

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：56203

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23525

研究課題名（和文）金属被覆プラスチックリサイクルへの高電圧・パルスパワー技術の応用に関する基礎研究

研究課題名（英文）Application of pulsed power technology to recycling of metal-coated plastic

研究代表者

山下 智彦（Yamashita, Tomohiko）

香川高等専門学校・機械電子工学科・助教

研究者番号：20846109

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、金属層が露出している金属被覆プラスチックへのパルスパワーを用いた金属剥離処理の適用に関する研究を行った。処理対象には金属層が露出するように前処理を施したDVD-Rを使用し、パルス放電によって金属が剥離する際の剥離特性・電気的特性などを詳細に調査した。処理対象上に電極と金属層との間に空隙ができるように電極を配置し、パルスパワーを印加して電圧・電流波形や放電の様子、金属剥離後の表面状態を取得した。また、金属剥離処理における放電と衝撃波の様子を高速度カメラおよびシュリーレン法を用いて観測した。その結果、電極と金属層との間に空隙を設けることで効果的に金属が剥離され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

本研究では、パルスパワー技術を用いた金属剥離処理の電気電子機器筐体などへの適用拡大を目的として、金属層が露出している金属被覆プラスチックからの金属剥離について研究を行った。パルス放電によって金属層が露出した金属被覆プラスチックを処理する場合は、電極と金属層との間に空隙を設けることで金属が効果的に剥離されることが明らかとなった。このことは、パルス放電を用いた金属剥離処理の実用化に向けて、非常に重要な知見である。さらに、金属剥離処理中に発生する放電および衝撃波の様子を撮影した。それらは、極めて薄い金属薄膜の蒸発を伴う放電現象の解明および衝撃波の効果的利用にも役立つと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study has focused on a phenomenon of metal removal from metal-coated plastic using pulsed power technology from the viewpoint of valuable resource recovery. In this study, to expand the application of metal removal treatment, a DVD-R with the pretreated to expose a metal layer was used as the treatment target. An out-sided and center electrode (OCE) arrangement with an air gap between the electrodes and metal layer was employed. The influence of the air gap on the metal removal was examined and discussed mainly based on the voltage/current waveforms. The state of discharge and the shockwave were also observed with the high-speed camera and the Schlieren system. As a result, it was revealed that the metal is effectively removed from the DVD-R by providing an air gap between the electrodes and the metal layer.

研究分野：高電圧パルスパワー工学

キーワード：パルスパワー 放電 衝撃波 金属被覆プラスチック 金属剥離 リサイクル

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

金属被覆プラスチックは、耐腐食性や軽量性、金属外観を容易に得ることができるため、電気電子機器製品の筐体など様々な製品に使用されている。その需要の多さから、廃棄物のリサイクルが課題となっている。一般にはプラスチックが回収の対象であるが、有価金属が含まれる場合は、両方の回収が目的となる。いずれの場合もプラスチックと金属の分離が必要であり、多様で複雑な形状に対応できる分離技術の開発が求められている。この問題に対して、金属プラスチックリサイクルに高電圧・パルスパワー技術を適用し、パルス放電によりプラスチックと金属に分離する方法を提案している。高電圧・パルスパワー技術によって発生する放電は、絶縁物のプラスチック表面に沿って発生しやすく、表面に存在する金属を選択的に剥離する。しかしながら、処理対象が電気電子機器製品の筐体のように金属層が露出した金属被覆プラスチックの場合、パルス放電を発生させるための電極を直接設置すると電極間が金属層で短絡された状態になり、放電の発生が困難になる。そのため、金属層が露出した金属被覆プラスチックの金属剥離処理における放電特性や金属剥離特性を取得し、金属層が露出した場合を考慮した電極配置について詳細に検討する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、金属被覆プラスチックへのパルス放電を用いた処理の適用を検討するため、接合面から2つに分離して金属層が露出した状態の DVD-R を対象に放電特性や金属剥離特性、効果的な電極配置等を調査することを目的としている。加えて、金属層が露出した金属被覆プラスチックからの金属剥離における放電および衝撃波を高速カメラおよびシュリーレン法を用いて観測する。

