

高機能光学素子の低コスト製造へのチャレンジ

— ガラスインプリント法によるサブ波長周期構造の実現 —

西井 準治

光の波長以下の周期構造からなる「サブ波長光学素子」において、製造コスト等の実用化を阻害してきた要因を、日本が得意とするガラスモールド法と、新たな成型プロセスとして知られるインプリント法との融合によって解決することを試みた。材料メーカー、家電メーカー、大学、産総研が役割分担を明確にして垂直的に連携することにより、波長板機能、反射防止機能などをガラス表面に形成することに成功した。

1 はじめに

高度情報化社会の構築に貢献したのは、半導体技術と光技術である。数百年の長い歴史をもつ光技術には、今なお、多くの期待が寄せられている。その理由は2つある。1つは情報媒体としての容量が極めて大きく、伝達速度が速いこと。もう1つは、人間が80%以上の情報を視覚から取り入れていることである。光通信ネットワークの普及によって飛躍的に向上した情報の送受信環境をプラットフォームとして、それを追うようにディスプレイ、ストレージ、撮像機器など、様々なハードウェアに関わる技術革新が連鎖的に起こり、今後のさらなる発展のために、光技術への期待は日増しに大きくなっている。それに応えるためには、「科学」として積み上げられた光学に関わる多くの成果を、いかにして揺るぎない「技術」に仕上げていくか、その手法論が問われる時代である。

本稿では、次世代の情報入出力技術に大きな影響を及ぼすと思われる、光学素子に着目する。向こう10～20年の間に、情報家電分野や情報通信分野で必要とされる光学素子に関わる技術を予測し、既に科学的に明らかになりつつある、あるいは明らかになっている要素を組み合わせることによって、屈折・回折光学素子の次の世代を担う、新たな素子化技術の産業化を目指した取り組みについて述べる。

このような次世代の情報入出力に関わる光学素子化技術が構築できれば、ユーザー側にとっては、高画質画像などの大容量データの高速かつ効率的な撮像、保存・読み出しが可能となる。一方、製造側にとっては、これまで膨大なエネルギーを要していた光学素子の製造プロセスが大幅に簡素化されるばかりか、部品数の削減にも繋がり、近

隣諸国をリードする高度な情報家電機器の製品化が実現する。

2 産業化に向けた新展開と研究目標

1600年以降に登場した光学素子および産業分野で貢献している製造方法を、図1に模式的に整理した。この分野のものづくりは「光学材料」と「微細加工」に集約される。屈折率や分散など、設計で決められた物性の材料を開発し、それを精密に加工、評価するという作業の繰り返しである。1600～1800年代は、レンズ、プリズム、回折格子という3つの光学素子を基盤として、幾何光学と波動光学の分野で様々な理論が構築された時期である。先行する理論あるいは光学設計がものづくりに指針を与え、ものづくりがニーズに確実に応え、かつ理論と設計の高度化を促すという状況が現在でも続いている。

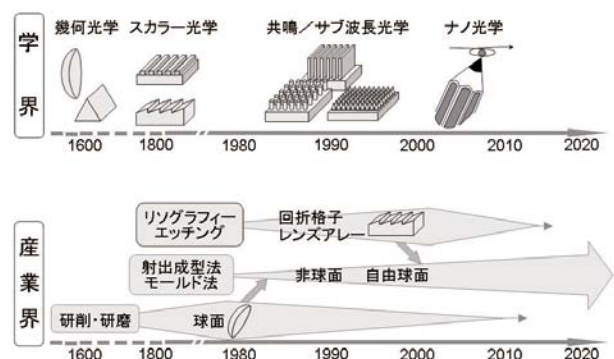


図1 1600年以降に登場した光学素子および産業に貢献している製造方法

2.1 コストの壁

1990 年前後に研究が開始された「共鳴・サブ波長」と呼ばれる分野に注目したい。光の波長レベルあるいはそれ以下の周期構造を高精度に作製できれば、従来よりもさらに高機能な素子が作製できることが、計算機シミュレーションによって次々に明らかにされ、その後、シリコン等の半導体微細加工技術の発達と共に、試作を伴った基礎研究が盛んに行われた^[1]。

