

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：32410

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18300

研究課題名(和文)レアメタル回収に向けた放電破砕と衝撃波収束を利用した超高効率革新的破砕法の確立

研究課題名(英文) Study on High Efficiency and Innovative Crushing Method for Recovering Rare Metal Using Discharge Crushing and Converged Shock Wave

研究代表者

小板 丈敏 (KOITA, TAKETOSHI)

埼玉工業大学・工学部・講師

研究者番号：00750192

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、廃電子部品からのレアメタル分離回収を目指し、放電破砕だけでなくリフレクターを用いた放電誘起衝撃波フォーカシング破砕を利用した超高効率革新的放電破砕法の確立のために、数値解析を用いて、衝撃波フォーカシング破砕を可能とし、放電破砕法の放電電極に装着可能な最適な小型リフレクター形状を解明した。本高効率放電破砕法の確立に必要な放電誘起水中爆発法でのレアメタル含有部品の単体分離のメカニズム、および、放電破砕法での放電回数、樹脂塊破砕の粒度分布への影響を解明した。そして、これら研究成果により、本高効率革新的放電破砕法の確立の可能性が得られた。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to develop the high efficiency crushing method for recovering rare metal utilizing the discharge crushing and the distribution caused by the shock wave focusing using the reflector. The optimum geometry of reflector attachable to the electrode of discharge crushing device causing the distribution by the shock wave focusing was researched by the numerical simulation. The mechanism of liberation of rare metal block from the simulated capacitor model induced by the underwater electrical discharge, the underwater explosion, was clarified by the visualization. The effect of number of discharge times on the particle size distribution of resin lump by the discharge crushing was investigated. The results of these researches indicated the possibility of establishment of high efficiency crushing method using the discharge crushing and the distribution by the shock wave focusing with the optimized reflector.

研究分野：衝撃波工学

キーワード：衝撃波 気泡 水中放電 放電破砕 衝撃波フォーカシング リフレクター レアメタル リサイクル

1. 研究開始当初の背景

(1) 高性能小型電気電子機器の電子部品に欠かせないレアメタルの産出は一部の資源国に偏在しているため、我が国はレアメタル安定供給の確保の問題に直面している。一方で、我が国には都市鉱山と呼ばれるレアメタルを多量に含む廃電気電子機器が存在する。日本のハイテク電気電子製品の国際的優位性を保つためには、レアメタル資源の確保が必要であり、廃電気電子機器からのレアメタルリサイクル技術の研究が行われてきた。このリサイクル技術の構築に対し、廃電子部品を破碎し、レアメタルを分離する高効率破碎分離法の確立が必要不可欠である。

(2) 過去の研究において、廃電子部品の破碎分離に放電破碎法または水中爆発法を応用する研究がされてきた。放電破碎法では直接試料に水中放電を行い、試料内部で放電誘起衝撃波を発生させ、衝撃波の衝撃圧により試料を絶縁破壊させる。水中爆発法は放電誘起水中衝撃波の衝撃圧を用いた破碎である。しかし、放電破碎法と水中爆発法において、放電誘起水中衝撃波により廃電子部品を破碎するためには、高放電エネルギーが必要となるため、放電装置の高コスト化が課題となっている。よって、持続可能なレアメタル資源の確保を実現させるためには、上記の課題を解決した、放電エネルギーを抑えた高効率な放電破碎法の研究開発が必要不可欠である。

(3) 研究代表者はこれまで、放電発光を抑えた放電誘起高速現象の可視化技術を確立し、理論解析、数値解析、可視化計測を用いて、放電誘起の水中衝撃波および単一気泡の現象解明を行ってきた。

(4) (3)で示した研究代表者の過去の研究成果である、放電破碎法と水中爆発法の破碎原理の解明より、(2)の課題解決を可能とする、放電破碎だけでなくリフレクターを用いた放電誘起衝撃波フォーカシング破碎を利用した、放電エネルギーを抑えた超高効率革新的放電破碎法の確立の構想を得た。

