ガラスレンズの製造技術

Fabrication of glass lenses / Hideo TAKINO

株式会社ニコン 瀧野日出雄

1. は じ め に

カメラやCDドライブ、さらに最近では携帯電話にまでレンズが取り付けられており、日常生活においても光学部品を用いた製品に触れる機会が多い。光学部品は古い歴史を持っている¹⁾。たとえばエジプトからは紀元前16世紀頃のミラーが、イラクからは紀元前7世紀頃のレンズが出土しているという。また、身近な光学部品である眼鏡は14世紀頃にすでに普及し始め、さらに16世紀には望遠鏡や顕微鏡なども作られるようになったらしい。このようにミラーやレンズは古くから使われていて、近年ますます広い分野において利用されている。この光学部品の製造技術の発展に対してこれまで精密工学は大きく貢献してきており、今後果たす役割も大いに期待できる。そこで、専門外の方や学生会員に精密工学の理解を深めて頂こうというこの連載記事の趣旨に沿うように、できるだけ平易にレンズの製造技術を解説する。

2. ガラス製球面レンズの製造技術

レンズは通常、ガラス、結晶材料、樹脂のいずれかを用いて製造される。レンズ用のガラスは、一般のガラスと同じく SiO_2 を主成分とするものが多い。代表的なものに、 SiO_2 だけからなる石英ガラスや、 SiO_2 と B_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 等からなるBK7などがある。結晶材料としては、蛍石 CaF_2 や水晶 SiO_2 、シリコン Si 、ゲルマニウム Ge などがある。 Si や Ge は金属光沢を有する固体であるため一見、光を通すようには思えないが、赤外光を良好に透過する。樹脂としては、アクリルなど加熱すると軟化するものや、CR39（ジエチレングリコールビスアリルカーボネート）など加熱すると硬化するものが用いられる。いずれにしても、透過率が良好で、光学的に均質な材料がレンズの素材となる。

以上の材料のなかで、特に高い形状精度が要求されるレンズには、寸法や光学物性の安定性に優れたガラスや結晶材料が用いられる。図1には、ガラス製の球面レンズの代表的な製造法を示す。この製造法は、レンズの素材としてのガラスブロックを製造する工程^{2,4)}と、レンズの形状を創成する工程⁵⁻⁷⁾と、コーティングの工程^{8,9)}とに大きく分けることができる。以下に、各工程について説明する。

図1 ガラス球面レンズの製造工程

2.1 ガラスの製造(原料の調合からアニールまで)

レンズやプリズムに用いられるガラス、すなわち光学ガラスは約200種類もある。まず、この中で製造したい光学ガラスに応じて、原料を適当な比率で調合し、混合する。そして、混合した原料を1000-1500℃程度で溶解する。溶解方法として代表的なものに、るつぼ溶解法と連続溶解法とがある。るつぼ溶解法は、高温の炉に設置されたるつぼ中で原料を溶解し、工程中に一部攪拌操作を加えた後、徐冷してガラス塊を得る。るつぼは粘土や白金製である。るつぼ溶解法はガラスの収率は高くないが、多品種少量生産には適している。

一方、図1①に示したのは連続溶解法である。これはガ

図2 連続溶解装置から引き出されるガラス

図3 ダイレクトプレス

図4 カップ砥石

図5 ダイヤモンドペレットを貼り付けたラップ皿

ラスの収率も高く大量生産に適した方法である。連続溶解装置は図1①のように原料を溶解する槽(溶解槽)、泡をぬく槽(清澄槽)、均質化し成形温度に調整する槽(搅拌槽)などのいくつかの槽が連結されたものである。この方法では、最終段の槽から得られる熔融状態のガラスを棒状に成形し、徐冷しながら引き出す。図2に示す写真は、連続溶解装置から引き出された棒状のガラスである。このガラスを切断し(図1②)、加熱プレスして(図1③)、レンズの概略形状を作る。なお図3のように、熔融状態のガラスをそのままプレスして、レンズの概略形状を成形することもある。以上のように製造されたガラスは、内部の歪みを除去するためにアニールされる(図1④)。アニールとは、ガラスを電気炉中で加熱、定温保持、徐冷の過程にて熱処理する工程である。高い品質が要求される場合はアニールに数ヶ月も要することがある。

