

(技術資料)

自動車用中強度Al-Mg系合金のミグ溶接継手特性

Tensile Properties of Medium Strength Al-Mg Alloy MIG Weldments for Automotive Structural Members



江間光弘*
Mitsuhiro EMA

The present work relates to the improvement in joint strength of a MIG-welded, medium strength Al-Mg alloy for automotive structural members, such as sub-frames. A study has been conducted to improve the joint strength by changing the alloy composition of the parent material and welding wire. As a result, a trial parent material, Al-3.3Mg-Mn-Cr, has been found to exhibit the highest joint strength in both butt joints and double-side welded lap joints of the medium strength Al-Mg alloy. It has been shown that the use of an Al-3.4Mg-0.7Mn-Cr-Ti-Zr alloy wire or Al-2.5Si alloy trial production wire can achieve a tensile strength as high as that of the parent material in a butt joint even after the weld reinforcement has been removed. In the case of single-sided welded lap joints, however, the parent material and welding wire composition have almost no effect on joint strength improvement. It has been confirmed that optimizing the welding conditions to ensure a thick throat in welds is effective in improving the joint strength of single-sided welded lap joints.

まえがき = 自動車におけるアルミニウム材料の適用は拡大しつつあり、エンジンフードやフェンダ、トランクリッドなどのパネル用薄板材料だけではなく、高強度が必要で比較的板厚の厚い構造部材からなるサブフレームなどの足回り部品もアルミ化されている¹⁾。このような自動車部品の軽量化を目的にアルミニウム材料を適用する場合、アーク溶接性および成形性が良好なAl-Mg系合金が候補に挙がる。なかでも、耐食性（耐応力腐食割れ性）の観点から、自動車用ホイールなどにも適用されている²⁾ 5052, 5454, 5154をはじめとするMg添加量が3%前後の中強度Al-Mg系合金が推奨される。

しかし、溶接構造用合金として代表的な5083合金に比べ、これら中強度Al-Mg系合金の溶接継手強度に関する報告³⁾は少ない。また、自動車におけるアーク溶接の継手構造は、突合せ継手よりもすみ肉継手、とくに重ね継手のすみ肉溶接からなる継手構造が多いが、5554などMg添加量が比較的少ない溶加材による継手特性に関する報告⁴⁾もあまり見られない。

一方、近年、自動車分野に限らずアルミニウム材料のアーク溶接継手特性を合金組成などの材料面から検討したという報告もほとんど見受けられないなかで、4943合金のように新たに開発されたAl-Si系溶加材が紹介⁵⁾されている。4943溶加材は6000系合金や5052などMg添加量が2.5%未満の合金を対象に開発された溶加材である。

当社は、Mg添加量が3%前後の中強度Al-Mg系合金を対象に母材および溶加材の組成を検討し、材料開発によるミグ溶接継手の引張特性向上を検討した。その結果の概要を以下に報告する。

1. ミグ溶接継手強度に及ぼす母材強度の影響

非熱処理型アルミニウム合金であるAl-Mg系板材の強度を高めるためには、加工硬化による高強度化の必要がある。しかしながら、加工硬化によって母材強度を高めても溶接熱によって軟化するため、継手強度の向上はあまり期待できない。

そこで、軟質材であるO調質材の機械的性質が異なる中強度Al-Mg系合金を準備し、ミグ溶接継手強度に及ぼす母材強度の影響を調査した。

1.1 供試材

供試材は、表1に示すように中強度Al-Mg系のJIS合金である5154および5454に加え、試作合金(alloyX)を準備した。alloyXはMg添加量を3.3mass%とし、結晶粒微細化元素であるMnやZrを添加して強度を高めた合金である。板厚はいずれも3.0mmである。5154および5454の引張強さは約230MPaであるのに対し、alloyXは257MPaである。耐力と伸びは5454<5154<alloyXの順に高い。

1.2 実験方法

母材をシャー切断し、溶接ジグに固定して自動溶接

表1 供試母材の機械的特性
Table 1 Mechanical properties of base material

Alloy	Nominal composition (mass%)	TS (MPa)	YS (MPa)	El. (%)
5154	Al-3.5Mg-Cr	227	109	27.1
5454	Al-2.8Mg-Mn-Cr	233	95	25.0
alloyX	Al-3.3Mg-Mn-Zr	257	127	28.0

