

負圧浮上工具方式による硬脆材料の延性モード切削

Ductile Regime Cutting of Brittle Materials Using a Flying Tool Under Negative Pressure

上 村 康 幸*・谷 泰 弘*・佐 藤 壽 芳**・山 口 ひとみ***

Yasuyuki KAMIMURA, Yasuhiro TANI, Hisayoshi SATO and Hitomi YAMAGUCHI

1. はじめに

大型天体望遠鏡等で使用される大口径光学部品や大口径化が進められているシリコンウェハ等の硬脆材料の加工において、それらのポリシングの前工程として延性モード切削の適用の可能性が検討されている。これは切削加工が制御性の優れた加工方法であり、形状精度の管理やスクラッチの防止が容易であるためである。こうしたことから、特に加工と計測が繰り返されその製造が長時間にわたっている大口径光学部品の加工に対して、延性モード切削は革新的な高能率の加工技術として期待されている。

延性モード切削に関する研究は、1980年代の初期に脆性から延性に遷移する臨界切込み深さ dc 値を求めることから始まった。その結果、各種硬脆材料の dc 値を種々の加工条件にて求めた結果が多数報告され^{1,2)}、延性モード切削を実現する新しい加工技術も提案されている³⁾。しかし、未だ工業的に適用可能な加工技術は確立されていない。これは、従来の運動転写原理を基本とした切削加工技術では、加工機械の運動誤差をそのまま加工面に転写することになり、実切込み深さを常に臨界切込み深さに以下に維持することができないためである。

そこで、著者らは工作機械の運動誤差の影響を受けない加工技術として、負圧により工具を常に工作物に吸着させて浮上高さを常に一定に保つとともに、その時負圧を発生させている真空吸引により切り屑を排除する新しい加工方法、負圧浮上工具方式による加工技術を考案した。本論文では、この加工技術を用いて、光学ガラスと単結晶シリコンのクラックフリー切削を試みた結果について報告する。

2. 負圧浮上工具方式の加工技術

2.1 負圧浮上工具の構造および特徴

図1に負圧浮上工具の構造を示す。開発した負圧浮上工具は、直径 $\phi 20$ mm、厚み 12 mm の円筒形をしており、その外周部を図2左図に示されるように厚さ 0.1 mm の3枚のリン青銅製の板バネにより支持されている。工具の中心軸に沿って針状の切れ刃が設置されており、切れ刃は工具とは摺動できるようになっている。切れ刃の工具面からの突き出し量は、切れ刃が固定された裏面の円板と工具本体との隙間を切込み設定ねじにより変化させることで調整した。切れ刃先端部の周囲には窪みを設け、この窪みを真空ポンプに接続し、ここから吸気することで負圧を発生させた。工具前面には $\phi 14$ mm、幅 2 mm の