上記の溶解法とは異なる技術によって製造されるガラスもあるので、ここで簡単に紹介しておこう。石英ガラスは、紫外光から近赤外光において良好な透過率を有し熱膨張率も小さいことで知られる。そのなかでも不純物が少なく、透過率、レーザ耐久性などの品質がとりわけ高いものが合成石英ガラスである。合成石英ガラスの製造には、直接加水分解法やスート再溶解法、プラズマ法など、CVD(Chemical Vapor Deposition)を主体にした方法が一般的に用いられる。これらは、熱やプラズマなどのエネルギーにより解離した原料ガスを反応させ、その反応生成物である SiO_2 を堆積させることによって石英ガラス塊を製造する方法である。

2.2 レンズの形状創成(研削から心取りまで)

光学面の形状精度は、通常は $10^{-1} - 10^{-2} \mu\text{m}$ 程度が求められる。一般的には、使用する光の波長が短くなるほど、高

い形状精度が求められる。最近注目されている波長13nmという短波長の光(EUV光、極端紫外光)で使用する光学部品にいたっては $10^{-3} \mu\text{m}$ 以下、すなわちサブナノメートルの精度が必要である¹⁰⁾。一方、表面粗さに関しては、一般的には $10^{-2} \mu\text{m}$ 以下の平滑性が要求される。本節で述べるレンズの表面形状を加工する工程では、このような要求を満たすための精密加工技術が必要となる。

2.2.1 研削

前記のように製造したガラスを、研削機によって球面形状に加工する。ここで用いられる研削機はカーブジェネレータとも呼ばれる。この加工では、図1⑤のように被加工物を回転させ、これに回転するカップ砥石(円筒状の砥石)を押しつける。そしてカップ砥石を、加工したい球面の中心を支点として円弧運動させる。これにより任意の曲率の球面を創成することができる。図4にカップ砥石の写真を示す。砥石には#60-200程度が用いられる。ここで、記号#は粒度であり、砥石に用いられている砥粒の大きさを表す。この数値が大きくなるほど砥粒径は小さくなる。この工程において、被加工物の除去量は0.5-2 mm程度であり、得られる表面粗さ(最大高さ)は5-10 μmRz 程度である。

2.2.2 スムージング

つぎに、図1⑥のようにダイヤモンドペレットを多数貼り付けた金属製の皿(ラップ皿)を、前節のように得られた研削面に密着させて揺動運動させる。これにより表面粗さを向上させながら、研削で生じたクラック層を除去する。ダイヤモンドペレットとは、ダイヤモンド砥粒を金属や樹脂を結合剤にして固めた砥石であり、ここでは#800-2000程度が用いられる。図5にはラップ皿の写真を示す。この工程では、被加工物の除去量は20-50 μm 程度であり、得

図6 ピッチへの溝切り

図7 ピッチを塗布した研磨皿を用いた研磨

られる表面粗さは $0.3\text{--}3\ \mu\text{mRz}$ 程度である。なおスムージングは、ダイヤモンドペレットのような固定砥粒ではなく、皿と被加工面との間に酸化アルミ Al_2O_3 などの遊離砥粒を介在させて行われることもある。これは砂かけと呼ばれる。

2.2.3 研磨

図1⑦のように被加工物を回転させ、研磨液を供給しながら研磨皿を揺動させることによって、スムージングされた面を磨く。これによって、鏡面化と形状精度の向上を行う。図1⑦には複数のレンズを同時に磨く様子を模式的に示しているが、1個ずつ研磨する場合もある。研磨皿は、金属製の皿にピッチ(アスファルトなど)を数mmの厚さで塗布したり、発泡ポリウレタン、フェルトなどを貼り付けたりして作られる。

ピッチは研磨皿に塗布して成形した後に、図6のように溝切りして用いられる。図では、一例としてナイフでらせん状の溝を切っている様子を示すが、格子が切られる場合や、網目形状を付与する場合もある。図7の写真は、ピッチを塗布した研磨皿で研磨している様子である。ピッチは高精度で平滑な面を得るのに有効である。図8の写真は、発泡ポリウレタンを貼り付けた研磨皿で研磨している様子である。発泡ポリウレタンを用いると研磨皿を高速度高圧力で運動させることが可能となり、高い除去速度を得ることができる。研磨液には、酸化セリウム CeO_2 や酸化ジルコニウム ZrO_2 などの砥粒を水に混ぜたものが用いられる。砥粒の平均粒径は一般的には $1\ \mu\text{m}$ 程度以下である。この工程では被加工物の除去量は $5\text{--}20\ \mu\text{m}$ 程度であり、得られる表面粗さは $10\ \text{nmRz}$ 以下程度である。

