

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03157

研究課題名(和文) 切削プロセスの実時間シミュレーションによるモードカップリング型自励振動の解析

研究課題名(英文) Analysis of self-excited chatter with mode coupling using real-time simulation of cutting process

研究代表者

松原 厚 (Matsubara, Atsushi)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：80243054

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：切削モデルで加工プロセスをシミュレートして対象構造系に仮想的な切削力を与え、加工プロセスと構造系を分離して振動応答を解析した。このために負荷装置と実時間シミュレーションシステムを開発した。構造系のクロス方向の動特性、切削の断続性の影響とモードカップリングの発生条件を調査した結果、クロス方向の動特性の影響は小さく、切削の断続性の影響が大きいことがわかった。特に断続性の影響により、振動が不安定に遷移する状況を再現できた。また主軸回転時には、振れまわりの影響で切れ刃通過周波数に対して、主軸回転周波数分オフセットした振動が発生することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：加工における従来の自励びり振動理論は、変位励振と時間遅れモデルが基礎となっている。これに対して、運動量交換をベースにしたインパクトモデルが研究されてきた。しかし、これらのモデルを実験で検証することは難しかった。本研究は、切削プロセスの実時間シミュレーションを用いるので、モデルの検証法として貢献できる。

社会的意義：高齢化に伴う熟練者数の減少により技術伝承が難しくなっている。本研究は切削の多様さを分析する方法を提供し、切削効率向上のための条件選定や制振方法の評価にも応用できる。すなわち、客観的指標による技術伝承と生産性向上に寄与できる。

研究成果の概要(英文)：The machining process was simulated by a cutting model and a virtual cutting force was applied to the machining system. The vibration response was analyzed, where the real process and the structural system were separated. Loading devices with a real-time simulation system were developed for the experiments. The dynamic characteristics in the cross direction of the structural system, as well as the intermittent effect of cutting, were investigated with the condition of occurrence of mode coupling. It was found that the effect of the cross-direction dynamic characteristics was small and the intermittent effect was large. The vibration transition in unstable oscillation was successfully simulated in a real-time sense. It was also found that when the spindle rotates, vibrations occur at the sideband of the tool passing frequency due to runout.

研究分野：生産工学

キーワード：切削 自励振動 制御 振動モード 工作機械 加振

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

切削工具と工作物系が力学的に連成し、切れ刃通過周波数以外の不安定な振動が発生する現象は自励びり振動と呼ばれ、加工面や工具にダメージを与えるため、その解析と抑制に多くの研究がなされてきた(文献)。過去の研究は再生理論に基づいているが、実加工においては構造系の複数のモードがカップリングする振動が発生する場合がある。しかし、この現象の解析を実切削で行うことは極めて難しい。そこで、切削力を模擬した加振力を実時間で工作物系や機械系に与えて振動を解析する方法を着想した。

### 2. 研究の目的

切削モデルで加工プロセスをシミュレートして対象構造系に仮想的な切削力を与え、加工プロセスと構造系を分離して振動応答を解析する。構造系のクロス方向の動特性、切削の断続性の影響とモードカップリングの発生条件を調査する。このために負荷装置と実時間シミュレーションシステムを開発する。

### 3. 研究の方法

薄肉ワーク系(工作物系)と回転主轴系(機械系)を対象にして、自励びり振動やモードカップリング現象を調査するための実時間シミュレーションシステムを構築する。いずれの対象系についても、エンドミル加工における切削力を模擬した加振力を用いて、対象系の振動を解析するというアプローチをとる。切削力のシミュレーションは文献( )に準じた。クロスカップリングの影響を調べるために、加振方向とクロス方向の振動解析を行う。また、断続切削の影響の調査には位相解析を用いる。加振周波数の影響を短時間で調べるために、加振周期を連続的に変化させる方法を用いる。

それぞれの対象系における研究方法の相違点は以下の通りである。

- (1) 薄肉ワーク系について、圧電素子を用いた接触型負荷装置を設計・製作する。負荷実験系を構成し、ワークと負荷装置の相互干渉や制御帯域について検証する。
- (2) 回転主轴系について、電磁力を用いた2軸非接触型負荷装置を設計・製作する。負荷系のコイル電圧-電流-力応答について解析し、加工を模擬できる負荷帯域を検証する。