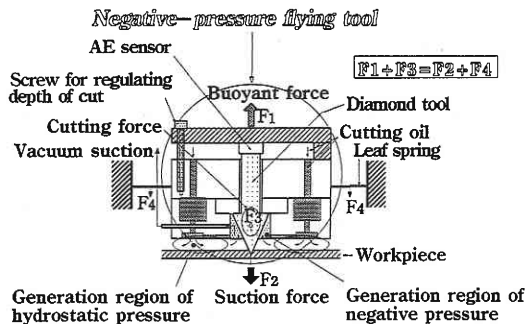


Fig. 1 Structure of the negative-pressure flying tool

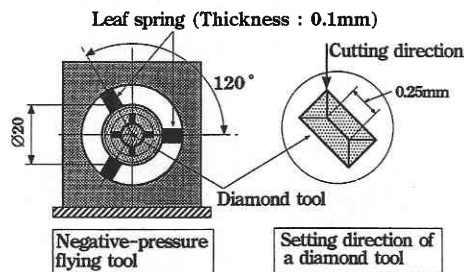


Fig. 2 Front view of the negative-pressure flying tool

*東京大学生産技術研究所 第2部

**東京大学名誉教授

***エクストールドホーンコーポレーション

リング状の溝が掘られ、この溝には切削油供給用の穴が30°毎にあけられており、切削油タンクに接続されている。そのため、この工具台を工作物に接近させ真空吸引を行うと、中央の窪みで負圧が発生し、その結果円形溝の部分から自然と切削油が流出し、中央の窪みに流入する。この時工具前面と工作物の間には油膜が生成され、静圧が作用する。切削油の絞り弁を調整することにより流量を変化させ、油膜の厚みを変えることができる。このようにして変化する静圧による浮上力F1と真空吸引により発生する負圧による吸引力F2がバランスする位置で、工具と工作物間の隙間が決定される。したがって、真空圧と切削油流量を調整することで切込み深さの制御が可能となる。切削時には、切れ刃に切削力F3が作用し、板バネによる押しつけ力F4が作用する。これらが $F1 + F3 = F2 + F4$ の関係でバランスしている。

工具前面の油膜の剛性は板バネの剛性よりはるかに大きいので、加工機械の運動誤差が生じてもそれは板バネの変形により吸収され浮上高さは一定に保たれる。その結果、加工機械の運動精度に影響されない加工が実現できる。さらに、この加工法は切削油を真空吸引していることで、切削時に発生する切屑の自動排出が可能である。

2.2 切れ刃および切込み量の設定

切れ刃としては、切削溝が干渉しやすいように、0.25 mmの長い稜線を持ったダイヤモンドビッカース圧子を使用した。この切れ刃を摩耗しにくいように図2右図に示すような角度で工具中央に固定した。工具前面からの切れ刃の突出量は、前述のようにピッチ0.2 mmの切込み設定ねじにより設定した。その際、まず真空圧を-10 cmHgに切削油流量を13 mL/minに設定して工具の浮上高さを決め、その状態で工作物をフリーラン状態で回転させながら工作物表面に切れ刃が接触するまで突出量を徐々に増加させた。接触検知は、切れ刃背面部に取り付けられたAEセンサにより行った⁴⁾。この後、真空圧と切削油流量を調整することで切込み深さを設定した。切削油にはダイヤモンド切れ刃の冷却のために動粘度(1.25 mm²/s)の白灯油を使用した。

工具の浮上高さの決定メカニズムを知るために、まず浮上高さや切削油流量の関係を調査することにした。そこで、回転している工作物に対して工具を負圧浮上させ、そのときの工具の平均浮上高さを切削油の有無により検討した。浮上高さは工具本体裏面の変位を静電容量型変位センサにより測定し、非浮上時と浮上時の変位を比較することにより求めた。図3はその結果を示している。切削油流量が13 mL/minの時には浮上高さが1.59 μmで、切削油流量が50 mL/minの時には浮上高さが1.73 μmであった。このように、切削油流量が増加することにより浮上高さが増加することが分かった。

3. 負圧浮上工具の追従特性

切削実験を行う前に、負圧浮上工具の動的追従特性について検討した。まず前述の正面旋盤のスピンドルに金めつきしたガラス板を真空チャックし、工作物を1000 rpmで回転させた時の工作物表面の変位を静電容量型変位センサにより計測した。次にこの測定位置上に負圧浮上工具をセットし、真空圧-10 cmHg、切削油流量13 mL/minで約1.59 μmの浮上状態を作った。この状態で工作物を1000 rpmで回転させた時の負圧浮上工具裏面の變位を静電容量型変位センサで計測した。図4は、この工作物表面の変位と負圧浮上工具裏面の変位を周波数分析し空間周波数毎に示したものである。空間周波数で50 (1/m)までの低周波数域では同一周波数でピークを持っており、このことは浮上工具が工作物表面の動きによく追従していることを示している。しかし、この空間周波数より高周波数域では浮上工具のピークがなくなっており、浮上工具が工作物表面の動きに追従していない。このカットオフ周波数は負圧浮上工具前面の直径(φ20 mm)に対応している。すなわち、負圧浮上工具は工具直径よりも長い波長の工作物変位については追従していることが分かる。

