

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25340077

研究課題名(和文)環境に配慮した新しい歯車加工法 - 熱処理後超音波ドライ加工の提案及びメカニズム解明

研究課題名(英文)Development of environment-friendly gear hobbing method - Vibration dry hobbing

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・准教授

研究者番号：70370054

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：切削油を用いないドライ環境での歯車加工方法について研究を行った。材料を焼入れしてからドライホブ切り加工を行うことで、歯車の製作過程を単純化でき、低環境負荷・低コストで高精度の歯車を量産することができる。本研究では、材料の硬度を変化させて歯車加工を行い、切削力と加工精度を測定した。その結果、硬度の高いHRC54の材料を加工した場合の方が、硬度の低いHRC23の場合よりも加工精度が高く、切削力も同程度であることを確認した。更に、工具に微小高周波振動を与える振動ホブ切り加工を開発し、ドライ加工による発熱が抑制できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This study proposes a new environment-friendly gear hobbing method for cutting gear materials finished heat treatment. This method is capable of reducing the environmental pollution brought by cutting oils and producing a large quantity of precise gears by low costs. Our experiments show that the HRC54 material is higher accuracy and about the same cutting force than HRC23 material under the method. These results show that our method is effective. Also, we propose another new method - vibration hobbing method - to solve the high processing temperatures at dry hobbing. The vibration hobbing method is useful for reducing of processing heat.

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 機械要素 コスト縮減 ドライ加工 歯車  
振動切削

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究開始当初より現在まで、省エネルギー・環境負荷低減のため、金属加工工場における切削油使用量の削減が全世界的に進められている。歯車加工（ホブ切り加工）の分野でも企業等によるドライ切削工具の開発が積極的に進められ、ドライホブ切り加工が普及し始めていた。しかしドライホブ切り加工に移行しても、切削油を使用しないだけで、歯車を削る手順は歯切り加工をしてから焼入れ処理をするという従来通りのものが殆どであった。

(2) 研究代表者らは、ホブ切り加工の被削材料に焼入れ処理を施した後にドライホブ切り加工を行うことで、切削油を用いた従来の加工と同等の加工品質が得られることを実験で確認した。しかし、高硬度材料をホブ切りした場合、切削力がどの程度増加するかが不明であった。更にドライ加工は冷却・潤滑効果に乏しいため、高硬度材料加工時の高熱発生によるホブ寿命の低下が問題であった。

(3) 焼入れした高硬度材料に対しドライホブ切り加工を行う手法は、ホブ切り後の歯車形状の修正が不要となるため、高精度の歯車を低コストで大量生産できる利点がある。更にドライ加工全般の問題である加工時の高熱発生に関しては、研究代表者の専門である振動加工技術を応用することで解決できる可能性があると考えた。

2. 研究の目的

(1) 切削油を用いないドライホブ切り加工において、材料硬度を変化させた実験を行い、各硬度における切削力、加工面粗さ、歯形誤差等を調べることで、最適な高硬度ドライホブ切り加工条件を明らかにする。

(2) ドライホブ切り加工モデルを作成し、材料硬度を変化させた場合のドライホブ切り加工のメカニズムを明らかにする。

(3) 精密加工法である振動切削技術をホブ切り加工に応用した振動ホブ切り装置を新規開発する。ホブに振動を付与することでドライホブ切り加工の問題点である高熱の抑制が可能であるかを実験的に検討する。

3. 研究の方法

(1) ドライホブ切り加工における材料硬度と切削力の関係を実験により測定する。図1に実験装置（ホブ盤、カシフジ KR-600）、図2にホブ切り加工時の切削力の測定系を示す。ひずみゲージを貼り付けたホブアークに2つのスペーサとホブを通し、左端面にスリップリングを取り付ける。また、スリップリングからアースをとることでノイズを除去する。ひずみゲージのリード線はホブアークの中心を通しスリップリングに接続する。材

