

令和元年6月27日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00591

研究課題名(和文)環境に配慮した工程短縮型高精度歯車加工法 - 振動歯切り加工法の開発 -

研究課題名(英文) Environment-friendly process shortening type high precision gear machining method -Development of vibration gear cutting method-

研究代表者

軽部 周 (KARUBE, Shu)

大分工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：70370054

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ドライ環境下における歯車の振動加工技術について研究を行った。最初に、工具に強制振動を与えながら加工を行う工具振動歯切り装置のモデル化を行い、振動工具応答を再現した。また、本装置の加工温度低減効果の定量化を行った。実験の結果、通常のドライ加工に比べ、本加工法により約15%の加工温度低減効果が認められた。次に、工作物に強制振動を与えながら加工を行う工作物振動歯切り装置を新規開発した。本加工法による送りマーク除去のメカニズムを示し、実際に送りマークが除去できることを実験により確認した。通常のドライ加工に比べ、本加工法により歯車歯面の算術平均粗さが76%向上した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ドライ加工は切削油を使用しないため、加工温度の上昇や切りくずの噛みこみによる歯面精度の低下が問題となる。本研究ではこれらの問題点を振動援用により解決した。工具振動歯切り装置により、ドライ加工における加工温度を低減した。これにより工具寿命が延長し、歯車生産のコストダウンが可能になる。更に工具振動歯切り装置のモデル化を行い、設計時におけるパラメータ決定の指針を得た。これにより本装置の設計が簡便になり、社会実装がしやすくなる。また、工作物振動歯切り装置の開発により、騒音の原因となる歯面の送りマークを除去し、歯面精度を向上させることができた。これは、騒音の少ない高精度歯車の生産に寄与する技術である。

研究成果の概要(英文)：The vibration processing technology of the gear in dry environment was studied.

First, with respect to our tool oscillating gear machining device that performs machining with giving forced vibration to a tool, reproduction of the vibration tool response by modeling and quantification of the machining temperature lowering effect by this device were performed. As a result of experiment, about 15% reduction effect of processing temperature by this processing method was showed.

Next, we developed a new workpiece vibration cutting device that performs machining with giving forced vibration to the workpiece. The mechanism of feed mark removal by this processing method was shown, and it was experimentally confirmed that the feed mark can be actually removed. By this processing method, the arithmetic mean roughness of the tooth surface was improved by 76% as compared with the conventional dry hobbing.

研究分野：機械力学

キーワード：公害防止・対策 機械工作・生産工学 機械力学・制御 振動切削 コスト縮減 ドライ加工 歯車 機械要素

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 省エネルギーかつ環境負荷低減のために金属加工工場における切削油使用量の削減が世界的に進められている中で、ドイツ、日本を中心に、切削油を用いない「ドライ加工」、使用量を減らす「セミドライ加工 (MQL)」の研究が進んでいる。しかし、ドライ加工では切削油による冷却・潤滑効果が得られないため、加工時の高熱発生、切りくずの付着、摩擦による工具寿命の低下などの諸問題が生じている。歯車加工（以下、歯切り加工）におけるドライ加工の問題点としては、切削温度の上昇による工具摩耗、高温の切りくずによる工作機械の熱変形（引用文献）、切りくず凝着による仕上げ精度の低下（引用文献）などが報告されている。

(2) 歯切り加工における国内外の研究動向としては、高寿命を実現するドライ切削用工具の開発、種々の条件下におけるドライ加工実験などの研究が進められており、歯車をドライ加工できる環境が整いつつある。しかし、これらの研究は従来の生産システムから単に切削油を省いた場合を想定しており、ドライ加工の現場に適した生産工程を考慮した研究は少ない。

(3) 研究代表者らは、従来の生産工程とは逆に、焼入れ後の高硬度材料に対してドライ歯切り加工を行うことで歯車の生産工程を大幅に短縮し、かつ振動加工により加工熱を大幅に抑制する手法を提案した。振動加工の分野では、旋削、フライス加工、ドリル加工等についてはこれまで多くの研究が成されているが、歯切り加工に振動加工を応用した例は見当たらない。

