

(論文)

アルミニウム合金と鋼の異材スポット溶接継手の特性に及ぼすSi添加の影響

Effects of Silicon Content on Joint Strength of Aluminum Alloy and Steel Spot Welded Joints



松本克史*1(工博)
Dr. Katsushi MATSUMOTO



漆原 亘*1
Wataru URUSHIHARA



武田実佳子*1(工博)
Dr. Mikako TAKEDA



加藤 淳*2(工博)
Dr. Jun KATO

An increase in the silicon content of cold rolled steel sheets sufficiently improved the joint strength of 6000 series aluminum alloy sheets joined to cold rolled steel sheets by spot welding. This improvement was mainly brought about by the increase in nugget size due to increasing electronic resistance and an increased quantity of heat generation. It was also due to a decrease in the thickness of the interfacial reaction layer composed of the intermetallic compounds (IMC), resulting in an increase in the area of the optimum thickness of the interfacial reaction layer for strengthening interfacial joints. On the other hand, the higher silicon content in the 6000 series aluminum alloy sheets decreased the joint strength. Silicon in the 6000 series aluminum alloy sheets was not effective in enlarging the nugget size, although the IMC layers became thinner due to the concentration of solute silicon in them, which brought about the decrease in the area of the optimum thickness for joint strength.

まえがき＝近年、地球温暖化問題への対応の流れの中で、自動車の軽量化が進んできている。そうした軽量化に向けた取組の一つとして、アルミニウム合金板（以下、アルミ合金板という）の適用が検討され、実用化されてきている。軽量化をさらに推し進めるためには、従来の蓋物だけでなく、ボデー骨格などへの適用の拡大が要求されてきているが、その場合、鋼板とアルミ合金板との異種金属接合が課題となる。

鋼板とアルミ合金板の異種金属接合の課題は、脆弱なFe-Al系金属間化合物（Intermetallic compound：IMC）からなる界面反応層が接合界面に形成され、継手強度が劣化することであり^{1), 2)}、継手強度の向上には、その界面反応層の厚さの制御が重要である^{1), 3)}。界面反応層の形成挙動に関してはこれまで、プロセス因子の影響^{4), 5)}や、鋼板およびアルミ合金板中の合金成分の影響^{6)~10)}が検討されてきている。しかしながら、合金成分の影響に関しては、固相接合での検討が主であり^{3), 7)~9)}、とくに鋼板およびアルミ合金板の主要成分の一つであるSiの影響に関しては、実用化が想定される溶融接合プロセスでの挙動は十分には明らかにされていない。そこで、現状の自動車材の主要な接合プロセスの一つであるスポット溶接法に絞って、冷延鋼板と6000系アルミ合金板の異種金属接合継手の機械的特性に及ぼすSiの影響に関して検討を行った¹¹⁾。

1. 実験方法

供試材として、Si添加量の異なる6000系アルミ合金板（表1）、および板厚やCおよびMn添加量が異なるもの

表1 供試材（6000系アルミ合金板）の組成および板厚

Table 1 Chemical composition and thickness of 6000 series Al alloy sheets

Specimen designation	Chemical composition (mass%)				Thickness (mm)
	Mg	Si	Fe	Mn	
A1	0.64	0.57	0.19	0.07	1.0
A2	0.64	0.94	0.19	0.07	
A3	0.69	1.46	0.19	0.07	

表2 供試材（冷延鋼板）の引張強度、組成および板厚

Table 2 Tensile strength, chemical composition and thickness of cold rolled steel sheets

Specimen designation	TS (MPa)	Chemical composition (mass%)			Thickness (mm)
		C	Si	Mn	
S1	304	0.002	0.01	0.16	1.2
S2	638	0.067	0.01	2.14	
S3	631	0.057	0.48	1.20	
S4	797	0.077	0.69	1.58	
S5	987	0.175	1.38	1.98	

