

# 超精密加工機の開発

## - 機械加工でマイクロ～ナノ形状に挑戦 -

ファナック株式会社 ロボナノ事業部

河合 知彦, 蛸原 建三, 山本 明, 小田 隆之, 酒井田 康宏, 見波 弘志, 大木 武, 中村 文信, 矢羽多 義和

### 1. 機械加工で微細加工に挑戦

ナノテクノロジーという言葉はメディアに頻繁に取り上げられているためか、医療、バイオなどと並んで、将来を期待される最先端技術として一般的に認知されている。国もナノテクノロジーに積極的に投資しており、各市場予測における規模や成長率の上位品目にナノテクノロジーを用いた商品がずらりと並んでいることから、今後の重要技術の一つがナノテクノロジーであることに間違いはないだろう。ただ一言でナノテクノロジーと言っても幅が広く、ナノメートル単位で物質を制御して何らかの機能を得る技術を総じてナノテクノロジー呼んでおり、例えば有名なカーボンナノチューブは、材料技術の一つと言える。これに対してこれから述べる技術は、刃物をナノメートル単位で動かして加工物を削り取る、切削や研削という非常に古典的な機械加工の手法を用いて、最先端のマイクロ～ナノ形状を得ようとするものである。

マイクロ～ナノ形状の加工で最もポピュラーな方法は、リソグラフィー、ドライエッチングに代表される半導体製造技術の応用技術であり、この方法で加工されたマイクロ～ナノ形状が各研究機関や関連企業から次々と発表されている。新聞や雑誌等を賑わせているシリコンウエハ上に構成されたミクロンレベルのモータや歯車などは、ほとんどこの加工技術で作られたものである。

元々この方法は、マイクロ～ナノ形状を機械加工するのが困難だったために考案されたものだが、ここ十年来、工作機械、工具、測定器などの性能が向上してきたことで、逆に半導体製造技術では加工困難な複雑形状に対応できる点や材料選択の自由度という面で、再び機械加工方法が見直されてきていると言える。以後、機械加工によってミクロン～ナノ形状に挑戦するために必要不可欠な、精度を極限まで高めた超精密工作機械の開発と、その加工事例を中心に述べていきたい。

### 2. 市場の要求

携帯電話、DVD プレイヤー、デジタルカメラなどの各種デジタル機器の性能向上と低価格化の速さには驚かされるが、これらを支えている技術の一つは、レンズ、プリズム、ミラー、回折格子などの光学素子を用いて光信号制御する光エレクトロニクス技術である。光学素子の殆どはプラスチックやガラスの成形品のため、これらを量産するための金型が製品性能を左右する重要な役割を担っている。

光学素子の特徴は、素子全体の大きさは数～数十ミリレベルで、その表面を拡大するとサブミクロン～数十ミクロンレベルのマイクロ構造体や曲面で構成されており、その形状精度や面粗さがナノメートルレベルであることである(図1)。光学部品は、光の波長を基準として設計されることが多いため(例えば面粗さは波長の1/20以下など)、最近の光源の短波長化(話題のブルーレーザなど)や機器のサイズダウンに伴って、部品やその金型への精度要求はますます厳しくなっている。

また同じ光部品でも、液晶ディスプレイの導光板のように、絶対精度はそれほど必要ないものの、ナノメートルレベルの面粗さや均一性が求められるものもあり、この場合の判定基準は、「人間が目視で見ても、綺麗か汚いか?」というメーカ泣かせの分野である。

最近では、バイオチップや注射針など医療・バイオ分野からも、マイクロ～ナノ形状への要求が高まっている。バイオチップは血液などの微少サンプルを扱うため、それを構成するマイクロ流路には光学

部品とはまた違った意味で、厳しい絶対精度と滑らかな面粗さが求められる。  
 ナノテクノロジーと聞くと、どこかの研究所で研究されているというイメージがあるが、このようにもつと身近な分野で既にマイクロ～ナノ形状が必要になってきている。これらの民生機器は大半の人が所有していることを考えると、現在はマイクロ～ナノ形状部品が世界中に氾濫しているという状態に突入していると言えるだろう。