### 4. 研究成果

#### (1) 薄肉ワーク系の加振システム

薄肉ワーク振動系の動特性を機械上で測定し、切削加工の実時間シミュレーションを行うために、負荷装置と薄肉ワーク系を準備した。本装置は piezo 素子をアクチュエータとした接触式の加振デバイスである。加振のセットアップの概要を図1、加振系と測定システムを図2示す。piezo 素子はアンプによって駆動され、加振力は加振ヘッドに内蔵された力センサによって測定される。加振ヘッドは治具を介して工作機械のツールホルダーに取り付けられる。振動は加速度と変位センサで測定する。

切削力はアップカットとダウンカットをシミュレートして piezo 素子の指令電圧として与えている。ただし実際の切削とは異なり、切れ刃通過周波数を徐々に変化させている。この方法により振動の全体像をとらえることができる。また接触加振系で断続切削を模擬することは難しい。これに対して、加振ヘッドのワークへの予圧を変化させて対応している。製作した負荷装置の帯域は正弦波加振で 2kHz であることを確認した。

加振データの例として、加振開始直後の加振指令と変位センサ応答を図3に示す。それぞれのパターンにおいて、変位応答は加振指令に responding している。切削力パターンの指令において、指令値が急激にアップまたはダウンするポイントでは、加振力がインパルス状になっていることがわかる。

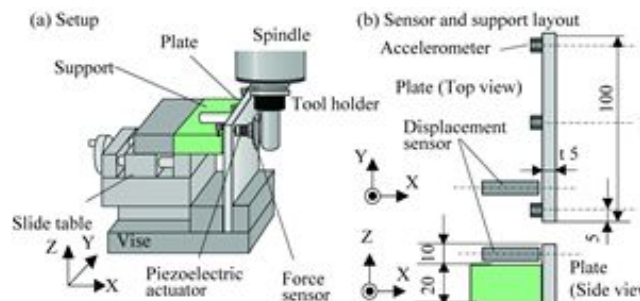


Fig. 1 Experimental setup.

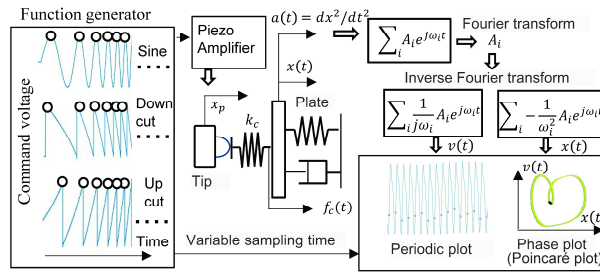


Fig. 2 Excitation and measurement system.

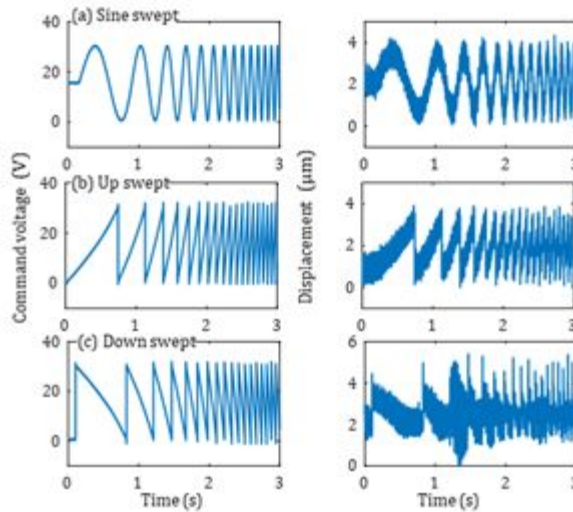


Fig. 3 Command voltage and measured displacement.

(2) 薄肉ワーク系の振動解析

板面の法線方向に加振した場合と接線方向に加振した場合についてクロス方向も含めた振動解析を行った。接線方向の切削力の影響については文献( )に報告されているが、実験の結果、その影響は小さいことがわかったので、法線方向のみの加振で実験を進めた。

図4に、加速度データから得られた、周期サンプリング図とスペクトログラムを示す。周期サンプリングにおいて水色の線が測定データ、赤色の点が周期サンプリング点である。周期サンプリング点からは、応答の位相から不安定さの情報を読み取ることができる。具体的には図中の  $S_1$ - $S_3$  は振動が不安定になっていることがわかる。

同図(a)の板端の加振結果では、加振の早い段階から、加振の基本周期成分だけでなく、2倍と3倍の周期を持つ振動(Period-2, -3)があらわれている。正弦波加振の実験結果から推定した周波数応答から、500 Hzにプレートの曲げ振動、1000 Hzにねじり振動が存在することがわかった。16秒あたりでは、この2つの振動が発生する領域も観察された。同図(b)の板中央の加振においても、同様に固有振動の影響が観察されるが、治具の固有振動数である166 Hzも同時にあらわれていることが興味深い。

