

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02041

研究課題名（和文）切削加工におけるびびり振動の常識を覆す切削工具の逃げ面テクスチャ設計

研究課題名（英文）Design of cutting tool flank texture that overturns the conventional limit in chatter stability

研究代表者

鈴木 教和 (Suzuki, Norikazu)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：00359754

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：切削加工におけるプロセスダンピング現象のシミュレーション技術を開発するとともに、プロセスダンピングを効果的に発現する切削工具の逃げ面テクスチャの設計技術を開発した。開発した工具は、逃げ面において不具合をもたらす顕著な凝着や刃先力（エッジフォース）の増加を生じず、プロセスダンピングのみを高切削速度領域においても発現し、振動周波数に対してロバストに振動減衰効果をもたらすことができる。FEMを利用したプロセスダンピング係数の解析技術と、工具刃先形状および逃げ面凝着の影響を考慮した補正を行うことで、プロセスダンピング現象の高精度推定が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案手法は、理論モデルに基づきプロセスダンピングを効果的に発現する切削工具の逃げ面テクスチャの設計を実現する。単純なテクスチャ形状を逃げ面に付与するだけで、切削速度に依らずにロバストなびびり抑制を実現しており、そのメカニズムについても学術的な考察を加えることで、効果の定量推定に成功している。従来の常識を覆す究極のびびり振動抑制技術として学術面での貢献が高いだけでなく、産業界における我が国の画期的な競争力向上に寄与することが期待でき、世界に先駆けて我が国が取り組むべき研究課題の一つである。

研究成果の概要（英文）：A simulation technique for process damping phenomena in cutting has been developed, as well as a design technique for the flank surface texture of cutting tools that effectively generate process damping. The developed tool exhibits process damping not only at low cutting speed range but also at high cutting speeds without significant adhesion or increased edge force. The flank texture does not cause any critical defects on the flank surface and cut surface, and thus can provide robust vibration damping against vibration frequency. The analysis technique to estimate the process damping coefficient using FEM and the compensation for the effects of tool edge geometry and flank adhesion enable highly accurate estimation of the process damping phenomenon.

研究分野：生産加工

キーワード：切削加工 びびり振動 切削工具

## 1. 研究開始当初の背景

切削加工はものづくりの重要な基盤技術の一つである。日本はこの技術分野で長年世界をリードしており、これが日本のものづくりを根本から支えている。切削加工において、解決が困難であるとして残されてきた最重要課題に、“びびり振動”の問題が挙げられる。びびり振動のメカニズムは複雑で難解だが、従来の研究によってびびり振動の基礎的な安定限界解析理論が徐々に確立されており、びびり振動の回避・抑制に効果を発揮する可能性のある様々な解決手段が提案されている。一方で、万能な解決手段がなく、適切な対策の選定が極めて難しいという問題がある。根本的には、系の剛性を上げることで振動問題を解決することができるが、工具や被削材、機械構造の形状などの制約で、剛性を無限に向上することはできない。そこで、生産の現場では昔から、切削速度を下げたプロセスダンピングを利用するという方法が良く用いられてきた。びびり対策としては概ね万能な方法だが、適切な切削速度領域を利用できずに切削性能や能率の低下を招く“致命的な欠点”があるため、望ましい対処法ではない。このため、安定ポケット法や不等ピッチ・不等リードエンドミルなどの不等工具、主軸回転数変動法などの生産性低下を伴わない高度な技術の活用が注目されてきた。しかし、系やプロセスの特性に応じて限定的な効果を発現するため、適切な手法や条件の選定が難しい側面があり、不適切な方法・条件を選択するとかえって悪化する事もあるなどの課題がある。このため、生産の現場では、このような高度な技術をうまく活用できずに、加工能率を犠牲にして安全な条件を選択することが多い。

## 2. 研究の目的

プロセスダンピングを、任意の高切削速度領域で発現することができれば、加工能率の低下を伴わない万能なびびり振動の抑制手法として利用することができる。そこで本研究では、切削加工におけるプロセスダンピング現象のシミュレーション技術を開発する。これを応用して、プロセスダンピングを効果的に発現する切削工具の逃げ面テクスチャの設計技術を開発し、従来の常識を覆す究極のびびり振動抑制技術の確立に挑戦する。提案手法では、切削振動による工具の逃げ面接触力を推定する新しい解析モデルを開発する。これを実装した時間領域シミュレーション技術を活用し、凝着や刃先力(エッジフォース)の増加を生じずにプロセスダンピングのみを高切削速度領域においても発現し、振動周波数に対してロバストに振動減衰効果をもたらす手法を開発する。加工実験を通じて提案手法の検証を行い、びびり振動の周波数に依らずにロバストな安定化を実現するとともに、切削性能を低下しない万能な革新的振動抑制技術の確立を目指す。

