

# 空間的縞解析法を用いた電子スペックル干渉法におけるオプティカルディスロケーション発生とフィルタリング処理との関係

新井 泰彦\*・藤本 雅大\*\*・横関 俊介\*\*\*

\*関西大学工学部機械工学科 〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35

\*\*関西大学大学院機械工学専攻 〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35

\*\*\*九州工業大学情報工学部機械システム工学科 〒820-8502 飯塚市大字川津 680-4

## Investigation of Relationship between Occurrence of Optical Dislocation and Filtering Processing in Electronic Speckle Pattern Interferometry Using Spatial Fringe Analysis Method

Yasuhiko ARAI\*, Masahiro FUJIMOTO\*\* and Shunsuke YOKOZEKI\*\*\*

\*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kansai University, 3-3-35, Yamate-cho, Suita 564-8680

\*\*Mechanical Engineering Major, Kansai University Graduate School, 3-3-35, Yamate-cho, Suita 564-8680

\*\*\*Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Computer Science and System Engineering, Kyushu Institute of Technology, 680-4, Kawazu, Iizuka 820-8502

The measurement accuracy in electronic speckle pattern interferometry (ESPI) using the spatial fringe analysis method is influenced with the ratio between speckle size and pixel size of a CCD. This ratio sometimes causes the problems concerning optical dislocations. In this paper, the parameters concerning the speckle size and the passing band of band-pass filter are discussed to keep the accuracy. The experimental results show that the proposed parameters can evade the problems of occurrence of optical dislocations and of deterioration of the accuracy.

**Key words:** ESPI, in-plane displacement measurement, spatial fringe analysis method, band-pass filter, optical dislocation

### 1. はじめに

粗面をもつ測定対象の面外、面内変位の測定においてはスペックル干渉法が用いられる<sup>1)</sup>。特に、ESPI (electronic speckle pattern interferometry) に基づく処理<sup>1-3)</sup>では、計算機による複雑な処理も可能であることより、サブフリンジ処理<sup>4-6)</sup>が行われるに至っている。ところが、ESPI に空間的な縞解析法<sup>7)</sup>を導入しようとする場合、unsolved speckle<sup>8)</sup>などによるコントラストの低い領域において縞画像に optical dislocation (以下、OD) とよばれる現象<sup>9)</sup>が生じることはよく知られた問題である。Unsolved speckle についての議論は、確率論に基づく解析など、多くの研究者によってすでに行われている<sup>10)</sup>。しかしながら、そ

れによって発生する問題の回避については、現状において十分な検討がなされているとはいえない。

本研究では、この OD ならびに測定精度の問題を周波数領域で縞画像を議論することによって検討し、またフィルタリング処理によってこれらの問題の解消についての検討を行っている。さらに、スペックルサイズと検出器としての CCD のピクセルサイズとの関係<sup>11,12)</sup>において、スペックルサイズとピクセルとの関係が OD の発生に影響を及ぼすことを示している。また、そのスペックルサイズとピクセルサイズとの議論に基づく結果とフィルタリング処理による結果を用いて、面内変位測定を行い、上記の議論に基づく処理を行う場合には、OD の発生もなく高分解能な面

E-mail: arai@kansai-u.ac.jp

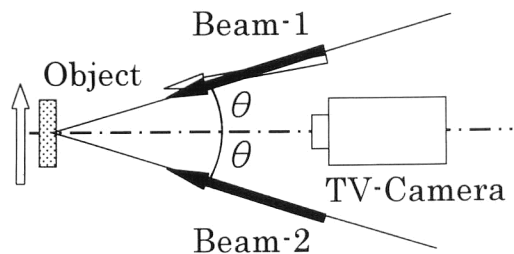


Fig. 1 Outline of optical measurement system.

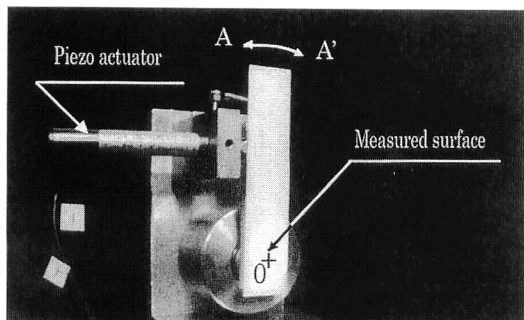


Fig. 2 Experimental apparatus for generating some in-plane displacement.

