

衝撃圧接法を利用した新素材接合技術に関する研究

熊本大学 工学部 知能生産システム工学科
助教授 外本和幸
(平成9年度奨励研究助成 AF-97027)

キーワード：接合、爆発圧接、衝撃波

1. 研究の背景

衝撃波現象の応用技術として、爆発圧接技術は金属板同士の接合に広く用いられている。しかしながら高速飛翔する材料が薄い場合は、金属板を均一に加速させることが困難であり、良好な接合体を得ることが難しい。そこで本研究では、水中衝撃波を利用して金属板を高速に加速し、母材と衝突、接合させる技術の提案と、その応用に関して報告する。ここではまず、銅薄板の軟鋼板上への接合について基礎的諸因子の影響を明らかにするための研究結果を述べる。さらにこの方法の新しい応用技術として、金属薄板をセラミックス上に爆発圧接することを試み、いくつかの試行錯誤の後に、セラミックス中にクラックをほとんど生じることなく、良好な状態で接合することに成功したのでその結果について報告する。

2. 提案する方法および基礎的諸因子の影響の検討及びいくつかの応用の可能性についての検討

本研究で用いた銅薄板の軟鋼板上への爆発圧接の装置の模式図を図1に示す。金属薄板と母材の間隙は0.5mm(一定)とした。爆薬は爆速7km/sの比較的高爆速のものを用いているので、水平方向への衝突点の移動速度 V_c を抑えるために一定の傾斜角 α を設けてある。傾斜角 α による V_c の変化を図2に示す。 V_c は接合する物質の弾性波速度以下が良く、傾斜角は最低 10° 以上必要である。図3は0.1mm厚の金属板が垂直方向へ加速されている状況の解析例を示すが、1mm以下の短い距離で金属板が急速に加速されていることがわかる。本方法では、水を媒体としているのでこのような薄い材料の均一な加速が可能であるが、爆薬を直接用いる方法では金属薄板は容易に破壊し、良好な接合体を得ることは難しい。

水中衝撃波を用いると銅板の接合は極めて容易で、表面荒れなどの無い良好な接合体が得られた。界面の断面組織には爆発圧接特有の波状界面¹⁾が観察され、接合強度

は十分に高いことが知られた。爆薬の初期傾斜角 α による界面波長の変化の状況を図4に示すが、波長は一般に起爆側で大きく終端側に向かって減少する。これは爆薬に初期傾斜角を設けたことによって、金属薄板に作用する圧力が変化したこと起因していると思われる。すなわち、起爆側の金属薄板は爆源から近いので加速されやすい。また、初期傾斜角 α は大きくなるほど大きな波長を示す傾向を示すが、これは初期傾斜角が大きいほど金属板の衝突角が大きくなることに起因する。すなわち、衝突角が大きいほど衝突点前方への金属ジェットの排出量は大きくなる²⁾。これとともに波を形成するような激しい変形域の厚さも増大し、波長が増大する。

本研究では0.5mmずつの間隙を設けて多層に積層した材料の接合についても試みた。図5に5層の銅積層材の波長の測定結果の一例からもわかるように、波長は一般に雷管側から遠ざかるにつれ減少する傾向が図2と同様に認められた。また、上から数えて第1～第4番目までの界面はほとんど同じ波長変化を示したが、最終の界面では非常に大きな波長を示した。これは最終層が基板である厚い鋼板に衝突し、衝突条件が急変することによって生じたと推察された。ここでは他に多層接合技術の可能性についても、その限界を知ることを目指して実験を試みたが、最大45層程度の銅(いずれも0.1mm厚さ)の多層材が得られることが知られた。

積層材の接合技術の応用として、軟鋼材の表面にアモルファス金属箔(約 $35\mu\text{m}$ 厚さ)を5層積層して接合することなどを試みた。その結果についての詳細は省略するが、軟鋼上へ5枚積層したアモルファス箔が剥離などを生じることなく良好な形で接合することに成功している。爆発圧接の接合強度への信頼性は極めて高いことがこれまで多く報告されており、このような技術の実用化は、材料表面の高機能化技術として極めて多様な用途の開拓が望めると期待している。

