

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01350

研究課題名（和文）工作機械の特性と切削力の動的連成挙動の解明

研究課題名（英文）Analysis of Coupled Dynamic Behavior between Machine Tool Dynamics and Cutting Force

研究代表者

佐藤 隆太（SATO, Ryuta）

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60376861

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,100,000円

研究成果の概要（和文）：数値制御工作機械は、金属材料から所望の形状を削り出すための機械であり、様々な工業製品の生産には欠かすことのできない産業機械である。数値制御工作機械による切削加工では、加工中の振動特性が加工後の製品の品質や加工能率に大きな影響を及ぼすが、加工中の工作機械の振動特性についてはこれまで明らかにされてこなかった。本研究では、加工中の工作機械の周波数特性を評価する方法を新たに開発し、工具と工作物との間の接触が振動特性に及ぼす影響を評価したほか、工具系と工作物系の振動特性および工具と工作物との間の接触を考慮した数学モデルを構築し、実際の加工中の振動をシミュレーションで表現できることを検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、切削加工中の工作機械の周波数特性を直接測定する方法が確立された。これは、より優れた加工条件の探索や工作機械の開発につながるものであり、加工能率や品質の向上による生産工程におけるCO2排出量の削減につながるなど、大きな社会的意義がある。また、工具と工作物間の接触による影響を考慮した切削加工中の工作機械の振動特性のシミュレーションが可能となったことで、これまで明らかにすることができなかった、工具と工作物との間における加工中の接触剛性や振動減衰性の解明が可能になると考えられ、学術的に大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：NC machine tools are widely used for to generate desired shapes from materials. It is a key facility in the industrial fields. Although vibration characteristics of the machine tools influences the machining ability and quality, the vibration characteristics during the cutting operations have not been clarified up to now. This study newly proposes an evaluation method for the frequency characteristics during the cutting operation which influenced by the contact between tool and workpiece. A mathematical model which considers the influence of the contact is developed in this study. It is confirmed that the proposed model can simulate the actual vibration characteristics during the cutting operations.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：NC工作機械 切削加工 振動特性 シミュレーション

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

数値制御工作機械における切削加工において、加工能率と加工精度の向上は常に重要な課題であるが、加工中の振動現象がその大きな阻害要因となることが多い。とくに、びびり振動と呼ばれる現象が生じると、加工そのものを継続することも不可能になる。これまで、主に工具系の振動特性に起因する高周波数域でのびびり振動について、主軸回転数といった加工条件を変更することで抑制する研究が多くなされてきた。一方で、真に加工能率の向上が必要な荒加工時に行われる主軸回転数の低い重切削を行うと、工作機械構造そのものの振動特性に起因するびびり振動が発生し、その場合には、切込み量を下げるなど加工能率を低下させる対策をとるしかないのが現状である。また、工作機械構造の振動特性に起因する加工中の振動については、いまだ十分な解明がなされていない。

比較的低周波数域で発生する振動においては、その挙動において工作機械の構造振動、主軸系および工具系の振動、送り駆動系や主軸駆動系の特性、案内面や軸受の摩擦特性などが総合的に影響を及ぼし、それらが加工現象に及ぼす影響を明らかにすれば、工作機械構造や送り駆動系の制御系を適切に設計することによる加工能率の向上が可能になると考えられるが、そのような視点から行われた研究例は見当たらなかった。本研究課題の核心をなす「問い」は、「数値制御工作機械における切削加工中に工作機械内部でどのような現象が起きているのか」ということである。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、工作機械の特性と切削力との間の動的な連成挙動を明らかにすることである。これまで検討が行われてこなかった工作機械構造、送り駆動系および主軸駆動系と切削力との間の連成シミュレーションを実行し、そこから加工中に起こっている様々な現象を明らかにすることである。これまでに主に研究代表者らによって研究が進められてきた工作機械の運動シミュレーション技術と、汎用的な活用が可能な工作物のボクセル表現に基づく切削力シミュレーション技術とを組み合わせる点に、他の研究機関や研究者では実現できない本研究の独自性と創造性がある。

