

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02050

研究課題名（和文）ハイブリッド粉末混入放電加工による高性能金型仕上げ面の創成

研究課題名（英文）Study on Formation of High-performance Metal Mold Surface by EDM with Hybrid Metal Powder Mixed Fluid

研究代表者

岡田 晃（Okada, Akira）

岡山大学・環境生命自然科学学域・教授

研究者番号：60263612

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：はじめに、クロム粉末混入加工液を用いた放電仕上げ加工によって、炭化クロム含有の硬質皮膜を加工面に形成できることを見出した。続いて、クロム粉末とシリコン粉末を混入した加工液を用いるハイブリッド粉末混入放電加工の効果を検討し、実用可能なレベルの加工面粗さを達成できた。一方、クロム電極と超硬電極を用いて電極消耗の大きい放電条件を適用することで電極成分の放電加工面への含有にも成功し、二つの電極を順に用いることで、炭化クロムと炭化タンゲステンを含有する2層構造形成にも成功した。さらに、金型仕上げ面の離型性の定量的評価のため、樹脂剥離装置を検討し精度よく成形樹脂との離型性を評価できる測定装置を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放電加工を用い、加工液に混入した金属粉末や電極材質の成分を仕上げ面に含有できる現象を確認し、そのメカニズムを解明したところに学術的な意義がある。また、加工液の熱分解炭素と化合した硬質炭化物を含有する表面層を形成できること、異なる電極を順に用いることで2層構造表面層を創成できることは産業的な意義も大きい。放電加工のみで金型形状創成から表面仕上げ・改質が達成できる可能性があり、金型加工プロセス全体の高性能低コスト化が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study found firstly that a hard surface layer containing chromium carbide can be formed on the EDM finished surface by using a chromium powder mixed working fluid. Then, the effect of hybrid powder-mixed EDM with using chromium powder and silicon one, was investigated, and sufficiently small surface roughness with a practical level for metal mold could be obtained. On the other hand, by applying EDM conditions with large electrode wear, the formation of surface layer containing electrode components was also succeeded. By using a chromium electrode and a cemented WC one in sequence, we succeeded the formation of a two-layer structure surface layer containing chromium carbide and tungsten carbide. Furthermore, in order to quantitatively evaluate the releasability of molded resin from the finished surface of metal mold, we built a new device to measure the resin releasing force, and accurate evaluation of the mold releasability from metal surface became possible.

研究分野：特殊加工

キーワード：放電加工 金型

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

工業製品を構成する各部品は小型軽量化が求められるため、樹脂部品が多用されている。そして、これらの大量生産にはコスト低減のために、金型を用いた射出成形が広く利用される。今後更なる工業製品の小型化・高機能化が要求され、複雑微細形状の金型の形状創成、その表面仕上げ、表面高機能化のための表面処理やコーティングなどが必要である。一般的に、これらの各金型製造工程は、切削加工や放電加工による形状創成加工、手研磨作業による表面仕上げ、および焼入れ等による表面処理や電気めっきや気相めっきを利用した表面コーティングなどによって行われる。しかし、多くの時間やコストを要する。従って、一連の工程を連続して一加工技術で達成できれば、金型加工プロセス全体の高能率化・低コスト化、および高機能化が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、金型の微細形状創成に従来応用される放電加工技術を用いて、形状創成加工、表面仕上げ、および表面高機能化を連続して効率的に行う技術を確立することを目的とする。特に放電加工を用いた金型表面の硬質膜コーティング技術や改質技術の可能性を検討し、またそれらの加工面の表面機能を評価した。具体的には放電加工表面の平滑化効果を有する金属微粉末、および金型表面の耐食性や離型性を向上させる効果をもつ異なる微粉末を加工液に混入して放電加工を行う、新しい表面仕上げ、高機能表面形成プロセスの可能性を検討した。併せて、電極材質成分を加工面に含有させる現象を利用した高機能表面創成の可能性についても議論した。さらに、樹脂成型金型における表面機能として最も重要視される離型性を定量的評価する方法についても検討を加えた。

