

令和 4 年 6 月 26 日現在

機関番号：23201  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2019～2021  
課題番号：19K04128  
研究課題名(和文) ウルトラファインバブル放電加工の研究

研究課題名(英文) Study on EDM utilizing Ultra Fine Bubble

## 研究代表者

岩井 学 (Iwai, Manabu)

富山県立大学・工学部・教授

研究者番号：30363873

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)：申請者はマイクロバブル(直径数 $\mu\text{m}$ ～100 $\mu\text{m}$ )を水溶性加工液中に発生させたマイクロバブルクーラントを各種の除去加工に適用し、加工特性の向上作用や加工液の浄化作用があることを明らかにしてきた。本研究では放電加工性能の改善を目的に、直径1 $\mu\text{m}$ 以下のウルトラファインバブルを適用した、微細多孔質体を利用したUFB発生器を開発し、UFBの発生状況や加工液の物性に及ぼす影響とともに放電加工性能を調べた結果、電極消耗率が改善されることがわかった。効果発現機構は、放電時の電極と工作物との極間に生成する気泡への影響、加工液の物性への影響、加工液中の溶存気体による影響等が考えられる。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

金型加工や硬質金属材料の切断・穴あけを目的とした放電加工の加工性能を改善させることを目的に、加工機械、放電電源、電極材、加工方法などの面から研究が行われている。本研究では簡易的なウルトラファインバブル装置を適用している。本発生器はバブル径や密度を変化させることができる微細多孔質体を利用している。高比抵抗水や放電加工油を使った放電加工に適用したときの加工性能に及ぼす効果を明らかにするとともに、効果発現機構を推察している。また各種ガスをウルトラファインバブルとして混入し、放電の発生に影響を及ぼすかを明らかにしている。

研究成果の概要(英文)：We have been studying the application of micro bubbles (MB: several micro meter to 100 micro meter in diameter) generated in the working fluid for removal machining. Currently, the research has developed into the application of UFB coolant generated ultra fine bubbles (UFB) with the diameter of less than 1 micro meter. It is known that UFB coolant improves tool wear in turning and grinding machining, but the mechanism is still unknown. In this study, we applied a UFB generator using a micro-porous-ceramics that the UFB conditions can be changed. And the relationship between changes in the physical property of the working fluid mixed UFB and machining characteristic was investigated. As a result, it was found that the viscosity of coolant was reduced when UFB was mixed into coolant. Furthermore, when the UFB coolant was applied to die-sinking EDM of stainless steel, the electrode wear was decreased.

研究分野：加工学および生産工学

キーワード：放電加工 ウルトラファインバブル 加工液 加工能率 電極消耗 表面粗さ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

金型加工や硬質金属材料の切断・穴あけを目的とした放電加工の加工性能を改善させることを目的に、加工機械、放電電源、電極材、加工方法などの面から研究が行われている。具体的には、加工能率の向上、工作物の表面粗さの改善、電極消耗量の改善が主目的である。放電加工は、工作物と電極が数十  $\mu\text{m}$  の距離に接近した時に放電が生じ、工作物が気化・溶融することで除去が行われる。放電加工性能を改善するには、放電が安定して連続的に発生できるように、放電電源回路を検討する他、工作物と電極との間に堆積する気泡や工作物の加工くずを効果的に除去する方法が検討される。申請者は、放電の安定発生および堆積物の除去を目的に、電極に超音波振動を付与する方法を採用し、加工能率や工作物の表面粗さが改善することを明らかにしている。

申請者は水溶性加工液中に直径数  $\mu\text{m}$  ~ 100 $\mu\text{m}$  のマイクロバブルを発生させたマイクロバブルクーラントを除去加工に適用する方法を提案し、穴あけ、旋削加工および研削加工に対して工具寿命を約 20% 向上させ得ることなどの効果を明らかにしてきた。また、マイクロバブルクーラントには水溶性加工液の腐敗抑制や浄化作用の他、微細な切りくずや遊離砥粒および摺動油を吸着して液面に浮上させ分離できることも示してきた。最近では nm オーダーの微細バブルを発生できる発生器も市販されおり、 $\mu\text{m}$  オーダーのバブルをマイクロバブルと呼ぶのに対し、nm オーダーの微細バブルはウルトラファインバブルと呼んでいる。申請者はマイクロバブルクーラントの一連の研究の中で、初期に放電加工への適用を試みたが、当時のマイクロバブル発生器から生成されるバブル径は 20 ~ 300 $\mu\text{m}$  と大きく、電極と工作物の間に大きなバブルが入り込み、放電状態を不安定にする結果だった。近年、武沢らは放電加工液中に直径 10~50 $\mu\text{m}$  のマイクロバブルを混入し、放電加工性能を調べている。放電時の気泡とマイクロバブルが抱合し、気化爆発の瞬間への影響に着目している。水中および油中加工に適用した結果、条件によっては加工性能や表面粗さに数%程度の改善が見られているが、工作物と電極との極間距離に対しマイクロバブル径が過大な点が課題であった。一方、申請者は nm オーダーの微細バブルを簡易に生成することを目的に、微細多孔質体を利用したウルトラファインバブル発生器を製作に取り組み、切削加工や研削加工において加工性能の改善効果を明らかにしていた。

