接触型減衰付与機構を用いたびり振動抑制技術の研究*

— 工作物に起因するびり振動の抑制技術 —

吉田勇太** 高野昌宏*** 宮川広康*** 廣崎憲一**

A Study on Chatter Vibration Suppression by Bringing a Damping Beam into Contact with Workpiece
- Chatter Vibration Suppression in Cutting Workpiece with Low Stiffness -

Yuta YOSHIDA, Masahiro TAKANO, Hiroyasu MIYAKAWA and Kenichi HIROSAKI

Cutting thin cylindrical workpiece with low stiffness causes chatter vibration. The vibration increases machined surface roughness and cutting tool wear. This study aims to stabilize chatter vibration arising in turning workpiece with low stiffness. For the purpose of stabilizing vibration, the simple attenuation mechanism of bringing a damping beam into contact with workpiece is proposed. By this method, following results are obtained. Workpiece dampening could be improved using a damping beam with spring constant that maximizes strain energy of beam and modal damping ratio of vibration mode. Damping device could cut workpiece without chatter vibration compared with the case of not using it.

Key words: cutting metal, thin cylindrical workpiece, chatter vibration, damping ratio, strain energy

1. 緒 言

切削加工時に発生するびり振動は、工作物の仕上げ面性状の劣化や工具の異常損耗を引き起こし、品質や生産性の低下を招くことが多い¹⁾ため、この振動を抑制する対策が求められている。旋削加工やエンドミル加工におけるびり振動は強制びり振動と自励びり振動に大きく分けられ、それぞれの発生機構には基礎理論が構築されている²⁾。自励びり振動の対策としては、事前に工作機械の振動特性評価を行うことでびり振動が発生しない回転数や切り込み深さなどの安定な加工条件となる領域を求め、その安定領域での加工が行われており、この領域を探索する機能はすでに一部の市販の工作機械に実装されている³⁾。さらに、最近では主軸モータに外乱オブザーバを適用することでセンサレスでびり振動を検知する技術も研究されている⁴⁾。この他には、エンドミルの傾斜角度⁵⁾を変えることによる安定領域の拡大や、旋削加工での送り速度の制御により切削力変動を抑制⁶⁾することでびり振動の発生を抑制する方法も検討されている。一方で、安定な加工領域を探す対策以外では、工作機械本体や工具、工作物の動剛性を向上することで安定領域を広げる対策が有効とされている。工作機械本体の動剛性を高める方法には、ベッドにコンクリート材の採用⁷⁾や、ラムにサーボダンパを適用⁸⁾、チャックに動吸振器を適用⁹⁾、チャックの支持条件の検討¹⁰⁾、チャックと刃物台に鉛材を適用した例¹¹⁾がある。工具の動剛性を高める対策では、コレットチャックに動吸振器を適用した例¹²⁾や、異方性を持つ低剛性エンドミルを用いた例¹³⁾があり、長尺のボーリング工具では材料に高減衰 CFRP を適用¹⁴⁾や、多自由度ダンパを付加した構造¹⁵⁾が提案されている。工作物の動剛性を高める対策では、薄肉インペラや薄肉円筒工

作物、長尺フィンのような剛性の低い工作物に事前に複数の動吸振器を付加して加工を行った例^{16)~18)}や旋削加工において加工中の工作物に動吸振器を有するアームを直接押し当てる手法¹⁹⁾がある。しかし、動吸振器は工作物の振動特性に合わせた精度の高い調整がなされていないと効果がないという短所を持つ。一方、加工現場では、薄肉円筒工作物に生じるびり振動に対して、工作物にゴムを巻く、ジグを当てるなど、経験をもとにした試行錯誤的な抑制手段が依然として用いられている²⁰⁾。この手段は、容易に工作機械へ適用可能ではあるが、その効果については工学的に十分検証がなされていない。

