

多波長法による位相変調型微分干渉顕微鏡の計測範囲拡張

石渡 裕*・近藤 清志*・伊藤 雅英*・谷田貝豊彦*,**

* 筑波大学大学院数理物質科学研究科電子・物理工学専攻 〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1

** 宇都宮大学オプティクス教育研究センター 〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2

Extending Measurement Range for Retardation-Modulated Differential Interference Contrast Microscope with Multi Wavelength Method

Hiroshi ISHIWATA*, Kiyoshi KONDOH*, Masahide ITOH* and Toyohiko YATAGAI**,**

* Institute of Applied Physics, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai, Tsukuba 305-8573

** Center for Optical Research and Education, Utsunomiya University, 7-1-1 Yoto, Utsunomiya 321-8585

While investigating measurement method of phase objects with the retardation-modulated differential interference contrast (RM-DIC) microscope, we found two problems. One of them is that smaller measured values than the actual phase are obtained when phase objects are beyond the weak phase approximation range. The first problem is improved by the new analysis “three-image self phase-correction (SPC) method” that we developed. The second problem is that the measured relief shape flips by RM-DIC microscope, when the object phase passes half a wavelength. In order to overcome the second problem, we developed a new phase unwrapping technique “Multi wavelength method” for beyond the half-wavelength phase difference. We confirm the effectiveness of our methods in experiment with beyond half-wavelength phase objects and show that our new methods can extend the measurement range of the RM-DIC microscope over the half-wavelength phase difference.

Key words: differential interference contrast, microscope, phase measurement, Nomarski

1. はじめに

微分干渉 (differential interference contrast: DIC) 顕微鏡^{1,2)}は、生体細胞の構造や半導体結晶の表面に現れる微小段差を観察するのに有効な観察方法であり、高感度化や高解像力化についての改良が進められている。

いくつかの研究グループが、微分干渉顕微鏡を用いて観察物体の定量化を試みた³⁻⁷⁾。そして、Hartmanのグループにより、微分干渉顕微鏡を用いて観察物体表面の勾配分布に関する計測方法が示された⁴⁻⁶⁾。しかし、微細構造を有する観察物体の形状を計測する場合、観察物体の微細構造で光が回折され、その影響により DIC 画像から微細構造を正確に計測することが難しい。

筆者らは、位相変調型微分干渉 (retardation-modulated differential interference contrast: RM-DIC) 顕微鏡を開発し、微分干渉顕微鏡の MTF (modulation transfer function) を考慮したデコンボリューション法を考案すること

により、弱位相領域における観察物体の微細構造の定量計測を可能にした^{8,9)}。

弱位相領域を超える位相量をもつ観察物体では、観察物体の位相量と微分干渉画像の像コントラストとの線形性が悪くなる。そして、位相量が $\lambda/4$ を超えると、位相量が大きい物体のほうが、微分干渉画像の像コントラストが低下する現象が現れる。さらに、 $\lambda/2$ を超えると、像コントラストの反転が発生する。筆者らは、まず観察物体の位相量が $\lambda/2$ 以下である場合の計測方法について研究を進め、物体の位相分布を弱位相領域にあると仮定して位相分布を計測し、この計測した位相分布自体を用いて補正を行い、弱位相領域を超える位相分布を求める手法 (self phase-correction method: SPC 法) を開発した¹⁰⁾。これにより、筆者らは $\lambda/2$ 以下の位相量をもつ物体の定量計測を可能にした。

今回、筆者らはさらに計測法の改良を行い、 $\lambda/2$ を超

E-mail: h.ishiwata@ot.olympus.co.jp

える位相量をもつ物体の位相分布を計測可能にする手法を開発した。本論文では、まず弱位相領域を超える物体の像特性について概略説明を行い、 $\lambda/2$ 以下の位相量をもつ観察物体の計測方法を紹介する。そして、観察物体の位相量が $\lambda/2$ を超えたときに発生する微分干渉画像の像コントラストの反転を検出する方法として開発した多波長法 (multi wavelength method) を示し、最後に段差量が200 nmの格子サンプルを用いた計測実験の結果を示す。

2. 原 理

2.1 位相変調型微分干渉顕微鏡の原理

まず、顕微鏡の応答特性を考慮した微分干渉顕微鏡の像強度分布を表す式を示し、筆者らが開発したRM-DIC顕微鏡とデコンボリューション法の原理について説明する。

部分的コヒーレント結像理論により、観察物体の顕微鏡による像強度分布は

$$I(x, y) = \iiint_{-\infty}^{\infty} R(f_x, f_y, f'_x, f'_y) O(f_x, f_y) O^*(f'_x, f'_y) \exp[-2\pi i\{(f_x - f'_x)x + (f_y - f'_y)y\}] df_x df'_x df_y df'_y \quad (1)$$

で表される¹¹⁾。

$R(f_x, f_y, f'_x, f'_y)$ は TCC (transmission cross coefficient) であり、

$$R(f_x, f_y, f'_x, f'_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} Q(\xi, \zeta) p(\xi + f_x, \zeta + f_y) p^*(\xi + f'_x, \zeta + f'_y) d\xi d\zeta \quad (2)$$

で表される。ここで、 $O(f_x, f_y)$ は物体の複素振幅分布のフーリエ変換を表し、 $p(\xi, \zeta)$ は結像光学系の瞳関数を表し、 $Q(\xi, \zeta)$ は照明光学系の瞳の強度分布を表す。

説明を簡単にするために、観察物体は x 方向に分布をもち、 y 方向には一様な次元分布の位相物体であるとして、顕微鏡による位相物体の結像特性を示す。

物体の位相分布を $\phi(x)$ とし、反射率または透過率は一定であり定数 C とすると、物体の複素振幅分布 $o(x)$ とそのフーリエ変換 $O(f_x)$ は、弱位相近似によりそれぞれ

$$O(x) = C \exp[i\phi(x)] = C \left\{ 1 + i\phi(x) - \frac{1}{2} \phi(x)^2 \right\} \quad (3)$$

$$O(f_x) = C \left\{ \delta(f_x) + i\Phi(f_x) - \frac{1}{2} \Phi(f_x) \otimes \Phi^*(f_x) \right\} \quad (4)$$

