

# NEDOプロジェクト「三次元光デバイス高効率製造技術」 の終了報告

(一社)ニューガラスフォーラム

外池 正清

## The Result of the finished national project on “High-efficiency Processing Technology for 3-D Optical Devices in Glass”

Masakiyo Tonoike

*New Glass Forum*

### 1. 事後評価

平成18年6月5日から開始したNEDOプロジェクト「三次元光デバイス高効率製造技術」の開発は、平成23年2月28日に研究を終え、平成23年6月23日にNEDOの研究評価委員会分科会（分科会長兵庫県立大学矢澤哲夫教授）に研究成果を報告した。

### 2. 成果の要約

この成果の要約は、NEDO「平成18年度～平成22年度三次元光デバイス高効率製造技術成果報告書」を元に作成している。これに関しては、プロジェクトリーダー：平尾一之（京都大学教授）、サブリーダー：三浦清貴（京都大学教授）、同：田中修平（ニューガラスフォーラム）、同：原勉（浜松ホトニクス）らにより詳しく報告がなされている。

本研究では、LCOS-SLM（位相変調型液晶空間光変調器）を用いる一括加工法とガラス・ホログラムを用いる一括加工法とがある。

#### (1) デバイス化加工用ガラス材料技術

##### 1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

密度変化による異質相形成（屈折率変化）のメカニズム解明に引き続き、元素分布形成による屈折率変化の屈折率制御の可能性とメカニズムの解明を実施した。その結果、元素分布の様子はガラス材料を構成している元素の組み合わせにより変化し、 $\text{SiO}_2$ を主成分とするシリケートガラスにおいてはSiが中心に集まる傾向にあることがわかった。Si濃度の増加は、結果としてレーザー照射領域中心が低屈折率化することを意味する。そこで、網目形成酸化物が異なる様々な組成のガラスについて元素移動を系統的に調べ、リン酸塩ガラスとホウ酸塩ガラスにおいて、中心が高屈折率化可能であることを確認した。元素分布が形成される領域はガラスが融液に近い領域であり、閉じられた空間

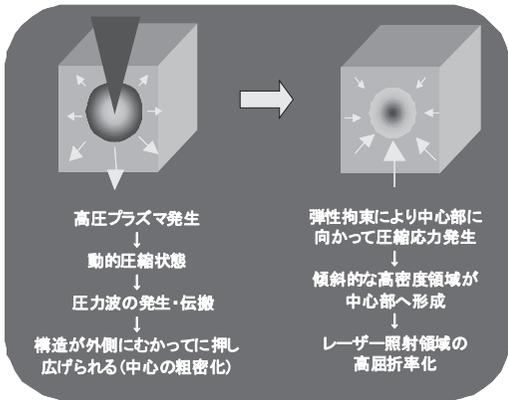


図1 異質相形成メカニズム

における高温かつ急峻な温度勾配が元素分布形成において重要であることを確認したので、この知見をベースにシミュレーションを実施することで、メカニズムの解明を実施した(図1参照)。

高繰り返しフェムト秒レーザー照射中に、集光点近傍の温度が数千℃以上に上昇し、かつ1μmあたり数十℃以上の急峻な温度勾配が生じていることを確認し、この温度勾配の結果をもとにシミュレーションを行った。結果、分子動力学法において温度勾配を支配的な駆動力としたシミュレーションを行うことで、実験結果における元素分布の特徴が非常に良く再現で

ることが確認でき、元素分布形成メカニズム解明における重要な指針を示すことができた。

## 2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

本研究では、光学ローパスフィルタをターゲットデバイスとした光学デバイス加工用材料の開発を目的としている。フェムト秒レーザー照射によりガラス内部に形成される異質相の母材との屈折率差( $\Delta n$ )とその分布の情報を光学デバイスの加工や設計にフィードバックするためには、それらを高精度で測定する必要がある。中間評価までの検討において、定量位相顕微鏡(図2 測定波長:633nm)は、 $\Delta n$ の符号も含めて評価できる上、サブミクロン以下の面分解能で、かつ $\Delta n$ の測定精度が $0.001 \pm 0.0005$ 以下で測定できる。また、60xレンズを使用した $\Delta n$ の実測において $0.001 \pm 0.002$ で測定できることを確認した。

$\Delta n$ とガラス組成に関する基礎的な知見を得るために、市販の光学ガラスに対して、ガラス内部に異なる集光状態のレンズ10x(0.3)と40x(0.85)を使用して、逐次照射加工でライン状異質相を形成し、ラインの断面方向から $\Delta n$ を評価した。結果として、パワーの増加に伴い $\Delta n$ の絶対値は増加する傾向が見られた。10xレンズの加工では、比較的均質な異質相が得られ易いことが確認された。一方、40x

