

## 京都大学における三次元光デバイス研究の現状

京都大学 工学研究科

三浦 清貴

### Recent research of three-dimensional optical devices in Kyoto University

**Kiyotaka Miura**

*Department of Material Chemistry, Graduate School of Engineering, Kyoto University*

#### 1. はじめに

NEDO「三次元光デバイス高効率製造技術プロジェクト」の概要、ならびにプロジェクトでの京都大学の取り組みについては本機関誌「NEW GLASS」シリアル番号 88 号に既に掲載している。本稿では、本プロジェクトにおける京都大学の研究体制と研究の現状を中心に紹介する。

京都大学では平尾一之教授（プロジェクトリーダー）を中心に、平尾研究室（工学研究科材料化学専攻無機構造化学分野）と NEDO 光集積講座とが「平尾グループ」として三次元光デバイス研究に取り組んでいる。平尾研究室では、無機固体材料を中心として、原子・分子オーダーからミクロン領域に至る微細構造制御をトップダウン法とボトムアップ法の両側面か

ら研究し、それに伴う電氣的、磁氣的、光学的性質の制御や新規な機能発現を目指した研究を実施している。最近の研究テーマの幾つかを概念図（図 1）と共に以下に記す。

#### *Top Down*

1. 超短パルスレーザーと透明材料（ガラス、単結晶等）との相互作用メカニズムの解明
2. 空間位相変調素子を利用した超短パルスレーザーによる透明材料内部への局所選択的（多次元）周期構造の誘起
3. 超短パルスレーザーによるナノ微粒子の形態制御とメカニズムの解明

#### *Bottom Up*

1. 自己組織化を利用したナノ・マイクロ微粒子の液相合成と形態制御
2. 制御された共連続多孔構造をもつ光機能性材料および触媒材料の合成
3. 気相法による酸化物薄膜の合成と光・磁気機能発現

一方、NEDO 光集積講座は、「三次元光デバイス高効率製造技術」をはじめとする

〒615-8510 京都市西京区京都大学桂 A 3-120

TEL 075-383-2411

FAX 075-383-2410

E-mail: kimura@collon1.kuic.kyoto-u.ac.jp

NEDO プロジェクトを効率的・効果的に推進し、プロジェクトでの成果の幅広い活用を図ることを目的に、フェムト秒レーザー材料プロセッシングに関連する技術・研究に携わる人材の育成を実施している。加えて、ナノガラス技術、三次元光デバイス技術等の NEDO プロジェクト関連技術を含めた異分野融合的な研究・開発にも取り組んでいる。以下に掲げる研究は、平尾研究室と共に実施している課題である。

1. 「光と物質の相互作用のメカニズム解明」  
ポンプ・プローブ法によるフェムト秒レーザーパルスによる位相分布の揺らぎ観測および圧力波発生メカニズムの解明
2. 「光によるナノ構造の形成」フェムト秒レーザーシングルビームによるナノ周期構造およびナノドット形成
3. 「光による光機能性材料の創生」ガラス内部における空間選択的な結晶性シリコンの析出とそのシリコンフォトンクスへの応用
4. 「光によるメタマテリアルの作製」ダイヤモンド等のテラヘルツ領域において透明な材料内部に空間選択的な伝導体の形成
5. 「光による超微粒子の形成と形態制御」フ