図8 発泡ポリウレタンを貼り付けた研磨皿を用いた研磨

(a) 被検レンズの上に原器を乗せようとしている様子

(b) 原器を乗せて観察した干渉縞

図9 研磨されたレンズの形状精度の評価

形状精度の評価は図9(a)のように、精度よく作られた原器と被加工面とを重ね合わせて、その隙間に形成される干渉縞を調べることにより行われる。図9(b)には、干渉縞の一例を示す。なお、形状精度の評価にはレーザ干渉計が用いられることも多い。代表的なものにはフィゾー干渉計がある。

2.2.4 心取り

レンズの両面が研磨された後に、レンズの外周を削る。この工程の目的は、レンズの外径を所定の寸法にするとともに、レンズの外径に対する中心とレンズの光軸とを一致させることにある。この工程は心取りと呼ばれる。心取りにも種々の方法があるが、図1⑧に示したのはベルクランプ方式である。この方式では、同軸上にある2つのホルダでレンズを完全に密着するように挟む。これにより、レンズの光軸をホルダの中心軸に一致させることができる。このままの状態、レンズを回転させながら外周を所定の寸法に研削する。

2.3 コーティング

反射防止のために、レンズ表面に薄膜をコーティングす

図 10 各工程完了後の被加工レンズ
(同一のレンズではない)

図 11 非球面レンズの効果

る。光学用の薄膜は ZrO_2 、 Al_2O_3 、 MgF_2 などの金属の酸化物や弗化物が多く、その厚さの精度は光の波長以下にしなければならない。コーティングには、図 1 ⑨に示すように真空蒸着法が用いられることが多い。真空蒸着法とは、 10^{-3}Pa 程度の真空中で蒸着したい固体物質を加熱して気体分子として蒸発させ、これをレンズ面に付着させる方法である。蒸着物質の加熱には抵抗加熱や電子ビーム加熱などが用いられる。

本章の最後として、一連の工程で得られたレンズ面の写真を図 10 に示す。徐々に平滑化され、外観が変化している様子がうかがえる。

3. 非球面レンズの製造技術

3.1 非球面レンズ

ところで、図 11 (a) に示すように球面レンズでは、厳密に言えば、入射した光を一点に集光できない。たとえば、レンズ面上の光が通過する位置や、波長によっても集光する点異なる。このような現象は収差と呼ばれる。鮮明な像を得るためには収差をできるだけ小さくする必要がある。収差は、複数の球面レンズを組み合わせることにより低減させることができる。しかし、これは光学系の大型化や、重量の増大、透過率の低下などを招く。

図 12 超精密研削による非球面創成

図 13 スモールツール研磨による非球面研磨

収差低減の手段として、非球面レンズが提案されている。非球面レンズは、図 11 (b) に示すように光が一点に集光するように、レンズ面の場所ごとに曲率半径を変えたレンズである。非球面を用いれば少ないレンズ枚数で光学系を構成できるため、前記のような課題を解決できる。しかし、全面において曲率半径が一定でないために、図 1 に示した研削から研磨に至る工程は適用できない。

3.2 非球面レンズの加工

非球面レンズには種々の製造法がある。そのなかで、高い形状精度や平滑性が要求される非球面は、コンピュータ制御(数値制御、NC 制御)の機能を有する超精密研削機¹¹⁾とスモールツール研磨機¹²⁻¹⁴⁾を用いて、レンズ素材であるガラスや結晶材料を加工して製造されることが多い。

この場合、まず図 12 のようにレンズ素材を研削して、非球面の概略形状を創成する。この研削では、被加工物を回転させながら、非球面の設計形状に倣うように砥石を移動させて加工を行う。軸対称形状の非球面であれば、砥石は被加工物に対して直交 2 軸方向に NC 制御して移動させればよい。しかし、このように研削しても、加工機や砥石などにかかわる種々の誤差要因によって、加工された面には形状誤差が生じていることがある。この際には、形状誤差に基づいて砥石の移動軌跡を補正して、再加工して所望の精度を得るようにする。

つぎに図 13 のようにスモールツール研磨によって、研削面の平滑化と形状精度の向上を図る。これは、小径の工具を多軸制御することによりレンズ面上に走査させて研磨を行うものである。小径であるために、非球面のように場所ごとに曲率半径の異なる面であっても、任意の場所に工具をほぼ密着させて研磨できる。工具は、金属製の小径皿にピッチを塗布したり、発泡ポリウレタンを貼り付けたりして作られる。