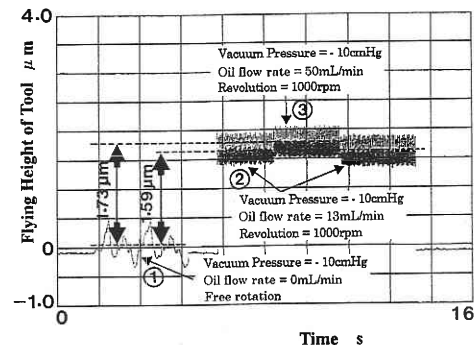


Fig. 3 Effect of the flow rate of coolant on the flying height

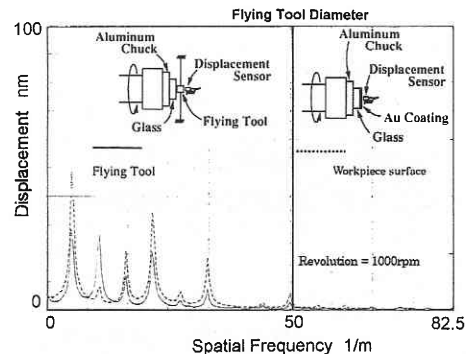


Fig. 4 Dynamic characteristics of flying tool under negative pressure

研究速報

4. 負圧浮上工具を用いた延性モード切削

4.1 光学ガラスの延性モード切削

図5は、ソーダガラスを加工中心付近から外側に30 μm/revの送りで正面切削した時の工作物表面の断面曲線を示している。これは、真空圧-10 cmHg, 切削油流量13 mL/min, 工作物回転数1000 rpmでの結果である。断面曲線より、切削溝が完全に干渉していないこと、またこの時の切削溝深さは0.12 μm前後となっていることが分かる。また、光学顕微鏡写真から切削面の所々にマイクロクラックが発生していることが分かる。

そこで、実切込み深さをさらに小さくするために、負圧による吸引力を低下させることを目的として真空圧を-10 cmHgから-8 cmHgに減圧した。さらに、切削溝を干渉させるために、工具の送りを10 μm/revに減少させて、ソーダガラスとBK7の延性モード切削を試みた。図6に切削面の光学顕微鏡写真を示す。これらの結果は、加工中心付近から外側に半径35 mmの位置まで切削した時の加工面を、(a) (切削開始点), (b) (aと(c)の間差点), (c) (切削終了点)の3箇所を観察したものである。この写真から、ソーダガラスとBK7のいずれもがクラックの発生なしに切削できていることが伺える。また、触針式粗さ計により図7のように(a), (b), (c)の位置で断面曲線を測定した結果、ソーダガラス、BK7共に切削溝深さは切削開始から切削終了まで80 nm前後の安定した値となっていることが分かった。

この結果をまとめて示したのが図8である。切削開始点、中間点、切削終了点での工作物表面の振れを静電容量型変位センサで測定し、これと同時に断面曲線から求められた切削溝深さを半径位置に対応させて示したものである。この振れの値には、スピンドルの軸方向の回転運動誤差のほかに工作物や真空チャックの平面度や工作物の厚みむら、工作物の取り付け誤差等が含まれている。また、硬脆材料の弾性変形量は微小なため、切削溝深さは実切込み深さとほぼ同一の値を示しているものと思われる。

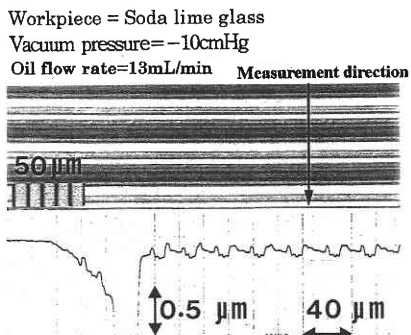


Fig. 5 Cut surface of soda lime glass with feed rate of 30 μm/rev

この結果によれば、0.6 ~ 0.7 μmの工作物表面の振れがあるにもかかわらず、切削溝深さは80 nm一定に保たれている。また、工作物と工具との相対速度の増加とともに増大するであろう動圧の影響も全く見られない。このように、負圧浮上状態が実現されることで、加工機械の運動誤差や浮上時に発生しやすい動圧に全く影響されない切削が行えることが分かった。