### 2. 研究の目的

本研究では放電加工性能の改善を目的に、微細多孔質体を利用したウルトラファインバブル(以下 UFB)発生器を開発するとともに、高比抵抗水や放電加工油を使った放電加工に適用したときの加工性能に及ぼす効果を明らかにする。

### 3. 研究の方法

- (1) 微細多孔質セラミックス焼結体を利用した UFB 発生装置の開発
- (2) UFB 発生状況とクーラントの物性に及ぼす効果の調査
- (3) UFB クーラントによる放電加工性能
- (4) 効果発現機構の推察

### 4. 研究成果

- (1) 微細多孔質セラミックス焼結体を利用した UFB 発生装置の開発

本研究のために開発した UFB 発生装置を図 1 に示す。セラミックス焼結体表面の微細孔より

発生する気泡は，図 1 (b)のように液流によって剥離され，UFB が発生する．セラミックス焼結体は外径 16mm，長さ 180mm，気体導入孔の内径は 7mm で止まり穴になっている．セラミックス焼結体の周囲には内径 18mm のプラスチックパイプが配されており，その隙間に液体が所定の流速を持って流れる構造である．隙間を変化させてバブル発生量を変化できる．

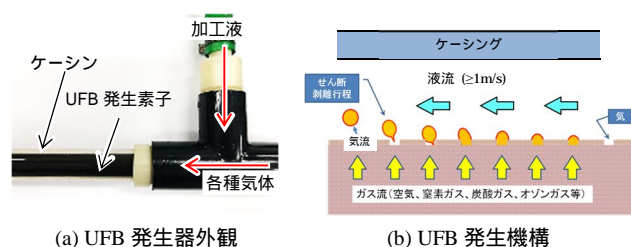


図 1 微細多孔質セラミックス焼結体を用いた UFB 発生器と発生機構

## (2) UFB 発生状況とクーラントの物性に及ぼす効果の調査

### 純水への UFB 発生状況

純水(工業用， $0.5\text{k}\Omega\cdot\text{m}$ )を 20L 入れた水槽に UFB 発生器およびポンプを浸漬し，所定時間循環し発生させた．空気の供給量を 1L/min，純水の供給量を 10L/min とした．UFB の測定には動的光散乱法を利用した Zetasizer Ultra(Malvern Panalytical 社)を用いた．なお，サンプル水を取得後，測定が終了するまで 20 分間を要した．純水を 10~20 分間循環させて UFB を発生させたときの結果を図 2 に示す．バブル直径は 100~120nm だった．バブル数は発生時間 10 分後では  $10^7$  個/ml オーダーだったのに対し，20 分後では  $10^9$  個/ml オーダーに増加していた．バブル直径およびバブル数に相当する UFB が純水に占める体積率は  $10^{-7}\sim 10^{-5}\%$  のオーダーと僅少である．

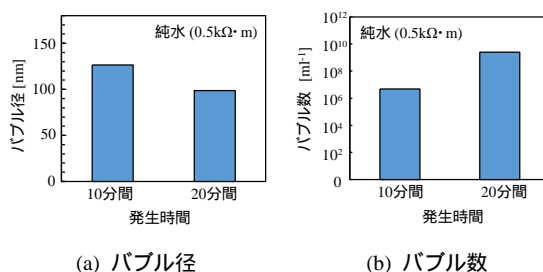


図 2 純水に対する発生時間と UFB 発生状況の関係

### UFB による純水の粘性係数の変化

図 3 に示すように，1.9m の高さに設置した 4L の水槽から UFB を混入した純水を自重のみで一定の流速でガラスビーズ(φ6mm)が充填された管(内径 6.5mm，長さ 1.5m)に流し，粘性係数を測定する実験を行った．ガラスビーズ充填管での圧力損失  $hf$  と流速  $v$  の経時変化を測定し，ダルシーワイスバッハの式より粘性係数  $\mu$  を導出した．結果を図 4 に示す．純水に UFB 含有水を 0.5L ずつ補ったときの経時変化を調べた結果，UFB 含有率の増加に伴い粘性係数が減少し，2.9 時間後の UFB 含有率 100% のときに粘性係数は初期の UFB が含有されていない時より 7% 減少した．