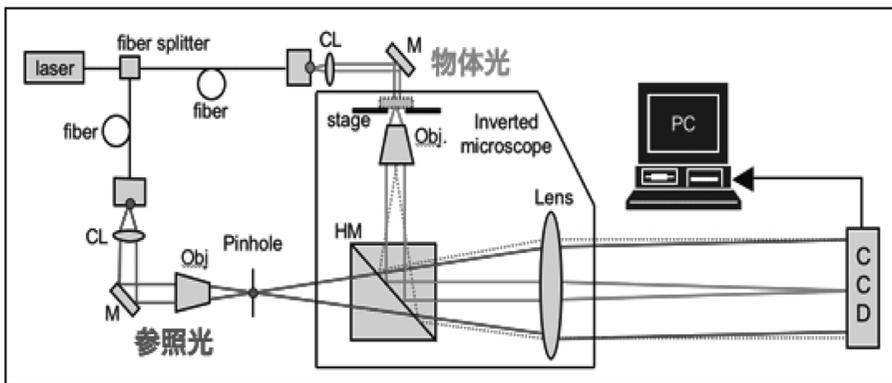


図2 定量位相顕微鏡の光学系の模式図。

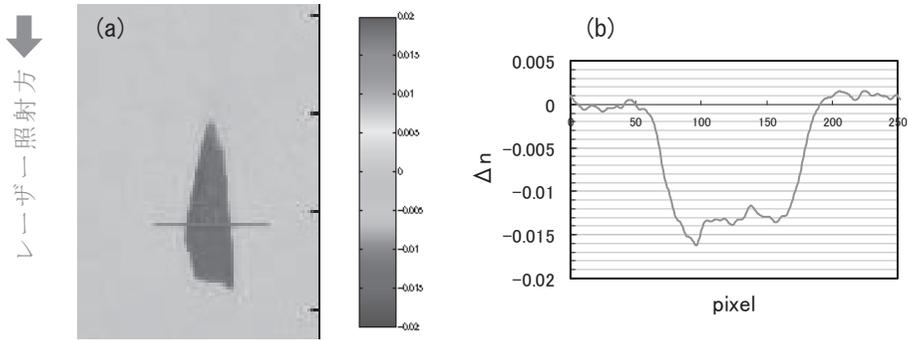


図3 異質相ライン断面の $\Delta n$ 測定画像 (a) と画像 (a) 内の $\Delta n$ のラインプロファイル (b)。レーザー照射方向は画像の上→下方向 (赤矢印)、焦点走査方向は画像の垂直方向。

レンズの加工では、パワーの増加とともに、異質相内の $\Delta n$ の高低が大きくなり不均質になった。 $\Delta n$ はガラスによってプラス/マイナス側への変化のし易さの傾向が異なり、 $\text{TiO}_2$ を含有するケイ酸塩系ガラスにおいてマイナス方向に比較的大きな $\Delta n$ となる ( $|\Delta n| > 0.01$ ) ことが分かった。更にその結果を基に、 $\text{TiO}_2$ を含有するリン酸塩系ガラス (ガラス A) について調査したところ、 $\Delta n$ が0.015を越えることが確認された。より詳しくは次のとおりで

ある。図3 (a) にガラス A 内部の異質相周辺部の定量位相顕微鏡による $\Delta n$ 測定画像を示す。また、図3 (b) は異質相部の $\Delta n$ のラインプロファイルである。 $\Delta n$ はマイナス側に変化しており、ピーク値で-0.016程度であった。また、このガラスは可視光領域 (波長400-760 nm) で透明であった。図4に $\Delta n$ の最大/最小値の絶対値 ( $|\Delta n|$ ) をピークパワー密度に対するプロットを示す。ガラス A では、 $8.5 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$ で $\Delta n = 0.015$ を越え、従来のシリ

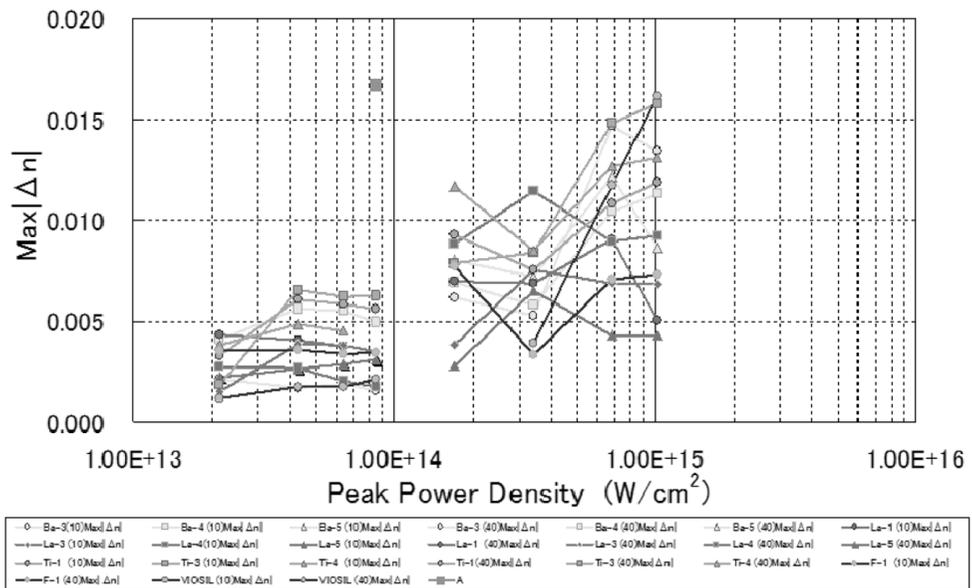


図4 フェムト秒レーザー照射により形成されたライン状異質相  $\text{Max} |\Delta n|$  のピークパワー密度に対するプロット。 $\text{Max} |\Delta n|$  は $\Delta n$ の最大値 (プラス側) / 最小値 (マイナス側) の絶対値。

カガラスの場合の  $6.8 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$  よりも  $1/8$  程度のエネルギーで実現した。本研究で開発された光学ガラスを光学デバイスに応用することにより、光学デバイスの薄型化が期待できる。更に、ホログラムを使用した高効率製造技術に適用することにより、高精度な光学デバイスを低コストで作製することが可能となるであろう。

