

異種アルミニウム合金インサート材を用いた
半溶融成形アルミニウム合金板の摩擦攪拌接合
に関する研究

高 橋 正 詞

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の立場と研究目的	3
1.3 本論文の構成	5
参考文献	6
第2章 使用した合金, 鑄造法および接合法	8
2.1 供試材に用いたアルミニウム合金	8
2.1.1 AC4CH	8
2.1.2 A6061	8
2.2 各種鑄造法	9
2.2.1 砂型鑄造法	9
2.2.2 金型鑄造法	9
2.2.3 高圧鑄造法 (溶湯鍛造法)	9
2.2.4 ダイカスト法	10
2.2.5 セミソリッド鑄造法	10
2.3 アルミニウムの接合法	12
2.3.1 TIG 溶接	12
2.3.2 MIG 溶接	13
2.3.3 レーザ溶接	13
2.3.4 摩擦攪拌接合	13
2.4 FSW の技術概要	14
参考文献	20

第3章 供試材および実験方法	22
3.1 供試材	22
3.2 実験装置および実験方法	26
3.2.1 接合装置	26
3.2.2 回転工具	26
3.2.3 評価方法	27
(1) 外観検査と巨視的および微視的組織観察	27
(2) 硬さ試験	28
(3) 引張試験	30
(4) 攪拌量	32
参考文献	33
第4章 半溶融成形 AC4CH-T6 の同種材摩擦攪拌接合	34
4.1 緒言	34
4.2 供試材および実験方法	34
4.3 実験結果	35
4.3.1 継手外観	35
4.3.2 巨視的組織	37
4.3.3 微視的組織	39
4.3.4 硬さ試験	43
4.3.5 引張試験	45
4.4 結言	48
参考文献	48

第5章 半溶融成形 AC4CH と A6061 の異種材摩擦攪拌接合	49
5.1 緒言	49
5.2 供試材および実験方法	49
5.3 実験結果	51
5.3.1 継手外観	51
5.3.2 巨視的組織	53
5.3.3 微視的組織	57
5.3.4 硬さ試験	61
5.3.5 引張試験	63
5.4 結言	66
参考文献	67
第6章 A6061 インサート材を用いた半溶融成形 AC4CH-T6 の摩擦攪拌接合継手におけるインサート材幅と攪拌量の効果	68
6.1 緒言	68
6.2 供試材および実験方法	68
6.3 オフセット量	70
6.4 攪拌量	72
6.5 実験結果	78
6.5.1 継手外観	78
6.5.2 巨視的組織	81
6.5.3 微視的組織	85
6.5.4 引張試験	91
6.6 結言	96
参考文献	97

第7章 結論	99
7.1 本研究の結論	98
7.2 総括	100
7.3 今後の展望	101
謝辞	103

Friction Stir Welding of Semi-Solid Cast Aluminum Alloy Plates Using Dissimilar Aluminum Alloy Inserts

Masashi Takahashi

The present study aims to clarify the feasibility of friction stir welding (FSW) to welding of semi-solid cast AC4CH aluminum alloy plates to the same metal using A6061-T6 strips as the insert metal by the following three steps. In the first step, the direct FSW of AC4CH plates to each other are implemented. The effect of welding process parameters on the weld structure formation as well as the mechanical properties of the joints are investigated. Low welding speed conditions, *i.e.* high heat input conditions, results in formation of wider and softer heat-affected zone (HAZ). Better mechanical properties, such as the joint efficiency reaching 82% of the base metal and the elongation exceeding the base metal are obtained under low heat input conditions. In the second step, AC4CH plates are FSWed with A6061 plates. In FSW of dissimilar materials, the layout of materials can dominate the weldability. Consequently, both layouts, *i.e.* AC4CH placed on the advancing side and A6061 on the counterpart and vice versa, are investigated. In the combination of AC4CH and A6061, the layout does scarcely affect the weldability. The hardness distribution in the stir zone is not affected by the welding condition. In the third step, AC4CH plates are FSWed to each other using A6061 strips with various breadths. The representative difference from the direct FSW is that the welding using inserted strip consists of two interfaces, *i.e.* the insert/base metal on advancing side and that on retreating side. FSW using the insert strip has to weld both interfaces simultaneously in one pass of the FSW tool. To evaluate the effect of the relative position of the interface and the tool center, as well as the other welding process parameters, a new parameter “the stirring stroke” is proposed. The results indicate that the insert strip thicker than the half of the probe diameter deteriorates the mechanical properties of the joints. In addition, an appropriate offset of the tool path allows the use of wider insert strip. By using a 2-mm-thick insert strip of A6061, FSW of AC4CH aluminum alloy achieves tensile strength of 236 MPa (joint efficiency 84%) and elongation of 11.0%.

第1章 序論

1.1 本研究の背景

世界の平均気温上昇を抑えるために CO₂ に代表される温室効果ガスの排出を抑制することが強く求められている^{1-1, 1-2)}。その取り組みのひとつとして自動車の燃費規制が挙げられ、自動車をはじめとした輸送用機器の軽量化は急務である。軽量化には、従来使用されてきた鉄鋼材料から軽量の代替材料への置換、部品一体化による締結品点数の削減などが考えられる。

軽量の材料への置換としてアルミニウム合金やマグネシウム合金などの軽金属材料が注目されている。マグネシウム合金は実用金属の中で最も密度が小さく（純マグネシウム： $1.738 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 293 K）¹⁻³⁾、軽量化には最も適しているが、塑性加工性が低いため冷間での圧延やプレス加工が難しい¹⁻⁴⁾。また、切削後の切削屑や粉状になると引火の恐れがあり、鋳造する際には防燃ガスで湯面を常に覆う必要がある¹⁻⁵⁾。このように、製品加工を行う際には設備や取り扱いに注意が必要である。アルミニウム合金の密度はマグネシウム合金より高い（純アルミニウム： $2.698 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 293 K）¹⁻⁶⁾が、適切な元素を添加して合金化し、熱処理や加工硬化での調質で、高強度や高延性の材料となり、高い耐食性や熱伝導性を得ることも可能である。塑性加工、切削加工、鋳造も適切な添加元素を含む合金であれば良好な製品を得ることができる。そのためアルミニウム合金は軽金属材料の中で最も多く使用され、鉄鋼材料からの置換も増加傾向にある¹⁻⁷⁾。

様々な加工方法を選択できるアルミニウム合金であるが、同一形状、そしてプレス加工では難しい形状を大量生産する生産面を考えるならば鋳造工程は必須となる^{1-8, 1-9)}。アルミニウムの鋳造法で現在最も使用されているのはダイカストである。ダイカスト法¹⁻¹⁰⁾は寸法精度の高い鋳造品を大量生産することが可能である。その一方で、ブローホール等の内部欠陥が多い問題を本質的に抱えている。これらの欠陥は機械的性質の低下だけでなく、熱処理におけるブリストアの発生や溶接阻害の原因となり、設計の自由度を制限している面もある。ダイカスト

は生産性に秀でていますが前述した欠点が無視できない。これらの欠点を克服する一つの方法として高橋らは半溶融成形法に着目した。詳細は後述するが、鑄造材の中では欠陥が少なく熱処理もできることから、高強度・高延性等の優れた特性を付与することが可能である¹⁻¹¹⁾。しかし、一度ピレットを鑄造する工程が増えること、鑄造方案がダイカストと同様にはならないことからコストの面で敬遠されていた。それでも、近年の輸送用機械の燃費向上はコスト増を甘受してでも必要となり、軽量化は最も有効な燃費向上策になると考えられるためこの半溶融成形法はさらなる利用用途の拡大が見込まれる。

重力鑄造をはじめ、各種の鑄造を行うには必ず鑄型が必要となる。さらに、ダイカスト用をはじめとした生産性が高く、高強度な鑄型として金型が利用される。一体成形部品の大型化を図るには、成形機等の設備の大型化も必要となりコストも大きくなる。また、製品が複雑形状を有する場合、金型部品点数増加や型組み／型ばらし工程の複雑化によるコストが増す。これらのコスト増大を抑制するには大型部品を単純形状部分と複雑形状部分に細分化することが有効である。この細分化は形状改定への対応の柔軟性も得られるため、中長期的視野での製造コストを下げることも可能になると考える。

一体成形部品の細分化を実現するには、各部に合った方法で製造された複数種類の製品を一体化する接合工程が不可欠である。ボルト・ナットを用いるような機械的締結では材料の強度低下を招くことなく一体化可能ではあるが、部品点数の増加やボルトを通すための穴あけ工程等によるコスト・重量の増加が避けられない。

一般的な溶融溶接はアルミニウムへの適用が難しいとされていたが、溶接電源や電極棒の改良や技術向上により適用可能範囲が広がっている。前述したダイカスト品は内部欠陥の存在により溶融溶接での接合は困難であるが、その他の鑄造用アルミニウム合金の多くは溶融溶接が可能である。欠陥が少ない鑄造法である半溶融成形で製造された部品も溶融溶接が可能であるとされているが、熱処理により大きな特性を得ていることから、それらの特性を保持するために

も接合時の入熱による調質状態変化はできるだけ抑えたい。

摩擦攪拌接合法 (Friction Stir Welding: FSW) は、低入熱の固相接合法であることから、熔融溶接が適用困難とされているダイカストを含む鋳造用アルミニウム合金や熱影響を受けやすい熱処理型アルミニウム合金に利用でき、接合に伴う変形も少ないとされている¹⁻¹²⁾。現在では鉄道、船舶等輸送機器や土木・建築構造物にも適用されている^{1-13, 1-14)}。

重力鋳造したアルミニウム合金やダイカスト材と展伸材の接合に FSW を適用した研究報告^{1-15, 1-16)}はあるが、同一の化学組成、熱処理であっても鋳造方法が異なると、冷却速度の違いから組織や機械的性質が大きく異なるため^{1-17, 1-18)}、接合性に影響すると予想される。しかし、半熔融成形材の FSW に関する報告は少なく、さらに展伸材との異材接合はごくわずかしか報告例がない¹⁻¹⁹⁾。

1.2 本研究の立場と研究目的

接合法の中でも固相接合は接合時の入熱が小さく、融点より低い温度で接合を行う。その中でも摩擦攪拌接合は板材の突合せ接合に適しており、また接合機の改良により平面だけでなく三次元曲面等の複雑な接合面に対応できるようになってきた。一方で、棒状や板状の単純形状品や大型品の製造には鋳造ではコストがかかり展伸材の方が有利となることが多い。FSW を鋳造材と展伸材の接合に利用できれば両材料の特長を生かしたものづくりを実現できると期待される。

本研究では、これまでに幅広くアルミニウム合金で FSW の研究が行われている中で、少数である鋳造材、さらに特殊な鋳造法である半熔融成形したアルミニウム合金に適用した際に接合条件が組織や機械的性質におよぼす影響について明らかにするものである。

アルミニウム鋳造材のほとんどの合金に Si が含まれている。これは鋳造時の合金融点を下げることにより鋳造性を良好にする効果がある。しかし、Si は Al 中にほとんど固溶せず存在し、多量に添加することにより耐摩耗性を向上させることもできる。これは同時に工具に多大な摩耗負荷をかける。FSW の回転工

具（ツール）はアルミニウム合金の接合の場合、コストの面から SKD などの鉄鋼材料を使用することが多い。極端な例ではあるが SiC 粒子粉末分散強化アルミニウム合金複合材料に FSW を適用することでプローブが数回の接合でねじ形状が磨滅して攪拌能力が著しく低下する¹⁻²⁰⁾。この他、過共晶となったアルミニウム合金で初晶 Si が粗大となった場合も加工時の刃物に大きなダメージを与え、耐摩耗性が高くなった場合もツールが減耗することも考えられる。亜共晶アルミニウム合金中の Si 量では共晶 Si は微細に晶出するため、ここまで顕著に摩耗しないと考えられるが、複数回にわたり同一プローブを使用すればプローブの減耗は避けられず、ツールの交換作業を余儀なくされる。また、減耗したプローブの主成分である Fe は高速回転しながら供試材内に取り込まれることになる。本実験で使用する AC4CH は汎用的に使用される AC4C から不純分を規制して伸びを重視した合金である。AC4CH は Fe 含有量が増加するに伴い機械的性質が劣化する傾向にあり、特に伸びおよび衝撃値の低下は著しい¹⁻²¹⁾。ツールの減耗および供試材性質低下の両面からの影響を考えて Fe の混入はできるだけ抑えたい。

溶融接合において、開先の面どうしが密着しない材料、融点が大きく異なる材料、金属間化合物の生成により継手強度低下が著しい材料などを接合する際にインサート材（filler metal）を用いることがある。適切なインサート材を選定することにより、溶融溶接の難しい融点の異なる材料や金属間化合物の形成を抑えることで接合性を向上させることが可能である^{1-22, 1-23)}。固相接合においても摩擦圧接では固相接合の難しい材料どうしや金属間化合物を生成しにくい材料をインサート材として材料間に挟み込むことにより接合強度を向上させている^{1-24, 1-25)}。これらの技術は FSW にも適用が可能であると考えられる。本研究において異種材料の相手材となる A6061 は、アルミニウム合金の中で FSW 接合条件可能範囲が広く¹⁻²⁶⁾、Si 含有量は 0.40~0.8% であり、AC4CH（6.5~7.5%Si）と比較し非常に少量である。

そこでプローブが供試材への接触面積と接触時間をできるだけ少なくするた

め共晶 Si 量が少ない展伸アルミニウム合金 A6061 インサート材を用いた FSW を行い接合性および継手性能を評価する。また、このインサート材幅をできるだけ大きくし、かつ機械的性質が低下しない接合条件が求められるがこのような研究は他に例がない。