表3 冷延鋼板/6000系アルミ合金板の溶接条件

Table 3 Welding conditions for cold rolled steel sheet/6000 series Al alloy sheet joints

Electrode	Cu-Cr alloy (Dome-radius type: R150-φ16)
Welding current	18-32kA
Welding time	40ms (2 cycles)
Electrode force	3.0kN

の主にSi添加量が異なる様々な引張強度レベルの冷延鋼板（表2）を用いた。これらの供試材をアセトンで脱脂洗浄し、单相整流式スポット溶接機（NRDAIS-90-601G、容量90kVA）を用いてスポット溶接した。鋼板とアルミ合金板の接合継手強度には電極形状が影響することが明らかになってきており⁵⁾、ここでは、ドーム型（先端径

*1 技術開発本部 材料研究所 *2 技術開発本部 開発企画部

φ16mm, R150, クロム銅製)の電極を用いて、表3に示す溶接条件にて試験した。

得られた接合継手に対して十字引張試験を行い、接合強度を評価した。また、光学顕微鏡とSEMによ接合断面の観察を行い、ナゲット組織のサイズや界面反応層の厚さを調査した。さらに、これらの接合継手の接合界面状態の評価解析のため、JEOL製電界放射型透過電子顕微鏡(JEM-2010F)を用いて加速電圧200kVで界面反応層のHAADF-STEM像観察を行った。

2. 実験結果および考察

2.1 冷延鋼板中のSi添加量の影響

2.1.1 接合継手の機械的特性

6000系アルミ合金板(A2)に各種冷延鋼板(S1~S4)を組合せて各種溶接条件でスポット溶接した接合継手の十字引張強度を図1に示す。今回の溶接条件ではいずれの冷延鋼板においても高電流側で十字引張強度が増大する傾向を示した。さらに、冷延鋼板の引張強度が高いほど十字引張強度が増大し、接合継手S3/A2およびS4/A2では1.5kN/spotに近い十字引張強度が得られた。また、S1/A2およびS2/A2では破断形態は界面破断が主であった一方で、十字引張強度が増大したS3/A2およびS4/A2においては、破断形態も6000系アルミ合金板側のプラグ破断が主となった。これらの接合継手ごとに得られた最大十字引張強度と冷延鋼板中のSi添加量との関係を図2

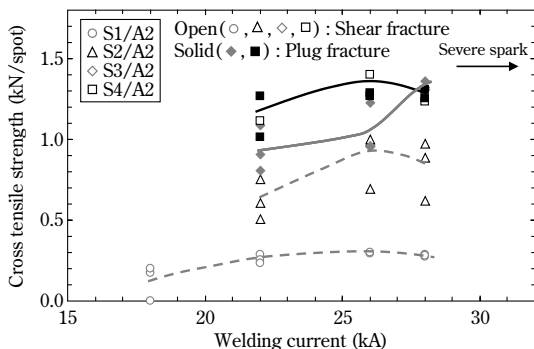


図1 冷延鋼板/6000系アルミ合金板(A2)接合継手の十字引張強度に及ぼす鋼種および溶接条件の影響
Fig. 1 Effects of steel grade and welding conditions on cross tensile strength of cold rolled steel sheet/6000 series Al alloy sheet (A2) joints

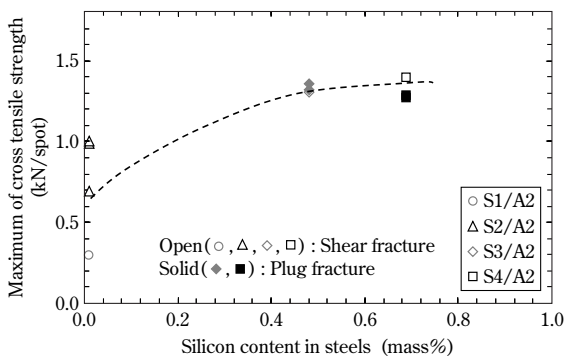


図2 冷延鋼板/6000系アルミ合金板(A2)接合継手の最大十字引張強度に及ぼす冷延鋼板中のSi添加量の影響
Fig. 2 Effects of silicon content in cold rolled steel sheets on maximum of cross tensile strength of cold rolled steel sheet/6000 series Al alloy sheet (A2) joints

