

衝撃圧接法を利用した新素材接合技術に関する研究

外本和幸*

1. はじめに

われわれはこれまで、水中衝撃波を利用した各種材料プロセス技術に関して研究を行ってきた¹⁾⁴⁾。水中衝撃波を利用すると、比較的容易に試料に作用する圧力条件などをコントロールすることができる。そこでここでは、この特徴を活かして、金属薄板を爆発圧接が可能な数百m/s以上の高速に加速し、板同士を接合する技術を提案するとともに、新素材接合技術として応用することの可能性について述べる。

本方法を用いることで、爆薬の爆轟によって生じる衝撃波を水中衝撃波の形で薄板に作用させることができ、金属の薄板を均一かつ高速に飛翔させることができる。このことで金属薄板の接合を比較的容易に行うことが可能になった。爆薬の爆轟ガス圧を直接薄板に作用させた場合には、薄板は容易に破壊し、良好な接合体は得られない。

ここでは、金属薄板を軟鋼板上へ圧接した結果や薄板材の多層同時爆接の他、セラミックスや工具鋼板上への金属薄板接合など、各種の新素材の接合法としての可能性について検討した結果について紹介する。

2. 実験方法

本研究で用いた実験装置の模式図を図1に示す。また今回実施した実験条件の詳細を表1にまとめて示す。装置は上部の爆薬部と下部の試料部分に分けられ、両者は水を介して設置されている。本装置は爆薬に一定の傾斜角を設けているので、試料と爆薬の間の平均距離Dを図1のように決めて実験を行った。本研究では、標準的な実験条件として、爆薬の初期傾斜角 $\alpha=20^\circ$ 、板間の間隔(SOD)=0.5mm、爆薬の厚さ $t=5\text{mm}$ とした。ここで爆薬は旭化成工業(株)製のSEP爆薬(爆速約7km/s)を用い、図1の左下端より雷管によって起爆した。また、接合させる金属板上には、モーメントムトラップとして別の金属カバープレート(Anvil)を接着してある。

ここで爆薬に初期傾斜角を持たせているのは、傾斜角を設けない場合には水平方向への衝突点移動速度が物質中の音速を超えてしまうため、このような条件の場合には爆発圧接の接合条件からはずれてしまう⁵⁾。これに対して、一定の傾斜角を持たせることで水平方向への衝突点移動速度は接合材料中の音速以下となり、接合条件を満たすようになる。これに加えて垂直方向へ十分に加速される条件が達成されるならば、材料同士は爆発圧接の条件を満たし、良好に接合されることになる⁵⁾。

3. 実験結果

図2に、本方法によって接合された界面(軟鋼板上にCu薄板を接合したもの)の顕微鏡組織の一例を示す(実験番号1)。界面組織は、爆発圧接に特有の規則的な界面波を形成しており、両金属が高圧下で激しく高速変形・流動して波状組織を形成した痕跡を明確に示している⁶⁾。

また界面波長は、図3に示すように、接合を試みた80mmの長さについて、雷管側から終端側に向かって次第に減少する傾向が認められた。これは、通常爆発圧接に用いられる平行法ではなく、傾斜法を用いたことによる。終端側では爆薬と試料の距離が大きくなり、水中衝撃波の圧力は終端側ではかなり減衰している。この時、得られる垂直方向への衝突速度の値は、図4に示すように終端側では起爆側より2~3割程度低くなっている。従って、本方法を用いる場合には、同一試料内での接合条件の変化が問題であり、全面にわたって接合条件範囲内で接合が行われるように注意を払う必要がある。また、垂直方向への加速の状況を図5に示すが、ほんの0.5mm程度のわずかな間隙内で数百m/s以上の速度にまで急速な加速が行われていることがわかる。通常の爆発圧接においては、このような急激な加速は一般に得ることは難しく、本法の特徴のひとつとして位置付けられる。

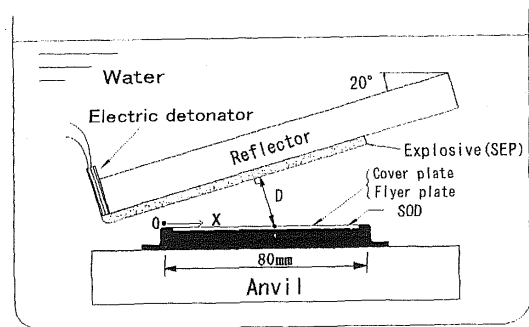


図1 本研究に用いた実験装置の模式図

表1 本研究で行った実験条件

実験	飛翔板 (厚さ/mm)	カバプレート (厚さ/mm)	母材 (厚さ/mm)	D/mm	SOD/mm
1	Cu(0.3)	Al(0.3)	軟鋼(5.0)	80	0.5
2	Cu(0.1) x5	SUS304 (0.1)	軟鋼(5.0)	70	0.5
3	Amor. (0.035)x5	SUS304 (0.1)	軟鋼(5.0)	20	0.5
4	Al(0.1)	SUS304 (0.3)	ZrO ₂	80	0.4
5	Al(0.1)	SUS304 (0.1)	SKD11	40	0.5
6	Ti(0.1)	SUS304 (0.1)	SKD11	40	0.5
7	Cu(0.1)	SUS304 (0.1)	SKD11	40	0.5