内変位計測が実施可能であることを示している。

## 2. OD の発生状況とそのフィルター処理

### 2.1 OD の発生

Fig. 1 に示す二光束スペックル干渉法<sup>1)</sup>に、Fig. 2 に示す面内変位発生装置を用いて面内変位を計測する場合のキャリア縞、変形キャリア縞内に発生する OD の状況を観察した。面内変位発生装置は、Fig. 2 に示すように、2つのベアリングによって支えられた回転中心 O をもつ測定面を回転中心から 50 mm の位置に取り付けられた圧電素子を用いて回転させることによって、面内に変位を発生させることができるものである。また、Fig. 1 に示す二光束スペックル干渉法では、光源として He-Ne レーザーが用いられ、かつ黒矢印で示す 2 光束の入射角  $\theta$  はともに初期状態として 18.3 deg に設定されている。この設定によって、光学系の縞感度は  $1 \mu\text{m}/\text{fringe}$  となっている。さらに、Fig. 1 に示す光学系では、2 光束の一方 (Beam-1) のレーザービームは白矢印で示すように入射角を変更することができるように設計されている。この結果、1 枚目のスペックルパターン  $S_1$  を 2 光束の入射角を若干異なった状態で撮影し、その後初期状態としての 2 光束の入射角が等しい状態に戻して、2 枚目のスペックルパターン  $S_2$  を撮影する。さらに、この状態で測定対象に変位を与えて、3 枚目のスペックルパターン  $S_3$  を撮影する。この処理によって  $(S_1 -$

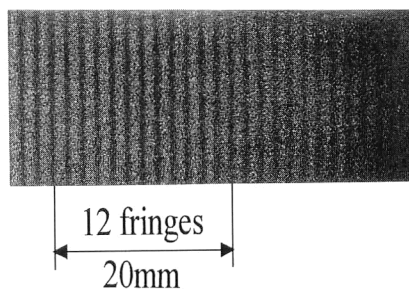
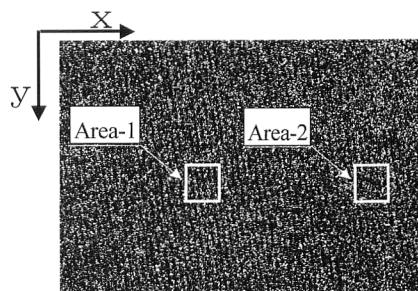
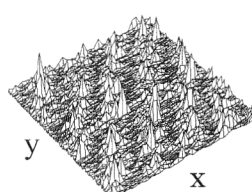


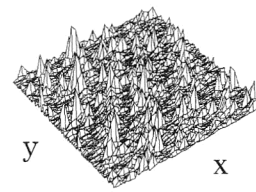
Fig. 3 Specklegram for discussing the validity of the measurement system.



(A) Specklegram of deformed carrier fringes



(B) Area-1



(C) Area-2

Fig. 4 Contrast of fringe image of deformed carrier fringes.

$S_2)^2$  の演算を行うとキャリア縞を、また  $(S_1 - S_3)^2$  の演算によって変形キャリア縞を得ることができる。さらに、この場合、Fig. 1 に示す光学系の縞感度は、 $1 \mu\text{m}/\text{fringe}$  となっているので、2 枚目と圧電素子によって  $30 \mu\text{m}$  変位を与えた場合に得られた 3 枚目のスペックルパターンを用いて  $(S_2 - S_3)^2$  を演算すると、そのスペックルグラムでは、Fig. 3 に示すように 12 縞に相当する位置が y 座標の回転中心から 20 mm の位置に対応することになり、実験結果においてもこの対応を確認することができる。すなわち、縞感度と縞数とその位置との関係から、本実験における面内変位発生装置ならびに計測システムが正当なものであると考えることができる。したがって、以下、本システムを用いて実験を行った。

