

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K05095

研究課題名（和文）セラミック粒子添加プレス油の高潤滑メカニズムの解明

研究課題名（英文）Lubrication mechanism of stamping oil containing fine ceramic particles

研究代表者

安部 洋平（Abe, Yohei）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：60402658

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）：電気自動車、ハイブリット自動車などの電池容器のプレスによる大量生産が急務である。プレスでは成形品の表面拡大率と金型面圧が高く、焼付きの生じやすいしごき加工が問題である。焼付き抑制に塩素系添加油が有効であるが、大きい環境負荷のために代替が必要である。本研究では、塩素系添加油の代替となれそうなセラミック微粒子添加しごき加工油を提案するために添加プレス油による潤滑メカニズムの調査、有効な条件を調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微粒子添加油を用いたしごき加工においてガラスダイを用いた焼付き抑制の観察、アルミニウム合金およびステンレス鋼の焼付き限界を調査した。観察より10ミクロンの粒径では平板とガラスの間で粒子が拘束、加工により平板に埋設されて直接接触を妨げているようであり、より小さな粒径では凝集したものの分裂分散も観察された。また、加工条件の調査結果から1ミクロンのSiO₂粒子を1vol%添加した油によりA3003では12.8%から17.4%、SUS430では3.7%から9.4%に、炭素粒子では3.7%から6%ほどに向上できた。

研究成果の概要（英文）：There is a need for the mass production of battery containers for electric and hybrid vehicles by stamping. The surface expansion ratio of the product and the die surface pressure are high in the stamping process, and the problem is that the stamped product is subjected to an ironing process that tends to cause seizure. Chlorinated additive oil is effective in preventing seizure, but its high environmental impact requires an alternative. In this study, we investigated the lubrication mechanism and the effective conditions for lubrication with an additive oil.

研究分野：塑性加工学

キーワード：しごき加工 微粒子添加油 焼付き 直接観察 セラミック微粒子 カーボン微粒子 ガラスダイ

1. 研究開始当初の背景

電気自動車、ハイブリット自動車に欠かせない電池容器のプレスによる大量生産が急務であり、それにはプレス加工に用いられる環境負荷の大きい塩素系物質が添加されている潤滑油の代替が望まれている。本研究では、塩素系潤滑油の代替となれそうなセラミック粒子添加油を提案するために添加油による潤滑メカニズムの調査、有効な条件を明確にする。合わせて、加工界面の接触状態のモニタリング、粒子埋設による成形品表面の硬さ向上を試みる。

2. 研究の目的

ガラスダイを介した直接観察法をプレス加工界面に適用し、塑性変形を伴う圧力下における成形品と金型の間にセラミック粒子がどのように侵入するかを調査した。また、セラミック粒子、添加量などを変化させて添加油の焼付き防止効果の有効範囲を示すとともに、荷重への影響を示す。

3. 研究の方法

3.1 平板しごき加工におけるガラスダイを用いた焼付き抑制の観察法

セラミック微粒子を添加した潤滑剤を用いた加工における焼付き抑制メカニズムとして、工具と被加工材の界面に進出して直接接点の抑制、焼付いた部分の研磨などが考えられ、本観察では直接接点の抑制についてガラスダイを通じて観察した。しごき加工では、図1のように潤滑油中の硬いセラミック微粒子がダイと被加工材間に入り、直接接点を防ぐ。界面では被加工材と粒子の接触、凝集粒子の破壊、粒子の埋設などの挙動が予測される。