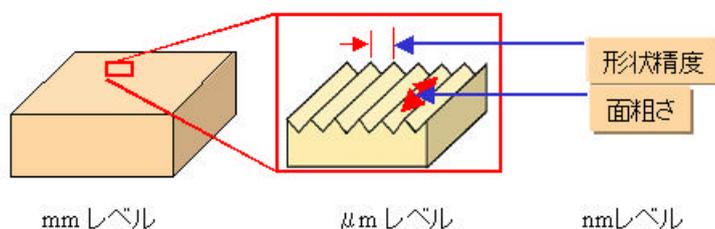


図1 光学素子の特徴

### 3. 超精密工作機械の開発

機械加工でマイクロ～ナノ加工に挑戦する上で最も重要な役割を担うのは、ナノメートル単位で工具やワーク位置を制御する超精密工作機械である。

こう聞くと、超精密工作機械には軸方向の位置決め精度がナノメートル単位で駆動できるステージがあれば良いと思われがちである。特に最近のコンピュータの処理速度向上やナノメートルの分解能をもつ各種フィードバックスケールの登場によって制御技術全体が飛躍的に向上しており、世の中にはナノメートルレベルの位置決めが可能と謳ったステージが数多く実用化されている。一見これらのステージを組み合わせただけのような超精密工作機械だが、両者の間には歴然たる違いがある。超精密工作機械においては、ナノメートル単位の位置決め精度だけでは不十分で、当たり前ではあるが、加工物をナノメートル精度で加工できるシステムとしてのトータルの完成度、具体的には、摩擦、熱、振動という制御技術では抑えることの難しい外乱要素を極力排する工夫が必要となる。

以降、これらを一つ一つ解決しながら開発した同時5軸制御の超精密工作機械(FANUC ROBONANO、図2)における、いくつかの特徴的な要素技術について順に述べる。(参考に、軸構成を図3に示す)



図2 FANUC ROBONANO

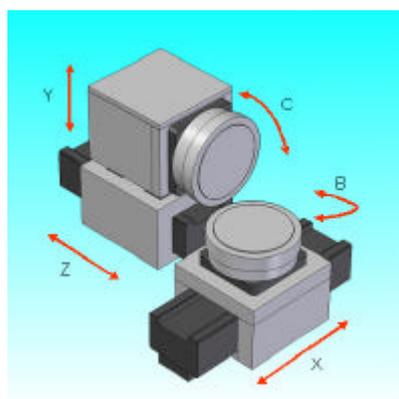


図3 機械軸構成

## 摩擦対策

第一に摩擦であるが、すべりやころがりなど摩擦が介在する軸受方式を用いてナノメートル位置決めをすると、必ずバックラッシュやスティックスリップという非線型な現象に悩まされる。仮にこれらを各種の制御技術や機構的工夫によって解決したとしても、基本的に物体同士が接触しているため、送り方向以外の運動誤差や発熱の問題が残る。

そこで原理的に摩擦を無くすために、全ての滑動部に静圧空気軸受を適用することにより、直線軸で1nm、回転軸では0.00001degの指令分解能での位置決めと滑らかな送り運動を実現することができた。摩擦のないサーボ系では、モータに限りなく微少な電流を流せば、ステージは必ず限りなく微量移動するため、理論的にはナノメートル以下の制御も十分可能である。図4に直動ステージの1nmステップ応答試験結果を示す。バックラッシュやスティックスリップのない良好な応答が確認できる。

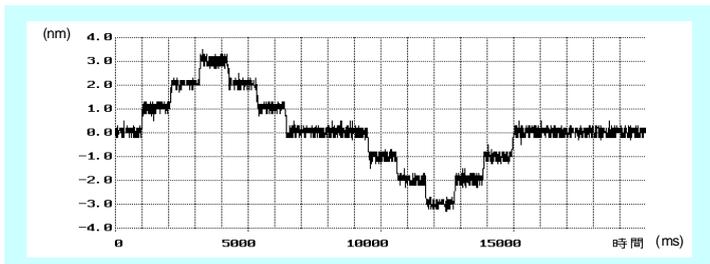


図4 1nm ステップ応答試験

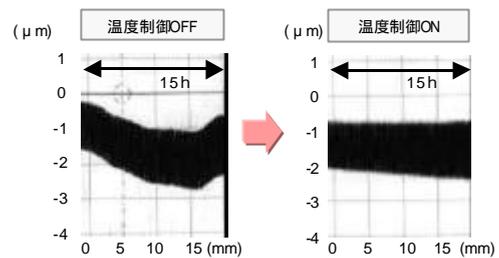


図5 圧縮空気温度精密制御

## 熱対策

次に熱であるが、マイクロ～ナノ加工を行なう上では、熱には相当気を使う必要がある。熱には機械内部から発生するもの（モータ発熱、摩擦熱、各種電気回路の発熱など）、機械外部の設置環境の温度変化、そして加工による発熱などが考えられるが、どれも発熱そのものより温度変化が問題になる。

