

平成21～23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「微細構造・高硬度金型の超精密微細加工技術と
成形技術の開発」

成果報告書

平成24年3月

委託者 関東経済産業局
委託先 株式会社 長津製作所

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	2
第2章 マイクロエンドミル工具と微細形状の精密かつ高能率な微細切削技術の開発	3
2-1 マイクロエンドミル工具と微細切削技術の現状とその問題点	3
2-2 提案技術の内容（技術の新規性，独創性，改善性又は技術基盤強化性）	3
2-3 解決方法の具体的実施内容	4
2-3-1 cBN 製マイクロフライス工具の試作	4
2-3-2 PCD 製マイクロフライス工具の試作	6
2-3-3 単結晶ダイヤモンド製半月形状マイクロフライス工具の試作	6
2-3-4 PCD 製マイクロフライス工具の製造標準化と極小化	6
2-3-5 単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具の製造標準化と極小化	7
第3章 リニアモータ・ボイスコイル・圧電アクチュエータ応用研磨ヘッドの開発	8
3-1 リニアモータ・ボイスコイル・圧電アクチュエータ応用研磨ヘッドの 現状とその問題点	8
3-2 提案技術の内容（技術の新規性，独創性，改善性又は技術基盤強化性）	8
3-3 解決方法の具体的実施内容	8
3-3-1 ボイスコイルモータを利用した低研磨荷重装置の設計	8
3-3-2 リニアモータ・圧電アクチュエータ利用の 直線・曲線振動研磨ヘッドの設計	9
3-3-3 ボイスコイルモータ・リニアモータを 利用した低荷重研磨装置の試作・開発	10
3-3-4 リニアモータ・圧電アクチュエータ利用の 直線・曲線振動研磨ヘッドの試作・開発	10
3-3-5 3軸（X, Y, Z）制御の研磨システムの開発	13
第4章 多自由度方向制御可能な研磨システムの開発	14
4-1 自由度方向制御可能な研磨システムの現状とその問題点	14
4-2 提案技術の内容（技術の新規性，独創性，改善性又は技術基盤強化性）	14
4-3 解決方法の具体的実施内容	14
4-3-1 超音波2軸振動子によるポリシャ先端の挙動解析	14
4-3-2 多自由度で研磨方向を制御可能な自動化された研磨システムの開発	15
4-3-3 圧電素子型研磨システムの検証	17
4-3-4 低周波振動ユニット援用時の研磨特性	18
4-3-5 リブ形状の側面研磨特性	20
第5章 非接触機上測定装置の開発	21
5-1 非接触機上測定装置の現状とその問題点	21
5-2 提案技術の内容（技術の新規性，独創性，改善性又は技術基盤強化性）	21
5-3 解決方法の具体的実施内容	22
5-3-1 リアルタイム測定システム	22
5-3-2 加工・機上計測の実践	23
5-3-3 補正加工の実践と検証	23
5-3-4 フレネル形状の計測及び評価	24

第6章	微細形状の成形転写技術の開発	25
6-1	微細形状の成形転写技術の現状とその問題点	25
6-2	提案技術の内容（技術の新規性，独創性，改善性又は技術基板強化性）	25
6-3	解決方法の具体的実施内容	25
6-3-1	集光型太陽電池用フレネルレンズ	25
6-3-2	フレネル形状の研削	29
6-3-3	マイクロチャンネル（シリコーン樹脂など）	31
6-3-4	半導体検査用マイクロプローブ	33
第7章	全体総括	35

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

デジタル情報家電・カメラ等の光学素子だけでなく、自動車・医療機器等あらゆる川下製造業で、超精密微細加工技術と成形技術の有効利用が進められている。

特定ものづくり基盤技術高度化指針のうち、

- (二) 金型に係る技術に関する事項 1 金型に係る技術において達成すべき高度化目標
- (5) その他 の項目で

記載の川下製造業者の抱える課題及びニーズにおける、研究開発の背景やこれまでの取り組みは下記の通りである。

ア. 高精度化・微細化

デジタル情報家電機器、太陽光発電システム、 $\mu T A S$ などにおける微細な溝構造を有する金型の高精度・微細な加工技術が必要とされている。

ウ. 大型化・小型化

デジタル情報家電機器（青紫色レーザ光ディスク）や携帯電話内蔵デジタルカメラでは、小型化とウエハーレベルでの組み込み（WLC）などの小型化技術が要望されている。一方で、太陽電池パネルや $\mu T A S$ においては微細な形状を有しつつさらに大型化が求められている。

エ. 複雑形状化

ウエハーレベルでの組み込みには、電子回路パターンに対応した複雑化が求められており、太陽電池集光パネルや $\mu T A S$ では同心円状等の単純な形状ではない複雑な形状の加工・仕上げ技術が求められている。

キ. 環境配慮

超微細複雑形状により、光学素子の少量化が達成され、また太陽光発電の集光化によりエネルギー吸収の効率化が求められている。

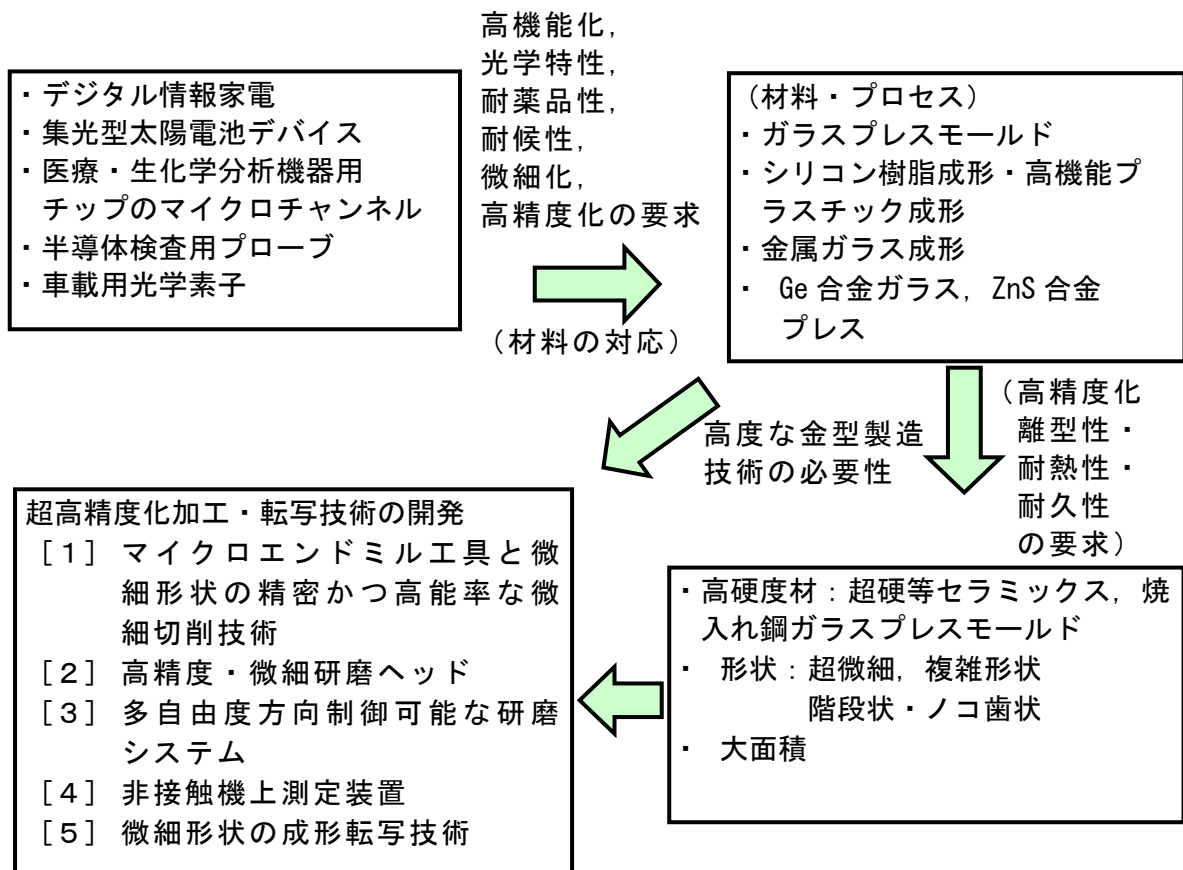
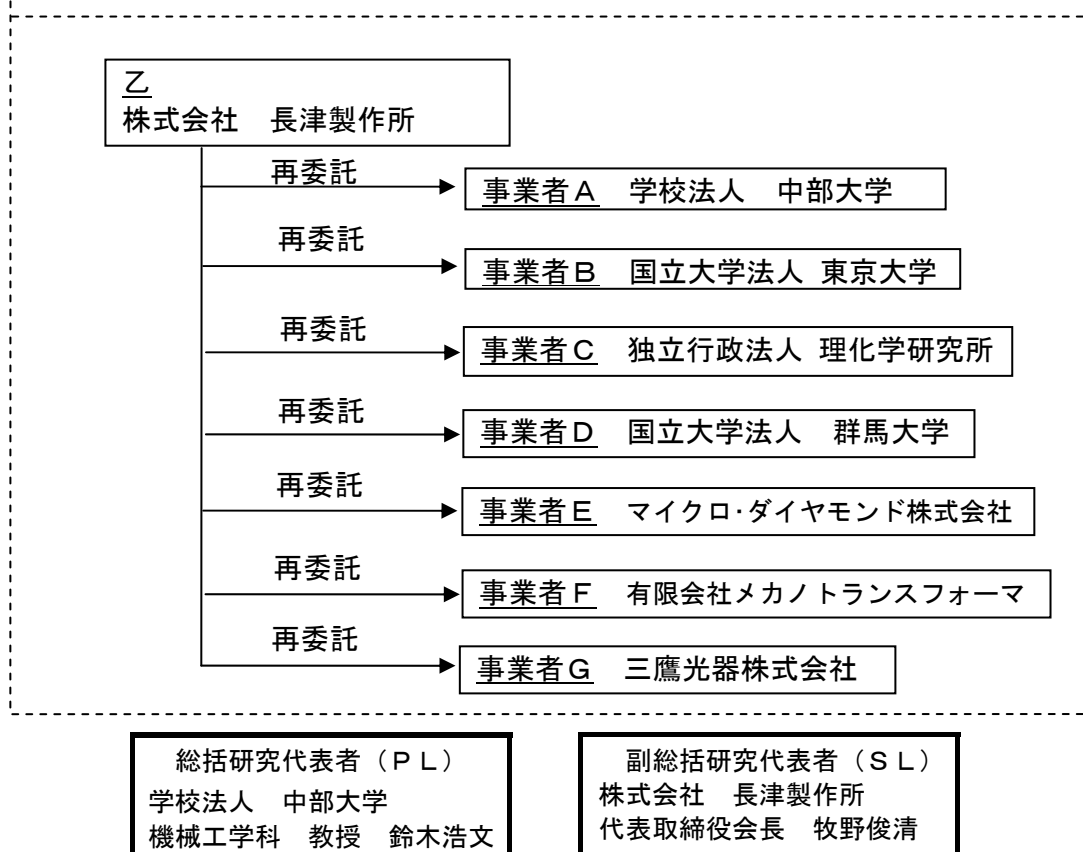


図 1.1 研究開発概念図

これまで、デジタルカメラ、カメラ付き携帯電話、DVD、光通信用デバイスなどデジタル家電用のマイクロ非球面ガラスレンズ用セラミック型とガラスレンズは、近年の超精密研削・切削・研磨技術と計測技術の目覚ましい研究開発により量産加工が実現し、様々なデジタル家電が普及した。しかし、これらの技術は韓国、台湾はじめ東アジアにおいても一部で製造が可能となり、世界的には需要が伸び続けてはいるが、供給が増え、低価格化、高機能化がさらに必要となり、日本のものづくり、特に中小企業においても厳しさを増している。このような状況を打破するには、これまで培われた光学デバイス用の超精密非球面加工技術を応用し、デジタル情報家電機器のみならず、太陽光発電システム、 μ TASなど医療分野、半導体検査など精密微細部品全ての分野に転用することが、新しいマーケットの開拓という意味においても重要となっている。とくにこれらの領域では、精密加工技術の低コスト化と新しいプロセスの開発が重要な課題である。特に、環境負荷という観点からは、高精度な光学素子であっても製造に必要なエネルギーを削減することが求められ、特に太陽光発電に関してはエネルギーペイバックタイムに大きな影響がある（図 1.1）。

1-2 研究体制



第2章 マイクロエンドミル工具と微細形状の精密かつ高能率な微細切削技術の開発

2-1 マイクロエンドミル工具と微細切削技術の現状とその問題点

一般的な非球面光学素子などのように滑らかな表面形状を有する金型の場合は、金型材が無電解 Ni-P めっきのようなアモルファス金属では、図 2.1(a)に示すような単結晶ダイヤモンドバイトにより、超精密加工される。また、超合金などのセラミックス型では図 2.1(b)に示すようなダイヤモンドホイール（砥石）により超精密研削されている。課題は次の点である。(a) 耐摩耗性の向上、(b) 微細工具形状の創成が必要、(c) 工具の精密セッティングが困難である。



(a) 単結晶ダイヤモンドバイト
(b) ダイヤモンドホイール（砥石）
図 2.1 従来工具

さらに、近年、デジタル情報家電や集光型太陽電池デバイス、医療診断用チップのマイクロチャンネルなどのアプリケーションにおいては、鋸歯状や階段状の微細な構造を持つ金型が必要とされている。こうした金型は、微細な構造を有するだけでなく、エッジのシャープさや表面粗さなども同時に必要とされるようになった。

単結晶ダイヤモンド工具による無電解ニッケルメッキなどの軟質金属の超精密切削加工あるいは手動による研磨以外の方法ではこうした微細構造を有する金型の作成は不可能であった。超精密切削加工による軟質金属金型は、耐熱温度等に問題があり高温を有するガラス成型等への適応が困難であった。また手動の研磨による方法では、作業者の技能によりシャープエッジの維持が困難である、表面粗さのばらつきが大きい、また仕上げ作業に非常に長い時間がかかるという問題点があった。さらに、環境負荷を低減したものづくりが求められている現状を勘案すると、希少元素や製造に大きなエネルギーを必要とする材料を多用した製品ではなく、汎用的な材料で低環境負荷な加工手法に基づく金型の製造技術の開発が必要とされている。

2-2 提案技術の内容（技術の新規性、独創性、改善性又は技術基盤強化性）

上述のような微細形状を持つ形状を高精度に対しても、研磨加工の前段階として精密加工する必要がある。そこで、本提案では、軟質金属を単結晶ダイヤモンド工具で切削する場合と異なり、プラスチックあるいはガラス成型金型に適したセラミック材料や焼入れ鋼を精密加工するため、超微粒 PCD 工具や超微粒 cBN 切削工具等の開発を行い、研磨の前段階まで達成可能な加工技術の開発を行うものである。

半導体用プローブ用の金属ガラスを成形し、あるいは金型の成形寿命を長くするためには、耐熱性の要求から超合金やセラミックスなどが必要である。従来の加工方法は単結晶ダイヤモンドによる切削加工のため、無電解 Ni めっき金型しか用いることが出来なかった。あるいはダイヤモンドホイール（砥石）を用いた研削加工でなければ、超精密加工することはできず、複雑形状の微細溝の研削加工は不可能であった。しかし、本提案の先端が鋭利な刃先で構成されるマイクロフライス工具を用いると、従来切削加工が不可能であった鏡面切削が以下の理由で可能になると考えられる。

- (1) 見かけの切込み(a)が大きくても実切込み(h)は極微小
- (2) 回転工具 → 工具の輪郭度は工作物形状に影響しない
- (3) 断続切削 → 工具温度/工具摩耗の低減

工具形状は図 2.2 および図 2.3 に示すように円筒・円盤状の工具のエッジの全周に超精密研削により微小な切れ刃を設けるものである。このような手法により、多結晶 cBN や多結晶ダイヤモンド (PCD) でこのような形状を創成し、ナノレベルで切り込みを与えることにより回転させながらフライス加工するものである。鉄系の焼入れ鋼製金型の精密加工に対しては多結晶 cBN 製工具を用い、超合金や SiC 製の金型の精密加工に対しては多結

晶ダイヤモンド（PCD）工具を用いる。

このような工具を用いることのメリットは、以下の点である。

- (1) 従来の砥石を用いる研削加工では、フレネルレンズ金型などのように微細な形状やシャープな段差などの加工は極めて困難であったが、可能になる。
- (2) 工具の機上成形が不要。
- (3) 断続切削のため工具の温度上昇が小さく、その結果、工具摩耗が小さくなり、高効率に精密加工が可能となる。

本提案により、cBN や多結晶ダイヤモンド（PCD）工具等の先端的材料を使用した工具を開発し、焼入れ鋼、超硬合金、セラミックス加工用の超精密微細加工を検討する。

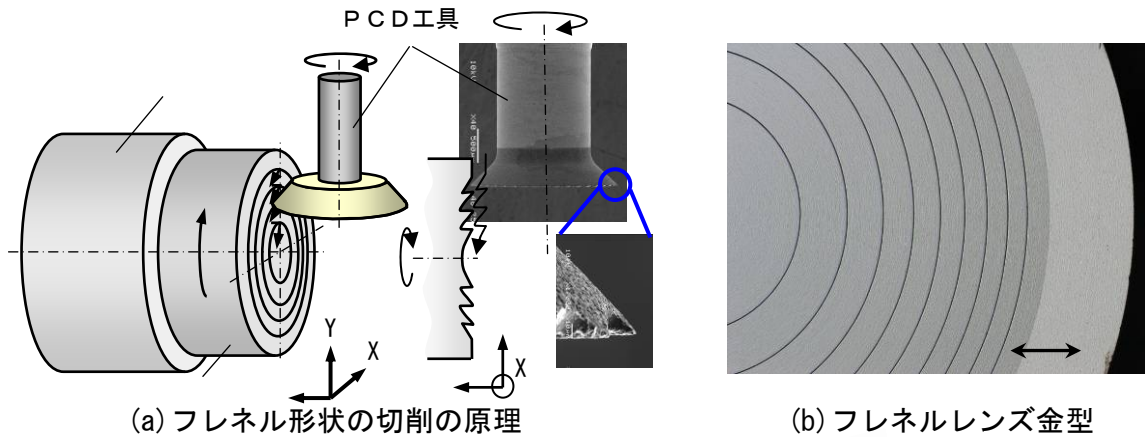


図 2.2 フレネルレンズ金型（超硬）切削用 PCD 製エンドミル（現状：無電解 Ni ⇒ 目標：超硬）

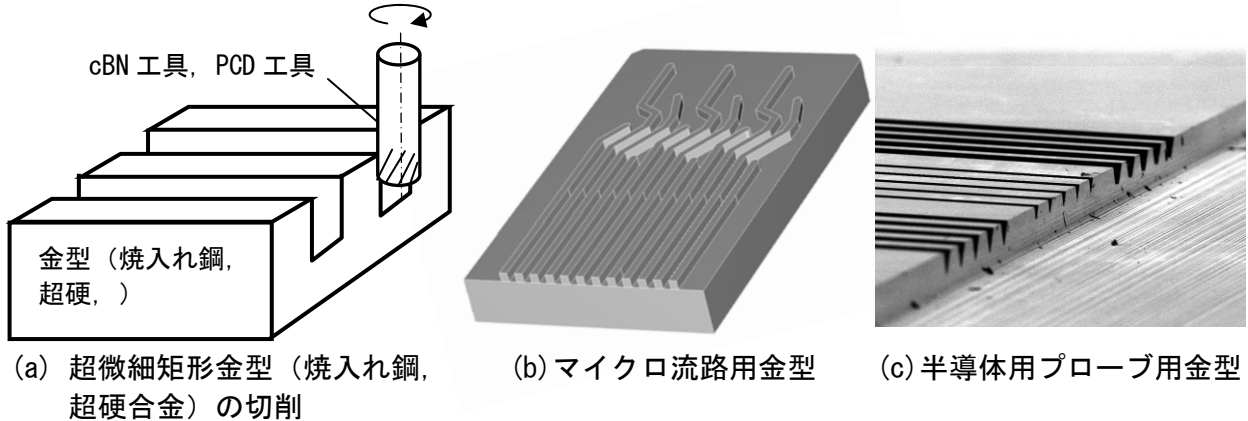


図 2.3 矩形形状の超微細金型（現状：無電解 Ni ⇒ 目標：焼入れ鋼，超硬）

2-3 解決方法の具体的実施内容

2-3-1 cBN 製マイクロフライス工具の試作

多刃形状のスクエアエンドミルのほかに切れ刃コーナー部に R 形状を持つラジラスエンドミルも試作した。それぞれの略形状は図 2.4 に示す通りである。

スクエア形状については前年度に試作した製造条件から予定通りの加工時間と精度で完成できた。次年度では NC 機による製造条件出しと試作を行い、さらなるコスト低減と量産体制の準備を実施したい。一方、ラジラス形状については切れ刃創製時の砥石磨耗が想像以上に激しく、ドレッシング作業（砥石を整形する作業）を頻繁に行わなければならない、あらためて砥石を選定し直す必要があると判断した。工具としては様々な用途に使用出来る可能性があり、次年度では NC 機による製造標準化まで完了させたい。