(5) 過去の研究において、リフレクターを用いた衝撃波フォーカシングによる高圧発生の原理が解明され、衝撃波フォーカシング破碎は体外衝撃波結石破碎術に適用されてきた。本研究の放電破碎と衝撃波収束を利用した超高効率革新的破碎法の開発では、従来の放電破碎法の上部電極に設置する小型リフレクターの研究開発が必要となる。しかし、レアメタル含有廃電子部品の樹脂筐体の破壊強度以上の高圧力を発生させ、廃電子部品の衝撃波フォーカシング破碎を可能とする小型リフレクターの最適形状は十分に明らかにされていない。

(6) これまでの研究では、放電破碎法と水中

爆発法による廃電子基板からの電子部品の単体分離の粒度分布の調査が行われてきた。また、放電破碎法での試料への放電経路が解明されてきた。廃電子部品からレアメタル含有部品を分離させるためには樹脂筐体の破碎と単体分離が必要不可欠である。しかし、水中爆発法による廃電子部品からのレアメタル含有部品の単体分離のメカニズムは解明されていない。また、放電破碎法による放電回数が破碎樹脂の粒度分布に与える影響は十分に解明されていない。本研究のレアメタル回収に向けた放電破碎とリフレクターを用いた衝撃波フォーカシング破碎を利用した超高効率革新的破碎法の確立には、放電破碎法と水中爆発法での上記の未解決課題の解決が必要不可欠である。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、廃電子部品からのレアメタル分離回収を目指し、放電破碎だけでなくリフレクターを用いた放電誘起衝撃波フォーカシング破碎を利用した超高効率革新的放電破碎法の確立を目的とした。

(2) 本目的を達成するために、数値解析による電子部品筐体の衝撃波フォーカシング破碎を可能とする最適なリフレクター形状を調査する。

3. 研究の方法

(1) 数値解析によるコンデンサ筐体の衝撃波フォーカシング破碎を誘起する最適なリフレクター形状の調査

図1に数値解析モデルの概略図を示す。本研究では、レアメタルのタンタル(Ta)を含むTaコンデンサを対象とする。衝撃波フォーカシング破碎が発生する第2焦点の位置と圧力はリフレクターの長短径比 a/b に依存する。よって、長短径比 a/b を変化させ、放電破碎法にリフレクターによるフォーカシング破碎を適応させるために、リフレクターを水中に設置した。リフレクターの第2焦点にコンデンサ樹脂筐体を模擬したアクリルブロック(1.5 mm × 6 mm)を設置し、アクリルブロックに負荷する第2焦点の圧力の数値解析を行った。圧力解析では、衝撃解析コードAUTODYNを用いて、2次元軸対象モデルにおいて、Multiple Material Euler法を使用した。本研究では放電破碎法において、放電電極に小型リフレクターを装着させる。よって、数値解析では、リフレクターの長径 $2a = 20$ mmと固定し、過去の研究で使用されてきた a/b の値を採用し、 $a/b = 1.05, 1.20, 1.40$ と変化させた。リフレクターの第1焦点 f_1 に放電エネルギー $E_c = 2.025$ Jを設定した。そして、各 a/b の解析条件において、コンデンサの樹脂筐体の破壊強度以上の圧力が第2焦点 f_2 で発生するのかを調査し、最適なリフレクター形状 a/b を選定した。

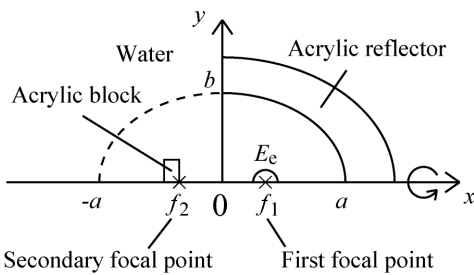


Fig. 1 Schematic diagram of simulation model of reflector.