3. 研究の方法

本研究では、まず、硬質皮膜を形成するためのクロム粉末混入加工液を用いた放電仕上げ加工において粉末混入濃度や加工条件が硬質皮膜形成に及ぼす影響を解明し、硬質クロム表面層形成を検討した。次に、加工面の表面粗さ低減のためにクロム粉末に加えて炭素粉末を混入した加工によるハイブリッド粉末混入放電加工による仕上げ面形成を検討した。各粉末混入濃度やそれらの比率、加工条件の影響を調査した。さらに、シリコン粉末とクロム粉末のハイブリッド粉末混入放電加工についてもその効果を検討した。

一方、クロム電極やタングステン電極を用いて電極消耗の大きい電気加工条件を適用することでこれらの電極成分の放電加工面への含有の可能性、ならびに電気加工条件の最適化による加工面粗さ低減を検討した。また、二つの電極を順に用いることによる2層構造加工面形成の可能性を検討し、創成した2層構造の深さ方向の成分分布について分析を行った。さらに、超硬電極を用いた炭化タングステン含有表面層の形成、炭化クロム層と炭化タングステン層の2層構造形成についてもその可能性を検討した。

さらに、これらの検討とは別に、本研究で形成できる硬質金型仕上げ面と成形樹脂との離型性を定量的に評価するための、引張試験機を利用した樹脂剥離装置を検討した。種々の改良を重ねながら、精度よく成形樹脂との離型性が評価できる測定装置を構築した。

4. 研究成果

(1) クロム粉末混入放電加工によるクロム含有加工面の形成

まず、炭化クロム含有硬質皮膜を形成するためのクロム粉末混入加工液を用いた放電仕上げ加工実験を行った。図1に実験装置および加工液に混入したクロム粉末の写真を示す。電極には直径25mmの丸棒銅電極を用い、工作物には合金工具鋼SKD11を使用した。また、加工液には平均粒径 $5\mu\text{m}$ のクロム粉末を混入した加工液を用い、加工中は粉末の沈殿を防ぐために攪拌機により加工液を攪拌した。加工条件が表面性状に及ぼす影響について検討を行うため、クロム粉末混入濃度を1, 3, 5g/L、放電電流値0.4, 1.2, 1.6Aと変更した。

図2はクロム粉末混入濃度および放電電流値を変化させて作成した放電加工仕上げ面の、EDXにより測定したクロム含有率の変化を示す。右の画像は放電電流値1.6Aにおける加工面中央部のCrK α 像である。図より、クロム粉末混入濃度1g/Lと3g/Lにおいては、放電電流値が低いほどクロム成分の含有率は増加する。また、混入濃度が高いほどクロム含有率は増加する。しかし、クロム粉末混入濃度5g/Lでは、粉末の攪拌が不十分であることに起因して、表面に含有したクロム分布が著しく不均一になることが分かる。

図3に加工面断面のTEM観察像および深さ方向のEDXライン分析結果を示す。TEM観察像から加工面から $3\mu\text{m}$ 程度の深さまで母材組織と異なる

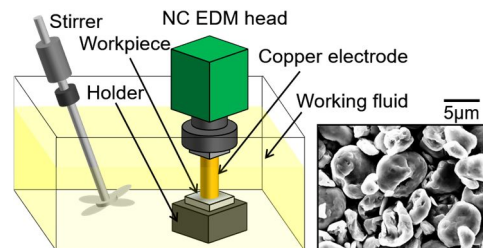


図1 放電加工装置およびクロム粉末

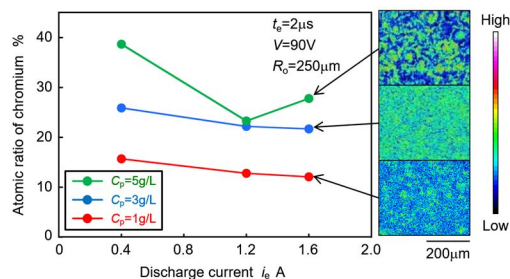


図2 加工条件によるクロム含有率変化

る部分が存在し、再凝固層を確認することができる。また、表面近くでは、非常に微細な結晶粒組織となっており、母材と再凝固層の境界付近では柱状組織を確認できます。次にライン分析結果からクロム、炭素成分の含有率は加工面付近で高く、そこから徐々に減少し、深さ約 3.0 μm で母材の成分比となる。この結果よりクロム含有深さは、約 3.0 μm と考えられる。また、再凝固層と母材との間に明確な界面は存在せず、耐剥離性の高いクロム含有層を形成していると考えられる。

