

赤外線光学素子用多結晶 ZnS の微細溝加工

○松下幸司^{A)}，鳥居龍晴^{A)}，増田忠志^{A)}，

三ツ井健司^{B)}，岡田則夫^{B)}，青山正樹^{C)}，鈴木光一^{C)}

^{A)} 教育・研究技術支援室 装置開発技術系

^{B)} 国立天文台， ^{C)} 分子科学研究所

1 はじめに

多結晶硫化亜鉛 (ZnS) は赤外線に対し優れた透過特性 (波長 $0.5\ \mu\text{m}$ ~ $10\ \mu\text{m}$ に対し透過率 70%以上^{[1])} を持つ光学材料であり，赤外線観測機器用回折格子などへの適用が期待されている．脆性材料である ZnS の加工には研磨を適用することが考えられるが，回折格子のような微細溝形状の製作に対しては適用が困難である．また，回折格子は図 1 のような階段状の溝で構成されており，溝の平面部分に光を反射させるため，溝の谷部分の削り残しを小さくし，光の損失を小さくすることが要求される．同じ脆性材料である Ge に対しては研削加工で溝作製を行った例が報告されており，砥石エッジはツルイーグ後に半径 $6\sim 8\ \mu\text{m}$ ^[2] となることが示されている．そのため，深さ $100\ \mu\text{m}$ 以上の溝に対しては，溝の谷部分の削り残しの割合が十分小さくなり，研削加工は有効な手段である．一方深さ $10\ \mu\text{m}$ 程度の溝に対しては，溝谷部の削り残しを $1\ \mu\text{m}$ 以下にする必要があるため，刃先を鋭利に成形可能なダイヤモンドバイトによる切削加工が有効である．そこでダイヤモンドバイトを用いたフライカット法により，多結晶 ZnS にピッチ $30\ \mu\text{m}$ の直角溝加工を試みた．

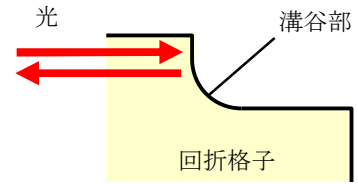
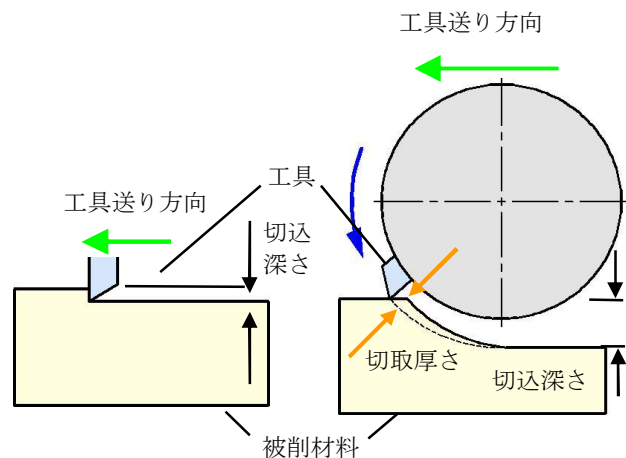


図 1 回折格子

2 フライカット法

切削加工で溝加工を行う方法として，シェーパー加工とフライカット法が挙げられる．シェーパー加工は工具を一定の向きに固定し移動させ加工するのに対し，フライカット法は，工具を回転させながら移動させ加工する．

脆性材料を延性的に切削加工する条件として，切込深さを小さく (一般的に約 100nm 以下) する必要があるため，シェーパー加工で深い溝を加工する場合には，加工回数が増加する．一方，図 2 に示すように，フライカット法では工具が実際に切り取る厚さが小さくなるため，切込深さを大きくできるという特徴を持つ．



(a) シェーパー加工 (b) フライカット法

図 2 切削方法概略図

3 実験方法

多結晶硫化亜鉛マルチスペクトラル (ZnS-MS) は脆性材料であるため、延性モード加工可能な加工条件を知る必要がある。

まず、アールバイトでシェーパ加工とフライカット法により溝加工テストを行い、延性モード加工可能な切込深さの比較を行った。次にフライカット法で、送り速度、切込深さを変化させ、アールバイトで延性モード加工が可能な加工条件について調べた。その実験結果を参考にして決定した加工条件で、直角バイトを用いて図3に示すようなピッチ $30\ \mu\text{m}$ 、溝深さ $9.64\ \mu\text{m}$ の直角溝の加工を試みた。

加工に使用した機械は、超精密非球面加工機 (ULG-300C) であり、その仕様を表1に示す。図4に示すように空気静圧軸受機構を有する軸にフライカット工具を取り付けた。被削材料の多結晶 ZnS-MS は、表2に示すような特性であり、寸法は $\phi 25\text{mm} \times t 5\text{mm}$ で、表面が研磨加工されたものを用いた。被削材料の固定は、超精密旋盤加工したアルミニウム円盤にワックスで接着した。加工後は微分干渉顕微鏡および SEM により加工面の観察を行い、非接触3次元形状測定装置 WYKO NT1100 により $25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ の範囲の面粗さを測定した。

