

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 12 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04104

研究課題名（和文）表層の材料流動を積極活用する新バニシング加工法の開発と樹脂射出成形用金型への応用

研究課題名（英文）Development of newly burnishing process for active material flow of surface layer and its application to plastic injection molds

研究代表者

岡田 将人（Okada, Masato）

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：60369973

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、研究遂行者らが開発した工具回転を伴うバニシング加工の加工特性を明らかにするとともに、樹脂射出成形金型の表面処理に適用した場合の有用性について明らかにした。バニシング加工特性は、主に表面形状、表面粗さ、光沢度、残留応力により評価した。工具の送り方向をバニシング工具の回転によるしゅう動作用の方向と揃えることで、良好な仕上げ面が得られた。バニシング加工により得られた射出成形金型は、切削加工、研磨加工によるそれらより良好な仕上げ面を呈した。加えて、バニシング加工を施した金型より得られた成形品は、研磨加工の場合と同様であり、本加工法を適用することで樹脂射出成形金型の機上一貫加工を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、これまでに工業製品の表面加工法として広く適用されてきた切削加工、研磨加工に対し、新たな手法であるバニシング加工の有用性を検証した。バニシング加工は、上述の加工法と加工原理が異なり、対象面表層の材料を押しなすことにより、所望の表面形状と表層の機械的特性を同時に得ようとする加工法である。本研究で、研究遂行者らが開発した新たなバニシング加工法の基本的な加工特性を明らかにし、材料流動による表面創成の学術的有用性を提示できた。

研究対象としたバニシング加工法は、一般的な工作機械で実現可能であり、今後、様々な表面特性を求められる工業製品に対し、本加工法の実用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, the fundamental burnishing characteristics and quality of a molded product were evaluated during the sliding burnishing process with an active rotary tool was applied to the on-machine surface finishing of an aluminum mold for resin injection molding. The burnishing characteristics were mainly evaluated based on the surface profile, roughness, glossiness, and residual stress. The surface quality improved when the sliding directions of the tool rotation and tool feed were the same. The mold piece obtained from the burnishing process had almost same surface roughness as that obtained from the polishing process. The molded product quality obtained for these molds was similar to the mold surface quality. Based on these results, on-machine surface finishing of the injection mold was achieved using a general machine tool through position control by applying sliding burnishing with an active rotary tool.

研究分野：精密加工（切削加工・バニシング加工）

キーワード：バニシング加工 樹脂射出成形用金型 しゅう動 仕上げ面性状 アルミニウム合金

1. 研究開始当初の背景

工業製品において、構成要素の「表面特性」は、その製品性能を決定する重要な特性であり、表面材質(組織形態)、粗さ(形状)、硬さなどの様々な因子の相互作用により決定される。表面特性は、熱処理等も含めた種々の表面加工法により、所望の特性へと加工される。一方、表面加工法の良否は、実用性を踏まえた場合、加工コスト、環境負荷なども重要な因子となる。そのため、理想的な表面加工法とは、図1の要件を満たす「所望の表面特性を簡便で効率的かつサステナブルに実現できる加工法」といえる。

平滑な表面の創成には、主に対象面上の微小凹凸を削り落とす研削加工や研磨加工が用いられる。一方、これに対して、対象面上の微小凹凸を押しなす加工法にバニシング加工がある。バニシング加工とは図2に示すとおり、硬質工具を対象面上でしゅう動させることで、表層に材料流動を発生させて、平滑化と同時に表層のみに加工硬化と圧縮残留応力に由来する耐摩耗性と疲労強度を付与することができる。さらに、切削加工のための工作機械内で実施でき、専用機を必要としない利点も有しており、前述の理想的な表面加工法として期待される。しかしながら、高速のしゅう動作用を得るために旋盤系工作機械を用いる必要があるため生産現場では軸形状製品の仕上げ加工に部分的に採用されるに留まっており、効果的な適用に至っていない。

