

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04111

研究課題名(和文)3Dプリンタ造形樹脂型を用いたマイクロバブル活用高効率放電成形法の研究開発

研究課題名(英文)Study on high efficiency method of electrical discharge forming with microbubbles using resin mold made by three-dimensional printer

研究代表者

小板 丈敏(Koita, Taketoshi)

早稲田大学・理工学術院・講師(任期付)

研究者番号：00750192

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)：本研究では高価な金型を使用した放電成形の高コスト化の課題解決に対し、安価な型である3Dプリンタ造形樹脂型を使用し、放電誘起水中衝撃波とマイクロバブルの干渉による高圧力を利用した、樹脂型利用マイクロバブル活用放電成形の研究開発を行った。放電時の磁場ノイズを絶縁した放電誘起水中衝撃波の圧力測定を開発し、水中衝撃波の圧力推算式を評価した。金属板底面に気泡径を変化させたマイクロバブルを付着させ、この式を用いた水中衝撃波の干渉によるマイクロバブル崩壊時の衝撃圧の理論解析を行い、3Dプリンタ造形樹脂型を用いたこの衝撃圧による放電成形を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は3Dプリンタ造形樹脂型を用いたマイクロバブル活用放電成形に必要な放電時の磁場ノイズを絶縁した放電誘起水中衝撃波の圧力測定の開発、および、成形を誘起する金属板底面に付着させたマイクロバブル径の理論解析を評価した学術的意義を有する。本研究成果では放電成形での金型に樹脂型を適用したため、工業製品、自動車部品の製造に欠かせないプレス加工での金型の低コスト化に寄与する社会的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：We studied the development of underwater electrical discharge forming with resin mold which was made by the 3D-printer with the microbubble attachment on the bottom of metal plate to address the issue of excessive cost of metal mold used traditionally in the forming. The forming was conducted by the high pressure of rebound shock wave emitted by the bubble collapse which was induced by the interaction of underwater shock wave generated by the discharge. We developed the pressure measurement of loading underwater shock wave with isolating the magnetic field noise during discharge and evaluated the pressure estimation formula for the shock wave. The bottom of metal plate was attached to microbubbles that diameter was changed and the impact pressure at the collapse of microbubbles acting on the bottom was theoretically analyzed. Based on this analysis, we established the discharge forming with 3D-printed resin molds using the impact pressure generated by the underwater shock wave loading.

研究分野：衝撃波工学

キーワード：衝撃波 マイクロバブル 放電成形 水中放電 樹脂型 3Dプリンター

## 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、自動車部品の製造に欠かせない金属塑性加工でのプレス加工は非常に高価な金属金型が必要であること、設備コストが高いことが課題である。放電誘起水中衝撃波の圧力負荷による金属薄板の塑性成形を行う放電成形では水中衝撃波の高圧力を発生させる大規模な高電圧放電装置が必要となり、設備コストが増加する課題がある。これら課題を解決するために、本研究では低コストである 3D プリント造形樹脂型を使用し、金属板底面にマイクロバブル群を付着させることで気泡崩壊時の高圧なりバウンド衝撃波を用いて衝撃圧を底面に均一に作用させた樹脂型利用マイクロバブル活用放電成形の研究開発を行った。

### 2. 研究の目的

本研究では、高価な金型を使用した放電成形の高コスト化の課題解決に対し、安価な型である 3D プリント造形樹脂型を使用し、放電誘起水中衝撃波とマイクロバブルの干渉による高圧力を利用した、樹脂型利用マイクロバブル活用放電成形の研究開発を行った。この研究開発で必要とな以下の研究目的(1)~(4)を設定し、研究を遂行した。

- (1) マイクロバブルに作用させる放電時の磁場ノイズを絶縁した放電誘起水中衝撃波の圧力測定法の確立と圧力推算の評価
- (2) 理論解析による成形金属板に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径の把握
- (3) 光学的可視化計測による放電誘起水中衝撃波の干渉を受けた金属板付着マイクロバブルの気泡運動の解明
- (4) 3D プリント造形樹脂型に設置した金属板底面のマイクロバブル群の付着有無での放電成形による塑性変形量の把握

