

平成23年度第3次補正予算戦略的基盤技術高度化支援事業

「超低粘度液状樹脂を用いた金型・成形加工技術の確立と
高機能製品の開発」

研究開発成果等報告書

平成24年12月

委託者 近畿経済産業局

委託先 財団法人奈良県中小企業支援センター

[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	4
1-3 成果概要	7
【専門用語等の解説】	11
1-4 当該研究開発の連絡窓口	13
第2章 本論（成果報告）	14
2-1 金型における超低粘度液状樹脂の封止技術の確立	14
(1) 金型表面精度に依存する流動性の解明	14
(2) 金型の隙間への液漏れの定量化	14
2-2 超低粘度液状樹脂成形品に見合った成形システムの構築	18
2-3 超低粘度液状樹脂製品の高機能化のための金型の複雑微細加工	26
(1) 金型部品の微細加工における加工精度の向上	26
(2) 高精度な複雑形状化・一体化加工技術の確立	28
第3章 全体総括	49
むすび（研究開発成果と課題および事業化展開）	49
1. 研究開発成果と課題	49
2. 事業化展開	51

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) 研究開発の背景

近年の製造業等における環境配慮設計は、生産時および製品使用時の省エネにも対応していることが求められている。これは平常時からのコスト削減とともに、環境配慮・省エネ・省資源の要請(ニーズ)に対応した生産設備・商品は、災害時にも有効であることが、東北地方太平洋沖地震災害にも報じられているとおりである。この震災の衝撃により、商品機器の高機能化とともに省エネ・省資源の更なる推進は、社会的必須条件になったと考えられる。

そのような中で、情報家電、光学機器分野では、省エネに加えて薄型化・軽量化と高機能化を図るため、商品機器内のデバイスの小型化、集光・発光の効率化などが求められる。その結果、光学設計上、部品形状はますます複雑化かつ高機能化し続けており、市場の拡大に合わせて開発競争は激化している。

これらの製品を構成する部品の多くは金型によって大量生産されており、益々製品の高機能化をめざすためには、金型の精密加工技術を高精度化・微細化するための研究開発が重要である。また、プラスチック成形品では商品機器内・周辺から被る「熱」「紫外線」による変形・変色対策の軽減が省エネ・省資源に有効である。その取組として耐熱・耐候性に優れた新素材である当該超低粘度液状樹脂を従来樹脂・ガラス材等の代替材とすることが高機能化・省エネ化において有用である。

当社では、既存樹脂金型あるいはそれらの高精度金型用部品加工など通じて様々な業種分野との製品開発に関わってきた。この中で川下企業より、下記のような多機能商品化についてニーズ(要請)があった。当該樹脂については(株)カネカより実用化の協力要請があった。

- a. スピーカー内の振動板は、現在均一な厚みのシート材にて製品形状を作り出している。従来品の板厚は、概ね 0.025mm であるが、この一部分の厚みを 20~40% 変えることによってスピーカーの性能を改善するものである。このような振動板を開発することによって、高低周波数域の音声等音質の改良が可能になり、高齢者等にも聴き取り易いマイクロスピーカ関連の商品化が可能となる(図1参照)。
- b. 事務機器関係においては商品設計時の課題として、デバイス内の発生熱の放出、遮光のための工夫として、デバイス内のユニット分割化など様々な機構設計によって対処しているのが実状である。ガラス材からの代替として、当該樹脂が有する特性である耐熱・耐候性を活かし、かつガラス材では一体加工が不可能な複雑微細形状部品(ガラス製代替各種レンズなど)の実現が可能となる(図2参照)。
- c. 機構部品の耐熱性向上のための超低粘度液状樹脂を用いた開発を行っており、そ

の金型に関する生産技術課題を抽出するための研究依頼があった。



図1 振動板(均一板厚)

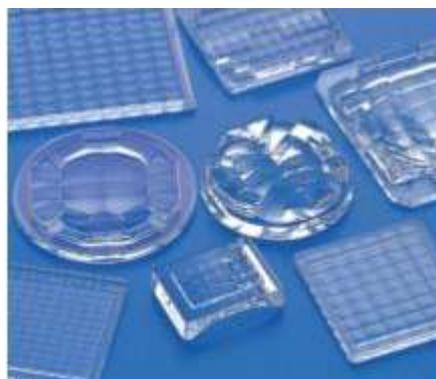


図2 ガラス製レンズ

本研究開発に用いる超低粘度液状樹脂の生産性に関して、従来材料との耐熱性での比較を図3に示す。

図3に示すように、当該樹脂は生産性・タクトタイムについては従来樹脂と同等で、かつガラス材を上回り、耐熱性では従来樹脂と比較して優れている。現状のガラス材に比べて生産性に優れていることは、今後の市場での展開が多いに期待できる。

当該樹脂は従来樹脂やガラスとの比較において粘度、成形テストにより高い転写性を示す。また、耐熱・耐候に優れ、透明性・接着組立性では全ての従来樹脂と同等以上である。当該樹脂はプラスチックの分類上「熱硬化性樹脂」に分類される。

本研究開発は、耐熱・耐候性に優れた新素材である超低粘度液状樹脂を従来ガラス材等の代替材として実用化をはかるために、金型における樹脂封止技術、樹脂成形金型の精密加工技術を確立し高機能製品の開発を目指す。

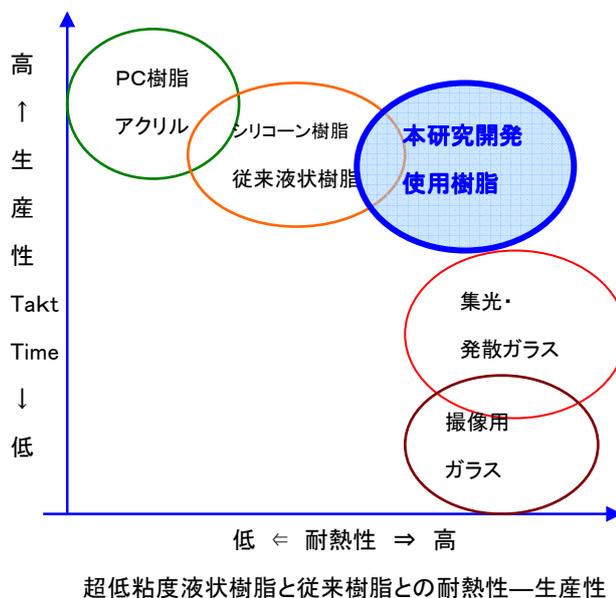


図3 耐熱性及び生産性に関して当該樹脂と従来材との比較

(2) 研究目的及び目標

1) 研究目的

最近のスマートフォンに代表される情報家電機器や、光学分野ではLED用レンズ、太陽光発電用の集光プリズム、フライアイ等の薄型化、軽量化、高機能化、かつ低コスト化することによる開発競争力の強化が急務である。その取組として耐熱・耐候性に優れた新素材である超低粘度液状樹脂を用いた金型成形技術を開発することによって、従来樹脂材、ガラス材等の代替技術を確立し、厚みを部分的に制御した薄肉成形品(振動板)及び低コストで耐熱・耐候性に優れた成形品(レンズ等)の実用化を図ることを目的とする。

本新技術を実現するために開発すべき研究課題として、

- ア) 超低粘度液状樹脂の金型封止技術の確立
- イ) 超低粘度液状樹脂に適した成形機システムの構築及び運用諸元の研究
- ウ) 金型加工機の運用諸元と加工プログラム設定の研究

があげられる。樹脂成形部品の高精度・微細化を図るため、金型における超低粘度樹脂の封止技術及び高転写性を活用可能な微細形状加工技術の実現を目指す。

研究における具体的な形状及び寸法精度の高度化目標を以下にあげる。

2) 目標

①金型加工における技術的目標値

- ・金型微細加工精度 : $\pm 1\mu\text{m}$ 未満 (精密CNC研削盤)
- ・複雑一体化形状精度 : $\pm 5\mu\text{m}$ 以下 (多軸研削機)
(従来樹脂用金型では金型部品のブロック分割化にて対応)
- ・面精度 : Rz $5\mu\text{m}$ 以下 (多軸研削機)
(フライアイ等の分野の現状値 : Rz $10\mu\text{m}$ 以上に対して大幅な向上を図る)

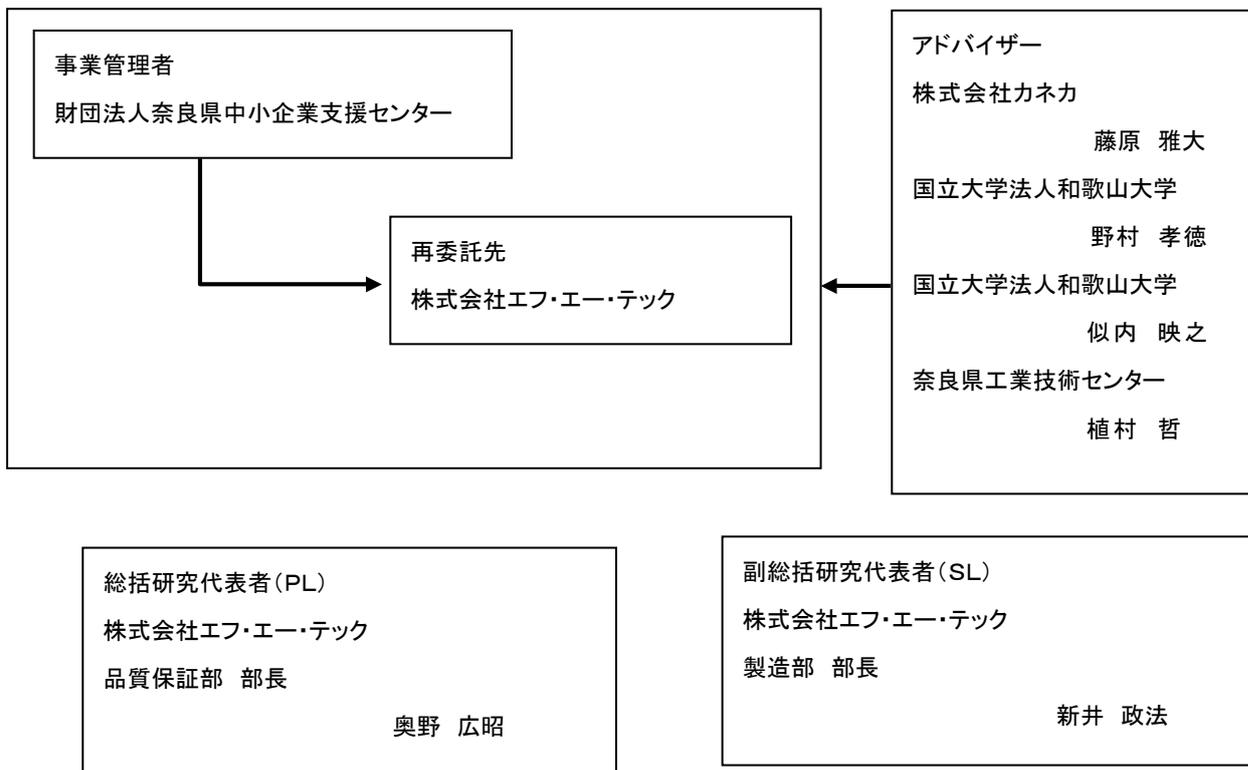
②超低粘度液状樹脂の特性を活かした高度化目標

多くのデバイスに用いられているプラスチック部品の材料は熱可塑性樹脂が大半を占めている。しかし、成形プロセス時の発生ガス、応力による歪が微細・高精度化に対する障壁となっている。当該超低粘度液状樹脂は熱硬化性樹脂であるためそれらの課題を解消し、機能及び品質向上が可能である。そのために、金型の高精度化とともに堅型成形機による超低粘度液状樹脂成形システムの構築をおこなう。

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

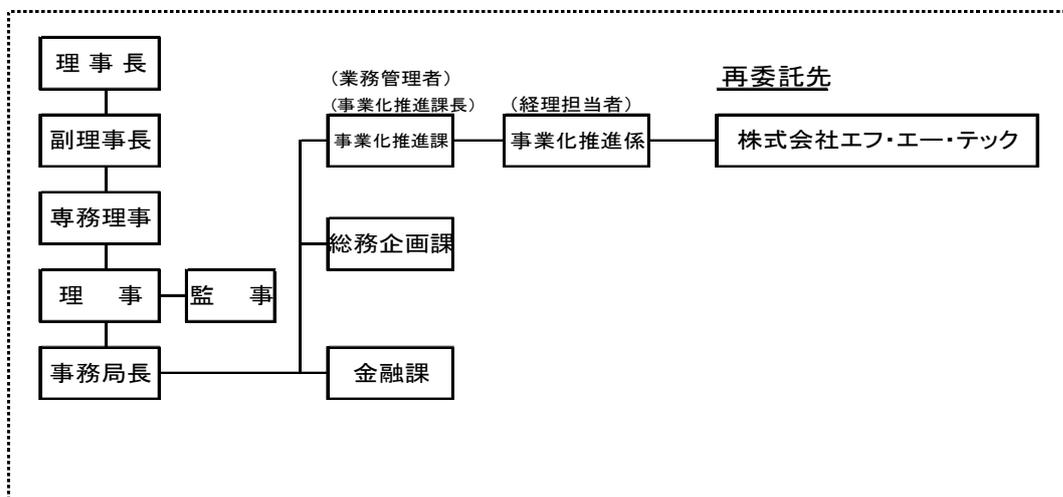
1) 研究組織(全体)



2) 管理体制

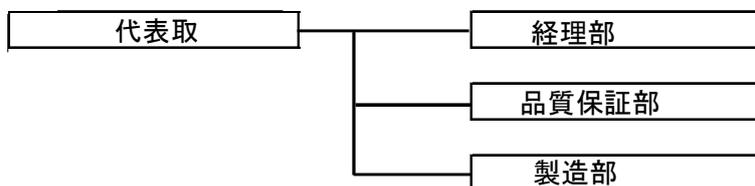
① 事業管理機関

[財団法人奈良県中小企業支援センター]



②(再委託先)

[株式会社エフ・エー・テック]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】財団法人奈良県中小企業支援センター

①管理員

氏名	所属・役職
浅井 保典	事業化推進課長
杉山 淳一	事業化推進課 事業化推進係 係長
杉本 卓三	事業化推進課 事業化推進係 主査
東 正訓	事業化推進課 事業化推進係 主査
山田 裕士	事業化推進課 事業化推進コーディネータ

【再委託先】※研究員のみ

株式会社エフ・エー・テック

氏名	所属・役職
福井 一史	代表取締役
奥野 広昭	品質保証部長
新井 政法	製造部長
楠田 善朗	製造部チームリーダー
井上 貴之	製造部リーダー
奥村 篤司	品質保証部リーダー

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

財団法人奈良県中小企業支援センター

(経理担当者) 事業推進課 事業化推進係

杉本 卓三

(業務管理者) 事業化推進課長

浅井 保典

(再委託先)

株式会社エフ・エー・テック

(経理担当者) 経理部

福井 美江

(業務管理者) 品質保証部長

奥野 広昭

(4) 知的財産権の帰属

知的財産権は全て当方に帰属することを希望。

(5) 他からの指導・協力者の所属、氏名

氏名	所属	備考
藤原 雅大	株式会社カネカ	アドバイザー
野村 孝徳	国立大学法人和歌山大学	アドバイザー
似内 映之	国立大学法人和歌山大学	アドバイザー
植村 哲	奈良県工業技術センター	アドバイザー

(6) その他

なし

1-3 成果概要

本研究計画における目標を踏まえ、以下の研究成果が得られた。なお、平成23年10月に川下事業者より具体的な研究課題となる「製品図」(以下 特殊レンズと呼ぶ)が提示された。平成24年2月に、製品形状に特に必要となる箇所が見極めることができるサンプル品作製ができ、製品として必要な生産技術の具現化と、製品機能の検証に向けた実践的な取組をおこなった。

1-3-1 金型における超低粘度液状樹脂の封止技術の確立

①-1 金型表面精度に依存する流動性の解明

「特殊レンズ」用として製作した金型コアの面精度において、超低粘度液状樹脂は滞りなく均一に流動し、均一な面転写が得られた。ほぼ鋭角(90°)で形成される製品形状においても、10 μ m以下レベルの製品形状が得られた。

①-2 金型の隙間への液漏れの定量化

「特殊レンズ」用金型において、製品部を構成する金型を2分割して製作し、実践での成形テストを実施した結果、超低粘度液状樹脂の液漏れはなかった。金型の分割部分の加工精度は次のとおりである。

- ・ 平行度 : 0.7 μ m
- ・ 加工面精度 : Rz 0.5 μ m

1-3-2 超低粘度液状樹脂に見合った成形システムの構築

川下業者が必要とする試作組立に必要なサンプル成形品の作製をおこなった。金型ブロックを用い、金型の形状精度に対し、成形品で1~2 μ mレベルでの「特殊レンズ」(図4)が得られた。成形性の安定化をはかるべく、“その他機能部分”の設計変更(製品の厚み変更)を川下業者と協議の上おこなったが、狙いとする成形性及び製品形状品質の安定化には及ばなかった。再度、該当部分の厚み変更による新規金型ブロックを新作した結果、製品形状全体含め、光学形状部分の精密測定が可能なサンプルが得られるようになった。この取組の結果、製品形状部の厚み変化(偏肉比率)に対し、成形時での温度制御をより厳しくする必要性が判明した。

