

# 偏光高速度イメージセンサを用いた 複屈折計測法

大沼隼志



博士學位論文

偏光高速度イメージセンサを用いた複屈折計測法

**Study on birefringence measurement method  
by high-speed polarization image sensor**

国立大学法人宇都宮大学 大学院工学研究科  
システム創成工学専攻

平成23年入学

117106C

大沼隼志



# **Study on birefringence measurement method by high-speed polarization image sensor**

## **Abstract**

This study provides measurement method of two-dimensional birefringence distribution by high-speed polarization image sensor. In the past 80 years, high-speed image sensor has been applying to various applications such as microscopy, strain measurement, and spectroscopic temperature measurement. On the other hand, by classifying those applications according to a three-element of the light, polarization has hardly used until now. In polarization measurement field, since polarization modulation techniques featuring rotating polarizer, photoelastic modulator and liquid crystal enabled the quantification, they have successfully applied to thickness measurement system, shape measurement system and birefringence measurement system. By paying attention to the birefringence field, requirements of birefringence distribution measurements are increasing based on activation of materials researches such as stretching test of optical films, and precision machining test of glass. On the other hand, because currently established systems have employed time modulation, it is difficult to apply them to dynamic phenomena. In order to overcome this problem, polarization image sensor has been proposed that can measure two-dimensional polarization by single photo-detection. However, since they employ general image sensors, they have difficulty to increase sampling rate. There, establishing of measurement methods for two-dimensional and high-speed birefringence phenomena was set as purpose of this study. A high-speed polarization image sensor has been designed and fabricated. It is composed of a pixelated polarizer array made by photonic crystal and parallel read out circuits with a multi-channel analog to digital converters. Parallel read out pixels have been connected directly with each polarizer in order to achieve higher

sampling rate of two-dimensional polarization detection. By installing it to the current high-speed camera, sampling rate of 1.3MHz has been achieved as high-speed and two-dimensional polarization detection system. Moreover, by applying phase shifting algorithm with circularly-polarized incident light, birefringence phase difference and principal azimuthal angle have become measured. Measurement accuracy of the system has been verified experimentally by using Babinet-Soleil compensator. Thus, in order to improve repeat accuracy, temporal and spatial signal averaging methods have been successfully demonstrated. Furthermore, lighting system with high-speed wavelength modulation has been developed in order to measure high order phase of birefringence distributions. It can be achieved to determine each order by two phase datas measured two wavelengths so called phase wrapping by coincidence method. Finally, measurement range of the phase difference has been expanded from  $\pi/2$  to  $3\pi$ . Moreover, three experiments have been conducted to establish high speed birefringence measurement methods. Firstly, high-speed birefringence distribution caused by impact hammer in acrylic bar has been visualized. Thus, velocity of birefringence distribution has been measured by tracking front edge of the birefringence wave in time series images. The result is in agreement with the theoretical values within several percent. Secondly, birefringence mapping method is proposed by using line measurement with external synchronization. By measuring transferring optical film, actual constructed mapping data is presented. Thirdly, an object with dynamic deformation and movement has been measured. Preliminarily-printed lattice pattern of the sample has been used in order to correct thickness and position coordinate of it by tracking each lattice point. By stretch test of the film, comparative verification has been conducted between proposed method and current method. By showing each principle and experimental result, a high-speed and two-dimensional birefringence measurement method can be newly proposed.

**Key words:** Birefringence, Measurement, High-speed, Image sensor, Pixelated polarizer, Polarization.

## 概 要

本研究は、偏光高速度イメージセンサを用いた複屈折計測法についての研究を行ったものである。高速度カメラは80年以上の歴史を経て、現在までに数多くの撮影手法が提案された。例えば、顕微鏡観察手法、光増倍観察手法、分光温度計測手法が挙げられる。一方で、それらの撮影手法を光学特性で分類すると、偏光を用いた手法が少ない。偏光計測分野では、回転検光子、光弾性変調器、および液晶を用いた手法により定量化が可能となり、膜厚計測、形状計測、および複屈折計測へ応用された。複屈折計測に注目すると、高機能材料分野において、フィルム延伸中の複屈折分布や、ガラス加工中の複屈折分布を定量化するための高速複屈折計測手法が必要とされている。しかしながら、従来の複屈折計測手法では、偏光素子を時間変調するため、動的現象の計測ができない。異なる手法として、偏光イメージセンサを用いた手法が提案されているが、従来のイメージセンサを用いているため、高速化が難しい。これらの背景を踏まえ、本研究は、高速複屈折計測手法確立と応用を目的とした。はじめに、高速複屈折計測装置化を行う。偏光高速度イメージセンサの基本原理は、マイクロ偏光素子アレイと高速度イメージセンサの並列読出し画素を直結し、高速化を実現するものである。マイクロ偏光素子アレイの開発仕様を作成し、フォトニック結晶を用いて外部委託制作した。イメージセンサは、ガラスやマイクロレンズ除去のため、専用プロセスで委託制作した。2つの素子を貼り合わせたセンサを従来の高速度カメラに組み込み、従来比6,500倍となる秒間130万枚までの偏光イメージング可能な偏光高速度カメラを実現した。高速複屈折計測装置化の基本原理は、円偏光をサンプルに入射し、透過光を偏光高速度カメラで検出し、得られた隣接4画素毎の光強度を用いて位相シフト計算することで、サンプルの複屈折位相差、および主軸方位を得るものである。はじめに、バビネソレイユ補償器を用いて複屈折計測精度検定を行った。つぎに、センサ起因のランダムノイズ成分に対して積算平均処理を時間的、空間的に行うことで複屈折位相差の繰り返し精度向上を実現した。さらには、計算を2画素シフトから1画素シフトにすることで空間情報を従来の2倍に高めた。また、2波長から得た複屈折位相差を用いて位相差計測

レンジ拡大を試みた。コーシーの分散式を用い、予め次数のしきい値毎に、2波長それぞれから得る位相差の差分理論値を求め、ルックアップテーブルを作成した。つぎに、仕様を作成し、外部委託制作した2波長変調LED照明装置を用いて実験値を取得した。4マイクロ秒毎に隣接2個のLEDが偏光高速度カメラと同期して交互点灯可能で、LED前面に任意のバンドパスフィルタを実装することで高速波長変調できる。バビネソレイユ補償器を用い、高次複屈折位相差計測を行った。2波長それぞれから得た位相差値の差分値とルックアップテーブル値を用い、合致法によって次数決定し、位相差計測結果をアンラップすることで、位相差計測レンジを従来の $\pi/2$ から $3\pi$ ラジアンへ拡大した。これらの基本性能確認と性能向上実験結果によって高速複屈折計測装置が実現された。つぎに、応用として、高速複屈折現象計測について述べている。高速伝播する応力分布計測では、衝撃時の材料内複屈折分布の可視化と、複屈折伝搬速度計測を行ったものである。伝搬速度の理論値は材料の物性値から求め、実験値は計測結果画像の複屈折伝搬先端座標と撮影速度から求めた。結果は理論値と96%一致し、秒速1,690mであった。以上の結果から、毎秒130万枚の高速複屈折伝搬速度計測を実現している。つぎに、広範囲の高速複屈折マッピング計測を行ったものである。偏光高速度イメージセンサをラインセンサとして用い、外部同期撮影によって得られた計測結果を隙間なく敷き詰め、計測面内を超える大きなサンプルの複屈折位相差マッピング手法を開発し、実際に透明フィルムを計測することで実用性を示している。さいごに、移動および変形する複屈折物体の計測を行った。フィルムを延伸し、計測位置移動と変形を同時に与えた状態で複屈折計測を行ったものである。サンプルに予め塗布した格子座標を追跡計測し、格子変形から厚みを求め、格子重心から計測位置を決定する。厚みの解析結果は、接触計測値と98.9%一致している。追跡した重心点の位相差計測結果に、厚みを与え、複屈折を計測することで、定点計測と0.01異なる複屈折値が得られ、開発した追跡複屈折計測手法の実用性が確認できた。以上の計測手法開発結果によって、高速複屈折現象計測手法を新たに確立したものである。

# 目次

## Abstract

## 概要

<b>第 1 章 研究背景および目的</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景	1
1.1.1 高速度撮影法および課題	1
1.1.2 偏光計測法および課題	9
1.3 研究目的	14
1.4 本論文の構成	15
<b>第 2 章 偏光高速度イメージセンサ</b>	<b>18</b>
2.1 偏光高速度イメージセンサの原理	19
2.1.1 偏光素子アレイ	19
2.1.2 高速度イメージセンサ	22
2.1.3 偏光高速度イメージセンサの構造	25
2.2 偏光高速度イメージセンサの開発	27
2.3 偏光高速度イメージセンサの基礎的な評価	28
2.3.1 偏光高速度カメラの構築	28
2.3.2 偏光高速撮影に必要な光量	29
2.4 本章のまとめ	32

<b>第 3 章 高速複屈折計測法</b>	<b>33</b>
3.1 偏光と複屈折	33
3.1.1 偏光	33
3.1.2 複屈折	37
3.1.3 偏光の表示	38
3.2 高速複屈折計測原理	41
3.2.1 複屈折計測原理	41
3.2.2 基礎実験	44
3.3 複屈折精度検定	46
3.3.1 精度検定実験	46
3.3.2 精度検定実験結果	49
3.4 高速複屈折計測法の精度向上	50
3.4.1 複屈折計測の誤差要因	50
3.4.2 計測精度向上原理	52
3.4.3 計測精度向上実験	56
3.4.4 計測精度向上実験結果	59
3.4.5 空間分解能向上原理	60
3.4.6 空間分解能向上実験および結果	61
3.5 本章のまとめ	64
<b>第 4 章 高速高次位相差計測法</b>	<b>65</b>
4.1 背景	65
4.2 高速高次位相差計測原理	66
4.2.1 複屈折波長分散表示	66
4.2.2 次数判定方法	70

4.3	高速波長変調照明装置の開発	74
4.3.1	高速波長変調照明装置の構造	74
4.3.2	LED 発光遅延時間	74
4.3.3	高速波長変調照明装置の仕様	75
4.4	高速高次位相差計測実験	78
4.4.1	実験装置	78
4.4.2	高次位相差計測実験	80
4.4.3	結果と考察	82
4.5	本章のまとめ	84

## **第5章 応用計測** **85**

5.1	高速伝搬する応力分布計測	86
5.1.1	背景	86
5.1.2	計測原理	86
5.1.3	実験	88
5.1.4	結果と考察	91
5.2	広範囲の高速複屈折マッピング計測	92
5.2.1	背景	92
5.2.2	計測原理	94
5.2.3	実験	95
5.2.4	結果と考察	96
5.3	移動および変形する複屈折物体の計測	98
5.3.1	背景	98
5.3.2	計測原理	99
5.3.3	実験	100

5.3.4 結果と考察	103
5.4 本章のまとめ	105
<b>第6章 結論</b>	<b>107</b>
<b>参考文献</b>	<b>112</b>
<b>謝辞</b>	<b>119</b>
<b>研究業績</b>	<b>121</b>

# 第1章 研究背景および目的

本章では、高速度イメージセンサを用いた高速複屈折現象の計測を論じるにあたり、研究背景と目的を説明する。はじめに、高速度カメラ開発史80年を振り返り、撮影速度を達成するために開発された技術について説明するものである。つぎに、高速度カメラと同時に開発された高速度撮影法について、それぞれの特徴を説明し、高速度撮影法の課題についてまとめる。さらには、偏光計測において、既に提案されている手法について、それぞれの特徴を説明し、現在までの課題を示すものである。また、偏光計測に対し、新たに要求されている計測法について偏光に関係する現象を踏まえ分析している。最後に、研究目的を示すとともに、目的達成に向けて必要となる研究課題について述べるとともに、本論の構成を説明し、結論する。

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 高速度撮影法および課題

高速度カメラは、研究開発分野向け専用カメラとして開発され、1900年代初めに開発の歴史が始まったものである<sup>1-3)</sup>。本論で報告する高速度カメラは、単一センサ、単一カメラ内部光路、かつ100枚以上の連続記録ができるものと定義する。したがってストリーク管方式や分光多面素子方式のカメラは含まれていない。

第一世代の高速度カメラは、高速回転するフィルムに光情報を直接記録するアナログ方式のカメラであった。フィルムは35mm, 16mm, 8mm幅が使われた。高速度化のための主たる部品は、フィルムを高速回転駆動させるためのスプロケットと呼ばれる歯車、モータ、カメラへの入射光を時間分割するための多面プリズムであった。この方式では、撮影速度はフィルムの搬送速度、多面プリズムの面数、多面プリズムの回転速度で決まる。開発当初は、フィル

ムの詰まりや、スプロケットの故障があり、高速駆動技術の安定化が技術課題であったため、たとえばスプロケットを減らした高速度カメラ開発が行われた。つぎに、高速化のためのプリズム多面化が進んだ。1932年に報告されているカメラでは2面、1941年には4面、そして1942年には8面となった。電圧を上げることによりフィルムの搬送速度も上がった。結果として得られた高速撮影速度は、1932年に毎秒2,000枚、1934年に毎秒4,000枚、1959年に毎秒10,000枚、1962年に毎秒12,000枚、以上のものが市販高速度カメラとして報告されている<sup>2)</sup>。1900年代初頭から、1970年代まで、フィルム方式は使われたものである。

第二世代の高速度カメラは磁気テープに記録した光情報を読み取るデジタル方式のカメラであった。高速度化に関係する主たる部品は磁気テープ、およびモータであった。撮影速度は磁気テープの搬送速度で決まる。フィルム方式で見られた、フィルム消費量過多の問題点を繰り返し記録技術で解決した。高速度撮影速度は、1970年代に秒間120枚、1978年に秒間200枚、1980年代に秒間2,000枚、以上のものが市販高速度カメラとして報告されている<sup>3)</sup>。1970年代から1990年代まで、磁気テープ方式は使われたものである。

第三世代の高速度カメラは半導体で作られたイメージセンサに記録した光情報を読み出し、DRAMに記録する方式のカメラである。高速度化に関係する主たる部品はイメージセンサ、アナログデジタル変換器、そしてDRAMである。この方式では、撮影速度はイメージセンサの読出し速度、アナログデジタル変換器の変換速度、DRAMの書込み速度で決まる。各デバイスは単体での性能に限界があるため、早期から並列処理が取り入れられた。アナログ変換器とDRAMは物理的には複数のデバイスを並べることで高速化が実現できるため、光電変換されたイメージセンサ各画素の電荷を並列に読みだすための回路設計が重要であった。イメージセンサの並列読出しライン数は、1980年代では32ライン、現在では100ラインを超える読出しがなされている。これらのライン数は半導体製造プロセスの集積化技術で決まる。結果として得られた高速撮影速度は、1989年に秒間1,600枚、1991年に秒間4,500枚、2006年に秒間5,400枚、2008年に秒間7,500枚、2013年に秒間13,500枚、そして2014年には22,500枚、以上のものが市販高速度カメラとして報告されている。1980年代から、現在において使われて

いるものである。

第四世代の高速度カメラは、イメージセンサの各画素で光電変換された電荷を、画素に直結した集積メモリに書き込む画素内メモリ方式のカメラである。高速度化に関する主たる部品はイメージセンサであり、撮影速度は画素からの読出し速度で決まる<sup>4, 5)</sup>。2005年には秒間100万枚、2012年には秒間1,000万枚が、市販高速度カメラとして報告されている。

以上のように高速度カメラは、センサ部品が年代とともに変わり、現在では、撮影速度が秒間1,000万枚に到達した。まとめとして、図1.1に高速度カメラにおける撮影速度性能推移を示す。

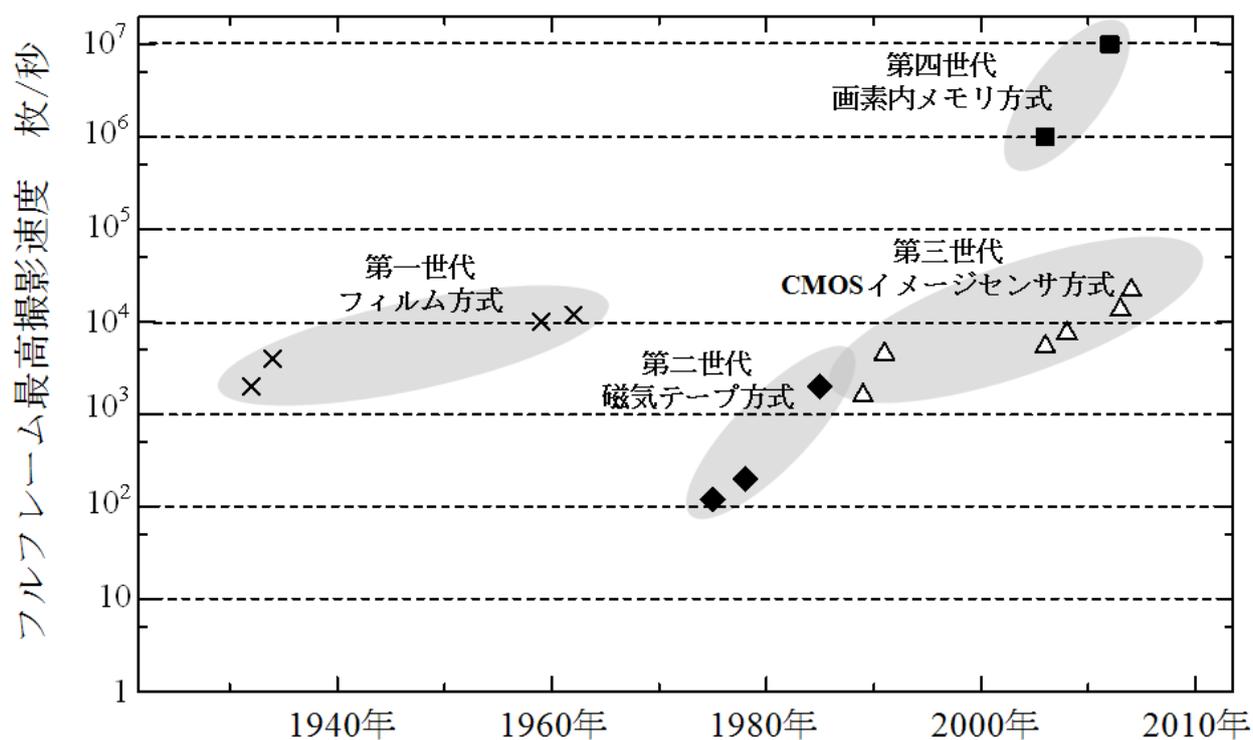


図1.1 高速度カメラにおける撮影速度性能推移

高速度カメラ開発と同時に高速度撮影法が開発された。それらを光学特性に分類し、表 1.1 に示したうえで、それぞれの手法の特長について説明をする。

はじめに、振幅を用いた手法では、可視化、画像情報による計測、および光学パターン計測について述べるものである。

可視化の手法としては、輝度観察、顕微鏡観察、および光増倍観察が挙げられる。輝度観察では、物体から反射、あるいは透過した光を高速度カメラで撮像し、高速現象をスローモーションで再生するものである。たとえば、自動車の衝突試験や、衝撃破壊試験への適用が挙げられる。顕微鏡観察では、高速度カメラと顕微鏡を組み合わせることによって、計測波長を最小空間分解能とし、高速現象をスローモーション再生するものである。微小領域からの反射光量が小さいため照明光量の検討が重要となる。予め物体への熱影響を考慮し、与える波長、エネルギー、照射時間を決定する。たとえば、インクジェットから塗出されたインク形状の観察や、半導体製造プロセスにおけるワイヤボンディング時のワイヤー震動観察、および生体一分子イメージングへの適用が挙げられる<sup>6, 7)</sup>。光増倍観察では、高速度カメラと電子増倍管を組み合わせることによって、光電変換された電子を二次放出によって1万倍化し、高感度撮影するものである。電子増倍管では、光電変換面や蛍光面の焼きつき等、過大光の入射によって増倍性能劣化が生じるために、入力光量を慎重に見積もる必要がある。適用例としては、電極間の微小発光解析や、エンジン燃焼初期の希薄火炎観察が挙げられる。

画像情報による計測としては、位置計測、面積計測、および粒子追跡計測が挙げられる。位置計測では、高速度カメラによって得られた時系列画像中の特徴点に、画像相関処理をかけ時系列追跡し、座標を求める。撮影速度情報と組み合わせることで、変位、速度、および加速度を求めるものである<sup>8)</sup>。カメラを2台用いたステレオ視によって、3次元座標を求めることも可能である。また、物体によって光の反射状態が変わるため複数のアルゴリズムが提案されている。たとえば、特徴的な物体形状を追跡する相関アルゴリズム、2値化した輝度重心を追跡するアルゴリズム、そして予め追跡アルゴリズムと一体となった十字線マーカを物体に付ける手法が提案されている。また、隣接する画素毎に得られた輝度情報に重みづけを行い、

画素サイズ未満の空間分解能で位置座標をもとめるサブピクセル補間と呼ばれるアルゴリズムも提案されている。予め物体の移動方向とイメージセンサの位置関係を考慮し、座標系を決めること、および必要な計測分解能を得るための画素サイズ、焦点距離、および撮影距離を用い、空間分解能を見積っておくことが重要である。面積計測では、高速度カメラ撮影によって得られた画像を、二値化処理によって計測領域分割し、領域に含まれる画素数から面積変化を時系列に計測するものである。希望する境界線が画像処理で分離しやすいように、予め背景との輝度差をつけるための撮影時の工夫や、光散乱などで境界線がにじまないように照明配置を工夫することが重要である。たとえば、エアバックの膨張試験や、紙に塗布されたインクの広がりやを計測することで得られる浸透速度計測への適用が挙げられる。粒子追跡計測では、PTV と呼ばれる流動場の計測手法がある。流れに混入された比重の等しい粒子を画像追跡することで流動を2次元、3次元にベクトル化できるものである。高速度カメラからの出力信号に同期されたレーザパルスでシリンダレンズでシート状にし、高速度カメラの光軸に対し垂直に流動場へ入射し、粒子からの散乱光を高速度カメラで撮影する。結果として得られた輝度情報に画像処理をかけることによって撮影視野内の全粒子を座標化し、撮影速度と組み合わせることによってベクトルを得る<sup>9, 10)</sup>。流動場に追従するための粒子サイズの選択が重要である。また、散乱光は粒子直径の二乗に反比例するため、空間分解能を高めるために更なる微粒子化を行った場合にレーザのエネルギーが高くなることが多く、安全面の注意が必要である。適用例として、自動車の空力特性評価や、人工血管を模したマイクロ流路の流動場計測が挙げられる。

光学パターン計測では、ホログラフィ法、およびスペックル法が挙げられる。ホログラフィ法は物体光と参照光の干渉光を予め得たうえ、再生光を照射することで物体の虚像を得るものである。ホログラフィの1つに、高速度カメラを用いた計算機ホログラフィ法がある。レーザ光を用いて平行光を作り、ビームスプリッタで二光束に分け、光学素子を用いて光路設計することで、一方の光束は物体に反射したのちイメージセンサに、他方は参照光として直接イメージセンサに入射することで、高速度イメージセンサ面に干渉像を得る。参照光方位

から再生光を当てることで、物体があった位置に虚像が再生されるが、この再生処理を計算機処理で行うことで、高速度カメラで得られた干渉像から 3 次元物体形状をデジタル的に得ることができる。ピント面がなく、奥行き情報の座標を得ることができるため、適用例として、移動量の多い物体の三次元位置計測が挙げられる。つぎに、スペックル法について説明する。紙などの荒い面にレーザ光を当てた時に得られる斑状の模様をスペックルと呼ぶ。スペックルの大きさ、およびコントラストを解析することによって、表面あらさや、拡散面の変位量を計測するものである。予め拡散面で生じるスペックルパターンの変化を記録しておくことで、高精度に変位量に分かる。そのため高速度カメラと組み合わせることで、二次元的振動計測を行うことができる。たとえば、自動車部品の振動試験や、デジタルカメラの機械式シャッター開閉時の振動評価への適用が挙げられる。

つぎに、波長を用いた手法では、可視化、および分光計測について述べるものである。

可視化の手法としては、カラー観察、および可視光外観察が挙げられる。カラー観察は一般にイメージセンサ面にパターン塗布された赤、緑、青のバンドパスフィルタを並べ、各フィルターを透過してイメージセンサで検出した光強度と、イメージセンサの分光感度特性を計算し、赤、青、緑の成分比によってカラー画像を再現するものである。高速度カメラは、高い空間分解能での撮影や、撮影後の画像処理が多いため、一般にモノクロカメラが多く使われるが、微細な部品が密集しているときに特定部品の動きを観察したい場合や、ガソリンエンジンの青色燃焼場を効率よく観察したいときにカラーカメラが適用される。可視光外撮影では、シリコンで制作された汎用のイメージセンサは感度を持たないため、可視光外に感度をもつ材料を用いたセンサが用いられるものである。長波長域では、既に秒速 1,000 枚以上の赤外高速度カメラが実用化されており、直接的に撮影することができる。赤外高速度カメラでは一般の高速度カメラに対して発熱量が大きくなるため、低ノイズで撮影する場合には、空冷や水冷といった冷却機構が組み合わされる。適用先としては、エアバック点火試験時の温度計測が挙げられる<sup>11, 12)</sup>。また、短波長域では、イメージインテンシファイアを用いて X 線や中性子線を光電面で検出し、蛍光面で可視光に変換した光を、ファイバーカップリング

された高速度イメージセンサで検出することによって高速度撮影するものである<sup>13,14)</sup>。被ばくする危険があるため、専門的な施設での撮影が一般的である。また、蛍光面の残光時間によって露光時間が決まるため、秒間 10,000 枚以上の撮影では残像が出やすい課題がある。たとえば、X線では、携帯電話やディスプレイの落下衝撃試験時における内部部品の振動評価への適用が挙げられる、中性子線では、エンジン内にオイルを循環させたときのオイルの流動性評価への適用が挙げられる。

分光による計測では、温度計測が挙げられる。各温度で物体から放射される光強度分布に波長依存性があることを利用し、複数波長から得た放射光強度比を求めることで、温度を計測するものである<sup>15)</sup>。センサに結像するためのレンズの焦点位置が波長毎に異なるため、光学系の制作が難しい。また、低温になるにつれ、たとえば数百度の領域では、波長毎の光強度比、および放射光強度が小さくなるため、計測が難しい。イメージセンサのリニアリティと低ノイズ性が重要となる。たとえば、セラミックの温度計測や、ディーゼルエンジン燃焼場温度計測への適用が挙げられる。

最後に偏光を用いた手法では、可視化について述べるものである。

可視化の手法としては、材料に圧力がかかった時に、光弾性効果によって生じる応力性複屈折を 2 枚の偏光板を組み合わせて可視化するものである。応力起因の複屈折が支配的である時には、応力集中点を簡単に見ることができる。たとえば、複雑な形状の樹脂成型品の落下衝撃試験において、負荷が生じる場所が、設計値とどの程度一致しているか評価する場合に適用される。

高速度カメラは高速かつ二次元の光検出器である。光によって解明される現象は限りなく多い。そのため、高速度カメラにおいても多くの撮影法が開発されてきた。それらを光学特性に分類した結果、振幅を用いた手法が最も多く、波長を用いた手法についても赤外や、X線に感度をもったセンサの利用によって用途が広がっている。一方で、偏光については、応用が非常に少ない。以上のことから、高速撮影技術に、偏光を付加することに大きな意味を感じるものである。偏光を用いた手法が未開拓な理由の 1 つとして、偏光に感度をもつ高速度イメージ

センサが実現されていないことが挙げられる。そのため、偏光高速度イメージセンサを実現することで、偏光高速度カメラ装置化を行い、新たな可視化、および計測手法の研究を行うことに強く興味を持ったものである。

表1.1 高速度撮影法

光学特性	分類	手法	計測対象
振幅	可視化	輝度観察	自動車破壊試験
		顕微鏡観察	生体1分子
		光増倍観察	微弱放電
	画像情報による計測	位置計測	運動フォーム
		面積計測	エアバック膨張
		粒子追跡計測	マイクロ流路
	光学パターン計測	ホログラフィ法	燃料噴霧粒子の粒度分布
		スペックル法	自動車部品の振動試験
波長	可視化	カラー観察	エンジン燃焼
		可視光外観察	装置内部の部品振動
	分光による計測	温度計測	セラミック温度
偏光	可視化	光弾性観察	ガラスの応力集中点

### 1.1.2 偏光計測法および課題

物体に入射した光の偏光状態を偏光素子を変調することによって解析することで、計測ができる。偏光計測法について、現在までに提案されている手法を表 1.2 に示す。

光変調方式としては、物質に電場が印可されたときに、電場の強さの 2 乗に比例した複屈折が生じるカー効果を用いた手法、同様に誘電体の等方性結晶に電場をかけた時に生じるポッケルス効果を用いた手法がある。

磁気を用いた変調方法では、磁気を平行な直線偏光を物質に透過させたときに偏光面が回転するファラデー効果を用いた手法がある。

電気的変調法では、液晶セルを用いた方法がある<sup>16,17)</sup>。電圧を印加し、液晶分子に 3 次元のひねりを与えることによって、可変位相子として機能させるものである。小型かつ簡単に変調素子を実現できる特徴があり、一方で高速変調が難しい課題がある。光ヘテロダイン干渉法では、周波数がわずかに異なる光を干渉させることで、光のうなりを生じさせ、一方の光を変調させることによって得られるうなりの変化から物質の複屈折を解析するものである。参照光を大きくすることで微弱変化を検出可能であることや、外乱による光強度振動の影響を受けにくい特徴がある。また、PEM(光弾性変調器)ではピエゾアクチュエータ等の圧電素子で光学素子に圧力を加えることで生じる応力性複屈折を制御し、偏光変調する<sup>18)</sup>。変調速度が高い特徴がある一方、素子材料の問題から面均一性や大型化が困難である。

機械的変調方法としては回転検光子法がある。入射側と出射側の偏光素子の回転角を一定の角度比を保ったままモータ等を用いて同期回転することで多周期混在の信号を得る。得られた信号をフーリエ変換することによって物質の複屈折を計測するものである<sup>19)</sup>。高精度化するためのキャリブレーション法が提案されており、実用化が進んだ結果として、産業分野で広く使われている<sup>20)</sup>。

偏光変調手法によって偏光計測の定量化が実現され、膜厚計測、形状計測、および複屈折計測装置として実用化されたことによって偏光計測の応用範囲が広がった。

研究的なアプローチとして、反射型多板検出法では光を素子内部で複数回反射させ、反射角度を決めておくことで得られる偏光を、それぞれの光路に設置したカメラで光強度検出し、得られた光強度を位相シフトによって計算することで偏光状態を解析するものがある。この方法では時間的な変調が必要ないため高速化が実現できる<sup>21)</sup>。その他にも高速化を実現可能な手法が提案されている<sup>22)</sup>。

また、チャネルド分光干渉を用いた手法では、2つの高次位相子の波数依存性を用いて、出力光を分光することによって得られた各波数の光強度変化を解析することによって1回のスペクトル測定でストークスパラメータの波長分布を1ショットで求めることができる<sup>23-25)</sup>。また、4ショットの分光情報をとることで、ミューラー行列を求める手法が提案されている<sup>26)</sup>。

以上のように高精度化、分光同時計測、高速化、について様々な素子を用いた手法が提案され確立されている。一方で、ミリ秒からマイクロ秒の高速領域において二次元計測するための手法は未だ空白領域として残されている。

表 1.2 従来の偏光計測法

変調方式	手法
光変調	カー効果
	ポッケルス効果
磁気変調	ファラデー効果
電气的変調	液晶
	光ヘテロダイン干渉
	PEM
機械的変調	回転検光子
その他	反射型多板検出
	チャネルド分光干渉

図 1.2 に実用化されている偏光センサの性能を示す。1次元偏光センサはサンプリング速度に優れる。光弾性変調器を用いた方法では 57kHz が実用化されている。その他の 1次元偏光センサは回転検光子、あるいは回転位相子を用いている。2次元検出素子については 260Hz 程度のものが既に提案されており、1ショットで 100 万点の偏光検出が可能となっている。それらは、後述するワイヤグリッド、電子線リソグラフィ、そしてフォトニック結晶によって実現されている。一方で、図 1.2 に破線で示す領域は未だ実用化されていない。

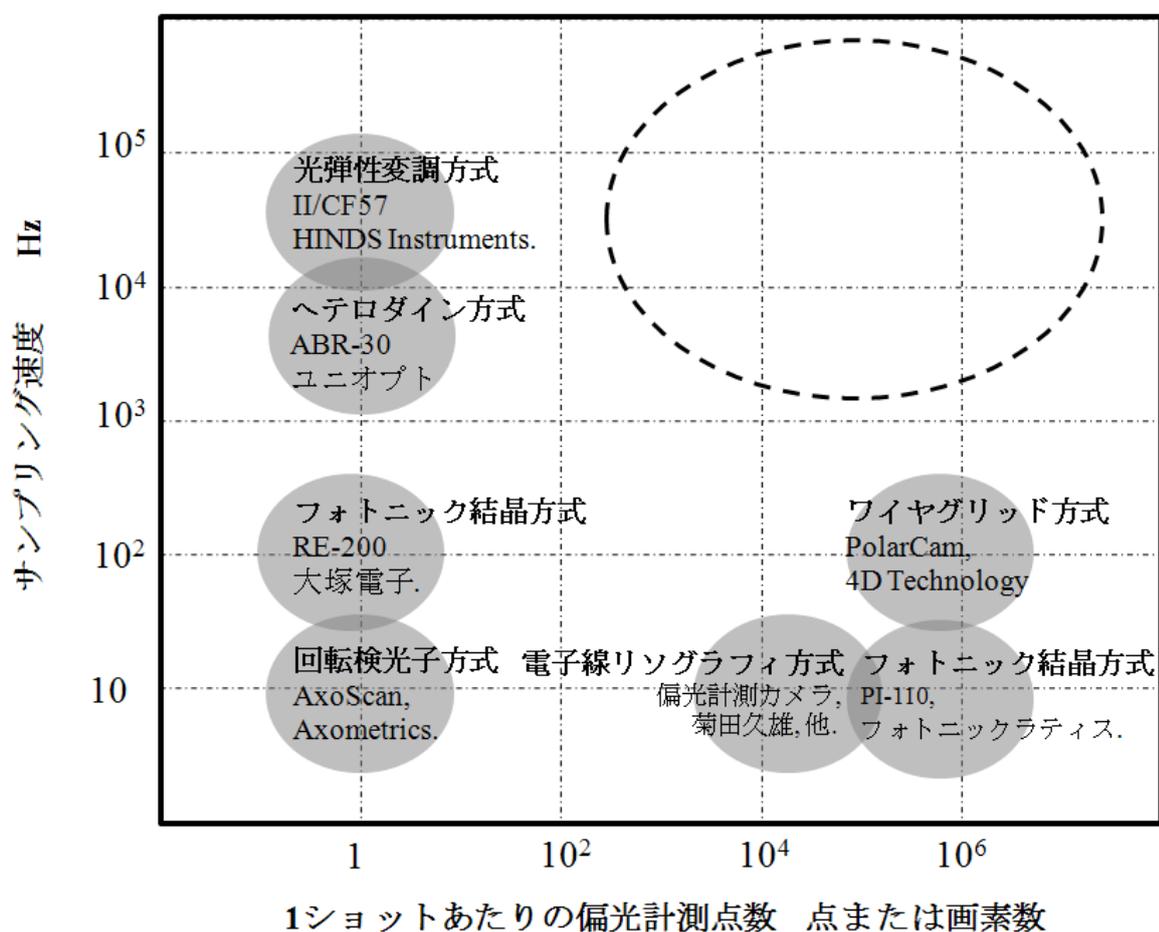


図 1.2 従来の偏光センサ性能と課題 (2014 年 2 月時点)

