

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「多数個取り曲面ナノインプリント装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成26年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社キャンパスクリエイト

目次

第1章 研究開発の概要

- 1-1. 研究開発の背景・研究目的および目標
- 1-2. 研究体制
- 1-3. 成果概要
- 1-4. 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2-1. 研究目的及び目標
- 2-2. 一個取り原理検証機による条件検討
 - 2-2-1. UV式一個取りガス圧ナノインプリント装置（ α 機）の設計・開発
 - 2-2-2. レンズ成形用モールドの作製
 - 2-2-3. 被成型樹脂のレンズ表面へのコート
 - 2-2-4. レンズ表面への無反射微細構造の成型評価
- 2-3. 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（ β 機）の設計・開発・検証
 - 2-3-1. レンズ成形用モールド作製技術の開発
 - 2-3-2. 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（ β 機）の開発
 - 2-3-3. 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（ β 機）の試運転評価
- 2-4. 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（ β 機）の改造及びプロセスの最適化
 - 2-4-1. 樹脂コート条件の最適化
 - 2-4-2. レンズ成形用モールド作製条件の最適化
 - 2-4-3. レンズ表面への無反射微細構造形成における装置及びプロセスの最適化によるサイクルタイムの向上
 - 2-4-4. 安全性及び操作性の向上

最終章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1-1. 研究開発の背景・研究目的および目標

開発の背景

情報通信分野や医療分野では、情報通信端末等の高度化により高精度な撮像技術が求められており、その鍵を握る重要なパーツの一つが光学レンズである。

一般的に光学レンズは、光学ガラスや光学樹脂を研磨あるいは成型することで作製されるが、その表面は空気界面となり屈折率差により光の一部を反射する。反射率はフレネルの式で表すことができ、 R を反射率、 n_1 を媒体1の屈折率、 n_2 を媒体2の屈折率とすると、以下の式となる。

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

空気層 ($n_1=1$) からガラス板 (n_2) へ光が入射することを考えると $n_2=1.5$ で、 $R=4\%$ 、 $n_2=1.7$ で $R=7\%$ 近くにもなる。この反射光は光学面が増えると効率を著しく低下させ、光学レンズが1枚で光学面は2面となることを考えると、4枚で8面を仮定した場合、30%近くロスすることになる。

また、この反射光が迷光となって別の面で反射したり、鏡筒内面で反射したりすると、ゴースト・フレアの原因となる。フレアとは、強い光源方向にレンズを向けた時、レンズ面や鏡筒で有害光が反射して発生する光のカブリ現象であり、カメラレンズにおいては、画像の一部や全体が白っぽくなり、画質を低下させる要因となる。レンズ内面での再反射によって生じるフレアは反射面の形状や曲率によって様々なものを生じ、特に凹レンズ面や絞りの前後で強い光の反射が起これると、ゴーストと呼ばれる比較的はっきりとした像が発生する (図 1-1)。

これらは、受光素子がノイズとして入り込むことで、様々な光学系において画質劣化、信号劣化の原因となる。



図 1-1. 写真上のゴースト

こういった光学レンズの界面反射防止には、薄膜のコーティングを行うことが一般的である。単層コーティングでは、薄膜の厚みを設計波長の 1/4 波長程度の厚みにすることで、薄膜表面からの反射とレンズ表面からの反射との相殺的な干渉を起こし、反射光を減らしている。空気界面を考慮すると、薄膜の理想的な屈折率は、レンズ材料の屈折率の平方根であるが、現実的な耐久性や安定性を持つ材料としてフッ化マグネシウム (MgF_2 : $n=1.38@550\text{nm}$) が多用されているが、反射率はおよそ 1.5%程度までしか低減できない上に、設計波長以外の波長では膜厚が 1/4 波長にならないため、波長依存性が大きい。

この反射率自体をさらに低減させるために、また広帯域における反射率低減を実現させるために、現在主流となっているのが、多層膜による反射防止膜である。薄膜の屈折率と膜厚を波長に合わせて設定することで、干渉的な相殺効果を高度化し、膜数を増やすことでさらなる低減と波長依存の低下を図っている (図 1-2)。最近では、10 層を超える反射防止多層膜も開発されてきたが、可視光全域にわたって反射防止を行うことは難しく、また入射角の依存性も高く、多くの課題がある。

また、薄膜の形成手法は、様々な手法があるが、主流となっているのは物理気相成長法 (真空蒸着、スパッタリング、イオンプレーティング) である。膜厚の制御が行い易いという利点から、反射防止コートが提唱された当時から使用されている手法である。しかしながら、実用できる蒸着種が限られていることもあり、最近では、反射率低減や波長依存性低減などの性能面、及びコスト面で急速に高度化する市場のニーズに応えることが困難になってきている。

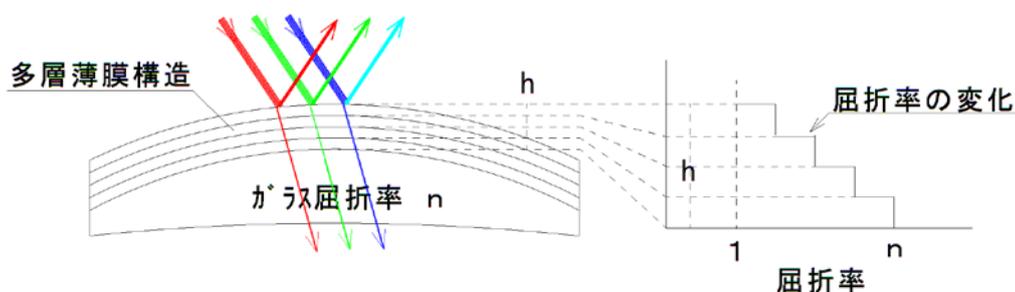


図 1-2. 多層膜反射防止コーティングされたレンズ (従来技術)

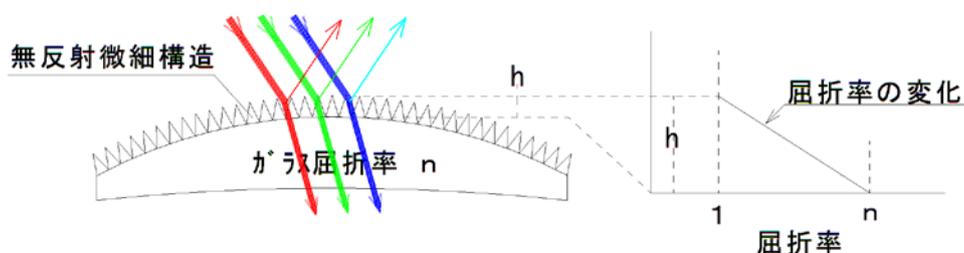


図 1-3. モスアイ構造体が形成されたレンズ

これらの課題を克服する方法としてレンズ表面にモスアイ（蛾の目）構造と呼ばれる無反射微細構造を形成し、大幅にレンズの性能を向上することが試みられている（図 1-3）。モスアイ構造とは、可視光の波長よりも小さいサイズの楔形状が無数に並んだ構造体であり、蛾の目の表面に存在する微細構造に由来している。1962年に Karolinska Institute の C.G.Bernhard らにより発見され、1982年に英国 National Physical Laboratory の S.J.Wilson と M.C.Hutley らが周期的な凹凸により表面厚み方向の屈折率が徐々に変化しており、反射率が著しく低下することを明らかにした。これにより、夜行性の蛾が少ない光を無駄なく目の中に取り込む事ができ、暗闇でも自由に飛び回ることができ、また大きな目からの反射光を抑えることで鳥などの外敵から発見されにくくなると言われている。