### 3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

光伝送損失因子の特定とその低減化検討により、合成石英ガラスおよび一部のホウケイ酸塩ガラスにおいて光伝播損失：0.1 dB/cm の材料を実現し、中間目標を達成した。また、元素分布形成により、光導波路構造が形成可能であることを確認した。分岐デバイスとして空間光変調器を利用した一括加工光学システムおよびホログラム作成プログラムを構築し、ダンマングレーティングおよび Y 分岐導波路の一括形成を各種ガラスにて試みた。その結果、Au 含有ガラスにおいて比較的低閾値にて分岐が可能な素子が得られることを確認した。分子動力学法において温度勾配を支配的な駆動力としたシミュレーションを行うことで、実験結果における元素分布の特徴が非常に良く再現できることを確認するとともに、元素分布形成を利用することで、光導波路構造が形成可能であることを確認した。さらに LCOS-SLM モジュール（本プロジェクトにて浜松ホトニクス株式会社が開発）を利用した高繰り返し（250 kHz）レーザーと低繰り返し（1 kHz）レーザーとの同時多点照射システムを構築し、このシステムによりシミュレーション結果をもとに温度分布形状を変化させることで、元素分布形状を制御することに成功した（図5）。

#### (2) 三次元加工システム技術

##### 1) 波面制御三次元加工システム技術

##### (a) ホログラム設計用ソフトウェアシステム技

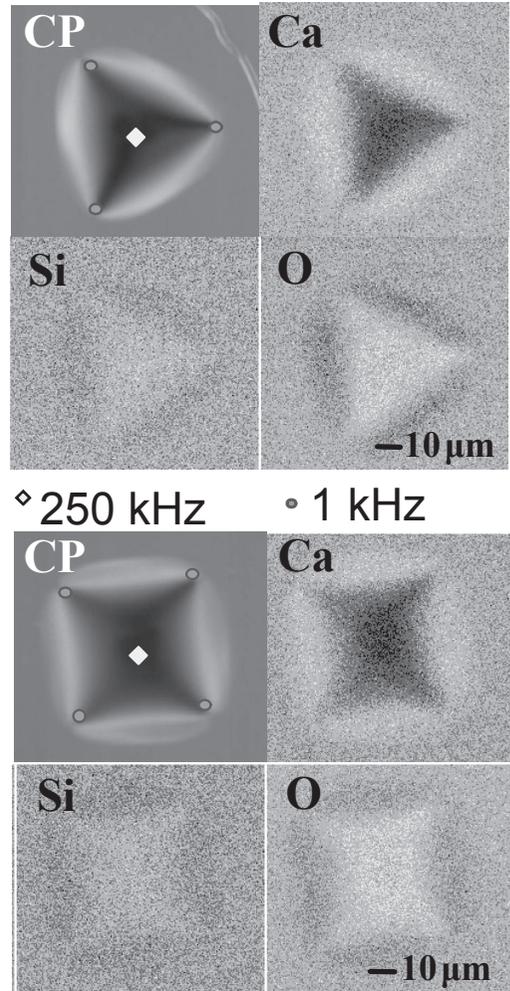


図5 1 kHz と 250 kHz レーザーの多点同時照射による元素分布形状制御（アルカリシリケートガラス）

#### 術とホログラム設計技術

本研究の目的は、三次元一括加工を実現するためのホログラム設計技術を提案・構築することである。具体的には、①大規模計算のためのソフトウェアシステムを構築すること、②三次元物体を表現するホログラム設計方法を開発すること、③ホログラム設計の高速化を実現することである。

ホログラムの設計に必要な環境として、高性能 CPU を搭載した計算機器による HPC (High Performance Computing) 基盤システムを構

築した。ソフトウェアに関しては、波面計算(回折積分)の計算領域を適切に絞り込むことで効率的な設計時間の短縮化を実現した。これを基に、最終目標であるガラス内部で1辺60 $\mu\text{m}$ の立方体内に直径10 $\mu\text{m}$ 以下の球状異質相を100個以上、三次元で形成するためのホログラムを設計した。その他の設計事例としては、直線形状や三次元螺旋形状、光軸平行直線、マルチレベル強度分布形状などがある。

実際に設計したホログラムを基にガラス・ホログラムを作製し、フェムト秒レーザー加工によってガラス内部への三次元一括加工を実現できたことから、開発したホログラム設計技術は有効な研究成果である。また計算領域を適切に絞り込む計算手法により、最終目標の従来比10倍以上の高速化を達成した。図6は、その計算時間測定の結果である。

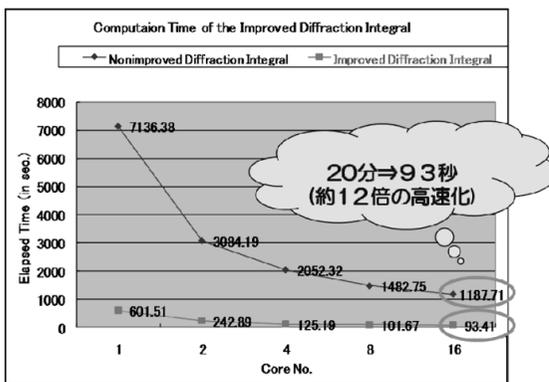


図6 回折積分1回あたりの計算時間測定の結果

#### (b) 光デバイスと光情報処理用ホログラムの設計技術

直線導波路や曲線導波路をフェムト秒レーザー一括加工により作製するための位相ホログラムの設計方法について検討を行った。計算機ホログラフィを基に直線、半円、円を再生する位相ホログラムを設計することができた。また、個々の位相ホログラムを合成する方法について検討し、1つのホログラムで2本以上の線を再生可能であることを確認した(図7)。