産業分野においては、ナノ技術、および液晶表示技術の発展により、高機能材料研究が活発化している。さらなる高機能化、高精度化が求められているため、ナノメートルの分解能をもつ偏光計測に対する注目が高まっている。高機能材料の事例を表 1.3 に示し、それぞれに必要な偏光計測パラメータ、および計測課題について述べる。

強化ガラスは、剛性が高く、かつ質感がよいためディスプレイの表面板として用いられることが多い。近年の携帯端末の小型軽量化に伴い、ガラスの薄型化が求められているため、厚み方向に応力分布を持たせた強化ガラスの量産化が必要とされている。一方で、材料内部に応力分布があるため加工荷重と加工速度制御が非常に難しく、歩留まりを上げにくい課題がある。加工に用いる小径ドリル等の回転速度はキロヘルツオーダー、かつ破壊は秒速数千メートルで伝播するため、高速かつ二次元で計測する必要がある。複屈折は応力と相対的に比例しているため、高速複屈折計測の実現によって精密加工制御への応用が期待できる。

表 1.3 偏光計測課題

材料	偏光計測パラメータ	偏光計測課題
ガラス	複屈折	高速伝播する応力分布計測
TAC	複屈折	広範囲の高速複屈折マッピング計測
COP	複屈折	移動および変形する複屈折物体の計測

トリアセチルセルロース (TAC) フィルムは非常に低複屈折かつバリア性が高いため、偏光板の保護フィルムとして用いられる。そのため、面内の複屈折分布があった場合には、ディスプレイの明るさムラに繋がる。近年の量産向け生産ライン速度の向上、ディスプレイ大型化に追従して、低複屈折と面均一性の維持が難しくなっており、面分布評価手法が必要となっている。従来の点計測ではフィルム面内の複屈折分布が計測できない。また、フィルムロールは、1ロールあたりキロメートルオーダーであり、さらに、フィルム生産ラインは24時間かつ365日稼働しているため、面内計測とともに、生産ライン最中に広範囲を連続記録するためのマッピング計測手法が求められている。

シクロオレフィンポリマー (COP) フィルムは、世界で初めて溶融押出法により生産された光学フィルムである。透明性と複屈折性に優れており、湿度に強いため、広帯域な波長板としてディスプレイ内で多く使われている。COP波長板では特殊な延伸技術で高分子配向を制御し複屈折制御を行っているため、延伸時の動的複屈折計測ニーズがある。従来の複屈折計測では点計測であるため、延伸時のフィルム変形による測定点の移動に追従できない。また、延伸機に接続されているロードセルから得られる応力値と伸長量から得られる歪み値はフィルム全体の平均値となるため、局所データを取ることができない。そのため高速複屈折分布を局所的に追跡計測するための手法が求められている。

### 1.3 研究目的

本論では高速二次元複屈折計測法の確立と応用を目的とする。

高速度カメラ開発の歴史と同時に高速度撮影法が開発された。しかしながら、光の 3 要素である偏光を用いた撮影法は現在までに提案が少ない。したがって、高速度カメラに偏光を付加することに技術的な意味を見出したものである。また、偏光計測分野では、偏光変調手法の確立によって定量化が可能となったことから、応用範囲が拡大しており、現在までに膜厚計測、形状計測、複屈折計測が実用化されている。また、高機能材料研究の活性化に伴い、ナノメートルの分解能で構造計測できる偏光への注目が、益々高まっている。現在までに要求されている偏光計測手法は、高速伝播する応力分布計測、広範囲の高速複屈折マッピング計測、そして移動および変形する複屈折物体計測が挙げられるが、実用化されていない。そのため、これらの技術課題を解決することに、さらなる技術的な意味を見出したものである。以上の背景を踏まえ、目的達成のために、以下の技術を実現する必要がある。

- ・高速イメージセンサに対する偏光検出機能付加
- ・高速複屈折計測装置化
- ・高速伝播する応力分布、広範囲の複屈折、および移動かつ変形複屈折物体の計測手法開発

そのため、はじめに、偏光素子、イメージセンサ、複屈折計測原理の調査と研究を進め、偏光イメージセンサの仕様を決め、制作することが必要となる。また、複屈折計測装置化では、基本性能評価を踏まえ、開発する計測手法に耐え得る誤差量、繰り返し精度、計測レンジ、計測速度を備えていることを確認し、不足する場合は、向上のための手法を開発する必要がある。また、新たな計測手法開発では、計測手法を立案し、理論的かつ実験的に確認していく必要がある。また、異分野の知識取得、および照明装置やアルゴリズムの付加開発が必要となる。以上の研究課題を解決するとともに、目的達成に向け研究を推進するものである。

## 1.4 本論文の構成

本論文は偏光高速度イメージセンサを用いた複屈折計測手法と題して 6 章で構成されるものであり、論文構成を図 1.3 に示す。

第 1 章では、研究背景と目的について述べるものである。はじめに、高速度カメラの高速度化の技術史を振り返ることで、高速度イメージセンサの移り変わりや、高速撮影性能の推移を示す。また、高速度カメラと同時に開発された撮影法について、現在までに提案されている手法を説明し、未開拓な撮影法を明示する。同様に、偏光計測について、現在までに提案されている偏光計測手法を説明し、偏光計測における現状課題を挙げる。それらの背景を踏まえ研究目的を決定し、目的達成のための技術的課題を明確に示す。

第 2 章では、偏光高速度イメージセンサについて述べるものである。はじめに、偏光高速度イメージセンサの基本原理について説明を行う。マイクロ偏光素子アレイの実現方法について示し、また、高速度イメージセンサと従来センサの違いを示す。それらを踏まえ、偏光高速度イメージセンサの開発仕様を作成し、外部委託することで制作された偏光高速度イメージセンサの仕様を説明するとともに、必要光量実験を行うことで基本性能を確認する。

第 3 章では、高速複屈折計測法について述べるものである。はじめに、偏光と複屈折の基本的な説明を行ったうえで、複屈折計測原理を示す。さらには、基本性能を確認するための精度検定結果を示す。つぎに、精度向上について取り組んでいる。時間的、かつ空間的な積算平均手法を提案し、実験的に得られた計測精度向上結果を報告する。さいごに、計算方法の改良によって空間情報量を 2 倍にし、空間精度向上を実現する手法について示している。

第 4 章では、高次位相差の計測法について述べるものである。異なる 2 波長から得た複屈折位相差を用い、位相差計測レンジ拡大を試みたものである。はじめに、波長分散の理論とコーシーの分散式を示す。つぎに、予め次数のしきい値毎に、2 波長それぞれから得る位相差の差分理論値を求め、作成された次数判定のためのルックアップテーブルを示す。さらには、2 波長計測に必要な波長変調 LED 照明装置の開発仕様を作成し、制作した結果について報告する。

最後に、バビネソレイユ補償器を用い、位相差の実験値、および次数の理論しきい値を用い合致法によって次数を決定し、実際の高次複屈折位相差計測を行った結果を示す。

第2章から第4章の結果によって複屈折計測装置を確立し、第5章では、高速複屈折計測課題に対し、応用計測手法を提案し、それぞれに実験的かつ理論的な検証を行ったものである。

第5章では、応用計測について述べるものである。はじめに、高速伝播する応力部分布計測法の研究について述べるものである。衝撃時の材料内複屈折分布の可視化と、複屈折伝搬速度計測を行った。伝搬速度の理論値を材料の物性値から求め、実験値的に得られた伝搬速度と比較検討することで、高速計測課題に耐え得る結果を示す。つぎに、広範囲の高速複屈折マッピング計測法の研究について述べるものである。偏光高速度イメージセンサをラインセンサとして用い、外部同期撮影によって得られた計測結果を隙間なく敷き詰め、透明フィルムの複屈折位相差マッピングを行っている。広範囲計測課題に耐え得る計測手法として、実現方法について説明したのち、搬送機で移動する視野範囲を超えるフィルムを計測することで得られた結果によって実用性を示す。最後に、移動および変形する複屈折物体の計測の研究について述べるものである。フィルムを延伸し、移動と変形を同時に与えた状態で複屈折計測を行った。計測手法について説明した後に、サンプルに予め塗布した格子座標と延伸装置を用いて実際に計測を行い、結果を示すことによって提案法の実用性について述べる。

第6章では、論文全体のまとめを行い、結論を述べる。

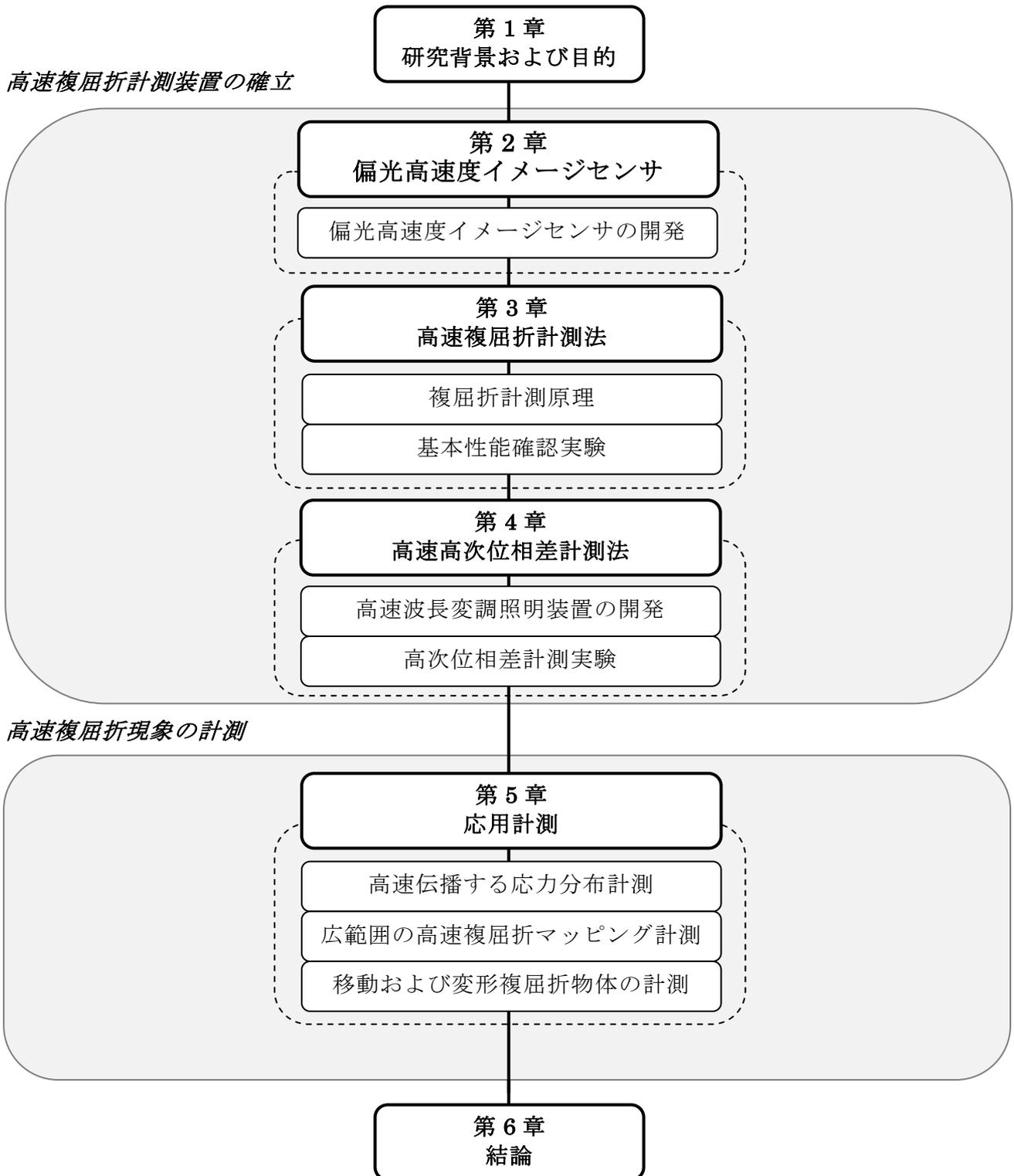


図 1.2 本論文の構成

## 第 2 章 偏光高速度イメージセンサ

偏光高速度イメージセンサの開発を行った。フォトリソ結晶型偏光素子アレイをイメージセンサの並列読み出し画素と直結することによって実現されたものである。提案する構造では、読み出し回路の並列数と等しい画素数を、センサの信号読み出し時間で処理することができるため、サブマイクロ秒での二次次元偏光検出が可能となった<sup>27-35)</sup>。また、バッジ処理的に並列読み出しエリアを組み合わせることで撮影速度を落とせば 2048×2048 画素で秒間 1,000 枚の偏光検出が可能となる。

はじめに、偏光高速度イメージセンサの原理について説明する。偏光素子アレイにの実現方法を挙げ、それぞれの特徴について述べる。つぎに、イメージセンサについて、従来のイメージセンサと高速度イメージセンサの違いについて構造を説明する。さいごに、偏光高速度イメージセンサの開発仕様を作成のうえ、偏光高速度イメージセンサを制作した。開発したセンサの基本性能について説明と評価を行う。

偏光高速度イメージセンサの基礎的な評価をするうえで必要な偏光高速度カメラの制作を行った。開発したセンサを従来の高速度カメラに実装することで実現したものである。偏光高速度カメラの動作フローについて示している。つぎに、高速撮影時に懸念される必要光量について、確認実験を行い、秒間 30,000 枚撮影時の必要光量を示している。

以上の結果から、高速複屈折計測装置に必要な偏光センサを実現している。

## 2.1 偏光高速度イメージセンサの原理

### 2.1.1 偏光素子アレイ

二次元的な偏光検出手法として、マイクロメートルスケールの偏光素子をアレイ状に並べた偏光素子アレイ法が実用化されている。近年、半導体プロセスの微細化技術が発達したことにより、波長以下の繰返し構造体の実現可能になった。数マイクロメートル単位の微小な偏光素子の繰返し構造を製造できる。この技術を用いれば時間的同時に、異なる方位の偏光強度を検出できるため、イメージセンサと組み合わせることで、動的偏光計測向け素子として適用できる。また駆動部を持たずに偏光検出ができるため、繰返し精度や、経年変化が少ないといった特徴をもっている。現在提案されている偏光素子アレイについて示し、それぞれの特徴について説明する。

図2.2は電子線リソグラフィ技術によって作られたマイクロ波長板のSEM写真である。電子線を用いて微細な構造を直接描画するため、直線偏光子や直線位相子といった偏光素子だけでなく、同心円状の偏光素子など複雑形状の素子を実現することができる<sup>36, 37)</sup>。そのためイメージングだけでなくレーザー加工用のレーザー集光素子等、応用研究が期待されている。一方で、レーザービームを用いて点から線へとパターンを順次描画していく必要があるため、1素子あたりの制作時間が長いという課題がある。近年、並列描画技術など、高速化にむけた研究報告がされている。

図2.3はワイヤーグリッドによって制作された偏光素子アレイである。一般にワイヤーグリッド偏光素子は、微細な金属ワイヤーを精密に並べることによって実現される。入射した光は、ワイヤーに垂直な成分が透過され、水平な成分は反射される。そのため光を振動方向で選択的に透過させることが可能であることから直線偏光子として機能する。製造方法がシンプルであることから、量産性に優れる。また可視光域から近赤外領域までを1つの素子を使うことができるため、測定波長の動作帯域が広いことが特徴である<sup>38-42)</sup>。課題としては表面構造が損傷に弱く取り扱いに注意を要すること、また曲率や三次元的な複雑形状に対しては製造が難

しいことが挙げられる。

図2.4はフォトニック結晶によって作られた直線偏光アレイの顕微鏡写真である。波長以下の微細パターンを描画した基板に、多重かつ連続スパッタリングをすることで積層された多層膜構造によって実現される。基板に描画された周期と同一周期の構造体を実現できるため基板設計を工夫することによって偏光素子アレイとして用いることができる。描画パターンに合った構造が成膜されるため、曲率構造等の複雑形状を実現できる特徴がある<sup>43-48</sup>。また、構造的に強固かつ安定しているために摩擦や熱などの外部環境に強い。課題としては、単一の素子において、測定波長に対する動作帯域の狭いことが挙げられる。

また、量産化されていないものの、薄いフィルムを細断し、画素単位に貼り合わせることで偏光素子アレイを作る技術など、多くの偏光イメージング技術が提案されている<sup>49-54</sup>。

以上のことから、近年では二次元偏光計測技術が高まっており、偏光素子アレイの重要性が増している。また、偏光素子アレイは複数の方法で実現が可能である。これらの技術は、今なお研究が進んでおり、それぞれの課題の解決に向け、更なる微細化、消光比向上、動作波長帯域の拡大などが期待されている。

本論では、フォトニック結晶型の偏光素子アレイを用いて偏光イメージセンサ開発に取り組む。1ショットかつ高速なサンプリング周期で偏光計測できるため、偏光の高速二次元検出が期待できる。将来的には、可視域外の偏光検出や、波長板型センサ等への発展性も期待される。

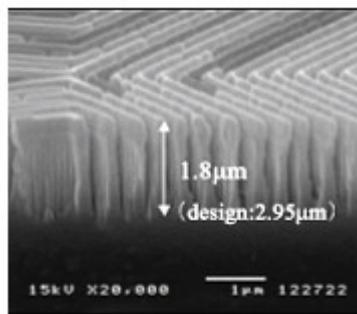


図 2.2 電子線リソグラフィを用いた偏光素子アレイ<sup>36)</sup>.

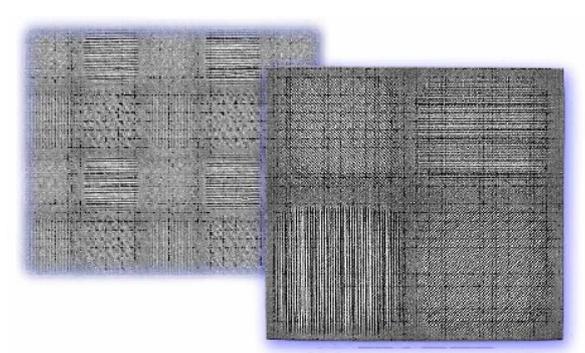


図 2.3 ワイヤグリッドを用いた偏光素子アレイ<sup>42)</sup>.

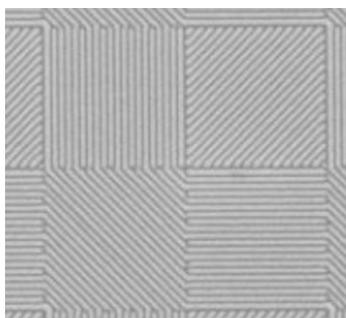


図 2.4 フォトニック結晶を用いた偏光素子アレイ<sup>44, 45)</sup>.

### 2.1.2 高速度イメージセンサ

物質に光が入射し、物体を構成している原子の近くにいる電子にエネルギーが加わって電子の移動が起こると電気が流れる。物質に電極をつけ、電流を作り取り出すことで光を電気信号に変換することができる。これを光電変換と呼ぶ。半導体では、外部から電圧をかけることなく電流を得ることが出来るため光電変換素子として用いられる。

イメージセンサは、撮像センサとも呼ばれる。撮像とは物体をそのままの姿として記録することを意味する。人間における撮像は目がもっているレンズ（水晶体）と絞り（虹彩）の機能を用い、網膜に結ばれた光による刺激を脳が感じることで行われる。イメージセンサに求められる基本的機能は人間の目としての機能に近い。そのため網膜で行われている作用を画素として並べたアレイ状の半導体で代替し、各画素にレンズによって光を結ぶことによって得られた電気信号を読み出し、画素の各座標を用いて信号強度を並べることで像(画像)が得られる。

イメージセンサは一般に読み出し方式の違いから CCD と CMOS の 2 種類に分けられる。

CCD イメージセンサでは水平、あるいは垂直に並んだ画素を同一ラインで転送し、増幅したうえで読み出す。そのため画素毎の増幅ムラが少なく低ノイズ (S/N が高い) という特徴がある。一方で、製造が読み出し回路に特化した専用プロセスとなることが多いため設計開発コストが高いことや、駆動電圧が高いという課題がある。

CMOS イメージセンサでは画素毎に電荷を増幅して読み出す。そのため画素毎の増幅ムラがあり、CCD と比べると一般にノイズが多い。一方で、低電圧駆動であることや、生産プロセスが標準化しやすく量産に向いている。また読み出し回路の設計方法を工夫することで高速イメージセンサの実現性が高い。

近年のイメージセンサは携帯電話や一般向けデジタルカメラで用いることが多いことから量産性や低消費電力の特長から CMOS イメージセンサが一般的に利用されている。1,000 万画素のセンサを携帯電話の中に納める必要性等から、今では画素サイズが波長程度まで小さく

なっている。さらには CMOS イメージセンサの普及によって CMOS 技術が発達することで、低ノイズ化も進み現在では CCD と比較した CMOS の欠点が少なくなっている。

ここで、高速度イメージセンサの特徴を示すものとして、**図2.5**に従来のイメージセンサ構造を示し、**図2.6**に高速度イメージセンサ構造を示したうえで2つの構造の違いについて説明する。

はじめに、共通項について述べる。**図2.5**および**図2.6**に示す通り、各画素にメモリが隣接していることが挙げられる。各画素で光電変換された電荷は隣接する各メモリに移された後、画素と接続する信号線を開放することで全画素の電荷読み出し完了まで新たな電荷がメモリに流入することを防いでいる。この機構により、イメージセンサは読み出し時間に関わらず、全画素の露光時間を時間的同時に保つことができるため、空間的に連続した像再生が可能となる。

次に、異なる点について述べる。読み出し方式、および量子化方法が異なる。従来のセンサでは各画素で光電変換され、各画素に隣接するメモリに蓄積された電荷は、順次読み出しによって量子化される。電荷読み出し回路は同一の回路が複数の画素に連なっており、(**図 2.5**) 水平または、垂直に配置されている。各画素の電荷はこれらの回路を通して順次読み出され、その後に A/D 変換機で量子化される。そのため電荷の高速読み出しが難しい。一方で、高速度イメージセンサは、メモリからの電荷読み出し回路が各画素に複数接続されているため、並列に読み出し処理をすることで高速化が可能である。例えば並列数を 4 本にすれば、従来センサと比較し、読み出し速度は 4 倍となる。最新の技術では、100 本以上の読み出し回路をセンサ内に構成し、並列読み出し処理することができる。さらには並列に読み出し回路線それぞれに、アナログデジタル変換機を実装し、並列処理することによって高速性を損なうことなく量子化することが可能である。これらの処理を繰り返し行うことで、高速撮影が実現する。したがって、高速度イメージセンサの並列読み出し線と 2 次元検出に必要な偏光素子アレイを直結することができれば、最高撮影速度を単一画素の読み出し時間程度とする高速二次元の偏光検出に特化したセンサが実現可能である。

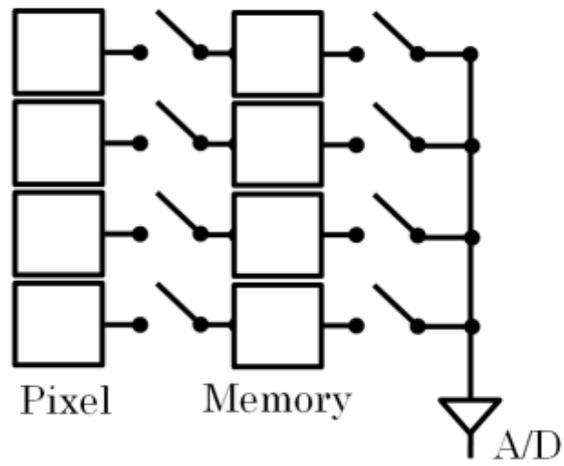


図2.5 従来のイメージセンサの構造.

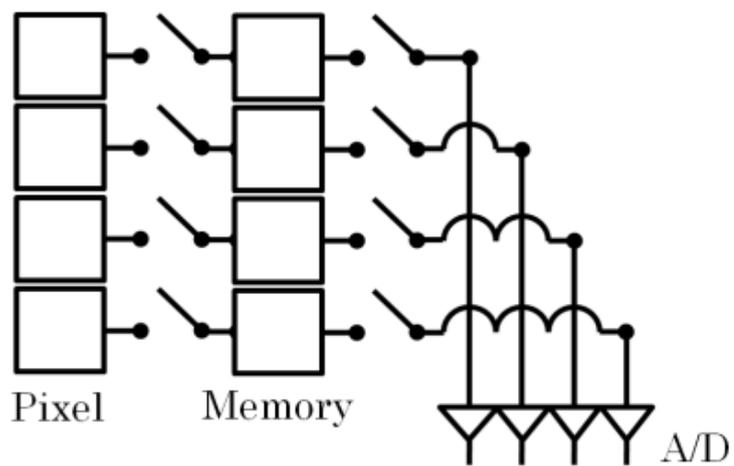


図 2.6 高速度イメージセンサの構造.

### 2.1.3 偏光高速度イメージセンサの構造

図2.7に偏光高速度イメージセンサの構造を示す。フォトニック結晶で作られた偏光素子1つのサイズはイメージセンサ画素サイズと同一の  $20\mu\text{ m}^2$  である。垂直水平に隣接する4個の偏光素子構造は、図に示す通り時計回りに45度ずつ主軸方位の異なる直線偏光子で構成される。そのため4個から得られた光強度を組み合わせることで、駆動部のない回転検光子として機能する。イメージセンサの水平垂直4画素は1:1で各直線偏光子に対応しており、かつ4画素の電荷を出力するための並列読み出し回路が4画素それぞれに実装されている。そのため、4画素から時間的同時、かつ1回の読み出し処理で電荷を取得することができる。提案するセンサでは4×4画素が基本構造となる。2×2画素で1点の偏光計測が行うため、4×4画素の同時処理は2次元検出の最小単位となる。以上の構造によって、時間的変調なしに1度の読み出し処理で二次元的な偏光分布情報が取得できる。

また、順次読み出しを行わないために、センサの純粋な読み出し時間程度で2次元処理に必要な電荷を出力することが出来る。そのために2次元面の読み出し速度が最大化する。時間的な繰り返し検出をするためには読み出した信号を量子化し、画素に蓄積された電荷を連続処理しなければならない。そのために読み出し線1つ1つにA/D変換器が接続されている。この構造によって、読み出し速度を損なうことなく量子化し、同時に高速読み出し処理を繰り返し行えるため、高速偏光検出するためのセンサとなる。

また、基本構造の並列数を増やすことで、より多い測定点数の2次元偏光検出ができる。並列数は理論的に無限にできる。しかしながら、画素を横断する読み出し線が露光エリアを圧迫すること、各画素の開口率を小さくするとセンサ感度が下がり必要光量過多になること、以上のことからイメージセンサ内に信号線を配置する面積は実情として限られる。そのため並列読み出し線の数量も有限となる。

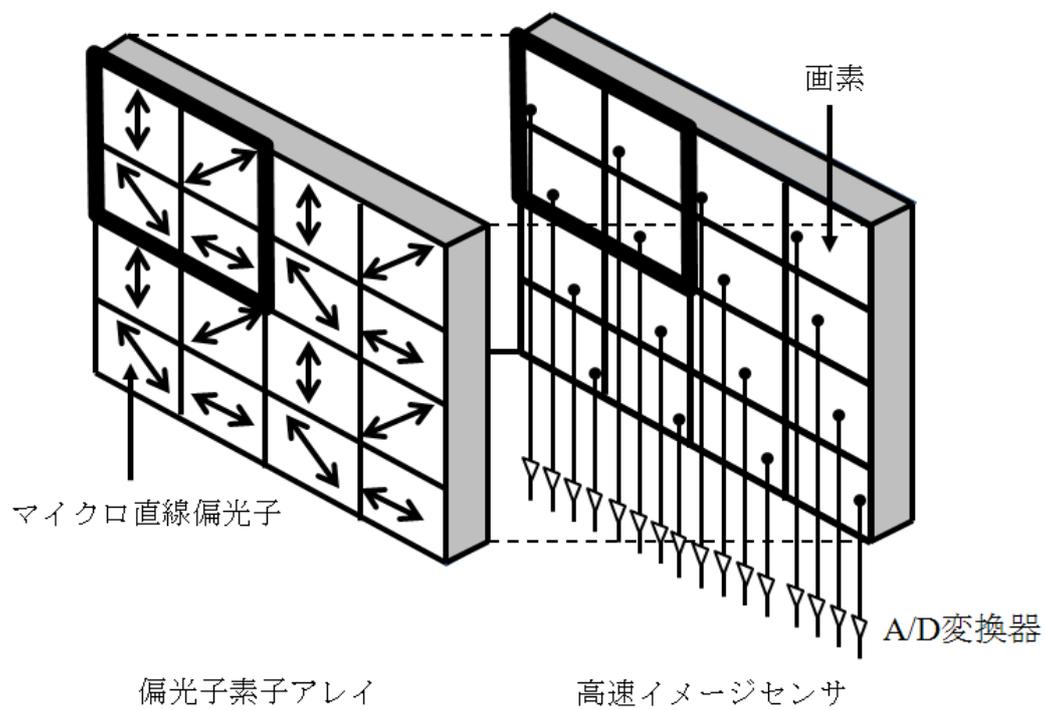


図 2.7 偏光高速度イメージセンサの構造

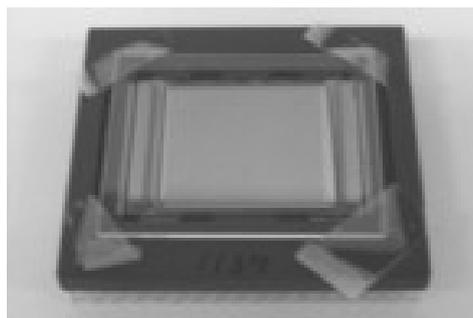


図 2.8 偏光高速度イメージセンサの外観写真

## 2.2 偏光高速度イメージセンサの開発

表 2.1 に示す開発仕様を作成し、外部委託することで偏光高速度イメージセンサを制作した。外観写真を図 2.8 に示し、仕様を表 2.1 に示す。最高サンプリング速度を秒間 130 万枚とする 2次元偏光検出が可能になった。また各画素には時間同時性を保つためのメモリが実装されているため、順次読み出しと組み合わせ、バッジ処理をしていくことで、撮影速度を落とせば、より多くの画素数で偏光検出が可能である。技術的には 2,048×2,048 点の二次元偏光情報を秒間 1,000 枚得ることができる。そのため、サブマイクロ秒の高速現象を捉えることや、ミリ秒の動きを高精細に取るなど、計測ニーズに合わせて適用できる。

表 2.1 偏光高速度イメージセンサ仕様

イメージセンサ種	高速度イメージ CMOS
最高有効画素数	1,024×1,024 画素
画素および偏光素子サイズ	20×20 $\mu$ m
偏光素子アレイ種	フォトニック結晶
偏光素子種	直線偏光子
隣接 4 画素の偏光子主軸方位	0°, 45°, 90°, 135°
二次元最高計測点数	262,144 点
二次元最高撮影速度	秒間 130 万枚

## 2.3 偏光高速度イメージセンサの基礎的な評価

### 2.3.1 偏光高速度カメラの構築

開発した偏光高速度イメージセンサを、従来の高速度カメラに組み込むことによって、偏光高速度カメラ化を行った。動作システムを図2.9に示し、以下に各部の機能とともに説明する。(a)では各種光学系を用いることができる、光学系を任意に接続できるため、実験目的に応じて計測範囲を拡大縮小できる。顕微鏡を用いれば波長程度の空間分解能で2次元偏光計測が可能となる。また、各種光学素子をセンサ前面に配置することができるため、偏光素子を用いた偏光変調、バンドパスフィルタを用いた入射光波長の制限、分光器を設置することでの偏光と分光情報の同時取得等が可能である。(b)の撮像素子部には偏光高速度イメージセンサが実装されているため、2次元かつ高速で異なる4方位の偏光強度を連続記録できる。撮像素子によって読み出された光強度情報を持った電気信号はA/Dコンバータによって量子化され、(f)のCPUによって制御されながら(d)のカメラ装置内部のメモリに保持される。メモリはリングバッファ構造となっているためメモリサイズが許容する撮影時間の限り、トリガ前後の記録が可能である。また外部からの電氣的または接点を用いたトリガに対し、数百ナノ秒の誤差量で同期記録ができる。(e)のディスプレイ部では、偏光処理した結果を映像情報として実時間でモニターに表示することができるため、ビデオレート程度で偏光情報を直接観察しながら作業を進めることができる。最大で64GB分のメモリ部に保持されたデータは(g)のギガビットイーサネットIFを通し、RAW形式でPCへ転送、および保存できる。保存したデータに対して(h)が示す任意の計測アルゴリズムを適用すれば、高速度二次元に検出した偏光情報に対して計測処理ができる。

