

# 接触型減衰付与機構を用いたびびり振動抑制技術の開発

－薄肉円筒工作物のびびり振動抑制技術－

吉田勇太\* 高野昌宏\* 宮川広康\* 廣崎憲一\*

薄肉円筒工作物など動剛性が低い工作物の切削加工では、びびり振動と呼ばれる自励振動が発生する。びびり振動は、仕上げ面粗さの低下や工具の異常摩耗を引き起こす原因となる。そこで本研究では、低剛性な工作物の旋削加工におけるびびり振動を抑制することを目的に、工作物に棒材を接触させることで構造減衰を付与する手法について検討を行った。その結果、棒材のバネ定数を適切な値とすることで工作物の振動減衰性を高められることが明らかになった。この手法を用いた加工実験の結果、棒材の接触がない場合と比べて、より薄肉の円筒工作物をびびり振動なしで加工することが可能となった。

キーワード：切削加工，薄肉円筒工作物，びびり振動，減衰比

## Development of Chatter Vibration Suppression by Bringing a Damping Beam into Contact with Workpiece - Chatter Vibration Suppression in Cutting Thin Cylindrical Workpiece -

Yuta YOSHIDA, Masahiro TAKANO, Hiroyasu MIYAKAWA, Kenichi HIROSAKI

Cutting thin cylindrical workpiece with low stiffness causes chatter vibration. The chatter 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 the vibration, the simple attenuation mechanism of bringing a damping beam into contact with workpiece was investigated. By this method, following results were obtained. Workpiece damping could be improved using a damping beam with spring constant that maximizes modal damping ratio. Damping device could cut workpiece without chatter vibration compared with the case of not using it.

Keywords : cutting metal, thin cylindrical workpiece, chatter vibration, damping ratio

### 1. 緒 言

切削加工時に発生するびびり振動は、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<sup>1)</sup>ため、この振動を抑制する対策が必要とされている。工作物が原因で発生するびびり振動については、工作物の動剛性を高める対策が有効とされている。例えば、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複数の動吸振器を付加して加工を行った研究<sup>2),3)</sup>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<sup>4)</sup>が報告されている。しかし、動吸振器は工作物の振動特性に合わせる必要があり、調整が困難である。一方、加工現場では、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行われている<sup>5)</sup>が、工学的な検証が十分ではないのが現状である。

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びり振動を抑制する減衰付与機構について検討を行った。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。その結果をもとに減衰付与機構を試作し、加工試験によりび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

\*機械金属部

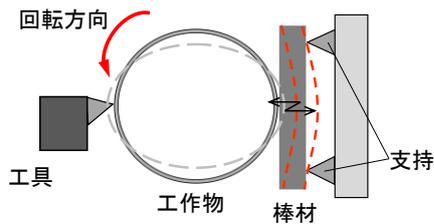


図1 減衰付与機構の概要

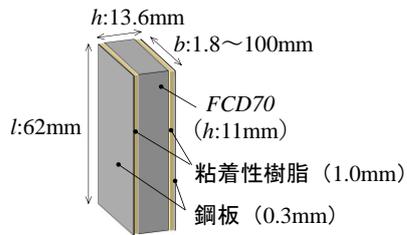


図2 棒材の概要

エネルギーに変換させることで、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を基材とし、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の粘着性樹脂と厚み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。棒材の寸法は、厚み $h$ を13.6mm、長さ $l$ を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枚足し合わさったものとなる。つり下げ打撃加振法（JIS G 0602-1993<sup>6)</sup>）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。この減衰比は、棒材の厚みと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確認した。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、長さが225mm（肉厚7.0mm）であり、材質はSUS304材である。加工実験には汎用旋盤（㈱テクノワシノ製LEO-80A）を使用し、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3に接触型減衰付与機構の概要を示す。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

