平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

# 「光学・成形シミュレーション技術を利用した超精密光学素子成形プロセスの高精度・高能率化」

研究開発成果等報告書

平成２５年１月

委託者　関　東　経　済　産　業　局

委託先　一般財団法人素形材センター

# 目　　次

第１章　研究開発の概要 ---------- 1

１－１　研究開発の背景・研究目的及び目標 ---------- 1

１－２　研究体制 ---------- 3

１－３　成果概要 ---------- 12

１－４　当該研究開発の連絡窓口 ---------- 14

第２章　本論 ---------- 15

２－１　機上計測システムを利用した超精密金型形状創成 ---------- 15

２－２　数値制御研磨システムによる金型形状補正 ---------- 26

２－３　光学・成形シミュレーション形状補正予測システムの開発 ---------- 38

２－４　超精密形状・内部密度測定システムの開発 ---------- 45

２－５　補正加工データ生成システムの開発 ---------- 48

２－６　最終製品の性能予測に基づく実証 ---------- 57

第３章　全体総括 ---------- 57

３－１　研究開発成果のまとめ ---------- 57

３－２　研究開発後の課題・事業化展開 ---------- 59

# 第1章　研究開発の概要

## １－１　研究開発の背景･研究目的及び目標

（１）研究の背景・目的

本研究開発の目的は、プラスチックやガラスの成形シミュレーションと光学解析ソフトウェアを組み合わせることにより、金型の形状誤差や成形に伴う形状誤差、内部の不均一を予測し、これに基づいてあらかじめ金型形状を補正し、試作成形を行わなくとも目的とする性能が得られるようにすることである。さらに、残存した形状誤差に関しても、実形状に基づくシミュレーションにより最終的な製品での光学性能評価を可能とする。これにより、超精密光学素子の高精度化と工程短縮を同時に実現する。

本研究開発においては、超高精度な光学素子、特にデジタル家電等への展開を図るため、サブテーマ毎に以下の技術目標値を設定する。

①機上計測システムを利用した超精密金型形状創成

加工後に金型を着脱せずに（着脱回数 0 回を目標）加工装置上で計測を行い、必要な補正加工をその場で実施できるシステムを構築する。超精密金型の形状精度は P-V100nm、光学特性は λ/8（λ＝633nm）の精度を目標とする。

②数値制御研磨システムによる金型形状補正

超精密光学素子金型の最終仕上げ研磨を、数値制御研磨加工により実現し、加工時間の短縮と、補正加工回数の低減を行う。目標数値は、形状精度 P-V100nm、表面粗さ Rz10nm（Ra2nm）とする。

③光学・成形シミュレーション形状補正予測システムの開発

射出成形シミュレーションにより成形品の形状誤差及び内部の密度の不均一さを予測し、さらにこの予測データを用いて最終製品の光学特性の予測を可能とするシステムの開発を行う。予測の精度はλ/8 を目標とする。

④超精密形状・内部密度測定システムの開発

超精密金型と成形品の形状精度及び内部の密度を計測可能なシステムの開発を行い、形状補正予測システムとの比較を行う。形状の測定精度は P-V100nm を目標とし、内部密度の計測精度は、光路長差でλ/8（λ=633nm）を目標とする。

⑤補正加工データ生成システムの開発

予測された成形形状を基に金型の補正加工データを生成可能とするシステムを構築する。形状データ生成の精度は、P-V100nm 以下、光学特性はλ/8（λ=633nm）の精度を目標とする。

⑥最終製品の性能予測に基づく実証

実製品のサンプルデータを用いて、設計データから、金型加工、成形、最終製品の試作と評価を実施し、システム全体の性能を確認する。光学特性は、総合的にλ/4（λ=633nm）の精度を目標とする。

（２）研究の概要および目標

本研究開発では、最終製品の光学特性をシミュレーションによって予測できるシステム、即ち、VCAD システムをベースとした「現物」に基づくシミュレーション技術を確立する。(図 1-1 参照)

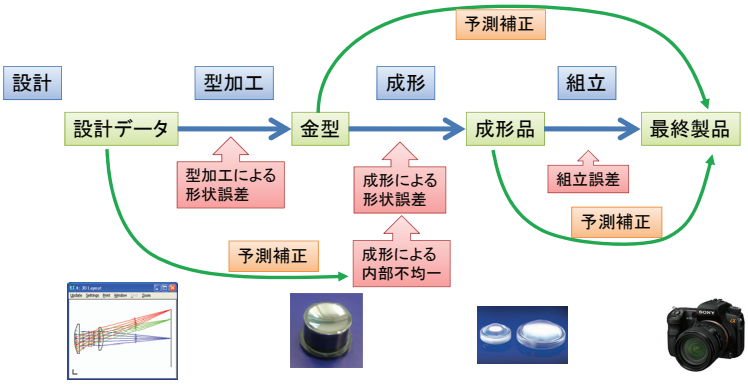



**図 1-1　研究開発工程のフロー図**

設計データに基づき金型の加工が完了した段階で、形状測定を行い、そのデータを基に最終製品の性能をシミュレーションし予測・補正する技術を確立する。これにより、単に形状誤差の絶対値が P-V で規定の誤差範囲内に入っているかだけではなく、最終製品に組み込まれた際の性能予測も可能となり、場合によっては過剰品質の防止にもつながる。また、同様に成形時の形状誤差も成形品の形状データを基に予測・補正を行い、最終製品に到達する前に事前にその性能を予測し、補正加工を行わなくとも最終製品の性能を確保できるシステムを構築する。

本研究開発においては、超高精度な光学素子、特にデジタル家電等への展開を図るため、サブテーマ毎に以下の技術目標値を設定する。

①機上計測システムを利用した超精密金型形状創成

加工後に金型を着脱せずに（着脱回数 0 回を目標）加工装置上で計測を行い、必要な補正加工をその場で実施できるシステムを構築する。超精密金型の形状精度は P-V100nm、光学特性は λ/8（λ＝633nm）の精度を目標とする。

②数値制御研磨システムによる金型形状補正

超精密光学素子金型の最終仕上げ研磨を、数値制御研磨加工により実現し、加工時間の短縮と、補正加工回数の低減を行う。目標数値は、形状精度 P-V100nm、表面粗さ Rz10nm（Ra2nm）とする。

③光学・成形シミュレーション形状補正予測システムの開発

射出成形シミュレーションにより成形品の形状誤差及び内部の密度の不均一さを予測し、さらにこの予測データを用いて最終製品の光学特性の予測を可能とするシステムの開発を行う。予測の精度はλ/8 を目標とする。

④超精密形状・内部密度測定システムの開発

超精密金型と成形品の形状精度及び内部の密度を計測可能なシステムの開発を行い、形状補正予測システムとの比較を行う。形状の測定精度は P-V100nm を目標とし、内部密度の計測精度は、

光路長差でλ/8（λ=633nm）を目標とする。

⑤補正加工データ生成システムの開発

予測された成形形状を基に金型の補正加工データを生成可能とするシステムを構築する。形状データ生成の精度は、P-V100nm 以下、光学特性はλ/8（λ=633nm）の精度を目標とする。

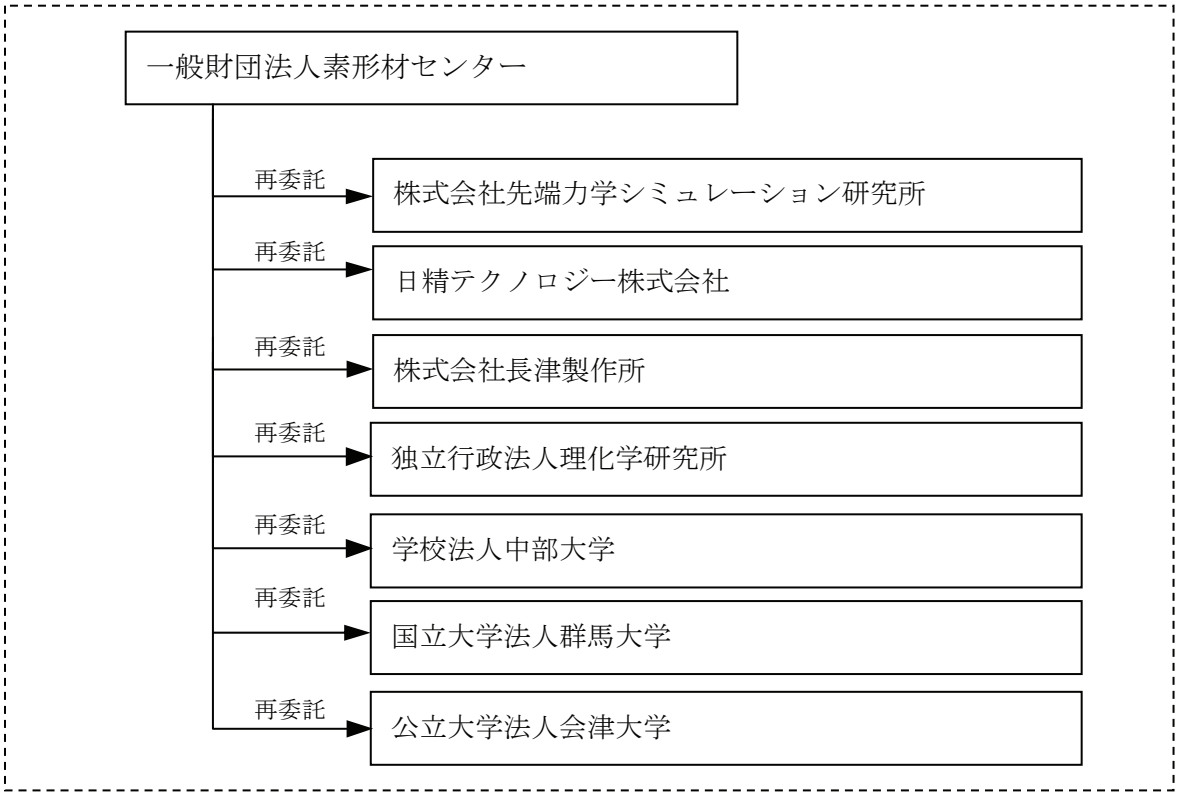
⑥最終製品の性能予測に基づく実証

実製品のサンプルデータを用いて、設計データから、金型加工、成形、最終製品の試作と評価を実施し、システム全体の性能を確認する。光学特性は、総合的にλ/4（λ=633nm）の精度を目標とする。

## １－２　研究体制

（１）研究組織及び管理体制

１）研究組織（全体）



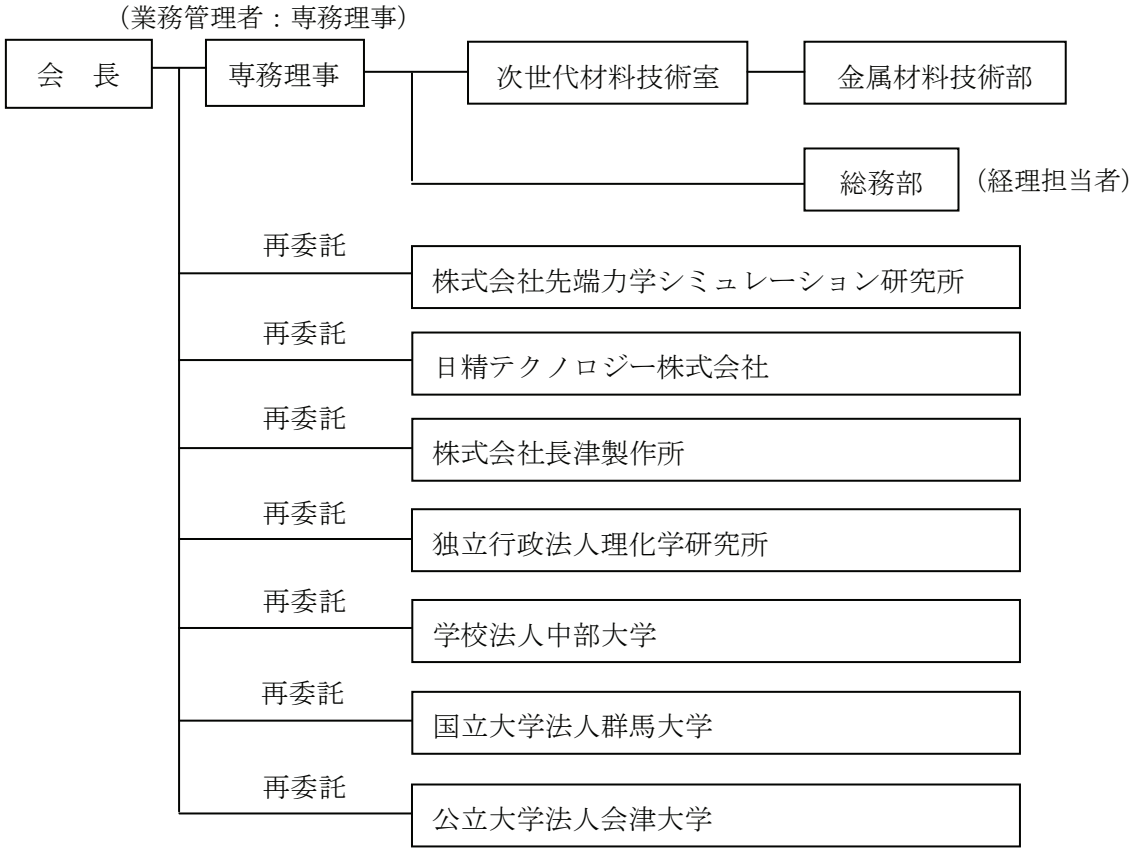

総括研究代表者（ＰＬ）
独立行政法人理化学研究所
先端技術基盤部門 超精密加工技術
開発チーム　チームヘッド
　山形　豊

副総括研究代表者（ＳＬ）
日精テクノロジー株式会社
代表取締役社長
　辻花　牟志

２）管理体制

①事業管理機関

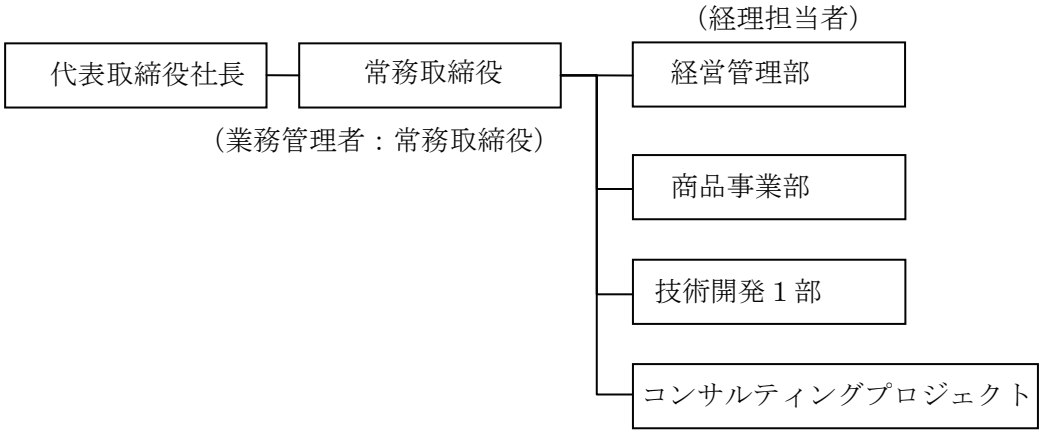
［一般財団法人素形材センター］



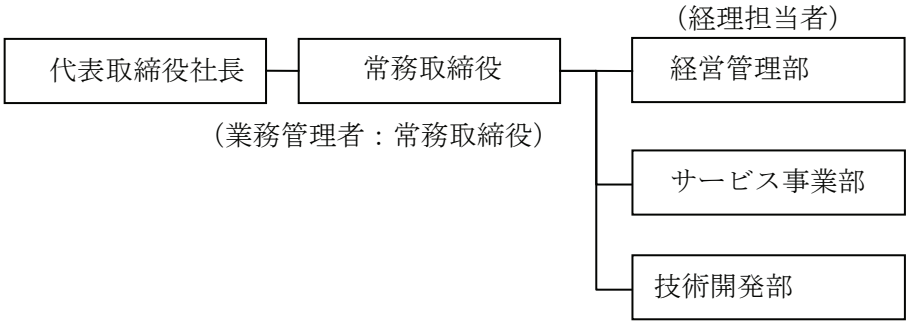

② 再委託先

［株式会社先端力学シミュレーション研究所］

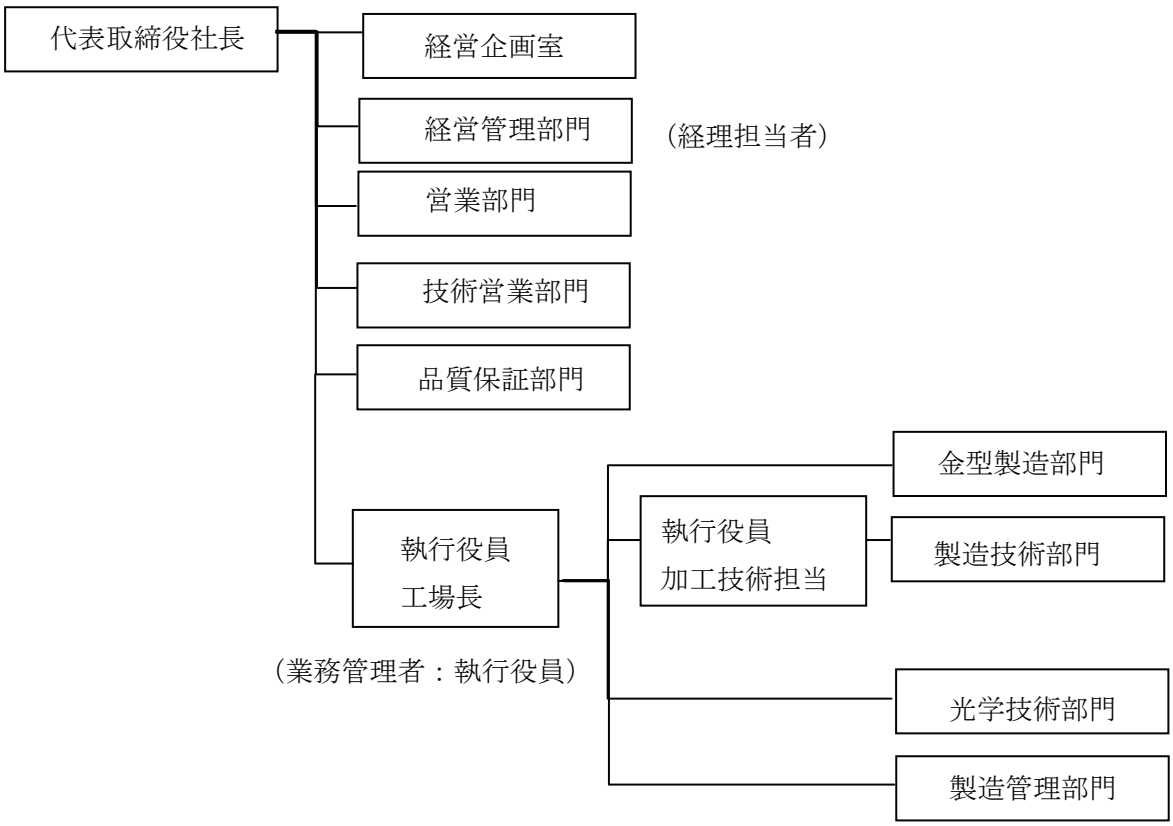
平成 24 年 2 月 27 日～平成 24 年 3 月 31 日



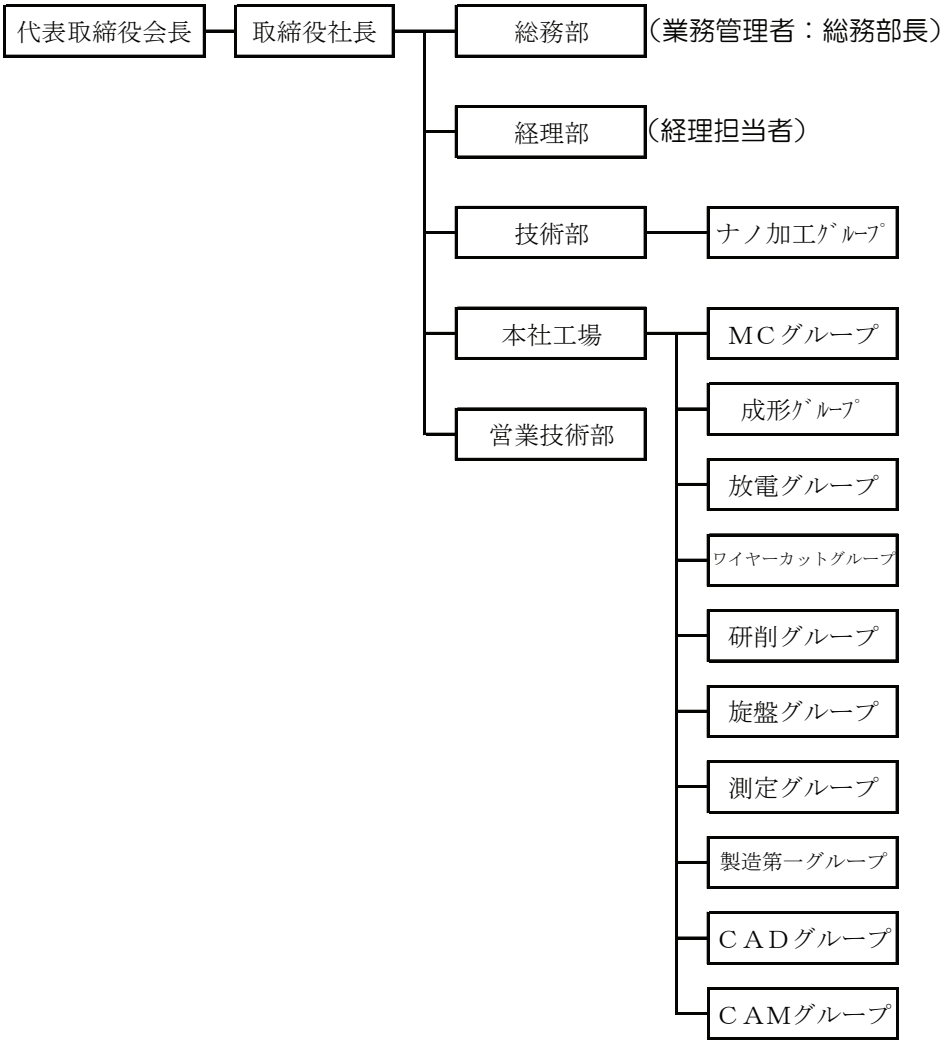
平成 24 年 4 月 1 日～平成 25 年 1 月 31 日



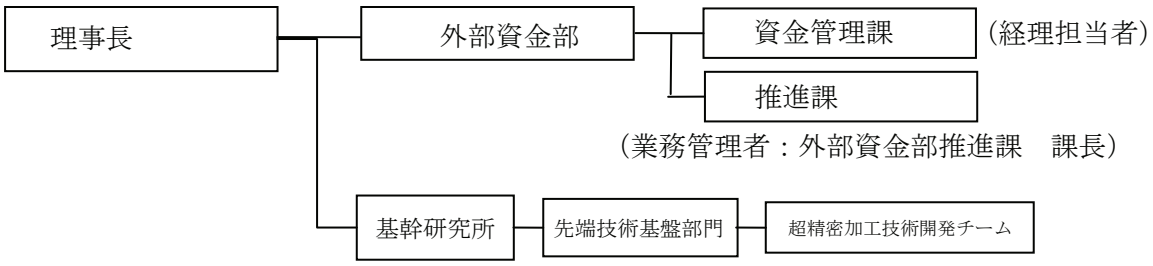

［日精テクノロジー株式会社］



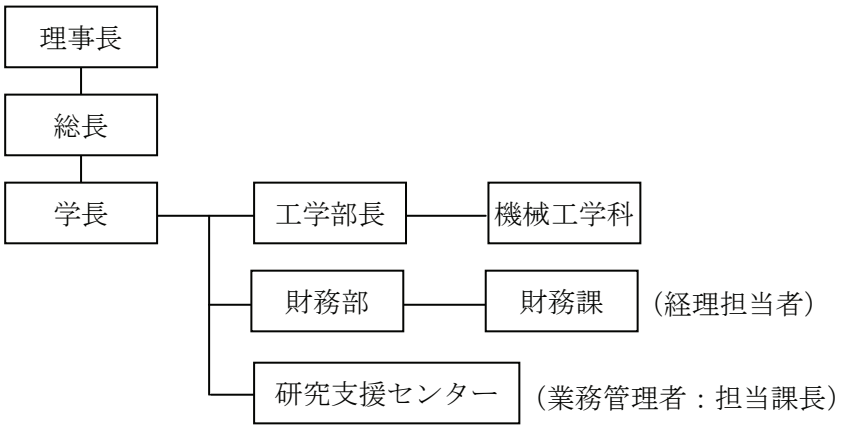
［株式会社長津製作所］



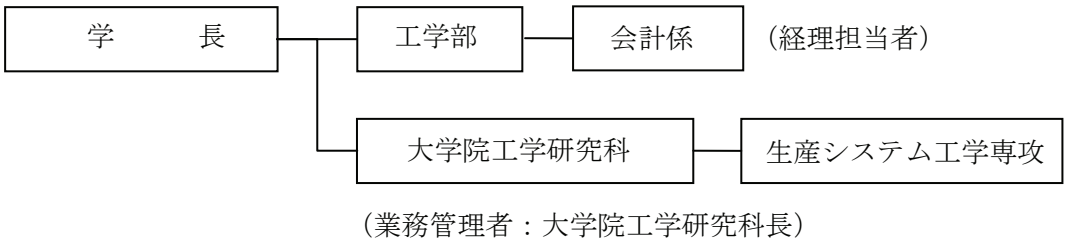

［独立行政法人理化学研究所］



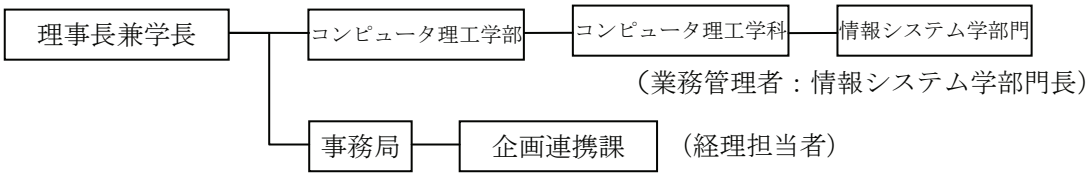
［学校法人中部大学］




［国立大学法人群馬大学］




［公立大学法人会津大学］




（２）管理員及び研究員

①　管理員

【事業管理機関】一般財団法人素形材センター

| 氏名 | 所属・役職 | 実施内容（番号） |
|---|---|---|
| 板谷　憲次 | 専務理事 | ⑦ |
| 笹谷　純子 | 金属材料技術部　部長<br>(～平成24年3月31日) | ⑦ |
| 平野　誠一 | 総務部長 | ⑦ |
| 田邊　秀一 | 金属材料技術部　主幹研究員 | ⑦ |
| 中野智香子 | 金属材料技術部　(平成24年4月1日～) | ⑦ |

