

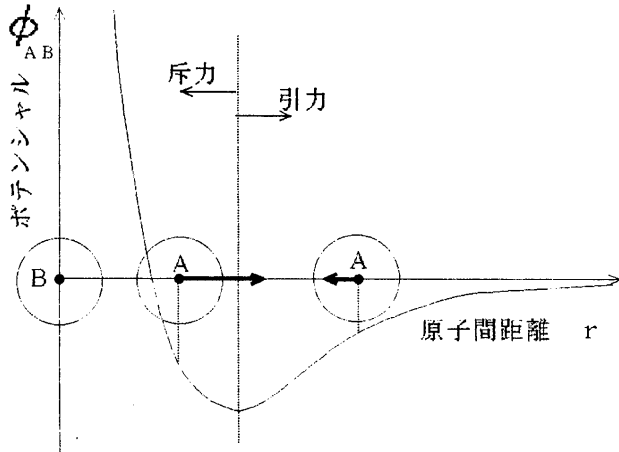


図2 レナードジョンスポテンシャル

ギーを上回るようにすればよい。そして、現在このためのエネルギー注入方法としては、レーザー、電子ビーム、他原子の衝突、等が考えられている。

ではこのような現象を理想的に行う為にはどのような環境が必要だろうか。今、必要な条件としては、理想的な材料（三次元的に物質の配列状態と種類が把握できる材料）。正確な位置制御（二つの原子の一つを選択できる程度の正確さ）。正確なエネルギーの制御。雰囲気（の制御である。そして、この4つの条件を妨げる要因はすべて不要である。例えば雑音としての振動、温度変化、異物の混入、等がその対象となる。

4.1 振動の防止

有害な振動は、機械外部から伝わってくるものと機械自体から発生するものがある。外部から伝わる振動はパッシブ防振台やアクティブ防振台で防止する。パッシブ防振台は定盤を吸振構造の空気パネで上下、左右、前後方向から支え、主に高周波振動を減衰させるものである。アクティブ防振台はパッシブ防振台の機能に加え、センサ、アクチュエータや制御回路を使用して低周波振動を減衰させる機能を有する。また、内部で発生する振動については防止が難しい。主な振動源としてはテーブル駆動用のモータやスピンドル軸受けなどがあげられる。

4.2 温度変化

温度変化は、理想的には無い事が好ましいが、機械内部での熱の発生等を考慮すると、完全に取り除くことは難しい。温度変化には大別して空間的な変化と時間的な変化が考えられる。空間的な変化は機械の各部位によって温度が異なる等の問題であるが、この点は設計時の工夫で影響を少なくすることができる。問題なのは温度の時間的な変化で、この影響は加工経過とともに変化するため、変化が急峻なものは安定化する必要がある。

4.3 異物の混入

異物とは主に空気中の埃である。埃にも柔らかい物、砂のような硬い物、塩のように化学的影響が出るもの、生物など様々である。これらを除く為には加工環境内の空気を常時フィルタに通す必要があり、クリーン度を高めるためには室内の空気を淀まないようにスムーズに流す工夫も必要である。

5. 切削加工

超精密切削とは材料表面の原子にバイトと呼ばれる工具の原子を衝突させ、その時の衝突エネルギーを利用して材料表面の原子を削除する作業である。従って理想的には材料表面へのバイト先端の切り込み間隔を原子オー

ダーの精度で一定に保つ必要がある。もしこの間隔が一定にならない場合には、その影響が材料表面に転写され加工精度は低下する。従って超精密切削ではスピンドルに空気又は油を持ちいた静圧軸受けを使用し、バイトは圧電素子等を使用した微小位置決め装置で送ることが一般的な方法である。また、少しでも理想的な加工を行う為には、加工が行われる微小領域でのバイト剛性を上げるため、バイト材質としてダイヤモンドが使われる。

5.1 軸受け

切削加工を行う場合、材料と工具の相対速度を作り

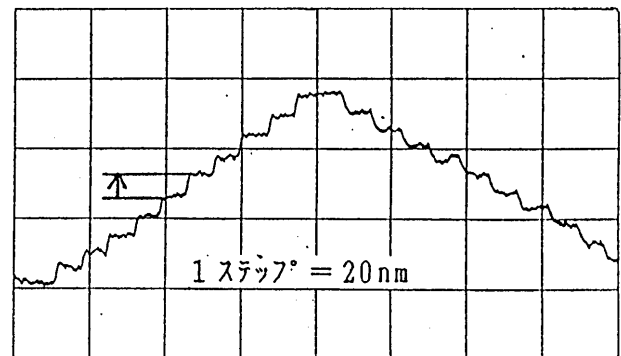


図3 アクチュエータの動作状況

出す為に、材料もしくは工具を動かさなくてはならない。一般には材料を回転運動させ、工具は直線運動させることが多い。従って物が回転運動したときにそれを支える軸受けが必要になる。そして軸受けは理想的な回転を支持しなくてはならない。

