, 360/375 (2015)
- 45) G. Bartl, P. Becker, B. Beckhoff, H. Bettin, E. Beyer, M. Borys, I. Busch, L. Cibik, G. D'Agostino, E. Darlatt, M. Di Luzio, K. Fujii, H. Fujimoto, K. Fujita, M. Kolbe, M. Krumrey, N. Kuramoto, E. Massa, M. Mecke, S. Mizushima, M. Muller, T. Narukawa, A. Nicolaus, A. Pramann, D. Rauch, O. Rienitz, C. P. Sasso, A. Stopic, R. Stosch, A. Waseda, S. Wundrack, L. Zhang, X. W. Zhang: A new ^{28}Si single crystal: counting the atoms for the new kilogram definition, *Metrologia*, **54**, 693/715 (2017)
- 46) N. Kuramoto, S. Mizushima, L. Zhang, K. Fujita, Y. Azuma, A. Kurokawa, S. Okubo, H. Inaba, K. Fujii: Determination of the Avogadro constant by the XRCD method using a ^{28}Si -enriched sphere, *Metrologia*, **54**, 716/729 (2017)
- 47) K. Fujii, E. Massa, H. Bettin, N. Kuramoto, G. Mana: Avogadro constant measurements using enriched ^{28}Si monocrystals, *Metrologia*, **55**, L1/L4 (2018)
- 48) S. Schlamminger, R. Steiner, D. Haddad, D. Newell, F. Seifert, L. Chao, R. Liu, E. Williams and J. Pratt: A summary of the Planck constant measurements using a watt balance with a superconducting solenoid at NIST, *Metrologia*, **52**, L5/L8 (2015)
- 49) B. Wood, C. Sanchez, R. Green and J. Liard: A summary of the Planck constant determinations using the NRC Kibble balance, *Metrologia*, **54**, 399/409 (2017)
- 50) D. Haddad, F. Seifert, L. Chao, A. Possolo, D. Newell, J. Pratt, C. Williams and S. Schlamminger: Measurement of the Planck constant at the National Institute of Standards and Technology from 2015 to 2017, *Metrologia*, **54**, 633/641 (2017)
- 51) M. Thomas, D. Ziane, P. Pinot, R. Karcher, A. Imanaliev, F. Pereira Dos Santos, S. Merlet, F. Piquemal and P. Espel: A determination of the Planck constant using the LNE Kibble balance in air, *Metrologia*, **54**, 468/480 (2017)
- 52) L. Pitre, F. Sparasci, L. Risegari, C. Guianvarc'h, C. Martin, M. Himbert, M. Plimmer, A. Allard, B. Marty, P. Giuliano Albo, B. Gao, M. Moldover and J. Mehl: New measurement of the Boltzmann constant k by acoustic thermometry of helium-4 gas, *Metrologia*, **54**, 856/873 (2017)
- 53) J. R. Pratt, J. A. Kramar, D. B. Newell, D. T. Smith: Review of SI traceable force metrology for instrumented indentation and atomic force microscopy, *Meas. Sci. Technol.*, **16**, 2005, 2129/2137 (2005)
- 54) G. Shaw, J. Stirling, J. Kramar, A. Moses, P. Abbott, R. Steiner, A. Koffman, J. Pratt, Z. Kubarych: Milligram mass metrology using an electrostatic force balance, *Metrologia*, **53**, A86/A94 (2016)
- 55) G. Shaw: Current state of the art in small mass and force metrology within the International System of Units, *Meas. Sci. Technol.*, **29**, 072001 (2018)
- 56) A. Nishino, K. Ueda and K. Fujii: Design of a new torque standard machine based on a torque generation method using electromagnetic force, *Meas. Sci. Technol.*, **29**, 025005 (2017)
- 57) 藤井賢一：プランク定数にもとづくキログラムの新しい定義がもたらすもの，計測と制御，**58**，336/340 (2019)

時間の単位「秒」についての基礎解説と最新動向

洪 鋒雷*、安田 正美**

*横浜国立大学 工学研究院知的構造の創生部門 教授

**産業技術総合研究所 計量標準総合センター 物理計測標準研究部門 時間標準研究グループ長

1 はじめに

時間は国際単位系 (SI) の七つの基本量の一つであり、記号は t 、単位は「秒」で、単位の記号は s である。また、古くから使われている「分」、「時」、「日」の三つの時間単位も SI と併用することが認められている。時間は、あらゆる計測量の中で、最も正確に計測できるもので、長さや電圧など、他の基本単位の精度を支えている。例として、GPS ナビゲーションシステムでは、衛星に搭載されている原子時計の信号を使って、距離計測を行い、車などの物体の位置を精度良く決めている。

時間を計るのは時計なので、ここで時計の原理を説明しておこう。時計は、周期現象を伴う振動子とその周期を数えるカウンター (計数器) から構成されている。人間が太古の時代から使ってきた日時計は、地球の自転という周期現象を利用し、太陽光の影をカウンターとして使った。また 17 世紀に発明された振り子時計は、振り子の振動を数えて時計の針を進める仕組みを持っている。振り子の振動数は、周波数ともいい、単位はヘルツ (Hz) である。この周波数という物理量は、時間と密接に関係し、周期現象において時間と逆数関係にある。周波数が決まれば時間も一義的に決まるので、時間の定義を実現する時間標準は周波数標準とも呼ばれ、時間を計ることはすなわち周波数を測ることもある。さて、時間を精度良く計るには、時間をより細かく分割する、つまり時計に利用される周期現象の周波数を上げる必要がある。このことが、まさに時間を計る技術が発展する歴史の中で貫かれている基本線であり、この解説の中でも随所に登場する。

この解説では、秒の定義の変遷を振り返りながら、原子時計の原理やその応用について説明する。また、時計比較の重要性を言及しながら、GPS、通信衛星、光ファイバーネットワークなどによる比較方法を紹介する。さらに、原子時計から作られる国際原子時や協定世界時などの時系について説明し、これらの時系が周波数校正や日本標準時などサービスを通じて産業界や日常生活に貢献していることを紹介する。最後に、次世代原子時計である「光時計」を紹介しながら、秒の再定義への道のりと今後の展望について

述べる。秒の再定義は、このリレー解説の中心となっている、キログラム、アンペア、ケルビン、モルの 4 単位の基礎定数を用いた定義への改定¹⁾とは別に、今後次世代原子時計の研究成果がまとまった段階で行われる予定である。

2. 秒の定義とその変遷

秒の定義は、他の単位と同様に常に不確かさの小さいものを目指して変化してきた。さらに、より普遍的な定義の仕方を求めて、「もの」による標準から量子力学の原理を利用した「量子標準」へと進化してきた。図 1 に秒の定義の変遷を示す。

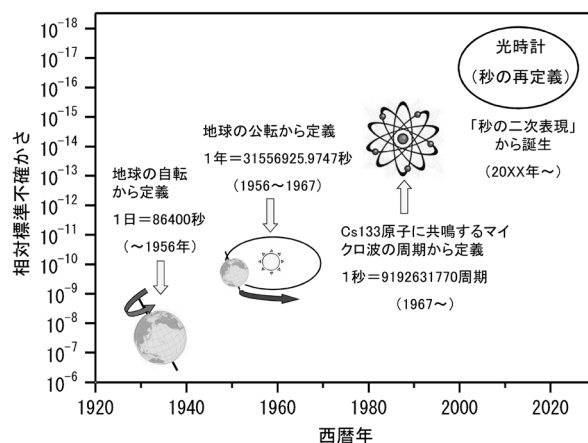


図 1 秒の定義の変遷

1956 年までは、1 秒は地球の自転から定義され、1 日 (平均太陽日) の 86 400 分の 1 と決められていた。測定の不確かさは 10^7 程度で、潮汐摩擦などによる地球自転の不整が不確かさ要因であった。1956 ~ 1967 年の間では、1 秒は地球の公転から定義され、1 太陽年の 31 556 925.9747 分の 1 とされていた。この定義による秒の不確かさは約 2×10^9 である。この定義は、惑星の運動を司るニュートン力学を拠り所としており、地球という「もの」による前の定義よりは進歩したと言える。しかしこの定義では、利用している周期現象の地球の公転は、自転よりも長い周期を持っているので、小さい不確かさを実現するにはかなり長い年月の測定が必要であった。

1956 年に、国際度量衡委員会において SI に統合しうるような秒の定義について助言するための諮問

委員会が創設され、翌 1957 年にその第 1 回会合が開かれた。この会合では、イギリス国立物理学研究所 (NPL) のエッセン (Essen) 氏が 1×10^{-10} の不確かさをもつセシウム時計ができていたので 1 日も早くこれを採択すべきだと主張したが、まだ研究途上という理由で採り入れられなかった。最終的には 10 年後の 1967 年に、第 13 回国際度量衡総会において「秒はセシウム 133 の原子の基底状態の 2 つの超微細準位間の遷移に対応する放射の周期の 9 192 631 770 倍の持続時間である」という新しい定義が採択された。ここで基準として用いられるセシウム原子の超微細構造は量子力学によって決まっている。ついに秒の定義は量子標準へと進化し、物理学者の手に委ねられるようになった。この定義が利用する原子の周期現象は約 9 GHz の周波数を持ち、地球の自転と比べて約 10^{15} 倍、公転と比べて約 10^{17} 倍周波数が高いので、時間の測定精度を高める上で重要な役割を果たしている。このセシウム原子に基づく時間の定義は今日まで使われている。

3. 原子時計

上記秒の定義を実現するのが、セシウム原子時計である。セシウム原子時計は大きく分けて、一次周波数標準器と商用セシウム原子時計がある。一次周波数標準器は、世界の少数の標準研究機関で実現されている最高精度のセシウム原子時計である。一方、商用セシウム原子時計は大多数の標準研究機関が所有し、各国の時間標準として運用している。また多種多様なニーズに対応するために、水素メーザー、ルビジウム原子時計、チップスケール原子時計などの原子時計が開発されている。さらに、次世代の原子時計として、光時計の研究開発も進んでいるが、その詳細は第 6 章で述べる。

3.1 一次周波数標準器

^{133}Cs はアルカリ原子であり、原子核を取り巻く電子の閉殻の外側に 1 個の電子を配置した構造になっている。基底状態 ($6^2S_{1/2}$) では最外殻電子の軌道角運動量がゼロなので、核スピン $I=7/2$ と最外殻電子スピン $S=1/2$ が結合し、全角運動量 $F=4$ と $F=3$ の超微細構造となる。この二つの準位がそれぞれ角運動量を有しているため、磁場があれば 9 本と 7 本のゼーマン準位に分裂する (図 2 a)。この中で磁場による変動の最も少ない $[F=4, m_F=0]$ と $[F=3, m_F=0]$ の二つの準位間の遷移がセシウム原子時計の時計遷移として用いられている。ここで、さらに $m_F=0$ 同士の時計遷移でも磁場によるわずかな周波数のシフトがあるので、磁場を正確に測定し、その周波数補正を行っ

ている。

さて、一次周波数標準器は大きく分けて、原子ビーム方式と原子泉方式がある。過去 20 年間においては、レーザー冷却技術を用いた原子泉方式の実現が大きなステップとなった。原子泉方式では、原子集団を約 $2 \mu\text{K}$ 程度まで冷却し、上方に打ち上げて自由落下させることにより約 1 s の長い滞空時間、すなわち実効的な相互作用時間を確保している (図 2 b)。これにより、約 1 Hz の線幅のラムゼイ共鳴スペクトルが得られ (図 2 c)、原子ビーム方式と比べて 1 桁以上小さい不確かさを実現している。セシウム原子時計の不確かさは、これまで約 10 年に 1 桁の割合で減少し、エッセンの原子時計から 50 年以上経過した現在では 10^{-16} のレベルに到達している。この不確かさの主な要因は原子の衝突による周波数シフトである。

一次周波数標準器は、フランス、アメリカ、ドイツ、イタリア、イギリス、日本、ロシアで運用されており、日本では、産業技術総合研究所と情報通信研究機構が運用している。

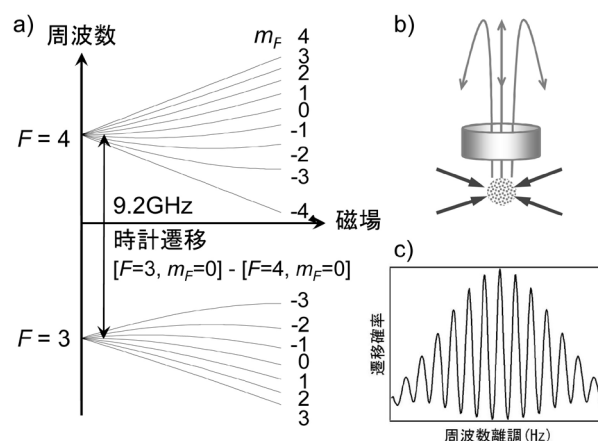


図 2 a) セシウム原子基底状態の超微細構造を使った時計遷移 ; b) 原子集団がレーザー冷却され、打ち上げられる様子 ; c) 原子のラムゼイ共鳴スペクトル

3.2 商用セシウム原子時計

商用のセシウム原子時計 (型番 5071A、米国 Microsemi FTD 社) は、長期安定度が極めて優れており、メンテナンスフリーの連続運転が可能である。平均時間 5 日以上で周波数安定度が $< 1 \times 10^{-14}$ となり、数ヶ月にわたってそれを維持することが可能である。単体での秒の定義の実現能力を周波数不確かさで表すと 5×10^{-13} となる。多くの標準研究機関が 1 つもしくは複数の商用のセシウム原子時計を運用して、その研究機関の現地版協定世界時を作り出している (詳細は第 5 章を参照)。この時計の内部にバッテリーが搭載されており、最長 45 分間の継続運転が可

能で、外部バッテリーを使えば運転しながらの長距離移動も可能となる。

3.3 水素レーザー

水素原子の基底状態では、電子スピン $1/2$ と原子核である陽子スピン $1/2$ が結合し、全角運動量 $F=1$ と $F=0$ の超微細構造が存在する。この超微細構造間のマイクロ波遷移の周波数が約 1.42 GHz である。この遷移によるレーザー発振を利用したのが水素レーザーである。水素レーザーの周波数変動要因は、マイクロ波共振器の周波数変動、遷移の二次ゼーマンシフト、スピン交換シフト及び二次ドップラーシフトで、これらの変動要因を抑えるには、共振器の温度、磁場及び水素原子ビーム量を精度良く制御する必要がある。水素レーザーの一番の特徴は、短期周波数安定度の良さである。積算時間 1 秒において、商用セシウム原子時計と比べて数十倍良く、さらに数時間の積算時間で 1×10^{-15} の安定度に到達する。したがって、一日以内の測定時間において高安定な参照基準が必要な応用では欠かせない存在となっており、後述する光時計の絶対周波数計測でも大いに活躍する。1 つもしくは複数の水素レーザーを運用して、現地版協定世界時を作り出す標準研究機関も多い。

3.4 ルビジウム原子時計

ルビジウム原子の基底状態では、核スピン $I=3/2$ と最外殻電子スピン $S=1/2$ が結合し、全角運動量 $F=2$ と $F=1$ の超微細構造が存在する。この超微細構造間のマイクロ波遷移の周波数が約 6.835 GHz である。この遷移を周波数基準として用いて、低雑音の水晶発振器を制御して作られるのがルビジウム原子時計である。積算時間 1 秒における短期安定度が約 2×10^{-11} で、1 ヶ月の周波数変動が 5×10^{-11} 以下である。ルビジウム原子時計は、小型・安価で、標準研究機関以外の大学及び企業などの研究機関でよく使われる実用標準器である。ルビジウム原子時計と GPS 受信機の組み合わせで高精度な周波数標準を実現する。さらに第 5 章で述べる周波数校正サービスを受ければ、国家標準へのトレーサビリティも確保できる。

3.5 チップスケール原子時計

ルビジウム原子時計は、光とマイクロ波の二重共鳴方式を使い、原子にマイクロ波照射を行うための共振器を必要とするので小型の限界がある。一方、レーザー光のみを用いるコヒーレント・ポピュレーション・トラッピング (CPT) 方式では光学的な現象を用いてマイクロ波遷移を検出するため、小型化が可能となる。この原理を利用したセシウムチップス

ケール原子時計では、米粒より小さいガスセルやマッチ箱サイズの標準器が実現されている。積算時間 1 秒における短期安定度が 2.5×10^{-10} で、エージングによる 1 ヶ月の周波数変動が 3×10^{-10} 以下である。GPS 信号の届かない水中探査や地下の掘削などの機器に組み込んで使うことができる。

3.6 原子時計から 1 秒を作る

時計を動作させるには、振動子の振動を数えて時計の針を進める必要がある。機械式時計では、心臓部にテンプという振動する部品が入っており、典型的なものはその振動を 8 回数えて時計の針を 1 秒進める。また、今日我々が日常的に使っている腕時計には、水晶振動子が入っており、水晶の振動を 32768 回数えて時計の針を 1 秒進める。セシウム原子時計を使って時刻を表示するには、カウンターで 9 192 631 770 回の電磁波振動を測って、時計の針を 1 秒動かすような仕組みを使う必要がある。また、約 9.2 GHz の周波数を低い周波数へと分周し、最終的に 1 Hz の信号を導き出して、時計の針を 1 秒ずつ動かす方法もある。

4. 時計の比較

19 世紀の初期、イギリスのグリニッジ天文台がその屋根に「報時球」を設置し、午後 1 時ちょうどの時刻に球を落下させ、ロンドン港に訪れる船に時計を合わせるサービスを提供していた。航海する船にとって、自分の位置を正確に割り出すのに、時計の正確さがとても重要である。現代では、ナビゲーションだけではなく、情報通信から株の取引まで正確な時間が必要とされている。ここではまず、正確な時間を作り出すために、原子時計がどのように比較されているかを見てみよう。

4.1 GPS 衛星

GPS ナビゲーションシステムは、30 個の非静止衛星で構成され、受信者が自身の現在位置を知るシステムであるが、原子時計による時刻信号も放送している。この時刻信号を用いて、高精度な時計比較を実施することが可能で、よく用いられるのは GPS コモンビュー (common view) 法である (図 3)。2 つの遠隔地にある地上局は GPS 衛星の時刻情報を同時に受信し、それぞれ自局の時計との時刻の差を記録する。それらのデータの差をとることにより、GPS 衛星の時刻情報が相殺され、遠隔地におかれた時計の時刻比較が行われる。さらに、時間において測定することにより、時刻比較結果の差から周波数比較を行うことができる。

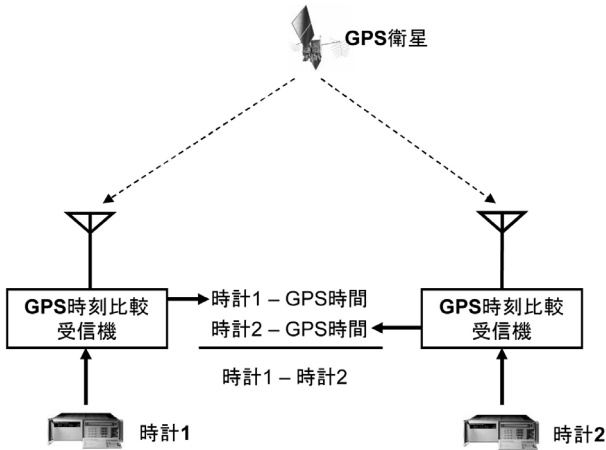


図3 GPS コモンビュー法による時計比較の原理図

GPS コモンビュー法において、15分間平均すると、実験データのばらつきから求められる不確かさが約数ナノ秒 (ns) となる。これを周波数不確かさに直すと、

$$\text{ns}/15 \text{ min} = (1 \times 10^9)/(15 \times 60) \sim 1 \times 10^{-12}$$

となる。この周波数不確かさは、平均時間に反比例するので、5日間の平均で 10^{-15} 台の時計周波数比較ができる。なお、GPS コモンビュー法において、時刻比較方法のバイアス値の不確かさも存在するが、この不確かさは周波数比較には寄与しない。GPS コモンビュー法は、第5章で述べる周波数遠隔校正サービスで応用されている。また、後述する国際原子時を決定する際にも GPS コモンビュー法が用いられていたが、最近では GPS 軌道情報や電離層パラメーターの精度向上により、複数衛星の観測から自局の時計の時間を計算するオールインビュー (All in view) 法が採用されるようになった。さらに、ロシアの衛星ナビゲーションシステム (GLONASS) を利用した時計比較も広く行われるようになった。他にも、最近では中国の BeiDou、欧州の Galileo も利用されている。

4.2 より高精度な時計比較方法

原子時計の性能向上により、一層高精度な時計比較方法が求められるようになった。原子泉方式のセシウム原子時計の不確かさが 10^{-16} で、さらに第6章で述べる光時計の不確かさが 10^{-18} まで向上している。特に、光時計は短期の安定度が非常に優れているので、短時間で高精度な比較方法の研究開発が重要である。以下にいくつかの例を示す。

1) GPS 搬送波位相法

この方法は、GPS の時刻情報の載っているコード信号ではなく、周波数が約 1000 倍大きい搬送波の位相情報を用いて時計の比較を行う。時刻比較の不確かさが数十ピコ秒 (ps) なので、1日の平均時間で 10^{-15}

を切る不確かさで周波数比較を行うことができる。

2) 衛星双方向搬送波位相法

この方法では、両方の地上局から通信で使う静止衛星を経由して自局の時計信号を送信しあうので、2つの信号が同一の経路を通過して電離層や対流圏の遅延の影響がキャンセルされ、不確かさが小さくなる。この方法による時刻比較の不確かさが数 ps から 10 ps なので、1日の平均時間で $10^{-15} \sim 10^{-17}$ の不確かさで周波数比較を行うことができる。

3) 光ファイバー双方向周波数比較

この方法は、実際に敷設されている光ファイバーを利用して、伝搬する光信号そのものを使って周波数比較を行う。通常、振動や温度変化によって光ファイバー中の実行光路長が変化し、その結果光信号の位相が大きく乱れ、時計の周波数比較に悪影響を及ぼす。受け取った信号光をもう一度送り返すことにより、ファイバー光路長の変化を検出することができる。そして、検出した光路長の変化をフィードバック制御によりキャンセルすることができる。この比較法による周波数比較の不確かさが1秒の平均時間で 10^{-15} を切るので、平均時間を増やせば 10^{-18} の不確かさで時計の周波数比較が実現できる。

5. 時系

時系は時間を表す基準である。同一時刻でも、用いる時系によって表現する時間が違ってくる。例えばこの章で述べる協定世界時 (UTC) と国際原子時 (TAI) とでは 2014 年現在、UTC による時刻は TAI による時刻よりも 35 秒遅れた値となる。原子時計が誕生する前に、よく用いられた時系として、地球の自転にもとづく世界時 (UT) と地球の公転にもとづく暦表時 (ET) があった。もっと昔を遡れば、グリニッジ子午線 (経度 0 度) における平均太陽時であるグリニッジ標準時 (GMT) が世界時間の基礎を作り、航海などで使われていた。

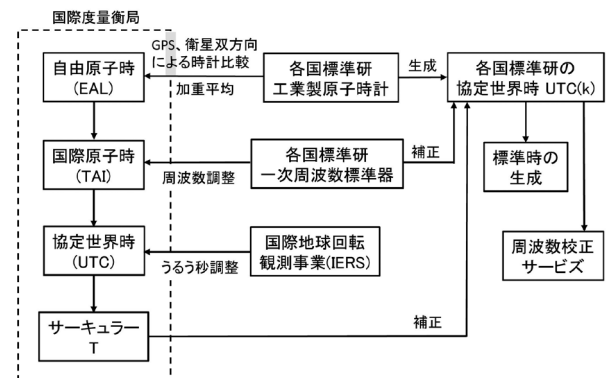


図4 国際原子時と協定世界時

5.1 国際原子時

時系は、時間の流れを表現する基準で、途切れることなく続くものである。原子時計が発明された当初は、メンテナンスなどの理由から、果たして原子時計は時系を維持できるかどうか、疑問があった。この心配は、たくさんの原子時計集合体で時系を維持することで解消された。原子時計の時系である国際原子時 (TAI) は、世界各国約 70 の標準研などの機関で稼働している 420 台前後の工業製原子時計 (商用セシウム原子時計や水素メーザー) 及び一次周波数標準器の相互比較のデータや機関間の比較データをもとに構築されている (図 4)。機関間の時計比較は、GPS 衛星や衛星双方向比較法などを用いて行われている。国際度量衡局に報告された工業製原子時計比較データは、各時計の加重平均として計算される自由原子時 (EAL) と呼ばれる時系を作るのに使われる。自由原子時が目指すのは長期間安定な時系である。この自由原子時に対して、一次周波数標準器による評価結果を加味して周波数が微調整され、国際原子時 (TAI) と呼ばれる時系が計算される。調整の結果、国際原子時の 1 秒と一次周波数標準器で実現される SI 秒の差が 10^{-16} 位の低いところで抑えられている。このように、正確さを保ちつつ、その中長期の安定性を損なわない方法で国際原子時が運用されているのである。

5.2 協定世界時

国際原子時による時間は刻み方が非常に正確で、その時間と地球の自転にもとづく世界時との間にずれが生じてしまう。つまり、地球の回転がふらふらしているため、国際原子時と世界時がどんどん離れていってしまい、天文観測や日常生活にも支障をきたすおそれがある。この問題を解決するために、原子時と世界時が 0.9 秒以上離れないよう国際原子時に対してうるう秒調整を行い、協定世界時 (UTC) という時系を構築した。うるう秒の実施は国際地球回転・基準系事業 (IERS) によって発表される。協定世界時の 1 秒の長さは国際原子時と同じだが、うるう秒が挿入されているため現在の協定世界時の時刻は国際原子時の時刻と比べて遅れている。

各国の標準研究所では、1 台もしくは複数の工業製原子時計を運用して現地版の協定世界時 UTC(k) という時系を作っている。国際度量衡局は、毎月 1 回、先月分の協定世界時と現地版協定世界時の差 [UTC - UTC(k)] を 5 日間毎に分けて、サーキュラー T という形でホームページを通じて公表している。サーキュラー T はいわば UTC(k) の成績表のようなもので、70

の標準研の内、約 20 の標準研が [UTC - UTC(k)] を ± 10 ns に近い精度で運用している。各国の標準研究所はこのサーキュラー T の情報、もしくは自前の一次周波数標準器の情報をもとに、UTC(k) に補正をかけることができる。サーキュラー T で発表される UTC が 1 ヶ月前の情報であるため、UTC は実時間で生成されるものではない。それに対して、UTC(k) は実時間で生成しているため、時間・周波数関連の各種サービスに用いることが可能である。日本では、産業技術総合研究所計量標準総合センター (NMIJ) と情報通信研究機構 (NICT) がそれぞれ UTC(NMIJ) と UTC(NICT) の運用を行っている。

5.3 UTC(NMIJ) を用いた周波数校正サービス

産業技術総合研究所計量標準総合センターでは、UTC(NMIJ) を運用して、各種の時間・周波数関連業務を行っている。その中でもっともユーザーに近い業務は、各種測定器メーカーが利用する周波数校正サービスである。周波数校正サービスは、大きく分けて持込校正と遠隔校正の 2 つの形態がある。持込校正では、顧客に校正器物を研究所に持ち込んでもらい、UTC(NMIJ) で直接校正を実施する。一方、遠隔校正は校正器物を顧客のサイトに置いた状態で校正を行う。遠隔校正では、第 4 章で紹介された GPS コモンビュー法による測定を行い、校正器物と UTC(NMIJ) の周波数差を出して、校正証明書に記載する。周波数校正サービスは産業界の発展に寄与するものである。

5.4 UTC(NICT) を用いた日本標準時

情報通信研究機構では、UTC(NICT) を運用して、各種の時間・周波数関連業務を行っている。その中でもっともユーザーに近い業務は、日本標準時 (JST) の供給サービスである。日本標準時は UTC(NICT) を 9 時間 (東経 135 度分の時差) 進めた時刻である。日本標準時を載せた標準電波 (JJY) は、福島県のおおたかどや山標準電波送信所 (40 kHz) 及び佐賀県のがね山標準電波送信所 (60 kHz) から送信され、常時ユーザーに供給されている。日本国内で広く普及している電波時計は、この標準電波を受信することによって、日本標準時に合わせている。日本標準時の供給サービスは日常生活や時計産業に貢献している。

6. 光時計と秒の二次表現

原子時計の性能をさらに上げるために、原子 (またはイオン) の基底状態と励起状態間の光遷移を周波数の基準として用いる「光時計」の研究開発が進められている。光の周波数はマイクロ波と比べて 5

桁高いので、光時計を用いることで時間をより細かく測定することが可能となり、時間分解能が一気に5桁上がる。しかし20世紀の終わりまでは、光周波数をカウントすることが非常に困難であった。1999年頃から、ドイツと米国のグループで、モード同期超短パルスレーザーによる「光周波数コム」²⁾を用いたレーザー周波数カウンターの提案がなされ、この分野において極めて大きな技術革新が起こった。高精度な光周波数標準と光周波数コムの組み合わせで「光時計」が誕生する。

ここで光周波数コムのもう1つの応用に言及しておこう。産総研の「光周波数コム装置」は長さの国家標準であり、UTC(NMIJ)と合わせて、超精密な波長標準を実現し、長さのトレーサビリティの頂点に位置している³⁾。これも時間標準がほかの計測を支える好例である。

6.1 光時計

光時計は主に「単一イオン光時計」と「光格子時計」の2つのタイプがある(図5)。単一イオン光時計では、レーザー冷却された単一イオンがトラップポテンシャルの底に置かれ、相互作用時間が長いなどの長所がある。最新の報告によると、Al単一イオン光時計の不確かさは 8.6×10^{-18} に達し⁴⁾、33 cmの高低差による時計の遅れ(相対性理論)を確認することに成功した。しかし、イオン光時計は単一の粒子からの弱い信号を使うため、周波数安定度が上がらないという欠点がある。

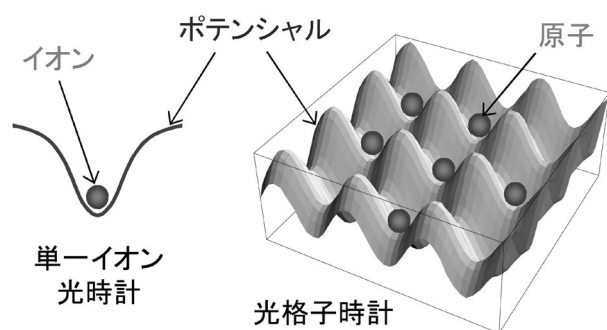


図5 単一イオン光時計及び光格子時計の概念

光格子時計は東大工学部香取の提案によるもので、レーザー光の定在波で作る光格子ポテンシャルに閉じ込められる多くの原子がすべて信号に寄与するので、周波数安定度が単一イオン光時計よりもよくなる。光格子を作るレーザー光の強度に依存した時計遷移の周波数シフト(光シフト)に関しては、上準位と下準位の光シフトが等しくなる光格子波長(魔法波長)の存在が見出され、光シフトが時

計遷移の周波数に影響を及ぼさない⁵⁾。最初に実現された光格子時計は ^{87}Sr によるもので、今や最も研究されている光時計となっており、 6.4×10^{-18} という光時計の不確かさのチャンピオンデータを出している⁶⁾。また最近では、 ^{171}Yb や ^{199}Hg を用いた光格子時計も実現され、光格子時計の研究が広がりを見せている。

6.2 秒の二次表現

光時計に関する研究の飛躍的な発展は、光時計の測定不確かさがセシウム原子時計で制限される事態を招いた。つまり、光時計同士の直接比較によって光時計がより良い再現性を持っていることを示しても、秒の定義であるセシウム原子時計の正確さ以上に周波数を測る(セシウム原子時計の正確さ以上の桁数で光時計の周波数を表現する)ことは原理的にできない。国際度量衡委員会は、このような状況を分析し、「秒の二次表現」という秒の再定義の候補リストを構築することを決めた。もちろん、秒の二次表現の正確さはセシウムを超えることはできない。しかし、この候補リストの構築は、秒の再定義の準備過程における異なる標準の比較にとってたいへん有用である。

2006年に、国際度量衡委員会はマイクロ波時計の ^{87}Rb 及び光時計の $^{88}\text{Sr}^+$ 、 $^{199}\text{Hg}^+$ 、 $^{171}\text{Yb}^+$ (四重極子遷移)、 ^{87}Sr が秒の二次表現として使えることを決めた。2009年には、秒の二次表現である ^{87}Sr 光格子時計の新しい研究成果を取り入れて、その周波数値及び不確かさを改定した。また2013年には、各国から報告された光時計の測定結果を検討した結果、新たに ^{171}Yb 、 $^{171}\text{Yb}^+$ (八重極子遷移)、 $^{27}\text{Al}^+$ の三種類の光時計を秒の二次表現に加えることを決めた。2017年には新たに ^{199}Hg が追加された。表1に、現在勧告されている全9種類の秒の二次表現を示す。これらの秒の二次表現の勧告値を決める上で、日本から報告された測定結果も多く採択されているが、詳細は別の解説に譲る⁷⁾。

表1 秒の二次表現(2017年)

方式	時計の周波数(Hz)	不確かさ
^{87}Sr 光格子時計	429228004229873.0	4×10^{-16}
^{171}Yb 光格子時計	518295836590863.6	5×10^{-16}
^{199}Hg 光格子時計	1128575290808154.4	5×10^{-16}
^{171}Yb 単一イオン光時計 (四重極子遷移)	688358979309308.3	6×10^{-16}
^{171}Yb 単一イオン光時計 (八重極子遷移)	642121496772645.0	6×10^{-16}
^{88}Sr 単一イオン光時計	444779044095486.5	1.5×10^{-15}
^{199}Hg 単一イオン光時計	1064721609899145.3	1.9×10^{-15}
^{27}Al 単一イオン光時計	1121015393207857.3	1.9×10^{-15}
^{87}Rb マイクロ波時計	6834682610.9043126	6×10^{-16}

今は原子時計の大競争時代で、秒の二次表現はどれ

も新しい秒の定義となる可能性をもっている。では、秒の再定義への道のりはどのようになるのだろうか。新しい秒の定義となる光時計は複数の国際機関で実現されていることが望ましい。光格子時計の研究開発においては、各国の標準研究機関が多くのリソースの投入をしている。多くの研究者が光格子時計に将来性を見出していることは確かである。また、新しい秒の定義となるには現行の国際原子時への寄与が求められる。現在の1次周波数標準と同じように、決められた報告期間中の測定結果を国際度量衡局に報告し、その結果を使って国際原子時を決めることとなる。

7. 秒の再定義

秒の再定義候補として、秒の二次表現リストが作成され、順調に更新されているが、次に考えるべきことは、秒の再定義が、どのように、いつごろ行われるか、ということである。

7.1 秒の再定義アルゴリズム

秒の再定義の方法（アルゴリズム）については、P. Gillによる以下の5つの提案がある⁸⁾。

1) リュードベリ定数を不確かさゼロの定数に固定することによって得られる定義

2018年のSI単位大改定は、この考え方に基づくものであり、プランク定数（質量）、素電荷（電流）、ボルツマン定数（温度）、アボガドロ定数（物質質量）が、それぞれの基礎物理定数に相当する。秒（周波数）については、リュードベリ定数が相当する。さて、単一の陽子と電子の組み合わせである水素原子については、最も高い精度でエネルギー準位構造を計算することが可能である。非相対論的な水素原子の記述によれば、そのエネルギー準位 E_n は以下のように与えられる。

$$E_n \sim -hcR_\infty/n^2$$

ここで、 n は主量子数、 c は光速、 h はプランク定数、 R_∞ はリュードベリ定数である。水素原子の1S-2S遷移周波数の直接的な測定結果と、ラムシフト周波数を適切に比較するためには、ディラック方程式に相対論的効果を全面的に取り入れるだけでは不十分であり、量子電磁力学（QED）的効果をも考慮しなくてはならない。現在、水素原子の1S-2S遷移の精密レーザー分光による測定の不確かさは、 1.4×10^{-14} であり、ラムシフトの見積りのための水素原子の他の遷移の測定不確かさとも合わせて、リュードベリ定数の最小の不確かさは、 6.6×10^{-12} となっている。もしもこの定義が実現されれば、7つのSI基本単位のすべてが基礎物理定数に基づくものとなり、「上がり」の

状態となるが、リュードベリ定数の不確かさは、現状の光周波数標準で実現されている不確かさには遠く及ばないものである。この不確かさを低減するためには、高次のQED理論の精密化と同時に、水素原子、または、水素様ヘリウムイオンの高精度レーザー分光技術の向上が求められるが、それらの質量が小さいことに由来する2次のドップラーシフトの低減や、レーザー冷却に必要となる光源の波長が100 nm程度と短いことなどが実験的な困難さにつながっている。

