

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：37401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03888

研究課題名(和文) 金属加工面と成形樹脂との離型性に関する基礎的研究と高離型性への取り組み

研究課題名(英文) Fundamental Study on Releasability of Metal Mold

研究代表者

北田 良二 (Kitada, Ryoji)

崇城大学・工学部・教授

研究者番号：60540276

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、金型加工面と成形樹脂との離型性について考察した。金型加工面として、精密金型の表面加工で汎用的に使用されている形彫り放電加工面、切削加工面、研削加工面を採用した。各種加工面に熱硬化性フェノール樹脂を圧縮成形した後に、成形樹脂を加工面から垂直方向に引張り、成形樹脂が剥離する際の最大引張荷重を離型力として測定した。

各種加工面と離型力との相関を調査した結果、表面粗さが大きくなるにしたがって離型力が大きくなる傾向が得られた。したがって、表面粗さは離型性に影響を及ぼす因子の一つであり、加工面の凹凸の起伏を小さくすることで離型性を改善できる可能性があることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プラスチック成形に使用される金型は、製品の品質、コストに大きな影響を及ぼすことから、耐摩耗性、耐食性、離型性などの金型特性を向上させることが重要となる。これらの金型特性を向上させるために、一般的には表面処理が適用されているが、連続成形により摩擦摩耗するために金型寿命が課題となる。また、離型性においては、金型表面の加工面状態が影響することから、表面処理の効果は限定的である。

本研究成果は、表面処理に頼らずに金型加工面によって離型性を根本的に向上させる基盤技術であり、成形品の品質向上とコスト削減が期待される。したがって、プラスチック成形金型において大きな進展をもたらすものと考えられる。

研究成果の概要(英文)： In this study, factors of the mold releasability for the processed surface properties of the metal molds were investigated by evaluations of adhesion forces between the processed metal mold surfaces and the molded resins in compression molding of thermosetting phenol resin. Die sinking electrical discharge machining, milling and grinding process were employed as the processed surfaces of the metal molds. In order to measure a mold release force, molded resin to the processed surface was pulled up in the perpendicular direction from its processed surface.

As a result, the mold release forces tended to increase as the surface roughness increased. It is considered that the anchor effect at the compression molding becomes higher with the increase of undulation on the processed surface. Therefore, the undulation is one of the factors affecting the mold releasability, and it would be possible to improve the mold releasability by reducing the undulation with processing conditions.

研究分野：精密加工学

キーワード：金型 離型 熱硬化性樹脂 表面粗さ 圧縮成形 放電加工 切削加工 研削加工

1. 研究開始当初の背景

樹脂成形は、大量生産および低コスト化には必要不可欠な生産手法であり、今後も生産性の向上や高品質化が期待されている。樹脂成形に使用される金型の表面特性は、成形品の品質やコストに直接影響を及ぼすため、耐摩耗性・耐食性・離型性などの金型表面特性の機能向上が要求されている。一般的に金型表面特性の向上には図1に示す様に表面処理が適用されるが、表面処理は連続成形による摩擦・摩耗により機能が損なわれるため、その効果は限定的である。特に、樹脂成形品を金型から取り出す際の剥離のし易さである離型性は、金型加工法による表面性状も影響を及ぼすために表面処理のみでは解決することが難しい。離型性が低い(悪い)と成形品を金型から取り出すのに大きな力(離型力)を必要とするため成形品にダメージを与える、金型が汚れやすくメンテナンスを頻繁に行う必要があるといった課題が生じる。そこで、樹脂成形金型の加工面と成形樹脂との離型性について基礎的研究に取り組み、課題解決を目指した。

精密金型に一般的に使用されている彫り放電加工面と成形樹脂との離型性について、基礎的研究に取り組んだ結果、放電加工面の表面粗さと離型力との定性的な相関関係は得られた。しかしながら、離型性向上を目指すためには、各種金型加工法に対して離型性を評価して離型メカニズムを解明する必要がある。離型メカニズムを解明できれば、加工面性状によって成形樹脂の離型力を抑制することが可能となり、生産現場における経験や勘に頼っていた不安定要素を改善して生産性向上に寄与できる。そこで、離型力の定量評価システムの開発から離型力評価までの一連について取り組み、各種金型加工面と成形樹脂との離型性について、離型メカニズムの解明と金型加工面性状における離型力の抑制方法を目指した。

