

国際単位系（SI）第9版（2019）日本語版について

国際単位系（SI）第9版（2019）日本語版は、冊子『国際単位系（SI）基本単位の定義改定と計量標準』の付録として収録されている。

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。

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

電話番号：029-861-4346

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。

国際単位系 (SI) 第 9 版 (2019) 日本語版

国際度量衡局 (BIPM)

国際単位系 (SI)

第 9 版 (2019)

国際度量衡局 (BIPM) とメートル条約

国際度量衡局 (BIPM) はメートル条約により創設された機関である。このメートル条約は、1875年5月20日にパリで開催されたメートル法にかかる外交会議の最終セッションにおいて17か国によって締結されたものであり、その後1921年に改定されている。

国際度量衡局は、フランス政府より提供されたパリ近郊のパピヨン・ド・ブルトイユ (サン・クルー公園) の敷地 (43 520 m²) 内に本部を置き、その維持費はメートル条約加盟国が共同で負担している。

国際度量衡局は、測定の世界的な統一を確保することをその任務とし、次に示す目標を掲げている。

- 世界の計量コミュニティを代表し、その社会への取り込みと影響力を高めることを目指すこと
- 加盟国間の科学および技術分野における国際協力の中心となり、経費の共同負担にもとづいて国際比較の実施を提供すること
- 世界の計量システムのコーディネータとして、比較可能かつ国際的に受け入れられる測定結果を確保すること

国際度量衡局は、国際度量衡委員会 (CIPM) の監督下で活動し、この国際度量衡委員会は国際度量衡総会 (CGPM) の権限の下にあり、国際度量衡局が実施した業務について国際度量衡総会に報告を行う。

国際度量衡総会には全加盟国の代表が出席し、通例として4年毎に開催されている。国際度量衡総会の役割を次に示す。

- メートル法の現在の形態である国際単位系 (SI) の普及と改良に必要な取り決めについて議論し、それを実行すること
- 計量の基礎に関わる新しい測定結果および科学に関する国際的視点にもとづく各種決議を確認すること
- 国際度量衡局の財務、組織体制、整備発展に関する主要なあらゆる決定を行うこと

国際度量衡委員会は、出身国の異なる18人の委員で構成され、現在、毎年会合が開かれている。国際度量衡委員会の事務局は、国際度量衡局の運営および財務状況について、年に一度、加盟国政府に報告している。国際度量衡委員会の主たる任務は、測定単位の世界的な統一性を確保することである。この任務達成のために、国際度量衡委員会は自ら活動をすると共に、国際度量衡総会へ提案を提出する。

国際度量衡局の活動は、設立当初は、長さや質量の測定およびこれらの量に関わる計量研究に限定されていたが、その後次第に拡大され、電気 (1927年)、測光・放射測定 (1937年)、電離放射線 (1960年)、時系 (1988年)、化学 (2000年) の計量標準が含まれるようになった。このため、1876年から1878年に建設された当初の研究室が1929年に拡張され、さらに、1963年から1964年には電離放射線研究室、1984年にはレーザー研究室、1988年には書庫と事務室が入る新たな建屋がそれぞれ建設された。また、2001年には、工作室、事務室、会議室の入った新たな建屋が完成した。

国際度量衡局の研究部門では、およそ45名の物理学者と技術者が業務を行っている。主な業務は、計量関連の研究、単位の実現に関する国際比較、計量標準の校正である。実施中の業務の詳細は、年次の局長報告書に記載され

2019年5月20日現在、次に示す59ヶ国が加盟国となっている。

アルゼンチン、オーストラリア、オーストリア、ベルギー、ブラジル、ブルガリア、カナダ、チリ、中国、コロンビア、クロアチア、チェコ共和国、デンマーク、エジプト、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、ハンガリー、インド、インドネシア、イラン、イラク、アイルランド、イスラエル、イタリア、日本、カザフスタン、ケニア、大韓民国、リトアニア、マレーシア、メキシコ、モンテネグロ、オランダ、ニュージーランド、ノルウェー、パキスタン、ポーランド、ポルトガル、ルーマニア、ロシア連邦、サウジアラビア、セルビア、シンガポール、スロバキア、スロベニア、南アフリカ、スペイン、スウェーデン、スイス、タイ、チュニジア、トルコ、ウクライナ、アラブ首長国連邦、英国、アメリカ合衆国、ウルグアイ

次に示す42の国と経済地域が国際度量衡総会の準加盟国である。

アルバニア、アゼルバイジャン、バングラディッシュ、ベラルーシ、ボリビア、ボスニア・ヘルツェゴビナ、ボツワナ、カリブ共同体、台湾、コスタリカ、キューバ、エクアドル、エストニア、エチオピア、ジョージア、ガーナ、香港 (中国)、ジャマイカ、クウェート、ラトビア、ルクセンブルグ、マルタ、モリシヤス、モルドバ、モンゴル、ナミビア、北マケドニア、オマーン、パナマ、パラグアイ、ペルー、フィリピン、カタール、セイシェル、スリランカ、スーダン、シリア、タンザニア、ベトナム、ザンビア、ジ

ている。

国際度量衡局に委託される業務の拡張を受けて、1927年、国際度量衡委員会は、諮問委員会として知られる組織を設立をした。諮問委員会の役割は、国際度量衡委員会が調査研究および助言を要請した案件について、情報を提供することである。諮問委員会は、場合によっては特定のテーマの研究を行うために臨時もしくは常設の作業部会を設けることができ、それぞれの専門分野における国際的活動の調整・取りまとめを行い、国際度量衡委員会に対して単位に関する勧告を提案する責務を担っている。

これらの諮問委員会に対しては、共通規則 (Document CIPM-D-01, *Rules of procedure for the Consultative Committees (CCs) created by the CIPM, CC working groups and CC workshops*) が定められ、会合は不定期に開催されている。各諮問委員会の委員長は国際度量衡委員会によって指名される。通常、国際度量衡委員会の委員が諮問委員会委員長を務める。諮問委員会の委員は、国際度量衡委員会が承認した計量研究所や専門機関であり、これらの研究所や機関が選んだ者が派遣されている。これに加えて、国際度量衡委員会が任命した個人も委員となっており、さらに、国際度量衡局の代表も含まれている (Document CIPM-D-01, *Rules of procedure for the Consultative Committees (CCs) created by the CIPM, CC working groups and CC workshops*)。現在、次に示す10の諮問委員会が設立されている。

1. 電気・磁気諮問委員会 (CEEM) : 前身は1927年に設立された電気諮問委員会 (CCE)。1997年に現在の名称が付与された。
2. 測光・放射測定諮問委員会 (CCPR) : 前身は1933年に設立された測光諮問委員会 (CCP)。1971年に現在の名称が付与された (1930年から1933年までは、CCEが測光に関する案件を扱っていた)。
3. 測温諮問委員会 (CCT) : 1937年に設立。
4. 長さ諮問委員会 (CCL) : 前身は1952年に設立されたメートルの定義に関する諮問委員会 (CCDM)。1997年に現在の名称が付与された。
5. 時間・周波数諮問委員会 (CCTF) : 前身は1956年に設立された秒の定義に関する諮問委員会 (CCDS)。1997年に現在の名称が付与された。
6. 放射線諮問委員会 (CCRI) : 前身は1958年に設立された電離放射線測定標準諮問委員会 (CCEMRI)。1997年に現在の名称が付与された (本諮問委員会は、1969年、第1部門 (X線、 γ 線、電子)、第2部門 (放射性核種の測定)、第3部門 (中性子の測定)、第4部門 (α 線エネルギー標準) の4部門を設立した。その後1975年に第4部門が廃止され、その活動は第2部門に引き継がれた)。
7. 単位諮問委員会 (CCU) : 1964年に設立 (本諮問委員会は、1954年に国際度量衡委員会が設立した単位系小委員会に代わって設立されたものである)。
8. 質量関連量諮問委員会 (CCM) : 1980年に設立。
9. 物質質量諮問委員会 (CCQM) : 1993年に設立。
10. 音響・超音波・振動諮問委員会 (CCAUV) : 1999年に設立。

国際度量衡総会および国際度量衡委員会の会議記録は、国際度量衡局によって次のようなかたちで公表されている。

- 「国際度量衡総会会合報告」 (英語 : Report of the meeting of the General Conference on Weights and Measures, フランス語 : Comptes rendus des séances de la Conférence générale des poids et mesures, 以下略して CR)

- 「国際度量衡委員会会合報告」(英語: Report of the meeting of the International Committee for Weights and Measures, フランス語: Procès-verbaux des séances du Comité international des poids et mesures, 以下略して PV)

2003年、国際度量衡委員会は、諮問委員会の会合報告を印刷物として発行することを取り止め、それに代わって、国際度量衡局のホームページに原語で掲載することを決定した。

国際度量衡局はまた、特定の計量に関する主題を対象とする論文や、「国際単位系 (SI)」の表題で定期的に更新される文書を出版する。ここには、単位に関する全ての決定と勧告が収められている。

「*Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures*」(1881年から1966年に22巻出版された) および「*Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures*」(1966年から1988年に11巻出版された)は、いずれも国際度量衡委員会の決定によって廃刊となった。

国際度量衡局の研究実績は一般の学術文献で発表されている。

1965年より国際度量衡委員会の後援により発行されている国際学術誌「*Metrologia*」は、計量科学、測定方法の改良、標準および単位に関する取り組みに関する論文だけでなく、さらにメートル条約の下で設立された各種機関による活動、決定、勧告も収録している。

国際単位系

目次

第9版への緒言	91
1 序章	94
1.1 SI と定義定数 (defining constants)	94
1.2 定義定数を用いた SI の定義が導かれた背景	94
1.3 SI の運用	95
2 国際単位系	96
2.1 量の単位の定義	96
2.2 SI の定義	96
2.2.1 七つの定義定数の性質	97
2.3 SI 単位の定義	98
2.3.1 基本単位	98
2.3.2 SI 単位の実現方法	104
2.3.3 量の次元	104
2.3.4 組立単位	105
2.3.5 生物学的および生理学的作用を示す量の単位	110
2.3.6 一般相対性理論の枠組みにおける SI 単位	111
3 SI 単位の十進の倍量および分量	112
4 SI と併用できる非 SI 単位	114
5 単位の記号と名称の表記および量の値の表現方法	116
5.1 単位の記号と名称の使用	116
5.2 単位記号	116
5.3 単位の名称	117
5.4 量の値の表現方法に関する規則と様式の慣例	117
5.4.1 量の値と数値および量の四則演算 (quantity calculus)	117
5.4.2 量の記号と単位記号	118
5.4.3 量の値の形式	118
5.4.4 数字の形式および小数点	119
5.4.5 量の値における測定の不確かさの表現	119
5.4.6 量の記号、量の値、数の乗除	119
5.4.7 純粋に数字 (pure number) である量の値の表示方法	120
5.4.8 平面角、立体角、位相角	120
付録1: 国際度量衡総会 (CGPM) および国際度量衡委員会 (CIPM) の決定	121
付録2: いくつかの重要な単位の定義の実現方法	169
付録3: 光化学的および光生物学的な量の単位	170

付録 4 : 国際単位系およびその基本単位の発展の歴史	171
第 1 部 : SI 単位の実現の発展の歴史	171
第 2 部 : 国際単位系の発展の歴史	173
第 3 部 : 基本単位の歴史的考察	175
略語リスト	180
索引	182

第9版への緒言

国際単位系 SI は、1960 年に第 11 回国際度量衡総会 CGPM（フランス語：Conférence générale des poids et mesures; 英語：General Conference on Weights and Measures）における決議によって確立されて以来、科学技術、産業、取引における望ましい単位、つまり基本的な“ことば”として、世界中で使用されてきました。

この文書は、SI の奨励と内容説明を目的として、国際度量衡局 BIPM（フランス語：Bureau international des poids et mesures; 英語：International Bureau of Weights and Measures）が発行しています。この文書では、メートル法に関する国際度量衡総会（CGPM）の決議および国際度量衡委員会 CIPM（フランス語：Comité international des poids et mesures; 英語：International Committee on Weights and Measures）の決定の中で最重要とされるものを 1889 年開催の第 1 回国際度量衡総会にまでさかのぼって掲載しています。

SI は、常に、その時々最新の科学技術の進展を取り込みながら進化してきた、実用的で絶えず変化する単位系です。特に、過去 50 年間における原子物理学と量子計量学の大きな進歩により、秒とメートルの定義および電気系各種単位の実現方法が、原子現象や量子現象を利用することで、それぞれの単位を実現する精度はそれらの定義自体によって制約されるのではなく、私たちの技術力によって制約されるようになってきました。こうした科学の進歩と計測技術の進展によって、本文書の旧版で今まで奨励および説明されてきた SI について、改定を加えることが可能となったのです。

SI 文書第 9 版は、第 26 回国際度量衡総会で採択された広範囲に及ぶ改定を受けて編纂されています。この総会では、七つの「定義」定数の数値を定めることによって、単位全般の定義、特に七つの基本単位の定義を明確化するという新たなアプローチが導入されました。この定義定数には、プランク定数や光の速さなどの基礎物理定数も含まれ、それらの定義は、物理の法則に関する現在の理解を基礎とし、またそれを反映するものとなっています。今回初めて、全ての定義が、人工物を使った標準、物質の特性、測定方法のいずれにも関連づけられないかたちで確立されました。こうした改定によって、あらゆる単位の実現の精度が、定義自体によって制約されることなく、自然界の量子構造と人類の技術力のみによって制約されるようになったのです。定義定数のある単位に結びつける有効な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、これによって、今後の技術の進展に伴って更に精度を高めた革新と実現の機会があらゆるところで拓かれていきます。このように、今回の定義改定は、大きな意義を持つ歴史的一歩を前に踏み出す節目となるものです。

今回の改定は、2018 年 11 月に開催された国際度量衡総会で合意に達し、2019 年 5 月 20 日発効しました。この日が選ばれた理由は、5 月 20 日が 1875 年にメートル条約が締結された日で「世界計量記念日」となっているためです。今回の改定が今後もたらす影響は広範囲に及ぶものではありませんが、新たな定義が、改定実行時に運用されている定義と整合したものであることを徹底するため細心の注意が払われてきました。

1960 年に確立されて以降、国際単位系が常に「SI」という略称で呼ばれてきたことに注目しています。この原則は、SI 文書の過去八つの版で維持されてきており、このことは、第 26 回国際度量衡総会で採択された決議 1 で再確認され、これにより、本文書の表題も単に「国際単位系」とされています。

SIについてこのように一貫して同じ呼称が使われていることは、折々に改定を加える中でも SI 単位で表現される測定値の連続性を確保しようとする、国際度量衡総会と国際度量衡委員会の取り組みを反映するものであります。

この文書の本文は、SI について詳細に記述し、その歴史的背景の一端を紹介するために作成されています。また、この文書には、四つの付録も掲載されています。

付録 1 (Appendix 1) では、1889 年以降に国際度量衡総会 (CGPM) および国際度量衡委員会 (CIPM) より公布された、測定単位および国際単位系に関する全決定 (決議、勧告、宣言) を時系列的に再現しています。

付録 2 (Appendix 2) は、電子版でのみ閲覧可能です (www.bipm.org)。この付録では、七つの基本単位および各分野で重要な他の単位の実現方法について概説しています。付録 2 は、各種単位を実現する際に利用できる実験手法の改良を反映させるため、定期的に更新されていきます。

付録 3 (Appendix 3) も電子版でのみ閲覧可能です (www.bipm.org)。この付録では、光化学的および光生物学的な量の単位について取り扱っています。

付録 4 (Appendix 4) では、SI の発展の歴史について記載しています。

緒言の最後に、この文書の起草を担当した国際度量衡委員会の単位諮問委員会 CCU (フランス語 : Comité consultatif des unités; 英語 : Consultative Committee for Units) の委員各位に謝意を表します。本文書の最終稿の承認は、単位諮問委員会と国際度量衡委員会の両委員会によって行われました。

2019 年 3 月

国際度量衡委員会委員長	B. Inglis
単位諮問委員会委員長	J. Ullrich
国際度量衡局局長	M. J. T. Milton

本文に関する注釈

1997年の国際度量衡委員会（CIPM）の決定を受けて、2003年、第22回国際度量衡総会（CGPM）で「小数点の記号には、点（.）またはカンマ（,）のいずれかを使う」ことが決まりました。本決定およびフランス語と英語の二つの言語の慣習に従い、第9版においては、英語版では点（.）を小数点として使い、フランス語版ではカンマ（,）を使っています。このことは、他言語への翻訳における小数点の表示方法について指示を与えるものではありません。英語圏の国々の間では、英単語のつづりに若干の違いがある場合があります（例：「metre」と「meter」、「litre」と「liter」）。この点については、本文書の英語版はISO/IEC 80000シリーズ「量および単位」に準拠しています。ただし、本文書で使われるSI単位の記号は、いずれの言語でも全て同じです。

本文書を読まれる皆様は、国際度量衡総会の会合および国際度量衡委員会のセッションの公式記録はフランス語で作成されることに留意して下さい。この文書は英語で記載されたものを日本語に翻訳したのですが、正式な本文の確認が必要な場合、あるいは、文章の解釈に疑義がある場合は、フランス語版をお使い下さい。

1 序章

1.1 SI と定義定数 (defining constants)

本文書は、国際度量衡総会 (CGPM) がその責任を持ち、SI (フランス語の *Système international d'unités* に由来) としてあまねく知られている国際単位系の定義と使用に関する情報を提供するものである。SI は、1960 年の第 11 回国際度量衡総会において正式に定義され確立した。その後、利用者からの要求や科学技術の進歩を受けて、その時々国際度量衡総会において改定されてきた。SI 確立以降、直近かつおそらく最大の改定は、第 26 回国際度量衡総会 (2018 年) で実施されたものであり、本 SI 文書第 9 版にその内容が記されている。メートル条約およびその関連機関である国際度量衡総会、国際度量衡委員会 (CIPM)、国際度量衡局 (BIPM)、各諮問委員会については、86 ページの「国際度量衡局とメートル条約」において記述されている。

SI は、国際取引、製造、セキュリティ、健康と安全、環境保護を始めとする、生活のあらゆる側面において、また、これらを下支えする基礎科学において利用される一貫性のある単位系 (coherent system of units) である。SI の根底にある量の体系およびそれらの量を関係づける式は、自然に関する現在の理解にもとづくもので、あらゆる研究者、技術者、エンジニアによく知られたものである。

SI 単位の定義は、七つの定義定数 (defining constants) を用いて確立されている。単位系全体が、これらの定義定数の SI 単位で表された定められた値から導かれている。この七つの定義定数は、単位系全体を定義するうえで最も根幹的な特徴を表すものである。これらの特定の定義定数は、七つの基本単位にもとづく SI の従来の定義と科学の進歩を考慮して、最良の選択であると確認されたうえで選ばれたものである。

定義の実現には、国際度量衡委員会の各諮問委員会が示す多様な実験方法を使用できる。これらの実現方法を示したものは「ミゾンプラティック (フランス語: *mises en pratique*)」とも呼ばれている。実現方法は、新たな実験の開発を受けていつでも改定される可能性がある。このため、定義の実現に関する勧告は本文書には盛り込まず、国際度量衡局のウェブサイトにて提示する。

1.2 定義定数を用いた SI の定義が導かれた背景

従来、SI 単位は、いくつかの (直近では七つの) **基本単位** を用いて定義されてきた。**組立単位** と呼ばれる他の単位は全て、基本単位のべき乗の積で構築されている。

これまで、基本単位について様々な種類の定義が使われてきた。すなわち、キログラムにおける国際原器 (IPK) の質量のような人工物の固有の特性、ケルビンにおける水の三重重点のような物質固有の物理的状態、アンペアやカンデラの場合のような理想化された実験条件、メートルの定義における光の速さのような自然界の定数などである。

実用性を確保するためには、これらの単位は、定義されるだけでなく、その供給のために物理的に実現できるものでなくてはならない。人工物の場合は、定義と実現は同等なものとなる。これは、先進的古代文明が追求したアプローチであった。このアプローチは単純かつ明快ではあるが、人工物は、損失、損傷、もしくは、変化するリスクを伴う。これ以外の種類の単位の定義は、

より抽象的であり、理想化されている。ここで、実現は、単位をいつでもどこでも独立に実現できるよう、原則として、概念的に定義から切り離される。さらに、科学技術の発展を受けて、単位を再定義することなく、新たな優れた実現方法を導入することが可能となる。こういった利点は、メートルの定義が、人工物によるものから、原子遷移を基準とすることを経て、光の速さの数値を固定することへと改定されてきた歴史を見れば何よりも明確である。このような利点が、定義定数を使ってあらゆる単位を定義するという決定につながったのである。

どれを基本単位とするかという選択は、これしかあり得ないという絶対のものではなく、長い年月を経て成熟し、SIの利用者にとって身近なものとなってきたものである。基本単位および組立単位を用いた表現方法は現在のSIの定義にも受け継がれてはいるが、定義定数を採用することとなったため、再構築が行われた。

1.3 SIの運用

SI単位の定義は、国際度量衡総会による決定に従って、SIへの計量学的トレーサビリティにおける最上位の基準となっている。

世界各国の計量研究所は、計測のSIへのトレーサビリティを実現するため、定義の実現方法の確立に取り組んでいる。諮問委員会は、全世界におけるトレーサビリティの整合を図るため、実現方法の同等性を確立するための枠組みを提供している。

標準化機関は、利害関係者が必要とする場合には、量および単位の更なる詳細およびそれらの適用に関する規則を策定することができる。SI単位が関与する場合は常に、それらの規格は、国際度量衡総会による定義を参照しなければならない。数多くのこのような規程が、例えば、国際標準化機構および国際電気標準会議において制定された規格で参照されている（国際規格ISO/IEC 80000シリーズ）。

それぞれの国が、国の法令によって単位の使用に関する規則を策定しており、それらには、一般的な使用に関わるものと、商業、健康、公共安全、教育など個別の分野に関するものがある。ほとんどの国では、こういった法令はSIにもとづいて作られている。国際法定計量機関(OIML)は、このような法令の技術的な規程についての国際的な整合を図る作業の責任を負う。

2 国際単位系

2.1 量の単位の定義

量の値は、一般に数値と単位の積で表される。単位は、単に、ある量の特
定の例であり、基準として使われる。数値は、その単位に対する量の値の比
である。

ある一つの量に対して、異なる単位が使われることもある。例えば、ある
粒子の速度 v の値は、 $v = 25 \text{ m/s}$ あるいは $v = 90 \text{ km/h}$ と表すことができ、ここ
で、メートル毎秒とキロメートル毎時は、どちらも速さという量について同
じ値を表す際に使える単位である。

ある測定の結果を記述する前に、示される量を適切に表すことが不可欠で
ある。これは、ある鋼の棒の長さの場合のように単純なこともあるが、高い
正確さが求められ、温度などの付加的なパラメータを規定する必要がある場
合は、複雑なものとなることもある。

ある量の測定結果を報告する際には、測定量（測定の対象となる量）の
推定値およびその値の**不確かさ**が必要である。両者は、同じ単位で表現さ
れる。

例えば c で表される
真空中の光の速さは、
自然界の定数であり、
SI 単位での値は、式
 $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ に
よって与えられる。こ
こで 299 792 458 が「数値」
に、また m/s が「単位」
にそれぞれ対応する。

2.2 SI の定義

任意の量について、基礎定数の値は、数値と単位の積として表すことがで
きる。

以下に示す定義は、各定数の厳密な数値を規定したもので、その値は対応
する SI 単位で表現されている。厳密な数値を定めることで、その単位が定義
される。これは、**数値と単位の積**が、不変量であると仮定される定数の**値**と
等しくなければならないという関係にもとづく。

七つの定数は、SI の任意の単位が、定義定数そのもの、もしくは、定義定
数の積または商のいずれかによって記述できるように選ばれている。

SI 単位の除算を表す記
号として斜線 (/) または
負の指数 (-) が用いら
れる。

例えば
 $\text{m/s} = \text{m s}^{-1}$
 $\text{mol/mol} = \text{mol mol}^{-1}$

国際単位系 (SI) では、七つの定義定数は次のように定義される。

- セシウム 133 原子の摂動を受けない基底状態の超微細構造遷移周波数
 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ は、9 192 631 770 Hz
- 真空中の光の速さ c は、299 792 458 m/s
- プランク定数 h は、6.626 070 15 $\times 10^{-34}$ J s
- 電気素量 e は、1.602 176 634 $\times 10^{-19}$ C
- ボルツマン定数 k は、1.380 649 $\times 10^{-23}$ J/K
- アボガドロ定数 N_{A} は、6.022 140 76 $\times 10^{23}$ mol⁻¹
- 周波数 540 $\times 10^{12}$ Hz の単色放射の視感効果度 K_{cd} は、683 lm/W

ここで、Hz、J、C、lm、W をそれぞれ単位記号とするヘルツ、ジュール、クー
ロン、ルーメン、ワットは、s、m、kg、A、K、mol、cd をそれぞれ単位記号
とする単位、秒、メートル、キログラム、アンペア、ケルビン、モル、カン
デラに、 $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ 、 $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ 、 $\text{C} = \text{A s}$ 、 $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ 、 $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$
として関連づけられる。

この七つの定義定数に不確かさはない。

表 1 SI の七つの定義定数とそれらによって定義される七つの単位

定義定数	記号	数値	単位
セシウムの超微細遷移周波数	$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770	Hz
真空中の光の速さ	c	299 792 458	$m s^{-1}$
プランク定数	h	$6.626 070 15 \times 10^{-34}$	J s
電気素量	e	$1.602 176 634 \times 10^{-19}$	C
ボルツマン定数	k	$1.380 649 \times 10^{-23}$	$J K^{-1}$
アボガドロ定数	N_A	$6.022 140 76 \times 10^{23}$	mol^{-1}
視感効果度	K_{cd}	683	$lm W^{-1}$

可能な限り連続性を保持することは、国際単位系に対する任意の変更において常に必須の要件である。定義定数の数値は、科学や知見の進展が許す限りにおいて、従前の定義と一貫性を持つよう選ばれた。

2.2.1 七つの定義定数の性質

自然界の基礎定数から人工的に作られた定数に至る様々な定数が、定義定数として用いられている。

定数を使って単位を定義することによって、実現方法から定義が切り離される。これによって、技術が進化していくにつれ、定義を変更する必要無く、従来とは全く異なる、もしくは、新しく優れた実現方法を開発できる可能性が生まれてくる。

K_{cd} (周波数 540×10^{12} Hz の単色放射の視感効果度) などの人工的に作られた定数は、特定の用途のために決められたものである。これは、原則として、例えば、慣習的に用いられている生理的な要因や他の重み付け要因を含めるなど、自由に選択することができる。一方、自然界の基礎定数については、一般に、このような選択は許容されない。基礎定数は、物理学の式によって他の定数と関係付けられるためである。

七つの定義定数の組は、根本的で安定なユニバーサルな基準となり、同時に不確かさが最小の実現方法が実現できるよう選ばれている。技術的な取り決めや規定については、従来の経緯も考慮に入れている。

プランク定数 h と真空中の光の速さ c の双方は、基礎的な定数として記述される。プランク定数 h は量子効果、真空中の光の速さ c は時空特性をそれぞれ決定するものであり、あらゆる環境、あらゆる尺度で、あらゆる粒子および場に等しく影響を与える。

電気素量 e は、微細構造定数 $\alpha = e^2/(2c\epsilon_0 h)$ を通して電磁場の結合強度に対応している。ここで、 ϵ_0 は真空中の誘電率または電気定数である。一部の理論では α の経時変化を予見しているが、その最大変動量は仮に実験的に観測できたとしても極めて小さいものなので、予見できる実際の測定には影響を与えない。

ボルツマン定数 k は、温度 (単位はケルビン) とエネルギー (単位はジュール) という二つの量の間の比例定数であり、その数値は温度目盛の従来の規定から求められる。系の温度は、熱エネルギーに関連づけられるものであるが、系の内部エネルギーに必ずしも関連づけられるとは限らない。統計力学では、ボルツマン定数は、エントロピー S を量子力学的に取り得る状態の数 Ω に結び付けるものであり、 $S = k \ln \Omega$ で表される。

セシウム周波数 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 、すなわち、セシウム 133 原子の摂動を受けない基底状態の超微細構造遷移周波数は、特定の原子の性質に依存しているため、電磁場などの環境による影響を受けることもある。しかし、その基礎となっている遷移は、十分理解され、安定しており、実際には基準遷移として用いるのに適正な選択肢である。 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ のような原子の特性を選択することで、 h 、 c 、 e 、 k の場合と同じように定義と実現を切り離すことにはならないが、これによって基準を定めることができる。

アボガドロ定数 N_A は、物質質量(単位はモル)と要素粒子の計数に関わる量(単位 1、記号は 1) という二つの量の間の比例定数である。このため、アボガドロ定数には、ボルツマン定数 k と類似した比例定数としての特質がある。

周波数 540×10^{12} Hz の単色放射の視感効果度 K_{cd} は、周波数 540×10^{12} ヘルツにおける、人間の眼に知覚を与える放射束の純粋な物理特性 (W) と、標準観測者の分光応答度で起因する光束 (lm) によって定義される光生物学的応答との間の厳密な数値関係を示す人工的に作られた定数である。

2.3 SI 単位の定義

2018 年に採択された定義より前は、SI は七つの**基本単位**を通して定義され、**基本単位**のべき乗の積として**組立単位**が構築されていた。2018 年に七つの定義定数の数値を定めることによって SI を定義することになり、この基本単位と組立単位の区別の必要が原則として不要となった。あらゆる単位、すなわち**基本単位**と**組立単位**、は定義定数から直接構築できるようになったためである。とは言え、基本単位と組立単位という概念は保持されている。これは、この概念が有用かつ歴史的に定着したものであるためのみならず、ISO/IEC 80000 規格シリーズが、ここで定義される SI の基本単位と組立単位に必然的に対応する基本量と組立量を規定しているからである。

2.3.1 基本単位

SI 基本単位を表 2 に示す。

表 2 SI 基本単位

基本量		基本単位	
名称	代表的な記号	名称	記号
時間	t	秒	s
長さ	l, x, r など	メートル	m
質量	m	キログラム	kg
電流	I, i	アンペア	A
熱力学温度	T	ケルビン	K
物質質量	n	モル	mol
光度	I_v	カンデラ	cd

量の記号は、一般に、ラテン語またはギリシャ語のアルファベットの 1 文字を斜体で表記するが、これはあくまで推奨である。単位記号は、直立体(ローマン体) フォントで表記することになっており、これは必須である。第 5 章参照。

定義定数の定められた数値を用いた SI の定義を起点とし、七つの基本単位それぞれの定義が、これらの定義定数の一つもしくは複数を適切に使用することによって導き出され、次に示す定義が与えられている。

秒

秒（記号は s）は、時間の SI 単位であり、セシウム周波数 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 、すなわち、セシウム 133 原子の摂動を受けない基底状態の超微細構造遷移周波数を単位 Hz (s^{-1} に等しい) で表したときに、その数値を 9 192 631 770 と定めることによって定義される。

この定義は、 $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770$ Hz という厳密な関係を示している。この式から定義定数 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ の値を用いて秒を以下のように厳密に表現することができる。

$$1 \text{ Hz} = \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}}}{9\,192\,631\,770} \quad \text{または} \quad 1 \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

この定義は、秒とは、 ^{133}Cs 原子の摂動を受けない基底状態の二つの超微細準位間の遷移に対応する放射の周期の 9 192 631 770 倍の継続時間と等しいことを意味している。

摂動を受けない原子と言っているのは、SI 秒の定義が、黒体放射などの如何なる外部場による摂動も受けない孤立したセシウム原子にもとづくものであることを明確にしようと意図しているためである。

このように定義された秒は、一般相対性理論における固有時の単位である。協定時系 (coordinated time scale) を提供するため、様々な場所の様々な一次標準時計の信号を組み合わせて、これを相対論的セシウム周波数偏移に対して補正する必要がある (2.3.6 項参照)。

国際度量衡委員会 (CIPM) では、選ばれたいくつかの原子、イオン、もしくは、分子のスペクトル線にもとづいた、秒の様々な二次表現 (secondary representation) を採用してきた。これらのスペクトル線の摂動を受けない周波数は、 ^{133}Cs の超微細構造遷移周波数にもとづく秒の実現の相対不確かさを下回らない相対不確かさで確定することができるが、中にはそれよりも優れた周波数安定度で再現できるものもある。

メートル

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 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ によって定義される。

この定義は、 $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ という厳密な関係を示している。この式から定義定数 c および $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ を用いてメートルを以下のように厳密に表現することができる。

$$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} \approx 30.663\,319 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