1.3 本論文の構成

本研究では、半溶融成形した AC4CH アルミニウム合金板に FSW を適用して AC4CH どうしの接合を行い、粒状 α -Al とその周りの共晶組織で構成されるアルミニウム合金の攪拌の影響と接合性の評価、続いてインサート材候補である A6061 との異材接合を行い展伸材と AC4CH 材の攪拌後の組織と接合性を評価する。そして最後に実際に A6061 をインサート材として接合により継手の組織や機械的性質に対するインサート材使用の影響を明らかにするために以下の研究を行った。本論文は全 7 章よりなり、その概略を以下に示す。

第 1 章「序論」では、本研究の背景、摩擦攪拌接合の現状、本研究の立場と研究の目的および本論文の構成を記述する。

第 2 章「使用した合金、鋳造法および接合法」では、供試材である半溶融成形した AC4CH 材について各種鋳造法と比較して説明する。また、その供試材の接合に使用する摩擦攪拌接合の技術概要をその他の接合法と比較して説明する。

第 3 章「供試材および実験方法」では、本研究で使用した供試材の製造方法、接合法、評価方法について記述する。本研究では複数ある接合条件パラメータを統合して 1 つの指標で制御するため、新たに「攪拌量」を定義して使用する。この攪拌量についても本章で説明する。

第 4 章「半溶融成形 AC4CH-T6 の同種材摩擦攪拌接合」では、今回使用する半溶融成形した AC4CH 材の直接摩擦攪拌接合において接合条件が継手の組織および機械的性質に及ぼす影響について検討し、基準となる FSW 継手の状態と性能を把握する。

第 5 章「半溶融成形 AC4CH と A6061 の異種材摩擦攪拌接合」では、半溶融成

形した AC4CH 材と A6061 で異種材料接合し，異材界面組織，欠陥，機械的性質の 3 者を攪拌量に結びつけることを試みる．

第 6 章「A6061 インサート材を用いた半溶融成形 AC4CH-T6 の摩擦攪拌接合継手におけるインサート材幅と攪拌量の効果」では，前章で良好な継手効率が得られた A6061 材をインサート材として半溶融成形した AC4CH 材を FSW し，インサート材幅により変化する攪拌量を指標として最適な接合状態を達成する．

第 7 章「結論」では第 4 章から第 6 章までの実験結果の総括的結論を述べ，今後に残された課題を示す．

参考文献

- 1-1) 外務省，”気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書”，外務省，2005-1-20，https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/treaty/pdfs/t_020413.pdf，(参照 2021-11-15)．
- 1-2) United Nations，”PARIS AGREEMENT”，United Nations，2015-12-12，https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf，(参照 2021-11-15)．
- 1-3) J. Emsley: THE ELEMENTS THIRD EDITION, CLARENDON PRESS・OXFORD, (1998), 120-121.
- 1-4) 根本茂：初歩から学ぶマグネシウム，工業調査会，(2002)，152-156.
- 1-5) 根本茂：初歩から学ぶマグネシウム，工業調査会，(2002)，187-192.
- 1-6) J. Emsley: THE ELEMENTS THIRD EDITION, CLARENDON PRESS・OXFORD, (1998), 18-19.
- 1-7) 技術情報協会：自動車軽量化のための材料開発と強度，合成，強靱性の向上技術，技術情報協会，(2015)，329-339.
- 1-8) 公益社団法人日本鋳造工学会：基礎から学ぶ鋳造工学，公益社団法人日本鋳造工学会，(2017)，29-36.
- 1-9) 軽金属協会：KAISER アルミニウム鋳物第 2 版，軽金属協会，(1967)，1-7.
- 1-10) 社団法人日本鋳造工学会：鋳造工学便覧，丸善，(2002)，515-532.

- 1-11) 岩澤 秀, 山口友康, 才川清二, 林 勝三, 鎌土重晴, 小島 陽 : 鑄造工学, 74 (2002), 291-297.
- 1-12) 時末 光 : FSW (摩擦攪拌接合) の基礎と応用, 日刊工業新聞社, (2005), 1-5.
- 1-13) 森 久史, 野田雅史, 富永誉也 : 軽金属, 57 (2007), 506-510.
- 1-14) 奈良圭祐 : 溶接学会誌, 82 (2013), 177-180.
- 1-15) 小久保正史, 高山善匡, 和井伸一, 金内良夫, 加藤 一, 平野 聡 : 軽金属, 58 (2008), 146-150.
- 1-16) M. Tehyo, P. Muangjunburee, S. Chuchom : Songklanakarin J. Sci. Technol., 33 (2011), 441-448.
- 1-17) S. Kumai, T. Tanaka, H. Zhu, A. Sato : Mater. Trans., 45(2004), 1706-1713.
- 1-18) E.Lee, B.Mishra : Int. J. Metalcasting, 12 (2018), 449-456.
- 1-19) M. Tehyo, P. Muangjunburee, A. Binraheem, S. Chuchom, N. Utamarat: Songklanakarin J. Sci.Technol., 34 (2012), 415-421.
- 1-20) H. Liu, H. Fujii, K. Nogi: Proceeding of IIW Pre-Assembly Meeting on FSW in Nagoya 2004, (2004), 185-190.
- 1-21) 軽合金の生産技術教本編集部会 : 軽合金鋳物・ダイカストの生産技術 改訂版, 財団法人素形材センター, (2000), 37-38.
- 1-22) 松本幸樹, 西本明生, 石川武, 永塚公彬, 伊藤和博, 塚本雅裕, 中田一博 : 軽金属溶接, 57 (2019), 320-324.
- 1-23) 及川初彦, 斎藤亨, 吉村尚, 永瀬隆夫, 切山忠夫 : 溶接学会論文集, 14 (1996), 267-277.
- 1-24) 越智秀, 小川恒一, 山本義秋, 渡部光利, 菅泰雄 : 軽金属, 44 (1994), 320-324.
- 1-25) 加藤数良, 時末光 : 軽金属, 54 (2004), 430-435.
- 1-26) 社団法人溶接学会編 : 摩擦攪拌接合-FSW のすべて-, 産業出版, (2006), 18.

第2章 使用した合金， 鑄造法および接合法

本章では，本研究で使用した供試材である半溶融成形した AC4CH アルミニウム合金板の製作方法，異種材接合の相手材またインサート材となる A6061 アルミニウム合金，アルミニウム合金で用いられる他の鑄造法，合わせてアルミニウムに用いられる接合法について説明する．

2.1 供試材に用いたアルミニウム合金

2.1.1 AC4CH^{2-1, 2-2)}

本研究で使用した AC4CH は Si を主たる添加成分として AC3A を改良した鑄造用アルミニウム合金である．AC3A は Al にほとんど固溶しない Si だけを 10.0～13.0%合金元素として添加するもので，シルミンと呼ばれている．AC4C は AC3A の Si を 6.5～7.5%に減じ，Mg を 0.25～0.45%加えて固溶強化したものでシルミン γ と呼ばれる．Si と Mg が反応することで Mg_2Si が形成され，時効硬化性があるので，熱処理を施すことによってさらに高い強度が得られる．AC4CH は AC4C において靱性の向上を目的として不純物の含有量を厳しく規制したものである．鑄造性は AC4C と同様であるが，時効硬化性に優れかつ高い伸びを示すことから，鑄造性の良い強靱性の合金として，保安的要求が高い部品，自動車用ホイール材料などに使用される．

2.1.2 A6061^{2-3, 2-4)}

6000 系合金は Mg, Si を主成分とし，熱処理により Mg_2Si を析出させ，時効硬化する熱処理型合金である．本系合金は押出性や耐食性に優れている A6063 は Mg 添加量が 0.45～0.9%であり，押出性に優れている．本研究で使用した A6061 は 6000 系合金の中でも Mg が 0.8～1.2%と高く，また Cu が 0.15～0.40% 添加することにより同合金系の中でも強度が高く，自動車部品用材料をはじめ広く利用されており，橋梁などの構造材としても利用されている．

2.2 各種鑄造法

2.2.1 砂型鑄造法^{2-5~2-7)}

砂型鑄造法は古くから利用されている鑄造法である。鑄型構成材料は珪砂であり、粘結剤を加えて混練し鑄型を成形する。砂で構成された鑄型は、金属で構成された鑄型と比較して保温力が高く、一般には徐冷凝固が行われ、凝固収縮に対する補償効果大きい。しかし、高強度な鑄物を作るには急冷凝固を必要とする部分あるいは必要とする場合があり、そのときは冷やし金等を使用して冷却速度を制御する。近年では珪砂の代わりに人工砂を使用することで再生時の砂の破碎を抑えることにより、繰り返しの使用回数を増やし、破碎による粉塵飛散防止を図り環境に配慮した工場もある。

2.2.2 金型鑄造法^{2-8~2-10)}

金型鑄造法は広義として鑄型に金属材料を用いる鑄造法の総称であるが、ここでは狭義として重力を用いて鑄造する方法を説明する。全体が金型で構成された鑄型に鑄造した鑄物はもちろん金型鑄造であるが、鑄型の主型以外、たとえば中子に砂型を用いた場合も該当する。

金型は砂型と比較して、一方では高い剛性により鑄物の形状・寸法の精度を保証し、他方では優れた熱伝導率により溶湯を急冷凝固させ、組織の微細化による強度向上と生産性向上に大きく寄与している。1個の鑄型で多数の鑄物を反復生産できるのも特徴である。形状設計の自由度は砂型に劣るが、分割鑄型の採用で補うことができる。急冷凝固は鑄造サイクルタイムを短縮させるが、流動性の悪い溶湯では鑄型充填完了前に凝固が起こるので、金型鑄造に適する合金は溶湯の流動性が良いことを条件としている。

2.2.3 高圧鑄造法（溶湯鍛造法）^{2-11~2-13)}

高圧鑄造法は、金型に溶湯を低速で流し込んだ後、外部から高圧力を加えて加圧下で凝固を完了させる鑄造方法である。低速層流充填により空気巻き込み防

止を図り，凝固時に生じる収縮巣に対して高圧下で金型表面に熔融金属が密着し冷却速度は高くなり組織が微細化する．加圧下では金属合金の液相線が上昇しさらに冷却速度が高くなるなどの理由により他鑄造法に対して強度，伸びが優れている．加圧による湯漏れの危険や，Cu を含む材料などの偏析の起こしやすい材料の場合，製品一部の強度低下があるため鑄造方案の配慮を必要とする．

2.2.4 ダイカスト法²⁻¹⁴⁻²⁻¹⁶⁾

ダイカスト法は精密に造られた金型に，溶湯をダイカストマシンにて高圧で注入する鑄造法である．溶湯圧入装置が溶湯保持炉中にあるか否かによって，ホットチャンバ式とコールドチャンバ式に区別されるが，アルミニウム合金は後者を適用する．スリーブに注入された溶湯はプランジャの作動により高い速度で射出され，狭いゲートを通して固定型と可動型で構成されたダイキャビティに圧入される．鑄型は冷却能力が高いので溶湯はすぐに凝固するが，加圧効果により鑄型の寸法・形状に忠実な鑄物が得られる．長所としては，薄肉鑄物の鑄造が可能で寸法精度が高い，サイクルタイムが短く生産性が高い，急冷凝固により組織が微細化されるなどが挙げられる．一方で短所として，肉厚製品，肉厚不揃い製品，アンダーカットがある製品等は不向きである，溶湯は射出圧入されるので空気や酸化膜を巻き込みやすい，熱処理や溶接等の後加工が不適であることが挙げられる．

2.2.5 セミソリッド鑄造法²⁻¹⁷⁻²⁻¹⁹⁾

セミソリッド鑄造法は，1970 年代にマサチューセッツ工科大学において開発された．この鑄造法は粒状化した固体を含む液体の流れが層流になりやすいことを利用したものであり，粒状化した固相を 20～60%含む固液共存状態で金型内に充填し加圧するものである．この方法では引け巣が少なく鑄造時の冷却速度が大きいため健全な高強度鑄物の製造が可能である．

セミソリッド法は温度アプローチにより二つに分けられる．ひとつは半凝固

成形法である。通常の鋳造凝固過程では初晶 α -Al は樹枝状晶に晶出する。しかし、溶湯を電磁攪拌や機械攪拌等によりせん断力を与えることにより冷却過程で晶出する初晶 α -Al は粒状化する。この溶湯を半凝固状態スラリーになっている状態で金型内に圧入する方法である。溶湯を冷却過程からそのまま鋳造できる利点があるが、鋳込み重量の大きい製品では鋳壁からの冷却であることからスラリー内の温度分布を均一にすることが難しいことが欠点である。

もうひとつは半溶融成形法である。この方法は半凝固成形法と同様に電磁攪拌や機械攪拌により、通常の冷却では樹枝状晶に晶出する α -Al を粒状化させた状態でビレットを鋳造する。そのビレットを再加熱して半溶融状態のスラリーにして金型内に圧入する成形法である。一度ビレットを鋳造する工程が増えるが、加熱に高周波誘導加熱装置を用いることで鋳込み重量の大きいものでもビレットの内部・外部の温度差を小さくすることが可能である。

半溶融成形法で使用するビレットの製造に電磁攪拌や機械攪拌を利用するのが一般的であるが、このほかに SIMA (Strain Induced Melt Activated)法がある。SIMA 法は、通常の連続鋳造したビレットに押し出しのような塑性加工により大きな歪を与え、再加熱時に初晶 α -Al が粒状化する。いずれも高価で大型の装置を必要とする。ビレットをメーカより購入すればこれらの装置を持つことは不要となるが、鋳造品のビスケット、ゲート、ランナーなど鋳造方案部分や不良品になった製品はダイカストや重力鋳造のように戻り材としてそのまま再使用が不可となる。高強度、高延性が期待できる製品を製造できる技術であってもコストが大きくなると普及には大きな障害となる。

この問題に対し杉浦ら²⁻²⁰⁾は、円筒ステンレス製鋳型（鋳型温度 573 K、肉厚 10 mm）に AC4CH を 877 K で注湯することで、鋳壁に遊離核を発生させてその遊離核から粒状の初晶 α -Al を晶出させる方法を開発した。この方法では、ビレットは通常の溶解工程を経て一定の温度に保ったステンレス製鋳型を用意できればどの場所でもビレットを鋳造でき、鋳造方案部分や不良品も通常の戻り材として再溶解し、再度ビレットを鋳造することができる。