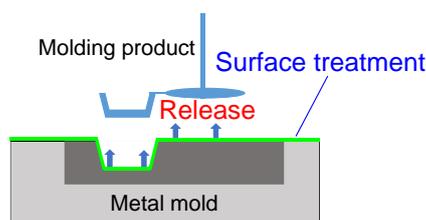


図1. 金型の表面処理と離型性

2. 研究の目的

樹脂成形は、良質な製品を低コストで大量生産できることが最大の利点であるが、使用される金型の表面特性である耐摩耗性、耐食性、離型性は成形品の品質およびコストに大きな影響を及ぼす。そのため、金型の表面特性を向上させるために、一般的には表面処理が適用されている。しかしながら、表面処理の膜厚は μm オーダーであるため、その効果は限定的である。また、離型性においては、金型加工法による表面状態の影響も受けるため、加工面性状が課題となることがある。したがって、表面処理によらず加工面の状態において離型性を向上させることは、樹脂成形金型において進展をもたらすものと考えられる^{①, ②}。そこで、各種加工法により表面粗さの異なる加工面を形成して、熱硬化性フェノール樹脂を圧縮成形した場合の離型力を測定することで、加工法と表面粗さの違いが離型性に及ぼす影響について実験的に検討した。

3. 研究の方法

(1) 成形材料

圧縮成形では、主に熱硬化性樹脂が使用されている。本研究では、熱硬化性樹脂で最も生産量が多い熱硬化性フェノール樹脂を使用した。離型試験で使用した熱硬化性フェノール樹脂の配合を表1に示す。マトリクス材には、汎用的なフェノール樹脂原料として、硬化剤を含むパウダー状のノボラック型フェノール樹脂を使用した。成形時の機械的強度を得るために、粒径 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ のガラスビーズを骨材として使用した。離型試験において、加工面に対する成形品の転写性と界面剥離は重要であり、そのためにワックス剤としてステアリン酸亜鉛を微量添加した。

表1. 熱硬化性フェノール樹脂の配合

Component	Volume ratio (%)	Volume (mm ³)	Density (mg/mm ³)	Weight (g)	Weight ratio (%)	Material
Phenol resin powder 【Base resin】	30	457.8	1.5	0.69	16	
Glass filler 【Reinforcing filler】 Grain size 20 - 30 μm	70	1068.2	2.6	2.78	84	
Zinc stearate 【Waxing compound】	-	-	-	0.0080	-	
Ethyl alcohol (99.5 %) 【Binder】	-	60	0.793	0.05 (60 μL)	-	
Total	100	1526	-	3.53	100	 Resin tablet $\phi 13 \times h 4 \text{ mm}$

圧縮成形の離型試験において、成形材料の安定した加熱・溶融と加圧は重要であり、金型キャビティへ未充填なく充填させる必要がある。したがって、成形材料には、直径13 mm、高さ14 mmの円柱形状のタブレットを使用した。表1の配合比により混合した各材料に対して約70 μL のエタノールを結合剤として添加して攪拌した後に、 $\phi 13 \text{ mm}$ のダイを用いて打錠することでタブレットを製作した。

(2) 成形装置および離型力測定法

成形手法としては、最も単純な成形機構である熱硬化性樹脂の圧縮成形法を採用した。圧縮成形および離型力測定のために開発した成形装置の模式図を図2に示す。また、離型試験の模式図を図3に示す。金型加工面を想定した試験片の加工面に対して、熱硬化性フェノール樹脂を圧縮成形した後に、加工面から成形樹脂を垂直方向に引っ張り上げることで、剥離する瞬間の最大荷重を離型力として測定する。離型試験法の手順と離型力測定法について、以下に列記する。