次に、上記の実験システムを用いて、変形キャリア縞における縞の強度分布を検討する。この実験における変形キャリア縞のスペックルグラムを Fig. 4(A) に示す。Fig. 4(A) に示すように、Area-1 では右下がりの変形キャ

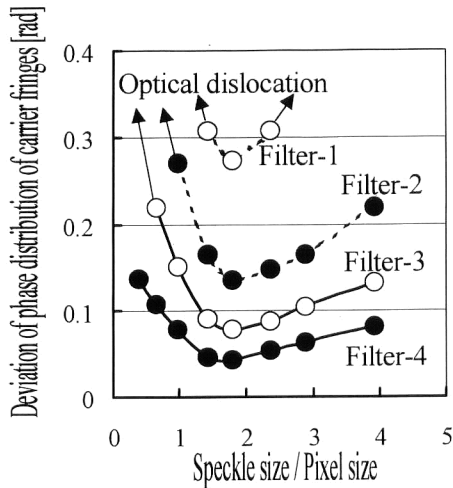


Fig. 5 Interrelationship among the ratio of speckle size and pixel size of CCD, the characteristics of band-pass filter, and the measurement accuracy.

リヤー縞を明確に確認することができるものの、Area-2では縞を鮮明に確認することができない。それぞれの領域を拡大してその縞の強度を三次元座標で示したものが、それぞれ Fig. 4(B), (C) である。Area-1では、縞の明るい部分を形成する強度の高い部分が整然と並び、結果として明確な縞となっている。一方、Area-2では縞の明るい部分を形成する強度の高い部分に乱れがあることがわかる。すなわち、この乱れによって縞のコントラストが低下しているものであると考えられる。Fig. 4(A) に示すスペックルグラムを発生させるために撮影された2枚のスペックルパターンをそれぞれ観察する限りでは、他の領域とのスペックルの強度の違いは確認できないものの、変位が与えられた場合に、スペックルパターンのArea-2に示すこの領域での強度の変化はほとんど認められないことが観察されている。すなわち、コントラストの低い、あるいは変位に伴う強度変化の低いスペックルがこの領域内に存在しているものと考えられる。したがって、この領域において縞のコントラストは低下するものであると考えられるので、ODの発生確率は高くなるものであると考えられる。そこで、スペックルサイズとピクセルサイズとの比を変化させた場合のODへの影響を明確にするために、スペックルグラムの構造が最も簡単なキャリア縞の位相分布のばらつきの変化を実験により求め、この問題を検討した。結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5では8 pixel 一周期をキャリア縞周波数として設定した場合の結果を示している。また、Fig. 5には、発生したキャリア縞を Table 1 に示したバンドパスフィルター(Filter-1, -2, -3, -4)で処理した結果が示されている。Table 1では、通過帯域をピクセルの大きさを用い

Table 1 Pass bands of band-pass filters.

Filter	Pass band in $x$ -axis	Pass band in $y$ -axis
Filter-1	$1/10.4 < f_x < 1/6.5$	$ f_y  < 1/34.1$
Filter-2	$1/9.1 < f_x < 1/7.2$	$ f_y  < 1/68.3$
Filter-3	$1/8.7 < f_x < 1/7.4$	$ f_y  < 1/102.4$
Filter-4	$1/8.3 < f_x < 1/7.7$	$ f_y  < 1/204.8$
Filter-5	$1/10.4 < f_x < 1/6.5$	$1/\infty < f_y < 1/17.1$
Filter-6	$1/9.9 < f_x < 1/6.7$	$1/256.0 < f_y < 1/19.2$
Filter-7	$1/9.0 < f_x < 1/7.2$	$1/73.4 < f_y < 1/23.5$
Filter-8	$1/8.3 < f_x < 1/7.6$	$1/42.7 < f_y < 1/30.6$

Unit:  $f = 1/\text{period of pixel}$ .

