

三次元幾何標準の動向

高辻 利之・土井 琢磨・三隅伊知子・大澤 尊光・黒澤 富蔵

Dimensional Standard

Toshiyuki TAKATSUJI, Takuma DOI, Ichiko MISUMI, Sonko OSAWA and Tomizo KUROSAWA

Dimensional standards are primitive and therefore have been used in many fields for a long time. Recently requirements of ultra-high-precision measurement of dimensional quantities are raised for example in semiconductor industry. In this paper, recent development of dimensional standards in National Metrology Institute of Japan (NMIJ), such as length, step height, micro scale, and flatness, are reviewed.

Key words: dimensional standard, step height, micro scale, flatness, interferometry, atomic force microscope

三次元幾何標準とは、別の言い方をすれば長さに関連する量の標準である。現在のメートルの定義は、「299 792 458 分の1秒間に真空中を光が進む行程の長さ」であり、長さ関連量を突き詰めると光そのものに行き着くことになる。歴史的にみてもマイケルソンの実験から始まって現代のレーザー干渉計に至るまで、長さの測定には必ずと言ってよいほど光が使われてきた。

幾何学量には非常に多くの種類があり、ここではそのすべてを取り上げることはできないが、光学的手法を使うものを中心に、独立行政法人産業技術総合研究所計量標準総合センター（NMIJ/AIST）で近年国家標準の整備がなされつつあるものや、急速な展開をみせているものを中心で解説する。

1. 波長の標準

長さの定義は上に記したとおりであるが、このままでは実際の使用に不便であるため、実用的には波長約 633 nm の He-Ne レーザーなど国際度量衡委員会により勧告されている何種類かのレーザーの波長（周波数）が使われている¹⁾。光の周波数は非常に高いため、市販の装置で周波数を

測定することは不可能である。そのため、これまでには、その測定に周波数チェーンとよばれる大掛かりな装置を使う必要があった。ところが、近年開発されたフォトニック結晶ファイバーと短パルスレーザーをうまく利用することにより、デスクトップサイズの装置で簡単に測定することが可能になった²⁾。今後、光通信などへの大きな貢献が期待できる。

光の周波数がわかると真空中での波長は簡単に計算できるが、空気中では光の波長は空気の屈折率によって変化する。したがって、実際の長さ測定を行う際には、空気の屈折率を知る必要がある。そのためには、屈折率計を使うか、あるいは温度、湿度、気圧、二酸化炭素濃度から空気の屈折率を計算する必要がある。後者の計算式として Edlen の式³⁾が有名であるが、より高精度な測定が必要な際には Ciddor の式⁴⁾が使われることが多い。

2. 長さの測定とその校正法

2.1 ブロックゲージ

空気中の光の波長がわかると、一次元の長さ、つまり寸法の測定は光干渉により行える。光干渉による長さの測

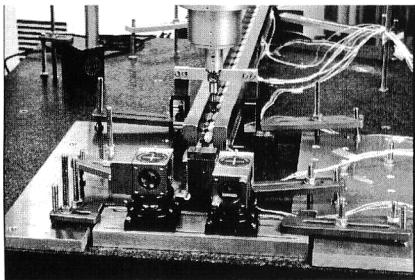


図1 ステップゲージとその校正。

定法は、合致法と計数法に分類することができる。

合致法により測定する代表的なものは、ブロックゲージである。ブロックゲージは断面が通常 $35\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ の長方形をした四角柱で、いろいろな材質・長さのものが用意されている。機械加工における標準として、莫大な数が現場で使用されている。ブロックゲージの長さの校正に当たっては、まずオプティカルフラットとブロックゲージをリングングとよばれる現象を使って、互いに密着させる。それをマイケルソン干渉計の一方の腕に置いて観察すると、オプティカルフラットとブロックゲージのそれぞれの表面にはほぼ平行な干渉縞が観察できる。それぞれの干渉縞は互いに位相がずれており、そのずれを δ とすると、ブロックゲージの長さ L は

$$L = \frac{\lambda}{2} \times (N + \delta)$$

と表すことができる。 N は整数、 λ は使用する光の空気中の波長である。

測定量は δ であり、 λ は既知であるので、 N がわかればブロックゲージの長さ L がわかる。ここで、1つの波長の光を用いている限り N の値は未知であるが、波長の異なる複数の光を用いて測定を行うと、それぞれの測定結果が互いに整合する N の値を決定することができる。この方法が合致法とよばれている。

