

# 計量標準とトレーサビリティ

松本 弘一

## Measurement Standard and Traceability

Hirokazu MATSUMOTO

Measurement standard becomes to important fundamental technology in order to raise the reliability of measurement data and quality of products, and recently have a trust and safety of society. Therefore, it is important to establish the traceability of the practical standards based on the international system of units and the national standard. These are introduced considering the present state of length standards and their future trends are discussed with the progress of new optical science and technology.

**Key words:** SI unit, measurement standard, traceability, mutual recognition, uncertainty, length standard, optical frequency comb

最近、科学技術や産業技術の高度化・複雑化により、精密な計測が求められている。このような計測の重要性は、科学現象を正しく理解し、異なる地域で発見された現象を同じ尺度で比較できることである。この場合、単位の定義より導かれる標準に基づいた計測が実現されると、より信頼性の高いデータを算出できる。

また、計測技術は、生産工程において不可欠であり、製品の品質や互換性の向上に重要である。このため、標準の分野においては、定義するだけでなく、ユーザーにとって実用的であることも大きな使命となっている。近年、貿易の関税障壁を解消するひとつの要因として、国際間の標準の同等性を確保し、相互承認協定を結ぶ必要性が指摘されてきた。このための技術課題としては、標準の国際比較が有効であり、その国の最高レベルの標準技術の競争が行われている（国際度量衡局（BIPM）、<http://www.bipm.org>）。さらに、安心・安全を確保するための社会基盤として、計測技術の信頼性が重要になっている。これに応えるためには、国際標準に基づいて、いつでも、どこでも、だれでも利用できることが必要であり、国家プロジェクトとして、遠隔校正技術（e-trace）が開発されてきた<sup>1)</sup>。

ここでは、標準全体を視点にして概説し、具体的実証例

として長さ標準を取り上げて説明し、また、今後の発展方向に関して述べる<sup>2)</sup>。

## 1. 標準・計量

### 1.1 標準

メートル条約において定義された「SI単位」には7つの基本単位があり、これに加えた組立単位は、すべての計量標準の基本であり、ほぼすべての物象はこれらの単位系から導き出すことができる（図1）。この中で、多様な科学技術の進展により、質量標準においてはこの単位系の見直しが早くから議論されている。ワットバランス法やアボガドロ定数法が浮上しているが、それらの精度はまだ原器（人工物標準）を超えていないのが現状である<sup>3)</sup>。この中で、電圧標準においては、ジョセフソン技術の高度化が大きなインパクトを与えている。

また、「秒」は国際単位系の基本単位のひとつであり、重要な量である。秒と周波数は逆数の関係にあり、本質的に同じであるとして取り扱うが、周波数技術は、おもに無線通信技術の急速な発展とともに、今後の展開が期待される。具体的には、1940年に日本が標準電波の送信を開始するとともに、標準周波数の発信源としての水晶発振機の

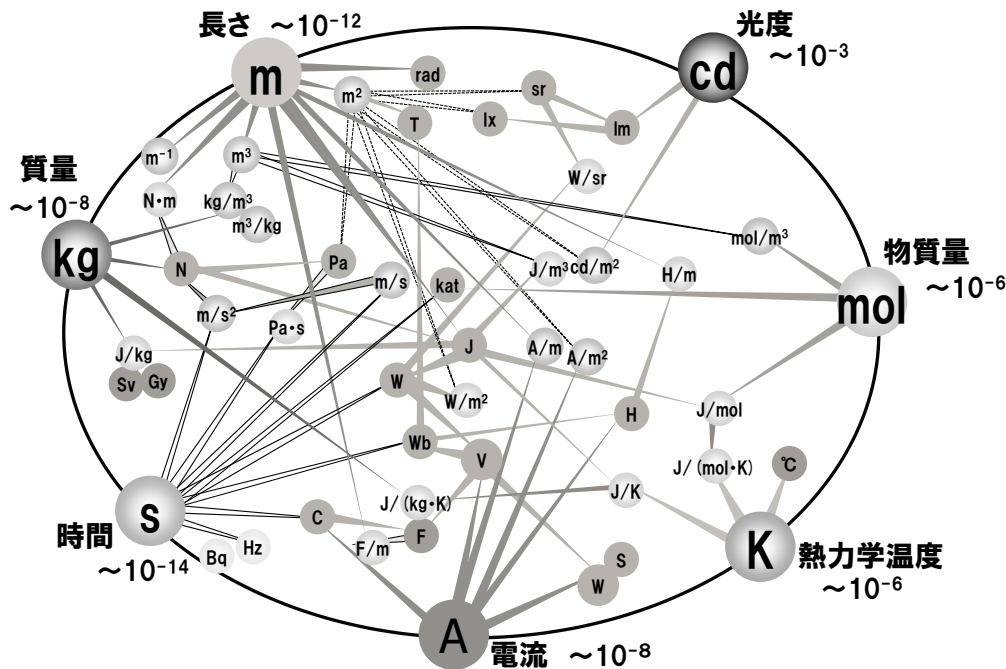


図1 SI単位系の相関図と精度.

