

難接合性 A 5083/SUS 304 鋼クラッド作製のための 爆発圧接条件の設定

藤田 昌大*, 伊妻 猛志**, 青柳 宗伯***, 外本 和幸*

爆発圧接法は、ほとんど全ての金属組合せで接合が可能であるが、本研究では例外的に接合が困難とされる A 5083 アルミニウム合金と SUS 304 ステンレス鋼の爆発圧接条件を設定することを試みた。A 5083 と SUS 304 鋼の組合せでは、通常行われる 2 枚板の接合は非常に困難であったので、母材 (SUS 304) と合せ材 (A 5083) の間にステンレス鋼の薄板を挿入する新しい実験方法を提案した。中間材を挿入する場合、小さな間隔における金属板の衝突条件を正確に知る必要があるため、以前に報告した解析(藤田ほか, 工業火薬, 48, 176(1987))に修正を加え, それをもとに適正な爆接条件について検討した。

1. 緒言

爆発圧接法(以下爆接法と略称する)は通常, Fig.1 に示すように 2 枚の金属板を平行に設置し, 合せ材の上に置かれた爆薬の爆轟エネルギーによって合せ材を高速度飛翔させ, 瞬時に接合する金属接合法である。爆接法は, 金属の組合せによらずほとんどすべての金属組合せで接合が可能であるとされているが, Al-Mg 合金と鋼など, ごく一部の組合せでは接合が困難であるとされている¹⁾。

本研究では, 接合が難しいとされている A 5083 アルミ合金 (Al-4.5mass%Mg) と SUS 304 ステンレス鋼の組合せを取り上げ, 爆接可能な条件について調べる。この組合せのクラッドの用途は広く, LNG タンカーの液化天然ガスタンクの継手部分あるいは電車の車台と上部構造の継手など, 様々な方面で用いられている²⁾。従来のこの組合せの爆接材は, A 5083/工業用純 Al/SUS 304 鋼の 3 層構造のものが製造されており, 2 枚板の爆接の繰り返しによって作製されてきた。この爆接材は軟らかい純 Al を媒接材として用いているので, 界面の強度を低下させるという欠点を有してい

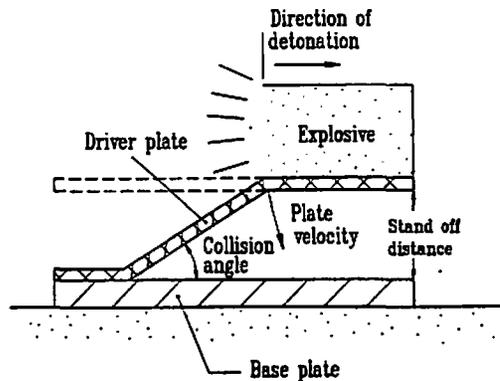


Fig. 1 Schematic illustration of conventional explosive welding process.

る。また爆接の繰り返しは, 工程を複雑化させる。

上記のような問題点を解決するために, 本研究では A 5083 と SUS 304 鋼の直接接合を達成する技術の確立を試みた。ここでは両金属の間に SUS 304 鋼の薄板を挿入する新しい実験方法を提案する。この組合せでは, 接合界面に厚い溶融層が生じる³⁾ことが接合を妨げる問題点であった。しかし SUS 304 鋼薄板を挿入することによって, 金属板の衝突時に失われる運動エネルギーを軽減し, 溶融層の厚さをきわめて薄くでき, 良好な接合状態が容易に達成される。

筆者らの一部はこれまで多層爆着過程の解析を行い, 多層に積層した金属板の飛翔条件について研究している⁴⁾⁻⁸⁾。今回は, これまでの研究では爆薬の厚さの影響が考慮されていなかったこと, 実験寸法が以前とかなり異なることなどから, これまでの解析に多少修