### 3. 研究の方法

図 1 に本研究で処理対象として使用した DVD-R の構造を示す。DVD-R の直径および厚みは一般的な光ディスクと同様にそれぞれ 120 mm、1.2 mm である。DVD-R には様々な種類があるが、本研究では一般消費者に広く普及している片面タイプを使用した。片面 DVD-R は図 1 に示すように、2 枚のプラスチック基板、金属層、記録層、印刷層を含む保護層から構成されている。DVD-R の金属層には銀や銀合金、記録層にはアゾ化合物が使用されている。本研究では、金属被覆プラスチックへのパルス放電を用いた処理の適用を検討するため、DVD-R を金属層と記録層の接合面から2つに分離する前処理を施し、金属層が露出した前処理済みの DVD-R を処理対象とした。

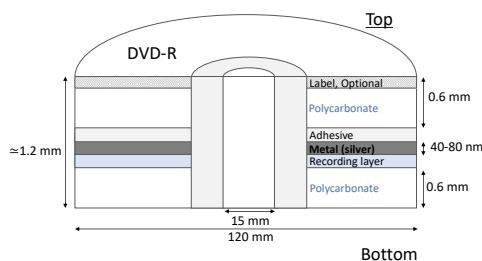
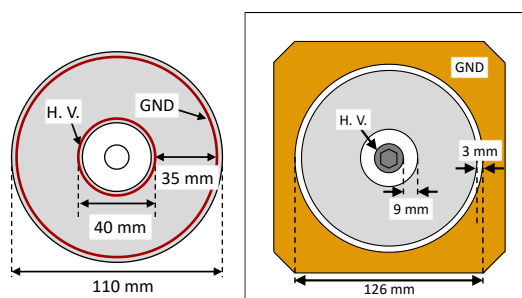


図 1. DVD-R の構造

図 2 に本研究における電極配置を示す。本研究では、2 種類の電極配置を使用して金属被覆プラスチックからの金属剥離特性に対する電極配置の影響を調査した。1 つは図 2(a)に示すような処理対象の金属層上に配置した同心円環状電極(Concentric Ring Electrode: CRE)配置で、もう 1 つは図 2(b)に示すような両方の電極と金属層の間に空隙を設けて配置した外側と中心電極(Out-sided and Center Electrode: OCE)配置である。どちらの電極においても、内側の電極は高電圧電極、外側の電極は接地電極であり、内側と外側の電極間に高電圧・パルスパワーを適用し、処理を行う。



(a) 同心円環状電極 (CRE 配置) (b) 外側と中心電極 (OCE 配置)

図 2. 電極配置

図 3 に DVD-R の金属剥離実験装置を示す。本研究ではパルス発生器として、最大蓄積エネルギー 40 J/pulse、最大出力電圧 120 kV の性能を備えた磁気パルス圧縮方式パルスパワー発生器(MPC-PPG)を使用し、高電圧電極と接地電極間に 35.3 J/pulse のパルスパワーを印加した。電圧・電流波形は、高電圧プローブ(EP-150K, Nissin Pulse Electronics Co., Ltd.)とカレントモニタ(Model-110A, Pearson Electronics)を介して、オシロスコープ(DPO5104B, Tektronix Inc.)によって取得した。さらに、デジタル一眼レフカメラ(Model D60, D40, Nikon)によって金属

