

アルミクラッド鋼を用いた AI と鋼の接合

Spot Welding of Aluminium and Steel Sheet with Insert of Aluminium Clad Steel Sheet

泰山正則/Masanori Yasuyama・総合技術研究所 薄板研究部

福井清之/Kiyoyuki Fukui・総合技術研究所 薄板研究部 主任研究員

小川和博/Kazuhiro Ogawa・本社 人材開発室 参事 工博

高 隆夫/Takao Taka・本社 企画部 参事

要 約

アルミニウムと鋼のスポット溶接において、あらかじめ圧延法により接合したアルミクラッド鋼をインサートし接合する方法を提案した。本接合技術を用いることにより、アルミニウム合金での母材破断を示す十分な継手強度が得られることを示した。加えて、アルミニウム合金同士の接合界面を有するにも関わらず、溶接時の鋼材の発熱を利用し、アルミニウム接合界面を接合することが可能であるため、従来の鋼用スポット溶接機が適用可能という特徴を有する。本技術は、従来の車体組立スポット溶接設備を利用できる、信頼性の高い、簡便なアルミニウムと鋼の接合技術として鋼とアルミニウムの共存を図るうえで期待される。

Synopsis

The spot welding of aluminium and steel sheet with an insert of aluminium clad steel sheet was investigated. This study was conducted considering the application to automotive body fabrication, with the objective of decreasing weight. The mechanical properties of spot welded joint of aluminium and steel sheet with and without the insert of aluminium clad steel sheet were measured and the microstructures of joints welded by this process were observed. Two nuggets of aluminium to aluminium and steel to steel were obtained independently by this process. These two nuggets and the clad interface utilizing hot rolling contributed to maintaining the joint strength.

It was clarified that the spot welded joint using an insert of aluminium clad steel sheet has excellent tensile strength in cross tension tests and fractured in the base metal of aluminium alloy.

1. 緒 言

近年、環境保全や省エネルギーの観点から、自動車、鉄道車両など軽量化が求められており、アルミニウム、マグネシウム、プラスチックなど軽量材料の活用が検討されている。その中でもアルミニウムは他の候補材と比べ、加工性、リサイクル性に優れることから、注目され車体の部材への適用拡大が期待されている。

しかし、アルミニウムの経済性、強度、溶接性等を考慮すると鋼部材をそのままアルミニウムに置き換えることは、技術的な課題が多く、軽量、高耐食性というアルミニウムの特性を生かし、鋼と併用されと考えられる。従って、信頼性の高いアルミニウムと鋼の異材接合技術の確立が重要な技術課題の一つであるが、アーク溶接に代表されるような熔融溶接により、両者を溶接すると脆弱な Fe-Al 系金属間化合物層が形成され、信頼性のある継手部が得られ

ない。従って、アルミニウムと鋼の接合には、圧延接合¹⁾、爆着、摩擦圧接²⁾などのいわゆる固相接合法に限られているのが現状であるが、これらの接合法は薄板を対象とする車体組立に適しているとはいえない。本報告では、薄鋼板の組立溶接として広く用いられているスポット溶接法を取り上げ、あらかじめ圧延にて接合した AI/鋼薄クラッド鋼板をトランジションピースとして用いるアルミニウムと鋼の異材接合技術³⁾について紹介する。

2. アルミニウムと鋼の接合における課題

2-1 アルミニウムと鋼の抵抗溶接について

本稿において取り上げたスポット溶接（抵抗溶接）では、接合材に通電し、抵抗発熱により接合界面を熔融させ、接

合するところに特徴があり、接合材の電気抵抗、熱伝導度、融点などの物性によりそれぞれの金属特有の溶接条件を有する。第1表、第2表には、アルミニウムと鋼の物性値、スポット溶接条件の比較⁴⁾を示す。このように、アルミニウムは、鋼に比べ、熱伝導度が高く(約4.4倍)、電気抵抗値(比抵抗)が小さい(約1/3.6)特徴を有する。このため、アルミニウム同士のスポット溶接での適正条件では、鋼同士のスポット溶接条件等比べ、溶接時間で1/2~1/3程度、溶接電流で3~4倍が必要とされ、アルミニウムの接合では、通常の鋼用の溶接機と比べ、大容量な溶接機が用いられている。アルミニウムと鋼を重畳させ通電加熱するスポット溶接では、アルミニウム、鋼両者をそれぞれの適正な温度に抵抗加熱することは極めて難しいといえる。

第2表 アルミニウムと鋼のスポット溶接条件の比較

Table 2 Comparison of welding condition between aluminium to steel

	Thickness (mm)	Welding conditions		
		Current (kA)	Time (cycles)	Force (N)
Steel	0.5	6.0	6	1 324
	1.0	8.8	10	2 207
	2.0	13.3	20	4 611
Aluminium	1.0	33.0	3	3 434
	2.0	45.0	7	6 475