モスアイ構造の突起先端の面を反射面として、空気層の屈折率を n_1 、モスアイ構造の屈折率を n_2 とした場合、その面の平均屈折率は、 $n_2 \times$ 反射面を上から見た時の突起の面積率 $A + n_1 \times$ 反射面を上から見た時の空気の面積率 B ($B=1-A$) となる。すなわち、モスアイ構造の突起先端部での平均屈折率はほぼ空気の屈折率 n_1 に等しいが、モスアイ構造では光の進行方向に対して徐々に A の比率が増加するので、平均屈折率は n_1 から n_2 まで連続的に変化し、突起の根元でモスアイ構造の屈折率 n_2 に等しくなる。理想的なモスアイ構造の場合、屈折率の段差がなくなるため、反射が全く生じなくなる。

モスアイ構造の特徴としては、反射率が低減できることに加え、広帯域での波長に対しても反射率低減が可能となること、また低入射角の光に対しても反射率低減が可能となることがある。

しかしながら、曲面に微細パターンを形成する現実的な微細加工技術は存在しない。研究レベルでは、半導体リソグラフィ技術を用いたテストが行われているが、量産可能なプロセス手法ではない。また市場においても 1 枚の、かつ片面だけにモスアイ構造が入ったレンズが発売されているが、コストに見合う現実的なプロセスではないため、超高級カメラレンズの一部に採用されているに留まっている。

以上のような背景から、曲面における微細加工技術が求められており、また低コストで作製できることも求められている。SCIVAX(株)の持つナノインプリント技術を応用することで、低コストにて曲面への微細化加工を実現化し、廉価で広範囲な光学レンズに対しても高性能な反射防止技術が提供されることが期待されている。

研究目的

情報通信分野及び医療分野をはじめとする様々な光学機器の高機能化、ならびに高付加価値化が求められており、その一つにレンズ表面の無反射構造体加工技術がある。従来の多層膜コーティングによる方法ではコスト面及び性能面で十分ではなく、それらの問題を解決できる無反射構造体の形成技術が強く求められている。本開発では、当社の有するナノインプリント技術（特許技術）をベースにレンズ曲面への無反射構造体形成技術を開発する。

現行のナノインプリント技術では、数十～数百 nm レベルのパターンを平面上に形成することはできる。しかし、レンズのような曲面上に低コストかつ高い再現性も有して形成する技術は未だ出ていない。

本開発では、光学系の高度化に対応すべく、レンズ曲面への超微細加工を多数のレンズに一括で行うことにより光学レンズの高機能化を図り、加工コストの大幅な低減を実現することができるナノインプリント（超微細加工）技術を開発することを目的とする。

研究開発目標

本研究開発の目標は、以下に示す通りである。

【1】 一個取り原理検証機による条件検討（実施：SCIVAX株式会社）

本開発では、タクトタイムが短く量産性に優れる UV 硬化樹脂を用い、UV 照射が可能な一個取りガス圧ナノインプリント検証用ユニットを製作し、原理検証及び条件検討を進めていく。

【1-1】 UV 式一個取りガス圧ナノインプリント装置（ α 機）の設計・開発

$\phi 25\text{mm}$ 及び $\phi 50\text{mm}$ の光学レンズを用いて設計開発を進める。それぞれのレンズ片面に対し、UV 硬化樹脂による無反射微細構造の形成が可能であることを確認するため、ナノインプリント原理検証機を作製する。

【1-2】 レンズ成形用モールドの作製

既存のナノインプリント装置を用い、平面上の樹脂フィルムに対して無反射微細構造を形成し、平面樹脂モールドを作製してから、その樹脂モールドを最適形状に加工する。目標誤差を $\pm 20\%$ とする。

【1-3】 被成型樹脂のレンズ表面へのコート

既にスピncerを用いてレンズ表面に樹脂を塗布できることは検証しているが、塗布樹脂膜厚の均一性に関する評価は実施していない。樹脂膜厚の評価方法と、スピncerによる、より均一な樹脂コート方法を確立する。目標膜厚分布は $\phi 25\text{mm}$ で $\pm 200\text{nm}$ 以下、 $\phi 50\text{mm}$ で $\pm 300\text{nm}$ 以下とする。

【1-4】 レンズ表面への無反射微細構造の成型評価

レンズ曲面への無反射微細構造の成形性の確認と課題の抽出を実施する。成形性の確認は膜厚の均一性と反射率の評価により行う。十分な結果が得られない場合は、【1-2】に戻り、繰り返し条件最適化を進めていく。目標反射率を 0.8%以下（波長 430～680nm）とする。

【2】 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（ β 機）の設計・開発・検証（実施：SCIVAX 株式会社）

【1】の条件検討結果を元に多数個取り曲面ナノインプリント装置の開発を進める。量産へのスケールアップが可能と判断される以下の仕様で設計を行う。

- 一括成形レンズ個数： $\phi 25\text{mm}$ で 7 個、 $\phi 50\text{mm}$ で 4 個

- ・ 成形サイクルタイム：3 サイクル/時間

【2-1】 レンズ成形用モールド作製技術の開発

【1-2】で得られた最適形状をもつ、多数個配置の成形モールドを作製する。多数個を配置できる成形機と、レンズサイズ毎の治具を作製し、 $\phi 210\text{mm}$ の範囲に $\phi 25\text{mm}$ で 7 個、 $\phi 50\text{mm}$ で 4 個の成形モールドを作製する。成形パラメータは【1-2】での成形レンズ面の最適形状を基に、精度向上と再現性を図る。

【2-2】 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（ β 機）の開発

準量産製造が可能となる多数個取り曲面ナノインプリント装置を開発試作する。またそれを用いて曲面に対して両面ナノインプリントを行う。

【2-3】 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（ β 機）の試運転評価

$\phi 25\text{mm}$ 及び $\phi 50\text{mm}$ のガラスレンズを用いて無反射微細構造の成形を実施し（以下、「成形レンズ」という）、その評価を行う。

β 機試運転・評価に当たっては、一個取り原理検証機を用いた成形レンズ（初年度実施）と同等性能が得られることを目標とし、評価項目・目標値を以下とした。

- ・ 膜厚分布測定（目標値： $\phi 25\text{mm}$ ： $\pm 200\text{nm}$ 以下、
 $\phi 50\text{mm}$ ： $\pm 300\text{nm}$ 以下）
- ・ 反射率測定（目標値：0.8%以下（有効波長帯：430～680nm））
- ・ タクトタイム（目標値：3 サイクル/時間）
- ・ 成形再現性

【3】 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（ β 機）の改造及びプロセスの最適化（実施：SCIVAX 株式会社）

【1】及び【2】での成形レンズ性能評価、装置の機能、性能評価により抽出された課題を基にプロセスの最適化及び装置の改造を行う。

【3-1】 樹脂コート条件の最適化

レンズ面へのスピコート条件の最適化を更に進める。樹脂のコート厚の目標膜厚分布は以下の通りとする。

- ・ $\phi 25\text{mm}$ ： $\pm 100\text{nm}$ 以下
- ・ $\phi 50\text{mm}$ ： $\pm 200\text{nm}$ 以下

【3-2】 レンズ成形用モールド作製条件の最適化

モールドの成形条件で、より正確な形状を実現できる、新たな操作パラメータの抽出を行い、最適化を進める。

- ・ 目標誤差： $\pm 10\%$ 以下

【3-3】 レンズ表面への無反射微細構造形成における装置及びプロセスの最適化によるサイクルタイムの向上

成形レンズの性能評価より予熱温度、成形加圧力、加圧速度、加圧時間、減圧速度等のレンズ両面成形プロセス条件の最適化を進める。また、自動離型機構等の最適化

により、サイクルタイムの向上を図る。

【3-4】安全性及び操作性の向上

β機の反復操作により安全性及び操作性の検証を繰り返し、安全性の向上、操作の自動化、使い易さの改善を図る。また、併せて、それを実現するために必要となる電装設備改造も実施する。

