



# 金属切削加工におけるバリ生成機構に関する研究

橋村, 雅之

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2000-03-31

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲2094

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002094>

※ 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）	橋 村 雅 之 <small>はし むら まさ ゆき</small>	（北海道）
博士の専攻分野の名称	博士（工学）	
学位記番号	博い第173号	
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当	
学位授与の日付	平成12年3月31日	
学位論文題目	金属切削加工におけるばり生成機構に関する研究	

審査委員	主査 教授 上 田 完 次	
	教授 中 井 善 一	
	教授 三 谷 勲	助教授 柴 坂 敏 郎

### 論 文 内 容 の 要 旨

近年、切削工具寿命の延長や生産ラインのNC制御化などによって切削工程の自動化による高能率化および省力化が進められている。しかしばりや切りくず処理のような多様な加工品が有するそれぞれ固有の問題に対しては、いわゆる一般解がなく、加工品質と省力化の点で依然大きな障害となっている。特にばりの問題は切りくず処理問題に比べて技術的な対策が検討されていなかったため、その重要度が増してきた。

一般にばりはかえりなどとも表現され、切削加工や研削加工などの機械加工において、工具が工作物から離脱する際に工作物の切り残し部が刃先の応力によって塑性変形することにより加工部のエッジ近傍に発生する小さな突起物と定義される。脆い材料を加工した場合、端部に欠けを生じるが、この欠けも負のばりと呼ばれる。ばりと欠けは加工端部の小さな突起物および材料欠落部であるため、生産ラインでその工程設計、製造能率、製品品質などに大きな影響を及ぼす。

たとえば生産ラインにおいて多くの精密部品、他部品との高精度の組み込みを要求される製品および作業者の切創防止対策を必要とする場合にばり取り工程の追加が必要で、まさに工程設計へ影響する。またばりが自動化ラインの位置決め誤差を生じる原因となり、誤作動による生産ライン停止、位置決め不良による製品精度の低下など製造能率および製品品質の低下の原因にもなる。当然、一切削工程においてもばりの突起、欠けの欠損が直接的な製品精度の低下や取り扱い作業者の切創の原因となるので精度および安全性の問題も引き起こす。このようにばり問題は単なる一工程の切削加工精度の問題にとどまらず、生産ライン全体の課題であり、生産ラインの自動化および省力化を阻む大きな障害となり、製造コスト増大の一因となる。

これらの諸問題を解決するためにばりの抑制は重要である。そのためにはばりの生成機構を明確にするとともに、その支配因子を抽出し、それを制御することが具体的な対策となる。したがってばりの生成機構の明確化が技術的な課題である。

これまでもばりに関する研究は為されてきた。しかしその多くは断片的であり、切削におけるばりの複雑な生成機構をうまく説明した研究は少ない。実用切削において多種多様なばりの抑制を目指す

にはその生成機構を系統的に解析し、その抑制のための指標を提示することが重要である。

そこで本研究においては金属切削におけるばり生成機構の解明およびそのばり寸法への影響を系統的に解析・理解し、切削におけるばり抑制技術を確立することを目的として、実験と有限要素法によってばり生成機構を解析した。切削実験では走査型電子顕微鏡内での切削によって被削材変形過程を直接観察することで二次元切削及び傾斜切削における被削材の変形挙動を直接観察した。さらにそれらの変形挙動を剛塑性有限要素法によって解析した。さらに実用切削におけるばり生成機構を解析するために正面フライス切削実験を行ない、生じたばりを詳細に観察するとともに、工具形状と被削材端部の形状のばり寸法に及ぼす影響を定量的に解析した。その一部に関しては剛塑性有限要素法にて解析した。それらを総合的に検討することで、代表的な実用切削である正面フライス切削について、ばり抑制のための指針を示した。

すなわち第1章においては本研究の背景となるばり問題の重要性を説明した。これまでの研究成果を整理するとともに、ばりに関する研究の問題点を示し、本研究の目的を明らかにした。

第2章ではばり生成機構を解析するために必要となる実験／解析手法について述べた。剛塑性有限要素法についてはその基礎理論と計算手法の定式化について述べた。さらに実験に関して走査型電子顕微鏡内での切削実験と正面フライス切削実験で用いた装置の概要を説明した。

