

# 水中衝撃波を利用する爆発圧接技術の新展開

熊本大学 衝撃・極限環境研究センター  
 准教授 外本和幸  
 (平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007008)

キーワード：接合，爆発圧接，水中衝撃波

## 1. 研究の目的と背景

爆発圧接技術はこれまで広く工業的に利用されており、特に他の方法より優れた接合強度を有する異材接合法として知られている<sup>1)</sup>。我々の研究室では、本方法のより広い応用の可能性を考えて、水中衝撃波を利用する爆発圧接技術について提案し<sup>2)</sup>、金属とセラミックスの接合<sup>3)</sup>など、従来にない成果を挙げている。

水中衝撃波を利用する本方法は、従来法と比べて薄板の接合に向いており、それを活かしたアプリケーションの分野を見出す必要がある。そのような新しい展開を目指すことを目的として、本研究が提案され、一連の実験が実施された。

本研究ではまず、実験条件と接合可能な条件範囲に関して、基礎的な実験データの多い Ti 薄板とステンレス鋼に関して系統的な実験を行い、各種の接合条件に対する接合可能条件範囲を明らかにすることを行った。さらに工業化が期待されるいくつかのユニークな材料組み合わせに対する接合条件などについて研究を行った。ここでは併せて、プラズマ対抗壁材料への期待が高い<sup>4)</sup>W と Cu の接合を試みた結果等について報告する。

## 2. 実験方法

Fig. 1 に、本研究で用いる水中衝撃波を利用する装置の基本的な概略図を示す。実験では、旭化成ケミカルズ株式会社製の高性能爆薬 SEP (爆ごう速度 6970m/s, 初期密度 1310kg/m<sup>3</sup>) を使用し、6 号電気雷管 (同社製) で起爆した。Fig. 1 に示すように、全体の構造は上部の爆薬部と下部の接合部分に分けられ、爆薬は爆発圧接の条件を満たすために一定の角度  $\alpha$  だけ初期傾斜を設けてある。接合させる金属薄板上には一定厚さのカバープレートを設置 (一部実験では未使用) し、衝突速度の調整を行った。金属板上に作用する水中衝撃波の圧力をコントロールすることを目的として、爆薬と試料の平均距離  $D$  を変化させた実験を行っている。本研究で実施した実験条件を Table1 にまとめて示す。

接合体は爆轟方向に平行に中央断面を切断し、断面の組織観察等を行った。

接合条件に関しては、Autodyn-2D を利用して金属板の飛翔速度  $V_p$ 、衝突角度  $\beta$ 、水平方向への衝突点移動速度

$V_c$  などを求め<sup>2)</sup>、それらのデータに基づいて接合可能条件の範囲を議論した。

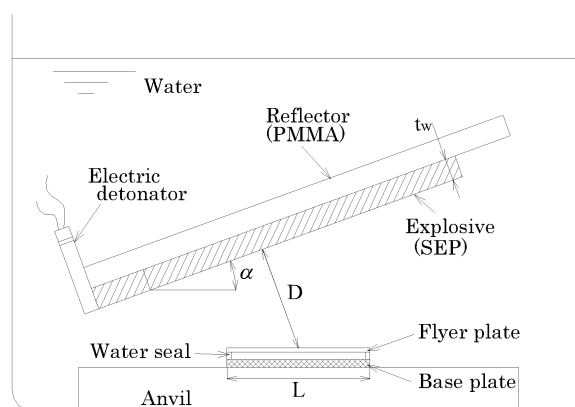


Fig.1 Set-up for underwater explosive welding.

Table 1 Experimental conditions employed for experiments (Unit; mm).