- 1) 離型力を測定する加工面を上面にして、試験片をホルダーへ固定する。
- 2) 引張圧縮試験機のヘッドを下降させて金型を試験片へ仮クランプする。
- 3) 熱硬化性フェノール樹脂タブレットとプランジャーを金型内部へ挿入する。
- 4) 引張圧縮試験機のヘッドを更に降下させて、金型と試験片を所定の荷重によりクランプすると同時に、加工面に対して所定の圧力により樹脂を圧縮成形する。
- 5) クランプ力と成形圧力を印加した状態で所定の硬化時間で保持し、樹脂を硬化させる。
- 6) 硬化時間が経過したら、引張圧縮試験機のヘッドを上昇させてクランプ力と成形圧力を開放する。
- 7) 引張圧縮試験機のヘッドを所定の離型速度で更に上昇させることで、加工面と成形樹脂との引張荷重をフォースゲージによりモニターする。
- 8) 加工面と成形樹脂とが垂直方向に剥離する瞬間の最大荷重を離型力として測定する。

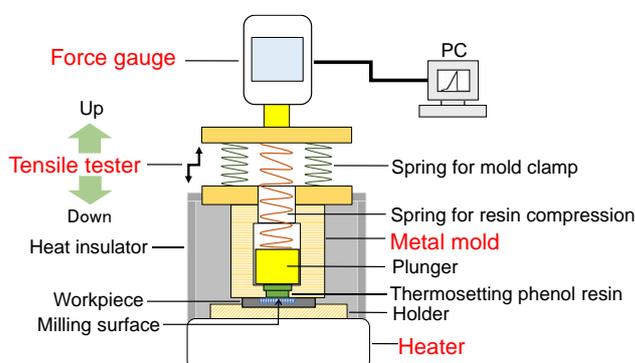


図2. 離型試験装置

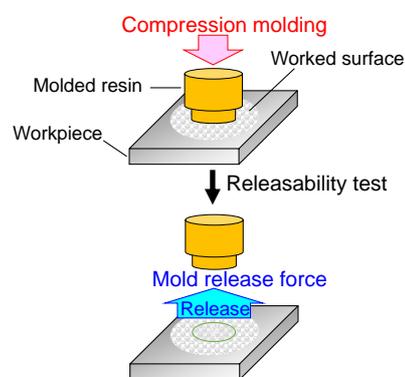


図3. 離型試験法

離型試験条件を表2に示す。試験片の加工面に対して、 $\phi 14$ mmの円形に熱硬化性フェノール樹脂を0.82 MPaの成形圧力で10分間圧縮成形して、その後、加工面から成形樹脂が10 mm/minで垂直方向に剥離する際の離型力を測定した。

表2. 離型試験条件

Mold clamping force	250 N (25 kg)
Molding resin	Thermosetting phenol resin
Molding pressure	0.82 MPa (8.36 kg/cm ²)
Molding speed	100 mm/min
Molding temperature	423 K (150 °C)
Cure time	10 min
Crosshead speed	10 mm/min
Contacting area	154 mm ² ($\Phi 14$ mm)

4. 研究成果

(1) 各種加工面の離型試験結果

離型試験に使用する試験片の金型鋼材には冷間金型に一般的に用いられるSKD11を使用して、そのサイズを28×31×厚み5 mmとした。その試験片表面に、金型表面加工として一般的に使用されている形彫り放電加工、切削加工、研削加工を行い、表面粗さの異なる各種加工面の試験片を作製して離型試験を実施した。

離型試験後の各種加工面の試験片と成形樹脂について、外観および表面の顕微鏡写真を比較したものを図4に示す。離型試験後の各種加工面と成形樹脂との転写面を確認すると、加工面と成形樹脂が界面剥離しており、加工面粗さと成形樹脂の表面粗さが同程度であることから離型性に問題ないことがわかる。

(2) 離型力測定結果

図4の離型試験における離型力の測定結果の一例として、形彫り放電加工面の離型力測定結果を図5に示す。金型と一緒に成形樹脂を形彫り放電加工面から垂直方向に上昇させるにつれて引張荷重は直線的に上昇し、加工面から成形樹脂が剥離する瞬間に最大荷重となる。この最大荷重から風袋重量を除いたものが離型力となり、数値が高いほど離型力は大きく、離型しにくい加工面となる。