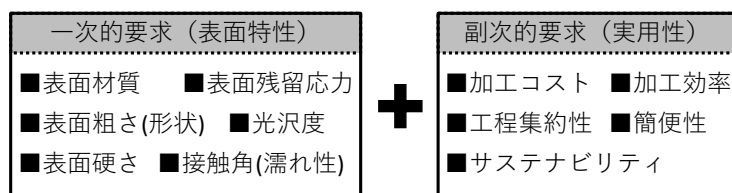


図1 表面加工法への要求

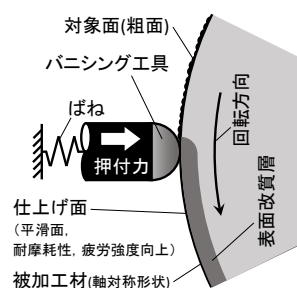


図2 一般的なバニシング加工

2. 研究の目的

本研究では、著者らが開発した新たなバニシング加工法(以後、新バニシ加工法)により、新たな表面特性の制御方法を確立することを目的とする。新バニシ加工は図3に示すように、球頭形状の硬質工具を対象面法線方向から傾斜させて、高速回転させながら対象面に倣って送る加工法である。軸対称形状製品への適用のみならず、フライス系工作機械を用いて平面や自由曲面にも適用できる柔軟性の高い加工法である。

新バニシ加工法の有用性を検証するために、樹脂射出成形用金型(樹脂金型)表面を対象とし、新バニシ加工により得られる表面特性を評価するとともに、従来加工法(切削+研磨加工)と新バニシ加工法により創成した金型を用いた射出成形により、その優位性を明らかにする。加えて、新バニシ加工を応用して金型表面にテクスチャを創成することで、射出成形時の金型内における樹脂流動の制御を実現する。

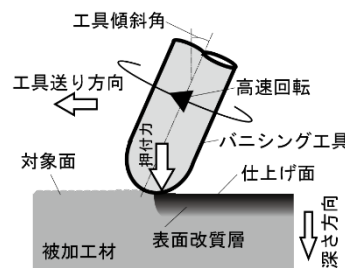


図3 新バニシ加工法の概略

3. 研究の方法

(1) バニシング加工特性の基礎的検討

本研究で対象とする新バニシ加工法の基礎的な加工特性を検討するために、仕上げ面評価が容易な平面を対象とし、種々の加工条件下において、3成分力計により加工中の加工力を測定するとともに、その仕上げ面を評価した。実験装置の概略図を図4に示す。本実験では、加工機に5軸マシニングセンタ、工具には、DLCをコーティングした球頭工具を用いた。バニシング加工において、工具送り方向をX方向、クロスフィード方向をY方向とした。アルミニウム合金(JIS A7075)からなる工作物は、3成分動力計の上に固定し、面出し加工のための切削加工を行った後にバニシング加工を施した。工具は、対象面法線方向から10°で傾斜させた。図5(a), (b)にバニシング加工の工具経路を示す。新バニシ加工では、工具を回転させるために、工具回転による対象面に対するしゅう動が作用する。このしゅう動に対し、同一の方向に工具全体を送る場合を上向き送り、その逆を下向き送りと定義し、工具送り方向による仕上げ面性状への影響も検討した。