(4) 研究代表者らは前年度までの研究で、ホブ（工具）に軸方向振動を与えて加工温度を低下させる「工具振動歯切り装置」を発明した。本装置は、HRC43.9以上の高硬度材料に対し、切削温度の低減が可能であることを定性的に確認した。しかし、装置の最適条件の検討や、加工温度の実測定などの定量的評価ができていなかった。また、工具振動歯切り装置は構造が複雑であり、製品として販売するには振動加工専用の歯車加工装置（ホブ盤）を開発する必要があるため、工作機械メーカーからは、より単純な構造で既存装置に簡便に実装できる振動加工装置の要望があった。

2. 研究の目的

(1) ホブ振幅の推定が可能な工具振動歯切り装置のモデルを提案する。これにより、装置を構成するパラメータの変化によるホブ振幅の推定を行い、工具振動歯切り装置の設計指針を得る。

(2) 工具振動歯切り装置における加工温度測定を行い、加工温度低減効果の定量的評価を行う。これにより、工具振動歯切り加工における適正な使用条件について検討する。

(3) 工具振動歯切り装置に比べ単純な構造で既存装置に実装しやすい新しい振動加工法として、工作物振動歯切り装置を設計・製作し、装置の有用性について検討する。本手法は、歯切り加工時に生じる歯面の送りマーク除去を目的とした加工法であり、歯面精度を高めることで、歯車使用時の騒音発生が抑制できると期待される。

3. 研究の方法

(1) 【工具振動歯切り装置のモデル化】
 図1に、工具振動歯切り装置を示す。ホブの右側に6枚の皿ばねを設置し、図左端の振動ホーンからの振動を持続させる構造である。種類の異なる皿ばねを直列配置したときの合成ばね定数を計算し、これを用いた物理モデルを構築す