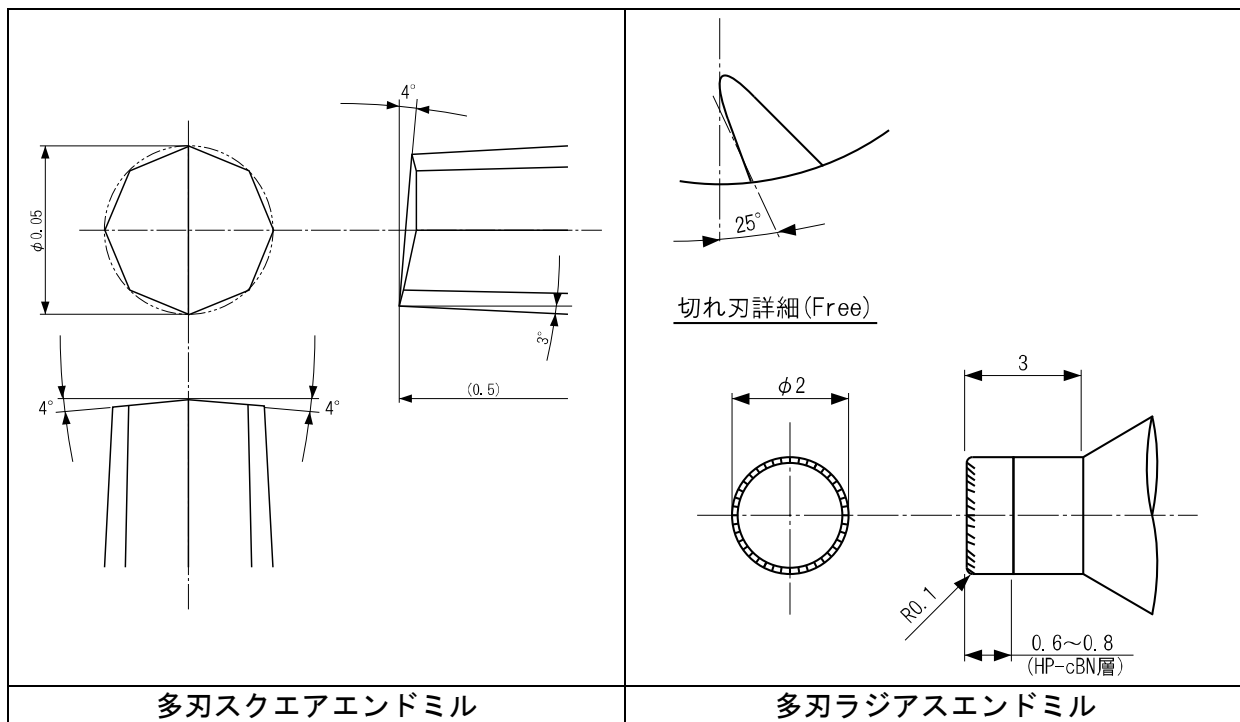
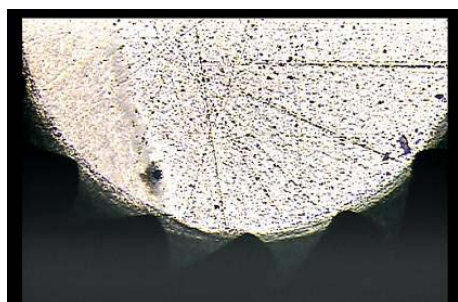


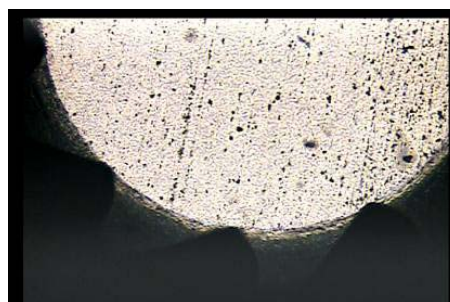
図 2.4 cBN 製マイクロフライス工具

高硬度材の高精度・高品位加工用として、今後の需要増加が見込まれる cBN 製のマイクロ多刃工具の製造標準化作業を実施した。さらに、2 枚刃形状での極小化も実施した。

多刃工具では切れ刃数が多い方が切削作業には有利であるが、切れ刃数が多くなるとひとつひとつの切れ刃のすくいポケットが浅くなるため、切削中の磨耗により早く浅くなってしまい、切削効率に比して短寿命となることも考えられる。前年度には 15 枚の切れ刃数のものを試作したが、今年度は図 2.5 に示すような 15 枚のものと寿命を重視した 8 枚のものをそれぞれ 10 本製作した。いずれの場合も安定した研磨作業を行うことが出来、完成品のスペックにおいてもすべて設定公差内に入れることが出来た。さらなる量産化と製造コスト低減のためには全自動機による製造を視野に入れたホイールの選定と研磨条件の開発が今後の課題となる。



(a) 切れ刃数 15 枚



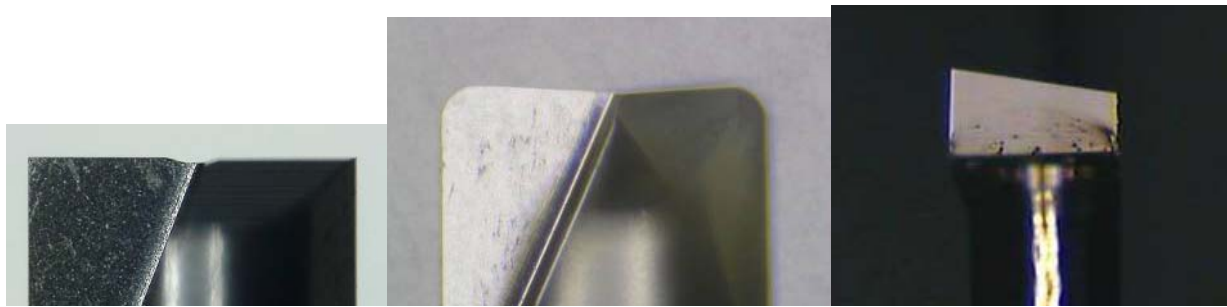
(b) 切れ刃数 8 枚

図 2.5 cBN 製マイクロフライス工具

次に図 2.6 に示すように cBN 製マイクロフライス工具の極小径化の限界についての検証を行った。最も基本的な 2 枚刃のスクエアエンドミルとラジウスエンドミルについて、安定的に製造できる最小径の確認を行った。当初 $\phi 0.05\text{mm}$ サイズでの製造を行ったが、歩留まりは約 50%であった。そこで、サイズを $\phi 0.1\text{mm}$ にして行ったところ、ほぼ 100%の歩留まりで完成させることが出来た。

除去体積の違いによる切削抵抗などが歩留まり同様の極小化について 1 枚刃形状でも実施したところ、 $\phi 0.05\text{mm}$ までを安定的に完成させることが出来た。これは除去体積の違いによる折損等のリスクが低かったことが要因と考えられる。

2 枚刃形状の $\phi 0.1\text{mm}$ 未満については、研磨抵抗の低減と研磨効率の両立を今後の課題とした。



(a) $\phi 0.1\text{mm}$ 2枚刃 スクエアエンドミル
 (b) $\phi 0.1\text{mm}$ 2枚刃 ラジラスエンドミル
 (c) $\phi 0.05\text{mm}$ 1枚刃 スクエアエンドミル

図 2.6 cBN 製マイクロフライス工具の極小径化

2-3-2 PCD 製マイクロフライス工具の試作

超硬あるいは硬脆材料の切削加工用として PCD 製のマイクロ工具を試作した。こちらについても前年度に製造条件出しを行った多刃形状のスクエアエンドミルを試作し、予定通りの加工時間と精度で完成できた。次年度では NC 機による製造条件出しと試作を行い、さらなるコスト低減と量産体制の準備を実施したい。工具形状は図 2.7 に示す通りである。

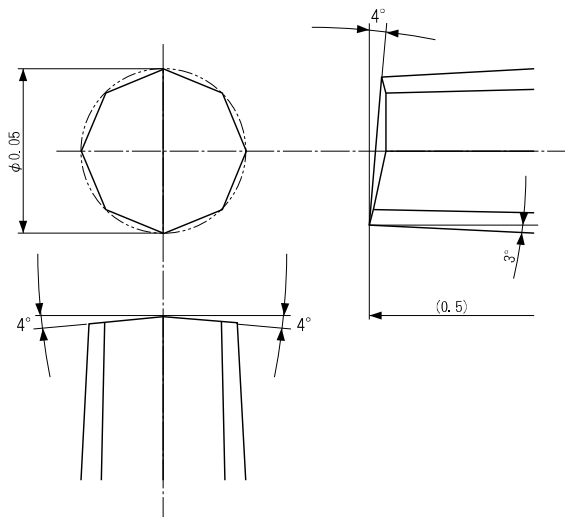


図 2.7 多刃スクエアエンドミル

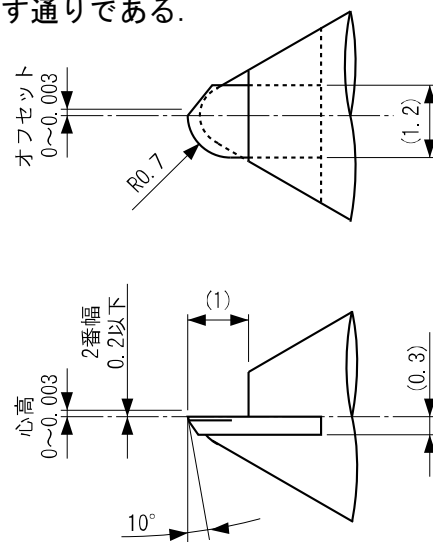


図 2.8 半月形状マイクロフライス工具

2-3-3 単結晶ダイヤモンド製半月形状マイクロフライス工具の試作

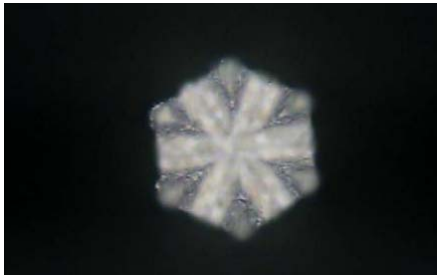
今年度の「微細形状の成形転写技術の開発」【5-4】にあるマイクロ WLC レンズ加工用として単結晶ダイヤモンド製の半月形状のエンドミルを試作した。工具の研究開発項目には無い試作ではあるが、成形部門の研究開発に必須の工具であるため追加で行うこととした。単結晶ダイヤモンドには結晶方位があり、耐摩耗性の高い方位を避けて切れ刃を研磨創製する必要がある。しかしながら、半月形状では切れ刃に必ず耐摩耗方位を含むため、ピンポイントで適正な研磨条件を見出さなくてはならない。この点については、当社がこれまで蓄積してきた切れ刃創製のためのノウハウにより高精度で鋭利な切れ刃を持つ工具が完成できた。工具概略は図 2.8 に示す通りである。

2-3-4 PCD 製マイクロフライス工具の製造標準化と極小化

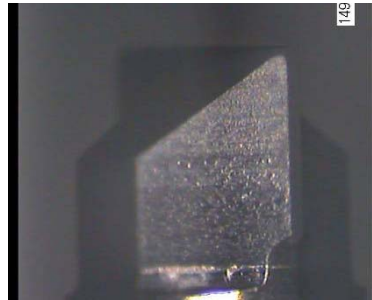
超硬材料への切削加工用として、PCD 製のマイクロ工具の製造標準化作業を実施し、さらに極小化の検証も行った。PCD は結晶方位の依存性が無く、特に極小径の切れ刃研磨は最も難しい作業のひとつである。図 2.9 に示すように cBN 同様に多刃工具と 2 枚刃形状を製作した。

多刃工具の全体形状は cBN の場合とほとんど同じであるが、PCD については切削抵抗の低減と切り屑の排出性向上を狙って底部に逃げ溝を付加した。研磨抵抗がホイール剛性あるいはチャック剛性をやや上回ったために溝形状が乱れてものもあったが、切削加工自体にはあまり大きな影響は無いと思われる。

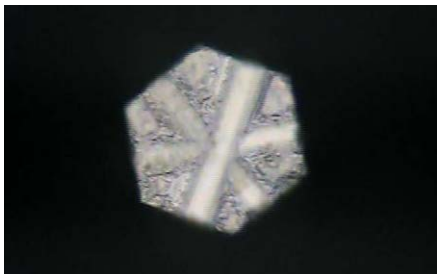
次に、図 2.10 に示すように変形の 2 枚刃形状のスクエアエンドミルとラジラスエンドミルについて、刃径 $\phi 0.05\text{mm}$ での製造標準化を行った。すくい面を鈍角に取ることで、ロー付け強度が維持され $\phi 0.05\text{mm}$ までの極小径化が可能となった。但し、歩留まりの点では $\phi 0.1\text{mm}$ 以上ではほぼ 100%であったのに対し、 $\phi 0.05\text{mm}$ では約 30%であった。



(a) 均一な底面逃げ溝形状



(a) $\phi 0.05\text{mm}$ スクエアエンドミル



(b) 溝が曲がってしまったもの



(b) $\phi 0.05\text{mm}$ ラジラスエンドミル

図 2.9 PCD 製マイクロフライス工具

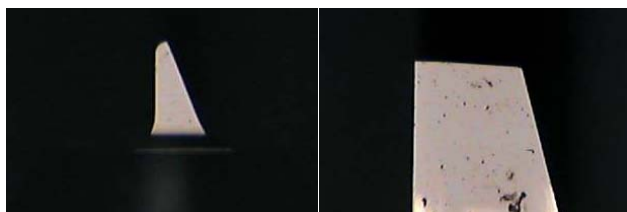
図 2.10 2 枚刃形状のエンドミル

2-3-5 単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具の製造標準化と極小化

単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具については、 $\phi 0.5$ 前後までの製造標準は完成しており、今年度は極小化とその製造標準化に取り組んだ。単結晶ダイヤモンド工具は結晶方位などの関係から一般的には 1 枚刃形状となるが、独自デザインによる多刃形状でも作業を実施した。

特に光学分野での需要が見込まれる 1 枚刃ボールエンドミルについては、ほぼ 100%の歩留まりで $R20\mu\text{m}$ までの製造標準化を完成させた。それ以下では $R15\mu\text{m}$ の場合で歩留まりが約 30%であった。最先端分野からは $R10\mu\text{m}$ までの開発要請があり、今後の継続課題とした。同様にラジラス形状とスクエア形状についても極小化と製造標準化に取り組んだ(図 2.11)。これらについては必要な刃長との関係で歩留まりが左右された。刃長が刃径の 50%以下であれば約 80%の歩留まりで $\phi 50\mu\text{m}$ まで製造できる。

多刃工具については、結晶方位の関係からラジラス形状の研磨は今のところ非常に困難なため、スクエアエンドミルについてのみ極小化を実施した。1 枚刃形状と比較して研磨による除去体積が少ないため、最終的に $\phi 20\mu\text{m}$ までにはほぼ 100%完成させることが出来た。



(a) $R20\mu\text{m}$ ボールエンドミル (b) $\phi 80\mu\text{m}$ スクエアエンドミル

図 2.11 単結晶ダイヤモンド製マイクロフライス工具



図 2.12 $\phi 20\mu\text{m}$ 多刃エンドミル

第3章 リニアモータ・ボイスコイル・圧電アクチュエータ応用研磨ヘッドの開発

3-1 リニアモータ・ボイスコイル・圧電アクチュエータ応用研磨ヘッドの現状とその問題点

従来の微小金型の超精密研磨は図 3.1 に示すように回転型研磨工具を用いるものが主流であった。しかし上記のような微細構造を有する金型は、従来の回転型研磨工具や方向性を制御されない揺動型研磨工具では、(a)形状が微細すぎる、(b)金型エッジ部の研磨が困難などの理由で適応できないなどの問題点があった。

研磨荷重付加装置

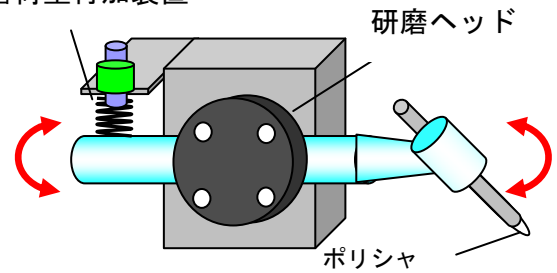


図 3.1 従来の回転工具研磨システム

3-2 提案技術の内容（技術の新規性、独創性、改善性又は技術基盤強化性）

そこで、図 3.2 に示すようなリニアモータやボイスコイル・圧電アクチュエータを利用し、微細構造の溝の方向に沿って研磨可能な研磨システムを開発する。これにより、熟練した技能者が行うようなシャープエッジを残した研磨を自動化して実現することが可能となる。

回転工具研磨する方式では、回転する微小な軟質ポリシャを金型に接触させ、ダイヤモンド砥粒などの遊離砥粒をかけながら研磨する。この方式では、研磨剤が回転工具と金型の間に存在させ、荷重を負荷し、工具の回転による相対移動により研磨が行われる。しかし、微小な工具とはいえ回転させるため、矩形溝を研磨する場合など、そのエッジ部に工具が接触せず研磨残しが生じる。また、接触面積が微小であるために研磨荷重も超微小にする必要があるが、その制御が困難であるために正常な研磨が困難である。それに対して、円柱状のポリシャを用い、その荷重の制御に棒状のボイスコイルを用いるために、微小な荷重のコントロールが可能となる。また、金型とポリシャとの相対速度はリニアモータ、圧電アクチュエータを利用した往復運動を行うため、微細な溝のエッジも良好に研磨することが出来る。

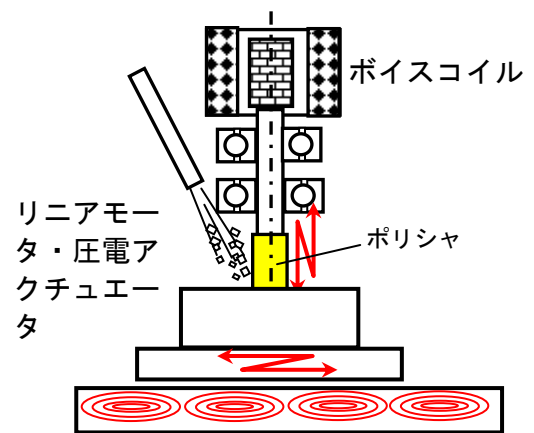


図 3.2 リニアモータ・ボイスコイル・圧電アクチュエータ利用研磨

3-3 解決方法の具体的実施内容

3-3-1 ボイスコイルモータを利用した低研磨荷重装置の設計

低い研磨圧力を安定に実現するため、ボイスコイルモータの選定を行った。その性能表を表 3.2 に示す。そして、電流値で、研磨荷重を制御する必要があり、研磨荷重と電流値との基本実験のセットアップを設計した。セットアップイメージ図を図 3.3 に示す。実験として、図 3.4 に示した通り、電子天秤で VCM の電流値と荷重との関係を計測できるようにした。

表 3.2 ボイスコイルモータ性能

定格推力	6N
ストローク	4mm
推力定数	4.2N/A
可動部質量	25g
全体質量	0.20kg
直流抵抗	1.8Ω
外径 D	Ø42mm
ストローク中央時	35mm

