

氏 名	たぐちきょうすけ 田口 恭輔		
本籍（国籍）	青森県		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	工博 第305号		
学位授与年月日	令和元年 9月25日		
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士		
研究科及び専攻	工学研究科 機械・社会環境システム工学専攻		
学位論文 題目	SUS316の超音波振動援用ドリル加工におけるバリ抑制効果		
学位審査委員	主査 教授	水野 雅裕	
	副査 教授	西村 文仁	
	副査 教授	脇 裕之	
	副査 准教授	吉野 泰弘	
	副査 准教授	吉原 信人	

論 文 内 容 の 要 旨

SUS316 は優れた耐食性を有していることから、食品加工設備や医療機器を始めとする様々な分野で広く用いられている。近年、製品の小型化や高精度化に伴い、SUS316 に対する小径穴加工や交差穴加工などのドリル加工の需要が増加している。これらの加工は、一般的にドリル加工によって行われている。その際に問題となるのが穴交差部に生じるバリである。このバリが装置稼働中に脱落することで、装置の動作に悪影響を与えたり、異物として製品に混入して不良品を生み出したりと様々なトラブルを引き起こす可能性がある。そのため、バリの除去は非常に重要なプロセスであり、効率的にバリを除去する方法が求められている。それと同時にバリが生じにくいドリル加工も求められている。その方法として注目されているのが超音波振動援用ドリル加工である。アルミやチタンなどのドリル加工においては超音波振動を援用することによりドリル出口側に生じるバリ（以下、出口バリと呼ぶ）の高さが抑制されることが確認されているが、そのバリ抑制メカニズムを裏付けるための実験や観察は行われていない。本研究では、SUS316 に対して超音波振動援用ドリル加工を行い、SUS316 においてもバリ高さの抑制効果があるかどうかを確認するとともに、ドリル出口側の穴周辺の材料内部の金属結晶構造への影響を調べることで、超音波振動援用によるバリ抑制メカニズムを明らかにすることを目的とする。

目的達成のために実施した内容は次の4点である。

1. はじめに、SUS316 に対して慣用ドリル加工と超音波振動援用ドリル加工を行い、超音波振動援用によってバリ抑制効果が得られるかどうかを調べた。実験では送

り量を変化させてバリ高さ・切りくず・工具刃先の比較を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 超音波振動を援用することにより出口バリの高さが抑制されることを確認した。特に、1 刃当たりの送り量が超音波振動の振幅よりも小さい条件下において、出口バリの高さは慣用加工時の半分以下に抑制された。

(2) 1 刃当たりの送り量が超音波振動の振幅よりも小さい条件下において、切りくずが微細化することを確認した。この条件では工具軌跡が自己交差するので切りくずが微細化すると考えられる。

(3) 1 刃当たりの送り量が超音波振動の振幅よりも小さい条件下において、構成刃先が付きにくくなることを確認した。この条件では工具刃先が断続的に工作物に進入するので、進入時に構成刃先にせん断力が作用し、構成刃先が脱落しやすくなると考えられる。

2. 次に、超音波振動援用ドリル加工におけるバリ抑制メカニズムの解明のため、切削温度の測定を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 実験で設定した全ての送り量において、超音波振動の援用によって材料内部の切削温度が約 100 °C 抑制されることを確認した

(2) バリ高さの抑制効果は送り量の増加に伴って小さくなったのに対して、切削温度は送り量が増加しても一様に抑制された。このことから、切削熱の抑制がバリ高さの主要因である可能性は低いと考えられる

3. 材料内部の金属結晶構造に与える超音波振動の影響を調べるために、ドリル出口側の穴周辺の EBSD 分析および硬さ分布の測定を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) EBSD 分析で得られた IPF-map より、1 刃当たりの送り量が超音波振動の振幅よりも小さい条件下において、ドリル送り方向への結晶粒の変形が非常に少なくなることを確認した。

(2) EBSD 分析で得られた KAM-map より、1 刃当たりの送り量が超音波振動の振幅よりも小さい条件下において、工具半径方向への加工ひずみの広がり抑制されることを確認した。

(3) 硬さ分布の測定により、全ての加工条件において穴壁面から 100 μm の範囲で加工硬化が生じることを確認した。

(4) 1 刃当たりの送り量が超音波振動の振幅よりも小さい条件下において、穴壁面から 70 μm 以下の範囲では送り量が小さくなるほど硬さが上昇する傾向が確認された。これは、送り量が小さくなるほど超音波振動によって穴壁面の単位面積当たりに作用する繰り返しせん断応力の回数が増加するためであると考えられる。

4. 最後に、止まり穴加工を行って穴底部付近の EBSD 分析および硬さ分布の測定を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 超音波振動援用加工の場合、穴底部の結晶粒の微細化領域が大きくなること

を IPF-map により確認した。超音波振動によって穴底部が繰り返し叩かれることで金属結晶の微細化が進んだものと考えられる。

- (2) 超音波振動援用加工の場合、穴底部における送り方向への加工ひずみの広がりが大きくなることを KAM-map により確認した。このことから、穴底部における加工ひずみの広がり、超音波振動の援用によって工具半径方向から送り方向へ変化すると言える。
 - (3) 超音波振動援用加工の場合、穴底部の硬さが上昇することを確認した。慣用加工でも超音波援用加工でも穴底部外周に近いほど硬さが上昇する傾向が見られたが、その傾向は超音波振動援用加工時の方が顕著であった。
 - (4) ドリル先端が出口側の加工表面に近づくほど穴底部外周付近の硬さが大きくなることを確認した。試験材料はロール加工で製造されたものであるため表面に加工硬化層を持っている。そのロール加工による加工硬化層の硬さに超音波振動援用加工による硬さの上昇分が加算されることを確認した。
5. 以上の結果を踏まえて超音波振動援用によるバリ抑制効果の考察を次のように行った。

