

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高性能フレネルレンズ用金型および金型材料の開発」

研究開発成果等報告書

平成27年 3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 一般財団法人大阪科学技術センター

目 次

| | | |
|-----|--------------------------------|----|
| 第1章 | 研究開発の概要 | |
| 1-1 | 研究開発の背景・研究目的及び目標 | 1 |
| 1-2 | 研究体制 | 4 |
| 1-3 | 成果概要 | 5 |
| 1-4 | 当該プロジェクトの連絡窓口 | 5 |
| 第2章 | 高集光効率フレネルレンズの開発 | 6 |
| 第3章 | 射出成形による金型形状の樹脂レンズへの高転写性技術開発 | 13 |
| 第4章 | 延性電析 Ni 合金めっき皮膜の超鏡面・超微細切削加工の開発 | 17 |
| 第5章 | ダイヤモンド工具の長寿命化 | 23 |
| 第6章 | 延性電析 Ni-P めっき材料の品質安定化技術開発 | 27 |
| 第7章 | 高速かつ平坦めっき製造条件の開発 | 33 |
| 第8章 | 全体総括 | 38 |

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

太陽光発電ロードマップにおける2020年目標は、太陽光発電の高効率化により、現行の42円/kwhに対し14円/kwhを達成することとなっている。

一方で、福島原発事故以来、グリーンエネルギー実用化の加速が切望されている。また、我が国の太陽光発電の国際競争力を高めるため、その高効率化が急がれている。本開発では、高効率化が最も期待されている集光型太陽電池システムの主要部品であるフレネルレンズの集光効率を（現行78%から）85%以上に向上できる金型技術および金型材料を開発する。

具体的には、樹脂製のフレネルレンズの集光効率を高めるために、①レンズを通過する光の損失を少なくすることと、②通過する光を太陽電池セルに高効率で集めることが求められる。①の達成にはレンズを射出成形する金型の表面粗度を10nm未満に、②の達成にはレンズの等溝ピッチを $30\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ の高精度微細に加工する必要がある、この実現のために加工性に優れた金型用めっき材料の開発を行う。

変換効率の高い集光型太陽電池システムの主要部品性能の高効率化により、太陽光発電ロードマップ2020年目標達成に寄与する。電池セルに太陽光を集光するフレネルレンズの表面およびその形状を超鏡面（10nm未満）・高精度（ $1\mu\text{m}$ 以下）に加工し、エネルギー損失を減少させる。レンズは射出成形法で製作することから、金型の超精密切削加工技術ならびに加工性の高いめっき新材料の開発により目標を達成する。

実施内容

①高集光効率フレネルレンズの開発（嶋田プレジジョン株式会社）

以下の項目に示すめっき材料、切削加工、金型構造および射出成形の技術開発を総合して完成させたフレネルレンズの集光効率85%を目標としている。24年度は、フレネルレンズ単体での集光効率評価を行うための装置を作製し測定法を確立した。25年度は、光学シミュレーション（ZEMAX）を活用し、以下の様に金型を設計した。離型性を勘案したレンズの抜き勾配およびレンズ先端丸みについて検討を行い、抜き勾配を 0.5° 、先端丸みをエッジから $5\mu\text{mR}$ と設定した。試作したレンズの集光効率は81.5%であり、25年度目標を達成した。さらに加熱冷却成形を適用したところ88.5%となり、最終目標にも達成したが、離型性が困難となり生産性への課題を残した。

26年度は離型性の改善を狙い、抜き勾配を強化したレンズを製作した。課題は解消でき、集光効率は89.7%となった。集光効率評価の客観性も高めるため、長岡技術科学大学 機械系山田研究室で開発された高平行シミュレータによるレンズ評価を、三菱レイヨンの助言により実施した。さらに高機能複合レンズの設計製作も実施した。

②射出成形による金型形状の樹脂レンズへの高転写性技術開発（嶋田プレジジョン株式会社）

フレネルレンズの射出成形に際し、金型形状の樹脂レンズへの高転写性技術の開発を行った。24年度は転写性に影響を及ぼす面内温度分布を流動シミュレーションにより実施し金型仕様検討用の事前データとして取得した。25年度はフレネルレンズ用超精密立形加工機によりレンズ用金型を製作し、成形評価を行った。射出成形時の樹脂への型転写性向上を目的に加熱冷却装置の導入および金型温調回路設計を行った。レンズ高さについて、充填した樹脂高さと金型高さの比で示す転写率の目標は、25年度90%とし、26年度95%の最終目標としていた。生産性より転写性重視の射出条件では、最終目標95%を上回る98%を達成できた。しかし、サイクルタイムで長時間を要し、かつ離型性の問題で製品に不具合の発生や、自動での成形品取出ができないという課題が残った。

26年度は、生産性ならびに自動取出をクリアし、最終目標 95%を達成しうる温調・射出条件を見出すことができた。

③延性電析Ni 合金めっき皮膜の超鏡面・超微細切削加工の開発

(嶋田プレジジョン株式会社、国立大学法人神戸大学)

高集光効率を可能とするフレネルレンズ用金型に対して面粗さ 10nm 未満の超鏡面および等溝ピッチ $30\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ の高精度微細加工を目標とした。25年度は、めっき条件の異なる皮膜材料を準備し、切削評価をヘール加工、プリズム加工、正面旋削加工の各方法で行った。リンを 13wt%含有し、基材が圧縮応力を受けるめっき条件の材料が良好な結果となった。プリズム加工では、目標を大幅に達成するピッチ $1\mu\text{m}$ の等溝ピッチ加工ができ、さらに先端角 90° 先端丸み $5\mu\text{mR}$ の工具を使用した毎回転送り $0.6\mu\text{m}$ の正面旋削加工にて面粗さ 14nm の鏡面を得た。これらの基礎評価を踏まえてフレネルレンズの試作を行い前①②項の成果を得た。一方、切屑の SEM 観察から、切削性の良いめっき材料の切屑には、規則的な層状すべりが観察され、高精度微細加工に適する切削性との関係が示唆された。

26年度は、光学式表面形状測定器を導入し、加工後のレンズ面形状精度の評価を行うとともに、加工法による表面粗さの差と集光効率などのレンズ特性の関係も検討した。また、めっき材料の変形機構と加工力の関係、さらには残留応力の影響などについて検討した。また、①項で示した高機能な複合レンズ加工にもトライした。

④ダイヤモンド工具の長寿命化 (嶋田プレジジョン株式会社、国立大学法人神戸大学)

工具寿命10,000m/本の最終目標に対し、H25年度は、8,000m/本を目標としていたが、前項で良好な切削性をしためっき材料のプリズム加工において、10,000m加工後も刃先の摩耗やカケが観察されず最終目標を達成できた。しかし、めっき品質が不安定なこともあり、めっき条件と切削性の関係を追求していく必要性があった。

26年度は、実際のレンズ加工において切削速度など加工条件(生産性)の影響も考慮した工具寿命評価を行った。

⑤延性電析 Ni-P めっき材料の品質安定化技術開発

(株式会社野村鍍金、地方独立行政法人 大阪府立産業技術総合研究所)

25年度は、フレネルレンズ用金型用にめっき条件を変えた試料(4試料)で切削性の評価を行い、快削性を示すめっき材料は、組成がリン 13wt%以上、水素 0.015wt%以上を含有し、基材に圧縮応力を示すことが明らかになった。一方、フレネルレンズ用めっき槽(600L)を立ち上げ、フレネルレンズ試作用めっき金型基材に上記めっき皮膜を作製した。

③項に示しためっき材料の切削試験時に観察された切屑の規則的な積層すべり構造と、めっき材料のロックエル圧痕周辺に観測された微細な縞模様構造が類似しており、切削評価をしなくても快削性が評価できる品質管理法になりうる可能性を示した。

26年度は、品質(快削性)の安定したフレネルレンズ金型用めっき材料を提供することが、最も重要な使命であった。めっき液品質管理法を以下の内容で発展させた。めっき液を安定化させる種々の緩衝剤はキャピラリー電気泳動装置を用いてめっき施工前後で管理を行った。また、同装置では定量分析が困難な有機性緩衝剤は、全有機材料を特殊な全有機炭素計(TOC計)を用いて定量し、分解生成物の総量を推量する方法で行った。一方、機械的評価法として、ロックエル圧痕周辺に観測される微細な縞模様構造(すべり構造)の、より詳細な観察とめっき材料特性、切削性能、経時変化などとの関係を詳細に詰めることにより、一層の品質安定化を進めた。

また、快削性は含有水素安定性と関係のあることが、25年度の九州大学の分析結果から明

らかになった。しかし、含有水素と快削性の直接的な因果関係は理解されていない。この解明は、相当に困難と思われるが検討を継続した。

⑥高速かつ平坦めっき製造条件の開発

(株式会社野村鍍金、地方独立行政法人 大阪府立産業技術総合研究所)

25年度は、めっき液流量、電流量、応力調整により最終目標である析出速度 $15\mu\text{m/h}$ を達成した。しかし、高速めっき条件では、めっき材料の快削性が損なわれることから、品質が維持できた析出速度は、 $5\mu\text{m/h}$ を $12\mu\text{m/h}$ まで向上させるにとどまった。

また、電流密度を向上させれば、析出速度は上がるが、平坦性は悪くなる。26年度は、フレネルレンズサイズにおける膜厚誤差 10%以内を維持しつつ、析出速度の最終目標 $15\mu\text{m/h}$ を達成する条件を見出した。

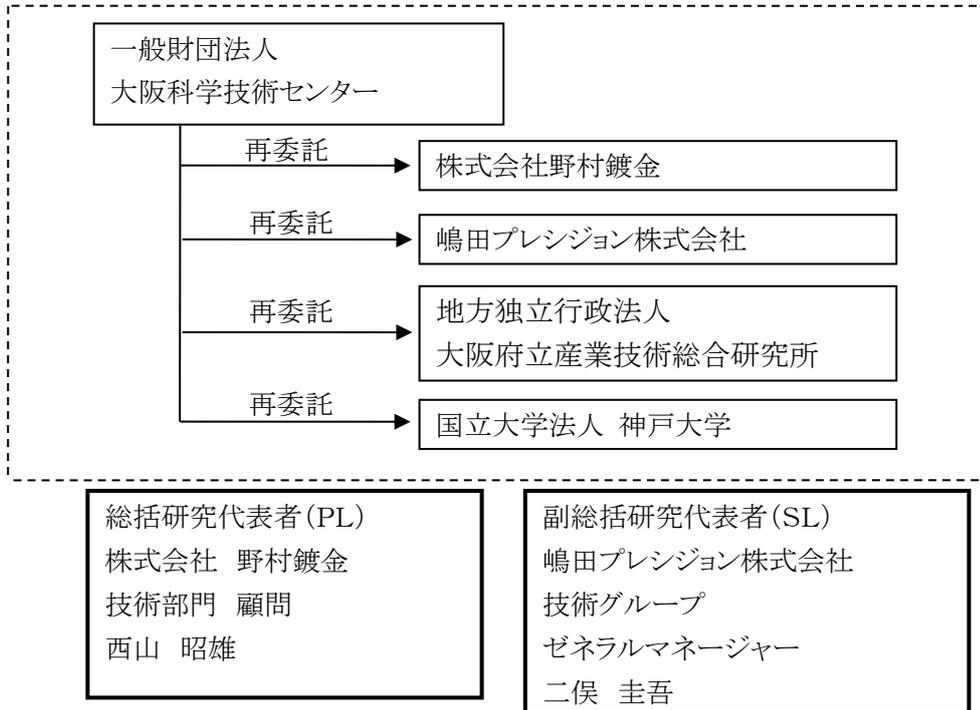
このために、陰極電流密度と平坦性のバランスを基本とした電流密度解析法 (μ -EXCEL) による計算結果をもとに、フレネルレンズ用にめっき陽極形状、補助陰極形状および電極用遮蔽治具形状を再検討した。

また、一部設備改造により極間稼動領域を拡張可能とし、めっき電圧を減少させることによる析出速度の向上を試みた。並行して、新たなパルスおよびバイポーラ電源(整流器)を導入し、平滑性を向上(目標は5%以内)させると同時に、めっき析出速度の向上を試みた。

1.2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

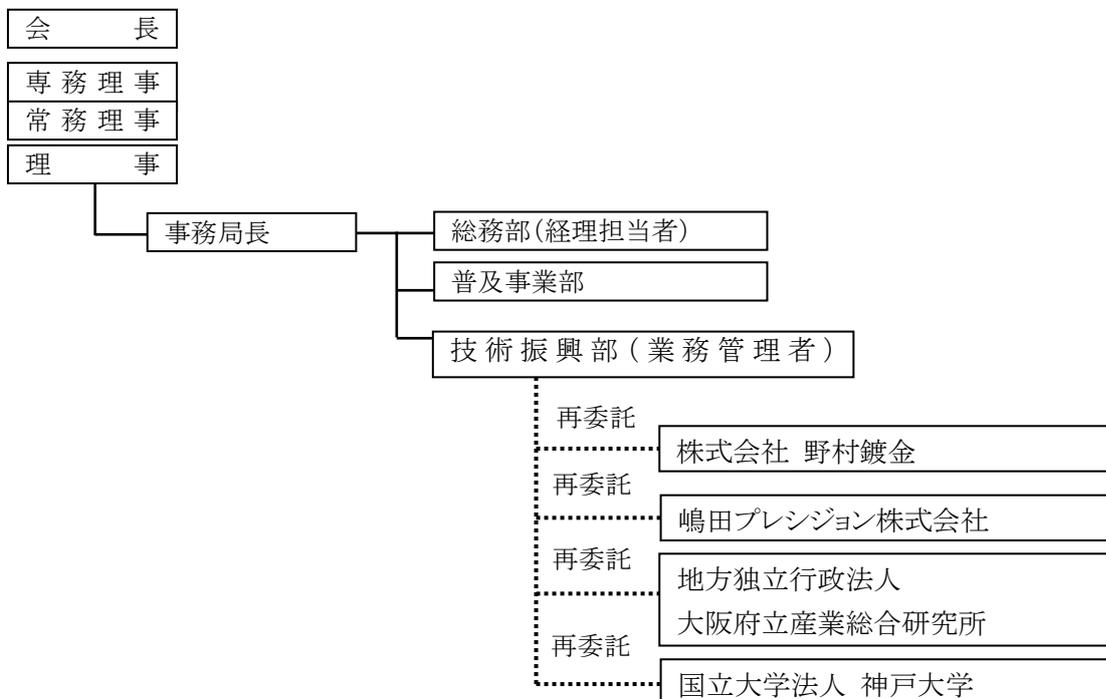
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

①事業管理機関

[一般財団法人大阪科学技術センター]



1.3 成果概要

| 項目 | 今年度目標（最終目標） | 達成状況 |
|-------------------------------|---|---|
| ①高集光効率フレネルレンズの開発 | フレネルレンズの集光効率 85%以上 | <ul style="list-style-type: none"> 高転写性射出成形技術も駆使し製作したフレネルレンズの集光効率は89.7%であり、最終目標を達成した。 5つのレンズを組み合わせ一体化させた複合フレネルレンズ金型を製作し、その成形サンプルを試作した。 |
| ②射出成形による金型形状の樹脂レンズへの高転写性技術開発 | 転写率 95%以上 | <ul style="list-style-type: none"> 射出成形による金型に対する成形樹脂レンズの平均転写率は加熱冷却成形を適用し98%となり、最終目標を達成した。 射出成形工程において加熱冷却システムを高効率化し、量産性の見通しが立った。 |
| ③延性電析Ni合金めっき皮膜の超鏡面・超微細切削加工の開発 | <ul style="list-style-type: none"> レンズ用金型の面粗度 Ry10nm未満 レンズ用金型の溝ピッチ加工 $30\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ 以下 | <ul style="list-style-type: none"> 面粗度10nmの鏡面加工目標は、平面の送り切削で達成された。 金型の溝ピッチ実測値はレンジで$2\mu\text{m}$未満に収まっており、最終目標値を達成した。 |
| ④ダイヤモンド工具の長寿命化 | バイト寿命 10000m(切込み $20\mu\text{m}$ のV溝形状。V形状にバリ、脱落のないこと) | <ul style="list-style-type: none"> 最適Ni-Pめっき皮膜にて$1\mu\text{m}$ピッチ、総切込み$24\mu\text{m}$のV溝シェーパー加工でバリ、脱落も無く10000m/本の工具寿命(最終目標)を達成した。 フレネルレンズ形状の送り切削加工でも目標値は達成できたが、面粗さが悪くなる傾向にあった |
| ⑤延性電析Ni-Pめっき材料の品質安定化技術開発 | ③項の目標実現できる金型用めっき材料の開発 | <ul style="list-style-type: none"> ③項の目標を達成できる金型材料の開発に成功 ロックウェル圧痕をベースに金型用めっき材料の切削性評価手法の開発に成功 キャピラリー電気泳動装置とTOC計によりめっき液中の副成分も含めた全成分の分析方法を確立した。 |
| ⑥高速かつ平坦めっき製造条件の開発 | めっき析出速度を $15\mu\text{m}/\text{h}$ まで上昇させること | <ul style="list-style-type: none"> PW電源およびバブリングによるめっき法で$15\mu\text{m}/\text{h}$を達成した。 バブリング法ではめっき品質不十分。 PW電源法によるめっき被膜については、補完研究で切削性の評価を行う予定。 |

1.4 当該プロジェクトの連絡窓口

〒550-0004 大阪市西区靱本町1丁目8番4号
 一般財団法人大阪科学技術センター
 技術振興部 TEL：06-6443-5322 FAX：06-6443-5319
 脇坂 啓司 Email：wakisaka@ostec.or.jp

第2章 高集光効率フレネルレンズの開発

2.1 はじめに

本プロジェクトではフレネルレンズの集光効率 85%以上を目標としている。評価には一部のメーカーで採用されている He-Ne レーザーを光源とするフレネルレンズ評価装置を独自製作し使用した。さらに高平行シミュレータによる評価も合わせて行った。

ここではフレネルレンズ設計、レンズ加工ならびに金型設計・製作、成形試作およびレンズ評価までを一貫して実施し、レンズ加工に先立ち後述する電析 Ni-P 皮膜の被削性の基礎検討を行ない、加工法検討も踏まえて推進した。

さらに高機能化が期待される複数レンズを一体化させた複合フレネルレンズの設計製作についても実施をした。なおここでは従来のフレネルレンズをノーマルフレネルレンズと呼ぶことにする。

2.2 ノーマルフレネルレンズ設計

今回の製品形状を図 2.1 に示す。製品外形は 160×160mm、フレネルレンズ部は 150×150mm とし、厚みは 3mm とした。

レンズ設計には光学解析ソフト ZEMAX を使用し、解析条件は光源パワー 1W、焦点距離 200mm、集光効率はディテクターでの到達パワー (W) を光源パワー 1W で割った値とみなした。レンズを射出成形で製作する場合、抜き勾配を設定しないと離型性が困難となるため、抜き勾配の影響について検討を行なった。

勾配は図 2.1 に示すように 0°、0.5°、1° と変化させ、それぞれの集光効率を求めた。表 2.1 にシミュレーション結果を示す。勾配 0° から 0.5° にすると集光効率は 0.6% 低下し、さらに 1° まで設定すると約 1% の低下がみられた。できる限り効率低下を抑制したいが、成形時の離型性も勘案して今回の設計値は 0.5° とした。同じくレンズ先端 R の検討を行なった。抜き勾配 0.5° を設定した上でレンズ先端 R を 0 (ピン角)、5 μm の 2 種類を比較したところ、0 から 5 μm に変化することにより約 1.1% の低下がみられた。

これ以上の低下はレンズ性能に大きく影響を及ぼすため、加工性の観点からもレンズ先端 R は 5 μm とした。

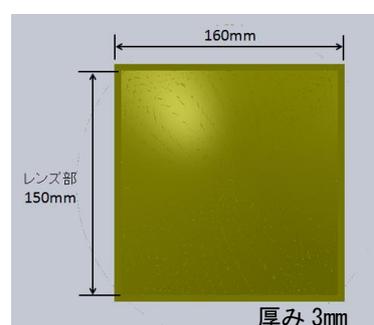


図 2.1 製品形状

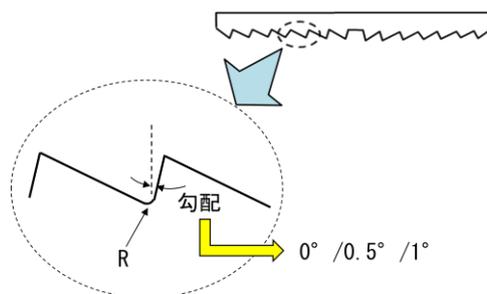


図 2.1 フレネルレンズの抜き勾配

表 2.1 シミュレーション結果

2.3 フレネルレンズ加工

フレネルレンズ面の創生方法として 2 種類の加工法があり、図 2.2 に示すように、1) 工具の前逃げ面/横逃げ面をワークに突き当てる「工具突切」、2) 工具先端丸み部をレンズ形状の軌跡に沿わせながら加工を行なう