ガラスダイを用いた観察条件を図2に示す。セラミック微粒子添加潤滑油を平板に塗布し、ガラスダイを用いてしごき加工を行い、潤滑油中の微粒子を直接観察した。観察には10倍および50倍の対物レンズを使い、観察範囲はそれぞれ約 $225\mu\text{m} \times 275\mu\text{m}$ 、約 $50\mu\text{m} \times 75\mu\text{m}$ であり、観察位置は加工終端部からの距離 x とし、 $x = 60 \sim 70\mu\text{m}$ が加工開始位置でそれまでとそれ以上がそれぞれ加工面と未加工面になる。公称0.5mm厚さで焼鈍された純アルミニウム A1050-O 平板をガラスの割れの生じない約1~2%のしごき率、0.25mm/sで加工した。パラフィン系鉱物油(動粘度: $433\text{mm}^2/\text{s}$ at 40°C)に焼付き抑制効果が高い公称粒径 $d = 1\mu\text{m}$ のアルミナ Al_2O_3 粒子(硬さ: 1570HV)を $c = 1\text{vol}\%$ 添加した油が超音波振動を用いて攪拌され、平板に塗布された。比較のために焼付き抑制効果が低い $d = 10\mu\text{m}$ 、 $d = 1\mu\text{m}$ においては $c = 5\text{vol}\%$ と向上させた。

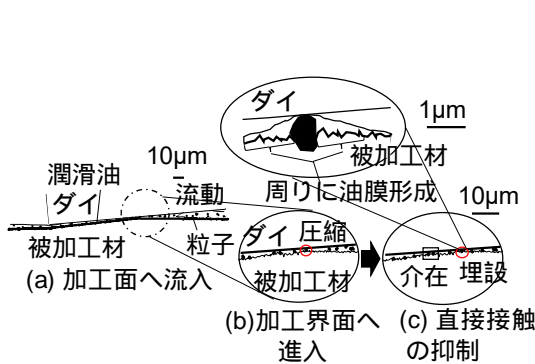


図1 しごき加工における焼付き抑制メカニズム

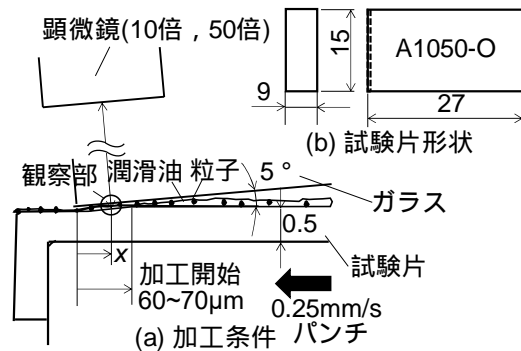


図2 ガラスダイを用いた平板しごき加工条件

3.2 セラミック粒子添加油の焼付き抑制効果

しごき加工条件を図3に示す。パンチに取り付けられ、微粒子を添加した潤滑油を塗布した平板をダイスで加工速度 100 mm/s でしごき加工した。ここでは、試験前後の板厚減少率をしごき率 r とした。ダイスとパンチの隙間を減少させてしごき率を増加させ、焼付きの生じる限界を求めた。試験片は0.79 mm厚さのA3003-O(表面粗さ $0.311\mu\text{mRa}$, 36.2HV)、0.59 mm厚さのSUS430(表面粗さ $0.047\mu\text{mRa}$, 183.0HV)とし、長さとは幅はそれぞれ27 mmと15 mmとした。ダイスは、A3003-Oのしごき加工に、工具鋼SKD11(表面粗さ $0.010\mu\text{mRa}$, 791HV)、SUS430のしごき加工に、超硬合金(表面粗さ $0.015\mu\text{mRa}$, 1725HV)を用い、傾斜角は 5° である。潤滑油はパラフィン系プレス油(粘度 $414\text{mPa} \cdot \text{s}$ at 40°C)であり、公称粒径 $d = 0.15, 1\mu\text{m}$ の

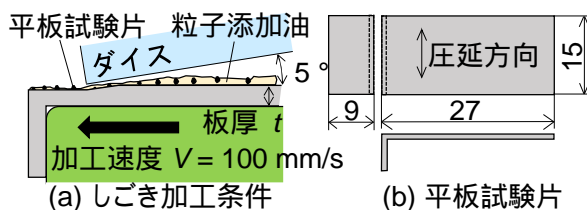


図3 焼付き抑制効果の実験条件

Al₂O₃ 粒子(1570HV), $d = 0.3, 1 \mu\text{m}$ の SiO₂ 粒子(950HV), $d = 0.45 \mu\text{m}$ の層状カーボン粒子 C が分散された添加剤の添加率 c を変化させて潤滑油に添加し、焼付き限界調査した。また、試験は室温(18~25°C)で行った。