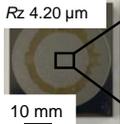
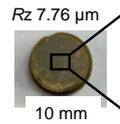
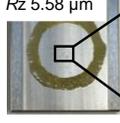
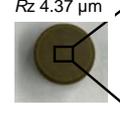
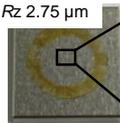
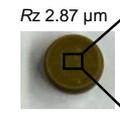
	Workpiece	Molded resin
EDM	 Rz 4.20 μm EDMed surface	 Rz 7.76 μm Resin surface
	Electrode: Cylindrical copper ($\Phi 25$ mm), Discharge current: 0.8 A, Pulse duration: 7 μs , Working fluid: Normal kerosene type	
Milling	 Rz 5.58 μm Milling surface	 Rz 4.37 μm Resin surface
	Feed pitch: 0.06 mm, Depth of cut: 20 mm, Nose radius : 0.4 mm Spindle speed: 4000 rpm, Feed rate: 80 mm/min, Number of path: 184	
Grinding	 Rz 2.75 μm Grinding surface	 Rz 2.87 μm Resin surface
	Abrasive grain, Alumina, Grain size: #80, Bond: Vitriified bond, Size: 205 × 19 × 50.8 mm, Peripheral speed: 1300 m/min, Depth of cut: 0.002 mm (Rough grinding), 0.001 mm (Fine grinding), Feed: 4 mm (Rough grinding), 2 mm (Fine grinding)	

図4. 各種加工面の離型試験結果

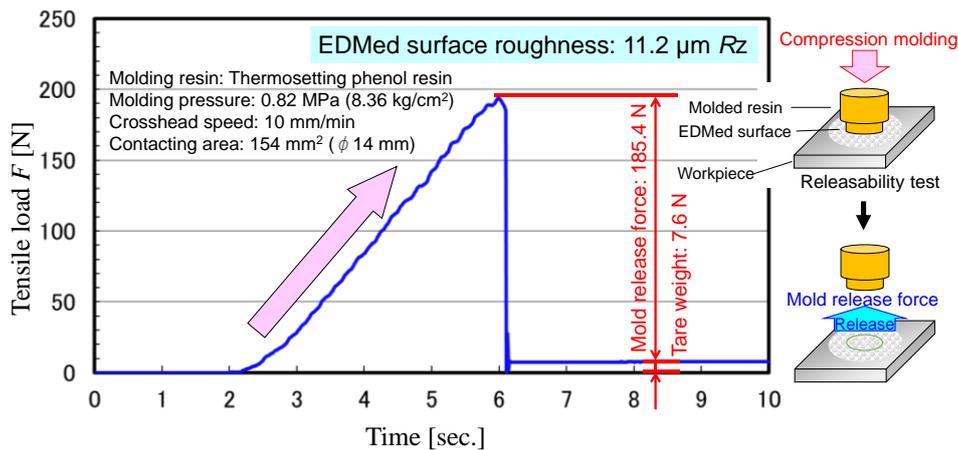


図5. 離型力測定結果(形彫り放電加工面)

(3) 各種加工面の離型力比較

表面粗さ(最大高さ粗さ Rz , 図6参照)が異なる各種加工面の試験片に対して離型試験を行い, 最大高さ粗さ Rz と離型力 F_r との関係性を求めた結果を図7に示す. 同図(a)より, 測定された離型力 F_r を試験片毎にプロットした場合, 同一表面粗さにおける離型力にばらつきがあり明確な傾向が得られなかった. そこで, 同図(b)では, 同一加工条件の試験片に対して, 最大高さ粗さ Rz と離型力 F_r のそれぞれについて平均値を求めてプロットした. 平均値で評価することで最大高さ粗さ Rz と離型力 F_r について相関を確認することができた.

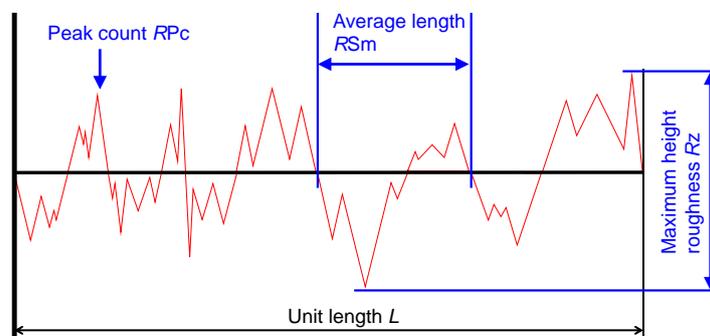


図6. 表面粗さプロフィール

形彫り放電加工面と切削加工面においては, 表面粗さが大きくなるにつれて離型力 F_r は大きくなる傾向であり, 全体的に放電加工面よりも切削加工面のほうが離型力は大きいことがわか

