

# ホログラフィックプリンタによる各種シートレンズの設計

梅崎 太造、服部 公央亮（中部大学）

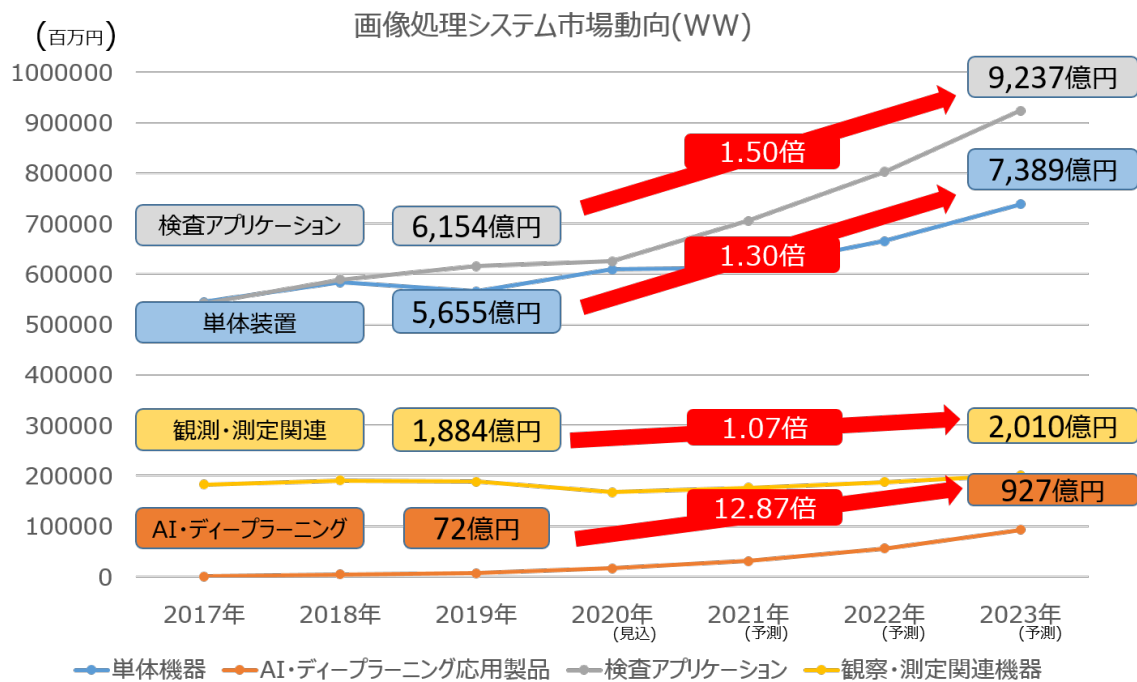
本研究では、近年注目を集めている FA 分野での利用を視野に入れ、HOE フィルムを用いたシートレンズを設計し、それを用いた光学照明（HOE 照明）とその応用システムを構築した。さらに、シートレンズ設計のための予備実験として、HOE シートを露光する際の条件を変化させた際の特性評価実験結果について報告する。

## 1. はじめに

近年、FA 分野を中心にマシンビジョン技術が注目を集めており、様々な計測器や認識手法が自動化を目指す生産現場で活用されている。昨今の統計では、年率 10[%]という驚異的な市場成長を見せており、自動車部品市場だけでも 4 年で 800[%]の成長が予想されている。

その中で、2次元画像を用いた認識のほか、物体の形状を検査したいというニーズが非常に高く、我々もアクティブステレオや光干渉を用いた手法などに関する多くの企業との共同研究を実施しており、研究を通じて社会貢献を実現してきた。

しかし、従来の形状計測では対応が難しい対象物もまだまだ多く、自動車ボデー、ヘッドアップディスプレイ等で用いられる凹面ミラー、スマートフォンの筐体等の光沢表面を対象とした外観検査手法が大きな課題の一つとして残る。光沢表面上の傷や凹みについては、2次元画像により検査する方法もあるが、表面形状や光源及びカメラの設置位置の微小な変化により、撮影される画像が大きく変化する。その為、画像処理に適した画像を安定して取得することが困難であり、マシンビジョンシステムの構築が難しい。本研究では、これらの課題を克服するべく、光沢表面上の外観検査方式の新手法を提案する。提案法で用いる照明は照明内部に HOE（ホログラフィック光学素子）を搭載する。ホログラフィは光の干渉の記録と物体光の再生を可能とする技術であり、この特性を活用した物体の変形測定は古くから提案されている。しかし、これらの手法は大規模な光学装置が必要であり、基準となる対象を正確に記録する必要があるため、インラインでの運用には適していない。それに対し、本研究では、白色 LED 光源から照射される光が HOE により回折された光を従来のマシンビジョン用の照明光として用いる。このような構成であるため、従来の光干渉などに基づくホログラフィ計測技術に比べ、耐振動性が高く、提案法はインラインでの運用にも適している。以後、本研究で用いる HOE を用いた照明を HOE 照明と呼ぶことにする。HOE 照明では、HOE により回折される光の有する色分散効果を活用し、照明光の光線方向に応じて波長が変化する、という従来の照明には存在しない特徴が実現される。HOE 照明の持つ特徴を利用することにより、1枚の撮影画像中の「色の変化」からカメラに受光される光に対する照明光の光線方向を取得することができる。HOE 照明により取得される照明光の光線方向の変化から、光沢表面の検査を行うシステムを構築することが可能である。提案法で用いる HOE は薄く軽量であり、従来のマシンビジョン用照明で用いられる LED 照明を光源として使用することができ、1枚の画像から広い範囲の検査が可能である。



出典：富士経済「2020画像処理システム市場の現状と将来展望」を参考に制作

図 2-1 マシンビジョンの市場規模推移予想



出展：ASIA GATEWAY

図 2-2 大規模構造化照明の例

HOE の製造コストを下げて安価な照明ユニットを構築するには、高精度な HOE を高速に製造できる技術開発が欠かせない。HOE の作成は基本的に、数十[ $\mu$ m]角のスポットホログラムに対して、物体光と参照光の 2 つのレーザーをそれぞれ最適な角度に設定して照射せねばならない。HOE 上の

作成ポイント毎にレーザー角度を制御することにより、検査対象の形状に合わせた HOE の製造も可能であるが、そのような HOE を高速かつ安価に製造するためには、レーザー光の位置・物体光と参照光の角度・レーザー光の出力パワーなどの諸条件を、同期を取りながら最適な状態に制御し続けねばならず、高度な制御ソフトウェア技術を必要とする。

また、製造中に支障が生じたりして、HOE 上のとあるポイントで歪みや作成ムラが生じてしまうと、検査効率が低下する。そこで、HOE 全体で歪みや作成ムラ等がなく、設計通りの回折効率（品質）を有することを評価できる専用小型評価装置が必要となる。

本研究では、HOE プリンタの高速化・高精度化の制御技術を開発することを目標とする。具体的には、100[mm]角の HOE を 1 ライン当たり 100[mm/s]の速度で製造できる高精度な HOE プリンタを製作することを目標とする。今回は、そのための基礎検討として露光時間・光量・光線露光角度などの各種パラメータを変動させた際に、HOE の回折効率がどのように変化するかを評価するシステムを構築し、それを用いた露光条件の評価方法を検討した。

また、利便性の高い計測システムを試作として顕微鏡タイプの計測システムを構築し、その性能を定量的・定性的に評価した。これを用いることで、電子機器筐体など小型部品の光沢面であれば、簡便かつごく短時間に外観検査を行なうことができ、かつ微細表面凹凸不良の画像データも記録できる。

