

課題番号	Q19T-02
課題名 (和文)	レーザー複屈折位相差顕微鏡の開発と応用
課題名 (英文)	Development and application of laser birefringence phase contrast microscope
研究代表者	所属 (学部、学科・学系・系列、職位) システムデザイン工学部 情報システム工学科, 教授 氏名 新津 靖
共同研究者	所属 (学部、学科・学系・系列、職位) 工学部 機械工学科, 教授 氏名 五味 健二
	所属 (学部、学科・学系・系列、職位) 氏名
	所属 (学部、学科・学系・系列、職位) 氏名

#### 研究成果の概要 (和文)

本文

レーザー光弾性法の複屈折計測手法を1点計測から2次元分布計測に拡張することを試みるため、高速度カメラを用いた全視野型位相差計測装置を試作した。複屈折の大きさと方向を同時にとらえるため、電気的に位相差を制御する光学素子「光弾性変調器」を用い、その変調周波数の10倍程度のフレームレートで輝度分布を高速度カメラで撮影した。時空間フーリエ変換を使って、各ピクセル位置の光量の周波数成分を求め、平均光量と1次と2次の振幅値からそのピクセル位置の光学的位相差(大きさと方向)を求めることに成功した。

#### 研究成果の概要 (英文)

本文

In order to try to extend the birefringence measurement method of the laser photoelastic method from one-point measurement to two-dimensional distribution measurement, we prototyped a full-field phase difference measurement device using a high-speed camera. In order to capture the magnitude and direction of birefringence at the same time, we used an optical element "photoelastic modulator" that electrically controls the phase difference, and measured the brightness distribution with a high-speed camera at a frame rate of about 10 times of the modulation frequency. Using the spatiotemporal Fourier transform, we obtained the frequency component of the amount of light at each pixel position, and succeeded in finding the optical phase difference (magnitude and direction) of that pixel position from the average amount of light and the first and second amplitude values.

### 1. 研究開始当初の背景

複屈折測定分野の研究動向は、ここ 20 年で大きく進歩したとは言い難い。偏光顕微鏡は依然として定量的評価はできず、かつ試料を回転させる方法が一般的である。レーザー光弾性法やその他の複屈折計測技術についても、リアルタイムで高分解能の複屈折位相差の分布を計測できるものはない。

複屈折計測で最も進んでいるのは、米国ハインツインstrument社と考えられる。計測分解能は 0.001 nm/±0.008 nm(繰返し再現性)を可能としているが、フォトディテクターとロックインアンプを使う方法のため計測速度は遅く、レーザーのスポット径は 1~3 mm もある。数千から数万点の分布計測では測定時間は数分間にもなり、高空間分解能の計測も困難である。計測分解能を 1~2 nm 程度にしても、高速にかつ高空間分解能で測定ができることの意味は大きい。

### 2. 研究の目的

材料内を透過あるいは反射する光を観測してその材料の状態を可視化する技術、すなわち顕微鏡は昔から、科学技術の発展に貢献する技術として発展してきた。光の性質上、観測できる空間分解能はその波長により制約される。最近では近接場光を利用

して、波長以下の分解能で観測できる近接場光顕微鏡も一般的になってきている。一方、光の横波としての機能を応用した顕微鏡として偏光顕微鏡がある。偏光顕微鏡は物質を透過した光の位相差を可視化する顕微鏡で、物質の屈折率の異方性を見るものである。しかし、屈折率の異方性を定量的に評価することは困難である上、位相差がナノメートル以下の小さな異方性を計測することは簡単ではない。申請者らはこれまでレーザー光弾性法を開発し、1ナノメートル以下の分解能で計測できることを示したが、光学系の調整や、温度管理、雑音除去など十分な注意を払って実現するものであった。また、2次元的に分布する位相差分布を十分な精度で計測する技術はできていない。ゼーマン安定化レーザーを使った方法で 0.01 nm の位相差を測る技術が開発されたが、この方法も分布計測に応用できないという問題がある。本研究では、レーザー光弾性法の複屈折計測手法を1点計測から高速度カメラを用いて2次元分布計測に拡張することを試みる。

