

超精密機械加工技術の現状と光学部品の加工事例

Ultra Precision Machining and Its Application to Optical Parts

村田 一夫*
Kazuo Murata

山口 勝己*
Katsumi Yamaguchi

足立 和俊*
Kazutoshi Adachi

本田 索郎*
Sakuro Honda

(1999年9月9日 受理)

キーワード：超精密機械加工技術，光学部品，レンズ金型，軸対称非球面形状，3次元自由曲面形状

1. はじめに

明治以降，近代日本をリードしてきた主要産業は，繊維産業→電機産業→鉄鋼産業→自動車産業と推移し，近年はエレクトロニクス産業の時代，特に現在は，マイクロエレクトロニクスの時代といわれている¹⁾．エレクトロニクス産業では，主として電子機器，情報機器，光学機器，精密機器関連の産業が中心であり，そこで用いられる製品や部品は，一般に形状が小さくしかも何らかの優れた機能あるいは優れた性能を有する付加価値の高いものが多い．ここで述べる超精密機械加工技術は，極めて高精度で高剛性の加工機と極めて切れ味の良いダイヤモンド工具を用いて，ナノメートルオーダの正確な形状および滑らかな表面を切削や研削加工などにより創成する技術で，高付加価値を与え得るものの一つである．

ここ15～20年ほど前から，加工要素技術や計測技術の進歩，ダイヤモンド旋盤の開発などにより切削や研削加工の高精度化が急速に進み，従来手磨きで長時間かけて製作されていた非球面形状鏡面加工が短時間にしかも繰り返し行えるようになってきた²⁾．

現在では，生産機械としての超精密加工機が市販され，光学部品，電子デバイス，精密機械部品など高精度を要する高付加価値部品の製作において欠くことのできない技術として脚光を浴びている．

そこで当研究所でも平成8年に国内最高レベルの超精密加工機を導入し，産学官共同研究『高機能部品の超精密加工と評価技術の開発』の中で，光学レンズ，ミラーやレンズ成型金型を対象として，ナノメートルオーダ加工精度を得るための諸技術の開発に取り組んできた．本稿では，この研究を通じて得られた知識と経験をもとに，超精密加工を達成するための条件という観点から，加工機，工具，材料，加工環境などについて概説すると共に，光学部品を対象とした軸対称非球面，3次元自由曲面形状の加工事例を紹介する．

2. 超精密加工の条件

超精密切削・研削加工の基本原理は，極めて高精度・高剛性の加工機の運動を極めて切れ味のよい工具を用いて極めて被削性のよい工作物に転写するものであるが，その転写精度は母性原理に支配され，母なる加工機の精度を超えることはできない．そのため，

* 生産技術部 精密機械グループ

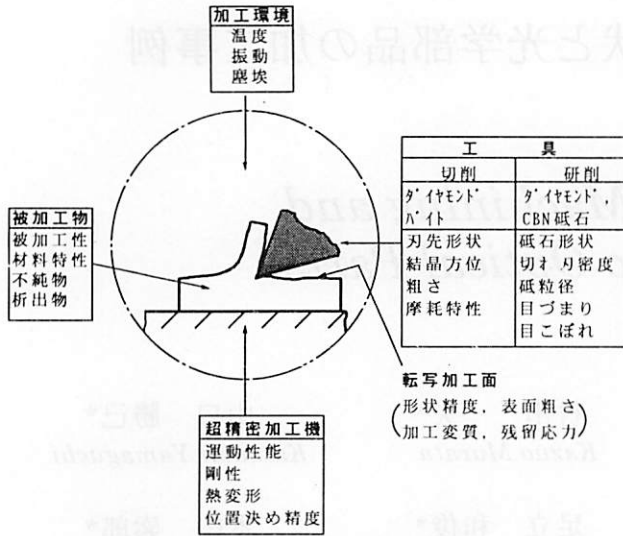


図1 超精密加工の各種要因

加工精度に影響を及ぼす要因として加工機の各要素の精度が非常に重要となる。その他、図1の超精密加工に関係する各種要因に示すように、微小切り込みに基づく超精密切削や研削では、工具、被削材の特性および加工環境なども加工精度に影響を及ぼす重要な因子となる²⁾³⁾。そこで、筆者らが現在使用している加工機やダイヤモンド工具、いくつかの材料の超精密切削特性実験結果や加工環境測定結果などを紹介し、加工精度に影響を及ぼす諸問題について概説する。

(1) 超精密加工機

切削や研削の加工機の基本的構成要素は、主軸スピンドル、スライドテーブル、微動送り機構などであり、超精密加工機では、これらの構成要素を従来の加工機では問題にならないレベルの高精度・高剛性にする必要がある。実際にそれらがどの程度になっているかを、当所の超精密加工機(豊田工機(株)製 AHN60-3D)を例として各要素ごとに紹介する。

