

氏名 ヤン キョウ 閻 紀旺

授与学位 博士(工学)

学位授与年月日 平成12年3月23日

学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項

研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科(博士課程) 機械電子工学専攻

学位論文題目 単結晶シリコンの超精密切削に関する研究

指導教官 東北大学教授 庄司 克雄

論文審査委員 主査 東北大学教授 庄司 克雄 東北大学教授 清野 慧
東北大学教授 伊藤 耿一 東北大学助教授 厨川 常元

論文内容要旨

先端科学技術の進歩に伴い, 様々な光学結晶を光学素子として超精密加工に対する要求がますます増大している. 最近, 特に単結晶シリコン(以下単にSiという)が赤外線集光レンズ, フィルター, ウインド, レーザ反射鏡の基板などとして多く使われてきた. この種の加工には, 当然鏡面加工が要求される. 以前から, 平面や球面形状の光学素子に加工するには, 研磨加工が用いられている. しかし, 最近の高機能光学系では, 球面収差や色収差などを完全に除去することや, システムの小型化や集積化なども一層厳しく要求されている. したがって, 非球面や自由曲面, フレネルレンズ, ホログラム光学素子のような複雑形状の光学素子を加工する必要性が生じた. このような加工には, 超精密切削が不可欠である. 一方, 単結晶Siは典型的な硬ぜい材料であり, その超精密切削による加工メカニズムについては, まだ解明されていない点が多数残されている.

本研究は, 単結晶Siの超精密切削に関する基礎的な研究であり, 平バイトによる延性モード切削法を提案しながら, 延性・ぜい性遷移における基本的な材料除去機構およびそれを支配する要因, 延性・ぜい性遷移機構におけるすくい角の影響, ダイヤモンドバイト切れ刃の損傷機構などについて検討を行った. 本研究の内容を要約すると, 次のようになる.

第1章 [序論]: 本研究の背景, 必要性和重要性, 研究目的を明らかにした.

第2章 [ダイヤモンド平バイトによる延性モード切削法]: 単結晶Siの切削実験において, 従来のアールバイ

トによる延性モード切削法の代わりに, 平バイトによる延性モード切削という新しい切削法を提案した. 平バイトによる硬ぜい材料の削モデルを図1に示す. これにより, 切り取り厚さを極めて小さくしかも切れ刃全長にわたって一様にできるため, 延性・ぜい性遷移の臨界切り取り厚さをより正確にしかも簡単に求めることができた. また, 微小な切込み角を与えることによって, 大きな送りであってもSiの延性モード切削が可能になった. 提案に基づいて行った実験から得られた結果は次の通りである.

- (1) 延性・ぜい性遷移点は, 臨界切り取り厚さで一意的に評価でき, 切り取り厚さにより切削形態は延性モード切削域, 境界域, ぜい性モード切削域の3つに分類できる.
- (2) 結晶方位により臨界切り取り厚さが著しく異なる. し

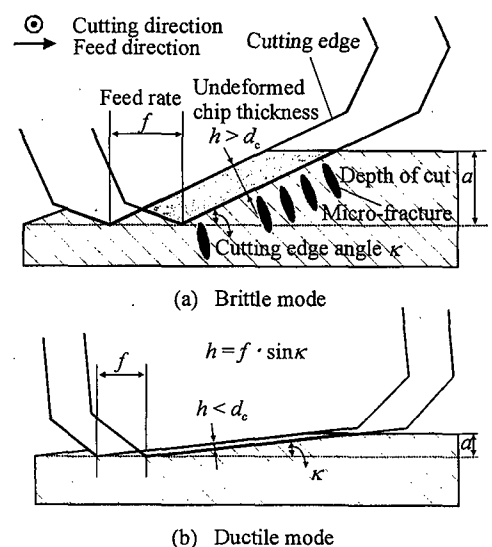


Fig.1 Cutting model of straight-nosed tool

たがって全面均一な延性モードの切削面を得るには切取り厚さを最小臨界切取り厚さ以下に設定しなければならない。

- (3) 延性モード切削域では流れ型に近いリボン状の切りくずが確認され、仕上面粗さは幾何学的な理論値にほぼ近い値が得られた。また、正常な延性モード切削が行われるためには、ある値以上の切取り厚さが必要である。その最小切取り厚さは、切れ刃のエッジ丸みの大きさに依存する。
- (4) すくい面に面取りを行うことによって副切込み角を小さくし、切込み量 $1\mu\text{m}$ 、送り $12\mu\text{m}/\text{rev}$ で 15.6nmR_y の表面粗さを達成した。また、 $35\mu\text{m}/\text{rev}$ と大きな送りでも仕上面粗さ 52.2nmR_y の切削面を得られた。

第3章 [延性・ぜい性遷移における切りくず生成機構]

