

ここ10年の技術開発系委員会における共同研究活動 ならびにその主たる成果

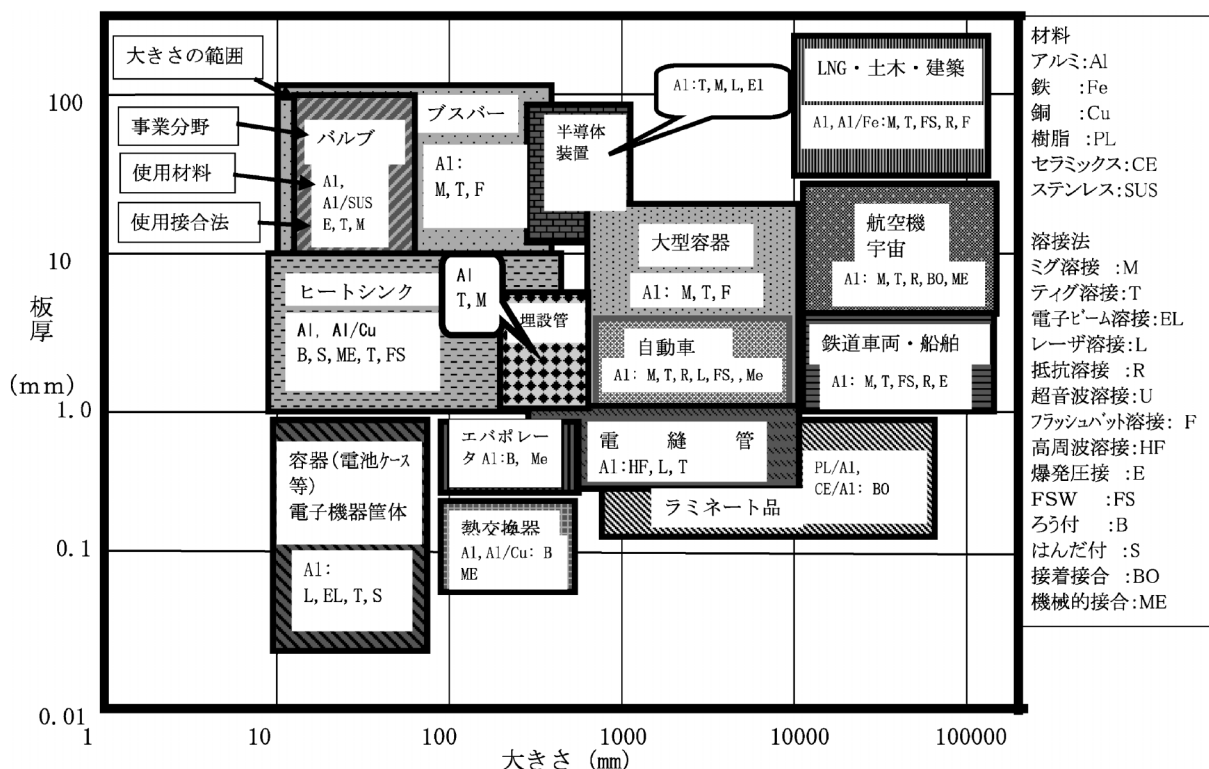
Collaborative investigation main results of these past 10 years
in the technology development committee of JLWA

本協会における委員会活動は鋭意取り組まれてきており、その成果は機関誌軽金属溶接の毎年、事業報告特集号(6月)に、年度報告として公開されており、節目となる10, 20, 30, 40周年ごとにその成果が取りまとめられている。ここでは、40周年(2002年、平成14年)以降の10年間に於ける、とりわけ技術開発関連の共同試験研究活動に焦点を当て、多年度にわたる成果の一端を紹介したい。

まずは、2002年に取りまとめられた溶接・接合技術のロードマップの作成がある。本協会の長期計画に基づき、企画運営委員会にロードマップ作成ワーキンググループが設置され、とりまとめられたものである。多岐にわたる各種事業分野を、適用される材料の厚さと構造物の大きさとで Fig. 1 のように分類し、20年後の2020年に適用されるで

あろう溶接・接合技術はどうあるべきか、あるいはこうなっていてほしいといった願望も含めてのイメージがまとめられた。接合要素技術からみた将来展望を Table 1 に、溶接・接合プロセスの観点ならびに3つに分類した事業分野の観点からのそれを Table 2~3 に示す¹⁾。予測度の判定は読者にお任せするとして、レーザ溶接やFSW(摩擦攪拌接合)等の新規溶接・接合技術のメリットを活かす方向で、従来型の溶接方法が置換されてきており、さらに、レーザとアークとのハイブリッド溶接技術や新たな電磁成形接合技術の適用例も散見されるようになってきた。

さて、ベースとなるアーク溶接分野においても、約30年前にその電源としてインバータ制御方式が登場し、その後の高速かつ大電力を制御可能な各種スイッチング素子に



加え、高速演算処理が可能となったマイクロプロセッサが登場し、これらを組合わせた小型で高速応答の制御（ μ s制御）が可能となったデジタルインバータ制御式アーク溶接機が、今や主流となりつつある。このことは、溶接機の性能が作業者の技量を上回り、作業者の経験に頼らずとも溶接ができるという世界ができつつあるというメリットを感じる反面、溶接機をうまく使いこなせていないのではという状況も推定される。一方、サイリスタ制御に慣れたい

わば匠の技能者からすると、半ばブラックボックス化された設定条件にはいささかとまどいを感じるという状況にもある。

これを受けて、施工法委員会ではデジタルパルス溶接分科会を設置し、市販のデジタルパルスミグ溶接機を用いて、電源特性と溶滴移行現象そして溶接部の諸性質を明らかにすべく試験調査が行われた。パルス条件毎にその溶滴移行現象を高速ビデオでとらまえ、1パルス1溶滴となる確率を整理したものがFig. 2である。図中の①が溶接機の標準設定で、100%の確率を持っており、且つスパッタやスマットの発生が抑制された良好な外観をもっているこ