(2) 水中爆発法による廃電子部品からのレアメタル含有部品の単体分離機構の解明のための可視化実験

本研究の衝撃波フォーカシング破碎を利用した高効率放電破碎法を開発するためには、研究の方法(1)の衝撃波フォーカシング破碎を誘起する最適なりフレクター形状の調査だけでなく、放電電極で発生する水中爆発による、レアメタル含有部品の単体分離のメカニズムの解明が必要となった。よって、水中放電による廃電子部品からのレアメタル含有部品の破碎分離機構の解明を目的とし、Ta コンデンサ模擬モデルにおいて、シャドウグラフ法による可視化計測を用いて、放電誘起の水中衝撃波と単一気泡の Ta ブロックへの干渉、および、Ta ブロックの単体分離の現象解明を行った。

図 2 に Ta コンデンサ模擬モデルおよび実験装置の概略図を示す。Ta コンデンサの模擬モデルとして、コンデンサ筐体をアクリル樹脂 (PMMA) とし、Ta ブロックを PMMA ブロックの上に置いた。Ta コンデンサの Ta 焼結体と同じ寸法である、2 mm の Ta ブロックを使用した。PMMA ブロックの寸法は高さ 134 mm、幅 135 mm、奥行き 20 mm である。水中放電を用いた線爆発により、水中衝撃波と単一気泡を発生させた。放電装置のコンデンサ容量は $0.2 \mu\text{F}$ であり、放電電圧を 4.5 kV とした。よって、理論的な放電エネルギーは $E_c = 2.025 \text{ J}$ であり、研究の方法(1)の数値解析条件と同等である。電極と Ta コンデンサ模擬モデルとの距離 L が Ta ブロックの単体分離に与える影響を調査するため、 $L = 10, 20 \text{ mm}$ と変化させた。

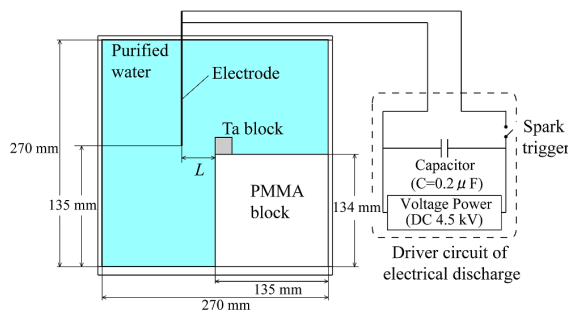


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental model and the experimental setup for electrical discharge and pressure measurement.

なお、 $L = 20 \text{ mm}$ は研究の方法(1)の数値解析での放電電極と Ta コンデンサ筐体樹脂との間の距離と同等である

図 3 に可視化計測で使用したシャドウグラフ法の光学系の概略図を示す。光源にメタルハライドランプ (PCS-UMX350) を使用し、高速度ビデオカメラ (PHANTOM V2010) を用いて Ta ブロックの単体分離の現象を記録した。撮影速度は $2.0 \times 10^5 \text{ frame/sec}$ 、露光時間は $0.5 \mu\text{s/frame}$ とした。

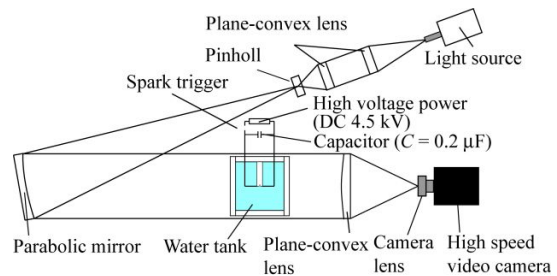


Fig. 3 Schematic diagram of the optical arrangement for visualization.