本研究では、鋳込み重量が容易に変えられること、バッチでの鋳造、成形が容易であることからセミソリッド法のなかで半熔融成形法を選択した。これらのことから、金型、成形マシン、アルミニウム溶解・鋳造設備を有するのみで製品の成形が可能であり、中小企業等でも普及の可能性が高い半熔融成形法で供試材を作成し実験に供した。

2.3 アルミニウム合金の接合法

アルミニウム合金の接合には、機械的接合、接着、熔融溶接、固相接合が用いられている。

機械的接合²⁻²¹⁾は、接合しようとする部材の接合表面にボルト・ナット、リベットなどの機械要素で圧力を加えて接合する方法である。そのほかに、加熱・冷却による部材の膨張・収縮を利用する焼きばめという方法もある。いずれも接合面は化学的に結合してらず、機械的に接触しているだけである。

アルミニウムの熔融溶接には不活性ガスを用いた TIG 溶接、MIG 溶接のほかレーザー溶接やろう付などが用いられる。

2.3.1 TIG 溶接^{2-22, 2-23)}

TIG 溶接は Tungsten Inert Gas アーク溶接の頭文字をとったもので、放電ガスとしてはアルゴンやヘリウムなどの不活性ガスが用いられる。これらの不活性ガス雰囲気中でタングステン電極と母材との間にアークを発生させ、そのアーク熱により母材および溶加棒を熔融して接合する方法である。電極が陽極となる棒プラス極性での溶接の場合、アークの集中度が小さく熔融池が浅く広い形状になり厚板の溶接には不向きである。しかし、クリーニング作用により酸化被膜を破壊、消滅させることができるため、補修溶接、小物の溶接、薄板の溶接などでは高品質なものが得られる。電極が陰極になる棒マイナス極性では電極直下の母材に集中した強いアークを発生させることにより、幅が狭く溶込みの深い熔融池が得られ、厚板の溶接も可能となる。アルミニウム合金の溶接では、交

流電源を使用することにより両極のメリットを低下させずに接合することもできる。

2.3.2 MIG 溶接^{2-24, 2-25)}

MIG 溶接は Metal Inert Gas アーク溶接の頭文字をとったもので TIG 溶接と同様にアルゴンやヘリウムなどの不活性ガス雰囲気中で行われる。電極となるワイヤを連続的に溶接部に送り、その先端と母材との間にアークを発生させる方法である。細径ワイヤに比較的大電流を通電する高電流密度の溶接方法であるため、溶着速度が高く、深い溶込みを得ることができる。スラッグの除去が容易または必要でないため、半自動溶接やロボット溶接等に広く用いられる。一方、短所としては野外作業で横風などの防風対策が必要であること、磁気吹き現象によりアークが乱れる場合があることなどが挙げられる。

2.3.3 レーザ溶接^{2-26, 2-27)}

レーザー溶接は発振器で作られた波長と位相がそろったレーザー光をレンズで細く絞って入射することによって母材を加熱し溶融する溶接法である。アークの 1000 倍以上に相当するエネルギー密度を持ち、幅が狭く深い溶け込みを形成する。レーザー溶接の長所として、大気中で溶接が可能、熱源が微小スポットであり熱影響部、溶接変形が小さいなどが挙げられる。一方短所は、材料の種類や表面状態などによってレーザー光の吸収率が異なるため、溶け込み深さが変化しやすい、ビード幅が狭いため高精度の開先加工と組立てが必要になる、レーザー光に対する特別の安全対策が必要であることが挙げられる。

2.3.4 摩擦攪拌接合²⁻²⁸⁾

FSW は 1991 年に英国溶接研究所において間接摩擦熱の利用によって板材を接合する摩擦圧接法として開発され特許が取得され、主に軽金属材料の長手方向突合せ接合に適用されている。本研究で使用したこの接合法は次節で詳しく

説明する。

2.4 FSW の技術概要

FSW は、**Fig. 2.1** に示すように、棒状工具（ツール）を高速で回転させながら材料に挿入し、接合すべき突合せ面に沿って移動させる接合法である。このとき、材料は裏当て板に拘束し、固体の状態を維持しながら、ツールによる塑性流動を受けることによって接合が達成される。ツールは径の大きいショルダー部とその先端に設置されたプローブと呼ばれる突起部からなる。ショルダーはプローブが材料に挿入された際に材料がぼりとなって外部に排出されるのを防止することと材料表面から摩擦熱を与える役割を果たしている。

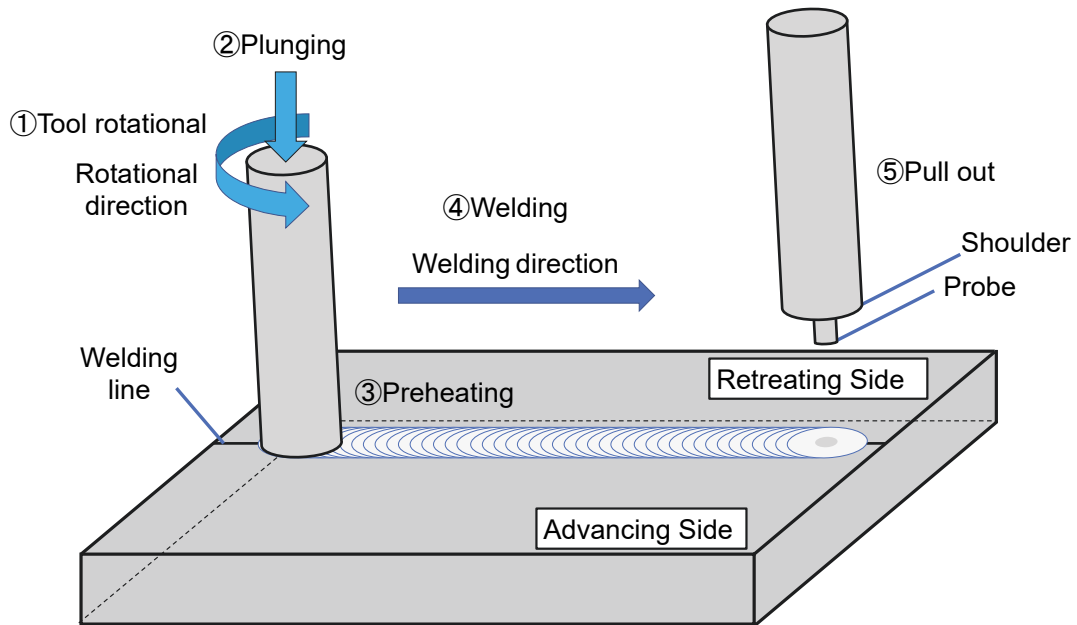


Fig. 2.1 Schematic illustration of FSW process.

Fig. 2.2 に FSW の断面組織模式図を示す. 接合部の組織は溶融溶接の場合と異なり左右非対称となる. 接合面を垂直に切断し, 工具回転方向が反時計回りとし紙面手前から奥へ接合した場合, ツールの回転方向と接合方向が一致する側(図内右)を前進側(Advancing Side: AS), その反対側(図内左)を後退側(Retreating Side: RS)と呼称する. プローブによって攪拌させた組織(赤実線で囲った接合部中央にあるエリア)と, 前進角をつけたプローブによりショルダー後縁が材料に押し付けられて一部挿入状態となり攪拌された部分(赤点線で囲った接合部上部にあるエリア)で構成される攪拌部(Stir Zone: SZ), 攪拌部の外側に形成されるプローブやショルダーの攪拌の影響を受け塑性変形により結晶粒が伸びた形状を持つ緑線で囲った熱加工影響部(Thermo-Mechanically Affected Zone: TMAZ), さらにその外側に塑性変形してないが入熱の影響をうける青線で囲った熱影響部(Heat Affected Zone: HAZ), もとの材料と変化のない母材部(Base Metal: BM)と分類される²⁻²⁹⁾.

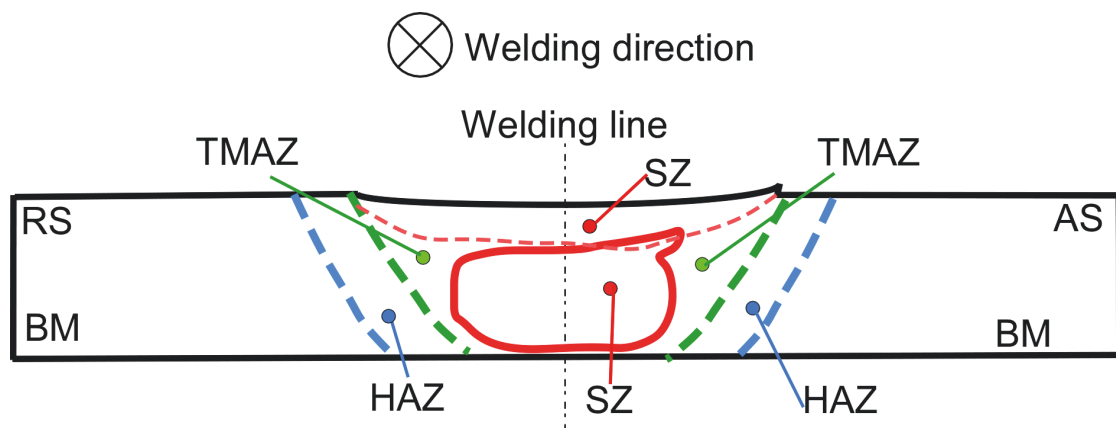


Fig. 2.2 Distribution of the stir zone (SZ), thermo-mechanically affected zone (TMAZ), heat affected zone (HAZ), and base metal (BM) in cross-sectional structure of FSW.

FSW は固相接合であることから以下のような利点がある。

- 1) 変形が小さく，溶融溶接（アーク溶接）の数分の一以下である。
 - 2) アルミニウム合金の接合ではシールドガスが不要である。
 - 3) 接合中にヒューム，スパッタが発生せず，紫外線などの有害光線も発生しない。
 - 4) 溶融溶接で発生しやすい気孔，割れなどの欠陥が発生しない。
 - 5) 熱処理品や鋳造材などの従来の溶融溶接で不適とされている材料に適用できる。
 - 6) 異種材料の接合が比較的容易である。
- などが挙げられる。

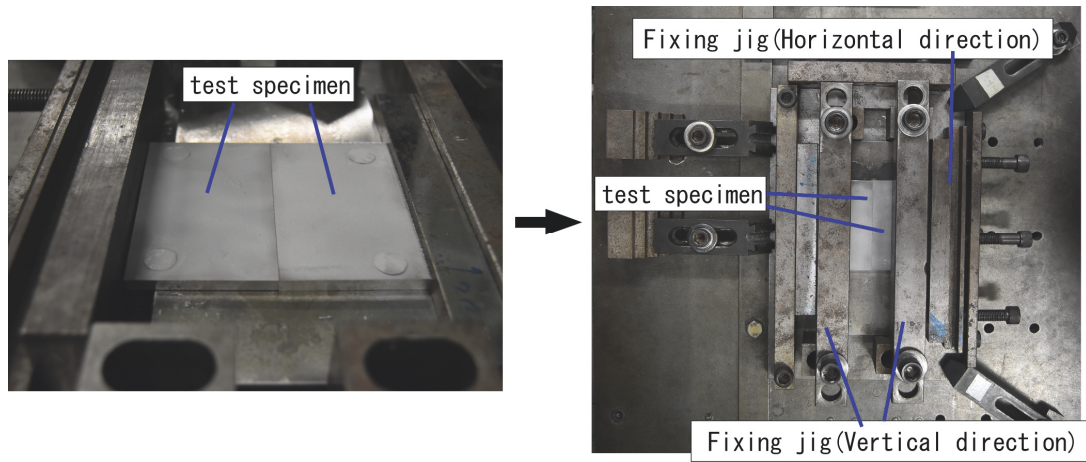
一方，これまでに不向きとされていた条件としては，

- 1) 余盛できないため，すみ肉溶接ができない。
 - 2) 高融点金属の接合は困難である。
 - 3) ツールを押し当てるため裏当て板が必要となる。
 - 4) 三次元曲面の接合は困難である。
- などが挙げられる。

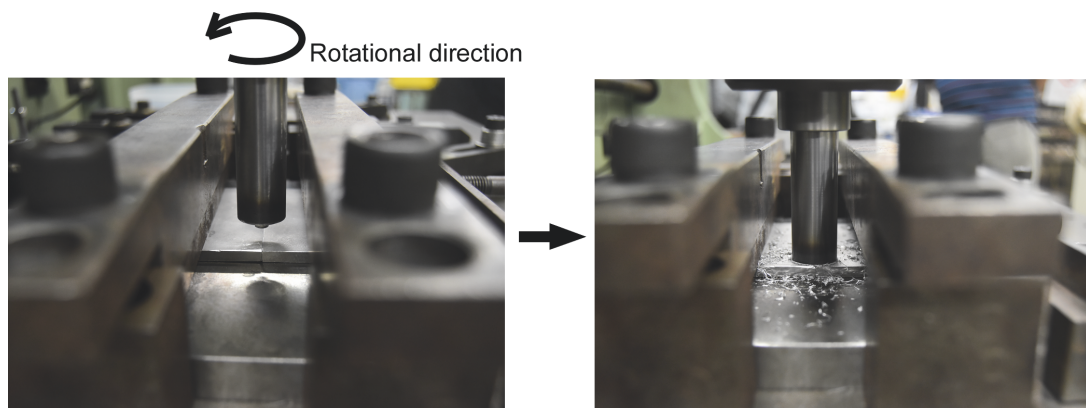
現在ではこれらの欠点について，(1)については，ステーションナリーショルダーと溶加材を用いる接合方法の開発，(2)については，セラミック等の耐熱性ツールの使用，(3)については，ポピンツールの使用，(4)については，5軸マシニングセンターを元にした接合機の開発によりこれらの弱点が解消しつつある。

本研究での接合手順を **Fig. 2.3** と **Fig. 2.4** の写真を用いて説明する。

- (1) SS400 製裏当て板上に供試材を間隙なしで突合せた状態で配置する。Fig. 2.3(a)において接合は紙面下から上方向に行い、ツール回転方向は反時計回りであることから右が AS、左が RS となる。ツール挿入中や接合中に開先が開かないように AS から横締付ボルトにて供試材を押さえる。供試材上に帯板を這わせ、供試材が接合中に浮かないようにボルトにて固定する。帯板は、各接合実験において均一にするため、各ボルトをトルクレンチで $30 \text{ N}\cdot\text{m}$ で締め付ける。
- (2) ツールの走行位置がツール中心と接合線と一致するように調整、接合開始点直上に移動させ、回転させながらツールを指定位置まで降下させて供試材にプローブを挿入する。指定位置（本研究では厚さ 5 mm の板に対して表面から 4.9 mm ）まで挿入後、一定時間（本研究では 15 s ）保持しショルダーおよびプローブより供試材に摩擦熱で予熱を与える。（Fig. 2.3(b)）
- (3) ツールを接合線に沿って接合終了点まで移動させる。接合速度およびツール回転数の適正な接合条件は供試材により異なり、各章の接合条件表に記載している。供試材にこの写真では紙面手前から奥方向の接合である。（Fig. 2.4(c)）
- (4) 接合終了点到達後、ツールを供試材から抜き取り接合が終了する。各締結部を緩めて供試材を取り出す。（Fig. 2.4(d)）



(a) Test specimen setting.