次に、川下業者の新しいユニット設計機構への組立評価のため、サンプル作製をおこない、各成形品サンプルの形状精度と組立評価との関連を川下業者にて実施するまでに至っている。

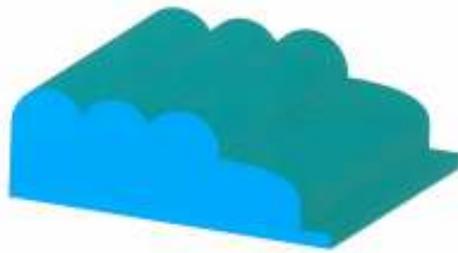


図4 特殊レンズ（イメージ立体図）

成形品の主要な形状精度の PV値^(注)は以下となった。

(注)PV 値については【専門用語等の解説】を参照。

光学機能中心部： $\pm 1 \mu\text{m}$

光学機能周辺部： $40 \mu\text{m}$ / A機能部

光学機能周辺部： $20 \mu\text{m}$ / B機能部

これらの結果より、複数回にわたって、川下業者にて光学ユニット機能の設計検証を平成24年5月より実施している。

当研究テーマにおいて使用する主要な設備機器は以下である。

超低粘度液状樹脂型成形機 TR100VRE (株)ソディックプラスチック製

設備の外観写真を機器図5に示す。



図5 超低粘度液状樹脂型成形機

1-3-3 超低粘度液状樹脂製品の高機能化のための金型の複雑微細加工

③-1 金型部品の微細加工における加工精度の向上

本テーマを実施するための設備機器を以下に示す。

平成24年2月11日に設置。

精密CNC研削盤 SHS-80 (株)ナガセ インテグレックス製
設備の概観写真を図6、7に示す。



図6 精密CNC研削盤



図7 CNC研削盤温度制御管理システム

平成24年3月までの事前加工検討での結果は次のとおりである。

- ・ 輪郭精度 Rz: $\pm 1.0 \sim 1.4 \mu\text{m}$
- ・ 面精度 Rz: $0.18 \sim 0.45 \mu\text{m}$

加工ヘッド部の温度制御が重視されることから、設置室内温度との関係を見据えて、温度管理体制の準備と、適正な砥石による加工設定条件の取組をおこなった後、前述した「特殊レンズコアの再新作」において、実践実施をおこなった。

③-2 高精度な複雑形状化・一体化加工技術の確立

高精度な複雑形状化・一体化加工のために必要な機器設備の、調査・検討を実施した結果、多軸研削機の必要精度等の絞込み後、下記設備機器を平成24年4月23日に据付をおこなった。

多軸研削機 YMC 430 Ver. II 安田工業(株)製

設備の外観写真を図8に示す。



図8 多軸研削機

加工検討の実施において、「特殊レンズ形状」は、川下業者の設計意匠及び機密保持の観点から、当社独自の形状(以下 ダミーレンズコアと呼ぶ)にて実施した。凹凸のある形状にて、また当研究テーマを推進・検証する自由曲面を有する形状とした。ダミーレンズコアを図9、10に示す。



図9 ダミーレンズコア写真

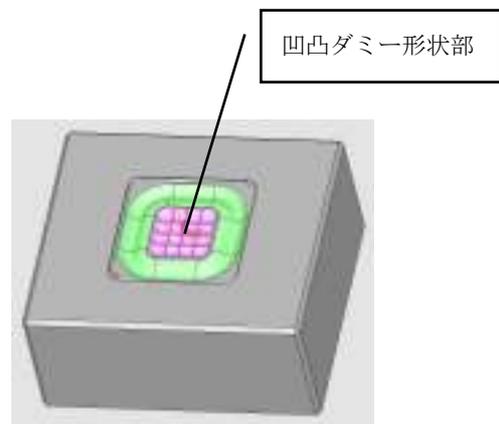


図10 ダミーレンズ金型コア形状(立体図)

設備機器据付前での事前加工テストを基本に、据付後の加工検討は 次の順におこなった。

〈第1ステップ〉

材料: SUS420J2(STAVAX) HRC52

〈第2ステップ〉

材料: 超々微粒子タイプ超硬 HRA90

第2ステップでの結果を以下に示す。

- ・ 複雑一体化形状精度 : $\pm 5 \mu\text{m}$ 以下 ⇒ 達成
- ・ 面精度 : Rz $5 \mu\text{m}$ 以下 ⇒ ほぼ達成

【専門用語等の解説】

・本研究開発に用いる樹脂特性*

* (株)カネカ新規事業開発部の開発製品である。

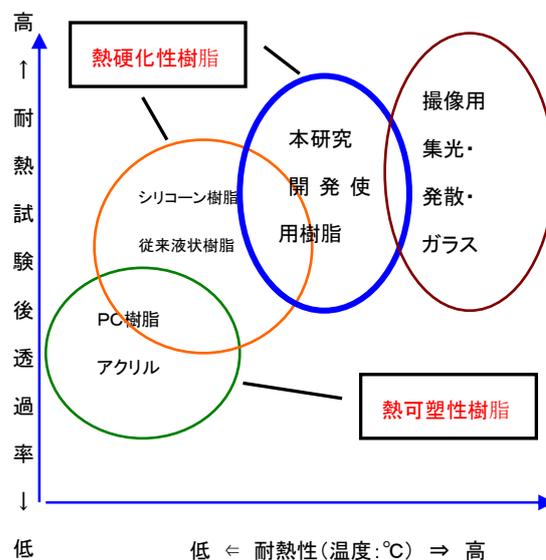
耐熱性、透明性、耐光性において総合的に優位性をもつ。

・超低粘度液状樹脂

通常の生産時(室温)での樹脂自体が持つ粘度が、完全な液体状のものを指す。液状樹脂は多くあるが、常温時での粘度を $1.0 \text{Pa}\cdot\text{s}$ 以下のものを便宜上総称した。下図は本研究開発における樹脂、ガラス材での位置づけを示す。

・熱硬化性樹脂

樹脂素材は加熱することによって硬くなる。一旦硬化すると加熱しても柔らかくはならない。素材は耐熱性が高い。ゴム、シリコンなども熱硬化性であり、精密部品を製作するには生産工法の制約もあり、産業界では一定分野での使用に限定されている。“熱可塑性樹脂”とは樹脂素材を加熱することによって柔らかくなり、冷やすことによって硬くなる。再度加熱すると柔らかくなる。生産工法も多岐にわたり産業界では、幅広く用いられている。熱硬化性樹脂に比べ、耐熱性は低く、耐候性においても使用条件幅に制約が多い。



超低粘度液状樹脂と従来樹脂との耐熱性及び透過率の比較

・シリコン樹脂

従来のソフトシリコンは強度等に難点があり、ハードシリコンは製品の組立性に制約がある。

・振動板

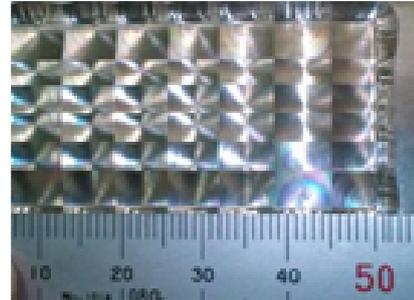
音波と電機信号を相互に変換する機構。マイクロホンやスピーカーの音波とのインターフェースで、マイクロホンの場合は音波を受けて振動し、これを電気変換系に伝える役目をし、スピーカーの場合は電気信号を受けて振動、空中に音波を放射する役目をするもの。

・特殊レンズ

当研究課題を進めるにあたって機密保持上“仮称名”としている。市場には現存しない製品形状を有しており、光学レンズとして、高精度複雑化・一体化形状となっている。

・フライアイ(レンズアレイ)

同一単レンズを縦横に配列したレンズ体(レンズアレイ)で、概観が蠅の目に似ていることからフライアイレンズと呼ばれている。主として半導体露光装置の照明光学系に使用されている。右図は、フライアイレンズ用金型の製品形状部を示している。



・偏肉

成形品など物体において、全体の体積の中で、局部的に体積が変化している形状(状況)を指す。成形品にて製品形状を決定する際、偏肉部分を可能な限り均一化することが望ましいが、製品設計上困難な場合が多い。この場合、製品形状部にヒケ(窪み)という不良原因となる。

・ヒケ(窪み)

樹脂成形において、必要とする製品面形状に凹あるいは、紋様などの形状不良を指す。

・Rz

表面粗さをあらわす単位。十点平均粗さを指す。粗さ曲面からその平均線の方向に基準長さだけを抜き取り、この抜き取り部分の平均線から縦倍率の方向に測定した、最も高い山頂から5番目までの谷底の標高の絶対値の平均値との和を求め、この値をマイクロメートル(μm)で表したもの。別途、Ra(算術平均粗さ)という値があるが、一般的に次のような傾向があり、Rz値の方が厳しい数値となる。 $Rz \cong Ra \times 1/3$

・PV値 (Peak to Valley)

一般的には面精度を称する。本研究においては、加工、または成形した面において、設計値に対する形状の最大誤差を称する。測定範囲内で、最も高い点(Peak)と最も低い点(Valley)の差をあらわす。

・多軸研削機

NC制御において複数のパラメータを同時に稼働させる方法を有する加工設備。マシニングセンタが代表的ではあるが、より複雑な加工パラメータを同時におこなえるものを指す。一般的には、4軸加工機、5軸加工機と称される。

・ダミーレンズ(コア)

当研究テーマにて用いる言葉。任意で設計した複数のレンズアレイを配し、また自由曲面となるトリック面を同時に配した形状。研究実施期間の中で、様々な加工検討、測定評価において、川下業者などの研究開発部門との意匠などに制約を持たせないため製作した形状。

・超硬(合金)

炭化タングステン(WC)と結合剤(バインダ)によって混合して焼結したもの。金属加工において、刃物、砥石などに用いられている。より、硬度、機能を上げるため、炭化チタン(TiC)、炭化タンタル(TaC)などを添加させたものがある。バインダにはコバルト(Co)が用いられることが多い。平成25年1月より、労働安全衛生法施行令等一部改正により特定化学物質の第2類物質として「コバルト

及びその無機化合物」が新たに追加指定されることから、本研究テーマで実施した超硬材には、バインダレスというグレードを用いた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

〔プロジェクト全体に関すること〕

所属 財団法人奈良県中小企業支援センター
氏名 浅井 保典
電話 0742-36-8312
FAX 0742-36-4010

〔研究開発内容に関すること〕

所属 株式会社エフ・エー・テック 品質保証部
氏名 奥野 広昭
電話 0747-25-1140
FAX 0747-25-1141
E-mail okuno@fatec.co.jp

第2章 本論 (成果報告)

「超低粘度液状樹脂を用いた金型・成形加工技術の確立と高機能製品の開発」において平成23年8月より平成24年12月に実施した内容と成果は以下の通りである。

2-1 金型における超低粘度液状樹脂の封止技術の確立

(1) 金型表面精度に依存する流動性の解明

(2) 金型の隙間への液漏れの定量化

超低粘度液状樹脂は、既存の熱可塑性樹脂とは、生産プロセスの中で「粘度」がまったく異なり、金型という生産ツールを用いる中で、既存の工法では製品化は困難となる。生産時での粘度は次のような値である。

- ・ 熱可塑性樹脂 10 ~ 数 100Pa・s
- ・ 超低粘度液状樹脂 1.0Pa・s 以下

研究実施は「特殊レンズ」を構成する金型コアを製作し実践的におこなった。特殊レンズの製品化の上で、金型製作上、2分割化が必要となる。その分割部分の断面形状を図11に示す。

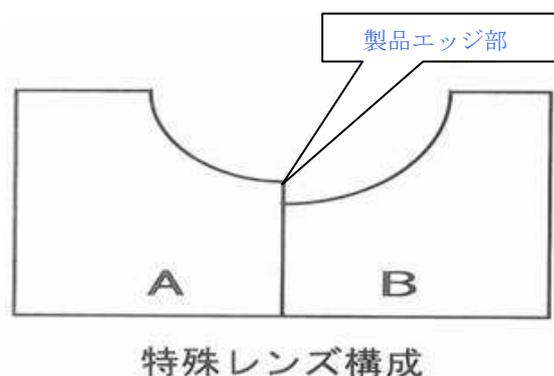


図11 特殊レンズ金型コア断面形状(イメージ図)

「特殊レンズ」の内容について

現在、光学用ガラスレンズ、光学用熱可塑性樹脂を複数使用してデバイスユニット化されている「A機能」、「B機能」、「その他機能」を一挙に高精度複雑化・一体化を目指した全く新しい光学設計品である。一体化によりユニットの小型化、軽量化と共に、高精度化を図っている。超低粘度液状樹脂での成形流動性、転写性、また材料が持つ、耐熱・耐候性を有効に取り入れ、包括した設計思想にて開発試作用として設計された。

特殊レンズは、図12に示すように「A機能部」と「B機能部」が製品機能上限りなく近接する形状になっており、境界は0.3mm未満であり、かつ「A機能部」の最端形状精度は数 μ mの要求設計となっている。

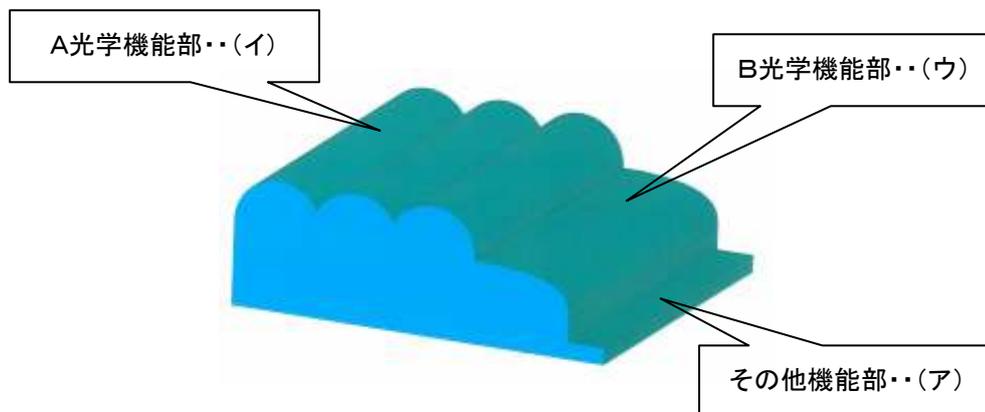


図12 特殊レンズ製品形状(立体イメージ図)

図13は、特殊レンズを構成する金型コア形状である。

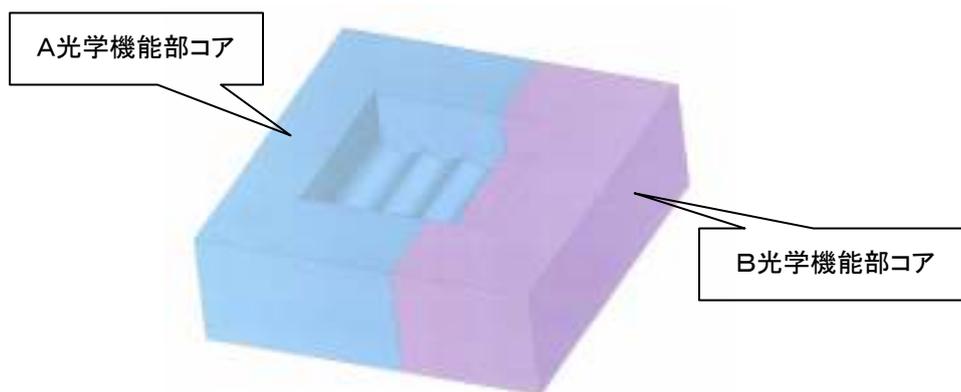


図13 特殊レンズ金型コア形状(立体イメージ図)

特殊レンズ金型に用いる金属材料は、光学金型などに加工実績がある SUS420J2 を選定した。以下に加工内容を記す。

- ・ 製品形状部 金型材料 : SUS420J2 (STAVAX)
- ・ 製品形状部 加工機 : マシニングセンター
ソディック(株) MC430L

最適なエンドミル、またその加工切削条件を繰返し加工テスト実施した後、今回の特殊レンズ金型として、使用可能と判断に至った主な加工条件を表1に示す。使用エンドミルは、製品形状部の加工において、最終仕上げ加工時のみを記載する。表中の(ア)、(イ)、(ウ)の箇所は 図12に示した箇所である。

表1 使用したエンドミルの種類と加工条件

加工条件他	(ア)部分=機能部分	(イ)／(ウ)部分=光学部分
使用エンドミル(仕上加工)	Φ1 R0.05 4枚刃	Φ2 BALL 2枚刃
使用本数	2本	3本
回転数 min-1	20,000	20,000
送り速度 mm/min	600	800
切込み (注記参照)	0.01×0.1 [ap×ae(mm)]	0.0001 [Rmax(mm)]
仕上げ代 mm	0.05	0.006
送りピッチ mm	0.1	0.045