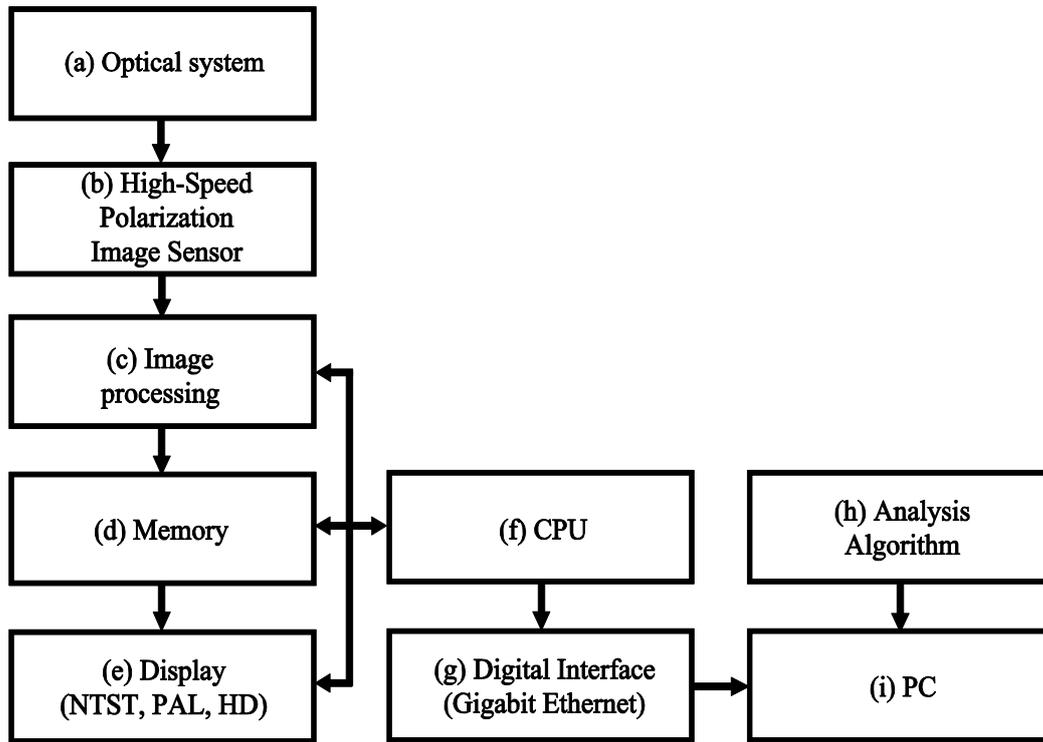


図 2.9 偏光高速度カメラの動作システム

### 2.3.2 偏光高速撮影に必要な光量

高速度カメラは高速撮影するための必要光量を懸念される場合が多い、必要光量過大の場合には、目的の偏光検出するために光量が膨大になるだけでなく、被写体への熱影響や、装置の大型化に繋がる。そのため予め必要光量を見積もることが重要である。そこで、実験的に秒間 30,000 枚の高速度偏光検出をした際の光エネルギーを測定し、結果として得られた必要光量について、イメージセンサに入力するフォトン数や量子効率から整合性を検討し、光量を事前に見積もるうえで必要な実験的評価を行った。図 2.10 に実験に用いた光学系を示す。光源から出射し、バンドパスフィルタ、直線偏光子、および 4 分の 1 波長板を通過した光は 1/30,000 秒の露光時間に設定された偏光高速度カメラに入射する。偏光高速度カメラで得られた出力信号を量子化した値は 4096 階調中の 1750 階調程度であった。偏光高速度カメラに

用いたイメージセンサにおける 1 画素の飽和電荷量は  $3.5 \times 10^4$  個であることから、カメラが検出した電子数は、 $1.49 \times 10^4$  個となる。その時の光強度を図 2.11 で示す通り分光放射強度計で測定し、得られた光強度を用い、偏光高速カメラによって得られた電子数との整合性を確認した。

入射エネルギーが画素に入力した後、画素で電荷として読み出されるまでの流れを 1 つ 1 つ述べる。計算の流れと結論を表 2.2 に示す。測定によって得られた光強度は  $2.5 \text{ W/m}^2$  であった。偏光高速カメラの 1 画素サイズは  $20 \mu\text{m}^2$  であるため、1 画素領域のエネルギーは  $1.0 \times 10^{-9} \text{ W}$  と見積もられる。この時の光子数はプランク定数と測定波長(520nm)から計算することにより  $2.75 \times 10^9$  個程度となる。偏光高速カメラの露光時間は  $1/30,000$  秒としたため、1 枚の画像あたり 1 画素に取り込まれる光子数は  $9.17 \times 10^4$  個となる。さらに、直線偏光を通過することで光子数は半分になる。また、イメージセンサの光電変換効率と画素面積に対する開口面積を示す開口率の積の 0.3、および 520nm の分光感度が最大量子効率比において 20%程度低下することから 1 画素に蓄積される電荷量は  $1.1 \times 10^4$  個と見積もられた。そのためカメラから出力される信号強度  $1.49 \times 10^4$  個と 73.8%一致した。入射光側が小さい要因として、偏光素子の消光比率、およびイメージセンサの光電変換効率の誤差が考えられる。

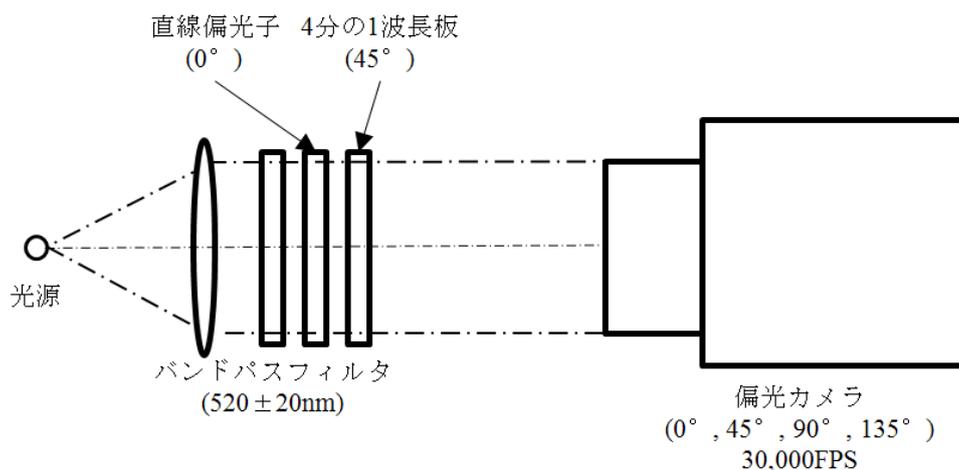


図 2.10 実験装置

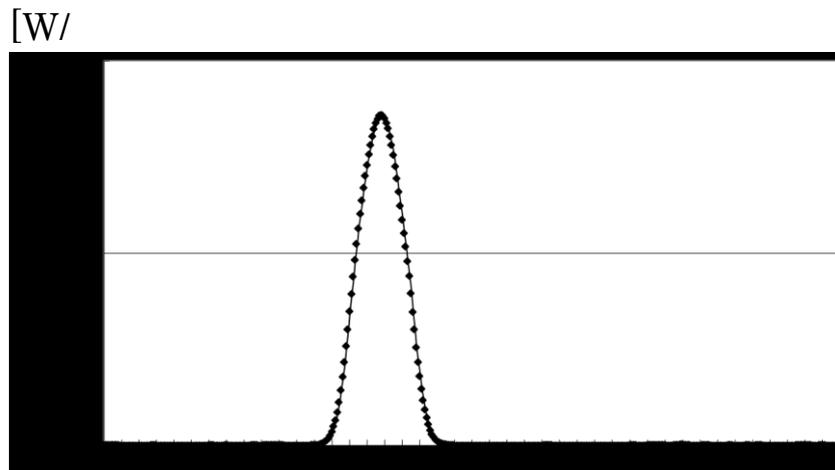


図 2.11 4 分の 1 波長板通過後の分光放射強度測定結果

表 2.2 毎秒 30,000 枚の偏光イメージングに必要な光量計算結果

分光放射強度計から得られた出射光のエネルギー W/m <sup>2</sup>	2.5
1 画素 (400μm <sup>2</sup> )に入力するエネルギー W	1.00×10 <sup>-19</sup>
1 フォトンのエネルギー(測定波長 520nm) W	3.82×10 <sup>-19</sup>
1 画素に入力するフォトン数 Photon	2.75×10 <sup>9</sup>
同, 30,000 分の 1 秒のフォトン数 Photon	9.17×10 <sup>4</sup>
同, 偏光素子通過後のフォトン数 Photon	4.59×10 <sup>4</sup>
同, 発生する電子数 (Q.E×F.F を 0.3) Electron	1.37×10 <sup>4</sup>
520nm 分光感度補正 (ピーク感度比 0.8) Electron	1.10×10 <sup>4</sup>
偏光高速度カメラで検出された電荷量 Electron	1.49×10 <sup>4</sup>

## 2.4 本章のまとめ

本章では、偏光高速度イメージセンサの開発を行い、サブマイクロ秒の時間分解能で偏光検出可能なセンサを完成した。また必要光量の評価を行うことで、実験毎に必要な光量を見積ることが可能であることを示した。

はじめに、偏光高速度イメージセンサの目標について従来技術と比較して示し、次に開発するセンサの基本構造について説明を行った。既に提案されている偏光素子アレイの実現方法を挙げ、それぞれの特徴や課題について述べた。従来のイメージセンサと高速度イメージセンサの構造的な違いを示したうえで、偏光高速イメージセンサ化の実現方法について述べた。さらには、実際に開発したセンサと性能を示した。

開発したイメージセンサを用いて偏光高速度カメラ装置化を行い、装置の動作フローを示したうえで、高速偏光検出に必要な光量について実験結果を説明した。

以上のことにより、偏光高速度二次元検出センサ、および評価装置を実現したものである。

## 第3章 高速複屈折計測法

開発した偏光高速イメージセンサの複屈折計測装置化を行う。はじめに、偏光および複屈折について必要な説明をしたのち、高速複屈折計測原理について述べる。円偏光の光学系を用い、各光学素子およびサンプルのミュラー行列を計算することで得られた光強度の計算式を示す。示された計算式に、実験的に偏光高速カメラから得られた光強度値と、偏光高速イメージセンサの主軸方位値を用いることで、複屈折位相差と主軸方位を得る。この処理を高速に繰り返すことで高速計測が実現される。次に、バビネソレイユ補償器を用い、連続的に与えた複屈折変化を計測することによって精度検定を行った。さらには、精度向上に取り組む。はじめに、位相シフト複屈折計測手法の誤差要因について述べる。次にイメージセンサ起因のノイズに注目し、信号に含まれるランダムノイズ低減方法について積算平均法を提案したうえ、実際の実験によって計測精度向上効果を確認している。最後に偏光高速イメージセンサの読み出し方法を工夫することで、空間的に、多くの情報を得るための手法を提案し、実験結果を示す。

以上の結果から高速複屈折計測の基本装置を実現している。

### 3.1 偏光と複屈折

#### 3.1.1 偏光

光波は電磁波であり横波である。そのため伝搬方向に垂直な面内で磁界と電界が振動する。電界と磁界は互いに直行の関係があり、また同位相であるため振動方向以外は同じである。したがって、本論では電界の振動成分のみを述べる<sup>55-58)</sup>。

光波の伝搬方向を  $z$  軸とし、その軸に垂直な面内の電界振動ベクトルをみたときに、振動方向が規則的、あるいはその状態が偏っている状態を偏光いう。  $z$  軸に垂直な面の振動ベクトルは一般に面内で互いに直行する 2 つの振動成分として、  $x$  軸および  $y$  軸に分けて表わすことができる。 直行する 2 つの振動成分の振幅、および位相差により偏光の振動状態は変化する。  $z$  軸から伝搬する光を眺めると、その振動軌跡は円、楕円、直線偏光となる。 ここで  $z$  軸のある時刻における電界の振動を  $x, y$  成分に分けると

$$E(z, t) = \hat{i}E_x(z, t) + \hat{j}E_y(z, t) \quad (3.1)$$

と表わすことができる。 ここで  $\hat{i}, \hat{j}$  は、  $x$  軸と  $y$  軸の単位ベクトルを表わす。 各成分の振動ベクトルは時刻  $t$ 、位置  $z$  において、波数を  $k$ 、各周波数を  $\omega$ 、初期位相を  $\delta$ 、振幅を  $A$  として

$$E_x(z, t) = A_x \cos(kz - \omega t + \delta_x) \quad (3.2)$$

$$E_y(z, t) = A_y \cos(kz - \omega t + \delta_y) \quad (3.3)$$

と表すことができる。 ここで  $x$  成分と  $y$  成分の位相差を  $\delta$  とすると、

$$\delta = \delta_y - \delta_x \quad (3.4)$$

と表わすことができる。 ここで式(3.1), (3.2)から時間空間伝播関数である  $kz - \omega t$  消去し、連立して解くことによって得られる  $x$ - $y$  面内の光の軌跡は、

$$\left(\frac{E_x}{A_x}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{A_y}\right)^2 - 2\frac{E_x E_y}{A_x A_y} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (3.5)$$

となる。ここで、 $\delta$  が  $\pi/2$  の整数倍の時、光の軌跡は、

$$\left(\frac{E_x}{A_x}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{A_y}\right)^2 = 1 \quad (3.6)$$

となるため  $z$  軸から眺めた  $x, y$  を合成した振動ベクトルの軌跡は円を描く。これを円偏光と呼ぶ。位相差の符号が異なる場合、光の軌跡において回転方向が反転する。また、

$$\left(\frac{E_x}{A_x} - \frac{E_y}{A_y}\right)^2 = 0 \quad (3.7)$$

または

$$\frac{E_x}{A_x} = \frac{E_y}{A_y} \quad (3.8)$$

のとき、光の軌跡は直線となる。これを直線偏光と呼ぶ。位相差が  $0, \pi/2, \pi$  の整数倍以外の時、合成した振動ベクトルの軌跡は楕円となる。例として、**図 3.1** および **図 3.2** に円偏光および直線偏光における  $x, y$  成分の位相差、および  $z$  軸に垂直な参照面内での合成振動ベクトルの軌跡について示す。

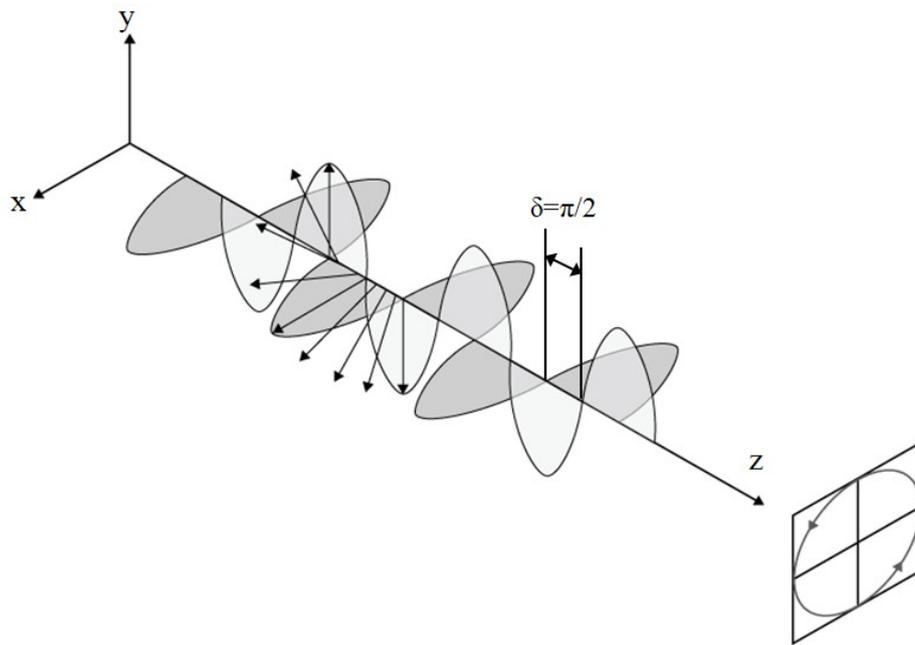


图 3.1 円偏光

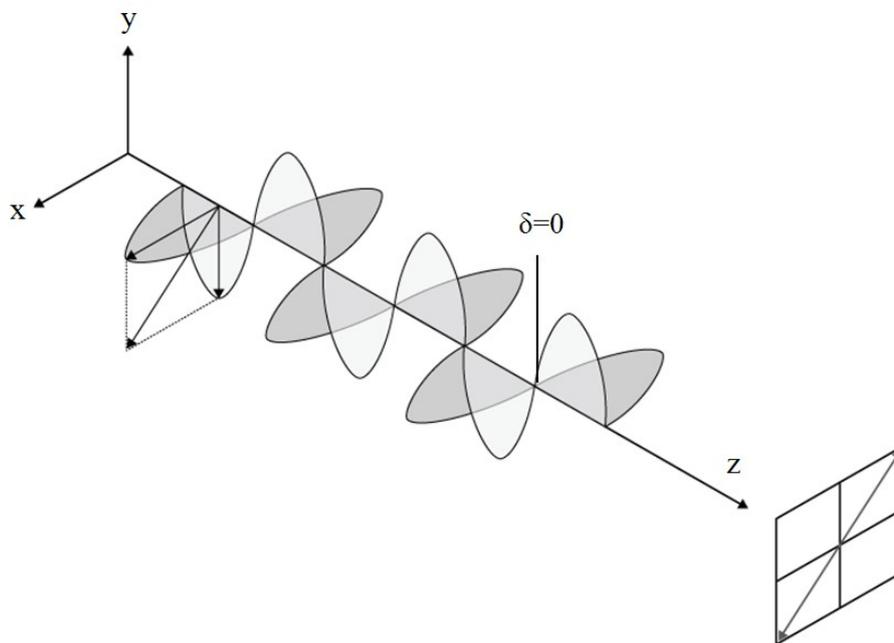


图 3.2 直線偏光

### 3.1.2 複屈折

光の伝搬する,  $z$  軸方向に伝播する光の偏光状態は  $z$  軸に垂直な面内で直行する 2 つの振動ベクトル成分  $x$  および  $y$  の振幅と位相差で決まる. 複屈折性物体を光が通過した時, 複屈折位相差  $n_{x-y}$  が発生する.  $x$  軸の屈折率を  $n_x$ ,  $y$  軸の屈折率を  $n_y$  としたとき, 複屈折は以下の式で表される.

$$n_{x-y} = n_x - n_y \quad (3.9)$$

図 3.3 に複屈折位相差の発生過程を示す. 屈折率が最大または最小の軸は主軸方位と呼ばれる. また, 屈折率最小の軸は光の進行が速いため速軸, 同様に屈折率最大の軸を遅軸と呼ぶ. また, ここで, 複屈折材料を通過したときに生じる, 複屈折位相差  $\Delta$ , 材料の厚さ  $d$ , および材料の複屈折の関係は,

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_x - n_y) d \quad (3.10)$$

となる. そのため光軸方向に複屈折が均一とした時, 材料の厚みが分かれば複屈折位相差を計測することで複屈折を得ることができる. また, 複屈折は複数の要因で発生する. 材料が圧力を受けて構造的に歪んだときに生じる応力性複屈折, 高分子の並び方によって生じる配向性複屈折, 波長以下の繰り返し形状によって発生する形態性複屈折, 方解石など結晶構造によって発生する構造的複屈折が挙げられる. 複屈折計測では以上の複屈折要因を個々に分解することが難しいため, 現象に応じて支配的なパラメータに注意することが, 計測するうえで重要となる.

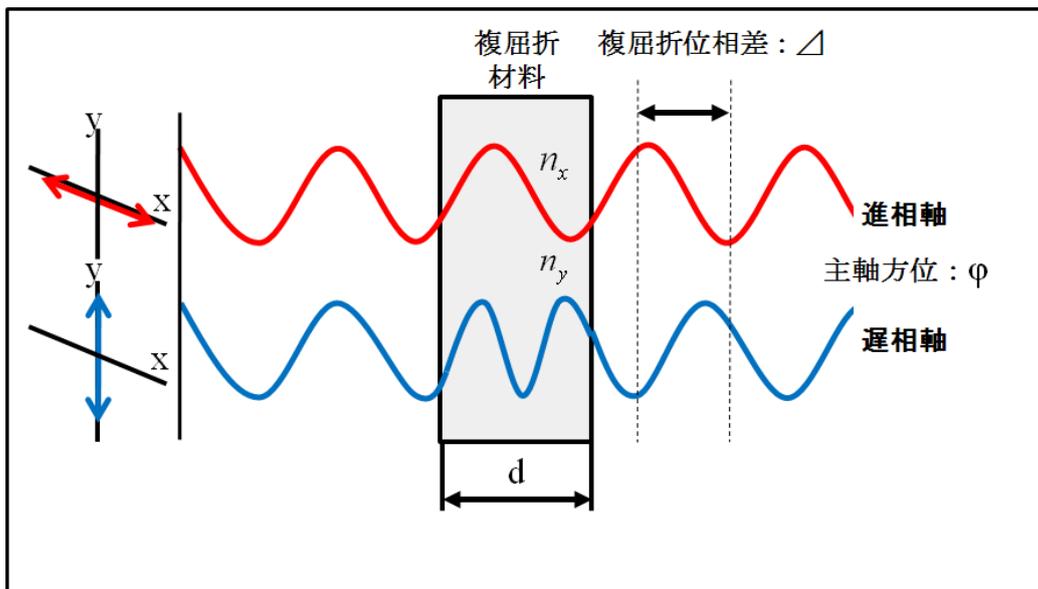


図 3.3 複屈折

### 3.1.3 偏光の表示

伝播方向に直行した面内 2 成分の振動ベクトルの位相差を  $\delta$  とした時、全ての偏光状態はストークスパラメータと呼ばれる  $1 \times 4$  の行列で表わすことができる。<sup>59)</sup>

$$S_0 = E_x^2 + E_y^2 \quad (3.11)$$

$$S_1 = E_x^2 - E_y^2 \quad (3.12)$$

$$S_2 = 2E_x E_y \cos \delta \quad (3.13)$$

$$S_3 = 2E_x E_y \sin \delta \quad (3.14)$$

$S_0$  は光強度,  $S_1$  は水平垂直成分,  $S_2$  は  $45^\circ$  と  $135^\circ$  成分,  $S_3$  は左右円偏光成分を表わしている. 代表的な偏光状態を表わすストークスパラメータを 図 3.4 に示す. 完全偏光を取り扱うとき, 一般的に各成分を  $S_0$  の光強度によって規格化し, 表示する.

0度 直線偏光	90度 直線偏光	45度 直線偏光	右回り 円偏光	左回り 円偏光
$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$

図 3.4 ストークスパラメータによる偏光の表示

ストークスパラメータで偏光を取り扱う時, 入射間に含まれる各偏光素子は入射偏光状態を出射偏光状態に変換する行列と考えることができる<sup>60)</sup>. この変換行列をミュラー行列と呼ぶ. 入射偏光のストークスパラメータを  $S$ , 出射偏光を  $S'$  とすると, ミュラー行列  $M$  は  $4 \times 4$  の行列によって表すことができ, 以下の関係がある.

$$S' = M \cdot S \tag{3.15}$$

または,

$$\begin{bmatrix} S_0' \\ S_1' \\ S_2' \\ S_3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} & M_{03} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{30} & M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

となる。光学素子を組み合わせ、光学系を組んだとき、各光学素子のミュラー行列を組み合わせ、計算することによって、出射光の偏光状態を求めることができる。

## 3.2 高速複屈折計測原理

### 3.2.1 複屈折計測原理

図 3.5 に複屈折計測原理図を示す。入射光は方位  $0^\circ$  に設置された偏光子(P)および  $45^\circ$  に設置された  $\frac{1}{4}$  波長板(Q)を透過し円偏光となる。その後、未知の位相差  $\Delta$  および主軸方位  $\varphi$  を持つ複屈折測定サンプル(X)を通過した光は、 $0^\circ$  から  $135^\circ$  まで  $45^\circ$  毎の方位を持つ回転検光子( $\theta$ )を通り光検出器によって光強度検出が行われる。ここで、偏光状態を示す入射光のストークスパラメータを  $S$ 、出射光のストークスパラメータを  $S'$ 、および入射光強度を  $I_0$  とした時、偏光状態を表わすストークスパラメータおよび各光学素子のミューラー行列は、

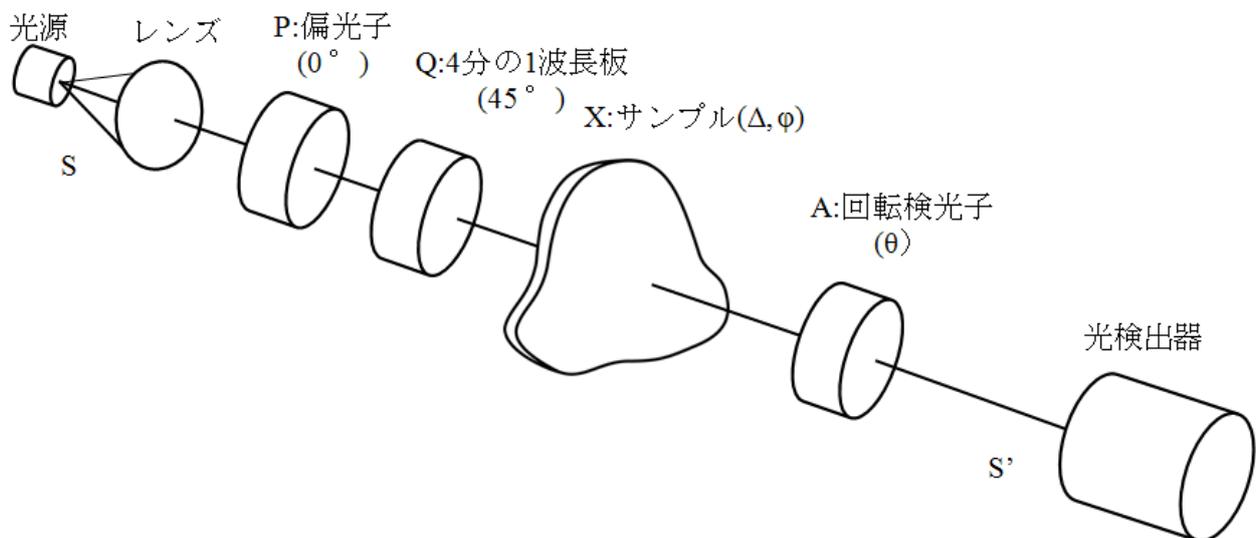


図 3.5 複屈折計測原理図

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$S' = \begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$P_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$Q_{45} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$X_{\Delta, \varphi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\varphi \\ 0 & (1 - \cos \Delta) \sin 2\varphi \cos 2\varphi \\ 0 & \sin \Delta \sin 2\varphi \\ 0 & 0 \\ (1 - \cos \Delta) \sin 2\varphi \cos 2\varphi & -\sin \Delta \sin 2\varphi \\ 1 - (1 - \cos \Delta) \cos^2 2\varphi & \sin \Delta \cos 2\varphi \\ -\sin \Delta \cos 2\varphi & \cos \Delta \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$A_{0,45,90,135} = \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

と表わすことができる<sup>58)</sup>。

各光学素子のミュラー行列と入射光および出射光のストークスパラメータの関係は、

$$S' = A_{0,45,90,135} \cdot X_{\Delta,\varphi} \cdot Q_{45} \cdot P_0 \cdot S \quad (3.23)$$

となる。

出射光強度  $I$  は  $S_0'$ 、入射光強度  $I_0$  は  $S_0$  であるので式(3.23)の関係式に式(3.17～3.22)を用いることによって得られる。したがって出射光の光強度は、

$$I = S_0' = \frac{1}{2} I_0 (1 - \sin \Delta \sin 2\varphi \cos 2\theta + \sin \Delta \cos 2\varphi \sin 2\theta) \quad (3.24)$$

となる。

ここで、出射光側の回転検光子(A)の方位  $\theta$  に  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  をそれぞれ適用したときの光強度を  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$  とし、位相シフト法<sup>61-65)</sup>を用いることによって得られる入射光強度  $I_0$ 、サンプル(X)の主軸方位  $\varphi$  および位相差  $\Delta$  は、

$$I_0 = \frac{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}{2} \quad (3.25)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{(I_3 - I_1)}{(I_2 - I_4)} \quad (3.26)$$

$$\Delta = \sin^{-1} \frac{\sqrt{(I_3 - I_1)^2 + (I_2 - I_4)^2}}{I_0} \quad (3.27)$$

と表すことができる。

そのため回転検光子(A)の4つの異なる偏光方位の光強度が分かれば、入射光強度、サンプルの複屈折位相差、および主軸方位が求められる。したがって偏光高速度カメラを適用することにより高速かつ二次元の複屈折計測が実現できる。この時の複屈折位相差の測定レンジは測定波長の4分の1、主軸方位の測定レンジは±90°である。

### 3.2.2 基礎実験

原理確認のため、複屈折位相差に関する基礎実験を行った。実際に構築した実験装置を図3.6に示す。光源は532nmのCW-YAGレーザを用いた。レーザ光をミラーでガイドし、光学系の光軸に合わせる。レンズによって集光し、ピンホールによって周辺光を除去された光はレンズを用いて平行になる。その後、方位0°のグラントムソンプリズム直線偏光子によって方位0°の直線偏光となり、その後45°に設置された4分の1波長板によって円偏光となる。サンプルにバビネソレイユ補償器を用い、複屈折位相差および主軸方位を変調する。サンプルを通過した光は、サンプルを静止させた状態で、パワーメータの前に設置された2つ目の直線偏光子を0°、45°、90°、135°に回転させ、得られた光強度を記録する。アルゴリズム確認実験では、バビネソレイユ補償器のマイクロメータを送り出すことで位相差を一方向に段階的に増加させる。それぞれの位相差において得られた4方位の光強度値と式(3.25)、および(3.27)を適用し、得られた結果を、図3.7に示す。

実験結果から、 $\pi/2$  毎に折り返す複屈折位相差が得られた。このことから基本原理の確認が出来たことと、基本的な光学系構築の基本的な手法を身に付けた。バビネソレイユ補償器の送り量 2.2 から 4.4mm 間の最大位相差値が小さい理由として入射光の若干の楕円化等が考えられる。

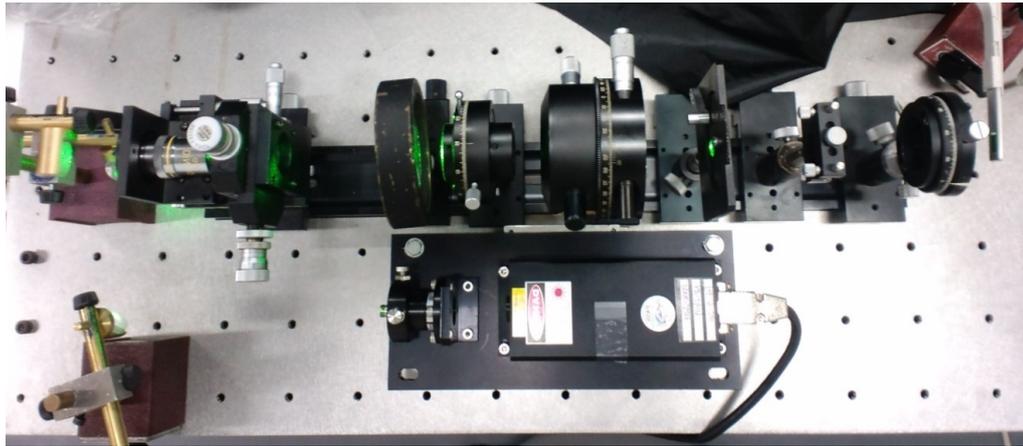


図 3.6 アルゴリズム確認のための基礎実験装置

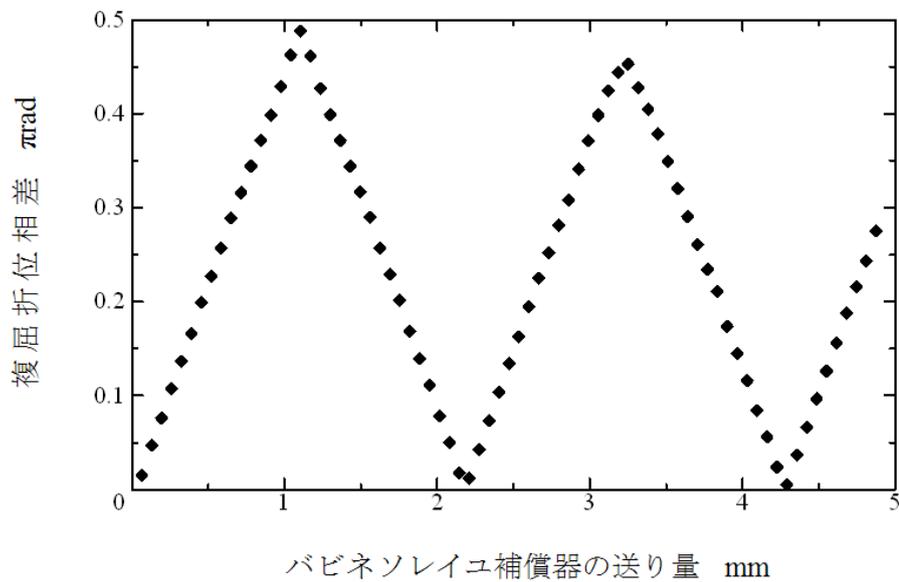


図3.7 基礎実験結果

### 3.3 複屈折精度検定

#### 3.3.1 精度検定実験

偏光高速カメラを用いて、図3.8に示す実験装置によって、複屈折精度検定を行った。実際の試験装置写真を図3.9に示す。実験は複屈折位相差と主軸方位、それぞれに行った。