超精密加工で要求している理想的な回転とは、負荷が変動しても回転軸のベクトルや角速度が時間的に変動しないことである。通常、超精密加工の切削抵抗は比較的小さいがそれでも加工中は回転軸が外力を受け、その影響で変形したり全体が傾いたりする。すると僅かな振動が発生し、切り込み等に影響を与え結果的に仕上げ面の状態に影響する。このことを考慮すると軸受けとしては静圧軸受けが好ましく、転がり軸受けは超精密加工に不向きということになる。理想的にはロバスト制御された支持荷重の大きな磁気軸受けが良いことになるが、現在支持荷重の大きな磁気軸受けはない。

本研究では超精密切削加工に関して静圧軸受けを確保することができなかった為、軸受けとして玉軸受けを使用した¹⁾。

5.2 微小位置決め装置

微小位置決め装置は工具をサブミクロンオーダーで移動させる装置である。超精密切削加工の場合、加工中は工具が材料に接触しており、その切削抵抗の変動が位置決め装置に影響を与える（切削抵抗が変動するとその変動に合わせて工具も押し戻される。）。精密切削の場合、切り込みが大きいためその変動量が切り込みに対して無視できるように切り込み装置をオー

ブングループで設計することができる。これに対し、超精密切削ではその押し戻され量が切り込み量に対して無視できない大きさになり、位置フィードバックが必要になる。要するに微小領域の加工にはその加工抵抗に応じて剛性の高い位置決め装置が必要になる。本研究では圧電素子を利用して微小位置決め装置を製作した¹⁾²⁾。

5.2.1 圧電素子を利用した微小位置決め装置¹⁾²⁾

微小位置決め装置は主にアクチュエータと変位を拡大したり剛性を高める為の機構からなる。アクチュエータには一般に電荷を与えると寸法が変化するPZT素子が使用されている。

本研究では動作範囲 $1\mu\text{m}$ の範囲で線形性をしめす共振点 1.3kHz の微小位置決め装置を製作した。この装置は約 800Hz 付近まで平坦な利得を実現している²⁾(図3参照)。

5.2.2 超磁歪素子を利用したアクチュエータの試作³⁾

本研究ではアクチュエータとしてPZTの代わりに超磁歪素子を利用した簡易型アクチュエータを試作した。その結果、超精密加工用には圧電素子を利用した位置決め装置が、性能、発展性、装置規模、安定性の点で適していることを確認した。

5.3 工 具

一般に材料を引き離す為に必要なせん断応力は切り込み量を小さくすると急激に増加する¹⁾(図4参照)。従って切り込み量が小さい超精密加工では、その大きなせん断応力に耐えられる材料が工具となる。このような理由から超精密切削加工では単結晶ダイヤモンドを使用するのが一般的である。

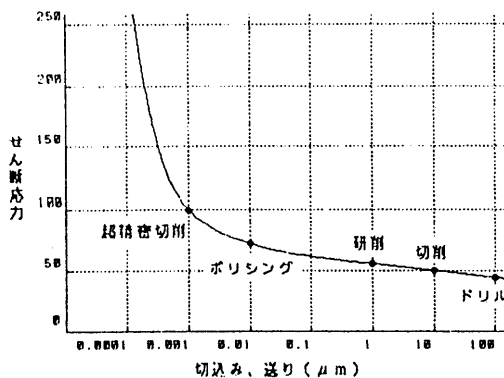


図4 切り込みによるせん断応力の増加

5.4 加工例¹⁾

本研究では製作したサーボシステム(図5参照)を用いて微小切り込み装置を制御し、切削速度 565m/min 、送り速度 0.03mm/rev でアルミニウムの切削加工を行った。その結果、切削面粗さは $Ra=0.17\mu\text{m}$ 、 $Rmax=1.08\mu\text{m}$ であった。

6. 研削加工

ある意味で超精密研削加工は材料の表面をホイール表面に固定した砥粒と呼ばれる微小チップによって細かく切削していく加工である。この場合、砥粒一つが受け持つ加工は小規模なものであるが、加工の並列化と高速化によって全体の加工速度を高めている。従っ