そこでまず、摩擦がないことを利用して、通常運転時のモータ駆動電力を機械全体で1W以下に抑えた。その上で、機械内部に張り巡らされた静圧空気軸受用の空気管路内の圧縮空気温度を $\pm 0.01$ で精密制御することで、 $\pm 1$ 程度の恒温室に設置した場合でも $\pm 0.01$ の部屋並みの温度環境に安定化させることに成功した。図5は、深さ可変の連続マイクロV溝を $\pm 1$ の恒温室内で長時間に渡って加工した結果の断面形状を、前述の温度制御した場合としない場合で比較した結果である。温度制御しない場合は、一日の温度変化に伴い最大 $0.8\mu\text{m}$ の形状誤差が発生しているが、制御したものでは10nm以下の形状誤差に抑えられていることがわかる。

## 振動対策

最後に振動であるが、振動には機械内部から発生する振動（モータの振動、加工時に発生する振動、スピンドルの振動など）と、外部から伝わってくる振動があるが、空気軸受の機械特有のものとして、各空気配管内や空気軸受の絞り部分、排気部分の空気の流れによる微小振動がある。そこで、この空気の流れが層流か乱流かに着目し、機械内全ての空気管路内の空気の流れを層流化することで、この振動を除去することを考えた。図6は層流と乱流のイメージで、層流は乱れない流れ、乱流は小さな渦が発生する流れであり、両者の境界はレイノルズ数で2500前後になっている。よって本機械内の全ての配管はレイノルズ数で2500以下になるように設計した。

図7に機械内の空気の流れが乱流と層流の状態における機械振動の比較を示す。また、図8に本機でマイクロV溝の引き切り加工を行った時の、工具送り方向の加工面粗さを示す。引き切り加工方法（図9）は、工具とワーク間の相対振動がそのまま転写されやすい加工方法であるが、面粗さがRa0.7nmの良好な加工結果が得られた。