に示す。冷延鋼板中のSi添加量が増加するにつれて十字引張強度が増大する傾向を示した。

このように、冷延鋼板中のSi添加量と十字引張強度に相関が認められたため、その理由を検討するために、次項では組織調査を行った。

2.1.2 接合継手の組織

図3に接合継手の断面マクロ組織を示す。冷延鋼板中のSi添加量が増加するほど冷延鋼板側のナゲットサイズ(図中の矢印)が増大している。それに伴い、6000系アルミ合金板側のナゲットサイズも増大し、冷延鋼板と6000系アルミ合金板の接合部の面積も増大する。接合部面積の増大は接合強度に影響するため、Si添加量が増加した冷延鋼板の接合継手S3/A2およびS4/A2の十字引張強度の増大は、接合部面積増大による接合強度の増大が一因となっていると考えられる。

一般に、鋼板のスポット溶接時のナゲット形成には鋼板の固有抵抗が影響することが報告されている¹²⁾。今回使用した冷延鋼板の体積抵抗率の測定結果は図4に示したとおりであり、冷延鋼板中の添加元素量が多いほど、体積抵抗率が増大する傾向となっている。その中でもとくに、図3においてナゲット径の差が顕著に認められた冷延鋼板S2, S3においては、体積抵抗率でも顕著な差が認められている。これらの冷延鋼板の組成では主にSi量に差があり、冷延鋼板中のSiによって固有抵抗が増大し、ナゲット径が増大したものと考えられる。

さらに、冷延鋼板と6000系アルミ合金板の接合部界面には界面反応層が形成され、接合強度に影響を及ぼしていることが想定される。図5に、これらの接合継手の界面反応層の厚さ分布の測定結果を示す。十字引張強度が

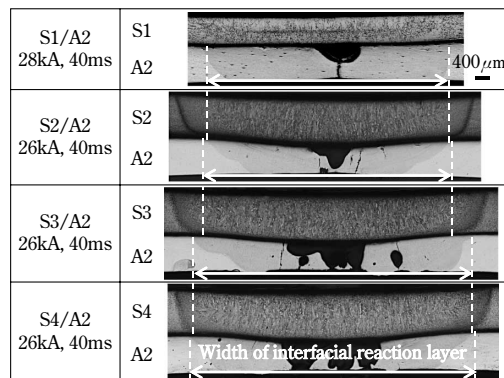


図3 冷延鋼板(S1~S4)/6000系アルミ合金板(A2)接合継手の断面マクロ組織
Fig. 3 Macro structures of cold rolled steel sheet (S1~S4)/6000 series Al alloy sheet (A2) joints

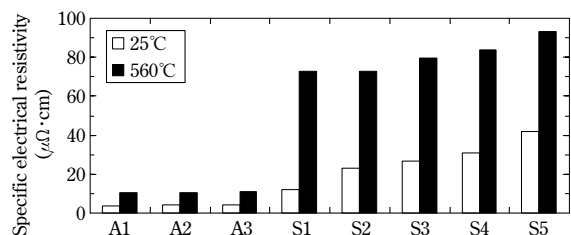


図4 6000系アルミ合金板および冷延鋼板の電気抵抗の温度依存性
Fig. 4 Temperature dependence on specific electrical resistivity of 6000 series Al alloy sheets and cold rolled steel sheets

