マイクロ・メゾ領域における
小型・超精密加工技術に関する調査研究（第 2 報）

坂井　朋之[*]　杉井　伸吾[**]　宮口　孝司[*]　丸山　英樹[*]　石川　淳[**]　中川　昌幸[***]　樋口　智[*]　岡田　英樹[****]

Research of Technology for Ultra Precision Machining

SAKAI Tomoyuki[*], SUGII Shingo[**], MIYAGUCHI Takashi[*], MARUYAMA Hideki[*] ,
ISHIKAWA Atsushi[**], NAKAGAWA Masayuki[***], HIGUCHI Satoru[*] and OKADA Hideki[****]

抄　　録

平成 17 年 10 月，ながおか新産業創造センター内にナノテク研究センターが設置され，超精密加工機が利用できる環境が整った。それに伴い，本年の調査研究は加工を主体とした研究となった。具体的な内容は，①県内企業の協力を得て行った射出成形用金型の試作と射出成形試験，②CAD/CAM の研修課題として行ったフレネルレンズの金型試作, ③ダイヤモンドドリルを用いた超硬合金の微小穴加工実験, である。あわせてニッケルリンめっきの試作や金型のメンテナンス性向上を目指した DLC（Diamond Like Carbon) のコーティング試験を行った。

1．緒　　言

昨年度, 新潟県内の超精密加工の動向について調査を行った。その結果，県内企業の多くは将来，超精密な加工技術が必要という認識はあるものの, そうした部品業界との繋がりがないことや, 設備投資に費用がかかることから参入できずにいることがわかった。

平成 17 年 10 月, 財団法人にいがた産業創造機構により, ながおか新産業創造センター内にナノテク研究センターが設置された。センター内は超精密加工室と MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）加工のためのクリーンルームに分かれており, 加工室にはファナック（株）の超精密加工機 ROBONANO α-0iA（図 1 参照）及び三鷹光器（株）の非接触３次元測定装置 NH-3SP が整備された。

本年度は超精密加工機を用いて，（1）射出成形用金型と射出成形試験，（2）フレネルレンズ金型試作，（3）ダイヤモンドドリルによる超硬合金の微小穴加工実験，（4）ニッケルリンめっき試作，（5）金型の DLC コーティング試験，（6）無酸素銅・アルミ・モリブデンの鏡面加工実験，（7）企業からの試作相談などを行ってきた。

ここでは（1）～（3）の実験について報告し，（4）～（7）については結言のみの報告とした。

図 1　超精密加工機 ROBONANO

2．射出成形用金型の試作と射出成形試験

2.1　概　要

ポリカーボネートの樹脂部品に光の干渉による装飾効果をつけることを目的として, 金型に微細な V 溝加工を行った。加工した射出成形金型を用いて射出成形を行った結果, 成形部品に装飾効果が生じ,

*　レーザー・ナノテク研究室
**　研究開発センター
***　下越技術支援センター
****　県央技術支援センター

微細な溝が転写されていることを確認した。但し，走査型電子顕微鏡 （SEM）で観察した形状には，バリの発生，倒れなどの問題点が明らかになった。

2.2 シャトルユニットについて

シャトルユニットはシェーパーと同じ動作で, 直線的な溝加工を行う ROBONANO のオプションユニットである。リニアモータとピエゾ素子の上下動により最高で 1 秒間に 3 本の溝加工が可能である。シャトルユニット加工時の様子を図 2 に, 加工の概略を図 3 に示す。