2) ある単一の光時計遷移に基づく定義

第6章に、秒の再定義候補としての、秒の二次表現リストが掲載されている。特に、レーザー冷却された単一イオンや、魔法波長の光格子に捕獲された中性原子を参照に用いる光時計が、候補となると考えられる。もっとも単純な定義改定の方法は、このリストの中から、「最も良い」遷移を選びだすことであるが、これは思ったよりも簡単なものではないことが分かる。2010年代初頭においては、最も小さな不確かさを誇っていたのは、 Al^+ イオン時計であった。もっとも小さな不確かさを持つ時計が、最も良い時計である、という単純な考え方によれば、この Al^+ イオン時計が再定義候補ということになるが、当時、量子情報的手法によって時計遷移を測定していた Al^+ イオン時計が実現されていたのは、米国のNISTのみであった。その後、SrやYbを用いた光格子時計が、 Al^+ イオン時計の性能を上回ることが実証された。光格子時計を保有する研究機関は世界に広く分布しており、この点も標準の観点からは望ましいものと考えられる。

3) 単一の光時計遷移と、光周波数比セットとの組み合わせによる定義

2017年現在の秒の二次表現リストの不確かさ項目を見てわかるように、ある種の光時計の不確かさが突出して（桁違いに）小さい、ということはなく、多くの光時計の不確かさは、おおむね同等な桁に収まっているといえる。（この不確かさを制限しているのは、光時計自身の不確かさではなく、Cs一次標準器比較のための光リンクの不確かさであることから）この事実により、まず、最も小さな不確かさを持つ、単一イオン時計、または、光格子時計を一次標準とし、この一次標準と比べて不確かさが10倍以下に収まるような単一イオン、または、光格子時計を秒の二次表現セットとするシナリオも想定可能である。光周波数コムによる光周波数の比較精度は、 10^{-19} 以下であるので、定義へのトレーサビリティは容易に確保できると考えられる。このシナリオによれば、一次標準、または、二次表現リストのうちのいずれかの標準を用いることによって、主要な時間周波数標準

研究所間、また、トレーサビリティ的に下位の2次の標準機関への時間周波数の配信が可能となる。この選択肢によれば、国家計量研究所間の適切な遠隔時計比較技術が導入された場合に、最も正確で効率的な時間周波数標準供給のためのインフラを提供できると考えられる。

4) 「最良の」光時計遷移の組み合わせ (マトリックス) に基づく、「仮想的」周波数による定義

この方法では、個々の原子種の最も正確に測定された値を組み合わせることで、再定義の時点における、周波数比のセットと、周波数マトリックス値の重み付き平均値が用いられる。その後、適切な時期に、個々の原子種の周波数値は、そのバイアスと不確かさが更新されていくこととなる。このアイデアの欠点は、周波数マトリックス値は仮想的なものであり、物理的な実体を持たないということである。また、定期的な更新も必要となることと、新しい周波数が導入された場合には、周波数マトリックス値が大きく変更される可能性もあるという欠点もある。

5) 真空紫外域、または、X線領域の高周波数遷移に基づく定義

最後に考慮するのは、真空紫外 (VUV)、または、X線/極端紫外 (XUV) 領域に属する高周波数遷移である。これは、より高いQ値を持つ吸収線を探索してきた流れの延長線上にある。もちろん、この方向性を追求するためには、これらの周波数領域で定常的に動作できる狭い線幅の光源の確保という技術的課題の解決が必要となる。水素の1S-2S遷移をプローブするという従来からの分光学的手法とは別に、最近の研究においては、可視光領域の光周波数コムの高調波発生によって、VUVやXUV領域の周波数と、光周波数との比較が可能となってきた。この周波数領域における測定精度と、測定機器の支援体制については、まだ研究の余地がある。

このような高エネルギー領域においては、電子のX線遷移に加えて、原子核の γ 線遷移を励起できる可能性が浮上してくる。そのような核遷移は、マイクロヘルツ領域のきわめて狭い自然幅を持ち、潜在的には 10^{20} のオーダーのQ値を持つ。ただし、自由な原子における場合には、反跳効果や、それに伴う大きなドップラーシフトの影響により、この手の遷移を観測することは困難である。この問題はメスbauer分光法によって回避されてきた。すなわち、固体中の格子によって反跳を吸収させるというものである。ここ何年かの間、トリウム放射性同位体 ^{229}Th を原子核時計として利用する可能性についての関心が高まってきた。 ^{229}Th は、基底状態から測って、わずか7.6(5) eVと、異常に低いエネルギーの異性核

状態を持つ。これは、波長で表すと、163 nmに相当し、周波数で表すと、1840(120) THzに相当する。実験的提案としては、 $^{229}\text{Th}^{3+}$ の核遷移を、固体結晶中、または、rfトラップ中に捕獲された孤立イオン中でプローブするというものがある。一般的に、核遷移は、電子遷移と比べて、外部環境からの摂動から遮蔽されている。固体結晶中における場合には、反跳効果が結晶格子によって抑制されるという利点があるが、結晶場の強い影響を適切に見積もらなくてはならない。rfトラップ中に捕獲する場合には、レーザー冷却法によりドップラー広がりを抑制できるし、その他の電子遷移に起因するシフトは大幅に抑制できるか存在しなくなる。しかし、現在の大きな課題は、そもそもその遷移が見つかっていないということである。現在、242 THzもの広大な周波数掃引範囲の中から、狭線幅紫外遷移の探索が試みられている。この核遷移を検出するために、二重共鳴量子跳躍法が提案されている。これは、核遷移を探索しつつ、強く許容された電気双極子遷移をプローブするという手法である。核遷移が励起された場合には、核モーメントとスピンの変化し、その結果、電子の超微細分裂と角運動量に変化が生じることとなる。このことが、電子共鳴の損失につながり、核励起が検出されるという手法である。この探索に向けた努力は、ドイツ、アメリカ、そして、わが国においても精力的に行われている。しかし、核遷移の共鳴周波数が特定されたとしても、この原子核時計が定義として採用されるまでに成熟するためには、まだ一定の時間を要すると考えられる。

以上、5つのアルゴリズム候補を紹介したが、筆者の主観によれば、3) が最も可能性が高いと考えられる。

7.2 秒の再定義に向けたマイルストーン

第6章、6.2 秒の二次表現、のリストに示されるように、多くの光時計の不確かさは、それ自体の不確かさというよりも、Cs一次標準器もしくは、それら同士の比較の不確かさで制限されるようになってきた。光時計自身の不確かさは、最善のものについてはすでに、 10^{-18} 台前半の性能をたたき出しており、さらには、 10^{-19} 台の不確かさも視野に入りつつある。しかし、正確な重力ポテンシャルについての知識が限られたものであることから、地上においてそのようなレベルで実用的な時間スケールを取り扱うことは困難であると考えられる。 10^{-18} 台の相対不確かさを議論するためには、重力赤方シフトを正しく取り扱うために、cmレベルで重力ポテンシャルを決定しなくてはならない。このような観点から、秒の再定

義のタイミングとして適切なのは、光時計の典型的な不確かさとして、およそ 10^{-18} のレベルを示せるようになるときであろう。また、その不確かさは、その時点でのセシウム原子泉時計の不確かさよりもおおよそ二けた小さなものであろう。上記の考え方を背景として、秒の再定義のタイミングを適切に予測するために、CCTF WGSP（時間周波数諮問委員会戦略企画作業部会）にて、秒の再定義を行うにあたり達成すべき条件としてのマイルストーンが設定され、それを時間軸上に配置したロードマップが提示された⁹⁾。マイルストーンは全部で5つあり、以下のように列挙される。まず、光時計がセシウム一次標準器よりも二桁小さな不確かさをもつことを立証するために、以下のマイルストーン1)と2)が設定された。

1) 少なくとも3つの異なる光時計（異なる研究機関、または異なる原子種）が、その時点での最高性能のセシウム原子時計よりもおよそ2桁小さな不確かさ（ 10^{-18} 乗前半）を示すこと。（以下、この条件を満たす光時計をマイルストーン1時計と呼ぶ。）

2) 異なる研究機関における、マイルストーン1時計との独立な比較測定が少なくとも3つ行われること。（ $< 5 \times 10^{-18}$ ）比較方法としては、可搬型時計、高性能光リンク、周波数比閉包測定のいずれでも良い。現在の秒の定義との連続性を確保するために、以下のマイルストーン3)が設定された。

3) マイルストーン1時計のセシウム一次時計による絶対周波数測定が少なくとも3つ独立に行われること。（ $< 3 \times 10^{-16}$ ）

秒の二次表現というステータスに認定された光時計が定期的にTAIに貢献することは、時系の精度向上と、時刻比較のための技術的、また、手続きの進んだ方法を開発するという観点からも望ましいものである。よって以下のマイルストーンが設定される。

4) 秒の2次表現リストに掲載された光時計が定常的に国際原子時（TAI）に貢献すること。

第7章、7.1 秒の再定義アルゴリズム、の3)で表されたように、 10^{-18} レベルでの時計の評価は、異なる光時計同士の比較によってのみ可能となる。また、これまで長年かけてどの光時計（原子種）が最も良いかを探索するために開発されてきた種々の光時計のリソースを引き続き有効利用するという観点からも、光周波数比の決定は重要である。よって以下のマイルストーンが設定される。

5) 少なくとも5つの光時計間の光周波数比測定が行われること；各々の周波数比が独立な研究機関で少なくとも2回行われ、例えば、 5×10^{-18} よりも小さな不確かさで一致すること。

7.3 秒の再定義ロードマップ

秒の再定義について、国際度量衡総会（CGPM）への発議がいつ頃なされるかは、国際度量衡委員会（CIPM）が責任を持って決める事項である。CCTFとCGPMが開催されるタイミングと上記のマイルストーン達成状況から判断して、秒の定義改定が行われるのは、おそらく2026年または2030年ころではないかと考えられている。秒の再定義後は、従来の時間周波数標準は、これまでと同等の不確かさで秒を実現できる、秒の二次表現として働くこととなる。また、セシウム原子時計の改良は、すでに確立された枠組み内で、秒の二次表現として定常的に評価されることとなる。

7.4 秒の再定義に向けた現在の動向

マイルストーン1)については、すでにわが国（理研・東大）、並びに、米国（JILA）にて 10^{-18} 台前半の不確かさを持つ光時計（Sr光格子時計）が実現されている。よって、このマイルストーン1)の達成が最も早く期待される。また、マイルストーン2)については、日米欧の各地域において、光ファイバーを用いた遠隔周波数比較実験が行われている。その中でも、ヨーロッパのものは、数か国をつないだ最も大規模なものである。また、ドイツ物理工学研究所（PTB）で開発された可搬型Sr光格子時計は、イタリアやフランスに運搬されて、相対論的測地学の原理検証実験も含めた、精密比較実験において大いに活躍している。2017年6月に開催されたCCTFにおいて、10年あまりの歳月をかけて、Srの時計遷移周波数の絶対値が、不確かさの範囲内で収束してきたことが示された。これは、前節のマイルストーン3)の条件が満足されつつあることを意味している。国際原子時（TAI）への光時計の定常的な貢献を謳った、マイルストーン4)については、フランス時空標準機構（SYRTE）のSr光格子時計が予備的な報告を行い、サーキュラーTにその結果が報告された。また、イギリスNPLのYb⁺時計や、わが国のNICTにおけるSr光格子時計も光時系の生成に向けて、研究開発が精力的に行われている。マイルストーン5)については、²⁷Al⁺/¹⁹⁹Hg⁺、⁴⁰Ca⁺/⁸⁷Sr、¹⁷¹Yb⁺(E3)/¹⁷¹Yb⁺(E2)、¹⁹⁹Hg/⁸⁷Sr、¹⁷¹Yb/⁸⁷Sr、¹⁹⁹Hg/⁸⁷Rbなど、数多くの周波数比の測定が行われている。上記の周波数比測定と、セシウム一次標準器による絶対周波数測定のデータセットは、未知数の数よりも方程式の数の方が多いため、全体として不確かさを最小に保つために、基礎物理定数の決定の際に用いられる手法が用いられた。例えば、Margolisらによる最小二乗法や、

Robertsson らによるグラフ理論を用いた解析などである^{10),11)}。

7.5 懸念事項

秒の再定義という歴史的イベントに向けて、世界的な盛り上がりを見せている現在であるが、その一方でいくつか懸念事項も指摘されている。それは、現在の秒を維持管理するシステムについてである。まず、TAIの校正に寄与しているセシウム一次周波数標準器（ファウンテン時計）の数が漸減傾向にあることである。マイクロ波による時計から、光時計へと移行しつつある時期であり、そのような状況では、リソースの投入も難しくなってくる可能性もある。これが事実かどうかを確認するために、2010年以降のサーキュラー T の記述を元にして、TAIの校正に寄与した1次周波数標準器（または、それによる校正イベント）の個数をプロットしたのが下の図である。

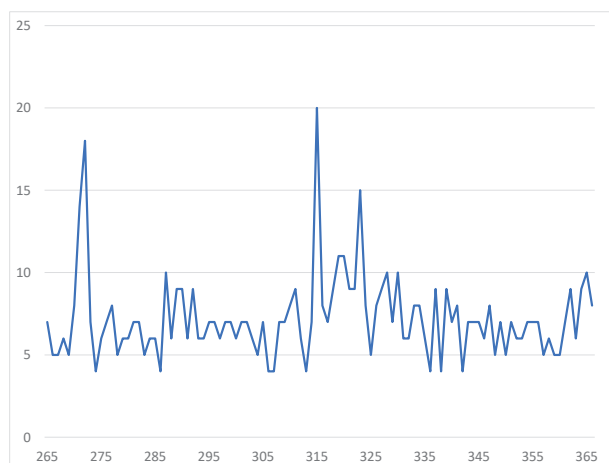


図6 TAIの校正に寄与したセシウム一次標準器の個数の履歴（横軸：サーキュラー T の発行番号。おおむね2010年から2018年に相当する。縦軸、セシウム一次標準器の個数）

この図を虚心坦懐に眺めれば、危惧されるほどの個数の減少傾向は見られない。しかし、不確かさの小ささからその寄与の重みが大きなセシウム原子泉時計を定常的に運転できているのが、実質的にドイツ PTB とフランス SYRTE の2か国である場合が多いというのが現状である。中国の NIM も健闘しているといえるが、SI秒の信頼性の確保のためには、わが国を含めたアジア諸国、そして北米諸国のさらなる貢献も望まれるところである。さらに光時計による TAI の校正が頻繁に行われるようになれば、懸念が低減されるとともに、秒の再定義を促進するようになる。もう一つ指摘された懸念事項は、衛星双方向方式を含めた時刻比較にかかわる機器の老朽化の現状を意

識した、インフラ投資の呼びかけである。これらのインフラ機器は、停止することが許されるものではなく、また、秒の再定義後も引き続き重要な役割を果たすので、適切な維持・管理が望まれる。

8. 終わりに

次世代原子時計は、秒の再定義のほかにどのような応用があるのだろうか。光時計は最も精密な量子標準であると同時に、相対性理論の効果を身近に観測するツールとなり得る。また、物理定数の恒常性を検証する上でもたいへん有効であることがわかってきた。さらに、重力ポテンシャルの高精度センサーとして、鉱物の探査や地殻変動の観測にも役に立つと期待されている。次世代原子時計である光時計は基礎科学と実用技術の両面で多くの研究成果を生み出すことは間違いない。

参考文献

- 1) 白田孝：国際単位系 (SI) の体系紹介と最新動向について (概論), 計測と制御, **53**, 74/79 (2014)
- 2) 洪鋒雷：光コム-光科学のイノベーション, 応用物理, **79**, 546/549 (2010)
- 3) 産総研プレスリリース (2009年7月16日発表). http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2009/pr20090716/pr20090716.html
- 4) C. W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij, D. J. Wineland and T. Rosenband: Frequency comparison of two high-accuracy Al^+ optical clocks, *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 070802 (2010)
- 5) M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi and H. Katori: An optical lattice clock, *Nature*, **435**, 321/324 (2005)
- 6) B. J. Bloom, T. L. Nicholson, J. R. Williams, S. L. Campbell, M. Bishof, X. Zhang, W. Zhang, S. L. Bromley and J. Ye: An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level, *Nature*, **506**, 71/75 (2014)
- 7) 洪鋒雷：原子時計の発展と秒の定義に係わる国際勧告, 日本物理学会誌, **69**, 196/203 (2014)
- 8) P. Gill: When should we change the definition of the second?, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **369**, 4169/4130 (2011)
- 9) F. Riehle, P. Gill, F. Arias and L. Robertsson: The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures, *Metrologia*, **55**, 188/200 (2018)
- 10) H. S. Margolis and P. Gill: Determination of optimized frequency and frequency ratio values from overdetermined sets of clock comparison data, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **723**, 012060 (2016)
- 11) L. Robertsson: On the evaluation of ultra-high-precision frequency ratio measurements: examining closed loops in a graph theory framework, *Metrologia*, **53**, 1272/1280 (2016)

改定国際単位系における電気標準

金子 晋久

産業技術総合研究所計量標準総合センター物理計測標準研究部門首席研究員

1 まえがき

国際単位系 (SI) は、量子力学に基づき、かつ器物に依存しない形へと改定され 2019 年 5 月 20 日から適用された。電流の単位であるアンペアは、改定前の SI においては 2 本の平行電流間に働く力の大きさにより定義されていたが、改定後の SI においては、電気素量と周波数により定義されている。また、この電気素量に加えてプランク定数が定義値となったことにより、これまで国際的に合意された「協定値」をもとに電気標準として利用されてきたジョセフソン効果電圧標準、量子ホール効果抵抗標準も完全に SI に準拠することとなった。これらについて解説し、さらにそのメリットと改定の具体的な手続きについて述べる。

2. SI 基本単位の電流と関連する基礎物理定数

国際単位系 (SI) は 2018 年 11 月に国際度量衡総会において改定が決議され、その改定 SI は 2019 年 5 月 20 日から適用された。改定 SI においても電流の単位「アンペア」は引き続き、7 つの基本単位の一つである。ここで改定 SI では単位の定義が出发点となるのではなく、真空中の光の速さなどに加え新たに定義されるプランク定数、電気素量、アボガドロ定数、ボルツマン定数が基本となり、それらの基礎物理定数に基づき単位が定義される。

まず、改定前のアンペアについて説明する。その定義は、

アンペアは、真空中に 1 メートルの間隔で平行に配置された無限に小さい円形断面積を有する無限に長い二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 メートルにつき 2×10^{-7} ニュートンの力を及ぼし合う一定の電流である。

と表現されている。この定義は、1948 年の第 9 回国際度量衡総会 (CGPM) で採択され、その後、1954 年の第 10 回 CGPM で電流の基本単位として正式に承認されている。この定義を簡単に示したのが、図 1 である。

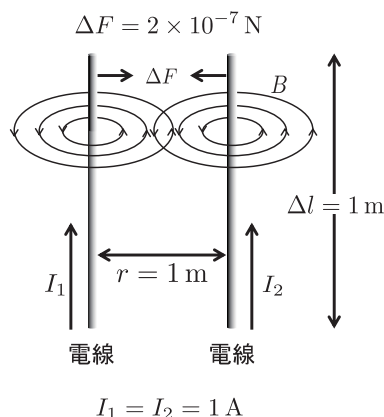


図 1 理想化された状態での 2 つの電流線の単位長さあたりに働く力を図示したもの: Δl は単位長さ、 ΔF はその単位長さあたりの線間に働く力、電流 I_1, I_2 は共に 1 A、 B は電流によって発生する円状磁界。

図 1 で示される、同じ (反対) 方向に電流が流れている 2 本の導体つまり電線間に働く引力 (斥力) はアンペールの法則で表現でき、実際に数式で記述すると下式のようなになる。

$$\Delta F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} \Delta l$$
$$2 \times 10^{-7} = \frac{\mu_0 \times 1 \times 1}{2\pi \times 1} \times 1$$

この式から、直接

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2 \quad (1)$$

が導かれる。つまりアンペアの定義は実体として磁気定数 (真空の透磁率) μ_0 を式 (1) で定義していることと同義である。この表現は採択当時の修辭・表記上他の定義との統一性も考慮すべきとの考えからできたものである。仮に改定 SI でこの定義を使うとすると、「磁気定数が式 (1) となるように、アンペアを定める」という表現になるであろう。しかし、改定 SI ではこの定義は破棄された。

この改定前のアンペアの定義の字義通りに実験を行い、十分小さな不確かさでアンペアを実現することは困難に思われるが、実際このアンペアの定義を直接利用して電流を実現する方法は電流天びんと呼ばれる装置を用いることにより可能で、1930 年代から 1940 年代初めまでにアメリカ、ドイツ、フランス、

日本で盛んに研究が行われた^{1),2)}。

磁気定数 μ_0 、電気定数（真空の誘電率） ϵ_0 、および真空中の光の速さ c の間には

$$\frac{1}{c} = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (2)$$

の厳密な関係式がある。改定前の SI では μ_0 と c は定義値であるので、この厳密式を通じ ϵ_0 も含めこの三つの基礎物理定数は全て不確かさ零として扱われてきている。ただし、 $c = 299\,792\,458$ m/s は有限の桁数、 μ_0 は式 (1) で定義されているが、それらから式 (2) を通じて導出される電気定数は、

$$\epsilon_0 = 8.854\,187\,817 \cdots \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

となり、形式的には無限の桁数を持つことになる。

改定 SI では磁気定数 μ_0 （および電気定数 ϵ_0 ）は定義量でなくなり不確かさを持つ被測定量である。その不確かさは、微細構造定数 α 、真空の特性インピーダンス Z_0 、真空の特性アドミッタンス Y_0 と同じ（改定時点で拡張相対不確かさ 2.3×10^{-10} ）である。このことは、上式 (2) に加え厳密式、

$$\begin{aligned} Z_0 &= \mu_0 c = \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \\ Y_0 &= \frac{1}{\mu_0 c} = \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} = \frac{1}{Z_0} \\ \mu_0 &= \alpha \frac{2h}{ce^2} \end{aligned}$$

から即導くことができる。ここで h はプランク定数、 e は電気素量、つまり電子の電荷の符号を変えたものである。一方、 c は改定 SI においても長さ、メートルの基準でありその値は定義値として維持される。

3. 改定 SI における電気標準

電流天びんの研究が一段落した後、いくつか他の絶対測定の手段が開発されたが、1962 年のジョセフソン効果の理論的導出³⁾とその後の検証実験、1980 年の量子ホール効果の発見⁴⁾により、電気関係量の具体的な実現にはこの二つの量子効果を用いたジョセフソン効果電圧標準と量子ホール効果抵抗標準を用いることがほとんどとなっている。アンペアの「実現」においては、これら「ボルト」と「オーム」の 2 つを用いて逆に「組み立て量」として「アンペア」を導く。つまり、アンペアの改定前の定義は実態としては電気標準には利用されていなかった。多くの場合、これら 2 つの量子効果を利用し、必要に応じて電流を実現する方が不確かさが小さいという現実

の問題によるからである。すなわち、アンペアは SI 基本単位にも関わらず、その実現においては直接的な一次表現は行われてきていない。一方、後で述べるように上記二つの量子効果による電圧、抵抗標準は極めて安定であり、比較的容易に実現できる。

しかし、改定前のアンペアやその他の SI の定義（国際キログラム原器によるキログラムの実現など力学量の定義など）からプランク定数と電気素量を測定し、それらに基づきジョセフソン効果電圧標準と量子ホール効果抵抗標準を実現すると、その不確かさはそれらの量子効果の普遍性と比較して大幅に大きく、産業界の要求を満たさなかった。具体的には改定前の SI において他の SI 量にトレーサブルにする場合、ジョセフソン効果を利用した電圧測定では 4×10^{-7} ($k=1$ 、ここで k は包含係数)、量子ホール効果を用いた抵抗測定では 1×10^{-7} ($k=1$) の不確かさを付加的に付与する規則^{6),8)}になっていた。電気標準では、他の物理量の測定に起因するこのような不確かさの影響を避けるため、厳密な意味では他の SI 単位から離れ、それら二つの量子効果を記述する特徴的基礎物理定数であるジョセフソン定数とフォン・クリツィング定数の不確かさを零として定めることとなった。それらの値は「協定値」⁹⁾と呼ばれ、その協定値をもとに 1990 年より 2019 年改定時まで標準の実現・供給がなされていた。このことは 1987 年の第 18 回 CGPM にて決議されメートル条約加盟国間で合意されたものである。つまり、電気標準は純粋な意味では SI とのトレーサビリティを失ったことになっていた。このことは、実用的には電気標準、電気計測業界に大きな利益をもたらした反面、改定前のアンペアの定義には直接的には従わない方法であることは自明であった。ジョセフソン定数とフォン・クリツィング定数の協定値は、

$$\begin{aligned} K_{J-90} &\equiv 483597.9 \times 10^9 \text{ HzV}^{-1} \sim \frac{2e}{h} \equiv K_J \\ R_{K-90} &\equiv 25\,812.807 \, \Omega \sim \frac{h}{e^2} \equiv R_K \end{aligned} \quad (3)$$

であり、この値は 1989 年当時、最も確からしくかつ近い将来大きな変更をする必要がないように慎重に決定されていた。この式において「 \sim 」の記号は、数値的には近いがプランク定数 h と電気素量 e への直接的なトレーサビリティを喪失していることを意味する。逆にいうと、科学・測定技術の発展で h と e の値がより小さい不確かさで決定できても、改定前の規則ではその恩恵を享受できる論理的構造を取っていないかった。

改定 SI では、ジョセフソン効果、量子ホール効果を用いた電圧標準と量子ホール効果抵抗標準と電気素量が定義値となる

ため、それら量子効果を用いた標準は厳密な SI トレーサビリティを取り戻すことになった。つまり、電圧、抵抗標準は SI の改定後も改定前と同じ様にジョセフソン効果、量子ホール効果をもとに実現できる。そして改定後は完全な SI トレーサビリティを持つとともに、これらをもとにオームの法則を通じて SI トレーサブルな電流標準を作ることも自然に可能である。

さらに改定 SI では、単位時間に流れる電子の数でもアンペアは実現可能である。改定前の SI では被測定量であった電気素量 e が定義値となるためである。つまり別に定まる周波数標準と組み合わせ一秒間に f_{SET} 個の電子を移送、つまり f_{SET} (1/s) の周波数で移送することで、

$$I = e \cdot f_{\text{SET}} \quad (\text{C/s}) \quad (4)$$

の電流が得られる。これはまさに改定されるアンペアの定義、

アンペア（記号は A）は、電流の SI 単位である。これは、単位 C（A s に等しい）による表現において、電気素量 e を正確に $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ と定めることによって設定される。ここで、秒は $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ により定義されている。

と同じ意味を持ち、そのまま実現方法の一つとなっている。ここで、電流の単位は C/s = A となる。また、 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ は時間・周波数標準に利用されているセシウム 133 原子の基底状態の超微細準位の周期であり、正確に 9 192 631 770 Hz である。

これ以外にもアンペアの実現方法が提示されており、まとめると、

- オームの法則、つまり単位間の関係式 $A = V/\Omega$ としてジョセフソン効果と量子ホール効果による SI 組立単位であるボルト V、オーム Ω を用いて実現。
- 単一電子移送（single electron transport, SET）あるいは同様の素子と単位間の関係式 $A = C/s$ 、アンペアの定義において与えられる電気素量 e の値、そして SI 基本単位である秒 s を用いて実現。
- 関係式 $I = C \cdot \frac{dU}{dt}$ と $A = F \cdot V/s$ 、SI 組立単位であるボルト V とファラド F そして SI 基本単位の秒 s を用いて実現。

の三つである。この二つ目の実現方法つまり、電気素量 e と周波数 f を用いる方法は SI に忠実な手段として、特に微小電流を発生する手段として各国で盛

んに研究が行われている。しかし、発生できる電流はナノアンペア程度と比較的小さく今後の研究が待たれている。この研究はナノテクノロジーおよび量子ナノ構造、キュービット、量子コンピューティングなど物性物理の最先端の技術と親和性が高く周辺技術の発展とともに飛躍的な電流増大が期待されている。この課題については 5.3 節で取り扱いたい。

ここで、改定 SI におけるプランク定数と電気素量の値^{10),11)}を示しておく。

$$\begin{aligned} h &\equiv 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s} \\ e &\equiv 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C} \end{aligned} \quad (5)$$

これらは、2017 年の基礎物理定数 CODATA 特別調整値¹⁰⁾

$$\begin{aligned} h &= 6.626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J s} [1.0 \times 10^{-8}] \\ e &= 1.602\,176\,6341(83) \times 10^{-19} \text{ C} [5.2 \times 10^{-9}] \end{aligned}$$

から決定されたものである（[括弧内]は相対不確かさ）。式 (5) から、改定 SI で利用されるジョセフソン定数、フォン・クリッツィング定数が計算される。

$$\begin{aligned} K_J &\equiv \frac{2e}{h} = 483\,597.848\,416\,984 \text{ GHz V}^{-1} \\ R_K &\equiv \frac{h}{e^2} = 25\,812.807\,459\,3045 \text{ } \Omega \end{aligned} \quad (6)$$

勿論、桁数はいくらかでも取ることは可能だが、多くの研究開発、標準での利用において、実用上問題のない桁数として 15 桁を取ることを原則とする。しかしそれ以上の桁数が必要であれば、 h および e の式 (5) の定義値を用いて桁数を追加することは自由である。

4. SI の改定による校正サービス、トレーサビリティへの影響

前節で、ジョセフソン定数とフォン・クリッツィング定数の協定値と改定 SI での値を述べた。その差が、改定 SI による電気標準への影響である。実際に式 (3) と式 (6) の値の差を取る。

$$\begin{aligned} \frac{K_J - K_{J-90}}{K_J} &= -106.7 \text{ ppb} \\ \frac{R_K - R_{K-90}}{R_K} &= +17.79 \text{ ppb} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで「ppb」は相対値 10^{-9} を表す。これらの相対変化量は、式 (6) あるいは式 (5) に応じてより多くの桁数を取ることも可能である。改定後の SI で使用されるジョセフソン定数は協定値の値と比較し、約 106.7 ppb (= 0.1067 ppm, ppm は 10^{-6}) 減り、フォン・クリッツィング定数は約 17.79 ppb (= 0.017 79 ppm) 増えることになる。

日本では国際的な合意と決議に則り、この改定 SI

への移行が2019年5月20日に実行された。また、対応する計量単位令を改正する政令も同日に合わせて施行された。この対応状況は各国により異なる。

つまり日本においては「厳密」にいうと、改定 SI の使用が開始される2019年5月20日以降の校正値 V_{SI} 、 Ω_{SI} はその直前の校正値 V_{90} 、 Ω_{90} から、

$$\begin{aligned} V_{SI} &= V_{90} + 106.7 \text{ ppb} \\ \Omega_{SI} &= \Omega_{90} + 17.79 \text{ ppb} \end{aligned} \quad (8)$$

の調整が必要である。ここで電圧に関して式(7)と符号が逆転しているのは、式(6)の単位や後に説明する式(9)から自明に分かるように、電圧は K_V の逆数で表現されるからである。整理すると改定後、電圧の SI トレーサブルな校正値は改定前の $K_{V,90}$ を基準にした校正値に比べ 106.7 ppb だけ大きくなり、抵抗の SI トレーサブルな校正値は $R_{K,90}$ を基準にした校正値に比べ 17.79 ppb だけ大きくなることを意味する。これは、単位の視点から見たときに「1 V」が 106.7 ppb だけ小さくなり、「1 Ω 」が 17.79 ppb だけ小さくなることによる。

例えば、量子化ホール抵抗とそれと同じ値を持つ抵抗器、つまり抵抗比「1」の校正を考えるとわかりやすい。抵抗ブリッジでその比を測定するとき、改定に関わらず物理現象は変化しないので、改定前後でその比「1」は変化しない。よって抵抗器の値は改定前は $R_{K,90}$ で改定後は R_K である。つまり、ある基礎物理定数にある相対変化量が与えられるとき、対応する物理量に換算して正の相対変化量を生じることになる場合、その分その物理量の校正値は増え、負の相対変化量があればその分校正値は小さくなる。

この調整について2019年5月20日以降の校正で取るべき対応¹²⁾を記載しておく。校正事業者で宣言している拡張相対不確かさ ($k=2$) を U 、式(7)、(8)で示す相対変化量を d とすると、下記の2つの分類に整理できる。

$2.5d \leq U$ 次回の参照標準器の校正まで、相対変化量の調整なしに校正作業を継続しても良い。電圧関連量では 2.5×10^{-7} 以上の不確かさ、抵抗関連量では 5×10^{-8} 以上の不確かさの場合がこの分類に対応する。ほとんどの校正事業者の対応、あるいは電力など多くの組み立て量の校正はこの分類に当てはまる。

$U < 2.5d$ 参照標準器の校正値をこの相対変化量の分だけ数値的に調整して校正を行うか、改定 SI に基づいた参照標準器の再校正を

行った上でそれを基準にした校正作業をおこなう。

産業界や様々な研究開発現場で利用されている標準電圧発生器や標準抵抗器は極めて高い安定度を有する。例えば、ツェナーダイオード電圧標準は 2 ppm/year 程度以下、標準抵抗器は 1 ppm/year 程度以下の経年安定度がある。これらの標準器を利用した測定・校正の不確かさは当然標準器自体の安定性からくる不確かさより大きくなるが、それでもほとんどの分野で十分な性能である。ここで、これらの安定度の値を式(7)、(8)で示す SI の改定による値の相対変化量と比べると、相対変化量はかなり小さいことがわかる。つまり、ほとんどの校正事業者や研究開発現場での校正は上記の $2.5d \leq U$ の分類に当てはまり、実態として SI の改定による校正値への影響はないと考えられる。

それらの相対変化量は当然量子効果を用いた一次標準の不確かさに比べると大きい。日本国家計量標準の場合、ジョセフソン効果電圧標準の不確かさは 10 V において 4.5 ppb ($k=2$)、量子ホール効果抵抗標準は 100 Ω の場合 56 ppb ($k=2$) (国際比較時などの場合に用いる実力値としてはこの値の数分の1か1桁程度小さい) である。つまり、国家計量標準機関を中心とした量子効果を用いて標準を維持している機関での校正作業は上記の $U < 2.5d$ の分類に当てはまり、これらの相対変化量を考慮して校正サービスなどへ対応する。

最後に、代表的な電気関係量について連動して発生する相対変化量を表1にまとめておく。

5. 量子電気標準の実現

前節で述べた様に、ジョセフソン効果と量子ホール効果が現在の電気標準の基準であり、改定 SI でも引き続き利用される。これらについて概説¹³⁾しておく。

5.1 ジョセフソン効果電圧標準

二つの超伝導体に挟まれた薄い絶縁層または金属層からなる接合素子をジョセフソン接合素子と呼ぶ。超伝導転移温度以下に冷却したジョセフソン接合素子に高周波を照射し、超伝導の電極間に適切なバイアス電流を流すと、超伝導電極間の電流-電圧特性上に楕状又は階段状の定電圧ステップが生じる。これをシャピロスステップと呼び、この効果を発見者の名前にちなみジョセフソン効果と呼ぶ³⁾。シャピロスステップの一例を図2に示す。これは超伝導とトンネル効果という二つの量子効果を同時利用した素子で

表1 SI改定における電気関係量の校正值の相対変化量

量	数式	相対変化量 (ppb)	$U_{\text{NMIJ}} / \text{AIST}$ ($k = 2$, ppb)	備考
電圧	$V_{\text{SI}} = V_{90} [1 + (106.7 \times 10^{-9})]$	+106.7	4.5 (10 V)	$V \propto 1/K_J$
抵抗	$\Omega_{\text{SI}} = \Omega_{90} [1 + (17.79 \times 10^{-9})]$	+17.79	56 (100 Ω)	$\Omega \propto R_K$
電流	$A_{\text{SI}} = A_{90} [1 + (88.87 \times 10^{-9})]$	+88.87		$A = V/\Omega \propto 1/(K_J R_K)$
電荷	$C_{\text{SI}} = C_{90} [1 + (88.87 \times 10^{-9})]$	+88.87		$C = A/\omega \propto 1/(K_J R_K)$
電力	$W_{\text{SI}} = W_{90} [1 + (195.5 \times 10^{-9})]$	+195.5		$W = AV = V^2/\Omega \propto 1/(K_J^2 R_K)$
キャパシタンス**	$F_{\text{SI}} = F_{90} [1 - (17.79 \times 10^{-9})]$	-17.79	72 (1000 pF)	$F = 1/(j\omega\Omega) \propto 1/R_K$
インダクタンス	$H_{\text{SI}} = H_{90} [1 + (17.79 \times 10^{-9})]$	+17.79		$H = \Omega/(j\omega) \propto R_K$