「工具送り」が挙げられる。この 2 種類の加工法の評価を行なった結果を図 2.3 に示す。工具突切

| 抜き勾配 | 0° | 0.5° | 0.5° | 1° |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 先端 R | 0 | 0 | 5 μm | 0 |
| 集光効率 | 89.1% | 88.5% | 87.4% | 88.2% |

の方が工具送りより面粗さが格段に良好であった。この結果を受けて、今回のフレネルレンズ加工は工具突切にて実施した。図 2.4 に加工したレンズコアの外観写真を示す。評価時の損傷を懸念し、目視による確認に留めた。ダイヤモンド工具については図 2.5 に示すように加工前後でのダメージは特にみられなかった。

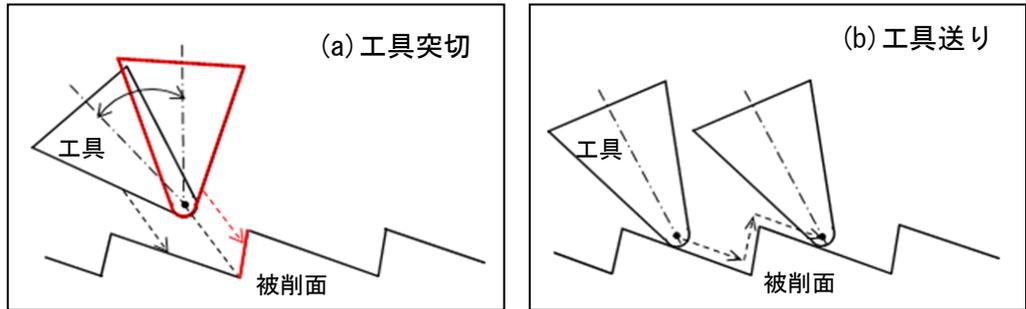


図 2.2 レンズ創成方法

なお第 4 章では本加工法に関連して、めっき条件との関係も踏まえた基礎検討評価を行なった結果を記述している。

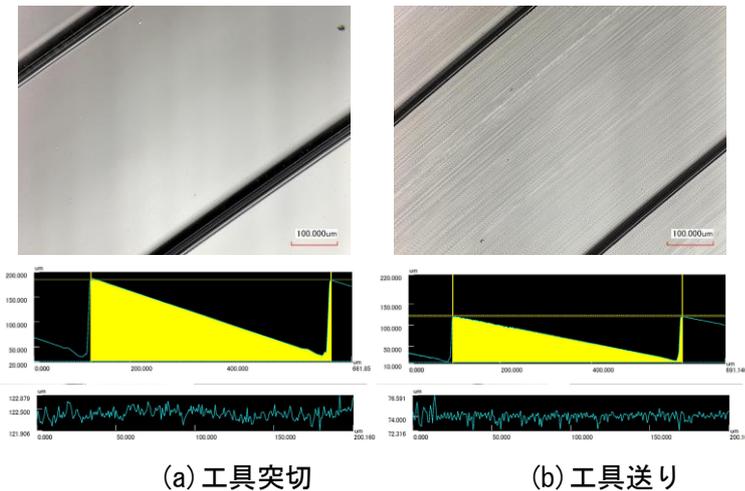


図 2.3 2種類のレンズ創成方法における加工面

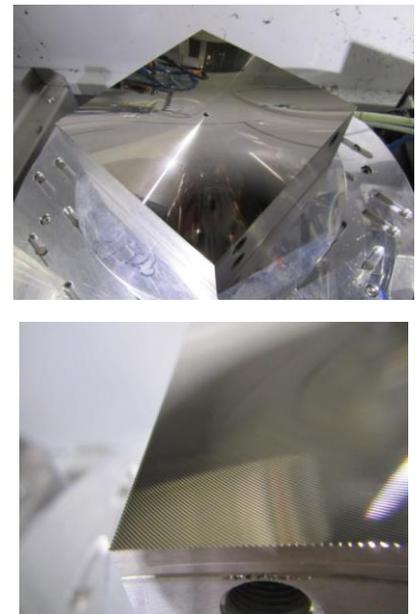


図 2.4 フレネルレンズコアの外観



図 2.5 加工前後のダイヤモンド工具先端

2.4 フレネルレンズ金型設計・製作

図 2.6 に今回製作したフレネルレンズ金型の写真を示す。取り数は 2 個取りのレイアウトであるが、今回の評価に際しては片側のみを使用した。ホットランナーを使用し、製品中央部にバルブゲートを設定した。中央ならびに周囲にはエジェクターピンを配置した。また後述する加熱冷却システムに対応するためヒーターを金型の温調回路内に組み込んだ。



図 2.6 金型外観

2.5 フレネルレンズ成形

射出成形機に金型を搭載した際の様子を図 2.7 に、得られた製品の的外観画像を図 2.8 にそれぞれ示す。成形機は日本製鋼所製 J350ELⅢ-UPS (嶋田プレシジョン独自仕様) を使用した。なおヒーターを組み込んであるが、通常成形ではヒーターによる昇温はせず、通常の温水による金型温度コントロールを行なっている。



可動側

固定側

図 2.7 金型搭載時の様子

さて射出成形によりフレネルレンズを製作するにあたり、成形条件のパラメータは非常に多く複雑に絡み合っており、各々の影響度を把握するため L18 直交表を用いて検討を行なった。因子として冷却時間、金型温度、樹脂温度、ホットランナー温度、射出速度、保圧、保圧時間、回転数を設定した。材料は三菱レイヨン製の PMMA 材料 VH5-001 (MFR=5) を使用した。



図 2.8 製品外観

以上の条件割付を行なった計 18 種類のサンプルを取得し、He-Ne レーザー光源であるフレネルレンズ評価装置 (嶋田プレシジョン製) による各々の集光効率を評価した後、要因効果図を作成した。図 2.9 にその結果を示す。金型温度、保圧の影響が高く、いずれも高い方が集光効率は高い傾向にある。しかしながら、単純にこれらの結果を元に組み合わせた条件では離型不良や製品の割れ、ヒケなどの発生もみられたため、さらに最適条件として調整を行なった上サンプル取得を行なった。そのサンプルの集光効率の評価結果を図 2.10 に示すが、

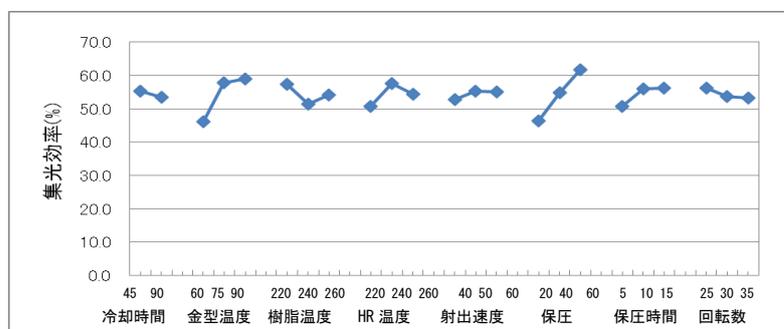


図 2.9 集光効率の要因効果図

81.5%の性能となった。

次に後述する加熱冷却システムを適用し条件調整を行い製作したサンプルの集光効率を図 2.11 に示す。集光効率が 88.5%の性能となり、本プロジェクトの最終目標である 85%は達成できた。しかしながら離型が困難で成形品にクラックの発生や自動取出ができない状態であることから生産効率が低いため、改善が必要な結果となった。

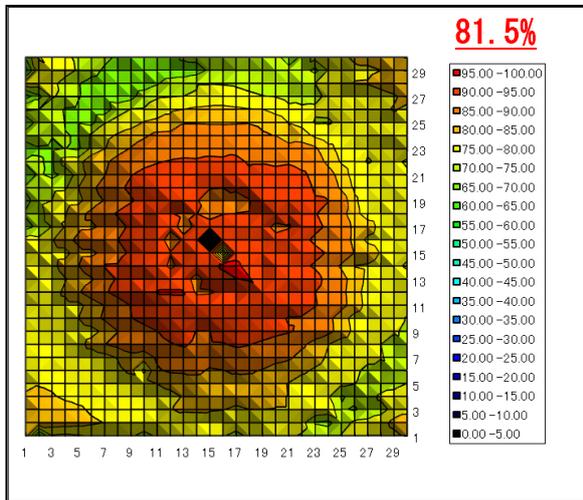


図 2.10 通常成形サンプルの集光効率

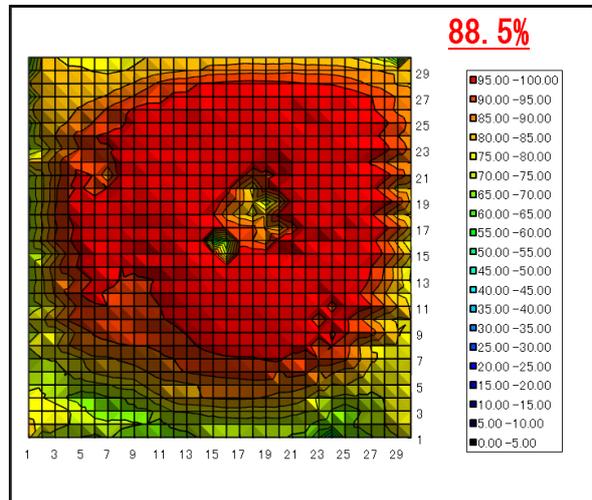


図 2.11 加熱冷却成形サンプルの集光効率

2.6 離型性の改善

先節の通り離型性の改善のためレンズの抜き勾配 0.5° から増加させることを検討した。この影響についてレンズ先端 R を $5\mu\text{m}$ としてシミュレーションを行なった結果を図 2.12 に示す。勾配が 0.5° から 1° による集光効率の低下は約 1.7%であった。この低下は比較的大きいが、生産性重視の観点で集光効率 85%以上の確保は期待できる見込みから今回は抜き勾配 1° とした。この設計値に基づき金型を製作し、加熱冷却による成形を行ったところ離型性改善の効果がみられ、連続成形が可能となった。得られた成形品の集光効率を図 2.13 に示す。抜き勾配 0.5° の 88.5%を上回る 89.7%の結果となり、懸念された性能低下はみられなかった。

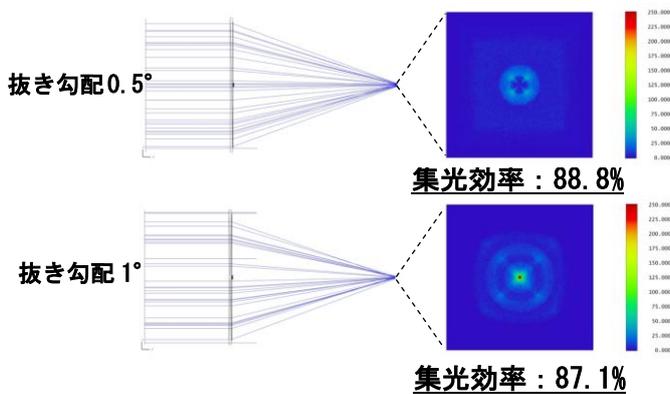


図 2.12 光学シミュレーションによる
レンズ先端 $R5\mu\text{m}$ フレネルレンズの集光効率比較

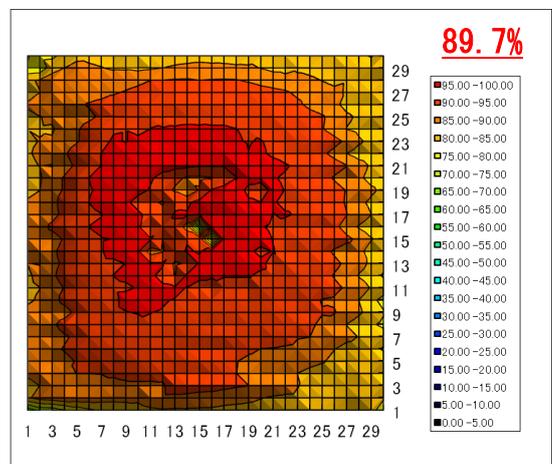


図 2.13 抜き勾配 1° サンプルの集光効率

2.7 複合フレネルレンズ

複合フレネルレンズについて説明する。集光用太陽電池で使用される光学系ではフレネルレンズで集めた光をセル上で均整化させるために SOE (二次レンズ) が使用されることが多い。今回ここで提案したレンズは SOE を使用しなくてもセル上で均整化させることが可能となる。レンズ構造は図 2.14 にあるように、中央部は 4 つの基準レンズを各々中心から距離 a を偏芯させた形で構成し、外周部レンズは中心と同軸として、計 5 つのレンズを組み合わせて構成される。端的にいえば元形状の効率を維持したままセル上への焦点を面内でずらすことで均整化を図るものである。

この概念に基づき先述の抜き勾配 1° のレンズを基準に設計を行なった。レンズサイズは $150 \times 150 \text{mm}$ 、セルサイズは $\square 5.5 \text{mm}$ と想定しシミュレーションにより設計検討を行ない、偏芯量 a を決定した。ここで光学的効率 η_{opt} は以下のように定義される

$$C_f = \eta_{\text{opt}} \times C_g \quad (1)$$

C_f : エネルギー密度集光比 (レンズ前のエネルギー密度と CPV セル面でのエネルギー密度)

C_g : 幾何学的集光倍率 (レンズ面積を CPV セル面積で除したもの)

図 2.15 にシミュレーション結果を示す。複合フレネルレンズ、ノーマルフレネルレンズの η_{opt} は各 91.7%、91.6% でほぼ同等であるが、 C_f の最大値と平均値の比 PAR (Peak to Average Ratio) はノーマルフレネルレンズが 8.64 に対し複合フレネルレンズは 3.13 となり均整化ができていることが確認できる。

複合フレネルレンズの製作についてはパーツを 5 分割にして各々を加工した。特にパーツの合わせ面で段差を極力生じさせないように外周、内周の角だれを防止するため製品部よりオーバーラップさせた形でめっきを行っている。最終これらの加工したパーツの組立調整を行ない図 2.16 にあるように一体化させた。He-Ne レーザー

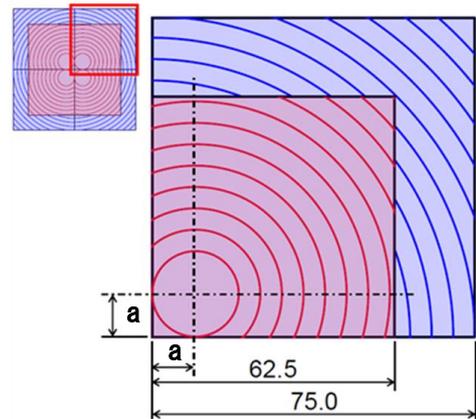
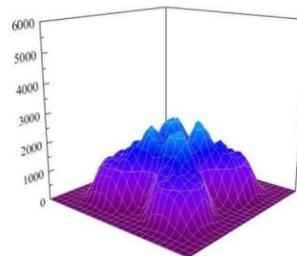


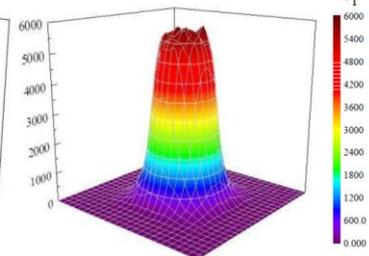
図 2.14 複合フレネルレンズ構造

複合フレネルレンズ



$\eta_{\text{opt}} = 91.7\%$
 $C_{f_ave} = 682$
 $C_{f_max} = 2613$
 $PAR = 3.83$

ノーマルフレネルレンズ



$\eta_{\text{opt}} = 91.6\%$
 $C_{f_ave} = 681$
 $C_{f_max} = 5882$
 $PAR = 8.64$

図 2.15 複合フレネルレンズとノーマルフレネルレンズのエネルギー分布

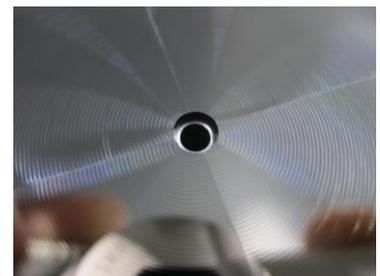
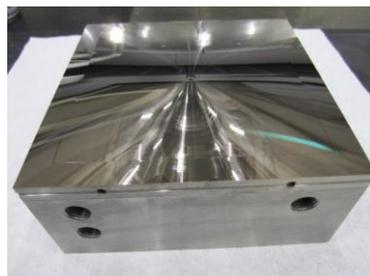


図 2.16 組立調整後の複合フレネルレンズコア

光源であるフレネルレンズ評価装置による複合フレネルレンズの集光効率は何図 2. 17 に示すように 87.2%となった。

2.8 高平行ソーラーシミュレータによる評価

図 2. 18 に高平行シミュレータの概略図を示す。本シミュレータは長岡技術科学大学 エネルギー光学研究室の山田昇准教授らにより開発されたシステム¹⁾である。シミュレータの光源にはファイバ型汎用小型擬似太陽光源装置(朝日分光 HAL-320)を用いた。装置内部のキセノンランプ光が光ファイバにより導光され、ファイバ端に取り付けた専用設計した光線拡大レンズ(HAL-320 オプション)を介して外部へ照射される。光線拡大レンズより射出する光束を凹面鏡へ照射した。凹面鏡は外径

400mm、焦点距離 $f=3000\text{mm}$ 、正反射率 87~89% (アルミ蒸着) の球面鏡(曲率半径 6000mm、溝尻光学 7217)であり、光線拡大レンズから照射された光束をコリメート(平行化)し直径約 350mm の照射面(評価面)を形成する。このシミュレータを用いて図 2. 19 に示すように口 5.5mm の 3 接合型 CPV セル(分光感度曲線は何図 2. 20 参照)を取り付け焦点距離 200mm 離れた箇所にフレネルレンズを設置し評価を行った。なお評価面では約 0.01SUN ($10\text{W}/\text{m}^2$) の放射照度となる。

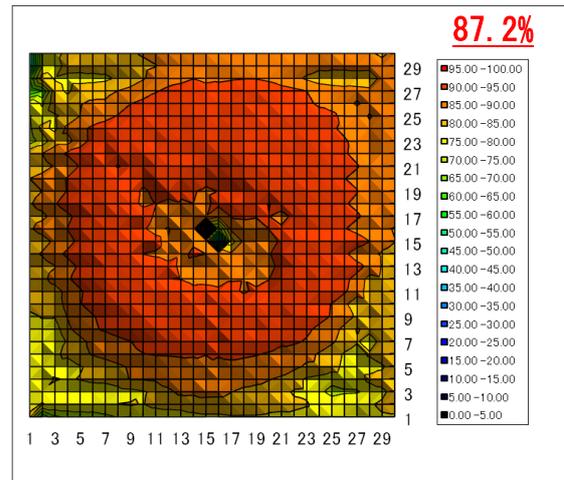


図 2. 17 複合フレネルレンズの集光効率

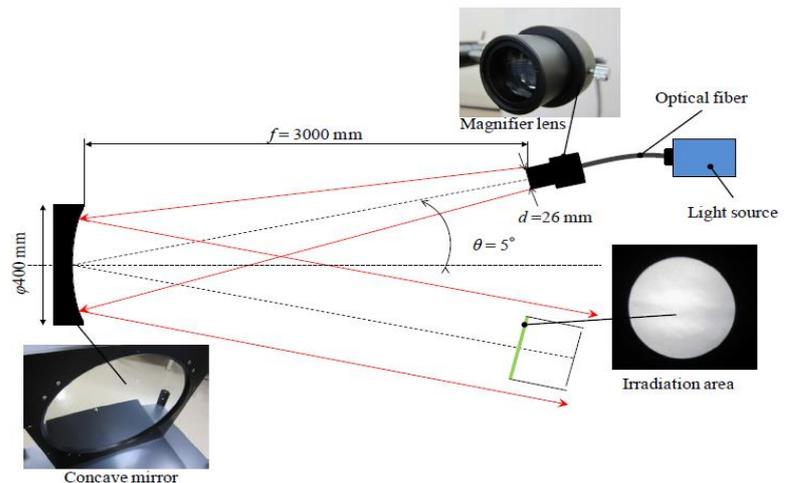


図 2. 18 高平行ソーラーシミュレータの光学構成¹⁾

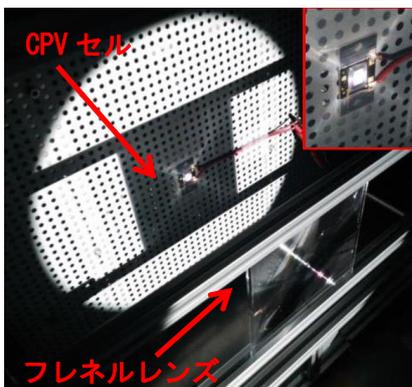


図 2. 19 評価面の様子

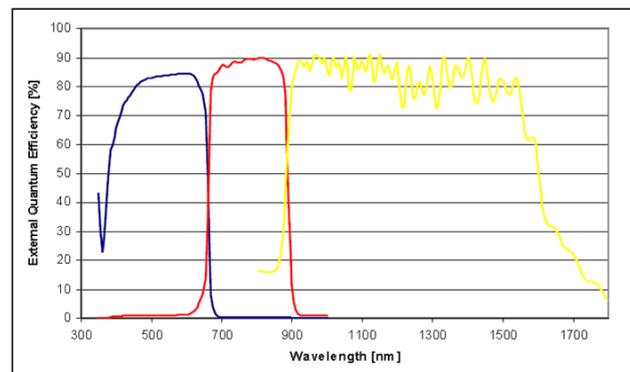


図 2. 20 3 接合型 CPV セルの分光感度

光学的効率 η_{opt} の算出方法は、レンズなしでの短絡電流 I_{sc_ref} ($V=0$ の時の電流値) と集光時の短絡電流 I_{sc_con} の比から集光倍率 $C_f (I_{sc_con}/I_{sc_ref})$ を計算し、それを幾何学的集光倍率 C_g で除することによって算出した(式(1)参照)。