この定義は、1 メートルとは、1 秒の $1/299\,792\,458$ の継続時間に、光が真空中を伝わる行程の長さであることを意味している。

キログラム

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 s ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ に等しい) 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。ここで、メートルおよび秒は c および $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ に関連して定義される。

この定義は、 $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{s}^{-1}$ という厳密な関係を示している。この式から定義定数 h 、 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 、 c を用いてキログラムを以下のように厳密に表現することができる。

$$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{6.626\,070\,15 \times 10^{-34}} \right) \text{m}^{-2} \text{s}$$

これは次式と等しい。

$$\begin{aligned} 1 \text{ kg} &= \frac{(299\,792\,458)^2}{(6.626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \\ &\approx 1.475\,5214 \times 10^{40} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \end{aligned}$$

この定義は、 $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ という単位（物理量である作用と角運動量の双方の単位）を定義していることを意味している。これは、秒およびメートルの定義と組み合わせることによって、プランク定数 h を用いて表現された質量の単位の定義を導いている。

キログラムの従来の定義では、国際キログラム原器（IPK）の質量 $m(K)$ の値を厳密に 1 キログラムと等しく定めていたので、プランク定数 h の値は、実験によって確定しなければならなかった。現在の定義では、 h の数値を厳密に定め、原器の質量は実験によって決定される。

この定義におけるプランク定数の数値は、キログラム国際原器の質量に等しく、 $1 \text{ kg} = m(K)$ となるよう選ばれている。また、その相対標準不確かさは 1×10^{-8} である。この相対標準不確かさは、従来の定義の下で行われた種々の実験から求められたプランク定数の最良推定値の相対標準不確かさに相当する。

現行の定義では、第一原理にもとづく実現は、原則として、どのような大きさの質量に対しても適用できることに留意されたい。

アンペア

アンペア（記号は A）は、電流の SI 単位であり、電気素量 e を単位 C (A s に等しい) で表したときに、その数値を $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ と定めることによって定義される。ここで、秒は $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ によって定義される。

この定義は $e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ A s}$ という厳密な関係を示している。この式から定義定数 e および $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ を用いてアンペアを以下のように厳密に表現することができる。

$$1 \text{ A} = \left(\frac{e}{1.602\,176\,634 \times 10^{-19}} \right) \text{s}^{-1}$$

これは次式と等しい。

$$1 \text{ A} = \frac{1}{(9\,192\,631\,770)(1.602\,176\,634 \times 10^{-19})} \Delta\nu_{\text{Cs}} e \approx 6.789\,687 \times 10^8 \Delta\nu_{\text{Cs}} e$$

この定義は、1アンペアとは、1秒間に電気素量の $1/(1.602\,176\,634 \times 10^{-19})$ 倍の電荷が流れる電流であることを意味している。

アンペアの従来の定義は、電流を通す2本の導体の間の力にもとづいたもので、真空の透磁率 μ_0 (磁気定数とも呼ばれる) の値を厳密に $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$ と定めることを意味していた。ここで、HとNは、それぞれ一貫性のある組立単位であるヘンリーとニュートンである。アンペアの新たな定義では、 μ_0 ではなく e の値を定めている。この結果、 μ_0 は実験によって決める必要がある。

さらに、真空の誘電率 ϵ_0 (電気定数とも呼ばれる)、真空の特性インピーダンス Z_0 、真空のアドミタンス Y_0 は、それぞれ $1/(\mu_0 c^2)$ 、 $\mu_0 c$ 、 $1/(\mu_0 c)$ に等しいので、新しい定義では、 ϵ_0 、 Z_0 、 Y_0 の値も実験によって決めなければならない。ただし、 c はすでに定義定数になっているので、 μ_0 と同じ相対標準不確かさの影響を受ける。 ϵ_0 と μ_0 の積 $\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$ および Z_0 を μ_0 で割った商 $Z_0/\mu_0 = c$ には、以前と同様に不確かさがない。アンペアの現在の定義を採択した時点では、 μ_0 は $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ と等しく、その相対標準不確かさは 2.3×10^{-10} であった。

ケルビン

ケルビン (記号は K) は、熱力学温度の SI 単位であり、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。ここで、キログラム、メートルおよび秒は h 、 c および $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ に関連して定義される。

この定義は $k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ という厳密な関係を示している。この式から定義定数 k 、 h 、 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ を用いてケルビンを以下のように厳密に表現することができる。

$$1 \text{ K} = \left(\frac{1.380\,649}{k} \right) \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{s}^{-2}$$

これは次式と等しい。

$$1 \text{ K} = \frac{1.380\,649 \times 10^{-23}}{(6.626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k} \approx 2.266\,6653 \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k}$$

この定義は、1ケルビンとは、 $1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}$ の熱エネルギー kT の変化をもたらす熱力学温度の変化に等しいということの意味している。

ケルビンの従来の定義では、水の三重点の温度 T_{TPW} を厳密に 273.16 K としていた。ケルビンの現在の定義では、 T_{TPW} ではなく k の数値を定めているため、 T_{TPW} は実験によって決める必要がある。現在の定義が採択された時点では、定義改定に先立って行われた k の測定にもとづいて決定された T_{TPW} は 273.16 K と等しく、その相対標準不確かさは 3.7×10^{-7} であった。

以前に用いられた温度目盛の定義に由来して、熱力学温度 (記号 T) を氷点近くの $T_0 = 273.15 \text{ K}$ という参照温度からの差を用いて表す方法が、今も広く使われている。この差はセルシウス温度 (記号 t) と呼ばれ、次の量方程式によって定義される。

$$t = T - T_0$$

セルシウス温度の単位は、セルシウス度（記号は°C）であり、定義によって、ケルビンの大きさと等しい。温度の差または間隔はケルビンまたはセルシウス度のどちらによっても表すことができ、その数値は同じになる。ただし、セルシウス度で表したセルシウス温度の数値はケルビンで表した熱力学温度の数値に対して次の関係を持つ。

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15$$

（ここで使われている表記に関する説明については 5.4.1 項参照）

ケルビンとセルシウス度は双方とも 1989 年の国際度量衡委員会の勧告 5 (CI-1989, PV, 57, 115) で採択された 1990 年国際温度目盛 (ITS-90) においても用いられる単位であることに留意されたい。ITS-90 では、 T_{90} と t_{90} という二つの量を定義している。この二つは対応する熱力学温度 T と t の良い近似である。

現行の定義では、ケルビンの第一原理にもとづく実現は、原理的には、温度目盛のどの点においても適用できることに留意されたい。

モル

モル（記号は mol）は、物質量の SI 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。

系の物質量（記号は n ）は、特定された要素粒子の数の尺度である。要素粒子は、原子、分子、イオン、電子、その他の粒子、あるいは、粒子の集合体のいずれであってもよい。

この定義は $N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ という厳密な関係を示している。この式から定義定数 N_A を用いてモルを以下のように厳密に表現することができる。

$$1 \text{ mol} = \left(\frac{6.022\,140\,76 \times 10^{23}}{N_A} \right)$$

この定義は、モルとは、特定された要素粒子を $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ 含んだ系の物質量であることを意味している。

モルの従来の定義では、炭素 12 のモル質量 $M(^{12}\text{C})$ の値を厳密に 0.012 kg/mol と定めていた。現在の定義によれば、 $M(^{12}\text{C})$ はもはや定義から厳密に決めることはできず、実験によって決めなければならない。 N_A の値は、モルに関する現在の定義を採択した時点において、 $M(^{12}\text{C})$ が 0.012 kg/mol に等しく、その相対標準不確かさが 4.5×10^{-10} となるように選定された。

現在でも、あらゆる原子または分子 X のモル質量をその相対原子質量から次の式によって得ることができる。

$$M(\text{X}) = A_r(\text{X}) [M(^{12}\text{C})/12] = A_r(\text{X}) M_u$$

また、あらゆる原子または分子 X のモル質量を次の関係式によって要素粒子の質量 $m(X)$ と関係付けられる。

$$M(X) = N_A m(X) = N_A A_r(X) m_u$$

これらの式において、 M_u はモル質量定数であり、 $M(^{12}\text{C})/12$ に等しく、 m_u は統一原子質量定数であり、 $m(^{12}\text{C})/12$ に等しい。これらは、次の関係式でアボガドロ定数と関係付けられる。

$$M_u = N_A m_u$$

「物質質量」という名称において、「物質」という文言は、通常、特定の用途に関わる物質を明確化する文言と入れ替えられる。例えば、「塩酸 (HCl) の量」、「ベンゼン (C₆H₆) の量」などである。(モルの定義でも強調されているように)、関与する要素粒子に精密な定義を与えることが重要である。この精密な定義は、望ましくは、関与する物質の分子化学式を明確化することによって与えられるべきである。「amount」という単語には、より一般的な辞書的定義があるが、簡潔にするため「amount-of-substance (物質質量)」という正式名称の略語として「amount」を使用してもよい。これは、「amount-of-substance concentration (物質質量濃度)」などの組立量の場合にも適用でき、これを単純に「amount concentration」と呼んでもよい。臨床化学の分野では、「amount-of-substance concentration (物質質量濃度)」は、一般に「substance concentration」と略されている。

カンデラ

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。

この定義は、周波数 $\nu = 540 \times 10^{12}$ Hz の単色放射について $K_{cd} = 683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ という厳密な関係を示している。この式から定義定数 K_{cd} 、 h 、 $\Delta\nu_{Cs}$ を用いてカンデラを以下のように厳密に表現することができる。

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

これは次式と等しい。

$$1 \text{ cd} = \frac{1}{(6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34})(9\ 192\ 631\ 770)^2\ 683} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd}$$

$$\approx 2.614\ 830 \times 10^{10} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd}$$

この定義は、1 カンデラとは、周波数 540×10^{12} Hz の単色放射を放出し、所定の方向における放射強度が $(1/683) \text{ W/sr}$ である光源の、その方向における光度であることを意味している。ステラジアン の定義については、後述の表 4 を参照のこと。

2.3.2 SI 単位の実現方法

物理学の式を使って単位を実現するために用いられる最高レベルの実験方法は、第一原理にもとづく方法として知られている。第一原理にもとづく方法に不可欠な特性は、ある量のある単位で測定する際、その単位が関与しない量の測定のみを使うことができることである。現在の SI の構成では、定義の基礎となるものが、従来使われていたものと異なっており、このため、SI 単位の実現に新たな方法を用いることができる。

実現の精度に根本的な限界を設定してしまうある特定の条件や物理的状态を規定する定義のかわりに、ユーザーは、測定しようとする量に定義定数を結びつけるのに便利な任意の物理学の式を自由に選択することができる。これは、測定の基本単位を定義する方法としては従来よりもはるかに一般性が高まっている。また、今日の科学や技術にしばられるものでもない。すなわち、将来の科学技術の発展によって、今以上に高い正確さで単位を実現する新たな方法が登場するかもしれない。このように定義されているため、原則として、単位の実現の正確さには限界が無い。但し、秒の定義はこの例外である。秒の定義では、当面の間、定義の基礎として、従来からのセシウムのマイクロ波遷移を引き続き使う必要がある。SI 単位の実現に関する更に包括的な説明については、付録 2 を参照のこと。

2.3.3 量の次元

物理量は、次元の系の中で体系化することができ、使用する系は取り決めによって決められる。SI で使われている七つの基本量は、そのそれぞれが自身の次元を持っていると見なされる。基本量に使われる記号、およびそれら次元を表示するのに使われる記号を表 3 に示す。

表 3 SI で使われている基本量と次元

基本量	量に関する代表的な記号	次元の記号
時間	t	T
長さ	l, x, r など	L
質量	m	M
電流	I, i	I
熱力学温度	T	Θ
物質量	n	N
光度	I_v	J

個数の計数を除く、上述以外の他の量は全て組立量で、物理学の式に拠って基本量を用いて示すことができる。組立量の次元は、組立量を基本量に関係付ける式を使って、基本量の次元のべき乗の積で表される。一般に、任意の量 Q の次元は、次に示すように、基本量の次元の積で表される。

$$\dim Q = T^\alpha L^\beta M^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta$$

ここで、指数である α 、 β 、 γ 、 δ 、 ε 、 ζ 、 η は、通常、正または負の小さい整数もしくはゼロで、次元指数と呼ばれる。

量 Q の中には、 Q の次元に関する式の中の次元指数が全てゼロという定義式のものもある。特に、同じ種類の二つの量の比として定義される任意の量がこれにあたる。例えば、屈折率は二つの速さの比であり、また、比誘電率は、真空の誘電率と誘電体媒質の誘電率の比である。このような量は、単純に数字である。関連する単位は 1 (記号は 1) であるが、明示されることは滅多にない (5.4.7 項参照)。

また、SI の七つの基本量を用いて記述することができない、個数を数える性質を持った量もある。例えば、分子の数、細胞または生体分子の数 (例: 特定の核酸配列のコピー)、量子力学における縮退度などである。個数を数える量もまた、単位 1 の量である。

単位 1 は、任意の単位系において、ごく自然に用いられる要素である。すなわち、必然的であり、当たり前存在している。決定によりこれを公式に導入せよという要求はない。従って、SI への正式なトレーサビリティは、適切かつ妥当性確認の行われた測定手順を通して確立することができる。

平面角と立体角も、それぞれラジアンとステラジアンによる表現において、単位 1 の量として、実質的に SI の中で取り扱われている (5.4.8 項参照)。その記号である rad と sr は、検討対象の量が、それぞれ平面角もしくは立体角であること、または、それぞれ平面角もしくは立体角を含んでいることを強調するために、適宜、明示的に示される。ステラジアンについては、例えば、放射測定および測光において、放射束 (光束) と放射強度 (光度) の単位の区別が強調される。しかし、数学および科学のあらゆる領域において、rad = 1 と sr = 1 を使用することが長年に渡って確立された慣習となっている。従来からの経緯により、ラジアンとステラジアンは、2.3.4 項で説明するように、組立単位として扱われている。

単位 1 で表される任意の量 (5.4.7 項参照) については、同じ種類の量の比 (例えば長さの比あるいは割合) あるいは数えられる量 (例えば光子の数や消滅数) のように、量を明確にすることが特に重要である。

2.3.4 組立単位

組立単位は、基本単位のべき乗の積と定義されている。この積の係数が 1 のとき、その組立単位は**一貫性のある組立単位**と呼ばれる。SI の基本単位と一貫性のある組立単位は、一貫性のある集合を形成し、これを**一貫性のある SI 単位**と呼ぶ。ここで「一貫性のある」という文言は、量の数値の間の関係を示す式が、その量自体の間の関係を示す式と全く同じかたちであることを意味する。

SI の一貫性のある組立単位の中には、固有の名称を与えられたものもある。表 4 には、固有の名称を持つ 22 の SI 単位が示されている。七つの基本単位 (表 2) と共に、これらの組立単位は、SI 単位の中核となっている。他の SI 単位は全て、この 29 個の単位のいくつかの組み合わせである。

七つの基本単位と固有の名称を持つ 22 個の SI 単位は、いずれも、七つの定義定数から直接構築できることに留意しておくことが重要である。実際、七つの定義定数の単位は基本単位と組立単位の両者を含む。

国際度量衡総会（CGPM）では、一貫性のある SI 単位の十進の倍量および分量を表す一連の接頭語を採択した（第 3 章参照）。これらは、一貫性のある単位よりも大幅に大きいもしくは小さい量の値を表現するのに便利である。しかし、接頭語が SI 単位と共に使われる場合、接頭語によって、1 以外の係数が導入されるため、結果として生ずる単位は一貫性を持たないものとなる。接頭語は、固有の名称を持つ 29 個の SI 単位のいずれとも共に使うことができるが、基本単位の一つであるキログラムはこの例外である。この詳細は第 3 章に示す。

表 4 固有の名称と記号を持つ 22 個の SI 単位

組立量	単位の 固有の名称	基本単位のみ による表現 ^(a)	他の SI 単位も 用いた表現
平面角	ラジアン ^(b)	rad = m/m	
立体角	ステラジアン ^(c)	sr = m ² /m ²	
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz = s ⁻¹	
力	ニュートン	N = kg m s ⁻²	
圧力、応力	パスカル	Pa = kg m ⁻¹ s ⁻²	
エネルギー、 仕事、熱量	ジュール	J = kg m ² s ⁻²	N m
仕事率、放射束	ワット	W = kg m ² s ⁻³	J/s
電荷	クーロン	C = A s	
電位差 ^(e)	ボルト	V = kg m ² s ⁻³ A ⁻¹	W/A
静電容量	ファラド	F = kg ⁻¹ m ⁻² s ⁴ A ²	C/V
電気抵抗	オーム	Ω = kg m ² s ⁻³ A ⁻²	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S = kg ⁻¹ m ⁻² s ³ A ²	A/V
磁束	ウェーバ	Wb = kg m ² s ⁻² A ⁻¹	V s
磁束密度	テスラ	T = kg s ⁻² A ⁻¹	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H = kg m ² s ⁻² A ⁻²	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(f)	°C = K	
光束	ルーメン	lm = cd sr ^(g)	cd sr
照度	ルクス	lx = cd sr m ⁻²	lm/m ²
放射性核種の 放射能 ^(d, h)	ベクレル	Bq = s ⁻¹	
吸収線量、カーマ	グレイ	Gy = m ² s ⁻²	J/kg
線量当量	シーベルト ⁽ⁱ⁾	Sv = m ² s ⁻²	J/kg
酵素活性	カタール	kat = mol s ⁻¹	

(a) この表に記載した基本単位の記号の順序は、SI 文書第 8 版とは異なっている。これは、第 11 回国際度量衡総会（1960 年）の決議 12 で規定した元々の順序に戻すことを決めた第 21 回単位諮問委員会（2013 年）の決定に従ったためである。決議 12 では、ニュートンは kg m s⁻²、ジュールは kg m² s⁻²、J s は kg m² s⁻¹ として記述された。この意図は、対応する量方程式の基礎となる物理学を反映している。しかしながら、いくつかのより複雑な組立単位に対してはその限りではない。

- (b) ラジアンは、平面角に関する一貫性のある単位である。1 ラジアンは、円の半径に等しい長さの弧が円の中心に対して作る角度である。ラジアンは、また位相角の単位でもある。周期現象において、位相角は、1 周期で 2π rad ずつ増加する。ラジアンは、以前は SI 補助単位であったが、補助単位という分類区分は 1995 年に廃止された。
 - (c) ステラジアンは、立体角に関する一貫性のある単位である。1 ステラジアンは、球の半径の 2 乗に等しい面積を持つ球表面が球の中心に対して作る立体角である。ラジアンと同様、ステラジアンも以前は SI 補助単位であった。
 - (d) ヘルツは周期現象にのみ使用し、ベクレルは、放射性核種の放射能における確率過程にのみ使用すること。
 - (e) 電位差は、数多くの国々で「電圧」とも呼ばれており、また、「electric tension」もしくは単純に「tension」と呼ぶ国もある。
 - (f) セルシウス度は、セルシウス温度を表すために使用される。温度差または温度間隔を表す数値は、セルシウス度とケルビンのいずれで表しても同じである。
 - (g) 測光学では、ステラジアンという名称と記号 sr を単位の表し方の中にそのまま維持している。
 - (h) 放射性核種の放射能について、activity referred to a radionuclide と呼ぶべきところ、誤って radioactivity と呼ばれることがある。
 - (i) シーベルトの使用については国際度量衡委員会の勧告 2 を参照のこと (PV, 2002, 70, 205)
-

七つの基本単位と固有の名称および記号を持つ 22 個の単位は、他の組立量の単位を表すために組み合わせて用いてもよい。量の数には限りがないため、組立量と組立単位を全て網羅した一覧を示すことはできない。表 5 は組立量および基本単位を用いて表したそれらに対応する一貫性のある組立単位のいくつかの例を示す。これに加えて、表 6 は、名称および記号にも組立単位が含まれている一貫性のある組立単位の例を示す。SI 単位全体には、一貫性のある集合と SI 接頭語を使って作られる倍量単位および分量単位が含まれる。

表 5 基本単位を用いて表現された一貫性のある組立単位の例

組立量	量の典型的な記号	基本単位のみによる表現
面積	A	m^2
体積	V	m^3
速さ、速度	v	m s^{-1}
加速度	a	m s^{-2}
波数	σ	m^{-1}
密度、質量密度	ρ	kg m^{-3}
面密度	ρ_A	kg m^{-2}
比体積	v	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$
電流密度	j	A m^{-2}
磁界強度	H	A m^{-1}
物質濃度	c	mol m^{-3}
質量濃度	ρ, γ	kg m^{-3}
輝度	L_v	cd m^{-2}

表 6 名称および記号の中に固有の名称と記号を持つ一貫性のある SI 組立単位が含まれている、一貫性のある SI 組立単位の例

組立量	一貫性のある組立単位の名称	記号	基本単位のみによる表現
粘度	パスカル秒	Pa s	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N m^{-1}	kg s^{-2}
角速度、 角周波数	ラジアン毎秒	rad s^{-1}	s^{-1}
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s^2	s^{-2}
熱流密度、 放射照度	ワット毎平方メートル	W m^{-2}	kg s^{-3}
熱容量、 エントロピー	ジュール毎ケルビン	J K^{-1}	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$
比熱容量、 比エントロピー	ジュール毎キログラム 毎ケルビン	$\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J kg^{-1}	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル 毎ケルビン	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\text{kg m s}^{-3} \text{K}^{-1}$
エネルギー密度	ジュール 毎立方メートル	J m^{-3}	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V m^{-1}	$\text{kg m s}^{-3} \text{A}^{-1}$
電荷密度	クーロン 毎立方メートル	C m^{-3}	A s m^{-3}
表面電荷密度	クーロン 毎平方メートル	C m^{-2}	A s m^{-2}
電束密度、 電気変位	クーロン 毎平方メートル	C m^{-2}	A s m^{-2}
誘電率	ファラド毎メートル	F m^{-1}	$\text{kg}^{-1} \text{m}^{-3} \text{s}^4 \text{A}^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H m^{-1}	$\text{kg m s}^{-2} \text{A}^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J mol^{-1}	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{mol}^{-1}$
モルエントロピー、 モル熱容量	ジュール毎モル 毎ケルビン	$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
照射線量 (x 線および γ 線)	クーロン毎キログラム	C kg^{-1}	A s kg^{-1}
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy s^{-1}	$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W sr^{-1}	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル 毎ステラジアン	$\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2}$	kg s^{-3}
酵素活性濃度	カタール 毎立方メートル	kat m^{-3}	$\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-3}$

ここで重要なことは、それぞれの物理量は、その単位を固有の名称や記号のいくつかを使うことで様々なかたちで表現できるが、一貫性のある SI 単位は本質的には一つだけであるということである。

ただし、この逆は真ではない。一般に、いくつかの量が共通の同じ SI 単位を共有することもあるためである。例えば、熱容量という量と同様にエントロピーという量に対する SI 単位はジュール毎ケルビンである。同様に、基本量である電流と組立量である起磁力では、SI 単位はどちらもアンペアである。このため、単位のみを使った量の特定は避けることが重要である。このことは、専門的な文章だけではなく、例えば、測定機器などにも当てはまる（すなわち、測定機器の読み取り値では、単位と測定した量の双方を表示する必要がある）。

実際に、ある量では、同じ次元を持った異なる量を区別し易くするためにある固有の単位の名称を使用することが選択される。このようなやりかたを使うと、その量が定義された過程が思い起こされることもあるだろう。例えば、トルクという量は位置ベクトルと力のベクトルの外積であり、SI 単位としてはニュートンメートルが用いられる。トルクはエネルギー（SI 単位ジュール）と同じ次元を持つが、トルクを表すために単位としてジュールが使用されることはない。

周波数の SI 単位はヘルツ、角速度および角周波数の SI 単位はラジアン毎秒、放射能の SI 単位はベクレルであり、これらは、1 秒当たりの計数を意味する。この三つの単位はいずれも、正式には毎秒で書くことが正しいわけであるが、異なる名称を使うことによって、この三つの量の異なる特性を強調できる。とりわけ重要なのが、周波数と角周波数を慎重に区別することである。なぜならば、定義上は、角周波数の数値は周波数の数値の 2π 倍であるからである（注：詳細については ISO 80000-3 参照）。この事実を無視すると 2π の誤差が生じる可能性がある。一部の国々では、周波数の値を SI 単位である Hz ではなく、慣習的に「cycle/s」あるいは「cps」を使って表していることに留意すること。但し、「cycle/s」と「cps」のいずれも SI 単位ではない。また、推奨するものではないが、rad/s で表現される量に対して周波数という用語が使われることがよくあることにも留意されたい。このため、「周波数」、「角周波数」、「角速度」と呼ばれる量は、常に、 s^{-1} ではなく、明示的な単位である Hz または rad/s を用いて表現されることが推奨される。

電離放射線の分野では、毎秒ではなく、SI 単位であるベクレルが使われている。また、吸収線量と線量当量には、ジュール毎キログラムではなく、SI 単位のグレイとシーベルトがそれぞれ使われている。毎秒やジュール毎キログラムという単位を使った場合、異なる量を示していると誤解され、この誤りによってヒトの健康に対する危険が生じる恐れがあるため、ベクレル、グレイ、シーベルトという固有の名称が特に導入された。

温度または温度差を表す際には、それぞれ特別な注意を払わなければならない。1 K の温度差は 1°C の温度差と等しいが、絶対温度に関しては、273.15 K の差を考慮しなければならない。セルシウス度という単位は、温度差を表すときのみ一貫性がある。

国際電気標準会議(IEC)では、無効電力の単位に関する固有の名称としてバル（記号: var）を導入した。一貫性のある SI 単位を用いると、バルはボルトアンペアと同じである。

2.3.5 生物学および生理学的作用を示す量の単位

表 2 と表 4 に示した四つの SI 単位、カンデラ、ルーメン、ルクス、シーベルトは、生理学的な重み係数を含む。

ルーメンとルクスは、基本単位であるカンデラから組み立てられている。カンデラと同様、この二つは人の視覚に関する情報を含む。日常生活における光の重要性にもとづき、カンデラは、1954 年に基本単位として確立された。光化学的および光生物学的な量の定義に使われる単位と取り決めに関する詳細情報は付録 3 に記載されている。

電離放射線の照射により物質にはエネルギーが付与される。付与されたエネルギーの質量に対する比は、吸収線量 D と呼ばれている。2002年に国際度量衡委員会で決定されたように、線量当量 $H = Q D$ は、吸収線量 D と、放射線の生物学的影響を考慮し放射線のエネルギーおよび種類に依存する線質係数 Q との積とされている。

生物学的作用を記述し、重み係数を含む量の単位ではあるが、SI単位ではないものもある。以下に二つの例を示す。

音は、空気中で圧力の変動を引き起こし、通常の大気圧と重ね合わさり、それがヒトの耳で感知される。耳の感度は音の周波数に依存するが、これは、圧力変化や周波数の単純な関数ではない。このため、音の聞こえかたを近似するために、音響分野では周波数で重み付けされた量が使われる。このような量は、例えば、聴覚の損傷保護に関する測定で使われている。超音波の影響は、医療診断や治療における同様の懸念を引き起こしている。

医療診断や治療で使われる物質の生物活性を定量化するための単位という分類区分があるが、これについては、SI単位を用いた定義はまだできていない。この理由は、これらの物質に固有の生物学的作用の仕組みが、物理化学的パラメータを用いて定量化できるほど十分にはまだ解明されていないからである。ヒトの健康や安全におけるこれらの物質の重要性の観点から、世界保健機関 (WHO) は、このような物質の生物活性に関する WHO 国際単位 (IU) を定義する責務を担っている。

2.3.6 一般相対性理論の枠組みにおける SI 単位

単位の実現およびその比較プロセスは、理論的背景にもとづく数式を必要とする。場合によっては、こういった数式は相対論的效果を含む。

周波数標準の場合は、電磁気的な信号を使って、距離の離れた地点での比較を行うことができる。この比較結果を解釈するには、一般相対性理論が必要となる。なぜなら、一般相対性理論では、地球表面における高度 1メートル当たり約 1×10^{-16} の周波数標準間の相対的周波数偏移を予測しているためである。最上位の周波数標準を比較する場合は、この大きさの影響を補正する必要がある。

局所的に、すなわち、小さい時空領域で、周波数標準の比較を行う場合は、一般相対性理論で示されている時空の曲率による影響は無視できる。複数の周波数標準において、同じ時空座標 (例えば、同じ運動および加速度つまり重力場) が使われている場合、相対論的影響は完全に無視してよい。

3 SI 単位の十進の倍量および分量

10^{24} から 10^{-24} までの十進の倍量および分量が、SI 単位と共に使用できるものとして与えられている。これらの倍量および分量の接頭語の名称と記号を表 7 に示す。

接頭語記号は、その前後の文章の様式にかかわらず、単位記号と同様に立体で表記され、接頭語記号と単位記号の間に空白を空けずに記載する。da (デカ)、h (ヘクト)、k (キロ) をのぞく全ての倍量を表す接頭語の記号は大文字、全ての分量を表す接頭語の記号は小文字で表記する。接頭語の名称は全て、文頭の場合を除き、小文字で表記する。

SI 接頭語は、厳格に 10 の整数乗を意味しているもので、2 のべき乗を示すために用いてはならない (例えば、1 キロビットは 1000 ビットであって、1024 ビットではない)。2 のべき乗と共に用いる接頭語の名称と記号は、次のように推奨されている。

表 7 SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^1	デカ	da	10^{-1}	デシ	d
10^2	ヘクト	h	10^{-2}	センチ	c
10^3	キロ	k	10^{-3}	ミリ	m
10^6	メガ	M	10^{-6}	マイクロ	μ
10^9	ギガ	G	10^{-9}	ナノ	n
10^{12}	テラ	T	10^{-12}	ピコ	p
10^{15}	ペタ	P	10^{-15}	フェムト	f
10^{18}	エクサ	E	10^{-18}	アト	a
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-24}	ヨクト	y

キビ	Ki	2^{10}
メビ	Mi	2^{20}
ギビ	Gi	2^{30}
テビ	Ti	2^{40}
ペビ	Pi	2^{50}
エクスピ	Ei	2^{60}
ゼビ	Zi	2^{70}
ヨビ	Yi	2^{80}

接頭語の記号を単位記号に結合して作られたグループは、元の単位の倍量および分量を表す新しい不可分な単位記号を形成し、それらを正または負の指数でべき乗することができる。また、他の単位記号と組み合わせて合成単位記号を形成することもできる。

例： pm (ピコメートル)、mmol (ミリモル)、 $G\Omega$ (ギガオーム)、THz (テラヘルツ)

$$2.3 \text{ cm}^3 = 2.3 (\text{cm})^3 = 2.3 (10^{-2} \text{ m})^3 = 2.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ cm}^{-1} = 1 (\text{cm})^{-1} = 1 (10^{-2} \text{ m})^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1} = 100 \text{ m}^{-1}$$

同様に接頭語の名称も、それが結合している単位の名称と不可分である。このため、例えば、ミリメートル、マイクロパスカル、メガニュートンは、一語である。

複数の接頭語記号を並置して作られる接頭語記号、すなわち合成接頭語記号を使用することはできない。同様に、合成接頭語名称を使用することも許されない。

接頭語記号を単独で用いたり、数字の 1 すなわち単位 1 の記号と結合して使うこともできない。同様に、接頭語の名称を単位 1 の名称すなわち “one” という言葉に結合して使うことはできない。

キログラムは、一貫性のある SI 単位の中で唯一、歴史的経緯により、その名称と記号に接頭語が含まれている。質量の単位の十進の倍量および分量

に関する名称は、単位の名称である「グラム」に接頭語の名称を結合して作り、その記号は、単位の記号である「g」に接頭語の記号を結合して作る。例えば、 10^{-6} kg は、マイクロキログラム μkg ではなく、ミリグラム mg と表記される。

4 SI 単位と併用できる非 SI 単位

SI は国際的に合意された基準であり、これを用いて他のあらゆる単位は定義されている。一貫性のある SI 単位には、量に関する特定の値を量方程式に挿入する際、単位変換の必要がないという重要なメリットがある。

とは言え、非 SI 単位の中にも、広く使用され、これからも長年に渡って使われ続けていくと想定されるものもある。このため、国際度量衡委員会 (CIPM) では、一部の非 SI 単位について SI との併用を認めている。このような非 SI 単位を表 8 に示す。これらの非 SI 単位を用いる場合、SI 単位の持つメリットの一部が無くなることを理解しておかなければならない。SI 接頭語は、表 8 に示した単位の一部とは併用できるが、例えば時間の非 SI 単位との併用はできない。

