

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 18 日現在

機関番号：32601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760083

研究課題名（和文）偏光画像解析を用いた時間変動ひずみ分布測定法の確立

研究課題名（英文）A method for measuring time-variant strain distributions using imaging polarimetry

研究代表者

米山 聡 (YONEYAMA SATORU)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：90306499

研究成果の概要（和文）：光干渉法および光弾性法において、1枚の画像から縞模様を解析し必要な情報を抽出することで応力・ひずみ解析を行う方法を提案する。この方法では、干渉計や偏光器から現れる光を2枚のサバル板、1/2波長板および検光子から成る偏光解析光学系により解析する。これによりストークスペクトルの分布を得ることができる。光弾性縞や干渉縞の位相値はそのストークスペクトルから算出する。この提案する方法の有効性を検証するため、実際に光学系を構築し、干渉縞および光弾性縞の解析を行った。その結果、1枚の画像からそれら縞画像の解析が可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：A method for analyzing the fringe pattern from a single image is proposed for interferometry and photoelasticity. The emerging light from a polariscope or an interferometer is analyzed using an optical setup of a polarimeter that is composed of two Savart plates, a half-wave plate, and an analyzer. Then, the distributions of the Stokes parameters are obtained. The phase distribution of the fringe pattern produced by the interferometer is then calculated from these Stokes parameters. Similarly, the phases of the isochromatics and the isoclinics in photoelasticity are obtained by analyzing the emerging light from the polariscope. The effectiveness of the proposed method is validated by simple experiments of interferometry and photoelasticity. Results show that the fringe pattern analysis from a single image is possible by the proposed method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：機械材料・材料力学、ひずみ測定、画像処理、干渉、偏光

1. 研究開始当初の背景

各種材料・構造物の変形や破壊に関する研究において、従来からモアレ干渉法・スペックル干渉法・ホログラフィ干渉法などの光学

的測定法が用いられている。また最近では、簡便な測定法が開発されたこともあり、光学的測定法は実構造物の健全性評価など様々な用途に利用されるようになってきている。その

ような測定法の中で、デジタル画像相関法は時々刻々と変化する測定対象物の表面の画像から変位・ひずみの測定が可能である。本研究代表者もその方法を種々の問題へ適用している。その一方で、デジタル画像相関法は微小な変位・ひずみの測定ができない。微小な変形を測定する場合には光の干渉を用いる必要があるが、この場合、干渉縞画像の解析を必要とする。その方法として、フーリエ変換法、ウェーブレット変換法、位相シフト法などの種々の方法がこれまでに提案され、縞画像解析の自動化および高精度化が行われている。それらの方法の中でも、位相シフト法は簡単な計算で高精度な位相分布を得ることが可能であり、最も広く利用されている方法の一つである。しかしながら、従来の位相シフト法では複数の縞画像を必要とするため、それらの画像を撮影している間に縞模様の分布が変化するような状況においては高精度な解析を行うことはできない。すなわち、測定対象物体が振動する場合や、粘弾性問題やき裂進展問題の様に時間と共に変動する問題において、光の干渉を用いた方法による変位・ひずみ測定はほとんど不可能である。

以上の様に、比較的大きい変形に対しては、デジタル画像相関法を用いることで時々刻々と変化する変位・ひずみの測定が可能である。一方、微小変形の場合には静的な問題に対しては高精度な変位・ひずみ測定可能であるが、変位・ひずみ変動する場合の測定は困難である。このような問題を解決するため、これまでに位相シフト画像の高速撮影法や同時撮影法などが開発されている。中でも、複数のカメラを用い、それぞれのカメラにより位相シフトした画像を同時に撮影する方法が多く提案されている。しかしながら、これらの方法では撮影装置が大型化すると同時に、複数の画像間での空間座標位置の対応を調整する必要がある。本研究代表者も、これまでにマイクロ波長板アレイを有する CCD カメラを用い、光干渉法や光弾性法、デジタルホログラフィ法において一度の撮影により複数の位相シフト画像を取得する方法を開発してきた。また、このカメラを用いて、熱応力によりガラス板中を蛇行・分岐するき裂の応力場を世界で初めて測定し、開発した方法の有効性を示している。しかしながら、このカメラではマイクロ波長板を特殊な技術で作製し CCD に貼付ける必要がある。また、カメラそのものは一般的な CCD カメラであるため、高速現象などへの適用は不可能である。したがって、より簡便で、かつ高速度カメラにも適用可能な光学系を用いて、変位・ひずみ分布の変動の測定を可能とする方法の開発が必要である。一方、これまでのマイクロ波長板アレイを有するカメラを用

