

## 外乱の影響を受けにくい二波長光干渉応用変形測定法

金沢大学大学院自然科学研究科 橋本康弘, 安達正明

Deformation measurement using two different wavelengths of laser insensitive to air disturbance  
Grad. School Natural Sci & Tech, Kanazawa University Yasuhiro HASHIMOTO, Masaki ADACHI

In discontinuous deformations the techniques using a laser beam of single wavelength cannot measure the deformation amount. Because the deformation change between sequential capturings of specklegram would be larger than the wavelength of laser. We have developed the technique that can measure the large deformation having step-like discontinuities by using two laser beams of different wavelengths. This technique is here combing with a common path interferometor permitting the technique is insensitive to air disturbance.

## 1. 緒言

現在、非接触、高感性などの点からレーザを用いた光干渉応用計測技術が注目されている。しかし、光干渉応用変形測定では光路差のサブミクロンオーダの正確な制御が必要であり、振動や空気擾乱等の影響を受ける環境下での応用は難しかった。さらに、取り込み画像間での変形による光路差変化が測定に使用しているレーザの波長より大きい場合には、変形量を測定することができなかつた。本研究では、DSPI(Digital Speckle Pattern Interferometry)法に二波長レーザと共通光路干渉計を組み合わせ、突発の変形を測定でき、さらには外乱の影響を受けにくい高精度な変形測定法の開発を目的とした。

## 2. 変形量の測定原理

## 2.1 二波長光干渉変形測定法

波長が異なる 2 つのレーザ光の干渉画像をほぼ同時にかつ独立に記録し、2 つの光での位相変化量を別々に算出できれば、それらの差を用いることにより、波長より大きい突発の変形を正確に測定することができる。

例えば、2 つの異なる波長  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  の光源を用いて変形量を測定する場合、そのダイナミックレンジは次式で与えられる等価波長  $\lambda_{eq}$  まで伸びる。

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \quad (1)$$

今、それぞれの干渉光の位相を  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  とし、それらの位相差を  $\Delta\phi$  とすると、測定対象物の変形量  $d$  は位相差と等価波長を用いて次式のように表される。

$$d = \frac{\lambda_{eq}}{4\pi} \Delta\phi \quad (2)$$

故に、位相差の変化量を連続的に測定し続けることによって、1 画像取り込む間に波長より大きな突発の変形があっても、その変形量の時間変化を正しく測定することができる。

## 2.2 より高精度な変形測定に向けて

式(2)のみを用いて変形量を算出すると、実はノイズの影響をかなり大きく受けてしまう。よって、1 画像取り込む間の位相差の変化量  $\Delta\phi^i - \Delta\phi^{i-1}$  をある閾値  $\lambda_2\pi/\lambda_{eq}$  と比較し、波長より大きな変形があったかどうかを判別しながら次の 2 式を用いて変形量を計算する。

$$Cd_i = \frac{\lambda_2}{4\pi} (\phi_2^i - \phi_2^{i-1}) \quad (3)$$

$$Sd_i = \frac{\lambda_2}{2} \left[ \text{int} \left( \frac{\frac{\lambda_{eq}}{2\pi} \Delta\phi^i - \frac{\lambda_2}{2\pi} \phi_2^i}{\lambda_2} \right) + \frac{\phi_2^i}{2\pi} \right] - \frac{\lambda_2}{2} \left[ \text{int} \left( \frac{\frac{\lambda_{eq}}{2\pi} \Delta\phi^{i-1} - \frac{\lambda_2}{2\pi} \phi_2^{i-1}}{\lambda_2} \right) + \frac{\phi_2^{i-1}}{2\pi} \right] \quad (4)$$

式(3)は波長より小さな変形が起こった場合の変形変化量である。位相差変化  $\Delta\phi^i - \Delta\phi^{i-1}$  が閾値より小さいため、連続的変形が起こった判断し、 $\lambda_2$  光のみを用いて変形変化量を算出する。式(4)は波長より大きな変形が起こった場合の変形変化量である。 $\Delta\phi^i - \Delta\phi^{i-1}$  が閾値より大きいため、突発的変形が起こった判断し、 $\lambda_1$  光と  $\lambda_2$  光を用いて変形変化量を算出する。そして、測定時間内の合計した変形量を得るために、式(3)と式(4)から得られた測定時間中の変形変化量を加算していく。