Table 1 接合技術から見た将来展望

接合材料 (1) 母材 (2) 溶加材	(1) 強度向上 (2) 割れない
接合方法	(1) 省エネ：低温接合化 (2) コスト低減：高速化・消耗材不要 (3) リサイクル性向上：材料の単一化・分離性良好化 (4) 環境改善：ヒューム・騒音・有害光の発生無し (5) 資源枯渇防止：希少元素材料の使用低減
試験・検査方法	(1) 検査・検査方法の自動化 (2) 精度向上
規格・基準	(1) アルミニウム合金溶接継手強度データベースの構築 (2) 世界共通品質基準の作成

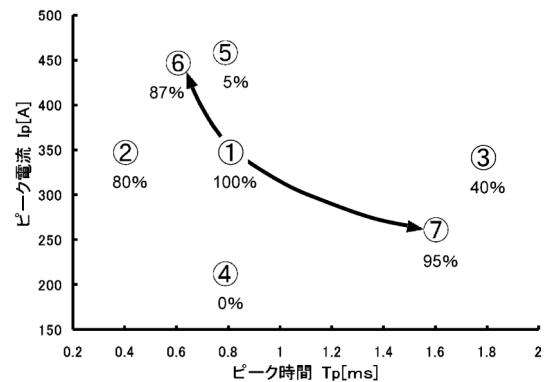


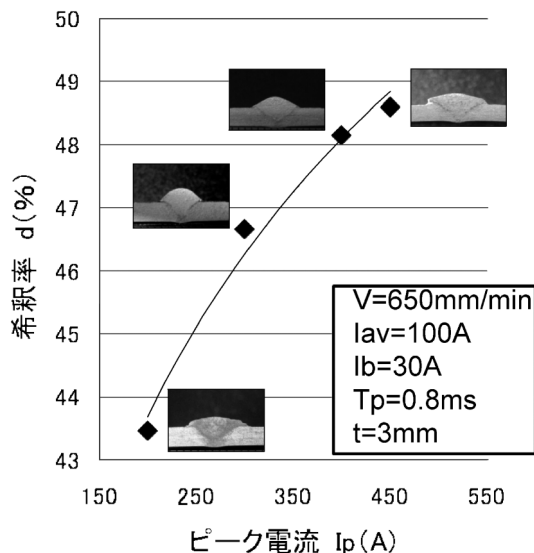
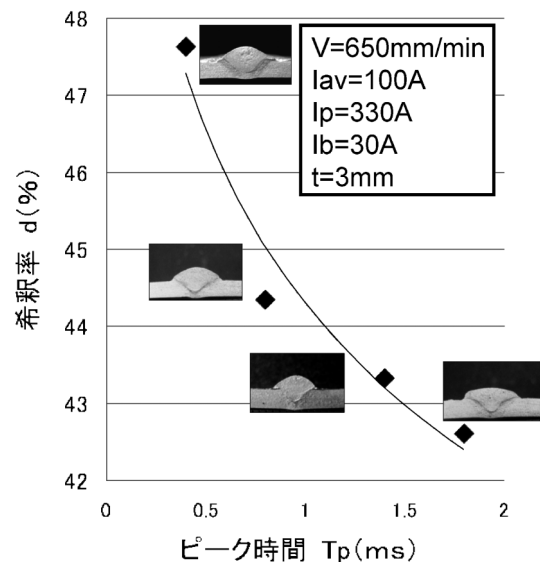
Fig. 2 1パルス1溶滴の移行現象が生じる確立

Table 2 アルミニウム合金の溶接技術ロードマップのまとめ

接合技術名	到達状況	時期	備考
ミグ・ティグ・プラズマ溶接	- 電源小型化、ビート細く溶けこみ大 - 溶接速度 5 m/min - 継手強度低下少なく、ひずみ	2010年 2015年 2010年	将来完全なロボットによる溶接作業が可能になる。
FSW	4 mm 板を 2D 溶接装置で 5 m/min で溶接 4 mm 板を 3D 溶接装置で 2 m/min で溶接	2005年 2007年	現在のミグ溶接のように一般的に使用される。
レーザ溶接	- LD (5 km) ミグ溶接並みの溶接品質 - 高吸収率 (60%UP) の開発 - 溶接速度 10 m/min - ギャップ裕度板厚の 30% (フィラー使用時 40~50%)	2010年 2015年 2015年 2015年	発振器の進化により高品質な継手が得られるようになる。また、エネルギー消費量が低減される。
抵抗溶接	- 電源交流インバータ - 片面からの溶接 6000系合金で電極寿命 10000 点以上 - 鉄並み電流で溶接	2003年 2007年 2010年 2010年	新たな電源設備の開発により進化する
ろう付	- ブレーシングシート厚現状の 20% 減 - 大気中フラックスレスブレーシング - 高 Mg ノコロック、真空ろう付 - 低温ろう付	2010年 2015年 2010年 2020年	低温ろう付が 450℃ 近傍でできるようになる。
機械的接合	- 凸凹が小さい接合法 - 電食問題解決	2010年 2015年	今後より一層一般的な接合方法になる。
接着接合	- コスト、寿命、耐水性、強度の方向性等の問題解決 - オールロボット化 - 下地処理なし	2015年 2020年 2020年	今後信頼性が向上し、溶融と同様に広くアルミニウムの接合に使われる。