表 8 SI 単位と併用できる非 SI 単位

量	単位の名称	単位記号	SI 単位で表した値
時間	分	min	1 min = 60 s
	時	h	1 h = 60 min = 3600 s
	日	d	1 d = 24 h = 86 400 s
長さ	天文単位 ^(a)	au	1 au = 149 597 870 700 m
平面角および位相角	度	°	1° = (π/180) rad
	分	'	1' = (1/60)° = (π/10 800) rad
	秒 ^(b)	"	1" = (1/60)' = (π/648 000) rad
	ヘクタール ^(c)	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
体積	リットル ^(d)	l, L	1 l = 1 L = 1 dm ³ = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³
質量	トン ^(e)	t	1 t = 10 ³ kg
	ダルトン ^(f)	Da	1 Da = 1.660 539 066 60(50) × 10 ⁻²⁷ kg
エネルギー	電子ボルト ^(g)	eV	1 eV = 1.602 176 634 × 10 ⁻¹⁹ J
比の対数	ネーパ ^(h)	Np	本文参照
	ベル ^(h)	B	
	デシベル ^(h)	dB	

ガル (記号 Gal) は、測地学および地球物理学で重力加速度を表現するために用いられている加速度の非 SI 単位である。

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ m s}^{-2}$$

- (a) 国際天文学連合 (IAU) 第 28 回総会の決定に拠る (決議 B2, 2012)。
- (b) 天文学など一部の利用分野では、微小角度は as または " の記号で表される秒角 (平面角の秒)、あるいは、それぞれ mas、μas、pas、の記号で表されるミリ秒角、マイクロ秒角、ピコ秒角で測定されている。秒角は平面角の秒の別称である。
- (c) ヘクタールという単位とその記号 ha は、1879 年の国際度量衡委員会で採択された (PV, 1879, 41)。ヘクタールは、土地面積を表す際に使われる。
- (d) リットルとその記号である小文字の l は、1879 年の国際度量衡委員会で採択された (PV, 1879, 41)。もう一つの記号である大文字の L は、小文字の l (エル) と数字の 1 (いち) を間違えるリスクを回避するため、第 16 回国際度量衡総会 (CGPM) で採択された (1979 年, 決議 6; CR, 101 および *Metrologia*, 1980, 16, 56-57)。

- (e) トンとその記号 t は、1879 年の国際度量衡委員会で採択された (PV, 1879, 41)。この単位は、一部の英語圏の国で「メートルトン」と呼ばれている。
- (f) ダルトン (Da) と統一原子質量単位 (u) は、同じ単位の別称 (と記号) で、静止して基底状態にある自由な炭素 12 原子の質量の 1/12 と等しい。表中のダルトンの値は、CODATA 2018 の推奨値である。
- (g) 電子ボルトは、電子が真空中で 1 ボルトの電位差を通過することによって得る運動エネルギーである。電子ボルトは、SI 接頭語と組み合わせて使われることが多い。
- (h) これらの単位を使う際には、量の性質が特定されていること、そして、使用されるあらゆる基準値が特定されていることが重要である。

表 8 には、比の対数の単位であるネーパ、ベル、デシベルも含まれている。これらの単位は、対象となる比の対数の性質に関する情報を伝えるために用いられる。ネーパ Np は、ネイピア数を底とする対数 (または自然対数) $\ln = \log_e$ を使って量の値を表す際に使われる。ベル B とデシベル dB は、 $1 \text{ dB} = (1/10) \text{ B}$ の関係にあり、この二つは、10 を底とする対数 $\lg = \log_{10}$ を使って表される比の対数の数値を表す際に使われる。例えば、 X_0 を基準値とする量 X についての比の対数が $L_X = m \text{ dB} = (m/10) \text{ B}$ (ここで m は数字) として表される場合、これは、 $m = 10 \lg(X/X_0)$ であることを意味する。ネーパ、ベル、デシベルという単位は、国際単位系との併用が国際度量衡委員会で認められているが、SI 単位ではない。

上述以外にも数多くの非 SI 単位があり、それらは、歴史的に重要であるもの、あるいは、特有の分野で現在も使用されているもの (例: 石油のバレル) もしくは特定の国々で使われているもの (例: インチ、フット (フィート)、ヤード) のいずれかである。国際度量衡委員会の見る限り、現代の科学や技術においてこのような単位が使われ続けているケースはない。しかし、これらの単位とそれに対応する SI 単位との関係が想起できることは明らかに重要であり、このような状況は今後何十年にも渡って継続するだろう。

5 単位の記号と名称の表記および量の値の表現方法

5.1 単位の記号と名称の使用

単位記号と数字の表記に関する一般原則が最初に決められたのは、第9回国際度量衡総会（CGPM）であった（1948年、決議7）。この一般原則は、その後、国際標準化機構（ISO）、国際電気標準会議（IEC）および他の国際機関によってさらに詳細なものとなった。その結果、現在では、接頭語の記号および名称や量の記号を含む、単位の記号と名称の表記と使用方法および量の値の表記方法について、世界の共通認識が存在する。このような規則と様式の慣例の中でも最も重要なものが本章に記載される。これらを順守することによって、科学技術に関する文献が誰にも読めるものとなる。

5.2 単位記号

単位記号は、その前後の文章で使われている活字書体にかかわらず、直立体で表記される。また、単位記号は小文字で表記する。ただし、単位記号が固有名詞に由来する場合はこの限りではなく、その場合は最初の文字を大文字にする。

例外として、リットルの単位記号について、数字の1（いち）と小文字の1（エル）を間違える可能性を回避するため、大文字のLも小文字のlに加えて使っても良いことが第16回国際度量衡総会で採択された（1979年、決議6）。

倍量または分量の接頭語を使う場合、この接頭語は単位の一部となり、1字分の空白を空けず単位記号の直前に置く。接頭語は単独で使用することはなく、複数の接頭語を合成して使用してはならない。

単位記号は、数式の一部となる要素（mathematical entities）であって、省略記号ではない。このため、単位記号の後には、句点（ピリオド）は打たない。ただし、単位記号が文末に来る場合はこの限りではない。さらに、単位記号の複数形を使ったり、一つの表現（expression）の中で単位記号と単位名称と一緒に使ってはならない。名称は数式の一部ではないからである。

単位記号の積と商については、通常の代数で使われる掛け算や割り算の規則が適用される。掛け算は、1字分の空白もしくは中黒（ \cdot ）で示す。これは、一部の接頭語が単位記号と誤解されることを防ぐためである。割り算は、水平の線、斜線（斜めの線 $/$ ）、もしくは、負の指数で示す。いくつかの単位記号を組み合わせる場合は、例えば、括弧や負の指数を使うなどして、曖昧さを回避するよう注意すること。斜線を単位の一つの表現（expression）の中で複数回使う場合は、曖昧さを取り除くため、括弧で括弧すること。

単位の記号や名称の省略語を使ってはならない。例えば、secは使わず、sまたは秒のいずれかとする。sq.mmは使わず、 mm^2 または平方ミリメートルのいずれかを使う。ccは使わず、 cm^3 または立方センチメートルのいずれかを使う。mpsは使わず、m/sまたはメートル毎秒のいずれかを使う。SI単位および単位全般について、本文書で前述した正式な記号を使わなければならない。これによって、量の値に関する曖昧さや誤解が回避される。

5.3 単位の名称

単位の名称は、通常、直立体で表記し、通常の名詞のように扱う。英語では、文頭の場合もしくは表題のように大文字で書き始めるものを除き、単位の名称は（単位記号が大文字で始まる場合でも）小文字で書き始める。この規則に従って、記号 °C の単位の名称の正しいつづりは「degree Celsius（セルシウス度）」となる（単位 degree は小文字の d で始まり、その修飾語である Celsius は人名に由来するため大文字の C で始まる）。

量の値は、通常、数字の記号と単位記号を使って表されるが、何らかの理由で単位の名称のほうが単位記号よりも相応しいという場合は、単位の名称を省略無しでつづる。

単位の名称が、倍量または分量の接頭語の名称と組み合わせられる場合は、接頭語の名称と単位の名称の間に 1 字分の空白やハイフンを挿入しない。接頭語の名称と単位の名称を組み合わせたものは一語である（訳注：例えば、milligram、第 3 章参照）。

組立単位の名称を、個々の単位の名称を並べて作る場合、1 字分の空白もしくはハイフンのいずれかを使って個々の単位の名称を区切る（訳注：例えば、pascal second または pascal-second）。

5.4 量の値の表現方法に関する規則と様式の慣例

5.4.1 量の値と数値および量の四則演算（quantity calculus）

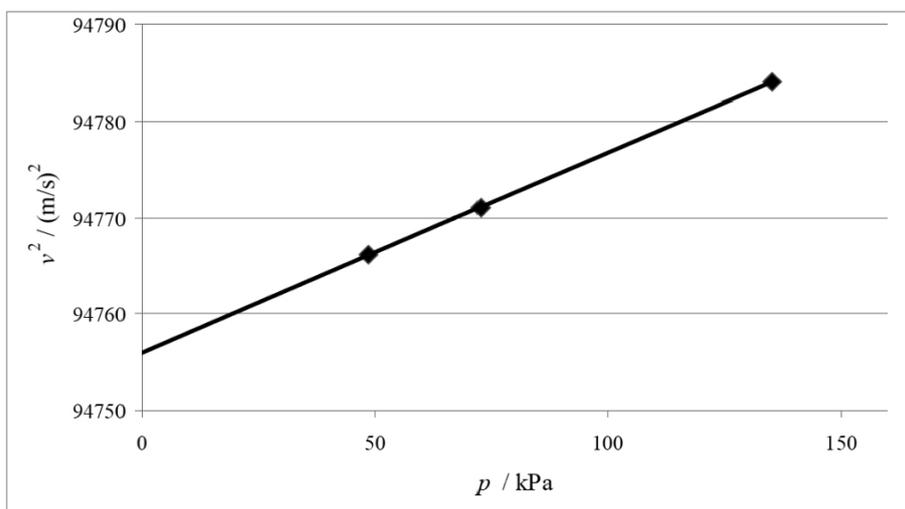
量の記号は、一般にイタリック体（斜体）で表した一文字であるが、下付きもしくは上付き文字、あるいは、括弧を使って情報を追加し、特徴づけることもできる。例えば、 C は熱容量、 C_m はモル熱容量、 $C_{m,p}$ は定圧モル熱容量、 $C_{m,v}$ は定積モル熱容量に対してそれぞれ推奨されている記号である。

量に対して推奨されている名称および記号は、ISO/IEC 80000 シリーズ「量および単位」、IUPAP SUNAMCO レッドブック「物理における記号、単位、用語」、IUPAC グリーンブック「物理化学における量、単位、記号」など数多くの標準的な参考文献にまとめられているが、量の記号はあくまでも推奨されたものに過ぎない（これとは対照的に、単位記号は、正しい形のものを使うことが必須である）。状況によっては、文献の筆者は、ある量について自らが選んだ記号を使いたいと考えることもある。例えば、二つの異なる量について同じ記号を使うと混乱が生じるような場合である。このような場合は、記号の意味を明確に示す必要がある。とは言え、量の名称も、それを表す記号も、特定のいかなる単位の選択を示唆するものではない。

単位記号は、数式の一部となる要素（mathematical entities）として扱われている。ある量の値を数値と単位の積として表現する際、その数値も単位も通常の代数の規則に則って扱われる。このことを量の四則演算（quantity calculus）もしくは量の代数演算（algebra of quantities）と呼ぶ。例えば、 $p = 48 \text{ kPa}$ という式は、 $p/\text{kPa} = 48$ と書くこともできる。表の中の各欄の見出しには、このように量と単位の比で記載することが一般的である。これにより、表中の記載は単純に数値だけでよくなる。例えば、速度の 2 乗対圧力を示す表は、次のような形式を使うこともできる。

p/kPa	$v^2/(\text{m/s})^2$
48.73	94766
72.87	94771
135.42	94784

また、次に示すグラフのように、グラフの軸も同じようなかたちで記載して、目盛を数値のみで表記することができる。



5.4.2 量の記号と単位記号

単位記号は、量に関する情報を提供するために使ってはならず、また、量に関する唯一の情報源としてはならない。単位は、量の性質に関する追加情報によって限定を加えられることはない。量の性質に関する追加情報は全て、量の記号に付与されるものであり、単位記号に付与されるものではない。

例：

最大電位差は
 $U_{\max} = 1000 \text{ V}$ であって、
 $U = 1000 \text{ V}_{\max}$ ではない。

シリコン試料中の銅の質量分率は
 $w(\text{Cu}) = 1.3 \times 10^{-6}$ であって、
 $1.3 \times 10^{-6} \text{ w/w}$ ではない。

5.4.3 量の値の形式

数値は、常に単位の前に来て、必ず1字分の空白を使って数字と単位を離す。このように量の値は、数字と単位の積で表される。数字と単位の間1字分の空白は、(単位と単位の間1字分の空白が掛け算を示唆するのと同様に) 掛け算の記号とみなされる。この規則の唯一の例外は、平面角の度(°)、分(')、秒(")である。この三つについては、数値と単位記号の間に空白は取らない。

この規則により、セルシウス温度 t の値を表記するには、その単位記号である °C の前に1字分の空白を挿入する。

量の値が形容詞として使われる場合も、数値と単位記号の間に1字分の空白を空ける。単位の名称がつづられている場合のみ、通常の文法の規則が適用されるため、英語では、ハイフンを使って数値と単位を離すことになる。

いかなる表現においても、一つの表現の中で使う単位は一つである。この規則の例外として、時間、および平面角の値を非 SI 単位で表す場合がある。しかし、平面角については一般に度を十進法で表すことが好まれているので、 $22^\circ 12'$ という表現ではなく、 22.20° と表記することが望ましい。ただし、航海学、地図作成、天文学、そして微小角度の測定などの分野ではこの限りではない。

$m = 12.3 \text{ g}$

ここで、 m は質量という量を表す記号。

一方、

$\varphi = 30^\circ 22' 8''$

ここで、 φ は平面角という量を表す記号。

$t = 30.2^\circ \text{C}$ であって、

$t = 30.2^\circ \text{C}$ あるいは

$t = 30.2^\circ \text{C}$ ではない。

例：

a 10 k Ω resistor

a 35-millimeter film

$l = 10.234 \text{ m}$ であり、

$l = 10 \text{ m } 23.4 \text{ cm}$ ではない。

5.4.4 数字の形式および小数点

数字の整数部分と小数部分を分ける記号を小数点と呼ぶ。第22回国際度量衡総会(2003年,決議10)の決定により、小数点は「点(.)またはカンマ(,)のどちらかを使う」ことになっている。どちらを選ぶかは、言語の習慣や関連する状況による。

数字が+1と-1の間にある場合は、小数点の前に常にゼロを記載する。

第9回国際度量衡総会(1948年,決議7)および第22回国際度量衡総会(2003年,決議10)により、桁数の多い数字を表記する際は、読み易くするために、3桁ごとに空白を空けてもよいことになった。この3桁ごとのグループの間に点やカンマは挿入しない。しかし、小数点の前または後の桁数が4桁のみの場合は、1桁だけを分けるための空白は設けないことが一般的である。このようなかたちで桁数をグループ分けするか否かは、それぞれの選択に委ねられる。設計図、財務諸表、コンピュータが読み取るスクリプト(scripts)などの特定の専門的分野では、このやりかたは必ずしも使われていない。

表中の数字の場合、同じ欄の中で使用する形式は統一する。

-0.234であって、-.234ではない。

43 279.168 29はよいが、43,279.168,29は不可。

3279.1683あるいは3 279.168 3のどちらでもよい。

5.4.5 量の値における測定の不確かさの表現

量の推定値の不確かさは、JCGM 100:2008 (GUM 1995に微修正を加えたもの)「測定データの評価 - 計測における不確かさの表現のガイド」に従って評価し、表現する。 x という量の標準不確かさは $u(x)$ と表される。標準不確かさを示す便利な方法を次の例に示す。

$$m_n = 1.674\,927\,471\,(21) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

ここで、 m_n は量の記号(この場合は中性子の質量)、括弧内の数字は m_n の推定値の標準不確かさの数値で、引用された推定値の最後の2桁に対応する。この例では、 $u(m_n) = 0.000\,000\,021 \times 10^{-27} \text{ kg}$ である。標準不確かさ $u(x)$ の代わりに拡張不確かさ $U(x)$ を使う場合は、包含確率 p と包含係数 k を明示しなければならない。

5.4.6 量の記号、量の値、数の乗除

量の記号を乗除する場合は、次に示す方法のいずれを用いてもよい。

$$ab, a b, a \cdot b, a \times b, a/b, \frac{a}{b}, a b^{-1}$$

量の値の積を表す場合は、中黒(\cdot)は使わず、乗算記号 \times あるいは括弧のいずれかを使う。数のみの乗算では、乗算記号 \times を使う。

斜線を使って表記した量の値を除算する場合は、曖昧さを排除するため、括弧を用いる。

例:

$F = ma$ は、力が質量と加速度の積であることを表している。

$(53 \text{ m/s}) \times 10.2 \text{ s}$ または $(53 \text{ m/s})(10.2 \text{ s})$

25×60.5 と表記すべきで $25 \cdot 60.5$ は不可。

$(20 \text{ m})/(5 \text{ s}) = 4 \text{ m/s}$

$(a/b)/c$ と表記すべきで、 $a/b/c$ は不可。

5.4.7 純粋に数字 (pure number) である量の値の表示方法

2.3.3 項で述べたように、単位 1 (unit one) の量の値は、単純に数字で表現される。単位記号の 1 あるいは単位の名称である「いち (one)」は、明示的に示されることはない。SI 接頭語の記号は、単位記号 1 にも単位の名称である「いち (one)」にも付けることができないため、特に大きな値または小さい値を表すには 10 のべき乗が使われる。

同じ種類の量の比である量 (例えば、長さの比、物質質量分率) の表現のしかたにはいくつかの選択肢があり、表記されている量を分かり易くするために単位と共に表記する (m/m, mol/mol) ことも、また、SI 接頭語も合わせて使うほうが望ましい場合はこれを使う ($\mu\text{m}/\text{m}$, nmol/mol) こともできる。計数に関わる量は単に数字であり、このような選択肢はない。

国際的に認められている記号である % (パーセント) は、SI と併用してもよい。% を使う場合は、数字と記号 % を離すために空白を入れる。「パーセント」という名称ではなく、記号の % を使うのがよい。しかし、文章の場合、記号の % は、一般に「parts per hundred (百分率)」の意味で使われる。「質量パーセント」、「体積パーセント」、「物質質量パーセント」などの言い回しを単位として使ってはならない。量に関する追加情報は、このような言い回しではなく、量の説明と記号で伝えるべきである。

相対値である 10^{-6} 、あるいは、 10^6 分の 1、あるいは、「parts per million (百万分率)」を意味する「ppm」という用語も使われる。これは、パーセントの意味の一つである「parts per hundred (百分率)」に類似したものである。「parts per billion」と「parts per trillion」、そしてこの二つに対応する略語である「ppb」と「ppt」もまた使われるが、これらの意味は、言語によって違ってくる。このため、ppb と ppt という略語は使用を避けるべきである。

5.4.8 平面角、立体角、位相角

平面角と位相角に関する一貫性のある SI 単位はラジアン、単位記号は rad であり、立体角の場合は、ステラジアン、単位記号は sr である。

ある一点から始まる二つの直線の間の平面角はラジアンで表記され、その二つの直線の間で、その共通点から始まる長さ r の半径ベクトルで掃引される円弧の長さ s を半径ベクトルの長さで割ったもの、 $\theta = s/r$ rad である。位相角 (単に「位相」と呼ばれることが多い) は複素数の偏角であり、複素平面でその複素数を極座標で表したときの、正の実軸と動径との間の角度である。

1 ラジアンは、 $s = r$ のときの角度であり、それゆえ、 $1 \text{ rad} = 1$ となる。直角の大きさ (measure) は $\pi/2$ と厳密に等しい。

歴史的に使われてきた慣例は度である。ラジアンと度とは、 $360^\circ = 2\pi \text{ rad}$ の関係にもとづいて変換できる。度 (記号は $^\circ$) は、SI 単位ではないことに留意する。

立体角はステラジアンで表記され、これは、半径 r の球の表面の面積 A と半径の 2 乗との比、 $\Omega = A/r^2$ sr である。1 ステラジアンは、 $A = r^2$ のときの立体角で、それゆえ $1 \text{ sr} = 1$ となる。

rad と sr という単位は、それぞれ、二つの長さおよび二つの長さの 2 乗の比であるが、rad と sr は、それぞれ角度と立体角を表すためにだけに使うべきもので、一般の長さの比や長さの 2 乗の比を表すために使うものではないことを強調しておく。

n が屈折率という量の記号である場合、
 $n = 1.51$ と表記すべきで
 $n = 1.51 \times 1$ は不可。

英語圏の国々では、「a billion」は 10^9 、「a trillion」は 10^{12} とするのが一般的だが、「a billion」が 10^{12} 、「a trillion」が 10^{18} と解釈される場合もある。また、ppt という略語は「parts per thousand」と読まれることもあり、混乱がさらに増している。

1960 年開催の第 11 回国際度量衡総会 (CGPM) で SI が採択されたとき、ラジアンとステラジアンを取り入れるため「補助単位」という分類区分が作られた。その数十年後に国際度量衡総会は次に示す二つの決定を行っている。(1) SI の中の補助単位、すなわちラジアンとステラジアンは、他の SI 組立単位の表現の中で、適宜、使用してもよい (が、必ずしも使用する必要はない) 無次元の組立単位、名称、記号と解釈する。(2) 補助単位という分類区分を廃止する (第 20 回国際度量衡総会 (1995 年、決議 8))。

付録 1

国際度量衡総会（CGPM）および国際度量衡委員会（CIPM）の決定

この付録は、SI 単位の決定、国際単位系（SI）の一部として用法が定義されている接頭語、および単位記号とその数値の書き方のための取決めに関して、直接に関係をもつ国際度量衡総会および国際度量衡委員会の諸決定を記載する。これは上記の総会および委員会の諸決定の完全な記録ではない。完全な記録に関しては、国際度量衡総会報告（*Comptes Rendus des Séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures: CR*）および国際度量衡委員会議事録（*Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures: PV*）の既刊の各号を、また最近の決定に関しては、*Metrologia* をも参照すべきである。

SI は不変的な取決めではなくて、計量学における発達に伴って進化しているので、ある決定は取り消されたり、変更されているし、他のものは追記によって明確化されている。そのような変更されている決定はアスタリスク (*) によって認識され、注記によって修正された決定に結びつけられている。

各決定の原文は、それを主文と区別するために、主文とは異なるフォントで示されている（訳注：日本語版文書ではこの体裁になっていない）。アスタリスクと注記は文書をより理解しやすくするために、国際度量衡局（BIPM）によって付け加えられた。これらの印と注記は本来の決定事項の部分を構成するものではない。

1889 年から 2018 年までの国際度量衡総会と国際度量衡委員会の決定はこの付録に年代順に記載されている。しかし、特定のトピックに関連する決定が容易に見つけられるよう、トピックでまとめられた目次が収録されており、関連した決定が行われた会議にかかるページが記載されている。

付録1の目次（トピックごと）

SI 設立に関する決定		ページ	訳注
第9回 CGPM, 1948年:	SI 設立の決定	129	SI : 国際単位系
第10回 CGPM, 1954年:	最初の六つの基本単位の決定	131	CGPM : 国際度量衡総会
CIPM, 1956年:	名称「Système International d'Unités」の決定	131	CIPM : 国際度量衡委員会
第11回 CGPM:	略称「SI」の確認		
	接頭語 テラからピコまでの決定		
	補助単位 ラジアンおよびステラジアンの設定		
	組立単位の追加	132	
CIPM, 1969年:	基本・補助・組立・一貫性のある単位と接頭語の使用に関する声明	138	
CIPM, 2001年:	SI 単位	148	
第23回 CGPM, 2007年:	いくつかの SI 基本単位の再定義の可能性	155	
第24回 CGPM, 2011年:	今後考えられる SI 改定	157	
第25回 CGPM, 2014年:	SI の今後の改定	163	
第26回 CGPM, 2018年:	SI の改定（2019年5月20日施行）	165	
SI 基本単位に関する決定			
長さ			
第1回 CGPM, 1889年:	メートル原器の承認	126	
第7回 CGPM, 1927年:	メートル原器の定義と使用方法	127	
第10回 CGPM, 1954年:	基本単位としてのメートルの採用	131	
第11回 CGPM, 1960年:	クリプトン 86 からの放射波長を用いたメートルの再定義	132	
第15回 CGPM:	光の速さの推奨値	140	
第17回 CGPM:	光の速さを用いたメートルの再定義、メートル定義の実現	143	
CIPM, 2002年:	メートル定義の実現方法の規定	149	
CIPM, 2003年:	推奨放射リストの改定	151	
CIPM, 2005年:	推奨放射リストの改定	153	
CIPM, 2007年:	推奨放射リストの改定	154	
第23回 CGPM, 2007年:	メートルの定義の実現方法の改定および新しい光周波数標準の開発	154	
CIPM, 2009年:	標準周波数リストの更新	157	
第24回 CGPM, 2011年:	今後考えられる SI 改定	157	
第24回 CGPM, 2011年:	メートルの定義の実現方法の改定および新しい光周波数標準の開発	161	
CIPM, 2013年:	標準周波数リストの更新	161	
第26回 CGPM, 2018年:	SI の改定（2019年5月20日施行）	165	
質量			
第1回 CGPM, 1889年:	キログラム原器の承認	126	
第3回 CGPM, 1901年:	質量と重量の区別と標準重力加速度 g_n の宣言	126	

第 10 回 CGPM, 1954 年 :	基本単位としてのキログラムの採用	131	訳注
CIPM, 1967 年 :	グラムに対する接頭語に関する宣言	136	SI : 国際単位系
第 21 回 CGPM, 1999 年 :	将来のキログラム再定義	147	CGPM : 国際度量衡総会
第 23 回 CGPM, 2007 年 :	いくつかの SI 基本単位の再定義の可能性	155	CIPM : 国際度量衡委員会
第 24 回 CGPM, 2011 年 :	今後考えられる SI 改定	157	
第 25 回 CGPM, 2014 年 :	SI の今後の改定	163	
第 26 回 CGPM, 2018 年 :	SI の改定 (2019 年 5 月 20 日施行)	165	

時間

第 10 回 CGPM, 1954 年 :	基本単位としての秒の採用	131
CIPM, 1956 年 :	太陽年 1900 年を用いた秒の定義	131
第 11 回 CGPM, 1960 年 :	1956 年の CIPM の秒の定義の承認	132
CIPM, 1964 年 :	セシウム 133 原子の超微細遷移を 推奨される標準として宣言	134
第 12 回 CGPM, 1964 年 :	CIPM に対する原子および分子周波数標準の 研究を行う権限付与	134
第 13 回 CGPM, 1967/68 年 :	セシウム原子の遷移周波数による秒の定義	136
CCDS, 1970 年 :	国際原子時 (TAI) の定義	138
第 14 回 CGPM, 1971 年 :	CIPM に対する TAI の定義付けと設立の 要請	139
第 15 回 CGPM, 1975 年 :	協定世界時 (UTC) 使用の推奨	140
CIPM, 2006 年 :	秒の二次表現	153
第 23 回 CGPM, 2007 年 :	メートルの定義の実現方法の改定および 新しい光周波数標準の開発	154
CIPM, 2009 年 :	標準周波数リストの更新	157
第 24 回 CGPM, 2011 年 :	今後考えられる SI 改定について	157
第 24 回 CGPM, 2011 年 :	メートルの定義の実現方法の改定および 新しい光周波数標準の開発	161
CIPM, 2013 年 :	標準周波数リストの更新	161
CIPM, 2015 年 :	標準周波数リストの更新	164
第 26 回 CGPM, 2018 年 :	SI の改定 (2019 年 5 月 20 日施行)	165

電気単位

CIPM, 1946 年 :	メートル - キログラム - 秒 (MKS) 単位系に おける一貫性のある電気単位の定義 (1948 年 1 月 1 日施行)	127
第 10 回 CGPM, 1954 年 :	基本単位としてのアンペアの採用	131
第 14 回 CGPM, 1971 年 :	電気コンダクタンスのための ジーメンズ (記号 S) を採択	139
第 18 回 CGPM, 1987 年 :	ボルトとオームの実現に対する 今後の調整	144
CIPM, 1988 年 :	ジョセフソン定数の協定値 (1990 年 1 月 1 日施行)	145
CIPM, 1988 年 :	フォン・クリツィング定数の協定値 (1990 年 1 月 1 日施行)	145
第 23 回 CGPM, 2007 年 :	いくつかの SI 基本単位の再定義の可能性	155
第 24 回 CGPM, 2011 年 :	今後考えられる SI 改定	157

第 25 回 CGPM, 2014 年 :	SI の今後の改定	163	訳注
第 26 回 CGPM, 2018 年 :	SI の改定 (2019 年 5 月 20 日施行)	165	SI : 国際単位系 CGPM : 国際度量衡総会 CIPM : 国際度量衡委員会

熱力学温度

第 9 回 CGPM, 1948 年 :	熱力学温度の参照点として水の三重点を採択、セルシウス温度の零点として水の三重点より 0.01 度低い温度を採択	128
CIPM, 1948 年 :	セルシウス温度目盛りの名称を採択	129
第 10 回 CGPM, 1954 年 :	水の三重点を厳密に 273.16 K とする	
	熱力学温度の定義、標準大気圧の定義	130
第 10 回 CGPM, 1954 年 :	基本単位としてケルビン度の採用	131
第 13 回 CGPM, 1967/68 年 :	ケルビンの正式な定義、記号 K の決定	136
CIPM, 1989 年 :	1990 年国際温度目盛、ITS-90	146
CIPM, 2005 年 :	ケルビンの定義への水の同位体組成に関する追記	152
第 23 回 CGPM, 2007 年 :	ケルビンの定義、熱力学温度の単位の明確化	155
第 23 回 CGPM, 2007 年 :	いくつかの SI の基本単位の再定義の可能性	155
第 24 回 CGPM, 2011 年 :	今後考えられる SI 改定	157
第 25 回 CGPM, 2014 年 :	SI の今後の改定	163
第 26 回 CGPM, 2018 年 :	SI の改定 (2019 年 5 月 20 日施行)	165

物質質量

第 14 回 CGPM, 1971 年 :	7 番目の基本単位としてのモル (記号 mol) の定義とその使用方法	139
第 21 回 CGPM, 1999 年 :	カタール (記号 kat) の採用	148
第 23 回 CGPM, 2007 年 :	いくつかの SI 基本単位の再定義の可能性	155
第 24 回 CGPM, 2011 年 :	今後考えられる SI 改定	157
第 25 回 CGPM, 2014 年 :	SI の今後の改定	163
第 26 回 CGPM, 2018 年 :	SI の改定 (2019 年 5 月 20 日施行)	165

光度

CIPM, 1946 年 :	測光量の単位、ブージ・ヌーベルとルーメン・ヌーボーの定義 (1948 年 1 月 1 日施行)	127
第 10 回 CGPM, 1954 年 :	基本単位としてのカンデラの採用	131
第 13 回 CGPM, 1967/68 年 :	黒体放射体を用いたカンデラ (記号 cd) の定義	137
第 16 回 CGPM, 1979 年 :	単色放射を用いたカンデラの再定義	141
第 24 回 CGPM, 2011 年 :	今後考えられる SI 改定	157
第 26 回 CGPM, 2018 年 :	SI の改定 (2019 年 5 月 20 日施行)	165

SI 組立単位と補助単位に関する決定

SI 組立単位

第 12 回 CGPM, 1964 年 :	非 SI 単位としてのキュリーの継続的な使用に対する容認	135
第 13 回 CGPM, 1967/68 年 :	組立単位の例の更新	137

第 15 回 CGPM, 1975 年 :	ベクレル Bq とグレイ Gy の採用	140	訳注
第 16 回 CGPM, 1979 年 :	シーベルト Sv の採用	141	SI : 国際単位系
CIPM, 1984 年 :	吸収線量 (グレイ) と線量当量 (シーベルト) との関係の明確化のための決定	144	CGPM : 国際度量衡総会 CIPM : 国際度量衡委員会
CIPM, 2002 年 :	吸収線量と線量当量との関係を修正	150	

補助単位

CIPM, 1980 年 :	無次元組立単位としての補助単位の解釈にかかる決定	142
第 20 回 CGPM, 1995 年 :	補助単位の階級の廃止と CIPM による補助単位が無次元組立単位であるとの解釈の確認	147