本加振では再生効果は考慮されていない。したがって、再生効果がない場合においても、切れ刃通過周波数以外の振動が発生し、その周期は、固有周期の整数倍に近い。また2種類の固有振動が発生しており、これらのモード

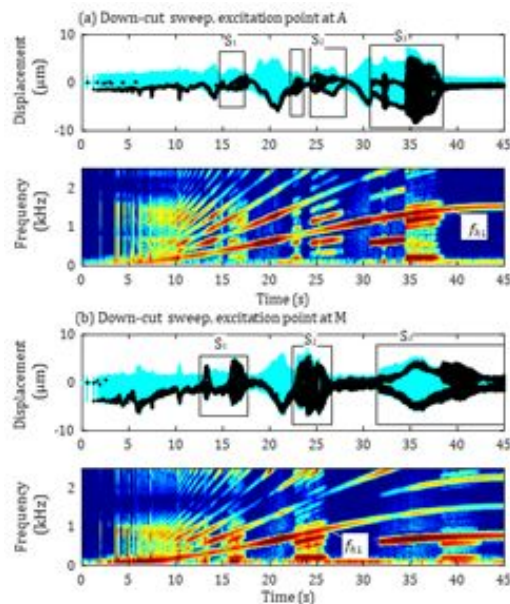


Fig. 4 Measured displacement with periodic sampling plot and spectrogram.



がカップリングしている可能性がある。

### (3) 回転主軸振動系の加振システム

回転主軸振動系の解析を目的として、電磁力を用いた2軸非接触負荷装置を準備した。外観と構造を図5に示す。非接触加振器は、電磁コイル、鉄心、ハウジングで構成されており、鉄心はハウジングの内壁に固定され、樹脂で固められている。コイル中心には鋼製のダミーツールを配置し、コイルに電流を流して発生する吸引力で加振を行う。ダミーツールは鋼板を積層してレーザー溶接して製作した。コイル-疑似工具間のエアギャップは約0.4 mmとした。コイルは計8個配置されており、2つ1組で疑似工具を1軸1方向に吸引する。したがって、この装置で2軸各2方向(X軸±方向、Y軸±方向)に吸引することができる。加振装置を評価対象の縦型マシニングセンタのテーブルに設置した。図6にこの概要と測定システムの構成を示す。主軸の変位はダミーツールのホルダ部の半径方向の変位で評価する。エンドミル加工の切削力をシミュレートし、図7に示すように電流指令に変換してアンプに指令する。

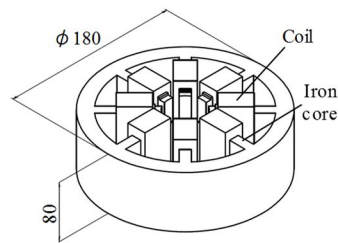


Fig. 5 Magnetic exciter..

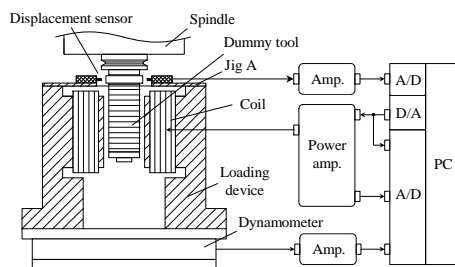


Fig. 6 Set-up and measurement system.

### (4) 回転主軸振動系の振動解析

主軸を回転させた場合 X,Y 方向の振動モードがカップリングして不安定になることは数理モデルで説明されている( )。そこで、主軸を20,000rpmまで回転させて、X,Y軸方向に加振し、クロス方向の振動の応答を測定したが、その影響は小さいことがわかった。以降の実験においても、1軸法線方向だけの振動の解析を行うことにした。

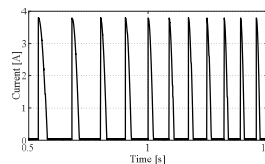


Fig. 7 Excitation pattern (command current).