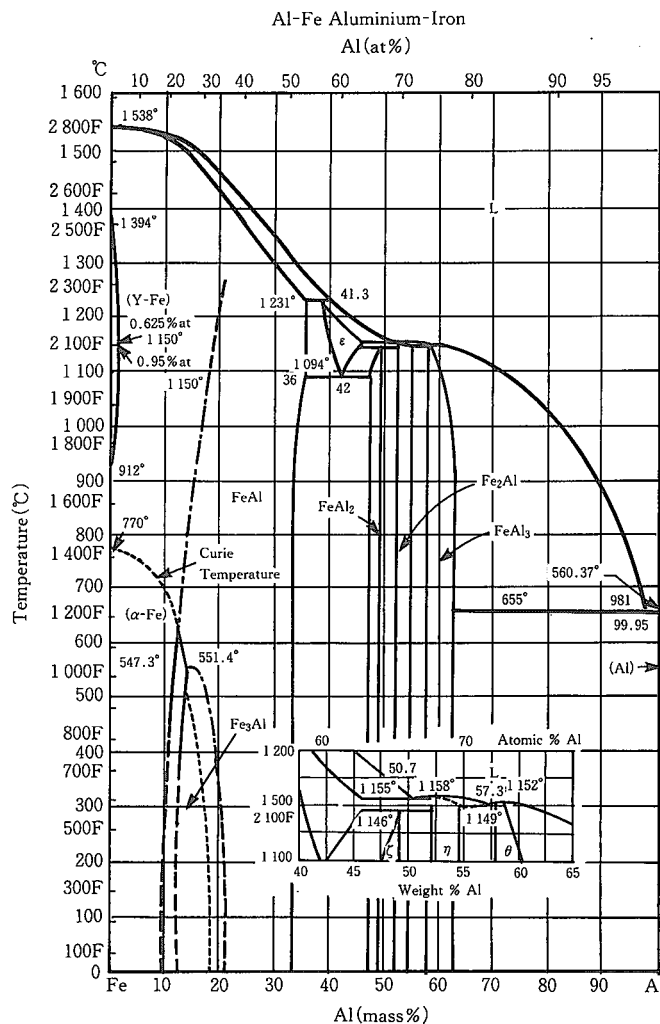
2-2 Al/鋼異材接合界面における課題

第1図は、Fe-Al二元系平衡状態図⁵⁾を示す。状態図上、

第1表 アルミニウムと鉄の物性値の比較

Table 1 Comparison of physical properties between aluminium and iron

	Melting point (°C)	Specific heat (J/kg·°C)	Thermal conductivity (J/m·s·°C)	Resistivity ($\mu\Omega \cdot m$)
Iron	1 540	460	50	0.27
Aluminium	660	920	220	0.97



第1図 Al-Fe 二元系平衡状態図

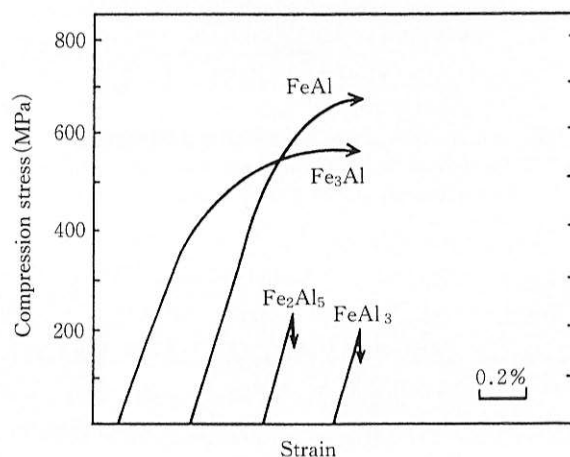
Fig.1 Equilibrium phase diagram for Al-Fe binary system

Fe-Al 二元系には、 Fe_3Al 、 FeAl 、 Fe_2Al_5 、 FeAl_3 等の金属間化合物が存在する。これらの金属間化合物の機械的性質について調べた結果を第3表及び第2図に示す³⁾。 FeAl_3 及び Fe_2Al_5 相は、それぞれビッカース硬度で、892, 1013HVと高い値を示し、ビッカース圧痕の端部から亀裂を生じるような極めて脆性的な相である。一方、 FeAl 、 Fe_3Al 相は、ビッカース硬度がそれぞれ470, 330と上記二相と比べると比較的低い値を示し、圧縮試験では、0.5%の歪み量では、破壊しなかったことから金属間化合物としては、 FeAl 、 Fe_2Al_5 相と比べて高い延性・靱性を有すると考えられる。

ところで、Al/鋼、チタン/鋼等の異種金属の接合界面では、溶接時に溶融相を生じた場合や、溶融しないまでも高温に加熱されることにより原子の相互拡散が起こり、金属間化合物相が形成されることが知られている。第3図には、圧延接合法により接合したAl/鋼接合界面を熱処理し、接合界面に形成される金属間化合物相の厚さと接合界面のせん断強度の関係について調べた結果³⁾を示す。圧延接合法により接合されたアルミニウム/鋼の接合界面では、2000倍のSEM観察では、界面に金属間化合物相の形成は認められず、60MPaという高いせん断強度を示すが、第3図に示すように熱処理により界面の金属間化合物が成長するため、接合界面の強度は、急激な低下を示すことがわかる。このときに接合界面に形成されている主相は、EPMA

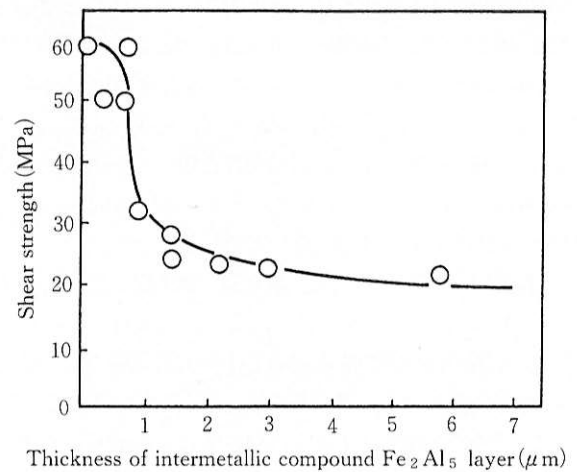
第3表 Al-Fe金属間化合物の硬さと破壊靱性値
Table 3 Hardness and fracture toughness of Al-Fe compounds