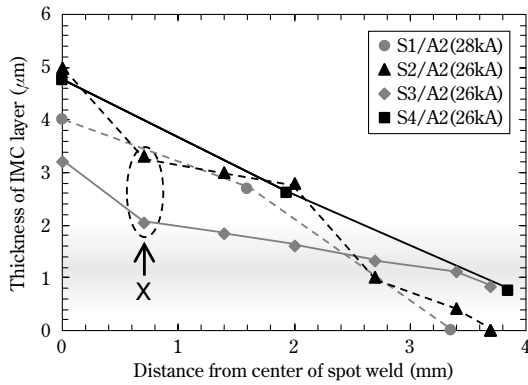


図5 冷延鋼板/6000系アルミ合金板 (A2) 接合継手の界面反応層の厚さ分布に及ぼす鋼種の影響

Fig. 5 Effects of steel grade on thickness distribution of interfacial reaction layer in cold rolled steel sheet/6000 series Al alloy sheet (A2) joints

増大した接合継手S3/A2およびS4/A2は、そうでない接合継手S1/A2あるいはS2/A2と比較すると、形成される界面反応層の厚さ分布が異なっている。これまでに、厚さが1~2μm程度に形成した界面反応層の面積が広いほど接合強度が高いことが報告されている^{1), 7)}。冷延鋼板中のSi添加量が少ない接合継手S1/A2やS2/A2では界面反応層の厚さ分布が不均一であるうえに、ナゲット端部側の反応層の厚さも十分でなく、接合強度に寄与する厚さの界面反応層の面積が小さい。これに対して、Si添加量が多い冷延鋼板を用いた接合継手S3/A2およびS4/A2は、界面反応層の形成される領域が増大すると共に、その厚さ分布がより均一となり、さらに全体的に薄くなる結果、強度に寄与する厚さの界面反応層がナゲット端部側においてもより広範囲に形成されている。したがって、冷延鋼板中のSi添加量増加により、接合部界面に形成される界面反応層がより薄く広範囲に形成された結果、十字引張強度増大に寄与したものと考えられる。

以上のように、接合部界面反応層の厚さ分布形成に冷延鋼板中のSiが関与していることが明らかになったが、そのSiの存在状態と役割を明確化するために、図5に示す接合継手S2/A2, S3/A2の位置Xの接合界面反応層のHAADF-STEM像観察を行った。その結果を図6に示す。この図より、接合部界面反応層としては、冷延鋼板側に Al_5Fe_2 、6000系アルミ合金板側に Al_3Fe の2種類の反応層が形成されていることがわかる。さらに、冷延鋼板中のSi添加量が少ない接合継手S2/A2では、これらの界面反応層中にはSiの存在は認められなかったのに対して、冷延鋼板中のSi添加量が多い接合継手S3/A2では、とくに Al_5Fe_2 中にSiが濃化していることが明らかになった。このことから、冷延鋼板中のSiは Al_5Fe_2 の過剰な成長の抑制に寄与していると推察される。また、 Al_5Fe_2 中には、サブミクロンレベルの微細なSi系酸化物粒子(SiO_2 など)が分布していることも見出した。このSi系酸化物粒子は、図7に示すように、スポット溶接前の段階において、Si添加量が多い冷延鋼板の表層部に既に分布している。したがって、このような酸化物は、スポット溶接時に接触抵抗を顕著に増大させてナゲット径を増大させる

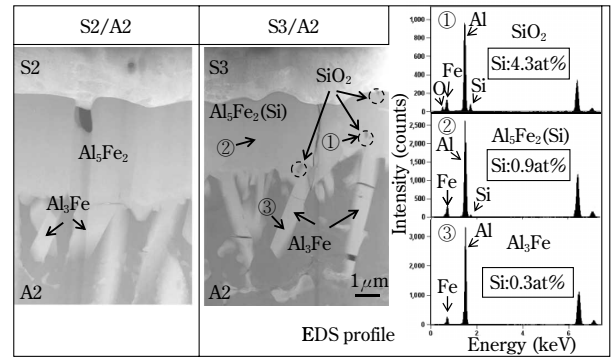


図6 冷延鋼板/6000系アルミ合金板 (A2) 接合継手の界面反応層のHAADF-STEM像とEDS分析結果 (図5中の位置X)