Table 3 分野・材料厚さによるアルミニウム合金の溶接技術ロードマップのまとめ

接合技術名	到達状況	時期	備考
アルミニウム合金製自動車	- FSW が現在のミグ並に使用されて自動車を生産 - 高速度レーザ溶接が自動車生産に採用される - 一体ろう付自動車の生産 - オールリベット構造の自動車の生産 - オール接着構造の自動車の生産	2020年 2015年 2020年 2015年 2020年	軽量化, LCA に適したアルミニウム材料を用いた自動車の組立技術として種々の接合方法が自由に使い分けられるようになる。
厚板 (10 mmt 以上)	- 大電流・小型化・高速溶接 - 低真空 (大気中) EBW・小型化 - 大型フラッシュバット (DC バット) 溶接 - リニヤー運動摩擦圧接・大型化	2010年 2020年 2015年 2020年	厚板の接合エネルギーを低減できるようになる。
薄板 (1 mm 未満)	- 跡が着かない突き合わせ超音波シーム溶接 - 異種金属接合可能高周波溶接 - 薄肉 (0.3~0.5 mm) 用 LD レーザ溶接 - 大気中電子ビーム溶接	2015年 2020年 2015年 2015年	薄板の同種及び異種材料の接合が自由にできるようになる。

**Fig. 3** 希釈率とピーク電流**Fig. 4** 希釈率とピーク時間

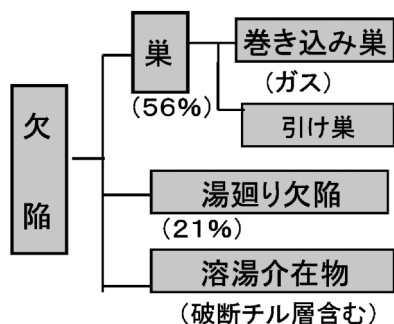
とがわかった。同様に板への溶込みを希釈率として整理した結果を、**Fig. 3~4** に示す。平均電流値を一定にする条件範囲においては、ピーク電流を高く、ピーク時間を短くする方が希釈率が高くなる傾向にあることもわかった²⁾。なお、このデジタルインバータミグ溶接機を用いて、溶接技術検定における板厚 3, 8, 20 mm の下向き突き合せ条件の最適化についてもその後、種々報告^{3),4)}されている。

次に、被溶接材料としての鋳物に関してであるが、その需要の約90%を占める自動二輪車ならびに自動車とともに進歩を遂げており、軽量高剛性な構造体の実現化のための各種材料との溶接が必然的に要求されてきている。一方、量的には少ないがロボットアームや医療機器向けの精密鋳造品においては、その高付加価値であるがゆえの溶接補修による鋳造欠陥の救済などの需要が潜在的にある。

これら二ニーズを背景に、鋳造品接合委員会が設立され、

鋳物の欠陥が溶接に与える影響を、共同試験にて取組まれた。**Fig. 5** に鋳造欠陥の種類を示すが、引け巣をも含む場合には、ASTM の欠陥グレード分類が、A, B, C, D と低下するにしたがって継手性能は低下するという傾向が**Fig. 6** のように認められた⁵⁾。なお、母材は AC4CH で、溶加材に 4043WY を用いたミグ溶接で、溶接後に T5 処理が後熱処理として行われた。

次に母材のグレードを、溶湯の脱ガスレベルの調整で、制御がより可能なピンホールに着目し、種々のグレードの母材を作製し、その溶接性能をさらに調査している。溶接金属部の性能比較のために余盛削除で行った結果によると、欠陥グレードに関係ない傾向が得られた。これは、母材の硬さよりも硬さの低い溶接金属部から破断し始めるものの、その後、母材の欠陥部に進展して破断完了するという特異性に起因するものと判断された。よって溶加材に母



※ (); 鋳造不良の中の原因%を示す

Fig. 5 アルミニウム鋳物の鋳造欠陥

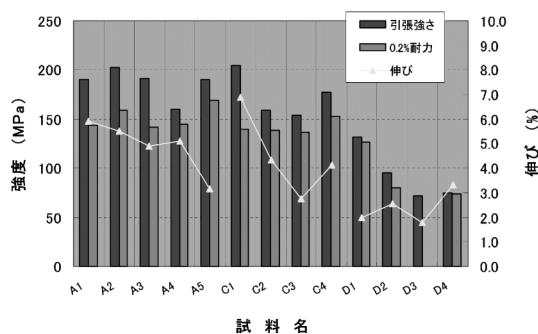


Fig. 6 溶接部引張試験 15 t 鋳造⇒12 t

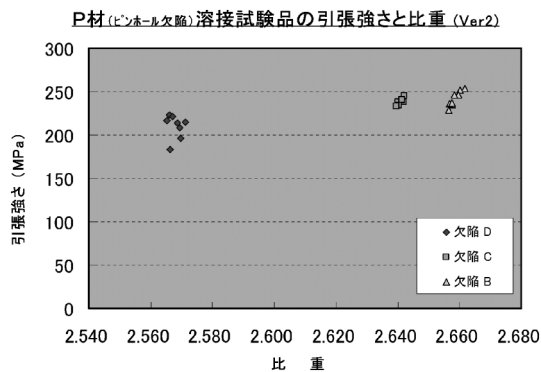


Fig. 7 引張強さと母材比重の相関性 (AC4CH)

材の共合金材にて再トライすると、母材部ですべて破断することとなり Fig. 7 のように欠陥グレードの低下に従って、継手性能も低下するという結果が得られた。つまり、別途のガス分析量との対比によると、0.20 cc/100 gr 以下レベルの含有ガスのピンホール欠陥では、及ぼし溶接金属部で破断してしまうような、つまり溶接性の低下を来すようなことにはならないという結論⁶⁾が得られたことになる。

レーザ溶接に関しては、レーザ溶接法研究プロジェクトの一環としてレーザ溶接委員会にてとりおこなわれてきて

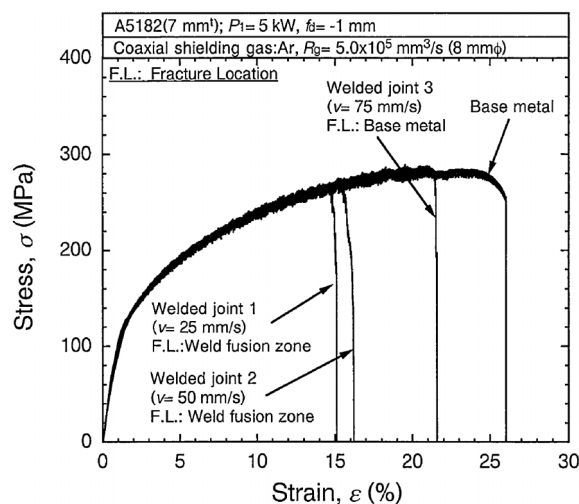


Fig. 8 Comparison of stress-strain curves between A5182 base alloy and laser welds produced at speeds of 25, 50 and 75 mm/s.