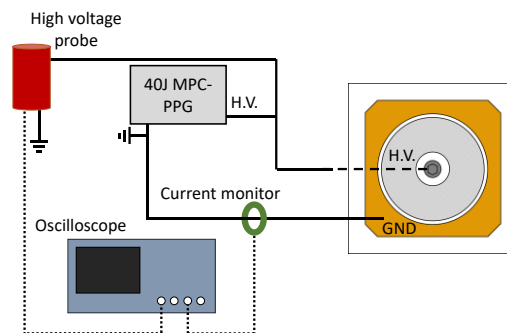


図 3. DVD-R の金属剥離実験装置

剥離の進行状況を撮影し、また、放電の様子については露光時間を1秒に設定し撮影した。金属剥離の進行は、背後から光を当てて透過光を撮影するシャドウピクチャー法によって取得した。本研究では、得られた写真を画像解析ソフト Image J によって解析し、金属剥離の進行状況を評価することで除去率を推定した。

DVD-R の金属剥離における放電については、高速度カメラ(ULTRA Neo, Nac Image Technology, Inc.)によって CRE 配置電極を使用したときの放電の様子を観測した。具体的には、処理対象である前処理済みの DVD-R を取り付けられた電極をテーブルに垂直方向に置き、水平方向から高速度カメラによって放電の連続写真を得た。このとき、フレーミングレートを 4 Mfps に設定したため、得られた連続写真のフレーム間隔は 250 ns である。また、DVD-R の金属剥離における衝撃波については、処理対象である前処理済みの DVD-R を  $10 \times 30 \text{ mm}^2$  に裁断したものを対象として使用し、観測を行った。対象上に電極間隔約 6 mm の銅製の棒対棒電極を配置して、最大蓄積エネルギー 1 J/pulse, 最大出力電圧 30 kV の性能を備えた MPC-PPG によってパルス電圧を印加した。棒電極間の放電発生部がシュリーレンシステムの作業部に位置するように電極を配置し、金属剥離における衝撃波を観測した。電圧印加後、所望の時間にディレイジェネレータ(9520 series, Quantum Composers, Inc.)でシングルフラッシュレーザー(Continuum, minilite, Nd:YAG Laser)を動作させた。Nd:YAG レーザーの波長は 532 nm, パルス幅は 5 ns である。衝撃波の写真は、デジタル一眼レフカメラ(Model D40, Nikon)の露光時間を 1 秒に設定して撮影した。

#### 4. 研究成果

##### 【(1) DVD-R の金属剥離特性】

図 4 に DVD-R にパルスパワーを印加したときの金属剥離の様子を示す。図 4 は 2 種類の電極配置の各電極にパルスパワーを印加したときの DVD-R の状態を示しており、左図は CRE 配置、右図は OCE 配置における様子である。また、図 4 中の白破線は高電圧電極と接地電極の位置を示している。図 4(a)-(c)に示すように、電極の配置に関係なく、パルスパワーのショット数の増加に伴って DVD-R から徐々に金属層が剥離されることが明らかとなった。図 4(a)および図 4(b)は、それぞれ処理前と 1 ショット印加後の DVD-R の表面状態を示す。CRE 配置の場合は高電圧電極の近くの金属層の一部だけが剥離された。一方、OCE 配置の場合は CRE 配置と比較してより大きな領域で金属層が剥離された。図 4(c)に、35 ショット印加後の DVD-R の表面の状態を示す。図 4(c)の右側に示すように、OCE 配置の場合は 35 ショットの印加によって DVD-R からほぼ完全に金属層が剥離される。一方で、CRE 配置の場合は図 4(c)の左図に示すように、35 回のショット後も電極付近の金属層が残っている。

図 5 に金属剥離率に対するショット数依存性を示す。結果として、OCE 配置を使用することで、14 ショットのパルスパワーを印加によって約 90%の金属層が剥離されることが明らかとなった。一方で、CRE 配置の場合は 14