性能向上の必要性が再確認された。1956年の国際度量衡総会において、「1秒は1956年1月0日12時系暦表時における瞬間の1太陽年の1/31,556,925.9747とする」と定義されたが、1年以上の観測時間でも正確さが $10^{-9}$ 程度しか得られなかった。このために、量子標準として、セシウム(Cs)の原子時計が開発され、その設定精度は格段に向上した。その技術は、原子泉へと発展し、その精度と運転時間はさらに向上した<sup>4)</sup>。

1983年の国際度量衡総会(CGPM)では、「メートルは1/299,792,458秒間に光が真空中を伝わる行程の長さ」によって定義された。この結果、100億分の1を超える高精度な長さ標準が可能になり、これを実現するための波長標準として、1997年の国際度量衡委員会(CIPM)において13本のレーザー波長が再勧告された<sup>5)</sup>。この中で、ヨウ素分子を利用した安定化633 nm He-Neレーザーは実用長さ標準の光源として最も重要なものとなっており、おもな国立標準研究所はこのレーザーを所有している。なぜなら、勧告の条件を満足するレーザーの製作が比較的容易であるからである。この結果、標準のトランスファーに光ビートによる計測法が利用できるようになり、精度が著しく向上した。また、光ビート信号の周波数をカウンターで計数することができるので、高分解かつ高精度に校正することができる。図2は、実際の安定化レーザーの写真であり、このようなレーザーは電氣的制御系と一緒に輸送して、国際比較を行うことができる。国際度量衡局(BIPM)のもとに行われた各国標準機関の国際比較値は、BIPMの値から

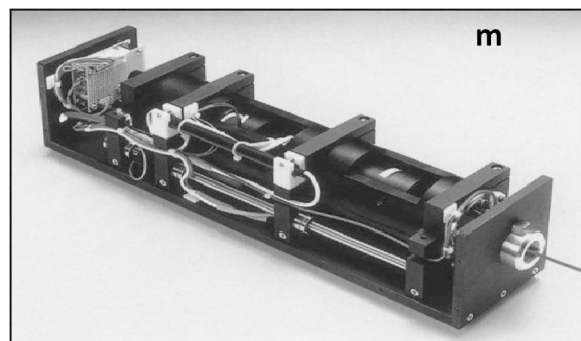


図2 ヨウ素安定化 He-Ne レーザー.

の偏差が $\pm 2 \times 10^{-11}$ 以内であることがわかった<sup>6)</sup>。

## 1.2 長さ標準

“秒”の定義(Csの時計)とその実現により、周波数の精度は13桁以上もあるので、光の周波数を、電気の周波数のチェーンによって計測することができれば、 $\lambda$ も高精度に決まることになる(波長校正)。この周波数チェーンでは、遠赤外・赤外の伸介レーザーが必要であり、非常に大型の装置となるので、高精度な光周波数測定が容易でなかった。

1990年代の後半から、フェムト秒(fs)モードロックパルスレーザー技術とフォトニクス結晶ファイバー技術の進展が、新しい分野を切り開いた。これらの技術は周波数間隔が正確に一定で安定した光周波数領域の目盛り(光コム)を実現した。また、ブロードな光コムも実現するとともに、現在では、モード間周波数の精度が $10^{-15}$ を超える

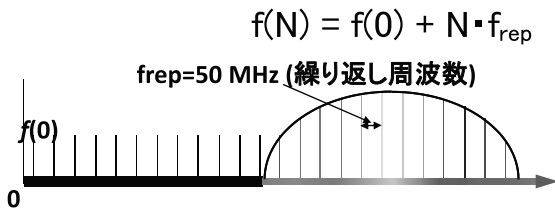


図3 光周波数コムによる長さ標準 (光周波数計測).

