長さ標準—歴史，現状，今後—*

Length Standards (History, Present, and Future)

松本弘一**

Hirokazu MATSUMOTO

Key words length standard, history, iodine-stabilized standard, optical frequency comb

1. はじめに

標準は、税金徴収などの重要な基準であり、社会・団体を形成する上での役割が大きい。一つの社会で閉じているときは、独自の標準を活用することで十分であった。このことを非常に感じたのは、1983年に米国コロラド州で1年間生活したときであった。米国は思っていたより広かった。町と町との距離が長く、道路の幅も広いので、マイルという単位が理にかなっている。必然的に、ガソリンの単位もガロンであることもうなずける。また、体格も大きいので、肉などの秤量には、ポンドの単位も合理的であると思った。しかしながら、米国からメキシコ国のゲートに自動車で向かったときに、道路の標識が、マイルからキロメートルの単位に替わっていくことに興味を覚えた。

このような生活習慣から生まれた基準は、現在も、スポーツ、建設、ネジなどの分野において使われているが、国境を超えて利用するためには、単位の統一は重要であることが理解できる。実際、米国において、ヤードとメートルとを取り違えて失敗した話は有名である。さらに、国のグローバル化が進み、貿易が盛んになると、なおさらである。特に、ものづくりにおいて、最終製品でなくて、そのための部品を共有するようになると、単位の統一は決定的である。そのための標準は不可欠であり、製品などの高度化とともに、標準の精度が重要となってくる。

ここでは、長さ標準の定義に関する歴史とその進化の必要性・結果を紹介し、最後に、光周波数コムに関して、現在の話題と進展、およびトレーサビリティ確立のための計測技術に関して紹介する。

2. 長さ標準の歴史

図1に長さの定義・標準とその特長を示す¹⁾。

2.1 メートル原器の時代 (1880年～)

18世紀における産業革命は、メートルの定義の協定に

大きな拍車をかけた。この中で、メートル原器が製作された。この製作には、英国のプラチナ産業・製造技術と仏国の加工技術との連携が有効であったといえる。ここで、金属には、多くの欠陥が存在するので、鍛造技術を生かして、何回も叩いて、欠陥を追い出すことに成功した。この結果、比較的欠陥が少ない「プラチナ・インジウム」の材料による「メートル原器」が製作され、日本にも配布された¹⁾。この原器は、支持したときの曲がり量を小さくするために、加工しにくいX断面になっている。そして、仏国の製作技術によって完成された。これらの結果、メートル原器が各国に配布され、現在の工業・産業・社会の基準としての重要な役割を担ってきた。メートル原器と標準尺とを縦、または横に並べ、別々の光学顕微鏡で、それぞれの0mの目盛線を、視野のレチクルに調整した後、1mの目盛線を観測し、視野内のスケールから標準尺の目盛線のずれを観測することによって校正が行われた。この比較器は、一般に、温度15℃の水の中で行われた。

2.2 クリプトンの時代 (1960年～)

1940年代に入ると、光の干渉技術が、マイケルソンらによって確立された。そして、干渉縞の形成も容易になり、目視であるが、干渉縞の数をカウントできるようになった。国際度量衡局 (BIPM) において、メートル原器と

図1 長さ標準の変遷と利用技術 (産総研資料)

*原稿受付 平成26年5月2日

**正会員 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 (東京都文京区本郷7-3-1)

干渉縞との比較を, 光源のコヒーレンス長をはるかに超えた 70 cm 程度の長さまで行った. しかしながら, 光電技術が不完全であったので, 目測で比較が行われた.

定義において, 最も重要な課題は, ランプの精度・安定性であり, その発光原子の同位体分離である. このために, 各国で手分けして, 光源の開発を行った. 主に, 水銀 (Hg), カドミウム (Cd), そしてクリプトン (Kr) などの同位体分離の研究が, 米国, 独国, 英国, 日本などにおいて精力的に行われた. この 3 原子の特長は個々に多くの特長がある.

この中で, 基準器として精度 (再現性) があるのが, クリプトンであり, また, 低温に冷却すると, コヒーレンス長が長くなることもあって, メートルの定義には, クリプトン原子からの放射光が用いられ, その精度は, 10^{-9} とされた. この結果, 人工物による定義から, 物理標準による定義へと大きな改良が行われた.

しかしながら, クリプトンのスペクトルは, 当時, 急に成長しているブロックゲージの測定に必要な多波長を発光していない. このために, 長さ測定は, 主に, 水銀ランプやカドミウムによる光源が用いられた. 標準尺に比べて, 測定装置が簡便であり, 特に, 現場における利用がブロックゲージは容易であり, 多くのユーザを抱えていたからである.