※Temper: O, Thickness: 3.0 mm

*アルミ・銅事業部門 技術部

(トーチ固定)を行った。重ね継手形状は試験板を10mm重ねたすみ肉継手で、両側溶接と片側溶接の二種類の継手を作製した。両側は同じ条件で溶接し、パス間温度は30℃以下とした。主な溶接条件を表2に、溶接部の代表的な断面マクロを図1に示す。いずれの母材においても溶接部の断面形状はほぼ同じであった。

各継手につき溶接線と直角方向のJIS Z2241 5号試験片を2本採取し、引張試験を実施した。突合せ継手は、各材料につき余盛を付けたままの場合と機械加工によって余盛を削除した場合について、それぞれ2本の引張試験を実施した。重ね継手は上板と下板でそれぞれその板厚分の段差があるため、引張試験では母材と同じ板厚のスペーサを挿入してチャッキングした。また、継手の引張特性として、破断荷重を平行部における母材の断面積で除した引張強さを用いた。標点も溶接ビードをまたいで斜めに取って破断伸びを測定し、参考データとした。

表2 溶接条件(1)
Table 2 Welding parameters (1)

Welding process	DCEP-pulse MIG welding	
Welding wire	A5554-WY φ1.2 mm	
Shielding gas (L/min)	Ar 25	
Welding speed (mm/min)	760	
Joint type	Butt joint	Lap joint
Welding current (A)	115	138
Arc voltage (V)	21	24

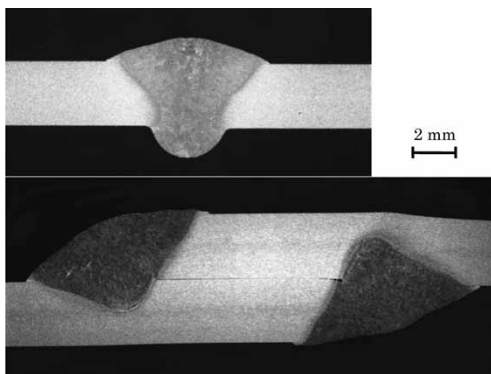


図1 代表的な溶接部の断面マクロ
Fig. 1 Typical cross-sections of welds

1.3 実験結果および考察

継手の引張試験結果を図2に示す。突合せ継手の場合、母材の引張強さが最も高いalloyXの継手引張強さが最も高くなった。余盛を削除するといずれの合金も若干引張強さが低下するが、余盛の有無にかかわらず、5154 < 5454 < alloyXの順に継手引張強さが高くなる。継手効率率は、余盛を付けたままの場合ではほぼ100%、余盛を削除した場合でも90%以上であった。

両側溶接した重ね継手の場合、引張強さは、突合せ継手の場合と同様に、5154 < 5454 < alloyXの順に高くなり、継手効率もほぼ100%となった一方で、片側溶接の場合は、母材の引張強さが比較的低い5154の継手引張強さが最も高い結果となった。

