

超精密5軸ナノ加工機の開発

ファナック株式会社
代表取締役社長 稲葉善治

ファナック(株)	ロボナノ事業本部	副本部長	河合 知彦
ファナック(株)	ロボナノ事業本部	ロボナノ開発室長	蛭原 建三
ファナック(株)	ロボナノ事業本部	ロボナノ技術室長	山本 明
ファナック(株)	ロボナノ事業本部	ロボナノ開発室 主任研究員	小田 隆之
ファナック(株)	ロボナノ事業本部	ロボナノ開発室 研究員	中村 文信
ファナック(株)	ロボナノ事業本部	ロボナノ開発室 研究員	見波 弘志
ファナック(株)	ロボナノ事業本部	ロボナノ開発室 研究員	大木 武
ファナック(株)	ロボナノ事業本部	ロボナノ技術室 研究員	酒井田 康宏
ファナック(株)	ロボナノ事業本部	ロボナノ技術室 研究員	松浦 修

はじめに

マイクロメートル（100万分の1メートル）やナノメートル（10億分の1メートル）レベルの加工と聞くと、一般的に、リソグラフィ、ドライエッチングなどの所謂半導体製造技術の応用技術が連想される。しかし、これらの方法は膨大な設備コストがかかることが多い。もし機械精度を極限まで高めた超精密工作機械を用いて、切削や研削といったオーソドックスな機械加工でマイクロ～ナノ加工が実現できれば、機械加工のメリットである「材料の選択肢が多い」、「形状の選択肢が多い」、「加工能率が良い」、「加工精度が良い」、「設備コストが低い」などを生かすことができ、新たな市場を掘り起こせる可能性がある。

当社では、約20年前から、将来は必ずナノメートルオーダーの位置決め性能をもった超精密加工機が必要になると考えて、開発を開始したが、開発当初は、特殊な部品を多用していたため、非常に高額な機械であった。幸いなことに、近年、当社で製造販売している最新の標準CNC、標準リニアモータ、標準アンプなどの制御装置の性能が格段に向上したことにより、こ

れまで培った超精密技術をベースにこれらを組み込んで、大幅なコストダウンと、信頼性を上げることができるようになった。

これが、一般の生産現場で使用できる身近な「超精密5軸ナノ加工機」（図1）の開発を後押しした。



図1 超精密5軸ナノ加工機の外観

開発のねらい

マイクロ～ナノ部品の加工精度の主な評価値には表面粗さと形状精度がある。表面粗さは機械性能そのものであり、一方、形状精度は、繰り返し性が良ければ、補正することで、理論的には表面粗さまで近づけられる。本機の開発には、分解能の細かさ、送りの滑らかさ、送り方

向の繰り返し位置決め安定性に加えて、「摩擦」、「振動」、「熱」というなかなか制御技術では抑えることの難しい外乱要因を徹底的に排除して繰り返し性を良くすることに重点を置くことで、世界最高レベルの精度を実現する加工機の開発を行なった。

装置の概要

図2に本機の軸構成を示す。直線3軸(X, Y, Z) + 回転2軸(B, C)を備えた合計5軸の超精密加工機である。B、C軸テーブル上に、加工物の目的に合わせてスピンドルやワークを取り付けて加工できるフレキシブルな構造を採用しており、同時5軸制御により、自由曲面をはじめとする複雑形状の超精密加工に対応する。また、アタッチメントを交換することで、ミリング加工、旋削加工、引き切り加工、高速引き切り加工といった各種の加工方法を加工対象に合わせて選択できる。良好な表面粗さを得るため、工具は単結晶ダイヤモンド製、ワークはニッケルリンメッキなどアモルファス材料が使われることが多い。

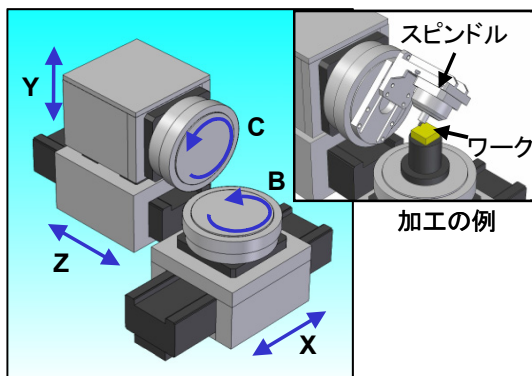


図2 機械の基本構成

技術上の特徴

1. 摩擦、振動のない機械

すべりや転がり軸受など摩擦が介在する機構を用いてナノメートルオーダーで駆動する場合、

バックラッシュやスティックスリップという非線型現象が位置決め精度に影響する。本機では、あらゆる滑動部を静圧空気軸受(図3)で構成し、摩擦を排除することで、この問題を解決している。

