

# 国際単位系における長さの単位「メートル」の定義と実現

稲場 肇\*、平井 亜紀子\*\*、阿部 誠\*\*\*

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

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

\*\*\*株式会社ミツトヨ 執行役員 研究開発本部副本部長



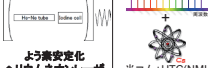
## 1 はじめに

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

## 2 メートルの定義の変遷

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

表 1 メートルの定義、日本の国家標準の変遷

メートルの定義	国際メートル原器の目盛線間の距離	<sup>86</sup> Kr の準位 2p <sub>10</sub> と 5d <sub>5</sub> 間の遷移に対応する光の真空中における波長の 1,650,763.73 倍	光が真空中を 1 / 299 792 458 秒間に伝わる行程の長さ
日本の国家標準	 メートル原器 (1889~1960) 精度: 10 <sup>-6</sup> ~10 <sup>-7</sup>	 クリプトンランプ (1960~1983) 精度: 10 <sup>-8</sup> ~10 <sup>-9</sup>	 よう素安定化ヘリウムネオンレーザ (1983~2009) 不確かさ: 2.1 × 10 <sup>-11</sup> 光コム+UTC(NMIJ) (2009~) 不確かさ: 6.8 × 10 <sup>-14</sup>

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

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

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

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

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

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

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

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

て表記した。

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

準位  $2p^{10}$  と  $5d^5$  の間の遷移に対応する光の真空中における波長の 1 650 763.73 倍に等しい長さ」と定義された<sup>7)</sup>。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

様々な議論を経て、1983 年の第 17 回国際度量衡総会において、「メートルは、1 秒の 299 792 458 分の 1 の時間に光が真空中を伝わる行程の長さとする。」との定義に改定された。メートルの定義を素直に読めば、長さを  $l$ 、光の飛行時間を  $t$  としたとき、 $l = ct$  により距離を実現するような定義に見えるが、実際には「光の速さを 299 792 458 m/s と定義する。」という意味であり、実現方法は他にもある。これについて

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

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

### 3 メートルの実現

#### 3.1 長さの定義の実現方法

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

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

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

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

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

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

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

#### 3.2 日本の国家標準 1 よう素安定化ヘリウムネオンレーザー

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

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



現性を含む標準不確かさが  $2.1 \times 10^{-11}$  であり、長さでいえば、月までの距離に対して  $10 \mu\text{m}$  以下の精度に相当する。現在、干渉計測における空気の屈折率補正は  $10^{-9}$  が限界であり、 $\text{I}_2/\text{HeNe}$  レーザーの精度は問題になっていない。

### 3.3 日本の国家標準 2 光周波数コム

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

#### 3.3.1 光コムによるレーザーの周波数計測

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

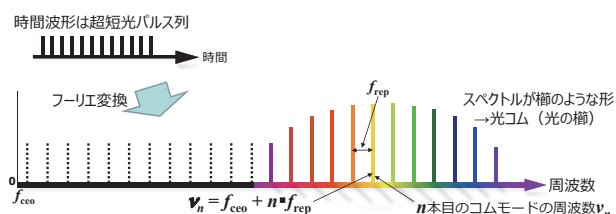


図 1 光コムの特スペクトル（概念図）

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

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

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

(1) 式を元に、周波数  $\nu_0$  の CW レーザーと光コムとの  $n$  番目のモードとのビート周波数が  $f_{\text{beat}}$  であるとき、

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

の関係が成り立つ。 $f_{\text{ceo}}$  および  $f_{\text{rep}}$  を周波数標準である UTC(NMIJ) に位相同期し、 $f_{\text{beat}}$  を計測することにより、 $\nu_0$  を求める（絶対周波数を計測する）ことができる。

#### 3.3.2 国家標準「光周波数コム装置」

光コムは  $\text{I}_2/\text{HeNe}$  レーザーと異なり超短光パルス列である。これは、長さの標準として違和感があるかもしれない。実際、光コムを既存の長さ測定用光干渉計にそのまま適用することはできない。しかし、特定標準器の役割は図 2 に示すようにレーザー一周波数の校正であり、干渉計に直接使えなくても問題はない。

