

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：87402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25871248

研究課題名(和文)水中パルス放電による超高压力の制御技術の開発と切断及び塑性加工への応用技術の開発

研究課題名(英文)Development of the control technique of ultrahigh pressure generated by an underwater discharge and their applications for cutting and plastic working

研究代表者

濱嶋 英樹 (HAMASHIMA, Hideki)

熊本県産業技術センター(ものづくり室、材料・地域資源室、食品加工室)・その他部局等・研究員

研究者番号：30398242

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)：水中パルス放電による超高压力の制御技術を開発するため、開発した光学観測実験装置を使って、電極棒形状の最適化及びバブルパルス、気泡脈動、水撃作用の観測に成功し、安定した水中パルス放電による超高压力を利用できるようになった。また、実験と比較して数値シミュレーションの妥当性を評価し、数値シミュレーションを使って水撃作用などの超高压力の制御を行うことが可能となった。水中パルス放電を利用した切断及び塑性加工法を開発するため、試作機を製作し、水中パルス放電が金属薄板の塑性加工に利用できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In order to establish the control technique of ultrahigh pressure generated by an underwater discharge, the experimental device used for optical observation was developed. Using this device, the electrode shape was optimized. And it succeeded in the observation of bubble pulse, bubble pulsation and water hammer generated by an underwater discharge. As a result, a steady ultrahigh pressure generated by an underwater discharge became available. The validity of the numerical simulation was evaluated compared with the experiment. It became possible to control the ultrahigh pressure of the water hammer etc. by using the numerical simulation. The prototype to develop cutting and the plastic working method using an underwater discharge was produced. It was demonstrated to be able to use an underwater discharge for the plastic working of thin metal sheet with this device.

研究分野：衝撃工学

キーワード：塑性加工 衝撃加工 衝撃波 高速度撮影 超高压力 水撃 水中放電

### 1. 研究開始当初の背景

現在、大型プレス機械の発展により爆発成形法は使われなくなってきたが、爆薬や大電流放電から発生する衝撃波を用いた加工法は、国内では申請者が所属した熊本県にある熊本大学及び崇城大学を中心に金属加工（爆発成形、爆発圧着及び爆発合成等）や木材改質（乾燥性能向上及び浸透性能向上）などの研究が行われている。申請者の指導教員である熊本大学衝撃・極限環境研究センター（現熊本大学パルスパワー科学研究所）の伊東繁教授（前沖縄工業高等専門学校校長）率いる研究グループでは、2005年頃から、衝撃波負荷による食品加工技術を提案し、その技術が新しい食品加工法として有効であることを示した。衝撃波負荷を利用した食品加工方法は加工時間が数マイクロ秒と短いため、熱による食品の劣化がないことが大きな特徴である。これまでは強い衝撃波を活かした破壊作用などの研究が中心となっていた衝撃・爆発加工の研究分野に、新たな可能性を見出す研究を進めており、この特徴を活かした食品の軟化、粉碎や抽出性の向上などの成果が申請者も含む伊東繁の研究グループにより近年数多く報告されている。また、金属加工方法における瞬間的超高压の利用の利点は、例えば1965年の熊本大学の清田の論文によると爆発成形においては、衝撃波を用いた加工は変形速度が高いため、ひずみ速度依存性が高い金属材料はプレス成形で行う加工よりも大きな変形を得ることができ、また、微細な加工も得意とする。

上述の衝撃波負荷による食品加工法、爆発成形法は、水中での爆発によって発生する衝撃波を用いる場合が多く、水は衝撃波の強さを制御するための圧力媒体として使われる。水中爆発の研究においてはRobert H. COLEの「UNDERWATER EXPLOSION」(1948)を代表とする様々な研究が行われてきたが、軍事的背景の火薬類を用いた水中爆発の研究が多く、加工力としての発生圧力の制御を必要とする金属加工や食品加工に水中爆発を用いた研究は多くなされていない。水中爆発では複雑な衝撃波が発生し、そのときに発生するバブルパルスと呼ばれる衝撃波は、大きな破壊作用を持つ現象として知られている。液体中で爆発が起こると、爆発した瞬間に発生する衝撃波と、発生したガスの膨張・収縮によって発生する衝撃波（バブルパルス）が発生する。前者の衝撃波よりも後者の衝撃波は最高圧力は低いが、圧力作用の持続時間が長いこと、仕事の効果としては大きいことが知られている。更に、物体近傍での爆発では、気泡によるジェット作用（水撃作用）が生じる。本研究では、光学観測実験と数値シミュレーションを効果的に利用してこれらの3種類の負荷作用の現象を詳細に解明する。また、その結果をもとに、今までは一つの威力（仕事力）として考えられてきた3種類の負荷力を分離する手法を開発し、爆発