2.3 光速度 (CW レーザ) の時代 (1983 年～) よう素安定化の時代

1983 年に, 定義は「1 秒の 299792458 分の 1 の時間に光が真空中を伝わる工程の長さ」となった. この定義に向かっては, 原子・分子の吸収スペクトルを利用して CW レーザの安定化が精力的に行われ, 10^{-12} 近くに達する安定化レーザが開発された. 図 2 に示すように, 吸収線のピークの位置に安定化が行われた. この中で, それなりの精度があり, 再現性も高いことから, よう素分子安定化 He-Ne レーザが大きなインパクトを与えた. そして, クリプトン光源との干渉計比較が行われた. この場合の最終精度は, クリプトンの波長精度となる.

一方, このようなレーザは再現性がよいことから, 「秒の定義」との整合性を確かめる研究「光周波数を測定する研究」が精力的に行われた. この結果, 長さは秒と同一レベルの舞台に上った. このためには, よう素安定化レーザ (波長: 633 nm) はもちろんであるが, 波長 $3.39 \mu\text{m}$ のメタン分子安定化レーザ, 波長 $10 \mu\text{m}$ の CO_2 レーザが重要な光源となり, 波長数十～百 μm の波長領域安定化レーザ

を開発し, 従来の定義を超える精度まで比較が行われた. これらの結果, 長さ標準の定義として, 安定化 CW レーザを用いることを議論したが, 今後, さらによい安定化レーザが開発されることが考えられる他に, 天文学などの分野では, 定義として, 光速度を用いることが強く求められたことから, 現在の長さの定義となっている²⁾.

当時は, 悪夢のように見えたが, この結果, 新たな研究が始まり, 非線形光学の利用による干渉測長技術の開発が, 魅力的な分野となった. なぜなら, CW 可視レーザが主流になり, 非線形効果の利用も容易になったからである.

3. 光コムの時代 (2005 年～)

3.1 光コムの発生技術

フェムト秒モードロックレーザは色素溶液を媒体として大きく進展してきたが, 安定した発振には多くのノウハウが必要であり, 深い専門性が必要であった. また, 励起光源として用いるアルゴンイオンレーザは大電流と大量の冷却水が必要であったので, 熱や振動の不安定要因が介在していた. しかしながら, レーザ媒質としてタイサファイア (結晶) が利用できるようになり, また, 励起光源としても半導体レーザ励起型 YAG レーザの第二高調波が利用できるようになると, 熱の発生も少なくなった. この結果, フェムト秒モードロックレーザの発振の再現性や安定性が格段に向上した. その後, パルス幅も 10 フェムト秒に達するものも市販され, これに伴ってスペクトル (光コム) 幅もブロード化が実現された. 長さの国家標準として広く利用されているよう素安定化 He-Ne レーザなどの光周波数を, それらのレーザの再現精度まで測定できるようになった³⁾.

この時点でも, 終日の連続運転のためにはかなりの技術が必要であったので, 長期の連続測定が不可能であった. その後, 光コムの発生において全光ファイバシステムが実現された. この結果, 光コムの発生システムはかなりコンパクトになるので, 安定化も格段と容易になり, 産業技術総合研究所において 8 日間の光周波数測定の連続運転が実証された⁴⁾. この光コムのモード間周波数を制御するためには, リング共振器長を変化させる必要がある. 共振器を構成する光ファイバーの長さを電歪素子などによって伸縮させる. このコム光源を増幅するために, 先の高非線形光ファイバーと励起用半導体レーザが用いられる. この後, フォトニック結晶ファイバーに入力して, 光コムのスペクトル幅を 1 オクターブ以上に広げられる. さらに, 非線形結晶 PPLN を用いて第二高調波が発生されるので, 光コムのキャリアエンベロープの周波数 (位相) が評価される. このような, 光ファイバー光コム発生装置は発熱部品が少ないので, レーザ装置を周囲環境と遮蔽することによって安定度の改善で実現できる.

3.2 光コムの特長と周波数計測

光源に関しては, 長さ計測を目的として, コムのブロード性の開発ではなく, 長さ計測に必要なスペクトル幅に限定した. この結果, 全光ファイバー型の実用的な長さ用光

図2 光速度による定義とCW安定化レーザ

図3 光周波数コムの概要 $E(t)$: 電場, $\Delta\phi$: スリップ位相, f_0 : オフセット周波数, f_r : 繰り返し周波数

コムレーザを開発でき, 簡便に使えるようになった. しかしながら, 光コムのスペクトル幅はあまり広くないので, 図3に示すキャリアエンベロップオフセット周波数 f_0 の評価をすることができないので, 工夫が必要である⁵⁾.