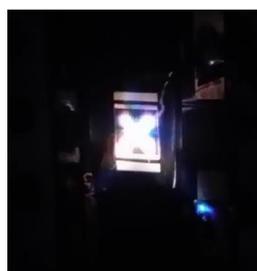
本シミュレータにより得られた評価結果を表 2.2 に示す。今回開発したレンズはノーマルおよび複合フレネルレンズのいずれにおいても市販プレス品レンズより光学的効率が上回った。

複合フレネルレンズのスポット画像を図 2.21 に示すが、シミュレーションにより得られたエネルギー分布と一致していることがわかる。よって設計通りの集光がなされているとは考えられるが、今回の評価方法ではノーマルフレネルレンズの性能より低かったこともあり、今後、屋外評価試験も行った上、性能確認をしていく予定である。

表 2.2 高平行ソーラーシミュレータによる評価結果

| | 複合フレネル レンズ | ノーマルフレネル レンズ | 市販プレス品 レンズ |
|--------------|---------------|-----------------|---------------|
| η_{opt} | 0.739 | 0.780 | 0.738 |
| He-Ne 評価 | 87.3% | 89.7% | 83.4% |

複合フレネルレンズ



ノーマルフレネルレンズ

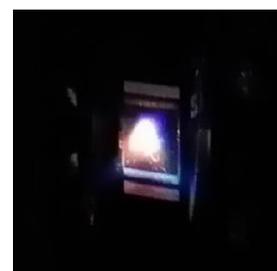


図 2.21 評価面スポット画像

2.9 第2章のまとめ

- ・フレネルレンズ設計、レンズ加工ならびに金型設計・製作、成形試作、レンズ評価を行い、通常成形で集光効率 81.5%、加熱冷却システムを適用した場合は集光効率は 88.5% となったが、離型性に対する課題が残った。
- ・抜き勾配を増加させレンズを再設計し製作したところ、上記の離型性の課題を解消することができ、集光効率 89.7% を達成し、最終目標である 85% 以上を達成した。
- ・高平行ソーラーシミュレータ(長岡技術科学大学)による評価においても市販プレス品レンズの性能を上回ることが確認できた。
- ・複合フレネルレンズにおいても同様にレンズ設計から成形品までを製作し、集光効率 87.3% を達成した。しかしながら He-Ne レーザー評価ならびに高平行ソーラーシミュレータのいずれの評価においてもノーマルフレネルレンズの性能より低い結果となった。
- ・今後、屋外評価試験を始め許容角特性検討について補完研究として実施する予定である。

参考文献)

- 1) 山田 昇ら：太陽エネルギー-Vol. 38 No. 4 (2012) pp39-46

第3章 射出成形による金型形状の樹脂レンズへの高転写性技術開発

3.1 はじめに

フレネルレンズを射出成形にて製作する際の転写性としてレンズ面に充填した樹脂の高さと金型のレンズ高さの比である転写率に対し、本プロジェクトでは最終的に95%を目標としている。前章の光学シミュレーションの結果でもみられるようにレンズ先端が丸みを持つことで集光効率が低下するため、重要なファクターになる。本章では転写性に注目し、評価検討を行なった。

3.2 成形条件による転写性への影響

前章で説明したL18直交表に基づき製作した18種類のサンプルならびに最適条件として調整したサンプルについて、製品対角線上で切断し、図3.1に示す中心から外周に向けてAからEまでの5ポイントのレンズ形状を評価した。特に中央側にあるレンズ高さが浅い箇所ではその高さ計測のばらつきが生じやすく、レンズ先端Rについても同時に評価した。

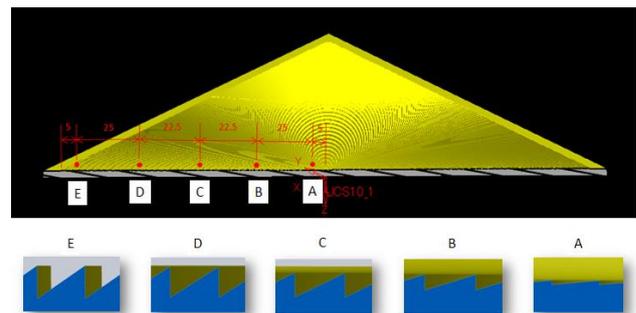


図 3.1 転写性評価ポイント

転写率についてばらつきも考慮した要因効果図を作成するにあたり、次式の望大特性(値が大きい程望ましい)のSN比を算出した。

$$S/N \text{ 比} = -10 \times \log \left[(1/n) \times \sum (1/y_i^2) \right] \quad y_i = \text{評価値、} n = \text{総数}$$

図3.2に全ポイントを平均化した転写率の要因効果図を示す。金型温度、射出速度の効果は大きいことがわかる。金型温度、

射出速度は高い方が充填時、樹脂のスキン層(固化層)の成長が遅れ、よりレンズ先端部に樹脂が流入しやすく圧力も伝達されやすいためと考えられる。集光効率では射出速度よりも保圧の効果大きいことに対し、転写率では保圧よりも射出速度の効果大きい

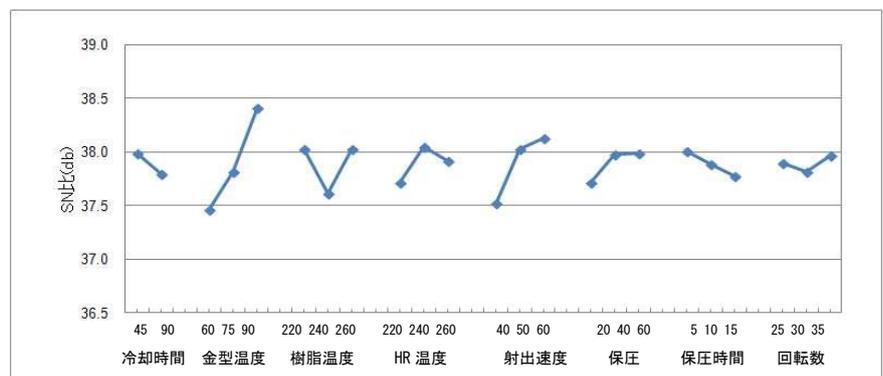


図 3.2 要因別転写率のSN比

が、平均化した評価での限界であると考えられる。図3.3にAからEの各ポイントでの転写率の要因効果図を示す。各ポイントで評価を行うと違いがみられた。最も中央側のAでは射出速度の影響が大きい、外周に向かうにつれてその影響は小さくなる。B、C、Dにおいては金型温度の影響を最も受けており、最外周のEについては各条件に対して突出して影響するものはみられない。特にポイントCが金型温度、保圧の影響が大きいことから集光効率の要因効果と類似しており、今回の形状についてはこの近傍(B~D)の転写率の違いが特に集光効率に影響していると考えられる。

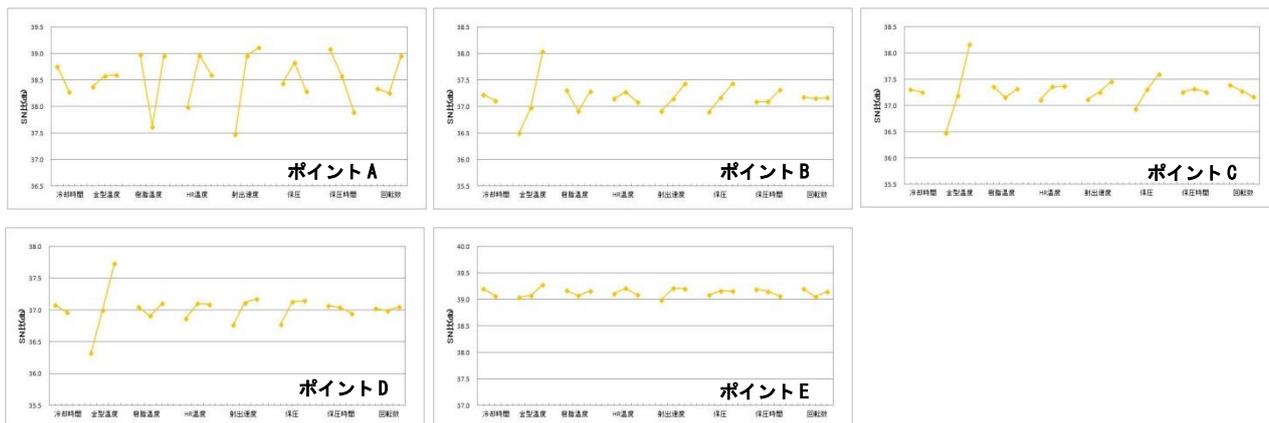


図 3.3 各測定ポイントにおける要因別転写率の SN 比

3.3 加熱冷却成形によるフレネルレンズ成形

金型温度を成形工程中に昇温、降温させる加熱冷却システム(インタープラス製)について成形時の様子を図 3.4 に示す。昇温時は金型温調回路内に組み込まれたヒーターが加熱され、回路内に供給された純水が蒸気化することにより金型温度が上昇する。降温時はヒーターを切り、バルブを切り替え、冷却水を通水することで金型温度が下降する。なおコントローラの制御部について嶋田プレシジョン独自仕様として製作している。

図 3.5 に金型の温度プロファイルを示す。最高到達温度は固定側 107℃、可動側(レンズ側)101℃、最低到達温度は固定側 62℃、可動側 74℃であった。PMMA の Tg が約 105℃ であるためほぼ狙い通りのコントロールができています。

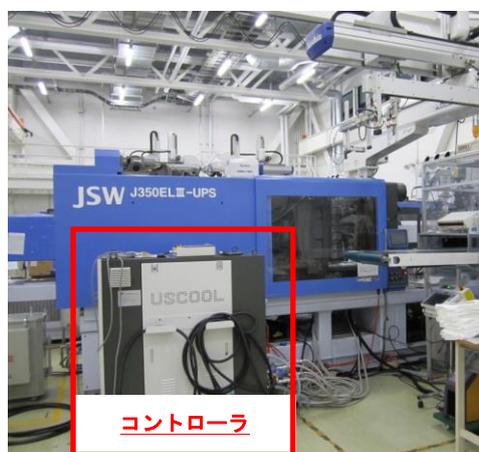


図 3.4 加熱冷却システムによる成形時の様子

3.4 通常成形と加熱冷却成形による転写性評価

図 3.6、図 3.7 に通常成形および加熱冷却成形の各サンプルの断面画像ならびに転写率、レンズ先端 R の各評価データを示す。5 ポイント全平均でみた場合、通常成形では転写率 88.0%、レンズ先端 R は 32.4 μm に対し、加熱冷却システムでは転写率 98.0%、レンズ先端 R 11.8 μm となった。最外周のポイント E ではいずれも転写率が約 95% 近くになっているが、A から D では両者の違いが大きく表われている。通常成形では転写率 95% 以上は全平均では未達となったが、加熱冷却成形では最終目標の 95% 以上を達成することができた。前章の集光効率の結果とも一致している。

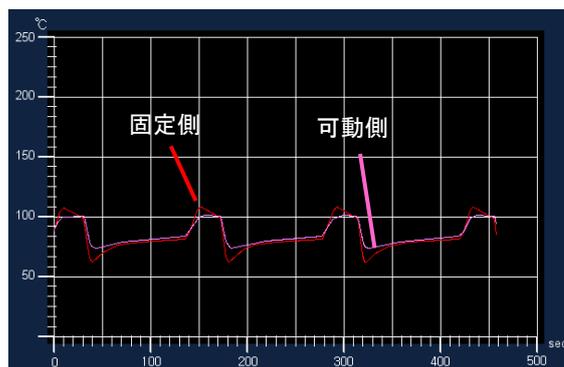


図 3.5 加熱冷却成形の金型温度プロファイル

このように転写性を向上させるには加熱冷却成形は効果的であることが明らかとなったが、離型

時のクラックの発生や取出不良などにより連続成形に支障をきたすことがあり、さらなる改善が必要である。

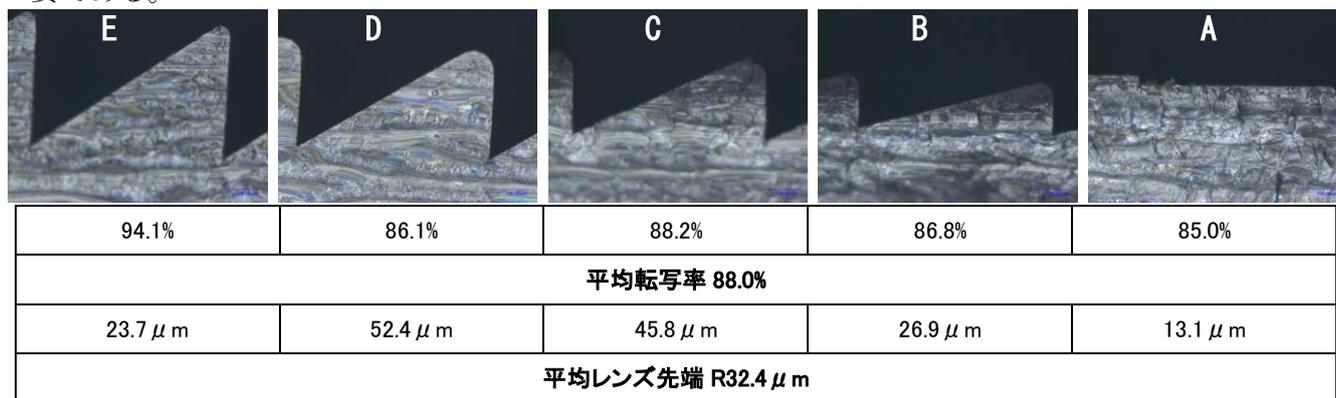


図 3.6 サンプルの断面画像、転写率、レンズ先端 R(通常成形)

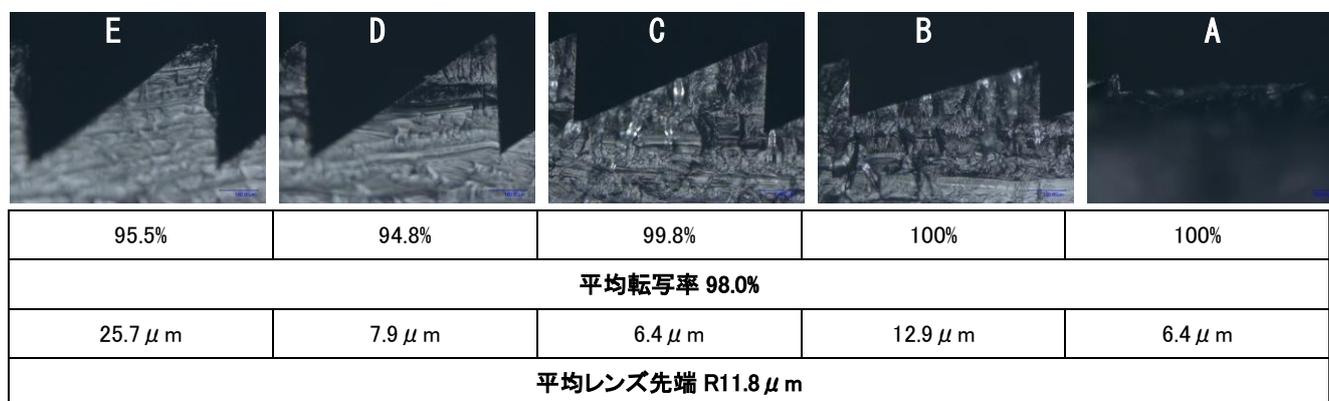


図 3.7 サンプルの断面画像、転写率、レンズ先端 R(加熱冷却成形)

3.5 離型性の改善ならびに複合フレネルレンズの転写性評価

前章で示した通り抜き勾配を増加させることで離型性の改善に効果がみられ、連続成形も可能となり課題を解消することができた。さらに条件調整も行い、サイクルタイムも当初実施した抜き勾配 0.5° の際と比較して 20s の短縮を図ることができた。

ノーマルフレネルレンズ、複合フレネルレンズの転写性評価結果を図 3.8、図 3.9 にそれぞれ示す。ノーマルフレネルレンズでは評価ポイント全てにおいて 90%以上、5ポイント平均では 95.3% となった。

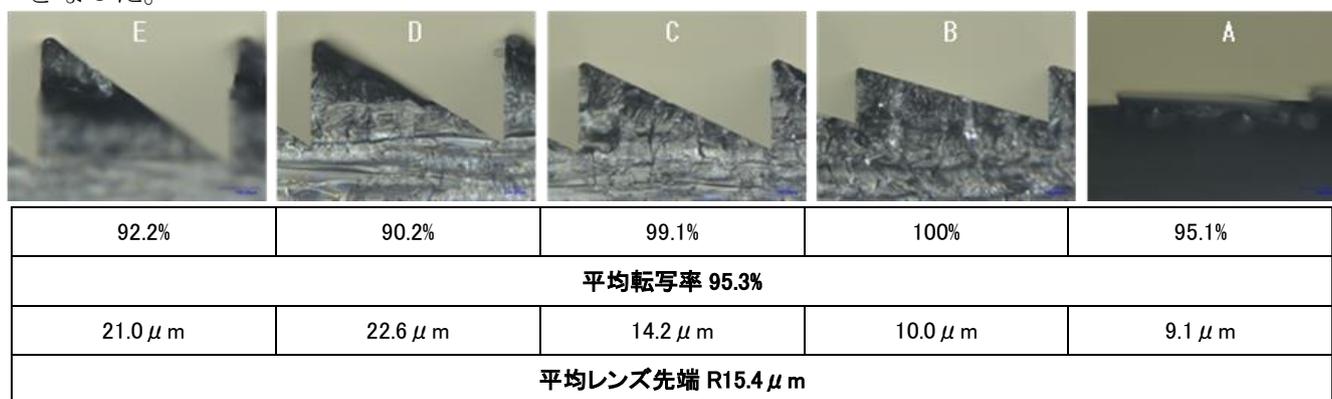


図 3.8 ノーマルフレネルレンズの断面画像、転写率、レンズ先端 R

一方、複合フレネルレンズでは外周部近傍で 90%前後となったが、5 ポイント平均では 94.3%となった。なお転写率はレンズ最高高さで定義しており、樹脂の充填状態によってはレンズ先端 R と必ずしも等価にはならない。

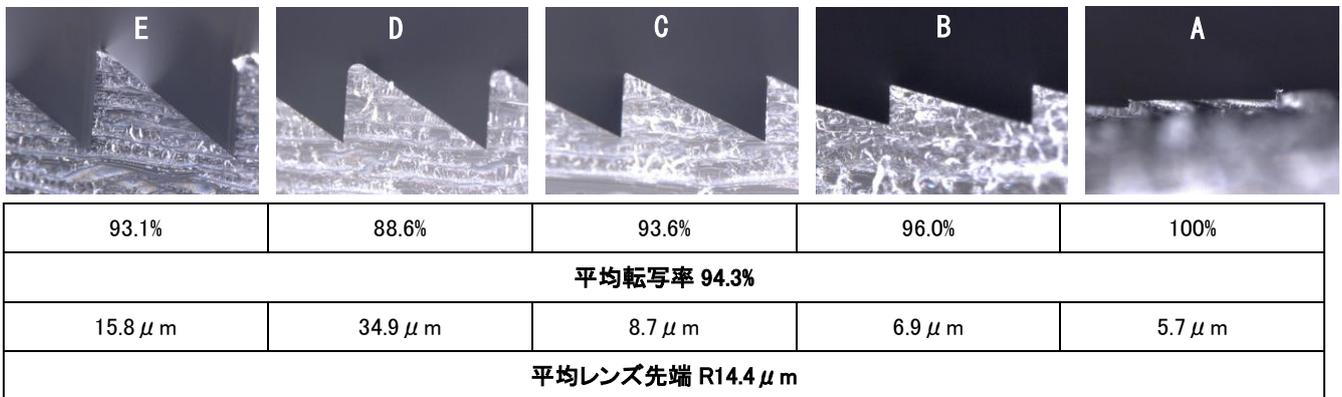


図 3.9 複合フレネルレンズの断面画像、転写率、レンズ先端 R

いずれのレンズにも共通してみられるのが測定ポイント D の転写率が低い傾向にある。樹脂の流動を考えた場合、中央から同心円状に拡大しながらフローフロントが進展していくが測定ポイント D 近傍より端面(側面)に樹脂が到達することで角部に向かい樹脂が流入していき見かけの流速が上がる。このため図 3.11 で示したように主流方向に対し厚み方向への流速が低下することで樹脂温度が下がりレンズ谷底への押し込まれない状態で流動するためと考えられる。

