

# 学 位 論 文 要 旨

題 目 超精密加工機を用いた硬脆性材料の延性モード切削加工に関する研究

(A Study on Ductile Mode Cutting of Brittle Materials by Ultra Precision Machine Tools)

氏 名 栗山 邦隆

硬脆性材料の切削加工においては、切れ刃近傍において不安定な亀裂伝播のために大規模な脆性破壊が発生し、このために仕上げ面性状が悪化する危険がある極めて難削性の高い材料である。そのため超精密加工では、切取り厚さを脆性破壊が生じる臨界値以下に制御することで連続した流れ型切り屑を生成し、延性モード切削を継続して高品位な仕上げ面の創製を可能としている。

本論文では、延性モード切削によって硬脆性材料の適用範囲を拡大することを目的として、実際の工業製品の創製に必要な安定した延性モード切削を実現するための条件と技術について研究対象としている。

第1章では、加工方法と加工精度の年代ごとの変遷と超精密加工の立ち位置について述べた。

第2章では、これまでに行われた硬脆性材料の超精密切削加工分野における主要な研究概要と各研究の成果と位置付けについて検討を行った。超精密加工機における機械要素の向上により、超精密研削加工を行うことで比較的平易に高品位面が得られるようになってきたが、研削加工がゆえに加工の高能率化には限界があり、また研削砥石の回転半径より大きいものしか加工できず、加工形状の自由度は制限される。そのため優れた材料特性を持つ硬脆性材料に対して延性モード加工を利用した多くの切削加工に対する研究がなされてきた。ここでは、超硬合金の切削に関する研究、フライカットによるガラスの延性モード切削加工に関する研究、硬脆性材料の延性モード楕円振動切削加工に関する研究、大きな負のすくい角工具による単結晶 Si への延性モード切削加工に関する研究、これらの研究について得られた研究成果とその課題について精査した。また多くの研究がなされた中でも、現状では実用アプリケーションが創製される状態には到達していないため、実際に延性モード切削加工を実用アプリケーション創製に活用するための手法について検討を行った。

ついで第3章では、超精密加工分野で優れた材料特性により利用頻度の高い各種硬脆性材料に対して、超精密加工機を用いた傾斜切込みプレーナ切削を行った。硬脆性材料は優れた材料特性を有する一方で非常に困難な被削特性を示すが、加工する際に鋭い切れ刃を持つ工具を用いて加工単位を微小化していくと、塑性変形を主体とする材料除去機構が取られる延性モード切削領域の存在が確かめられている。実験では極めて高い運動精度を持つ超精密加工機を用いて、材料には高い平坦度に前処理を施し、測定に影響を与える可能性の高い不安定な条件を高い精度に確保した状態で延性－脆性遷移限界である臨界切取り厚さを調査し、延性モード切削の持続性という観点からそれぞれの材料に対して難削性の評価した。実

験では、全ての硬脆性材料が延性モード切削領域を持っていることが分かり、光学ガラスや単結晶 Si などこれまで分かっていた臨界切取り厚さよりも大きな値で切削することが可能であった。また、これまで切削不可能と考えられていた Hv2700 の超硬や、Hk3500 の硬さを持つ CVD-SiC などの極めて高い硬度を示す硬脆性材料においても数十ナノメートル程度ではあるが延性モード切削領域が存在することが分かった。

また、硬脆性材料には他にも優れた特性を持つ材料が多く、全ての材料において傾斜切込みプレーナ切削を行い比較することは出来ないため、簡便にその難削性を評価する方法が求められる。そこで被削材の一般的に知られている材料特性値である、硬さ、ヤング率、熱特性値、破壊靱性値を用いて各特性値を座標軸に配置したレーダーチャートを作成し、囲まれた面積で評価を行う方法を提案し、傾斜切込みプレーナ切削実験による結果と比較検討を行った。

