

報告番号	甲 第 13632 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 切削加工におけるびびり振動の安定性を  
向上する工具技術の開発  
(Development of tool technology to  
improve chatter stability in cutting)

氏 名 高橋 亘

## 論 文 内 容 の 要 旨

切削加工では、高能率、高精度、低コストの実現が常に求められている。そのため、工具寿命の低下や加工面粗さの悪化などを引き起こすびびり振動は生産技術者が直面する大きな問題として挙げられる。本研究では、びびり振動の抑制を実現する実用的な新技術の開発を目的とし、旋削加工で発生するびびり振動の新しい抑制手法を検討した。一つ目に、びびり振動の問題が発生しやすいボーリング加工に着目し、構造異方性を利用して実質的な動剛性を無限大化する防振ボーリング工具の検討を行った。実際の工具設計において生じる異方性伝達特性の誤差がびびり安定性に与える影響を解析的に分析し、検証実験を通じてその実用性を評価した。二つ目に、プロセスダンピング効果を発現する逃げ面テクスチャ工具の検討を行った。実用的な観点から、プロセスダンピング効果に加えて耐凝着性や耐欠損性に優れるテクスチャ形状の検討と検証実験を実施した。最後に、2つの防振技術を同時に採用して切削試験を実施し、その効果を検証した。本章では、本研究によって得られた結果を以下にまとめる。

第1章では、本研究で対象とするびびり振動のメカニズムについて説明したのち、ボーリング加工を対象として、市販技術および先行研究について調査し、その結果を解説した。市販のボーリング工具で利用されている防振技術においては、動吸振器の利用、工具素材の改良、工具形状の工夫の順番で防振効果が高い傾向があり、突き出し長さ直径比 (L/D) で10を超える技術も存在することを確認した。さらに、先行研究を調査し、防振ダンパーをはじめ、様々な防振技術が提案されていることを確認した。先行研究の中でも、構造の

異方性を利用する防振ボーリング工具技術とプロセスダンピングを効果的に発現する逃げ面テクスチャ技術は、製造コストの増加を伴わずに防振効果を発現する新技術として期待されることを確認した。

第 2 章では、先行研究で提案されている異方性構造をもつ防振ボーリング工具技術について、工具設計の基本的な概念と、異方性伝達特性の設計誤差が系の安定化性能に及ぼす影響について述べたのち、設計した工具モデルを対象にその安定性向上効果を解析的に検証した。提案手法では、切削力変動によって生じる切込み方向の振動がゼロとなるように伝達特性を設計する。一般に、ボーリング工具は形状が細長く突き出すため、径方向（2 自由度）の剛性が低下する。提案手法では径方向の振動モードにおいて、各軸の固有振動数が一致し、コンプライアンス比が 1 より大きくなる異方性振動系を設計する。さらにプロセス座標系（xy 座標系）に対して工具形状で特徴づけられた座標系（pq 座標系）に回転角を与えることで所望の異方性伝達特性を実現することができる。解析の結果、この回転角を 148 deg とすることで、切りくず流出角の変化に対してロバストに動剛性を向上することができる特徴を見出した。さらに、理想の動剛性を実現するには、被削材と工具の組合せによって変化する分力比および切りくず流出角に応じて、コンプライアンス比を適切に設計する必要があることを明らかにした。加えて、設定した座標系における周波数伝達関数の対角成分の相似性は極めて重要であることを確認した。次に、FEM 解析を活用した工具設計法を提案し、 $L/D=4$  と  $L/D=10$  の工具設計に関する事例を通じて予想される特性を分析した。提案する異方性ボーリング工具では、切り欠きとホーン形状を与えることで所望のコンプライアンス比を実現する。分析の結果、提案手法では加工プロセスや条件に応じて伝達特性を適切に設計することで、安定性を大幅に向上する効果が得られる可能性があることを確認した。さらに、提案手法は切込み量の変化に対するロバスト性が高く、荒加工から仕上げ加工まで幅広い条件で利用できる可能性があることを明らかにした。

第 3 章では、第 2 章で設計した異方性伝達特性をもつ防振ボーリング工具を実際に試作し、動特性評価実験および切削試験を通じてその安定化性能の検証と実用面における課題を分析した。試作した  $L/D=4$  の提案工具に対し、インパルス応答試験を実施して周波数伝達関数を分析した結果、概ね FEM 解析通りの振動特性が得られるとともに、荒加工から仕上げ加工まで汎用工具と比較して優れた安定性向上効果が得られることを確認した。また、外径の旋削実験を実施したところ、汎用工具と比較して安定加工が可能な切込み量が約 17 倍向上する効果を確認した。また、試作した  $L/D=10$  の提案工具の周波数伝達関数を分析した結果、 $L/D=4$  と同様に荒加工から仕上げ加工に至るまで安定性を向上させる効果が確認された。一方で、びびり振動に対して安定切削を実現できる効果までは見込めないことが明らかとなった。外径の旋削実験においても、 $L/D=10$  の提案工具では汎用工具と比較してやや安定化する効果を確認したが、びびり振動の回避までは至らなかった。更なる解析的