AHN60-3Dは、切削・研削による3次元曲面加工が可能な超精密加工機で、図2に示すように、X・Y・Z軸スライドテーブル、B軸回転テーブルの4軸と主軸で構成されている⁴⁾。軸対称非球面切削は、主軸上に被削材を、B軸上に工具を取り付けX・Z軸、B軸の3軸制御により行う。3次元曲面加工(切削・研削)は、Y軸上にエアースピンドル(工具搭載)を取り付け、X(被削材取り付け)・Y・Zの3軸制御により形状創成する。機械の主な仕様を表1⁴⁾に、各軸の運

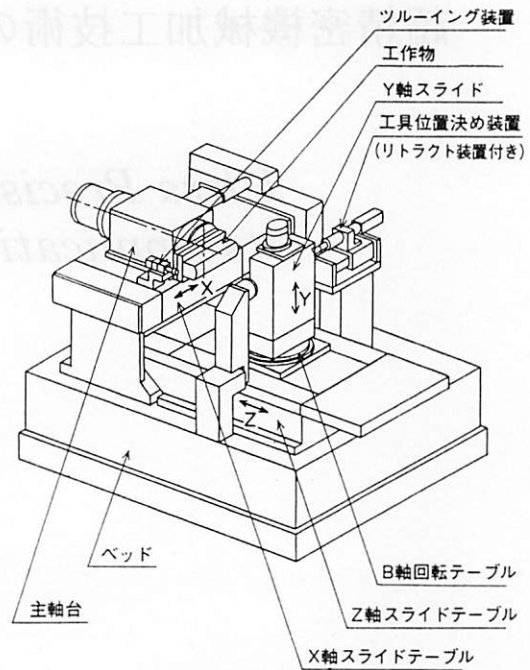


図2 超精密非球面加工機の構成

表1 超精密非球面加工機の仕様

| 項目 | 単位 | 仕様 |
|--------------|-------------------|------------|
| 最大加工径 | mm | φ600 |
| 主軸回転数 | min ⁻¹ | 30~1,000 |
| X,Z軸ストローク | mm | 350 |
| Y軸ストローク | mm | 110 |
| X,Y,Z軸早送り速度 | mm/min | 240 |
| X,Y,Z軸切削送り速度 | mm/min | 0.0001~240 |
| X,Z軸最小設定単位 | nm | 1 |
| Y軸最小設定単位 | nm | 10 |
| B軸回転角度 | 度 | 330 |
| B軸回転数 | min ⁻¹ | 0~3 |
| B軸最小設定単位 | 秒 | 1.3 |

動精度、剛性、支持方式を表2にまとめて示す。また、最も重要なX・Z軸の位置決めは、レーザ干渉測長システムおよびフィードバック制御により最小設定単位1nmとなっている。図3にその応答性を示す⁴⁾。その他、バイトや砥石工具先端の位置の誤差が形状精度に大きく影響を及ぼすことから機上工具位置検出装置を備えると共に、研削の場合、砥石形状や切れ刃の数が加工精度に大きく影響するため機上ツールイング装置が設置されている。さらに、機内空調(機内温度変化±0.06℃)、各軸受けの油温制御(±0.05℃)、主軸における駆動部冷却および低熱膨張材料構造な

表2 各軸の支持方式, 剛性, 運動精度

| 運動軸 | 支持方式・剛性 | 運動精度 |
|-----------------------|---|--|
| 主軸 スピンドル | 静圧油軸受 軸方向: 700N/mm 半径方向: 900N/mm | 回転精度: 0.05 μ m 以下 (軸 半径方向) |
| 砥石軸 I7-スピンドル | 静圧空気軸受 軸方向: 37N/mm 半径方向: 25N/mm | 回転精度: 0.05 μ m 以下 (軸 半径方向) |
| X, Y, Z 軸 スライドテーブル | 静圧油軸受 水平方向: 1300N/mm(X) 垂直方向: 2700N/mm(X) 水平方向: 2200N/mm(Z) 垂直方向: 4600N/mm(Z) | 真直度: (X, Z 軸) 0.3 μ m/350mm (20nm/25mm), (Y 軸) 0.3 μ m/110mm (100nm/50mm) 位置決め精度: (X, Z 軸) 0.3 μ m/350mm (絶対) $\pm 0.03\mu$ m/7 回 (繰り返し), (Y 軸) 0.3 μ m/110mm (絶対), $\pm 0.05\mu$ m/7 回 (繰り返し) |
| B 軸 回転テーブル | 静圧油軸受 軸方向: 2000N/mm 半径方向: 1000N/mm | 回転精度: 0.05 μ m 以下 (軸 半径方向) 位置決め精度: 10°/335 度 (絶対) $\pm 3^\circ/7$ 回 (繰り返し) |

