

令和元年6月28日現在

機関番号：32410

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18066

研究課題名(和文)水中衝撃波とマイクロバブルを活用した射出成形品の革新的バリ破碎加工法の開発

研究課題名(英文) Study on an innovative deburring method of resin injection molded article using underwater shock wave and microbubbles

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ポリスチレン樹脂射出成形品のバリを対象とし、放電誘起水中衝撃波とマイクロバブルの干渉を用いた革新的衝撃波バリ破碎法の確立を目的とし、理論解析を用いて、本破碎を可能とする最適なマイクロバブル半径を解明した。可視化計測により、本最適なマイクロバブルを用いた衝撃波バリ破碎の過程の現象解明、および、実証実験を行った。実証実験より、本衝撃波バリ破碎を実現させるの最適条件は水中にバリを設置し、バリの底面だけにマイクロバブルを付着させる条件であることを解明し、本衝撃波バリ破碎法を確立させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はマイクロバブル工学的応用と衝撃波工学を融合し、バリ加工技術に応用する学術的特徴を持つ。本研究の衝撃波バリ破碎加工法は従来の超音波バリ取り法よりも高圧破碎を行うため、バリ取り加工時間の短縮が可能となる。マイクロバブルを射出成形品に付着させるため、同時多数かつ選択的バリ破碎が可能となる。よって、バリ取り技術の画期的イノベーションをもたらす可能性が予想される。本研究は射出成形加工産業に対して加工生産性の向上に大きく貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop the high efficiency deburring method for polystyrene (PS) burr on the resin injection molding by the underwater shock wave loading induced by the electrical discharge to the burr attached with the microbubbles. The optimum radius of microbubble subjected by the underwater shock wave causing the disintegration of PS burr was researched theoretically. The fragmentation of PS thin plate attached with the microbubbles simulating the burr by the underwater shock wave loading was visualized. We clarified the optimum conditions causing the fragmentation was that the microbubble was attached to the bottom of PS plate set in the water that was the water-backed plate model from the visualization results. From these results, the deburring method using the microbubbles subjected to the underwater shock wave loading was established.

研究分野：衝撃波工学

キーワード：衝撃波 マイクロバブル 水中放電 破碎 バリ取り 射出成形

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 自動車部品、電気電子機器に欠かせない樹脂射出成形品のバリ取り法には工具を使用した手作業・ロボットアームによる切削、プラスト研磨、ウォータージェット加工が確立されている。しかし、これら従来のバリ取り法では成形品の同時多数加工ができないため生産効率が低い課題がある。また、同時多数個のバリ取り加工が可能な超音波バリ取り法は超音波誘起キャピテーションの膨張、収縮の気泡運動による水撃作用、および、気泡の再膨張で発生する衝撃波圧力によりバリを破砕する方法である。しかし、射出成形品のバリ取り加工には 7,500,000 回の気泡運動、衝撃波負荷が必要となり（超音波の周波数 25 kHz, 5 分間）、気泡力学の観点から加工効率が低いとは言い難い。射出成形の生産効率を向上させるためには従来のバリ取り加工法のこれら課題を解決した高効率なバリ取り加工法の確立が必要不可欠である。

(2) 近年、マイクロバブルに水中衝撃波を干渉させた場合、マイクロバブルは収縮し、再膨張（リバウンド）時に水中衝撃波圧力の 10 倍以上の超高压なりバウンド衝撃波圧力が発生することが解明された。申請者はこの衝撃波圧力を活用し、放電誘起水中衝撃波とマイクロバブルを用いた高効率な樹脂薄板破砕法の確立に関する研究[平成 28 年度東北大学流体科学研究所一般公募共同研究, 研究代表], および, 放電成形の高効率化[平成 28 年度熊本大学パルスパワー科学研究所一般公募共同研究, 研究代表]の研究を進めてきた。

(3) 申請者は水中衝撃波破砕の研究, 水中衝撃波とマイクロバブルを用いた樹脂薄板破砕の研究からマイクロバブルの工学的応用と衝撃波工学を融合し, 加工学へ応用した, 従来のバリ取り法より同時多数加工, 選択的加工, 加工時間の短縮を可能とする高効率な衝撃波バリ破砕加工法の構想を得た。射出成形品バリにマイクロバブルを付着させ, 水中衝撃波の干渉により発生するマイクロバブルのリバウンド衝撃波を活用した革新的衝撃波バリ破砕加工法を開発する。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、ポリスチレン（PS）樹脂射出成形品のバリを対象とし、放電誘起水中衝撃波とマイクロバブルの干渉を用いた革新的衝撃波バリ破砕法の確立を目的とした。