て、加工速度はホイール表面に点在する砥粒密度とホイールの周速度によって既定されている。そして砥粒の大きさは材料の表面粗さに影響を与える。超精密加工のように表面粗さを小さくすることを考えれば砥粒の大きさは小さい方が好ましい。同時にそれに見合った切り込み精度も実現されなければならない。そしてこの切り込み精度の確保は実際は難しい。

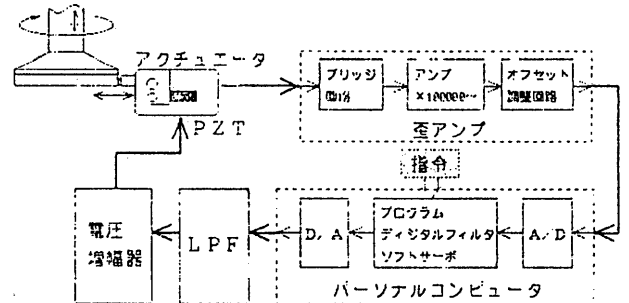


図5 サーボシステムの構成

6.1 切り込み精度の確保

通常、研削加工では砥石と呼ばれる高速回転するホイールが降下して切り込みを与える。従って切り込み時に移動する部分は切削加工に比べるときわめて大きい。しかも殆どの研削盤はホイールを片持ちで支えており、加工が行われる部分はその先端に位置する。当然、加工抵抗や、可動部分の張り出し量の変化による重心の移動などが全体を変形させ、結果的に先端位置が変化する。要するに、通常の研削盤は剛性が不十分でとても超精密加工には使えないということになる。しかし強いて汎用的な研削盤を使って超精密を行う場合は、砥石を移動させるのではなく、材料を微小位置決め装置で移動させ加工を行う⁵⁾⁶⁾。

6.2 研削液

超精密の実験で研削液をかけるか否かは問題である。研削で液をかけない場合は接触時に発生する熱で表面が膨張するし、かければその液の流れが生み出す圧力によって正確な切り込みはできなくなる。しかも研削では砥石の入り込み側と出ていく側とでは圧力に大きな差があり、材料や砥石はこの圧力によって変形し、砥石可動部分全体も引き込まれるように変形すると考えられる。

6.3 砥 粒

超精密加工で使用する砥粒は当然きわめて小さなものである。例えば数十オングストロームという話である。しかしながらこのような小さな粒子をそのままの状態に砥石に含ませるのは一般に難しい。通常、このような粒子は直ちに複数の粒子が結合しクラスタをつくる。従って、砥石を作ったとしても電子顕微鏡でその表面を観察するとそこにはクラスタが存在する。クラスタの表面には確かに細かな粒子が存在すると考えられるがその部分の結合力は弱く、いわゆる砥石のイメージとは大きく異なり、切り込みが理想的に行われたと仮定しても、どちらかと言えばパウダーで研磨しているようなイメージに近いと考えられる。もし切り込みが正確に行われていなければ、殆どボンドで材料を擦ることになり、材料は大きなダメージを受け

る。

6.4 加工例⁵⁾⁶⁾

本研究では上記事項を考慮し、クラスタダイヤモンド砥石によるガラスやセラミックスの研削実験を行った。その結果、(1)極微粒子ダイヤモンドを用いたレジソンド砥石による研削加工は、大面積では平滑な加工表面を得ることは困難であったが、小面積では平滑な加工表面が得られた。(2)砥石表面に研削熱によると考えられる微小な割れが発生することがわかった。

7. 研磨加工

超精密加工を切削加工、研削加工、研磨加工ととらえれば研磨加工は最も理想的な超精密加工であると考えられる。事実、研磨加工はシリコンウエハーや特に滑らかさを要求される加工に使用されている。例えばガラスやシリコン等をケミカルポリッシングやフLOATポリッシング加工した場合、Ra で数オングストロームの表面が得られる。

研磨加工は小さな砥粒(大きさは段階的に数 μm ~ 数 nm と様々)を材料の表面に衝突させて、表面の凹凸を少しずつ削除していく加工と考えられる。一般に砥粒が小さい為に砥粒一つが受け持つ加工量はきわめて少なく、そのため周囲に与える加工歪等もきわめて小さい。