### 3. 研究の方法

レーザー光弾性法では電氣的に位相差を制御する光学素子「光弾性変調器」を用いる。この変調周波数は最低でも 20 kHz であるため、2次高調波まで

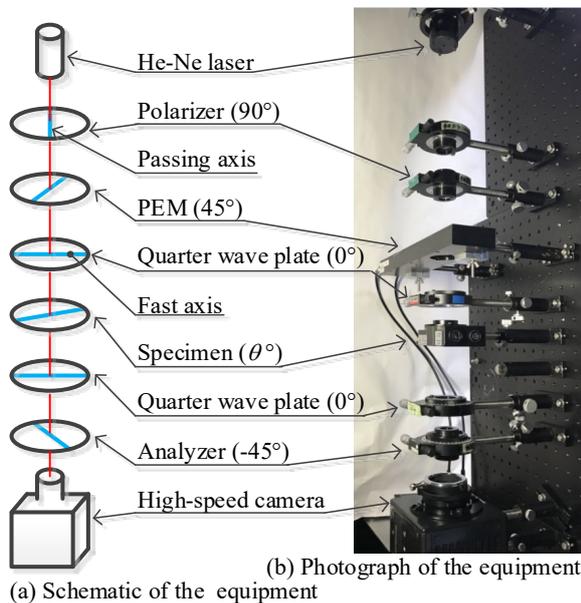


Fig.1 Schematic of the experimental equipment and photograph

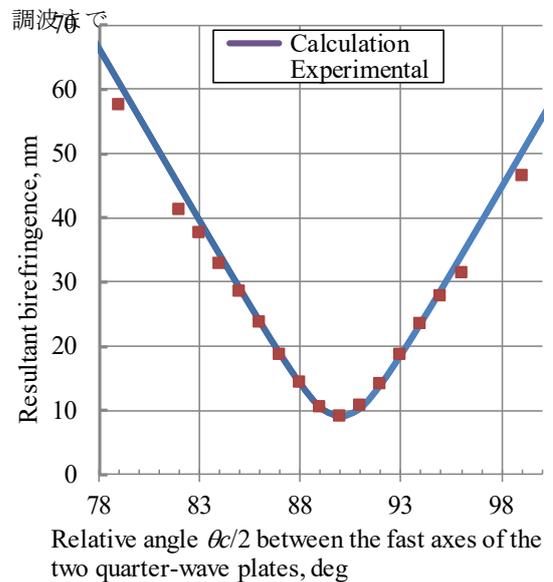


Fig.2 The relation between the relative angle  $\theta_c/2$  of the fast axes of the two quarter-wave plates and the resultant birefringence

分析するには毎秒 160 kHz 以上のサンプリングが可能な高速度カメラで画像を捉える必要がある。測定原理としては、時空間フーリエ変換を使って、各ピクセル位置の光量の周波数成分を求め、平均光量と1次と2次の振幅値からそのピクセル位置の光学的位相差（大きさと方向）を求める。欠点は、高い計測分解能を得ることが困難なことである。画像の各ピクセルの光量デジタル値は12ビットが限界でかつ電氣的雑音も1~2ビット含んでいることが主な原因である。本研究では2 nm 以上の測定分解能の実現を目指した。2 nm の測定分解能は市販の偏光顕微鏡の性能を超える値である。それも定量的に分布を求めることができる。実験装置を Fig.1 に示す。

#### 4. 研究成果

Fig.2 は、2枚重ねた1/4波長板のそれぞれの進相軸がなす角度（横軸）とそのときの合成複屈折の関係を表す。透過光の結像点1ピクセルの複屈折を縦軸としている。以後この2枚重ねの波長板をタンデム波長板と呼称する。実線が理論計算値、プロット群が実験結果に対応する。合成複屈折が30 nm 以上では数 nm の誤差が散見されるものの、30 nm 未満では理論値と実験値とのよい一致が見られる。

1ピクセルでの測定に成功したため、先のタンデム波長板の透過光の結像点における8×8ピクセルの複屈折分布を求めた。Fig.3 に試料の複屈折の測定範囲(a)と測定された複屈折 $\gamma$ の分布図(b)を示す。