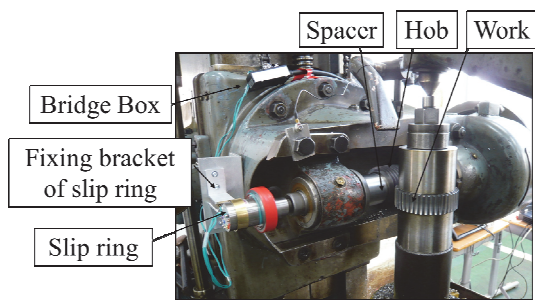


図1 ドライホブ加工装置

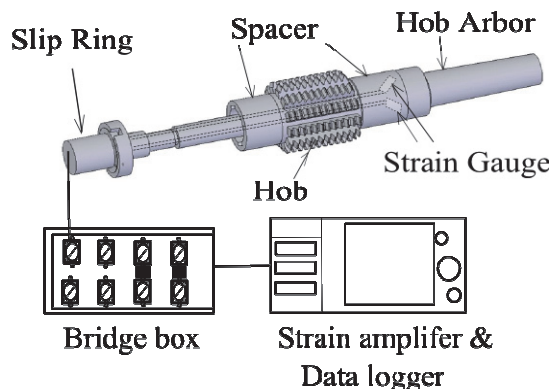


図2 切削力測定系

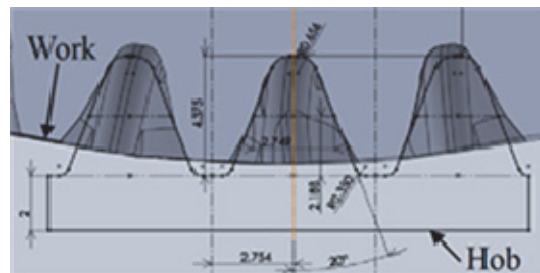
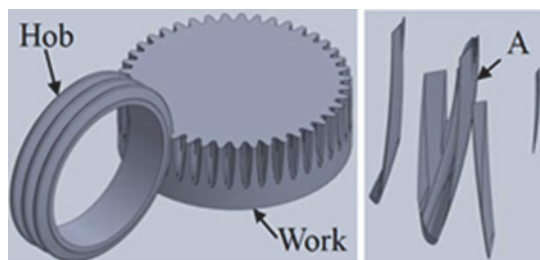


図3 ホブと工作物の切削時の位置関係



(a) ホブ-工作物モデル (b) 切りくず  
図4 3D-CADによるシミュレーション

料は高周波焼入れにより S45C 材を HRC23.3, 36.1, 43.9, 52.6, 54.3 の 5 種類の硬度とし用いる。工具はモジュール 1.75 の超硬ホブを用い、切削速度 40.8m/min, 切込み深さ 3.94mm でコンベンショナルカットを行った。

(2) (1) で得られた材料硬度と切削力の関係について、ドライホブ切り加工モデルを作成し、同様の傾向が得られることを示す。ホブ加工における切削力の理論式は、中山が提唱した旋削加工における切削力の理論式を用いて構築する。最大切りくず厚さには、実験による実測値を用いて計算を行う。実験条件