継手引張試験後の代表的な試験片の外観写真を図3

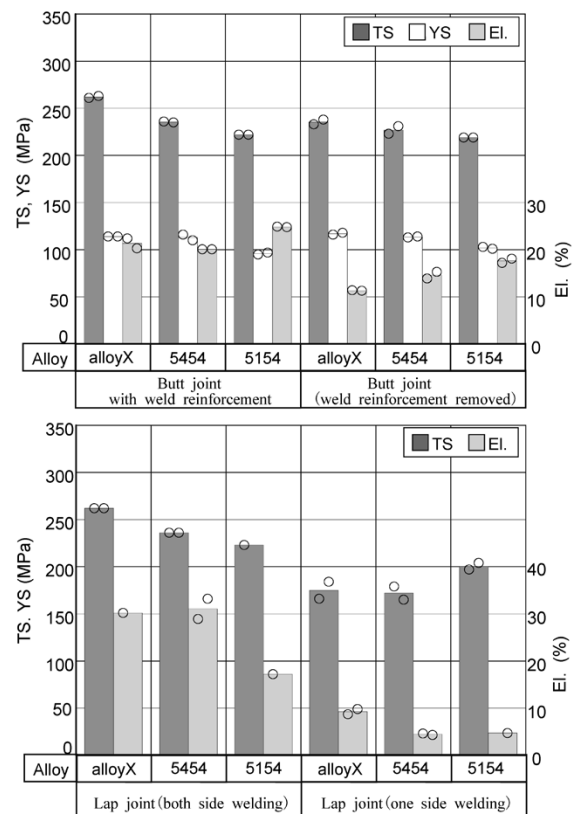


図2 継手の引張試験結果
Fig. 2 Results of tensile tests for butt joints and lap joints

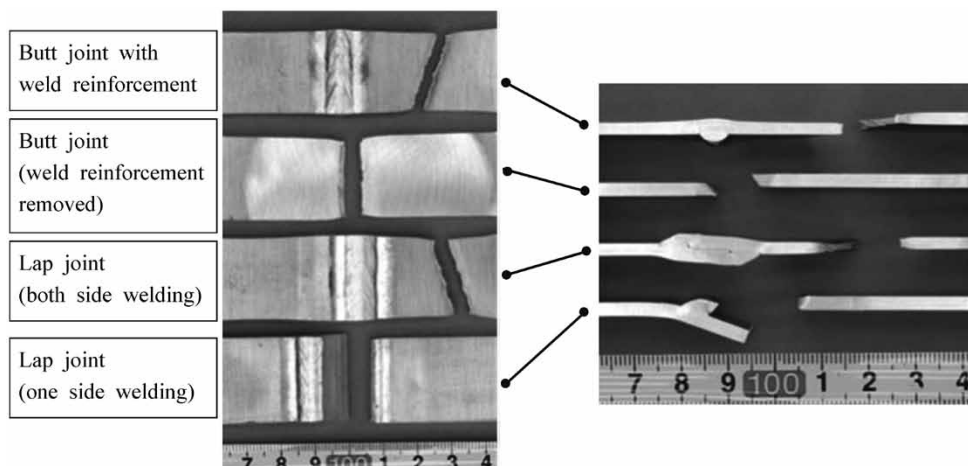


図3 継手引張試験片の破断位置
Fig. 3 Typical fracture points of tensile test pieces

に示す。いずれの合金においても突合せ継手の破断位置は、余盛を付けたままの場合は母材部、余盛を削除した場合は溶接金属で破断した。重ね継手の破断位置は、両側溶接の場合が母材破断で、片側溶接の場合が溶接金属破断である。

突合せ継手の場合は、余盛を削除して溶接金属で破断しても、母材強度の高い継手の方が引張強さが高くなった。Mgをはじめとする母材添加元素の希釈によって溶接金属の強度が高くなるため、継手強度も高くなったものと推定される。

しかし、片側溶接の重ね継手の場合は、継手強度に及ぼす母材組成の影響は認められなかった。突合せ溶接よりも重ね継手のすみ肉溶接の方が溶込み率（溶接金属における母材の溶融率）が小さく、母材添加元素の希釈が少ない。このため、溶接金属の強度があまり高くなっていないためと推定される。

2. ミグ溶接継手強度に及ぼすAl-Mg系溶加材組成の影響

1章において、組成を調整することによって母材（O調質）の強度を高めても、すみ肉溶接は突合せ溶接よりも母材添加元素の希釈が少ないため溶接金属の強度が高くないこと、また、溶接金属部で破断する片側溶接の重ね継手は、継手強度があまり高くないことが推定された。そこで、溶加材の組成を変えることによって継手強度を向上させることを検討した。

2.1 供試材

母材は、表1に示す三種類の中強度Al-Mg系合金とし、溶加材は、JIS Z3604-2002の溶加材選定指針において推奨されている5554, 5654, および5183のJIS合金、およびMg添加量が3.4mass%で結晶粒微細化元素であるMnやZr, Tiなどを添加した試作合金（以下、alloyWという）を準備した。いずれも線径1.2mmの溶接ワイヤである。表3に供試溶加材の合金成分を示す。