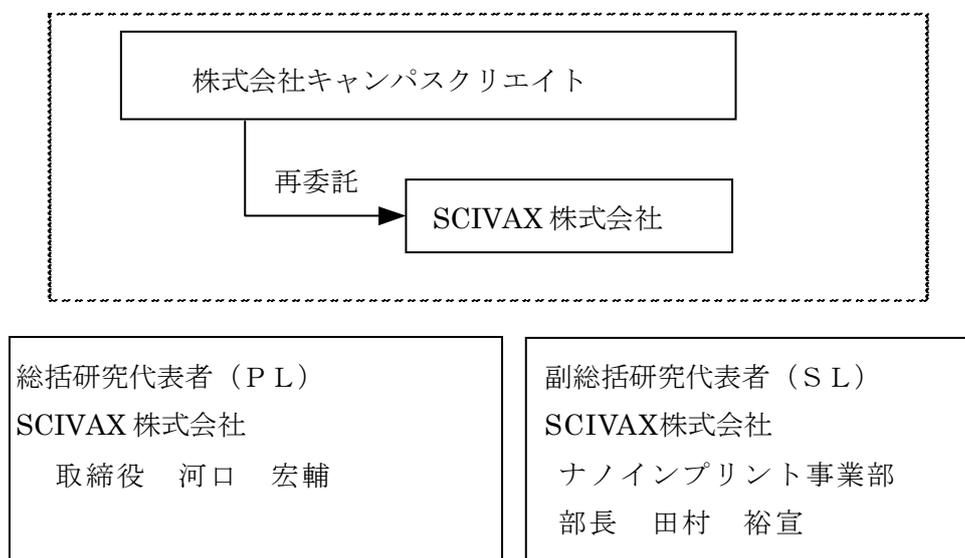
【4】プロジェクトの管理・運営（実施：株式会社キャンパスクリエイト）

- ・事業管理機関 株式会社キャンパスクリエイトにおいて、本プロジェクトの管理を行う。プロジェクトの研究経緯と成果について取りまとめ、成果報告書1部及び電子媒体(CD-ROM)一式を作成する。
- ・本研究の実用化に向けた到達の度合いを検証するとともに、事業化に向けての課題等について研究実施者と調整を行う。
- ・再委託先事業者が作成する証憑書類について、指導・確認を行う。
- ・研究開発推進委員会を委託契約期間内に4回程度開催する。

1-2. 研究体制

1-2-1. 研究組織及び管理体制

1-2-1-1. 研究組織（全体）

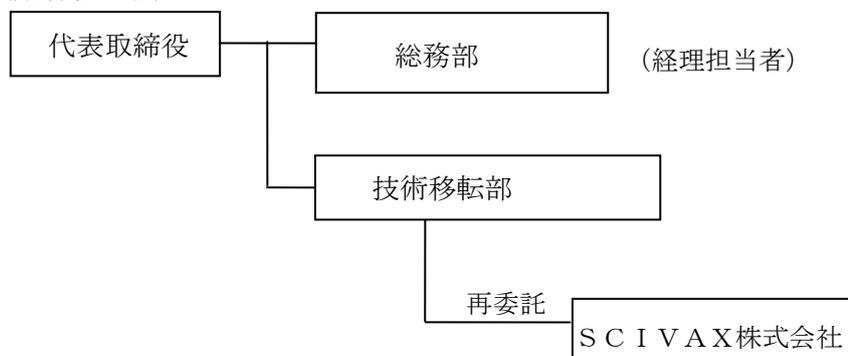


1-2-1-2. 管理体制

①事業管理機関

株式会社キャンパスクリエイト

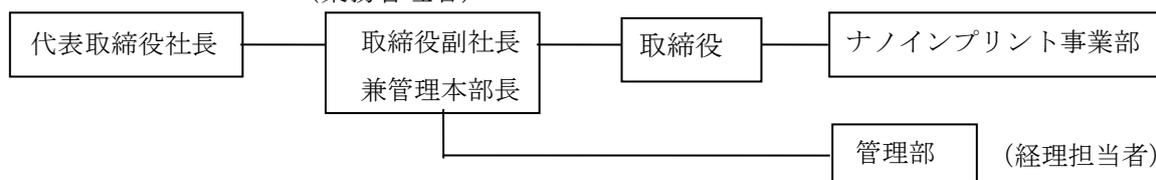
(業務管理者)



②再委託先

SCIVAX 株式会社

(業務管理者)



1-2-2. 管理員及び研究員

①事業管理機関：株式会社キャンパスクリエイト
(管理員)

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
角田 智子	技術移転部 産学官連携コーディネータ	【4】
堺 奈都	技術移転部 産学官連携コーディネータ	【4】
佐藤 公俊	技術移転部 ゼネラルマネージャ	【4】
齋藤 弘美	技術移転部	【4】
坂田 芳幸	技術移転部 産学官連携コーディネータ	【4】 (平成 24 年度)

②再委託先：SCIVAX 株式会社
(研究員)

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
河口 宏輔	取締役	【1-1~4】 【2-1~3】 【3-1~4】
田村 裕宣	ナノインプリント事業部 部長	【1-1】 【1-4】 【2-1~3】 【3-1~4】
萩野 竜也	ナノインプリント事業部 主任研究員	【1-1~2】 【1-4】 【2-1~3】 【3-1~4】
坂口 綾菜	ナノインプリント事業部 研究員	【1-2~4】 【2-1】 【2-3】 【3-2~3】
谷口 豊	ナノインプリント事業部 主任研究員	【1-1】 【1-3~4】 【2-1~3】 【3-1~4】
廣谷 務	ナノインプリント事業部 研究員	【1-3~4】 【2-3】 【3-1】 【3-3~4】
田邊 大二	ナノインプリント事業部 研究員	【1-1】 【1-3~4】 【2-2~3】 【3-1~4】
大場 康絵	ナノインプリント事業部 研究員	【1-2~4】 【2-1】 【2-3】 【3-2~4】
山口 博明	ナノインプリント事業部 研究員	【2-3】 【3-2~4】
伊藤 大介	ナノインプリント事業部 研究員	【2-3】 【3-1~4】

1-2-3. 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

①事業管理機関

株式会社キャンパスクリエイト

(経理担当者) 総務部 グループリーダー 川崎 和美

(業務管理者) 代表取締役 安田 耕平

②再委託先

SCIVAX 株式会社

(経理担当者) 管理部 坂田 麻美

(業務管理者) 取締役副社長兼業務管理本部長 奥田 徳路

1-3. 成果概要

レンズ曲面に対して、両面かつ多数個一括でナノインプリント加工することを目的とし、 $\phi 25\text{mm}$ で 7 個、 $\phi 50\text{mm}$ で 4 個を成形するための装置開発を行い、これに成功した。

プロセス最適化により $\phi 25\text{mm}$ レンズを 7 個、及び $\phi 50\text{mm}$ レンズを 4 個について両面かつ多数個一括でのナノインプリントを行い 5 サイクル/時間を達成した。

装置改造により、安全性と操作性を向上させた。

【1】 一個取り原理検証機による条件検討

【1-1】 UV式一個取りガス圧ナノインプリント装置（ α 機）の設計・開発

既存装置にアタッチメント取り付けることで、レンズ一個取りナノインプリント成形機を完成させた。 $\phi 25\text{mm}$ レンズ、 $\phi 50\text{mm}$ レンズに対して、片面 UV 成形を成功した。

【1-2】 レンズ成形用モールドの作製

作製条件の最適化を行った。 $\phi 25\text{mm}$ レンズにおいては、目標値内のレンズ成形用モールドを作製、 $\phi 50\text{mm}$ レンズにおいても、目標値内のレンズ成形用モールドを作製し、目標としたレンズとの誤差を $\pm 20\%$ を達成した。