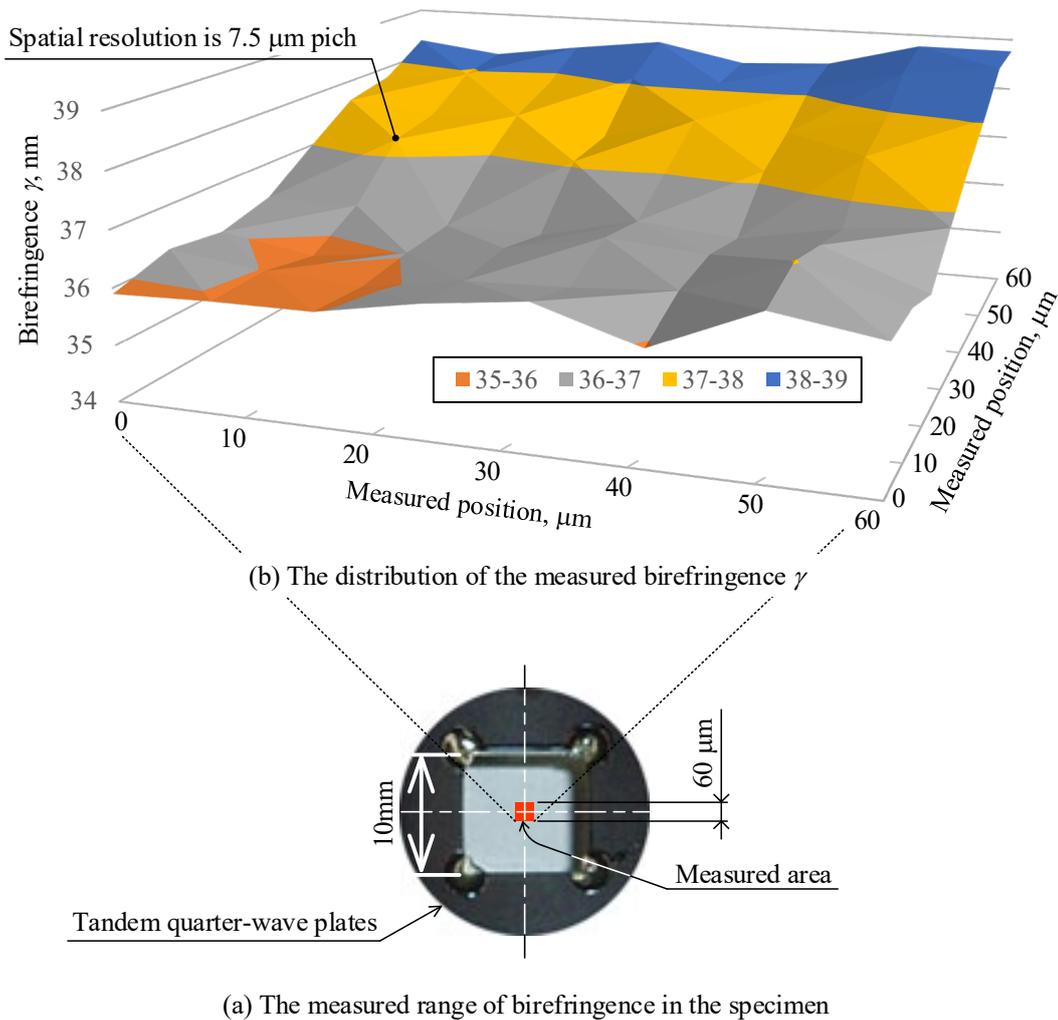


Fig.3 The measured range of birefringence in the specimen (a) and the distribution of the measured birefringence  $\gamma$  (b)

Fig.3(b)では、分布図の縦軸は複屈折量を示し、他の軸は測定位置を示している。分布図の手前から奥に向かって、複屈折の分布が滑らかに変化している。波長板は、研磨によって方解石の厚みを調整することで、所望の複屈折量を得ている。したがって、公称では面内で一定値とされている波長板の複屈折分布は、実際には単調に増減する滑らかなそれとなる。そして実験結果も同様の傾向を示している。以上の結果により研究の目的は達せられたと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計4件)

- ① Kenji Gomi, Yasushi Niitsu, Prototyping of high-speed full-field birefringence measurement equipment, SPIE, 2019年10月16日, Phuket, Thailand, 2名による査読.
- ② 田沼溪太, 五味健二, 新津靖, 高速度カメラを用いた複屈折分布測定, 日本機械学会, 2020年9月14日, 名古屋大学大学.