1991年6月24日受理

*熊本大学工学部機械工学科

〒860 熊本市黒髪 2-39-1

TEL 096-344-2111 内線 3739, 3740

**旭化成工業㈱ あいばの工場

〒520-15 滋賀県高島郡新旭町大字あいば

TEL 0740-25-3741

***熊本大学大学院生(現在:熊本大学地域共同研究センター)

〒861-22 熊本県上益城郡益城町田原

TEL 096-286-1212

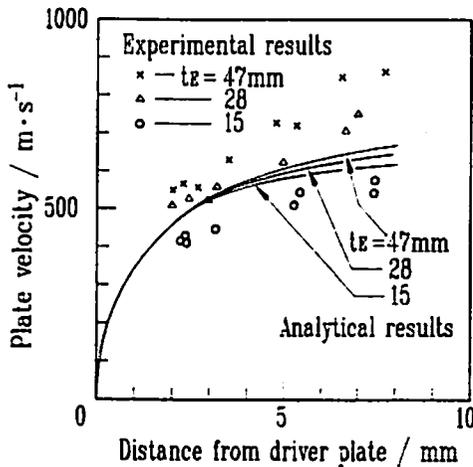


Fig. 2 Comparison of analytical and experimental plate velocity change with different thickness of explosive t_E . Analytical results are calculated by former analysis⁽¹⁾.

正を加え、その妥当性について調べた。さらにその解析を用いて、中間材を用いるA5083とSUS304鋼の爆接条件を明らかにすることを試みる。

2. 金属板の運動に関する解析の修正

筆者らが従来提案していた解析⁽¹⁾を用いて計算した金属板の飛翔速度の飛翔距離に対する変化(実線)と、ピンコンタクト実験による計測結果(各点)の比較をFig.2に示す。ここで駆動板は4mm厚さのA5083を用いた。しかし本解析結果は、計測結果とあまりよく一致していない。解析では飛翔距離の増加にもなって速度が上昇している状況は見ることができ、装薬厚さの違いによる飛翔速度の差がほとんど認められない。これまでの研究⁽¹⁾では装薬厚さ一定の条件下で解析を行っていたので、装薬厚さの影響については考慮されていなかったのが、今回の不一致の原因であると思われる。

装薬厚さの変化が、爆薬の爆轟速度に影響を及ぼすことはよく知られている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。爆薬の爆轟ガス圧力 P は、次式によって与えられる⁽¹¹⁾。

$$P = A\rho V_D^2 \quad (1)$$

ここで V_D (m/s)は爆薬の爆轟速度、 ρ は爆薬の密度、 A は比例定数である。式(1)から明らかなように、爆轟速度のわずかな変化が、合せ材を駆動するための爆轟ガス圧力の値に大きな影響を及ぼすことがわかる。Fig.3に本実験に用いた硝酸アンモニウム系爆薬の爆速の、装薬厚さに対する変化を示す。爆速は装薬厚さの逆数に比例し、次式によって与えられる。

$$V_D(\text{m/s}) = -\frac{1.236 \times 10^4}{t_E} + 2766 \quad (2)$$

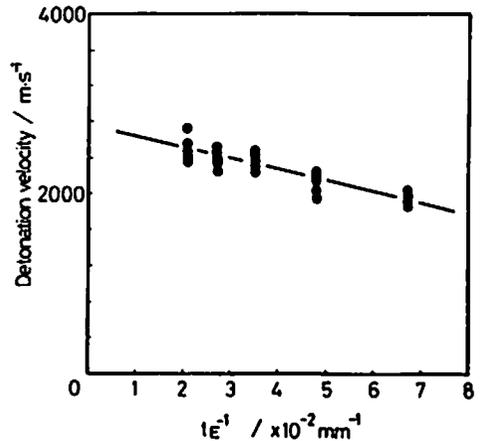


Fig. 3 Relation between thickness of explosive t_E and detonation velocity of explosive used in present study.

ここで t_E は装薬厚さ(mm)である。Fig.3から今回用いた爆薬が、装薬厚さ15mmから47mmで変化したとき、爆轟速度は約2000m/sから約2500m/sまで、1.25倍程度変化することになる。これによって爆轟ガス圧力は、装薬厚さ15mmと47mmの間で1.5倍ほどの相違が生じ、解析において無視できなくなる。