Fig. 6 HAADF-STEM images and EDS analysis of interfacial reaction layer of cold rolled steel sheet/6000 series Al alloy sheet (A2) joints (X section in Fig.5)

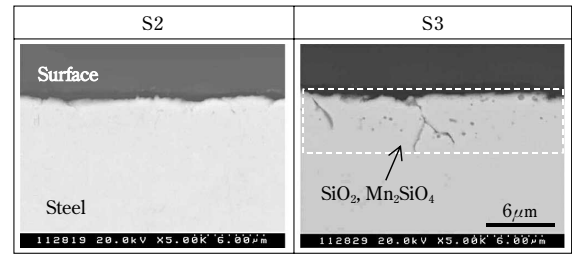


図7 スポット溶接前の冷延鋼板の表層SEM組織

Fig. 7 SEM microstructures of surface of cold rolled steel sheets before spot welding

効果に加えて、接合部界面反応層 (とくに Al_5Fe_2) の成長を阻害するピン止め効果も果たしていると推察される。これらの冷延鋼板中のSi添加効果によって強度向上に最適な厚さの界面反応層がより広範囲に形成され、十字引張強度が増大したのと考えられる。

2.2 6000系アルミ合金中のSi添加量の影響

2.2.1 接合継手の機械的特性

図8に、冷延鋼板 (S1, S5) に対して各種6000系アルミ合金板 (A1~A3) を組合せ、各種溶接条件でスポット溶接した接合継手の十字引張強度の測定結果を示す。冷延鋼板S1の場合、いずれの6000系アルミ合金板との組合せにおいても、溶接条件の変更による十字引張強度の顕著な増大効果は得られなかった。このうち、6000系アルミ合金板中のSi添加量が少ない接合継手 (S1/A1) でわずかな十字引張強度増大効果が得られたものの、いずれも界面破断であった。

これに対して、冷延鋼板S5の場合では、いずれの6000系アルミ合金板との組合せにおいても高電流側で十字引張強度が顕著に増大する傾向を示し、破断形態もプラグ破断が増大した。さらに、6000系アルミ合金板中のSi添加量が少ないほど十字引張強度が増大し、接合継手S5/A1においては、1.5kN/spotに近い十字引張強度が得られた。図9に、これらの接合継手ごとに得られた最大十字引張強度と6000系アルミ合金板中のSi添加量との関係を示す。この図より、組合せる冷延鋼板によってその程度は異なるものの、全体的には6000系アルミ合金板中のSi添加量が増大するにつれて十字引張強度が低下する傾向を示した。

このように、6000系アルミ合金板中のSi添加量と十字

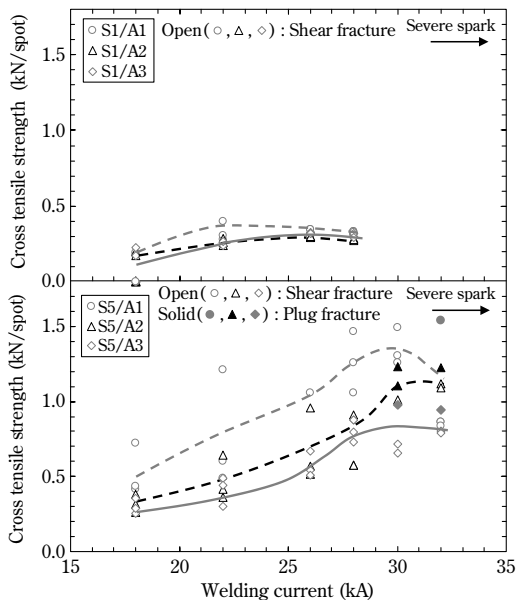


図8 冷延鋼板(S1, S5)/6000系アルミ合金板接合継手の十字引張強度に及ぼすアルミ合金種および溶接条件の影響
 Fig. 8 Effects of Al alloy type and welding conditions on cross tensile strength of cold rolled steel sheet (S1, S5)/6000 series Al alloy sheet joints

