

Fig. 2 Al/Cu electrical transition joint made by explosive welding technique

ら界面の接合強度が十分でないなどの問題から、純AlやAgあるいはTiなどを両金属の間にインサート材として挿入することによって製造されている。しかし軟らかい純AlやAgでは界面の接合強度を十分に改善することができない。またTiはFig. 1⁵⁾に示す熱膨張曲線から明らかなように、AlとTiの間で大きな熱応力を生じる可能性がある。これらの問題から、Al合金とステンレス鋼の直接接合への要求は非常に高い。

またAl合金と銅の組合せについても、Fig. 2に示すように導電用継手材として用いられている¹⁾ものの、界面反応層が生成しやすいために接合強度に問題が生じる場合が時折、認められる。

そこで本研究では、組成や変形抵抗の異なる4種類のAl合金とステンレス鋼およびAl-Mg合金と銅の組合せについて、母材と同質の中間材を挿入する場合も含めて、いくつかの爆接実験を行った。そして界面反応層の形成の状況の詳細について調べ、さらに反応層厚さと接合強度の関係について明らかにできたので報告する。

2. 実験方法

Fig. 3に通常の爆接法および中間材を用いた爆発圧接実験装置の模式図を示す。ここで駆動板であるAl合金は4mm、母材は9mm厚さのステンレス鋼(SUS304)および銅(C1100)を用いた。駆動板には4種類のAl合金を用い、実験条件の詳細はTable 1に示す。各素材の組成及び機械的性質はTable 2に示す。本研究では、爆薬の装薬厚さ(t_E)、駆動板と中間材の間隙(SO1)の変化および中間材の有無によって実験条

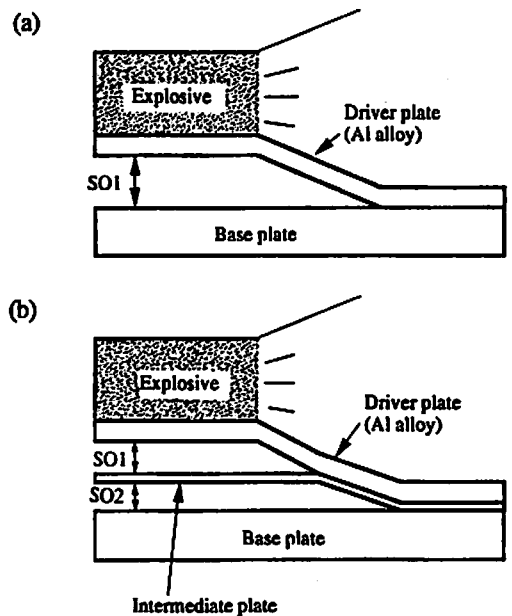


Fig. 3 Set up for conventional explosive welding (a), and by use of intermediate plate (b)

件を制御した。本研究では装薬厚さ(t_E)を14~38mmの間で、駆動板と中間材の間隙(SO1)を1~3mmの間で変化させて実験を行った。なお同一材質の中間材と母材の接合は容易で、実験条件にはほとんど影響されないため、中間材と母材の間隙(SO2)は一定にした。ここで爆薬は爆速2,300m/s程度の粉末状爆薬を用いた。 t_E およびSO1を変化させることによって駆動板の

Table 1 Experimental conditions for explosive welding

Experiment number	Driver plate	Base plate	Intermediate plate (t_1 /mm)	V_p /m·s ⁻¹	ΔKE /MJ·m ⁻²	t_R / μ m	σ_B /MPa
AS1	A1100	SUS304	-	461	1.0	22	92
AS2	"	"	SUS304 (0.3)	"	0.21	3.7	126
AS3	A5083	"	-	"	1.0	12	x
AS4	"	"	SUS304 (0.3)	"	0.21	1.8	259
AS5	A2017	"	-	381	0.68	-	x
AS6	"	"	SUS304 (0.3)	"	0.14	0	182
AS7	A7075	"	-	345	0.58	17	x
AS8	"	"	SUS304 (0.3)	490	0.23	1.4	123
AC1	A5083	C1100	-	441	1.15	15	67
AC2	"	"	C1100 (0.3)	"	0.21	3.7	216
AC3	"	"	-	520	1.58	7.0	146
AC4	"	"	C1100 (0.3)	"	0.31	1.3	200

