

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：32601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870699

研究課題名(和文) 外乱振動下で使用可能なスペックル干渉ナノメートル変位測定法の開発

研究課題名(英文) Development of nano-order displacement distribution measurement technique using speckle interferometry under environmental disturbance

研究代表者

有川 秀一 (Arikawa, Shuichi)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：40581781

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：これまでレーザ干渉計測を適用できなかったランダムな外乱振動下で、スペックル干渉法による面内2軸方向の変位分布測定方法を確立した。多数の画像から干渉可能な画像を選出することで、500mW以下のレーザでも測定可能な手法を確立し、3脚に設置可能な小型干渉計を構築した。さらにレーザの偏光を利用した分離方法および位相解析を適用可能にすることで面内2軸方向の変位分布・ひずみ成分を取得可能にした。そのためこれまでレーザ干渉測定が困難であった様々な現場でのスペックル干渉測定が可能になり、多くのひずみ測定実験や非破壊検査技術への応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：A technique for displacement distribution measurement by speckle interferometry which can be applied under the random vibration as environmental disturbances was developed. In this technique, optimum images for obtaining interference fringes were extracted from a large number of speckle images captured at both initial and deformed states. A compact interferometer could be constructed on a tripod, because a middle-crass power laser could be used in this technique. Random phase stepping method was applied using multiple optimum images for each state. Bi-directional measurement was performed using polarizations of the laser beams for each sensitive direction. By these techniques, bi-directional displacement distribution and strain components could be obtained under the environmental disturbance. Therefore, it is expected that ESPI measurements are applied for various fields by the developed technique.

研究分野：材料力学、材料科学、光計測

キーワード：ひずみ測定 レーザ干渉 スペックル干渉法 外乱 位相解析 偏光

### 1. 研究開始当初の背景

レーザ干渉測定では他の手法では困難な微小範囲、すなわちレーザ波長の 1/100 のナノメートルオーダーでの変位測定を実現できる。特にスペックル干渉法は、観測面の面内変位および面外変位を全視野測定することが可能であり、粗面物体の乱反射光を利用することから様々な対象への適用が可能である。また材料力学の分野においては弾性変形のような微小変形の分布を測定するために最も有効な手法である。スペックル干渉法では、干渉縞を得ることができれば、その模様から定性的な変形状態の識別が可能であり、また一定精度の定量解析も可能である。さらに高精度な解析には干渉縞の位相解析が必要となる。外乱の無い環境で静的な現象を測定する場合には、位相シフト画像を用いる位相シフト法を適用できる。これに対し時間的に変動する現象を測定する場合には和差法<sup>(2)</sup>を用いた手法<sup>(3)</sup>や、ヒルベルト変換を用いた手法<sup>(4)</sup>がある。

スペックル干渉法はその感度の高さから実験室内で除振台を用いる等の外乱振動を十分に制御した環境で用いられているのが現状である。外乱振動のある環境もしくは時間変動のある現象を観察する場合には、動的な現象に対応させたシステムを用いる場合がある。この場合、高速撮影や非常に短い露光時間での撮影を必要とするため高出力レーザが用いられている。この場合レーザを外部に散乱させないための十分な対策が必要となる。

研究代表者らは比較的手易く危険性の低い 500mW 以下のレーザを利用して外乱振動下でも面内単軸方向の変位分布測定が可能なる手法<sup>(5)</sup>を確立してきた。これはランダムな外乱振動のある状況で連続的に画像を撮影した場合に、振動速度の十分に遅い瞬間に撮影された画像を独自に提案した方法<sup>(5)</sup>により識別することで実現している。また干渉計の小型化も可能であり市販の三脚に設置できる干渉計の構築も実現している。しかし実際の測定では直交する面内二軸方向の変位成分を要求するケースが多いため、単軸の変位測定から面内二軸の測定に拡張する必要がある。また干渉縞による定性的な測定ではなく、ランダム位相シフト法<sup>(6)</sup>を応用した位相解析が可能であることから、これを二軸方向に適用することで詳細な面内変位の測定が可能となる。