4. 研究成果

4.1 ガラスダイを用いた焼付き抑制の観察

粒子添加なし, $x = 98 \mu\text{m}$ における加工中の界面および $d = 10 \mu\text{m}$, $x = 66 \mu\text{m}$ における加工中の粒子の挙動を図4と5に示す。ここで t は粒子が平板に拘束されてからの時刻である。粒子を添加すると粒子によって黒くなっている部分が増えている。油中の流れてきた粒子は、平板とガラスの間にひっかり拘束され、加工により圧縮されて平板表面に埋設されて加工界面へ進入しているようであった。

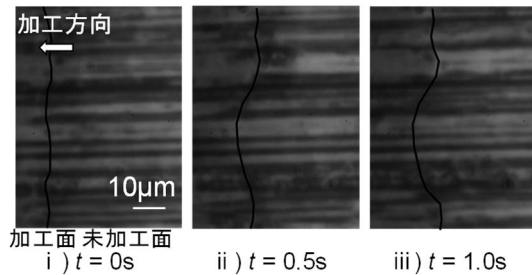


図4 粒子添加なし, $x = 98 \mu\text{m}$ における加工中の界面

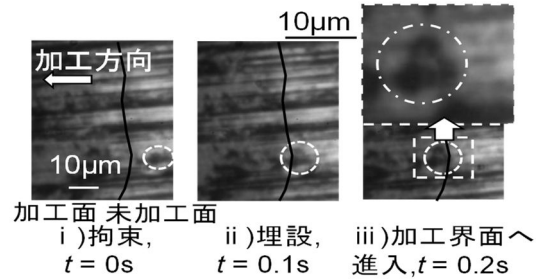


図5 $d = 10 \mu\text{m}$, $x = 66 \mu\text{m}$, $c = 1 \text{vol}\%$ における加工中の粒子挙動

$d = 1 \mu\text{m}$, $x = 63 \mu\text{m}$ における加工中の粒子挙動を図6に示す。加工開始位置付近で、(a)に示す粒子はそのまま平板表面に埋設されているが、(b)に示す粒子は凝集していたようであり、分裂して少し広い範囲に粒子が広がって界面へ進入する様子が観察された。

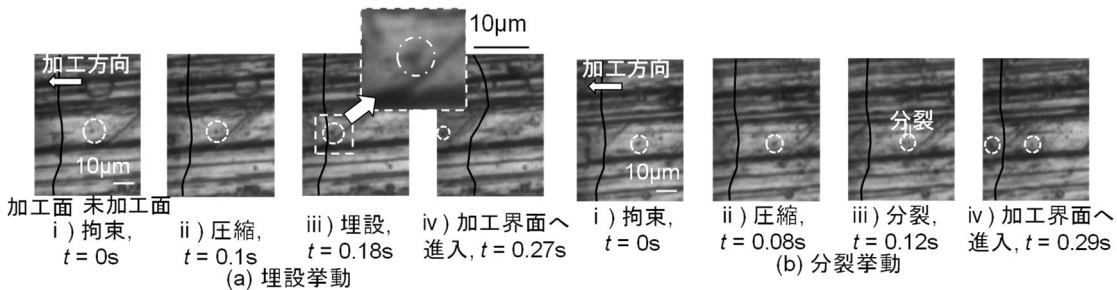


図6 $d = 1 \mu\text{m}$, $x = 63 \mu\text{m}$, $c = 1 \text{vol}\%$ における加工中の粒子挙動

$d = 1 \mu\text{m}$ において粒子添加率を $c = 5 \text{vol}\%$ に増加させた。図7に示すように埋設される量が増加しており、粒子添加率を増加させると直接接触を抑制できる範囲が増えると考えられる。