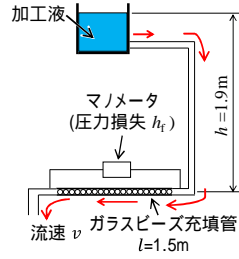


図3 粘性係数測定装置

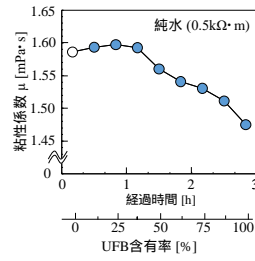


図4 UFBによる粘性係数の変化

### 各種気体の UFB の混入による物性変化

高比抵抗水(2kΩ·m)に各種気体を 1L/min の供給量で UFB として混入した時の溶存酸素量と導電率の関係を図5に示す．溶存酸素量の初期値は 8mg/L である．N<sub>2</sub>-UFB および CO<sub>2</sub>-UFB を発生させると溶存酸素量は減少し、30 分後には 2mg/L 以下に低減された．一方 O<sub>2</sub>-UFB はすぐに測定器の上限値の 20mg/L を越えた．導電率は、UFB 発生時間に比例して漸減するが、CO<sub>2</sub>-UFB では顕著に減少し 0.2kΩ·m になった．

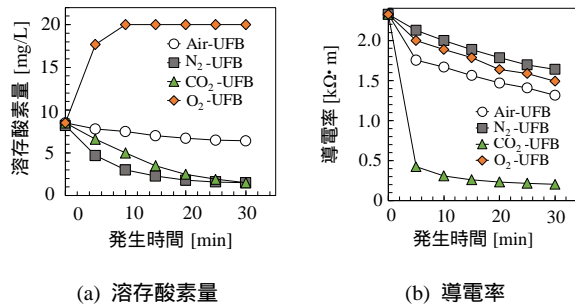


図5 各種気体の UFB 混入による高比抵抗水の物性変化

### (3) UFB クーラントによる放電加工性能と効果発現機構の推察

#### 放電加工条件

ステンレス鋼(SUS304)に銅電極(φ6mm)で深さ 0.3mm まで彫り込み加工を行った．高比抵抗水 20L に各種気体の UFB を 10~30 分間それぞれ発生させ、水温が 26 に調整されるまで 30 分間置いてから実験に供した．工作物と電極間にノズル

表1 放電加工実験装置および条件

加工機	形彫 EDM (AQ35L, ソディック)
電極	銅丸棒 (φ6mm)
工作物	ステンレス鋼 (SUS304)
加工液	高比抵抗水 (2kΩ·m)
放電条件	電極極性+, 設定加工深さ: 0.3mm u <sub>i</sub> =120V, SV=30V, i <sub>p</sub> =24A, t <sub>e</sub> /t <sub>o</sub> =20/20μs

で加工液を噴出しながら行った．放電条件は u<sub>i</sub>=120V, SV=30V, i<sub>p</sub>=24A, t<sub>e</sub>/t<sub>o</sub>=20/20μs で、電極を 300min<sup>-1</sup> で回転させた．実験条件を表1に示す．結果を図6に示す．