### 3. 研究の方法

送り駆動系に存在する非線形摩擦特性を考慮した数学モデルを構築し、摩擦特性が工作機械全体の振動特性に及ぼす影響をシミュレーションで的確に表現できるか検証したほか、送り駆動系のモータにインパルス状のトルク指令を印加することで工作機械を加振する方法を考案し、その方法を使って切削加工中の工作機械の振動特性を測定した。また、工具系と工作物系についてそれぞれの振動モード解析を行い、その結果に基づくモデルを工作機械全体のモデルに組み込み、工具と工作物との間の接触剛性および振動減衰性についてもモデルに考慮できるようにした。工具と工作物との間の接触剛性及び振動減衰性について、工具と工作物を接触させた状態における周波数特性の測定結果から同定し、上記全ての要素を組み込んだ工作機械全体の振動モデルと切削力のボクセルシミュレーションモデルとを組み合わせた時間領域連成シミュレーションを行い、工具と工作物との間の接触を考慮することで、実際の加工中に発生する振動をより正確にシミュレーションで表現できることを確認した。

### 4. 研究成果

#### 4.1 送り駆動系に存在する非線形摩擦特性が工作機械全体の振動特性に及ぼす影響

本研究では、実験に用いた工作機械の構造を図1に示す振動モデルでモデル化した。このモデルは、ベッド、コラム、サドル、テーブル、およびヘッドからなり、各構成要素について6自由度の運動を考慮しているほか、各軸を駆動するモータおよびボールねじの回転を考慮した合計33自由度のモデルとなっている。加工中の振動特性をシミュレーションする際には、このモデルに、工作物系および工具系のモデルがヘッドとテーブルにそれぞれ付加される。

各軸を駆動するモータや軸受、ボールねじ-ナット間のほか、各軸の運動を案内する直動転がり案内には非線形摩擦特性が存在することが知られている。Y軸の非線形摩擦特性の例を図2に示す。非線形摩擦特性には、微小変位領域において摩擦力が変位に依存する非線形ばね特性と呼ばれる特性(図(a))と、速度依存性(図(b))とがある。本研究では、その両方をモデル化し、図1の振動モデルに組み込んだ。

非線形ばね特性の影響は軸が停止している場合のみ表れるほか、ある程度高い送り速度になると摩擦力は速度に比例する粘性摩擦となるため、非線形摩擦特性による影響は受けなくなる。そこで本研究では、軸停止中と送り運動中とでインパルスハンマによる加振試験を行い、周波数特性の違いを評価することで、非線形摩擦特性による影響を確

