

# インプリント法による高機能ガラス光学素子の作製

北海道大学 電子科学研究所

西井 準治

## Fabrication of highly-functional optical devices using glass imprinting

Junji Nishii

Research Institute of Electronic Science, Hokkaido University

### 1. はじめに

ガラスはディスプレイ、ストレージ、撮像機器を支える重要な光学部材であり、高機能化を目指した様々な取り組みが実施されている。ガラスを光学部材に加工する手段としてモールド法<sup>1,2)</sup>が幅広く用いられているが、技術的には成熟期を迎えた感があり、新たな技術展開が模索されている。本稿では、ガラス部材の表面に高い光機能を発現する微細構造を形成するためのインプリント技術の研究開発の現状について紹介する。

### 2. モールドの微細加工とガラス成形

光の波長レベルの微細構造をガラス表面に形成するためのモールド基材には、優れた機械的強度と微細加工性を有する SiC が用いられる。

SiC の表面微細加工は、電子線描画法あるいは紫外レーザー干渉露光法によるレジストのパターニングとドライエッチングによって行う。一方、光の波長よりも大きなマイクロオーダーの構造を形成するためのモールド基材には、高い耐熱性とダイヤモンドバイトによる切削加工性に優れた NiP が用いられる。樹脂の射出成形用モールドに幅広く使われているアモルファス NiP の耐熱温度はおよそ 250°C が限界であり、それ以上の温度に加熱すると結晶化によって亀裂が入るが、本研究ではそのような問題点を解決して 500°C 以上の耐熱性を実現している。

微細構造転写のためのガラスインプリントは、モールド表面の酸化を防止するために成形室内を窒素置換した後に、1 Pa 程度の真空中で行うのが一般的である。ガラスとモールドとの融着を抑えるため、ガラスの粘度が  $10^6 \sim 10^8$  Pa·s になる温度域で成形する<sup>3)</sup>。この値は樹脂の成形に比べて 2 桁程度高い。したがって、モールド形状、離型膜の最適化およびモールドと融

〒001-0021 札幌市北区北 21 条西 10 丁目  
TEL 011-706-9377  
E-mail: nishii@es.hokudai.ac.jp

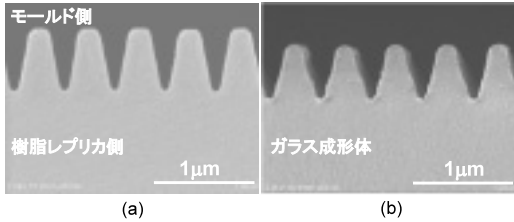


図1 SiC モールドの樹脂レプリカ (a) およびリン酸塩系ガラスの成形体 (b) の断面 SEM 写真

着しにくいガラス組成の開発が、高アスペクト比の周期構造を得る上で重要である。図1(a)は、周期 500 nm の SiC モールドのレプリカを紫外線硬化樹脂で作製し、その断面を走査電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果である。また、(b)は成形後のリン酸塩ガラス(住田光学 K-PSK-100, At=415°C)の断面である。溝側壁を傾斜させ溝幅を広くすると成形体の高アスペクト比(成形体の構造高さ÷構造の周期)が大きくなる。この傾向は、有限要素法による成形シミュレーションの結果ともよく一致する<sup>4)</sup>。

このようなモールドの超精密加工とインプリント技術を使って、光学設計に基づいてガラス光学素子を作製した事例を以下に紹介する。

### 3. インプリント法で作製したガラス光学素子

#### 3.1 反射防止レンズ

光の波長よりも小さな周期の円錐に近い構造を光学表面に2次元的に形成すると、波長依存性や入射角依存性が小さな反射防止効果を発現することが1980年代に報告された<sup>5)</sup>。これまで、樹脂プレートへの転写に関する報告はあるが<sup>6)</sup>、インプリント法によるガラスへの形成は、筆者らのグループが公表した2008年の事例がおそらく初めてであろう<sup>7)</sup>。研究開始当初は、SiC レンズモールドへの反射防止構造の形成に紫外線レーザー干渉露光とドライエッチングを用いていたが、勾配が急峻になるモールド周囲のレジストパターンの周期が中央部よりも長くなり、パターニング自体の歩留まりも下がると