	Te	Cover pl.	Flyer pl.	Base pl.	D	$\alpha$	Stand off
TS1	5	None	Ti(0.1)	304S.S.(1)	20	20°	0.5
TS2	5	None	Ti(0.1)	304S.S.(1)	30	20°	0.5
TS3	5	None	Ti(0.1)	304S.S.(1)	40	20°	0.5
TS4	5	None	Ti(0.1)	304S.S.(1)	50	20°	0.5
TS5	10	None	Ti(0.1)	304S.S.(1)	40	20°	0.5
WC1	5	S.S	W(0.1)	Cu (3)	25	15°	0.1
WC2	5	S.S	W(0.1)	Cu (3)	25	30°	0.1
WC3	5	S.S	W(0.05)	Cu (3)	25	25°	0.1
WC4	5	S.S	W(0.5)	Cu (3)	25	30°	0.1

Te; Thickness of explosive

## 3. 研究成果

Fig. 2~Fig.6 に、ステンレス鋼上に Ti 薄板を接合時多彩の実験結果について、試料中央部付近の縦断面組織写真を示す。これらの実験において接合長さは 90mm とした。D が大きく作用する水中衝撃波の圧力が十分でない

場合には、境界はわずかに揺動する程度であったが、Dが小さくなり作用圧力が十分に高い場合には、爆発圧着に特有の波状組織が明瞭に観察された。すなわち、爆発圧接のメカニズムに基づく良好な接合が達成されていることがわかる。本研究で行った光学顕微鏡観察においては、接合界面に硬脆な化合物相は明確に観察されなかった。通常の爆発圧接では、同様の組み合わせの材料に対して、X線回折実験によって接合境界にFeTiやFe<sub>2</sub>Tiといった化合物がわずかに認められることが多かった<sup>5)</sup>。これに対して水中衝撃波を利用する方法では、衝突時のエネルギー損失を低減できることから、熱影響による化合物の形成を抑制することが可能である。

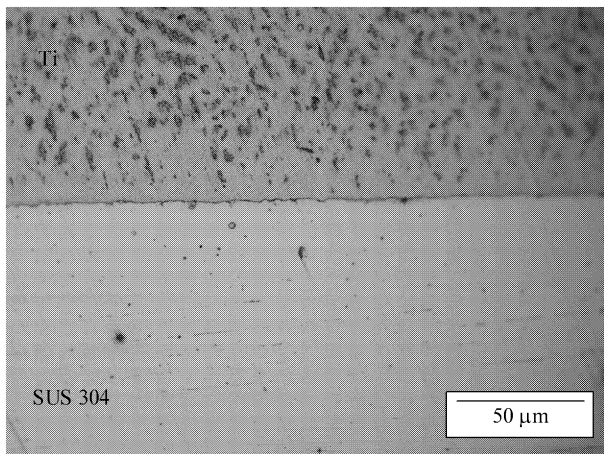


Fig.2 Microstructure of titanium/stainless steel welded for experiment #TS4.

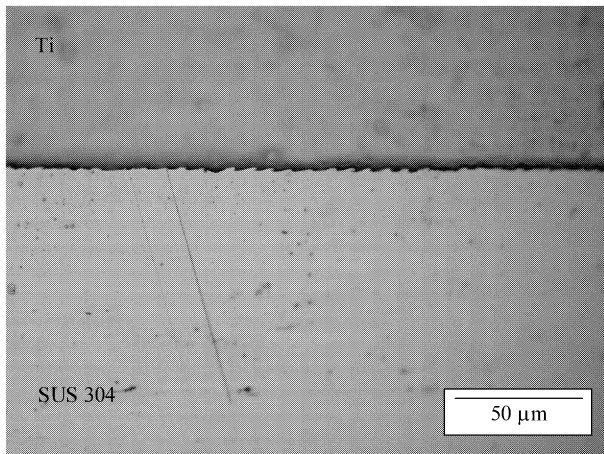


Fig.3 Microstructure of titanium/stainless steel welded for experiment #TS3.