(3) 放電破碎法での放電回数が樹脂破碎の粒度分布に与える影響の実験的調査

本研究の放電破碎と衝撃波フォーカシング破碎を活用した高効率放電破碎法を確立させるためには、放電破碎法によるコンデンサ筐体樹脂の破碎粒度の詳細な調査が必要である。本研究では、電子部品、コンデンサ筐体を使用される PBT (ポリブチレンテフタート) と GFPBT (PBT にガラス繊維を混入させ強度を強化した樹脂) を対象とし、放電破碎実験を行い、放電回数がこれら樹脂破碎の粒度分布に与える影響を調査した。

図 4 に放電破碎実験の概略図を示す。基礎研究として、60 g の PBT と GFPBT の樹脂塊を試料とした。電気パルス粉碎機 (SELFLAG 社製) を用いて、これら樹脂塊の放電破碎を行った。この電気パルス粉碎機の電極間距離は 20 mm であり、研究の方法(1)の数値解析での放電電極と試料との間の距離と同等である。放電電圧を $V = 180 \text{ kV}$ 、パルス周波数を $f = 1 \text{ Hz}$ とし、電極間に樹脂塊を設置した。放電回数を 75、150、300、600、1200、2400 回と変化させた。JIS Z 8801 に基づいた試験用ふるいを用いて、放電破碎実験後に各放電回数での破碎樹脂の粒度分布を調査した。

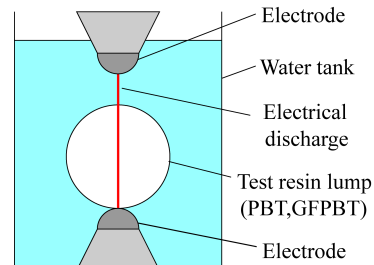


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup for electrical discharge crushing.

4. 研究成果

(1) コンデンサ筐体の衝撃波フォーカシング 破碎を誘起する最適なりフレクター形状

図5にリフレクターの長短径比 $a/b = 1.20$ (長径 $2a = 20$ mm) における、放電エネルギー $E_c = 2.025$ J で発生する水中衝撃波伝播の圧力分布の時間履歴を示す。図5(c)の $t = 4.0$ μs において、放電誘起水中衝撃波は先行水中衝撃波としてコンデンサ筐体樹脂を模擬したアクリブロックに向かって左方向へ伝播している。