ど、運転時の熱変位発生防止にも配慮されている。

(2) ダイヤモンド工具

超精密加工では、加工機の運動に従って工具輪郭形状がそのまま材料に転写されるため、工具の先端形状精度が加工精度に大きく影響する。

超精密切削工具の性能としては、微小切り込みが可能な鋭利な刃先形状であること、高硬度で耐磨耗性が良く長寿命であることなどが望まれ、これらを満足するものとして単結晶ダイヤモンドバイトが多く用いられる。微小な切り込みで安定して切削するためには、単結晶ダイヤモンドバイトの刃先稜(すくい面と逃げ面のなす稜)の丸み半径は小さく刃先が鋭いことが好ましい。また、刃先ノーズ半径 R は、加工面の表面粗さ PV ($PV=f/8R$ (f: 1 回転当たりの送り)) を定めるものとなるため、その輪郭形状精度やすくい面、逃げ面の滑らかさが重要となる。刃先稜先端丸み、ノーズ R 輪郭形状、すくい面・逃げ面の表面粗さは、ポリッシングによりナノメートルオーダの精度に仕上げられている⁹⁾。図4に筆者らが軸対称非球面加工に用いたダイヤモンドバイトの刃先形状を示す。

また、ダイヤモンドの硬さは結晶方位によって異なり、すくい面や逃げ面にどの方位の結晶面を用いるか

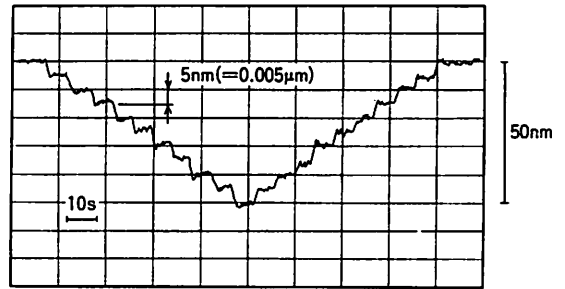


図3 スライドテーブルの1パルス応答

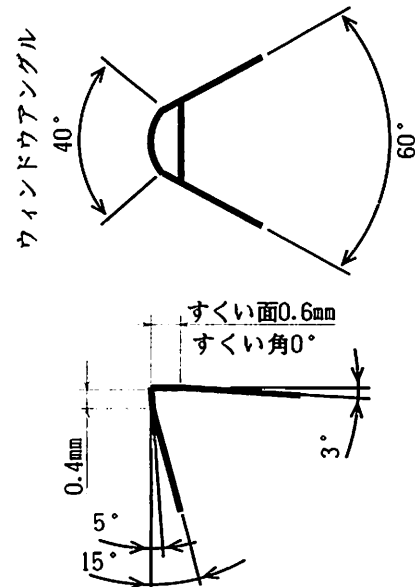


図4 単結晶ダイヤモンドバイト刃先

ということも、耐磨耗性、寿命の点から非常に重要となる。通常は(110)面がすくい面として用いられているが⁹⁾、すくい面、逃げ面とも(100)面を選ぶ方が好ましいとも言われている¹⁰⁾。なお、ダイヤモンドはすべての材料に適用できるものではなく、鉄、チタン、ニッケルなどいくつかの金属との間では化学的に活性となり激しい工具摩耗が生じる⁹⁾¹⁰⁾ため、それらの金属材料の超精密加工は難しい。超精密切削では工具のわずかな摩耗や損傷が形状精度、表面粗さを悪化させるため、現在のところ主としてアルミニウムや銅などの軟質金属に適用されている。

高硬度鉄系材料やセラミックス、ガラスなどの硬脆材料に対しては研削加工が施される。超精密研削加工では、鉄系材料に対してはCBN 砥石、ガラスやセラミックスに対してはダイヤモンド砥石が用いられている。ここで、超精密研削用砥石として求められる条件は、①砥粒切れ刃が非常に硬く鋭利で、微小研削が

表3 各種材料の切削精度と切削特性

| 被削材 | 加工精度 | 切削特性 |
|------------------|--------------------------|----------------------------|
| 無電解 Ni-P メッキ層 | PV - 26nm, Ra - 4nm | 他材料に比べて最も鏡面 が得やすい |
| 無酸素銅 | PV - 31nm, Ra - 5nm | 多結晶材料では最も鏡面 が得やすい |
| 純アルミ | PV - 25nm, Ra - 3nm | スクラッチがなければ良好な加 工面となる |
| シリコン | PV - 43nm, Ra - 7nm | 破壊痕多数. 破壊の容易さ は結晶方位に関連. |
| チタン | PV - 127nm, Ra - 24nm | むしれ痕が激しい. 鏡面は 得にくい |

可能なこと, ②砥粒切れ刃が表面のどの場所でも均一に分布し, 同一高さに多数の切れ刃が存在すること, ③砥粒保持力が大きく, 加工時の変形が少ないことおよび砥石形状の変化も生じにくいこと, ④ツルーイング, ドレッシングが適切に行えること, などである. 超精密研削を目的とした砥石として, 微細砥粒砥石や砥粒均一分散砥石などが市販されており, 最近では, 微細砥粒鉄ボンド砥石とインプロセス電解ドレッシング法を組み合わせた ELID 研削やダイヤモンド砥粒の表面にレーザ加工を施して微小切れ刃を持たせた砥石など超精密鏡面研削を目指した手法や砥石が開発され注目されている¹¹⁾⁻¹³⁾. また, 脆性材料を超精密研削するためには, 脆性破壊を生じさせずに延性モードで材料除去を行うことが必須である. しかし, 脆性材料の延性/脆性遷移機構は未だ明確でなく, 活発な研究がなされているところである¹⁴⁾⁻¹⁶⁾.