まず、主軸を停止させた状態で、図7に示すダウンカットパターンの周波数を掃引しながら加振を行った。図8(a)(b)に発生した加振力と相対変位を示す。図8(a)より、加振力のピークの高さは基本加振周波数が増加するにつれて小さくなることわかる。これはアンプの応答が低下するためであるが、この原因については現時点では不明である。図8(b)より、相対変位の振幅も基本加振周波数が上がるにつれて小さくなることわかる。これは、加振力のピーク高さが小さくなったためである。図9(a)(b)に加振力と相対変位のスペクトログラムを示す。図9(a)より、加振力のスペクトルは基本加振周波数 $f_0$ とその整数倍の周波数でピークを持ち、基本加振周波数が高くなるにつれて整数倍のピークの周波数も高くなることわかる。図9(b)より、相対変位のスペクトルも基本加振周波数とその整数倍の周波数で応答するが、主軸系とテーブル系の固有振動数333Hzと485Hzで特に応答が顕著になり、1000 Hz以上ではピークが弱まることわかる。

次に主軸を回転させて加振を行った。加振条件として、加振周期  $T = 4 \text{ ms}$  とし、加振周波数の整数倍が固有振動数付近となるようにした。また、吸引時間  $t = 1 \text{ ms}$  とした。主軸回転数  $N$  は  $0 \text{ min}^{-1}$ 、 $3750 \text{ min}^{-1}$  の2通りとし、4枚刃のエンドミルを想定して、回転時には工具1回転中に4回吸引が行われるようにした。図10に加振時に生じた変位の振幅スペクトルを示す。点線で重ねて示しているのは、事前に求めた機械系のコンプライアンスであり、縦軸は適当にスケールリングしてある。コンプライアンスにおける300 Hz付近のピークは動力計や荷重発生装置を含めた機械構造の振動に起因するものであり、500 Hz付近のピークは主軸系の固有振動によるものである。同図より、スペクトルの各ピークの大きさは機械系コンプライアンスの振幅増幅率に応じて変化することがわかる。図11に、変位を横軸、速度を縦軸にとった相関を示す。青色の

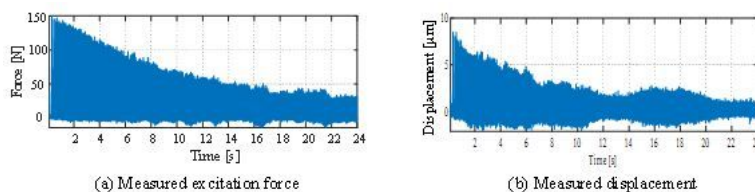


Fig. 8 Measured excitation force and displacement.

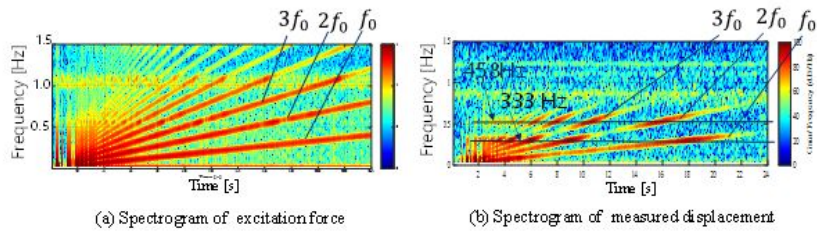


Fig. 9 Spectrogram of measured excitation force and displacement.

線が吸引時，緑色の線が非吸引時のものである．同図より，主軸は吸引され変位したのち，非吸引時には減衰振動しながら原点に収束していくという挙動が繰り返されていることがわかる．また同図より，無回転時は毎周期おおよそ同じ軌道を描くが，回転時には軌道が遷移することがわかる．これは，力の変動により振動の振幅が周期的に変化するためであると考えられる．以上より，回転周期に応じた変動が加振力に断続的に加わると，加振周波数の整数倍だけでなく，回転周波数分だけシフトした位置にも側帯が生じることがわかった．