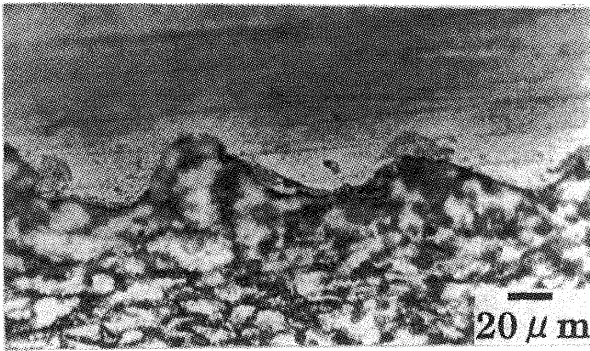


図2 銅/軟鋼接合体の界面組織 (実験番号1)

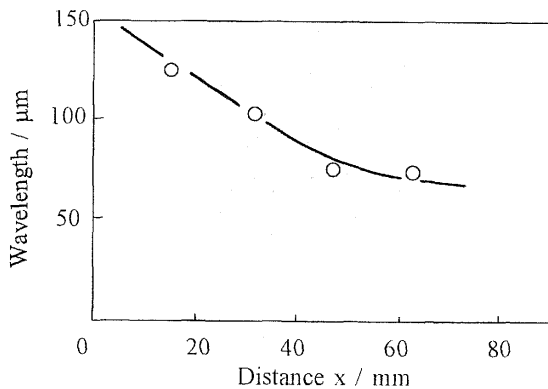


図3 接合界面波長の水平方向位置による変化 (実験番号1)

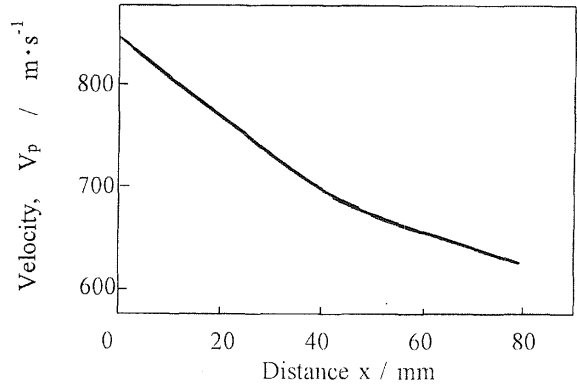


図4 実験番号1の条件における金属薄板の水平方向位置 x による衝突速度の変化状況

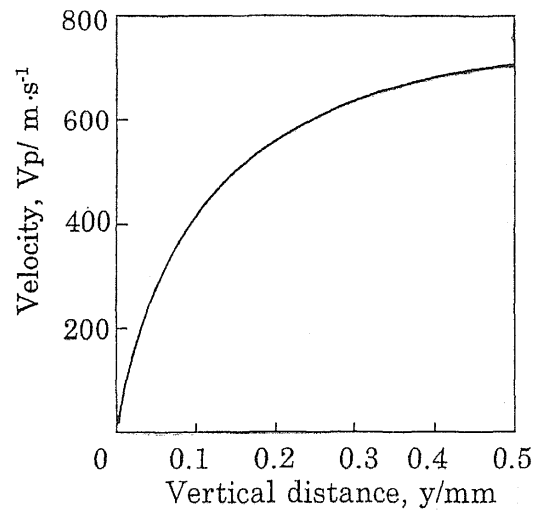


図5 金属板の加速状況の計算結果の一例

本方法の応用技術として、多層に積層した銅薄板を同時に接合することや、アモルファス箔の多層同時接合、硬脆なセラミックス上へ金属薄板を接合すること⁹⁾などにもこれまで成功している。以下にこれらの結果についていくつか簡単に紹介する。

図6は多層同時接合を行った銅板の断面組織の例である。各界面に波状組織を呈して良好に接合されていることがわかる。アモルファスについても、図7に示すようにそれぞれ約35 μm厚さの箔を5層積層して接合し、剥離のない良好な接合体が得られることを確認している。プロセスが短時間であることから熱的影響はほとんどなく、結晶化のような現象は全く認められなかった。