本稿で対象とする光の波長は、可視域から近赤外域（波長 400 nm ～ 2000 nm 程度）である。構造の周期が入射する光の波長の $2n$ 倍 ($n=0,1,2,3 \dots$) の場合は、回折波が発生する他、周期構造内での光波の共鳴による強い反射や光の閉じこめ作用が起こる。構造の周期が短くなると、回折や光波共鳴は発生せず、微細構造は周期を構成する材料と空気の平均屈折率の物質とみなすことができる。これが、「共鳴・サブ波長」の原理である。

これまでにいくつかの共鳴・サブ波長光学素子が実用化されてはいるものの、その用途は限定的であり、情報家電製品などの汎用機器に搭載されるまでには至っていない。その理由は、月産数百万個以上の製造規模と低コスト化の障壁があまりにも高すぎたからである。

2.2 機能の壁

1980 年に発明されたモールド法や射出成型法で、それまでの研削・研磨法では作製が困難であった非球面レンズや回折格子が安価に製造できるようになった。精密なモールド作製技術が確立され、非球面等の様々な形状の光学素子の量産が可能になった。例えば、デジタルカメラのズーム光学系には、ほぼ 100 % の割合でガラスモールドレンズが使われており、日本および近隣諸国において、年間数億個のペースで生産されている。しかしながら、高精細化、小型・軽量化に加えて、ゴースト、球面収差、色収差の複合的な抑制等の新たなニーズが浮上してきた。一方、次世代光ディスクドライブには波長 405 nm の紫色の光が使われるため、従来からの CD（波長 785 nm）、DVD（波長 655 nm）を加えた計 3 波長の光に同時に対応できる新たな光学素子が求められている。これらの機能素子のニーズに応えるためには、屈折と回折の併用、波長依存性のない構造的複屈折、波長・入射角依存性の小さな反射防止などの機能を、従来からのレンズ等の光学素子に組み込むための新たな技術が必要である。

2.3 本研究の目標

従来のインプリント技術は、微細な構造を形成できることで知られているが、低温成型が可能な樹脂のみに対応可能で、数百度の高温が要求されるガラスに適用した事例はなかった。また、ガラスモールド法は、レンズなどの表面

が平坦な光学部材の製造に用いられており、光の波長より小さい構造の形成に使われた例はほとんど無い。そこで本研究では、学会で話題になっている樹脂材料のインプリント技術と、産業界で成熟したガラスモールド技術を組み合わせ、ガラスインプリント技術の開発に取り組み、これまで、微細加工技術を駆使して試作されてきた共鳴・サブ波長光学素子の新たな製造技術を開発することを目標とした。

3 目標達成のためのシナリオ

共鳴・サブ波長光学素子の作製に必要な加工サイズは数十 nm ～ 数 μm の領域であり、可能な限り短時間で大面積の微細加工を行う必要がある。現在、産業界で使われているリソグラフィとエッチング、レーザー加工、機械加工等の手法では満足できない領域である。しかしながら、その様な光学素子は、レンズ、プリズム、窓材などの表面に形成する場合が大半であるため、既存の微細加工技術を使って耐久性のある微細構造モールドを作製することができれば、素子の表面にインプリント法の原理を応用して微細構造を転写できるはずである。モールド法およびインプリント法の概念を図 2 に示す。日本のモールド法の技術レベルは世界でも突出して優れており、人材、設備、ノウハウの十分な蓄積がある。また、インプリント法は、米プリンストン大学の Chou らが報告した技術であり^[2, 3]、ナノスケールに微細加工されたモールドを樹脂に押しつけ、紫外線あるいは熱を用いて構造を転写する方法である^[4]。これまでに、インプリント法によって微細構造を形成して製品化した事例としては、液晶ディスプレイ用導光板など、樹脂材料が主体であった。一方、信頼性に優れたガラス材料では、10 μm 以上の構造単位のマイクロレンズアレーや回折格子が知られている程度で、共鳴・サブ波長領域での製品化は未踏領域であった。

そこで本研究では、ガラスインプリント技術によるサブ波長光学素子の産業化を目指して、図 3 に示すシナリオに基づいて、複数の要素技術および中間統合技術に関する研究課題を設定した。要素技術については、組成開発や物性評価を得意とする産総研が材料メーカーを先導する体制