【1-3】 被成型樹脂のレンズ表面へのコート

$\phi 25\text{mm}$ レンズ、 $\phi 50\text{mm}$ レンズに対して、塗布の最適化を行った。膜厚分布が $\phi 25\text{mm}$ レンズでは $\triangle 110\text{nm}$ 、 $\phi 50\text{mm}$ レンズでは $\triangle 100\text{nm}$ 程度となり、目標値 $\pm 300\text{nm}$ 以下を達成した。

【1-4】 レンズ表面への無反射微細構造の成型評価

【1-1】～【1-3】にて開発した技術を元に、実際にレンズ成形を行った。片面 UV 成形を行い、 $\phi 25\text{mm}$ レンズ、 $\phi 50\text{mm}$ レンズともに成功した。評価は反射率計で行い、目標値反射率 0.8%以下を達成しており、(可視光領域における)平均反射率は、 $\phi 25\text{mm}$ で 0.35%、 $\phi 50\text{mm}$ で 0.34%を達成した。

【2】 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（ β 機）の設計・開発・検証

【2-1】 レンズ成形用モールド作製技術の開発

多数個取りモールド成形機を製作し、 $\phi 25\text{mm}$ レンズ用モールドで 7 個、 $\phi 50\text{mm}$ レンズ用レンズ成形用モールドで 4 個の一括成形に成功した。

$\phi 25\text{mm}$ レンズ 7 個取りにおいて、 $\triangle 16\%$ の面内分布を生じているが、誤差は最大 17%に収まり、目標値である $\pm 20\%$ 以内を達成した。

また、 $\phi 50\text{mm}$ レンズ 4 個取りにおいても、 $\triangle 7\%$ の面内分布を生じているが、誤差は最大 17%に収まり、目標値である $\pm 20\%$ 以内を達成した。

【2-2】 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（ β 機）の開発

多数個取り曲面ナノインプリント装置を製作し、仕様を満足した装置が完成した。また、 $\phi 25\text{mm}$ レンズで 7 個、 $\phi 50\text{mm}$ レンズで 4 個の一括両面成形に成功した。評価

は反射率計で行い、目標とした反射率 0.8%以下を達成した。

【2-3】 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（β機）の試運転評価

樹脂コート膜厚分布は、φ 25mm レンズでは±55nm、φ 50mm では±50nm を得ている。このレンズを用い、β機にて多数個一括成形したレンズの反射率はφ 25mm、φ 50mm とともに 0.8%以下を達成した。

サイクルタイムは 950 秒で 3.8 サイクル/時間となり、目標を達成した。

φ 25mm、φ 50mm いずれのレンズにおいても、多数個一括でのナノインプリントを実施することができた。

【3-1】 樹脂コート条件の最適化

【1-3】にて検討した樹脂を用いて、スピコートによる塗布条件の最適化をさらに進めた。膜厚分布がφ 25mm レンズの時は±28nm となり目標値±100nm を達成した。φ 50mm レンズの時は±33nm となり、目標値±200nm を達成した。

【3-2】 レンズ成形用モールド作製条件の最適化

作成条件の最適化と測定方法の最適化を行った。φ 25mm レンズにおいては、対象とするレンズとの誤差が-3.4～0.6%を達成し、目標値±10%を達成した。また、φ 50mm レンズにおいても、対象とするレンズとの誤差が-4.6～-0.6%を達成し、目標値±10%を達成した。

【3-3】 レンズ表面への無反射微細構造形成における装置及びプロセス最適化及びサイクルタイムの向上

多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（β機）を用いて、一括成形（φ 25mm レンズ：7 個取り、φ 50mm レンズ：4 個取り）の条件最適化を行い、サイクルタイムは 660 秒で 5.5 サイクル/時間となり、目標を達成した。

【3-4】 安全性及び操作性の向上

構造シミュレーションによる構造最適化を行うとともに、それに基づく改造を行い装置安定性と安全性を向上させることができた。また PLC とユーザーインターフェースであるタッチパネルの改善により操作性を向上させた。

1-4. 当該研究開発の連絡窓口

SCIVAX 株式会社

取締役副社長 奥田 徳路

〒212-0032 神奈川県川崎市幸区新川崎 7-7 NANOBIC # 2007

Tel: 044-599-5051 Fax: 044-599-5052

第2章 本論

2-1. 研究目的及び目標

これまでのナノインプリント技術の常識では、2次元形状、すなわち平面のモールドと平面の被転写材料を、平面のステージに乗せて、モールドの微細構造を被転写材料に転写を行う方式が主流であり、曲面のような3次元形状へのナノインプリント加工は困難とされてきた。

前述の通り、曲面に対する超微細加工技術のニーズが高まっていることもあり、SCIVAXでは、曲面ナノインプリント技術の開発に取り組み、既に一個取り曲面ナノインプリント検証用ユニットを作製していた。これは、転写材料を熱可塑性樹脂とした熱式ナノインプリントであるが、レンズ曲面への超微細構造（モスアイ構造）の形成が可能であることを確認している。

しかしながら、装置的な観点から見ると、ラボベースでの原理検証がようやくできた段階であり、量産への課題と開発は数多く残されていた。

また、プロセスの観点から見ても、熱可塑性材料を被転写材料とする熱式ナノインプリントは、生産性に問題がある。一般的には、流動性を上昇させて微細構造を充填させる必要があるために、ガラス転移温度を超えて加熱する必要がある。また、最終的にモールドから被転写材料を離型する必要があるため、ガラス転移温度よりも冷却して構造を作製する必要もある。すなわち加熱プロセス、冷却プロセスにかかるプロセス時間が生産性を左右することになり、よほどの高付加価値製品ではない限り、コストの制約が発生することになる。

一方、UV式ナノインプリントは、流動性のあるモノマーの状態では微細構造を充填することが可能であり、UV照射することで架橋反応が開始され、硬化することで流動性がなくなり、微細構造を形成することができる。プロセス時間においても、熱式ナノインプリントの加熱時間、冷却時間に対応する部分がUV照射の時間のみであり、大幅な短縮が期待できる。

本開発では、製造生産性を考慮し、UV式ナノインプリントの曲面成型の技術開発を目標とする。

開発の第一段階として、一個取りでの曲面形状への片面UVナノインプリント加工を行う α 機を先行開発し、これにより金型、UV硬化樹脂及びUV成型特性を検討した。また、第二段階として、多数個取りでの曲面形状への両面UVナノインプリント加工を行う β 機の開発・評価・検証を行い、準量産に堪えうる、さらに、安全面も考慮した装置の改造、プロセスの最適化を進めた。

2-2. 一個取り原理検証機による条件検討

被転写物を $\phi 25\text{mm}$ レンズおよび $\phi 50\text{mm}$ レンズとし、曲面に対するUVナノインプリントについて条件最適化を行った。

まず、要素技術として、①曲面に対して加圧/UV 照射できる装置（ α 機）の開発、②レンズ成型用モールドの開発、③曲面レンズ上に被転写材料の均一な膜を形成するコーティングの開発を行い、以上のものを合わせて、曲面上に UV ナノインプリント成型を行った。

2-2-1. UV式一個取りガス圧ナノインプリント装置（ α 機）の設計・開発

曲面に対して加圧/UV 照射できる装置の開発を行った。UV 光源と加圧/減圧システムは既存のものを利用し、既存装置にアタッチ出来る構造にて、設計製作を行った。UV 式ナノインプリント成型に必要な減圧、加圧性能を備えており、 $\phi 25\text{mm}$ レンズ、 $\phi 50\text{mm}$ レンズに対しても、曲面に対してモスアイ構造の成型を行うことができた。