第3章では二次元切削におけるばり生成機構を解析した。特に最終ばり形状の異なる2種の材料、銅 Cu およびアルミニウム Al-2024O に関して SEM 内切削と剛塑性有限要素法による解析を行った。切削実験では Cu は被削材端部が突出して被削材端部に残留するばかりを生じたが、Al では被削材端部が欠損する欠けを生じ、両者のばりの外見は大きく違った。しかしばりと欠けの生成初期段階は類似で、①連続切削（ばり生成初期状態）、②ばり発生直前、③ばり発生、④転回、⑤負のせん断域生成、⑥クラック発生、⑦クラック伝播、⑧ばりまたは欠けの生成終了の8段階からなる。その①から⑤までの初期段階では定常切削における切り屑生成が被削材端部の自由面の影響を受けて被削材端部大変形域の生成、切削の進行に伴う被削材端部の変形域と切削刃先周りの変形域の合体による負のせん断域の形成、被削材端部がせん断と回転によって変形して行く過程であたかも回転中心の如くみえる転回点の生成が認められた。また⑥から⑧では被削材端面の生成後期の切り屑分離経路に両者の相違が見られ、Cu のように延性に富む材料では切削線に近い主せん断域で切り屑が分離されるが、Al のように延性が不足する材料では負のせん断域に沿って切り屑が分離された。両者ともそのばり厚さは転回点と切削線の距離を良く対応し、ばりと欠けと最終形状が異なってもその厚さは負のせん断域の生成位置で推定できることを示した。切削諸元との関係では切込み量が大いほど、工具刃先丸みが大いほど転回点が切削線から離れた位置に生成するので、ばり厚さが大きくなった。

第4章では傾斜切削におけるばり生成機構を解析した。傾斜角を増すことで、工具の進行方向に生じる出口ばりが小さく、工具の側方に生じる側面ばりが大きくなった。有限要素法解析では傾斜切削において出口面側のひずみが小さくなること、側面側の変形域が大きくなることなど、ばり寸法に対応した解析結果を得た。また同じ出口ばり上でも傾斜切削においては刃先の先行側は小さくなり、追従側に最終回転点が生成するために追従側のばりが大きくなった。さらに傾斜切削におけるばり生成機構と二次元切削のそれとの相違点を明確化した。

第5章では実用切削に近い正面フライス実験をおこない、多種多様なばりを生成させ、詳細に観察した。これまで外観イメージだけで整理されていたフライス切削のばりを破面観察などによって生成機構を推定し、それに基づいて極力客観的にばりを分類した。対象は工具の進行方向に生じる出口面のばりだけでなく、工具が接触しはじめる入口面などに生じるばりも含んで解析した。形状はばりの

平面形状と断面形状に分けて観察し、平面形状では工具送り量との関係に注目し、断面形状ではばりに残留した破面に注目してその生成過程を推定し、最終形状と生成過程の関係を明確化した。その結果、最終形状では被削材端部および切りくずの分離挙動がばり最終形状に大きな影響を及ぼすことを示した。また異なる位置のばりが相互に関連を有することを示した。

第6章では正面フライスのばり寸法に及ぼす縦すくい角、横すくい角および被削材端部の平面出口角の影響を定量的に評価した。すなわち縦すくい角が大きい方が出口ばりが小さくなるほど、定量的な実験結果を示した。またその一部については生成過程を剛塑性有限要素法によって解析し、ばり寸法に及ぼす工具および被削材の幾何形状の影響を明確化した。

さらに本章ではそれらの検討結果に加え、第3章から第5章で得られた結果を基に正面フライス切削におけるばり寸法抑制手法を加えて検討し、①切込み量または送り量を小さくする、②工具刃先丸みを小さくする、③工具すくい面角を大きくする、④被削材端部の出口角を小さくする、⑤被削材材質の延性・脆性を最適化して欠けを避ける場合には延性を大きくし、ばりをさける場合には脆性を大きくする、などの指針を示した。また実用切削を想定し、工具通過あたりの切取り面積を一定にした場合のばり抑制手法を検討し、切り屑流出角と工具離脱順位を指標として最終製品端部側の変形領域を小さくし、変形形態をせん断型となるように切削条件および工具形状を選択すればよいことを示した。その指標として切り屑流出角と工具離脱順位が有効であることを示した。

このように二次元切削、傾斜切削から実用切削である正面フライス切削に関して実験と有限要素法によって解析することでばり生成時の基本的な生成機構に及ぼす諸因子の影響を明確にするとともに、ばり寸法と諸因子の関係を定量的に評価した。これによって単純な切削における基本的なばり生成機構と正面フライス切削におけるばり生成機構を関係づけ、それに基づく正面フライス切削のばり抑制手法を提示するとともに、ばり問題への対応策導出のための指標を示した。