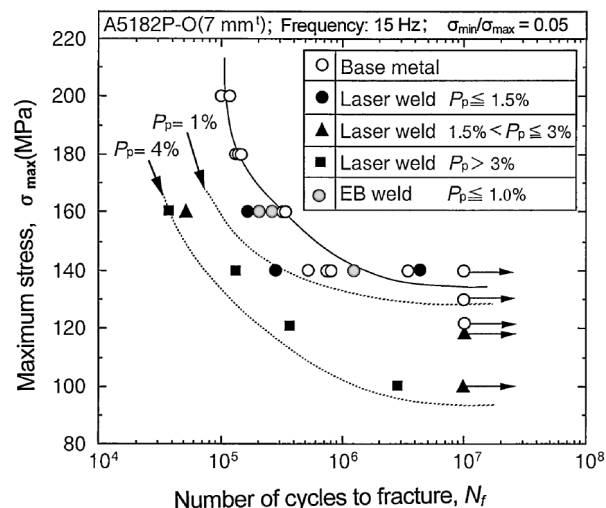


Fig. 9 Fatigue test results of A5182 alloy, laser welds and EB welds, showing effect of porosity percentage on fatigue cycles to fracture and fatigue limit.

いる。「CO₂レーザ高速溶接における薄板アルミニウム合金溶接部の継手強度」⁷⁾、「アルミニウム合金レーザ溶接部の機械的性質」⁸⁾、「アルミニウム合金レーザ溶接部の疲労特性」⁹⁾、「アルミニウム合金のYAGレーザ・MIGハイブリッド溶接における溶込み特性とポロシティの防止機構」¹⁰⁾、「レーザ溶接性と溶接部の時効特性—市販アルミニウム合金7N01のレーザ溶接性」¹¹⁾等の成果が報告されている。継手特性に関して、溶接金属部のポロシティの存在は、静的引張時の引張強度・破断伸びともに Fig. 8 のように低下させ、疲労特性にも Fig. 9 のように悪影響を及ぼす。強度特性改善のためには、引張強度に関してはポロシティ面積率を2%以下にする必要があり、そして疲労

強度に関してはポロシティ最大面積率を1%以下にし、そのサイズを約0.5 mm以下に小さくする必要があり、且つ分散させると母材 (A5182P-O) と同等の特性が得られるとした。このポロシティを低減する方法として、パワー密度および溶接速度の最適化により Fig. 10¹²⁾ に示すように、キーホールが安定化が不可欠であるが、板隙補完・溶込み増加などの点から有用視されるミグ溶接とのハイブリッド溶接においても、Fig. 11¹²⁾ のように後行ミグ方式におけるミグ溶接電流を増加させることで、熔融池表面が強いアーク力によりより広範囲でより凹むために、気泡が発生しても熔融池表面から抜けて消滅する現象が観察され、既に実用化されている。

船舶関連技術として、軽量化のための A5083-H321 材の溶接継手の設計耐力に関するとりまとめならびに接水材料として海外規格 (ICAS) で認定されている 6082 材に関する各種試験調査がアルミニウム合金船構造の軽量化委員会 (SOD) にておこなわれた。また、船底の防汚塗料に関する共同研究が表面処理委員会 (ST) にて行われた。

5083 の加工硬化材に対する過去のデータ (1966 年 (1/4H), 1986 年 (H32)) をも参考にしながら、1995 年から

2001 年までに取組んだ SOD 委員会での共同試験結果を、A5083-H321 適用時の突合せ継手設計耐力の指針として取りまとめ提案された。移動熱源の熱伝導理論から 2 次元熱流の場合、HAZ (熱影響部) の軟化は、溶接入熱 $Q/$ 板厚 T に比例するので、 $Q/[T \cdot GL]$ (GL : 引張試験標点距離) で、実測の継手耐力が整理された。その結果を、ミグ溶接ならびにティグ溶接における結果を Fig. 12~13 に示す。まず、ミグ溶接の場合、溶接技術、品質管理、品質保証が十分実施され、且つ入熱制限 ($Q/(T \cdot GL) < 25 \text{ J}/(\text{cm} \cdot \text{mm}^2)$) している場合 (ケース 1) は 170 MPa, 最小限の溶接技術、品質管理、品質保証を満たし、入熱制限なしの場合 (ケース 2) は 150 MPa, ケース 2 において溶接管理技術者の有資格者認定を満たさない場合 (ケース 3) は 130 MPa が提案されている。一方、ティグ溶接の場合、最小限の溶接技術、品質管理、品質保証を満たし、入熱制限なしの場合 (ケース 1 及び 2) は 150 MPa, 十分な品質管理の下でケース 2 の必要条件から溶接管理技術者の有資格者認定を満たさない場合 (ケース 3) は 130 MPa が提案されている。溶接施工等が十分管理状態にあることは前提としても、品質管理と加工工数とのコストバランスを考慮すれば、ケース 2 (150 MPa) を設計耐力として適用することが一般的には有利ではないかのコメントも付されている¹³⁾。