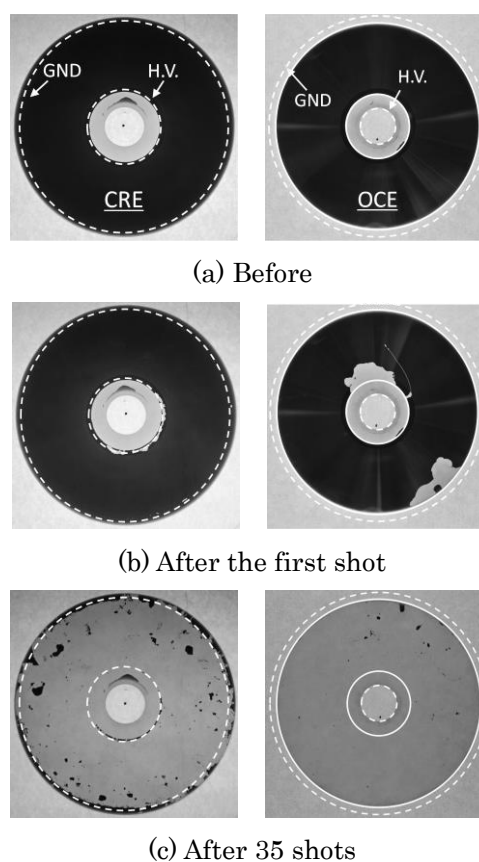


図 4. DVD-R の金属剥離の様子

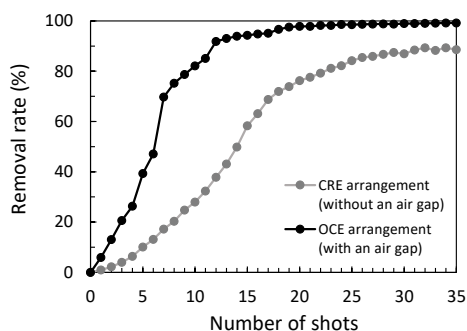


図 5. 金属剥離率のショット数依存性

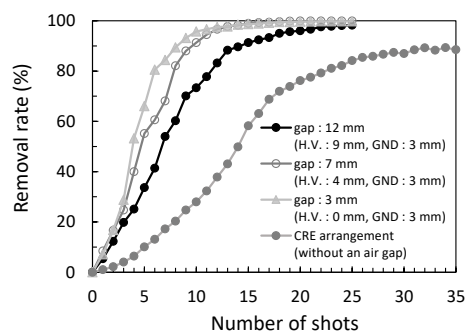


図 6. 空隙間隔をパラメータとした金属剥離率のショット数依存性

ショットの印加で剥離率が約 45% までしか到達しなかった。さらに、OCE 配置の場合、35 ショットの印加によって約 99% の金属層が剥離されることが明らかとなった。

図 6 に金属層と電極との空隙間隔をパラメータとした場合の金属剥離率に対するショット数依存性を示す。結果として、空隙のない CRE 配置では 100% の除去ができず、また一方で、空隙の間隔が大きくなると処理速度が低下することを明らかにした。

## 【(2) DVD-R の金属剥離における放電特性と電気的特性】

図 7 はパルスパワーを 1 ショット印加したときの放電の様子と電圧・電流波形を示しており、図 7(a)、図 7(b) はそれぞれ CRE 配置と OCE 配置における結果である。図 7(a) 左図に示すように、CRE 配置の電極にパルスパワーを 1 ショット印加すると、高電圧電極付近においていくつかの小さな領域の緑色の発光が観察された。この発光の色は、金属層の成分である銀に起因している。

図 7(a) 左図と図 4(b) 左図を比較すると、緑色の発光領域と剥離領域が一致していることがわかる。また、図 7(a) 右図に示すように、CRE 配置における 1 ショット目のピーク電圧値は 1-2 kV と非常に小さい。

図 7(b) は OCE 配置においてパルスパワーを 1 ショット印加したときの放電の様子と電圧・電流波形を示している。図 7(b) 左図に示すように、高電圧電極と接地電極付近の広い領域で緑色の発光が観測された。放電は、電極と金属層の間で発生し、その後放電の先端から金属層に大電流が流れ、金属層にて金属が気化・プラズマ化していると考えられる。また、図 7(b) 右図に示すように、OCE 配置における 1 ショット目のピーク電圧値は約 20 kV と CRE 配置の場合に比べて高い。