2-2-2. レンズ成形用モールドの作製

曲面にナノインプリント成型を行うためには、フレキシブルなモールドが必要である。しかし、UV 透過性を備えていないモールドを使用しており、UV 式ナノインプリントには使用できない。したがって、まずナノインプリントにおいて離型が担保できるパターン形状、レプリカモールド材料を成型プロセスと合わせて最適化し、新規レプリカ材料を用いて、レンズ成型用モールドの条件出しを行った。 $\phi 25\text{mm}$ レンズ用のモールド成形については、 $0.1\sim 0.4\text{MPa}$ で目標誤差 $\pm 20\%$ を達成した。 $\phi 50\text{mm}$ では、その形状から、より精密な圧力コントロールが必要となるが、目標誤差 $\pm 20\%$ を達成した。

2-2-3. 被成型樹脂のレンズ表面へのコート

$\phi 25\text{mm}$ レンズと $\phi 50\text{mm}$ レンズに樹脂塗布を行い、中央部と端部から 3mm の 2 箇所にて膜厚を測定した。

$\phi 25\text{mm}$ レンズでは、樹脂濃度を 15% としたとき、膜厚分布が 110nm におさまり、目標値である膜厚分布 $\pm 200\text{nm}$ は達成した。

また、 $\phi 50\text{mm}$ レンズでは、樹脂濃度を 20% としたとき、膜厚分布が 100nm におさまり、目標値である膜厚分布 $\pm 300\text{nm}$ は達成した。

2-2-4. レンズ表面への無反射微細構造の成型評価

以上のレンズ成形用モールドと曲面上に塗布された樹脂と α 機を用いて曲面上への UV ナノインプリント加工を実施した。成形レンズの反射率性能を図 2-1 に示す。パターンによる若干の回折光（構造色）が見られるが、フレネル反射は低減している事がわかり、結果も目標値を達成した。

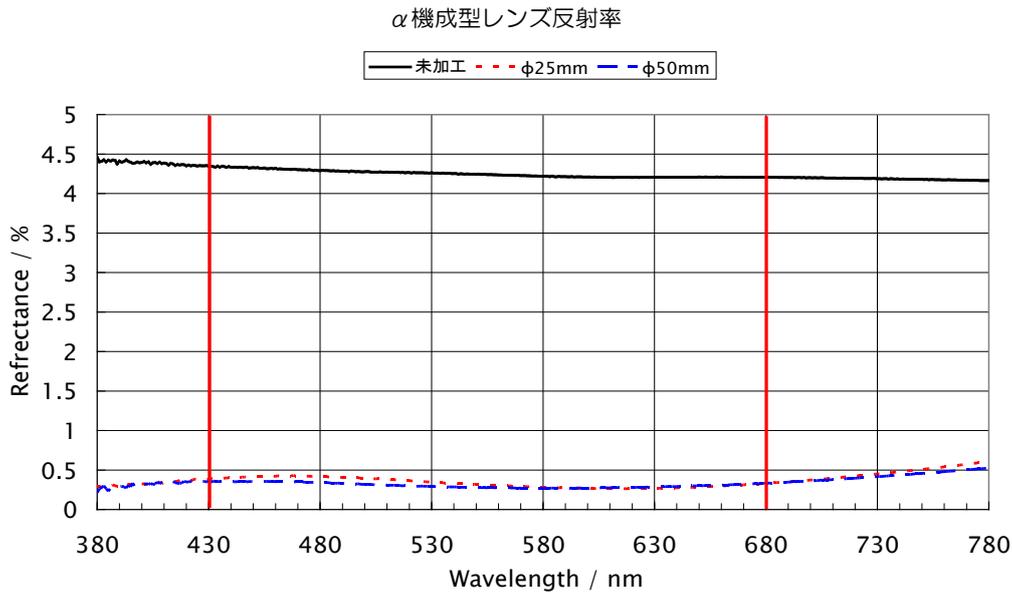


図 2-1. α機により曲面上ナノインプリント加工されたモスアイの反射率

2-3. 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（β機）の設計・開発・検証

α機による検証を経て、多数個取り両面一括曲面ナノインプリント装置（β機）を製作した。φ25mm レンズ 7 個、φ50mm レンズ 4 個を一括で両面成型できる装置とし、初年度に装置製作を行った。

2-3-1. レンズ成形用モールド作製技術の開発

φ25mm7 個取りのレンズ成形用モールドは、形状誤差 PV は 0.5mm 以内におさまり、目標値である±20%以内を達成した。

φ50mm4 個取りのレンズ成形用モールドは、形状誤差 PV は 0.4mm 以内におさまり、目標値である±20%以内を達成した。

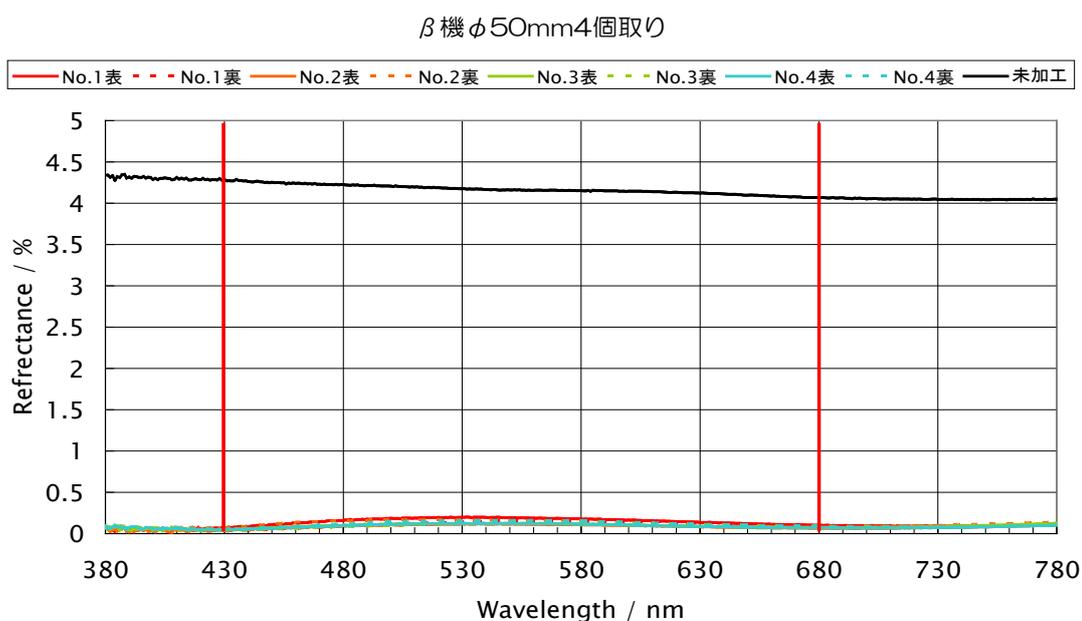
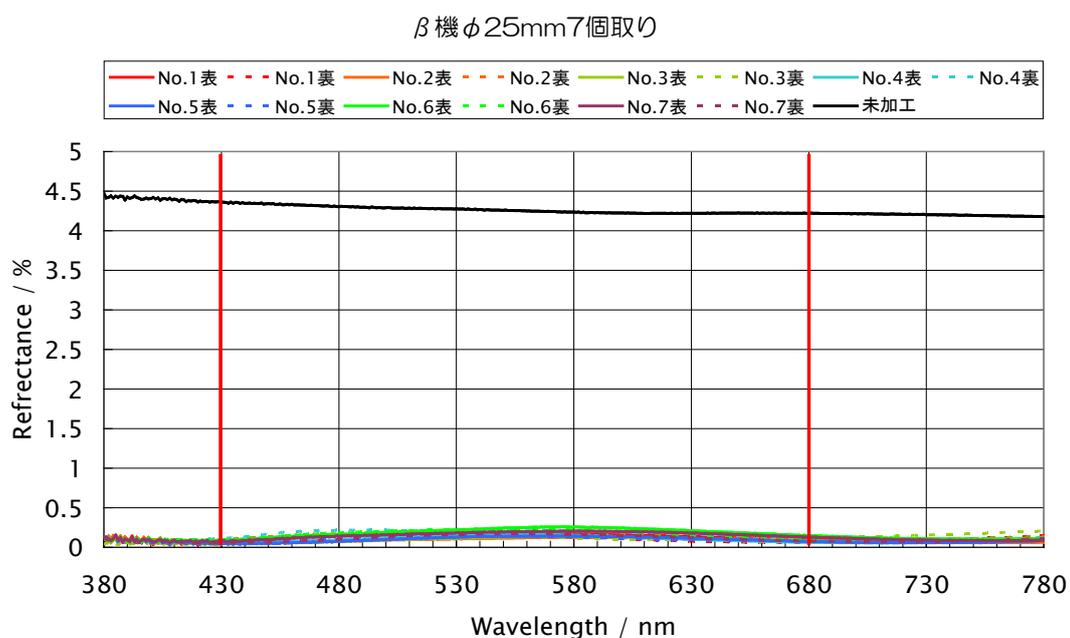
2-3-2. 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（β機）の開発