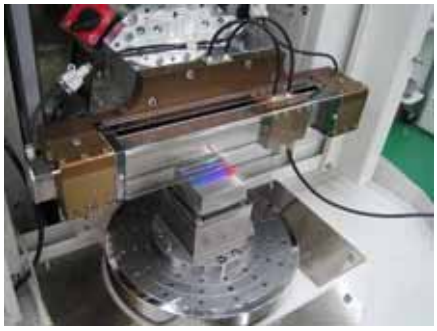


図 2　シャトルユニット加工時の様子

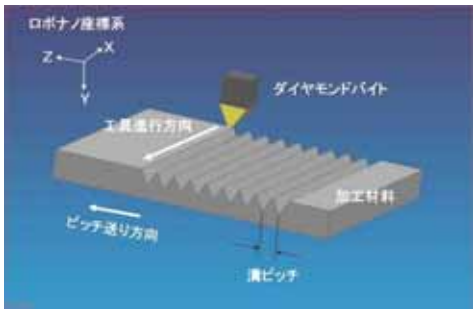


図 3　シャトルユニット加工概略

2.3 射出成形金型の加工

金型材料は県内の企業から提供を受けた NAK80 調質鋼で大きさは 60mm 角である。実際の溝加工は上面につけたニッケルリンめっき層に行った。めっきは県外の超精密加工用めっきメーカーの共和産業（株）に依頼した。ニッケルリンめっきの仕様を表 1 に示す。めっき面は平面出し用ダイヤモンドバイトを用いて 1μm ピッチで基準平面を出した後, 開き角 90 ° の V 型ダイヤモンドバイトで溝加工を行った。V 溝のピッチは 1，2，3，5μm の 4 種類である。90 ° の V 溝の切込み深さは各ピッチの半分である。1 度に加工する切込み深さは最大で 2μm までとし，仕上げに 0.5μm の切込み深さとした。従って 1μm ピッチの溝加工のみ 0.5μm の切込み一回で終了となる。各溝ピッチの加工方法（切込み深さ）を表 2 に示す。加工の際には新日本石油（株）製の放電加工油を 6 秒に 1 回程度供給した。

表 1　ニッケルリンめっきの仕様

厚　さ（μm）	100
リン含有量（%）	9.8
マイクロビッカース硬さ（HV）	541

表 2　溝のピッチと切込み深さ

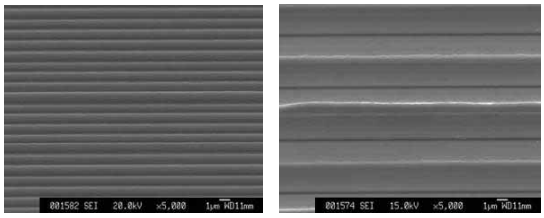
溝ピッチ	1μm	2μm	3μm	5μm
1 **回目加工**	0.5	0.5	1	2
2 **回目加工**	**無し**	0.5	0.5	0.5

（μm）

2.4 金型および成形部品の SEM 観察

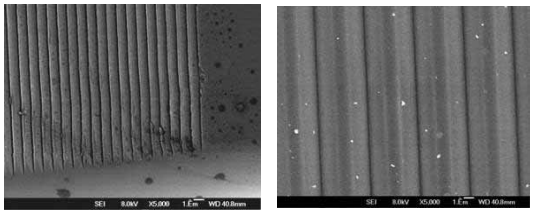
加工した金型とそれを用いて射出成形した部品を SEM で観察した。溝ピッチが 1μm と 5μm の金型の SEM 像を図 4 に示す。金型では 1μm ピッチにピッチ間隔が均等でない所があった。また観察したすべてのピッチの加工面にバリが観察された。

射出成形品の SEM 像を図 5 に示す。1μm，5μm ピッチ共に金型の溝が転写されることが確認できたが, 金型の奥まで樹脂が入り込んでいない部分がある事がわかった。また 1μm の射出成形品では山がわずかに倒れている。



1μm **ピッチ**　　5μm **ピッチ**

図 4　金型の SEM 像



1μm **ピッチ**　　5μm **ピッチ**

図 5　射出成形部品の SEM 像

2.5　射出成形金型についての考察

1μm ピッチの溝加工ではピッチの間隔が不均等な部分が見られた。これは加工時の振動等による影響と考えられる。バリはすべてのピッチで生じていたが，バリの大きさはどのピッチでも大差がない。相対的にピッチが細かくなるほど, バリの影響で形が崩れて見える。図 6 は意図的に切込みを過大にした際の SEM 像である。大きなバリが生じ，そのバリが次の加工を行うバイトによって倒されていると考えられる。これほど極端ではないが，1μm ピッチの金型でも同様の現象が生じており, このため射出成形部品に倒れが見られたと推察する。