(3) 被削材

極めて被削性が良く, 熱の発生や加工変質の生成が少なく, 工具摩耗を生じさせない材料が超精密加工用材料として好ましいが, 一般には種々の特性を持つ材料があり, 個別に超精密加工の可能性を検討しなければならない. ナノメートルオーダの高精度を得るためには, ヤング率, 硬さ, 破壊じん性や線膨張率などの材料特性が深く関係するが, それ以外に, 不純物, 金属間化合物や析出物の存在, 結晶粒界段差の生成, 加工による残留応力の変化とそれに基づく形状変化など, 加工による材料固有の現象が超精密加工を阻害する要因として問題となるところである. ここでは, 特徴的な材料特性を有するいくつかの材料について, 超精密切削を行った実験結果をもとに, 超精密加工と

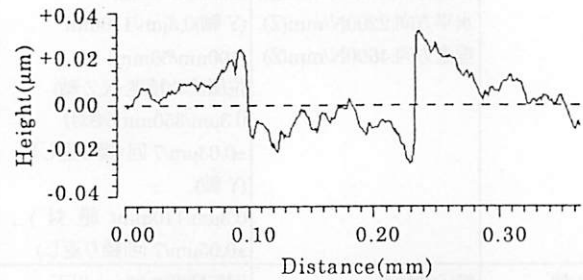
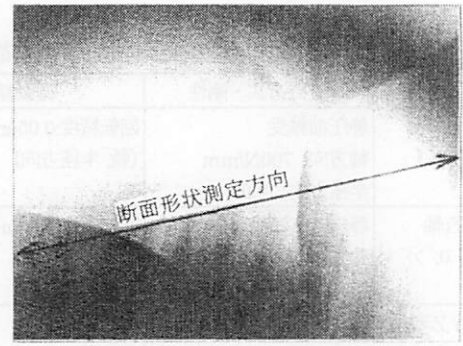


図5 無酸素銅超精密切削面の結晶粒界段差

材料について考えてみる.

特徴的な材料特性を持つ材料として, 無酸素銅, 純アルミ (軟質金属), 無電解 Ni-P メッキ層 (非晶質材料), シリコン (脆性材料), チタン (化学的活性金属) を取り上げ, これらを図4に示したダイヤモンド R バイト (ノーズ半径 R=5mm) を用いて正面旋削により平面加工した. 各材料の加工面精度および切削特性を表3に示す¹⁷⁾. 無酸素銅, 純アルミの軟質金属は, 切り屑などによるスクラッチが生じなければ良好な加工面が得やすい. しかし, 無酸素銅では, 図5に示すように, 弾性率が結晶面によって異なることに起因する結晶粒界段差が観測された. 非晶質の無電解 Ni-P メッキ層ではこのような段差は生じないが, 軟質金属に比べて硬さが高く, 工具損耗が早いものと思われる. 脆性材料のシリコン (単結晶) の場合は, 結晶方位によって脆性破壊が生じやすく¹⁸⁾, そのため, 図6に示すような放射状の縞模様が形成された. 前述のように脆性材料の超精密加工では, 脆性破壊を生じさせずに塑性流動型の材料除去を行うことが重要であり, この場合も Si の延性モード加工条件を明確にする必要がある.

チタンのような化学的に活性な金属は, ダイヤモンドとの親和性が良く, 加工中に化学反応を生じダイヤモンドが激しく損耗するため, 通常のままでは超精密

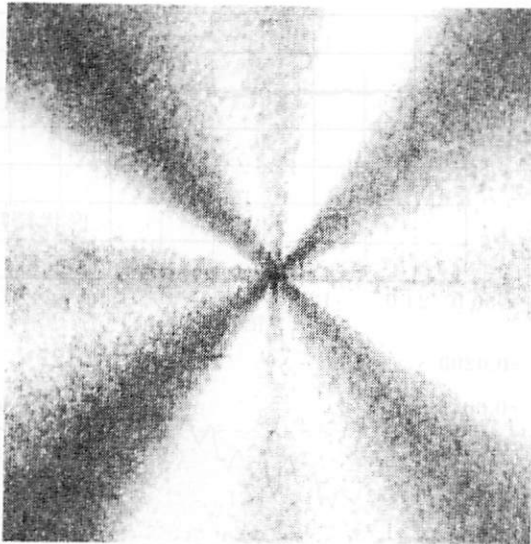


図6 Siの切削面性状 (回転数; 750rpm, 送り量; 10 μ m/rev, 切り込み; 1 μ m)

加工面を得ることは難しい。ダイヤモンドの損耗を少なくするためには、加工点の温度を下げる、加工点に酸素が入り込まないような工夫をするなどの方法が言われている¹⁰⁾が、いずれもなかなか困難な問題である。