V_p ; Collision velocity of driver plate

ΔKE ; Kinetic energy lost by collision

t_1 ; Thickness of intermediate plate

t_R ; Thickness of reacted interfacial zone

σ_B ; Ram tensile strength

x; Separation is generated during machining

衝突速度 (V_p) および衝突によって失われる運動エネルギー量 (ΔKE) が変化し、これらが接合に関して重要な因子となるので、それらの値を Table 1 中にまとめて示した。 V_p および ΔKE の値は、すでに報告した 1 次元の差分法によって解析的に求めた⁶⁾。

得られた爆接材は爆轟方向に平行方向に切り出し、界面の光学顕微鏡組織を観察した。生じた界面層の濃度分布は、EPMA を用いて測定し、各元素の特性 X 線の相対強度を補正して求めた。測定条件は加速電圧 20kV、特性 X 線取り出し角は 52.5° であり、分光結

晶は Al および Mg は RAP 結晶、その他の元素については LiF 結晶を用いた。

爆接後の各試料は、中心部の位置から、Fig. 4 に示すような Ram tensile 試験片に加工し、接合界面のはく離強度を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 爆接後の界面組織

爆接後の断面の組織の一例を Fig. 5 に示す。Fig. 5 は A5083 (Al-Mg 合金) と SUS304 の組合せについて、中間材を用いずに直接接合した場合 (a) と、中間材を

Table 2 Constitution and mechanical properties for materials used

Alloy (JIS)	Chemical composition (mass%)				UTS /MPa	Maximum elongation (%)	Hv
	Cu	Mg	Zn	Al			
A1100	0.05-0.2	-	<0.10	>99.0	>157	>4	31
A5083	<0.1	4.0-4.9	<0.25	bal.	275-353	>16	93
A2017	3.8-4.9	0.4-0.8	<0.25	bal.	>353	>15	137
A7075	1.2-2.0	2.1-2.9	5.1-6.1	bal.	>539	>8	181
	C	Ni	Cr	Fe			
SUS304	<0.08	8.0-10.5	18-20	bal.	>520	>40	285
	Cu						
C1100	>99.90				245-314	>15	115

UTS; Ultimate tensile strength

Hv; Micro-Vickers hardness (Load 0.98N)

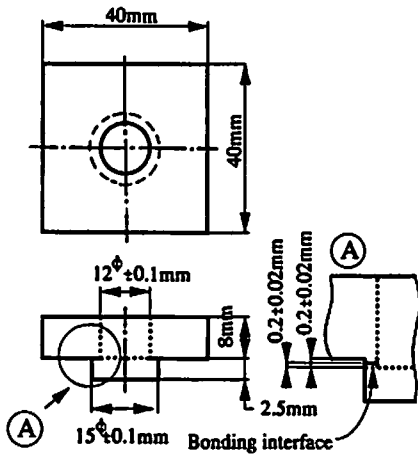


Fig. 4 Dimensions of ram tensile test specimen

用いない場合 (b)についてそれぞれ示す。Fig. 5 (a), (b)の実験条件はそれぞれTable 1の実験番号AS 3およびAS 4である。Fig. 5からも明らかなように、直接接合ではエネルギー過剰によって生じたと思われる厚い反応層が生じているのに対して、中間材を用いた場合には反応層の形成をほとんどなくすることができるのがわかる。