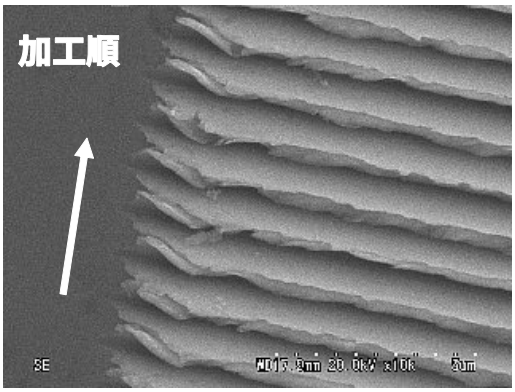


図 6　切込み過大時のバリと倒れ

バリの発生を少なくするためには切れ味の良いバイトを使用し，1 回の切込み量を小さくする事が重要と思われる。また図 7 に示すように 1μm 以下を切削するダイヤモンドバイトの先端形状は 90 ° より開いた形状になっていた。このため，1μm のピッチに対して 0.5μm は切込み過ぎだったと思われる。1μm ピッチの溝加工では切込み過ぎによってバリが生じ，さらにバイト先端の開き角が 90 ° より大きかったことで、発生したバリを倒してしまったものと考えられる。理想的には溝は図 8 のように必要最小限の深さであることが望ましい。しかし工具の先端形状を考慮し, さらにバイトと基準面との位置を正確に合わせることは目視では非常に難しい。正確な位置合わせを行うことが今後の課題である。

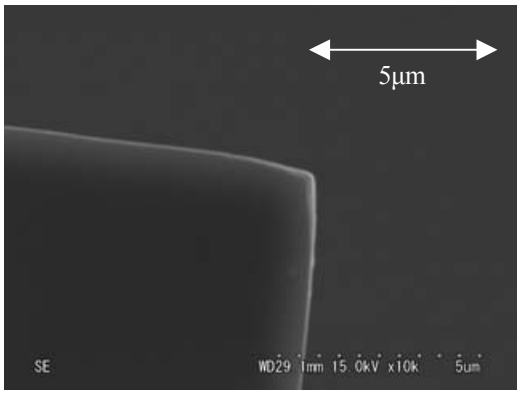


図 7　ダイヤモンドバイトの先端形状

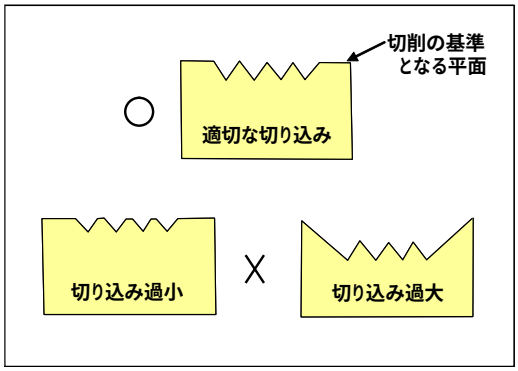


図 8　適切な切込み量

3．フレネルレンズ金型試作

デジタルプロセス（株）の CAD/CAM 導入支援事業に対し，フレネルレンズ金型の試作を提案し，設計から加工までのプロセスを検証した。

3.1　仕　様

目標とするフレネルレンズの仕様を表 3 に示す。また，工具は単結晶ダイヤモンドバイト（開き角 45 ° ）を使用し，旋盤用スピンドルの回転数は 2500min^{-1} とした。

表 3　フレネルレンズ仕様

項　　目		
外 径 寸 法	D(mm)	50
プリズム角	θ　(°)	0.5〜54.0
逃　げ　角	α　(°)	0.25〜13.625
ピ　ッ　チ	P(mm)	0.224
材　　料		銅めっき