光コムは時間領域においてパルス間隔が非常に安定した超短パルス列である. このパルス列をフーリエ変換した周波数領域においては, 多数の安定な光周波数群となっている. この光周波数群が櫛の歯のように離散スペクトル構造を示すため, 光コムと呼ばれている. そして, これらの櫛のスペクトル幅は非常に狭く, コヒーレンス長は非常に長い. また, 櫛の歯同士間の周波数間隔を繰り返し周波数 f_r と呼んでいる. この f_r は超短パルス列のパルス間隔 t_r の逆数である. この周波数間隔は正確で, 10^{-17} 以上の安定性も可能であることが確認されている. このように, 光コムは, 今までにない多くの可能性を秘めたレーザであるといえる. この光コムを用いると, 光の絶対周波数を, 10^{-17} 以上の精度で測定できる可能性があるので, 図4に示すように, 2009年7月に産業技術総合研究所は計量法の長さ特定標準器を, 「よう素安定化 He-Ne レーザ」から「光周波数コム」(光コム)に変更した⁶⁾. この変更は世界でも初めてのことである.

4. 今後の展開

4.1 時間的コヒーレンス干渉

図5は, 光路差の大きなマイケルソン干渉計において, ある時刻での光コムの時間的振る舞いを示したものである. 光コムは, そのパルス幅 (10 fs) に応じて, 時間的に狭い空間に局在しており, これらが光速で伝搬している⁷⁾. このために, 光コムが重なり合うのは, 干渉計の光路差がパルス間隔 (t_r) の伝搬距離の整数倍の場合である. そして, 干渉計の短い腕 (L_1) のパルス列の光は, それぞれ長い腕 (L_2) のパルス列の光と干渉する. この干渉縞は低コヒーレンス干渉と等価な干渉縞が形成される. したがって, 光コムのスペクトル幅が数十 nm あれば, 低コヒーレンス干渉縞のエンベロップと同じようにピークを精密に測定すれば, 空間位置決めをナノメートルオーダーの分解能で計測することが可能である. この場合,

図4 産総研・経済産業省が決めた特定標準器³⁾

図5 光コムの時間的コヒーレンス干渉とエタロンによる繰り返し周波数の高速化

光コムのコヒーレンシーから, パルス列の中で, 非常に離れたパルス間でも干渉することが可能であるので, 長い距離における精密な位置決めへの応用も可能である. この場合, 干渉縞パターンを得るために, 電歪素子などによって走査することが必要である.

4.2 絶対位置・長さ測定

長光路での干渉を実現するためには, 大気ゆらぎや機械的振動などの影響 (パワースペクトラムは, 大体, 数 kHz 以下) を小さくすることが重要である. ここで開発したのは, 音響光学変調器を用いたヘテロダイン干渉法である. 光コムの繰り返し周波数 f_r が 100 MHz の場合, 音響光学変調器によって光コムを 100.1 MHz だけシフトさせ, 測定光路の光ビームと干渉させると, 100 kHz のヘテロダイン干渉を実現でき, 位相敏感検出器 (ロックイン増幅器) の利用によって SN 比のよい信号を形成できる. さらに, 干渉計の光路を光ファイバー化し, コンパクトにすることによって, 現場においても利用できるようになる. この信号のピークの位置を利用して, 空間位置決めを精密に行うことができる⁸⁾.

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では, 次世代高輝度放射光の発生のための加速器を製作するために, 数百 m の距離を精密に測定することが大きな課題である. このため, KEK の現在のビームラインの通路 (一般廊下) において, 403 m までの距離で実証実験を行った. この実験結果における空間位置の再現性は約 $6 \mu\text{m}$ より十分小さかった. 相対精度としては 1.5×10^{-8} であり, これは光周波数コムでしか実現できない精度である. 空気ゆらぎの影響を考慮すると, 本方法の精度は少なくとも $2 \mu\text{m}$ (相対精度; 5×10^{-9} 以下) より小さいと考えられる⁹⁾. ここで,

光コムのパワーは約 12 mW であり, パルス幅は約 150 fs であった. また, 光コムの繰り返し周波数は, 100 MHz であったので, 空間的には, 1.5 m 間隔ごとの干渉縞の形成となる.

4.3 長さの標準器

本技術を産業や工業の分野にも応用するには, 約 1.5 m ごとの干渉では使いにくいので, まず, $f_r=100$ MHz の繰り返し周波数を $f_r=5$ GHz の繰り返し周波数に改良するために, 従来のバルク型ファブリー・ペロー・エタロンでなくて, 光ファイバーを共振器とするファブリー・ペロー・エタロンを新しく開発した. したがって, このエタロンは, 通常の FC/PC コネクターと同様に装着でき, そのアラインメントが不要である上に, 対環境特性も格段に向上する特長がある. この結果, 時間的コヒーレンス干渉の空間での繰り返しは, 30 mm ごとになり, 空間的分解能が格段に改良される. そして, 5 GHz の繰り返し周波数の精度も, 元の精度と同じの 10^{-11} であった. したがって, 産業計測や工業計測のほとんどに対応できると考えられる. 実際の応用としては, ものづくりに必要なブロックゲージなどの測定を $0.06 \mu\text{m}$ の精度で実現できた¹⁰⁾. さらに, 三次元座標測定機 (CMM) の標準器として, 長さ用リニアエンコーダーなどを用いるのではなく, 光コムを直接利用することも予想される (アッペの条件).