7.1 加工例⁷⁾⁸⁾

本研究では研磨加工の中からフLOATポリッシング加工を取り上げた。フLOATポリッシング加工はケミカルポリッシング加工と並んで比較的平滑な表面が得られるため最近では研究用や特殊な部品に対して利用されている。しかし、現在、その加工現象の解明が遅れている状況だとも言われており、本研究ではフLOATポリッシング加工の基礎的な研究を行った。そして、本研究の結果は次のとおり、フLOATポリッシング加工では定盤の断面形状が加工後のワークの表面形状に影響する。研磨圧力分布を計算するモデルを作成することにより、最適な定盤断面形状やワーク相対速度を求めることができる。

8. 表面状態の計測評価について

現在、超精密加工によって得られるワークの検査、評価方法は曖昧である。理由としては表面粗さが原子オーダーに近づくとその状態の測定原理、装置の評価、ワーク管理等が難しいことがあげられる。

測定原理については複数提案され、実際に測定器も開発販売されているが、その使用条件や使いやすさ、結果の安定性、等はそれぞれ異なる。一般に超精密加工と呼ばれる分野で代表的なものには、光の干渉を利用した非接触表面粗さ計や接触式の粗さ計である。特に前者はその使いやすさ、測定の容易さ等の理由から最近増加傾向にあり、本研究で利用した評価装置の一つである。この測定は被測定物の表面と参照面にレーザーもしくは白色光を照射して、入射光と反射光の位相ズレの情報から被測定物の表面状態を推定するものである。ところで光など電磁波は反射する物質の種類によって、その潜り込み方が異なるから、反射時も位相ズレは生じる。従って、この測定方法では被測定物の物質構成が分からなければならないという短所をも

つ。しかし、この測定方法には測定時間が数 100ms と短いことや非接触であるという長所もある。また後者は接触式であることから測定時間が長いことや測定結果が雑音等、外乱に影響されやすいという短所をもち、比較的粗いものまで測定できるという長所をもつ。この他、超精密加工ではトンネル電流や原子間力の変化を利用した方法や電子ビームやX線等を照射する方法等が利用されることもある。

ところでこれらの測定器間で結果比較を行うと多少のズレが生じる。これはそれぞれの測定器が絶対的なものではなく、あくまでも相対的な測定であることを意味している。従って、超精密加工で粗さを論ずる場合には測定器を示さなくてはならない。

また、測定時のワーク管理も問題であり、加工後の洗浄方法、保管方法、保管環境、等も測定結果に大きな影響を与える。一般には、クリーンルーム内で加工後段階的に洗浄を行い、最後に純水で洗浄、その後、樹脂シートによって表面を保護している。

9. 結 言

本研究では超精密加工のイントロダクションとして現状の把握、加工環境の整備、周辺技術の獲得、切削加工、研削加工、研磨加工、評価方法の検討、等を現状の拘束条件下で試行錯誤しながら進めてきた。その結果、時に非現実的な試みや技術的に無謀とも思える実験を行ったが、それらは様々な知見を導き多くのご批判と課題を生みだし、僅かながらまた新たな技術への引き金となってきたと思う。超精密加工技術は複合的な技術であり、今後その裾野が広がることを期待したい。

最後に、本研究をご支援、ご理解して頂いた様々な方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 徳武:微小切り込み装置を用いた超精密切削加工技術, 茨城県工業技術センタ-ORT 研究報告第 20 号, 35/45 (1992)
- 2) 菊池, 小石川: PZT 微小位置決めアクチュエータの設計と試作, 茨城県工業技術センタ-研究報告第 20 号, 31/35 (1992)
- 3) 小石川, 菊池:超磁歪材料の変位特性, 茨城県工業技術センタ-研究報告第 20 号, 26/30 (1992)
- 4) 菊池, 小石川:超磁歪アクチュエータの温度補償に関する研究, 茨城県工業技術センタ-研究報告第 20 号, 36/39 (1992)
- 5) 小石川, 他 5 名: 50A クラスタダイヤモンドによる砥粒加工に関する研究, 茨城県工業技術センタ-研究報告第 20 号, 40/44 (1992)
- 6) 小石川, 他 4 名:クラスタダイヤモンド砥石による超精密表面創成に関する研究, 茨城県工業技術センタ-研究報告第 21 号, 49/52 (1993)
- 7) 菊池, 小石川:フLOATポリッシングにおける加工量シミュレーション茨城県工業技術センター研究報告第 21 号, 53/58 (1993)
- 8) 菊池, 小石川:フLOATポリッシング液の流動解析モデルの定式化, 茨城県工業技術センタ-研究報告第 21 号, 59/62 (1993)