② 研究員

【再委託先】

株式会社先端力学シミュレーション研究所

| 氏名 | 所属・役職 | 実施内容（番号） |
|---|---|---|
| 金井　　茂 | 商品事業部・マイスター<br>(～平成 24 年 3 月 31 日)<br>技術開発部・マイスター<br>(平成 24 年 4 月 1 日～) | ③④⑥ |
| 青野　昌弘 | 商品事業部・エキスパート<br>(～平成 24 年 3 月 31 日)<br>技術開発部・エキスパート<br>(平成 24 年 4 月 1 日～) | ⑤⑥ |
| 神庭　幸男 | 商品事業部・主任<br>(～平成 24 年 3 月 31 日)<br>サービス事業部・主任<br>(平成 24 年 4 月 1 日～) | ⑤⑥ |
| 田中　真二 | 商品事業部・主任<br>(～平成 24 年 3 月 31 日)<br>サービス事業部・主任<br>(平成 24 年 4 月 1 日～) | ⑤⑥ |
| 佐藤　允俊 | 商品事業部・研究員<br>(～平成 24 年 3 月 31 日)<br>技術開発部・研究員<br>(平成 24 年 4 月 1 日～) | ③④ |
| 蒔田　憲典 | 商品事業部・研究員<br>(～平成 24 年 3 月 31 日)<br>技術開発部・研究員<br>(平成 24 年 4 月 1 日～) | ③④ |
| 愛智　正昭 | コンサルティングプロジェクト・主任<br>(～平成 24 年 3 月 31 日)<br>サービス事業部・主任<br>(平成 24 年 4 月 1 日～) | ⑤⑥ |
| 孫　　智剛 | 技術開発一部・エキスパート<br>(～平成 24 年 3 月 31 日)<br>技術開発部・エキスパート<br>(平成 24 年 4 月 1 日～) | ③④ |

日精テクノロジー株式会社

| 氏名 | 所属・役職 | 実施内容（番号） |
|---|---|---|
| 辻花　牟志 | 代表取締役社長 | ①②④⑥ |
| 白藤　芳則 | 執行役員　加工技術担当<br>(～平成 24 年 3 月 31 日)<br>技術顧問　　(平成 24 年 4 月 1 日～) | ①②④⑥ |
| 藤澤　啓太 | 執行役員　工場長 | ①②④⑥ |

| | | |
|---|---|---|
| 原田　雅己 | 金型製造部門　課長 | ①②④⑥ |
| 渡辺　英治 | 製造技術部門　課長 | ①②④⑥ |
| 渡辺　幸治 | 金型製造部門　係長 | ①②④⑥ |

株式会社長津製作所

| 氏名 | 所属・役職 | 実施内容（番号） |
|---|---|---|
| 牧野　俊清 | 代表取締役会長 | ①②④⑥ |
| 上原　純一 | ナノ加工グループ　グループリーダー | ①②④⑥ |
| 田中　司郎 | 営業技術部　次長 | ④⑥ |
| 高橋　五郎 | MC グループ　グループリーダー | ⑥ |
| 東　　孝昭 | MC グループ | ⑥ |
| 佐藤　久之 | MC グループ | ⑥ |
| 西村　　勇 | 成形グループ　グループリーダー | ⑥ |
| 高野　圭介 | 放電グループ　グループリーダー | ⑥ |
| 野地　一利 | ワイヤーカットグループ　グループリーダー | ⑥ |
| 小林　　昇 | 研削グループ　グループリーダー | ⑥ |
| 藤巻　吉朋 | 旋盤グループ　グループリーダー | ⑥ |
| 菅野　博之 | 製造第一グループ　サブリーダー | ⑥ |
| 佐藤　　守 | 測定グループ　グループリーダー | ⑥ |
| 町田　洋章 | CAD グループ　グループリーダー | ⑥ |
| 朝倉　貴幸 | CAD グループ | ⑥ |
| 小川　達郎 | CAM グループ　グループリーダー | ⑥ |
| 斉藤　弘明 | CAD グループ | ①②④⑥ |
| 秋生　純一 | CAM グループ | ①②④⑥ |

独立行政法人理化学研究所

| 氏名 | 所属・役職 | 実施内容（番号） |
|---|---|---|
| 山形　　豊 | 超精密加工技術開発チーム　チームヘッド | ③④⑤⑥ |
| 森田　晋也 | 超精密加工技術開発チーム　研究員 | ③④⑤⑥ |
| 朱　　正明 | 超精密加工技術開発チーム　特別研究員 | ③④⑤⑥ |

学校法人中部大学

| 氏名 | 所属・役職 | 実施内容（番号） |
|---|---|---|
| 鈴木　浩文 | 工学部機械工学科　教授 | ①②⑥ |
| 岡田　　睦 | 工学部機械工学科　研究員 | ①②⑥ |
| 町田　一道 | 工学部機械工学科　客員教授 | ①②⑥ |

国立大学法人群馬大学

| 氏名 | 所属・役職 | 実施内容（番号） |
|---|---|---|
| 林　　偉民 | 大学院工学研究科　生産システム工学専攻　准教授 | ②⑤⑥ |

公立大学法人会津大学

| 氏名 | 所属・役職 | 実施内容（番号） |
|---|---|---|
| 西舘　陽平 | コンピュータ理工学部　コンピュータ理工学科　情報システム学部門　准教授 | ③⑥ |

（３）経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

（事業管理機関）

一般財団法人素形材センター

（経理担当者）　総務部長　平野　誠一

（業務管理者）　専務理事　板谷　憲次

（再委託先）

株式会社先端力学シミュレーション研究所

（経理担当者）　経営管理部長　大川　由夫

（業務管理者）　常務取締役　常木　優克

日精テクノロジー株式会社

（経理担当者）　経営管理部門　課長　笹倉　幹雄

（業務管理者）　執行役員　工場長　藤澤　啓太

株式会社長津製作所

（経理担当者）　経理部　部長　古川　浩一

（業務管理者）　総務部　部長　池田　　均

独立行政法人理化学研究所

（経理担当者）　外部資金部　資金管理課　今里　一之

（業務管理者）　外部資金部　推進課　課長　山口　晴夫

学校法人中部大学

（経理担当者）　財務部財務課　課長　岡畑　満孝

（業務管理者）　研究支援センター　担当課長　墨　　勝典

国立大学法人群馬大学

（経理担当者）　工学部　会計係長　宮路　昌浩

（業務管理者）　大学院工学研究科長　板橋　英之

公立大学法人会津大学

（経理担当者）　事務局企画連携課長　引地　敬

（業務管理者）　情報システム学部門長　ジュナディ　ニキシコフ

（４）他からの指導・協力者

研究開発推進委員会　委員

| 氏名 | 所属・役職 | 備考 |
|---|---|---|
| 山形　豊 | 独立行政法人理化学研究所先端技術基盤部門<br>超精密加工技術開発チーム　チームヘッド | ＰＬ |
| 辻花　牟志 | 日精テクノロジー株式会社　代表取締役社長 | ＳＬ |
| 白藤　芳則 | 日精テクノロジー株式会社　技術顧問 | 再委託先 |
| 安藤　知明 | 株式会社先端力学シミュレーション研究所<br>代表取締役社長 | 再委託先 |
| 金井　茂 | 株式会社先端力学シミュレーション研究所<br>技術開発部・マイスター | 再委託先 |
| 牧野　俊清 | 株式会社長津製作所　代表取締役会長 | 再委託先 |
| 上原　純一 | 株式会社長津製作所　ナノ加工グループ<br>グループリーダー | 再委託先 |
| 田中　司郎 | 株式会社長津製作所　営業技術部 次長 | 再委託先 |
| 鈴木　浩文 | 学校法人中部大学工学部機械工学科　教授 | 再委託先 |
| 林　偉民 | 国立大学法人群馬大学大学院工学研究科<br>生産システム工学専攻　准教授 | 再委託先 |
| 西舘　陽平 | 公立大学法人会津大学　コンピュータ理工学部<br>コンピュータ理工学科　情報システム学部門　准教授 | 再委託先 |
| 板谷　憲次 | 一般財団法人素形材センター　専務理事 | 事業管理法人 |
| 笹谷　純子 | 一般財団法人素形材センター　金属材料技術部　部長<br>（～平成 24 年 3 月 31 日） | 事業管理法人 |
| 田邊　秀一 | 一般財団法人素形材センター　金属材料技術部<br>主幹研究員 | 事業管理法人 |

| | | |
|---|---|---|
| 中野智香子 | 一般財団法人素形材センター　金属材料技術部<br>(平成 24 年 4 月 1 日～) | 事業管理法人 |
| 樋口　俊郎 | 国立大学法人東京大学工学系研究科<br>精密工学専攻 教授 | アドバイザー |
| 片岡　秀直 | パナソニック株式会社 エンジニアリンググループ<br>マネージャー | アドバイザー |
| 源田　享二 | 株式会社タムロン　技術企画室　室長付 | アドバイザー |
| 武田　　弘 | 協伸産業株式会社　代表取締役 | アドバイザー |
| 矢野　　健 | 有限会社メカノトランスフォーマ　代表取締役 | アドバイザー |
| 三浦　勝弘 | 三鷹光器株式会社　第一製造部　部長 | アドバイザー |
| 坂西　伸一 | 黒田精工株式会社　常務取締役 | アドバイザー |

## 1－3 成果概要

各サブテーマの成果概要は、下記のとおりである。

①機上計測システムを利用した超精密金型形状創成

プラスチック射出成形やガラスのプレスモールド、シリコーン樹脂の成形等による超精密光学素子を成形するための金型の高精度・高能率加工を実現するために、金型加工後に光学素子金型を超精密加工装置から取り外さずに機上計測し、そのまま補正加工システムを構築した。さらに、従来の機上計測システムでは加工された金型のみを測定し補正加工を行っていたが、本システムでは、機上計測用プローブの取り付け位置を移動させ、単結晶ダイヤモンド工具や研削工具等の工具形状をも測定することで、これらの工具データを基に NC プログラムに補正を加え、金型の微少なうねりなどの形状誤差を低減させ、高精度化を実現した。超高精度な光学素子用金型を短時間で完成させることを可能とするため、加工後に金型を着脱せずに加工装置上で非接触計測を行うため、必要な補正加工をその場で実施できるようにした。超精密金型の補正加工実験を行った結果、形状精度は 100nmP-V、光学特性は λ/8 の精度を目標としたが、91nm P-V の形状精度が得られ、また λ/9 相当の光学特性が得られているとみなすことができる。

②数値制御研磨システムによる金型形状補正

超精密光学素子金型の仕上げ研磨に使用する数値制御式研磨装置を用い、回転式研磨ツールによる効率的な研磨ができる数値制御式研磨装置ヘッドを新規開発した。また、金型の測定データから修正研磨プログラム生成が可能の金型補正加工データ生成システムを開発し、超精密切削加工した非球面光学素子金型の形状補正研磨実験を行った。小径研磨ツールによる非球面金型の数

値補正研磨を行い、最適研磨条件の検討により目標としていた形状精度 P-V100nm、表面粗さ Rz9nm をクリアした。

③光学・成形シミュレーション形状補正予測システムの開発

超精密光学素子(レンズ)の成形において、成形時に発生する光学性能の不具合に対し、シミュレーションを活用して表面形状の補正量を予測するシステムの開発を行った。具体的には、成形シミュレーションにより引けや内部屈折率の変化を予測し、それを用いて光線追跡シミュレーションを実施して光学性能を評価し、レンズ表面形状の補正を行うシステムを構築した。形状補正はレンズ表面形状を表す軸対称の多項式パラメータを修正することによって行った。モデルレンズを対象とした分析結果から、レンズの成形の際の引けを補正すると、光学性能としてスポット径が 1/2 へと小さくなり、高精度となる表面形状が得られた。内部屈折率については軸対称分布をしていないため、採用した補正方法では補正が難しいことが判った。

本システムを用いて補正することにより、高精度な性能を持つレンズの表面形状を予測することが可能になった。

④超精密形状・内部密度測定システムの開発

白色光干渉計を用いた内部密度計測システムを開発し、プラスチックの内部密度の計測に成功した。システムの計測精度はλ/17 を充分下回っていると推測され、目標の形状精度をクリアしていると考えられる。

⑤補正加工データ生成システムの開発

光学・成型シミュレーション形状補正予測システムにより出力される長田パッチにて表現された形状を読み込み、各種の加工条件、ツールの条件設定を行い、NC 工作機械で利用可能な G コードを出力できる補正加工用 CAM システムを開発した。当システムの精度は、形状表現に用いられる長田パッチのパッチ数により決定されるため、目標精度を充分達成しているものと考えられる。

⑥最終製品の性能予測に基づく実証

⑥－１　実証試験(Ⅰ)

本研究開発のモデルレンズを決定し、設計値での金型製作、レンズ成形を行い、実製品での樹脂の収縮誤差、成形での誤差、内部密度の不均一を含んだ誤差を示すことができた。

今回の研究開発では、射出成形での樹脂収縮による誤差、成形誤差、内部密度の不均一、等の誤差をシミュレーション、内部密度測定システムの開発を行い、実製品のサンプルデータを用いて、設計データから、金型加工、成形、最終製品の試作と評価を実施し、システム全体の性能を確認することにあったが、金型の補正加工データの生成システムを構築するところまでいたっておらず、今後、研究開発を加速して行う必要がある。

⑥－２　実証試験(Ⅱ)

設計データに基づき精密金型の製作を行った。金型の製作過程では、本研究の別テーマで開発

した機上計測加工法の実施や、金型内部に組み込んだセンサにより、金型成形中の状態を測定できるシステムを使用しつつ、システム全体の性能確認を行なった。上記の内容から、最終的に光学特性λ/9 相当(λ=633nm)の目標を達成した。

### 1－4 当該研究開発の窓口

一般財団法人素形材センター　金属材料技術部
(担当；主幹研究員　田邊秀一)
Tel：03-3434-3907　Fax：03-3434-3698　E-mail：mail@sokeizai.or.jp

# 第2章　本論

## ２－１　機上計測システムを利用した超精密金型形状創成

（実施機関：日精テクノロジー株式会社、株式会社長津製作所、学校法人中部大学）

### ２－１－１　研究内容

形状補正予測システム（サブテーマ③④⑤にて開発）のデータを利用して、最終製品の光学性能を考慮しつつ超精密金型を高能率に加工可能なシステムの開発を行う。

プラスチック射出成形やガラスのプレスモールド、シリコーン樹脂の成形等による超精密光学素子を製造するための金型を想定し、機上計測システムを用いて短時間で高精度に加工を行えるシステムとする。機上計測システムは、現有の機上測定装置に加えてオートコリメータを利用して実施する。

新たに開発するシステムでは、金型加工後、光学素子金型を超精密加工装置から取り外さずに、機上計測装置で測定し、そのまま補正加工を実施する。さらに、従来の機上計測システムでは、加工された金型のみを測定し、補正加工を行っていたが、本システムでは、機上計測用プローブの取り付け位置を移動させることで、単結晶ダイヤモンド工具や研削工具等の工具形状をも測定することで、これらの工具データを基に NC プログラムに補正を加え、金型の微少なうねりなどの形状誤差を低減させ、高精度化を実現する。

### ２－１－２　研究成果

非球面レンズやその成形金型に加え、集光型太陽電池デバイス、 マイクロチャンネルなどの医療診断用デバイスにおいては、 鋸歯状や階段状の微細な構造を持つ部品および成形金型が必要となっている。このような金型は、微細な構造を有するだけでなく、エッジのシャープさや良好な表面粗さなども同時に要求されている。そのような微細形状の測定は、従来から 2μm 程度の曲率半径のダイヤモンドスタイラスを有する接触式形状測定器により行われている。しかし、(1)無電解 Ni などの軟質金型の測定においては引掻き痕がつく。(2)触針 R の輪郭度や R の個体差の影響が出る．(3)触針の摩耗の影響が出る。(4)矩形エッジ部の正確な計測ができない。などの問題点が生じる。それに対して、サブミクロンサイズのレーザ光をプローブとして走査する非接触 3 次元測定法では、上述のような問題点がなく、非球面形状の機上計測において有望であると考えられる [1)]．そこで、超精密加工機に、非接触騎乗測定器を搭載し、機上測定システムを構築した。用いた構成は以下のとおりである。

#### ２－１－２－１　超精密加工機 ULG-100D(東芝機械)

超精密加工機は図 2.1.1 に示すように 4 軸(X、Y、Z、C)制御の超精密加工機である．超精密加工機の XY、Z 軸の案内面は、VV の超精密ころ軸受け案内で、1nm 分解能のレーザリニアスケールによるリニアモータ駆動である。ワーク主軸は超精密空気軸受けであり、1/1 万°分解能を有し、高精度回転が可能である。

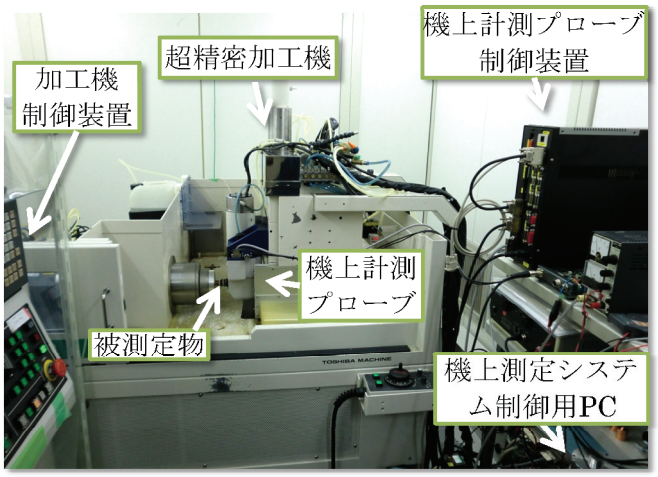



図 2.1.1　同時4軸制御超精密加工機

### 2－1－2－2　非接触機上測定器(三鷹光器)を用いた機上計測システム

レーザプローブ式形状測定器の装置外観を図 2.1.2 に、測定原理を図 2.1.3 に示す[2)]。測定装置の仕様は、使用レーザの波長 λ=0.635μm(赤色)で、レーザリニアスケールにより Z=1nm 分解能である。レーザは顕微鏡鏡筒部に組み込まれており、対物レンズから被測定物に照射しその反射光を AF センサ上で結像させる。この時レーザスポットが光軸の中心に来るように AF 駆動機構にて対物レンズを Z 方向に位置決めし、フォーカス点の XYZ の座標値(超精密加工機の座標)をコンピュータに取り込む。高精度に位置決めされた(X、Y、Z)軸案内で被測定物を移動させフォーカスした各点の XYZ 値から三次元形状測定等を行なう。つまり、レーザのスポットをプローブとして表面形状の測定を行なう。レーザポイントオートフォーカスプローブと高速スキャン測定機構により測定を行う．特徴は以下のとおりである。

(1)小型超精密加工装置上に搭載可能

(2)ワークを取り外すことなく、研削・切削・研磨等の加工と測定の実施が可能

(3)レーザスポット径は、0.4μm 程度と水平方向分解能が高く、微細形状の測定に効果的

(4)連続フォーカス方式に対応し、高速なスキャン測定が可能

図 2.1.2　レーザプローブ式形状測定器の装置外観

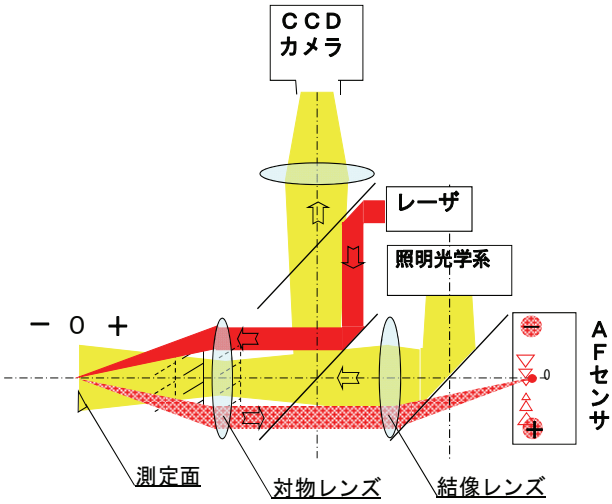



図 2.1.3　測定原理

### ２－１－２－３ リアルタイム測定システム

機上測定装置の構想設計した非接触機上測定プローブの外形図を、図 2.1.4 に示す。連続フォーカス方式を実現するための制御システムのダイアグラム、およびリアルタイム測定システムのダイアグラムを、図 2.1.5 および図 2.1.6 に示す。

超精密加工装置上への装置の搭載を進め、ソフトウェアの開発を実施した(図 2.1.7～2.1.8)。

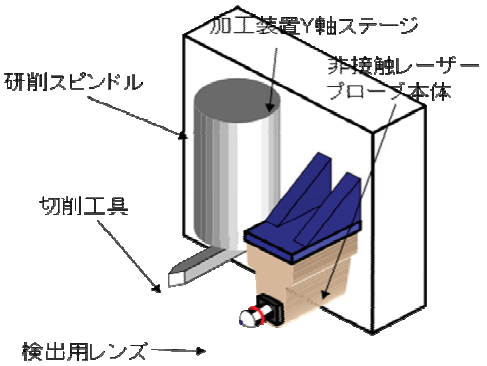



図 2.1.4 非接触機上測定プローブの超精密加工装置への搭載図

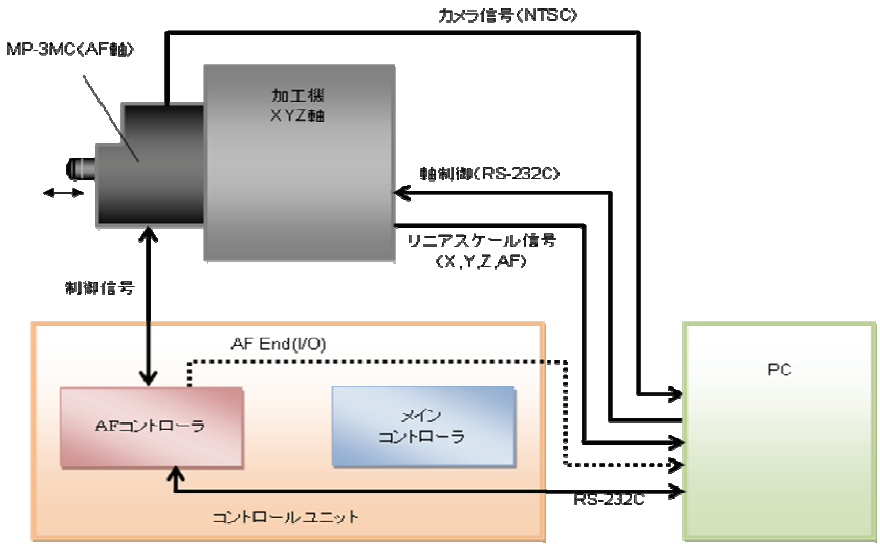



図 2.1.5 連続フォーカス方式を実現するための制御システムのダイアグラム

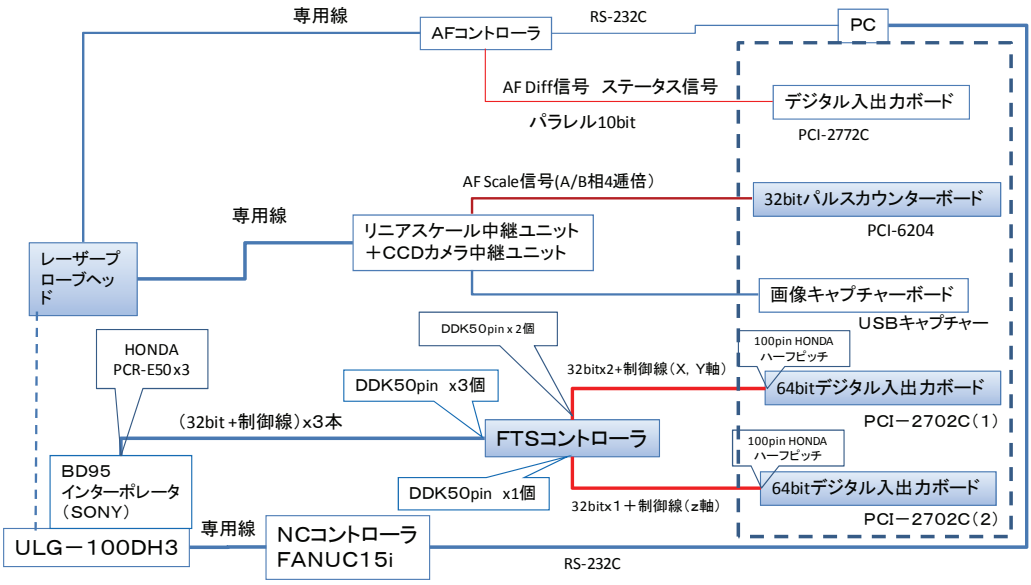



図 2.1.6 リアルタイム測定システムのダイアグラム

超精密加工装置は、4 軸同時制御可能は 1nm 制御の加工装置で、能動型防振台に搭載されており、開発されたプローブの試験用として充分な性能を有していると考えられる。まず、機上計測システムは、リアルタイム測定を実現するために加工装置の X、Y、Z 軸のリニアスケール信号を PC で直接キャプチャーできるような分岐回路を通し、レーザープローブヘッドの信号と同時にキャプチャーした。レーザプローブ側の信号は、AF のためのリニアスケールの変位信号と同時に AF システムのオートフォーカス誤差信号も同時に入力し、高速なリアルタイム測定によりフォーカスが完全に得られていない場合でも、これを用いて精度を改善できるように配慮されている。