駆動板の衝突によって界面に与えられたエネルギー (ΔKE)は、次式で与えられる³⁾。駆動板が十分に厚

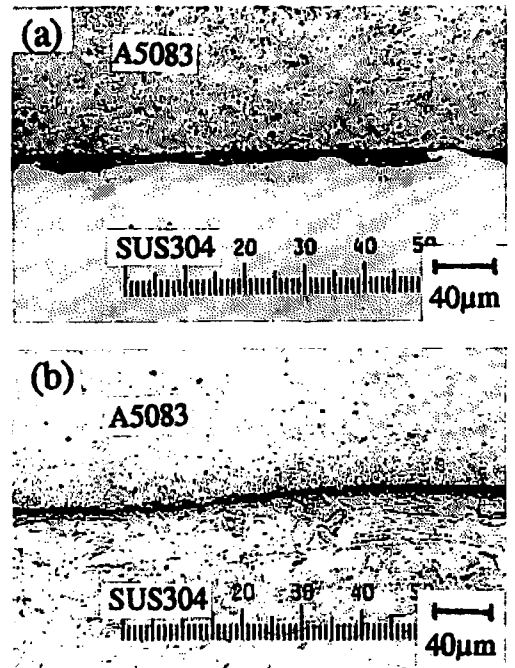


Fig. 5 Explosively welded interface in A5083/SUS 304 clad made by direct welding (a), and by use of intermediate plate (b)

ければ (1) 'の近似式が成り立つので、 ΔKE は被衝突

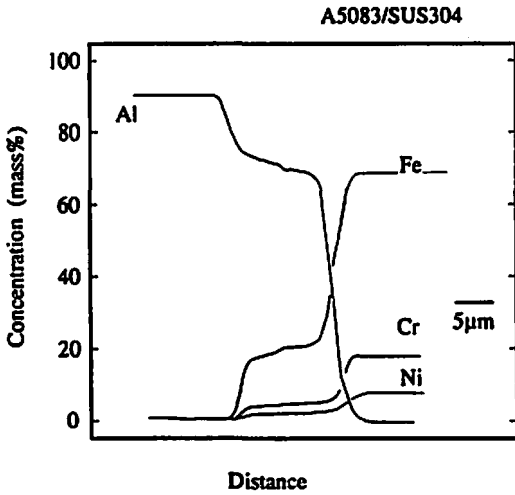


Fig. 6 Concentration profile across welded interface in A5083/SUS304 clad made by direct welding

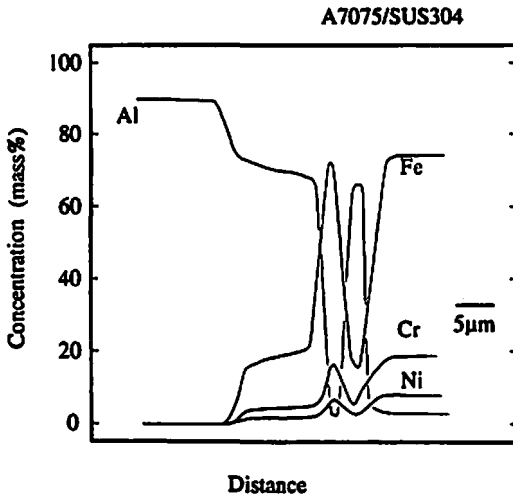


Fig. 7 Concentration profile across welded interface in A7075/SUS304 clad made by direct welding

板の質量にはほぼ比例する。

$$\Delta KE = \frac{m_1 m_2 V_P^2}{2(m_1 + m_2)} \quad (1)$$

$$\approx \frac{1}{2} m_2 V_P^2 \quad (1)'$$

ここで m_1 , m_2 は衝突金属板および被衝突板の単位面積当りの質量, V_P は金属板の衝突速度である。

上式から, 薄い中間材を用いることによって, これにはほぼ比例した形で界面に与えるエネルギーを減少させることができ, 反応層を薄くすることができることが説明される。