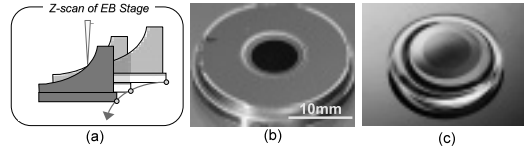


図2 電子線描画法による反射防止レンズモールドの作製法 (a)、SiC モールド (b)、およびリン酸塩系ガラスレンズ (c)

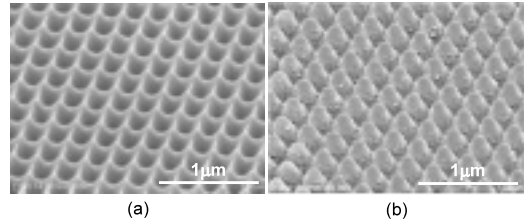


図3 電子線描画とドライエッチングで作製した SiC レンズモールド (a) とガラスレンズ表面 (b) の SEM 写真 (成形体周期 250 nm)

という問題が生じた。そこで、2009年に電子線曲面描画法の開発を開始し、曲面全域で周期が一定のパターンを確実に形成できるようになった。図2は、電子線描画法の概略と、作製した SiC モールドおよびガラスレンズの外観である。モールドおよびレンズの中央部分の反射が抑えられていることがわかる。また、両者の中央部分の電子顕微鏡写真を図3に示す。構造周期は 250 nm である。観察時にレンズ表面に異物が付着したが、厳密結合波解析 (RCWA) で設計した形状<sup>8)</sup>に近い構造が正確に転写できている。形状の先端部分が丸みを帯びているが、この領域が反射率に及ぼす影響はあまり大きくなく、先端を鋭利に尖らせたとしても 0.1% 以下の反射率の改善しか期待できない。それよりも、成形レンズのハンドリング性や洗浄等に対する耐久性を考慮すると、このような丸みを帯びた形状の方が好ましい。

最近では成形技術がさらに進化して、レンズの両面にほぼ理想通りの反射防止構造を形成できるようになった。図4はレンズ両面それぞれの反射率の測定結果である。光学研磨された平坦ガラスの片面の反射率は5%以上であることから、広い波長範囲で優れた低反射が実現でき

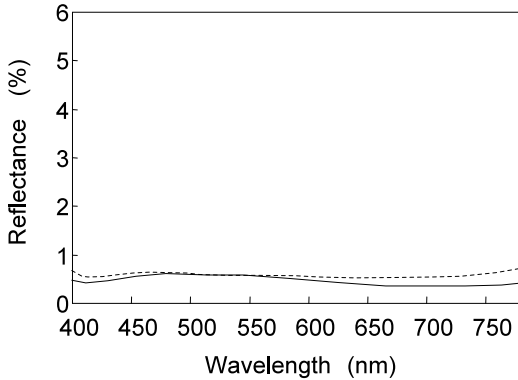


図4 レンズの両面に形成した反射防止構造のそれぞれの反射率（構造が無い場合の反射率は約5%）

ている。

### 3.2 屈折・回折レンズ

レンズの球面収差は非球面化によってほぼ解消できるが、色収差については、昔ながらの分散の異なる2枚のレンズの組み合わせによって補正されている。1990年代から、レンズと回折格子の複合化による色収差補正が試みられているが、未だに幅広く普及するまでには至っていない<sup>9,10)</sup>。その理由は、表面に回折格子を形成したレンズモールドの耐熱性と機械的強度が十分では無かったからである。本研究では、耐熱性の高いNiPモールドによるガラス成形技術の開発に取り組み、屈折・回折レンズの成形に成功した。図5(a), (b)は、切削加工によって回折格子を形成したレンズモールドと、自主開発した高屈折率ガラス ( $\text{Li}_2\text{O}-\text{Nb}_2\text{O}_5-\text{P}_2\text{O}_5$ 系,  $n_d=1.66$ ,  $A_t=457^\circ\text{C}$ ,  $v_d=49$ ) を成形した結果である。ほぼ100%の転写率が達成されており、繰り返し成形してもモールド表面に亀裂が生じることはない。