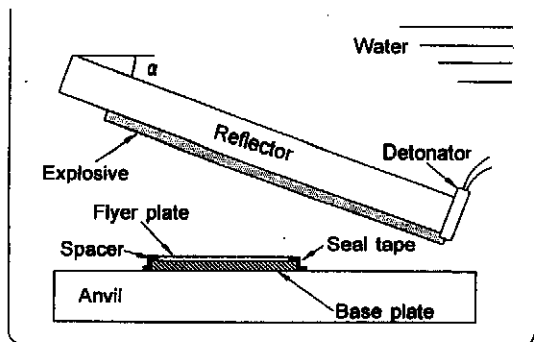


図 1 水中衝撃波を利用する金属薄板の爆発圧接装置の模式図

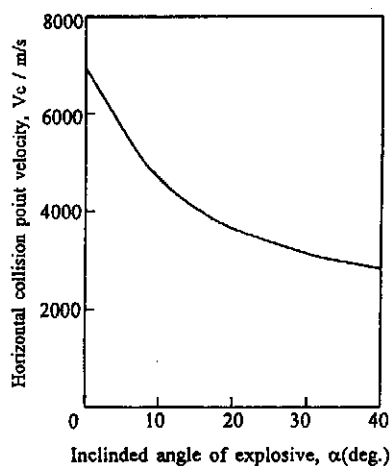


図 2 爆薬の初期傾斜角による衝突点移動速度 V_c の変化

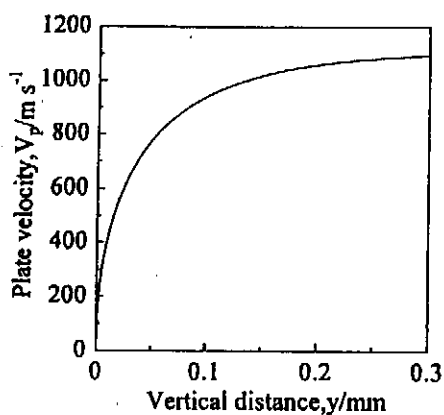


図 3 0.1mm 厚さの Cu 板の加速状況の数値解析結果

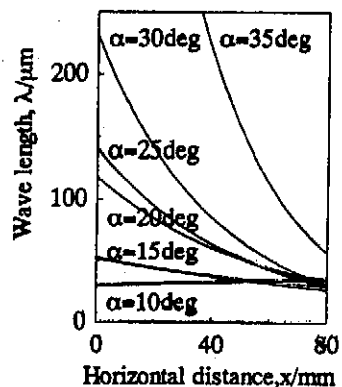


図 4 初期傾斜角 α の変化による各位置での界面波長の変化

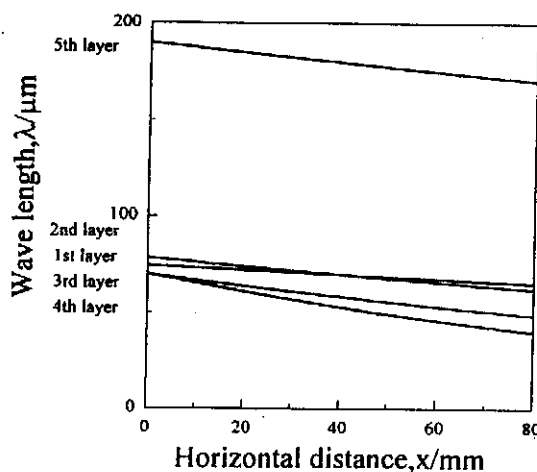


図 5 5層積層材における波長変化

3. 金属とセラミックスの爆発圧接の試み

すでに述べたように、本方法は金属薄板を高速かつ均一に加速できるという特徴を有している。特に金属とセラミックスの接合に際しては、一般の金属同士の場合より高速の加速が必要であると思われる。しかしながら、高速で衝突する際にはセラミックスの比較的低い靱性のために容易に破壊してしまうことも予想され、セラミックス中に生じるクラックの除去が最も重要な課題となる。本方法が通常法と比べて利点となるのは、金属板が薄いために同じ衝突速度の条件であれば、衝突時の運動エネルギーは少なくて済むことになる。その分、割れの無い材料を得ることのできる可能性が高まると期待される。類似の研究はわずかに 1 例の報告があるだけで、20 年以上前に数 mg の爆薬を直接金属板上に載せてわ

ずか 3mm^2 程度の領域の接合が試みられたのみで³⁾、そのときの接合状態の詳細な評価などは全く行われていない。

このために用いた装置の概要を図6に示す。金属薄板は $0.1 \sim 0.3\text{mm}$ 厚さの Al および 0.1mm 厚さの Ti とし、母材はセラミックスとしては比較的破壊靱性値の高い ZrO_2 を用いた。金属薄板上には別の金属板を接着してカバープレートとし、これを 20° 傾斜して設置した。セラミックスは鉄粉を添加したエポキシ樹脂中に固定され、その前後には同じ材質のセラミックスをモーメントムトラップとして配置した。これらは材料内を伝播する反射希薄波の影響を除くように作用する。

