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

杉井 伸吾[*1]　宮口 孝司[*2]　丸山 英樹[*3]　石川 淳[*1]　本多 章作[*4]　片山 聡[*1]

Research of Technologies for Ultra Precision Machining

SUGII Shingo[*1], MIYAGUCHI Takashi[*2], MARUYAMA Hideki[*3], ISHIKAWA Atsushi[*1],
HONDA Shosaku[*4] and KATAYAMA Satoshi[*1]

抄　録

小型・超精密な加工技術の中で、主に機械加工分野による超精密加工を用いた製品化の動向と、県内企業における精密加工に関する取り組みについて調査を行い、今後新潟県で取り組むべき研究の方向性について検討を行った。また、超精密加工機を使用した加工実験を通して加工における留意点を明らかにするとともに、加工物の評価を測定原理の異なるいくつかの測定機で行い、その特徴を調べた。さらに、今後金型材料として適用が拡大すると考えられるセラミックス材料の超音波援用加工実験を行い、その有効性を確認した。

1. 緒　　言

光学部品、半導体、電子部品は自動車等の電子化や電子家電製品の発達に伴い、市場が急速に拡大している。一方、こうした部品の高度化には、部品の微細化、精密化が不可欠であり、超精密・微細加工技術の向上が望まれている。こうした中で、本研究では機械加工による超精密加工技術について、新潟県内企業の取り組みの状況を調査するとともに、加工実験と加工物評価を通して、超精密加工の概要を把握し、今後新潟県で取り組むべき研究の方向性について検討を行った。

また、精密加工が必要となる金型関連企業で要求が高い、硬脆性材料の高効率加工が可能な超音波援用加工の加工実験を試みた。

＊１ 研究開発センター
＊２ 中越技術支援センター
＊３ 県央技術支援センター
＊４ 上越技術支援センター

2. 県内企業調査結果

県内で超精密加工に関連すると考えられる光学部品、精密プラスチック部品、精密金型等を製造する企業を対象に、超精密加工技術への取り組み、あるいはその方針について調査を行った。

2.1　光学部品、精密プラスチック部品関連企業

県内において超精密加工を必要とする光学部品やプラスチック部品を製造する企業は限られる。しかし、光学部品ではサブミクロンから数十ナノメートルレベルの形状精度がその特性を左右することから、関連企業では関心が非常に高く、すでにこうした高精度加工に取り組んでいる、あるいは今後取り組むとするところがあった。

精密プラスチック部品の製造では、製品の装飾性、美観の確保と製造工程の効率化、短納期化といった点で興味を持つところがあった。

2.2　精密金型関連企業

金型関連企業では、光学部品金型を手掛けるところは少なく、今回の調査では超精密加工を行っている企業はなかった。この領域の加工を行うためには設備投資が多額になることから、現在の市場では取り組みを始めることは困難との判断が多いものの、次世代技術としての認識は高く、多くの企業で情報収集を進めている。

また、現在の金型製造においては加工の効率化と、ミクロン、サブミクロンの形状、寸法の測定、評価法に問題があり、今後改善を進めたいとする意見が多かった。

3.　超精密加工実験および加工物評価

3.1　加工実験概要

ファナック（株）において、同社のナノ加工機 ROBONANO α-0iA による台形溝加工実験を行い、加工前段取りの手順と加工の際の留意点を確認した。実験概要を図 3-1 に示す。被削材の材質は無酸素銅で、予め平面出しバイトにより平面加工されたものを用いた。工具は溝と同形状の単結晶ダイヤモンドを先端に有するミリングバイトである。加工条件は工具回転数 28,000min $^{-1}$、切削送り 3mm/min、切り込み 3 μm/pass とした。加工の様子を図 3-2 に示す。