* 産総研の拡張相対不確かさ ** クロスキャパシタを用いる場合には改定で変化なし j 、 ω はそれぞれ虚数単位と角周波数

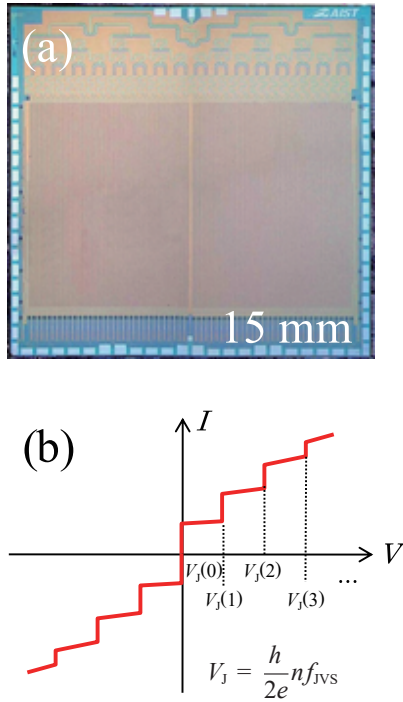


図2 集積したジョセフソン接合素子とシャピロステップ: (a) 524 288 個の NbN/TiN_x/NbN ジョセフソン接合を集積した素子。 $f_{\text{JVS}} = 16$ GHz で動作する。(b) シャピロステップの模式図。

ある。この定電圧は、照射する高周波の周波数を f_{JVS} とすると、以下の式で表される。

$$V_J = \frac{h}{2e} n f_{\text{JVS}} = \frac{1}{K_J} n f_{\text{JVS}} \quad (9)$$

ただし、 n は整数であり、シャピロステップの次数と素子上のジョセフソン接合数(集積度)の積である。つまり、照射する高周波を正確に定めれば、あとは基礎物理定数であるプランク定数と電気素量(組み合わせるとジョセフソン定数)のみにより決まる普遍的電圧を得ることができる。ここでジョセフソン定数 $K_J \equiv 2elh$ は、1990 年から改定前までは3節の式(3)の協定値が使われ、改定後は式(6)の定義値が利用されている。ちなみに周波数の不確かさは極めて小さ

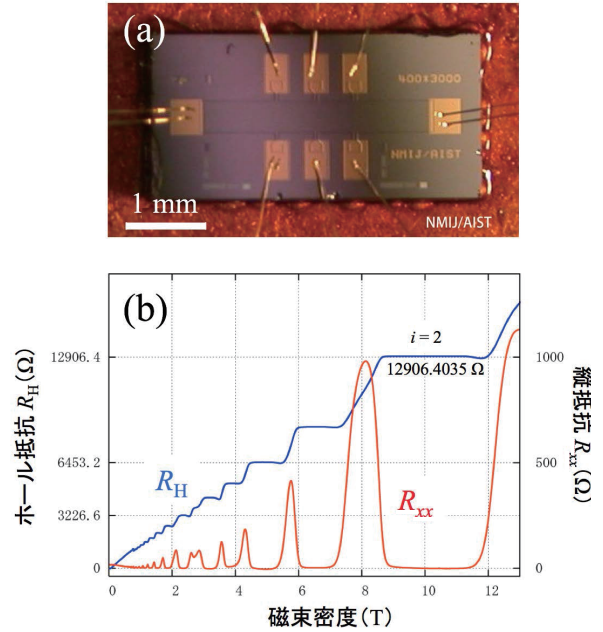


図3 量子ホール素子と量子ホール効果の様子: (a) 量子ホール素子。(b) 量子ホール効果。左側の軸がホール抵抗 R_H 、右側の軸が対応する縦抵抗 R_{xx} 。量子ホール状態を示すとき、縦抵抗は非散逸状態(抵抗ゼロ)となる。

いため、実際の標準供給や国際比較においては無視できるレベルである。このジョセフソン効果の普遍性は極めて高い精度で、ある場合には 10^{-19} のオーダーまで確認されている¹⁴⁾。

5.2 量子ホール効果抵抗標準

量子ホール効果は、磁場中の2次元電子系のホール効果が量子化される現象である。主には GaAs/AlGaAs ヘテロ構造基板や MOSFET の界面に形成される高い移動度を有する2次元電子系が用いられる。このような2次元電子系を1 K程度の低温に冷却し、磁場を印加すると、磁場に対するホール抵抗(ホール電圧を素子に流す電流で割った量をホール抵抗と呼ぶ)は、階段状に量子化される。この様子を図3に示す。ちなみに温度が高くなると、量子効果は喪失しホール抵抗は通常の3次元系と同じく磁場に対

して線形に増加する。この量子化ホール抵抗 R_H は下式で表される。

$$R_H = \frac{h}{ie^2} = \frac{R_K}{i} \quad (10)$$

ここで、 i は自然数であり、「占有率」と呼ばれる物理量に対応する。つまり、適切に磁場を与えれば、基礎物理定数であるプランク定数と電気素量（組み合わせるとフォン・クリツィング定数）のみにより決まる普遍的抵抗を得ることができる。ここでフォン・クリツィング定数 $R_K \equiv h/e^2$ は、1990 年から改定までは 3 節の式 (3) の協定値が使われ、改定後は式 (6) の定義値が利用されている。通常は $i=2$ の量子状態を利用するため、量子化ホール抵抗の改定前後の値はそれぞれ、

$$\begin{aligned} \text{(改定前)}: \frac{R_{K-90}}{2} &= 12\,906.403\,5\,\Omega \\ \text{(改定後)}: \frac{R_K}{2} &= 12\,906.403\,729\,652\,25\,\Omega \end{aligned} \quad (11)$$

となる。この値もジョセフソン効果の場合と同じく、基礎物理定数のみによって決定され、その普遍性は 10^{-11} のレベルまで確認されている¹⁵⁾。最近ではより高温で、より低磁場で利用できるグラフェンの量子ホール効果も研究が進んでおり、標準への応用研究も盛んである。

5.3 量子電流標準

前節までで説明したジョセフソン効果電圧標準と量子ホール効果抵抗標準を直接組み合わせ、電流標準が実現可能である¹⁶⁾。しかし、通常その形で電流の「校正」をすることは実施されておらず、何らかの適切な値の「標準器」を校正しそれらを組み合わせることで電流標準が実現している。いずれにせよこれらは 3 節で解説したアンペアの実現方法のうちの一つ目である。

これ以外に、二つ目の方法として、電気素量つまり電子を一つ一つ計数し、単位時間当りに移送される電荷でアンペアの実現が可能である。従来は被測定量であった電気素量が改定 SI で定義量となるため、この手段による電流の標準は SI に極めて忠実な実現方法として注目を集めている。以下にその原理について述べる。

単一電子（単電子）トンネリング効果は電子を孤立させ周囲の電位を適切に調整することにより、電子一つ一つを制御しながらエネルギー的な障壁を通過させる効果である。その素子の写真を図 4 に示す。

これから分かる様に、電子を一つ一つ量子ドットと呼ばれる、電位的に孤立した数十 nm オーダの微細構造へ導入する。ドットは極めて小さいため電子のエネルギー準位は離散的となる。つまり、ドットに電子が入ると自らのクーロン相互作用（キャパシティブな効果）で 2 つ目の電子は入らない。この状態をクーロンブロッケードと呼ぶ。その量子ドットの電位に対応するゲート電圧を用いて制御することでソースドレイン間で一つ一つの電子の移送を制御する。この単一電子移送素子の動作の様子を「ポンプ」に例え、単一電子ポンプと呼ぶこともある。

正確な周波数でこの動作を行うと、正確な電流が式 (4) の形で発生できるという仕組みである。ジョセフソン電圧標準の説で述べた様に、周波数標準は十分に小さな不確かさで決まる。

単一電子ポンプとして、金属による量子ドット構造を用いたもの、GaAlGa/GaAs ヘテロ構造基板の 2 次元電子系上の量子ドットを利用したもの、同じ 2 次元電子系上の微細構造と表面弾性波を利用したもの、超伝導ギャップを利用したもの、シリコン中の不純物準位を用いたものなど様々な単一電子ポンプが開発され研究されている¹⁷⁾。また、単一電子ポンプにより発生した量子電流とジョセフソン効果による量子電圧、量子ホール効果による量子抵抗をオームの法則を通じて比較するという、いわゆる量子メトロロジートライアングル（量子計測三角形）実験も勢力的に行われている。

6. まとめ

以上、電気標準における改定前の SI、改定 SI およびそれらにおける基礎物理量の取り扱いや相互関係の説明を行なった上で改定 SI の影響を述べた。また

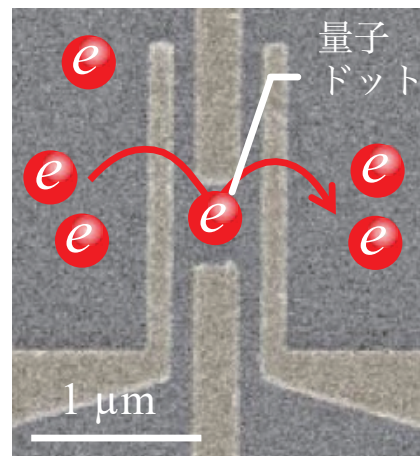


図 4 単一電子ポンプ：GaAlAs/GaAs ヘテロ構造の 2 次元電子系に形成された量子ドットを用いたもの。

3つの量子電気標準、すなわちジョセフソン効果電圧標準、量子ホール効果抵抗標準、及び単一電子トンネリング効果による単一電子ポンプを用いた量子電流標準を解説した。前者2つは、完全に確立した技術といっても良いが、量子電流標準は研究途上である。よって、実際の電流標準では、ジョセフソン効果と量子ホール効果を用いその組み合わせで電流標準が実現されている現在の状況が当面継承される。単一電子トンネリング効果はその関連分野も含め波及効果は大きいと期待される。

改定SIによる校正値の変化は産業界には多くの場合影響を与えないことを説明したが、現場での電気計測精度への要求が高まるにつれその技術も向上し、同時に量子効果を用いた標準もより簡便になりつつある。今回の改定は将来産業界で量子標準が積極的に利用される場合への重要な布石になっている。量子センシング・超精密リアルタイム測定の研究は電気計測に留まらず、全ての物理量へ波及する。改定前の協定値に基づく電気標準の閉じた体系から、改定SIでは他の物理量と調和した精密電気計測が確立することになる。今後の研究開発動向を見据えると、このSI改定は長期的に多大な恩恵を与えるであろう。

謝辞

本原稿は主には産業技術総合研究所内の研究者、そして国内外の標準研究所などの機関・大学での多くの研究員との研究・議論をもとにしている。各位のご協力に感謝する。

参考文献

- 1) H. L. Curtis: Review of recent absolute determinations of the ohm and the ampere. *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, **33**, 235/254 (1944)
- 2) 米田麟吉, 石橋勇一: 電流の絶対測定, 電気試験所彙報 1, 294/300 (1937)
- 3) B. D. Josephson: Possible new effects in superconductive tunneling, *Phys. Lett.*, **1**, 251/253 (1962)
- 4) K. von Klitzing, G. Dorda and M. Pepper: New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance, *Phys. Rev. Lett.*, **45**, 494/497 (1980)
- 5) B. N. Taylor and T. J. Witt: New international electrical reference standards based on the Josephson and quantum Hall effects, *Metrologia*, **26**, 47/62 (1989)
- 6) CIPM. Resolution 1, PV, 56, 1988:44. Available at <http://www.bipm.org/en/CIPM/db/1988/1/>
- 7) CIPM. Resolution 2, PV, 56, 1988:45. Available at <http://www.bipm.org/en/CIPM/db/1988/2/>
- 8) CIPM. PV, 68, 2001:101, following CCEM, 22, 90; b P. J. Mohr and B. N. Taylor: CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998. *Rev. Mod. Phys.*, **72**, 351/495 (2000)

- <https://www.bipm.org/en/committees/cipm/cipm-2000.html>.
- 9) T. J. Quinn: News from the BIPM, *Metrologia*, **26**, 69/74 (1989)
 - 10) P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor and E. Tiesinga: Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment, *Metrologia*, **55**, 125/146 (2018)
 - 11) D. B. Newell, F. Cabiati, J. Fischer, K. Fujii, S. G. Karshen-boim, H. S. Margolis, E. de Mirandés, P. J. Mohr, F. Nez and K. Pachucki: The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI, *Metrologia*, **55**, L13/L16 (2018)
 - 12) Documents are available at <https://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/>
 - 13) N.-H. Kaneko: Review of quantum electrical standards and benefits and effects of the implementation of the 'Revised SI', *IEEJ Trans.*, **12**, 627/637 (2017)
 - 14) A. K. Jain, J. E. Lukens and J.-S. Tsai: Test for relativistic gravitational effects on charged particles, *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 1165/1168 (1987)
 - 15) F. Schopfer and W. Poirier: Testing universality of the quantum Hall effect by means of the Wheatstone bridge, *J. Appl. Phys.*, **102**, 054903 (2007)
 - 16) J. Brun-Picard, S. Djordjevic, D. Leprat, F. Schopfer and W. Poirier: Practical quantum realization of the ampere from the elementary charge, *Phys. Rev. X*, **6**, 041051(15)
 - 17) N.-H. Kaneko, S. Nakamura and Y. Okazaki: A review of the quantum current standard, *Meas. Sci. Technol.*, **27**, 032001 (2016)

熱力学温度の単位「ケルビン」の定義改定

山田 善郎*、中野 享**

*産業技術総合研究所 計量標準総合センター 物理計測標準研究部門 首席研究員

**産業技術総合研究所 計量標準総合センター 物理計測標準研究部門 温度標準研究グループ長

1 はじめに

2019年5月20日、国際単位系 (Le Système International d'Unités, SI) の基本7単位のうち、4つの単位の定義が改定された¹⁾。キログラム (kg)、アンペア (A)、モル (mol) と並んで、本稿で解説する熱力学温度の単位ケルビン (K) もその一つである。キログラムの場合と同様に、基礎物理定数の値による定義への改定に向け、各国標準研究機関の温度標準関係者が定義に用いる定数の値の高精度決定に取り組んできた。

国際度量衡委員会の温度に関する技術諮問委員会である、第27回の測温諮問委員会 (Consultative Committee for Thermometry, CCT) が2014年5月、パリ郊外セーブル市にある国際度量衡局 (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) において開催され、定義改定のための技術的達成条件が国際度量衡委員会への勧告として採択された²⁾。そして2017年6月の第28回CCTではこの条件が満たされたことが確認された。翌2018年11月開催の第26回国際度量衡総会 (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM) においてケルビンを含むSIの4つの基本単位の新定義が採択され、2019年5月20日に発効することが決定された。

SIが誕生した1960年以来、基本単位の一つとして組み込まれた熱力学温度 (Thermodynamic Temperature) の単位ケルビンの定義は水の三重点温度に基づいていた。キログラム原器と比べると歴史が浅いとはいえ、この50余年の間に物質固有の性質に基づく定義の限界が見え始め、より普遍的な物理定数の値による新たな定義へ移行することとなった。

その一方、我々が日常測定している温度は「1990年国際温度目盛 (International Temperature Scale of 1990, ITS-90)」(4章で詳述) と呼ばれる、国際的な協約として定められている温度である³⁾。国際温度目盛は1927年に最初の目盛が採択されて以来、約20年に一度のペースで大幅な改訂が行われ、1990年に改訂が行われてからは、約30年に亘って現在の国際温度目盛ITS-90が使われている。

本解説ではケルビンの定義改定の背景を解説するとともに、これに向けた各国の取組を紹介する。さ

らに熱力学温度と国際温度目盛の関係を解説したのち、将来の温度標準の体系について展望を試みる。

2. SI 単位ケルビン

2.1 新しいケルビンの定義

新しい定義では熱力学温度の単位ケルビンは「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」⁴⁾。従来の定義 (次節参照) がケルビンを水の三重点温度を厳密に 273.16 K と規定した物質の性質に依存したものであったのに対し、新しい定義ではボルツマン定数という基礎物理定数の値を厳密に規定した普遍的な定義に移行する。

新しいケルビンの定義の中には、キログラム、メートルおよび秒という熱力学温度以外の基本単位が使われている点、戸惑う方もいるのではなかろうか。しかし、他の量でも同様のケースがあり、これまでも真空中の光速を用いて定義されているメートルはその定義に秒を内包 (光速の単位は m s^{-1}) している。新しい定義のもとではアンペアも同じ (電気素量の単位は A s) で、キログラムの場合にはメートルと秒を内包 (プランク定数の単位は $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$) している。一方、参照が循環的になっては定義として成り立たない。この点、キログラム、メートル、および秒の定義にはケルビンは内包されないため、循環的とならず、定義として成立する。さらに、キログラムもメートルも秒も、その定義実現精度はケルビンのそれより高いため、実用上も問題はない。

2.2 これまでのケルビンの定義とその課題

SIにおける熱力学温度の単位ケルビン (K) は「水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ 」と定義されてきた。さらに、セルシウス度 ($^{\circ}\text{C}$) で表記したセルシウス温度の値はケルビン (K) で表記した熱力学温度の値から 273.15 引いたものと定義されている⁵⁾。新しい定義でもこの関係は変わらない。

三重点とは図1a)の水の状態図に模式的に示すように、気相・液相・固相の三相が共存する状態である。氷点や水の沸点が圧力に依存して変動するのに対し、水の三重点では温度・圧力共に一意に決まるため、これらに比べ再現性に優れている。温度計の

校正には水の三重点セルを用いる（図1b）。これは二重構造のガラス製容器で、内管は上端が解放されて温度計が挿入できるようになっている。内管と外管の間には真空引きしたのちに純水が封入されている。内管の中に冷却用器具や寒剤を挿入して適切に冷却し、内管を均一に取り囲む氷の層を形成することで、セル内に固相、液相、気相の三相が共存する状態、すなわち、三重点が実現される（図1b, c）。これを精密に温度制御した液体温槽中に保持することで、1ヶ月以上の長期間に亘って水の三重点を実現することが可能となっている。温度計が検出するのは温度計挿入孔の底の方の温度であるため、水の深さによる静水圧の影響を補正して使用される。

2002年から2004年にかけて水の三重点セルの国際比較が実施された⁶⁾。世界20カ国の標準研究機関の水の三重点セルが国際度量衡局に集められ、国際度

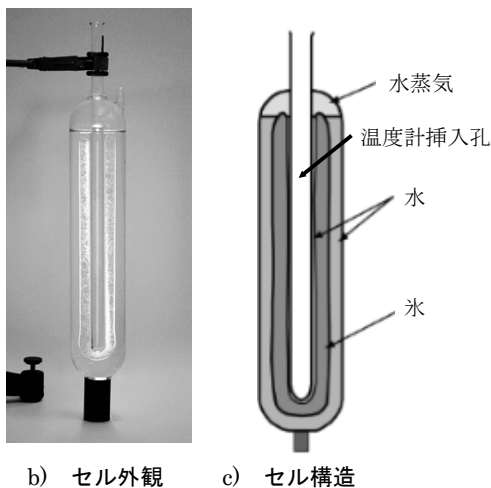
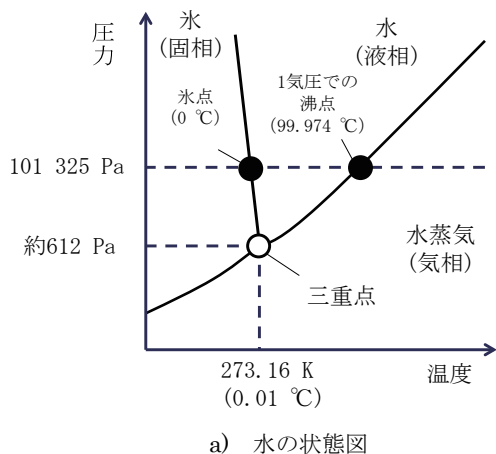


図1 水の三重点セル（写真・図提供：産業技術総合研究所（産総研））：水の三重点は温度・圧力共に一意に決まるため再現性に優れ、ケルビンの定義に用いられていた。温度計の校正に使用される水の三重点セルでは上部の気相との界面に三相が共存する三重点が実現される。

量衡局のセルとの温度差が精密に測定された。そして各国国家標準と国際度量衡局の標準との差およびその不確かさが求められた。

その結果、標準偏差で 50 μK 、最も高い温度を示すセルと低い温度を示すセルの差で約 170 μK と、良い一致が確認された。温度が 273.16 K であるから、当時の定義実現の再現性としては大雑把に 1 ppm を切るオーダーと言える。

ところが、差の測定結果をグラフ化してみると、図2のようになった。これはそれぞれの国家標準と国際度量衡局との差とその不確かさを（正規分布を仮定して）確率密度分布で表し、その和として求めた全体の確率密度分布である。0 μK と約 100 μK 付近にピークを持つ2つの分布が重ね合わされているように見える。その後、この2つのグループに分かれた原因が、水分子を構成する水素と酸素の同位体組成の扱いの違いによるものであることが明らかになった。

水の三重点温度は分子を構成する同位体の種類により変動し、複数の同位体が混在する場合はその組成比に依存することが知られている⁷⁻¹⁰⁾。基準の組成比としては VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) があるが、同位体組成を評価しそれが VSMOW の時のものに補正して温度を報告した国々が温度が高い方の分布を構成し、補正を行わなかった国がもう一方の分布を構成していた。このように各国の対応が分かれた理由はケルビンの定義の曖昧さにあった。同位体組成の補正を行うことは ITS-90 の補足文書⁷⁾で推奨されていたものの、ケルビンの定義あるいは ITS-90 の定義そのものには明示されていなかったため、各国で統一した扱いが行われなかったのである。

この結果を受け、曖昧さを排除する目的で以下の

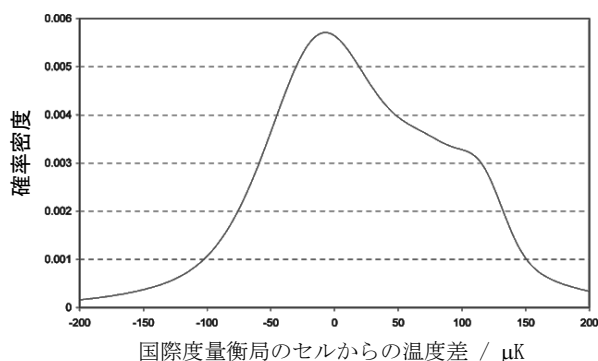


図2 水の三重点セルの国際比較結果（BIPM の許可により転載）⁶⁾：各国国家標準と国際度量衡局の差を確率密度分布で表したもの。0 μK と約 100 μK 付近にピークを持つ2つの分布が重ね合わされている。当時のケルビンの定義の曖昧さがもたらした結果である。

VSMOWにおける同位体組成比の値を記載した補足が2005年にケルビンの定義に追加された。「この定義は、下記の物質量の比により厳密に定義された同位体組成を持つ水に関するものである：1モルの ^1H あたり0.000 155 76モルの ^2H 、1モルの ^{16}O あたり0.000 379 9モルの ^{17}O 、および1モルの ^{16}O あたり0.002 005 2モルの ^{18}O 。」⁵⁾

現在、水の三重点セルに封入する純水は封入時にサンプルを取得して同位体組成分析を行い、それによる実現温度への影響を補正して用いられている。また、不純物分析も行い、その実現温度への影響も不確かさに反映している。しかし、長い年月に亘って使用する標準器に求められる安定性を考えた場合、セルを構成するガラスに含まれる成分の溶出による純水の汚染をどう防ぎ、その影響をどう評価するかということを含め、不純物の影響という課題は相変わらず残っている^{11),12)}。

従来のケルビンの定義は上記補足により同位体組成の曖昧さはある程度は解消したものの、現状のガラス製のセルを用いた水の三重点の実現では、物質固有の性質に基づく定義の限界は排除出来ず、次に述べる物理定数の値による定義改定に向けた各国の活動を後押しすることとなった。

2.3 新しいケルビンの定義の意味と特長

ボルツマン定数 k の値を用いて熱力学温度 T の単位が定義できるのは何故であろうか。それを次の例を用いて考える。理想気体の場合、個々の分子は他の分子と衝突する時以外は自由に動き、1個の単原子分子の平均の運動エネルギーは、その質量 m と二乗平均速度 $\overline{v^2}$ を用いて、

$$\frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT \quad (1)$$

と表されることはよく知られている。つまり、熱力学温度 T とは物質に内在する熱エネルギーに比例した状態量である。

一方、理想気体の分子 N 個を体積 V の容器に入れた場合、その圧力 p は、質量 m と二乗平均速度を用いて次式で表される。

$$p = \frac{1}{3} \frac{Nm\overline{v^2}}{V} \quad (2)$$

気体の物質量 n 、および、アボガドロ定数 N_A から、 $N = n N_A$ であり、また、ボルツマン定数 k は、気体定数 R とアボガドロ定数 N_A から、 $k = R / N_A$ の関係が成立する。これらを用いると、(1)式、(2)式から次式のいわゆる理想気体の状態方程式が得られる。

$$p(T) V = N k T \quad (3)$$

ここで、 V は気体の体積が温度に拠らず一定とし、

$p(T)$ は熱力学温度 T に依存した圧力としている。状態方程式の左辺、圧力と体積の積は、その体積中における理想気体分子のエネルギーに比例した量を表していると捉えることができる。

定積気体温度計 (Constant Volume Gas Thermometer, CVGT) と呼ばれる温度計は(3)式の状態方程式を利用して熱力学温度を測定する。ヘリウムガス等の温度による圧力変化を体積一定のもとで捉え、 $p(T)$ 、 V 、 N の測定値と k の値から熱力学温度 T を求めるものである。なお、(3)式は有限の圧力や密度を持つ実気体では分子間相互作用を考慮したビリアル展開を用いて記述できることが知られており、実際にはこの形で用いる¹³⁾⁻¹⁶⁾。次節以降で扱う他の気体温度計でも同様である。

このように、熱力学温度を測定するという事は、物質に内在する熱エネルギーに比例した量、この例では $(p(T) V) / N$ を捉えてそこから熱力学温度 T を求める行為に相当する。エネルギーは単位 J ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ に等しい) で表されることから、単位 J K^{-1} ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ に等しい) で表わされるボルツマン定数 k の値を厳密に決めることは単位 K の大きさを決定することになる。ボルツマン定数 k を用いたケルビンの定義はこのように解釈できる。

新しいケルビンの定義の特長としては下記が挙げられる。

- 物質固有の性質に依存せず、定義の普遍性が得られる。

従来の定義は「水」という物質固有の性質を利用していたため、精密な熱力学温度の実現には、ガラスのセルに密封される水の同位体組成分析が必須であった。またセル内での水のガラスからの汚染の懸念もあった。新しい定義ではこのような問題から解放される。

- 特定の温度域・温度計を優遇しない。

従来の定義では水の三重点温度の実現精度のみが他の温度より飛びぬけて高く、水の三重点温度から離れると急速に精度が低下した。さらに、一次温度計(後述)によっては水の三重点温度を測れないため定義を直接実現できなかった。新しい定義ではどの温度でも直接定義が実現可能である。

- 水の三重点の実現不確かさに制約されない。

従来の定義では水の三重点温度の測定が必須であり、その実現の不確かさが、他の熱力学温度の実現の不確かさに影響を与えていた。新しい定義ではこのような制約はない。

新しい定義は従来の定義のいくつもの課題を克服

する特長をもつ。定義改定は直ちに我々が測定する温度に影響を及ぼさない一方で、将来的には、特に水の三重点温度から離れた温度域では、大きなメリットが期待できる。

2.4 ケルビンの定義改定のための技術的条件

定義改定の前後で SI における熱力学温度の単位ケルビンの大きさに不連続が生じてはならない。そこで、10 年以上の歳月をかけ、水の三重点温度に基づく従来のケルビンの定義によるボルツマン定数の精密測定に各国標準研が精力的に取り組んだ^{17),18)}。

ボルツマン定数の測定には、一次温度計が用いられた。(各種一次温度計に関しては次章で解説する。)先に示した CVGT であれば、 $p(T)$ 、 V 、 N の測定値と (3) 式を用い、熱力学温度 T が精度よく分かっている状態の測定に適用することによりボルツマン定数 k の値を測定することができた。このため、温度の実現不確かさが最も小さい水の三重点温度における測定が行われた。

k の値は様々な測定データを総合して求めた不確かさを持つ値として Committee on Data for Science and Technology (CODATA、科学技術データ委員会) の推奨値に与えられてきた¹⁹⁾。ケルビンの定義改定が本格的に議論されるようになった 2005 年当時、CODATA によるボルツマン定数の推奨値の標準不確かさは 1.7×10^{-6} であり、水の三重点温度の再現性と比べて一桁近く大きかった。そこで、定義改定に向けてボルツマン定数 k の値がクリアすべき次の 2 つの条件が 2014 年の第 27 回 CCT 会議で採択された(勧告 T1)²⁾。

- 1) k の CODATA 調整値の不確かさが 1×10^{-6} (1 ppm) を下回ること。
- 2) k の値の決定が少なくとも二つの根本的に異なる方法に基づいており、それぞれ少なくとも一つの結果は 3×10^{-6} (3 ppm) より小さい相対標準不確かさを持つこと。

2017 年に報告された CODATA の k の調整値とその算出に寄与した測定結果を図 3 に示す¹⁹⁾。ここに示すとおり、 k の値の相対標準不確かさは 0.37×10^{-6} であり、第一の条件が満たされた。音響気体温度計 (Acoustic Gas Thermometer, AGT) を用いた測定結果が最も小さな不確かさを得ている。長年、球形共鳴器を用いた 1988 年の米国標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST)²⁰⁾ の測定が最も不確かさが小さかったが、疑球形音響共鳴器を用いた 2011 年のフランス計量研究所 - 工芸院 (Laboratoire National de Métrologie et d'Essais - Conservatoire national des arts et métiers, LNE-Cnam)

の報告の標準不確かさが 1 ppm に迫り、それを反映した CODATA 2010 の推奨値は 1 ppm を満たした。さらに LNE-Cnam は 2015 年には測定ガスの Ar を ⁴He に変更し、液体ヘリウムのコールドトラップにより不純物を除去するとともに残留 ³He を精密に質量分析することで不確かさを低減し、2017 年には共鳴器を 0.5 L から 3 L に大型化して不確かさ 0.6 ppm を達成した²¹⁾。2013 年の英国国立物理学研究所 (National Physical Laboratory, NPL) の報告も 1 ppm を下回ったものの、当初 LNE-Cnam の値との間に不一致があった。その後、Ar ガスの同位体組成に関する新たな測定により報告値が 2017 年に改訂され、良好な一致を得るとともに 0.7 ppm の不確かさを報告している²²⁾。これ以外では微妙に軸をずらした球体共鳴器を用いたイタリア計量研究所 (Istituto Nazionale de Ricerca Metrologica, INRiM)²³⁾ の結果、および円筒形の共鳴器を用いた中国計量科学研究院 (National Institute of Metrology, NIM)²⁴⁾ の結果もボルツマン定数 k の調整値の算出に寄与している。

一方、AGT 以外の温度計による測定では、ドイツ物理工学研究所 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) による誘電率気体温度計 (Dielectric Constant Gas Thermometer, DCGT) を用いた測定で 2013 年には 4.3 ppm (2015 年には圧力測定の不確かさを再解析して 4.0 ppm) の不確かさが報告されており²⁵⁾、2017 年には三組の異なるキャパシタの結果を用いることで 1.9 ppm の不確かさが達成されている^{26),27)}。さらに、NIM と NIST のチームによるジョンソン雑音温度計 (Johnson Noise Thermometer, JNT) を用いた測定では

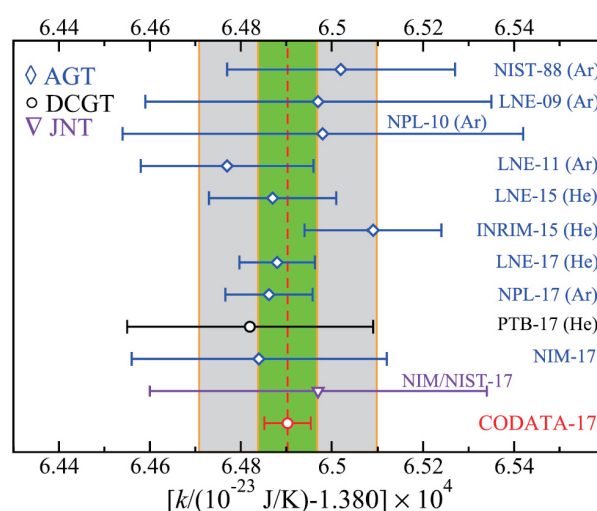


図 3 2017 年 CODATA のボルツマン定数の調整値およびその算出に用いられたデータ¹⁹⁾;年代順。中央のバンドは $\pm 5 \times 10^{-7}$ 、外側のバンドは $\pm 15 \times 10^{-7}$ を表す。各データのキャプションは測定機関、年、および用いられた気体の種類。

2015年に3.6 ppm あった不確かさが2.7 ppmに低減された²⁸⁾。測定帯域幅の拡大と100日間におよぶ積分時間が寄与している。なお、産業技術総合研究所(産総研)においても超電導集積回路を用いた独自技術によるJNTの開発が行われ、不確かさが10.2 ppmで、ボルツマン定数の調整値との一致が確認されている²⁹⁾。以上により定義改定のための第二の条件も、二つならず三つの根本的に異なる手法に基づく測定により満たされた。

以上の結果を受け、2018年の第26回CGPMで新定義が決議された¹⁾ことは冒頭で述べたとおりである。このようにして求められたボルツマン定数の値は $1.380\,649\,03 \times 10^{23} \text{ J K}^{-1}$ 、その不確かさは $0.000\,000\,51 \times 10^{23} \text{ J K}^{-1}$ (相対標準不確かさで 0.37×10^{-6} 、水の三重点温度で約0.000 1 Kに相当)で、不確かさは水の三重点温度の実現不確かさに近づくことができた。この値からボルツマン定数の定義値を決めたのが前述のケルビンの定義に用いられている値、 $1.380\,649 \times 10^{23} \text{ J K}^{-1}$ である。一方、ボルツマン定数が定義値になったかわりに、水の三重点温度の273.16 Kは定義値ではなくなり、約0.000 1 K(相対標準不確かさ 0.37×10^{-6})の不確かさを持つとともに、今後、新しい定義に基づいた熱力学温度測定により精密に求められるものとなった。

3. 一次温度計による熱力学温度の測定

前節で理想気体の状態方程式で記述される系を用いる温度計CVGTに言及した。この例のように、熱力学温度と他の独立した量の関係が、温度に依存する係数や不明な係数を含まない状態方程式で記述されるとき、この物理系を用いて他の量の測定から熱力学温度を求めることが可能となる。このような物理系に基づく温度計を一次温度計と呼ぶ^{30),31)}。一次温度計でない温度計を二次温度計と呼ぶ。我々が日常使用している白金抵抗温度計、熱電対、サーミスタ、ガラス製温度計などは全て二次温度計である。一次温度計はケルビンの定義に基づき直接熱力学温度を測定できる半面、日常求められる温度測定を行うには再現性や使い勝手の面で適していない。これに対し、二次温度計は一般に使い易く、再現性に優れるものの、一次温度計もしくは一次温度計を用いて決定された温度参照点などで校正して初めて正確な温度測定が可能になる。

現在、主要国の標準研究機関では、先のCVGT以外にもいくつかの一次温度計の開発が進められている。その原理を下記にごく簡単に説明する。なお、より詳細は解説文献^{13), 32)}などにあるので、興味のある方にはこちらを参照いただきたい。

1) 音響気体温度計 (Acoustic Gas Thermometer, AGT)^{20),24)}

理想気体中の音速の二乗は、下記(4)式で示すように気体を構成する分子の二乗平均速度、ひいては kT に比例する。

$$w^2(T) = \frac{\gamma_0}{m_{\text{gas}}} kT \quad (4)$$

ここで、 $w(T)$ は熱力学温度 T における音速、 m_{gas} は気体の平均分子質量、 γ_0 は理想気体の比熱比である。

音速の測定には、多くの場合、金属製の疑球形音響共鳴器が用いられ、この中に測定試料気体のArまたはHeを入れ、マイクロ波共振周波数測定による共鳴器の精密な寸法計測と音響共鳴周波数測定による音速測定が行われる。疑球形を用いるのは、マイクロ波共振三重項ピークを分離し寸法測定精度を高めるためである。