そこで本研究では、薄肉円筒工作物の旋削加工において、工作物に棒材を接触させることにより構造減衰を付加することでびり振動を抑制する減衰付与機構について提案した。棒材の寸法を変えたときの工作物の振動減衰性を高める減衰付与効果について、解析および実験により調べた。さらに、その結果をもとに減衰付与機構を試作し、加工実験によりびり振動抑制効果を評価した。

2. 接触型減衰付与機構

本研究で提案する減衰付与機構は、図 1 のように薄肉円筒工作物に棒状の減衰部材を接触させる構造とした。工作物に生じた振動が棒材に伝わることで、棒材に曲げ変形によるひずみを発生させ、棒材内部で熱エネルギーに変換させることにより工作物の振動を低減する機構となる。

棒材は、図 2 に示すように減衰性能が高い材料である FCD70 を基材に厚み方向と垂直な面の両面に制振材を貼り合わせたものとした。制振材は、厚み 1mm の粘性樹脂と厚み 0.3mm の薄鋼板からなる積水化学工業(株)製のカルムーンシートを使用した。棒材の厚み h は 13.6mm、長さ l は 62mm で一定とし、幅 b のみを 1.8~100mm の範囲で変化させた。厚み h は、11mm の FCD 材と 1.3mm の制振材が 2 枚足し合わせたものとなる。つり下げ打撃加振法 (JIS G 0602-1993²¹⁾) により伝達関数を測定し、半値幅法から棒材の減衰比を算出した結果、5.18%であった。本研究では、異なる幅の棒材を評価するが、その減衰比は、厚みと

* 原稿受付 令和 2 年 7 月 17 日

掲載決定 令和 2 年 9 月 30 日

** 正 会 員 石川県工業試験場 (石川県金沢市鞍月 2-1)

*** 石川県工業試験場 (石川県金沢市鞍月 2-1)

長さを一定としたため、棒材の幅が変化しても、ほぼ変わらないことを実験で確認した。したがって、本論文における棒材の減衰比は 5.18% を用いることにした。また、棒材は、両端支持の条件での 1 次の固有振動数が 4438Hz であり、3000Hz 付近で発生するびり振動で共振しない条件となる。

工作物の寸法は、外径が 104mm、内径が 90mm (肉厚 t 7.0mm)、長さが 225mm であり、材質は SUS304 材である。加工実験には汎用旋盤 (株式会社ノジロ・LEO-80A) を使用した。工作物のチャッキングは、SU420J2 材のボスを両端に焼きばめし、図 3 に示すように一端はボスを把持し、もう一端は回転支持とした。チャックに把持した状態の工作物の伝達関数をインパルスハンマを用いた打撃加振により計測し、半値幅法から工作物の減衰比を算出した結果、0.077% であった。

図 4 に提案した接触型減衰付と機構の概要を示す。棒材の両端をジグを介したボルト締結にて支持し、その中央部をエアシリンダを使用して工作物に一定圧で接触させる機構とした。棒

Fig.1 Structure of Damping Device

Fig.2 Beam

Fig.3 Support conditions of workpiece

Fig.4 Damping device

材の接触は、工作物の外表面とし、かつ工具位置に対して円周方向に 180° 反対の位置とした。エアシリンダは 30N の加圧力が発生するようにエア圧を調整し、かつ旋削により工作物の外径が小さくなくても工作物と棒材が常に接触状態を保つようにストロークの位置を調整した。