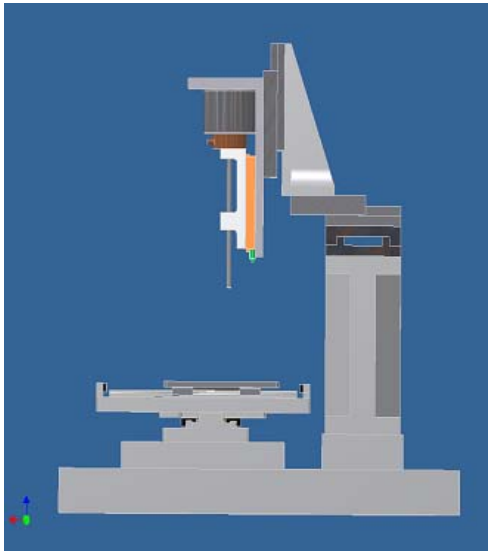


図 3.3 定荷重と電流との関係の実験セットアップ

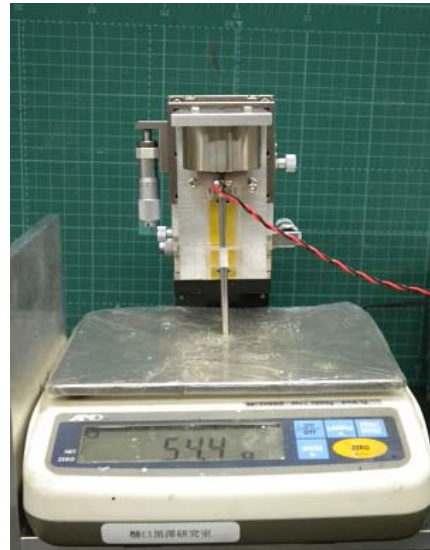


図 3.4 電子天秤による VCM 荷重の計測セットアップ

3-3-2 リニアモータ・圧電アクチュエータ利用の直線・曲線振動研磨ヘッドの設計

研磨振動子をバランス機構に取り付ける際、振動子の自重が非常に大事になってくる。軽い方がバランスを取りやすく、微小荷重を研磨荷重として印加することが簡単になる。設計した、軽量重視振動子のイメージ図を図 3.5 に示す。これは X 軸と Y 軸の方向に振動し、研磨運動をなすだけでなく、3本の圧電素子に適切な駆動波形を印加することによって、X 軸も Y 軸も Z 軸も振動できるように設計を行った。但し、Z 軸につき、変位拡大機構を有しない。

また、荷重载荷装置を図 3.6 に示す。この装置によって、ポリシャに定荷重を加えることができるだけでなく、荷重印加方向以外では動作を抑制できる効果がある。そして、図 3.7 に示したようにヒンジ部ひずみゲージを貼ることで、载荷した荷重を定量的に計測できる。

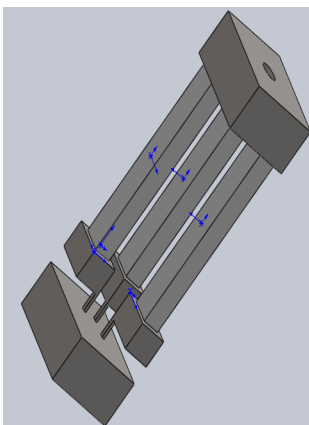


図 3.5 軽量重視振動子

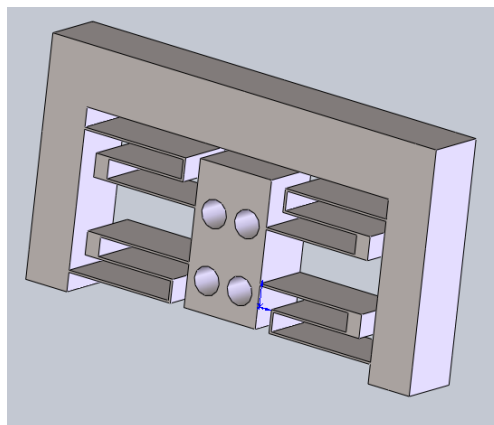


図 3.6 荷重载荷装置

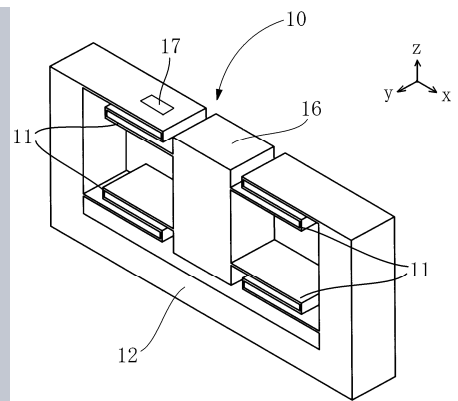


図 3.7 ひずみゲージの貼付例

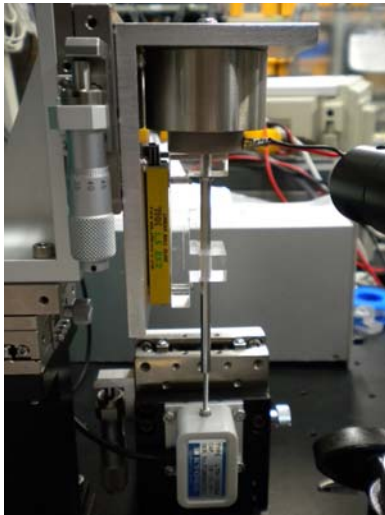


図 3.8 低荷重研磨装置の実験試作

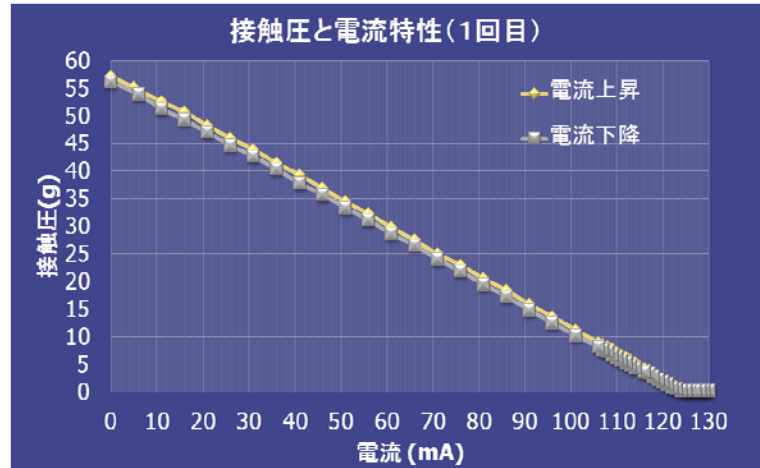


図 3.9 電流 Vs 印加荷重

3-3-3 ボイスコイルモータ・リニアモータを利用した低荷重研磨装置の試作・開発

図 3.8 は、試作した低荷重研磨装置の実験試作を示す。これで、ボイスコイルモータ・リニアモータから構成した装置からの載荷荷重を電流で、コントロールできる実験を実行出来る。載荷荷重はロードセルで検出する。実験結果を図 3.9 に示す。実験結果から、ボイスコイルに印加する電流とロードセルに載荷した荷重とはほぼ比例していることを確認できた。これで、研磨時、ワークに載荷する荷重をボイスコイルの印加電流で制御すれば、最適な研磨荷重を載荷することができる。

3-3-4 リニアモータ・圧電アクチュエータ利用の直線・曲線振動研磨ヘッドの試作・開発

図 3.10 に、VT-7 の試作品写真と立体イメージを示す。A, B, C の圧電素子が L 字配列に並べられ、変位拡大率 10 倍を有する機構で、3 次元動作できるアクチュエータになっている。図 3.11 に変位結果を示す。120V での駆動では 225 μ m の変位を示す。図 3.10 に、VT-7 を用いた研磨の動作原理を示す。

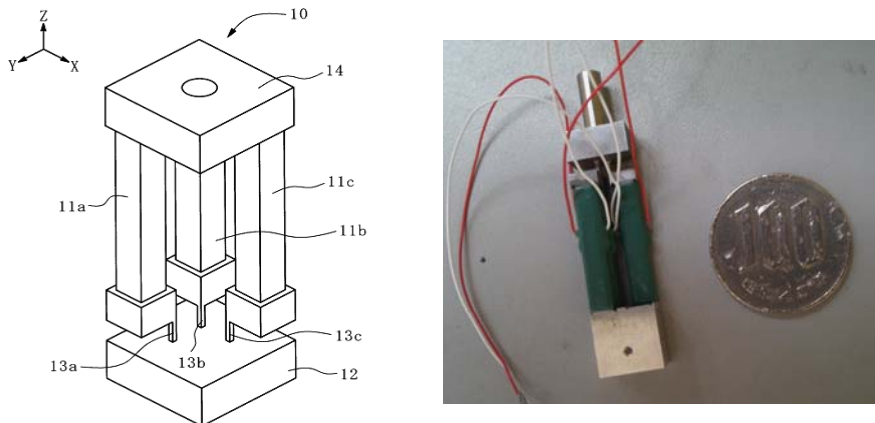


図 3.10 VT7 試作品の写真と立体イメージ図

VT-7 という変位拡大機構を構成する条件を説明する。図 3.10 は、本発明の変位拡大機構の説明図である。ヒンジ部 13a, 13b, 13c から作用部 14 までの長さを r とし、ヒンジ部 13a と 13b 及びヒンジ部 13b と 13c の間隔を d とする。そして、伸縮部材 11a が 11b と 11c に対し、相対的に Δr だけ伸びたときに、又は、伸縮部材 11c が 11a と 11b に対し、相対的に Δr だけ伸びたときに、変位拡大機構 10 が角度 θ 傾斜し、作用部 14 に Δx の変位が生じたとする。

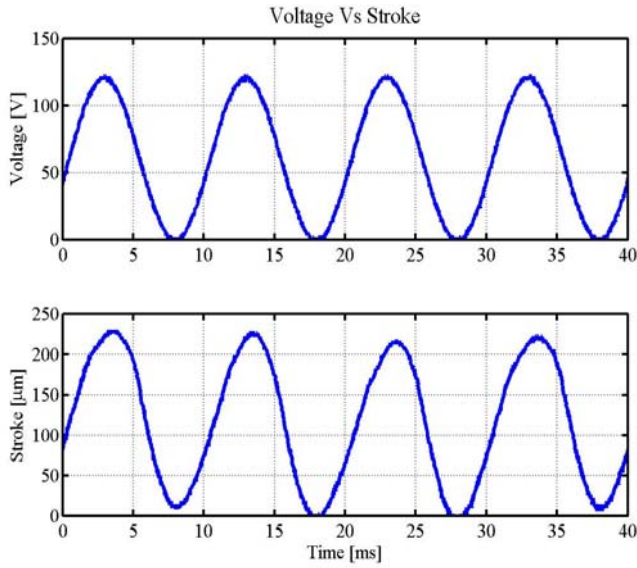


図 3.11 VT-7 の発生変位

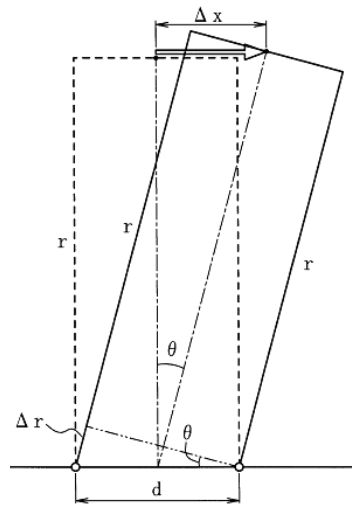


図 3.12 VT-7 拡大率の計算

このとき，図 3.16 より， Δx 及び Δr は，以下のように表せる。

$$\Delta x = r \theta \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

$$\Delta r = d \theta \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

式 (3.1)，(3.2) より，次の関係式が得られる。

$$\Delta x = r / d \cdot \Delta r \quad \dots \dots \dots (3.3)$$

一方で，図 3.13 に VT-15 の試作品写真を示す。各 A, B, C のアクチュエータが相対的に 120 度に配置されている。120 度の位相差で駆動されることで中心に取り付けられているポリシャを 2 次元の円軌跡を実現できる。図 3.14 に VT-15 の発生ストローク $80\mu\text{m}@60\text{V}$ を示す。駆動周波数は 900Hz で実行できる。VT-15 のセンターピースに，図 3.15 のように，研磨ツールを取り付け，ワークを研磨できる。

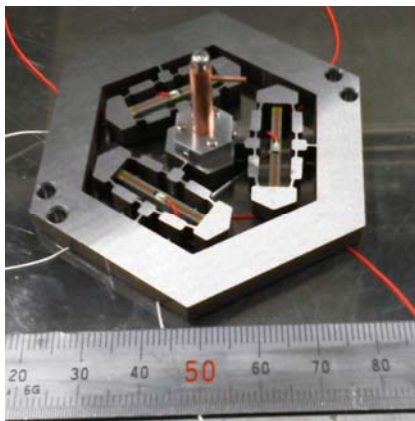


図 3.13 VT15 試作品の写真

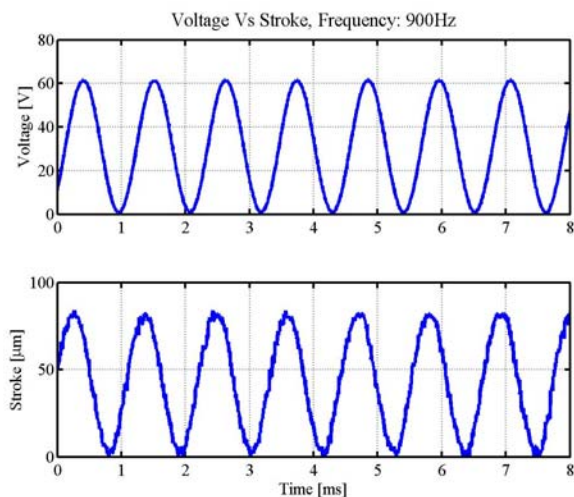


図 3.14 VT-15 の発生変位

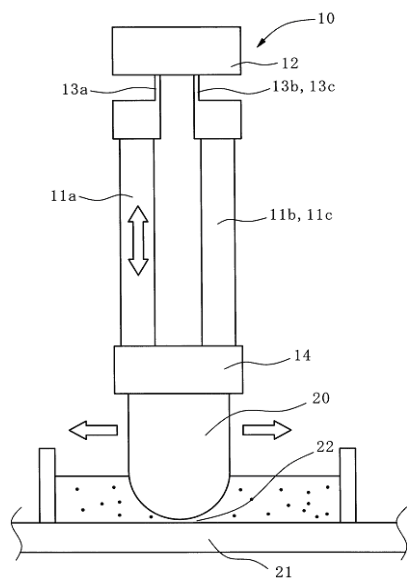


図 3.15 VT-7 の動作原理

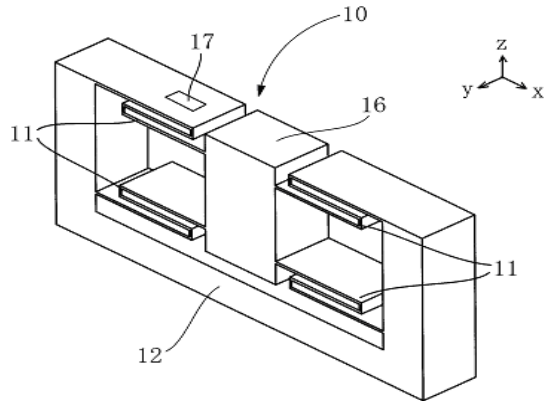
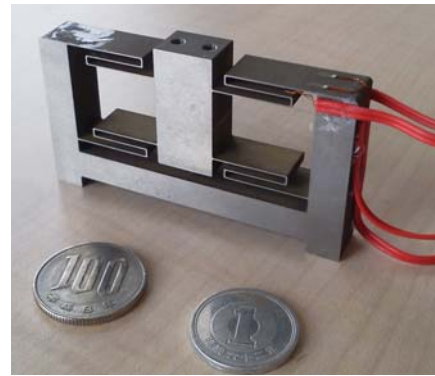


図 3.16 荷重装置



図 3.17 ブリッジ回路付き表示器

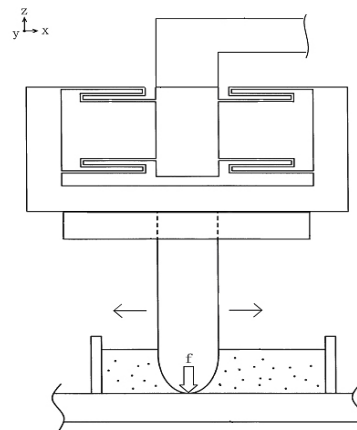


図 3.18 荷重装置と VT-15 による研磨イメージ

図 3.16 に荷重装置の機構を示す。この装置を用いたことにより、ワークへの研磨荷重の設定が簡易になるだけでなく、荷重印加方向以外、動作が抑制されているので、安定した研磨荷重をワークに与えることができる。また、図 3.16 に示した通り、荷重装置のヒンジに、4 枚のひずみゲージを貼り、これで最も正確に研磨荷重をワークに与えた際、ヒンジがひずみ、そのひずみ量をひずみゲージが拾い、そして、載荷荷重として、ブリッジ回路つき換算表示に表示する。表示の様子を図 3.17 に示す。

図 3.18 に、VT-7 と荷重装置と合わせた研磨のイメージを示す。この方法によって、安定した所望の載荷荷重を付与できる構成になり、研磨装置の取り扱いを容易とする荷重装置を提供することができる。

3-3-5 3軸 (X, Y, Z) 制御の研磨システムの開発

3軸 XYZ の制御研磨システムの開発において、アクチュエータを安全に使用するために、アクチュエータが故障した場合、過剰に電流が流れないように、駆動回路を保護する必要がある。駆動電力を常に監視し、ある設定した一定の消費電力を超えた条件の場合、異常と判定して、動作を停止する為の制御信号を出力できる装置を検討・設計した。



図 3.19 荷重装置と VT-15



図 3.20 MTAD4200

図 3.20 に 4 チャンネル駆動電源の試作品 (MTAD4200) を示す。この駆動電源は下記の性能を有することを旨とした。

性能特性：

- (1) 入出力特性：正弦波信号入力に対し、過電流保護動作内で、 $\pm 1\%$ 以内の直線性を持つこと
- (2) 振幅特性：周波数特性 (1Hz~2KHz) 正弦波 入力に対し、偏差が 1% 以内のこと
- (3) Monitor の結合度：主回路に対し、 $1/10 \pm 5\%$
- (4) デイスプレイ表示精度： $\pm 5\%$ 以内

MTAD4200 の入力対出力特性を図 3.21 に示す。計測した特性から、設計通り、増幅率約 30 倍であることを得られていることを確認できた。また、周波数特性の結果を図 3.22 に示す。

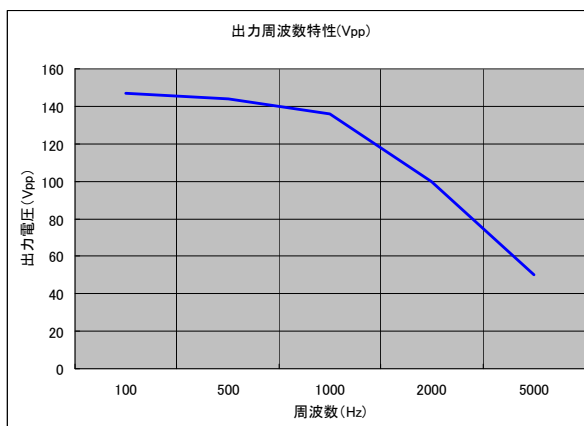


図 3.21 周波数特性

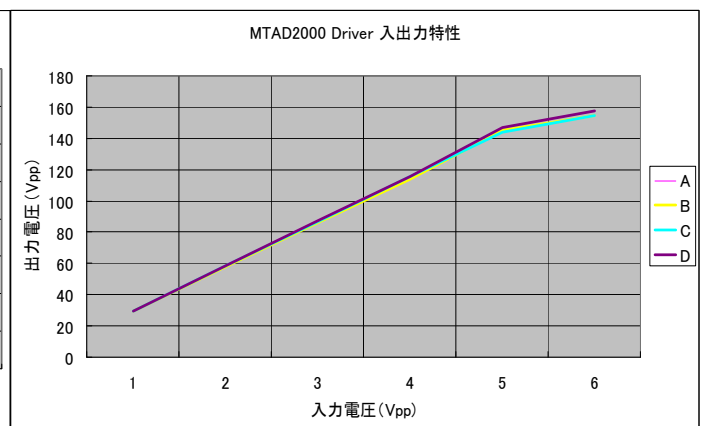


図 3.22 入力対出力の特性

第4章 多自由度方向制御可能な研磨システムの開発

4-1 自由度方向制御可能な研磨システムの現状とその問題点

振動の方向を多自由度に制御可能な研磨ヘッドを備えた自由度方向制御可能な研磨システムの開発を行う。振動の制御は圧電アクチュエータ等を使用し、高速かつフレキシブルな研磨方向の制御が可能となるようにする。

従来の研磨用のポリシャは図4.1に示すようにポリウレタンや発泡ポリウレタンを用いていた。しかし、上記のような微細な金型の研磨では、微細なパターンであるため、研磨ポリシャを極めて微小にする必要がある。それに対して、金型自体は非常に大きく、ポリシャの摩耗、研磨率の変化が無視することが出来ず、金型の研磨精度の悪化が問題となる。