スモールツール研磨では、誤差量が多い場所に工具を長時間滞在させることにより、その誤差を除去してレ

図14 研磨機を制御するためのNCコードの算出

レンズ面の形状精度を向上させる。すなわちこの研磨を実施するためには、上記の研削とは違い、レンズ面上における工具の滞在時間分布を最適化し、単位時間当たりの加工形状 $f(x, y)$ やレンズ面の誤差形状 $g(x, y)$ 等のデータを入力する。そして、計算除去形状 $h(x, y)$ (除去形状の予測値) と誤差形状 $g(x, y)$ との差が最小になるように、工具の滞在時間分布 $t(x, y)$ を計算する。出力されるのは、多軸の研磨機を制御するのに必要な、工具の経路や滞在時間などにかかわる指令が記述されたNCコードである。しかしながら、こうして研磨を行っても、除去速度の不安定性などが原因となって、1回で所望の形状精度が達成できるとは限らない。このため、所望の精度を達成するまで研磨と形状計測とが繰り返されることが多い。形状計測には、プローブを用いた3次元座標測定器や、干渉計が用いられる^{15, 16)}。なお、このスモールツール研磨は、図1の工程で作られた球面レンズの高精度化を図るのにも有効である。

4. おわりに

本稿では、主としてガラスを素材に用いた場合について、球面や軸対称非球面レンズの代表的な製造技術を解説した。光学部品はこの他にも、非軸対称の自由曲面、回折光学素子、レンズアレイなど様々な形態のものがある。また、寸法においても1mm以下の小さなものから1mを超える大きなものまで様々である。それらの製造には本稿で紹介したものとは異なる技術が用いられることもある。また、プラスチック成形、ガラス成形、樹脂とガラスからなる複合型レンズ成形など、非球面を量産するうえで有効な技術

もいろいろとある。本稿で述べていないこれらの製造技術も精密工学の立場からは興味深いものが多い。専門外である方や学生会員の方にも光学部品の製造技術に関心を持って頂くことで、この分野の研究開発がさらに活発となれば幸いである。

本稿を作成するにあたり、株式会社ニコンの佐藤栄治氏、西塚公次氏、小松宏一郎氏、吉富靖氏、野村和司氏から貴重なご助言を頂いた。また写真は、西塚公次氏からご提供頂いたものと、株式会社ニコンが発行したパンフレットから転載したものとで構成した。各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 鶴田匡夫: 光とレンズ, 日本工業新聞社 (1985).
- 2) 作花清夫, 境野照雄, 高橋克明編: ガラスハンドブック, 朝倉書店 (1975).
- 3) ニューガラスハンドブック編集委員会: ニューガラスハンドブック, 丸善 (1991).
- 4) 泉谷徹郎: 光学ガラス, 共立出版 (1984).
- 5) 応用物理学会 光学懇話会編: 新編 レンズ・プリズムの工作技術, 中央科学社 (1969).
- 6) ヴィリー・チョムラー著, 浅野俊雄訳: レンズ・プリズムの精密加工, 恒星社厚生閣 (1969).
- 7) 吉田正太郎: レンズとプリズム—その研磨の実際—, 地人書館 (1985).
- 8) 生産現場における光学薄膜の設計・作製・評価技術: 技術情報協会 (2001).
- 9) 光・薄膜技術マニュアル: オプトロニクス社 (1989).
- 10) 木下博雄, 渡邊健夫, 浜本和弘: 極紫外リソグラフィ, 光学, **31**, 7 (2002) 524.
- 11) 田中克敏: 非球面レンズの製作方法と超精密非球面加工機, 光技術コンタクト, **38** (2000) 592.
- 12) 野村和司: 非球面光学素子のスモールツール研磨, 光技術コンタクト, **32** (1994) 449.
- 13) 安藤学: 軸対称非球面光学素子の研磨, 光技術コンタクト, **33** (1995) 46.
- 14) 品田邦典: 光学素子の研磨加工技術, 光学, **25** (1996) 76.
- 15) 横関俊介: 非球面計測の現状と動向, オプトロニクス, **3** (1986) 64.
- 16) 精密工学会第274回講習会「非球面形状計測の基礎」テキスト (2001).