図7の結果から粒子数が直接接触の抑制に効果があるようであった。添加率一定では、粒子直径が大きいほど粒子数が減るために $d = 10 \mu\text{m}$ において添加率を増加させた。しかしながら、図8に示すように粒子を添加した油は、添加量が増加すると粘度が上昇して、 $c = 20 \text{vol}\%$ 以上では潤滑油としての利用が難しくなった。

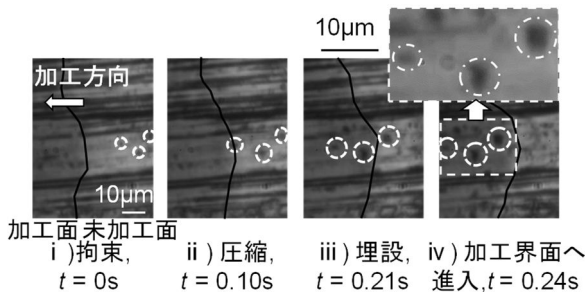


図7 $d = 1 \mu\text{m}$, $x = 63 \mu\text{m}$, $c = 5 \text{vol}\%$ における加工中の粒子挙動

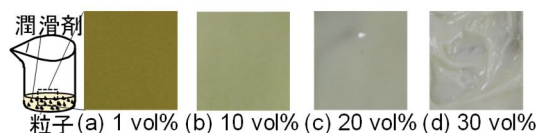


図8 $d = 10 \mu\text{m}$ における添加油に及ぼす粒子添加率の影響

粒子を球形と仮定した体積から 1 mm^3 あたりの潤滑油に含まれる粒子数を求めた。表1に示すように同一粒子添加率においては、 $d = 1 \mu\text{m}$ の粒子数は $d = 10 \mu\text{m}$ の 10^3 倍多く、 $d = 10 \mu\text{m}$ では図8に示したように $c = 10 \text{ vol}\%$ 程度までしか利用できず、 $d = 1 \mu\text{m}$ のように粒子を増やすことが困難である。

表1 1 mm^3 あたりの潤滑油に含まれる粒子数

粒径 $d [\mu\text{m}]$	粒子添加率 $c [\text{vol}\%]$	潤滑剤 $1 [\text{mm}^3]$ あたりに含まれる粒子数 [個]
1	1	1.91×10^7
	5	9.54×10^7
10	1	1.91×10^4
	10	1.91×10^5

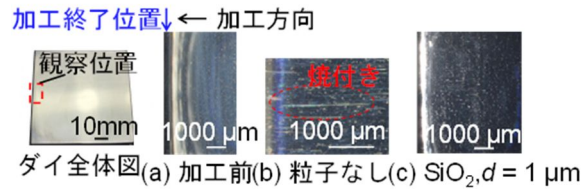


図9 しごき加工前後の工具鋼SKD11ダイ表面

4.2 セラミック粒子添加油の焼き抑制効果

A3003, SiO_2 粒子, $r = 15\%$, $c = 1 \text{ vol}\%$ でしごき加工された工具鋼SKDダイ表面を図9に示す。加工後にプレパノールで脱脂した後、表面を顕微鏡で観察した。粒子添加なしでは加工方向にアルミニウムがダイ上に凝着して焼きが発生しているが、 SiO_2 粒子を用いたしごき加工後のダイ上に凝着はなかった。

$c = 1 \text{ vol}\%$, SKDダイにおける焼き限界に及ぼす粒子径の影響を図10に示す。試験毎にダイと試験片を洗浄して表面観察を行い、ダイの焼き、焼きなしに分類した。微粒子を添加することで添加なしよりも高くなり、粒子の種類に関わらず、粒径が大きくなるにつれて限界は高くなり、 SiO_2 粒子, $d = 1 \mu\text{m}$ の条件で 12.8% から 17.4% に向上できた。