な検討を実施した結果、 $L/D=10$ においてびびり振動を回避する効果を得るには、設定した座標系で伝達特性の相似性をさらに向上するとともに、動コンプライアンスの大幅な低減が必要であることを確認した。

第4章では、逃げ面テクスチャ工具の実用性を向上する形状設計について検討を行った。従来研究によって、逃げ面テクスチャがプロセスダンピングを積極的に発現し、びびり振動の安定性を向上する基礎的な効果は明らかにされていたが、凝着や工具欠損を引き起こす問題があり、逃げ面テクスチャを用いた手法はその実用性が解明されていなかった。そこで、プロセスダンピング効果が得られるだけでなく、逃げ面の凝着や工具の欠損の回避が見込まれるテクスチャの形状と配置について解析的に検証した。新しいテクスチャ形状として、横ライン型、ドット型、縦ライン型を提案した。さらに、振動とプロセスダンピング力の関係をモデル化し、FEM解析を通じて振動振幅と振動波長がプロセスダンピング効果に与える影響を分析した。その結果、横ライン型の場合、工具の刃先からテクスチャまでの距離（テクスチャ距離）に依存して、高いプロセスダンピング効果を発現する振動波長が変化することを明らかにした。ドット型および縦ライン型の場合は、横ライン型と比較して振動波長に対するロバスト性は高いが、その一方で、プロセスダンピング効果が低下する可能性があることを明らかにした。

第5章では、第4章で設計した逃げ面テクスチャ工具を試作し、2種類の旋削試験を実施して、その実用性の評価を行った。まず、設計した逃げ面テクスチャ形状の各種特性（プロセスダンピング効果・切削抵抗・凝着/欠損性）を評価するため、2つの直線切れ刃で構成されるフラット工具に逃げ面テクスチャを与えて、炭素鋼の端面旋削試験を実施した。実験の結果、テクスチャがない通常工具と比較して試作した3種類のテクスチャ工具すべてで振動抑制効果を発現することを確認した。また横ライン型では刃先からのテクスチャ距離を適切に設計することで凝着・欠損を抑制しつつ、十分なプロセスダンピング効果を得ることを確認した。ドット型と縦ライン型では、テクスチャ部に凝着と欠損が生じやすい傾向を確認した。すなわち、ドット型やライン型は振動波長に対するロバスト性に優れる可能性がある反面、凝着性と欠損性に課題がある。次に、実用性の検証を目的として、ノーズRを持つインサート（R工具）の逃げ面にテクスチャを設けた工具で外径旋削実験を行った。その結果、適切なテクスチャ距離に設計された横ライン型テクスチャ工具を用いることで、安定性が向上してびびり振動を抑制することに成功した。実験結果を分析した結果、切削力の増加を伴わずに良好な仕上げ面粗さが得られると同時に、致命的な凝着や欠損は生じないことを確認した。

第6章では、異方性防振ボーリング工具と逃げ面テクスチャ工具を併用する効果について検証を行った。実用性の観点から、 $L/D=8$ のボーリング工具による内径加工を通じて検

証を行ったところ、十分なびびり振動の抑制効果を得ることはできなかった。実験結果を分析し、三つの問題があることを明らかにした。一つ目は、異方性防振ボーリング工具の設定した座標系における周波数伝達特性の相似性が不十分であったことである。二つ目は設計したコンプライアンス比 (1.68) に対して、実際のコンプライアンス比 (3.7) が大きくなりすぎたことである。これらは、実験に使用した工作機械側の剛性の影響を受けたためであると考えられる。三つ目は、主分力と背分力によって工具に静的な変位が生じ、この影響により想定よりも実効テクスチャ高さが大きくなりすぎたことによる。そのため、テクスチャが被削材に干渉せずプロセスダンピング効果が十分に得られなかったと考えられる。これらの結果は、内径加工においては、系の伝達特性や工具のたわみを十分に考慮してホルダや工具を設計しなければならないことを示唆している。

以上のように、異方性防振ボーリング工具と逃げ面テクスチャ工具における総合的な実用性を解析的・実験的に検証した。異方性防振ボーリング工具によるびびり振動の抑制効果は実証できた一方で、 $L/D$  が大きい場合では、設定した座標系における伝達特性の相似性をさらに向上するとともに、動コンプライアンスを大幅に低減させる構造設計が必要となる課題が明らかになった。逃げ面テクスチャ工具においては、ノーズ R 部にテクスチャを設計した工具でもプロセスダンピング効果が得ることに成功した。また、形状設計が極めて重要であることを明らかにした。ここでは、レーザー加工を利用してテクスチャ形状を製作したが、実用化するにあたっては工具の製造方法についてさらなる検討が必要であると考えられる。今後、更なる検討を経て提案手法の課題が解決され、びびり振動の解決手法として生産現場で利用されることに期待したい。