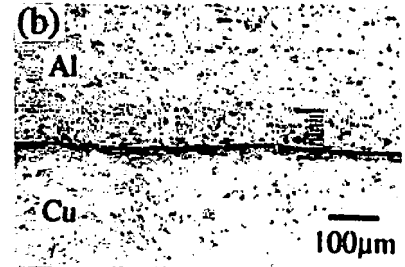
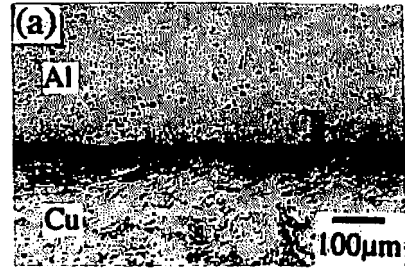


Fig. 8 Explosively welded interface in Al/Cu clad made by direct welding (a), and by use of intermediate plate (b)

Fig.6は, 上述の直接接合の場合 (Fig.5 (a))について, 接合界面部を横切る成分元素の濃度プロファイルを示す。Fig.6から, 反応層はAlを70mass%程度含むステンレス鋼成分との混合組織であることがわかる。Fig.7はA7075とSUS304鋼の組合せについての結果の一例であるが, 反応層内部はほとんど均一なAl濃度を示すが, 一部にステンレス鋼の部分が数 μm 程度の島状の組織として存在する場合が認められた。このような島状の組織は, 他のいずれのAl合金とステンレス鋼の爆接材の反応層にも認められたが, その量はわずかにステンレス鋼付近に生じている程度であった。

この反応層は, 爆接時に界面に与えられたエネルギーによって界面が熔融し, 銅とAlが混りあった液相を作り, その凝固過程でAlと Fe_2Al_3 に分解したものであることはすでに報告した通りである³⁾。菊池ら⁷⁾, Balakrishna⁸⁾, 福井ら⁹⁾も, 爆接したAlと銅のクラッドについて, これと同様なAlと金属間化合物の混在組織が生じることを報告している。

Al合金と銅の組合せの場合に生じた界面組織をFig.8に示す。接合界面はAl合金とステンレス鋼の組合せの場合とは異なって, 爆接においてよくみられる波状の組織を示した。反応層の形成に関しては前述と同様で, 中間材を用いない場合にはFig.8 (a) (実験番号AC3) に示すように厚い反応層を形成し, 中間材を用いた場合にはFig.8 (b) (実験番号AC4) のように反応層はほとんど生じなかった。反応層の濃度プロ

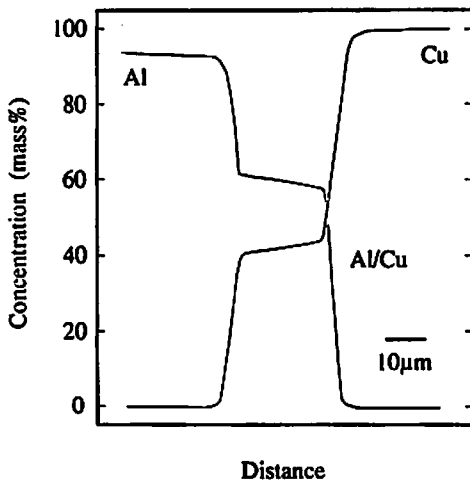


Fig. 9 Concentration profile across welded interface in Al/Cu clad made by direct welding

ファイルをFig. 9に示す。この反応層はAlを約60 mass%含んでおり、Al合金とステンレス鋼の組合せの場合と同様、Al合金と銅の成分が熔融し、AlとCuAl₂に分解した組織であった。

3.2 反応層形成に関する簡単な考察

爆接材の界面反応層の組成に関しては、石井ら¹⁰⁾によって理論式が提案されており、石井ら¹⁰⁾によると、衝突によって生じる2種類の金属板(添字の1,2)の熔融量の比は、界面部に熱が与えられたとしてそれが伝導し、熔融したとする場合、次式で与えられるとしている。

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{\rho_1 c_1 \lambda_1}{\rho_2 c_2 \lambda_2} \right)^{0.5} \cdot \frac{c_2 (T_{M2} - T_0) + H_2}{c_1 (T_{M1} - T_0) + H_1} \quad (2)$$