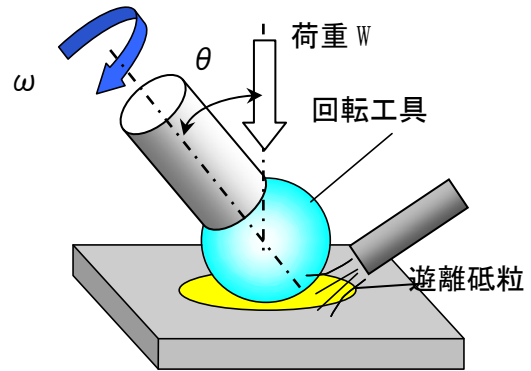


図4.1 従来の微小回転研磨

4-2 提案技術の内容（技術の新規性、独創性、改善性又は技術基盤強化性）

そこで、図4.2に示すようにリニアモータと圧電アクチュエータで振動させて研磨するが、その振動パターンを解析し、最も良好な表面粗さと形状が得られるように最適化させる。併せて、微細な形状を研磨するための微細研磨ポリシャの開発も行う。そこで、本提案では、ポリシャとして軟質のゴムを結合材として用い、微小なダイヤモンド砥粒を含有させるものである。このようにすることにより、ポリシャが摩耗しても新たに出現したポリシャの研磨液に対する濡れ性が一定となり、研磨速度も一定となり、金型の加工精度が向上できると期待できる。

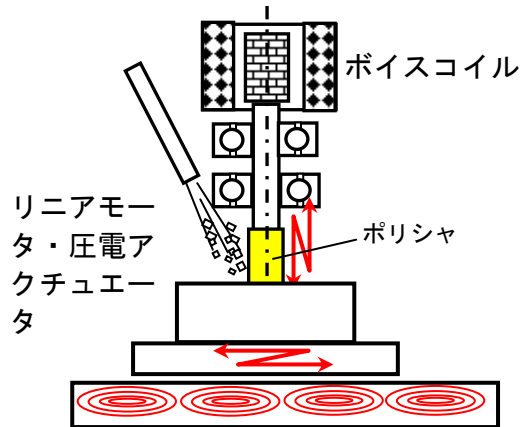


図4.2 リニアモータ・ボイスコイル・圧電アクチュエータ利用研磨

4-3 解決方法の具体的実施内容

4-3-1 超音波2軸振動子によるポリシャ先端の挙動解析

本研究で提案する超音波2軸振動援用研磨法では振動子に直行する2方向に異なる周波数の振動を付加し、ポリシャ先端で2方向の変位を合成している。そのためポリシャ先端の軌跡は2方向の発振周波数の組み合わせにより変化することになる。本節では2方向の発振周波数の組み合わせを変化させてポリシャ先端の挙動を解析した。

軸方向振動の変位を x たわみ方向振動の変位を y とすると、それぞれの振動の変位は振幅を λ_a 、 λ_f とし、発振周波数を ν_a 、 ν_f とすると次式で表せる。

$$x = \lambda_a \cos(\nu_a \cdot t - \phi_a) \quad , \quad y = \lambda_f \cos(\nu_f \cdot t - \phi_f) \quad \dots \dots (4.1)$$

ここで t は時間、 ϕ_a 、 ϕ_f はそれぞれの初期位相を示す。

式(4.1)よりポリシャ先端の位置を $x-y$ 平面上に任意の時間経過するまでプロットしポリシャ先端の軌跡を得る。解析条件を表 4.1 に示す。本研究で使用する研磨装置においてポリシャを最高速度で走査したとき、ポリシャと加工物の接触する領域を直径 $100\mu\text{m}$ の円形であると仮定した場合、その直径の距離をポリシャが通過する時間を単位時間とする。この時間内におけるポリシャの変位を 1000 点プロットし、ポリシャ先端が描く軌跡を求める。軸方向の周波数は 28kHz で固定し、たわみ方向の周波数を $20\sim 30\text{kHz}$ の間で 1kHz ずつ変化させた。軸方向とたわみ方向の振幅は $20\mu\text{m}$ で等しいとする。また軸方向とたわみ方向の振動の初期位相差は 90° とした。

表 4.1 解析条件

最大送り速度		$25000\mu\text{m/s}$
接触面積の径		$100\mu\text{m}$
接触面積の径の移動時間		$4 \times 10^{-3}\text{s}$
分割数		1000
軸振動	振幅 λ_a	$20\mu\text{m}$
	振動数 ν_a	28kHz
横振動	振幅 λ_f	$20\mu\text{m}$
	振動数 ν_f	$20 - 30\text{kHz}$
位相差		90deg.

解析の結果、以下が明らかとなった。軸方向の振動に対するたわみ方向の振動の各周波数における軌跡と軸方向とたわみ方向の周波数の比を併せて示した。グラフの横軸は軸方向の振幅を示し、縦軸はたわみ方向の振幅を示す。グラフが示すように、直交する 2 方向に異なる周波数で振動を付加した場合、先端の軌跡はリサージュ図形を描く。このときリサージュの網目の細かさは 2 つの周波数の比によって決定される。周波数の比の値が小さい場合は網目は大きくなる。それに対し周波数の比の値が大きい場合は網目は小さくなる。また軸方向とたわみ方向の発振周波数が等しくなる場合はポリシャ先端は円を描く。これらの結果を研磨加工の観点からみれば網目が細かいほど研磨痕を相殺する効果があり滑らかな研磨面が得られると考えられる。

次にポリシャの走査速度に対する振動子の振動速度について評価する。ポリシャの走査速度より振動速度が遅い場合、ポリシャと工作物の相対速度はポリシャの走査速度が支配的となる。従って研磨の特性は走査速度の影響を受け 2 軸振動による研磨の効果は得られない。解析の結果をみるとポリシャの軌跡は振幅の範囲内で全体に分布しており、ポリシャの走査速度に対して振動による速度が十分であるといえる。つまりポリシャの走査速度に対して振動子の発振周波数は 2 軸振動の効果を得られる周波数以上となっている。本節における解析では走査速度を実際に加工を行っている速度よりも 10 倍程度大きな値で設定しているため、超音波領域の周波数で振動を付加すれば、走査速度に対して 2 軸振動の効果を利用するために必要な振動の速度は十分に得られるといえる。

4-3-2 多自由度で研磨方向を制御可能な自動化された研磨システムの開発

研磨加工では軟らかい研磨ツールを用いて、加工物間と遊離砥粒を介して相対運動をさせ、加工物表面の凹凸がわずかながら時間をかけて除去する原理となっている。このような研磨加工において、除去量の不均一性や時間に対する不安定性を加え、研磨時間の進行につれて、研磨面の粗さが向上する一方で加工物の形状精度が低下してゆく問題が残っている。本研究において、安定的な研磨ができる自転/公転型研磨法を援用し、均一研磨ができるポリシングヘッドの開発を行った。本年度は昨年度に引き続き、自転/公転型研磨法の安定的な研磨基礎特性について検討した。また、自転運動と公転運動が別々に設定できる新しい研磨ユニットを新作し、各種条件での研磨実験を行った。

図 4.3 に自転/公転型研磨装置の外観写真を示す。装置は、卓上タイプの 3 軸加工機に図 4.4 のような自転/公転型研磨ユニットが搭載されている。加工機の各軸は PC によって、 X (左右)、 Y (前後)、 Z (上下)の制御ができ、ワークの位置を決める。 $X-Y-Z$ 軸の最小の分解能はそれぞれ $0.1\mu\text{m}$ である。図 4.4 に示す研磨ユニットのベース部に公転用のモーターが搭載され、ベルトを使用し動力を伝え、その動力がプーリの下スピンドルに伝わり、スピンドルが回転して公転を与える。スピンドルの内部には自転用のモーターが搭載しており配線をスリッピングに繋げることで導線の絡まりを防いでいる。この 2 つのモーターにより研磨ツールに自転/公転運動を同時に与えることが可能である。自転用モーターの回転数は最大 8000rpm で、公転用モーターの回転数は最大 400rpm である。また、自転用モーターには研磨用のツールホルダが取り付けられている。

ツールホルダの中にはバネが入っていて、バネの復元力によって加工エリアに研磨圧力を与えている。

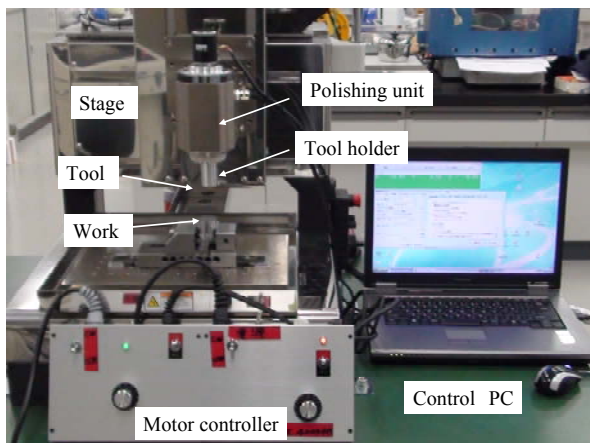


図 4.3 研磨加工装置の外観写真

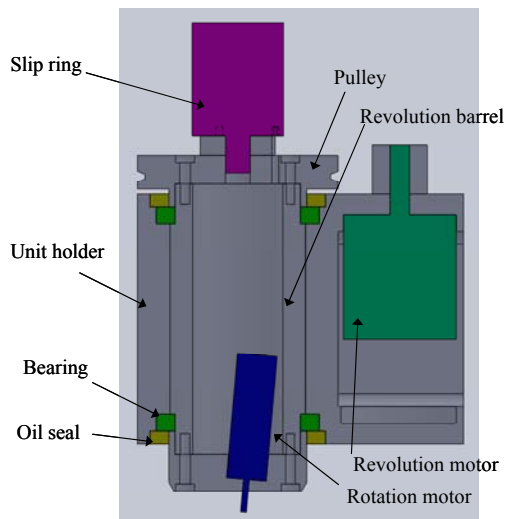


図 4.4 自転／公転型研磨ユニットの構造図

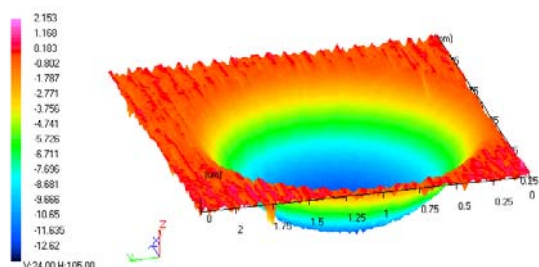


図 4.5 研磨エリアの測定イメージ例

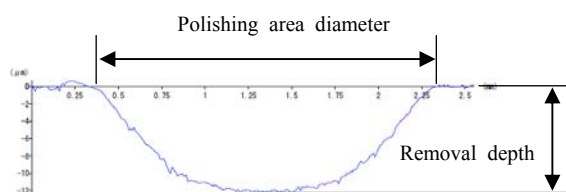


図 4.6 研磨痕半径と研磨深さの定義

自転／公転型研磨法の基礎研磨特性を検討するために、新作した自転／公転型研磨ユニットを用いて、研削仕上げしたワークの研磨実験を行った。表 4.2 に実験条件を示す。実験を行う前に条件を毎回同じにするためにツールイングを行う。時間を変更して研磨実験を行う際は、ワークが初期表面の状態の場所から研磨を行う。研磨剤として遊離砥粒を使用するが、砥粒は 5 分毎に新しいものと交換する。また、研磨の安定性を確認するため研磨ツールをワーク表面の一箇所に固定し、研磨時間の推移と研磨痕（エリア）の変化や除去深さの変化を調べた。それぞれの時間で研磨を 5 回ずつ行うが、安定性を確認するために同じ条件で他の実験者による研磨実験も行い、比較に取り入れた。

図 4.5 に研磨痕を非接触式表面形状測定装置(三鷹光器(株), PF-60)で測定した一例を示す。測定した研磨エリアの中心部を図 4.6 のように断面で表し、ワークが研磨された箇所の直径を研磨痕直径と定義して、研磨の除去深さは断面曲線の最大高さで求め、それぞれの結果を比較し研磨加工の安定性を調べた。なお、初期研磨面は研削で $0.73 \mu\text{m Ra}$ 程度に統一した。

表 4.2 自転／公転型基礎研磨実験条件

研磨ワークピース	SUS420
自転速度	600 rpm
公転速度	200 rpm
自転公転軸なす角度	5°
研磨荷重	200 g
研磨スラリー	#3000 アルミナペースト
スラリー供給量	0.05 g
研磨時間	5 min, 10 min, 15 min

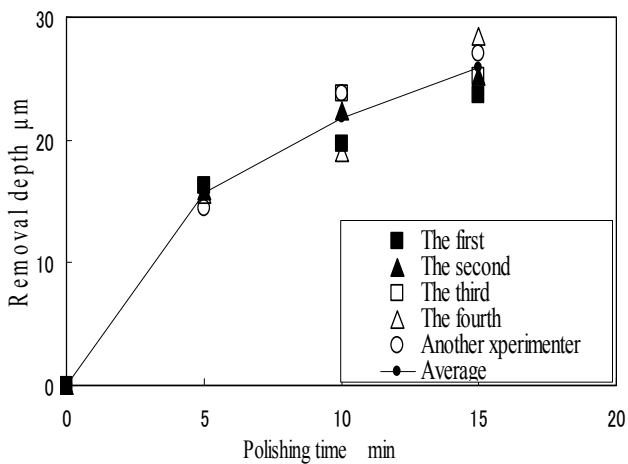


図 4.7 研磨痕半径と研磨時間の関係

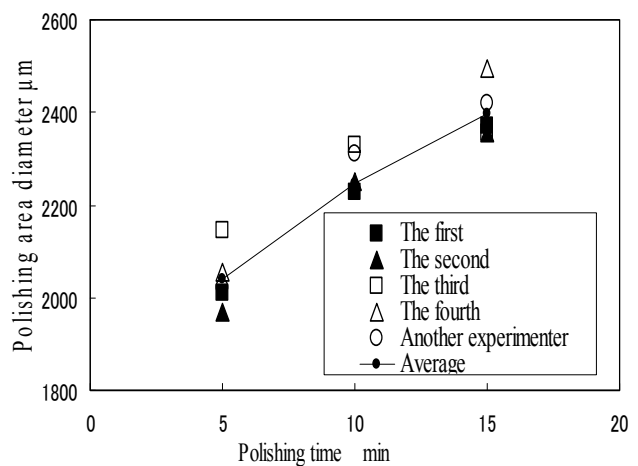


図 4.8 研磨深さと研磨時間の関係

4-3-3 圧電素子型研磨システムの検証

試作した圧電素子型研磨システムを検証するために、図 4.9 に示すようにレーザードップラ振動計を用いて振動の軌跡測定を行った。測定では、図 4.10 に示すように振動子に予めねじを固定し、ネジの傘部に反射シールを貼り付け、2つのレーザードップラ振動計（株式会社小野測器、LV-1610）のセンサヘッドからのレーザビームをこの反射シールに当て、そして反射光をセンサヘッドでピックアップしベクトル演算器に入力して楕円運動に合成される。なお、楕円運動の記録と出力にはオシロスコープを用いた。

図 4.11 に振動子の振幅測定結果の例を示す。結果として、縦振幅 $24\mu\text{m}$ 、横振幅は $22\mu\text{m}$ となり、圧電素子型研磨システムが安定的に作動していることがわかった。

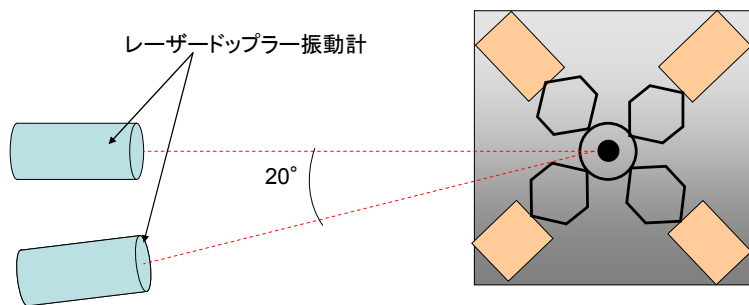


図 4.9 研磨システムの振動測定方法

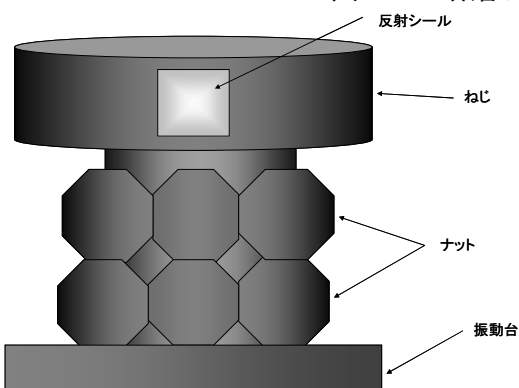


図 4.10 ネジを研磨システムに固定した状態

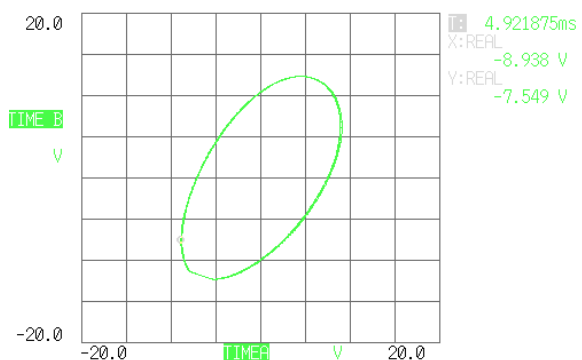


図 4.11 測定した楕円振動の軌跡

また、研磨特性を確認するために、開発した圧電素子型研磨システムを自転／公転型研磨機に図 4.12 に示すように固定し、振動有無による研磨の影響を確認した。研磨実験に使用するワークは HPM75 で研削仕上げしたブロックを #1000 サンドペーパーで表面粗さの調整を行ってから、表 4.3 に示す研磨条件で一定の研磨エリアで 5 分間研磨を行った。結果として、振動を付加した研磨では、振動を付加しない研磨より、研磨面の表面粗さの向上が認められた。また、圧電素子研磨システムの安定的な作動状態を確認した。

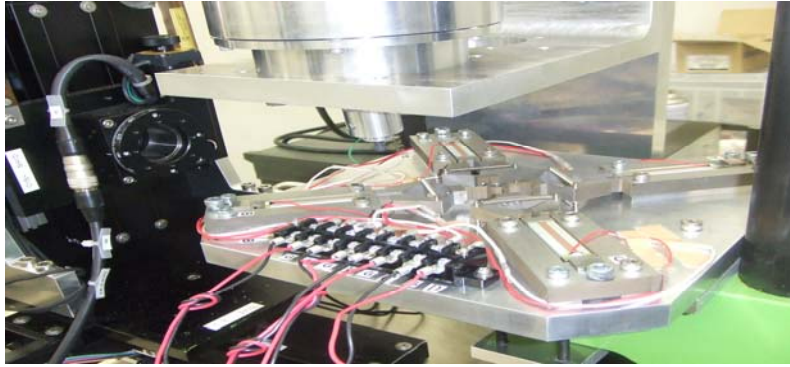


図 4.12 研磨システムに取り付けた圧電素子型研磨システムの様子

4-3-4 低周波振動ユニット援用時の研磨特性

開発した低周波振動 (Low frequency vibration : LFV) ユニットによる研磨エリアの変化について確認する。図 4.13 に研磨装置に搭載したときの外観写真を示す。ワークは低周波振動ユニットの中央部にネジで取り付け、低周波振動ユニットを分解能 0.001mm の 3 軸制御卓上機械のテーブルに設置し、研磨箇所を決めた。また、レーザドップラー振動計による低周波振動ユニットの基礎特性を測定し、周波数と振幅の関係を図 4.14 に示す。測定結果から 200Hz 以上になると振幅値はほとんど変わらなくなり、安定していることがわかる。本研磨実験を行う前に初期条件をそろえるためにツルイーグを行い、研磨圧力はツールホルダに取り付けたバネの収縮量で調整している。また、5 分間研磨したら新たに遊離砥粒を供給する。主な実験条件を表 4.3 に示す。

表 4.3 テスト研磨条件

ワーク	HPM75
自転数	467rpm
公転数	187rpm
研磨ツール傾斜角	5°
研磨ツール	フェノール樹脂
研磨荷重	250gf
砥粒	シミックロン (#3000)
研磨時間	5 分