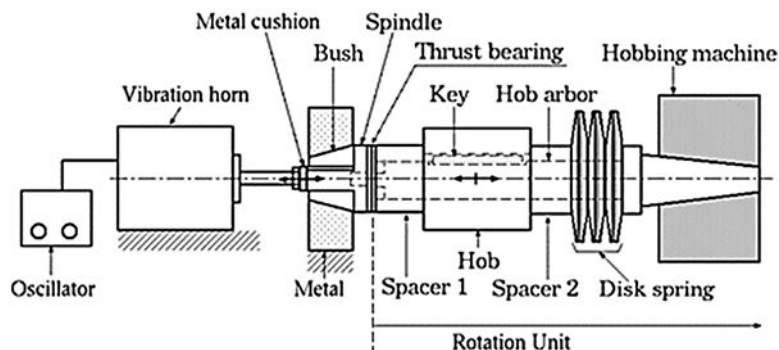


図1 工具振動歯切り加工装置

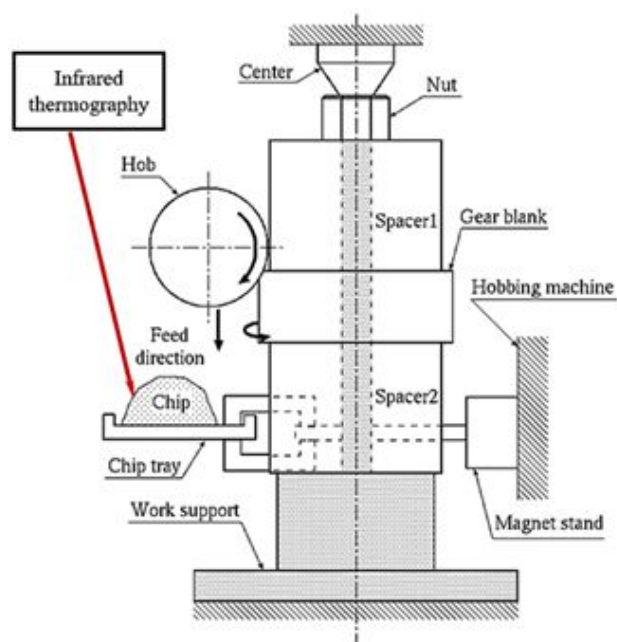


図2 非接触による切削温度測定系

る。物理モデルから運動方程式を導出し、数値シミュレーションにより外力の振動数と工具振幅の関係を調べ、実験値と比較し、モデルの妥当性について検討する。

(2) 【工具振動歯切り加工における加工温度計測】切削温度の測定は、熱電対による直接測定が一般的である。しかし、歯切り加工では切削中、工具（ホブ）と工作物が相互に回転するため熱電対の使用は難しい。そこで歯切り加工の切削温度について検討するための簡便な手法として、加工中の切りくず温度を赤外線放射温度計により非接触測定する方法を提案する。図2に、今回提案する切削温度測定系を示す。工作物の下に金属製の受け皿を配置し、切削中に排出される切りくずを収集する。この受け皿に集めた切りくずを赤外線放射温度計により測定する。赤外線放射温度計の測定条件として、酸化した鋼の放射率 $\varepsilon = 0.79$ を用いる。本装置により1個の歯車を加工する際の温度変化を測定し、妥当性について検討する。また、本装置を用い、工具振動による加工温度低減効果について実験的かつ定量的な評価を行う。実験には高周波焼入れにより熱処理した S45C 材と、モジュール 1.75 のホブを用いる。加工条件は、切削速度 40.8 m/min, ホブ送り速度 1.0 mm/rev, ホブ回転数 200 rpm, コンベンショナルカットとする。全歯たけは 3.94 mm であり、切込み量 3.6 mm で荒加工 0.34 mm で仕上げ加工を行う。工具振動歯切り加工においては、荒加工時は振動を与えずに加工し、仕上げ加工時のみホブに微小振動を与えて加工を行う。ホブ振動数は 740 Hz および 1490 Hz とし、ホブ振幅は $a = 1.3 \mu\text{m}$ で一定とする。

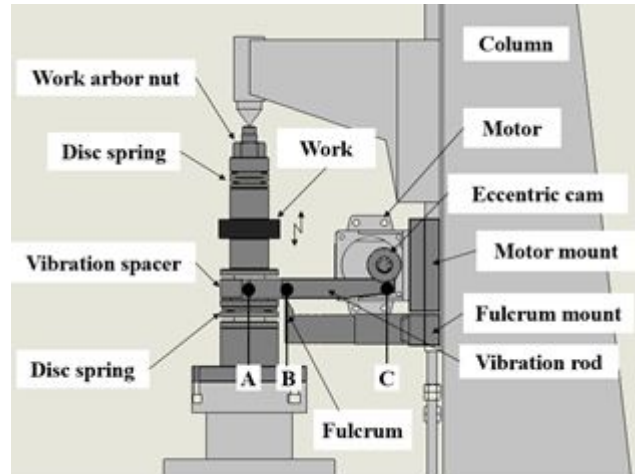


図3 工作物振動歯切り加工装置



図4 歯切り加工による送りマーク

(3) 【工作物振動歯切り加工装置の開発】

図3に、本研究で新たに設計・製作した工作物振動歯切り加工装置を示す。工作物直下に振動スペーサを配し、振動スペーサにアームを取付け、てこの原理で振動スペーサをワークアバ方向（図垂直方向）に振動させる。図中のA点は作用点、B点は支点、C点は力点を示す。力点には、偏心カムをつけたモータにより周期変動を与える。

図4は、振動を付与しない通常のドライ歯切り加工で製作した歯車の写真である。歯車の歯底・歯面に、歯切り加工による送りマークが発生していることが確認できる。歯面に送りマークがあると騒音の原因となるため、通常は歯車研削盤等により加工除去する。

図5は、工作物振動による送りマーク除去の概念図である。工作物を図上下方向に振幅 a_w で振動させることで工具と工作物の間に相対運動が生じ、工具の刃と工作物の接触する軌跡が図中赤線から青線に変化する。これにより、図5中の工作物表面の黒い領域（送りマーク）が除去できると考えられる。本装置を用いた振動加工実験を行い、本加工法の有用性について、歯底および歯面の表面粗さデータを基に検討する。