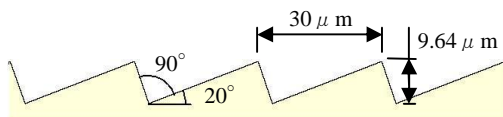


図3 直角溝形状図

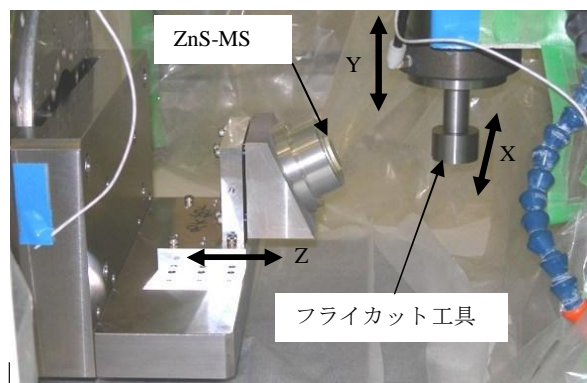


図4 加工部写真

表1 超精密非球面加工機仕様

加工機械	ULG-300C 東芝機械 (株) 製
X 移動量	250 mm
Y 移動量	75 mm
Z 移動量	150 mm
各軸最小設定量	1 nm
送り速度	0.1~320 mm/min
フライカット用 スピンドル回転数	600~6000 min^{-1}

表2 多結晶 ZnS-MS の特性^[1]

ヤング率	85.5 GPa
スラブ硬さ	150~165 kg/mm^2
熱伝導率	27 W/(m·K)
熱膨張係数	$6.5 \times 10^{-6}/\text{K}$

4 実験結果

4.1 円弧溝加工実験結果

表3に加工条件を示す。アールバイトを用い、延性モード加工可能な切込深さを確認するため、図5に示すように溝長さ1mmに対し1 μm の割合で切込深さが連続的に増加するように、溝を加工した。ZnS-MS とフライカット工具を図6のように配置し、またシェーパ加工の際も、同様に ZnS-MS を工具の横に配置した。

図7は、シェーパ加工による溝の微分干渉顕微鏡写真である。加工開始部付近の切込深さの小さい部分を除いて、ほぼ全面が脆性破壊面となっている。最初に脆性破壊部が生じる手前の切込深さは、およそ70nmであり、次に大きく脆性破壊している部分の手前の切込深さは、およそ150nmである。

一方、フライカット法で加工した溝は、図8のように脆性破壊部が少なく、シェーパ加工に比べ切込深さを大きくしても、延性的な加工が可能である。

図9に、フライカット法を用いて、3種類の送り速度で加工した円弧溝全体と切込深さ $14.5\ \mu\text{m}$ 近傍の加

工面の微分干渉顕微鏡写真を示す。図9(a)の送り速度 50mm/min (最大切取厚さ 330nm) では、脆性破壊部が観察でき、図9(b)の送り速度 24mm/min (最大切取厚さ 158nm) では、脆性破壊部が減少している。図9(c)の送り速度 12mm/min (最大切取厚さ 80nm) では、ほとんど脆性破壊部は見られず、面粗さが 10 nmRq (RMS) 以下の延性的な加工面であった。この実験結果に基づき、直角溝の加工条件を送り速度 12mm/min, 切込深さ 13 μm とした。

表3 円弧溝加工条件

シェーパ加工	
切込深さ	0~4 μm (連続的に切込増加)
送り速度	20 mm/min
フライカット法	
切込深さ	0~15 μm (連続的に切込増加)
送り速度	12, 24, 50mm/min
回転数	6000min ⁻¹
工具回転半径	18.5mm
切削速度	697m/min
切削方向	ダウンカット
シェーパ加工, フライカット法共通	
バイト	単結晶ダイヤモンド
すくい角	-10°
逃げ角	10°
ノーズR	1 mm
切削油	鉱油ミスト