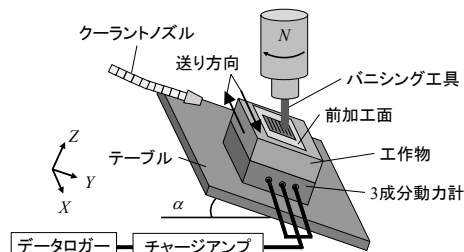


図4 実験装置

表 1 に本研究で実施した加工条件を示す。工具押込み方向位置 Z_p は、前加工であるボールエンドミル加工時の工具先端位置を $Z_p = 0 \mu\text{m}$ と定義し、前加工の切削条件より得られる理論的なカスプ高さと同じ対象面法線方向に $3 \mu\text{m}$ 離れた位置を走査させる場合を $Z_p = +3 \mu\text{m}$ と定義した。これに加え、 $Z_p = -5 \mu\text{m}$ はカスプの谷の位置から $5 \mu\text{m}$ の距離で対象面法線方向に押し込んだ位置と定義した。なお、工具回転による加工対象面とのしゅう動速度である v_s は、理論的な工具と工作物間の接触点における相対速度と定義した。仕上げ面の比較対象とする研磨加工は #800 から #8000 の研磨紙により十分な鏡面が得られた研磨面とした。

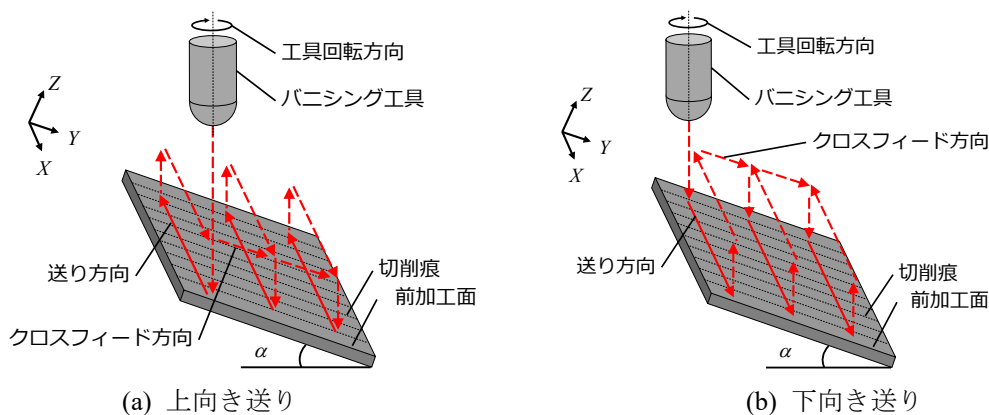


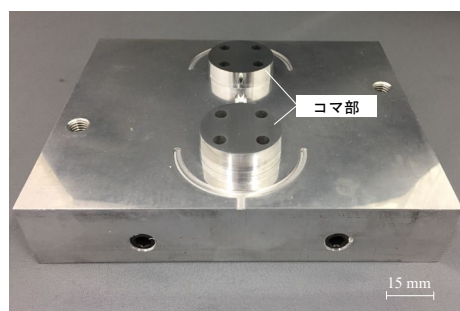
図 5 工具経路

表 1 バニシング加工条件

工具送り方向		上向き送り, 下向き送り
工具押込み方向位置	μm	$Z_p = +3, 0, -5$
しゅう動速度	m/min	$v_s = 0.82, 7.4, 14.7$
送り速度	mm/s	$f = 5, 10, 20, 30, 50$
クロスフィード量	μm	$C_f = 30$
加工油剤		HYSOL MB 50, BP Castrol K.K.

(2) バニシング加工の樹脂射出成形用金型への適用

図 6(a), (b)に、バニシング加工の有用性を検討するために用いた樹脂射出成形用金型のコア型、キャビティ型の外観写真を示す。これら金型は、入れ子構造として鋼製母型に挿入したうえで、コア型を樹脂射出成形機の可動側に、キャビティ型を固定側に取り付けた。本実験では、コア型コマ部に対し、前加工である切削加工、ならびにバニシング加工、研磨加工の3種類の仕上げ加工を施した場合の成形実験を施した。切削加工は、ボールエンドミルによりカスプ高さが $2.5 \mu\text{m}$ とした。バニシング加工、研磨加工においては、コマ部上面と側面の両面に同様に加工を施し、コマが樹脂と接触する面全体を均一に揃えた。コマ部上面にはエジェクタピン用の穴が4カ所設けられており、成形中は、エジェクタピン先端により、コマ部上面は平坦形状を呈するように設置した。樹脂射出成形実験では、2つのコマを上下位置となるように固定するが、固定位置による影響を排除するために、上方にはダミーのコマを設置し、下方に位置するコマに、それぞれの加工法により仕上げたコマを設置した。本金型により得られる成形品は軸対称の容器状製品となり、成形品の表面性状は、成形時にコマ部と接触状態にある容器内底面とした。なお、樹脂射出成形実験における樹脂材料は ABS 樹脂とした。