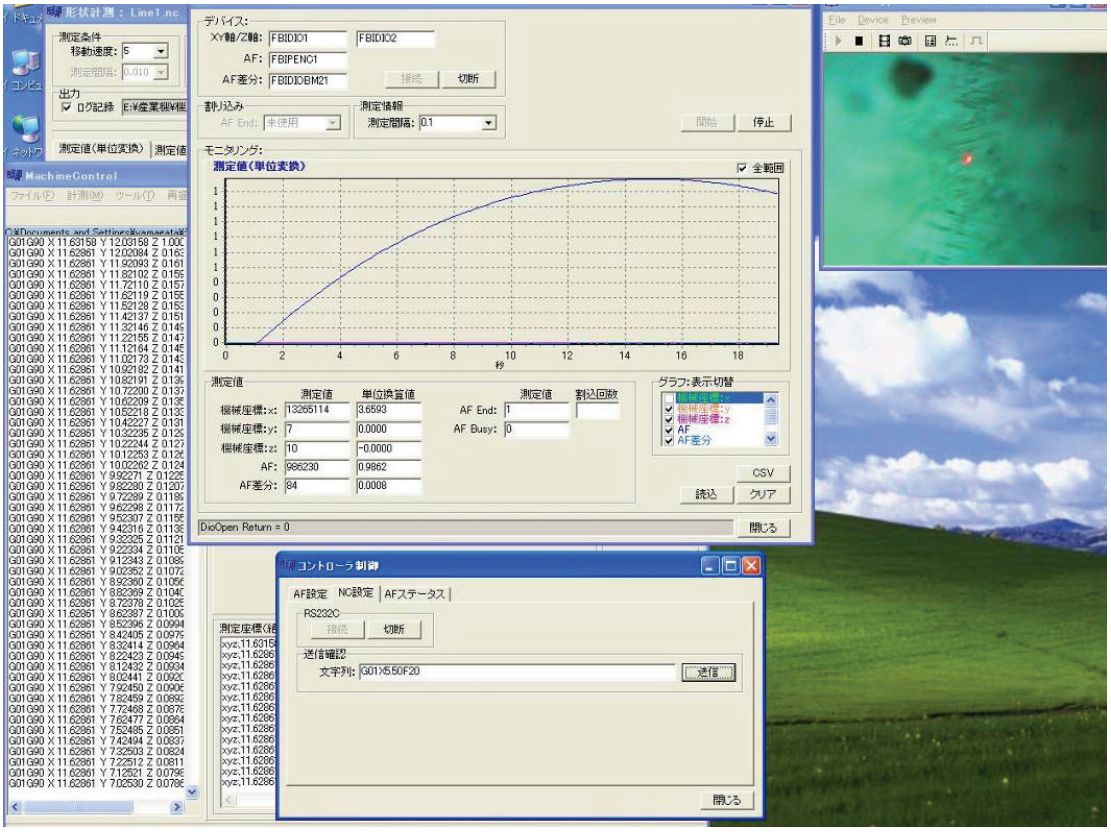



図 2.1.7　開発した微細形状計測・評価ソフトウェアの画面構成

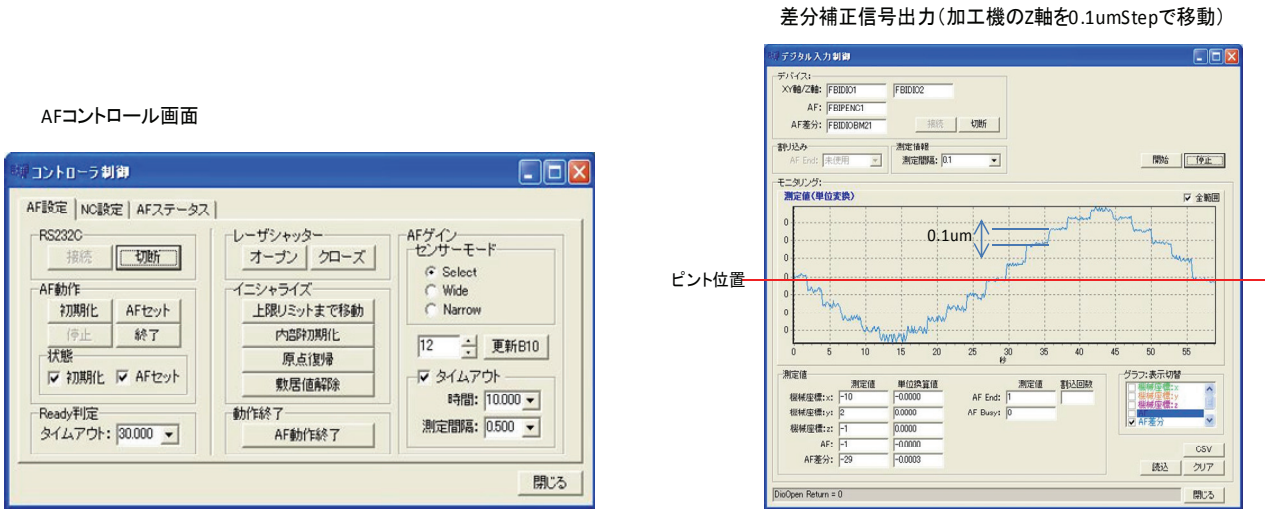



図 2.1.8　レーザプローブ制御機能

### ２－１－２－４　開発した機上測定ソフトウェア

微細形状の計測・評価を実施するソフトウェアの開発を行い、レーザプローブの信号、超精密加工装置の信号、そして NC 制御装置へのコマンド送信も処理可能となった。開発されたソフトウェアの画面を図 2.1.9 に示す。複数のウィンドウが混在するとし操作性が悪いため、操作に必要な機能だけに絞って一画面化している。また加工機との連携を深めるため、刃先原点と計測原点の 2 つの座標を 1 つにしている。

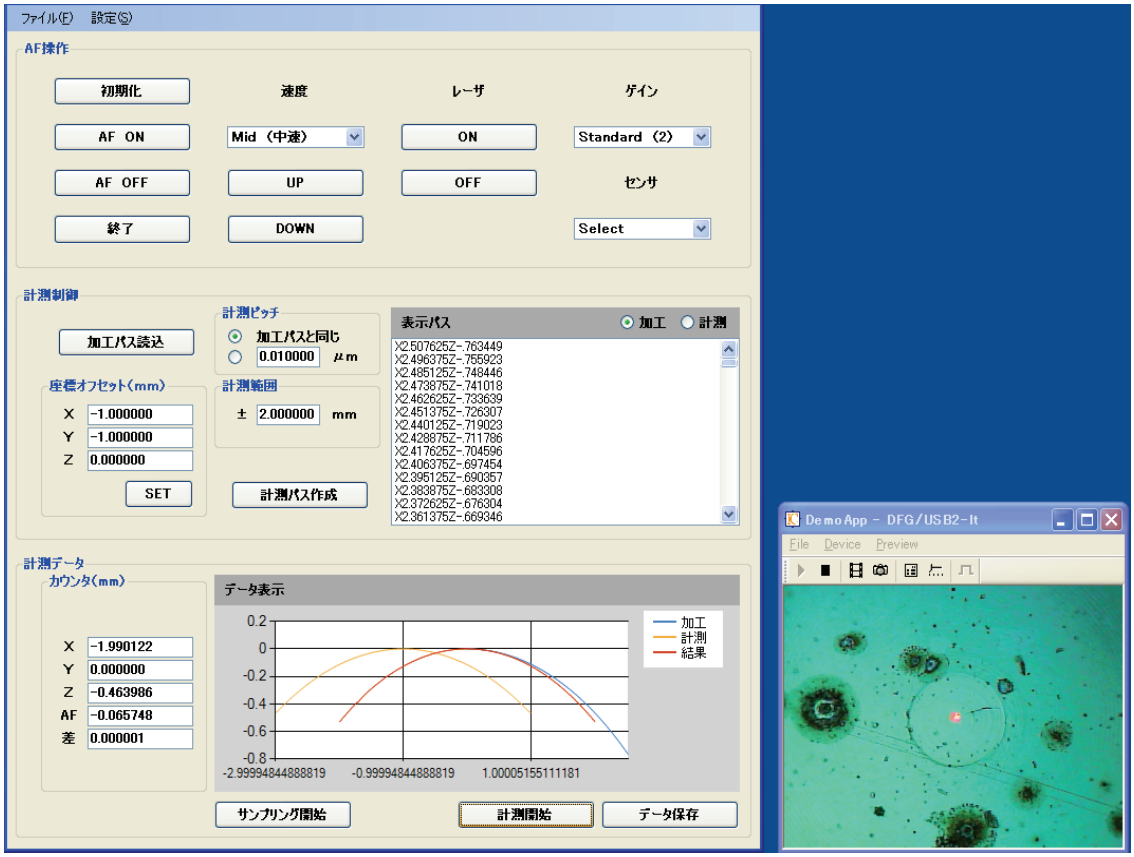



図 2.1.9　機上計測用ソフトウェア

### ２－１－２－５　非球面形状の加工･計測･補正加工実験

ここでは図 2.1.10 に示す非球面レンズの成形金型を用いて補正加工実験を行った。金型材質は焼入れステンレス鋼に無電解 Ni を施して加工した。ワーク形状としては光ディスクピックアップ対物レンズの模擬拡大形状とした。

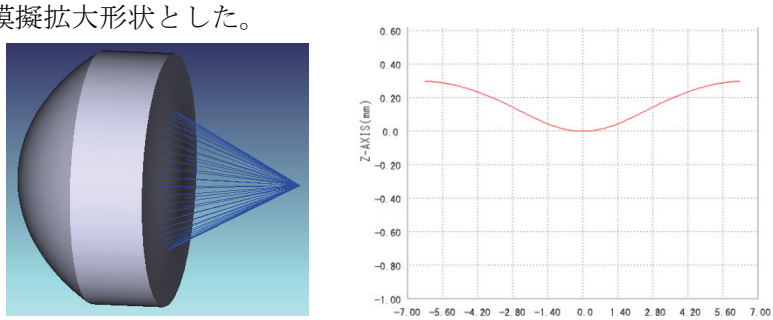
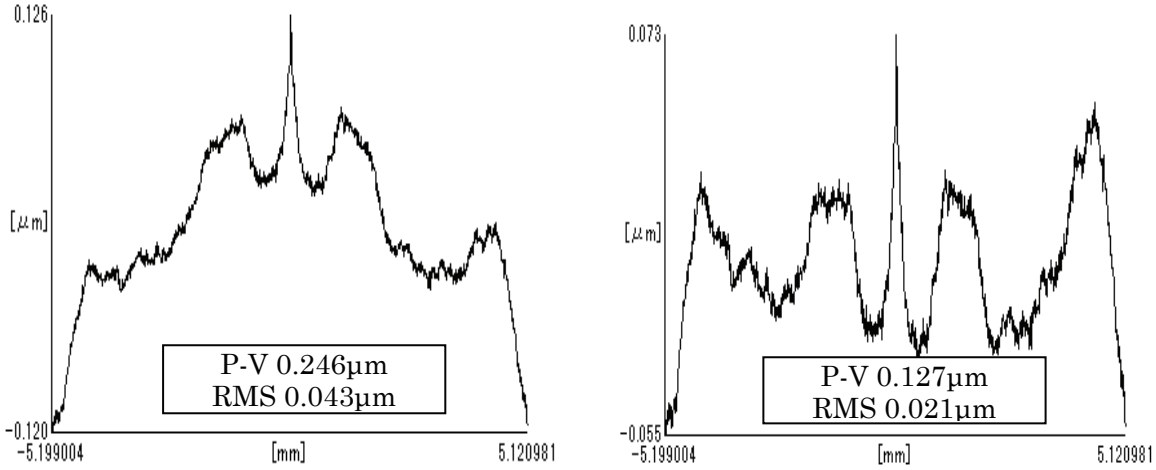



図 2.1.10　光ディスクピックアップ対物レンズの模擬拡大形状の非球面レンズ

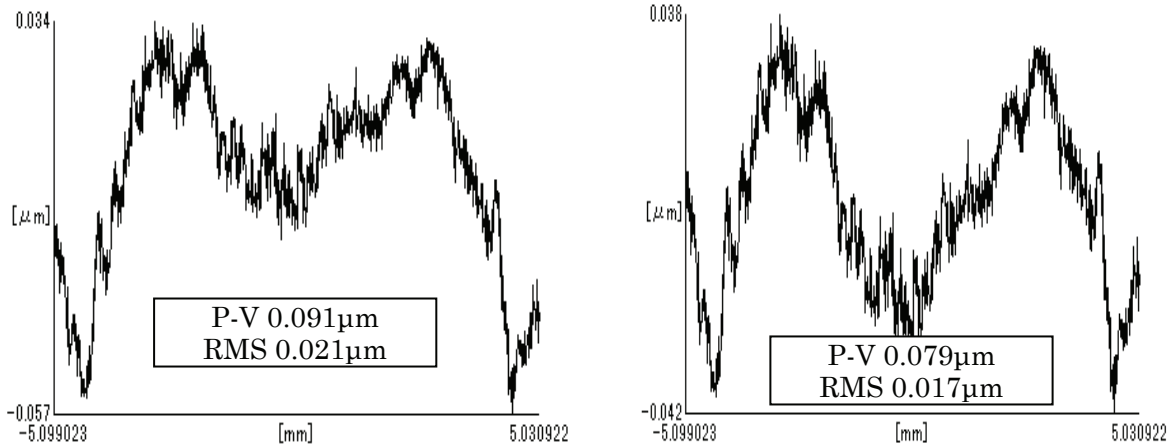
機上計測ソフトウェアにて加工パスを用いて計測パスを作成し、図 2.1.10 に示す球面形状を計測した。補正加工は計測した結果をベスト R フィッティング評価で誤差量を算出し、誤差量を加工パスに足し合わせて補正加工パスを作成し再度加工を行った.次に、補正加工後の形状を再び計測し誤差量を求め、補正加工前と後での結果を比較する。

加工を行ったあと形状を計測し、ベスト R フィッティング評価した結果を**図** 2.1.11 に示す。約 0.25μmP-V の加工誤差が存在することを確認できる。図 2.1.11 の形状誤差曲線から補正加工用パスを作成し再加工したものを形状計測し、ベスト R フィッティング評価したものを**図** 2.1.12 に示す。約 0.25μmP-V であった加工誤差が約 0.09μmP-V に減少しているのが確認できる。またベストフィット R による形状誤差は 0.079μmP-V で、光学特性でλ/9 に相当する。これらのことから機上計測は非常に有用であり、新しいソフトウェアも加工～計測～補正加工までスムーズに作業できることが実証できた。




(a)設計形状に対する形状誤差　　(b)ベストフィット R による形状

**図 2.1.11　補正加工前の形状誤差曲線**




(a)設計形状に対する形状誤差　　(b)ベストフィット R による形状

**図 2.1.12　補正加工後の形状誤差曲線**

### ２－１－２－６ まとめ

超高精度な光学素子用金型を短時間で完成させることを可能とするため、加工後に金型を着脱せずに(着脱回数 0 回を目標)加工装置上で非接触計測を行うため、必要な補正加工をその場で実施できるシステムの構築を行った。超精密金型の形状精度は 100nmP-V、光学特性としてはλ/8 の精度を目標としたが、 91nmP-V の形状精度と、λ/9 相当の光学特性が得られているとみなすことができる。

今後は、様々なメーカの実形状の非球面金型の機上測定と補正加工テストを繰り返し、機上測定精度、補正加工精度、加工能率の短縮を図っていき、実用性を高めるとともに本システムの商品化も検討していく。

### 参考文献

1) H. Suzuki 1, T. Onishi 1, T. Moriwaki 2 (1), M. Fukuta 3 , J. Sugawara, Development of a 45 Degrees Tilted On-Machine Measuring System for Small Optical Parts, Annals of the CIRP, 55, 1(2008)pp. 414-417.

2) H. Suzuki, T. Kinoshita, T. Onishi, T. Moriwaki, K. Miura, T. Okino: Development of On-Machine Non-Contact Type Aspherical Measurement System, Proceedings of 8th euspen international Conference, Zurich, Austria (2008) pp.325-328.

## ２－２ 数値制御研磨システムによる金型形状補正

（実施機関：日精テクノロジー株式会社、株式会社長津製作所、国立大学法人群馬大学、学校法人中部大学）

### ２－２－１ 研究内容

超精密切削又は研削にて加工された超精密光学素子の金型の表面粗さを向上させ、場合によっては同時に形状を補正し、目的とする最終製品の性能を満足する形状を創成する数値制御方式の研磨システムを開発する。回転式研磨工具又は振動式研磨工具を、X,Y,Z の直交 3 軸と回転軸を有する NC 制御精密ステージに設置し、超精密金型の形状測定データに基づき、数値的に滞留時間制御を行い、超高精度な形状と良好な表面粗さを効率的に形成可能とする。研磨条件の検討は、数値制御式研磨装置ヘッドを利用して実施する。最終的には、非球面金型の均等研磨装置にて研磨痕を除去した後に、CVD 法やフィルタードアーク法による DLC 薄膜や CVD 法による窒化物薄膜等を金型表面に必要に応じて形成することにより金型の耐久性を量産に耐えうるものとする。

### ２－２－２ 研究成果

#### ２－２－２－１ 数値測定式研磨装置ヘッドの開発

小型光学素子の超精密研磨の場合、数値制御式研磨装置の応用が有効であることがすでに確認でき、実際の金型量産加工に応用した。数値制御式研磨装置は直交軸 X,Y,Z の 3 軸とワーク回転軸 C 軸の 4 軸同時制御が可能であり、超音波振動援用により、小径光学素子金型の研磨が可能で

ある。しかし、本プロジェクトの開発対象である結図像系光学素子の研磨において研磨効率が低く、研磨ツールの形状制御(摩耗)が難しいなどの問題点があった。

本研究では、小径回転工具による研磨法を提案し、数値制御式研磨ヘッドの開発を行った。図 2.2.1 に小径回転工具による研磨法の原理を示す。ウレタンゴムや研磨布などの軟質のポリシャを角度 θ 傾斜した状態で高速回転させ、荷重を付加して砥粒懸濁液を噴霧しながら送り速度を制御して形状創成するものである。この場合、加工量を δ、加工圧を P、ポリシャと工作物の相対速度を V、研磨時間を t とすると、加工量 δ は Preston の法則により式(2.2.1)で表わせる。

$$\delta = k \cdot P \cdot V \cdot t \qquad \cdots\cdot(式\ 2.2.1)$$

ここで k は工作物や砥粒、ポリシャなどの研磨条件によって決定される定数である。この場合、加工点におけるポリシャと工作物の相対速度 $V$ は式(2.2.2)で表せる。

$$V = 2\pi r \omega \cdot \sin\theta \qquad \cdots\cdot(式\ 2.2.2)$$

ここで、$\omega$ は回転数、$r$ はポリシャ半径である。

提案した小径回転工具を数値制御式研磨装置へ搭載可能にするには、まず、小径回転工具を使用する数値制御式研磨ヘッドを設計し、図 2.2.2 に示すように数値制御式研磨装置への搭載を検討した。その後、数値制御式研磨ヘッドを試作し、研磨装置に搭載した。図 2.2.3 に数値制御式研磨ヘッドを搭載した研磨装置の外観を示す。

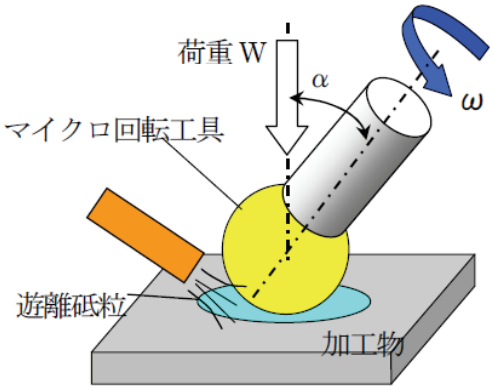



図 2.2.1 数値制御式研磨装置の外観

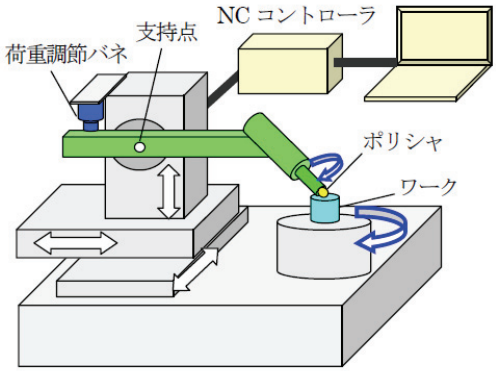



図 2.2.2 数値制御式研磨ヘッドのイメージ

図 2.2.3 数値制御式研磨ヘッドを搭載した研磨装置

### ２－２－２－２　金型補正加工データ生成システム

非球面光学素子金型研磨において、測定データより金型研磨時の修正研磨量の算出が必要であり、また、算出した修正量により修正研磨を行うことが可能であることが前提である。本研究において、すでに開発した数値制御式研磨装置に対応し、プログラムは PC(OS:Windows)上で稼動するものが必要である。また、3 軸加工機対応：X,Y,Z の 3 軸並進運動に対応可能とし、軸対称非球面形状の対象物に対する測定データの読み込みを可能とし、加工データの生成を可能とする条件が必要である。図 2.2.4 に開発した金型補正加工データ生成システムの実行画面である。

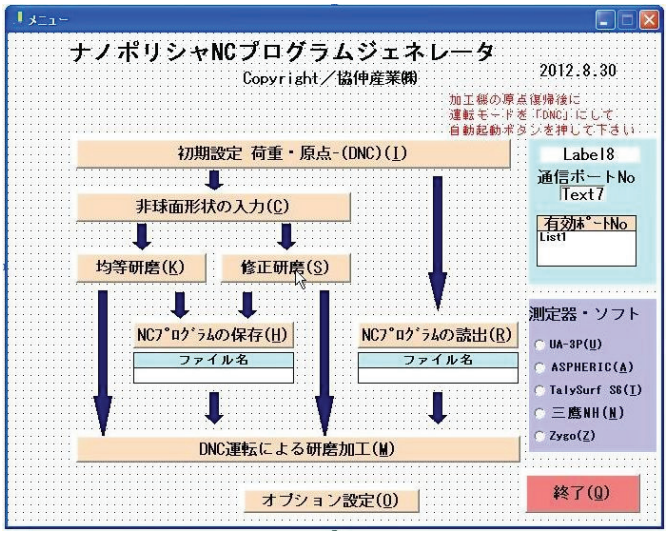



図 2.2.4　開発した金型補正加工データ生成システムの実行画面

### ２－２－２－３　超精密光学素子金型補正研磨実験

#### （1）　小径研磨ツールの研磨特性

開発した数値制御式研磨ヘッドより､研磨加工対象材料の NiP メッキの研磨特性調査を行った。表 2.2.1 に実験条件を示す。実験サンプルを研磨装置に固定し、回転ツールのみが回転した場合の研磨加工量の推移を調べた。図 2.2.5 に非接触形状測定機により測定した研磨エリアの断面形状を示す。また、各研磨時間で得られた研磨痕の中心断面の高さを研磨量と定義し、整理した研磨量結果を図 2.2.6 に示す。図 2.2.6 から、研磨時間の増大に伴い、研磨量が線形に増加することがわかった。