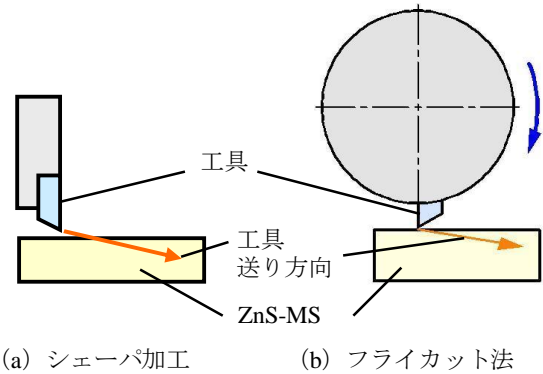


図5 円弧溝加工経路

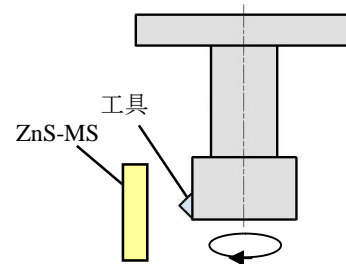


図6 円弧溝加工時配置

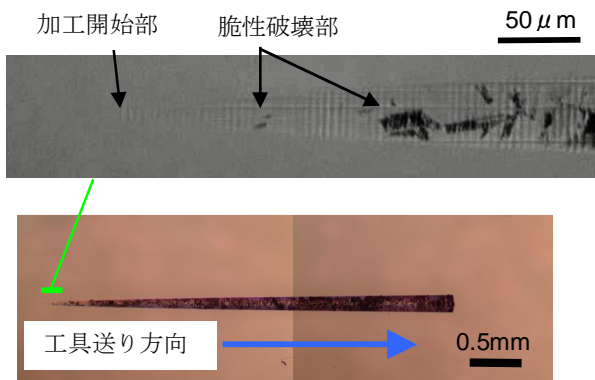


図7 シェーパ加工
切込: 0~4 μm , 送り速度: 20mm/min

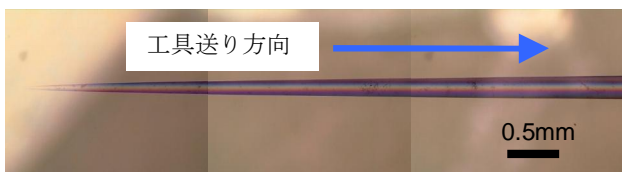


図8 フライカット法
切込: 0~6 μm , 送り速度: 24mm/min

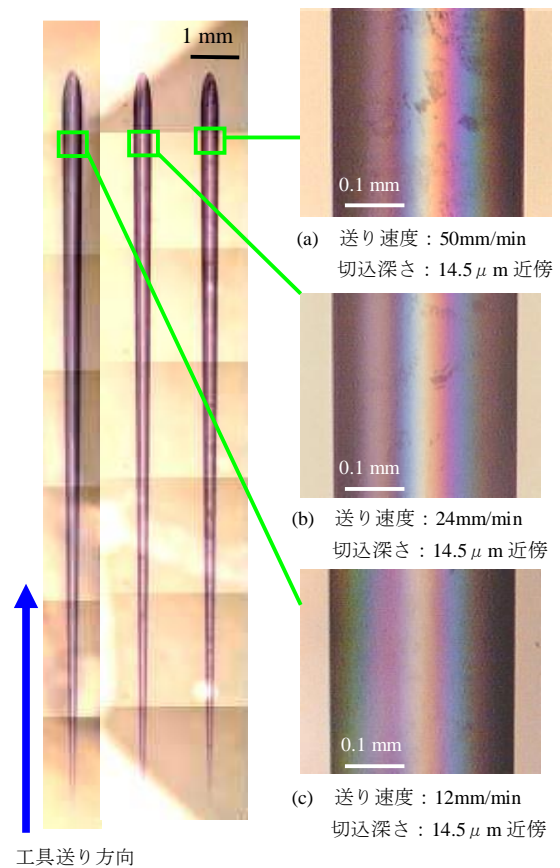


図9 フライカット法による円弧溝干渉顕微鏡写真

4.2 直角溝加工結果

表 4 に示す加工条件で、図 3 に示す直角溝の加工を行った。このときの最大切取厚さは約 75nm である。図 10 に ZnS-MS とフライカット工具の配置を示す。工具を加工機械（図 4）の Z 軸方向に切り込み、X 軸方向に送って溝加工を行った後、Y 軸の下方向に移動し、次の溝を加工する工程で溝を製作した。図 11 (a) に溝加工した ZnS-MS を示す、図 11 (b) は加工初期の溝の SEM 写真である。欠けはなく、溝の谷部も工具形状が転写されている。この加工面の粗さは 13nmRq (RMS) であった。図 11 (c) は加工溝長さ 1.1m 付近の SEM 写真であり、溝の山部に欠けが発生している。これ以降の溝は欠けが増加していった。

表 4 直角溝加工条件

切込深さ	13 μm
送り速度	12mm/min
回転数	6000min ⁻¹
工具回転半径	18.5mm
切削速度	697m/min
切削溝長さ	5 m
加工方法	フライカット法
切削方向	ダウンカット
バイト	単結晶ダイヤモンド
すくい角, 逃げ角	-10°, 10°
先端角	90° (先端 R 1 μm)
切削油	鉱油ミスト