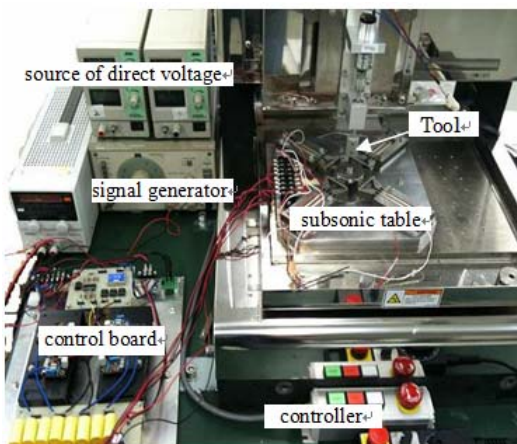


図 4.13 研磨加工機に搭載した周波振動ユニット

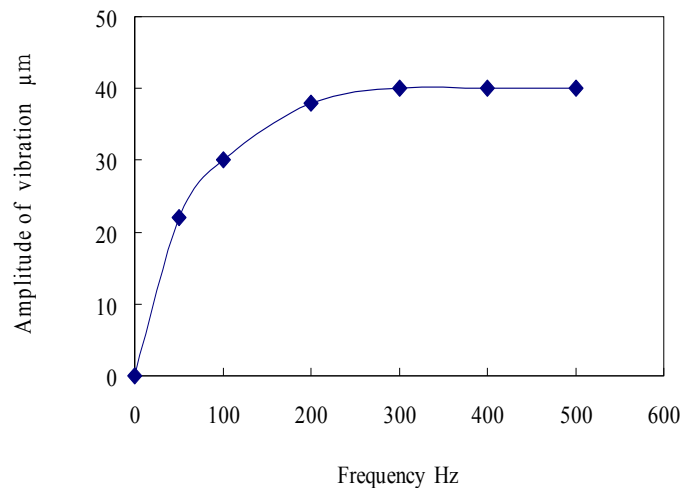


図 4.14 低周波振動ユニットの基礎特性

図 4.15 に非接触式表面形状測定装置 (三鷹光器 (株), PF-60) で測定した研磨痕の 3D 画像と中心部の断面曲線の一部を示す。このように研磨痕は球面上の凹面になることがわかる。この研磨痕の体積を研磨量と定義する。低周波振動有無のそれぞれの条件で研磨した時間的变化を図 4.6 に示す。低周波振動有無にかかわらず研磨時間を長くすると研磨量も増加することが確認できる。しかし、研磨時間 5 分経過で低周波振動有無による研磨量の差は約 0.008mm^3 とあまりないが、研

磨時間を長くすると 10 分経過で約 0.056 mm^3 とそれは大きくなり、さらに 20 分経過後では約 0.080 mm^3 とさらに増大する。したがって、研磨時間が長くなると低周波振動の効果も大きくなり、多くの研磨量を得られることが確認できた。これは、低周波振動を援用するとツールの自転回転、公転回転方向にさらに振動の方向が加わったことから、ツールとワークの接触面積が増えて、より多くの面積を研磨することができたと考えられる。さらに低遊離砥粒の中の砥粒の動きが活発化したと考えられ、その結果ツールとワークの間に砥粒の介入をしやすくして、より多くの砥粒を保持することができ、効率的な研磨ができたと考えられる。

図 4.16 と図 4.17 に図 4.15(a) で示した研磨エリア断面の表面粗さに対する低周波振動有無の影響を示す。初期研磨面は研削で $0.78 \mu\text{m Ra}$ 程度に統一し、研磨時間 5 分で低周波振動なしでは $0.099 \mu\text{m Ra}$ 、低周波振動ありでは $0.066 \mu\text{m Ra}$ となり、両者とも研磨時間 5 分で大幅に改善された。さらに、研磨時間 20 分間で最も良好だった表面粗さは低周波振動なしで $0.080 \mu\text{m Ra}$ に対し、低周波振動ありでは $0.058 \mu\text{m Ra}$ であり、その表面粗さの差は $0.022 \mu\text{m}$ となった。したがって、低周波振動の効果として、表面粗さを改善することができる。図 4.18 に低周波振動有無のそれぞれの研磨痕の顕微鏡写真例として、5 分間研磨後の状態を示す。低周波振動なしでは自転と公転による目立った研磨傷が確認できるが、低周波振動ありでは研磨傷は小さくなっている。これは低周波振動を援用した研磨ではより多くの砥粒を保持できるため、砥粒一個に対する圧力が小さくなり、研磨傷が短くなったと考えられる。これが表面粗さを良好にしている原因であると考えられる。

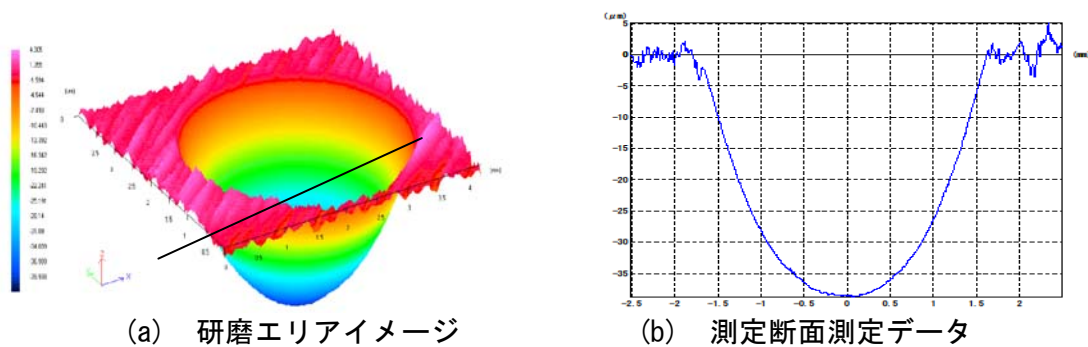


図 4.15 研磨痕エリアの測定イメージ

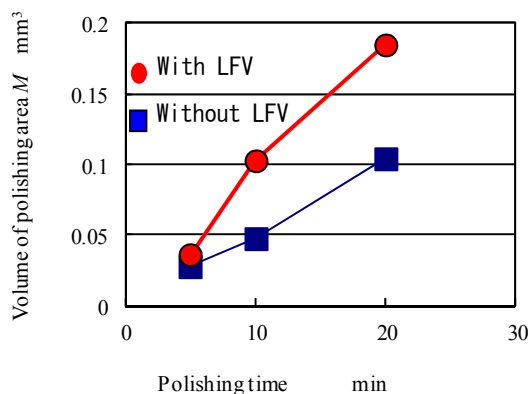


図 4.16 振動援用による研磨除去体積の変化

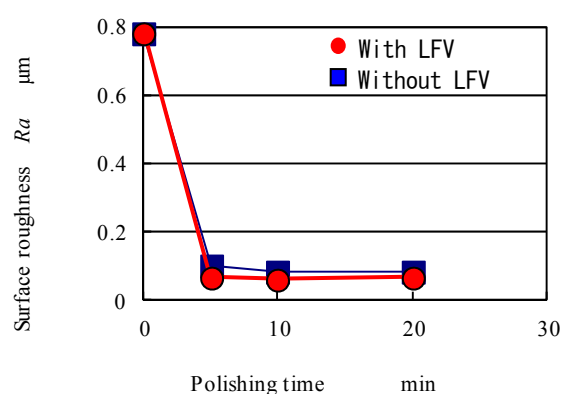
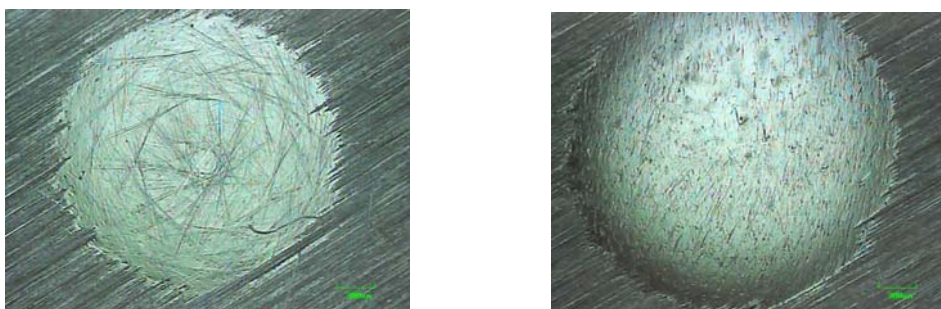


図 4.17 振動援用による研磨面粗さの変化



(a) 低周波振動援用なし (b) 低周波振動援用あり

図 4.18 振動援用による研磨痕の表面状態 (5 分研磨後)

4-3-5 リブ形状の側面研磨特性

昨年度に得られた低周波振動援用研磨特性の結果に踏まえて、微細構造をもつ金型研磨について確認実験を行った。図 4.19 に低周波振動テーブルによる構造体研磨の実験方法のイメージを示す。小径軸付き研磨工具を用いその円周および端面を使い、リブ形状実験サンプルの側面および底面の研磨を行った。図 4.20 に研磨結果の一例を示す。楕円振動条件で、振動数 750Hz、研磨圧力（荷重）150gf、ツールの移動速度が 0.5mm/s の場合、低周波振動有無に関わらず研磨時間 4 分で表面粗さは大きく改善することができた。具体的に研磨時間 4 分で振動なしが表面粗さ約 55nmRa であり、振動ありではおよそその半分の表面粗さ Ra 約 25nm となった。以後研磨時間が進むと振動ありでは研磨時間 8 分で表面粗さ 1nm Ra 以下となった。このとき振動なしでは表面粗さ約 4nmRa であり、研磨時間 10 分で表面粗さ 1nm Ra 付近まで改善することができた。このときの表面粗さの測定結果を図 4.21 で示す。このように研磨時間が進むにつれて初期の研削条痕が改善されていることがわかる。低周波振動ありでは研磨時間 8 分、低周波振動なしでは研磨時間 10 分で研削条痕が除去しきれているがわかる。したがって、低周波振動ありでは表面を高精度かつ高能率に仕上げることができた。

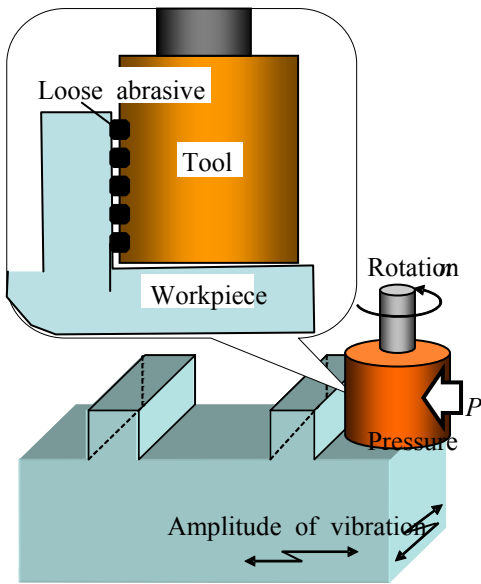


図 4.19 低周波振動テーブルによる構造体研磨の実験方法

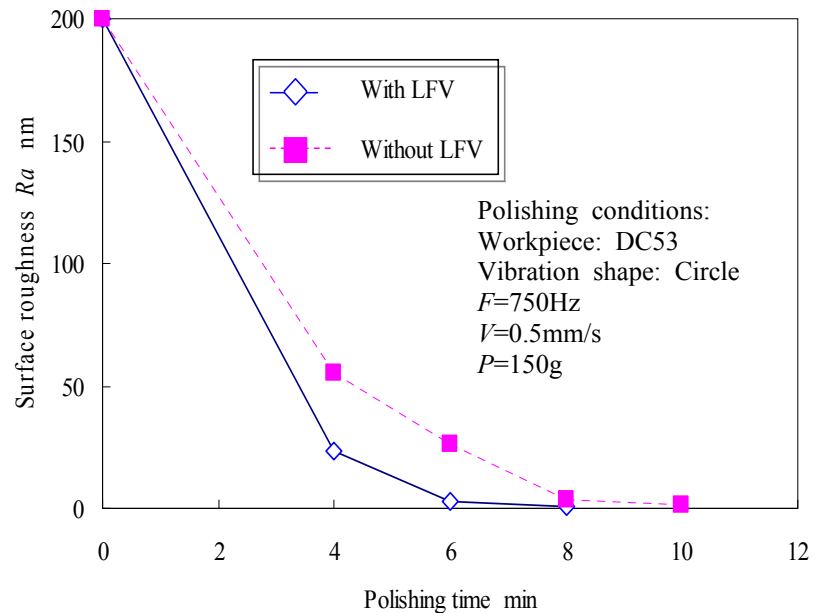
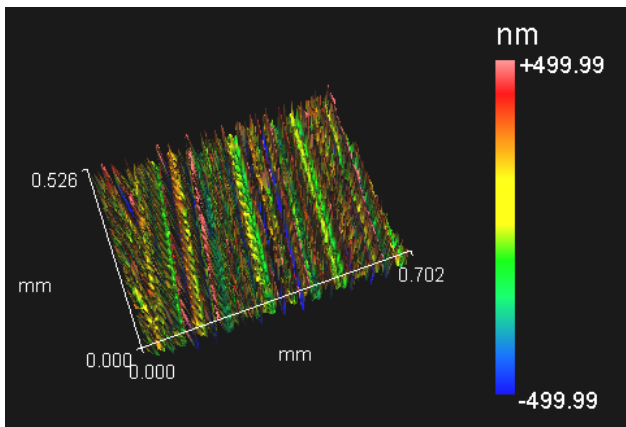
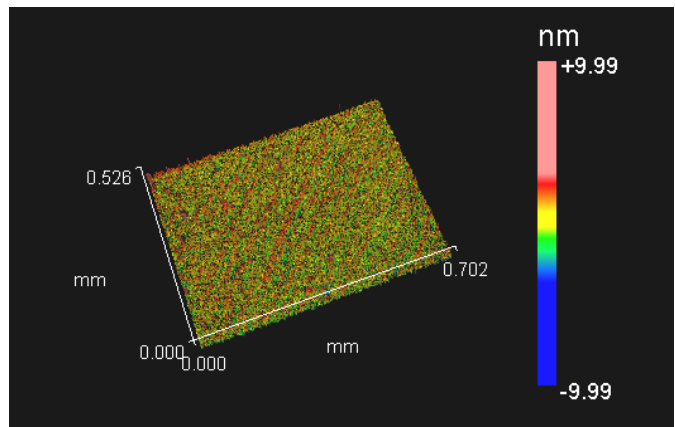


図 4.20 研磨結果の一例



(a) 初期表面



(b) 8 分間研磨後（振動援用）

図 4.21 表面粗さの測定結果

第5章 非接触機上測定装置の開発

5-1 非接触機上測定装置の現状とその問題点

前記のフレネルレンズやマイクロ流路、微細電極金型などの微少な凹凸を持つ構造物の金型が設計通りに加工されているかどうかを検証することは製品の品質保持上きわめて重要であることは言うまでもないが、現状では主に接触式の形状測定装置が使用されておりその性能は十分とは言えない。一例をあげると、先端が極めて鋭利なダイヤモンドから構成される探針のばあいでも先端半径は $1\sim 4\mu\text{m}$ 程度と大変鋭利であるが、図5.1に示すように先端角度は $10\sim 40$ 度程度となりアスペクト比の高い形状の測定は困難である。

こうした状況を考慮すると、図5.2に示すような光学式のプローブを用いた測定手法が極めて有効と考えられる。レーザを用いた測定手法の場合は、スポット径を $1\mu\text{m}$ 以下とすることも可能であり、かつ先端角度は必ずしも側面壁の角度に制約されないため、垂直に近い形状でも測定できる可能性がある。このため、こうした非接触方式の測定技術の開発が望まれる。

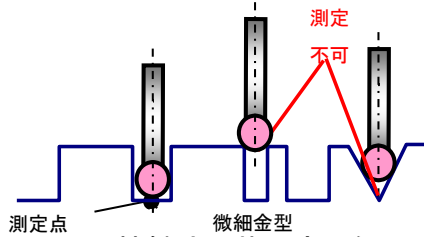


図 5.1 接触式形状測定の実例

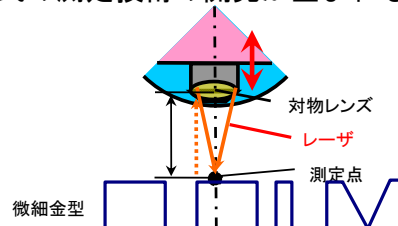


図 5.2 非接触（光学式）測定システムの実例

5-2 提案技術の内容（技術の新規性、独創性、改善性又は技術基盤強化性）

そこで本研究課題では、レーザ光を用いたオートフォーカス方式を利用した非接触形状測定装置の開発を行うこととした。これは、図5.3に示すように対物レンズを通してレーザ光を物体に照射し、その反射光あるいは散乱光を再度対物レンズで捕集し、オートフォーカスセンサーにて検出することでオートフォーカスを実現し、その際の対物レンズの変位をZ軸ステージに取り付けられたリニアスケールにより検出するものである。これにより、極めて微細なスポット径で超高精度な形状測定を実現することが可能となる。測定システムの仕様としては、フレネルレンズなどの光学素子の測定を行うことも考慮し、分解の 1nm 、レーザスポット径約 $1\mu\text{m}$ 程度とした。さらに、加工途中での計測が可能となるように超精密加工装置や研磨装置への取り付けを考慮しコンパクトな形状とした。測定範囲は 10mm である。

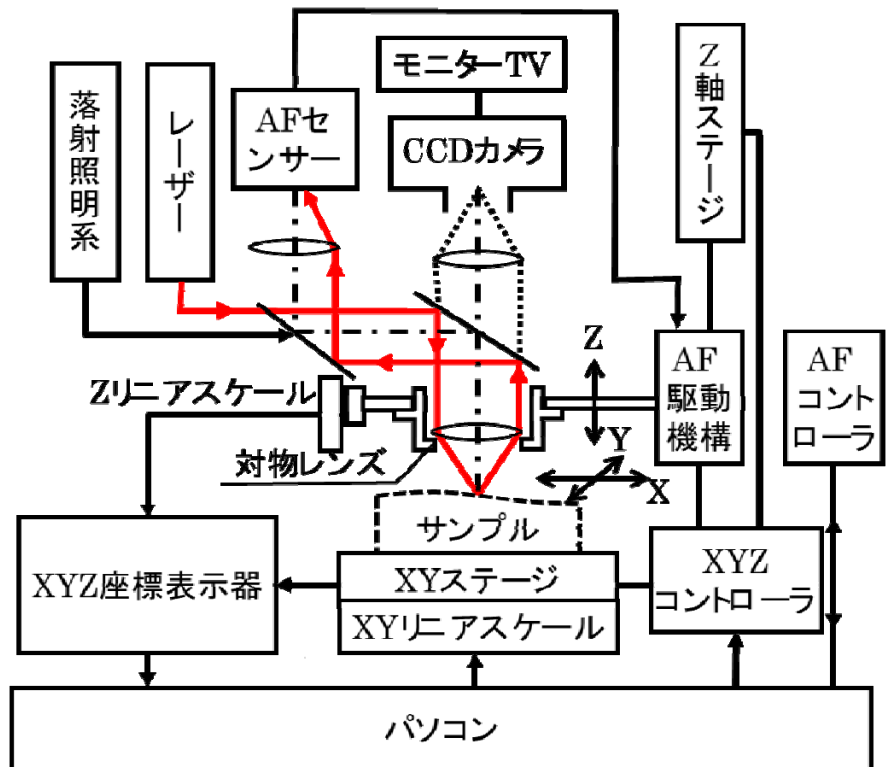


図 5.3 非接触オートフォーカス式測定システムの原理

5-3 解決方法の具体的実施内容

エンジニアリングモデルの机上計測用ソフトウェアは、各部の動作確認や机上計測の有用性を検証するためには問題は無かったが、事業化を目指すに当たっては作業者の操作性や加工機とのリンクに問題を残していたため、ソフトウェアの改修作業を行った。また、加工～計測～補正加工の一連の操作を連続して行い、机上計測の有用性を確認する。

5-3-1 リアルタイム測定システム

机上測定装置の構想設計した非接触机上測定プローブの超精密加工装置への搭載を図 5.4 に示す。図 5.5 に、連続フォーカス方式を実現するための制御システムのダイアグラム、およびリアルタイム測定システムのダイアグラムを示す。