### 3. 研究の方法

本研究では電気パルスを用いた電極間での水中放電により水中衝撃波を発生させた。研究目的(1)~(4)の研究において、以下の(1)~(4)の研究方法で研究を行った。

(1) 従来の水中衝撃波の圧力計測で使用されてきた圧電素子を用いた圧力センサーでは電気パルス時の磁場ノイズが圧力波形に作用し、圧力測定が困難であった課題を解決するために、光ファイバーによるアイソレーションシステムを用いた放電誘起水中衝撃波の磁場ノイズ絶縁圧力計測法を開発し、圧力測定を行った。図 1 に電気パルス、および、この圧力計測の模擬図を示す。TNT 爆薬誘起の水中衝撃波圧力の式である Cole の式において、放電エネルギーを TNT 当量に変換させ、放電誘起の水中衝撃波圧力を推算した。そして、圧力測定結果と比較することで Cole の式の放電誘起水中衝撃波の推算を評価した。

(2) 液体の圧縮性と壁面の影響を考慮した固体壁近傍の一次元球対称の単一気泡モデルである Shima & Tomita の式を用いて、成形金属板に付着させるマイクロバブルの半径を変化させ、水中衝撃波の圧力負荷を受けた金属板付着の単一マイクロバブルの気泡運動、および、気泡の表面圧力を算出した。この圧力を用いて気泡と金属板の音響インピーダンスを考慮した気泡崩壊時のなりバウンド衝撃波の金属板への衝撃圧を計算した。

(3) 顕微鏡を設置した高速度ビデオカメラを用いた可視化計測により、放電誘起水中衝撃波の干渉を受けた金属固体壁付着のマイクロバブルの崩壊挙動を把握した。可視化画像の解析により付着させるマイクロバブル径の変化が気泡挙動に与える影響を把握した。

(4) 樹脂型利用マイクロバブル活用放電成形の模式図を図 2 に示す。3D プリントで造形した樹脂型を放電成形の治具に設置し、成形金属の底面に研究目的(2)、(3)の研究で明らかとなったマイクロバブル径を付着させ、放電誘起の水中衝撃波を干渉させ、放電成形を行った。電気パルスを用いた水中放電により水中衝撃波をマイクロバブルに干渉させた。図 3 に電気パルスの回路図を示す。研究目的(1)で構築した推算式を用いて干渉させた水中衝撃波の圧力を推算した。

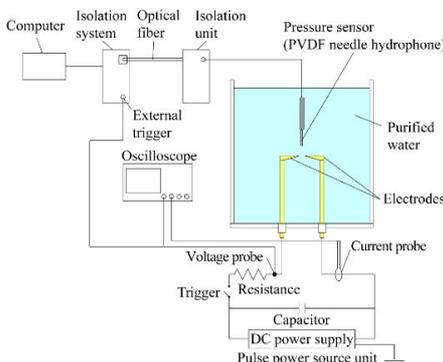


図 1 放電誘起水中衝撃波の圧力測定の様式図

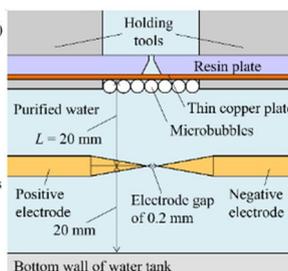


図 2 樹脂型利用マイクロバブル活用放電成形の様式図

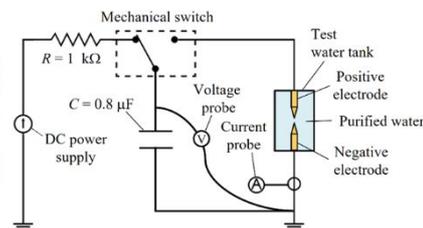


図 3 放電成形での電気パルスの回路図

#### 4. 研究成果

(1) 図4に電気パルス装置のコンデンサ充電エネルギー $E_c = 9.18 \text{ J}$ で発生した水中衝撃波の電極から上部の $L = 8 \text{ mm}$ の位置での光ファイバによるアイソレーションを用いた磁場ノイズを絶縁した圧力計測およびColeの式での推算圧力を示す。図4で見られるように、この測定法により、放電時の磁場ノイズは見受けられるものの、圧力測定位置ではノイズがない水中衝撃波圧力が可能となることが明らかとなった。また、放電エネルギーをTNT当量に変換させたColeの式で推算された水中衝撃波の圧力時間履歴は圧力測定値と同等となり、この式は放電誘起水中衝撃波の圧力推算に有効であることが分かった。