	Vickers hardness	K_{IC} (MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$)
FeAl_3	892	2.15
Fe_2Al_5	1013	2.30
FeAl	470	
Fe_3Al	330	



第2図 Al-Fe 金属間化合物の圧縮試験結果
Fig.2 Stress-strain curves in compressive test of Al-Fe intermetallic compounds

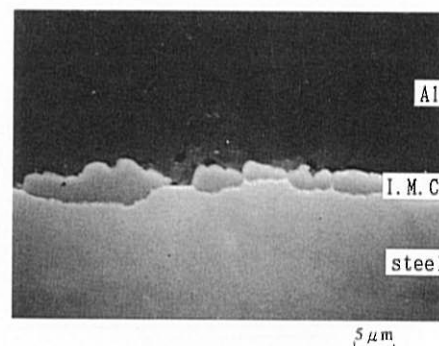
による分析結果(第4図)から、 Fe_2Al_5 相であった。このように異材界面における接合強度確保のためには、接合界面に形成される金属間化合物相の成長を抑制することが重要な課題となる。



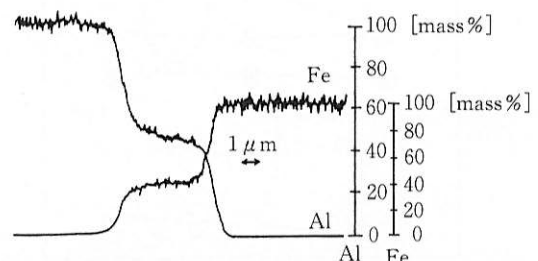
第3図 アルミ/鋼接合界面強度に及ぼす金属間化合物の厚さの影響

Fig.3 Effect of thickness of intermetallic compound layer at clad interface on shear strength of steel/Al clad sheet

a) SEM image



b) EPMA analysis

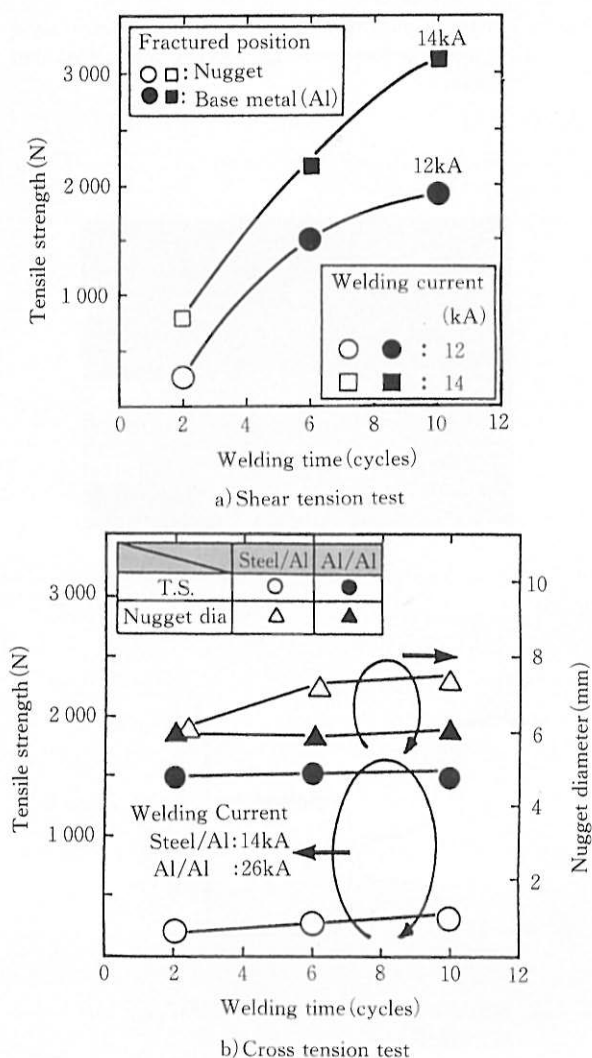


第4図 熱処理後のアルミ/鋼接合界面組織と EPMA による線分析結果

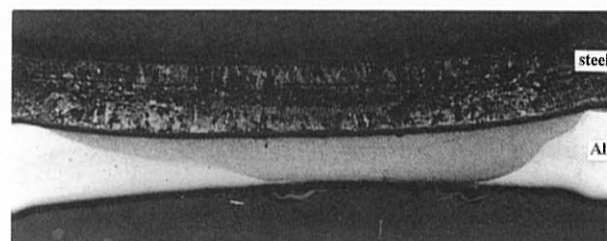
Fig.4 Microstructure and distribution of Fe and Al content by EPMA in clad interface of steel/Al heated at 873K for 10s

3. アルミニウムと鋼のスポット溶接

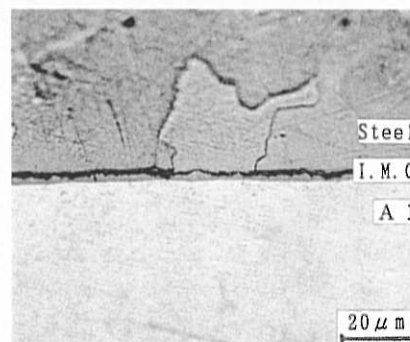
第5図には、鋼板とアルミニウム合金を重ね合わせ、スポット溶接により接合した継手の引張せん断試験結果と十字引張試験結果を示す。スポット溶接により接合した場合には、破断荷重は、引張せん断試験では、高い継手強度（1500N以上）を有し、アルミニウム合金での母材破断を示した。しかし、十字引張試験では、引張せん断試験にて、高い継手強度を示した溶接条件を用いても得られた破断荷重は、400N程度でありアルミニウム合金同士の接合材（1500N程度）と比べ、極めて低い値を示し、接合界面での脆性的な破断を生じた。第6図、第7図には、溶接電流16kA、溶接時間6サイクルの条件にて接合したアルミニウムと鋼の接合部の断面組織と十字引張試験による破面組織をそれぞれ示す。接合部では、融点の低いアルミニウムが一方的に溶融し、アルミニウム側にのみ成長したナゲットが観察されていた。このようにスポット溶接によりア



