

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：34407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04283

研究課題名(和文) 薄肉円筒工作物切削加工時に生じる工作物変形型びびり振動の発生メカニズムと抑制対策

研究課題名(英文) Generation mechanism and suppression measures of chatter vibration of workpiece deformation type in cutting thin-walled cylindrical workpiece

研究代表者

栗田 裕 (KURITA, Yutaka)

大阪産業大学・工学部・教授

研究者番号：70275171

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：薄肉円筒工作物に生じるびびり振動の発生メカニズムを解明した。円筒工作物には、節直径の数が同じで位置が異なる2つの固有振動が存在する(SineモードとCosineモード)。切削時には、この2つの固有振動の間で連成が生じ、フィードバックループが形成される。この連成振動系の一巡伝達関数を、主分力-背分力、背分力-並進変位、並進変位-主分力の3つに分けて算出した。一巡伝達関数のゲインが、位相交点周波数で1より大きくなると、びびり振動が発生する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機産業などで、軽量化のために薄肉部品の使用が増加している。薄肉円筒工作物の切削加工時には、工作物の円形断面が変形するびびり振動が発生する。びびり振動が発生すると、加工品質が低下するので、試行錯誤的なびびり振動対策が行われているものの、十分な振動抑制効果が得られていない。びびり振動の発生メカニズムの解明によって、合理的な振動抑制対策が確立できれば、軽量で質の良い薄肉部品を、短時間で製作できるようになる。

研究成果の概要(英文)：This report describes the generation mechanism of chatter vibration in cutting thin-walled cylindrical workpieces. Cylindrical workpieces have two natural vibrations with the same number of node diameters but different positions (sine mode and cosine mode). During cutting, coupling occurs between these two natural vibrations, forming a feedback loop. The open-loop transfer function of this coupled vibration system is calculated by dividing it into three parts: principal force - thrust force, thrust force - translational displacement, and translational displacement - principal force. When the gain of the open-loop transfer function becomes larger than 1 at the phase crossover frequency, chatter vibration is generated at the frequency.

研究分野：機械力学

キーワード：びびり振動 固有振動 連成振動系 安定判別 自励振動 切削加工 薄肉円筒 減衰

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 航空機産業では、軽量化のために薄肉部品の使用が増加している。研究代表者らは、薄肉円筒工作物を旋盤で切削加工するときに、工作物の円形断面が変形するびびり振動(「工作物変形型びびり振動」と呼ぶ)が発生する現象に着目した(平成26~28年度経済産業省戦略的基盤技術高度化支援事業,平成27年度工作機械技術振興財団工作機械技術振興賞・奨励賞)。薄肉部品のびびり振動の発生を抑えるために、従来から、振動の大きい場所を治具で押さえるなど試行錯誤的な振動対策が行われてきたが、振動抑制効果はあまり上がっておらず、びびり振動を効果的に抑制する方法が求められている。

(2) 切削加工中に生じるびびり振動に関しては、1940年代から、実験、理論の両面で研究されているものの、その多くは工具が弾性変形するものや細長い軸がたわみ振動するものである。これらのびびり振動の発生要因は、切削力の負性抵抗や1回転前の加工面形状が切削力変動を生み出す再生作用であるとされている。

(3) 近年、薄肉部品の切削加工の需要が高まるにつれて、薄肉円筒工作物の断面が変形する工作物変形型びびり振動が問題になってきた。薄肉工作物に比べて、工具は十分に剛であり変形しない。また、細長い軸に比べて工作物の直径が大きいため、1回転前の加工面形状が切削力変動を生み出す再生作用は小さい。加工現場においては、様々の試行錯誤的なびびり振動対策が行われているものの、十分な振動抑制効果が得られていない。そこで、薄肉円筒工作物に生じるびびり振動の発生メカニズムを解明し、発生メカニズムに基づいたびびり振動抑制の合理的な指針を作成することが求められている。

### 2. 研究の目的

(1) 薄肉円筒工作物に生じるびびり振動の発生メカニズムを解明する。薄肉円筒工作物切削加工時の連成振動系に対して、フィードバック制御系の安定判別理論を適用することで、びびり振動の発生を合理的に表しうる「びびり振動発生メカニズム」を明らかにする。

(2) 発生メカニズムに基づいて、びびり振動の発生を合理的に予測しうる解析手法を確立する。びびり振動に及ぼす工作物(寸法,材質,減衰特性),工具(刃先半径,逃げ角,切削力特性),切削条件(切込量,送り量,切削速度)の影響を、定量的に明らかにする。