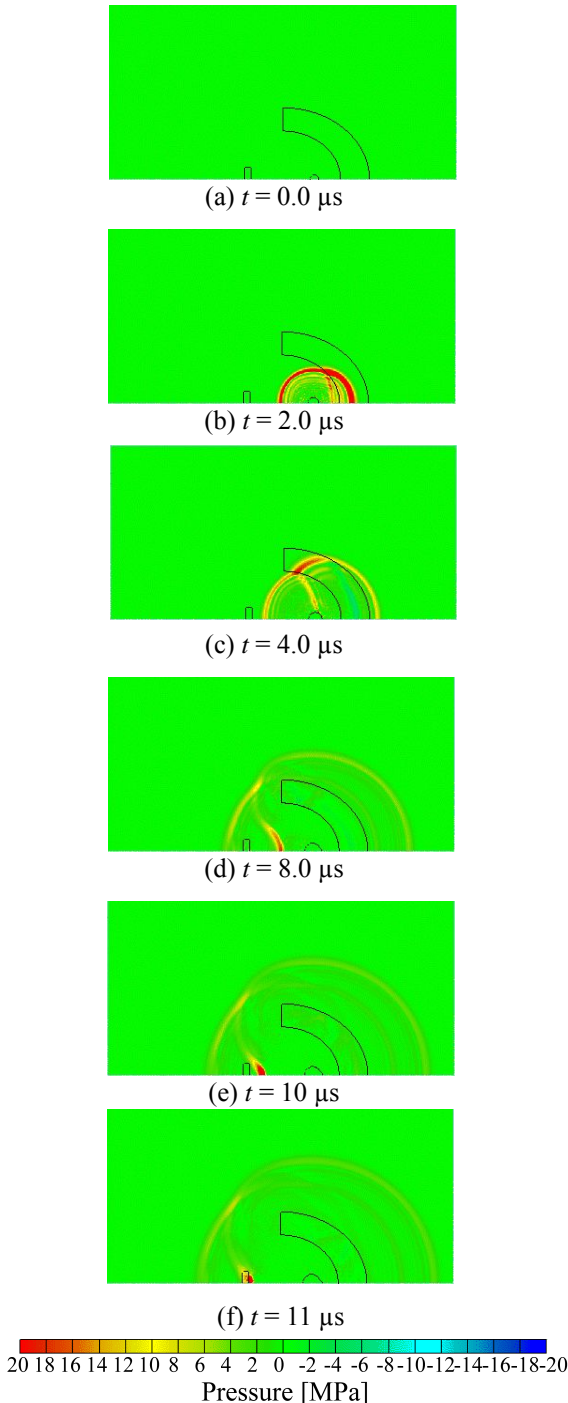


Fig. 5 Time histories of pressure distribution of underwater shock wave reflected from the reflector, $a/b = 1.20$, $E_c = 2.025$ J.

図5(b)、(c)で見られるように、リフレクターの第1焦点で発生した放電誘起水中衝撃波はリフレクターで反射し、反射水中衝撃波は第2焦点へ向かって収束した。図5(f)の $t = 11$ μs において、第2焦点に設置されたアクリブロックに収束水中衝撃波が干渉することが明らかとなった。

図6に $a/b = 1.05, 1.20, 1.40$ ($a = 10$ mm)、 $E_c = 2.025$ J の解析条件における、アクリブロックに負荷した先行水中衝撃波のピーク圧力 P_1 、収束水中衝撃波のピーク圧力 P_2 、 P_2/P_1 を示す。図6より、本解析条件において、 $a/b = 1.20$ において、 $P_2/P_1 = 23$ となり、最大値となった。このとき、 $P_2 = 263$ MPa であり、コンデンサ筐体樹脂の PBT の破壊強度 79.5 MPa、および、GFPBT の破壊強度 143.5 MPa 以上の高圧力が発生した。よって、 $a/b = 1.20$ のリフレクター形状において、第2焦点の収束水中衝撃波のピーク圧力により、コンデンサ筐体樹脂が破碎されることが示唆された。

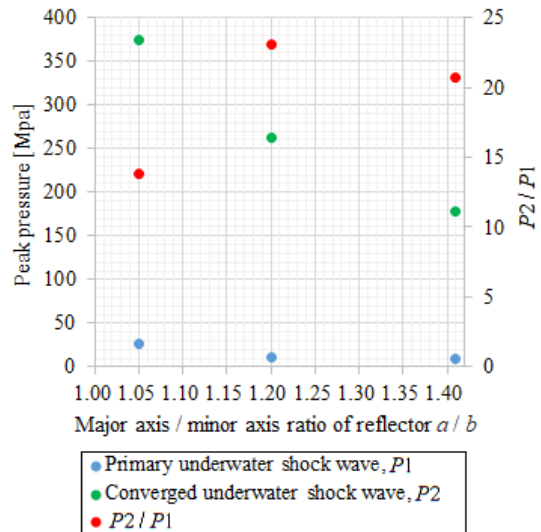


Fig. 6 Relationships between the major axis / minor axis ratio of reflector a/b and the peak pressure of primary and converged underwater shock waves loading to the acrylic block set in the secondary focal point of reflector.

以上より、衝撃波フォーカシング破碎を可能とし、放電破碎法の電極に装着可能な最適な小型リフレクター形状は、放電エネルギー $E_c = 2.025$ J において、リフレクターの長短径比 $a/b = 1.20$ (長径 $2a = 20$ mm) であることを解明した。

(2) 水中爆発法によるコンデンサ模擬モデルからのレアメタル Ta ブロックの単体分離のメカニズム解明

$L = 10, 20$ mm、放電エネルギー $E_c = 2.025$ J での放電誘起の水中衝撃波と単一気泡の Ta ブロックへの干渉、および、Ta ブロックの移動分離の可視化画像をそれぞれ図7、8に示す。図7(a)と図8(a)は放電前の画像である。