解析におけるもう一つの問題点は、これまでの解析では爆薬の爆轟ガス圧力の左右への散逸を考慮して、初期圧力分布について、このガスの散逸分を補正して与えていたことである。このときの初期圧力分布をFig.4(b)に示す。ここでFig.4は装薬厚さ $t_E=40$ mmの場合の圧力分布を示す。これまでの報告⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾では60mm幅の駆動板を用いていたが、今回は工業化にできるだけ近づけることを考慮して120mmと、より大きな面積の爆接材を得ることを目指した。駆動板の板幅が広い場合には、爆轟ガスの左右への散逸は相当減少するものと思われ、板幅の中心付近の金属板の飛翔に関しては、ガスの散逸の効果は考慮しなくてよいと思われる。従って今回の解析では、初期圧力分布は、Fig.4(a)に示すような爆轟ガスの散逸を考慮しない矩形型の初期圧力分布を用いた。

上記の二つの点を考慮して初期の爆轟ガス圧力を算出し、再計算を行った結果がFig.5であり、修正後の計算結果と測定結果はよく一致することがわかる。今回の解析では爆轟ガスの左右への散逸を考慮していないので、これ以上板幅が増える場合にも、解析の結果は同じであることが予想され、本解析法はより大きな面積の爆接においてもそのまま利用できると思われる。

金属板を多層に積層した場合の飛翔速度の変化についても、衝突する金属板の運動量保存則を用いて、容

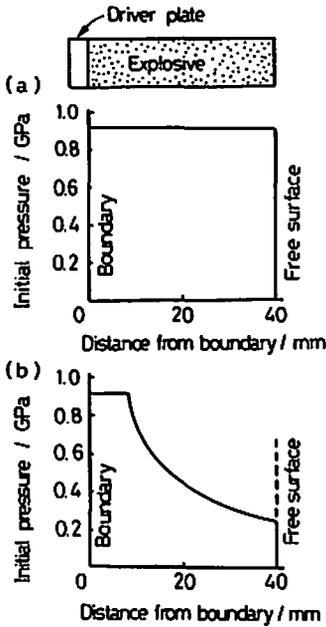


Fig. 4 Hypothetical initial pressure distribution of exploded gas layer in case of thickness of explosive $t_E=40\text{mm}$. (a) and (b) are applied in former⁴⁾ and present analysis, respectively.

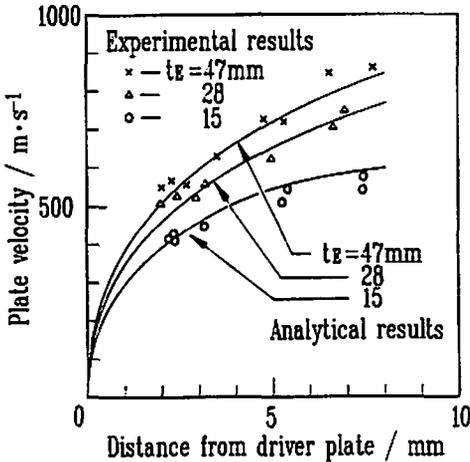


Fig. 5 Comparison of analytical and experimental plate velocity change calculated by modified initial conditions.

易に計算することができる。Fig.6に1.2mm厚さの銅板を3mmの間隙を設けて2枚積層したときの速度変化の解析結果、および2枚目の金属板の速度の計測結果をあわせて示す。第1の衝突後の速度の解析結果は、計測結果よりわずかに高い値を示すものの、両者はほぼ一致しているといえる。

3. A5083/SUS304 鋼の爆接実験

3.1 A5083とSUS304 鋼の直接接合の試み

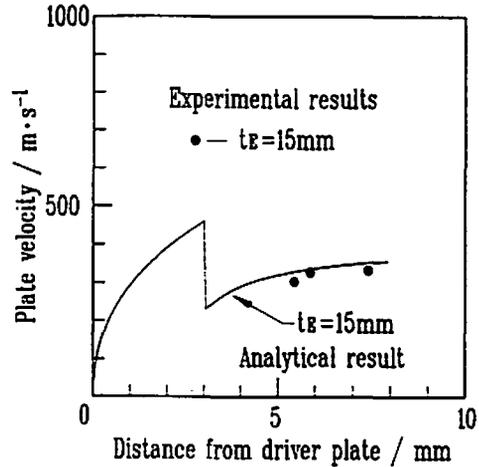


Fig. 6 Comparison of analytical and experimental plate velocity after collision.