従来、光源として1つの水銀ランプを使い、複数の干渉フィルターを使用して、異なる波長をつくり出していた。近年、ブロックゲージの測定に必要な安定度をもつレーザーが手軽に使用できるようになってきたため、3種類のレーザーを使用したブロックゲージ校正装置も使われている⁵⁾。

2.2 ステップゲージ⁶⁾

計数法を使って値付けをするゲージの代表的なものにステップゲージがある。形状の異なるステップゲージが何種類か市販されているが、図1に示すものはシリンダー型をしたセラミックがほぼ等間隔に鉄の棒に埋め込まれているものである。同じ長さのブロックゲージを多数リングング

によりつなげたものもある。測定面であるシリンダーやブロックゲージの間隔はほぼ同じになるようにつくられているが、完全には同じではない。そこで、測定面の間隔を正確に校正する必要がある。値のわかったステップゲージを三次元測定機や工作機械を使って測定すると、それらの装置の誤差を評価することができる。

ステップゲージは、測定面が一直線上に多数並んでいるため、ゲージの端から測定面を観察することができない。そこで接触式のプローブを測定面に接触させ、そのときのプローブの位置を測定することにより、ステップゲージの測定面の間隔を知ることができる。

ステップゲージ校正装置では図1に示すように、マイケルソン干渉計の1本の腕である物体光を反射する鏡（物体鏡）が固定され、もう一方の腕である参照光を反射する鏡（参照鏡）と偏光ビームスプリッター（PBS）はステップゲージと一緒にテーブルの上に載っているので、参照鏡と偏光ビームスプリッターの移動距離つまりテーブルの移動距離を測定することによりステップゲージの校正ができる。ステージおよび接触式プローブには、三次元測定機を利用している。三次元測定機とレーザー干渉計を組み合わせたこのような装置は interferometric coordinate measuring machine とよばれており、適切な日本語訳がないので干渉式三次元測定機とよんでいる。

この光学配置では、物体鏡に物体光が4回当たる。つまり、4パスの干渉計が構成されている。それぞれの照射位置は、プローブの先端に対して、左上、左下、右上、右下の4点となっており、4点の重心がプローブの先端と一致する。したがって、三次元測定機の機械的誤差によりプローブの移動軸がピッキング、ヨーイング、ローリングなどの望ましくない運動を起こしても、その重心位置を測定している限りはこれらの運動誤差は自動的にキャンセルされる。また、プローブの先端が実質的な光軸上に存在することになるので、測定対象が測定軸上に存在するときに誤差がもっとも小さくなるという計測工学の基本であるアベの原理を満足しており、高精度な測定が可能である。

2.3 段 差

近年の半導体産業分野におけるパターンの高集積化、微細化の進展により、表面の微細形状や粗さの測定の需要が大きくなっている。それらは光、触針、各種走査プローブ顕微鏡などの手法を使って測定されるが、その測定はナノメートルの分解能でかつ、長さ標準にトレーサブルであることが求められている。