(a) コア型

(b) キャビティ型

図 6 樹脂射出成形用金型の外観

4. 研究成果

※前章の実験方法では、実施した実験条件全てを示しているが、紙面の都合上、本章では得られた実験結果の一部を紹介する。

(1) バニシング加工特性の基礎的検討

図 7(a)-(c)に新バニシ加工法において上向き送り、下向き送りにより得られた仕上げ面の 3 次元表面形状を、前加工面と併せて示す。工具送り方向以外のバニシング加工条件は、 $Z_p=0\ \mu\text{m}$ 、 $v_s=7.4\ \text{m/min}$ 、 $f=5\ \text{mm/s}$ 、 $C_f=30\ \mu\text{m}$ とした。加えて、図 8(a), (b)に両工具送り方向の仕上げ面外観、ならびに図 9 に前加工面である切削痕が認められる X 方向の表面粗さと光沢度をそれぞれ示す。図 7(a)より、前加工であるボールエンドミル加工による高さ $3\ \mu\text{m}$ 程度のカスパが明瞭に認められるのに対し、図 7(b), (c)に示すとおり、バニシング加工後の仕上げ面は安定して平滑化されていることがわかる。一方、バニシング加工後の仕上げ面を工具送り方向と比較すると、下向き送りによる仕上げ面の場合に、X、Y の両方向に微小かつ周期的な凹凸の発現が認められた。図 8(a), (b)に示すとおり、仕上げ面外観も、上向き送りは極めて良好な鏡面状態が得られているものの、微小な凹凸が認められた下向き送りの仕上げ面に鏡面性は認められなかった。加えて、図 9 に示す通り、表面粗さならびに光沢度の観点からも、上向き送りが明らかに良好な表面性状を示した。なお、前加工面の X 方向の表面粗さは $Ra=0.70\text{-}0.80\ \mu\text{m}$ 、 $Rz=3.5\text{-}4.5\ \mu\text{m}$ であり、両工具送り方向ともにバニシング加工により大幅に改善されていたことを付言する。これらの工具送り方向による仕上げ面品質の違いは、新バニシ加工特有の表層の材料流動形態の差異により生じるものであり、本加工法の場合、工具送り方向に向けて工具回転によるしゅう動作用を発現させることが望ましいといえる。加えて、新バニシ加工により、平滑な鏡面を工作機械上で工具を付け変えるのみで得られることがわかった。