## 2. HOE 露光と FA での利用例

本章では、HOE の製造とその特性を利用した画像計測手法について説明を行う。

### 2.1 ホログラムプリンタ

我々は、これまでに、HOE 関連の論文を投稿するとともに、製造装置（以下、HOE プリンタと呼ぶ）を試作している（下図参照）。

このプリンタを用いることで、緑色短波長を用いて 2 光線をホログラムシート上で干渉刺さることで、HOE の各点に任意の回折方向を記録したシートが製造可能である。一般に、ホログラムの露光は、光の干渉に基づいて行われるため、ナノオーダーの微小振動の発生はその品質に大きな影響を与え、些細な振動があるだけでも製造不能となる。そのため、大面積の HOE シートの製造は非常に困難であった。しかし、我々が試作した HOE プリンタは、コリニア方式と呼ばれる手法を採用することで、100[mm]角サイズの HOE の製造を 90 分で達成できる。これは、従来の製造装置の 1/10 以下のスピードで製造できるが。しかしながら、各種の露光条件に関する詳細な検討は行われていない。

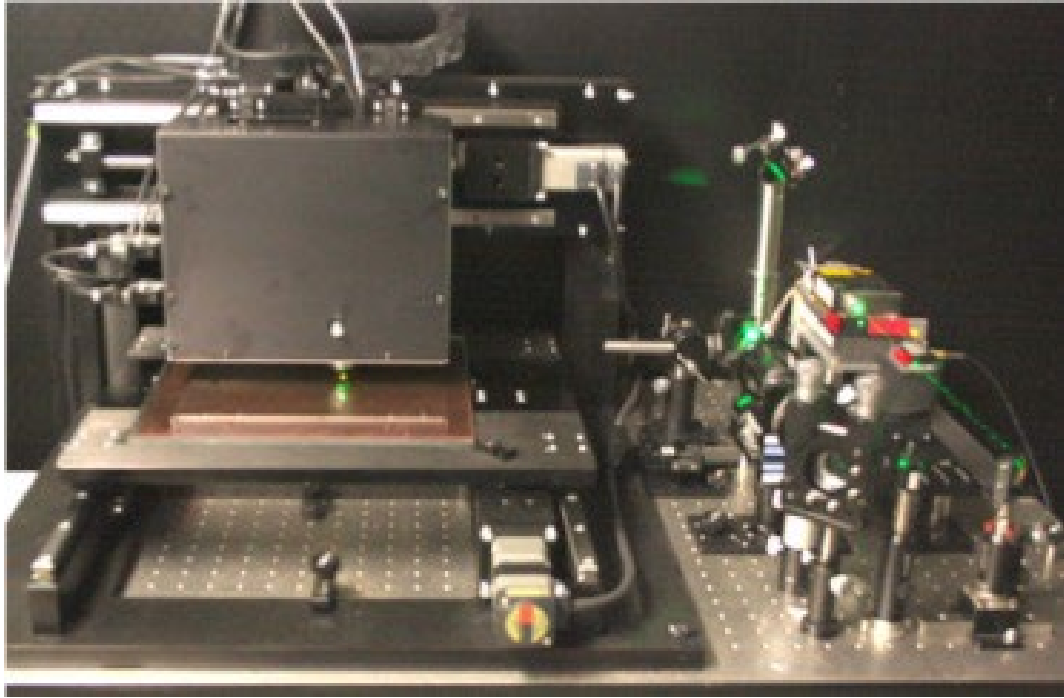


図 2-1 ホログラムプリンタ外観

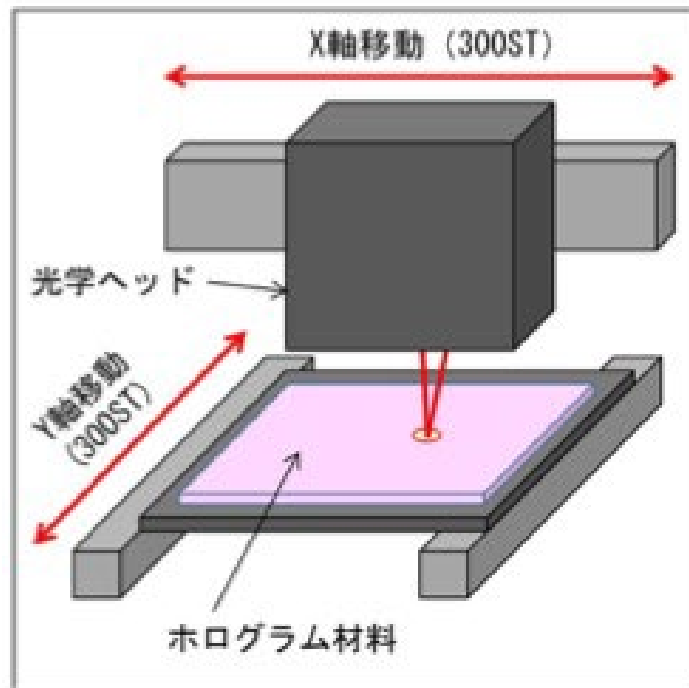


図 2-2 ホログラムプリンタ外観

## 2.2 HOE を用いた光沢面のセンシング手法

緑色光源により露光された透過型 HOE は、物体光が入光された際に露光と同一波長は記録方向に、その他は波長に応じて若干ずれた方向に回折される。そのため白色の平行光を露光済みの回折型 HOE に入光すると、強い色分散を持つ光源となる。

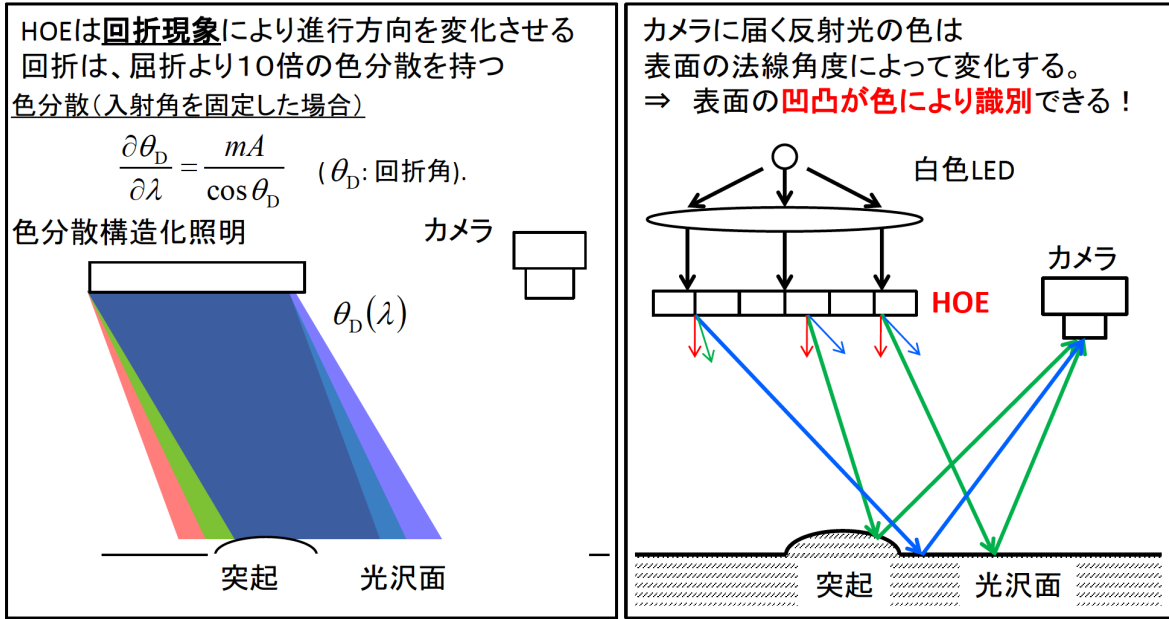


図 2-3 HOEを用いた光学面センシング手法の概要

我々が提案しているセンシング手法では、計測対象となる光沢面（鏡面含む）に対して、この強い色分散を持つ光源を照射することで、計測対象の表面の法線方向に応じてカメラから観察される色に変化する。すなわち、計測対象の表面法線方向を色に変換することが可能であり、これにより通常のカラーカメラで撮影することで、表面の形状計測が可能な光源となる。