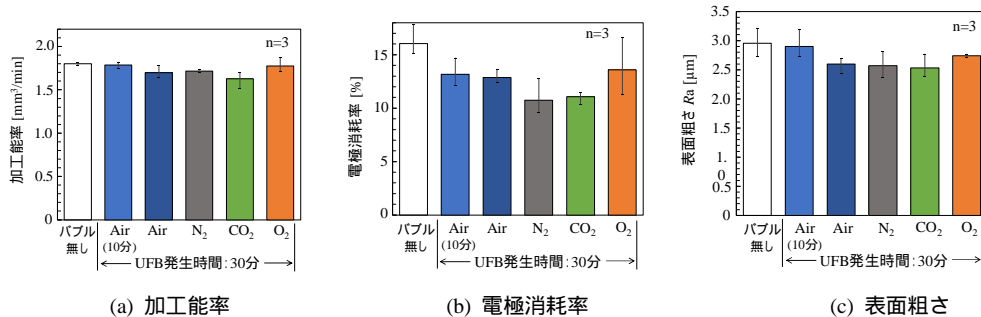


図6 放電加工性能に及ぼす各種気体 UFB の効果

#### 各種気体混入 UFB クーラントによる放電加工性能

- ・加工能率：設定深さ 0.3mm まで彫り込む時間はいずれの水も 4 分間程度であり，加工能率は 1.7~1.8mm<sup>3</sup>/min だった．UFB による顕著な差異が見られなかったのは，サーボ送り制御が要因であると思われる．導電率が低下した CO<sub>2</sub>-UFB の加工能率は若干低下したのみだった．
- ・電極消耗率：パブル無しときの電極消耗率が 16% だったのに対し，Air-UFB を 10 分間および 30 分間発生させたときは 13% に減少した．N<sub>2</sub>-UFB および CO<sub>2</sub>-UFB を 30 分間発生させたときは更に 11% まで低下し，パブル無しに比べると約 3 割低減する効果が得られた．これは純水中の溶存酸素量が低下し，酸化反応による電極消耗を抑制したためと思われる．一方，O<sub>2</sub>-UFB を 30 分間発生させたときには電極消耗率が 14% に増大したことから酸化反応との関連が示唆できた．
- ・工作物表面粗さ：パブル無しが Ra=3.0μm だったのに対し，各種気体の UFB を 30 分間発生させると Ra 2.6μm となり，UFB クーラントによって 13% 改善された．

#### (4) 効果発現機構の推察

UFB クーラントは粘性係数が低減するため，放電時の気化爆発によって電極と工作物との極間に生成する気泡に何らかの影響を及ぼしていると思われる．その結果，アークの飛びや放電屑の排出性が向上し，放電状態を安定にさせていると思われる．また各種気体を UFB としてクーラント中に効果的に作用させることができ，特に不活性ガスである窒素や炭酸ガスは電極消耗を抑制できることがわかった．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 安齋聡, 田越元康, 岩井学, 二ノ宮進一
2. 発表標題 ウルトラファインバブルクーラントによる熱交換率と研削性能に及ぼす効果
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安齋聡, 田越元康, 岩井学, 大木伸一郎, 二ノ宮進一
2. 発表標題 ウルトラファインバブルクーラントのバブル条件と加工性能の関係 第4報: 研削加工に及ぼす影響
3. 学会等名 砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ウルトラファインバブルクーラントによる難加工材の切削加工
2. 発表標題 山下凌大, 鳥村奈央, 松岡志帆, 安齋聡, 岩井学, 二ノ宮進一
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下凌大, 松岡志帆, 鳥村奈央, 安齋聡, 岩井学, 原田武則, 山田邦治, 遠藤慶輝, 二ノ宮進一
2. 発表標題 ウルトラファインバブルクーラントによる放電加工性能 第2報: ウルトラファインバブルの効果
3. 学会等名 電気加工学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下凌大, 鳥村奈央, 松岡志帆, 安斎聡, 岩井学, 二ノ宮進一
2. 発表標題 ウルトラファインバブルクーラントのバブル条件と加工性能の関係 第3報: 旋削性能に及ぼす効果
3. 学会等名 砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Manabu Iwai, Ryouta Yamashita, Satoshi Anzai, Shinichi Ninomiya
2. 発表標題 Removal machining performances by using inert gas filled micro bubble coolant
3. 学会等名 JSME 2020 Conference on Leading Edge Manufacturing/ Materials and Processing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下凌大, 市川可奈子, 安斎聡, 岩井学, 原田武則, 山田邦治, 遠藤慶輝, 二ノ宮進一
2. 発表標題 放電加工におけるウルトラファインバブルの効果
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下凌大, 鳥村奈央, 松岡志帆, 安斎聡, 岩井学, 二ノ宮進一
2. 発表標題 ウルトラファインバブルクーラントの難加工材の切削加工
3. 学会等名 精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下凌大, 市川可奈子, 安齋聡, 岩井学, 原田武則, 山田邦治, 遠藤慶輝, 二ノ宮進一
2. 発表標題 ウルトラファインバブルクーラントによる放電加工性能
3. 学会等名 電気加工学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安齋聡, 岩井学, 山下凌大, 市川可奈子, 神谷和秀, 関口有揮, 二ノ宮進一
2. 発表標題 ファインバブルクーラントのバブル条件と加工性能の関係 - 第2報: クーラント中のバブル状態
3. 学会等名 砥粒加工学会学術講演会
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