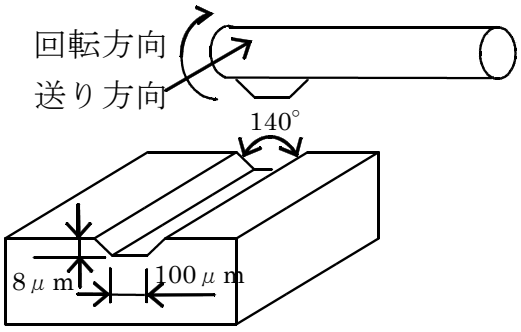


図 3-1　加工実験概要

3.2　加工前段取り

加工前段取りについて、実際の工程順に説明する。大きな流れとしては、通常の工作機械による精密加工と同様の手順であるが、調整量が小さいことが特徴である。

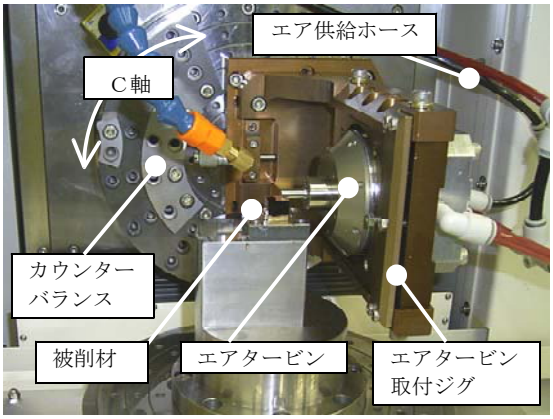


図 3-2　加工の様子

（1）C 軸バランス調整

エアタービンスピンドルは C 軸上にジグを用いて固定されるが、その重量により C 軸の重量バランスが崩れる。そのため、カウンターバランスにより重量バランスを調整する必要がある。その際、エアタービンのエア供給ホースの張力によってもバランスが崩れるため、取り扱いには注意が必要である。

（2）回転軸平行出し

工具回転軸と送り軸の平行は、エアタービン取り付け面にて、軸を移動させた際の傾き量を電気マイクロメータにより測定して求める。調整は C 軸を回転させて行い、最終的に傾き量が電気マイクロメータの指示精度 0.1 μm と同等になるようにする。

（3）動バランス調整

加速度センサにより動バランス調整を行う。最低でも調整重量 3mgf のところまでは調整を繰り返す必要がある。なお、調整錘を取り付ける面はチャック両端面となっている。

（4）工具接触確認

工具と被削材の接触はファイバースコープ観察で確認する。被削材が鏡面に近いため、工具先端が映りこみ、ある程度の目安をつけることができる。しかし、最下点に焦点を合わせるのは難しく、接触しそうな距離となったら超微動送り（1nm/パルス）にて近づけていく必要がある。

3.3　加工実験

加工した台形溝（加工終了点付近）を上面よりファイバースコープで観察した画像を図 3-3 に示す。線が太くなっている部分が台形の斜辺部分である。切削量が小さいこともあり、加工状況を監視することは困難であった。切り込み過多による工具折損などは段取り時点で注意を払う必要がある。また加工時には環境の変化(振動・温度）に注意が必要である。

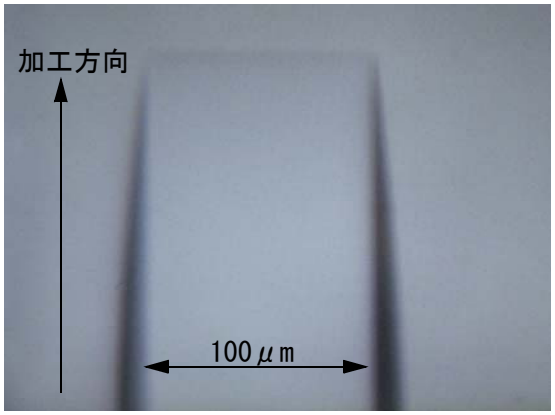
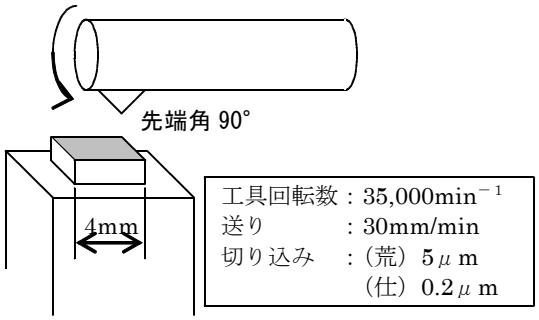