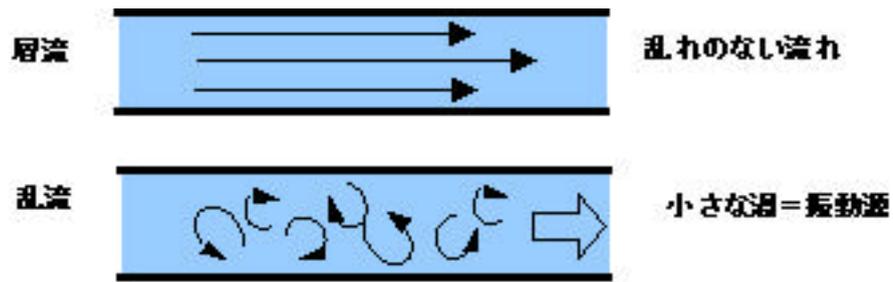


図6 乱流と層流のイメージ

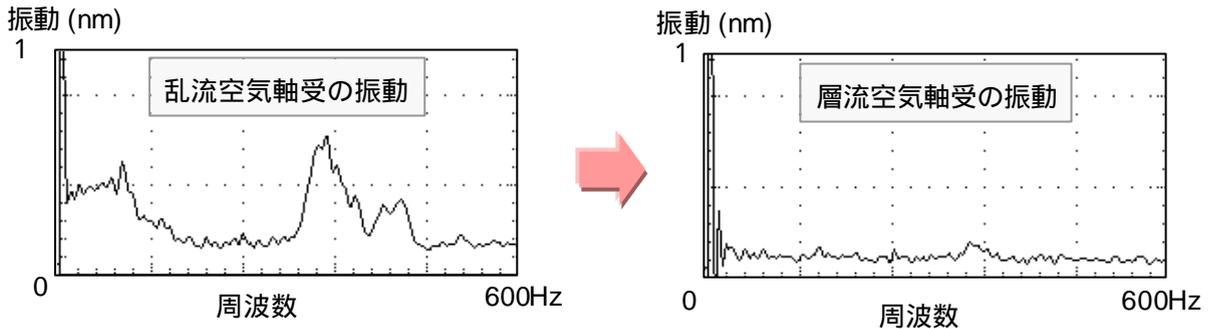


図7 層流化の効果

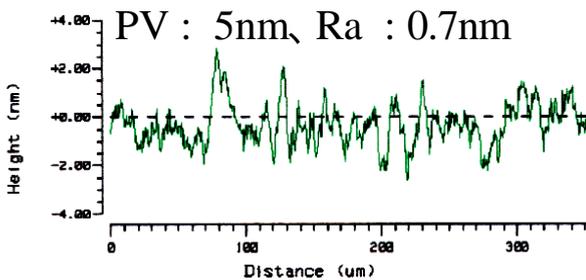


図8 引き切り加工の面粗さ

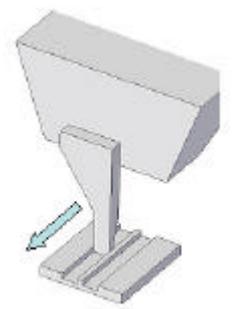


図9 引き切り加工

#### 4. 超精密・超高速加工

先に述べた比較的緩やかな熱変化や定常的な振動以外にも、突発的な熱変化や振動により加工面が乱れることもあるため、総加工時間は短ければ短い方が良いのは通常の機械加工と同じである。特に最近では光学素子は小さくなる方向なので加工面積は減る一方、例えば回折格子のピッチは狭くなる傾向にあるのでマイクロ溝数は膨大になり、場合によっては数日レベルで加工時間かかるものもある。これまでのマイクロ～ナノ加工と言えば、「精度は最高・加工時間も膨大」がまかり通っているが、現在のミクロンレベルの工作機械が「高速・高精度」を売り文句にしているように、マイクロ～ナノの世界も「精度は当たり前、高速化の時代」が到来することは明らかである。

そこで、ある程度加工形状は限定されるものの、シャトルユニットと呼ばれる回折格子や導光板金型などの連続直線溝を1秒間に3ショットで高速加工する専用アタッチメントを開発した(図10)。機械本体同様に空気軸受を採用するとともに、10Gにもなるシャトルの反転振動を機械本体に伝えないような無反動機構(図11)を開発することで、超高速加工と超精密な面粗さ Ra 1nm が両立させることに成功した。例えば、図12のような100mm角の加工面にピッチ 70 $\mu$ m のV溝が1500本で構成される導光板金型であれば僅か8分、図13のような10mm角の加工面にピッチ 2.4 $\mu$ m のV溝が4100本で構成された回折格子でも25分という驚異的な速度で加工完了することができる。

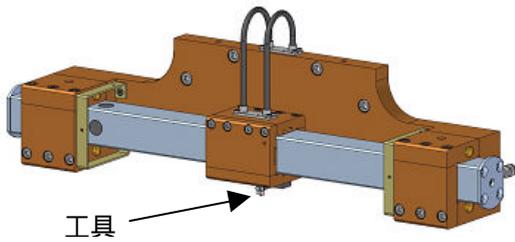


図10 シャトルユニット

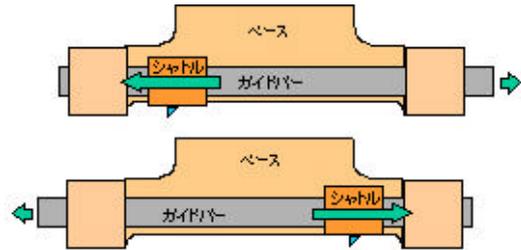


図11 無反動機構

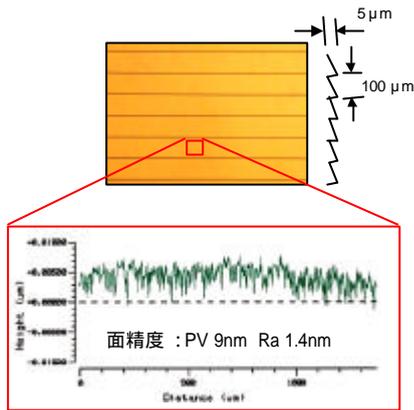


図12 導光板金型

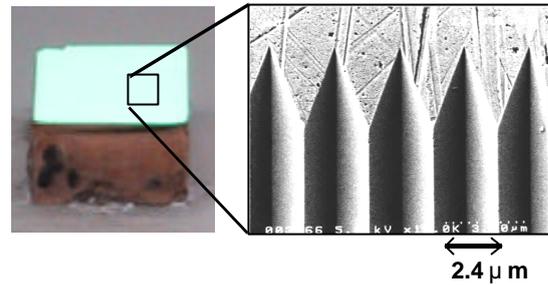


図13 回折格子

さらに本ユニットを用いて、ちょうどプリンターでスキャン印刷するようなイメージで、1.2m/s の高速送りの間に、工具を切り込み方向に更に高速に制御することにより、より複雑な3次元形状の高速加工を試みた(図14)。この方式で加工した100×30mmのデモサンプルを図15に示す。図中の文字部分はその他の部分に比べて2μm高くなってピッチ5μmのマイクロV溝で構成され、その他の部分はピッチ50μmのマイクロV溝で構成されている。全部で3600本余りのマイクロ溝を40分で加工できた。