2.2 実験方法

1章と同様に供試母材をシャー切断し、溶接ジグに固定して自動溶接を行い、突合せ継手および重ね継手を製作した。主な溶接条件を表4に示す。

継手特性の評価も1章と同様であり、各継手につき溶接線と直角方向のJIS Z2241 5号引張試験片を原則的に2本採取して引張試験を実施した。突合せ継手は余盛を付けたままの場合と機械加工によって余盛を削除した場合について実施した。

2.3 実験結果および考察

2.3.1 突合せ継手の引張特性

突合せ継手の場合、余盛を付けたまま引張試験を実施した場合、いずれの母材および溶加材の組み合わせにおいても母材部で破断した。継手効率はほぼ100%であり、継手強度に及ぼす溶加材組成の影響は認められなかった。

一方、機械加工によって余盛を削除した場合は、図4のように母材部で破断する場合と溶接金属で破断する場合があった。母材の強度が最も高いalloyX合金の場合

表3 供試溶加材（Al-Mg系）
Table 3 Al-Mg series alloy welding wires for test

Alloy	Nominal composition (mass%)	Dia. (mm)
5554	Al-2.6Mg-0.7Mn-Cr-Ti	1.2
alloy W	Al-3.4Mg-0.7Mn-Cr-Ti-Zr	
5654	Al-3.7Mg-0.2Cr	
5183	Al-4.9Mg-0.6Mn	

表4 溶接条件（2）
Table 4 Welding parameters (2)

Welding process	DCEP-pulse MIG welding	
Welding wire	Table 3	
Shielding gas (L/min)	Ar 25	
Welding speed (mm/min)	760	
Joint type	Butt joint	Lap joint
Welding current (A)	115~120	135~140
Arc voltage (V)	21	24

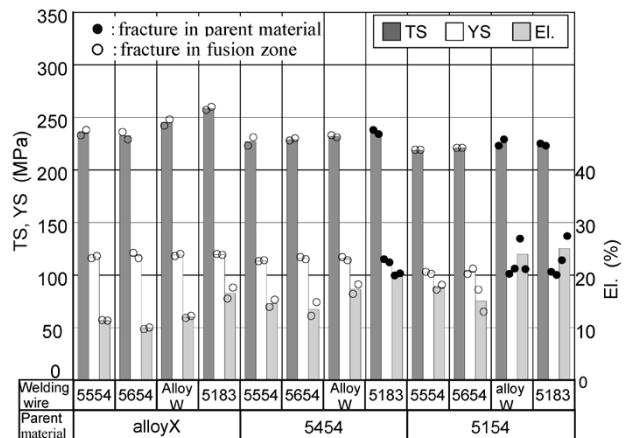


図4 Al-Mg系溶加材による突合せ継手（余盛削除）の引張特性
Fig. 4 Tensile properties of butt joint (weld reinforcement removed) by Al-Mg series welding wire

は、いずれの溶加材を用いても溶接金属で破断した。その引張強さは、溶加材が5554<5654<alloyW<5183の順に高くなり、Mg添加量の最も多い5183の継手が最も高くなった。試作溶加材のalloyWはMg添加量が3.4mass%と比較的少ないものの、Mg添加量が3.7mass%の5654よりも高強度となった。これは、MnやZr, Tiなどの添加元素の効果で溶接金属の強度が高くなったためと推定される。

また、母材がalloyXよりも強度の低い5454合金の場合も、溶加材が5554<5654<alloyW<5183の順に継手の引張強さが高くなり、溶加材が5183の場合は余盛を削除したにもかかわらず母材破断となった。さらに、母材の引張強さが低い5154合金の場合は、溶加材がalloyWでも母材破断となった。alloyWによって溶接すると5183には及ばないものの、5554や5654によって溶接した場合よりも溶接金属の強度が高いといえる。