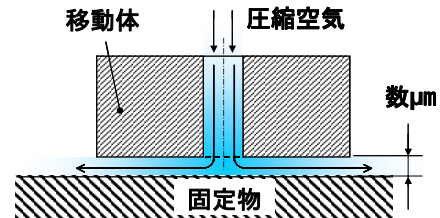


図3 静圧空気軸受

摩擦が極めて少ない静圧空気軸受は、高速駆動に伴う発熱や振動を生じない一方で、軸受に供給される空気流から微小振動が生じる可能性がある。本機では、この空気流が層流か乱流かに着目し、全ての空気管路内の空気流を層流化することで(図4)、この微小振動が発生しないようにした。

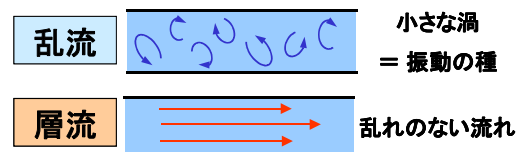


図4 空気流の乱流と層流

2. ナノ制御

直線軸はリニアモータ、回転軸では同期ビルトインサーボモータでダイレクト駆動しており、当社CNCにより直線軸では1nm、回転軸では0.00001degの指令分解能でナノ制御を行なう。図5に直線軸の1nmステップ応答試験結果を示す。実際に、1nm単位で駆動されていることが分かる。

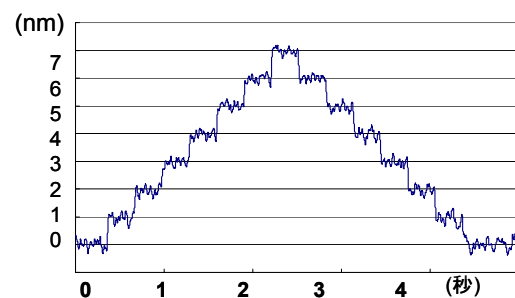


図5 1nmステップ駆動

3. 恒温化した機械システム

ナノメートルオーダーの加工では、機械内部からの発熱、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、特に熱の変化が問題になる。本機では通常運転時の消費電力が機械全体で5W以下、実際の各モータの駆動電力はその1割程度に抑えられているため、発熱は0.1℃以下である。その上で、全静圧空気軸受機械の特有構造である機械内部に張り巡らされた空気管路内の圧縮空気温度を±0.01℃で精密制御することで、±1℃程度の恒温室に設置した場合でも±0.01℃の部屋並みの温度環境（図6）に安定化できる。

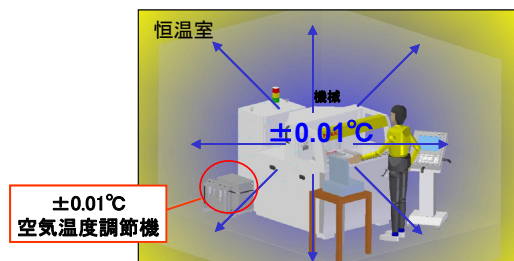


図6 恒温化した機械システム

4. 高い生産性

微細な溝を数万本加工する回折格子などの加工においては、高速駆動による加工時間の短縮が必須である。本機では、シャトルユニットと呼ばれる専用アタッチメントを機械本体に取り付けて、高速引き切り加工を可能としている。高速駆動は、加減速時の反動や発熱が問題となるが、本ユニットでは、図7のように、2つの可動部で反動を打ち消す構造を採用している。また、発熱も3W以下に抑えた上で、200mmのストローク間を毎秒3往復することが可能になっている。本ユニットの無反動構造は、他の

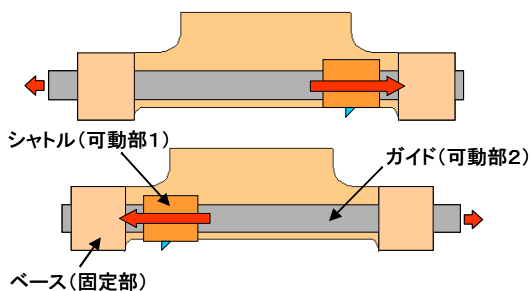


図7 シャトルユニットの無反動の原理

工作機械にはない独自の構造である。

実用上の効果

マイクロ～ナノ加工を従来から使用されるリソグラフィなど半導体製造技術を応用して行おうとした場合、装置を設備するには億単位での投資が必要になる。これに対して、本機による機械加工は投資額が少なく、通常の機械加工の知識で実現することができる。また、材質や形状の自由度も広い。本機による代表的な加工事例を以下に紹介する。

図8は、0.3μmピッチのピラミッド形状をミリング加工した例である。サブミクロンピッチの加工においても、バリのないシャープな輪郭が本機で加工できることがわかる。任意の角度をもつ斜面の加工は、半導体製造技術では難しいが、機械加工では工具さえ製作できれば、容易に加工できる。