図 7(a) 左図と図 7(b) 左図より、CRE 配置の場合に比べて OCE 配置の場合の緑色発光の領域がはるかに大きいことがわかる。また、図 7(a) 右図と図 7(b) 右図を比較すると、電流波形はほぼ同じであるが、電圧波形が異なっていることがわかる。CRE 配置の場合、電極と金属層との間に空隙がなく短絡状態となっているため、原則として電圧は発生しないが、金属層の表面が酸化されている場合や電極が金属層と完全に接触していない場合、または瞬間的に電圧が印加された場合は抵抗値が増加し、小さな放電が発生する可能性がある。今回はパルス発生器によって瞬間的に

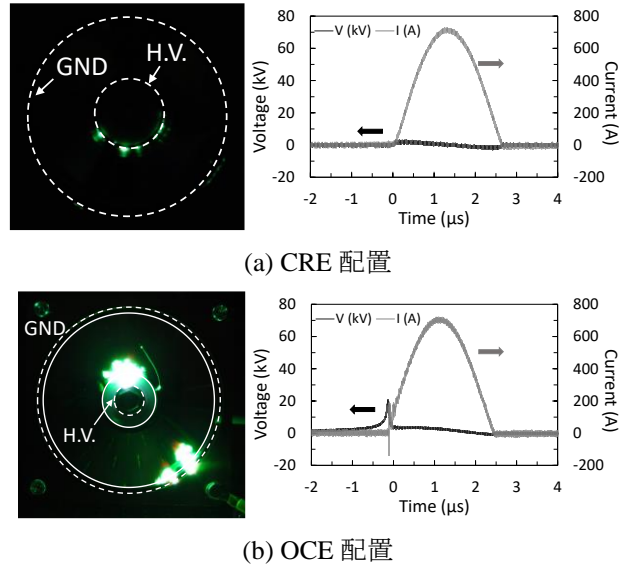


図 7. 放電の様子と電圧電流波形(1 ショット目)