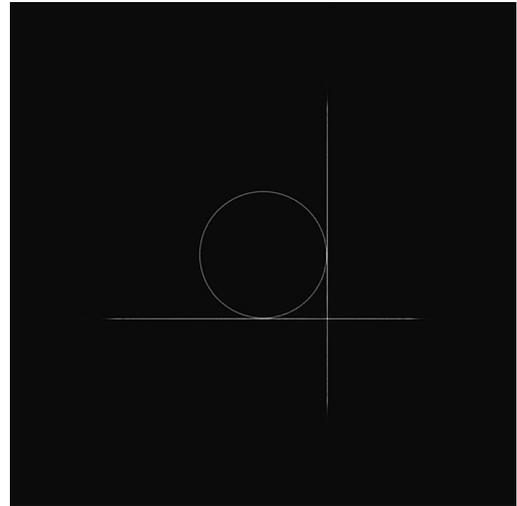


図7 直線2本と円を同時に再生する位相4段ガラス・ホログラムの計算による再生像

#### (c) ガラス・ホログラム作製技術(基盤技術)

ガラス・ホログラム作製プロセスを構築した。ここでは、短期間でガラス・ホログラムを作製することに重点を置いた。作製プロセスの大半を占める電子線描画の描画時間を約35%に短縮し、作製期間の大幅な短縮を行うことができた。ガラス・ホログラム作製プロセスの問題点の検討を行い、作製プロセスの改良を行った。プロセス改良後、4段のテストパターンでは段幅2.5 $\mu\text{m}$ 以上において設計段幅 $\pm 40\text{nm}$ 、設計段の深さ $\pm 40\text{nm}$ で作製できることを確認した(図8)。また、作製した位相4段、ピクセルサイズ5 $\mu\text{m}$ のガラス・ホログラムに



図8 ガラス・ホログラム概観

においても、パターン幅と段の深さが設計値 $\pm 40$  nm で作製できることを確認した。これらの結果から、最終目標である「波面制御素子の作製精度 $\pm 40$  nm」を達成した。今回作製したガラス・ホログラム作製プロセスでは、ピクセルサイズ $1\ \mu\text{m}$ （フェムト秒レーザー波長）、位相8段、ホログラムサイズ $13\ \text{mm} \times 13\ \text{mm}$ のようなガラス・ホログラムも作製可能となった（図9）。

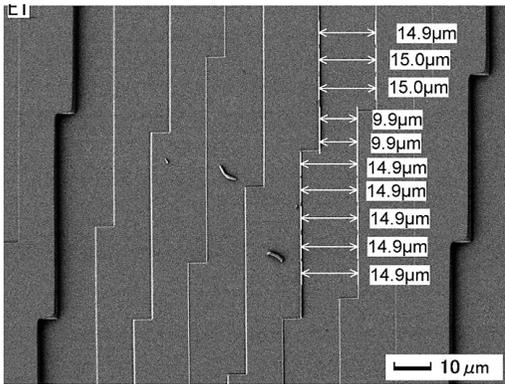


図9 ピクセルサイズ $5\ \mu\text{m}$ 、位相8段ガラス・ホログラムのSEMによる観察例

(d) ガラス・ホログラム作製技術（実用化基礎技術）

ポイントビーム方式のEB描画機を使用すると、ガラス・ホログラムの高精細化、及びホログラム作製領域の大面积化に伴い、EB描画時間が著しく増加する。このためホログラムの試作が困難であり高精細化、大面积化の具体的な検討ができなかった。高速描画用に開発された可変整形ビーム方式のEB描画装置を使用し、基礎検討を行った。また、高速描画により実現可能になったホログラム作製プロセスの簡易化を試みた。

結果を以下に記す。

- ・画素サイズ $1\ \mu\text{m}$ の高精細4段ホログラムの作製を可能にした。
- ・3インチ円のガラス基板において、 $25\ \text{mm}$ ホログラムの4枚取りに相当する面積での4段ホログラム作製を可能にした。

- ・ガラスエッチングの際にレジストマスクを併用するプロセスで、4段ホログラム（画素サイズ $5\ \mu\text{m}$ ）の作製を可能にした。本方法では従来法に比べて工程数を減らすことができる。

(e) ホログラムによる加工のための基盤技術

フェムト秒パルスレーザーとガラス・ホログラムを用いて、ガラス内部の一辺 $60\ \mu\text{m}$ の立方体体積内に三次元的に分布する100点の異質相を一括で加工することに成功した（図10）。レーザーによる内部加工においては、加工形状が光軸方向へ伸びてしまうことが最大の問題であったが、レーザーのフルエンス、パルス幅、それにホログラムの焦点距離、ホログラム-レンズ間距離などを最適化することによりこれを克服し、伸びが全くない、球体の異質相を複数個同時に加工することに成功した。

(f) ホログラム加工に及ぼす設計技術の寄与と三次元加工例

高精度な設計技術に基づき設計したホログラムは、空間的に任意の三次元形状を形成できる。直線形状を形成するホログラムを用いた回折格子製作と、逐次加工による回折格子製作の対比から、ホログラム加工の有効性と、その要素技術である設計技術の寄与を示す。