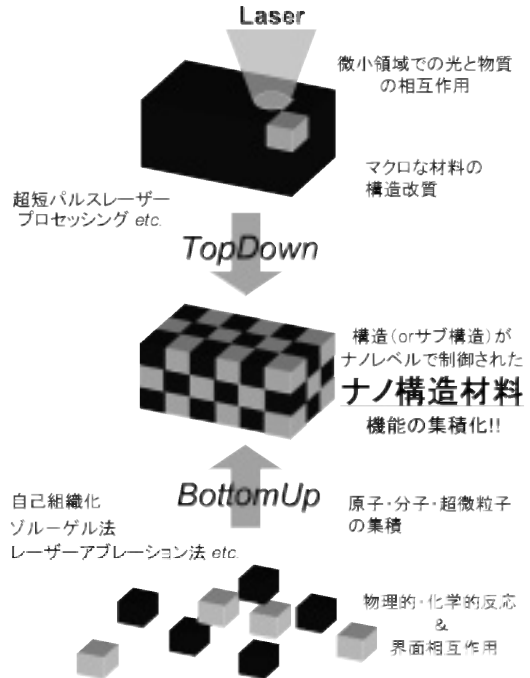


図1 微細構造制御の概念図

フェムト秒レーザー照射による超微粒子の形成と形態制御

図2は、アメーバ的な技術・人材ネットワーク構築から生まれた現研究体制を示したものである。このような体制下、京都大学では「三次

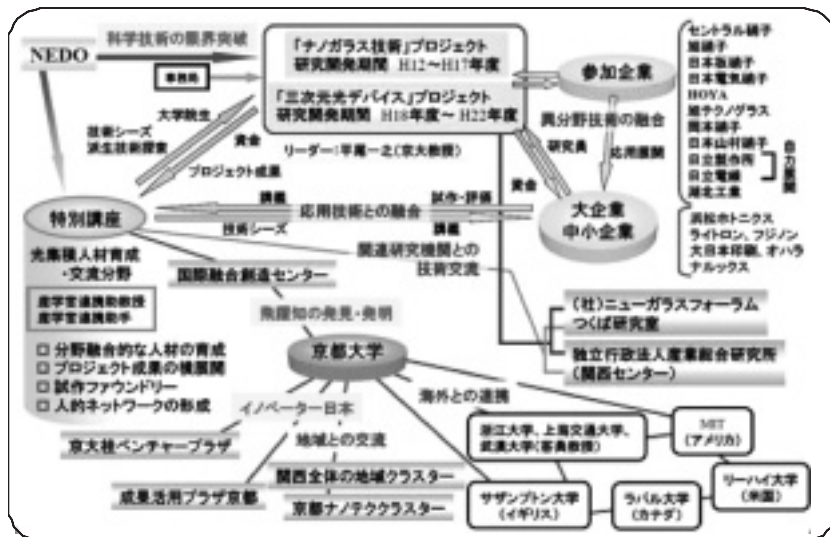


図2 京都大学の研究体制

元光デバイス高効率製造技術プロジェクト」における三つの大きな研究開発課題の一つである“デバイス化加工用ガラス材料技術”を中心とした研究に取り組んでいる。紙面の関係で多くを紹介することができないので、ここでは構造変化のメカニズムに絞って成果を紹介する。

フェムト秒レーザーの集光照射により、ガラスの局所的な密度変化が生じ、この現象を利用することでガラス内部に三次元的な光導波路が描画可能であることは早くより知られていた。しかし、この現象（屈折率変化）のメカニズムについては不明な点も多く、フェムト秒レーザーと波面制御技術（ガラスホログラムや空間位相変調素子の利用）とを組み合わせることで三次元光デバイスを高品質・高効率で製造できるガラス材料を開発するためには、屈折率変化をはじめとする各種構造変化のメカニズム解明が重要となる。そこで、ポンププローブ法の一つである過渡レンズ法により、フェムト秒レーザー集光照射によりガラス内部においてどのような現象が起こっているのかを、ピコ秒～ナノ秒およびナノ秒～マイクロ秒領域についてそれぞれ調べた。その結果、レーザー照射直後からナノ秒程度の時間領域において、レーザー照射（シングルパルス）により焦点中心の温度が半径  $1\ \mu\text{m}$  の領域において数千 $^{\circ}\text{C}$ 以上に、圧力が1 GPa程度まで上昇（照射後1 ps以内）し、その結果として集光点中心から周囲に向かって同心円状に圧力波がガラスの音速に近い速度で伝搬することを確認した。ナノ秒レーザー照射では、圧力波が伝播する時間よりもはるかに遅い速度で熱歪みが生じることになるため、大きな熱歪みが形成される前に応力緩和がほとんど終わってしまい、ガラスの破壊を伴わずに圧力波を発生させることは困難である。ガラス内部での瞬間的な高温・高圧状態実現による圧力波発生が、フェムト秒レーザー集光照射の大きな特徴であり、フェムト秒レーザー加工と他のレーザー加工との決定的な違いを生む要因の一つと言える。また、ナノ秒からマイクロ秒の領域に