(b) Tool insert and pre-heating.

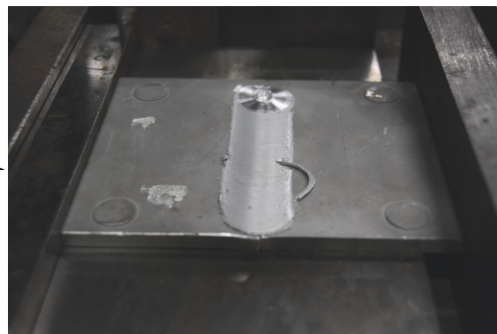
Fig. 2.3 Process of FSW.



Welding direction



(c) FSW.



(d) Finish.

Fig. 2.4 Continued.

参考文献

- 2-1) 公益社団法人日本鋳造工学会：鋳造工学便覧，丸善，(2002)，470-475.
- 2-2) 一般社団法人軽金属協会：新版アルミニウム技術便覧，カロス出版，(1996)，70-71.
- 2-3) 一般社団法人日本アルミニウム協会：現場で生かす金属材料シリーズ アルミニウム，工業調査会，(2007)，166.
- 2-4) 軽金属学会 50 周年記念実行委員会：アルミニウムの製品と製造技術，軽金属学会，(2001)，258-259.
- 2-5) 一般社団法人日本アルミニウム協会：アルミニウムハンドブック（第7版），日本アルミニウム協会，(2007)，213.
- 2-6) 公益社団法人日本鋳造工学会：鋳造工学便覧，丸善，(2002)，501-508.
- 2-7) 一般社団法人軽金属協会：新版アルミニウム技術便覧，カロス出版，(1996)，359-367.
- 2-8) 一般社団法人日本アルミニウム協会：アルミニウムハンドブック（第7版），日本アルミニウム協会，(2007)，213.
- 2-9) 公益社団法人日本鋳造工学会：鋳造工学便覧，丸善，(2002)，508-511.
- 2-10) 一般社団法人軽金属協会：新版アルミニウム技術便覧，カロス出版，(1996)，367-376.
- 2-11) 一般社団法人日本アルミニウム協会：アルミニウムハンドブック（第7版），日本アルミニウム協会，(2007)，216.
- 2-12) 公益社団法人日本鋳造工学会：鋳造工学便覧，丸善，(2002)，589-597.
- 2-13) 一般社団法人軽金属協会：新版アルミニウム技術便覧，カロス出版，(1996)，383-385.
- 2-14) 一般社団法人日本アルミニウム協会：アルミニウムハンドブック（第7版），日本アルミニウム協会，(2007)，216.
- 2-15) 公益社団法人日本鋳造工学会：鋳造工学便覧，丸善，(2002)，508-511.

- 2-16) 一般社団法人軽金属協会:新版アルミニウム技術便覧, カロス出版, (1996), 376-383.
- 2-17) 一般社団法人日本アルミニウム協会:アルミニウムハンドブック(第7版), 日本アルミニウム協会, (2007), 216.
- 2-18) 公益社団法人日本鋳造工学会:鋳造工学便覧, 丸善, (2002), 532-533.
- 2-19) 一般社団法人軽金属協会:新版アルミニウム技術便覧, カロス出版, (1996), 385-388.
- 2-20) 榊原幸夫, 杉浦泰夫, 岩澤秀, 河辺昭雄. アルミニウム合金鋳造素材の製造方法. 特開 2007-181874. 2007.7.19.
- 2-21) 佐藤邦彦:溶接・接合工学概論(第2版), 理工学社, (2011), 4-5.
- 2-22) 一般社団法人溶接学会, 一般社団法人日本溶接協会:溶接・接合技術入門, 産報出版, (2019), 37-42.
- 2-23) 一般社団法人日本塑性加工学会:接合—技術の全容と可能性—, コロナ社, (1990), 180-181.
- 2-24) 一般社団法人溶接学会, 一般社団法人日本溶接協会:溶接・接合技術入門, 産報出版, (2019), 43-49.
- 2-25) 一般社団法人日本塑性加工学会:接合—技術の全容と可能性—, コロナ社, (1990), 181.
- 2-26) 一般社団法人溶接学会, 一般社団法人日本溶接協会:溶接・接合技術入門, 産報出版, (2019), 60-62.
- 2-27) 一般社団法人日本塑性加工学会:接合—技術の全容と可能性—, コロナ社, (1990), 192-193.
- 2-28) 時末 光:FSW(摩擦攪拌接合)の基礎と応用, 日刊工業新聞社, (2005), 1-5.
- 2-29) 社団法人溶接学会編:摩擦攪拌接合-FSWのすべて-, 産業出版.(2006), 47-49.

第3章 供試材および実験方法

本章では、本研究で使用した供試材の製造方法、接合方法、評価方法について記述する。評価方法のひとつとして本研究では複数ある接合条件パラメータを統合して1つの指標で制御するため、新たに「攪拌量」を定義して使用する。この攪拌量についても本章で説明する。

3.1 供試材

半熔融成形した AC4CH アルミニウム合金板は、市販の AC4CH インゴットを溶解し、直径 75 mm の円筒金型に鑄込み重量 1.3 kg を目標としたビレットを溶製した。このビレットを高周波誘導加熱装置 858 K に加熱し半熔融状態にした。成形は型締力 3500 kN のダイカストマシン（東芝機械製 DC350JMS）を用いた。ダイカストマシンに設置した段付試験片金型に半熔融状態のビレットをスリーブに投入し、射出成形した。金型温度、プランジャ速度、鑄造圧力はそれぞれ 443 K、0.5 m/s および 60 MPa とした。得られた段付試験片成形品の模式図を **Fig. 3.1** に示す。成形品の板厚 5 mm 部分を供試材とし、T6 に相当する溶体化処理を 808 K にて 28.8 ks、水冷後時効処理を 428 K にて 21.6 ks 行った。成形後の鑄物表面には成形時に金型に塗布した離型剤が付着するため、サンドブラスト処理を施した。供試材として使用する AC4CH 材はこの鑄肌のまま使用する。

Fig.3.2 に半熔融成形した AC4CH 材の微視組織の一例を示す。「A」に示す明るく丸い組織が初晶 α -Al であり、「B」に示す初晶 α -Al を埋めている組織が共晶組織である。一般的な鑄造組織では初晶 α -Al はデンドライトと呼ばれる樹脂状組織となり存在するが、半熔融成形は初晶 α -Al が粒状になることで流動性が保たれて金型内に充填される。このような組織が FSW により攪拌されることで初晶 α -Al と共晶組織が混合され、機械的性質や組織境界部にどのような影響を与えるかを研究された報告はごくわずかである。また、ビレットの製造方法により各組織の大きさが異なるため、それぞれの特性が異なることも予想される。よっ

て本研究で使用した材料で FSW し、その特性を明らかにする必要がある。

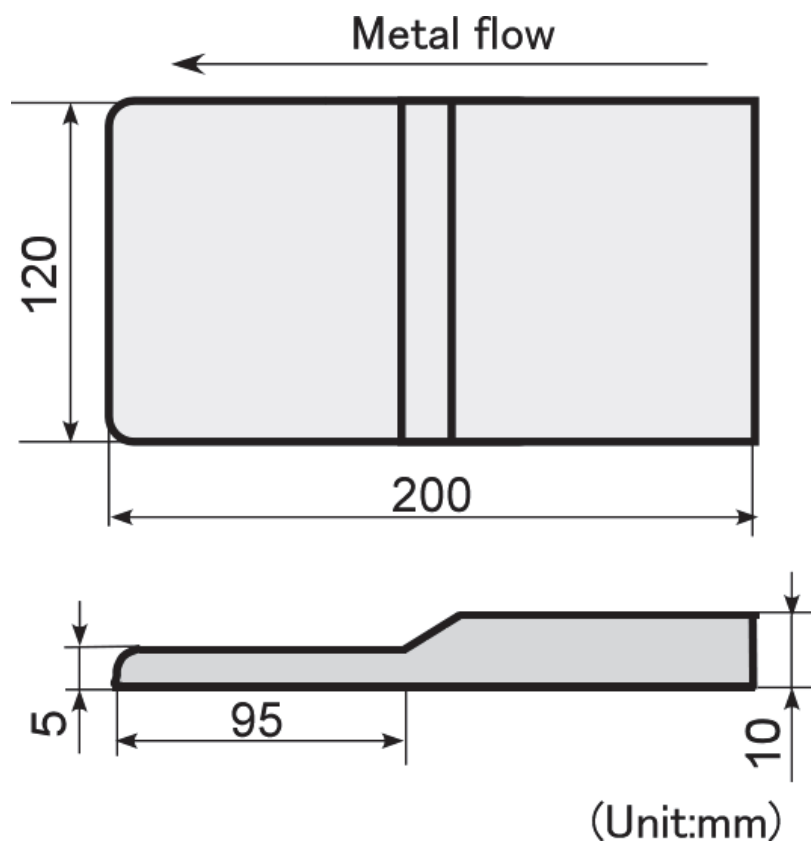
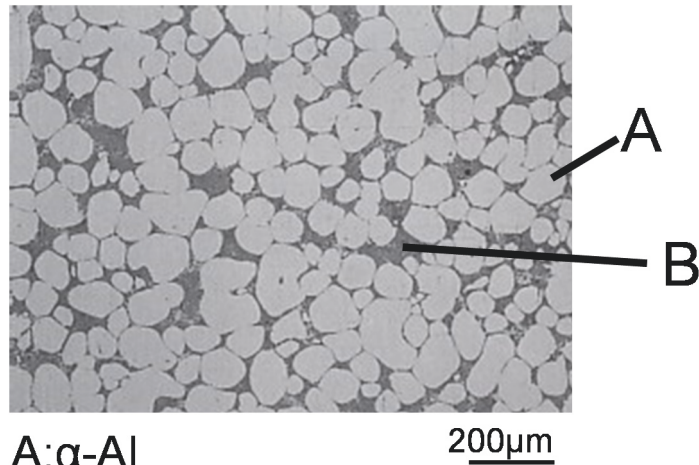


Fig. 3.1 Schematic drawing of molded product.



A: α -Al
B: Eutectic structure

Fig. 3.2 Microstructure of semi-solid AC4CH aluminum alloy.

展伸材は市販の 6061-T6 アルミニウム合金板 (以下 A6061) を用いた。AC4CH 板は成形品の 5 mm 部分のものを、A6061 は板厚 5 mm のものをそれぞれ湯流れ方向および圧延方向に長さ 90 mm, 幅 55 mm に機械加工したものを実験に供した。突合せ面は実験条件を同一とするために立フライス盤により面削した。また, 接合方向は湯流れ方向および圧延方向と平行とし, 接合長は 65 mm とした。

鋳造材および展伸材の化学組成および機械的性質を **Table 3.1**, **Table 3.2** にそれぞれ示す。半溶融成形した AC4CH 成形品は, 各章の実験で鋳造ロットの違いにより 3 種類ありそれぞれ表内に示している。化学組成は, A6061 は JIS H4000, AC4CH は JIS H5202 にそれぞれ定める規格値を満たしている。AC4CH 板の機械的性質は金型別鋳込み試験片の機械的性質³⁻¹⁾と比較すると引張強さは 20 MPa 程度高く, 伸びは第 4 章で使用したロットはわずかに低く, 第 5 章, 第 6 章で使用したロットは同程度である。

Table 3.1 Chemical compositions of base metals (mass%).

	Cu	Si	Mg	Fe	Mn	Ti	Al
AC4CH Chapter4	0.01>	7.1	0.30	0.11	0.01	0.11	Bal.
AC4CH Chapter5	0.01	6.9	0.32	0.11	0.01	0.11	Bal.
AC4CH Chapter6	0.01	6.9	0.31	0.11	0.01	0.11	Bal.
A6061	0.27	0.61	1.1	0.3	0.06	0.01	Bal.

Table 3.2 Mechanical properties of the base metals.

