

単結晶蛍石の超精密旋削における加工特性の解析

慶應義塾大学 ○寒川大, ◎柿沼康弘

要旨

信号処理回路を従来の電子技術ではなく光で代替する技術が注目を集めている。次世代の光信号処理を実現するためには、光速で移動する光を一定時間・一定の場所に閉じ込める役割を担う微小光共振器が必要になる。本研究では、高性能な微小光共振器の材料として期待される単結晶蛍石の超精密旋削において、工具形状が加工面性状に与える影響を検討した。また、超精密旋削プロセスの最適化に向け、TEMによる加工変質層の評価を行った。

1. 結論

信号処理の高速化と低エネルギー化に向け、従来の電子技術による信号処理回路を、光で代替する技術が注目されている。光信号処理を実現するには、光速で移動する光を一定時間・一定の場所に捕捉する微小光共振器が必要であり、その材料として単結晶蛍石が適している。しかし単結晶蛍石は硬脆材料であり、また結晶異方性を持つなどの理由から、加工が難しい難削材といわれている。一方で、微小光共振器の性能の向上に向けて、単結晶蛍石の加工表面と加工表面下の高精度な加工が不可欠である。そこで、本研究では単結晶蛍石の加工精度の向上を目的として、単結晶蛍石の超精密旋削における工具のノーズ半径とすくい角が加工面性状と加工変質層に与える影響を調べた。特に加工変質層を透過型電子顕微鏡(TEM)により観察することで、加工表面下のダメージ深さの評価を行った。

2. 実験装置・方法

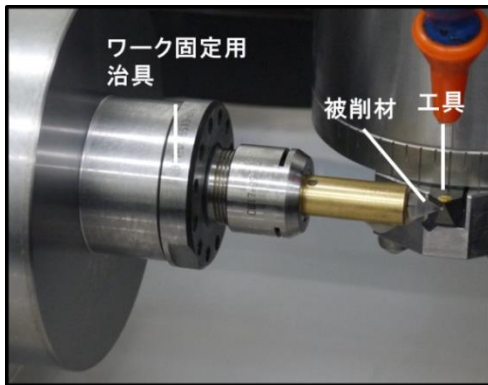


図1 超精密旋削試験の概観

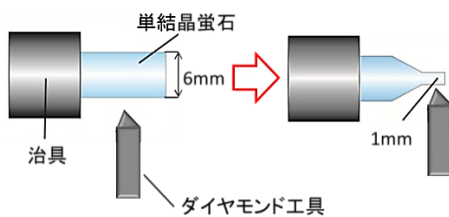


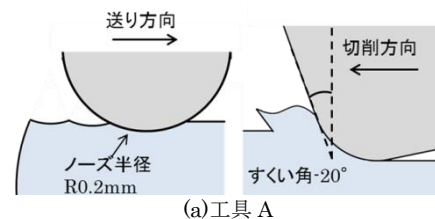
図2 実験準備(粗加工)

表1 実験条件(仕上げ加工)

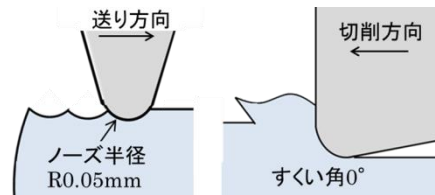
主軸回転数 min^{-1}	1000
切削速度 m/min	3.14
送り量 $\mu\text{m/rev}$	0.5
切りこみ深さ nm	50

図1に本試験の概観を示す。本研究では単結晶蛍石の外周旋削を行った。まず図2に示すように直径6mmの円柱型の単結晶蛍石を粗加工により直径1mmまで小さくした。その後、表1の実験条件で仕上げ加工を施し、図3に示した工具A,Bそれぞれを用いた外周旋削により、加工表面と加工表面下の評価を

行った。延性モード加工領域が大きいとされるすくい角 -20° 、ノーズ半径0.2mmの工具A^[1]による外周旋削では、びびり振動や加工面のうねりといった加工時の不安定性と結晶異方性の影響によるクラックが生じることがわかった。そこで背分力の低減を目的として、すくい角 0° 、ノーズ半径R0.05mmの工具Bを準備し、加工精度の向上を目指し単結晶蛍石の超精密旋削における加工特性の解析を行った。