で表すことができる。ここで、 $\Phi(f_x)$ は $\phi(x)$ のフーリエ変換を表し、 \otimes はコンボリューションの演算子を表す。

式(4)を式(1)に代入し、shear量を Δ としたときの微分干渉顕微鏡の瞳関数を用いて整理すると、微分干渉顕

微鏡の像強度分布 $I(x)$ は近似的に以下の式で表すことができる⁹⁾。

$$I(x, \theta) = C \left[\frac{1}{2} (1 - \cos \theta) \left\{ M(0) - \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\pi \Delta f) M(f_x) \Phi(f_x) \otimes \Phi^*(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x \right\} + i \sin \theta \int_{-\infty}^{\infty} \sin(\pi \Delta f_x) M(f_x) \Phi(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \{1 - \cos(2\pi \Delta f_x + \theta)\} m_0(f_x) \Phi(f_x) \Phi^*(f_x) df_x + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \{\cos \theta + \cos(2\pi \Delta f_x)\} m_d(f_x) \Phi(f_x) \Phi^*(-f_x) \exp(-4\pi i f_x x) df_x \right] \quad (5)$$

ここで、

$$M(0) = \iint_{-\infty}^{\infty} Q(\xi, \zeta) p(\xi, \zeta) p^*(\xi, \zeta) d\xi d\zeta, \\ M(f_x) = \iint_{-\infty}^{\infty} Q(\xi, \zeta) p(\xi + f_x, \zeta) p^*(\xi, \zeta) d\xi d\zeta, \\ m_0(f_x) = \iint_{-\infty}^{\infty} Q(\xi, \zeta) p(\xi + f_x, \zeta) p^*(\xi + f_x, \zeta) d\xi d\zeta, \\ m_d(f_x) = \iint_{-\infty}^{\infty} Q(\xi, \zeta) p(\xi + f_x, \zeta) p^*(\xi - f_x, \zeta) d\xi d\zeta$$

式(5)の各項はそれぞれ、第1項が微分干渉画像の背景成分を、第2項は物体の位相分布の微分成分を、第3項は物体の勾配成分を、第4項は物体の位相分布の2乗に比例する成分を表している⁹⁾。

ここで、位相物体に勾配成分がないとすると、

$$I(x, \theta) = C \left[\frac{1}{2} (1 - \cos \theta) \left\{ M(0) - \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\pi \Delta f) M(f_x) \Phi(f_x) \otimes \Phi^*(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x \right\} + i \sin \theta \int_{-\infty}^{\infty} \sin(\pi \Delta f_x) M(f_x) \Phi(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \{\cos \theta + \cos(2\pi \Delta f_x)\} m_d(f_x) \Phi(f_x) \Phi^*(-f_x) \exp(-4\pi i f_x x) df_x \right] \quad (6)$$

と書き換えることができる。

位相物体が弱位相領域の位相分布であるとき、 $\Phi(f_x) \otimes \Phi^*(f_x)$ および $\Phi(f_x) \Phi^*(-f_x)$ は小さく無視できるとして、式(6)は以下のように書き換えることができる。

$$I(x, \theta) = C (1 - \cos \theta) M(0) + i \sin \theta \int_{-\infty}^{\infty} \sin(\pi \Delta f_x) M(f_x) \Phi(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x \quad (7)$$

ここで、リタレーション量が $\pm\theta$ の2枚の画像を取り込み、その画像の差演算と和演算を行うと、

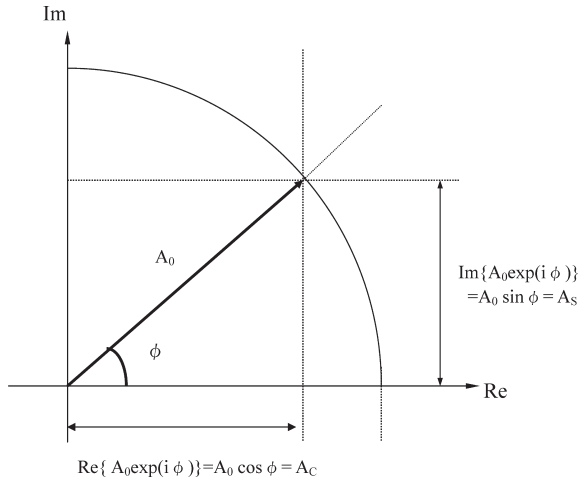


Fig. 1 Components of light passed through a phase object with vector representation.

$$I(x, \theta) - I(x, -\theta) = 2iC \sin \theta \int_{-\infty}^{\infty} \sin(\pi \Delta f_x) M(f_x) \Phi(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x \quad (8)$$

$$I(x, \theta) + I(x, -\theta) = C(1 - \cos \theta) M(0) \quad (9)$$

となり、物体の位相分布に比例する像強度成分と、微分干渉画像の背景の光強度成分に分離することができる。

したがって、差演算の結果式(8)を和演算の結果式(9)で規格化して、微分干渉顕微鏡のMTFを用いてデコンボリューション処理することにより、観察物体の位相分布 $\phi(x)$ は

$$\phi(x) = \frac{-\cos \theta}{2 \sin \theta} \cdot \text{Decon} \left[\frac{I(x, \theta) - I(x, -\theta)}{I(x, \theta) + I(x, -\theta)} \right] \quad (10)$$

で表すことができる⁹⁾。

2.2 位相分布と干渉画像の関係

ここでは、弱位相領域を超える位相物体の像特性を考えるために、観察物体の位相量と微分干渉顕微鏡の像強度分布の関係を、Fig. 1に示すベクトル表示を用いて説明する。

位相物体に照明光が入射すると、照明光は物体で回折され、透過または反射光と回折光に分離される。微分干渉顕微鏡や位相差顕微鏡では、この透過(反射)光と回折光の間に発生する位相飛びをリタデーション量の調整や位相膜を用いることで補正した後で干渉させ、位相分布を強度分布に変換している。

位相量が ϕ の位相物体を射出した光の複素振幅を A とすると、 A は以下のように表せる。

$$A = A_0 \exp(i\phi) = A_0 \cos \phi + iA_0 \sin \phi = A_c + iA_s$$

ここで、 b を位相物体の可視化パラメーターとして、微分干渉顕微鏡や位相差顕微鏡による干渉画像の像強度は以下の式で表すことができる。

$$I = |bA_c + iA_s|^2$$

一般に、微分干渉顕微鏡や位相差顕微鏡では $b = \exp(i\pi/2) = i$ となるようにリタデーション量や位相膜等の工夫が施されている。よって、像の強度は

$$I = A_c^2 + A_s^2 + 2A_c \cdot A_s \quad (11)$$

となる。

位相物体の位相情報は1次回折光に含まれることから、式(11)は微分干渉画像が透過または反射した0次光による像強度成分と、1次回折光を2乗した像強度成分と0次光成分と1次回折光成分が干渉した像強度成分とから構成されていることを表している。位相物体の位相分布 ϕ に比例する像強度成分を I_s とすると、 I_s は0次光成分と1次回折光成分の干渉によって形成されることから、