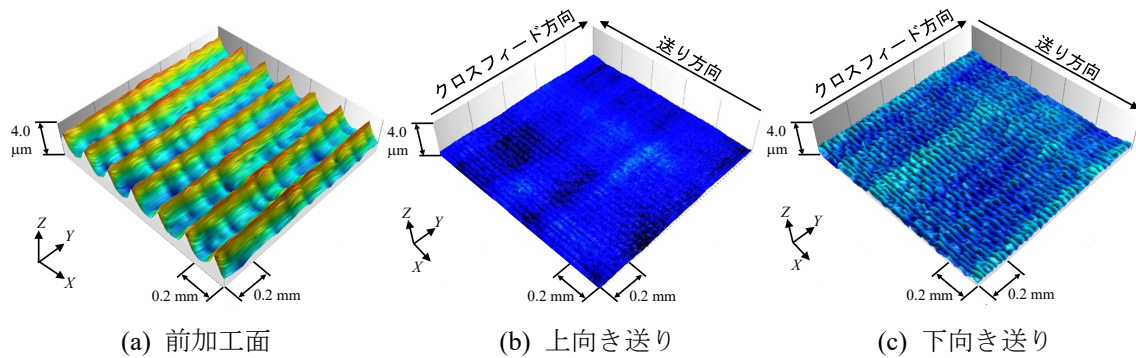


図 7 工具送り方向による仕上げ面形状

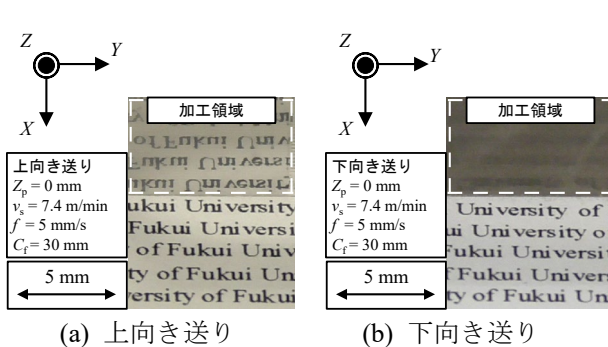


図 8 工具送り方向による仕上げ面外観

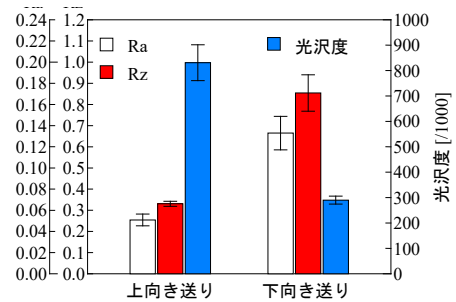


図 9 X 方向の表面粗さと光沢度

(2) バニシング加工の樹脂射出成形用金型への適用

図 10(a)-(c)に、切削加工、バニシング加工、研磨加工により得られた樹脂射出成形用金型のコマ部上面の 3 次元表面形状を示す。切削加工、バニシング加工においては、素材状態からの機上一貫加工により得られたコマ部である。バニシング加工の条件は、上向き送り、 $Z_p=0\ \mu\text{m}$ 、 $v_s=0.82\ \text{m/min}$ 、 $f=5\ \text{mm/s}$ 、 $C_f=30\ \mu\text{m}$ とした。加えて、図 11(a)-(c)に、それぞれの加工法によるコマ部上面の外観写真、図 12 にそれぞれのコマ部上面 X 方向の表面粗さと光沢度を示す。図より、切削加工後の仕上げ面にはボールエンドミル加工のクロスフィードに伴う周期的なカスパが明瞭に認められるのに対し、この切削加工の後にバニシング加工、研磨加工を施すことによって、それらカスパが消失していることがわかる。バニシング加工においてはカスパ材料を流動させることで、研磨加工においてはカスパ材料を除去することで平滑化されたことがわかる。バニシング加工と研磨加工の場合を比較すると、バニシング加工のほうが表面粗さ、光沢度ともに研磨加工よりも良好な結果が得られている。これらのことから、切削加工からの機上一貫加工により得られたバニシング加工によるコマ部は、手仕上げによる研磨加工によるコマ部より表面粗さ

と光沢度の観点で良好な仕上げ面を得たといえる。なお、測定結果は割愛するが、バニシング加工により得られた仕上げ面には、切削加工、研磨加工の仕上げ面と比較して圧縮側の残留応力が発現していたことも付言する。