3. 薄肉円筒工作物への減衰付と機構の設計と評価

3.1 薄肉円筒工作物のびり振動

薄肉円筒工作物を旋削加工したときに発生するびり振動の周波数とそのときの振動モードを実験および FEM 解析により調べた。工作物を旋削加工したところ肉厚 t が 4.5mm のときにびり振動が発生した。このときの音をマイクロホンで計測し、周波数分析した結果を図 5 (1) に示す。周波数分析の測定条件は、サンプリング周期 0.039msec、周波数分解能 3.125Hz とした。図から 3028Hz に音圧の 1 次のピークが存在しており、この周波数がびり振動の周波数といえる。そこで、この周波数で工作物に存在する固有振動モードを調べるため、汎用有限要素解析ソフトウェア (ANSYS ver.19.2) を使用してモーダル解析を行った。その結果、びり振動の周波数付近の 3034Hz において、工作物の固有振動は、図 6 (1) に示すような円筒に振動の山が 2 つ存在するモードであった。この振動モードを山が 2 つの振動モードと呼ぶ。さらに工作物を旋削加工したところ、肉厚 3.0mm では 2950Hz、肉厚 1.7mm では図 5 (2) に示すように 2325Hz に音圧の 1 次のピークが存在した。そこで、同様にびり振動の周波数付近の固有振動を調べた結果、肉厚 3.0mm では、山が 2 つの振動モードであったが、肉厚 1.7mm では、図 6 (2) に示すような山が 3 つの振動モードであった。図 7 にモーダル解析により求めた工作物の肉厚 t と固有振動数の関係を示す。山が 2 つの振動モードは、工作物の肉厚が変化しても固有振動数の変化が小さい。一方、山が 3 つの振動モードは、工作物の肉厚が小さくなると固有振動数が低下する傾向があり、工作物の肉厚が 1.7mm では山が 2 つの振動モードよりも低くなる。

(1) Thickness of workpiece t 4.5mm

(2) Thickness of workpiece t 1.7mm

Fig.5 Sound pressure spectrum of chatter vibration

Fig.7 Relationship between frequency of natural vibration mode with 2, 3 ridge shapes and thickness of workpiece t

3.2 減衰付与機構の設計

本節では、薄肉円筒工作物に棒材を接触させた場合の減衰付与効果について述べる。

3.2.1 減衰付与機構の設計方法

モードひずみエネルギー法¹⁴⁾によれば複数の部材からなる系全体のモード減衰比は、各部材のモードひずみエネルギーに各部材の減衰比を乗じ、その和から求められる。そこで、工作物への減衰付与効果を工作物と棒材から成る系のモード減衰比 ζ で評価することとし、以下の式より求めた。

$$\zeta = 1/2 \cdot (V_{Work} \cdot \zeta_{Work} + V_{Beam} \cdot \zeta_{Beam}) / (V_{Work} + V_{Beam}) \quad (1)$$

ここで、 V_{Work} , ζ_{Work} , V_{Beam} , ζ_{Beam} は工作物および棒材のモードひずみエネルギーと減衰比である。

3.2.2 減衰付与効果をもつ棒材寸法の検討

表 1 に示すように棒材の幅 b を 1.8~100mm の範囲で変化させることで、両端支持条件での棒材のバネ定数を 3314~184100kN/m の範囲で変え、系全体のモード減衰比に及ぼす影響を調べた。なお、棒材に貼り合わせた制振材の剛性は、棒材の剛性と比較して十分に小さいため無視した。実験で得られた工作物と棒材の減衰比を表 2 に示す。工作物の山が 2 つの振動モードにおける工作物と棒材のモードひずみエネルギーを算出するため FEM による固有値解析を行った。解析モデルは、図 8 に示すように工作物と棒材を 0.5mm×0.5mm の面積で接触部を剛接合させた。解析結果の一例を図 9 に示す。図より工作物の振動の山の動きに合わせて棒材が曲げ変形していることがわかり、この結果から系全体のモード減衰比を求めた。

図 10 に工作物の固有振動数と棒材のバネ定数の関係を示す。棒材のバネ定数が大きくなると、工作物の固有振動数は高くなる傾向にあるが、いずれの場合も棒材の 1 次の固有振動数 4438Hz よりも十分に低いため、棒材には共振が生じていない。固有振動数の変化は、棒材無しの場合と比べても 3%程度と小さく、棒材の接触による剛性変化は小さいと考えられる。