ので、光ビート法によって、周波数カウンターなどを使用して高精度な光周波数の測定が可能になった(図3)。この結果、特に、群速度分散のない光ファイバーの製作が実現されている現在では、紫外線から遠赤外線の超広スペクトル帯域において、50 MHz から数 GHz の周波数間隔で、超高精度な光周波数標準群が実現されることになる<sup>7)</sup>。また、この絶対周波数を50 MHz から数 GHz にわたってシフトさせることは容易であるので、これらの全波長域で波長標準すなわち長さ標準が実現されることになる。

### 1.3 計量標準とトレーサビリティ

1990年代に入って、科学技術基本法が制定され、計量標準の言葉が一躍有名になった。これは、科学、産業、社会の基盤となる単位系をユーザーまで普及させることにより、当該分野を発展させるためである。科学技術や先端産業では非常に高精度を要求する場合もあるが、生産現場や社会においては、高い精度というよりも、国家標準へ連鎖できる標準が重要であり、それほど高い精度を要求しない場合もある。したがって、国家標準へと繋がりを持つとともに、その分野において基準的に使えることが重要であった。この結果、計量標準は階層的な構造となり、国家標準を頂点とするピラミッド型の形態を有し、多くの校正サービス業者を通して実現される。また、トレーサビリティの考え方では、標準が国家から末端に供給されるという形ではなく、末端の計測のユーザーが国家標準に向かって自ら繋がりを実現するというものとなっている<sup>7,8)</sup>。

このようなトレーサビリティの考え方は40年前に生まれたものであるが、最近、ISO 9000等の規格で、製品の検査等で行われる計測にこのトレーサビリティを要求するようになり、そのニーズが急速に増大した。また、その背景には通商のグローバル化があり、外国の企業が日本のサプライヤーから部品等を調達しようとする場合に、従来はその外国の企業がサプライヤーを直接査察して契約を行っていたが、このような契約は大仕事であるために、認証を取得したサプライヤーであることを条件とするようになり、当該分野の基準として計量標準の重要性が再認識された<sup>9)</sup>。

基本的に、SI単位系に基づいた計測技術を開発するこ

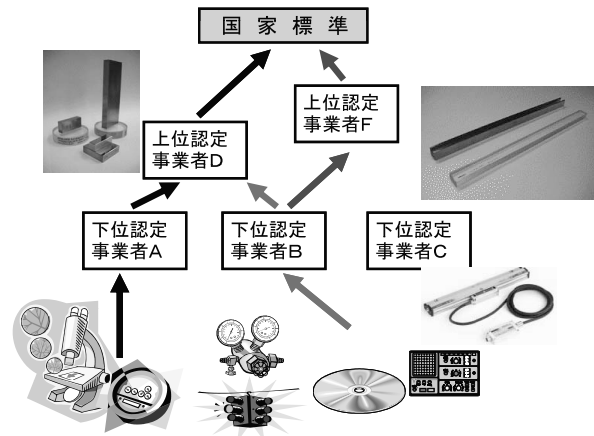


図4 計量のトレーサビリティの例。

とが重要である。つまり、開発した計測技術のよりどころとなる基準が、何らかの方式で上位に標準があり、この標準によって校正できることである。さらに、この標準は、もっと上位の標準へとつながり、この連鎖によって、SI単位系に繋がっていることが求められる。計測機器を開発するときに考えることは、どの量が基準となるかを見極めて、その量の国家標準を探ることである(図4)。

すでに記述したように、ユーザーから要求される長さの標準は、不確かさが小さいものから大きいものまで、まちまちである。また、貿易で必要とされる不確かさも、上位から下位の標準に及んでいる。これらはすべて重要であるが、一機関からすべての標準を供給することは困難である。このため、供給すべき計量標準の高度性やリスク性に応じて、わが国の長さ標準の供給体系を確立することは重要である。このため、1992年に計量法において計量標準供給制度(JCSS)が制定された。この法律の施行において、紆余曲折があったが、科学技術基本法による支援のもとに、順調に進展してきている。現在では、校正登録事業者の数は、222者に達しようとしている。

## 2. 実用長さ標準

### 2.1 線度器標準(干渉縞計数法)

長さ測定の典型的な方法は、干渉縞の数を数える方法であり、干渉測長法としては一番多く利用されている<sup>10)</sup>。マイケルソン干渉計において、その干渉計の一方の反射鏡を直線運動する移動台上に配置しておく。この移動台が移動すると、 $\lambda/2$ の移動ごとに明暗の干渉縞が生じる。これを光电検出して得られる強弱の信号をカウンターで計数すると、移動台の移動量、つまり長さを求めることができる。この場合、干渉縞測定の分解能を向上させるために、位相が $90^\circ$ だけ異なる2種類の信号を作成し、電気的補間法に

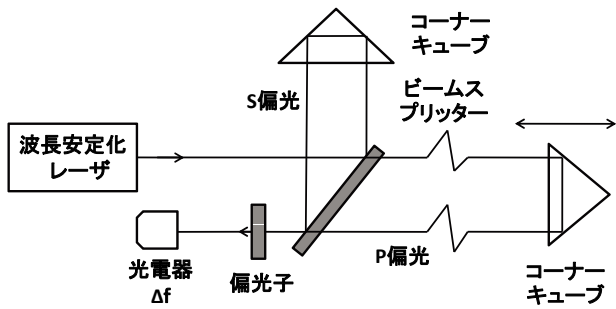


図5 二周波ヘテロダイン干渉計の原理 ( $\Delta f$ : ヘテロダイン周波数).