いた研究の結果から、偏光画像解析により干渉縞などの解析が可能であることがわかっている。また、偏光画像解析の分野において、一枚の画像から偏光情報を解析する種々の方法が提案されている。したがって、これらを組み合わせれば、変位・ひずみ分布の時間変動の測定を行う新しい方法を開発可能であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、偏光画像解析を利用し、複数の画像を必要とせずに、一度の撮影により得られた画像から干渉縞（ホログラム）や光弾性縞などの解析を可能とする方法を開発する。すなわち、静的問題だけではなく、振動などの影響がある屋外での測定や、時間とともに変形が進行する種々の現象においても高精度な測定を可能とすることを目的とする。位相シフトを利用しないことで、デジタル画像相関法と同等の簡便さを備えた方法の確立を目指す。

一枚の画像から偏光解析を行う方法として、複数のサバル板および半波長板などを組み合わせた光学系を利用した方法がある。原理的には、この方法を利用して変位・ひずみ測定を行うことは可能であると考えられる。しかしながら、実際に光学系を構築し、変位・ひずみ測定を行うことが可能かどうかについては未知の部分が多く存在している。また、この方法の空間分解能、変位測定の分解能、精度、適用範囲なども未知である。したがって、本研究期間内に、まず、実際に測定可能となる光学系を構築し、その精度や分解能について調査・検討を行う。それらが明らかとなり、測定が可能となれば、この方法を時系列データに適用することで、ひずみの時間変動を測定可能となる。

3. 研究の方法

本研究では、これまでのモアレやスペクルなどの干渉計に偏光ビームスプリッタ、波長板、偏光子などを追加することで偏光干渉計とし、干渉計から現れる光の偏光成分を解析することで干渉縞の位相値を決定する。偏光画像解析を行う方法として、複数のサバル板や波長板などの光学系を利用した方法を導入する。この方法では、干渉計から現れた光（この光に変位・ひずみの情報が含まれる）を複数のサバル板を用いることで4つに分離し、その光を干渉されることで得られる干渉縞を解析する。サバル板とは、図1に示すように、2枚の複屈折を示す板を重ね合わせたものであり、光の偏光状態に応じて光を分離することができる。この偏光画像解析法は、サバル板の特性を利用して入射光の偏光状態を調べる方法である。これにより光の偏光状態を表すストークスペクトルを

得ることができ、結果として変位・ひずみの情報を得ることができる。

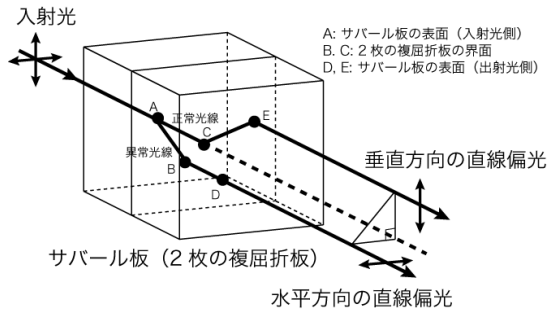


図1 サバール板の構造

4. 研究成果

(1) 偏光解析

図2に示すような、2枚のサバール板、1/2波長板および検光子から成る光学系を構築した。CCDカメラにより撮影された画像には、サバール板により分離した光同士の間隔が記録される。この画像をフーリエ変換し、この光学系に入射した光のストークスペクトルの解析を行う。