(4) 加工環境

加工機、工具、被削材に関する各種要因は直接的に加工精度に影響するが、このほか、間接的に加工精度に影響する要因として、周囲温度変化、振動、空気変動および切削・研削油中の塵埃、給油方法など加工部の環境がある。ここでは、実測データをもとに温度と振動の問題について述べる。

切削や研削を行う際、照明の点灯や加工機の駆動により周囲の温度は容易に変化する。図7(b)は、軸対称品加工における「室内照明点灯→加工機・機内空調電源ON→主軸回転」の通常の運転順序時の機内各部温度変化を約12時間にわたって調べたものである¹⁰⁾。

図7(a)は主軸正面(Z方向)から見た時の温度測定位置を示している。加工点に近いch4, ch5, ch6の測定位置では、室内照明点灯で約0.2 $^{\circ}$ C、加工機・機内空調電源ONで約0.5 $^{\circ}$ C、主軸回転(回転数1000rpm)で約1.3 $^{\circ}$ Cの温度変化が観測されている。100mmの長さの鉄系金属では、1 $^{\circ}$ Cの温度変化で約1.2 μ mの伸縮が生じることを考えると、ナノメートル加工精度を目指す超精密加工では温度安定化に相当の配慮をし

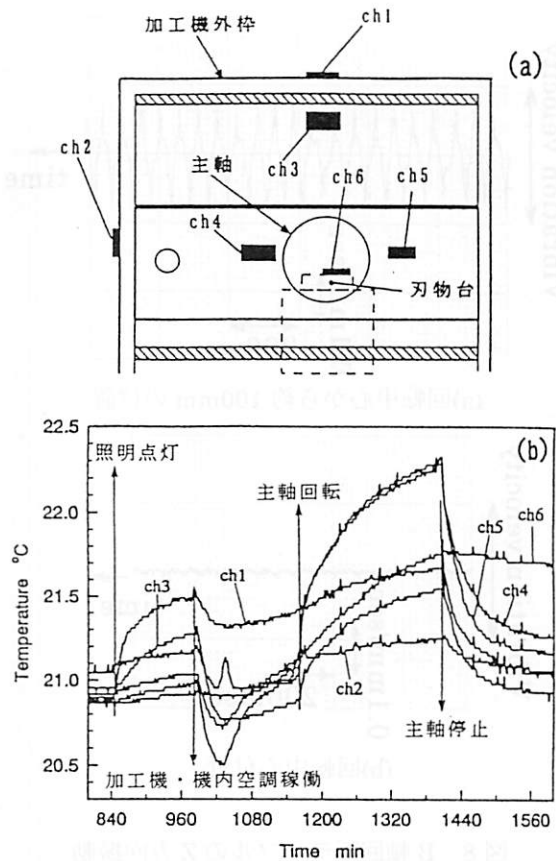


図7 超精密加工機稼働に伴う温度変化

なければならない。特にこの場合、主軸の回転による温度上昇は3時間を経過してもなお上昇中であり、主軸回転開始から温度が安定するまでの時間を正確に測定し、そのデータをもとに、加工時間中の温度変化が加工精度に影響しないことを確認する必要がある。

振動については、外部から伝わってくる振動と内部で発生する振動に分けて対処する必要がある。当所の加工機は、周囲と縁切りをした大きな鉄筋入りコンクリート基礎(2.1m \times 2.7m \times 2.0m(深さ)、重量約30トン)の上に空気ばねを介して設置しており、外来振動の防振対策には十分な配慮がなされている。機械内部から発生する振動に対しては、発生箇所と振動特性(周波数、振動レベル)を調査し、機械各構成部分の剛性や共振特性との関係を把握するとともに、他の部分への振動伝搬防止対策などを考慮しなければならない。機械内部から発生する振動の一例として、フィードバック制御により回転方向に微小振動している当所加工機B軸テーブル上の振動測定結果を図8に示す。図8(a)は、B軸中心からX軸方向に約100mm離れた位置、(b)はB軸中心付近、のZ方向振動(振