表 2.2.1　小径研磨ツールの研磨特性実験条件

| | |
|---|---|
| 工具の半径 | 3mm |
| 荷重 | 0.098N |
| ツールの回転数 | 約 5000rpm |
| 研磨液 | アルミナ<br>平均粒子径 0.3μm |
| ツール材質 | ポリウレタン |
| 研磨時間 | 10,20,30,40 分 |

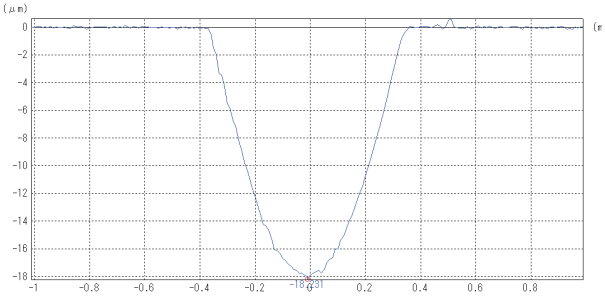


図 2.2.5　単一研磨痕の断面測定データ例

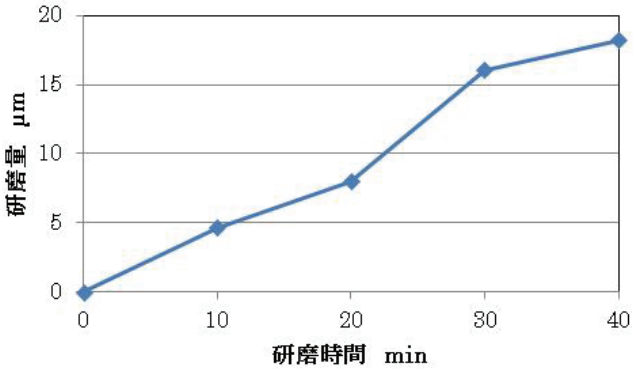


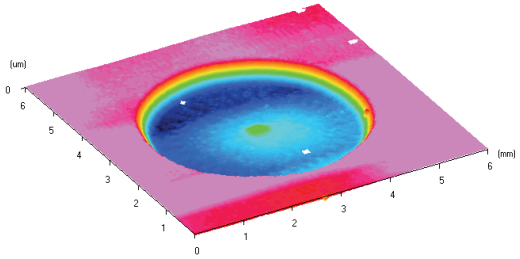

図 2.2.6　小径研磨ツールによる研磨加工量の変化

（2） 小径研磨ツールのツール半径の影響

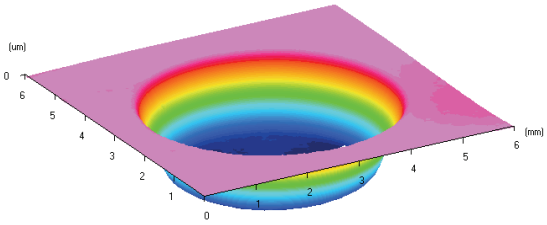
続いて研磨ツールの研磨能力について実験した。ツール半径 2mm、3mm と 5mm の研磨ツールを用い、表 2.2.2 に示す条件で実験を行った。なお本実験において、初期条件を揃えるために、精密に研磨を施したガラス板を研磨対象にした。図 2.2.7 に測定した研磨エリアの 3 次元形状を示す。本実験から、使用する研磨工具の半径の増大によって、研磨量が増大することがわかった。実際の金型の形状、誤差状況により、研磨工具の半径を選択する必要がある。

表 2.2.2　ツールの研磨特性実験条件

| | |
|---|---|
| 研磨エリア直径 | φ4 mm |
| 工具の材質 | 発泡ポリウレタン |
| 研磨サンプル材質 | スライドガラス |
| 工具の半径 | 2mm,3mm,5mm |
| 工具の回転数 | 約 2500rpm |
| 目標加工量 | 0.2μm |
| 往復回数 | 2 回 |
| 荷重 | 0.196 N |
| 研磨時間 | 約 17 分 |
| 使用研磨液 | 酸化セリウム 10wt% |



研磨ツール半径 2mm



研磨ツール半径 5mm

図 2.2.7　研磨エリアの測定結果例

### （3） 非球面金型の仕上げ研磨結果

数値制御式研磨ヘッドによる非球面光学素子の金型研磨実験を行った。研磨性能を確認するため、超精密加工機でダイヤモンドバイトによる非球面形状の切削加工を行った。異なる切削条件により、いくつのサンプルを加工した。図 2.2.8 に切削加工した非球面金型の外観を示す。また、切削加工後の表面粗さ測定データを図 2.2.9 に示す。図 2.2.9 からわかるようにダイヤモンドバイトによる切削痕がはっきり残っていることがわかった。本サンプルを数値制御式研磨装置による修正研磨を行った。表 2.2.3 に修正研磨実験条件を示す。半径 3mm の研磨ツールを使用することにより、工具の回転数を変更させたところ、図 2.2.10 に示すように回転数が 5000rpm の時において、表面粗さ Rz9nm を達成した。また、形状精度も P-V100nm に収めた。図 2.2.11 に修正研磨前後の金型断面形状精度の測定結果の一例を示す。

図 2.2.8 切削加工した非球面金型の外観

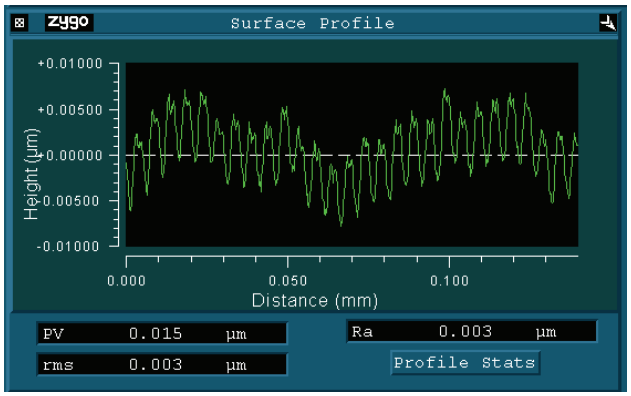



図 2.2.9 切削した非球面金型の表面粗さ測定結果

表 2.2.3 非球面金型研磨条件

| | |
|---|---|
| 研磨部半径 | 2 mm |
| 工具の材質 | 発泡ポリウレタン |
| 工具の半径 | 3mm |
| 工具の回転数 | 2000-5000rpm |
| 目標加工量 | 0.2 μm |
| 往復回数 | 2 |
| 荷重 | 0.196 N |
| 研磨時間 | 10-40 min |
| 使用研磨液 | アルミナ(平均粒径 50nm) |

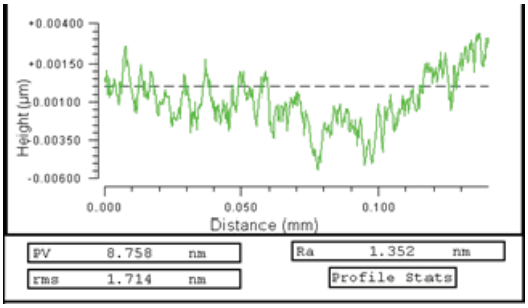



図 2.2.10 修正研磨後の粗さ測定結果

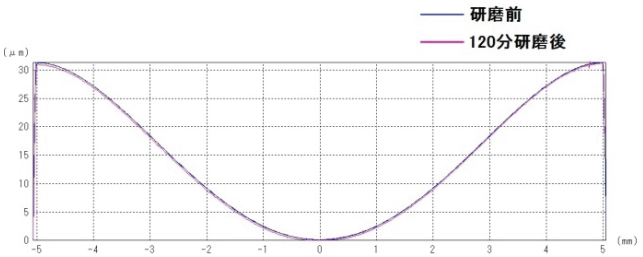



図 2.2.11 修正研磨前後の形状比較

### ２－２－２－４ まとめ

超精密光学素子金型の仕上げ研磨に使用する数値制御式研磨装置を用い、回転式研磨ツールによる効率的な研磨ができる数値制御式研磨装置ヘッドを新規開発した。また、金型の測定データから修正研磨プログラム生成が可能の金型補正加工データ生成システムを開発し、超精密切削加工した非球面光学素子金型の形状補正研磨実験を行った。小径研磨ツールによる NiP 材料の研磨特性を調べ、非球面金型を数値補正研磨の実施により、最終的に目標としていた形状精度 P-V100nm、表面粗さ Rz9nm をクリアした。

## ２－３ 光学･成形シミュレーション形状補正予測システムの開発

（実施機関：株式会社先端力学シミュレーション研究所、独立行政法人理化学研究所、公立大学法人会津大学）

### ２－３－１ 研究内容

「現物」に基づくシミュレーションである VCAD システムをベースとし、計測された形状データを利用して最終製品の光学特性を予測し、形状補正データを出力システム（サブテーマ⑤にて開発）との協力により、補正量を事前に予測できるシステムの開発を行う。プラスチック等の高温成形時の材料パラメータを考慮し、VCAD システムを利用した有限要素法シミュレーションにより、成形の全プロセスで発生する形状誤差及び内部屈折率の不均一性を予測する。予測結果とサブテーマ④の計測結果を比較し、シミュレーションパラメータのチューニングを行う。さらに、予測された形状誤差及び内部屈折率の不均一を考慮して光線追跡シミュレーションを行い、最終的な光学特性を予測できるシステムとする。これにより、成形加工を実際に行わなくとも最終製品の光学的な特性の予測が可能となる。シミュレーションシステムの開発には、光学設計システム及びソフトウェア開発パッケージを利用して行う。

### ２－３－２ 研究成果

#### ２－３－２－１ 光学･成形シミュレーション形状補正システムの概要

図 2.3. 1 に今回開発した光学・成形シミュレーション形状補正予測システムの概要図を示す。

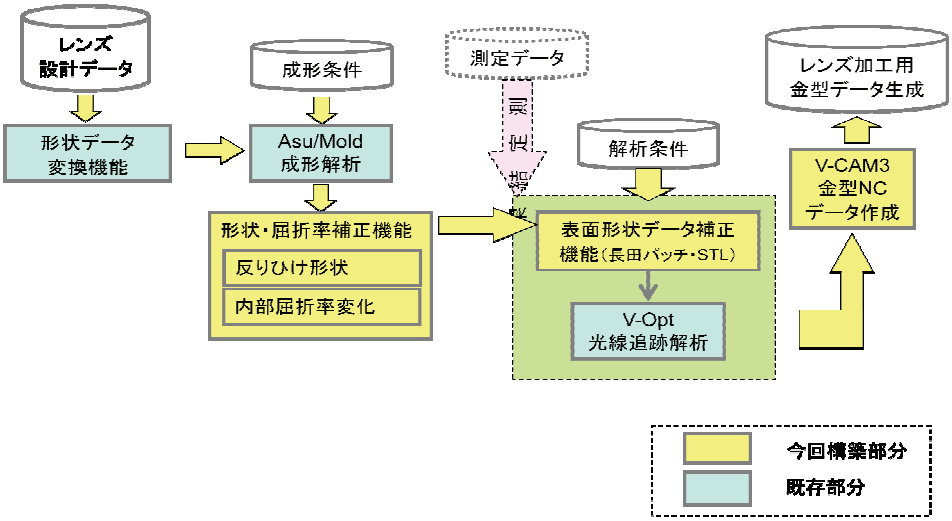



図 2.3.1　光学・成形シミュレーション形状補正予測システムの概要

本補正システムの主な機能としては、図 2.3.2 に示すような下記の 5 つの機能を有する。

① レンズ初期設計データの入力機能

② 成形シミュレーションの実施機能

③ 光線追跡シミュレーションの実施機能

④ 計測データのフィッティング機能

⑤ CAM データ生成の実施機能

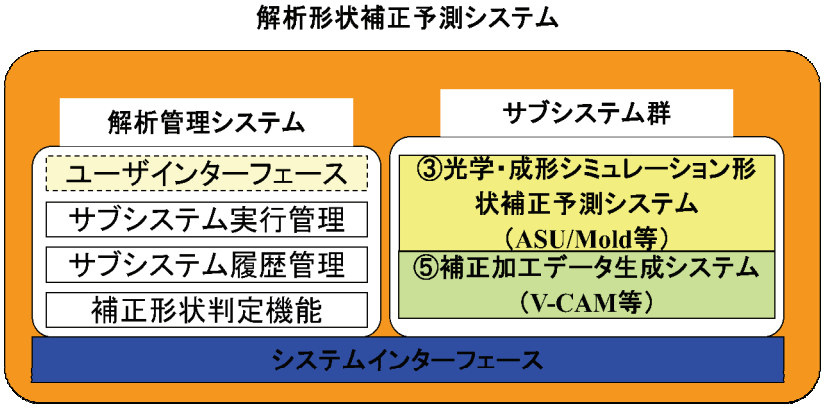



図 2.3.2　光学・成形シミュレーション形状補正予測システム機能図

以下に、光学・成形シミュレーション形状補正予測システムの概略について述べる。

①レンズ初期設計データの入力機能

レンズの形状は、下記の多項式で与えられている。なお、レンズ初期設計データは、図 2.3.3 に示す画面より入力する。

$$Z = \frac{X^2/R}{1+\sqrt{1-(1+k)*(X^2/R^2)}} + A_2X^2 + A_4X^4 + A_6X^6 + A_8X^8 + A_{10}X^{10} + A_{12}X^{12} + A_{14}X^{14}$$

$$+A_{16}X^{16} + A_{18}X^{18} + A_{20}X^{20} \qquad \cdots\cdot(式\ 2.3.1)$$

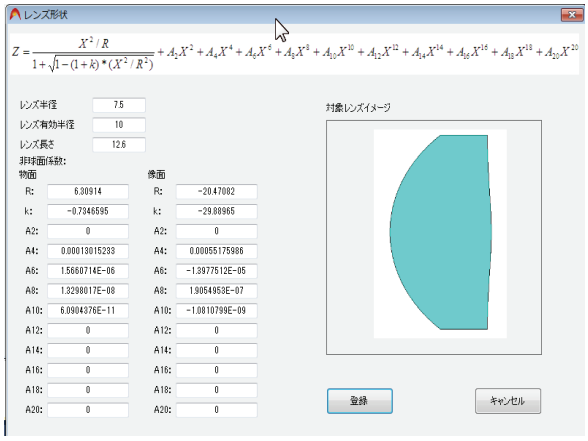



図 2.3.3 レンズパラメーター入力画面

また、本研究で実施したレンズ初期設計形状およびパラメータは、図 2.3.4、表 2.3.1 で与えられている。

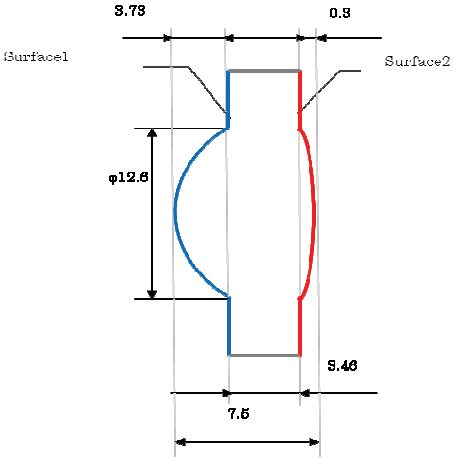



図 2.3.4 対象レンズ形状(単位:mm)

表 2.3.1 レンズ形状パラメータ

| | Surface1 | Surface2 |
|---|---|---|
| R | 6.30914 | -20.47082 |
| K | -0.7346595 | -29.88965 |
| A | 0.0 | 0.0 |
| B | 0.00013015233 | 0.00055175986 |
| C | 1.6560714e-006 | -1.3977512e-005 |
| D | 1.3298017e-008 | 1.9054953e-007 |
| E | 6.0904376e-011 | -1.0810799e-009 |

②成形シミュレーションの実施機能

樹脂の射出成形シミュレーションプログラム(ASU/MOLD)を起動する機能である。解析の詳細については次節にて述べる。

③光線追跡シミュレーションの実施機能

光線追跡シミュレーションプログラムを起動する機能である。解析の詳細については次節にて述べる。

④計測データのフィッティング機能

実製品または解析結果の表面データから、式 2.3.1 の多項式に最小 2 乗法でフィッティングして各次数の係数を求める機能である。

⑤CAM データ生成の実施機能

本システムで長田パッチ[1]データ形式で与えられたレンズ表面データに対応した NC 加工用カッターパスデータ生成プログラム VCAM3 の起動を行う。図 2.3.5 に VCAM3 の画面例を示す。

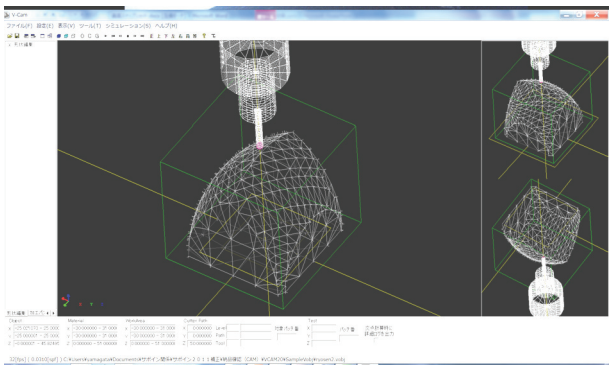


図 2.3.5　VCAM 画面

### 2－3－2－2　樹脂成形シミュレーション

本研究に於ける樹脂射出シミュレーションは ASU/MOLD (ASTOM 社製、射出成形シミュレーションソフトウェア)を用いて実施した。実際に試作が行われた図 2.3.6 に示す 4 個取りのレンズを対象とした。

なお、解析に用いた物性値及び解析条件を以下に示す。

樹脂種類：ZEONEX

金型温度：270℃

射出時間：1 秒

保圧条件：816kg×11 秒

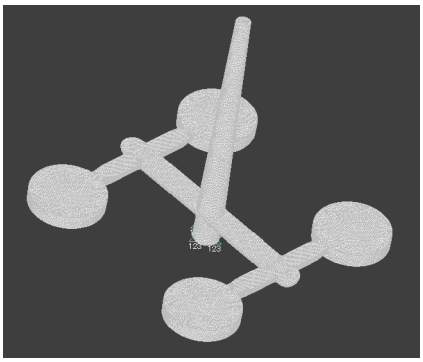


図 2.3.6　成形解析メッシュ

解析結果を図 2.3.7～図 2.3.8 に示す。図 2.3.7 には流動履歴図(樹脂が充填された時間)、図 2.3.8 には成形後の残留ひずみ(体積ひずみ)の分布断面図を示す。

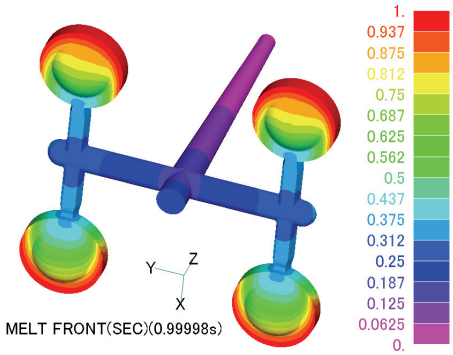



図 2.3.7　流動履歴図

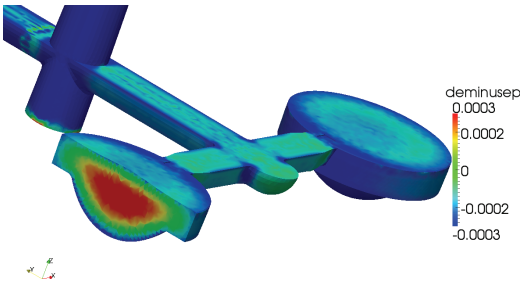
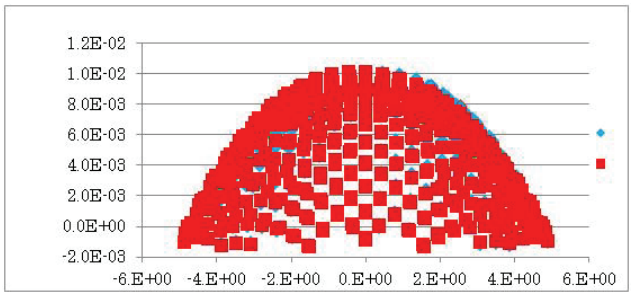


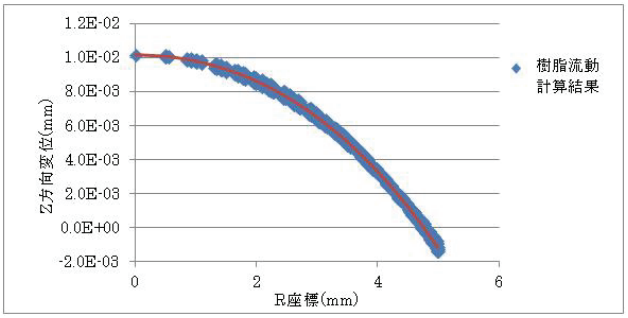

図 2.3.8　体積ひずみ分布図

1 個のレンズを取り出して初期に与えた(金型)形状と比較してみると、成形の際の収縮や圧力分布により若干の差が生ずる。そこで解析的にこの問題について検討した。図 2.3.9 には解析結果の表面節点の変形をプロットした。この図は左右(X 軸：ゲート方向)反転させた変位を元の位置に

重ねてプロットした図である。(青：計算結果、赤：反転結果)

これらの図より、レンズは収縮の結果中心近傍で最大 10μm 変形し、中心軸は 250μm ゲートと逆方向(X 方向)にシフトしていることがわかった。一方、表面節点の Z 方向変位分布は図 2.3.10 のように中心近傍で最大となり 2.5μm を示している。図中赤線は最小 2 乗法でフィッティングを行った線である。



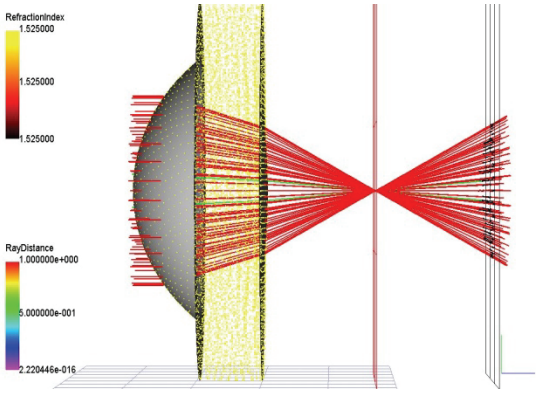

青：計算結果　　赤：反転させたもの

**図 2.3. 9　レンズ表面変形**

**図 2.3.10　レンズ表面の変形フィット**

### 2－3－2－3　光線追跡シミュレーション

本研究で用いている光線追跡プログラム VOPT2 は、理化学研究所の VCAD プロジェクトで開発されたもので、不均質な屈伏率を持つ材料での光線追跡が可能なものである [2)]。図 2.3.11 に光線図、図 2.3.12 にスポット図を示す。なお、図 2.3.12 中の外側の円は焦点面で入射光線が全て入る距離を表し、内側の円は光線の 50%が入る距離を示す。この径が小さいほど焦点がはっきりし大きいとぼやける。いわゆるスポット径に近い物理量である。



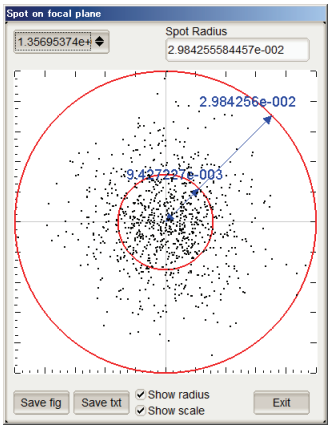




**図 2.3.11　光線図**

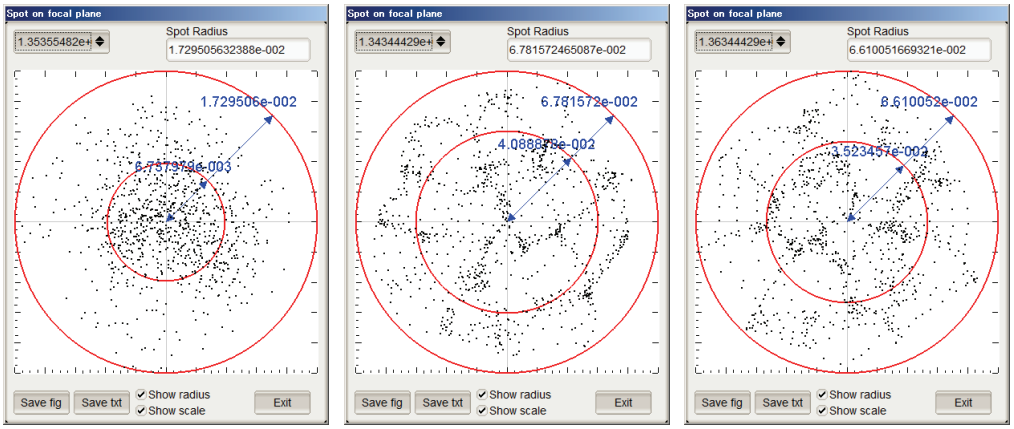
**図 2.3.12　スポット図**

内部屈折率の変化のみを考慮した場合(レンズ表面形状の変形を考慮せずに)の光線追跡結果を図 2.3.13 に示す。内部屈折率の変化は、成形シミュレーションで得られた残留ひずみよりを式(2.3.2)により計算した。

$$N=N_0/(1+\varepsilon) \qquad \cdots\cdots (式\ 2.3.2)$$

$N_0$：初期屈折率　(今回の材料では 1.523344241 を用いた)