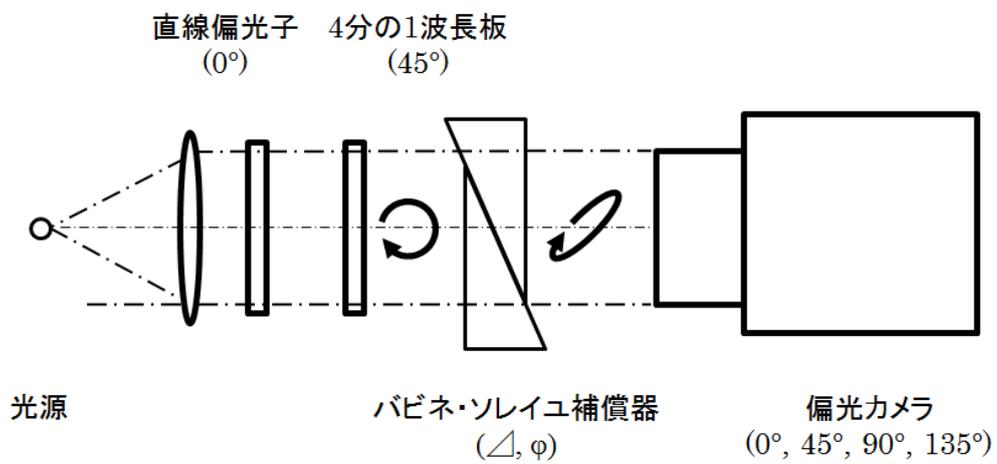


図 3.8 複屈折精度検定実験装置

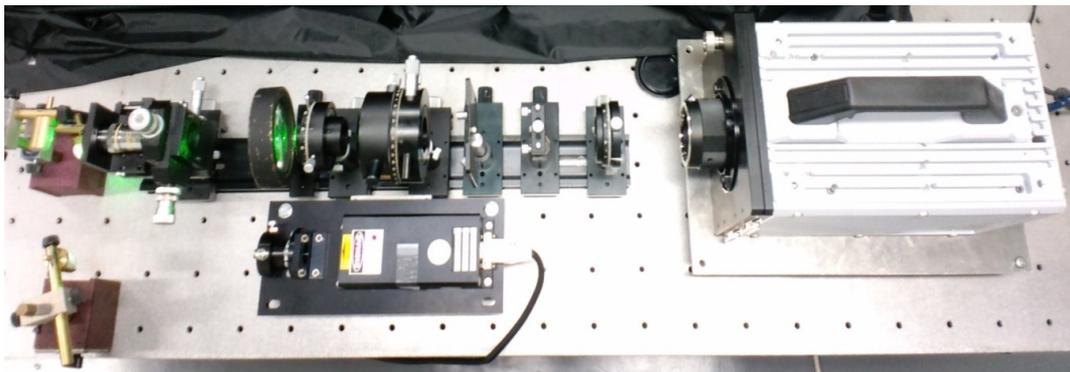


図 3.9 複屈折精度検定実験装置写真

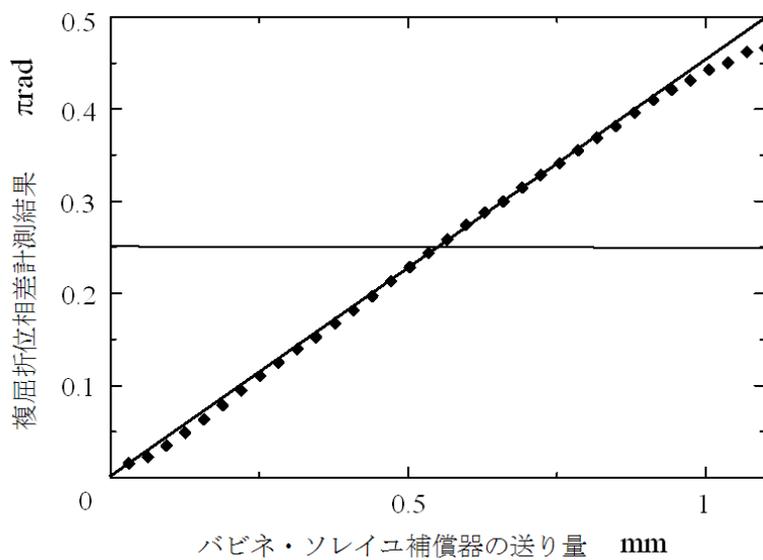


図 3.10 複屈折位相差の精度検定実験結果

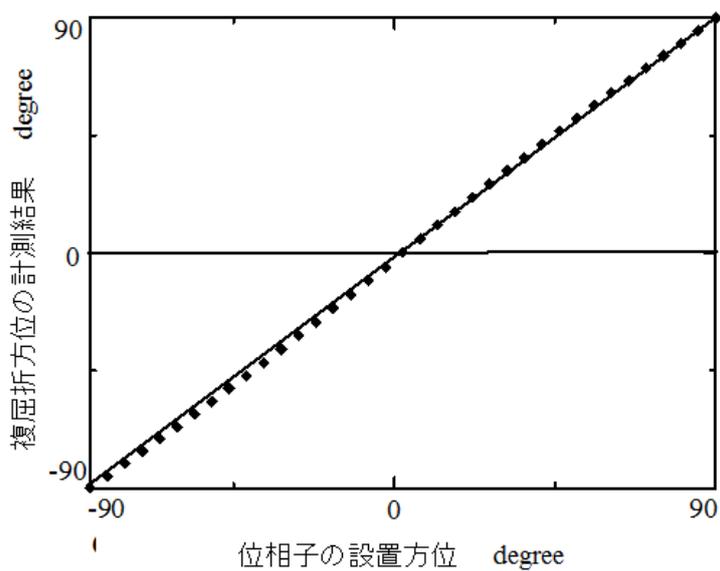


図 3.11 主軸方位の精度検定実験結果

表 3.1 複屈折位相差の精度検定実験条件および結果

光検出部	偏光高速度カメラ
サンプリング速度	10 秒／1 ステップ
測定波長 nm	520±10
サンプル	バビネソレイユ補償器
理想直線からの誤差 $\pi\text{rad}$ (範囲 0~0.442 $\pi$ rad)	$0.58\times 10^{-3}$
理想直線からの誤差 $\pi\text{rad}$ (範囲 0~0.5 $\pi$ rad)	$2.99\times 10^{-3}$

表3.2 主軸方位の精度検定実験条件および結果

光検出部	偏光高速度カメラ
サンプリング速度	10 秒／1 ステップ
測定波長 nm	520±10
主軸方位ステップ °	5
サンプル	バビネソレイユ補償器
理想直線からの誤差 ° (範囲±90°)	0.29

### 3.3.2 精度検定実験結果

バビネソレイユ補償器のマイクロメータの値を0から1.1mmまで繰り出した時に得られた複屈折位相差の精度検定実験結果を図3.10および表3.1に示す。このとき理想直線に対して0から $0.442\pi$ ラジアンまでの範囲においては、誤差が $0.58\times 10^{-3}\pi$ ラジアンであった。また、最大測定レンジの0から $0.5\pi$ ラジアンの範囲においては、直線からの誤差は $2.99\times 10^{-2}\pi$ ラジアンであった。

同様に主軸方位の精度検定結果について図3.11および表3.2に示す。検定には複屈折位相差と同様にバビネソレイユ補償器を用い、 $0\sim 180^\circ (\pm 90^\circ)$ を $5^\circ$ ずつに37分解して値を取得した。測定範囲における直線からの誤差は $0.29^\circ$ であった。

以上の結果から、複屈折位相差については測定レンジの88.5%の領域で、測定波長に対して1080分の1程度の誤差である。最大測定レンジの $0.5\pi\text{rad}$ では測定波長に対して210分の1程度の誤差である。 $\pi/2$ ラジアン近傍の誤差要因拡大としては、計測アルゴリズムにアークサインを用いていること、偏光素子が光を完全に消光できないため直線偏光を完全に判別できないこと等が挙げられる。一方で、偏光強度変化が得られているため繰返し精度を向上することによって、将来的にはキャリブレーションによって測定レンジ全体の誤差低減を目指す。また、主軸方位については、測定レンジ内で理想直線に対して $0.29$ 度の誤差を示した。

## 3.4 高速複屈折計測法の精度向上

### 3.4.1 高速複屈折計測法の誤差要因

表3.3に高速複屈折計測の誤差要因を示す。位相シフト計測ではすべての場合において、期待される検出光強度はSin曲線上にある。したがって、データ取得時の光強度、位相シフト増加量、および全体範囲が、測定波長の予定された $2\pi$ 領域と合致しなかった場合、測定結果はsin曲線を正確にマッピングすることが出来ないため計測誤差となる<sup>66,67)</sup>。

検出器による測定誤差について、本論の位相シフト法では4つの異なる光強度を組み合わせで計算することから、検出器の線形性が測定精度に影響する。また光電変換し、検出器で読み出し量子化する過程で、後述する様々なノイズが発生する。その一部は原理的に除去することが不可能であることから、計測時に誤差影響を考慮することが重要である。

さらに、光源には強度と周波数の両方の安定性が求められる。主に電源に起因する発振強度の不安定性は複屈折位相差計測の繰り返し精度に影響し、発振波長のゆらぎは測定サンプルの波長依存性等に影響して誤差となる。

実験装置に振動があった場合には、位相情報が時間とともに変化してしまうため、同一点の計測において計測に困難さを生む。また、実験の前段階で光源平行度や光軸ずれなどがあった場合には計測誤差となって現れる。

空気の流れや温度変化は、高い測定精度を求めた時には難しい課題となる。例えば偏光素子は温度による膨張によって位相変調特性が変わってしまう。

本研究では検出部に新たに開発した偏光高速度イメージセンサを用いていることから、イメージセンサ起因のノイズに注目し、計測精度向上を試みた。

撮像素子における光電変換効率を100%としたときの入射光に対する出射光とノイズの関係を図3.12に示す<sup>68)</sup>。ノイズは光強度の増加に関わりないノイズと、光強度の増加にともなって増加するノイズがある。前者では暗電流ノイズと読み出しノイズ、後者では固定パターンノイズと光ショットノイズが挙げられる。暗電流ノイズはランダムであるが、近年のセン

サは非常にノイズが小さいため誤差影響は小さい。また、読出しノイズについても同様に小さいため影響が少ない。固定パターンノイズは得られた光強度を差分処理することによって解消する、しかしながら光ショットノイズは光とともに増大し、かつランダムであるため計測誤差影響が大きい。そこで光ショットノイズの誤差低減のための検討と実験を行った。

表3.3 高速複屈折計測の誤差要因

誤差	要因
位相シフト誤差	$2\pi$ 周期位相差変化の取得周期誤差
検出器誤差	入出力の非線形性
	出力信号のノイズ
光源誤差	発振振幅（光強度）のゆらぎ
	発振周波数のゆらぎ
光学素子誤差	面不均一性
	ゆらぎ
実験装置誤差	実験装置の振動
	光学系のセッティング
環境誤差	雰囲気温度・湿度変化

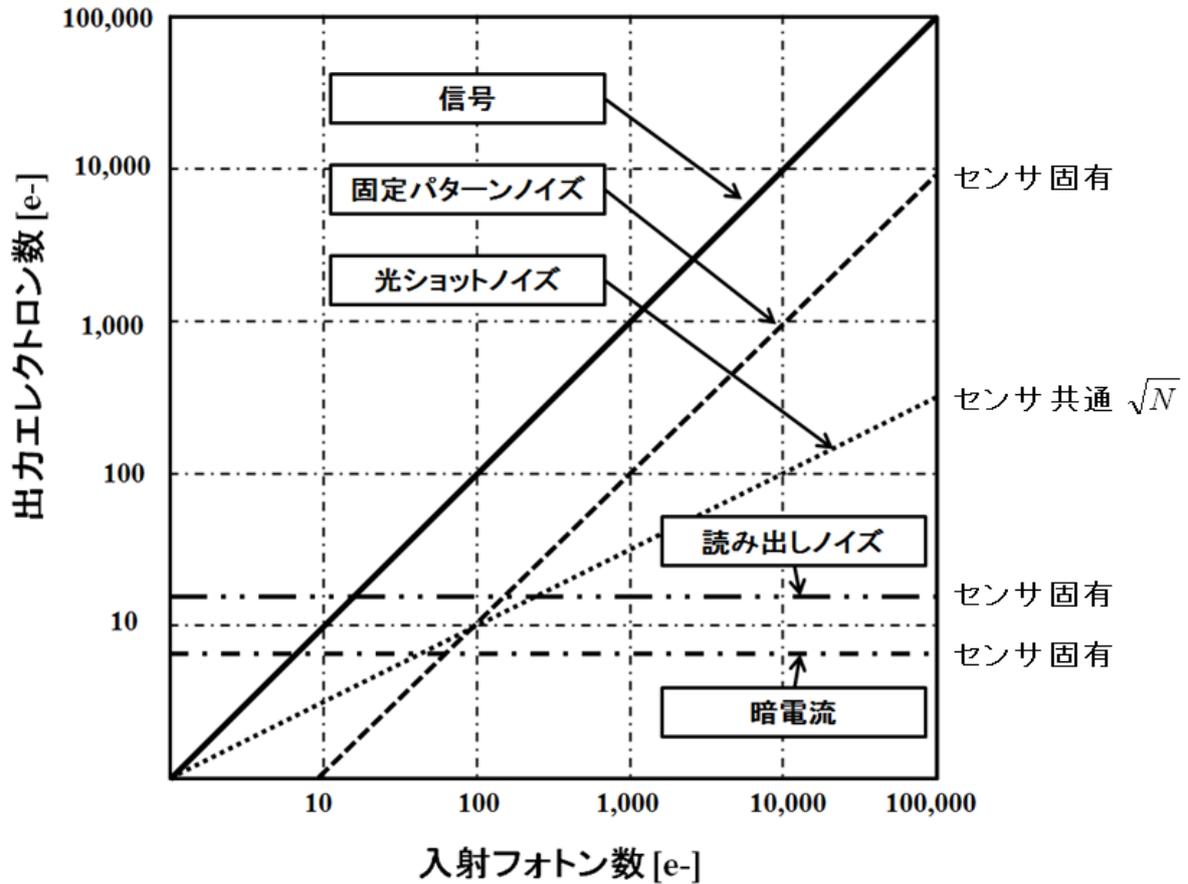


図 3.12 撮像素子におけるノイズ

### 3.4.2 計測精度向上原理

光ショットノイズは全ての光センサに共通のノイズである。また、入射光強度とともに増大し、かつ時間的にランダムなノイズであるため、ノイズ低減には時間や空間情報の積算平均処理が有効である。提案手法では、高速度イメージセンサを用いているため、時間軸に多くの信号を取ることが可能である。また2次元検出しているため、センサ面内の部分的な領域を空間的に統合して、1点として使うことも可能である。この特長を用いて、時間軸あるいは空間軸に積算平均をとることで、出力信号に含まれるランダムノイズ成分低減を目的とし、実験的な

確認を行った。また、結果に対して理論値との比較を行うことで実用性を示す。

カメラによってn回のサンプリングを行った時、ある時間の信号成分を $S_i$ 、ノイズ成分を $N_i$ とする。この時信号成分は変化しないため平均値 $S_{ave}$ は、

$$S_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i = S_i \quad (3.28)$$

となる。一方ノイズはランダムに変動するため、N回のサンプリングによる2乗平方平均をとることによって $N_{ave}$ は以下のように表される。

$$N_{ave} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n N_i^2} = \frac{N_i}{\sqrt{n}} \quad (3.29)$$

以上から、n回の積算平均によってノイズ量は、

$$\frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3.30)$$

となる。そのため積算平均処理後の信号と雑音のSN比は、

$$\frac{S}{N} = \sqrt{n} \frac{S_{ave}}{N_{ave}} \quad (3.31)$$

となることから精度向上が可能である。

次に原理確認のための基礎実験を行った。無偏光を偏光カメラに入射し、同一設置条件、同一画素から得られた検出光強度を、積算平均なし、積算平均 10 枚、積算平均 100 枚の 3 つの異なる条件によって偏光高速度カメラの信号検出繰返し精度を確認した。実験装置を図 3.13 に示し、図 3.14 および表 3.4 に平均なし、積算平均 10 枚、同 100 枚の時の実験値と理論値の結果を示す。図 3.14 の実験結果は、平均なしの時の繰返し精度で規格化されている。また、表 3.4 の実験結果は実際の入力信号に対するランダムノイズの振幅量を示す。

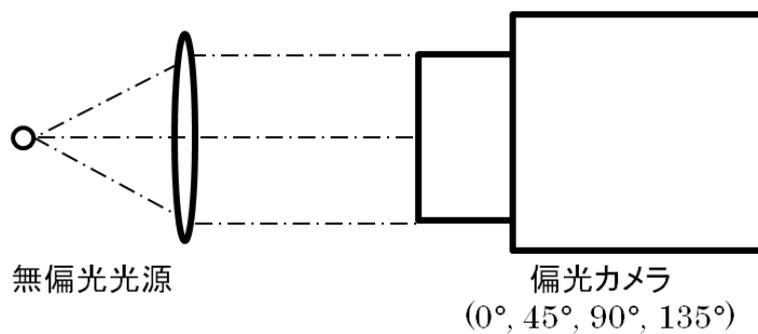


図 3.13 ランダムノイズ低減のための基礎実験装置

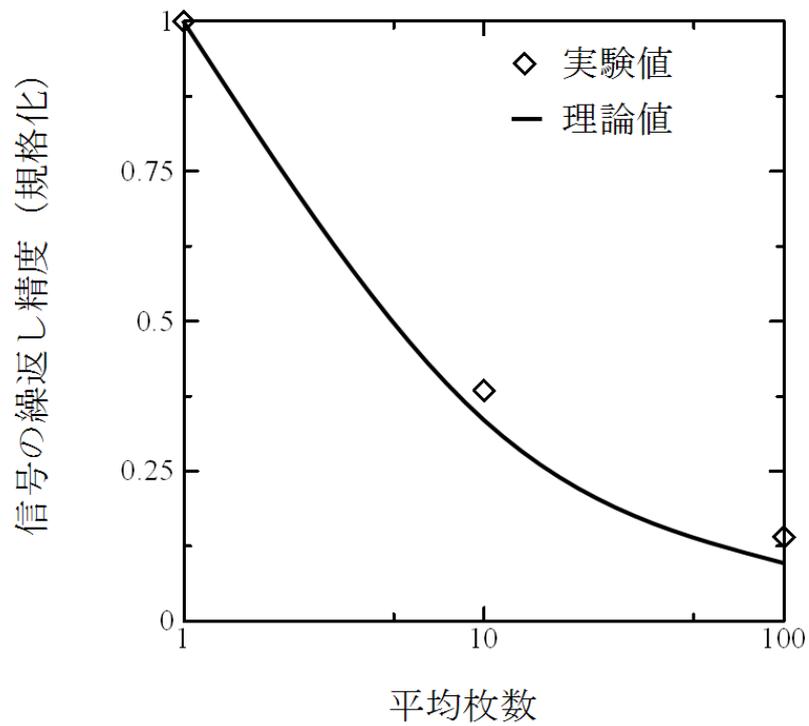


図 3.14 積算平均理論値と実験結果

表 3.4 積算平均実験結果. 積算枚数毎の信号の繰り返し精度

積算平均回数	繰り返し精度
1	±3.85%
10	±1.48%
100	±0.54%

### 3.4.3 計測精度向上実験

次に図 3.15 に示す実験装置と式(3.25, 3.27)を用い、サンプル無し時の複屈折位相差測定結果の繰り返し精度向上実験を行った。n 回の実験から得られた複屈折位相差の積算平均値 $\Delta_{ave}$ は以下の式で表される。

$$\Delta_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (3.32)$$

実験は積算平均なし、同 10 回、同 100 回、同 1,000 回の条件で得られた複屈折位相差積算平均値の繰り返し精度を測定することで、実用性を確認した。偏光高速カメラでは時間方向に得られた画像を用いた時間積算平均と、同一画像の複数画素から得られた空間積算平均を行うことができる。はじめに、時間軸について積算平均をおこなった実験結果について図 3.16 および、表 3.5 に示す。次に同一画像内の複数画素を用いた空間積算平均を行った実験結果について図 3.17 および表 3.6 に示す。

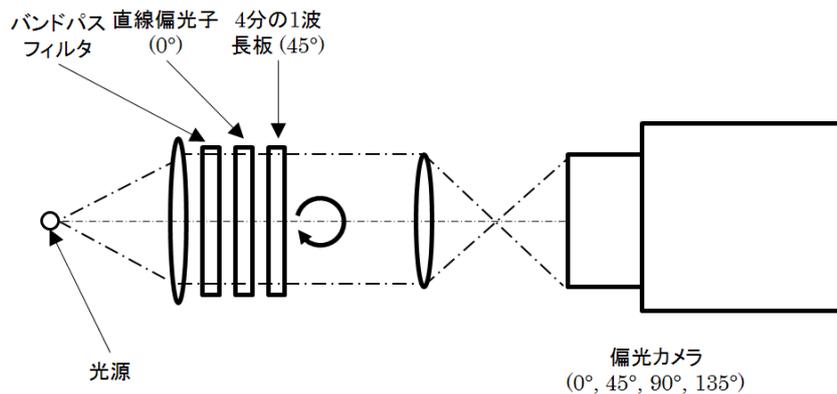


図 3.15 高速複屈折位相差の計測精度向上実験装置

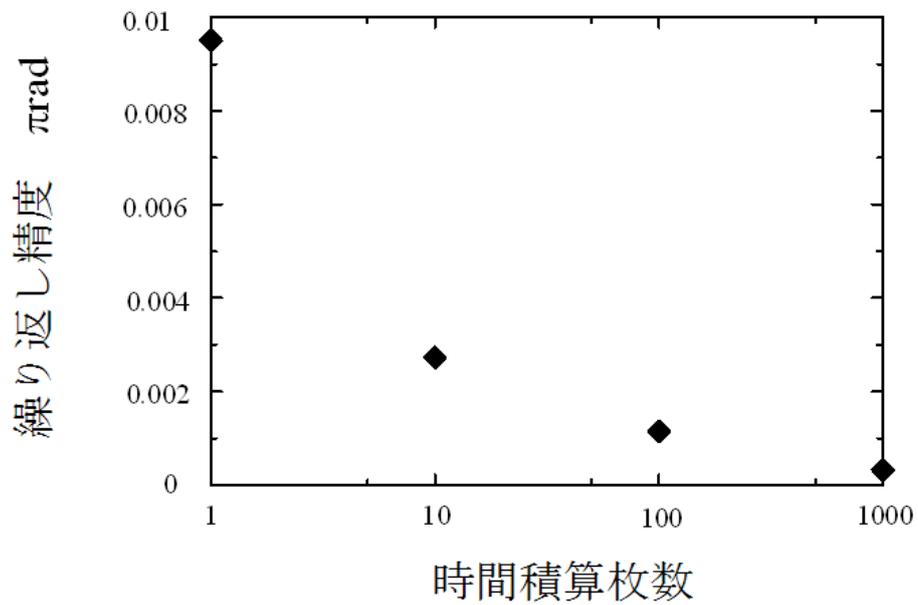


図 3.16 時間積平均に精度向上実験結果

表 3.5 時間積算平均による精度向上実験結果

積算平均回数	繰り返し精度 πrad
1	$\pm 9.51 \times 10^{-3}$
10	$\pm 2.73 \times 10^{-3}$
100	$\pm 1.15 \times 10^{-3}$
1,000	$\pm 0.33 \times 10^{-3}$

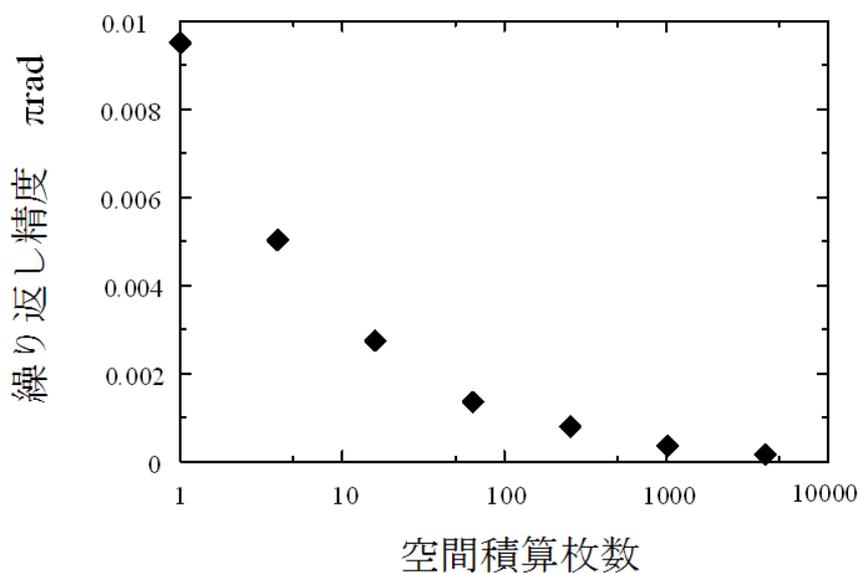


図 3.17 空間積算平均による計測精度向上実験結果

表 3.6 空間積算平均による計測精度向上実験結果

積算平均画素数	繰り返し精度 πrad
1 (1×1)	±9.51×10 <sup>-3</sup>
4 (2×2)	±5.03×10 <sup>-3</sup>
16 (4×4)	±2.74×10 <sup>-3</sup>
64 (8×8)	±1.35×10 <sup>-3</sup>
256 (16×16)	±0.79×10 <sup>-3</sup>
1,024 (32×32)	±0.36×10 <sup>-3</sup>
4,096 (64×64)	±0.17×10 <sup>-3</sup>

#### 3.4.4 計測精度向上実験結果

はじめに、高速複屈折計測手法の計測誤差要因を示した。次にイメージセンサ起因のノイズに注目し、積算平均による繰返し精度向上を理論的に示した。さらには、実験的に得られた無偏光に対する光検出強度に対して、時間積算平均をとり、繰返し精度から繰返し精度向上効果測定を行った。積算平均10回の時、繰返し精度は測定レンジの $\pm 1.4\%$ となり、理論値からの誤差は $5.1\%$ であった。また、同じく100回を積算した時の繰返し精度は $\pm 0.54\%$ となり、理論値からの誤差は $4\%$ であった。理論値に近い精度向上が得られたこと、および積算平均回数に応じて精度向上結果が得られたことから提案法の有効性を確認した。理論値に対して実験値が異なった要因として、光ショット以外のイメージセンサ起因のノイズや、光源のゆらぎの影響が考えられる。

次に複屈折計測結果について、各画素で得られた光強度を時間積算平均および空間積算平均を行った後に、複屈折位相差計算を行うことで得られた複屈折位相差の繰返し精度を示すことで、積算平均の複屈折計測精度向上効果を確認した。時間積算平均を用いた複屈折計測結果では、光検出強度同様に積算回数によって繰返し精度が向上し、1,000回平均時では積算平均無しの条件に対して、28.6倍の精度向上が得られ、その時の繰返し精度は $\pm 0.33 \times 10^{-3} \pi$  ラジアンであった。空間積算平均では、同様に積算回数によって繰返し精度が向上し、4,096画素平均時では、積算平均なし時に対して55.9倍の精度向上が得られ、その時の繰返し精度は $\pm 0.17 \times 10^{-3} \pi$  ラジアンであった。

以上の結果から、提案法の精度向上効果を示すとともに、高速測定および2次元測定の計測精度向上有効性について確認できた。

### 3.4.5 空間分解能向上原理

偏光高速度カメラと位相シフト法を用いた高速複屈折計測では4画素の検出光強度を用いて1点の複屈折計測を得る。そのため計測点数は最高画素数の4分の1となる。そこで、隣接4画素毎の複屈折計算を縦横方向へ1画素ずつシフトして行うことで複屈折計測結果を空間的に4倍多くの計測点数を得るための画素シフト手法と称する提案を行う<sup>69)</sup>。従来法と画素シフト法の違いについて図3.18に示す。従来法では、図3.18(a)に示すように、重なり合わない4画素を計測単位として計算を行うため、計測点数は最高画素数の4分の1となる。一方で、提案法では、偏光高速度イメージセンサ片側端部の画素行、画素列を除けば、計測点数が従来法の4倍となる。開発したセンサでは同一方位の直線偏光子が行方向、列方向に1画素毎に配置されている。そのため図3.18(b)に示すように、位相シフト計算処理を1列1行毎にシフトして $I_1$ と $I_4$ の組み合わせを変えながら行うことで、計測点数が垂直、水平方向に2倍化する。

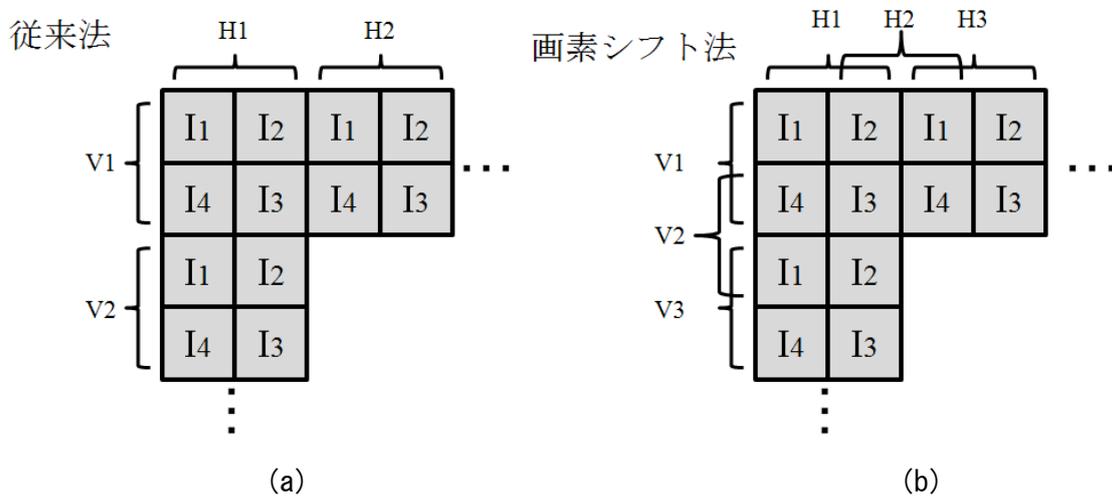


図 3.18 従来手法と画素シフト法の違い

### 3.4.6 空間分解能向上実験および結果

図 3.19 に実験装置を示す。サンプルとして用いたコの字型のエポキシ樹脂に対し、圧力を加え、複屈折分布がサンプルに生じた状態で固定する。実験的に得られた複屈折位相差分布に対して、値の連続性を評価することにより、提案手法の有効性を確認する。図 3.19 の赤枠で示した領域を計測した結果を図 3.20 に示す。また図 3.20 に垂直方向に示した破線上かつ長さ 6mm の領域に対して得られた複屈折位相差分布を図 3.21 に示す。また、画素シフト手法によって得られた複屈折計測値の連続性を確認するために、図 3.21 に赤枠で示した領域を拡大した計測結果を図 3.22 に示す。

図 3.21 および図 3.22 の実験結果において画素シフト有のマークは、画素シフト無のマークに対して背面にあり、マークサイズが 4 倍あるため、画素シフト無の白抜きマーク周囲が黒縁であることは 2 つの結果が同一点をプロットしていることを示す。図 3.21 の青枠で囲んだ領域を拡大した結果が図 3.22 となる。図 3.22 の結果における急峻な複屈折分布の連続的な変化を画素シフトの計測結果が空間的連続に補間していることから、提案法の有効性を確認した。