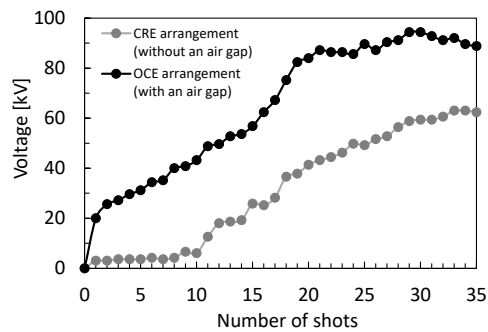


図 8. 放電開始電圧のショット数依存性

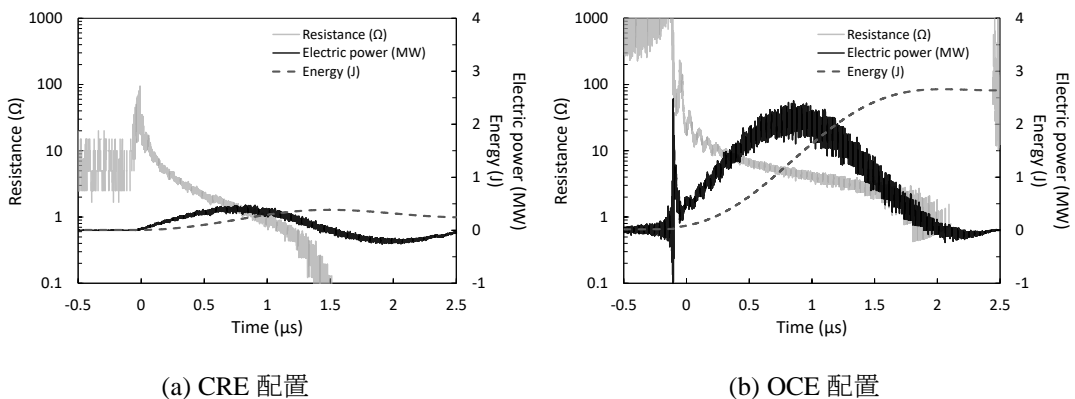


図 9. 1 ショット目印加における電力、入力エネルギー、抵抗値の時間的変化

電圧を印加しているため、放電が発生したと考えられる。また、OCE 配置においては、まず初めに放電が電極と金属層の間で発生するため、ピーク電圧は空隙部の空気の絶縁破壊電圧に相当する。したがって、空隙のない CRE 配置の場合に比べて高い電圧値となっている。

図 8 に放電開始電圧のショット数依存性を示す。図に示すようにどちらの電極配置においてもショット数が増加するに従い、放電開始電圧が増加していることが明らかとなった。これはショット数が増加して処理が進むとともに剥離領域が広がり、剥離されていない金属層と電極との距離が増加するためである。また、CRE 配置に比べて OCE 配置の場合に電圧値が高いのは、電極と金属層との間に設けた空隙の分だけ電極間距離が大きいためである。

図 9 に CRE および OCE 配置における 1 ショット目を印加したときの電力、入力エネルギーおよび電極間の抵抗の時間的变化を示す。電力、入力エネルギーおよび抵抗の値は、オシロスコープで測定された電圧と電流から算出された。図 9(a)は、CRE 配置の場合の時間的变化を示しており、CRE 配置においては電力が緩やかに上昇し続け、ピーク値は約 0.5 MW であった。このとき、電流は金属層に分散して流れているため、抵抗値はすぐに減少している。また、入力エネルギーのピーク値は約 0.4 J に達した。図 9(b)は、OCE 配置の場合の時間的变化を示しており、まず、突然大きな電力パルスが発生していることがわかる。これは、電極と金属層の間で発生する放電を介して入力されたと考えられる。その後、電力は緩やかに上昇し続け、ピーク値は約 2.5 MW であった。このとき、抵抗値はすぐには減少していないことがわかる。これは、OCE 配置の場合、放電の先端である 1 箇所から金属層に電流が流れ始めるためであると考えられる。また、入力エネルギーは約 2.7 J に達した。

### 【(3) DVD-R の金属剥離における放電および衝撃波観測】

図 10 に高速度カメラによって撮影した DVD-R を対象として 3 ショット目のパルスパワーを印加したときの放電進展の様子を示す。このとき、電極には CRE 配置電極を使用した。高速度カメラは、放電開始後電流が 4 A に達した後に 250 ns 毎に撮影するよう同期を取っている。図 10(a)-(d)に示すように、CRE 配置電極を用いた場合、両電極付近で緑色に発光する箇所が徐々に増加する様子が確認された。特に、図中の白矢印で示すように、接地電極付近では 4 箇所で発光領域が確認された。また、図中の赤色矢印で示すように、高電圧電極付近では接地電極付近よりも少ない箇所が発光が確認されており、その中でも 1 箇所では発光領域が扇状に広がる様子が確認された。このように CRE 配置の電極において、多くの箇所での発光が確認されたが、これは前述したように、CRE 配置の場合、電極と金属層との間に空隙がなく短絡状態となっており、電流が金属層に分散して流れていることに起因している。

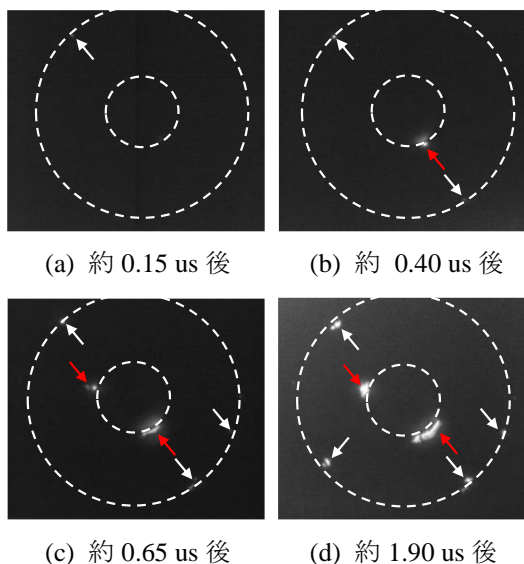


図 10. 放電進展の様子 (3 ショット目)