図 7(b)において、水中衝撃波は Ta と PMMA ブロックに干渉し、伝播している。PMMA の音速の方が水より速いため、PMMA ブロック内の弾性波は先行波として伝播する。図 7(a)と図 8(a)に見られるように、この PMMA 内の先行波により、水中に弱い斜め衝撃波が発生した。また、水中衝撃波は Ta および PMMA ブロック左端面で反射し、反射水中衝撃波は回折した。

$L = 10 \text{ mm}$ の場合、Ta ブロックの単体分離が発生した。図 7(c) の $t = 0.95 \text{ ms}$ において、単一気泡は Ta と PMMA ブロックの左壁面近傍まで膨張し、気泡の最大直径は 16.8 mm となった。図 7(c)に見られるように、単一気泡が膨張するにつれて、Ta ブロックは PMMA 上の右方向に移動した。単一気泡の膨張により、Ta ブロック左壁面の力積が増加し、Ta ブロックは加速され、右方向へ移動したと考えられる。図 7(d)において、単一気泡はブロック左壁面近傍まで膨張したため、単一気泡は PMMA ブロック左壁面へ向かって収縮した。図 7(d)、(e)において、単一気泡が収縮するにつれて、Ta ブロックは PMMA 上の左方向(電極側)へ移動した。図 7(c)、(e)より、単一気泡が最大膨張するまでの時間は約 0.95 ms 、最大膨張した気泡が収縮するまで時間は約 0.67 ms であった。よって、気泡が収縮する加速度の方が膨張する加速度より速いため、単一気泡の収縮によって電極側へ Ta ブロックが移動したことが分かった。

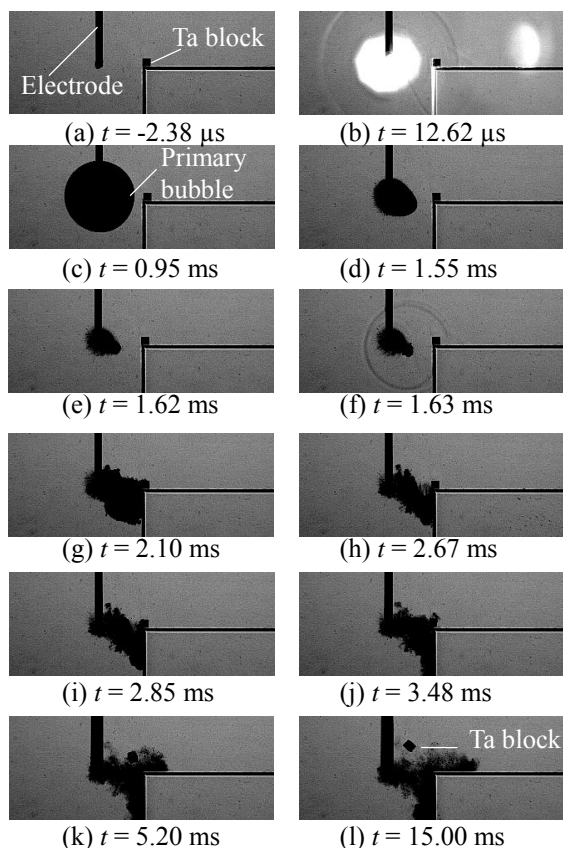


Fig. 7 Shadowgraph images of the interaction of underwater shock wave and primary bubble with a Ta block for $L = 10 \text{ mm}$.