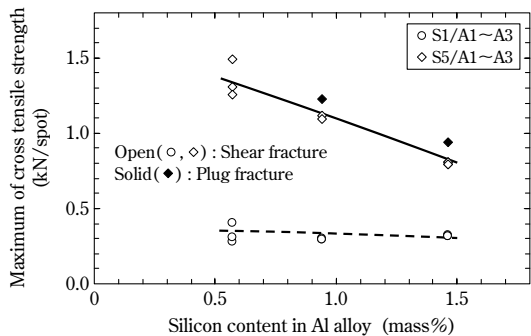


図9 冷延鋼板(S1, S5)/6000系アルミ合金板接合継手の最大十字引張強度に及ぼす6000系アルミ合金板中のSi添加量の影響
 Fig. 9 Effects of silicon content in 6000 series Al alloy sheets on maximum of cross tensile strength of cold rolled steel sheet (S1, S5)/6000 series Al alloy sheet joints

引張強度との関係は、前節で述べた冷延鋼板中のSi添加量と十字引張強度との関係とは逆の傾向を示しており、その理由を検討するために、次項では組織調査を行った。

2.2.2 接合継手の組織

図10に接合継手の断面マクロ組織を示す。この図からわかるように、いずれの冷延鋼板との組合せにおいても、6000系アルミ合金板中のSi添加量が増加しても、冷延鋼板側のナゲットサイズは変化しないため、6000系アルミ合金板側のナゲットサイズも変化しない。したがって、冷延鋼板と6000系アルミ合金板の接合部の面積も変化しない。6000系アルミ合金板の固有抵抗は、図4に示すように、冷延鋼板と比較して非常に小さいことに加えて、Si添加による変化もほとんど認められない。冷延鋼板/6000系アルミ合金板のスポット溶接プロセスの場合、固有抵抗値が高い冷延鋼板側のジュール発熱による加熱の寄与が大きく、加熱された冷延鋼板側からの熱伝導によって6000系アルミ合金板が溶融していると推定される。このため、6000系アルミ合金板中の合金組成の変

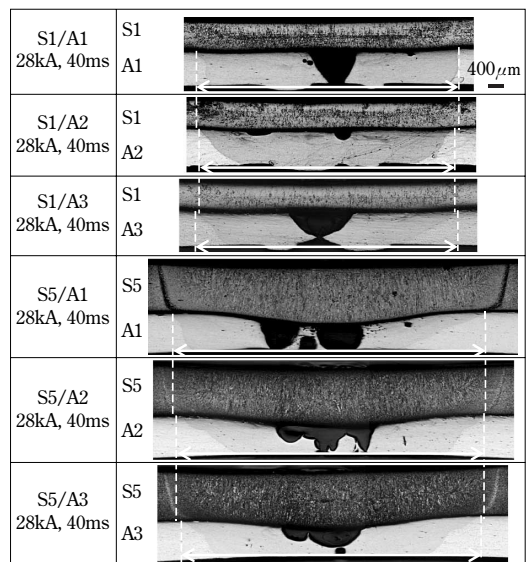


図10 冷延鋼板(S1, S5)/6000系アルミ合金板接合継手の断面マクロ組織
 Fig.10 Macro structures of cold rolled steel sheet/6000 series Al alloy sheet (A1-A3) joints