本研究の初期段階においては、板厚 $7 \sim 10\text{mm}$ のセラミックスを使用し、モーメントムトラップを用いることなしに実験を行っていたが、板厚の効果は極めて大きく、これらの実験では全ての試料でセラミックス内に極めて多数の割れを生じた(図7)。セラミックスの板厚を 20mm 以上とすると、割れの数は急激に減少した。また、モーメントムトラップとしてのセラミックスの使用は重要で、これらの処置を施すことで $\text{Al/ZrO}_2, \text{Ti/ZrO}_2$ に関して、ある程度良好な接合体が得られた。

図8に Al/ZrO_2 の断面組織の一例を示す。界面組織は図8(b)に示すように平滑な組織を示すが、曲げ試験などによっても剥離は生じず、かなり強固に接合していることが伺われた。接合界面部には時折、熔融・凝固したと思われる金属部が観察され、図9に模式的に示すように、主に金属部のみが激しい変形をすることで金属ジェットを形成し、その後の高圧力の衝突で両者が接合されたものと推察している。金属/セラミックスを継手として実用化するためには、例えば薄い Al の上に別の Al を拡散接合などによって接合することなどが必要ではないかと思われる。図10は実際に拡散接合された材料の概観であるが、今の所接合強度が十分でない(20MPa 程度)。しかしながら Al-Al の拡散接合は 400°C 位の低温で理論的には十分に可能であり、実用に耐え得る接合体を得ることはさして困難ではないと考えている。

Ti/ZrO_2 に関してマクロ的には割れのない良好な接合体が得られた。図10に接合体界面の顕微鏡写真を示すが、起爆側付近では界面の揺動とそれに起因した 0.1mm 程度のクラックの発生がみられた(図10(a))。これに対し終端側では平滑な界面を呈し、良好に接合された(図10(b))。前

者の界面の揺動は、衝突圧が高いことでセラミックス側にも変形が生じたことによると思われるが、セラミックスの変形能はわずかであり、容易にクラックを生じるため、波状界面の形成は好ましくないものと判断されたので、接合条件について多少の不均一は不可避であると思われる。これは傾斜法を用いることに起因すると思われた。完全にクラックをなくすには条件の詳細な調整が必要と思われるが、研究はまだ萌芽的段階にあり、今後の実験によって完全な接合体が得られるものと考えている。

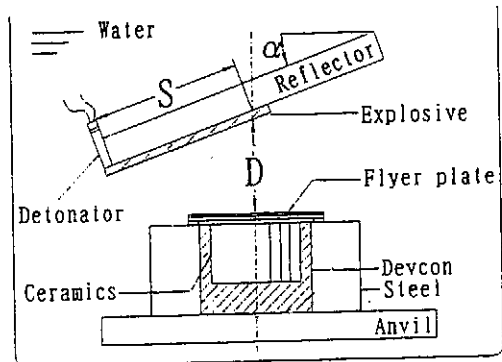


図6 金属とセラミックス接合のための装置の模式図



1mm

図7 研究当初の金属/セラミックス接合体の接合状況 (Al/ZrO_2)

4. まとめ

本研究においては、水中衝撃波を利用して金属薄板を高速飛翔、衝突させることで爆発圧接を行う新しい技術を開発し、その基礎的諸因子の影響を明らかにするとともに、金属とセラミックスの接合技術としての応用することの可能性について示すこと

ができた。今後は、接合可能な条件範囲や各種材料組み合わせについての接合の可否などを、定量的に明らかにすることなどを行っていきたいと考えている。また得られた接合体の接合強度など、実用化のための基礎的データ試験などを行いたいと考えている。

謝辞

本研究に助成頂いた天田金属加工機械技術振興財団に深謝申し上げます。

参考文献

- 1) B. Crossland, Explosive Welding of Metals and Its Application, Oxford Science Publication, New York, 1982.
- 2) R. C. Gupta, Proc. 8th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Eng., Hauge, 483-488(1989).
- 3) J. W. Shaffer et al., Proc. 5th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication, 4.12(1975).