上述のように、ガラスレンズの表面に設計通りの回折格子をインプリントする技術は確立できたが、それだけでは色消しレンズとしてカメラに搭載することはできない。その理由は、回折効率の波長依存性が解消されていないからである。すなわち、空気とガラスとの屈折率差を

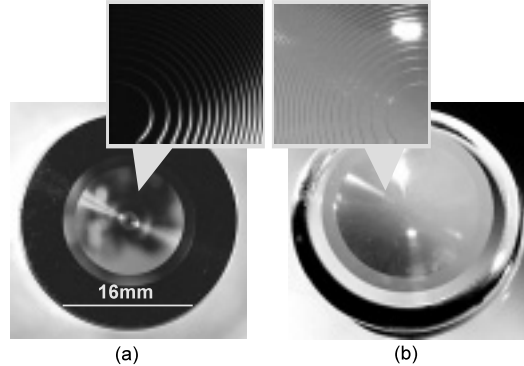


図5 機械加工によって作製したNiPレンズモールド(a)と、自主開発したリン酸塩系低分散ガラスレンズ(b)

使って光を回折させるため、ガラスの屈折率の波長依存性に応じて回折効率も変化するのである。この問題は、ガラスよりも屈折率が低く、アッペ数の小さな樹脂を回折格子の表面に貼り合わせることで解消できる。既に平面回折格子でこのようなハイブリッド化を行い、95%以上の回折効率が達成できている。今後は、レンズにおいて同様なハイブリッド化を行うと共に、ガラスとガラスのハイブリッド化によって、さらなる高機能化を目指す予定である。

## 4. おわりに

ガラスインプリント法に関する最近の研究成果をまとめた。リソグラフィとドライエッチングを用いたSiCモールドの微細加工、さらにはダイヤモンドバイトを用いたNiPモールドの微細加工に取り組んだ。前者では、光の波長よりも小さな周期の2次元円錐構造を形成したSiCモールドを開発し、反射防止レンズの成形に成功した。また後者では、切削加工によって回折格子の加工を行い、自主開発した高屈折・低分散ガラスを用いた屈折・回折複合レンズを開発した。低屈折・高分散樹脂あるいはガラスとのハイブリッド化によって、可視全域での色収差補正レンズの実現が近い。今後も、本稿で紹介した基盤技術が活用され、ガラスが有する高い信頼性を犠牲にすることなく、光の反射、

屈折，回折，位相を自在に制御できる高機能光学部材が様々な機器に搭載されることを期待している。

#### 謝辞

本研究は，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行われた。本稿に記載したデータは，パナソニック(株)，コニカミノルタオプト(株)，日本山村硝子(株)，五鈴精工硝子(株)，産業技術総合研究所，大阪府立大学，京都工芸繊維大学，愛媛大学との共同研究によるものである。

#### 参考文献

- 1) 特開昭 47-11277; ガラスレンズの成形方法およびその装置.
- 2) 広田慎一郎, 宇野 賢; ニューガラス 11, 66 (1996).
- 3) T. Mori, K. Hasegawa, T. Hatano, H. Kasa, K. Kintaka, J. Nishii; Jpn. J. Appl. Phys., 47, 4746 (2008).
- 4) T. Mori, Y. Kimoto, H. Kasa, K. Kintaka, N. Hotou, J. Nishii, and Y. Hirai; Jpn. J. Appl. Phys., 48, 06 FH 20-1~4 (2009).
- 5) S. J. Wilson, and M. C. Hutley; Opt. Acta, 29, 993 (1982).
- 6) 前納良昭; 光技術コンタクト, 43, 38-50 (2005).
- 7) 田中康弘; ニューガラス 23, 32 (2008).
- 8) K. Yamada, M. Umetani, T. Tamura, Y. Tanaka, H. Kasa and J. Nishii; Appl. Surf. Sci., 255, 4267 (2009).
- 9) 春原正明, 梅谷誠, 清水義之, 白藤芳則; Nikkei Mechanical, 458, 40 (1995).
- 10) 中村徹, 鈴木憲三郎, 高瀬裕嗣, 倉田俊彦, 宮川晶子, 山口修一, 田村 淳, 中山尚行; Optics Japan 予稿集, p. 462, 2005 (東京).