

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24760183

研究課題名(和文) ディザーコントロールを用いた低剛性部品加工時に生じるびびり振動抑制に関する研究

研究課題名(英文) Suppression of chatter occurring in end milling operation of low rigidity workpiece using dither control

研究代表者

中野 寛 (NAKANO, YUTAKA)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：70433068

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、低剛性被削材をエンドミル加工するときに生じるびびり振動に対して、被削材を強制加振するディザーコントロールを与えたときの、びびり振動抑制効果を検証する。被削材を平行板ばねで支持された治具に取り付けた低剛性被削材をエンドミル加工し、切削加工中に小型加振器を用いて被削材を工具送り方向に加振したときの被削材の振動を測定し、びびり振動の抑制効果を確認した。低剛性被削材を2自由度集中質量系でモデル化し、時刻歴応答解析を行い、びびり振動抑制効果を得るための加振振動数や加振振幅の条件を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In the present study, the analytical and experimental investigations are performed to study the effect of workpiece excitation on workpiece chatter in end milling operation. The workpiece is supported by the low rigidity jig and is excited by an exciter in the feed direction of tool. First, the equations of motion of the low rigidity workpiece model which is modeled as a lumped mass system with orthogonal degrees of freedom in the feed and normal directions are derived. The excitation frequencies and excitation amplitudes to effectively reduce workpiece chatter are investigated by the direct numerical integration method. Furthermore, the numerical analysis and the experiments reveal that the workpiece chatter vibration is greatly reduced when the excitation frequency is equal to the natural frequency of workpiece in the feed direction.

研究分野：工学

キーワード：自励振動 びびり振動 ディザー エンドミル加工

1. 研究開始当初の背景

エンドミル加工技術の発展によって、薄肉管体やタービン翼等の低剛性被削材などもエンドミル加工が可能となった。しかし、低剛性被削材はびびり振動が生じやすいため、切込み量をできるだけ小さくして加工せざるをえず、加工効率の向上が求められている。低剛性部品加工時の制振に関する研究は今後重要な課題である。

びびり振動の抑制対策として、不等ピッチエンドミルや動吸振器を用いる方法、主軸回転数を変動させて切削する方法等がある。しかし、エンドミル加工時のびびり振動に関する研究では、工具が主振動系となる問題を対象としたものが多く、低剛性被削材のびびり振動抑制を対象とした研究は少ない。低剛性被削材のびびり振動抑制対策の難点は、工具ツールパスに干渉しないように制振装置を取り付けなければならない点や、加工が進むにつれて被削材の剛性が変化し、発生するびびり振動数の変動に応じて動吸振器など制振装置のパラメータも調整する必要がある点である。これまで、バイク用ディスクブレーキの制動時に生じるブレーキ鳴き抑制対策として、鳴き発生中にパッドを強制加振するディザークントロールを適用し、鳴き抑制効果を実験的に明らかにした。具体的には、ブレーキパッドの押付け力を微小変動させることで、振動数の異なる複数のブレーキ鳴きを抑制した。そこで本研究では、被削材の質量や剛性変化による、びびり振動数の変動に対して励振条件を調整することでびびり振動を抑制可能な新たな方法として、切削加工中に被削材の取付治具を強制加振するディザークントロールを適用し、びびり振動抑制効果の有無を検証することを考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、タービン翼や薄肉管体等の低剛性被削材加工時に生じるびびり振動の抑制対策としてディザークントロールを適用し、その抑制効果の検証と抑制メカニズムの解明を試み、抑制効果を最大にする励振条件を明らかにすることである。

3. 研究の方法

上記の研究目的を踏まえて以下の方法により実施した。

<解析モデルの構築>

ディザークントロールの有無によるびびり振動抑制効果を検証するため、図1に示すような解析モデルを構築する。導出される運動方程式は、周期係数を有する遅延微分方程式となる。また、被削材の加振やびびり振動発生後の定常振動を考慮するために切削中の切れ刃の離脱を考慮し、多重再生効果を考慮する。この運動方程式を直接数値積分によって時刻歴応答解析を行ない、励振振動数や励振振幅、主軸回転数などの切削条件の違いによるディザークントロールのびびり振動