(2) 本目的を達成するために、理論解析を用いて、PS 樹脂バリの破壊強度以上の高圧力なりバウンド衝撃波を発生させるマイクロバブル半径を調査した。調査したマイクロバブルをバリに付着させ、放電誘起水中衝撃波を干渉させ、衝撃波バリ破砕加工の実証実験を行った。バリ破砕の詳細な実証を行うために、可視化計測を用いて、衝撃波バリ破砕の過程の現象解明を行った。そして、本衝撃波バリ破砕の円滑な実施を確立させるために、マイクロバブル水中に設置した薄板への放電誘起衝撃波バリ破砕の放電回数の影響を調査した。

3. 研究の方法

(1) 理論解析による衝撃波バリ破砕を誘起するマイクロバブル半径の調査

本研究では水中で薄板の下面に付着したマイクロバブルに水中衝撃波圧力が負荷した際のマイクロバブル崩壊圧による薄板への衝撃圧の理論解析を行った。図 1 に解析モデルを示す。まず、水中衝撃波の圧力負荷を受けたマイクロバブルの気泡半径 R と表面圧力 p_b の時間履歴を解析した。本解析では、液体の圧縮性および壁面の影響を考慮した剛体壁近傍の一次元球対称の単一気泡モデルである Shima & Tomita の式を用いた。初期気泡半径を R_0 とすると壁に気泡が付着している場合、Shima & Tomita の式において、気泡中心と壁との距離は R_0 となる。この式において、無限遠方液体中の圧力 p_∞ には放電エネルギー $E_c = 3.6 \text{ J}$ 、爆発深さ $L = 9.0 \text{ mm}$ （水中爆発条件）での Cole の式で計算した水中衝撃波の圧力時間履歴を導入した。そして、本式を 4 次の Runge-Kutta 法を用いて解き、 R と p_b を解析した。 p_b を用いて、マイクロバブル壊圧による薄板への衝撃圧 P の理論解析を行った。水中衝撃波圧力の負荷により、マイクロバブルが収縮し、再膨張する。再膨張時にリバウンド衝撃波が発生し、この衝撃波圧力が入射衝撃圧として薄板へ伝播する。リバウンド衝撃波が発生する際、マイクロバブルの中心位置と薄板の間の距離は R_0 である。 R_0 は μm オーダーであり、極微小距離であるため、薄板に伝播する入射衝撃圧 p_1 は $p_1 = p_b$ と仮定した。また、各マイクロバブルのリバウンド衝撃波が均一に薄板に作用すると仮定し、バブル間の相互作用は考慮せず、薄板には均一に p_1 が負荷すると仮定した。水中衝撃波の圧力負荷を受ける平板の運動方程式である Taylor の WBP (Water-Backed Plate) モデルに p_1 を導入し、薄板に作用するマイクロバブルのリバウンド衝撃波誘起の衝撃圧 P を算出した。そして、PS 樹脂バリの破壊強度以上の P を発生させるマイクロバブル直径 D_{MB} を調査した。

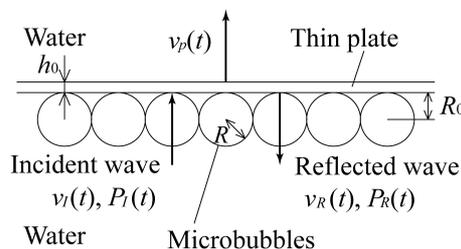


Fig. 1 Schematic diagrams of Taylor's Water-Backed Plate model applied in a thin plate attached microbubbles subjected to the underwater shock wave loading.