図 3-3　加工した台形溝
（上面からの観察画像）



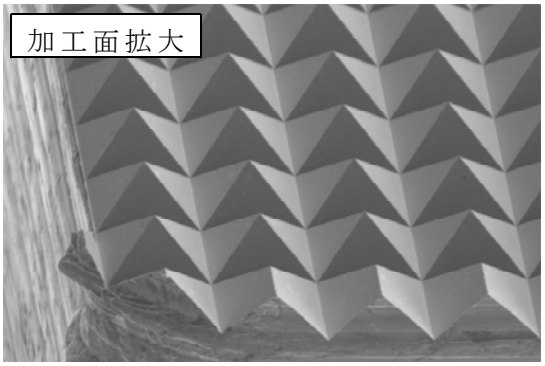


図 3-4 交差 V 溝加工概要

3.4　加工物の評価

図 3-4 に示す交差 V 溝加工をファナック(株)に委託し、その形状を走査電子顕微鏡、三次元構造解析顕微鏡、非接触三次元測定機、レーザ顕微鏡により評価した。溝ピッチは 100 μ m（4 × 4mm 上に 90° 交差、縦横 40 本ずつ)、深さは 50 μ m である。

走査電子顕微鏡(日本電子(株)製 JSM-6330F)による観察結果を図 3-5 に示す。観察倍率は 6,500 倍である。頂点付近において約 1 μ m 角の未切削部が確認できた。未切削部はどの頂点にも見られるため、送り機構による誤差が累積されてできたものではないと推測される。また斜面上に加工方向と平行な傷をいくつか確認できた。

三次元構造解析顕微鏡､非接触三次元測定機、レーザ顕微鏡では、走査電子顕微鏡で確認された未切削部と斜面上の傷の原因を解明するため、溝高さおよび溝角度の測定を試みた。しかし、三次元構造解析顕微鏡と非接触三次元測定機では、斜面が鏡面で且つ 45 ° であることから反射光を得ることができず、上面からの測定は行えなかった。レーザ顕微鏡では形状を確認することができたが、図 3-6 に示すようにレーザスポット径以下の寸法である頂点・谷交差部においてノイズが発生し、溝高さおよび溝角度の正確な測定は行えなかった。

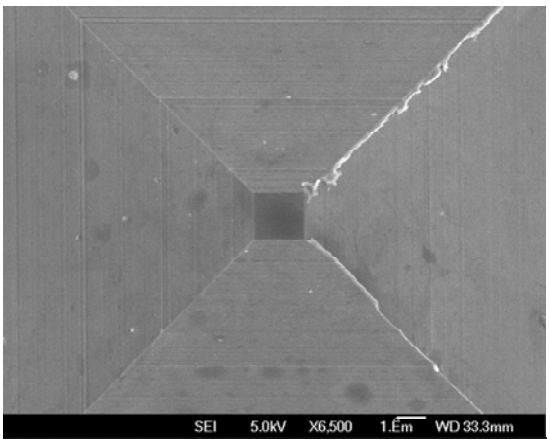


図 3-5　走査電子顕微鏡による観察画像

図 3-6　レーザ顕微鏡測定結果

斜面上の傷については、加工物を傾けて測定したところ、全ての測定機において加工方向と平行な傷を確認することができた。この傷は二種類のパターンを持ち、斜面上のほぼ同じ位置に生じていることがわかった。ただし、その大きさについては測定機によって大きく異なり、三次元構造解析顕微鏡では 8nm、非接触三次元測定機では 40nm、レーザ顕微鏡では 50nm であった。この違いは、各測定機のスポット径以下の領域における処理の違いによるものと思われる。

今回の測定においては反射の問題が大きく、溝高さ・溝角度を正確に測定できなかったため、未切削部が生じた原因については解明することができなかった。これについては測長走査電子顕微鏡による測定や、光学系の測定機であっても回転テーブルを用いることで測定できる可能性がある。