重要な専門用語の決定と SI と共に使用する単位に関する決定

SI 接頭語

第 12 回 CGPM, 1964 年 :	接頭語フェムトとアトの追加の決定	135
第 15 回 CGPM, 1975 年 :	接頭語ペタとエクサの追加の決定	141
第 19 回 CGPM, 1991 年 :	接頭語ゼタ、ゼプト、ヨタ、ヨクトの追加の決定	147

単位記号と数

第 9 回 CGPM, 1948 年 :	単位記号の表し方の決定	129
----------------------	-------------	-----

単位名称

第 13 回 CGPM, 1967/68 年 :	マイクロンとブージ・ヌーベルの使用の廃止	138
--------------------------	----------------------	-----

小数点

第 22 回 CGPM, 2003 年 :	小数点としてのカンマ、ピリオド使用の許可	151
-----------------------	----------------------	-----

SI と共に使用することが許可された単位：リットルなど

第 3 回 CGPM, 1901 年 :	1 キログラムの水の体積としてリットルを定義	126
第 11 回 CGPM, 1960 年 :	CIPM に対するリットルと立方デシメートルの違いを報告する要請	134
CIPM, 1961 年 :	体積をリットルでなく SI 単位を使用して表記する推奨	134
第 12 回 CGPM, 1964 年 :	リットルの従前定義の廃止、リットルを立方デシメートルに対する特別な名称として推奨	135
第 16 回 CGPM, 1979 年 :	リットルの記号として、l と L の両方を認める例外的な決定	142

第 1 回 国際度量衡総会 (CGPM), 1889 年

■メートルとキログラムの国際原器の承認 (CR, 34-38) *

国際度量衡総会は、

- 「国際度量衡委員会委員長報告」と「国際度量衡委員会報告書」の両報告は、国際メートル委員会フランス部会と国際度量衡委員会との協力によって、メートルとキログラムの国際原器並びに国家原器の根本的な測定が、現在と科学が可能とする最高の正確さと信頼性によって行われたことを示すこと
- メートルとキログラムの国際原器および国家原器が、 (10 ± 0.01) パーセントのイリジウムを混ぜた白金合金で作られていること
- 国際メートル原器の長さおよび国際キログラム原器の質量と、フランス国立公文書館に置かれているメートル原器の長さおよびキログラム原器の質量が同等であること
- 国家メートル原器の国際メートル原器に対する器差が、0.01 ミリメートルの範囲に収まっていること、およびそれらの器差が、水素の物性の不変性のゆえに、同一条件の下に置かれればいつでも再現することが可能である水素気体温度計目盛を根拠としていること
- 国家キログラム原器の国際キログラム原器に対する器差が、1 ミリグラムの範囲に収まっていること
- 国際メートル原器と国際キログラム原器および国家メートル原器と国家キログラム原器が、メートル条約によって要求された条件を満たしていること

を考慮し、

A. 国際原器に関して

1. 国際度量衡委員会によって選定されたメートル原器。今後この原器は氷の融解温度においてメートル法における長さの単位を表すこと
2. 国際度量衡委員会によって採用されたキログラム原器。今後この原器は質量の単位と見なされること
3. 各メートル原器の器差が設定された際に参照した水素気体温度計による百分割温度目盛

B. 国家原器に関して

…略…

を承認する。

* このメートルの定義は 1960 年の第 11 回国際度量衡総会で廃止された (決議 6, p. 132 参照)。

第 3 回 国際度量衡総会 (CGPM), 1901 年

■ リットルの定義についての声明 (CR, 38-39) *

…

国際度量衡総会は、

1. 高精度測定のための体積の単位は、最大密度で、標準大気圧の下にある 1 キログラムの純水によって占められる体積であり、その体積を「リットル」と称する
 2. …
- ことを声明する。

■ 質量の単位と重量の定義に関する声明 ; g_n の協定値 (CR, 70)

キログラムが質量の単位として定義された 1887 年 10 月 15 日の国際度量衡委員会の決定を考慮し、

* この定義は、1964 年の第 12 回国際度量衡総会 (決議 6, p. 135 参照) によって廃棄された。

国際度量衡総会によって、1889年9月26日の会合において満場一致で採択されたメートル法諸原器承認の文書に含まれている決定を考慮し、あるときは質量に対して、あるときは力学的な力に対して使われている重量という用語の意味について、日常的な使い方の中にいまだに残っているあいまいさを取り除く必要を考慮し、

国際度量衡総会は

1. キログラムは質量の単位であって、それは国際キログラム原器の質量に等しい*
2. 「重量」という用語は「力」と同じ性質の量を示す。ある物体の重量は、その物体の質量と重力加速度の積であること、特に、ある物体の標準重量は、その物体の質量と標準重力加速度の積である
3. 標準重力加速度の値に対して国際度量衡業務で採用された数値は 980.665 cm/s^2 であり、すでにいくつかの国の法律において明記されている。**
ことを声明する。

* この定義は、2018年の第26回国際度量衡総会（決議1, p. 165参照）によって廃止された。

** この g_n の値は、現在は排除されている単位であるキログラム重を計算するための協定参照値である。

第7回 国際度量衡総会 (CGPM), 1927年

■ 国際原器によるメートルの定義 (CR, 49) *

長さの単位はメートルであり、国際度量衡局 (BIPM) に保管され、第1回国際度量衡総会によってメートル原器であると声明された白金イリジウムの棒の上の両端にそれぞれしるされた二つの中心線の軸間の、温度 0°C における距離によって定義される。この物差しは標準大気圧下にあつて、同一水平面上で、互いに 571 mm 離れて対称に置かれた、少なくとも直径 1 センチメートル はある2個のころによって支持される。

* この定義は、1960年の第11回国際度量衡総会により撤廃された（決議6, p. 132参照）。

国際度量衡委員会 (CIPM), 1946年

■ 測光量の単位の定義 (PV, 20, 119-122) *

決議

4. 測光量の単位は次のように定義される：

ブージ・ヌーベル（光度の単位）— ブージ・ヌーベルの大きさは、白金の凝固点温度における完全放射体の輝度が 1 平方センチメートル 当たり 60 ブージ・ヌーベル になるような量に相当する。

ルーメン・ヌーボー（光束の単位）— ルーメン・ヌーボーは、 1 ブージ・ヌーベル の光度をもつ一様な点光源から単位立体角（ステラジアン）に放射される光束である。

5. …

* この決議に含まれている二つの定義は、1948年の第9回国際度量衡総会によって承認された。また、総会は「ブージ・ヌーベル」に対してカンデラという名称を与えることを承認した (CR, 54)。

その後、ルーメンに対して形容詞「ヌーボー」が削除された。

この定義は1967年の第13回国際度量衡総会によって修正された（決議5, p. 137参照）。

■ 電気単位の定義 (PV, 20, 132-133)

決議2

…

4. (A) 電気単位の定義に用いられる力学単位の定義：

力の単位 — (MKS (メートル、キログラム、秒) における) 力の単位は、 1 キログラム の質量に 1 m s^{-2} の加速度を与える力である

この決議に含まれている定義は1948年の第9回国際度量衡総会 (CR, 49) によって承認された。また、総会は力の MKS 単位に対してニュートンという名称を採択した（決議7, p. 129参照）。

ジュール（エネルギーまたは仕事の単位）— ジュールは、1 MKS 単位の力（ニュートン）の作用点はその力の方向に 1 メートルに等しい距離だけ移動するときになされる仕事である

ワット（仕事率の単位）— ワットは、毎秒 1 ジュールに等しいエネルギーを生じさせる仕事率である

(B) 電気単位の定義：国際度量衡委員会は、電気単位の理論的な大きさを定める次の提案を承認する。

アンペア（電流の単位）— 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 2 本の直線状導体のそれぞれを流れ、これらの導体の長さ 1 メートルにつき力の MKS 単位（ニュートン）の 2×10^{-7} 倍の力を及ぼし合う一定の電流である *

ボルト（電位差および起電力の単位）— ボルトは、1 アンペアの一定電流が流れている 1 本の導体の 2 点間で消費される電力が 1 ワットに等しいとき、その 2 点間に存在する電位差である

オーム（電気抵抗の単位）— オームは、起電力源を含まない 1 個の導体の 2 点間に加えられた 1 ボルトの一定電位差がこの導体中に 1 アンペアの電流を生じさせるとき、その 2 点間に存在する電気抵抗である

クーロン（電気量の単位）— クーロンは、1 アンペアの電流によって 1 秒間に運ばれる電気量である

ファラド（静電容量の単位）— ファラドは、1 クーロンに等しい電気量を印加されたとき、電極間に 1 ボルトの電位差が現れるコンデンサーの静電容量である

ヘンリー（インダクタンスの単位）— ヘンリーは、一つの閉回路を周回する電流が 1 アンペア毎秒の割合で一様に変化するとき、内部に 1 ボルトの起電力が生じる閉回路のインダクタンスである

ウェーバ（磁束の単位）— ウェーバは、1 回巻きの閉回路を貫く磁束を一様に減少させていって 1 秒間で消滅させるとき、1 ボルトの起電力を発生させる磁束である

1954 年、第 10 回国際度量衡総会（決議 6, p. 131 参照）において、国際実用単位系が確立された。アンペアはこの単位系の基本単位として指定された。

* このアンペアの定義は 2018 年の第 26 回国際度量衡総会（決議 1, p. 165 参照）によって、廃止された。

第 9 回 国際度量衡総会（CGPM），1948 年

■ 水の三重点;ただ一つの定点による熱力学温度目盛;熱量の単位（ジュール）
(CR, 55 および 63)

決議 3

1. 現段階の技術では、水の三重点の方が氷の融解点よりも正確に測温の参照点を与えることができる。したがって、測温および測熱諮問委員会は、水の三重点の温度より 0.0100 度だけ低い温度によって百分割の熱力学温度目盛の零点を定義すべきと考える
2. 測温および測熱諮問委員会は、ただ一つの基礎的な定点により絶対的な熱力学温度目盛を構築するという指針を承認する。ただし現時点において、この定点は純水の三重点により与えられ、その絶対温度は後日定められるものである。この新しい温度目盛の導入は、実用目盛として勧告された国際温度目盛の使用になんら影響を与えるものではない
3. 熱量の単位はジュールである

備考：熱測定の実験結果は、できるだけジュールで表すことが要請される。

ケル빈は 2018 年の第 26 回国際度量衡総会決議 1, p. 165 参照) によって再定義された。

実験が水の温度上昇との比較で行われれば（そして、何らかの理由でカロリーという単位の使用が避けられないならば）、ジュールへの換算に必要な情報が提供されなければならない。国際度量衡委員会は（測温および測熱）諮問委員会の助言を受けて、水の比熱測定から得られる最も正確な値を、ジュール毎度の単位で表す表を作成すべきである。

上記の要請にこたえて作成された表は、国際度量衡委員会によって 1950 年に承認され、出版された（PV, 22, 92）。

■「セルシウス度」の採択（CIPM, 1948 年（PV, 21, 88）および第 9 回 CGPM, 1948 年（CR, 64））

温度を表すために用いる「度」（degree）を示すために提案されている三つの名称（degree centigrade, centesimal degree, degree Celsius）の中から、国際度量衡委員会は「degree Celsius（セルシウス度）」を選択した（PV, 21, 88）。

この名称用語は第 9 回 国際度量衡総会によっても採択された（CR, 64）。

■ 実用単位系を確立するための提案（CR, 64）

決議 6

国際度量衡総会は、

- 国際度量衡委員会が、国際物理学連合から国際実用単位系の国際的な使用を承認するよう要請されていること、および、国際物理学連合が、CGS 単位系を廃棄するよう物理学者たちに勧告してはいないものの、MKS 単位系と実用絶対単位系の一つの電気単位を勧告していること
- 国際度量衡総会自体が、計量単位の完全な規則を確立するための討議の基礎に供することを目的とした草案を付して、フランス政府から同様な要請を受けていること

を考慮し、国際度量衡委員会に対して、

- この目的のために、あらゆる国の科学、技術、教育の各界の意見についての公的な調査を（まず、フランス政府からの要請文書を実際に提供することから）始め、その調査を積極的に推進すること
- その回答を集約すること
- メートル条約に加盟しているすべての国において採用しやすい単一の実用計測単位系の確立に関する勧告を出すこと

を委託する。

■ 単位記号と数値の表し方（CR, 70）*

決議 7

原則

単位記号はローマン字体（直立体文字）で、一般には小文字で表される；ただし、記号が人名に由来するものであれば、大文字のローマン字体が用いられる。これらの記号には終止符号（ピリオド）を付けない。

数値の表示において、カンマ（フランス式）またはピリオド（イギリス式）は、数値の整数部分と少数部分とを分けるためにのみ用いられる。読み取りやすくするために、数値は適当に小さな間隙によって 3 桁ずつに区切ってよい。ただし、その区切りは決してピリオドによってもカンマによっても分けてはならない。

* 国際度量衡総会は単位と用語に関するいくつかの決定を廃止した。特に、マイクロン、絶対度、および用語「degree」、「deg」（1967/68 年の第 13 回 CGPM, 決議 7 と 決議 3, p. 138 と p. 136 参照）および「リットル」（1979 年の第 16 回 CGPM, 決議 6, p. 142 参照）。

単位	記号	単位	記号
・メートル	m	アンペア	A
・平方メートル	m ²	ボルト	V
・立方メートル	m ³	ワット	W
・マイクロン	μ	オーム	Ω
・リットル	l	クーロン	C
・グラム	g	ファラド	F
・トン	t	ヘンリー	H
秒	s	ヘルツ	Hz
エルグ	erg	ポアズ	P
ダイン	dyn	ニュートン	N
セルシウス度	°C	・カンデラ (ブージ・ヌーベル)	cd
・絶対度	°K	ルクス	lx
カロリー	cal	ルーメン	lm
バール	bar	スチルブ	sb
時	h		

備考

1. 前に符号「・」が付いている単位の記号は、国際度量衡委員会の決定によって、すでに過去において採用されていたものである。
2. 燃料用木材の体積の単位 stere (ステール) の記号は、国際度量衡委員会によって以前から指定されていた「s」ではなく「st」とする。
3. 温度ではなく、温度間隔または温度差を示すためには、用語のつづり字の全部である「degree」または省略形である「deg」が用いられなければならない。

第 10 回 国際度量衡総会 (CGPM), 1954 年

■ 熱力学温度目盛の定義 (CR, 79) *

決議 3

第 10 回国際度量衡総会は、水の三重点を基礎的な定点として選び、それに厳密に 273.16 ケルビン度という温度を付与することによって熱力学温度目盛を定義することを決定する。

* 1967 年の第 13 回国際度量衡総会はケルビンを明示的に定義した (決議 4, p. 137) 参照。

* ケルビンは 2018 年の第 26 回国際度量衡総会 (決議 1, p. 165 参照) によって再定義された。

■ 標準大気圧の定義 (CR, 79)

決議 4

第 10 回国際度量衡総会は、第 9 回国際度量衡総会が国際温度目盛を定義する際に標準大気圧の定義を与えたために、この標準大気圧の定義は温度の精密測定に限って適用されるものとする物理学者がいることを認識し、一般的に使用されるものとして次の定義を採択することを**声明する**。

1 標準大気圧 = 1 013 250 ダイン毎平方センチメートル、
すなわち、101 325 ニュートン毎平方メートル。

■ 実用単位系 (CR, 80) *

決議 6

第 10 回国際度量衡総会は、国際実用計量単位系の確立に関して、第 9 回総会が決議 6 の中で表明した要望の実現のために、

この単位系の基本単位として、

長さ	メートル
質量	キログラム
時間	秒
電流	アンペア
熱力学温度	ケルビン度
光度	カンデラ

の採用を決定する。

* 単位の名称「ケルビン度」は 1967 年に「ケルビン」に変わった(第 13 回国際度量衡総会, 決議 3, p. 136 参照)。

国際度量衡委員会 (CIPM), 1956 年

■ 時間の単位 (秒) の定義 (PV, 25, 77) *

決議 1

第 10 回国際度量衡総会がその決議 5 によって与えた権限にもとづき、国際度量衡委員会は、

1. 第 9 回国際天文学連合の総会 (1955 年、ダブリン) が、秒を太陽年に関係づけることに肯定的な意見を表明したこと
2. 第 8 回国際天文学連合の総会 (1952 年、ローマ) の決定に従って、暦表時 (ET) の秒が暦表時の 1900 年 1 月 0 日 12 時に対する

$$\text{太陽年の } \frac{12960276813}{408986496} \times 10^{-9} \text{ 倍であること}$$

を考慮し、

「秒は、暦表時の 1900 年 1 月 0 日 12 時に対する太陽年の $1/31\,556\,925.9747$ 倍である」

ことを決定する。

* この定義は 1967 年に第 13 回国際度量衡総会によって廃止された(決議 1, p. 136 参照)。

■ 国際単位系 (PV, 25, 83)

決議 3

国際度量衡委員会は、

- 第 9 回国際度量衡総会が行った、メートル条約に加盟しているすべての国によって採用されやすい実用計量単位系の確立に関する決議 6 により委託された任務
- 第 9 回国際度量衡総会によって要請された調査に対して回答した 21 ヶ国から受け取った文書
- 確立すべき単位系の基本単位を定める第 10 回国際度量衡総会の決議 6

を考慮し、

1. 第 10 回国際度量衡総会によって採用された基本単位にもとづく単位系が「国際単位系」と呼ばれること、すなわち

(この後に、第 11 回国際度量衡総会 (1960 年) の決議 12 の中に提示されている六つの基本単位とその記号の表が示されている)

2. 次の表に列挙される各単位が、将来追加されるであろう他の単位を排除せずに使用されること

(この後に、第 11 回国際度量衡総会 (1960 年) の決議 12 第 4 項に提示されている単位の表が示されている) を勧告する。

第 11 回国際度量衡総会 (CGPM), 1960 年

■ メートルの定義 (CR, 85) *

決議 6

第 11 回国際度量衡総会は、

- 国際原器が、計量学で今日要求される十分な正確さでメートルを定義していないこと
- 自然界に由来する不滅の標準を採用することがさらに望ましいことを考慮し、
- 1. メートルは、クリプトン 86 の原子の準位 $2p_{10}$ と $5d_5$ の間の遷移に対応する放射の、真空中における波長の 1 650 763.73 倍に等しい長さである
- 2. 1889 年以来有効であった白金イリジウム製の国際原器にもとづくメートルの定義は廃止される
- 3. 1889 年の第 1 回国際度量衡総会によって承認された国際メートル原器は 1889 年に定められたのと同じ条件の下で、国際度量衡局に保管されることを決定する。

* この定義は 1983 年に第 17 回国際度量衡総会によって廃止された (決議 1, p. 143 参照)。

■ 時間の単位 (秒) の定義 (CR, 86) *

決議 9

第 11 回国際度量衡総会は、

- 第 10 回国際度量衡総会によって国際度量衡委員会に与えられた、時間の基本となる単位を定義する権限
- 1956 年に国際度量衡委員会によって行われた決定を考慮し、
次の定義
「秒は、暦表時の 1900 年 1 月 0 日 12 時に対する太陽年の $1/31\,556\,925.9747$ 倍である」
を承認する。

* この定義は 1967 年に第 13 回国際度量衡総会によって廃止された (決議 1, p. 136 参照)。

■ 国際単位系 (CR, 87) *

決議 12

第 11 回国際度量衡総会は、

- 国際的な実用計量単位系を確立するために、次の六つの基本単位を採用した第 10 回国際度量衡総会の決議 6
- | | | |
|-------|-------|----|
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン度 | °K |
| 光度 | カンデラ | cd |
- 1956 年に国際度量衡委員会によって採択された決議 3
 - この単位系の略称と単位の十進の倍量および分量を形成するための接頭語に関して、1958 年に国際度量衡委員会によって採択された勧告を考慮し、

* 国際度量衡総会は、後にこの諸決定の中のいくつかを取り消し、接頭語の個数を拡充した。以下の注を参照。

熱力学温度の単位に対する名称と記号は、1967 年の第 13 回国際度量衡総会によって修正された (決議 3, p. 136 参照)。

1. 上記の六つの基本単位にもとづく単位系は「国際単位系」という名称で呼ばれること
2. この単位系の名称の国際的な略称は SI であること
3. 単位の十進の倍量および分量の名称は、次の接頭語の名称を用いて形成されること

七つ目の基本単位であるモルは、第 14 回国際度量衡総会によって採択された(1971 年, 決議 3, p. 139 参照)。

単位に乘じられる因数	接頭語	記号	単位に乘じられる因数	接頭語	記号
1 000 000 000 000 = 10^{12}	tera	T	0.1 = 10^{-1}	deci	d
1 000 000 000 = 10^9	giga	G	0.01 = 10^{-2}	centi	c
1 000 000 = 10^6	mega	M	0.001 = 10^{-3}	milli	m
1 000 = 10^3	kilo	k	0.000 001 = 10^{-6}	micro	μ
100 = 10^2	hecto	h	0.000 000 001 = 10^{-9}	nano	n
10 = 10^1	deca	da	0.000 000 000 001 = 10^{-12}	pico	p

この表以外の新しい接頭語の導入が、1964 年の第 12 回国際度量衡総会(決議 8, p. 135 参照)、1975 年の第 15 回国際度量衡総会(決議 10, p. 141 参照) および 1991 年の第 19 回国際度量衡総会(決議 4, p. 147 参照)によって採択された。

4. この単位系においては、将来追加されるであろう他の単位を排除せずに、下記の単位が使用されること

補助単位

平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

1995 年の第 20 回国際度量衡総会は SI における補助単位の分類を廃止した(決議 8, p. 147 参照)。これらは現在では、組立単位とみなされている。

組立単位

面積	平方メートル	m^2	
体積	立方メートル	m^3	
周波数	ヘルツ	Hz	1/s
質量密度(密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m^3	
速さ、速度	メートル毎秒	m/s	
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	
加速度	メートル毎平方秒	m/s^2	
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s^2	
力	ニュートン	N	$kg \cdot m/s^2$
圧力(応力)	ニュートン毎平方メートル	N/m^2	
動粘度	平方メートル毎秒	m^2/s	
粘度	ニュートン秒毎平方メートル	$N \cdot s/m^2$	
仕事、エネルギー、熱量	(quantity of heat 右注参照)		
	ジュール	J	$N \cdot m$
仕事率	ワット	W	J/s
電気量(quantity of electricity 右注参照)	クーロン	C	A·s
電圧、電位差、起電力	ボルト	V	W/A
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
静電容量	ファラド	F	A·s/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s

1967 年の第 13 回国際度量衡総会は、この表へ追加されるべき他の単位を指定した(決議 6, p. 137 参照)。原則として、この表中の組み立て単位の数には制限はない。

現代の「熱量」の英語表記は「quantity of heat」でなく「amount of heat」である。なぜなら、計量学において単語「quantity」に別の意味が有るからである。

現代の「電気量」の英語表記は「quantity of electricity」でなく「amount of electricity」である(直上の注を参照)。

インダクタンス	ヘンリー	H	V·s/A
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m	
起磁力	アンペア	A	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²	
照度	ルクス	lx	lm/m ²

を決定する。

■ 立方デシメートルとリットル (CR, 88)

決議 13

第 11 回国際度量衡総会は、

- 立方デシメートルとリットルが等しくなく、100 万分の 28 程度の差があること
- 体積測定を含む物理量の測定がますます高精度になり、それによって立方デシメートルとリットルとの間に起こりうる混同のリスクが重大になること

を考慮し、

国際度量衡委員会に対して、この問題を検討し、その結論を第 12 回国際度量衡総会へ提出することを要請する。

国際度量衡委員会 (CIPM), 1961 年

■ 立方デシメートルとリットル (PV, 29, 34)

勧告

国際度量衡委員会は、精密な体積測定の結果をリットルによってではなく、国際単位系の単位によって表すことを勧告する。

国際度量衡委員会 (CIPM), 1964 年

■ 原子と分子による周波数標準 (PV, 32, 26)

声明

国際度量衡委員会は、

第 12 回国際度量衡総会の決議 5 によって、時間の物理学的測定のために暫定的に用いるべき原子または分子にもとづく周波数標準器の指定を行う権限を委ねられ、

採用されるべき標準は、外部からの電磁界によって擾乱されないセシウム 133 の原子の基底状態 $^2S_{1/2}$ の超微細準位 $F = 4, M = 0$ と $F = 3, M = 0$ の間の遷移にもとづくものであること、およびこの遷移の周波数に対し 9 192 631 770 ヘルツという値が付与されることを声明する。

第 12 回国際度量衡総会 (CGPM), 1964 年

■ 周波数の原子標準 (CR, 93)

決議 5

第 12 回国際度量衡総会は、

- 第 11 回国際度量衡総会がその決議 10 の中で、高度な計量学の目的のために、時間の間隔についての原子または分子にもとづく標準を採用することの緊急性を認めたこと

- セシウムを用いた周波数の原子標準を用いてすでに成果が得られているにもかかわらず、現在行われている諸研究によって、新しい、かつ、重要な発展が得られる可能性があるゆえに、国際単位系の基本単位である秒の新しい定義を国際度量衡総会として採択する時期がまだ到来していないこと

を考慮し、

また、物理学における時間の測定が、原子あるいは分子周波数標準にもとづき実施されるのをこれ以上待つのは望ましくないことを考慮し、

暫定的に用いるべき原子または分子にもとづく周波数標準の指定を行う権限を国際度量衡委員会に委ね、

秒の新しい定義に役立つ研究の推進を、この分野の専門の機関および研究所に要請する。

■ リットル (CR, 93)

決議 6

第 12 回国際度量衡総会は、第 11 回国際度量衡総会によって 1960 年に採択された決議 13 と、国際度量衡委員会によって 1961 年に採択された勧告を考慮し、

- 第 3 回国際度量衡総会によって 1901 年に与えられたリットルの定義を廃止する
- 「リットル」という用語は、立方デシメートルに対する固有の名称として使用され得ることを声明する
- リットルという名称は、高精度の体積測定の結果を表すためには使用されないよう勧告する

■ キュリー (CR, 94) *

決議 7

第 12 回国際度量衡総会は、

キュリーが、長期にわたって、多くの国において放射性核種の放射能の単位として使用されていることを考慮し、

国際単位系 (SI) においては、この放射能の単位が、秒のマイナス 1 乗 (s^{-1}) であることを認め、

キュリーが、SI に属さない放射能の単位として、 $3.7 \times 10^{10} s^{-1}$ という値で、今後とも用いられることを承認する。この単位の記号は Ci とする。

* 「ベクレル」(Bq) という名称が、放射能の SI 単位として、第 15 回国際度量衡総会によって採択された (1975 年, 決議 8)。

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

■ SI 接頭語 フェムトとアト (CR, 94) *

決議 8

第 12 回国際度量衡総会は、

第 11 回国際度量衡総会の決議 12 第 3 項によって採択された、単位の十進の倍量および分量の名称を形成するための接頭語の表に次の二つの新しい接頭語を付け加えることを決定する。

* 新しい接頭語が 1975 年の第 15 回国際度量衡総会によって付け加えられた (決議 10, p. 141 参照)。

単位に乗じられる因数	接頭語	記号
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

国際度量衡委員会 (CIPM), 1967 年

- 質量の単位の十進の倍量および分量 (PV, 35, 29 および *Metrologia*, 1968, 4, 45)

勧告 2

国際度量衡委員会は、

第 11 回国際度量衡総会 (1960 年) の決議 12 第 3 項の単位の十進の倍量および分量の名称を形成する規則が、質量の単位への適用において様々な表現を招く可能性のあることを考慮し、

第 11 回国際度量衡総会の決議 12 の規定は、キログラムの場合においては次の方法で適用されること、すなわち質量の単位の十進の倍量および分量の名称は「グラム」という語に接頭語を付けることで形成されることを声明する。

第 13 回国際度量衡総会 (CGPM), 1967/68 年

- 時間の SI 単位 (秒) (CR, 103 および *Metrologia*, 1968, 4, 43)

決議 1

第 13 回国際度量衡総会は、

- 国際度量衡委員会によって、その 1956 年の会期中に採択され (決議 1)、第 11 回国際度量衡総会 (1960 年) の決議 9 によって承認され、次いで第 12 回総会 (1964 年) の決議 5 によって支持された秒の定義が、計量学上の現在の要求に対しては十分でないこと
- 第 12 回国際度量衡総会 (1964 年) の決議 5 によって権限が与えられた国際度量衡委員会が、その 1964 年の会期中にこの要求にこたえるため、セシウムによる周波数の原子標準を暫定的に用いるべく指示したこと
- この周波数標準が、すでに十分検討され、現在の要求に応える秒の定義を提供するのに十分精確であることがわかっていること
- 国際単位系の時間の単位に関する現行の定義を、この原子標準にもとづく定義に置き換えるべき時期が到来していること

を考慮し、

1. 国際単位系の時間の単位は、

「秒は、セシウム 133 の原子の基底状態の二つの超微細準位間の遷移に対応する放射の周期の 9 192 631 770 倍の継続時間である」

として定義される秒であること

2. 1956 年に国際度量衡委員会によって採択された決議 1 および第 11 回国際度量衡総会の決議 9 が廃止されること

を決定する。

国際度量衡委員会は、1997 年の会議において、この定義が熱力学温度 0 K での基底状態にあるセシウム原子を参照していることを確認した。秒の定義の表現は、2018 年の第 26 回国際度量衡総会によって変更された (決議 1, p. 165 参照)。

- 熱力学温度の SI 単位 (ケルビン) (CR, 104 および *Metrologia*, 1968, 4, 43) *

決議 3

第 13 回国際度量衡総会は、

- 第 9 回国際度量衡総会 (1948 年) の決議 7、第 11 回国際度量衡総会 (1960 年) の決議 12 および国際度量衡委員会によって 1962 年に採択された決定 (PV, 30, 27) の中で与えられた「ケルビン度」と「度」という名称、「°K」と「deg」という記号、およびそれらの使用規則
- 熱力学温度の単位と温度間隔の単位は、ただ一つの名称とただ一つの記号によって示されるべき同一の単位であること

* 国際度量衡委員会は 1980 年の会議で、「°K」と「deg」という記号の使用が今後は許されないとする第 7 回単位諮問委員会 (1980 年) の報告を承認した。

を考慮し、

1. 熱力学温度の単位は「ケルビン」という名称で示され、その記号はKであること **
2. それと同じ名称と記号が、温度の間隔を表すために用いられること
3. 温度の間隔は、セルシウス度によって表してもよいこと
4. 本決議の最初の段落で言及した熱力学温度の単位の名称、その記号および温度の間隔または差を表すための単位の指定に関する決定は廃止するが、これらの決定に従った単位の用法は当分の間認められることを決定する。

** ケルビンの定義における水の同位体組成に関する国際度量衡委員会の勧告 2 (CI-2005, p. 152) 参照。

■ 熱力学温度の SI 単位の定義 (ケルビン) (CR, 104 および *Metrologia*, 1968, 4, 43) *

* 1990 年国際温度目盛に関する CIPM の勧告 5 (CI-1989, p. 146) 参照。

決議 4

第 13 回国際度量衡総会は、
第 10 回国際度量衡総会 (1954 年) の決議 3 中の熱力学温度の単位の定義を、より明示的な記述で表すことが有用であることを考慮し、
この定義を、
「熱力学温度の単位、ケルビンは、水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ である」と表現することを決定する。

* 2018 年、第 26 回国際度量衡総会によって、ケルビンの再定義が行われた (決議 1, p. 165 参照)。

■ 光度の SI 単位 (カンデラ) (CR, 104 および *Metrologia*, 1968, 4, 43-44) *

* この定義は、1979 年の第 16 回国際度量衡総会によって廃止された (決議 3, p. 141 参照)。

決議 5

第 13 回国際度量衡総会は、
• 第 9 回国際度量衡総会 (1948 年) によって承認され、第 8 回国際度量衡総会 (1933 年) によって委託された権限にもとづき、1946 年に国際度量衡委員会によって採択された「測光量の単位の変更にに関する決議」(PV, 20, 119) に含まれている光度の単位の定義
• この定義は光度の単位の大きさを満足できるレベルで定めているが、その表現について批判の余地があるかもしれないことを考慮し、
カンデラの定義を
「カンデラは、101 325 ニュートン毎平方メートルの圧力の下での、白金の凝固点の温度における黒体の $1/600\ 000$ 平方メートルの表面の垂直方向の光度である」と表すことを決定する。