6082 材に関して、FSW にて接合された部品サンプルを海外から入手し、各種溶接性の調査と、FSW 継手部の疲労特性の調査が行われた。まず、素材部の特性は、7N01-T5 材には及ばないものの、引張強さは 5083-O 材よりも約 100 MPa 高い。6N01-T5 材に対しては、引張強さ、耐力ともに上回る特性が得られている。溶接性に関しては Table 4 に示す通り、不完全部の発生はなく溶接の健全性を確認している。また、継手強度を他合金と比較すると、7N01 や 5083 材には及ばないものの、6N01-T5 材よりも継手強度は高く、FSW を適用すればさらに高い継手強度が得られるとしている¹⁴⁾。一方、疲労特性については、Table 5 ならびに Fig. 14 に示すとおりである。疲労亀裂は、継手部よりも母材部からの発生が多く、ピットや粒界腐食が疲労亀裂の発生起点となったためと考えられ、入手材料の腐食状態に影響を受け、短寿命化を引き起こしたも

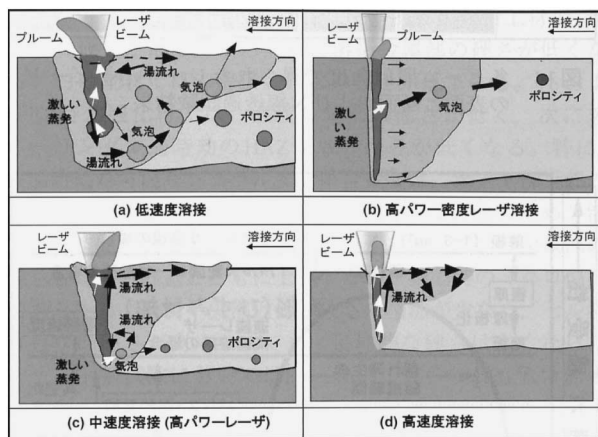


Fig. 10 レーザ溶接時のキーホール挙動と気泡およびポロシティの発生・防止を示す溶接現象 (模式図)

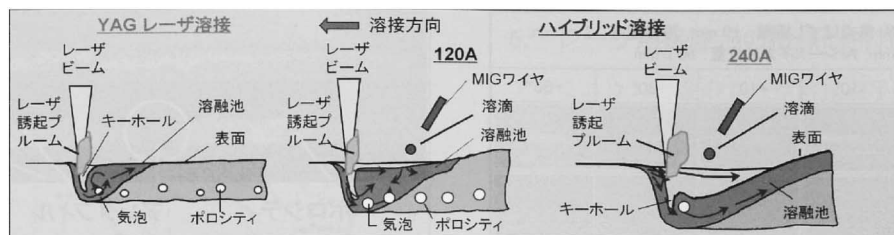


Fig. 11 レーザ溶接およびハイブリッド溶接時の溶融池内部のキーホール、湯流れおよび気泡とポロシティの生成 (模式図)