(3) 発生メカニズムに基づいた合理的なびびり振動抑制方法を開発する。びびり振動を発生することなく切削加工できる範囲を予測するとともに、効果的に振動抑制できる手法を開発する。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究の目標は、次のとおりである。

- ・ びびり振動発生メカニズムの妥当性を検証する。
- ・ びびり振動の発生に及ぼす工作物,工具,切削条件の影響を定量的に評価する。
- ・ 最も効果的なびびり振動抑制方法を開発する。

(2) 本研究の実施計画は、次のとおりである。

・ 薄肉円筒工作物連成振動系の一巡伝達関数を用いてびびり振動発生の予測を行い、発生メカニズムの妥当性と各要因の影響を検証する。次の(i)~(iii)の手順で発生の予測を行う。

(i) 一巡伝達関数の静的ゲインを算出する。一巡伝達関数を、主分力 背分力,背分力 並進変位,並進変位(切込量) 主分力の3つの要素に分けて、各要素の静特性を求める。

(ii) 位相交点周波数におけるゲイン増幅率を算出する。連成振動系の位相交点周波数は、2つの固有振動数のほぼ中央になる。ゲイン増幅率は、工作物の減衰比 から求まる。

(iii) 静的ゲイン×ゲイン増幅率で、位相交点周波数における一巡伝達関数のゲインを求める。位相交点周波数におけるゲインが1(0dB)より大きいときに、自励振動(連成びびり振動)が発生する。

- ・ 開発したびびり振動発生予測法を用いて、最も効果的なびびり振動抑制法を選定する。

### 4. 研究成果

(1) 薄肉円筒工作物を切削加工するときに、工作物の円形断面が変形する工作物変形型びびり振動が発生する。本研究では、「どのような仕組みでびびり振動が発生するのか」、「びびり振動の発生に、工作物,工具,切削条件は、どのような影響を与えるのか」、「どのような対策をとれば、びびり振動の発生を抑制できるのか」を明らかにした。

(2) まず、「どのような仕組みでびびり振動が発生するのか」について、検討した。薄肉円筒工作物には、節直径の数が同じで位置が異なる2つの固有振動（工具接触点を原点とするSineモードとCosineモード）がある。均一な円筒の場合、2つの固有振動の固有振動数は一致している。この2つの固有振動の間で連成が生じ、びびり振動が発生する。図1に、連成振動系のブロック線図を示す。図1に示すように、主分力により、工作物は工具接触点まわりにわずかに回転変形する。工具の先端形状が接触点の前後で非対称となっているため、回転変位によって背分力の変動が生じる。この背分力変動により切込量の変化が生じ、主分力が変動する。この連成振動系の一巡伝達関数を導出した。

「8の字」のループを描く連成振動系のねじれを解消して、単一のループで表現したブロック線図を、図2に示す。図2の負帰還までの各要素の直列結合が一巡伝達関数である。この一巡伝達関数のゲインが、位相交点周波数で1より大きいときに、連成振動系は不安定になり、びびり振動が発生する。一巡伝達関数を算出するため、図2中に示すように、一巡伝達関数を、の3つの要素に分割した。

(3) 次に、「びびり振動の発生に、工作物、工具、切削条件は、どのような影響を与えるのか」について、検討した。連成振動系の一巡伝達関数の静的ゲイン（DC成分）を、図2中の3つの要素（、）に分けて求めた。は主分力 - 背分力の静特性、は背分力 - 並進変位特性、は並進変位（切込量） - 主分力特性である。 $\times \times$ の積から、一巡伝達関数の静的ゲインを算出した。

まず、主分力 - 背分力の静特性（）を切削実験で求めた。図3に、一例として求めた外径187mm、軸長200mm、肉厚5mmの薄肉円筒工作物切削加工時の主分力 - 背分力特性を示す。変換ゲインの値は、主分力の値に依存せず、一定値0.25である。肉厚が1mm~20mmのときの変換ゲインの値を図4に示す。変換ゲインの値は、肉厚1mmから6mmまでは線形に増えており、6mm以上では0.30とほぼ一定の値になっている。

