

北海道大学工学部 藤井章弘 藤井 茂 柴田隆行 高橋義美 牧野英司 池田正幸
 日本電波工業(株) 千葉亜紀雄

要 旨

脆性材料の超精密切削実験を行った。また、ビッカース圧子による押込み試験により得られたクラックを発生機構別に分類して評価した。水晶、シリコン、ガラスなどの工具刃先でクラックの発生しやすい材料は、刃先上方にクラックが成長し、延性モードと同様の切削面となった。しかし、切込み量が大きくなると、弾性回復力により破壊し、脆性モード切削となった。弾性破損しやすい石英ガラスでは、延性モード切削にならなかった。

1. はじめに

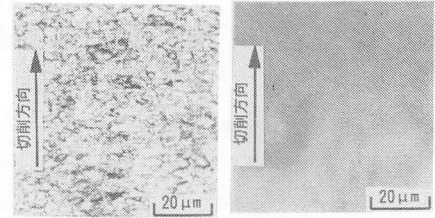
高精度、高剛性の超精密旋盤により、脆性材料でも延性モード切削が可能であるという報告がされている¹⁾。しかし、被削材の破壊の挙動から、超精密切削機構について論じた研究は少ない。そこで本研究では4種類の脆性材料の切削実験を行い、ビッカース圧子による押込み試験から得られた各材料の破壊の挙動を基に、延性モード切削機構について考察した。

2. 実験装置および方法

切削実験には超精密旋盤(日立精工製DPL-100)を使用し、工具には単結晶ダイヤモンドR刃バイト(ノーズ半径0.8mm、すくい角 -20° 、逃げ角 10°)を使用した。試料には水晶、単結晶シリコン、バリウム硼硅酸ガラス(以下ではガラスと呼ぶ)、および石英ガラスを用いた。切削条件は、切込み量100、300nm、工具送り量5、 $10\mu\text{m}/\text{rev}$ 、主軸回転数1000rpm(切削速度 $2.5\sim 3.7\text{m/s}$)とした。切削中は白灯油を噴霧供給した。押込み試験は、ビッカース圧子を用いた微小硬度計により行った。

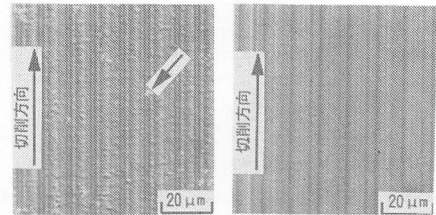
3. 実験結果および考察

図1は水晶切削面の金属顕微鏡写真である。切込み量300nm、送り量 $10\mu\text{m}/\text{rev}$ の条件(a)では脆性破壊によるクラックに覆われた面性状となっている。切込み量、送り量を共に小さくした条件(b)では延性モード切削となり、透明な面が得られた。図2は送り量を $10\mu\text{m}/\text{rev}$ とし、切込み量を変化させたときの、シリコン切削面の微分干涉顕微鏡写真である。切込み量300、100nmの(a)、(b)共に、切削方向に沿った条痕が認められる。切込み量の大きい(a)では図中に矢印で示した脆性破壊による微小な穴(以下ではピットと呼ぶ)も見られ、延性、脆性両モードが共存した切削となっている。(b)ではピットは認められず、また、この条件では連続した切りくずも確認されており、完全に延性モード切削となった。図3は切込み量100nm、送り量 $10\mu\text{m}/\text{rev}$ で切削したと



(a)切込み量 300nm 送り量 $10\mu\text{m}/\text{rev}$ (b)切込み量 100nm 送り量 $5\mu\text{m}/\text{rev}$

図1 水晶切削面



(a)切込み量 300nm 送り量 $10\mu\text{m}/\text{rev}$ (b)切込み量 100nm 送り量 $10\mu\text{m}/\text{rev}$

図2 単結晶シリコン切削面

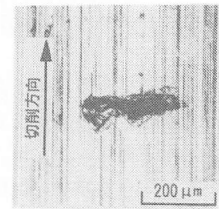


図3 ガラス切削面

ときの、ガラスの面性状である。切削方向に沿って条痕が認められる。また、条痕と直行する方向に大きなクラックも見られる。しかし、連続した切りくずが確認されており、大部分では延性モード切削となっていた。石英ガラスの切削では、切込み量、送り量を小さくしても、図1(a)と同様な脆性破壊による切削面しか得られなかった。

図4に押込み試験で得られたクラックの外観とその発生機構を示す。ただし、圧子の押込み深さが小さいときには、すべての材料においてクラックは発生しなかった。このことから、切り込み量が非常に小さい場合は、いずれの材料も延性モード切削となる可能性がある。(a)はすべての材料で見られたもので、圧痕の対角線方向にクラックが発生している。これは、塑性変形により圧子が内部にくい込み、圧子の先端や稜の部分に引張応力が集中するため発生すると考えられている(タイプ1)²⁾。(b)のクラックは水晶、シリコンにおいて(a)よりも圧子を深く押込んだときに発生したものである。タイプ1のクラックと、図中に矢印で示した貝殻状のクラックが発生している。このように変形量が大きい場合には、圧子を取り除く際に元に戻れない塑性変形部分が、弾性回復