図4にはクロム含有加工面の結晶構造を XRD により分析した結果である。確認できるピークは $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ と Fe_3C であり、特に $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ のピークが明確に確認できる。従って、クロム粉末混入放電加工面には、 $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ として多く存在していることが明らかとなった。

また、クロム含有放電仕上げ面粗さについても検討を行い、電流値 0.4A、パルス幅 2 μs の放電条件下では 0.4 μmRa (1.8 μmRz) の鏡面が得られることも明らかとなった。

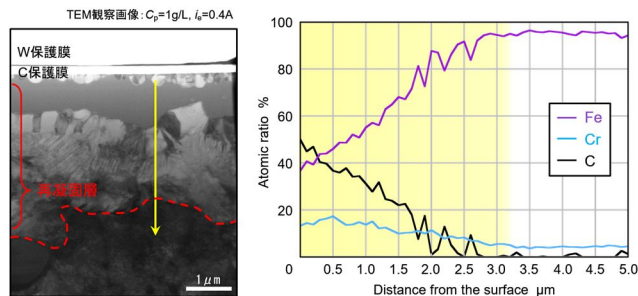


図3 加工断面 TEM 像および深さ方向成分分布

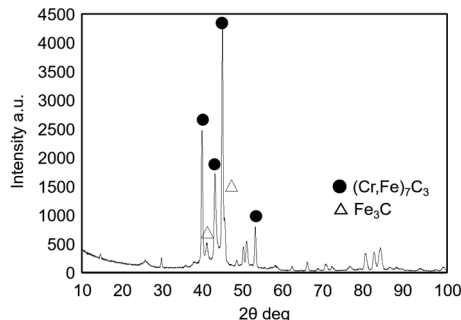


図4 加工面の XRD スペクトル

(2) 炭化クロム含有放電仕上げ面の表面特性評価

得られたクロム含有放電仕上げ面の表面硬度、撥水性、耐食性について評価を行った。図5は、クロム粉末混入放電加工仕上げ面のピッカース硬度を示す。図より、工作物 SKD11 の硬度は約 650Hv であり、放電加工中の浸炭によって硬度が上昇すると言われる通常の灯油系加工液を用いた場合は、830Hv となる。これに対し、クロム粉末混入放電加工面では 1100Hv を超える高硬度の結果となった。これは、クロム炭化物が表面に存在しているためであり、本手法により硬質膜を形成できることが明らかとなった。

次に、放電仕上げ面の撥水性を評価するために水滴との接触角を測定した。図6中の破線は接触角が 90°の値を示している。放電加工を行っていない SKD11 研削面では接触角は 80°程度である。また、純クロムのラップ面、および灯油系加工液を用いた SKD11 の放電加工面の接触角も 90°に及ばない。これに対し、クロム粉末混入放電加工仕上げ面においては接触角 100°を超える撥水面となっている。純粋なクロムにおいて、接触角 90°を下回るにも関わらず、クロム粉末混入放電加工によってクロム成分を含有した面において撥水性が向上した。これは、加工面表面へのクロム炭化物の分布に加え、放電加工による梨地面の形成が影響したと考えられる。

さらに、電気化学測定システムを用いたアノード分極電流密度を測定することで耐食性を比較した。電解液には濃度 1% の NaCl 水溶液を、作用電極を各放電加工仕上げ面、対極には白金を用いた。また、参照電極には銀/塩化銀電極を使用し、ポテンショスタットを用いて 1mV/s の電圧掃引速度のもとで、自然電圧から最高 2V までのアノード分極電流の測定を行った。図7に各放電加工仕上げ面の結果を示す。図より明らかなように、黒線で示す純クロムは極めて高い耐食性を示す。これに対し、赤線で示すクロム粉末混入放電加工面は、青線で示している灯油系加工液を用いた加工面よりも自然電位が貴となり、電流密度も小さく、耐食性が向上していることが分かる。