実際に製作した回折格子の仕様は、 $2\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$ （格子定数： $80\ \mu\text{m}$ ）で、長さ $2\ \text{mm}$ の直線形状を50本加工することで実現した。回折

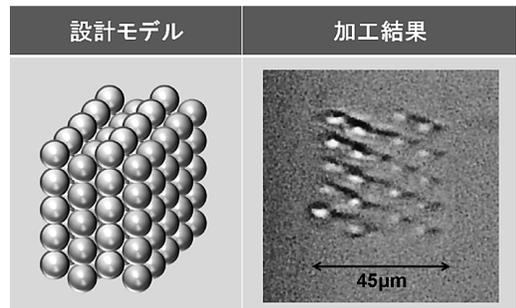


図10 異質相100個の三次元格子配列の加工結果

格子の光学的な性能（±4次光まで入射光の分離）は、ほぼ同等である。

ホログラムを用いることで、一例として、長さ2mmの直線1本あたりの加工時間は、わずか0.005秒で済んだ。逐次加工の場合は、長さ2mmの直線1本あたりの加工時間が1秒である。これにより、ホログラムを用いることで、加工時間が1/200程度に削減できたことを確認した。正確に設計された直線ホログラムの寄与は大きいと考える。

図10は、最終目標である60μm立方体内への異質相100個加工を実現した三次元加工例である。複雑で高密度化した三次元ドット配列を1つのホログラムで一括加工により実現した。この加工例においてもホログラム設計技術の寄与は大きい。

直線ホログラムによる回折格子製作や、異質相100個の三次元格子配列加工の結果から、正確に設計したホログラムの役割は非常に大きい。このため、ホログラム設計技術の開発は、三次元一括加工の発展させる上で重要なテーマである。

#### (g) 光デバイスと光情報処理用 TEG（評価素子）の作製

ガラス・ホログラムを用いたフェムト秒レーザー一括加工により、全長1cmの直線導波路、半径0.5mm～3mmの半円導波路、半径10μmや半径1mmの円等を合成石英内部に作製した。ここでは、ホログラムが生成する直線や曲線を合成石英内部に結像して導波路を作製した。作製した1cmの直線では、波長1550nmのレーザー光の導波を確認した。また、作製した半径1mm以上の半円導波路では、波長635nmのレーザー光の導波を確認した。これらの導波路を組み合わせ、結合器（図11）や Macha-Zehnder 型干渉計等を試作した。これらの基本的機能を確認した。

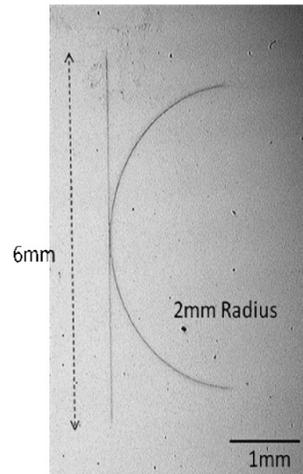


図11 K型結合器の試作例

#### (h) ホログラムを用いた光学ガラスの加工

光学デバイス加工用ガラス材料技術で開発された材料に対して、ガラス・ホログラムを用いた加工の適用について検討する。より具体的には、前項においてレンズを用いた逐次照射加工により屈折率差 $\Delta n > 0.015$ となる材料の検討を行い、従来よりも $\sim 1/8$ 程度の比較的低エネルギーで $\Delta n > 0.015$ となるガラス材料（ガラスA）を開発した。一方で、光学デバイスを高速に加工するためには、開発中のホログラム加工を適用する必要があるため、検討を行った。図12に示されるようにガラス・ホログラムと対物レンズ40x(0.55)を配置して加工を行った。レーザー加工条件は、波長：800nm、パルス幅：200fs、照射時間は0.005秒とした（図13）。

#### (i) 三次元形状計測技術

##### a) ガラス内部の形状測定

使用した三次元測定器は市販の表面反射により表面形状を測定する非接触式の装置である。このままでは透明体内部の異質相と母材の屈折率差が少なく境界面よりの反射光強度が弱いた

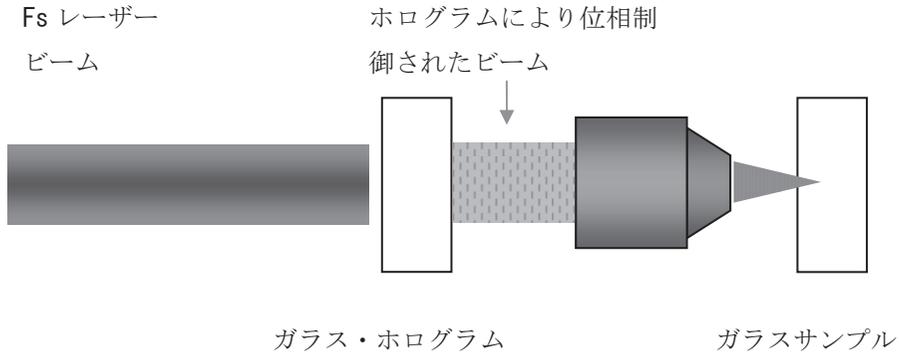


図 12 ガラス・ホログラムを用いてレンズを併用する加工の配置の模式図。

め、ガラス等の透明体内部の形状測定はできなかった。屈折率差が小さい試料での測定を可能とするため、三次元測定器に改良を加えることにより形状測定が可能となった (図 14)。すなわち試料の下面にミラーを配置し、レーザー結像点がミラー面となるようにし、この反射像位置を検出するようにした。これによりレーザーの光路中にある異質相の屈折率差に応じた光路長変化により形状を検出できるようになった。