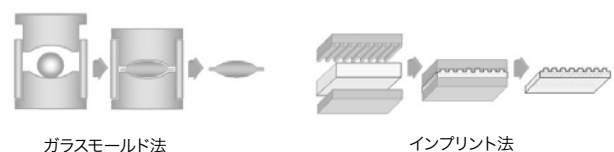


図 2 ガラスモールド法およびインプリント法のイメージ図
ガラスモールドには耐熱超硬材料が、インプリント用モールドにはガラスあるいはシリコンが使われる。

の中で、過去の膨大な研究成果を活用しつつ取り組むことにした。一方、モールドの微細加工、離型処理、および精密成型の3つの技術については、家電メーカーのノウハウに依存する部分が多く、産総研が家電メーカーを支援する形で、慎重かつ戦略的に取り組むことにした。

4 要素技術の統合による新規な光学素子の開発

独自のモールド法で製造した光学素子を最終製品に搭載している家電メーカーと、モールド法に相応しい材料を開発しているガラスメーカー、光学およびレオロジー分野で先端的シミュレーション研究に取り組んでいる大学との連携体制を構築し、各々の研究ポテンシャルを融合するために、産総研に集中研究室を設置した。ここで重要だったのは、ガラスやセラミックスの微細加工技術と評価技術に関するノウハウが、産総研の研究グループに蓄積されていたことである。以下に、素子の作製に成功した事例を述べる。

4.1 構造型複屈折波長板の開発

光ディスクドライブには、光源からディスクへ向かう光と、ディスクから反射して検出器に戻る光を分離するために、波長板が使われている。現在の波長板の材料は樹脂あるいは水晶であるが、波長毎に仕様の異なる波長板を実装しなければならない。つまり、次世代ドライブには赤～青の

波長域で3枚必要となるため、機器の小型化、低コスト化の阻害要因として懸念されている。また、光源の短波長化に伴って、十分な耐光性を有する光学素子が求められている。これらの問題点を克服できる可能性があるのがガラス製の構造型複屈折波長板である。

透明材料の表面に波長よりも小さな周期の1次元微細構造を形成すると、透過する光の電場の向きに応じて屈折率が異なる、いわゆる「構造型複屈折」が発現する^[5]。

光学的に等方的なガラスでも、表面に異方性のあるサブ波長構造を形成すれば、構造型複屈折の実現が期待できる。

有効媒質理論あるいは厳密結合波解析などの計算手法を用いれば、理論的に構造の最適化が可能である。重要なパラメーターは、微細構造の周期、溝幅、高さ、そして材料の屈折率である。また、溝幅は主に位相差の波長依存性に影響するため、波長無依存化のためには形状の最適化が必須である。さらに、構造高さは材料の屈折率が高いほど低くできる。ガラス材料は樹脂に比べて高屈折率化が容易であり、構造高さを低くできるというメリットがあるが、これまでモールド法でその様な構造を形成した例はなかった。