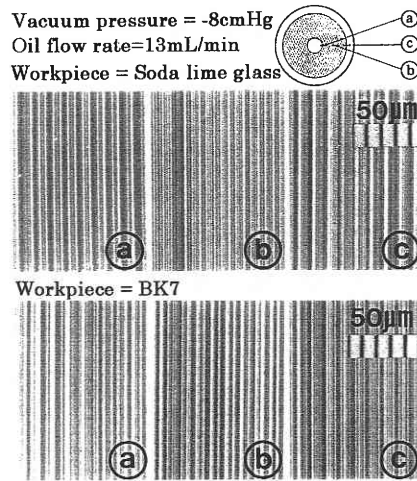


Fig. 6 Cut surfaces of soda lime glass and BK7 with feed rate of 10 μm/rev

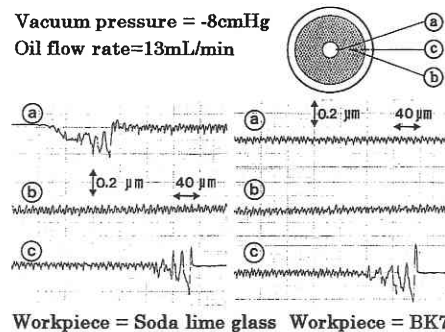


Fig. 7 Profile curves of soda lime glass and BK7

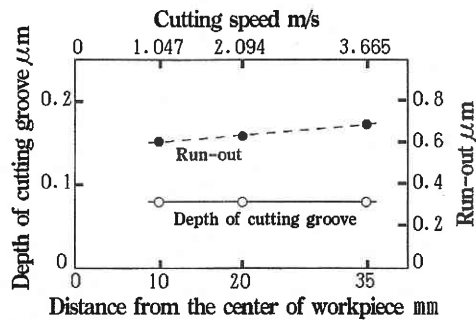


Fig. 8 Stability of actual depth of cut using a flying tool under negative pressure

4.2 単結晶シリコンの延性モード切削

単結晶シリコンは脆性が顕著であるため、ガラスよりもさらにその延性モード切削が困難であるとされている。そこで、単結晶シリコンの延性モード切削に負圧浮上工具方式の加工技術を適用してみることにし、ガラスの場合と同様に精密正面旋盤上でスピンドル前面に単結晶シリコンの(100)面を真空チャックし正面切削を行った。ガラスの場合に切削溝の干渉が確認できた $10\ \mu\text{m}/\text{rev}$ の工具送りで、加工中心付近から外側へ切削した(図9)。加工は、真空圧 $-10\ \text{cmHg}$ 、切削油流量 $13\ \text{mL}/\text{min}$ 、工作物回転数 $1000\ \text{rpm}$ で行った。

断面曲線および光学顕微鏡写真から、切削溝深さとしては $60\ \text{nm}$ 前後の値が得られているが、全ての領域でマイクロクラックが発生し、ついには脆性破壊を起こしていることが分かる。この結果から考察すると、単結晶シリコンの延性モード切削は、さらに小さな切込み深さに設定しなければ実現できないと考えられた。