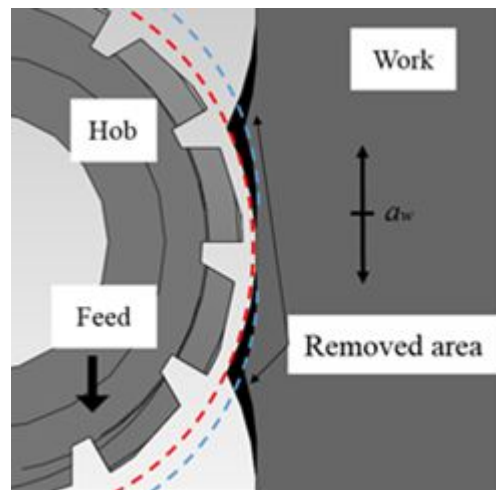


図5 工作物振動による送りマーク除去

4. 研究成果

(1) 皿ばねは荷重の増加に伴いばね定数が減少する漸軟ばねであるため、皿ばねの特性を近似した Almen-László 式（引用文献）を用いると、皿ばねのばね定数 k は式(1)で求められる。

$$k = \frac{dP}{d\delta} = \frac{D-d}{(D-d)-3R} \frac{4E}{1-\nu^2} \frac{t^3}{C_1 D^2} \left[\left(\frac{h_0}{t} \right)^2 - 3 \frac{h_0}{t} \frac{\delta}{t} + \frac{3}{2} \left(\frac{\delta}{t} \right)^2 + 1 \right] \quad (1)$$

実験装置の皿ばねには初期たわみ量 δ を与えてある。種類の異なる二種類の皿ばね A, B を用いる場合、皿ばね A, B 1 枚あたりの初期たわみ量 δ_A, δ_B をニュートン法により求めることで、各皿ばね 1 枚あたりのばね定数を式(1)より求める。求めたばね定数を k_1, k_2 、等価質量を m とすると、皿ばね A 4 枚、B 2 枚の直列配置の場合、運動方程式は式(2)となる。ここで、 C は等価減衰係数、 F_0 は周期外力の最大値、 ω は外力の角振動数、 t は時間である。

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + \frac{k_1 k_2}{2k_1 + 4k_2} x = F_0 \sin \omega t \quad (2)$$

式(2)に実験装置により得られたパラメータを代入して 4 次の RKG 法で計算した結果を図 6 に示す。図中の黒丸はレーザードップラー振動計で計測したホブ振幅の最大値、実線は式(2)から得られた計算結果である。図 6 より、本モデルから得た計算値は測定値と良く一致しており、本モデルは妥当であると考えられる。振動切削の性能は工具振幅に異存すると考えられるため、本モデルは装置設計上の有用な指針となり得る。

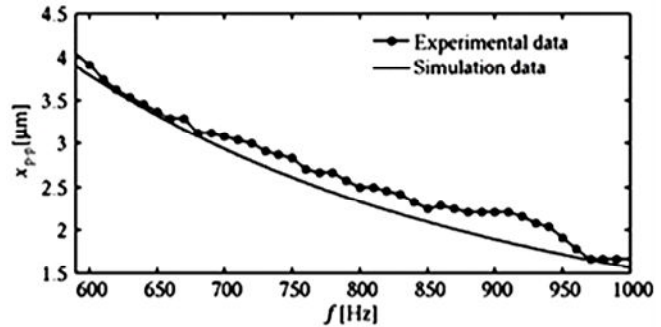


図 6 最大ホブ変位と加振振動数の関係

(2) 図 7 に、硬度 HRC55 の工作物に対し、切込み量 3.94mm で通常のドライ歯切り加工をした場合の切りくず温度の測定結果を示す。縦軸は切りくず温度の測定値、横軸は加工時間である。なお、図中の P_{pr} は加工進捗率であり、加工開始時に 0、加工終了時に 1 となる指標である。図中のデータ点は、赤外線放射温度計に表示される切りくず温度の 1 秒間分の平均値であり、最大値と最小値を誤差範囲として示す。図中の誤差範囲は最大 18°C であり、安定した測定ができていると考えられる。図 7 から、除去体積の増加する領域 A では、切りくず温度は単調に増加していることがわかる。除去体積が最大となる領域 B で切りくず温度は最大値となり、その値は約 400°C である。除去体積が減少していく領域 C では、切りくず温度は単調減少する。以上から、本測定法はドライ歯切り加工における切削温度の傾向を良く示している。従って、本測定法により得られる結果は、実際の加工温度と良い相関があると考えられる。

