

マイクロプロファイルのナノプレシジョン成形加工技術の研究開発

独立行政法人 理化学研究所

主任研究員 大森 整

(平成 14 年度研究開発助成 AF-2002013)

キーワード：ナノプレシジョン，マイクロツール，マイクロ成形

1. 研究の目的と背景

近年、情報通信機器、各種モバイル機器の急速な小型化・軽量化に伴い、極微細な構造を有する精密部品の製造技術が重要視されている。そうしたマイクロパーツの量産技術の確立、製造コストの削減を実現するためには、マイクロ形状を持つ金型を用いた塑性加工によるナノプレシジョン成形に基づく製造技術の構築が急務とされてきている。

一方，“マイクロファブ리케이션”と呼ばれることの多い半導体プロセス技術では、マイクロ形状を持つ金型などの金属の微細加工が困難であり、シャープかつナノプレシジョン加工の実現は難しいため、近年、微細な除去加工や成形加工を含む機械加工による微細加工“マイクロメカニカルファブ리케이션”の適用が認識され始めている。マイクロメカニカルファブ리케이션により、金型加工の微細化、極限化および転写成形精度を確立するためには、そのツール形状や転写成形による微細表面構造の計測・評価技術が不可欠となり、またツール形状とその転写条件を効率的に確立するためには、コンピュータシミュレーションの援用が重要となり、これらを一貫性を持つ形に統合化する必要がある¹⁾³⁾。

本研究では、マイクロ金型形状による塑性加工に基づくマイクロパーツの製造技術の確立には、まず申請者らにより開発された超精密鏡面研削技術である ELID（電解インプロセスドレッシング）研削法を応用したマイクロツール加工プロセスの適用技術の確立を目指す。さらに、超精密加工されたマイクロツールプロファイルの転写成形加工により、微細化とともにナノプレシジョン精度を実現させるためには、適正なマイクロツール形状および転写成形条件の検討が不可欠となる。そのために、コンピュータシミュレーションを援用するとともに、実験的検証により適正なツールデザインと成形条件の確立を目指す。また一方で、転写成形加工の極限化を狙うために、プロファイルと表面とを超精密かつ超微細レベルで計測・評価できるマイクロ計測プローブの検討を行い、マイクロツール加工工程におけるオンマシン計測、フィードバック技術の確立を目指す。これらの技術の統合化を図り、マイクロ金型の製造技術およびマイクロパーツ量産化技術の確立に向け

た成果を狙う。

2. マイクロツールの超精密加工

2.1 デスクトップ ELID 研削加工機によるマイクロツールの創製

本加工装置の加工方法はワークに回転運動を与えず X-Y ステージの制御動作により、所望の形状に加工を行う。この加工方法により円柱形状ばかりでなく正方形や長方形の角柱形状、楕円形状、コーナーR付き角柱形状などの様々な形状の加工を可能とする。また、マイクロ円柱ピンの加工方法は、ワークが砥石の周囲を渦巻状に移動し、切り込みはワークが砥石周囲を1回転するにしたがい、ワーク軸心を砥石軸心方向に一定量切り込み送りするように加工を行う方法を採用している（図1）。

本加工装置を用いて、四角柱マイクロピンの加工実験を行った。ELID 研削条件について表1に示す。砥石は鑄鉄ボンドダイヤモンド砥石#4000 を用い、ELID 研削システムを適用し、当研究により考案した高精度なツルイーイング方法を併用することにより、先端直径 $2\ \mu\text{m}$ のマイクロツールの製作に成功した。また、表面性状と角柱エッジ部の状態もきわめて良好で、マイクロツールとしての機能と性能を十分に果たす事が期待できる。また、加工後 SEM により観察した結果を図2に示す。また、同加工条件によって作成した高アスペクトのマイクロピンを図3に示す。先端直径が $15\ \mu\text{m}$ 、全長が $300\ \mu\text{m}$ アスペクト比 20 を達成している。