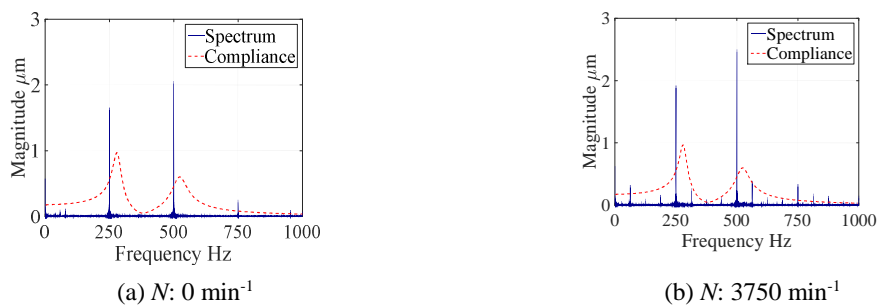


Fig. 10 Spectrum of displacement and compliance

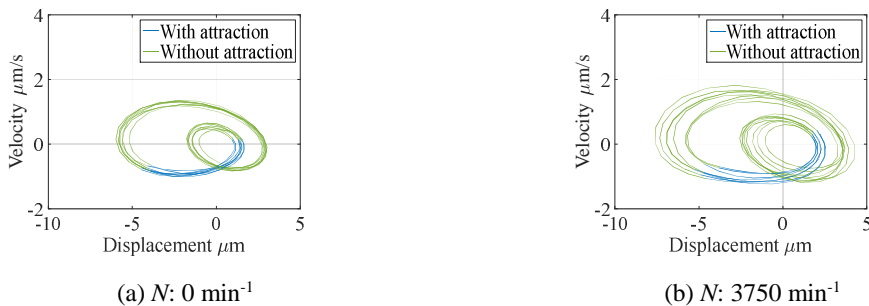


Fig. 11 Phase diagram

#### (5)まとめ

負荷装置を開発して，切削力の実時間シミュレーションを行って得た知見は以下の通りである

- 法線と接線方向の動特性のクロスカップリングの影響は小さい．
- 切削力の断続性の影響は大きく，周期が短くなると固有周期の整数倍の振動を発生しやすい．また，2つの固有振動がカップリングしてあらわれる現象が再現できた．
- 主軸を回転させると，切れ刃通過周波数に対して，主軸回転周波数分オフセットした振動が発生する．実際の加工において，切れ刃通過周波数の側帯（特に低い方）に不安定振動があらわれる場合があり，切削においては，再生型自励びり振動との分離が難しい．

#### 引用文献

- Munoa J, Beudaert X, Dombovari Z, Altintas Y, Budak E, Brecher C, et al. Chatter suppression techniques in metal cutting. CIRP Ann - Manuf Technol. 2016;65(2):785-808.
- Altintas Y. Manufacturing Automation, Cambridge University Press, 2012; 35-40.
- 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，2020;86(884):19-00335.
- 小寺忠，パラメータ励振，森北出版，2010.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Atsushi Matsubara, Hiroaki Nagai, Nils Knorr, Daisuke Kono	4. 巻 77
2. 論文標題 Influence of contact condition between flexible plate and passive pivot support on machining vibration	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Procedia CIRP	6. 最初と最後の頁 557-560
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.225">https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.225</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiroaki NAGAI, Nils KNORR, Iwao YAMAJI, Atsushi MATSUBARA	4. 巻 11
2. 論文標題 Vibration Suppression Mechanism of a Passive Pivot Support in Thin-Wall Milling	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Prof. of 17th International Conference on Precision Engineering.	6. 最初と最後の頁 C-1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 該当する

1. 著者名 Matsubara Atsushi, Takata Kie, Furusawa Masataka	4. 巻 69
2. 論文標題 Experimental study of thin-wall milling vibration using phase analysis and a piezoelectric excitation test	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.066">https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.066</a>	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9件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 岸野 遼馬, 松原 厚, 山路 伊和夫
2. 発表標題 非接触荷重発生装置による工作機械主軸回転時の振動の調査
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第 94 期定時総会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高田 希恵,梅津 拓真,河野 大輔,松原 厚
2. 発表標題 薄肉部品の切削加工における振動の安定性の解析
3. 学会等名 2019 年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松原 厚,高田 希恵,河野 大輔
2. 発表標題 相図を用いた切削加工振動の解析
3. 学会等名 日本機械学会第 13 回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸野 遼馬, 松原 厚, 山路 伊和夫
2. 発表標題 非接触荷重発生装置による工作機械主軸評価のための加振波形の研究
3. 学会等名 日本機械学会第 13 回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Matsubara
2. 発表標題 Excitation test with cutting force pattern
3. 学会等名 CIRP Winter meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸野遼馬, 松原厚, 山路伊和夫
2. 発表標題 2軸方向非接触荷重発生装置による工作機械主軸系動剛性の測定
3. 学会等名 日本機械学会第 12回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shunsuke GOTO Atsushi MATSUBARA Iwao YAMAJI Shinji ISHII
2. 発表標題 Development of a Contactless Biaxial Magnetic Loader for Evaluation of Spindle Dynamics
3. 学会等名 Proceedings of the 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長井大顕 松原厚 梅津拓真
2. 発表標題 薄肉部品の切削加工における振動抑制に関する研究(第一報) 治具の振動抑制効果
3. 学会等名 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 後藤俊輔 松原厚 山路伊和夫 石井眞二
2. 発表標題 主軸動剛性の評価を目的とした非接触式2軸荷重発生装置の開発
3. 学会等名 2017年度精密工学会関西地方定期学術講演会
4. 発表年 2017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	河野 大輔  (Kono Daisuke)  (80576504)	京都大学・工学研究科・准教授     (14301)	