■ SI 組立単位 (CR, 105 および *Metrologia*, 1968, 4, 44) *

* 放射能の単位は、1975 年の第 15 回国際度量衡総会によって固有の名称を与えられた (決議 8, p. 140 参照)。

決議 6

第 13 回国際度量衡総会は、
第 11 回国際度量衡総会 (1960 年) の決議 12 第 4 項の表の中に、いくつかの組立単位を加えることの有用性を考慮し、

波数	毎メートル	m^{-1}
エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比熱容量	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg·K)
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m·K)
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
(放射線源の) 放射能	毎秒	s^{-1}

を付け加えることを決定する。

■ 初期の決定の廃止（ミクロン、ブージ・ヌーベル）（CR, 105 および *Metrologia*, 1968, 4, 44）

決議 7

第 13 回国際度量衡総会は、
国際単位系に関して、国際度量衡総会によって、後に採択された諸決定が、
第 9 回国際度量衡総会（1948 年）の決議 7 のいくつかの部分と矛盾することを
考慮し、

第 9 回国際度量衡総会の決議 7 から、

1. 単位の名称「ミクロン」およびその記号として与えられた「 μ （この記号は、
現在は、接頭語の一つとなっている）」
2. 単位の名称「ブージ・ヌーベル」
を取り去ることを決定する。

国際度量衡委員会（CIPM），1969 年

■ 国際単位系、第 11 回 CGPM（1960 年）の決議 12 の適用のための規則（CR, 37, 30 および *Metrologia*, 1970, 6, 66）*

勧告 1

国際度量衡委員会は、

国際単位系に関する第 11 回国際度量衡総会（1960 年）の決議 12 が、いくつかの議論を引き起こしたことを考慮し、

1. 一貫性のある集合を構成している国際単位系の基本単位、補助単位および組立単位は、「SI 単位」** という名称で表示されること
2. SI 単位の十進の倍量および分量を作るために上記総会によって採用された接頭語は「SI 接頭語」と呼ばれることを
声明し、さらに
3. SI 単位と、その名称が SI 接頭語を用いて作られるそれらの十進の倍量および分量を使用することを
勧告する。

備考：第 11 回国際度量衡総会の決議 12（および本勧告）の中の「補助単位」という名称は、同総会がそれを基本単位に関係づけるか、組立単位に関係づけるかを決定していない SI 単位に与えられている。

* 1995 年の第 20 回国際度量衡総会は SI における補助単位の分類の廃止を決定した（決議 8, p. 147 参照）。

** 2001 年、国際度量衡委員会は「SI units」および「units of the SI」に関する定義を明確にするための単位諮問委員会の提案を承認した（p. 148 参照）。

秒の定義のための諮問委員会（CCDS），1970 年（国際度量衡委員会（CIPM），1970 年）

■ TAI の定義（PV, 38, 110-111 および *Metrologia*, 1971, 7, 43）

勧告 S2

国際原子時（TAI）は、国際単位系の時間の単位である秒の定義に従って、いくつかの機関で運転されている原子時計の指示値にもとづいて国際報時局が定める基準となる時刻の座標である。

1980 年、TAI の定義は次のように完成された（CCDS の声明、*BIPM Com. Cons. Déf. Seconde*, 1980, 9, S 15 および *Metrologia*, 1981, 17, 70）：

TAI は、回転するジオイド面上で実現される SI の秒を目盛りの単位とした、地心座標系で定義される座標時の目盛りである。

この定義は、以下の 1991 年の国際天文連合の決議 A4 によってさらに詳細なものとなった：「TAI は、その理想とする地球時（TT）を実現する時刻系であり、地球時とは一定の差 32.184 s だけ異なっている。地球時は、地心座標系の座標時である地心座標時（TCG）とは、一定の歩度差を持つと関係付けられている。」（*Proc. 21st General Assembly of the IAU, IAU Trans.*, 1991, vol. XXIB, Kluwer を参照。）

第 14 回 国際度量衡総会 (CGPM), 1971 年

■ パスカルおよびジーメンズ (CR, 78)

第 14 回国際度量衡総会は、SI 単位のニュートン毎平方メートルに対する固有の名称「パスカル」(記号 Pa) と、電気コンダクタンスの SI 単位 (オームの逆数) に対する固有の名称「ジーメンズ」(記号 S) を採択した。

■ 国際原子時、CIPM の役割 (CR, 77-78 および *Metrologia*, 1972, 8, 35)

決議 1

第 14 回国際度量衡総会は、

- 国際単位系の時間の単位である秒が、1967 年以來、ある自然に存在する原子の周波数にもとづき定義され、もはや、天体の運動によってもたらされる時間スケールにもとづかなくなっていること
- 国際原子時 (TAI) 目盛が必要となったのは、原子による秒の定義の結果であること
- いくつかの国際機関では、とりわけ国際報時局 (BIH) の永続的な業務の恩恵によって、天体の運動にもとづき時間スケールを設定してきており、また、現在も首尾良く設定されていること
- 国際報時局によって、十分認められた特性をもち、その有用性が証明されている原子時目盛の設定が開始されたこと
- 秒の実現に使われる原子周波数標準が、諮問委員会の協力のもとに国際度量衡委員会によって検討されてきており、また、この状態は続けられなければならないこと、そして、国際原子時目盛の一日盛の間隔が、原子にもとづく秒の定義に従って実現される秒でなければならないこと
- 権威ある国際科学機関やこの分野で活躍している国立研究所などのすべてが、国際度量衡委員会と国際度量衡総会に対し国際原子時に定義を与え、国際原子時目盛の設定に貢献すべきであるという要望を表明したこと
- 国際原子時の活用が、天体の運動にもとづく時間目盛との密接な調整を必要としていること

を考慮し、

国際度量衡委員会に対し、

1. 国際原子時の定義を与えること
2. 関連する国際機関と協力して、利用可能な科学的能力と現有の施設が国際原子時を実現する最も良い可能な方法で用いられるよう、また、国際原子時のユーザーの要求を満たすよう、必要な処置をとること

を要請する。

■ 物質量の SI 単位 (モル) (CR, 78 および *Metrologia*, 1972, 8, 36) *

決議 3

第 14 回国際度量衡総会は、

物質量の単位を定義する必要性に関する、国際純粋・応用物理学連合、国際純正・応用化学連合および国際標準化機構の意見を考慮し、

1. モルは 0.012 キログラムの炭素 12 の中に存在する原子の数と等しい数の要素粒子を含む系の物質量であり、その記号は「mol」である **
2. モルを用いるとき、要素粒子が指定されなければならないが、それは原子、分子、イオン、電子、その他の粒子またはこの種の粒子の特定の集合体であってよい

TAI の定義は 1970 年の CCDS (現在の CCTF) によって与えられた (CCDS 報告書 p. 22 参照)。

* 国際度量衡委員会は、その 1980 年の会合中に、この定義において炭素 12 の原子は結合しておらず、静止しており、基底状態にあるものを基準とすることが想定されている、ということを確認した第 7 回単位諮問委員会会議 (1980 年) の報告を承認した。

3. モルは国際単位系の基本単位であることを決定する。

** 2018年の第26回国際度量衡総会によって、モルの再定義が行われた(決議 1, p. 165 参照)。

第 15 回 国際度量衡総会 (CGPM), 1975 年

■ 光の速さの推奨値 (CR, 103 および *Metrologia*, 1975, 11, 179-180)

決議 2

第 15 回国際度量衡総会は、
可視または赤外波長域の分子吸収線に安定化されたレーザー放射の波長測定結果が、 $\pm 4 \times 10^{-9}$ と推定される不確かさで非常によく一致していることを考慮し、
また、これらの放射に関し、いくつかの周波数測定が整合していることを考慮し、
その結果として与えられる、真空中を伝播する電磁波の速さの値 $c = 299\,792\,458$ メートル毎秒の採用を勧告する。

ここで与えられている相対不確かさは、対象とされた測定結果群の標準偏差の 3 倍に相当する。

■ 協定世界時 (UTC) (CR, 104 および *Metrologia*, 1975, 11, 180)

決議 5

第 15 回国際度量衡総会は、
「協定世界時」(UTC) と称される時系が、極めて広く使用されていること、その時系が多くの場合、報時発信局によって放送されていること、かつ、その放送が利用者に対して、同時に標準周波数、国際原子時および近似的な一つの世界時(または平均太陽時としてもよい)を提供していることを考慮し、この協定世界時が、多くの国で法定常用時の基礎となっていることを確認し、この使用が十分に推奨に値するものであると評価する。

■ 電離放射線のための SI 単位 (ベクレル、グレイ) (CR, 105 および *Metrologia*, 1975, 11, 180) *

決議 8 および 9

第 15 回国際度量衡総会は、
放射線学の研究と応用に国際単位系の適用を広げることが、国際放射線単位測定委員会(ICRU)によって緊急に表明されたため、また非専門家にそれらの単位をできるだけ容易に使用させる必要性のために、臨床医学上の過失の重大性をも考慮した上で、放射能の SI 単位に対して、次の固有の名称を採用する。

* 1976年、国際度量衡委員会はICRUの意見に従って提出された、グレイを質量エネルギー分与、カーマおよび吸収線量を表すために使用してもよいという第5回単位諮問委員会の報告を承認した。

ベクレル、記号 Bq、毎秒に等しい(決議 8)

電離放射線測定のための SI 単位に対する次の固有の名称を採用する。

グレイ、記号 Gy、ジュール毎ケルビンに等しい(決議 9)

備考: グレイは吸収線量の SI 単位である。放射線測定の分野では、グレイは、また、ジュール毎キログラムで表示される別の物理量にも使用される可能性がある。そのため単位諮問委員会は、適切な国際機関と協力してこの問題を検討する責任を負う。

■ SI 接頭語ペタとエクサ (CR, 106 および *Metrologia*, 1975, 11, 180-181) *

決議 10

第 15 回国際度量衡総会は、
第 11 回国際度量衡総会の決議 12 第 3 項によって採択された、単位の十進の
倍量および分量の名称を形成するための SI 接頭語の表に、次の二つの新しい
接頭語を付け加えることを決定する。

単位に乘じられる因数	接頭語	記号
10^{15}	ペタ	P
10^{18}	エクサ	E

* 新しい接頭語が 1991 年の第 19 回国際度量衡総会によって付け加えられた (1991 年, 決議 4)。

第 16 回国際度量衡総会 (CGPM), 1979 年

■ 光度の SI 単位 (カンデラ) (CR, 100 および *Metrologia*, 1980, 16, 56)

決議 3

第 16 回国際度量衡総会は、

- いくつかの研究所の懸命の努力にも関わらず、現在の黒体一次標準にもとづくカンデラの実現結果の間には大きな差異が存在していること
- 放射測定技術が急速に発展し、すでに測光の精度と同等の精度を確立していること、およびそれらの技術が、黒体を組み立てることなしにカンデラを実現するために、すでにいくつかの国立研究所で用いられていること
- 測光量と放射測定量との間の関係、すなわち周波数 540×10^{12} ヘルツの単色放射の分光視感効果度に対する 683 ルーメン毎ワットという値が、国際度量衡委員会によって 1977 年に採択されたこと
- この値が、明所視における測光量の系に対して十分に正確であると認められていたこと、暗所視における測光量の系に対して約 3 % の変更しか伴わないこと、したがって、十分な連続性を確保するものであること
- カンデラについて、測光標準の確立の容易さと精密さの両方を改良することができ、かつ、明所視と暗所視の両方における測光量および薄明視領域においてこれから定義される諸量に対して適用されるような、新しい定義を与えるべき時期がきていること

を考慮し、

1. カンデラは、周波数 540×10^{12} ヘルツ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 ワット毎ステラジアンである光源の、その方向における光度であること
2. 第 8 回国際度量衡総会によって 1933 年に委託された権限にもとづき国際度量衡委員会によって 1946 年に決定され、第 9 回国際度量衡総会によって 1948 年に承認され、第 13 回国際度量衡総会によって 1967 年に修正されたカンデラ (当初はブージ・ヌーベルと呼ばれた) の定義は廃止されること

を決定する。

2018 年の第 26 回国際度量衡総会によって、カンデラの定義の表現が変更された (決議 1, p. 165 参照)。

明所視は、眼の網膜上の錘体によって検知される。錘体は高いレベルの輝度 ($L > \text{約 } 10 \text{ cd/m}^2$) での感度が高く、日中の視力で使われる。暗所視は、網膜の桿体によって検知される。桿体は低いレベルの輝度 ($L < \text{約 } 10^{-3} \text{ cd/m}^2$) での感度が高く、夜間の視力で用いられる。これらの輝度レベルの間の領域では、錘体と桿体の両方が用いられ、これを薄明視と言う。

■ 線量当量の SI 単位のための固有の名称 (シーベルト) (CR, 100 および *Metrologia*, 1980, 16, 56) *

決議 5

* 1984 年、国際度量衡委員会はこの決議に補足説明を加えることを決めた (勧告 1, p. 144 参照)。

第 16 回国際度量衡総会は、

- 電離放射線測定分野において SI 単位を導入するための努力が積み重ねられてきたこと
- 過小評価された照射のために起こる人体傷害のリスク、すなわち吸収線量と線量当量との混同から生じるかもしれないリスク
- 固有の名称の急増は、国際単位系のリスク因子となる可能性があり、極力避けるべきではあるが、人体の健康保全を問題にする場合には、この原則に反してもやむを得ないこと

を考慮し、

放射線防護分野における、線量当量の SI 単位に対し固有の名称シーベルト、およびその記号 Sv を採用する。シーベルトはジュール毎キログラムに等しい。

■ リットルの記号 (CR, 101 および *Metrologia*, 1980, 16, 56-57)

決議 6

第 16 回国際度量衡総会は、

第 9 回国際度量衡総会 (1948 年) の決議 7 で、単位記号の書き方に対して採択された原則を認知し、

単位リットルに対する記号 l が、国際度量衡委員会によって 1879 年に採用され、1948 年に同委員会決議で確認されたことを考慮し、

また、文字 l と数字 1 との間の混同が原因の危険を避けるために、いくつかの国が単位リットルに対する記号 l の代わりに L を採用していることを考慮し、

リットルという名称は、国際単位系に含まれるものではないとはいえ、同単位系との一般的併用が認められなければならないことを考慮し、

例外的な措置として、単位リットルに対して使用できる記号として、二つの記号 l と L を採用することを決定し、

更に、将来二つの記号のうち一つだけを使用するべきであることを考慮し、国際度量衡委員会に二つの記号の使用についての普及状況を追跡させること、それにもとづいて、二つのうち一つを排除する可能性についての意見を第 18 回国際度量衡総会に提出することを要請する。

1990 年、国際度量衡委員会はリットルに対してただ一つの記号を選択することは、時期尚早であると考えた。

国際度量衡委員会 (CIPM), 1980 年

■ SI 補助単位 (ラジアンとステラジアン) (PV, 48, 24 および *Metrologia*, 1981, 17, 72) *

勧告 1

国際度量衡委員会は、

国際標準化機構の第 12 技術委員会 (ISO/TC 12) によって 1978 年に採択された決議 3、および単位諮問委員会 (CCU) によってその第 7 回会議で採択された勧告 U1 (1980 年) を考慮し、

- 単位ラジアンとステラジアンは、特に測光分野で、単位の表現の明確化のために通常導入されており、ステラジアンは異なる量に対応する単位を区別する重要な役割を果たしていること
- 平面角を二つの長さの間の比として、立体角を面積と長さの 2 乗との間の比として一般に表すこと、したがって、これらの量が無次元量として扱われること
- 科学分野における形式論の研究が、一貫性があると同時に便利なものは存在しないと、平面角と立体角の二量を基本量と考えるとしていること

* SI 補助単位の階級は 1995 年の第 20 回国際度量衡総会の決定によって廃止された (決議 8, p. 147 参照)。

を考慮し、更に、

- 1960年の第11回国際度量衡総会の決議12で導入された補助単位の階級に対して、1969年に国際度量衡委員会が与えた見解は、ラジアンとステラジアンを国際単位系の中の基本単位として扱う自由を残していること
- このような可能性が、七つの基本単位だけにもとづく国際単位系の内部的な一貫性と両立すること

を考慮して、

国際単位系の中の補助単位の階級を、国際度量衡総会が国際単位系の組立単位の表示において、それらを用いるか否かの自由を残して、無次元の組立単位の階級と解釈することを決定する。

第17回国際度量衡総会 (CGPM), 1983年

■ メートルの定義 (CR, 97 および *Metrologia*, 1984, 20, 25)

決議1

第17回国際度量衡総会は、

- 現在の定義では、すべての要求に対して十分に正確なメートルを実現できないこと
- レーザーの周波数安定化の進歩により、クリプトン86ランプの標準放射よりも再現性がよく、使い易い放射が得られること
- レーザー放射の周波数と波長の測定において、整合性のある光の速さが得られており、その正確さがほぼ現在のメートルの定義であるランプによる実現で制限されること
- レーザー一周波数の測定と光の速さの勧告値からレーザー波長を決定する方が、レーザー波長をクリプトン86の標準放射の波長と比較することよりも優れた精度が得られること
- 1975年に第15回CGPMによってその決議2で勧告された光の速さの値 ($c = 299\,792\,458\text{ m/s}$) を変更しないでおくことに (特に天文学や測地学にとって) 利点があること
- 新しいメートルの定義について種々の表現形式が考えられ、そのすべてが光の速さを厳密な定義値 (勧告値) とするものだったこと、そして、現在のメートルの定義におけるその最良の実現の相対不確かさが $\pm 4 \times 10^{-9}$ であることを考えれば、新しい定義が長さの単位に目に見える不連続性をもたらさないこと
- 特定の時間に光が進む行程による表現と、測定された、または特定の周波数の放射波長による表現とが、徹底した議論の対象になり、それらが同等であると認められたこと、また、前者の表現がよいという合意が得られたこと
- メートルの定義のための諮問委員会は、このような定義の実用的な実現方法を示す立場にあり、実現方法には今まで標準として用いられたクリプトン86のオレンジ色の放射の使用を含ませることができ、かつ、実現方法はその後改定しても拡張してもよいこと

を考慮し、

1. メートルは、1秒の299 792 458分の1の時間に光が真空中を伝わる行程の長さである
2. クリプトン86の原子の準位 $2p_{10}$ と $5d_5$ の間の遷移にもとづく、1960年以来施行されているメートルの定義を廃止することを決定する。

メートルの定義の表現は、2018年の第26回国際度量衡総会によって変更された (決議1, p. 165 参照)。

ここで与えられている相対不確かさは、対象とされた測定結果群の標準偏差の3倍に相当する。

■ **メートルの定義の実現について** (CR, 98 および *Metrologia*, 1984, 20, 25-26)

決議 2

第 17 回国際度量衡総会は、
国際度量衡委員会に対して、

- 新しいメートルの定義を実現するための方法を作成すること
 - 長さの干渉測定のための波長標準として勧告されうる放射を選択し、その使用のための方法を作成すること
 - これらの標準を改良するための研究を推進すること
- を要請する。

メートルの定義の実現方法の改定に関しては CIPM の勧告 1(CI-2002, p. 149) を参照。

国際度量衡委員会 (CIPM), 1984 年

■ **シーベルトについて** (PV, 52, 31 および *Metrologia*, 1985, 21, 90) *

勧告 1

国際度量衡委員会は、

第 16 回国際度量衡総会 (1979 年) によって承認された決議 5 について存続している混同を考慮し、
SI 文書の中に、次の説明を導入することを**決定する**。

* 国際度量衡委員会は 2002 年に、SI 文書中の線量当量という量に関する記述を変更することを決定した (勧告 2, p. 150 参照)。

線量当量 H という量は、電離放射線の吸収線量 D と国際放射線防護委員会によって規定された二つの無次元の係数 Q (線質係数) と N (その他すべての係数の積) との積である。

$$H = Q \cdot N \cdot D$$

したがって、ある放射線に対して単位をジュール毎キログラムとした場合の H の数値は、 Q と N の値によって、単位をジュール毎キログラムとした場合の D の数値とは異なることがあり得る。吸収線量 D と線量当量 H を混同する危険を避けるために、それぞれの単位に対して固有の名称を使用すべきである。すなわち、吸収線量 D の単位に対しては、ジュール毎キログラムの代わりにグレイという名称を、線量当量 H の単位に対しては、ジュール毎キログラムの代わりにシーベルトという名称を使用すべきである。

第 18 回国際度量衡総会 (CGPM), 1987 年

■ **ボルトとオームの実現に対する今後の調整** (CR, 100 および *Metrologia*, 1988, 25, 115)

決議 6

第 18 回国際度量衡総会は、

- 電氣的諸単位の各国での実現の国際的な同等性と長期安定性は、科学、通商、工業にとって、技術的見地からも経済的見地からも最重要課題であること
- 多くの国立研究機関が、ボルトの実現のためにジョセフソン効果を用い、また、オームの実現のために量子ホール効果を用い始めていること。これら二つの量子効果は、最も良い長期安定性を提供する。
- 種々の物理量の計量単位間の一貫性が重要であるため、これらの単位の実現に用いられる値は可能な限り SI に一致しなければならないこと

- 近年および現在の実験の結果により、二つの効果のそれぞれを対応する電気単位に結びつける係数の許容し得る値、すなわち SI に十分に一致し得る値、を定めることが可能となるであろうこと

を考慮して、

ジョセフソン効果の場合の電圧を周波数で除した商と量子ホール効果の場合の電圧を電流で除した商を定めるのに貢献できる研究機関に対し、積極的に研究を遂行しその成果を遅滞無く国際度量衡委員会に報告することを要請し、国際度量衡委員会に対し、それらの商の値を、すべての国が同時にそれらを用いることが可能となった時点で、勧告する権限を与える。この値は遅くとも 1 年前に通告され、1990 年 1 月 1 日から採用される予定である。

国際度量衡委員会 (CIPM), 1988 年

- ジョセフソン効果を用いたボルトの実現 (PV, 56, 44 および *Metrologia*, 1989, 26, 69) *

* 2018 年の第 26 回国際度量衡総会において、 K_J の協定値の使用が廃止された (決議 1, p. 165 参照)。

勧告 1

国際度量衡委員会は、

ボルトとオームの実現の今後の調整に関して、第 18 回国際度量衡総会の決議 6 で与えられた指示に従って、

- ジョセフソン定数 K_J 、すなわちジョセフソン効果におけるステップ $n = 1$ に対応する電圧と周波数の商として、最近の測定結果に対する詳細な検討により、483 597.9 GHz/V が導かれていること
- この K_J の値を用いて、ジョセフソン効果を、ボルトに対して 4×10^{-7} と見積もられる標準偏差に相当する不確かさで、起電力の参照標準を実現するために用いることができること。また、その実現の再現性は 4×10^{-7} より十分良いことを考慮して、
- ジョセフソン定数 K_J に対する協定値、 K_{J-90} 、として厳密な値 483 597.9 GHz/V が採用されること
- この新しい値は、1990 年 1 月 1 日から (そしてそれ以前ではなく)、現在使用されている値に代って使い始められること
- この新しい値は、起電力の測定をジョセフソン効果にもとづいて行っているすべての研究所で同日から使い始められること
- 同日以降、他のすべての研究所は、この新しい値と整合が図られるように、それぞれの参照標準の値を調整すること

を勧告し、

予測可能な将来において、このジョセフソン定数として勧告された値のいかなる変更の必要も生じないであろうという考えのもと、

この新しい値が、1972 年に電気諮問委員会の宣言 E-72 で与えられた値に比べて 3.9 GHz/V だけ大きい、すなわち相対的に約 8×10^{-6} だけ大きいものであることに対し各研究所の注意を促す。

- 量子ホール効果によるオームの実現 (PV, 56, 45 および *Metrologia*, 1989, 26,70) *

2000 年の第 89 回会議において国際度量衡委員会は、フォン・クリッツィング定数の値の使用に関する電気・磁気諮問委員会の第 22 回会議の宣言を承認した。

勧告 2

国際度量衡委員会は、

ボルトとオームの実現の今後の調整に関して第 18 回国際度量衡総会の決議 6 で与えられた指示に従って、

- ほとんどの電気抵抗の参照標準が時間とともに有意な変動を示すこと
- 量子ホール効果にもとづいた電気抵抗の参照標準は、安定で再現性も良好であること
- フォン・クリッツィング定数 R_K 、すなわち量子ホール効果におけるホール電圧を量子化次数 $i = 1$ のプラトーに対応する電流で除した商として、最近の測定結果に対する詳細な検討により $25\,812.807\ \Omega$ が導かれていること
- この R_K の値を用いて、量子ホール効果を、オームに対して 2×10^{-7} と見積もられる標準偏差に相当する相対不確かさで電気抵抗の参照標準を実現するために用いることができること。また、その実現の再現性は 2×10^{-7} より十分良いこと。

* 2018年の第26回国際度量衡総会において、 R_K の協定値の使用が廃止された(決議 1, p. 165 参照)。

を考慮して、

- フォン・クリッツィング定数 R_K に対する協定値、 R_{K-90} 、として厳密な値 $25\,812.807\ \Omega$ が採用されること
- この新しい値は、1990年1月1日から(そしてそれ以前ではなく)、電気抵抗の測定を量子ホール効果にもとづいて行っているすべての研究所で使い始められること
- 同日以降、他のすべての研究所は、 R_{K-90} と整合が図られるように、それぞれの参照標準器の値を調整すること
- 量子ホール効果にもとづいた電気抵抗の参照標準を確立するために、各研究所は電気諮問委員会によってまとめられ、国際度量衡局によって発行される量子ホール効果に関する最新の技術ガイドラインに従うこと

を勧告し、

予測可能な将来において、このフォン・クリッツィング定数として勧告された値のいかなる変更の必要も生じないであろうと考える。

国際度量衡委員会 (CIPM), 1989 年

■ 1990 年国際温度目盛 (PV, 57, 115 および *Metrologia*, 1990, 27, 13)

勧告 5

国際度量衡委員会は、1987 年に開催された第 18 回国際度量衡総会の決議 7 に従って、1968 年国際実用温度目盛 (IPTS-68) に代わって 1990 年国際温度目盛 (ITS-90) を採択した。

国際度量衡委員会は、IPTS-68 と比較して、ITS-90 が、

- 更に低い温度領域 (0.65 K まで) に拡張されること、したがって、1976 年 0.5 K-30 K 暫定温度目盛 (EPT-76) に代わるものともなること
- 対応する熱力学温度との一致が概ね更に良くなること
- その全温度領域で大幅に改善された連続性、精密さおよび再現性を持つこと
- 複数の温度サブレンジおよび、ある温度レンジでは、選択可能な複数の目盛りの定義を持ち、その使用が大幅に促進されること

に留意する。

あわせて国際度量衡委員会は、ITS-90 の文書に加えて、二つの文書: 「ITS-90 に関する補足情報」および「ITS-90 を近似するための手法」が国際度量衡局によって出版され、定期的に更新されることに留意する。

国際度量衡委員会は

- ITS-90 が 1990 年 1 月 1 日から発効すること

ケルビンは、2018年の第26回国際度量衡総会によって再定義された(決議 1, p. 165 参照)。

- IPTS-68 と EPT-76 が同日をもって廃止されることを勧告する。

第 19 回 国際度量衡総会 (CGPM), 1991 年

■ SI 接頭語ゼタ、zepto、yocto および Metrologia, 1992, 29, 3)

決議 4

第 19 回国際度量衡総会は、第 11 回国際度量衡総会の決議 12 第 3 項、第 12 回国際度量衡総会の決議 8 および第 15 回国際度量衡総会の決議 10 によって採択された、単位の十進の倍量および分量の名称を形成するための SI 接頭語の表に、次の接頭語

単位に乘じられる因数	接頭語	記号
10^{21}	ゼタ	Z
10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yocto	Y
10^{-24}	yocto	y

を付け加えることを決定する。

名称zepto (zepto) とゼタ (zetta) は、数字の 7 (10^7 の 7 乗) を示唆する septo から導出され、記号として文字「s」の重複使用を避けるために、文字「z」が文字「s」に置き換わっている。名称yocto (yocto) とヨタ (yotta) は、数字の 8 (10^8 の 8 乗) を示唆する octo から導出され、数字のゼロと混同する可能性のある文字「o」の使用を避けるために、文字「y」が付け加えられている。

第 20 回 国際度量衡総会 (CGPM), 1995 年

■ SI における補助単位の階級の廃止 (CR, 223 および Metrologia, 1996, 33, 83)

決議 8

第 20 回国際度量衡総会は、

- 国際単位系 (SI) を確立した 1960 年の第 11 回国際度量衡総会が、その決議 12 において、単位を三つの階級、すなわち、基本単位、組立単位および補助単位に分類したこと、そして、この最後の階級がラジアンとステラジアンだけを含んでいること
- 基本単位や組立単位に対する補助単位の地位が、議論を引き起こしたこと
- 補助単位のあいまいな地位が SI の内部的な一貫性を危うくしていることを認めている国際度量衡委員会が、1980 年にその勧告 1 (CI-1980) の中で、補助単位を SI では無次元の組立単位として解釈したこと

を考慮し、

国際度量衡委員会によって 1980 年に与えられた解釈を承認し、

- SI の中で補助単位、すなわちラジアンとステラジアンを無次元の組立単位として解釈すること、それらの名称と記号は便宜上、他の SI 組立単位の表示の中で、必然的ではないが、必要に応じて用いられうること
- したがって、SI の中で補助単位の階級を単独の階級としては廃止することを決定する。

第 21 回 国際度量衡総会 (CGPM), 1999 年

■ キログラムの定義 (CR, 331 および Metrologia, 2000, 37, 94)

決議 7

第 21 回国際度量衡総会は、

- 国際単位系 (SI) の長期的な安定性を確保する必要性
- SI の基本単位の一つである質量の単位を人工物で定義することによる本質的な長期安定性の不確かさ
- この不確かさにもとづく、キログラムに依存する他の三つの基本単位、すなわちアンペア、モルおよびカンデラの長期安定性の不確かさ
- 質量の単位を基礎定数や原子定数に結びつけるために行われたいくつかの実験のこれまでの進捗
- そのような結びつきを達成する複数の方法を持つことが望ましいことを考慮し、

将来のキログラムの再定義のために、複数の国家標準研究機関が、質量の単位を基礎定数や原子定数に結びつける実験を改良する努力を続けるよう勧告する。

■ 酵素活性の表現のための SI 組立単位、モル毎秒の固有の名称、カタール (CR, 334-335 および *Metrologia*, 2000, 37, 95)

決議 12

第 21 回国際度量衡総会は、

- 人の健康や安全のために医学や生物化学の分野において SI 単位の使用を促進することの重要性
- 国際単位系 (SI) とは一貫性が無い、1 マイクロモル毎分に等しい非 SI 単位である「ユニット」(unit、記号 U) が、1964 年以降、医学や生物化学において酵素活性を表現するために広汎に使用されていること
- 国際単位系と一貫性のある組立単位モル毎秒に対する固有の名称がないことにより、臨床計測の結果が様々なローカル単位で与えられていること
- 医学や臨床化学における SI 単位の使用が、これらの分野の国際団体から強く勧告されていること
- 国際臨床化学連合が単位諮問委員会に SI 単位 モル毎秒に対する固有の名称カタール (記号 kat) を勧告することを要請したこと
- 固有の名称の多用は国際単位系のリスク因子となる可能性があるものの、人の健康や安全に関する事項では特例とされること (第 15 回国際度量衡総会 (1975 年) における決議 8 および 9、第 16 回国際度量衡総会 (1979 年) における決議 5)

を考慮し、

酵素活性の表現のために、名称カタール (記号 kat) が、SI 単位 モル毎秒に対して 30 年以上使用されていることを留意し、

特に医学や生物化学の分野における酵素活性の表現のために、SI 単位のモル毎秒に対する固有の名称カタール (記号 kat) を採用することを決定し、カタールを使用する際、測定手法に言及して測定対象を規定し、測定手法では指示反応を明示しなければならないことを勧告する。

国際度量衡委員会 (CIPM), 2001 年

■ SI 単位 (PV, 69, 120)

国際度量衡委員会は 2001 年、単位諮問委員会の SI 単位に関する次の提案を承認した。

「SI 単位 (SI units および units of the SI) は、基本単位、一貫性のある組立単位、および推奨される倍量および分量接頭語と結合することによって得られる全ての単位の名称と見なされるべきであると提案する。その意味が基本単位と一貫性のある組立単位のみにより制限されるとき、「一貫性のある SI 単位」(coherent SI units) という名称が使われるべきである」

国際度量衡委員会 (CIPM), 2002 年

■ メートルの定義の実現方法の改定 (PV, 70, 194-204 および *Metrologia*, 2003, 40, 103-133)

