

# 一次元グレーティングのピッチ校正とその不確かさ

三隅 伊知子\*, 権太 聡\*, 佐藤 理\*, 菅原 健太郎\*, 吉崎 和典\*

(平成19年2月7日受理)

## Pitch calibration methods of one dimensional gratings and their uncertainties

Ichiko MISUMI, Satoshi GONDA, Osamu SATO, Kentaro SUGAWARA, Kazunori YOSHIKAZI

### 1. はじめに

一次元グレーティング標準試料は、測長走査型電子顕微鏡 (CD-SEM) や原子間力顕微鏡 (AFM) などナノメートル計測装置の校正用試料の中で重要なものの一つである。各国の国家計量標準機関 (NMI) は、一次元グレーティングなどのナノメートル標準試料を長さの国家標準にトレーサブルに校正できる、レーザ干渉計搭載型の AFM の開発を行ってきた<sup>1)</sup>。

旧工業技術院計量研究所 (現独立行政法人産業技術総合研究所 (産総研)) は、1997-1999年、XYZ軸に超高分解能レーザ干渉計を搭載した原子間力顕微鏡 (測長原子間力顕微鏡, 測長AFM) を開発した<sup>2)</sup>。開発した測長AFM を用いて2000年に一次元グレーティングの予備国際比較 (CCL-S1, Nano4) に参加し、校正結果の国際的な同等性を得て<sup>3)</sup>、2001年より依頼試験の対応 (校正範囲200 nm - 8 μm) を開始した。また、2000年から2002年にかけて、産総研が幹事で光回折計、CD-SEMおよび測長AFMを用いた一次元グレーティングの国内持ち回り測定を行い、良好な結果を得ている<sup>4), 5)</sup>。2003年に品質システムを構築し、校正・測定能力 (CMC) 登録を行った<sup>3)</sup>。2001-2004年、産総研はXY軸に差動式レーザ干渉計、Z軸に超高分解能レーザ干渉計を搭載したAFM (差動式測長AFM) を開発し、開発したAFMを用いて50 - 100 nmのピッチを有するテスト試料の測定及び不確かさ評価を行った<sup>6)</sup>。この結果を設計に反映させ、2004-2005年、電子線描画法を用いた一次元グレーティング (面内方向スケール, ピッチ: 100, 60, 50 nm) の開発を行った<sup>7)</sup>。開発した一次元グレーティングを用いて2005-2006年、産総研が幹事となり、

ドイツ物理工学研究所 (PTB) との二国間比較 (APMRL-S2) を行い、校正結果の同等性を確認できた<sup>3)</sup>。この結果を受けて、依頼試験の校正範囲を50 nm - 8 μmに拡大した。2007年、新しい校正範囲でCMC登録を行う予定である。

本技術資料では、測長AFM及び差動式測長AFMを用いた一次元グレーティングのピッチ校正方法について述べる。2章に校正方法、3章に校正の不確かさ、4章に一次元グレーティングのピッチ校正のまとめと今後の課題を示す。

### 2. 校正方法

一次元グレーティングの校正は、測長AFM又は差動式測長AFMを使って行われる。図1に測長AFMのブロック図を示す。被測定物である一次元グレーティングを測長AFM又は差動式測長AFMのXYZ軸ステージユニットに固定された移動鏡兼試料ホルダーに設置する。測長AFM又は差動式測長AFMのカンチレバークローブ先端を一次元グレーティング表面付近に接近させ、XY平面内でステージを走査させる。カンチレバークローブ先端の変位を光で式で検出し、信号が一定になるようZ軸を制御する。XYZ軸に搭載されたレーザ干渉計で移動鏡の位置を測定する。XY軸ステージのサーボコントロールにXY軸の干渉計信号を用いる。XYZ軸干渉計信号より得られた一次元グレーティングのトポグラフィ像の傾き補正を行った後ピッチ値を得る。

この測定において、レーザ干渉計の光源周波数が長さの標準である、よう素安定化He-Neレーザの周波数に対してトレーサブルに校正されているため、一次元グレーティングの校正も長さの標準に対してトレーサブルな絶対測定が行える。図2に一次元グレーティングのピッチ校正業務の流れを示す。

\* 計測標準研究部門 長さ計測科

本論文は当所における校正証明書等の不確かさ算出における一般的な考え方を記述したものであり、個別の校正証明書等に記載される不確かさ評価とは必ずしも一致していません。