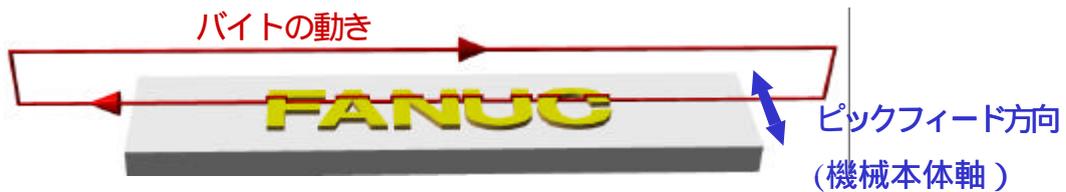


図14 シャトルユニットによる複雑形状の加工



図15 複雑形状のデモサンプル

またR形状の工具を用いることで、自由曲面やマイクロレンズアレイなどの曲面複雑形状の高速加工にも期待される。図16は100 $\mu\text{m}$ 、深さ10 $\mu\text{m}$ のディンプルアレイを加工した例で、70mm角の加工面上にある6万個のディンプルを僅か2分で加工することができた。

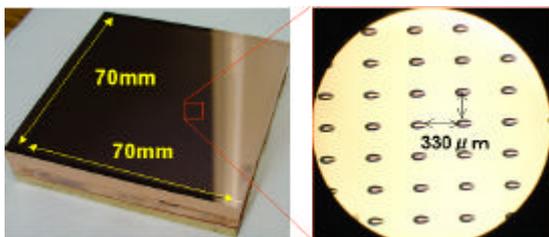


図16 マイクロディンプルアレイ

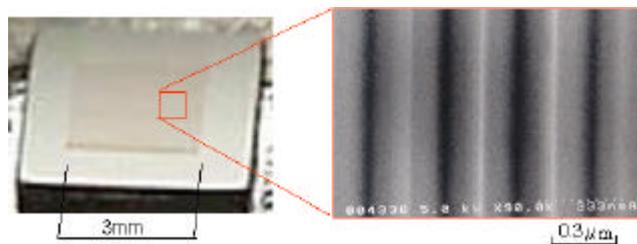


図17 サブミクロンピッチの回折格子

## 5. 機械加工による微細加工例

超精密工作機械 ROBO-NANO を用いた機械加工 (主に切削)による微細加工例について以下に述べる。機械の性能を最大限に引き出すため、工具は刃先が鋭利で凹凸の少ない単結晶ダイヤモンドを使い、加工材料はダイヤモンドが鉄と親和性があることや、結晶方位のないアモルファス材料が適しているため、鉄母材にニッケルリンメッキや銅メッキなどを数百ミクロン付けて、そのメッキ部分を加工することが多い。

加工方法は本機のフレキシブルな機械構造により、回転工具を用いるミリング、非回転工具を用いる引き切り、加工物を回転させる旋盤など、加工形状によって最適な方法を選択できる。

### マイクロ溝

図17は、3mm角の加工面にピッチ0.3 $\mu\text{m}$ で開き角90°のマイクロV溝が構成された回折格子のミリング(図18)加工例である。加工面は、形状精度や面粗さがナノメートルレベルの滑らかな面が得られるだけでなく、機械振動を最小限に抑えているため、このような微細ピッチのV溝であっても溝エッジにバリが発生しないのが特徴である。

図19は溝ピッチ40 $\mu\text{m}$ 、幅20 $\mu\text{m}$ 、高さ200 $\mu\text{m}$ の角溝のミリング加工例である。このような機械加工では難しいとされる高アスペクト比の形状でも、切削反力が微少のため、微小な工具さえ製作可能であれば、折れたり曲がったりせずに加工可能である。