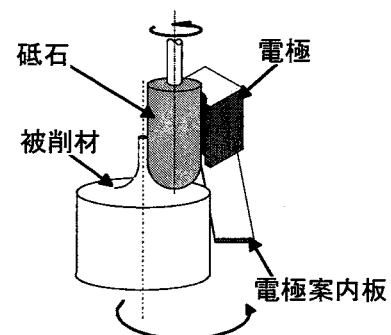


図1 旋回電極式 ELID の加工方法

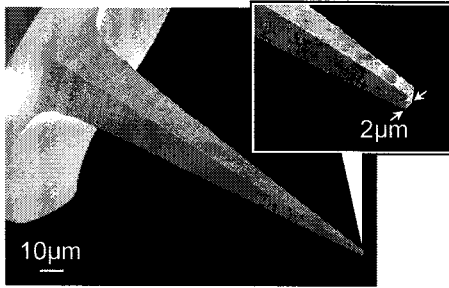


図2 四角柱マイクロピン

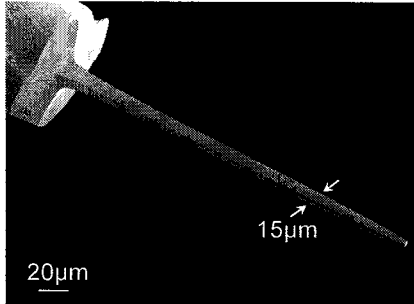


図3 高アスペクトマイクロピン

この方法により加工されたマイクロツールはナノレベルの高品質な表面を有することから、ツールに破壊起点を生じさせずに、従来に比べ著しい強度が実現できた。さらに表面にDLC(ダイヤモンドライクカーボン)被覆(図4)を施すことにより、さらなる高耐久化を実現した。また、加工方式を工夫することにより、図5のように八角柱状のマイクロツールも実現できた。現在までに、こうして製作されたマイクロツールを用いて、図6に示すマイクロスタンプングによる微細角穴の加工や、図7に示すマイクロ金型の微細加工の基礎研究を進めている。以上のようなマイクロツール加工手法とそれを用いた微細加工手法の基本技術・コンセプトを応用し、マイクロプロファイル創製に関する研究開発を進める。