慣用加工時は工具半径方向への加工ひずみの広がりが大きく、穴底部の加工硬化層が薄くなる。その結果、切り残し部がロールオーバーする際、工具半径方向への塑性変形領域が広くなり、バリ高さが大きくなると思われる。超音波振動援用加工時は工具半径方向への加工ひずみの広がりが小さくなる一方で、穴底部の加工硬化層が厚くなり、ロールオーバーする直前の切り残し部とそれを支える部分との硬さの差が大きくなる。その結果、切り残し部を支える部分に応力が集中し、切り残し部が穴壁面に沿ってせん断されやすくなるのでバリ高さが抑制されると考えられる。また、硬さの上昇によって材料が延びにくくなることもバリ高さの抑制につながると考えられる。

論文審査結果の要旨

本論文は、SUS316 のドリル加工においてドリル出口部に発生するバリ（以下、出口バリと呼ぶ）に対し、超音波振動がどのような影響をもたらすかについて実験的に明らかにしたものである。SUS316 は優れた耐食性を有していることから、食品加工設備や医療機器を始めとする様々な分野で広く用いられている。近年、製品の小型化や高精度化に伴い、SUS316 に対する小径穴加工や交差穴加工などのドリル加工の需要が増加している。その際に問題となっているのが出口バリである。このバリが装置稼働中に脱落することで、装置の動作不良が発生したり、異物として製品に混入して不良品を生み出したりとさまざまなトラブルを引き起こす。そのため、出口バ리를効率よく除去する方法や、出口バリが発生しにくいドリル加工方法が求められている。出口バリが発生しにくいドリル加工方法として注目されているのが超音波振動援用ドリル加工である。アルミやチタンなどのドリル加工においては超音

波振動を援用することにより出口バリの高さが抑制されることが過去の研究で確認されている。しかし、その現象を裏付けるための実験や観察は行われていない。本研究では、SUS316 に対して超音波振動援用ドリル加工を行い、SUS316 においてもバリ高さの抑制効果があるかどうかを確認するとともに、ドリル出口側の穴周辺の材料内部の金属結晶構造を調べることで、超音波振動援用によるバリ抑制メカニズムを明らかにしている。

本論文は6章から構成されている。第1章は緒言であり、本研究の背景について述べている。第2章は超音波振動がドリル加工に与える外観的影響（出口バリの高さ、切りくず形状、ドリル刃先の状態）について、慣用ドリル加工と比較して述べている。第3章は超音波振動が切削熱に与える影響について、熱電対を用いた温度測定実験を行って慣用ドリル加工と比較している。第4章は、超音波振動が加工表面層に与える影響について、加工表面層のEBSD分析と硬さ分布測定を行って調べている。第5章は超音波振動によって出口バリ高さが抑制されるメカニズムについて、本研究で得られた実験結果に基づいて議論している。第6章は結言であり、本研究で得られた知見をまとめている。

本論文において工学的価値が認められる点は、以下の点である。

- (1) 1 刃当たりのドリル送り量が超音波振動の振幅よりも小さい条件下では、穴壁面での結晶粒の変形が非常に小さくなることをEBSD分析により明らかにしたこと。
- (2) 1 刃当たりのドリル送り量が超音波振動の振幅よりも小さい条件下では、ドリル半径方向への加工ひずみの広がりが増加することをEBSD分析により明らかにしたこと。
- (3) 超音波振動援用によって、加工穴底部における結晶粒の微細化領域が大きくなることをEBSD分析により明らかにしたこと。
- (4) 超音波振動援用加工の場合、加工穴底部におけるドリル送り方向への加工ひずみの広がりが増加することをEBSD分析により明らかにしたこと。
- (5) 超音波振動援用加工の場合、穴底部の、特に外周付近での硬さが上昇することを明らかにしたこと。
- (6) 以上の実験結果に基づき、超音波振動援用によるバリ抑制効果を以下のように考察したこと。

慣用加工の場合はドリル半径方向への加工ひずみの広がりが増加し、穴底部の加工硬化層が薄くなる。その結果、切り残し部がロールオーバーする際、ドリル半径方向への塑性変形領域が広くなり、バリ高さが大きくなると考えられる。超音波振動援用加工の場合はドリル半径方向への加工ひずみの広がりが増加する一方で穴底部の加工硬化層が厚くなり、ロールオーバーする直前の切り残し部とそれを支える部分との硬さの差が大きくなる。その結果、切り残し部を支える部分に応力が集中し、切り残し部が穴壁面に沿ってせん断されやすくなるのでバリ高さが抑制されると考えられる。また、硬さの上昇によって材

料が延びにくくなることもバリ高さの抑制につながると考えられる。

また、本論文は超音波振動援用ドリル加工を用いることで SUS316 のドリル加工においても出口バリ高さを低減させることができることを示しており、今後、食品加工設備や医療機器をはじめとする様々な分野の発展に寄与することが期待される。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。

原著論文名（1編を記載）

SUS316 の超音波振動援用ドリル加工におけるバリ抑制効果，田口恭輔，吉原信人，原圭祐，水野雅裕，砥粒加工学会誌，2019年7月27日採録決定