この手法を用いて、光沢面を有する樹脂部品（スマホケース）を撮影した例をいかに示す。微細なブツ不良が明瞭に撮影可能であることが確認できる。

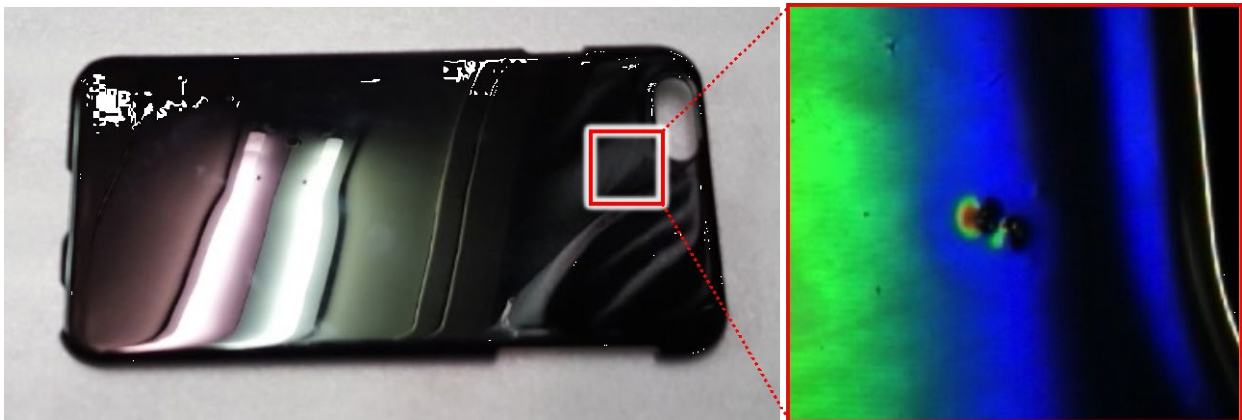


図 2-4 HOEを用いた光沢面センシング撮影例

### 3. HOE を用いた形状の計測

HOE 照明を用いた形状計測の結果の一例を報告する。

#### 3.1 ブツ不良の撮影例

光沢面上のブツ不良（微細凹凸）について、提案法と従来法の比較を行った。その結果、提案法の HOE を用いた照明が最も鮮明に不良を浮かび上がらせて撮影可能であることが確認された。

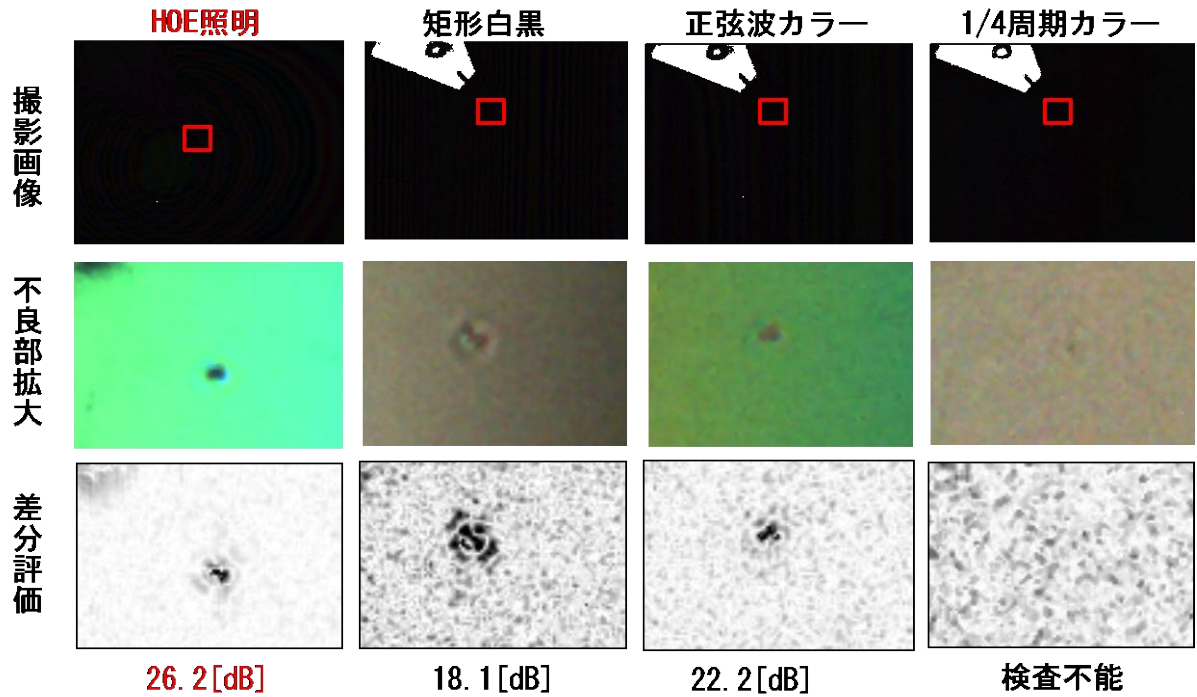


図 3-1 HOE光源と従来法の比較（ブツ不良を対象として）

### 3.1 凹面鏡の形状計測例

理想的な鏡面である鏡を対象として、色相で求めた角度を積分することで形状計測を行う実験を試みた。計測対象としては、Thorlabs 社の精度保証された凹面鏡を使用している。結果を以下に示す。

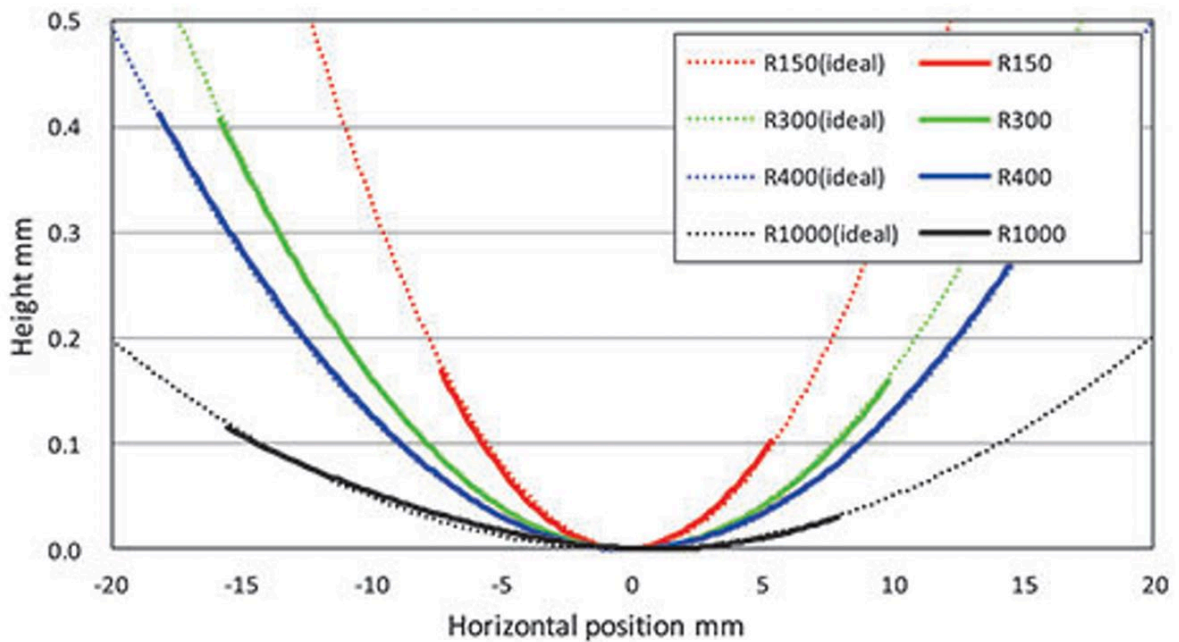


図 3-2 HOEを用いた凹面鏡の形状計測例



## 4. HOE 光源を組み込んだ顕微鏡の構築

HOE 光源を組み込んだ顕微鏡の施策結果を報告する。

### 4.1 使用した光源

HOE のシートレンズの応用例ととして、物体の微細な凹凸により生じる角度変化を色に変化する事例を紹介した。今回、顕微鏡に組み込むにあたり、平行光光源ユニットをスポット照明とピンホール・レンズにより構成し、顕微鏡に組み込み可能な平行光ユニット光源を作成した。光源は光源が LED であるため理想的な平行光ではないが、平行光に極めて近い光源特性を有している。この光源を透過型の HOE に入射したところ、HOE により回折が生じていることが確認できた (図 4-1)。