	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
AC4CH Chapter4	280	10.1	81.0
AC4CH Chapter5	284	14.2	78.1
AC4CH Chapter6	284	14.0	78.2
A6061	319	16.2	87.2

3.2 実験装置および実験方法

3.2.1 接合装置

接合には，日東制機株式会社製の FN-II型全自動摩擦攪拌接合機を用いた。

3.2.2 回転工具

回転工具は合金工具鋼（SKD61）製とし，**Fig. 3.3** に示す形状に加工したものを使用した。ショルダー直径 20 mm，ショルダー角 4°，プローブは M6，長さ 4.5 mm（第 4 章）もしくは 4.7 mm（第 5 章および第 6 章）とした。いずれも過去の研究結果より一般的なアルミニウムに適しているツール形状を採用した。ショルダー角の付与はショルダー部の回転により接合母材の表面直下での塑性流動運動を促進し，混合攪拌の効果を増大させるとされている³⁻²⁾。

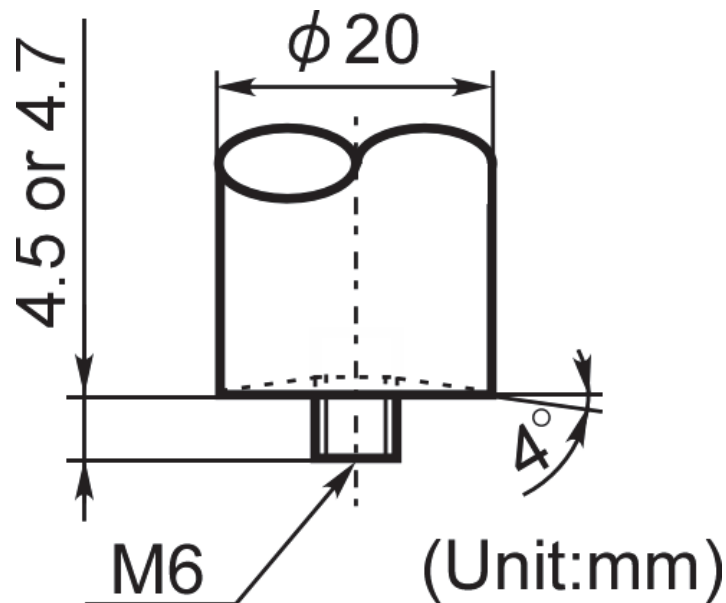


Fig. 3.3 Design of the FSW tool used in the present study.

3.2.3 評価方法

本研究では下記の試験方法を選定して継手の評価を行った。

(1) 外観検査と巨視的および微視的組織観察

外観検査は接合部表面状態を目視によって観察した。継手横断面の巨視的および微視的組織観察は、**Fig. 3.4** に示すように接合長の中央で FSW 継手を接合方向と垂直に切断し、赤矢印で示す方向の面を観察面として、エメリーペーパーによる研磨、バフ研磨後、エッチングを行い光学顕微鏡により組織観察を行った。エッチングは水酸化ナトリウム水溶液または、バーカー液を用いた電解腐食にて行った。

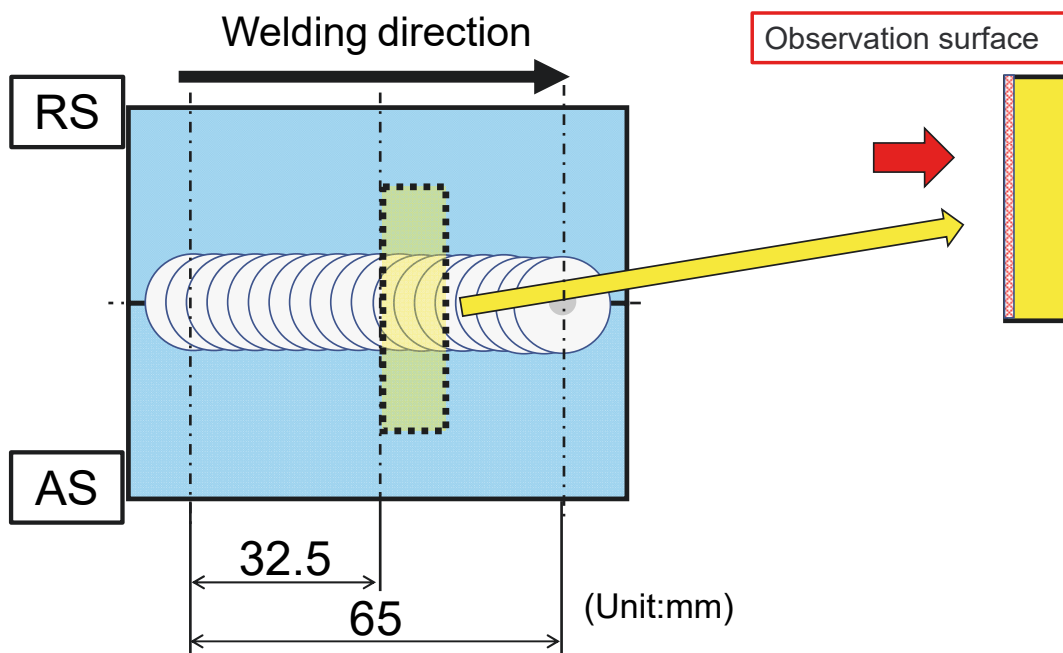


Fig. 3.4 Sampling position for structure analysis.

(2) 硬さ試験

硬さ試験はマイクロビッカース硬度計（島津製作所製 HMV-1）を用い、マイクロビッカース硬さ試験を行った。試験は Fig. 3.3 に示す組織観察用と同一の試験片を用いて、観察面を Fig. 3.5 に示すように板厚中央部を接合中心より 0.5 mm 間隔でマイクロビッカース硬さ試験（試験荷重 1.96 N，荷重保持時間 15 s）を行った。アルミニウム鋳物などの組織の大きい材料の硬さ測定は、ブリネル硬度計のような圧痕が大きなものを選択して行うのが一般的であるが、本試験では接合部や HAZ の硬さ分布を狭い間隔で測定するため圧痕の小さいマイクロビッカース硬さ試験を採用した³⁻³⁾。

JIS Z2244 ビッカース硬さ試験によれば、平均くぼみ対角線長さ d とすると、測定するくぼみの中心間の距離はくぼみの $6d$ 以上必要であると定めている。今回の測定間隔は 0.5 mm であり、この場合対角線長さ d は 0.083 mm 以下にならなければならない。対角線長さ $d=0.083$ mm のときのビッカース硬さは約 54 HV となる。くぼみの平均対角線長さを $6d$ と定めているのはくぼみをつけることによりくぼみ回りが塑性変形し、隣のくぼみを測定する際にその塑性変形による硬化を受けて測定個所の硬度が高くなる現象を防ぐためである。今回の供試材を焼鈍（623 K, 7.2 ks）しビッカース硬さを測定したところ、AC4CH は 39.3 HV、A6061 は 43.7 HV であった。第 2 章 FSW 組織で記したように HAZ は入熱により軟化が発生し、特に熱処理型アルミニウム合金では顕著に発生する。後述の第 4 章および第 5 章の研究結果でも、高入熱の接合条件において HAZ が観察され硬度低下がみられる。今回の硬さ試験の目的は HAZ の接合速度における相対的な硬度比較、HAZ の大きさ、幅であることから、ビッカース硬さが 54 HV 以下になる測定点であっても、HAZ 内である場合の 54 HV 以下となる測定は参考値として有効に扱う。くぼみの平均対角線長さを $6d$ 以下にする手段として試験荷重を下げる方法があるが、設定可能な次に小さい試験荷重である 0.98 N で測定した場合には、測定圧痕の投影面積が試験荷重 1.96 N の 1/4 となり大幅に小さくなる。AC4CH の組織内で初晶 α -Al と共晶組織で硬

さが大きく異なるため、圧痕が小さいと各測定個所での平均的な値が得られず母材組織においてばらつきが大きくなる。これらのことから、本研究での硬さ試験は試験荷重 1.96 N で行うこととする。

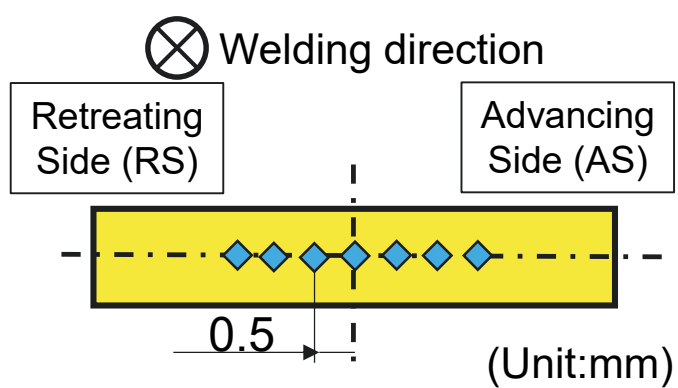


Fig. 3.5 Hardness test measurement position.

(3) 引張試験

引張試験には、インストロン型引張試験機（島津製作所製，AG-10TG）を用いた。引張試験片は接合方向と垂直に **Fig. 3.6** に示す位置より試験片を採取し，表面および裏面を 0.5 mm 面削後，**Fig. 3.7** に示す JIS14B 号試験片形状に準じた形状に機械加工したものをを用いた。引張速度は 2 mm/s（初期ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-3} \text{ S}^{-1}$ ）とし，室温で試験を行った。

引張試験結果は，試験片より得られた引張強さと，試験前後の標点間距離を測定して算出した伸びで評価を行うのが一般的であるが，本研究において各章ごとに AC4CH 供試材のロットが異なる。鑄造材はロットにより化学成分がわずかに異なるため，引張強さ，伸びも差異が生じる。これを統一する工程は非常に困難である。そこで各ロットの母材の引張強さおよび伸びを測定し，その値を 100%として，各測定結果の比で表すこととした。引張強さは「継手効率 (%)」として各試料の引張強さを該当ロットの母材の引張強さで除して 100 倍したものの，伸びは「伸び率 (%)」として各試料の伸びを該当ロットの母材の伸びで除して 100 倍したもので評価する。

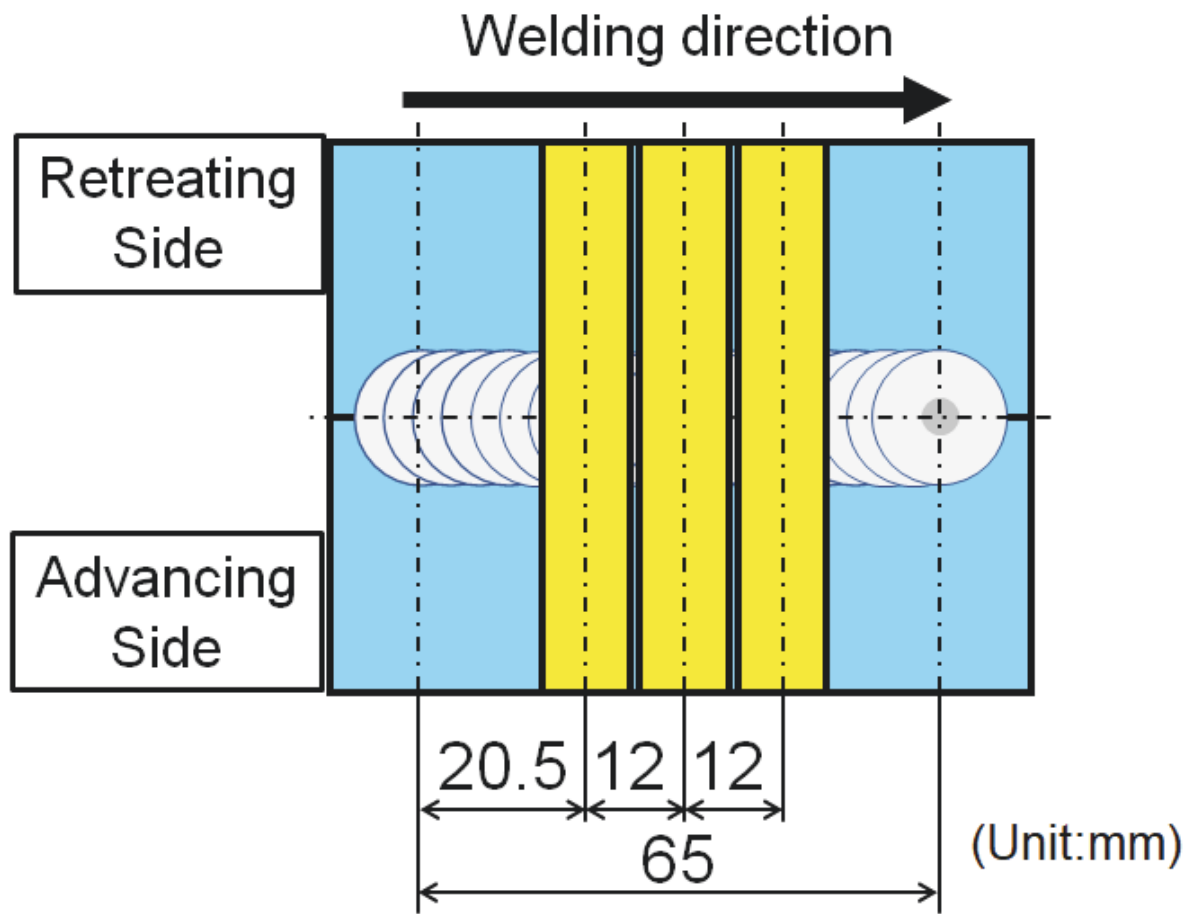


Fig. 3.6 Test specimen collection position.

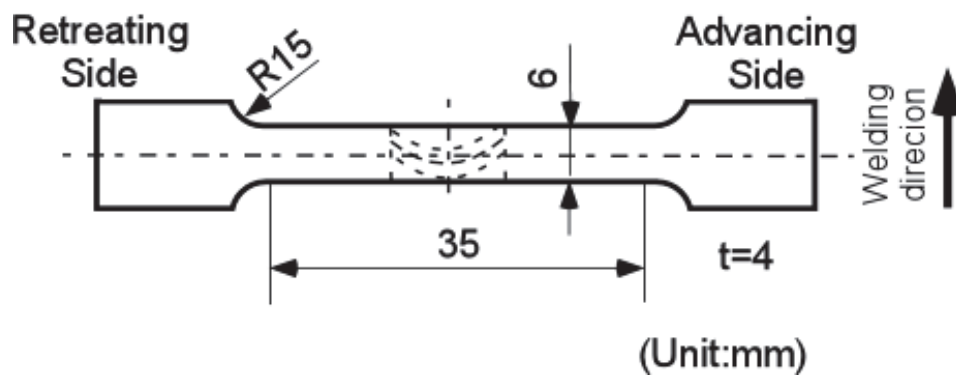


Fig. 3.7 Shape and dimensions of tensile test pieces.