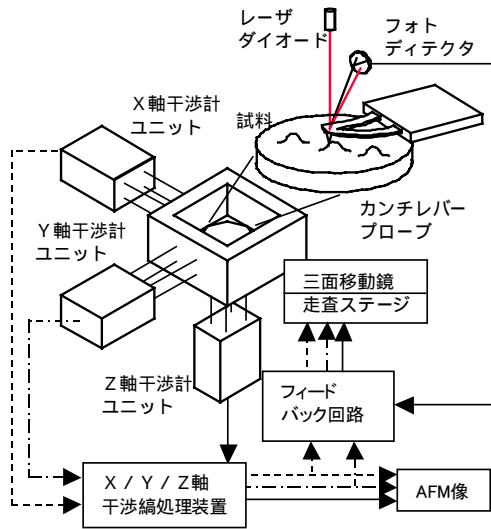


図1 測長原子間力顕微鏡のブロック図

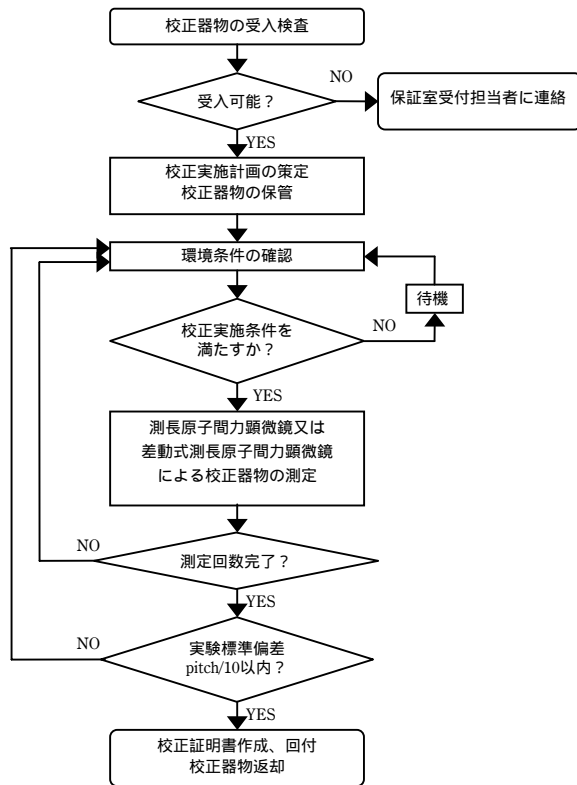


図2 一次元グレーティングのピッチ校正業務の流れ

### 3. 校正の不確かさ

測定の不確かさの推定は、「計測における不確かさの表現ガイド (GUM)」<sup>8)</sup>に則って行う。

校正におけるモデル式は、以下のように表される。

$$Y_i = Z_i \cdot L_u \cdot C_i \cdot C_s \cdot C_t \quad (1)$$

ここで

- $Y_i$ : 単一ピッチ測定値
- $Z_i$ : 干渉計カウンタUp/Downパルスの積算値
- $L_u$ : 1カウントあたりの長さ
- $C_i$ : 大気屈折率補正係数
- $C_s$ : 傾き補正項
- $C_t$ : 試料温度補正項

また、 $L_u$ ,  $C_s$ ,  $C_t$ は以下のように表される。

$$L_u = \lambda \cdot \left( \frac{1}{2M_{opt}} \cdot \frac{1}{M_{el}} \right) \quad (2)$$

$$C_s = \frac{1}{\cos \theta_i} \cdot \cos \varphi_i \quad (3)$$

$$C_t = 1 + \alpha_{Si} (T_i - 20) \quad (4)$$

ここで

- $\lambda$ : レーザ波長
- $M_{opt}$ : 光学的増倍係数(4)
- $M_{el}$ : 電氣的増倍係数(2048)
- $\theta_i$ : 試料の傾き角
- $\varphi_i$ : 試料の面内回転角
- $\alpha_{Si}$ : 試料の熱膨張係数
- $T_i$ : 試料温度