本研究では第1ステップとして、周期を500 nmに固定

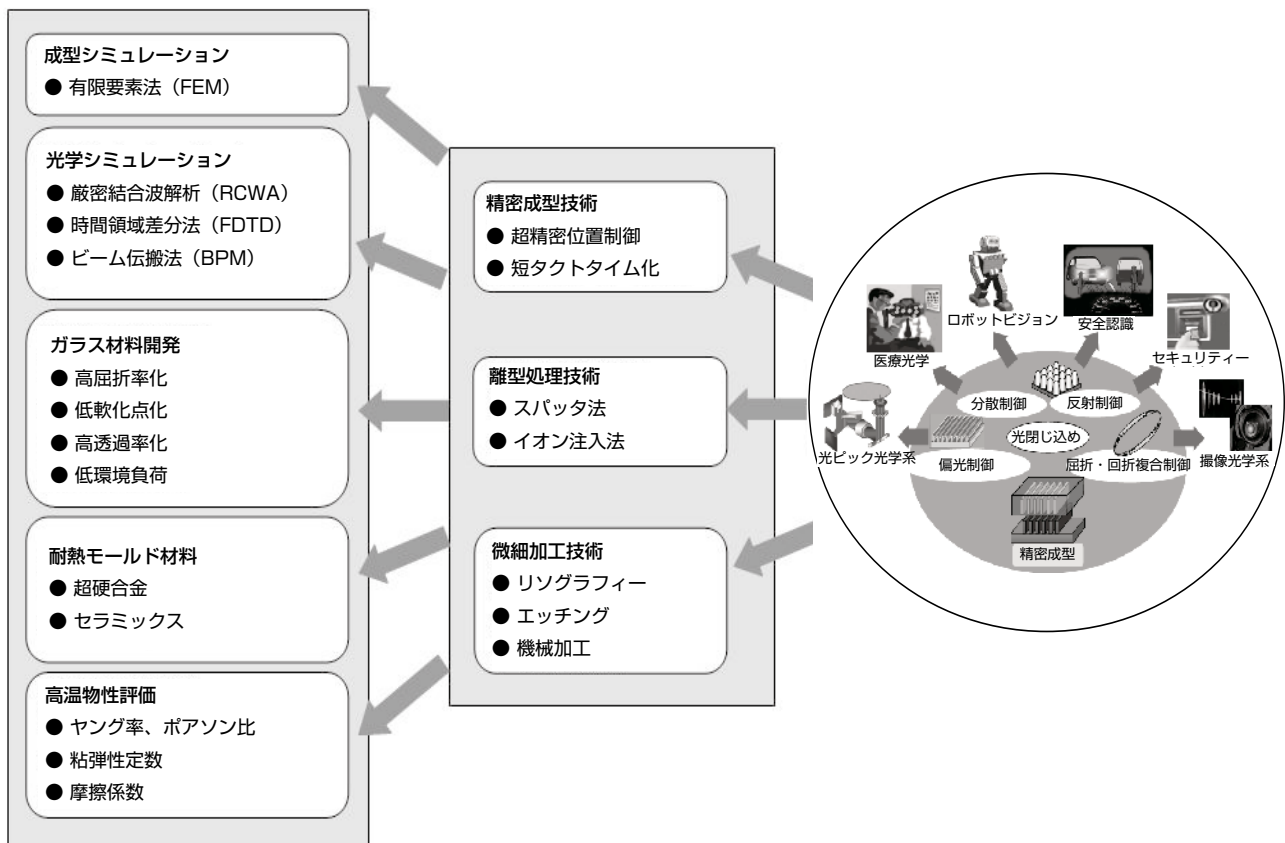


図3 モールド法によるサブ波長光学素子の製品化のためのシナリオ

し、様々な溝幅の耐熱モールドを試作して、ガラスの成型性について定量的に調べた。成型結果を図4に示す。溝幅330 nmのモールドの場合、得られるガラス成型体の構造高さは730 nmに達しており、極めて高精度な成型が可能になることがわかる。このようなモールド形状と、インプリントによって得られるガラス周期構造の形状との相関を定量的に明らかにしたのは、本研究が初めてである。ここで最も重要なポイントは離型条件であった。高温で離型すると、ガラス表面に形成された微細構造が熱変形する。また、低温で離型すると、モールドとガラスの熱膨張率の差に起因する機械的破壊が、モールドあるいはガラスのどちらか、あるいは双方同時に発生する。500 °C以下の比較的低温での成型が可能で光学ガラスの場合、成型に伴うモールドの劣化が抑えられるという点では有利であるが、成型温度付近でガラスの粘度が急激に変化するため、離型のタイミングの見極めが極めて難しくなる。この問題に対して、モールド法に関して十分な経験を有する企業の研究員と、材料物性および微細加工に詳しい産総研の研究者との連携が功を奏し、短期間の内に世界トップの構造高さの離型に成功した。本研究では、図5に示すように6 mm × 6 mmの大面积化も実証済みであり、位相差0.1 λが達成できた^[6]。ガラスモールド法で作製された周期構造で位相差を実現したのは本研究が初めてである。周期300 nmの構造体の成型にも成功しており、溝幅と構造高さの最適化によって、光ディスクドライブへの搭載条件である位相差0.25 λを、波長400 ~ 800 nmの全域で達成することが今後の目標である。

4.2 サブ波長反射防止構造の開発

情報家電から照明に至るまで、幅広い製品に利用されているガラス部材には、光利用効率の向上、あるいは不要な反射光・迷光の抑制が求められている。現状の撮像光学素子やディスプレイパネルには、反射防止膜が施されているが、波長依存性、入射角依存性の無い反射防止という新たなニーズに対応することは、原理上難しい。一方、素