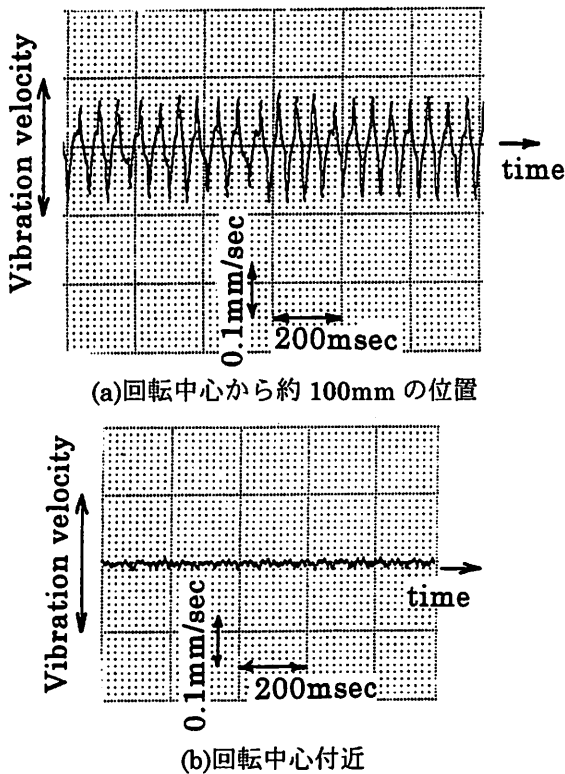


図 8 B 軸回転テーブルの Z 方向振動

動速度)を示している。図から、(a)の位置では、周波数は約 17.6Hz、振動速度が約 0.2mm/sec (振動変位量 $1.8\mu\text{m}$)となっており、回転振動であることから、中心からわずかに離れた位置では Z 方向に数 nm の変位振動が容易に生じる。B 軸回転を用いる軸対称非球面加工では、ダイヤモンド R バイトの切削点位置を B 軸中心にセッティングするが、その位置合わせの精度は、幾何学的なものだけでなく振動の発生によっても形状創成誤差に影響を及ぼす。

3. 光学部品の加工事例

実際に当所の超精密加工機 AHN60-3D、形状測定機 (松下電器産業 (株) UA3P-5)、3次元構造解析顕微鏡 (Zygo 社 New View 100) を用いて、光学部品を対象に加工・計測した例を紹介する。

(1) 回転対称非球面切削加工

材料は、熱伝導性が良く、超精密加工が比較的容易なことからレーザ加工機用集光ミラーなどに用いられている無酸素銅を取り上げ、凸状球面ミラー (曲率半径 $r=250\text{mm}$ 、外径 $\phi=75\text{mm}$) の超精密切削を試

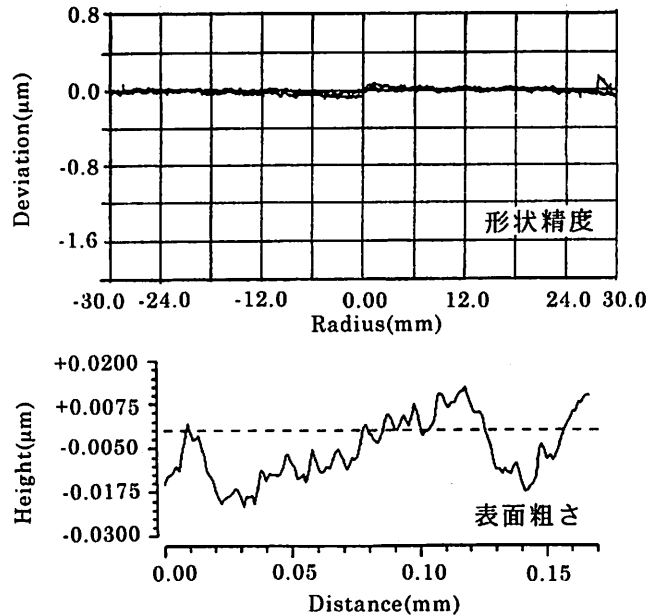


図 9 無酸素銅の球面切削加工精度

みた。試料は主軸に取り付けた真空チャックに、単結晶ダイヤモンド R バイト (刃先ノーズ半径 $R=5.052\text{mm}$) は B 軸回転テーブル上に取り付けた工具台にそれぞれ固定し、X 軸 (送り方向)、Z 軸 (切り込み方向) および B 軸旋回の 3 軸 NC 制御により加工した。加工条件は、主軸回転数 1000rpm、送り速度 10mm/min、切り込み $5\mu\text{m}$ で、切削油はケロシン (白灯油) を使用した。形状精度、表面粗さを図 9 に示す。この場合、形状精度 $0.1\mu\text{m}$ 、表面粗さ 34nm を得た²⁰⁾。レンズやミラーの加工精度は形状精度 $0.1\mu\text{m}$ 、表面粗さ 10nm が目標とされており、切削のみでかなり近い精度が得られた。しかし、形状精度については中心付近での段差を少なくすること、表面粗さについては 1 回転当たりの送り量や切り込み深さなど加工条件を変えること、などによりもう少し精度を向上させることが可能であろう。

(2) 3次元自由曲面研削加工

3次元自由曲面加工の例として、レーザビームプリンタ (LBP) 用レンズの金型加工を想定し、ラスタスキャン方式により金型材料 STAVAX (ステンレス鋼 AISI420 相当) を CBN 砥石 ($r=25\text{mm}$ 球状工具) を用いて研削加工した。ラスタスキャン方式は、図 10 に示すように、工作物を取り付けた X 軸、工具切り込み方向の Z 軸の 2 軸制御により Y 軸上一断面を加