斜面上の傷については、その規則性から工具表面の凹凸が転写されたものと推測される。ただし、測定機により傷の大きさが異なっているため真の値は不明である。測定機の横方向分解能が問題となるため、未切削部同様、測長走査電子顕微鏡による観察が有効であると思われる。また、工具表面観察を実施することで、その因果関係を明確にできると予想される。

4. 超音波援用加工実験

超音波を加えて同時 3 軸加工が可能な装置を使って加工実験を行い、その加工能力を確認した。

加工機は、超音波振動を与えたメタルボンドダイヤモンドホイール工具を、回転させながら被加工物に接触させて加工を行うものである。

加工材料はジルコニアセラミックスとして、加工形状は階段状の形状を試みた。以下に実験条件と結果を示す。

4.1　加工材料及び加工条件

加工材料：ZrO_2
（日本ファインセラミックス（株）製）
加工装置：ULTRASONIC 50
（日本 DMG（株））
使用工具：円筒状ダイヤモンド砥石
ϕ 10mm　#200（粒径 76 μ m）
（メタルボンド＋セラミックス粒子）
超音波周波数：20.9kHz
クーラント：水溶性
加工内容：図 4-1　階段状形状
加工方法：図 4-1　加工面①→⑤の順に加工
最後に最上段を超音波なしで仕上げ加工
加工条件：
《形状加工》回転数 3,000　min^{-1}，切り込み 10 μ m，送り 700mm/min，アップカット／ダウンカット交互
《仕上げ加工》回転数 3,000　min^{-1}，切り込み 10 μ m × 10 パス＋ 2 μ m × 4 パス（超音波あり）＋回転数 4,500 min^{-1}，2 μ m × 1 パス（超音波なし），送り 400mm/min，アップカット／ダウンカット交互

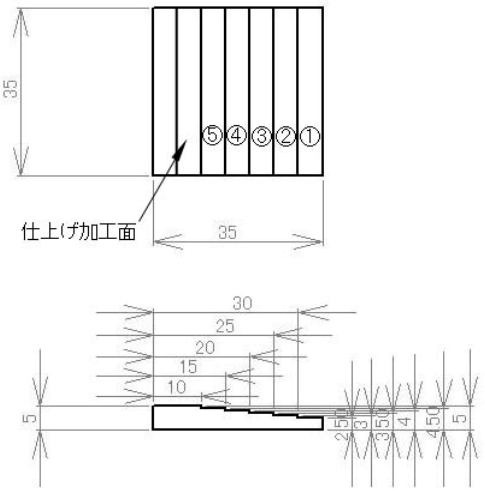


図4-1　加工形状

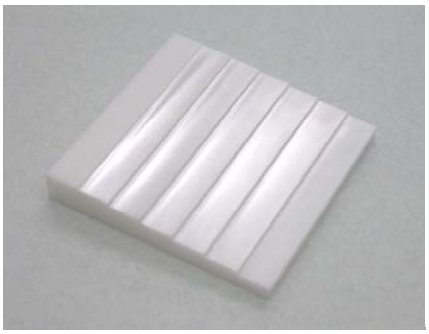


図4-2　加工後写真

4.2　加工結果及び考察

加工品を図 4-2 に示す。加工面①、⑤および仕上げ加工面の表面形状測定結果を図 4-3、図 4-4 および図 4-5 にそれぞれ示す。

これらの結果から、加工初期（加工面①）よりも加工終盤（加工面⑤）の方が表面粗さが小さくなっており、工具状態が変化したと考えられる。また、仕上げ加工においては超音波を付加しない加工で、表面粗さを向上させることができている。

各面を加工するのにかかった時間は表 4-1 に示す通りで、5 段の加工をおよそ 1 時間で完了した。このことから、超音波援用加工によりセラミックス等の硬脆性材料を効率よく加工できることが確認できた。