切取り厚さを変化させたときの切りくず形態や切削面の形態を観察し、延性・ぜい性遷移における切りくず生成機構について考察した。また、このような切削機構遷移の起因を調べるために、有限要素法を用いて切削領域の応力分布を求めた。その結果は次の通りである。

- (1) 切取り厚さを小さくするにしたがって、切りくず形態はき裂型からせん断型、そして流れ型へと遷移する。また、切りくず幅が次第に切削幅に近づく。
- (2) き裂型切りくず生成時の切削面は、クレータからなる梨地面であった。そしてクレータは結晶へき開破壊による断層から構成された。境界切削モードでは、せん断変形によって断続的な線状切りくずが生成され、切削面に周期性のある微細な線条模様が生じた。延性切削モードでは、**図2**に示したような安定した流れ型切りくずが生成され、金属切削に近い切削挙動が確認された。**図3**はこの場合に得られた表面のAFM画像であり、切れ刃形状の転写による滑らかな表面となった。また、結晶方位による切りくず形態の差異は、境界切削モードでは線状体の幅に、延性切削モードでは切りくず表面模様に見れた。
- (3) 切取り厚さに伴う切りくず生成機構の延性・ぜい性遷移は、切削領域における応力状態の変化に起因する。切取り厚さの大きい場合に、切れ刃の前方下部の引張り応力が支配的になり、切れ刃前方上部においてせん断応力が集中する。切取り厚さの小さい場合、切れ刃稜の丸みによって静水圧応力場が支配的になった。**図4**は、切取り厚さが 50nm の場合の静水圧応力分布を示したものである。



Fig.2 Ductile cutting chip ($h = 58\text{nm}$)

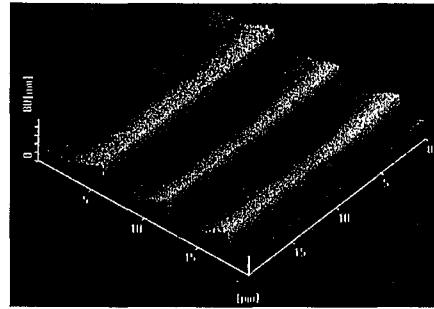


Fig.3 AFM image of ductile cut surface ($h = 58\text{nm}$)

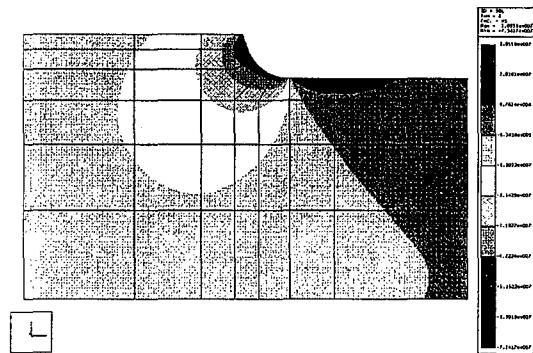


Fig.4 FEM Simulation of hydrostatic stress, ($h = 50\text{nm}$)

機構についてより詳しく検討した。その結果は次の通りである。

- (1) 臨界切取り厚さは、**図5**に示したように、すくい角を負の方向で大きくすると、単調に増加するのではなく -40° 付近に最大値が存在した。すくい角 $0^\circ \sim -40^\circ$ では境界域が存在したが、 $-60^\circ \sim -80^\circ$ では境界域は存在せず、切取り厚さが臨界切取り厚さを超えると微小な破壊痕が発生した。また臨界切取り厚さ以下では微細な切削条痕が見られた。
- (2) 切削力は、延性域ではすくい角に関係なく切取り厚さにほぼ比例したが、臨界切取り厚さを超えると、すくい角 $0^\circ \sim -40^\circ$ では切取り厚さの増加と共に減少し、 $-50^\circ \sim -80^\circ$ では逆に増加した。大きな負のすくい角では、被削材がすくい面上を下方に流れることが、切削力比から明らかになった。
- (3) 切りくずは、すくい角 $0^\circ \sim -40^\circ$ では切取り厚さの増加に伴って次第に流れ型、せん断型、き裂型へと移

第4章 [大きな負のすくい角工具による延性・ぜい性遷移]

大きな範囲において工具すくい角を変化させ、臨界切取り厚さ、切削力、切削機構に及ぼすすくい角の影響を調べた。特に第3章と関連して、大きな負のすくい角での切削

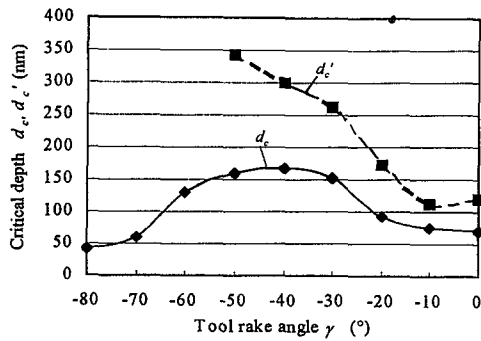


Fig.5 Variation of critical depth versus tool rake angle

行した。しかしすくい角 $-60 \sim -80^\circ$ では臨界切取り厚さ以下のとき糸状に、臨界切取り厚さを超えると切れ刃稜後方に断片状の切りくずが生成された。大きな負のすくい角で切取り厚さが臨界切取り厚さ以下のとき構成刃先が形成され、糸状切りくずや微細な切削条痕の原因となる。