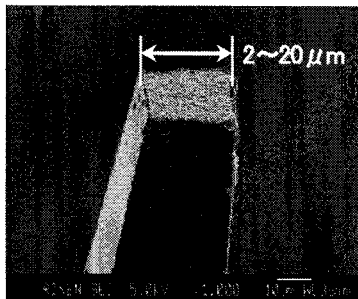


図4 ダイヤモンドライクカーボン被覆ツール

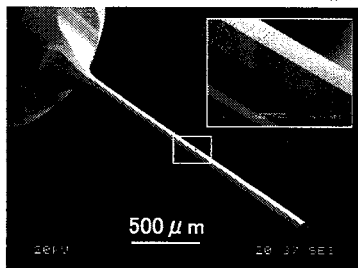


図5 八角柱マイクロツール

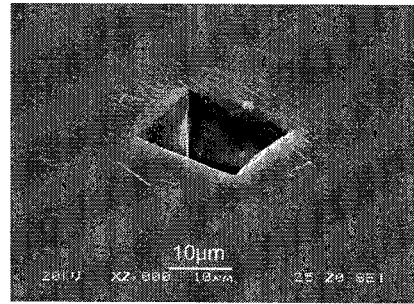


図6 金属板へのマイクロスタンプング穴

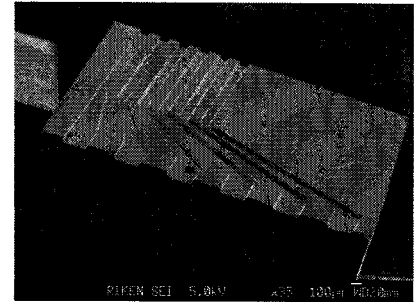


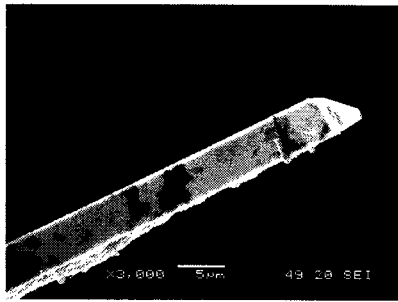
図7 マイクロ金型微細加工

2. 2 単結晶ダイヤモンド工具によるマイクロプロファイル形成加工

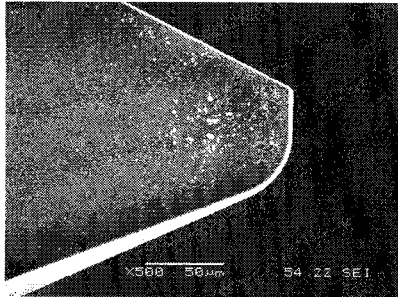
超精密金型の加工プロセスとして、基本的には切削加工と研削加工がある。超精密切削加工は、通常、シャープエッジを持つ単結晶ダイヤモンド工具と、それにより超精密な運動軌跡の転写加工を行うための超精密切削加工機を用い、複雑な形状加工に耐え、かつ光学鏡面に近い平滑な機械加工面を得るもので、光学部品用のマイクロ金型加工やマイクロ部品加工などに適用される。超精密切削加工機は、回転軸には空気や油による静圧軸受を採用し、閉ループ制御によりサブミクロンの運動制御精度を実現し、テーブル案内方式としては精密すべり、精密ローラー、空気もしくは油静圧などがある。またNC装置としては、4軸以上の多軸同時制御を1nm分解能で行うなど、高性能化が進行している。単結晶ダイヤモンド工具のSEM観察例を図8に示す。

これらの工具を用いたサブミクロン回折格子の加工実験として、3種類の1µm以下のV溝の切削加工実験を行った。加工装置には超精密マイクロ5軸空気静圧駆動システムを用い、工具には刃先角90度の単結晶ダイヤモンド工具を用いた。加工材料には無酸素銅を用いた。図9に示すような溝形状を、工具回転軸を加工面の法線に対して30度傾けて加工を行った。実験時の主な加工条件を表2に挙げる。加工を行った溝の断面形状と表面性状を原子間力顕微鏡(AFM)および電子顕微鏡(SEM)により測定した。AFMによる測定結果を図10~12に示す。

実験の結果、表1の加工条件においていずれの溝もバリの発生はなく、1µm以下の間隔で非対称の3角形溝の形状加工ができてることがわかる。同様の実験を無電解ニッケルめっきについて行ったところほぼ同等の結果が得られた。



(a) 単結晶ダイヤモンドバイト



(b) 単結晶ダイヤモンドエンドミル

図8 単結晶ダイヤモンド工具

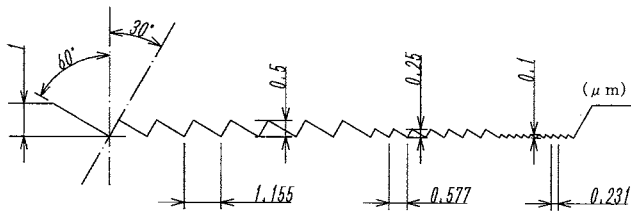


図9 加工された微細溝の形状

表1 加工条件

加工工具	単結晶ダイヤモンド工具 (刃先角度90度)
工具傾け角	30度
切り込み深さ	1 μm
格子間隔	0.25~1 μm
工具送り速度	10mm/min
工具スピンドル回転数	60,000min ⁻¹

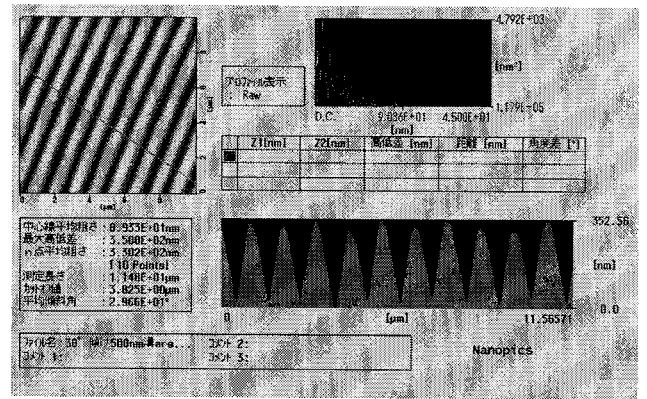


図11 500nm溝断面形状(測定範囲10 μm)