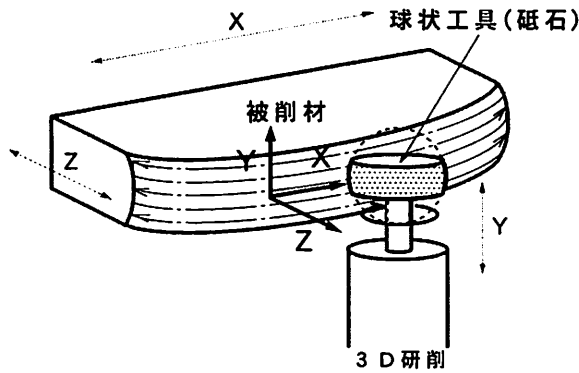


図 10 3次元自由曲面（非軸対称非球面）の加工

表 4 研削加工条件

| | 粗仕上げ | 中仕上げ | 仕上げ |
|---------|------------|-----------|-----------|
| 砥石 | CBN#170 | CBN#600 | CBN#1800 |
| 砥石回転数 | 9000rpm | 9000rpm | 9000rpm |
| 砥石周速度 | 1413m/min | 1413m/min | 1413m/min |
| 切り込み量 | 15 μ m | 5 μ m | 1 μ m |
| 被削材送り速度 | 240mm/min | 240mm/min | 20mm/min |
| 送り方式 | 双方向 | 双方向 | 一方向 |
| Y方向ピッチ | 0.5mm | 0.10mm | 0.08mm |

表 5 研削加工面精度

| | | X軸方向 | Y軸方向 |
|----------|----|-------|-------|
| 表面粗さ | | 22nm | 171nm |
| 形状 精度 | 軸上 | 317nm | 221nm |
| | 面上 | 527nm | |

工し、次いで Y 軸方向に工具を一定量スライドし同様の X, Z 軸制御により次の一断面を加工する。これを繰り返すことにより非軸対称非球面（3次元自由曲面）形状を創成する方法である。形状は、R=150mmの凹球面形状で、研削条件を表 4 に、加工面精度を表 5 に示す。LBP 用金型の加工精度は、形状精度 500nm、表面粗さ 50nm 以下が望まれている。形状精度は目標値に近い値となっているが、図 11 に示すように、表面粗さは、多数の不揃いの砥粒切れ刃が被削材と干渉するため、凹凸の激しい断面曲線が形成され目標値の 3 倍以上の値となっている。この場合には、後工程のポリッシングに少し時間をかけねばならないであろう。

(3) 3次元自由曲面切削加工

多数切れ刃を持つ砥石に対して、回転時に単刃球状工具となるような単結晶ダイヤモンド R バイトを用いて、研削と同様に LBP 用レンズの創成を想定し、ラスタスキャン方式で切削加工（フライカット加工）した。被削材は、切削可能な金型材として無電解 Ni-P

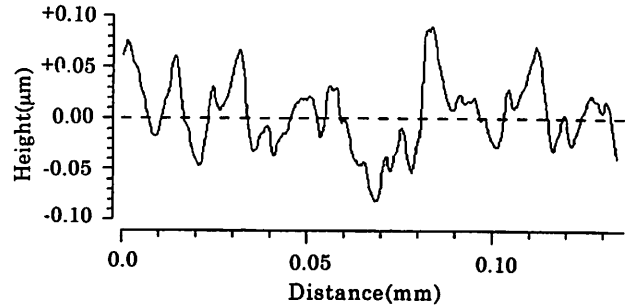


図 11 研削加工面の表面粗さ（Y方向）

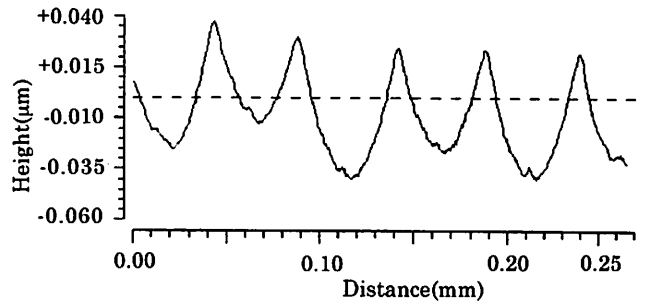


図 12 フライカット加工面の表面粗さ（Y方向）

表 6 フライカット加工条件

| | 粗仕上げ | 中仕上げ | 仕上げ |
|---------|------------|-----------|-----------|
| 工具回転数 | 5000rpm | 5000rpm | 5000rpm |
| 切り込み量 | 10 μ m | 5 μ m | 3 μ m |
| 被削材送り速度 | 240mm/min | 240mm/min | 120mm/min |
| 送り方式 | 双方向 | 双方向 | 一方向 |
| Y方向ピッチ | 0.20mm | 0.10mm | 0.05mm |

表 7 フライカット加工面精度

| | | X軸方向 | Y軸方向 |
|----------|----|-------|-------|
| 表面粗さ | | 54nm | 78nm |
| 形状 精度 | 軸上 | 458nm | 163nm |
| | 面上 | 528nm | |