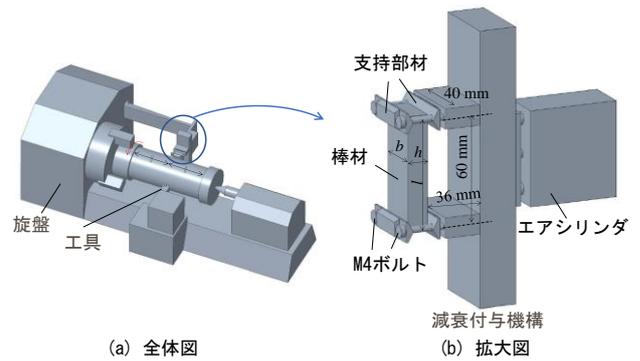


図3 接触型減衰付与機構

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エア圧を調整し、かつストロークは15mm伸びる余裕がある設定とし、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した。

### 3. 減衰付与機構の設計と評価

#### 3. 1 薄肉円筒工作物のびびり振動

薄肉円筒工作物を旋削加工したときに発生するびびり振動の周波数とそのときの振動モードを調べた。工作物を旋削加工したところ、肉厚が4.5mmのときにび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4に示す。図から3028Hzに音圧の1次のピークが存在しており、この周波数がびびり振動の周波数と考えられる。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、FEM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5に示すように円筒に振動の山が2つ存在するモードであった。この振動モードを振動の山が2つの振動モードと呼ぶ。

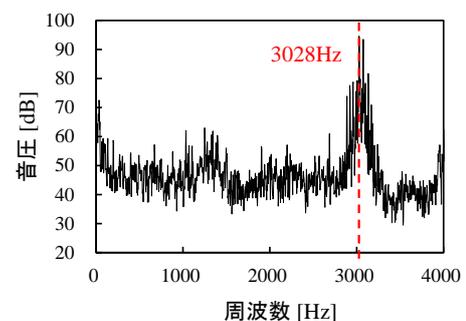
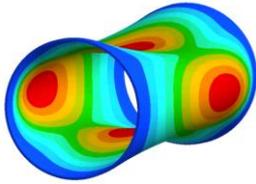


図4 びびり振動時の音圧スペクトル分布



厚み 4.5mm - 3034 Hz

図5 固有振動モード

### 3. 2 減衰付与機構の設計

#### 3. 2. 1 減衰付与効果の評価方法

モードひずみエネルギー法<sup>7)</sup>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 $\zeta$ 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、 $V_{Work}$ ,  $\zeta_{Work}$ ,  $V_{Beam}$ ,  $\zeta_{Beam}$  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 減衰付与効果をも高める棒材の寸法

両端支持した棒材の中心に静的負荷を加えたときの荷重をたわみ量で除した値をバネ定数とする。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、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、棒材の剛性と比べて十分に小さいため無視した。工作物の振動の山が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解析を行った。解析結果の一例を図6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7に、工作物の肉厚が4.5, 3.0, 1.7 mmのときのバ

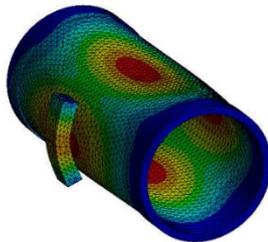


図6 工作物のモード変形と棒材の変形

表1 棒材の条件

$h$ [mm]	$b$ [mm]	$l$ [mm]	棒材の バネ定数 [kN/m]	1次の 固有振動数 [Hz]
13.6	1.8 - 100	62	3314 - 184100	4438

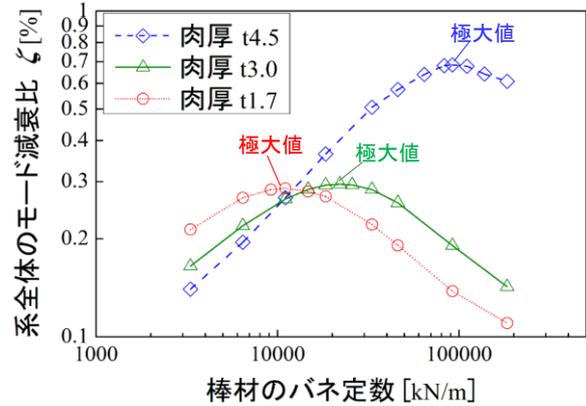


図7 系全体のモード減衰比とバネ定数の関係

ネ定数と系全体のモード減衰比の関係を示す。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し、さらに、その極大値を示すバネ定数は、工作物の肉厚によって異なることが明らかになった。したがって、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考えられる。