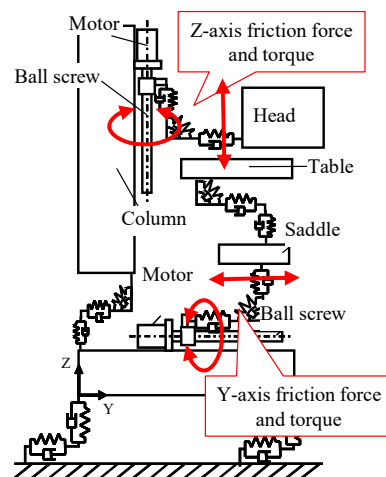


図1 工作機械の振動モデル

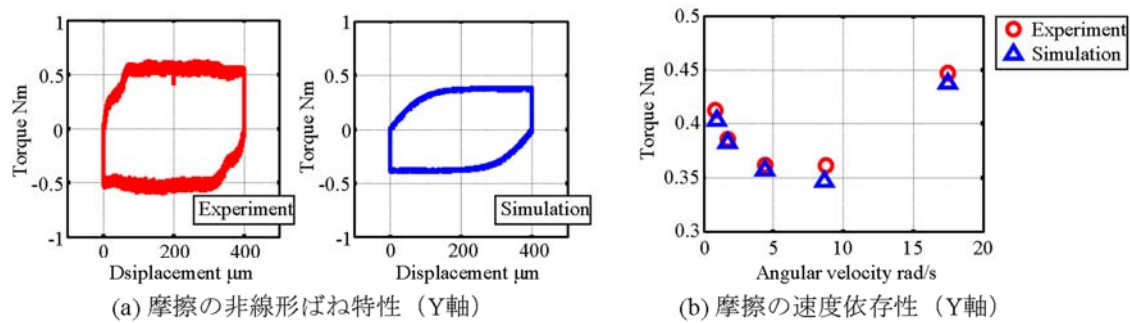


図2 送り駆動系に存在する非線形摩擦特性

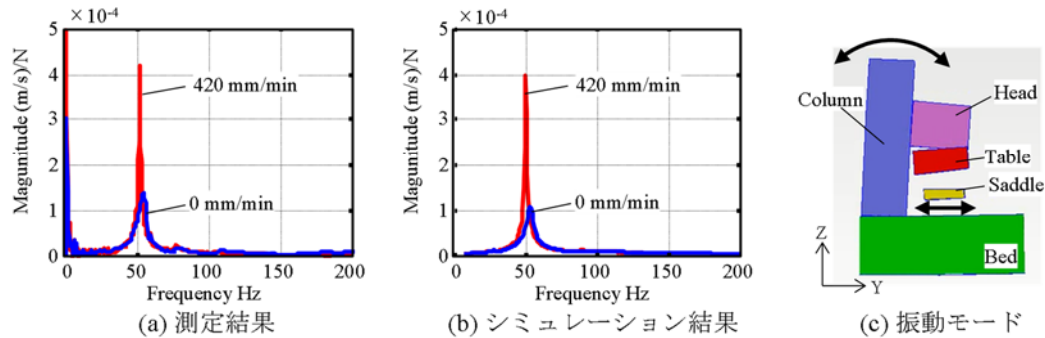


図3 非線形摩擦特性の影響を受ける工作機械の周波数特性と振動モード (Y軸方向)

認した。

Y軸方向の周波数特性の測定結果を図3(a)に示す。図からわかるように、送り運動中には、停止中と比べて50Hz付近の振動が極端に大きくなっていることがわかる。これは、停止中には非線形摩擦特性の影響によって振動が抑制されるためであると考えられる。測定と同じ条件でのシミュレーション結果を図3(b)に示す。シミュレーション結果においても、測定結果と同様に停止中には振動振幅が小さくなっていることから、非線形摩擦特性が工作機械全体の振動特性に及ぼす影響をシミュレーションで的確に表現できているといえる。また、そのときの振動モードを図3(c)に示す。図に示すように、50Hz付近の周波数では、コラムが倒れこむのと同時にY軸が横方向に移動する振動が発生しており、このY軸の移動に際し、Y軸の非線形摩擦特性が振動を抑制する効果を示しているものと考えられる。

#### 4.2 加工中の振動特性の評価

通常の加振試験では、例えばインパルスハンマによる加振が行われる。しかし、加工中にはインパルスハンマによる加振は危険であるほか、加振のタイミングを適切に制御することができない。そこで本研究では、送り駆動系内部のトルク指令信号にインパルス状の加振信号を印加することで、加振試験を行う方法を考案した。図4(a)に示す送り駆動系のブロック線図において、加振信号  $T_d$  をトルク指令  $T_{ref}$  に加算する。加振信号は図4(b)に示すように矩形波状になっており、大きさと幅を変えることで任意の加振力を発生させることができる。また、加振信号を印加するタイミングは主軸の回転角度と同期して設定できるようになっており、例えば、工具の切れ刃がある方向を向くタイミングを狙って加振することができる。

