

## 学位論文の要旨

氏名	小原 裕也
学位論文題目	R刃工具を用いた単結晶シリコン円板の精密切削加工に関する研究

本論文は、前加工として位置づけられる、焼結CBNのR刃工具による単結晶シリコン円板の精密切削加工および仕上げ加工として位置づけられる、単結晶ダイヤモンドR刃工具による単結晶シリコン円板の超精密切削加工についてまとめたものである。本論文は、4章から構成されている。

第1章は緒論であり、本論文の背景、従来の研究における問題点及び本研究の目的について述べている。単結晶シリコンは、赤外線領域の波長に対して高い透過率と屈折率を有しているため赤外線レンズの材料として用いられており、加工法として加工能率が高く、複雑な形状の創成も可能な切削加工が望まれている。単結晶シリコンの切削加工に関する研究は、これまでに数多く報告されているが、いずれも工具刃先は鋭利な切れ刃になっており、チッピングが生じ易い。従って、実際の加工現場では、切れ刃にチャンファを付けたチッピングが生じ難い工具が用いられているが、この工具に関する研究は少ない。また、単結晶シリコンの切削加工には、工具材料として最も硬く、熱伝導率も高く、耐摩耗性に優れた単結晶ダイヤモンドが一般的に用いられているが、非常に高価という問題がある。そこで、ダイヤモンドに次ぐ硬さはあるが、安価な焼結CBN工具による単結晶シリコンの切削加工への適用が期待される。本論文は、単結晶シリコン製の赤外線レンズの実用的な切削加工技術を確立することを目的とし、R刃焼結CBN工具およびR刃単結晶ダイヤモンド工具を用いて単結晶シリコン円板を精密切削加工し、各種切削条件が加工精度と工具摩耗に及ぼす影響を調べ、前加工および仕上げ加工への適用について検討した。

第2章では、赤外線レンズ製作における前加工への適用を検討するため、チャンファ付R刃焼結CBN工具を用いて単結晶シリコン円板の精密切削加工を行い、工具送り量、切込み量、主軸回転速度、ノーズ半径が工具摩耗と加工精度に及ぼす影響について調べた結果を述べている。被削材1枚の切削において、逃げ面摩耗幅は工具送り量の増加に伴う切削距離の減少によって単調に小さくならず、ある工具送り量で極小値となることが分かった。ノーズ半径が0.4 mmの工具を用いた場合、逃げ面摩耗幅はノーズ半径0.8 mmの工具に比べて大きくなるが、摩耗体積が一致するという結果が得られた。また、逃げ面摩耗幅 $VB$ は切削距離 $L$ の関数になり、 $VB = KL^n$ で表され、すべての切削条件において係数 $K$ は工具送り量の増加に伴って大きくなる

が、指数 $n$ は工具送り量によらずほぼ一定となることが分かった。さらに、摩耗体積を考慮した逃げ面摩耗速度の係数 $K_{v,0.8} (= K_{0.8n})$ は、切削条件によらず背分力の増加に伴って単調に大きくなり、1つの線形関数で近似することができた。これらの結果を考慮し、背分力と切削距離の関数として逃げ面摩耗幅の実験式を導いた。単結晶シリコンの精密切削加工における焼結CBN工具の主な摩耗は、切削断面積の増加のよって切削温度が上昇するという仮定を基に、拡散摩耗であると考察した。

第3章では、赤外線レンズ製作における仕上げ加工への適用を検討するため、チャンファ付R刃単結晶ダイヤモンド工具を用いて単結晶シリコン円板の超精密切削加工を行い、工具送り量、切込み量、切削油剤が加工精度と工具摩耗に及ぼす影響について調べた結果を述べている。まず、工具摩耗に及ぼす切削油剤の影響として、植物油を使用した場合、工具にはチッピングが見られ、灯油を使用した場合には逃げ面の摩耗を主とする機械的摩耗であることを示した。次に切削油材として灯油を使用し、加工精度と工具摩耗に及ぼす工具送り量と切込み量の影響について調べた結果、加工面は工具送り量が $2.0 \mu\text{m}/\text{rev}$ 、切込み量が $1.0 \mu\text{m}$ の場合、 $6 \text{ nmRa}$ の鏡面が得られた。一方、切込み量が $1.0 \mu\text{m}$ 以下、工具送り量が $2.0 \mu\text{m}/\text{rev}$ 以下の場合の加工面は、工具刃先の丸みの影響を受けて実際に作用するすくい角が負へ増加するため、梨地面になるということが分かった。さらに、切込み量が $1.0 \mu\text{m}$ 以上、工具送り量が $2.0 \mu\text{m}/\text{rev}$ 以上の場合には、切取り厚さが大きくなるために加工面が脆性破壊を起こし、梨地面になるということが分かり、結果として加工面が鏡面となる最適な切削条件が存在することを示した。工具摩耗に関しては、単位切削距離あたりの逃げ面摩耗幅である逃げ面摩耗速度が工具送り量や切込み量によらずほぼ一定となり、切削抵抗の背分力成分は逃げ面摩耗幅の増加に伴って直線的増加することが分かった。加工面の形状は切削条件によらず凸形状となり、平面度は逃げ面摩耗幅から幾何学計算で求めた刃先後退量とほぼ一致したことから、平面度が大きくなる主な原因は、工具の摩耗によるものだということを示した。