図 11 にシュリーレン法によって撮影した DVD-R の金属剥離処理中の衝撃波の様子を示す。図 11 に示すように、金属が樹脂層で覆われている CD-R などの場合と同様に、DVD-R の金属剥離処理中にも衝撃波が発生していることを明らかにした。得られたシュリーレン像には、図中黒矢印で示すように、煙のようなものが映っており、これは金属片が微粒化したものと考えられる。金属片は非常に小さいため、飛散の様子は確認できなかった。

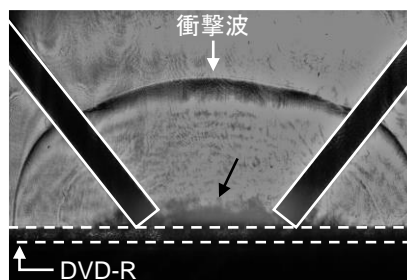


図 11. 金属剥離処理中の衝撃波の様子

### 【(4) まとめ】

本研究では、金属被覆プラスチックへのパルス放電を用いた処理の適用を検討するため、接合面から 2 つに分離して金属層が露出した状態の DVD-R を対象に放電特性や金属剥離特性、効果的な電極配置等の調査を実施した。金属層上に配置した同心円環状電極(CRE)配置ならびに両方の電極と金属層の間に空隙を設けて配置した外側と中心電極(OCE)配置を用いて剥離特性を調べた結果、空隙のない CRE 配置では 100%の除去ができず、OCE 配置ではほぼ完全に除去できるが、空隙の間隔が大きくなると処理速度が低下することを明らかにした。また、その結果について、放電特性ならびに電圧・電流波形、投入電力、入力エネルギー等の電気的特性から説明した。本研究で得られた成果は、金属被覆プラスチックのパルス放電を用いた処理技術の発展に貢献するものとする。

## 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 Yamashita Tomohiko, Yamashita Reon, Hosano Hamid, Sakugawa Takashi	4. 巻 110
2. 論文標題 Influence of electrode arrangement on recycling metal-coated plastic (DVD-R) using pulsed electric discharge	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Electrostatics	6. 最初と最後の頁 103557 ~ 103557
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elstat.2021.103557	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 Sato Mitsuhiko, Sakugawa Takashi, Yamashita Tomohiko, Hosano Nushin, Hosano Hamid	4. 巻 48
2. 論文標題 Effects of Voltage and Current Waveforms on Pulse Discharge Energy Transfer to Underwater Shock Waves for Medical Applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 2639 ~ 2645
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPS.2020.2992638	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 T. Tagawa, T. Yamashita, T. Sakugawa, S. Katsuki, K. Hukuda, and K. Sakamoto	4. 巻 209
2. 論文標題 Study of SiC device for pulsed power switching circuit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Electrical Engineering in Japan	6. 最初と最後の頁 3 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/eej.23242	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 田川 亨, 山下 智彦, 佐久川 貴志, 勝木 淳, 福田 憲司, 坂本 邦博	4. 巻 139
2. 論文標題 SiCデバイスのパルスパワースイッチング回路への適用研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌)	6. 最初と最後の頁 345 ~ 350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.139.345	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 T. Yamashita, R. Fujimoto, T. Tagawa, K. Sakamoto, and T. Sakugawa
2. 発表標題 A Method of Energy Recovery Switching for Pulsed Power using SIC-MOSFET
3. 学会等名 IEEE Pulsed Power and Plasma Science 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------	---------