(2) 可視化計測を用いた単発放電誘起衝撃波によるマイクロバブル群付着樹脂薄板の破碎現象の実験的解明

本実験ではバリを模擬した厚さ 0.1 mm の PS 薄板を使用した。可視化計測を用いて、(1)で解明した最適なマイクロバブル直径 D_{MB} を付着させた PS 薄板に、単発放電で発生させた水中衝撃波と単一気泡を干渉させ、この薄板の衝撃波破碎現象を解明した。そして、マイクロバブル付着有無樹脂薄板の設置条件 (Air-backed plate model, および, Water-backed plate model) が本薄板の衝撃波バリ破碎へ与える影響を調査した。図 2 に Water-backed plate model における実験装置の模式図を示す。図 3 に可視化計測の光学系の模式図を示す。

マイクロバブル発生器 (MBLL11-102V-S、関西オートメ機器製) を用いて、加圧発泡方式により、(1)で解明した最適なマイクロバブル直径 $D_{MB} = 40 \mu\text{m}$ のマイクロバブル水を発生させた。そして、このマイクロバブルを PS 薄板の底面だけに付着させた。本実験での単発放電の条件は(1)での解析条件で使用した爆発条件と同じ条件を採用し、放電エネルギー $E_c = 3.6 \text{ J}$, $L = 9.0 \text{ mm}$ ($L/R_{\text{max}} = 1.00$, R_{max} は放電誘起単一気泡の最大直径) とした。

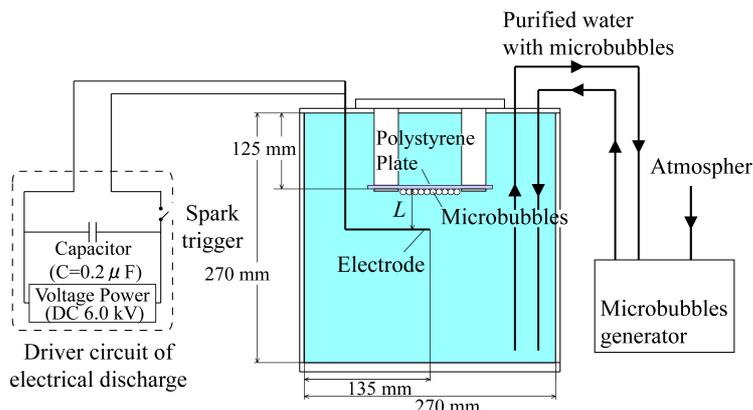


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup and the discharge device.

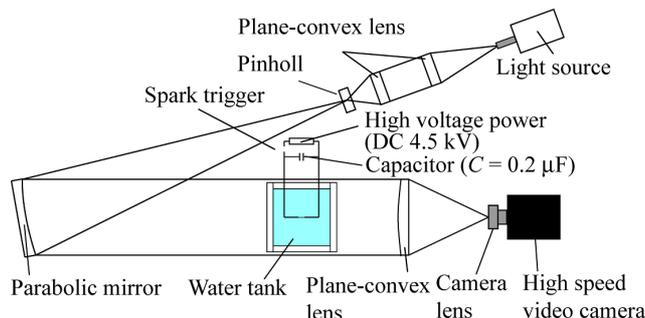


Fig. 3 Schematic diagram of the optical arrangement for visualization

(3) マイクロバブル水中の樹脂薄板へのパルス放電誘起衝撃波による薄板変形の放電回数の影響の調査

本マイクロバブル活用衝撃波バリ破碎の円滑な実施を確立させるために、PS 薄板を、(1)で解明した最適なマイクロバブル直径 $D_{MB} = 40 \mu\text{m}$ のマイクロバブル水中に設置した。そして、パルス放電による水中衝撃波と単一気泡を薄板へ干渉させ、放電回数が薄板の破碎へ与える影響を調査した。図 4 に本実験装置の模式図を示す。

パルスパワー電源 (CUS3010S-5J, 未松電子製作所製) を用いて水中アーク放電を行い、パルス放電誘起の水中爆発を発生させた。本実験では放電エネルギー $E_c = 5.2 \text{ J/pulse}$ とし、爆発深さは $L = 9.0 \text{ mm}$ とした。パルス放電の繰り返し周波数 10 PPS とし、累積放電時間を変化させることにより、累積放電回数 N_c を設定した。 N_c はパルスカウンタを用いて測定した。マイクロバブル付着有無の樹脂薄板の 1 枚ずつに対して、累積放電時間 200 秒とし、累積放電回数 N_c を増加させた。パルスカウンタを用いて N_c を測定した。マイクロバブル付着なし薄板に対して、 $N_c = 1966 \text{ shot}$, および、マイクロバブル付着あり薄板に対して、 $N_c = 1881 \text{ shot}$ の放電実験を行った。