図8はジルコニアセラミックス上に Al を接合した場合の結果である。このような組み合わせの場合には、波状界面が形成するような条件で接合を行うと、容易にセラミックス中に割れを生じるので、平滑な界面を示すような条件で接合を行うことが必要であった。図9に曲げ試験による破断面を示すが、界面に剥離は認められず、良好に接合されていることがわかる。これらの接合の際にも材料表面を活性にする金属ジェットが生じたと思われる金属溶融の痕跡が接合界面に多く認められ、この場合の接合も爆発圧接の基本メカニズムによって行われていることが確かめられている。ジェットは図10に模式的に示すように、主体は金属（この場合 Al）であると思われる。

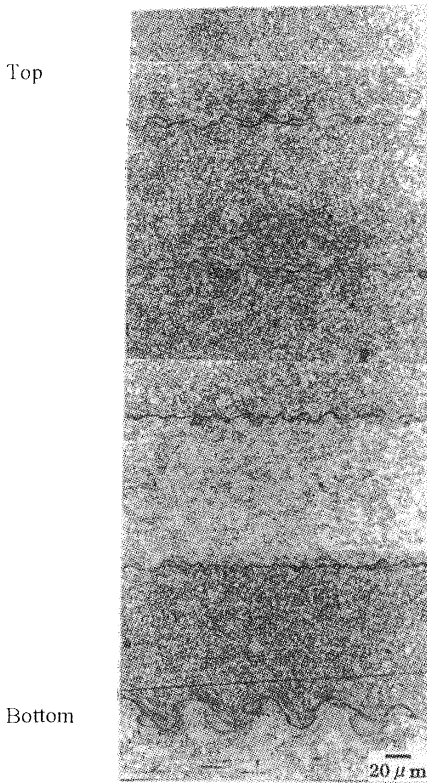
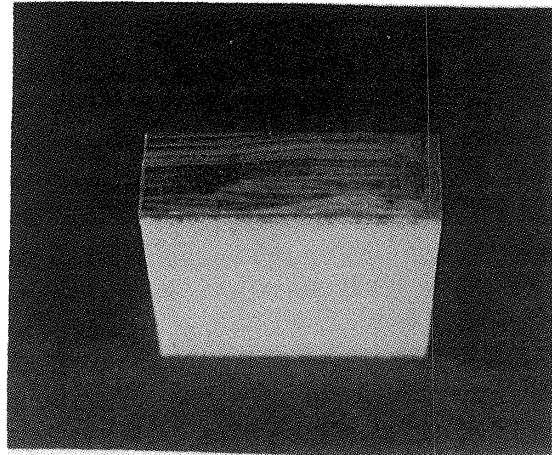


図6 多層爆着した銅の界面組織 (実験番号2)

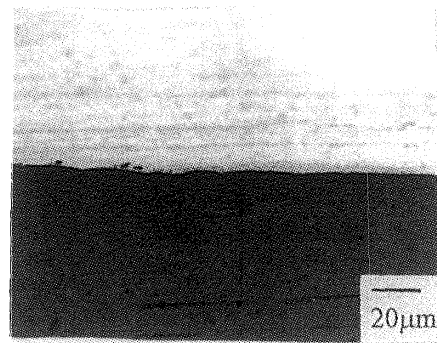


図8 Al/ZrO₂ 接合体の外観及び界面組織 (実験番号4)

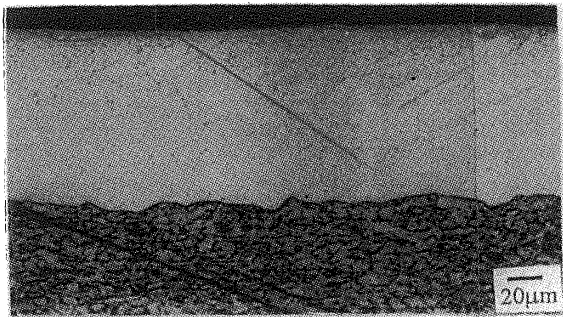
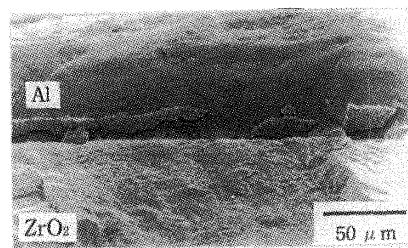


図7 5層積層したアモルファス箔材料の断面組織 (実験番号3)

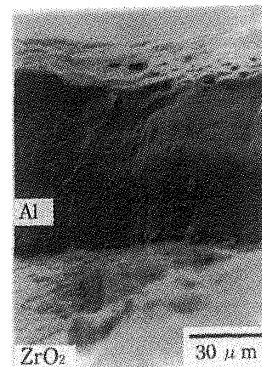


図9 Al/ZrO₂ 接合体の破断面組織 (実験番号4)