## 3. 外乱の評価法

変形量測定中に空気擾乱や振動などが起こった場合、それが外乱となり光路差が変化する。この光路差変化量をもって外乱を定量化する。一般的な干渉系で得られる干渉縞の光強度を  $A(\theta) = I_A \cos\theta$  とし、また  $A(\theta)$  から位相を  $\pi/2$  ずらした所の干渉縞の光強度を  $B(\theta) = I_B \cos(\theta - \pi/2) = I_B \sin\theta$  とする。これらを、振幅が 1 で偏りのない光強度波形にするために次式を用いて  $A'(\theta)$  や  $B'(\theta)$  に規格化する。

$$A'(\theta) = \frac{I_A \cos(\theta) - I_{ave}}{(I_{max} - I_{min})/2} \quad (5)$$

すると位相変化量  $\theta$  と光路差変化量  $d$  は次の 2 式で表される。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{B'(\theta)}{A'(\theta)} \quad (6)$$

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \theta \quad (7)$$

このように、位相が互いに  $\pi/2$  ずれた 2 点の干渉縞の強度を測定することで光路上での外乱の影響を光路差として定量化する。

## 4. 実験装置及び方法

図 1 に実験装置の概略図を、図 2 に測定物体の概略図を示す。Ar レーザ光をプリズムで分光し、光強度の強い 2 つの波長  $\lambda_1 = 488.0\text{nm}$ 、 $\lambda_2 = 514.5\text{nm}$  だけを抜き出す。次にカメラ信

号に同期してレーザ光をシャッタリングする AO モジュレータにこれらを導く。その後、ビームスプリッタによって2つのレーザ光をピンホールに入れ、さらに物体光と参照光に分ける。物体光は対物レンズで広げて、測定物であるアルミ板の測定面に照射し、参照光はアルミ板に取り付けたコーナリフレクタで反射させた後、CCD カメラ前のビームスプリッタで、物体光と干渉させる。なお、この光学系は共通光路干渉計となっており、測定物の振動や移動、さらに空気擾乱による光路差変化の影響を抑えている。

CCD カメラは RESTERT RESET MODE を用いることにより、二種類の干渉画像をほぼ同時にかつ独立して取り込むことができ、その取り込み画像枚数は 100 枚とした。位相解析には、我々がこれまでに開発してきた位相測定法を用いた<sup>(1)</sup>。この位相測定法を用いることで、変形物体の干渉画像をコンピュータに連続的に取り込むだけで、全画素で取り込み時間領域の位相測定を行うことができる。

光学系 A は外乱を評価するための光学系である。半導体レーザ( $\lambda_d=700.0\text{nm}$ )の光をビームスプリッタ2つに分け、一方をミラーに、もう一方を測定物体に取り付けたコーナリフレクタに照射する。それぞれの反射光を干渉させ干渉縞の2点の光強度を光ディテクタから取り込む。変形開始後、測定物の干渉画像を連続して取り込むと同時に、光学系 A で干渉縞画像の2点の光強度を2つの光ディテクタから取り込む。これにより、この共通光路干渉計がどれほど外乱の影響を受けにくいかを評価する。