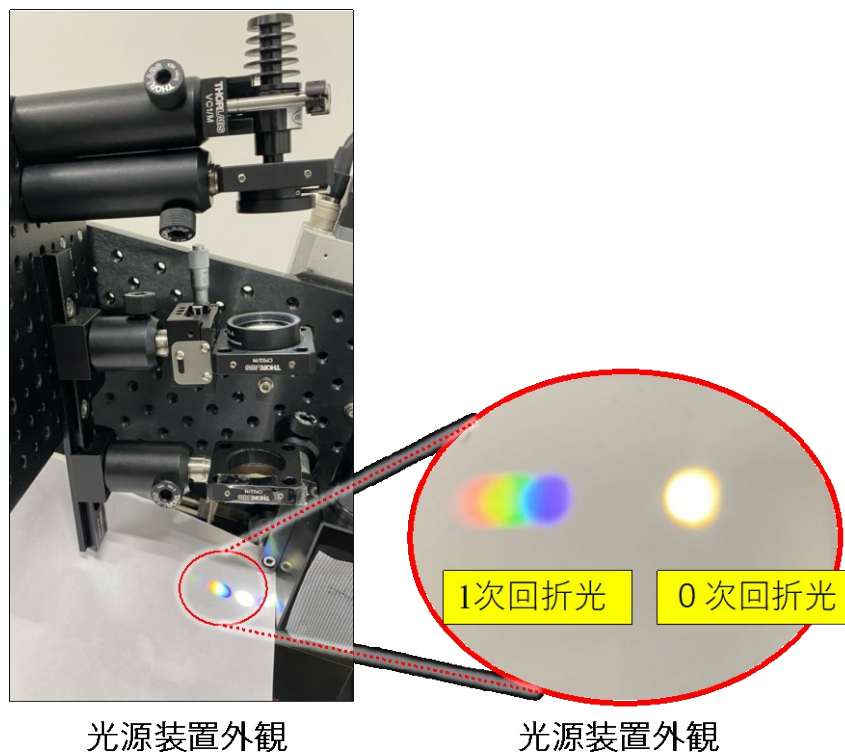


図 4-1 顕微鏡組み込み用に設計したシートレンズ付き光源

### 4.2 顕微鏡ユニットへの組み込み

作成した光源を同軸光源として、実体顕微鏡ユニットへの組み込みを実施した。1次回折光を顕微鏡の同軸光源部に入射することで、明視野の光源として HOE 光源を利用することとした。組み込みの様子を以下に示す。光源ユニットを小型化したことで、装置に近づけることができおり、狙い通りに入射の時点では RGB が分光しきっていない白色の状態が入射出来ていることが確認できる。

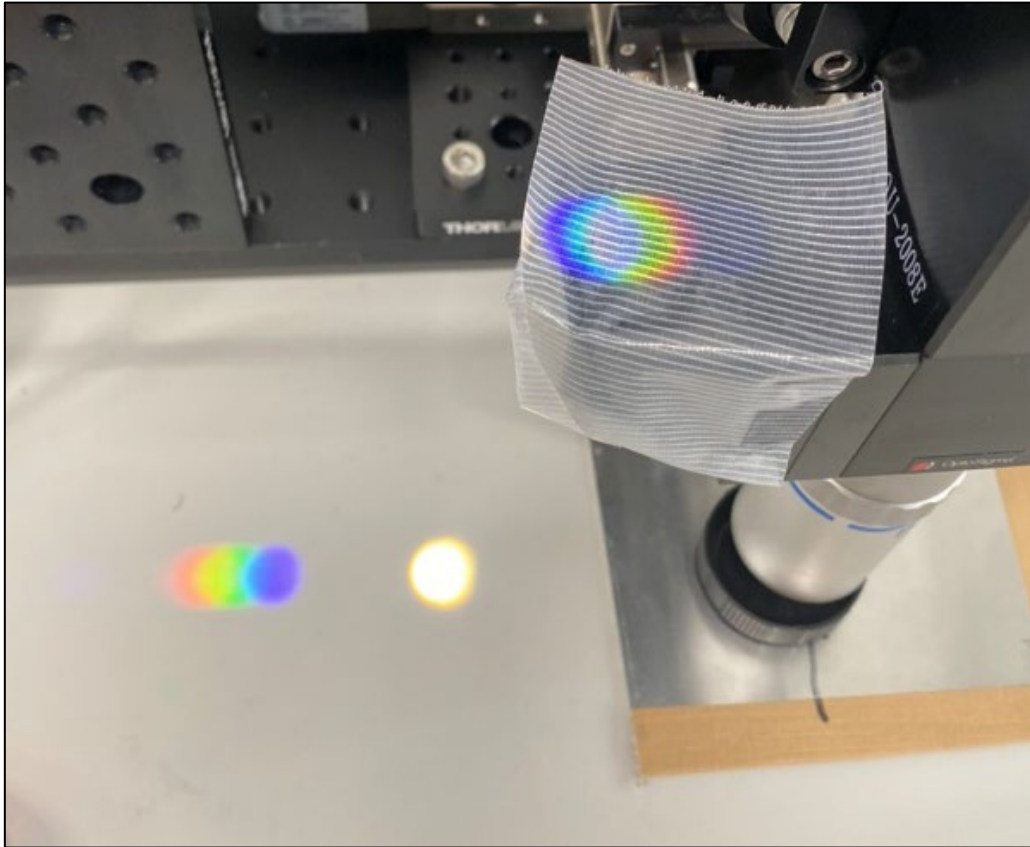


図 4-2 光路のアライメント

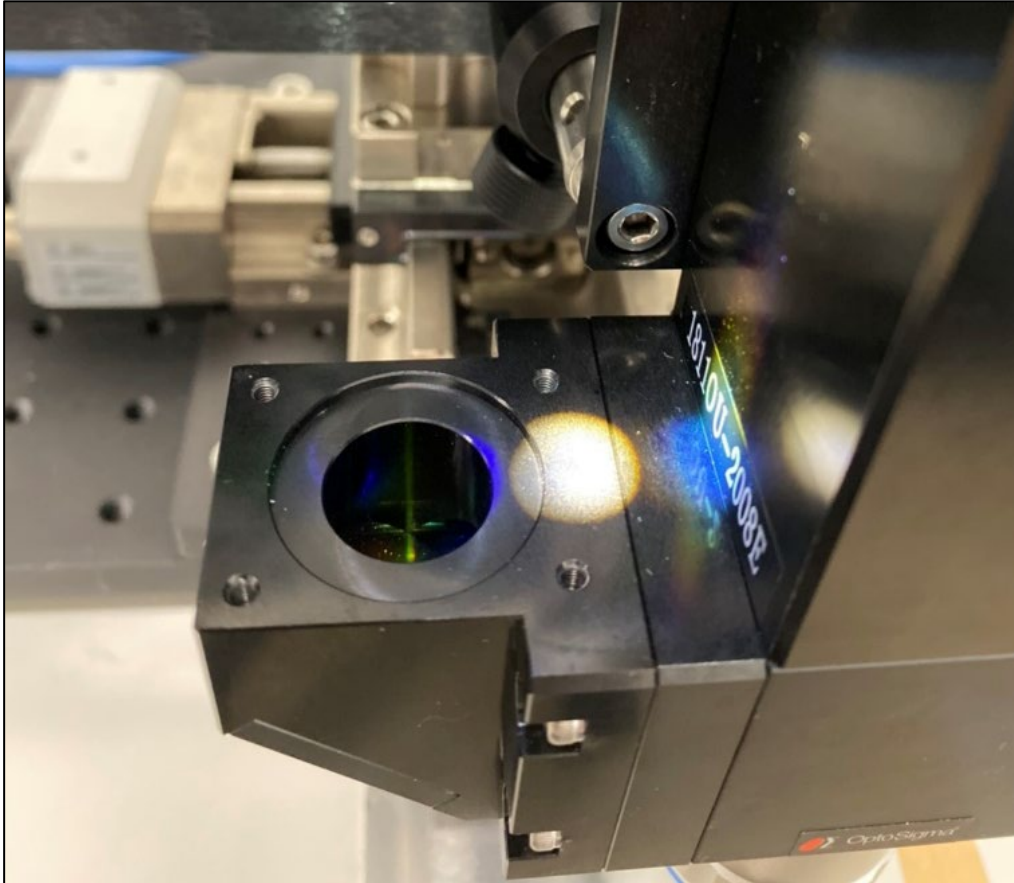


図 4-3 入光部の様子



### 4.3 顕微鏡ユニットの特性評価結果

平面鏡を対象として、対象を左に角度を1度ずつ傾けた際の色の変化を観察した。以下には回折角度が11.5(deg)のHOEを光源ユニットに用いて撮影した実験結果を示す。