## 3. 研究の方法

プロセスダンピングはびびり振動の安定性に大きく影響するため、多くの研究者がそのシミュレーション技術の開発に取り組んできた。しかし、その定量的なシミュレーション技術や、効果の実験的な評価技術は未だ確立されていない。これはプロセスダンピングを援用する提案手法のような技術の発展を阻む原因の一つとなっている。言葉を裏返すと、プロセスダンピング現象のシミュレーション技術および評価技術が、提案手法を実現する上で重要な役割を担うと考える。そこで、まず**プロセスダンピング現象の高精度なシミュレーション技術の開発**に取り組む。ここでは、テクスチャの有無におけるプロセスダンピングの効果を推定可能な、時間領域プロセスシミュレータを開発する。これを用いて、**高切削速度領域で必要十分なプロセスダンピングを発現するテクスチャの形状や配置の最適設計**について検討を行うとともに、基礎的な旋削プロセスを対象としてその効果の実験検証を実施する。さらに、主に凝着性と対欠損性の観点から**正常時の切削性能を阻害しないテクスチャ形状**について、解析と実験の両面から探索を行う。さらに、**エンドミル加工などの回転系工具を用いた加工における応用技術の開発**に取り組む。これらの取り組みを通じて提案手法の総合評価を行い、実用的な切削プロセスにおける提案手法の実現可能性とその実用性および課題を明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) プロセスダンピング現象の高精度なシミュレーション技術の開発

本研究では、有限要素法解析(FEM)を利用してプロセスダンピング力 $F_{pd}$ を求める手法を開発した。ここでは、市販ソフトウェア AdvantEdge FEM™を用いて切削シミュレーションを実施した。正弦波状の工具振動が生じると仮定して、2次元切削シミュレーションを実施した。時刻 $t$ におけるプロセスダンピング力 $F_{pd}(t)$ は、逃げ面に作用する垂直応力およびせん断応力より求めることができる。このプロセスダンピング力を周波数領域においてモデル化し、振動振幅と角振動数を変化させてシミュレーションを繰り返すことにより、プロセスダンピング係数の振幅・波長依存性を求めた。この計算結果を内挿することで、任意の振幅・波長に対する係数を求めることができる。実験検証を通じて多角的な検討を行ったところ、低切削速度条件(波長が小さい条件)において、振幅が小さく軌道角が逃げ角を超えない場合においても、プロセスが安定化する効果が確認されている。この現象を考慮するため、振動振幅の下限值 $A_{lim}$ を設定し、下限値以

下の振幅時は、 $A_{lim}$ のプロセスダンピング係数を与えるように補正することとした。実験および解析結果の事例を図 1 に示す。ここでは、テクスチャなし工具を用いて端面切削実験を実施した。図より、高切削速度領域では、速度に応じて振幅が任意の値に収束していることが分かる。切削速度が 70m/min 程度に小さくなると、振幅が急速に減少して、系が安定化する。提案手法による解析結果は実験結果とよく一致していることが分かる。このように振幅依存性を考慮したモデルを与えることで、びびり現象における安定不安定の判別だけでなく、準安定状態の到達振動振幅を精度よく推定することが可能となった。