Fig.8 Analysis model

Fig.9 Natural vibration with 2 ridge shapes of workpiece and beam

く、棒材の接触による剛性変化は小さいと考えられる。

図 11 に、工作物の肉厚 t が 4.5, 3.0, 1.7 mm のときの工作物と棒材のモードひずみエネルギー比と棒材のバネ定数の関係を示す。モードひずみエネルギー比は、棒材または工作物のモードひずみエネルギーを系全体のモードひずみエネルギーで除した値を示す。工作物のモードひずみエネルギー比は変化の割合が小さいのに対して、棒材のモードひずみエネルギー比は変化の割合が大きく、かつ棒材のモードひずみエネルギー比を極大とするバネ定数が存在することがわかる。棒材のモードひずみエネルギー比は、工作物の肉厚 t が 4.5mm のときはバネ定数がおおよそ 92050kN/m, 3.0mm のときはおおよそ 22092kN/m, 1.7mm のときはおおよそ 11046kN/m で極大を示した。これより、棒材のモードひずみエネルギーが極大を示すバネ定数は、工作物の肉厚が厚いほど大きくなる。棒材のモードひずみエネルギーは、棒材のばね定数を k 、変位を x とすると $1/2 \cdot kx^2$ で表される。この式から、あるバネ定数で極大となる理由を考える。バネ定数が大きすぎる場合は棒材の変位が小さくなることでモードひずみエネルギーは低下し、一方、バネ定数が小さすぎる場合は棒材の変位は大きくなるが、バネ定数が小さいため、モードひずみエネルギーが低下する。よって、あるバネ定数で棒材のモードひずみエネルギーが極大になると考えられる。また、棒材のモードひずみエネルギーの極大値の大きさは、工作物の肉厚が厚いほど大きくなる。

図 12 に、工作物の肉厚 t が 4.5, 3.0, 1.7 mm のときの系全体のモード減衰比とバネ定数の関係を示す。図より系全体のモード減衰比を極大とするバネ定数が存在することがわかる。この傾向は、図 11 の棒材のモードひずみエネルギー比と同様となる。これは、工作物のモードひずみエネルギーは変化の割合が小さく、一方で棒材のモードひずみエネルギーは変化の割合が大きいことから、系全体のモード減衰比に対する棒材のモードひずみエネルギーの寄与度が大きいといえる。よって、系全体のモード減衰比を高めるには、工作物の肉厚に応じて棒材のバネ定数を適切な値とすることが重要であるといえる。

Table 1 Beam conditions

h mm	b mm	l mm	Spring constant of beam kN/m	1st Natural frequency Hz	Damping ratio %
13.6	1.8 - 100	62	3314 - 184100	4438	5.18

Table 2 Damping ratio

Component	Damping ratio %
Workpiece	0.077
Beam	5.18

Fig.10 Relationship between frequency of vibration mode with 2 ridge shapes and spring constant of beam

Fig.11 Relationship between strain energy ratio of vibration mode and spring constant of beam

 Fig.12 Relationship between calculated ζ and spring constant of beam

3.3 減衰付与機構の評価

系全体のモード減衰比を実験で測定し、前節のFEM解析の結果を検証した。工作物に加速度センサを取付け、工具の位置でインパルスハンマを用いて工作物を打撃加振したときの伝達関数

 Fig.13 Comparison of measured ζ and calculated ζ (workpiece t3.0)

 Fig.14 Relationship between measured ζ and rotational speed (workpiece t3.0)

を求め、系全体のモード減衰比を半値幅法により算出した。実験に使用した棒材は、幅 b が 3.5, 10, 25, 50mm とし、工作物は肉厚 t が 3.0mm とした。図 10 に示す実験で求めた固有振動数は、計算値とほぼ一致しており解析の接合条件は妥当といえる。FEM 解析と実験による系全体のモード減衰比を比較した結果を図 13 に示す。図からわかるように FEM 解析の結果は、実験結果にほぼ一致し、その妥当性が確認された。