$$I_s = A_s \cdot A_c = A_0^2 \sin \phi \cdot \cos \phi \quad (12)$$

で表せる。式(12)は、式(6)の位相分布に比例する第2項をデコンボリューション処理した結果に相当する。

微分干渉画像の背景成分は、0次光成分によって形成される像強度成分であるので、

$$I_c = A_c \cdot A_c = A_0^2 \cos^2 \phi \quad (13)$$

で表すことができ、式(12)の場合と同様に、式(13)は式(6)の第1項をデコンボリューション処理した結果に相当する。同様に、位相分布の2乗に比例する像強度成分は

$$I_d = A_s \cdot A_s = A_0^2 \sin^2 \phi \quad (14)$$

で表せ、式(6)の第4項をデコンボリューション処理した結果に相当する。

ここで、弱位相物体の像強度分布を考える。弱位相物体では、位相成分 A_s が小さいことから、 $I_d = 0$ と近似することができ、式(11)は

$$I = I_c + I_s \quad (15)$$

と書き換えることができる。

微分干渉画像から I_c と I_s の像強度成分をそれぞれ分離して求め、式(12)と式(13)から位相分布 ϕ は

$$\phi = \tan^{-1}(I_s/I_c) \quad (16)$$

から求めることができる。

しかし、物体の位相量が弱位相領域を超える場合には、Fig. 2に示すように $I_d \neq 0$ となり、 I_c と I_d を分離して求めることができず、式(16)は

$$\phi_w = \tan^{-1}\{I_s/(I_c + I_d)\} \quad (17)$$

となり、弱位相を仮定したときの計測値 ϕ_w は、実際の位相分布 ϕ より小さい値になってしまう。

ここで、式(17)の $\{ \}$ 内を考える。式(13)と式(14)

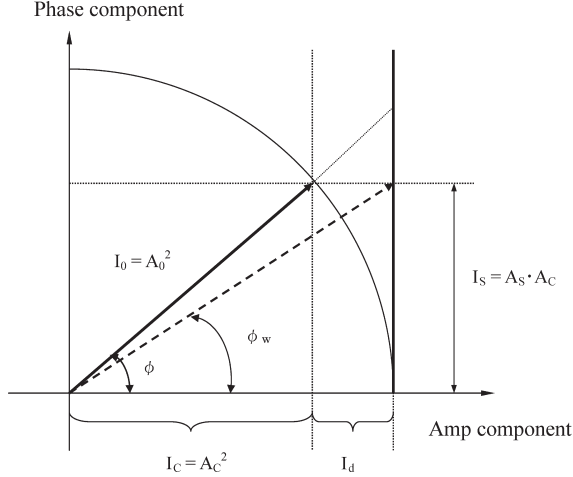


Fig. 2 Image components of a DIC image with vector representation.

から, $I_c + I_d = I_0$ と置けるので,

$$\frac{I_s}{I_c + I_d} = \frac{I_s}{I_0} = \sin \phi \cos \phi = \frac{\sin 2\phi}{2} \quad (18)$$

となる. ここで, 実際の位相分布は, Fig. 3 に示すように, $P-V$ 値が ϕ_p となることから

$$\phi = \phi_p/2$$

と表せる.

したがって, 式 (17) は

$$\phi_w = 2 \tan^{-1} \{ \sin(\phi_p)/2 \} \quad (19)$$

となる.

よって, 位相量 ϕ が $\lambda/4$ を超える領域では, 式 (19) から位相量 ϕ の増加とともに計測値 ϕ_w は減少し, 実際の位相量 ϕ との差が大きくなる.

特に, 位相量 ϕ が $\lambda/2$ に近づくと, 微分干渉画像が形成されず, 位相分布が計測されなくなる. さらに, $\lambda/2$ を超えると位相分布の符号が反転し, 計測された結果に凹凸形状の反転が発生する.

2.3 位相計測法

前節で, 観察物体の位相量と微分干渉顕微鏡の像強度分布の関係を示した.

観察物体の位相分布が弱位相領域を超えると, 計測される位相量は, 観察物体の位相量より小さくなる問題が発生する. この問題点を解決するために, 筆者らは弱位相領域を仮定して計測した結果を用いて補正を行う SPC (self phase-correction) method を考案した¹⁰⁾.

この節では, 弱位相領域から $\lambda/2$ までの位相分布を計測する SPC 法の原理を説明し, SPC 法の中でも一番補正効果がよい Three-image SPC method を紹介する.

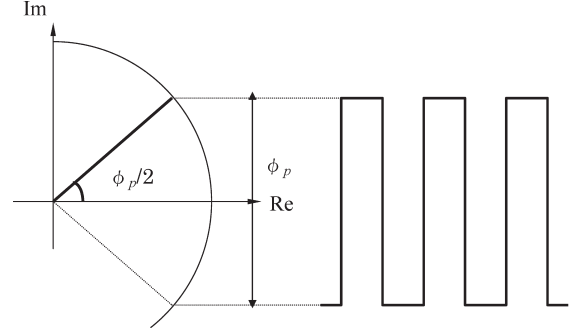


Fig. 3 Expression of phase distribution. The phase distribution ϕ_p is shown by $P-V$ value of sample profile.

弱位相領域を超えると, $I_d \neq 0$ であり, 0 次光成分 I_c と位相分布の 2 乗に比例する成分 I_d を分離して求めることができず, 計測結果が物体の本来の位相分布より小さくなる. したがって, 観察物体の位相量を正確に求めるためには, 微分干渉画像の強度成分から 0 次光成分である I_c のみを分離して求めることができれば, 弱位相領域を超える位相分布を計測することが可能になる.

0 次光成分 I_c を分離して物体の位相分布を求める方法を以下に説明する. この方法では, まず弱位相近似を仮定して近似的な位相分布を求め, 求めた近似的な位相分布から位相分布の 2 乗に比例する成分 I_d を推定し, 測定に影響を与える位相分布の 2 乗に比例する像強度成分による影響を補正する.

Fig. 2 に示すように, 式 (13) と式 (14) から I_0, I_s, I_c の間には, $I_c = \sqrt{I_0^2 - I_s^2}$ の関係があり, $I_c = I_0(1 - I_s^2/2I_0^2)$ と近似すると,

$$\frac{I_s}{I_c} = \frac{I_s}{\sqrt{I_0^2 - I_s^2}} \approx \frac{I_s}{I_0(1 - I_s^2/2I_0^2)} = \frac{I_s/I_0}{(1 - I_s^2/2I_0^2)} \quad (20)$$

で表せる. ここで,

$$\phi_w = I_s/I_0 \quad (21)$$

と置くと, 弱位相近似を仮定した近似的な位相分布 ϕ_w を求めることができる.