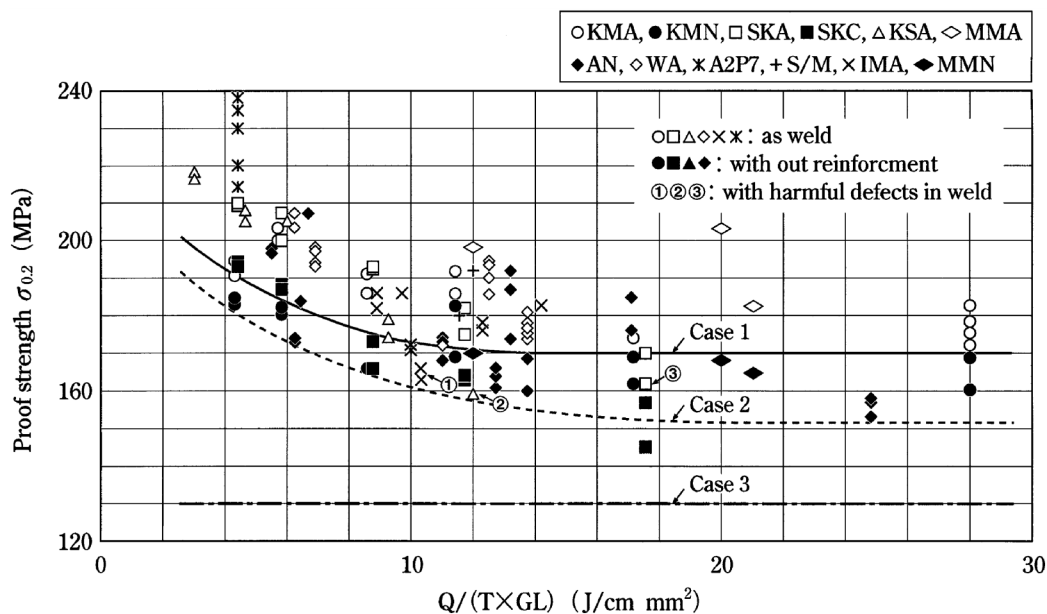


Fig. 12 Relation between $Q/(T \times GL)$ and proof strength of MIG joint

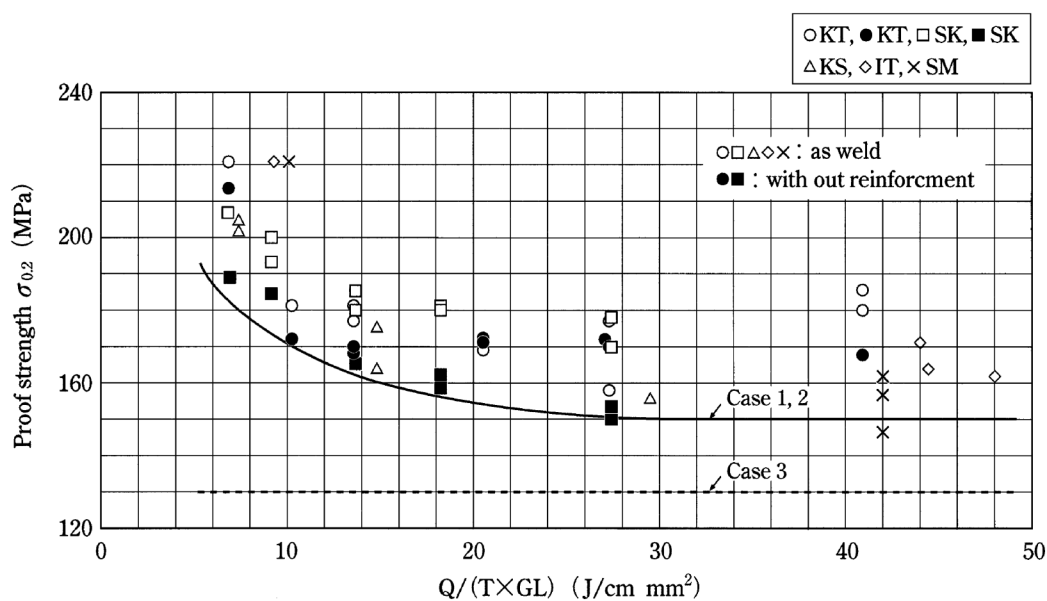


Fig. 13 Relation between $Q/(T \times GL)$ and proof strength of TIG joint

Table 4 他合金との継手強度比較

合金	厚さ (mm)	形状	調質	溶接方法	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	継手効率 (%)
6082	4	形材	T6	ミグ	216~244	153~172	72~80
				FSW	248~257	173~175	81~85
5083	4~8	板	O	ミグ	301	148	98
	5	形材	H112	ミグ	294	152	92
6N01	3~5	形材	T5	ミグ	186	118	68
7N01	5~10	形材	T5	ミグ	333	241	87

Table 5 Fatigue strength

Materials	Types of specimen	Mark of specimen	Bead direction to extrusion	Loading direction to extrusion	Fatigue limit	Tensile strength	Δ Sf/Su	Remarks
					Δ Sf	Su		
					MPa			
6082 alloy extruded shapes	Mother metal	MO-P		//	84.0	300	0.280	Center of flange
		MO-C		$\perp$	75.0	304	0.247	
	FSW joints	FSW-H	//	$\perp$	90.0	255	0.353	Ground flush
		FSW-K	//	$\perp$	63.0	248	0.254	Ground flush
	MIG Welding	MIG-P	$\perp$	//	70.0	220	0.318	Ground reinforcement
		MIG-C	//	$\perp$	68.0	237	0.287	Ground reinforcement
6N01-T5	Mother metal				117.6	264	0.445	
	MIG Welding				54.9	186	0.295	With reinforcement

// : Parallel, ⊥ : Perpendicular

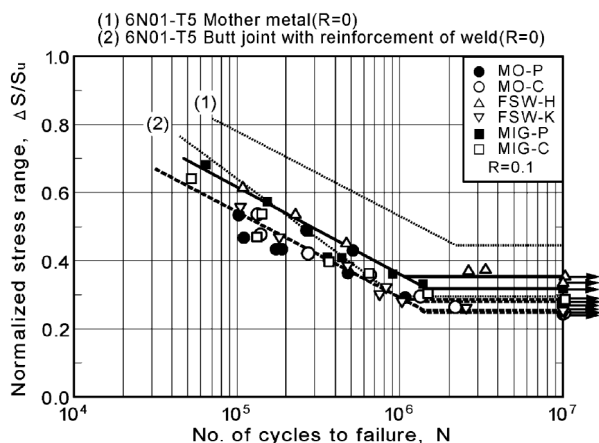


Fig. 14 Normalized S-N curves

のと思われた。また、腐食後の溶接熱履歴が腐食を助長したとも考えられ、詳細な検討が必要であるともコメントされた¹⁵⁾。

「あらかぜ」の船底防汚塗料の開発のために、表面処理委員会は1953年に試験を開始して以来、約半世紀にわたり有機化合物を防汚剤とする防汚塗料の開発試験が継続されてきた。アルミニウム合金船には防汚性に優れた銅化合物を含む一般鋼船用船底塗料は、アルミニウム製試験板のかき傷部分に通電作用によるガルバニック腐食の影響が観察されたために使用はできない。有機錫化合物も環境に影響を及ぼす影響が懸念されることから使用が制限される。このように銅化合物・錫化合物を含まず防汚性と防食性に優れた船底塗料に研究が取組まれ、58次研究で、有機N系及び有機S系防汚剤とエポキシあるいはアクリル樹脂との特殊合成樹脂防汚塗料が船底塗料として優れた性能を有することを明らかにした¹⁶⁾。さらに59次研究では浸漬時期による生物付着の影響が調査された。浸漬時期により防汚性は異なるが、付着の最盛期を過ぎた後の汚損は同じ

経過で進行することが分かった¹⁷⁾。なお、表面処理委員会は第59次研究をもってその活動を完了した。

地球温暖化ガスの排出規制の観点からは、とりわけ自動車の燃費向上のための軽量化が取り組まれている。その動きを加速させるためには、自動車補修時の技術確立が急務であるとの認識に立ち、まずは国際オートアフターマーケット展示会や国際自動車素材・加工展などへの展示や講演会には積極的に参加し、バーナによる加熱の影響などアルミニウム補修時に問題となる事項に対して啓蒙活動を展開中である。さらに、詳細な加熱試験や溶接試験に取り組むために、自動車のアルミ化接合委員会内に、補修ワーキンググループを立上げ、鋭意試験活動もスタートさせている。

FSW 施工法の普及や工業化の促進を目的にして、FSW 継手の諸特性に関するデータを整備するべく FSW 委員会が設置された。ここで得られた継手諸特性が、FSW の国際基準 (ISO 25239) 化活動に有効に活用されたことは、前報 (ここ10年の関係規格・標準) の通りである。