メッキ層が好ましいが、ここでは被削性の良い無酸素銅を切削した。形状は、R=250mmの凸球面形状で、加工条件を表 6 に、加工精度を表 7 に示す。この場合、形状精度は研削と同程度であるが、表面粗さは、図 12 に示すように、ダイヤモンド切れ刃形状が正確に転写された断面形状を示しており、目標値に近い値となっている。この場合には、後工程のポリッシングは短時間で済むであろう。なお、研削、切削とも形状精度が回転対称物切削の場合に比べてあまり良くない。この原因は、被削材中心付近で工具運動が Z 軸方向に反転する際、指令通り追従しないため、突起部（凸面）あるいは陥没部（凹面）が形成されることによるもので、被削材中心付近での送り速度を遅くすれば改善す

ることができる。

4. おわりに

ナノメートルオーダの高精度加工を行うためには、まず少なくとも、従来の加工機に比べて運動精度や剛性が数段高い加工機を必要とする。しかし、このような超精密加工機が与えられたとしても、工具特性、被削材材料特性や加工環境など高精度加工を得るための諸条件や微小な材料除去を行う超精密機械加工特有の技術的諸問題があり、容易に高精度加工が達成されるものではない。本稿では、このような観点から、超精密機械加工を行うための基本的な事柄について、当所所有の設備、産学官共同研究で得た経験や実測データをもとに概説した。拙稿ではあるが、これをお読みいただき多数の企業の方々が超精密加工に関心を持ち、超精密加工関連産業への進出を考えて頂ければと願っている。しかし、超精密加工機や高精度評価機器、それらを設置する施設など超精密加工に取り組むための設備費は非常に高価であり、また、高精度加工技術の知識やノウハウの習得に多くの時間を必要とする。そのため超精密加工への挑戦は、人件費も含めると多額の初期投資を覚悟しなければならず、中小企業の方々にとって躊躇するところである。そこで、当研究所の設備および技術支援を利用いただき、安価な初期投資で超精密加工関連の産業への参入を計画していただくことを願っている。

参考文献

- 1) 小林 昭 監修, 超精密生産技術体系第1巻基本技術, p.13, フジテクノシステム, 1995.
- 2) 小林 昭 監修, 超精密生産技術体系第1巻基本技術, p.25, p.154, フジテクノシステム, 1995.
- 3) 小林 昭 監修, 超精密生産技術体系第2巻実用技術, p.133, フジテクノシステム, 1995.
- 4) 坪井 暉, 前田幸雄, 大阪哲嗣, AHN60 CNC 超精密非球面加工機, 豊田工機技報, VOL35, No.2, 1994.
- 5) 井川直哉, 切削加工の精度限界, 機械の研究, 24, 12, p1545, 1972.
- 6) 丸井悦男, 超精密加工学, p.61, コロナ社, 1997.
- 7) 小林 昭 監修, 超精密生産技術体系第1巻基本技術, p.107, フジテクノシステム, 1995.
- 8) 小島一志, 超精密ダイヤモンドバイト“UPC-R,UPC-T”の性能と使い方, 機械と工具, p27, 7, 1996.
- 9) 島田尚一, 工具材としてのダイヤモンドの工学物性, 大阪府立大学ニュー・フロンティア材料研究会第130回講演会資料, p12, 1998.
- 10) Ed Paul, Chris J. Evans, Anthony Mongamelli, Michael L. McGlaulin, and Robert S. Polvani, Chemical aspects of tool wear in single point diamond turning, Precision Engineering, 18, 1, 1996.
- 11) 大森 整, 超精密非球面加工システム(1), 機械の研究, 48, 4, p429, 1996.
- 12) 大森 整, 超精密非球面加工システム(2), 機械の研究, 48, 5, p561, 1996.
- 13) 門村和徳, 福西利夫, 三井康祐, 大下秀雄, 原 昭夫, 超精密研削用ホイールの開発 - 第2報 - UPホイールの研削性能, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p247, 1997.
- 14) 宮下政和, ぜい性材料の延性モード研削加工技術, 精密工学会誌, 56, 5, p782, 1990.
- 15) 島田尚一, 脆性材料の機械加工における材料除去機構の制御, 機械の研究, 49, 7, p731, 1997.
- 16) Yoshio Tanaka, Kazuo Murata, Katsumi Mizutani, Okito Ogasawara, Ductile/Brittle Material in Indentation, International Conference on Precision Engineering, Taipei (Taiwan), 1997.
- 17) 村田一夫, 山口勝己, 足立和俊, 各種材料の超精密切削加工精度, 平成9年度大阪府立産業技術総合研究所研究発表会要旨集, p44, 1997.
- 18) T.Nakasuji, S.Kodera, S.Hara, H.Matsunaga, Diamond Turning of Brittle Materials for Optical Components, Annals of the CIRP, 39, 1, 1990.
- 19) 山口勝己, 村田一夫, 足立和俊, 超精密加工における熱の影響, 平成9年度大阪府立産業技術総合研究所研究発表会要旨集, p46, 1997.
- 20) 水谷勝己, 村田一夫, 山口勝己, 足立和俊, 光学部品の超精密切削と精度評価, 平成8年度大阪府立産業技術総合研究所研究発表会要旨集, p49, 1996.