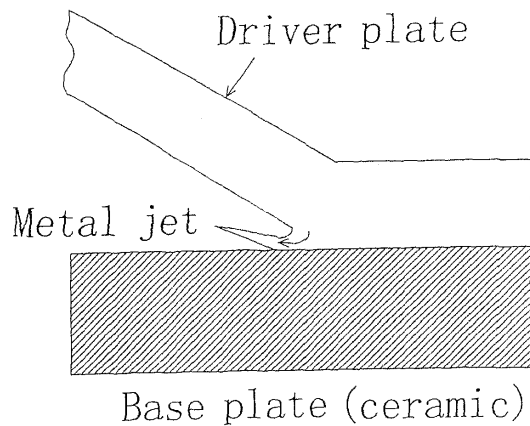


図10 平滑な界面を示す場合の接合機構の模式図

上記の他にも硬化の飽和した工具鋼 (SKD11;焼入焼戻材) 上に各種金属を接合することも試みた。図11(a),(b)のAlやTiの場合の結果で示すように、Al,Ti薄板を接合した場合(実験番号5,6)の接合界面は平滑な組織を示した。これに対して、Cuを接合した場合(実験番号7)には波状の界面を示した(図11(c))。これは、この材料組み合わせでは概ね同じ衝突速度でもインピーダンスの関係で衝突圧力が高まり、両材料の流動化が起きやすくなるためと考えられた。また変形能のほとんどないSKD11に、波状界面の形成によって変形が生じた場合にも、クラックは全く生じていなかった。クラックはAl,Tiを接合した場合も同様に生じていなかった。さらに興味深い結果として、硬化の飽和しているSKD11に関して、Cu/SKD11接合体の界面近傍では、波状組織を形成する時の激しい変形に伴って、ピッカース硬度値で1000以上の高い硬度を示す場所が認められた。

4. 結 言

本研究を通じて、新しく開発した装置が金属薄板を比較的容易に圧着可能な速度にまで加速できることが明らかになった。ここではいくつかの材料に対して接合実験を行った。金属材料については、爆発圧着に典型的な波状界面を示したが、金属とセラミックスの場合にはセラミックス中に割れを誘起するので波状組織は好ましくなく、むしろ平滑な界面であることが望ましかった。硬化の飽和した工具鋼の場合には、変形能のない工具鋼にも波状組織を形成して良好に接合される場合もあり、高速変形による特殊な効果が期待できるようなケースがあることが知られた。

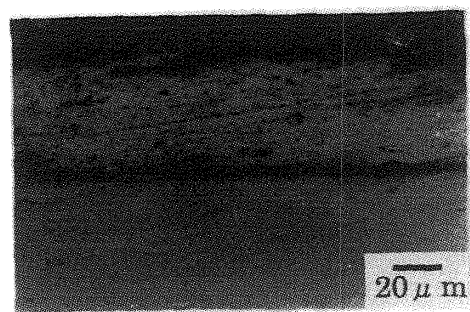
最後に、本研究は天田金属加工機械技術財団および科学研究費補助金によって行われたことを付記し、ここに深謝

申し上げます。

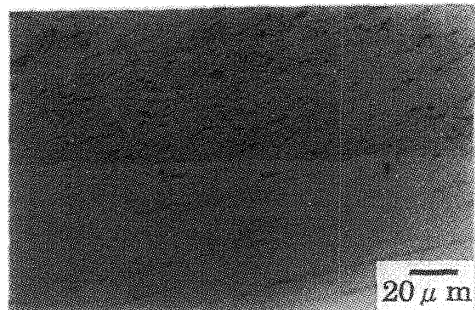
参考文献

- 1) Hokamoto, K. et al.: Scripta Mater., 39 (1998), 1383.
- 2) 外本ほか: 50 回塑加連講論, (1999), 255.
- 3) カヂイほか: 平 12 塑加春講論, (2000), 81.
- 4) 外本ほか: 平 13 塑加春講論, (2001), 269.
- 5) Crossland, B.: Explosive Welding and Its Application, Oxford University Press (1982).
- 6) Hokamoto, K. et al.: J. Mater. Process. Technol., 85 (1999), 175.

(a)



(b)



(c)

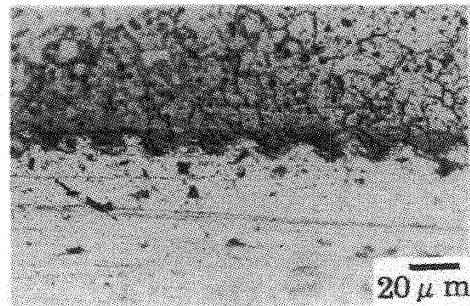


図11 金属/工具鋼接合体の界面組織 (a) Al/SKD11 (実験番号5), (b) Ti/SKD11 (同6), (c) Cu/SKD11 (同7)