力により押し上げられ、破壊が起こる(タイプ2)²⁾。(c)のクラックは石英ガラスのみで見られ、圧痕を中心として円形にクラックが入っている。このようなクラック(タイプ3)は先端半径の大きな圧子を押込んだときによく見られるもので、塑性変形が主体で発生するタイプ1とは異なり、弾性変形領域が大きい場合に、試料表面に引張応力が働き破壊(弾性破損)する²⁾。

図5に押し込み深さとクラック発生率の関係を示す。(a)、(b)の水晶、シリコンでは、押し込み深さを大きくすると、タイプ1からタイプ2のクラックとなる。水晶ではタイプ1からタイプ2に急激に変化するがシリコンでは両者が共存している。切削実験では、水晶は脆性と延性モード切削の遷移が狭い切削条件範囲で起こり、シリコンではそれらが共存する条件があり、押し込み試験の結果と対応している。タイプ1のクラックしか発生しなかった(c)のガラスは大部分が延性モード切削となった。タイプ3のクラックが発生した(d)の石英ガラスでは、延性モード切削とはならなかった。

図6(a)は、押し込み試験でタイプ1、タイプ2のクラックを発生する水晶、シリコン、ガラスの切削モデルである。切込み量が大きくなり、材料の破壊強度以上の応力が加わると、工具刃先端の応力が集中した部分からクラックが発生する(タイプ1)。しかし、クラックは図のように刃先前上方に成長し、切削面にクラックは残らない。その結果、見かけ上延性モード切削と同様な面性状が得られるものと考えられる。このようなクラックの成長はガラスの切削において実際に観察されている³⁾。しかし、切込み量が大きくなると、工具通過後に試料表面の塑性変形部分が、弾性回復力によって押し上げられて、破壊が起こり(タイプ2)、脆性モード切削となる。水晶はこのような弾性回復力による破壊が狭い切削条件範囲で起こるため、脆性と延性モード切削の遷移が明瞭となる。一方、シリコンは両者のクラックが共存するため、脆性、延性両モードの切削となる。

同図(b)はタイプ3のクラックを生じやすい石英ガラスの切削モデルである。切込み量を小さくしても先端半径が大きなバイトで切削した場合と同様に、弾性変形領域が大きく広がり、試料表面に引張応力が働き大規模に破壊が起こる。このような弾性破損を生じやすい材料では延性モード切削になりにくい。

ガラスの切削面でクラックが発生したのは、バイト摩耗により切れ刃稜丸み半径が非常に大きくなったためである。すなわち、先端半径の大きな圧子での引っかかり試験でも見られるように、切削方向に大きな引張応力が働き⁴⁾、クラックが発生したものと思われる。

4.まとめ

水晶、シリコン、ガラスでは工具刃先で発生したクラックは刃先前上方に成長し、延性モードと同様の切削面となる。しかし、切込み量が大きくなると弾性回復力により破壊が起こり、脆性モード切削となる。石英ガラスのような弾性破損の生じやすい材料では、大規模に破壊が起こるため延性モード切削になりにくい。

- 参考文献 1)柴田ほか：1992年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1992) 15。
 2)谷口紀男：硬脆材料の衝撃破砕加工法，誠文堂新光社，(1959) 113。
 3)白樫ほか：1992年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1992) 25。
 4)最新フェイセラミックス技術，工業調査会，(1983) 210。

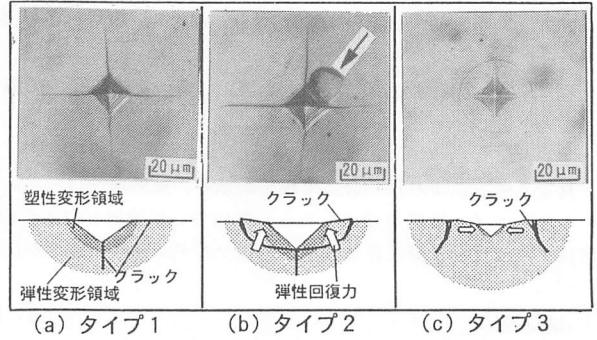


図4 クラックの種類と発生機構

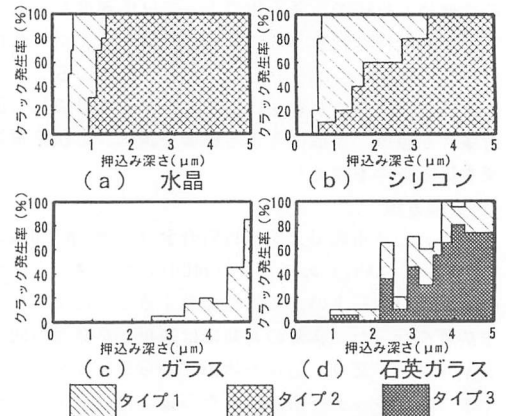


図5 押し込み深さとタイプ別クラック発生率

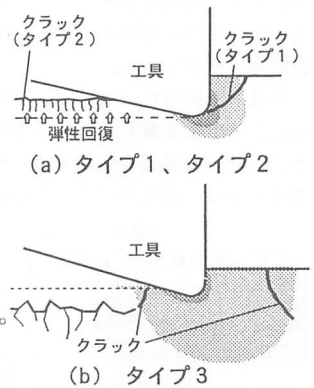


図6 切削モデル