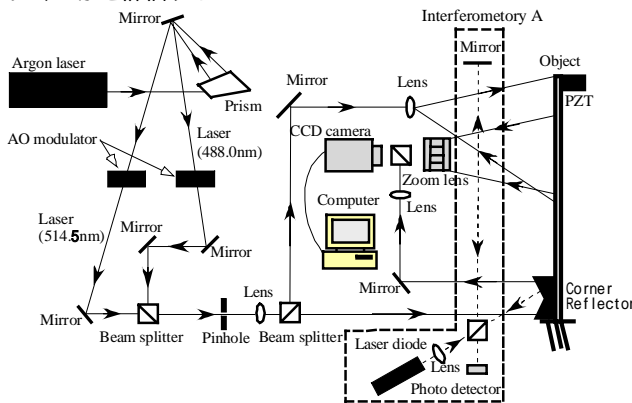


図1 光学系概略図

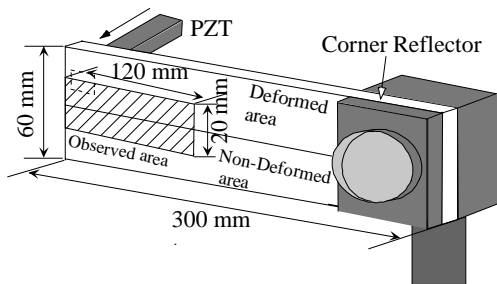


図2 測定物体概略図

5.測定結果

連続変形中の取り込み画像 50 番目に突発変形を与え、式(3)、(4)を用いて前記の方法で変形変化量を測定した。図3は取り込み画像番号 98 枚目の変形量の分布を示す。X 画素の 0~24 は変形を与えた領域で、X 画素の 24~40 は変形を与えない領域である。X 画素の 24 付近は測定物の切れ目の部分であり干

渉していないために信用性の低い領域である。変形量の分布には所々不連続な点が見られる。これは位相解析が正しく行われていない領域であり、これらの画素は干渉光の暗点になっており、コントラストが悪いためだと考えられる。また、図4にはある画素での変形量の時間変化と変形を与えている PZT への出力値を示す。

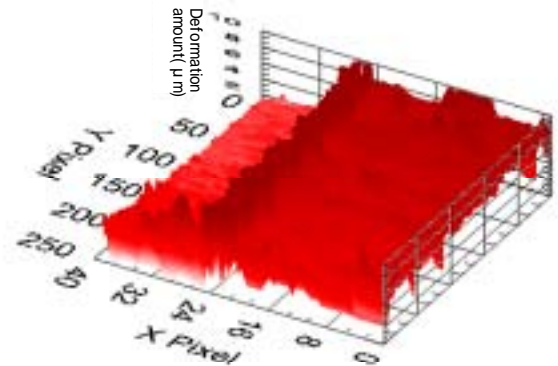


図3 取り込み画像番号 98 枚目の変形量分布

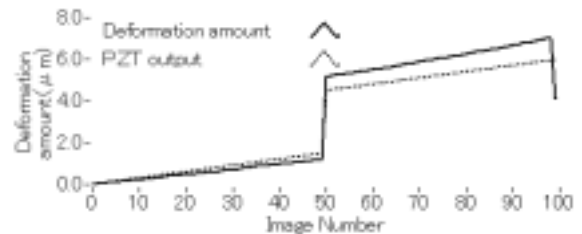


図4 変形量の時間変化

図5は、光学系 A で干渉縞画像を取り込んで、式(7)を用いて算出した外乱による光路差変化(Optical Path Length)を示す。外乱の影響によって、光路差が約 2.4 μm 程度変化している。ここで図4を見ると、この大きな光路差変化を持つ環境下でも正確に変形量が計測できることがわかる。

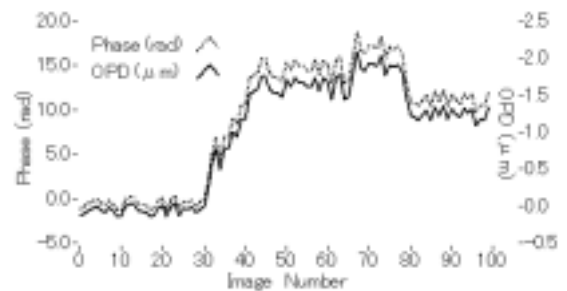


図5 外乱の光路差変化(OPD)と位相変化

6.結言

- ・二波長レーザを用いることにより、1 画像取り込む間に波長より大きな突発変形が起こった場合でも、その変形量を正確に測定することができる。
- ・共通光路干渉計を用いることで、2.4 μm の光路差変化の外乱を受けることなく、正確に変形量を測定できる。

参考文献

1.Y.Tambara and M.Adachi, "Deformation-phase measurement of diffuse objects by using two laser beams of different wavelengths" PROCEEDINGS OF SPIE 4902, pp. 608-616, 2002