ここまでは工作物が固定として検討してきたが、加工中は工作物が回転し、棒材の接触位置も変化する。そこで、回転している工作物の減衰比を実験により測定した。工作物に近い位置にマイクロホンを設置し、工具の位置でインパルスハンマを用いて回転している工作物を打撃加振したときの音を計測し、系全体のモード減衰比を半値幅法により算出した。実験に使用した棒材は、幅 b が 25mm とし、工作物は肉厚 t が 3.0mm とした。工作物の回転数は 92, 360, 700rpm と変化させた。図 14 に棒材を接触させたときと棒材無しときの系全体のモード減衰比と回転数の関係を示す。0rpm は無回転のときの結果になる。図より、回転した状態においても無回転のときと同様に減衰が付与されていることがわかる。回転数が高くなると、減衰比が高くなる傾向が見られるが、その変化は小さい。

4. 加工実験によるびり振動抑制効果の検証

製作した接触型減衰付与機構を用いて、実際に薄肉円筒工作物の旋削加工を行い、びり振動抑制の効果を検証した。加工の様子を図 15 に示す。工具は仕上げ用の正三角形のチップ（コーナー R0.4mm）を使用し、回転数 700rpm、送り速度 0.05mm/rev、切り込み深さを 0.05~0.6mm の範囲で変えた加工条件で旋削加工を実施した。棒材の寸法は、工作物の厚み t が 1.7mm~4.5mm

Fig.15 Cutting test

Fig.16 Comparison of finish surface in cutting test

Fig.17 States of machining under various cutting conditions

の範囲で系全体のモード減衰比が大きい値を示した厚み h 13.6, 幅 b 25, 長さ l 62mm とした。このときの棒材のパネ定数は 46025kN/m である。加工実験は減衰付与機構を取り付けた場合と取り付けない場合で行い、図 16 に示すように工作物表面にびり模様がみられたか否かでびり振動発生の有無を判断した。図 17 に、工作物の肉厚 t と切込み深さを変えて加工実験し、びり振動の有無を調べた結果を示す。びり振動が発生した場合を×、発生しなかった場合を○印で表し、それらの境界を点線で示す。減衰付与機構が有る場合と無い場合を比較すると、減衰付与機構有りの場合は、びり振動が発生しない加工条件領域が広がり、びり振動抑制の効果を確認できる。また、工作物の肉厚 t が 1.6mm~4.5mm に変化してもびり振動が抑制されていることから、設計対象とした山が 2 つの固有振動モード以外の振動モードに対しても減衰付与効果があったと考えられる。

したがって、本手法は、工作物の固有振動数に合わせる調整が必要なく、容易に適用できると考えられる。また、棒材の長さを変えることで適用範囲をより広げることが可能である。

5. 結 言

本研究では、薄肉円筒工作物の旋削加工において発生するびり振動を抑制することを目的とし、工作物に棒材を接触させることで工作物の構造減衰を高める接触型減衰付与機構を提案し、その性能を評価した。以下のような結果を得た。

- (1) 接触型減衰付与機構の棒材には、棒材のモードひずみエネルギーを極大とする最適寸法 (パネ定数) が存在する。
- (2) 工作物の肉厚に応じて、棒材のパネ定数を適切な値とすることで工作物の構造減衰を高めることが可能である。
- (3) 工作物に棒材を接触させて構造減衰を付与する手法により、減衰付与機構がない場合と比べて、びり振動が発生せず安定した加工が可能である。