第4章は結論であり、第2章および第3章で得られた結果をまとめたものである。

## Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Study on Precision Cutting of Single Crystal Silicon Disc using Radius Nosed Cutting Tool

Name: Kobaru Yuya

This thesis deals with precision cutting of the single crystal silicon disc using sintered CBN tool with large nose radius regarded as pre-cutting and ultra-precision cutting of that using single crystal diamond tool with large nose radius regarded as finish-cutting. The thesis consists of four chapters.

Chapter 1 describes the background and the purpose in this study. Single crystal silicon is used to create infrared lenses because silicon has a high transmissivity and refractive index in the infrared domain. The fabrication of single crystal silicon lenses by cutting are desired because it is difficult to create aspherical lenses and ensure the accuracy of the lens shape using the conventional grinding and polishing processes. Numerous studies have reported the cutting of single crystal silicon, and the cutting tools used in the cutting tests had a sharp cutting edge. Therefore, chipping is easy to occur at the cutting edge. In machining shops, cutting tools with a small chamfer which chipping is hard to occur are usually used, but few studies have investigated this cutting tool. On the other hand, the single crystal diamond is used as a tool material in cutting of single crystal silicon. Although diamond is the hardest material and has a high thermal conductivity and excellent wear resistance, it is very expensive. Therefore, it is expected to be applied to the cutting of single crystal silicon using the sintered CBN tool which is hard next to diamond and inexpensive. The purpose of this study is to establish the practical cutting technology of single crystal silicon infrared lens. The precision cutting of single crystal silicon disc was conducted using sintered CBN and diamond cutting tools with a chamfered cutting edge and a large nose radius, and the influence of various cutting conditions on the machining accuracy and the tool wear were investigated.

In Chapter 2, the precision cutting of single crystal silicon disc is conducted using sintered CBN cutting tools with a chamfered cutting edge and a large nose radius to examine the application to pre-cutting, and the effects of the feed rate, depth of cut, and nose radius on the tool wear and the machine accuracy are investigated. In the cutting of one workpiece, the width of flank wear land does not monotonously decrease by reducing the cutting distance with increase of the feed rate and it is found that the width of flank wear land has a local minimum at a certain feed rate. With all other cutting conditions held constant, the wear volume of the tool at a nose radius of 0.4 mm was approximately equal to that at a nose radius of 0.8 mm, although the width of flank wear land was larger. Approximating the flank wear land width  $VB$  as a nonlinear function of the cutting distance  $L$  ( $VB = KL^n$ ), the coefficient  $K$  increased with increasing feed rate, whereas the exponent  $n$  remained approximately constant at all feed rates. The coefficient of flank wear rate  $K_{v0.8}$  ( $=K_{0.8n}$ ) in consideration of the wear volume was approximately by the same linear function of the thrust force under all investigated cutting conditions. An equation describing the flank wear land width  $VB$  as a function of the thrust force  $F_z$ , the exponent  $n$  of the experimental flank wear width function, and the cutting distance  $L$  was derived. The flank wear land width calculated using this equation agreed well with the experimental flank wear land width. Based on the assumption that cutting temperature increases with

increasing cut cross-sectional area, it was concluded that the primary type of sintered CBN tool wear is diffusion wear.

In Chapter 3, the ultra-precision cutting of single crystal silicon disc is conducted using single crystal diamond cutting tools with a chamfered cutting edge and a large nose radius to examine the application to finish-cutting, and the effects of the feed rate, depth of cut, and cutting fluids on the machine accuracy and tool wear are investigated. The chipping of the cutting edge occurred when the cutting fluid made of the plant oil was used. However, there was no cutting edge chipping with the kerosene used as the cutting fluid, and the tool wear was indicated the abrasive wear of tool flank face. The machined surface was glossy when the cutting fluid was the kerosene, the depth of cut was  $1.0\ \mu\text{m}$ , and the feed rate was  $2.0\ \mu\text{m}/\text{rev}$ , but the machined surface was pear skin under other cutting conditions even if the depth of cut was smaller than  $1.0\ \mu\text{m}$  or the feed rate was smaller than  $2.0\ \mu\text{m}/\text{rev}$ . Consequently, the machined surface was indicated that there was an optimum cutting condition to become a mirror surface. The tool flank wear rate (increment of width of flank wear land per unit cutting distance) was about  $3.0\ \mu\text{m}/\text{km}$  and the thrust force linearly increased with increase of the width of flank wear land. The flatness of the machined surface approximately coincided with the recession length of the cutting point estimated from the width of flank wear land by the geometrical calculation.

In Chapter 4, the results of this study summarize.