- 注記
- ap×ae apは切込深さをあらわし、aeは切込幅をあらわす。
 - Rmax エンドミルの加工軌跡(プログラム)の中で隣合う軌跡の最大深さをあらわす。

次に、前述した加工条件にて加工した、製品形状部(ア)、及び(ウ)部の加工面精度データを図14、図15に示す。

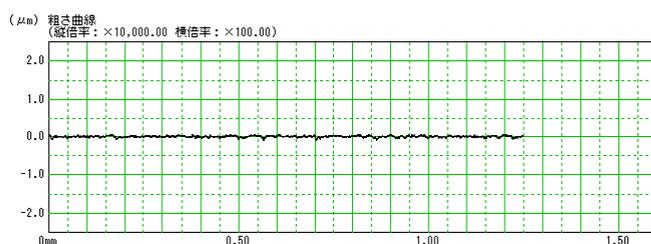


図14 エンドミルΦ1で加工した(ア)製品部の粗さデータ

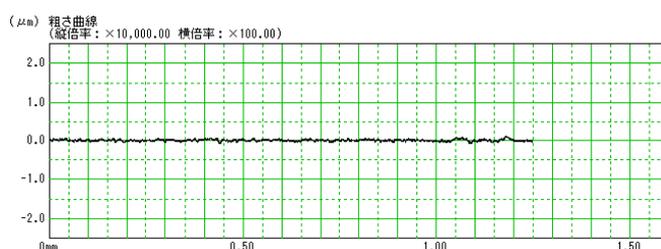


図15 エンドミルΦ2で加工した(ウ)製品部の粗さデータ

製品形状部(ア)及び(ウ)の加工面精度データを表2にまとめる。

表2 製品形状部(ア)及び(ウ)の加工精度データ

測定箇所	Ra μm	Rz μm
(ア)製品部	0.2140	0.1384
(ウ)製品部	0.0140	0.1258

最終仕上げ加工時でのエンドミルの磨耗は、刃物回転数、送り速度の適正化にて、5 μm までであれば、目標とする加工面精度 Rz 0.2 μm が得られることがわかった。

次に、超低粘度液状樹脂を用いて様々な製品化に対応するためには、製品形状を構成する金型構成上の隙間を小さくする必要がある。特殊レンズにおいて図11、図13に示したように金型を分割させている。それぞれ加工後、コアとしてセット化した。その加工結果は以下である。加工時の室温は23℃にて、加工前の暖気運転は1時間にて実施している。

表3 金型コアセット部の加工条件

内容	加工条件
砥石タイプ(仕上げ)	SDC600
回転数 min-1	1420
送り速度 mm/min	25
仕上げ加工代 mm	0.01未満

加工機は平面研磨機 長島精工(株) NAS520-CNC2 を用いた。

特殊レンズ金型のセット部分の加工精度は以下である。

- ・ 平面度 : 0.0007 mm
- ・ 面精度 : Ra 0.081 μm、Rz 0.532 μm

次に、特殊レンズ金型を用いた超低粘度液状樹脂流動性の結果を表4示す。計測は、特殊レンズ製品形状での充填完了時間にて比較をおこなった。

表4 超低粘度液状樹脂流動性の試験結果

金型温度	充填完了時間
室温 ~ 80℃	2.0秒 ~ 2.5秒
90° ~ 110℃	1.7秒 ~ 1.9秒
140℃ ~ 150℃	0.9秒 ~ 1.2秒

この結果から、流動性については 金型温度の依存性が大きいことがわかる。

(金型温度は、後述する製品品質の問題=気泡及び、製品が安定した固化状態に達するための金型の昇温時間など、超低粘度液状樹脂を製品化する上で重要であることが解明されている。)

金型面精度においては特殊レンズの(ア)部分に相当する周辺部の面精度が確保されれば、今後の製品化に向けての指標とすることができる。

また、特殊レンズ(前述 図11)の製品部となる鋭角なエッジ部分は金型構成上も同様、鋭角で構成されており、樹脂流動が安定しないと均一な成形が困難となる箇所である。成形結果は良好であり、金型加工表面精度Rz0.13 μmであれば支障ないことが確認できた。

図13のセットした金型コアを用いて、超低粘度液状樹脂にて充填テストをおこなった結果、成形品にはバリは一切認められなかった。このことから、分割した金型をセットする場合、加工面精度Rz0.5 μmにて、金型加工及び面精度を管理維持すれば、液漏れが無いことがわかり、今後の様々な製品化に対応するための金型製作の指標とした。

2-2 超低粘度液状樹脂成形品に見合った成形システムの構築

平成23年11月9日に設置した、「超低粘度液状樹脂型成形機」にて、「特殊レンズ」の成形安定化と川下業者による製品化のためのサンプル作製をおこなった。型成形機を用いるのは、液状樹脂の粘性が低いことから、金型内部に液状樹脂が充填された際、重力による影響、つまり液状樹脂が重力方向への樹脂漏れの懸念を払拭するためである。

表5に示す基本成形条件にて、特殊レンズのサンプル作製をおこなった。また、サンプル作製における主な不良内容を表6に示す。

表5 基本成形条件

制御(設定)項目	制御、設定値
初期金型温度 (°C)	100 ~ 110
昇温完了金型温度 (°C)	150
樹脂充填後昇温開始時間 (分)	5
樹脂充填後型締開始時間 (分)	1
型締終了後コンプレッション開始時間 (分)	2 ~ 4
コンプレッション力 Kg・N	5 ~ 7
計量設定 ml	3.0 ~ 3.8

表6 成形テストからの成形不良内容の原因

不良内容	原因 及び 予想
気泡大	計量不足、 型締時間 、
気泡小	充填状態、 金型温度
充填不足(全体)	計量不足、 型締時間
充填不足(周辺)	計量不足、 金型温度 、 型締時間
充填不足(裏面)	型締力 、 型締時間
変形	金型温度 、加熱時間
クラック	金型温度
泡噛み	充填状態、
白濁(濃い)	金型温度
白濁(薄い)	充填状態、 金型温度

これらの不良要因は単独の原因ではなく、複合的に因子が絡んでいる。対策として

- ・ 金型温度
- ・ 型締時間
- ・ 型締力

について重点的な取組をおこなった。結果は成形品のサンプル評価できるレベルまでに至ったが、成形安定性においてバラツキが生じた。

特殊レンズの光学機能部分を変更させず、その他機能部分となる厚みを変更(肉厚)させることにより、安定したサンプル作製を目指した。これは、主な不良要因である、気泡、変形など成形プロセスにおける原因を抑える目的で進めた。図16は、特殊レンズの断面図を示す。

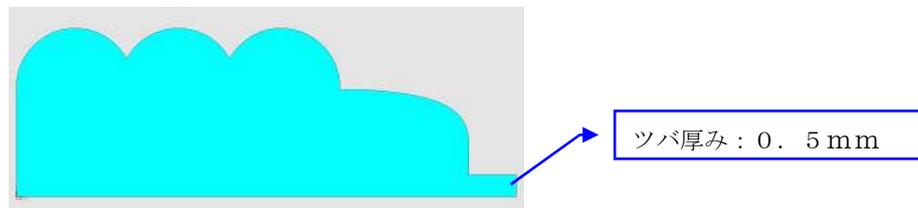


図16 特殊レンズ断面図 (当初設計)

川下業者と協議の上、一部製品形状部の設計変更を実施した。組立機能部となる「ツバ厚み」が当初設計では0.5mmに対し、1.0mmにて形状の変更をおこない、前述した基本成形条件にてサンプル作製をおこなった。設計変更後の断面図を図17に示す。

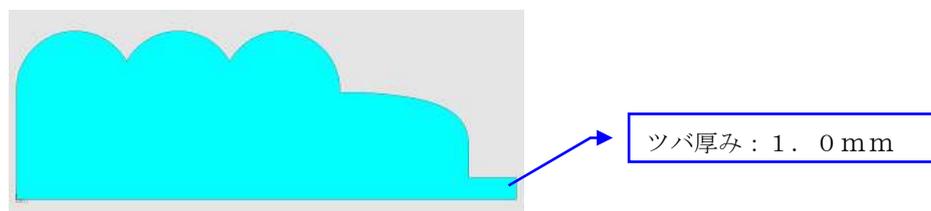


図17 特殊レンズ断面図 (設計変更1)

しかし、基本成形条件の中では、良品形状品を確保することが困難な状況となった。

原因は、定量的に把握しきれていないが、不良内容が、気泡、クラックに絞られたことから成形プロセス内において、金型温度コントロールができていないと推測した。超低粘度液状樹脂の基礎データ(図18参照)により、110℃~120℃ の間に急激に粘度が上昇し、つまり硬化が促進されることがわかっている。また、硬化時において、反応熱が生ずることも、基礎実験にて把握できている。実際の内部温度は定量的に把握にできていないが、研究実施の中で金型表面を通じて計測した結果 200℃程度の発熱があると推論した。

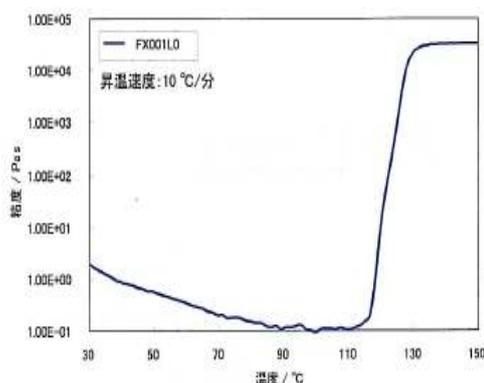


FIG7 FX001L0 温度上昇時の粘度変化

図18 超低粘度液状樹脂の温度と粘度の関係

今回の設計変更では、光学機能部分全体において、製品断面図から計算すると偏肉率は次のようになる。偏肉率を 表7に示す。

表7 特殊レンズ偏肉率

ツバ厚み	当初設計	設計変更1
	0.5mm	1.0mm
レンズ部最大厚み 6.57mm	$0.5 \div 6.57 = 7.6\%$	$1.0 \div 6.57 = 15.2\%$
レンズ部中間厚み 3.00mm	$0.5 \div 3.00 = 16.6\%$	$1.0 \div 3.00 = 33.3\%$

偏肉率については、熱可塑性樹脂の経験値から、改善する方向を期待したが、ツバ厚みを増やすことによる特殊レンズ全体の体積が10%以上増えたことにより、硬化時の自己発熱を制御することが困難になったと推論づけた。ちなみ、成形品全体の形状を安定的に確保することは可能になっている。

この結果より、ツバ厚みを再度設計変更することにより、成形安定性を見ることとした。設計変更2としてツバ厚みを0.6mmとした断面図を図19に示す。

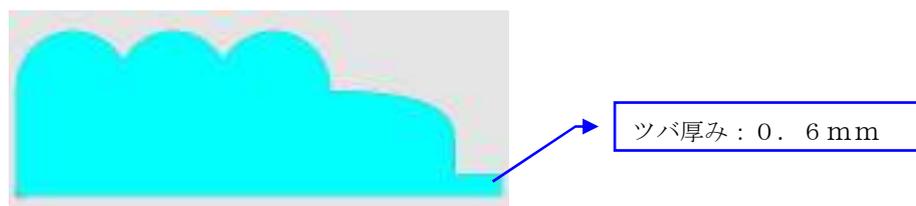


図19 特殊レンズ断面図（設計変更2）

結果は、川下業者にての組立評価用としてのサンプル成形製作が可能となった。

ダミーレンズコア金型を用いて自己発熱による樹脂の固化観察をおこなった。当該ダミーレンズコアは平成24年5月にSTAVAX材にて作製したものをを用いた。ダミーレンズコアについては、次項に述べる。

図20は成形プロセスの中で金型を開放し、つまり型締めせずに樹脂充填後の固化変化を見るために映像撮影したものの初期写真である。

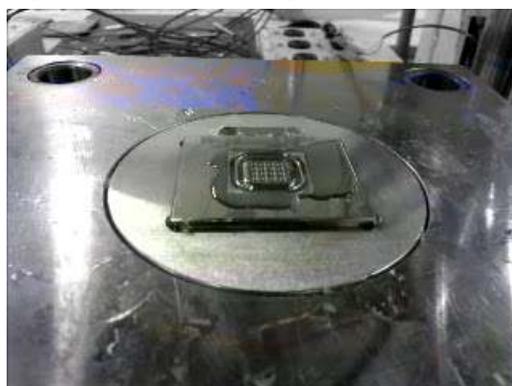


図20 固化実験

固化は急激に始まるとともに、固化変化は、成形品中心部へ急激に収縮変化をきたすものであった。固化現象を模式化したものを図21に示す。

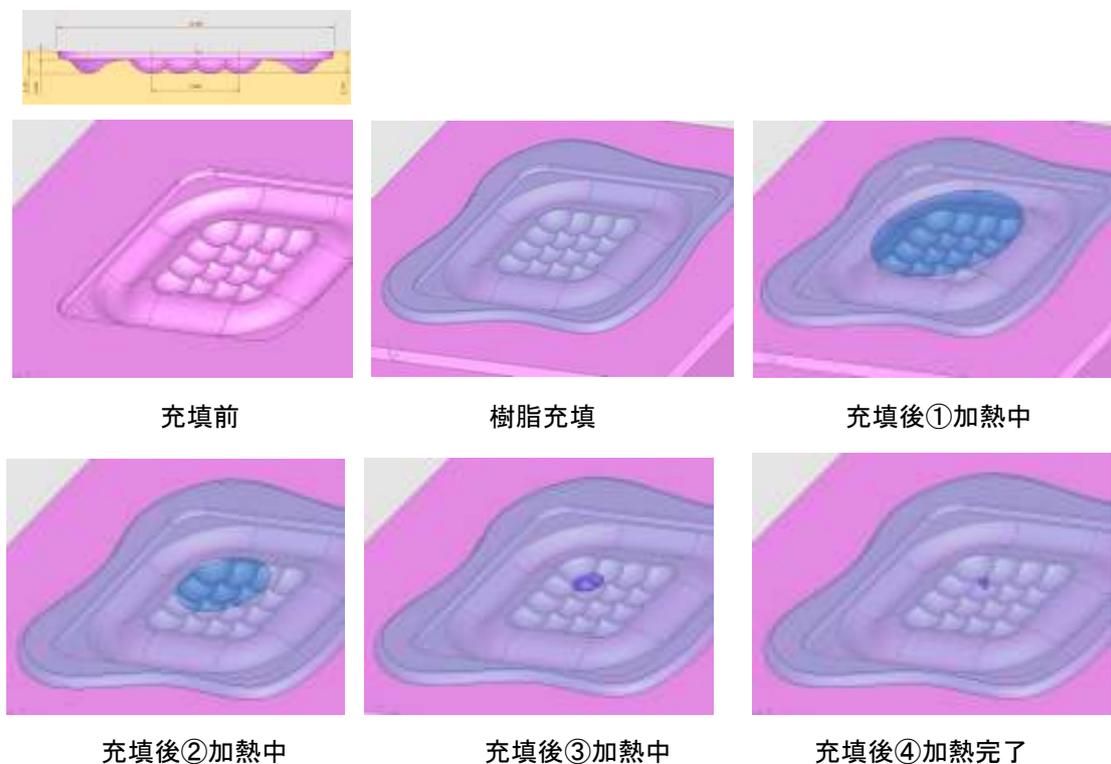


図21 固化現象の模式化

実験条件を下記に示す。

- ・ 樹脂充填時金型温度110℃
- ・ 充填後金型昇温開始時間1分
- ・ 昇温度150℃
- ・ 固化完了時間2分

樹脂充填/過熱開始後①において、樹脂表面全体にヒケ(窪み)が発生し、時間経過②~③を経て、加熱最終温度150℃において、ほぼ中央部にヒケ(窪み)が集約=集合する現象が確認できた。このヒケ(窪み)が、気泡発生の要因であり、製品中央に集約する際に樹脂に収縮引っ張り力が発生し、これがクラック発生のメカニズムであることが検証できた。図22は自己発熱と固化イメージをあらわす。

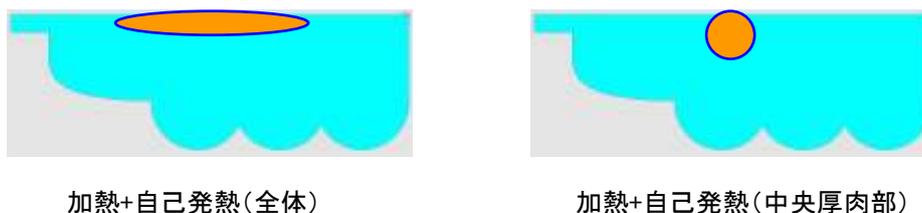


図22 自己発熱と固化イメージ

特殊レンズの厚肉部になる中央部と周辺部との固化時間差が発生し、それが不良原因を作り出している。

今回の実験・検証結果より、一定以上の偏肉率を持つ製品形状においては、自己発熱による急激な収縮を回避すべく、金型上の冷却回路・システムを配置する必要がある。特殊レンズにおいては、量産試作金型を新規設計・製作時(川下業者での組立検証ステージ後)に製品部中央部からの冷却機構を設ける予定である。温度コントロールについては、研究テーマとしての成形システムをベースに、量産試作型へは高精度カートリッジヒーターを組込むことで対応できる。次に、ツバ厚み:0.6mm(設計変更2)での、サンプル成形品の形状測定結果を示す。成形品の形状測定及びピッチ測定は、図23に示したS1、S2の場所を実施した。図は特殊レンズの平坦部を下に、A機能(S1)、B機能(S2)を上にしたものである。