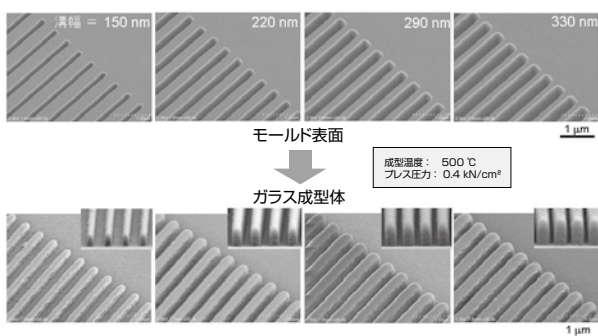


図4 1次元周期構造モールドとガラス成型品の電子顕微鏡写真

子表面へサブ波長周期の錘形構造を形成できれば、高度な反射防止が可能なることは以前から知られていた。

重要なのは、波長よりも小さな錘形を2次元的に配列することである。波長レベルの周期の錘形では光の回折が起こり、反射防止効果は得られない。波長よりも十分小さな錘形の場合、その先端の領域では、ガラスよりも空気の体積分率が大きい。光が構造の内部に進むに連れて両者の体積分率が徐々に逆転するため、様々な角度で入射する光にとって、ガラスと空気の界面が存在しないと見なせる。また、2次元的に等方的な配列によって偏光依存性も無くなる。

これまでに、サブ波長反射防止構造に関する多くの理論解析やものづくり研究の事例が報告されてきたが、そのほとんどが、アクリル系等の樹脂を用いており^[7]、試作の域を出なかった。撮像機器等に必須の材料であるガラスへの反射防止構造としては、電子ビームリソグラフィとエッチング技術を利用した研究がいくつか報告されている^[8,9]。しかし、作製に長時間を要し、大量生産は不可能であった。そこで我々は、これまでに全く報告例が無かったガラスモールド法による反射防止構造の形成を目指すことにした。

本稿では、耐熱モールド材料としてシリカを用いた事例を紹介する。基板表面に成膜した金属薄膜を電子ビームリソグラフィでパターニングし、その後、ドライエッチングによって目的とする周期構造をシリカ基板に形成した。成型したガラス表面の反射率が低くなるようにモールド形状の設計を行い、図6(a)に示す周期300 nm、高さ約550 nmの2次元周期構造を形成した。真空成膜法により、モールド表面に離型膜を形成し、リン酸塩系光学ガラス（屈折率1.6）を約500 °Cで成型したところ、図6(b)に示す高さ約500 nmの反転形状を形成することに成功した^[10]。ここでも、離型のタイミングの見極めと、離型に適したモールド形状の実現が成功の鍵を握っていた。積分球を用いて

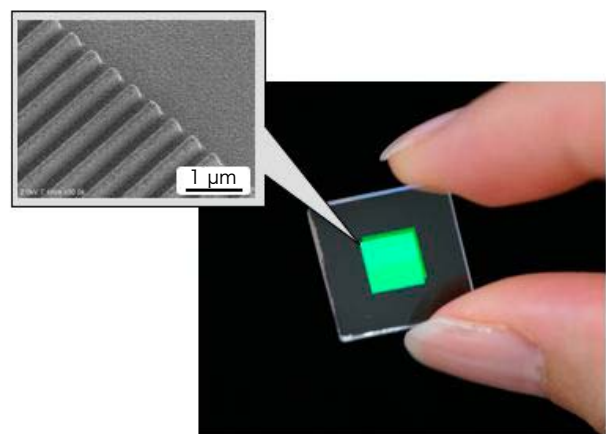


図5 位相差を発生する大面积1次元周期構造

周期構造を形成した光学ガラスの反射率を精密に測定した結果、入射角 0° 、波長462 nmにおいて0.56%であった。この値は、ガラス表面に単層の反射防止膜を形成した場合よりも低く、実用レベルの性能である。図6(c)は試作品の写真である。成型条件の最適化と共に反射率が低下し、斜めからでも下の文字がはっきりと見える。本研究の当面の製品ターゲットは光ディスクドライブ用ピックアップレンズやデジタルカメラ用レンズである。現在は量産性を考慮して、シリカに代えて超硬材料を用いた曲面モールドの開発を進めているが、本研究によって、実用化を阻害していた低コスト化と高い量産性を克服できる可能性が高まった。