第5図 アルミ／鋼スポット溶接継手の引張試験結果
Fig.5 Tensile strength and nugget diameter of steel/Al and Al/Al spot welding joints

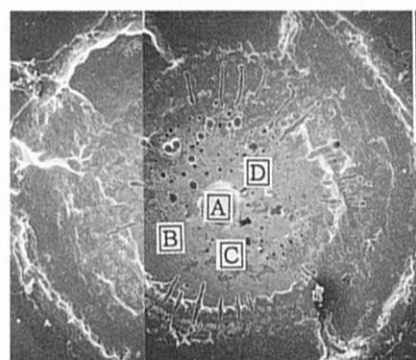


a) Cross section



b) Steel/Al interface

第6図 アルミ／鋼スポット溶接部の断面組織
Fig.6 Microstructure in cross section of steel/Al spot welding joint with welding time of 6 cycles and welding current of 16kA



	A	B	C	D
Al(mass%)	1.2	56.0	96.9	89.7
Fe(mass%)	98.8	44.0	3.1	10.3

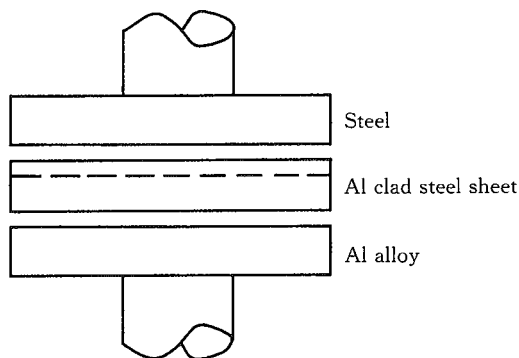
第7図 アルミ／鋼スポット溶接部のアルミ側破面組織
Fig.7 Fracture surface and analysis of Al side surface after cross tension test of steel/Al spot welding joint

ルミニウム母材のみが、溶融凝固するのは、アルミニウムが鋼と比べ、熱伝導率が高いために、鋼の抜熱体として働き、さらに、融点が低いために溶融したものと考えられる。また、ナゲットの中央部の接合界面には、第6b図に示すように内部に亀裂を有する脆弱な厚さ2～5μm程度の生成層が観察された。この相は第7図に示すように破断面のEDXによる定量分析により、Fe₂Al₅金属間化合物の化学量論組成とはほぼ一致する組成が測定された。接合界面に金

属間化合物層が形成されると前述したように、高い継手強度が得られなくなると推察される。

4. クラッド鋼を用いたアルミニウムと鋼の接合

鋼とアルミニウム合金のスポット溶接では、接合界面に脆弱な Fe_2Al_5 金属間化合物を生じるために高い継手強度を得ることが困難であることがわかった。そこで、第8図に示したようにあらかじめ熱間圧延法により接合したアルミクラッド鋼を鋼板とアルミニウム合金薄板の間にインサート材として挿入し、スポット溶接する方法にて検討した。本接合法は、鋼とアルミニウムの間にアルミクラッド鋼をインサートすることにより、接合面を鋼／アルミニウムから鋼／鋼とアルミニウム／アルミニウムの同種金属同士の接合に置き換えることができるという特徴を有する。



第8図 アルミクラッド鋼を用いた Al と鋼の溶接法
Fig.8 Schematic illustration of spot welding with an insert of aluminium steel sheet

4-1 実験方法

接合用の供試材として、厚さ1.0mmの Al-Mg5000系アルミニウム合金 (JIS A5052)、厚さ0.8mmの冷延鋼板を用いた。供試材の化学組成を第4表に示す。インサート用のクラッド鋼としては、厚さ1.0mmの熱間圧延により接合した純アルミニウム／炭素鋼クラッド板 (純アルミニウム側0.7mm) を $1.0^{\circ} \times 30^{\circ} \times 30^{\circ}$ に切断して用いた。

スポット溶接は、第8図に示すように鋼板とアルミニウム合金薄板との間にクラッド鋼をインサートし、単相交流式のスポット溶接機を用い、第5表に示す溶接条件にて行った。

第5表 スポット溶接条件
Table 5 Spot welding conditions

Welding current	8～18kA
Welding time	2～10cyc. (60Hz)
Welding force	1 960N
Electrode configuration	Dome Radius type
Electrode materials	Cu—Cr

スポット溶接により接合した鋼とアルミニウム合金の異材接合継手について、常温にて、引張せん断試験 (JIS Z3136)、十字引張試験 (JIS Z3137) の二種類の引張試験を行い、その最大破断荷重を測定することによって、継手強度を評価した。スポット溶接した継手を切断し、その断面を研磨後、硝酸により腐食し、光学顕微鏡、SEMによる組織観察及び EPMA、EDX による元素分析を行った。