測定位置は、2つの機能のうち、シャープエッジが求められているA機能の最端をX軸とした。組込みサンプルとして8個(#1~#8)を対象とした。

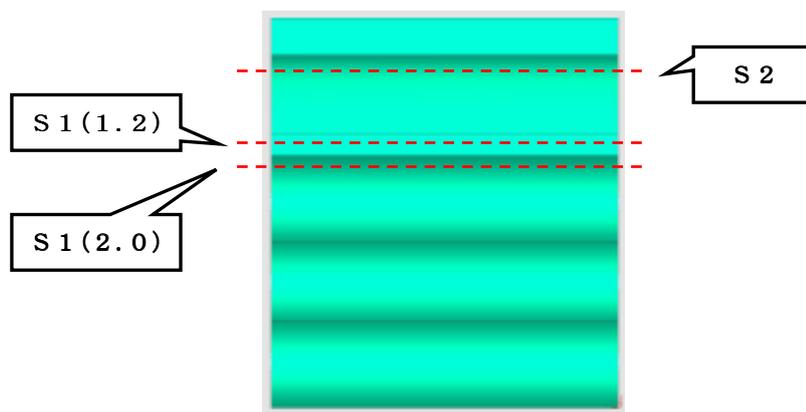


図23 特殊レンズ測定箇所

- ・ S1(1.2) : X軸より1.2mm位置 (A機能部)
- ・ S1(2.0) : X軸より2.0mm位置 (A機能部)
- ・ S2 : X軸より1.50mm (B機能部)

この位置は、製品設計上 もっとも高い(Z方向)位置となる。

- ・ 測定機器 : Panasonic UA3P

図24に S1(1.2mm位置) PV図を示す。



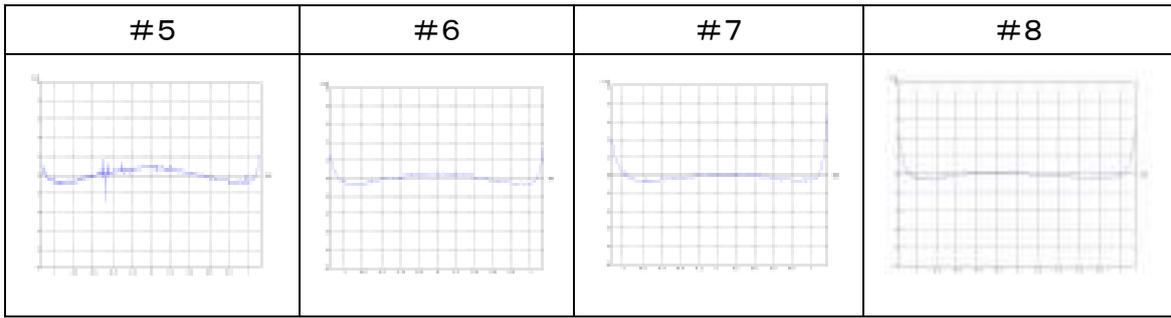


図24 S1(1.2mm位置)測定データ

図25に S1(2.0mm位置) PV図を示す。

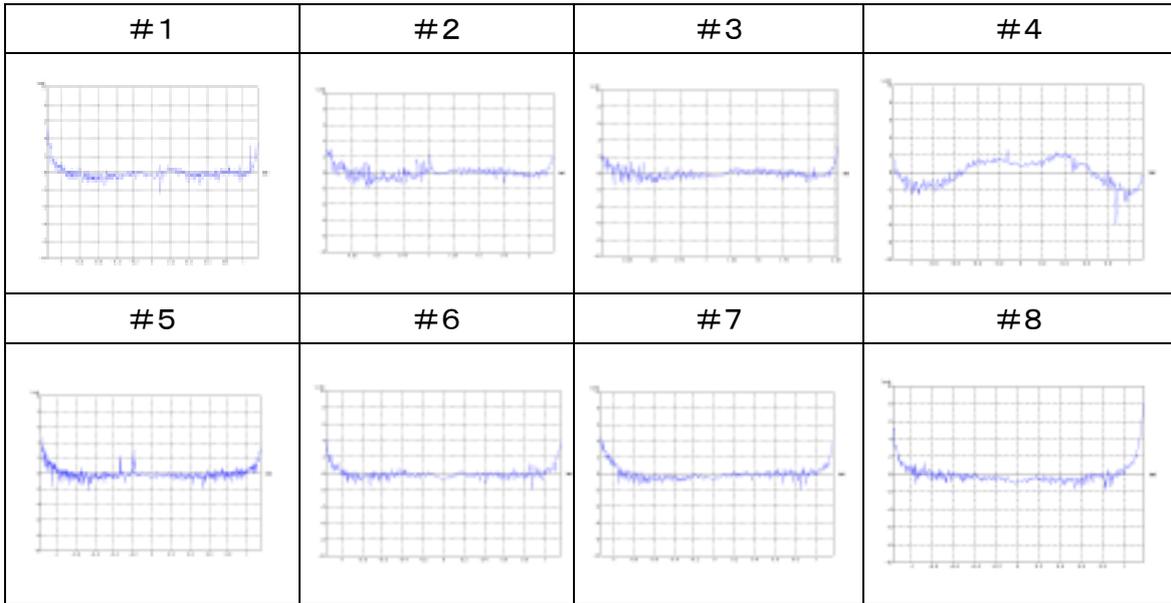


図25 S1(2.0mm位置)測定データ

図26は S2(1.50mm位置)でのPV図を示す。

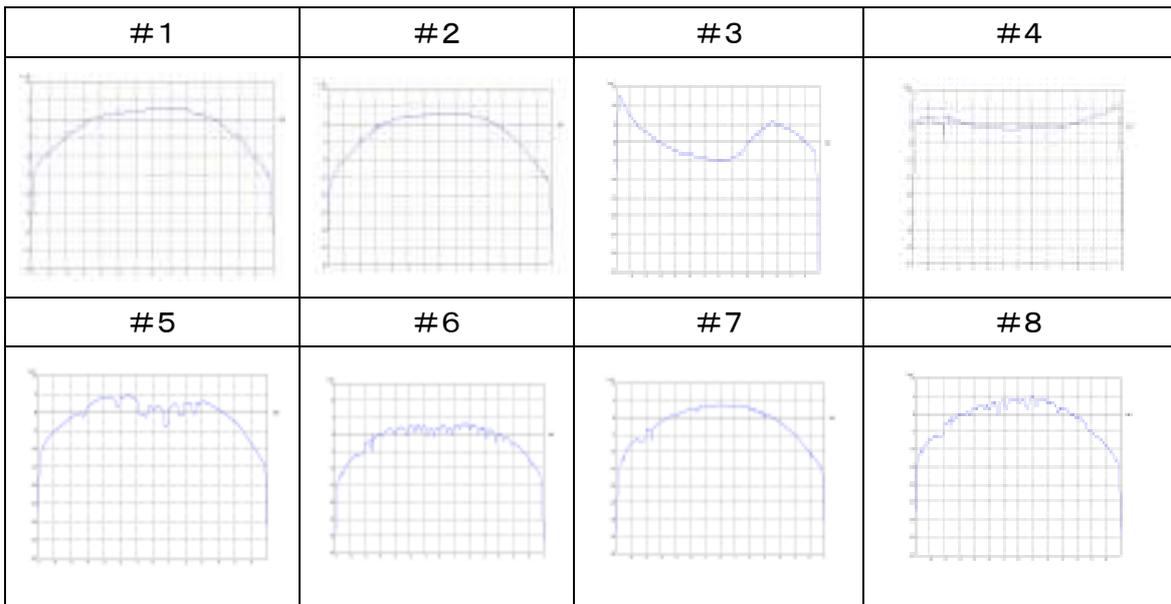


図26 S2(1.50mm位置)測定データPV図

表8は S1(A機能部)、S2(B機能部)各測定でのPV値を示す。S2については、光学機能範囲(製品中心部より ±6mm)を、測定図から簡易的に読み取った値である。

表8 測定点でのPV値 (単位: μm)

サンプル No #	測定点		
	S1(1.2mm)	S1(2.0mm)	S2
1	5.526	7.855	12.5
2	5.170	4.935	15.0
3	2.489	4.729	12.0
4	3.926	8.505	9.0
5	4.892	7.129	12.5
6	4.124	5.970	11.0
7	7.665	6.560	13.5
8	5.804	10.189	13.5

次にA機能部にある凹凸形状部の凸部分のピッチ測定をおこなった。

凸部分は、X軸方向に等間隔で複数配置されている。ピッチ測定の原点は図23に示した測定位置 X軸に対し、S1(1.2mm)とS1(2.0)を結ぶ稜線より算出した。

S1(A機能部)のピッチ精度は以下であった。単位はmm。

- ・ ズレ小 0.004 ~ 0.010
- ・ ズレ大 0.040 ~ 0.050

これらの特殊レンズ(n=8 #1~#8)を川下業者にて開発試作組立を実施した。

開発試作組立の目的は、当該特殊レンズの性能・機能のみならず、光学ユニットとしての総合的な判断のステージである。これは、まったく新しい製品設計であることから、特殊レンズ単体としての性能を判断する段階には至っていない。結果を、表9にまとめる。

表9 サンプル品による組立評価

サンプル No #	外観	S1(A部)		S2(B部)	組立評価
		ピッチ	PV	PV	
1	◎	○	○	○	○
2	○	○	○	○	○
3	○	△	○	○	△
4	△	△	△	○	×
5	△	△	○	△	△
6	△	○	○	△	○
7	○	○	○	○	○
8	○	○	○	△	○

記号の説明; ◎:最良 ○:良好 △:劣る ×:不適

試作成形での特殊レンズの組立評価から、次のことが傾向として見えてきた。これらは、次のステージに入るにあたって改善すべき内容である。

① #4 組立評価「×」の考察

「S1部ピッチ」がもっとも設計値から離れている。よって、A機能部での成形転写性、精度が当該光学ユニットでは影響が大きいと予想できる。

② #3、#5 組立評価「△」の考察

#3は「S1部ピッチ △」にて 組立評価が △となっている。#5については、更に「S2部 PV値 △」であるが、#6 及び #8は「S2部 PV値 △」にもかかわらず、組立評価が○であることから、S1部ピッチの精度がより必要であることが予想される。

③ 外観全体については、現時点での組立検証ステージでは判断はついていない。

④ S2部PV値(形状)についての考察

#6、#8においてPV値は△であったが、組立評価は○となった。図27に○評価の#1と△評価の#8を示す。

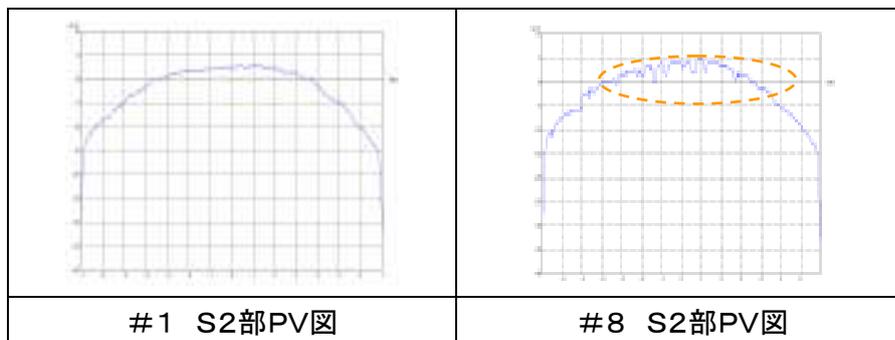


図27 サンプル#1と#8のS2部 PV図比較

#8において、 内に示した部分に数 μm の形状の悪さが現れている。川下業者での組立評価は、ユニット関連部品との最終判断に時間を要することから、当面現状維持という判定になっている。しかし、今後の新たな製品形状を見据えた場合、この現象をいかに小さくするかが課題として捉まえていく。

次に、形状精度の安定性について検証する。これは、サンプル成形品にて川下業者より、今後のステージに向けた製品化への確認の要請を受けたものである。当該特殊レンズでの光学性能領域は図28に示す領域は図28に示す 領域内にある。

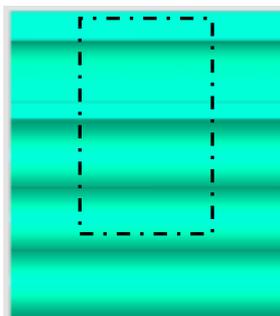


図28 光学性能必要領域

前述した、図24のS1部のPV図、図26のS2部のPV図を検証すると、概ね光学領域周辺部での各々のPV値(形状)は安定していることがわかる。光学領域内及びその範囲外において、今後特殊レンズの金型補正をおこなう必要がある。平成23年度での研究実施の中で、超低粘度液状樹脂に対応した特殊レンズコアを作製した後、実際の成形収縮率に合わせ、再度新作コアを作製した。新作後に各形状精度が再現されており、次のステージとなる形状補正への反映は可能である。図29は S2部(B機能部)の形状精度と補正箇所を示す。

補正を必要と考える箇所を各図中  にて示す。

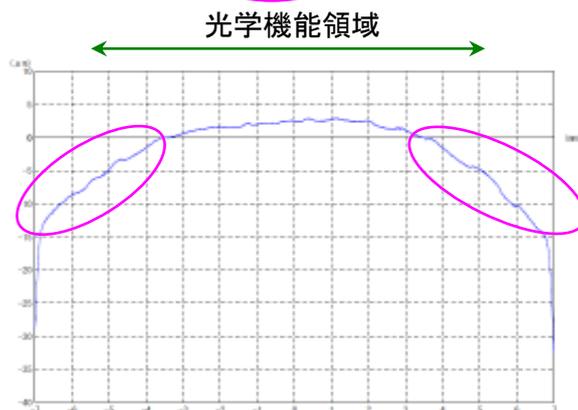


図29 S2形状光学必要領域と補正箇所

S2(B機能部)での光学領域両端での PV値は $20\mu\text{m}$ で安定している。図30は特殊レンズ成形品写真である。

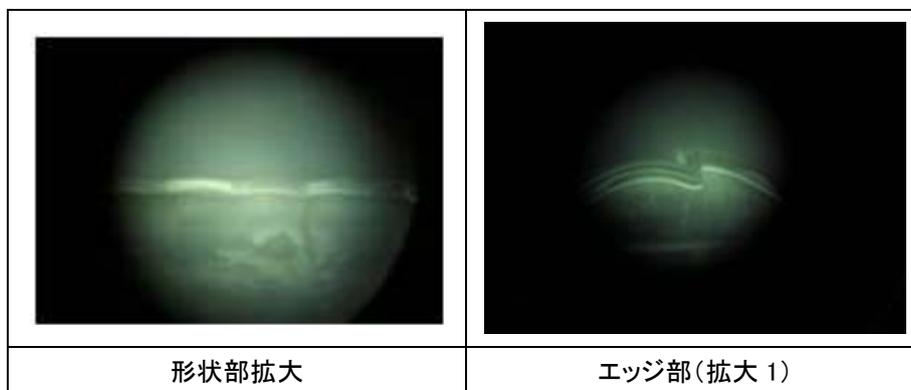


図30 特殊レンズ写真

2-3 超低粘度液状樹脂製品の高機能化のための金型の複雑微細加工

(1) 金型部品の微細加工における加工精度の向上

金型部品の微細加工技術は、2-1-(2)に記した超低粘度液状樹脂を成形金型に用いた際、樹脂漏れを如何に防御するか、つまり、より高度な製品化に対応するための加工精度、輪郭精度、加工面精度を包括して、高度な加工技術を達成することにある。

金型部品の表面に凹凸の無い形状であれば、通常は平面研削盤にて、一定水準以上の加工面精度が確保できる。しかし、曲線を含む凹凸のある形状においては、加工方法は限定

され、形状精度、面精度は超低粘度液状樹脂に即したものは確保できない。平成24年2月に設置したCNC研削盤にて、図31のような表面が凹凸形状を有するものについて加工検討を実施した。



図31 加工検討品(凹凸形状)

材料：超硬 耐蝕性合金タイプ HRA 88.0以上

サイズ：全長 80mm、全幅 30mm 厚み 10mm

荒加工後の仕上げ加工時の主な加工条件を表10、形状精度を表11に示す。

表10 凹凸形状部を荒加工後、仕上げ加工条件

項目	内容
砥石(仕上げ用)	SD400MVD
砥石先端R mm	R0.04
回転数 min ⁻¹	18,000
送り速度 mm/min	0.2
ストローク幅 mm	65
テーブルターン速度 R/min	360
加工面繰返回数	2 ~ 4
暖気設定時間	3時間以上