室温付近で用いる一次温度計としては、現在では、AGTが最も高精度であり、ボルツマン定数の決定および室温を含む温度域の熱力学温度と国際温度目盛の差(次節で解説)の精密測定に向けた開発が精力的に行われている。詳細は、レビュー記事²⁷⁾や三澤によるAGTの解説¹³⁾があるのでそちらを参照されたい。

2) 誘電率気体温度計 (Dielectric Constant Gas Thermometer, DCGT)^{17),26)}

定積気体温度計同様、理想気体の状態方程式に基づく温度計である。(3)式の状態方程式において数密度 N/V を誘電率 ϵ との関係 $\epsilon = \epsilon_0 + \alpha_0 N/V$ を用いて置き換えれば、状態方程式は

$$p(T) = kT(\epsilon - \epsilon_0) / \alpha_0 \quad (5)$$

と書き換えられる。ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率で、その値は真空の透磁率と空中の光速により決められるものであり、 α_0 は用いた気体の分子分極率である。圧力変化による気体で満たしたキャパシタの静電容量の変化を測定する。⁴Heガスをを用いた場合、 α_0 は第一原理計算により0.1 ppmの不確かさで求められている。したがって、圧力 $p(T)$ と誘電率 ϵ の測定から熱力学温度 T を求めることができる。

3) ジョンソンノイズ温度計 (Johnson Noise Thermometer, JNT)^{28),29)}

電子の熱運動に起因して抵抗体に生じる熱雑音(ジョンソンノイズ)の測定に基づく温度計である。周波数が十分低い領域では周波数に依存しないホワイトノイズとなり、二乗平均雑音電圧 $\langle U^2 \rangle$ はナイキストの定理に基づき

$$\langle U^2 \rangle(T) = 4kTR\Delta\nu \quad (6)$$

と表すことが出来る。ここで、 $\Delta\nu$ は測定周波数帯域幅、 R は抵抗である。近年、ACジョセフソン接合を利用

した疑似ノイズ源を用い、この疑似ノイズと抵抗体の熱雑音を切り替えて比較測定する技術が開発されている^{28),29)}。相関を持つ導線やアンプからの雑音の除去、装置のドリフトの影響排除が可能になるメリットがある。

4) 絶対放射温度計 (Absolute Radiation Thermometer, ART)³²⁾

ART は一般の放射温度計と同様に下記プランクの放射則に基づき分光放射輝度 L_λ の測定を通じて温度 T を測定する。

$$L_\lambda(T) = \frac{2c^2h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{ch}{k\lambda T}\right) - 1} \quad (7)$$

ここで、 c は真空中の光速、 h はプランク定数、 λ は波長を表す。波長 λ は測定光学系で決まり、他は物理定数として与えられる。ただし、分光放射輝度 L_λ の測定は容易ではなく、途中光路の損失や光学系の視野サイズ・視野角、さらには検出器の絶対応答特性が不明であり、このままでは可能ではない。このため、一般の放射温度計は既知の温度 T_0 での校正を経て測定を行う。すなわち、校正温度 T_0 の黒体の分光放射輝度を予め測定し、放射温度計の光検出器が捉える光量信号比から分光放射輝度比 $L_\lambda(T)/L_\lambda(T_0)$ を求める相対測定を行うことで、光路の損失や検出器の絶対応答特性などを相殺し温度 T を求めている。

これに対し、 $L_\lambda(T_0)$ の情報を必要とせずに放射温度計の光検出器が捉える光量信号から $L_\lambda(T)$ を絶対測定して T を求めるのが ART である。別途絶対分光放射輝度特性を精密評価した波長可変一様光源を用いて絶対校正する方法などが開発されている^{32),33)}。

現状 ART は可視光あるいは近赤外光の波長域で実用化され、約 1000 °C 以上の高温域の熱力学温度測定に適用されている。ケルビンのボルツマン定数による新しい定義に移行するメリットの一つとして、特定の温度域を優遇しないことを挙げた。特に高温域では国際温度目盛を上回る精度が ART による熱力学温度測定で実現されている³⁴⁾。この温度域では筆者らの提案した金属 - 炭素系高温定点群³⁵⁾の開発が進み、2750 °C までの温度域に再現性が 0.2 °C を下回る温度定点が複数得られるようになってきている³⁶⁾。メートル条約加盟主要国および欧州国立標準研究機関協会のワーキンググループ活動として行われた各国が協調して ART による温度値の決定に取り組んだ³⁷⁾結果は 2016 年に公表され^{38),39)}、その後、国際度量衡委員会の測温諮問委員会 (Consultative Committee for Thermometry, CCT) のドキュメントにも反映されている^{30),40)}。

これら以外にも、気体の吸光スペクトルのドップ

ラーシフトがマックスウェル-ボルツマン分布に従うことを利用するドップラー幅温度計 (Doppler Broadening Thermometer, DBT)⁴¹⁾、DCGT と同様の原理に基づき、比誘電率をマイクロ波の屈折率 (すなわち伝搬速度) から求める屈折率気体温度計 (Refractive Index Gas Thermometer, RIGT)、Fermi 分布を利用する光電子分光温度計⁴²⁾、気体の振動回転スペクトルを利用する回転状態分布温度計 (Rotational-state Distribution Thermometry, RDT)⁴³⁾ など、各種一次温度計の開発が進められている。

上記の方法により、技術的には熱力学温度の測定は可能であるが、その測定システムは大型であり、取り扱いも複雑である。また、高精度に熱力学温度を測定するためには、一つの温度点においても、一ヶ月を超えるような長期の測定が必要となることが多い。そのため、一つの国で、全ての温度領域において、途切れることなく熱力学温度を測定出来るようなシステムは未だ構築されていない。また、温度計測における再現性に関しては、白金抵抗温度計のような二次温度計の方が、現時点でも良いという現状がある。そのため、現場での温度計測のためには、より使い易く、かつ、再現性が良い、実用的な温度の標準が必要となっている。次節で紹介する国際温度目盛は、その実用的な温度標準であり、国際的に広く普及している。

4. 熱力学温度の近似：国際温度目盛

Ar や酸素などの三重点、各種純金属の凝固温度や He および H₂ の蒸気圧点などのような物質の相転移温度の高い再現性を利用した温度計校正用の参照点のことを温度標準の世界では「温度定点」と呼ぶ。

温度定点の熱力学温度は、前章で紹介した一次温度計で測定される。2章で述べたようにボルツマン定数の決定という目的のため各国標準研究機関が研究開発に注力した結果、水の三重点温度では 1ppm を下回る精度で熱力学温度の測定が可能になった。しかし、他の温度では一次温度計の測定精度は、例えば、Ar や酸素などの三重点などの再現性に未だ到達していない。熱力学温度により途切れのない温度目盛を一つの国で実現するのも、まだ出来ていない状況である。このため、前章で述べたとおり、現場での温度計測のためには、より使い易く、かつ、再現性が良い、実用的な温度の標準が必要である。

そこで、温度定点を活用し、白金抵抗温度計など再現性の優れている二次温度計を用いた国際温度目盛が、実用的な温度標準として、メートル条約の下で古くから国際協約として定められてきた⁴⁴⁾。国際温度目盛は複数の温度定点を定義定点としその温度

値を不確かさを持たない定義値として与え、さらにこれら定点間を補間する温度計（補間計器）と補間式を定めることで途切れのない目盛を定義している。

現在用いられている 1990 年国際温度目盛 (ITS-90)³⁾、および、2000 年に行われた低温域拡張である暫定低温度目盛 (Provisional Low Temperature Scale (PLTS-2000 目盛)⁴⁵⁾ を合わせると、下限温度 0.9 mK から目盛が定義されている。高温側は放射温度計を計器とし、プランクの放射則に基づく定点からの補外で定義されており、上限はない。ITS-90 の定義に用いられる定点温度（概略値）と補間計器および定義の温度レンジ・サブレンジを模式的に図 4 に示す。

先に述べたように、国際温度目盛は約 20 年に一度、大幅に改訂されてきた。これまでの目盛改訂では、まず、既存の温度定点がより性能の優れたものと入れ替えられるとともに新しい温度定点が追加されてきた⁴⁷⁾。例えば、1948 年の国際温度目盛の改訂では、温度定点として、氷点、氷点よりも 0.01°C 高い水の三重点に置き換えられた。1990 年の改訂では、金の凝固点（約 1064 °C）の約 20 °C 高温側に銅の凝固点（約 1085 °C）が追加されるなどした。時の経過とともに一次温度計の測定技術が向上し、データの蓄積も多くなり、国際温度目盛と熱力学温度の不一致が顕著になってくる。この不一致を解消するように、温度定点の定義値と、温度定点間を補間する補間計器・補間方法の改訂がおこなわれた。

ITS-90 が導入された際には、例えば金の凝固点温度が -0.25 °C 動くこととなった。熱力学温度の最良近似になるように補間方法も見直され、例えば、ITS-90 以前では、水の沸点が 100 °C であったが、ITS-90 の改訂で水の沸点は定義定点でなくなるとともに、その値は 99.974 °C と 0.026 °C 低くなった。また、ITS-90

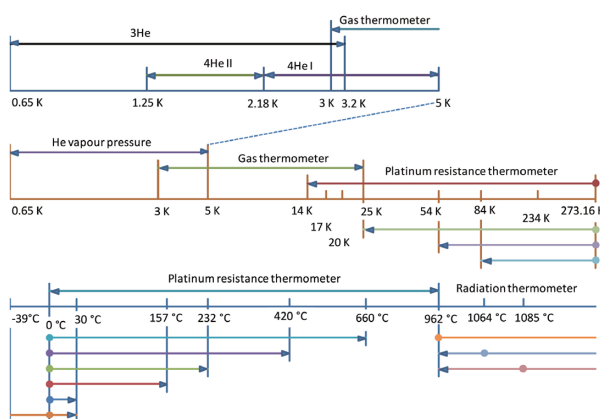


図 4 ITS-90 の構成 (BIPM の許可により転載)⁴⁶⁾ : 定義定点および補間計器。補間計器のレンジの重複、サブレンジの選択肢を許すことで定義の柔軟性を持たせている。定点温度は概略値。

以前は高温域の補間計器として熱電対が用いられていたが、銀の凝固点 (961.78 °C (1234.93 K)) を境に白金抵抗温度計と放射温度計でカバーされる定義となり、熱電対は国際温度目盛の補間計器ではなくなった。

1990 年に改訂が行われてからは、約 30 年に亘って現在の国際温度目盛 ITS-90 が使われているが、ITS-90 ではその施行後の研究により、水の三重点、平衡水素の三重点、および、ネオンの三重点など、その定義定点の温度が同位体組成により影響を受けるといった問題があった⁹⁾。ITS-90 が定められてから約 20 年経過した頃、その問題を解決するように、まず、水の三重点と平衡水素の三重点を実現する同位体組成が定義された⁴⁸⁾。その後、ネオンの三重点を実現する同位体組成が定義された⁴⁹⁾。それらの同位体組成の定義は、最新の研究結果を基に CCT によりとりまとめられ、ITS-90 自身を改訂せずに、ITS-90 の技術附属書 (Technical Annex) として Web 上で公開され、必要に応じて更新がされている。現在の最新のものは 2017 年 6 月 28 日付けのものである⁵⁰⁾。

この他にも、ITS-90 には様々な課題があることが指摘されている^{34), 46)}。一つは、ITS-90 と 1 K 以下の暫定低温度目盛 PLTS-2000 を融合して一つの国際温度目盛にすることである。次に、ITS-90 の 0 °C 以下の温度目盛を実現するのに必須の温度定点である水銀の三重点 (-38.8344 °C (234.3156 K)) に課題がある。これは、水銀の水俣条約に伴い、水銀自体の取り扱いが国際的に難しくなっていることに関係している。また、白金抵抗温度計で定義されている Ag の凝固点 (660.323 °C (933.473 K)) から Ag の凝固点の温度域は高温に曝される温度計の安定性に課題がある⁵¹⁾。さらに、962 °C 以上の放射温度計で定義されている温度域では銅の凝固点 (1084.62 °C (1357.77 K)) から高温には温度定点が定義に用いられていないため、温度が高くなるにしたがって目盛実現精度が劣化するという課題がある。

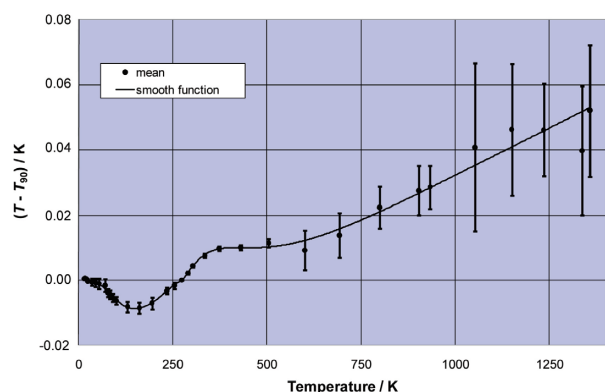
この他、ITS-90 の本質的な課題として、定義が唯一とまらない「ノンユニークネス」がある⁵²⁾。ITS-90 は定義実現方法に柔軟性を持たせることを意図して同じ温度に対し複数の定義が重複して存在する構成を採用している (図 4 参照)。ノンユニークネスとは目盛定義そのもの持つ曖昧さであり、補間計器を用いた定義に基づく限り避けられない本質的な課題である。温度域によっては目盛実現技術の向上によりノンユニークネスの大きさが目盛の実現不確かさの支配的な要因となり、より高精度な温度計測を行うためには、ノンユニークネスの低減が求められる状況になりつつある。

国際温度目盛は熱力学温度の最良近似の温度目盛となるよう、最新の研究結果を基に改訂をしながら、再現性の良い温度定点と二次温度計により維持されてきた。一方、CCTでは各国標準研究機関による一次温度計を用いた熱力学温度とITS-90の差 ($T-T_{90}$) の測定結果を集める作業を継続的に行っている。改訂から20年以上経過し、その間の測定結果をグラフ化したのが図5である⁵³⁾。ITS-90と熱力学温度の差として、例えば室温近辺でITS-90は熱力学温度と約0.004 Kずれていることが明らかになってきた。

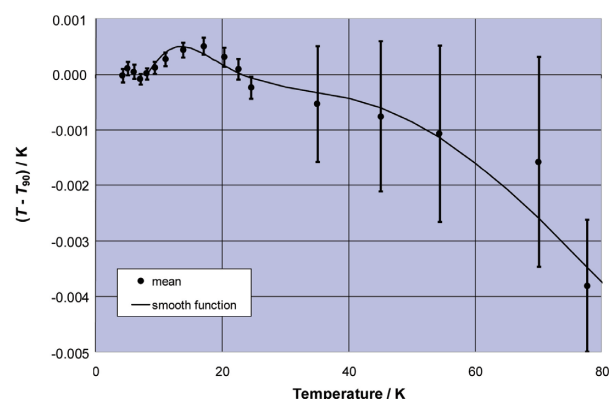
これらの課題を抱えるITS-90であるが、ケルビンの定義改定という重大な出来事が決着したことで、今後、上記ITS-90の課題の解決に向けた研究や、熱力学温度とITS-90の差の精密測定が進んでゆくと考える。

5. 今後の見通しと社会へのインパクト

先の章で説明したように、一般的に広く使われている温度計の温度目盛は、実用的な温度標準である



a) 全温度域の概観



b) 80 K 以下の拡大

図5 $T - T_{90}$ の推定値 (BIPM の許可により転載)⁵³⁾: 黒丸は各温度における測定の平均、エラーバーは標準不確かさ。実線の平滑関数は黒丸をフィッティングして得られた。不確かさの範囲を超えたITS-90の熱力学温度からのかい離が明確になってきた。

国際温度目盛に従っており、その国際温度目盛は、これまで、熱力学の最良近似の温度目盛として定められている。現在使われている国際温度目盛ITS-90の実現方法は文書“*Mise en pratique for the definition of the kelvin*”に記載されていたが、今回のSI単位の定義改定に伴い、新しい定義に従って熱力学温度を実現するための方法が別途追記され、改訂版“*Mis-en-pratique for the definition of the kelvin in the SI*”が2019年5月20日に発行された³⁰⁾。この改訂版には、ITS-90に関しては、下記のように明記されている³⁰⁾。

「国際温度目盛で与えられた定点温度は、それぞれの温度値に関して厳密であり（不確かさはない）、固定値である（目盛が生存している間、値は変わらない）。結果として、ボルツマン定数によるケルビンの定義改定は、国際温度目盛の温度値または実現の不確かさに影響を与えない。」

すなわち、今回のSIにおけるケルビンの定義改定に関して、実用的な温度標準であるITS-90は影響されることはない。このため、ITS-90に基づく温度計を用いている一般ユーザにとっては、その測定結果は、定義改定によって直ちに影響を受けることはない。

一方、ITS-90において放射温度計では、銅の凝固点から高温側にはITS-90の温度定点がないため、温度が高くなるにしたがって目盛実現の精度が劣化するという課題があった。3章で述べたように、962 °C以上の高温域では既に一次温度計の精度がITS-90の精度を上回ってきているとともに、定義改定により、高温域では新しい定義に従った方法で熱力学温度に基づいた温度計測が行い易いというメリットがある。また、産総研が962 °C以上の高温域で開発してきた金属-炭素系高温定点群は、その熱力学温度値も公表されている⁴⁰⁾。このため、962 °C以上の放射温度計の標準供給では、金属-炭素系高温定点群を使うことで、温度目盛の不確かさを低減出来るとともに、熱力学温度に基づいた温度目盛として、放射温度計の標準供給が可能となる技術が確立されている。従来のITS-90に基づく放射温度計による高温温度計測よりも、不確かさが低減出来るというインパクトは大きく、国際的にも、962 °C以上温度域の放射温度計の標準供給は、熱力学温度に基づく方法へと移行していく動きが既に始まっている。

この他、約20 Kよりも低い温度域では、第3章で紹介した、ジョンソンノイズ温度計の他にクーロンブロード温度計により、新定義に基づく温度計測が行いやすく、熱力学温度に基づいて、標準供給や温度計測が行われていく可能性が高いと考えられて

いる³⁴⁾。近年、リニアモーターカーなどの超伝導利用や、新エネルギーとしての液体水素利用など、産業において低温度の温度計測は重要になってきており、その世界的な動向は注視しておく必要がある。

産業や一般生活で広く使われている 20 K から 1235 K (約 962 °C) の温度域においては、依然、熱力学温度の測定の不確かさは ITS-90 に比べると大きく、かつ、熱力学温度の実現には多大な労力が必要となっている。このため、短期的には、国際協約である ITS-90 に基づいて温度計測が継続されていくものと考えられる。

しかし、熱力学温度の測定技術は年々向上しており、熱力学温度と ITS-90 の差は、より明確になってくるものと考えられる。そのため、この温度域では、最新の研究に基づき、ITS-90 から熱力学温度への変換式の精度が向上していくものと期待される。通常の ITS-90 に基づく温度計測から、その変換式により高精度に熱力学温度を導くことが出来るようになれば、熱力学的な現象を元にした研究の発展に寄与するものと考えられる。

ITS-90 には、第 4 章に述べたような課題があり、その課題の解決を目指した研究が、世界各国で現在精力的に行われている。上述の熱力学温度と ITS-90 の差がより高精度に求められた場合には、ITS-90 のその他の課題を解決するのにあわせて、国際温度目盛がより熱力学温度に近づくように改訂される可能性は否定出来ない。しかし、ITS-90 は産業界に広く普及しており、その大幅改訂は、ユーザーへの負担も大きくなってしまいうため、改訂を行う際には、十分な議論と考察が必要と考えられている。

一方、長期的には、熱力学温度の測定技術が向上し、その不確かさが国際温度目盛の不確かさ以下にまで低減され、かつ、その測定技術が国際温度目盛よりも効率的になってきた場合には、20 K から 1235 K (約 962 °C) の温度域においも、熱力学温度に基づく直接的な標準供給が開始されることになる予想される。将来的には、第 3 章で紹介した AGT、JNT、DBT、RDT などの技術が発展することにより、SI の定義に基づいて直接的に熱力学温度により温度計測が出来るような技術が開発されるという可能性もある。新 SI における温度標準や温度計測としては、それが理想型である。その理想型に少しでも近づくべく、国際的な研究・協力が今後も進んでゆくものと期待される。

6. 終わりに

SI において、2019 年 5 月 20 日に改定された熱力学温度の単位ケルビンの定義に関して、その改定の背景と、改定に至るまでのボルツマン定数の測定に関

して概要を紹介した。また、熱力学温度の最良近似として国際協約により定められている温度の実用的な標準である、国際温度目盛に関して解説するとともに、その課題についても紹介した。今回の熱力学温度の単位ケルビンの定義改定は、国際温度目盛には影響しないため、一般ユーザーの温度計測へは直ちに影響を及ぼすことはない。

その一方で、20 K より低温域、および、1235 K (約 962 °C) よりも高温域では、今回の定義改定により、熱力学温度が活用しやすくなり、特に、高温域での放射温度計を用いた温度計測では、世界的に熱力学温度に基づくものへと移行が始まりつつあることを紹介した。温度計のユーザーが最も多い 20 K から 1235 K (約 962 °C) までの温度域においては、標準供給や温度計測を熱力学温度に基づいて行うという理想的な体系に、未だ到達していない。そのため、今回の定義改定は、より理想的な温度標準 (次世代標準) や温度計測を目指した研究の幕開けとなっている。理想型に到達するには、長い道のりが必要であることは想像に難くないが、今後もより良い標準や計測技術を開発・維持・供給し、社会に貢献するために、努力を続ける必要があると考えている。

参 考 文 献

- 1) The International System of Units (SI), <https://www.bipm.org/en/measurement-units/> (2019) (2019 年 5 月 20 日確認)
- 2) CCT: CCT:Recommendation to the CIPM T1 2014 On a new definition of the kelvin (2014) https://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/Summary_reports_and_strategy/RECOMMENDATION_web_version.pdf (2019 年 12 月 11 日確認)
- 3) H. Preston-Thomas: The international temperature scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia*, **27**-1, 3/10 (1990) 1990 年国際温度目盛 (ITS-90) [日本語訳], 計量研究所報告, **40**, 60/69 (1991)
- 4) The International System of Units (SI), 9th edition, Bureau International des Poids et Mesures (2019), <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/si-brochure/ SI-Brochure-9-EN.pdf> (2019 年 12 月 11 日確認)
- 5) The International System of Units, 8th edition, Bureau International des Poids et Mesures (2006)
- 6) M. Stock *et al.*: Final report on CCT-K7 key comparison of water triple point cells (2006) https://www.bipm.org/utis/common/pdf/final_reports/T/K7/CCT-K7.pdf (2019 年 12 月 6 日確認)
- 7) 1990 年国際温度目盛りに関する補足情報 [日本語訳], 計量研究所報告, **41**, 307/358 (1992)
- 8) J. V. Nicholas, T. D. Dransfield and D. R. White: Isotopic composition of water used for triple point of water cells: *Metrologia*, **33**, 265/267 (1996)
- 9) 中野 亨: 温度定点の同位体効果とその不確かさへの寄与に関する調査研究: 計量研究所報告 **49**, 183/195 (2000)
- 10) D. R. White, T. D. Drasfield, G. F. Strouse, W. L. Tew, R. L.

- Rusby and J. Gray: Effects of heavy hydrogen and oxygen on the triple-point temperature of water, in: *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, **7**, 221/226 (2003) and references therein
- 11) K. D. Hill: Is there a long-term drift in triple point of water cells?, *Metrologia*, **38**, 79/82 (2001)
 - 12) G. F. Strouse and M. Zhao: The impact of isotopic concentration, impurities, and cell aging on the water triple-point temperature: *Int. J. Thermophys.*, **28**, 1913/1922 (2007)
 - 13) 三澤哲郎：音響気体温度計による熱力学温度測定に関する調査研究，産総研計量標準報告，**9**，75/98 (2014)
 - 14) W. Cencek, M. Przybytek, J. Komasa, J. B. Mehl, B. Jeziorski and K. Szalewicz: Effects of adiabatic, relativistic, and quantum electrodynamics interactions on the pair potential and thermophysical properties of helium, *J. Chem. Phys.*, **136**, 2303 (2012)
 - 15) O. Tamura, S. Yakasu, T. Nakano and H. Sakurai: Constant-volume gas thermometry with different helium-3 gas densities at NMIJ/AIST, *Int. J. Thermophys.*, **32**, 1366/1377 (2011)
 - 16) T. Nakano, T. Shimazaki and O. Tamura: Reproducibility of the helium-3 constant-volume gas thermometry and new data down to 1.9 K at NMIJ/AIST, *Int. J. Thermophys.*, **38**, 105 (2017)
 - 17) J. Fischer *et al.*: The Boltzmann project, *Metrologia*, **55**, R1/R20 (2018)
 - 18) M. R. Moldover, R. M. Gavioso, J. B. Mehl, L. Pitre, M. de Podesta and J. T. Zhang: Acoustic gas thermometry, *Metrologia*, **51**, R1/R19 (2014)
 - 19) D. B. Newell *et al.*: The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI, *Metrologia*, **55**, L13/L16 (2018)
 - 20) M. R. Moldover, J. P. M. Trusler, T. J. Edwards, J. B. Mehl and R. S. Davis: Measurement of the universal gas constant R using a spherical acoustic resonator, *Phys. Rev. Lett.*, **60**, 249/252 (1988)
 - 21) L. Pitre *et al.*: New measurement of the Boltzmann constant k by acoustic thermometry of helium-4 gas, *Metrologia*, **54**, 856/873 (2017)
 - 22) M. de Podesta *et al.*: Re-estimation of argon isotope ratios leading to a revised estimate of the Boltzmann constant, *Metrologia*, **54**, 683/692 (2017)
 - 23) R. M. Gavioso, D. Ripa Madonna, P. P. M. Steur, C. Gaiser, D. Truong, C. Guianvarc'h, P. Tarizzo, F. M. Stuart and R. Dematteis: A determination of the molar gas constant R by acoustic thermometry in helium, *Metrologia*, **52**, S274/S304 (2015)
 - 24) X. J. Feng, J. T. Zhang, H. Lin, K. A. Gillis, J. B. Mehl, M. R. Moldover, K. Zhang and Y. N. Duan: Determination of the Boltzmann constant with cylindrical acoustic gas thermometry: new and previous results combined, *Metrologia*, **54**, 748/762 (2017)
 - 25) C. Gaiser, T. Zandt, B. Fellmuth, J. Fischer, O. Jusko and W. Sabuga: Improved determination of the Boltzmann constant by dielectric-constant gas thermometry, *Metrologia*, **50**, L7/L11 (2013)
 - 26) C. Gaiser, B. Fellmuth, N. Haft, A. Kuhn, B. Thiele-Krivoi, T. Zandt, J. Fischer, O. Jusko and W. Sabuga: Final determination of the Boltzmann constant by dielectric constant gas thermometry, *Metrologia*, **54**, 280/289 (2017)
 - 27) P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor and E. Tiesinga: Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment, *Metrologia*, **55**, 125/146 (2018)
 - 28) J. Qu *et al.*: An improved electronic determination of the Boltzmann constant by Johnson noise thermometry, *Metrologia*, **54**, 549/558 (2017)
 - 29) C. Urano, K. Yamazawa and N-H. Kaneko: Measurement of the Boltzmann constant by Johnson noise thermometry using a superconducting integrated circuit, *Metrologia*, **54**, 847/855 (2017)
 - 30) CCT: *Mise-en-pratique* for the realization of the kelvin in the SI
<https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/SI-App2-kelvin.pdf> (2019年12月6日確認)
 - 31) 計測自動学会温度計測部会編：温度計測 基礎と応用，コロナ社 (2018)
 - 32) 山口祐：黒体放射による熱力学温度測定に関する調査研究，産総研計量標準報告，**8**，423/440 (2013)
 - 33) Y. Yamaguchi, Y. Yamada and J. Ishii: Supercontinuum-source-based facility for absolute calibration of radiation thermometers, *Int. J. Thermophys.*, **36**, 1825/1833 (2015)
 - 34) G. Machin: The kelvin redefined, *Meas. Sci. Technol.*, **29**, 022001 (2018)
 - 35) 山田善郎：金属-炭素共晶を用いた高温度標準の動向，計測と制御，**42**，918/921 (2003)
 - 36) N. Sasajima *et al.*: Performance of WC-C peritectic and Ru-C eutectic fixed points, *Metrologia*, **56**, 055010 (2019)
 - 37) G. Machin *et al.*: A concerted international project to establish high-temperature fixed points for primary thermometry, *Int. J. Thermophys.*, **28**, 1976/1982 (2007)
 - 38) E. R. Woolliams *et al.*: Thermodynamic temperature assignment to the point of inflection of the melting curve of high-temperature fixed points, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **374**: 20150044 (2016)
 - 39) D. H. Lowe *et al.*: The equilibrium liquidus temperatures of rhenium-carbon, platinum-carbon and cobalt-carbon eutectic alloys, *Metrologia*, **54**, 390/398 (2017)
 - 40) CCT: Guide on Secondary Thermometry, Specialized Fixed Points above 0 °C,
<https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Specialized-FPs-above-0C.pdf> (2018)
 - 41) C. Lemarchand, S. Mejri, P. L. T. Sow, M. Triki, S. K. Tokunaga, S. Briaudeau, C. Chardonnet, B. Darquié and C. Daussy: A revised uncertainty budget for measuring the Boltzmann constant using the Doppler broadening technique on ammonia, *Metrologia*, **50**, 623/630 (2013)
 - 42) I. Kinoshita, E. Kobayashi and J. Ishii: Preliminary experiments of photoelectron thermometry, in *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, **8**, AIP Conf. Proc. 1552, (C. W. Meyer ed.) 915/919 (2013)
 - 43) Y. Shimizu, S. Okubo, A. Onae, K. M. T. Yamada and H. Inaba: Molecular gas thermometry on acetylene using dual-comb spectroscopy: analysis of rotational energy distribution, *Appl. Phys. B*, 124:71 (2018)
 - 44) 山田善郎：ケルビンのボルツマン定数に基づく定義もたらす未来の温度測定，計測と制御，**58**，349/354 (2019)

- 45) Procès-Verbaux du Comité International des Poids et Mesures, 89th meeting, 129/130 (2000)
<http://www.bipm.org/utis/en/pdf/PLTS-2000.pdf>
- 46) Guide to the Realization of the ITS-90 1. Introduction
https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide_ITS-90_1_Introduction_2018.pdf
- 47) 櫻井弘久：温度とは何か，コロナ社（1992）
- 48) B. Fellmuth, L. Wolber, Y. Hermier, F. Pavese, P. P. M. Steur, I. Peroni, A. Szmyrka-Grzebyk, L. Lipinski, W.L. Tew, T. Nakano, H. Sakurai, O. Tamura, D. Head, K. D. Hill and A. G. Steele: Isotopic and other influences on the realization of the triple point of hydrogen, *Metrologia*, **42**, 171/193 (2005)
- 49) F. Pavese, P. P. M. Steur, Y. Hermier, K. D. Hill, J. S.Kim, L. Lipinski, K. Nagao, T. Nakano, A. Peruzzi, F. Sparasci, A. Szmyrka-Grzebyk, O. Tamura, W. L. Tew, S. Valkiers and van Geel J. : Dependence of the triple point temperature of neon on isotopic composition and its implications for the ITS-90, In: *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, 192/197 (2013)
- 50) Technical Annex for the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)
https://www.bipm.org/utis/en/pdf/MeP_K_Technical_Annex.pdf
- 51) J. V. Widiatmo, K. Harada and K. Yamazawa: Characterization of high-temperature platinum resistance thermometers at silver point, *Int. J. Thermophys*, **38**, 43 (2017)
- 52) Guide to the Realization of the ITS-90 5. Platinum Resistance Thermometry
https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide_ITS-90_5_SPRT_2018.pdf
- 53) Estimates of the Differences between Thermodynamic Temperature and the ITS-90 (2010)
https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Estimates_Differences_T-T90_2010.pdf

物質量の単位「モル」の基礎解説とアボガドロ定数にもとづく新たな定義を導いた計測技術

倉本 直樹

産業技術総合研究所 計量標準総合センター 工学計測標準研究部門 質量標準研究グループ長

1 はじめに

「物質量」は物質の量をその構成要素（原子、分子など）の個数に着目して表したものである。単位はモルであり、その記号は mol である。キログラム（質量）、メートル（長さ）、秒（時間）、アンペア（電流）、ケルビン（温度）、カンデラ（光度）と共に国際単位系（SI）の基本単位の役割を担う¹⁾³⁾。特に、化学の分野で重要な単位であるが、キログラムあるいはメートルといった日常生活と密接に関連した基本単位と比べると、そのイメージは非常につかみづらい。そこで本稿ではまず、物質量、モル、さらに、それらと密接に関連するアボガドロ定数について概説する。

また SI は単純な世界共通の「ものさし」ではなく、新たな技術革新を導くための高精度な人類共有の知的基盤である。このため、基本単位の定義には多くの分野の英知が結集され、その時代の最も高精度な技術が用いられてきた。より高い普遍性と再現性を求めて、基本単位の定義は普遍的な物理定数にもとづいた定義へと変遷してきている。モルも、2018 年までは炭素原子の質量を基準として定義されていたが、2018 年 11 月に開催されたメートル条約の最高議決機関である国際度量衡総会（General Conference on Weights and Measures）での決議を受け、現在では、普遍的な物理定数であるアボガドロ定数を基準として定義されている。そこで本稿では、モルの定義の変遷、新たな定義を導いた計測技術、定義改定の物理学・化学への影響などについて解説する。

2 炭素原子に基づくモルの定義

物質の量を表現する際には質量や体積で表すことが多い。ただし、化学反応の解釈においては、関与する原子や分子の個数に着目して物質の量を表現するとわかりやすい。例えば、水素を燃やすと、水素分子 2 個と酸素分子 1 個が反応して、水分子 2 個ができる。ただし、原子や分子のサイズや質量はきわめて小さい。後述するように、我々が実際に取り扱うスケールの物質中には 10^{24} のオーダー、すなわち、1 兆の 1 兆倍の数の原子や分子が含まれている。このため、実際の数で個数をいちいち表現するのは大変不便である。そこで、一定の個数の集団を単位として、粒子の個数を表すと都合が良い。ちょうど鉛筆 12 本

を 1 ダースとして、鉛筆の本数を表すのに似ている。

このような考えのもと 1971 年の第 14 回国際度量衡総会でモルが新たな SI の基本量である「物質量」の単位として承認され、「モルは 0.012 kg の ^{12}C の中に存在する原子の数に等しい要素粒子を含む系の物質量であり、単位の記号は mol である」と定義された。 ^{12}C は質量数（原子核に含まれる陽子の数と中性子の数の和）12 の炭素を意味する。この以前のモルの定義では、12 g の ^{12}C に含まれる要素粒子の数のことをアボガドロ定数と呼び、記号 N_A で表した。この定数は 1 mol あたりの数を表すので mol^{-1} の単位を伴う。このモルを用いることで、莫大な数の原子や分子を、例えば「1 mol の炭素」のように簡単に表すことができる。

「モル」の語源はラテン語の「塊」を意味する moles とされている⁴⁾⁵⁾。一方、「アボガドロ定数」の名称は、一定温度、一定圧力、一定体積の気体には、気体の種類によらず同数の分子が含まれることを提唱したアボガドロ（Amedeo Avogadro, 1776-1856）に由来する。ただし、アボガドロが生きていた時代には、どれくらいの数の分子が気体に含まれているかを検証するすべはなかった。アボガドロの死去から半世紀以上が経過し、20 世紀になってからようやくペラン（Jean Perrin, 1870-1942）やミリカン（Robert Millikan, 1868-1953）によってアボガドロ定数を求めるための実験が行われた。1908 年にペランは懸濁微粒子の沈降平衡の実験から、アボガドロ定数を $6.8 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ と見積もった⁶⁾。さらに、微粒子のブラウン運動の観察などの複数の異なる測定手法からもこれに近い値を得た。一方ミリカンは 1917 年に、帯電した油滴を浮遊させるのに必要な電場の強さから電気素量を測定し、すでに測定されていたファラデー定数を用いて、アボガドロ定数を $6.062 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ と見積もった⁶⁾。複数の原理的に異なる方法を用いて測定されたアボガドロ定数がほぼ同じ大きさであったことは、原子や分子が確かに実在することのみ説明がつく。このため、20 世紀初頭に行われたこれらの歴史的な測定は、原子や分子の存在を実証し、観察することができないものの実在を証明することはできなとする実証主義の立場から原子や分子の存在に懐疑的であった科学者との論争に終止符を打った。