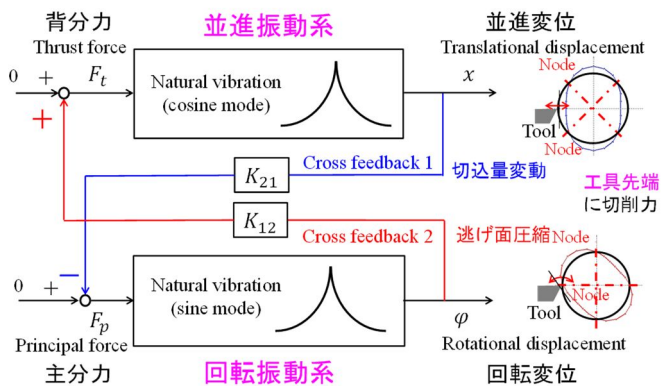


図1 連成振動系のブロック線図

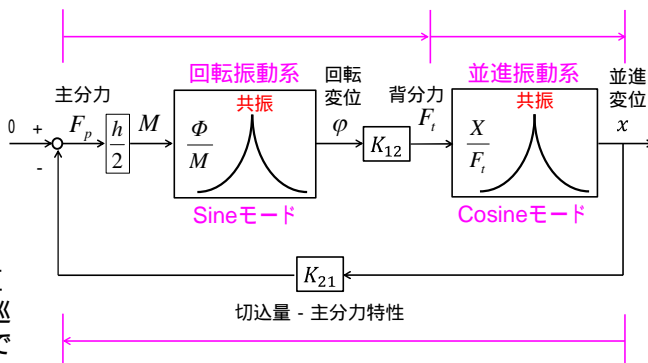


図2 等価な単一ループ系

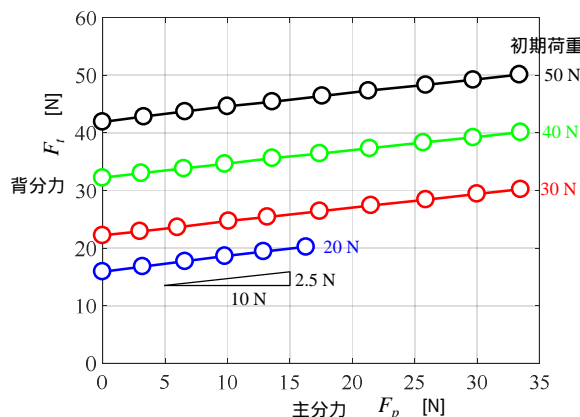


図3 主分力 - 背分力特性

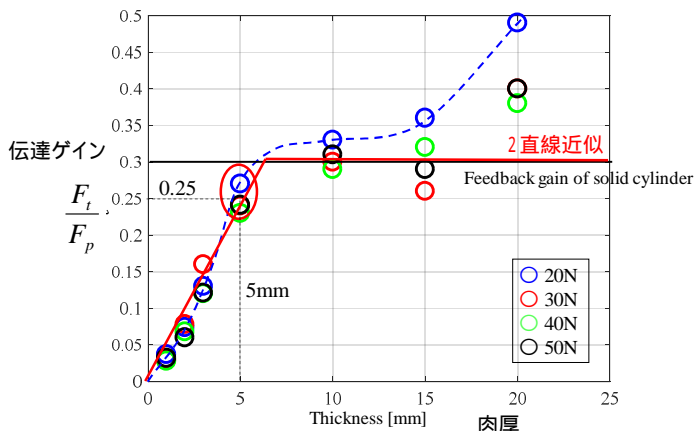


図4 主分力 - 背分力変換ゲイン

次に、背分力 - 並進変位特性 ( ) を有限要素法で求めた。図 5 に、有限要素法の変形図を示す。工作物の先端に背分力を加え、その時の並進変位を求めた。図 6 に、背分力 - 並進変位特性の肉厚依存性を示す。肉厚が 10mm 以下になると、変形が急激に大きくなるのがわかる。