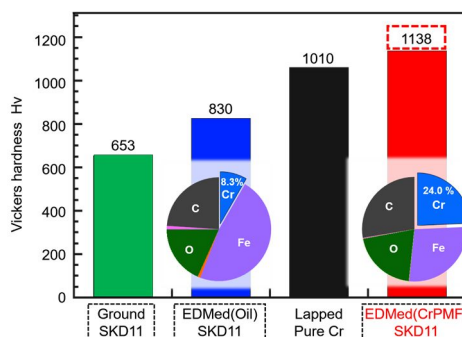


図5 加工面のピッカース硬度

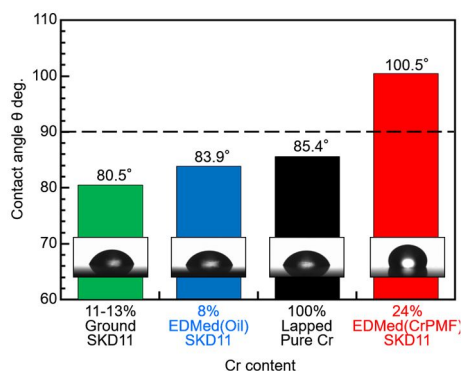


図6 加工面の接触角

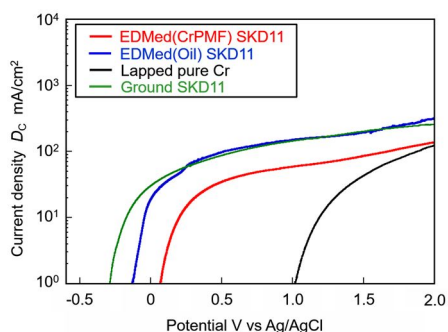


図7 加工面のアノード分極電流密度

(3) ハイブリッド粉末混入放電加工による仕上げ面形成

上記のように、クロム粉末混入放電加工による最適な加工条件下では表面粗さ $1.8\mu\text{mRz}$ 程度のクロム炭化物が分布する硬質の放電加工仕上げ面を得ることに成功した。しかしながら、一般に金型の樹脂成型においては表面粗さ $1.0\mu\text{mRz}$ 以下を求められることが多く、その点で表面粗さの更なる向上が必要である。そこで、クロム粉末に加えて炭素粉末やシリコン粉末を加工液中に混入した加工によるハイブリッド粉末混入放電加工による仕上げ面形成について検討を行った。その結果、シリコン粉末を混入し加工条件を最適化した場合に表面粗さの向上が見られた。図8は、クロム粉末とシリコン粉末の二種の粉末を混入した加工液を用いて放電仕上げを行った際の、シリコン粉末混入濃度による仕上げ面粗さの変化を示している。クロム粉末濃度は 1.0g/L 一定、放電電流値を 1.6A としている。図より、シリコン粉末混入濃度の増加とともに表面粗さは僅かに減少し、シリコン粉末混入濃度 $3\sim 4\text{g/L}$ で $1.5\mu\text{mRz}$ まで低減できた。

さらに、図9に示すように、電流値を 0.4A まで低減することで、 $1.0\mu\text{mRz}$ を達成することができた。このときの加工面のSEM画像とクロムのマッピング画像を図10に示す。加工面にクラック等はない健全な加工面となっており、かつクロム成分が均一に分布していることが分かる。以上の結果から、クロム粉末/シリコン粉末ハイブリッド粉末混入放電加工において、表面粗さが小さく、クロムの含有率の高い加工面を作成できることが明らかとなった。

