

主論文の要約

論文題目 角度差の大きい不等リードエンドミルによる高精度・高能率側面加工法の開発

氏名 伊藤 敦

論文内容の要約

本研究は、焼入れされた鋼のような高硬度材の工作物に対して、軸付き砥石を用いる従来の研削仕上げ加工を、スクエアエンドミルを使った切削加工と置き換えることを目的としている。突出しが長く低剛性のエンドミルによる高硬度材の側面仕上げ加工で問題となるのは、加工中に発生するびびり振動である。モードカップリング型と再生型の二つの自励びびり振動が発生する可能性があるが、半径方向低切込み、軸方向高切込み、従来より角度差が大きい不等リードエンドミル “highly-varied end mill” の使用により、本研究で行ったすべての加工条件において、びびり振動の発生がなく高効率な安定した加工を実現できることを示した。この中で、注目すべきことは、不等リードエンドミルのねじれ角度差を大きくすることにより、再生効果相殺線間隔が密となり、軸方向切込みを大きくしてもびびり振動の発生がなく、高能率な加工が実現できることを明らかにしたことである。

また、適用した不等リードエンドミルの再生びびり振動の抑制効果を示す設計指標 a_p/a_{lim} の提案と、そのびびり振動が発生する限界値の導出を行い、その実験検証を行った。その結果、 a_p/a_{lim} の値と加工テスト結果が一致していることを確認し、再生びびり振動を抑制する不等リードエンドミルの設計と加工条件を決める時に使用する設計指標 a_p/a_{lim} が非常に有益であることを明らかにした。特に、本研究で提案する設計指標 a_p/a_{lim} は、従来からの研究ではエンドミル単体による検討から得られる安定ポケットを利用する考え方であったが、工作物の硬度、エンドミルの外径、突出し長さ等の多くの加工条件のパラメータが含まれて評価するものであり、汎用性が高く、実用的である。

以下に、本研究の総括を述べる。

第1章では、「緒論」として、本研究を始めるに至った背景と、研究目的について述べた。

最初に、研究の背景として、日本の製造業の現況を説明し、急速に進んでいる少子高齢化と生産年齢人口の減少という課題があり、その対応として、熟練作業の単純化、海外工場において製造しやすい加工法の開発、金型の短納期化、自動化が考えられることを記述した。それらの課題の具体的な対策として本研究を開始したことと、従来の研削仕上げ加工に代えて、エンドミルによる焼入れ鋼の側面仕上げ加工を実用化することを研究の目的とし、実用化での大きな課題として加工中にびびり振動が発生しやすいということを説明した。そして、本研究に関連するびびり振動の研究、びびり振動の種類、その対策方法についてまとめた。

第2章では、「加工戦略」として、高硬度に熱処理された工作物に対して、びびり振動が発生することなくスクエアエンドミルにより高能率で安定した側面仕上げ加工を実用化する加工戦略の提案を行い、その後、その有用性を実験的に証明した。具体的には、標準エンドミルではほとんどの加工条件においてびびり振動が生じていたのに対して、不等リードエンドミルではびびり振動の発生はほぼなくなり、戦略が正しいことを示した。本研究で提案した加工戦略を下にまとめる。

- ① 半径方向低切込み（モードカップリング型のびびり振動を避け、再生びびり振動のみにする）。
- ② 軸方向高切込み（高能率加工のため）。
- ③ 不等リードエンドミルの適用（再生びびり振動を抑えるため）。

第3章では、最初に、エンドミルによる半径方向低切込みの側面加工の安定限界 a_{lim} は、突切り旋削加工の安定限界切削幅 b_{lim} と類似し、単純化できることを説明し、導出を理論解析により行った。その後、焼入れ鋼の比切削抵抗を突切り切削加工で同定し、主軸に装着したエンドミルのインパルス応答試験を行うことで伝達関数の最大負実部の値と周波数を求めて、焼入れ鋼の安定限界 a_{lim} の定量化を行った。

次に、表題である「角度差が大きい不等リードエンドミルによる高硬度材の切削加工の提案」として、従来の不等リードエンドミルよりも角度差が大きい（ねじれ角度差 5° ）“highly-varied-helix end mill”を提案し、その検証実験を行った結果、広い条件（本実験で設定した条件のすべて）においてびびり振動（工具先端で振幅 $2\ \mu\text{m}$ 以上の振動）が抑制され、焼入れ鋼の高能率仕上げ加工を実現し得ることを明らかにした。