収縮した単一気泡は再膨張(リバウンド)した。図 7(f)において、リバウンド誘起水中衝撃波が発生し、Ta ブロックへ干渉した。図 7(g)-(l)より、リバウンドした気泡は Ta と PMMA ブロックへ干渉することが明らかになった。図 7(h)において、気泡は PMMA ブロック左壁面に沿って下方方向に収縮し、Ta ブロックは電極側へ移動した。図 7(i)において、気泡は PMMA ブロック左壁面に沿って再び膨張した。その後、図 7(j)-(l)において、Ta ブロックは PMMA ブロックから上方方向へ放物線運動をしながら単体分離した。

$L = 20 \text{ mm}$ の場合、Ta ブロックは単体分離しなかった。 $L = 20 \text{ mm}$ は単一気泡の最大直径よりも大きいため、図 8(d)、(e)で見られるように、気泡は電極の中心に向かって収縮した。単一気泡が収縮するにつれて、Ta ブロックは電極側へ移動した。しかし、 $L = 10 \text{ mm}$ での図 7(e)と比べた場合、 L の増加に伴い、電極方向への Ta ブロックの加速度の減少に伴い、Ta ブロックはあまり電極側へ移動しなかった。収縮した単一気泡は再膨張、再収縮した。そして、再び、リバウンドした。図 8(f)において、リバウンド誘起水中衝撃波が Ta ブロックに干渉した。また、図 8(f)-(h)において、単一気泡の再膨張、再収縮による Ta ブロックの大きな移動は観測されなかった。図 8(i)-(l)において、気泡は Ta と PMMA ブロックに干渉せず、Ta ブロックは分離しなかった。

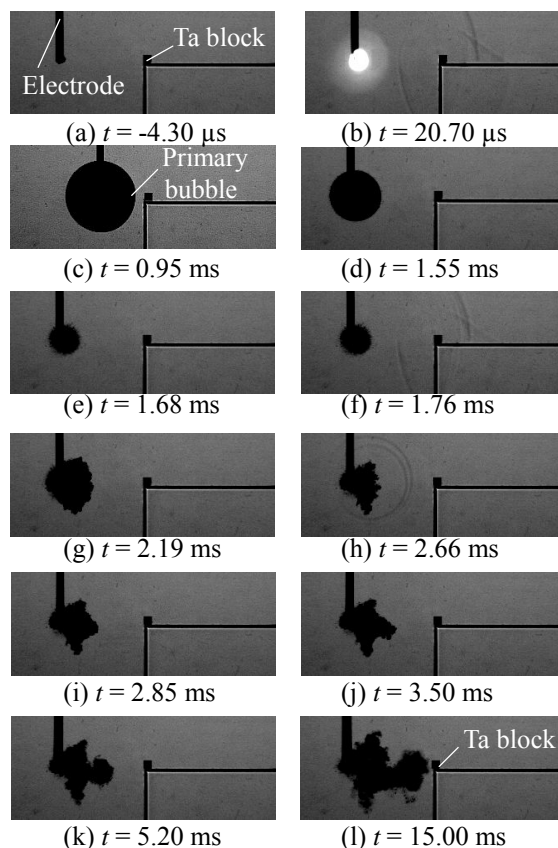


Fig. 8 Shadowgraph images of the interaction of underwater shock wave and primary bubble with a Ta block for $L = 20 \text{ mm}$.

以上の可視化結果より、水中爆発法でのレアメタル単体分離のメカニズムは放電誘起単一気泡の気泡運動によりレアメタルブロックの分離が誘起されることが解明された。水中爆発法では、Taブロックの移動と単体分離は L に依存することが判明した。 L が単一気泡の最大直径より小さい場合、TaブロックがPMMAブロックから単体分離することが明らかになった。

(3) 放電破碎法による樹脂破碎の粒度分布に与える放電回数の影響

図9、10に放電破碎法(放電電圧 $V=180$ kV、パルス周波数 $f=1$ Hz)による、各放電回数でのPBTとGFPBTの樹脂塊(60g)の破碎粒度分布を示す。図9、10において、放電回数75回から600回では、GFPBTの破碎産物の質量の割合の方がPBTより多く、GFPBTの方が細かく破碎されなかったことが分かった。一方で、放電回数1200、2400回において、PBTの破碎産物の質量の割合の方がGFPBTより多く、PBTは細かく破碎されなかったことが判明した。