この近似的な位相分布 ϕ_w を用いて式 (16) を書き換えると, 弱位相領域を超える物体の位相分布 ϕ は,

$$\phi = \tan^{-1} [\phi_w / (1 - \phi_w^2/2)] \quad (22)$$

で表すことができる.

式 (21) と式 (22) を用いることにより, 弱位相領域を超える位相分布をもつ位相物体に対しても, 弱位相領域の位相物体と同様に計測することが可能になる. この方法は計測した位相分布自体を用いて補正を行うことから, 筆者らは SPC (self phase-correction) method とよんでいる¹⁰⁾. Three-image SPC method は SPC 法の拡張で, 計測時の

リタレーション量を $\pm\theta$ に設定した2つの画像に加え、リタレーション量をゼロとした画像を加えた3つの画像を用いて計測を行い、微分干渉画像の0次光成分 I_c を抽出する精度を向上させている。

微分干渉顕微鏡のshear量は分解能程度に設定されることから、shear量 Δ は十分小さいと仮定すると、式(6)は近似的に

$$I(x, \theta) = C \left[\frac{1}{2}(1 - \cos \theta) \left\{ M(0) - \int_{-\infty}^{\infty} M(f_x) \Phi(f_x) \otimes \Phi^*(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x \right\} + i \sin \theta \int_{-\infty}^{\infty} \sin(\pi \Delta f_x) M(f_x) \Phi(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \{\cos \theta + 1\} m_d(f_x) \Phi(f_x) \Phi^*(-f_x) \exp(-4\pi i f_x x) df_x \right] \quad (23)$$

と書き換えることができる。

ここで、リタレーション量が $\theta=0$ のときの像強度は、近似的に

$$I(x, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} m_d(f_x) \Phi(f_x) \Phi^*(-f_x) \exp(-4\pi i f_x x) df_x \quad (24)$$

で表せる。

式(23)から、リタレーション量が $\pm\theta$ の2つの画像の和演算は

$$I(x, \theta) + I(x, -\theta) = C \left[(1 - \cos \theta) \left\{ M(0) - \int_{-\infty}^{\infty} M(f_x) \Phi(f_x) \otimes \Phi^*(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x \right\} + \int_{-\infty}^{\infty} \{\cos \theta + 1\} m_d(f_x) \Phi(f_x) \Phi^*(-f_x) \exp(-4\pi i f_x x) df_x \right] \quad (25)$$

で表せ、式(24)および式(25)からは

$$I(x, \theta) + I(x, -\theta) - (\cos \theta + 1) \cdot I(x, 0) = C(1 - \cos \theta) \left\{ M(0) - \int_{-\infty}^{\infty} M(f_x) \Phi(f_x) \otimes \Phi^*(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x \right\} \quad (26)$$

と書き換えられる。

したがって、リタレーション量が0, $\pm\theta$ の3つの画像から近似的な位相分布 ϕ_w は

$$\phi_w(x) = \frac{1 - \cos \theta}{2 \sin \theta} \left\{ \text{Decon} \left[\frac{I(x, \theta) - I(x, -\theta)}{I(x, \theta) + I(x, -\theta) - (\cos \theta + 1) \cdot I(x, 0)} \right] \right\} \quad (27)$$

で表せる。

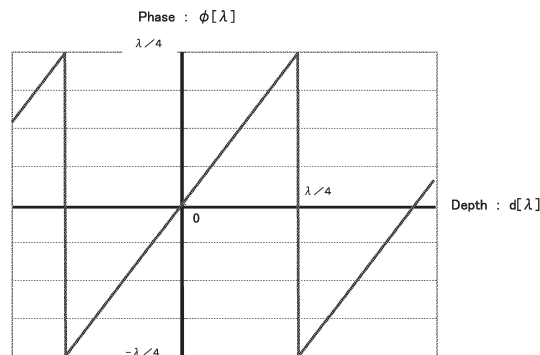


Fig. 4 Replicated phase distribution.

この近似的な位相分布 ϕ_w を式(21)に示すSPC法によって位相分布の2乗に比例する像成分の影響を補正すると、計測される位相分布 ϕ は

$$\phi = \tan^{-1} [\phi_w / (1 - \phi_w^2 / 2)] \quad (28)$$

で表せる¹⁰⁾。

2.4 多波長法

式(28)により、弱位相領域から $\lambda/2$ までの位相分布を定量的に計測することが可能になった。SPC法は $\lambda/2$ を超える位相分布に対しても適応可能である。しかし、 $\lambda/2$ を超えたときの符号の反転を判定することができない。よって、SPC法を用いても、計測された形状は凹凸の反転の問題は残ったままである。そこで、複数の波長で計測を行い、各波長の計測結果を比較し、位相量が $\lambda/2$ を超えているかの判定を行う手法を考案した。

複数の計測波長を用いて、位相分布が $\lambda/2$ を超えているかを判定する原理を、反射型の段差測定を例にして説明する。特定の段差量 d を計測した場合、微分干渉顕微鏡によって求められる位相量は、計測波長を λ とすると、

$$\phi = 2d/\lambda$$

で与えられ、位相量 ϕ と d の間には模式的に表すとFig. 4の関係がある。

同一の段差量 d を異なる波長で計測したとき、計測される位相量は波長に反比例する。測定の基準波長を λ_0 、判定用の波長を λ_s と λ_l とし、これらの波長には以下の関係があるとすると、

$$\lambda_s < \lambda_0 < \lambda_l$$

それぞれの波長を用いたときに計測される位相量を ϕ_s , ϕ_0 , ϕ_l とすると、段差量 d と各波長の位相量の関係は、模式的にFig. 5のように表せる。

Fig. 5から、 $d < \lambda_0/4$ の領域では、 ϕ_s , ϕ_0 , ϕ_l の間には

$$|\phi_l| < |\phi_0| < |\phi_s| \quad (29)$$

の関係が存在する。

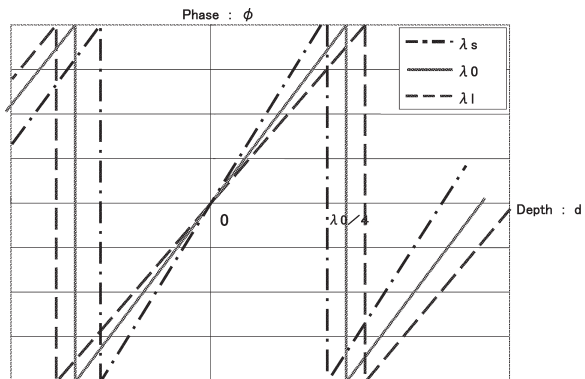


Fig. 5 Replicated phase distribution in three different wavelength.