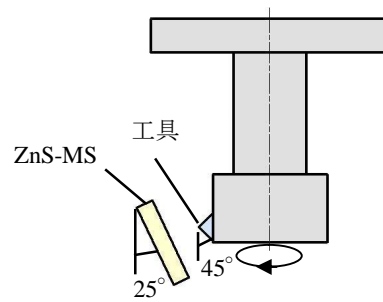


図 10 直角溝加工時配置

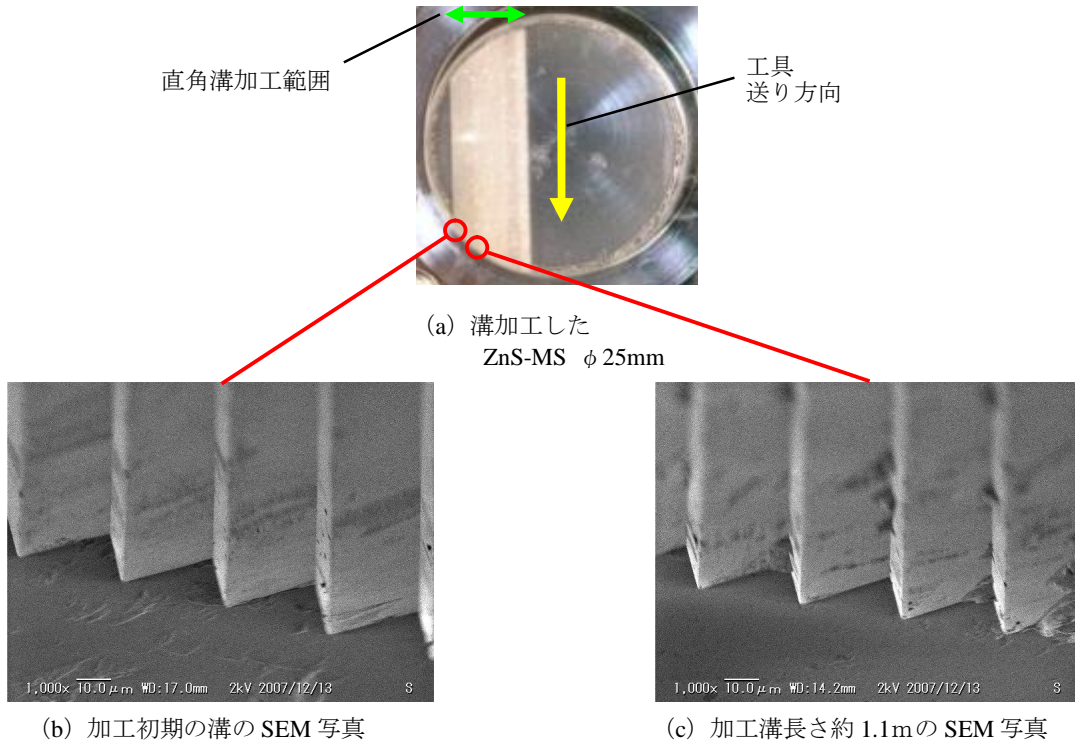


図 11 フライカット法による直角溝写真

5 まとめ

ダイヤモンドバイトを用いた切削加工により、多結晶 ZnS-MS に溝加工を行い、以下の結果を得た。

- (1) アールバイトを用いた溝加工で、延性的な加工が可能な切込深さは、シェーパ加工（送り速度 20mm/min）では $0.15\ \mu\text{m}$ 以下であった。フライカット法（送り速度 24mm/min）では $14.5\ \mu\text{m}$ 以下であったが、さらに大きな切込深さで延性的な加工面が得られるかどうかについては追加実験を要する。
- (2) アールバイトを用いフライカット法で溝加工した場合、切込深さ $14.5\ \mu\text{m}$ で、送り速度 50mm/min（最大切取厚さ 330nm）のとき、脆性破壊部が観察され、送り速度 24mm/min（最大切取厚さ 158nm）のとき、脆性破壊部は減少し、送り速度 12mm/min（最大切取厚さ 80nm）のとき、面粗さ 10nmRq (RMS)以下の延性的な加工面であった。
- (3) フライカット法を用い、切込深さ $13\ \mu\text{m}$ 、送り速度 12mm/min（最大切取厚さ約 75nm）の条件で直角溝加工した場合、延性的な加工が長さ約 1.1m の範囲で可能であり、粗さ 13nmRq (RMS) の加工面が得られた。

参考文献

- [1] II-VI カタログ
- [2] 尹, 大森, 上原, 清水, 林: 大型超精密鏡面加工システム “N-aou-VEL” による大型赤外用回折格子 “ゲルマニウムイマージョングレーティング” 加工 第 2 報 微細 V 溝の高精度加工, 2003 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, P202