2.3.2 重ね継手の引張特性

片側溶接の重ね継手の引張試験結果を図5に示す。いずれも溶接金属で破断し、母材および溶加材の組み合わせと継手強度との顕著な傾向は認められなかった。

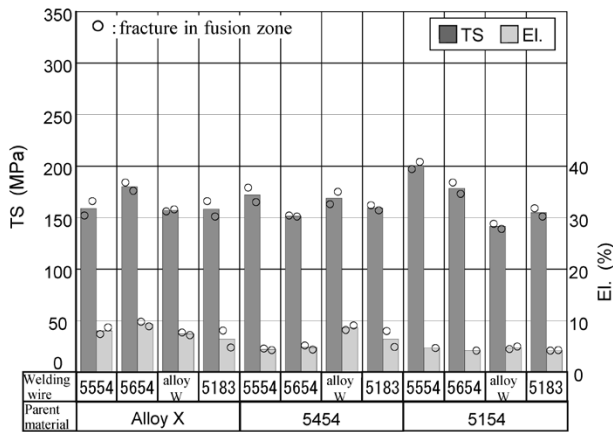


図5 Al-Mg系溶加材による重ね継手の引張特性
Fig. 5 Tensile properties of lap joint by Al-Mg series welding wire

alloyXと5454合金の場合は、いずれの溶加材を用いても継手引張強さが150~180 MPaで継手効率も60~70%と、同じ溶接金属で破断した突合せ継手の余盛を削除した場合よりも低くなった。母材強度が最も低い5154合金の場合は、5554溶加材で溶接した場合の継手引張強さが約200MPaと最も高くなり、alloyXや5454合金の場合よりも高くなった。溶接金属のビッカース硬さを測定した結果、突合せ継手だけではなく重ね継手においても5554<5654<alloyW<5183の順に溶接金属の硬さも高くなっていることを確認した。突合せ継手の場合、継手の引張強さと溶接金属の硬さに相関が認められたが、重ね継手の場合は、相関は認められなかった。

3. ミグ溶接継手強度に及ぼすAl-Si系溶加材組成の影響

2章の試験結果から、Al-Mg系溶加材の組成を変えたものの、片側溶接による重ね継手の引張強さはあまり高くならなかった。一方、Al-Si系溶加材による溶接金属のせん断強度はAl-Mg系溶加材よりも低い、代表的なAl-Si系溶加材である4043よりもSi添加量が3.6~4.6mass%と少なくMgが若干添加(0.10~0.30mass%)されている4643合金であれば、Al-Si系の溶加材の中では比較的高い継手強度が得られるという報告⁶⁾がある。

当社においても、Si添加量が4043より少ないAl-Si系溶加材によって5454などのAl-Mg系合金を溶接すると継手強度が比較的高くなるという知見⁷⁾を得ている。そこで、5454合金の溶接継手に関し、Al-Si系溶加材を適用した場合の継手強度をAl-Mg系5554溶加材と比較した。

3.1 供試材

母材は、表1に示す三種類の中強度Al-Mg系合金のうち、5454合金のみを準備し、Al-Si系溶加材は表5に示す3種類のミグ溶接ワイヤを用いた。alloySは主添加元素のSiが2.5mass%のAl-Si系試作合金である。4043と4047はSi添加量がそれぞれ5.0mass%と12.0mass%のJIS合金で、市販材を用いた。Al-Mg系の比較溶加材は5554合金を準備した。いずれも線径は1.2mmである。

3.2 実験方法

2章と同様に溶接金属の引張特性を比較するため、ミ

表5 供試溶加材 (Al-Si系)

Table 5 Al-Si series alloy welding wire for test

Alloy	Nominal composition (mass%)	Dia. (mm)
alloy S	Al-2.5Si	1.2
4043	Al-5.0Si	
4047	Al-12.0Si	

表6 溶接条件 (3)

Table 6 Welding parameters (3)

Welding process	Pulse MIG welding			
	Butt joint		Lap joint	
Joint type	DCEP		DCEP	AC
Polarity	DCEP		DCEP	AC
Electrode negative ratio (%)	0		0	36 30
Welding wire	Al-Si alloy	5554	All alloy	Al-Si alloy 5554
Welding current (A)	120	130	130	155 150
Arc voltage (V)	21	20	25	22 21
Welding speed (mm/min)	780		760	
Wire diameter (mm)	1.2			
Shielding gas (L/min)	Ar 25			