によって発生する複合的な瞬間的超高压負荷を制御する装置を開発する。

水中爆発によるバブルパルスは破壊目的で利用されてきたため、このような衝撃波を活用した加工への応用は殆ど実施されていない。特に、火薬類を用いた水中爆発が利用されていたため、連続的な加工が困難であった。しかし、大電流を用いた水中放電による水中爆発は連続的な爆発が可能であり、申請者の過去の研究でコンデンサーに蓄電される充電エネルギーの容量と電極の形状と間隙の条件設定により、その威力を制御することが可能であることが分かっている。

本研究では、水中放電による爆発作用を利用した加工技術の開発を行う。爆発現象を利用した加工方法は、世界においてもユニークであり、国内では熊本大学を中心としたグループ以外ではその研究活動は殆ど行われていない。この加工技術は数マイクロ秒レベルの瞬時に終了しなければならない加工への応用に適しているため、熱的影響を与えない加工、化学変化や結晶の成長を必要としない加工（瞬間的な冷却が必要な加工）などへの利用が期待される。例えば、この技術は申請者も協力している熊本大学の研究グループが提案した水中放電による衝撃波負荷の食品加工技術の中で独創的に使用されており、また、2012年に申請者の研究グループで発表を行った酸化チタン生成法のように素材開発の新技术として期待される。この加工技術を応用した装置ができると、現在よりもさらに瞬間的超高压力の作用時間及び負荷力を制御でき、例えば、数マイクロ秒間隔の多段的な負荷力を与える装置など、細かな極限条件設定を可能とする新しい加工・開発手法として期待できる。また、開発に利用した数値解析技術は航空宇宙分野の設計開発やテロ対策等の社会問題への安全設計に応用されることが期待される。

### 2. 研究の目的

本研究の具体的な目的は「水中パルス放電による超高压力の制御技術の開発」と「その技術を用いた切断及び塑性加工法の開発」である。水中放電によって発生する衝撃波は放電直後に水が気化したときに生じる衝撃波、放電によって気化したガス（水蒸気）の脈動が生じることによって発生する衝撃波があり、また条件によっては、ガスによってマイクロジェットが発生することがある。これらの複雑な現象を光学観測実験と数値シミュレーションによって詳細に解明し、超高压力を制御する技術を開発する。また、複合的で瞬間的超高压力を制御する圧力収束容器を開発し、従来のプレス加工よりもエネルギー効率の高い新たな塑性加工法を開発する。

### 3. 研究の方法

(1) 光学観測実験：水中放電による3種類の瞬間的負荷の評価を行うため観測実験を

行った。観測実験は、熊本大学パルスパワー科学研究所の実験水槽と、熊本県産業技術センターで新たに製作した実験装置を用いて行った。熊本大学における実験では、コンクリートで覆われた実験ピット内で観測実験を行うことができ、使用電圧を高くした実験が安全にできるため利用した。製作した光学観測実験用水槽の写真を図1に示す。実験は製作したパルスパワー電源（使用電圧 3.0～3.5kV、静電容量 200～800 $\mu$ F、充電エネルギー0.9～4.9kJ）を用いて行った。熊本大学での実験では、水槽内寸 600x600x600mm、厚さ 10mm のステンレス製の水槽を使用した。熊本県産業技術センターでの実験では、新しく製作した水槽内寸 400x400x450mm、厚さ 9mm のステンレス製の水槽を使用した。水中放電の様子を観測するため、側面に対面した PMMA 製観測窓（厚さ 30mm）を 2 面設けた。電極先端部は平面とし直径 16mm の銅棒を用いた。また、電極中心の高さは水槽の中心高さに合わせた。電極間隙 5mm (d) とし、水中放電現象を高速度ビデオカメラ (GX-8: (株) NAC 社製、フレームレート:100,000fps、露光時間:0.5 $\mu$ s 解像度: 144x108 pix) を用いて観測し、気泡及びバブルパルスの挙動を調査した。光源には、フリッカーを抑えた LED 光源 (TGD-MR80W-FF: (株) スタイルプラス、600W 型 85W、集光式) を用いて点光源を作製し、フレネルレンズを用いて平行光を作り出した。また、熊本大学では、高速度ビデオカメラ (Phantom V7.3, Vision Research, Inc., Resolution: 800x600 pix) を用いて観測実験を行った。図2に光学観測実験の機器設置概略図を示す。