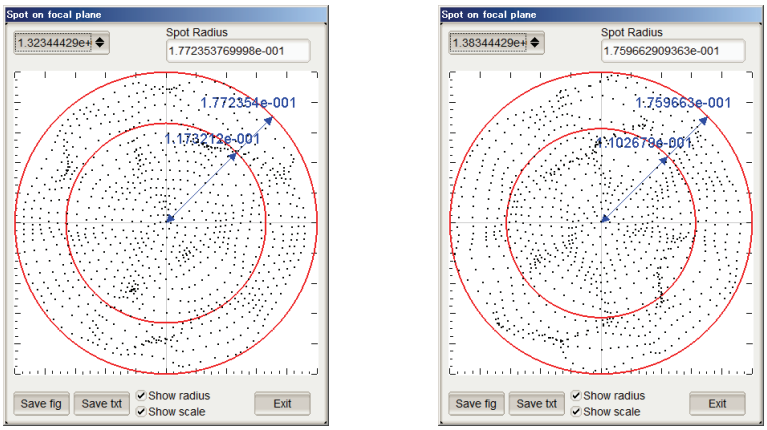
ε：体積ひずみ




焦点位置　　焦点位置の 0.1mm 前　　焦点位置の 0.1mm 後

**図 2.3.13　内部屈折率のみ変化した場合のスポット図**

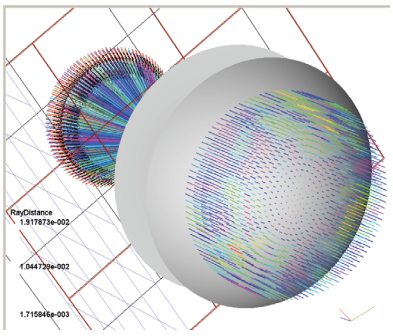
図 2.3.14 には本レンズの焦点位置の 0.3mm 前後のスポット図を示す。



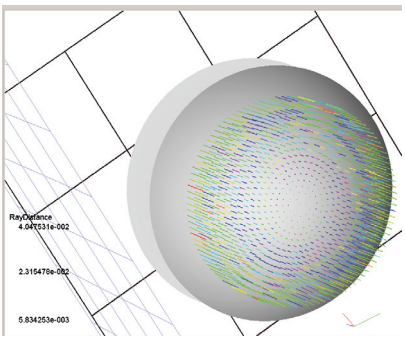

焦点位置の 0.3mm 前　　焦点位置の 0.3mm 後

**図 2.3.14　焦点前後 0.3mm のスポット図**

焦点位置と 0.05mm 手前での光線の集合状況を図 2.3.15 に示す。




光線の色は焦点位置(13.53mm)における中心からのズレに対応




光線の色は焦点位置の 0.05mm 手前(13.48mm)における中心からのズレに対応

**図 2.3.15 光線状況図**

### 2－3－2－4 補正アルゴリズムの検討

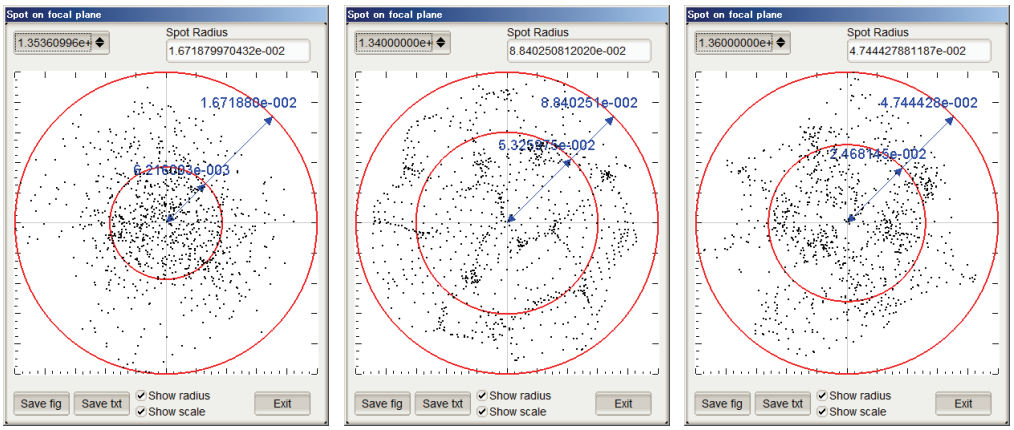
前項の検討で、収縮量分布は、X 方向に 200μm～300μm 程度ずれていることがわかった。ここでは、屈折率分布を X 方向にシフトさせた時、スポット径がどのように変化するかを計算した。その結果を表 2.3.2 に示す。

**表 2.3.2 中心軸シフトによるスポット径の変化**

| シフト量 | 50%のスポット径 | 100%のスポット径 |
|---|---|---|
| -0.2mm | $6.78\times10^{-3}$ mm | $1.77\times10^{-2}$ mm |
| 0 | 6.74 | 1.73 |
| 0.1 | 6.46 | 1.73 |
| 0.2 | 6.24 | 1.69 |
| 0.22 | 6.26 | 1.68 |
| 0.25 | 6.21 | 1.67 |
| 0.27 | 6.24 | 1.68 |
| 0.3 | 6.24 | 1.78 |
| 0.5 | 6.68 | 1.76 |
| 0.9 | 10.29 | 2.23 |

以上により、中心軸をゲート側に 0.25mm シフトさせた時が、スポット径が最も小さくなることがわかった。そこで、中心軸を X 軸方向(ゲートと逆方向)に 250μm シフトさせて光線追跡解析を実行し、焦点付近やその前後におけるスポットや光線の状況を検討した。図 2.3.16 に解析結果図を示す。但し計算は内部屈折率分布を考慮して行った。

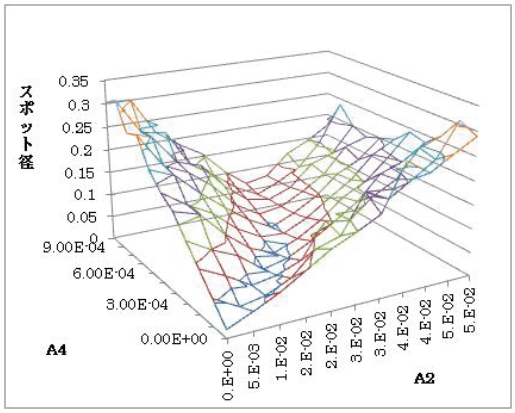
中心軸をシフトさせないときと、傾向は変わらない。




焦点位置　　焦点位置の 0.1mm 前　　焦点位置の 0.1mm 後

図 2.3.16　中心軸を+0.5μm にシフトし内部屈折率分布を考慮したスポット図

次に図 2.3.16 のケースに対して(すなわち屈折率分布のみを考慮)、レンズ表面形状パラメータを修正して最適解を算定することができるかどうかを検討した。そのため、レンズ表面を表すパラメータの依存性について検討した。図 2.3.17 には A2、A4 を同時に変化させた時の場合の、スポット径(ここでは 100%の光線が入る半径とする)の分布を調べた。図 2.3.18 には A4 と A6 を同時に変化させた時のスポット径を示す。これらの図より、パラメータを振っても顕著な最適値(最低値となる鞍部)が見られないことがわかる。即ちパラメータを変更しても大きな改善が見込めないことがわかる。



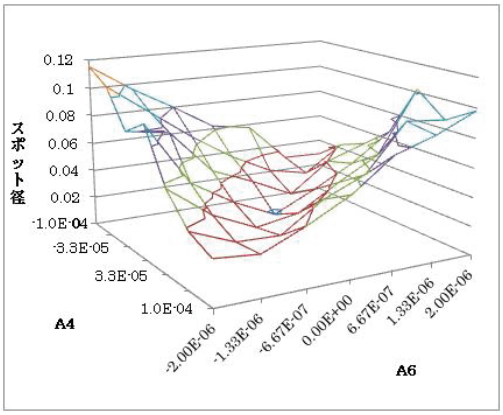




図 2.3.17　スポット径のパラメータ依存　　図 2.3.18　スポット径のパラメータ依存（A4、A6）

次に成形の際に生じる表面形状の変化(引け)の影響について検討した。成形解析の結果は、収縮の影響により引けている。これを打ち消すように、逆引けを入れて光線追跡計算を実行した。逆引け見込みは、最小 2 乗法によって求めた。その結果を表 2.3.3 に示す。

表 2.3.3　逆引け形状の補正量パラメータ

| | 物面側 | 像面側 |
|---|---|---|
| シフト量 | 1.014814553419485E-002 | -3.196036280599876E-003 |
| 2 次 | -3.723268468954899E-004 | 1.887691778950007E-004 |
| 4 次 | -4.839140830222277E-006 | 2.156109518301719E-006 |
| 6 次 | 1.168601969893643E-007 | -6.715422952252083E-007 |
| 8 次 | -2.592743319619330E-009 | 3.519463226726657E-008 |
| 10 次 | 1.402867450960912E-011 | -6.119913609956711E-010 |

図 2.3.19 には、逆引け見込みをした時のレンズ形状と初期設計形状のずれを示す。

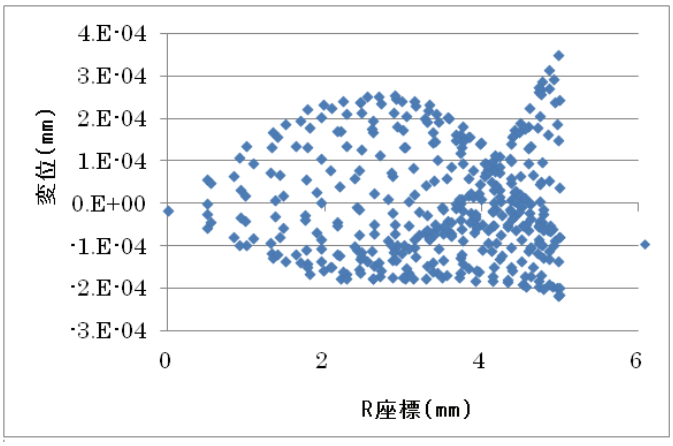
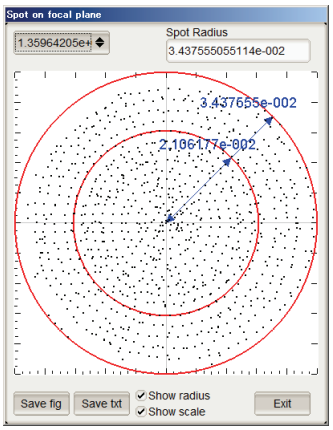
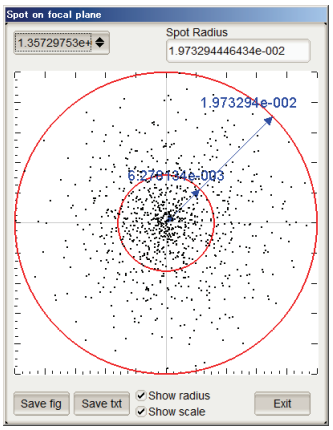



図 2.3.19　逆引け見込み形状と初期設計形状表面の差

図 2.3.20 には、引け見込みを行った場合と行わない場合、それに引け有りの場合との比較を示す。引け量は解析の結果から求めている。ただしこの場合、引けの影響度を見るため、屈折率は均一としている。




100%　34μm
50%　21μm
逆引けを入れない(計算による引け)
状態のスポット径




100%　20μm
50%　6μm
逆引けを入れた(最適化した形状)
状態のスポット径

図 2.3.20　屈折率均一で逆引け有無しの場合のスポット径

図 2.3.21 と図 2-3- 22 には、それぞれ逆引けを入れない場合と入れた場合の光線の状況を示す。

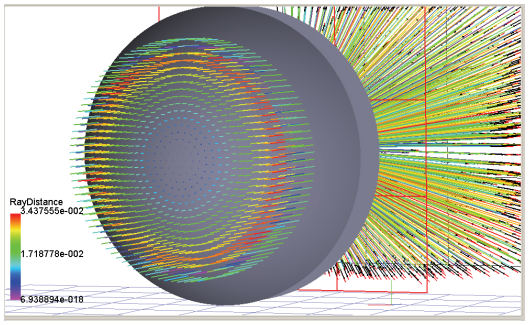



**図 2.3.21　逆引けを入れない(オリジナル)状態の光線(屈折率一定の計算)**
(光線の色は焦点位置における中心からのずれに対応)

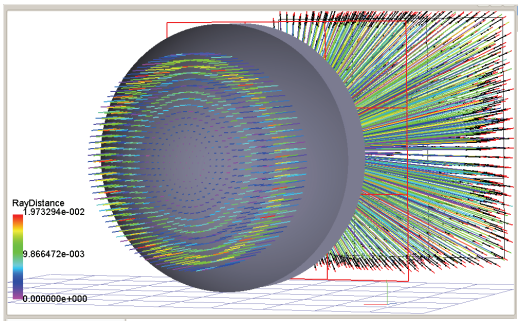
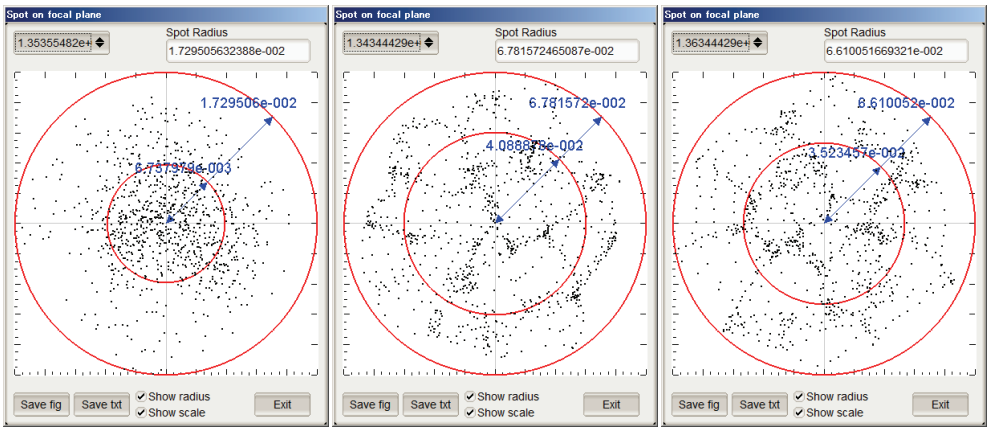



**図 2.3.22　逆引けを入れた(最適化した形状)状態のスポット径(屈折率一定の計算)**
(光線の色は焦点位置における中心からのずれに対応)

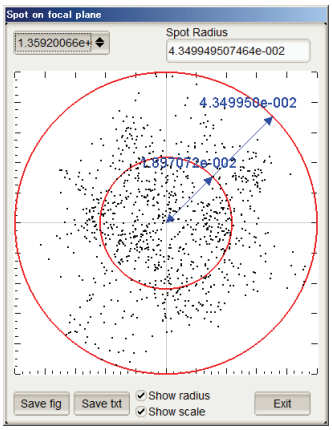
図 2.3.23 には、焦点の前後 0.1mm の場所でのスポット図を示す。この図に示すように形状補正をかけることにより、スポット径が小さくなり改善されることがわかった。



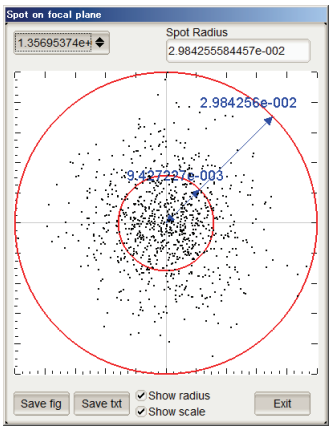

焦点位置の 0.1mm 前　　焦点位置の 0.1mm 後

**図 2.3.23　焦点近傍のスポット図**

屈折率分布が有りの場合(実際に想定される状況)、レンズ収縮を見込んで金型を逆引けした場合と逆引けしない元のままの形状を用いた場合のスポット径の比較を実施した。図 2.3.24 にその結果を示す。




屈折率分布は考慮し金型を
レンズ当初設計形状としたケース




屈折率分布を考慮しレンズ収縮を見込んで
金型を逆引けしたケース
（ゲート方向に 0.25mm 中心軸をシフト）

**図 2.3.24　屈折率分布　逆引け見込み有無しの場合のスポット径**

結果的には、

① 屈折率分布を考慮し金型をレンズ当初設計形状としたケース

スポット径　43.5μm(100%)　18.9μm(50%)

② 屈折率分布を考慮し、レンズ収縮を見込んで金型を逆引けしたケース

(ゲート方向に 0.25mm 中心軸をシフト)

スポット径　29.8μm(100%)　9.4μm(50%)

であり、屈折率分布がある場合でも、レンズ収縮の影響は大きく、引け形状を逆に見込むことによってスポット径は 1/2 に減少する。

屈折率分布がある場合は、均一の場合と比較して(図 2.3.20 と図 2.3.24 の両方共)、スポット径が大きくなっている。

① 均一屈折率で　レンズ収縮を見込んで、金型を逆引けしたケース

スポット径　20.0μm(100%)　6.3μm(50%)

② 屈折率分布を考慮し　レンズ収縮を見込んで、金型を逆引けしたケース

(ゲート方向に 0.25mm 中心軸をシフト)

スポット径　29.8μm(100%)　9.4μm(50%)

図 2.3.25 には屈折率分布を考慮し金型をレンズ当初設計形状としたケースの光線図を示す。図 2.3.26 には屈折率分布を考慮しレンズ収縮を見込んで、金型を逆引けしたケースの光線図を示す。

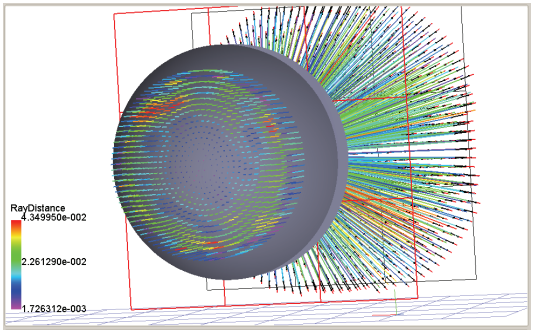



図 2.3.25　金型をレンズ設計形状としたケースの光線
(光線の色は焦点位置における中心からのずれに対応)

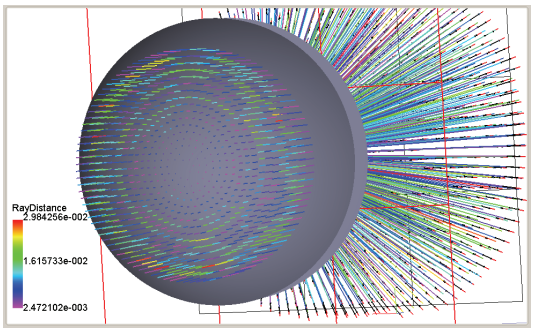



図 2.3.26　レンズ収縮を見込んで、金型を逆引けしたケース
(ゲート方向に 0.25mm 中心軸をシフト)
(光線の色は焦点位置における中心からのずれに対応)

スポット径の最適化のため、レンズ表面形状パラメータについて分析を行った。図 2.3.27 は A2 と A4 のパラメータを変更した時のスポット径(ここでは入れた光線 100%が入る径)の変化を示す。この図から補正によってほとんど改善が見込めない。即ち屈折率分布が軸対称の表面パラメータでは補正できないことを示している。

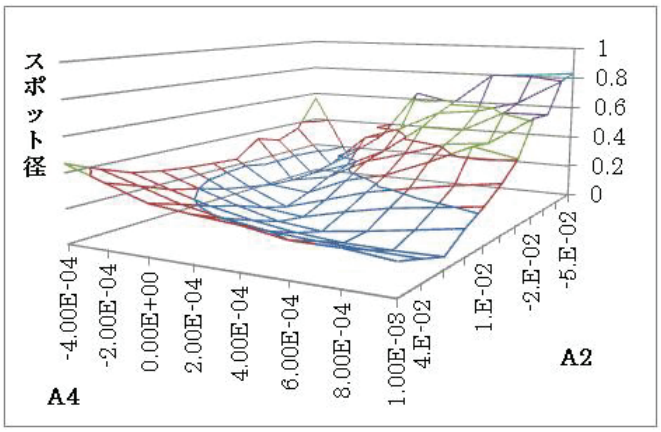



図 2.3.27　スポット径のパラメータ依存性

### 2－3－2－5　まとめ

光学・成形シミュレーション形状補正予測システムの開発を実施した。そのシステムの主な機能としては、①レンズ初期設計データの入力機能、②成形シミュレーションの実施機能、③光線追跡シミュレーションの実施機能、④計測データのフィッティング機能、⑤CAM データ生成の実施機能が開発された。

本システムにより、レンズの成形や光線追跡シミュレーションから補正量を予測し、最終製品形状として、補正量を見込んだレンズ加工用の金型を作成可能となった。また、補正のアルゴリズムの検討により、成形の際の収縮による表面の引け量を逆に見込むことにより、レンズ性能のスポット径を改善できることがわかった。

本研究を通じて、シミュレーション技術を用いて高精度レンズ加工用の金型データを作成する

ことが可能になった。

**参考文献**

1)T.Nagata,"Smooth Local Interpolation of Surfaces Using Normal Vectors",Journal of Applied Mechanics 2010,pp.1-24(2010)

2)S.Morita,Y.Nishidate,T.Nagata,Y.Yamagata and C.Teodosiu,"Ray Tracing simulation method using piecewise quadratic interpolant aspheric optical systems",Applied Optics 49(18),pp.3442-3451(2010)

## ２－４　超精密形状･内部密度測定システムの開発

（実施機関：株式会社先端力学シミュレーション研究所、日精テクノロジー株式会社、株式会社長津製作所、独立行政法人理化学研究所）

### ２－４－１　研究内容

成形されたプラスチック又はガラスレンズの形状や内部密度情報を測定し、光学・成形シミュレーションシステムの入力として使用可能なデータを生成するシステムの開発を行う。形状測定は、超精密形状測定装置を利用するが、内部屈折率の不均一性の測定は、一定屈折率媒体中に成形されたレンズを浸し、このときに発生する光路差を干渉計により測定し、CT 再構築を行うことで測定するシステムの構築を行う。本計測には白色光干渉計システムを利用する。さらに、複屈折に関してもフォトニック結晶フィルターを用いた偏光イメージセンサーにより計測を行い、サブテーマ③の結果得られるシミュレーション結果との整合性を検証する。これらの検証を通じて、光学・成形シミュレーションシステムの精度を向上させる。

### ２－４－２　研究成果

#### ２－４－２－１　内部密度の計測手法

成形されたプラスチックやガラスレンズの内部密度分布は、光学素子の性能に大きな影響を与える(図 2.4.1)。しかしながら、現在までこうした内部密度分布を計測する手法は一般的には確立されていない。計算機によるプラスチック射出シミュレーションによれば、こうした内部密度分布を求めることが可能であるが(図 2.4.2)、こうした結果が実際のレンズの状態をどの程度正確に反映しているかは確認されていない。

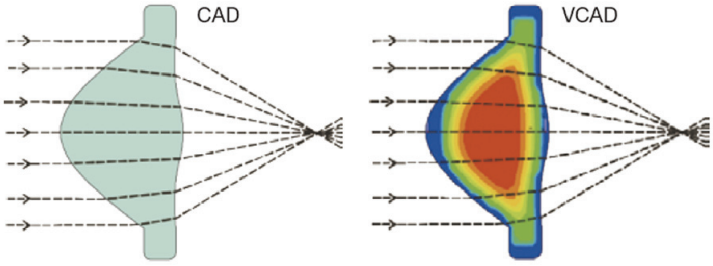



図 2.4.1　内部屈折率を有するレンズ

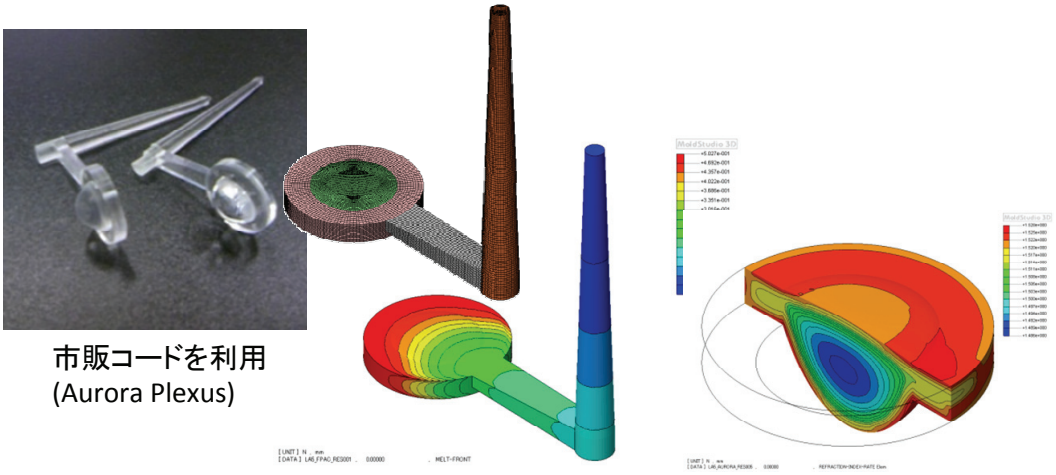



図 2.4.2　計算機シミュレーションによる内部屈折率計算例

内部密度の計測を行うため、レーザ干渉計を用いたいくつかの手法が検討されているが、必ずしも安定した計測を実現できているとはいえない。図 2.4.3 にレーザ干渉計を用いた内部密度の計測実験の例を示す。図は fizzau 式干渉計に被測定レンズを、高屈折性液体を満たしたセル内に入れ、その屈折率の変化を測定しようとするものである。屈折率の分布がレンズ内にある場合、光路長に差が発生するためレーザ干渉計の干渉縞に変化が現れ、形状の分布として観測される。レンズ形状データと測定された形状データから屈折率の光軸方向の積分値が得られる。このデータを、レンズを回転させながら複数投影取得し、CT 再構築の原理を応用して再構築すれば、レンズの内部密度分布を知ることができるはずである。しかしながら実際は、セルに使用されているウィンドウ界面やレンズ本体からの反射光など多くの反射光が干渉縞を形成し、レンズ内部の密度分布から得られる干渉縞と混合してしまうため、正確な測定は困難である。この様子を図 2.4.4 に示す。これは、レーザ光線が非常に長いコヒーレント長を有していることが大きな原因である。一般的に波長安定化されたレーザ光線のコヒーレント長は、数 cm～数 m 以上である。