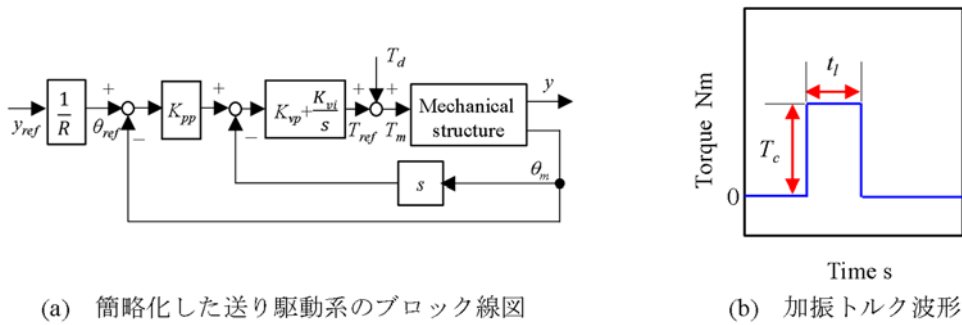
本研究では、工具切れ刃と工作物との接触による影響をより明確に評価するため、直径50mmの5枚刃のインサートチップ式フェイスミルから4枚のチップを外し、1枚刃のボーリング工具として使用した。図5(a)に示すように、予め直径47mmの下穴を加工しておき、半径方向切込み量を1.5mmとしてボーリング加工を行った。そのとき、工具切れ刃の逃げ面が+Y方向を向くタイミングでY軸モータから工具逃げ面が材料に押し付けられる方向に加振した。また、工具切れ刃が工作物上面から下方向に4mmと8mm切り込んだタイミングで加振を行っている。

周波数特性の測定結果を図6に示す。図からわかるように、加工中には50Hz付近の振動の振幅が小さくなり、より切り込んだ状態、すなわち切れ刃の接触長さが大きい場合に、振幅もより小さくなっていることがわかる。固有振動数についても、僅かではあるが加工中には上昇することが確認されている。

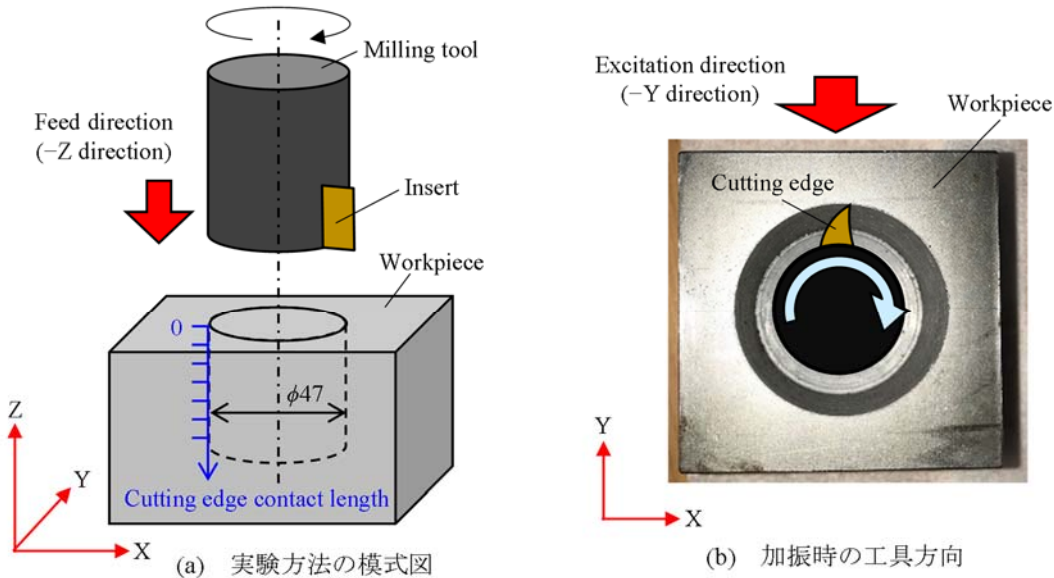
これは、工具と工作物との接触が工作機械全体の構造ループに影響を及ぼし、その接触剛性および工具系と工作物系の剛性が構造ループに加わることで固有振動数が変化するとともに、工具系、工作物系、および工具と工作物との間に存在する振動減衰能が振動振幅を減少させることによると考えられる。