(2)  $L = 8.0 \text{ mm}$ に金属板を設置し、板底面にマイクロバブルを付着させ、 $E_c = 9.18 \text{ J}$ での放電水中衝撃波圧力を干渉させた場合のマイクロバブルの気泡運動、および、気泡崩壊時の板底面に作用する衝撃圧の時間履歴の理論解析結果を図5, 6にそれぞれ示す。図5, 6より、マイクロバブルの初期半径 $R_0$ の増加とともに、水中衝撃波の干渉によるマイクロバブルの崩壊までの時間は増加し、リバウンド衝撃波による固体壁への衝撃圧のピーク圧力は減少するが、衝撃圧の作用時間は増加することが判明した。図5, 6より、マイクロバブル径 $40 \mu\text{m}$  ( $R_0 = 20 \mu\text{m}$ )において、衝撃圧のピーク圧力は $63 \text{ GPa}$ に到達し、衝撃圧の作用時間は約 $20 \text{ ns}$ となることが分かった。

(3) 図7, 8にマイクロバブル径 $55.6, 64.8, 139 \mu\text{m}$ を金属板底面に付着させ、放電誘起水中衝撃波を干渉させた時のマイクロバブル崩壊現象の可視化画像、および、画像解析で得られた気泡運動の時間履歴を示す。図7より水中衝撃波の干渉による気泡崩壊時のリバウンド衝撃波が観測され、図8よりマイクロバブル径の増加とともに気泡の崩壊時間が増加することが分かった。この結果は(2)の結果と同等であり、(2)の結果の有効性が示唆された。

(4) 樹脂型利用マイクロバブル活用放電成形の実証実験ではマイクロバブル崩壊時の金属板への衝撃圧の作用時間を長くさせる必要があるため、(1)~(3)の結果を反映させ、実証実験で生成可能なマイクロバブルの主含有径 $40 \mu\text{m}$ を金属底面に付着させた。 $E_c = 129.6 \text{ J}$ で発生したColeの式で推算されたピーク圧力 $87 \text{ MPa}$ の水中衝撃波をこのマイクロバブルに干渉させた実証実験実験後の金属板の塑性変形の写真を図9に示す。本研究では、3Dプリンタで造形した樹脂型に対して放電誘起の水中爆発成形を行う場合、マイクロバブル群を薄板の底面に付着させて成形を行った方が、型周囲の下方向への変形量を抑えて薄板を型に沿って塑性変形できることを明らかにした。