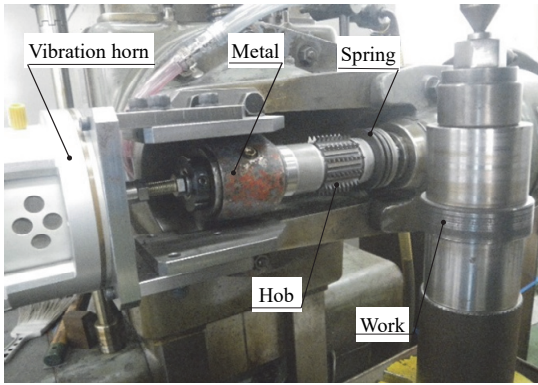


図5 開発した振動ホブ切り装置

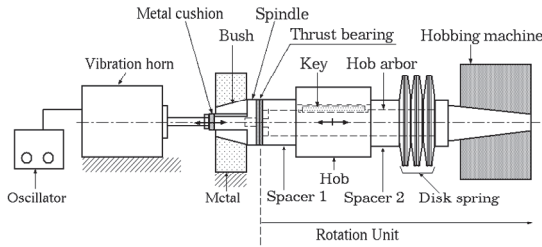
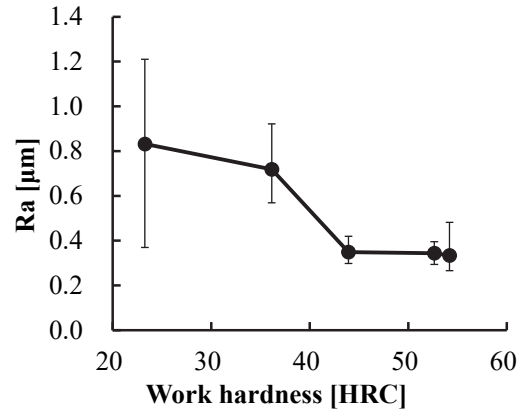


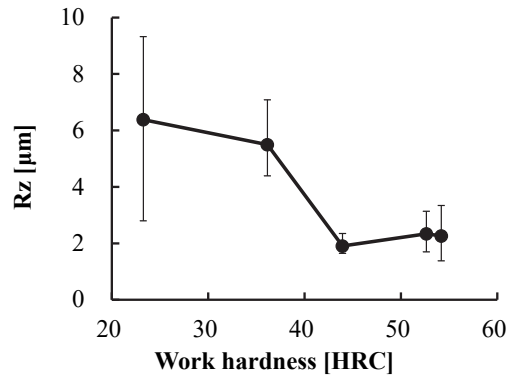
図6 振動ホブ切り装置の振動伝達機構

よりすくい角  $\alpha = 30 \text{ deg}$ , 切削幅  $b = 2.3 \text{ mm}$  とする. 各硬度のせん断角  $\phi_c$  は HRC54.3 のときを  $90 \text{ 度}$  と仮定し, 最大切りくず厚さにより変化する. また, すべり線上でのせん断変形応力  $\tau_s$  [ $\text{kgf}/\text{mm}^2$ ] は切りくず断面の微小ビッカース硬度値  $H_v$  とほぼ比例することより,  $\tau_s = H_v / 5.2$  を用いる. 材料硬度  $H_H$  [HRC] と  $H_v$  の関係式を導入することで, 切削力  $F$  [N] と材料硬度  $H_H$  [HRC] の関係式が得られる. 切削抵抗はせん断面の大きさに比例すると考えられる. ホブは複数刃であることを考慮すると, ホブ加工時のせん断面積がホブ 1 刃分の何倍かを求めることで 1 刃分の切削力から全体の切削力を求めることができると考える. せん断面積は 3DCAD による切りくず面積から求める. 切りくずは 3DCAD 上でワークにホブ刃のモデルを組み合わせることで製作する. 図 3 にホブと工作物の切削時の位置関係を示す. 図 4 (a) に 3D-CAD による切削シミュレーションの様子, 図 4 (b) に得られた切りくず形状を示す. 図 4 (b) 中の A が 1 刃分の切りくずに相当する. 切りくずモデルから求めると全体のせん断面積は 1 刃分のせん断面積の 1.58 倍になるため, 本研究では式 (3) の  $F$  を 1.58 倍した値を切削力の理論値とする. 以上のモデルから, 材料硬度と切削力の理論値との関係を調べ, 実験値と比較する.

(3) 切削中のホブを長手方向に微小振動させる振動ホブ切り装置を新規開発する. 図 5 が開発した振動ホブ切り装置である. 図 5 左の振動ホーンは先メタル上下に設置したプレートにより, ホブ盤にボルト締結で固定している. 振動ホーンから発する振動が先メタル内のスピンドルを介してスペーサ, ホブ, 皿ばねへと伝達される. スピンドルを装着する



(a) 算術平均粗さ Ra



(b) 最大高さ粗さ Rz

図7 材料硬度と歯底面粗さの関係

先メタルの穴にはテーパがあるため, ブッシュを装着し, 先メタル内部の穴を平行にしてスピンドルが振動できるようにする.

