

石英ガラスの固定砥粒加工における弾性および塑性挙動の解明

北見工業大学 ○武知孝洋, 田牧純一, 久保明彦

要 旨

石英ガラスをダイヤモンド砥粒で延性モード加工することを想定して、石英ガラスの弾性・塑性変形領域における諸現象をナノインデンテーション(静的挙動)およびフライカット(動的挙動)実験により検討した。

1. 緒言

硬脆材料の固定砥粒を用いた研削加工において、砥粒切れ刃支持部および工作機械の弾性変形による上すべり、工作物の弾性回復、塑性変形領域における掘りおこしと盛上がり、切り屑生成といった現象が生じる。これらの現象は、金属材料については既に解明されており、硬脆材料は延性モード加工領域において発現すると予想できる。

本研究では硬脆材料の延性モード加工での弾性挙動と塑性挙動を解明するため、石英ガラスを用いてナノインデンテーション試験と単粒フライカット試験を行い、検討を行っている。

2. 実験方法

2.1 ナノインデンテーション

実験装置は、微小押し込み試験機(ENT-1100a)を使用した。本装置は電磁力駆動式により、0.01 mN から、1000 mN までの広い範囲での高精度の押し込みが可能であり、押し込み変位量の測定に静電容量非接触変位計が使用されており、0.3 nm の分解能を有している。この装置を用いることによって、工作物の弾性回復と塑性変形を測定することが可能である。

図1に使用した圧子形状を示す。圧子はダイヤモンドビッカース圧子と球圧子(曲率半径 10 μ m)の形状を使用した。押し込み荷重は、0.1~100 mN の範囲で変化させ、負荷時間を5秒、荷重保持時間を1秒、除荷時間を5秒とした。圧痕の観察には、走査型電子顕微鏡(SEM)、原子間力顕微鏡(AFM, Nanopics1000)を用いた。

2.2 単粒フライカット

図2に単粒フライカット(SPFC)モデルを示す。回転半径 R の単粒工具は O 点で工作物と接触(cut in)し、切込み深さ d_s が徐々に増加していく。単粒工具が工具回転中心の直下点に達した後、切込み深さ d_s を徐々に減少させながら接触を終了(cut out)し、幾何学的には長さ L 、半径 R の円弧状切削痕が形成される。切込み深さ d_s は次式を用いて求める。

$$d_s = \frac{x_i(L - x_i)}{2R} \tag{1}$$

ここで、 x_i は cut in 側からの切削距離である。しかし、実際には SPFC 装置の弾性変形と工作物の弾性回復の影響により、溝深さ d_o の切削痕が形成される。硬脆材料の延性モード加工は、切込み量 d_s が臨界切込み深さ以下となる cut in 側と cut out 側で発

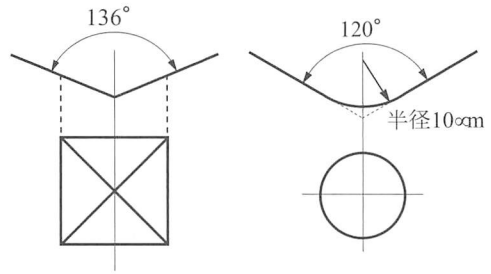


図1 圧子形状

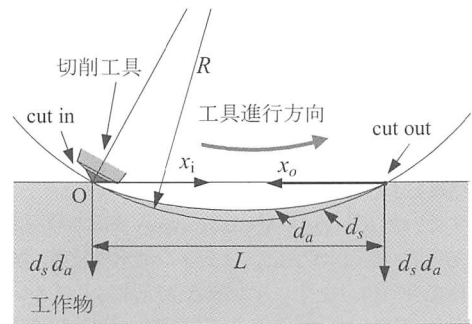


図2 単粒フライカットモデル

表1 単粒フライカット実験条件

使用機械	空気静圧スピンドル搭載平面研削盤 (OKAMOTO PSG-52DX) 単粒工具取付け円板: 直径 150 mm
単粒工具	ビッカース圧子 対面角 136° 球圧子 半径 10 μ m
工作物	石英ガラス
切削条件	切削方式 フライカット 工具回転数 $N = 3000$ rpm 切削速度 $V = 23.8$ m/sec 送り速度 $f = 25$ mm/sec 切削油剤 白灯油

現する。本実験では切込み量が増加する cut in 側に着目した。

表 1 に実験条件を示す。実験装置は平面研削盤テーブル上に単粒工具の回転軸方向に送りを与えるため、1 軸テーブルを設置した。また、工作物と 1 軸テーブル上の間にフィルターゲージを挟み、単粒工具の回転軸方向に対して工作物表面を微小角度だけ傾けた。これらにより、微小切込み量の制御と切削痕の分離が可能となった。単粒工具には、ナノインデンテーションと同様

にビッカース圧子と球圧子を用いた。ビッカース圧子は、単粒工具の進行方向に対して圧子面を向ける場合(面切れ刃)で行った。また、装置の剛性はナノインデンテーション試験装置と比べ低くなるので、剛性の影響を考慮して検討する。