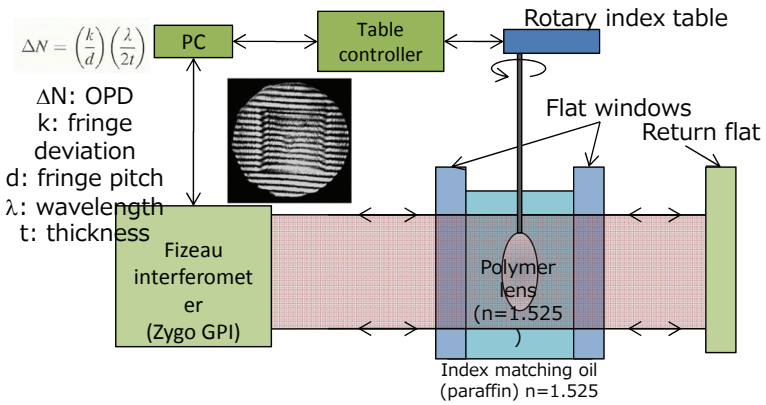



図 2.4.3 レーザ干渉計による内部密度測定システムの構成例

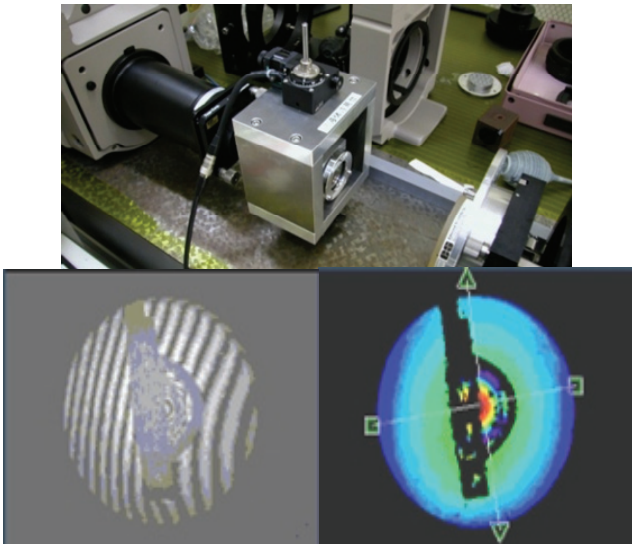


図 2.4.4 干渉縞の様子

こうした問題を解決するため、白色光干渉計を用いた計測システムの開発を行う。白色光干渉計は、光源として白色光を利用する。このためレーザ光線と異なりコヒーレント長が極めて短くなり、数μm から数十μm 程度となる。このことは、一見すると計測には不利なように見えるが、実際は目的とする光路以外の経路からの干渉光をほぼ全て排除することが可能となり、複数の反射面を光路内に有するような複雑な光学系でも目的の形状身を抽出することが可能である。

### 2－4－2－2 白色光計測システム

図 2.3.4 に白色光干渉計システムの概略を示す。白色光干渉計は、既存の表面形状計測用に開発されたシステム（ZYGO 社 NewView7200)を利用した。これは、同システムが白色光干渉計および計測に必要な微動ステージや干渉縞処理ソフトウェアを備えており、これらを活用することで効率的に開発が進められるためである。しかしながら、このままではレンズの内部密度の計測を行うことは不可能であるため、検出光学系を改造することにより内部密度計測システムとした。まず計測用の対物レンズとして、テレセントリックレンズを装着可能なよう改造する。テレセン

トリックレンズは、物体から出た光の中で光軸にほぼ平行な光のみを利用可能な特殊な光学系を有するレンズであり、撮影距離が変化しても倍率が変化しにくいという特長を有している。今回の内部密度計測システムでは、レンズの内部の密度を計測するためにほぼ平行な光線にて測定セル内を計測する必要があるためテレセントリック光学系は最適な手法といえる。白色光干渉のためには、干渉光学系を設置する必要がある。一般的には表面粗さ計測用には mirau 型干渉計が利用されているが、今回は測定範囲が大きいこともあり、michelson 型干渉計を構築した。テレセントリックレンズの前方にビームスプリッターを設置し、分岐された光を参照用ミラーにて反射し、計測システムへ戻す。また、測定光はビームスプリッター下部に設置された測定セルを通過し、物体側ミラーで反射され計測システムへ戻り、干渉縞を形成する。このとき、レンズの内部密度に差があると、光路に変化が生じ干渉縞を通じて形状として認識される。このデータを CT 再構築の原理で再構成することにより内部密度の計測が可能となる。計測セル内部には、高屈折液体を満たし、レンズの屈折率とほぼ同等の屈折率とすることで光が曲がって計測不能となることを防ぐ。

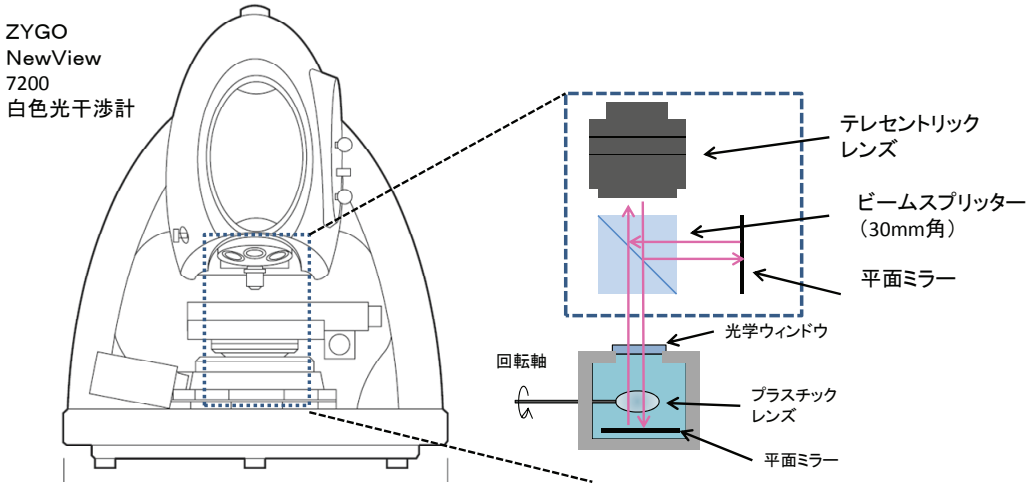



図 2.4.5　白色光干渉計を利用した内部密度計測システム

### ２－４－２－３　実験システム

図 2.4.6 に実際に構築した内部密度計測システムを示す。対物レンズとしては、テレセントリック対物レンズ(Mitutoyo ML-1)を使用した。無限遠光学系に適応させるためネガティブアクロマティックレンズを挿入し、NewView7200 システムとの整合性を確保した。ビームスプリッターは無偏光型 20mm 角のビームスプリッターであり、偏光による測定の誤差が出ないような構成とした。参照ミラーは、3 軸型微動ステージにマウントされ、アライメントと干渉距離を調整可能となっており、平面精度はλ/20 である。測定光は、テレセントリックレンズにより約 3°以内の集束光となって測定セルに入射され、物体側ミラーにて反射されてシステムへ戻る。測定セルの上面は、光学ウィンドウにより仕切られており、内部は高屈折率液体が充填される。高屈折率液体は、本プロジェクトの対象レンズの材質である Zeonex 480R の屈折率(n=1.521@25℃)に最も近い n=1.5240@25℃を選択した。

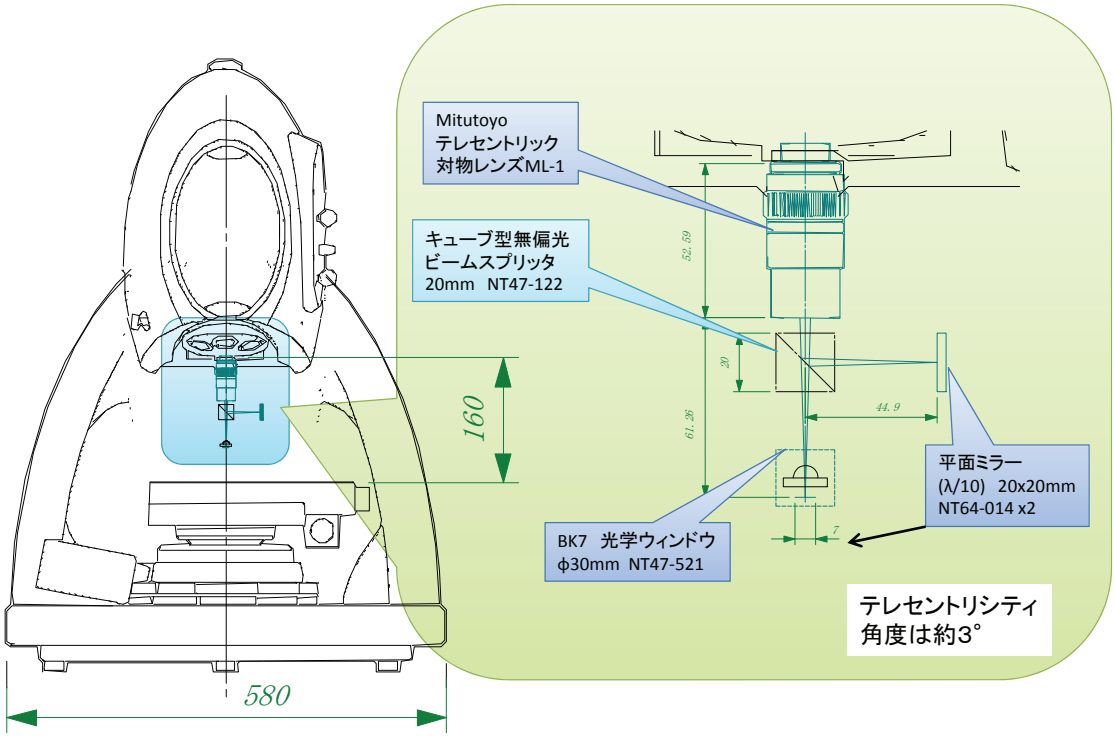



図 2.4.6 構築した内部密度計測システムの構成図

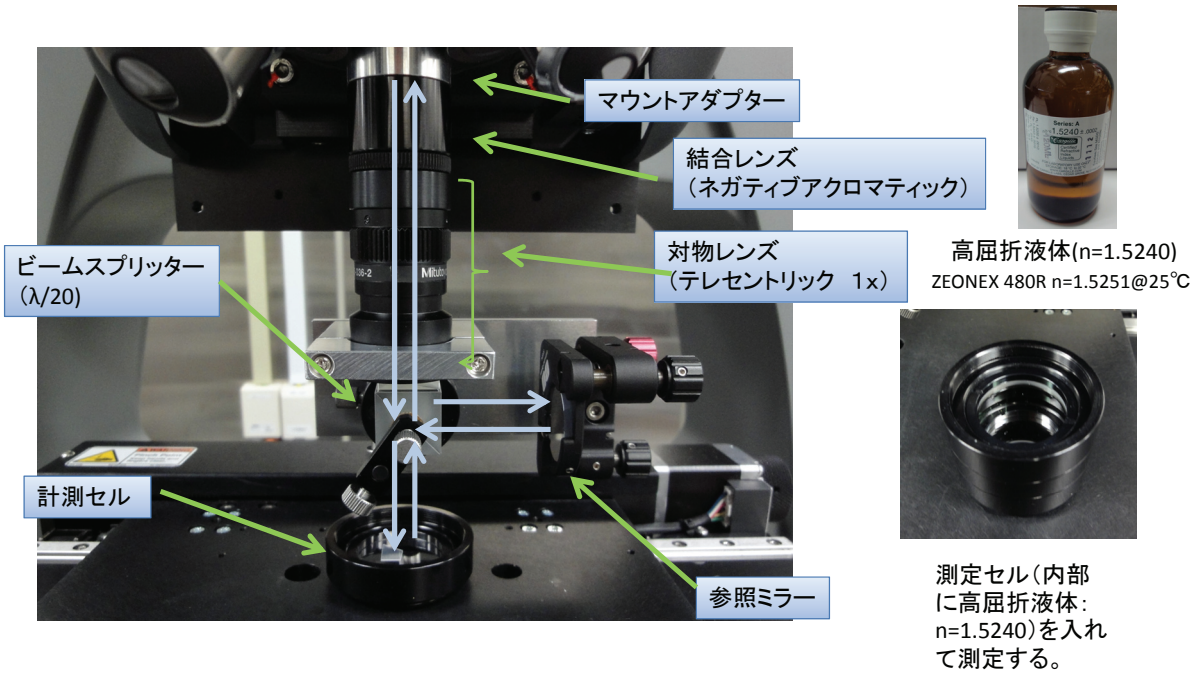



図 2.4.7 内部密度計測システムの干渉計部分の写真

### ２－４－２－４ 実験結果

図 2.4.8 に精度検証のためにプラスチックシートの内部屈折率を計測した例を示す。プラスチッ

クシートおよびミラー上に干渉縞が安定して形成されていることがわかる。この状態で計測した結果を図 2.94.9 および図 2.4.10 に示す。いずれの結果でもプラスチックシート部分は凹部のように認識されているが、これは光路差を正しく反映した結果と考えられる。この様子を図 2.4.11 にて説明する。プラスチックシート内を通過した光線は、プラスチックの屈折率分の光路差(d*(n-1))を走ることになり、参照ミラーで直接反射した光線よりも長い光路を進んだと認識される。このため、これを表面形状として認識すると、図 2.4.11 の右のように凹部として認識されるのである。プラスチックシートの厚みを正確に測定し、その値を用いて内部屈折率を計算したものが表 2.4.1 である。このように本システムを用いることでプラスチックの内部屈折率を計測できることが示された。

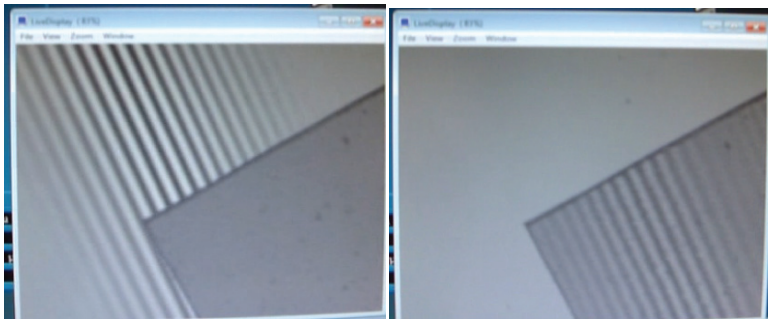


図 2.4.8 プラスチックシートおよび参照ミラー上の干渉縞の様子

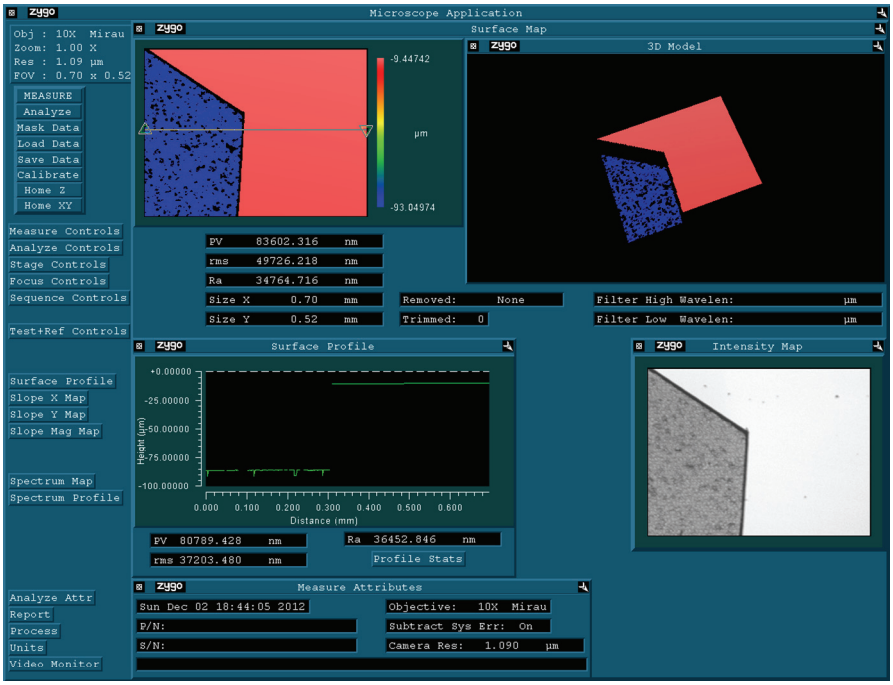



図 2.4.9 プラスチックシート(100μm)計測結果

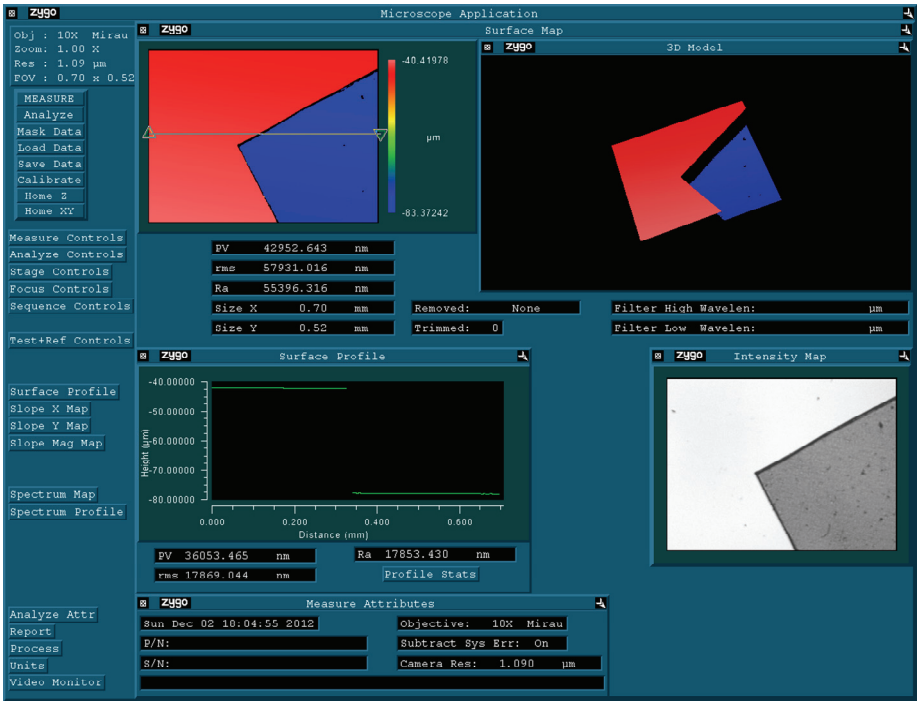



図 2.4.10　プラスチックシート（50μm）計測結果

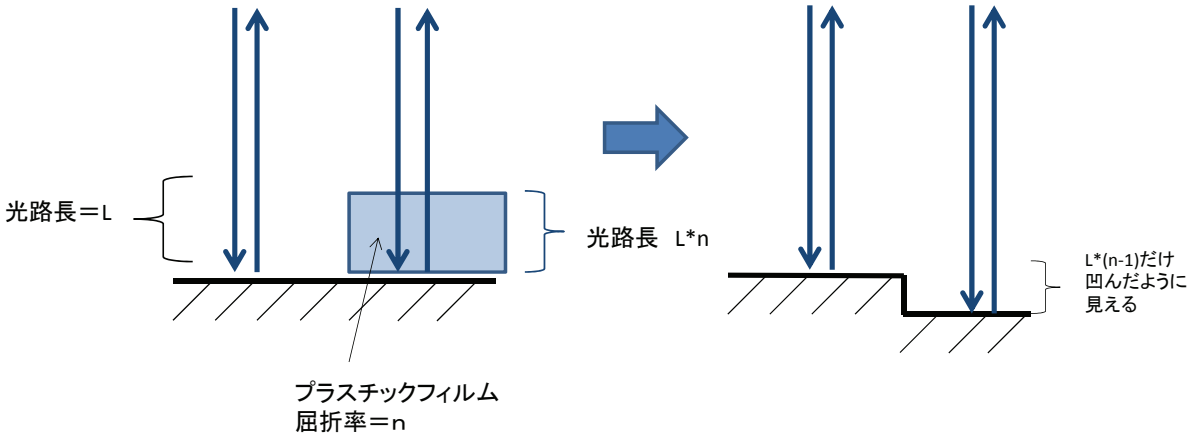



図 2.4.11　実験結果の考察

表 2.4.1 プラスチックシートの内部屈折率

| | 光学的段差 | フィルム厚み | 屈折率計算値 |
|---|---|---|---|
| フィルム1 | 36.053 | 53 | 1.680245283 |
| フィルム2 | 80.789 | 107 | 1.755037383 |

また、計測システムの精度についても検証を行った。図 2.4.12 にシステムの計測誤差を測定した例を示す。計測された誤差は約 37nm と見積もれ、これはレンズ厚さが 1mm としても屈折率の 0.0001 に相当する値である。レンズの波面収差に換算しても単純計算でもλ/17 に相当する。

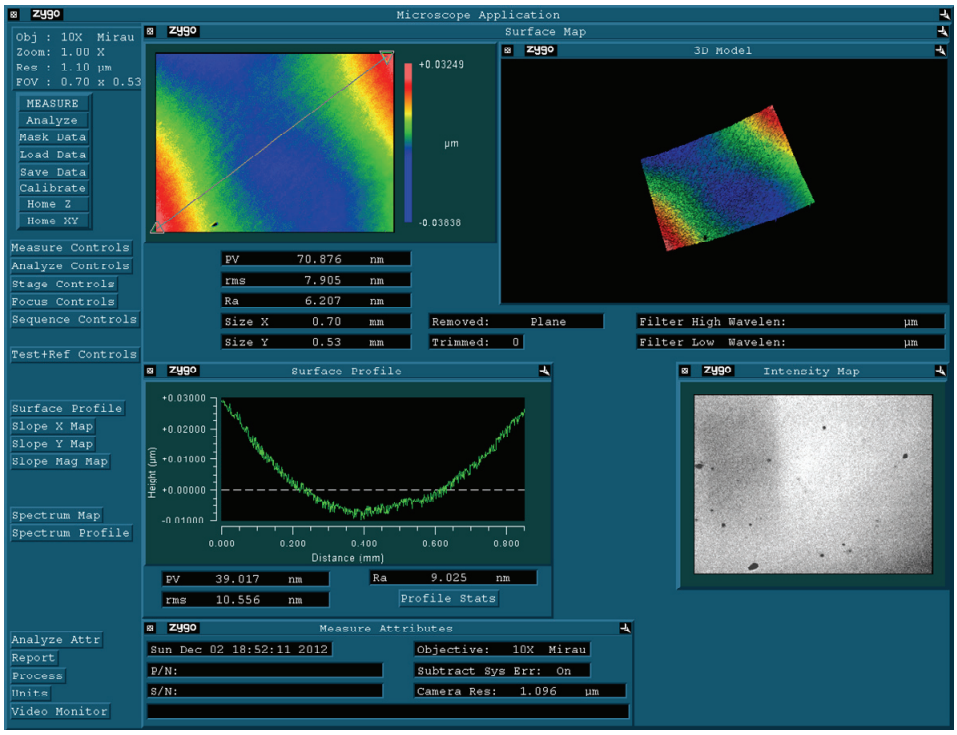



図 2.4.12 システム計測誤差の評価

### 2－4－3 まとめ

白色光干渉計システムを利用した内部屈折率計測システムの構築を行い、その性能を検証した。プラスチックの内部屈折率を計測することが可能であり、その精度はλ/17 以下と推測され当初の目標を充分満たしている。