おいては、レーザー照射により発生した熱エネルギーの拡散が起こっていることが確認でき、熱緩和には  $10\ \mu\text{s}$  程度の時間を要することがわかった。この結果は、熱の蓄積効果を積極的に利用する光導波路描画のような場合には繰り返し周波数が100 kHz以上のレーザーが必要であり、逆に数十kHz以下のレーザーを用いれば熱蓄積が関与しない加工が可能であることを意味する。更に、レーザー照射直後に数千 $^{\circ}\text{C}$ に達した集光点領域の温度は  $1\ \mu\text{s}$  後には数百 $^{\circ}\text{C}$ 程度まで下がり、その際の冷却速度は  $10^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ にも達することを確認した。フェムト秒レーザー集光照射によるガラス内部の構造改質では、圧力波の発生・伝搬とともに、局所領域における高温状態からの超急冷によるガラス構造の瞬間的な凍結が重要な意味を持ち、一連の研究から明らかにされた構造変化メカニズムは以下の通りである。レーザー集光照射により、音速に近い速度で内部を伝搬する圧力波によりガラス構造が中心から周囲へと押し広げられる。レーザー照射を止めた時点で、圧縮応力がレーザー集光焦点の中心に向かって働く。結果として、傾斜的な高密度領域がガラス内部へ形成される。その状態が超急冷により瞬間的に凍結されることで密度分布が形成され、密度分布に相当する屈折率変化が生じる。最終的に形成される屈折率分布はレーザーの照射条件とガラスの種類に依存し、パルスエネルギーが強すぎる場合には中心の空洞化現象（ボイド形成）も起こる。また、多成分系ガラスの種類によっては圧力波の伝搬により密度変化と同時に選択的なイオン拡散が生じ、これが屈折率変化の一因となることもある。

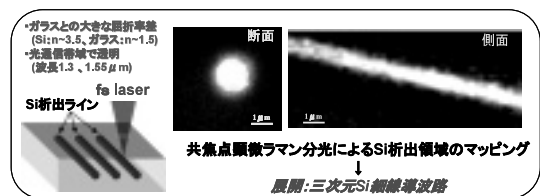


図3 ガラス内部へのSiライン形成

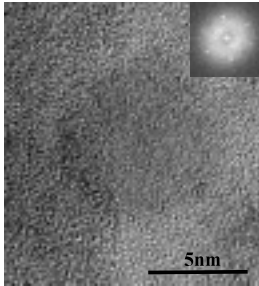


図4 ガラス内部に析出させたSiナノ微粒子のTEM像

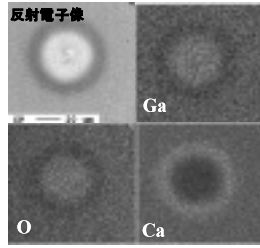


図5 元素分布形成による屈折率制御

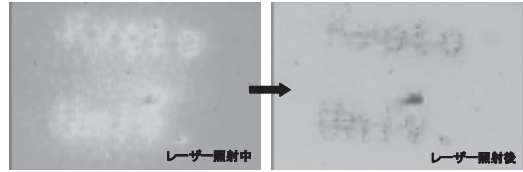


図6 ガラス内部一括加工例

以上、「京都大学における三次元光デバイス研究の現状」とのタイトルで書き進めてきたが、スペースの関係上、ガラス内部へのSi構造体形成(図3)やSiナノ微粒子析出(図4)、圧力波によるイオン交換(元素分布形成)を利用した局所領域での屈折率制御(図5)、およ

びこれら新しい誘起構造の三次元光デバイスへの応用や空間位相変調素子による多点同時一括加工(図6)に関する研究については紹介しきれなかったことを付け加えおきたい。

最後に、我々の研究拠点である京都大学桂キャンパス(平尾研究室)、京大桂ベンチャープラザ南館(NEDO光集積講座)および同館内の実験室風景の写真を以下に載せる。直接お越しいただければ施設の見学も含め研究紹介をさせていただくことも可能であり、色々な議論をさせていただくことも大歓迎である。



京都大学大学院 桂キャンパス



京都桂ベンチャープラザ南館



レーザー関連実験室