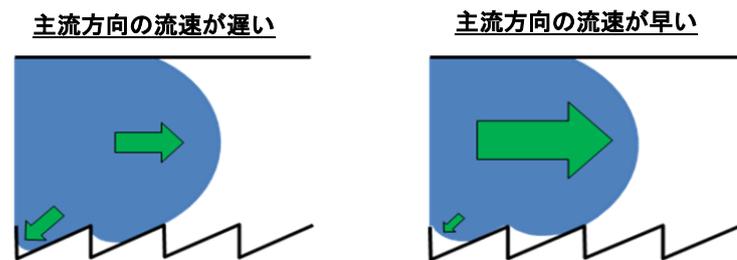


図 3.11 局所的な流速の違いによるレンズ面への流動概念図

これは射出速度を調整することで改善できる余地はあると考えられる。

3.6 第 3 章のまとめ

- ・通常成形は平均転写率 88.0%となり目標達成には至らなかったが、加熱冷却成形では平均転写率 98.0%となり、最終目標 95%を達成することができた。
- ・抜き勾配を増加したノーマルフレネルレンズならびに複合フレネルレンズにおいて指定測定ポイントにおける平均転写率はそれぞれ 95.3%、94.3%と目標値 95%に到達もしくは若干下回る結果となった。
- ・加熱冷却成形において条件の最適化を図り、当初サイクルタイムから 20s 短縮することができた。
- ・生産性、光学性能の総合的な観点から今回の製作手法により、商用化に向けた展開への糸口を掴むことができた。

第4章 延性電析Ni合金めっき皮膜の超鏡面・超微細切削加工の開発

4.1 はじめに

高集光効率を可能とするフレネルレンズ用金型に対して Ry10nm 未満の超鏡面および等溝ピッチ $30\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ の高精度微細加工を目標としている。フレネルレンズ用金型の成形として、図 4.1 に示すレンズの創成方法のように、レンズピッチが小さい場合、レンズ面創成には工具形状の転写による突切加工(図 4.1 に示すレンズ面となす前切れ刃角が零の場合)と工具送りによる加工の二通りがある。突切加工にて電析 Ni-P めっきと無電解 Ni-P めっきに対し、工具切れ刃の転写によりどの程度の表面性状が得られるか、皮膜材料の差異はどの程度あるか、抜き勾配の表面粗さに工具先端丸みがどの程度影響するかを中心に検討を行った。その結果も踏まえて、皮膜材料と表面性状、加工性能の検討から、さらなる皮膜材料改善への方向性を検討した。加工後のレンズ面における形状精度、面精度については表面性状測定機(ZYGO)などを利用した定量的な評価法の確立し、それに基づき、適切な工具先端丸み、加工条件など検討を行った。

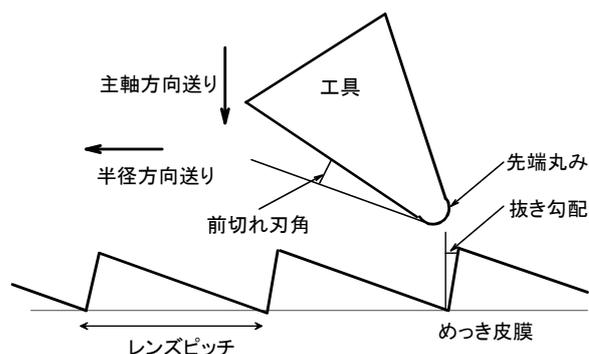


図 4.1 レンズの創成方法

具体的には、電析 Ni-P 合金めっき皮膜は、含有リン量の調整が一つの特徴であり、そのリン量の仕上げ面性状に及ぼす影響、およびその切削性に及ぼす影響を検討した。これらについては、工具送りによるレンズ面創成では工具送りあるいは、レンズ金型の抜き勾配面は工具の刃先丸味の影響を受けることからその検討も行った。使用した工作機械は図 4.2 に示す超精密切削加工機(東芝機械 ULC-100C(H³))である。



図 4.2 超精密切削加工機の概観

4.2 各皮膜材料における加工精度の評価

正面旋削において工具突切にてレンズ面を、工具送りにて抜き勾配面を加工した。回転速度は 500rpm、主軸方向の送り速度は $0.14\mu\text{m}/\text{rev}$ で、使用した単結晶ダイヤモンド工具(アライドマテリアル製)は先端角 60° とし、先端丸みは $2\mu\text{m}$ と $5\mu\text{m}$ の比較検討を行った。

図 4.3 は電析 Ni-P めっき皮膜材料を加工したときの溝形状(a)、レンズ面に対応する工具転写面および抜き勾配面に相当する工具送りにより創成された面の光学写真(b)、および粗さ曲線の走査型白色干渉計による非表面形状測定器(zygo New View 6200)による測定結果(c)、(d)の一例を示している。同図から非接触表面形状測定器による溝形状測定では、工具転写面の情報はほぼ得られているが、送りによる面では必ずしも十分な情報が得られていないことが分かる。光学写真からは工具転写面は非常に平滑であり、送りによる面では送りに依存する粗さが観察される。それらの面の

断面曲線を求めた結果がそれぞれ図 4.3(c)、(d) である。図 4.3(c)の工具転写面ではほぼ Rz10nm の表面粗さが得られているが、Rz 20nm に近い粗さも見られ、工具切れ刃稜線の加工精度に依存すると考えると、今後工具の成形精度に注目する必要があるが、要求精度の Rz10nm 以内は得られる可能性が十分あると考えられる。工具の送りによる面では Rz 1 μ m 近い粗さとなっており、樹脂成形の際にどの程度問題になるか検討する必要がある。(※ Rz 十点平均粗さ)

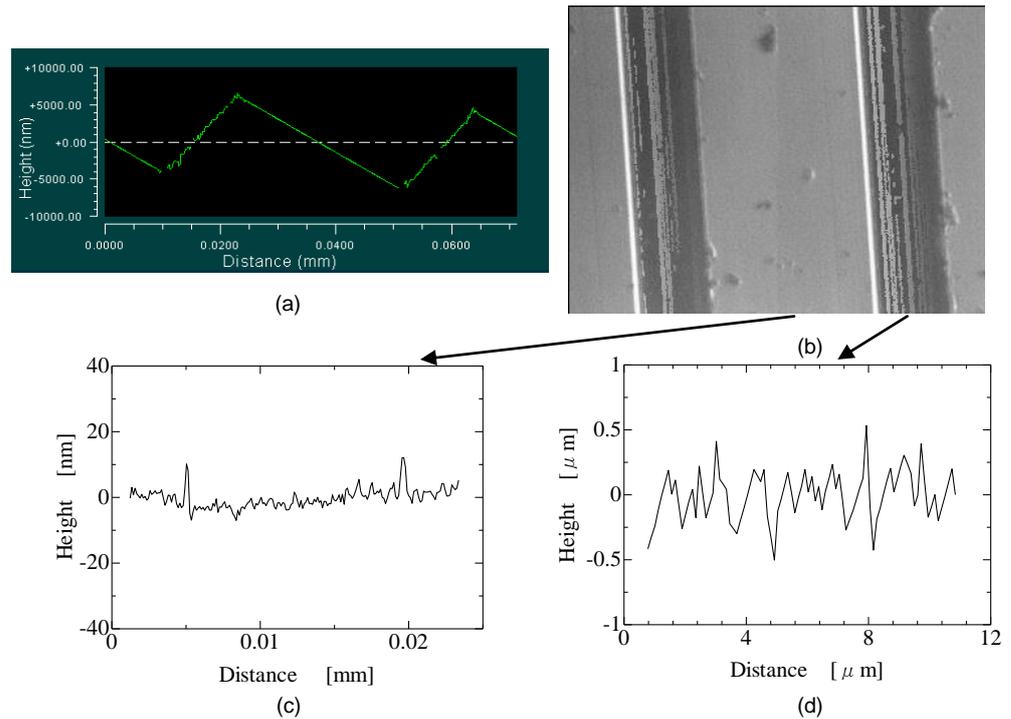


図 4.3 電析 Ni-P めっき皮膜の溝形状と溝面の観察結果の一例 (R2 μ m)

図 4.4 は無電解電析 Ni-P めっき皮膜材料加工したときの結果である。図 4.3 の電析 Ni-P めっき皮膜と比較すると、工具転写面の図 4.4(c)ではうねりが観察され、表面粗さとしては電析 Ni-P めっき皮膜材料より悪くなっていることが分かる。一方、工具の送りによる面の図 4.4(d)では電析 Ni-P めっき皮膜材料と同様に大きな粗さとなっていることが分かる。なお、工

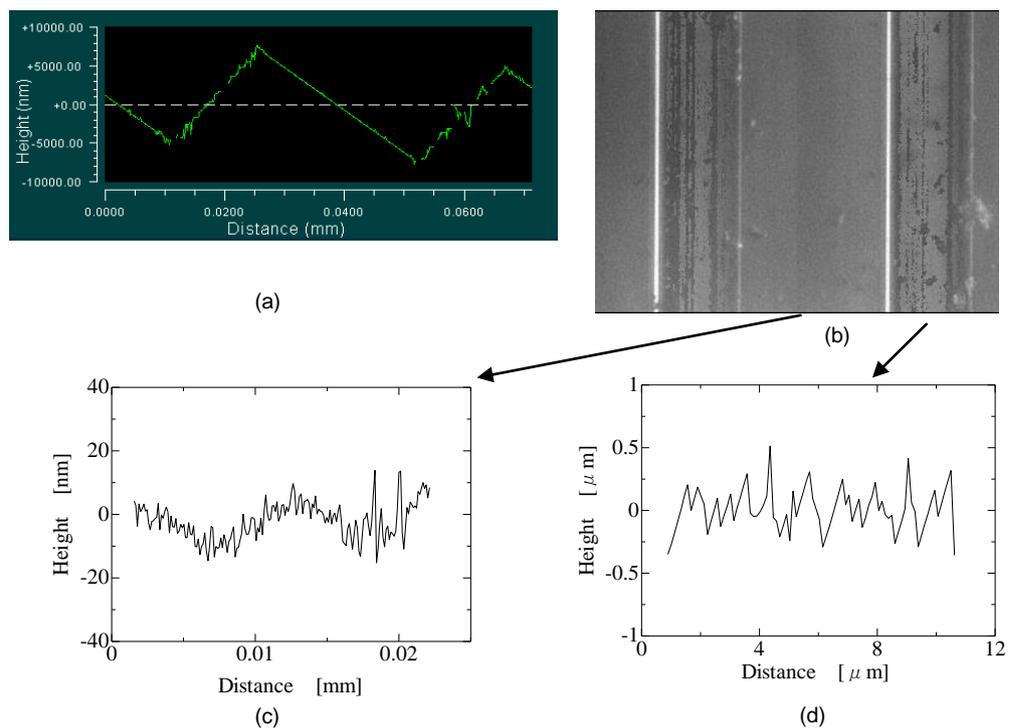


図 4.4 無電解 Ni-P めっき皮膜の溝形状と溝面の観察結果の一例 (R2 μ m)

具の送りによる面の図 4.4(d)では電析 Ni-P めっき皮膜材料と同様に大きな粗さとなっていることが分かる。なお、工

具転写面では図 4.5 に示すように大きな粗さ曲線が計測され、これが表面そのもの結果なのか、計測上の問題なのかは判断できていない。

図 4.6 は電析 Ni-P めっき皮膜材料(リン量 13.6%)で、図 4.3 が工具先端丸み $2\mu\text{m}$ に対し、 $5\mu\text{m}$ にした場合の結果である。まず、溝形状については、工具の送りによる面の情報は得られなかったが、図 4.6(a) の光学写真から分かるように、工具送りによる面は平滑に近く、そのため光学的に情報が得られなかったとも考えられるが、工具先端丸み $2\mu\text{m}$ より明らかに改善されていることは理解できる。今後、計測方法の検討が必要である。一方、工具転写面の図 4.6(b) は、無電解電析 Ni-P めっき皮膜の図 4.4(c) のよううねりはないが、図 4.3(c) より、若干表面粗さが大きくなっている。これは前述のように工具の成形精度に依存すると考えられ、更なる追加実験が必要とされる。しかし、表面粗さとしては Rz 20nm に近いものとなっている。

4.3 皮膜材料におけるリン量の仕上げ面性状に及ぼす影響 (正面旋削実験)

表 4.1 に示すように電流密度の異なる条件で皮膜作成を行ったが、その結果として、リン量が異なることから、リン量の仕上げ面性状に及ぼす影響として検討した結果を図 4.7 に示す。同図には先述のリン量 13.6% の皮膜、および無電解皮膜(NNi-P)の結果も合わせ示している。同図から、リン量の増加と共に仕上げ面性状が改善されることが分かる。また、ほぼ同一リン量と考えられる、リン量 13.3% と 13.6% で表面粗さの違いが見られ、電析めっき状態に依存するものと推定される。リン量約 13% で、最大粗さ(Rv)は 20nm 程度で、目標値には到達しないが、樹脂成形時には大きな影響がないとも推定される。次に、ZYGO による仕上げ面表面の観察像の一例を図 4.8 に示す。同図の表面の黒丸部分はポアであり、仕上げ面性状の良いリン量約 13.6% の場合(同図 b)はポアが小さくリン量 8.7%(同図 a)では大きなポアが多数観察された。ポアの生成要因は検討する必要があるが、仕上げ面粗さと合わせて考えると、リン量 13%(めっき条件 B)付近で最適と理解される。

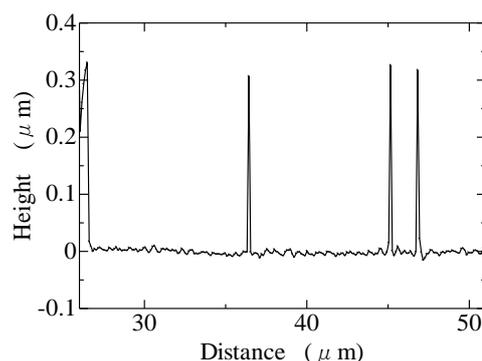
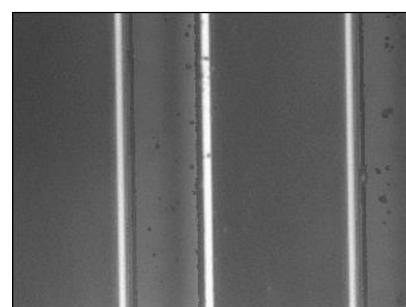
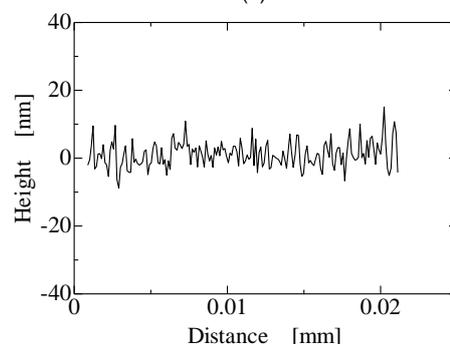


図 4.5 無電解 Ni-P めっき皮膜の工具転写面の表面形状(R2 μm)



(a)



(b)

図 4.6 電析 Ni-P めっき皮膜の溝形状と溝面の観察結果の一例(R5 μm)

表 4.1 皮膜材料のめっき条件とリン量

| めっき条件 | リン量 (wt%) |
|-------|-----------|
| A | 14.3 |
| B | 13.3 |
| C | 11.3 |
| D | 8.7 |

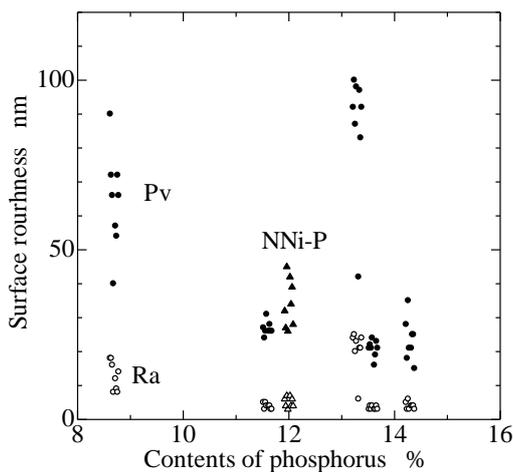


図 4.7 正面仕上げ旋削時における表面粗さに及ぼす含有リン量の影響

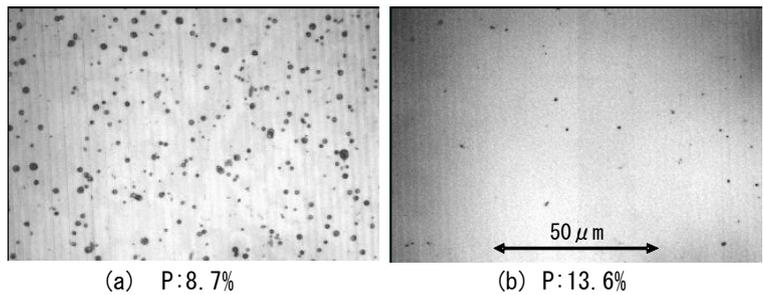


図 4.8 正面仕上げ旋削時における加工表面の観察結果

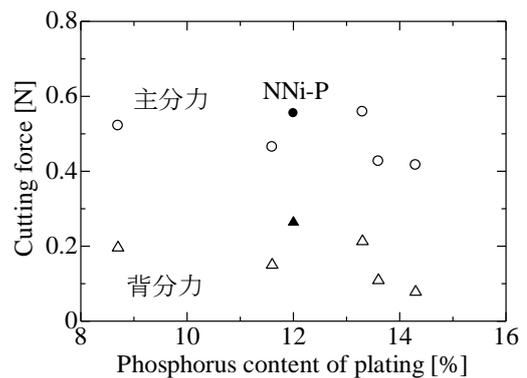


図 4.9 二次元切削時における切削力に及ぼすリン量の影響

4.4 切削加工性とリン量 (二次元旋削実験)

4.4.1 切削力

切削力測定については、切削力値自体が小さく、測定感度が三分力測定器では限界であることから、切削幅、切込みを大きくし、切削力測定精度向上させるとともに、切込みが大きいことから切りくず生成状態の観察も容易で、切りくず生成機構の検討を行った。

図 4.9 は切削力の測定結果で、皮膜材料は図 4.7 の仕上げ面評価と対応する。図 4.9 から無電解のものと仕上げ面性状の悪かったリン量 13.3%の結果を除くと、リン量の増加共に切削力が低下している。特に、背分力の低下が顕著である。背分力と主分力との比をとると、リン量の増加と共に比の値は低下する。本実験ではすくい角が零度であることから、主分力に対する背分力の比は切削時におけるすくい面上の摩擦係数に相当する。従って、リン量の増加により摩擦係数が減少し、その結果、切削力が低下すると共に、仕上げ面性状が改善されることが理解される。リン量 13.3%の結果は切削力が大きく、かつ切削力比も大きいことから、図 4.7 の仕上げ面も悪いということと対応する。

4.4.2 切りくず生成機構

アモルファス材料の超精密切削加工時には層状すべりにより切りくずが生成されることが知られている。図 4.10 は、前述の切込みの大きい切削力測定時の切りくずについて、切りくず側面、および自由面を観察した例である。図 4.11 には、層状すべりによる切りくず生成機構の模式図を示している。層状すべりによる切りくず生成は、微小すべりによる切りくず生成と共に、間歇的に巨大すべりを生じることであり、図 4.10 の切りくず側面から巨大すべりの様子が理解される。ただ、間歇的の巨大すべりの発生が必ずしも規則性を持っていないことも同図から理解される。このことは自由面観察でより顕著で、図 4.12 に示したリン量 13.3%の自由面では切削幅方向に層状すべり