例えは、表面微細形状測定機の高さスケールを校正するために、微小段差標準片 ($<0.2\text{ }\mu\text{m}$) が求められている。

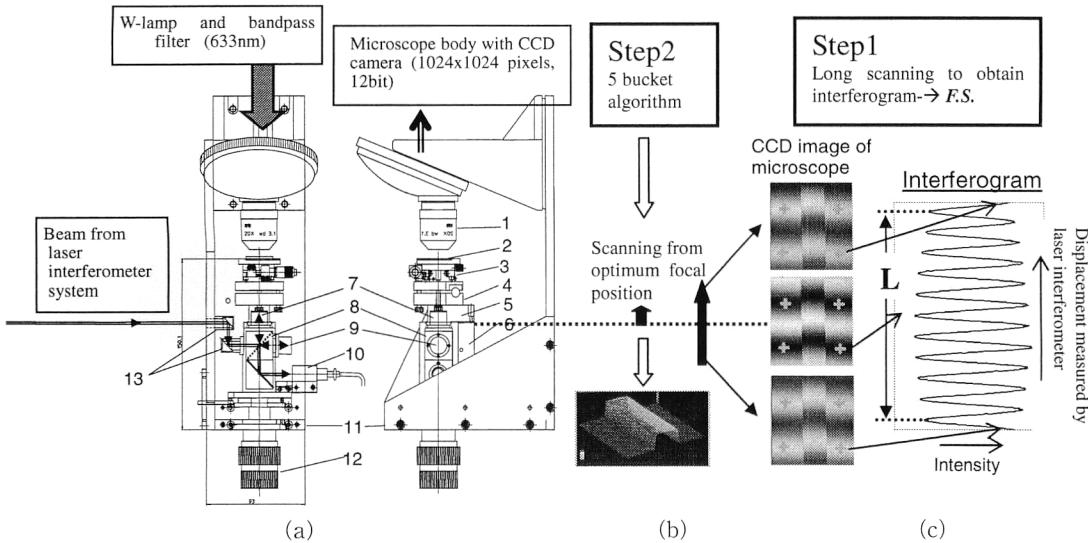


図2 長さ標準にトレーサブルな顕微干渉計。1:ミラウ型干渉対物レンズ (20 x), 2:試料, 3:Xステージ, 4:X-Yチルトステージ, 5:PZT素子, 6:移動コーナーキューブ, 7:偏光ビームスプリッター, 8:固定コーナーキューブ, 9:測長器の受光部, 10:つり下げ型ステージ, 11:焦点合わせ用作動マイクロメーター, 12:焦点合わせ用作動マイクロメーター, 13:ビームベンダー。

顕微干渉計（二光束干渉顕微鏡）を使うと非接触、非破壊で試料の三次元形状を短時間で求めることができ、縞走査法を導入することにより、その高さをナノメートル以下の分解能で測定することができる。しかしながら、試料をレンズで集光して照明するために引き起こされる斜入射効果によって、測定の基本スケールとなる干渉縞間隔は光源の半波長よりも大きくなり、その補正が必要となる⁷⁾。

NMIJ/AISTでは、干渉縞間隔を実用上の長さ標準であるレーザーで校正した直後、縞走査法によって段差試料の三次元形状を求め段差値を校正する「長さ標準にトレーサブルな顕微干渉計」を開発した。この測定装置と測定スキームの概要を図2に示す⁸⁾。まず、ステップ1として、試料を顕微鏡の合焦点位置から図2(a)に6で示すPZT素子により5縞程度下げる10縞程度上に走査する。CCDカメラで取り込んだ干渉縞画像の1ピクセルに注目すると、図2(c)に示すように走査量に対する干渉強度の変化（インターフェログラム）が得られる。また、その走査量は図2(a)の7, 8, 9で構成されるマイケルソン干渉計を使ってレーザー測長器で測定される。紙面の関係で詳細は省略するが、得られたインターフェログラムの位相とレーザー測長器で測定された走査量を比較することによって合焦点位置での干渉縞間隔が求められる。

ステップ2として、合焦点位置において縞走査法により試料の三次元形状を求め、校正された干渉縞間隔を基準として試料の段差値が校正される。本装置の特徴として、干渉縞間隔は10縞程度から決定されるので、干渉縞間隔決定の多くの不確かさ要因を小さくできること、測定スケ