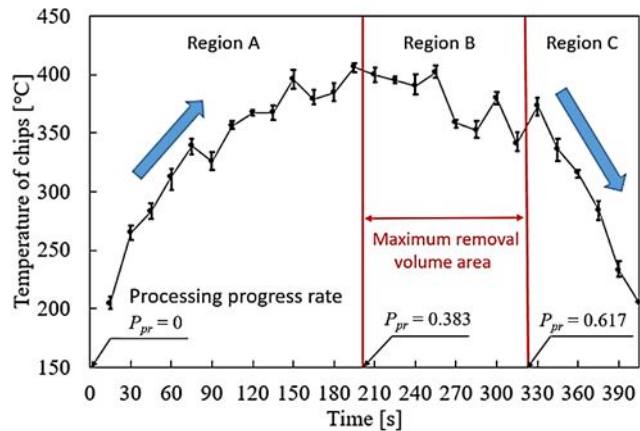


図 7 通常のドライ歯切り加工における切りくず温度の時間変化

図 8 に、工具振動数 740 Hz, 1490 Hz の各振動数におけるホブ振動歯切り加工、通常のドライ歯切り加工の計 3 種類の加工条件による切りくず温度の測定結果を示す。これは、硬度 HRC 50 の工作物を切込み量

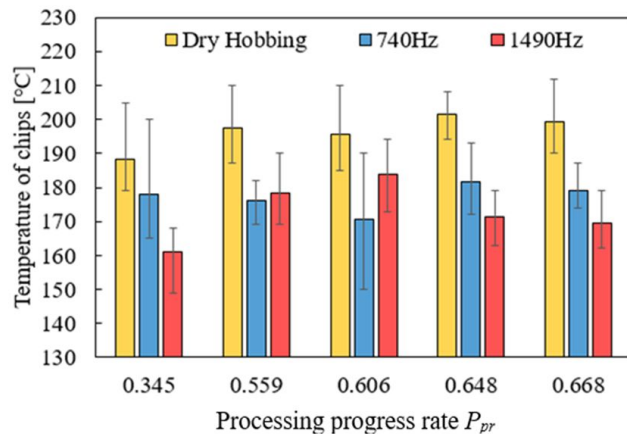


図 8 切りくず温度と加工進捗率の関係

0.34 mm で仕上げ加工したときの結果である。グラフは 1 秒間の測定値の平均値である。横軸の加工進捗率 P_{pr} は全て、除去体積が最大となる範囲（図 7 の領域 B）に含まれている。図中の全ての加工時間において、工具振動歯切り加工時は通常のドライ歯切り加工時と比較して、平均値、最大値ともに切りくず温度が低下していることが確認できる。切りくず温度の平均値に着目すると、ドライ歯切り加工における切りくず温度の最大値は、 $P_{pr} = 0.648$ における 201.4°C である。同条件における工具振動歯切り加工時の切りくず温度は、ホブ振動数 740 Hz のとき 181.8°C、1490 Hz で 171.4°C であり、ドライ歯切り加工時に比べ最大 14.9% 減少している。

図9に、切りくず温度と切込み深さの関係を示す。図中青がホブ振動数 740 Hz, 赤が 1490 Hz の結果である。実験結果より、切込み深さが 0.54 mm 以下のときは 740 Hz の方が切りくず温度が低く、切込み深さが 0.54mm 以上のときは 1490 Hz の方が切りくず温度が低いことがわかる。これは、ホブに与える振動の振動数が低いと、切削抵抗が上昇したときに振動を維持することが難しくなることを示しており、工具振動歯切り加工装置を適正に利用する際の指針となる結果であるといえる。