偏光状態が既知である光を入射し、実際に光の偏光状態を表すストークスペクトルを算出した。図3(a)はストークスペクトルが $\mathbf{s}^T = [1 \ -0.250 \ 0.433 \ 0.866]$ の偏光 (楕円偏光) を偏光解析光学系に入射した場合に得られた画像である。なお、この画像の寸法は 512×512 画素、色の深さは8ビットである。この画像に現れている縞模様は図2の光学系により生じた干渉縞である。理想的には等間隔でまっすぐな縞模様を得られるはずであるが、歪んだ縞模様が得られている。この原因は光学系のミスアライメントおよびレンズの歪曲収差が考えられる。この画像をフーリエ変換したスペクトル分布が図3(b)である。このフーリエスペクトル分布の中心がストークスペクトル S_0 を、横軸および縦軸上のピークが $S_{23} = S_2 + iS_3$ を (i は複素単位)、斜め -45° 方向のピークが S_1 を表す。これらのピークを抜き出し、逆フーリエ変換を行うことでストークスペクトルを得ることができる。ピークの抜き出しには半径10画素の円形のフィルタを用いた。図4はストークスペクトルを決定した結果である。ただし、 S_0 は $S_1 \sim S_3$ から決定できるため示していない。この結果から、入射した光のストークスペクトルが得られていることがわかる。

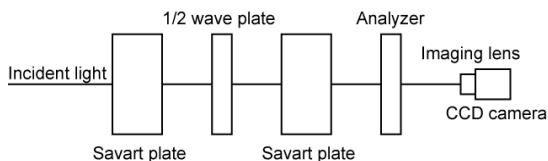


図2 偏光解析光学系

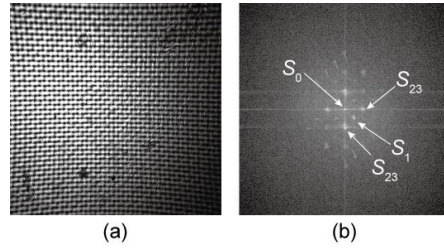


図3 (a) CCDカメラにより撮影された画像、(b) フーリエスペクトル

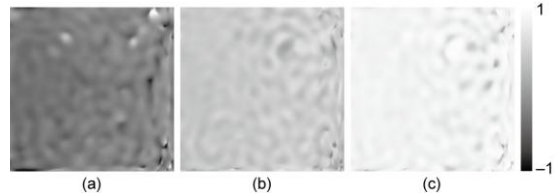


図4 ストークスペクトルの分布 : (a) S_1 , (b) S_2 , (c) S_3

(2) 干渉縞の解析

図5はマッハ・ツェンダー干渉計に2枚の偏光子を加えた光学系である。このような光学系を用いると参照光と物体光が直交するため、干渉縞を観察することはできない。一方で、この光学系を用いることで提案する方法による縞画像解析が可能である。

まず、試験片を用いずにキャリアパターンの解析を行った。図6(a)は光学系に偏光子を入れない場合に得られるキャリアパターンである。このような縞模様を得られる状態で光学系に偏光子を入れ、偏光画像光学系を通して得られた画像が図6(b)である。偏光画像光学系による細かい干渉縞模様が現れている。この画像をフーリエ変換することにより、図6(c)に示すフーリエスペクトル分布が得られる。前述した手順によりストークスペクトルを求め、さらにストークスペクトルから干渉縞の位相値を求めた結果が図6(d)である。この図に示すように、キャリアパターンの位相値が得られていることがわかる。すなわち、提案する方法により1枚の画像から干渉縞の解析が可能である。

次にき裂近傍の干渉縞の解析を行った。その結果得られた位相分布が図7である。図5の光学系を用いると、透明な試験片の主応力分布を得ることができる。そこで、得られたき裂近傍の主応力分布から応力拡大係数を決定した。その結果を表1に示す。この表に示すように得られた応力拡大係数の値は妥当である。すなわち、測定により得られた主応力分布の値は妥当であり、提案する方法の有効性を示すことができたと言える。