### 2. 研究の目的

従来レーザ干渉測定の適用が困難であった外乱振動のある環境において、静的な現象を対象にスペックル干渉法(1)を適用可能とすることで、外乱振動の振幅よりもはるかに小さい微小変位分布の測定を面内二軸方向に対して実現する。画像を多数枚取得して干渉可能となる画像を選出し、さらに干渉縞の位相解析により面内単軸の変位分布を得る

ことができる。本研究では同時に二軸方向の変位測定を可能にするためにレーザの光軸を直交方向に追加し、またそれぞれの偏光角度も直交させることで偏光による分離を可能とし同一視野を同時に二つのカメラで観察可能にする。本手法の確立により、外乱振動のある実環境における高精度ひずみ測定を実現できる。

### 3. 研究の方法

スペックル干渉法による面内二軸方向の変位測定を実現する干渉計の構築および最適な位相解析手法の検討を行う。干渉計については各軸方向でレーザの偏光角度を変えることで干渉した光をカメラの直前で分離し二台のカメラで同時に撮影できる小型の干渉計の構築を目指す。位相解析についてランダム位相シフト法等の適用を検討し本手法に最適な解析法の確立を目指す。これらを実現できた後には、本手法の妥当性および測定精度を理論的および実験的に検証する。この過程では実際の振動変位も測定する必要がある。これらをふまえて干渉計を改良し、最終的には実験室外での様々な対象の変形測定を行い提案する手法の有効性を示す。

### 4. 研究成果

(1)小型スペックル干渉計測システムを構築した。Fig. 1 には干渉系の概略図を示す。偏光を直交させた 2 組のレーザを垂直方向と水平方向から照射し、乱反射光をカメラで取得する。また偏光ビームスプリッタをカメラの前に設置し、各方向成分の偏光を分離したうえで 2 台のカメラでそれぞれ撮影可能とした。

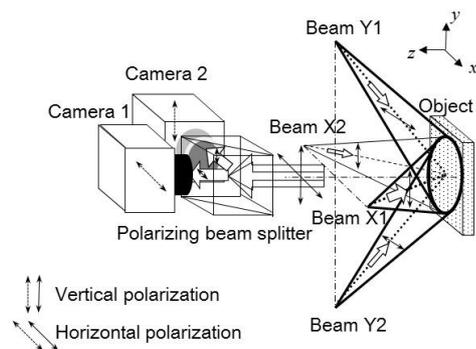


Fig. 1 Schematic of bi-directional measurement interferometer

実際に構築した小型干渉系の写真を Fig. 2 に示す。光源やカメラなどを含めた小型干渉系を市販のカメラ用三脚の上に構成することができた。なお、ケーブルを介して、光源の電源およびカメラの制御用コンピュータは別置きとなっている。実際は小型のキャスター付きの台に電源やコンピュータを設置しているため、測定システム全体として容易に移動可能な構成を実現できた。



Fig. 2 Bi-directional measurement interferometer constructed on tripod

(2) 偏光を利用し各感度方向のレーザ光を分離し、2台のカメラにより撮影可能にした。測定対象が金属でない場合や、金属表面に塗装がされている場合、その塗装面におけるレーザの反射では偏光が乱れるため、各感度方向の偏光を分離することができなくなり、また干渉測定も困難になってしまう。そこで、本研究では、アルミニウム粉末を測定面に塗布することで偏光の乱れを解決した。アルミニウム粉末を塗布した測定面に対する偏光成分の分離実験結果を Fig. 3 に示す。X 方向（水平方向）感度のレーザのみ照射した際の、各感度方向撮影用カメラで取得した画像が (a)、(b) であり、X 方向感度用カメラのみでスペックル画像が撮影されていることがわかる。同様に Y 方向感度のレーザのみ照射した場合の結果が (c)、(d) であり、Y 方向感度用カメラのみで撮影できたことがわかる。したがって、レーザの偏光を利用して各感度方向のレーザを分離することができたことが