式(1)に式(2), (3), (4)を代入した数式モデルは式(5)のようになる。

$$Y_i = Z_i \cdot \lambda \cdot \left( \frac{1}{2M_{opt}} \cdot \frac{1}{M_{el}} \cdot C_i \right) \cdot \frac{1}{\cos \theta_i} \cdot \cos \varphi_i [1 + \alpha_{Si} (T_i - 20)] \quad (5)$$

#### 3.1 不確かさの要因

不確かさ要因は大きく分けて以下の5つに由来するものが挙げられる。さらにそれぞれ1~9の範囲の要因に分けられる。

- (1)レーザ干渉計 (9つ)
- (2)大気の屈折率補正 (1つ)
- (3)試料温度 (2つ)
- (4)ピッチ測定 (2つ)
- (5)傾き補正 (2つ)

各不確かさ要因について以下に記述する。

(1-1) レーザ光源の周波数ゆらぎに由来する不確かさ (Bタイプ)

様々にゲート時間を変更したときのアランバリエンスの最大値から求める。

(1-2) レーザ光源の周波数の経時変化に由来する不確か

さ (Bタイプ)

レーザ光源周波数の過去二年間における変化の最大値から求める。

(1-3) 干渉計のデッドパス変化 (温度変化の項) に由来する不確かさ (Bタイプ)

干渉計を設置しているベースプレートが温度変化により、熱膨張又は収縮する。その温度変化の最大値からデッドパスの変化を求める。

(1-4) 干渉計のデッドパス変化 (熱膨張係数の項) に由来する不確かさ (Bタイプ)

(1-3)同様、温度変化によって干渉計を設置しているベースプレートが熱膨張するが、ベースプレートの熱膨張係数の信頼性から不確かさを算定する。

(1-5) レーザ干渉計の分解能に由来する不確かさ (Bタイプ)

レーザ干渉計の分解能より小さな値を読み取ることはできない。レーザ干渉計の1フリンジ分の長さをレーザ干渉計の分解能に由来する不確かさとする。

(1-6) 干渉計の光学的アライメントによるコサイン誤差に由来する不確かさ (Bタイプ)

光学部品のアライメント時における誤差角度の最大値より求める。

(1-7) アッペ誤差に由来する不確かさ (Bタイプ)

アッペ誤差は以下の式から算定される。

$$\delta_{Ai} = \frac{d \cdot \tan \phi + D \cdot \left( \frac{1}{\cos \phi} - 1 \right)}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

$d$ はアッペオフセット、 $D$ は測定点と干渉計の移動鏡表面との距離、 $\phi$ はステージの回転角である。3で割っているのは矩形分布と仮定しているためである。

(1-8) ステージ回転による干渉計の光路長変化に由来する不確かさ (Bタイプ)

ステージ走査時のステージ回転から生じる干渉計の光路長変化に由来する不確かさは以下の式より求められる。

$$\delta_{OP} = \frac{4L \cdot \left( \frac{1}{\cos(\theta + 2\phi_p)} - \frac{1}{\cos \theta} \right)}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

$L$ は移動鏡方向と参照鏡方向とにレーザ光を分けるビームスプリッタと移動鏡表面との距離、 $\theta$ はアライメント誤差角、 $\phi_p$ は1ピッチ分走査したときの回転角である。

(1-9) 干渉計の周期誤差に由来する不確かさ (Bタイプ)

ステージに三角波駆動信号を与え、干渉計で得られた変位信号を多項式近似して残差から見積もる。

(2-1) 大気の屈折率補正に由来する不確かさ (Bタイプ)

大気の屈折率補正には気温成分、湿度成分、気圧成分

及び炭酸ガス濃度成分がある。過去一年間の環境変化より最大値、最小値を求め、矩形分布を仮定する。

(3-1) 試料の熱膨張による試料サイズ変化 (温度変化の項) に由来する不確かさ (Bタイプ)

試料の熱膨張により試料サイズが変化する。過去一年間における試料近傍の温度変化の最大値から矩形分布を仮定し不確かさを求める。

(3-2) 試料の熱膨張による試料サイズ変化 (熱膨張係数の項) に由来する不確かさ (Bタイプ)

試料の熱膨張により試料サイズが変化する。熱膨張係数の信頼性から不確かさを求める。シリコンの熱膨張係数  $2.60 \times 10^{-6}/K$  を中心、幅を  $5.20 \times 10^{-6}/K$  とする矩形分布を仮定する。