b) ガラス内部の屈折率の非破壊測定

三種類の異なった方法によりガラス等の透明体内部の異質相の屈折率差を非破壊で測定する方法を開発した。すなわち、異質相の構造や大きさにより異なる方法を用いた。光路長が 10  $\mu\text{m}$  程度までの円柱構造体ではスキューレイ追跡を行い、三次元測定器より測定した光路長差と一致させる方法を用いた。光路長が更に短い球状もしくは円柱状構造体の場合には干渉計に

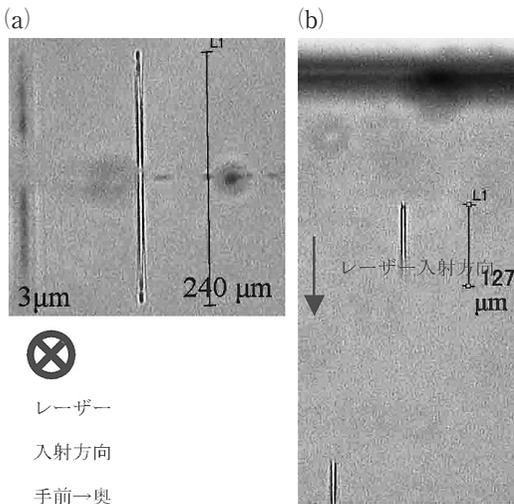


図 13 照射時間 0.005 秒のときの異質相光学顕微鏡像。

- (a) レーザー入射面から、
- (b) ライン断面方向から観察

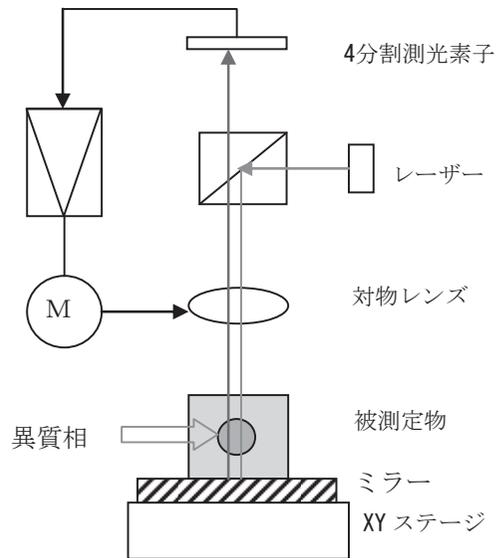


図 14 三次元測定機構造

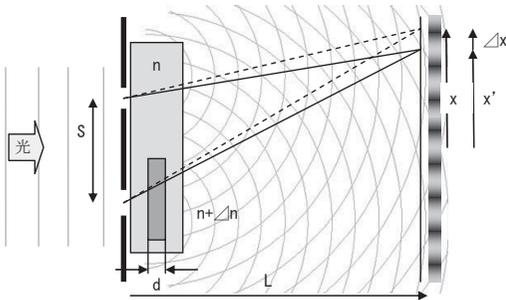


図 15 a) ダブルスリット測定配置図

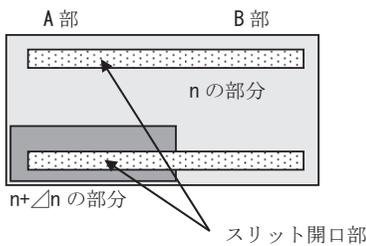


図 15 b) スリット開口部への試料配置図

図 15 (a) K型結合器の試作例 (b) 直線と半円の近接部付近の拡大図

よる干渉縞の変化を測定し、これに位相増幅処理と超解像処理を行う方法を用いた (図 15)。

OLPF (Optical Low Path Filter) のような層状構造体の場合には、ダブルスリットによる干渉縞の変位を測定する方法を用いた (図 16)。

## 2) 空間光変調器三次元加工システム技術

本研究開発の目的は、三次元光デバイスの製造技術のひとつである可変型の三次元加工システムの要素技術となる、フェムト秒レーザー光の位相の空間分布 (波面) を動的に変化させるフェムト秒レーザー光波面制御モジュール、およびそれを用いた波面制御技術を開発することである。

そのため、下記の研究開発を進めた。

(i) 三次元加工システム用フェムト秒レーザー

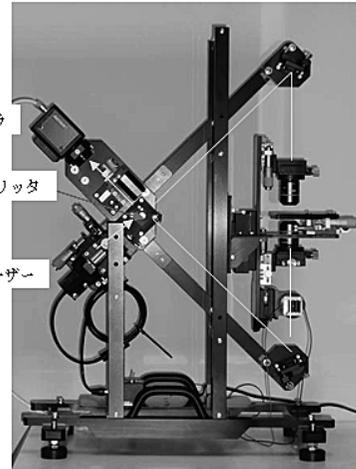
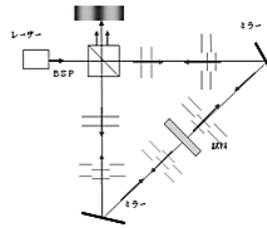