ここでMは熔融量、ρは密度、cは比熱、λは熱伝導率、Hは潜熱である。また各定数の値については、衝撃状態下での推定は困難であるので、常圧における値を用いた。T_Mは融点、T₀は室温である。一方、また爆接における熔融、凝固はごく瞬間的な現象であり熱伝導によらないと考えると、熔融比は次式で示される。

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{c_2 (T_{M2} - T_0) + H_2}{c_1 (T_{M1} - T_0) + H_1} \quad (3)$$

上記の(2)、(3)式をそれぞれ用いて組成の予測値を計算した結果と、EPMAによる濃度分析結果との比較をTable 3に示す。Table 3中ではAl合金/鋼の組合せについても結果を示す。

前論文³⁾では簡単のために、純Alとステンレス鋼の場合についてのみ計算を行ったが、今回は各Alの熱伝導率を考慮して再計算を行った。その結果、(3)式を用いて計算したAl合金とステンレス鋼に生じる反応層のAl濃度は50mass%程度であり、実測されたAl濃度の値(70~85mass%; Table 3参照)と比べてかなり低い。また熱伝導を考慮した場合においても、(2)式から求めたAl割合は64~76mass%程度であり、実測値よりも低い値しか示さなかった。

Alと鋼の組合せは、融点や密度あるいは変形抵抗など、諸性質の大きく異なる金属組合せである。このような場合、爆接時の衝突点近傍での変形の様相が両金属で大きく異なると思われる。すなわち金属ジェット形成といった著しい塑性変形は、変形抵抗の小さいAl側に多く生じると思われる。ジェットにより金属表面は浄化され、その後の高圧力、高温状態のもとで接合が達成される。この場合、熔融はおもに変形

Table 3 Comparison of calculated and measured Al content at reacted interfacial zone

Combination	Measured Al content (mass%)	Calculated Al content by eq. (2) (mass%)	Calculated Al content by eq. (3) (mass%)
A1100/SUS304	83-85	76.0	51.5
A5083/SUS304	70-75	64.5	"
A2017/SUS304	75	68.4	"
A7075/SUS304	70-75	64.3	"
A5083/Cu	57-60	29	40

の集中するAl側で生じる。それに付随する形で鋼の成分が幾分か溶解すると考えると、実測値が2つの計算値より高い値を示すことを説明できる。このことはステンレス鋼とAl合金の変形抵抗の相違が、反応層の形成に大きく影響を及ぼすことを示している。

Al合金と鋼の爆接に際しても、生じている現象は上述のAl合金とステンレス鋼の場合とほぼ同じであった。Table 3に示すように、この場合も(2)、(3)式による計算値より高いAl濃度の反応層を形成しており、変形抵抗の低いAl側に変形が集中することによって、Al側がより多く溶解したためにこのような層が生じたものと考えられる。

3.3 反応層厚さと接合強度

生成する反応層が厚い場合には、この層が硬脆な金属間化合物を含んでいるので、接合強度の測定時に破断はこの部分を起点にして生じると考えるのが妥当であると思われる。しかしながら本研究の場合のように、生じた反応層が金属間化合物とAlの混在組織であることを考えると、反応層が金属間化合物だけの場合と比較して、多少は良好な界面接合を有することが期待できると思われる。実際、反応層の硬度は400~500 Hv程度で、ステンレス鋼の硬度(300Hv程度)と比べても著しく硬化しているとは言いがたい。ちなみに熱処理によって生じたAl/ステンレス鋼に生じる反応層(すべて金属間化合物からなる)の硬度は1000Hv以上であった⁵⁾。

各実験における反応層厚さおよびRam tensile試験によって測定した接合強度はTable 1中に記した。いずれのAl合金を用いる場合についても、中間材を用いた場合には反応層の形成をほとんど無くすることができ、高い接合強度が得られることが知られる。ただし、用いたAl合金中で最も硬いA7075とステンレス鋼の接合の場合の接合強度は120MPa程度で、A7075合金の引張強度と比べて十分な接合強度を得ることは難しかった。

