

学位論文題名

超精密切削における微視的切削機構の基礎研究

学位論文内容の要旨

1960年代に端を発した超精密ダイヤモンド切削技術の開発は、ここ20~30年の間に急速に発展し、現在では、比較的小型の赤外線光学部品や磁気ディスク基板などの産業的ニーズに対してはほぼ満足する結果が得られており、今日の先端科学技術を支えるキーテクノロジーとして大きな役割を担っている。しかしながら、高度化・高機能化を指向する現代では、先端科学機器あるいはシステムの要求精度は益々高まっており、超精密ダイヤモンド切削をはじめとする種々の加工技術のさらなる発展が大いに期待されている。なかでも、短波長光学部品や大型部品のニーズの顕在化、微細寸法創成技術としての展開、さらには、光学結晶材料および半導体結晶材料などの脆性材料への適用範囲の拡大といった要求に応えるためには、超精密ダイヤモンド切削技術のさらなる高度化・高精度化、加工能率の向上ならびに加工面の高品質化がこれからの重要な課題となっている。しかし、これまでの研究を通観すると、従来の加工技術の延長としての試行錯誤的なアプローチが多く、加工現象の理解は断片的でしかも定性的なものにとどまっており、どちらかといえばノウハウ的なものでしかないのが現状である。ましてや、脆性材料の延性-脆性遷移機構に関してはほとんど明らかにされていないといえる。このため、原理・原則に立脚した科学的見地からのアプローチを行い、ミクロな視点での被削材の変形挙動を理解し、加工機構を解明することが超精密ダイヤモンド切削技術のさらなる発展には必要不可欠であるとの認識が高まっている。

本論文は、超精密ダイヤモンド切削における加工機構の解明、特に脆性材料の破壊のふるまいといった観点からのマクロな延性-脆性遷移機構、さらには本論文の最も大きな特徴となる透過型顕微鏡による加工面の結晶学的解析および分子動力学法による変形挙動の原子論的解析からのアプローチによって、被削材のすべり変形に立脚した軟質金属および脆性材料の加工モデルの確立を目的として実施したものである。

第1章は緒論であり、最初に超精密ダイヤモンド切削加工の歴史的背景と今日の先端科学技術におけるその重要性について述べている。次いで、超精密ダイヤモンド切削技術の現状と今後の課題について述べるとともに、加工機構に関する研究の欠如を言及し、本研究の必要性と目的について述べている。

第2章では、本研究で使用した超精密旋盤の詳細とその性能について実際の評価結果も含めて述べている。さらに、各章で共通な事項である切削手順についても述べている。

第3章では、第5章および第10章で行った分子動力学法による計算機実験の原理および本研究で用いた解析方法の詳細について述べている。

第4章では、銅単結晶を種々の結晶方位で切削し、切削面性状ならびに切りくず観察を行うとともに、加工変質層を結晶学的に解析している。特に、透過型電子顕微鏡観察によって、形成される加工変質層および切りくず構造の結晶方位依存性を検討し、加工変質層の結晶学的構造を明らかにした。

第5章では、第4章の結果をもとに、銅単結晶(111)面を被削材とし透過型電子顕微鏡によって種々の方位に切削した試料の断面観察を行い、加工変質層の断面構造ならびに結晶方位の影響を明らかにした。また、分子動力学法を用いた原子モデルでの計算機実験によって微小変形挙動を動的に観察し、切削実験によって得られた加工変質層の結晶方位依存性

について原子論的に解析している。さらに、加工面の結晶学的構造ならびに被削材の微小変形挙動の解析から、すべり変形に基づく加工モデルについて論じている。

第6章では、脆性材料の超精密ダイヤモンド切削における基礎研究として、水晶の切削実験を行った。切削面性状に及ぼす加工条件の検討から、延性モード切削条件下においては金属と同様な流れ型の切りくずが排出されることを明らかにした。また、ダイヤモンド工具の摩耗形態の観察から、延性モード切削に有効な工具形状、結晶方位についても論じている。