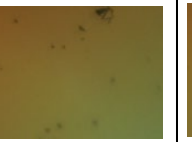


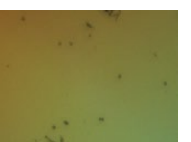
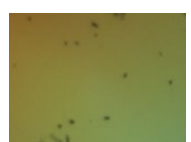

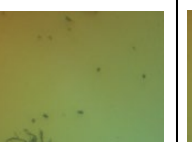
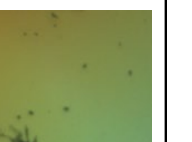
左傾き 10°	左傾き 9°	左傾き 8°	左傾き 7°	左傾き 6°	左傾き 5°
					
左傾き 4°	左傾き 3°	左傾き 2°	左傾き 1°	0°	
					

図 4-4 鏡面左傾き(HOE回折角度11.5deg)

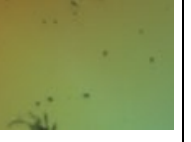
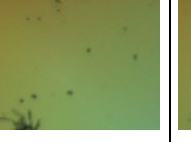
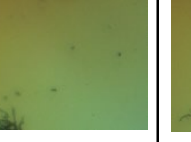



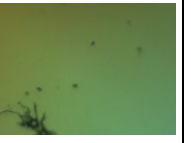
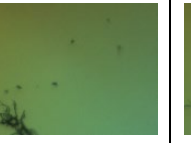



0°	右傾き 1°	右傾き 2°	右傾き 3°	右傾き 4°	右傾き 5°
					
右傾き 6°	右傾き 7°	右傾き 8°	右傾き 9°	右傾き 10°	
					

図 4-5 鏡面右傾き(HOE 回折角度 11.5deg)

図の画像を位相変換すると次のようになる。

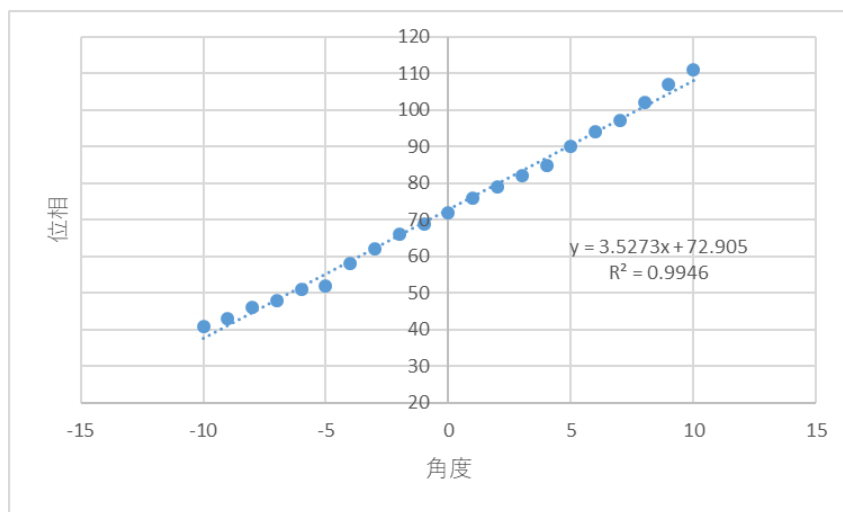


図 4-6 位相変換 (HOE回折角度11.5degで設計したフィルムを使用)

以上の結果から、鏡面の左側はオレンジ色、右側は黄緑色と鏡面の色の変化が確認できた。左に角度を傾けると画面左側から赤みがかっていき、左に角度を傾けると画面右側から青みがかっている。図4-6の色相とミラー角度の相関では、 $R$ 二乗値が0.9946という高い精度で一次近似が出来ていることがわかる。このことより、この顕微鏡ユニットで、色から鏡面の角度方向を計算可能であることが確認できた。