### 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、3. 2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

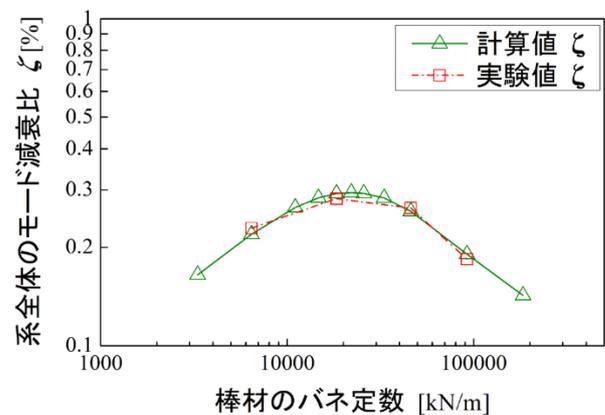


図8 FEM解析結果と実験の比較

肉厚を3.0mmとした。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8に示す。図からわかるようにFEM解析の結果は、実験結果とほぼ一致し、その妥当性が確認された。

#### 4. 加工実験によるび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、薄肉円筒工作物の旋削加工を行い、びびり振動抑制の効果を検証した。工具は仕上げ用の正三角形形状のチップ（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、工作物の厚みが4.5、3.0mmの両方の場合において、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。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9に示すように工作物表面にびびり模様が見られたか否かでびびり振動発生の有無を判断した。図10に、工作物の肉厚と切り込み深さを変えて加工実験し、びびり振動の有無を調べた結果を示す。びびり振動が発生した場合を×印、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、同

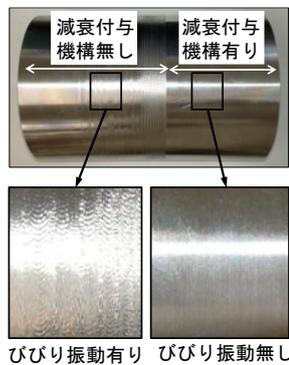


図9 びびり振動有無の判定

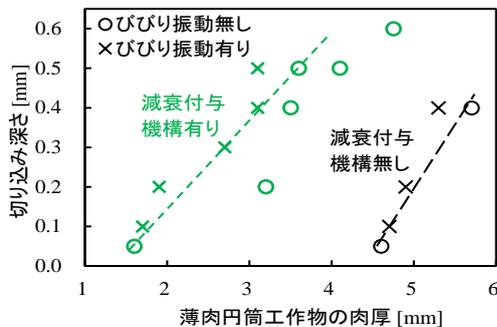


図10 加工実験によるびびり振動抑制結果の検証

じ切り込み深さに対して工作物の肉厚を薄くしてもびびり振動が発生せず、本機構のびびり振動抑制に対する有効性が明らかになった。これにより従来の加工と比べて肉厚が薄い工作物に対しても安定した加工が可能となった。

#### 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により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) 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で工作物への減衰付与効果を高めることが可能となった。
- (2) 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、びびり振動の影響が無い加工面が得られ、減衰付与機構が無い場合と比べて、同じ切り込み深さに対して工作物の肉厚を薄くしてもびびり振動が発生しない加工が可能となった。

#### 参考文献

- 1) 鈴木教和. 切削加工におけるびびり振動(前編). 精密工学会誌, 2010, vol. 76, no. 3, p. 280-284.
- 2) 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, 2015, vol. 81, no. 2, p. 187-192.
- 3) 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, C25, p. 215-216.
- 4) 吉元弘, 稲崎一郎, 米津栄. 旋盤用びびり振動抑制ダンパの試作. 精密学会秋季大会学術講演会, 1982, vol. 48, no. 12, p. 1603-1607.
- 5) 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びり振動(びびり振動の発生メカニズム). 日本機械学会論文集, 2020, vol. 86, no. 884, p. 335-350.
- 6) 日本産業規格. JISG0602 制振鋼板の振動減衰特性試験方法. 1993.
- 7) 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), 1999, vol. 65, no. 636, p. 3135-3141.