グ突合せ溶接継手を作製し、機械加工によって余盛を削除して引張試験を実施した。また、自動車構造に多用されているすみ肉溶接による重ね継手においても、片側溶接継手の引張試験によって溶接部の強度に及ぼす溶加材の影響を調査した。

溶接方法は、2章と同様に供試母材をシャー切断し、溶接ジグに固定して自動溶接を行い、突合せ継手ならびに重ね継手を作製した。また、片側すみ肉溶接による重ね継手の場合は、継手の引張試験を実施すると溶接金属部で破断しやすく、のど厚が引張強度に影響すると考えられる。そこで、高溶着量を確認しやすい交流ミグ溶接によっても継手を作製した。

主な溶接条件を表6に示す。突合せ継手は、溶接速度を780mm/minに固定して安定的な裏ビードが得られる溶接条件を検討し、Al-Si系溶加材はいずれも120A×21V、Al-Mg系の5554は130A×20Vで溶接した。一方、重ね継手の場合は、同じ電源であればいずれの溶加材であってもほぼ同じ溶接速度および溶接電流、アーク電圧で溶接できたが、交流ミグ溶接における極性比率(electrode negative ratio)は、Al-Si系の溶加材の場合は36%、5554溶加材の場合は30%とした。

3.3 実験結果とその考察

3.3.1 突合せ継手の引張特性

溶接後機械加工によって余盛を削除した継手の引張試験結果を図6に示す。継手の引張強さは、溶加材が4047と5554で同程度であるのに対し、4047よりもSi添加量の少ないalloySや4043によって溶接した継手の引張強さはさらに高い値となった。4047や5554の場合は3本すべての試験片が溶接金属部で破断したが、alloySや4043の場合は、3本の試験片のうち2本は母材部で破断した。alloySや4043において溶接金属部で破断した場合は、4047や5554によって溶接した継手よりも高い引張強さとなっており、その値は母材の引張強さに匹敵している。

3.3.2 重ね継手の引張特性

重ね継手の断面マクロを図7に示す。直流ミグ溶接の

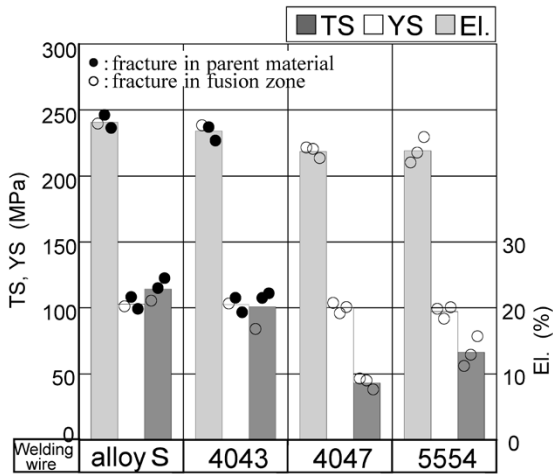


図6 Al-Si系溶添加材による突合せ継手(余盛削除)の引張特性
Fig. 6 Tensile properties of butt joints (weld reinforcement removed) by Al-Si series and 5554 welding wire

場合、下板における溶込み深さやビード幅などはいずれの溶添加材においてもほとんど同じであるが、5554溶添加材による溶接金属部の形状は、Al-Si系溶添加材の場合よりも若干凸状になっている。交流ミグ溶接の場合は、Al-Si系溶添加材においても凸状のビード形状となっていて5554の場合と同程度ののど厚になっている。

重ね継手の引張試験結果を図8に示す。直流ミグ溶接による重ね継手の引張強さは、溶添加材が4047<4043<alloyS<5554の順に高くなり、Al-Si系の中ではSi添加量の少ないalloySが最も高くなった。しかし、破断荷重を平行部における母材の断面積で除して求めた引張強さは、突合せ継手に比べて低く、最も低い4047の場合で突合せ継手の約36%、最も高い5554でも77%であった。継手効率はそのそれぞれ4047が33.3%、5554が72.2%である。突合せ継手の場合ほぼ100%の継手効率となったalloySと4043の継手効率は、それぞれalloySが53.5%、4043が43.1%で、突合せ継手に比べ低い。