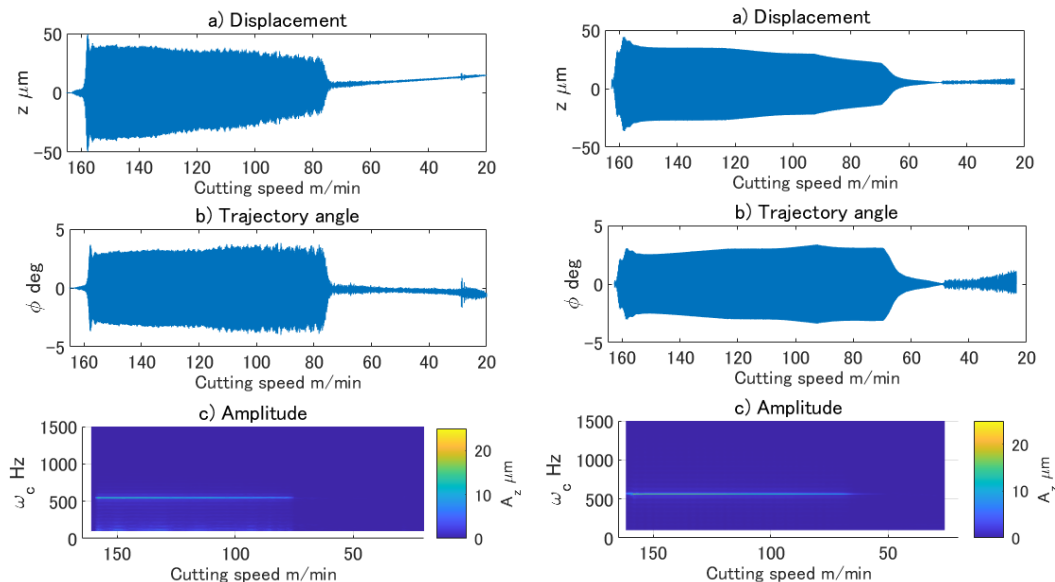


図 1 実験結果（左）およびシミュレーション結果（右）

## (2) 高切削速度領域で必要十分なプロセスダンピングを発現するテクスチャの形状や配置の最適設計

逃げ面テクスチャの形状と配置がもたらす影響について解析と実験の両面から検討を行った。プロセスダンピングの性能に影響を与えると考えられる複数種類のテクスチャ形状を提案し、有限要素法解析を用いて、振動波長と振動振幅の影響を分析した。さらにこれらの工具を試作し、炭素鋼の旋削実験を通じて、凝着や欠損などの問題が生じずに十分な性能を発現する逃げ面テクスチャについて検討を行った。ここでは、単純な 2 つの直線切れ刃を組み合わせたフラット工具を用いた。各種テクスチャ工具における検討結果の事例を図 2 に示す。検討の結果、テクスチャ距離とテクスチャ高さに依存して、プロセスダンピング係数が増加する振動振幅と振動波長の領域が変化することが、FEM 解析によって示唆された。特に、横ライン型の場合、振動波長に合わせて適切にテクスチャ形状を設計する必要がある。ドット型および縦ライン型のテクスチャにおいては、横ライン型と比較して振動波長に対する優れたロバスト性を持つが、プロセスダンピング効果は低下する可能性があることを明らかにした。また、テクスチャがない通常工具と比較していずれの試作工具も振動抑制効果が発現することを確認した。特に、テクスチャ距離を適切に設計することで、凝着・欠損を抑制しつつ、十分なプロセスダンピング効果を得ることができる。一方で、ドット型と縦ライン型においては、テクスチャ部に凝着と欠損が生じやすいことを明らかにした。

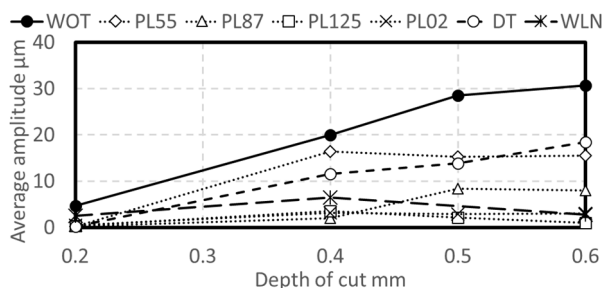


図 2 各種テクスチャ工具における切込み量と平均到達振動振幅の関係

## (3) 正常時の切削性能を阻害しないテクスチャ形状

前述の検討では、切れ刃に平行な横ライン型テクスチャを与えた場合に特に優れた特性を発現することを明らかにした。そこで、実用的な R 工具を用いて炭素鋼の外周旋削を行い、提案工

具のプロセスダンピング効果と仕上げ面性状への影響を評価した。突き出しの長い被削材端面側から根元の方向に z 軸送りを与えて乾式で加工を行った。被削材構造は端面側で最もコンプライアンスが大きくなり、びびり振動が生じやすい。そして、根元に近づくにつれてコンプライアンスが減少し、びびり振動が生じにくくなる。テクスチャがない通常工具と、横ライン型テクスチャ工具を比較したところ、テクスチャ工具を用いることで大幅にびびり安定性が改善されることを確認した（図3参照）加工後のテクスチャ工具の逃げ面にはやや凝着が生じているが、逆にこの凝着が系の安定化に寄与しているものと考えられる。すなわち、逃げ面テクスチャ工具においては、適度にテクスチャ部に凝着を生じる形状の方が望ましい。同時に、テクスチャ工具のびびり振動を推定するには、逃げ面凝着の影響を加味したシミュレーションが必要となる。