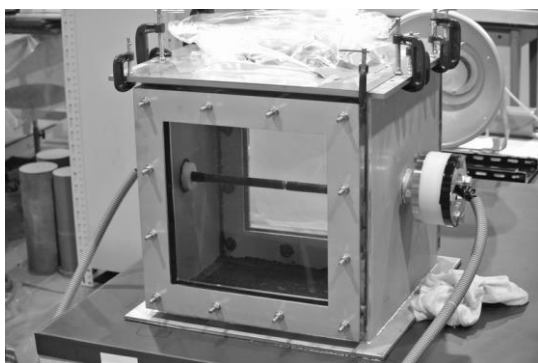


図1 光学観測実験用水槽

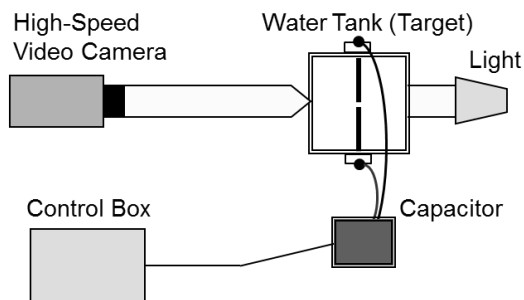


図2 光学観測実験の機器設置概略図

(2) 数値シミュレーション：実験と平行して解析ソフトウェア LS-DYNA を用いて、実験の数値シミュレーションを行い、数値解析技術の妥当性を検証した。水中放電を加工に利用するとき、水中放電によって発生する気泡挙動の影響が大きいため、容器内部の領域のみ解析を行い、密閉容器と開放容器の気泡挙動の特性を調査した。放電現象のモデル化を簡素化するため、実験から算出した高压の空気（半径 6mm、圧力 277MPa）を爆発源として模擬した。Multi-material Euler 法を用いて水、空気、高压空気を解析した。空気と高压空気は理想気体の状態方程式、水には Gruneisen 状態方程式をそれぞれ適用した。

(3) 水中放電負荷を用いた塑性加工を行う装置の開発を数値シミュレーションを用いて効率的に行い、試作機を開発した。その試作機を用いて、金属薄板の塑性加工実験を行った。

#### 4. 研究成果

図3に光学観測実験により得られた充電電圧 3.5kV、電極間隙 5mm のときの水の絶縁破壊の画像を示す。印加電界が大きく、電子が分子に衝突して失うエネルギーよりも液体中の電子が電界から得るエネルギーが大きくなると衝突電離を生じ、水の絶縁破壊が起こる。そのため、水の絶縁破壊が生じた部分は画像のように影となって撮影され、電極のマイナス側からプラス側へ絶縁破壊が進行することがわかった。また、空間電荷を形成し、陰極面の電界を強めるため、電界放出が増加し、絶縁破壊が急激に促進されることが、スパーク直前の絶縁破壊の進行速度が増加する様子により確認することができた。