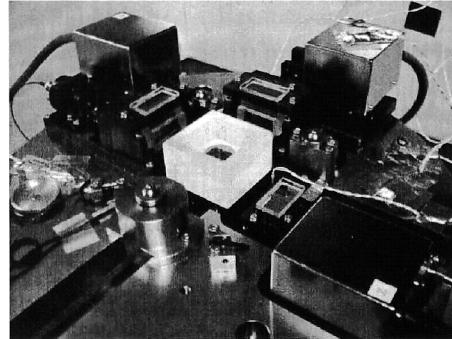


図3 XYZ軸レーザー干渉計搭載型原子間力顕微鏡（測長AFM）のレーザー干渉計部。中央の箱が三面移動鏡で内部に測定試料を導入する。

ルの基準はレーザー測長器であり、顕微干渉計の光源波長には依存しないこと。つり下げ型ステージを採用し防震対策を行うとともに、各光学系がコンパクトにつくられていること、などが挙げられる。これらの特徴により、本装置の表面形状測定分解能と繰り返し再現性はサブナノメートル以下を達成しており、試料表面の光学定数が均一であれば⁹⁾、段差値90 nmの試料を測定した際の拡張不確かさ($k=2$)は0.57 nmと非常に小さなものとなる。この校正性能は、微小段差標準片に求められる産業界の要求を満たしているものと考える。

2.4 マイクロスケール

マイクロスケールは段差標準片と同様に半導体製造において特に重要であり、その校正はナノメートルの分解能でかつトレーサブルに行う必要がある。

NMIJ/AISTでは、XYZ軸にレーザー干渉計を搭載し

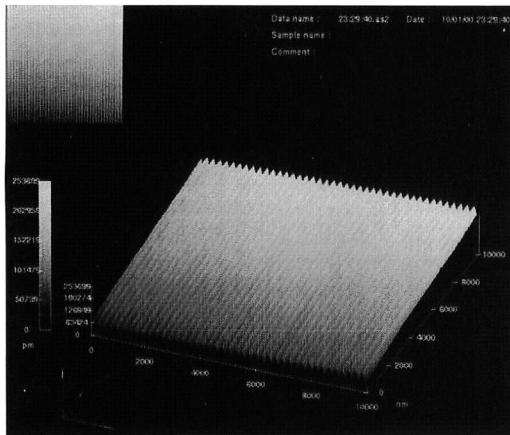


図4 測長AFMを用いて得られたマイクロスケール像。

た原子間力顕微鏡（測長AFM）の開発を行ってきた（図3参照）。このレーザー干渉計は4パスのホモダイン干渉計で、光学的増倍係数(4)と電気的増倍係数(2048)から分解能約0.04 nmを実現している。光源は周波数安定化He-Neレーザー（波長633 nm）で、ヨウ素安定化He-Neレーザーで校正を行っている。ステージ走査範囲は17.5 μm(X)×17.5 μm(Y)×2.5 μm(Z)である。この測長AFMを用いて、市販のAFMや走査型電子顕微鏡(SEM)の校正時に用いられるマイクロスケールの校正を行っている。

測長AFMで得られる断面ラインプロファイル（図4参照）に対し、大気の屈折率補正、試料の傾き補正を行った後、各ピッチの測定値を算定し、測定の不確かさの評価を行っている。屈折率補正、アライメント誤差、ピッチ測定のばらつき、測定の繰り返し性、干渉計の周期誤差など、13項目にわたる不確かさ要因について評価したところ、最大の不確かさ要因はレーザー干渉計の周期誤差で0.115 nmであった。これらの各要因の標準不確かさについて積算したところ、呼称値240 nmピッチのマイクロスケールに対して、測定値239.98 nm、拡張不確かさ($k=2$)0.280 nmが得られた。この拡張不確かさの値はサブナノメートルオーダーであり、ナノメートルオーダーの寸法測定への要求を十分に満たしている。

2.5 長さ測定の精度

長さの定義は時間をもとに定められており、その測定精度は15桁にも達する。また、実用的な長さの標準器であるヨウ素安定化He-Neレーザーの安定度は13桁のレベルである。

ところが、実際の長さ測定においては多くの誤差要因が存在し、7桁の精度(1 mの測定長さに対して0.1 μm)を実現するのさえかなり困難である。レーザー干渉計さえ使えば簡単に高精度な測定ができると考えられがちである