#### 4.3 工具-工作物間の接触による影響を考慮したシミュレーション

工具系と工作物系の振動特性も加工中の挙動に影響を及ぼすため、工具系と工作物系それぞれについてインパルスハンマによる加振試験を行い、その周波数特性の測定結果から振動モー



(a) 簡略化した送り駆動系のブロック線図 (b) 加振トルク波形  
 図4 送り駆動系のトルク指令を用いた加振試験の方法



(a) 実験方法の模式図 (b) 加振時の工具方向  
 図5 加工中の振動特性評価方法

ド解析を行った. その結果に基づき, 工具系と工作物系のそれぞれについて, ヘッドおよびテーブルに対する X 軸回りの回転を考慮した振動系としてモデル化した. 工具と工作物が接触すると, 接触部分において接触剛性と振動減衰性が発生すると考えられる. 本研究では, 工具と工作物との間の相対変位のシミュレーション結果に基づき, 接触状態でのみ工具と工作物との間に剛性と粘性係数を考慮するようにした.

図 1 の工作機械の振動モデルに, 工具系, 工作物系, および工具-工作物間の接触モデルを組み込むとともに, 別途開発された切削力と加工形状の同時シミュレーション技術および主軸駆動系のモデルと組み合わせることで, 加工中の工作機械の振動と切削力との連成シミュレーションを実現した. その概要を図 7 に示す. すなわち, 工具との工作物との間の相対変位と主軸回転角度シミュレーション結果は切削力モデルに伝送され, 時間ステップごとの切削力と切削後の加工形状が計算される. 計算された切削力は, 工具系と工作物系にそれぞれ外乱直として考慮されるほか, 主軸への外乱トルクとしても考慮される. なお, 工具との工作物との間の接触による剛性および粘性係数は, 切削力モデルとは別に考慮される.

加工中の周波数特性をシミュレーションした結果を図 8 に示す. 図からわかるように, 本研究で構築したモデルによって, 工具と工作物との接触によって生じる工作機械全体の周波数特性の変化を的確に表現できていることがわかる.

直径 50mm のインサートチップ式フェイスミルに 5 枚のチップを取り付け, 半径方向切込み量 5mm, 軸方向切込み量 5mm, 切れ刃通過周波数 70Hz のフライス加工を行ったときの切削力波形を図 9 に示す. 図(a)は測定結果, 図(b)および(c)はシミュレーション結果であり, 図(b)のシミュ