よって数百分の1までの分解能も実現されている。この干渉縞計数法においては、移動鏡の姿勢が多少変化しても、入射ビームを正しく元の方向に戻すために、反射鏡としてコーナーキューブが用いられる。

これに類似するものとしては、ヘテロダイン干渉計がある(図5)。これには、光の周波数シフトが重要であり、磁場によるゼーマン効果などを利用して、光の周波数を数十kHzから数十MHzだけシフトさせる。ゼーマン法の場合、内部鏡型レーザーでは磁場によって互いに直交した直線偏光状態の二周波光が得られるので、干渉計内に偏光ビームスプリッターを用いることによって二周波光は分離され、参照光とプローブ光が形成される。これらの反射光を混合することによってビート信号が得られる。この信号の周波数と位相の測定から長さが求められる。この測定分解能の向上は電氣的に容易である。また、ヘテロダイン干渉計は交流的に信号を処理するので、雑音を除去するうえで有効である。

## 2.2 多波長干渉計

実用長さ標準として一番多く利用されている端度器は、ブロックゲージ(おもにスチール製とセラミックス製が使用されている)である<sup>11)</sup>。これには、複数の波長を利用する干渉計が用いられ、長さの決定に合致法が利用される(図6)。つまり、波長ごとに干渉縞の端数(位相)を測定し、それらの端数値と各波長による縞間隔の目盛りとによる組み合わせから、干渉縞の整数値を一義的に決定し、ブロックゲージの寸法を精密に決定する。この際、位相の測定で誤差を含み、あまり大きな次数まで決定することができないので、寸法の概略値をあらかじめ別の方法で測定する。可視光を用いる場合、数 $\mu\text{m}$ の精度までの測定が要求される。この方法を用いて数メートル以上の寸法を求める場合、大気のゆらぎや機械的振動などにより端数の正確な測定が困難になるので、光源として波長の長い赤外線が用いられる。

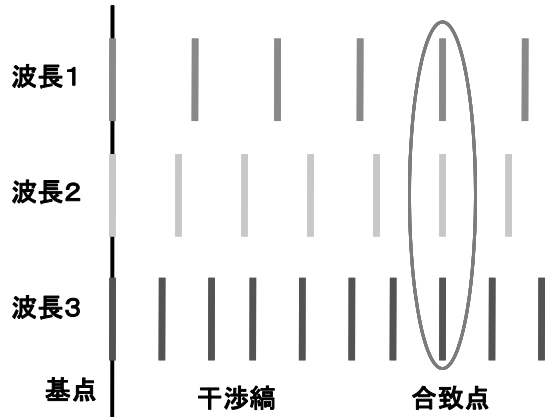


図6 3波長による合致法の原理。

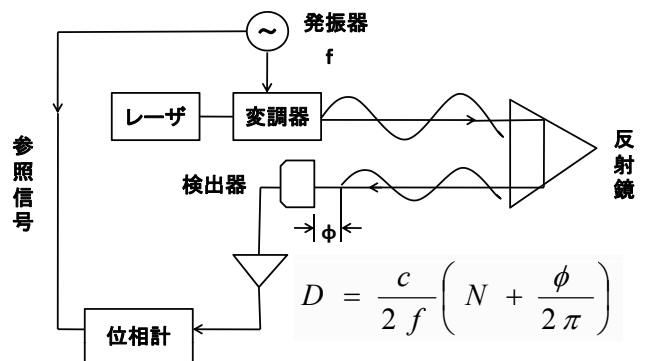


図7 変調方式の光波距離計の原理 ( $f$ : 変調周波数,  $D$ : 距離,  $c$ : 光速,  $N$ : 正数).