表11 加工結果の形状精度

測定内容	A断面: μm		B断面: μm	
	+域(ズレ)	-域(ズレ)	+域(ズレ)	-域(ズレ)
荒加工時	13.6	0	18.0	0
1回目加工	1.3	1.2	1.3	1.2
2回目加工	1.0	0	1.0	1.0

結果は、目標値 $\pm 1\mu\text{m}$ の形状精度誤差(ズレ)に対し、プラス側に $0.4\mu\text{m}$ の誤差(ズレ)が一部生じていた。面精度は、 $Rz 0.18\mu\text{m} \sim 0.45\mu\text{m}$ に仕上がっている。

その実績内容にもとづき、前述の「特殊レンズコア」を複数回製作した結果、支障は出ていない。また、後述する「ダミーレンズコア」の検討においても、コアブロックとして加工精度が必要な箇所に対応実施した。

(2) 高精度な複雑形状化・一体化加工技術の確立

当サブテーマは 以下を目標として取り組んだ。

- ・ 複雑一体化形状精度 : $\pm 5 \mu m$ 以下
- ・ 面精度 : Rz $5 \mu m$ 以下

これらの目標を達成すべく、平成24年4月23日に「多軸研削機」を据付、研究テーマの実施をおこなった。表12は主な仕様を示す。

表12 多軸研削機の仕様

主要な機能	スペック・仕様	応用性
高速主軸回転	40,000rpm	加工面精度
機体温度制御	内蔵式	加工面精度
ワーク位置	座標自動変換	任意形状精度
BC軸割出精度	$\pm 3 \text{ sec}$ 以下(加工プログラム応答)	任意形状精度
回転軸変換	自動	変則曲率形状

研究テーマを実施するにあたって、各方面との機密保持等に影響しない独自の形状にて設計をおこなった。また、超低粘度液状樹脂での成形テストにも転用が可能なサイズにて設計をおこなっている。独自設計のため、名称を「ダミーレンズコア」と称する。図32に立体図を、図33にその概要を示す。

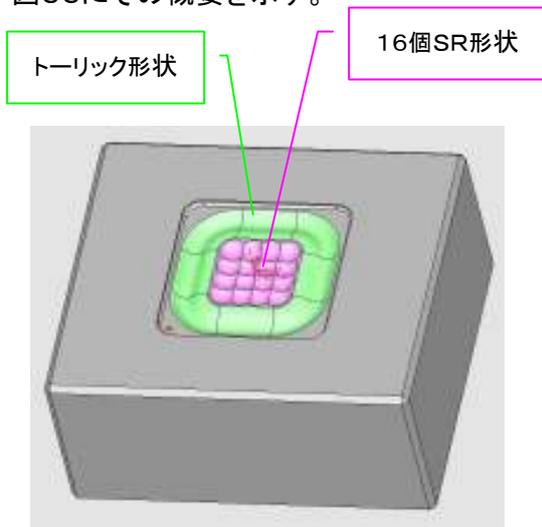


図32 ダミーレンズコア形状(立体図)

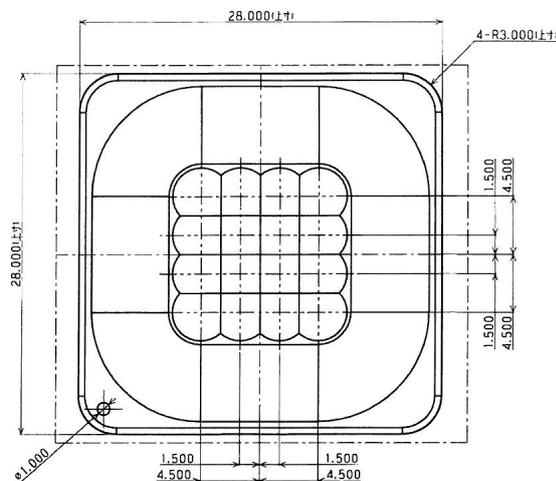


図33-1 ダミーレンズコア形状(正面図)

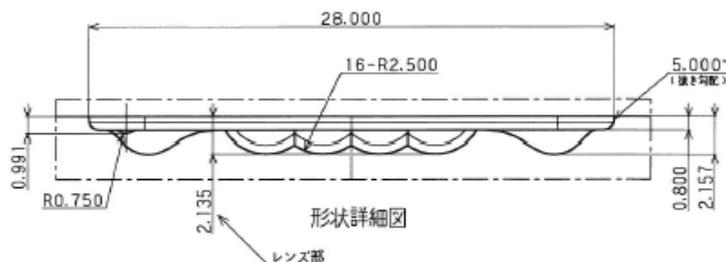


図33-2 ダミーレンズコア形状(断面図)

ダミーレンズの設計上の主な仕様を表13に示す。

表13 ダミーレンズコア形状仕様 単位:mm

コア全体サイズ	60×52×(20t)
形状部サイズ	28×28
トーリック部	自由曲面 周辺部全体 深さ: 1. 357 (コア上面より 2. 157)
SR部	4×4=16個
	R 2. 5
	中心ピッチ 3. 0 (注記参照)
	深さ 1. 335 (コア上面より 2. 135)

注記) 各隣り合うSR形状は、ピッチ3. 0 :< R2. 5×2 のため、形状が重なり合う仕様になっている。このことから、理論上 シャープエッジが発生する仕様になっている。

多軸研削機(YMC 430 Ver. II 安田工業(株))を用いてダミーレンズコアの加工テストを実施した。

- ・ 材料 : SUS420J2 (STAVAX) HRC 52
- ・ 加工液 : 油性切削液

加工工程及び使用工具及び加工条件を表14に示す。

表14 加工テスト工程及び内容

加工工程	使用工具	工具サイズ	主軸回転数	送り速度
			(mm/min)	(min)
荒加工	ボールエンドミル	R1×3	25,000	2,000
中荒加工	ラジアスエンドミル	Φ5×R0. 5	7,000	700/300
中仕上加工	ボールエンドミル	R0. 5×3	40,000	150/300
仕上加工	ボールエンドミル(CBN)	R0. 5×2. 5	40,000	150/300

結果は、ダミーレンズコア加工面が「曇った」状態となり、加工面精度は肉眼にて不可となった。加工工程での観察では、最終仕上加工において、複雑形状化・一体化における、使用工具の限界であると判断した。単一形状での加工では支障はないものの、工具摩耗による工具の頻繁な交換は、ダミーレンズコアの仕様を得るには困難との結果から、工具の選定見直しを実施した。表15は 仕上加工工程時に採用した工具及びその加工内容である。

表15 工具変更内容

加工工程	使用工具	工具サイズ	主軸回転数	送り速度
			(mm/min)	(min)
仕上加工	バイダレスエンドミル (CBN) 1枚刃	R0. 5×3. 0	40,000	150/300

結果は、加工後の測定評価ができるレベルまで達した。図34は 仕上加工工程に用いた工具の写真である。

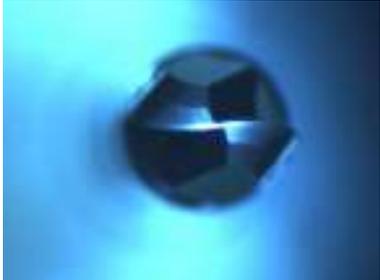
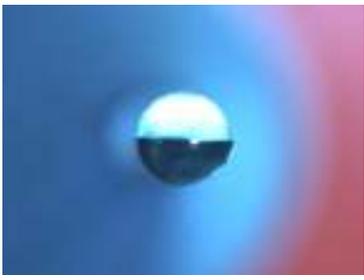
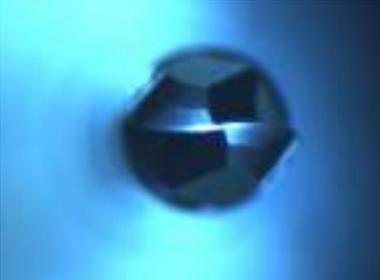
仕上工程用刃物	
変更前	変更後
	
	
ボールエンドミル(CBN) 2枚刃	バインダレスエンドミル(CBN) 1枚刃

図34 加工に用いた刃物形状

加工テストを実施した ダミーレンズコアのSR形状部の測定評価をおこなった。測定箇所は図35に示す。16個のSRに対し、行(a、b、c、d)、列(1、2、3、4)とし、測定原点は、コアの中心とした。

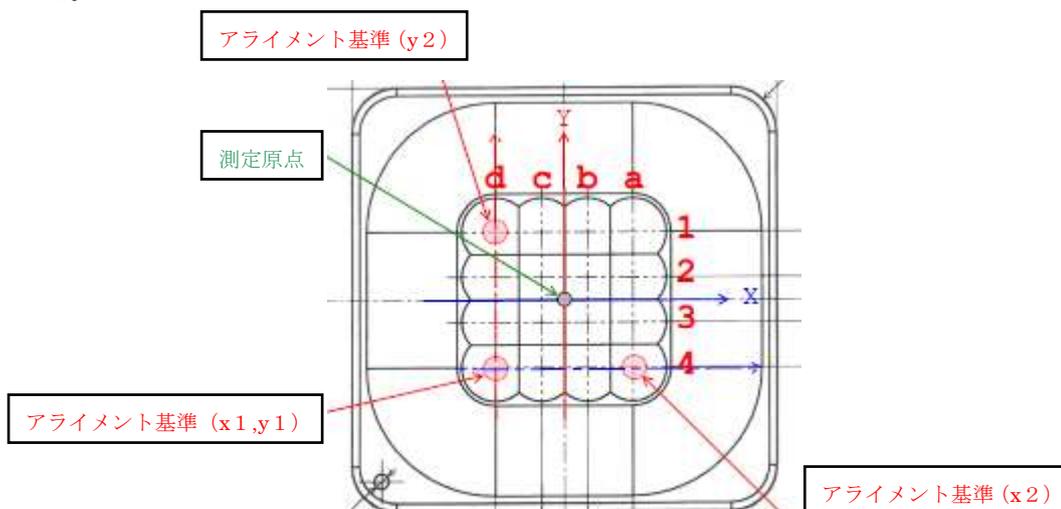


図35 ダミーレンズコアの測定箇所

(a、1)箇所での 補正をかけないSR部形状データ(PV図)を 図36に示す。
 青線は、SRのX方向を示し、赤線はY方向をあらわす。

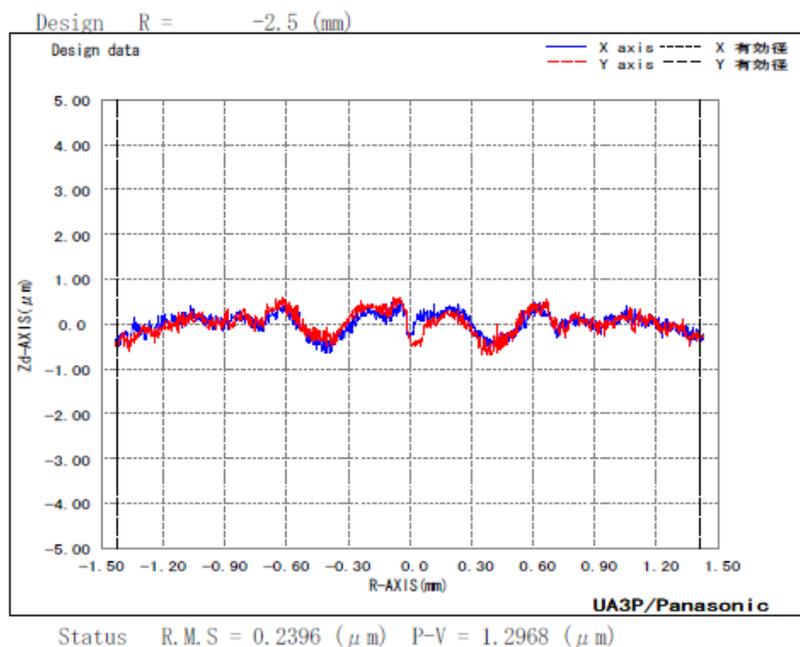


図36 図35の(a、1)箇所 補正なしPV図

図37は (a、1)箇所において、Best FitさせたSR、つまり補正したPV図である。
 Best Fitとは、設計値:2.500mm のSRに対し加工後の実際のR値を計算上求めた値である。

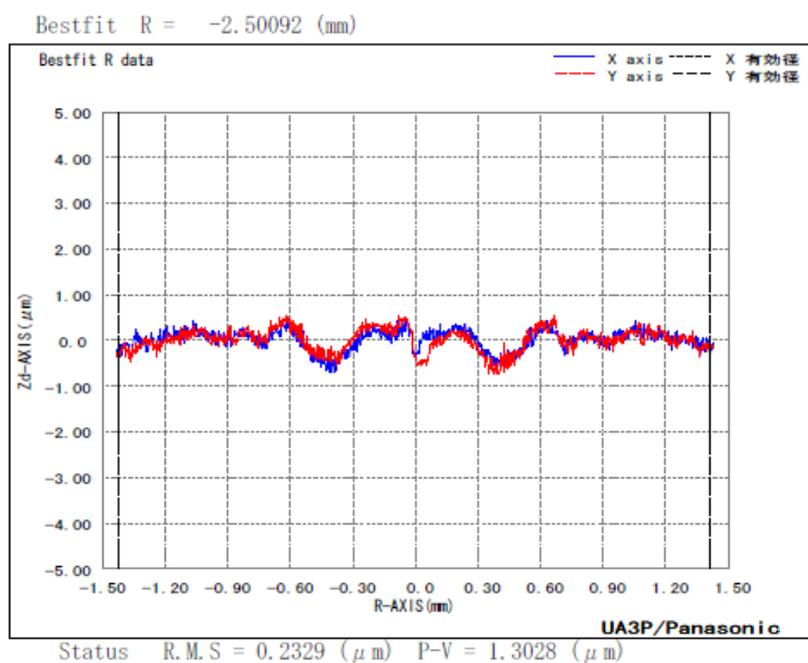


図37 図35の(a、1)箇所 補正後PV図

表16に 全16個の R Best Fit(単位:mm) 及び PV値(単位:μm)を示す。

表16 SR16個のデータ

測定箇所	R:Best Fit	PV値	測定箇所	R:Best Fit	PV値
a	1	2.5009	b	1	2.5037
	2	2.5005		2	2.5001
	3	2.5006		3	2.4998
	4	2.4992		4	2.5010
c	1	2.5041	d	1	2.5013
	2	2.5015		2	2.5011
	3	2.5033		3	2.5011
	4	2.5007		4	2.4996

この結果から、設計値(2.50mm)に対する SR加工精度は次のようになる。

- ・ R Best FIT : 約 $-1\mu\text{m} \sim +4\mu\text{m}$
- ・ PV値 : $1.297\mu\text{m} \sim 2.326\mu\text{m}$

概ね、形状精度は、研究実施目標内には収まっている。図38は SR部の面粗さを示す。

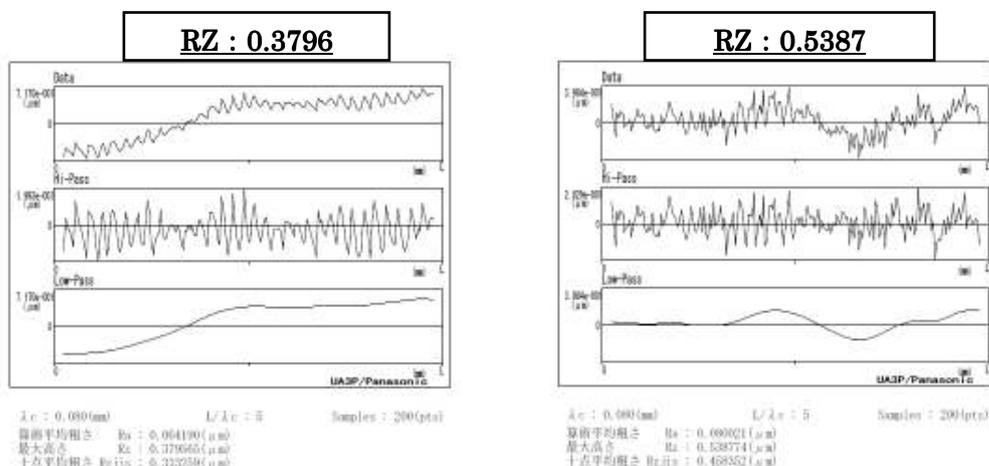


図38 SR部 面粗さ

次に示すのは、前述したように、今回のダミーレンズコアのSR形状の配置は、各SRが重なり合う設計にしている。つまり、隣り合うSRには、設計理論上の断面形状として「シャープエッジ」が存在する。しかし、機械加工においては、金属材料の材質にもよるが、加工設備機器、加エプログラム、また、加工用刃物によりその形状に影響を与える。機械加工において、自由曲面(R形状含む)で構成された中での「シャープエッジ」を確保することは非常に高度な生産技術要素となる。