共同研究に用いた材料は、A5083P-O, A6N01 (6005C) S-T5, A7N01 (7204) S-T5 の厚さ 3 mm, 8 mm そして 20 mm (5083のみ) の3種類であり、各組合せの継手特性が詳細に調査された。2004年ならびに2006年に、それぞれ薄肉材、中肉・厚肉材の報告としてシンポジウム^{18),19)}が2回開催されると同時に、本誌にも論文投稿されている^{20)~30)}。継手効率や疲労特性には Table 6, Fig. 15 のように従来のアーク溶接に対するメリットが明らかとなっている。その後も、耐食性や疲労特性などが継続調査されると同時に、不完全部の非破壊検査法に対しても詳細調査され、今回、創立50周年記念の共同研究成果報告書としてまとめられた。この後者の非破壊検査に関して、不完全部の中でも特に継手強度に大きな影響を及ぼすキッキングボンドに的を絞って超音波フェイズドアレイにて探傷試験を

Table 6 各種材料の継手部の継手効率

(1) Averaged tensile properties of 52X joints

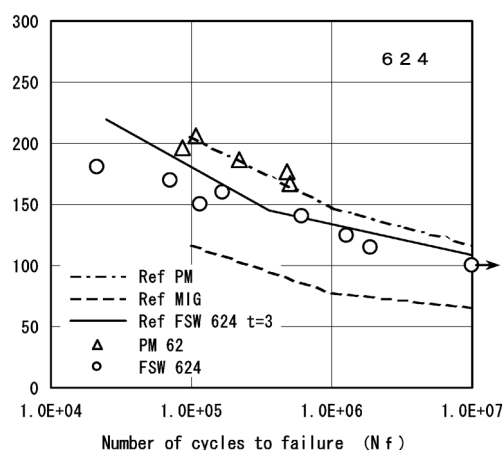
Item	Tensile strength MPa	0.2% proof strength MPa	Elongation% (50) (80)		Joint efficiency %
FSW	322	152	22	21	100
MIG	313	149	18	16	97
Parent material	322	147	24	—	—

(2) Averaged tensile properties of 63X joints

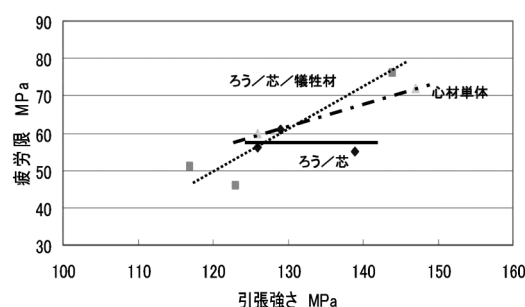
Item	Tensile strength MPa	0.2% proof strength MPa	Elongation% (50) (80)		Joint efficiency %
FSW	211	137	13	8	76
MIG	190	122	14	8	69
Parent material	276	258	10	—	—

(3) Averaged tensile properties of 71X joints

Item	Tensile strength MPa	0.2% proof strength MPa	Elongation% (50) (80)		Joint efficiency %
FSW	407	300	14	13	99
MIG	372	244	7	5	91
Parent material	411	363	21	—	—

**Fig. 15** S-N diagram of 6XX joints and their fracture locations (without dress, 8 mm thickness and stress ratio R=0) Al-Mg-Si系材料FSW断手のS-N線図

したところ、蛍光探傷では検出不可能なレベルでも検出可能なことが分かっているが、断面観察から明らかに連続のキッシングボンドであっても、不連続にしか検出されない場合もあるという結果となっており、検査の精度をより高める取組が望まれていた。小型の単体斜角探触子による直接探傷によると、明らかに検出されることから、フェイズドアレイにおけるより詳細な探傷条件の設定が重要になる

**Fig. 16** グレージングシート材における引張強さと疲労限との関係

との示唆が得られている。

ろう付関連に関しては、内部に高压の媒体が通過する熱交換器等に適用されるブレイジングシートならびにろう付フィレット部の疲労強度やクリープ強度等が設計上、重要な要素であるとの認識に立ち、疲労試験ならびにクリープ試験が低温接合委員会にて共同研究が行われた。標準的なろう付熱サイクルを加えた各種材料をシェンク式疲労試験を実施し、さらにデータのバラツキなどを補正し、その疲労限を静的引張強さとの関係にて **Fig. 16** に示す。心材単体およびろう材/心材/犠牲材の構成材では引張強さの増加に伴い、両者間でやや勾配が異なるものの疲労限の増加が認められる。一方、ろう材/心材の構成材では、3003心材と3N33心材間では差異がみられない結果となった。しかし、前2者の結果からはろう材層の影響が支配的であった可能性は低く、3N33心材部の値が何らかの要因で低くなった可能性も考えられた。ろう付熱サイクル後のろう材表面の熔融凝固面の粗度の影響等、今後の課題とされた³¹⁾。

次に、ろう付フィレット部の特性に関しては、Al-Si合金铸造材にて種々のSi量と共晶Siサイズを作製し、その模擬材にて試験調査が行われた。その疲労限を、比較としてのろう付相当加熱材の3003、3N33をも含めて引張強さとの関係を示すと、**Fig. 17** のようになる。共晶Siのサイズに大きく影響を受けていることがわかり、実製品の調査結果からは、その大半が共晶Si粗大材と中間材の間に位置し、トーチろう付のようなろう付後急冷材でのみ共晶Si微細材に近いという結果が得られている。一方、クリープ特性については、比較的短時間のクリープ破断データから長時間の各種値を推定できるとして広く適用されているLarson-Miller法の適用を前提に、比較的短時間破断となる条件にてデータを採用し、例えば **Fig. 18**³²⁾ に示すような結果が得られている。疲労・クリープ特性ともに共晶Siサイズが大きく影響することを明らかにした³³⁾。