勧告 1

国際度量衡委員会は、

- 1983 年に開催された第 17 回国際度量衡総会が新しいメートルの定義を選択したこと
- 同じ年、国際度量衡総会が国際度量衡委員会に
 - メートルの実現方法について文書としてまとめること
 - 長さの干渉測定のための波長標準として勧告され得る放射を選択し、その使用方法について文書としてまとめること
 - これらの標準を改善するために行われる研究を推進すること、そして、これらの方法を今後拡張または改定していくことを要請したこと
- この依頼に応じて国際度量衡委員会が以下の趣旨の勧告 1 (CI-1983) (メートルの定義の実現方法) を採択したこと
- メートルは、次の方法の一つによって実現される
 - a) 時間 t の間に平面電磁波が真空中を伝わる行程の長さ l による方法。この長さは、 $l = c_0 t$ の関係式および真空中の光の速さ $c_0 = 299\,792\,458$ m/s の値を用い、時間 t を測定することによって得られる
 - b) 周波数 f の平面電磁波の真空中の波長 λ による方法。この波長は $\lambda = c_0/f$ の関係式および真空中の光の速さ $c_0 = 299\,792\,458$ m/s の値を用い、周波数 f を測定することによって得られる
 - c) 真空中の波長または周波数が与えられている下記のリストにある放射の一つによる方法。示された仕様と適切と認められる操作方法に従うならば、そこに示されている不確かさで用いることができる
- ただし、すべての場合、回折、重力あるいは真空の不完全さのような実際の条件を考慮して必要な補正が施されるべきである
- 一般相対性理論では、メートルは適切な長さの単位と考えられる。したがって、その定義は、重力場の非一様性の効果（地球表面において、この効果は鉛直方向 1 メートル当たり約 1×10^{-16} ）が無視できるような十分小さい空間領域でのみ適用される。この場合、考えるべき効果は特殊相対性理論の効果のみとなる。b) や c) で勧告されているメートル実現のための局所的な方法は適切なメートルを与えるが、a) で勧告されているものについては必ずしもそうではない。したがって、方法 a) については、長さ l が十分短く、一般相対性理論により予想される効果が実現の不確かさに比べ無視できる範囲に制限されるべきである。そうでない場合、測定の解釈をどうするかにあたっての助言については、時間・周波数諮問委員会の一般相対性理論の計量学への応用についての作業部会の報告を参照のこと (*Application of general relativity to metrology, Metrologia*, 1997, 34, 261-290)
- 国際度量衡委員会がこの目的のため、すでに放射のリストを勧告したことを想起し、
また、1992 年と 1997 年に国際度量衡委員会がメートルの定義の実現方法を改定したことをも想起し、
- 科学と技術が、メートルの実現のさらなる正確さ向上を要求し続けていること

- 1997年以降、国立研究所、国際度量衡局およびその他での研究が、不確かさのより小さい新しい放射とそれらの実現方法を明らかにしたこと
- 時間に関連した研究のための光周波数への動きが増加していること、メートルの定義の実現方法として推奨される放射がカバーする領域が、幾何形状測定の詳細やメートルの実現といった分野だけでなく、高分解能分光学、原子分子物理学、基礎定数や通信の分野にも広がり続けていること
- 高安定な冷却原子やイオンの標準放射について不確かさを減少させた新しい周波数値がすでに勧告値の表として利用でき、いくつかの新しい冷却原子やイオン種の放射の周波数が最近測定されるようになってきたこと、光通信において重要な波長帯も含む、気体セルにもとづく多くの光周波数標準について、不確かさが大きく減少した値が決められてきたこと
- 新しいフェムト秒コム技術が、高い安定性をもつ光周波数標準の周波数とSI秒を実現している周波数を関連づけるために明らかに重要であること、これらの技術がSIトレーサビリティをもたらす便利な測定技術であること、そしてコム技術が測定技術だけでなく周波数源ともなりうることを考慮して、

コム技術が、時を得た適切な技術であることを認識するとともに、この技術の能力を十分に調べるためのさらなる研究を奨励することを認める。

また、他の周波数チェーン技術との比較によるコム技術の妥当性確認がなされたことを歓迎する。

さらに、国家標準研究機関と他の研究機関に対し、コム技術の達成でき得るかぎりの正確さの追求と、幅広い応用へむけた簡便化への追求を促す。

そして、以下の通り勧告する。

- 国際度量衡委員会によって1997年に推奨された放射のリスト（勧告1 (CI-1997)）を以下の内容を含むように改定すること*
 - 冷却Ca原子、水素原子、およびトラップされたSr⁺イオンの改訂された周波数値
 - トラップされたHg⁺イオン、In⁺イオン、Yb⁺イオンを含む新しい冷却イオン種の周波数値
 - Rb安定化レーザー、I₂安定化Nd:YAGレーザーとHe-Neレーザー、CH₄安定化He-Neレーザー、および波長10 μmのOsO₄安定化炭酸ガスレーザーに関する改訂された周波数値
 - RbおよびC₂H₂安定化レーザーを含む光通信波長帯に関連する標準の周波数値

* 推奨放射のリスト、勧告1 (CI-2002)、はPV, 70, 197-204およびMetrologia, 2003, 40, 104-115において与えられる。

■ 線量当量 (PV, 70, 205)

勧告 2

国際度量衡委員会は、

- 現行の線量当量（シーベルト）のSI単位の定義、が国際放射線防護委員会（ICRP）によって規定された係数「N」（その他すべての係数の積）を含んでいること
- ICRPと国際放射線単位測定委員会（ICRU）が共にこの係数Nはもはや必要ないと考え、削除すると決定したこと
- 係数Nを含むHの現行のSIの定義が多少の混乱の原因となっていることを考慮し、

SI文書中の説明を下記のように変更することを決定する。

J. Radiol. Prot., 2005, 25, 97-100 参照。

線量当量 H という量は、電離放射線の吸収線量 D と ICRU によって線形エネルギー移動の関数として定義された無次元の係数 Q の積である。

$$H = Q \cdot D$$

したがって、ある放射線に対して単位をジュール毎キログラムとした場合の H の数値は、 Q の値によって、単位をジュール毎キログラムとした場合の D の数値とは異なることがあり得る。

また当委員会は、SI 文書中の説明の最後の文は下記のままとすることを**決定する**。

吸収線量 D と線量当量 H を混同する危険を避けるために、それぞれの単位に対して固有の名称を使用すべきである。すなわち、吸収線量 D の単位に対しては、ジュール毎キログラムの代わりにグレイという名称を、線量当量 H の単位に対しては、ジュール毎キログラムの代わりにシーベルトという名称を使用すべきである。

国際度量衡委員会 (CIPM), 2003 年

■ 実現方法としての推奨放射リストの改定 (PV, 71, 146 および *Metrologia*, 2004, 41, 99-100)

勧告 1

国際度量衡委員会は、

- すでに推奨放射リストにある、いくつかの高い安定度をもつ冷却イオン標準の放射に対する改善された周波数値が、最近になって利用できるようになってきたこと
- すでに推奨放射リストにある、ガスセルを用いた赤外の光通信帯の光周波数標準に対する改善された周波数値が決められるようになってきたこと
- 補助的な推奨周波数源リストにある、特定のヨウ素のガスセル標準に対し、フェムト秒コムによる周波数計測が初めて行われ、その不確かさが大きく減少したこと

を考慮し、

推奨放射リストに下記を含めるように改定することを**提案する**。

- トラップされた $^{88}\text{Sr}^+$ 単一イオンの四重極遷移、およびトラップされた $^{171}\text{Yb}^+$ 単一イオンの八重極遷移の更新された周波数値
- 1.54 μm の C_2H_2 安定化標準の更新された周波数値
- 543 nm と 515 nm のヨウ素安定化標準の更新された周波数値

第 22 回 国際度量衡総会 (CGPM), 2003 年

■ 小数点の記号 (CR, 381 および *Metrologia*, 2004, 41, 104)

勧告 10

第 22 回国際度量衡総会は、

- SI 単位の主要な目的は、世界中いたるところで量の値がたやすく理解できるように表されること
- 量の値は通常、数値と単位の積として表される
- 量の値を説明する数値は、整数部分と小数部分を含む複数の桁からなる

- 1948 年第 9 回国際度量衡総会の勧告 7 において、数値の表示において、カンマ（フランス式）またはピリオド（イギリス式）は、整数部分と小数部分を分けるためのみに用いられると記述されている
- 第 86 回国際度量衡委員会（1997 年）の決定にしたがって、国際度量衡局は SI 冊子英語版（SI にかかる参照国際文書）を含む英語の出版物においてはポイントを使用し、フランス語版出版物においてはカンマを使用する
- しかしながら、いくつかの国際団体はその英語の文書で小数点としてカンマを使用している
- さらに、いくつかの国際標準組織を含む国際団体で、すべての言語において小数点としてカンマを指定している
- 小数点としてのカンマの指定する多くの言語は、小数点として慣例的にポイントを使用する言語と対立している
- 複数の国で話されるいくつかの言語では国によって、複数の言語が話されている国では言語によって、ピリオドかカンマのどちらかが小数点として使用されている

ことを考慮し、

小数点の記号は、ピリオドかカンマのどちらかを使用すべきであると宣言し、

「数は読みやすいよう 3 桁ずつに区切ってよい。ただし、その区切りは決してピリオドによってもカンマによっても分けられてはならない」という 1948 年第 9 回国際度量衡総会の勧告 7 を再承認する。

国際度量衡委員会（CIPM）、2005 年

■ 熱力学温度の単位ケルビンの定義の明確化（PV, 73, 235 および *Metrologia*, 2006, 43, 177-178）*

勧告 2

国際度量衡委員会は、

- 熱力学温度の単位、ケルビン、が水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ として定義されていること
- 水の三重点の温度は、試料として使用された水の中に存在する水素と酸素の種々の同位体の量の比率に依存すること
- この効果が、現在では、水の三重点の個々の実現の間で観測される温度のばらつき的主要原因の一つであること

を考慮し、

- ケルビンの定義は特定の同位体組成の水を参照するものであること
- その組成は次の通りであること
 - 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
 - 1 モルの ^{16}O あたり 0.002 005 2 モルの ^{18}O

これは、IUPAC によって Atomic Weights of the Elements: Review 2000 において推奨されている、国際原子力機関（IAEA）の標準物質 Vienna Standard Mean Ocean Water（VSMOW）の組成である。

- この組成を SI 冊子中のケルビンの定義に付された注記の中で次のように規定すること

「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を参照するものである。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

* ケルビンは 2018 年の第 26 回国際度量衡総会によって、再定義された（決議 1, p. 165 参照）。

0.002 005 2 モルの ^{18}O 」

を決定する。

■ 実現方法としての推奨放射リストの改定 (PV, 73, 236 および *Metrologia*, 2006, 43, 178)

勧告 3

国際度量衡委員会は、

- すでに推奨放射リストにある、いくつかの高い安定度をもつ冷却イオン標準の放射に対する改善された周波数値が、最近になって利用できるようになってきたこと
- すでに推奨放射リストにある、ガスセルを用いた赤外の光通信波長帯の光周波数標準に対する改善された周波数値が決められるようになってきたこと
- 補助的な推奨周波数源リストにある、特定のヨウ素のガスセル標準に対する改善された周波数値が決められたこと
- 新しい冷却原子、近赤外波長領域の原子、光通信波長帯の分子それぞれの周波数値が、光コムによって初めて周波数計測されたこと

を考慮し、

推奨放射のリストが下記を含むように改定することを決定する。

- トラップされた $^{88}\text{Sr}^+$ 単一イオンの四重極遷移、トラップされた $^{199}\text{Hg}^+$ 単一イオンの四重極遷移、およびトラップされた $^{171}\text{Yb}^+$ 単一イオンの四重極遷移の更新された周波数値
- Ca 原子の遷移の更新された周波数値
- 波長 1.54 μm の C_2H_2 安定化標準の更新された周波数値
- 波長 515 nm のヨウ素安定化標準の更新された周波数値
- 波長 698 nm の ^{87}Sr 原子の遷移の追加
- 波長 760 nm の ^{87}Rb 原子の 2 光子遷移の追加
- 波長 1.54 μm の $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ ($\nu_1+\nu_3$) バンドそして $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ ($\nu_1+\nu_3$) と ($\nu_1+\nu_3+\nu_4+\nu_5$) バンドの追加

国際度量衡委員会 (CIPM), 2006 年

■ 秒の二次表現について (PV, 74, 249 および *Metrologia*, 2007, 44, 97)

勧告 1

国際度量衡委員会は、

- 「メートルの実現および秒の二次表現を含めた応用における、標準周波数の勧告値」の共通リストを作成しなければならないこと
- メートルの定義および秒の二次表現に関する実現方法を協議する CCL/CCTF 合同作業部会 (JWG) が、国際度量衡局における 2005 年 9 月の会合において、秒の二次表現に関し、このリストに盛り込む可能性のある候補について議論したこと
- CCL/CCTF JWG が、2006 年 9 月のセッションにおいて、Hg イオン、Sr イオン、Yb イオン、Sr 中性原子の遷移周波数に関する値を精査し、更新したこと
- CCTF は、その勧告 CCTF1 (2004 年) の中で、すでに、秒の二次表現として ^{87}Rb の摂動を受けない基底状態の超微細構造量子遷移周波数を勧告していること

を考慮し、

次に示す遷移周波数を秒の二次表現として使い、「メートルの実現方法および秒の二次表現を含めた応用における標準周波数の勧告値」の新しいリストに盛り込むことを勧告する。

- ^{87}Rb の摂動を受けない基底状態の超微細構造量子遷移、周波数が $f_{\text{Rb}}^{87} = 6\,834\,682\,610.904\,324\text{ Hz}$ 、推定相対標準不確かさが 3×10^{-15}
- $^{88}\text{Sr}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $5s\ ^2\text{S}_{1/2} - 4d\ ^2\text{D}_{5/2}$ 、周波数が $f_{\text{Sr}^+}^{88} = 444\,779\,044\,095\,484\text{ Hz}$ 、相対不確かさが 7×10^{-15}
- $^{199}\text{Hg}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $5d^{10}\ 6s\ ^2\text{S}_{1/2} (F=0) - 5d^9\ 6s^2\ ^2\text{D}_{5/2} (F=2)$ 、周波数が $f_{\text{Hg}^+}^{199} = 1\,064\,721\,609\,899\,145\text{ Hz}$ 、相対標準不確かさが 3×10^{-15}
- $^{171}\text{Yb}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $6s\ ^2\text{S}_{1/2} (F=0) - 5d\ ^2\text{D}_{3/2} (F=2)$ 、周波数が $f_{\text{Yb}^+}^{171} = 688\,358\,979\,309\,308\text{ Hz}$ 、相対標準不確かさが 9×10^{-15}
- ^{87}Sr 中性原子の摂動を受けない光学遷移 $5s^2\ ^1\text{S}_0 - 5s\ 5p\ ^3\text{P}_0$ 、周波数が $f_{\text{Sr}}^{87} = 429\,228\,004\,229\,877\text{ Hz}$ 、相対標準不確かさが 1.5×10^{-14}

国際度量衡委員会 (CIPM), 2007 年

■ 実現方法としての推奨放射リストの改定 (PV, 75, 185)

勧告 1

国際度量衡委員会は、

- すでに標準周波数リストにある光通信波長帯の分子の周波数値が、フェムト秒コムによる周波数測定によって改善されてきたこと
- 光通信波長帯の分子の周波数が、フェムト秒コムによる周波数測定で初めて決定されてきていること
- 波長 532 nm 帯の特定のヨウ素ガスセル吸収の周波数が、フェムト秒コムによる周波数測定によって初めて決定されたこと

を考慮し、

下記の事項を含めるよう、標準周波数リストを改定することを提案する。

- 波長 1.54 μm における $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ の ($\nu_1 + \nu_3$) バンドの周波数値を更新したリスト
- 波長 1.54 μm における $^{12}\text{C}_2\text{HD}$ ($2\nu_1$) バンドの周波数値の追加
- 波長 532 nm におけるヨウ素分子の遷移 P(142) 37-0、R(121) 35-0 および R(85) 33-0 の超微細構造成分の周波数値の追加

第 23 回 国際度量衡総会 (CGPM), 2007 年

■ メートルの定義の実現方法の改定および新しい光周波数標準の開発 (CR, 431)

決議案 9

第 23 回国際度量衡総会は

- 光周波数標準の性能に急速かつ重要な進歩が見られた
- フェムト秒コム技術が単一地点で光放射とマイクロ波放射を関係付けるために定常的に利用されている
- 複数の国家計量標準機関が、光周波数標準の近距離での比較技術について研究を進めている
- 光周波数標準を比較できるようにするには、遠隔比較技術が国際的レベルで開発される必要がある

ことを考慮し、

- 光による秒の表現の周波数を審査するための、長さ諮問委員会と時間・周波数諮問委員会の合同作業部会の活動
- 2002年、2003年、2005年、2006年および2007年に国際度量衡委員会によりなされた、メートルの定義の実現方法並びに推奨放射のリストへの追加
- 光周波数標準をどのように比較するかの問題を取り上げるために国際度量衡局が果たした主導的役割

を歓迎し、

- 国家標準研究機関が光周波数標準およびその比較法の開発に資源を投ずること
- 光周波数標準の比較に役立つ可能性のある技術の研究を目的として、国家標準研究機関の参加による国際プロジェクトの調整を国際度量衡局が行うこと

を勧告する。

■ 熱力学温度の単位ケルビンの定義の明確化について (CR, 432)

決議案 10

第23回国際度量衡総会は

- 熱力学温度の単位、ケルビンが水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ として定義されていること
- 三重点の温度は使用した試料水中に存在する水素と酸素の各同位体の相対量に依存すること
- この影響は現在、水の三重点のいろいろな実現の間の観測される変動の主たる原因の一つであること

を考慮し、

測温諮問委員会の助言にもとづく、2005年10月の国際度量衡委員会による下記の決定に留意し、これを歓迎する。

- ケルビンの定義は特定の同位体組成をもつ水を参照する
- その組成は

^1H 1 モル当り ^2H 0.000 155 76 モル

^{16}O 1 モル当り ^{17}O 0.000 379 9 モル

^{16}O 1 モル当り ^{18}O 0.002 005 2 モル

である。これは国際原子力機関標準物質ウィーン標準平均海洋水 (VSMOW) の組成であり、“元素の原子量：総説 2000”の中で国際純正・応用化学連合によって推奨されているものである

- この組成はSI文書の中で、ケルビンの定義を補足する注釈で次のように規定されている

「この定義は、次の物質質量比によって定義される同位体組成をもつ水を参照する：

^1H 1 モル当り ^2H 0.000 155 76 モル

^{16}O 1 モル当り ^{17}O 0.000 379 9 モル

^{16}O 1 モル当り ^{18}O 0.002 005 2 モル」

■ 国際単位系 (SI) の基本単位の再定義の可能性について (CR, 434)

決議案 12

第23回国際度量衡総会は

ケルビンは、2018年の第26回国際度量衡総会によって再定義された(決議1, p.165参照)。

2018年の第26回国際度量衡総会において、SI改定の最終承認が行われた(決議1, p.165参照)。

- 長年に渡って、国家計量標準機関と国際度量衡局が、SI 基本単位が自然の不変量である基礎物理定数を用いて定義できるように、計測の最先端を拡大することで、国際単位系 (SI) を進歩、向上させることに多大な努力を払ってきたこと
- SI の七つの基本単位のうち、キログラムだけがいまだに人工物である国際キログラム原器 (第 2 回国際度量衡総会 (1889 年)、第 3 回国際度量衡総会 (1901 年)) を用いて定義されており、アンペア、モル、およびカンデラの定義がキログラムに依存すること
- 第 21 回国際度量衡総会 (1999 年) の決議 7 において、「国立研究所はキログラムの将来の再定義という観点から質量の単位を基礎定数または原子定数に結び付ける実験を改良する努力を続けること」が勧告されたこと
- 国際キログラム原器の質量をプランク定数 h またはアボガドロ定数 N_A と関係付ける実験における近年の多大な進歩
- ボルツマン定数 k_B を再決定する研究を含む、いくつかの関連する基礎定数の値を決定する構想
- 最近の進展の結果、キログラム、アンペア、ケルビンおよびモルの再定義に対する重大な結果とそれらの再定義から得られる潜在的利益が存在すること
- 2005 年 10 月の国際委員会における勧告 1 (CI-2005)、および SI 基本単位の一つまたはそれ以上の基本単位の再定義の課題に関する諮問委員会の様々な勧告

を考慮し、

- SI 単位の定義の変更はどれも自己一貫性をもたなければならないこと
- 基本単位の定義は容易に理解されるべきことが望ましいこと
- 国際度量衡委員会と諮問委員会の作業
- 関連実験の結果を見守る必要性
- 広範な科学およびユーザーコミュニティからの意見や寄与を求める重要性
- キログラム、アンペア、ケルビンの新定義の作成およびモルの再定義の準備を、原則として、承認する 2005 年の国際度量衡委員会の決定

に留意し、

国家計量標準機関と国際度量衡局に、

- 国際度量衡委員会が、第 24 回国際度量衡総会 (2011 年) の時点で、キログラム、アンペア、ケルビンおよびモルを基礎物理定数の固定された値を用いて再定義することが可能かどうか判断できるように関連の実験を続けること
- 国際度量衡委員会、その諮問委員会、および適当な作業部会と共に、基礎定数の固定値にもとづく新しい定義を実現する具体的な方法について研究し、それぞれの定義の実現方法を作成するとともに、新定義をユーザーに説明する最適な方策を検討すること
- 再定義の可能性についてユーザーコミュニティ知らせる啓蒙活動を開始すること、そして、再定義とその具体的な実現の技術的および法的な意味を慎重に検討・考慮すること

を勧告し、

国際度量衡委員会に対し、これらの問題を 2011 年の第 24 回総会に報告し、実験の結果が良好でユーザーのニーズが満たされるものであれば、キログラム、アンペア、ケルビンおよびモルの定義の変更に関する正式の提案を第 24 回総会に上程できるように、必要と考えられる如何なる準備にも着手することを要請する。

国際度量衡委員会 (CIPM), 2009 年

■ 標準周波数リストの更新 (PV, 77, 235)

勧告 2

国際度量衡委員会は、

- 「メートルの実現方法および秒の二次表現を含めた応用のための標準周波数の勧告値」の共通リストが作成されたこと
- CCL-CCTF 周波数標準作業部会 (FSWG) が、このリストに盛り込むいくつかの有望な候補について精査したこと

を考慮し、

標準周波数勧告値のリストにおいて、次に示す遷移周波数を盛り込むこと、あるいは、更新することを勧告する。

- ^{87}Sr 中性原子の摂動を受けない光学遷移 $5s^2\ ^1\text{S}_0 - 5s\ 5p\ ^3\text{P}_0$ 、
周波数 $f = 429\ 228\ 004\ 229\ 873.7\ \text{Hz}$ 、相対標準不確かさは 1×10^{-15} (この放射は、秒の二次表現として、国際度量衡委員会によりすでに推奨されている)
- ^{88}Sr 中性原子の摂動を受けない光学遷移 $5s^2\ ^1\text{S}_0 - 5s\ 5p\ ^3\text{P}_0$ 、
周波数 $f = 429\ 228\ 066\ 418\ 012\ \text{Hz}$ 、相対標準不確かさが 1×10^{-14}
- $^{40}\text{Ca}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $4s\ ^2\text{S}_{1/2} - 3d\ ^2\text{D}_{5/2}$ 、
周波数 $f = 411\ 042\ 129\ 776\ 393\ \text{Hz}$ 、相対標準不確かさが 4×10^{-14}
- $^{171}\text{Yb}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $^2\text{S}_{1/2} (F=0) - ^2\text{F}_{7/2} (F=3, m_F=0)$ 、周波数 $f = 642\ 121\ 496\ 772\ 657\ \text{Hz}$ 、相対標準不確かさは 6×10^{-14}
- ^{171}Yb 中性原子の摂動を受けない光学遷移 $6s^2\ ^1\text{S}_0 (F=1/2) - 6s\ 6p\ ^3\text{P}_0 (F=1/2)$ 、
周波数 $f = 518\ 295\ 836\ 590\ 864\ \text{Hz}$ 、相対標準不確かさは 1.6×10^{-13}

第 24 回 国際度量衡総会 (CGPM), 2011 年

■ 今後考えられる国際単位系 (SI) 改定について (CR, 532)

決議案 1

国際度量衡総会は、第 24 回総会において、

- 国際単位系 (SI) のいくつかの単位の再定義の重要性、価値および潜在的メリットについての国際的な合意
- 国際度量衡局と国家計量標準機関は、SI 基本単位が自然の不変量である基礎物理定数または原子の特性で表すことができるように、過去数十年間にわたって、計量学のフロンティアを広げることで、国際単位系を進歩させることに多大な努力を払ってきた
- こうした努力が実を結んだ顕著な例として、現在の長さの SI 単位であるメートルの定義が挙げられる (第 17 回国際度量衡総会 (1983 年)、決議 1)。この定義は、メートルを、真空中における光の速さ c の厳密な値、すなわち $299\ 792\ 458$ メートル毎秒に結びつけている
- SI の七つの基本単位のうちキログラムだけが、いまだに人工物である国際キログラム原器によって定義されている (第 1 回国際度量衡総会 (1889 年)、第 3 回国際度量衡総会 (1901 年))。また、アンペア、モル、カンデラの定義はキログラムに依存している
- 1889 年の第 1 回国際度量衡総会において承認されて以来、国際キログラム原器は科学と技術に貢献したが、国際キログラム原器にはいくつかの大きな制約がある。最も重要な制約の一つは、質量が自然の不変量と明示的に結びつけられておらず、そのために長期的な安定性が確保されないことである

2018 年の第 26 回国際度量衡総会において、SI 改定の最終承認が行われた (決議 1, p. 165 参照)。

- 国際度量衡総会は、1999年の第21回総会において、「各国の研究所は、将来的なキログラムの再定義を目指し、質量の単位を基礎定数または原子定数と結び付けるための精密な実験を実施する努力を継続する」とする決議7を採択した
- 近年、ワットバランスやシリコン原子の質量測定を含む方法によって、国際キログラム原器の質量をプランク定数に結びつけることにおいて多くの進展があった
- ジョセフソン効果および量子ホール効果、ならびにジョセフソン定数 K_J およびフォン・クリッツィング定数 R_K のSI値によって直接的または間接的に実現されるすべてのSI電気単位の不確かさは、もしキログラムが h の厳密な数値と結び付けられ、アンペアが電気素量 e との厳密な数値と結びつけられた場合、著しく低減される可能性がある
- ケルビン、現在、水の固有特性によって定義されている。これは自然の不変量ではあるが、実際には、使用される水の純度および同位体組成に依存する
- ボルツマン定数 k の厳密な値と結びつけるよう関連づけられるようにケルビンを再定義することは可能である
- アボガドロ定数 N_A の厳密な値と結びつけられるようにモルを再定義することも可能である。これにより、キログラムが h の厳密な数値と結びつけられるように定義された場合でも、モルの定義はキログラムの定義に依存せず、物質質量と質量の違いが明確になる
- 他の多くの重要な基礎定数およびエネルギー変換ファクターの値の不確かさは、もし、 h 、 e 、 k および N_A がSI単位で表された厳密な値を持つならば、除去されるか、もしくは著しく低減されるだろう
- 2007年の第23回総会において、決議12が採択された。この決議においては、基礎定数を用いたキログラム、アンペア、ケルビン、モルの新定義が採択されるよう、国家標準研究機関、国際度量衡局および国際度量衡委員会ならびに諮問委員会が実行すべき作業がまとめられた
- この作業は順調に進んでいるが、2007年の第23回総会において採択された決議12に記載された全ての要件が満たされたわけではない。このため、国際度量衡委員会は、まだ最終提案を行う準備ができていない
- しかしながら、提案されるであろう事項の明確かつ詳細な説明は、現在、提示される

ことを考慮し、

次のようなSIの改定を提案する国際度量衡委員会の意向を留意する。

- 国際単位系 (SI) を以下のような単位系とする
 - セシウム 133 原子の基底状態の超微細準位の周期 $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$ は、厳密に 9 192 631 770 ヘルツ
 - 真空中の光の速さ c は、厳密に 299 792 458 メートル毎秒
 - プランク定数 h は、厳密に $6.626\ 06X \times 10^{-34}$ ジュール秒 *
 - 電気素量 e は、厳密に $1.602\ 17X \times 10^{-19}$ クーロン
 - ボルツマン定数 k は、厳密に $1.380\ 6X \times 10^{-23}$ ジュール毎ケルビン
 - アボガドロ定数 N_A は、厳密に $6.022\ 14X \times 10^{23}$ 毎モル
 - 周波数 540×10^{12} Hz の単色放射の視感効果度 K_{cd} は、厳密に 683 ルーメン毎ワット

上記において

* 定数の表現において現われる X は、決議の時点でその数字が不明であったことを意味している。

(i) ヘルツ (Hz)、ジュール (J)、クーロン (C)、ルーメン (lm)、ワット (W) は、 $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ 、 $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$ 、 $\text{C} = \text{s A}$ 、 $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ および $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$ によって、それぞれ、秒 (s)、メートル (m)、キログラム (kg)、アンペア (A)、ケルビン (K)、モル (mol)、カンデラ (cd) の各単位と関連づけられている。

(ii) 本決議案において記号「X」は、最新の CODATA 調整にもとづく値を用いることで、 h 、 e 、 k および N_A の数値に一つまたは二つ以上の数字が加えられることを示す。

従って、SI は、今後も現在の七つの基本単位を持つことになる。特に、

- キログラムは今後も質量の単位として使用されるが、その大きさは、SI 単位 $\text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$ (これは J s に等しい) で表したときのプランク定数の数値を厳密に $6.626\,06\text{X} \times 10^{-34}$ に定めることによって設定される
- アンペアは今後も電流の単位として使用されるが、その大きさは、SI 単位 s A (これは C に等しい) で表したときの電気素量の数値を厳密に $1.602\,17\text{X} \times 10^{-19}$ に定めることによって設定される
- ケルビンは今後も熱力学温度の単位として使用されるが、その大きさは、SI 単位 $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$ (これは J K^{-1} に等しい) で表したときのボルツマン定数の数値を厳密に $1.380\,6\text{X} \times 10^{-23}$ に定めることによって設定される
- モルは今後も、要素粒子 (原子、分子、イオン、電子その他の粒子またはそれらの粒子の特定の集合体がありうる) の物質量の単位として使用されるが、その大きさは、SI 単位 mol^{-1} で表したときのアボガドロ定数の数値を厳密に $6.022\,14\text{X} \times 10^{23}$ に定めることによって設定される

国際度量衡総会はさらに以下の事項に留意する。

- キログラム、アンペア、ケルビン、モルの新しい定義は、定数を明示的に定める形になる予定である。すなわち、十分に認知された基礎定数について厳密な値を明示的に定めることによって、単位が間接的に定義される
- 現行のメートルの定義は、真空中の光の速さの厳密な値に関連づけられている。これもまた、十分に認知された基礎定数である
- 現行の秒の定義は、セシウム原子の明確な特性の厳密な値に関連づけられている。これもまた、自然の不変量である
- 現行のカンデラの定義は基礎定数に関連づけられていないが、自然の不変量の厳密な値と関連づけられていると考えることができる
- 全ての基本単位が同様の文言で表されれば、国際単位系がより分かりやすくなるだろう

このため、国際度量衡委員会は、秒、メートル、カンデラの現行の定義を以下のような全く同じ形式で再編成することを提案する。

- 秒 (記号は s) は時間の単位である。その大きさは、温度 0 K で、静止状態のセシウム 133 原子の基底状態の超微粒準位の周期の数値を、SI 単位 s^{-1} (これは Hz に等しい) で表した場合、厳密に $9\,192\,631\,770$ と定めることによって設定される
- メートル (記号は m) は長さの単位である。その大きさは、SI 単位 m s^{-1} で表したときの真空中の光の速さの数値を厳密に $299\,792\,458$ と定めることによって設定される
- カンデラ (記号は cd) は、一定方向における光度の単位である。その大きさは、SI 単位 $\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{cd sr}$ または cd sr W^{-1} (これは lm W^{-1} に等しい) で表したときの周波数 $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ の単色放射の視感効果度の数値を厳密に 683 と定めることによって設定される