5 考察

材料、微細加工、素子化の3つの研究分野において、企業、産総研の研究者が集まり、そこに大学を交えた垂直的な連携による研究は予想以上に効果的である。日本の光学ガラスの技術開発力は世界トップであり、インプリント法によってサブ波長光学素子を作製できる材料が市販品の中にいくつか存在する。しかしながら、量産化という観点では、今後も多くのハードルを超えなければならない。ガラス企業は、集中研究室の中で産総研や材料メーカー、家電メーカーと一体となって、組成改良-成型-素子評価の3つの研究課題に効率的に取り組んでいる。一方、モールド材料については、そもそも、微細加工によってナノレベルの構造を形成する目的で開発されていないため、製造元と摺り合わせながら材料及び製造方法を最適化しなければならない。これらの材料技術に関しては、得られる知見を特許によって権利化し、それが近隣諸国で機能すれば、研究戦略上の大きな問題にはならないと考えている。また、成型温度域のガラス材料は粘弾性的な挙動を示すことが知られているが、成型シミュレーションに必要な高温物性等のデータがほとんど存在しないのが実状である。場合によっては評価装置そのものを開発する必要があるが、これらも材料と同様に権利化が可能であろう。

一方、研究戦略上、非常に難しい問題を抱えているのが、モールド加工、離型膜、精密成型の3つの課題である。これらは、権利化できたとしても、それを保護することが極めて困難で、むしろブラックボックス化した方が得策

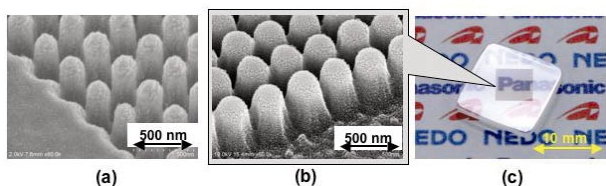


図6 (a) 成型用モールドと(b) 成型された反射防止構造のSEM写真、および、(c) 成型品の外観写真

だという考え方がある。昨今、このような製法に関わる情報を、加工、成膜、成型等の製造装置にレシピとして付属し、商品化する動きが見られる。本研究で導入した装置にもある程度のレシピが付属されており、汎用品であれば誰でも試作できる。これは、装置メーカーが、光学部材メーカーと摺り合わせながら性能を向上させる過程で知識を蓄積した結果であり、それがなければ装置の性能向上はあり得なかったであろう。今後、ガラスモールド法およびインプリント法の技術レベルをさらに向上させ、量産化に漕ぎ着けるためには、材料やシミュレーションを含む各種解析手法の進展だけでなく、加工、成膜、成型等の装置の高機能化が極めて重要である。その部分を光学素子メーカーが全てブラックボックスの中で個別に実施するのか、それとも、装置メーカーと情報を共有しながらノウハウをレシピとして搭載した商品にするのか、やがて選択を迫られる時期が来る。

6 まとめ

ここで紹介した研究事例は、情報家電の中でも比較的小型な光学部材の開発を目的としている。近い将来の応用先である撮像機器や光ディスクドライブなどの製品群は、近隣諸国の追い上げが非常に激しく、常にコストダウンと機能向上の2つの課題に直面しており、立ち止まることが許されない。「ガラスインプリント技術」には、機能向上と部品数削減の両立、あるいは、製造エネルギーとコストの大幅削減の可能性があり、次世代の光学部材製造技術の中核になると期待される。たとえば、本研究によって全波長対応の波長板ができれば、次世代CD・DVDドライブに必要な波長板の枚数は1/3になる。また、反射防止のために別途必要であった成膜プロセスが不要になる。

本稿で述べたサブ波長光学素子に関わる技術分野の研究開発は、やがて、大型ディスプレイや照明器具、太陽電池等の産業分野にも波及し、光の利用効率の向上に伴って、最終的には、情報入出力機器全般の消費エネルギーの削減に貢献することが期待される。そのためには、さらに高度な微細化技術と材料技術の融合が求められることは必至である。これまで、企業同士の連携が中心で、大学や公的研究機関が参画することが希であった本技術分野は、産総研が提唱する「第1種基礎研究」はもちろんのこと、「第2種基礎研究」の領域でも、既に完結した技術であると認識されていた。ところが、技術レベルが向上し、これまでの学問では解決できない新たな問題が生じ、それが障害となって技術的な壁に遭遇することが多くなった。すなわち、「第1種基礎研究」と「第2種基礎研究」の両方に立ち返り、問題点や取り組むべき研究課題の抽出を行い、効率的かつ