単位幅当たりのしごき荷重としごき率の関係を図11に示す。いずれの条件においてもしごき率の増加とともに平均しごき荷重は増加し、 $r = 10\%$ 以上では、微粒子添加油の荷重は添加なしよりも小さくなった。

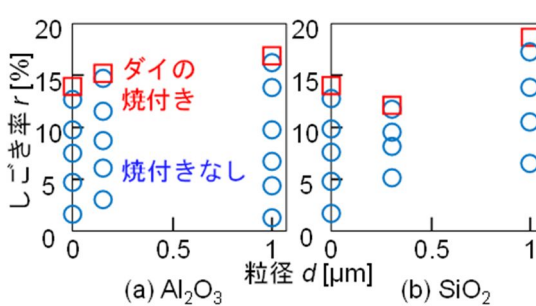


図10 $r = 15\%$ の焼き限界に及ぼす粒子径の影響

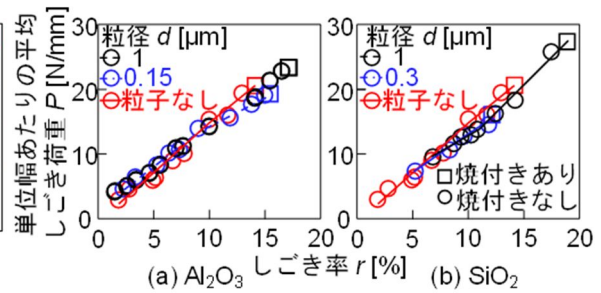


図11 A3003の単位幅当たりのしごき荷重としごき率

Al_2O_3 粒子, $r = 6\%$, $c = 1 \text{ vol}\%$ でしごき加工された超合金ダイ表面を図12に示す。加工後にプレパノールで脱脂した後、拭き取って表面を顕微鏡で観察した。微粒子添加なしでは加工方向にステンレスがダイ上に凝着して焼きが発生しているが、 Al_2O_3 粒子を用いたしごき加工後のダイ上に凝着はなかった。

$c = 1 \text{ vol}\%$, 超合金ダイにおける焼き限界に及ぼす粒子径の影響を図13に示す。A3003の傾向と同じく、いずれの場合も微粒子を添加することで添加なしよりも高くなった。また、粒径が大きくなるにつれて限界は高くなり、 SiO_2 粒子, $d = 1 \mu\text{m}$ の条件で焼き限界が最大となり、焼き限界は 3.7% から 9.4% に向上できた。

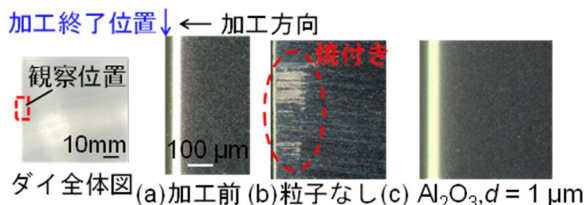


図12 $r = 6\%$ における加工後の超硬ダイ表面の焼き

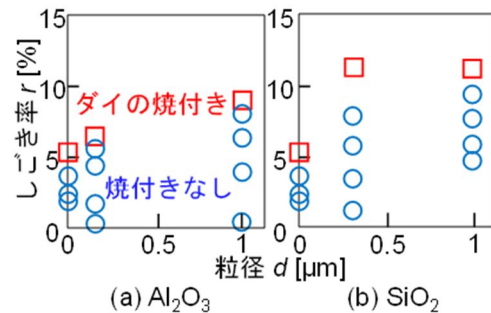


図13 SUS430の焼き限界に及ぼす粒子径の影響

単位幅当たりのしごき荷重としごき率の関係を図 14 に示す。いずれの条件においてもしごき率の増加とともに平均しごき荷重は増加した。また、 $r=5\%$ 以上において、微粒子添加油の荷重は添加なしよりも小さくなった。