3 次元デジタルマイクロスコープ (VHX-2000, キーエンス製) を用いて、マイクロバブル付着有無 PS 薄板に対して、放電実験前と N_c での放電実験後の薄板表面の高さ分布を測定した。マイクロスコープの拡大率は倍率 500 倍とした。マイクロスコープの測定範囲の制約により、薄板の x 軸, y 軸の交点を中心とし, $-1 \text{ mm} < x < 1 \text{ mm}$, $-1 \text{ mm} < y < 1 \text{ mm}$ の領域で高さ測定した。

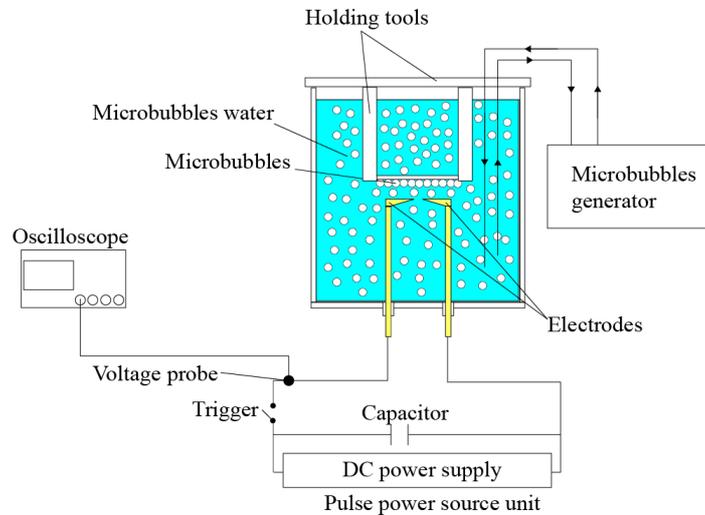


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setups of the pulse discharge for the plate attached with microbubbles in the microbubble water .

4 . 研究成果

(1) 理論解析による衝撃波バリ破碎を誘起するマイクロバブル半径の解明

図 5 に水中衝撃波の圧力負荷を受ける壁に付着したマイクロバブルの半径 R の時間履歴を示す．図 6 にマイクロバブル群崩壊による薄板への衝撃圧 P の時間履歴を示す．図 5, 6 において $R_0 = 20 \mu\text{m}$ の場合，水中衝撃波の作用後，1 回目の気泡の再膨張は約 86 ns で生じ，薄板へ負荷する最大衝撃圧 P_{max} は 12.5 GPa に達した．衝撃圧の減衰時間は約 12 ns であり，衝撃圧の作用時間は極短時間であることが分かった．この P_{max} は PS 樹脂の破壊強度以上であることが判明した．3 . 研究の方法の(2)での実験で使用したマイクロバブル発生器で生成できるマイクロバブル半径は 5, 10, 15, 20 μm である．よって，放電エネルギー $E_c = 3.6 \text{ J}$ ，爆発深さ $L = 9.0 \text{ mm}$ （水中爆発条件）において，樹脂薄板の衝撃波バリ破碎加工を可能とする最適なマイクロバブル直径は $D_{\text{MB}} = 40 \mu\text{m}$ であることを解明した．

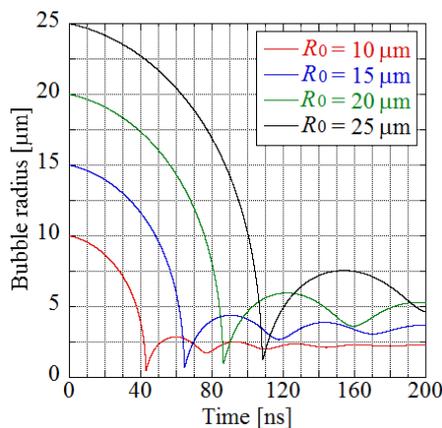


Fig. 5 Theoretical results of the time histories of the radius of a microbubble attached to the wall subjected to the underwater shock wave loading.

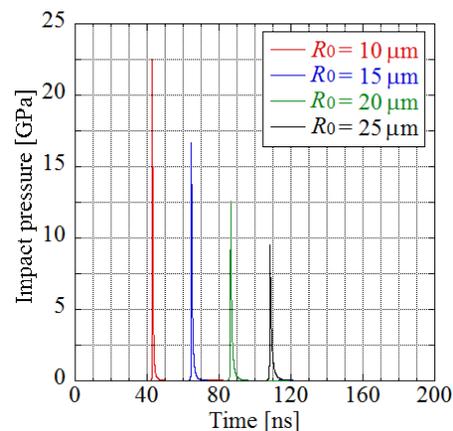


Fig. 6 Theoretical results of the time histories of impact pressure loading on the thin plate induced by the collapse of microbubbles subjected to the underwater shock wave loading.