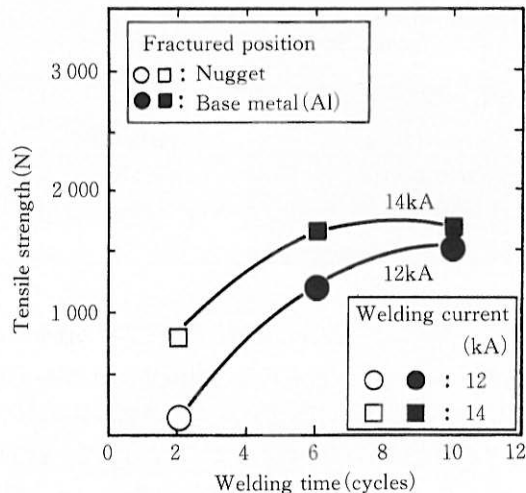
4-2 クラッド鋼を用いたアルミニウム／鋼スポット溶接継手の強度

第9図に鋼板とアルミニウム合金薄板の間にアルミクラッド鋼をインサートしたスポット溶接継手の十字引張試験結果を示す。溶接電流12～14kAの範囲では、溶接時間6～10サイクルの溶接条件で、アルミニウム合金薄板内での母材破断を示し、そのときの破断荷重は1 000N以上 (クラッド鋼を用いない場合の約3～4倍) の高い値を示した。

一般に、アルミニウムは鋼と比べ、電気抵抗が低く、熱伝導が高いためにスポット溶接などの抵抗溶接では、鋼同士の溶接に比べ短時間に大きな溶接電流 (たとえば22～30 kA 程度) を用いて溶接する必要があるとされている。しかし、アルミクラッド鋼をインサート材として用いる方法では、溶接時間6～10サイクル、溶接電流12～14kA という鋼同士のスポット溶接に近い条件で、十字引張試験においてアルミニウム合金薄板内での母材破断を示していることがわかる。一方、溶接時間が短く溶接電流が大きい溶接条件、たとえば溶接時間2サイクル、溶接電流16kA ではナゲットの成長が不足し、高い継手強度が得られなかった。また、溶接時間6～10サイクルの範囲では、16kA 以上の高い溶接電流でアルミニウム同士の接合側でのちりの発生が顕著となり、継手強度が低下する傾向が認められた。

第4表 供試材の化学成分組成
Table 4 Chemical compositions of material used

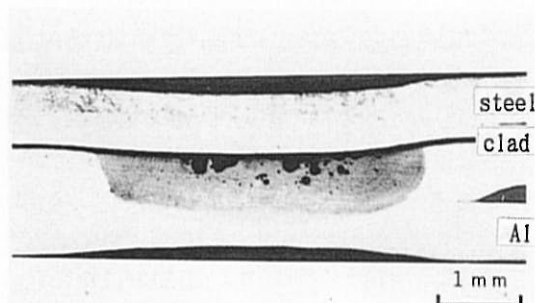
(mass%)								
Materials	Fe	C	Mn	P	S	Nb	Ti	Al
SPCD	Bal.	0.02	0.15	0.015	0.003	<0.001	0.052	0.038
Materials	Al	Cu	Mg	Si	Mn	Cr	Ti	Fe
A5052	Bal.	0.33	4.55	0.02	0.13	0.04	0.04	0.09



第9図 クラッド鋼を用いたアルミ／鋼溶接継手の引張強さ
Fig.9 Tensile strength in cross tension test of steel/Al spot welding joint with an insert of Al clad steel sheet

4-3 クラッド鋼を用いたアルミニウム／鋼スポット溶接継手の接合界面組織

アルミクラッド鋼をインサート材として14kA、6サイクルの溶接条件でスポット溶接した接合部の断面組織の一例を第10図に示す。

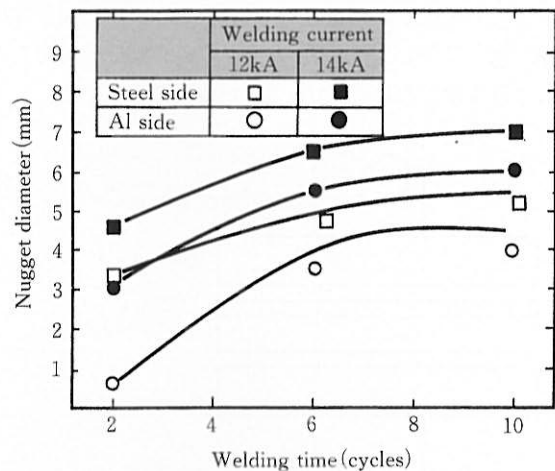


第10図 クラッド鋼を用いたアルミ／鋼溶接部の断面組織
Fig.10 Cross section of steel/Al spot welding joint with an insert of Al clad steel sheet with welding time of 6 cycles and welding current of 14kA

本接合によると一回の溶接で、鋼同士の接合面でのナゲットとクラッド界面からアルミニウム合金側の接合面に成長したナゲットの二つが観察された。アルミニウム側のナゲット内には、アルミニウム同士の溶接にて観察されるような母材中の水素に起因すると考えられるブローホールが認められた。また、鋼側、アルミ側の接合面に形成されるナゲットはともに第11図に示すように溶接電流、溶接時間の増加とともに成長する傾向を示し、アルミニウム、鋼それぞれの接合界面にて $4 \times \sqrt{t}$ (t : 板厚) 以上の十分なナゲットの成長が認められた。

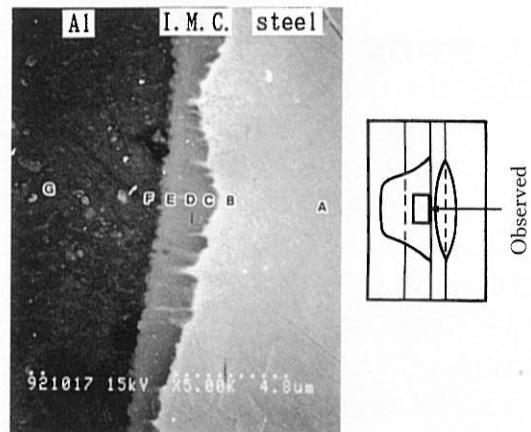
一方、マクロ的には、板厚方向での EPMA による線分析の結果、鋼同士のナゲット内への Al の混入や、アルミニウム同士のナゲット内への Fe の混入は認められなかった