## 2.3 大寸法標準

大型施設、航空機などにおいては、精密な距離測定が必要であり、各種の方法が開発されている。マッハ・ツェンダー型の光導波路変調器の場合、光路の途中にある電極に電界が加わると、2つの光路長において位相差が生じるので、ギガヘルツ領域の強度変調が実現される<sup>12)</sup>。図7に示すように、変調されたレーザー光を遠方にある反射鏡に向かって出射する。次に、反射鏡からの反射光を光電器で検出し、その検出信号と参照信号との位相差を位相計によって測定する。光の変調周波数が高い場合、反射鏡からの反射光を再び別の光変調器に入射させ、出射光用の変調周波数と幾分異なる周波数で動作させると、測定周波数が数十kHzまで低下され、位相の精密測定が可能となる。この方法によって、数十 $\mu\text{m}$ の分解能が実現されているが、現場計測においては距離に比例しない周期誤差の補正が課題である。

このような距離計の校正には、レーザー干渉測長計が利用され、20 mから100 mの移動台を利用して光波距離計の校正が行われている。つまり、波長標準が利用されてい

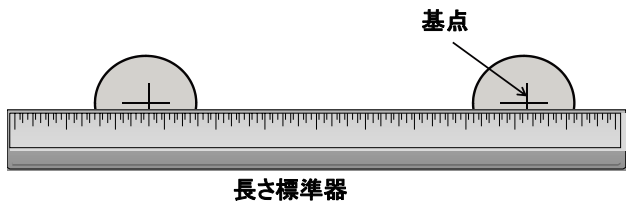


図8 基点間隔の測定例.

る。産業技術総合研究所には 300 m 長の光学トンネルに 100 m の移動台が設置されており、低い変調周波数（粗い目盛り）の場合の校正も可能であるとともに、距離に依存した校正も可能である<sup>13)</sup>。

## 2.4 不確かさ

測定結果を正しく評価するためには、その不確かさの算出が重要である。なぜなら、測定においては、必ずばらつきや誤差が発生するからである。また、作業者のミスを防ぐためにも、何度も測定を繰り返すことは重要である。しかしながら、何度も測定を繰り返すとコストがかかるので、不確かさの算出は有効である。ここでは、スチールの巻尺によって、土地の基点間隔を測ることを想定する（図 8）<sup>14)</sup>。標準偏差（ばらつき）を推定するには、経験的に、測定回数が 4 から 10 の間が十分に経済的な回数 ( $n$ ) といえる。標準偏差を計算するには、測定値と平均値との差をとり、それらの二乗和を測定回数で割るが、統計的に推定するには、 $(n-1)$  で割るのが有効である。表 1 は、本測定におけるエラーバジェット表である。実験計画法による分散分析によって不確かさ要因が見つかり、また自由度も推定される。評価法では、統計を用いた不確かさの推定（タイプ A）と、他のすべての情報を用いた不確かさの推定（タイプ B）とに分類される。したがって、タイプ A は一般に正規分布などとなり、タイプ B は矩形（一様）分布になることが多い。分解能（最小目盛）の場合、±で広がるので、標準不確かさは  $\sqrt{3}$  で除することになる。感度係数は、他の量を通して計算する場合の係数を示す。表 1 では、温度に対する熱線膨張係数の不確かさが感度係数と

なる。これらの合成標準不確かさは、 $98 \mu\text{m}$  と計算される。この測定の信頼性水準を示すことが多く、包含係数  $k$  が用いられる。一般に、 $k=2$  は約 95% 信頼性水準が利用される。

## 3. 国際相互承認と計量法 (JCSS)

### 3.1 概要

国際度量衡委員会 (CIPM) や国際度量衡総会 (CGPM) では、国家計量標準の同等性を確保するために、国際比較を実施することを決議した。この場合、1つの量に関して全世界で比較するには、多くの時間がかかるために、全世界を 5つのブロックに分け、各ブロックからの数機関の代表機関が、CIPM 基幹比較 (key comparison) に参加することになった。そして、この代表機関を加えて、地域 (RMO: regional metrology organization) の基幹国際比較を行う。これによって、RMO 基幹比較が、代表機関の結果を通して、CIPM 基幹比較と同等であることを確保する方式を採用することにした。この結果、国際比較の期間がかなり短縮されるとともに、1つの量の参加機関が少なくなるので、人工物標準のようなものは傷がついたり、標準の値が変化することの問題がかなり改善された。しかしながら、RMO 基幹比較と CIPM 基幹比較との同等性を示す方法でいくぶん問題がある。なお、5 ブロックは、ヨーロッパ地区、アジア地区、アメリカ地区、東ヨーロッパ地区、南アフリカ地区である<sup>15)</sup>。

### 3.2 基幹比較

CIPM 基幹比較への参加機関は最も高い技術的能力と経験を持っており、普通、該当する諮問委員会のメンバー研究所である。諮問委員会のメンバーでない、そして国立標準研究所でない機関は、指定された国立標準研究所によって推薦されなければならない。参加機関の選定において、諮問委員会は地域の主張を考慮することが必要である。

これらの比較の結果、測定値がお互いにどれだけ近いかということだけでなく、それぞれの不確かさ評価が、科学

表 1 基点間隔の測定における不確かさの算出例.