タイムリーに問題解決に取り組まなければならない状況が出てきた。ここで特に重要なのは第2種基礎研究をミッションの1つとする産総研の役割である。ニーズに直結した研究課題を設定し、企業および大学に潜在する技術を融合させることによって、研究成果を的確に提示できるポテンシャルを持ち続けなければならない。さらに、本研究事例のように、様々な材料や先端的インフラを集中的に管理・運営し続けなければならない。

謝辞

本研究のガラスモールドに関する研究は、革新的部材産業創出プログラム「次世代光波制御材料・素子化技術」の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託を受けて、松下電器産業株式会社、コニカミノルタオプト株式会社、日本山村硝子株式会社、五鈴精工硝子株式会社、大阪府立大学、京都工芸繊維大学、愛媛大学と共同で行われたものである。

キーワード

光学素子、周期構造、インプリント、ガラス、微細加工

参考文献

- [1] 菊田久雄, 岩田耕一: 波長より細かな格子構造による光制御, *光学*, 27, 12-17 (1998).
- [2] S.Y.Chou, P.R.Krauss and P.J.Renstrom: Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers, *Appl. Phys. Lett.*, 67, 3114-3116 (1995).
- [3] S.Y.Chou, P.R.Krauss, W.L.Guo and L.Zhuang: Sub-10 nm imprint lithography and applications, *J. Vac. Sci. Technol.*, B 15, 2897-2904 (1997).
- [4] T.Yoshikawa, T.Konichi, M.Nakajima, H.Kikuta, H.Kawata and Y.Hirai: Fabrication of 1/4 wave plate by nanocasting lithography, *J. Vac. Sci. Technol.* B 23, 2939-2943 (2005).
- [5] 宮越博史, 森川雅弘, 増田修, 今榮真紀子, 山田基弘, 吉田和三: ナノインプリントを利用したサブ波長構造広帯域波長板の作製, *Optics Japan 2005 予稿集*, 24pD5, 東京 (2005).
- [6] T.Mori, K.Hasegawa, T.Hatano, H.Kasa, K.Kintaka and J.Nishii: Fabrication of sub-wavelength periodic structures upon high-refractive-index glasses by precision glass molding, *Proc. of 13th Micro Optics Conference*, B2, Takamatsu, Japan (2007).
- [7] S.J.Wilson and M.C.Hutley: The optical properties of 'moth eye' antireflection surfaces, *Optica Acta*, 29, 993-1009 (1982).
- [8] H.Toyota, K.Takahara, M.Okano, T.Yotsuya and H.Kikuta: Fabrication of microcone array for antireflection structured surface using metal dotted pattern, *Jpn. J. Appl. Phys.* 40, L747-749 (2001).
- [9] J.Nishii, K.Kintaka, Y.Kawamoto, A.Mizutani and H.Kikuta: Two dimensional antireflection microstructure on silica glass, *J. Ceram. Soc. Japan*, 111, 24-27 (2003).
- [10] 梅谷誠, 山田和宏, 田村隆正, 田中康弘, 西井準治: ガラ

ス表面に反射防止構造を形成する成型プロセスの開発, *精密工学会 2007 年度秋季大会学術講演会予稿集*, L33, 旭川 (2007).

(受付日 2007.9.19, 改訂受理日 2007.11.20)

執筆者略歴

西井 準治 (にしい じゅんじ)

昭和 57 年、東京都立大学大学院工学研究科修士課程を修了後、同年、日本板硝子株式会社に入社。在職中に基盤技術研究促進センターが実施するプロジェクトに出向し、その間の仕事をまとめて、平成 2 年に工学博士号取得。平成 5 年、工業技術院大阪工業技術試験所に入所し、平成 11 年からガラス構造研究室長。平成 14 年から、神戸大学連携大学院自然科学研究科教授を併任。平成 18 年から NEDO 次世代光波制御材料・素子化技術プロジェクトリーダー。また、平成 19 年から大阪府立大学大学院工学研究科客員教授を併任。

