

「ものさしは時間につながっている？」

みなさんが普段使われているさまざまな計測装置の精度はどのように保証されているかご存じでしょうか。ほとんどの場合、製品購入時に付いてくる保証書や校正証明書といったものを信用して使われていると思います。この信用を成立させるためには、装置のチェックや校正に使う物理量の基準（標準）が製造メーカーごとに異なるないようにし、なおかつその標準が各単位の定義に照らして、必要な精度で付けられていることが必要となります。このことを保証するしくみとして、トレーサビリティ制度とよばれる制度があります。

トレーサビリティ制度とは読んで字のごとく、精度のつながり（保証）が国家標準までトレース（遡る）できる制度のことです。たとえば、われわれが普段使っている長さの計測装置である「ものさし」の製造メーカーでは、そのものさしに目盛りを付けるための「基準（標準）ものさし」があります。そして、その「標準ものさし」の製造メーカーでは、さらにその基準となる「標準ものさし」があり、最終的には国家の長さ標準にまで遡ることができます。つまり、精度の保証が1つの標準（国家標準）、さらには長さの定義へと繋がっていることになります。

長さ計測の世界では、こういった標準体系を成立させるために光（レーザー）が非常に重要な役割を果たしています。ここでは、長さ標準のトレーサビリティ体系について、光とのかかわりを中心に少し紹介したいと思います。図1に日本における長さ標準供給の大まかな体系図を示しています。標準供給体系を逆に遡ったものがトレーサビリティ体系です。長さ標準のスタートは時間（周波数）標準です。そこから、標準レーザー、実用標準器、実用計

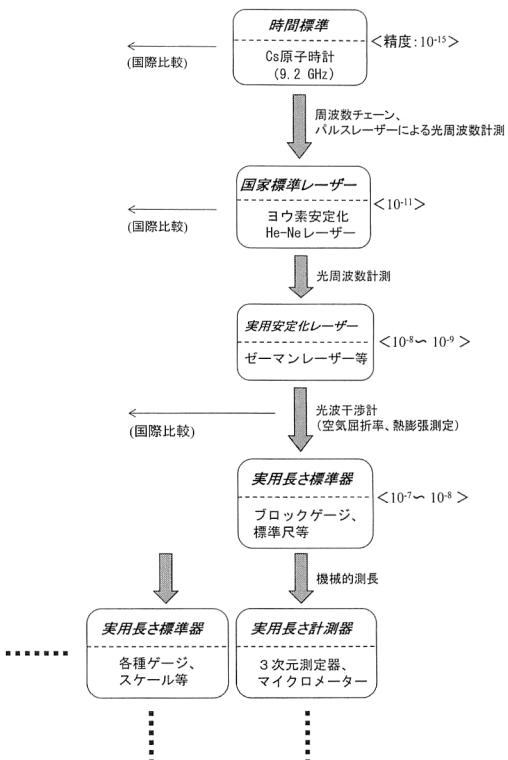


図1 長さ標準の供給体系（トレーサビリティ体系）。

測器へと繋がっています。以下にそれぞれの具体的な流れについて説明します。

1. 時間 (s) から長さ (m), 標準レーザーへ

長さ (1 m) の定義は、最初、メートル原器とよばれる人工物の目盛りの間隔として定義されていました。その後、同位元素ランプの波長に変更になり、1983年以降は、1 m は光が 299, 792, 458 分の 1 秒の間に真空中を進む行程の長さとして定義されています。これは言い換えると、時間 (1 s) の定義から、光の速度 c を介して長さ (1 m) が定義さ

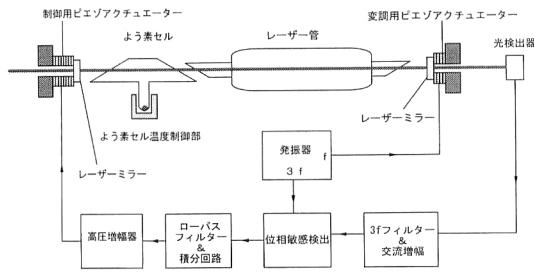


図2 ヨウ素安定化 He-Ne レーザーの構成。

れているということになります。このような定義となつたのは、時間標準（周波数標準）が現在もっとも高い精度を達成されている（相対精度で 10^{-15} ）ということが理由のひとつとして挙げられます。