要因	値 ±	タイプ	確率分布	除数	自由度	感度係数	標準不確かさ ( $\mu\text{m}$ )
巻尺の校正の不確かさ	$100 \mu\text{m}$	A	正規	2	10	1	50
分解能 (最小目盛)	$50 \mu\text{m}$	B	矩形	$\sqrt{3}$		1	29
物体の置き方	$80 \mu\text{m}$	B	矩形	$\sqrt{3}$		1	46
繰り返し測定の標準偏差	$60 \mu\text{m}$	A	正規	1	10	1	60
熱膨張係数	$2 \times 10^{-6}$	B	矩形	$\sqrt{3}$		1	
温度補正	2.0 K	A	矩形	1	20	$1.15 \times 10^{-5}L$ (10 m)	23
合成標準不確かさ							98
拡張合成不確かさ			( $k=2$ )				196



的・技術的に合理的なものであるかどうか明らかにできると考えられる。また、各国標準機関が不確かさの評価をするとき、意図的に小さくしたり、大きくしたりすることは利益にならない。

RMO 基幹比較は、各地域の計量標準機関の連合体が主催する国際比較であり、この比較へはすべての地域計量機関のほかに、(地域の外から招待された機関を含む)地域の機関の規則に従う他の機関や特別な比較に必要な技術的能力を有する機関が参加できるが、CIPM や BIPM 基幹比較に参加して同等性が明らかになった機関を少なくとも 2 機関含むことにした(これをリンク機関と呼ぶ)。RMO 補完比較も、同様に実施でき、同様な機関が参加できる。

### 3.3 比較の同等性

相互承認協定のための技術的基盤となるものは、国際比較によって得られた結果のデータである。CIPM 基幹比較は基幹比較参照値を提供する。協定の目的のためには、計量標準の同等性に関して、参加機関の標準が基幹比較参照値と同等であるという程度を意味するように行われるべきである。各国家計量標準同等性が、基幹比較参照値からの偏差とこの偏差の拡張不確かさ(信頼の 95%水準)の 2 つの項目によって定量的にあらわす<sup>8)</sup>。参加機関の値を  $X_{lab}$ 、参照値を  $X_{ref}$  とし、それぞれの拡張不確かさを、 $U_{lab}$  と  $U_{ref}$  とすると、同等性を示す  $En$  値は次の式で与えられる。

$$En = \frac{X_{lab} - X_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (1)$$

この  $En$  値が、 $|En| < 0.5$  であると良で、 $|En| > 1$  であると問題ありとなる。

現在、RoHS 指令への対応で話題になっている標準物質などにおいては、SI 単位系に直接関係づけることが困難であることもある。それでもなお、基幹比較参照値とそれからの偏差は SI 単位系のよい指標である。この理由のために、これらの値は、参加研究所の標準間の同等性を示すために使われる。つまり、母集団の平均値を参照値とすることもある。

### 3.4 承認

校正するための標準機器が開発され、その不確かさが算出されると、その機器の仕様を、ISO/IEC17025 に従って、マニュアルの作成が必要になる。このマニュアルは、大きく分けると、1) 技術マニュアル、2) 校正マニュアル(不確かさを含む)、3) 校正用機器管理マニュアルとなる。これらからわかるように、技術的な事項以外に、管理的な事項が多い。このマニュアルは、校正システムの変更のたびに些細なことでも訂正が求められるとともに、教

育・訓練の持続も求められる。

このマニュアルや国際比較の結果を根拠にして、当該分野の技術者・研究者および認定機関によって評価を受ける必要がある。各国の標準研究機関においては、外国から専門家を招聘し、審査を受けることになる。この審査は通常英語で行われるため、深い意味を伝えることが困難であったが、今後、定期的に審査を受ける場合は、共通の理解が得られるので、かえって良い方向である。このような審査に合格すると、前述の BIPM ホームページに掲載され、貿易などにおける機器の認証に利用できる。輸入する国では、安心して機器を受け入れることができる。また、世界的な統一基準となり、機器の信頼度を評価できる。

これらのことは、JCSS(計量法校正事業者登録制度)においても等価である。計量法においては、特定標準器(SI 単位とは幾分異なる)が官報に告示され、これらに連鎖することが求められる。したがって、幾分厳しい法律であるといえるが、その運用での広がりも見えてきている。