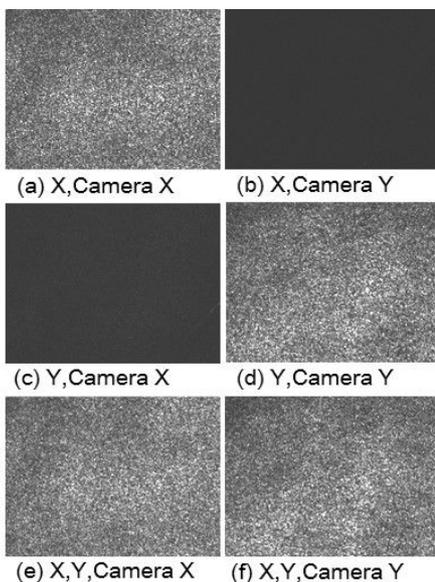


Fig. 3 Polarization separation test result

わかる。また XY 方向感度のレーザを同時に照射した場合に撮影された各カメラの画像が (e)、(d) である。この場合、一見両画像は同じようであるが、各方向感度用カメラでは、それぞれの感度成分のみが撮影できている。

(3) ランダム位相シフト法を適用可能にし、面内のひずみ成分の分布測定を可能にした。ここでは外乱振動かで多数撮影したスペックル画像から最適画像選出法により可干渉画像を複数選出し、その複数の過干渉画像を用いることでランダム位相シフト法による位相解析を可能にした。本手法の妥当性を検証するために面内回転を観察し位相解析をした結果が Fig. 4 である。(a) には Y 方向の変位に対応した位相分布、(b) には X 方向の変位に対応した位相分布を示している。この位相分布から求められる回転角度と実際に与えた回転角度は良い一致を示したことから、本手法が妥当であることを確認した。

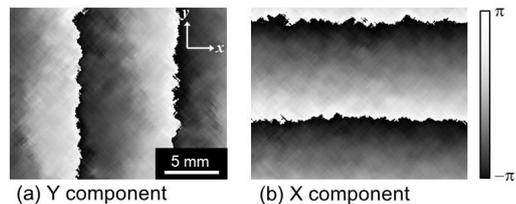


Fig. 4 Phase map obtained by random phase stepping method

(4) 実際の外乱振動下で圧力タンク溶接部の変形測定を開発した手法により行い、良好な測定結果を得た。ここでは Fig. 5 に示すコンプレッサータンクの溶接部近傍の圧力変化による変形の測定を行った。実験環境は、建物 2 階の実験室内で、干渉系および測定対象とともに除振台を用いずに実験を行った。図

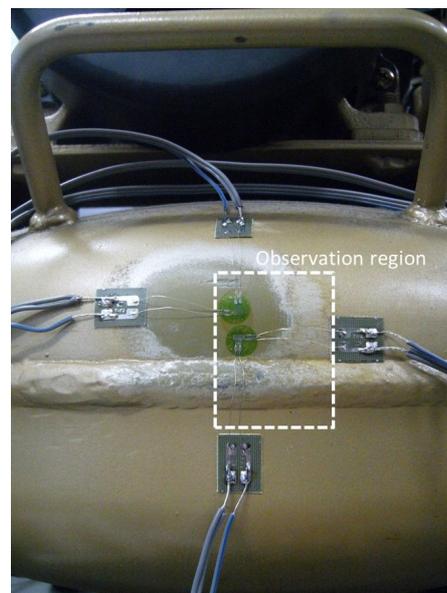


Fig. 5 Observed region around weld line of compressor tank

中の破線で囲む範囲が測定範囲となっており、スペックル干渉法による測定後に、図のようにひずみゲージを貼り付け、同じ圧力変化におけるひずみ測定を行い結果を比較した。また実験環境の外乱振動を実際に測定し、その成分を調査したところ、数 Hz と 20 Hz に強いピークを持つランダムな振動であり、これは、撮影時の露光時間が 1/20s 以上では測定が困難であることを意味している。実験では 1/100s 以下の露光時間で撮影を行った。この実験により得られた位相分布を Fig. 6 に示す。いずれの感度方向においても位相解析ができており、良好な偏光の分離および位相解析が行えたことがわかる。