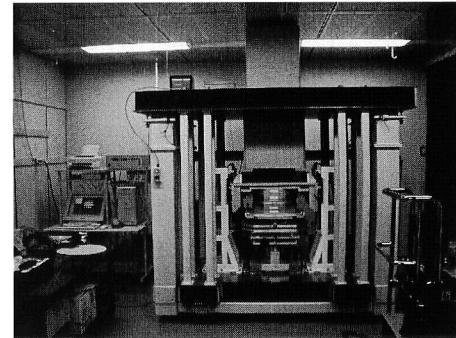


図5 NMIJ/AISTが開発した平面度干渉計。

が、マイクロメートルオーダーの測定は思ったほど簡単ではない。

以下に、いくつか代表的な誤差要因を述べる。これらの誤差要因がそのまま今後の研究課題であるともいえる。

- ・被測定物の熱膨張：被測定物は温度により伸縮する。長さ測定における標準温度は20°Cと決められているため、20°Cに補正した長さを測定値とする。そのためには被測定物の温度と熱膨張係数を正確に知る必要がある。温度の測定も容易ではないが、それ以上に熱膨張係数の測定は困難である。熱膨張係数は物質によってある程度決まっているが、その物質の製造ロットごとに、あるいは同一ロットでも使う部位によって同じではなく、理想的には被測定物そのものの熱膨張係数を個別に測定する必要があるが、それは非常に困難である。

- ・レーザー波長：先に述べたCiddorの式により補正するが、空気の温度は一定にすることが非常に困難である。また、その温度測定も、使用する白金測温抵抗体による自己発熱の影響により、正確に測ることは容易ではない。

- ・レーザー干渉計の周期誤差：高精度測定では、計数法による明暗のカウントだけでなく、干渉縞の位相まで読み取る必要がある。ディテクターの特性や感度誤差により測定値には非線形誤差（周期誤差）が乗っており、その補正を行わなければ超高精度な測定ができない。そのための方法はいくつも発表されているが、決定的な手法はまだ確立されていない。

今後ともより高精度な測定を目指して、これらの誤差要因を地道に低減させる必要がある。

3. 幾何偏差

幾何偏差には平面度、真直度、真円度など数多くの種類があるが、ここでは光学的測定でよく利用される平面度について解説する。

平面度は昔から機械産業において重要な幾何学量のひとつであったが、近年、シリコンウェハーやハードディスク基板などの平面度が半導体産業における性能や歩留まりを左右するため、より重要になってきている。また、科学の面においても、重力波検出用干渉計¹⁰⁾やX線干渉計などこれまでにない超高精度な光学部品が必要になっている。

平面度の測定原理はいくつも提案されているが、現在の主流はフィゾー干渉計による方法である。できる限り理想的につくられた参照平面と被測定物とでつくられるギャップの間隔を測定する。参照平面にも必ず理想平面からの偏差が存在するので、高精度測定が要求される場合には、なんらかの方法であらかじめ偏差を評価しておき、測定値から補正する必要がある。

参照平面に液体の表面を利用する試みは最近でも行われており¹¹⁾、例えはドイツでは国家標準として使用されているが、ごみによる表面の汚染、静電気・表面張力・地球の曲率・振動による表面の変形などの問題がある。

現在、ほとんどの装置ではガラス製のオプティカルフラットが参照平面として使用されている。こちらも偏差の評価が容易ではなく、保持方法や重力によるたわみの影響も補正する必要があるが、測定の安定性の点においては波面よりも優位である。

NMIJ/AISTでは近年、国家標準となるフィゾー型平面度干渉計の製作を続けてきた¹²⁾。できるだけシンプルな光学系を採用し、使用する部品にはできるだけ高品位なものを使用することにより、これまでにない高精度測定が可能になっている(図5参照)。