多数個取り曲面ナノインプリント装置を製作した。加圧部が大きいと、シール性能と荷重支持機構が機能しないと加圧も減圧もすることができない。加圧シール性能では、加圧して 30 分放置しリーク量を確認した。測定結果は 3%であり、仕様上問題ないことを確認した。真空シール性能では、真空状態で閉空間を作った上で、一定時間のリーク量を確認した。真空脱気装置として目安の $10^{-1}\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ を達成しており、仕様上問題ないことを確認した。

また、UV照射ユニットについてもヒートシンク構造を工夫し、冷却性能に優れたものを製作することができた。照度 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 以上で、連続照射時間 1800sec を達成し、温

度も 40℃以下で安定することができた。温度は面内で 16 箇所測定を行い、68mW/cm²で、およそ平均 28℃程度、106mW/cm²で、およそ平均 35℃程度で安定状態となった。

以上の要素技術を駆使し、目的である多数個一括成型を行い、φ 25mm レンズで 7 個、φ 50mm レンズで 4 個の一括両面成形に成功した。評価は反射率計で行い、目標とした反射率 0.8%以下を達成した (図 2-2、2-3)。



2-3-3. 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（β機）の試運転評価

初年度に開発した多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（β機）を用いて、φ25mm レンズ及びφ50mm レンズの多数個取りナノインプリント加工を行った。多数個取りレンズ成形をφ25mm 及びφ50mm レンズに対して行い、反射率とサイクルタイムの評価を行った。φ25mm レンズ、φ50mm レンズ共に、有効波長帯430～680nm に対して目標値0.8%以下を達成している。（図2-4、2-5 参照）

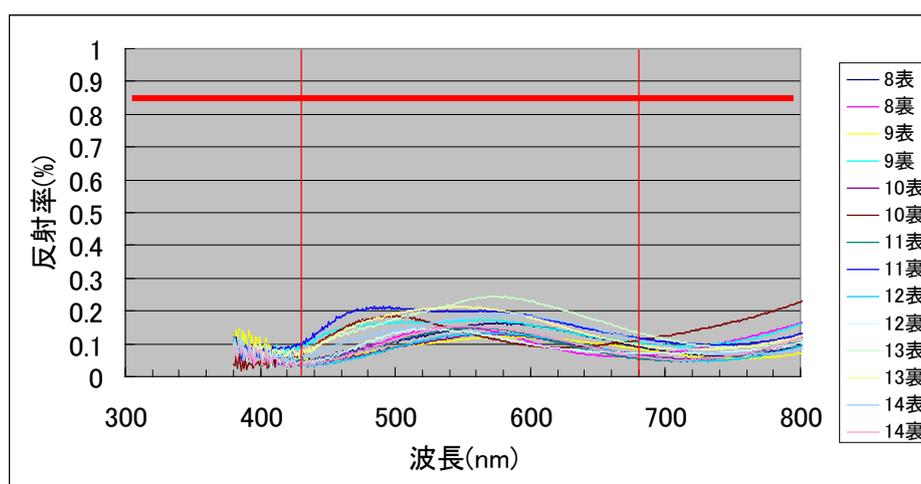


図 2-4. φ25mm レンズ 7 個取りナノインプリント加工の反射率

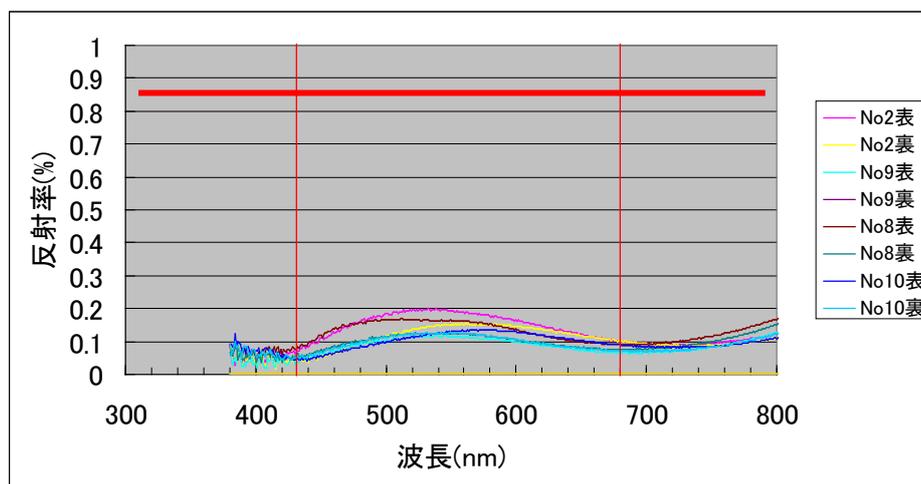


図 2-5. φ50mm レンズ 4 個取りナノインプリント加工の反射率

タクトタイムは、目標 3 サイクル/時間に対し、3.8 サイクル/時間となり、目標を達成した。各φ25mm レンズ、φ50mm レンズにおいて、それぞれ 26 枚/時間、15 枚/時間を達成している。

2-3. 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（β機）の改造及びプロセスの最適化

各要素技術である曲面への材料塗布の均一化とレンズ成形用モールド形状精度、多数個取りレンズ成形においては、さらに目標を高めて最適化を行った。また装置改造を行い、準量産に堪え得る多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（β機）を完成させた。

2-3-1. 樹脂コート条件の最適化

低濃度樹脂の方が膜厚の誤差分布の絶対値は低下するが、膜厚に対しての誤差分布の割合は増加するという傾向が得られた。低濃度樹脂ほど溶媒割合が多くなるため、粘度上昇による固定化が阻害されていると考察される。

また、回転数を上昇させれば、絶対値も誤差分布の割合も低下傾向にある。高回転により遠心力が速度の 2 乗分だけ力が働くことになり、レベリング効果が大きいことを示している。φ25mm レンズでは±28nm となり、目標値±100nm を達成した。また、φ50mm レンズでは±33nm となり、目標値±200nm を達成した。

2-3-2. レンズ成型用モールド作製条件の最適化

φ25mm レンズ成形用モールドでは、誤差が-3.4～0.6%となり、目標値である±10%を大幅に達成した。φ50mm レンズ用においても、誤差が-4.6～-0.6%となり、φ25mm 同様に目標値である±10%を大幅に達成した。繰り返しによる再現性も得られた。今後は、多様なレンズ径、レンズ形状への対応を行うために、本件研究にて導出された成形条件と実際の形状が合致するかの検証を本開発の補完研究として進める予定である。