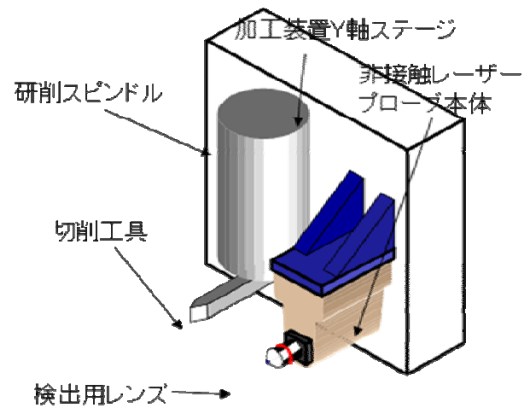


図 5.4 非接触机上測定プローブの超精密加工装置への搭載図
カメラ信号<NTSC>

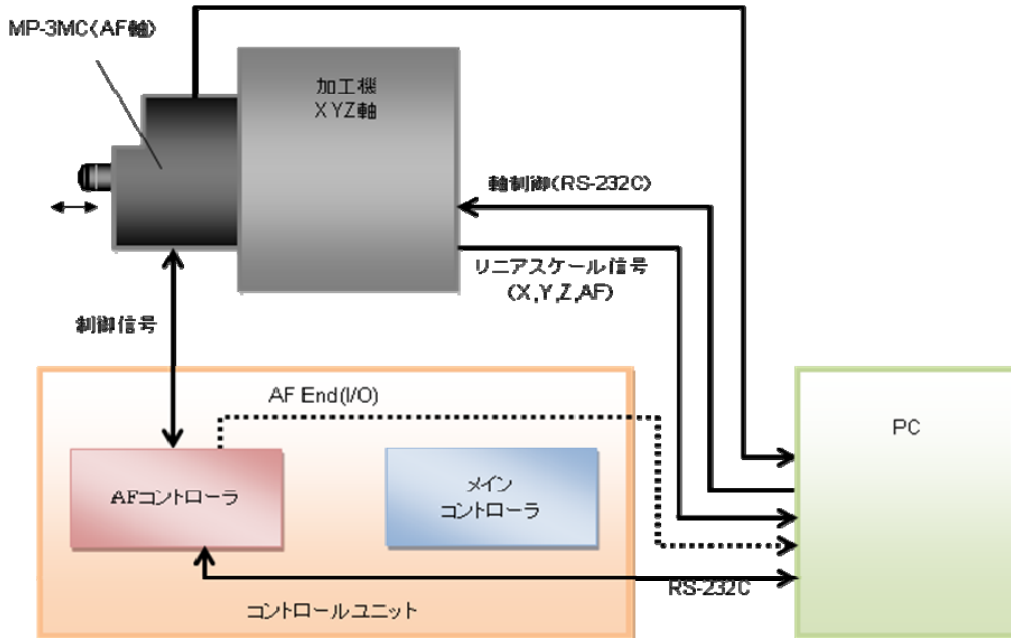


図 5.5 連続フォーカス方式を実現するための制御システムのダイアグラム



図 5.6 超精密加工装置上の机上計測の様子

超精密加工装置上への装置の搭載を進め、ソフトウェアの開発を実施した。図 5.6 に機上計測時の様子を示す。超精密加工装置は、4軸同時制御可能な1nm制御の加工装置で、能動型防振台に搭載されており、開発されたプローブの試験用として十分な性能を有していると考えられる。まず、機上計測システムは、リアルタイム測定を実現するために加工装置のX、Y、Z軸のリニアスケール信号をPCで直接キャプチャできるような分岐回路を通し、レーザープローブヘッドの信号と同時にキャプチャした。レーザープローブ側の信号は、AFのためのリニアスケールの変位信号と同時にAFシステムのオートフォーカス誤差信号も同時に入力し、高速なリアルタイム測定によりフォーカスが完全に得られていない場合でもこれを用いて精度を改善できるように配慮されている。

5-3-2 加工・機上計測の実践

加工は図 5.7 に示すように無酸素銅先端に先端R=0.5mmのダイヤモンドバイトにてφ5.6mm、R=4mmの球面加工を施した。(仕上条件：切込2μm、送り速度F1mm/min)ダイヤモンドバイト先端の摩耗状態は不明である。



(a) 機上測定の様子 (b) ワーク写真 (無酸素銅)

図 5.7 東芝機械製 超精密非球面加工機による加工の外観

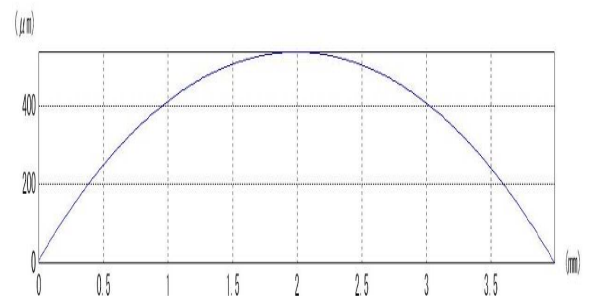


図 5.8 R=4mm 形状計測結果

機上計測ソフトウェアに加工パスを読み込ませ、刃先原点と計測原点のオフセット値を入力すると計測パスが算出されるので、それを元に機上計測を開始する。計測する際に計測ピッチや計測範囲を入力することで加工パスと違う条件で計測することが可能である。今回は計測ピッチ1μm、計測範囲4mmで図 5.8 に示す球面形状を計測結果として得られた。計測に掛かった時間は約2分ほどである。

5-3-3 補正加工の実践と検証

機上計測で得られた計測結果を形状評価ソフトウェアでベストRフィッティング評価し、誤差量を算出する。「加工パス修正ソフトウェア」に加工パスと算出された誤差量をそれぞれファイルとして読み込ませ、補正加工用パスを作成し加工を行う。加工パス修正ソフトウェアは加工パスと誤差量の合成だけではなく、刃先Rや加工Rを入力することによって、工具刃先Rを考慮した補正加工パスの作成が可能であり、高精度な補正加工を実現している。また、出力されるデータはGコード化されているため、そのまま加工機に読み込ませることが可能である。補正加工後の形状を再び計測し誤差量を求め、補正加工前と後での結果を比較する。図 5.9 は補正加工前の形状をベストRフィッティング評価した結果である。約3μm P-Vの加工誤差が存在することを確認できる。図 5.9 の形状誤差曲線から補正加工用パスを作成し、再加工したものを形状計測し、ベストRフィッティング評価したものを図 5.10 に示す。約3μm P-Vであった加工誤差が約0.4μm P-Vに減少しているのが確認できる。これらのことから機上計測は非常に有用であり、加工～計測～補正加工までスムーズに作業できることが実証できた。

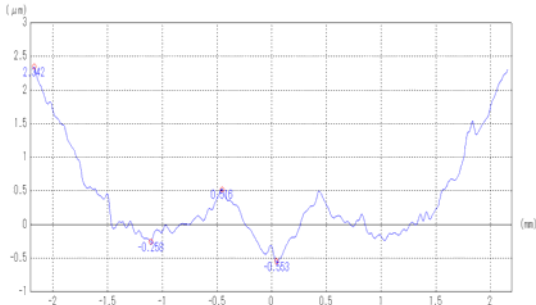


図 5.9 形状誤差曲線（補正加工前）



図 5.10 形状誤差曲線（補正加工後）

5-3-4 フレネル形状の計測及び評価

図 5.11 は机上計測により得られたフレネルレンズの断面形状である。このフレネルレンズ金型を中部大学の超精密非接触三次元測定装置で測定し設計形状からの形状誤差曲線を図 5.12(a)に示す。図 5.12(b) は机上計測で得られた形状誤差曲線である。外周部において $0.5 \mu\text{m}$ 程度の形状差があるもののほぼ同様の計測結果が得られた。これらの結果から机上測定機が数十 mm の測定範囲においてサブ μm レベルの形状精度を有していることが確認できた。製品が小型化、高精度化する超精密加工の分野において机上計測の需要は益々増えており本技術が今後加工現場で広く使われていくと考えられる。

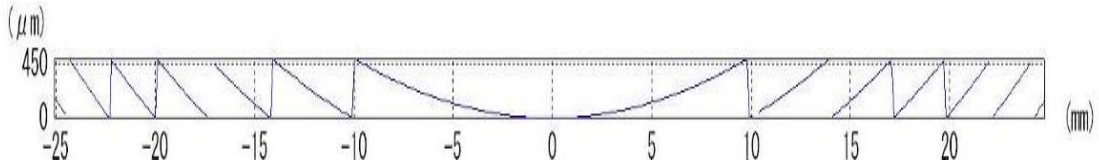
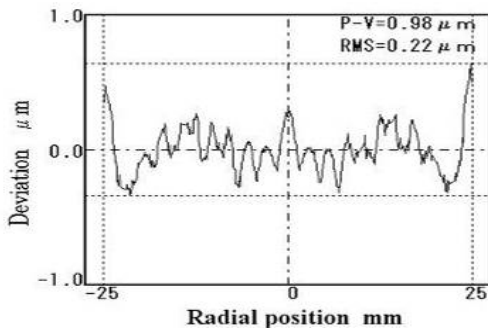
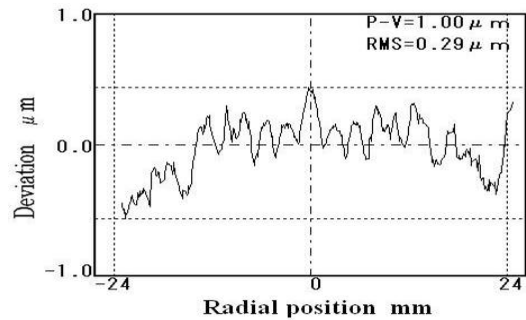


図 5.11 フレネルレンズ 測定形状



(a) 中部大での形状誤差曲線



(b) 机上測定機での形状誤差曲線

図 5.12 フレネルレンズ金型による精度の検証

第6章 微細形状の成形転写技術の開発

6-1 微細形状の成形転写技術の現状とその問題点

第2章～第5章で開発した技術を利用して加工された金型等を使用し、シリコン樹脂・プラスチックやガラスを使用して成型品を形成する実験を行い、成型品の精度、性能を評価する。適応分野としては、光ディスク等の光学素子、太陽電池のための集光レンズ、医療診断用バイオチップに使用されるマイクロチャンネル等を対象とする。また、次世代のLSIの検査は、さらに細い検査用プローブを回路の端子に接触させ通電検査を行うため、その検査用部品にも微細化が要求されている。部品の材料に求められる条件として高弾性・導電性・微細構造の金属ガラス製プローブが有効であると考えられている。

しかし、現状のレベルでは、図6.1に示すように金型の機械加工と成形（射出成形、ガラスプレス）により量産されているため微細化、量産化に限界がある。

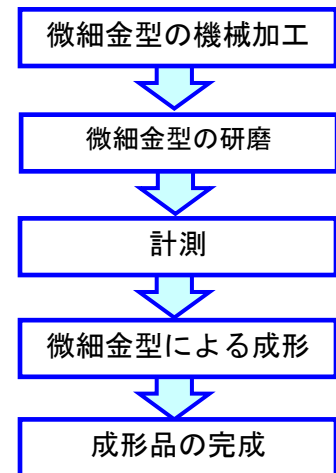


図6.1 従来の機械加工と成形によるプロセス

6-2 提案技術の内容（技術の新規性、独創性、改善性又は技術基板強化性）

そこで、超硬などの材料にPCD製マイクロフライス工具で微細溝パターンを形成し、それを一次金型として2次金型を作成し、さらに成形を繰り返す、様々なプロセスを複合させることにより、従来得られなかったような寸法、精度の成型品を量産することが可能となる。

例えば、マイクロチャンネルの場合、1次金型を切削加工し、その一次金型により二次金型を放電加工し、DLCなどの離型膜を成形し、その金型で製品を成形する。また、プローブも超硬などの放電金型をPCD製マイクロエンドミルで切削し、その金型で二次金型をマイクロ放電加工し、その二次金型で金属ガラスのプレス成形し、最後に機械加工により不要部を除去することを検討する。このように、大きな特徴は機械加工と金型による成形でなく、放電加工、蒸着など、電気加工、物理加工、マイクロ転写成形を複合させて、実用的な微細形状の成形転写技術を開発する。

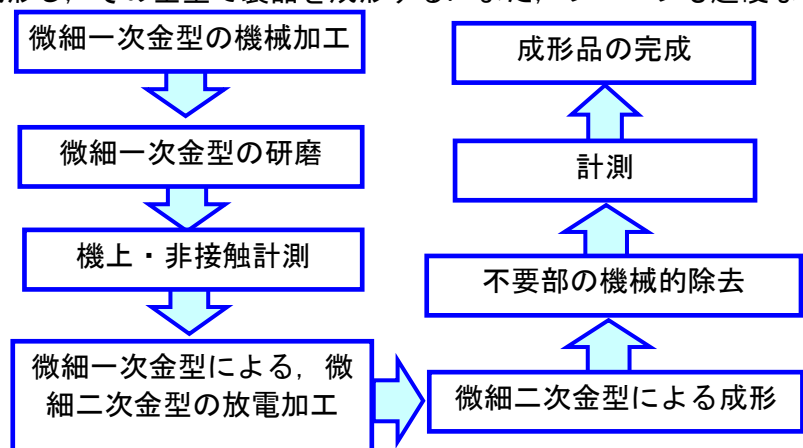


図6.2 電気加工、物理加工、マイクロ転写成形の複合成形プロセス

6-3 解決方法の具体的実施内容

6-3-1 集光型太陽電池用フレネルレンズ

近年、太陽光発電のニーズが増大しており、発電効率を高めるため、フレネルレンズを付加したソーラパネルの開発が行われている。図6.3に示すようにフレネルレンズにより均一に太陽電池に太陽光を照射する必要がある。高熱にも耐える必要性から、ガラス製であることや、安価であることが求められている。プラスチックレンズでは、型材として、無電解Niなどの軟質金属が用いられ、単結晶ダイヤモンドによる超精密切削が可能である。しかし、ガラス製フレネルレンズを量産（プレス成形）するためには、超硬合金などの硬脆材料に対して、研削加工が不可欠である。そこで、本実験では、ダイヤモンドホイールを用いて、超硬合金に対して、フレネルレンズ形状の高精度・高能率研削について検討した

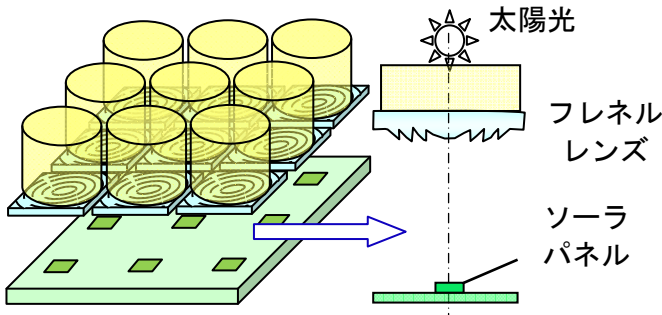


図 6.3 ソーラーパネル用太陽光集光フレネルレンズ

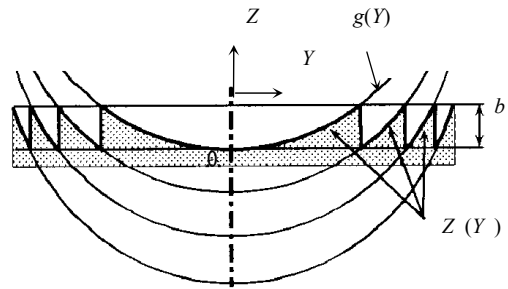


図 6.4 フレネルレンズ型の形状・定義

図 6.4 に示される軸対称のフレネル形状は次式で表される。

$$Z=f(Y)=\text{mode}(g(Y), h) \dots \dots \dots (6.1)$$

$$g(Y)=\frac{C_V \cdot Y^2}{1+\sqrt{1-(K+1) \cdot C_V^2 \cdot Y^2}}+\sum_{i=1}^n C_i \cdot Y^i \dots \dots \dots (6.2)$$

ここで、 Y は工作物の半径方向位置、 Z は回転軸方向の位置、 $g(y)$ は非球面関数(多項式)、 b はフレネルレンズの溝の段差である。

シリコン成形は、一般的なプラスチック成形と異なり、熱硬化性であり、スプルー・ランナーは金型を冷やさないと固まってしまう。一般的なプラスチック成形では、ホットランナーシステムにより加熱してスプルー・ランナーを固めさせないのと反対で、冷水を使用したコールドランナーシステムを使用することにより安定成形が可能となる。

しかしながら、ゲートの開閉を行うバルブゲートは、スプリングの押圧力と LSR の射出圧により行う複雑な機構のため高価であり、試作を行うたびに型を起こすのは容易ではない。

このため、集光型太陽電池用フレネルレンズだけでなく、血液分析用マイクロチャンネル用等、他試作にも使用できるコア、キャビティ等を比較的容易に入れ替える金型を開発した。

液状シリコンゴム(LSR)は流動性が良いので1点ゲートとし、コア、キャビティの寸法は280mm×280mmとした。また、LSRは成形時液状であり、流動性のよさのため、わずかな隙間でもバリが生じる。そのため、PLを構成する型板は平面度加工に定評のある機械で研削を行い、鏡面加工とした。

集光型太陽電池用フレネルレンズの使用環境は、最悪の場合、炎天の砂漠で砂嵐に耐えるものでなければならない。そのため、砂嵐等に直面する面はガラスとし、裏面は、プラスチックの欠点である耐紫外線に有効で、成形時に転写性が優れたシリコンを使用した。シリコンは高価でもあるので、強度を厚さでなくガラスに依存し、0.9mmの厚さとした。

試験用ガラスは光学用ガラスを用い、75mm×75mm×3.15mmのサイズとした。

フレネル形状は、集光型太陽電池を想定した下記の非球面多項式を用いた。

$$f(x)=\frac{x^2/R}{1+\sqrt{1-\frac{(1+k)x^2}{R^2}}}+\sum A_i x^i \dots \dots \dots (6.3)$$

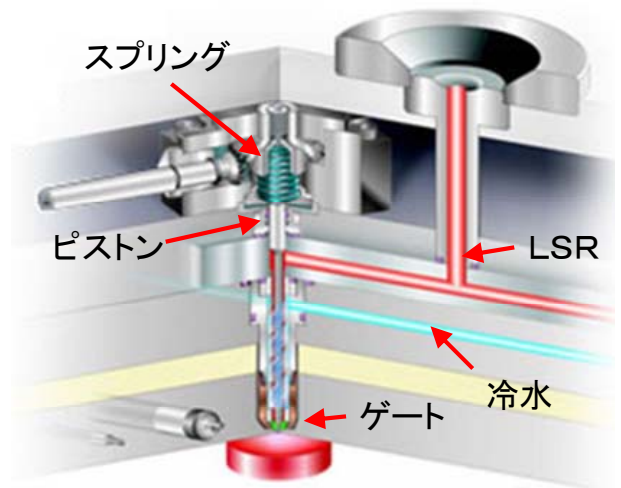


図 6.5 シムゲートノズル

非球面パラメータ (mm)

R	99.99	Cr	0.0100010001
K	0		
A_0	0		
A_1	4.73324E-03	A_{11}	0
A_2	-2.10466E-04	A_{12}	0
A_3	4.36303E-05	A_{13}	0
A_4	-1.79107E-06	A_{14}	0
A_5	2.28631E-08	A_{15}	0
A_6	-1.36485E-10	A_{16}	0