抑制効果を検証する。

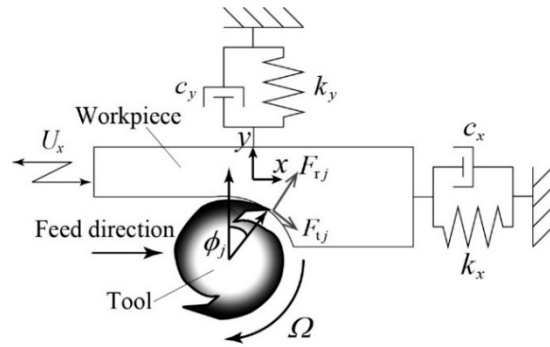


図1 解析モデル

<実験装置>

低剛性被削材を模擬するために、図2に示すような、平行板バネで支持された治具に被削材を固定し、小型動電式加振器を用いてこの治具を加振するシステムを構築した。加振方向は、工具送り方向（加工面）と平行とする。

切削実験では、縦型マシニングセンタを使用し、被削材エンドミル加工時の振動測定は被削材直下に直交する2方向に取り付けた加速度センサを用いる。被削材の材料は、加工による振動痕の転写性や乾式切削を行なうために快削黄銅を用いる。

<ディザークントロールの励振条件とびびり振動抑制効果の検証>

まず、ディザークントロールを加えずに、エンドミルで側面加工し、びびり振動の発生限界線図を実験により導出する。次に、発生するびびり振動数より高い励振振動数を選択し、治具を加振しながら加工を行ない、デ

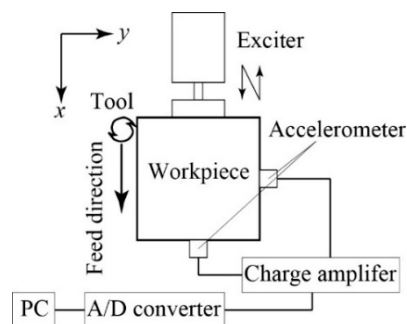


図2. 実験装置

デザイナーコントロールの有無による発生限界となる切込み深さを比較する。さらに、デザイナーコントロールの励振振幅や励振振動数を変えてびびり振動抑制効果への影響を調べる。

数値計算結果と実験結果を比較して計算結果の有効性を検証する。

デザイナーコントロールを加えて加工した被削材の加工面をデジタルマイクロスコープで測定し、加工面への影響を調査する。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下に示す。

(1) びびり振動発生限界線図

直接数値積分による時刻歴応答解析および切削加工試験を行ない、被削材を加振せずにエンドミル加工した際のびびり振動発生限界線図をそれぞれ図3に示す。図3の■は数値計算結果から得られたびびり振動発生限界となる切込み深さを示す。○と×は実験結果であり、それぞれ、びびり振動が発生していないときと発生したときの軸方向切込み深さを示す。びびり振動の発生有無の判定は、軸方向切込み深さ一定で切削したときの被削材の振動変位の時刻歴波形を周波数分析し、被削材の1次の固有振動数成分に近いびびり振動数成分が、切れ刃通過周波数成分より卓越したとき、びびり振動が発生したと判定している。図3から、実験結果と解析結果は概ね一致していることを確認した。