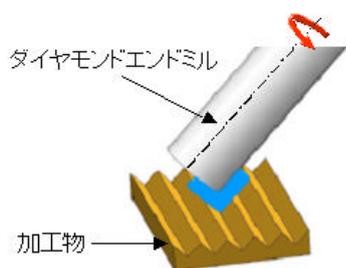


図18 ミリング加工

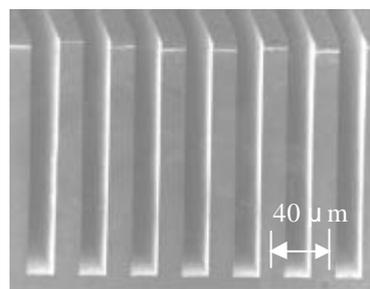


図19 マイクロ角溝

図20は、4mm、ピッチ数~数十 $\mu\text{m}$ 可変で、深さ1 $\mu\text{m}$ 一定の回折型フレネルレンズの金型の旋削加工例である。剣先バイトを用いてX、Z直線2軸+B回転1軸で制御することで、プレーズ側面はバイトの剣先部、平面部は側部で加工している。

図21は、R3mm球面上に構成された深さ15 $\mu\text{m}$ 、幅20 $\mu\text{m}$ 、開き角80°のマイクロV溝の引き切り加工例である。このように方向や角度、幅などが変化する溝形状は、例えばレンズ面などの曲面上に回折格子を構成して複数の光学部品を集約するなど、部品点数の大幅削減や精度向上に期待されている。

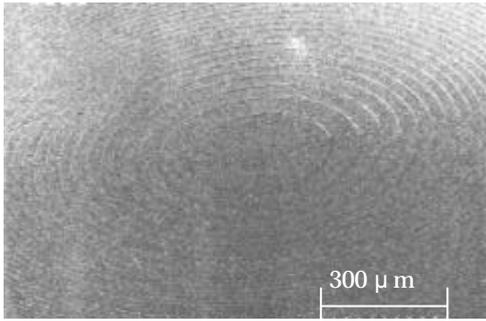


図 20 回折レンズ

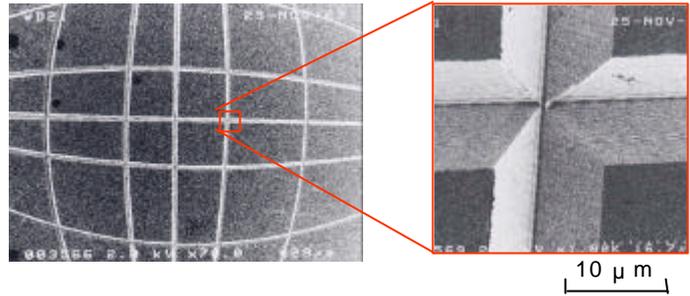


図 21 曲面上のマイクロ溝

### レンズ形状

図 22 は直径 3mm の非球面レンズ金型の旋削加工例である。最近では、レンズの小径化に加えて、形状精度 50nm 以下、面粗さ 10nm 以下という厳しい精度が求められているため、レンズを磨く技術として一般的なポリッシングのような研磨技術を適用することは形状精度面で難しく、切削のみで形状精度と面粗さを両立させる必要がある。

図 23 はピッチ 60 μm の凹球面レンズアレイ、図 24 は半径 660mm の大きな球面の一部を幅 1mm の瓦状に切り出したセグメントを並べた一種の凹レンズアレイで、ステッパーなどに用いられるフライアイミラーのミリング加工例である。従来このようなアレイ形状は、セグメントごとに加工してから組立てる方法であったが、このように一体加工を可能にすることで、精度や工数の向上が期待される。