#### 4.4 段差を有する金属サンプルに対する撮影結果の例

各種工業製品への転用の可能性を視野に入れて、様々なサンプルを撮影した。以下にボタン電池の撮影例を示す。段差部前後で法線方向が変わっており、色が違うことがわかる。

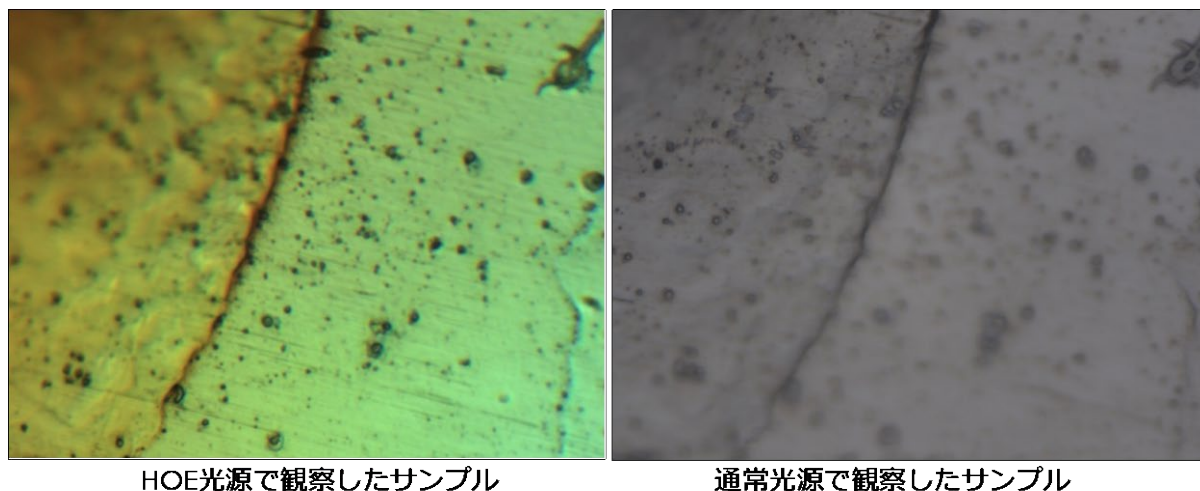


図4-7 ボタン電池の撮影例1

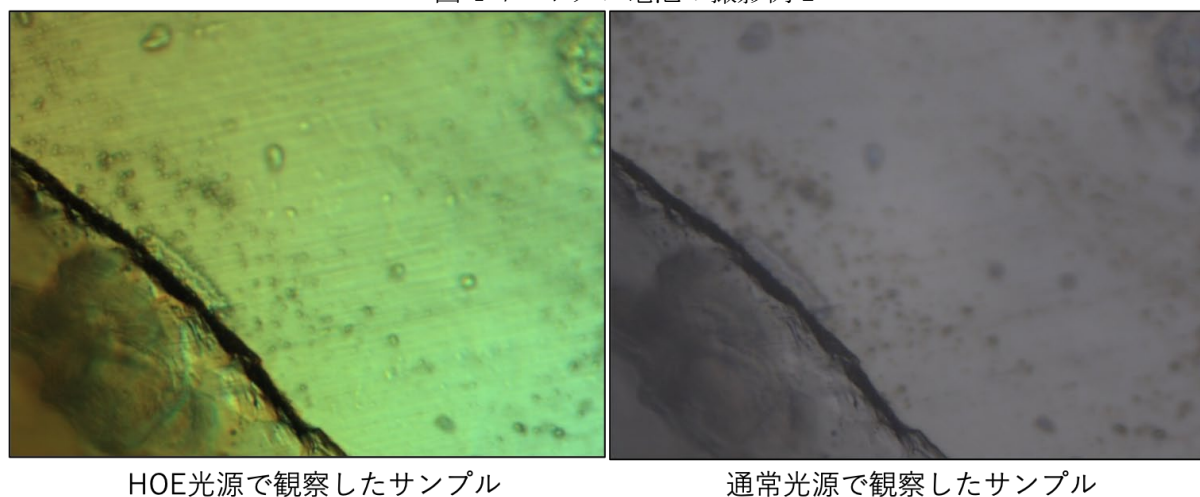
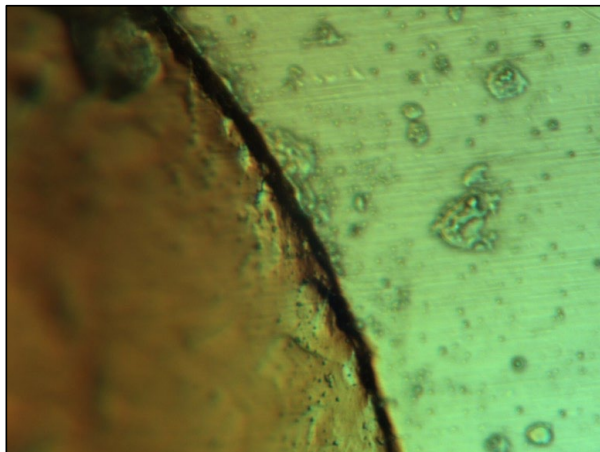
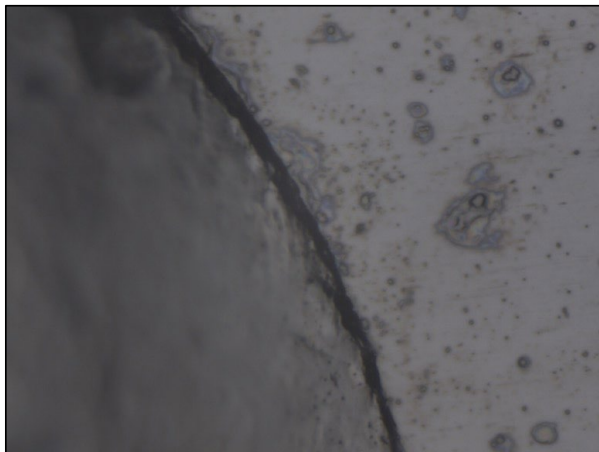


図4-8 ボタン電池の撮影例2

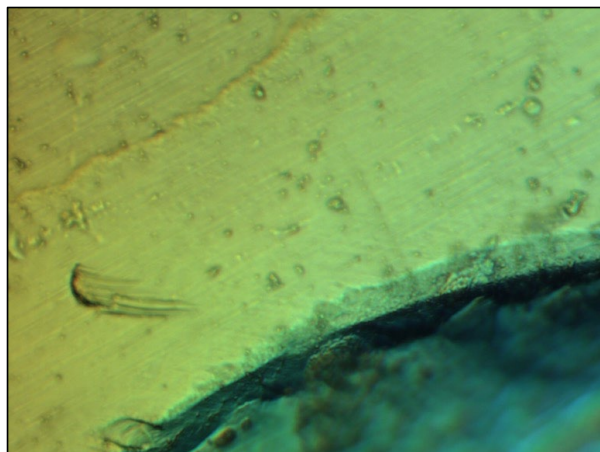


HOE光源で観察したサンプル

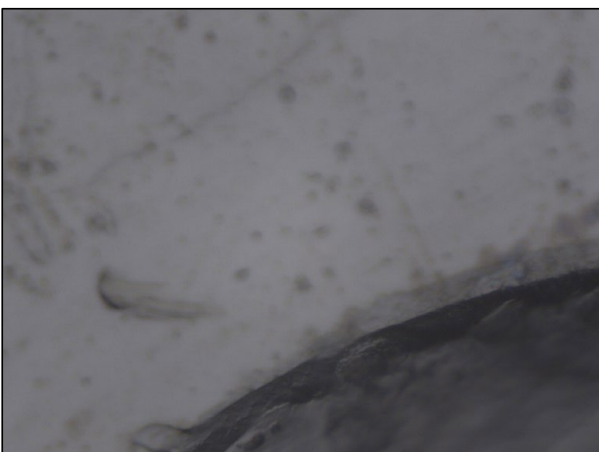


通常光源で観察したサンプル

図 4-9 ボタン電池の撮影例3



HOE光源で観察したサンプル



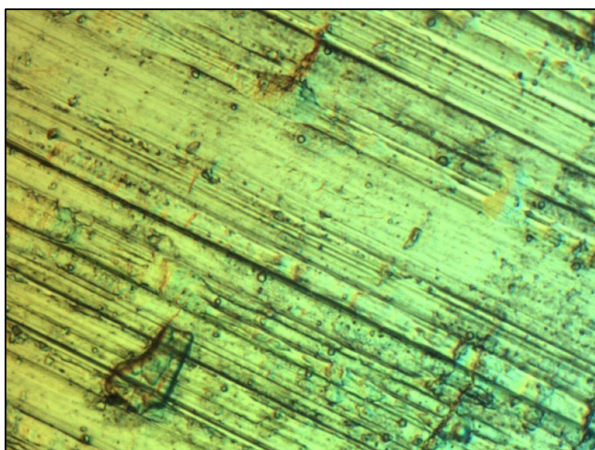
通常光源で観察したサンプル

図 4-10 ボタン電池の撮影例4

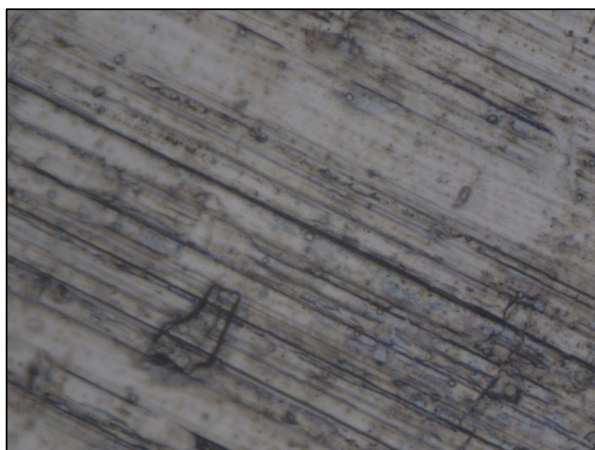
#### 4.5 金属圧延サンプルに対する撮影結果の例

次に、アルミ圧延材の撮影例を以下に示す。HOE 光源を使用した場合、極微小な凹凸が色に変化されて撮影されていることが示唆される結果が撮影された。この結果から、圧延の状況や微細傷などの検査への応用が期待される。今後、何らかの方法で真値を確認したいと考えている。