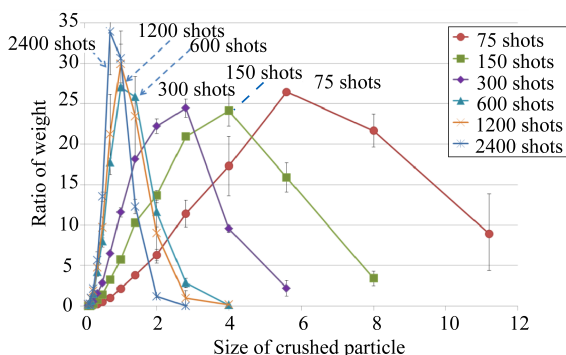


Fig. 9 Particle size distribution for PBT of 60 g by the discharge crushing method at $V=180$ kV and $f=1$ Hz.

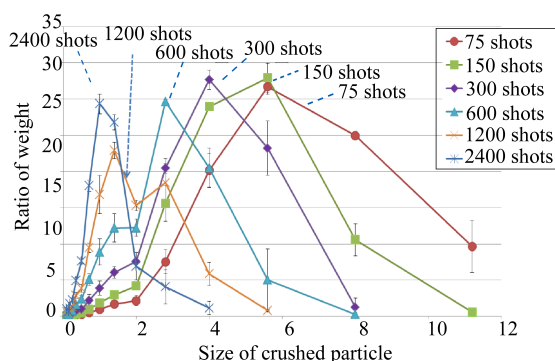


Fig. 10 Particle size distribution for GFPBT of 60 g by the discharge crushing method at $V=180$ kV and $f=1$ Hz.

以上より、本研究では、放電破碎だけでなくリフレクターを用いた放電誘起衝撃波フォーカシング破碎を利用した高効率革新的放電破碎法の確立を目的とし、数値解析を用いて衝撃波フォーカシング破碎を可能とする最適な小型リフレクター形状を解明した。

本高効率放電破碎法の確立に必要な水中爆発法でのレアメタル含有部品の単体分離のメカニズム、および、放電破碎法での放電回数樹脂塊破碎の粒度分布への影響を解明した。研究代表者の所属変更に伴い、本研究成果である、衝撃波フォーカシング破碎を誘起する最適なリフレクターを電気パルス粉碎機の放電電極に実装することができず、本高効率放電破碎法の実証実験が実施できなかった。しかし、本研究成果により、本高効率放電破碎法の確立の可能性が得られた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計5件)

1. T. Gonai, T. Koita, M. Sun, S. Owada, T. Nakamura, Experimental Study of Separating Two Solid Materials by Underwater Electric Discharge, Twelfth International Conference on Flow Dynamics, 2015年10月27日, 仙台
2. 小坂丈敏, 小林晋, 孫明宇, 郭林世, 趙希祿, 福島祥夫, 放電誘起水中衝撃波負荷による薄板に付着したマイクロバブル群崩壊時の衝撃圧の理論解析, 第35回数理科学講演会, 2016年8月19日, 大阪
3. T. Koita, M. Sun, Y. Fukushima, S. Kobayashi, Experimental Study on Disintegration of Thin Resin Plate Using an Underwater Shock Wave Induced by Electrical Discharge and Microbubbles, Thirteenth International Conference on Flow Dynamics, 2016年10月11日, 仙台
4. Taketoshi Koita, Mingyu Sun, Takahiro Koike, Masaya Numata, Experimental Study of the Effect of Microbubble Diameter on Fragmentation of Thin Resin Plate by Underwater Explosion, Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, 2017年11月2日, 仙台
5. 小森谷未星, 小坂丈敏, 浪平隆男, 松田樹也, 川岡宏典, 矢野誠明, マイクロバブルを活用した水中放電誘起爆発成形の促進に関する研究, 平成29年度衝撃波シンポジウム, 2018年3月8日, 仙台

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小坂 丈敏 (KOITA TAKETOSHI)

埼玉工業大学・工学部・講師

研究者番号: 00750192