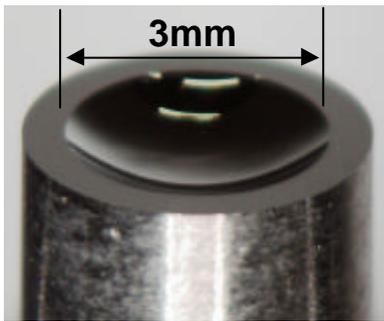


図 22 非球面レンズ金型

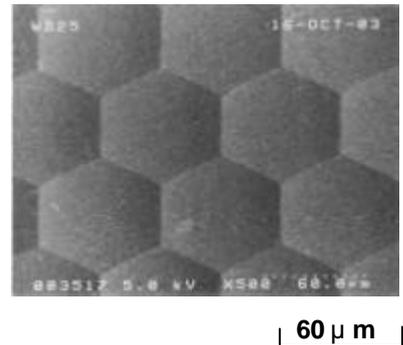


図 23 マイクロレンズアレイ

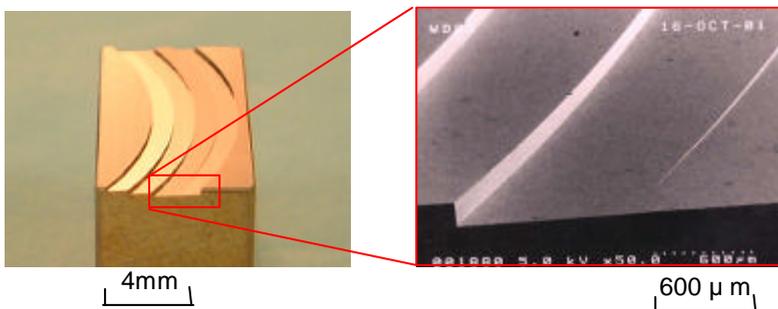


図 24 フライアイミラー



図 25 マイクロ仏像

## 複雑形状

図 25 は、刃先が  $R30\mu\text{m}$  に成形された単結晶ダイヤモンドエンドミルを 5 軸制御して、複雑な自由曲面形状である  $1\text{mm}$ 、高さ  $2\text{mm}$  のマイクロ弥勒菩薩形状をミリング加工（図 26）したものである。このような完全なマイクロ立体形状の具体的なニーズはまだこれからであるが、医療やバイオ分野における複雑なマイクロ立体形状など、半導体製造技術の応用技術等では対応困難なアプリケーションに応用が期待される。

次に医療・バイオ分野への適用例の一つとして、「痛くない注射針」であるマイクロ針アレイの加工例を紹介する。図 27 は、 $0.5\text{mm}$  角上に 9 本の針で構成されたマイクロ針アレイで、針の高さ  $300\mu\text{m}$ 、直径  $30\mu\text{m}$ 、先端角  $15$  度である。針間隔に入る極細のエンドミルを用いて 1 本ずつ切削しているが、機械振動と切削抵抗が非常に少ないため、このような細長い形状も折れたりすることがない。

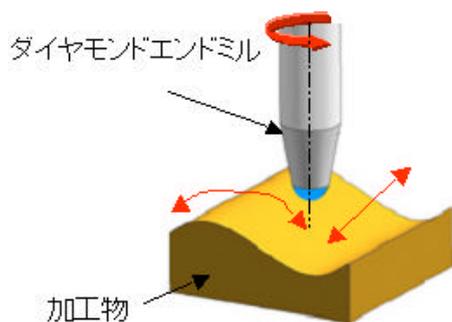


図 26 5軸制御ミリング加工

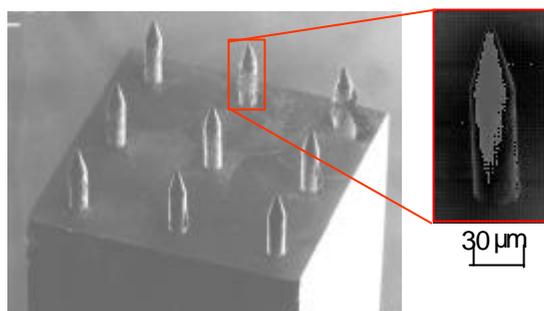


図 27 マイクロ注射針アレイ

## 脆性材料

ガラスやシリコンなどの脆性材料であっても、工具の切り込み量を小さくすることで、通常の金属加工のように延性モードと呼ばれる流れ型の切り屑を発生させる状態で切削加工できることはよく知られている。ただしこの方法は、切り込み量を小さくする必要があるのと、金型を製作してプラスチックやガラス成形で量産というプロセスでなく、最終製品そのものを加工するというプロセスになるため、効率的とはいえない。しかし最近では、レンズの精度を更に 1 段上げるために、成形後のガラスレンズを直接加工したり、光通信分野のキーデバイスである光導波路の材料であるニオブ酸リチウムや、赤外光学系で用いられるゲルマニウム製レンズなどの成形による複製が困難な材料へのマイクロ～ナノ加工の要求が高まっている。特に溝形状など、研削では難しいシャープエッジが欲しい場合には、切削加工する必要がある。図 28 はガラス（BK7）を延性モードでミリング加工した時の流れ型の切り粉である。図 29 はニオブ酸リチウムにマイクロ V 溝をミリング加工した例で、エッジが欠けずに加工できている。