特定標準器を光コムにすることには以下のようなメリットがある。

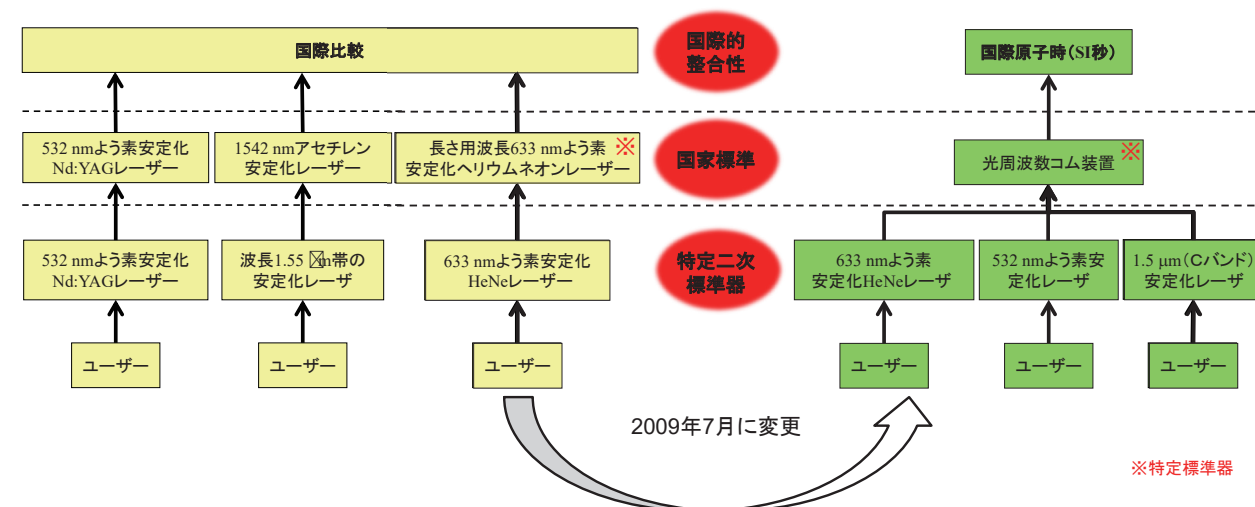


図 2 日本の長さのトレーサビリティ体系（特定標準器に近いところのみ）

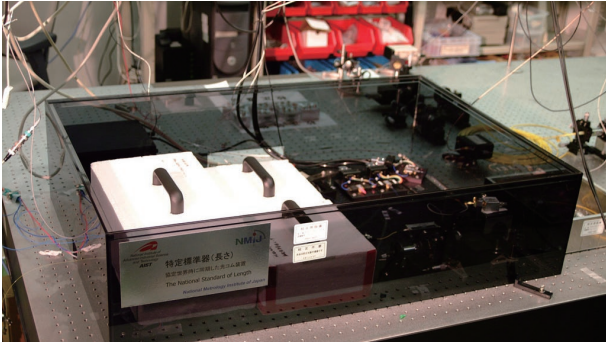


図3 産総研が保有する長さの特定標準器・光コム

① 周波数の不確かさが小さい。

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

② 広い波長帯の光周波数を 1 つの光コムで測定できる。

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

③ 国際的な承認を得るための運用が容易。

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

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

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

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

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

## 4 新しい SI におけるメートル

2019 年、メートルを含む全ての基本単位の定義が改定された。メートルについては「メートル(記号は m) は長さの SI 単位であり、真空中の光の速さ  $c$  を単位  $m s^{-1}$  で表したときに、その数値を 299 792 458 と定めることによって定義される。ここで、秒はセシウム周波数  $\Delta\nu_{Cs}$  によって定義される。」と改定された。

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

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

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

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

## 5 長さ計測におけるトピック

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

### 5.1 レーザー干渉測長器

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

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

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

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

### 5.2 ブロックゲージ

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

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

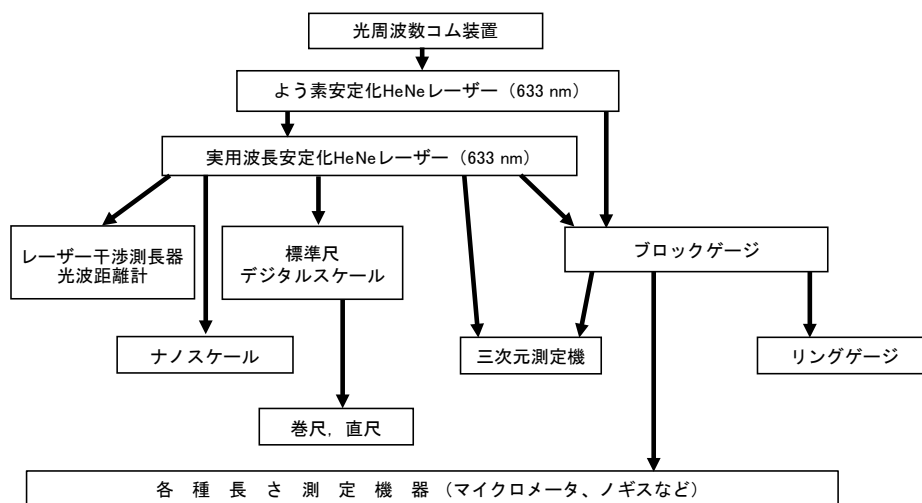


図4 長さ・幾何学量の標準供給体系 (一部)