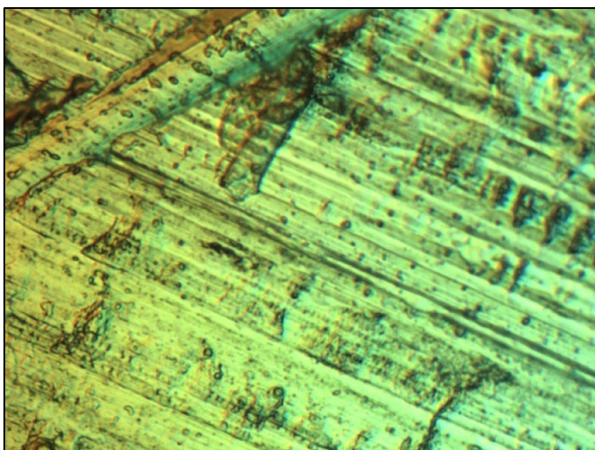


HOE光源で観察したサンプル

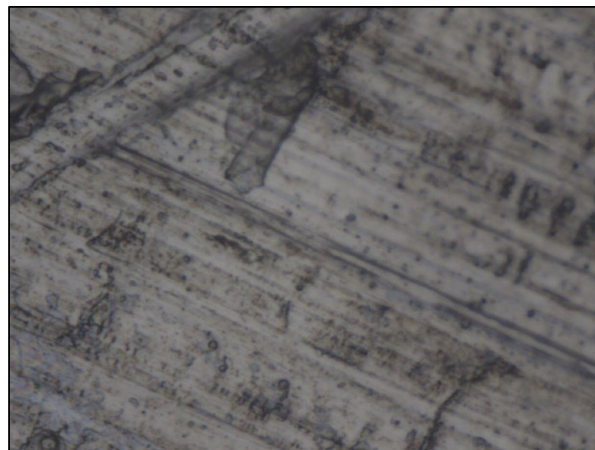


通常光源で観察したサンプル

図 4-11 アルミ圧延材の撮影例1

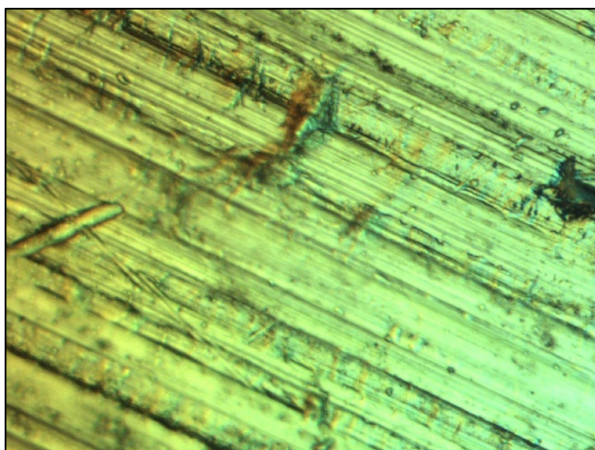


HOE光源で観察したサンプル

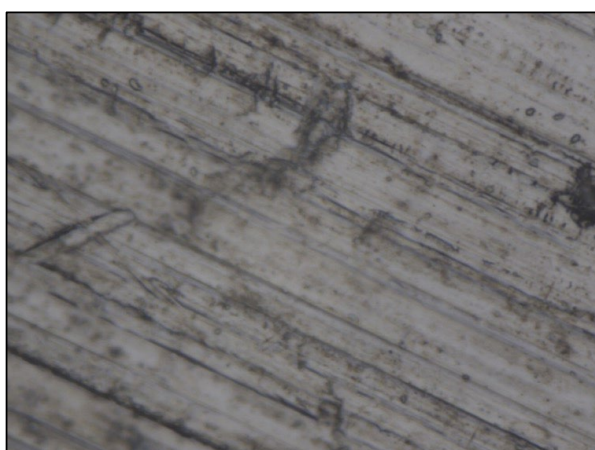


通常光源で観察したサンプル

図 4-12 アルミ圧延材の撮影例2



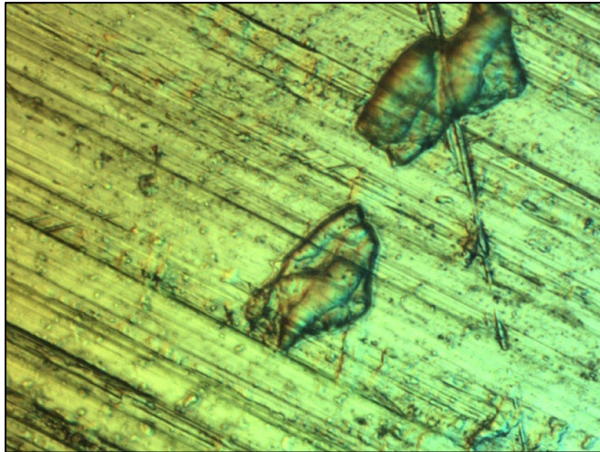
HOE光源で観察したサンプル



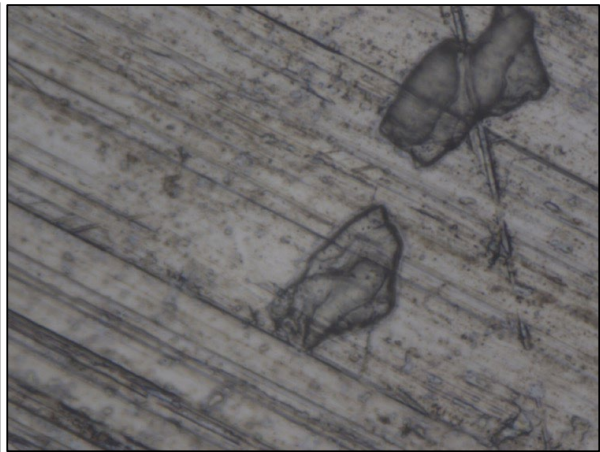
通常光源で観察したサンプル

図 4-13 アルミ圧延材の撮影例3





HOE光源で観察したサンプル



通常光源で観察したサンプル

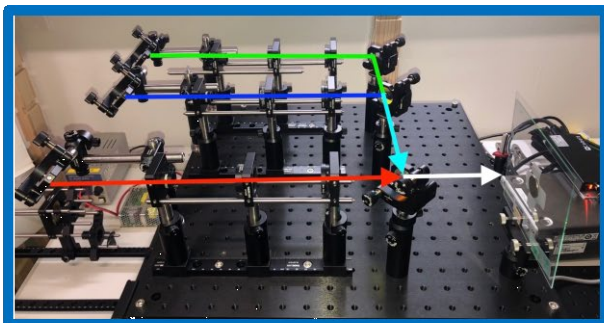
図 4-14 アルミ圧延材の撮影例4

## 5. HOE シートの露光実験

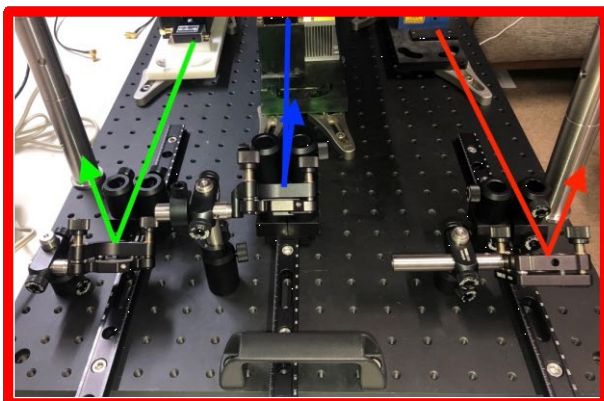
我々は、HOE フィルムによりレンズを任意に設計することを目指して、研究開発を推進している。ここでは、そのために必要となる露光条件決定のための各種検討結果を報告する。

### 5.5 シートフィルム露光用フルカラーRGB光源の試作

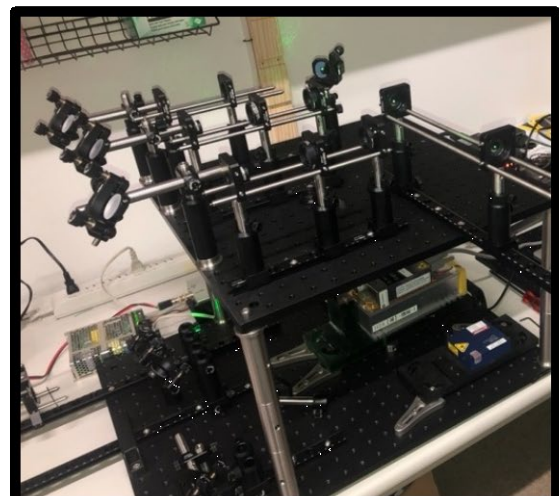
現在用いているフィルムは、G（緑）単色で露光をしているが、RGB の3波長を用いて露光することで、新たなフィルム特性が実現できるのではないかと考えている。そこで、RGB を平行にアライメントして出光するシステムを構築した。