2-3-3. レンズ表面への無反射微細構造形成における装置及びプロセスの最適化によるサイクルタイムの向上

前述の要素技術を組み合わせた上に、多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（β機）を用いて、φ25mm レンズ 7 個取り及びφ50mm レンズ 4 個取りの多数個取りナノインプリント加工のプロセス最適化を行った。

φ25mm の加工済みレンズ外観写真を図 2-6 に示す。1 枚だけ未加工レンズを置き、他は 7 枚一括で両面に無反射構造体を成形したレンズである。反射がほとんどないのがわかる。

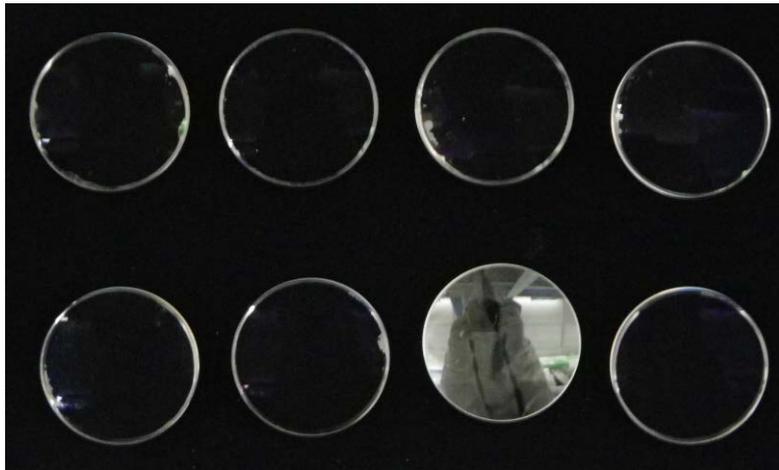


図 2-6. $\phi 25\text{mm} \times 7$ 個一括無反射構造成形レンズ (1 枚は未加工)

このレンズの反射率を図 2-7 に示す。各レンズの表側と裏側にて反射率を測定し、未加工レンズと一般的に真空蒸着で成膜された誘電多層膜の AR コート処理されたレンズの反射率と比較した。AR コートは特徴的な W 型の波形を示しており、波長が 500nm 付近では、反射率が立ち上がっている。また、モスアイ無反射構造成形品レンズは、広い波長帯において低い反射率であることが確認でき、可視光域全域において、目標値とした 0.8%以下を達成した。

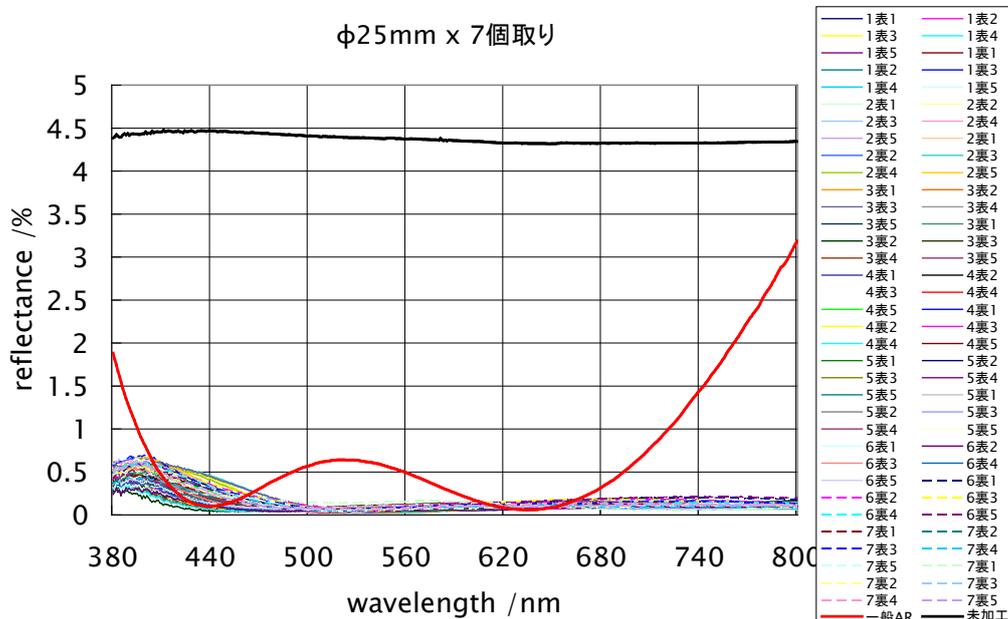


図 2-7. $\phi 25\text{mm} \times 7$ 個一括無反射構造成形レンズの反射性能

次に $\phi 50\text{mm}$ の加工済みレンズ外観写真を図 2-8 に示す。1 枚だけ未加工レンズを置き、他は 4 枚一括で両面に無反射構造体を成形したレンズである。 $\phi 25\text{mm}$ 同様、反射がほ

とんどないのがわかる。

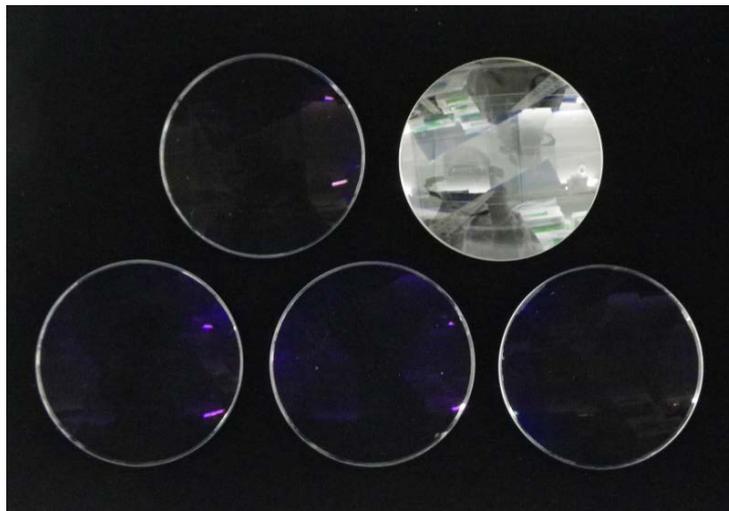


図 2-8. $\phi 50\text{mm} \times 4$ 個一括無反射構造成形レンズ (1 枚は未加工)

このレンズの反射率を図 2-9 に示す。 $\phi 25\text{mm}$ 同様、各レンズの表側と裏側にて反射率を測定し、目標としていた 0.8%以下となり、目標値を達成した。