る。また、形彫り放電加工面と切削加工面よりも表面粗さの小さい研削加工面の離型力 F_r をみると、表面粗さが小さいにも関わらず離型力 F_r が大きくなっていることがわかる。

(4) 各種加工法における離型要因

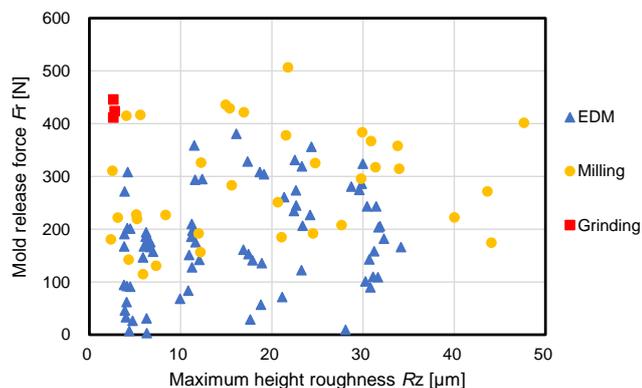
形彫り放電加工面と切削加工面においては、表面粗さが大きくなるにしたがって離型力 F_r は大きくなった。したがって、形彫り放電加工面と切削加工面の離型要因としては、図8に示す様に、加工面の凹凸形状の谷部分におけるアンカー効果が強くなることが影響した結果であると考えられる。

一方、最大高さ粗さが $Rz4 \mu\text{m}$ 以下となる研削加工面の離型力 F_r においては、表面粗さが小さくなると離型力は大きくなった。研削加工面の離型要因としては、フラットな表面形状であるためアンカー効果ではなく、加工痕やピンホールなどの影響が考えられる。表面粗さが小さいほうが剥離の際に離型の起点がなく、離型力 F_r が高くなったものと推測される。

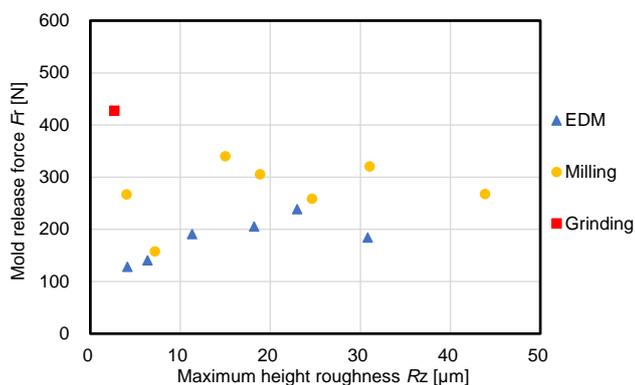
(5) まとめ

各種加工面の離型力 F_r を比較考察した結果、離型力 F_r が低く離型性に優れた加工法と表面粗さは、表面粗さが小さい最大高さ粗さ Rz が $4\mu\text{m}$ 以下の形彫り放電加工面であると考えられる。

今後、離型試験の安定性を向上させて、表面粗さの異なる各種加工面の離型試験を継続実施して、表面粗さの小さい形彫り放電加工面の高離型性について実証していく計画である。



