

北海道大学工学部 〇栗原賢二 小野 敦 柴田隆行 高橋義美 牧野英司 池田正幸

要 旨

高精度で高剛性の超精密旋盤と、単結晶ダイヤモンドバイトを用いて、硬脆材料であるシリコン単結晶の超精密切削実験を行い、延性モード切削による鏡面加工の可能性について検討した。その結果、切込み量が200nm以下のときに、表面あらさ約20nmR_{max}の鏡面を得ることができた。

1. はじめに

単結晶ダイヤモンドバイトを使用した超精密切削加工技術の急速な発展により、工作機械の運動精度と同程度の精度をもった表面仕上げ加工が実現され、サブミクロン以下の超微小領域での材料除去加工が可能となった。これらの成果は主に軟質金属を対象にしたものであるが、硬脆材料においても、脆性破壊を抑え、塑性変形により材料除去が行われる延性モードによる鏡面加工の可能性が検討されている。そこで本研究では、硬脆材料であるシリコン単結晶の切削実験を行い、加工条件と切削面性状の関係を明らかにし、鏡面加工の可能性を検討した。

2. 実験装置及び方法

切削実験には超精密旋盤(日立精工製DPL-100)を使用した。切込み方向のテーブルの変位量を渦電流式非接触変位計を用いて測定し、切込み量の設定を行った。切込み分解能は50nmである。工具は単結晶ダイヤモンドR刃バイト(すくい角40°, 逃げ角10°, ノーズ半径0.8mm)を使用し、切込み方向のテーブル上に固定した。試料にはφ11mm、厚さ0.625mmのシリコン単結晶を用いた。試料をスピンドル端面に接着し、スピンドル回転数1000rpm(切削速度2.57~3.72 m/s)、工具送り量10μm/revと一定として正面旋削を行った。切込み量は100nm、200nm、300nm、500nmで実験を行った。切削面は{100}で、切削方向は<100>とした。

得られた切削面を微分干渉顕微鏡で観察し、タリステップを用いてあらさを測定した。また切削面のレプリカを作成しTEMによって観察した。切りくず、工具刃先はSEMを用いて観察した。

3. 実験結果

3.1 切込み量と切削面性状

図1は得られた切削面の外観写真である。全ての切込み量において図のような鏡面が得られ、硬脆材料であるシリコン単結晶の鏡面加工の可能性が確認された。

図2(a)~(d)は、切込み量を変化させたときの切削面の微分干渉顕微鏡写真とその表面あらさ曲線である。いずれの切削面にも、切削方向に沿って、工具送り量に相当する約10μm間隔の送りマークが観察される。しかし、(a)、(b)の送りマークは(c)、(d)程明瞭ではない。また(c)では図中に矢印で示したように、ピット(微小穴)が観察され、(d)では切削方向に垂直に微小な縞模様を観察される。表面あらさは、切込み量300nm、500nmではそれぞれ約70nm、80nmR_{max}であるが、切込み量200nm以下では約20nmR_{max}となった。このように微視的な観察では、切削面性状は切込み量に大きく依存していることが認められた。

図3は切込み量300nmの切削面のTEMによるレプリカ像である。工具刃先の微小な凹凸の転写によるものと思われる溝が切削方向に観察される。更に、溝の周囲には塑性流動した跡が認められる。これは全ての切削面で観察され、塑性変形による材料除去が行われたと

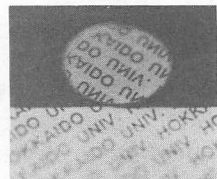


図1 切削面の外観写真 (切込み量: 300nm)

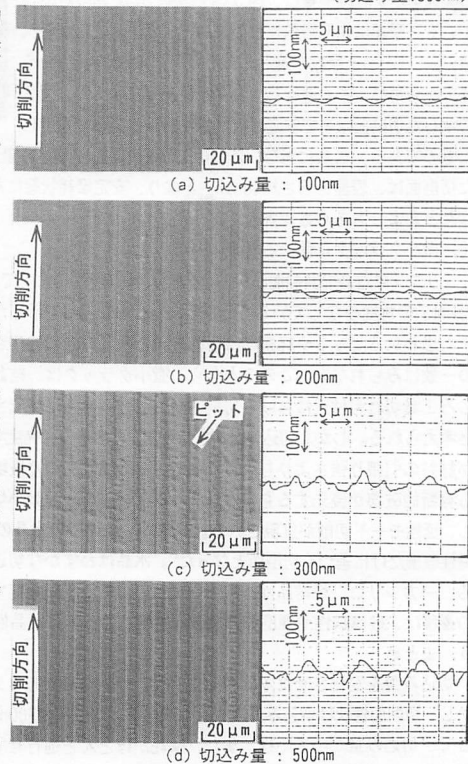


図2 切込み量による切削面性状の変化

考えられる。切削面をエッチングしたところ、切込み量300nm以上の切削面における、ピットや縞模様を観察された部分のみが極端にエッチング速度が大きくなった。このことから、ピットや縞模様は微小クラックと考えられ、この部分に大きな加工歪が残留しているため、エッチング速度が大きくなったと考えられる。従って切込み量300nm以上では、塑性変形と同時に脆性的破壊も発生しているものと考えられ、“脆性破壊を抑えた”延性モード切削は厳密には達成されていないと考えられる。