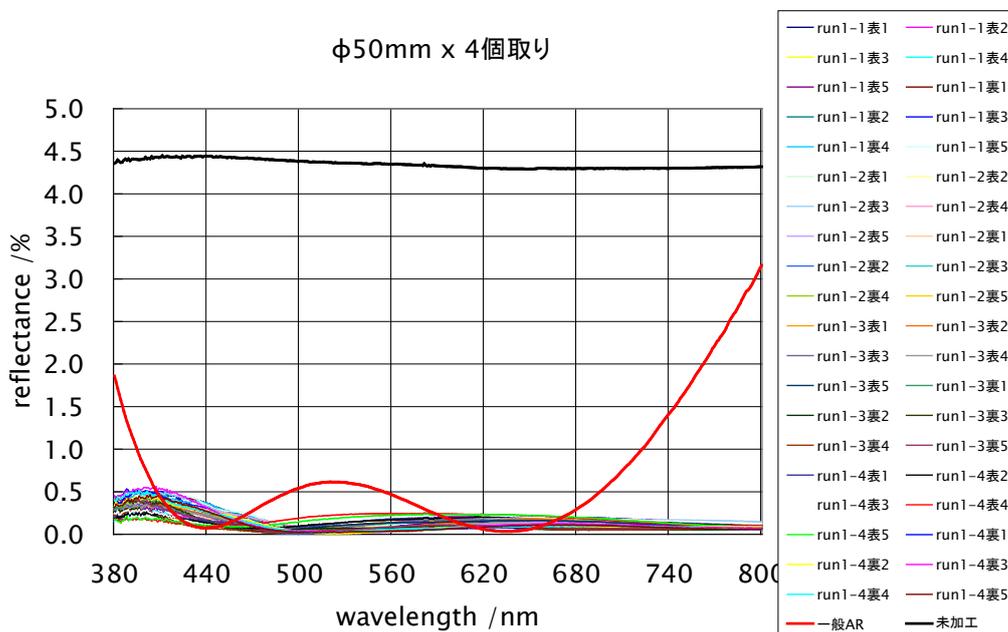


図 2-9. $\phi 50\text{mm} \times 4$ 個一括無反射構造成形レンズの反射性能

タクトタイムは、目標 5 サイクル/時間に対し、5.5 サイクル/時間を達成した。成形数は、 25mm レンズ：38 枚/時間、 $\phi 50\text{mm}$ レンズ：21 枚/時間 となる。

2-3-4. 安全性及び操作性の向上

装置の反復操作により、レンズ成形用モールド作成装置及び多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（β機）の安全性や操作性を向上させるための改造を行った。また、安全インタロックの整備とソフト自動化、インターフェース Update による操作性の向上を図り、電装項目の改造を行った。

最終章 全体総括

曲面に対する両面一括 UV ナノインプリント成型を多数個一括で行うことを目的とし、 α 機で一個取り曲面 UV ナノインプリントの原理検証を行い、 β 機の装置開発を行い、これに成功した。

各研究開発テーマに対する目標値を達成した技術、また量産へ向けた課題となる技術について、以下にまとめた。

【1】 一個取り原理検証機による条件検討

【1-1】 UV式一個取りガス圧ナノインプリント装置（ α 機）の設計・開発

既存装置にアタッチメント取り付けすることで、レンズ一個取りナノインプリント成形機を完成させた。 $\phi 25\text{mm}$ レンズ、 $\phi 50\text{mm}$ レンズに対して、片面 UV 成形を成功した。装置技術としては、 β 機へ移行している。

【1-2】 レンズ成形用モールドの作製

レンズ成形用モールド作成条件の最適化を行った。 $\phi 25\text{mm}$ レンズにおいては、目標に対して-2%の誤差、 $\phi 50\text{mm}$ レンズにおいては、目標に対して-7%の誤差であり、目標値を達成した。

【1-3】 被成型樹脂のレンズ表面へのコート

スピコートにより、 $\phi 25\text{mm}$ レンズ、 $\phi 50\text{mm}$ レンズに対して、塗布の最適化を行った。膜厚分布が $\phi 25\text{mm}$ レンズの時は $\Delta 110\text{nm}$ 、 $\phi 50\text{mm}$ レンズの時は $\Delta 100\text{nm}$ 程度となり、目標値を達成した。

各基材に対して、適した光学性能を持つ樹脂の選定を行う必要があり、また均一に塗布することが必要となる。それには塗布技術の向上（膜厚分布の低減）や、塗布手法の検討も今後の課題として挙げられる。

【1-4】 レンズ表面への無反射微細構造の成型評価

【1-1】～【1-3】にて開発した技術を元に、実際にレンズ成形を行った。 $\phi 25\text{mm}$ レンズ、 $\phi 50\text{mm}$ レンズともに、片面 UV 成形を行い、成功した。評価は反射率計で行い、反射率 0.8%以下を達成しており、目標を達成した。今後は β 機を用いた開発となる。

【2】 多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（ β 機）の設計・開発・検証

【2-1】 レンズ成形用モールド作製技術の開発

多数個取りレンズ成形用モールド成形機を製作し、 $\phi 25\text{mm}$ レンズで 7 個、 $\phi 50\text{mm}$ レンズで 4 個の一括成形に成功した。誤差は、狙いに対して $\phi 25\text{mm}$ レンズで-17%、 $\phi 50\text{mm}$ レンズで-17%程度となり、目標値を達成した。

量産に向け、多種多様なレンズへ対応できる制御パラメータの抽出とともに、非球面への対応などが、今後の課題として挙げられる。またプロファイル評価手法も検討し、正確なデータとする必要がある。またレプリカモールドの耐久性評価、パターンのさらなる最適化が挙げられる。

【2-2】多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（β機）の開発

多数個取り曲面ナノインプリント装置を製作し、仕様を満足した装置が完成した。また、φ25mm レンズで7個、φ50mm レンズで4個の一括両面成形に成功した。評価は反射率計で行い、反射率0.8%以下を達成しており、目標を達成した。

量産へ向けた条件の最適化、タクトタイムの向上、UVユニット高照度化、また安全性や操作性の向上などが課題として挙げられる。

【2-3】多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（β機）の試運転評価

β機の試運転評価を行い、φ25mm レンズで7個、φ50mm レンズで4個一括での無反射構造体の成形に成功した。

【3】多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（β機）の改造及びプロセス最適化

【3-1】樹脂コート条件の最適化

スピコート技術を用いた塗布の最適化をさらに進めた。膜厚分布がφ25mm レンズの時は±28nm、φ50mm レンズの時は±33nm となり目標値を達成した。

【3-2】レンズ成形用モールド作製条件の最適化

条件最適化と測定方法の最適化により、レンズ成形用モールド作製条件の最適化を行った。φ25mm ではレンズとの誤差が-3.4~0.6%を達成し、φ50mm ではレンズとの誤差が-4.6~-0.6%を達成し、目標値を達成した。また、曲率が大きいレンズに対するレンズ成形用モールドの有効性についても証明することができた。

課題としては、さらなる性能向上へのパターン形状シミュレーションへの取り組みと、レンズ成形用モールド形状の近似式での導出検証であり、今後本開発の補完研究として進めていく。

【3-3】レンズ表面への無反射微細構造形成における装置及びプロセス最適化及びサイクルタイムの向上

多数個取り曲面ナノインプリント準量産装置（β機）を用いて、φ25mm レンズを7個取り及びφ50mm レンズを4個取り一括成形の条件最適化を行った。サイクルタイムが5.5 サイクル/時間となり、目標を達成した。真空減圧時間の改善として配管径を大きくするなど、今後さらに検討を行う予定である。また、透過率の変角評価を行った結果、パターン由来による短波長側の透過率の低下が見られた。これを基に回折光の影響がないパターン設計を前述のシミュレーションで検討を行なっていく。

【3-4】安全性及び操作性の向上

構造シミュレーションによる構造最適化を行うと共に、それに基づく改造を行い装置安定性と安全性を向上させることができた。また PLC とユーザーインターフェースであるタッチパネルの改善により操作性を向上させた。

【4】プロジェクトの管理・運営（実施機関：株式会社キャンパスクリエイト）

- ① 本プロジェクトの管理を行った。主に、プロジェクトの研究経緯と成果について取りまとめ、成果報告書 2 部及び電子媒体 (CD-ROM) 1 式を作成した。
- ② 研究の進捗状況を検証すると共に、研究を実施する上で発生する課題等について、随時再委託先研究員および管理部担当者と調整を行った。
- ③ 再委託先からの証憑書類について、指導・確認を行なった。
- ④ 研究開発推進委員会を 4 回開催した。ここでは、各種研究テーマの報告・問題点、課題点をアドバイザーである、谷口准教授、大井取締役からアドバイスをいただき、SCIVAX 株式会社での研究開発に役立てた。