## 4. 今後の方向

### 4.1 光コムの利用

2005 年におけるジョン・ホルのノーベル賞の受賞はメートル条約においてもインパクトが大きかった。なぜなら、フェムト秒モードロックレーザーとフォトニクス結晶ファイバーとによって発生される光周波数コムは、コム間周波数の精度が  $10^{-15}$  を超えるようになり、可視光領域からマイクロ波領域に及ぶ広範囲で、精密な周波数群が実現できたからである。一方、前述の秒の定義を実現する原子泉によるクロックは、9 GHz の周波数領域であるので、高い精度を得るには一か月近くもかかり、現実的でないからである。このため、光の領域で定義するのが有効であることから、本シリーズで執筆されている光格子時計が実現されはじめており、再定義が予期される<sup>16)</sup>。

産業技術総合研究所では、光ファイバーモードロックレーザーを開発し、光周波数コム発生システムのコンパクト化・高品位化を実現した。この結果、長期にわたる連続測定も実証し、2009 年 7 月に JCSS における特定標準器(長さ)を、ヨウ素安定化 He-Ne レーザーから光周波数コム装置に変更した。この結果、安定化レーザーなどの波長の校正精度を、3 桁以上向上させることが可能になった。同研究所では、早くから光周波数コムを用いた光波距離計の開発に着手し、世界最高の精度(分解能と直線性)を実現している<sup>17)</sup>。今後、インクリメンタル CW レーザー干渉測長器に代わる、絶対測長型の光周波数コム干渉測長器などの開発が待たれる。

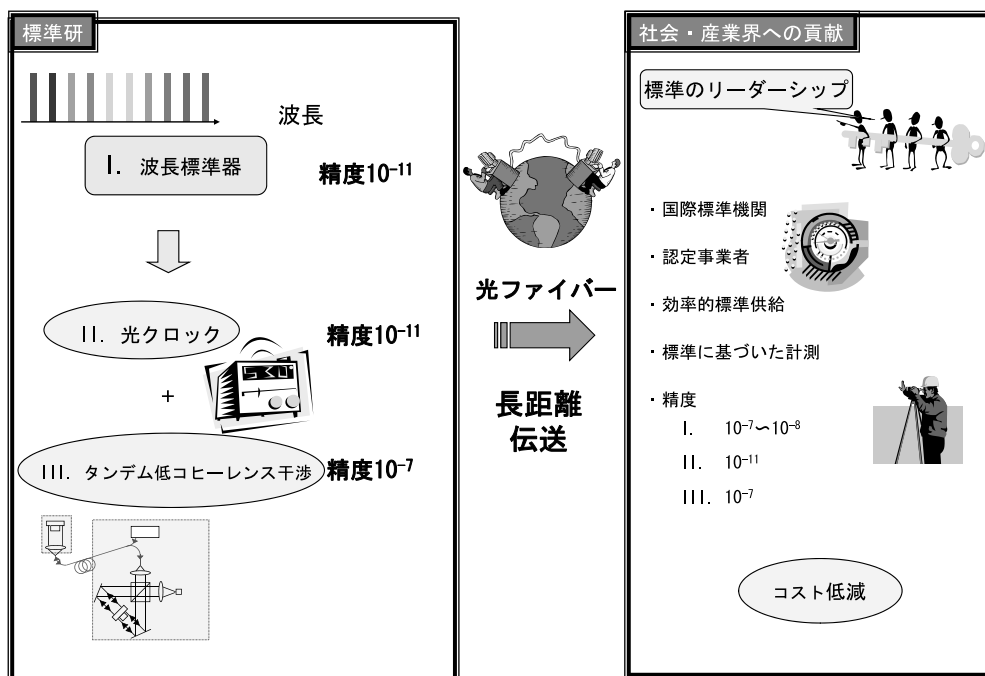


図9 光ファイバーによる遠隔校正のパラダイム。

## 4.2 遠隔校正 (e-trace) 技術

産業技術・科学技術において、ナノメートル領域の空間的位置決めは重要であり、多くの研究が行われてきたが、実用化は遅れている。これを実現するひとつには、スペクトル幅の広い光源を用いて得られる白色干渉を利用する方法がある<sup>18)</sup>。この方法は、低コヒーレンス干渉効果により、干渉縞の形成が微小空間に局在することを利用するものである。この干渉縞を端数まで測定することによって、ナノメートルの領域まで空間位置の決定を行うことができる。