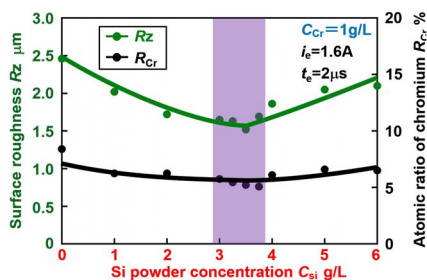


図8 Si粉末濃度の影響

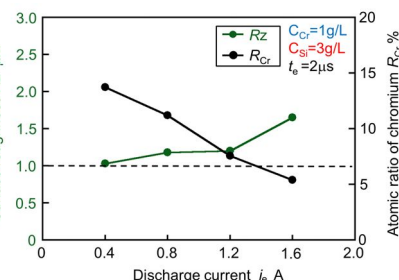


図9 放電電流値の影響

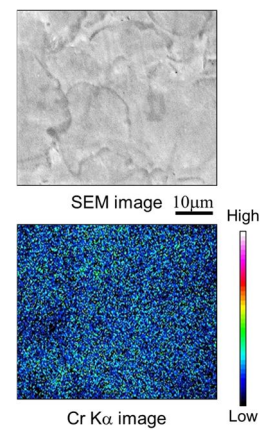


図10 加工面のSEM像及びクロム分布

(4) 放電加工による電極成分含有層形成の可能性

粉末混入加工液の使用は加工液の管理が煩雑となり実用性はやや乏しい。この観点から、別の簡便な手法により放電加工面に硬質皮膜が形成できることが望ましい。そこでクロム電極やタングステン電極を用いて電極消耗の大きい電気加工条件を適用することでこれらの電極成分の放電加工面への含有の可能性や電気加工条件の最適化による加工面粗さ低減を検討した。

図11にクロム電極を用いて放電仕上げ加工を行った場合の電極消耗率と加工面へのクロム成分含有量の変化を示す。パルス幅および放電電流値を変化させその影響を調査した。図より、パルス幅が短くなるほど、また放電電流値が大きくなるほど電極消耗速度が増加するとともに加工面へのクロム含有率が増加していることが分かる。したがって、パルス幅を短く、電流値を大きくすることでクロム電極の消耗を大きくし、加工面のクロム含有率を増加できることが分かった。

図12にその際の加工面でのクロム分布を示しているが、ほぼ均一にクロムを含有することが可能であった。また、XRDを用いてその組成を評価したところ、クロム粉末混入放電仕上げと同じく、クロムは炭化物として加工面に存在していることも明らかとなった。

さらに、超硬合金電極を用いての炭化タングステンの加工面への含有を試みたところ、同様に炭化タングステンの加工面への含有が可能であることを確認した。

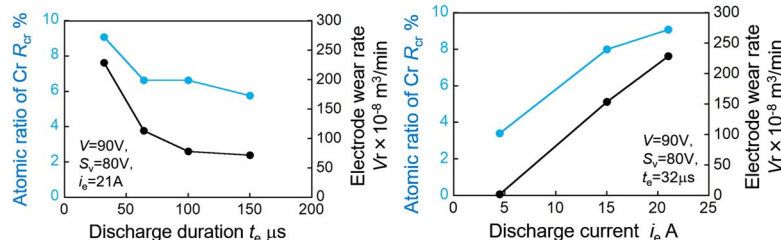


図11 放電加工条件がクロム含有率および電極消耗率に及ぼす影響

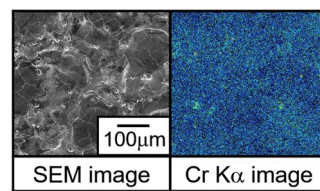


図12 加工面のSEM像及びクロム分布

(5) 2層構造放電加工仕上げ面形成と表面組織分析

電極成分の加工面への含侵が可能となったため、クロム電極と超硬電極の2つの電極を順に用いることによる2層構造加工面形成の可能性を検討した。はじめに、クロム電極を用いて放電加工を行った加工面のSEM像と粗さ曲線および最大高さ粗さを図13左に示す。この加工面に対し超硬合金電極を用いて放電仕上げを行った加工面のSEM像と粗さ曲線および最大高さ粗さを右に示す。超硬合金電極を用いて仕上げ加工を行うことによって 1.0 ミクロン R_z を下回る金型表面として適用できる実用レベルの仕上げ面を得ることが可能であることが分かる。