図 16 三角光路干渉計原理図と作製干渉計

光波面制御モジュールの開発

- ・フェムト秒レーザー加工用位相変調型液晶空間光変調器 (LCOS-SLM) の開発
  - ・LCOS-SLM を内蔵するフェムト秒レーザー光波面制御モジュールの開発
- (ii) 高機能三次元加工のための LCOS-SLM による波面制御技術の開発

並行して、社団法人ニューガラスフォーラムおよび国立大学法人京都大学の「三次元光回路導波路デバイス技術」グループと連携して、上記フェムト秒レーザー光波面制御モジュールの評価実験とそれによる検討・改良をおこなった。

これにより本研究開発項目において最終目標を達成できたことを確認した。すなわち、空間分解能 48 万画素 (800×600 画素) の高精細化、変調速度 50.7 Hz、光位相変調度  $2\pi$  ラジアン以上 (256 レベルの中間値制御も可能)、90 GW

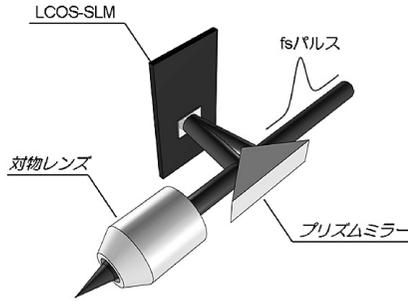


図 17 フェムト秒レーザー用 LCOS-SLM を内蔵した光波面制御モジュール概念図と外観 (右：モジュール，左：コントローラ)

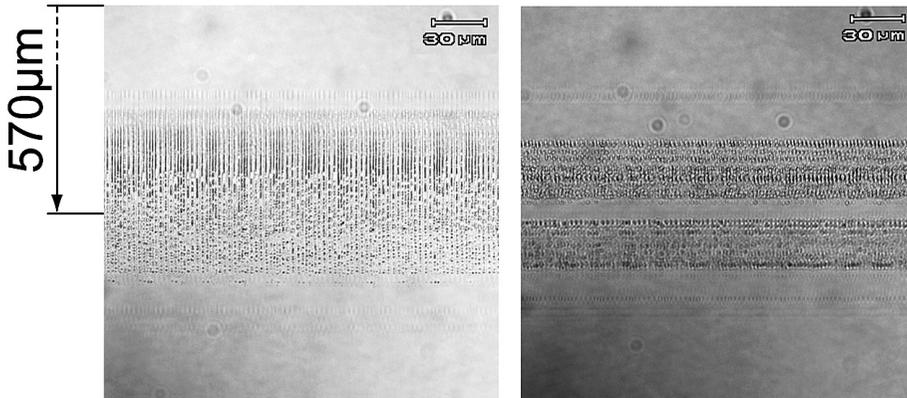


図 18 波形成形によって2つのビームを作成し、ガラス内部を加工したときの加工痕 (左：収差補正なし，右：収差補正あり)

$/\text{cm}^2$  (100 fs, 1 KHz) のフェムト秒レーザーパルスへの耐光性を有するフェムト秒レーザー光波面制御モジュールを実現した (図 17)。また、フェムト秒レーザーによる高機能三次元加工のための LCOS-SLM による波面制御技術の開発を行い、当該加工に必要な波形成形、収差補正を実現した。波形成形技術と収差補正技術とを併用することで、異なる深さに常に良好な集光状態、すなわち良好な加工をすることが可能となった (図 18)。

### (3) 三次元加工システム応用デバイス技術

#### 1) 三次元光学デバイス技術

本プロジェクトでは、高速・高精度にフェムト秒レーザー照射によりガラスに異質相を形成する技術を開発した。異質相とは、ガラス母材と屈折率の異なる部分と呼ぶ。

ここでは、異質相を利用したデバイスの有効性の確認のため、一例として、ガラス光学ローパスフィルタの開発について報告する。光学ローパスフィルタとはデジタルカメラで生じるモアレ (図 19) を低減する部品である。

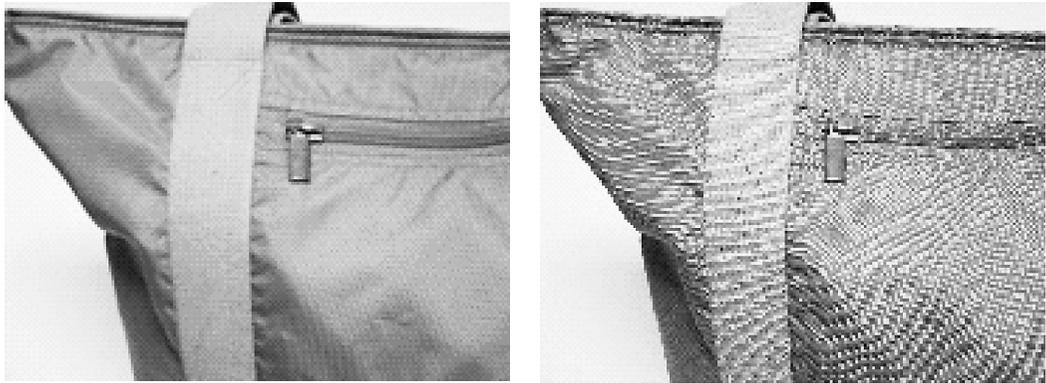


図19 モアレの例(左:モアレを生じうる被写体の例。右:モアレが生じた画像)