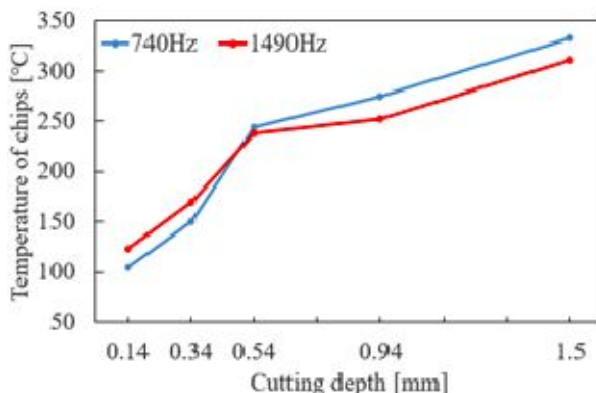


図9 切りくず温度と切込み深さの関係

(3) 図10に、工作物振動歯切り装置の実験結果を示す。実験条件は工作物振幅 $a_w = 0.2$ mm, 工作物振動数 $f_w = 12$ Hz, 工作物の硬度は HRC 55 で、ホブ(工具)には振動を与えない。その他の加工条件は工具振動歯切り装置の場合と同様である。図10の左図より、振動を与えない通常のドライ歯切り加工では歯面にホブ送り速度と同じ 1mm 毎の送りマークが確認できる。一方、図10の右図より、工作物振動歯切り加工を行うことで、歯面の送りマークが目立たなくなっていることが確認できる。歯面の表面粗さを算術平均粗さ R_a で比較すると、ドライ歯切り加工の歯面は平均で $R_a = 0.37 \mu\text{m}$ であるのに対し、工作物振動歯切り加工では平均で $R_a = 0.09 \mu\text{m}$ であり、76%の精度向上がみられた。また、歯毎の歯面精度のばらつきも工作物振動歯切り加工では殆どみられなかった。この傾向は、最大高さ粗さ R_z でも同様であった。以上から、新規に開発した工作物振動歯切り装置は歯面精度の向上に有用であることが確認できた。これは、低騒音歯車を量産する際のコスト削減に大きく寄与する結果である。

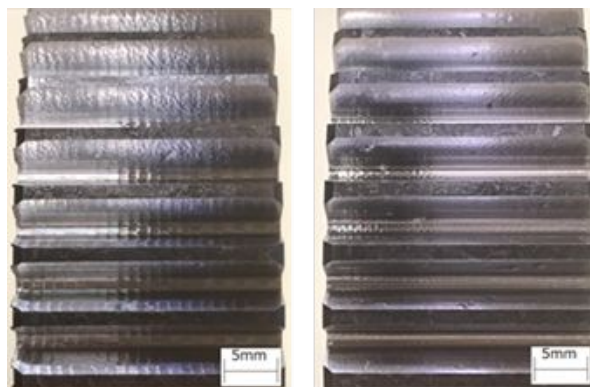


図10 ドライ歯切り加工(左)と工作物振動歯切り加工(右)の比較

< 引用文献 >

- 飯村和雄, 井出隆, 歯車の加工精度と歯切り機械の熱変形, 精密機械 36(42), 63-69, 1970
 吉村博仁 他, ホブ切りのドライ加工に関する研究, 砥粒加工学会誌 51(2), 36-41, 2007
 J.O.Almen, A.Laszlo, The uniform-section disk spring, Trans. ASME, RP-58-10, 305-314, 1936

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件) 他に 3 件の論文を投稿したが、未掲載である。

- 久保良樹, 軽部周, 高坂拓司, パワースペクトルを用いた振動切削系における加工状態の評価, 電子情報通信学会技術報告, 査読無, 2017, 117(42), 79-82
 中村隼平, 軽部周, 高坂拓司, 振動切削系に生じるびびり振動に関する実験的検討, 電子情報通信学会技術報告, 査読無, 2016, 116(151), 13-16

[学会発表](計 16 件)

- Shu Karube, Daiki Gotou, Masatoshi Shimura, The influence of workpiece subjected to periodic forced vibration on the dry hobbing, 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics(国際学会), A08138, 査読有, 2018/11/1, 85 Sky Tower Hotel (Kaohsiung, Taiwan)
 Shu Karube, Takuya Nagaoka, Takuji Kousaka, Experimental study of stick-slip dynamics in periodically forced oscillators with dry friction, 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会), F09102, 査読有, 2018/11/1, 85 Sky Tower Hotel (Kaohsiung, Taiwan)
 軽部周, 川野厚樹, 志藤広陸, 高坂拓司, 微小高調波が振動切削系に与える影響, Dynamic and Design Conference 2018 講演論文集, 115, 査読無, 2018/8/28, 東京農工大学(東京都小金井市)
 T. Yamaguchi, S. Osada, H. Asahara, S. Karube, T. Kousaka, Dynamical effect on a forced self-excited system with dry friction by weak harmonic perturbation, Proc. of 2018 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing

(NCSP '18) (国際学会), pp.483-486, 査読有, 2018/3/7, Hilton Waikiki Beach Hotel (Honolulu, Hawaii)