平行光アライメント・RGB合成ユニット



光源ユニット



RGBフルカラー光源ユニット全体

図 5-1 試作したRGB光源



この光源は、AOMユニットにより RGB の各色のレーザーを独立して ON/Off させられる校正になっている。構築した光源がホログラムシートを露光させるのに十分な特性（強度・コヒーレンシー）を有するのかが確認するため、100 円玉から反射する光を用いた反射型のホログラムの露光実験を実施した。その結果、以下に示す通り反射型のホログラムが露光されることが確認された。このことより、この光源はホログラムを露光するのに必要な特性を有していることが確認された。

現在、緑色のみで動作確認をしているが、より暗い環境を用意して、RGB のフルカラー露光実験を今後予定している。

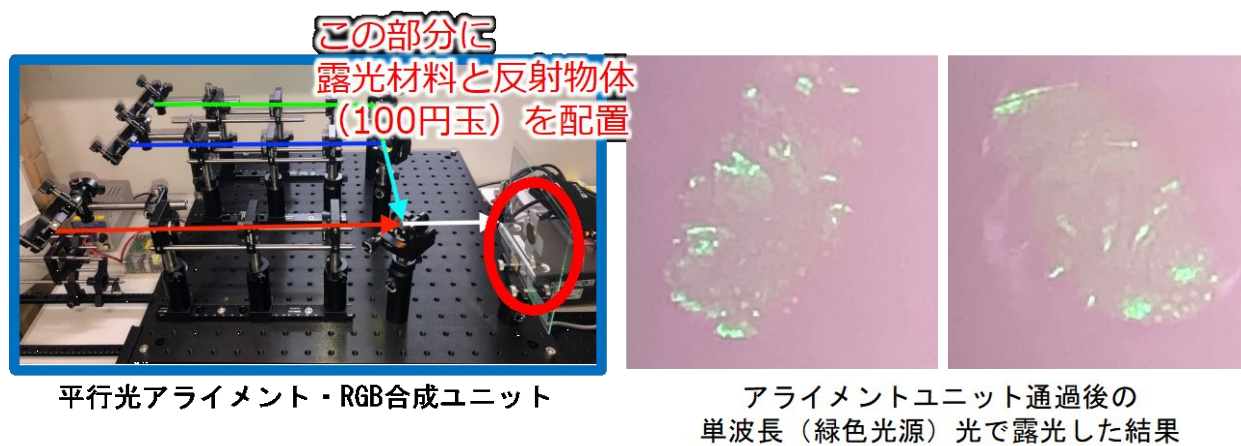


図 5-2 露光実験結果

### 5.5 透過型ホログラムの回折効率向上に向けた検討

現在、各種条件をを変えつつ、最適な条件を検討中である。以下に透過型のホログラムの露光系を示す。

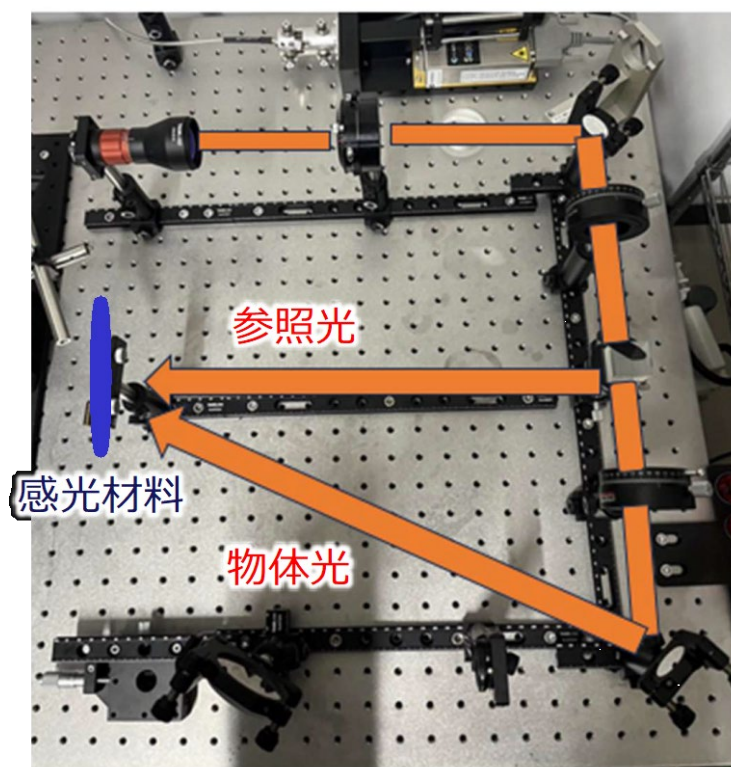


図 5-3 透過型ホログラムの露光実験用光学系

露光時間、角度、物体光/参照光の光量割合など各種の条件があり、現在それらの条件を変えた際の回折効率の評価を進めている。以下に露光時間を変えた際の回折効率のグラフを示す。一定以上の時間照射をすると、散乱による回折が出てしまうことが確認された。また、フィルムシートのシュリンクにより評価値が安定しないという問題も確認された。そのため、現在より短い時間で露光切り替えを行うことが出来るよう回収を行うとともに、物体光と参照光の角度設計を評価用に見直すことを検討している。

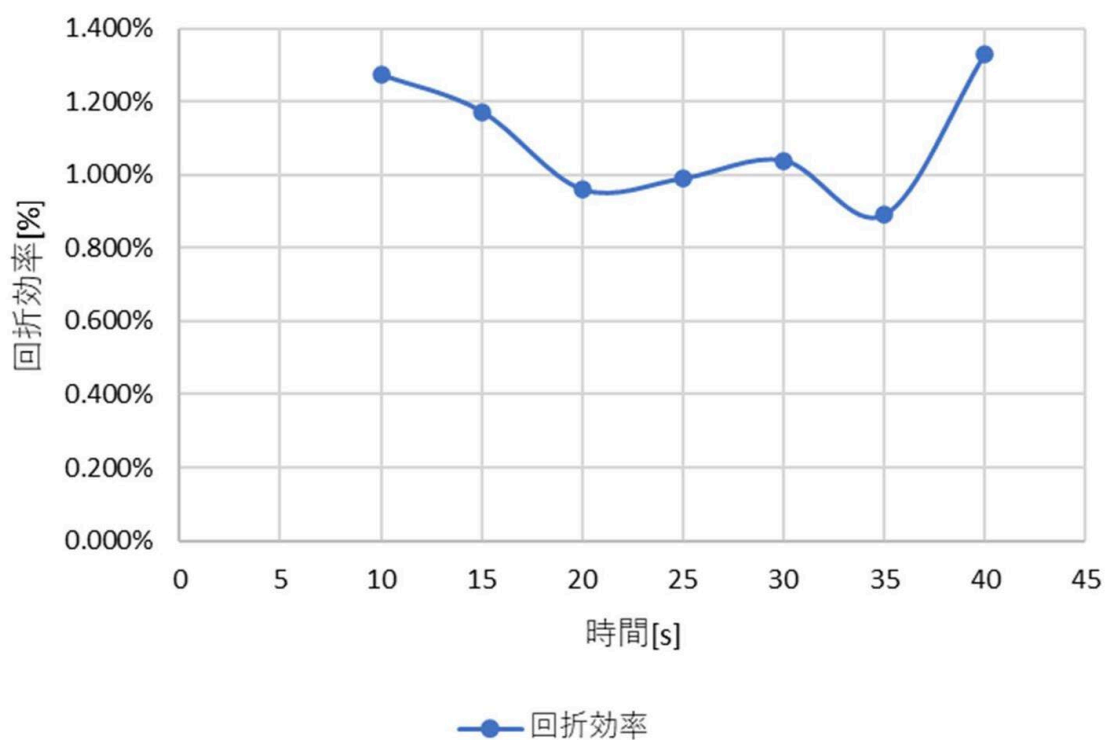


図 5-4 透過型ホログラムの露光実験用光学系

## 6. まとめ

本研究では、HOE を用いた計測手法について研究開発を進めるとともに、多波長・各種条件での実験が可能な環境構築を進めている。本稿ではその取組の現状を報告した。今後、検査・計測対象物に合わせたシートレンズの設計を進め、インラインに適用可能な自動検査システムを実現したいと考えている。生産技術開発センターの支援に深く感謝する。