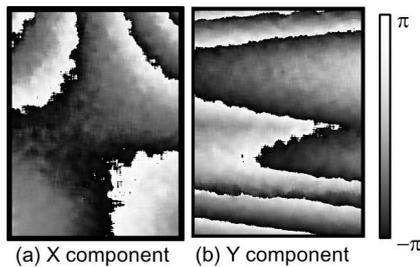


Fig. 6 Phase map obtained by proposed technique

得られた位相分布に対して、局所最小二乗法を適用し、レーザ干渉感度の係数および画像の倍率を考慮して得られたひずみ成分を Fig. 7 に示す。 $\varepsilon_x$ ,  $\gamma_{xy}$  では目立った分布は見られないのに対し、 $\varepsilon_y$  では溶接線に対し直交方向にひずみの分布が生じていることがわかる。

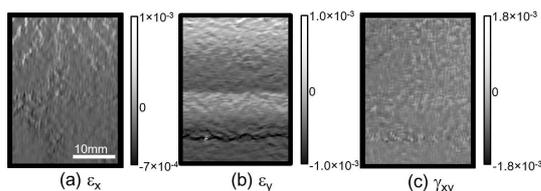


Fig. 7 Strain maps by local least squares

この観察の後にひずみゲージによる測定結果と比較したところ、近い値を示していたことから妥当な測定結果が得られと考えられる。なお、本測定では面内成分を測定しており、面外成分を測定していないため測定面が平面でない場合には、平面内に投影した成分を測定していることになる。したがって表面の勾配が大きいほどひずみゲージによる測定結果との誤差が大きくなる可能性がある。これを解決するためには、現在の 2 軸測定に加えて面外を含めた 3 軸測定を可能にする必要がある。現段階では平面である測定対象が平面と近似できる範囲の物体表面の測定に対して十分に有効な測定手法である。

(5) 本研究ではこれまでレーザ干渉計測を適用できなかった同期が困難なランダムな外乱振動のある環境に対して、スペックル干

渉法による面内 2 軸方向の詳細な変位分布測定方法を確立した。また多数の画像から干渉可能となる最適な画像を独自の方法で選出することで干渉計測を実現するため比較的入手しやすい 500mW 以下のレーザでも測定可能な手法を確立し、さらにレーザの偏光を利用した分離方法および位相解析を適用可能にすることで面内 2 軸方向の変位分布・ひずみ成分を取得可能にした。そのためこれまでレーザ干渉測定を導入を想定していなかったような様々な現場でのスペックル干渉測定が可能になり、多くのひずみ測定実験や非破壊検査技術への応用が期待できる。

#### < 引用文献 >

- (1) F. P. Chiang : ASM handbook Volume 17(1989)432, ASM International.
- (2) S. Yoshida, et.al. : OpticsLetters, 20(1995)755-757.
- (3) S. Toyooka, et.al. : Report of Cooperative Research Center, Saitama University, 2(2001)55-59.
- (4) 坂上賢一, 他 : 日本実験力学会講演論文集, 6(2006)31-32.
- (5) S. Arikawa, et. al. : Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 6-6 (2012)634-644.
- (6) Z. Wang, et. al. : Optics Letters, 29-14 (2004)1671-1673.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

#### [雑誌論文](計1件)

S. Arikawa and S. Yoneyama, Bi-directional Displacement Measurement by Speckle Interferometry Immune to Random Vibration, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 2015, Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics, Vol. 3, 2014, 89-95 (査読なし)

#### [学会発表](計1件)

S. Arikawa and S. Yoneyama, Bi-directional Displacement Measurement by Speckle Interferometry Immune to Random Vibration, SEM 2014 Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Greenville, SC USA, 2014

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

有川 秀一 (ARIKAWA Shuichi)  
 青山学院大学・理工学部・助教  
 研究者番号: 40581781