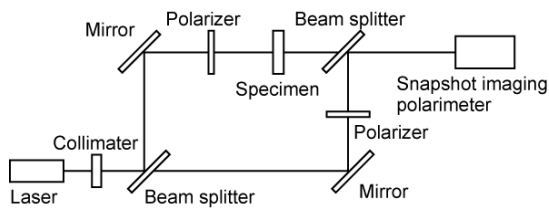


図 5 2 枚の偏光子を加えたマッハ・ツェンダー干渉計

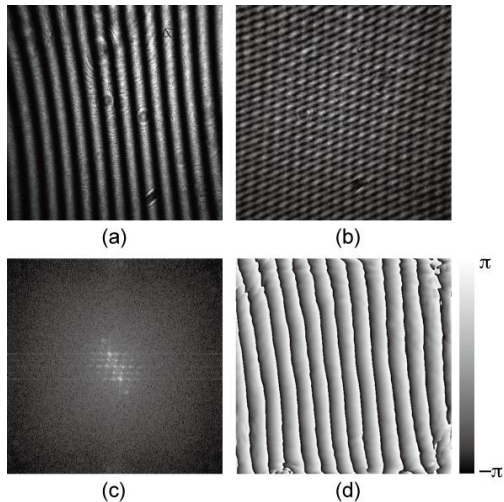


図 6 キャリアパターンの解析:(a) キャリアパターン, (b) 得られた画像, (c) フーリエスペクトル分布, (d) 位相分布

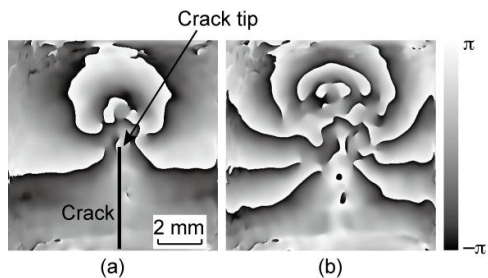


図 7 き裂近傍の位相分布:(a) 100 N, (b) 250 N

表 1 種々の荷重下で得られた応力拡大係数

Load	Theoretical K_I [MPa·m ^{1/2}]	Experimental [MPa·m ^{1/2}]
100 N	0.380	0.356
200 N	0.760	0.756
250 N	0.950	0.938
300 N	1.14	1.17

(3) 光弾性縞の解析

図 8 に示す光学系を用いて光弾性縞模様の解析を行った. 対抗圧縮荷重をうける円板を対象とした. 図 9 がその結果であり, 等色線および等傾線の位相値を表している. なお, 等色線は主応力差を, 等傾線は主方向を示している.

図に示すように, 等色線の位相値は全域にわたって得られているものの, 等傾線の位相値には誤差が多く, 等傾線の解析が可能であるとは言い難い結果となった. 等傾線は従来の方でも精度よく測定することは困難であることが知られている. 今後, 高い精度での測定を可能とするためには工夫が必要である.

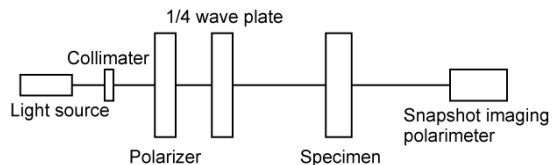


図 8 光弾性法の光学系

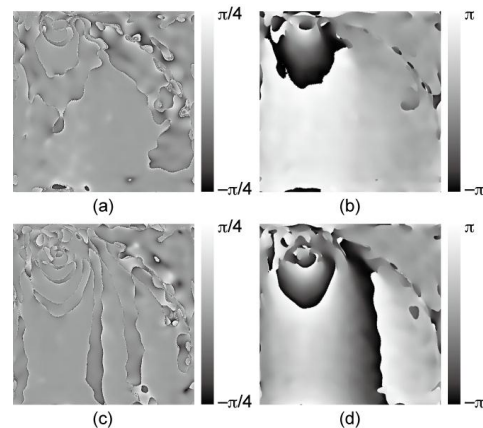


図 9 光弾性法に提案手法を適用した結果:(a) 等傾線の位相値 (200 N), (b) 等色線の位相値 (200 N), (c) 等傾線の位相値 (900 N), (d) 等色線の位相値 (900 N)

以上の研究により, 1 枚の画像から光弾性縞模様や干渉縞模様の位相値を得ることが可能であることを示した.

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)

[学会発表] (計 1 件)

- ① Yoneyama, S., Arikawa, S. and Kugiyama, Y., Interference and Photoelastic Fringe Pattern Analysis Using Snapshot Imaging Polarimetry, 6th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2011 年 11 月 3 日, 関西空港会議場 (大阪府泉佐野市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

米山 聡 (YONEYAMA SATORU)
青山学院大学・理工学部・准教授
研究者番号: 90306499