焼付き限界に及ぼすカーボン粒子の添加量の影響および微粒子ごとの焼付き限界を図 15 に示す。カーボン粒子は潤滑油に分散しやすいよう調性された分散液中に添加されており、分散液を潤滑油に添加することで微粒子添加油を作成するため、添加量が多くなるとともに微粒子添加油の粘度は低下した。カーボン粒子を添加することにより、焼付き限界は 3.7%から 6%ほどに向上した。また、添加量ごとの焼付き限界の違いはほぼ見られなかった。しかしながら、カーボン粒子添加油の焼付き限界をセラミック粒子と比較すると、セラミック粒子ほどの効果は見られなかった。

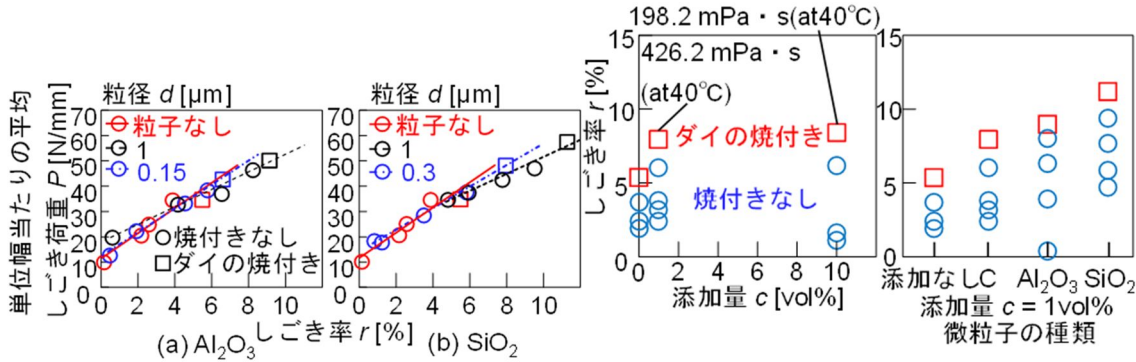


図 14 SUS430 の単位幅当たりのしごき荷重としごき率

図 15 SUS430 の焼付き限界に及ぼす粒子添加量の影響および微粒子ごとの焼付き限界

0.6mm 厚さの A1050-0 に対して、潤滑剤ポケットを有する SKD ダイで粒子添加なし油の場合と平滑な SKD ダイでセラミック粒子添加油の焼付き限界を図 16 に示す。潤滑剤ポケットを有するダイでは、潤滑剤ポケットにより生じる流体潤滑を利用するためにポケットなしよりも向上している。一方、セラミック粒子添加油の焼付き限界は、潤滑剤ポケットを有するダイよりも向上しており、粒子添加により境界潤滑下での焼付き抑制の効果の方が高いことを示している。

4.3 セラミック粒子添加油の焼付き抑制効果のまとめ

本研究では、微粒子添加油を用いたしごき加工におけるガラスダイを用いた焼付き抑制の観察、ならびに、アルミニウム合金およびステンレス鋼のしごき加工における焼付き限界としごき荷重に及ぼすしごき加工条件の影響を調査し、以下の知見を得た。

- 1) 10 μm の粒径では、平板とガラスの間にひっかかり、拘束され、加工により圧縮されて平板表面に埋設され、板材とダイの直接接触を妨げているようであった。
- 2) 1 μm の粒径では、粒子が界面へ進入、埋設されているものだけでなく、凝集したものが分裂して少し広い範囲に粒子が広がって界面に進入しているものも観察された。
- 3) 1 μm の粒径では潤滑油中の粒子数が多くできるために直接接触を抑制でき、焼付き抑制効果が高かったようであった。
- 4) A3003 におけるしごき加工において、セラミック粒子添加油を用いることで焼付き限界は向上し、1 μm の SiO₂ 粒子を 1 vol% 添加した条件で 12.8% から 17.4% に向上できた。また、しごき率 10% 以上において、しごき荷重は添加なしよりも小さくなった。
- 5) SUS430 のしごき加工において、セラミック粒子添加油を用いることで焼付き限界は向上し、1 μm の SiO₂ 粒子を 1 vol% 添加した条件で 3.7% から 9.4% に向上した。また、しごき率 5% 以上において、しごき荷重は添加なしよりも小さくなった。
- 6) 炭素粒子を用いることで、粒子添加なしと比較して SUS430 における限界しごき率は 3.7% から 6% ほどに向上できた。