が規則的に観察されるのに対し、図 4.10 では幅方向に一様ではないことがわかる。前述の切削力と合わせて考えると、切削力が小さい場合に幅方向に層状すべりが一様ではなく、切削力が大きくなるにつれ、規則性が現われている。このことは皮膜材料の変形時におけるせん断帯の形成頻度とその方向性に依存すると考えられる。詳細については、せん断帯の形成頻度のリン量依存性(めっき状態)についてはさらに検討する必要がある。

また、図 4.13 は正面旋削による仕上げ加工時の切りくず自由面(図中左)の観察例で、切りくず厚さが薄いことら切りくずの側面観察はできないが、自由面に見られる畳目の模様は切りくず流出方向に直角であり、前述のように切りくずが層状すべりによって生成されていることを示している。

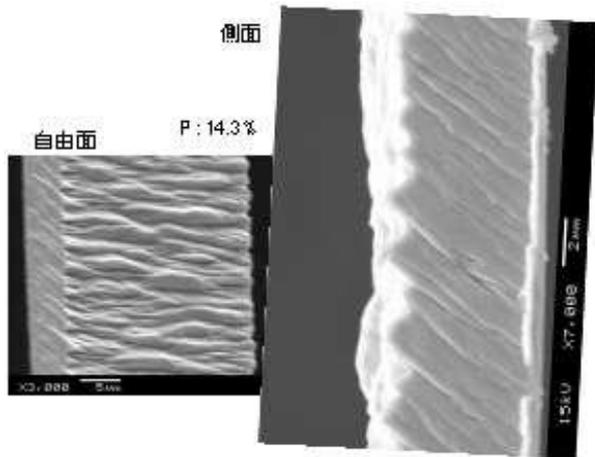


図 4.10 二次元切削時における切りくずの観察例

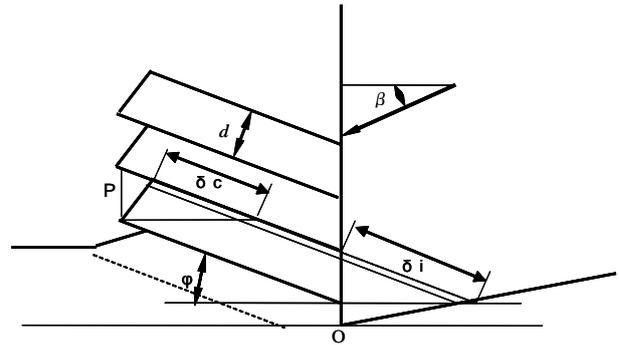


図 4.11 層状すべり機構

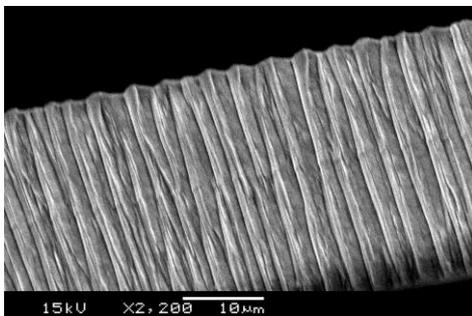


図 4.12 リン量 13.3%での切りくずの自由面観察例

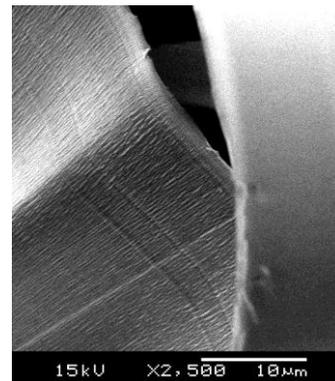


図 4.13 正面仕上げ旋削時における切りくずの自由面観察

4.5 工具送りによる微細溝の創成

図 4.14 は表面粗さを検討した結果で、工具本数との関係で、前述の仕上げ面性状とリン量の関係から、粗さの粗い場合(リン量 8.7%)と良い場合(13.3, 13.6%)について検討を行った。工具送りでの面創成であることから、工具先端丸みも重要な要素と考え、工具先端丸み R5, 10 μm について行った。図 4.14 から明らかなように、表面粗さは 300nm と非常に大きく、工具送りでは、工具先端丸

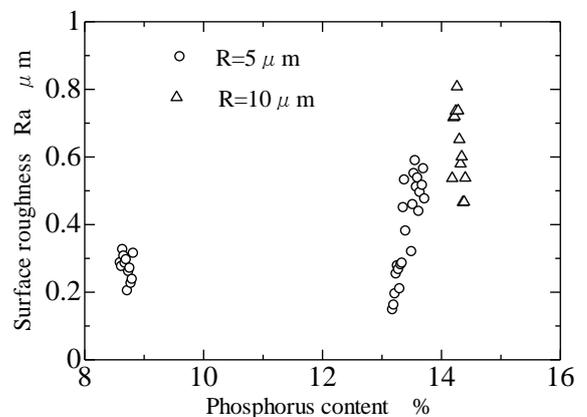


図 4.14 レンズ面の表面粗さに及ぼす含有リン量の影響

みに関係なくレンズ面が創成できないと判断された。(このことは 2.3 節の実際のフレネルレンズ加工時と一致する。)

なお、レンズ面創成時の工具送り、正面旋削による平面加工の工具送りとの表面粗さの差異については、その理由が現在不明で、さらなる検討が必要である。

4.6 レンズ面創成条件の検討

レンズ加工における加工条件について、工具送り、切込み、切削速度、工具先端丸み等から検討を行った結果一例が図 4.15 である。

同図中、工具送り(平面)は平面加工時の図中に示すように切込みを変えた場合の結果、工具送り(溝)は送りによりレンズ面を加工した場合で、平面からレンズ面を加工した場合切込みがこの実験では $12\sim 0\mu\text{m}$ まで変化し、その結果を $12\mu\text{m}$ と、レンズ面を荒加工し、最終仕上げを一定の小さな切込み $1\mu\text{m}$ と $3\mu\text{m}$ で加工した場合の結果を示している。なお、突切加工(溝)は工具形状の転写による昨年度の結果である。同図から、平面加工では Rz で

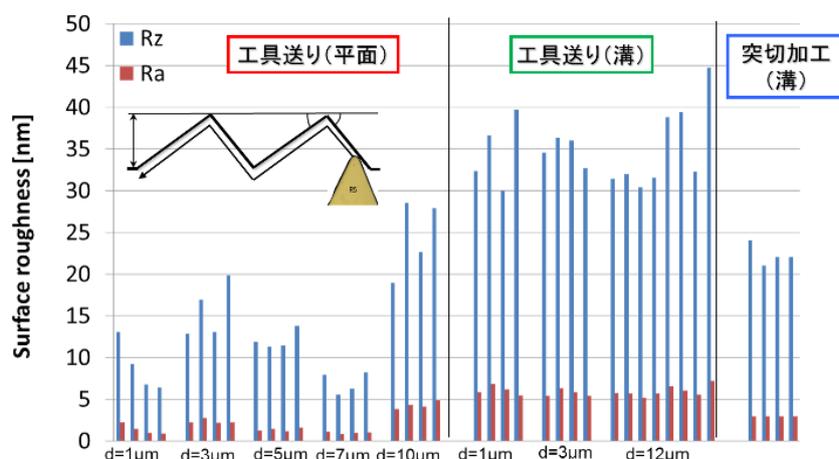


図 4.15 レンズ面加工時に表面粗さに及ぼす加工条件の影響

10nm 以下も得られるが、工具送りによるレンズ面加工では粗さが大きいこと、かつ現状では前年度の突切加工より粗くなっていることがわかる。レンズ面加工では加工方向を変更し $0\sim 12\mu\text{m}$ と変化させた場合の検討も行ったが、粗さには変化はなかった。

4.7 第4章のまとめ

- ・工具切れ刃の転写によりレンズ面の創成による皮膜材料間の比較、および工具先端丸みの工具送り面への影響および、皮膜材料間の切削力について検討し、次のことが分かった。

(1) 工具切れ刃の転写では、電析 Ni-P めっき皮膜材料の表面粗さが良く、表面粗さとしては Rz 20nm 程度が得られ、工具切れ刃の成形精度によりさらに改善されると推定された。

(2) 工具先端丸みの工具送り面への影響では、 $2\mu\text{m}$ より $5\mu\text{m}$ の方が面性状は良いことが分かった。しかし、表面粗さの評価では他の手法を含めた検討が今後の課題である。

- ・電析皮膜の作成条件として、リン量は約 13%が最適である。なおリン量、電析電流のみでは皮膜特性としての評価は不十分である。

- ・レンズ創成法としてはレンズピッチが小さいならば、工具突切法が選定される。

- ・レンズ面創成時の表面粗さは Ra10nm 以下となったが、工具送りによるレンズ面創成については表面粗さ向上へのさらなる検討も必要である。

第5章 ダイヤモンド工具の長寿命化

5.1 はじめに

切削加工に使用する単結晶ダイヤモンド工具は、刃先をミクロンレベルに仕上げる必要があり、数十万円/本の高価な工具である。延性電析 Ni-P 皮膜材料は、無電解 Ni-P 皮膜に比較し、超鏡面・高精密加工が容易な快削性を示すことから、工具寿命を 10000m/本以上と長寿命化することで工具費および加工費低減と製造期間短縮を目標とする。具体的にはバイト寿命：10000m（切込み $20\mu\text{m}$ の V 溝形状）、V 形状にバリ、脱落のないこととする。

そこで野村鍍金で開発した電析 Ni-P めっき皮膜に対しめっき条件を変更させたワークにて評価を行なった。

5.2 電析 Ni-P めっき皮膜の被削性基礎評価ならびに工具摩耗評価

評価方法を下記に示す。

- ・母材：ウツデホルム製 STAVAX $50\times 50\times 30\text{mm}$
- ・めっき皮膜：電析 Ni-P めっき（野村鍍金）、条件 A、B、C、D の 4 種類、めっき厚約 $200\mu\text{m}$
- ・加工機：フレネルレンズ用超精密立形加工機、嶋田プレシジョン独自仕様（図 5.1 参照）

加工内容

- ・工具：単結晶ダイヤモンド（東京ダイヤモンド工具製作所）

① ヘール加工（面粗さ）

- ・工具形状：先端丸み $R10\text{mm}$
- ・加工条件：ピッチ $20\mu\text{m}$

② プリズム加工（工具摩耗）

- ・工具形状：先端角 90° 、先端丸み $R0\mu\text{m}$
- ・加工条件：
送り速度 $10\text{m}/\text{min}$ 、ピッチ $1\mu\text{m}$ （※加工距離 2500m ）、切込み $6\mu\text{m}$ （図 5.2 参照）

全面加工を 4 回繰り返し 加工距離総計 10000m 、切込み総計 $24\mu\text{m}$

- ・工具摩耗評価：

工具転写のため 2500m 毎に同素材のワークに 1 本の溝加工を切込み $10\mu\text{m}$ で行ない、溝形状から工具損傷状態を検討した。

③ 正面旋削

- ・工具形状：先端角 90° 、先端丸み $R5\mu\text{m}$
- ・加工条件：毎回転送り $0.6\mu\text{m}$ 、回転数 500rpm 、切込み $10\mu\text{m}$ 、加工幅 3mm



図 5.1 フレネルレンズ用超精密立形加工機

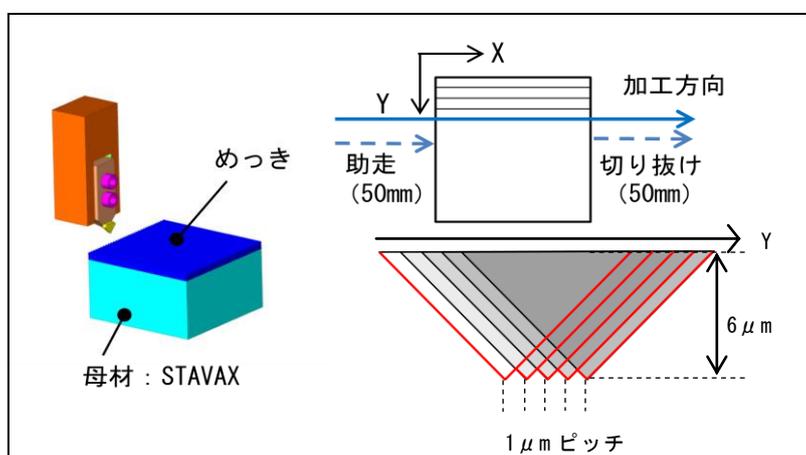
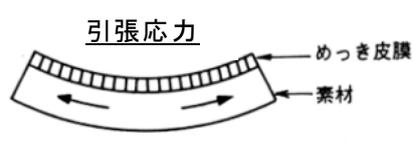


図 5.2 被削性基礎評価加工内容

5.3 電析 Ni-P めっき皮膜の基礎特性

表 5.1 に今回の電析 Ni-P めっき条件とリン含有量の測定結果を示す。条件 A、B は 13% 超、C は 13% 弱、D は 11% 強となっている。またデータは後述するが、スパイラル鍍金応力計により内部応力を評価した結果、A および B は圧縮応力、C および D は引張応力を受けていた。なお応力の方向の定義は表 5.1 に示す通りである。さらに図 5-3 にナノインデンテーションによるめっき評価結果を示すが、こちらは特に大差はみられなかった。

表 5.1 皮膜材料のめっき条件とリン量、応力方向

| めっき条件 | A | B | C | D |
|----------|---|-----------|---|-----------|
| リン量(wt%) | 13.5~13.8 | 13.4~13.6 | 12.5~12.9 | 11.0~11.6 |
| 応力方向 |  | |  | |

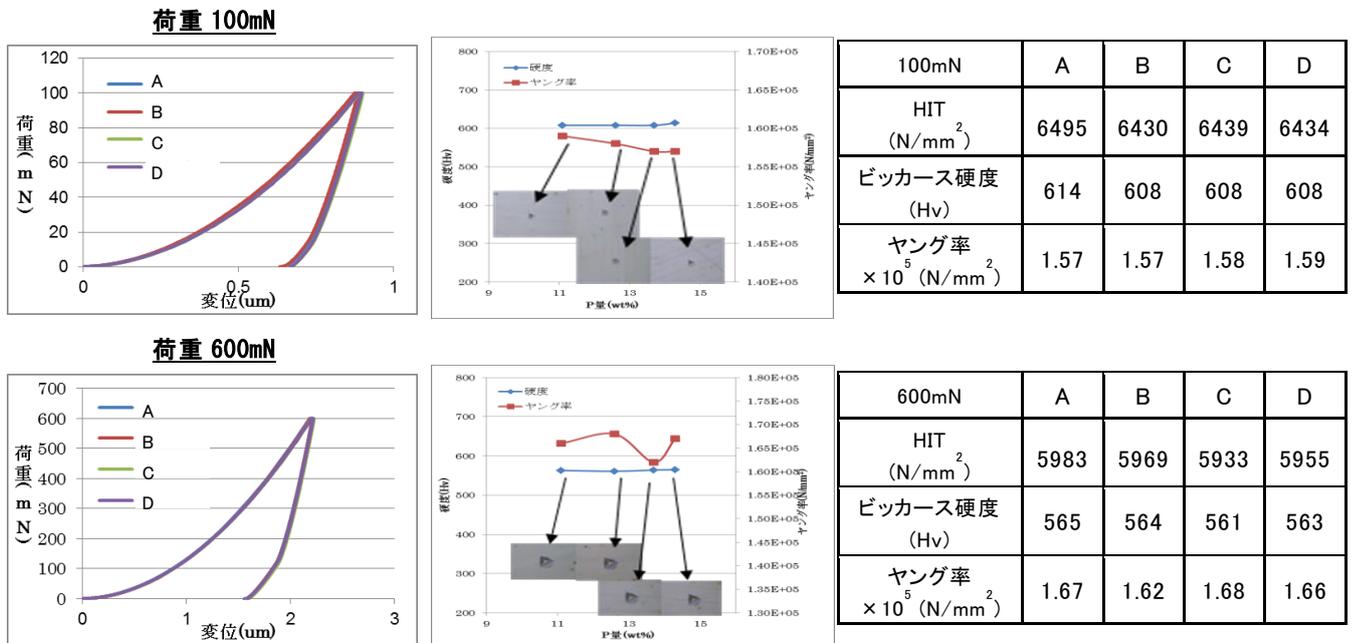


図 5.3 ナノインデンテーションによるめっき評価

5.4 加工評価

図 5.4 にヘール加工を行なった各めっき条件のサンプルおよびレーザー顕微鏡による粗さ評価データ(評価エリア□100μm)を示す。面粗さでは D が最も良好で C、B、A での順に低下していく。

このヘール加工したサンプルに対し、今回は最良の面粗さである D および応力方向が異なる B に絞ってプリズム加工評価を行なった。

図 5.5 に各プリズム加工距離における摩耗評価のデータ、図 5.6 に同じくダイヤモンド工具の加工前後の先端様相を示す。B では加工距離 10000m に対し摩耗、カケなどの損傷もなく加工が完了できているのに対し、D では 2500m 加工時には既に工具のチッピングがみられた。

図 5.7、5.8 に正面旋削による加工評価について示す。面粗さは B で $Ra=14\text{nm}$ 、 $Ry=118\text{nm}$ に対し D では $Ra=16\text{nm}$ 、 $Ry=103\text{nm}$ と大きな差はみられなかった。しかしながら図 5.9 に示すように D では工具先端の摩耗が観察された。

以上の結果より D ではいずれの加工評価においても工具へのダメージがみられたが、この 2 種類の違いについて基礎特性によるとリン含有量と応力方向が挙げられる。D では引張応力となっているが工具に対し締め付ける方向で負荷が掛かりやすいとも考えられる。

今回の結果よりレンズ加工に適用するめっき条件は B を選択した。(このことは 4.2 節の結果とも一致する)