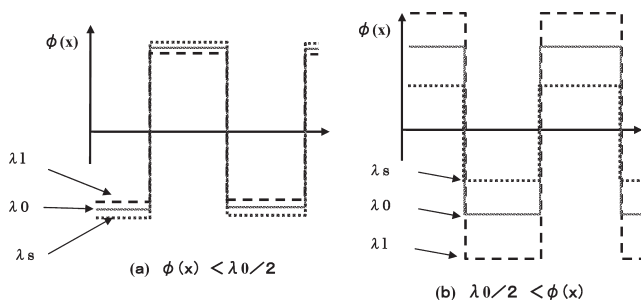


Fig. 6 Measured phase value versus three different wavelengths. (a) is under a half of main wavelength λ_0 , (b) is beyond a half of main wavelength λ_0 .

また、 $\lambda_0/4 < d < 3\lambda_0/4$ の領域では、

$$|\phi_s| < |\phi_0| < |\phi_1| \quad (30)$$

となる。

3種類 of 測定波長を用いて、観察物体の段差量を計測し、計測された各波長の位相量を比較することにより、計測すべき段差量 d が基準波長 λ_0 の $\lambda_0/4$ を超えているか (位相が折り返されているか) の判定を行うことができる。

異なる3つの波長 (λ_s , λ_0 , λ_1) で、three-image SPC method を用いて段差計測を行い、それぞれの波長における位相量を比較する。これにより、波長ごとの応答特性の違いによる影響を小さくすることができる。

Fig. 6 (a) に示すように、式 (28) の結果を得た場合は、位相の折り返しがないので、

$$d = \phi_0 \cdot \lambda_0 / 2$$

から段差量が求められる。また、Fig. 6 (b) に示すように、式 (29) の結果を得た場合は、位相の折り返しが発生しているので

$$d = (1 - \phi_0) \cdot \lambda_0 / 2$$

から、段差量を求めることができる。

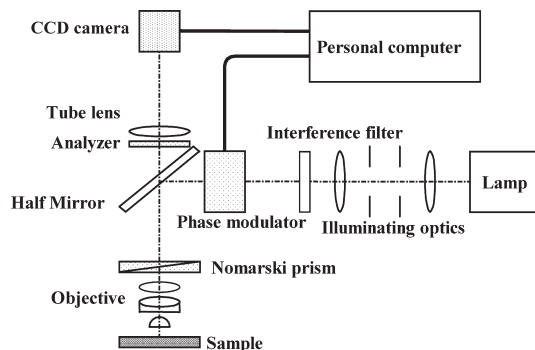


Fig. 7 Block diagram of our equipment for surface metrology. A modulating retardation unit is built into the illuminating optics of a conventional microscope. Using a halogen lamp, it is possible to select the observation wavelength by varying the interference filter. We can control the retardation of the DIC microscope using the phase modulator. The phase modulator is controlled by a desktop computer to within $\pm 1^\circ$ accuracy. The CCD camera is a 1/3" (B/W) VGA type and is connected to a frame grabber in the desktop computer.

通常の干渉計測では、異なる2つの波長で計測した位相量を比較することで、位相の折り返し判定が可能である。微分干渉顕微鏡のように、物体で回折した光の干渉によって像が形成される場合には、段差量が基準波長の $\lambda_0/4$ で、画像が形成されないことから、位相の折り返し判定の誤差が大きくなると考え、筆者らは異なる3つの計測波長を用いて、位相の折り返しの判定を行った。

3. 計測実験

3.1 実験装置

筆者らは、市販の顕微鏡 OLYMPUS BX51 に位相変調装置を組み込み、位相変調微分干渉顕微鏡を開発した⁹⁾。その構成図を Fig. 7 に示す。

筆者らが開発した位相変調型微分干渉顕微鏡は、10倍、20倍、50倍、100倍の4種類の対物レンズを用いて、観察する物体の計測倍率が選択できる。ノマルスキープリズムを交換することで、shear 量を変えることが可能である。

光源にハロゲンランプを用い、中心波長がそれぞれ 480 nm, 550 nm, 620 nm でバンド幅が半値幅で 10 nm の3種類の干渉フィルターを交換することにより、計測波長を変更することができる。CCD カメラは 1/3 インチ (B/W) VGA タイプを用いた。

位相変調器はパーソナルコンピュータに接続され、リタデーション量が $\pm 1^\circ$ の精度で制御可能になっている。パーソナルコンピュータは、リタデーション量が $\pm \theta$ と 0 の3つの微分干渉画像を取り込む際に、リタデーション量の制御と画像取り込み制御、および三次元形状計測の演

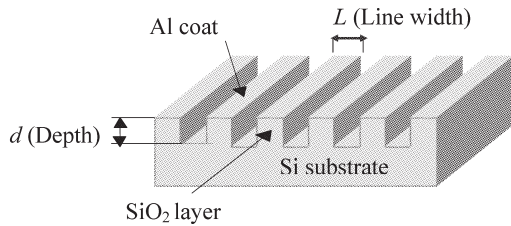


Fig. 8 Shape of the sample. The sample is a silicon wafer with grating patterns made using a semiconductor process. The grating patterns have line widths L ranging from $0.5 \mu\text{m}$ to $10 \mu\text{m}$ and are covered with an aluminum film to give phase objects with depth d .

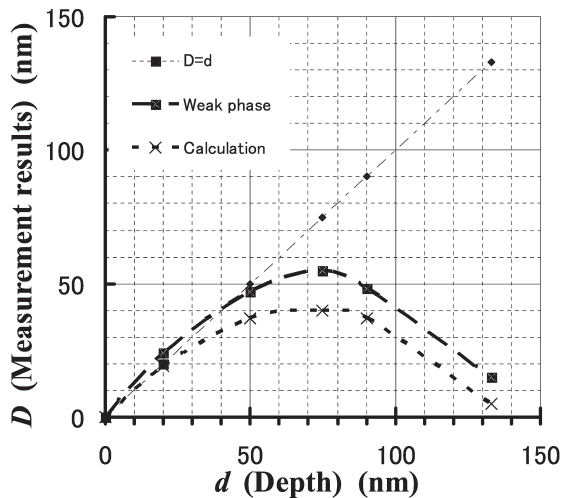


Fig. 9 Calculation result and measurement result by RM-DIC microscope based on the weak phase approximation. Horizontal axis is depth of sample. Vertical axis is measurement value.