ことから、ナゲット内全域での Fe-Al 系金属間化合物の形成による脆化は生じていないと考えられた。インサート材として用いたアルミクラッド鋼のクラッド界面では、スポット溶接による熱影響を受け組織変化を生じている可能性があるため SEM による観察及び EDX による組成分析を行った。第12図に溶接後のクラッド界面の断面組織と生成層の定量分析結果を示す。熱間圧延法による接合界面では、圧延接合時には、クラッド界面では、金属間化合物等の生成相は、全く認められなかったが、スポット溶接後のアルミクラッド鋼の界面では、溶接時の熱影響により Fe_2Al_5 相と考えられる厚さ約 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ の金属間化合物相の形成が認められた。それにも関わらず十字引張試験において、優れた接合強度が得られた理由については後述する。



第11図 クラッド鋼を用いたアルミ／鋼溶接部におけるナゲット成長挙動

Fig.11 Nugget growth in steel/Al spot welding joint with an insert of Al clad steel sheet



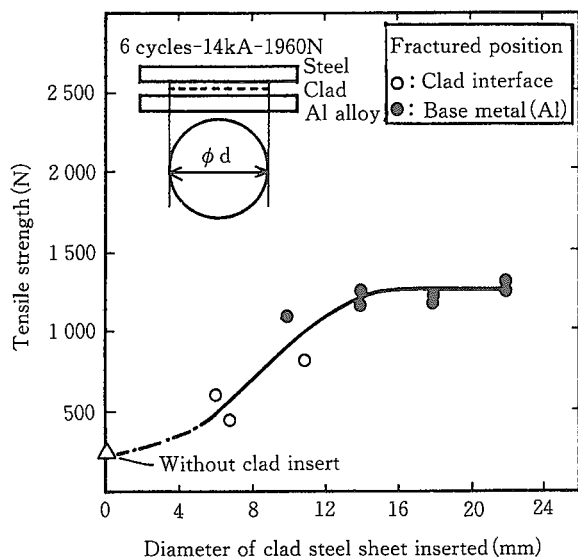
Analysis site	A	B	C	D	E	F	G
Fe(mass%)	99.9	83.3	45.1	43.3	37.6	11.0	3.1
Al(mass%)	0.1	16.6	54.8	56.7	61.8	86.6	93.7
Mg(mass%)	0	0.1	0.1	0	0.6	2.4	3.2

第12図 スポット溶接後のクラッド界面組織

Fig.12 Microstructure and chemical compositions at clad interface in steel/Al spot welding joint with an insert of Al clad steel sheet

4-4 継手強度に及ぼすクラッド鋼の面積の影響

外径の異なる円盤状のアルミクラッド鋼をインサートして、鋼板とアルミニウム合金をスポット溶接し、継手強度を評価した。結果を第13図に示す。継手強度は、インサートしたクラッド鋼の外径が14mmまでは、外径が大きくなるほど、高くなる傾向が認められた。十字引張試験後の破断位置を観察した結果、インサートしたクラッド鋼の外径が10mm以上では、アルミニウム合金内での母材破断を示したが、クラッド鋼の外径が6mmの場合には、高い継手強度が得られず、クラッド鋼のクラッド界面で破断を生じた。



第13図 継手強度に及ぼすアルミクラッド鋼の大きさの影響
Fig.13 Effect of diameter of Al clad steel sheet inserted on tensile strength in cross tension test of steel/Al spot welding joint

5. アルミニウムと鋼の継手強度確保について

5-1 アルミニウムと鋼のスポット溶接継手

熱間圧延接合後、熱処理した鋼/アルミニウム異材接合界面からも明らかなように、鋼/アルミニウムの直接接合界面に、脆弱な Fe-Al 系の金属間化合物 Fe_2Al_5 が $1\mu\text{m}$ 以上に成長した場合には、高い継手強度が得られなかった。

鋼板とアルミニウム合金を直接スポット溶接した接合界面のナゲット中央部にも厚さ $2\sim 5\mu\text{m}$ の脆弱な金属間化合物が形成されていた。その継手強度は、主にせん断モードの荷重が負荷される引張せん断試験では、高い破断荷重を示したものの、十字引張試験のように引張モードの荷重を受ける場合には、低い荷重で脆性的な破断を生じた。

ところで異材金属の接合界面における金属間化合物の成

長による接合強度への影響については、アルミニウム-銅、鉄-チタンなど多くの組合せにおいて観察されており、これらいずれの界面においても多少の大小はあるものの、金属間化合物の厚さが数 μm 以上になると継手強さを低下させることが報告されている。従って、高い継手強度を確保するためには、鋼/アルミニウム界面における金属間化合物の成長を少なくとも $1\mu\text{m}$ 以下に抑制することが必要であると考えられる。

界面の金属間化合物相を $1\mu\text{m}$ 以下に制御する溶接条件を求めれば良いわけであるが、Fe と Al では第1表に示したように比抵抗、熱伝導率、融点などの物性値が大きく異なっているため以下の問題点があると考えられる。Al は Fe と比較して、比抵抗が小さく、熱拡散率が高い。また、融点は $1/2$ 以下であるので、鋼/アルミニウムのスポット溶接継手では、低電流側の溶接条件では、アルミニウムへの熱伝導により鋼が十分に加熱されないために、ナゲットが十分に成長することができず高い継手強度が得られない。一方、高電流側の溶接条件では、アルミニウム側への伝熱が生じて、鋼側が十分に加熱されるが、同時に、鋼/アルミニウム接合界面で厚さ $1\mu\text{m}$ 以上に金属間化合物が成長するために、高い継手強度が得られなかったものと考えられる。