(a)工具 A



(b)工具 B

図3 実験に用いた工具

3. 単結晶蛍石の外周旋削における工具形状の影響

端面(111)の単結晶蛍石の外周旋削において、工具Aと工具Bそれぞれ用いた際の外周面上の表面粗さを切削面(110)を測定基準の 0° として 15° おきに24カ所測定した結果を図4に示す。また図4中の赤丸で示した箇所の加工表面を図5に示す。工具Aを用いた際は、結晶異方性の影響を受け、表面粗さのばらつきとクラックの発生などの加工表面精度の悪化が見られたが、より鋭利な工具Bを用いた場合、結晶異方性の影響を受けることなく、良好な加工表面を得ることができた。また工具Aによる旋削時に頻りに発生していたびびり振動が工具B使用時には発生しなくなった。したがって、工具Bによる低負荷な旋削プロセスにより、結晶方位によらない加工精度及び加工時の不安定性の解消を実現することができた。

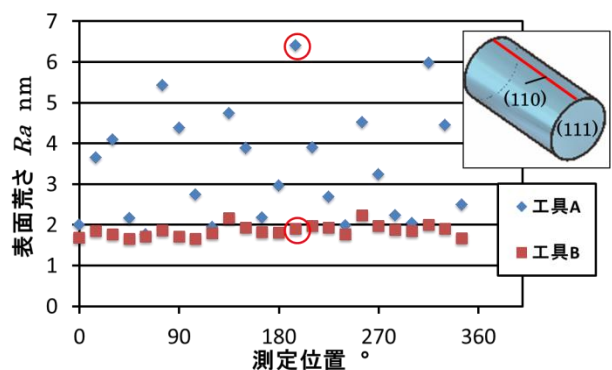
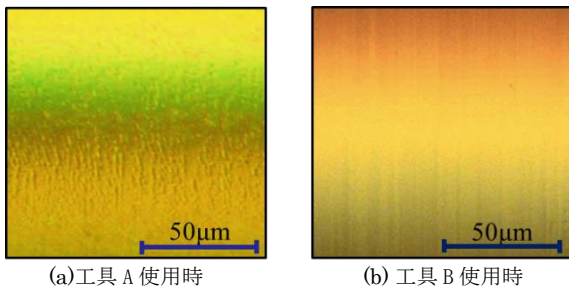


図4 工具形状と加工面性状の関係

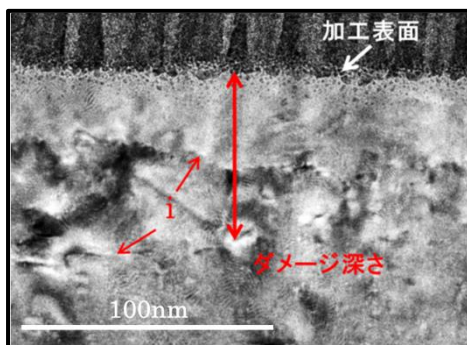


(a)工具 A 使用時 (b)工具 B 使用時
図 5 加工表面

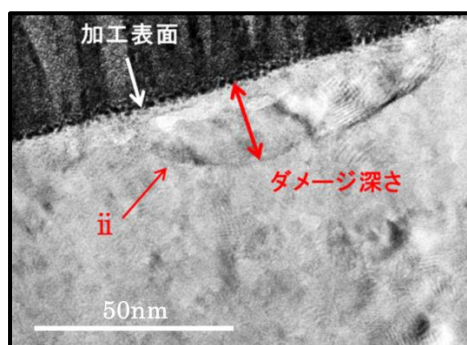
4. 透過型電子顕微鏡を用いた加工変質層の評価

次に、工具形状が加工変質層に及ぼす影響を、透過型電子顕微鏡を用いて評価した。表 1 の実験条件において、工具 A と工具 B をそれぞれ用いた際の、加工変質層の様子を図 6 に示す。