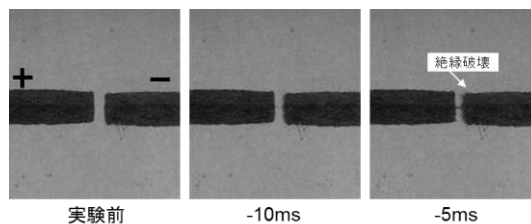


図3 放電により発生する電極間の水の絶縁破壊（充電電圧 3.5kV、電極間隙 5.0mm）

図4に光学観測実験により得られた充電電圧 3.5kV、電極間隙 5mm のときの気泡の画像を示す。水中で放電させると電極部でスパーク放電が起こり、スパーク周辺部の水が瞬時に蒸発して水中に衝撃波が伝播する。スパーク放電により水が蒸発することで高压の気泡が生じ、その気泡は徐々に大きくなる。気泡は電極及び側壁の影響により球状とならず、8.0ms で最大となり、おおよそ楕円状になった。その後、気泡は電極中心部に向かって収縮し、電極中心に底面方向に向かう急激な流れが発生した。また、使用した電極部が大きいため、大きな気泡を形成するような2回目

の気泡膨張は発生しないが、収縮状態から膨張状態に変化する気泡の挙動が現れ、このときに衝撃波が発生することが確認された。

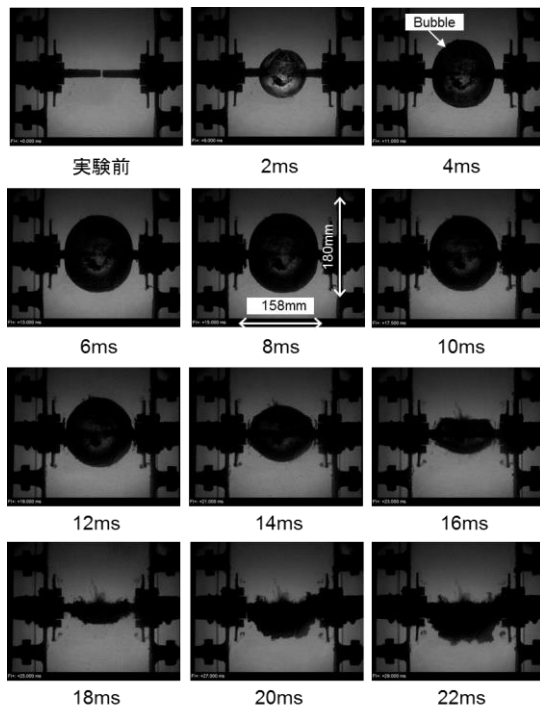


図4 水中放電により発生した気泡 (充電電圧 3.5kV、電極間隙 5.0mm)

壁近傍での水中放電について、気泡が壁から受ける影響についての影響を調査するため、電極下側に壁を設置した光学観測実験を行った。図5に電極中心からの距離を95mmにした時の気泡挙動の写真を示す。放電によって発生する気泡は放電から10ms後に最大長径200mm程度まで膨張した。その後、気泡上部が下部に比べ急速に収縮し、下方向に向かう水撃作用の挙動を観測することができた。

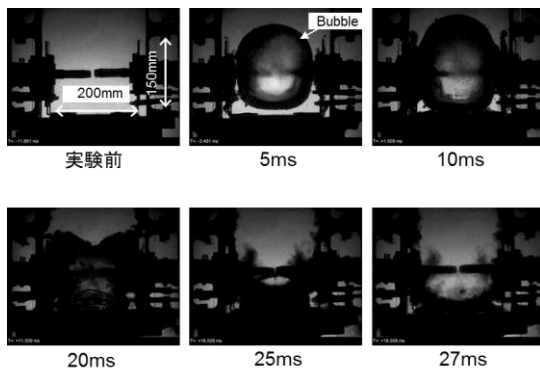


図5 気泡挙動の画像 (充電電圧 3.5kV、電極間隙 5mm、h=95mm)

図6に下壁までの距離75mmの条件で観測された気泡上下表面部の移動速度の時間履歴を示す。気泡の膨張方向を正とし、気泡中心の上側と下側の移動速度を画像から解析した。約20m/sの移動速度が得られ、電極下部

