



# 超精密切削加工における切りくず生成機構と仕上面性状に関する研究

奥田, 孝一

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1987-03-31

(Date of Publication)

2008-02-27

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲0687

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1000687>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・(本籍)	おく だ こう いち (兵庫県)
学位の種類	工学博士
学位記番号	工博い第17号
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
学位授与の日付	昭和62年3月31日
学位論文題目	超精密切削加工における切りくず生成機構と仕上面 性状に関する研究
審査委員	主査 教授 岩田 一 明 教授 中西 英 二 教授 森 脇 俊 道 教授 中 川 隆 夫

## 論文内容の要旨

近年、主として銅、アルミニウムなどの軟質金属に対してダイヤモンド工具を用いた超精密切削加工の実用化が促進され、仕上面最大あらさで数 nm の鏡面が切削によって得られるようになった。しかしながら、現状の超精密切削加工に関する研究報告は、主に工作機械の精度あるいは加工後の製品の寸法精度及び仕上面あらさに関した加工技術的報告がほとんどであり、超精密切削機構すなわち極く微小切込みにおける切削機構に関する研究はほとんど行われていない。また軟質金属以外の被削材、特に鉄系金属、セラミックス材料などに対する超精密切削加工のニーズも一段と高まりつつあるものの、これらの被削材に関しては加工技術的報告すら十分なされていない状態にある。

本研究は、軟質金属、鉄系金属及びセラミックスを被削材として超精密切削加工における切削機構を基礎的に解明することを目的にして、微小切削において生成される切りくずの詳細な観察及び切りくず生成過程の連続観察、微小切削力の測定、切削温度の測定及び解析、仕上面あらさの測定及び観察を行うことにより、切りくず生成、切削力、切削温度、仕上面あらさの観点より個々の微小切削現象を明らかにし、ついで切りくず生成機構及び仕上面性状に対するそれらの相互作用及び影響について明らかにしている。本論文は、7章より構成されている。以下に、各章の内容の要旨をまとめて示す。

第1章は緒論で、研究の背景と目的ならびに論文構成について述べている。

第2章では、本研究の目的を遂行するための超精密高速切削加工機及び走査型電子顕微鏡内超微小2次元切削装置の試作、開発を行った結果について述べている。すなわち、まず実用切削条件下

における超精密切削現象を明らかにするため、空気静圧軸受及び油静圧軸受で支持された主軸、油静圧案内テーブル、空気ばねで支持された高減衰能鋳鉄製ベッドで構成される超精密高速切削加工機の試作を行った。ついで、 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ のオーダの切込みによる微小切削過程を直接観察することにより、切りくず生成機構を明らかにし、さらに実用切削条件下における切削現象との比較検討を行うため、 piezo素子による極く微小切込み及び極く低速送りを精度よく実現し、切削過程が走査型電子顕微鏡内で直接観察することが可能な超微小2次元切削装置の試作を行った。それらの試作機の性能に関する特性を調べたところ、超精密高速切削加工機では主軸及びテーブルとも超精密切削加工面を得るのに十分な精度と剛性を有していることが確認され、また超微小2次元切削装置においては、 $0.01 \mu\text{m}$ の分解能で切込み設定が行え、かつ安定した極く低速送りが実現されることにより微小切削過程の直接観察が行えることを確認した。