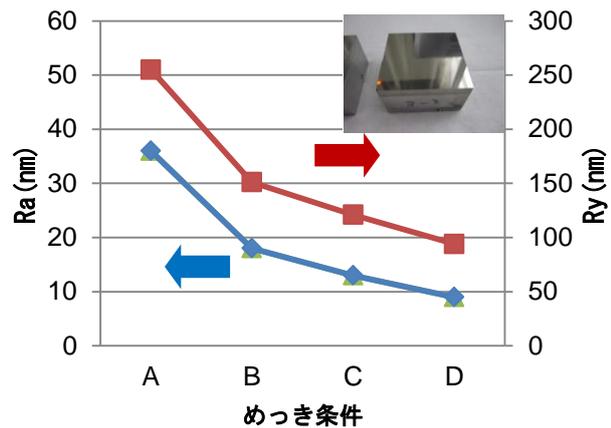


図 5.4 ヘール加工時の面粗さ

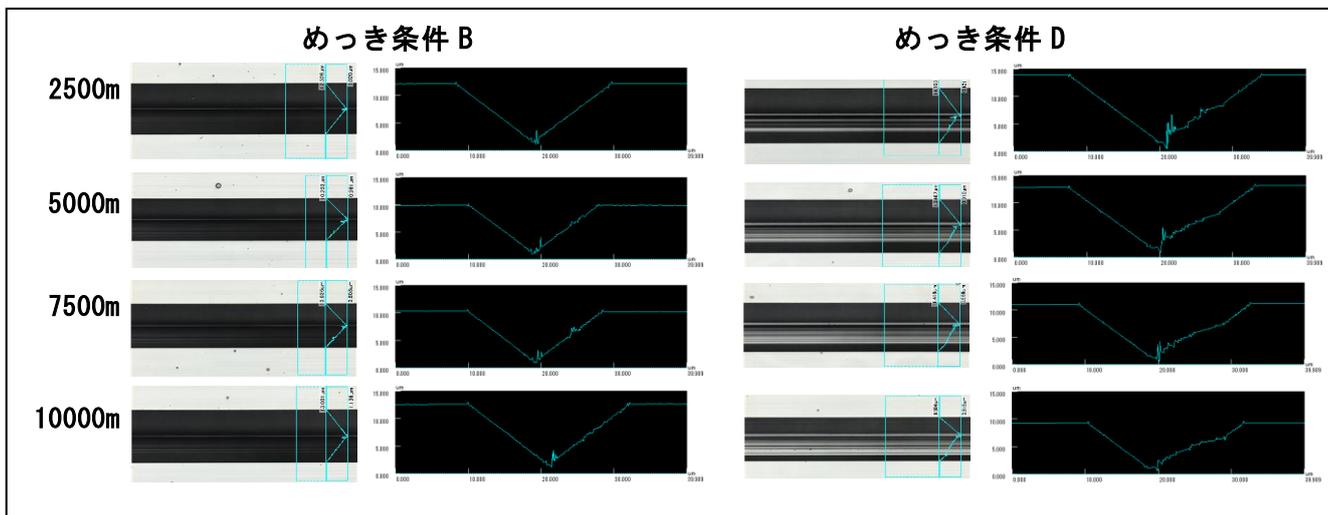


図 5.5 めっき条件の違いによる工具摩耗評価

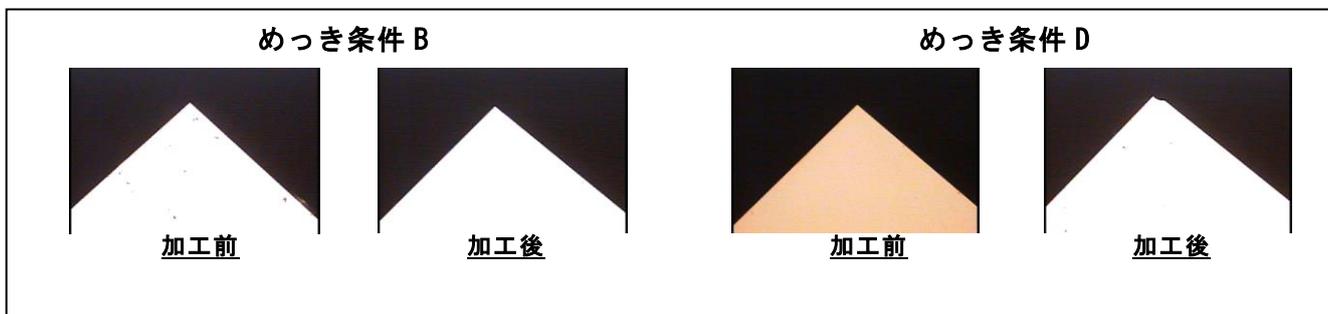


図 5.6 めっき条件の違いによる加工前後の工具先端様相

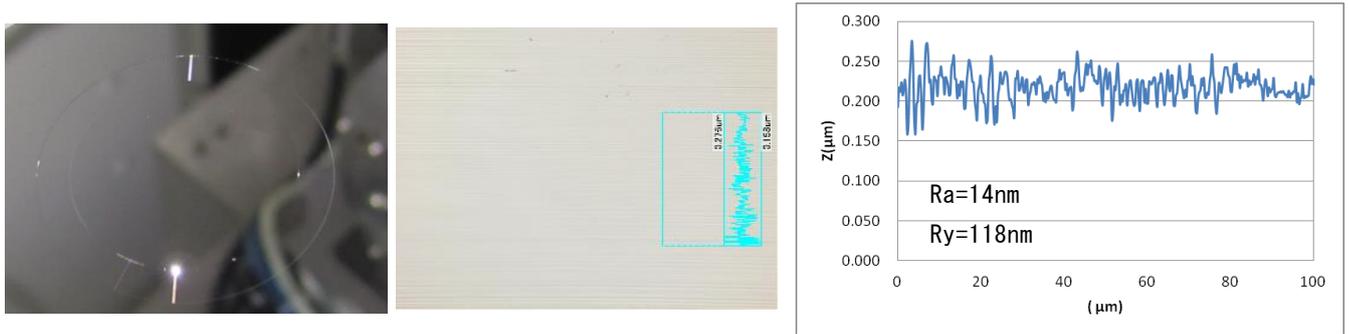


図 5.7 めっき条件 B における正面旋削時の加工面評価

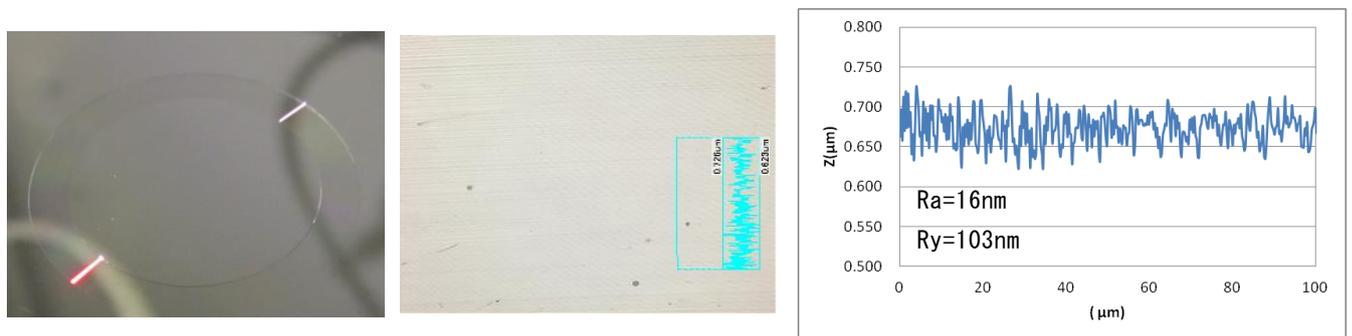


図 5.8 めっき条件 D における正面旋削時の加工面評価

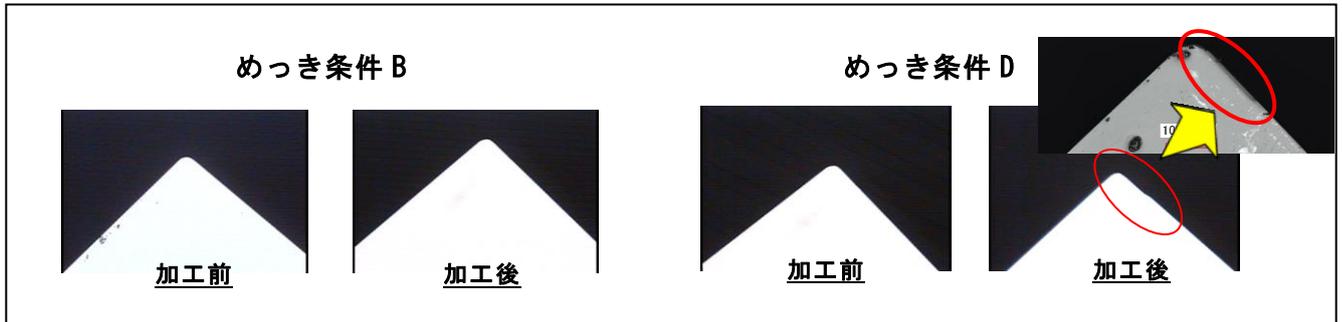


図 5.9 めっき条件の違いによる正面旋削時の加工前後の工具先端様相

5.5 第 5 章のまとめ

- ・電析 Ni-P めっき皮膜の加工評価、工具摩耗について評価を行い、条件 B では 10000m(切込み総計 $24\mu\text{m}$) の加工距離においてダイヤモンド工具のダメージがないことが確認され、切削性の点で 4 種類の中では最適であることがわかった。
- ・但しめっき条件と切削性の関係性については明らかになっていない点も多く、補完研究にて前章で挙げた加工特性評価について引き続き検討を行っていく。

第6章 延性電析 Ni-P めっき材料の品質安定化技術開発

6.1 はじめに

高集光効率を可能とするフレネルレンズ用金型では、切削加工により Ry 10nm 未満の超鏡面および等溝ピッチ $30\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ の高精度微細加形状を作製できねばならず、これを実現できる切削性に優れる金型用めっき材料の開発を目標としている。

そこで、第4章と第5章に示したように、実際の切削加工試験により切削性に優れる電気 Ni-P 合金めっき皮膜を選別した。本第6章では、切削加工性に優れるめっき皮膜を安定して製作できるめっき液組成および電気条件などのめっき条件を決定すると共に、その条件で作製しためっき皮膜が、なぜ切削加工性に優れるかについても検討した。さらに切削試験を行わずに、めっき皮膜の切削加工性を評価する方法についても検討した。

さらに、フレネルレンズ用金型サイズは、 $150\text{mm}\times 150\text{mm}$ の正方形をしており、金型表面に作製しためっき皮膜の切削加工に問題が生じないよう、めっき皮膜には表面全体の均一な外観性状、厚みおよび材料特性が求められる。めっき皮膜の良質な品質を得るために、電極形状の検討および長時間の継続的なめっき液分析手法の検討と分析を実施した。以上の結果より、フレネルレンズ用金型への切削性に優れるめっき皮膜を提供することができた。

6.2 切削加工性に優れる Ni-P 合金めっき皮膜の検討

電析 Ni-P 合金めっきは、硫酸ニッケル溶液をベースとし、亜リン酸を添加してめっき液を調製した。この場合、浴中の亜リン酸濃度ならびに浴 pH によって皮膜へ共析するリン含有量、皮膜の機械的性質、外観などが大きく変化する。また、めっき時の電気条件、電極条件、および液温度によっても、めっき皮膜の性状は大きく変化する。

図6-1に、STAVAX 基材表面にめっき条件を種々変化させて作製した膜厚 $500\mu\text{m}$ の Ni-P 合金めっき皮膜、具体的には A, B, C, D の4つの試験めっき皮膜についてりん含有量と水素含有量の分析結果およびめっき皮膜応力を示した。これらの試験めっき皮膜は、第4章で示した切削加工試験により切削性を調査した。その結果、Bの試験皮膜が優れた切削性を示すことが判った。

切削試験とめっき皮膜の分析結果から、切削加工性に優れるめっき皮膜は、13wt% 以上のリンを膜中に含有し、同時に水素含有量が $0.015\sim 0.02\text{wt}\%$ ($\approx 1\text{at}\%$) であることがわかった。

また、Ni-P 合金めっきの電着応力の測定は、スパイラル鍍金応力計（株式会社山本鍍金試験器製）を用いた。スパイラル応力計は、裏面をテフロンコートした帯状の試験片を螺旋状に巻き一端を固定し

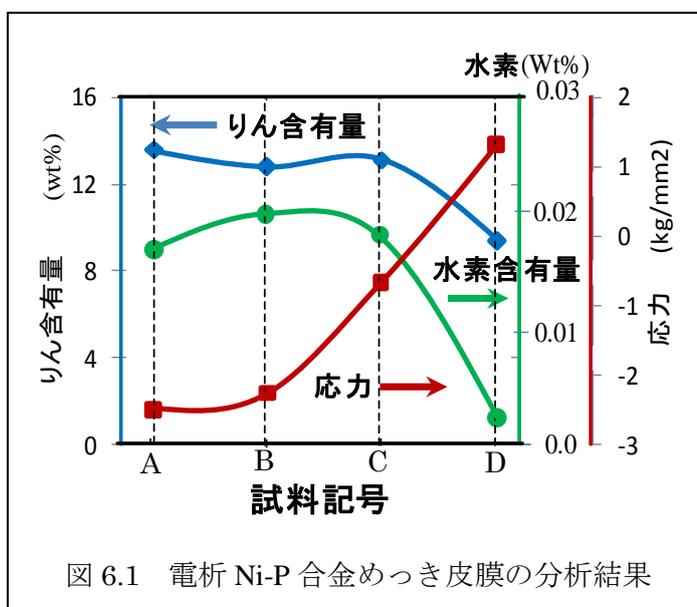


図 6.1 電析 Ni-P 合金めっき皮膜の分析結果

た状態で、表面にめっき皮膜を形成することで、内部応力によって螺旋がねじれることによる回転変位から、発生応力を算出する方法である。この応力測定から、切削加工性に優れるめっき皮膜の電着応力は 3kg/mm^2 以内の弱い圧縮応力が望ましいことが判った。

6.3 電気 Ni-P 合金めっき皮膜含有水素の挙動

目標とする超鏡面で高精度な切削加工性を達成するには、第 4 章のめっき皮膜の切削試験に示されたように、めっき皮膜を切削加工した時に、スムーズで均一な延性モードの切り屑が発生することが重要である。従来の電気 Ni-P 合金めっき皮膜では目標の切削性能が得られず、6.2 項で示した試料 B が優れた切削性能を示した。切削性が悪い従来電気 Ni-P 合金めっき皮膜では、水素の含有量が少なく、また、水素含有量が比較的多いめっき皮膜でも切削性に差があることから、めっき皮膜含有水素について検討した。

切削性の悪いめっき皮膜と切削性に優れるめっき皮膜について、示差走査熱量測定 (DSC) および水素脱離試験 (TDS) により、試料加熱時の水素の放出状況を、九州大学水素エネルギー国際研究センターの協力をいただき、複数の試料に対して実施した。

示差走査熱量測定 DSC 装置の断面を図 6.2 に示す。DSC 法は、試験片の加熱時あるいは冷却時のエンタルピーの変化を測定する熱分析法である。また、水素脱離試験 TDS 法は、試験片の加熱時に、試料から放出されるガス成分を質量分析計で検出する方法である。TDS 法では、水素以外のガス成分も検出可能であるが、水素以外の成分はほとんど検出できなかった。

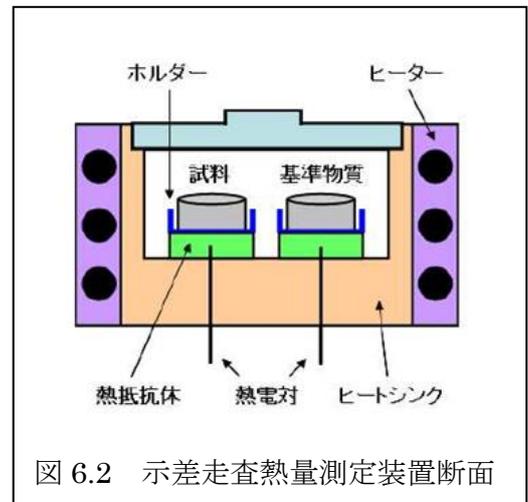


図 6.2 示差走査熱量測定装置断面

図 6.3 に DSC 法と TDS 法での測定結果を示す。切削性の悪いめっき皮膜では、いずれの試験でも 300°C より低い温度でほとんどの含有水素を放出するのに対して、切削性に優れるめっき皮膜では、 300°C 以上の温度でも、皮膜中に多くの水素が残留していることが判る。ここで、 300°C は、Ni-P 合金めっき皮膜が、アモルファスから結晶を析出する温度であり、皮膜の結晶化に伴う原子の移動により、含有水素も放出されたと考えることができる。

しかし、切削性に優れるめっき皮膜では、皮膜の構造変化が生じる 300°C を超える温度でも皮膜中に多量の水素を残していた。この残留水素の挙動と皮膜の切削性の関係は、再現性も確認され、強い因果関係があると考えられた。切削性に優れる皮膜の残留水素は、皮膜構成原子間の安定な位置、例えば Ni あるいはリンと比較的強い結合状態で存在している可能

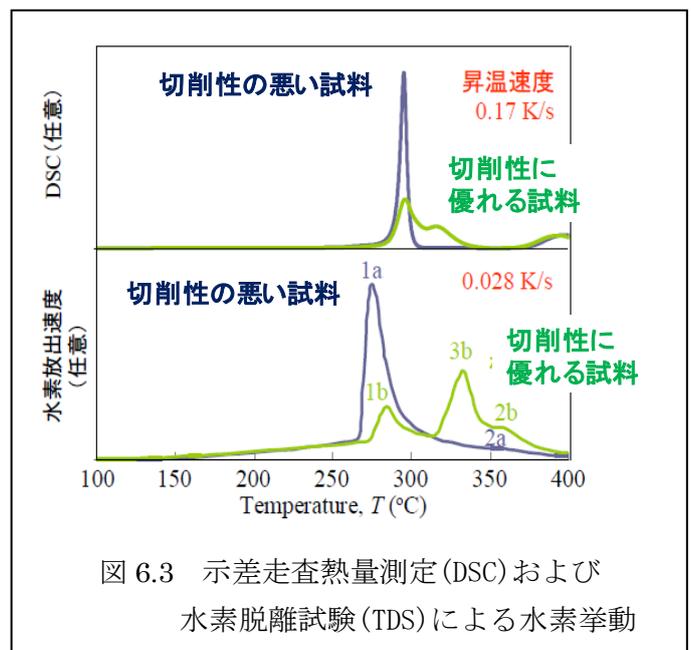


図 6.3 示差走査熱量測定 (DSC) および水素脱離試験 (TDS) による水素挙動

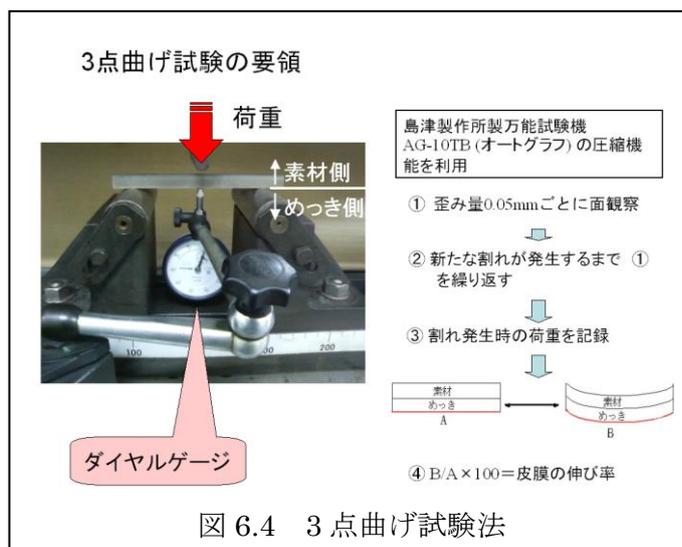
性が示唆された。

6.4 電気 Ni-P めっき皮膜の機械的評価試験

切削性に優れるめっき皮膜は、切削加工により延性モードの切り屑を出すこのことから、曲げ試験において比較大きな伸びを示すことが予想された。これを確認するために、STAVAX 材 10×130×10mm の表面にめっき皮膜 50 μm を設けた 3 点曲げ試験片を作製した。図 6.4 に 3 点曲げ試験法について示す。

切削性に優れる電気 Ni-P 合金めっきの伸びは 3.14%と 3.65%を示し、想定値の 2.5%を超え大きな伸びを示した。しかし、3 点曲げ試験による伸びの測定値は、ばらつきが大きく優れた評価法と考えにくかった。

3 点曲げ試験以外の機械的品質評価法を、継続して調査した。種々検討の結果、せん断発生頻度評価法が切削性能に対応する試験法であることが確認できた。

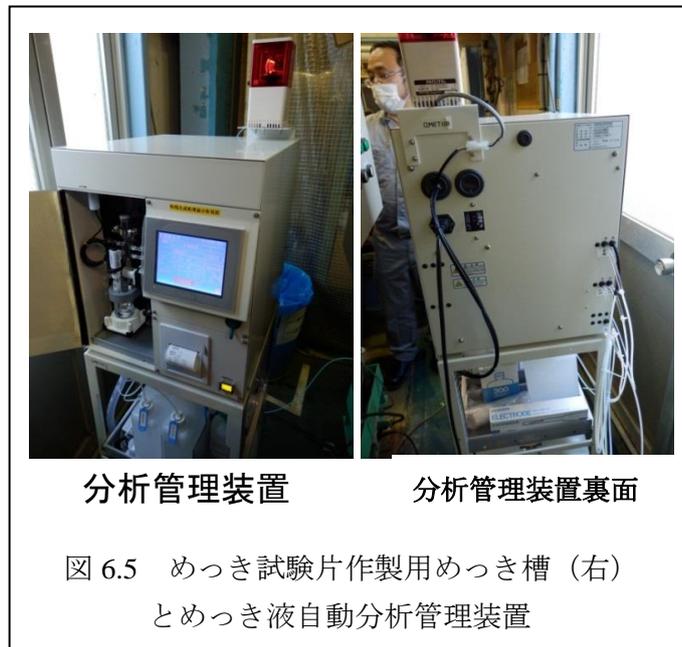


6.5 めっき浴組成と電極アライメントの最適化によるフレネルレンズ用金型へのめっき

フレネルレンズ用金型への電気 Ni-P 合金めっき皮膜は、めっき皮膜自身をダイヤモンド単結晶バイトにより超精密切削加工することから、めっき皮膜は 500 μm 以上の厚さを必要とする。このため、めっき時間は通常 50 時間を超える。長時間のめっき皮膜析出では、浴組成ならびに浴 pH は変動する。皮膜品質の安定化には、常に浴中の組成変動を把握し、その変動に対応する適正な薬剤補給を行うなど、浴管理が不可欠である。

図 6.5 に、試験片作製用 330L めっき槽(右)とめっき液自動分析管理装置を示す。試験片作製用めっき槽では、6.2~6.4 項で示した切削試験用および品質管理を目的とする機械的評価試験用に STAVAX 材に電気 Ni-P 合金めっき皮膜を被覆した。

一方、めっき液自動分析管理装置は、めっき槽からめっき液の一部を取り出し、ニッケル濃度、亜リン酸濃度および浴 pH を自動測定する。それらの値が、あらかじめ設定した管理範囲に入るよう、適宜必要な薬剤補給を行い、めっき浴の安定化が可能となった。また、亜リン酸濃度の最適化を



追求し、めっき皮膜の含有リン量を±1%以内に保った皮膜組成において、内部応力を±1 kg/mm² 以内の制御ができた。また、この時点での、めっき析出速度は10μm/hであった。