図4は切込み量100nmで切削したときの切りくず外観のSEM像である。金属の場合と同様な連続した切りくずが生成されることが確認された。また切削方向に沿って、工具刃先の凹凸の転写によると思われる濃淡が観察される。このように切込み量200nm以下では、連続した切りくずや切削面の塑性流動が観察され、脆性破壊を抑えた延性モードによる切削が実現され、微小クラックのない平滑な鏡面を得ることができた。

3.2 工具刃先の摩耗

図5(a)は1800m切削後の工具刃先のSEM写真である。摩耗面は刃先において一様な平滑面ではなく、微小な凹凸がある。またすくい面においても直線状の摩耗が観察される。すくい面上の摩耗は切りくずとの接触に起因するものと考えられ、この摩耗痕に沿って切りくずが排出されたと推察される。また同図(b)は(a)と同じ状態の工具刃先の側面のSEM写真である。図のように摩耗面の幅を定義した。図6に切削距離と摩耗幅との関係を示す。図中●は、図5(a)で示した工具に対応している。摩耗は初期段階において大きく進行(初期摩耗状態)し、ほとんど摩耗が進行しない状態(安定摩耗状態)を経てから再び大きく進行し、寿命摩耗状態となった。図2で示した切削面は全て安定摩耗状態における工具で切削したものである。これに対し、新しい工具を使用し、切込み量200nmで切削した切削面は、表面あらさ約40nm R_{ax} となり、安定摩耗状態にある工具を使用するときよりもあらさが大きくなった。

4. 微小クラックに関する考察

シリコン単結晶の劈開面は{111}であり、切削面{100}上で切削方向<100>とは45°の角度をなしている。しかし、図2(c),(d)で示した、微小クラックと思われるピットや縞模様は切削方向と垂直方向に観察され、劈開面との一致はみられない。このことから、微小クラックは、結晶構造よりはむしろ工具切れ刃付近における切削方向の引張り応力に支配されているものと考えられる。しかし切込み量を200nm以下にすると、発生する引張り応力が材料の引張り強さよりも小さくなる。その結果引張り破壊によるクラックの発生確率が小さくなり、切れ刃前方上部における剪断的破壊が優先するものと思われる。従って、超微小切込み量での切削加工ではシリコン単結晶も金属と同様な挙動を示し、延性モード切削が実現される。ほぼ同じ条件での水晶の切削実験では、切込み量300nmで延性モード切削であり、500nmで脆性破壊だけにに基づく切削面となった¹⁾。水晶はわずかな切込み量の変化で、延性モードから脆性モードへと切削状態が一変する。一方シリコン単結晶は、延性と脆性の両モードが共存するような切込み条件の範囲が存在する。塑性変形から脆性破壊への遷移は、破壊靱性や硬度等の機械的特性、あるいは結晶性等の材料特性が関与していると思われ、今後検討が必要である。

5. まとめ

切込み量を変化させた本研究の条件で、硬脆材料であるシリコン単結晶の延性モードによる鏡面切削加工が実現された。しかし、切削面性状は切込み量に大きく依存し、切込み量300nm以上では微小クラックと思われる痕跡が切削面にみられた。そして、切込み量が小さい程、また、摩耗がほとんど進行せず刃先形状が安定した工具を用いた場合により平滑な仕上げ面が得られた。特に切込み量200nm以下では表面あらさ約20nm R_{ax} の鏡面を得ることができた。

参考文献 1) 柴田ほか: 1992年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p15

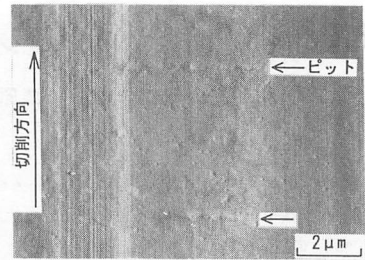


図3 TEMによる切削面レプリカ像 (切込み量: 300nm)



図4 切りくず外観のSEM像 (切込み量: 100nm)



図5 工具刃先のSEM写真 (切削距離 1800m)

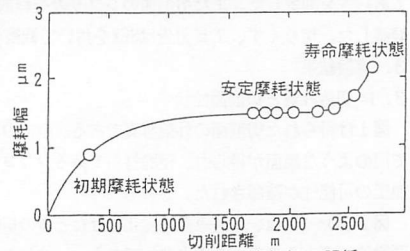


図6 切削距離と摩耗幅の関係