の壁面に水撃作用を加えることが明らかになった。

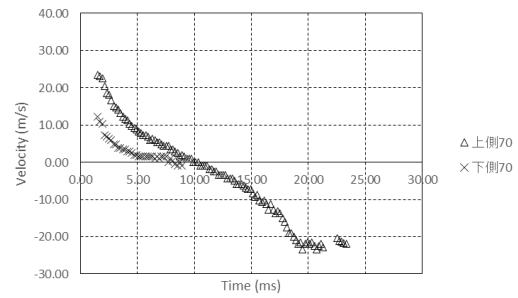


図6 気泡上下表面部の移動速度 (充電電圧 3.5kV、電極間隙 5mm、h=75mm)

図7に実験にて撮影された充電電圧3.0kV、電極間隙5mmのときのバブルパルスの画像を示す。通常、水中放電で発生した気泡は膨張収縮を繰り返す脈動運動を行うが、本実験では電極部が気泡に対して大きいため、電極部が脈動運動を阻害し、明確な気泡の脈動現象は起こらなかったが、バブルパルスを観測することができた。このバブルパルスは、平均速度1520m/sで伝ばしていることが画像解析からわかり、その時の衝撃波の圧力は約25MPaであることがわかった。また、この実験で使用した電極が大きいため、衝撃波の形状は真球状に広がらないことがわかった。

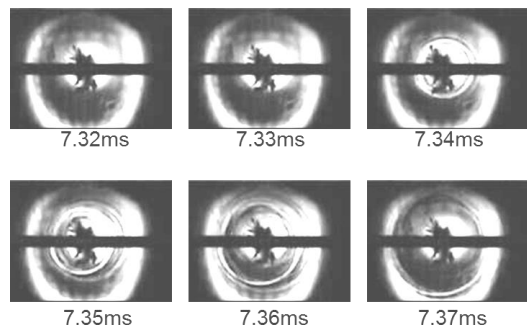


図7 水中放電によって発生したバブルパルス

電極棒の下側に壁を設置したときの気泡の挙動を調査するため、数値シミュレーションによる解析を行った。図8に数値シミュレーションによって得られた解析領域高さ520mm、密閉容器中の気泡の膨張収縮過程を示す。高圧空気により気泡が膨張し、11msで最大径220mmとなった。その後、気泡の中心軸上部が早く収縮し、水撃として水が容器底部に衝突することが明らかとなった。この現象は、図5で示した光学観測実験の結果と同様の結果を示し、数値シミュレーションを使って水撃現象の評価を行うことが可能となった。衝撃加工容器の特性を評価するため、密閉容器と開放容器についての解析を行い、また、空気層の高さの違いによる衝撃加工力の調査を行うため数値シミュレーションを行っ

た。図 9 に空気層高さによる気泡最大径、図 10 に水の底面への衝突速度、図 11 に底面への水撃圧、図 12 に底面中心に発生する圧力から得られた力積の結果を示す。気泡最大径は、密閉容器を模擬した条件では徐々に大きくなるが、開放容器の条件では空気層高さは約 220mm の一定となった。開放容器をモデル化した場合、この爆発初期条件では水面が約 110mm 上昇するため、空気層の高さは少なくとも 120mm 以上モデル化する必要がある、このことにより、解析コストを考慮した場合、必要最低限の空気層の高さが必要となることが明らかになった。

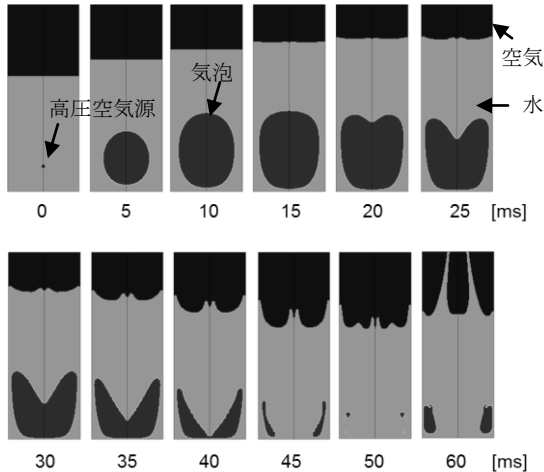


図 8 OC520 (HAir=200) 開放容器中の気泡の変化 (解析領域: 100x100x520mm)