3 物質量と濃度

「物質量」から組み立てられる身近な量として「濃度」がある。「モル分率」や「モル濃度」（正確には

それぞれ「物質分率」および「物質濃度」などの計算方法を学生時代に学習された方も多いと思う。近年、環境分析などで、種々の物質の濃度の正確な測定が求められている。産業技術総合研究所 計量標準総合センター (National Metrology Institute of Japan: 産総研 (NMIJ)) では凝固点降下法、重量法、滴定法、電量法などによってモルの定義に基づく濃度計測を実現しており、それらに連鎖するかたちで値付けされた様々な標準物質が分析機器の校正用に供給されている⁷⁻⁹⁾。

4 12 g の炭素 12 が基準となった経緯

以前のモルの定義において、水素や酸素ではなく「炭素」の、1 g や 10 g 等のきりの良い質量ではなく「12 g」が用いられていたのには、原子量測定との歴史が関与している¹⁰⁾。原子 1 個あたりの質量は 10^{-23} g 程度であり、原子の質量を実際の質量で表記するのは不便である。そこで、ある特定の原子の質量を基準とした比として、原子の質量を表す考え方が導入された。この原子の相対質量のことを原子量(相対原子質量)と呼ぶ。ドルトン(John Dalton, 1766 ~ 1844) は水素を基準とし $H=1$ とする 20 種類の元素の原子量表を発表したが、その値はあまり精密ではなかった。その後、バルセリウス (Jöns Berzelius, 1779 ~ 1848) は、それまでに知られていた元素の原子量を主にそれらの酸素化合物の分析により測定し、酸素を基準とし $O=100$ とする精度の高い原子量表を発表した。しかし、 $O=100$ とすると原子量 1000 以上の元素がでてきてしまう。これを防ぎ、さらに、最も軽い水素の原子量を 1 に近づけるために、 $O=16$ を基準としたスタス (Jean Stas, 1813 ~ 1891) による原子量表が国際的に使用されるようになった。

その後の素粒子物理の発展により、自然界の多くの元素には同位体が存在することが明らかになった。すなわち同じ元素でも、質量数の異なる原子が存在する。酸素にも ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O の三種類の同位体が存在する。これをうけ、物理学の分野では $^{16}\text{O}=16$ を基準とした。一方、化学の分野では三種類の同位体の混合物である天然の酸素の原子量を 16 とした。物理学と化学の分野で異なる原子量が用いられているのは非常に不便であり、共通の基準を利用するための協議が実施された。フッ素 $^{19}\text{F}=19$ を基準とする案などが検討されたが、最終的には $^{12}\text{C}=12$ を基準とする新たな共通の基準が採用された。質量分析器を用いた様々な原子の原子量測定における ^{12}C の優位性がその主な理由である^{11),12)}。この $^{12}\text{C}=12$ を基準とする国際的な合意が、以前のモルの定義にはそのまま反映されていた。

5 物理定数に基づく定義への移行

以前の ^{12}C に基づくモルの定義の重要な点は、アボ

ガドロ定数の値が定義に含まれていなかったことである。モルは要素粒子の個数に着目した量である物質の単位であるが、個数ではなく、質量にもとづいて (12 g の ^{12}C) 定義されていた。もし、アボガドロ定数の値を定めてしまうと、仮に ^{12}C の原子の数をなんらかの方法で数えて 1 mol 集めることができたとしても、その方法には不確かさがあるため、厳密には 12 g にはならない。このような二重定義からくる問題を避けるために、以前の SI では 1 mol の物質に含まれる要素粒子の数、すなわちアボガドロ定数を定めていなかった。

では、なんらかの方法で、質量の基準をしのぐ精度でアボガドロ定数を測定できるようになったとしたらどうだろうか。その場合、アボガドロ定数を基準としてモルの定義を改定することができる。実際にアボガドロ定数の高精度化が多くの国家計量標準機関で進められてきた。ただし、その目的は、モルではなく質量の単位であるキログラムの定義改定であった^{2),3),13)-18)}。2018 年以前、キログラムは国際度量衡局 (International Bureau of Weights and Measures: BIPM) が保管する国際キログラム原器によって定義されていた。国際キログラム原器は白金イリジウム合金製の分銅であり、1889 年の国際度量衡総会で質量の単位として承認されて以来約 130 年間、同一の分銅が質量の国際基準として使用されていた。何らかの理由で国際キログラム原器の質量が変化しても、それを厳密に 1 kg とするのが以前の定義であった。ただし、表面汚染などの影響により国際キログラム原器の質量の過去 100 年間にわたる長期安定性は約 50 μg 程度であると推定されていた。これは 1 kg に対して相対的に 5×10^{-8} の変動幅に相当し、近年の計測技術の進展においては無視しえない大きさとなっていた¹⁾。このため 1995 年に開催された第 20 回国際度量衡総会では、キログラムを普遍的な物理定数に結びつけるための道を拓くための新しい研究を、各国の国家計量標準機関が実施することが勧告された。これを受けて実施された研究の一つが、アボガドロ定数精密測定である。

6 アボガドロ定数精密測定

アボガドロ定数は自然現象を記述するために不可欠な「基礎物理定数」の一つである¹³⁾。例えば、原子や分子のミクロな特性からの我々の身のまわりのマクロな現象を統計力学により演繹する際に重要なものは、「アボガドロ定数」程度の莫大な「個数」の原子や分子が存在することである。すなわち、アボガドロ定数はミクロの世界の「粒子」とマクロの世界の「物質」をつなぐ重要な役割を担う。

以前のモルの定義にもとづけば、アボガドロ定数を十分小さな不確かさで測定することで、 ^{12}C 一つの質量を正確に導くことができる。この原子の質量を

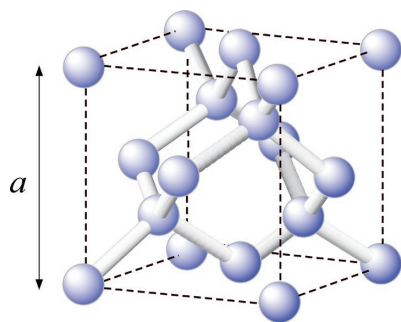


図1 シリコン結晶の単位格子：図中の18個の原子のうち、角の原子（8個）は8つの単位格子で共有されている。面の原子（6個）は2つの単位格子で共有されている。これらを考慮すると1つの単位格子には8個 $[=8 \times (1/8) + 6 \times (1/2) + 4]$ のシリコン原子が含まれる。

基準にしてキログラムをある決まった個数の ^{12}C の質量として定義することが可能であると考えられた。

X線結晶密度法はシリコン単結晶を用いてアボガドロ定数を高精度に測定する方法である^{2),3),15)-18)}。シリコン単結晶は、図1に示す単位格子から構成されている。単位格子の一边の長さ a は格子定数とよばれ、単位格子の体積は a^3 として与えられる。また単位格子には8つの原子が含まれる。従って、シリコン単結晶試料の体積を V 、質量を m とすると、試料に含まれるシリコン原子の数は $8V/a^3$ で与えられる。シリコンのモル質量（1 molあたりの質量）を $M(\text{Si})$ とすればアボガドロ定数 N_A は、

$$N_A = \frac{8V}{a^3} \frac{M(\text{Si})}{m} \quad (1)$$

として求められる。X線結晶密度法の根本的な原理は、単結晶試料に含まれる原子数の計測である。このため、入手が容易であり、高純度で無転位な単結晶が入手可能なシリコン単結晶を用いる。高精度に体積を測定するのに好都合な試料形状としては、立方体あるいは球体が考えられる。立方体の場合、角やエッジの部分の欠落が体積に及ぼす影

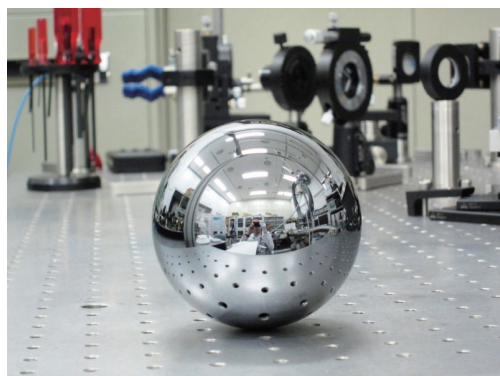


図2 産総研がアボガドロ定数決定に用いた自然同位体比1 kgシリコン単結晶球体：直径は約93.6 mmである。現在は我が国の密度の国家標準として使用されている。

響を小さな不確かさで測定することは容易でない。一方、真球度の高い球体の体積は様々な方位からの直径測定平均値より小さな不確かさで決定できる¹⁸⁾。さらに、試料の質量が約1 kgの場合、キログラム原器との比較によってその質量を正確に測定することができる。このため、測定用試料としては、質量が約1 kgのシリコン単結晶球体がいられる。図2は産総研が所有する質量約1 kgのシリコン単結晶球体である。直径は約93.6 mmであり、その真球度（最大直径と最小直径の差）は83 nmである。

また、自然界のシリコンには同位体 ^{28}Si 、 ^{29}Si 、 ^{30}Si がそれぞれ約92%、5%、3%の割合で存在するが、各同位体のモル質量は十分に小さい不確かさですでに求められているので、同位体の存在比を質量分析計で測定すれば、シリコンのモル質量を求めることができる。格子定数はX線干渉計により高精度に決定できる¹⁹⁾。

2003年、産総研は図2のシリコン単結晶球体を用い、アボガドロ定数を当時の世界最高精度である 2×10^{-7} で測定することに成功した²⁰⁾。ただし、この精度は国際キログラム原器の質量の長期安定性より一桁大きいものであった。ボトルネックとなったのはモル質量測定であり、その精度を飛躍的に高めるためには、それまで用いてきた自然界に存在するシリコン結晶ではなく、人工的に ^{28}Si だけを濃縮したシリコン結晶を用いる必要があった。そこで海外の7つの研究機関と協力して、 ^{28}Si だけを濃縮したシリコン単結晶からアボガドロ定数を定めるための国際研究協力「アボガドロ国際プロジェクト」を2004年から開始した²¹⁾⁻²³⁾。産総研、BIPM、イタリア計量研究所（Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Italy: INRIM）、オーストラリア計量研究所（National Measurement Institute, Australia: NMI-A）、英国物理研究所（National Physical Laboratory, UK: NPL）、米国標準技術研究所（National Institute of Standards and Technologies, USA:



図3 1 kg ^{28}Si 単結晶球体：アボガドロ定数高精度測定のためにアボガドロ国際プロジェクトによって製作された。1個あたりの製造費用は約1億円である。

NIST)、ドイツ物理工学研究所 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany: PTB)、標準物質計測研究所 (Institute for Reference Materials and Measurements, EU: IRMM) が参加し、それぞれの機関が得意とする分野を担当する国際分業によりプロジェクトを遂行した。産総研は、特に、シリコン単結晶球体体積測定において主導的な役割を果たした。

アボガドロ国際プロジェクトでは、 ^{28}Si の存在割合を 99.99 % にまで高めた ^{28}Si 単結晶を 5 kg 作成された²³⁾。AVO28 と名付けられたこの ^{28}Si 単結晶から研磨された直径 94 mm、質量 1 kg の球体を図 3 に示す。この球体の体積と質量を産総研、PTB、BIPM で測定した。

6.1 シリコン球体体積測定

6.1.1 レーザー干渉計

図 4 は、この球体の体積を測定するために産総研の

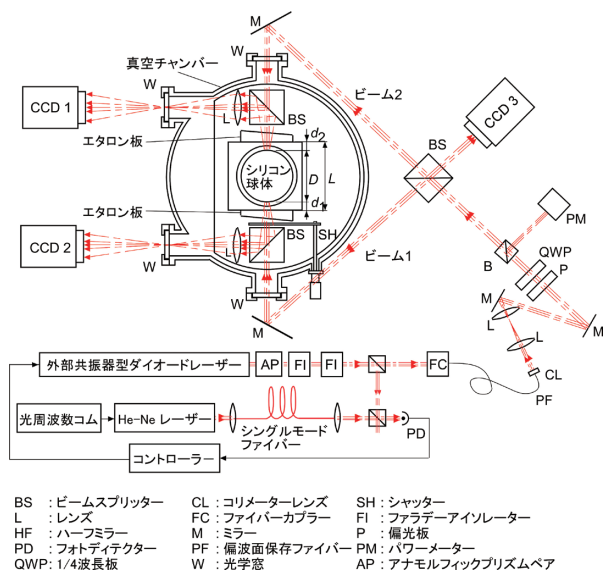
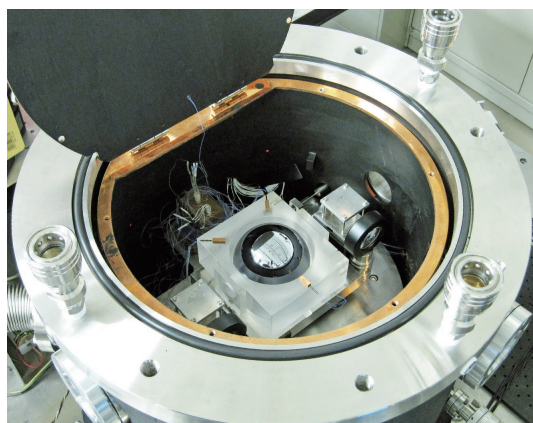


図 4 レーザーの光周波数精密制御によってシリコン球体の直径をサブナノメートルの精度で計測するレーザー干渉計 (上図) とそのブロック図 (下図)

倉本らによって開発されたレーザー干渉計を示す²⁴⁾⁻²⁹⁾。球体は二枚の石英ガラス製エタロン板とスペーサーからなるエタロン (図 5) 内に置かれる。レーザー光はエタロン板を介して球体に照射され、球体とエタロン板から反射したレーザー光によって同心円状の干渉縞が形成される。この干渉縞を CCD1 と CCD2 で撮像・解析することで球体とエタロン板とのギャップ d_1 および d_2 を決定する。干渉縞の解析には、光源である外部共振器型ダイオードレーザーの光周波制御技術を利用した位相シフト法を用いる。また、球体下方に格納された機構によって球体を持ち上げ光路から取り除くことができる。ビーム 1 をシャッターで遮ることで、機構に設けた穴を通過したビーム 2 の二枚のエタロン板からの反射光によって干渉縞が形成される。この干渉縞を CCD3 で観測し、位相シフト法で解析することでエタロン板の間隔 L を測定する。球体の直径は $D = L - (d_1 + d_2)$ として求められる。位相シフト法の詳細については次節で述べる。球体の下部には方位制御機構があり、球体を回転させることで様々な方位からの直径を測定することができる。

6.1.2 位相シフト法

レーザー干渉計では光周波数の制御により $\pi/3$ ずつ位相を 6 回変化させて取り込んだ合計 7 枚の干渉縞画像から位相を決定する。CCD で測定した干渉縞の強度をそれぞれ $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7$ とすると 4 番目の画像を取り込んだ際の位相 ϕ は次式で表される²⁴⁾。

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{3}(I_2 + I_3 - I_5 - I_6)}{-I_1 - I_2 + I_3 + 2I_4 + I_5 - I_6 - I_7} \right] \quad (2)$$

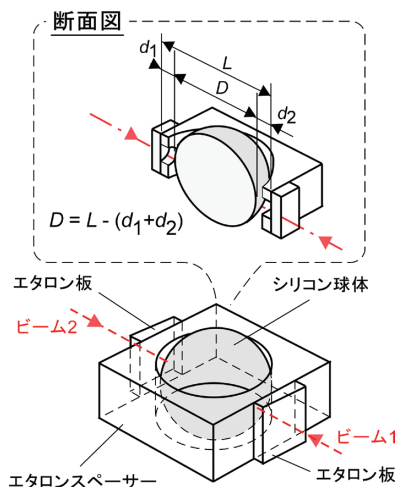


図 5 シリコン球体直径を測定するためのエタロン：二枚の石英ガラス製エタロン板およびスペーサーより構成される。エタロン板はスペーサーにオプティカルコンタクトによって固定されている。

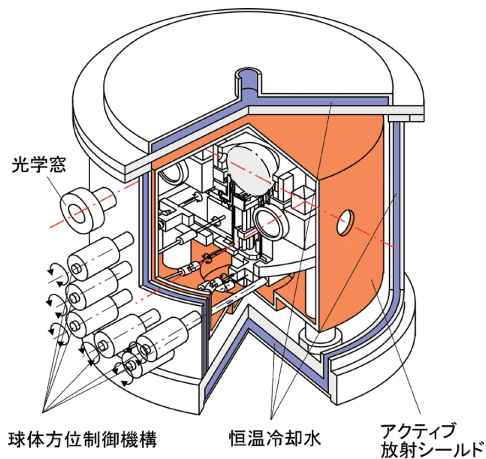


図6 シリコン球体の直径を計測するレーザー干渉計を格納する真空チャンバー：放射シールドの温度を制御することで、球体の温度を制御する^{24),25)}。

それぞれの CCD で決定した位相の 2 次元分布を Zernike 多項式で近似し、その極値から L , d_1 , d_2 を求める²⁴⁾。

球体とエタロン板との間隔は約 13 mm であり、位相シフト法による測定を行うためには少なくとも 10 GHz の光周波数掃引が必要である。このために開発した光周波数チューニングシステムを図 4 の下図に示す²⁷⁾。このシステムでは、長さの国家計量標準として産総研で維持・管理されている光周波数コム^{30),31)}を光周波数標準として用いている。この光周波数コムに位相ロックされた He-Ne レーザーからのビームが約 40 m のファイバーによってレーザー干渉計に送られる。このビームとのビート信号を計測・制御することで、外部共振器型ダイオードレーザーの光周波数を 20 GHz の範囲で 33 kHz の不確かさでチューニングできる。これは球体直径に換算すると 7×10^{-11} の相対不確かさに相当する。精密直径測定技術はこのように極めて高い精度の光周波数制御技術に支えられている。

6.1.3 球体温度測定

シリコン結晶は室温において約 $3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ の熱膨張係数をもつ。このため、球体の直径を高精度に測定するためには、球体の温度を一定に保ち、できるだけ小さな不確かさでその温度を測定する必要がある。図 6 は球体およびエタロンなどを格納する真空チャンバーを示す。体積測定は 20 °C で実施し、真空チャンバーの側面と上下面には 20 °C からわずかに低い温度に保った冷却水を循環させる。真空チャンバー内部には銅製のアクティブ放射シールドが備えられている。放射シールドの側面および上下面にはフィルムヒーターおよび温度計が組み込まれている。ヒーターに印可する電流をアクティブに制御し、放射シールドの温度を 20 °C に保つことで、球体の温度も 20 °C に制御できる。図 4 に示すように、放

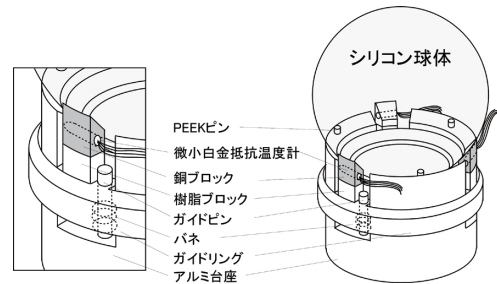


図7 球体温度計測システム：ITS-90 に準拠して校正された微小白金抵抗温度計を挿入した銅ブロックが、球体に弱く押しつけられている^{24),25)}。

射シールド内部は球体と放射シールドとの熱交換を高めるために黒く塗装されている。

図 7 は球体の下部に設置した球体温度測定システムを示す。球体は 3 本の PEEK 製のピンによって支持され、微小白金抵抗温度計 (直径 2 mm、長さ 15 mm) を挿入した 3 つの小型の銅ブロックが非常に弱い力で球体に接触している。銅ブロック表面は、球体表面が温度測定中に傷つくことを防ぐために PEEK でコーティングされている。微小白金抵抗温度計は、国際温度目盛 (ITS-90) の温度定点 (水の三重点、ガリウムの融点) を実現した定点セルで直接校正することができ³²⁾、球体温度制御用アクティブ放射シールドと組み合わせることで 0.0006 °C の不確かさで球体の温度を測定することができる。

式 (1) によってアボガドロ定数を求めるためには、同一の温度における格子定数と球体体積が必要である。球体体積は産総研と PTB で、格子定数は INRIM で測定され、各測定で用いられている温度計は各研究所で ITS-90 に準拠して校正されている。アボガドロ国際プロジェクトでは、これらの温度計を PTB に集め、それらのノンユニークネスがアボガドロ定数測定に及ぼす影響を検討した³³⁾。各温度計は同一の温度定点セルで校正された後、20 °C に制御された恒温槽に挿入され、温度測定値の差が評価された。三本の温度計による測定値の差の標準偏差は 52 μK であった。このばらつきのアボガドロ定数測定の不確かさへの相対寄与は 5.6×10^{-10} であり、無視できるほど小さい。

6.1.4 球体体積測定

図 8 に 2 個の ^{28}Si 単結晶球体について様々な方位から実施した直径測定の結果を示す。球体表面にほぼ均一に分布する約 2000 方位から測定を実施し、平均直径から球体体積を 2.0×10^{-8} の相対標準不確かさで決定した。この不確かさは直径測定精度に換算すると 0.6 nm である。図 1 に示した単位格子の一辺の長さ、すなわち、格子定数は約 0.5 nm である。つまり、原子間距離レベルの精度で約 94 μm の球体直径を測

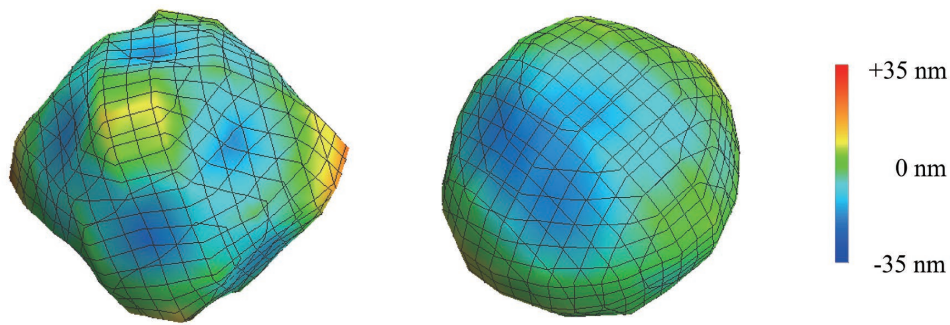


図8 様々な方位からの直径測定値を、平均直径からの偏差を強調して描画した球体形状三次元図：平均直径は約94 nmであり、直径の最大値と最小値の差は、一方の球体（左）では69 nm、もう一方の球体（右）では38 nmである²⁸⁾。

定できる。この世界最高レベルの精度での測定の実現には、産総研が独自に開発した高精度な光周波数チューニング技術および球体温度測定技術が大きく貢献した。

球体直径測定用レーザー干渉計の開発はPTBにおいても実施された³⁴⁾。産総研のレーザー干渉計と同様に、光周波数制御にもとづく位相シフト法によって球体直径を測定する。ただし、位相シフト法のアルゴリズムは大きく異なる。また、球面エタロンを用いることで、球を回転させることなく多方位からの直径測定が可能である。図9は二つのレーザー干渉計の測定原理の違いおよび²⁸Si単結晶球体について実施した測定結果の比較を示す。二つレーザー干渉計による測定結果は不確かさの範囲で一致しており、アボガドロ国際プロジェクトにおける球体体積測定の信頼性が極めて高いことを示す。

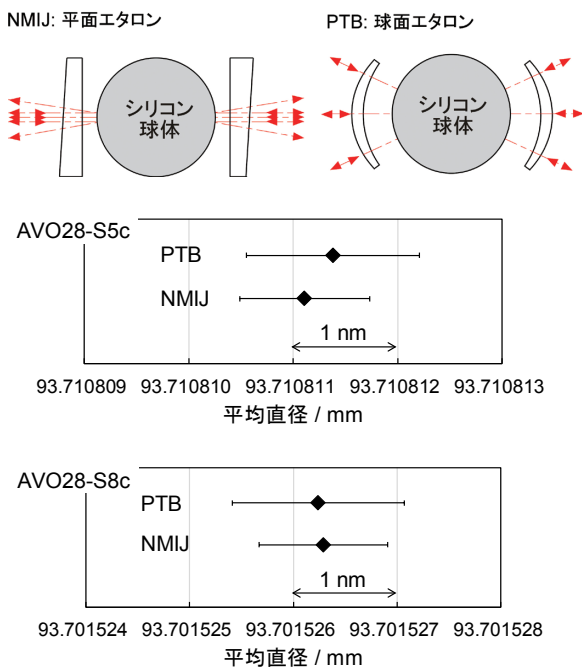


図9 (上) 産総研 (NMIJ) と PTB で開発されたレーザー干渉計の測定原理の比較 (下) 二つのレーザー干渉計で測定された二つの²⁸Si単結晶球体 (AVO28-S5c, AVO28-S8c) の平均直径の比較：データ上のバーは標準不確かさを表す。

アボガドロ定数の精密測定を目的とするシリコン球体体積測定用レーザー干渉計の開発は、INRIM、NMI-A、韓国標準科学研究所 (Korean Reserach Institute of Standards and Science: KRISS)、中国計量科学研究院 (National Metrology Insituite, China: NIM) でも行われたが、国際キログラム原器の質量の長期安定性である 5×10^{-8} をしのぐ精度での体積測定に成功したのは、産総研とPTBのみであった。

6.2 球体質量測定

産総研では真空天びんを用いて²⁸Si単結晶球体の質量を測定した。球体の質量はほぼ1 kgであり、我が国の質量の国家標準であった日本国キログラム原器を基準として値付けされた1 kg ステンレス基準分銅の質量と直接比較された。²⁸Si単結晶球体とステンレス分銅の質量はほぼ一緒であるが、材質が異なるためそれらの体積は大きく異なる。このため、空气中で測定を実施した場合、この二つの物体への空気浮力の影響の差を評価する必要があるが、その厳密な評価は簡単ではない。真空天びんによって質量比較を真空条件下で実施することで、空気浮力の影響を評価する必要がなく、球体質量を6 μg、相対値にすると 6×10^{-9} という非常に高い精度で測定することができた³⁵⁾。またBIPMは2013年から2015年にかけて国際キログラム原器を基準として、各国の白金イリジウム分銅の臨時校正 (Extraordinary Calibrations) を実施した。日本国キログラム原器の国際キログラム原器へのトレーサビリティは、この臨時校正によって確保されている³⁶⁾。

6.3 球体表面分析

シリコン球体表面は、酸化膜などからなる厚さ数 nm の表面層に覆われている (図10)。式 (1) を用いて正確にアボガドロ定数を求めるためには、表面層を除く、シリコン原子だけからなる部分 (シリコンコア) の質量と体積を決定する必要がある。そこで、アボガドロ国際プロジェクトでは、分光エリブソメトリー、X線反射率法、X線蛍

光分析法などの複数の表面分析技術を用いて ^{28}Si 単結晶球体表面に存在する物質の化学組成、厚さ、質量などを評価した³⁷⁾。産総研では、X線光電子分光法と分光エリプソメトリーによる球体表面分析システムを開発した(図11)^{38),39)}。いずれの装置もシリコン球体の回転機構を備え、球体の全表面を分析できる。このシステムにより、球体表面層の組成を決定し、さらに球体表面層の厚さを0.1 nmの精度で測定した。6.2と6.3で解説した球体の質量と体積の測定結果を表面層分析結果で補正し、シリコンコアの質量と体積を決定した⁴⁰⁾。

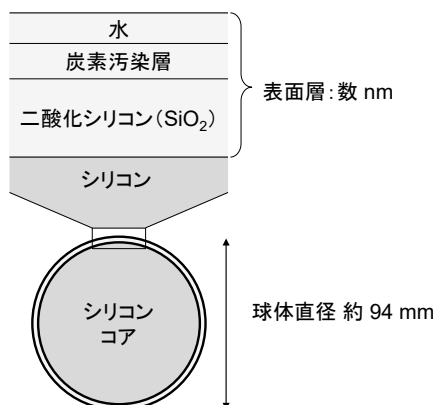


図10 真空中での ^{28}Si 単結晶球体表面層モデル：表面層は化学吸着水層、炭素汚染層、 SiO_2 層などからなる⁴⁰⁾。

6.4 モル質量測定

自然体同位体比シリコン結晶のモル質量を求めるために、IRMMはシリコン結晶を多段階の化学処理によって SiF_4 ガスに変換し、ガス質量分析計を用いて3種類の安定同位体、 ^{28}Si 、 ^{29}Si 、 ^{30}Si の存在比を測定していた⁴¹⁾。しかしモル質量測定の精度は 2.4×10^{-7} と国際キログラム原器の質量の長期安定性と比べて一桁大きく、基礎物理定数によるキログラムの定義改定を実現するためのボトルネックとなっていた。アボガドロ国際プロジェクトによる ^{28}Si 同位体濃縮結晶の製作をうけ、PTBでは多重検出器誘導結合プラズマ ICP 質量分析計を用いたモル質量測定を実施した⁴²⁾。この手法では、シリコン結晶を水酸化テトラメチルアンモニウムなどの溶媒に溶かすだけでなく、自然同位体比のシリコンが混入するリスクが前出のガス質量分析法と比べて極めて低い。さらに ^{28}Si の存在比が99.99%以上に高められた特殊な結晶の測定に適した新たな同位体希釈分析法が開発された。この方法では ^{28}Si の存在比を直接測定するのではなく、微量成分である ^{29}Si と ^{30}Si を測定し、それ以外の同位体を ^{28}Si とすることでモル質量を求めた。これらの改良によってモル質量の相対標準不確かさは 4.3×10^{-9} にまで向上した。同様の測定は産総研⁴³⁾ および NIST⁴⁴⁾ でも実施され、3つの研究機関の測定値は不確かさの範囲で一致した。

6.5 格子定数測定

^{28}Si 単結晶の格子定数の測定は INRIM で実施された。X線干渉計を用い、光の波長を基準として 1.8×10^{-9} の相対不確かさで格子定数が測定された¹⁹⁾。また産総研では、結晶内での格子定数の分布を高エネルギー加速器研究機構に設置した自己参照型格子比較器によって評価した⁴⁵⁾。

6.6 アボガドロ定数の決定

これまでに、 ^{28}Si 同位体濃縮単結晶を用いた測定に基づき、次の4つのアボガドロ定数の値が報告されている。

2011年、アボガドロ国際プロジェクトは ^{28}Si 同位体濃縮結晶 (AVO28) を用いて求めた最初のアボガドロ定数の値を報告した²³⁾。測定には AVO28 から研磨された二つの球体、AVO28-S5 および AVO28-S8、が用いられ、この球体の体積、質量、表面、格子定数、モル質量が評価された。2013年から2015年にかけて BIPM で実施された各国キログラム原器の臨時校正の結果をうけ、その値は次のように更新された⁴⁶⁾。

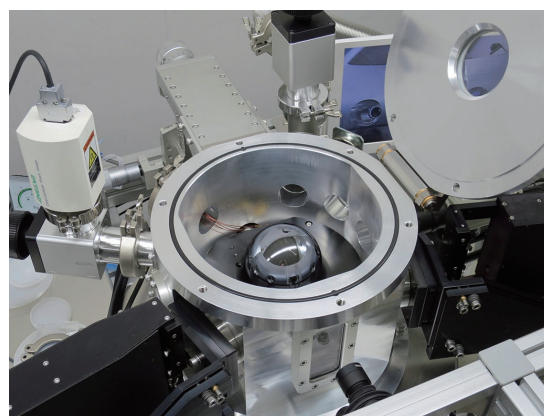
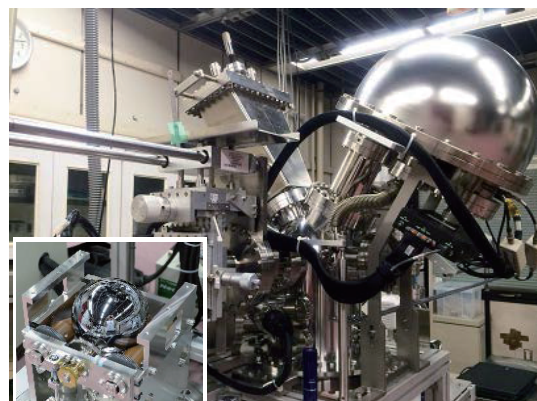


図11 産総研で開発したシリコン単結晶球体表面分析用 X線光電子分光法システム(上)と分光エリプソメーター(下)：いずれの装置も球体回転機構を備え、球体全表面を分析できる。また X線反射率法により値付けされた膜厚標準物質で校正することで、国家計量標準にトレーサブルな表面分析が可能である^{38),39)}。

$$N_A \text{ (IAC-11)} = 6.022\,140\,99(18) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (3)$$

測定相対標準不確かさは 3.0×10^{-8} である。測定精度は自然同位体比のシリコン結晶を用いた場合と比較して一桁向上し、国際キログラム原器の長期安定性を上回った。ただし、二つの球体の表面は銅やニッケルによって汚染されており、表面層の質量を高い精度で決定することができなかった。この球体表面の金属汚染が、アボガドロ定数測定のための主要な不確かさ要因の一つであった。

これを受けてアボガドロ国際プロジェクトでは、二つの球体を再研磨し、表面の金属汚染を取り除いた。さらに、再研磨後の球体、AVO28-S5c と AVO28-S8c、を用いて、より高精度な測定を実施し、次の値を 2015 年に報告している⁴⁶⁾。

$$N_A \text{ (IAC-15)} = 6.022\,140\,76(12) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (4)$$

相対標準不確かさは 2.0×10^{-8} にまで向上した。

上述の二つの値の測定後に、X 線光電子分光法を用いた表面分析システム (図 11) が産総研で開発された。これをうけて、産総研は AVO28-S5c の体積、質量、表面の評価を新たに単独で実施し、2017 年に次の値を報告した⁴⁰⁾。

$$N_A \text{ (NMIJ-17)} = 6.022\,140\,84(15) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (5)$$

この値を求めるための主要な測定を産総研が単独で実施したことから、データ名には著者が所属する産総研計量標準総合センターの英語名の略称である NMIJ が用いられている。なお、格子定数、モル質量などには、 N_A (IAC-15) を決定する際にアボガドロ国際プロジェクトで測定された値が用いられた。

一方、PTB は AVO28 よりも ^{28}Si 濃縮度の高い結晶 (Si28-23Pr11) を独自に入手し⁴⁷⁾、2 つの球体、Si28kg01a および Si28kg01b を製作した。PTB と産総研でこの新たな結晶についての測定が実施され、次の値が 2017 年に報告された⁴⁸⁾。

$$N_A \text{ (IAC-17)} = 6.022\,140\,526(70) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (6)$$

相対標準不確かさは 1.2×10^{-8} にまで向上した。

またアボガドロ国際プロジェクトは、 N_A (IAC-11)、 N_A (IAC-15)、 N_A (NMIJ-17) の導出に用いたモル質量と格子定数を最新の測定に基づき補正した。これを受けて、2018 年に 3 つの N_A の値は次のように補正された⁴⁹⁾。

$$N_A \text{ (IAC-11)} = 6.022\,140\,95(18) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (7)$$

$$N_A \text{ (IAC-15)} = 6.022\,140\,70(12) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (8)$$

$$N_A \text{ (NMIJ-17)} = 6.022\,140\,78(15) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (9)$$

7 プランク定数に基づくキログラムの定義改定案

キログラムの新たな定義案としては、原子の数から質量を決めるアボガドロ定数に基づくもののほかに、光子のエネルギーと質量を関連づけるプランク定数にもとづくものも検討されていた¹³⁾。キップルバランス法はプランク定数を実験的に直接決定する手法である。この方法では、主に電気的な測定から、ジョセフソン効果と量子ホール効果に基づいてプランク定数を測定する。カナダ国立研究機構 (National Research Council, Canada: NRC) はこの方法を用いて 1.0×10^{-8} の相対不確かさでプランク定数を 2017 年に決定している⁵⁰⁾。NIST、フランス計量研究所 (Laboratoire National de Métrologie et d'Essais, France: LNE) などでも開発が進んでいる。キップルバランス法の詳細については、本書の質量にかかる解説を参照いただきたい。