(4) 攪拌量

FSW はツール先端の有するプローブが供試材内に挿入し供試材を攪拌することにより接合をおこなう。このプローブがどれだけ供試材を攪拌したかにより接合強度への影響、攪拌不足や攪拌過剰となり接合欠陥が発生するかの研究はされているが、実際の攪拌量を数値化してその値を議論している研究はない。そこで本研究では接合条件から求められる攪拌量 L を定義し、その計算上の攪拌量 L と実際に接合した継手の機械的性質や組織への影響を明らかにして、攪拌量 L の有用性を確かめる。

Fig. 3.8 に接合線とプローブの関係の模式図を示す。この図は接合部直上から見た図である。攪拌は 2.4 で示したように断面組織はプローブが直接影響する部分とショルダー後縁部が供試材に挿入されて供試材表面付近に影響する部分がある。本研究における攪拌量 L はプローブによる攪拌のみを対象とする。また、プローブ形状は本研究において M6 形状を採用としているが供試材厚さ方向といま、攪拌量 $L(\text{mm})$ として供試材が接する開先を接合線とし、その線上の任意の点をプローブが通過する間 (図内赤線) にプローブ柱面上の一点がツールの回転により移動する長さとして定義すると、赤線を通過する時間、回転数、プローブ外周の積となり

$$L = \frac{D}{V} \cdot N \cdot \frac{1}{60} \cdot \pi D \quad (1)$$

これを整理すると

$$L = \frac{\pi D^2 N}{60V} \quad (2)$$

となる。

但し、 D はプローブ直径(mm)、 N は工具回転数(rpm)、 V は接合速度(mm/s)である。

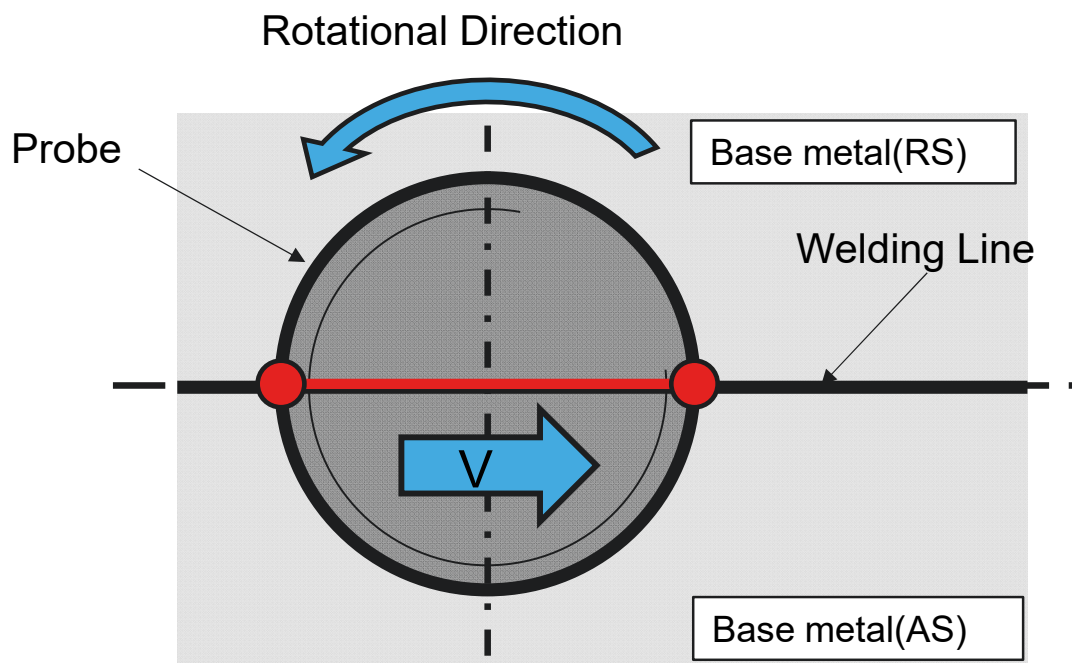


Fig. 3.8 Schematic illustration of the relationship between the welding line and the probe.

参考文献

- 3-1) 軽金属学会 40 周年記念実行委員会：アルミニウムの組織と性質，軽金属学会，(1991)，234.
- 3-2) 時末 光：FSW（摩擦攪拌接合）の基礎と応用，日刊工業新聞社，(2005)，16.
- 3-3) 富永敏文：鋳造工学，76 (2004)，415-421.

第4章 半溶融成形 AC4CH-T6 の同種材摩擦攪拌接合

4.1 緒言

半溶融成形した AC4CH どうしでの FSW を行い、FSW 継手の状態と性能を把握する。接合条件による外観上の欠陥の有無、接合断面組織の欠陥の有無の調査により、この供試材における健全な継手が接合可能な接合条件を明らかにする。熱処理型アルミニウム合金であることから、熱影響部を排除することは不可能であることから硬さ試験を実施し、接合条件による継手の軟化割合、攪拌部の硬さを調査する。健全な継手の機械的性質を調査し、接合条件と機械的性質を明らかにして最高強度になる継手効率を求める。本研究で用いた半溶融成形したアルミニウム合金組織は、他の鋳造アルミニウム合金と異なりこれまでに FSW した研究例は少ない。特に初晶 α -Al や共晶組織が攪拌の影響を受けて変質する可能性があるため、攪拌部やその周辺組織にも着目して評価する。

4.2 供試材および実験方法

供試材は、第3章に示した形状に機械加工した半溶融成形した AC4CH アルミニウム合金板を使用した。

供試材を Fig. 2.3 に示した治具により固定し、3.2.1 で示した接合装置で、Fig. 3.2 で示した形状の回転工具を使用した。ツールの回転方向は反時計回りとした。接合条件は予備実験において、工具回転数 600 rpm、接合速度 10 mm/s の条件ではプローブが破損し、一方、1800 rpm、5 mm/s の条件では接合開始部近傍のビード内に溝状欠陥が発生したことから、前者の接合条件を接合不可、後者を接合不良と判断した。これらの条件を含む範囲で **Table 4.1** に示す条件範囲を設定した。

得られた継手は第3章 3.2.3 評価方法に示す方法で外観検査および組織観察、マイクロビッカース硬さ試験、引張試験をいずれも室温で行った。

Table 4.1 Friction stir welding conditions.

Parameters, Symbol (unit)	Value or range
Rotational speed, N (rpm)	600, 1000, 1400, 1800
Welding speed, V (mm/s)	1, 5, 8, 10
Tilt angle, θ (deg.)	3
Preheating time, t (s)	15
Tool insertion depth, h (mm)	4.9

4.3 実験結果

4.3.1 継手外観

種々の接合条件で接合した継手外観の一例を **Fig. 4.1** に示す。接合方向は紙面左から右であり，供試材上部が RS，下部が AS となるように配置している。また，工具回転数と接合速度は各組織写真の下に記載している。

全ての接合条件において AS，RS にばりの発生が認められ，接合速度の低い条件および工具回転数の高い条件ではばりが大きくなる。特に接合速度 1 mm/s の各工具回転数の条件 (Fig. 4.1(a1), 4.1(b1)) および工具回転数 1800 rpm (Fig. 4.1(c1), 4.1(c2)) の各接合速度の条件では写真中「A」で示すように RS にも大きなばりが発生する。また，全条件において，接合開始点の RS に尖ったばりが写真中「B」で示すように発生して残されている。これは，プローブ挿入過程および予熱中に回転工具全周にばりが発生し，接合開始とともに工具前縁のばりが RS に押し流されて形成されたものである。接合部表面には FSW 特有の円弧状の模様が接合速度が低く，工具回転数の高い条件で明瞭に観察された。

工具回転数 1800 rpm，接合速度 5 mm/s の条件 (Fig. 4.1(c2)) では 4.2 節で述べたように接合開始部近傍の溝状欠陥が観察され，写真中の「defect」に示すように接合開始直後に AS のプローブ通過領域境界付近に表面に開口した欠陥が形成された。

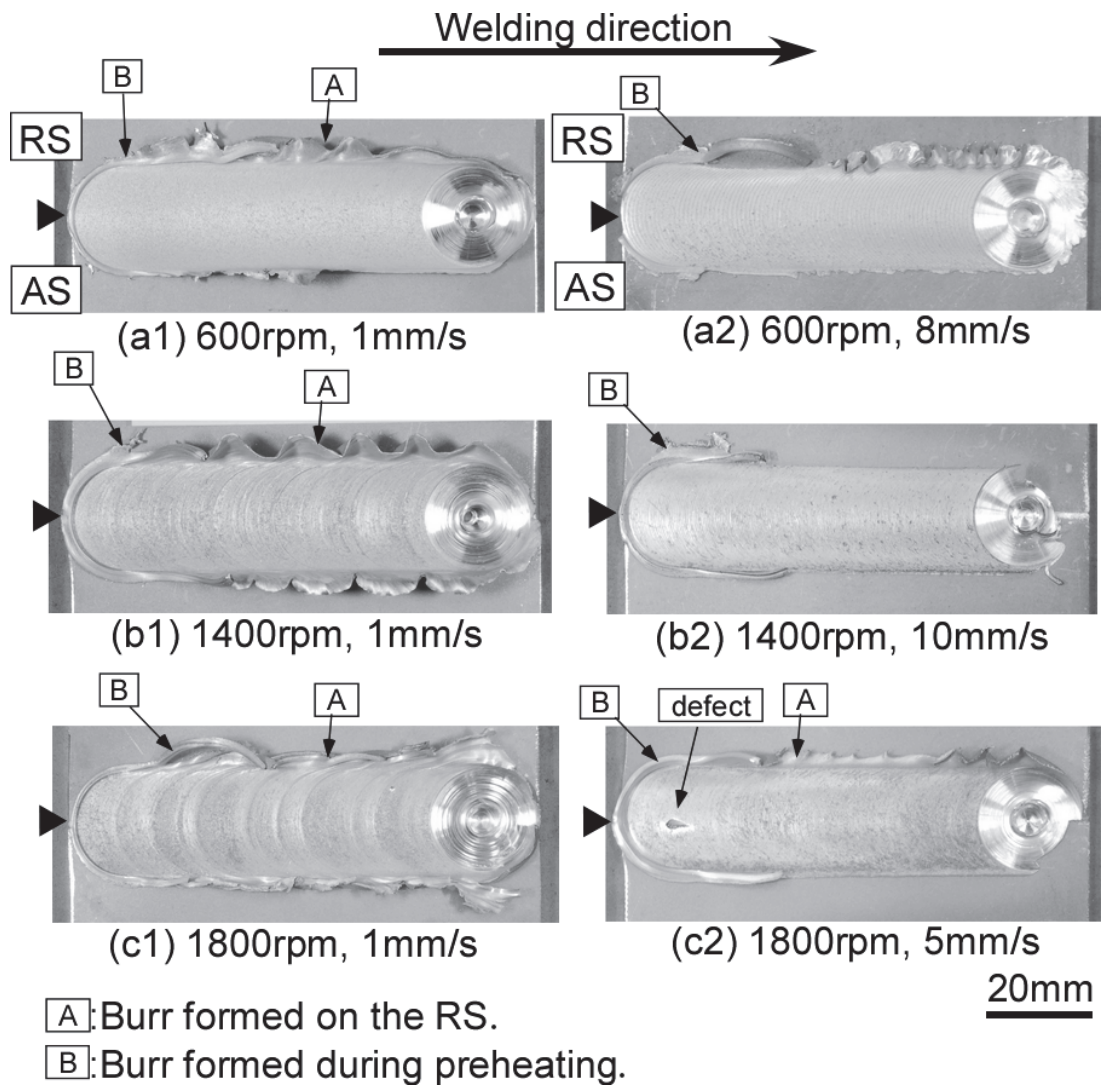


Fig. 4.1 Appearances of FSW joints welded under various conditions.

The triangle marked on the left edge of the photographs indicate the positions of the welding interfaces.