Table 1 Experimental conditions for conventional explosive welding of A5083 and SUS304 steel plates

Thickness of explosive t_E/mm	Stand off distance /mm
21	1
28	1, 2, 4, 8
38	1, 2
47	2

まずFig. 1に示したような、通常用いられる2枚の金属板を直接に接合する方法を、A5083とSUS304鋼の接合に用いることの可否を知るために、いくつかの実験条件で爆接実験を行った。このときの実験条件をTable 1に示す。ここでA5083は4mm厚、SUS304鋼は9mm厚と一定とし、駆動板と母材の寸法は120(幅) \times 200(長) mm^2 とした。

Fig. 7に各実験条件における接合の可否をまとめて示す。図中の各曲線は金属板の衝突速度 V_p を表す。図からも明らかなように、いくつか行った実験の中では、はく離強度が評価できたものは1つの試料だけで、この材料の爆接条件の設定は非常に困難であることがわかる。ここで、はく離強度は福田と岩館¹²⁾と同様にRam tensile試験片を用いて測定した。

Al-Mg合金と各種鋼の爆接が難しいことは、これまでも報告されており、Mgの気化が悪影響を及ぼすという考え方¹³⁾、Al-Mg合金と鋼との間における厚い界面層の形成によるという考え方³⁾などが報告されている。著者らは後者の厚い界面層の形成が接合不

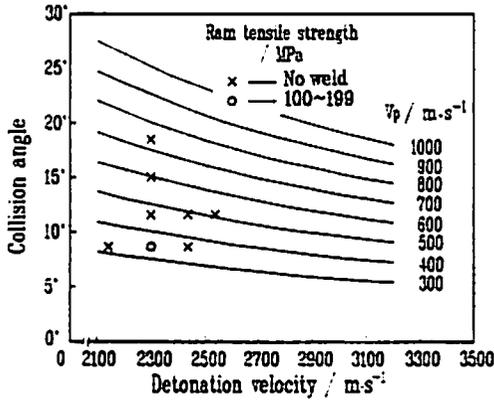


Fig. 7 Welding window for A 5083/SUS 304 clad using conventional explosive welding technique.

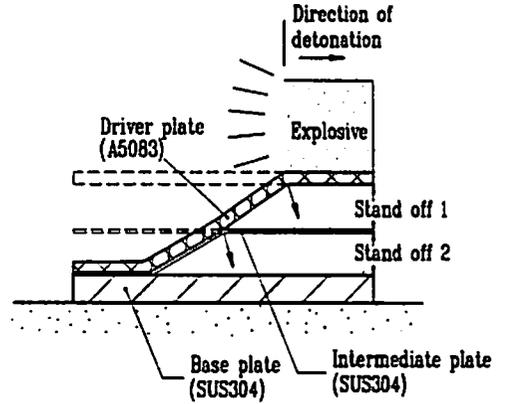


Fig. 8 Schematic illustration of explosive welding process using intermediate metal plate.

良をもたらすと考えているが、このことについては別報にて詳述する。

いずれにせよこの組合せで接合が困難である理由は、衝突時におけるエネルギーの過剰であり、エネルギーを抑えることによってMgの酸化もしくは界面層の形成を抑制することができるはずである。従って良好な爆接条件を得るためには、衝突によって失われる運動エネルギーを抑制しつつ、金属ジェットを発生するのに十分な衝突速度(もしくは衝突角度)を得ることが必要である。この条件を満たすためには、次で述べるSUS304鋼の中間材を用いる爆接方法は非常に有用であると思われる。

3.2 中間材を用いた A 5083 と SUS 304 鋼の爆接実験

前節で述べたように、A 5083 と SUS 304 鋼の直接接合が困難であることがわかったので、両者の間に SUS 304 鋼の薄板を挿入する新しい爆接方法について検討する。Fig. 8 に本方法の模式図を示す。

2 枚の金属板の衝突によって失われる運動エネルギー

(ΔKE)は以下の式で与えられる⁶⁾。

$$\Delta KE = \frac{m_1 m_2 V_p^2}{m_1 + m_2} \quad (3)$$

ここで m_1 、 m_2 は単位面積当たりの合せ材および被衝突板の質量、 V_p は合せ板の衝突速度である。(3)式からも明らかなように、被衝突板の質量(m_2)を小さくすることによって A 5083 と SUS 304 薄板の接合時のエネルギー損失(ΔKE)を小さくすることができるのがわかる。