- (4) 大きな負のすくい角で切取り厚さが大きいとき、被削材が切れ刃稜直下をよぎる際に静水圧による大きな弾性変形を受ける。切れ刃後方でそれが解放されたとき、切れ刃後方に生じた横クラックが進展し剥離型の切りくずを形成した。

第5章 [切削状態における切れ刃摩耗の影響] 臨界切取り厚さ以下の切取り厚さの比較的小さな条件とそれよりかなり大きい2つの条件で切削を行い、それぞれの切削域における切れ刃摩耗の形態、その推移と切削状態への影響について調べた。本章の結果は次の通りである。

- (1) 切取り厚さの小さい条件では、すくい面のクレータ摩耗が僅かであったが、フランク摩耗は切削距離にほぼ比例して単調に増加した。切削開始初期のフランク摩耗が漸進型の凝着摩耗と見られるが、切削後期では大きい範囲の摩耗面脱落へ転じた。またフランク摩耗の成長によって、切削面では切削方向と垂直なクラックが形成され、切削力の背分力が急増した。
- (2) 切取り厚さの大きい条件では、切れ刃のマイクロチップングが切れ刃損傷の主要な原因である。マイクロチップングは、切れ刃と被削材の破壊面との衝撃によるものである。また切削衝撃の発生は、切削力の測定波形から確認した。切れ刃のマイクロチップングの集積によって、切削力は急増した。
- (3) 切取り厚さに関わらず、最終的にフランク摩耗面に微細な溝模様が現れた。また、切削後期の切削力比は非常に大きくなった。

第6章 [結論] 本研究で得られた結果を総括した。

審査結果の要旨

単結晶シリコンは、暗視野用赤外線レンズやレーザ反射鏡基板として優れた光学特性を持っている。通常これらの光学素子では鏡面仕上げの必要があり、特に非球面レンズのように高精度の形状転写型加工が要求される場合には、切削加工が不可欠である。最近、単結晶シリコンのように脆性の高い材料であっても、ダイヤモンドバイトを使用し、すくい角を負にして切り取り厚さを極めて小さくすれば、延性モード切削が行われ鏡面仕上げが加工であることが明らかになってきた。本研究は、このような超精密切削における加工メカニズムを明らかにしたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、平バイトによる傾斜切削法を提案している。すなわち従来のアールバイトと異なり、平バイトによる傾斜切削法では切れ刃全体にわたって切り取り厚さが一定になる。したがって切削モードの同定が容易になり、切削モードが延性から脆性に変わる「臨界切り取り厚さ」をより精確にしかも簡単に測定することができる。この結果延性モード切削域でリボン状の流れ型切屑が確認され、臨界切り取り厚さが結晶方位によって著しく変わることを明らかにしている。この成果は、学界において高く評価されている。

第3章では、切り取り厚さが小さくなるに従って切屑形態が亀裂型から剪断型、流れ型へ遷移することを明らかにし、切削モードを脆性域、境界域、延性域に分類している。さらにこのような切削モードの遷移には、切れ刃稜丸みが大きく影響することを指摘している。すなわち切り取り厚さが小さいと切れ刃稜丸みのために実効すくい角が大きな負の値になり、切れ刃前方に大きな静水圧場が生じて延性モード切削になるという考えである。

第4章では、すくい角を変えて切削を行い臨界切り取り厚さや切屑形態への影響を調べた。その結果、臨界切り取り厚さは従来考えられていたように負のすくい角が大きくなるに従って単調に増加するのではなく、 -40° 付近に最大値が存在すること、非常に大きな負のすくい角では切れ刃後方に剥離型の切屑が発生すること、また延性モード切削域では切削抵抗はすくい角に関係なく切り取り厚さにほぼ比例することを明らかにしている。これらは単結晶シリコンの鏡面切削を行う上で非常に貴重な知見である。

第5章では、ダイヤモンドバイトの摩耗と切削形態への影響について検討している。その結果、延性モード切削域ではクレータ深さやフランク摩耗は切削時間と共に単調に増加するが、切れ刃稜丸みは切削初期に急増すること、また脆性モード切削域では切れ刃のチッピングが著しいことを明らかにした。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、切屑形態や切削抵抗、仕上面の詳細な観察を通して、単結晶シリコンの超精密切削メカニズムの解明に成功したもので、精密加工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。