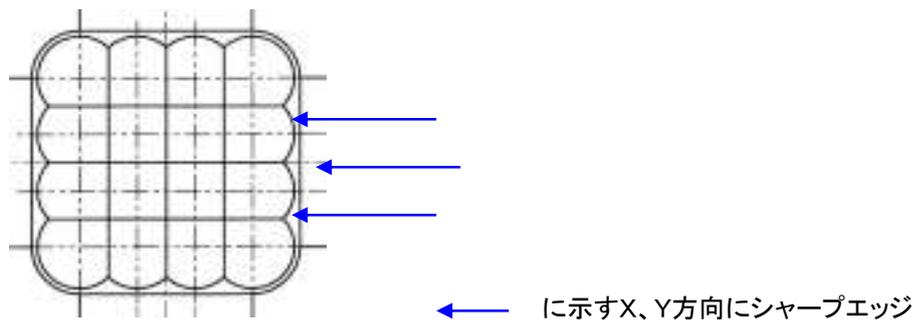


図39 シャープエッジ部

図40に SR部形状位置 (a1)、(b2)、(d4) の測定結果を示す。データは上段にSR全体を示し、下段はSR底面中心でのPV図を示している。測定機は、三鷹光器 NH-3SP を用いた。

a1	断面形状	
	PV図	
b2	断面形状	
	PV図	

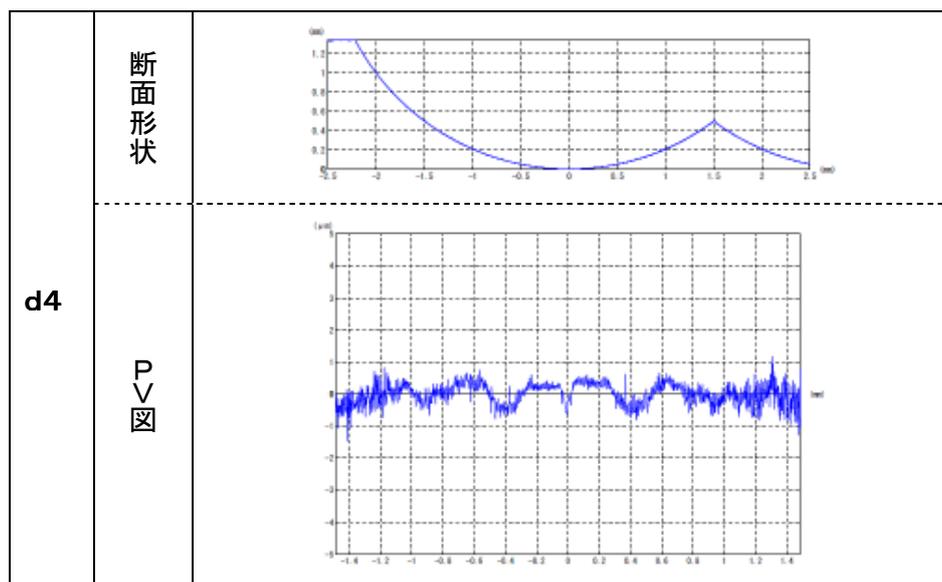


図40 シャープエッジ部形状データ

データより、シャープエッジ部近傍に、面精度のゆらぎが見える。PV図からは、約 $2\mu\text{m}$ 程度の誤差が発生している。次に、全16個のSR形状のピッチ間精度を表17に示す。

表17 ピッチ測定座標

測定箇所		規格(mm)		測定(mm)		差分(μm)	
		x	y	x'	y'	Δx	Δy
a	1	4.5	4.5	4.50323	4.50270	3.23	2.70
	2	4.5	1.5	4.50354	1.50116	3.54	1.16
	3	4.5	-1.5	4.50650	-1.49956	6.50	0.44
	4	4.5	-4.5	4.50264	-4.50073	2.64	-0.73
b	1	1.5	4.5	1.50209	4.50578	2.09	5.78
	2	1.5	1.5	1.50241	1.50323	2.41	3.23
	3	1.5	-1.5	1.50369	-1.50064	3.69	-0.64
	4	1.5	-4.5	1.50158	-4.50175	1.58	-1.75
c	1	-1.5	4.5	-1.49839	4.50219	1.61	2.19
	2	-1.5	1.5	-1.50102	1.50131	-1.02	1.31
	3	-1.5	-1.5	-1.49951	-1.50211	0.49	-2.11
	4	-1.5	-4.5	-1.49889	-4.50475	1.11	-4.75
d	1	-4.5	4.5	-4.49984	4.50176	0.16	1.76
	2	-4.5	1.5	-4.50324	1.50055	-3.24	0.55
	3	-4.5	-1.5	-4.50027	-1.49995	-0.27	0.05
	4	-4.5	-4.5	-4.49969	-4.50135	0.31	-1.35

上記測定は 下記方法にておこなっている。

- ・ XYクロス測定を任意の範囲でおこない、曲率中心を求める。
- ・ X方向、Y方向それぞれの断面曲線から、最小二乗法で求めた仮想円を作成。
- ・ その仮想円の中心の測定開始点として、X、Y方向に繰返して中心を求める。

測定条件は以下である。

- ・ 測定範囲： $\pm 0.3\text{mm}$ (X、Y共)
- ・ 測定ピッチ： $2\mu\text{m}$
- ・ 繰返し回数： 2回 もしくは3回

図41は 測定規格座標と測定結果座標を示したものである。

差分量については 100倍のスケールにてプロットした。

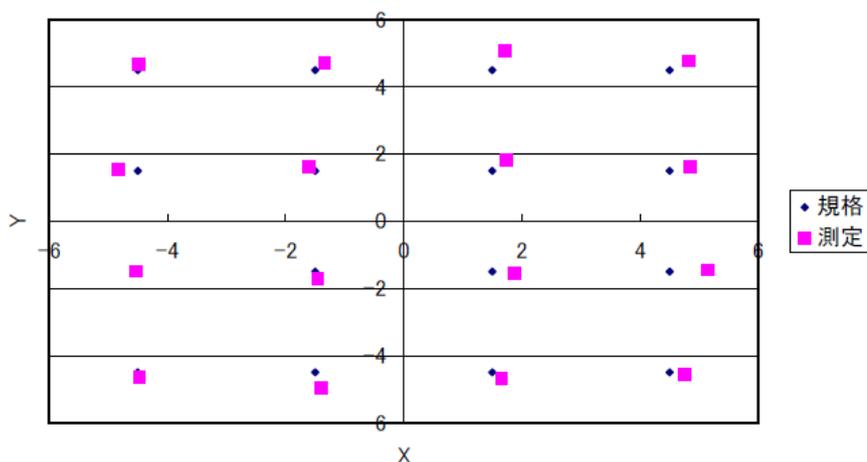


図41 ピッチ測定配置図

図41では、測定座標を構築する際に基準とした、 $(d, 4) = (-4.5, -4.5)$ での差分(誤差)がもっとも小さくなるため、 $(d, 4)$ から放射状に差分が広がるように見える。そこで、差分量が均等になるよう、測定原点をオフセットしてあらわしたものを、図42に示す。

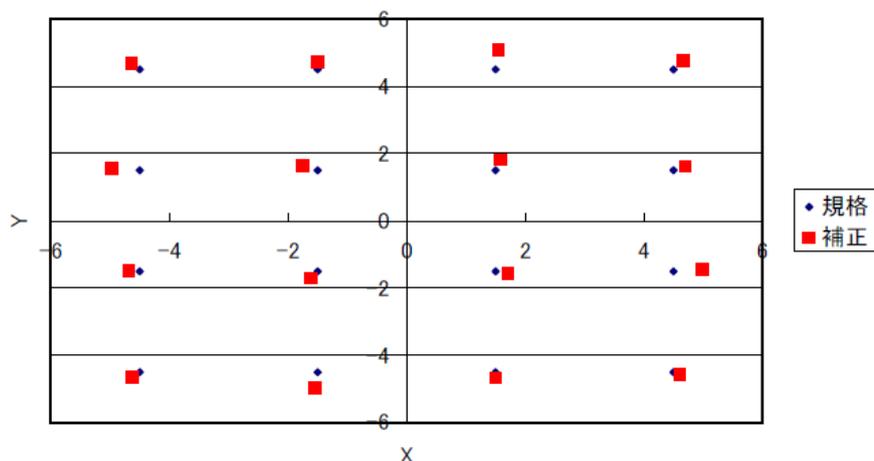


図42 ピッチ測定配置図(オフセット後)

オフセット量(x, y) = (-0.001552, -0.000490) であった。

オフセット後の配置から、ダミーレンズコア中心より放射状に、加工SRの中心が外側に広がっているように観察できる。(d, 2)、(a, 3) この2箇所は 原点と対象の位置にあり、もっとも差分(誤差)が大きくなっている。加工条件(加工プログラム)、加工刃物を変更して加工テストをおこなったが、ほぼ同様の結果となった。現時点では、要因は掴めていないが、連続切削加工の中で、加工物となる金属材料の熱膨張などが考えられる。

表18は、ダミーレンズコアの加工テスト結果をまとめたものである。

表18 ダミーレンズ加工結果

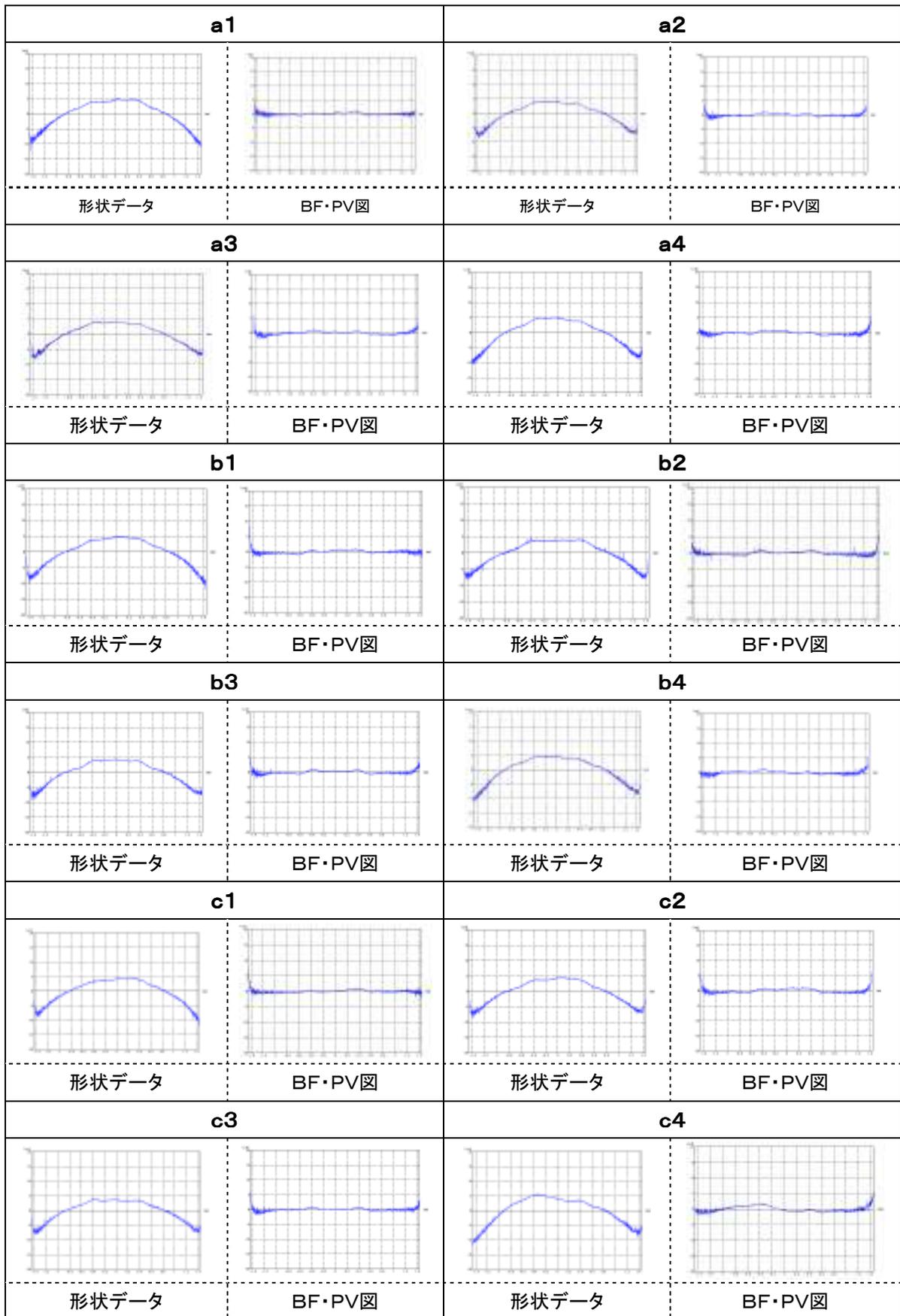
形状精度	SR部PV値 (μm)	1. 2977 ~ 2. 3265
ピッチ精度	基準測定 (μm)	-1. 02 ~ 6. 50
	原点オフセット時 (μm)	-4. 75 ~ 5. 78
	仮想中心オフセット時 (μm)	$\pm 2. 50$
面精度	SR部面精度 Rz (μm)	0. 3796 ~ 0. 5387
高度化目標値	複雑一体化形状化精度	$\pm 5 \mu\text{m}$ 以下
	面精度	Rz: $5 \mu\text{m}$ 以下

結果は、当研究テーマとしての高度化目標値にはほぼ達成した結果となっている。今回の、ダミーレンズコアを用い、超低粘度液状樹脂にて成形テストを実施した。図43はダミーレンズコアにて成形した、ダミーレンズ成形品である。



図43 ダミーレンズ成形品

図44は、前述した各測定箇所にあてはめられた箇所での成形品の形状データと、そのデータから Best Fit となる実際の成形品のRを算出したPV図(BF・PV図)である。



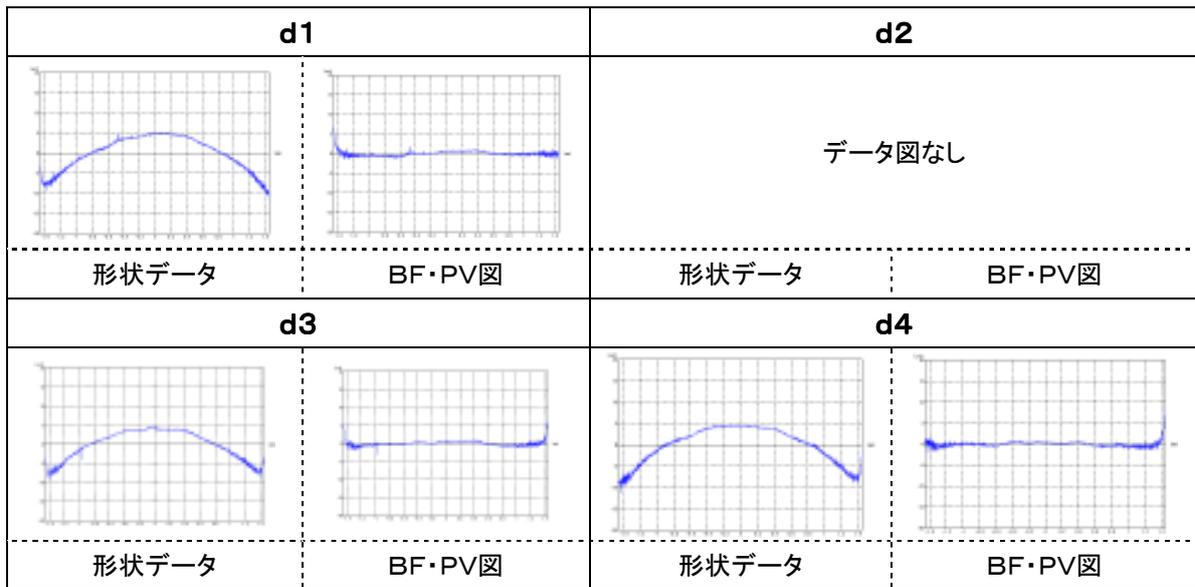


図44 ダミーレンズコアによる成形品形状データ

各データからは、ダミーレンズコアの加工において、SR形状部シャープエッジ近傍での面精度=ゆらぎ が顕著に超低粘度液状樹脂の特性から転写していることが確認できた。

ダミーレンズコアの測定と同様の方法にて、成形品の測定を実施した結果を表19に示す。

表19 ダミーレンズ成形品ピッチ測定座標

測定箇所	規格 (mm)		測定 (mm)		差分 (μm)		
	x	y	x'	y'	Δx	Δy	
a	1	4.5	4.5	4.29001	4.28817	-209.99	-211.83
	2	4.5	1.5	4.28749	1.35515	-212.51	-144.85
	3	4.5	-1.5	4.28461	-1.57222	-215.39	-72.22
	4	4.5	-4.5	4.28260	-4.50258	-217.40	-2.58
b	1	1.5	4.5	1.35724	4.28695	-142.76	-213.05
	2	1.5	1.5	1.35397	1.36009	-146.03	-139.91
	3	1.5	-1.5	1.35567	-1.57182	-144.33	-71.82
	4	1.5	-4.5	1.35498	-4.50205	-145.02	-2.05
c	1	-1.5	4.5	-1.57177	4.28857	-71.77	-211.43
	2	-1.5	1.5	-1.57743	1.36008	-77.43	-139.92
	3	-1.5	-1.5	-1.57374	-1.57191	-73.74	-71.91
	4	-1.5	-4.5	-1.57488	-4.50863	74.88	-8.63
d	1	-4.5	4.5	-4.50055	4.28874	-0.55	-211.26
	2	-4.5	1.5	-4.50370	1.36122	-3.70	-138.78
	3	-4.5	-1.5	-4.50463	-1.56944	-4.63	-69.44
	4	-4.5	-4.5	-4.50135	-4.49968	-1.35	0.32