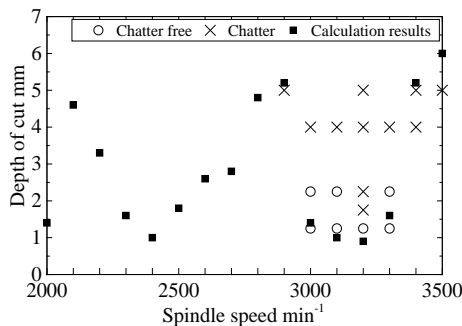


図3. びびり振動発生限界線図

(2) 励振振動数や励振振幅に対するびびり振動抑制効果

びびり振動発生限界線図の極小値となる主軸回転数 3200min^{-1} 、軸方向切込み深さ 1.1mm のびびり振動が発生する切削条件で加振振動数を変化させ、びびり振動抑制効果を比較した結果を図4に示す。図4の横軸は、加振振動数 f_d を切れ刃通過周波数 f_t で無次元化した振動数比、縦軸は加振時と非加振時の被削材の y 方向（加工面に垂直な方向）の時刻歴応答の両振幅比をとり、値が 1.0 より小さいとき抑制効果がある。また、図4のシンボルの違いは加振振幅の大きさの違いであり、△は加振振幅が小さい場合、■は加振振幅が大きい場合である。 x 方向（工具送り方向）および y 方向の被削材の時刻歴波形を周波数分析すると、加振振動数成分 f_d と切れ刃通過周波数の整数倍成分 nf_t との和差成分が現れていることを確認した。切れ刃通過周波数の整数倍成分 nf_t と加振振動数 f_d の和差が x 方向の固有振動数と等しいとき、 x 方向の振幅が大きくなり、 y 方向のびびり振動成分の振幅は小さくなり、びびり振動抑制効果が得られることを明らかにした。

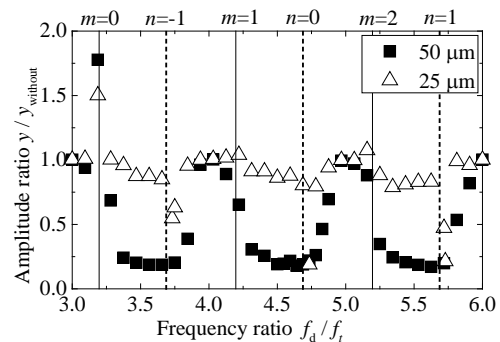


図4. 励振振動数とびびり振動抑制効果

図4と同じ切削条件(主軸回転数 3200min^{-1} 、軸方向切込み深さ 1.1mm)において、加振振動数の違いによるびびり振動抑制効果が得られる加振振幅の比較を行なう。図5の横軸は加振振幅 X_0

を非加振時に再生びり振動が発生したときの再生びり振動成分の y 方向変位振幅 y_c で除した振幅比, 縦軸は加振時の時刻歴応答の両振幅 (y 方向の被削材変位) の最大値を非加振時の両振幅で除した振幅比である. 各プロットは, 加振振動数の違いを表す. 図 5 から, 赤丸で示した加振振動数を工具送り方向と平行な被削材の固有振動数に一致させたとき, 最小の加振振幅で再生びり振動抑制効果が得られ, 加振振幅をびり振動成分の振幅と同程度の大きさにすると, びり振動成分の振幅が大きく低減された. 白抜き赤丸で示した切れ刃通過周波数の 4.5 倍と一致する加振振動数の場合も抑制効果は得られるが, より大きな振幅で加振する必要がある. 一方, 白丸で示した切れ刃通過周波数の整数倍と一致する加振振動数で加振すると, 加振振幅を大きくしても抑制効果は得られない. また, 黒丸で示した加振振動数を加工面に垂直なびり振動の主成分方向と平行な被削材の固有振動数に一致させたとき, 加振振幅を大きくするとびり振動抑制効果はなく, 被削材の振幅は加振振幅とともに増加する. 加工面に垂直な y 方向の振動モードが主成分であるびり振動に対して, 加振振動数と切れ刃通過周波数の整数倍成分の和が x 方向(工具送り方向)の固有振動数に近い加振振動数で被削材を加振する