このようにスポット溶接を用いて、鋼板とアルミニウム合金を溶接した場合には、接合界面の金属間化合物の形成を抑制した状態で金属結合が達成された界面を得ることは困難であると考えられる。

5-2 クラッド鋼を用いたスポット溶接継手

アルミクラッド鋼をインサート材として鋼板とアルミニウム合金を接合した場合には、鋼同士、アルミニウム同士の界面で十分なナゲットが形成される溶接条件において、クラッド界面には、厚さ $2\sim 5\mu\text{m}$ 程度の金属間化合物の形成は認められたが、高い継手強度を有し、アルミニウム合金内での母材破断を示した。一方、鋼板とアルミニウム合金とを直接接合した場合には、低い荷重で金属間化合物内で破壊が生じた。このようにいずれも鋼/アルミニウム界面で、スポット溶接により金属間化合物が生じていたにもかかわらず、クラッド鋼をインサートした方法と直接接合法で、継手強度に差が生じていた。この理由は以下のように説明できる。

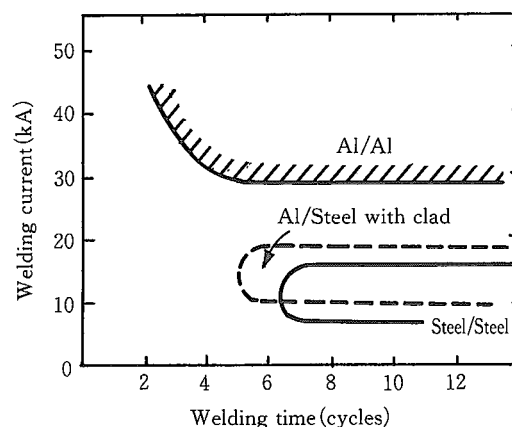
アルミクラッド鋼をインサートしてスポット溶接した場合でも第13図に示したように、インサートするクラッド鋼が小さい場合、すなわち、インサートしたクラッド鋼の圧延接合界面に占めるスポット溶接の熱影響により金属間化合物を形成した面積の割合が大きい場合には、金属間化合物を形成したクラッド界面で破壊を生じ、一方、インサートするクラッド鋼が十分に大きい場合には、アルミニウム

合金での母材破断を生じていた。

このことから溶接時の熱影響により金属間化合物を生じたクラッド界面の周囲すなわち金属間化合物を生じていない圧延接合界面の面積が重要であることがわかる。面積の違い（大小）のクラッド鋼をインサートした継手部の荷重負荷について考えてみると金属間化合物を生じていない接合面積が十分大きい場合（クラッド鋼面積大）には、十字引張試験においては、等荷重であっても脆化相を有するクラッド界面での発生応力は低く、そのため、クラッド界面には、亀裂を生じないが、熱影響を受けていないクラッド界面の面積が小さい場合（クラッド鋼面積小）には、等荷重であっても、熱影響により金属間化合物を生じたクラッド界面での応力が大きくなり破壊を生じるものと考えられる（第14図）。このことは、十分な継手強度を確保するには、ある大きさ以上のクラッド鋼をインサートする必要があることを示している。すなわち、アルミクラッド鋼をインサートした接合法では、荷重は、溶接時に熱影響を受け金属間化合物を形成したクラッド界面よりもむしろ圧延法によりあらかじめ強固に接合され、かつ、溶接時の熱影響を受けていない健全なクラッド界面で負担されることが、高い継手強を示す条件である。さらには、鋼に対して強度の低いアルミニウム合金側のナゲットが十分に成長すればアルミニウム合金での母材破断を示すと考えられる。これに対し、直接接合では、引張試験において金属間化合物を有していたナゲット内で、全ての荷重を負担することとなるため、低荷重で破断が生じたものと考えられる。

5-3 クラッド鋼インサート接合法におけるナゲット形成現象

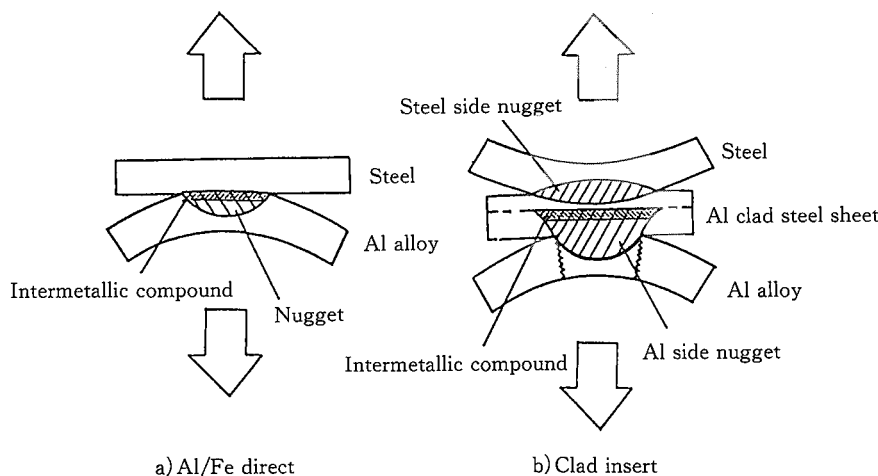
第15図には、アルミニウム同士、鋼同士のスポット溶接条件と本接合法の溶接条件を模式的に示した。前述したように、アルミニウムは鋼と比べ、電気抵抗が小さく、熱伝導度が大いいため、短時間に大電流を用いて溶接するこ