(4-1) ピッチ測定の一貫性に由来する不確かさ (Aタイプ)

ある測定箇所測定を繰り返し行ったときのその標準偏差をピッチ測定の一貫性に由来する不確かさとする。

(4-2) 試料の均一性に由来する不確かさ (Aタイプ)

全ての測定箇所におけるピッチ値の標準偏差を試料の均一性に由来する不確かさとする。場所によるピッチ値のばらつきを示す。

(5-1) 試料の傾きに由来する不確かさ (Aタイプ)

X方向に走査したときに得られる各ラインプロファイルの中心線の傾きを求め、その補正係数の最大値を試料の傾きに由来する不確かさとする。

(5-2) 試料の面内傾き角に由来する不確かさ (Aタイプ)

測長AFMに一次元グレーティングを設置するとき、一次元グレーティングのリブの方向が干渉計のY軸方向に平行になるようにするが、実際は完全に平行にすることは困難である。したがって、リブの方向とY軸方向とからなる傾き角を求め補正をする必要がある。傾き角の平均値より得られた補正係数を試料のXY面内傾き角に由来する不確かさとする。

### 3.2 測定の不確かさの算出

3.1節で見積もった各不確かさ要因の二乗和の平方根を合成標準不確かさとする。

$$u_c = \sqrt{\sum (u_i)^2} \quad (8)$$

また、拡張不確かさは

$$U = k \cdot u_c \quad (9)$$

とする。ここで  $k=2$  とし、この値を校正証明書に  $k$  の値とともに記入する。

以上により求められる不確かさの例を表1に示す。

表1 一次元グレーティング校正の不確かさの算出例 ( $L = 240 \text{ nm}$ の場合)

不確かさ要因	各要因の不確かさ	タイプ	分布	自由度	標準不確かさ
レーザ光源の周波数ゆらぎ, $f_i$	1.24E-01 MHz	B	R	200	1.21E-02 nm
レーザ光源の周波数の経時変化, $\lambda_i$	5.00E-05 nm	B	R	200	1.09E-05 nm
干渉計のデッドパス変化(温度変化の項), $\delta d_T$	3.20 K	B	R	12.5	1.17E-06 nm
干渉計のデッドパス変化(熱膨張係数の項), $\delta d_\alpha$	3.02E-05 /K	B	R	200	1.17E-06 nm
レーザ干渉計の分解能, $\delta l_{RE}$	3.86E-02 nm	B	R	200	2.23E-02 nm
干渉計の光学的アライメントによるコサイン誤差, $\delta l_{CO}$	2.83E-02 deg	B	R	200	1.69E-05 nm
アッペ誤差, $\delta l_{Ai}$	3.23E-05 arcsec/nm	B	R	200	1.09E-02 nm
ステージ回転による干渉計の光路長変化, $\delta l_{OP}$	3.23E-05 arcsec/nm	B	R	200	2.06E-03 nm
干渉計の周期誤差 $\delta l_{NL}$	0.20 nm	B	R	200	1.15E-01 nm
大気の屈折率補正					
気温変動成分, $n_t$	1.20 K	B	R	12.5	1.57E-04 nm
湿度変動成分, $n_a$	3.50 %	B	R	12.5	4.63E-06 nm
気圧変動成分, $n_p$	1.50 kPa	B	R	12.5	5.54E-04 nm
炭酸ガス濃度変動成分, $n_p$	50 PPM	B	R	12.5	9.84E-07 nm
試料の熱膨張(温度変化の項), $20-t_g$	3.20 K	B	R	12.5	1.15E-03 nm
試料の熱膨張(熱膨張係数の項), $\alpha$	2.60E-06 /K	B	R	200	1.15E-03 nm
測定 繰返し性, $s_i$	4.88E-02 nm	A		2	4.88E-02 nm
測定 試料の均一性, $s_p$	8.71E-02 nm	A		8	8.71E-02 nm
試料の傾き, $\delta l_{CV}$	4.83E-06	A		19	1.16E-03 nm
試料の面内傾き角, $\delta l_{CLi}$	4.75E-06	A		19	1.14E-03 nm

表2 一次元グレーティングピッチ校正の校正・測定能力

種類	校正範囲	校正・測定能力 ( $k=2$ )
一次元グレーティング	50 nm - 8 $\mu$ m	$U = k \cdot \sqrt{(1.6 \times 10^{-1})^2 + (9.9 \times 10^{-6} L)^2}$ $L$ : ピッチ値 [nm]