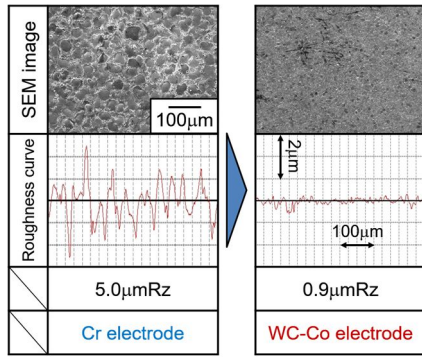


図 13 クロム電極と超硬電極による連続仕上げ時の加工面性状と粗さの変化

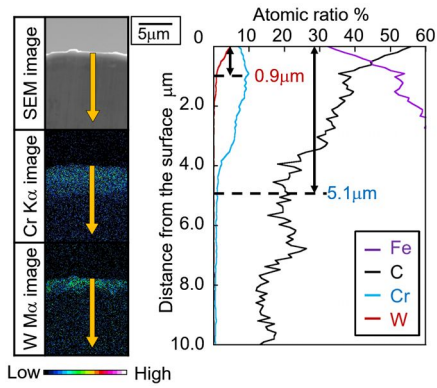


図 14 クロム電極と超硬電極を用いた連続仕上げ加工による 2 層構造創成

加工面の 2 層構造の形成を確認するために断面観察および成分分析を行った。その結果を図 14 に示す。成分マッピングより炭化クロム含有層とタングステン含有層がそれぞれ形成されていることが確認できる。そしてライン分析の結果から、タングステン含有層は約 2 μm、炭化クロム含有層は約 5 μm であることが分かる。以上の結果から、異なる 2 種類の電極を用いて放電加工を行うことによって二層構造表面層の形成が可能であることが明らかとなった。

さらに、形成した組成傾斜表面層に含有するタングステン成分の結晶構造について分析を行った。図 15 に加工断面の STEM 像を示す。白い部分と灰色の部分の境界が加工表面となる。成分マッピング結果を併せて示しており、クロム含有層は青い領域、タングステン含有層は赤い領域となる。このタングステン含有層内について、結晶構造を調べたところ、観察箇所によって複数の電子回折図形を確認することができた。すなわち、立方晶系や六方晶系である炭化タングステンが存在していること、そのほかに、直方晶系である Fe_3C や Cr_3C の結晶構造が表面層に存在していることが分かった。さらに、非晶質の箇所も存在することが分かった。以上の結果から、表面から数ミクロンのクロム炭化物含有層を形成し、表面にのみ炭化タングステン含有の硬質表面層を形成できることが明らかとなった。

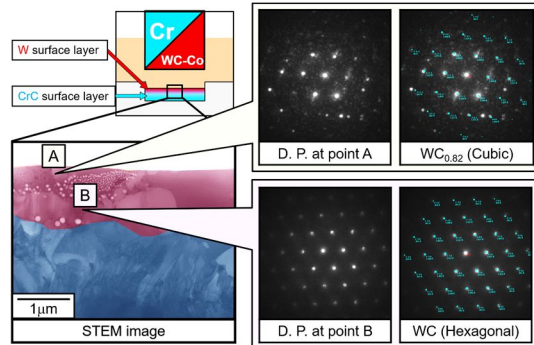


図 15 加工断面 STEM 像および各部の電子回折パターン

(6) 金型表面と成形樹脂との離型性評価方法の構築

本研究で形成できる硬質金型仕上げ面と成形樹脂との離型性を定量的に評価するための、引張試験機を利用した樹脂剥離装置を検討した。

本装置は、金型表面と成形樹脂の界面に対して垂直方向に引張り荷重が負荷された際の剥離荷重を離型力として測定する単純な評価法であり、金型加工仕上げ面や表面処理の離型要因を考察するのに適している。図 16 に離型力測定装置の模式図を示す。樹脂成形金型としての試験片表面に対して、引張圧縮試験機のヘッドを降下させることで熱硬化性樹脂を圧縮成形するそして、引張試験機のヘッドを上昇させることで、試験片表面と成形樹脂が垂直方向に剥離する瞬間の荷重をフォースゲージによって測定する手法である。