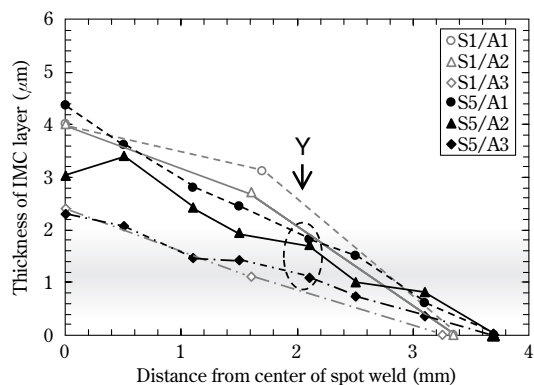


図11 冷延鋼板(S1, S5)/6000系アルミ合金板接合継手の界面反応層の厚さ分布に及ぼすアルミ合金種の影響
 Fig.11 Effects of Al alloy type on thickness distribution of interfacial reaction layer of cold rolled steel sheet (S1, S5)/6000 series Al alloy sheet joints

化によるナゲットサイズへの影響は非常に小さいと考えられる。

さらに、冷延鋼板と6000系アルミ合金板の接合部界面における界面反応層の厚さの測定結果を図11に示す。いずれの冷延鋼板との組合せにおいても界面反応層の形成領域(面積)に大差がない一方で、6000系アルミ合金板中のSi添加量が増加するほど、界面反応層の厚さが全体的に薄くなる傾向を示している。その結果、接合強度に寄与する厚さ(1~2 μ m)の界面反応層の面積が減少し、十字引張強度が低下したものと推察される。

以上のように、接合部界面反応層の厚さ分布形成に6000系アルミ合金板中のSiも関与していることが明らかになったが、そのSiの存在状態と役割を明確化するために、図11に示す接合継手S5/A1, S5/A3の位置Yの接合界面反応層のHAADF-STEM像観察を行った。その結果を図12に示す。この図より、6000系アルミ合金板中のSi添加量の増加によって、2種類ある接合部界面反応層のうち、冷延鋼板側の界面反応層(Al_5Fe_2)の厚さが減少していることがわかる。さらに、Siはとくに Al_5Fe_2 に濃

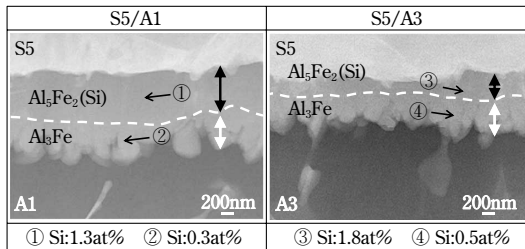


図12 冷延鋼板(S5)/6000系アルミ合金板接合継手の界面反応層のHAADF-STEM像とEDS分析結果(図11中の位置Y)

Fig.12 HAADF-STEM images and EDS analysis of interfacial reaction layer of cold rolled steel sheet (S5)/6000 series Al alloy sheet joints (Y section in Fig.11)

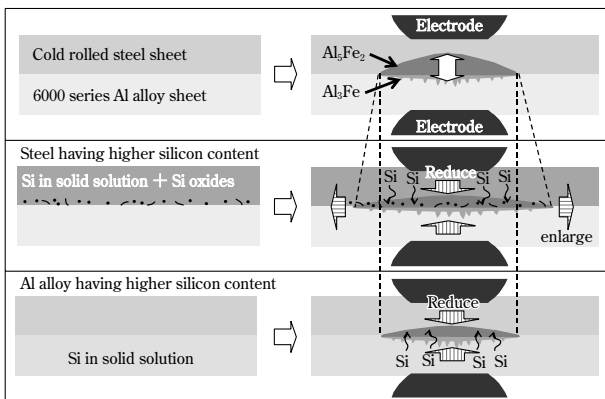


図13 冷延鋼板/6000系アルミ合金板接合継手のスポット溶接中の界面反応層形成挙動の模式図

Fig.13 Schematic illustration on formation behavior of interfacial reaction layer during spot welding of cold rolled steel sheet/6000 series Al alloy sheet joints

化していることが明らかになった。このことから、6000系アルミ合金板中のSiも、 Al_3Fe_2 の成長の抑制に関与していると考えられる。しかし、6000系アルミ合金板中のSi添加量が増加してもナゲットサイズ増大には寄与しないため、接合面積は増大せず、結果的に接合強度増大に効果的な厚さの界面反応層の面積が減少し、接合強度が低下したものと考えられる。