交流ミグ溶接によってビード形状が凸状でのど厚が大きくなると、継手の引張強さが高くなるものの、継手の引張強さに及ぼす溶添加材種の傾向は変わらず、5554が最も高く、Al-Si系の中ではalloySが最も高くなった。また、参考値として測定した継手の破断伸びも、5554は10%前後であるのに対し、Al-Si系溶添加材の場合は、いずれも低く5%にも満たないものの、4047<4043<alloySの順に高くなり、引張強さと同様の傾向となっている。

3.3.3 考察

すべて溶接金属部で破断した重ね継手の場合はもちろんであるが、突合せ継手(余盛削除)の場合も溶接金属部の強度が継手強度の支配因子であると考えられる。そこで溶接金属部のビッカース硬さを測定した。その結果、溶接金属の硬さは、5554(HV=62)よりもAl-Si系溶添加材の方が高く、alloyS(HV=79)<4043(HV=94)<4047(HV=102)の順にSi添加量の増加に伴って高くなっている。突合せ継手の場合、5554溶添加材よりも溶接金属の硬さの高いalloySの方が継手の引張強さが高くなっているが、4043および4047と溶接金属のSi量が増え、硬さが高くなっているにもかかわらず継手の引張強さは低下す

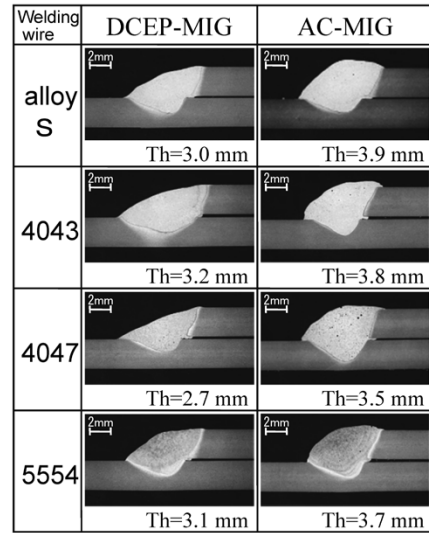


図7 代表的なすみ肉溶接部の断面マクロ
Fig. 7 Typical cross-sections of fillet welds

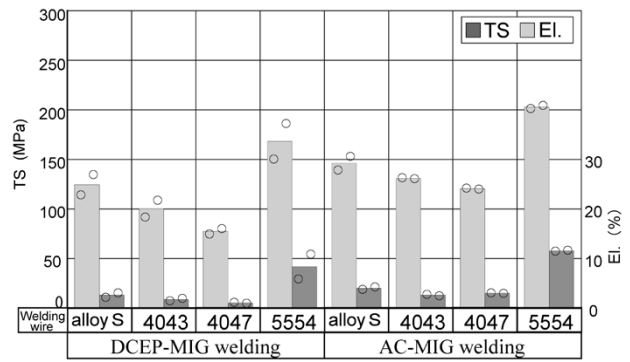


図8 Al-Si系溶添加材による重ね継手の引張特性
Fig. 8 Tensile properties of lap joint by Al-Si series and 5554 welding wire

る。重ね継手の場合、5554(HV=63)<alloyS(HV=82)<4043(HV=94)<4047(HV=101)の順に溶接金属の硬さが高くなっているが、継手の引張強さは逆に低下する傾向となっており、溶接金属の硬さが最も低い5554の場合、継手の引張強さが最も高くなった。溶接金属の硬さが高くなっているとその引張強さも高くなっていると考えられるが、継手の引張強さが低下している理由は明らかではない。

突合せ継手の場合、Si量の増加に伴って溶接金属の硬さが高くなる一方、溶接金属のじん性低下が継手引張強さの低下に寄与しているのではないかと推定される。片側溶接の重ね継手の場合、継手に引張荷重が負荷されたときにすみ肉溶接のルート部(上板と下板との界面と溶接金属との交点)に応力が集中して(図9)き裂の起点となる。継手の引張強さはこのルート部の応力集中に支配されるため、継手強度に及ぼす溶接金属の強度の影響が現れにくいものと推定される。

