

報告番号	甲 第 13162 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 再生型びびり振動安定性を向上する工具形状に関する研究
(Study on tool geometry to improve stability against regenerative chatter vibration)

氏 名 伊藤 雅敏

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、高能率な切削と滑らかな表面粗さを両立し、びびり振動に対しても高い安定性を実現する新しい工具切れ刃形状を提案した。従来から滑らかな表面粗さのために切れ刃には大きなノーズ R が採用されているが、これは再生幅が大きく、再生びびり振動を引き起こす傾向がある。提案する切れ刃形状は再生びびり振動に対する安定性を高めるために、R 部の幅は粗さを形成する部分のみに留め、切れ刃の先端は振動方向と平行に切断することで再生幅を小さくした。安定性を評価するために再生幅を考慮した分析モデルを構築し、安定限界とゲインマージンにより従来工具含めた各工具の安定性を比較した。提案する切れ刃形状を旋削とミリングに適用して解析的及び実験的に検証し、両加工における有効性を証明した。

第1章では、本論文の「緒論」とし、研究の背景と研究の目的を述べた。工作機械の進化と現状とともに、びびり振動について説明した。工作機械は加工精度と能率が重要であることを述べ、切削条件と理論的な表面粗さについて説明した。これらにより研究の対象をびびり振動に対する刃先の幾何形状の影響として、『再生型びびり振動安定性を向上する工具形状』と題し、刃先の R 部について着目した本研究の目的について説明した。

第2章では、「高能率で滑らかな表面粗さの高安定性旋削を実現するインサートの新しい幾何学的設計」と題し、旋削において、高能率と滑らかな表面粗さを実現しながら高い安定性を持つ、旋削用インサートの新しい幾何学的設計を提示した。

びびり振動は、切削中にしばしば一般的に発生し、表面の品質を悪化させたり、工具寿命を極端に短くしたり、さまざまなトラブルを引き起こす。したがって、振動方向の切削幅は、臨界幅以下で制限する必要がある。たとえばボーリングバーは深い内部の構造を作り上げるために使用されるので、長く突き出すツーリングになりがちで、コンプライアンスは大きくなる傾向がある。一方、このボーリングなどの旋削加工では、使用するインサートにはノーズ部分が存在し、その R の大きさによってびびりの安定性と表面粗さが決定される。つまり、ノーズ R が大きいほど再生幅が大きくなり、ボーリングバーが振動しやすい方向に再生型びびり振動が発生する原因となる。ノーズ R の大きさを制限すると、理論的な表面粗さが低下するため、送り速度も小さく制限する必要がある。その結果、びびり振動を抑えるためには能率が犠牲になるので、高能率で滑らかな表面粗さと、高い安定性を両立できるインサートは、既存の旋削インサートでは実現できていないと言える。本章ではまず、提案した新しい設計の旋削インサート、つまり「びびりレス旋削インサート」の形状についての概念を紹介した。刃先のノーズ部分に採用した大きな R により表面を仕上げるので、大きな送り速度を用いても小さな表面粗さを実現できる。前述のように、再生幅の大きさが再生型びびり振動の安定性を決定することから、刃先先端の送り方向側のノーズ部分を、鋭く振動方向と平行に切り上げることで、小さな再生幅を実現した。ノーズ部分の底からの切り上がりのポイントまでの幅は、送り速度の値によって設計され、この幅と送り速度の関係により、再生幅が現れたり、切削面が劣化したりすることを示した。実験用のインサートは加工中の何かしらのエラーに備えて、最適な設計からわずかにマージンを持たせた。切削深さ方向の動的な力成分により再生型びびり振動が発生することから、この成分が小さいほど安定性は高くなるが、提案したインサートの切込み方向の力成分は従来のインサートよりも小さくなるので、びびり振動に対する安定性の向上を実現できる。加えて、切削深さ方向の静的な力成分についても、提案したインサートの方が小さくなるので、加工誤差もより小さくなる。これらの特性により、高能率と滑らかな表面粗さを実現しながら、びびり振動に対して高い安定性を持つ旋削が可能となることを示した。次に、再生型びびり振動に対する安定性の予測モデルについて説明した。従来および提案したインサートによる切削の安定性を予測するための解析モデルを構築し、安定性を評価するためにゲインマージンと呼ばれるシステム余裕を示すインデックスを導入した。最後に、提案したコンセプトを分析と実験を通して検証した。従来の旋削インサートは市販品を採用し、びびりレス旋削インサートはそれに追加工を施した。動力計を用いた切削実験により、それぞれのインサートにおける比切削抵抗値を求め、切削力が従来のインサートの数分の一になることを確認した。びびり振動の実験のためにバイトホルダを切断し、その間を板ばねプレートでつなぐことで、通常よりもびびり振動に弱い工具を制作し、ハンマリングによりコンプライアンスを測定した。切削深さと送り速度を変化させながらびびり振動を測定し、分析結果と実験結果の両方において提案したインサートの有効性を証明した。実験条件の最大能率時において、提案したインサートを使えば、従来に比べ、びびり