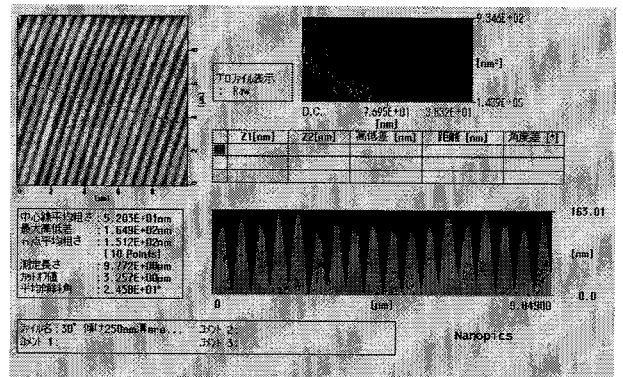


図12 250nm溝断面形状(測定範囲10 μm)

次にマイクロエンドミルを用いて微細な矩形形状を有する誘電体アンテナを加工した例を図13に挙げる。バリも少なく非常に良好な形状が作製できていることが確認できる。

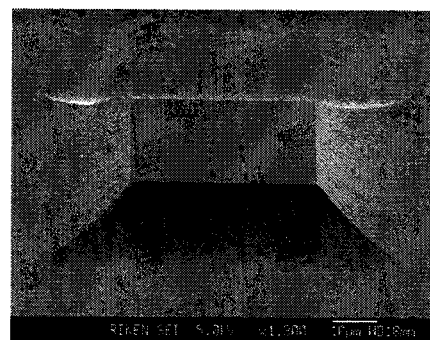
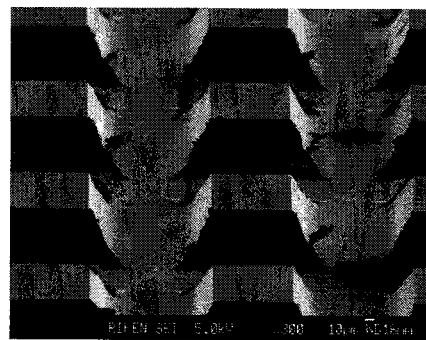


図13 マイクロ誘電体アンテナ

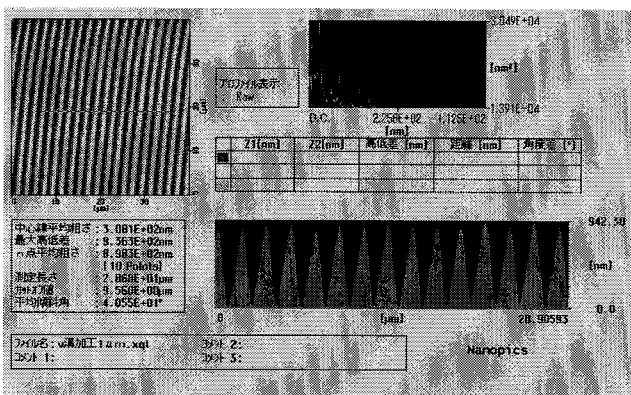


図10 1 μm溝断面形状(測定範囲40 μm)

3. マイクロプロファイルの転写成形

マイクロプロファイル、特にマイクロ光学素子であるホログラム等の極微細溝パターンの塑性加工による転写成形加工の極限化に関する研究に関しては、マイクロツール加工プロセス、転写成形プロセス、マイクロ計測技術との一貫性がなく、いまだ確立を見ない状況である⁴⁾⁻⁵⁾。