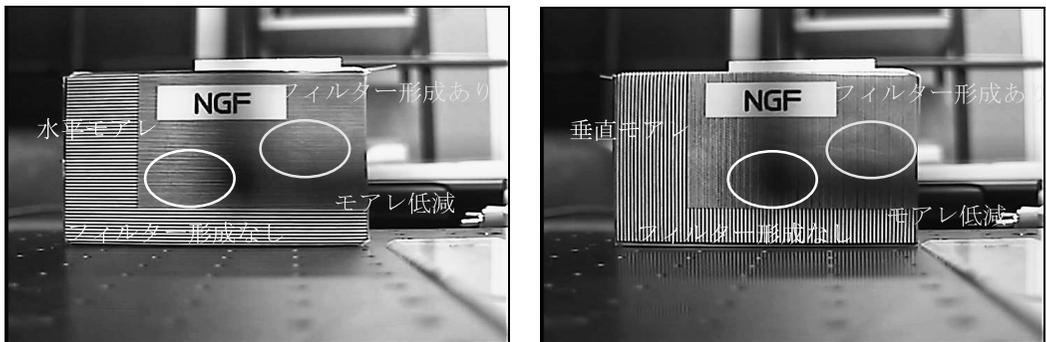


図20 試作したガラス光学ローパスフィルタを実装したカメラでの水平(左)と垂直(右)方向ラインチャートの画像

通常の光学ローパスフィルタは水晶製であるが、水平垂直両方向のモアレを低減するためには貼り合わせが必要であり、価格と厚みに課題があった。

しかし、我々は、異質相で市松状の回折格子を形成すれば、貼り合わせなく水平垂直両方のモアレを低減する光学ローパスフィルタを実現できると考えた。

そこで我々は、試作検証が容易なデジタルカメラとして、25万画素のCCDカメラを選択した。そのカメラに最適なガラス光学ローパスフィルタ用異質相回折格子の設計を行い、回折格子のピッチと格子の長さを決めた。ガラス・ホログラムを用いたフェムト秒レーザー一括加工により異質相回折格子の形成を行い、ガラス光学ローパスフィルタの試作を行った。

試作したガラス光学ローパスフィルタを装着

したデジタルカメラでチャートを撮影して、貼り合わせなしで水平垂直両方向がモアレを低減されていることを確認した。

試作したガラス光学ローパスフィルタの正味の厚みは0.3mmであり、用いたデジタルカメラにもともと装着されていた厚み1.5mmの水晶ローパスフィルタより薄くできた(図20)。

最後に、本プロジェクトで開発したホログラムによる異質相の一括加工により異質相回折格子を作製した。今後の実用化のための課題として、更なる加工時間の短縮と異質相の無色透明化を抽出した。

なお現在もこの研究は、つくばの集中研に参加していた企業のうち、株式会社オハラとともにNEDOの継続研究「フェムト秒レーザー三次元加工によるデジタルカメラ用光学ローパスフィルタの超高速加工」として実施している。

2) 三次元光回路導波路デバイス技術

逐次描画による直線導波路において、レーザー照射条件制御により、目標であるコア径9  $\mu\text{m}$  の直線導波路を描画し、 $\pm 1 \mu\text{m}$  の加工精度で伝送損失0.1 dB/cm の導波路を描画することができた。空間変調素子を中心とする波面制御光学系を用いた一括描画システムを用いて多ライン同時加工で16分岐回折光学素子を作製、その光伝搬損失および加工精度を確認した。さらに、二次元描画用ホログラムにフレネルレンズのホログラムを合成することで三次元一括描画が可能なホログラフィック加工システム

(フェムト秒レーザー+LCOS-SLM) を構築した。このシステムにより、複数の光導波路の一括描画、2分岐~6分岐の光導波路を描画し(図21)、これらが分岐回路として機能することを確認することで、構築したホログラフィック加工システムが三次元光デバイスの作製において有力なツールとなることを実証した。

出典：

NEDO「平成18年度~平成22年度三次元光デバイス高効率製造技術 成果報告書」

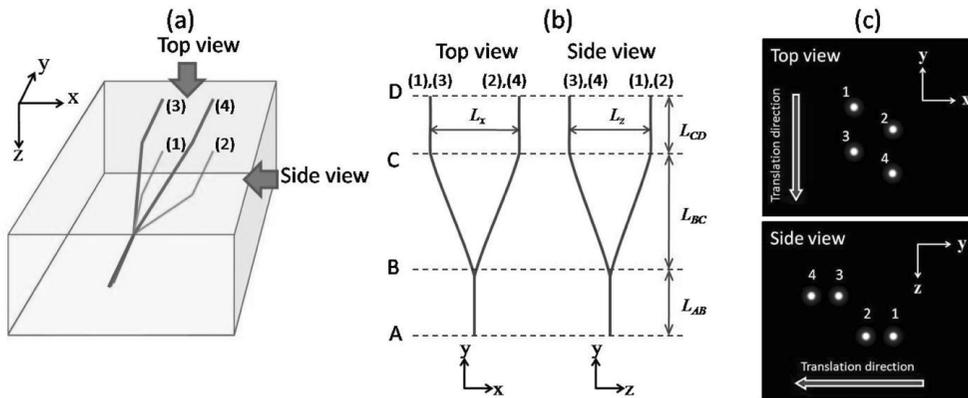


図21 (a) (b)作製した1 x 4分岐導波路の構造 (c)1 x 4分岐導波路を描画する時の集光スポットの位置