図 6.6 に、縦横 150mm×150mm サイズのフレネルレンズ用金型材上への Ni-P 合金めっき被覆用 600L めっき槽を示す。フレネルレンズ用金型のように大きな平面に均一な膜厚でめっきを施す場合には、平面上での電流密度をできるだけ一定にすることが必要となる。平面にめっきを施した場合の外観を図 6.7 に示す。めっき平面の角部に電流が集中し、その部分では著しくめっき厚さが増大している。金型用の厚めっきではできるだけ品物上での均一な厚さの皮膜を提供することが加工において大切であり、それを達成するために平面上での電流密度の均一化が重要な課題であった。

めっき槽内の一般的な電流密度分布のシミュレーションを、有限要素法を用いたコンピュータシミュレーションソフト μエクセル（株式会社ミューテック）により実施



図 6.6 フレネルレンズ用めっき槽

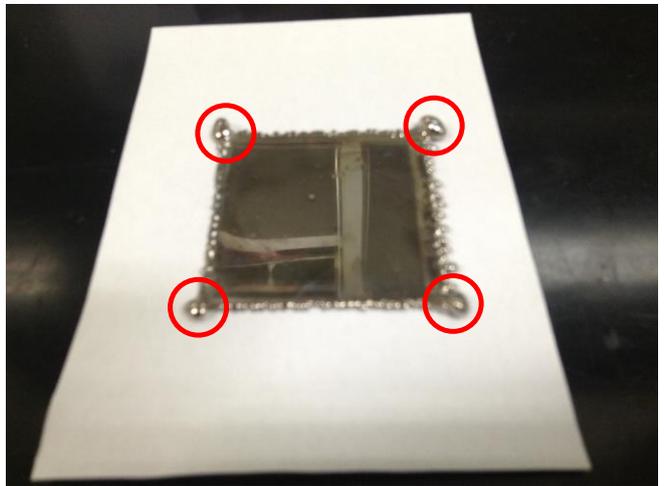


図 6.7 めっき平面角部の極端な盛り上がり

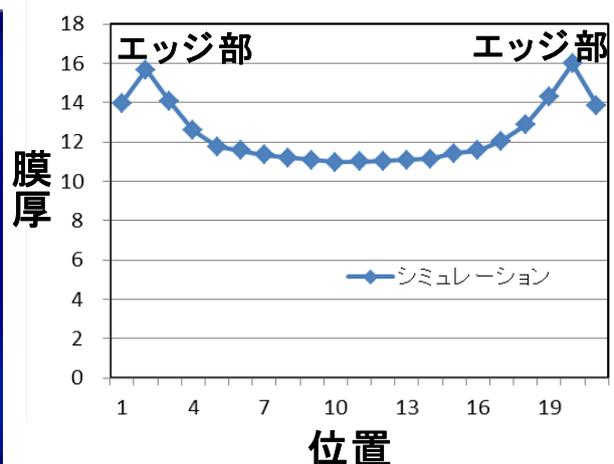
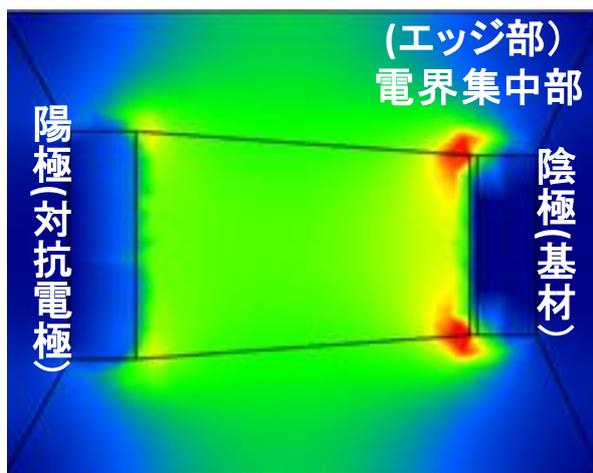


図 6.8 一般的な電気めっき時の電流密度分布と膜厚分布

した。その結果を図 6.8 に示す。左図に示す 2 次元電流密度分布図では、金型材エッジ部が赤色になっており、電解集中により中心部に比較し 2 倍以上の電流密度になることを示している。この

結果、右図の膜厚分布グラフに示されたようにエッジ部の膜厚が中央部に比較し約 50%厚く被覆される。エッジ部の電解集中を防ぐ方法として、補助陰極や電磁界遮蔽板の設置や電極間距離の調整を行った。その結果、金型基材表面における電流密度ムラを 0.9%以内にできた。

めっき液自動分析管理装置により、ニッケル濃度，亜リン酸濃度および浴 pH を制御したことは先に述べた。めっき浴には、上記主要成分や pH 調整成分以外に、めっき表面の均質化効果などを持つ薬剤の添加を行う。図 6.9 に示すキャピラリー電気泳動装置 (CAPI) により添加物成分の分析を行った。図 6.9 右グラフに測定結果を示す。これら分析装置を駆使し管理精度 3%以内を達成した。

以上示しためっき液管理手法と電流密度シミュレーションによる電極周辺のアライメントの最適化により、150mm×150mm サイズのフレネルレンズ用金型材上への電気 Ni-P 合金めっき皮膜の作製に成功した。

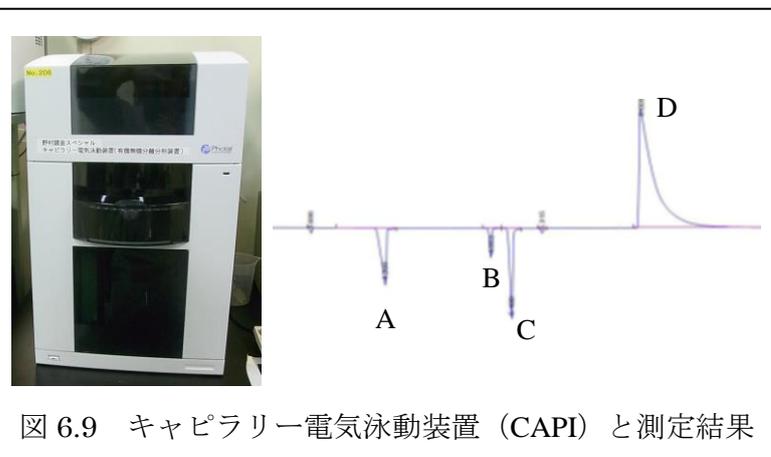


図 6.9 キャピラリー電気泳動装置 (CAPI) と測定結果

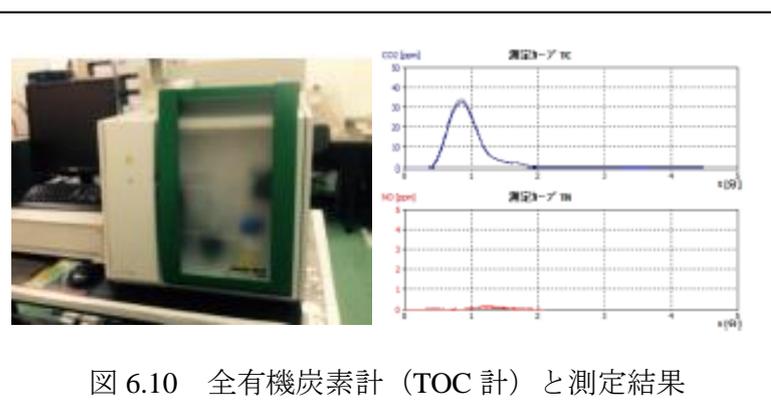


図 6.10 全有機炭素計 (TOC 計) と測定結果

6.6 めっき添加剤管理法の確立

前項で述べたように、キャピラリー電気泳動装置 (CAPI) により、めっき液添加剤の分析手法を確立した。しかし、めっき施工中にめっき液添加剤成分は、電解により正常なめっき反応を阻害する可能性を持つ有機物不純物を生成・蓄積する。この有機不純物量が多くなると、めっき不良の原因となる。分解生成した有機不純物の分子式などが不明であることから、キャピラリー電気泳動装置 (CAPI) のみによる有機不純物の定量は困難であった。そこで、全有機炭素計 (TOC 計と略) を導入し、TOC 計と CAPI の測定値の変化 (差) から有機不純物定量法の確立を検討した。図 6.10 に TOC 計装置と有機炭素量測定結果の一例を示す。

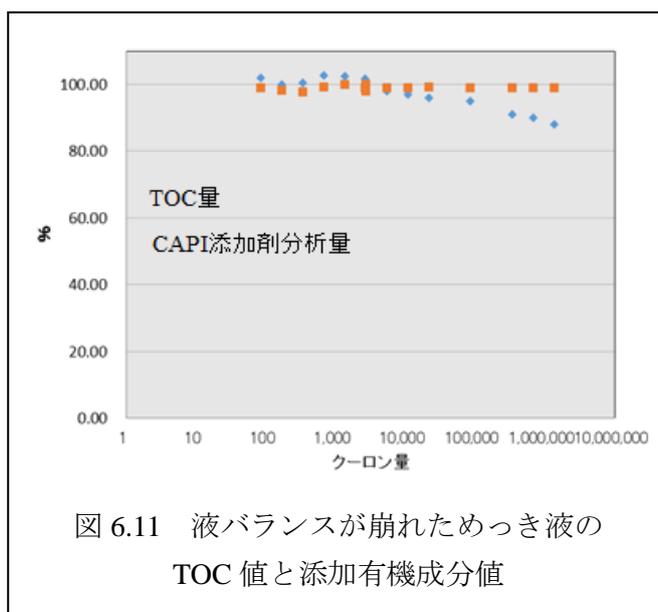
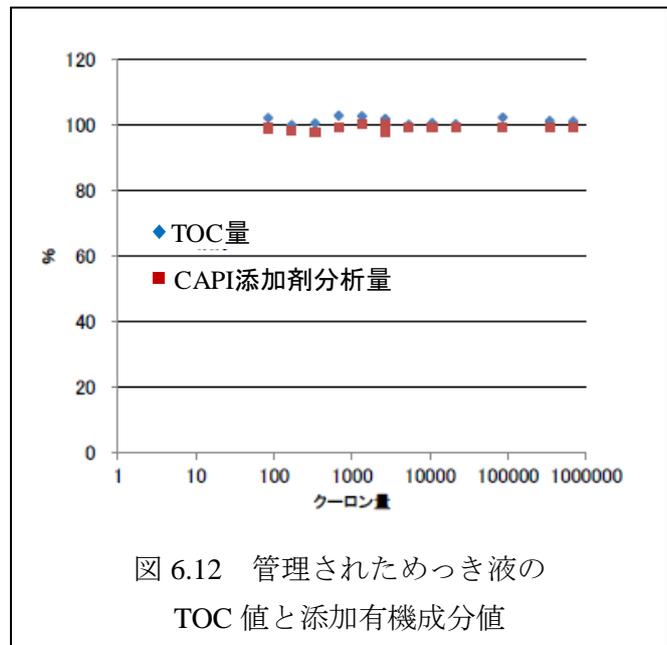


図 6.11 液バランスが崩れためっき液の TOC 値と添加有機成分値

図 6.11 に液バランスが崩れた場合の TOC 量と CAPI で測定しためっき液添加剤量を横軸クーロン量（めっき時間に相当）に対してプロットしたグラフを示す。クーロン量が多くなるほど（めっき時間が多くなるほど）、二つの測定値の差が大きくなっており、有機不純物量が増加傾向にあり、めっき液の状態が不適切であることを示している。

一方、図 6.12 では、クーロン量の増加に対しても、TOC 量と CAPI で測定しためっき液添加剤量の差がほぼ一定で安定しており、めっき液の管理が適切であることを示している。



6.7 第 6 章のまとめ

- 1) 切削性に優れる電気 Ni-P 合金めっき皮膜を、縦横 150mm×150mm サイズのフレネルレンズ用 STAVAX 材金型に被覆した。第 4 章の結果より、この電気 Ni-P 合金めっき皮膜層は、切削加工により Ry 10nm 未満の超鏡面および等溝ピッチ 30 μm ± 1 μm の高精度微細加形状を作製できた。
- 2) 切削性に優れる電気 Ni-P 合金めっき皮膜は、13wt%以上の P および水素含有量が 0.015~0.02wt% (≒1at%) であり、めっき皮膜の電着応力は 3kg/mm² 以内の弱い圧縮応力を持つ。特に、水素含有量は約 1at% と多く、良好な切削性と密接に関係していると推測された。
- 3) めっき液自動分析管理装置、キャピラリー電気泳動装置 (CAPI) および全有機炭素計 (TOC 計) により、めっき液主成分、めっき液添加剤と分解有機不純物の定量および pH の管理が可能となり、めっき浴の適正管理技術を確立した。また、電気めっき状態の電界シミュレーション技術と合わせ、安定した品質のめっき皮膜を被覆したフレネルレンズ用金型を提供できた。
- 4) 補完研究によりクーロン量がさらに増加した時の有機不純物増加量とめっき皮膜の切削性評価法であるせん断発生頻度との関係を求め、その関係からめっき液の更新頻度およびめっき液の長寿命化に取り組む。

第7章 高速かつ平坦めっき製造条件の開発

7.1 はじめに

電気Ni-P合金めっきの析出速度 $5\mu\text{m/h}$ を $15\mu\text{m/h}$ に高めることを、開発目標としている。フレネルレンズ用金型のめっき皮膜は、ダイヤモンド単結晶バイトによる切削により超鏡面・高精度形状を加工形成するために、 $500\mu\text{m}$ 以上～数mmの膜厚を必要としている。析出速度 $5\mu\text{m/h}$ で $500\mu\text{m}$ の膜厚を得るためには、100時間を必要とし製造コスト増をもたらしている。電気Ni-P合金めっきの高速化のために、めっき条件やめっき浴攪拌方法などの影響について検討した。

めっき表面の平坦化について、初歩的な対策を第6章で示した。すなわち、めっき平面角部の電界集中によるめっき厚さ異常を、補助陰極や遮蔽などの構造で対策した。本章では、めっき表面に発生する異常小突起の発生原因と対策について検討した。

7.2 めっきの高速化

7.2.1 電流密度とめっき速度

第6章で、亜リン酸濃度の最適化により、めっき皮膜の含有リン量を $\pm 1\%$ 以内、内部応力を $\pm 1\text{kg/mm}^2$ 以内の制御ができ、めっき析出速度は $10\mu\text{m/h}$ に向上したことを述べた。一方、析出速度を増加させる方法としては電流密度を増加することが考えられる。しかし、単純に電流密度を増加するとリン含有量が $10\text{wt}\%$ 以上の皮膜では、リン含有量の急激な低下が起これ、めっき物性も劣化した。図7.1に電流密度とリン含有量の関係を示す。切削性に優れるリン含有量 $13\text{wt}\%$ ($22\text{at}\%$) 以上のめっき皮膜の作製には、単純に電流密度を増加させる方法では不適切と判断された。

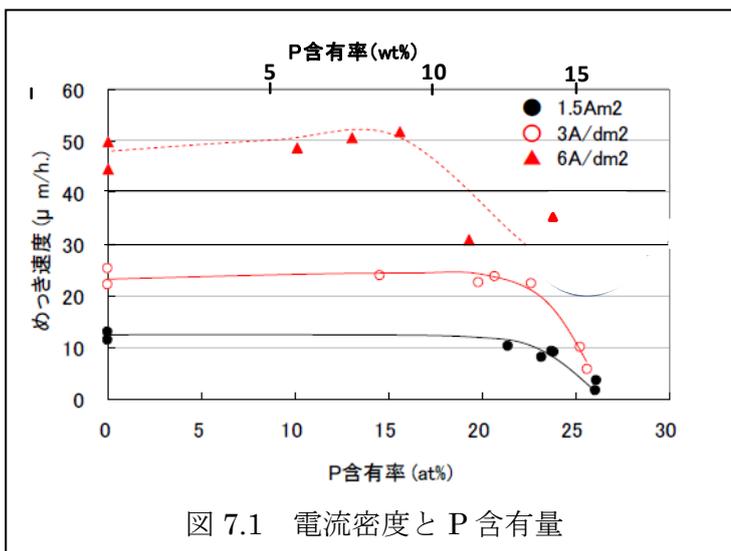


図 7.1 電流密度と P 含有量

7.2.2 攪拌効果とめっき速度

単純に電流密度を上げる方法では、多くのりを皮膜中に含有させることが困難であった。これは、リンの液中拡散速度よりめっき析出速度が大きくなるためと考えられた。リンの液中拡散速度を上げるために、めっき浴を攪拌することを考えた。めっき浴の攪拌法では、基板表面近傍の拡散層を薄くし、リン含有量を低下させずに電流密度を高める可能

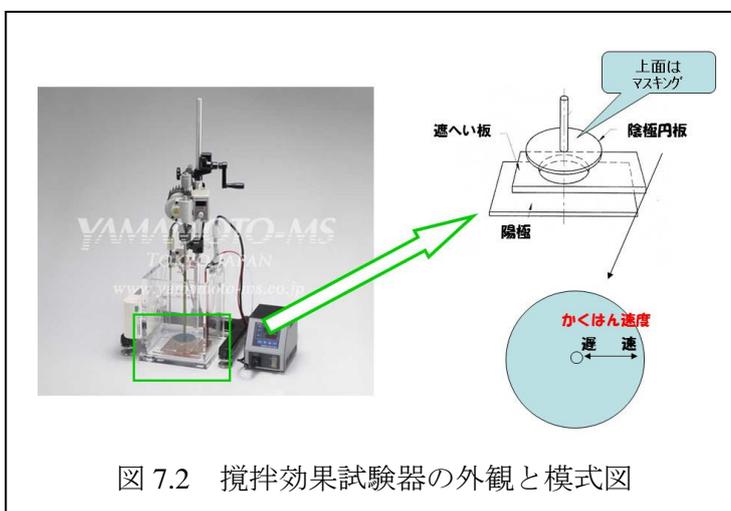


図 7.2 攪拌効果試験器の外観と模式図

性がある。図 7.2 に攪拌効果試験器の外観と模式図を示す。装置では、陽極と平行に配置された円板状の陰極がモータによって回転する。陰極円板では遮へい板により電流密度が一定となり、攪拌の影響を調べる事が可能となる。

本装置で、浴温度、攪拌速度がめっき皮膜のリン含有量および電流効率（析出速度に関係）に及ぼす影響を図 7.3 に示す。攪拌速度（回転数）が増加するとともに、リン含有率は 15wt%を越えても漸増する傾向にあり、めっき液からのリン成分の供給が期待通りであることが判る。しかし、析出電流効率の低下から、析出速度が大きく低下している。このことから、ベースである Ni の析出速度が大きく低下し、相対的にリンの含有率が増加したと考えることができる。浴温については、温度が高いほど析出速度が速いことから、65°C以上の高温であればリンの高含有量と析出速度を両立できる可能性が推測された。

攪拌効果をさらに確認するために、高速

ハルセル試験を行った。図 7.4 に高速ハルセル試験器の外観と模式図を示す。これは、円柱状の陰極棒が回転し、攪拌と電流密度の影響を同時に調べることができる。図 7.5 に実験結果を示す。縦軸は、蛍光 X 線分析から同定した 1/3 ニッケル量およびリン量とした。縦軸を 1/3 ニッケル量およびリン量にしたのは、正常に得られる電気ニッケルリンめっきの場合、これら量はほぼ一致し重なるが、組成不良となった場合は、これらの量が乖離するため、適正範囲を一目瞭然で判定できるからである。図 7.5 から、適正な皮膜組成が得られる析出速度は目標の 15 $\mu\text{m}/\text{h}$ に近づいているが到