振動ホブ切り装置の振動伝達機構の詳細を図 6 に示す. 振動ホーンは加振周波数を  $5 \sim 5,000 \text{ Hz}$  の範囲で調整できる. スピンドルの左端には焼入れを施した当たり金を装着しており, 振動ホーンから発した振動を効率的にスピンドルへ伝達させる. また, スピンドルの右端にスラストベアリングを取付ける. これによりベアリングより右側はホブの切削運動にあわせて回転し, 左側の振動発生部は回転しないようにする. 皿ばねは, 平和発條製呼び 35-1 を 4 枚, 35-2 を 2 枚直列で用いる. この皿ばねの復元力により, 切削中でもホブの振動が安定して持続できる.

本装置を用い, 振動によるドライホブ切り加工の加工熱低減が可能かについて検討する. 実験条件は (1) と同様であるが, 総切込み深さ  $3.94 \text{ mm}$  に対し, 切込み深さ  $3.6 \text{ mm}$  で荒加工を, 切込み深さ  $0.34 \text{ mm}$  で仕上げ加工を行う. 荒加工は振動を与えない通常のドライホブ切り加工で行う. 仕上げ加工は振動ホブ切り加工と通常のドライホブ切り加工の両方で行い, 結果を比較する. 振動ホブ切り加工の条件は, ホブ振動数  $740 \text{ Hz}$ , ホブ振幅約  $2 \mu\text{m}$  である.

#### 4. 研究成果

(1) 図 7 に, ドライホブ切り加工による材料

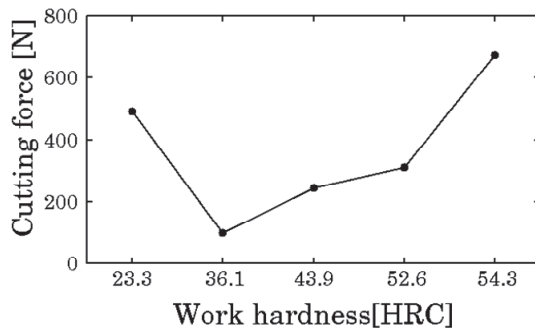


図8 材料硬度と切削力の関係 (実験値)

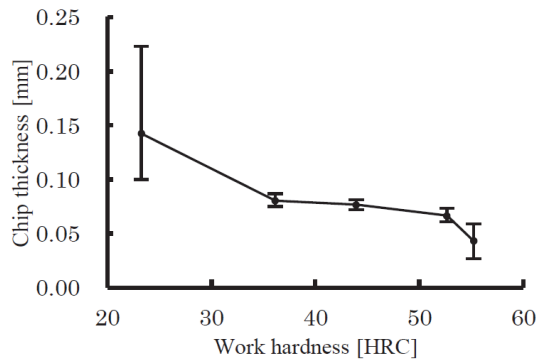


図9 材料硬度と切りくず厚さの関係

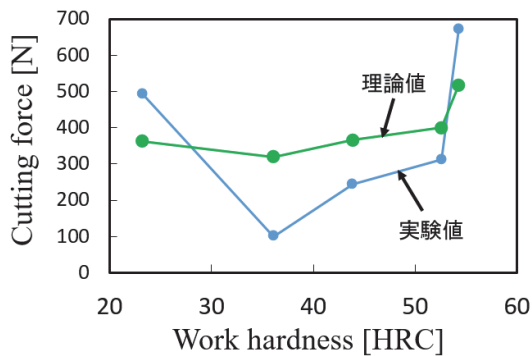
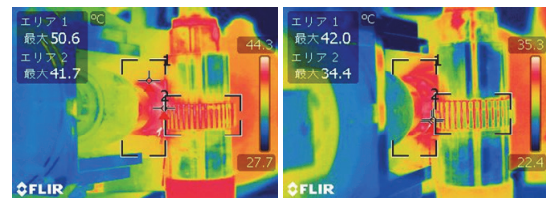