切削痕の観察には SEM を用い、溝の三次元形状はレーザープロブ式非接触形状測定装置(NH-3SP)、溝断面形状は微小段差測定器(TalyStep)で測定した。

3. 実験結果

3.1 ナノインデンテーション

図3にナノインデンテーション試験による押し込み量 d_s と塑性変形量 d_p の関係を示し、ビッカース圧子と球圧子の測定値をプロット(◆●)している。このとき、押し込み量 d_s は各荷重の荷重によって生じる最大押し込み量であり、塑性変形量 d_p は実際に工作物に残る圧痕深さである。ビッカース圧子の場合、塑性変形量 d_p は押し込み量 d_s に比例していることが確認でき、傾きを塑性変形率と定義すると $d_p/d_s=45\%$ という値が得られる。球圧子の場合、 $d_s=260\text{nm}$ 以下の領域で弾性回復だけが生じている。その後、塑性変形が生じており、塑性変形量 d_p は押し込み量 d_s に比例していることが確認でき、塑性変形率 $d_p/d_s=34\%$ という値が得られる。ナノインデンテーション試験より、ビッカース圧子の場合圧子押し込みと同時に塑性変形が生じ、球圧子の場合、弾性回復を経て、塑性変形が生じる。

3.2 単粒フライカッタ

図4に切削痕の SEM 写真を示す。ビッカース圧子の場合、O 点で工作物と圧子が接触し、A 点まで延性モード加工が行われている。A 点以降はクラックが発生し、脆性モードへと移行している。球圧子の場合、ビッカース圧子と同様に O' 点から A' 点までの間で延性モード加工が行われ、A' 点以降は脆性モードとなる。両圧子の OA 間、および O'A' 間を微小段差測定器によって溝形状を計測した。その結果、球圧子の O'B 間において、微細な溝が検出できた。しかし、OA 間と BA' 間の溝側面には盛上がりが生じていたのに対し、O'B 間では盛上りを確認できなかった。そのため、O'B 間では工作物と工具は接触しているが、塑性変形が生じていない。つまり、工作物が弾性回復していると考えられる。

図5 に SPFC 試験による切込み深さ d_s と切削痕の溝深さ d_a の関係を示し、ビッカース圧子と球圧子の測定値をプロット(◆●)している。ビッカース圧子の場合、切込み深さ d_s は切削痕の溝深さ d_a に比例しており、傾きをナノインデンテーション試験と同様に塑性変形率と定義すると $d_a/d_s=23\%$ という値が得られる。球圧子の場合、 $d_s=120\text{nm}$ 以下の領域で弾性回復だけが生じている。また、 $d_s=120\text{nm}$ 以下の領域は図4で述べた O'B 間であるといえる。その後、塑性変形が生じており、塑性変形量 d_p は押し込み量 d_s に比例していることが確認でき、塑性変形率 $d_p/d_s=14\%$ という値が得られる。SPFC 試験で得られた塑性変形率をナノインデンテーション試験の塑性変形率と比較すると、どちらの圧子も SPFC 試験の塑性変形率のほうが小さくなっている。つまり、装置剛性

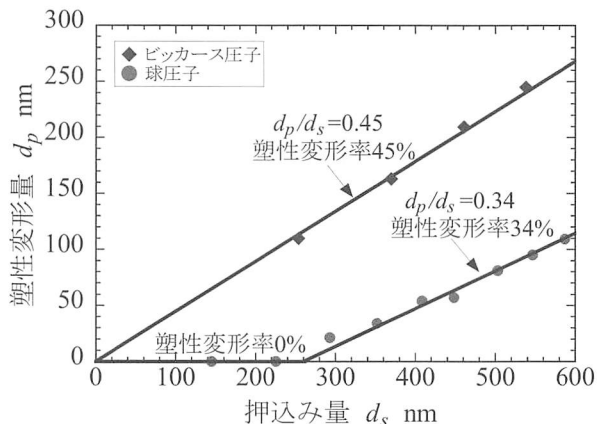


図3 塑性変形量

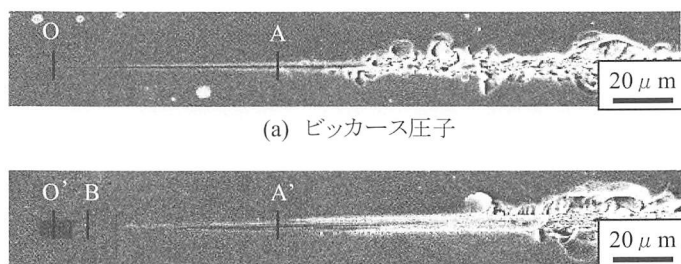


図4 切削痕 SEM 写真

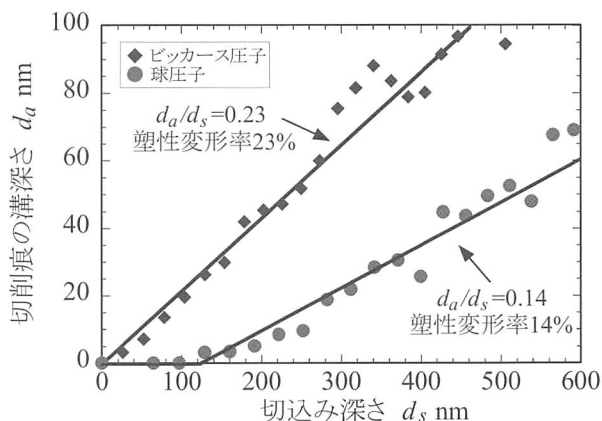


図5 切削痕の溝深さ

が低いと、塑性変形率が小さくなることがわかる。

4. 結言

石英ガラスの延性モード加工における弾性および塑性挙動をナノインデンテーションと SPFC 試験を行い実験的に解析し、得られた結果を示す。

- (1) ナノインデンテーション試験と SPFC 試験において、ビッカース圧子は加工開始点で塑性変形が生じ、球圧子は弾性回復のみの領域の後、塑性変形が生じる。
- (2) SPFC 試験における塑性変形率は、装置剛性の影響からナノインデンテーション試験における塑性変形率よりも小さくなる。