つぎに第4章では、金型材料として重要度の高い超硬合金を取り上げ、超精密加工機の動的特性が硬脆材料の延性モード切削に及ぼす影響について検討を行うため、駆動系の異なる二つの超精密加工機によって延性モード切削が可能な切削条件を調査し、加工状態を比較検討した。二つの加工機ともナノメートルオーダのスケールフィードバックを持つ加工機であるが、一つは V-V コロガリ案内+リニアモータ駆動方式で、高剛性案内方式による高ゲイン化で高速応答性を実現し、ナノメートルオーダでの高い再現性を持つ加工機 A。もう一方は、ボールネジ+サーボモータ駆動方式で、多くの加工機で採用された方式であるがボールネジには特有の非線形挙動があり、固有振動数による送り系の振動などの除去困難な位置決め誤差要因が存在する加工機 B である。加工結果は、加工機 A は良好な加工面が得られたのに対し、加工機 B は加工面にむしれが生じ粗悪な面であった。両者の加工時の指令座標に対する位置決め誤差量を比較したところ、加工機 A は指令値に対し数ナノメートルの誤差であるのに対し、加工機 B は数十ナノメートルにも達しており、加工機には単純に高い制御分解能だけでは無く、非常に高い運動性能を持ち合わせる必要があると分かった。

また超硬も用途により多様な組成を持つため、延性モード切削における加工状態に及ぼす超硬合金組成の影響についても検討を行った。硬度が高いが添加物が入っていない超硬 A と比較的硬度が低い微量の添加物が入っている超硬 B について同じ条件で旋削実験を行った。結果は、超硬 A では良好な仕上げ面性状が得られたのに対し、超硬 B は粗悪な仕上げ面性状しか得られなかった。超硬 B の仕上げ面を調査したところ、微量に添加されたモリブデン部分において面性状が劣化していることが分かった。

さらに第5章では、定圧切削ユニットの開発について検討を行った。前章では極めて高い動的特性を有する超精密加工機を用い加工中の挙動を安定させることで硬脆性材料に対して延性モード切削加工を成立させることが可能であったが、そのような極めて高い動的特性を有する超精密加工機は一般的に普及しているとは言えない。そこで硬脆性材料に対して、延性モード切削加工が適用可能な加工機の範囲を広げることを目的として、比較的運動精度

の低い工作機械であっても延性モード切削が適用できるように開発された定圧切込装置について述べた。硬脆性材料は、超精密加工において切削加工では良好な加工面を得ることが困難な反面、遊離砥粒を用いた研磨加工では比較的容易に良好な加工面を得られることに着目し、切削加工における工具切れ刃を研磨加工のように常に一定荷重で加工物に押し付けることで切取り厚さを一定に維持したまま加工できる方法として定圧切削加工を考案した。本装置は空気静圧軸受をラジアル方向とスラスト 2 方向の各 3 方向の空気静圧軸受によって支持されるものである。定圧切削ユニット上の工具刃先は、切込み方向 (Z 方向) にはエアスライダ可動範囲を自由に動くことが可能であるが、切込みの直交方向 (X,Y 方向) にはラジアル方向の空気軸受により拘束されており、スラスト 2 方向に供給する空気圧により工具が加工面に追従して一定圧力による定切り込みを維持しながら、加工機による位置決めが可能なものである。そこで開発した定圧切削ユニットが延性モード切削に対して適応可能であるか調査を行った。

定圧切削ユニットの静的特性として、空気軸受に供給する給気圧力を一定にした状態で板バネを押し込み実験と給気圧力差が小さい微小荷重領域で微小荷重用ロードセルを押し込む実験を行い、切込み力を一定に保持すること、工具押し込み力は空気静圧軸受のスラスト方向の圧力差によって調整すること及び線形的に上昇することが可能である結果が得られた。

定圧切削ユニットの動的特性として、加工時に回転したときに同期して変動する加工表面の傾斜及び凹凸への追従性について調査した。そこでユニットの振動変位特性を解析し、ユニットの等価質量と粘性減衰係数を導いた。その計算結果をもとにユニットの安定条件を求め、実際に加工を行い計算結果の妥当性について評価をおこなった。また定圧切込ユニットは、最終的な目的である運動性能の高くない加工機上でも安定した延性モード切削状態を実現することが可能であった。