図10 材料硬度と切削力の関係

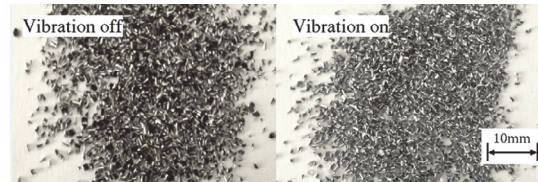
硬度と歯底面粗さの実験結果を示す。図7(a)に算術平均粗さRaの結果を示す。Raの平均値は、材料硬度の増加に伴い減少する傾向がみられ、HRC43.9以上ではほぼ一定となる。また、HRC23.3では測定値の幅が他の硬度に比べて大きいに対し、HRC43.9以上では測定値の幅が小さく均一な加工面が得られているといえる。図7(b)に最大高さ粗さRzの結果を示す。RzもRaとほぼ同様の傾向を示しており、Rzの平均値の最小値はHRC43.9の時の $1.9\mu\text{m}$ である。HRC23.3と36.1の場合にRa、Rzの値が大きくなる原因として、構成刃先の発生が考えられる。これらの条件では、材料が柔軟であり、低速切削かつ摩擦熱などで切削温度が高い状態であり、構成刃先が発生しやすいものと推測される。

図8に、各硬度で測定した切削力の平均値を示す。HRC23.3に比べHRC36.1における切削力は大きく減少しており、HRC36.1以上では材料硬度の増加に伴い切削力が上昇するというV字形の傾向を示した。即ち、HRC23.3とHRC36.1以上では切削の傾向が異なる。



(a) 振動無し (b) 振動有り

図11 振動ホブ切り加工におけるサーモグラフィ画像



(a) 振動無し (b) 振動有り

図12 振動ホブ切り加工による切りくず

以下、切りくずに着目して考察する。図9は実験から得られた材料硬度と切りくず厚さの関係であり、材料硬度が高いほど切りくず厚さが減少している。即ち、HRC23.3では加工面の温度が比較的低いため切りくず厚さが厚くなり、切りくずがホブ切れ刃に及ぼす抵抗力が大きくなるため、材料硬度が低いにもかかわらず切削力が増大したものと考えられる。一方、HRC36.1~54.3では切削時の高温により切りくずが薄く伸ばされるため切りくずの抵抗力が小さく、切りくずがホブ切れ刃に影響を及ぼさなくなるため、材料硬度の増加に伴い切削力が大きくなったと考えられる。

以上から、これまで測定できていなかったホブ切りの切削力測定を行い、ドライホブ加工時の切削力を把握することができた。また、切削力は材料硬度に対してV字形の傾向を持ったため、HRC52.6の方がHRC23.3よりも切削力が小さいことがわかった。また、表面粗さはHRC23.3よりもHRC52.6の方が小さく加工精度が良いため、HRC52.6での高硬度ドライホブ加工は有用であることが確認できた。

(2) 図10に、得られた切削力の理論値および実験値と材料硬度の関係を示す。切削力の理論値はHRC23.3のとき378N、HRC36.1のとき299N、HRC54.3のとき450Nであり、実験値ほど顕著ではないが、グラフにV字形の傾向が得られている。構築した理論式において切削力の増加は最大切りくず厚さと材料硬度に依存している。HRC36.1~54.3の範囲では材料硬度の増加に伴い最大切りくず厚さが減少するが、材料硬度の増加の影響が大きいため全体として切削力は増加傾向となる。一方、HRC23.3では最大切りくず厚さの値が他の硬度と比べ大きいいため切削力が増加する。即ち、HRC23.3における切削力の増加は切りくず厚さの影響であることが理論的に確認できた。