第3章では、軟質金属、鉄系金属及びセラミックスのSEM内微小切削における切りくず生成過程の直接観察を行い、超精密高速切削加工において生成された切りくずの観察結果と比較検討することにより、超精密切削加工における切りくず生成機構について明らかにした。 $0.01 \sim 0.1 \text{ mm}$ の切込みでの切削においては、工具刃先近傍及びせん断変形域における巨視的な力学的状態に依存したき裂の挙動が、切りくず生成機構に重要な役割を果たしたのに対し、 $1 \mu\text{m}$ あるいはそれ以下の切込みでの切りくず生成過程は、多結晶材料であっても個々の結晶の方位あるいは結晶粒界など被削材のもつ結晶の性質に大きく依存したものになり、層状すべり構造の形成によって行われることが明かとなった。この傾向は銅、アルミニウムの軟質金属で顕著であるが、炭素鋼においても単結晶ダイヤモンド工具を用いた切削の場合、切りくず生成は層状すべりによることが観察された。セラミックスの切りくず生成機構は、基本的には塑性変形を伴わない大規模き裂の不安定伝播によるものであるが、ジルコニアセラミックスの切削においては金属切削の場合と同様、塑性変形を伴った切りくず生成が行われた。単結晶ダイヤモンド工具による無酸素銅の高速2次元切削において、 $10 \text{ nm}$ 以下の切込みで正常な切りくず生成が行われていることが確認された。他方焼結体工具による切削では、刃先丸味の影響のため切込み $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ において正常な切りくずが生成されにくくなり、切りくず生成の限界が明らかとなった。また、SEM内における切りくず生成過程の直接観察から得られたせん断角と、高速2次元切削において生成された切りくずの厚さ及び切込みから算出されたせん断角は比較的良好一致がみられ、切りくずカールの現象についても定性的によく似た結果が観察された。

第4章では、主に無酸素銅、ステンレス鋼及びジルコニアセラミックスの微小切削における切削力の測定を行い、切削条件、工具形状との関係について実験的に明らかにするとともに、切削量の微細化に伴う切削力の特異性について考察を行った。まず、水晶圧電型の3分力力変換器を用いることにより、微小切込みにおける切削力が $0.01 \text{ N}$ の分解能で精度よく測定されることを確認した。無酸素銅の切削においては切削3分力は基本的に主分力が最も大きく、ついで背分力、送り分力の順になる。また送り量、切込みの増加に伴って各分力とも増大するが、切削速度に対しては $85 \sim 3770 \text{ m/min}$ の範囲でほとんど変化はみられなかった。ステンレス鋼及びセラミックスの切削にお

いては、いずれの場合も背分力が最も大きくなり、ついで主分力、送り分力の順に大きくなった。主分力に対する背分力の比はステンレス鋼で約2倍、セラミックスの場合で3～5倍にもなり、また工具の損傷に伴ってその比は大きくなる。これらの場合の主分力方向の比切削抵抗の値は、いずれも通常切削で得られている値に比べて非常に大きく、無酸素銅で数千 MPa、ステンレス鋼及びセラミックスでは数万 MPa もの値となり、被削材の理想強度に近い変形抵抗力を要することが明らかとなった。

第5章では、主に無酸素銅を超精密高速切削加工機を用いてダイヤモンド切削を行った場合の、切削温度ならびに被削材、工具の温度上昇の測定を試み、切削条件との関係について実験的に明らかにした。また、測定される切削力に基づいて切削変形域の平均切削温度及び被削材の温度上昇の分布を計算により求め、実験結果と比較した。銅被削材にコンスタンタン線を埋め込むことにより形成される熱電対によって、切削温度及び被削材の温度上昇を測定することが可能となった。測定される切削温度の値は、単結晶ダイヤモンド工具を用いた場合 100～200 °C、焼結ダイヤモンド工具を用いた場合 200～400 °C 程度になることが確認され、また切削速度及び切込みの増加に伴って高くなり、特に切削速度の影響が大きいことが明らかとなった。被削材の温度上昇量は切削速度、送り量、切込みの増加に伴って増大した。すなわち、高切削速度になるほど、また送り量、切込みの増加により切削力が増大するほど、せん断域及び工具すくい面の摩擦変形域での発生熱量を増大させることになり、被削材の温度上昇は増大した。この場合の温度上昇量は数°C程度になった。さらに、2次元切削で測定される切削力に基づいて平均切削温度を計算した結果、計算値はフライカッティングにおける実測値に近い値となり、切削速度及び切込みとの関係も実験結果と定性的に良い一致がみられた。また、2次元熱伝導解析により求められた被削材内部の温度の時間的変化は実験結果と比較的良好一致がみられた。