以上の結果のまとめとして、冷延鋼板および6000系アルミ合金板中の添加Siの効果を図13に模式図で示す。実際の接合強度増大のための材料設計としては、それぞれの材料中でのSiの作用を踏まえた成分設計が必要になるものと考えられる。

むすび＝スポット溶接による冷延鋼板と6000系アルミ合金板との異種金属接合継手の機械的特性に及ぼすSi添加量の影響に関して、界面反応層の形成挙動とSiの存在状態に着目して検討を行った。得られた主な結果を以下に示す。

(1) 冷延鋼板中のSi添加量増加によって、スポット溶接時の接合強度が増大する効果が得られた。これは、Si添加により、冷延鋼板の固有抵抗値が増大してナゲット径が増大したこと、および冷延鋼板の表層に微細酸化物が形成して界面反応層が均一薄肉化し、強度に寄与しうるに十分な厚さの反応層の面積が増大したことによるものと考えられた。

(2) 6000系アルミ合金板へのSi添加量増加によって、スポット溶接時の接合強度が低下する傾向が得られた。これは、Si添加による固有抵抗値の増大効果が6000系アルミ合金板では得られず、ナゲット径の増大に寄与しなかった一方、6000系アルミ合金板側のSiによる反応層成長抑制効果のみとなったことから強度に寄与しうる厚さの反応層の面積が低下したためと考えられる。

本検討により、従来から自動車ボデーの接合にも使用されてきたスポット溶接を対象として、アルミ合金板/鋼板の直接接合における接合強度を支配する、脆弱な界面反応層($Fe-Al$ 系金属間化合物層)の厚さ・構造を制御するための材料成分設計指針を得ることができた。

今回得られた界面反応層の制御指針は、スポット溶接に限らず、他の熔融溶接法や固相接合法など各種接合方法にも広く適用できるものである。今後は、界面反応層制御の成分設計指針を活用し、異材接合に適した材料設計に反映させていきたい。

参考文献

- 1) 泰山正則ほか. 溶接学会論文集. 1996, Vol.14, No.2, p.314-320.
- 2) 渡部健彦ほか. 溶接学会論文集. 2005, Vol.23, No.3, p.491-495.
- 3) H. Imaeda et al. "Effect of Interfacial Microstructure on Strength of Dissimilar Joint of Aluminum Alloys and Steels for Light-Weight Auto Body". Proc. Materials Science & Technology, Joining of Monolithic Structures and Components. Pittsburgh, PA, USA, September 25-28, 2005. The Minerals, Metals & Materials Society, 2005, p.17-27.
- 4) 及川初彦ほか. 溶接学会論文集. 1996, Vol.14, No.1, p.69-80.
- 5) 武田実佳子ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.2, p.69-73.
- 6) 幸田成康ほか. 日本金属学会誌. 1962, Vol.26, No.12, p.764-769.
- 7) V. V. Trutnev et al. Welding Production. 1967, Vol.14, p.18-23.
- 8) A. K. Kurakin. Fiz. Metal. Metalloved. 1970, Vol.30, No.1, p.108-114.
- 9) 及川初彦ほか. 鉄と鋼. 1997, Vol.83, No.10, p.37-42.
- 10) S.-H. Hwang. Mat.Sci.Eng. 2005, Vol.A390, p.437-443.
- 11) K. Matsumoto et al. "Effects of Silicon Alloying on Mechanical Properties of RSW Joints between Al-Mg-Si Alloys and High Tensile Strength Steels". Proc. 12th International Conference on Aluminum Alloys. Yokohama, Japan, September 5-9, 2010. The Japan Institute of Light Metals, 2010, p.966-971.
- 12) 及川初彦ほか. 新日鐵技報. 2006, No.385, p.36-41.