## 2－5 補正加工データ生成システムの開発

（実施機関：株式会社先端力学シミュレーション研究所、独立行政法人理化学研究所、国立大学法人群馬大学）

### 2－5－1 研究内容

光学・成形シミュレーションシステム（サブテーマ③で開発）による光学シミュレーションの結果、成形品の形状誤差や内部屈折率の不均一により、得られる最終的な光学性能が不十分な場合は、これを補正するため光学素子表面形状を補正し、最終製品で求める性能が得られる形状を生成するシステムとする。補正形状を求めるアルゴリズムは、光学設計システムに適応可能なプラグインとしてソフトウエアモジュールを設計し、これを利用することにより広範な利用が可能なシステムとする。さらに、最終的に得られた形状データを超精密加工装置や研磨システムで利用可能な形に変換する補正加工用 CAM システム及び金型補正加工データ生成システムの構築を行い、サブテーマ①②で開発される加工システムへの入力とする。CAM ソフトウェアの開発にあたっては、VCAD システムの成果を利用する。

## ２－５－２　研究成果

### ２－５－２－１　誤差をふくむ光学素子の形状表現手法

一般的に非球面光学素子の形状は、式 2.5.1 で示されるような式にて表現されている。これは、前半部分が回転 2 次曲面を表しており、これに高次の多項式による非球面項を付け加えたものである。

$$z=\frac{\left(x^2+y^2\right)/R}{1+\sqrt{1-(1+k)\left(x^2+y^2\right)/R^2}}+\sum_{i=1}^{10}A_{2i}\left(x^2+y^2\right)^i \qquad \cdots\cdots(\text{式 } 2.5.1)$$

こうした表現式は、各係数を変化させることで光学設計を比較的容易に進めることが可能であり、光学設計分野では非常に多く用いられているが、金型や成型されたレンズの形状などの様に不均一な誤差を含む形状を表現することは困難である。こうした不均一な形状を表現する手段としては、小さな平面を多数個集めたポリゴンや有利多項式を用いた NURBS 曲面などが知られており、前者はコンピュータグラフィックスの分野で、後者は CAD の分野で広く用いられている。しかしながら、非球面光学素子の様に超高精度な形状を表現するには、ポリゴンはなめらかな形状表現が困難で有り、NURBS 曲面は局所的な変形が全体に影響を及ぼすことや曲面間の接合面が数学的に連続にすることができないなどのいくつかの課題を有している。長田パッチは、ポリゴンと曲面の中間の特長を有する新しい形状表現手法で、理化学研究所 VCAD システム研究プログラムの長田によって提案されたものである。[1)]長田パッチは、ポリゴンの様な小さな面(パッチと呼ぶ)を多数個使用して自由な形状表現が可能であることに加えて、それぞれのパッチは 2 次曲面から形成されており、滑らかな形状表現が可能である。更に、隣接パッチ間で $C_0$ 連続性が数学的に厳密に確保されていることや変形が完全に局所的に行えることなど新たな形状表現として多くの利点を有している。このため本プロジェクトで想定している形状誤差を有する非球面光学素子の形状表現手段として極めて有効であると考えられる。

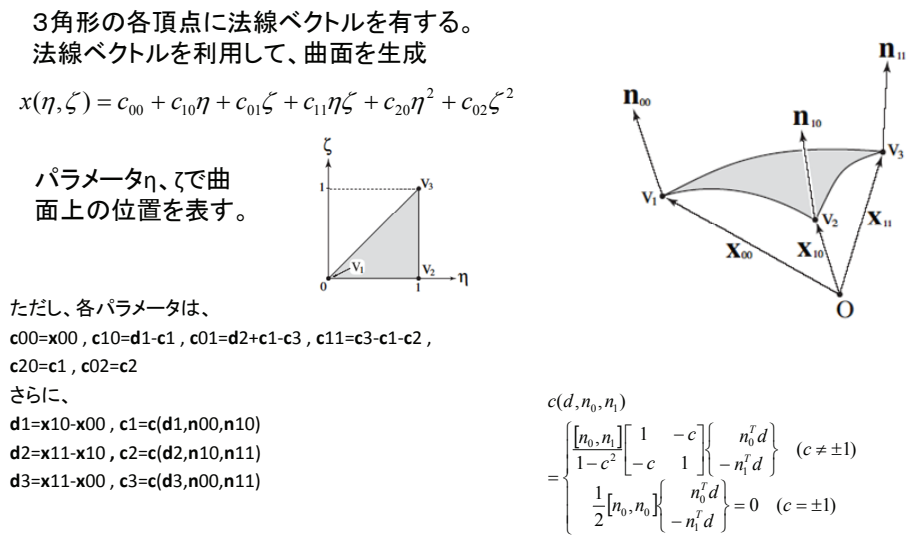



図 2.5.1　長田パッチの定式化 [1)]

### 2－5－2－2　長田パッチを用いた CAM システム

長田パッチは前述のような特長を有するため、光学素子の光線追跡シミュレーションや CAM システムのデータとして統一的に形状表現を行うことに適している。2.3 節にて開発された光学シミュレーションシステムも同様の長田パッチを形状表現方式として採用しており、これらのデータを直接 CAM に読み込み､加工データの生成を行うことが可能となる。図 2.5.2 に開発した CAM システムのスクリーンショットを示す。同システムは、長田パッチにて表現された形状データを VOBJ ファイル形式として読み込むことが可能であり、ワークサイズ、工具パラメータ等を設定することで、カッターパスを G コードにて出力することが可能である。加工工具はボールエンドミルおよびプレーナーカッターに対応しており、ミリング加工および旋盤加工が可能となっている。また、今回の開発ではシャープなエッジを有する形状を処理可能とするための複数の法線を有する形状データへの対応を可能とし、フレネルレンズなどのようにシャープな形状を有する光学素子への対応も可能となった(図 2.5.2)。また、長田パッチは直線との交点計算が 4 次方程式の解に帰着するため基本的に閉式解を有し、高速な計算が可能であるが、パッチ数の増大により計算コストが増大する。こうした問題を解決するためにバウンディングボックスとバケットサーチを用いた高速化手法を実装した。

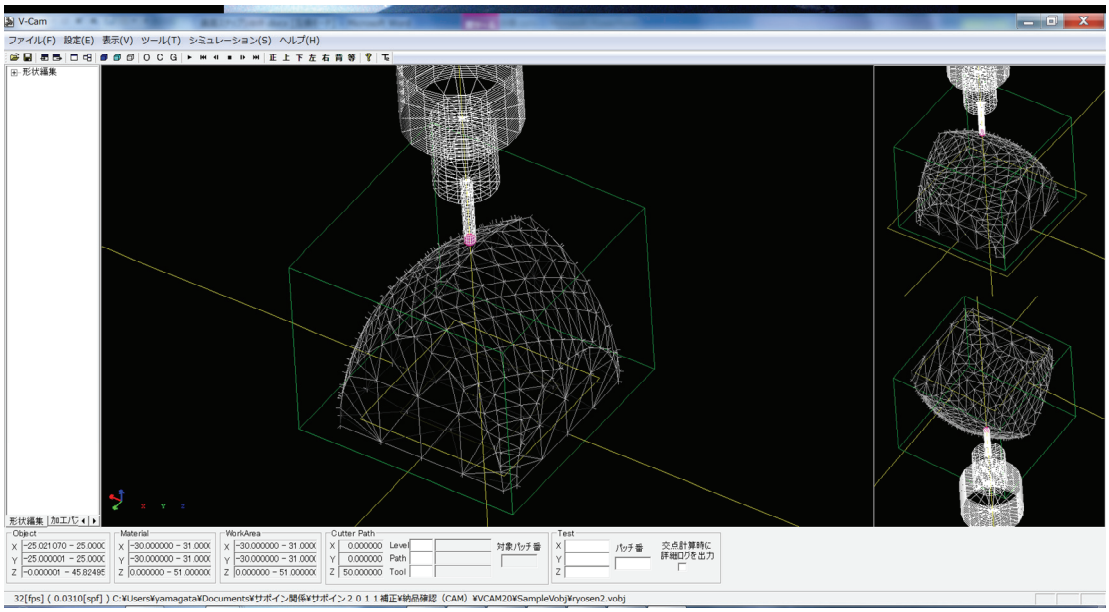



図 2.5.2　開発された補正加工用 CAM システムのスクリーンショット

### 2－5－2－3　実験結果

開発された CAM システムを用いて実際にカッターパスの生成を行った。図 2.5.3 は、稜線を有する形状に対するカッターパスの生成例を示しており、正常にカッターパスが生成されていることがわかる。

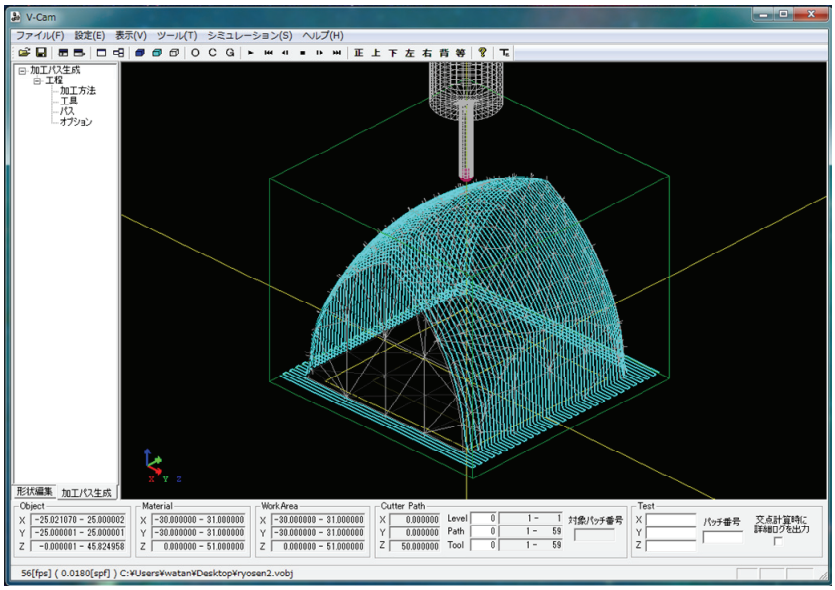



図 2.5.3　稜線を持つ形状のカッターパス生成

### ２－５－３　まとめ

長田パッチによる形状表現を用いて、光線追跡シミュレーションソフトウェアから出力された形状を読み込み可能な CAM システムを開発した。開発された CAM システムは正常に NC パスを生成可能であることが確認できた。同システムの精度は、長田パッチのパッチ数により決定されることが判明しており、パッチ数を充分に増大させることでその精度は回折限界以下にすることが可能であることが原理的に証明されている。このため、開発目標は 100%達成されたものと考えられる。

### 参考文献

1) T. Nagata, “Simple local interpolation of surfaces using normal vectors,” Computer Aided Geometric Design 22, 327-347 (2005).

## ２－６　最終製品の性能予測に基づく実証

（実施機関：株式会社先端力学シミュレーション研究所、日精テクノロジー株式会社、株式会社長津製作所、独立行政法人理化学研究所、学校法人中部大学、国立大学法人群馬大学、公立大学法人会津大学）

### ２－６－１　研究内容

上記の開発結果を総合し、実際の製品データを用いて性能予測に基づく実証を行う。

具体的には、設計データに基づき加工された金型の形状を機上計測機等により計測し、このデータを基に成形シミュレーション、光線追跡シミュレーションを実施し、必要な形状補正量を予

測する。予測された補正データにより、光学素子金型を取り外すことなくその場で補正加工を行い、数値制御研磨システムにより仕上げを行うことにより、最終製品の精度を満足する金型の製造を可能とする。製品としては、集光型太陽電池用フレネルレンズまたはスマートフォン用デジタルカメラの非球面レンズをターゲットとし、竪型射出成形機を用いて実際のレンズを試作し検証を行う。

### ２－６－２　研究成果

#### ２－６－２－１　実証試験(Ｉ)

##### ①－１　研究開発モデルレンズ

研究開発を進めるに当たり、図 2.6.1 に示すレンズをモデルとした。

まず、設計値から、樹脂成形に必要なモールドベース及び、レンズ金型を製作。レンズ金型の図 2.6.2 に示す。

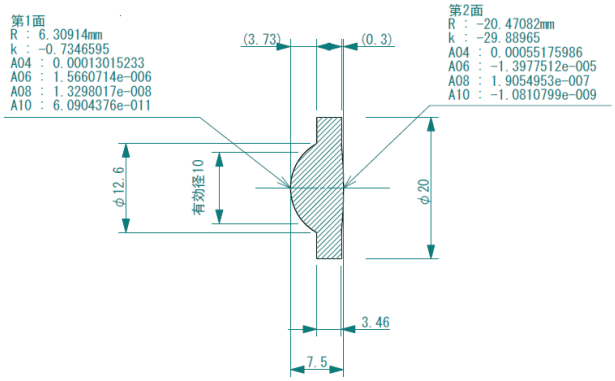



図 2.6.1　研究開発モデルレンズ図

##### ①－２　研究開発レンズ金型

レンズ成形金型は、STAVAX の素材を焼入れ焼もどしして、無電解ニッケルメッキを施し、単結晶ダイヤモンドバイトにてレンズ面を切削加工した。

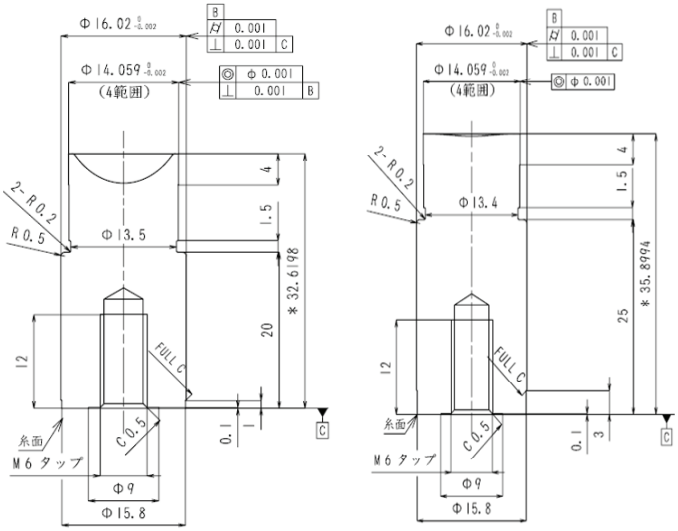



図 2.6.2　非球面レンズ金型図

##### ①－３　レンズ金型の精度

図 2.6.3 に、加工されたレンズ金型の形状精度を示す。横軸は金型の直径を示し、縦軸に設計値からの誤差を示す。上のグラフは、設計値からの誤差を表し、下のグラフは、ベストフィットからの誤差を現す。

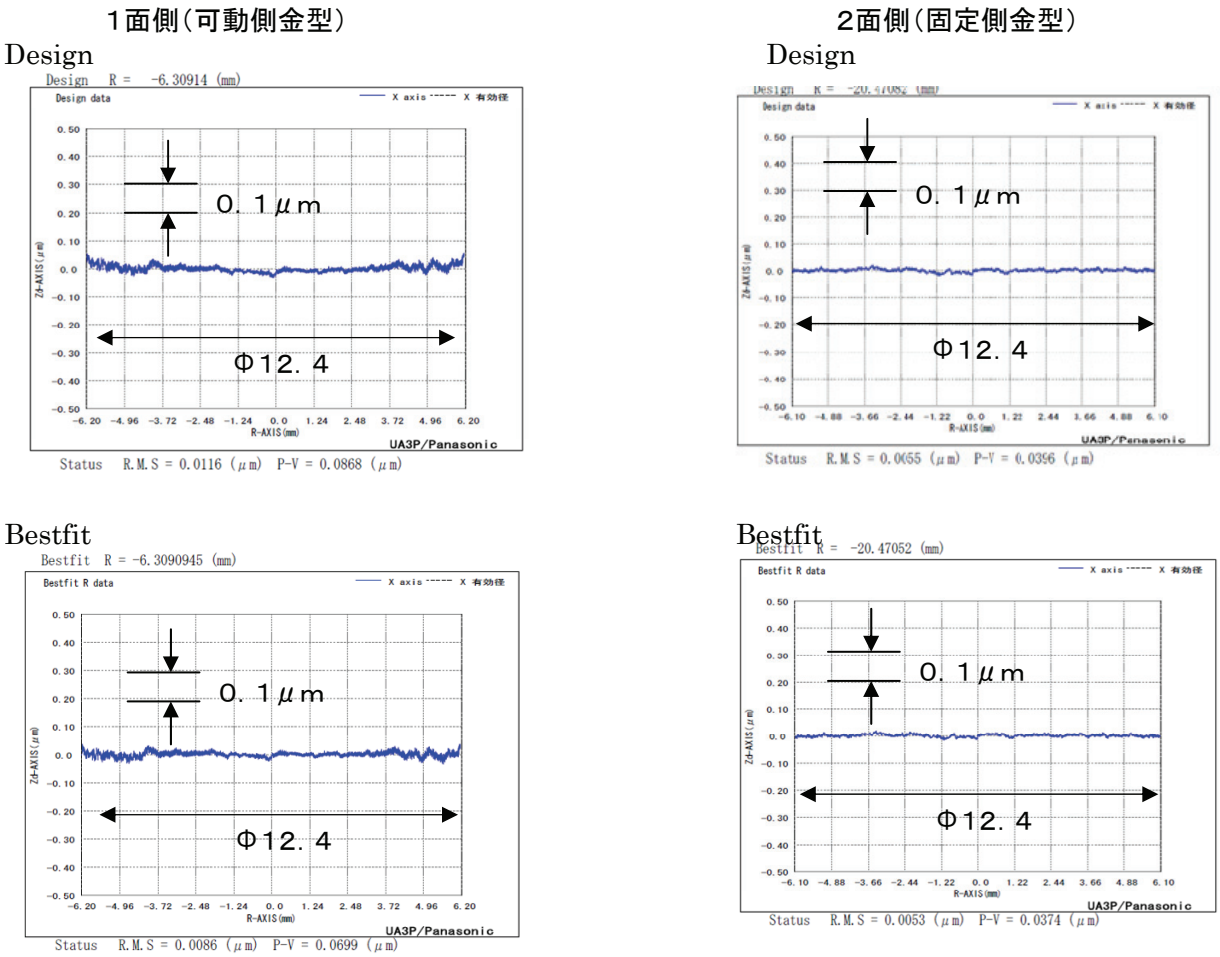


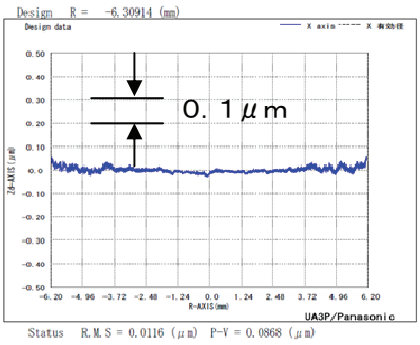

図 2.6.3　非球面レンズ金型形状精度

## ①－4　成形レンズの精度

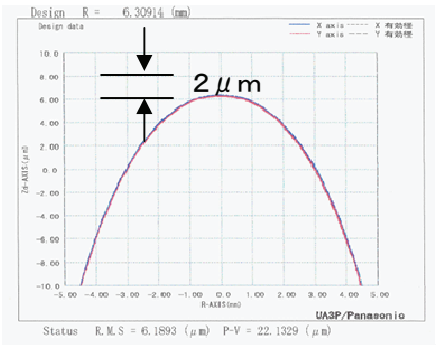
設計値を基に金型加工を行い、レンズ成形を試みた。図 2.6.4 に金型形状とレンズ形状を示す。成形したレンズの形状精度は、1 面側(可動側)で、約 22μm、2 面側(固定側)で、約 1.6μm の誤差が発生した。これは、樹脂の収縮、成形時の誤差、内部密度の不均一さ等の総合した誤差と考えられる。

1 面側(可動側)　　金型形状　　レンズ形状

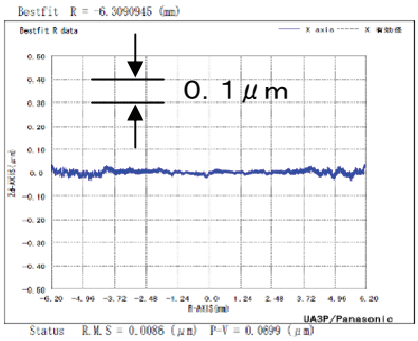
Design



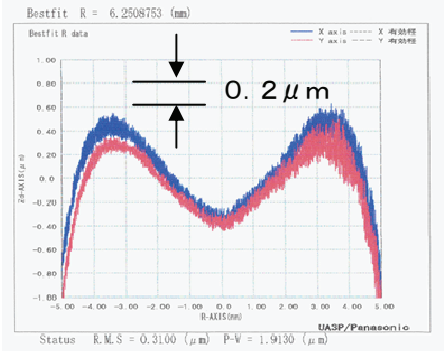

Design




Bestfit

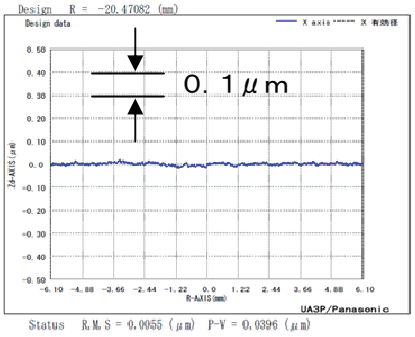



Bestfit

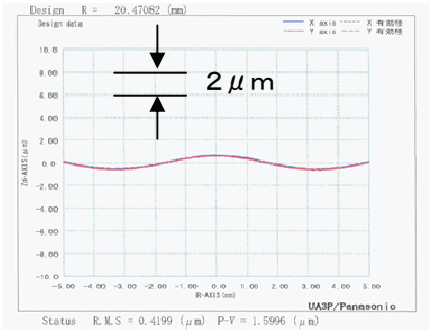



2 面側(固定側)　　金型形状　　レンズ形状

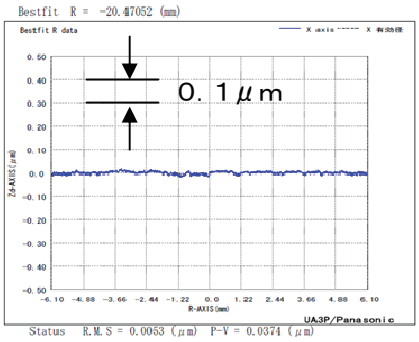
Design




Design




Bestfit




Bestfit

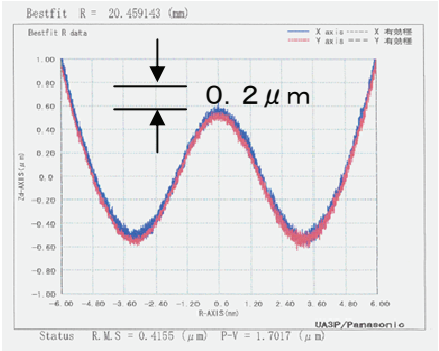



図 2.6.4　金型形状とレンズ形状

図 2.6.5 に成形したレンズの写真を示す。

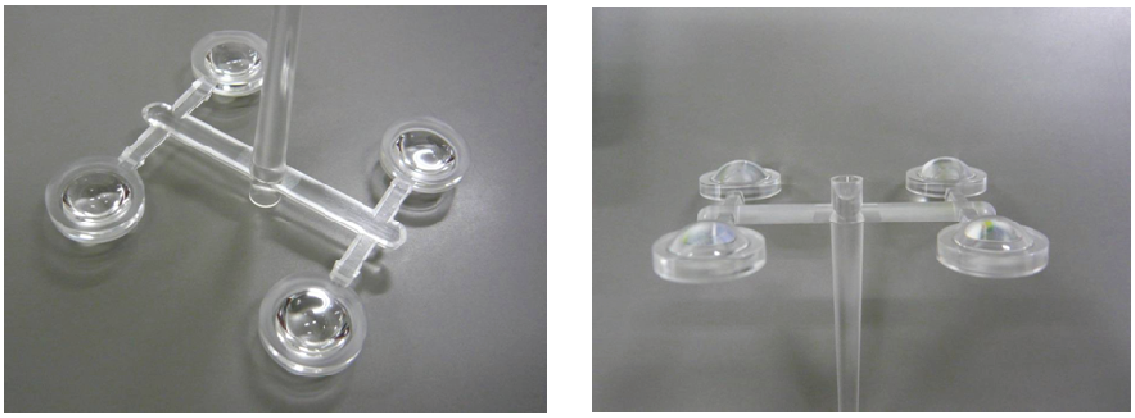


図 2.6.5　成形したレンズ

①－５　今後の課題

今回の研究開発では、射出成形での樹脂収縮による誤差、成形誤差、内部密度の不均一、等の誤差をシミュレーション、内部密度測定システムの開発を行い、実製品のサンプルデータを用いて、設計データから、金型加工、成形、最終製品の試作と評価を実施し、システム全体の性能を確認することにあったが、金型の補正加工データの生成システムを構築するところまで至っておらず、今後、研究開発を加速して行う必要がある。

２－６－２－１　実証試験(Ⅱ)

②－１　レンズ金型の設計

本研究のテーマとなるシステム全体の性能確認をする上で、光学シミュレーションソフト等から出力される理論値と、実際の成形中の金型状態における実測値との比較が重要となると推測し、成形中の金型内部の状態を計測できるシステムを組み込む金型設計を行った。金型内部を計測するためには、各種のセンサが販売されているが、その中でも成形条件の重要なものとなる圧力を測定できるセンサ(図 2.6.6)を組み込むこととした。