※プリズム角については 0.5 ° **，逃げ角については** 0.125 ° **ずつ増大するものとした。**

3.2　加工結果および考察

図 9 および図 10 に加工結果を示す。

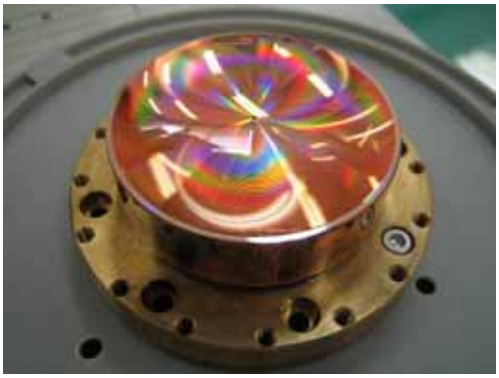


図 9　加工後写真

図 10　加工後拡大写真

モデリング（CAD）から NC データの生成（CAM），加工機へのデータの引渡し，実加工まで一連で確認することができた。また，今回は連続旋削を行ったが，切屑の排除がうまくいかずバイト上に堆積し，結果としてスピンドルの回転数が落ちるという問題も確認できた。

4．ダイヤモンドドリルによる超硬合金の微小穴加工実験

硬度の観点から，超硬合金の切削加工を可能にする現存する唯一の材料はダイヤモンドであるといわれている。本実験ではそのダイヤモンドのドリルを用い，超硬合金の微小穴加工実験を行った。

4.1　加工材料および加工条件

加工材料および加工仕様を表 4 に示す。また穴加工は図 11 に示すとおり，ステップ加工を行った。

表 4　加工材料および加工仕様

工　具	**タンガロイ製　アキュエンドミル** MEP **形** φ18，**細軸長** l=1.2mm
被削材	**共立合金製作所製** **超硬合金** KD20（1,450HV）
クーラント	**間欠供給**
目標穴寸法	**直径** φ0.18mm，**深さ** 1.0mm **止まり穴**

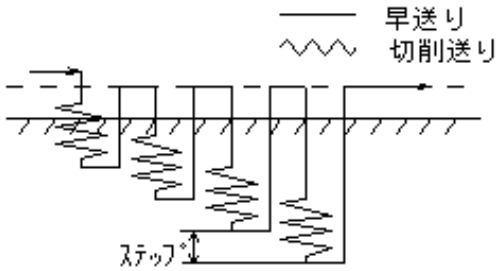


図 11　穴加工プロセス

4.2　加工実験

表 5 に示す 3 通りの条件で実験を行った。

表 5　実験条件

	工具回転数	ステップ量	送り速度
実験①	25,000min^{-1}	4μm	10 mm/min
実験②	40,000min^{-1}	4μm	0.5 mm/min
実験③	40,000min^{-1}	1μm	0.5 mm/min