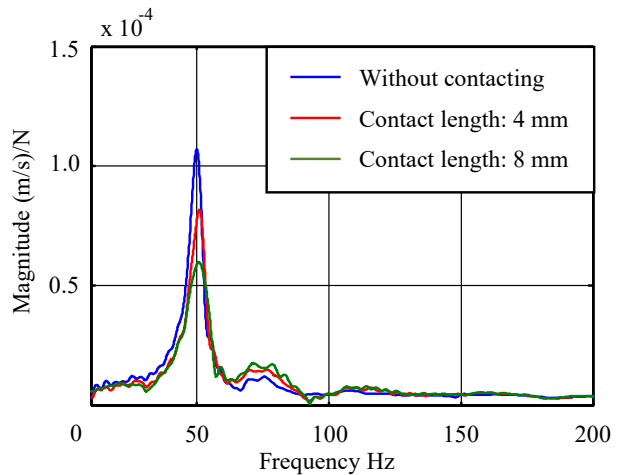


図6 加工中の周波数特性の変化

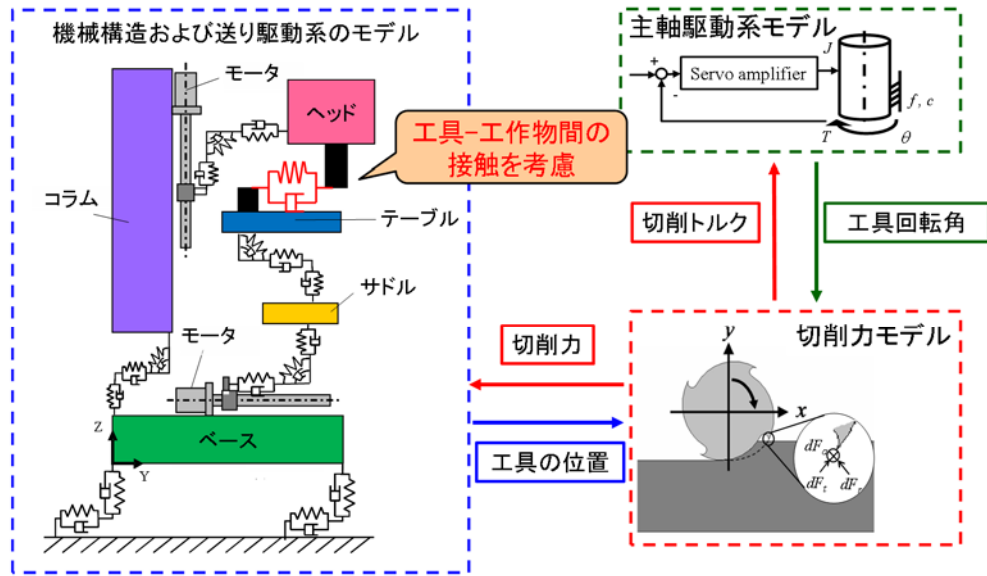


図7 工作機械の振動特性と切削力の連成シミュレーション技術

レーション結果は非線形摩擦特性や工具-工作物間の接触による影響を考慮しなかった場合の結果である。図によると、測定結果にはみられない大きな波形の乱れが生じており、これは自励びり振動が発生したことによるものと考えられる。一方、非線形摩擦特性と工具-工作物間の接触による影響を考慮した図(c)のシミュレーション結果では、切削力波形に乱れは生じていない。

このことから、送り駆動系に存在する非線形摩擦特性や、工具と工作物との間の接触による影響が、数値制御工作機械における切削加工の安定性に大きな影響を及ぼしていることが確認できた。さらに、そのことが本研究で構築したモデルによってシミュレーションでも表現されることが確認でき、価値のある研究成果が得られたと考えられる。

本研究の過程において開発された加工中の周波数特性の測定方法は様々な場面への応用も期待できるほか、本研究において構築されたシミュレーション技術を用いることで、実際には観察することのできない加工中の工具切れ刃の挙動と工作物との関係なども明らかにできるようになる可能性がある。

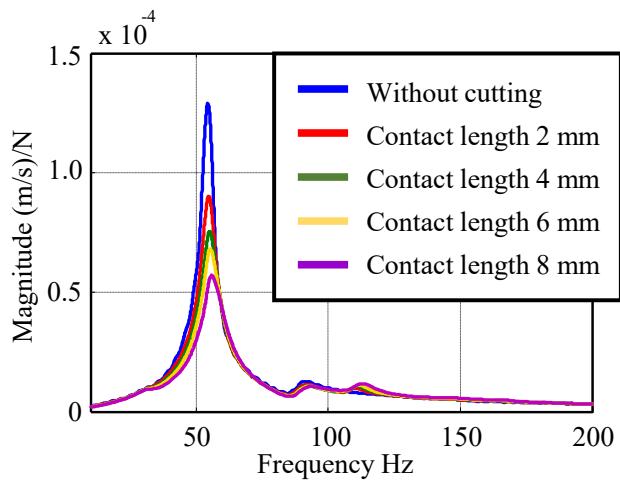
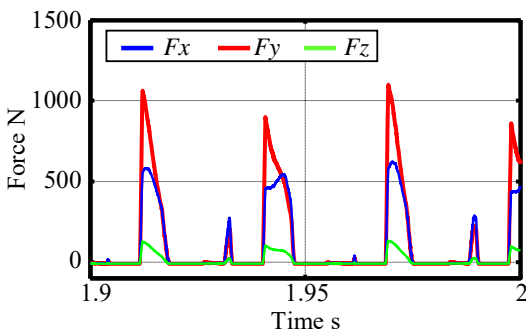
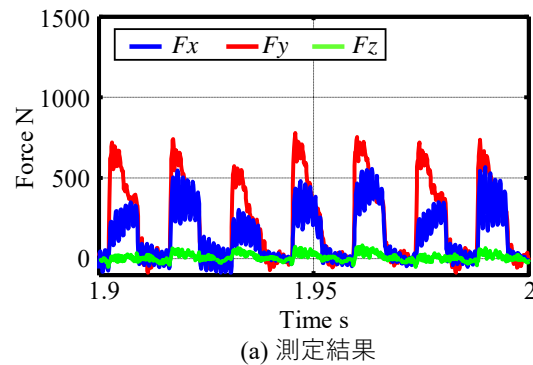
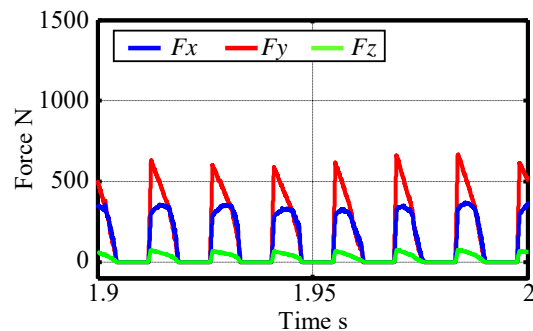