り振動の要素の変位振幅を 1/19 に抑えることができた。したがって、提案したインサート形状を利用することにより、高能率で滑らかな切削面の高安定性旋削を確認できた。

第3章では、「新しい刃先形状を用いた高能率で滑らかな切削面を持つ高安定性フェイスミリング」と題し、新しい正面フライスカッタの形状を提案した。柔軟な薄板に対し、高能率、滑らかな切削面、および高安定性を実現する新しい技術を紹介する。ラジラスエンドミル（ブルノーズエンドミル）は、高能率で滑らかな平面を得る加工に広く利用されているが、一般に加工安定性が低く、つまりびびり振動が頻繁に発生する。びびり振動の安定性は、構造物の剛性と切削条件に依存することはよく知られているが、カッタの形状に強く依存することはあまり知られていない。本研究では、ラジラスエンドミルを用いたフライス加工で得られる、高い能率と表面の滑らかさを犠牲にすることなく、特に再生型びびり振動の安定性を改善するために、新しい正面フライスカッタの形状を提案した。本章ではまず、既存のエンドミルの課題について説明した。スクエアエンドミルは、先端に非常に鋭いコーナーエッジを持つが、この幾何形状により理論面粗さが大きくなり、特に尖度または尖鋭度の上昇を引き起こす。尖度が大きいと製品の疲労強度が低くなることが問題となる。一方、再生幅は理論的には 0 となり、再生型びびり振動は成長しないこととなる。結果として、スクエアエンドミルはびびりのない加工を提供できるが、表面粗さは非常に悪くなる。ラジラスエンドミルはスクエアエンドミルと比較して大きな R を持っているため、表面粗さは比較的小さくなる。ただし、コーナーエッジが鈍いため、再生幅は非常に大きくなり、以前の切れ刃による振動のほとんどが再生することでびびり振動を引き起こす傾向がある。結果として、ラジラスエンドミルは滑らかな表面粗さを提供できるが、プロセスが動的に不安定になる。これらのエンドミルはそれぞれの利点欠点を持つことから、一概にどちらが優れていると言えるものではなく、生産現場においても工具選定におけるしばしば重要な課題となっており、現状では、滑らかな表面と高い安定性を同時に実現できる工具は存在しない。対して、提案した「びびりレスラジラスエンドミル」は第2章のコンセプトを踏襲した。滑らかな表面仕上げには大きなノーズ R が利用され、そのノーズ部分は再生幅が小さくなるように、滑らかさに必要な最小サイズに制限した。したがって、提案した刃先形状には、ラジラスエンドミルとスクエアエンドミルの利点が反映された。さらに、スクエアエンドミルのもう 1 つの特徴である、薄い部品の振動方向の動的な力を小さくすることも、提案されている刃先形状は実現できることを示した。次に、安定性を分析するために、半径方向の平均切込み角度を有効切削角度と定め、それを基準とした安定限界線図を求める手法を用いた。被削材は柔軟であるが、振動しやすい方向はエンドミル軸方向のみであり、エンドミルは軸方向に剛性があると仮定した。一連の分析と実験では、スクエアエンドミルは市販品を採用し、ラジラスエンドミルとびびりレスラジラスエンドミルについては比較を容易にするために特別に設計した。それぞれのエンドミルに対して比切削抵抗値を測定した。びびりレスラジラスエンドミルによる切削中の強制振動成分は、ラジラスエンドミルのそれよりも小さく抑制できた。安定性の限界を見つけ

るため、被削材を薄い治具プレートに設置して軸方向に振動しやすい構造とし、ハンマリ
ングによるコンプライアンスの測定を行った。提案したびびりレスラジラスエンドミルの
安定性は、従来のラジラスエンドミルよりも 2.68 倍の絶対安定性を持つことを示し、一方
で実験時の条件下では、提案したエンドミルを用いれば、ラジラスエンドミルに比べ、2 倍
の能率で切削できることが分かった。表面粗さは、スクエアエンドミルの 1/4 となり、ラジ
ラスエンドミルとほぼ等しいことが確認できた。切削面のびびりマークについても考察を
行い、測定したびびり周波数とよく一致していることを確認した。刃先形状を特別に設計
したびびりレスラジラスエンドミルは、実験に用いた 3 種のエンドミルの中で唯一、高能
率、滑らかな表面、高安定性を一度に実現できるエンドミルであると結論付け、提案され
た刃先形状により、高能率で滑らかな表面の高安定性加工を実現できることが明らかにな
った。

第 4 章では、「結論」と題し、本研究で得られた成果および結論の総括を行った。