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

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

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

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

着する方法より小さな不確かさを達成するのはまだ困難である。

### 5.3 座標測定システム

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

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

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

### 5.4 光学式座標測定システム

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

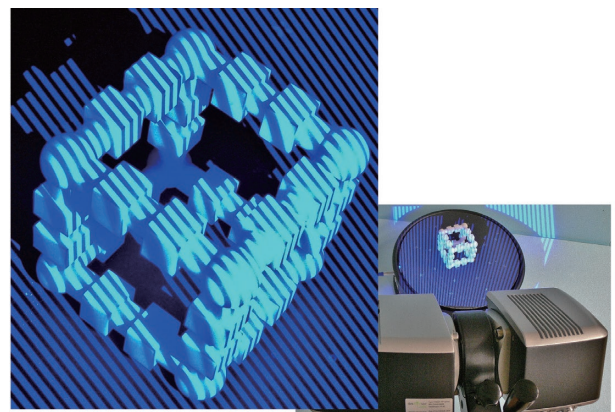


図 5 光学式 CMS の測定例

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

多数点群による座標測定システムの性能評価法としては、直交型の測定フレームをもつものに限定して ISO 10360-8<sup>31)</sup> およびこれに対応する JIS B7440-8<sup>32)</sup> が産総研のリーダーシップにより整備済みである。これ以外の形式の測定フレームをもつか、または測定フレームを明確な形式ではもたない CMS（以下、非直交光学式 CMS）の国際的な性能評価法も産総研のリードにより ISO 10360-13 として開発が始まった。その過程で、既存のガイドライン<sup>33)</sup> が記載する 2 球間距離による評価法は、非直交光学式 CMS の系統誤差の分布によっては、測定誤差を十分には捕捉できないことがわかってきた。そこで従来は補完的な評価項目と位置づけられた平面形状を参照する評価項目を強化することにより、この懸案を解消することを目指している。

## 5.5 計測用 X 線 CT

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

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

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

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

レートの矩形の輪郭形状と相関する形状偏差が円筒穴に現れていることがわかる。

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

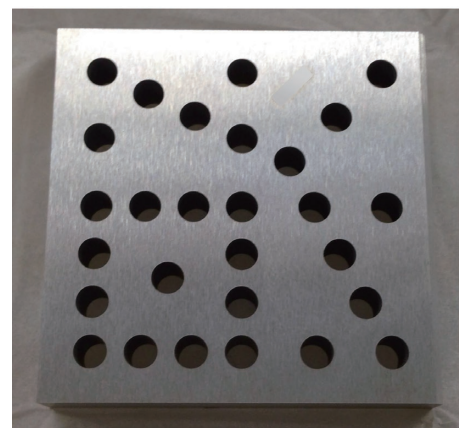
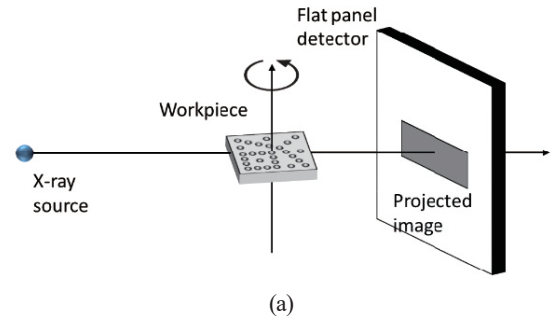