そこで、ガラスの場合と同様に真空圧を $-10\ \text{cmHg}$ から $-8\ \text{cmHg}$ に減圧した。しかしながら、切削面の所々に切り屑が残留し、その切り屑が原因と思われる引っかき傷が観察された。そこで、切削油流量を増加させ、切り屑の残留を抑えることを試みた。さらに、切削油流量を増加させれば、負圧浮上工具の浮上高さが増大し、より切込み深さを小さくすることができると考えられた。図10に、切削油の流量を $50\ \text{mL}/\text{min}$ に増加させ、真空圧を $-8\ \text{cmHg}$ にして2回繰り返し切削した結果を示す。切削範囲は、加工中心付近から外側に半径 $20\ \text{mm}$ の位置までとした。切削面の光学顕微鏡写真からは、引っかき傷やクラックは全く観察されない。また、断面曲線からその時の切削溝深さは $30\ \text{nm}$ 前後である。切削油流量を $13\ \text{mL}/\text{min}$ から $50\ \text{mL}/\text{min}$ に増加させることで、切削溝深さはわずかに減少したが、図3で示されたような大きな変化にはなっていない。これは当初働いていた切削力が十分大きな値であり、切削油流量の増加による静圧浮上力の増加が切削力の減少によって置き換えられたためと考えられる。このため、工具の浮上高さには大きな変

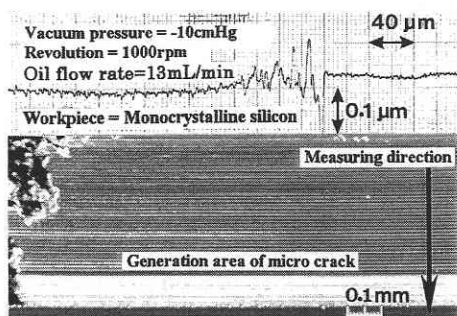


Fig. 9 Cut surface of monocrystalline silicon under the vacuum pressure of $-10\ \text{cmHg}$

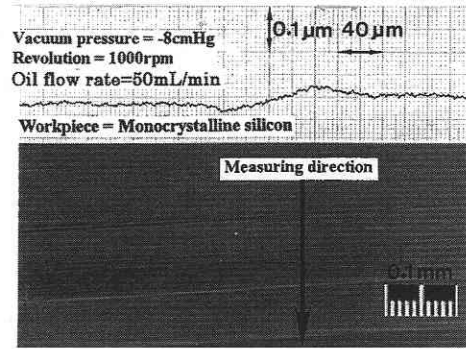


Fig. 10 Cut surface of monocrystalline silicon in the case of high oil flow rate

化がなかったものと思われる。

5. おわりに

硬脆材料をクラックフリー切削するために、加工機械の運動精度に影響されない負圧浮上工具方式の切削加工技術を考案した。この加工法を用いて、光学ガラスと単結晶シリコンの延性モード切削を試みた結果、次のような結論が得られた。

- (1) 負圧浮上工具方式の加工技術により、 $0.6\ \mu\text{m}$ 程度工作物表面の振れがある状態で、光学ガラスと単結晶シリコンのクラックフリー切削が可能となった。
- (2) 負圧浮上工具は、切削速度の変化に対しても浮上高さが全く変化せず、動圧の影響を受けない。
- (3) 負圧浮上工具の浮上高さは、定性的には真空圧および切削油流量を調整することで変化でき、これが切込み深さの変化につながる。
- (4) 負圧浮上工具は工具前面の直径よりも長い波長の運動成分にのみ追従する。
- (5) 単結晶シリコンの延性モード切削では、光学ガラスよりもさらに小さい切込み深さを実現することが重要である。また、切削油の供給量を増加させて、切り屑の除去を円滑にすることが重要である。

(1997年6月9日受理)

参考文献

- 1) K. E. Puttick, M.R. Rudman, K. J. Smith, A. Franks and Lindsey, Single-Point Diamond Machining of Glasses, Proc. Roy. Soc. Lond., A426, (1989) 19.
- 2) T. Nakasuji, S. Kodera, S. Hara, H. Matsunaga, N. Ikawa and S. Shimada, Diamond Turning of Brittle Materials for Optical Components, Ann. CIRP, 39, 1, (1990) 89.
- 3) T. Moriwaki and E. Shamoto, Ultraprecision Ductile Regime Cutting of Glass by Applying Ultrasonic Vibration, Annals of the CIRP, 41, 1 (1992) 141.
- 4) 上村, 谷, 延性モード切削における高精度初期接触検知技術, 日本機械学会論文集, C編, 62, 593, (1996-1) 129.