図 2.6.6　圧力センサの写真(左・全体、右・センサー部拡大)

また、実製品のサンプルデータはレンズ直径が大きく、高さもあるため、初期検討で一度の成形で 4 個の製品を製作できる 4 個取りの手法を使用する予定だったが、成形機の容量不足が考えられたため、金型設計を 4 個取りで行い、もしも、実際の成形時に容量不足が起きた場合には部品を入れ替えることで、2 個取りに対応できる金型の設計とした(図 2.6.7)。

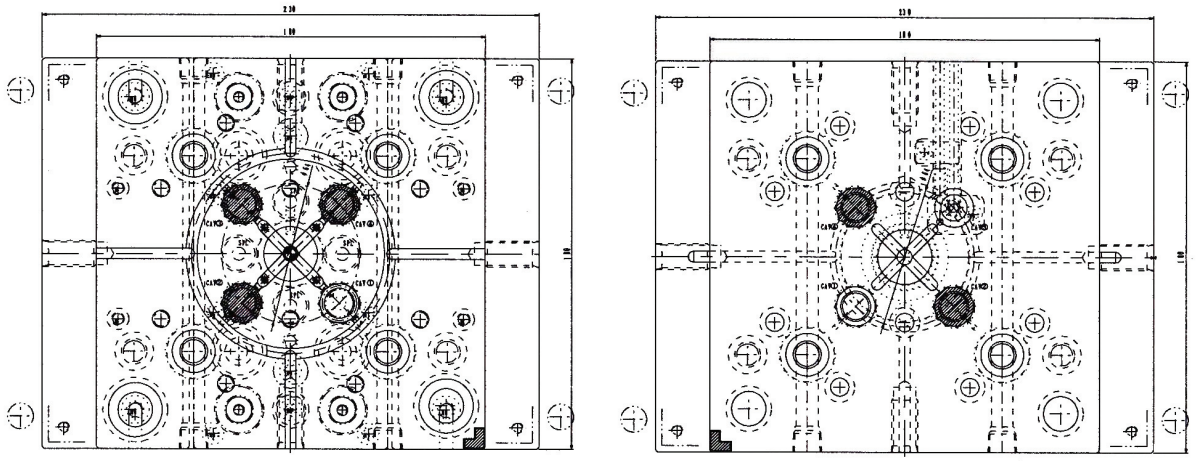


図 2.6.7 金型メインプレート平面図

②－2 レンズ金型の製作

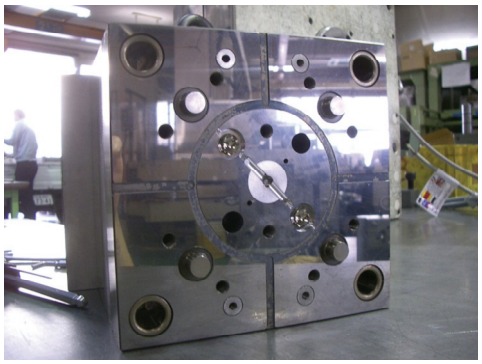
今回製作を行う金型(図 2.6.8)の中で、重要項目として挙げられるのが寸法精度であり、特にレンズの製品部を形成するレンズ駒と、レンズの軸ずれに影響をあたえるメインプレートの製作に関わる加工工程について、加工改善を行いつつ作業を進めた。

まず、メインプレートの製作にあたっては、従来の表面粗さを改善するため、研削作業で使用している砥石種類の変更と加工工程の数を増やし、加工途中での測定も実施しながら、作業を進めた。また、メインプレート同士の軸ずれを抑えるためのテーパーピン組込み部とレンズ駒組込み部については、プレートを 2 枚あわせての穴加工を行い、極力寸法精度を維持するための加工方法を行った。

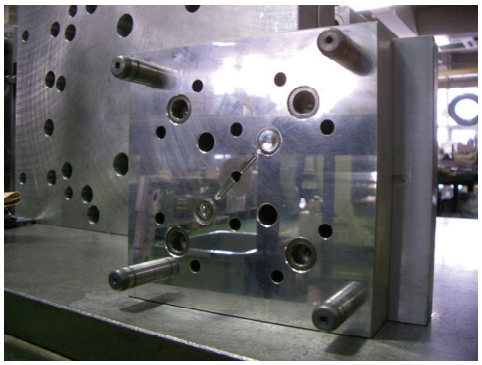
レンズ駒の製作については、本研究の別テーマである機上計測加工法を使用し、高精度に加工を行うことができた。

レンズ形状部以外では、レンズフランジ部も寸法重要部分であり、フランジ部の加工段取りの際には、平面確認を行なうための測定装置として、レーザ式オートコリメータを加工機械に取り付け、ワーク傾きを確認した後に切削加工を行っている。

その他、最終的に金型部品同士を組み合わせて、金型を完成させる工程においても、組み込み前の部品の洗浄を行い、平面度の高い石定盤の上で組み込み作業を行うなど、金型精度を維持するための対策を行なった。



金型　可動側



金型　固定側

非球面レンズ駒

図 2.6.8　完成した金型とレンズ駒

②－３　レンズ金型の成形作業・測定作業

完成した金型の成形作業を行うにあたって、成形条件の選定が必要とされる。一回目の成形は本研究のテーマに基づき、光学シミュレーションの結果から出力された成形条件を使用して、成形作業を行うこととする。使用した成形条件は表 2.6.1 のとおりである。また、図 2.6.9 にその成形品を示す。

表 2.6.1　一回目の成形条件

| | |
|---|---|
| 金型温度 | 128℃ |
| 樹脂温度 | 265℃ |
| 充填時間 | 5sec |
| 速　　度 | 30mm/sec |
| 保圧時間 | 12sec |
| 保圧圧力 | 100MPa |
| 冷却時間 | 25sec |

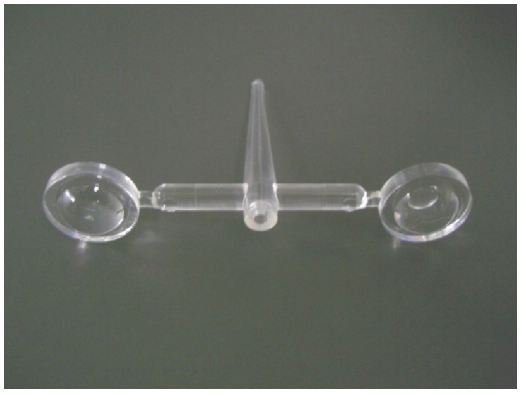
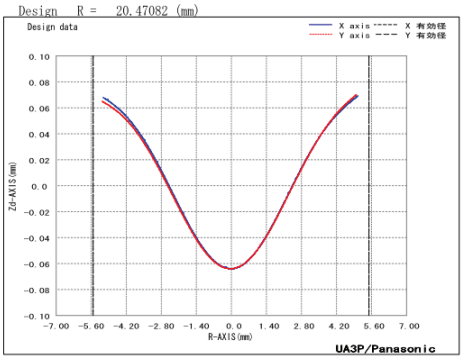


図 2.6.9　製作した成形品

次に、一回目の成形作業により製作された成形品の測定を行った。使用した測定装置はパナソニック社製の UA3P-4 である。また、測定時に使用したスタイラスはルビー製のものを使用している。まずは、形状が浅い側を測定し評価を行った。図 2.6.10 に示すように、測定結果の P-V 値は予定していた数値よりも非常に大きい値であり、レンズとしての性能を持っていない状態であった。別の成形品を測定してみたが同様の結果となり、測定ミスではないことが実証された。




設計R　P-V 134.144μm

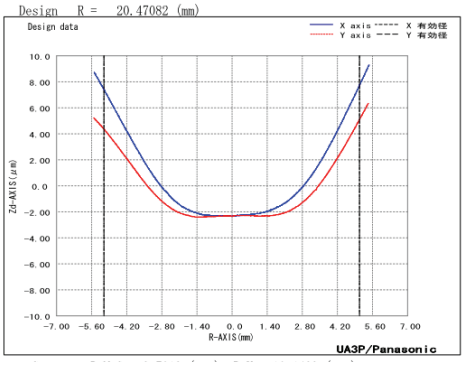
**図 2.6.10　一回目成形品の測定結果**

このような結果となった原因として推測されるのが、4 個取りの条件で 2 個取りの金型を成形したことが主原因だと思われる。その他として、通常の成形機は横型のものを使用するが、本研究で使用する成形機は竪型であることも影響していると推測される。

そのため、光学シミュレーションの結果を使用せず、通常の成形条件を使用して成形することを試みた。いくつかの成形条件を選定し成形作業を行ったが、悪いものでは、成形品がくぼんでいるものや半透明の状態になってしまうものなど、目視での不具合確認ができる状態のものもあった。そのため、数ある中から目視で状態の一番良いものを測定評価することとした。表 2.6.2 が測定に使用した成形品を製作したときの成形条件、図 2.6.11 が測定結果である。

**表 2.6.2　二回目の成形条件**

| | |
|---|---|
| 金型温度 | 130℃ |
| 樹脂温度 | 280℃ |
| 充填時間 | 5sec |
| 速　　度 | 30mm/sec |
| 保圧時間<br>(2 段階) | 30sec<br>(1st,2nd 共に) |
| 保圧圧力<br>(2 段階) | 100MPa(1st)<br>50MPa(2nd) |
| 冷却時間 | 30sec |



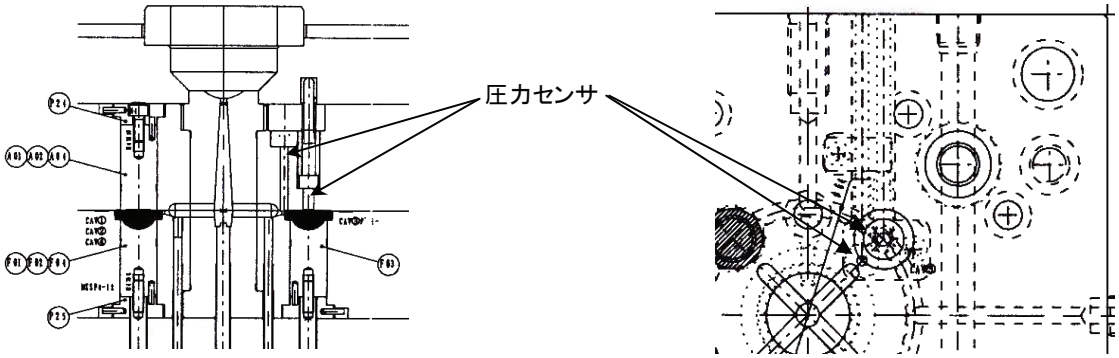

設計R　P-V 10.142μm

**図 2.6.11　二回目成形品の測定結果**

一回目の測定結果と比較すると、1/13 程度まで P-V 値が小さくなり、寸法精度が向上したことが確認された。ただし、この状態でも、レンズとしての性能が良いとはいえず、縦方向と横方向での測定結果に違いがあるため、これらを踏まえて金型修正の実施、もしくは、成形条件の再検討が必要と判断した。

### ②－4　圧力センサによる成形状態計測

光学シミュレーションソフト等の演算結果と成形中の金型内部の状態を比較するため、図 2.6.12 に示すように、金型に組み込んだ圧力センサを使用して測定を行なった。今回の設計では、センサの設置場所を 2 箇所とし、それぞれの箇所で測定を行なった。




側面図　　平面図

図 2.6.12　圧力センサ設置位置

圧力センサ測定時の成形条件は、一回目の成形条件と同様の条件を使用している。測定結果は図 2.6.13 のとおりである。また、グラフの横軸が成形時間、縦軸が成形圧力である。

内容をみると、2 箇所の測定結果は共にピークで 50～60MPa となっている。しかし、成形機の設定条件は 100MPa であるため、ほぼ半分近くになっていることが計測できた。一般的に通常の金型でも設定条件の 2/3 程度まで圧力が下がってしまうといわれており、その原因としては、成形機の圧力測定位置から製品部までに成形材料が徐々に固まってしまい、圧力の低下が起こるためである。そのため、圧力がほぼ半分となったことについては、金型の構造上の問題が大きく、金型を修正することで圧力の値が大きくなると予測される。

今回の測定結果を含め、数多くの測定データを収集し、光学シミュレーション等に反映できるようにしたいと考えている。

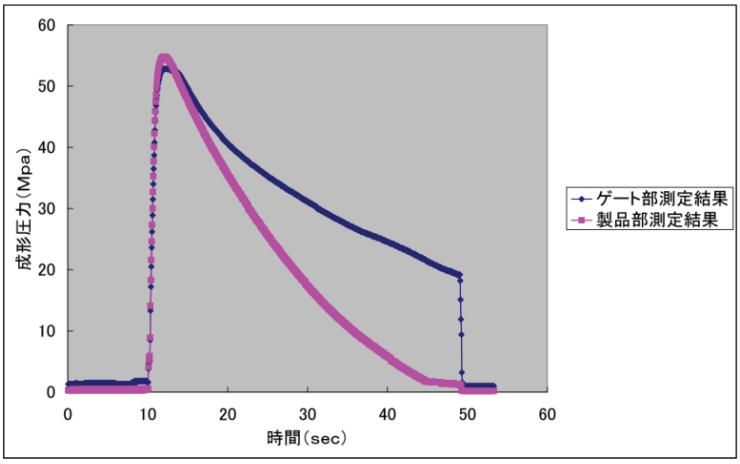



図 2.6.13　圧力センサによる測定結果

# 第3章　全体総括

## ３－１　研究開発成果のまとめ

各サブテーマとも所定の成果を上げることができ、表 3.1 のように提案書で記載した技術目標値を達成した。

表 3.1　技術目標値達成状況

| サブテーマ名、技術目標 | 実績 | 判定･摘要 |
|---|---|---|
| ①機上計測システムを利用した超精密金型形状創成<br>加工後に金型を着脱せずに(着脱回数0回を目標)加工装置上で計測を行い、必要な補正加工をその場で実施できるシステムを構築する。超精密金型の形状精度は P-V100nm、光学特性はλ/8(λ＝633nm)の精度を目標とする。 | 1nm 分解能の動超精密加工機に、レーザーポイントオートフォーカスプローブを有する機上測定・補正加工システムを構築した。非球面金型を用いた機上計測・補正加工実験を行い、91nmP-V の形状精度と、λ/9 相当の光学特性が得られた。 | ○<br>達成 |
| ②数値制御研磨システムによる金型形状補正<br>超精密光学素子金型の最終仕上げ研磨を、数値制御研磨加工により実現し、加工時間の短縮と、補正加工回数の低減を行う。目標数値は、形状精度 P-V100nm、表面粗さ Rz10nm(Ra2nm)とする。 | 数値制御式研磨装置ヘッド、金型補正加工データ生成システムを開発し、小径研磨ツールによる非球面金型の数値補正研磨を行い、目標としていた形状精度 P-V100nm、表面粗さ Rz9nm をクリアした。 | ○<br>達成 |
| ③光学･成形シミュレーション形状補正予測システムの開発<br>射出成形シミュレーションにより成形品の形状誤差及び内部の密度の不均一さを予測し、さらにこの予測データを用いて最終製品の光学特性の予測を可能とするシステムの開発を行う。予測の精度はλ/8 を目標とする。 | 射出成形シミュレーションデータを用いて光線追跡を行いレンズ表面形状の補正を行うソフトウェアの開発に成功した。成形レンズの干渉縞の計測結果と、シミュレーションによる焦点位置前後のスポット形状を比較すると、定性的に良く一致しているため、光線追跡計算は、λ/8 程度以下の計算精度が達成されているものと思われる。 | ○<br>達成 |

| | | |
|---|---|---|
| ④超精密形状・内部密度測定システムの開発<br>超精密金型と成形品の形状精度及び内部の密度を計測可能なシステムの開発を行い、形状補正予測システムとの比較を行う。形状の測定精度はP-V100nm を目標とし、内部密度の計測精度は、光路長差でλ/8(λ=633nm)を目標とする。 | 白色光干渉計を用いた内部密度計測システムを開発し、その精度を検証した。精度は、光路長換算で約 37nm と見込まれ、約λ/17 程度と考えられる。 | ○<br>達成 |
| ⑤補正加工データ生成システムの開発<br>予測された成形形状を基に金型の補正加工データを生成可能とするシステムを構築する。形状データ生成の精度は、P-V100nm 以下、光学特性はλ/8(λ=633nm)の精度を目標とする。 | 長田パッチを用いた加工データ生成システムの開発をおこなった。長田パッチの精度は原理上 1nm 以下も達成可能と考えられるため目標精度を達成していると考えられる。 | ○<br>達成 |
| ⑥最終製品の性能予測に基づく実証<br>実製品のサンプルデータを用いて、設計データから、金型加工、成形、最終製品の試作と評価を実施し、システム全体の性能を確認する。光学特性は、総合的にλ/4(λ=633nm)の精度を目標とする。 | 光ディスクピックアップレンズ模擬・拡大したレンズをモデルと決め設計値での金型製作、レンズ成形を行い、樹脂の収縮、成形時の誤差、内部密度の不均一さ等の総合した誤差を明らかにした。金型精度は、下型 P-V=0.0868μm、上型 P-V=0.00396μm であり、λ/4 を達成。<br>設計データを元に金型製作を行い、機上計測加工法と金型内に取り付けたセンサからの実測データを使用して、システム全体の性能確認を行なった。最終的な評価では、光学特性λ/9 相当の精度を達成することができた。 | ○<br>ほぼ達成 |

## ３－２ 研究開発後の課題･事業化展開

### ３－２－１ 今後の課題

①機上計測システムを利用した超精密金型形状創成

プラスチック射出成形やガラスのプレスモールド、シリコーン樹脂の成形等による超精密光学素子を成形するための金型の高精度・高能率加工を実現するために、金型加工後に光学素子金型を超精密加工装置から取り外さずに機上計測し、そのまま補正加工システムを構築した。さらに、機上計測用プローブの取り付け位置を移動させ、単結晶ダイヤモンド工具や研削工具等の工具形状をも測定することで、これらの工具データを基に NC プログラムに補正を加え、金型の微少なうねりなどの形状誤差を低減させ、高精度高能率化を実現した。なお、実証したものは一部の形状であり、今後は、様々なメーカの実形状の非球面金型の機上測定と補正加工テストを繰り返し、機上測定精度、補正加工精度、加工能率の短縮を図っていき、実用性を高めるとともに本システムの商品化も検討していく。

②数値制御研磨システムによる金型形状補正

高精度非球面金型の製作に関してすでに超精密切削・研削と機上計測による補正加工プロセスの完成で高精度・高能率加工の実現が可能となった。しかし、金型の粗さを向上させるには、最終プロセスである研磨加工が必要であった。本研究において、数値制御式研磨法の提案と金型補正加工データ生成システムの開発により高精度・高能率金型の補正研磨が可能になった。研磨加工前の金型形状誤差や表面品位に基づき、研磨ツールおよび研磨条件の選択により、研磨時間を短縮し、また、補正研磨回数の削減により金型の形状維持と粗さの向上の両立ができた。しかし、測定方法の多様化により、今回では研磨加工前の機上測定データとの対応や最終検査のプローブ式測定法のデータによる検証が行えなかった。今後は，非球面形状測定によく用いられたほかの測定装置にデータの使用も検討し、幅広い測定データの対応を可能にし、また、研磨条件、使用砥粒の最適化によりシステムとしての実用性を高めていく。

③光学・成形シミュレーション形状補正予測システムの開発

当初想定していた内部屈折率分布の補正については、分布が複雑な形状をしているため、通常レンズ設計に用いられている軸対称回転多項式近似では、高精度化が難しく、更なる研究の継続が望まれる。

④超精密形状・内部密度測定システムの開発

白色光干渉計を利用したシステムの開発により、プラスチック材料の内部密度を計測可能であることが確認された。また、その精度は目標数値を $\lambda/8$ を充分満たしていると考えられる。しかしながら、レンズ素材全体の内部屈折率を CT 再構築等の手段を用いた再構成することはまだできておらず、このため計算機シミュレーションデータの比較検討も十分行われているわけではない。今後は測定データのサンプル数を増大させ、計算機シミュレーションデータとの比較を行う

ことでその正確性を検証することが望まれる。

⑤補正加工データ生成システムの開発

光学・成型シミュレーションシステムから出力されたデータを読み込むことの可能な補正か応用 CAM システムの開発に成功し、稜線を有する形状への対応も可能となった。しかしながら、長田パッチ形状の定式化においては、ほぼ平行な法線を 2 つ以上有する長田パッチの場合、計算が破綻する場合や予測しない誤差が発生することが判明しており、こうした形状に対する対応を行うことが望まれる。もっとも、こうした形状自体は、生成された VOBJ ファイルに内在する欠陥ともいえるものであり、長田パッチクリーナーとも呼ぶべきこうした欠陥除去ソフトウェアを別途開発することが根本的な解決策とも考えられる。

⑥最終製品の性能予測に基づく実証

⑥－１　実証試験(Ⅰ)

モデルレンズを決定し、設計値での金型製作、レンズ成形を行い、実製品での樹脂の収縮誤差、成形での誤差、内部密度の不均一を含んだ誤差を示すことができた。

今回の研究開発では、射出成形での樹脂収縮による誤差、成形誤差、内部密度の不均一、等の誤差をシミュレーション、内部密度測定システムの開発を行い、実製品のサンプルデータを用いて、設計データから、金型加工、成形、最終製品の試作と評価を実施し、システム全体の性能を確認することにあったが、金型の補正加工データの生成システムを構築するところまで至っておらず、今後、研究開発を加速して行う必要がある。

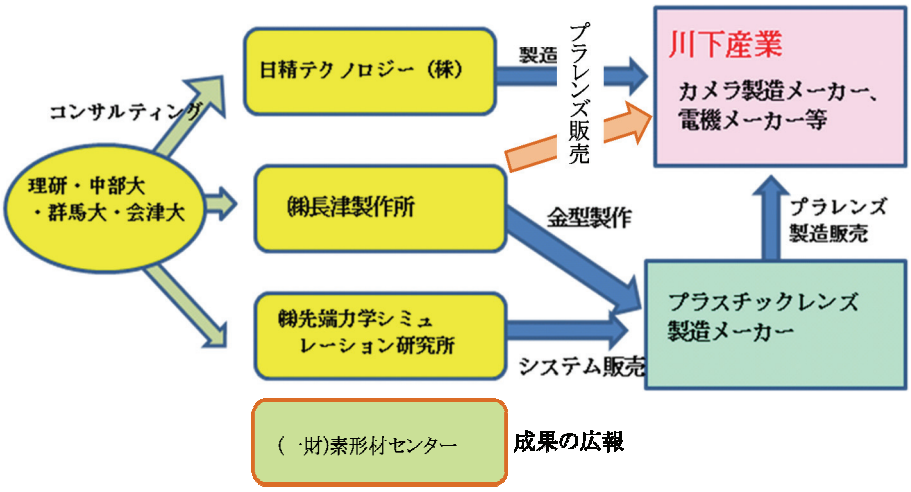
⑥－２　実証試験(Ⅱ)

本研究で開発された各システムを統合した全体の性能を確認した結果、光学シミュレーションソフト作成に関して、必要とされる実測データ数が少ないことを実感した。実際には、各種の実測データとシミュレーション結果との比較を数多く行なうことが、信用の高いシステムを確立できると考えられるため、金型内部の状態を測定するセンサの種類・数量・設置場所等を変更しつつ実測データを採取し、データベースを作成することが必須である。

### ３－２－２　今後の事業化展開

光学素子成形に関する研究開発は、これまで極めて機密を重視する中で行われてきた。例えば、樹脂レンズの成形におけるランナー配置や金型構造などは、レンズ成形企業から外部に知られることは決してなかった。今回の研究開発を公的な研究機関である理化学研究所、並びに中小企業を中心に実施した。今後は本成果の検証を行う中で、徐々に連携企業の枠を広げ、市場を開拓していきたい。

下記に事業化展開のイメージを示すが、本プロジェクトにて開発された、超精密光学素子シミュレーションソフトウェア等は、株式会社先端力学シミュレーション研究所により製品化を検討していく。更に、これらのソフトウェアを株式会社長津製作所、および日精テクノロジー株式会社が活用し、非球面光学素子、金型の製造技術を向上させ、販売につなげる。




事業化展開のイメージ

販売戦略としては、本企業メンバーでは既に代理店網等は確立されており、まずは既存の販売ルートを利用して普及に努める。また成果物個別の対応としては、企業メンバーは下記のようなことを想定している。

①光学素子成形

本成果を積極的に量産向けレンズへ適応すれば、短納期、低コストが計られ、業務拡大へとつながる。

②光学素子用金型、光学素子成形

本研究と関連した光学機器用の金型を多く生産している。それらの多くの顧客との接点を有効に活用した販売をおこなえたらよい、またアプローチもしていく。

③レンズ統合シミュレーションシステム

大手企業ユーザー、中堅企業ユーザーそれぞれ、検証を連携できる企業を選定し、それらの企業と「成功例」をつくり、その事例を対外的に発表する。その際、『公開するシステム・アルゴリズム』と、『非公開のシステム(主に材料データベース)』を明確に区分して、それぞれ別の単価設定とし、事業化を進める。