中間材を用いる接合実験の実験条件を Table 2 にまとめて示す。SUS 304 鋼同士の接合は容易で、ほとんど問題にならないので、中間材と母材の間隙は 2 mm と一定にした。

Fig. 9 は、0.3 mm 厚さの中間材を用いたときの接合可能な実験条件の範囲を示す。中間材を用いた場合には直接接合の場合と異なり、爆接可能な条件が高飛翔速度側に移行しているものの、接合可能領域は明らかに広がっていることがわかる。直接法と中間材を用いる方法のそれぞれについて、良好な接合が得られた

Table 2 Experimental conditions for A5083/SUS304 clad using SUS304 intermediate plate

Thickness of explosive t_E / mm	Thickness of intermediate plate / mm	Stand off 1 / mm
15	0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1	1, 2, 4
21	"	"
28	"	"
38	"	"
47	"	"

(Stand off 2) = 2 mm

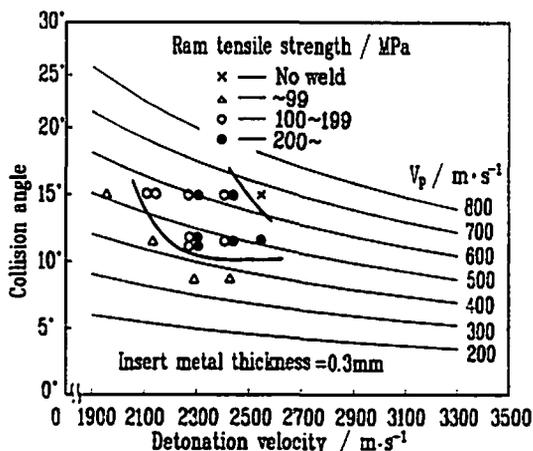


Fig. 9 Welding window for explosively welded A 5083/SUS 304 clad using SUS 304 intermediate plate.

条件での A5083 と SUS304 鋼の界面の光学顕微鏡写真を、Fig. 10 に示す。この写真から、直接法では 15-30 μm 程度の比較的厚い界面層が生じている (Fig. 10 (a)) のに対して、中間材を用いる方法では 10 μm 以下程度の薄い層しか生じていないことわかる (Fig. 10 (b))。以上のような実験事実から、中間材を用いることによって、両金属の接合性を改善できることが伺われる。爆接条件と発生する界面層の組織の関係については、別報にて報告する。

4. 結 言

本研究では、A5083 と SUS304 鋼の爆発圧接のための実験条件の確立を試みた。

まず爆発圧接条件については、装薬厚さによる爆速の変化および板幅の変化に伴う初期圧力分布の変化を考慮する必要があり、このために著者らが従来提案してきた解析の修正を行った。修正した解析を用いて計算した金属板の飛翔速度は、計測結果とよく一致し、本解析の妥当性を示すことができた。そこで本解析を利用して、A5083 と SUS304 鋼の爆接条件の設定を試みた。

A5083 と SUS304 鋼の直接接合実験では、接合可能な実験条件が非常に狭いことがわかったので、両金属板の間に SUS304 鋼の薄板を挿入する新しい実験方法を提案した。本方法を用いることによって、金属板の衝突速度を高く維持したまま、衝突時に失われる運動エネルギーを減少することができることがわかった。このことによって界面層の生成を抑制することができ、両金属の接合可能領域を広くできることが明らかになった。

謝 辞

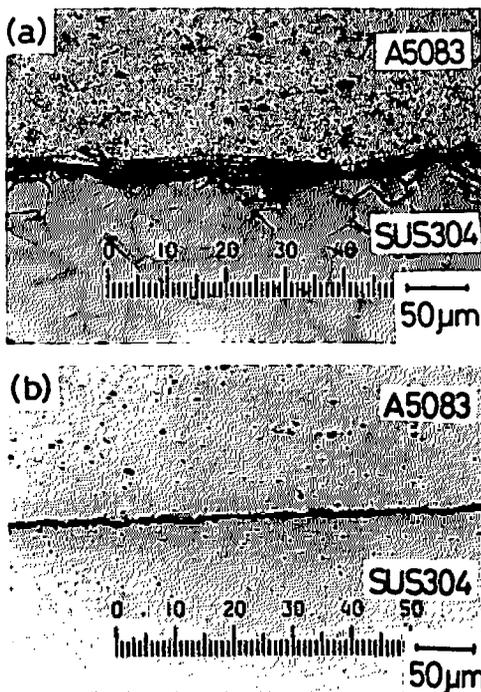


Fig. 10 Optical micrographs of explosively welded A 5083/SUS 304 clad by conventional method (a) and using intermediate SUS 304 plate (b).