以上の(1)から(4)の研究成果より、放電誘起水中衝撃波とマイクロバブルを活用した3Dプリンタ造形樹脂型を用いた放電放電成形を研究開発した。

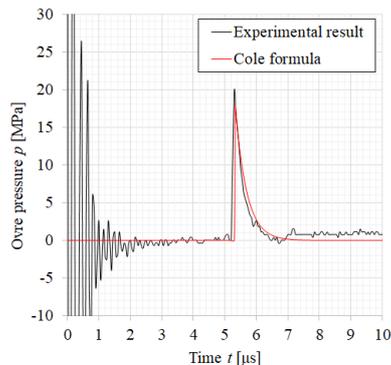


図4 放電時の磁場ノイズを絶縁した圧力計測とColeの式で推算による水中衝撃波の圧力

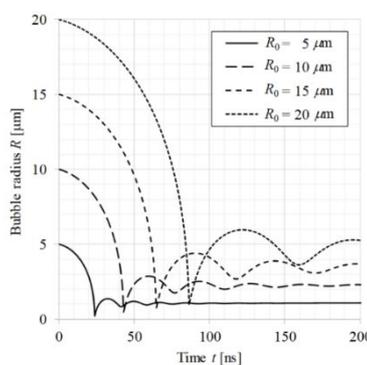


図5 マイクロバブルの気泡運動の理論解析結果

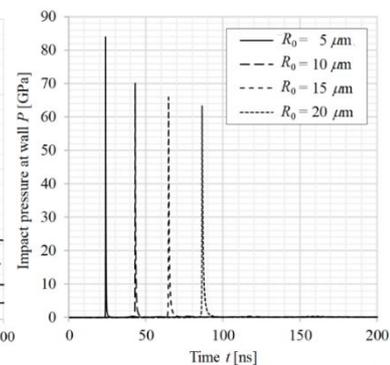


図6 マイクロバブル崩壊時の金属板底面への衝撃圧の理論解析結果

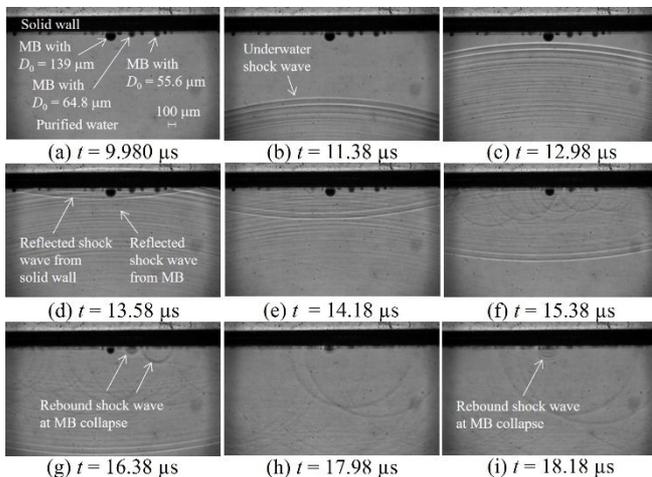


図7 放電誘起水中衝撃波を干渉によるマイクロバブル崩壊時のリバウンド衝撃波の可視化画像

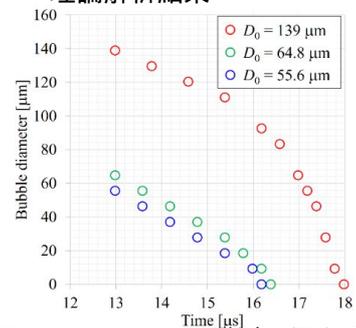


図8 図7でのマイクロバブル気泡運動



図9 樹脂型利用マイクロバブル活用放電成形後の金属板の写真

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小坂丈敏, 所千晴
2. 発表標題 樹脂型を用いたマイクロバブル活用放電誘起水中爆発成形に関する研究
3. 学会等名 2022年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小坂丈敏
2. 発表標題 放電誘起水中衝撃波の干渉を受けたマイクロバブル付着金属表面の性状に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2022年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小坂 丈敏, 林 秀原, 浪平 隆男, 所 千晴
2. 発表標題 放電誘起水中衝撃波の干渉による固体壁付着マイクロバブル挙動の可視化
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小坂丈敏
2. 発表標題 水中衝撃波の干渉による固体壁付着マイクロバブルの崩壊に関する研究
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小坂 丈敏, 渋谷 敬一, 所 千晴
2. 発表標題 医療用インプラントへのへのマイクロバブル付着現象および水中爆発の干渉の可視
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小坂丈敏, 浪平隆男
2. 発表標題 放電誘起水中衝撃波による3Dプリンタ造形樹脂型を用いた水中張出成形に関する研究
3. 学会等名 2020年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長野太郎, 永松マルセイロ秀幸, 小坂丈敏, 渋谷敬一
2. 発表標題 顕微鏡設置高速度カメラによるマイクロバブル付着現象の拡大撮影
3. 学会等名 第 38 回数理学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古田雅貴, 小坂丈敏
2. 発表標題 円筒容器を利用した水中衝撃波負荷によるパルス放電成形の放電回数の影響
3. 学会等名 第 38 回数理学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taketoshi Koita, Takao Namihira, Mikiya Matsuda, Masaki Furuta, Taro Nagano
2. 発表標題 Study on Effect of Discharge Resistance on Electrical Discharge Forming
3. 学会等名 Sixteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小坂丈敏、浪平隆男、松田樹也、龍輝優、王斗艶
2. 発表標題 3Dプリンタ造形樹脂型の放電誘起水中爆発成形への適応に関する研究
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小坂丈敏、浪平隆男、松田樹也、龍輝優、王斗艶
2. 発表標題 3Dプリンタ造形樹脂型の放電誘起水中爆発成形への適応に関する研究
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------