本節では、前節でも述べた同一面上に深さの違う溝形状を有する導光板の開発を具体例として、全空気静圧式超精密多軸加工機を使用し、3種類の溝形状パターンを金型に施し、開発を進めている卓上型射出成形機にて成形品を製作し、金型と成形品との転写率について調査を行った。

図14に実験に使用した卓上型射出成形機を示す。卓上型射出成形機による転写率を確認するために、3種類のピッチの違うV溝加工を施した金型を製作し、その金型を用いて射出成形を行った。深さはそれぞれ $1\mu\text{m}$ 、 $1.5\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ の3種類である。本実験における射出成形条件は、金型温度 140°C 、プランジャー温度 280°C 、プローブ温度 300°C 、チャンバー温度 280°C 、スクリュウ温度 260°C 、射出圧力80%、射出時間5秒、冷却時間7秒、成形材料はゼオネックスを使用した。成形後、成形品からランダムに10個抜き取り、成形品と金型をオンマシン原子間力顕微鏡(AFM)により計測し、転写精度の評価を行った。

図15に $1\mu\text{m}$ ピッチ金型表面の溝形状(AFM)を示す。図16に $1\mu\text{m}$ ピッチ成形品転写面の溝形状(AFM)を示す。図17に $1.5\mu\text{m}$ ピッチ金型表面の溝形状(AFM)を示す。図18に $1.5\mu\text{m}$ ピッチ成形品転写面の溝形状(AFM)を示す。図19に $2\mu\text{m}$ ピッチ金型表面の溝形状(AFM)を示す。図20に $2\mu\text{m}$ ピッチ成形品転写面の溝形状(AFM)を示す。図21に転写率の結果を示す。

実験の結果、ピッチ $1\mu\text{m}$ の時は、金型の溝のP-V値 327.28nm 、成形品の溝のP-V値 223.80nm 。このときの転写率68.4%となる。ピッチ $1.5\mu\text{m}$ の時は、金型の溝のP-V値 350.47nm 、成形品の溝P-V値 324.95nm 。このときの転写率92.7%となる。 $2\mu\text{m}$ ピッチの時は、金型の溝のP-V値 709.06nm 、成形品の溝のP-V値 469.90nm 。このときの転写率66.3%となる。この結果から、 $1.5\mu\text{m}$ ピッチの場合には開発した卓上型射出成形機においてもナノメートルレベルの溝を有する製品に対して、転写率の高い成形品を得られることが確認できた。しかし、 $1\mu\text{m}$ ピッチと $2\mu\text{m}$ ピッチの溝に関しては低い転写率となった。この結果から、同一面上にピッチの違う溝形状を有する成形品の場合それぞれの溝に対して同じ転写率を得られないということが示唆できる。これはゲートからそれぞれの溝の位置関係が影響しているのではないかと考える。また、ゲートの大きさが成形品に対して小さい事も影響していると考えられる。今後は、同一面上にある $1\mu\text{m}$ 及び $2\mu\text{m}$ のときの転写率を、 $1.5\mu\text{m}$ のときの転写率と同様に得られるような

成形条件の見極めと、スプール、ゲート、金型温度配管などの最適化を検討していく。

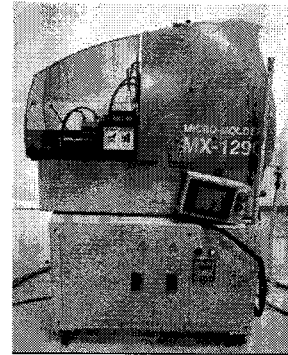


図14 卓上型射出成形機 MICRO-MOLDER

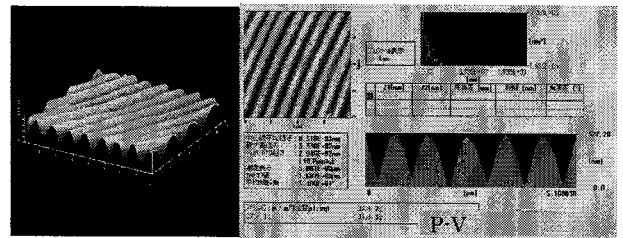


図15 ピッチ $1\mu\text{m}$ の金型表面の溝形状 (AFM)