異種材料との接合に関しては、接着接合、機械的締結やレーザ溶接などが考えられるが、短時間で大気中で接合で

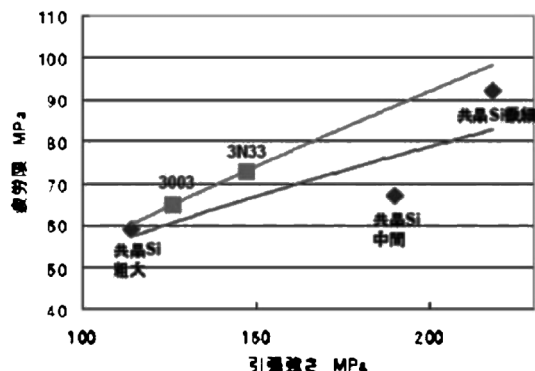


Fig. 17 フィレット部模擬鋳造材における引張強さと疲労限との関係

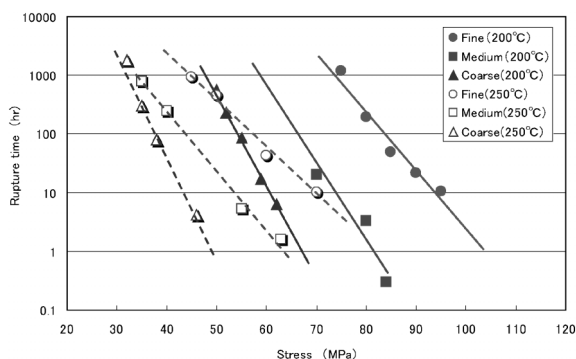


Fig. 18 Stress-Creep rupture time diagram of specimens. 応力-クリープ破断時間線図

きる低コストな接合工法として摩擦エネルギーを利用したFSWに着目し、樹脂との接合を異材接合委員会にてトライしている。用いた樹脂材料は、PE（ポリエチレン）ならびにEAA（エチレンアクリル酸ポリマー）で、金属材料はアルミニウムおよびマグネシウムである。樹脂材には極性を有するEAAを用いると良好な接合特性を有するが、極性を有しないものは、金属材料への表面処理が有効であるという結果が得られている。この後者の場合、化学反応効果なのかアンカー効果なのか等、詳細な解析が行われており、これらの成果は定時総会時の研究発表会へ報告される^{34),35)}とともに特許出願済である。材料の適材適所化には有望な接合技術であり、今後も鋭意、取組む予定である。

なお、本協会創立50周年を機会に、上記共同研究活動のうち、低温接合委員会ならびにFSW委員会における成果をCD-ROMにとりまとめ、発売中である。

(事務局 笹部誠二)

参 考 資 料

- 1) 軽金属溶接, Vol. 41 (2003), No. 1, p2
- 2) 軽金属溶接, Vol. 47 (2009), No. 7, p305
- 3) 軽金属溶接, Vol. 49 (2011), No. 4, p121
- 4) 軽金属溶接, Vol. 50 (2012), No. 7, p274
- 5) 軽金属溶接, Vol. 47 (2009), No. 7, p311
- 6) 軽金属溶接, Vol. 48 (2010), No. 11, p435
- 7) 軽金属溶接構造協会第33回研究発表会講演概要, p20, 平成15年 (2003) 5月
- 8) 軽金属溶接, Vol. 44 (2006), No. 8, p333
- 9) 軽金属溶接, Vol. 46 (2008), No. 2, p56
- 10) 軽金属溶接構造協会第35回研究発表会講演概要, p17, 平成17年 (2005) 5月
- 11) 軽金属溶接, Vol. 48 (2010), No. 12, p463
- 12) 片山: 軽金属, Vol. 62 (2012), No. 3, p75
- 13) 軽金属溶接, Vol. 40 (2002), No. 12, p744
- 14) 軽金属溶接, Vol. 44 (2006), No. 2, p49
- 15) 軽金属溶接, Vol. 44 (2006), No. 2, p61
- 16) 軽金属溶接, Vol. 40 (2002), No. 2, p87
- 17) 軽金属溶接, Vol. 41 (2003), No. 4, p159
- 18) シンポジウム「アルミニウム合金の摩擦攪拌接合継手の諸特性」(FSW小委員会研究活動成果報告会), 平成16年9月30日
- 19) シンポジウム「アルミニウム合金の摩擦攪拌接合継手の諸特性とその施工法の動向」(第2回FSW小委員会研究活動成果報告会), 平成18年11月21日
- 20) 軽金属溶接, Vol. 43 (2005), No. 5, p209
- 21) 軽金属溶接, Vol. 43 (2005), No. 5, p220
- 22) 軽金属溶接, Vol. 43 (2005), No. 5, p232
- 23) 軽金属溶接, Vol. 43 (2005), No. 5, p240
- 24) 軽金属溶接, Vol. 43 (2005), No. 5, p248
- 25) 軽金属溶接, Vol. 45 (2007), No. 4, p154
- 26) 軽金属溶接, Vol. 45 (2007), No. 4, p163
- 27) 軽金属溶接, Vol. 45 (2007), No. 5, p202
- 28) 軽金属溶接, Vol. 45 (2007), No. 5, p211
- 29) 軽金属溶接, Vol. 45 (2007), No. 5, p219
- 30) 軽金属溶接, Vol. 45 (2007), No. 5, p231
- 31) 軽金属溶接, Vol. 47 (2009), No. 7, p327
- 32) Proceedings of the 13th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA13), p. 741, June 3-7, 2012, Pittsburgh, Pennsylvania, USA
- 33) 軽金属溶接, Vol. 48 (2010), No. 8, p280
- 34) 委員会活動・成果報告会, 平成22年5月 (定時総会関連行事)
- 35) 委員会活動・成果報告会, 平成23年5月 (定時総会関連行事)