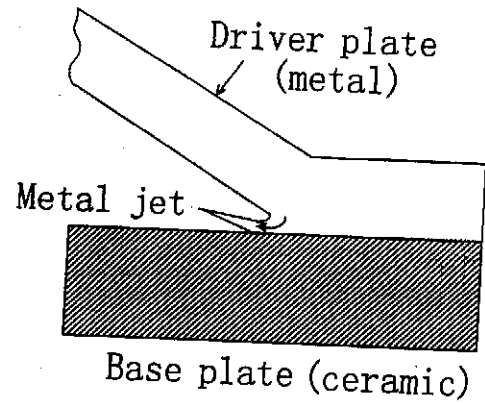


図9 接合機構の模式図

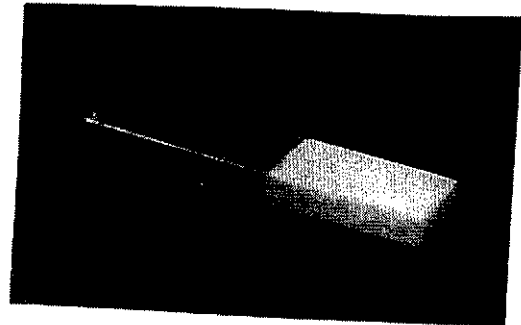


図10 拡散接合で作られた Al/ZrO₂ 継手

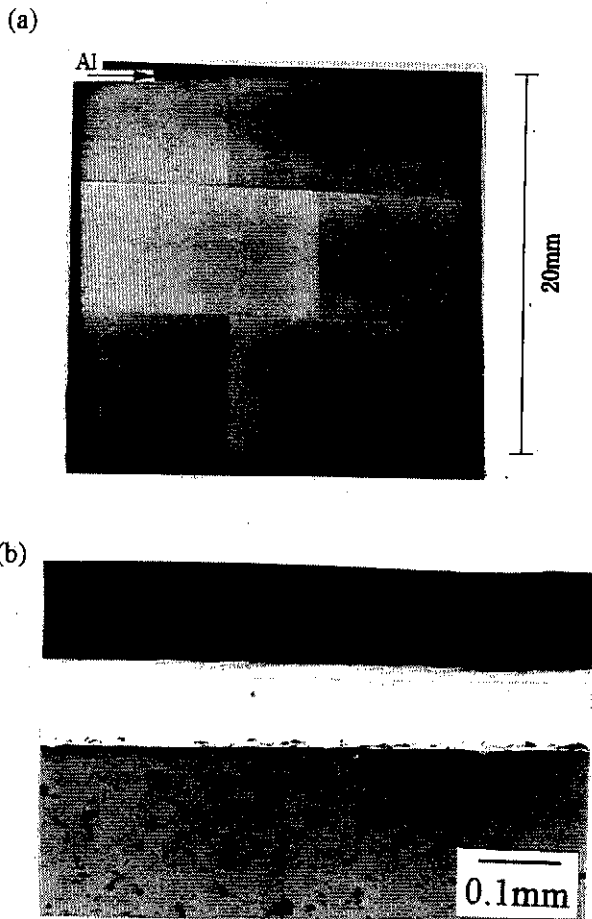


図8 良好に接合された Al/ZrO₂ の接合体の断面(a)と微細組織(b)

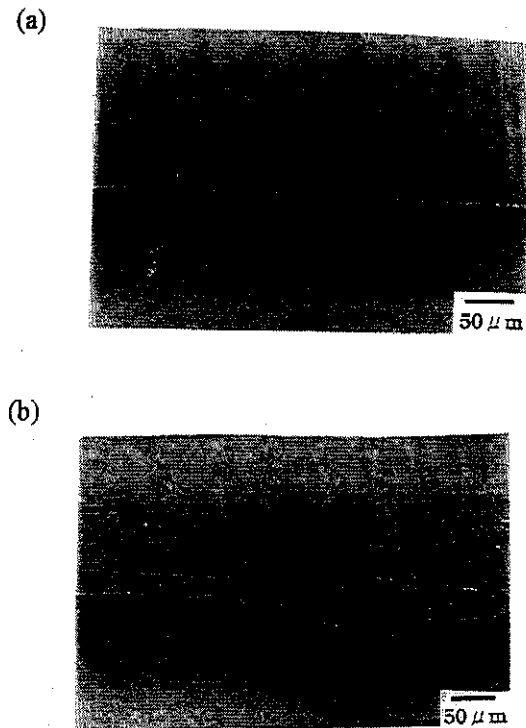


図11 Ti/ZrO₂ の接合体の界面組織 ((a); 起爆側、(b); 終端側)