4.3.2 巨視的組織

種々の接合条件で接合した継手横断面の巨視的組織を **Fig. 4.2** に示す。接合方向は紙面に垂直に手前から奥へ向け、工具回転数と接合速度および第3章式(2)より各接合条件から求めた攪拌量 L を各組織写真の下に記載している。各写真の中央部に観察される明るい領域が工具による攪拌を受けて組織が微細化したSZである。SZの形状は接合部中央に丸い形状に存在するプローブによって攪拌された部分と接合部上部にある前進角3度によって供試材に挿入されているショルダー後縁及びプローブによって攪拌された扇形部分が存在する。プローブのみで攪拌された組織は全ての条件で上部がAS方向の板上部へ流れるような形状になる。

SZの面積は工具回転数600~1400 rpm (Fig. 4.2(a1), 4.2(a2), 4.2(b1), 4.2(b2))では、接合速度が高いほど、また工具回転数が低いほど小さくなり、またSZの幅も狭くなる。工具回転数1800 rpm (Fig. 4.2(c1), 4.2(c2))のSZ形状は1400 rpmまでの形状とは異なり、他の条件と比較すると板厚下部へ大きく潰れた形状となる。これは、プローブのみの攪拌の影響を受けたSZが形成したのちにショルダー攪拌による上部扇形のSZが形成されるためショルダー後縁からの圧力を受けることによりこのような形状になったと考えられる。特に最も工具回転数の高い1800 rpmで顕著に現れている。攪拌量 L は同一回転数で比較すると大きい条件の方が面積も大きくなる傾向にあるが、回転数が異なる条件と比較するとショルダー後縁からの影響があることから大きな差異がみられなくなる。

SZとTMAZの境界部はASでは境界部がはっきりみえるのに対し、RSはASに比較して不鮮明になっている。これは後述の微視的組織で示すが、TMAZ領域がRSに対してASが狭く急激に変化していることが原因と考える。

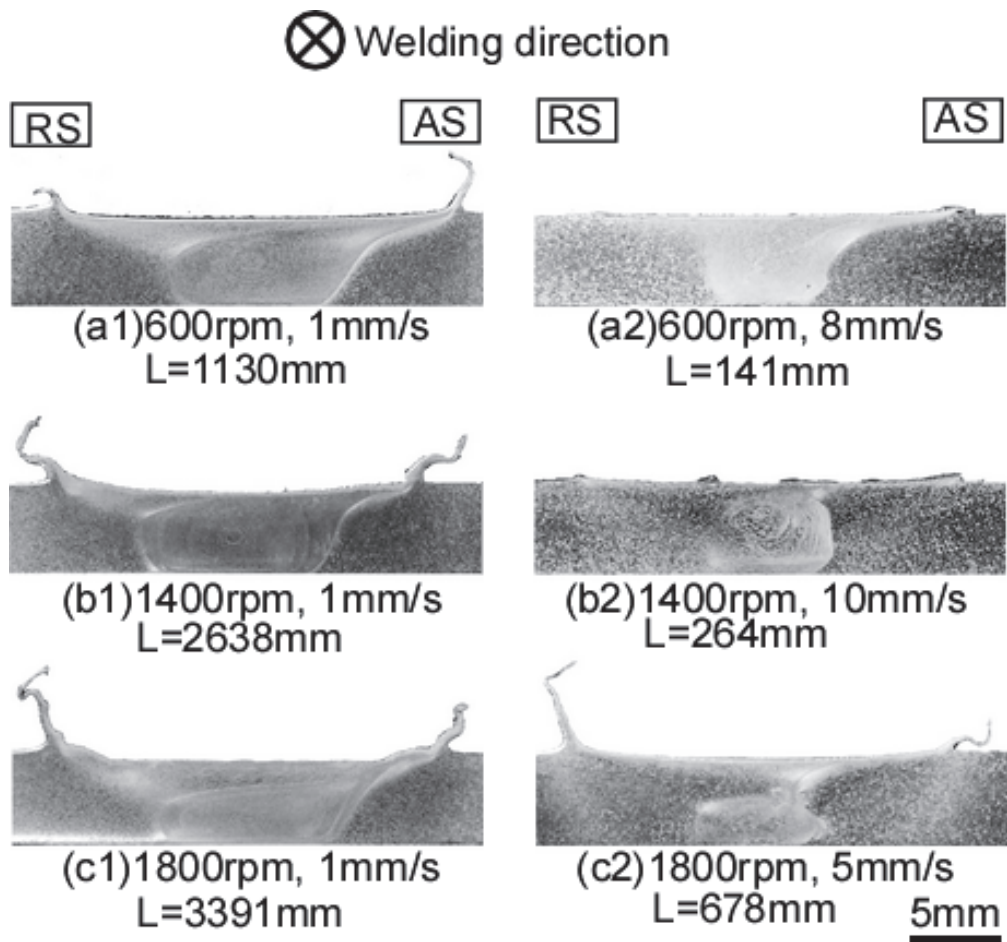


Fig. 4.2 Macrostructures of FSW joints welded under various conditions.

4.3.3 微視的組織

種々の接合条件で接合した継手横断面の微視的組織を Fig. 4.3 に示す。観察試料、観察方向は前項同様である。観察位置は板厚中央の SZ 中心、AS、RS の SZ/TMAZ 境界部であり、図の最上部に、工具回転数と接合速度は図の左端に記載している。Fig. 4.3(a1a)中の「A」に示す明るく丸い形状を呈する組織が初晶 α -Al、「B」に示す初晶 α -Al を埋めている組織が共晶組織である。SZ と TMAZ の境界部付近の TMAZ 組織は「C」で示すように母材として存在する α -Al が塑性流動の影響を受けて SZ に沿う形で引き延ばされるように変形している。明瞭に観察されるのは AS 境界部で Fig. 4.3(a1a)と 4.3(a2a), および Fig. 4.3(b1a)と 4.3(b2a) で比較すると境界部近傍の TMAZ では接合速度が低い条件で α -Al の変形が大きい。また、AS では SZ 近傍が特に大きく変形しているのに対し、RS では SZ から若干離れた位置においても緩やかに変形している。この変形量の差が、巨視的組織にあった RS の SZ と TMAZ の境界部が不鮮明に観察された原因であると考える。

ルートフローと称する接合部界面に発生する未接合部は、図には示さないが接合速度 10 mm/s, 工具回転数 1000 rpm でも観察されなかった。

SZ 中央の組織 (Fig. 4.3(a1c), 4.3(a2c), 4.3(b1c), 4.3(b2c)) は、母材に存在した粒状 α -Al 組織が攪拌により観察されなくなり、粒状 α -Al 組織周辺に存在した共晶 Si も攪拌により分散した。接合速度の低い条件 (Fig. 4.3(a1c), 4.3(b1c)) では同一地点での攪拌している時間が長いため、 α -Al と Si は微細かつ均一に分散分布している。接合速度の高い条件 (Fig. 4.3(a2c), 4.3(b2c)) では、Si の分散が不均一となり組織の流動方向を示すようなマーブル状に観察された。工具回転数による分散分布の差 (Fig. 4.3(a1c)と 4.3(b1c), および Fig. 4.3(a2c)と 4.3(b2c)) は小さかった。

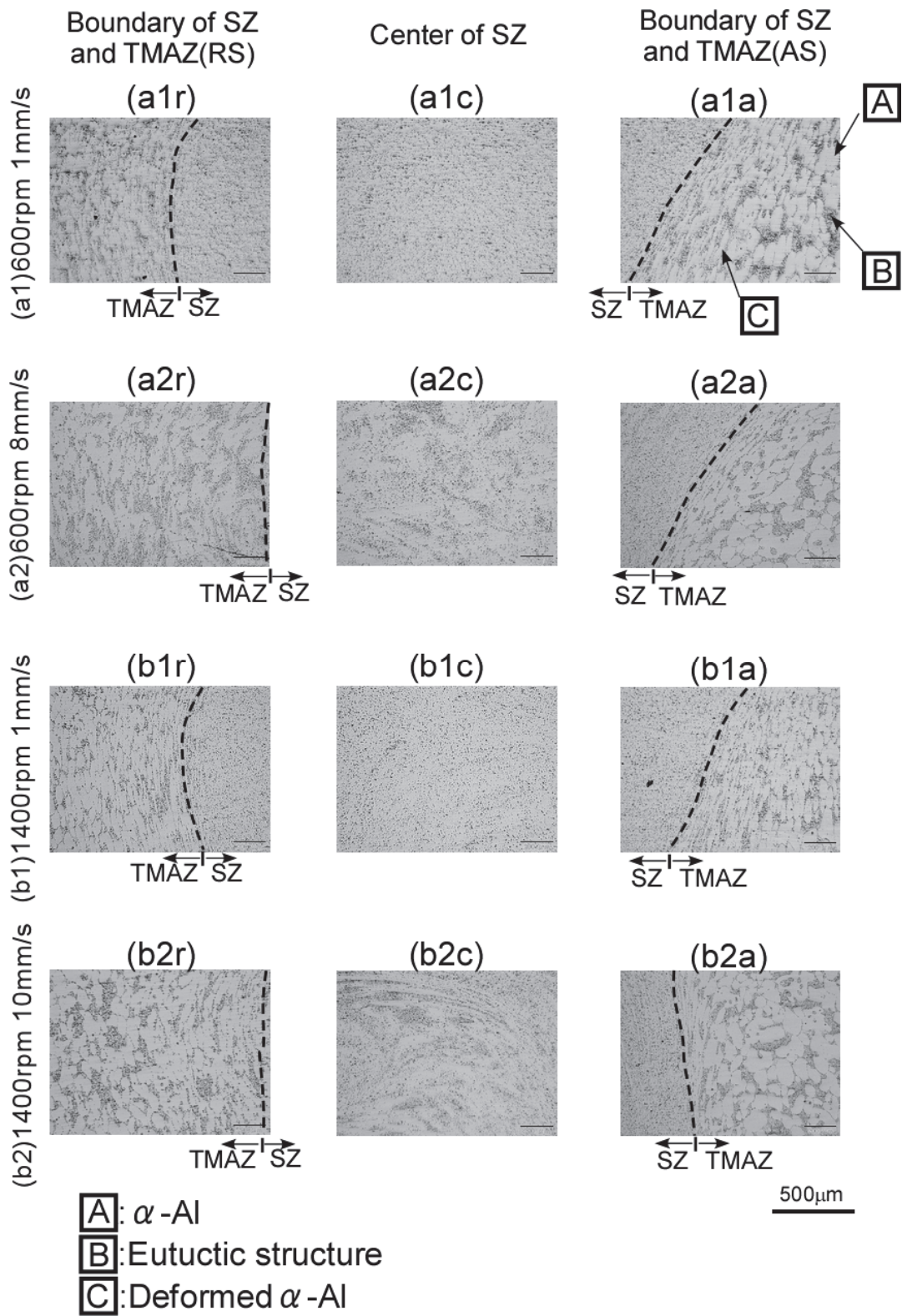


Fig. 4.3 Microstructures of FSW joints.

SZ 中央の組織の観察倍率が高い写真を **Fig. 4.4** に示す。Fig. 4.4(a1), 4.4(a2), 4.4(b1), 4.4(b2)の写真はそれぞれ Fig. 4.3(a1c), 4.3(a2c), 4.3(b1c), 4.3(b2c)を拡大した写真である。比較として母材部の同倍率の写真を Fig. 4.4(c)に示す。接合速度が高いほど Si の大きさは母材部 (Fig. 4.4(c)) に比較し小さくなるように観察されるが、粒径を測定したところ母材と全接合条件で 2~3 μm でありほぼ一定の値を示した。計算上の攪拌量 L を各写真下に示しているが、本研究における攪拌量範囲内では Si のへの影響はみられない。Si は塑性流動の力を受けているが、粗大化・破碎されることなく攪拌されて $\alpha\text{-Al}$ と混合分散されたことがわかる。このような混合分散は、6061 アルミニウム合金を用いて摩擦攪拌プロセスによるアルミナ粒子の複合化したものと類似した様相であった⁴¹⁾。

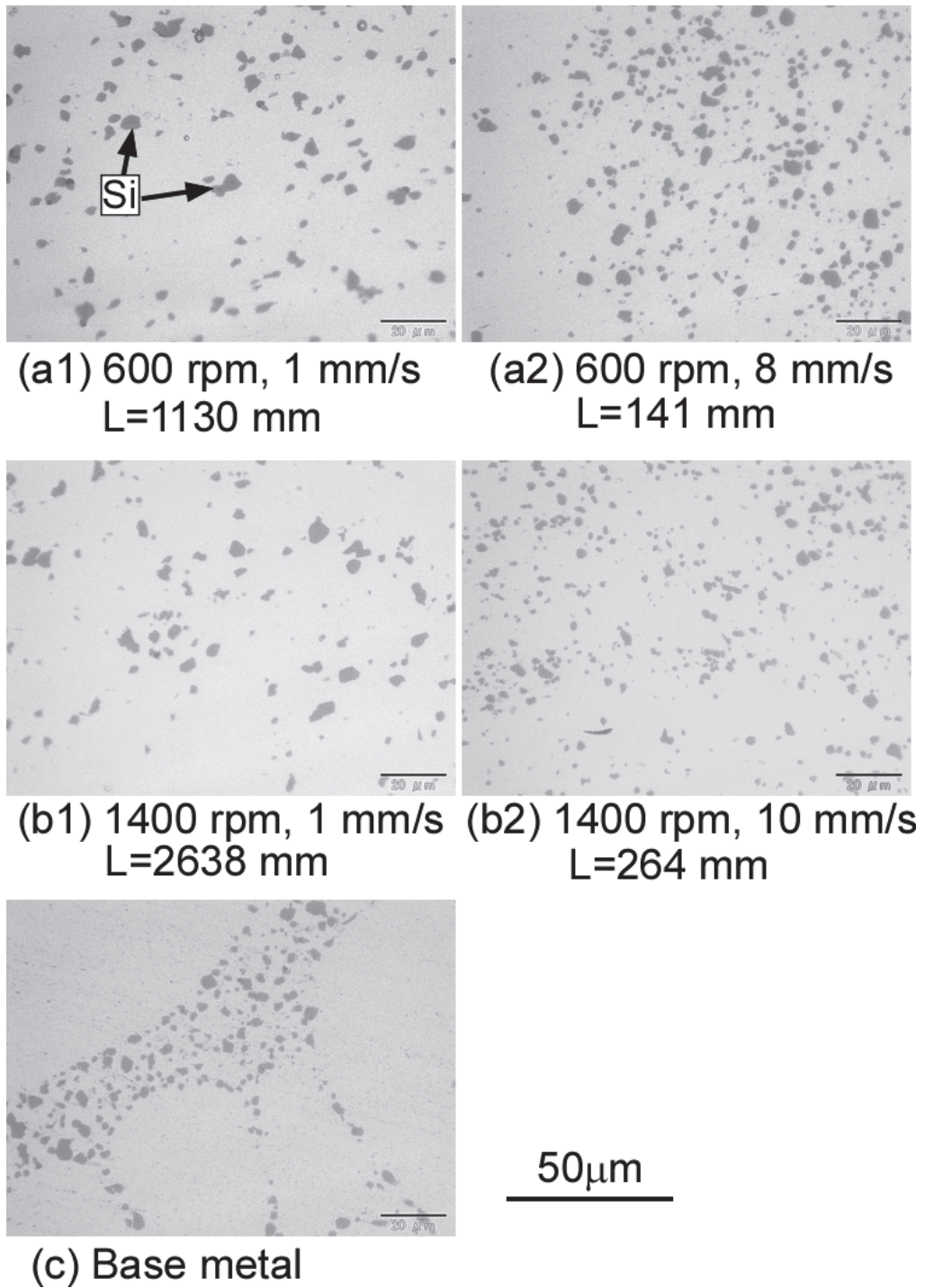


Fig. 4.4 Microstructures of SZ formed under various conditions. Note that the size of Si grains does not change by the FSW process.