このように、すべての七つの基本単位の定義が、上記の七つの定数から自然に導きだされることになる。

結果として、SI 改定の実施日において、

- 1889 年から施行されている国際キログラム原器の質量にもとづくキログラムの定義(第 1 回国際度量衡総会(1889 年)、第 3 回国際度量衡総会(1901 年))は、破棄される
- 国際度量衡委員会(1946 年 決議 2)によって提案された定義にもとづき、1948 年から施行されているアンペアの定義(第 9 回国際度量衡総会(1948 年))は破棄される
- ジョセフソン効果と量子ホール効果を用いたボルトとオームの実現の確立のための国際度量衡総会の要求(第 18 回国際度量衡総会(1987 年)決議 6)にもとづいて国際度量衡委員会で採択されたジョセフソン定数 K_{J-90} およびフォン・クリッツィング定数 R_{K-90} の協定値(1988 年 勧告 1 および 2)は破棄される
- 明示性の低い以前の定義(第 10 回国際度量衡局(1954 年)決議 3)にもとづき、1967/68 年から施行されているケルビンの定義(第 13 回国際度量衡局(1967/68 年)決議 4)は破棄される
- 炭素 12 のモル質量が厳密に $0.012 \text{ kg mol}^{-1}$ であるとする定義にもとづき、1971 年から施行されているモルの定義(第 14 回国際度量衡局(1971 年)決議 3)は破棄される。
- それぞれ、第 17 回国際度量衡局(1983 年 決議 1)、第 13 回国際度量衡局(1967/68 年 決議 1)、第 16 回国際度量衡局(1979 年 決議 3)で採択されたメートル、秒、カンデラの現行の定義は破棄される

国際度量衡総会は

さらに、同日、以下の事項に留意する。

- 国際キログラム原器の質量 $m(K)$ は 1 kg だが、その相対不確かさは、再定義直前の h の推奨値のそれと等しい。またその値は、後日、実験的に決定される
- 磁気定数(真空の透磁率) μ_0 は $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$ となるが、その相対不確かさは、微細構造定数アルファの推奨値のそれと等しい。その値は、後日、実験的に決定される
- 水の三重点の熱力学温度 T_{TPW} は 273.16 K だが、その相対不確かさは再定義直前の k の推奨値のそれと等しい。その値は、後日、実験的に決定される
- 炭素 12 のモル質量 $M(^{12}\text{C})$ は $0.012 \text{ kg mol}^{-1}$ だが、その相対不確かさは、再定義直前の $N_A h$ の推奨値のそれと等しい。その値は、後日、実験的に決定される

国際度量衡総会は以下の事項を奨励する。

- 国家計量標準機関、国際度量衡局および学術機関の研究者が、定数 h 、 e 、 k および N_A の決定に関する活動結果を、科学界、特に科学技術データ委員会(CODATA)に対して知らせる取り組みを継続すること
- 国際度量衡局が、各国のキログラム原器のトレーサビリティを国際キログラム原器と関連づける取り組み、および、再定義された質量の単位の供給を促進するための参照分銅群の開発を継続すること

また、以下の事項を要請する。

- 科学技術データ委員会は、入手可能な全ての関連情報にもとづく基礎物理定数の調整値を引き続き提供し、単位諮問委員会を通じて国際度量衡委員会にその結果を知らせる。これらの CODATA 調整値およびその不確かさが改定後の SI で使用される
- 国際度量衡委員会は、第 23 回総会の決議 12 の勧告事項が満たされた段階、特にキログラム、アンペア、ケルビン、モルの新定義の実現方法の準備ができた段階で、直ちに SI 改定の提案を行う
- 国際度量衡委員会は、基礎定数を用いた SI 基本単位の定義の定式化のさらなる改善に向けた作業を継続すること。定式化は、科学的厳密さと明快さを伴い、可能なかぎり、一般ユーザーにとってよりわかりやすいものとなること
- 国際度量衡委員会、諮問委員会、国際度量衡局、国際法定計量機関および国家計量標準機関は、SI の様々な単位を再定義する意向をユーザーコミュニティおよび一般社会に知らせることを目的とした啓蒙活動を開始するための取組みを大幅に強化し、より幅広い科学界およびユーザーからコメントおよび協力を募るために、再定義の実務、技術そして法務上の意味を検討すること

■ **メートルの定義の実現方法の改定および新しい光周波数標準の開発について** (CR, 546)

決議案 8

国際度量衡総会は、その第 24 回総会において、

- 光周波数標準の性能に急速かつ著しい改善がみられたこと
- 国家計量標準機関が、短距離にある複数の光周波数標準の比較方法を研究中であること
- 光周波数標準の比較を可能にするためには、国際レベルで遠隔比較方法を開発する必要があること

を考慮し、

- 光周波数による秒の表現を検討するための CCFT および CCL の合同作業部会の活動
- 国際度量衡委員会が 2009 年に行った「メートルの実用的な実現方法および秒の二次表現を含む標準周波数の推奨値」の共通リストへの追加、
- 「先端的な時間周波数伝送技術の開発に関する調整」に関する CCTF 作業部会の設立

を歓迎するとともに、

- 国家標準研究機関が光周波数標準の開発およびその比較にリソースを投入すること
- 光周波数標準の比較に役立つ可能性のある技術の研究を目的として、国家標準研究機関の参加による国際プロジェクトの調整を国際度量衡局が支援すること

を勧告する。

国際度量衡委員会 (CIPM), 2013 年

■ **標準周波数リストの更新** (PV, 81, 144)

勧告 1

国際度量衡委員会は、

- 「メートルの実現方法および秒の二次表現を含む応用のための標準周波数の勧告値」の共通リストが作成されたこと
- CCL-CCTF 周波数標準作業部会 (FSWG) が、このリストに盛り込むいくつかの有望な候補を精査したこと

を考慮し、

「メートルの実現方法および秒の二次表現を含む応用のための標準周波数の勧告値」のリストに次の変更を加えることを勧告する。

- 次の遷移周波数をリストに加えること
 - ^{199}Hg 中性原子の摂動を受けない光学遷移 $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$ 、周波数は 1 128 575 290 808 162 Hz、推定相対標準不確かさは 1.7×10^{-14}
- リスト中の次の遷移周波数を更新すること
 - $^{40}\text{Ca}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$ 、周波数は 411 042 129 776 395 Hz、推定相対標準不確かさは 1.5×10^{-14}
 - ^1H 中性原子の摂動を受けない光学遷移 $1S-2S$ 、周波数は 1 233 030 706 593 518 Hz、推定相対標準不確かさは 1.2×10^{-14}

注記：この周波数は、1S と 2S 状態の間のエネルギー差の半分に相当する。

- リスト中の次の遷移周波数を更新し、秒の二次表現として推奨すること
 - $^{171}\text{Yb}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $6s\ ^2S_{1/2} - 4f\ ^{13}6s^2\ ^2F_{7/2}$ (八重極遷移)、周波数は 642 121 496 772 645.6 Hz、推定相対標準不確かさは 1.3×10^{-15}
 - ^{171}Yb 中性原子の摂動を受けない光学遷移 $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$ 、周波数が 518 295 836 590 865.0 Hz、推定相対標準不確かさが 2.7×10^{-15}
- 次の遷移周波数を秒の二次表現としてリストに追加すること
 - $^{27}\text{Al}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $3s^2\ ^1S_0 - 3s\ 3p\ ^3P_0$ 、周波数が 1 121 015 393 207 857.3 Hz、推定相対標準不確かさが 1.9×10^{-15}
- リスト中の次の遷移周波数を秒の二次表現として更新すること
 - $^{199}\text{Hg}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $5d\ ^{10}6s\ ^2S_{1/2} - 5d\ ^96s^2\ ^2D_{5/2}$ 、周波数が 1 064 721 609 899 145.3 Hz、推定相対標準不確かさが 1.9×10^{-15}
 - $^{171}\text{Yb}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $6s\ ^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F=2, m_F=0)$ (四重極遷移)、周波数が 688 358 979 309 307.1 Hz、推定相対標準不確かさが 3×10^{-15}
 - $^{88}\text{Sr}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$ 、周波数が 444 779 044 095 485.3 Hz、推定相対標準不確かさが 4.0×10^{-15}
 - ^{87}Sr 中性原子の摂動を受けない光学遷移 $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^3P_0$ 、周波数が 429 228 004 229 873.4 Hz、推定相対標準不確かさが 1×10^{-15}
- 次の遷移周波数を秒の二次表現として更新すること
 - ^{87}Rb の摂動を受けない基底状態の超微細構造遷移、周波数が 6 834 682 610.904 312 Hz、推定相対標準不確かさが 1.3×10^{-15}

注記：推定標準不確かさの値は、信頼水準 68 % に対応するものと仮定されるが、入手できるデータ数が限定的であるため、将来振り返って見たときに、これが正しいと証明されない可能性はある。

第 25 回 国際度量衡総会 (CGPM), 2014 年

■ 国際単位系 (SI) の今後の改定について (CR, 416 および *Metrologia*, 2015, 52, 155)

決議 1

国際度量衡総会は、その第 25 回総会において

- 国際度量衡総会がその第 24 回総会 (2011 年) で採択した決議 1: この決議は、キログラム、アンペア、ケルビンおよびモルの定義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 およびアボガドロ定数 N_A の厳密な数値に関連づける SI の改定を提案する国際度量衡委員会の意向に留意し、また、長さ、質量、電流、熱力学温度、物質質量および光度に対する SI 単位の定義の文言を含む SI を定義する方法を、SI の礎となる参照定数が明確になるよう、改定するものである
- 決議 1 にまとめられた定義の改定、特に、キログラムを人工物の質量ではなく自然の不変量に関連づけること (これはキログラムの長期安定性を確保する) が、科学、技術、工業および商業に対して生ずる多くの利点
- 国際度量衡総会がその第 21 回総会 (1999 年) において採択した決議 7: この決議は、国家計量標準機関におけるキログラムの再定義を導く研究を奨励するものである
- 国際度量衡総会がその第 23 回総会 (2007 年) で採択した決議 12: この決議は、国家計量標準機関、国際度量衡局および国際度量衡委員会とその諮問委員会が、SI の改定案が国際度量衡総会での採択されるよう、実施すべき作業の概要を述べたものである

を想起し、

また、必要な作業を完了させることにおいて以下の項目を含む大きな進展があったことを考慮し、

- 関連したデータの取得と、必要とされる h 、 e 、 k および N_A の値を得るための科学技術データ委員会によるそれらの分析
- 改定された SI における質量の単位の供給を促進するための、質量の参照標準群の国際度量衡局による確立
- キログラム、アンペア、ケルビンおよびモルの新定義のための実現方法の準備

また、以下の、単位諮問委員会、国際度量衡委員会、国際度量衡局、国家計量標準機関および各諮問委員会が焦点をあてる更なる活動に留意し、

- 使用者業界および一般市民に SI の改定について知らせる啓蒙活動
- 科学的な厳密さに妥協することなく、多様な読み手が理解できる方法で改定された SI を紹介する SI 文書第 9 版の作成

また、この進展にもかかわらず、関連したデータが、国際度量衡総会がその第 25 回総会で改定 SI を採択するのに十分ではないように思われることに留意し、

- 国家標準研究機関、国際度量衡局および学術機関における、 h 、 e 、 k および N_A の決定に関係するデータを必要な不確かさで取得するための継続的な取り組み
- 国家標準研究機関が、各諮問委員会を通じてこのデータについて話し合い、レビューする活動を継続すること
- 国際度量衡委員会が、諮問委員会および単位諮問委員会を通じて、国際度量衡総会がその第 24 回総会 (2011 年) で採択した決議 1 の実施に向けた道筋を示す計画の策定を引き続き行うこと

2018 年の第 26 回国際度量衡総会において、SI 改定の最終承認が行なわれた (決議 1, p. 165 参照)。

- 国際度量衡委員会とその諮問委員会、国家標準研究機関、国際度量衡局および国際法定計量機関などによる、データの量、その不確かさおよび一貫性のレベルが十分であると見なされた場合、第26回国際度量衡総会において、現行のSIを改定SIで置き換える決議を採択するために必要な作業を完了する継続的な取り組みを奨励する。

国際度量衡委員会 (CIPM), 2015 年

■標準周波数リストの更新 (PV, 83, 207)

勧告 2

標準周波数リストの最新版はBIPMのwebサイトで入手可能。

国際度量衡委員会は、

- 「メートルの実現方法および秒の二次表現を含めた応用に対する標準周波数の勧告値」の共通リストが作成されたこと
- CCL-CCTF 周波数標準作業部会 (WGFS) が、このリストを更新する候補として、いくつか有望なものについて精査したこと

を考慮し、

標準周波数勧告値のリストにおいて、次に示す遷移周波数を更新することを勧告する。

- ^{199}Hg 中性原子の摂動を受けない光学遷移 $6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^3P_0$ の周波数 $f_{199\text{Hg}} = 1\ 128\ 575\ 290\ 808\ 154.8\ \text{Hz}$ 、推定相対標準不確かさは 6×10^{-16}
- $^{171}\text{Yb}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $6s\ ^2S_{1/2} - 4f^{13}\ 6s^2\ ^2F_{7/2}$ の周波数 $f_{171\text{Yb}^+}$ (八重極遷移) = $642\ 121\ 496\ 772\ 645.0\ \text{Hz}$ 、推定相対標準不確かさは 6×10^{-16} (この放射は、秒の二次表現として、国際度量衡委員会によってすでに推奨されている)
- $^{171}\text{Yb}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $6s\ ^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F=2, m_F=0)$ の周波数 $f_{171\text{Yb}^+}$ (四重極遷移) = $688\ 358\ 979\ 309\ 308.3\ \text{Hz}$ 、推定相対標準不確かさは 6×10^{-16} (この放射は、秒の二次表現として、国際度量衡委員会によってすでに推奨されている)
- $^{88}\text{Sr}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$ の周波数 $f_{88\text{Sr}^+} = 444\ 779\ 044\ 095\ 486.6\ \text{Hz}$ 、推定相対標準不確かさは 1.6×10^{-15} (この放射は、秒の二次表現として、国際度量衡委員会によってすでに推奨されている)
- $^{40}\text{Ca}^+$ イオンの摂動を受けない光学遷移 $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$ の周波数 $f_{40\text{Ca}^+} = 411\ 042\ 129\ 776\ 398.4\ \text{Hz}$ 、推定相対標準不確かさは 1.2×10^{-14}
- ^1H 中性原子の摂動を受けない光学遷移 $1S - 2S$ の周波数 $f_{1\text{H}} = 1\ 233\ 030\ 706\ 593\ 514\ \text{Hz}$ 、推定相対標準不確かさが 9×10^{-15}
注記：この周波数は、1S と 2S 状態の間のエネルギー差の半分に相当する。
- ^{87}Sr 中性原子の摂動を受けない光学遷移 $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^3P_0$ の周波数 $f_{87\text{Sr}} = 429\ 228\ 004\ 229\ 873.2\ \text{Hz}$ 、推定相対標準不確かさは 5×10^{-16} (この放射は、秒の二次表現として、国際度量衡委員会によってすでに推奨されている)
- ^{171}Yb 中性原子の摂動を受けない光学遷移 $6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^3P_0$ の周波数 $f_{171\text{Yb}} = 518\ 295\ 836\ 590\ 864.0\ \text{Hz}$ 、推定相対標準不確かさは 2×10^{-15} (この放射は、秒の二次表現として、国際度量衡委員会によってすでに推奨されている)

- ^{87}Rb の摂動を受けない基底状態の超微細構造遷移の周波数
 $f_{87\text{Rb}} = 6\,834\,682\,610.904\,310\text{ Hz}$ 、推定相対標準不確かさは 7×10^{-16} （この放射は、秒の二次表現として、国際度量衡委員会によってすでに推奨されている）

また、次に示す遷移周波数を標準周波数推奨値リストに盛り込むことを勧告する。

- 吸収分子 $^{127}\text{I}_2$ 、飽和吸収 a_1 成分、R(36) 32-0 遷移
 値 $f_{a_1} = 564\,074\,632.42\text{ MHz}$
 $\lambda_{a_1} = 531\,476\,582.65\text{ fm}$

ここで、周波数を 2 倍にした半導体 DFB レーザーの放射を、レーザー外部のヨウ素セルにより安定化した場合の、推定相対標準不確かさは 1×10^{-10} である。

- 吸収原子 ^{87}Rb の波長 780 nm における $5S_{1/2} - 5P_{3/2}$ (D2 遷移) 中の、飽和吸収の超微細構造成分 d および f 間のクロスオーバー共鳴

$$\text{値 } f_{d/f \text{ crossover}} = 384\,227\,981.9\text{ MHz}$$

$$\lambda_{d/f \text{ crossover}} = 780\,246\,291.6\text{ fm}$$

ここで、波長可変の外部共振器型半導体レーザーの放射を、レーザー外部のルビジウムセルの d/f クロスオーバーに安定させた場合の推定相対標準不確かさは 5×10^{-10} である。

注記：標準不確かさの値は、信頼水準 68 % に対応するものと仮定するが、入手できるデータ数が限定的であるため、将来振り返って見たときに、これが正しいと証明されない可能性はある。

国際度量衡委員会 (CIPM), 2017 年

- SI 単位の再定義に向けた進捗について (PV, 85, 101)

決定 10

国際度量衡委員会は、諮問委員会による SI 再定義に関する勧告を歓迎した。国際度量衡委員会は、再定義に関して合意した条件が現時点において満たされていることに留意し、第 26 回国際度量衡総会に決議案 A を提出すること、および、計画中のキログラム、アンペア、ケルビン、モルの再定義を前進させるために必要な他のあらゆる施策を講じることを決定した。

第 26 回国際度量衡総会 (CGPM), 2018 年

- 国際単位系 (SI) の改定について (CR, 印刷中, *Metrologia*, 2019, 56, 022001)

決議 1

第 26 回国際度量衡総会は

- 国際取引、ハイテク製造業、健康および安全、環境保護、地球規模の気候の調査研究、およびそれら全てを支える基礎科学に対して、一律かつ全世界で利用可能な国際単位系 (SI) に関する本質的な要求
- SI 単位は、長期に渡って安定であり、自己矛盾を持たず、かつ、現在の自然科学に関する理論的説明にもとづき、最も高いレベルで実現可能なものでなければならないこと
- これらの要求事項を満たすことを目的とした SI の改定が、第 24 回国際度量衡総会 (2011 年) において決議 1 の中で提案、満場一致で採択され、それは、七つの基本単位の定義の礎となる、基礎物理定数およびその他の自然定数から導き出された七つの定義定数にもとづいて SI を定義する新たな方法を提示したこと

- 第24回国際度量衡総会(2011年)で設定され、第25回国際度量衡総会(2014年)で確認された、改定 SI の採択前に満たすべき条件は、現時点において満たされていること

を考慮し、以下の事項を決定する。

2019年5月20日より、国際単位系(SI)は、次の事項が規定された単位系である。

- セシウム 133 原子の摂動を受けない基底状態の超微細構造遷移周波数 $\Delta\nu_{Cs}$ は、9 192 631 770 Hz
- 真空中の光の速さ c は、299 792 458 m/s
- プランク定数 h は、 $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s
- 電気素量 e は、 $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C
- ボルツマン定数 k は、 $1.380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K
- アボガドロ定数 N_A は、 $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹
- 周波数 540×10^{12} Hz の単色放射の視感効果度 K_{cd} は、683 lm/W

ここで、Hz、J、C、lm、W をそれぞれ単位記号とするヘルツ、ジュール、クーロン、ルーメン、ワットは、s、m、kg、A、K、mol、cd をそれぞれ単位記号とする単位、秒、メートル、キログラム、アンペア、ケルビン、モル、カンデラに、 $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ 、 $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$ 、 $\text{C} = \text{A s}$ 、 $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ 、 $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$ として関連づけられる。

この決定にあたって、国際度量衡総会は、SI 基本単位に関して、第24回国際度量衡総会(2011年)で採択された決議1で明示された結論に留意し、本決議自体と同じ効力を有するその決議の付録中の結論について確認する。

国際度量衡総会は、国際度量衡委員会に対して、SI の詳細な説明を盛り込んだ SI 文書の改定版を作成することを要請する。

付録 1. 基本単位の従前定義の廃止

上述の SI の新たな定義の採択を受け、

- 1967/68年(第13回国際度量衡総会、決議1)以来有効であった秒の定義が廃止される
- 1983年(第17回国際度量衡総会、決議1)以来有効であったメートルの定義が廃止される
- 1889年(第1回国際度量衡総会(1889年)および第3回国際度量衡総会(1901年))以来有効であった国際キログラム原器の質量にもとづくキログラムの定義が廃止される
- 1948年(第9回国際度量衡総会)以来有効であった、国際度量衡委員会提案の定義(1946年、決議2)にもとづくアンペアの定義が廃止される
- 1967/68年(第13回国際度量衡総会、決議4)以来有効であったケルビンの定義が廃止される
- 1971年(第14回国際度量衡総会、決議3)以来有効であったモルの定義が廃止される
- 1979年(第16回国際度量衡総会、決議3)以来有効であったカンデラの定義が廃止される

- ジョセフソン効果および量子ホール効果をそれぞれ利用したボルトおよびオームの実現の確立に関する国際度量衡総会の要請（第18回国際度量衡総会（1987年）、決議6）に対して国際度量衡委員会が下した、ジョセフソン定数の協定値 K_{J-90} 並びにフォン・クリッツィング定数の協定値 R_{K-90} を採択するという決定（1988年勧告1および勧告2）が廃止される

付録2. 従前定義で用いられていた定数の状態

上述のSIの新たな定義の採択および定義定数の基礎となる科学技術データ委員会による2017年特別調整の推奨値から、本決議が採択された時点で、

- 国際キログラム原器の質量 $m(K)$ は、本決議が採択された時点の推奨値 h の相対標準不確かさ、すなわち 1.0×10^{-8} に等しい範囲で、1 kg に等しく、将来、その値は実験的に決定される
- 真空中の透磁率 μ_0 は、本決議が採択された時点の微細構造定数の推奨値 α の相対標準不確かさ、すなわち 2.3×10^{-10} に等しい範囲で、 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$ に等しく、将来、その値は実験的に決定される
- 水の三重点の熱力学温度 T_{TPW} は、本決議が採択された時点の推奨値 k の相対標準不確かさ、すなわち 3.7×10^{-7} にほぼ等しい範囲で、273.16 K に等しく、将来、その値は実験的に決定される
- 炭素12のモル質量 $M(^{12}\text{C})$ は、本決議が採択された時点の推奨値 $N_A h$ の相対標準不確かさ、すなわち 4.5×10^{-10} に等しい範囲で、 $0.012 \text{ kg mol}^{-1}$ に等しく、将来、その値は実験的に決定される

付録3. SI基本単位

定義定数の固定値を用いた上述のSIの定義を起点として、七つの基本単位の定義は、これらの定義定数の一つもしくは複数を適切に使用することによって導き出され、次に示す定義が与えられる。

- 秒（記号はs）は、時間のSI単位であり、セシウム周波数 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 、すなわちセシウム133原子の摂動を受けない基底状態の超微細構造遷移周波数を単位 Hz (s^{-1} に等しい) で表したときに、その数値を 9 192 631 770 と定めることによって定義される
- 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 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 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ により定義される
- 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 s ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ に等しい) 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。ここで、メートルおよび秒は c および $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ に関連して定義される
- アンペア（記号はA）は、電流のSI単位であり、電気素量 e を単位 C (A s に等しい) で表したときに、その数値を $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ と定めることによって定義される。ここで、秒は $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ により定義される
- ケルビン（記号はK）は、熱力学温度のSI単位であり、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。ここで、キログラム、メートル、秒は、 h 、 c 、 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ に関連して定義される

- モル（記号は mol）は、物質量の SI 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。系の物質質量（記号は n ）は、特定された要素粒子の数の尺度である。要素粒子は、原子、分子、イオン、電子、その他の粒子、あるいは、粒子の集合体のいずれであってもよい
- 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、秒は h 、 c 、 ΔV_{Cs} に関連して定義される

付録 2 いくつかの重要な単位の定義の実現方法

付録 2 は電子媒体のみで刊行され、国際度量衡局のウェブサイトから入手できる (www.bipm.org)。

付録 3

光化学的および光生物学的な量の単位

付録 3 は電子媒体のみで刊行され、国際度量衡局のウェブサイトから入手できる (www.bipm.org)。

付録 4 国際単位系およびその基本単位の発展の歴史

第 1 部：SI 単位の実現の発展の歴史

単位の実現に使われる実験方法で物理学の式を用いるものは、第一原理にもとづく方法として知られている。この方法の本質的特徴は、ある量を特定の単位で、その単位の定義から直接、その単位を含まない量と定数のみを使って測定することができることである。

慣例上、ある量のための単位は、その量の特定の例として設定され、手ごろな大きさの一般的な測定の数値を提供するために選ばれた。近代科学の発展以前、単位は、必然的に、長さや質量のためのメートルやキログラムのように、ある人工物、もしくは、秒のための地球の回転のように、ある特定の物体の特性によって定義されてきた。18 世紀末にメートル法が確立された当時でさえ、例えば、長さの単位より望ましい定義は、秒を刻む振り子の長さのような自然の普遍的特性にもとづくものであることが認識されていた。このような定義は、時間と場所に左右されず、基本的に世界の何処にいても利用できるものである。当時は、実用性に対する配慮から、メートルとキログラムについては、より単純な人工物を使った定義となり、秒については地球の回転と関連づけられたままであった。1960 年になって初めて、人工物に依存しない定義が採択された。すなわち、ある特定の光放射の波長を使ってメートルを定義することとなったのである。

それ以降、アンペア、ケルビン、モル、カンデラの人工物に頼らない定義が採択されていった。アンペアは所定の電磁力を発生するのに必要な電流を参照し、ケルビンは、固有の熱力学的状態である水の三重点を参照することで、それぞれ定義された。秒については、原子レベルの定義まで登場し、セシウム原子の特定の遷移によって定義された。一方、キログラムは、人工物からの変更を終始拒んできた唯一の単位である。真の普遍性の実現への道を拓いたのは、1983 年のメートルの定義改定であった。

この定義は、そのように明示はしていないが、光の速さをある数値に定めることを意味していた。ただ、この定義の記述は従来からのかたちを踏襲して、メートルは、所定の時間内に光が伝わる行程の長さとしてされた。このように、メートルの定義は、他の SI 基本単位の定義の記述のしかたを反映したものとなっており、SI 基本単位の定義はどれも同じかたちで記述されていた。例えば、「アンペアは、…の電流である」、「ケルビンは、所定の温度の $\frac{1}{273.15}$ である」などである。このような定義は、明示的な単位の定義 (explicit unit definitions) と呼ぶことができる。

このような定義は、普遍性 (universality) と利用可能性 (accessibility) に関する数多くの要求を満たし、様々な実現がしばしば可能であるが、それらの実現は、やはり、各定義で規定された特定の条件もしくは状態に直接的または間接的に関連づけられる実験によって制約されている。その結果、このような定義の実現の精度は、定義で規定された特定の条件または状態の実現の精度を超えることは決してあり得ない。

これが、セシウム原子のマイクロ波遷移にもとづく、現行の秒の定義が抱える問題である。現在、様々な原子またはイオンの光学遷移の周波数のほうが、秒の定義に使われているセシウムの周波数より、再現性が数桁優れていることが実証されている。

定義定数 (defining constants) にもとづく現在の SI の定義では、実現の精度に根本的限界を課す、ある特定の条件または状態を規定した定義の代わりに、特定の定数、あるいは複数の定数を、測定しようとする量に結びつける任意の物理学の式を使用できる。この方が、測定の基本単位を定義する上で格段に一般性が高い。また、この方法は、今日の科学技術にしばられず、今後の科学技術の発展によって、非常に高い精度で単位を実現する方法をもたらす、まだ知られていない物理学の登場を促すかもしれない。この方法で定義することによって、原理的には、単位が実現される精度に制限は無くなる。ただし、秒の定義についてはこの限りではない。今後暫くの間は、従来からのセシウムのマイクロ波遷移が秒の定義の基礎である状態が続く。

明示単位 (explicit unit) と明示定数定義 (explicit constant definition) の違いは、定められた光の速さの数値に依存するメートルの二つの定義、およびケルビンの二つの定義を見ることで、明確に説明できる。1983年に決められた従来のメートルの定義では、実際に「メートルは、真空中で 1/299 792 458 秒間に光が伝わる行程の長さ」となっていた。新しいメートルの定義では、メートルは、秒を定義する定数であるセシウム周波数、および単位 m s^{-1} で表される光の速さの定められた数値を使って定義される、とだけ記述される。このため、従来の定義で示されていた物理学の式、すなわち、天文学的距離に使われる、光の飛行時間と距離の関係式はもとより、周波数と波長を、光の速さと関連づける式を始めとする、あらゆる物理学の式を用いることができる。水の三重点の温度を固定値とするケルビンの従来の定義では、結局は水の三重点での測定が必須である。ボルツマン定数を固定値とする新たな定義は従来の定義よりもはるかに一般的であり、原理的には、 k が含まれるあらゆる熱力学の式を用いて、温度目盛のあらゆる点における熱力学温度が決定できる。例えば、温度 T における黒体の全放射発散度 (total radiant exitance) を求めれば、 W m^{-2} を単位とする $[2\pi^5 k^4 / (15c^2 h^3)] T^4$ と等しいので、 T を直接決定できる。

最も根本的な変更が行われた単位であるキログラムでは、質量、プランク定数、光の速さ、セシウム周波数を関係づけるあらゆる物理学の式によって、実現が可能となっている。このような式の一つが、以前はワットバランスと呼ばれ、最近になってキップルバランス¹ と呼ばれるようになった電気機械式天びんの動作を示す式である。この装置では、質量 m 、重力加速度 g および速度 v から測定される機械的な仕事率が、量子ホール効果およびジョセフソン効果とそれぞれ関係付けて測定される電流および電圧を用いて測定される電氣的な仕事率から求められる。その結果を表す式が $mgv = Ch$ であり、ここで C は、測定周波数を含む校正係数、 h はプランク定数である。

キログラムの第一原理にもとづく実現に利用できるもう一つの方法が、シリコン球に含まれる原子数の決定による方法であり、次の式が使われる。

$$m = \frac{8V}{a_0^3} \frac{2R_\infty h}{c\alpha^2} \frac{m_{\text{Si}}}{m_e}$$

ここで、 m と V はそれぞれ約 1 kg のシリコン球の質量と体積、 a_0 は格子定数、 R_∞ はリュードベリ定数、 α は微細構造定数、 m_{Si} はシリコン原子の質量 (シリコン球に含まれるシリコン原子の三つの同位体の存在比を考慮した平均質量)、 m_e は電子質量である。左辺の最初の項はシリコン球の中の原子数、2 番目の項は電子質量、3 番目の項はシリコン原子の質量 (三つの同位体を存在比を考慮した平均質量) と電子質量との比を表している。

¹ワットバランス法を発明したブライアン・キップル (Bryan Kibble) の功績を称えるため

微小レベルではあるが、新たな定義によって質量を測定するもう一つの可能性が、 h/m を含む関係を使って原子の反跳を測定する方法である。

これらの例の全てが、単位の新たな定義方法の一般性を明確に物語っている。基本単位および他の単位の現在の実現方法に関する詳細情報は、国際度量衡局のホームページに掲載されている。

第 2 部：国際単位系の発展の歴史

第 9 回国際度量衡総会 (CGPM) は、国際度量衡委員会 (CIPM) に次の事項を委託した (1948 年, 決議 6, CR 64)。

- 整合性のある測定単位の規則の確立について検討すること
- この目的のため、公式な調査を通じて、全世界の科学、技術、教育の各分野において大勢を占める意見を明らかにすること
- **メートル条約**に加盟している全ての加盟国による採択にふさわしい**実用単位系**の確立に関する勧告を行うこと

また、この第 9 回国際度量衡総会は、決議 7 (CR 70) において「単位記号の表記に関する一般原則」を策定し、固有の名称が与えられている一貫性のある組立単位の一覧を作成した。

第 10 回国際度量衡総会は、実用単位系のための基本量および単位として六つの量、長さ、質量、時間、電流、熱力学温度、光度、および、これらに対応する六つの基本単位、メートル、キログラム、秒、アンペア、ケルビン、カンデラを採択した (1954 年, 決議 6; CR 80)。物理学と化学の間の長期に渡る議論を経て、第 14 回国際度量衡総会において、物質量とその単位モルが、七つ目の基本量および単位として追加された (1971 年, 決議 3, CR 78 および *Metrologia*, 1972, **8**, 36)。