(a) 測定値



(b) 平均値

図7. 最大高さ粗さ Rz と離型力 F_r との関係

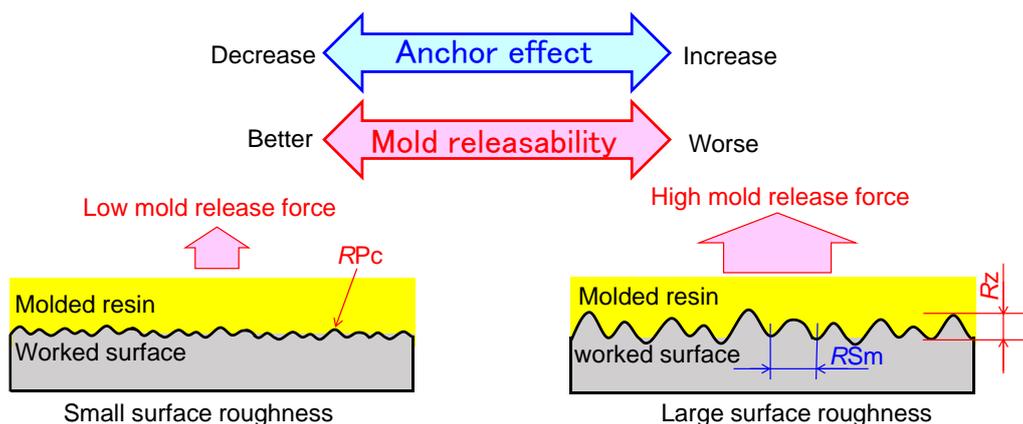


図8. 離型要因

<引用文献>

- ① M. Yoshii et al.: Investigation Into the Release Behavior and Releasability Evaluation of the Encapsulation of Semiconductor Packages, IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 30, No. 3 (2007), pp. 228-235.
- ② T. Sasaki et al.: An experimental study on ejection forces of injection molding, Precision Engineering, Vol. 24, No. 3 (2000), pp. 270-273.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Ryoji KITADA, Qin WANG, Kazuhiro KAWAGUCHI, Shun-ichiro TSUETANI, Akira OKADA
2. 発表標題 Fundamental Study on Factors of Mold Releasability from Milling Surface in Compression Molding of Thermosetting Phenol Resin
3. 学会等名 The 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21) (オンライン) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 王欽, 川口和大, 北田良二, 松岡将平, 岡田晃
2. 発表標題 熱硬化性フェノール樹脂の圧縮成形における形彫り放電加工面と切削加工面の離型抵抗比較
3. 学会等名 電気加工学会全国大会 (2021) (オンライン)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryoji KITADA, Qin WANG, Shun-ichiro TSUETANI, Akira OKADA
2. 発表標題 Influence of surface roughness of die sinking EDM on mold releasability in compression molding of thermosetting phenol resin
3. 学会等名 21st CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XXI) (ハイブリッド) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北田良二, 秋山晃太郎, 天本翔二, 池内祐貴, 岡田晃
2. 発表標題 熱硬化性フェノール樹脂の圧縮成形における形彫り放電加工面の離型性
3. 学会等名 電気加工学会全国大会 (2020) (オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryoji KITADA, Yuki IKEUCHI, Akira OKADA
2. 発表標題 Release Resistance of Compression-molded Thermosetting Resin from EDMed Metal Mold Surfaces
3. 学会等名 The 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE2020) (オンライン) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北田良二, 天本翔二, 秋山晃太郎, 杖谷俊一郎, 岡田晃
2. 発表標題 熱硬化性フェノール樹脂の圧縮成形における切削加工面の離型性に関する基礎的検討
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会 (オンライン)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北田良二, 藤井圭太, 岡田晃
2. 発表標題 形彫り放電加工面における熱硬化性樹脂の離型試験法
3. 学会等名 2019年度 精密工学会九州支部・中国四国支部共催 佐世保地方講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北田良二, 藤井圭太, 池内祐貴, 岡田晃
2. 発表標題 放電加工面と熱硬化性樹脂の離型力測定法の基礎的検討
3. 学会等名 2020年度 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井圭太, 王瑞祥, 岡田晃, 北田良二
2. 発表標題 クロム粉末混入放電加工による高機能金型表面の形成
3. 学会等名 型技術者会議 2 0 1 8
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ruixiang Wang, Ryoji Kitada, Ryota Toshimitsu, Akira Okada
2. 発表標題 Improvement of Surface Characteristics for Long Life of Metal Mold by EDM in Chromium Powder Mixed Working Fluid
3. 学会等名 電気加工学会 平成30年度総会および第223回研究会, 論文賞受賞者記念講演 (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 藤井圭太, 岡田晃, 北田良二	4. 発行年 2018年
2. 出版社 日刊工業新聞社	5. 総ページ数 2
3. 書名 型技術 2018年7月特別増大号	

〔産業財産権〕

〔その他〕

崇城大学 工学部 機械工学科 / 研究室紹介 / 研究室紹介資料 https://eng.mec.sojo-u.ac.jp/ 崇城大学地域共創センター / 研究シーズ集 / 機械・エネルギー http://www.sojo-kyoso.com/
--

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
連携研究者	岡田 晃 (Okada Akira) (60263612)	岡山大学・学術研究院 自然科学学域・教授 (15301)	

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