図8 加工中の周波数特性のシミュレーション結果



(b) シミュレーション結果  
(非線形摩擦なし, 工具-工作物間の接触なし)



(c) シミュレーション結果

(非線形摩擦あり, 工具-工作物間の接触あり)

図9 切削力の測定結果とシミュレーション結果の比較

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 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ryuta SATO, Shin NOGUCHI, Taisuke HOKAZONO, Isamu NISHIDA, Keiichi SHIRASE	4. 巻 61
2. 論文標題 Time Domain Coupled Simulation of Machine Tool Dynamics and Cutting Forces Considering the Influences of Nonlinear Friction Characteristics and Process Damping	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 103-109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.precisioneng.2019.10.010	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 -

1. 著者名 HOKAZONO Taisuke, SATO Ryuta, NISHIDA Isamu, SHIRASE Keiichi	4. 巻 86
2. 論文標題 Influence of contact between tool and workpiece onto vibration characteristics of machine tools (Evaluation method and influence of contact length of cutting edge)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 185
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.20-00185	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 -

1. 著者名 NISHIDA Isamu, OKUMURA Ryuma, SATO Ryuta, SHIRASE Keiichi	4. 巻 84
2. 論文標題 Voxel Based End-milling Simulation Considering Elastic Deflection of Tool System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 572～577
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2493/jjspe.84.572	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5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ryuta SATO, Shin NOGUCHI, Isamu NISHIDA, Keiichi SHIRASE
2. 発表標題 Influence of Non-linear Friction Characteristics of Linear Guide and Ball Screw in Milling Operation
3. 学会等名 the 8th International Conference on Virtual Machining Process Technology（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 外園泰介, 佐藤隆太, 西田勇, 白瀬敬一
2. 発表標題 工具と工作物の接触が工作機械の振動特性に及ぼす影響
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 佐藤隆太, 石田昂平, 白瀬敬一
2. 発表標題 機台支持部の防振ゴムの特性を考慮したNC工作機械の運動シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤隆太, 野口晋, 白瀬敬一
2. 発表標題 案内面とボールねじの非線形摩擦特性を考慮したNC工作機械の振動特性シミュレーション
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤隆太, 石田昂平, 大道壮毅, 白瀬敬一
2. 発表標題 小形立て形マシニングセンタにおける機台支持部の防振ゴムによる振動抑制効果
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

生産工学研究室ホームページ  
[http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-cimlab/new\\_index.html](http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-cimlab/new_index.html)

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	西田 勇  (Nishida Isamu)  (40776556)	神戸大学・工学研究科・助教    (14501)	
研究分担者	白瀬 敬一  (Shirase Keiichi)  (80171049)	神戸大学・工学研究科・教授    (14501)	

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
---------	---------