Shu KARUBE, Yoshiki KUBO, Takuji KOUSAKA, Experimental Study on Vibration Characteristics in Vibration Cutting Process, The 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2017) (国際学会), p.637, 査読有, 2017/12/7, Cancun International Convention Center (Cancun, Mexico)

Kazuki KAMADA, Kai KIMIHARA and Shu KARUBE, Direct Dry Hobbing of High Hardness Material Using Vibration Tool, 12th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (ISEM17-Kanazawa) Special Poster Session by Students of High School, College and College of Technology (国際学会), S023, p.143, 査読有, 2017/11/2 (Kanazawa, Japan), (Poster session) 【The Best Research award】

Shu KARUBE, Experimental Investigation of the Cutting Temperature in Vibration Hobbing, 12th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (ISEM17-Kanazawa) (国際学会), 094, p.23, 査読有, 2017/11/2 (Kanazawa, Japan)

山口拓人, 長田翔磨, 麻原寛之, 軽部周, 高坂拓司, 微小高調波外力が乾燥摩擦を伴う強制自励系に及ぼす影響, 2017年電子情報通信学会ソサイエティ大会, p.N-1-16, 査読無, 2017/9/13 東京都市大学 (東京都世田谷区)

久保良樹, 軽部周, 高坂拓司, パワースペクトルを用いた振動切削系における加工状態の評価, 電子情報通信学会技術報告, Vol.NLP2017-42, pp.79-82, 査読無, 2017/7/14, 宮古島マリンターミナル (沖縄県宮古島市)

Shu KARUBE, Development of Vibration Hobbing Machine, Proceedings of The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions (MPT2017) (国際学会), pp.113-117, 査読有, 2017/3/1, 京都テルサ (京都府京都市)

Shu KARUBE, Takuji KOUSAKA, Yuya KAWAZU, Dynamic Behavior of a Bouncing Ball, The 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (国際会議), pp.60-63, Paper ID: 1109, 査読有, 2016/11/28, New Welcity Yugawara (Yugawara, Japan)

軽部周, 江口侑希, 振動ホブ切り加工における切削温度の検討, 日本機械学会第11回生産加工・工作機械部門講演会, D37, 査読無, 2016/10/23, 名古屋大学東山キャンパス (愛知県名古屋市)

中村隼平, 松浦隆文, 軽部周, 高坂拓司, 振動切削系における切削速度の上昇に伴う動的挙動の変化, 第69回電気・情報関係学会九州支部連合大会, p.195, 査読無, 2016/9/29, 宮崎大学木花キャンパス (宮崎県宮崎市)

川野厚樹, 軽部周, 高坂拓司, 高調波励振を受けるはりの応答, 2016年度日本機械学会年次大会, G1000803, 査読無, 2016/9/13, 九州大学伊都キャンパス (福岡県福岡市)

河津裕也, 軽部周, 高坂拓司, パウンスングボール系の非線形特性, 2016年度日本機械学会年次大会, G1000705, 査読無, 2016/9/13, 九州大学伊都キャンパス (福岡県福岡市)

中村隼平, 軽部周, 高坂拓司, 振動切削系に生じるびびり振動に関する実験的検討, 非線形問題研究会 (NLP), 査読無, 2016/7/21, 北海道大学 百年記念会館 (北海道札幌市)

〔図書〕(計2件)

本江哲行編著, 阿部晶, 伊藤昌彦, 岡本峰基, 軽部周, 河村庄造, 外山茂浩, 中江貴志執筆, PEL 機械力学, 実教出版, 2016

軽部周, 振動ホブ切り装置の開発, 機械技術 Vol.64, No.9 (2016年8月号), pp.30-34, 2016

〔その他〕

〔講演〕(計2件)

軽部周, 大分高専の紹介および振動ホブ切り加工における取組みについて, 日本機械学会 P-SCD398 分科会第9回, 2018/3/5, 九州大学箱崎キャンパス (福岡県福岡市)

軽部周, 振動援用加工の現状と歯車加工装置への適用, 電子情報通信学会九州支部一般講演会, 2017/6/19, 大分大学駄原キャンパス (大分県大分市)

〔ホームページ〕 <https://karuken-1.webnode.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

- ・福永 圭悟 (Fukunaga, Keigo)
- ・井上 俊二 (Inoue, Shunji)
- ・川島 益男 (Kawashima, Masuo)