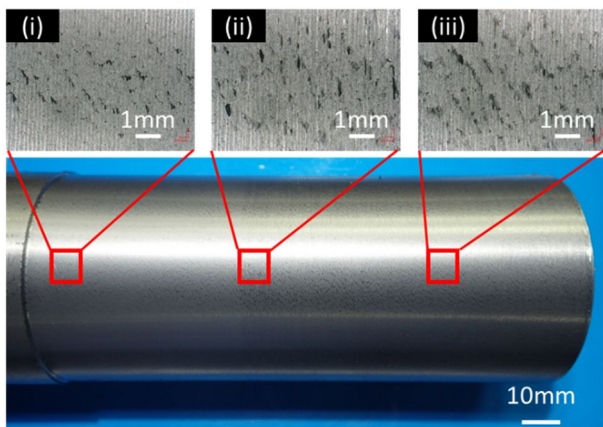


図3 横ラインテクスチャ工具によるびびり抑制の事例

#### (4) エンドミル加工などの回転系工具を用いた加工における応用技術の開発

ミリング加工では、加工面が曲面になるため、このことを考慮してテクスチャ高さの設計を実施する必要がある。これまでの検討において最も高い性能を発揮した形状を参考に、工具寿命とプロセスダンピング効果を両立するテクスチャ形状を設計した。設計した工具の模式図を図4に示す。現在作成中であり、入手次第その実用性について検討を進める予定である。