(2) 可視化計測によるマイクロバブル群付着樹脂薄板の単発放電誘起水中爆発による破碎現象の解明

図 7 に PS 薄板の底面だけに $D_{\text{MB}} = 40 \mu\text{m}$ のマイクロバブル群を付着させた場合での Water-backed plate model における，薄板に干渉する単発放電誘起の水中爆発現象と薄板の破碎現象の可視化画像を示す．図 7(a)において，単発放電誘起の水中衝撃波がマイクロバブル群付着薄板へ干渉し，図 7(b)において，水中衝撃波の負荷によるマイクロバブル崩壊でのリバウンド衝撃波，および，薄板からの反射水中衝撃波が観測された．そして，図 7(c) - (h)で見られるように，単発放電誘起の単一気泡の膨張と収縮の気泡運動が薄板へ干渉し，図 7(h)において，薄板の破碎が観測された．図 7 より，Water-backed plate model において，放電誘起単一気泡の再膨張の薄板への干渉が薄板を破碎することが明らかとなった．一方で，Air-backed plate model の場合，放電誘起単一気泡の収縮とともに，薄板は弾性変形し，薄板の破碎は発生しなかった．

よって、マイクロバブル活用衝撃波バリ破碎を発生させるバリ付き樹脂射出成形品の最適な設置条件は Water-backed plate model であることが判明した。

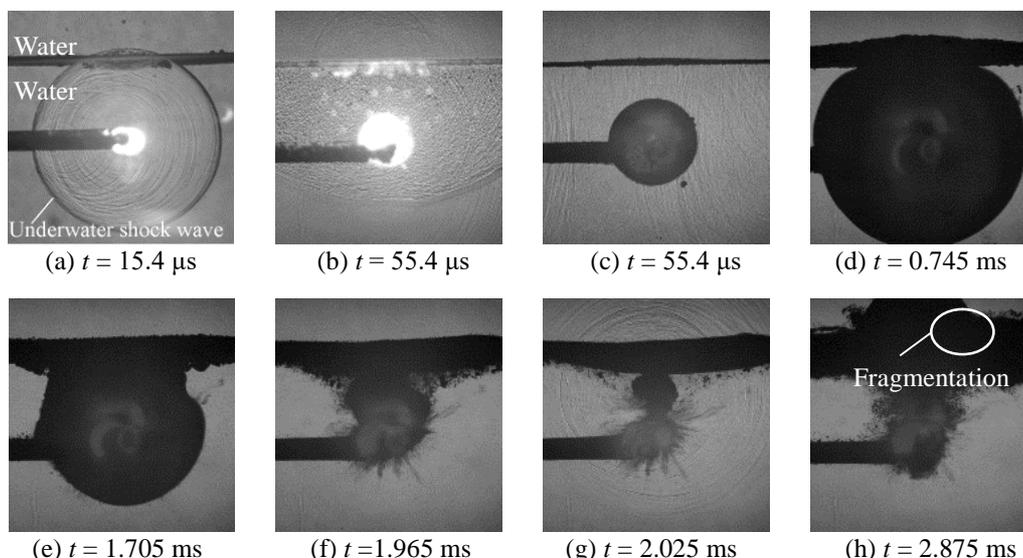


Fig. 7 Shadowgraph images of the behavior of thin PS plate attached microbubbles $D_{MB} = 40 \mu\text{m}$ subjected to the primary bubble motion for $L / R_{\text{max}} = 1.00$, $E = 3.6 \text{ J}$.