て示している。たとえば、Filter-1の $x$ 方向の通過帯域は、10.4 pixel 一周期の周波数から6.5 pixel 一周期の周波数成分を通過させるフィルターを示している。フィルター通過帯域の最も狭いFilter-4を用いた場合には、測定精度はスペックルサイズとピクセルサイズとの比(以後、S/P比)の変化に伴い、S/P比が1よりも若干大きい場合に、測定精度の改善をみることができるところが、フィルターをFilter-1へと変更することにより通過帯域を広くした場合には、Fig. 5に示すようにスペックルサイズが大きいあるいは小さい場合にはODの発生を確認することができる。このフィルターを用いた場合には、スペックルサイズがピクセルサイズよりも若干大きい領域でのみ、ODの影響を受けることなく位相演算処理を行うことができた。ただし、この場合にはFilter-4に比べて測定精度が低いこともわかる。すなわち、バンドパスフィルターの通過帯域の変化によってスペックルのもつノイズの影響が低減されていることがわかる。この問題を検討するために、信号成分とノイズ成分との関係を明白にする目的で、前報<sup>12)</sup>に示した面外変位計測時と同様に、キャリア縞画像をフーリエ変換した結果を Fig. 6 に示す。前報に示したように、スペックルサイズがピクセルサイズよりも小さく(S/P=0.69)なると、1つのピクセルからの出力はそのピクセル内に存在するいくつかのスペックル強度の平均化により信号成分が低下し、コントラストが劣化すると考えられ、スペックルサイズがピクセルサイズよりも小さい場合には、ODは生じやすくなるものであると考えられる。一方、スペックルサイズがピクセルサイズより大きく(S/P=3.98)なると、一般には信号成分の低下は認められない反面、低周波領域においてノイズ成分が大きくなり、この場合にもS/N比は低下する。すなわち、この領域においても縞のコントラストは低下すると考えられるので、ODの発生確率は高くなるものであると考えられる。

上記のように、フィルターの役割はODの発生のみならず測定精度についても大なる関与があり、計測において重要な役割を果たしていることがわかる。

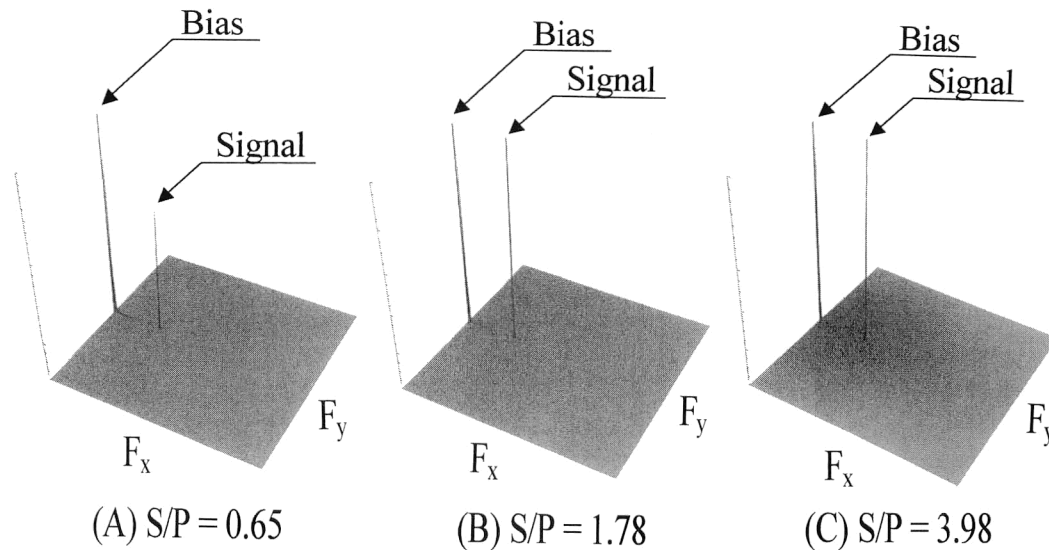


Fig. 6 Fourier analyzed results of specklegram with different speckle size.

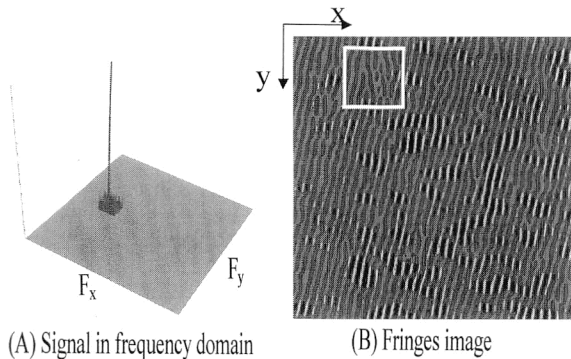


Fig. 7 Fringe image in the case of using a band-pass filter with a wide pass band.