キログラムの定義を改定する上で、アボガドロ定数 N_A とプランク定数 h のどちらかをを用いて表現すべきなのか議論されてきたが、両者の間には次の厳密な関係が成立する。

$$N_A h = \frac{cM(e)\alpha^2}{2R_\infty} \quad (10)$$

ここで、 $M(e)$ は電子のモル質量、 α は微細構造定数、 R_∞ はリュードベリ定数、 c は真空中の光速である。左辺の N_A と h の積はモルプランク定数とよばれ、 4.5×10^{-10} の相対標準不確かさで求められている⁵¹⁾。この不確かさは、これまで紹介してきた h や N_A の測定の不確かさと較べて十分に小さく、原理的にはどちらの定数を用いても矛盾なくキログラムの定義を改定することが可能であった。ただし、プランク定数を基準とした方が特に電気標準において利便性が高い。このため、2011 年に開催された第 24 回国際度量衡総会において、国際キログラム原器を将来廃止し、プランク定数を不確かさのない固定された値とし、キログラムの定義を改定する方針が決議された⁵²⁾。一方、アボガドロ定数を固定された不確かさのない値とすることでモルの定義を改定する方針も決議された。

8 モルの新しい定義の基準となるアボガドロ定数の決定

2014 年に開催された第 25 回国際度量衡総会では、モルおよびキログラムの定義の改定にかかる審議を 2018 年に開催される第 26 回国際度量衡総会で実施できるよう各国の国家計量標準機関が準備を進めることが提案された⁵³⁾。審議の結果、定義改定前後の整合性を示す実験データが順調に揃うことを条件に、

この提案は承認された。2015年に開催された第104回国際度量衡委員会では、定義の改定に必要な基礎物理定数の決定に際し、2017年7月1日までに論文としてアクセプトされたデータのみを対象とすることが決議された⁵³⁾。この締切までに報告されたデータを用いた新たな定義の基準となる基礎物理定数の決定は、科学技術データ委員会 (CODATA) によって実施された⁵⁴⁾。

図12および表1に、CODATAによる新たなモルの定義の基準となるアボガドロ定数の決定に貢献した8個のデータを示す。8個のうち、4つが7章で紹介したX線結晶密度法によって決定されたアボガドロ定数であり、残りの4つがキップルバランス法によってされたプランク定数から式(10)によって導出されたアボガドロ定数である。二つの異なる方法によって測定されたアボガドロ定数は良く一致した。CODATAはこれら8つの高精度な測定値の重み付き平均として、次のアボガドロ定数の調整値を決定した。

$$N_A (\text{CODATA 2017}) = 6.022\,140\,758(62) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (11)$$

さらに同じ8個のデータを用いて、次のプランク定数の調整値を決定した。

$$h (\text{CODATA 2017}) = 6.626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J s} \quad (12)$$

これらの調整値の相対不確かさは 1.0×10^{-8} であり、1 kg に換算すると 10 μg である。これは、国際キログラム原器の質量の長期安定性である 50 μg を大きく凌いだ。

9 モルの新しい定義

2018年11月に開催された第26回国際度量衡総会では、上述の調整値の不確かさをゼロとする定義値に基づく新しいモルとキログラムの定義への移行が

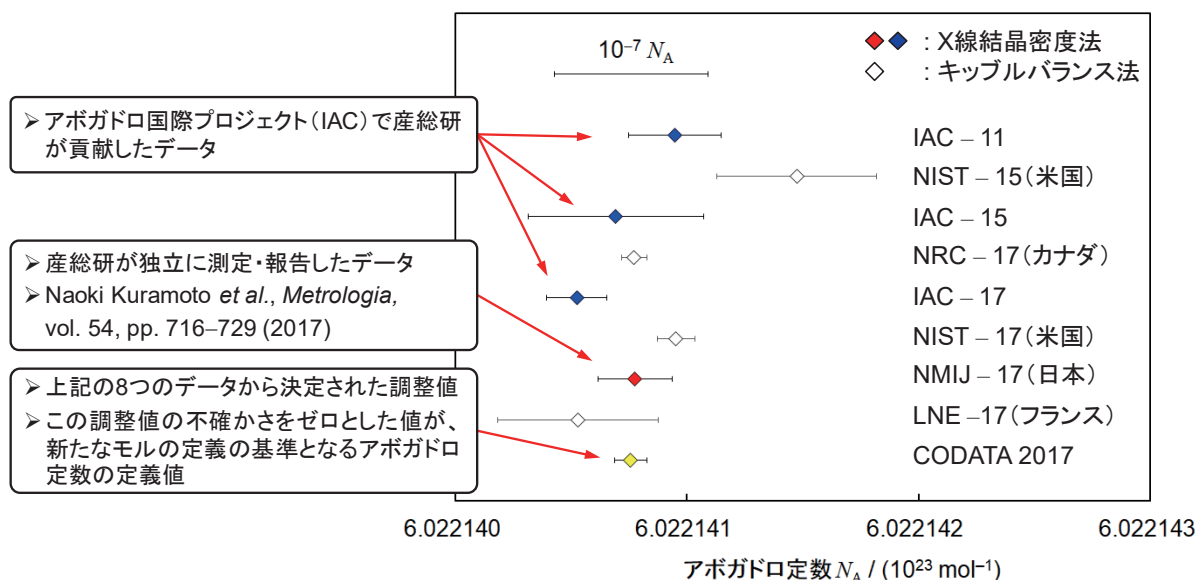


図12 CODATAによるアボガドロ定数の調整値決定に採用された8つの測定結果：調整値 (CODATA 2017) の不確かさをゼロとした値が、現在のモルの定義に使われている定義値である。

表1 CODATA2017特別調整におけるプランク定数 h およびアボガドロ定数 N_A の決定に採用されたデータ⁵⁴⁾: h と N_A は式(10)によって換算可能である。このため、 h と N_A の調整値の決定のいずれにも、これら8つのデータの全てが用いられた。

報告論文(出版年)	データID	測定を実施した研究機関	量	値	相対標準不確かさ
Schlamminger <i>et al.</i> (2015) ⁵⁵⁾	NIST-15	米国標準技術研究所	h	$6.626\,069\,36(38) \times 10^{-34} \text{ J s}$	5.7×10^{-8}
Wood <i>et al.</i> (2017) ⁵⁰⁾	NRC-17	カナダ国立研究機構	h	$6.626\,070\,133(60) \times 10^{-34} \text{ J s}$	9.1×10^{-9}
Haddad <i>et al.</i> (2017) ⁵⁶⁾	NIST-17	米国標準技術研究所	h	$6.626\,069\,934(88) \times 10^{-34} \text{ J s}$	1.3×10^{-8}
Thomas <i>et al.</i> (2017) ⁵⁷⁾	LNE-17	フランス計量研究所	h	$6.626\,070\,40(38) \times 10^{-34} \text{ J s}$	5.7×10^{-8}
Azuma <i>et al.</i> (2015) ⁴⁶⁾	IAC-11	アボガドロ国際プロジェクト	N_A	$6.022\,140\,95(18) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	3.0×10^{-8}
Azuma <i>et al.</i> (2015) ⁴⁶⁾	IAC-15	アボガドロ国際プロジェクト	N_A	$6.022\,140\,70(12) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	2.0×10^{-8}
Bartl <i>et al.</i> (2017) ⁴⁸⁾	IAC-17	アボガドロ国際プロジェクト	N_A	$6.022\,140\,526(70) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	1.2×10^{-8}
Kuramoto <i>et al.</i> (2017) ⁴⁰⁾	NMIJ-17	産業技術総合研究所	N_A	$6.022\,140\,78(15) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	2.4×10^{-8}

承認された。世界各国の多くの研究者の努力によって、二つの SI 基本単位の定義は次のような基礎物理定数にもとづくものへと改定されたのである。

- ・モルは、物質の単位であり、1 モルには、厳密に $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ の要素粒子が含まれる。この数は、アボガドロ定数 N_A を単位 mol^{-1} で表したときの数値であり、アボガドロ数と呼ばれる。

- ・キログラムは、質量の単位であり、プランク定数 h を単位 J s で表したときに、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。

新たな定義の基準となる定義値の決定に使用された 8 つのデータのうち、産総研は 4 つの値の測定に貢献した。またそのうちの 1 つは産総研がほぼ独立に測定したものである。表 1 に日本人の名前 (Kuramoto *et al.* および Azuma *et al.*) および日本の研究機関の名前 (NMIJ: 産総研 計量標準総合センター) が掲載されていることから明らかなように、我が国の研究成果はキログラムとモルと二つの単位の定義改定に直接大きく貢献した。特に、6.1 で紹介したシリコン単結晶球体直径測定には、世界各国の国家計量標準機関が取り組んできたが、原子レベルの精度での測定に成功し、モルとキログラムの定義改定実施に決定的な役割を果たすことができたのは産総研とドイツ物理学研究所のみであった。産総研による約 130 年ぶりとなるキログラムの定義改定および約 50 年ぶりとなるモルの定義改定への貢献は、正に歴史的な快挙である⁵⁸⁾。

10 定義改定の影響

炭素 12 に基づく定義から、現行のアボガドロ定数を基準とする定義への改定は物理学や化学にどのような影響をもたらしたのだろうか。4 章で紹介した原子量は今回のモルの定義改定の影響を受けておらず、その値は変動していない。例えば、 ^{12}C の原子量は、現在でも厳密に 12 (不確かさはゼロ) である。ただし、原子量からモル質量を算出する際の変換係数「モル質量定数 M_u 」は定義改定の影響を受けたことに注意してほしい。例えば ^{12}C については次式が成立する。

$$M(^{12}\text{C}) = A_r(^{12}\text{C}) \times M_u \quad (13)$$

ここで $A_r(^{12}\text{C})$ と $M(^{12}\text{C})$ はそれぞれ ^{12}C の原子量とモル質量である。以前の定義の下では、 M_u は厳密に $1\ \text{g mol}^{-1}$ と定義され、 ^{12}C のモル質量 $M(^{12}\text{C})$ は厳密に $12\ \text{g mol}^{-1}$ であった。一方、(10) 式から、現行の定

義における M_u は次式で与えられる。

$$M_u = \frac{2N_A h}{c} \frac{R_\infty}{\alpha^2 A_r(\text{e})} \quad (14)$$

微細構造定数 α 、リュードベリ定数 R_∞ 、電子の原子量 $A_r(\text{e})$ は実験的に測定される量であり、それらの測定値に応じて M_u も変化する。定義改定直後の現時点では、その値は依然として $1\ \text{g mol}^{-1}$ であるが、 4.5×10^{-10} の相対不確かさをもつ^{9),59)}。このため、 $M(^{12}\text{C})$ は定義改定前のように厳密に $12\ \text{g mol}^{-1}$ ではなく、 4.5×10^{-10} の相対不確かさをもつ。他の多くの核種の相対原子量は 10^{-11} レベルの相対不確かさで求められており⁶⁰⁾、それらのモル質量の不確かさも、僅かではあるが定義改定のために増加した。ただし、その増加の程度は非常に小さく、ほとんどの化学計測や 3 章で記述したモルの実現においては無視できる^{9),59)}。

11 おわりに

アボガドロ定数を基準とする定義に移行することにより、モルの定義は質量から切り離され、要素粒子の個数に基づく直接的でわかりやすいものとなった。また、原理的には原子や分子などの個数を絶対測定することで「モル」を実現することが可能であり^{9),59)}、現時点で最も高精度な原子数の計測方法が本稿で紹介した X 線結晶密度法である。原子数の計測にもとづくモルの実現を可能とした今回の定義改定が、アボガドロ定数のオーダーの原子や分子などを高精度にカウントし、物質量や濃度などを直接絶対測定する技術につながるブレイクスルーを生む契機となることを期待したい。

参考文献

- 1) 臼田孝: 特集: 国際単位系 (SI) の体系紹介と最新動向について (概論), 計測と制御, **53**, 74/79 (2014)
- 2) 倉本直樹: キログラムとモルの新しい定義, ぶんせき, 193/200 (2019)
<http://www.jsac.or.jp/bunseki/pdf/bunseki2019/201905p193.pdf> (2020 年 1 月 17 日確認)
- 3) 倉本直樹: 物質量 (mol) についての基礎解説と最新動向, 計測と制御, **53**, 368/373 (2014)
- 4) 大西寛: モルの過去と現在, 化学史研究, **29**, 254/259 (2002)
- 5) 朽津耕三, 田中充: アボガドロ定数, 化学と教育, **46**, 636/640 (1998)
- 6) 西條俊美, 物理定数とはなにか, 講談社 (1999)
- 7) 沼田雅彦: 標準物質の話, ペトロテック, **36**, (4), 307/311 (2013)
- 8) NMIJ 認証標準物質: 計量標準総合センターホームページ
<https://www.nmij.jp/service/C/>
- 9) Consultative Committee for Amount of Substance –

- Metrology in Chemistry and Biology (CCQM), Mise en pratique for the definition of the mole in the SI, <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/SI-App2-mole.pdf>
- 10) 卜部吉庸, 化学I・IIの新研究, 三省堂 (2005)
 - 11) 横山祐之: 1957年原子量表および原子量の統一について, 化学の領域, **13**, 45/48 (1959)
 - 12) 斎藤信房: 原子量の基準 ^{12}C , 化学教育, **15**, 376/378 (1967)
 - 13) 大苗敦, 洪鋒雷, 清水忠雄: プランク定数で kg を定義するって, いったいどうするの?, パリティ, **28**, 24/32 (2013)
 - 14) 臼田孝: 新しい1キログラムの測り方, 講談社 (2018)
 - 15) 倉本直樹: キログラムの新しい定義 –さらばキログラム原器–, 化学と工業, **32/33** (2019)
 - 16) 倉本直樹: プランク定数にもとづくキログラムの新しい定義を導いた計測技術, 電気学会誌, **139**, 348/351 (2019)
 - 17) 倉本直樹: 基礎物理定数に基づくキログラムとモルの新たな定義 –さらばキログラム原器–, 計測と制御, **58**, 330/335 (2019)
 - 18) 倉本直樹, 藤井賢一: 原子質量に基づくキログラム再定義のためのレーザー干渉計開発, 光学, **39**, 141/148 (2010)
 - 19) E. Massa *et al.*: A more accurate measurement of the ^{28}Si lattice parameter, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **44**, 031208 (2015)
 - 20) K. Fujii *et al.*: Evaluation of the molar volume of silicon crystals for a determination of the Avogadro constant, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **52**, 646/651 (2003)
 - 21) P. Becker *et al.*: Large-scale production of highly enriched ^{28}Si for the precise determination of the Avogadro constant, *Meas. Sci. Technol.*, **17**, 1854/1860 (2006)
 - 22) B. Andreas *et al.*: Determination of the Avogadro constant by counting the atoms in a ^{28}Si crystal, *Phys. Rev. Lett.*, **106**, 030801 (2011)
 - 23) B. Andreas *et al.*: Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition, *Metrologia*, **48**, S1/S13 (2011)
 - 24) N. Kuramoto, K. Fujii and K. Yamazawa: Volume measurements of ^{28}Si spheres using an interferometer with a flat etalon to determine the Avogadro constant, *Metrologia*, **48**, S83/S95 (2011)
 - 25) N. Kuramoto and K. Fujii: Improvement in the volume determination for Si spheres with an optical frequency tuning, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **58**, 915/918 (2009)
 - 26) N. Kuramoto *et al.*: Volume measurement of a ^{28}Si -enriched sphere for a determination of the Avogadro constant at NMIJ, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **68**, 1913/1920 (2019)
 - 27) N. Kuramoto *et al.*: Improvements to the volume measurement of ^{28}Si spheres to determine the Avogadro constant, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **64**, 1650/1656 (2015)
 - 28) N. Kuramoto *et al.*: Volume measurements of ^{28}Si -enriched spheres using an improved optical interferometer for the determination of the Avogadro constant, *Metrologia*, **54**, 193/203 (2017)
 - 29) N. Kuramoto *et al.*: Realization of the kilogram based on the Planck constant at NMIJ, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **66**, 1267/1274 (2017)
 - 30) H. Inaba *et al.*: Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb, *Optics Express*, **14**, 5223/5231 (2006).
 - 31) H. Inaba *et al.*: Frequency measurement capability of a fiber-based frequency comb at 633 nm, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **58**, 1234/1240 (2009).
 - 32) K. Yamazawa *et al.*: Evaluation of small-seized platinum resistance thermometers with ITS-90 characteristics, *Int. J. Thermophys.*, **32**, 2397/2408 (2011).
 - 33) E. Massa *et al.*: Accuracy of temperature measurement of the Avogadro-project, in *CPEM2018 Digest*, Paris, France, 2018.
 - 34) A. Nicolaus *et al.*: Volume determination of two spheres of the new ^{28}Si crystals of PTB, *Metrologia*, **54**, 512/515 (2017)
 - 35) S. Mizushima *et al.*: Mass measurement of 1-kg silicon spheres for determination of the Avogadro and Planck constants, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **66**, 1527/1532 (2017)
 - 36) S. Mizushima and K. Fujii: Establishment of the platinum-iridium kilogram mass standards at NMIJ after the extraordinary calibrations, *Metrologia*, **53**, 787/799 (2016)
 - 37) I. Busch *et al.*: Surface layer determination for the Si sphere of the Avogadro project, *Metrologia*, **48**, S62/S82 (2011)
 - 38) L. Zhang *et al.*: Thickness measurements of oxide and carbonaceous layer on a ^{28}Si sphere by using XPS, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **66**, 1297/1303 (2017)
 - 39) K. Fujita *et al.*: Surface layer analysis of a ^{28}Si -enriched sphere both in vacuum and in air by ellipsometry, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **66**, 1283/1288 (2017)
 - 40) N. Kuramoto *et al.*: Determination of the Avogadro constant by the XRCD method using a ^{28}Si -enriched sphere, *Metrologia*, **54**, 716/729 (2017)
 - 41) S. Valkiers *et al.*: Si Primary standards for the calibration of ion-current ratios in the molar-mass measurement of natural Si single crystals, *Metrologia*, **48**, S26/S31 (2011)
 - 42) A. Pramann *et al.*: Molar mass of silicon highly enriched in ^{28}Si determined by IDMS, *Metrologia*, **48**, S20/S25 (2011)
 - 43) T. Narukawa *et al.*: Molar-mass measurement of a ^{28}Si -enriched silicon crystal for determination of the Avogadro constant, *Metrologia*, **51**, 161/168 (2014)
 - 44) R. Vocke Jr *et al.*: Absolute silicon molar mass measurements, the Avogadro constant and the redefinition of the kilogram, *Metrologia*, **51**, 361/375 (2014)
 - 45) A. Waseda *et al.*: Homogeneity characterization of lattice spacing of silicon single crystals, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **64**, 1692/1695 (2015)
 - 46) Y. Azuma *et al.*: Improved measurement results for the Avogadro constant using a ^{28}Si -enriched crystal, *Metrologia*, **52**, 360/375 (2015)
 - 47) N. Abrosimov *et al.*: A new generation of 99.9995 enriched ^{28}Si single crystals for the determination of Avogadro's constant, *Metrologia*, **54**, 599/609 (2017)
 - 48) G. Bartl *et al.*: A new ^{28}Si single crystal: counting the atoms for the new kilogram definition, *Metrologia*, **54**, 693/715 (2017)
 - 49) K. Fujii *et al.*: Avogadro constant measurements using

- enriched ^{28}Si monocrystals, *Metrologia*, **55**, L1/L4 (2018)
- 50) B. Wood *et al.*: A summary of the Planck constant determinations using the NRC Kibble balance, *Metrologia*, **54**, 399/409 (2017)
- 51) P. J. Mohr *et al.*: CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **45**, 043102 (2016)
- 52) 田中充: 国際単位系 (SI) 改定の方向性, 産総研 Today, **12**, 23 (2012)
https://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/aistinfo/aist_today/vol12_01/vol12_01_p23.pdf
- 53) 臼田孝: 第 25 回国際度量衡総会, 産総研 Today, **15**, 20 (2015)
https://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/aistinfo/aist_today/vol15_01/vol15_01_p20.pdf
- 54) D. B. Newell *et al.*: The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI, *Metrologia*, **55**, L13/L16 (2018)
- 55) S. Schlamminger *et al.*: A summary of the Planck constant measurements using a watt balance with a superconducting solenoid at NIST, *Metrologia*, **52**, L5/L8 (2015)
- 56) D. Haddad *et al.*: Measurements of the Planck constant at the National Institute of Standards and Technology from 2015 to 2017, *Metrologia*, **54**, 633/641 (2017)
- 57) M. Thomas *et al.*: A determination of the Planck constant using the LNE Kibble balance in air, *Metrologia*, **54**, 468/480 (2017)
- 58) 産業技術総合研究所 質量標準研究グループホームページ
<https://unit.aist.go.jp/riem/mass-std/> (2020 年 1 月 16 日確認)
- 59) M. Stock *et al.*: The revision of the SI – the result of three decades of progress in metrology, *Metrologia*, **56**, 022001 (2019)
- 60) P. J. Mohr *et al.*: Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment, *Metrologia*, **55**, 125/146 (2017)

光度の単位「カンデラ」および測光・放射標準

蔀 洋司

産業技術総合研究所 計量標準総合センター 物理計測標準研究部門 光放射標準研究グループ長

1 はじめに

カンデラ (cd) は光度の単位であり、国際単位系 (SI) の基本単位の一つである。光度は、人間の視覚を加味した光の強さを表す量で、明るさの知覚を定量化する際の指標となる。人間の持つ五感 (視覚・聴覚・嗅覚・味覚・触覚) の中で、一般的に最も多くの情報を与えるのが視覚であると言われている。視覚は、眼の網膜上での光子と分子の相互作用に基づく光生物学的効果の一つであり、我々人類は、明るさや色に代表される視覚情報を、昼夜を問わず得るための手段として、最初は炎を、後にランプなどの人工光源を照明として利用してきた。そうした中で、光による視覚刺激を定量的に測定・評価する手段が必要となり、様々な照明環境を再現性よく正確に評価する目的から、測定の基準となる測光標準の整備や国際協調が進められ、高度な計量標準の体系が運用されてきた。

光度およびその関連量は、対象となる光に対して、人間の視覚情報に基づく重み付けを伴う測定量であることから、純粋な物理量ではなく心理物理量に区分される。このためカンデラは、SI の中ではやや特殊な単位であるが、視覚情報を加味した光の定量化は我々の日常生活に密接に関連したものである。そうした重要性が、カンデラを SI 基本単位の一つとして位置付ける根拠を与えている。

長年に渡る世界的な研究の集大成として、2018 年 11 月の第 26 回国際度量衡総会 (CGPM) の決議に基づき、質量、電流、温度、物質量の各基本単位の定義が大幅に改定された。この定義改定は、人工的な器物に依存しない単位系の実現をはじめ、多くの科学的な価値を持っているが、もう一つ大きな変革があった。今回の改定に伴い、国際単位系 (SI) における 7 つの基本単位は全て、基礎物理定数 (または常用定数) に基づく定義へと表現が改められた。カンデラについても今回、視感効果度 K_{cd} (単位 lm W^{-1}) に基づいて定義する表現へと修正する改定が決議された。

本稿では、カンデラの定義および実現方法について紹介すること主眼としつつ、他の SI 基本単位と比べると“一見”風変わりな印象を受けるカンデラについて正しく理解するために必要となる、測光量の

基本的な考え方について解説すると共に、測光・放射測定に係る単位を考える上で不可欠となる、主要な測光量および放射量の標準 (本稿では測光・放射標準と総称) とそれらの相互関係について解説することを目的とする。加えて、関連する最近の研究成果についても紹介する。

2 測光量および放射量

2.1 測光量、放射量とは

X 線への移行領域の波長 (約 1 nm) から、電波への移行領域の波長 (約 1 mm) までの波長範囲の電磁放射を光放射 (Optical Radiation) と称する。これに対して、光 (Light) には、視覚系に生じる明るさ及び色の知覚・感覚を意味すると共に、人の目に入って直接に視覚を起すことができる放射、即ち可視放射という狭義の定義がある¹⁾³⁾。一般的な光のイメージとしては可視放射以外の波長域の放射、例えば紫外放射 (UV) や赤外放射 (IR) も含まれると広義に考えられることもあり、慣用的な使われ方や技術分野による解釈の幅があるが、例えば照明工学の分野では、国際的には狭義の定義が採用されている。本稿で測定対象として取り扱っている光放射は、主として紫外域、可視域、近赤外域 (概ね 200 nm から 2500 nm の波長域) についてである。また本稿では、光放射と光を努めて使い分けて記載している一方で、例えば「光源」、「分光」、「発光」などの一般に確立した用語もあり、それらはそのまま使用している点にご留意頂きたい。

光放射は電磁放射であり、自由空間を伝搬する。この伝搬されるエネルギーを基準に光放射を定量化したものが放射量であり、放射量に対する測定を放射測定 (Radiometry) と呼ぶ。放射量において最も基本的な量は放射束である。放射束は、放射によって単位時間当たり伝搬するエネルギー、言い換えると放射パワーを表す量であり、 W ($= \text{J s}^{-1}$) の単位で表される。

自由空間を伝搬する光放射の計測は、空間、時間、波長の 3 つの要素を同時に加味する必要がある。レーザなどの単色性の極めて高い光放射を対象とする場合を除き、光放射の多くは、単色性に乏しく輝線ではない連続スペクトルを持っているため、波長の関数として捉える必要がある。つまり、単位波長あた

りの放射量を加味することが必要であり、これを分光放射量と言う。単位は波長 λ を nm 単位で表し $W\text{ nm}^{-1}$ とすることが多い。分光放射量を波長積分した結果が放射量を与える。放射束 Φ_e に対応する分光放射量は分光放射束 $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ であり、両者は、以下で示される微分・積分の関係で表される。

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

$$\frac{d\Phi_e}{d\lambda} = \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \quad (2)$$

その他の放射量は、放射束と幾何学的な量（面積、立体角など）および時間の組合せで定義される（2.2 参照）。

一方で、人間の視覚に対して光放射が与える影響に基づき光放射を定量化したものが測光量であり、測光量に対する測定を測光（Photometry）と言う。明るさなど、光が人間の視覚に与える影響の定量化は古くから人類にとって重要であり、度量衡の観点では、放射測定よりも測光の方が歴史は古い。初期の測光は、肉眼での直接的な比較測定（視感測光）に基づき行われていた。現代の測光は、光検出器に基づく物理測定により行われているが、視覚応答（感度）は人それぞれに異なることから、正確な測光を実現するために、光が人間に与える知覚を定式化する関数を内在させた体系が必要となる。このため測光においては、人間の目の感度を代表する特性を有する測光標準観測者を定義し、測光標準観測者の目の感度を、波長に対する2つの代表的な関数（分光視感効率関数）として定めている。

一つは明所視の標準分光視感効率関数 $V(\lambda)$ であり、これは、主に 5 cd m^{-2} 以上の輝度レベルの明所視（いわゆる明るい条件下）での測光に用いられる。厳密には、 $V(\lambda)$ は、錐体細胞が密である網膜の中心部分（中心窩）に光が結像した観察状態（中心視）に対応した分光視感効率関数であり、その時の視野範囲に由来して2度視野における標準分光視感効率関数とも称される。もう一つは暗所視の標準分光視感効率関数 $V'(\lambda)$ であり、 0.005 cd m^{-2} 以下の輝度レベルの暗所視（いわゆる暗い条件下）での測光に用いられる。暗所視条件は、網膜の桿体細胞に由来した分光視感効率関数であり、中心窩には殆ど分布していないため、暗所視条件は網膜の中心から外れた領域を使った観察状態に対応したものであり、これを周辺視と呼ぶ。

図1に、明所視および暗所視の標準分光視感効率関数 $V(\lambda)$ および $V'(\lambda)$ を示す。人間の眼が感度を持つ波長は 360 nm から 830 nm の可視域であり、これが

可視放射の定義波長範囲になっている。 $V(\lambda)$ の値は可視域において ($V'(\lambda)$ は 380 nm から 780 nm の範囲で) 1 nm 刻みの数表として定義されている。その間の波長での値が必要な場合は、線形補間によって求める。 $V(\lambda)$ は、明るさの知覚を与える網膜内の視細胞のうち錐体細胞の応答に起因するものであり、波長 555 nm で最大値となる。それ以外の波長では、 555 nm から離れるにつれて値が0に近づく釣りの関数形状である。波長 555 nm の光は緑色の知覚を与えるため、人の眼は緑色の光に対する感度が最も高く、青色や赤色に対する感度が低いことになる。一方で、 $V'(\lambda)$ は視細胞の中の桿体細胞の寄与に基づくものであり、ピーク波長が短波長側にシフトし、 507 nm でピークを与える。

$V(\lambda)$ および $V'(\lambda)$ に基づき、放射量と測光量の間に関係を確立する方法は、国際照明委員会 (CIE) において長年検討されてきたものであり、現在、CIE 物理測光システムとして標準化されている⁴⁾。CIE は当時の研究成果の集大成として、1924年に明所視の分光視感効率 $V(\lambda)$ の値を初めて定めた⁵⁾。その後、内外挿や平滑化などの諸検討を経て、1972年に国際度量衡委員会 (CIPM) で採択された⁶⁾。同様に、暗所視の分光視感効率 $V'(\lambda)$ は1951年にCIEで勧告され⁷⁾、1976年にCIPMで採択された⁸⁾。このようにして確立した $V(\lambda)$ と $V'(\lambda)$ が、現在の測光体系の根幹を支えており、1979年以降、カンデラの定義に基づく各種測光量および放射量の体系の根幹となっている。

明所視条件において、前述の放射束 Φ_e に対応する測光量は光束 Φ_v (単位:ルーメン lm) であり、CIE 物理測光システムでは分光放射束 $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ と $V(\lambda)$ を用いて、

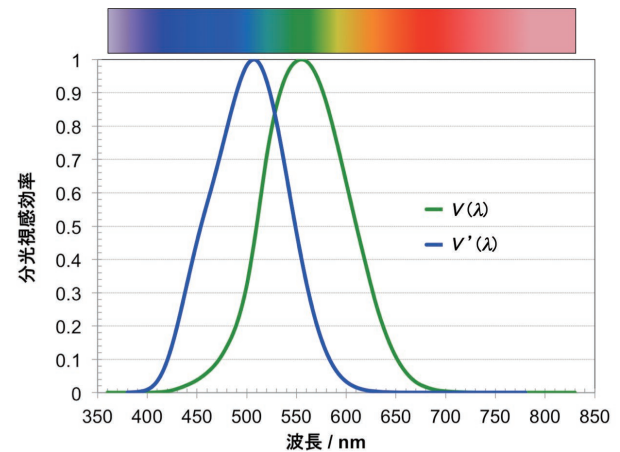


図1 標準分光視感効率関数 $V(\lambda)$ および $V'(\lambda)$

$$\Phi_v = K_m \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3)$$

で与えられる。ここで K_m は最大視感効果度である。 K_m の値はカンデラの定義から、 $K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$ となるが、これについては3.1で述べる。同様に、暗所視条件について

$$\Phi'_v = K'_m \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

という関係が成立する。ここで Φ'_v の単位は同じくルーメン (lm) であり、(3)式で示した光束と等価な関係にあるが、導出に用いた分光視感効率関数の違いを明示するため暗所視光束と称する。また $K'_m = 1700 \text{ lm W}^{-1}$ と与えられる。(3)式で導かれた Φ_v についても、必要に応じて明所視光束と称する場合もある。また、(3)式および(4)式から分かるように、測光量では加法性が成立する。

2.2 測光量および放射量の代表的な量および単位

2.1では、単位上もっとも単純な放射束 Φ_e を出発点に、類似次元の単位を持つ分光放射束 $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ と光束 Φ_v の関係を取り上げたが、光放射の空間伝搬特性は多様であるため、上記の量を面積や立体角で規格化した量が、光放射の定量化において必要不可欠である。表1に主要な放射量および対応する分光放射量、測光量ならびにそれらの単位を示す。以下、放射量を例として、放射束から各量がどのように定義上、組み立てられるかについて示す。分光放射量、測光量についても同様の考え方で各量が定義されている。

放射照度 E_e は、ある面要素 dA に入射する放射束の面積密度であり、次式で表される。

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (5)$$

放射強度 I_e は、点光源（照射を受ける面までの距

離に比べて大きさが無視できる程度に小さい光源）への近似ができる場合のみ定義可能な量で、光源から張られる円錐の立体角要素 $d\Omega$ 内を伝播する放射束の密度として、次式で表される。なお、本稿の主題であるカンデラ (cd) は、放射強度に対応する測光量である光度の単位である。

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (6)$$

放射発散度 M_e は、表面のある点を含む面積要素 dA から放射される放射束の面積密度であり、次式で表される。(5)式と同じ表式となるが、対象としている場所が異なっている点に注意が必要である。

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (7)$$

放射輝度 L_e はやや特異な量であり、光源の中心から張られる円錐の立体角要素内を伝搬する放射束について、光源の面積要素 dA に対する密度として定義される量である。実際の定義としては、光源を点と見なせず、その広がり方を考慮する必要がある場合の取り扱いとして、光源の面要素 dA から観測方向への放射強度 dI_e を考えた時の面積密度として、次式で表される。

$$L_e = \frac{dI_e}{dA \cdot \cos\theta} \quad (8)$$

ここで、 θ は光源の面上の法線と観測方向との角度である。

放射発散度および放射輝度については、自発光の場合に加えて、反射体や透過体上の面要素および放射束が通過する仮想的な面（空間上の像面）にも適用可能であり、反射面、透過面、仮想面を二次光源と考える。また、光源から発せられる放射束を全空間について積分した量を全放射束と呼び、対応する分光放射量は分光全放射束、測光量は全光束である。さらに、表1で示した量に加えて、時間積分した量や、光子数で表現する量も定義されている⁹⁾。

光放射は、分光分布や空間伝搬特性が多様で、こ

表1 代表的な測光量および放射量とその単位、量記号

放射量			単位波長で規格化した放射量			対応する測光量		
名称	量記号	単位	名称	量記号	単位	名称	量記号	単位
放射束	Φ_e	W	分光放射束	$\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$	W nm^{-1}	光束	Φ_v	lm
放射照度	E_e	W m^{-2}	分光放射照度	$E_{e,\lambda}(\lambda)$	$\text{W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$	照度	E_v	lx (= lm m^{-2})
放射強度	I_e	W sr^{-1}	分光放射強度	$I_{e,\lambda}(\lambda)$	$\text{W sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$	光度	I_v	cd (= lm sr^{-1})
放射発散度	M_e	W m^{-2}	分光放射発散度	$M_{e,\lambda}(\lambda)$	$\text{W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$	光束発散度	M_v	lm m^{-2}
放射輝度	L_e	$\text{W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$	分光放射輝度	$L_{e,\lambda}(\lambda)$	$\text{W sr}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$	輝度	L_v	cd m^{-2} (= $\text{lm sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$)

れらが均一とみなせる場合は極めて少ない。そのため、最もシンプルな単位を持つ放射束のみで放射特性を評価することは現実的ではなく、表1に示した、放射束の波長微分や空間微分の単位次元を持つ量が必要となる。また、光源や検出器の受光面の応答が均一とみなせる場合も同様に少なく、光源と受光面に対して定義される量が必要になる。さらに、前述のとおり物理量としての放射量と、心理物理量としての測光量の双方が必要となる。これらが、測光・放射測定には非常に多くの測定量が存在し、各々の量が相互に組み合わされる複雑な体系となっている所以である¹⁰⁾。図2に、測光・放射測定における主要な測定量について、点光源から放射される放射束を起点に、面積や立体角を介して関連付けられる測定量の相互関係を模式的に示す。

3 光度の単位「カンデラ (cd)」

3.1 定数 (K_{cd}) に基づく新しい定義の表現

2018年11月の第26回国際度量衡総会 (CGPM) の決議に基づき、7つのSI基本単位の一つである光度の単位「カンデラ (cd)」は、2019年5月20日以降、以下の定義で与えられることとなった。

「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 $\Delta\nu_{Cs}$ に関連して定義される。」

ここで h はプランク定数、 c は真空中の光の速さ、 $\Delta\nu_{Cs}$ はセシウム 133 原子の外乱を受けていない基底状態の超微細構造遷移周波数である。さらに、上記の定義には以下の補足が付記されている。

「この定義は、周波数 540×10^{12} Hz の単色放射に

ついて $K_{cd} = 683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ という正確な関係を示唆している。この関係式を反転させると定義値 K_{cd} 、 h 、 $\Delta\nu_{Cs}$ と関連付けられたカンデラに関する正確な式が得られる。

$$1 \text{ cd} = \left(\frac{K_{cd}}{683} \right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1} \quad (9)$$

これは次と等しい。

$$1 \text{ cd} = \left(\frac{1}{(6.62607015 \times 10^{-34}) \times (9192631770)^2 \times 683} \right) (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd} \approx 2.614830 \dots \times 10^{10} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd} \quad (10)$$