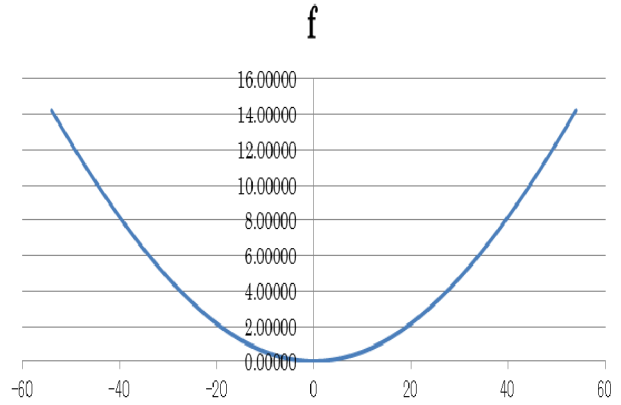


図 6.6 非球面形状

TOOLZ R先端

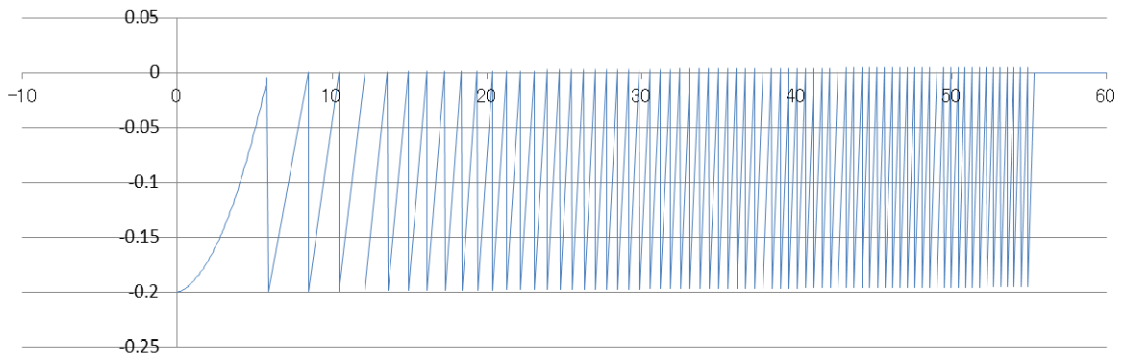


図 6.7 フレネル金型形状

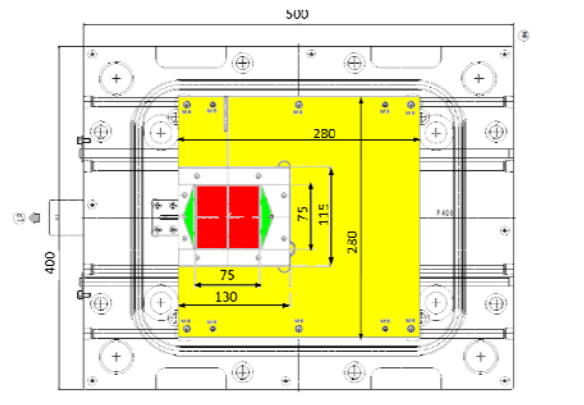


図 6.8 可動側平面図

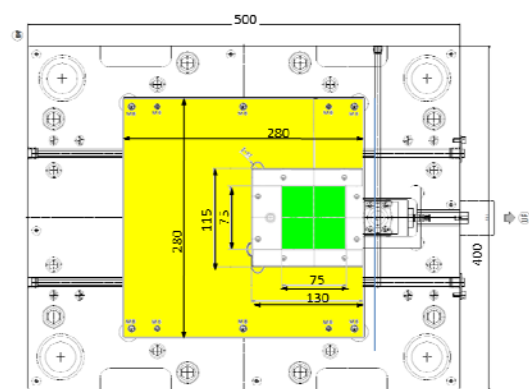


図 6.9 固定側平面図

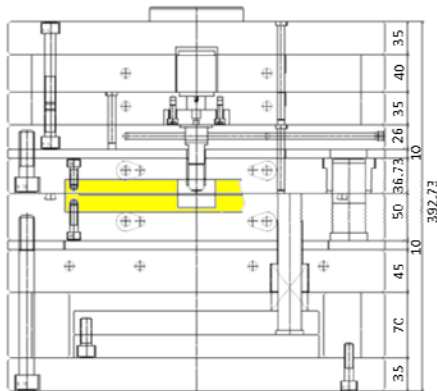


図 6.10 断面図その1

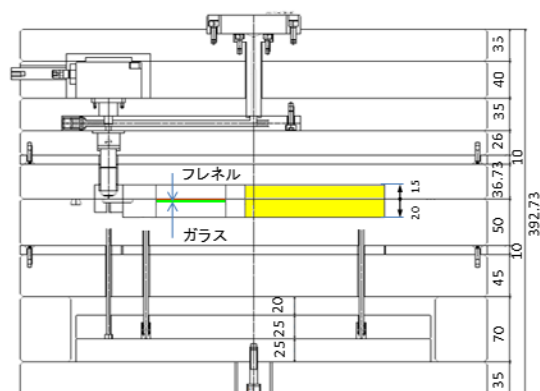


図 6.11 断面図その2

フレネルの高さは大きい方が、分割が少なく太陽光の損失が少ないが、シリコンの厚みからフレネルの高さを0.2mmとし、抜け勾配を 5.4° 、ノーズRを0.015mmとなるよう数値計算変換によりフレネル形状を算出した。設計した金型の設計図を図6.8～図6.11に示す。フレネルレンズをキャビティに加工した金型をメインパーティングで開いた状態を図6.10に、金型外観を図6.13に、シリコン成形の状況を図6.14に、シリコン成形をした成形品を図6.15に示す。使用した液状シリコンゴムは、信越化学工業㈱のLEDデバイスアセンブリ用シリコンLPS-L400で、仕様は、粘度35Pa・s、屈折率1.41、硬化温度150°Cである。

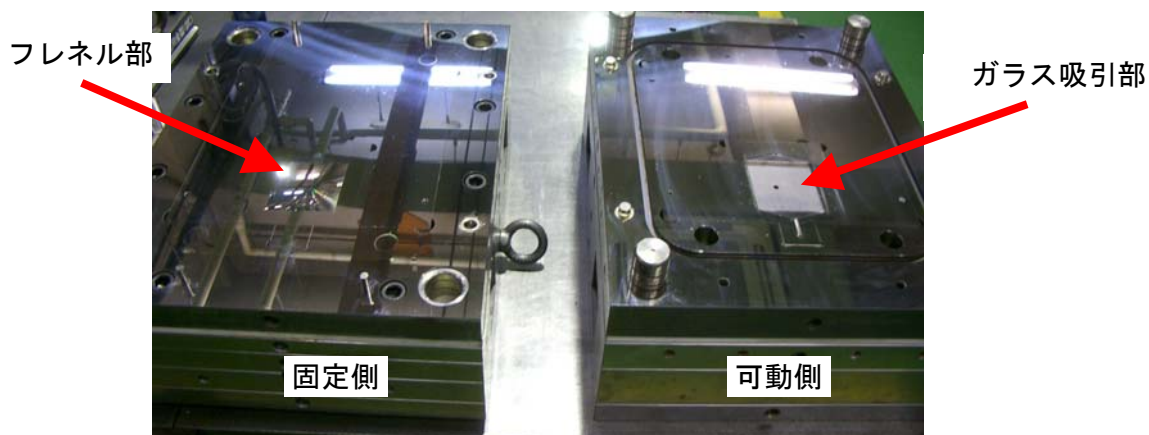


図 6.12 金型をメインパーティングで開いた状態

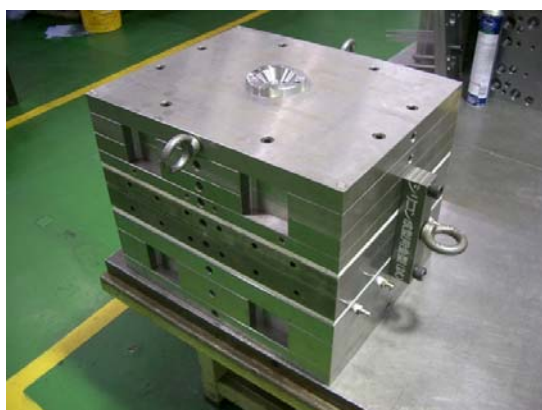


図 6.13 金型外観



図 6.14 シリコン成形状況

金型とレンズ成形品の、断面形状と表面粗さの測定結果を、図6.16、図6.17、図6.18、図6.19、に示す。表面粗さは金型16.3nmRz、レンズ成形品20.8nmRzで目標値30nmRzを下回っている。

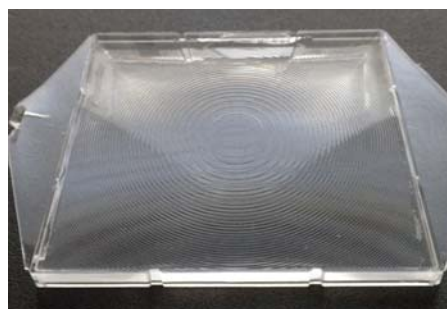
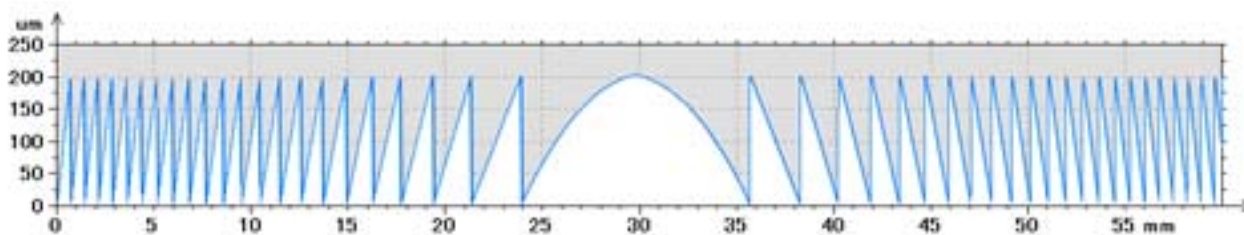


図 6.15 シリコン製フレネルレンズ



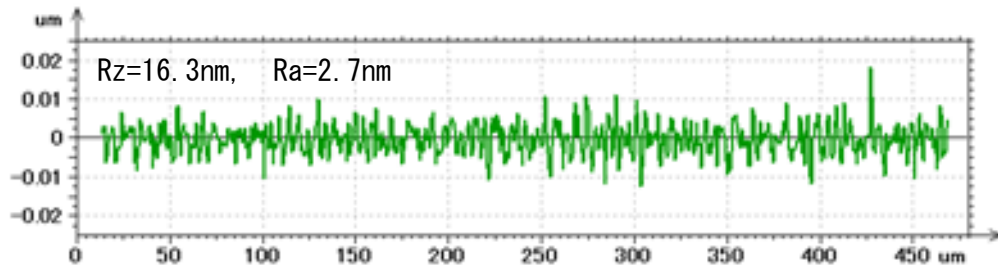


図 6.17 金型の表面粗さ

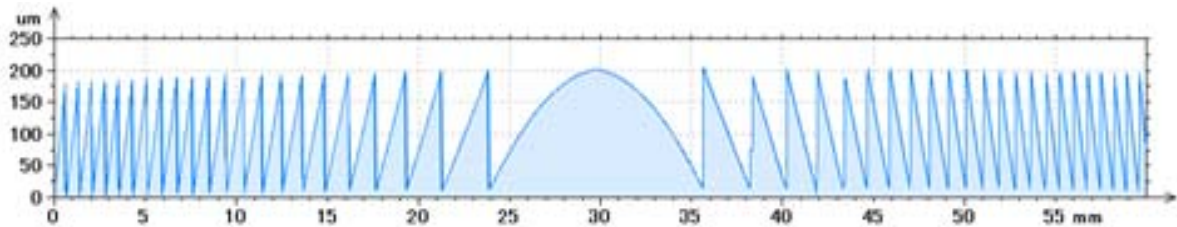


図 6.18 レンズ成形品の断面形状

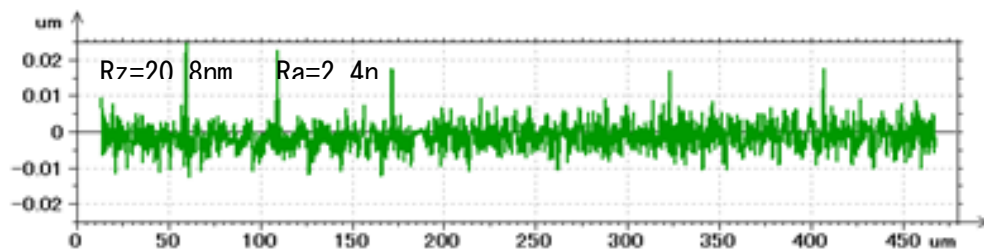
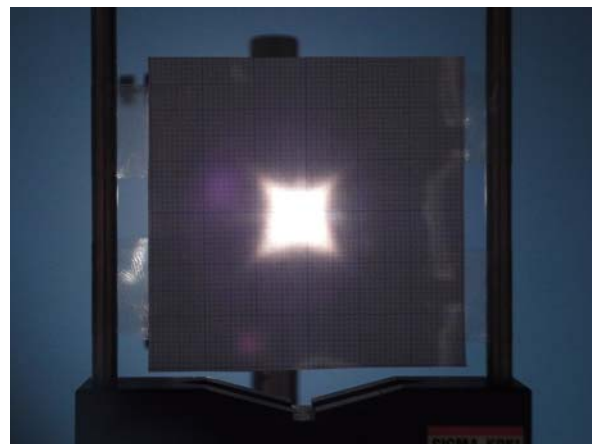


図 6.19 レンズ成形品の表面粗さ

シリコンは成形によって収縮するものの、その収縮率は一般的には成形条件により 26/1000～30/1000 と安定しない。本成形では、ガラスと付着させているので、平面方向は収縮を固定される。厚み方向は、0.99mmが0.97mmとなり、収縮率は 20/1000 と小さな値を示した。平面方向で拘束されている影響と考えられる。本研究で作成したフレネルレンズで、太陽光のもと実験を行った（図 6.20, 図 6.21）。良好な結果を得ている。あまり集光させすぎると太陽電池基板を破壊する。



6-3-2 フレネル形状の研削

フレネル形状の研削法を図6.22に示す。先端が 45° に尖ったダイヤモンドホイールを用い、Y、Z軸を同時2軸制御し、研削点において、ワークの回転方向と平行に砥石が回転するように研削加工を行った。この研削法では、砥石先端の鋭い形状が非常に重要である。砥石先端の曲率半径を R 、研削点での接線方向角を θ 、砥石先端の中心位置を (Y_0, Z_0) とすると、砥石先端の軌跡 (Y_g, Z_g) は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} Y_0 &= Y_w - R \sin \theta \\ Z_0 &= Z_w - R (\cos \theta - 1) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6.4)$$

図 6.22 に示すように同時 4 軸 (X, Y, Z, C) 制御超精密加工機 ULG-100D (SH³) を用いて研削加工を行った。研削装置の X, Y, Z 軸は転がり案内でリニアモータ駆動であり、最小分解能は 1nm である。主軸および工具スピンドルは多孔質空気静圧軸受を使用した。微粒子超硬合金製金型は真空チャックによりワークスピンドルに固定した。

本実験では、図 6.23 に示すように直径 φ50mm のフレネル形状の微粒子超硬合金製金型に対して研削加工を行った。研削条件を表 6.2 に示す。

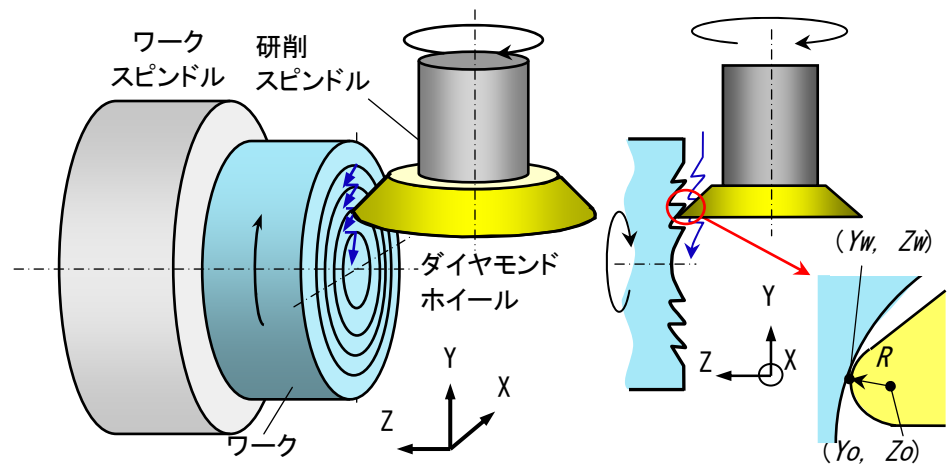


図 6.22 Y-Z 軸同時 2 軸制御によるフレネル形状研削法

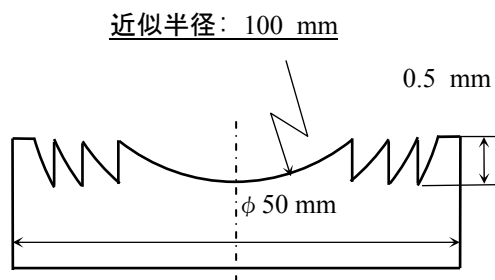


図 6.23 フレネル形状の研削加工の外観

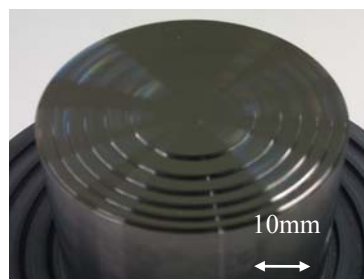
表 6.2 砥石の仕様と加工条件

砥石	レジンボンド・ダイヤモンド
砥粒	#1200
外形	φ 70 mm
回転速度	12000 min ⁻¹
金型	微粒子超硬合金
回転速度	500 min ⁻¹
切込み	0.5 μm
送り速度	0.05 mm/min
クーラント	ソリューションタイプ

研削加工したフレネル形状の超硬合金の断面形状を図 6.25 (a) に示す。図 6.25 (b) にフレネル段差部分を拡大した断面形状を示す。これらは非接触走査型青色レーザープローブにより測定した。非常に鋭利な段差が得られていることがわかる。図 6.25 (a) の結果を用いて解析した形状誤差曲線を図 6.26 に示す。0.8 μm P-V 以下の形状誤差が得られている。New View6200 にて中心部分の表面粗さを測定した結果を図 6.27 に示す。18nmRz と良好な表面粗さが得られているのがわかる。

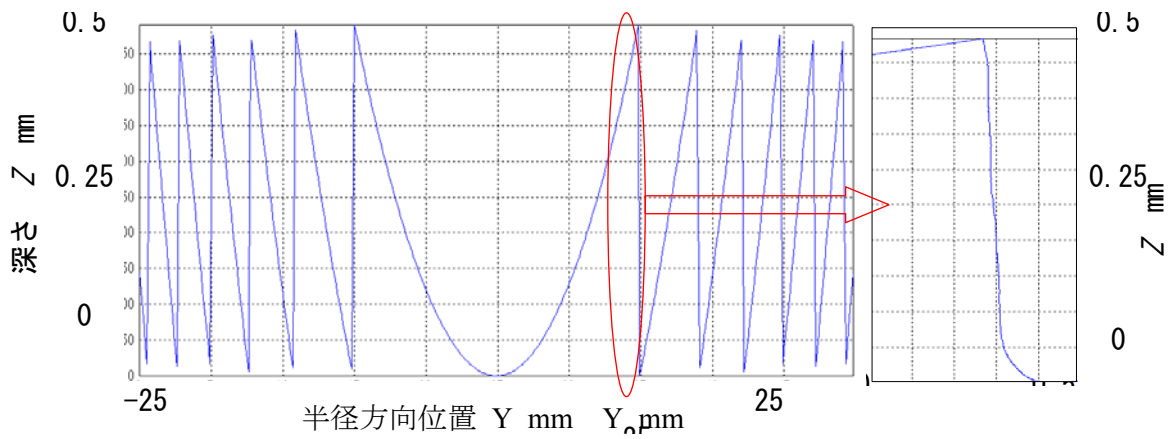


(a) 概略寸法



(b) 外観

図 6.24 フレネル形状レンズ成形型



(a)断面形状

(b)段差部分の詳細

図 6.25 フレネルレンズ成形型の断面形状

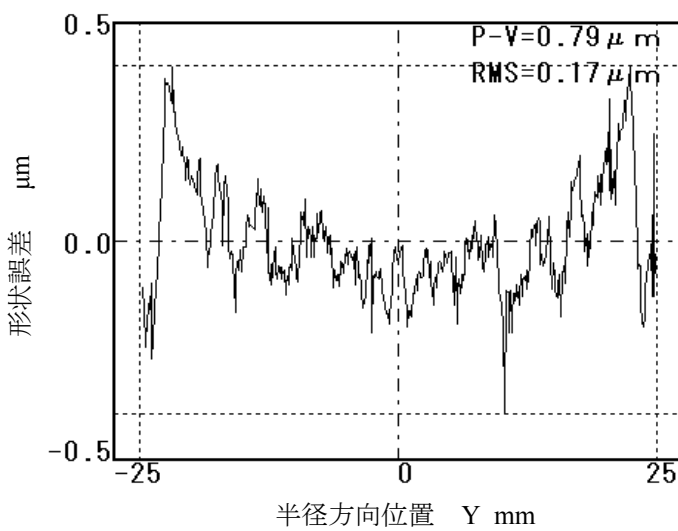


図 6.26 形状誤差曲線

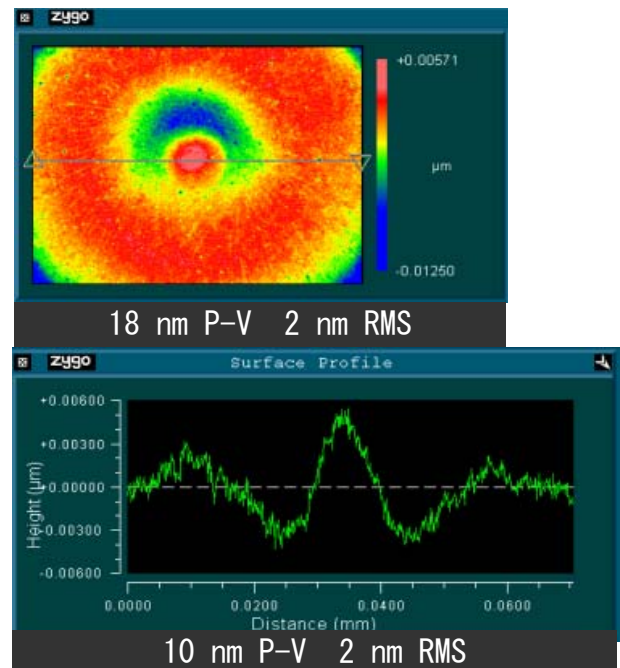


図 6.27 超硬合金中心部分の表面粗さ

6-3-3 マイクロチャンネル (シリコン樹脂など)

マイクロチャンネルは、血液分析用だけではなく、セルソーター (Cell Sorter) としても使用される。セルソーターは、細胞や染色体を連続的に移動する小さい液滴の中に閉じこめ、それに主にレーザー光を利用した励起光を照射して生じる回折光や蛍光の大きさと波長から、特定の細胞の分布を調べたり分取する目的で使われる。

セルソーターの形状を図 6.28 に示す。流路は $50 \mu\text{m}$ 幅 $\times 50 \mu\text{m}$ 高の微細溝となり、連絡流路は 0.1ϕ となる。

有限要素法解析ソフトウェア (COMSOL Multiphysics 3.5a) を用いて非圧縮性流体 + 拡散・対流 のシミュレーションを実施した。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c - u \cdot \nabla c \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho (u \cdot \nabla) u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + F \\ \nabla \cdot u = 0 \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots (6.5)$$

c:濃度 (mol/m^3) D:拡散係数 (m^2/s) u:流速 ρ :密度 (kg/m^3) μ :流速 (m/s) p:圧力 (Pa) F:外力 (m/s)

流速:0.1m/s(シースフロー), 0.05m/s(サンプル), マイクロ流路幅 50 μ mで, 2D 計算した結果を, 図 6.29 に示す.