第 11 回国際度量衡総会は、この実用単位系のために**国際単位系** (*Système international d'unités*) という名称とその世界共通の略語 **SI** を採択し、接頭語、組立単位、以前から採用されていた補助単位などに関する規程を策定した (1960 年, 決議 12; CR 87)。これにより、測定単位に関する包括的な規程が確立された。この後の国際度量衡総会および国際度量衡委員会は、科学の進展や利用者のニーズの変化を考慮し、オリジナルの SI の構造に追加や修正を加えた。

これらの重要な決定を導いた歴史的経緯を以下に示す。

- フランス革命時に十進法によるメートル法が創設され、それに続き 1799 年 6 月 22 日にメートルとキログラムを表す二つの白金製原器がパリの**共和国公文書館** (*Archives de la République*) へ保管された。これが、現在の国際単位系につながる第一歩と位置付けられる。
- 1832 年、ガウスは、物理学における一貫性のある単位系として、天文学で定義された秒と共に、このメートル法を適用することを強く促した。長さ、質量、時間にそれぞれ対応するミリメートル、グラム、秒の**三つの力学系単位**にもとづいて、十進法による地磁気の絶対測定を最初に行ったのはガウスである。後年、ガウスとウェーバは、他の電氣的現象も含め、先の測定を拡張した。
- 1860 年代には、英国科学振興協会 (BAAS) を通じたマックスウェルとト

ムソンによる積極的な指導の下、電気および磁気の分野におけるメートル法の適用がさらに拡充された。二人は、**基本単位** (base units) と**組立単位** (derived units) で構築される**一貫性のある単位系** (coherent system of units) に関する要件を策定した。1874年、英国科学振興協会は**CGS単位系**を導入した。これは、センチメートル、グラム、秒という三つの力学系単位を基礎とし、十進の分量と倍量を表記するためマイクロからメガまでの接頭語を使用した、一貫性のある三元単位系である。その後の実験科学としての物理学の進展は、広くこの単位系を土台としたものである。

- 電気および磁気の分野において、この一貫性のあるCGS単位の大きさが利便性を欠いていることが明白となったことを受けて、1880年代に英国科学振興協会と国際電気標準会議 (IEC) の前身である国際電気会議は、相互に一貫性のある**実用単位系**を承認した。この中には、電気抵抗のオーム、起電力のボルト、電流のアンペアが含まれていた。
- 1875年5月20日のメートル条約調印の後、国際度量衡局が創設され、国際度量衡総会と国際度量衡委員会が設立され、メートルとキログラムについての新たな国際原器を確立する作業が開始された。1889年、第1回国際度量衡総会は、メートルとキログラムについての国際原器を承認した。この二つの単位は、時間の単位としての天文秒と共に、CGS単位系と類似した力学系の三元単位系を構築した。この単位系は、基本単位がメートル、キログラム、秒であったことから、**MKS単位系**として知られている。
- 1901年、ジオルジ (Giorgi) は、この三つの基本単位に、アンペアやオームのような電気的特性をもつ四つ目の単位を加え、さらに、電磁気学の式をいわゆる有理化形式に書き直すことで、MKS単位系の力学系単位と実用的な電気単位とを組み合わせ、一貫性のある四元単位系を構築できることを示した。ジオルジの提案は、多数の新たな進展への道を拓いた。
- 第6回国際度量衡総会 (1921年) でメートル条約が改定された。この改定では、国際度量衡局の業務範囲と責務が物理学の他の分野に拡張され、続いて第7回国際度量衡総会 (1927年) で電気諮問委員会 (CCE) が設置された。この後、ジオルジの提案について、国際電気標準会議 (IEC)、国際純粋・応用物理学連合 (IUPAP) や他の国際機関による徹底的な議論が行われた。その結果、1939年に電気諮問委員会は、メートル、キログラム、秒、アンペアにもとづく四元単位系である**MKSA単位系**の採択を提案し、この提案は1946年に国際度量衡委員会によって承認された。
- 1948年に始まった国際度量衡局による国際的な調査を受けて、第10回国際度量衡総会 (1954年) は、熱力学温度と光度の基本単位として、それぞれケルビンとカンデラを導入することを承認した。第11回国際度量衡総会 (1960年) において、この単位系に国際単位系の名称が与えられ、その略語はSIとされた。接頭語、組立単位、以前の補助単位に関する規則が、その他の事項と合わせて確立され、これによって、測定単位全てに対する包括的な規程が確立された。
- 第14回国際度量衡総会 (1971年) において、物質質量についての新たな基本単位モル、記号 mol、が採択された。これは、国際純粋・応用物理連合 (IUPAP) の記号・単位・用語委員会 (SUN委員会) による提案に端を発した国際標準化機構 (ISO) からの提案を受けたものであった。この提案は、国際純正・応用化学連合 (IUPAC) から支持された。これによって、SI基本単位の数は七つとなった。
- これ以降、SI単位の基礎物理定数や原子の特性などの真の不変量への関連

づけにおいて、極めて顕著な進展があった。SI 単位をこのような不変量と結びつけることの重要性が認識され、第 24 回国際度量衡総会 (2011 年) は、七つのこのような定数を定義の基準として使うことにもとづく、SI の新たな定義の原則を採択した。第 24 回国際度量衡総会時点では、当時の基本単位の定義からそれらの定数の値を決定する実験が完全には整合していなかったが、第 26 回国際度量衡総会 (2018 年) までに整合性が確認され、決議 1 において SI の新しい定義が採択された。これが、本文書で提示している定義の基礎であり、SI を定義する最も単純かつ根本的な方法である。

- 以前 SI は、七つの基本単位と、基本単位のべき乗の積で定義された組立単位を用いて定義されていた。七つの基本単位は、メートル法とその後の SI が過去 130 年の間に進化、発展していく中で、その歴史的経緯によって選ばれたものである。この基本単位の選択は、これしかあり得ないという絶対のものではないが、SI を記述するための枠組みを与えるだけでなく、組立単位を定義することによって、長い年月を掛けて確立し、身近なものとなってきた。こういった基本単位の役割は、SI 自体が七つの定義定数を用いて定義されるようになった現在であっても、現行の SI の中で変わりなく続いている。従って、本 SI 文書でも七つの基本単位の定義はこれまでどおり記載されているが、これからは、セシウムの超微細構造周波数 $\Delta\nu_{Cs}$ 、真空中の光の速さ c 、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 、所定の可視放射の視感効果度 K_{cd} という七つの定義定数にもとづく。

七つの基本単位の定義は、七つの定義定数の数値に明確に関連づけることができる。しかし、基本単位の多くが複数の定義定数を必要とするため、七つの定義定数と七つの基本単位の間関係は 1 対 1 ではない。

第 3 部：基本単位の歴史的考察

時間の単位：秒

1960 年以前、時間の単位である秒は、平均太陽日の 1/86 400 倍と定義され、「平均太陽日」の厳密な定義は、天文学者に委ねられていた。しかし、地球の自転の不規則性が測定から明らかになり、その結果、この定義が不十分であることが判明した。時間の単位をさらに精密に定義するため、第 11 回国際度量衡総会において、国際天文学連合 (IAU) が示した太陽年 1900 にもとづく定義が採用された (1960 年, 決議 9, CR, 86)。しかし、そのときすでに、原子または分子の二つのエネルギー準位間の遷移にもとづく時間の原子標準のほうか、はるかに正確に実現および再現できることが実験によって明らかになっていた。時間の単位の極めて精密な定義が科学技術に不可欠であることを踏まえ、第 13 回国際度量衡総会では、セシウム 133 原子の基底状態の超微細構造遷移周波数を基準とする秒の新しい定義が選択された (1967-1968 年, 決議 1, CR, 103 および *Metrologia*, 1968, 4, 43)。そして、第 26 回国際度量衡総会 (2018 年) の決議 1 において、「セシウム 133 原子の摂動を受けない基底状態の超微細構造周波数 $\Delta\nu_{Cs}$ の定められた数値」を用いた同じ定義ではあるが、改定されたより厳密な表現が採択された。

長さの単位：メートル

1889年に採択された「白金イリジウム製国際原器の長さ」というメートルの定義は、第11回国際度量衡総会（1960年）において、クリプトン86の特定の遷移に対応する放射の波長にもとづく定義に置き換えられた。この改定は、メートルの定義を実現する正確さを向上させるために採択されたものであり、この背景には、可動顕微鏡付き干渉計（interferometer with a traveling microscope）を使った干渉縞の計数による光路差の測定技術があった。さらに、この定義は、1983年の第17回国際度量衡総会において、所定の時間内に真空中を光が伝わる距離を基準として定義に置き換えられた（決議1, CR, 97および *Metrologia*, 1984, 20, 25）。1889年に第1回国際度量衡総会で承認された国際メートル原器は、現在でも1889年に規定された条件（CR, 34-38）で国際度量衡局に保管されている。メートルの定義が光の速さ c の定められた数値に依存していることを明確に表すため、メートルの定義の文言が、第26回国際度量衡総会（2018年）の決議1で改定された。

質量の単位：キログラム

1889年に採択された定義では、キログラムは、単純に、白金イリジウム製の人工物である国際キログラム原器の質量とされていた。この原器は、現在でも、第1回国際度量衡総会で規定された条件（1889年, CR, 34-38）で国際度量衡局に保管されている。この第1回国際度量衡総会において、この原器が承認され、「今後この原器が質量の単位と見なされる」ことが宣言された。40個の同様の原器がほぼ同時期に作成された。これらは、国際原器とほぼ同じ質量を持つよう機械加工され、研磨されたものである。この40個の「国家原器」の大半は、国際原器にもとづいて校正された後、第1回国際度量衡総会（1889年）においてメートル条約の加盟国に個別に割り当てられ、一部は国際度量衡局にも渡された。第3回国際度量衡総会では、「重量」という言葉の使用に関する慣例における曖昧さを無くすことを意図した宣言が発表され、「キログラムは質量の単位である。キログラムは、国際キログラム原器の質量に等しい」ことが確認された（1901年, CR, 70）。この宣言の全文は上述の国際度量衡総会議事録の70ページに掲載されている。

1946年に実施された国家原器の第2回校正の頃までには、これら国家原器の質量の平均が、国際原器の質量からずれていくことが分かった。このことは、1989年から1991年にかけて実施された第3回校正でも確認され、第1回国際度量衡総会（1889年）に承認された一連の国家原器については、差の中央値はおよそ25マイクログラムであった。質量の単位の長期安定性を確保し、量子電気標準を最大限に活用し、現代科学における有用性を高めるため、第26回国際度量衡総会（2018年）の決議1において、基礎定数であるプランク定数 h の値にもとづくキログラムの新たな定義が採択された。

電流の単位：アンペア

電流と抵抗の「国際電気単位」は、1893年にシカゴで開催された国際電気会議で導入され、1908年のロンドンにおける国際会議で「国際アンペア」と「国際オーム」の定義が確認された。

第8回国際度量衡総会（1933年）開催前になると、「国際電気単位」を「絶

対単位」に置き換えたいという希望を関係者全員が持っていた。しかし、国際電気単位と絶対単位の比を決めるために必要な実験がいくつかの研究機関で完了していなかったため、国際度量衡総会は、この比と新しい絶対単位を発効する日について適切な時期に決定を行う権限を国際度量衡委員会に付与した。国際度量衡委員会は 1946 年にこれを実施し（1946 年，決議 2, PV, 20, 129-137）、新しい単位を 1948 年 1 月 1 日に発効することを決めた。1948 年 10 月開催の第 9 回国際度量衡総会において、この国際度量衡委員会の決定が承認された。国際度量衡委員会が選択したアンペアの定義は、平行に配置された 2 本の電流が流れる導体の間の力を基準としたもので、これは真空中の透磁率 μ_0 （磁気定数とも呼ばれる）の数値を定めることを意味していた。その後、1983 年にメートルの新しい定義が採択された結果、真空中の誘電率 ϵ_0 （電気定数とも呼ばれる）の数値が定められることになった。

しかし、1948 年のアンペアの定義はその実現が困難であることが明らかになり、ボルトおよびオームの双方をプランク定数 h と電気素量 e の特定の組み合わせに結び付ける実用的な量子標準（ジョセフソン効果と量子ホール効果にもとづくもの）が、オームの法則によるアンペアの実現方法としてほぼ普遍的に用いられるようになった（第 18 回国際度量衡総会（1987 年）、決議 6, CR 100）。この結果、実用的な量子電気標準を SI に厳密に一致させるために、キログラムの再定義のために h の数値を定めることのみならず、アンペアの再定義のために e の数値を定めることが自然の成り行きとなった。電気素量 e の定められた数値にもとづく現在のアンペアの定義は、第 26 回国際度量衡総会（2018 年）の決議 1 で採択された。

熱力学温度の単位：ケルビン

熱力学温度の単位の定義は、第 10 回国際度量衡総会（1954 年，決議 3; CR 79）で採択された。ここでは、基礎的な定点として水の三重点 T_{TPW} が選ばれ、273.16 K という温度を T_{TPW} に付与することによって、ケルビンが定義された。第 13 回国際度量衡総会において、このように定義された単位について、「ケルビン度」と記号「°K」に代わって、名称をケルビン、記号を K とすることが決められた（1967-1968 年，決議 3; CR, 104 および *Metrologia*, 1968, 4, 43）。しかし、この定義の実現には、同位体組成が明らかな純水試料と、新しい第一原理にもとづく測温方法の開発が必要であり、ボルツマン定数 k を固定値とする新しいケルビンの定義が採択されることとなった。これらの両方の制約を排除した現在の定義は、第 26 回国際度量衡総会（2018 年）の決議 1 で採択された。

物質量の単位：モル

化学の基本法則の発見をうけて、例えば「グラム原子」、「グラム分子」などと呼ばれる単位が、化学元素や化合物の量（amount）を規定するために用いられた。そして、これらの単位は、実際には相対原子質量および相対分子質量である「原子量」および「分子量」と直接結びついていた。「原子量」は、もともと酸素の原子量と関連づけられていたもので、これは一般的な合意によって 16 とされていた。ところが、物理学者は、質量分析計で同位体を分離し、16 という値を酸素の同位体の一つに帰属させ、一方で、化学者は、同じ 16 という値を酸素の同位体 16、17、18 の（僅かに変動する）混合物に帰属

させた。化学者にとっては、この混合物が自然に存在する酸素を構成するものであったためである。1959年から1960年にかけて、国際純粋・応用物理学連合（IUPAP）と国際純正・応用化学連合（IUPAC）の間でこの二重性に終止符を打つための合意が形成された。物理学者と化学者は、質量数 12 の炭素同位体（炭素 12、 ^{12}C ）の通称「原子量」、正式名称「相対原子質量 A_r 」に、厳密に 12 という値を付与することで合意した。こうして得られた統一目盛によって、相対原子質量と相対分子質量が与えられた。この二つは、それぞれ、原子量と分子量とも呼ばれる。この合意は、モルの再定義による影響を受けない。

化学において、化学元素または化合物の量（amount）を特定するために使われる量（quantity）を「物質量」と呼ぶ。物質量（記号は n ）は、試料中の特定された要素粒子の数 N に比例すると定義され、この比例定数はあらゆる要素粒子で同一の普遍定数である。比例定数は、アボガドロ定数 N_A の逆数 $n = N/N_A$ である。物質量の単位はモル、記号は mol である。国際純粋・応用物理学連合（IUPAP）、国際純正・応用化学連合（IUPAC）および国際標準化機構（ISO）からの提案を受け、国際度量衡委員会は、炭素 12 のモル質量は厳密に 0.012 kg/mol であると規定することによって、1967 年にモルの定義を定め、1969 年にそれを確認した。これによって、要素粒子 X のいかなる純粋な試料 S の物質量 $n_S(X)$ も、その試料の質量 m_S と要素粒子 X のモル質量 $M(X)$ から直接決定できるようになった。ここで、モル質量は、アボガドロ定数に関する精密な知識が無くても、その相対原子質量 A_r （原子量または分子量）から、次の関係式を使って決定された。

$$n_S(X) = m_S/M(X) \text{ および } M(X) = A_r(X) \text{ g/mol}$$

このように、このモルの定義は、人工物によるキログラムの定義に依存していた。

このように定義されたアボガドロ定数の数値は、12 グラムの炭素 12 中の原子数と等しかった。しかし、最近の技術の進展によって、あらゆる物質 1 モル中の要素粒子数を厳密に特定すること、すなわちアボガドロ定数の数値を定めることによって、より単純かつ普遍的なモルの定義が可能となるほど十分な精度で、現在は、この数値が知られている。このことによって、モルの新たな定義とアボガドロ定数の値は、キログラムの定義に依存しなくなった。その結果、根本的に異なる量である「物質量」と「質量」の区別を際立たせることができる。アボガドロ定数 N_A の定められた数値にもとづく現在のモルの定義は、第 26 回国際度量衡総会（2018 年）の決議 1 で採択された。

光度の単位：カンデラ

光度の単位は、1948 年以前は、数多くの国々で使われていた炎または白熱フィラメントによる標準にもとづくものであったが、それに代わって、まず、白金の凝固点温度におけるプランク放射体（黒体）の輝度にもとづく「ブージ・ヌーベル」が登場した。この変更は 1937 年以前に国際照明委員会（CIE）と国際度量衡委員会によって準備され、1946 年に国際度量衡委員会により決定が公布された。その後、1948 年の第 9 回国際度量衡総会において批准され、この単位の新たな世界共通名称をカンデラとし、記号を cd とすることが採択された。1954 年の第 10 回国際度量衡総会で、カンデラが基本単位として確

立され、1967年の第13回国際度量衡総会において、この定義が修正された（決議5, CR, 104 および *Metrologia*, 1968, 4, 43-44）。

高温域でのプランク放射体の実現が困難であり、また、放射測定分野で新たな可能性として光放射の放射束測定（絶対放射測定）が登場したこともあり、1979年、第16回国際度量衡総会において、カンデラの新しい定義が採択された（1979年, 決議3, CR, 100 および *Metrologia*, 1980, 16, 56）。

現在のカンデラの定義は、第26回国際度量衡総会（2018年）の決議1で採択されたもので、周波数 540×10^{12} Hz の単色放射の視感効果度 K_{cd} の定められた数値が使われている。

略語リスト

1. 研究所、委員会および会議の略語

BAAS	British Association for the Advancement of Science; 英国科学振興協会
BIPM	International Bureau of Weights and Measures / Bureau international des poids et mesures; 国際度量衡局
CARICOM	Carribean Community; カリブ共同体
CCAUV	Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration / Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations; 音響・超音波・振動諮問委員会
CCDS	Consultative Committee for the Definition of the Second / Comité consultatif pour la définition de la seconde; 秒の定義のための諮問委員会 (CCTF の前身)
CCE	Consultative Committee for Electricity / Comité consultatif d'électricité; 電気諮問委員会 (CCEM の前身)
CCEM	Consultative Committee for Electricity and Magnetism / Comité consultatif d'électricité et magnétisme; 電気・磁気諮問委員会 (以前の CCE)
CCL	Consultative Committee for Length / Comité consultatif des longueurs; 長さ諮問委員会
CCM	Consultative Committee for Mass and Related Quantities / Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées; 質量関連量諮問委員会
CCPR	Consultative Committee for Photometry and Radiometry / Comité consultatif de photométrie et radiométrie; 測光・放射測定諮問委員会
CCQM	Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology / Comité consultatif pour la quantité de matière: métrologie en chimie et biologie; 物質質量諮問委員会
CCRI	Consultative Committee for Ionizing Radiation / Comité consultatif des rayonnements ionisants; 放射線諮問委員会
CCT	Consultative Committee for Thermometry / Comité consultatif de thermométrie; 測温諮問委員会
CCTF	Consultative Committee for Time and Frequency / Comité consultatif du temps et des fréquences; 時間・周波数諮問委員会 (以前の CCDS)
CCU	Consultative Committee for Units / Comité consultatif des unités; 単位諮問委員会
CGPM	General Conference on Weights and Measures / Conférence générale des poids et mesures; 国際度量衡総会
CIPM	International Committee for Weights and Measures / Comité international des poids et mesures; 国際度量衡委員会
CODATA	Committee on Data for Science and Technology; 科学技術データ委員会
CR	<i>Comptes Rendus</i> of the Conférence générale des poids et mesures, CGPM; 国際度量衡総会報告
IAU	International Astronomical Union; 国際天文学連合
ICRP	International Commission on Radiological Protection; 国際放射線防護委員会

ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements; 国際放射線単位測定委員会
IEC	International Electrotechnical Commission; 国際電気標準会議
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service; 国際地球回転・基準系事業
ISO	International Organization for Standardization; 国際標準化機構
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry; 国際純正・応用化学連合
IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics; 国際純粋・応用物理学連合
OIML	International Organization of Legal Metrology / Organisation internationale de métrologie légale; 国際法定計量機関
PV	<i>Procès-Verbaux</i> of the Comité international des poids et mesures, CIPM; 国際度量衡委員会議事録
SUNAMCO	Commission for Symbols, Units, Nomenclature, Atomic Masses and Fundamental Constants, IUPAP; 国際純粋・応用物理学連合の記号、単位、用語、原子質量及び基礎定数に関する委員会
WHO	World Health Organization; 世界保健機関

2 科学用語の略語

CGS	Three-dimensional coherent system of units based on the three mechanical units centimetre, gram and second; 三つの力学系単位、センチメートル、グラム及び秒にもとづく一貫性のある三元系単位系
EPT-76	Provisional Low Temperature Scale of 1976 / Échelle provisoire de température de 1976; 1976年0.5K-30K 暫定温度目盛
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement / Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure; 計測における不確かさの表現のガイド
IPTS-68	International Practical Temperature Scale of 1968; 1968年国際実用温度目盛
ISQ	International System of Quantities; 国際量体系
ITS-90	International Temperature Scale of 1990; 1990年国際温度目盛
MKS	System of units based on the three mechanical units metre, kilogram, and second; 三つの力学系単位、メートル、キログラム及び秒にもとづく単位系
MKSA	Four-dimensional system of units based on the metre, kilogram, second, and the ampere; メートル、キログラム、秒及びアンペアにもとづく四元系単位系
SI	International System of Units / Système international d'unités; 国際単位系
TAI	International Atomic Time / Temps atomique international; 国際原子時
TCG	Geocentric Coordinated Time / Temps-coordonnée géocentrique; 地心座標時
TT	Terrestrial Time; 地球時
UTC	Coordinated Universal Time; 協定世界時
VSMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water; ウィーン標準平均海水

索引（五十音順）

あ

アボガドロ数, 102, 168
アボガドロ定数, 96, 97, 98, 102, 103, 156, 158, 159,
163, 166, 168, 175, 178
暗所視, 141
アンペア (A) , 94, 96, 98, 100, 110, 128, 130, 131, 132,
134, 148, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 163, 165, 166,
167, 171, 173, 174, 176, 177

い

一貫性のある組立単位, 101, 105-107, 148, 173
一般相対性理論, 99, 111, 149
インチ, 115

う

ウェーバ (Wb) , 106, 128, 133
ウェーバ (人名) , 173

え

英国科学振興協会 (BAAS) , 173
SI 接頭語, 106-107, 112, 114, 115, 120, 133, 135, 172, 173,
174
SI 設立, 173-175
SI 単位, 98-111
SI 発展の歴史, 171-179
MKSA 単位系, 174
MKS 単位系, 127, 128, 129, 174
エルグ, 130

お

オーム (Ω) , 106, 128, 130, 133, 139, 144, 145-146, 160,
167, 174, 176
音の単位, 111

か

ガウス, 173
科学技術データ委員会 (CODATA) , 115, 159, 160, 161,
163, 167
角度, 106-107, 114, 118, 120, 127, 133, 142
カタール (kat) , 106, 148
ガル (Gal) , 114
カロリー (cal) , 129, 130
カンデラ (cd) , 94, 96, 98, 103, 110, 127, 130, 131, 132,
134, 137, 141, 148, 156, 157, 159, 160, 166, 168, 171,
173, 174, 178, 179

き

基礎 (物理) 定数, 91, 96, 97, 148, 150, 156, 157, 158,
159, 161, 165, 174, 176
キップルバランス (ワットバランス) , 158, 172
基本単位, 91, 94-95, 98-103, 105-110, 171, 175
基本単位の定義, 98-103
基本量, 98, 104, 105, 110, 142, 173
吸収線量, 106, 110, 111, 140, 142, 144, 150-151
キュリー (Ci) , 135
協定世界時 (UTC) , 140
キログラム (kg) , 94, 96, 98, 100, 106, 112, 126, 127,
131, 132, 136, 147-148, 156, 157, 158, 159, 160, 161,
163, 165, 166, 167, 171, 172, 173, 174, 176
キログラムの検証, 176
キビビット, 112

く

クーロン (C) , 96, 106, 128, 130, 133, 158, 166
組立単位, 94, 95, 98, 105-110, 117, 120, 173, 174, 175
組立量, 98, 104-110
グラム (g) , 113, 130, 136, 174

グラム原子, 177

グラム分子, 177

グレイ (Gy) , 106, 110, 140, 144, 151

け

計数に関わる量, 105, 120

ケルビン (K) , 94, 96, 97, 98, 101, 137, 152, 155, 156,
158, 159, 161, 163, 165, 166, 167, 171, 172, 173, 174,
177

原子量, 177

こ

光度, 98, 103, 104, 173, 174, 178

国際温度目盛 (ITS-90) , 102, 137, 146

国際キログラム原器, 94, 100, 176

国際原子時 (TAI) , 138, 139

国際純粋・応用物理学連合 (IUPAP) , 139, 174, 178

IUPAP SUNAMCO レッドブック, 117

国際純正・応用化学連合 (IUPAC) , 139, 174, 178

IUPAC グリーンブック, 117

国際単位系 (SI) , 91-92, 94-95, 96-98, 171-179

国際標準化機構 (ISO)

ISO/IEC 80000 シリーズ, 93, 95, 98, 110, 117

国際標準化機構 第12技術委員会 (ISO/TC 12) ,

142

国際法定計量機関 (OIML) , 95, 161, 164

国際メートル原器, 176

さ

3桁ごとのグループ分け, 119, 129, 152

し

時 (h) , 114, 130

CGS 単位系, 129, 174

シーベルト (Sv) , 106, 110, 141, 142, 144, 150-151

ジーメンス (S) , 106, 139

ジオルジ, 174

時間, 98, 104, 114, 173, 174, 175

視感効果度, 96, 97, 98, 103, 141, 158, 159, 166, 168,
175, 179

磁気定数, 101, 160, 177

次元, 104-105

実用単位系, 174

質量, 98, 100, 104, 112, 114, 171, 172, 173, 174, 176

質量と重量, 126-127

ジュール (J) , 96, 97, 106, 110, 128, 129, 133, 159, 166

十進法によるメートル法, 173

小数点, 93, 119, 151-152

ジョセフソン効果, 144, 145, 158, 160, 167, 172, 177

ジョセフソン定数 (K_J , K_{J90}) , 145, 158, 160, 167

シリコン球, 172

真空中の光の速さ, 91, 94, 95, 96, 97, 99, 140, 143, 149,
157, 158, 159, 166, 167, 171, 172, 175, 176

す

スチルブ (Sb) , 130

ステラジアン (sr) , 106-107, 120, 127, 133, 142-143,
147

せ

世界保健機関 (WHO) , 111

WHO 国際単位 (IU) , 111

セシウム周波数, 98, 99, 167, 171, 172

セシウム超微細構造, 158, 159

絶対単位, 177

接頭語, 106, 107, 112, 114, 116, 117, 133, 135, 138, 141,
147, 148, 173, 174

セルシウス温度, 101, 106, 117

セルシウス度 ($^{\circ}\text{C}$) , 102, 106, 110, 117, 118, 129, 130

線量当量, 106, 110, 111, 141, 142, 144, 150-151

そ

測光量, 141
測光量の単位, 127, 137

た

ダイン (dyn) , 130
ダルトン (Da) , 114, 115
単位記号, 116
単位の実現, 94-95, 97-98, 104, 111, 144, 169, 171-173
単位の名称, 117, 138
単位に対する必須の記号, 98, 116-117
単位に対する固有の記号と名前, 105-110, 173
炭素 **12**, 102, 115, 139, 160, 167, 178

て

定義定数, 91, 94-98, 99, 104, 105, 165-167, 172, 175
デシベル (dB) , 114, 115
テスラ (T) , 106, 134
電気素量, 96, 97, 100, 101, 158, 159, 163, 166, 167,
175, 177
電気単位, 176-177
電子質量, 172
電子ボルト (eV) , 114, 115
天文単位, 114
電離放射線, 86, 87, 110, 111, 140, 142, 144
電流, 98, 100, 104, 110, 128, 131, 132, 159, 163, 167, 171,
172, 173, 174, 176, 177

と

動粘度, 133
トムソン, 173
トン (t) , 114, 130

な

長さ, 96, 98, 99, 104, 114, 171, 172, 173, 176

に

ニュートン (N) , 101, 106, 110, 112, 128, 130, 133, 139

ね

ネーパ (Np) , 114, 115
熱容量, 109, 110, 117, 137
熱力学温度, 98, 101, 104, 172, 173, 174, 177
熱力学温度目盛, 130
粘度, 109, 133

は

パーセント, 120
バール (bar) , 130
倍量 (接頭語) , 106, 107, 112-113, 132-133, 136, 138,
141, 147, 174
質量の倍量および分量, 112, 136
薄明視, 141
パスカル (Pa) , 106, 139

ひ

日 (d) , 114
ppm, 120
ppt, 120
ppb, 120
非 SI 単位, 114-115, 118, 148
光生物学的な量, 111, 170
微細構造定数, 97, 160, 167, 172
比の対数, 115
秒 (s) , 91, 96, 98, 104, 114, 116, 118, 130, 131, 171,
172, 173, 174, 175
秒角, 114
標準重力加速度 (g_n) , 114, 127, 172
標準大気圧, 130

ふ

ファラド (F) , 106, 128, 130, 133
フォン・クリツィング定数 (R_K, R_{K-90}) , 145, 146,
158, 160, 167
不確かさ, 96, 119
物質質量, 98, 102, 104, 120, 139, 159, 163, 173, 174,
177
フット (フィート) , 115
プランク定数, 91, 96, 97, 100, 156, 158, 159, 163, 166,
167, 172, 175, 176, 177
分 (min) , 114
分子量, 177
分量 (接頭語) , 112-113, 133, 136, 138, 147, 174

へ

ヘクタール (ha) , 114
ベクレル (Bq) , 107, 110, 135, 140
ベル (B) , 114, 115
ヘルツ (Hz) 96, 106, 107, 130, 133, 141, 158, 166
ヘンリー (H) , 101, 106, 128, 130, 134

ほ

ポアズ (P) , 130
放射性核種の放射能, 106, 107, 135, 140
法令による単位, 95
ホール効果 (量子ホール効果) , 144, 145-146, 158, 160,
167, 172, 177
補助単位, 107, 120, 133, 138, 173, 174
ボルツマン定数, 96, 97, 98, 101, 156, 158, 159, 163,
166, 167, 172, 175, 177
ボルト (V) , 106, 128, 130, 133, 144-145, 160, 167, 174,
177

ま

マイクロ秒角 (μas) , 114

マックスウェル, 173

み

水の三重点, 94, 101, 128, 130, 137, 152, 155, 160, 167,
171, 172, 177
水の同位体組成, 137, 152, 155, 158, 177
ミリ秒角 (mas) , 114

む

無次元量, 142

め

明示定数定義, 159, 172
明示的な単位の定義, 171, 172
明所視, 141
メートル (m) , 91, 93, 94, 95, 96, 98, 99, 171, 172,
173, 174, 176
メートル条約, 86-88, 91, 94, 126, 129, 131, 174
メートルトン, 115
メートル法, 86, 91, 126, 171, 173, 174, 175

も

モル (mol) , 96, 97, 98, 102, 133, 139, 140, 148, 156,
157, 158, 159, 160, 161, 163, 165, 166, 167, 168, 171,
173, 174, 177, 178
モル質量, 102, 160, 167, 178

や

ヤード, 115

ら

ラジアン (rad) , 105, 106, 107, 120, 133, 142-143, 147

り

リットル (L もしくは l) , 93, 114, 116, 125
リュードベリ定数, 172

量, 96

量子標準, 177

量に対して推奨される記号, 98, 104

量の値, 96, 117-119

量の値の形式, 118

量の記号, 104-105

量の四則演算, 117-118

量の数値, 117-118

量の比の対数, 114-115

臨床化学, 103, 148

る

ルーメン (lm) , 96, 106, 110, 127, 130, 134, 159, 166

ルクス (lx) , 106, 110, 130, 134

れ

連続性, 92, 97

わ

ワット (W) , 96, 106, 128, 130, 133, 159, 166