(3) 図11に、仕上げ加工中の振動ホブ切り

装置のサーモグラフィー画像を示す。図 1 1 (a) はホブに振動を与えない場合、(b) は振動ホブ切り加工時の画像である。エリア 1 はホブの領域、エリア 2 は工作物の領域で最高温度を表示している。図 1 1 (a) のホブ振動無しの場合ではホブ温度 50.6°C、工作物温度 41.7°C であるが、(b) の振動ホブ切り加工時ではホブ温度 42.0°C、工作物温度 34.4°C である。非接触測定ではあるが、本結果よりホブ、工作物の両方で振動ホブ切り加工により切削温度が相対的に低下することが確認できる。

図 1 2 は材料硬度 HRC50 を加工した際の切りくずの写真である。図 1 2 (a) はホブに振動を与えない時の切りくず、(b) は振動ホブ切り加工時の切りくずである。工具であるホブに振動を加えることで焼けの無い金属光沢のある切りくずが出ることから、振動ホブ切り加工による切削温度の低減効果が確認できる。以上から、新規開発した振動ホブ切り装置により、ドライ加工の問題点である切削温度の低減が可能であることが確認できた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 軽部周, 江口侑希, 振動ホブ切り加工法の開発, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.81, No.832, 2015  
DOI: 10.1299/transjsme.15-00299
- ② 軽部周, 麻原寛之, 高坂拓司, 振動切削系に生じるびり振動の発生メカニズム, 電子情報通信学会論文誌 A, 査読有, Vol.J98-A, No.9, 2015, 556-562
- ③ 河津裕也, 軽部周, 高坂拓司, バウンシングボール系における周波数応答解析, 信学技報, 査読有, 2015, 115(284), 11-16
- ④ 軽部周, 高坂拓司, 振動切削系に生じるびり振動の発生メカニズム, 信学技報, 査読有, 2014, 114(145), 11-16

[学会発表] (計 18 件)

- ① 河津裕也, 軽部周, バウンシングボール系に生じる非線形現象の解析, 日本機械学会九州学生会第 47 回卒業研究発表会, 査読無, 2016/3/4, 鹿児島高等専門学校 (鹿児島県霧島市) 【優秀講演賞】
- ② 首藤義晟, 軽部周, インポリュート歯車における歯数と歯形形状の関係, 日本機械学会九州学生会第 47 回卒業研究発表会, 査読無, 2016/3/4, 鹿児島高等専門学校 (鹿児島県霧島市)
- ③ 江口侑希, 軽部周, 振動ホブ切り加工における加工条件の最適化, 日本機械学会九州学生会第 47 回卒業研究発表会, 査読無, 2016/3/4, 鹿児島高等専門学校 (鹿児島県霧島市)