算処理を行う。今回の実験では、リタレーション量を $\theta = \pi/2$ として計測を行った。

3.2 計測標本

微細構造を有する標本は、Fig. 8 に示すような格子パターンをシリコンウェハ上に半導体製造技術を用いて作製した。標本には、線幅 L が $0.5 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ の複数の格子形状が SiO_2 膜によって形成され、表面にアルミコートが施されて格子形状がそのまま位相分布として扱える構造になっている。格子の段差量 d は、 20 nm 、 50 nm 、 75 nm 、 90 nm 、 130 nm 、 200 nm に設定されている。

4. 計測結果

50 倍の対物レンズを使用して計測実験を行った。その計測結果を以下に示す。

550 nm の干渉フィルターを用いて、単色光源によって段差計測を行った。それぞれの段差量の格子標本に対し、弱位相近似を仮定した計測手法を用いて処理した結果を

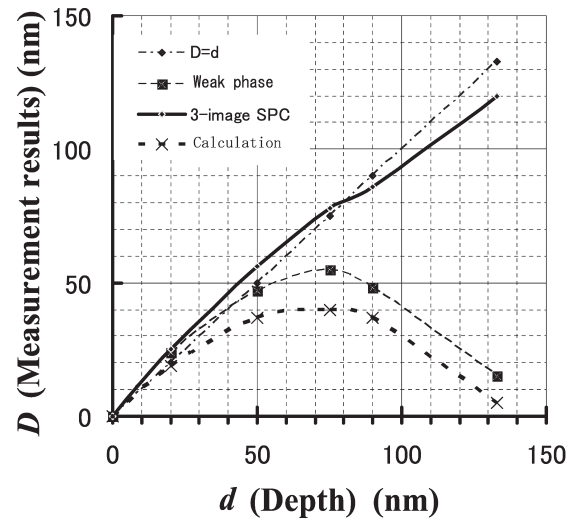


Fig. 10 Measurement results by 3-image SPC method. The result by weak phase approximation is included for reference. Horizontal axis is depth of sample. Vertical axis is measurement value.

Fig. 9 に示した。Fig. 9 から、格子標本の段差量が $\lambda/8$ (69 nm) を超えると、段差量 d と計測結果との差が大きくなっていることがわかる。式 (19) から Φ_w を計算した結果と比較すると、弱位相近似を仮定することによって、 $\lambda/8$ を超える段差量では位相分布の 2 乗の影響により、計測値が実際の段差量より小さくなってしまふことがわかる。

式 (19) から Φ_w を計算した結果と弱位相近似を仮定して計測した結果との差は、顕微鏡の応答特性により物体で回折した光がすべて像面に伝達されず、総光量が I_0 より小さくなっていることによると考えられる。

同じ段差標本を用いて、筆者らが考案した Three-image SPC method で計測した結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 に示す計測結果から、three-image SPC method は位相分布の 2 乗の影響を補正することができ、 $\lambda/8$ を超える段差量でも計測することが可能になった。そして、 $\lambda/4$ (138 nm) 近傍まで計測範囲を拡張できることがわかる。

次に、段差量が $\lambda/4$ を超える物体として、段差量が 200 nm の格子標本の計測結果について示す。Three-image SPC method を用いて計測した結果を Fig. 11 (a) に示す。ここで、比較のために段差量が 50 nm の格子標本の計測結果を Fig. 11 (b) に示す。Fig. 11 (a) に示すように、段差量が 50 nm と 200 nm の格子標本は同様に格子部分が凸になる部分を計測している。しかし、段差量が 200 nm の標本では再生される凹凸形状が反転し、段差量の値も 70 nm になっている。これは、段差量が $\lambda/4$ を超えたときに発生する像の折り返し現象が現れている。