本研究は、第20回火薬工業技術奨励会研究助成金によって行われた。また爆発圧接実験に際しては、熊本大学工学部附属衝撃エネルギー実験所 月俣 昇氏の協力を、ピンコンタクト実験に際しては、熊本大学工学部、長野司郎氏の協力を得た。記して深謝申し上げる。

文 献

- 1) 藤田昌大, 千葉 昂, 立川逸郎, 日本金属学会会報, 20, 385 (1981)
- 2) 久保田 彰, 塑性と加工, 28, 1121 (1987)
- 3) H. K. Balakrishna, V. C. Venkatesh and P. K. Philip, Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals (eds., M. A. Meyers and L. E. Murr), Plenum Press, New York and London, P. 975 (1981)
- 4) 藤田昌大, 千葉 昂, 福田 泉, 苅阪浩男, 馬場文章, 真鍋敏之, 工業火薬, 48, 176 (1987)
- 5) K. Hokamoto, L.-Q. Ruan, S. Urugami, M. Fujita and A. Chiba, Proc. 7th Int. Symp., "Use of Explosive Energy in Manufacturing Metallic Materials of New Properties", Czechoslovak Society for Science and Technology, p26 (1988)

- 6) 外本和幸, 藤田昌大, 千葉 昂, 阮 立群, 浦上 進, 工業火薬, 50, 153 (1988)
- 7) 外本和幸, 阮 立群, 山森 実, 千葉 昂, 藤田 昌大, 日本金属学会誌, 54, 809 (1990)
- 8) K. Hokamoto, M. Fujita, A. Chiba and M. Yamamori, Shock Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Metals (eds., M. A. Meyers, L. E. Murr and K. P. Staudhammer), Marcel Dekker Inc., New York and Basel, to be published
- 9) 藤原修三, 日下部正夫, 工業火薬, 34, 276 (1973)
- 10) 滝沢 雄, 伊妻猛志, 恩沢忠男, 工業火薬, 35, 184 (1974)
- 11) R. A. Patterson, ASME PVP, 70, 15 (1982)
- 12) 福田 隆, 岩館忠雄, 鉄と鋼, 76, 1293 (1990)
- 13) 立川逸郎, 石本俊司郎, 溶接学会論文集, 3, 335 (1985)

Establishment of Explosive Welding Condition to Fabricate Hard-to-Weld A5083/SUS304 Steel Clad

by Masahiro FUJITA* Takeshi IZUMA**
Munenori AOYAGI*** and Kazuyuki HOKAMOTO*

Most of metal combinations is weldable by using explosive welding technique, but some of the combinations are known as hard-to-weld, for example, Al-Mg alloy and stainless steel. In this study, explosive welding condition of A5083 Al-Mg alloy and SUS304 stainless steel is established. Since the direct explosive welding of A5083 and SUS 304 is very difficult, a new experimental technique, which interposes a thin SUS304 sheet between driver (A5083) and base (SUS304) plates, are proposed. In such a case, an accurate estimation of collision velocity should be accomplished due to the existence of acceleration of flying plate between small stand-off distances. In the present study, the analysis of explosive welding process is modified with the former analysis (M. Fujita et al. : J. Industrial Explosives Soc., JPN, 48, 176 (1987)) and an adequate explosive welding condition is examined by using this modified analysis.

(*Department of Mechanical Engineering . Kumamoto University, Kumamoto 860, Japan .

**Asahi Chemical Industry Co. Ltd, Shin-asahi-cho, Takashimagun, Siga 520-15, Japan .

***Graduate Student, Kumamoto University, Kumamoto, Japan.)