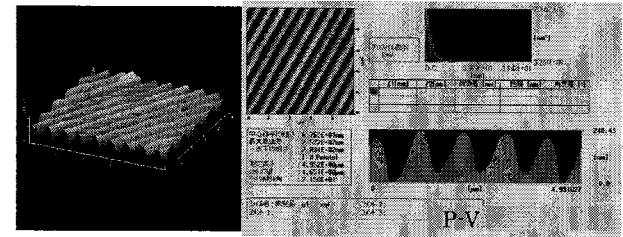


図16 ピッチ $1\mu\text{m}$ の成形品表面の溝形状 (AFM)

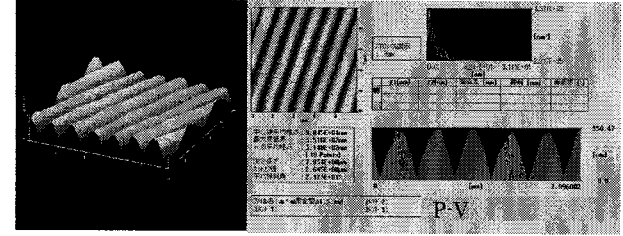


図17 ピッチ $1.5\mu\text{m}$ の金型表面の溝形状 (AFM)

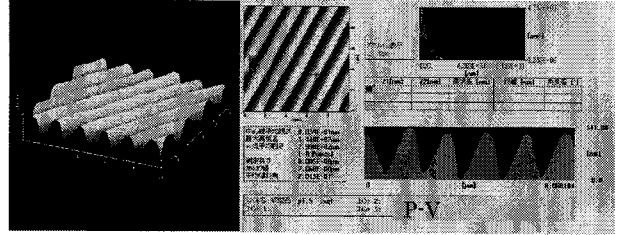


図18 ピッチ $1.5\mu\text{m}$ の成形品表面の溝形状 (AFM)

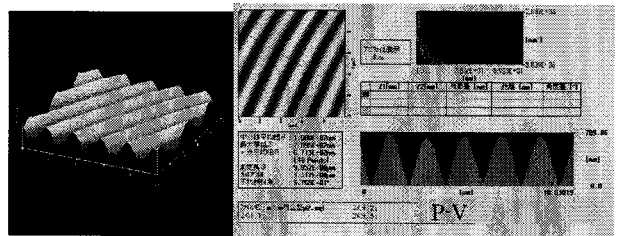


図19 ピッチ $2\mu\text{m}$ の金型表面の溝形状 (AFM)

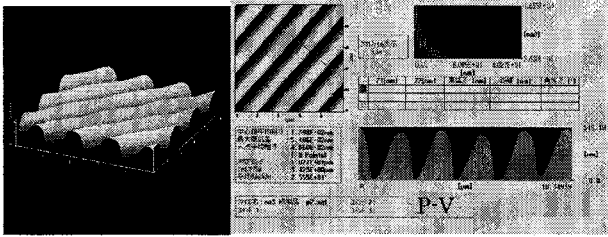


図 20 ピッチ 2 μm の成形品表面の溝形状 (AFM)

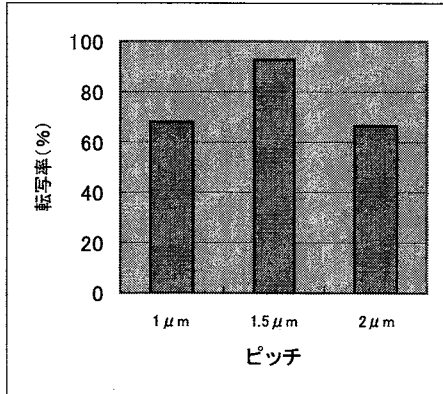


図 21 転写率

4. マイクロ成形加工のシミュレーションソフトの開発

樹脂の変形挙動は金属と比べるとはるかに複雑であり、シミュレーションが難しくなる。本研究では、成形加工の微細化による寸法効果を検討するため、熱圧縮成形シミュレーション専用ソフトの開発を行った。そのシミュレーションのもとで、成形材料、条件および金型設計の最適化の検討を行う。なお、本研究で開発した熱圧縮成形ユニットでの成形では、ガラス転移点を僅かに超えた半熔融状態からはじまり、また、射出成形のように圧力を加えて流動を起こすという意味合いが小さく、樹脂の変形挙動は固体の塑性変形に伴って大きく変形して行く前提のもとで解析される。