図に示すように, CMM のプローブとして, 屈折率が 2 のガラス球で製作すると, 空間位置の精密計測が可能になり, アッペの条件を満足させることができるので, CMM の長さ標準器として用いることができる. この結果, CMM の剛性が悪くても, CMM の精密化を実現できる可能性がある.

4.4 産業計測機

光コムの時間的コヒーレンス干渉を利用する方法は, 利用法が簡便であり, また秒の定義 (周波数) ヘトレーサブルにすることが, 容易である. なぜなら, 周波数は, GPS による遠隔校正や光ファイバーによる伝送が容易であるからである. さらに, その校正精度も 10^{-12} に達しているので, 長さのトレーサビリティとして十分である.

したがって, 産業計測に応用することはメリットが高いといえる. 特に, 光コムによる粗面物体の計測では, 図 6 に示す干渉計によって表面粗さ $Ra=1.6 \mu\text{m}$ の物体からの反射光を 9 m 離れた場所からも, 高い SN 比の信号で検出できた. また, 物体を 45° だけ傾けても測定が可能であった¹¹⁾. 将来, 光パルス性を利用した粗面物体のリモート計測や運動物体の計測も実現できる可能性がある.

5. まとめと期待

以上記述したように, 光周波数コムの進展は著しく, その応用性もかなり発展してきている. この技術が社会・産業に受け入れられるには, まだ, 利便性, コストなどの議論が必要であるが, 今後, メートル条約における単位系の基幹技術となることが明白であるので, 当該分野の技術開

図 6 光コムによる非接触計測の期待

発を世界に先駆けて民間レベルで実用装置を開発する必要がある. わが国だけが, そのキーになる技術やノウハウを有しているので, ここ数年が大きなチャンスといえる.

さらに, 2019 年の国際度量衡総会に向けて, 国際単位系の改定が議論されはじめていますが, この改定に寄与するのが, 光コムや光格子時計であることが予想される.

参考文献

- 1) 産業技術総合研究所計測標準総合センターのホームページ, <http://www.nmij.jp/library/>
- 2) 松本弘一: 長さ標準の現状と課題, 精密工学会誌, **66** (2000) 1671-1674.
- 3) Th. Udem, R. Holzwarth and T.W. Hänsch: Optical Frequency Metrology, Nature, **416** (2002) 233-237.
- 4) H. Inaba, Y. Daimon, F.-L. Hong, A. Onae, K. Minoshima, T.R. Shibli, H. Matsumoto, M. Hirano, T. Okuno, M. Onishi and M. Nakazawa: Long-term Measurement of Optical Frequencies Using Simple, Robust, and Low-noise Fiber Based Frequency Comb, Opt. Exp., **14** (2006) 5223-5231.
- 5) 松本弘一: 光周波数コム計測技術の進展と期待, OPTRONICS, No. 387 (2014) 62-67.
- 6) 稲場肇, 大苗敦, 中島善晶, 洪鋒雷: 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** (2009) 2-8.
- 7) Y. Yamaoka, K. Minoshima and H. Matsumoto: Direct Measurement of the Group Refractive Index of Air with Interferometry between Adjacent Femtosecond Pulses, Appl. Opt., **41** (2002) 4318-4324.
- 8) X. Wang, S. Takahashi, K. Takamasu and H. Matsumoto: Opt. Express, **20**, 2725 (2012).
- 9) H. Matsumoto, X. Wang, K. Takamasu and T. Aoto: Absolute Measurement of Baselines up to 403 m Using Heterodyne Temporal Coherence Interferometer with Optical Frequency Comb, Appl. Phys. Express, **5** (2012) 046601-046603.
- 10) N. Chanthawong, S. Takahashi, K. Takamasu and H. Matsumoto: High Accuracy Calibration of CMM Using Temporal-coherence Fiber Interferometer with Fast-repetition Comb Laser, Proc. ASPEN2013, (2013).
- 11) 松本弘一: 光コムによる超精密非接触計測, 2013 年精密工学会春季大会シンポジウム資料集, 東京工業大学, (2013) 25-28.

松本弘一

1976 年東京大学精密機械工学博士課程修了, 同時に工学博士取得. 1976 年より工業技術院計量研究所および 2001 年より産業技術総合研究所に組織変更 (長さ関連量の光計測技術). 2008 年より東京大学大学院 (光コム計測技術), 2013 年より (株) 東京精密社外取締役.