これらの実験では、一定厚さの爆薬を試料と傾斜させて設置しており、このことは水平方向に対して実験条件が変化することを意味する。すなわち爆源と試料の距離が近い雷管側では圧力の作用が強いことによって高い衝突速度（衝突角度も同様）で衝突しており、起爆側から遠ざかるとともに圧力、衝突速度（角度も同様）は減少することになる。これに伴って接合境界の波長は水平方

向に向かって変化する（減少する）ことはすでに報告済み<sup>2)</sup>なのでこれ以上議論しない。

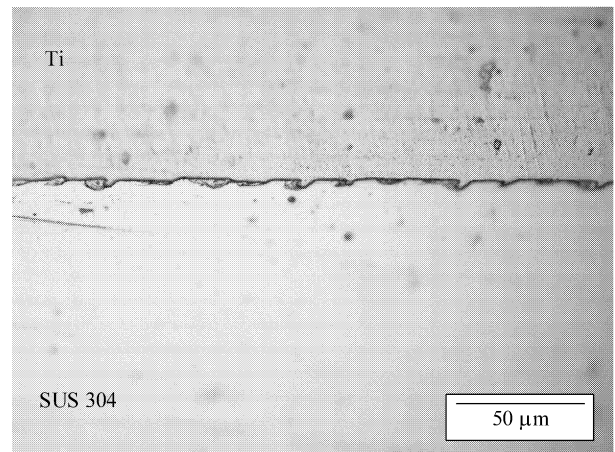


Fig.4 Microstructure of titanium/stainless steel welded for experiment #TS2.

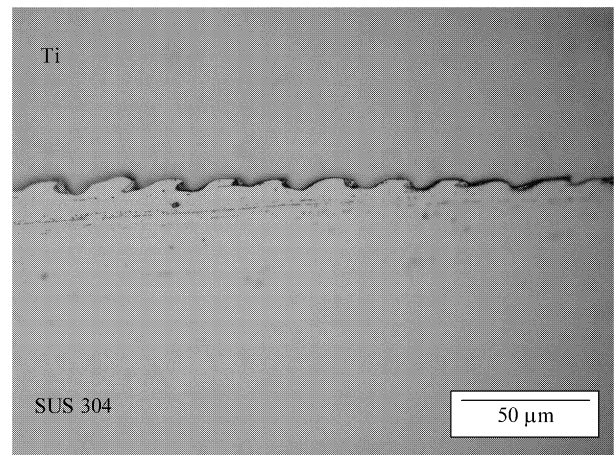


Fig.5 Microstructure of titanium/stainless steel welded for experiment #TS1.

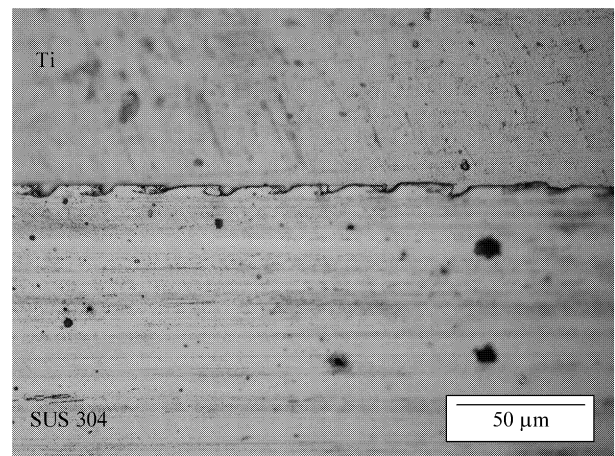


Fig.6 Microstructure of titanium/stainless steel welded for experiment #TS5.

爆発圧接における接合可能条件範囲は、水平方向への衝突点移動速度  $V_c$  と衝突角  $\beta$  に関して整理され、接合

条件の下限が Deribas らによって提唱されている<sup>1)</sup>。本実験結果を整理した図を Fig.7 に示す。図中の線状にプロットされた一連のデータが、実験条件ごとのデータである。図中には接合の下限のライン（両材料が塑性流動するか否かの限界線<sup>1)</sup>）が描かれており、いずれの場合も接合の下限以上の条件を満たしていることがわかる。ここで接合の上限の式<sup>6)</sup>も知られているが、上限はこの図より上方に存在している。図からも明らかなように、水中衝撃波の作用圧力が高い TS1 に関しては、計算によるデータも接合の下限より十分に離れた条件になっており、良好に接合されることが容易に想像される。これに対して圧力が低い TS4 のデータは、接合の下限に近づいた条件での接合になっている。長尺の材料の接合に関しては、このことを考慮した条件の設定が必要である。