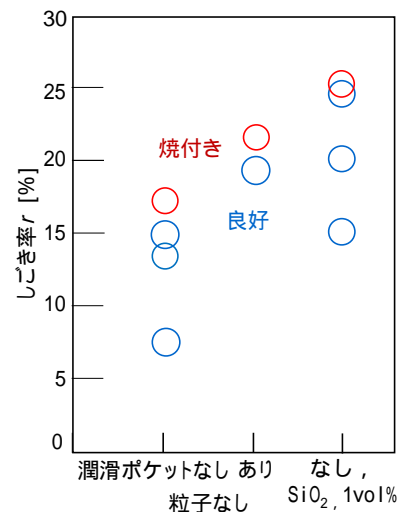


図 16 潤滑剤ポケットを有するダイとセラミック粒子添加油の焼付き限界

本研究の一部は、2019 年度科学研究費補助金基盤研究(c)研究課題番号 19K05095 によって行われた。本研究に用いた装置の部品及び試験片の一部は本学研究基盤センター工作支援部門において製作された。各種加工工具、潤滑油、微粒子の提供を頂きましたダイジェット工業株式会社、日本工作油株式会社、株式会社アドマテックス、株式会社シオン、レーザー加工により潤滑剤ポケットを製作くださいました株式会社リプス・ワークスに深く感謝致します。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 安部 洋平, 市村 昂己, 森 謙一郎	4. 巻 -
2. 論文標題 しごき加工における潤滑剤に添加したセラミック粒子挙動のガラスダイを用いたその場観察	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第71回塑性加工連合講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 201-202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Yohei Abe, Kai Sugiura, Ken-ichiro Mori	4. 巻 50
2. 論文標題 Ironing limit of aluminium alloy cups with lubricants containing nanoparticles and tool steel die	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Procedia Manufacturing	6. 最初と最後の頁 114-118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.promfg.2020.08.021	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 Yohei Abe, Takahiro Yamashita, Ken-ichiro Mori	4. 巻 1270
2. 論文標題 Increase in ironing limit of stainless steel cups with lubricants containing ceramic particles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.	6. 最初と最後の頁 12018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1757-899X/1270/1/012018	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 Yohei Abe, Mika Sugiura, Takumi Ando, Peerapong Kumkhuntod, Kamthon Septham, Witthaya Daodon, Ken-ichiro Mori	4. 巻 13-4
2. 論文標題 Improvement of Seizure Resistance in Ironing of Aluminum Alloy Sheets and Stainless Steel Cups by Utilizing Laser Textured Die Having Lubricant Pockets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met13040803	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 該当する

1. 著者名 安部 洋平, 黒木 隆太	4. 巻 -
2. 論文標題 平板しごき加工におけるセラミック微粒子を添加した潤滑油による焼付き限界の向上	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022年度塑性加工春季講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 153-154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 市村 昂己
2. 発表標題 しごき加工における潤滑剤に添加したセラミック粒子挙動のガラスダイを用いたその場観察
3. 学会等名 第71回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yohei Abe
2. 発表標題 Ironing limit of aluminium alloy cups with lubricants containing nanoparticles and tool steel die
3. 学会等名 18th International Conference on Metal Forming 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒木 隆太
2. 発表標題 平板しごき加工におけるセラミック微粒子を添加した潤滑油による焼付き限界の向上
3. 学会等名 2022年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

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		
タイ	ラジャモンコン工科大学イサン校	モンクット王工科大学トンブリー校	