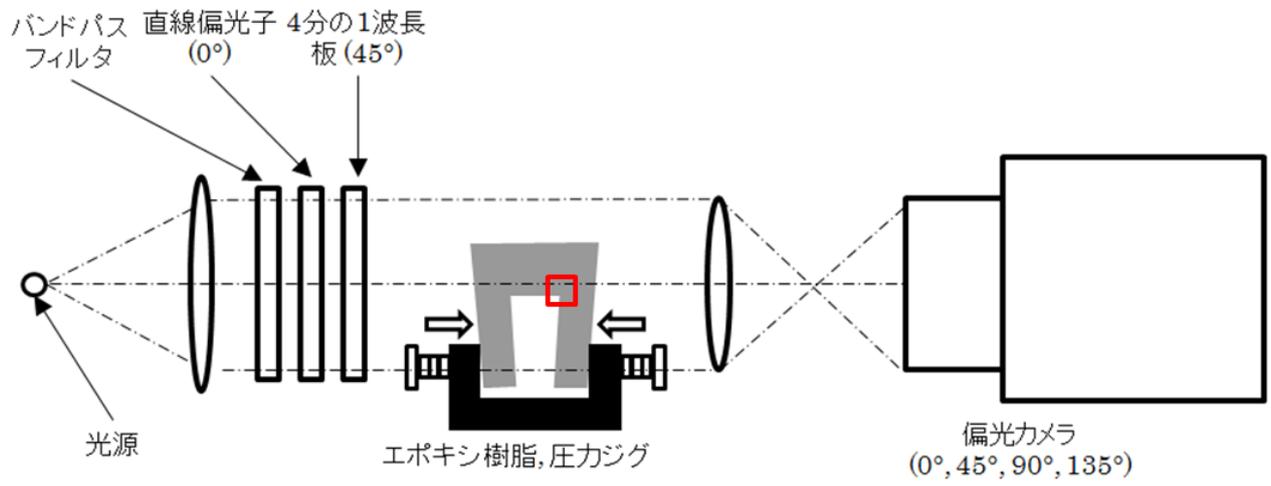


図 3.19 空間分解能向上の検証実験装置

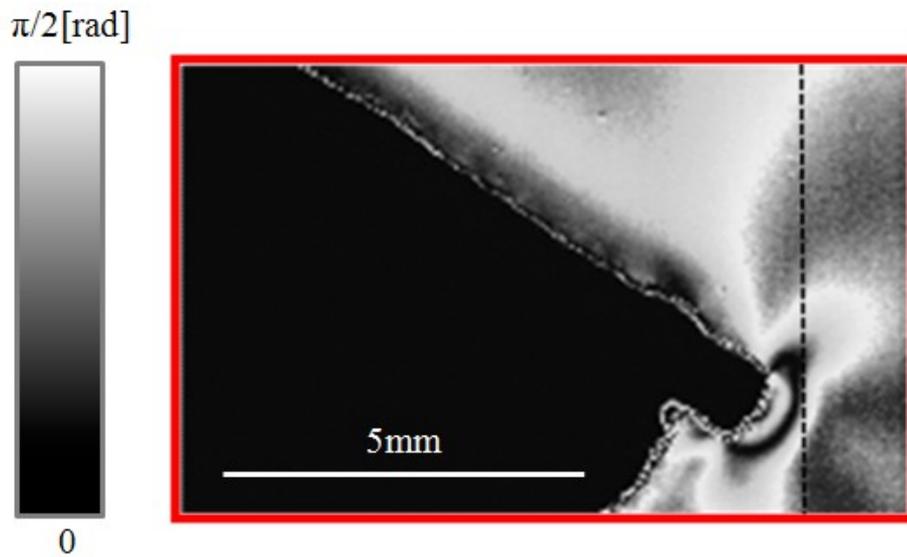


図 3.20 エポキシ樹脂の複屈折位相差画像

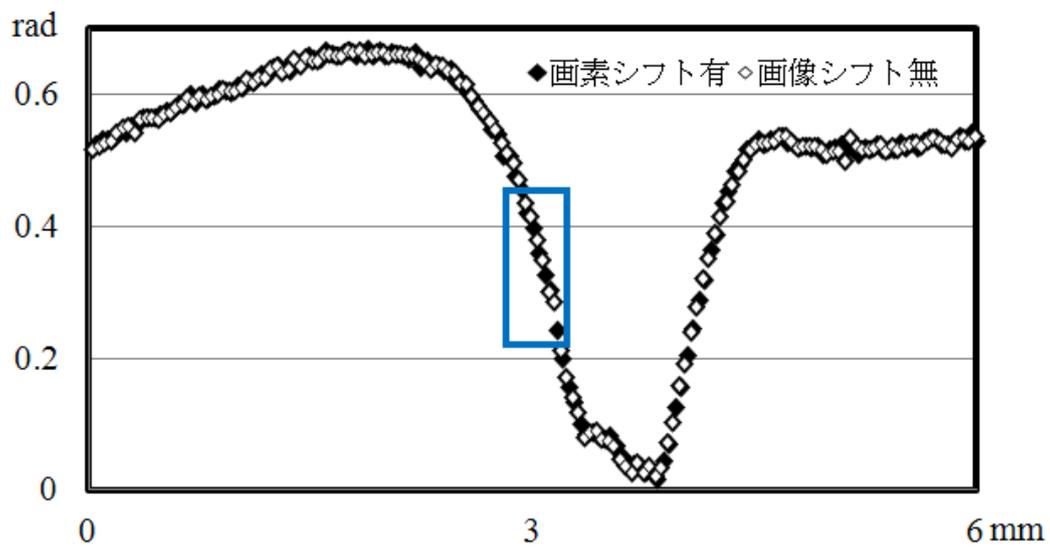


図 3.21 画素シフト手法による空間分解能向上実験結果

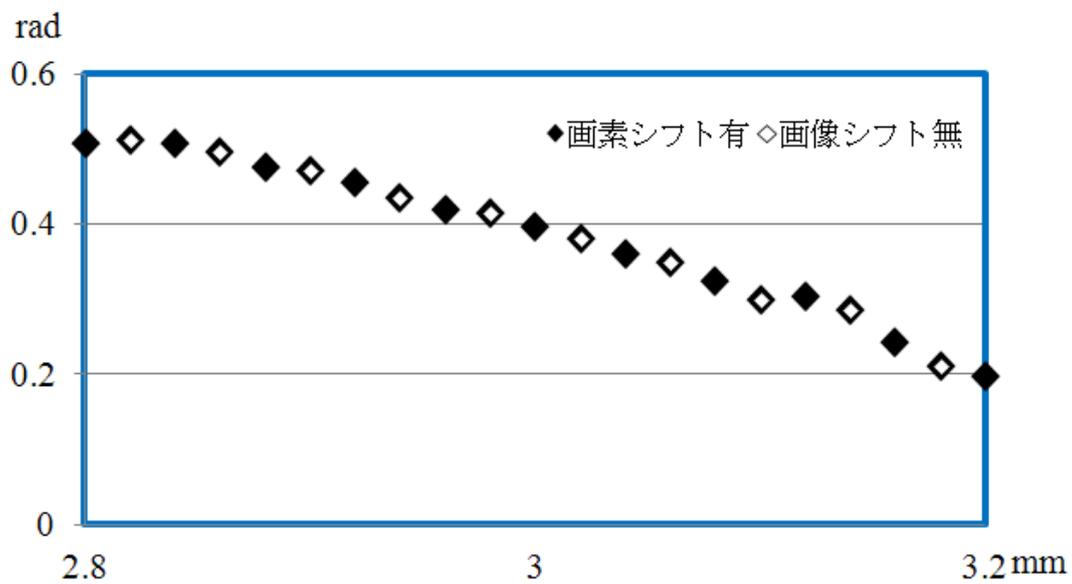


図 3.22 画素シフト手法による空間分解能向上実験結果

### 3.5 本章のまとめ

本章では、はじめに偏光および複屈折について説明し、次に高速複屈折計測原理について示している。各偏光素子とサンプルのミューラー行列を計算することで得られた出力光強度の式に対して、45 度ずつ主軸方位の異なる 4 つの偏光子を通過して得られた光強度を用いて、位相シフト計算することにより、光強度、複屈折位相差、そして主軸方位が求まる。隣接する 4 画素に同様の単位構造をもち、その構造をアレイ状に並べた偏光高速度イメージセンサを組み込んだ偏光高速度カメラを適用することにより、高速複屈折計測を実現している。

次に偏光素子を用い、計測原理の実験的な確認を行った。その結果を踏まえ、偏光高速度カメラを設置し、複屈折位相差と主軸方位それぞれについて精度検定を行った。

さらに、精度向上の検討を行ったものである。はじめに位相シフト計測の誤差要因について説明を行った。次に、イメージセンサ起因のノイズに注目し、積算平均を用いることによって光強度の繰返し計測精度が向上することを理論的に示した。さらには無偏光を用いて、偏光高速度イメージセンサから得られた光強度に対して積算平均なし、積算平均 10 回、積算平均 100 回の得られた実験結果から実際の精度向上効果を示した。複屈折位相差について時間積算平均、および画素積算平均の精度向上効果を確認するための実験を行い、光強度同様に精度向上効果が確認できた。今回の実験では、最高で  $64 \times 64$  画素の空間平均を行った時に、測定波長の  $2,941$  分の 1 の繰返し精度が得られた。以上の結果から、検出光の時間情報と空間情報を用いることで、高精度化が可能であることを示すことができた。さらには、画素シフトを用いることで計測時の空間情報を 4 倍に向上するための空間分解能向上法を提案し、検証実験により、実用性を確認した。

以上に示したように、複屈折位相差装置としての基本性能、精度向上、および空間解像度向手法を実現したことによって、高速複屈折計測装置を確立したものである。

## 第4章 高速高次位相差計測法

高速複屈折現象は衝撃、破壊、および加工など、強い負荷が材料にかかった時に生じる応力性複屈折であることが多い。提案法ではサブマイクロ秒で複屈折計測が可能であることから、衝撃、破壊、加工時に発生する高速応力伝搬解析ツールとしての用途が期待される。一方で、提案法は複屈折位相差の計測レンジが4分の1波長であるため、破壊時に生じる高次の複屈折位相差計測が難しい。この問題を解決する手法として、2つの異なる測定波長を用いて高次位相差の次数判定手法を提案する。また、高速現象に適用するため、高速波長変調照明装置を開発し、25万分の1秒毎の波長切り替え機構を実現した。バビネソレイユ補償器をサンプルとして複屈折を変調し、異なる2波長を用いて複屈折位相差を時間的連続に計測することで、提案手法を実験的に確認した。最後に、提案手法の課題と実用性について述べる。

### 4.1 背景

高速複屈折計測手法の適用先として、衝撃、加工時に材料内に生じる応力性複屈折計測がある。近年、携帯電話などに組み込むための樹脂レンズやガラスといった光学機能性材料では、さらなる微細加工が必要とされているが、加工の自動化が非常に難しく、歩留まりに課題がある。FEMなどの数値解析手法が提案されているが、動的な応力分布を計算することが難しい。そのため実験的な応力計測ニーズがある。本論で開発した高速複屈折計測手法では、動的追従性の面から、これらの分野での評価装置化が期待される。しかしながら、提案法では、複屈折位相差測定レンジが測定波長の4分の1であるため、衝撃、加工時に生じる大きな複屈折位相差を計測することが難しい。そこで、4分の1波長ずつ折りたたまれた複屈折位相差を正しく開き、また繋ぎ合わせる手法として、2波長計測手法の研究開発を行った。

## 4.2 高速高次位相差計測原理

### 4.2.1 複屈折波長分散表示

波長分散とは屈折率が波長に依存している現象であり、複屈折についても同様に生じる。誘電体物質に電磁波が通ると物質内部の電荷分布が変化する。この変化によって電気双極子モーメントが生成され、分極が生じる。この双極子モーメントがもたらす単位体積あたりの電気分極を  $P$  とすると次式で表される<sup>70)</sup>。

$$(\varepsilon - \varepsilon_0)E = P \quad (4.1)$$

ここで  $\varepsilon_0$  は真空の誘電率、 $\varepsilon$  は物質中の誘電率である。誘電率は電場中の物質に電場がどれくらい侵入するかを示す尺度とも言える。物質に光が通った際の分極は以下の様に生じる。誘電体に周波数  $\omega$  をもった光が入射すると、内部で電荷を持つ原子と電子に対して、時間的に変化する力が働く。原子は、サイズが大きく、大きな慣性モーメントをもっているため  $10^{14} \sim 10^{15}$  程度の光の周波数に応答することが出来ない。一方、電子は慣性モーメントが小さく光の周波数に追従する。この周波数を駆動力として振動し、比誘電率  $K_E(\omega)$  に寄与する。 $K_E$  は比誘電率であり  $\varepsilon/\varepsilon_0$  で定義される。このことから、屈折率  $n$  の光の周波数  $\omega$  に対する依存性は、各周波数で起こる電気分極との相互作用によって決定される。電子は原子のもつ電氣的引力に束縛されており、電子が振動した時は、その引力が復元力  $F$  となって作用する。そのため、電子は平衡状態における位置を横切るように振動しながら基の位置へ戻っていく様に動く。復元力はバネ定数  $k$  と同じく考えることができる。瞬間的に平衡状態が何らかの作用で破られると、原子に拘束されている電子は式(4.2)で表すように、自然周波数あるいは共鳴周波数で平衡点を中心に振動する。ここで  $m_e$  は電子の質量であり、 $\omega_0$  は駆動力を受けていない場合の系の振動周波数である。

$$\omega_0 = \sqrt{k_E / m_e} \quad (4.2)$$

ここで  $k_E$  は、ばね定数のような振動する電子の復元力を意味する弾性定数である。光の周波数は可視光線で  $10^{15}$  オーダである。周波数  $\omega$  の光によってもたらされた電場  $E(t)$  が、電荷  $q_e$  の電子に与える力  $F_E$  は、

$$F_E = q_e E(t) = q_e E_0 \cos \omega t \quad (4.3)$$

で与えられる。この力に対して原子によって位置  $x$  の電子に働く復元力は符号が反対向きに働き、以下のように表される、

$$m_e \frac{d^2 x}{dt^2} = q_e E_0 \cos \omega t - m_e \omega_0^2 x \quad (4.4)$$

電子の時間的変位は電磁波の周波数と同じであることが期待できるため、

$$x(t) = x_0 \cos \omega t \quad (4.5)$$

となり、(4.5)式を(4.4)式に代入すると変位  $x(t)$  は以下の式で表すことができる。

$$x(t) = \frac{q_e / m_e}{(\omega_0^2 - \omega^2)} E_0 \cos \omega t \quad (4.6)$$

ここで、 $E_0$  は入射光強度、そして変数は周波数  $\omega$  である。この変位は原子と電子との相対変位を表し、駆動力がない場合には、共鳴周波数  $\omega_0$  で振動しており、 $\omega_0 > \omega$  の時  $E(t)$  と  $x(t)$  は同符号で与えられた電波に同位相で振動する。電場の周波数が共鳴周波数を超え  $\omega_0 < \omega$  の時、電波と電子は 180 度位相がずれ逆符号で振動する。その時の双極子モーメントは、電化  $q_e$  と、変位の積となる。

いま単位体積中に電子がN個あった場合、単体体積あたりの双極子モーメント、あるいは分極は以下のようになる。

$$P(t) = q_e x(t) N \quad (4.7)$$

したがって、 $E_0 \cos \omega t$ を $E(t)$ と表すことによって

$$P(t) = \frac{q_e^2 N / m_e}{(\omega_0^2 - \omega^2)} E(t) \quad (4.8)$$

式 (4.1) に代入すれば、

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{P(t)}{E(t)} = \varepsilon_0 + \frac{q_e^2 N / m_e}{(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (4.9)$$

となり。ここで屈折率 $n^2 = K_E = \varepsilon / \varepsilon_0$ を用いると $\omega$ の関数として屈折率 $n$ の分散法定式が得られる。屈折率 $n^2 = \varepsilon / \varepsilon_0$ であることから、左右辺を $\varepsilon_0$ で除して $n$ と置き換えると、

$$n^2(\omega) = 1 + \frac{N q_e^2}{\varepsilon_0 m_e} \left( \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \quad (4.10)$$

となる。式(4.10)より、 $\omega_0 \gg \omega$ の場合は $\omega$ の影響は無視でき、その領域では屈折率は一定である。 $\omega_0 < \omega$ の時は、振動が全体に働く駆動力に対し、逆位相になり、屈折率は1より小さくなる。 $\omega_0 > \omega$ の場合は屈折率が1以上になり振動位相も $180^\circ$ 逆相となる。 $\omega_0$ と $\omega$ が近い値になったとき $\omega$ の増大とともに屈折率 $n$ は大きくなる。これを正常分散と呼ぶ。また式 (4.10) より屈折率 $n$ は $\omega_0$ と $\omega$ が非常に近くなると、著しく大きくなり減衰と入射光の著しい減衰をともなう。この領域は吸収帯と呼ばれる。吸収帯の中では $\omega$ が $\omega_0$ より大きくなっていくため、 $dn/d\omega$ が負の値を取る。これを異常分散と呼ぶ。

一方で、どんな物質も実際には、照射光の周波数を変えると  $n > 1$  から  $n < 1$  に変化する間にいくつかの遷移を示し、複数の吸収帯が現れる。これは物質の共鳴周波数  $\omega_0$  が単一でなく、複数存在することを示す。したがって単位体積に  $N$  個の分子があり、各分子は、各分子は共鳴周波数(自然周波数)  $\omega_{0j}$  をもつ  $f_j$  個の振動子からなる物質とするのが妥当と考えられる。この場合、分散方程式は、

$$n^2(\omega) = 1 + \frac{Nq_e^2}{\epsilon_0 m_e} \sum_j \left( \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2} \right) \quad (4.11)$$

となる。 $\omega_{0j}$  は原子が照射エネルギーを吸収あるいは放出する特性周波数である。入射光が特性周波数のいずれかと共鳴するとき、物質は不透明となる。したがって透明物質が透明に見えるのは、共鳴周波数が可視域外にあるからである。また、すべての物質は電磁波に対してどこかの周波数に吸収帯を持つ。可視域では電子分極が屈折率  $n(\omega)$  を実効的に決定する機構となっている。また式(4.11)は以下のように書き換えることができる。

$$(n^2 - 1)^{-1} = \frac{4\pi^2 c^2 \epsilon_0 m_e}{Nq_e^2} \left( \frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (4.12)$$

そのため、

$$(n^2 - 1)^{-1} = -C\lambda^{-2} + C\lambda_0^{-2} \quad (4.13)$$

と整理できる。ここで定数  $C$  は

$$C = \frac{4\pi^2 c^2 \epsilon_0 m_e}{Nq_e^2} \quad (4.14)$$

となる。この式から 自然周波数 (共鳴周波数)  $\lambda_0$  がもとまる。 $(n^2 - 1)^{-1}$  は与えられる光の周波

数を変数,  $-C$  を比例定数として変化する. 測定波長が共鳴周波数から離れているときは, 屈折率の波長分散は以下のコーシーの式で近似することができる.

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \dots \quad (4.15)$$

複屈折についてもコーシーの式を用いて同様に分散を求めることができ, 第 2 項までを用いて表すと以下の様になる.

$$n_{x-y} = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (4.16)$$

式(4.16)のA, Bが求まれば, 共鳴周波数から離れた周波数域における任意の複屈折を求めることができる.

#### 4.2.2 次数判定方法

高速複屈折計測装置の位相差計測レンジは計測波長の4分の1である. 計測上限の4分の1を超えたとき, 値は折り返し, 2分の1波長で再び0に戻る. より大きな位相差サンプルでは, 同様に4分の1波長毎に複数回折り返した後に, 4分の1波長内のどこかの数値が出力される. そのため, 高次位相差の計測が出来ない. そこで, 同一サンプルに対し異なる2波長で計測し, 得られた結果の差から, サンプルに対して予め作成したルックアップテーブルを用い, 合致法によって折り返し数を示す次数を判定し, 位相差計測レンジ拡大を試みた.

はじめに, サンプルの複屈折を式(4.16)から求める. 本検討では, サンプルに水晶のバビネソレイユ補償器, 測定波長に520nm, および540nmを用いた. 水晶の複屈折率 $n_{x-y}$ は文献によって報告されている波長400nmの時に0.0096, 波長589nmの時に0.0091<sup>58)</sup>を用いた. サンプル, お

よび定数A, B, 2波長それぞれの複屈折を表5.1に示す. 定数Aは $8.62 \times 10^{-3}$ , Bは $1.48 \times 10^{-16}$ , 測定波長520nmの複屈折は $9.14 \times 10^{-3}$ , 測定波長540nmの複屈折は $9.11 \times 10^{-3}$ となった.

次に次数判定しきい値をもとめる. 図4.1にコーシーの分散式と表4.1から得られた水晶の波長分散を示す. 位相差は式(3.2)に厚みを与えることで得た. この結果から, 複屈折波長分散の位相差依存性が分かる. そのため, 次数のしきい値は, 1つめの測定波長の4分の1波長毎の理論値, および2つめの波長で同様に分散を含む位相差の理論値を得て, 2つの値の差を求めることにより求めた. 各次数について同様に計算し, ルックアップテーブルを作成した.

主測定波長は520nmとした. はじめに表4.1で求めた複屈折値と, 520nmの4分の1波長を示す130nm毎に変化する厚み値をもとめ, 同じ値を用いて測定波長540nmの波長分散を含む位相差値を求めた. そのうえで, 2波長の位相差の差をそれぞれ計算し, 次数の増減点のしきい値とした. また後述する通り, しきい値の増減点に2波長から得た位相差結果が交錯することで次数判定障害となることから, 同様の手順で8分の1波長毎の2波長間位相差の理論差をルックアップテーブルに加えた. 結果を表4.2に示す.

表4.1 水晶の複屈折定数

サンプル	水晶のバビネソレイユ補償器
定数 A	$8.62 \times 10^{-3}$
定数 B	$1.48 \times 10^{-16}$
複屈折 ( $\lambda=520\text{nm}$ )	$9.14 \times 10^{-3}$
複屈折 ( $\lambda=540\text{nm}$ )	$9.11 \times 10^{-3}$

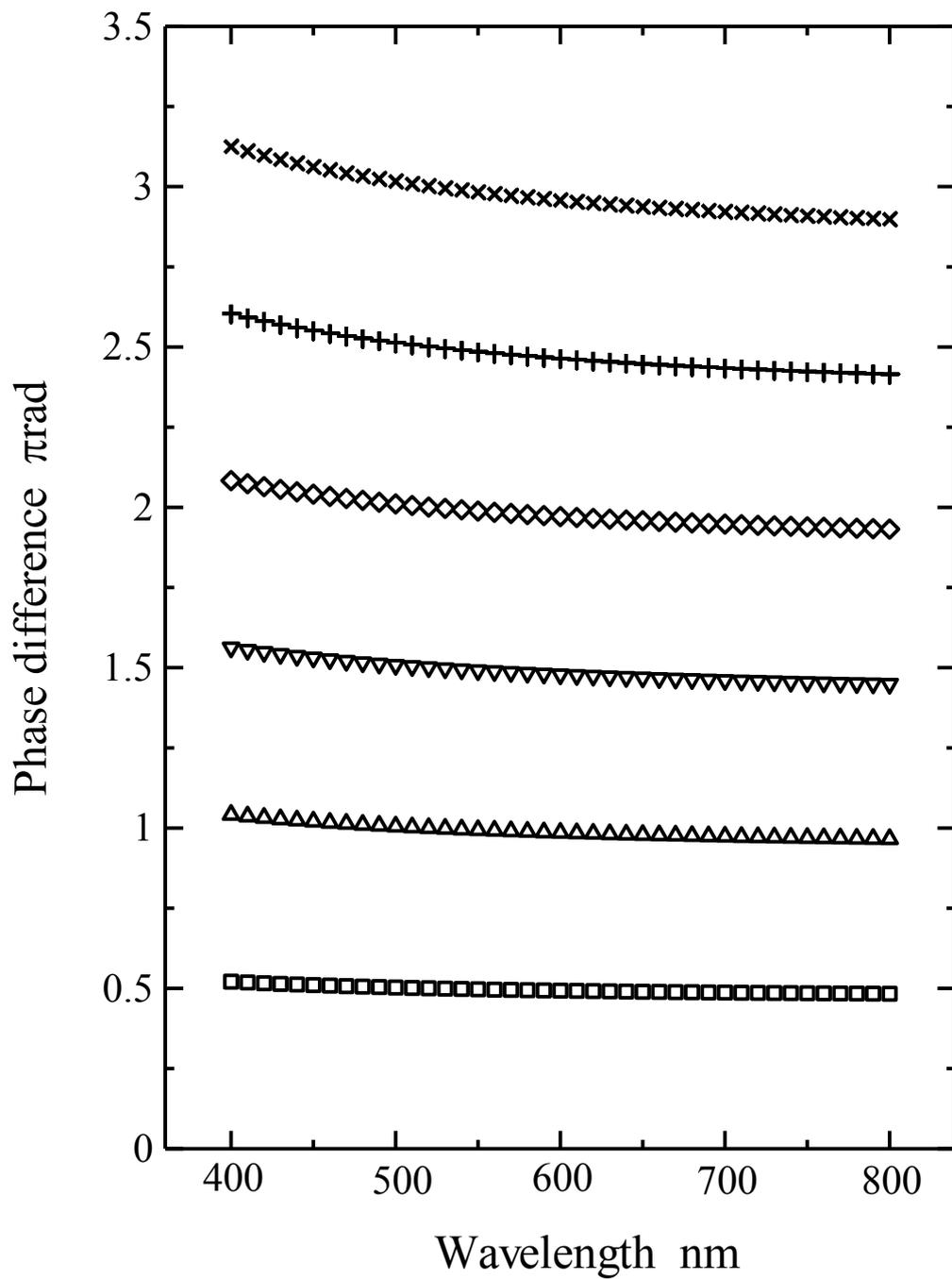


図4.1 水晶の波長分散

表4.2 水晶の次数判定ルックアップテーブル

B.S.Cの位相差 m ( $\lambda=520\text{nm}$ )	位相差 m ( $\lambda=520\text{nm}$ )	位相差 rad ( $\lambda=520\text{nm}$ )	位相差 m ( $\lambda=540\text{nm}$ )	位相差 rad ( $\lambda=540\text{nm}$ )	2波長の位相 差の差 rad	次数 N
0	0	0	0	0	0	0
$0.650 \times 10^{-7}$	$0.650 \times 10^{-7}$	0.786	$0.647 \times 10^{-7}$	0.753	0.032	1
$1.300 \times 10^{-7}$	$1.300 \times 10^{-7}$	1.571	$1.295 \times 10^{-7}$	1.506	0.065	1
$1.950 \times 10^{-7}$	$1.950 \times 10^{-7}$	2.357	$1.942 \times 10^{-7}$	2.259	0.097	2
$2.600 \times 10^{-7}$	$2.600 \times 10^{-7}$	3.142	$2.589 \times 10^{-7}$	3.013	0.130	2
$3.250 \times 10^{-7}$	$3.250 \times 10^{-7}$	3.928	$3.236 \times 10^{-7}$	3.766	0.162	3
$3.900 \times 10^{-7}$	$3.900 \times 10^{-7}$	4.713	$3.884 \times 10^{-7}$	4.519	0.194	3
$4.550 \times 10^{-7}$	$4.550 \times 10^{-7}$	5.499	$4.531 \times 10^{-7}$	5.272	0.227	4
$5.200 \times 10^{-7}$	$5.200 \times 10^{-7}$	6.284	$5.178 \times 10^{-7}$	6.025	0.258	4
$5.850 \times 10^{-7}$	$5.851 \times 10^{-7}$	7.069	$5.825 \times 10^{-7}$	6.778	0.291	5
$6.500 \times 10^{-7}$	$6.501 \times 10^{-7}$	7.855	$6.473 \times 10^{-7}$	7.531	0.324	5
$7.150 \times 10^{-7}$	$7.151 \times 10^{-7}$	8.641	$7.120 \times 10^{-7}$	8.285	0.356	6
$7.800 \times 10^{-7}$	$7.801 \times 10^{-7}$	9.426	$7.767 \times 10^{-7}$	9.038	0.388	6

## 4.3 高速波長変調照明装置の開発

### 4.3.1 高速波長変調照明装置の構造

図4.2に高速波長変調照明装置の基本構造を示す。隣接する2つのコンパートメントに1つずつLEDが実装されている。2つのコンパートメントは電源系統が独立しており、電氣的にスイッチングすることで、交互点灯する。そのため、高速スイッチング信号によって微小時間内に2つの発光を得ることができる。さらに、スイッチングおよびサンプリング速度は偏光高速度カメラから与えられるパルスと同期するため、複屈折計測と同期できる。

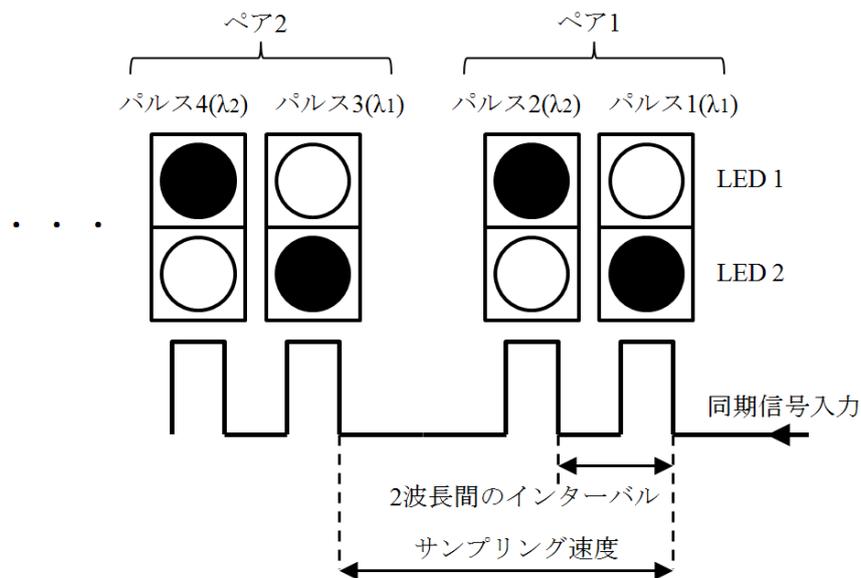


図4.2 高速波長変調照明装置の基本構造

### 4.3.2 LED発光遅延時間

図4.3に照明装置で用いたLEDに対して得られたLEDの同期発光タイミング実験結果を示す。偏光高速度カメラから図4.2に示すパルス幅  $2\mu\text{sec}$ 、立ち上がり  $5\text{V}$  の同期入力信号を照明装置に入力する。照明装置からの発光信号出力は光センサで検出し、同期入力信号と時

間的に同期させてオシロスコープで表示させた。結果として、偏光高速カメラから出力された信号入力後、LEDは $0.7\mu\text{sec}$ の遅延時間をもって発光を開始し、同期信号のパルス幅と同じ $2\mu\text{sec}$ 発光後に消光した。遅延時間は毎回一定である。この発光消光動作を繰り返し行うことができるため、単体LEDで $4\mu$ 秒毎に連続点灯できる。この結果から、偏光高速カメラから出力される同期信号を交互に分配し、それぞれ電源系統が独立したLEDを点灯させることで、LEDの2チャンネルの時には $8\mu\text{sec}$ ( $125\text{kHz}$ )程度のサンプリング速度と、 $4\mu\text{sec}$ 毎の波長変調が可能となる高速波長変調照明装置を実現できるが確認できた。

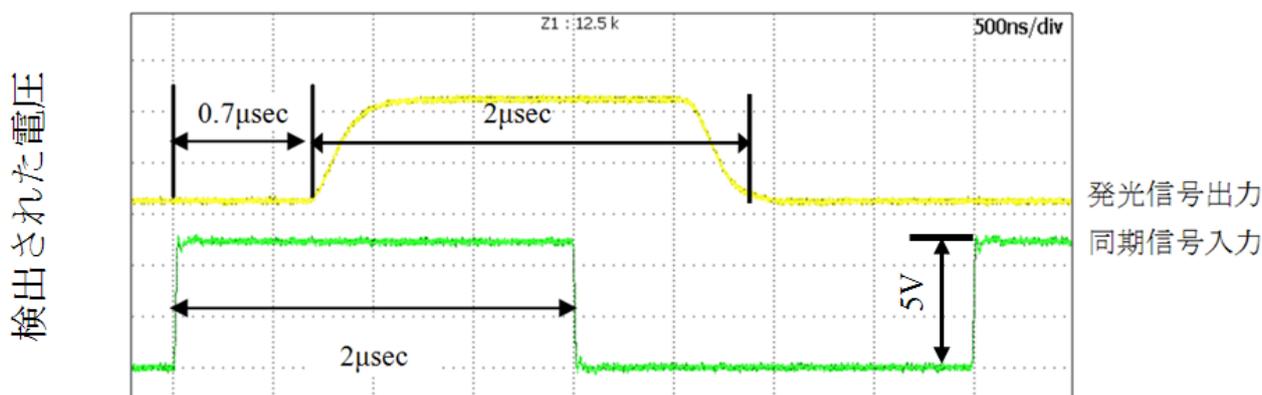


図4.3 開発した照明装置の発光遅延時間

#### 4.3.3 高速波長変調照明装置の仕様

図4.4に開発した高速波長変調照明装置を示し、表4.3に照明装置の基本性能を示す。前述の通り、隣接する2つのコンパートメントに1つずつ白色LEDが実装されており、分光発光強度特性として、450から570nmの発光が可能である。1つのコンパートメントサイズは $4\times 4\text{mm}$ あり、水平垂直方向に合計360個並んでいる。隣接する2つのコンパートメントは、それぞれ独立した同期系統と電源系統を持っている。そのため外部から信号を入力し、電氣的にスイッチングすることで高速に交互点灯ができる。

また、図4.4右下に示す各コンパートメント構造では、内壁周囲に0.5mm程度の段差がつけてある。そのため、4×4mmの光学素子を各LEDの前面に設置することができる。本論では、2つの異なるバンドパスフィルタを実装することで、複屈折位相差測定結果を補正するための波長変調照明装置として使う。予めバンドパスフィルタは、コンパートメントのサイズに切断し、ピンセットを用いて実装した。さらには、2波長の発光強度を、それぞれに0から256段階で変調できるため、光検出器の分光感度が異なる場合でも、2波長それぞれから検出器が得る光強度を等しくすることが出来る。

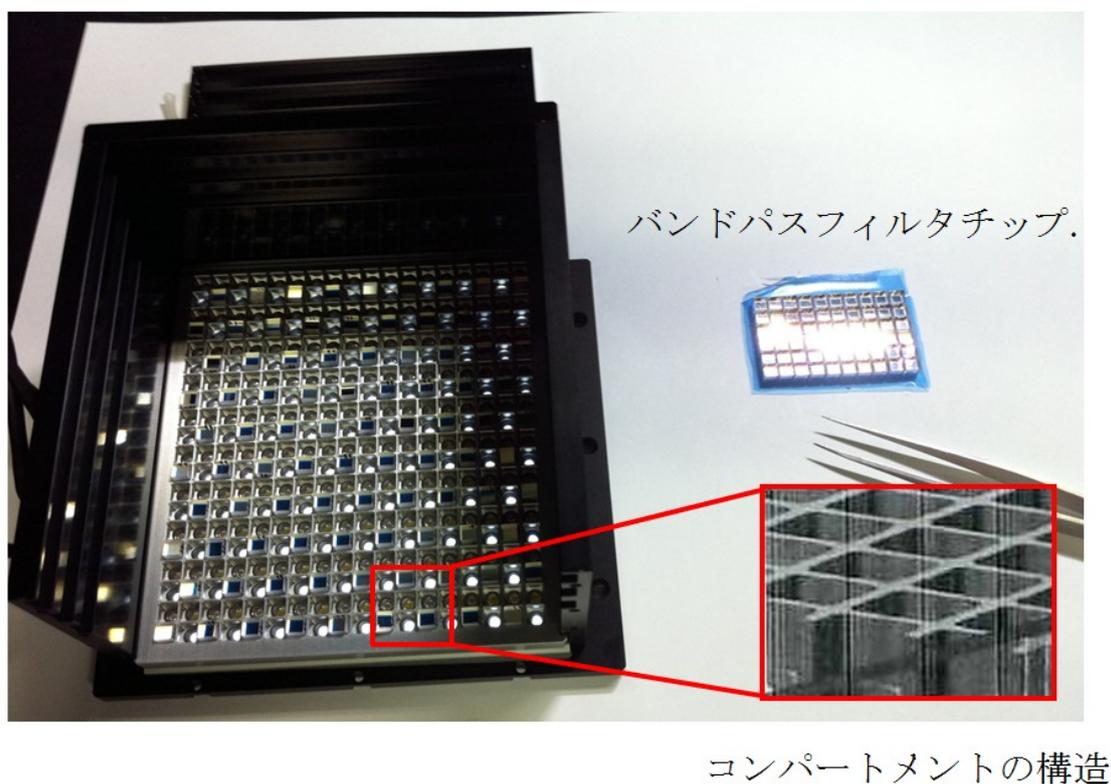


図4.4 高速波長変調照明装置の試作機

表 4.3 高速波長変調照明装置の仕様

発信波長域 nm	450-750
コンパートメントのサイズ mm	4×4
コンパートメントの数 個	360
最小インターバル時間 μsec	4
最高繰り返し変調周波数 kHz	125
調光性能 (0~100%出力における可変分解能)	0-256
消費電力 W	70
動作温度 °C	0-40