図 6 計測用 X 線 CT によるホールプレートの撮像 (a) 配置 (b) ホールプレート

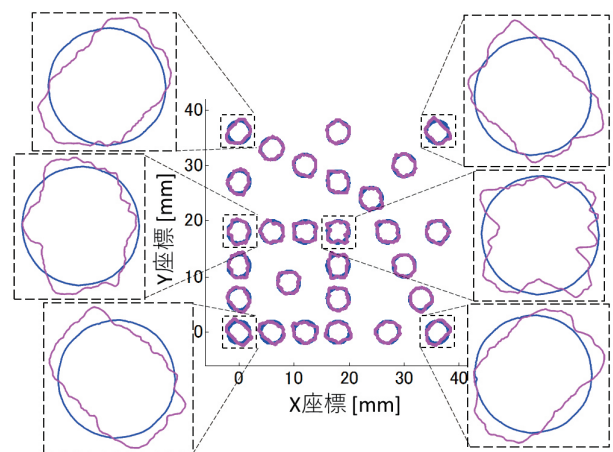


図 7 測定されたホールプレートの断面形状例



## 5.6 ナノ長さ標準

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

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

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

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

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

## 6. まとめ

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

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

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

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

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

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

## 参考文献

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

- F. R. Petersen: Speed of light from direct frequency and wavelength measurements of methane-stabilized laser, *Phys. Rev. Lett.*, **29**, 1346/1349 (1972)
- 10) Documents concerning the new definition of the meter, *Metrologia*, **19**, 163/177 (1984)
  - 11) 自然科学研究機構 国立天文台 編 理科年表オフィシャルサイト [https://www.rikanenpyo.jp/FAQ/tenmon/faq\\_ten\\_005.html](https://www.rikanenpyo.jp/FAQ/tenmon/faq_ten_005.html)
  - 12) K. Minoshima and H. Matsumoto: High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser, *Appl. Opt.* **39**, 5512/5517 (2000)
  - 13) Practical realizations of the definitions of some important units, BIPM ホーム ページ <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies.html>
  - 14) 高辻 利之: 長さ (m) についての基礎解説と最新動向, 計測と制御, **53**, 523/528 (2014)
  - 15) J. Stone *et al.*: Advice from the CCL on the use of unstabilized lasers as standards of wavelength: the helium-neon laser at 633 nm, *Metrologia*, **46**, 11/18 (2009)
  - 16) 石川純: 誰でも作れて携行できる長さの国家標準器, シンセシオロジー, **2**, 276/287 (2009)
  - 17) ヘンシュ教授とホール博士は, 光周波数コムなど精密分光学の発展への貢献により 2005 年度のノーベル物理学賞を受賞された: [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2005/index.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2005/index.html)
  - 18) D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka, A. Stentz, R. S. Windeler, J. L. Hall and S. T. Cundiff: Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis, *Science*, **288**, 635 (2000)
  - 19) 稲場肇, 大苗敦, 中嶋善品, 洪鋒雷: 特集 特定標準器 光周波数コムと長さの特定標準器, 計測標準と計量管理, **59**, 2/8 (2009)
  - 20) 大苗敦, 稲場肇, 洪鋒雷: 光周波数コムによる長さの国家標準, 光アライアンス, **21**, 52/56 (2010)
  - 21) 稲場肇: メトロロジーにおけるファイバコム, 分光研究, **62**, 238/245 (2013)
  - 22) P. E. Ciddor: Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared, *Appl. Opt.*, **35**, 1566/1573 (1996)
  - 23) T. Kim *et al.*: Simple, real-time method for removing the cyclic error of a homodyne interferometer with a quadrature detector system, *Appl. Opt.*, **44**, 3492/3498 (2005)
  - 24) S. Yokoyama *et al.*: A heterodyne interferometer constructed in an integrated optics and its metrological evaluation of a picometre-order periodic error, *Precision Engineering*, **54**, 206/211 (2018)
  - 25) 尾藤洋一, 平井亜紀子, 吉森秀明, 洪鋒雷, 大苗敦, 岩崎茂雄, 瀬田勝男: 3本の安定化レーザを用いた長尺ブロックゲージ干渉計の開発, 精密工学会誌, **68**, 542/547 (2002)
  - 26) A. Hirai *et al.*: Evaluation of long-term stability of low thermal expansion coefficient materials using gauge block interferometers, *Meas. Sci. Technol.*, **29**, 064014 (2018)
  - 27) 横山雄一郎, 栗山豊, 境久嘉, 鳴海達也, 山中誠: 両端面光波干渉測定システムの開発とその実用化, 精密工学会誌, **80**, 142/145 (2014)
  - 28) Y. Kuriyama *et al.*: Development of a new interferometric measurement system for determining the main characteristics of gauge blocks, *Annals of CIRP*, **55**, 563/566 (2010).
  - 29) A. Abdelaty *et al.*: Challenges on double ended gauge block interferometry unveiled by the study of a prototype at PTB, *Metrologia*, **49**, 307/314 (2012).
  - 30) 大澤尊光, 高辻利之, 佐藤理: ものづくり産業を支える高精度三次元形状測定, 一計量トレーサビリティ体系の構築と標準化一, シンセシオロジー, **2**, 101/112 (2009)
  - 31) ISO 10360-8: Geometrical product specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) -- Part 8: CMMs with optical distance sensors, (2013)
  - 32) JIS B7440-8: 製品の幾何特性仕様 (GPS) 一座標測定システム (CMS) の受入検査及び定期検査—第8部: 光学式距離センサ付き座標測定機 (2015)
  - 33) VDI/VDE 2634 Part6.2: Optical 3-D measuring systems, Optical systems based on area scanning (2002)
  - 34) K. Matsuzaki, O. Sato, H. Fujimoto, M. Abe and T. Takatsuji: A study of mechanism of bi-directional measurement influenced by material on dimensional measurement using X-ray CT, *Int. J. Automation Tech.*, **11**, 707/715 (2017)