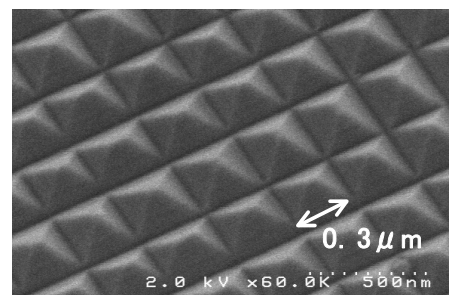


図8 サブミクロンのピラミッド形状

図9は、液晶ディスプレイのバックライトに用いられる導光板の金型である。100mm角の中に、1400本のマイクロV溝が加工されている。

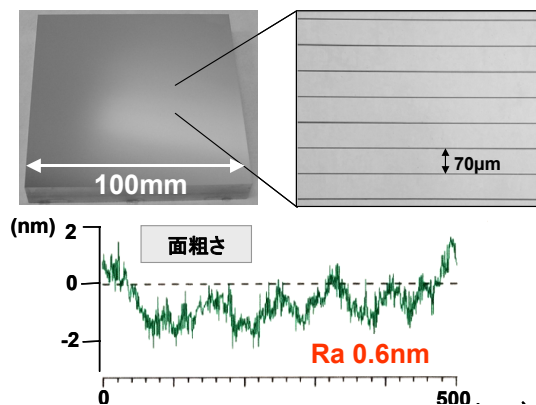


図9 導光板金型の加工例（微細溝）

本機にシャトルユニット搭載することで、表面粗さRa 1nm以下を保ったまま、総加工時間は僅か8分で加工完了できる。従来の加工方法では15時間かかる加工である。

導光板金型には、**図10**のようにディンプル形状のタイプも使用される。ワーク上には100万個のディンプルが加工されているが、従来2週間かかっていた加工が、シャトルユニットを使うことで、僅か20分で加工完了できる。このようにシャトルユニットを搭載することで、加工時間は驚異的に向上し、生産性の向上に大きく貢献している。

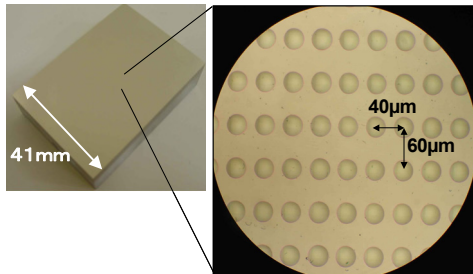


図10 導光板金型（ディンプル）

レンズ形状は磨き加工による仕上げが一般的であるが、最近では磨き加工では、形状制御が難しい自由曲面へとニーズが広がってきている。本機では多軸制御ミリング加工により、自由曲面形状にも切削で対応できる。**図11**は同方法によるスキャナ用レンズの金型で、縦横で異なる曲率をもつ自由曲面である。切削のみで、Ra3nmの鏡面が得られている。

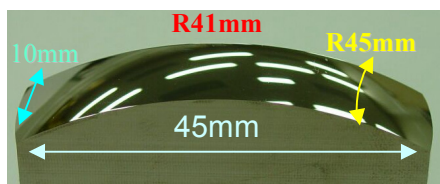


図11 f-θレンズ金型（自由曲面）

ガラスモールドの金型の場合は、超硬材などの非常に硬い材質が使用される。**図12**は、超硬材にφ3の凹球面をアレイ状に加工したものである。表面粗さはRa2.5nmの鏡面が得られており、本機ではこのような高硬度材料に対しても、磨き加工なしの鏡面加工が出来る。また、レンズアレイの形状は、通常のレンズ金型加工

に使用される超精密旋盤では、加工することが不可能な形状である。本機のように5軸を備えた機械であれば、加工形状の制限はないので、最近ではデザイン的な加工用途も増えている。

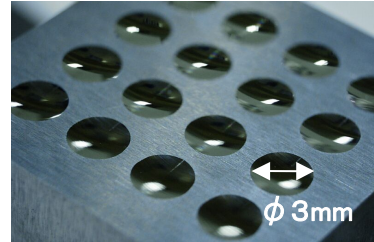


図12 レンズアレイ金型（超硬材の加工）

部品表面に微細パターンを施すことによって機能を付加する技術は、光学分野にとどまらず多岐に渡っている。**図13**は、微細穴が多数配列した形状をしており、医療用バイオチップに使用される。

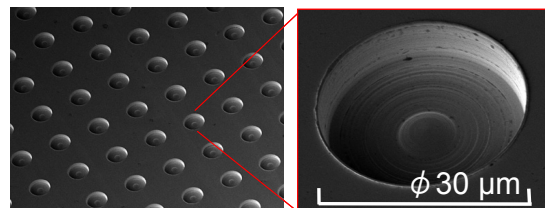


図13 医療用バイオチップ（微細穴）

工業所有権の状況

関連特許は、国内海外合わせて、28件が登録されており、68件が出願中である。（特許3746242号 層流静圧空気軸受など）

むすび

機械加工によるマイクロ～ナノ加工は、従来からの光学部品だけでなく、産業の様々な分野への広がりを見せている。本機は、5軸制御の工作機械であるので、半導体製造技術では制御が困難な自由形状にも対応できるのも注目される一因である。ここ数年は、海外の大学や研究機関から、本機についての問い合わせが増加しており、本機に対する関心が世界中で高まっている。