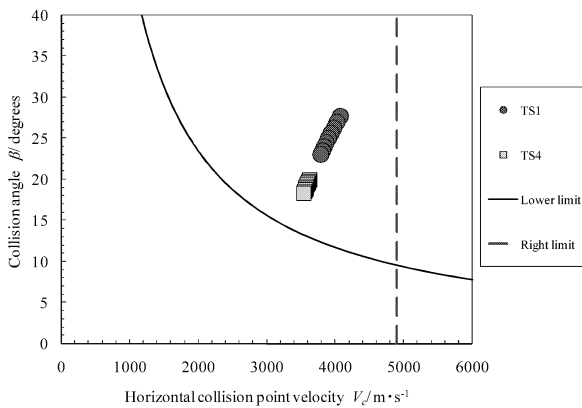


Fig.7 Weldable window for titanium and stainless steel.

高融点材料である W と Cu の接合についても一連の実験を行った。この実験における接合長さは 40mm とし、試料中心部付近の組織観察を行った。

Fig.8 は爆薬の傾斜角  $\alpha = 15^\circ$  の場合(WC1)の接合境界の顕微鏡組織を示す。傾斜角が小さい場合、金属ジェットがトラップされることで、Fig.8 に示す接合境界の組織は W と Cu が微小に混在する中間層を形成した。Fig.9 はその拡大写真を示すが、マイクロビッカース硬度測定によって、中間層は W と Cu の中間の硬さを有すること示された。このような材料組織は傾斜組成構造を有しているとも言え、材料中に急峻な熱勾配が生じた場合にも強い接合を示す可能性も期待される。今後、接合強度の評価実験や熱サイクル試験なども実施することを計画している。

Fig.10 は通常の爆発圧接条件を満たすような条件で得られた接合界面の組織である ( $\alpha = 30^\circ$  ; 実験条件 WC2)。Fig.10 から明らかなように、この場合には明瞭な波状界面が形成されており、良好な接合が得られていることが示された。波状界面の形成は良好な接合を示す指標<sup>1)</sup>とされており、このときの接合境界の強度も十分に高いと考えてよいものと思われた。

一連の接合実験において、多くの場合に W 中に欠陥が

生じることが認められた。具体的には、Fig.11 に示すように、W の板厚が薄い場合には板面方向に平行に多数のスポーリング破壊が生じた。これは熱間圧延等の製造過程において、板厚方向への力学特性が劣化していたことによって生じたと思われる。この点は、良質な W 箔が得られるとするなら、解決できる問題であると考えている。これに対して板厚が相対的に厚い場合には、板の衝撃波による加速時と接合（衝突）時に、激しい曲げ及び曲げ戻し変形を受けることに起因した板を垂直に横切る割れが認められた(Fig.12)。割れが直線状に伝播せず、僅かに板面に平行な経路を経由して伝わっていることを考えても、板面に垂直な方向への材料の強度に問題があることも伺われた。

W 以外の高融点金属として Mo の薄板に関しても水中衝撃波を利用した Cu との接合実験を行った。この場合、Mo は多少延性を有していることから、ここでは結果を示すことは省略するが、W の場合に見られたような割れは認められなかった。