4.3　加工結果および考察

実験①･･･2 ステップ目（8μm）で工具折損
実験②･･･10 ステップ目（40μm）で工具折損
実験③･･･180μm まで加工。工具折損なし

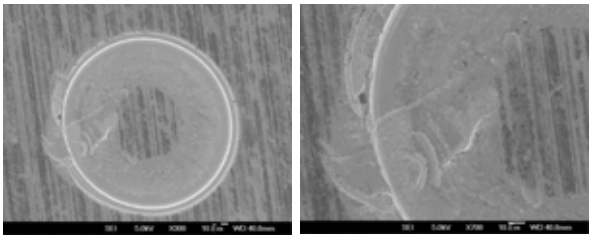


図 12　加工後写真－実験①

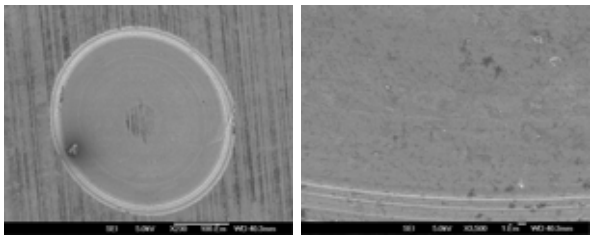


図 13　加工後写真－実験②

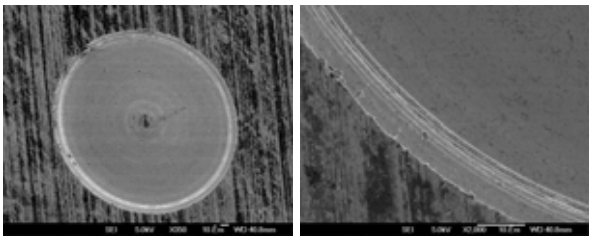


図 14　加工後写真－実験③

加工後の状態を SEM で観察した。SEM 像を図 12，図 13，図 14 に示す。

実験①について, 加工穴底面の性状はかなり荒れており，工具で強引にむしり取った感じである。加工開始後すぐに工具折損に至ったことから, 加工条件設定がかなり厳しかったと考えられる。

実験②について, 円周方向に条痕が観察されることから, 工具切れ刃を利用した切削が実現されていると考えられる。しかし，僅か 10 ステップで工具折損に至っていることから, 加工条件設定がまだ厳しいと考えられる。

実験③について，穴入り口のバリの様子から，塑性流動を伴う良好な切削が実現できていると考えられる。さらに工具を取り外して観察したところ, 切れ刃周囲に被削材の付着が見られるものの，顕著な摩耗，損傷などは確認されず，加工の継続は可能であった。しかし，深さ約 180μm 加工するのに時間が 60 分程度もかかることから, 実用化にはまだ多くの課題がある。

送り速度などの条件をかなり落とすことにより，高硬度脆性材料とされている超硬合金の塑性流動的な切削（穴加工）が実現できる。しかし，加工時間がかかることから, 能率の面で放電加工などには及ばない。また，工具が高価であり，最適な加工条件の設定を求めることが困難であり, 加工面性状などの点においては優位である可能性はあるものの，現状では実用化は難しいと考えられる。

5．結　　言

ROBONANO による超精密切削実験を行い以下の結果を得た。

(1) 射出成形用金型と射出成形試験

ROBONANO オプションのシャトルユニットを用いて微細 V 溝加工を行い，バリの問題点を確認した。さらにその金型を用いて射出成形を行い，最小 1μm ピッチの微細溝においても良好な転写性があることを確認した。県内企業の既存射出成形機でも微細金型の適用が可能であることを確認した。

(2) フレネルレンズ金型試作

モデリングから実加工までの一連のプロセスを実際に行い, 段取りや実加工に関わる問題点を確認できた。

(3) ダイヤモンドによる超硬の微小穴加工実験

ダイヤモンドドリルを用いた超硬合金の微小穴加工を行い，延性モードでの切削が可能であった。ただし, 加工時間の面では放電加工に及ばない現状も把握できた。

(4) ニッケルリンめっき試作

現在の超精密加工用被削材として一般に利用されているニッケルリンめっきについて, 専門メーカー（県外）と県内メーカーの現状，ニッケルストライクめっき層の密着性の問題を把握した。また工技総研で行ったニッケルリンめっきの試作では, 母材との密着性に課題は残るものの, 連続で厚さ 100μm のめっきが可能であった。

(5) 金型の DLC コーティング試験

射出成形用金型のメンテナンス性を向上させる目的として，DLC コーティングを検証した結果，V 溝ピッチ 1μm の微細溝において，コーティングによる形状の崩れなどは見られず, さらにはダイヤモンドペーストによるクリーニングにも良好な耐性を示した。さらなる実験は必要なものの実用の可能性は十分に確認できた。

(6) 無酸素銅･アルミ･モリブデンの鏡面加工実験

ROBONANO に装備されている平面切削用ダイヤモンド工具を用い, 各種金属材料の平面加工を行った結果，それぞれにおける最適加工条件，クーラント方法などを把握できた。

(7) 企業からの試作相談

5 件の試作相談を受け，うち 2 件に関しては実際に試作を行った。試作相談を通し，企業ニーズや超精密加工分野の動向を知ることができた。

参考文献

1） 杉井伸吾他，“ マイクロ・メゾ領域における小型･超精密加工技術に関する調査研究 ”，工業技術総合研究所工業技術研究報告書　No.34（2005），p.91-96