Multi wavelength method を用いて計測した結果を

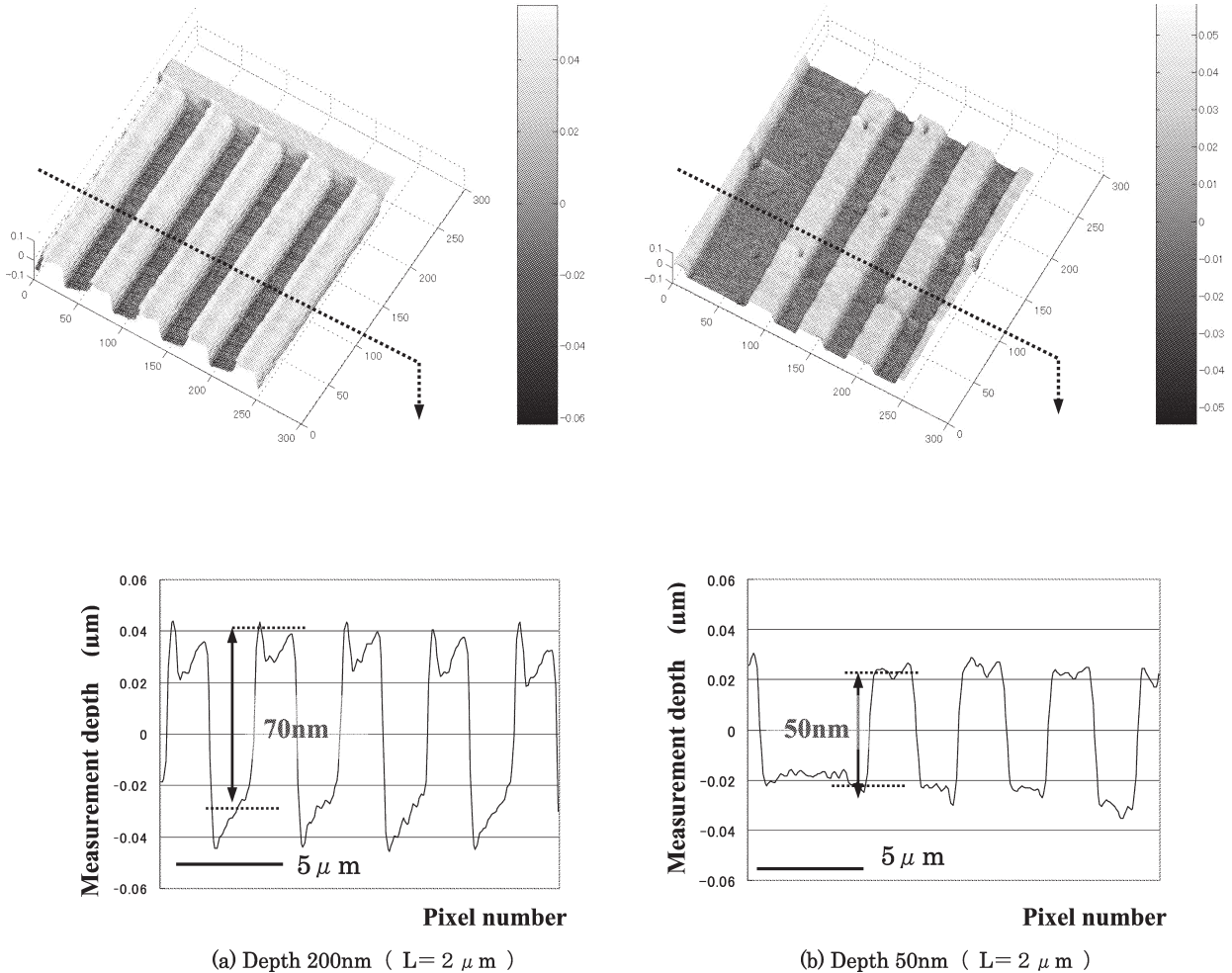


Fig. 11 Measurement results by 3-image SPC method. (a) is the result of 200 nm depth sample in $2 \mu\text{m}$ line-width region, (b) is the result of 50 nm depth sample in $2 \mu\text{m}$ line-width region.

Fig. 12 に示す。ここでも、Fig. 11 と同様に段差量が 50 nm の格子標本の計測結果と比較できるように示してある。

Fig. 12 (a) と Fig. 11 (a) を比較すると、再生された凹凸形状の反転と段差量の値が改善されていることがわかる。さらに、顕微鏡の応答特性の影響を確認するために、線幅の異なる格子標本についても計測を行った。その結果として、Fig. 13 に線幅 L が $1.0 \mu\text{m}$ と $1.2 \mu\text{m}$ の結果を示す。

Fig. 12 と Fig. 13 の結果から、筆者らが考案した multi wavelength method により、 $\lambda/4$ を超える段差量での像の折り返しの判定が行え、three-image SPC method を併用することで段差量の正確な計測が可能になることが示された。

5. ま と め

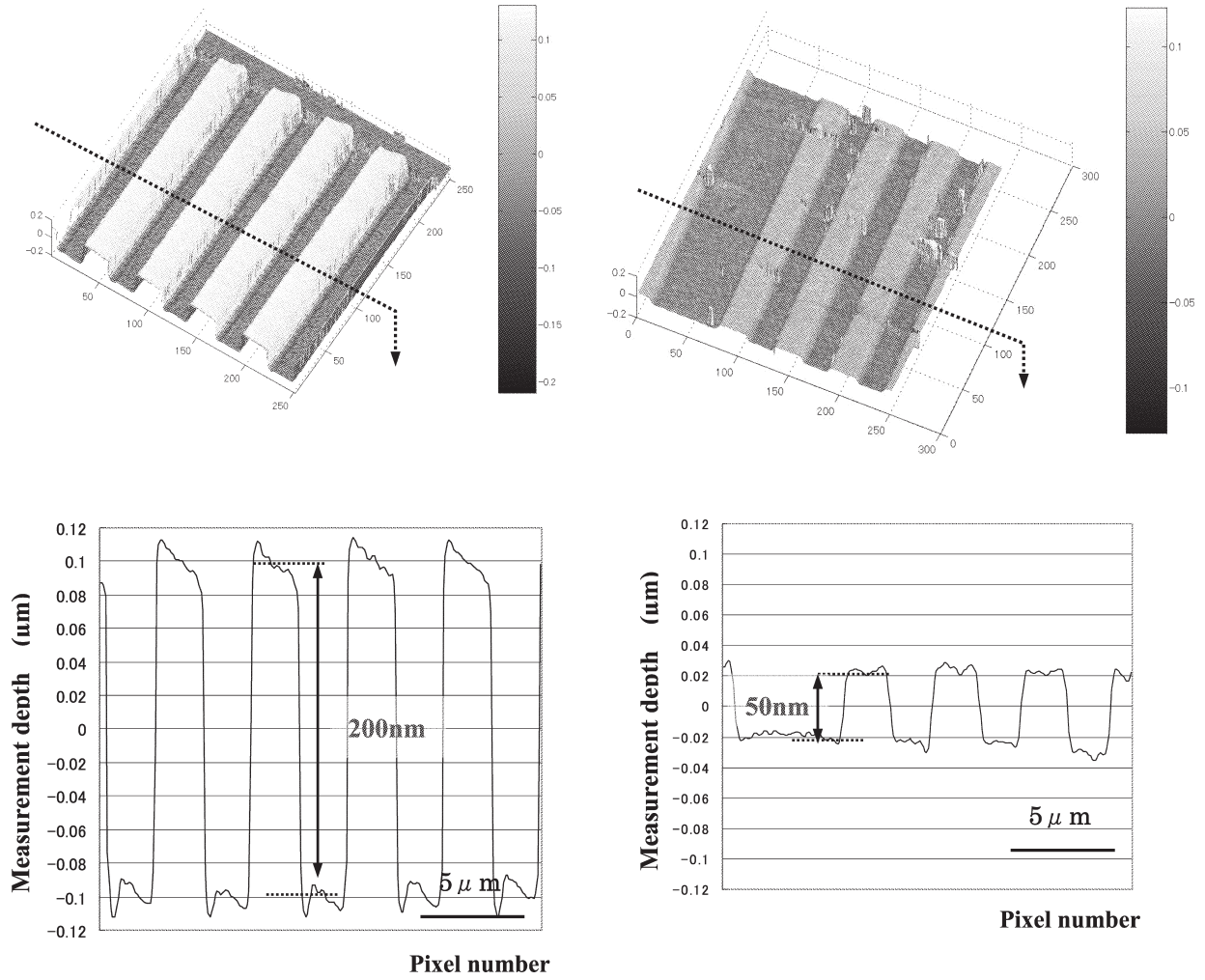
弱位相領域を超える位相分布をもつ物体は、位相分布と像強度分布の線形関係が保たれず、従来の弱位相を仮定し

た計測手法を用いると、計測結果が実際の位相量より小さくなる問題を理論的および実験的に示した。さらに、物体のもつ位相量が $\lambda/2$ を超えると、微分干渉像のコントラストに反転が発生し、反転した像コントラストから物体の位相分布を計測すると、凹凸形状も反転の問題が発生した。