図 10 の水の底面への衝突速度の比較において、密閉容器の条件では容器上部の空気が圧縮されるため、空気層が低い条件では水の底面へ向かう速度が増加することが明らかとなった。また、開放容器の条件では空気高さに関係なく約 9m/s と一定となった。底面に作用する水撃圧力の最大値は密閉容器においては空気層高さが高くなると徐々に大きくなり、空気高さが 50mm より大きくなると約 7MPa と一定となった。また、開放容器においては空気高さに関係なく約 7MPa と一定となった。図 12 に示すように、開放容器においては、空気層の高さに関係なく、水撃による力積は約 4200Pa・s と一定となるのに対し、密閉容器においては、空気高さ 50mm に最大値を示し、水撃の力積は約 5800 Pa・s となった。ここで、衝突速度と、最大水撃圧力、力積の変化の関係を分析すると、密閉容器においては、衝突速度の算出方法に底面からの高さが 30mm から 100mm の区間の平均速度で評価しており、底面に水流が衝突する直前で急激に減衰したため、水撃の最大圧力値はほぼ一定になり、その水流のエネルギーは圧力の持続時間に変換されることが明らかとなった。加工を行うための力を評価する場合、この力積値を比較することで処理能力を評価することができる。このことにより、密閉容器を使った加工装置を利用する場合は

最適な空気層の高さを設定する必要があることが明らかとなった。

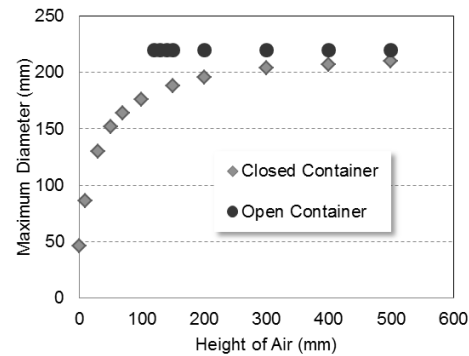


図 9 空気層高さによる気泡最大径の変化

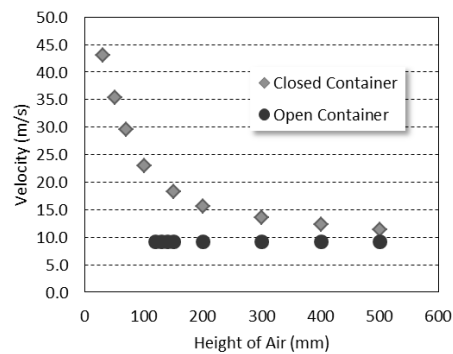


図 10 空気層高さによる衝突速度の変化

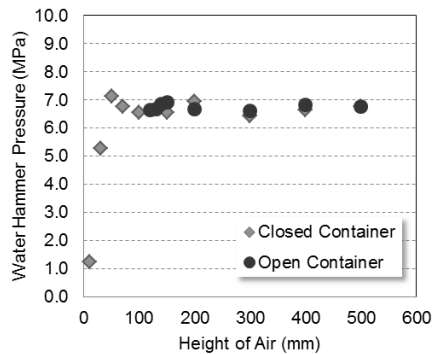


図 11 空気層高さによる最大水撃圧力の変化

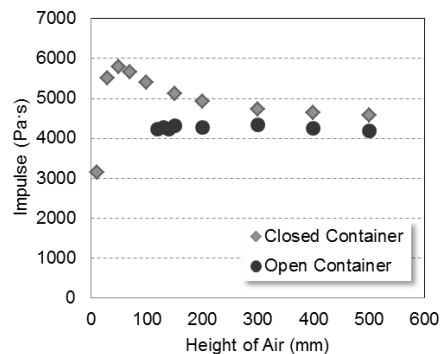


図 12 空気層高さによる力積の変化

実験結果及び数値シミュレーションの結果を分析し、水中放電による水中衝撃波や気泡を効果的に利用する圧力処理容器を製作した。図 13 に製作した圧力処理容器の写真を示す。この装置は、密閉型の処理容器で、内部に入れる水の量を調整することによって、被加工材に負荷する最適な加工力を得ることができる。また、加工力として利用する水中衝撃波が収束するように容器の形状を設計した。