### 3.3 校正・測定能力

一次元グレーティングピッチ校正の校正・測定能力は、前章及び本章で規定した校正条件および校正方法により求める。校正・測定能力を表2に示す。

### 4. おわりに

前章で、測長AFM・差動式測長AFMを用いた一次元グレーティングのピッチ校正における不確かさ評価方法の詳細を示した。本評価方法は、2003年の品質システム構築当時に定めたものである。最近、各国NMIや産総研での不確かさ評価方法が進展し、測定量が平均ピッチであることを考慮すると(4-2) 試料の均一性に由来する不確かさや、(1-9) 干渉計の周期誤差に由来する不確かさは過大評価ではないか、との議論もある。研究レベルでは一部そのような議論を取り入れている場合もあるが<sup>6)</sup>、該当の箇所について今後検討し、不確かさ評価方法の見直しを随時行う予定である。

2004-2006年にかけて、産総研が幹事となり、開発した面内方向スケールを用いて国内持ち回り測定を行った<sup>9)</sup>。深紫外レーザー回折計・CD-SEMで得られた校正値は産総研が提供した参照値との整合性が確認できたが、市販のAFMで得られた校正値のうち一部参照値との整合性が確認できなかった。これは、校正済の標準試料を用いて市販のAFMを校正する場合の不確かさ評価方法に関する研究が十分に進んでいないためである。本技術資料で示した不確かさ評価方法は、測長AFMや差動式測長AFMなど、レーザー干渉計を搭載したAFMのみを想定したものである。今後は、市販のAFMを用いたピッチ測定における不確かさ評価方法に関する研究も行う必要がある。

### 参考文献

- 1) 三隅伊知子：表面の微小寸法・形状評価と標準設定への課題，計量研究所報告 50-1 (2001) 69-79.
- 2) S. Gonda, T. Doi, T. Kurosawa, and Y. Tanimura, N. Hisata, T. Yamagishi, H. Fujimoto, and H. Yukawa: Real-time, interferometrically measuring atomic force microscope for direct calibration of standards, Rev. Sci. Instrum., 70-8 (1999) 3362-3368.
- 3) 国際度量衡局(BIPM) <http://www.bipm.org/>
- 4) I. Misumi, S. Gonda, T. Kurosawa and K. Takamasu: Uncertainty in pitch measurements of one-dimensional grating standards using a nanometrological atomic force microscope, Meas. Sci. Technol. 14-4 (2003) 463-471.
- 5) I. Misumi, S. Gonda, T. Kurosawa, Y. Tanimura, N. Ochiai, J. Kitta, F. Kubota, M. Yamada, Y. Fujiwara, Y. Nakayama and K. Takamasu: Submicrometre-pitch intercomparison between optical diffraction, scanning electron microscope and atomic force microscope, Meas. Sci. Technol. 14-12 (2003) 2065-2074.
- 6) I. Misumi, S. Gonda, Q. Huang, T. Keem, T. Kurosawa, A. Fujii, N. Hisata, T. Yamagishi, H. Fujimoto, K. Enjoji, S. Aya and H. Sumitani: Sub-hundred nanometre pitch measurements using an AFM with differential laser interferometers for designing usable lateral scales, Meas. Sci. Technol. 16-10 (2005) 2080-2090.
- 7) I. Misumi, S. Gonda, O. Sato, K. Sugawara, K. Yoshizaki, T. Kurosawa and T. Takatsuji: Nanometric lateral scale development using an atomic force microscope with directly traceable laser interferometers, Meas. Sci. Technol. 17-7 (2006) 2041-2047.
- 8) 監修 飯塚幸三：ISO 国際文書 計測における不確かさの表現のガイド（日本規格協会，1996）。
- 9) I. Misumi, S. Gonda, O. Sato, M. Yasutake, R. Kokawa, T. Fujii, N. Kojima, S. Kitamura, R. Tamochi, J. Kitta and T. Kurosawa: Round-robin measurements of 100- and 60-nm scales among a deep-ultraviolet laser diffractometer, a scanning electron microscope and various atomic force microscopes, Meas. Sci. Technol. 18-3 (2007) 803-812.