査読者との議論

議論 1 技術の統合の展開方法

コメント・質問 (小林 直人)

本研究論文は、「モールド技術」と「ナノインプリント技術」を統合して、従来にはない高い性能の光学素子を実用に供するためのブレイクスルーを行ったと言う意味で、極めて価値の高い内容であると考えられます。この統合の実現こそ第 2 種基礎研究の本質を表しているといえます。

本研究例のように、従来統合が困難と考えられていた技術を組み合わせ、今までにはない技術を創造したと言う経験を活かし、そのような新たな価値を実現するために、今後他の研究分野も含めて研究や技術の展開をどのように考えていけばよいか意見をお聞かせください。

回答 (西井 準治)

学術分野で盛んに取り組まれた「共鳴・サブ波長素子」が、大きな産業にならない理由は、「製造規模」と「コスト」に問題があることは明らかであり、そこをどのように解決するするのか、そのシナリオが重要と考え、本研究への取り組みを開始しました。そこでは、「本格研究」というミッションを掲げている産総研の役割をどのように考えるかが重要だったと思います。研究成果は、国民の生活に直接的に反映されるか、あるいは民間企業を介した製品として間接的に反映されると思いますが、ここで重要なのは、本格研究の課題設定とその後のシナリオであり、国が提示する施策と整合しているか、あるいは、逆に国が進むべき方向を提示するものであるべきだと考えています。つまり、本格研究の課題設定は、ひらめきや思いつき、あるいは思いこみによることなく、政策やニーズとの整合性を考慮に入れて決められることが望ましいと思います。

他の技術と同様に、今後の光技術においても省エネに向けた研究開発が必須だと思います。ここで紹介しました研究事例は、多くの光学機器における「光の有効利用」に関わる基盤になると考えています。

議論 2 共鳴・サブ波長光学の研究の発端

質問 (小林 直人)

今回の新技術の中心的課題である「共鳴・サブ波長」と呼ばれる分野は、1990 年前後に研究が開始されたとのことですが、なぜその頃開始されたのか (逆に言うと、なぜそれまで余り注目されなかったのか)、を教えてくださいませんか。

回答 (西井 準治)

光の干渉や偏光、回折に関連する研究者であれば「共鳴・サブ波長」の領域の光学素子の重要性に気づいていたに違いありません。しかしながら、それを設計する手段、作る手段が存在しなかったため、1900 年代後半まで、研究の対象として取り上げることができなかったのだと

思います。つまり、計算機シミュレーションと微細加工技術の進展がトリガーとなったことは明確です。そのように考えますと、半導体技術の今後の動向によっては、また新たな光技術が生まれてくる可能性があります。

議論 3 統合における技術的ポイント

質問（小野 晃）

本研究ではガラスインプリントの方法で構造的複屈折波長板とサブ波長反射防止構造の製造に成功しています。技術的には図3にある要素技術を統合して、「精密成型技術」、「離型処理技術」、「微細加工技術」の3つの中間統合技術を実現したことが成功の要因と理解します。それぞれの成果を得るために、ポイントとなった統合の方法を、差し支えない範囲で述べていただけますか。

回答（西井 準治）

本文の3の後半および4の前半に述べましたように、最終目標を達

成するために必要となる複数の要素技術に関する研究課題を的確に抽出し、それらを統合するためのシナリオを明確にすることが重要だったと思います。そのために、平凡なプロセスではありますが、研究成果を将来の製品化に活用したい企業、産総研、大学の研究者が納得するまでディスカッションを繰り返しました。その結果、限られた研究費を有効に活用するためには集中研方式が好ましいという観点では同意が得られましたが、「精密成型技術」と「離型処理技術」については、企業各社のノウハウに依存する部分が多く、産総研や大学はその領域に深く立ち入ることを控え、企業を支援する形で慎重かつ戦略的に取り組むことにしました。しかしながら、実際には、同じ場所で共同研究を実施しているため、お互いに知り得なかった様々な知見を共有できていることも事実です。現時点ではこれ以上の情報開示ができないことをご理解頂きたいですが、公的研究機関に公的資金を投入していることも認識しておりますので、権利化できない部分については、ノウハウ集等のかたちで残し、厳正な管理・運用をしていきたいと考えております。