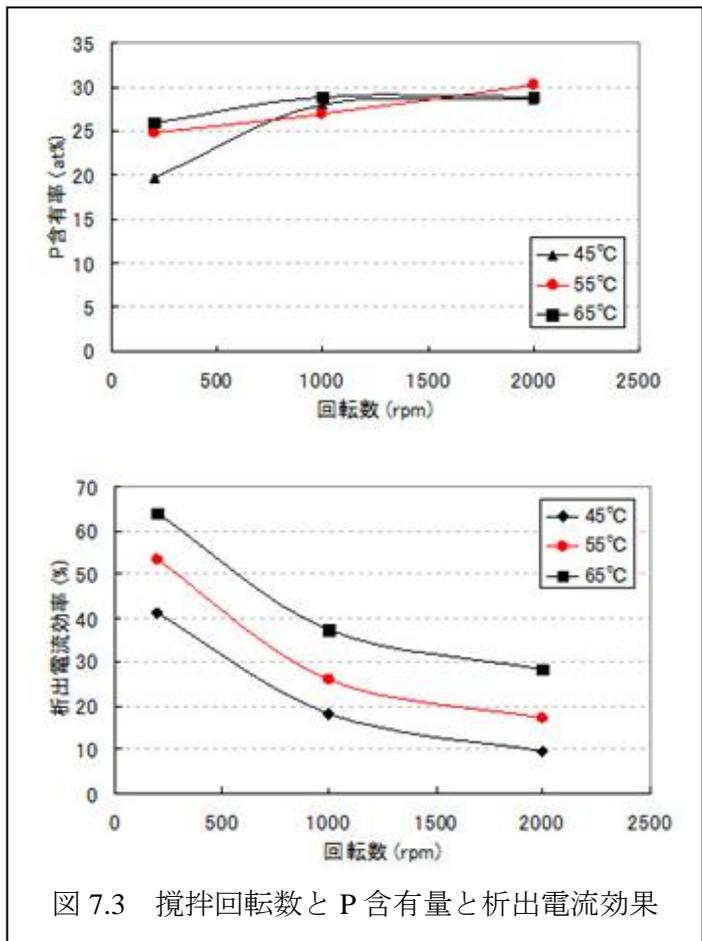


図 7.3 攪拌回転数と P 含有量と析出電流効果

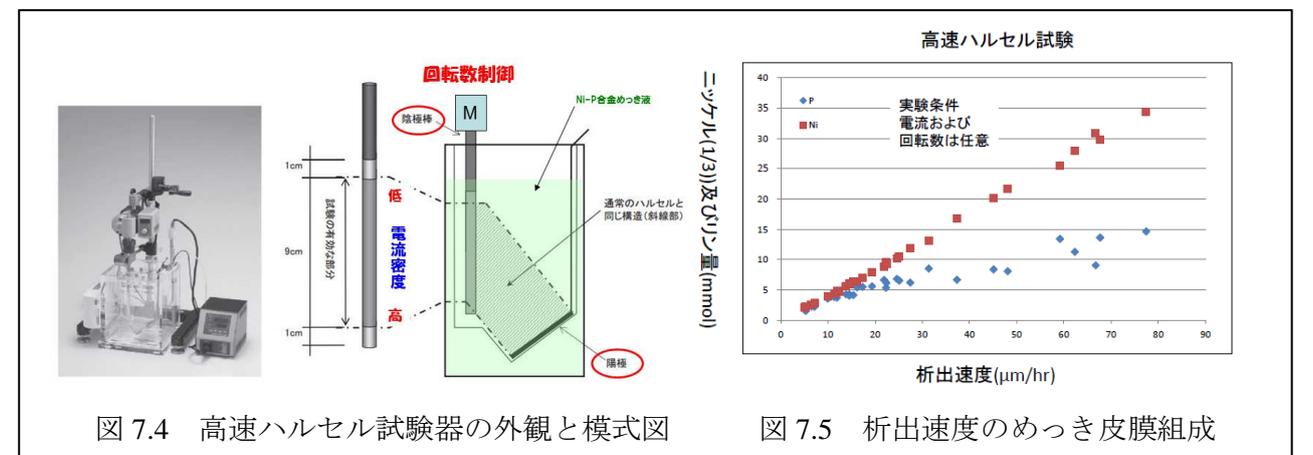


図 7.4 高速ハルセル試験器の外観と模式図

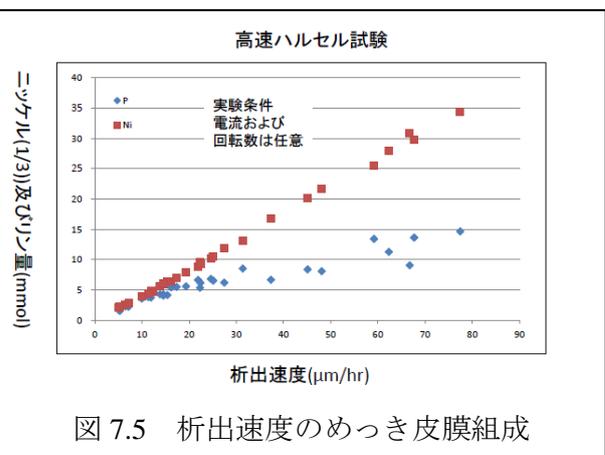


図 7.5 析出速度のめっき皮膜組成

達していないことが判る。

以上のことより、電流密度を上昇してリン含有率の高いめっき皮膜を製造するには、攪拌速度の

増加ならびに浴温の上昇が効果的と結論された。ただし、高温側では、めっき設備の耐久性やめっき液の組成制御が困難になるなど、めっき皮膜の安定性とめっき析出速度にはトレードオフの関係があると考えられた。

7.2.3 めっき液バブリング効果とめっき速度

バブリングによるイオン供給量の増加を図るとともに、電流密度を上昇させることによりめっきの析出速度向上を目指して検討を行った。図 7.6 にバブリング条件における析出速度による皮膜組成の変化を示す。縦軸は、高速ハルセル試験と同様に、1/3 ニッケル量およびリン量とした。バブリングにより、適正組成を維持したまま析出速度を $30 \mu\text{m/h}$ 以上に上げることが可能となった。めっきの外観についても問題がなかった。

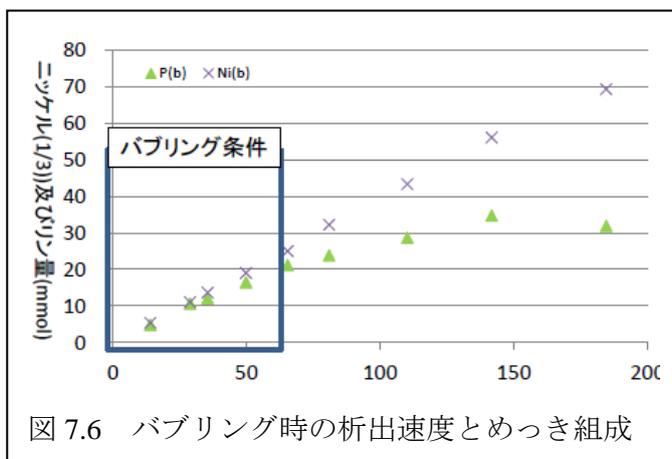


図 7.6 バブリング時の析出速度とめっき組成

ESCA によるめっき皮膜断面のリン量とニッケル量の分布分析結果を図 7.7 に示す。リン量は、基材との界面において 5%と低く、皮膜表面で目標値の 14.5%に達する傾斜組成となっていた。めっき皮膜組成が場所により異なっていること、また、析出速度が大きかった理由は、リン含有量が少なかったことによることが明らかになり、バブリング法で作製する皮膜は、製品として適さないと判断された。

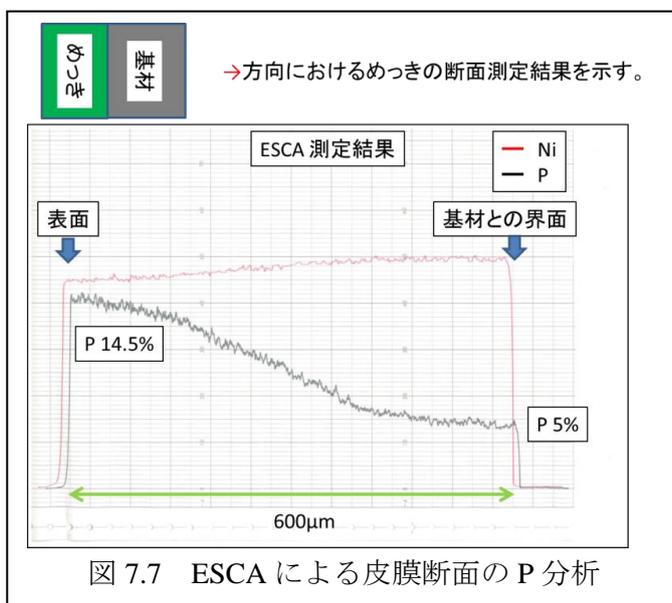


図 7.7 ESCA による皮膜断面の P 分析

7.3 めっき表面の小突起物の生成原因と対策による平坦化

7.3.1 小突起物の調査

フレネルレンズ用金型の試作に際し図 7.8 のような小突起物が観察された。小突起は皮膜の切削時に切削工具を損傷させる可能性があり、組織及び組成的に欠陥である可能性があり小突起物を詳細に観察した。小突起部分の断面写真を図 7.9 に示す。またシ

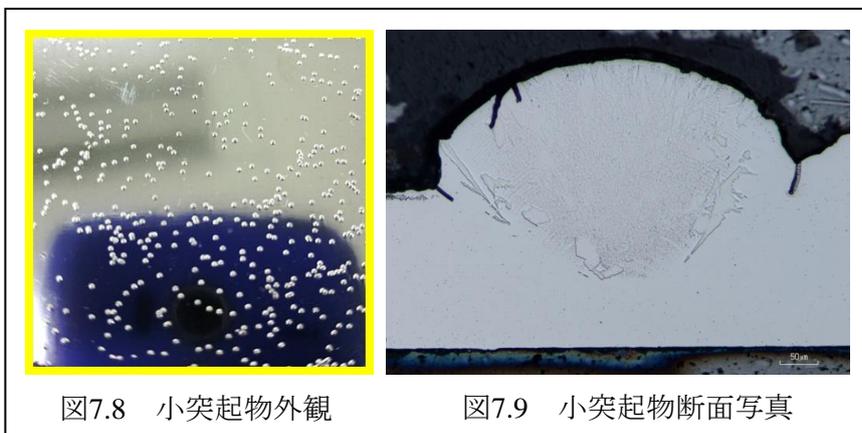


図7.8 小突起物外観

図7.9 小突起物断面写真

ユウ酸で電解エッチングを行った断面部の拡大写真を図 7.10 では、年輪のような縞模様が観察された。一般的に Ni-P 合金めっきにおいて、リン含有量は、pH 依存性が高く、かくはんと激しい水素発生による界面の極微小な pH 変動（ゆらぎ）によって、リンの濃淡が発生する。そのため、縞模様として観察されたと考えられる。この縞模様を観察すると、突起部と正常部では、その幅が異なり、突起部のほうが大きいことがわかった。このことから、めっきの析出速度は突起部のほうが正常部よりも大きいと考えられる。

断面観察から、突起部はある起点から扇状に成長していると考えられる。小突起物は、流量が高く、電流密度が小さいときに、発生しやすい傾向にあった。めっき液成分の界面への供給量の変化あるいは、成長促進成分の吸着が原因と考えている。しかし、起点ができる原因については推測の域であり、今後補完研究により解明をしてゆく。

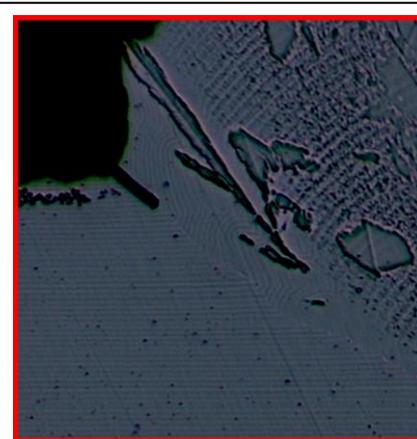


図 7.10 エッチング組織

図 7.11 に突起部およびその周辺部の EPMA によるスポット分析の結果を示す。この結果より突起部はリン含有量が正常部と比較して高いことがわかった。また、突起部が結晶化しているかどうかを電子線後方散乱回折法（EBSD）により調査した。電子線を走査しながら菊池パターンを測定、解析することで、微小領域の結晶系や結晶方位の分布に関する情報が得られる。突起部の観測で、菊池パターンが現れたことから、突起物は結晶構造であることがわかった。この理由については、現在のところわかっていないが、次年度以降の補完研究で、明らかにしてゆきたい。

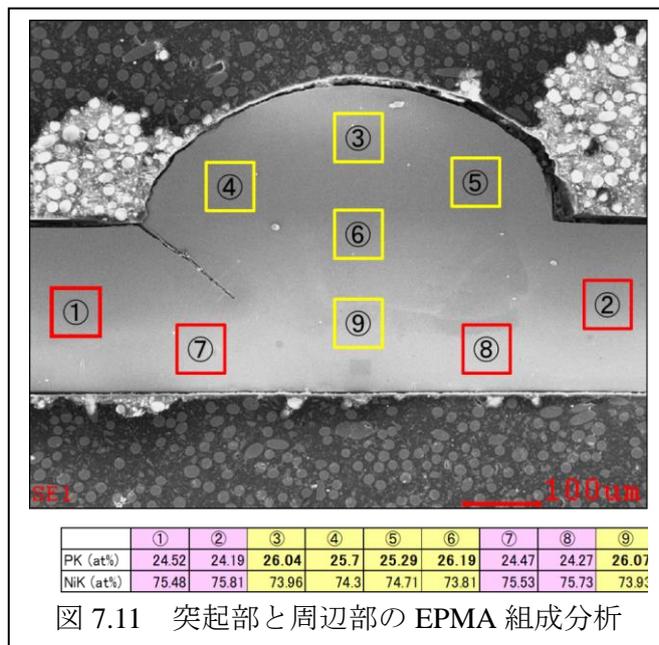


図 7.11 突起部と周辺部の EPMA 組成分析

7.4 パルスおよびバイポーラ電源めっきを使用しためっきの平滑化とめっき速度

電流の ON/OFF 時間を制御するパルス電源を用いてめっき施工するとめっきの角部の盛り上りを抑制し、平滑にめっきできることが知られている。しかし、本テストではめっき剥離が生じ、良好な結果が得られなかった。

次に、めっき電極をマイナスとプラスに交互変換できるバイポーラ電源（PR と略）を使うことで、めっきの析出と溶解を繰り返しながらめっきする PR 電解法の検討をおこなった。通常の直流電源（DC）を使っためっきでは、角部の電流密度が強くなり、角が盛り上がっためっきになる。しかし、PR 電解法では、角

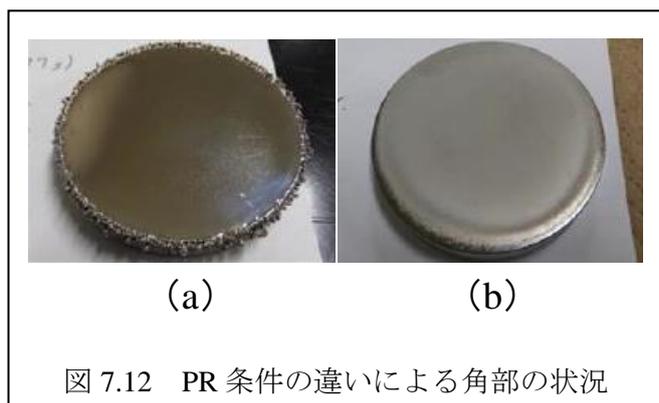


図 7.12 PR 条件の違いによる角部の状況

部の溶解電流密度も強くなることから、溶解と析出のバランスを適切に制御することにより、平滑なめっきが得られる。図 7.12 に角部の盛り上がり強く残る PR 条件 (a) と角部の盛り上がりをなくした PR 条件 (b) のめっき外観を示す。

種々の PR 条件でテストし、リン含有量と析出速度の関係を、DC と PR を比較した結果を図 7.13 に示す。目標とするリン量 14wt% を中心とするゾーンを図中に示した。適正なリン量での析出速度は本研究の目的である $15\mu\text{m/h}$ を超えることができた。また、膜厚均一性は、従来の DC 電源によるめっき皮膜に比較し約 10%改善した。しかし、膜厚偏差は約 140%と高いため、今後この偏差を 10%となることを目標として補完研究を行う。また、めっき皮膜の切削性についても補完研究にて確認する。

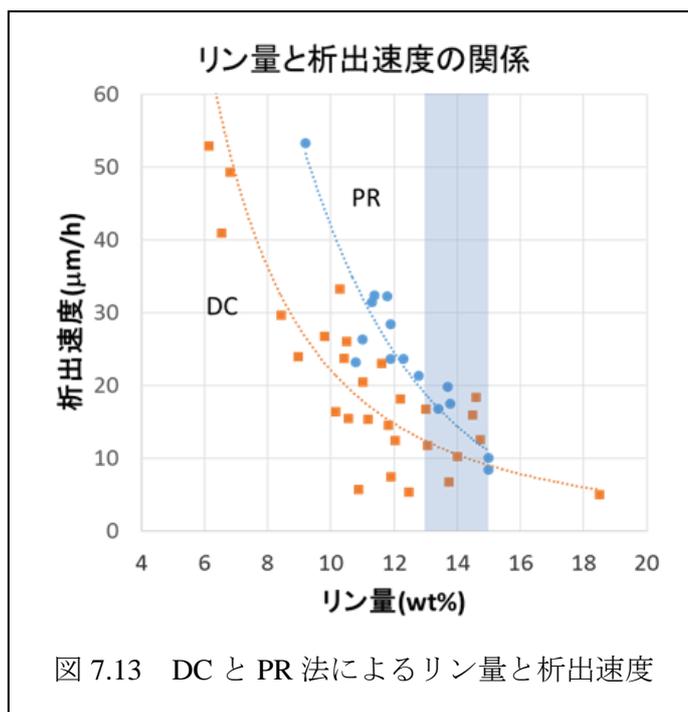


図 7.13 DC と PR 法によるリン量と析出速度

7.5 第 7 章のまとめ

- 1) めっき析出速度を現状 $5\mu\text{m/h}$ から目標 $15\mu\text{m/h}$ の達成を目的とした。従来法で電流密度を上げる方法では、含有リン量が不足した。めっき液成分の拡散促進法として、めっき液の攪拌法やバブリング法を試みた。結果、めっき析出速度は向上したが、 $15\mu\text{m/h}$ 以上の場合、適切なリン含有量を得ることができなかった。
- 2) めっき皮膜の平坦性や品質低下の原因である小突起について検討した。断面観察結果から、突起部は、ある起点から扇状に成長していた。まためっき液流量が大きく、電流密度が小さいときに、発生しやすい傾向にあった。めっき液成分の界面への供給量の変化あるいは、成長促進成分の吸着が原因と考えられるが、今後補完研究により解明をしてゆく。
- 3) バイポーラ電源を用いためっき法により、リン含有量が適正なめっき皮膜の析出速度 $15\sim 20\mu\text{m/h}$ を達成した。また、皮膜の平坦性を 10%改善し、角部の異常析出も改善させることができた。このめっき皮膜について、切削性の評価ができておらず、補完研究にて行う。

第8章 全体総括

1. 試作フレネルレンズ(160×160)の集光効率は、自作評価装置で88.5%を示し、最終目標の85%を達成した。しかしながら、離型性が困難であり生産性に課題があることから、抜き勾配を増加させたレンズの設計製作を実施し連続成形を可能とした。そのレンズの集光効率は89.7%となり、市販プレス品の83.4%を上回った。さらに長岡技術科学大学の高平行シミュレータによる測定においても、光学的効率が0.780を示し、プレス品の0.738より高い値となった。今後、補完研究として長岡技術科学大学の支援によりレンズの屋外評価試験も実施予定である。
2. 5つのレンズを組み合わせて構成される複合フレネルレンズを基材への快削性めっきおよび精密切削加工によりレンズコアを製作し、各レンズを組立て一体化した金型を製作した。加熱冷却システムを活用した高転写性射出成形を実施し試作品を作製した。
3. 射出成形による金型から成形樹脂レンズへの平均転写率は98%となった。さらに離型性改善のため抜き勾配を増加させたフレネルレンズでは95.3%となり最終目標の95%は達成した。その際、射出成形工程において加熱冷却システム含めた成形条件を調整し、サイクル時間は20秒短縮することができた。
4. 単結晶ダイヤモンド工具による快削性めっきの切削加工において、面粗さ10nmの鏡面加工目標は平面の工具送り切削で達成した。レンズ形状の切削でも目標値は達成できたが、面粗さが悪くなる傾向にあった。補完研究にて、切削形態および条件を検討する予定である。
5. 切削加工時の目標工具寿命10000mはV溝加工試験で達成した。実際のレンズ切削では、製品であるレンズの集光効率の目標値は達成されているものの面粗さについても課題が残った。切削加工法の違いによる工具寿命や面粗さが違ってくる原因について、補完研究にて追求していく。
6. 切削性に優れる皮膜組成を確立し、また、シミュレーション技術による角部の異常析出抑制法を検討し、皮膜で500 μ m以上の厚さに被覆したフレネルレンズ用めっき金型を作製した。切削性に優れるめっき皮膜は約1at%を含有しており、皮膜結晶化温度300 $^{\circ}$ C以上においても多量の水素を内部に残存した。切削性との関係が考えられた。
7. めっき液自動分析管理装置、キャピラリー電気泳動装置およびTOC計により、めっき液中の副生成成分も含めた全成分の分析・管理法を確立した。一方、めっき皮膜の切削性評価法として、せん断発生状況の解析法により再現性も確認した。
補完研究として、めっき品質に悪影響を与える表面形成小突起物の発生原因の究明を行う。
8. 攪拌法およびバブリング法で、目標析出速度15 μ m/hを試みたが、品質よい皮膜を製造することができなかった。一方、バイポーラ電源めっき法では析出速度15~20 μ m/hを達成できた。平坦性や角部の異常析出も抑制できた。補完研究で切削性の評価を行う。