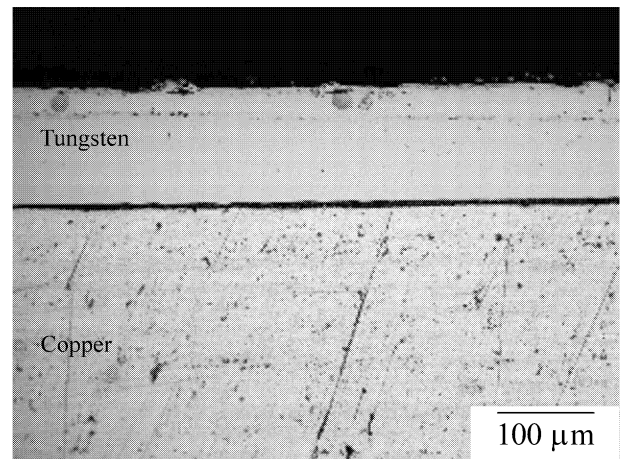


Fig.8 Microstructure of interface of W/Cu for experiment #WC1.

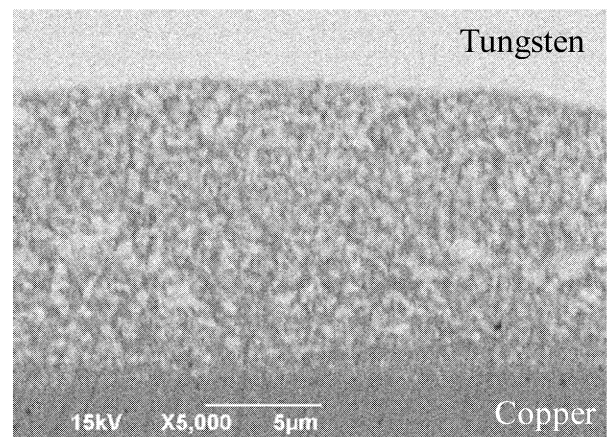


Fig.9 Enlarged microstructure taken by SEM (back scattered image) for W/Cu interface (experiment #WC1).

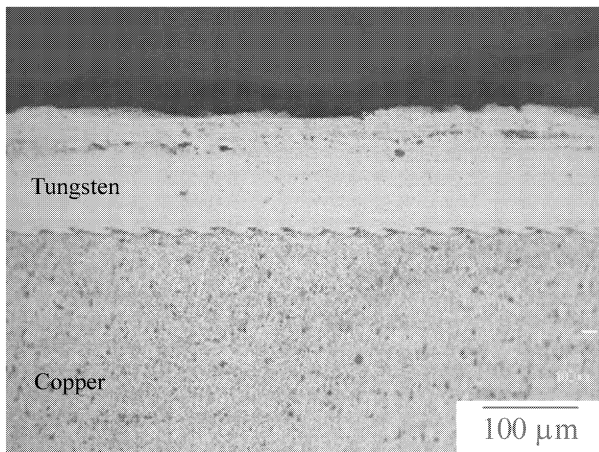


Fig.10 Microstructure of interface of W/Cu for experiment #WC2.

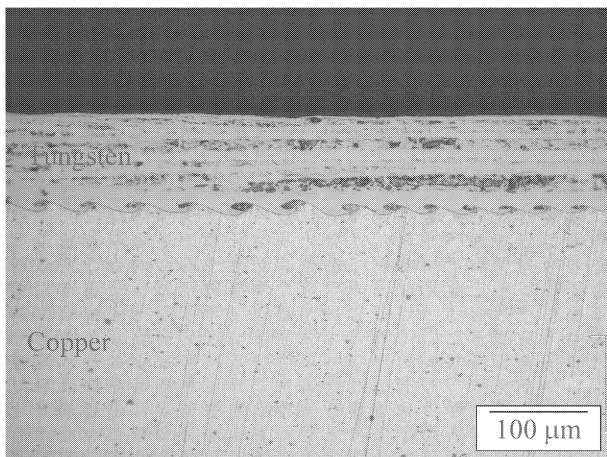


Fig.11 Spalling fracture found in thin W foil (0.05 μm-thick) layer welded onto Cu base for experiment #WC3.