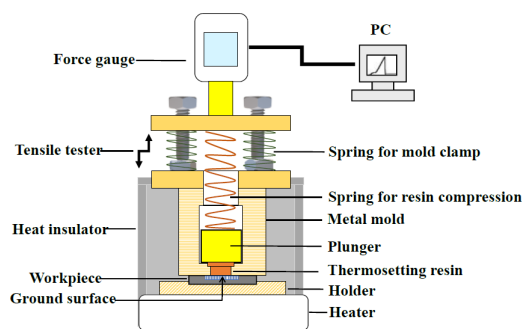


図 16 離型力測定装置の概要

離型力測定結果の一例 (Rz 365 μm の研削加工面) を図 17 に示す。金型とともに成形樹脂が試験片表面から垂直方向に上昇するにつれて引張荷重は直線的に上昇する。そして、試験片表面から成形樹脂が剥離する瞬間に最大引張荷重となり、成形樹脂が試験片表面から離型するこの最大引張荷重から風袋重量(金型, プランジャ, 成形樹脂の総重量)を除いたものが離型力となる。測定された離型力が小さいほど離型性がよい金型表面と判断できる。種々の改良を重ねることで、同一の加工面であればほぼ同じ離型力を得られるようになった。すなわち、成形樹脂との離型性が精度よく評価できる測定装置を構築することができた。

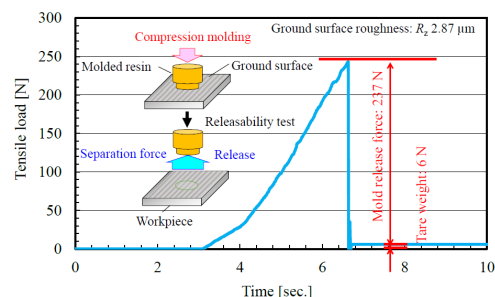


図 17 離型試験時の引張荷重の時間変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 北田良二, 岡田晃	4. 巻 68
2. 論文標題 樹脂成型金型における離型力測定と離型性の向上	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 砥粒加工学会誌	6. 最初と最後の頁 111 ~ 114
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 有
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 Kitada Ryoji, Wang Qin, Tsuetani Shun-ichiro, Okada Akira	4. 巻 113
2. 論文標題 Influence of surface roughness of die sinking EDM on mold releasability in compression molding of thermosetting phenol resin	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Procedia CIRP	6. 最初と最後の頁 238 ~ 243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.procir.2022.09.152	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 Shun-ichiro TSUETANI, Yuki IKEUCHI, Akira OKADA, Ryoji KITADA	4. 巻 -
2. 論文標題 Possibility of Compositionally Graded Surface Formation by Electrical Discharge Machining	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century	6. 最初と最後の頁 -
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 有
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 Yuki Ikeuchi, Shun-ichiro Tsuetani, Ryoji Kitada, Akira Okada	4. 巻 18
2. 論文標題 Fundamental Study on Double-Layered Surface Formation by Electrical Discharge Machining, Proceedings of the 18th International Conference on Precision Engineering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th International Conference on Precision Engineering (ICPE2020)	6. 最初と最後の頁 B-5-5
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 有
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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Qin Wang, Ryoji Kitada, Koki Yoshida, Akira Okada
2. 発表標題 Fundamental Study on Influence of Ground Surface Characteristics on Mold Releasability in Compression Molding of Thermosetting Phenol Resin
3. 学会等名 The 10th Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北田良二, 王欽, 吉田光希, 岡田晃
2. 発表標題 クロム粉末混入放電加工面の離型性に関する基礎評価
3. 学会等名 2024年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 杖谷俊一郎, 岡田晃, 北田良二
2. 発表標題 放電加工仕上げによる組成傾斜表面層形成に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第60期総会・講演会
4. 発表年 2022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)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池内祐貴, 杖谷俊一郎, 北田良二, 岡田晃
2. 発表標題 放電加工による二層構造表面層形成に関する基礎的検討
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020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) 講演論文集
4. 発表年 2020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
研究分担者	岡本 康寛 (Okamoto Yasuhiro) (40304331)	岡山大学・環境生命自然科学学域・准教授 (15301)	
研究分担者	北田 良二 (Kitada Ryoji) (60540276)	崇城大学・工学部・教授 (37401)	
研究分担者	篠永 東吾 (Shinonaga Togo) (60748507)	岡山大学・環境生命自然科学学域・助教 (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
---------	---------