一方、交流ミグ溶接の場合は、のど厚が大きくなっているため直流ミグ溶接の場合に比べて継手強度が高くなっている。片側溶接による重ね継手の引張特性を向上するためには、溶接金属の強度を高めるよりものど厚を確保することの方が有効であるといえる。

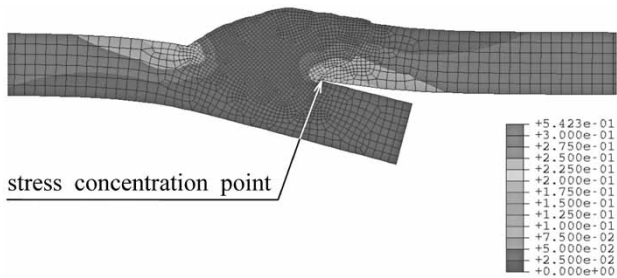


図9 片側重ね継手溶接部における応力分布のFEM解析結果
Fig.9 Stress distribution of single lap joint obtained by FEM analysis

むすび = Mg添加量が3%前後の中強度Al-Mg系合金は、高強度および高耐食性が必要なサブフレームなどの自動車足回り部品に適用される可能性が高い。そこで当社では、Al-3.3Mg-Mn-Cr合金の開発母材やAl-3.4Mg-0.7Mn-Cr-Ti-Zr合金、およびAl-2.5Si合金の開発溶加材によってミグ溶接継手の引張特性向上を検討し、以下の点を明らかにした。

- (1) 軟質材のO調質であっても、強度が高くなるよう母材の合金成分を調整したAl-3.3Mg-Mn-Cr合金の開発母材を用いると、両側溶接の重ね継手や余盛を付けたままの突合せ継手など母材で破断する場合だけでなく、余盛を削除し溶接金属で破断する突合せ継手も、母材の希釈によって継手強度が高くなった。しかし、片側溶接による重ね継手の場合は溶接金属で破断し、継手強度に及ぼす母材組成の影響はほとんど認められなかった。
- (2) 組成の異なるAl-Mg系溶加材によって中強度Al-Mg系合金の継手強度向上を検討した。Al-3.4Mg-0.7Mn-Cr-Ti-Zr合金の開発溶加材 (alloyW), あるいはJIS合金でも比較的高強度が得られる5183溶加

材によって5154母材を突合せ溶接した場合は、余盛を削除しても母材破断となった。余盛を削除した突合せ継手の引張試験結果や硬さ測定結果などから、溶接金属部の強度は、溶加材が5554<5654<alloyW<5183の順に高くなると考えられる。継手引張試験においては、片側溶接の重ね継手はいずれも溶接金属で破断し、溶加材と継手強度との顕著な傾向は認められなかった。

- (3) Si添加量の異なるAl-Si系溶加材によって5454合金母材の継手強度向上を検討した。余盛を削除した突合せ継手の場合、5554溶加材よりもAl-2.5Si合金の開発溶加材の方が引張強さが高く、溶接金属の強度が高まっていることを確認した。一方、片側すみ肉溶接による重ね継手では、Al-Si系溶加材よりも5554溶加材の方が引張強さが高くなった。溶接部に引張荷重が付加されたとき、片側溶接の重ね継手の場合はルート部に応力が集中し、引張強さはこの応力集中に支配されることから継手強度に及ぼす溶接金属の強度の影響が現れにくいためと推定された。
- (4) 片側溶接による重ね継手の引張特性を向上するためには、溶接金属の強度を高めるよりも、交流ミグ溶接法などによってのど厚を大きくするのが有効であることを確認した。

参考文献

- 1) 福地文亮ほか. 軽金属. 2005, Vol.55, No.3, p.147-152.
- 2) 軽金属協会. アルミニウム材料の基礎と工業技術. 1985, p.316.
- 3) 佐藤四郎ほか. 軽金属溶接. 1980, Vol.18, No.12, p.533-538.
- 4) I. L. Stern et al. Welding Journal. 1960, Vol.39, No.10, p.424s-432s.
- 5) T. Anderson. Welding Journal. 2013, Vol.92, No.7, p.32-36.
- 6) R. Iasconne et al. Welding Journal. 2002, Vol.81, No.4, p.29-31.
- 7) 特許第4229743号. 2009-2-25.