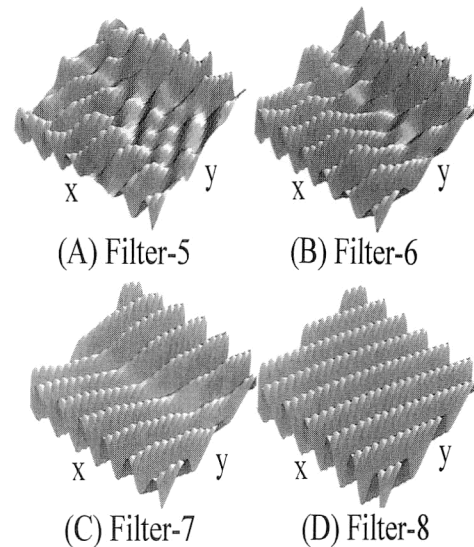


Fig. 8 Intensities of fringe images by using four kinds of band-pass filters.

## 2.2 OD とフィルターの通過帯域との関係

上記のように、フィルターの通過帯域と OD の発生、測定精度には強い因果関係があることがわかる。そこで次に、上記の変位測定システムを用いて、Fig. 5 で最も測定精度が高いと考えられる S/P 比が 1.85 倍になる条件で、空間的縞解析法によって 8 pixel 一周期とした Fig. 4(A) に示す変形キャリア縞に対応するスペックルグラムを、フィルターの通過帯域を変更させた場合の結果への影響として検討した。

Table 1 の Filter-5 を用いて処理した空間周波数帯域での信号成分 (Fig. 7(A) に示した) をもつ縞画像を Fig. 7(B) に示している。この場合、画像の至るところに OD が発生していることが確認できる。

上記のように、変形キャリア縞解析において、初期設定としてのバンドパスフィルター (Filter-5) の通過帯域では、Fig. 4(A) に示すスペックルグラムに OD を観察することになる。そこで、この状況をより明確にするために、

Fig. 7(B) の白枠で囲んだ OD が発生している領域の縞強度を詳細に検討することにした。その結果が Fig. 8 である。Fig. 8(A) の右下あたりを見ると、Fig. 7(B) の白枠内の画像と同様に明らかに、縞の強度分布が複雑な構造をしていることがわかる。

ここで用いたバンドパスフィルターでは、Fig. 7(A) に示すように変形キャリア縞信号の周辺に多くのノイズ成分が残存している。そのために、変形キャリア縞成分そのものがこれらのノイズの影響を受けることになり、数多くの OD が生じているものであると考えられる。この考え方にに基づき、この状況での縞画像をさらに狭い通過帯域をもつ Table 1 に示すバンドパスフィルターでフィルタリングした場合の結果を検討した。その結果を Fig. 8(B),

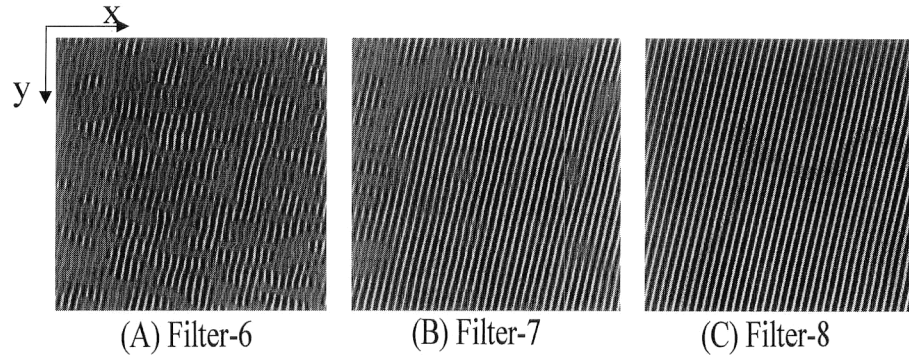


Fig. 9 Effect of the pass band of band-pass filters concerning the occurrence of optical dislocations in fringe image.