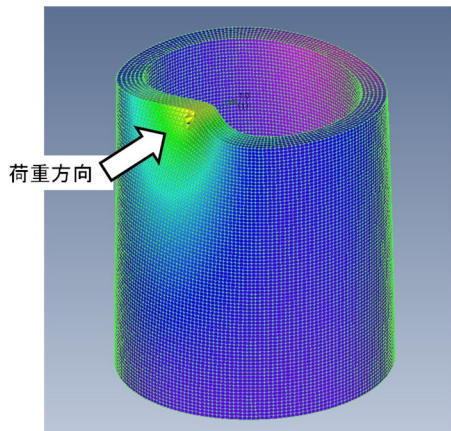


図 5 背分力による変形図

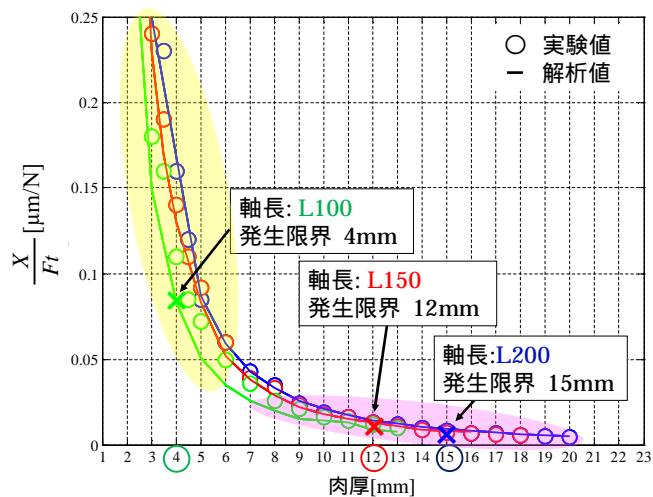


図 6 背分力 - 並進変位特性

さらに、並進変位 ( 切込量 ) - 主分力特性 ( ) を切削実験で求めた。被削材には、びびり振動が発生しないよう十分に肉厚が大きい工作物を選んだ。切込量を 0.05mm から 0.5mm まで変化させて、主分力の大きさを測定した。測定結果を図 7 に示す。図 7 からわかるように、切込量に比例して主分力の大きさは増加している。並進変位 ( 切込量 ) - 主分力の変換ゲインはほぼ一定であり、 $1.85 \times 10^5 \text{ N/m}$  である。一巡伝達関数の静的ゲインは、この 3 つのゲイン

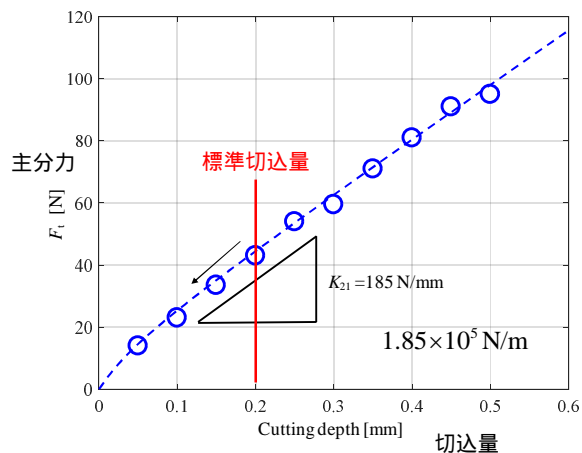


図 7 並進変位 - 主分力特性

、 の積で求められる。

一巡伝達関数の位相交点におけるゲインが、1 より大きくなると、フィードバック系は不安定となり、自励振動 ( びびり振動 ) が発生する。薄肉円筒工作物の 2 つの固有振動 Sine モードと Cosine モードの固有振動数はほぼ一致している。固有振動数で加振力から振動変位までの位相は  $90^\circ$  遅れるので、2 つの固有振動数で  $180^\circ$  遅れる位相交点となる。振幅増幅率は、固有振動 1 つで  $1/(2)$  となるので、位相交点におけるゲイン増幅率は  $1/(2)^2$  となる。一巡伝達関数のゲイン ( = 静的ゲイン  $\times$  ゲイン増幅率 ) とびびり振動発生限界の実験結果と比較すると、切削加工時の減衰比 は 1% 程度 ( ゲイン増幅率 2500 倍 ) と推定できた。

(4) 最後に、「どのような対策をとれば、びびり振動の発生を抑制できるのか」について、検討した。肉厚 2mm のときの静的ゲインに対して、減衰比 5% のときのゲイン増幅率を掛けても一巡伝達関数のゲインは 1 以下である。減衰比を 5% 以上にできれば、肉厚 2mm のときでも、びびり振動が発生しないことがわかった。実際の切削加工でも、肉厚 2mm の工作物に、積層型の制振装置を取り付けて、減衰比を大きくしたところ、びびり振動が発生しないことが確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 栗田裕, 大浦靖典, 田中昂, 川田昌宏	4. 巻 86-884
2. 論文標題 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）	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.19-00335	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 盛岡盾哉, 栗田裕, 上田久, 川田昌宏, 原田岳志, 眞喜志康平
2. 発表標題 薄肉長方形板のエンドミル加工時に発生するびびり振動（びびり振動と固有振動との関係）
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2020, 講演番号118
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田久, 栗田裕, 川田昌宏, 原田岳志, 眞喜志康平
2. 発表標題 薄肉円筒工作物の切削加工時に生じる工作物変形型びびり振動（一巡伝達関数による発生予測）
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2019, 講演番号152
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大浦 靖典 (OURA Yasunori) (60512770)	滋賀県立大学・工学部・准教授  (24201)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	田中 昂  (TANAKA Takashi)  (60759273)	滋賀県立大学・工学部・講師     (24201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関