この長さの定義を実現する方法としては、光の周波数測定による方法が採られています。これは、非常に安定かつ再現性 (stability, repeatability, reproducibility) のあるレーザーを作製し、その光の周波数 f を周波数標準をもとに測定し、そのときの波長 λ を $\lambda = c/f$ の関係により求め、長さの標準とするものです。ここで、周波数の標準は、セシウム (Cs) 原子周波数標準器より得られる、周波数約 9.2 GHz のマイクロ波です。光の周波数が数百 THz の領域であることを考えると、周波数標準により光の周波数を測定することは容易ではありません。以前は、何台ものレーザーを介してマイクロ波と光の周波数を繋いでおり (周波数チェーン)，測定は大変な作業でした。ところが、最近ではフェムト秒レーザーの出現により、周波数標準と光周波数を一気に繋ぐことが可能となっています。その詳しい原理については、光学第 31 卷第 12 号に紹介されていますのでそちらを参照ください。

具体的な長さ標準レーザーとしては、ヨウ素分子

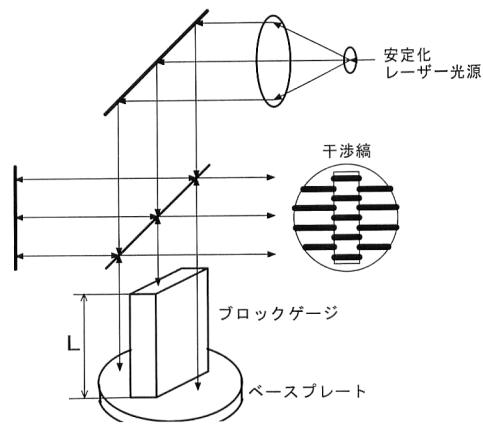


図3 ブロックケージ干渉計.

の吸収線に周波数を安定化した He-Ne レーザーが日本を含め各国の国家標準レーザーとして採用されています。図 2 にヨウ素安定化 He-Ne レーザーの簡単な構成図を示しています。レーザー共振器の中に、ヨウ素セルが配置される構造となっており、レーザー周波数の精度は相対精度で 10^{-11} 程度となっています。

2. 標準レーザーから実用標準器へ

標準レーザーの波長から実用的な長さ標準器へのつなぎは干渉計を利用します。まず、標準レーザーにより実用安定化レーザー（ゼーマンレーザー等）の周波数（真空波長）校正が行われます。そして、波長校正されたレーザーにより干渉測長が行われ、レーザー波長の値をもとに実用標準器の長さが決定されます。図3に代表的な長さ標準器であるブロックゲージの長さ測定（校正）のための干渉計を示しています。ブロックゲージは、鋼やセラミックスなどで作られた、その両端面が平行かつ平面に磨かれた

た直方体の物体です。端面間の長さ L を実用標準として用います。ブロックゲージの端面間の長さを干渉計で測定するには、図3に示すように、一方の端面を平面基板（ベースプレート）に密着（光学密着：リングング）させ、いわゆる段差測定として端面間の長さを測定します。長さの範囲は0.5 mm～1 m程度です。干渉計により長さの校正がされるブロックゲージ以外の実用標準器としては、標準尺とよばれるものさしのような標準器もあります。

干渉計により、空気中で長さを測定する場合は、屈折率による波長変化を補正する必要があります。また、実際の「もの」である実用標準器に対しては、熱膨張の補正といったことも必要となってきます。これらの補正の精度により、干渉計から校正される実用長さ標準器の校正精度は $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 程度となっています。

3. 実用標準器から実用計測器へ

干渉計によって校正された実用長さ標準器は、三次元座標測定機、ノギス、マイクロメーターといった実用計測器の校正用に用いられ、それらの計測器のトレーサビリティを保証します。また、さらに下のクラスのブロックゲージやスケールの比較校正にも用いられます。これらの校正の測定法は、機械的な接触を伴うもので、校正精度は干渉計よりもさらに1～2桁下になります。

以上のような流れ（逆を遡ること）により、長さ標準の国内トレーサビリティは保証されているわけですが、標準体系においてもうひとつ重要な要素に国際的な整合性があります。貿易などの際に障壁とならないように、「世界中どこで測っても1 mは1 m」であることが必要です。このことを保証するために、図1に示すように、トレーサビリティの各段階において国際的な比較が行われています。まず、おおもととなる時間標準は電波により隨時比較が行われています。次に、国家標準レーザーは、何年かに1度、1箇所に各国の標準レーザーをもち寄り光周波数の比較を行います。そして、干渉計では、同じ実用標準器を各国の干渉計で測定し、測定値の比較を行っています。また、図1には示していませんが、三次元座標測定機などにおいても国際比較が行われています。

計測標準は、正しいことが「当たり前のこと」として扱われている、いわば空気のような存在であることが多いと思います。しかしながら、この「当たり前のこと」を保証するために、技術だけでなく制度に関してもさまざまな工夫と努力がなされているのです。

この記事に関するお問い合わせはkato@optsun.riken.go.jpもしくはtanida@ist.osaka-u.ac.jpまでお寄せください。

（産業総合技術研究所 尾藤洋一）