第6章では、軟質金属、鉄系金属及びセラミックスの微小切削における仕上面あらさの測定及び観察を行い、結晶粒界、結晶方位などの微視的因子の仕上面生成機構に及ぼす影響、ならびに工作機械の運動精度、工具の摩耗の仕上面のうねり及びあらさに及ぼす影響について明らかにした。単結晶材料（アルミニウム）の切削では、切りくず生成の際の層状すべりの間隔に対応して仕上面に微小な凹凸が生成され、多結晶材料（無酸素銅）の切削では結晶粒界部において段差が生じ、これらが最終的なあらさ限界の主な要因として残されることがわかった。無酸素銅の超精密高速切削において得られる仕上面あらさは、ほぼ理論あらさに近いものとなっており、広範な切削速度域（85～3770 m/min）においてほとんど変化がみられなかった。また、仕上面に生じるうねりのピッチ及び振幅の大きさを測定した結果、主軸のスラスト方向の変位量と振動数によく対応しており、うねりは主に主軸の回転精度に起因するものであることが明らかとなった。鉄系金属及びセラミックスの切削においては工具の摩耗が激しく、摩耗後の形状が仕上面に転写されて表面性状を劣化させる原因となった。油静圧軸受主軸を用いて中速切削を行った場合に、ステンレス鋼では CBN 工具により最大あらさで 0.08  $\mu\text{m}$ 、ジルコニアセラミックスでは単結晶ダイヤモンド工具を用いることにより最大あらさで 0.04  $\mu\text{m}$  の鏡面に近い仕上面が得られ、これらの被削材に対しても適切な

切削条件を選択することにより鏡面切削を行える可能性のあることを示した。

第7章では、本論文の内容をまとめ、総括を行っている。

## 論文審査の結果の要旨

近年、種々の分野における先端的な機械、機器の高機能化、高精度化に伴って、主要部品の超精密加工が極めて重要な課題として認識されてきた。こうした中において、超精密切削加工は、ラッピングをはじめとする研磨加工など他の加工法に比べて極めて高い加工精度を得る可能性があること、および生産性が高いことなどの理由により、最近特に注目をあびている。

本論文は、各種材料の超精密切削加工における切りくず生成と得られた仕上面性状に関して、実験的、解析的な両面から研究を行った成果を集約したもので、その内容は以下のとおりである。

第1章は緒論で、研究の背景を明らかにし、研究目的を明確に設定している。

第2章では、超精密、超微小切削実験に供した超精密切削加工機ならびに試作走査型電子顕微鏡内超微小2次元切削装置の特性を明らかにし、これらの実験装置が本研究の目的に十分な性能を有することを確認している。

第3章では、主として単結晶ダイヤモンド工具を用い、無酸素銅、アルミニウム粗大結晶などの軟質金属、鉄系金属、セラミックスの超微小切削における切りくず生成機構を明らかにしている。特に無酸素銅については10 nm以下の切込みにおいても正常な切りくず生成が行われることを確認している。

第4章では、軟質金属、鉄系金属、セラミックスの超微小切削における切削力の測定と解析を行い、各材料の切削力特性を明らかにするとともに、力学的観点から超微小切削の機構について考察を加えている。また特に、切削量の微小化に伴い比切削抵抗が急増することを明らかにし、検討を行っている。

第5章では、無酸素銅を被削材とした場合の超精密ダイヤモンド切削における切削温度、被削材内部および工具における温度上昇を測定し、工具材質、切削条件などの影響を明らかにするとともに、解析的に求めた被削材内部の温度分布が実験値とよく一致することを確認している。

第6章では、軟質金属、鉄系金属およびセラミックスの超精密切削における仕上面の観察と測定を行い、金属材料の結晶方位、結晶粒界などの微視的因子が仕上面生成機構に及ぼす影響を明らかにするとともに、工作機械の運動精度、工具摩耗などが仕上面のうねり及びあらさに及ぼす影響を明らかにしている。

第7章は結論で、得られた研究成果を総括している。

以上のように本論文は、超精密切削加工の基礎とその技術的応用について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。特に超微小切削における切削の限界を明らかにし、ステンレス鋼やセラミックスの超精密切削加工の技術的可能性を示したことは、工業技術ならびに工学に寄与するところが大きい。よって本論文提出者奥田孝一は工学博士の学位を得る資格があると認める。