## 4.4 高速高次位相差計測実験

### 4.4.1 実験装置

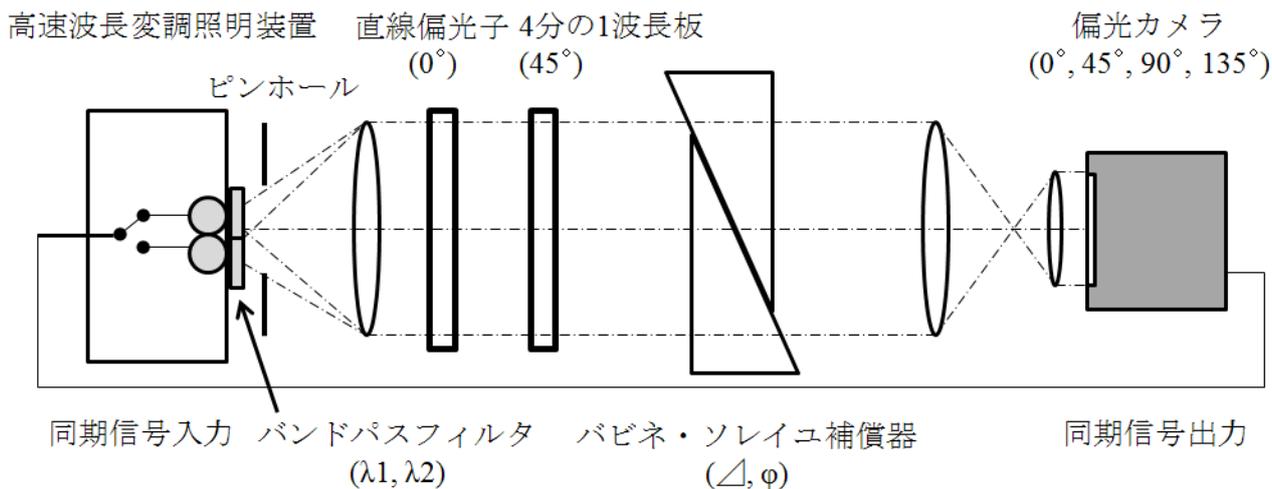


図4.5 高速高次位相差計測実験装置

図 4.5 および図 4.6 に実験装置を、表 4.3 に実験条件を示す。  $\lambda_1$  の中心波長は 520nm,  $\lambda_2$  の中心波長は 540nm を用いる。偏光高速度カメラから出力される同期信号によって電氣的に 8.3msec 毎に  $\lambda_1$  および  $\lambda_2$  を交互点灯させる。各バンドパスフィルタを通過した光はピンホールを通され点光源となり、レンズによって平行になる。その後、直線偏光子と 4 分の 1 波長板を通過して円偏光となる。2 波長の幅を 20nm と近接させることで、サンプルに入射する円偏光度の違いと、LED の発光遅延の波長依存性の問題を対策している。バビネソレイユ補償器によって 0 から  $1.5\lambda$  程度まで複屈折位相差を変調し、偏光高速度カメラによって時間的に同期し、かつ連続的に検出する。得られた各測定波長からの光強度変化と、偏光高速度イメージセンサの中心画素に対し、複屈折位相差計算を行った結果を図 4.7 に示す。

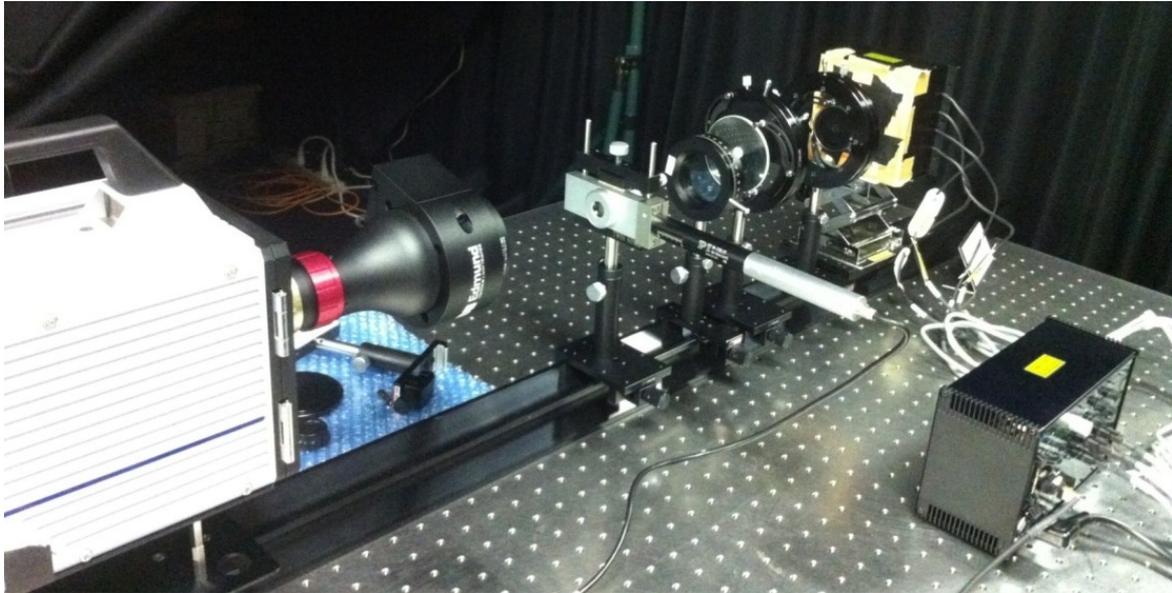


図4.6 高速高次位相差計測実験装置

表4.3 実験条件

測定波長 1 ( $\lambda_1$ ) nm	520±10
測定波長 2 ( $\lambda_2$ ) nm	540±10
2 波長インターバル時間 msec	8.3
サンプリング速度 Hz	2
サンプル	バビネソレイユ補償器

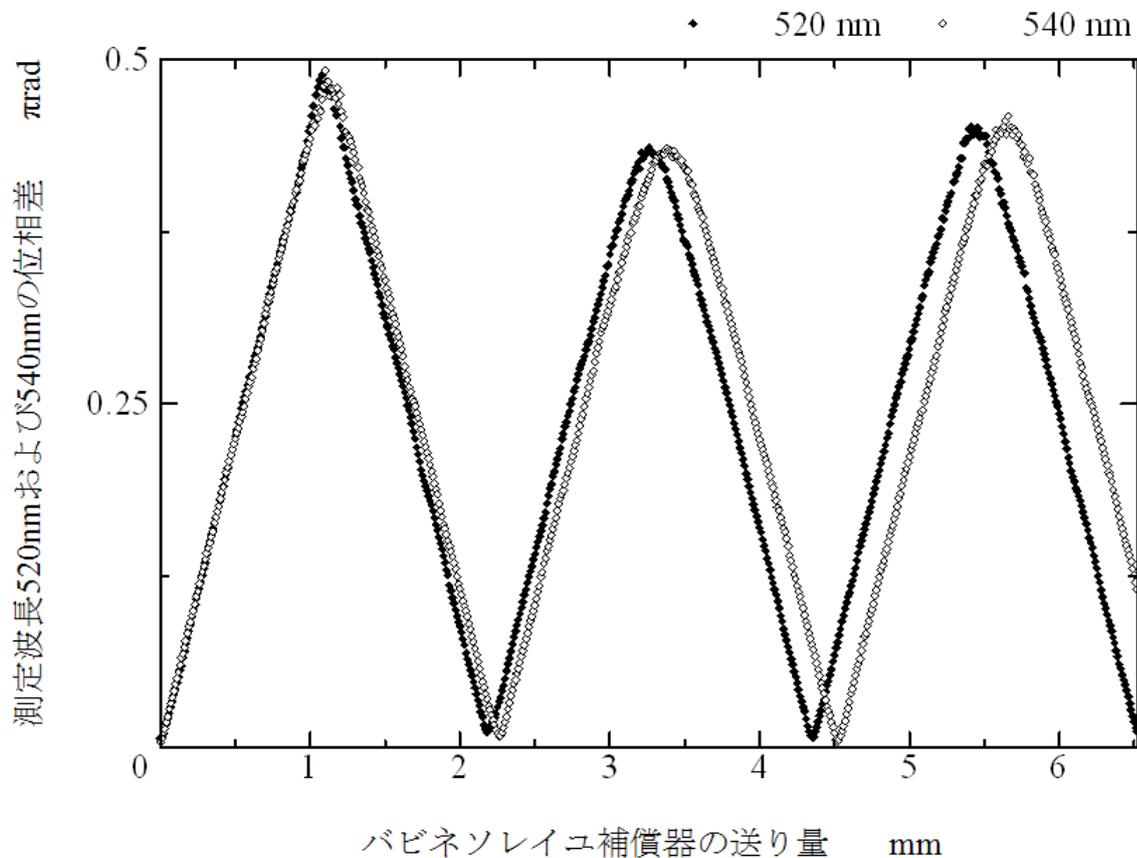


図4.7 2波長実験結果

#### 4.4.2 高次位相差計測実験

次数判定を行った結果を図4.8に示す。図4.7で得られた測定波長520nmの複屈折位相差測定結果を用い、横軸に示したバビネソレイユ補償器の送り量に対して4分の1波長周期を破線で示している。また、表4.2のルックアップテーブルから得られた次数増減の理論しきい値を、縦軸に破線で示している。破線で囲まれた領域に含まれる計測結果によって次数判定を行うため、図4.8のチャートに次数判定領域をグレーで示した。また、実験結果から得られた2波長の複屈折位相差の差は4分の1波長毎に符号の正負が入れ替わるため、差の二乗の平方根を取ることで得ている。

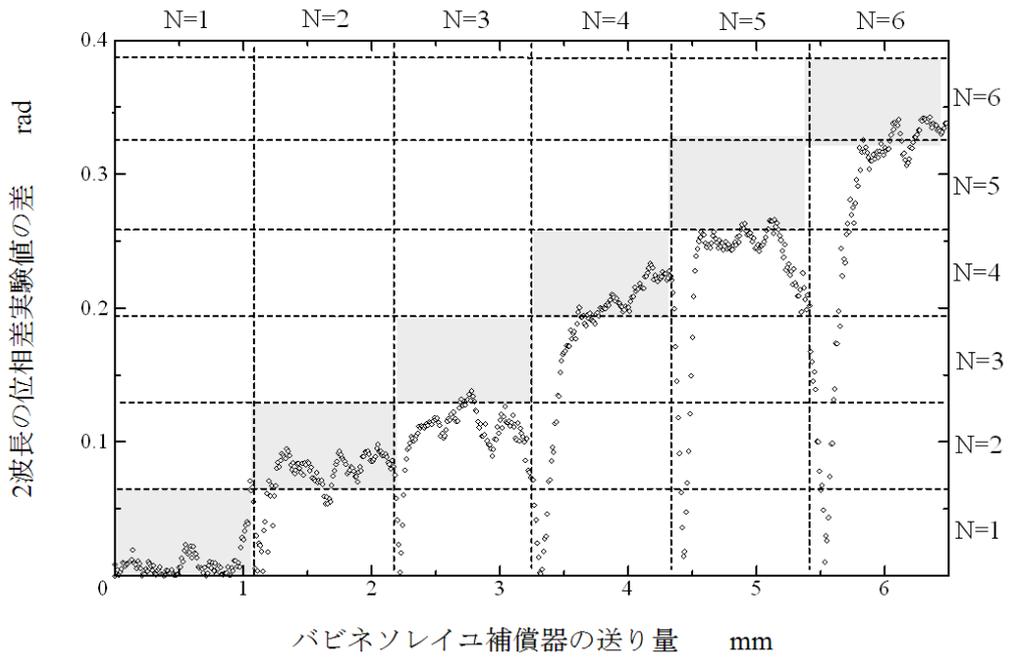


図4.8 2波長の複屈折位相差実験値と次数補正ルックアップテーブル領域の関係.

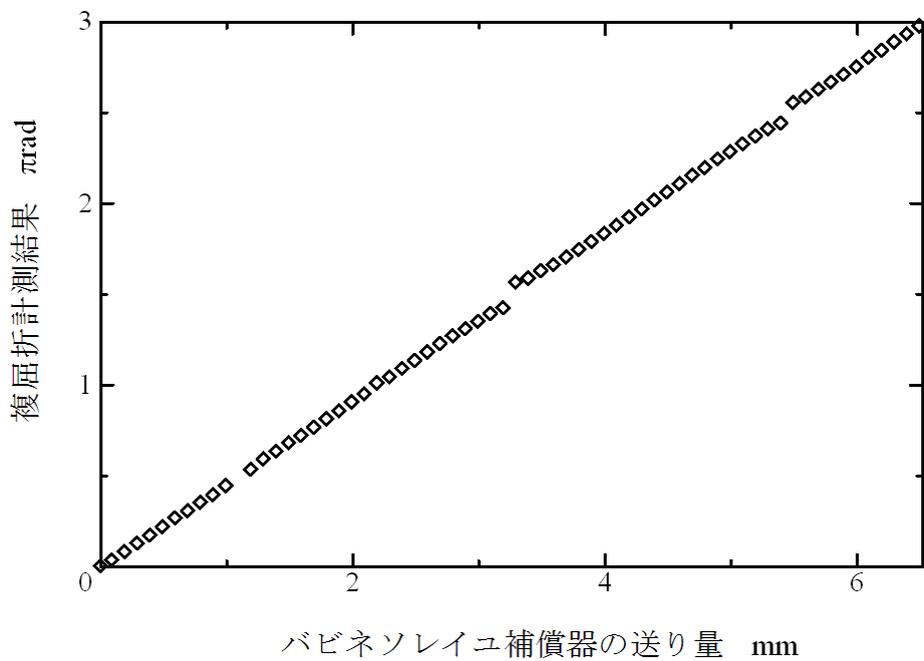


図4.9 位相差接続結果.

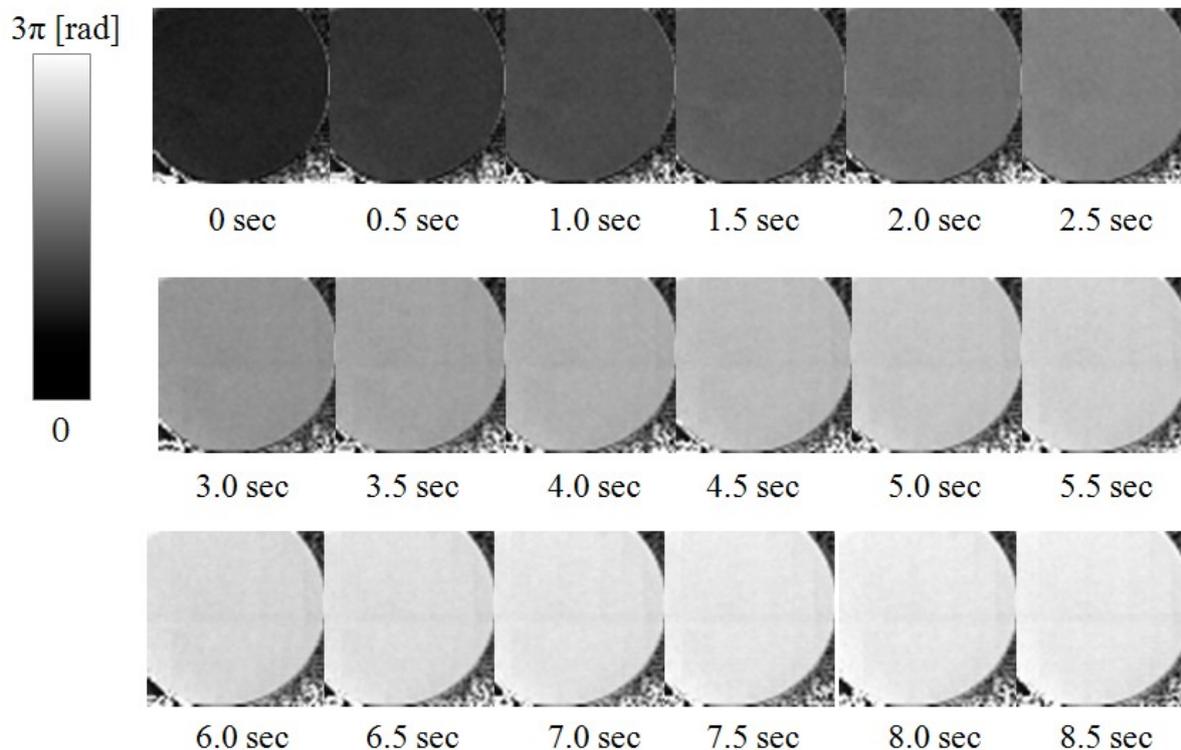


図4.10 高次複屈折位相差の動的二次元計測結果.

#### 4.4.3 結果と考察

図4.7の測定結果に表4.2の判定値から得られた判定領域を図4.8に示す. 結果として次数判定領域に対して実験的に得られた値は全体として低くなった. 測定レンジの中間付近のデータを用いた次数判定結果を用い, 図4.7によって $\pi/2$ 毎に連続する直線上の測定値に対して共通の次数で補正することで, センサ中心画素の値をアンラップした高次位相差計測結果を図4.9に示す. また, 確認した次数判定方法を用い, 動的に位相差を変調したバビネソレイユ補償器の2次元高次位相差の動的計測結果を図4.10に示す. 実験条件は表4.3と同一である.

図4.7の計測結果では, 位相差の計測レンジの最大値まで値が得られていない. 理由として, 入射光が完全な円偏光でないこと, 2波長間の入射光の偏光状態が完全に同一でないこと, 偏光高速カメラの消光比が不足していることが考えられる. そのため, 図4.9の結果において,

位相差の接続部が完全に繋がらない課題が生じている。また、高次位相差になるにつれ、各測定波長が±10nmの幅を持っているため、偏光解消が生じ、上記同様に位相差の計測レンジ最大値まで値を得ることが難しい。これらの課題解決方法として、円偏光光学素子の広帯域化、さらなる近接した測定波長の使用、そしてバンドパスフィルタの透過波長幅を狭めることが考えられる。

また、2波長の計測結果が交差する場所では2波長計測結果の差が0となるため次数判定ができない課題がある。連続的に位相差が変化する物体には周辺の次数判定結果を用い補正することで高次位相差に対応できる。連続的な位相差変化が少ない物体の計測については、あらかじめ測定物の分散、想定計測値、および組み合わせる2波長を選択することが重要である。一方で、測定波長間が離れることで、光学系の波長分散の影響や、LEDの発光遅延の波長依存性の問題が生じ、入射偏光状態が測定波長毎に変わってしまう課題があるため、使用の際に注意が必要である。

## 4.5 本章のまとめ

本章では、材料加工分野における高次計測ニーズを踏まえ、高次位相差計測法の研究を行った。提案手法では高速複屈折位相差計測レンジが $\pi/2$ であることから、高次位相差の計測が難しい。解決する手法として、2波長測定による計測レンジ拡大提案を行い、実験的に確認を行った。はじめに複屈折分散の周波数依存性を説明し、2つの測定波長とルックアップテーブルを用いた次数判定方法について述べた。次に高速波長変調照明を提案し、基本構造を示したうえ、さらにLEDの同期と遅延時間性能について実験的に確認した。それらの結果を踏まえ、実際の照明装置開発を行った。開発した装置とバビネソレイユ補償器をサンプルとして用い、0から $1.5\lambda$ 程度の高次位相差まで位相差を増加させ、2波長計測を行った。得られた結果から次数補正を行い、二次元計測結果として示した。最後に提案法の課題と解決手法について考察を行った。以上の結果から高速複屈折計測装置の位相差計測レンジ拡大の実現性を示したものである。

## 第5章 応用計測

本章では、実際の高速複屈折現象に対し、開発した高速複屈折計測装置を適用し、応用計測を行ったため結果を報告するものである。5.1では、高速伝搬する応力分布計測課題を踏まえ、衝撃試験時に生じる材料内部の複屈折伝搬の可視化と、伝搬速度計測を行ったものである。実験的に得られた秒間130万枚の高速複屈折伝搬画像として可視化結果を示している。さらには、計測結果画像から伝搬速度の実験値を求め、材料のヤング率と密度から得られる伝搬速度理論値との比較検証を行うことで実用性を確認している。5.2では、広範囲の高速複屈折マッピング計測課題を踏まえ、偏光高速度イメージセンサを用いた複屈折位相差マッピング計測手法を提案するものである。偏光高速度イメージセンサをラインセンサとして用い、駆動機械と同期することで得られた計測結果ライン画像を隙間なく接続することで、空間的に漏れのない広範囲の複屈折マッピング計測手法を提案している。実用性を示す結果として、透明フィルムを用いて実験的に得られた複屈折位相差マッピングデータを示している。5.3では、移動および変形する複屈折物体の計測課題を踏まえ、フィルム延伸実験を用いて、移動かつ変形する測定点の複屈折計測法を提案するものである。予めフィルムに塗布した格子パターンを用い、画像処理で格子座標を時系列にもとめることで、格子重心から計測点の座標、格子面積と単一格子の初期体積から厚みを得ることによって、移動かつ変形する点の複屈折が計測できる。実際にフィルム延伸実験によって得られた複屈折値と従来法から得られる値を比較検証をすることにより、実用性を示す。以上のことから、開発した高速複屈折計測装置の応用計測法を新たに実現したものである。

## 5.1 高速伝搬する応力分布計測

### 5.1.1 背景

高速複屈折変化が生じているとき、物質内で衝撃、破壊、加工といった外力に対して生じた応力性複屈折であることが多い。また、弾性領域では、複屈折性位相差と応力には材料固有の定数によって比例関係が成り立つため<sup>71)</sup>、複屈折位相差を用いて応力分布を解析することができる。

近年、ガラス、樹脂といった光学材料がディスプレイ分野において多く使われていることから、益々の小型化、高機能化が求められており、精密加工の重要性が増している。加工側では微細加工のための加工ツールの小径化や、超音波を用いるなど高速化が進んでいるため、精密加工条件は複雑化している<sup>72)</sup>。既に FEM 等の数値解析手法が提案されているが、精密形状に対して動的な応力分布を求めることは非常に難しく、実験的なアプローチが必要となっている。

光弾性手法を用いて衝撃時の応力分布の可視化手法が提案されているが<sup>73)</sup>、サブマイクロ秒の時間分解能での提案は見られない。繰返し現象に対して同期させた2つのストロボ照明の1方に時間遅延を与えることで、微小時間間隔での観察手法が提案されているが、現象を連続的に捉えることが出来ない。そこで、開発した高速複屈折計測装置を用いて高速伝播する応力分布の可視化および速度計測を試みた。また、実験結果について理論値と比較検証を行った。

### 5.1.2 計測原理

実験によって得られた複屈折計測結果画像から応力伝搬速度を求める。また、実験値と理論値を比較することにより提案手法の実用性を検証する。

屈折位相差 $\Delta$ 、サンプルの厚さ $d$ 、および光弾性材料の主応力差 $\sigma$ の関係を図5.1に示す。材料に外力が加わった場合、内部応力が生じ、また複屈折が生じる。応力最大または、最小の軸に対する応力を $\sigma_1$ 、および $\sigma_2$ とするとき、材料内の主応力差 $\sigma$ は以下の式で表される。

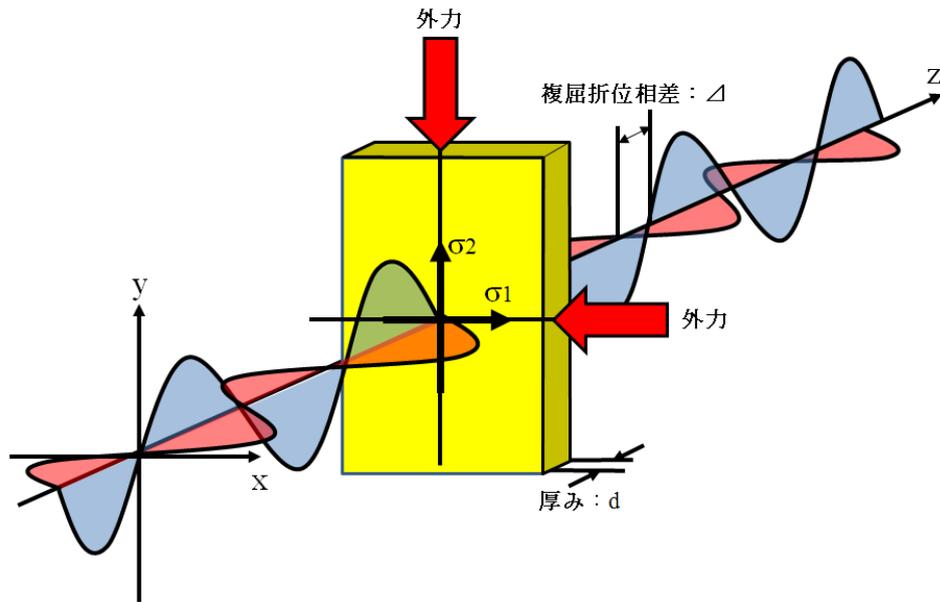


図5.1 応力と複屈折位相差の関係図

$$\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (5.1)$$

また、応力性複屈折位相差 $\Delta$ と主応力差は、

$$\Delta = \frac{2\pi C}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) d \quad (5.2)$$

の関係がある。

ここで、 $C$ は光弾性定数と呼ばれる材料のもつ応力光定数である。この式から複屈折位相差と主応力差が比例関係にあるため、複屈折について応力が支配的要因のとき、衝撃時に材料内を伝搬する複屈折位相差を追跡することで、応力伝搬速度を求めることができる。実験的に得られた応力伝搬速度 $V_{\text{measure}}$ は、

$$V_{measure} = \frac{dL}{dt} \quad (5.3)$$

と表わされる。ここでLは衝撃点から複屈折位相差先端までの距離を表わす。そのため、計測結果画像から伝搬速度を求めることができる。はじめに、複屈折位相差値のラインプロファイルによって、衝撃点と複屈折位相差先端の距離を画素数と1画素の空間分解能からもとめる。つぎに、撮影速度の逆数、衝撃を受けた画像の時刻、および位相差先端抽出画像の時刻を用いて経過時間tを決定する。以上のことから実験的に $V_{measure}$ が得られる。

一方、弾性材料を伝搬する応力の速度理論値は以下の式で表わされる<sup>74)</sup>。

$$V_{theory} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5.4)$$

そのため、サンプルのヤング率E(GPa)、および密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$ を用いて得ることができる。

### 5.1.3 実験

実際の実験としてアクリル材にハンマーで衝撃を加えた時の動的2次元複屈折位相差の計測を行った。実験装置を図5.2に、条件条件を表5.1に示す。

光源から出射した光はレンズを通して平行光となり、バンドパスフィルタを通過して中心波長520 $\pm$ 10nmの光となる。直線偏光子と4分の1波長板を通り、円偏光となった光は、サンプルを透過し、秒間130万枚で偏光高速度カメラによって記録される。各画素に蓄積された光強度情報は偏光高速イメージセンサ背面のA/D変換器で量子化され、16bitのRAWファイル形式の連番データとしてPCへ保存される。保存されたデータに位相シフト解析処理を繰り返しかけることにより、位相差測定レンジを256諧調に分割したグレースケールの複屈折位相差の時系列画像を得る。

ハンマーによってアクリル中央上部に衝撃を加える。サンプルのアクリル材はネジ留めされ、ジ

グを用いて衝撃時に動かない様、固定されている。偏光高速度カメラは外部トリガによって記録開始と終了ができ、また内部メモリがリングバッファとなっているため、現象終了後のトリガ入力によって数秒間時間をさかのぼって記録することができるため、衝撃時の一瞬の画像を記録することができる。

表5.1 実験条件

サンプル種	アクリル樹脂
サンプルサイズ H × W × D mm	80 × 20 × 20
サンプリング速度 MHz	1.3
計測範囲 mm	10 × 1.25
二次元測定点数	32 × 4
空間分解能 μm/point	313
測定波長 nm	520±10
光源種	緑色 LED
空間平均	なし
時間平均	なし

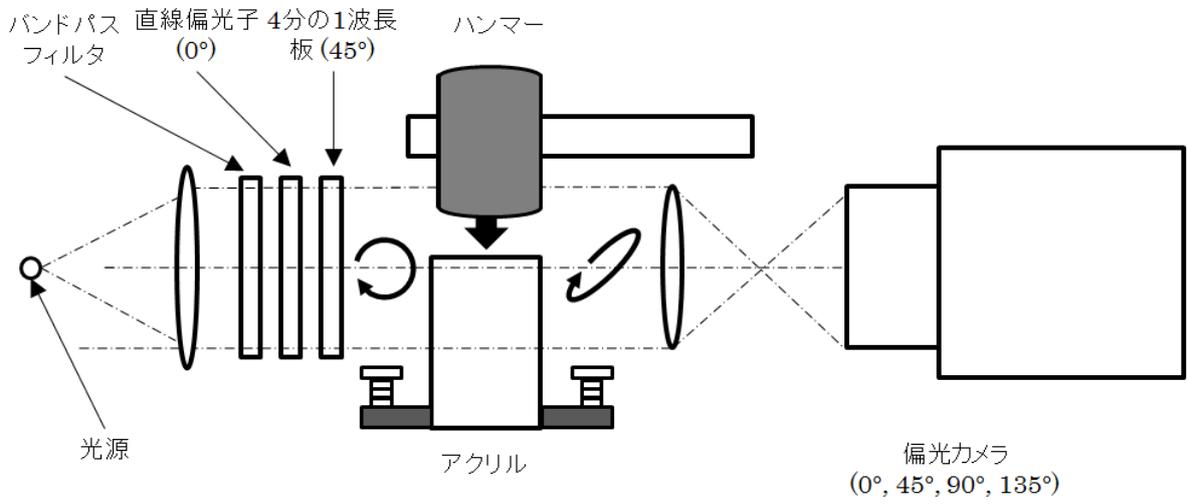


図5.2 衝撃実験装置

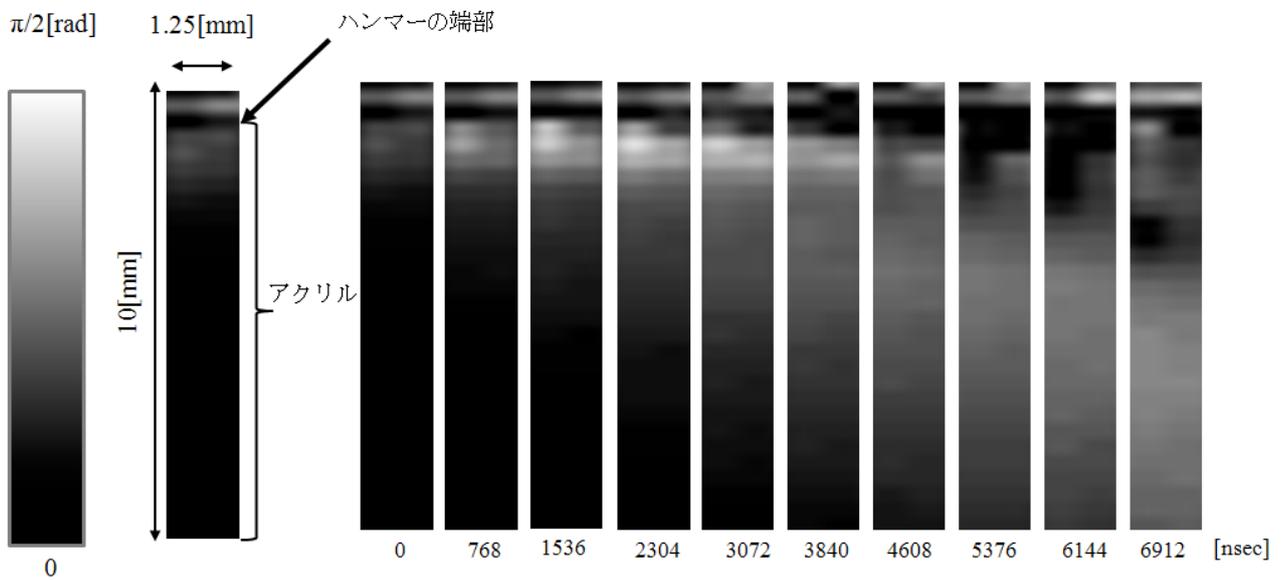


図5.3 アクリル内の高速複屈折伝播計測結果.