- ④ 河津裕也, 軽部周, 高坂拓司, バウンシングボール系における周波数応答解析, 非線形問題研究会 (NLP), 査読有, 2015/10/31, 大濱信泉記念館 (沖縄県石垣市)
- ⑤ 軽部周, 江口侑希, 振動歯切り加工装置の挙動解析, 日本機械学会 [No.15-7] Dynamics and Design Conference 2015, 査読無, 2015/8/25, 弘前大学文京町キャンパス (青森県弘前市)
- ⑥ 江口侑希, 軽部周, 振動歯切り加工法に関する実験的研究, 日本機械学会九州学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会, 査読無, 2015/3/3, 北九州工業高等専門学校 (福岡県北九州市)
- ⑦ 窄口昌大, 軽部周, 歯車加工のシミュレーションおよび切削力推定, 日本機械学会九州学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会, 査読無, 2015/3/3, 北九州工業高等専門学校 (福岡県北九州市)
- ⑧ 幸和範, 軽部周, 周期的に振動する弾性板上で跳ねるピンポン球の挙動, 日本機械学会九州学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会, 査読無, 2015/3/3, 北九州工業高等専門学校 (福岡県北九州市)
- ⑨ 軽部周, モデルによる歯車加工メカニズムの検討, 第 13 回評価診断に関するシンポジウム, 査読無, 2014/12/11, 北九州国際会議場 (福岡県北九州市)
- ⑩ Masahiro Sakoguchi and Shu Karube, Research on Appropriate Cutting Conditions for Direct Dry Hobbing, ISTS2014, Taipei, Taiwan, 査読有, 2014/11/20, National Taipei University of Technology (台湾)
- ⑪ Kazunori Yuki and Shu Karube, Bouncing Dynamics of a Ping-Pong Ball on a Periodic Oscillating Elastic Plate, ISTS2014, Taipei, Taiwan, 査読有, 2014/11/20, National Taipei University of Technology (台湾)
- ⑫ 軽部周, 振動を利用した新しい歯車加工方法の開発, 第 10 回生産加工・工作機械部門講演会, 査読無, 2014/11/15, 徳島大学常三島キャンパス (徳島県徳島市)
- ⑬ 軽部周, 周期振動するラケットに衝突するボールの挙動解析, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会, 査読無, 2014/8/28, 上智大学四谷キャンパス (東京都千代田区)
- ⑭ 軽部周, 高坂拓司, 振動切削系に生じるびり振動の発生メカニズム, 非線形問題研究会(NLP), 査読有, 2014/7/21, 函館市中央図書館 (北海道函館市)
- ⑮ 工藤智将, 高野拓真, 軽部周, ドライホブ加工における歯車材硬度と切削力の関係, 日本機械学会九州学生会第 45 回学生員卒業研究発表講演会, 査読無, 2014/3/4, 九州大学伊都キャンパス (福岡県福岡市)
- ⑯ 山本大平, 大塚卓弥, 軽部周, 高坂拓司,

- 卓球ラケット上で跳ねるボールの挙動解析, 日本機械学会九州学生会第 45 回学生員卒業研究発表講演会, 査読無, 2014/3/4, 九州大学伊都キャンパス (福岡県福岡市)
- ⑬ 軽部周, 高坂拓司, 早乙女辰男, 振動切削系における動的挙動のモニタリング, 日本機械学会第 12 回評価・振動に関するシンポジウム, 査読無, 2013/12/3, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市)
- ⑭ 軽部周, 高野拓真, 福永圭悟, 井上俊二, ドライホブ切りにおける歯車材硬度の影響, 日本機械学会MP T 2013 シンポジウム<伝導装置>, 査読無, 2013/11/14, 宮日会館 (宮崎県宮崎市)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 1 件)  
名称: ドライホブ加工装置  
発明者: 軽部周, 川島益男, 福永圭悟, 井上俊二  
権利者: 独立行政法人国立高等専門学校機構, 有限会社川島鉄工所  
種類: 特願  
番号: 2014-173154  
出願年月日: 2014-8  
国内外の別: 国内

〔その他〕

【受賞】

- ① 江口侑希, 軽部周, 振動歯切り加工法に関する実験的研究, 工作機械技術振興賞 (奨励賞), 公益財団法人工作機械技術振興財団, 2015/6/22, 東海大学交友会館 (東京都千代田区)  
<http://www.kousakukikai-zaidan.or.jp/results/incentive-award/>

【講演】

- ① 軽部周, 振動を利用した新しい歯切り加工法について, 信学会九州支部講演会, 2015/7/3, 大分大学旦野原キャンパス (大分県大分市)
- ② 軽部周, 振動を利用した新しい歯切り加工法について -振動切削加工技術と歯車加工への応用-, 日本機械学会 P-SCD380 分科会第 10 回, 2015/5/11, 九州大学箱崎キャンパス (福岡県福岡市)
- ③ 薬師寺輝敏, 軽部周, 大分高専が研究・開発した新しい加工技術について, 平成 26 年度第 2 回ものづくり大分産学交流会, 2015/2/26, 別府国際コンベンションセンター (大分県別府市)

6. 研究組織

(1) 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・准教授  
研究者番号: 70370054

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

福永 圭悟 (FUKUNAGA, Keigo)  
大分工業高等専門学校・機械工学科・教授  
研究者番号: 60390548