この定義は、1カンデラは、所定の方向における、周波数 540×10^{12} Hz の単色放射を放つ光源の光度であり、その方向における放射強度が $(1/683) \text{ W sr}^{-1}$ であることを意味している。」

これにより、1979年の第16回CGPMでの決議以降有効であったカンデラの定義が廃止されたが、上記の補足説明の最終段落は、1979年のカンデラの定義そのものであり、今回のカンデラの定義改定は、視感効果度を定数とする表現への修正であり、技術的な内容を何一つ変えていない。

カンデラの定義は一見すると分かりにくい内容と映るが、これは、ある特定の周波数の光放射における放射量と測光量の関係を厳密に結びつけるものである。単色放射の波長ではなく周波数で表現しているのは、伝搬媒質の屈折率による影響を排除するためである。周波数 540×10^{12} Hz の単色放射は、標準大気¹¹⁾ (気温 15°C 、気圧 101325 Pa で、二酸化炭素の体積組成が 0.045% である乾燥空気) 中での波長が $\lambda_{cd} = 555.017 \text{ nm}$ となる。従って、カンデラの定義は、標準大気中において波長 555.017 nm で 1 W の放射束を持つ単色放射の光束が 683 lm であることと同義である。つまり、波長 555.017 nm で $(1/683) \text{ W sr}^{-1}$ の放射強度を持つ単色放射の光度は 1 cd となり、これは従前のカンデラの定義で用いられた表現である。

次に、カンデラの定義を周波数 540×10^{12} Hz の単色放射以外に拡張する考え方について述べる。測光量の導出には標準分光視感効率関数が必要であることは2章で述べたとおりであるが、 $V(\lambda)$ および $V'(\lambda)$ はそれぞれ $\lambda_m = 555 \text{ nm}$ 、 $\lambda'_m = 507 \text{ nm}$ でピーク (つまり値が1) となる。ここで、ある光放射について光束 Φ_v (暗所視では Φ'_v) を放射束 Φ_e で除した値 K (暗所視では K') を考えると、これらは $V(\lambda)$ および $V'(\lambda)$ の各ピーク波長で最大値を与え、これを最大視感効果度 K_m (暗所視では K'_m) と呼ぶ。また、カンデラの定義で用いられている、周波数 540×10^{12} Hz の単色放射に対する視感効果度 (定数) を特に K_{cd} と称する。 K_{cd} と最大視感効果度 K_m および K'_m との関係は下記の式で表される。

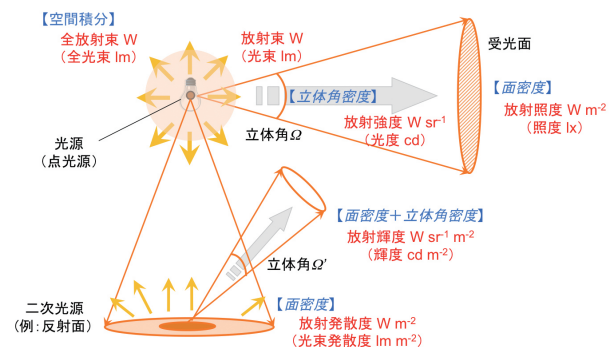


図2 点光源から放射される光放射とその主要な測定量との関係図 (括弧内は対応する測光量)

$$\begin{aligned}
 K_m &= K_{cd} \cdot \frac{V(\lambda_m)}{V(\lambda_{cd})} \\
 &= \frac{683 \text{ lm W}^{-1}}{V(555.017 \text{ nm})} \\
 &= 683.002 \text{ lm W}^{-1} \approx 683 \text{ lm W}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 K'_m &= K_{cd} \cdot \frac{V'(\lambda'_m)}{V'(\lambda'_{cd})} \\
 &= \frac{683 \text{ lm W}^{-1}}{V'(555.017 \text{ nm})} \\
 &= 1700.13 \text{ lm W}^{-1} \approx 1700 \text{ lm W}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

2.1 で示した、測光量と放射量の関係を表す (3) 式および (4) 式を用いて、ここに (11) 式および (12) 式で与えられる K_m および K'_m を適用することで、カンデラの定義に沿って、周波数 540×10^{12} Hz 以外の単色放射や、例えば白色光のような複数の波長成分を有する光源の光度を求めることができる。カンデラの定義で用いられている波長は、厳密には $V(\lambda)$ のピーク波長と一致しないため、 K_{cd} の値と K_m の値には僅かな差があるが、その差は一般的な測光標準の不確かさを考慮すると十分に無視し得る程度であり、実際の測光において、 $K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$ 、 $K'_m = 1700 \text{ lm W}^{-1}$ として差し支えない。

ここで、カンデラの定義において、2つの異なる分光視感効率関数を適用しているのに、なぜ一つの単位で運用できるのか、という点について補足したい。図3は、 $K(\lambda) = K_m \times V(\lambda)$ 、 $K'(\lambda) = K'_m \times V'(\lambda)$ で与えられる分光視感効果度 (lm W^{-1}) であり、これは各波長の単色放射 1 W あたりの光束の値に相当する。図3から分かるように、 $\lambda_{cd} = 555.017 \text{ nm}$ の波長で両者が 683 lm W^{-1} となるように規格化されており、これによって、測光量と放射量の関係は保持され、使用した分光視感効率関数を明示することで、基準となる明所視の標準分光視感効率関数および最大視感効

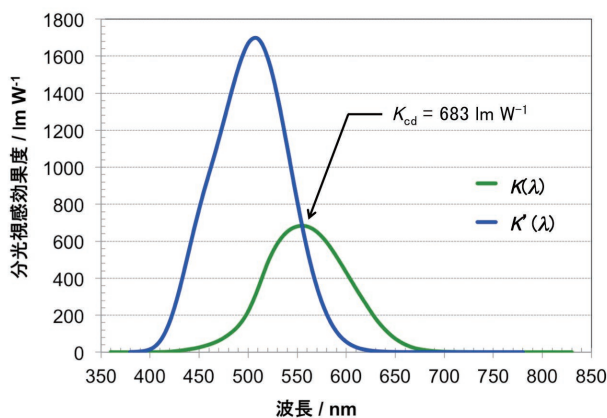


図3 カンデラの定義に基づく分光視感効果度 $K(\lambda)$ および $K'(\lambda)$

果度から導出される測光量と等価な測光量を与える。これは、(11) 式および (12) 式の最大視感効果度の導出原理そのものである。

3.2 カンデラの歴史

度量衡としての測光・放射測定は、1729年の光度計の開発に遡ることができる¹²⁾。この光度計は、2つの光源でそれぞれ照射された半透明のスクリーン上の輝度を肉眼で観測し、輝度が等しくなるように光源の距離を変えるものであり、逆二乗則の概念に基づく光度の比較測定の原型となるものである。その後、ランバートの余弦則¹³⁾などの測光の基本理論や、より精緻な視感測光器の開発が進められた。

測光単位は、原料、質量、消費速度が厳密に定められた標準蠟燭の仕様書が1860年に英国で設定され¹⁴⁾、その蠟燭1本あたりの水平光度を、光の強さの単位としたのが起源と言われている。この時に用いられた単位はCandle (燭) であった。その後、より安定な燃焼炎としてガス灯 (ペンタン灯など) が用いられるようになり、英米仏の3カ国により1909年、当時国ごとに独自運用されていた光度の単位統一が合意され、International Candle (国際燭) が設定された。日本で光度単位が定められたのは1911年であり、電気試験所がペンタン灯の標準状態における水平光度の1/10を1電試燭と規定したのが始まりである¹⁵⁾。しかし、燃焼炎に基づく標準は、国際的に合意された光度の単位を運用する上では、安定性や再現性に依然として多くの課題があった。

19世紀の中頃から既に、金属への通電に伴う発光を光度の基準とする研究が行われており、後に白金の凝固点における単位面積あたりの発光量に基づいて、光度の単位を定義する方法が提案された。この原理をもとに、1930年に米国国立標準局 (NBS) において、中心に細管構造を持つ酸化トリウムのルツボに白金を充填した構造を有する黒体放射炉が開発された¹⁶⁾。日本でも電気試験所が、同様の原理による白金点黒体標準器の開発に成功した¹⁷⁾。当時、黒体標準器を用いて一次標準を実現できた研究機関は日本を含む数カ国のみであり、そこで得られた測定データが、光度の一次標準として、白金の凝固温度における黒体の輝度を国際的に採用する根拠となった。

白金点黒体標準器に基づく新しい光度の単位 (ブージ・ヌーベル) の定義を採択する方針自体は、1937年の時点で固まっていたが、第二次世界大戦の影響により、1948年まで延期された。1948年の第9回CGPMにおいて、

「ブージ・ヌーベルの大きさは、白金の凝固温度における完全放射体の輝度が 1 cm^2 あたり 60 ブージ・

ヌーベルになるような量に相当する」
という 1937 年に提案された定義が採択され、さらに翌年、ブージ・ヌーベルに代わる新しい単位名称として Candela (カンデラ, cd) とすることが CIPM で承認された¹⁸⁾。(注:ブージ・ヌーベルは日本語では新燭と称されていた)

その後カンデラは、1960 年に国際単位系 (SI) 基本単位の一つとなり¹⁹⁾、定義の明確化のための見直しが提案され、

「カンデラは、 $101\,325\text{ N m}^{-2}$ の圧力の下での、白金の凝固点の温度における黒体の $1/600\,000\text{ m}^2$ の表面の垂直方向の光度である」

という定義に、1967 年の第 13 回 CGPM で修正された²⁰⁾。

白金点黒体標準器に基づくカンデラの定義は、酸化トリウムという放射性物質を使うことに起因する開発・運用の困難さや、国際比較での仲介器として用いられる標準電球と比較すると安定性が著しく悪いことなどから、実際には、カンデラを実現できる国家計量標準機関は極めて少なく、より実現性が高く高精度な実現が可能な方法について研究が進められた。その方向性は、「特定の光源に依存しないカンデラの定義の実現」であり、そのアプローチとして、電力置換型放射計を用いた放射束の絶対測定により、放射量と測光量の関係を求める方法が提案された。日本でも電子技術総合研究所 (電総研) が独自の電力置換型放射計を開発し、 $V(\lambda)$ に合致した分光応答度を有する放射計に基づく測定により、最大視感効果度 K_m を 683 lm W^{-1} と求めた²¹⁾。その後、測光・放射測定諮問委員会 (CCPR) において幾つかの国家計量標準機関から報告された K_m の測定結果を総合し、最良推定値として最終的に、当時の電総研が得た値と同じ値である $K_m = 683\text{ lm W}^{-1}$ が CIPM で採用された²²⁾。一連の研究成果を踏まえて、1979 年の第 16 回 CGPM において、新たなカンデラの定義として、

「周波数 $540 \times 10^{12}\text{ Hz}$ の単色放射を放出し、所定の方向におけるその放射強度が $1/683\text{ W sr}^{-1}$ である光源の、その方向における光度」

が採択された²³⁾。3.1 で述べたとおり、上記の定義を、その意味を全く変えることなく、普遍的な定数によって定義する表現へと修正したものが、最新のカンデラの定義である。

最新の定義を含め 1979 年以降のカンデラの定義の基本的考え方は、特定の単色放射に対して、放射束と光束の間に成立する一定の数値関係を定義することであり、この点からは、光束を基本単位とする方が直感的である。また、2.1 および 2.2 で述べたとおり、測光量および放射量の体系上では放射束が最も単純

な単位であり、放射束を基本単位とする考え方も成り立つ。しかしながら、冒頭に述べたとおり、視覚刺激を定量化する手段として人間の眼が光源を直視した状況をモデル化した測定に端を発し、脈々と受け継がれてきた光度という量が我々の生活に与える影響は極めて大きく、その実用上の意義、歴史的な蓄積などを勘案し、単位系の組み立てが改良されることによる混乱を避ける意味も含め、カンデラが現在も SI 基本単位の一つとして維持されていることは、測光・放射測定に係る単位を考える上で忘れてはならない、重要な側面である。

3.3 カンデラの定義に基づく測光量の考え方

1979 年にカンデラの定義が決議された時点では、国際単位系 (SI) の枠組みの中で、カンデラやルーメンなどの測光量の単位を与えることができる量は、波長に対する重み付けの関数として 2.1 で示した $V(\lambda)$ および $V'(\lambda)$ を用いた場合に限られていた。一方で、CIE は人間が持つ複雑な視覚効果に関する多くの研究成果をまとめており、 $V(\lambda)$ や $V'(\lambda)$ とは異なる分光視感効率率も勧告している。こうした分光視感効率率関数に対する重み付けを加味した量を SI の中で取り扱う必要性は、1979 年の決議の中でも謳われている。

カンデラの実現方法は、CCPR が作成した “*Mise en pratique*” 文書²⁴⁾にまとめられているが、より具体的な SI での測光量の単位の運用について定めた通則文書²⁵⁾が CCPR と CIE の合同文書として出版されている。この通則文書の改訂版 (2019 年 5 月以降に出版予定) では、 $V(\lambda)$ および $V'(\lambda)$ 以外の分光視感効率率関数に対象を拡張した、測光量の取り扱いが記載されることになっている。さらに、測光通則の改訂版の内容を踏まえて、近い将来、CIE 物理測光システムを定めた国際規格⁴⁾も改訂される予定である。

拡張された取り扱いの代表例は、明所視と暗所視との間の輝度レベルに相当する薄明視領域での分光視感効率率の取扱いについてである。CIE は、長年の研究成果をまとめ 2010 年に CIE 薄明視測光システムを提唱した²⁶⁾。これは、網膜中の錐体細胞と桿体細胞の双方が、輝度レベルに応じて一定の割合で寄与する視覚モデルに基づいており、 0.005 cd m^{-2} から 5 cd m^{-2} の間にある薄明視領域での分光視感効率率関数を、下記のように輝度レベルに応じて $V(\lambda)$ と $V'(\lambda)$ の線型結合によって、

$$V_{\text{mes};m}(\lambda) = \frac{1}{M(m)} \{m \cdot V(\lambda) + (1-m) \cdot V'(\lambda)\} \quad (13)$$

と与えるものである。ここで、 m は順応係数、 $M(m)$ は規格化関数で $V_{\text{mes};m}(\lambda)$ が 1 になるように選ばれる。順応係数 m は、順応輝度レベルに応じて逐次計算に

より導かれる²⁶⁾。

薄明視の分光視感効率関数 $V_{mes; m}(\lambda)$ に基づく測光量は、3.1 と同じ考え方にに基づき、例えば薄明視光束 $\Phi_{mes; m}$ は、

$$\Phi_{mes; m} = \frac{K_{cd}}{V_{mes; m}(\lambda_{cd})} \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V_{mes; m}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (14)$$

と導出され、単位はルーメン (lm) である。ここで、 $\Phi_{e,\lambda}$ は分光放射束、 $\lambda_{cd} = 555.017 \text{ nm}$ である。図 4 に薄明視領域における順応係数 m に依存した分光視感効率度の変化を示す。3.1 で示した考え方と同様に、 $\lambda_{cd} = 555.017 \text{ nm}$ で $K_{cd} = 683 \text{ lm W}^{-1}$ に一致するように規格化されており、各々の m の値に対応する分光視感効率度のピークが測光量の導出に必要な最大視感効率度を与える。ここで、CIE 薄明視測光システムは、周辺視における視作業性に関する実験に基づき導かれた概念であるため、中心視の条件には適用できない点に注意が必要である。中心視に対応した測光量の導出には、輝度レベルによらず $V(\lambda)$ が用いられる。

このほか、図 5 に示す、前述の中心視より広い視角を加味した 10 度視野分光視感効率率 $V_{10}(\lambda)$ ²⁷⁾ は、特に色の評価に関連して用いられているが、上記と同様な考え方で測光量の単位が与えられ、測定量は 10° 光束 (他の測光量も同様) と称する。さらに研究用途に限定すると、色覚細胞の波長応答特性の研究に基づき波長 460 nm より短波長域の $V(\lambda)$ の値を見直した分光視感効率関数 $V_M(\lambda)$ ²⁸⁾ や (図 5 参照)、CIE が勧告したその他の分光視感効率関数²⁹⁾ も、加法性が成立する場合、使用した関数を明示することを条件に、同様の扱いが認められている。

ただし、網膜応答に由来する刺激であっても、非視覚的效果に対して測光量の単位は使用できない。これは測光・放射測定分野においては、視覚刺激に由来する量のみが、その重要性を鑑み特

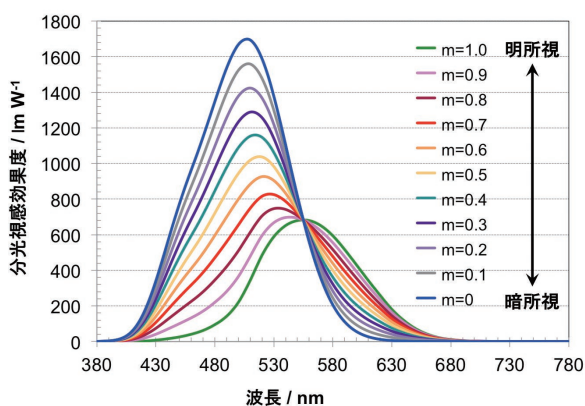


図 4 薄明視測光システムにおける分光視感効率関数

別に SI の中で固有の単位を与えられていると言うことである。光放射が与える光化学的および光生物学的作用は数多く存在し、その中には人体に大きな影響を与えるものも少なからず含まれている (例えば、紅斑、青色光網膜傷害、網膜熱傷害など³⁰⁾) が、こうした光化学的・光生物学的な作用量を光放射の観点で定量化する際には、分光放射量を対象となる効果 (の波長依存性) を与える作用関数で重み付けした放射量として表現する。例えば次式のように、作用関数 $Z(\lambda)$ を加味した放射束 $\Phi_{e,z}$ を求める場合には、分光放射束を $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ とすると、

$$\Phi_{e,z} = \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot Z(\lambda) \cdot d\lambda \quad (15)$$

と表され、単位は W である。放射量の単位を用いることから、特に異なる作用関数を用いた結果を比較する際には、使用した作用関数を明示することが不可欠である。

4 日本の測光・放射標準

4.1 カンデラの実現方法

4.1.1 カンデラの定義と実現

かつてのカンデラの定義は、白金点黒体標準器を実現しない限り自ら単位を設定できず、その実現が極めて困難であったのに対し、現行の定義では、特定の周波数の光放射に対する放射量と測光量の数値関係が根拠となっており、一次標準としての実現方法の選択肢が増え、不確かさの低減の可能性が増したことに大きな意味がある。ここでは、カンデラの定義に基づき光度の単位を実現する方法について説明する。分光視感効率関数を加味した心理物理量という SI の中での得意な位置付けを持つこともあり、現行の定義内容と相まって、異なる単位を経由する一見複雑な実現方法となる点が特徴である。

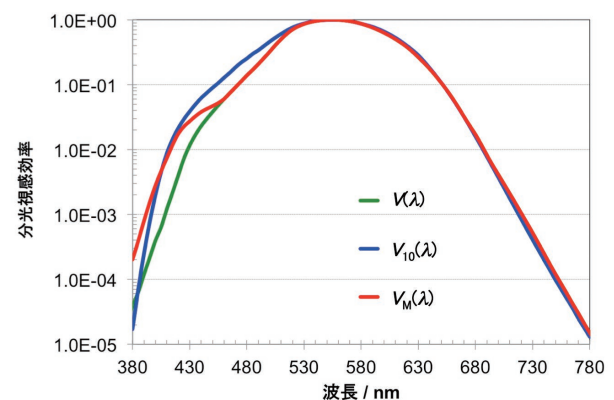


図 5 CIE 物理測光システムで使用されるその他の分光視感効率関数の例 (縦軸は対数表示)

4.1.2 極低温放射計による放射束の絶対測定

カンデラの定義に基づき光度の単位を実現する方法として様々な方法が研究されてきたが、主流となっているのは、電気標準に基づく電力との比較により放射束を決定する手法で、1990年代中頃から液体ヘリウム温度の環境下で熱型の光吸収体を動作させる極低温電力置換型絶対放射計（以下、極低温放射計）³¹⁾が用いられている。日本では1994年に電総研(当時)が極低温放射計を導入し、現在も測光・放射測定の一次標準として運用されている³²⁾。

図6に極低温放射計の外観および受光キャビティの概略を示す。液体ヘリウムタンクの内部に受光キャビティが設置されており、外部から放射束と電力を交互に与えることができる。入射した放射束 Φ_e (W)の吸収に伴う受光部の温度上昇と、直流電流印による電力 P (W)による受光部の温度上昇とが等しくなるように、与える電力を調整することにより、当該電力を電気標準にトレーサブルになるように決定すれば、放射束を高精度に校正可能である。

極低温放射計では、入射放射束と電力の等価性の成立が前提であり、そのために、極低反射体をアスペクト比の高い円筒形状の内面に施したキャビティ構造を有する光吸収体を用いることで99.99%を超える高い吸収率を実現している。さらに、熱絶縁性の高い超伝導材をヒータ配線に用いることで、給電回路での電力損失を抑えつつ、電力を与えるためのヒータの発熱がリード線を通して受光キャビティ外に流出する熱損失を抑えている。さらに、液体ヘリウム

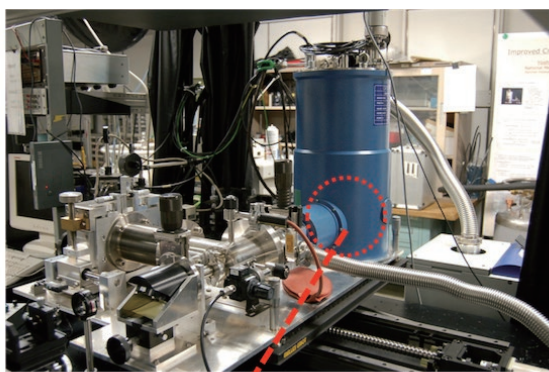


図6 極低温放射計の外観（上）および受光キャビティの概略（下）

温度で動作させることにより、周辺から光吸収体への熱放射の影響も抑制されるほか、極低温環境下では物質の比熱が小さくなるため温度測定の感度向上も実現している。

4.1.3 光放射検出器の分光応答度校正

4.1.2に基づき絶対校正された放射束 Φ_e を持つレーザ放射を、光放射検出器（以下、検出器の略）に入射させてその出力電流を測定することにより、分光応答度 (A/W) を求めることができる。分光応答度は検出器への入射放射束に対する感度を表す量であり、分光応答度が値付けされた検出器を用いることで、様々な光源の測定が可能になる。

しかし、極低温放射計に基づき決定される放射束 Φ_e は、測光・放射測定の中で最も不確かさが小さく、0.01%のオーダも実現可能であるが、前述のとおり極低温放射計の動作には特殊な条件が必要であるため、測定対象となる放射束には、高い指向性およびビームクオリティが求められるため、実質的にレーザからの光放射にほぼ限られてしまう。さらに、測定可能な入射放射束の範囲（パワーレベル）にも制限がある。このため、検出器の分光応答度は、特定の波長、特定のパワーレベルでしか得られない。このため、測光・放射測定で一般に対象とするような、多様な分光分布を有する光源の測定に供するためには、放射束レベルの拡張および波長範囲の拡張が必要となる。

限られたパワーレベルでの校正結果を範囲外に拡張するためには、使用する検出器の応答がどの程度のパワーレベルまで直線的な振る舞いをするか（応答非直線性）を知ることが必要不可欠である。図7に重畳法に基づく応答非直線性測定の概略を示す³³⁾。重畳法では、放射束のほぼ等しい2つの光放射 (Φ_{e1} および Φ_{e2}) を交互に入射させ、検出器からの出力信号 S_1 、 S_2 を測定する。次に、2つの光放射を同時に入射 ($\Phi_{e1} + \Phi_{e2}$) させた際

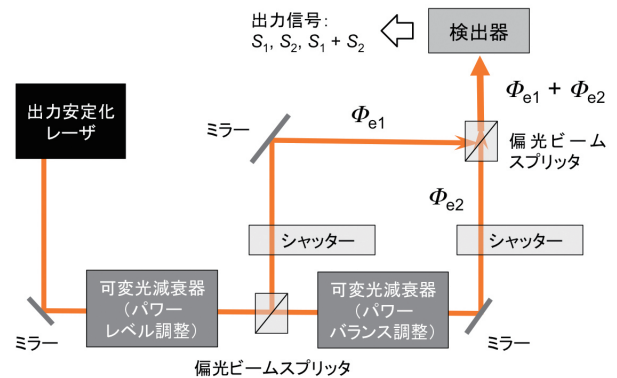


図7 重畳法による応答非直線性の測定

の出力信号 S_{1+2} を測定し、これらの比較から、放射束と検出器出力の間の直線性の程度が評価される。このとき、検出器の応答非直線性 F_{NL} は、

$$F_{NL} = \frac{S_{1+2}}{S_1 + S_2} - 1 \quad (16)$$

で与えられる。(16)式に基づく評価を、パワーレベルを変えながら繰り返すことで、各パワーレベルでの応答非直線性 F_{NL} が得られる。特定のパワーレベルでの分光応答度の校正結果に k_{NL} を加味することで、広いパワーレベルへと測定可能範囲を拡張することができる。産業技術総合研究所（産総研）では、可視・近赤外域のレーザ波長点において7桁超のパワーレベルで応答非直線性の評価が可能³⁴⁾である。

分光応答度の校正対象としては、シリコンフォトダイオードが用いられることが多い。特に、複数のシリコンフォトダイオードを内蔵し、互いに表面反射を入射させるような三次元配置とすることで、検出器全体としての反射率をゼロに近づけ、可視波長域では外部量子効率がほぼ100%となるように設計されてトラップ型光検出器（図8(a)）が、理想的な特性を有する検出器として、測光・放射測定における仲介標準器として用いられている³⁵⁾。

波長範囲の拡張については、シリコンフォトダイオードの場合、可視域における分光応答度の理論モデルの研究が成熟しており^{36),37)}、レーザ波長点に対して得られた離散的な分光応答度をモデル関数に最少二乗フィッティングすることで、可視域の全域に渡つ

て分光応答度を求めることができる。さらに、モデル関数に基づく方法に加えて、ランプ等の白色光源と分光器を組み合わせた、ほぼ単色で平行な光放射を発生可能な分光光源装置を用いて、極低温放射計を用いてレーザ波長点で分光応答度が校正されたトラップ型検出器を、応答特性の波長依存性が極めて少ない検出器（例えば熱型検出器）と比較することで、レーザ波長点以外での分光応答度を導くことができる。熱型検出器に基づく方法は、特に、モデル関数の適用が困難な紫外域および近赤外域への波長範囲の拡張でも用いられる。

このようにして分光応答度の校正波長範囲が拡張されたトラップ型検出器は、分光応答度標準として、比較測定に基づく分光応答度の校正基準として用いられている。なお分光応答度の比較測定は、分光光源装置から発せられる単色放射を用いて、出射波長を選択してトラップ型検出器と校正器物とに交互に照射し、その出力信号を比較測定することで行われる。

4.1.4 光度標準の設定

4.1.3に基づき、可視域において分光応答度が校正された検出器（シリコンフォトダイオード）が得られる。これに面積既知の精密アパーチャと標準分光視感効率関数 $V(\lambda)$ に近似した応答を得るための光学フィルタ（ $V(\lambda)$ フィルタ）を組み合わせて、測光用の標準検出器（ $V(\lambda)$ 受光器）を構成する（図8(b)参照）。この時、 $V(\lambda)$ 受光器の基準面（精密アパーチャのエッジ部に相当）の照度 E_v (lx) に対応する応答（出力電流）を i_0 (A) とすると、 $V(\lambda)$ 受光器の照度応答度 s_v (A/lx) は、

$$s_v = \frac{i_0}{E_v} = \frac{A \int_0^\infty \Phi_{rel,\lambda}(\lambda) \cdot s'(\lambda) \cdot d\lambda}{K_m \int_0^\infty \Phi_{rel,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (17)$$

と表される。ここで、 $s'(\lambda)$ は分光応答度標準に基づいて校正された $V(\lambda)$ 受光器の分光応答度 (A/W)、 A は、精密アパーチャの面積 (m^2)、 $\Phi_{rel,\lambda}(\lambda)$ は測定対象の相対分光分布（分光放射束 $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ の相対値）、 K_m は最大視感効果度である。(17)式の分母は、測定対象から精密アパーチャ面上に放射される光束 (lm) に相当し、それを精密アパーチャの面積で除することで照度 (lx) となる。分子の積分記号の中は、同じ光束に対する $V(\lambda)$ 受光器からの出力電流 (A) である。

2.2で述べたとおり、照度はある面要素に入射する光束の面密度であり、直接には光源の放射特性に関する情報を与えないが、光度 (cd) が点光源を前提に定義されている量であることから、照度 (lx) との間に、

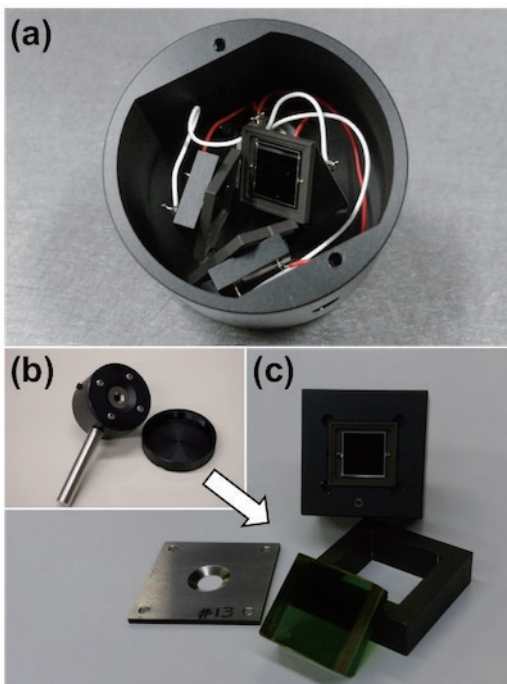


図8 (a) トラップ型検出器（三素子反射型）、 $V(\lambda)$ 受光器の (b) 外観および (c) 構成

$$E_v = \frac{I_v \cdot \cos\theta}{d^2} \cdot \Omega_0 \quad (18)$$

という関係が成立する。ここで d は光源の発光点から $V(\lambda)$ 受光器の基準面までの距離（測光距離 m）、 Ω_0 は単位立体角（1 sr）、 θ は光軸と受光器法線との角度である。(18) 式の関係 inverse square law と言い、測光・放射測定分野において広く用いられる基本法則の一つである。(17) 式および (18) 式に基づき、 $V(\lambda)$ 受光器で得られた照度の測定値から、対象光源の光度が求められる。

産総研におけるカンデラの実現は、図 9 に示すように、照度応答度 s_v (A/lx) が値付けされた $V(\lambda)$ 受光器 (図 8 (b)) を用いて、光度標準電球 (図 10) によって与えられる照度を、所定の測光距離 d (m) で測定することによって行われている³⁸⁾⁻⁴⁰⁾。

1879 年のエジソンによる白熱電球の発明以降、性

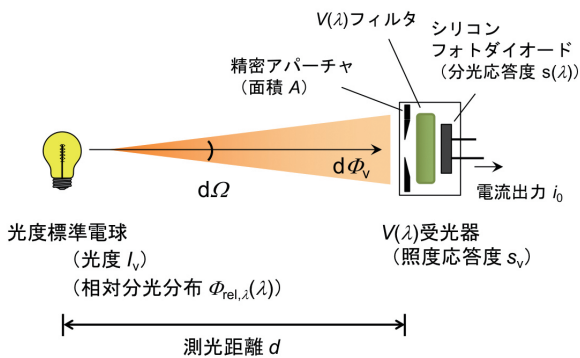


図 9 $V(\lambda)$ 受光器に基づくカンデラの実現

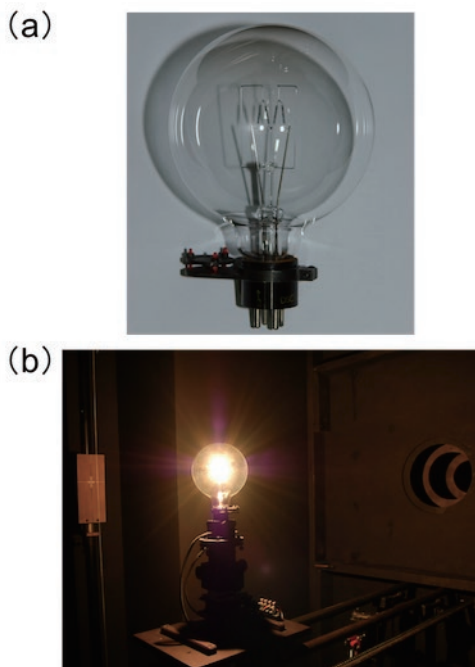


図 10 光度標準電球の (a) 外観、および (b) 測光ベンチ上での点灯時の様子

能改善や特性評価が順次進められ、20 世紀初頭に炭素フィラメント電球が、1930 年頃にタングステンフィラメント電球が光度値を維持する標準電球として用いられるようになった。日本は、高性能な標準電球の開発にこれまで大きな貢献を果たしてきており⁴¹⁾、現在でも、光度をはじめとする主要な測光・放射標準を維持し、比較測定における仲介標準器として広く使われている。図 10 は産総研で用いられている光度標準電球 (55 V-330 W 型) である。

現在、日本の光度標準の相対拡張不確かさ ($k=2$) は 0.58 % である。また、標準値の国際整合性については、基幹比較 (CCPR-K3.a) において、国際参照値 (Key Comparison Reference Value: KCRV) に対して -0.09 % という良好な結果が得られている⁴²⁾。

(17) 式の照度応答度の算出で用いる相対分光分布には、一般照明用のタングステンフィラメント電球の相対分光分布を代表する CIE 標準イルミナント A の値が用いられる。これは、約 2 856 K の温度における黒体放射に由来する⁴³⁾。このため、カンデラの実現に用いられる光度標準電球は、CIE 標準イルミナント A に近似した相対分光分布を有する必要があるが、実際には僅かな差が生じる。また、一般の光源の測光においては、多くの場合、光度標準電球とは異なる相対分光分布を持つ光源が測定対象となる。測光に用いる $V(\lambda)$ 受光器は、理想的には標準分光視感効率関数 $V(\lambda)$ と相似形の分光応答度を有することが求められるが、光学フィルタとシリコンフォトダイオード等の検出器の組み合わせでこれを実現することは極めて困難であり、一部の波長域で僅かな差を生じる。この分光応答度の差は、上記の相対分光分布の差を反映して測光誤差を与えるため、下記で求められる色補正係数 C を考慮する必要がある。

$$C = \frac{\int_0^\infty \Phi_{rel,s,\lambda}(\lambda) \cdot s'(\lambda) \cdot d\lambda \times \int_0^\infty \Phi_{rel,t,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{rel,s,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \times \int_0^\infty \Phi_{rel,t,\lambda}(\lambda) \cdot s'(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (19)$$

ここで、 $\Phi_{rel,s,\lambda}(\lambda)$ 、 $\Phi_{rel,t,\lambda}(\lambda)$ はそれぞれ光度標準電球と被校正対象光源の相対分光分布、 $s'(\lambda)$ 、 $V(\lambda)$ はそれぞれ $V(\lambda)$ 受光器の相対分光応答度と標準分光視感効率関数である。

4.2 その他の主要な測光・放射標準

4.2.1 標準量の組み立て・拡張

光放射の測定では、波長、空間、時間の広がりや考慮した様々な測定量が必要であり、それらが相互に関連して、組み立て量の関係を構築している。各々の組み立て量の実現には、上記の 3 要素を加味した拡張が必要であり、カンデラから都度、これらの単位を組み立てることは実用的見地から得策ではない。

また、パワーレベルなどの違いも考慮する必要がある。このため、測光・放射測定で必要とされる主要な測定量について、対応する標準を設定し、仲介標準器に値を維持し、校正体系を構築することが重要である。以下、主要な測光・放射標準の実現に関して述べる。

4.2.2 黒体放射炉に基づく分光放射標準

分光放射量は波長微分に相当する量であるため、検出器に値づけられた分光応答度からこれを求める場合には、所定の波長前後の狭い波長幅の放射のみを切り出し、波長幅 0 の極限での (放射束/波長幅) を求める必要があるが、条件に合致した理想的な特性を持った検出器の実現は現実的でない。このため分光放射量に関する測定の基準としては、 nm^{-1} の次元をもつ標準が必要であり、多くの場合、黒体放射が用いられている。黒体放射からの分光放射輝度 $L_{e,\lambda}(\lambda)$ は、プランクの放射則に基づき黒体の温度を決定する事で一意に決まり⁴⁴⁾、以下の式で表わされる。

$$L_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (20)$$

ここで h はプランク定数 (J s)、 c は光の速度 (m s^{-1})、 k はボルツマン定数 ($\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$)、 T は黒体の温度 (K) である。図 11 (a) は、(20) 式から導かれる分光放射輝度を示しており、黒体の温度が高いほど分光放射輝度のピーク強度は増大し、かつピーク波長は短波