マイクロ射出成形における材料の変形要因としては、金型の押込みによる型成形と温度低下による熱収縮がある。このうち型成形では材料の変形量が大きいため大変形の定式化を用いた構造解析(応力解析)をする必要がある。一方、熱収縮のように温度変化が起こることで、変形が生じる現象を扱う場合には、構造解析と温度解析の連成が必要となる。それらを配慮してシミュレーションソフトの開発を行った。また、対象物をレンズと想定し、開発したプログラムのテストを行った。図 22 に圧縮工程のシミュレーション結果の一例を示す。その結果から、型内冷却過程に樹脂の内部発熱による成型品の温度上昇がみられた。なお、解析に用いた成形材の物性値はメーカーのカタログ及び TECHNICAL DATA から引用し、温度依存性の分からない物性値は常温時の値を用いて推測した。

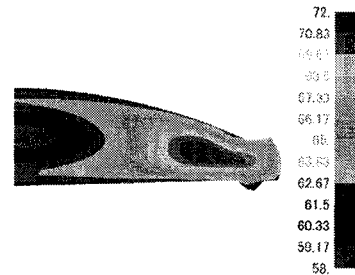


図 22 シミュレーション結果の一例 (型内冷却：内部発熱による温度上昇)

5. 結言および今後の展開

本論文で述べたマイクロツール加工システムは、マイクロメカニカルファブ리케이션に適し、エミッションの少ないデスクトップタイプであり、ELID 研削法の適用により、超硬工具を含む硬質材料の超精密鏡面加工が可能であり、数ミクロンの微細プロファイル加工が実現できる。今後は、マイクロツールおよび転写成形材のプロファイル・表面をオンマシンで計測する技術により、高精度かつ高効率な加工が実現できる。シミュレーションデータとの一貫性も確保できるものとする。本研究は、次世代のマイクロ光学素子、ホログラム、導光板などの量産化、極微細化に向けた技術開発とともに、マイクロ金型開発への進展が期待でき、広大な波及効果が期待される。

謝 辞

本研究は財団法人天田金属加工機械技術振興財団に研究開発助成として採択されたものであり、同財団からの研究助成に対し心よりお礼申し上げる。

参考文献

- 1) Moriyasu S., Lin W., Yamagata Y., Ohmori H., and Makinouchi A.: "Development of Ultraprecision Vertical-Type Contact-Probe for On-Machine Form Measurement", *Advances in Abrasive Technology III*, SGE, pp. 309-312 (2000).
- 2) Ohmori H., Ebizuka N., Morita S., and Yamagata Y.: "Ultraprecision Micro-Grinding of Germanium Immersion Grating Element for Mid-Infrared Super Dispersion Spectrograph", *Annals of the CIRP*, Vol. 50, No. 1, pp. 221-224 (2001).
- 3) Uehara Y., Ohmori H., Yamagata Y., Moriyasu S., Lin W., Kumakura K., Morita S., Shimizu T., and Sasaki T.: "Development of Small Tool by Micro Fabrication System Applying ELID Grinding Technique", *Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of Millennium*, JSPE, pp. 491-495 (2001).
- 4) "MICRO-WORK-SHOP (マイクロワークショップ)"の開発状況 マイクロワークショップ: 大森整, ほか. 理研シンポジウムテキスト, Vol. 15, 56~60.
- 5) 潘 他: 超精密卓上型射出成形機の開発における基礎的研究, 2002 年度精密工学会春季大会講演論文集, (2002), 581.