第15図 適正溶接条件範囲の比較

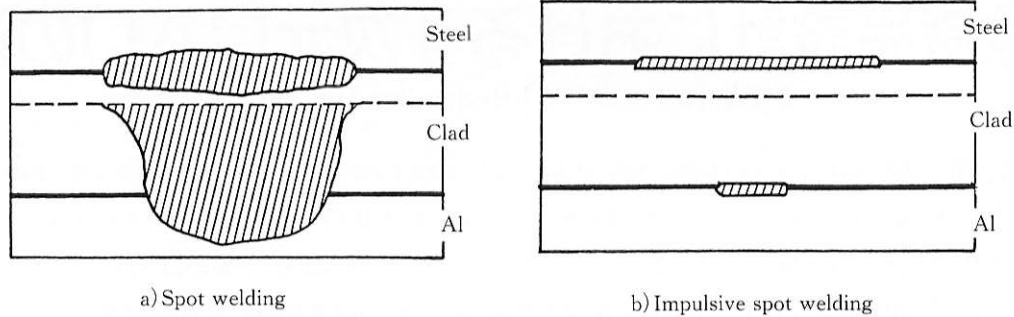
Fig.15 Welding conditions of Al/steel spot welding with an insert of aluminium clad steel sheet

とが要求される。しかし、クラッド鋼を用いた本接合法では、一回の通電加熱により、鋼とクラッド鋼の鋼、アルミニウムとクラッド鋼のアルミニウムをそれぞれ溶接するにも関わらず、その溶接電流は、鋼同士の溶接条件とほぼ同等であり、溶接条件の低電流化が図られている。これは、接合界面近傍のみを加熱することができる ms オーダーの極短時間通電によるナゲット形状との比較を行うことによって説明できる。第16図には、スポット溶接及び極短時間通電によるクラッド鋼をインサートした接合界面のナゲット形状の比較を示した。接合界面での発熱が支配的となる短時間通電の条件では、アルミニウム同士、鋼同士のナゲットがそれぞれの接合界面に形成されることとなる（第16図(b)）が、鋼、アルミニウム母材での発熱、熱伝導を考慮すべきスポット溶接では、これまで記してきたように、アルミニウム側のナゲットは、クラッド界面から接合面にかけて扇状に形成されている（第16図(a)）。これは、鋼母材及びクラッド鋼の鋼母材で生じた熱が、アルミニウム側の接合界面まで伝導し、融点の低いアルミニウムを溶融するこ



第14図 十字引張における応力負荷部の比較

Fig.14 Schematic illustration of concentration of stress around the welded nuggets



第16図 溶接条件によるナゲット形状の比較

Fig.16 Comparison of nugget formation between spot welding and impulsive spot welding

とにより、ナゲットが形成されているためと考えられる。本接合法では、鋼側での発熱をアルミニウム側でのナゲット形成に利用することにより、アルミニウム同士の接合面を有すにも関わらず低電流化が可能となる。さらに、クラッド鋼の鋼材として、炭素鋼よりも抵抗値の大きなステンレス鋼を用いることや、クラッド鋼の鋼厚比を大きくすることによってさらに低電流化が可能と考えられる。

このようにクラッド鋼を用いることにより、溶接電流の低電流化が図られ、従来の鋼用の溶接機をそのまま適用できることは本接合法の大きな利点である。

6. 結 言

高能率な鋼とアルミニウムの接合技術を確認するため、アルミクラッド鋼を用いた接合法を提案し、スポット溶接により、その溶接条件、接合界面組織と継手強度に与える影響について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 直接接合では、 Fe_2Al_5 を界面に生じ、Al同士の溶接継手と比較して、1/6程度の低い強度となる。
- (2) クラッド鋼をインサートすることによりアルミニウ

ム合金内での母材破断を示す高い継手強度が得られる。

- (3) アルミニウム合金内での母材破断を示す適正な溶接条件は、アルミニウム同士の溶接条件と比べ、低電流側に移行し、鋼同士の溶接条件とほぼ同一条件である。
- (4) 本接合法では、クラッド界面に金属間化合物を生じるが、適正なサイズのクラッド鋼をインサートすることにより継手強度が確保できる。



泰山正則 / Masanori Yasuyama

総合技術研究所 薄板研究部

(問合せ先: 06(489)5731)

参考文献

- 1) 大家正二郎: ステンレスクラッドアルミニウム板, 金属, No.7 (1989) p.25.
- 2) 菊池 夫, 武田裕正, 諸住正太郎: 摩擦及び爆発圧接したアルミニウムと鋼との接合界面, 軽金属, Vol.34 No.3 (1984) p.165
- 3) 泰山正則, 小川和博, 高隆夫: アルミクラッド鋼インサート抵抗溶接法の検討, 溶接学会論文集, 第14巻, 第2号
- 4) 軽金属協会: 自動車のアルミ化技術ガイド接合編, 第2版

p.19

- 5) ASM, Metals Handbook, 8th Edition (1973)
- 6) 泰山正則, 小川和博, 高隆夫: アルミニウムと鋼の抵抗溶接技術, 溶接技術 Vol.41 (1993) p.83
- 7) 八尋昭人, 益居健: アルミクラッド鋼の開発, 第40回塑性加工連合講演会講演論文集, 1 (1989), p.73
- 8) たとえば, 日野谷重晴: 純チタンと純鉄の拡散接合界面の微視的構造と接合強度, 鉄と鋼 (1989) 75, 第9号, p.1695