#### 5.1.4 結果と考察

実験結果を図5.3に示す。衝撃点を起点として材料内を高速伝搬する複屈折を130万分の1秒の時間分解能で可視化したものである。従来法では、二次元検出の高速性の課題から出来なかった。

つぎに、図5.3の計測結果画像から複屈折伝搬速度を求めた。得られた複屈折伝搬画像の水平方向中心に垂直方向の複屈折位相差輝度値のラインプロファイルをとることで得られた。複屈折位相差先端の移動距離は5376nsec間に9.09mmであった。そのため $V_{\text{measure}}$ は毎秒1,690mであった。一方、アクリル樹脂のヤング率 $E$ は3.14(GPa)、密度 $\rho$ は1.17~1.2g/cm<sup>3</sup>であるために<sup>75)</sup>、 $V_{\text{theory}}$ は1638~1618m/秒となる。以上の結果から、実験的に得られた応力伝搬速度が理論値と96%程度一致した。結果を表5.2に示す。4%程度の誤差が見られるが、ラインプロファイル時に画像の濃淡情報から読み取った画素座標の位置誤差と、文献ごとにアクリルの屈折率に若干の幅があることが原因と考えられる。

プラスチックの応力伝搬速度は1,000~2,000m/sec程度であるため、130万分の1秒で計測することにより0.7~1.5mm毎の応力変化を捉えることができる。また、ガラスでは3000~5000m/secであるため、同様に2.3~3.8mm毎に捉えることができる。そのため提案法は、物質内部の応力伝搬速度を任意の速度で求めることや、時間分布を評価するために有用な手法と考えられる。一方で、マイクロメートル領域での応力メカニズムを評価するうえでは、計測速度の更なる高速化が課題である。

表5.2 アクリル内の高速複屈折伝播の計測結果

	実験値	理論値
サンプル	アクリル	アクリル
密度 g/cm <sup>3</sup>	-	1.2 - 1.17
ヤング率 Gpa	-	3.14
応力伝搬速度 m/sec	1690	1618 - 1638

## 5.2 広範囲の高速複屈折マッピング計測

### 5.2.1 背景

ディスプレイの高機能化や大型化により、高機能フィルムが注目されている。高機能フィルムの事例として、複屈折を用いた明るさ、コントラスト、および視野角制御を行うフィルムや、偏光板を保護するための低位相差フィルムが挙げられる。そのため、複屈折計測によって評価することができる。フィルムに求められる複屈折位相差の面均一性は、各材料が持つ固有の位相差に対して0.5%程度と決められているが、近年のフィルム大型化による延伸倍率の増加、生産ラインの高速化に伴い、均一性の維持が困難になっている。そのため従来では点計測手法によって完成品を検査するための技術が用いられていたが、生産中の複屈折面内分布を計測するための技術が必要とされている。また、フィルムは長さが1ロールあたりキロメートルオーダー、幅がメートルオーダーであるため、広範囲のマッピング計測を行う必要がある。そこで、マッピング計測手法について検討を行った。図5.4に従来法と提案法の違いについて、生産ライン設置事例をもとに説明する。

従来法では回転検光子をフィルムの上下に配置し、レーザ光源からサンプルに入射する光を回転偏光素子によって偏光変調する。サンプルを透過した光を入射側の偏光素子と同様に回転制御された検光子を通過させ、フォトディテクタで検出する。入射側と出射側偏光素子を予め定めた相対角度関係を維持し、複数回取得された光強度を解析することにより、複屈折位相差と主軸方位を得る。そのため、搬送中のフィルム同一点の計測が難しいことから、局所複屈折が難しい。また、フィルム幅方向にトラバースと呼ばれる機械的な移動を行うことで、図5.4に示すジグザグライン状に幅方向の計測するための手法が実用化されている。しかしながら、ライン上にのらない複屈折分布が計測できない課題がある。

提案法では、偏光素子アレイを用いることにより、駆動機構がなく、1ショットで偏光情報を取得できるため、搬送中の動的フィルム対し、同一点の計測が可能である。そのため局所の複屈折を得ることが出来る。また、キロヘルツオーダーの繰返し計測が可能であるため、搬送速度

の高速化に対応できる特長がある。一方で、提案法ではデータ量過多の課題がある。例えばフィルム搬送速度を毎秒1mとした場合、空間分解能をレーザ径相当の1mmとして計測すると秒間1,000枚の計測が必要である。偏光高速センサにおいて1024×1024画素の情報を秒間1,000枚取得した場合には1GB以上のデータを1秒間に消費してしまうため、将来的なリアルタイム処理の負荷が非常に大きくなる。また24時間や365日の記録においては、ストレージ容量が膨大になり実用性が低い。そこで本章では、フィルム面内を広範囲に高速マッピング計測する手法確立を目指すとともに、データ量過多の課題解決を同時に実現することを目指し、研究を行ったものである。

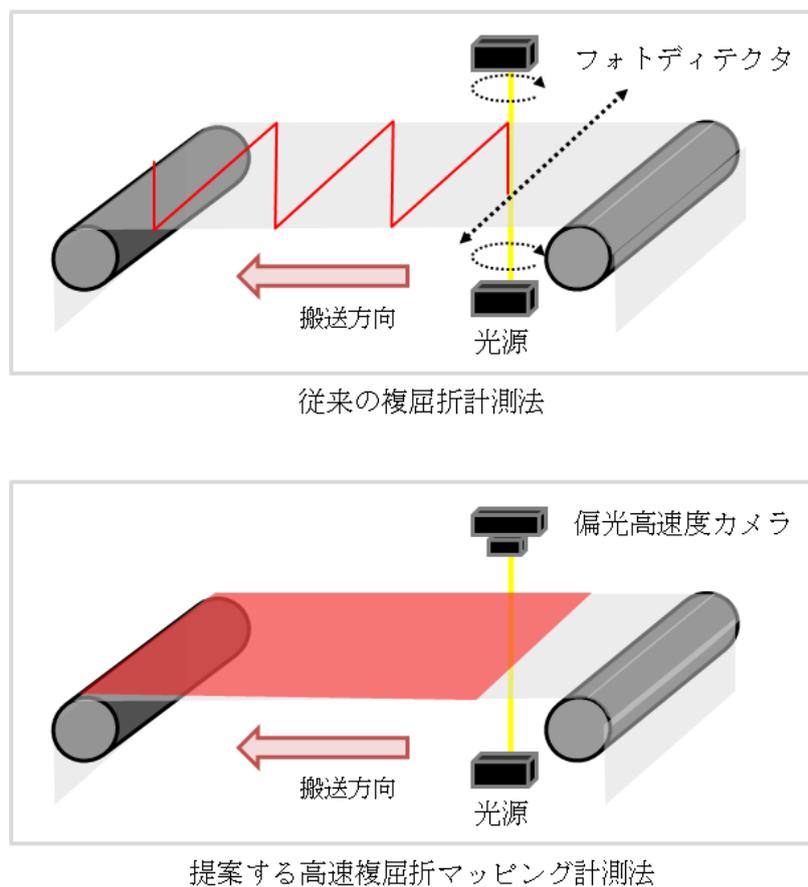


図5.4 従来法と提案法の違い

### 5.2.2 計測原理

図5.5に示す実験装置を用い複屈折位相差マッピング手法の原理を説明するものである。偏光高速イメージセンサはラインセンサとして用いられる。各ライン画像は、フィルム搬送機の搬送ロール回転角をエンコードして得られた信号と同期することで、漏れと重りのないフィルムと空間的に対応した画像となる。同期撮影時、イメージセンサは、信号入力毎にフレーミング信号をいったんリセットし、数マイクロ秒の遅延量で再露光動作をする。毎回の遅延量は一定である。そのため、これらのライン画像を撮影後、敷き詰めることで、偏光高速カメラの撮影範囲を超える広範囲の複屈折マッピングデータが取得できる<sup>76,77)</sup>。

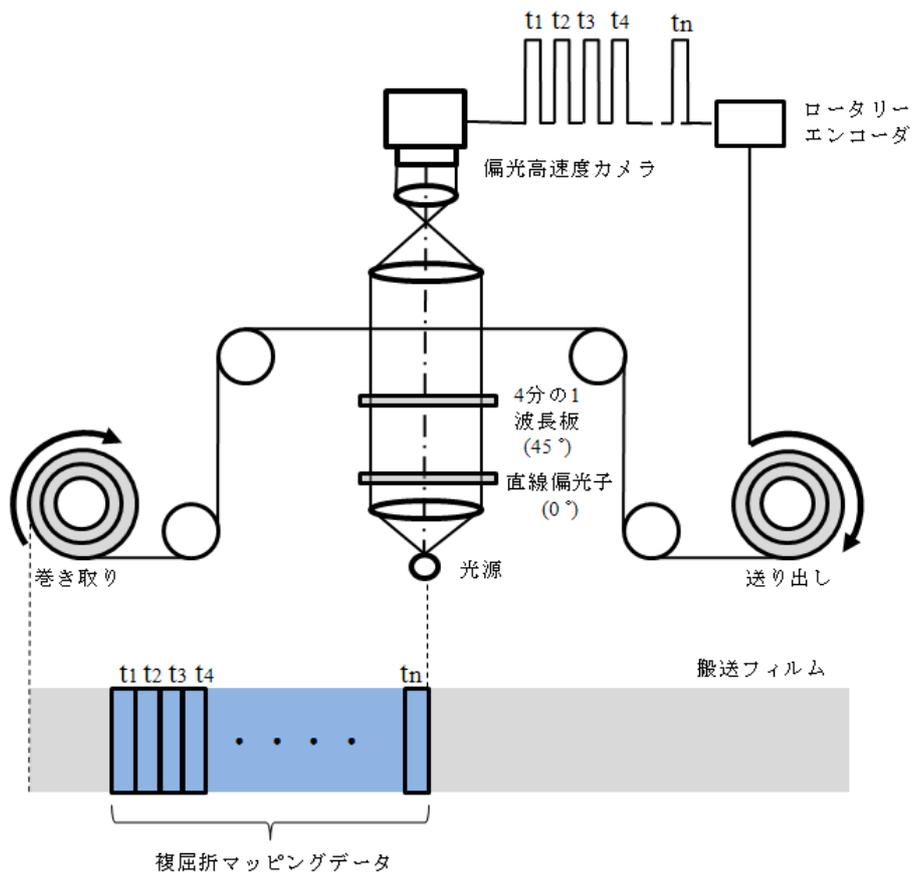


図5.5 ライン計測実験装置

### 5.2.3 実験

図5.5に示した図に装置を配置し、表5.3に示す条件で複屈折マッピング取得実験を行った。

図5.6はフィルム搬送をするために仕様を決め、所属企業内で委託し、試作した装置である。

表5.3 ライン計測条件

測定幅 mm	25 mm
レンズ光学倍率	0.2
空間分解能 $\mu\text{m}$	100
サンプリング速度 kHz	1
フィルム搬送速度 mm/sec	100
サンプル	PETフィルム
光源	緑LED
光源波長 nm	520 $\pm$ 20
バンドパスフィルタ透過波長域 nm	520 $\pm$ 10

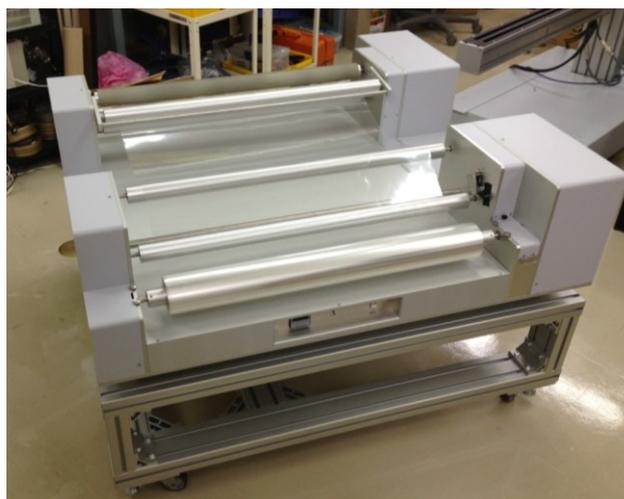


図5.6 フィルム搬送装置

#### 5.2.4 結果と考察

図5.5に示した実験装置にフィルムを取り付け、搬送した結果得られた2次元位相差分布を示す。実験条件を表5.3に、搬送装置の外観を図5.6に、そして実験結果を図5.7に示す。サンプルに用いた厚さ105マイクロメートルのPETフィルムは、一般に $40\pi$ 程度の位相差を持っていることから、提案法の複屈折位相差の測定レンジを大きく超えている。そのため、図5.7は、複屈折位相差は相対的分布の可視化結果となる。しかしながら、二次元的な複屈折位相差分布のムラを捉えることが出来ており、また、計測結果の複屈折位相差ムラの空間的な連続性が得られたことから、ライン計測と同期システムによる提案手法の実用性が確認できた。

将来的には、データ転送に光ファイバーを用い、ストレージと組み合わせることによって、原理上は24時間365日間の位相差面分布を記録することが可能である。またカメラの台数を増やし、同期駆動計測を行うことにより、フィルム全幅計測ができる。

また、現在までに秒間200ラインで偏光高速度センサ2台のリアルタイム同期計測が実現にとどまっているが、画像処理アルゴリズムを改善することで、秒間10,000ライン程度のリアルタイム計測が技術的に可能である。

フィルム検査向け複屈折位相差マッピング装置の産業展開として、装置開発を行った。外観を図5.8に示す。

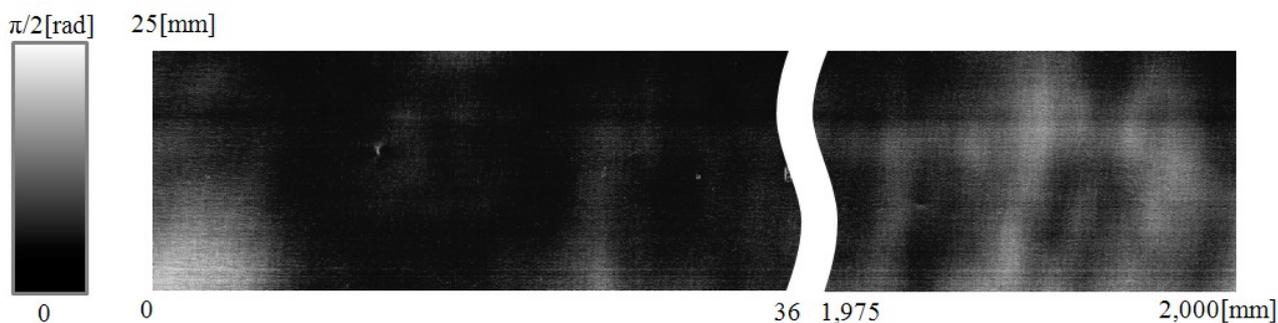


図5.7 ライン計測実験結果



図5.8 高速二次元位相差マッピング装置

## 5.3 追跡計測法

### 5.3.1 背景

図 5.9 に従来法と提案法の違いを示す。従来法ではレーザを用いて空間のある 1 点に光を通し、サンプルを透過して得られた光強度を回転検光子によって検出器で測定することで複屈折を計算する。そのため、光軸を外れた物体の計測ができない。また時間的同時にサンプルの偏光情報を取得することが難しい。一方、提案法では偏光高速カメラを用いる。偏光高速イメージセンサでは、時間的変調が不要であることから、偏光情報を時間的同時に取得することができる。また光軸に垂直な面内に 512×512 点の計測が可能であることから、2 次元計測装置として適用することができる。さらに、隣接 4 画素から得られた輝度情報を加算平均することで被写体の輝度情報を同時に取得することができるため、物体の位置情報や変形情報を同時取得したうえ、追跡複屈折計測が実現できる。

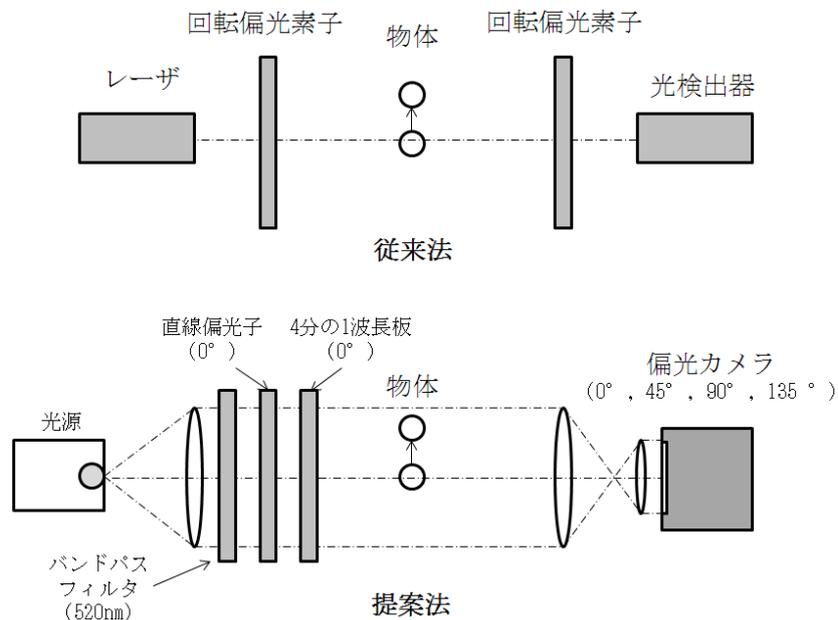


図5.9 従来法と提案法の違い

### 5.3.2 計測原理

図 5.10 に使用したサンプルの概念を示す。動的な位置情報と変形情報検出をするために予め画像処理追跡用のパターン塗布を行う。フィルムを延伸機に固定し、延伸をかけると図 5.11 に示す通り、フィルムの形状変化に追従し、塗布されたパターン形状、およびパターンの空間位置、パターン内の重心位置が変化する。ここでパターンの 4 隅を示す初期座標  $A_0, B_0, C_0, D_0$  によって求まる面積を  $S_0$ 、初期厚み  $d_0$  と  $S_0$  によって求まる初期体積を  $V_0$  とする。このとき、時刻  $t$  におけるフィルムの厚みは、時刻  $t$  において画像から求める 4 隅の座標  $A(t), B(t), C(t), D(t)$  から得られた面積  $S(t)$ 、および厚みの体積一定法則を用いて、

$$d(t) = \frac{V_0}{S(t)} \quad (5.5)$$

となる。また、時刻  $t$  における重心位置  $G(t)$  は、

$$G(t) = \frac{A(t) + B(t) + C(t) + D(t)}{4} \quad (5.6)$$

となる。各時刻における重心位置の複屈折は偏光カメラの隣接 4 画素の輝度情報  $I_0, I_{45}, I_{90}, I_{135}$  を用いて以下の式で表される。

$$n(G, t) = \frac{1}{d(t)} \cdot \sin^{-1} \frac{2\sqrt{(I(t)_{90} - I(t)_0)^2 + (I(t)_{45} - I(t)_{135})^2}}{I(t)_0 + I(t)_{45} + I(t)_{90} + I(t)_{135}} \quad (5.7)$$

となる。

そのため、偏光高速度カメラから得られた時系列画像の輝度値を用いて格子座標を追跡することによって、物体移動によって生じる計測位置の移動を追跡することができる。また計測位置から得られた複屈折位相差を、格子座標を同様に追跡することによって得られた厚みで補正することによって、複屈折を得ることができる。

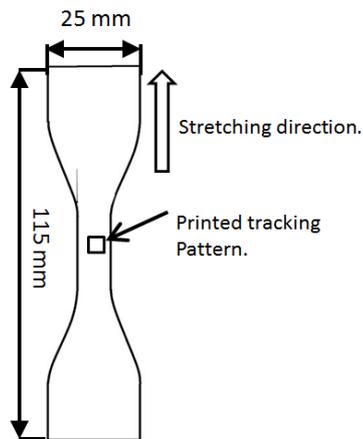


図 5.10 サンプル形状とパターン塗布

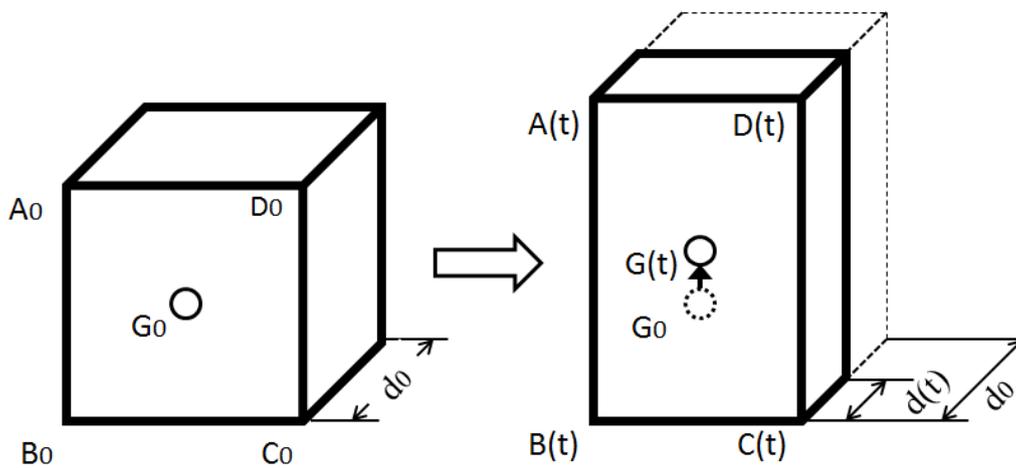


図 5.11 延伸前と延伸後の塗布を行ったセル内の座標変化

### 5.3.3 実験

図 5.10 に示す光学フィルムに予め業務用プリンターを用いて初期座標  $A_0$ ,  $B_0$  の間隔が 20mm,  $B_0$ ,  $C_0$  の各間隔が 5 mm となる様, 追跡パターンを塗布した. サンプルの初期厚み  $d_0$  は厚み計によって実測され, 105 $\mu\text{m}$  であった. したがって初期面積  $S_0$  は 100 $\text{mm}^2$ , 初期体積  $V_0$  は

10.5mm<sup>3</sup>である。図 5.12 に示した実験装置の片側延伸機、および透明フィルムをチャックによって固定し、毎分 40mm の速度で破断まで片側延伸をかけた。延伸 1mm につきフィルム厚みを実測したうえ、同時に画像を取得した。

図 5.13 に延伸中に得られた実際のフィルム画像を、図 5.14 に実測値と画像処理値、それぞれによって得られたフィルム厚み計測結果を示す。実測値を基準とした場合、画像処理によって得られた厚みの測定精度は $\pm 1.01\mu\text{m}$ 、最大計測誤差は 1.12%であった。このことから非接触計測による厚み計測の実用性が確認できた。なお、厚みの誤差の要因としては、厚み計の最小読み値が $1.0\mu\text{m}$ であったことや読み値誤差、画像処理時による4隅の点認識精度、そして延伸機に内蔵するセンサから得られた延伸量と実際のフィルムの伸び量の不一致等が考えられる。

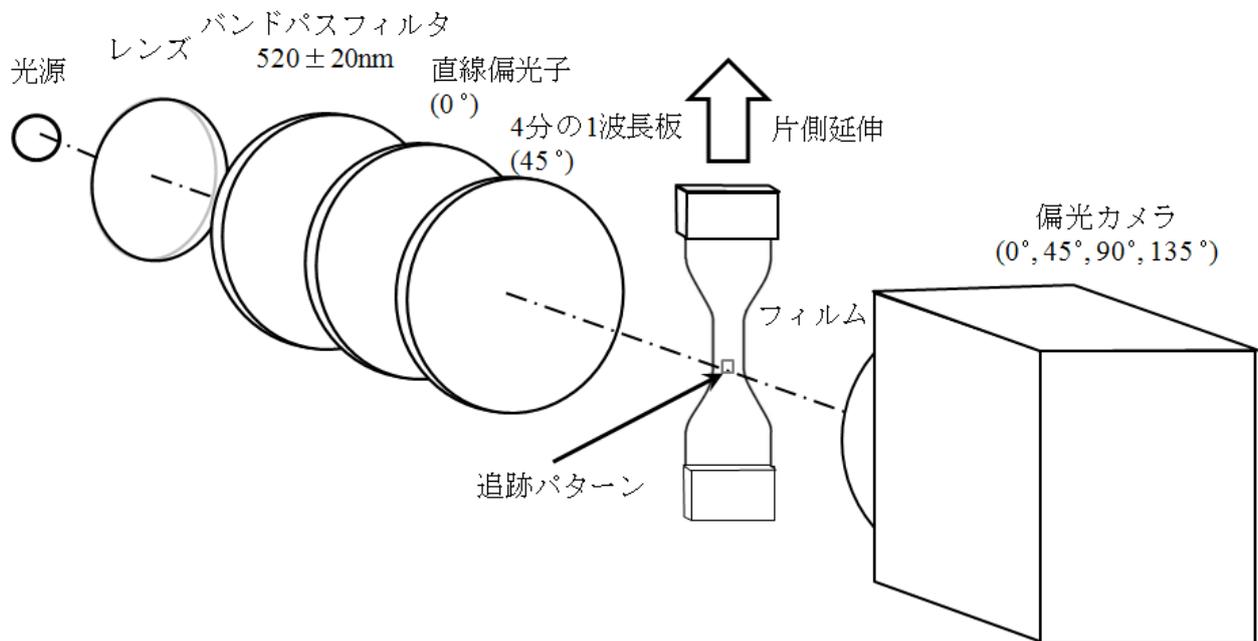


図 5.12 追跡複屈折計測実験装置

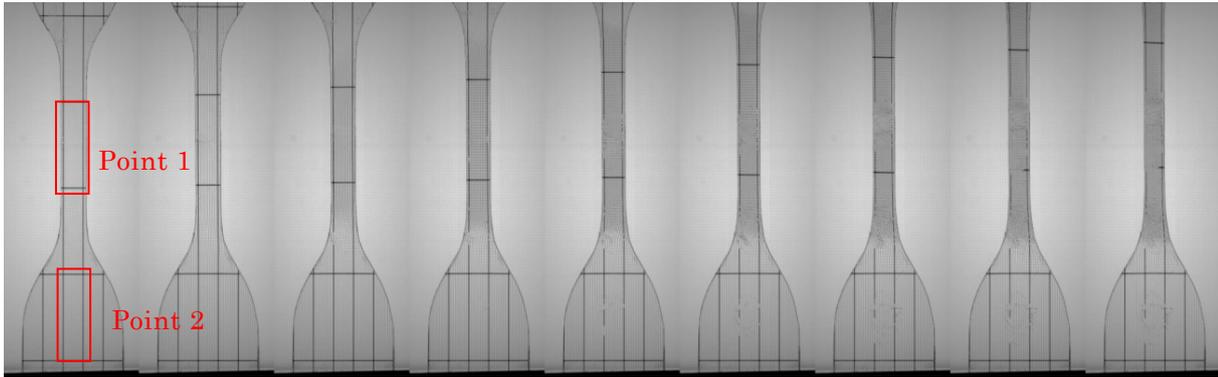


図5.13 フィルム延伸中のタイムフレーム画像

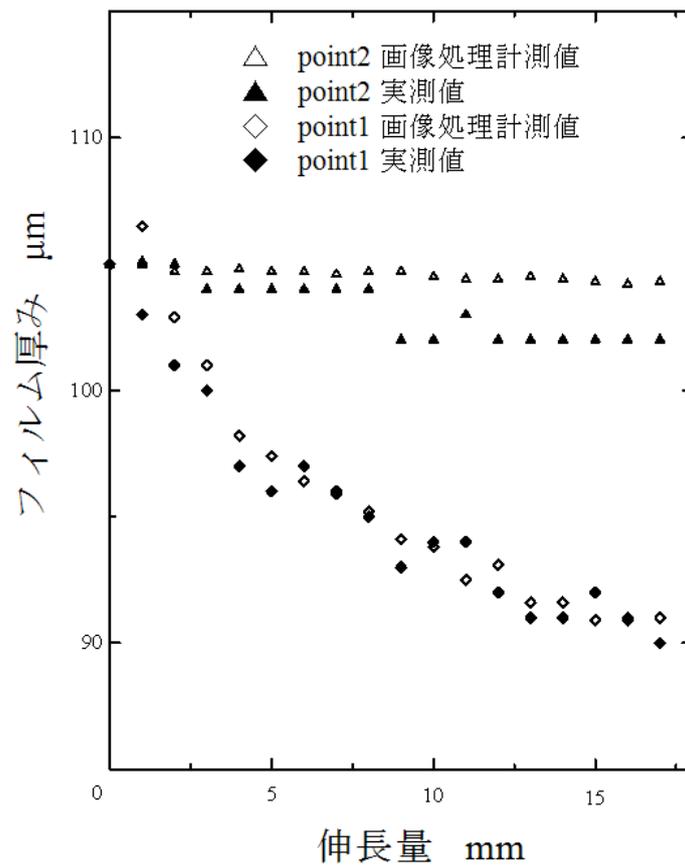


図5.14 フィルム厚みの実測値と画像計測結果

### 5.3.4 結果と考察

図 5.15 に実験結果として得られた複屈折値を示す。また、測定条件を表 5.4 に示す。図 5.15 では上部のチャートに3種類の複屈折計測結果を比較して示した。1つめは位置と厚みの補正を加えない従来法、2つめは追跡計測により測定位置補正を加えた方法、3つ目は測定位置と厚さ補正の両方を加えた値である。また下部のチャートは延伸機から得られた破断まで26秒間の引っ張り試験力を表わす。上下のグラフは時間的に同期している。実験結果から3つの条件における計測結果について、試験力から示される弾性変形領域では、3つの手法の計測結果に、ほとんど違いが見られない。しかしながら塑性変形領域になり、厚みと形状変化が顕著になると3つの条件における計測結果に差異が見られる。計測結果から得られた値として、破断までにフィルムに塗布した追跡パターン領域では15 $\mu\text{m}$ 厚みが減少し、かつ重心位置が16 mm移動した。

追跡複屈折計測の結果得られたフィルム内同一点の複屈折変化量は従来法と提案法によって最大で0.01の差があった。光学機能性フィルムは100 $\mu\text{m}$ 程度の厚みで作られることが多く、複屈折0.01の差は位相差にして1 $\mu\text{m}$ の違いが生じるため、今回得られた結果から、提案法が実際の複屈折開発技術に対して有効であることが確認できた。

表5.4 フィルム延伸実験条件

フィルム初期厚み $\mu\text{m}$	105
追跡パターン初期形状 $\text{mm}^2$	100
延伸速度 $\text{mm}/\text{min}$	40
空間分解能 $\mu\text{m}^2$	160
サンプリング速度 $\text{Hz}$	60
サンプリング時間 $\text{Sec}$	26

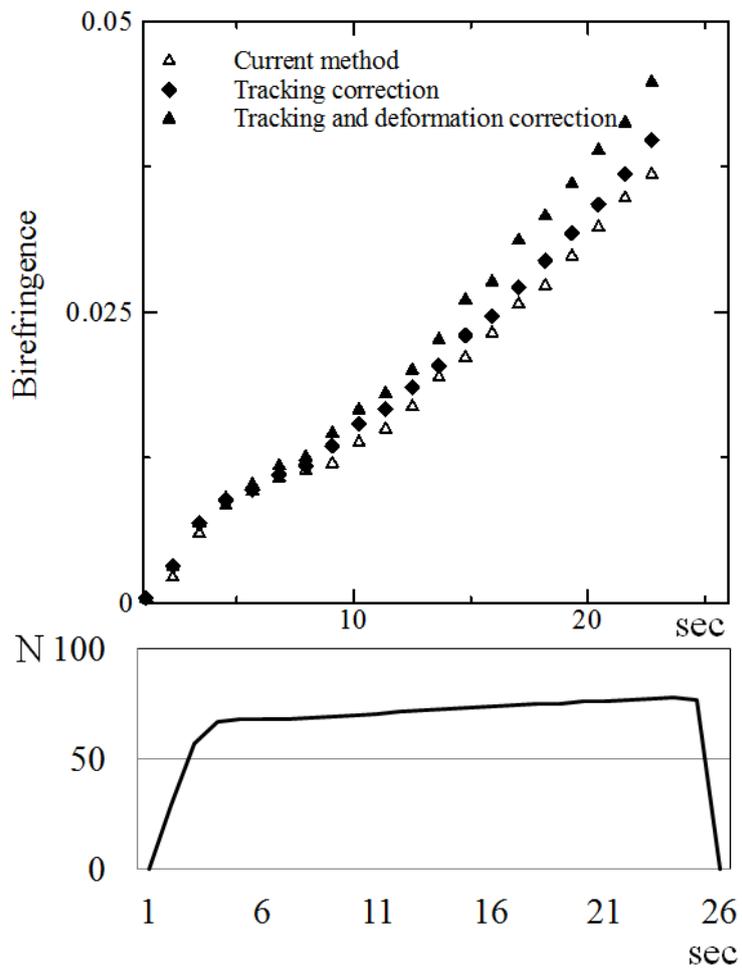


図5.15 実験結果. 従来法, 追跡補正有りかつ厚み補正無し, 追跡補正有りかつ厚み補正有りの場合の複屈折延変化量の比較結果.