Al合金と鋼の組合せの場合には、類似の条件では明らかに中間材を用いた場合の方が高い接合強度を示した。しかし直接接合の場合でも条件をうまく設定すれば、140MPa以上の接合強度が得られることもあった。これまでAlと鋼の爆接材は直接法によっても実用材が得られていたが、よりよい界面特性が必要となる場合には、今回報告した中間材を用いる方法がより有効であると考えている。

4. 結 言

従来接合条件の設定が難しいとされていた、Al合金とステンレス鋼およびAl合金と鋼の組合せに関して、母材と同種の中間材を用いる実験方法を提案し、界面組織及び接合強度の改善について検討して以下の結果を得た。

- (1) 中間材を用いることによって、衝突に伴って失われる運動エネルギーを小さくすることができ、これによって接合強度を劣化させる界面反応層の形成を抑制できることが知られた。
- (2) 界面反応層の組成は、界面に与えられたエネルギーが両層をどの様に溶かすかについて考慮した計算結果より高いAl濃度を示した。これは爆接時に変形抵抗の低いAl合金側に変形が集中し、より多くのAl成分が溶解したことによると考えられた。
- (3) 中間材を用いることによって、反応層厚さを薄くすることができた。このことによって界面の接合強度は改善され、良好な界面特性を有する爆接材が得られることがわかった。

謝 辞

本研究は、第22回火薬工業技術奨励会研究助成金によって行われた。また熊本大学工学部 石谷幸保氏に実験協力を頂いた。ここに記して深謝申し上げる。

文 献

- 1) 久保田彰, 塑性と加工, 28, 1121 (1987)
- 2) 立川逸郎, 石本俊一郎, 溶接学会論文集, 3, 335 (1985)
- 3) 外本和幸, 伊妻猛志, 安藤豪修, 藤田昌大, 溶接学会論文集, 11, 16 (1993)
- 4) 伊妻猛志, 熊本大学博士論文, (1993)
- 5) 千葉 昂, 外本和幸, 西田 稔, 日本金属学会誌, 53, 1268 (1989)
- 6) 藤田昌大, 伊妻猛志, 青柳宗伯, 外本和幸, 工業火薬, 48, 176 (1987)
- 7) 菊池迪夫, 武田裕正, 諸住正太郎, 軽金属, 34, 165 (1984)
- 8) 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), P. 975 (1981), Plenum Press.
- 9) 福井利安, 難波圭三, 杉山禎彦, 溶接学会誌, 39, 1315 (1970)
- 10) 石井勇五郎, 恩沢忠男, 生沼利充, 溶接学会誌, 38, 1372 (1969)

Formation of reacted interfacial zone and improvement of bonding strength in aluminum alloy clad stainless steel and aluminum alloy clad copper plate using explosive welding technique

by Kazuyuki HOKAMOTO*, Takeshi IZUMA** and Masahiro FUJITA*

The combinations of Al alloy and stainless steel, and Al alloy and copper, are tried to be welded by the use of explosive welding technique. So far, these combinations are known as hard-to-weld materials, but the bonding property at the interface is fairly improved by using a intermediate plate which is the same material as the base plate. In case of the direct welding, as conventionally used, a thick reacted interfacial zone is generated and the concentration of Al at the zone showed higher value than the expected Al content. The higher Al content phase is generated due to a large amount of deformation at the Al side. The thickness of the reacted zone is able to be decreased and the bonding strength is increased by the use of the intermediate plate.

(*Department of Mechanical Engineering, Kumamoto University,
2-39-1 Kurokami, Kumamoto, 860, Japan.

**Aibano Plant, Asahi Chemical Industry Co.Ltd.,
Shin-asahi-cho, Takashima-gun, Shiga 520-15, Japan.)