第4章では、「再生効果相殺線図の提案とその実験検証」として、不等リードエンドミルと不等ピッチエンドミルの「再生効果相殺線図」の提案と説明を行った。その後、第3章で行った加工テストの結果との検証を行い、加工テスト結果と再生効果相殺線図はおおよそ一致していたが、加工中に発生するびびり振動周波数がインパルス応答試験で得た最大負実部の周波数よりも高く、安定条件がシフトしていることを確認した。そして、角度差

の大きい不等リードエンドミル “highly-varied-helix end mill” は、再生効果相殺線が密にあることより、広い条件（本実験で設定した条件のすべて）においてびびり振動（工具先端で振幅 2 μm 以上の振動）を抑制し得ることを確認した。このように、提案した「再生効果相殺線図」は、不等リードエンドミルによるびびり振動抑制効果を理解することに役立つことを明らかにした。

次に、隣接する再生効果相殺線の最大間隔である「最大再生効果相殺線間隔 a_p 」の提案とその説明を行った。

第 5 章では、モードカップリング型のびびり振動が発生する半径方向切込みの限界値の理論解析を行い、本研究の加工条件において切削角度範囲が 50° 付近に臨界があり、この切削角度範囲より小さい条件ではモードカップリング型のびびり振動がなくなり、再生びびり振動のみになることを明らかにした。

次に、表題である「再生びびり振動を抑制する不等リードエンドミルの設計方法」として、不等リードエンドミルの再生びびり振動の抑制度合を表す設計指標 a_p/a_{lim} を提案し、再生びびり振動発生限界値 π を理論的に導き出したことを説明した。そして、4 枚刃の標準エンドミル、従来の不等リードエンドミル、提案する不等リードエンドミル “highly-varied-helix end mill” を用い、加工物の硬さとエンドミルの突出し長さを変化させた加工実験を行うことで、その検証を行った。その結果、理論解析と一致していることを確認し、設計指標 a_p/a_{lim} が不等リードエンドミルの設計と加工条件の設定に有用であることを示した。

以上のように、不等リードエンドミルの利用は再生びびり振動の抑制に非常に効果がある。すなわち、再生効果相殺線を密になるように設計することで、軸方向切込みを大きくしてもびびり振動が発生することなく安定した加工することが可能となる。ここで注目すべきことは、不等ピッチエンドミルや通常の小さなねじれ角度差の不等リードエンドミルと異なり、提案する不等リードエンドミル “highly-varied-helix end mill” は、加工中のびびり振動の周波数がずれたり（インパルス応答試験で得た最大負実部の周波数よりも高い周波数にシフト）、他のパラメータ同定も不正確になった場合でも、半径方向低切込みで設定値以下の回転数のすべての加工条件でびびり振動が抑制された安定な加工が可能であることから、ロバスト性が高く実用的であるということを本研究で明らかにしたことである。

また、提案する設計指標 a_p/a_{lim} の値が π 未満であると、びびり振動の抑制効果が期待でき、安定な加工を実現できることを述べた。エンドミル設計に関する従来の研究では、びびり振動に対するエンドミル自体による検討から得られる安定スポットを利用する概念であることより、正確なパラメータで正確に予測することが必要である。この設計指標 a_p/a_{lim} はある一つの限定された加工条件で有効であるのではなく、エンドミルの種類、直径、ねじれ角、伝達関数、工作物の硬さ、比切削抵抗、加工条件等のすべての要素を含ん

で評価される普遍的で汎用性が高い設計指標であることが従来のエンドミルの設計方法と異なっている。また、本概念は、最悪な場合でもびびり振動が発生しない安定な加工が可能ないように設計する概念であることも異なっている。

以上より、提案した設計指標 a_p/a_{lim} を用いて不等リードエンドミルの設計と加工条件の設定を行うことにより、与えられた加工に対して高能率でびびり振動が発生しない安定した高硬度材の側面仕上げ加工が、短期間で効率よく実現することができると考えられる。