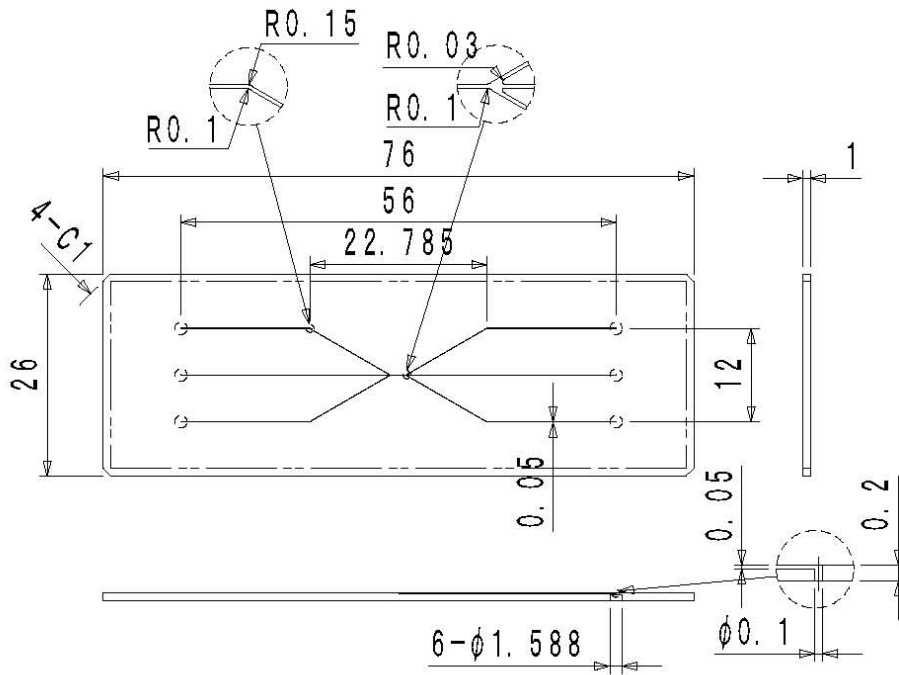


図 6.28 セルソーターの形状

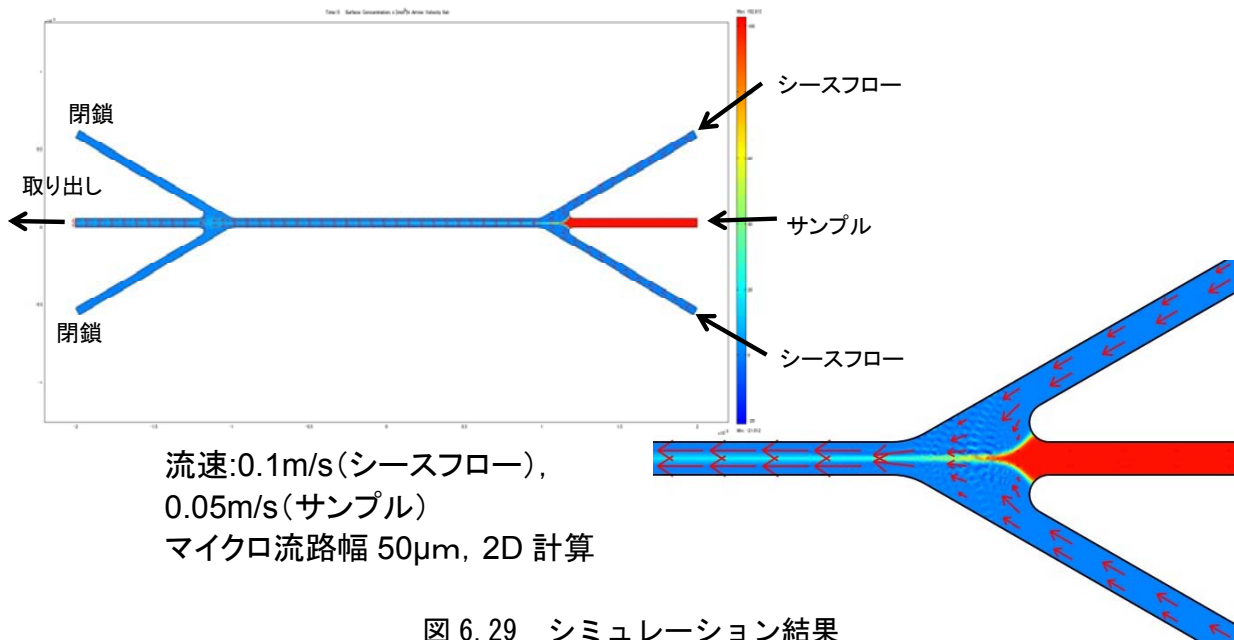


図 6.29 シミュレーション結果

成形試作品の写真を図 6.30 に示す. 使用した液状シリコーンゴムは, 信越化学工業(株)のLEDデバイスアセンブリ用シリコンLPS-L400である(フレネルと同じ).

シリコーンは成形により収縮するが, その収縮率は, 27~29/1000 となる. アニーリング処理は行っていない. 26mm の寸法では流動奥の方が小さく(収縮が多く)元と奥で 0.04 の違いが生じた. (表 6.3)

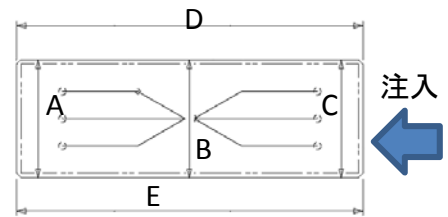


図 6.30 セルソーター (材質: シリコーン)

マイクロチャンネルの評価実験を行い、蛍光色素と超純水を注入しシースフローが形成されることを確認できた。(図 6.231)

表 6.3 セルソーターにおけるシリコンの収縮

	A	B	C	D	E	厚
金型寸法	25.83	25.83	25.83	75.83	75.83	1.06
製品寸法	25.07	25.10	25.11	73.73	73.75	1.03
収縮率	2.9%	2.8%	2.8%	2.8%	2.7%	2.8%



Overview

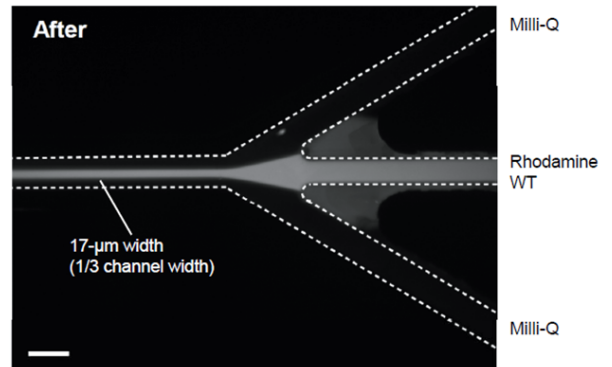
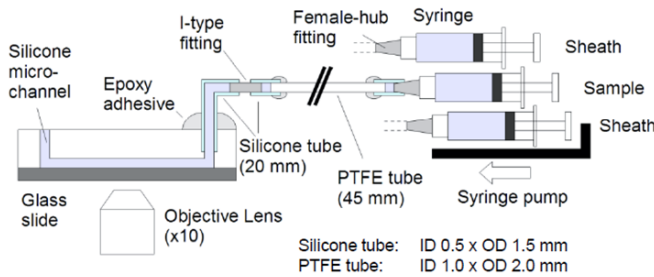
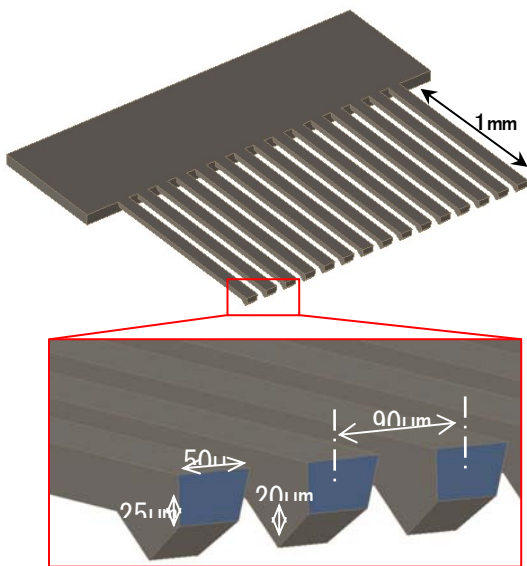


図 6.31 マイクロチャンネルの評価実験

6-3-4 半導体検査用マイクロプローブ (金属ガラス)

(a) マイクロ微細部品的设计

図 6.32 に設計したマイクロ微細部品の概略図を示す。15本のプローブ部分とそれらを固定する部分から構成されている。プローブの断面や寸法は第3章での成形性や第4章での加工時の耐久性を考慮し、矩形断面(25×50μm)とし、間隔は90μmとした。また先端に高さ20μm山形状の突起を設けた。これはウエハテスト時にICプローブとLSI側の電極パッドの接触部分となるように模したものである。この接触には確実な接触と適度な荷重が必要であるため先端が尖った形状は有効であると考えられる。



また部品のプローブ部分の柔軟性を検証するため有限要素解析を行った。解析にはシミュレーションソフト COSMOS Works を用いた。図 6.33 に解析結果を示す。プローブの先端が約14μm変位するときの荷重は0.5mNであった。

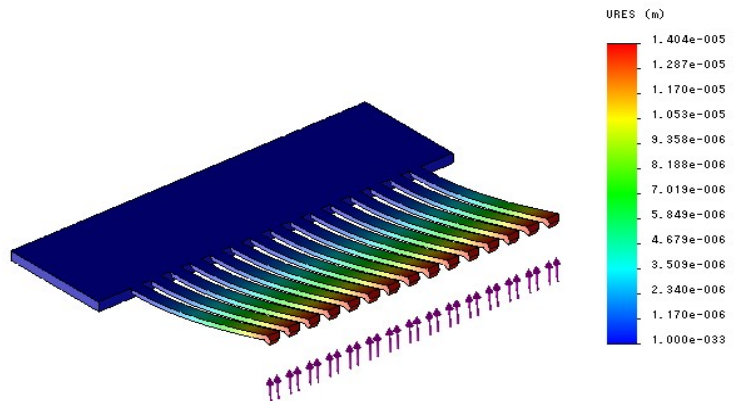


図 6.32 設計したマイクロ微細部品の概略図

図 6.33 プローブ部分の柔軟性の解析結果

(b) 金型の加工

金型中央の微細溝は精密切削加工や研削加工を用いての加工が考えられるが、微細溝先端に設けた山型の窪みの加工はこれらの加工方法では困難を伴うことが予想される。そこで本研究では型彫り放電加工を用いて金型の加工を試みる。型彫り放電加工は任意形状の電極を加工物に近づけアーク放電により加工物を少しずつ除去していくため溝の中に窪みがあるような複雑な形状も加工可能であると考えられる。また加工中に加工物にかかる力も小さいため微細溝加工に適していると考えられる。

①電極の設計および加工

はじめに放電加工に用いる電極の作成を行った。電極には銀タングステンをを用いた。銀タングステンは一般に放電加工に用いられる銅電極に比べ加工が困難であるが、より高精度に加工することができ、また放電加工時における電極の消耗が少ないため超硬合金の微細放電加工に適していると考えられる。電極の形状は放電加工時に電極と加工物の間に隙間（放電ギャップ）が必要であるため、放電ギャップ分の寸法を考慮して作成する必要がある。本加工では放電ギャップを片側 5 μ m とした。

まず金型中央の微細溝部分を加工する電極の加工を行った。電極の表面に微細溝の形状を凸形状で加工する。加工は超精密加工機（東芝機械製 ULG-100D (SH³)）を用いた。本機はレンズや成形用金型などを非球面形状に研削加工または切削加工することを目的とした同時 4 軸加工機である。研削スピンドルおよび C 軸（ワークスピンドル）には空気制圧軸受、送りテーブル (X, Y, Z 軸) には V-V 転がり案内テーブルを搭載し、個々に独立した高精度な送り駆動系を有している。

加工はダイヤモンドバイトを用いたシェーパ加工にて行った。バイトは先端の幅 35 μ m 台形形状で逃げ角は 15° である。加工実験の様子を図 6.34 に示す。工作物はジグを介して真空チャックで固定し、電気マイクロメータを用いて傾きを調整した。また工具の逃げ面側から白灯油を噴霧している。工具の動きを図 6.35 に示す。谷となる位置では工具を水平に送り、山の部分では工具を所定の位置まで送った後、突起部分を作成するため工具を斜め 45 度前方に逃がすようにプログラムを作成した。逆側の突起部分の加工は C 軸を用いて加工物を 180 度回転させて加工を行った。表 6.4 に切削条件を示す。工具や加工物への負担を軽減させるため一ヶ所を集中的に加工するのではなく全体的に順に 1 μ m ずつ切り込み、繰り返し加工を行った。

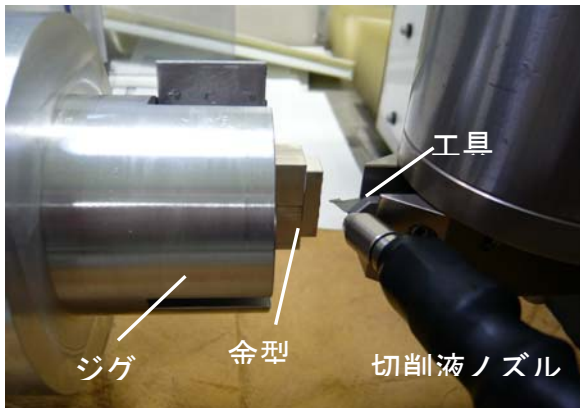


図 6.34 加工実験の様子

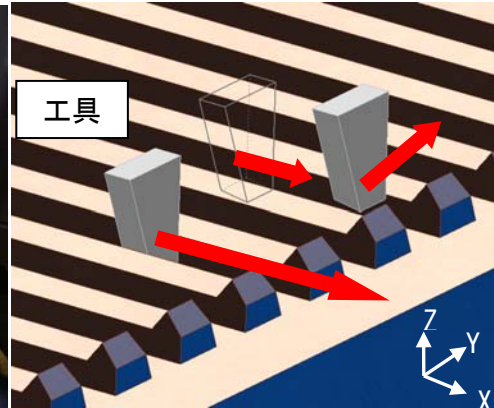


図 6.35 工具の動き

表 6.4 切削条件

工具	単結晶ダイヤモンド
幅	0.035 mm
すくい角	15 deg.
金型材	銀タングステン合金
切込み	1 μ m
送り	200 mm/min
切削液	泊灯油

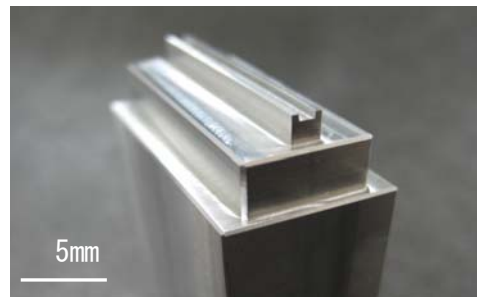


図 6.36 加工した電極の写真

金型の2本の溝加工に用いた電極を図6.36に示す。材質は同じく銀タングステンとし、一度の放電加工で2本同時に加工することが可能である。

① 放電加工による第2次金型へのマイクロ転写

次に、微細切削した銀タングステン製の第1次金型（電極）を用いて、NC放電加工機（牧野フライス製EDAC1）により微粒子超硬製の第2次型を放電加工により微細パターンの転写を行った。加工は合成油中で行った。放電加工後の第2次型のノマルスキー顕微鏡写真を図6.37に示す。微細なパターンが良好に転写されている。

② プレス成形による金属ガラスへの転写

次に、②で試作した2次金型を用いて、金属ガラスへの加熱プレスにより成形転写を行った。成形材料はZr系金属ガラス（Zr₅₅Al₁₀Ni₅Cu₃₀）を用いた。Zr系金属ガラスは広い過冷却液体域を持つためにガラス形成性が高い

2). 実験条件を表6.5に示す。金属ガラスの形状はφ3mm×t0.55mmとした。実験装置は高精度ガラス成形装置GMP-311V-SS（東芝機械製）を用いた。プレス成形後の微細部品のSEM像を図6.38に示す。放電加工により先端部が丸くなっているが良好に転写されている。

表6.5 成形条件

成形材料	Zr系金属ガラス Zr ₅₅ Al ₁₀ Ni ₅ Cu ₃₀ (atom %)
寸法	φ3 mm×0.15mm
金型材料	超硬合金
外径	φ6 mm
成形温度	450 °C
成形荷重	1.0 kN
成形時間	90 s
成形圧力	0.25 kN

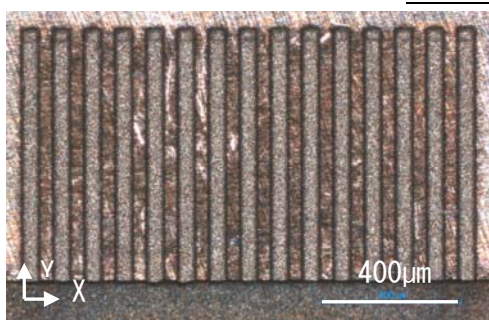


図6.37 銀タングステン金型で放電加工した超硬剛金製型

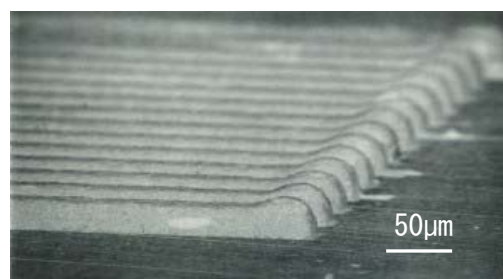


図6.38 金属ガラス製構造部品のSEM写真

第7章 全体総括

「微細構造・高硬度金型の超精密微細加工技術と成形技術の開発（H21～H23年度）」を課題として、平成21～23年度の3年間にわたり、株式会社長津製作所を事業管理者とし、株式会社長津製作所、マイクロ・ダイヤモンド株式会社、有限会社メカノトランスフォーマ、三鷹光器株式会社の企業と、学校法人中部大学、国立大学法人東京大学、独立行政法人理化学研究所、公立大学法人秋田県立大学の研究機関とが研究プロジェクトに参画し、研究計画に従い着実に研究開発を実施し、超精密金型分野における中堅企業の技術力と国際競争力の強化に貢献する成果を多数得ることができ、「戦略的基盤技術高度化支援事業」の最終年度の目的を達成することができた。

本研究プロジェクトでは、研究開発実施期間終了後における研究成果の早期の事業化を視野に入れ、(1)マイクロエンドミル工具と微細形状の精密かつ高能率な微細切削技術の開発、(2)リニアモータ・ボイスコイル・圧電アクチュエータ応用研磨ヘッドの開発、(3)多自由度方向制御可能な研磨システムの開発、(4)非接触機上測定装置の開発、(5)微細形状の成形転写技術の開発等の具体的な課題に取り組み、全ての技術目標を達成することができた。

平成23年度の最終結果に基づき、24年度は事業化を視野に入れてさらに、技術の開発に努める。また川下企業からの試作加工、展示会出展、学会発表を通じて、さらに事業化に向けて磨きを掛けると共に、技術PRに努めていく。