

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13632 号
------	---------------

氏 名 高橋 亘

### 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)

### 論文審査担当者

主査	名古屋大学	准教授	鈴木 教和
委員	名古屋大学	教授	社本 英二
委員	名古屋大学	教授	井上 剛志
委員	名古屋工業大学	教授	糸魚川 文広

## 論文審査の結果の要旨

高橋亘君提出の論文「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」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ている。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ている。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ている。二つ目に、プロセスダンピング効果を発現する逃げ面テスチャ工具の検討を行っている。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スチャ形状の検討と検証実験を実施している。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、その効果を検証している。各章の概要は以下の通りである。

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、市販技術および先行研究について調査し、その結果を解説している。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ている。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ている。

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ている。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付けられた座標系 ( $pq$ 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ている。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ている。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ている。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ている。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ている。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ている。

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ている。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ている。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ている。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する効果を確認している。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ている。

第4章では、逃げ面テ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ている。従来研究によって、逃げ面テ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を持つことが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スチャの形状と配置について解析的に検証している。新しいテスチャ形状として、横ライン型、ドット型、縦ライン型を提案している。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ている。具体的には、横ライン型の場合、工具の刃先からテスチャまでの距離 (テスチャ距離) 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ている。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

## 論文審査の結果の要旨

とを明らかにしている。

第5章では、第4章で設計した逃げ面テ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ている。まず、設計した逃げ面テ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スチャを与えて、炭素鋼の端面旋削実験を実施している。実験の結果、テスチャがない通常工具と比較して試作した3種類のテ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ている。また横ライン型では刃先からのテ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ている。ドット型と縦ライン型では、テスチャ部に凝着と欠損が生じやすい傾向を確認している。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）の逃げ面にテスチャを設けた工具で外径旋削実験を行った結果、適切なテスチャ距離に設計された横ライン型テ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ている。

第6章では、異方性防振ボーリング工具と逃げ面テスチャ工具を併用する効果について検証を行っている。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ている。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スチャ高さが大きくなりすぎたことによる。そのため、テ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。

第7章では、本研究の結論を与えている。

以上のように本論文では、異方性防振ボーリング工具と逃げ面テスチャ工具における総合的な実用性を解析的・実験的に明らかにしている。これらの工具設計理論並びに得られた結果は、提案するびびり抑制技術の実用化を実現するために重要であり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である高橋亘君は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があると判断した。