参照平面は、合成石英ガラスでできたオプティカルフラットで直径350 mm(装置の有効口径は310 mm)、厚さ100 mmである。同一形状のものを3枚製作し、それらを互いに比較する、いわゆる3枚合わせ法を使って絶対形状を評価している。絶対偏差は10 nm以下であり、さらにその偏差を補正することにより $\lambda/100$ 以下の不確かさでの測定が可能である。同等の性能の装置を有する外国の研究所と国際比較を実施し、その性能は確認済みである。

もう1つの平面度測定の方法として、ドイツ物理光学研究所(PTB)が提案している¹³⁾、オートコリメーターを使った方法を紹介する。オートコリメーターを水平に設置し、ペンタゴンプリズムで鉛直方向に光を折り曲げて、試料平面に照射する。プリズムを走査することにより試料表面の傾き曲線が測定できる。さらに、傾き曲線を積分することにより形状曲線を求める方法である。オートコリメーターを使う方法は昔から提案されているが、その原理を巧みに応用したものである。繰り返し0.1 nm、不確かさ1

nm以下という驚異的な値が得られている。

平面度は古典的な幾何学量のひとつであり $\lambda/20$ 程度の測定が行われていた時代が長く続いていたが、周辺技術の発展とともにナノメートルの世界に急速に近づいている。

幾何学量のほんの一部ではあるが、それらの標準と校正法について述べた。日本の得意なハイテクあるいは手作業による超高精度加工を支えているのは幾何学量計測である。また、ここで述べた段差やマイクロスケールの校正も半導体製造には欠かせない技術である。

世界的に幾何学量計測の重要性は皆が認識し始めており、標準をつかさどる最高機関である国際度量衡総会においても幾何学量計測の研究の重点化が勧告されている。

基本的に長さを測定するプリミティブな測定であり、測定精度の劇的な向上は長い間起こっていなかったが、近年、幾何学量計測の世界は新たな進展をみせている。これからさらなる飛躍が楽しみである。

文 献

- 1) T. J. Quinn: "International report—Practical realization of the definition of the metre (1997)," *Metrologia*, **36** (1999) 211–214.
- 2) 池上 健: "時間標準と周波数チェーン", *O plus E*, **22** (2000) 687–692.
- 3) B. Edlen: "The refractive index of air," *Metrologia*, **2** (1966) 71–80.
- 4) P. E. Ciddor: "Refractive index of air: New equations for the visible and near infrared," *Appl. Opt.*, **35** (1996) 1566–1573.
- 5) 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** (2002) 542–547.
- 6) 大澤尊光、高辻利之、黒澤富蔵: "ステップゲージ校正用干渉式三次元測定機の開発", 精密工学会誌, **68** (2002) 687–691.
- 7) K. Creath: "Calibration of numerical aperture effects in interferometric microscope objectives," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 3333–3338.
- 8) T. Doi and T. Kurosawa: "Accurate optical surface profilometer based on Mirau-type interferometric microscope," *Proc. of the Euspen 2001* (Turin, Italy, 2001) pp. 462–465.
- 9) T. Doi, K. Toyoda and Y. Tanimura: "Effects of phase changes on reflection and their wavelength dependence in optical profilometry," *Appl. Opt.*, **36** (1997) 7157–7161.
- 10) C. J. Walsh, A. J. Leistner, J. Seckold, B. F. Oreb and D. I. Farrant: "Fabrication and measurement of optics for the Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory," *Appl. Opt.*, **38** (1999) 2870–2879.
- 11) I. Powell and E. Goulet: "Absolute figure measurement with a liquid-flat reference," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 2579–2588.
- 12) T. Takatsuki, N. Ueki, K. Hibino, S. Osawa and T. Kurosawa: "Japanese Ultimate Flatness Interferometer (FUJI) and its preliminary experiment," *Proc. SPIE*, **4401** (2001) 83–90.
- 13) R. D. Geckeler and I. Weingärtner: "Sub-nm topography measurement by deflectometry: Flatness standard and wafer nanotopography," *Proc. SPIE*, **4479** (2002) 1–12.

(2002年10月2日受理)