図 13(a), (b)に樹脂射出成形実験により得られた成形品の一例を示す。ダミーのコマと3種類の加工法により得られたコマから同様の成形品が得られていることがわかる。これらの内、3種類の加工法により得られた成形品の内側平面を評価対象とした。図 14 に3種類の加工法により仕上げたコマにより得られた成形品のX方向の表面粗さと光沢度を示す。3次元表面形状の測定結果は割愛するが、切削加工より得られた仕上げ面には、図 10(a)に示すカスプ周期に做った凹凸が転写された形状が明瞭に認められ、この影響がX方向の成形品表面粗さの増加に起因したと考える。一方、バニシング加工、研磨加工により仕上げたコマによる成形品は、表面粗さ、光沢度ともに同程度の品質が得られた。これらのことから、バニシング加工により仕上げられた金型を用いた樹脂射出成形により得られた成形品は、手仕上げの研磨加工により仕上げられた金型を用いた場合と同程度の品質の成形品を得ることが可能であり、新バニシ加工法の有用性が明らかにできた。

本報では紙面の都合により割愛しているが、本研究では、これら樹脂射出成形金型への新バニシ加工法の適用効果の他に、フィラー入り樹脂による樹脂射出成形実験を想定し、バニシング加工により得られた仕上げ面に対し、炭素繊維とのしゅう動による摩擦摩耗試験を実施したところ、研磨加工面よりも良好な耐摩耗性を示し、新バニシ加工法が金型の耐久性の観点でも優位性を期待できる加工法であることを明らかにした。加えて、アルミニウム合金の重力 casting 用金型においても、同様の効果が得られることを明らかにした。さらに、バニシング加工時の工具回転による先端軌跡を制御することで、表面テクスチャリング技術に応用できることも明らかにできた。これらの本研究による成果を、今後の表面処理技術の高度化に継続的につなげていきたい。

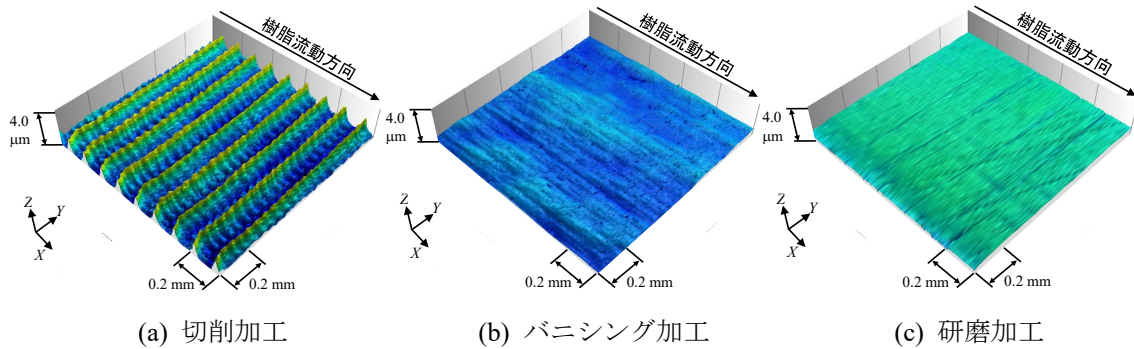


図 10 加工法によるコマ部上面の表面形状

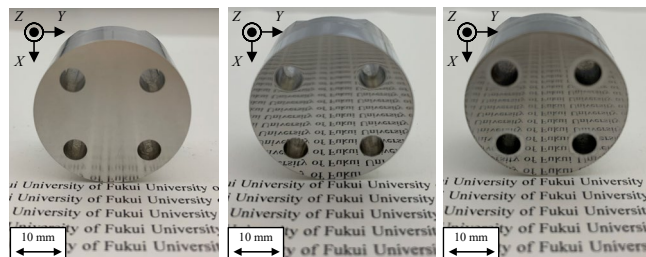


図 11 加工法によるコマ部上面の表面形状

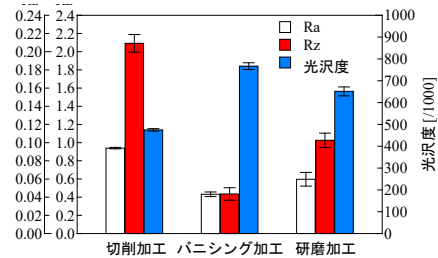


図 12 X方向の表面粗さと光沢度(コマ)