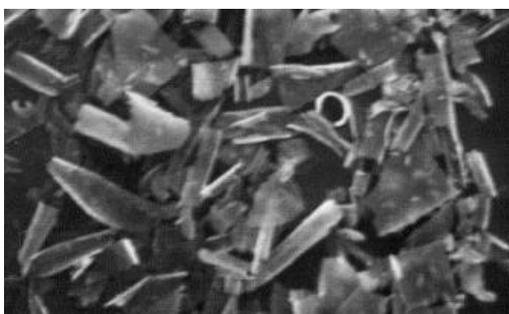


図 28 ガラス加工時の流れ型切粉

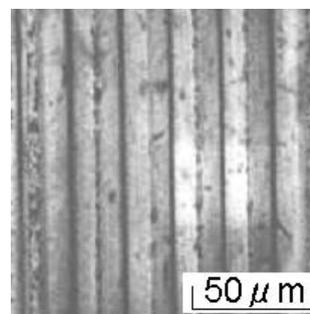


図 29 ニオブ酸リチウムへの微細加工例

## 6. おわりに

オーソドックスな機械加工方法によるマイクロ～ナノ加工について、開発した超精密加工機 ROBONANO の特長とその加工例を中心に述べた。

今後とも微細加工分野では、ますます精度要求が厳しく、形状も複雑化することが予想される。機械加工の究極という意味では、原子の大きさである 0.1～0.3nm を正確に切り取るのが限界ではないかと思われるが、残念ながら現在の面粗さのチャンピオンデータは P-V 値で 3nm 程度で、まだ精進する余地は残っている。ただしこのレベルになると、工作機械の向上だけでなく、工具、加工物、計測、環境など、あらゆる関係技術の向上が必須なのは言うまでもない。

今後の当面の目標は、これらの厳しい要求に対応した機械性能や加工方法を提供していくことだが、究極の目標は、現在のマシニングセンタのような殆ど自動化された超精密加工機である。即ち、素人の作業でもワークと工具をセットするだけで、次々にナノレベルの加工物が寸分違わず出来てくるといふ夢のような機械だが、もしそうなったら、もはや「超」精密加工機とは呼ばれないだろう。

## 7. 関連特許

国内：2002-283174（4 項で述べたシャトルユニットに関するもの）

2003-262226（3 項で述べた層流化空気軸受けに関するもの）

2004-255494（3 項で述べた機械内の温度制御に関するもの）

その他関連特許（出願、公開、登録）4 1 件

海外：アメリカ、ドイツ、中国に関連特許（出願、公開、登録）3 2 件

## 関連文献

- (1) 室田真弘、鈴村宜暎、石田 徹、竹内芳美、河合知彦、澤田 潔 超精密マイクロV形止り溝の創成、精密工学会誌、70-5 (2004.5) 677-682
- (2) 住田貴之、橋本義則、竹内芳美、河合知彦、澤田 潔、瀧野日出男、野村和司 :フライアイミラーの超精密5軸制御加工と光学特性評価、日本機械学会論文集 (C編) 70-697 (2004.9) 2723-2729
- (3) 久門哲也、石田 徹、竹内芳美、河合知彦、澤田 潔 非回転工具を用いた超精密マイクロV溝加工、精密工学会誌、70-10 (2004.10) 1301-1305
- (4) K. Ebihara, T. Kawai, K. Sawada, Y. Takeuchi: High Speed Creation of Ultraprecision Straight Microgrooves by Means of a Shuttle Unit, Proc. of 4th Int. Conf. of EUSPEN, Glasgow (2004.5) 374-375
- (5) Y. Yoneyama, T. Kawai, Y. Takeuchi: 6-Axis Control Ultraprecision Microgrooving on a Sculptured Surface, Proc. 2nd Int. Symp on Nanomanufacturing, KAIST, Daejeon (2004.11) 29-34
- (6) Y. Kikuchi, T. Kawai, Y. Takeuchi: Micro Sharp Corner and Character Line Creation by Means of 6-Axis Control Ultraprecision Machining, Proc. 2nd Int. Symp on Nanomanufacturing, KAIST, Daejeon (2004.11) 606-611
- (7) N. Kitamura, T. Kawai, Y. Takeuchi: 5-and 6-Axis Control Hybrid Ultraprecision Machining of 3D Microparts, Proc. 2nd Int. Symp on Nanomanufacturing, KAIST, Daejeon (2004.11) 612-617
- (8) F. Ando, A. Yamamoto, T. Kawai, H. Ohmori, T. Ishida, Y. Takeuchi: Microchannel Array Creation by Means of Ultraprecision Machining, Proc. 5th Int. Conf. on Machine Automation, Osaka (2004.11) 251-256