(3) マイクロバブル水中の樹脂薄板へのパルス放電誘起衝撃波による薄板変形の放電回数の影響の解明

マイクロバブル直径 $D_{MB} = 40 \mu\text{m}$ のマイクロバブル水に PS 薄板を設置し、マイクロバブル水中でパルス放電を行った。図 8 に放電前の放電回数 $N_C = 0 \text{ shot}$ および、放電後の $N_C = 0, 1881 \text{ shot}$ での PS 薄板の表面高さ分布を示す。図 8(a)で見られるように、放電前では PS 薄板の表面粗さの最大高さは $17.57 \mu\text{m}$ であった。図 8(b)において、 $N_C = 1881 \text{ shot}$ の放電後、薄板は破碎されず、最大高さ $27.78 \mu\text{m}$ の塑性変形が発生することが分かった。マイクロバブル水中で放電を発生させた場合、放電誘起の水中衝撃波は試験水（精製水）を伝播し、マイクロバブル内部の気体（大気）を透過する。この透過波は再び試験水中とマイクロバブルへ伝播する。この伝播現象を繰り返した後に、薄板底面に圧力が負荷する。大気の音響インピーダンスの方が精製水の音響インピーダンスよりも小さいため、マイクロバブルを透過し、試験水へ伝播する圧力は減少する。よって、マイクロバブル水中に薄板を設置した場合、マイクロバブル水は伝播する水中衝撃波の圧力を減少させるため、パルス放電誘起現象の圧力負荷による薄板の破碎が発生しないことが考えられる。よって、本衝撃波バリ破碎を確立させるためには、薄板の底面だけにマイクロバブルを付着させることが必要であることが判明した。

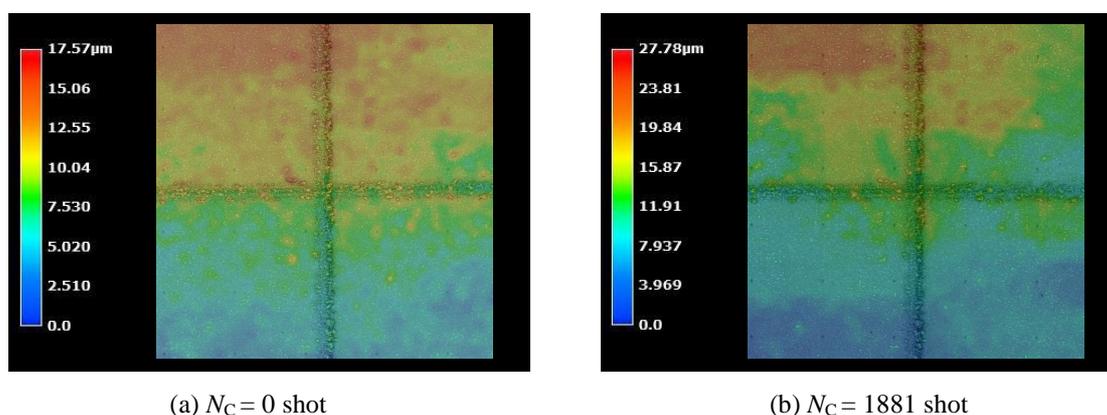


Fig. 8 Height distribution of thin resin plate attached with microbubbles, $D_{MB} = 40 \mu\text{m}$, at the cumulative number of discharge times (a) $N_C = 0 \text{ shot}$ and (b) $N_C = 1881 \text{ shot}$.

5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 5 件)

Taketoshi Koita, Mingyu Sun, Yoshio Fukushima, Linshi Guo, Xilu Zhao, Susumu Kobayashi, Experimental Study on the Influence of Underwater Explosion Depth on the Disintegration of Thin Resin Plate Attached Microbubbles, Proceedings of 31st International Symposium on Shock Waves, 2017

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, CRF-91

沼田雅哉, 小坂丈敏, 孫明宇, 渋谷敬一, マイクロバブル付着三角錐への放電誘起水中衝撃波および単一気泡の干渉の可視化, 平成 29 年度衝撃波シンポジウム論文集, 2018, 21C-4.

Taketoshi Koita, Yousuke Seki, Experimental Study of the Effect of Number of Discharge Times on Motion of Thin Resin Plate Attached Microbubbles Induced by Underwater Pulse Discharge, Fifteenth International Conference of Flow Dynamics, 2018, GS1-49

関洋佑, 小坂丈敏, 吉田拓矢, 村山隆弘, 小松優貴, 瀧上天夏, 山崎佑太, マイクロバブル活用パルス放電誘起樹脂薄板破砕への放電回数の影響, 第 37 回数理学講演会, 2018, B301

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: バリ取り装置及びバリ取り方法

発明者: 渋谷敬一, 小坂丈敏

権利者: 渋谷敬一, 小坂丈敏

種類: 特許

番号: 特願 2018-162148

出願年: 2018

国内外の別: 国内

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。