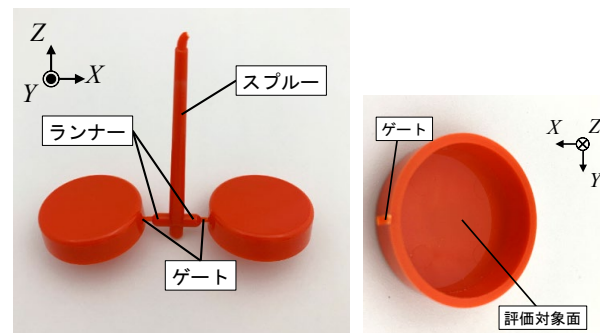


図 13 成形品外観

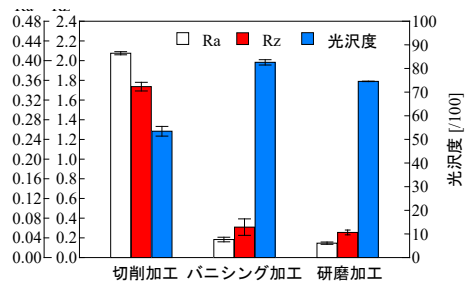


図 14 X方向の表面粗さと光沢度(成形品)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 岡田将人, 吉野裕大, 新川真人, 柳嘉代子, 佐々木敏彦	4. 巻 87
2. 論文標題 工具回転型バニシング加工による樹脂射出成形用アルミニウム合金金型の機上仕上げ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.21-00037	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6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 新川真人, 吉田佳典, 箱山智之, 山下実, 岡田将人, 吉野裕大
2. 発表標題 機械学習を活用した金型表面仕上げ方法の違いによる成形性評価
3. 学会等名 成形加工シンポジア'21
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田将人, 吉野裕大, 新川真人
2. 発表標題 樹脂射出成形用アルミニウム合金金型の仕上げ工程へのバニシング加工の適用効果
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西脇潤, 岡田将人, 川畠丈志, 助田武紀, 瀧真, 藤田裕希, 三浦拓也, 大津雅亮
2. 発表標題 チップバニシング加工に用いるDLCコーテッド超硬工具の膜材質による寿命評価
3. 学会等名 2020年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北川俊希, 岡田将人, 三浦拓也, 大津雅亮
2. 発表標題 断続的なチップパニング加工による表面テクスチャリング技術の提案
3. 学会等名 2020年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉野裕大, 岡田将人, 新川真人, 三浦拓也, 大津雅亮
2. 発表標題 アルミニウム合金を対象とした工具回転型チップパニング加工 -加工特性の基礎的検討と射出成形金型への応用の試み-
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 吉野裕大, 岡田将人, 新川真人, 三浦拓也, 大津雅亮
2. 発表標題 アルミニウム合金を対象とした工具回転型チップパニング加工 -金型表面処理とABS樹脂の射出成形への適用の試み-
3. 学会等名 2019年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

福井大学 精密加工(岡田)研究室 http://mech.u-fukui.ac.jp/~okada/

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	大津 雅亮 (Otsu Masaaki) (20304032)	福井大学・学術研究院工学系部門・教授 (13401)	
研究分担者	三浦 拓也 (Miura Takuya) (60781466)	大阪大学・接合科学研究所・特任講師 (14401)	

	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
研究協力者	新川 真人 (Nikawa Makoto)	岐阜大学・工学部・准教授 (13701)	
研究協力者	佐々木 敏彦 (Sasaki Toshihiko)	金沢大学・自然科学研究科・教授 (13301)	
研究協力者	柳 嘉代子 (Yanagi Kayoko)	金沢大学・人間社会研究域・研究員 (13301)	

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