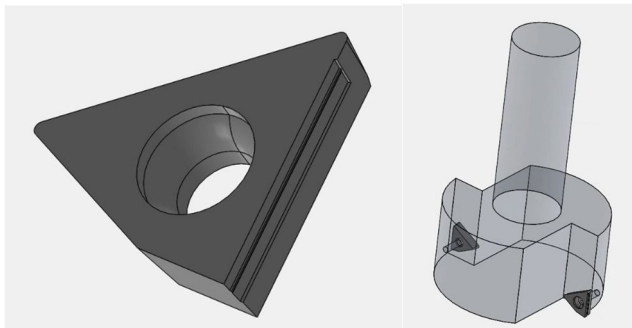


図4 設計したミリング用テクスチャ工具と工具シャンクの模式図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Jianguo Zhang, Norikazu Suzuki, Eiji Shamoto, Jianfeng Xu	4. 巻 71
2. 論文標題 Dynamic contour error compensation in micro/nano machining of hardened steel by applying elliptical vibration sculpturing method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 250-262
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2021.03.017	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 Naruhito Irino, Yasuhiro Imabeppu, Yosuke Higuchi, Yuta Shinba, Kengo, Kawai, Norikazu Suzuki, Junichi Kaneko, Yasuhiro Kakinuma, Masahiko Mori	4. 巻 70
2. 論文標題 Vibration analysis and cutting simulation of structural nonlinearity for machine tool	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 CIRP Annals - Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 317-320
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cirp.2021.04.073	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 Shuntaro Yamato, Kenichi Nakanishi, Norikazu Suzuki, Yasuhiro Kakinuma	4. 巻 22
2. 論文標題 Development of Automatic Chatter Suppression System in Parallel Milling by Real-Time Spindle Speed Control with Observer-Based Chatter Monitoring	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Precision Engineering and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 227-240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12541-021-00469-2	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 -
1. 著者名 Wataru Takahashi, Tomoki Nakanomiya, Norikazu Suzuki, Eiji Shamoto	4. 巻 68
2. 論文標題 Influence of flank texture patterns on suppression of chatter vibration and flank adhesion in turning operation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 262-272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2020.12.007	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 Wataru Takahashi, Norikazu Suzuki, Eiji Shamoto	4. 巻 68
2. 論文標題 Development of a novel boring tool with anisotropic dynamic stiffness to avoid chatter vibration in cutting Part 2: Analytical and experimental verification of the proposed method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 20-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2020.11.008	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 Wataru Takahashi, Norikazu Suzuki, Eiji Shamoto	4. 巻 68
2. 論文標題 Development of a novel boring tool with anisotropic dynamic stiffness to avoid chatter vibration in cutting Part 1: Design of anisotropic structure to attain infinite dynamic stiffness	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 57-71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2020.11.007	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 Shuntaro Yamato, Kenichi Nakanishi, Norikazu Suzuki, Yasuhiro Kakinuma	4. 巻 110
2. 論文標題 Experimental verification of design methodology for chatter suppression in tool swing-assisted parallel turning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 1759-1771
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-020-05951-1	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 Norikazu Suzuki, Wataru Takahashi, H. Igeta, Tomoki Nakanomiya	4. 巻 69
2. 論文標題 Flank face texture design to suppress chatter vibration in cutting	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 CIRP Annals - Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cirp.2020.04.037	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 Akihiro Sugiyama, Shuntaro Yamato, Norikazu Suzuki, Naruhiro Irino, Yasuhiro Imabeppu, Yasuhiro Kakinuma	4. 巻 104
2. 論文標題 Enhancement of cutting force observer by identification of position and force-amplitude dependent model parameters	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 3589-3605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-019-04080-8	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 Shuntaro Yamato, Toshiki Okuma, Kenichi Nakanishi, Junji Tachibana, Norikazu Suzuki, Yasuhiro Kakinuma	4. 巻 13
2. 論文標題 Chatter suppression in parallel turning assisted with tool swing motion provided by feed system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 80-91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2019.p0080	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 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 横川優弥, 鈴木教和, 藤中翼
2. 発表標題 逃げ面テクスチャ工具によるびびり抑制効果の時間領域シミュレーション
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会, 第29回学生会員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsubasa Fujinaka, Norikazu Suzuki, Tomoki Nakanomiya, Eiji Shamoto
2. 発表標題 Time domain simulation of turning process considering amplitude-dependency in process damping
3. 学会等名 The 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing Technologies in 21st Century (LEM21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi MIWA, Norikazu SUZUKI, Kazuki TAKAHEI, Eiji SHAMOTO
2. 発表標題 Analytical study on identification of milling simulation parameters by utilizing spindle speed variation method
3. 学会等名 The 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing Technologies in 21st Century (LEM21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Norikazu Suzuki, Hiroki Hayashi, Eiji Shamoto, Naruhiro Irino, Yasuhiro Imabeppu
2. 発表標題 Time domain simulation of dynamic corner milling process considering chatter vibration with finite amplitude
3. 学会等名 Proceedings of the ASME 2021 16th International manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuki Takahei, Ryosuke Ikeda, Tomoya Fujita, Satoshi Miwa, Norikazu Suzuki
2. 発表標題 Fast parameters identification of process-machine interaction model in milling
3. 学会等名 Proceedings of The Japan Society for Precision Engineering, ICPE2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Norikazu Suzuki, Tomoki Nakanomiya, Eiji Shamoto
2. 発表標題 Chatter Stability Prediction of Cutting Process With Process Damping Utilizing Finite Element Analysis
3. 学会等名 Proceedings of the international Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials & Processing (LEM&P 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 塚本有美, 鈴木教和, 社本英二, 入野成広, 今別府泰宏
2. 発表標題 プロセスダンピングの影響を考慮した5軸ボールエンドミル切削の時間領域シミュレーション
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会, 第28回学生会員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤中翼, 中之宮知樹, 鈴木教和, 社本英二
2. 発表標題 新しいプロセスダンピングモデルに基づく旋削プロセスの時間領域・周波数領域シミュレーション
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三輪智, 鈴木教和, 社本英二, 高幣一樹
2. 発表標題 主軸回転速度変動を利用したミリングシミュレーションにおけるパラメータの高速高精度同定
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ShuntaroYamato, Yasuhiro Imabepu, Naruhiro Irino, Norikazu Suzuki, Yasuhiro Kakinuma
2. 発表標題 Enhancement of Sensor-less Cutting Force Estimation by Tuning of Observer Parameters from Cutting Test
3. 学会等名 8th Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Yamato, K. Nakanishi, N. Suzuki, Y. Kakinuma
2 . 発表標題 Development of automatic chatter suppression system in parallel milling by real-time control strategy of spindle speed with observer-based chatter monitoring
3 . 学会等名 Proceedings of the 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Takahei, S. Ohno, N. Suzuki, E. Shamoto
2 . 発表標題 Fast Identification of Cutting Process with Sensor-Integrated Disturbance Observer
3 . 学会等名 Proceedings of 15th International Conference on High Speed Machining (HSM2019) in Czech (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Norikazu Suzuki , Rikiya Ishiguro, Tomoki Morita, Eiji Shamoto
2 . 発表標題 VARIABLE HELIX CUTTER DESIGN TO SUPPRESS REGENERATIVE EFFECT
3 . 学会等名 Proceedings of the ASME 2019 14th International manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 鈴木教和
2 . 発表標題 切削加工における動的振動現象の解析技術 ~周波数領域から時間領域まで~
3 . 学会等名 日本機械学会 スマートファクトリーにおける生産技術に関する研究分科会 RC279 (招待講演)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 中之宮知樹, 鈴木教和, 社本英二, 高橋亘
2. 発表標題 有限要素法解析によるプロセスダンピングパラメータ推定と安定性解析
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

〔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	社本 英二  (Shamoto Eiji)  (20216146)	名古屋大学・工学研究科・教授    (13901)	

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