## 論文審査の結果の要旨

金属切削時に生じるばりは製造ラインの自動化、高能率化および製品品質の点でさまざまな悪影響を及ぼす。そのため、ばりの抑制技術を提示することを目的として、基本的な二次元切削から実用的な正面フライス切削までのばり生成機構を解明した。またそれらを体系化して適用範囲の広いばり抑制指針を導出した。

第1章では本研究の背景とばり問題の重要性を説明した。これまでの散発的な研究成果を整理してばりに関する研究の問題点を示し、本研究の目的を明らかにした。

第2章ではばり生成機構の解析に必要な実験／解析手法について述べた。そして剛塑性有限要素法による計算手法、走査型電子顕微鏡内の切削実験および正面フライス切削実験で用いた装置の概要を説明した。

第3章では機械的性質の異なる2種の材料、CuおよびAl-2024Oに関して二次元切削のばり生成機構をSEM内切削と剛塑性有限要素法によって解析した。Cuは被削材端部が突出して被削材端部に残留するばりを生じ、Alでは被削材端部が欠損する欠けを生じて両者のばりの外見は大きく違った。しかしばりと欠けの生成初期段階は類似しており、①連続切削（ばり生成初期状態）、②ばり発生直前、③ばり発生、④転回、⑤負のせん断域生成、⑥クラック発生、⑦クラック伝播、⑧ばりまたは欠けの生成終了の8段階からなる。その①～⑤までの初期段階ではあたかも回転中心の如くみえる転回点の生成が認められた⑥～⑧では被削材端面の生成後期の切り屑分離経路にCuとAlの相違が見られ、

延性に富む Cu は切削線に近い主せん断域で切り屑が分離され、比較的脆い Al は負のせん断域に沿って切り屑が分離された。両者はばりと欠けと最終形状が異なるがその厚さは負のせん断域の生成位置、すなわち転回点の位置に対応した。そして切込み量が大きいほど、工具刃先丸みが大きいほど転回点が切削線から離れて生成し、ばり厚さが大きくなった。

第4章では傾斜切削におけるばり生成機構を解析した。傾斜角を増すと工具の進行方向に生じる出口ばりが小さく、工具の側方に生じる側面ばかりが大きくなった。有限要素法解析では傾斜切削により出口面側のひずみが小さくなり、側面側の変形域が大きくなることなど、ばり寸法に対応した解析結果を得た。また同じ出口ばり上でも傾斜切削の刃先の先行側は小さくなり、追従側は最終回転点が生成するので、ばりが大きくなった。このように二次元切削と傾斜切削のばり生成機構の相違点を明確化し、フライス切削のばり生成機構の解析における基本的検討事項を明確にした。

第5章では正面フライス実験で多様なばりを生成させ、詳細に観察した。これまで外観のみで整理されていたフライス切削のばりを破面観察などから生成機構を推定し、それに基づいて客観的にばりを分類した。対象は工具の進行方向に生じる出口面のばりだけでなく、他の位置に生じるばりも含んで解析した。その結果、最終形状では被削材端部と切り屑の分離挙動がばり最終形状に大きな影響を及ぼすこと、異なる位置のばりが相互に関連しあうことを示した。

第6章では正面フライスのばり寸法に及ぼす工具縦／横のすくい角と被削材端部の平面出口角の影響を定量的に評価した。また一部については生成過程を剛塑性有限要素法によって解析し、ばり寸法に及ぼす工具および被削材の幾何形状の影響を明確化した。さらに本章では第3章から第5章で得られた結果を基に正面フライス切削におけるばり寸法抑制手法を検討し、①切込み量または送り量を小さくする、②工具刃先丸みを小さくする、③工具すくい面角を大きくする、④被削材端部の出口角を小さくする、⑤被削材材質の延性・脆性を最適化する。すなわち欠けを避ける場合には延性を大きくし、ばりをさける場合には脆性を大きくする、などの指針を示した。また実用切削を想定し、工具通過あたりの切取り面積を一定にした場合のばり抑制手法を検討し、切り屑流出角と工具離脱順位を指標として最終製品端部側の変形領域を小さくし、変形形態をせん断型となるように切削条件および工具形状を選択すればよいことを示した。また実用上のばり問題には精度とコストを考慮した最適製造工程設計が重要なことを論じた。

本研究はばりの生成機構を明らかにして、実用切削にも有効なばり抑制指針を提示しており、学術上価値ある研究成果と判断できる。

このように、本研究は金属切削におけるばりについて、その生成機構と抑制技術について研究したものであり、金属切削で生じるばり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。よって学位申請者橋村雅之は博士（工学）の学位を得る資格があると認める。