同様、図45に測定結果を座標に示す。

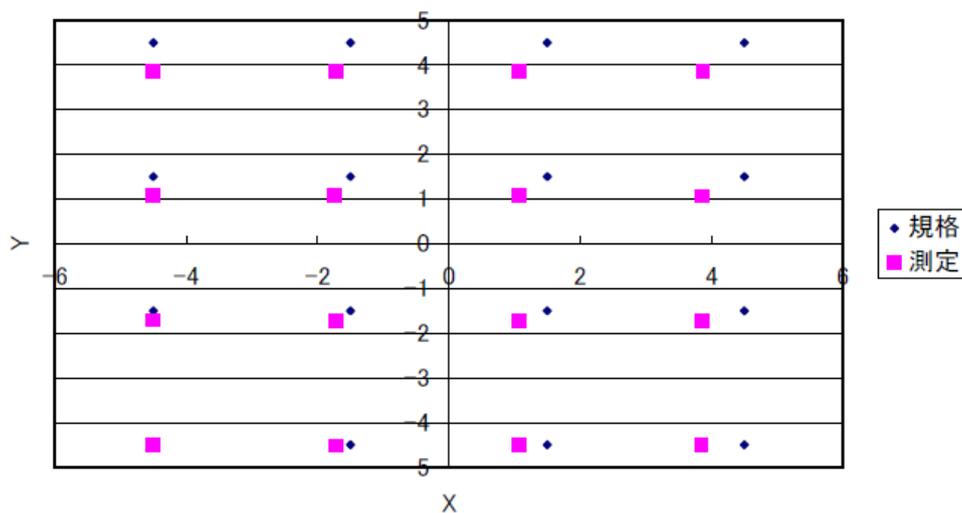


図45 ダミーレンズ成形品ピッチ座標

続いて、各差分が均等になるよう、オフセットした座標を図46に示す。
 オフセット量は $(x, y) = (0.108843, 0.106835)$ となる。

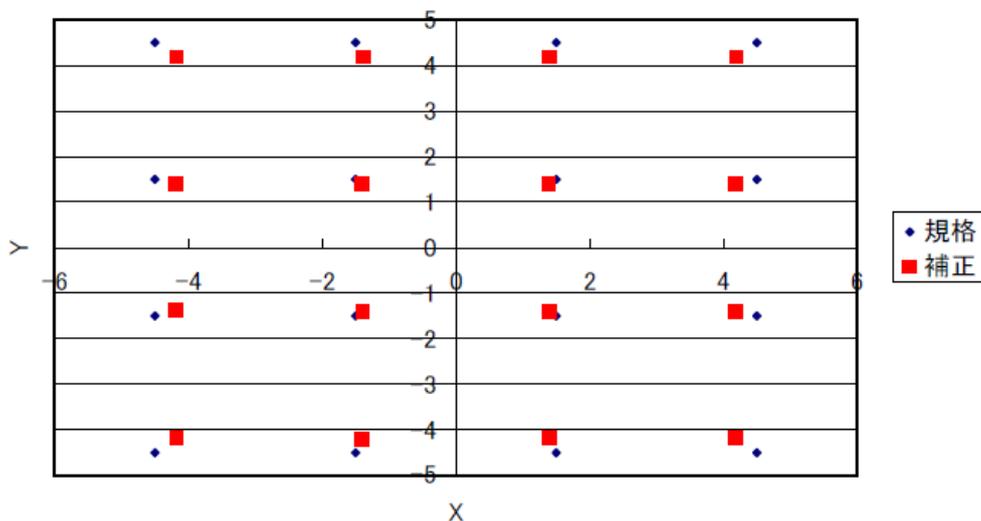


図46 ダミーレンズ成形品ピッチ座標(オフセット後)

ダミーレンズコアは、コア中心より外側へ形状部が放射状に広がっている結果であったが、超低粘度液状樹脂にて成形した成形品のSR形状の測定結果から、逆に中心へ向っていることが観察できる。これは、成形収縮によるものである。

各種データから、ダミーレンズコアの実測値と比較して、成形収縮率を算出した。収縮率は「SR形状でのR」、「各SR形状の座標ピッチ」より算出した。表20に示す。

表20 収縮率

測定箇所		Best Fit R		座標ピッチ
		(mm)	収縮率(%)	収縮率(%)
a	1	2.435932	97.437	97.710
	2	2.446598	97.864	97.673
	3	2.448025	97.921	97.638
	4	2.436475	97.459	97.635
b	1	2.439814	97.593	97.650
	2	2.446523	97.861	97.658
	3	2.444979	97.799	97.650
	4	2.438079	97.523	97.663
c	1	2.441342	97.654	97.661
	2	2.446796	97.872	97.850
	3	2.448296	97.932	97.666
	4	2.435979	97.439	97.809
d	1	2.438749	97.550	97.636
	2	—	—	97.684
	3	2.445341	97.814	97.666
	4	2.440081	97.603	97.615
Average			97.688	97.679

収縮率の差を見ると、個々のバラツキがあるが、計16箇所での SR部単体＝極小部分、座標ピッチ＝面全体 との差があまりないことが確認された。このことは、超低粘度液状樹脂を用いた成形品において、金型において、高精度な複雑形状・一体化加工が担保されれば、新たな製品形状への取り込みが可能となる。

測定(解析)条件は以下でおこなった。

- ・ 測定機器 : 三鷹光器 NH-3SP
- ・ 測定範囲 : ±1.600 mm (解析有効径 ≒ 1.450)
- ・ 測定ピッチ : 2 μm

ダミーレンズコアを SUS420J2(STAVAX)材を用いて高精度複雑形状化・一体化加工の検討実施を先に記したが、より硬度の高い、超硬合金材料を用いて加工検討を実施した。

現状、超硬合金材への「加工精度を必要」とする場合、ワイヤー放電加工、または型彫放電加工が一般的に用いられている。しかし、当研究テーマとする高精度複雑形状化・一体化加工は加工設備上、物理的な制約から加工実績がない現状である。金型上においても、コア・キャビを細かく分割化し、それらを組み立てての“形状化”を図っている。しかし、分割していることから、それぞれの加工誤差が累積され、トータルの“精度”は保証しづらい現状でもある。

主な加工条件を次に示す。

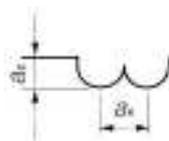
- ・ 材料 : 超硬合金 HRA90
超々微粒子タイプ (バインダレスタイプ)
- ・ 加工対象形状 : ダミーレンズコア
- ・ 加工機器 : YMC 430 Ver. II 安田工業(株)
- ・ 冷却方式 : 乾式(エアブロー)

加工検討に必要な、「加工プログラム」「加工用刃物」などの組合せテストを数回事前実施し、表21に示す加工条件にて検討実施をおこなった。

表21 超硬合金材への加工条件

加工内容(工程)	工具サイズ	n	Vf	ap	ae
		(min ⁻¹)	(mm/min)	(mm)	(mm)
①全体面荒加工	R1×L1.4	30,000	300	0.1	0.3
②トーリック荒加工	R0.5×L0.7	30,000	300	0.05	0.2
③トーリック中荒加工	R0.5×L0.7	30,000	300	—	0.02
④トーリック仕上加工	R0.5×L0.7	30,000	300	—	—
⑤球面部前荒加工	R1×L1.4	30,000	300	0.1	0.3
⑥球面荒加工	R1×L1.4	30,000	300	0.1	0.2
⑦球面形状中仕上加工	R0.5×L0.7	30,000	300	—	0.035
⑧球面仕上加工	R0.5×L0.7	30,000	300	—	—
⑨球/トーリック境界仕上	R0.5×L0.7	30,000	300	—	—

注記) 表中の ap、ae は刃物加工プログラム上の設定単位



ap : 軸方向の切込み深さ (mm)

ae : 半径方向の切込み深さ (mm) = Pr

次に、① ~ ⑨ の各工程を図47に示す。

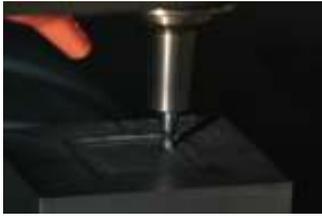
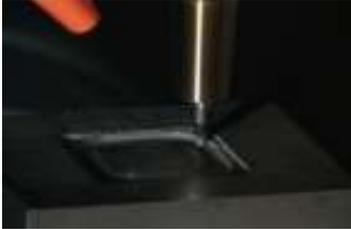
		
① 全体面荒加工		
		
② トーリック荒加工	③ トーリック中荒加工	④ トーリック仕上加工
		
⑤ 球面部前荒加工		⑥ 球面荒加工
		
⑦ 球面形状中仕上加工	⑧ 球面仕上加工	⑨ 球/トーリック境界仕上加工
		
⑨ 球/トーリック境界仕上加工		完了

図47 加工工程写真

超硬合金材へ切削にて直接加工する際、工具としてダイヤモンドエンドミルを用いることは既知である。しかし、非常に高価であること、また、加工切削量が数 μm 単位での条件があることから、高精度複雑形状化・一体化には生産コスト上成り立たない。また、刃物が欠損する恐れが多く、実用的でないのが現状である。

今回、事前テスト等を通じて、「ダイヤモンドコーティングエンドミル」にて加工検討を実施した。使用前、使用後の刃物先端部の写真を 図48に示す。

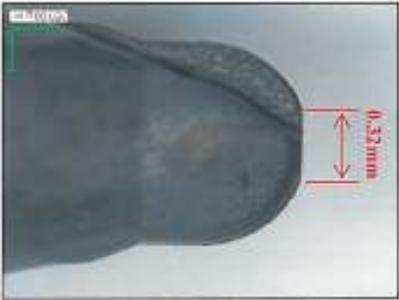
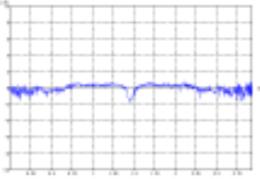
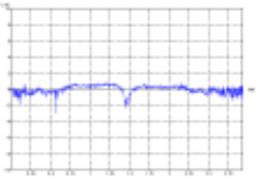
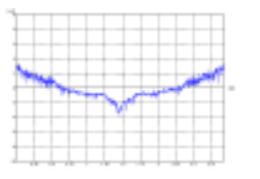
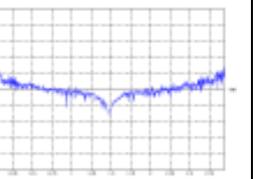
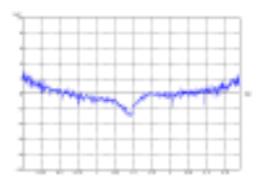
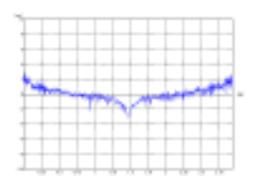
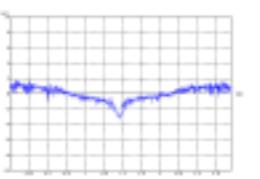
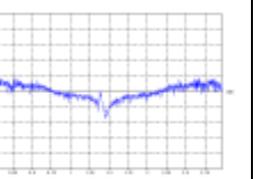
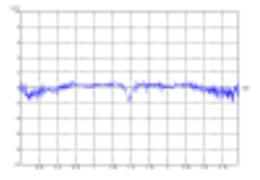
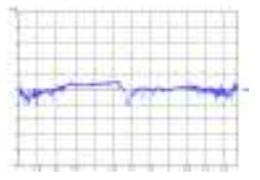
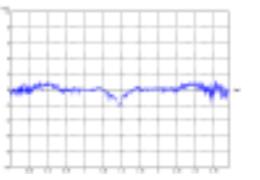
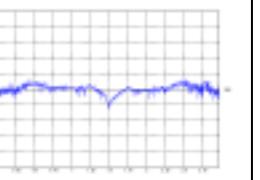
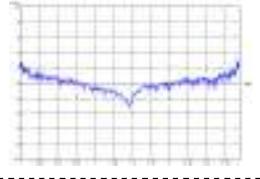
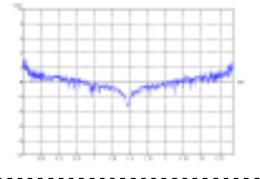
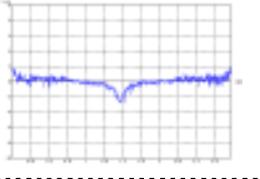
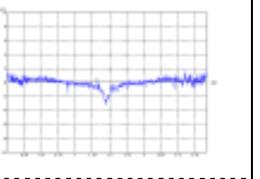
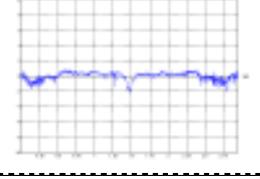
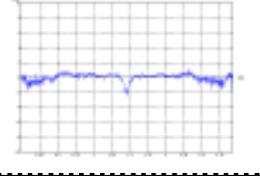
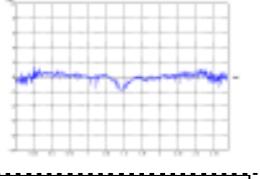
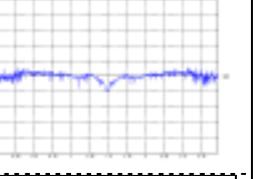
	使用前	使用后
上部		
側面		
側面		

図48 ダイヤモンドコーティングエンドミルの加工使用前、使用后写真

ダミーレンズコアを超硬合金材にての加工後のデータを図49に示す。測定方法は前述した測定位置、測定方法と同一である。測定箇所、X、Y の数値は PV値であり、単位は μm 。PV図の 縦軸1目盛は $2\mu\text{m}$ 、横軸は、 0.25mm である。

a1		a2	
			
2.44384	3.76000	6.97676	5.96792
x	y	x	y
a3		a4	
			
5.94701	5.96792	5.2255	5.22667
x	y	x	y
b1		b2	
			
2.87875	3.38771	3.27889	3.86937
x	y	x	y
b3		b4	
			
6.49402	6.38397	4.81949	5.05437
x	y	x	y
c1		c2	
			
2.99603	3.68695	3.47253	3.11554
x	y	x	y

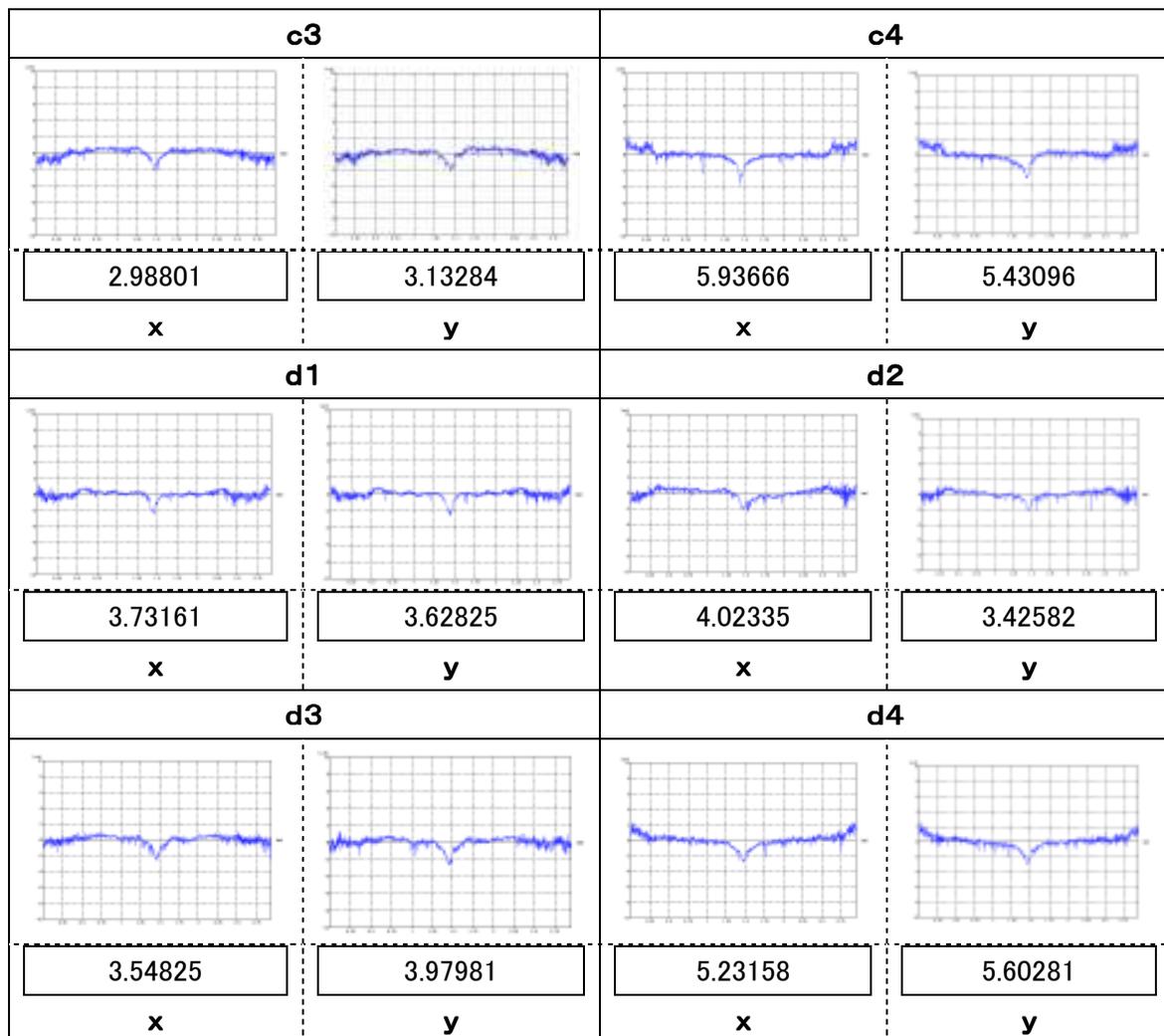


図49 加工後のx、y PVデータ

結果から 次のことがわかる。

- ・ PV値: 最少…… 2.44384 a1 X方向
最大…… 6.99676 a2 X方向
- ・ XY差分 a1 …… 1.31616 μm 、 a2 …… 1.00884 μm この2つのSR以外は1 μm 未満にて安定した球形状ができています。