図 14 に製作した圧力処理容器を使って得られた銅板(厚さ 0.15mm)の成形品の写真を示す。カッティングシートで製作した型通りの凸部が成形された。このことにより、衝撃成形による塑性加工が可能であることが示唆され、本研究で観測した水撃作用は、放電時に発生する水中衝撃波と同時に加工力に利用できることが示された。



図 13 水中放電を利用した圧力処理容器の写真

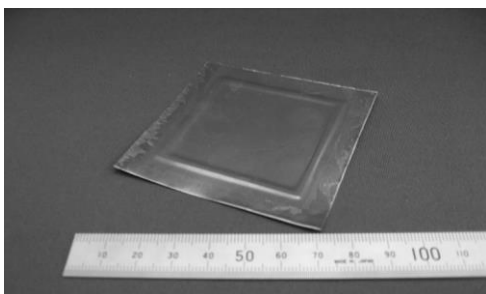


図 14 水中放電を利用した圧力処理容器の写真

最後に、本研究課題の成果は、水中放電を利用した塑性加工のこれまでの国内外の研究成果では確認されていなかった気泡挙動及びバブルパルスの撮影に成功し、その複雑な現象を明らかにしたことである。水中放電を利用した塑性加工に使用する衝撃波処理容器を想定した実験及び数値シミュレーションを行い、容器内径と同程度の気泡最大径が発生する水中パルス放電の現象を明らかにし、塑性加工に利用することができる衝撃加工用の試作機を製作した。本研究において明らかにした水中放電現象の特性は、水中放電を利用する様々な超高压加工分野へ応用でき、例えば、水中放電による衝撃波負荷の食品加工や、超高压を利用した新素材開発に利

用されることが期待される。

#### <引用文献>

- ①Asuka Oda, et al., Proceeding of 2006 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, ISBN 0-7918-3782-3, I749CD, (2006)
- ② R. H. Cole: Underwater Explosion, Princeton University Press, (1948)
- ③Kazumi Tanaka, "Behavior of gas bubble in underwater explosions", Sci. Tech. Energetic Materials, Vol. 36, No.1, pp. 11-19, (1975)
- ④濱嶋英樹ほか、社団法人火薬学会 2013 年度秋季研究発表講演会講演要旨集, pp. 69-70、(2013)
- ⑤濱嶋英樹ほか、平成 26 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp. 248-250、(2015)

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 7 件)

- ①濱嶋 英樹、水中放電現象を利用した金属薄板の衝撃加工、平成 26 年度衝撃波シンポジウム、2015 年 3 月 10 日、ホテル天坊 (群馬県渋川市)
- ②濱嶋 英樹、Evaluation of underwater discharge in small water container used in shock processing, The 5th International Symposium on Energetic Materials and Their Applications, 2014 年 11 月 12 日、ザ・ルイガンズ (福岡県福岡市)
- ③濱嶋 英樹、水中放電を利用した衝撃加工法の気泡脈動の効果の検討、第 65 回塑性加工連合講演会、2014 年 10 月 12 日、岡山大学 (岡山県岡山市)
- ④濱嶋 英樹、円柱状電極棒を用いた水中放電による衝撃加工法の評価、平成 26 年度塑性加工春季講演会、2014 年 6 月 8 日、つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
- ⑤濱嶋 英樹、円柱状電極棒を用いた水中放電により発生した気泡が壁から受ける影響の検討、火薬学会 2014 年度春季研究発表会、2014 年 5 月 22 日、慶應義塾大学日吉キャンパス (神奈川県横浜市)
- ⑥濱嶋 英樹、円柱状電極棒を用いた水中放電の観察、火薬学会 2013 年度秋季研究発表会、2013 年 12 月 12 日、海峡メッセ下関 (山口県下関市)
- ⑦濱嶋 英樹、水中放電による気泡脈動現象を利用した衝撃加工方法一考案、第 64 回塑性加工連合講演会、2013 年 11 月 1 日、大阪大学吹田キャンパス (大阪府吹田市)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

濱嶋 英樹 (HAMASHIMA, Hideki)

熊本県産業技術センター・ものづくり室・研究主任

研究者番号：30398242