以上の問題点から、従来の干渉計測技術を用いただけでは、微分干渉顕微鏡の画像から観察物体の位相分布を求めることが難しいと考えられていた。

筆者らは、弱位相領域を超える位相物体がもつ位相分布と像強度分布の線形関係が崩れる問題点を、three-image SPC method を考案して解決した。three-image SPC method により、弱位相領域を超える領域の位相分布の定量計測を可能にした。

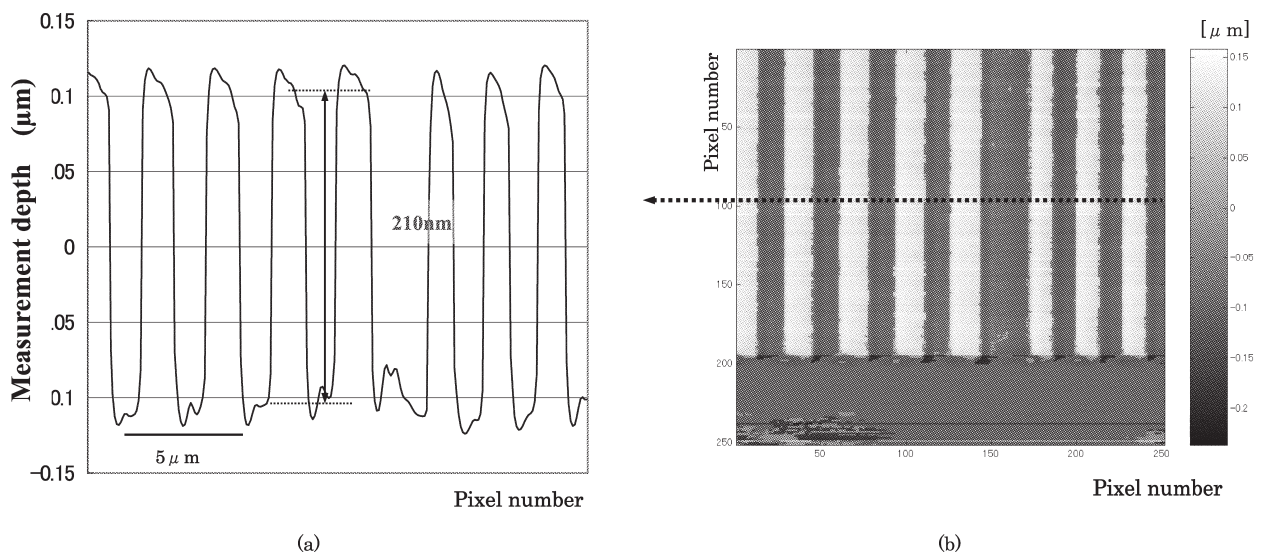
位相量が $\lambda/2$ を超えたときに発生する凹凸形状が反転する問題点は、今回考案した多波長法 (multi wavelength method) を用いることにより、微分干渉像のコントラ



(a) Depth 200nm ($L=2 \mu\text{m}$)

(b) Depth 50nm ($L=2 \mu\text{m}$)

Fig. 12 Measurement results by combing 3-image SPC method and multi wavelength method. (a) is the result of 200 nm depth sample in $2 \mu\text{m}$ line-width region, (b) is the result of 50 nm depth sample in $2 \mu\text{m}$ line-width region.



(a)

(b)

Fig. 13 Measurement results of 200 nm depth sample in $1.0 \mu\text{m}$ and $1.2 \mu\text{m}$ line-width region by combing 3-image SPC method and multi wavelength method. (a) is the close section and (b) is the distribution map of the result.

ト反転を判定することができ、観察物体の凹凸形状を実際に物体がもつ凹凸形状として計測することができた。

Three-image SPC method と multi wavelength method を併用することにより、 $\lambda/2$ を超える位相分布をもつ観察物体の位相量と凹凸形状を正確に再生することができ、位相変調型微分干渉顕微鏡の計測範囲を拡張することができた。そして、位相量が $\lambda/2$ 以上の位相分布をもつ観察物体の定量計測を可能にし、顕微鏡の焦点深度内であれば、 $3\lambda/2$ 程度までの位相量の計測が可能である。ただし、計測範囲は顕微鏡の対物レンズの NA で制限される焦点深度に限定される。

文 献

- 1) G. M. Nomarski: "Differential micointerferometer with polarized waves," J. Phys. Radium Paris, **16** (1955) 9S.
- 2) M. Francon: *Progress in Microscopy* (Pergamon Press, New York, 1961) p. 118.
- 3) T. Yatagai: "Applications of interferometry and automated inspection in Japan," Critical Reviews of Optical Science and Technology, V. Cr46 (SPIE, 1992) p. 197.
- 4) D. L. Lessor, J. S. Hartman and R. L. Gordon: "Quantitative surface topography determination by Nomarski reflection microscopy. 1," J. Opt. Soc. Am., **69** (1979) 357-366.
- 5) J. S. Hartman, R. L. Gordon and D. L. Lessor: "Quantitative surface topography determination by Nomarski reflection microscopy. 2: Microscope modification, calibration, and planar sample experiments," Appl. Opt., **19** (1980) 2998-3009.
- 6) J. S. Hartman, R. L. Gordon and D. L. Lessor: "Nomarski differential interference contrast microscopy for surface slope measurements: An examination of techniques," Appl. Opt., **20** (1981) 2665-2669.
- 7) E. B. van Munster, E. K. Winter and J. A. Aten: "Measurement-based evaluation of optical pathlength distributions reconstructed from simulated differential interference contrast images," J. Microsc., **191**, Pt. 2 (1998) 170-176.
- 8) H. Ishiwata, M. Itoh and T. Yatagai: "Retardation modulated differential interference microscope and its application to 3-D shape measurement," Proc. SPIE, **2873** (1996) 21-24.
- 9) H. Ishiwata, M. Itoh and T. Yatagai: "A new method of 3-dimensional measurement by differential interference contrast microscope," Opt. Commun., **260** (2006) 117-126.
- 10) H. Ishiwata, M. Itoh and T. Yatagai: "A new analysis for extending the measurement range of the retardation-modulated differential interference contrast (RM-DIC) microscope," Opt. Commun., **281** (2008) 1412-1423.
- 11) R. S. Siroshi and G. S. Bhatnagar: "Effect of partial coherence on the resolution of a microscope. II: Annular aperture at condenser," Opt. Acta, **18** (1971) 547-553.