表 4-1　加工時間

	加工時間 (min)
加工面①	21
加工面②	17
加工面③	12
加工面④	8
加工面⑤	4
計	62

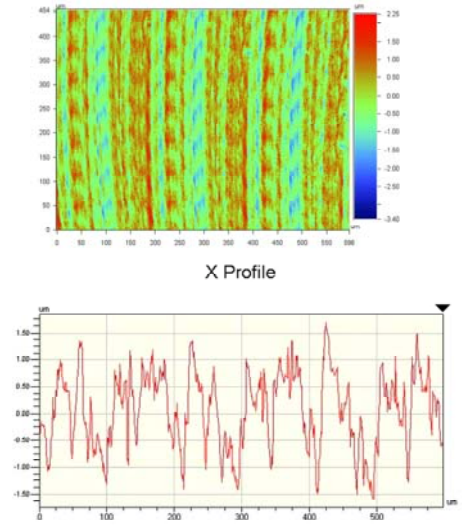


図4-3　加工面①形状測定結果

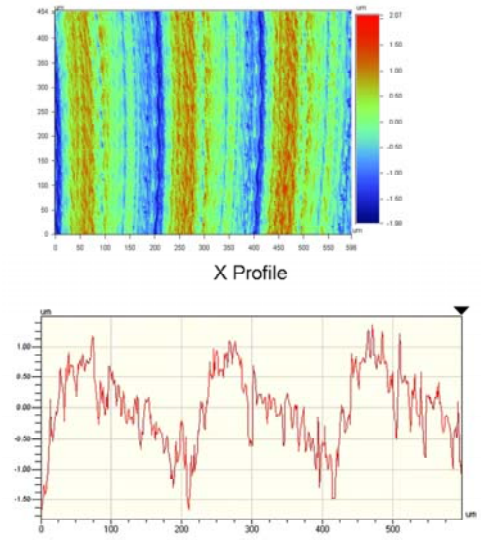


図4-4　加工面⑤形状測定結果

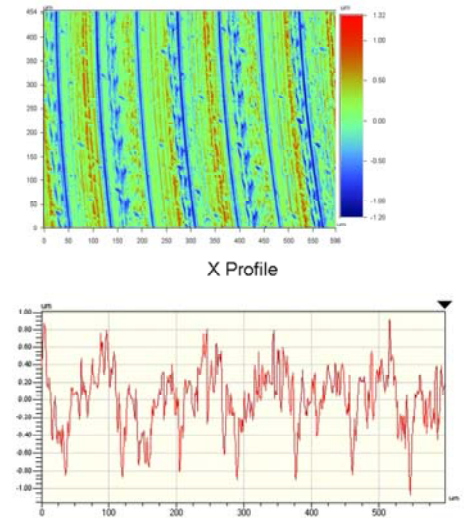


図4-5　仕上げ加工面形状測定結果

5. 結　　言

（１）新潟県内企業でサブミクロンから数十ナノメートルレベルの形状加工といった超精密加工技術への取り組みの状況を調査した結果、直接こうした精度の製品を扱う企業は限られるものの、光学部品、精密プラスチック部品関連企業では既に取り組みを進めているところがあり、精密金型関連企業では、次世代技術としての認識が高く、多くの企業で情報収集を進めている状況であった。

（２）超精密加工機を用いて台形溝加工実験を行い、加工前段取りの手順と加工の際の留意点など、超精密加工の概要を把握した。また、その加工品を測定、評価する上で、測定原理の違いによる結果の相違が明らかになり、測長走査電子顕微鏡による観察を検討する必要があることがわかった。

（３）超音波振動を与えたダイヤモンド砥石を同時 3 軸制御できる超音波援用加工機を用いてジルコニアセラミックスの加工実験を行い、効率よく加工できることを確認した。また、加工中における砥石状態の変化により加工面性状が変化することがわかった。

（４）県内の多くの企業にとって超精密加工技術は、加工、評価の両分野で、その工程や特長が広く理解されていないのが現状であり、今後こうした分野への参入を促進するためには、加工、評価技術の特長を明らかにし、製品開発を進める県内企業の研究を支援できる体制を早期に築く必要がある。