参 考 文 献

- 1) 鈴木教和, 切削加工におけるびり振動(前編), 精密工学会誌, **76**, 3 (2010) 280.
- 2) 社本英二, 切削加工におけるびり振動の発生機構と抑制, 電気製鋼, **82**, 2 (2011) 143.
- 3) 上野浩, 加工能率向上を支援する工作機械の知能化技術, 精密工学会学術講演会講演論文集, (2013) 27.
- 4) 小池綾, 柿沼康弘, 青山藤詞郎, 大西公平, エンドミル加工における外乱オブザーバを用いたセンサレスびり振動検出技術の開発(第2報), 精密工学会誌, **81**, 7 (2015) 692.
- 5) 赤澤浩一, 社本英二, 低剛性工作物のボールエンドミル加工における再生型びり振動に関する研究, 精密工学会誌, **75**, 8 (2009) 984.
- 6) 白瀬敬一, 沢田篤, 若松栄史, 荒井英司, 岩田一明, 切削力適応制御に基づく NC プログラムレス旋削加工の試み, 日本機械学会論文集 (C 編), **66**, 643 (2000) 335.
- 7) 鄭寅聖, 堤正臣, 伊東諒, コンクリート構造工作機械の制振性能, 日本機械学会論文集 (C 編), **50**, 457 (1984) 1673.
- 8) 田中信雄, 宮下政和, 鈴木登, 岩田義明, 金井彰, サーボダンパによる自動びり振動の抑制について, 日本機械学会論文集, **45**, 394 (1979) 653.
- 9) 土井雅博, 益子正巳, 岩田吉左, インパクトダンパ付き旋盤用チャックの減衰特性(第1報, 切削性能におよぼす減衰効果), 日本機械学会論文集 (C 編), **56**, 524 (1990) 1041.
- 10) 土井雅博, 益子正巳, 伊東諒, びり振動に及ぼすチャック-工作物系の減衰特定の影響, 日本機械学会論文集 (C 編), **50**, 460 (1984) 2392.
- 11) 田辺郁男, 金子義幸, 小林大輔, 鏡面加工用びり振動抑制旋盤の開発, 日本機械学会論文集 (C 編), **71**, 712 (2005) 256.
- 12) 中野寛, 高原弘樹, 河合謙吾, 多重動吸振器を用いたエンドミル加工時の強制びり振動および再生びり振動の抑制対策, 日本機械学会論文集, **80**, 812 (2014) DR0098.
- 13) 倉田祐輔, 鈴木教和, 樋野励, 社本英二, 異方性を持つ低剛性工具によるエンドミル加工時のびり振動安定限界, 精密工学会誌, **77**, 1 (2011) 97.
- 14) 上田宏樹, 井上喜雄, 長野修三, 辻内伸好, 藤井透, 小泉孝之, 高減衰 CFRP 製ボーリングバーの研究, 日本機械学会論文集 (C 編), **65**, 636 (1999) 3135.
- 15) 吉村充孝, 土肥嘉夫, 広瀬啓二, 多自由度ダンパ要素を付加したボーリングバーの防振設計の研究, 精密機械, **51**, 2 (1985) 422.
- 16) 内海幸治, 河野一平, 小野塚英明, 加藤吐夢, 笹原弘之, 薄板加工におけるびり振動抑制用動吸振器の設計方法に関する研究, 精密工学会誌, **81**, 2 (2015) 187.
- 17) Kiran Kolluru, Dragos Axinte, Adib Becker: A solution for minimising vibrations in milling of thin walled casings by applying dampers to workpiece surface, Manufacturing Technology **62** (2013) 415.
- 18) 河野一平, 川上正憲, 宮本敬行, 内海幸治, 動吸振器を用いた長尺フィン形状加工のびり振動抑制(第1報), 精密工学会学術講演会講演論文集, (2012) 215.
- 19) 吉元弘, 稲崎一郎, 米津栄, 旋盤用びり振動抑制ダンパの試作, 精密工学会秋季大会学術講演会, **48**, 12 (1982) 1603.
- 20) 栗田 裕, 大浦靖典, 田中昂, 川田昌宏, 薄肉円筒工作物の切削加工時に発生する工作物変形型びり振動(びり振動の発生メカニズム), 日本機械学会論文集, **86**, 884 (2020) 19-00335.
- 21) 日本産業規格, JISG6002 制振鋼板の振動減衰特性試験方法, (1993).