## 5.4 本章のまとめ

本章では、現在までに見られる偏光計測課題を踏まえ、それぞれの課題を解決するための計測手法を提案するとともに、実際の複屈折現象に対して高速複屈折計測装置および提案手法を用いて実験を行い、実用性の確認を行った。

はじめに、高速伝播する応力分布計測課題を踏まえ、衝撃時の材料内部に生じる高速複屈折伝搬を計測した。秒間 130 万枚の計測速度で、2 次元的な複屈折分布の可視化を行った。また、複屈折と応力の関係式を示し、得られた画像を用いて応力伝搬速度の計測を行った。材料のヤング率と密度から応力伝搬速度の理論値を求め、応力伝搬速度に対する実験値と理論値の比較検討を行った。結果として、実験値として得られた秒速 1,690m の伝搬速度は、理論値と 96% の一致を示した。不一致原因は画像の読み取り誤差、および材料の屈折率理論値に誤差があることが考えられる。以上の結果から、材料内を高速伝播する応力分布計測課題を解決するための新たな装置として、実用性を示すことが出来た。数値計算が難しい複雑な形状、あるいは物性をもった複合材料の衝撃破壊特性を評価法として、応用が期待される。

つぎに、広範囲の複屈折マッピング計測課題を踏まえ、解決するための計測手法を提案した。偏光高速度イメージセンサをラインセンサとして用い、フィルム搬送同期することで得られた複屈折位相差ライン画像を隙間なく敷き詰めることにより、空間的に広範囲の複屈折位相差マッピング画像を得るものである。確認実験として、サンプルに透明フィルムを用い、搬送機を制作し、偏光高速度カメラと同期撮影することによって得られたライン画像の連結をすることで得られたマッピング画像を示した。サンプルの複屈折位相差が高速複屈折装置の計測レンジを大きく上回ったことから、結果は相対的な複屈折位相差分布の可視化ではあったものの、提案法に基づき複屈折位相差マッピング画像が得られたことから、実用性を示すことができた。ロールツーロールのテンションによりフィルム内部に生じる応力分布の評価、および透明フィルム生産ラインにおける面内複屈折位相差評価装置として、応用が期待される。

さいごに、移動および変形物体の複屈折計測課題を踏まえ、解決するための計測手法を提案した。予めサンプルに塗布した格子パターンを画像処理によって追跡し、得られた格子重心点から移動する計測位置を得る。また、格子面積と単位格子の初期体積から厚みを得る。時系列に得られた計測位置に対し、複屈折位相差計測を行い、厚みを補正することによって複屈折を得る。確認実験として、サンプルに透明フィルムを用い、延伸機を用いて、偏光高速カメラ撮影と提案法によって得られた複屈折計測結果を示した。従来法に対し、複屈折値として、0.01の改善を行うことが出来たことから、提案手法の実用性を示すことが出来た。以上のことから、提案する高速複屈折計測装置の応用計測法を確立したものである。

## 第6章 結論

本研究の成果は、偏光高速度イメージセンサを用いた複屈折計測法を実現したことである。

偏光高速度イメージセンサを新たに開発することで、二次元高速複屈折計測速度を従来比 6,500 倍の秒間 130 万枚まで高めた。また、位相シフト法を用いた複屈折計測アルゴリズムの適用、精度検定、精度向上手法の開発、および高次位相差計測法の開発を行うことで、高速複屈折計測装置として確立した。さらには、現在までに見られる 3 つの異なる偏光計測課題を解決するため、高速伝播する応力分布計測法、広範囲の複屈折マッピング計測法、そして移動および変形する複屈折物体計測法を新たに提案し、検証実験結果を示すことで、それぞれの実用性を示したものである。

第 1 章の「研究背景および目的」では、はじめに、高速度カメラの高速度化の技術史、および現在までに開発された高速度撮影法の特徴について述べた。高速度撮影法を光の 3 要素で分類することにより、偏光を用いた手法が少ないことから、高速度カメラに偏光機能を付加することの技術的意味を示した。つぎに、現在までに提案されている偏光計測法について述べ、それぞれの特徴を示し、整理することで、高速かつ二次元偏光計測領域が空白であることを示した。さらに偏光計測課題として、高速伝播する応力分布計測、広範囲の複屈折マッピング計測、そして移動および変形物体の複屈折計測があることを示し、それらの課題を解決することに、さらなる技術的意味を見出した。これらの背景を踏まえ、研究目的を決定し、目的達成に必要な技術的課題について示したものである。

第 2 章の「偏光高速度イメージセンサ」では、はじめに、現在までに偏光素子アレイの実現方法として提案されている、電子線リソグラフィ方式、ワイヤーグリッド方式、およびフォ

トニック結晶方式について、それぞれの特徴と課題について述べた。さらに、従来のイメージセンサと高速度イメージセンサの構造の違いについて説明した。それらを踏まえ、偏光高速度イメージセンサの実現方法について述べ、偏光高速度イメージセンサの仕様を作成し、外部委託することによってフォトニック結晶型の偏光高速度イメージセンサを制作した。従来の高速度カメラに完成したセンサを組み込むことで偏光高速度カメラを制作した。偏光高速度カメラの動作システムを示すとともに、基本性能の確認として偏光撮影に必要な光量について実験結果を報告した。以上のことから、研究目的達成のために必要な、高速イメージセンサへの偏光検出機能付加を実現し、高速かつ2次元の偏光検出装置を得たものである。

第3章の「高速複屈折計測法」では、はじめに偏光と複屈折の基本的な説明を行い、また、複屈折計測するうえで必要なストークスパラメータ表示とミュラー行列について説明した。次に高速複屈折計測の基本原理を示した。円偏光光学系と回転検光子から構成された光学系に含まれる各光学素子のミュラー行列計算を行うことで光強度の式を得た。偏光高速度カメラの隣接4画素から得られた光強度、および同4画素の主軸方位を光強度の式に入力し、位相シフト計算することによって複屈折位相差と主軸方位が高速かつ二次元的に求めまることを示した。原理確認のための基礎実験を行ったのち、偏光高速度カメラの複屈折計測精度検定を行った。位相差については理想直線からの誤差量として $2.99 \times 10^{-2}$ ラジアン、主軸方位については同様に $2.90 \times 10^{-1}$ 度の結果を得た。さらには精度向上に取り組んだ。空間的、時間的積算平均による繰り返し精度向上手法を提案し、実験的に得られた結果を示した。時間積算平均では100枚時に繰り返し精度が $\pm 0.33 \times 10^{-3}$ ラジアンとなり、従来比28.6倍の精度向上結果を得た。また、空間積算平均では4,096画素を用いることによって繰り返し精度が $\pm 0.17 \times 10^{-3}$ となり、従来比55.9倍の結果を得た。さらに、偏光高速度イメージセンサによって得られた各画素の光強度を1画素ずつシフトしながら計算する手法を提案し、実験的に得られた空間的連続な計測結果から空間分解能を従来の2倍に高めた。

第4章の「高速高次位相差計測」では、位相差計測レンジの拡大を行った。提案手法では基本性能として、複屈折位相差計測レンジが $\pi/2$ であるため、高次の複屈折を測ることが出来ない。この問題を解決する手法として、2波長計測を提案した。はじめに、計測原理について述べている。物体の複屈折が位相差と波長に依存することを示し、コーシーの近似式を用いて次数判定のルックアップテーブルを作成した。実験的に2つの異なる波長によって得られた複屈折位相差の差分値とルックアップテーブルを比較解析することで次数を決定し、位相差計測レンジを拡大するものである。つぎに、検証実験をするために必要な高速波長変調照明装置を新たに提案し、仕様作成のうえ、外部委託によって制作した。LED単体の発光時間と遅延時間について実験的に確認し、最短4マイクロ秒で任意の波長で交互点灯する照明装置を完成させた。さいごに、バビネソレイユ補償器を用いて高次位相差の計測を行い、実験結果、および予め作成した理論値ルックアップテーブルとを用いて合致法によって次数を決定することで、位相差計測レンジを従来の $\pi/2$ から $3\pi$ に高め、結果を示した。第3章および第4章の結果から、研究目的達成のために必要な高速複屈折計測装置化を実現したものである。

第5章の「応用計測」では、実際の複屈折計測課題を踏まえ、応用計測を行った。はじめに、高速伝播する応力分布計測課題を踏まえ、サンプルに衝撃が加わった時の高速複屈折伝搬の可視化、および速度計測を行ったものである。検証実験として、サンプルにアクリルを用い、ハンマーによって与えられた衝撃により生じる材料内部の応力伝播を130万分の1秒毎の複屈折位相差時系列画像として示した。また、複屈折伝搬速度計測として、アクリルの密度とヤング率から求めた理論値、および画像から得られた実験値を比較検証することにより、高速伝播する応力分布計測法としての実用性を確認した。つぎに、広範囲の高速複屈折マッピング計測課題を踏まえ、偏光高速度イメージセンサのライン読み出し、および外部同期による計測手法を提案した。検証実験として、サンプルにフィルムを用い、フィルム搬送機を制作することで、実際に得られた複屈折位相差マッピング画像を示した。サンプルの位相差が計測レンジを超えているため、相対値での計測結果ではあるものの、空間的に隙間なく接続

したマッピング画像が得られたことから、広範囲の高速複屈折分布計測法の実用性を確認した。さらに、産業展開を目指し、開発した複屈折マッピング計測法を基とした装置化を行った。さいごに、移動および変形する複屈折物体の計測課題を踏まえ、サンプルの移動および変形を補正するための計測手法を提案した。検証実験として、サンプルに透明フィルム、および延伸機を用い、移動かつ変形する計測点の複屈折値を計測した。予めフィルムに塗布した格子パターンを画像処理によって追跡し、単一格子の重心から計測位置を、および単一格子初期体積と時系列の面積から厚みを得ることで、延伸前から破断まで同一点に対する複屈折値を得た。従来は点計測であるため、光軸から外れたサンプルを測ることができない。一方、提案法では、二次元計測であるために、光軸外の複屈折性物体を追跡できる。提案したサンプルへのパターン塗布により計測位置と厚みの補正を行い、同一点の複屈折を得ることができた。以上の結果から、研究目的達成のために必要な新たな複屈折計測手法を開発、および実現したものである。

現在までの高速度撮影法の課題として、偏光を用いた手法が少ないことを述べ、原因として偏光に感度をもつ高速度イメージセンサが実現されていないことを挙げた。そのため、本研究では、第一に高速度イメージセンサへの偏光検出機能付加に取り組み、結果として偏光高速度イメージセンサを実現することができた。また、偏光計測分野では、高速かつ二次元偏光計測法が空白領域であることを挙げた。本研究において開発した高速複屈折計測装置により、**図 6.1**に示す領域に偏光計測の適用範囲を拡大することができた。さらには、現在までの偏光計測課題である高速変化する応力分布計測、広範囲の複屈折マッピング計測、そして移動および変形物体の複屈折計測法を解決するための新たな計測法を確立し、高速複屈折計測装置の実用性を示すことができた。

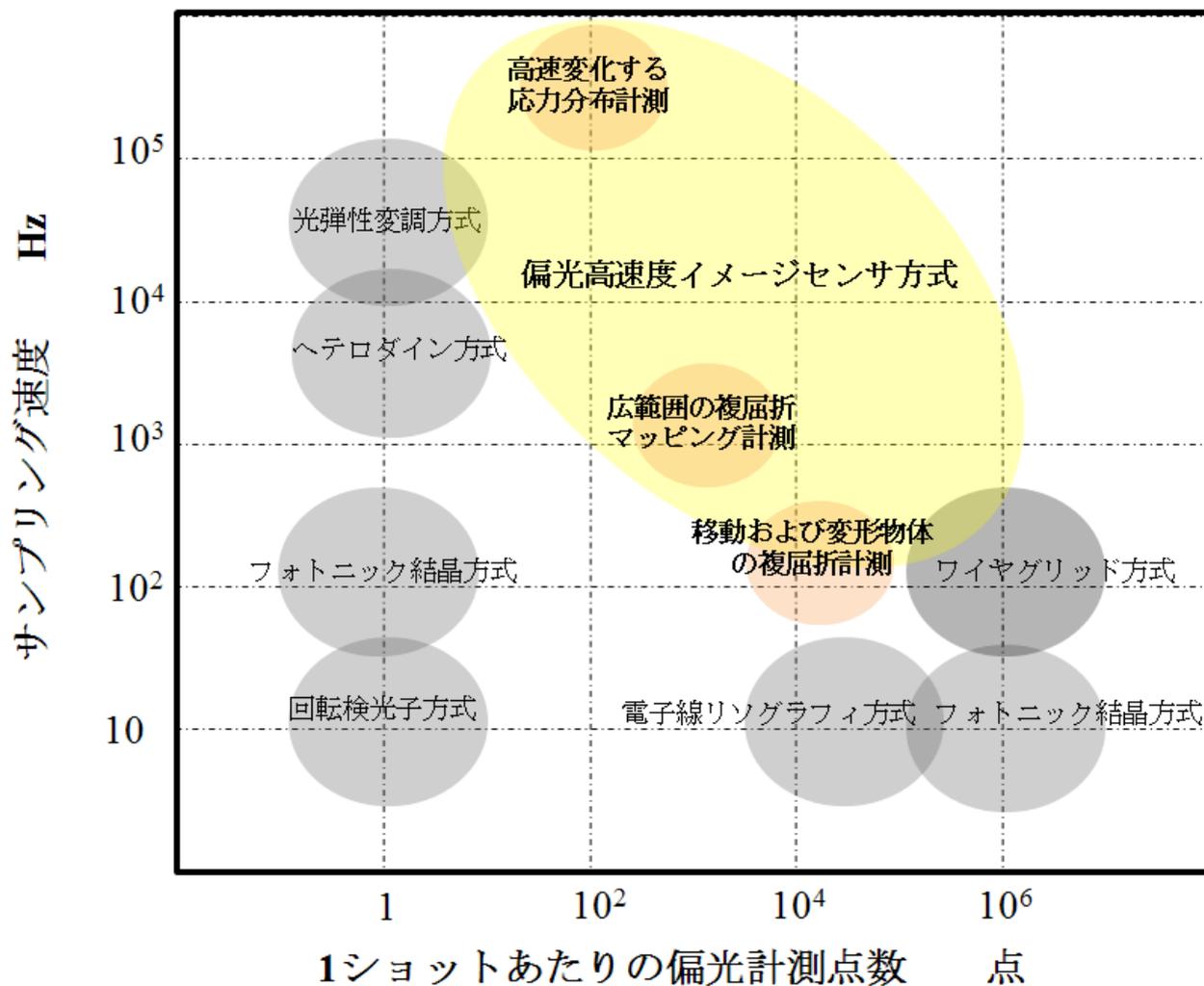


図6.1 偏光高速イメージセンサ方式の適用範囲

偏光を用いた観察法、および計測法は、未開拓領域が残されていると考えている。本研究では、高速かつ二次元の空白領域に注目し、偏光高速カメラ、および高速複屈折計測装置を確立することで、新たに3つの計測法を提案した。将来的な活動として、専門分野の研究者の方々との技術交流、共同研究、および開発した装置の継続的な性能向上研究を行っていくことで、未知なるアプリケーション開拓と、実用化開発に期待をし、結論とする。

## 参考文献

- [1] 三井健司, “高速度写真ビジネス半世紀の歩み”, 高速度イメージングとフォトにクスに関する総合シンポジウム 2009 講演予稿集, (2009) pp. 211-216.
- [2] John H.Waddell, “The Rotating-Prism Camera: An Historical Survey,” SMPTE. Vol.75 (1966).
- [3] 植村恒義, “画像計測入門”, 昭昇堂 (1979).
- [4] T. Goji Etoh, Dirk Poggemann, Greg Kreider, Hideki Mutoh, Albert J. P. Theuwissen, Arno Ruckelshausen, Yasushi Kondo, Hiromasa Maruno, Kenji Takubo, Hideki Soya, Kohsei Takehara, Tomoo Okinaka, and Yasuhide Takano, “An Image Sensor Which Captures 100 Consecutive Frames at 1000000 Frames/s,” IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, Vol. 50 (2003) pp. 144-151.
- [5] 江藤剛治, “高速度ビデオカメラの開発”, 高速度撮影とフォトにクスに関する総合シンポジウム 1999 講演予稿集, (1999) pp. 127-138.
- [6] 平林純, 高橋通, “現像プロセスにおけるトナー挙動計測”, 日本画像学会誌, 第39巻, 第3号, (2000), pp. 229-240.
- [7] H. Murakoshi, R.Iino, T.Kobayashi, T.Fujiwara, C.Ohshima, A.Yoshimura, A.Kusumi, “Single-molecule imaging analysis of Ras activation in living cells,” Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A, 101 (2004) pp. 7317-7322.
- [8] 横山直樹, “高速度ビデオの運動解析プログラムの開発 –OpenMP を用いた相関計算並列化によるトレース高速化”, 高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム 2009 講演予稿集, (2009) pp. 203-208.
- [9] Hiroshi Hayami, Koji Okamoto, Shinichiro Aramaki and Toshio Kobayashi, “Development of a Dynamic PIV System,” Journal of the Visualization Society of Japan, Vol. 23 (2003) pp. 207-208.

- [10] K. Shinohara, Y. Sugii, J.H. Jeong, K. Okamoto, “Development of 3D scanning micro particle image velocimetry system using a piezo actuator,” Rev. Sci. Instrum. Vol. 76 (2005) 106109.
- [11] 「Telops Inc., 製品紹介」 <http://www.telops.com/en/products>. (最終アクセス 2014年1月2日)
- [12] 岡部伸一, 守野哲也, 堀恒円, 端無憲, “赤外カメラによる点火プラグの温度計測”, デンソーテクニカルレビュー, Vol.13, No.1 (2008).
- [13] 呉田昌俊, “高度計算機科学を活用した中性子ビジュアルセンシング技術”, RIST ニュース, No.48, (2009) pp.24-37.
- [14] Kureta.M, Kumada.H, Kume.E, Someya.E and Okamoto.K, “Data Processing Methods for Dynamic Neutron Tomography Velocimetry,” CD-ROM of the 3<sup>rd</sup> Int. Workshop on Process Tomography, No64, (2009) 15.
- [15] 三井健司, 小西信宇, “二次元温度計測システム”, 日本機械学会 2000 年度年次大会資料集 (V), (2000) pp. 375-376.
- [16] 田中正之介, 中島吉則, 雨宮秀行, 大谷幸利, “液晶位相変調器を用いたストークス偏光計”, 光学第 41 巻, 第 3 号, (2012) pp.149-157.
- [17] 島田竜太郎, “高精度、分光、画像偏光測定例の紹介”, 第 6 回偏光計測研究会資料集 (2011).
- [18] Hinds Instruments, Inc., “MEASUREMENT OF WAVEPLATE RETARDATION USING A PHOTOELASTIC MODULATOR,” US Patent, 6473181 B1 (2002).
- [19] R.M.A.Azzam, “Photopolarimetric measurement of the Mueller matrix by Fourier analysis of a single detected signal,” Optics Letter, Vol. 2, (1978) pp.148-150.
- [20] D. Goldstein and R. Chipman, “Error analysis of a Mueller matrix polarimeter,” J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 7, (1990) pp. 693-700.
- [21] Shuich Kawabata, “High-speed Transmission type Four Detectors Polarimeter and its Applications,” Frontiers in Optics/Laser Science XXIX, JW3A.14, OSA (2013).
- [22] K. Oka and Y. Ohtsuka, “Polarimetry for Spatiotemporal Photoelastic Analysis,” Experimental

Mechanics, Vol.33 (1993) pp. 44-48.

- [23] 岡和彦, “チャネルド分光偏光測定”, 光学, 第 39 卷, 第 8 号, (2010) pp. 379-384.
- [24] 岡和彦, 森田隆二, “偏光で／の常識を破る-超広帯域光渦パルス・チャネルド偏光計“, 偏光計測・制御技術研究グループ設立記念シンポジウム資料集, (2010) pp. 41-47.
- [25] 大谷幸利, 若山俊隆, “分光偏光変調器を用いたミュラー行列測定”, 光学, 第 39 卷, 第 8 号, (2010) pp. 385-391.
- [26] Toshitaka Wakayama, Yukitoshi Otani, “Birefringence dispersion measurement based on achromatic four points of geometric phase,” Opt. Eng. Vol. 45 (2006).
- [27] 大沼隼志, 大谷幸利, “ダイナミック・ストークス偏光計を用いた実時間複屈折分布計測法”, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集 (2011) pp. 788-789.
- [28] 大沼隼志, 大谷幸利, “動的現象に対応した新しい複屈折計測技術の開発”, 第 48 回光波センシング技術研究会講演論文集”, (2011) pp. 155-160.
- [29] 大沼隼志, 大谷幸利, “動的 2 次元歪み測定のためのサブミリ時間分解能を有した偏光計測装置の開発”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan2012 講演予稿集 (2012).
- [30] Takashi Onuma, Yukitoshi Otani, “Real-time Measurement Method for Birefringence Distribution by Dynamic Stokes Polarimeter”, ISOT 2011 Proceedings (2011).
- [31] 大沼隼志, 大谷幸利, “サブミリ秒の時間分解能をもつ動的 2 次元複屈折計測装置の開発”, 精密工学会誌, 第 78 卷, 第 12 号 (2012) pp. 1082-1086.
- [32] Takashi Onuma, Yukitoshi Otani, “A Development of Two-dimensional Birefringence Distribution Measurement System with a Sampling Rate of 1.3 MHz,” Optics Communications, Vol. 315, No.15 (2014) pp. 69-73.
- [33] Yukitoshi Ontani, Takashi Onuma, “Real-time Birefringence Mapping by Polarization High-speed Image Sensor,” Abstracts and Program on 4th International Workshop on Perspectives of Optical Imaging and Metrology - Holomet 2012, (2012) pp. 37.

- [34] Yukitoshi Ontani, Takashi Onuma, “Dynamic Birefringence Mapping by High-speed Polarization Image sensor,” 2012 IUTAM Symposium on Advances of Optical Methods in Experimental Mechanics (2012) G27.
- [35] Takashi Onuma, Yukitoshi Otani, “High-speed Imaging for Dynamic Testing of Materials and Structures,” 21<sup>st</sup> DYMAT Technical Meeting (2013) pp. 55-57.
- [36] H. Kikuta, K. Numata, M. Muto, and K. Iwata, “Polarization imaging camera with a form birefringent micro-retarder array,” OSA Technical Digest paper ThRR3 (2003).
- [37] S. Yoneyama, H. Kikuta, and K. Moriwaki, “Simultaneous observation of phase-stepped photoelastic fringes using a pixelated microretarder array,” Opt. Eng. Vol. 45 (2006).
- [38] J. Millerd, N. Brock, J. Hayes, M. N. Morris, M. Novak and J. Wyant, “Pixelated Phase-Mask Dynamic Interferometer,” Proc. SPIE, Vol. 5531, (2004) pp. 304-314.
- [39] Katherine Creath, “4-Dimensional Microscope System for Cynamic Phase Imaging,” Proc. SPIE, Vol. 7782 (2010).
- [40] Kiyotaka Sasagawa, Sanshiro Shishido, Keisuke Ando, Hitoshi Matsuoka, Toshihiko Noda, Takashi Tokuda, Kiyomi Kakiuchi, Jun Ohta, “Image sensor pixel with on-chip high extinction ratio polarizer based on 65-nm standard CMOS technology,” Optics express. Vol. 21, No. 9 (2013).
- [41] Donghyun Kim, “Polarization characteristics of a wire-grid polarizer in a rotating platform,” Applied optics, Vol. 44, No. 8 (2005) pp. 1366-1371.
- [42] 「 Moxtek, Inc., 」 , <http://www.moxtek.com/optics-products/pixelated-polarizers.html>, “Pixelated Polarizers Datasheet,” (最終アクセス 2014年1月2日).
- [43] L. Fabre, Y. Inoue, T. Aoki, S. Kawakami, “Differential interference contrast microscope using photonic crystals for phase imaging and three-dimensional shape reconstruction,” Appl. Opt. Vol. 48, (2009) pp. 1347-1357.
- [44] 佐藤尚, 川嶋貴之, ローラン ファーブル, 井上喜彦, 川上彰二郎, “フォトニック結晶を用いた偏光イメージングセンサーと産業応用”, 光学, 第39巻, 第8号, (2010) pp. 392-397.

- [45] 川上彰二郎, 川島貴之, 井上喜彦, 本間洋, 佐藤尚, 太田晋一, 長島聖, 青木孝文, “フォトニック結晶偏光子を用いた偏光イメージングカメラの開発”, 電子情報通信学会論文誌, C, エレクトロニクス J90-C(1), (2007) pp.17-24.
- [46] 佐藤尚, 川島貴之, 井上喜彦, 千葉貴史, 川上彰二郎, “フォトニック結晶偏光素子と2次元偏光計測の応用”, 電子蔵法通信学会技術研究報告. OPE, 光エレクトロニクス Vol. 108, (2008) pp.1-4.
- [47] 津留英俊, “エリプソメトリーによる3次元形状計測”, 偏光計測・制御技術研究グループ設立記念シンポジウム (2010) pp. 22-27.
- [48] 山本 治美, 松川裕章, 荒木秀和, 津留俊英, “偏光イメージングのものづくり現場への応用”, 第7回偏光計測研究会講演資料集 (2011) pp. 37-39.
- [49] V. Gruev, J. V. Spiegel and N Engheta, “Dual-tier thin film polymer polarization imaging sensor,” Opt. Express, vol. 18, (2010) pp. 19292–19303.
- [50] Xiaojin Zhao, Amine Bermak, Farid Boussaid, Vladimir G. Chigrinov, “Liquid-crystal micropolarimeter array for full Stokes polarization imaging in visible spectrum,” Optics express. Vol. 18, No. 17 (2010).
- [51] Chun, Cornell Seu Lun, “Achromatic retarder array for polarization imaging”, US Patent, 6563582 (2003).
- [52] Alethia G. de Leon, Yvo Dirix, Yannick Staedler, Kirill Feldman, Georg Hahner, Walter R. Caseri, Paul Smith, “Method for fabricating pixilated, multicolor polarizing films,” Applied optics. Vol. 39, No. 26 (2000) pp. 4847-4851.
- [53] Donghyun Kim, Cardinal Warde, Kenneth Vaccaro, Charles Woods, “Imaging multispectral polarimetric sensor: single-pixel design, fabrication, and characterization,” Applied Optics. Vol. 42, No. 19 (2003) pp. 3756-3764.
- [54] J. M. Padilla, M. Servin, J. C. Estrada, “Synchronous phase-demodulation and harmonic rejection of 9-step pixilated dynamic interferograms,” Optics Express, Vol. 20, No. 11 (2012)

- [55] 谷田貝豊彦, “光学入門”, 森北出版 (2010).
- [56] 坪井誠太郎, “偏光顕微鏡”, 岩波書店 (1959).
- [57] 尾崎義治, 朝倉利光 訳, Eugene Hecht 著 “ヘクト光学 II -波動光学”, 丸善株式会社 (2003) .
- [58] 応用物理学会懇話会編, “結晶光学”, 森北出版 (1975).
- [59] 尾崎義治, 朝倉利光訳, Eugene Hecht 著, “ヘクト光学 II -波動光学-”, 丸善株式会社(2004).
- [60] 大谷幸利, “分光ミューラー行列偏光計と最近の動向”, 偏光計測・制御技術研究グループ設立記念シンポジウム資料集 (2010) pp. 33-37
- [61] Anand Asundi, Liu Tong, and Chai Gin Boay, “Dynamic phase-shifting photoelasticity,” Applied Optics, Vol. 40 (2001) pp. 3654-3658.
- [62] M. Noguchi, T. Ishikawa, M. Ohno, and S. Tachihara, “Measurement of 2D birefringence distribution,” Proc. SPIE 1720, (1992) pp. 367–378.
- [63] Y. Otani, T. Shimada, T. Yoshizawa, and N. Umeda, “Two-dimensional birefringence measurement using the phase shifting technique,” Opt. Eng. Vol. 33 (1994) pp. 1604–1609.
- [64] M. I. Shribak and R. Oldenbourg, “Sensitive measurements of two-dimensional birefringence distributions using near-circularly polarized beam,” Proc. SPIE Vol. 4819 (2002) pp. 56–67.
- [65] Michael Shiribak, Rudolf Oldenbourg, “Techniques for fast and sensitive measurements of two-dimensional birefringence distributions,” Applied Optics, Vol. 42, No. 16 (2006) pp. 3009-3017.
- [66] 成相恭二, 清原順子, 辻内順平訳, Daniel Malacara 編集 “光学実験・測定法 II Optical Shop Testing”, アドコム・メディア株式会社 (2010).
- [67] Bracley t. Kimbrough, “Pixelated mask spatial carrier phase shifting interferometry algorithms and associated errors,” Applied optics. Vol. 45, No. 19 (2006) pp. 4554-4562.
- [68] 米本和也, “CCD/CMOS イメージセンサの基礎と応用”, CQ 出版社(2003).
- [69] 大沼隼志, 大谷幸利, “ダイナミック・ストークス偏光計を用いた実時間複屈折分布計測法 (第 2 報) ”, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演論文集 (2012) pp. 1019-1020.

- [71] 尾崎義治, 朝倉利光 訳, Y Eugene Hecht 著 “ヘクト光学Ⅱ-波動光学”, 丸善株式会社 (2002) .
- [72] 高橋賞, 澤芳昭, 野方文雄, 武石洋征, 島本聡, 江角務, 森本吉晴, 清水鉦治, 末次正寛, 山口一郎, 豊岡了, 鈴木新一, 栗田政則, 梅崎栄作, “フォトメカニクス”, 山海堂 (1997) .
- [73] 村上敬宜, “応力集中の考え方”, 養賢堂 (2005).
- [74] 青野貴史, 湯澤修, 後藤知伸, 高野奉斉, “衝撃波による固体内部応力波伝播の数値計算 “ , 第 14 回数値流体力学シンポジウム講演予稿集, C09-4 (2000).
- [75] 「株式会社テラバイト 技術情報」, [http://www.terabyte.co.jp/gatten/article\\_dyna3.htm](http://www.terabyte.co.jp/gatten/article_dyna3.htm), (最終アクセス 2014 年 1 月 2 日).
- [76] 石橋達弥, 下田茂, 古川徹, 新田勇, 吉田秀敏, “球圧子の押込硬さ試験方式を利用した高分子材料のヤング率測定法”, 日本機械学会論文集(A 編), 第 53 巻, 第 495 号 (1987).
- [77] 大沼隼志, 大谷幸利, “動的二次元複屈折計測装置の開発と実用的事例” , 日本光学測定器工業会光計測シンポジウム 2012 論文集 (2012) pp. 53-56.
- [78] 大沼隼志, “高速度イメージセンサを適用した新しい応用事例” , 光応用技術シンポジウム Senspec2013 資料集 (2013) pp. 21-30.

## 謝 辞

本研究は、国立大学法人 宇都宮大学 オプティクス教育研究センターにおいて、指導教員である大谷幸利教授の指導の下で行われた。

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、懇切なご指導、研究者としての思想の教示、および挫折しそうな時には叱咤激励を賜り、研究遂行を終始支えて頂いた宇都宮大学 オプティクス教育研究センター 大谷幸利教授に心から感謝申し上げます。

社会人学生に理解を賜り、激励を頂くとともに、何度も貴重な御指摘をくださった、宇都宮大学 オプティクス教育研究センター 早崎芳夫教授に深く感謝申し上げます。

本論文作成にあたり、大変ご多忙の中、本論文の審査ならびに貴重なご教示を賜りました宇都宮大学 谷田貝豊彦教授、同 川田重夫教授、同 湯上登教授に深く感謝申し上げます。

学位取得にあたり、大変ご多忙の中、副専門分野の御指導を頂き、専門分野外の貴重な教えを賜った宇都宮大学 二宮尚准教授、同 東口武史准教授に深く感謝申し上げます。

また、宇都宮大学 大谷研究室在籍期間中、小生を受け入れ、常に明るく親切に接して頂くとともに、貴重な御意見をくださった研究員、ならびに学生皆様に深く感謝申し上げます。

本研究において、早期からご理解とご支援を賜り、偏光素子制作について多大なご協力を頂いた、株式会社フォトニックラティス 代表取締役 岸田勝人様、同社 取締役ファウンダー 川上彰二郎様、取締役副社長 井上喜彦様、専務取締役 川嶋貴之様、取締役 佐々木宣宜様、加藤守俊様、同社員皆様、ならびに元同社 本間洋様に深く感謝申し上げます。

高速度カメラの歴史を整理するうえで、快くご協力を賜り、また応援くださった株式会社フォトロン 元代表取締役社長 三井健司様に深く感謝申し上げます。

偏光計測への興味と研究を深めていくうえで、貴重な御意見、ならびに研究議論の機会を賜るとともに、終始応援してくださった、日本工業大学 梅崎栄作教授、ならびに長岡技術科

学大学 高橋勉教授に深く感謝申し上げます。

研究を遂行するうえで、貴重な御意見と御理解を賜り、応援してくださった、京都工芸繊維大学 栗辻安浩准教授、東京工業大学 佐藤千明准教授、長岡技術科学大学 磯部浩己准教授、東北大学 塚本勝男教授、山形大学 伊藤浩志教授、大阪大学 井上正志教授、山形大学 杉本昌隆准教授、山形大学 小室綾平様、名古屋工業大学 岩田修一准教授、千葉大学 森田昇教授、徳島大学 水谷康弘講師、ならびに埼玉医科大学 若山俊隆准教授に深く感謝申し上げます。

社会人当初、駆け出しの小生に、仕事の機会を賜るとともに、学位取得を志す思考を育ててくださった、日産自動車株式会社 外野義弘様、株式会社リコー 黒須久雄様、キヤノン株式会社 室伏康信様、ならびにキヤノン株式会社 平林純様に深く感謝申し上げます。

社会において、小生を育て、研究遂行と本論文作成の機会を与えてくださった、株式会社フォトロン、ならびに関係皆様に心から感謝申し上げます。

昨年、残念ながら他界されましたが、学位取得に向け、祖母とともに終始応援くださり、存命中に、社会人としての在るべき姿勢を示してくださった、祖父に深く感謝申し上げます。

終始暖かく見守り、現在までに育ててくださった両親に深く感謝申し上げます。本研究成果によって、夢が1つ叶いました。ありがとうございました。

応援してくださった兄、妹、親族、ならびに友人皆様に深く感謝申し上げます。

苦しい時期に、元気を与えてくれた娘に感謝申し上げます。

3年という長い期間、家庭を守り、辛抱強く応援し続け、支えてくれた妻に、心から感謝申し上げます。

振り返ると、様々な人との出会いがあり、出会った方々からのご助言と応援に支えられ、社会人としての現在に繋がっています。卒業後も、支えてくださった方々への感謝の気持ちと出会いの大切さを忘れることなく、与えられた仕事を精一杯努力して進めていきます。

最後に、今までお世話になった全ての方々に感謝申し上げます。ありがとうございました。

## 研究業績

### 原著論文

(1)大沼隼志, 大谷幸利, “サブミリ秒の時間分解能をもつ動的2次元複屈折計測装置の開発”, 精密工学会誌, 第78巻, 第12号, (2012), pp. 1082-1086.

(2)Takashi Onuma, Yukitoshi Otani, “A Development of Two-dimensional Birefringence Distribution Measurement System with a Sampling Rate of 1.3 MHz,” Optics Communications, Vol. 315, No.15 (2014), pp. 69–73.

(3)Takashi Onuma, Yukitoshi Otani, “Dynamic two-dimensional measurement of high order birefringence using a multi-channeled LED with wavelength modulation,” Optics Letters, (投稿中).

### 国際会議

(1)Takashi Onuma, Yukitoshi Otani, “Real-time Measurement Method for Birefringence Distribution by Dynamic Stokes Polarimeter,” ISOT 2011 Proceedings, China, (2011) Takashi Onuma.

(2) Yukitoshi Otani, Takashi Onuma, “Real-time Birefringence Mapping by Polarization High-speed Image Sensor,” Abstracts and Program on 4th International Workshop on Perspectives of Optical Imaging and Metrology - Holomet 2012, Japan (2012) pp. 37.

(3) Yukitoshi Otani, Takashi Onuma, “Dynamic Birefringence Mapping by High-speed Polarization Image sensor,” 2012 IUTAM symposium on advances of optical methods in experimental mechanics – Taiwan, (2012) G27.

(4) Takashi Onuma, Yukitoshi Otani, “High-speed Imaging for Dynamic Testing of Materials and Structures,” 21<sup>st</sup> DYMAT Technical Meeting, UK (2013) pp. 55-57.

(5) Yukitoshi Otani, Shuhei Shibata, Takashi Onuma, “Real-Time Imaging Polarimeter by Full-Stokes Polarization Camera,” Proceedings of 2013 JTBS, Japan (2013), MoB-06, pp. 31-32.

## 学会発表

(1) 大沼隼志, 大谷幸利, “ダイナミック・ストークス偏光計を用いた実時間複屈折分布計測法”, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, M39, (2011) pp. 788-789.

(2) 大沼隼志, 大谷幸利, “動的現象に対応した新しい複屈折計測技術の開発”, 第 48 回光波センシング技術研究会講演論文集, LST-47-23 (2011) pp.155-160.

(3) 大沼隼志, 大谷幸利, “ダイナミック・ストークス偏光計を用いた実時間複屈折分布計測法 (第 2 報) ”, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演論文集, M21 (2012) pp.1019-1020.

(4) 大沼隼志, 大谷幸利, “動的 2 次元歪み測定のためのサブミリ時間分解能を有した偏光計測装置の開発”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan2012, 講演予稿集 CD, 24pBS8 (2012).

(5) 大沼隼志, 大谷幸利, “動的二次元複屈折計測装置の開発と実用的事例”, 日本光学測定器工業会光計測シンポジウム 2012 論文集, (2012) pp.53-56.

(6) 大沼隼志, “高速度イメージセンサを適用した新しい応用事例”, 光応用技術シンポジウム Senspec2013資料集, (2013) pp. 21-30.