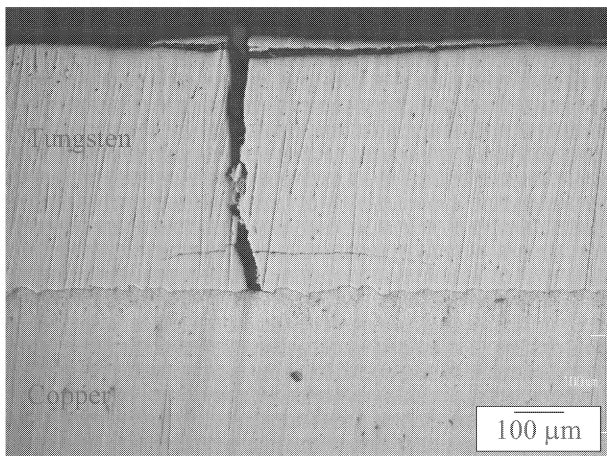


Fig.12 Crack found in relatively thick W plate (0.5 mm-thick) welded onto Cu base for experiment #WC4.

Ti とステンレス鋼の場合と同様に、本実験に関して Weldable window を描いた結果を Fig.13 に示す。図からも明らかなように WC1 では  $V_c$  は材料中の弾性波速度を超えており、接合可能の右限 (right limit) を外れている。すなわち、本実験では爆発圧接のメカニズムによらない接合であることが推察され、接合性の評価を改めて実施する必要があることは前に述べたとおりである。Fig.13

では図が見にくくなるために全部のデータを記載することを行わなかったが、WC1 以外の実験は、いずれも接合可能条件範囲内にあり、爆発圧接機構に基づく良好な接合であると考えられる。

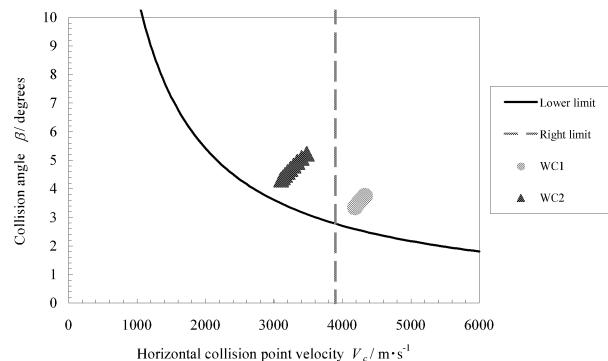


Fig.13 Weldable window for W and Cu.

#### 4. 結言

本研究では、水中衝撃波を利用する爆発圧接法の新しい展開を指向して、その特徴と可能性、さらには爆発圧接条件による接合可能範囲との関係を議論し、高機能な薄板材料の全面接合の可能性について報告した。ここでは実験条件を広く変化させて、接合可能範囲との比較のために一定厚さの爆薬を用いた実験を行ったが、実際には爆薬厚さを場所によって変化させ、作用圧力を一定にすることも可能である<sup>2)</sup>。すなわち、大面積の接合も可能であり、そのような観点からの研究も今後実施したいと考えている。

#### 謝 辞

本研究をご支援頂いた天田金属加工機械技術振興財団に、深くお礼申し上げます。特に本研究の実施にご協力いただいた P.Manikandan 博士 (熊本大学研究員) および研究に参画した大学院生、学生諸氏にも深謝いたします。

#### 参考文献

- 1) B. Crossland, Explosive welding of metals and its application, Oxford University Press, 1982.
- 2) 森昭寿・外本和幸・藤田昌大：塑性と加工，47-542(2006),195.
- 3) K. Hokamoto, M. Fujita, S. Shimokawa, H. Okugawa, J. Mater. Process. Technol., 85 (1999), 175-179.
- 4) M. Merola, M. Akiba, V. Barabash, I. Mazul, J. Nucl. Mater., 307-311 (2002) 1524-1532.
- 5) P. Manikandan, K. Hokamoto, A. Chiba, A.A. Deribas, K. Raghukandan, Prof.2nd Asian Conf. on High Pressure Research, Japan, Nov.1-5, (2004).
- 6) M.A. Meyers, Dynamic Behavior of Materials, Wiley, 1994.