次に、全データから同じ傾向が読み取れるのは、SR形状部の最底面に当たる部分に凹形状が発生していることである。その深さは1 μm 強の値になっている(図50参照)。

一般的な機械加工において、同様形状の場合凸残りが発生あるいは、エンドミル刃物の周速度がゼロになるため、平坦形状(またはムシレ)などあらわれる。今回、凹形状が幾度かのテスト加工でも発生していることに関して、以下に考察する。

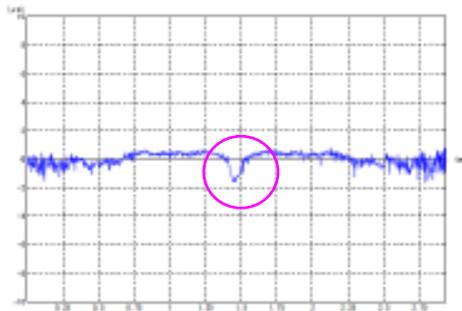


図50 a1 X軸PV図 中央凹形状

今回、荒加工、仕上げ加工の刃物Rは R1、R0.5 の組合せでおこなっている。この現象を探るため、R0.3 にて実験をおこなったところ、より悪い凹形状となった。反面、R1にて加工したところ、凹形状は緩和されたが、SR全体のPV値が悪化した。SR最底面の加工時には、多軸研削機にて、周速ゼロにならないプログラム設定ではあるが、低速による刃物の伸び(刃物姿勢の緩和・開放)が考えられる。最底部以外での加工時には、切削抵抗により刃物が傾く傾向があるためである。SRの大きさに際して、今後考慮すべき課題である。ちなみに、今回のダミーレンズコア形状においては、SR全体面粗さの中に吸収できる範囲である。

図51は ダミーレンズコアでのシャープエッジ形状を示したものである。

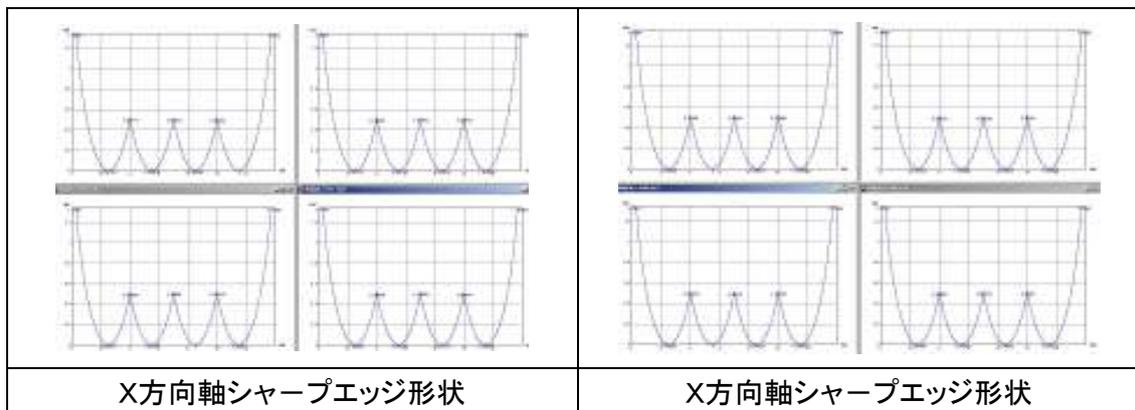


図51 シャープエッジ形状(X、Y軸)

図52は 拡大図である。

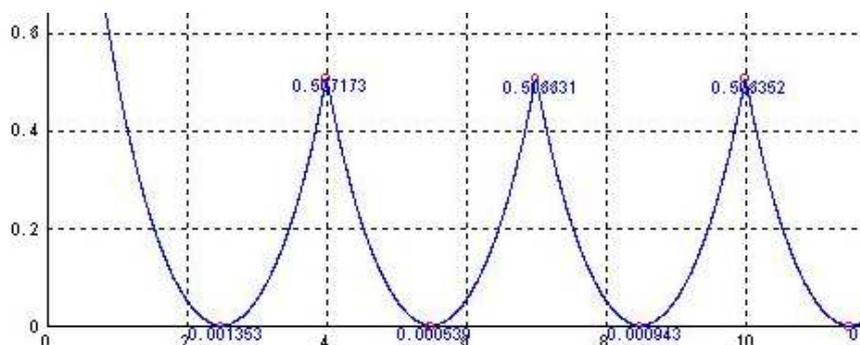


図52 1-X軸 断面形状拡大図

シャープエッジ部の高さを 表22に示す。単位は mm である。

表22 シャープエッジ高さ

軸	並び	シャープエッジ高さ		
X	1	0.5071	0.5066	0.5063
	2	0.5059	0.5074	0.5090
	3	0.5063	0.5085	0.5076
	4	0.5056	0.5055	<u>0.5049</u>
Y	a	0.5075	0.5086	0.5079
	b	0.5061	0.5052	0.5072
	c	0.5067	0.5054	0.5075
	d	0.5059	0.5070	<u>0.5092</u>

24箇所シャープエッジ高さのバラツキは、 $4\mu\text{m}$ 内に収まっている。

- ・ 最高箇所 … Y軸 dライン 0.509230
- ・ 最低箇所 … X軸 4ライン 0.504981

また、シャープエッジ部の頂点稜線幅は、測定機器感度から $2\mu\text{m}$ 未満に仕上がっていると推定できる。このことから、シャープエッジの形状精度は、前述したSR球形状も合わせ、高いレベルで仕上がっている。

次に、超硬合金材でのダミーレンズコアを 光学用への展開を想定し、SR部のミガキを実施した。

図53に写真を示す。

- ・ 上段 … ミガキ後
- ・ 下段 … ミガキ前



図53 ダミーレンズコアのミガキ後(上段)、ミガキ前写真(下段)

ミガキ時間については、加工素地面(面精度)が安定していること、また硬度が SUS420J2 (STAVAX)品に比べはるかに硬いことから、40%減となっている。16個のSRを全ミガキ後に再度精密測定にて、16個の座標をもとめ、ピッチ精度を示したものを、表23に示す。なお、表23はダミーレンズコア全体の傾き補正後の数値で、a1位置を座標上 (0, 0)とした。

表23 ピッチ測定 (単位:mm)

測定箇所	座標	x	y	
a	1	(0, 0)	0.0000	0.0000
	2	(0, -3)	-0.0000	-2.0006
	3	(0, -6)	-0.0004	-5.9995
	4	(0, -9)	-0.0000	-8.9995
b	1	(-3, 0)	-2.9998	-0.0005
	2	(-3, -3)	-2.9995	-3.0001
	3	(-3, -6)	-2.9996	-5.9996
	4	(-3, -9)	-2.9998	-8.9995
c	1	(-6, 0)	-5.9993	0.0004
	2	(-6, -3)	-5.9997	-2.9994
	3	(-6, -6)	-5.9997	-5.9996
	4	(-6, -9)	-5.9994	-8.9991
d	1	(-9, 0)	-8.9994	0.0000
	2	(-9, -3)	-8.9989	-2.9998
	3	(-9, -6)	-8.9995	-5.9999
	4	(-9, -9)	-8.9992	-8.9998

d2 位置のみ $1\mu\text{m}$ を越えるデータではあるが、測定誤差を考慮すると、SR中心の相対位置精度は $\pm 1\mu\text{m}$ 程度と考えられる。今回の 超硬合金材料でのダミーレンズコア加工の結果を 表24に示す。

表24 超硬合金での加工結果

超硬合金材	バインダレスタイプ HRA90
加工時間	8時間30分
シャープエッジ精度	$2\mu\text{m}$ 未満
中心部凹形状精度	$1\mu\text{m}$ レベル
SR部加工精度	PV: $2 \sim 7\mu\text{m}$
SR部加工面精度	Rz: $5\mu\text{m}$ レベル
ミガキ時間	SUS420J2(STAVAX)比 50%未満
SR部ピッチ精度	相互位置 $1\mu\text{m}$ レベル

超合金材料での加工結果は、SUS420J2(STAVAX)以上の形状精度が得られた。

次に切削性が保たれている結果として、図54のような超硬材料の“切子”が観察された。
(サンプリングはエアブローによる冷却をおこなっており困難である)

超合金材料は粉末金属を固めているため、切削時には粉末状の“切子”があらわれやすい。SUS420J2など、金属の切削加工においては、連続した“切子”があらわれている場合、加工精度、加工面精度がより高度に仕上がる。よって、今回の高い形状精度が得られたのは、加工設備×加工条件×加工刃物×加工プログラムによる各因子の最適な組み合わせによる結果であると考えられる。

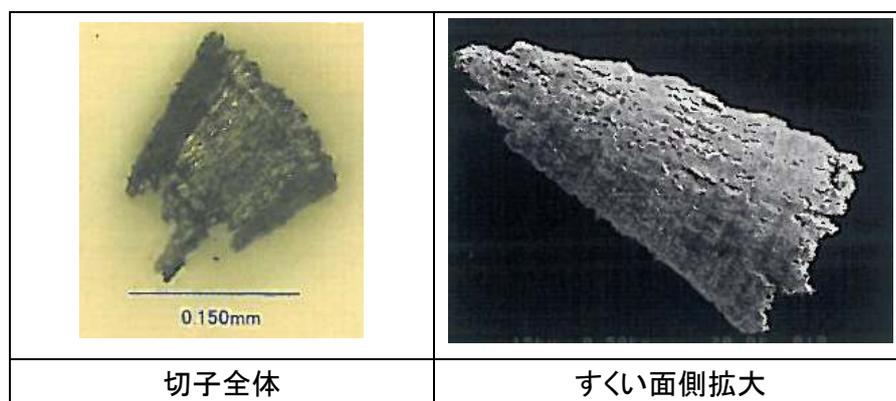


図54 超硬材 切子

第3章 全体総括

むすび (研究開発成果と課題および事業化展開)

1. 研究開発成果と課題

① 金型における超低粘度液状樹脂の封止技術の確立

①-1 金型表面精度に依存する流動性の解明

①-2 金型の隙間への液漏れの定量化

2つのサブテーマにて研究を実施した。川下業者より提案がなされた特殊レンズコアの製作に際し、超低粘度液状樹脂を用いての具現化に必要な面から実践的な取組をおこなっている。

「成果」

特殊レンズに見合った実践的な金型コア作製において、金型の精度Rz 加工面0.5 μ m以下、平行度0.3 μ m以下にて金型の加工精度を維持管理することにより、実際の成形テスト上支障が無いことが立証された。

また、流動性の解明においては、特殊レンズの実践において、金型表面精度が Rz0.2 μ m以下であれば、高機能製品を確保できることが立証された。

「課題」

特殊レンズの製品化を重要視したため、今後予想される様々な高機能製品に見合った予測検討が不十分と考えている。研究期間終了間際において、研究開発の背景にも記述した振動板において、川下業者において一旦保留とされていた検討依頼が入ってきている。特殊レンズは、偏肉の大きい比較的体積を有する高機能製品であるが、振動板は、薄肉厚にてかつ、機械物性の検討を要する高機能製品となる。図55は 川下業者より検討依頼が出ている振動板「成形品形状」、「金型コア形状」である。直径15mm程度、中心厚み0.2mm程度、周辺部厚み 0.1mm程度でのサンプル成形製作をおこない、川下業者が欲する、各種機械物性に適応した実験研究が必要となる、

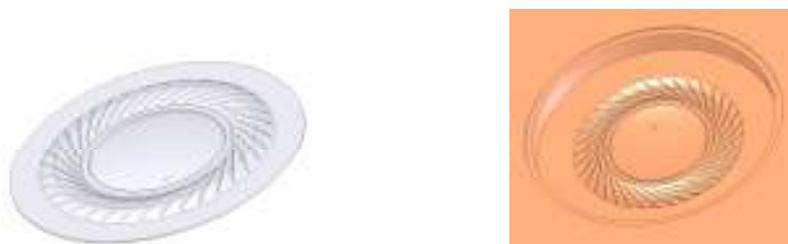


図55 振動板 製品及び金型コア形状

② 超低粘度液状樹脂に見合った成形システムの構築

特殊レンズコア、及びダミーレンズコアを用い、成形システムの構築についての研究実施をおこなった。

「成果」

超低粘度液状樹脂を用いての成形は可能となった。金型温度、型締時間／型締力などの最適化を特殊レンズの試作成形を通じて絞り込みをおこなった。川下業者での開発試作組立に対応できるまでの製品化が可能な水準まで実施できている。

「課題」

川下業者での製品化で新たに出てきた課題に対応すべき製品形状の品質の絞込みまでには至っていないが、提案されている、量産試作へ向けた本型への対応となる。これは合わせて、今後のコスト削減へ向けた課題も平行して進めていくことになる。

③ 超低粘度液状樹脂製品の高機能化のための金型の複雑微細加工

次の2つのサブテーマにて研究を実施した。

- ③-1 金型部品の微細加工における加工精度の向上
- ③-2 高精度な複雑形状化・一体化加工技術の確立

「成果」

精密CNC研削盤にての事前加工テストの加工形状精度の結果は、目標値 $\pm 1 \mu\text{m}$ に対して、凹凸のあるサンプル形状品全体での形状精度の目標が達成できた。また、特殊レンズコアの製作過程(複数回製作)においても再現性が維持されている。

多軸研削機においては、SUS420J2(STAVAX)材、続いて超硬合金材をダミーレンズコア形状にて加工テストを実施したところ、目標はすべての項目に対してほぼ達成された。特に特殊レンズ形状でのSRのピッチ精度は、目標値には設定していなかったが、予想を上回る加工精度になっている。

「課題」

超硬合金材への加工は、研究実施において、加工用刃物などまだまだ解明できていないことが多い。特に、加工上のプログラムとの関係もあるが、ダミーレンズコアの中央底面での凹形状が $1 \mu\text{m}$ 程度発生するメカニズムは解明できていない。機能用部品を対象とした高機能製品では支障ないレベルではあるが、光学機能部品においては制約があるものも想定される。今回の研究実施ではダイヤモンドコーティングエンドミル(今後市場化される予定)のみを用いた。

光学用のように、より高精度な製品形状対応として、ダイヤモンドエンドミルとの組合せなども課題とする。

2. 事業化展開

特殊レンズにおいては川下業者にて、開発試作の総合的な結果を見たうえで、平成25年度の製品化に向けた計画が提示されている。本型と呼ばれる量産試作型の設計製作、及び量産成形に向けた対応となる。振動板については、形状確認試作等を経て、今後の事業化に結び付けたい。

研究実施期間内であった、平成24年度に次に示す展示会にて市場動向の調査を実施した。

- ・ 10月3日～5日 関西機械要素技術展 (インテックス大阪)
- ・ 11月1日～6日 JIMTOF「日本国際工作機械見本市」(東京ビッグサイト)

展示品は、ダミーレンズコア 及び その成形品である。

分野は限られているが、光学メーカーまた機械加工部品メーカー複数社からの反応があり、今後の事業展開に向けた対応とする。

最後に、当「超低粘度液状樹脂を用いた金型・成形加工技術の確立と高機能製品の開発」におきまして、様々なご支援・ご助言いただきました機関・団体様へ謝辞申し上げます。