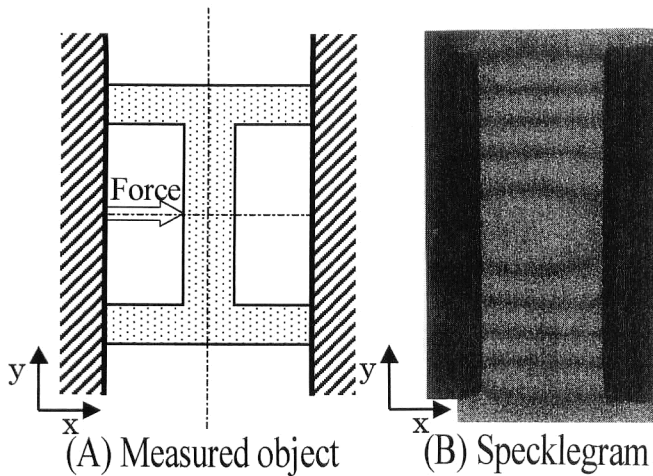


Fig. 10 Measured object in measurement of the in-plane displacement.

Table 2 Processing results in measurement of in-plane displacement.

	Before band-pass filtering	After band-pass filtering	Fringes image after filtering
Before deformation			
After deformation			

(C), (D) に示す。

通過帯域が狭隘化するに伴い, Fig. 7(B) に示した不規則な縞の部分は複雑な強度分布から変形キャリア縞本来

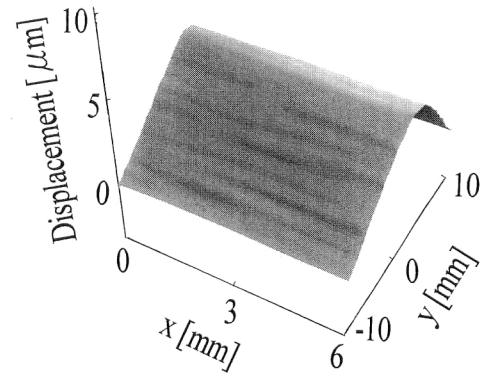


Fig. 11 Measured distribution of the in-plane displacement.

の周期的な波へと変化し, それに伴い Fig. 9(A), (B), (C) に示すように, OD の発生が解消されていることがわかる。ここで示すように, 変形キャリア縞が, 変形キャリア縞信号近傍のノイズ成分によって変調を受け, 複雑な形状をもつ強度分布になっていることがわかる。すなわち, OD の発生には単にコントラストが低下するということが問題ではなく, 縞の信号成分近傍に存在するノイズ成分との関係が問題であると考えられる。

この OD の構造を考えると, 周期的なキャリア縞情報の中に複雑な構造をもつ OD が生じるということは, 縞の信号成分にノイズ成分が結合し, ローカルに縞の信号成分が  $x$  方向・ $y$  方向に高い周波数成分をもって変調されていることを示唆するものであると考えられる。したがって, フィルタリング処理によって変調成分としての高い周波数成分を除去することによって, OD の発生が抑制されるものであると考えられる。しかしながら, 「いかに」あるいは「どのように」フィルタリング処理を行えばよいのかについては, 現在では不明であり, できる限りノイズを除去し, かつ信号情報を除去しないように処理する必要があるという表現にとどまらざるをえない状況でしかなく, この OD 発生問題の回避法については, 今後より詳細な検討が必要であると考えている。



### 3. 面内変位測定結果

Fig. 10(A) に示す H 型の厚さ 3 mm のアクリル樹脂により製作された測定対象に、矢印方向に圧電素子を用いて変位 ( $5 \mu\text{m}$ ) を与えた場合の面内変位分布を Fig. 1 に示す二光束法に基づく装置によって求めた変形縞画像を Fig. 10(B) に示す。この場合、1 縞が  $1 \mu\text{m}$  に対応するように設定されているので、発生する縞数からも、変形を与えられた中央部分で  $5 \mu\text{m}$  の変位が存在することがわかる。この測定対象に対して、空間的縞解析法を適用することによって、その面内変位を上記の議論に従った測定のパラメーター (スペckルサイズはピクセルサイズの 1.85 倍に設定し、フィルターの通過帯域は変形キャリア縞の信号成分を通過させるのに必要な最小の帯域を設定している) を用いて計測した。