工具 A を用いた場合、図 6(a) の i で示した箇所に切削時の加工負荷により発生した結晶配列のズレによる、塑性変形（転位の集合体）が確認できた²⁾。加工表面からこの塑性変形が見られる位置までの深さは約 60nm であった。すなわち加工負荷により加工表面下約 60nm の位置までダメージが及んだと考えられる。一方で、工具 B を用いた場合、図 6(b) の ii で示した位置に加工負荷による塑性変形が確認されたが、工具 A 使用時と比較すると、ダメージ深さは小さくなり、その深さは約 20nm であった。したがって、鋭利な工具 B を用いることで加工表面下のダメージ深さを半分以下に小さくすることができた。



(a)工具 A 使用時



(b)工具 B 使用時

図 6 加工変質層

5. 超精密旋削における工具形状と切削抵抗の関係

5-1. ノーズ半径と切削抵抗

本研究のようなナノスケールの切削では切削抵抗の寸法効果により、切削抵抗は被削材と工具の接触面積に大きく依存する。工具 A は工具 B と比較して 4 倍のノーズ半径を有するため、工具 A

を用いた切削では、工具 B と同じ切り込み量においても被削材-工具間の接触面積が増える。そのため、一回転当たりの被削材の変形領域が大きくなり、切削抵抗が増大したと考えられる。

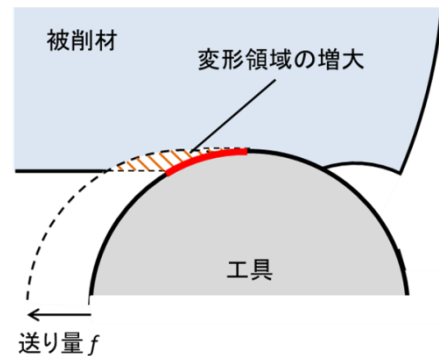


図 7 超精密旋削におけるノーズ半径と切削抵抗

5-2. 実質すくい角

図 8 のように、微小な切り込み量による切削では工具の刃先丸みが切削面に直接効いてくる事で、実質すくい角は工具が本来有するすくい角よりも小さくなる。SEM による観察で、本研究に用いた工具 A の刃先丸みは 30~40nm 程度と測定できた。工具 A は本来のすくい角が -20° であったが、この刃先丸みの影響で、実質すくい角は -20° よりはるかに大きく減少したと考えられる。それにより、せん断角が減少することでせん断面積が増加し、切削抵抗が上昇した。一方、工具 B においては、元々のすくい角が 0° であったため、工具 A 使用時と比較すると、実質すくい角の減少が小さく、切削抵抗の上昇を低減できたと考えられる。

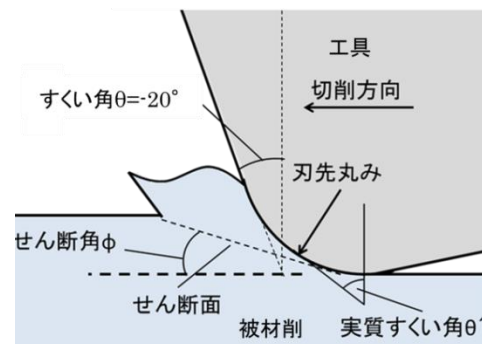


図 8 微小切り込みにおける実質すくい角

6. 結論

単結晶蛍石の超精密旋削において、すくい角 0° 、ノーズ半径 R0.05mm の鋭利な工具を用いることにより加工負荷を低減した切削を行った。この切削により、びびり振動の発生など切削時の不安定性を解消し、また結晶異方性の影響をほとんど受けることのない良好な加工面を得ることに成功した。また加工変質層において、同様に鋭利な工具を用いることで、加工表面下のダメージ深さを低減することができた。これらの結果より、単結晶蛍石の超精密旋削における鋭利な工具の優位性を示した。

7. 参考文献

- [1] 関 紀旺 他: 単結晶フッ化カルシウムの超精密切削加工, 精密工学会誌, Vol.70, No.1, 2004, pp.106-111
- [2] Fengzai Tang, Liangchi Zhang: Subsurface nanocracking in monocrystalline Si(001) induced by nanoscratching. Engineering Fracture Mechanics, Vol.124-125, 2014, pp.262-271