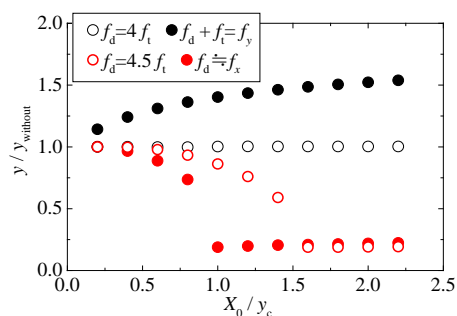


図 5. 励振振幅とびり振動抑制効果

ことで, x 方向の固有振動数成分が卓越し, びり振動成分の振幅を低減できることが明らかになった.

(3) ディザーコントロールを用いたびり振動抑制効果の実験検証

主軸回転数 3200min^{-1} , 軸方向切り込み深さ 4mm の条件でエンドミル加工を行い, 切削加工の途中で x 方向(工具送り方向)に加振したときの被削材の y 方向振動加速度の応答を図 6 に示す. 被削材の加振振幅を大きくするために, 被削材の x 方向の固有振動数 500Hz と等しい振動数で x 方向に加振している. 切削開始 0 秒から 4 秒後までと 7 秒後から 11 秒後の間に被削材を加振し, それ以外の時間帯は加振せずに切削している. 図 6 から, 被削材を強制加振すると, y 方向の振幅は小さくなり, 強制加振を止めると, びり振動が発生し, 再度加振するとびり振動が抑制され, 再現性があることを確認した. 被削材を加工面に平行な送り方向に加振することで, 加工面に垂直な y 方向に発生していたびり振動を抑制できることを確認した.

次に, 切削実験で使用した被削材の加工面を形状測定用レーザーマイクロスコープで測定した. 未切削領域から加工面の高さの平均値を測定した結果, 半径方向切り込み深さの目標値 2.50mm に対して, 加振していないときの加工面高さの平均値は 2.66mm , 加振しているときの加工面高さの平均値は 2.61mm となり, 加振しているときの方が目標値に近い値となった. 非加振時は, びり振動が発生して y 方向の振幅が大きくなっているため, 半径方向切り込み深さの目標値よりも大きく切削されていると考えられる. 被削材を工具送り方向に加振して切削加工する本手法は, びり振動を抑制し, 加工面に垂直な方向の被削材の振動

振幅を抑えることができ、目標とする半径方向切込み深さに近い値で加工できるため、仕上げ加工前の荒加工において有効であると考えられる。

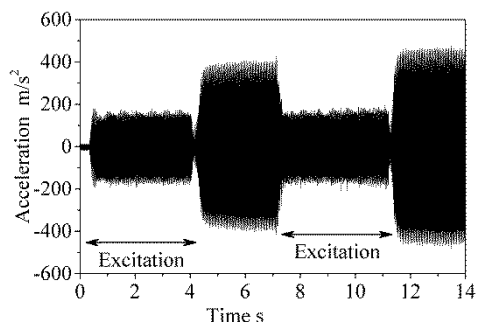


図 6. 加振時と非加振時の加工面に垂直な方向の被削材の振動加速度応答

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 3件)

- ① 中野 寛, 河合 謙吾, 高原 弘樹, 被削材外部励振による低剛性被削材に生じる再生びびり振動抑制効果, Dynamics and Design Conference 2014, 2014年8月26日, 上智大学.
- ② Nakano Yutaka, Takahara Hiroki, Akiyama Yu, Improvement of Workpiece Chatter Stability in Endmilling Process by Workpiece Excitation, The 22nd International Congress on Sound and Vibration, 2015年7月15日, Italy(Florence).
- ③ 中野 寛, 秋山 遊, 高原 弘樹, 強制加振による低剛性被削材に生じる再生びびり振動抑制メカニズム, Dynamics and Design Conference 2015, 2015年8月28日, 弘前大学.

6. 研究組織

(1)研究代表者

中野 寛 (NAKANO YUTAKA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：70433068