Table 2 に変形前後のキャリア縞・変形キャリア縞の空間周波数領域での信号成分を、フィルター処理前後の結果として示している。また、それぞれのフィルター処理後の縞画像も示している。フィルター処理後の縞画像には若干の強度のむらが存在しているものの、OD は発生していないことを確認することができる。

これらの縞画像を用いて、縞の位相分布を空間的縞解析法によって求め、変形前後の位相分布の差を求めた後に、縞位相の  $2\pi \text{ rad}$  が  $1 \mu\text{m}$  に対応することによる換算を行った変位計測結果を Fig. 11 に示す。本手法によって、容易に面内変位分布を求めることが可能であることがわかる。

以上のように、スペckルサイズとピクセルサイズとの適切な関係とフィルターの通過帯域の適切な設定により、OD の問題を解消した ESPI に基づく縞解析処理が実施可能であることがわかる。

### 4. おわりに

本研究では、ESPI に基づく空間的縞解析において問題となる OD の発生を検討し、周波数領域においてキャリア縞信号成分周辺に存在するノイズ成分がキャリア縞にとっての変調成分となることを示した。その結果として、このノイズ成分が多数存在することによって OD の発生確率が高くなることを示した。このようなノイズ成分によるキャリア縞信号の S/N 比は、スペckルサイズとピク

セルサイズとの比率が大きい場合、あるいは小さい場合に低下し、さらに、この S/N 比低下現象が OD の発生確率を高くしていることを示した。したがって、S/N 比を向上させるためには、スペckルサイズとピクセルサイズとの比率を 1.8 程度に設定すること、さらに、バンドパスフィルターを用いてできる限りキャリア縞信号周辺のノイズ成分を除去することが大切であることを示した。これらの検討結果を用いた議論において、フィルタリング処理が OD 発生に対する問題の回避だけでなく、測定精度にも大きく関与していることを示した。以上の検討結果を用いた測定条件下では、空間的縞解析法を用いた ESPI に基づく縞解析が容易に実施できることを、アクリル樹脂により製作された試験片を用いた実験において示した。

### 文 献

- 1) R. S. Sirohi: *Speckle Metrology* (Marcel Dekker, New York, 1993) pp. 99-234.
- 2) G. Cloud: "Speckle correlation interferometry," *Optical Methods of Engineering Analysis* (Cambridge University Press, New York, 1995) pp. 440-476.
- 3) B. J. Thompson: *Electronic Speckle Pattern Interferometry Principles and Practice* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, 1996) pp. 1-518.
- 4) S. Nakadate and H. Saito: "Fringe scanning speckle-pattern interferometry," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 2172-2180.
- 5) J. Kato, I. Yamaguchi and Q. Ping: "Automatic deformation analysis by a TV speckle interferometer using a laser diode," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 77-83.
- 6) D. Malacara: "Phase shifting interferometry," *Optical Shop Testing*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 501-598.
- 7) 新井泰彦, 横関俊介: "2次元空間的縞解析法のスペckル干渉法への適用", *光学*, **29**(2000) 250-255.
- 8) M. Lehmann: "Phase-shifting with unsolved speckles: A theoretical investigation," *Opt. Commun.*, **128** (1996) 325-340.
- 9) I. Freund, N. Shvartsman and V. Freilicher: "Optical dislocation networks in highly random media," *Opt. Commun.*, **101** (1993) 247-264.
- 10) J. W. Goodman: "Some problems involving high-order coherence," *Statistical Optics* (John Wiley & Sons, New York, 1985) pp. 237-285.
- 11) J. Burke and H. Helmers: "Performance of spatial vs. temporal phase shifting in ESPI," *Proceedings of SPIE 3744 Interferometry '99* (Pultusk, Poland, 1999) pp. 188-199.
- 12) 新井泰彦, 横関俊介: "空間的縞解析法を用いた電子スペckル干渉法のパラメーター設定", *光学*, **30** (2001) 49-55.