21世紀において求められる技術は、よりグローバルに利用できる計測技術であり、測定精度だけでなく、コストも、また、測定効率も大きな課題となる。情報量の増大とともに、通信技術と同じように、電気から光へと大きな変遷が起こりつつある。テラビット通信に必要なフェムト秒パルスレーザーは、光増幅、圧縮などの技術の付加によって、紫外線から赤外線に及ぶ広いスペクトル領域の光を非線形光学効果によって発生させることが可能になった。また、前述のファイバーレーザーの第二高調波を、780 nmを含む可視光付近にもってこることが可能である。この結果、工場や事業所においてフェムト秒パルスレーザーを保有していなくても、光通信用の未使用回線からの光を利用することが可能である。図9は、その概要を示したものであり、低コヒーレンス干渉などの新しい計測法の開発とともに、低コストの光増幅器や非線形光学材料の開発が期待

される。これらの技術は、医療、農業などの分野へと広がることが予期できる。たとえば、過疎地などでは、本人や町医者が病気の状態を計測する画像（データ）を撮り、都市の巨大病院で解析した結果を本人たちに知らせることによって、遠隔診断の道が開かれる可能性がある。

以上述べたように、計測は7つの基本単位に基づいて行うことが重要であり、国際的にも各国の標準研究所を中心にして研究が進められている。学術的な分野において、計測により得られたデータの信頼性を確保するために、計量標準の活用が進んできている。また、これらの研究成果が社会で実際に利用されるためには、定義に関連する研究のほかに、定義を忠実に実現することと、どのように利用するか、つまり利用するための技術の研究も重要である。さらに、ユーザーが必要な不確かさで簡便に標準を利用することが不可欠である。今後、計測は、周波数を標準としての利用がキーになる技術であるといえる。このために、エレガントなトレーサビリティ体系を確立することが望まれる。

## 文 献

- 1) 松本弘一：“計量トレーサビリティで社会を支える遠隔校正技術”，応用物理，**76** (2007) 599605.
- 2) 松本弘一：“進展する長さ標準とその普及”，計量標準と計量管理，**53** (2006) 30-35.
- 3) トニー・フェダー（藤井賢一訳）：“キログラムの再定義をめぐ

- る実験を検証する”, **21** (2006) 41-44.
- 4) 池上 健: “時間・周波数”, 計測と制御, **40** (2001) 531-535.
  - 5) T. J. Quinn: “Practical realization of the definition of the meter (1997),” *Metrologia*, **36** (1999) 211-244.
  - 6) 美濃島薫, 洪 蜂雷, 稲場 肇, 大苗 敦: “光コム・シンセサイザー”, 応用物理, **76** (2007) 169-173.
  - 7) 田中健一: “計量標準のトレーサビリティの現状と計画”, 計測と制御, **40** (2001) 507-510.
  - 8) 松本弘一: “国家計量標準の同等性と国際比較”, **40** (2001) 494-497.
  - 9) 住本 守: “適合性評価関連 ISO の動きと校正ビジネスの関わりについて”, 計量標準と計量管理, **56** (2006) 9-12.
  - 10) 松本弘一: “高精度測距技術”, 光学, **23** (1994) 170-175.
  - 11) 松本弘一, 平井亜紀子: “ファイナセラミックスを用いた実用長さ標準器”, セラミックス, **40** (2005) 449-451.
  - 12) 大石忠尚, 松本弘一, 瀬田勝男, 藤間一郎: “高精度レーザー測距技術”, 応用物理, **60** (1991) 548-555.
  - 13) H. Matsumoto, K. Minoshima and S. Telada: “High-precision long-distance measurement using a frequency comb of a femto-second mode-locked laser,” *Proc. SPIE*, **5190** (2003) 308-315.
  - 14) Stephanie Bell (製品評価技術基盤機構 (NITE) 認定センター 訳): “不確かさの入門”. [http://www.iajapan.nite.go.jp/jcss/pdf/koukaib\\_f/ASG104-03.pdf](http://www.iajapan.nite.go.jp/jcss/pdf/koukaib_f/ASG104-03.pdf)
  - 15) 今井秀孝: “計量標準分野の国際動向”, 計測と制御, **40** (2001) 479-482.
  - 16) 香取秀俊: “18桁の精度を目指す次世代時間周波数計測—光格子時計・光周波数コム・光リンク”, *OPTORONICS*, **27** (2008) 167-177.
  - 17) 美濃島薫: “モード同期ファイバーレーザーの光コムを用いた精密長さ測定”, *O plus E*, **31** (2009) 1041-1046.
  - 18) 松本弘一: “光応用精密計測と長さ標準の発展” 応用物理, **69** (2000) 63-640.

(2009年10月26日受理)