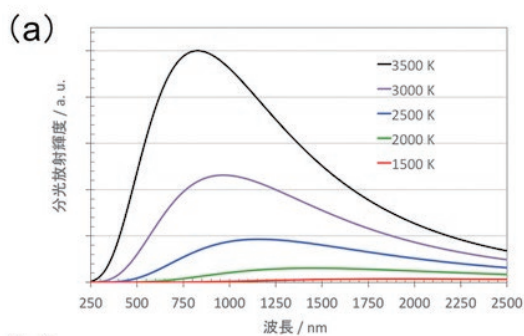


図 11 (a) 温度の異なる黒体からの分光放射輝度の比較、および (b) 高温黒体放射炉の外観

長側にシフトし、測光・放射測定で良く用いられる紫外・可視・近赤外域の測定に適した条件に近づくことが分かる。

図 11 (b) に、産総研が保有する高温黒体放射炉の外観を示す。炉心部分に開口が狭く奥行きの高い高アスペクト比な構造を有する黒鉛製の放射体が設置されており、 $3\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 近傍までの温度上昇が可能である。

分光応答度が校正された検出器を用いた、国際温度目盛 (ITS-90) による銅の凝固点などの温度既知の定点黒体放射炉との比較により、(20) 式に基づき高温黒体放射炉の温度を決定できる⁴⁵⁾。そして、黒体放射炉の温度とプランク放射則により、分光放射照度標準に代表される、紫外・可視・近赤外の波長域での分光放射量の一次標準となる。

4.2.3 配光測定に基づく全光束、分光全放射束標準

全光束は、全空間に放射される光束すべてを測定対象とした、光源の特性を表す基本的な測光量であり、単位はルーメン (lm) である。高精度な全光束の測定値は、省エネルギー性能の指標となる光源効率 (ある光源に投入した電力に対する全光束の比) を評価する際に必要不可欠である。

全光束は、1) 光源を中心とした球面上における照度の積分値、または 2) 立体角 $4\pi \text{ sr}$ にわたる光源からの光度の積分値、という形で表現される。ここで、図 12 (a) のような光源の中心から一定距離の仮想球

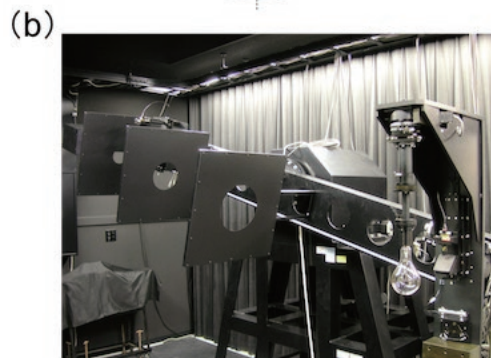
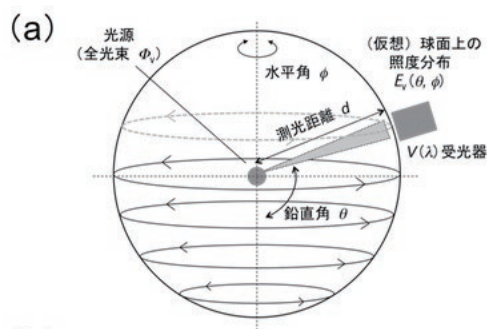


図 12 (a) 照度の空間積分のイメージ、および (b) 配光測定装置の外観

面を考え、その球面上での照度分布を $E_v(\theta, \varphi)$ とすると、球面上の微小面積 dS に入射する微小光束 $d\Phi_v$ を用いて、光源の全光束 Φ_v は、

$$\begin{aligned} \Phi_v &= \int_S E_v \cdot dS \\ &= d^2 \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} E_v(\theta, \varphi) \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (21) \end{aligned}$$

と照度の積分の形で与えられる。ここで、 d は光源から測定点までの距離 (m) である。また、(21) 式は、逆二乗則を用いて、測定対象となる光源の光度を全空間 (4π sr) の方向で積分する表式に変換することもできる。言い換えると、全光束は、光度または照度から導かれる組み立て量と位置付けられる。

(21) 式の原理の実現には、配光測定装置と呼ばれる、 $V(\lambda)$ 受光器を空間的に挿引することで、測定対象光源によって与えられる照度分布 (または測定対象光源の光度の空間分布) を求める装置が用いられる。図 12 (b) に、産総研が保有する配光測定装置^{46),47)}の外観を示す。この配光測定装置はアームの一端に測定対象光源 (例: 全光束標準電球) を、もう一方の終端部に $V(\lambda)$ 受光器を設置する。光源中心から $V(\lambda)$ 受光器の基準面までの距離 (測光距離) は 2.7 m である。アームの回転によって $V(\lambda)$ 受光器が光源を中心とした鉛直面内を移動するほか、独立した別の回転機構により、光源が自身の中心軸周りを水平回転する。また、光源設置部には、回転アームの鉛直回転に同期した逆回転 (補正回転) の機構があり、光源の姿勢は常に鉛直下向きで一定に保たれる。これにより、光源を中心とした半径 2.7 m の球面状の照度分布が計測可能である。(21) 式に基づいて、水平角周りの対称性や所定の角度ステップ内での一様性を仮定し、 $V(\lambda)$ 受光器によって離散的に得られた各空間位置での照度値を空間積分することで全光束が導出される。

これまで、白熱電球に代表される従来光源の全光束測定では、標準光源と被校正光源の相対分光分布の差異が比較的小さいことを前提として、4.1.4 で示した色補正係数を加味した校正が主流であった。しかし、従来光源に代わり普及が急速に進んでいる LED 照明では、素子や蛍光体の組み合わせに依存して多種多様な相対分光分布の製品が存在し、色補正係数のみでは正確な測定が困難である。こうした状況下では、分光測定に基づく分光全放射束標準が必要となる。

分光全放射束標準 (W nm^{-1}) は、全光束標準と分光放射照度標準を組み合わせることで実現されている⁴⁸⁾。具体的には、 $V(\lambda)$ 受光器の代わりに分光放射計を配光測定装置に設置し、分光放射計の応答関数

を、分光放射照度標準に基づき校正する。この校正結果に基づく配光測定を行うことで、測定対象光源によって生ずる相対分光放射照度 $E_{\text{rel},\lambda}(\lambda)$ の空間分布が得られるので、それらを (21) 式と同様の原理で空間積分することで、相対分光全放射束 $\Phi_{\text{rel},\lambda}(\lambda)$ となる。

分光全放射束 $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ と相対分光全放射束 $\Phi_{\text{rel},\lambda}(\lambda)$ との関係は、係数 a を用いて、

$$\Phi_{e,\lambda}(\lambda) = a \times \Phi_{\text{rel},\lambda}(\lambda) \quad (22)$$

と表されるので、分光全放射束の絶対値を求めるためには、係数 a が分かれば良い。ここで、測定対象光源の全光束 Φ_v と、相対分光全放射束 $\Phi_{\text{rel},\lambda}(\lambda)$ の関係を考えると、(3) 式に基づき、

$$a = \frac{\Phi_v}{K_m \int_0^\infty \Phi_{\text{rel},\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (23)$$

となり、(22) 式と (23) 式から分光全放射束標準が実現される。

4.2.4 カロリメータに基づくレーザパワー標準

測光量および放射量の体系上、最も単純な単位を持つ量は放射束 Φ_e で、その単位は W である。前述の通り、測光・放射標準を構築する上において、放射束の絶対測定技術の果たす役割は極めて大きく、現行のカンデラの定義に基づく実現方法の第一ステップとなっている。こうした重要性に加えて、単色性が高く、位相・偏光・放射の広がりなどの波に関わる諸特性が制御された光源であるレーザに対する高精度な放射束測定は、レーザの最も重要な性能評価指標を得る手段として必要不可欠である。しかし、4.1.2 で示した極低温放射計は、レーザからの放射束 (レーザパワー) の絶対測定の用に供されるものであるが、測定可能な入射放射束レベルに制限がある。

そこで、極低温放射計では対応が難しい高いパワーレベルに対応したレーザパワー測定を可能とするための一次標準として、常温型の電力置換式熱型検出器 (レーザカロリメータ) が用いられる。図 13 に産総研がレーザパワー測定の一標準として用いている、円筒型吸収体を持つ等温制御型レーザカロリメータ⁴⁹⁾の外観および測定原理の概要を示す。

図 13 では、熱電冷却素子に加える冷却パワーとヒータに加える電力のバランスを取り、受光部を等温制御している。この状態でレーザを入射すると、受光部での光吸収により受光部の温度が上昇して等温状態が崩れるが、ヒータに与える電力を減少させ、入射したレーザパワーとヒータ電力の和が冷却パワーと等しくなるようにフィードバック制御して等温状態を維持させる。入射したレーザパワーの絶対値は、ヒータに与える電力の変化分に相当する。また、円

筒型吸収体の先端部と底部に取り付けられたヒータは、円筒内で反射した後吸収されるレーザーパワーと電力の等価性を評価する機能を果たしている。

レーザーに係る高精度な放射測定は、空間に放射されるレーザーのパワー測定のみならず光ファイバを経由した系での測定や、パルスレーザーに対する時間応答を加味した評価が求められているほか、加工用の大出力レーザーから通信用などの微弱光まで、放射束測定に求められるパワーのダイナミックレンジが極めて広く、測定対象も多岐に渡っている^{50)~52)}。上述の方式で得られたレーザーパワー標準に基づき、これら一連のレーザー放射測定に係る標準の拡張が行われている。

5 測光・放射標準に関する最近の話題

5.1 光子数検出に基づくカンデラの実現に向けて

前述のとおり、光度のSI単位であるカンデラ(cd)は、2018年11月のCGPM決議により、周波数 540×10^{12} Hzの単色放射の視感効果度 K_{cd} を683 lm/Wと定義する表現に修正された。3.1で述べたとおり、今回表現が修正された定義は、1979年に決議された従前の光度単位の定義と同義であり、放射量と測光量を対応付ける定数である視感効果度 K_{cd} の値を一義に定めることで、絶対放射測定に基づいて光度単位を実現することを意図したものである。一方で、光度単位をはじめとする測光・放射測定に係る単位を実現するための考え方として、CCPRにおいて、絶対

放射測定に基づく方法に加えて、光子数に基づいた実現方法への言及がなされている点に注目する必要がある⁵³⁾。

空気中の波長 λ における、ある分光放射量 $Q_{e,\lambda}$ と対応する光子数に基づく量 $Q_{p,\lambda}$ との関係は、

$$Q_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{h \cdot c}{\lambda} \cdot n_a(\lambda) \cdot Q_{p,\lambda}(\lambda) \quad (24)$$

で表される。ここで、 h はプランク定数、 c は光速、 $n_a(\lambda)$ は波長 λ での空気中での屈折率である。これより、対応する測光量 Q_v との関係は、 K_{cd} および所定の分光視感効率関数 $V_x(\lambda)$ 、 $\lambda_{cd} = 555.017$ nmを用いて下記の式で表される。

$$Q_v = \frac{K_{cd} \cdot h \cdot c}{V_x(\lambda_{cd})} \cdot \int_0^\infty Q_{p,\lambda}(\lambda) \cdot \frac{n_a(\lambda) \cdot V_x(\lambda)}{\lambda} \cdot d\lambda \quad (25)$$

言うまでもなく、上記の原理に基づいて測光・放射測定に係る単位を実現しようとする場合、第一義的に必要な計測技術は、光子数の精密計測となる。こうした背景から、現在、世界の主要な国家計量標準機関において、高精度な光子数計測技術の開発に関する研究が盛んに進められている。ここでは、産総研が取り組んでいる、超伝導転移端センサ(Superconducting Transition Edge Sensor: TES)に基づく単一光子検出技術の研究について紹介する。

光放射は波としての側面と粒子としての側面を併せ持ち、光放射の周波数を ν (s⁻¹)とすれば、光子1個の持つエネルギー E (J)は、プランク定数 h (J s)を用いて $E = h\nu$ で表される。よって、単位時間当たり到達する光子数をカウントし、 $h\nu$ を乗じれば放射束 Φ_e (W)を求める事が可能となる。光子数計測技術は近年著しい発展を見せており、このような背景から、光子数を元にした放射束標準の実現やSI単位改訂を目指した研究が各国で進められている。

図14に、TESによる光子検出の原理を示す。TESも極低温放射計と同じく光によって生じた熱的な擾乱を検出原理とするが、極低温放射計では、入射した放射束をパワー(W)として計測するのに対し、TESは入射した光子列のエネルギー(J)を計測する点に違いがある。TESは、ある臨界温度で超伝導転移を起こす金属薄膜から構成され、平衡状態では図14(i)のようにTESの動作温度が常に超伝導転移領域にあるように調節されている。(i)の状態では光子がTESに入射して吸収されると、光子の持つエネルギー E によりTESの温度が上昇し、図14(ii)の状態へと移行する。この温度変化によりTESの抵抗は大きく変化し、これを外部電子回路で読み出すことによって光子検出の信号を得る。TESは典型的に数10 μm角の有感面積を持ち、その熱容量は微小であることから、単一光子を十分なエネルギー分解能で観測で

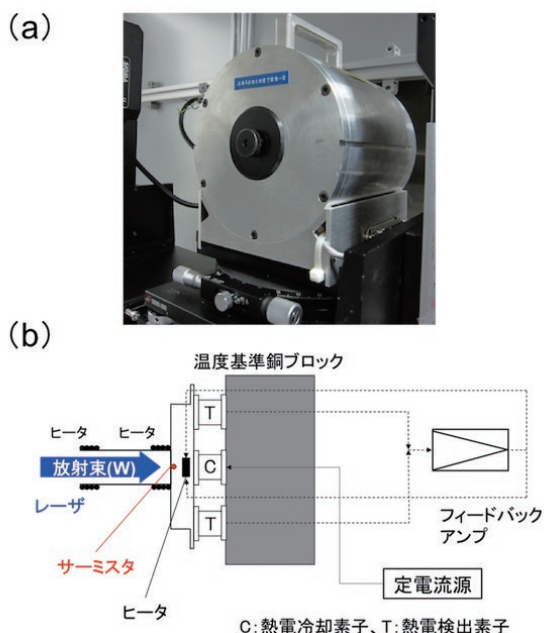


図13 レーザパワー測定用カロリメータ
(a: 外観、b: 測定原理の概要)

きる能力を持つ。TES の温度が転移領域にある限りは、抵抗変化量は入射した光パルスのエネルギーに比例するため、単一波長の光パルス列を観測では光パルス中の光子数を、単一光子の観測ではその振動数や波長を識別できるのが TES の大きな特徴である。

光子検出器の応答度（1 個の光子に対して必ず 1 個の信号を出力するか、数え落としはどの程度発生するか）の評価、測定器や電子回路の応答速度（人間の視覚に対して放射が与える影響が最大になる周波数 540×10^{12} Hz の単色放射に対する光子 1 個のエネルギーは 3.58×10^{-19} J で、一般的な放射測定での放射束レベルの下限である nW レベルでも、1 秒間に到達する光子は 10^9 個のオーダーとなる）など、SI 単位改訂に向けてはいくつかの課題がある。その克服に向け、光子検出器の応答度測定に関する国際標準化、

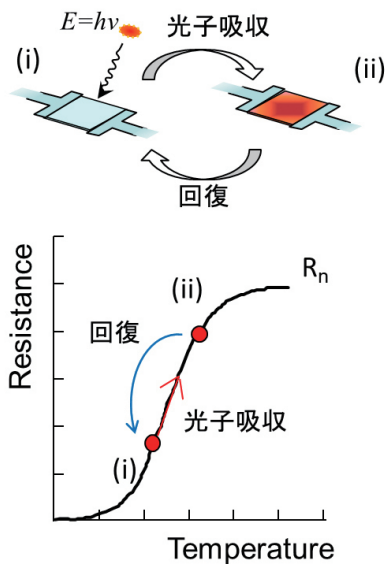


図 14 超伝導転移端センサ (TES) による光子検出の原理 (上) および TES 抵抗値の温度依存性の概念図 (下) (i) : 平衡状態、(ii) : 光子吸収により TES 温度が上昇した状態

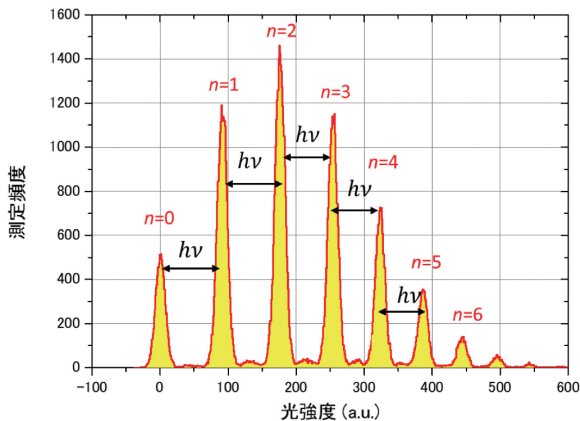


図 15 超伝導転移端検出器 (TES) による光子数測定結果の一例

単一光子の検出効率に関する国際整合性検証⁵⁴⁾、光子数から実用光強度へのトレーサビリティ確立に向けた、TES を電熱置換に応用した pW から μ W レベルの新しい極低温放射計の開発^{55),56)} など、現在、様々な取り組みが行われており、今後が期待される技術である。

図 15 は、産総研で開発した TiAu 近接二重層 TES による光子数識別器⁵⁷⁾により、単一波長 1550 nm のパルスレーザの弱コヒーレント光を測定した結果で、横軸は到達した光子のエネルギー、縦軸は到達イベント数を表す。弱コヒーレント光パルスでは、各光パルス中の光子数は、量子力学的な要請から光源側に光子数についてのショット雑音が内在し、その光子数は Poisson 分布となることが知られている。すなわち、弱コヒーレントパルス光の平均光子数を μ とすれば、その分散を μ とした光子数 n を含むパルス列が TES に到達することになる。単一光子のエネルギーは hf で量子化されているから、TES はその整数倍であるエネルギー $E = n \times hf$ を計測することになる。よって、図 15 の各ピークは、左端を $n = 0$ として、右に向かって順に $n = 1$ から最大 8 程度までの光子数を含む光パルスを計測したことを示している。このように、TES を用いると光源の光子数状態を明確に同定することが可能となる。図 15 の結果から、測定の平均光子数、パルスレーザの繰り返し周波数、TES 検出効率、レーザ波長が分かれば、観測した光放射の放射束を求めることが可能であり、この実験の場合ではおよそ 1.3×10^{-14} W の放射束を計測していることに相当する。

5.2 測光・放射測定用の標準光源の開発

測光・放射測定分野において標準光源の果たす役割は極めて大きい。標準光源は、光度、光束、分光放射照度など光源に由来する測定量に関して、絶対測定によって実現される標準値を安定に維持する役割を担っているほか、比較校正の際の基準に用いられており、トレーサビリティを介する仲介標準器 (トランスファー標準) として必要不可欠である。また、国際比較において各国の標準値の整合性の程度を検証する際にも、相互比較の対象として標準光源が回覧されることが多い。

戦後から現在に至るまでの測光・放射測定において、標準光源は、タングステンフィラメントに基づく白熱光源の技術によって支えられており、特別な製造・選定プロセスを経た白熱電球またはハロゲン電球 (以下、標準電球) がその主軸となっている。日本は標準電球の開発にこれまで大きな貢献を果たしており、特に、極めて良好な点灯再現性および長期的な安定性を有する測光用標準電

球の供給によって、国際的に高い評価を受けてきた⁴¹⁾。現在でも測光用標準電球は、国際比較用の仲介標準器や、標準値を維持するための実用標準として国内外で広く使われている。

こうした重要性に鑑み、産総研では、新たな測光・放射標準の開発に際し、その用途に適した標準光源の開発も行っている。ここでは、その代表的な成果を2つ紹介する。

4.2.3 で示した分光全放射束標準の開発にあたり、入手可能な市販のハロゲン電球に対して、点灯再現性・安定性、分光特性、配光特性、枯化処理による特性改善の程度などについて系統的な評価を行った。その結果、市販のハロゲン電球であっても、適切な枯化処理を施した上で選別することで、従来の測光用標準電球に比肩する特性を実現し得るものがあることを明らかにした。図16は、産総研が分光全放射束標準の仲介器として用いている標準光源である。これは、枯化処理および選定プロセスを経た24 V-150 W タイプのハロゲン電球と口金変換 (E11-E26) 用の専用ソケットで構成されている。典型的な出力特性は、6.25 A で定電流点灯制御したときの全光束は約3000 lm、相関色温度は約3000 K で、安定性・再現性は可視域 (360 nm から400 nm を除く) で約0.2 % である⁴⁸⁾。

さらに、LED 照明は、従来照明と比較してその分光分布・空間伝搬特性が極めて多様であるため、比較測定に基づく校正に際して、従来光源との分光特性・空間特性の差が課題となることが多い。分光測定に基づく校正の重要性については4.2.2 で示したとおりであるが、加えて、LED 素子は前面にのみ光を放射する特性を持っており、LED 照明においても前面のみに光を放射する配光を有する製品が多く存在することを考慮する必要がある。一般に積分球を用いた標準光源と被校正対象の比較測定では、図17に示すように、光源の設置方法により、従来光源と同様に光源を積分球の中心に設置する 4π 幾何条件と、光源を積分球の壁面に設置する 2π 幾何条件がある。このうち、 4π 幾何条件については、前述のハロゲン電球に基づく分光全放射束標準光源が校正基準として用いられている。

一方で 2π 幾何条件は、前面にのみ光を放射する光源の測定方法として適していることから、LED 照明の評価において特に重要視されている測定方法である。しかしこれまで、 2π 幾何条件に適用可能で、かつLED 照明の評価に適した特性を有する標準光源は存在しなかった。ここで標準光源に求められる重要な特性は、1) 前面にのみ光を放射する配光を有すること、2) 可視波長域全体で十分な光強度をもつこと、

の2点である。前者の観点からはLEDを用いた標準光源がふさわしいが、これまでに開発された白色LEDでは、可視域の短波長域および長波長域の光強度が不十分で、標準光源には適していなかった。

この問題を解決するため、産総研はLEDメーカーとの共同開発により、世界に先駆けて、 2π 幾何条件の分光全放射束測定に最適化された、LEDをベースとした標準光源 (標準LED) を開発した⁵⁸⁾。開発した標準LED (図18) は、中心の発光部の温度を一定に保つための温度制御機構を有し、周囲温度に対する光強度の変動が 1°C あたり0.01%以下と、従来型の白色LEDに比べ、約20倍の点灯安定性を実現しているほか、高い点灯再現性を有している。典型的な出力特性は、200 mA の定電流点灯において全放射束が約1300 mW、全光束が約200 lm である。また、スペクトル形状の最適化も行っており、中心波長

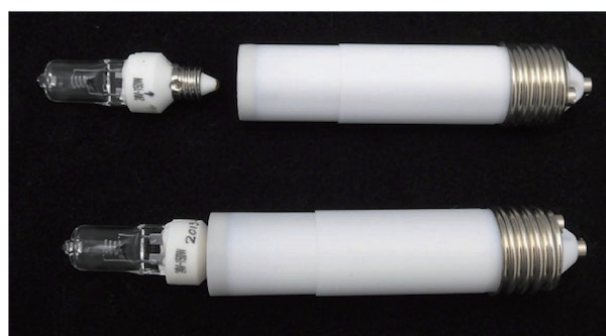


図16 分光全放射束標準光源 (24 V-150 W 型ハロゲン光源に口金変換 (E11-E26) ソケットを組み合わせたもの)

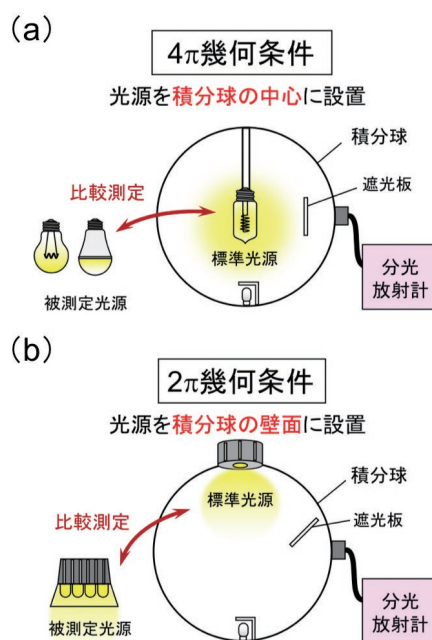


図17 積分球を用いた比較測定の幾何条件 (a: 4π 幾何条件、b: 2π 幾何条件)

が異なる複数の励起用 LED 素子を配置して、380 nm から 430 nm の波長域での光強度を改善するとともに、430 nm より長い波長域では、青、緑、赤の蛍光を発生する複数の蛍光体を組み合わせた構造を導入した。これにより、従来型の白色 LED と比してスペクトル形状の凹凸を減少させて波長平坦性を高めると共に、380 nm から 780 nm の波長範囲で十分な光強度を実現することに成功した。また、配光特性についても余弦配光に近似しており、分光分布の角度依存性も極めて小さく理想的な空間特性を実現している。こうした特性は分光測定における不確かさの低減に寄与するものであり、標準 LED に基づく分光全放射束標準光源の導入は、LED 照明の光学特性評価の信頼性向上に大きく貢献するものである。現在、産総研では、前述の標準 LED の小型化を進めているほか、より短波長域での分光測定に供することのできる標準 LED の開発や、従来の標準電球の代替となる 4π 配光特性を有する標準 LED の検討などを進めている。

高効率・長寿命な次世代照明として LED 光源の開発・普及が一気に進展した現在、従来光源と位置付けられる白熱電球やハロゲン電球は、一般向け製品としては減少の一途を辿っている。また、欧州を中心に、光源効率の低いこれらの光源の製造・販売を禁止する政策が実施されており、この先、マーケットの更なる減少が予想される。こうした動きから、標準値の維持・供給などの特殊用途を意図している標準電球についても、製造・販売の中止が続いている。日本においても、大手の標準電球の製造元が 2016 年に製造の終息方針を表明しており、世界的に入手が困難になってきている。こうした状況を踏まえると、分光全放射束標準光源の開発成果として紹介した、最適な特性を有する光源の市販光源からの探索およ

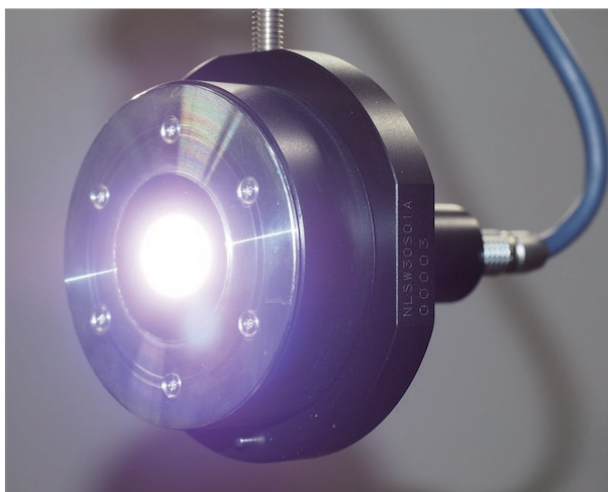


図 18 標準 LED に基づく分光全放射束標準光源 (2π 幾何条件用)

び性能向上のための付加プロセスの開発や、LED に基づく新たな標準光源の開発といったアプローチは、白熱光源に基づく標準光源の入手が困難になりつつある現在、その重要性が増しており、この先、多方面からの研究開発が展開され、知見の蓄積・共有が図られることが重要である。

6 おわりに

以上限られた紙数ではあったが、2018 年 11 月の CGPM 決議に基づく、視感効果度 K_{cd} を定数として定義する新しいカンデラの定義（従来の定義からの表現の修正）について、測光・放射標準の実現方法や関連する最近の研究に関する話題を交えて概説した。

紙数の関係上、標準器との比較測定に基づく校正方法や、国内での計量トレーサビリティ体系については本稿では殆ど触れていない。また、測光・放射標準も、ごく一部について解説しているに過ぎない。より詳細な測光・放射標準の実現およびその過程で開発された測定技術などについては、既報⁵⁹⁾を適宜ご参照頂きたい。

謝辞

本稿の執筆にあたり、校閲や写真・図の提供でご協力頂いた物理計測標準研究部門 量子光計測研究グループ 福田 大治 研究グループ長、応用放射計測研究グループ 神門 賢二 主任研究員、光放射標準研究グループ 田辺 稔 主任研究員、中澤 由莉 研究員に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) CIE S 017/E:2011, International Lighting Vocabulary (2011)
- 2) IEC 60050-845:1987, International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Chapter 845 "Lighting" (1987)
- 3) JIS Z 8113:1998, 照明用語 (1998)
- 4) ISO 23539:2005/CIE S 010:2004, Photometry - The CIE system of physical photometry (2005)
- 5) CIE 6e session Genève-Juillet 1924: Recueil des Travaux et Compte Rendu de Séances, Cambridge University Press, 67/69 (1926)
- 6) Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures (CIPM), **40**, 145. BIPM (1972)
- 7) Compte Rendu of CIE 12th Session, Stockholm 1951, Vol. III, 32/40 (1951)
- 8) Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures (CIPM), **44**, 4. BIPM (1976)
- 9) ISO 80000-7:2008, Quantities and units -- Part 7: Light (2008)
- 10) 座間 達也: 測光量 (cd) および測光・放射標準についての基礎解説と最近の話題, 計測と制御, **53**, 623/632 (2014)
- 11) P. E. Ciddor: Refractive index of air - new equations for the visible and near infrared, *Appl. Opt.*, **35**, 1566/1573

- (1996)
- 12) P. Bouguer: Essai d'optique, sur la gradation de la lumière, Jombert (1729)
 - 13) J. H. Lambert: Photometria, sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae, Klett (1760)
 - 14) J. W. T. Walsh: Photometry, Constable & Co. (1958)
 - 15) 山内 二郎: 測光単位の設定, 照明学会雑誌, **40**, 456/460 (1956)
 - 16) H. T. Wensel *et al.*: The Waidner-Burgess Standard of Light, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **6**, 1103/1117 (1931)
 - 17) 山内 二郎: 黒体光度標準器の実現について, 照明学会雑誌, **26**, 444/447 (1942)
 - 18) Comptes rendus de la 9e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), p.54, BIPM (1948)
 - 19) Comptes Rendus de la 11e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), 87, BIPM (1960)
 - 20) Comptes rendus de la 13e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), 104, BIPM (1967/68)
 - 21) H. Katsuyama *et al.*: An Experimental Determination of the Maximum Spectral Luminous Efficacy of Radiation, *Metrologia*, **11**, 165/168 (1975)
 - 22) 大場 信英: カンデラの定義改定について, 応用物理, **50**, 247/254 (1981)
 - 23) Comptes Rendus des séances de la 16e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), 100, BIPM (1979)
 - 24) J. C. Zwinkels *et al.*: Mise en pratique for the definition of the candela and associated derived units for photometric and radiometric quantities in the International System of Units (SI), *Metrologia* **53**, G1 (2016)
 - 25) G. Wyszecki, *et al.*: Principles Governing Photometry. BIPM Monograph, BIPM (1983)
 - 26) CIE 191:2010, Recommended System for Mesopic Photometry based on Visual Performance (2010)
 - 27) CIE 165:2005, CIE 10 Degree Photopic Photometric Observer (2005)
 - 28) CIE 86-1990, CIE 1988 2° Spectral Luminous Efficiency Function for Photopic vision (1990)
 - 29) 例 えば, CIE 200:2011, CIE Supplementary System of Photometry (2011)
 - 30) 薮 洋司: 光生物学的安全性の評価に関する国際標準化の現状と課題, 照明学会誌, **100**, 201/204 (2016)
 - 31) J. E. Martin *et al.*: A Cryogenic Radiometer for Absolute Radiometric Measurements., *Metrologia*, **21**, 147/155 (1985)
 - 32) Y. Ichino *et al.*: Improved Cryogenic Radiometry, Proc. CIE 25th Session, **1**, 18/21 (2003)
 - 33) 田辺 稔: 光パワーメータの応答直線性校正の波長広帯域化に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **8**, 349/365 (2011)
 - 34) 田辺 稔ほか: シリコンフォトダイオードの応答非直線性の波長依存性, 照明学会誌, **101**, 234/238 (2017)
 - 35) Y. Ichino *et al.*: Optical Trap Detector with Large Acceptance Angle, *J. Light & Visual Environment*, **32**, 295/301 (2008)
 - 36) E. F. Zalewski *et al.*: Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration, *Appl. Opt.*, **19**, 1214/1216 (1980)
 - 37) J. Geist *et al.*: Spectral response self-calibration and interpolation of silicon photodiode, *Appl. Opt.*, **19**, 3795/3799 (1980)
 - 38) 齊藤 一朗: 測光・放射標準, 光学, **32**, 181/188 (2003)
 - 39) 神門 賢二: 分光測定に基づく新しい光度の具現方法に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **2**, 575/585 (2004)
 - 40) 木下 健一: 検出器の応答度に基づく測光・放射標準の具現方法に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **7**, 41/50 (2008)
 - 41) 飯田 孝之: 国際比較用光渡標準電球, 照明学会雑誌, **39**, 204/207 (1955)
 - 42) G. Sauter *et al.*: CCPR key comparisons K3a of luminous intensity and K4 of luminous flux with lamps as transfer standards, PTB-Opt-62, PTB (1999)
 - 43) ISO 11664-2:2007(E)/CIE S 014-2/E:2006, Colorimetry – Part 2: CIE Standard Illuminants for Colorimetry (2006)
 - 44) M. Planck: Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum, *Annalen der Physik*, **309**, 553/563 (1901)
 - 45) T. Zama *et al.*: Determining the temperature of a blackbody based on a spectral comparison with a fixed temperature blackbody, Proc. 9th International Conference on New Developments and Application in Optical Radiometry (NEWRAD2005), 281/282 (2005)
 - 46) 薮 洋司ほか: 配光測定に基づく全光束絶対校正装置の開発, 光アライアンス, **15**, 1/7 (2004)
 - 47) 中澤 由莉: 分光放射測定に基づく配光特性評価による全光束および分光全放射束標準の確立と供給に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **9**, 229/255 (2015)
 - 48) K. Godo *et al.*: Realization of total spectral radiant flux scale at NMIJ with a goniophotometer/spectroradiometer, *Metrologia*, **53**, 853/859 (2016)
 - 49) 井上 武海ほか: 高感度レーザカロリメータによるレーザパワー標準, 電子技術総合研究所彙報, **11**, 1259/1275 (1992)
 - 50) 福田 大治: レーザパワー・エネルギー標準とその計測技術に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **2**, 593/607 (2004)
 - 51) 雨宮 邦招: 光ファイバにおける標準とその計測技術に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **4**, 293/305 (2006)
 - 52) 沼田 孝之: 高出力レーザパワーの標準技術に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **7**, 89/100 (2008)
 - 53) J. C. Zwinkels *et al.*: Photometry, radiometry and “the candela” - evolution in the classical and quantum world, *Metrologia*, **47**, R15/R32 (2010)
 - 54) C. J. Chunnillal *et al.*: Metrology of single-photon sources and detectors: a review, *Opt. Eng.*, **53**, 081910 (2014)
 - 55) D. Fukuda *et al.*: Improvements in the AIST Cryogenic Radiometer with superconducting thermometer, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **56**, 356/360 (2007)
 - 56) N. A. Tomlin *et al.*: Towards a fiber-coupled picowatt cryogenic radiometer, *Opt. Lett.*, **37**, 2346/2348 (2012)
 - 57) D. Fukuda *et al.*: Titanium-based transition-edge photon number resolving detector with 98% detection efficiency with index-matched small-gap fiber coupling, *Optics Express*, **19**, 870/875 (2011)
 - 58) Y. Nakazawa *et al.*: Development of LED-based standard source for total luminous flux calibration, *Light. Res. Technol.*, **51**, 870/882 (2018)
 - 59) 例 えば, 座間 達也: 光放射計測分野における達成点と今後, 計量標準と計測管理, **60**, 23/35 (2011)

国際単位系（SI）基本単位の定義改定と計量標準

2020年3月

国立研究開発法人産業技術総合研究所 計量標準総合センター

〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1

電子メール：nmij-info-ml@aist.go.jp

本冊子掲載記事の無断転載を禁じます。