第7章では、第6章での基礎的実験から得られた知見をもとに、単結晶シリコン、水晶、石英ガラスおよびガラスの切削実験を行い、仕上げ面性状および切りくず形態を観察し、被削材に依存する延性から脆性への遷移条件ならびに破壊のふるまいを実験的に明らかにした。さらに、切削実験の結果と押込み試験によって発生するクラック形態の違いから加工モデルを提案し、変形破壊挙動に基づく脆性材料のマクロな延性-脆性機構を論じている。また、被削材に依存するダイヤモンド工具の摩耗形態についても述べている。

第8章では、第4章および第5章で述べた銅単結晶と同じすべり系をもつ単結晶シリコンの切削面断面を透過型電子顕微鏡によって観察し、加工変質層の微視的構造を結晶学的に解析した。切削面表層ではアモルファスへの相転移が起こり、内部ではシリコンのすべり系である $\{111\}\langle 110 \rangle$ に起因する転位が存在することを示すとともに、延性モード切削の実現には表層でのアモルファス化とすべり変形に起因する材料除去が必要不可欠であることを明らかにした。また、切りくず構造の解析結果から、延性モード切削が実現される場合には、切りくずは流れ型となりその構造はアモルファスとなることを示した。

第9章では、単結晶シリコンを種々の方位に切削し、切削面性状ならびに切りくず形態の結晶方位依存性について述べている。また、透過型電子顕微鏡によって切削面断面の微視的構造を系統的に観察して結晶方位との関係を明らかにし、微小領域での延性-脆性遷移機構をすべり変形に基づいて論じている。さらに、延性-脆性遷移条件を記述するための Slip model を提案し、結晶方位に依存する切削面性状を予測するためのシミュレーションモデルについて述べている。

第10章では、少数のすべり変形の寄与によって変形過程が支配されるサブミクロン領域での単結晶シリコンの切削過程は、すべり変形の動的挙動に限定すれば、同じすべり系をもつ銅単結晶の原子レベルでの計算機実験によって記述できることを示した。第9章で得られた加工面の微視的構造と併せ、分子動力学法による加工過程の動的挙動の解析から、すべり変形に立脚した原子レベルでの加工機構を論じ、延性モード切削実現のための指導原理を提言している。

第11章では、本研究で得られた成果から、超精密ダイヤモンド切削機構について総括している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 池 田 正 幸
副 査 教 授 武 笠 幸 一
副 査 教 授 岡 田 亜 紀 良
副 査 教 授 石 川 博 將

学位論文題名

超精密切削における微視的切削機構の基礎研究

超精密ダイヤモンド切削技術は赤外線光学部品、磁気記録ディスク基板など先端工学部品の加工するキーテクノロジーとなっている。先端科学機器の高度化・高性能化の要求に対してさらなる高精度加工技術が求められている。

本論文は超精密切削加工技術における延性および脆性材料のミクロな変形・破壊挙動を目的に行われたものである。論文は8章で構成されており、超精密ダイヤモンド切削加工の重要性と研究の必要性・目的を緒論で述べている。第3章では銅単結晶の切削実験を行い、透過型電子顕微鏡による断面観察から、切削面の加工変質層は最表層の多結晶構造組織と内部のセル構造組織の層状構造であることを示した。これと分子動力学による解析からすべり変形の結晶方位依存性を考慮した加工モデルを提案している。第4章では単結晶シリコン、水晶、ガラスの脆性材料の超精密切削実験と押し込み試験を行い、変形破壊挙動におけるマクロな延性/脆性機構を明らかにした。第5、6章では第3章と同様にシリコン単結晶の種々の結晶方位を切削し、切り屑と切削断面を透過型電子顕微鏡観察を行っている。その結果、切削面性状の結晶方位依存性は切削時に活動するすべり系の種類と数に起因する事を明らかにし、延性/脆性遷移条件を記述するSlip modelを提案し、切削面性状の結晶方位依存性をシミュレーションモデルによって予測できる事を示した。

これを要するに、著者は超精密ダイヤモンド切削における加工機構に関して加工面の結晶学的解析と分子動力学による変形挙動の原子論的アプローチによって新知見を得たものであり、先端科学機器分野に対する超精密加工学の進展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。