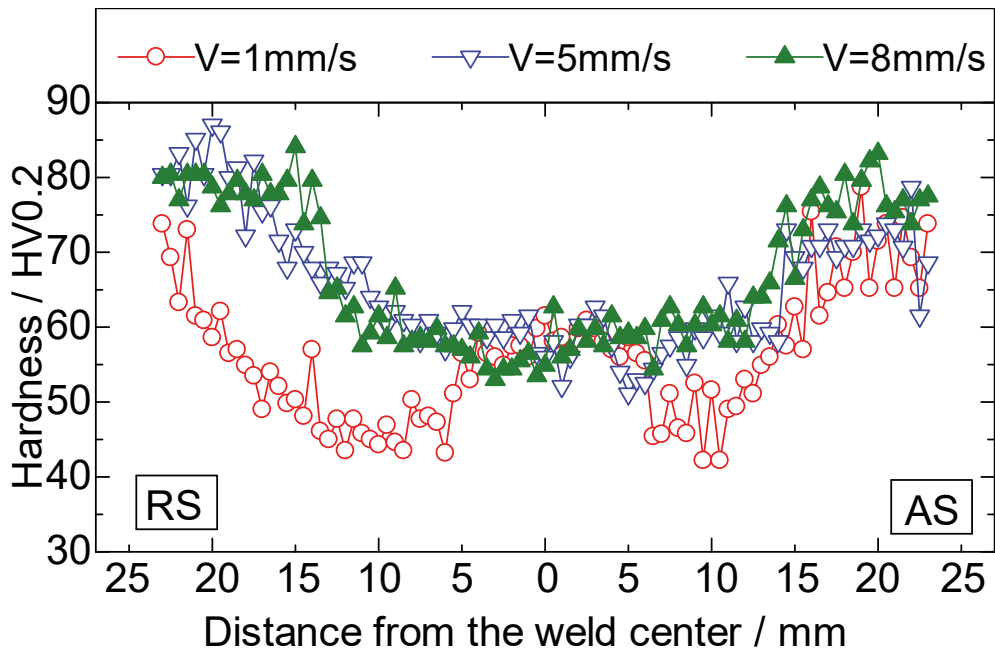
4.3.4 硬さ試験

接合部横断面の板厚中央の硬さ分布を **Fig. 4.5** に示す. 各グラフは横軸を接合部中心からの距離, 接合界面を 0 として左は RS, 右は AS である. 縦軸はビッカース硬さ (HV) を示す.

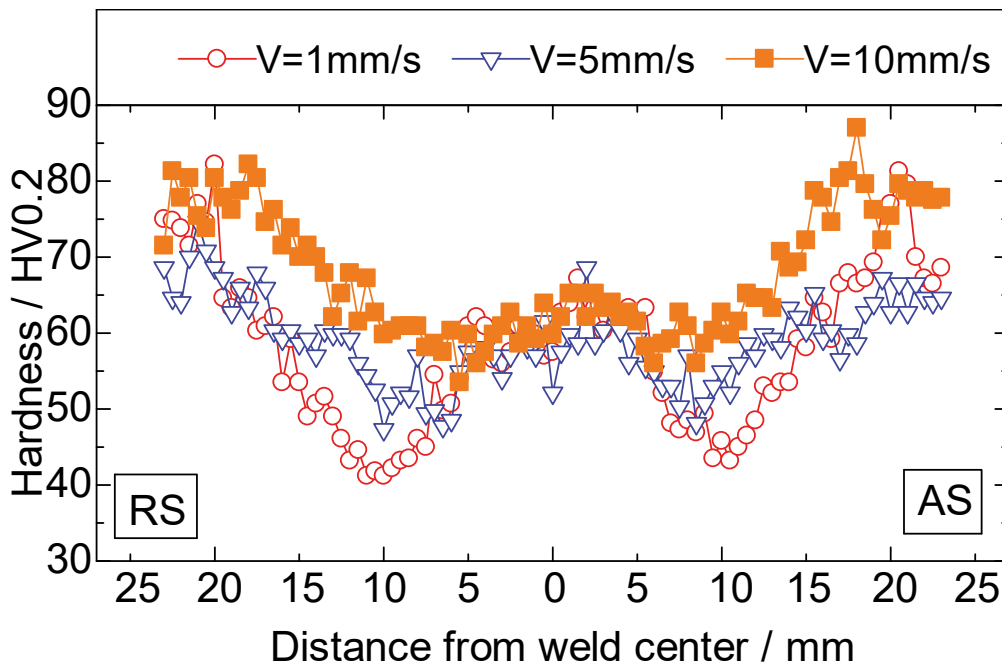
Fig. 4.5(a)は工具回転数 600 rpm の条件で接合速度を変化させた継手板厚中央における硬さ分布である. 全ての接合速度の条件で SZ から熱影響部に亘って軟化が認められる. 特に, 接合速度が低い 1 mm/s の条件では熱影響部が拡大し, 中でも RS の熱影響部拡大が著しい. 接合速度の低い条件でも, SZ に相当する RS, AS それぞれ 5 mm までの範囲の硬さ分布は, 接合速度の高い条件と同程度となった. SZ の組織は微視組織で示したようにどの接合条件においても粒状だった α -Al が細かく分散して Si が混在した組織となっている. Si の大きさ, 分布に差はあるもののこの荷重の硬さ試験では差が出なかったものとする. 接合速度 5 mm/s と 8 mm/s の場合を比較すると, 硬さ分布に大きな差異は認められなかった.

Fig. 4.5(b)は工具回転数 1400 rpm の条件で接合速度を変化させた硬さ分布である. この接合条件においても軟化が認められ, 接合速度の低い 1 mm/s で接合した継手の接合部が著しく軟化しており, 600 rpm の場合と同様に AS と比較して RS の軟化が大きくなっている. また, SZ に相当する RS, AS それぞれ 5 mm までの範囲の硬さ分布は, 接合速度の高い条件と同程度となった. 接合速度が高くなるのに伴い, HAZ および TMAZ の軟化量は少なくなる傾向にあった.

熱影響部が軟化する原因として過時効が考えられる. 接合速度が低い条件では入熱が大きくなるため大きな軟化を示し, 接合速度の高い条件では入熱が小さくなるため軟化が抑えられたものと推察する.



(a) 600rpm



(b) 1400rpm

Fig. 4.5 Hardness distributions of FSW joints.

4.3.5 引張試験

継手の引張試験結果を **Fig. 4.6** に示す。グラフの横軸は接合速度，縦軸左は継手効率，右は伸び率を示す。継手効率は接合速度が高くなるのに伴って上昇する一方，工具回転数には依存しない。工具回転数 1000 rpm および 1400 rpm，接合速度 10 mm/s の接合条件において継手効率 82% となる 230 MPa の値が得られた。伸び率も接合速度が高くなるのに伴って上昇し，工具回転数 1800 rpm を除く各工具回転数で最高接合速度の条件で母材を超える値が得られた。硬さ試験結果でも述べたように接合中に塑性加工を受けていない熱影響部は接合中の入熱によって過時効となっている。接合速度の高い条件でも過時効は起きるが，接合速度の低い条件より入熱が小さいため，継手効率の低下が抑えられかつ伸び率が増加したものと考える。

攪拌量と機械的性質の関係を **Fig. 4.7** に示す。グラフの横軸は攪拌量，縦軸左は継手効率，右は伸び率を示す。攪拌量が小さくなるのに伴い継手効率および伸び率は高くなる傾向にある。攪拌量は工具回転数と接合速度の関数となるが，同種材の接合においては接合界面においての欠陥はみられないため，外観上接合が可能な範囲であれば，工具回転数よりも接合速度に依存する結果となる。この結果より継手効率および伸び率が最も良好であった工具回転数 1400rpm を第 5 章の異種材 FSW の接合条件とする。

W. Boonchouyatan らの半凝固成形法を用いた 356 アルミニウム合金（板厚 4 mm）の FSW の結果⁴²⁾と比較すると，回転数 1750 rpm，接合速度 2.7 mm/s，使用工具形状は未記載であるが，継手効率は 58.5%，伸びは母材の 94% となっている。成形品の製造方法，化学成分が異なり，さらに本研究と比較して接合条件は接合速度が低く，工具回転数は高い条件となっているが，セミソリッドアルミニウム合金板の FSW 結果として本研究で得られたものの方が継手効率，伸びともに優れた値が得られている。

引張試験後の破断部巨視組織の一例を **Fig. 4.8** に示す。この試験片は AS 熱影響部で破断しているが RS 熱影響部の「A」で示した部分も断面減少が起きてい

る。継手の破断は全条件で AS, RS いずれかの熱影響部であり，接合条件に依存せず AS および RS のいずれかで破断する。前項で述べたように，AS と RS 熱影響部の最軟化部の硬さ同一条件ではほぼ同等である。AS および RS でいずれかで破断するのは，鑄造材の組織が展伸材に比べ不均一であり，わずかな差によって AS または RS で破断するものとする。

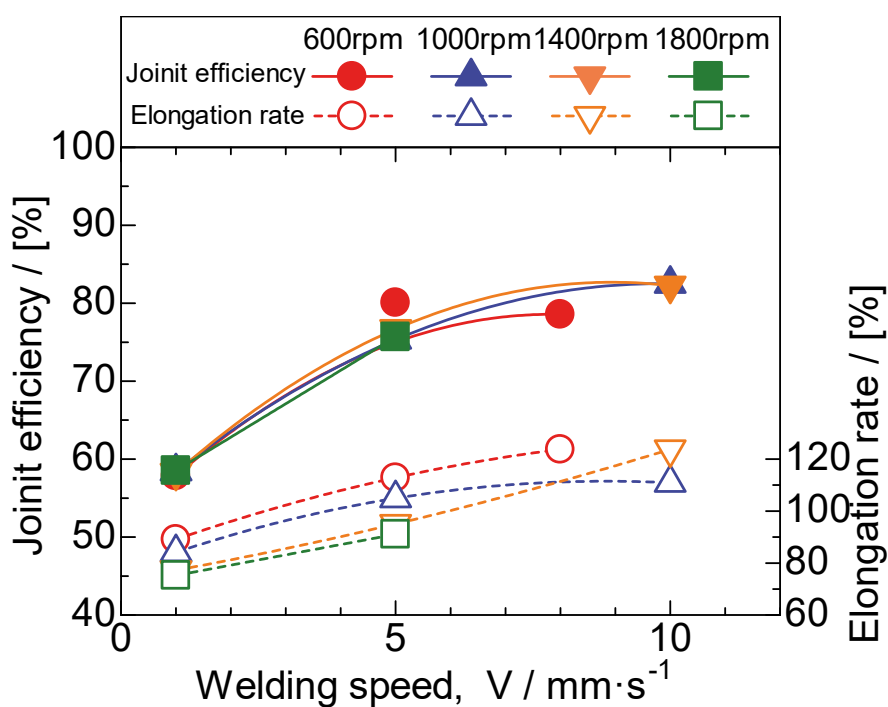


Fig. 4.6 Dependence of joint efficiency and elongation rate on the welding speed.

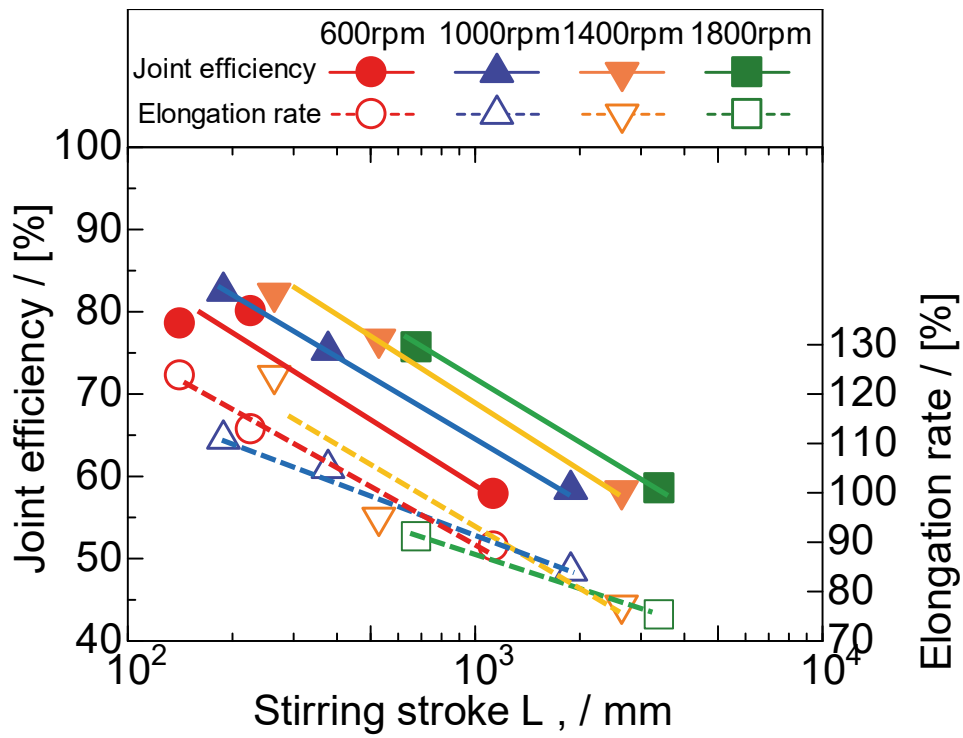


Fig. 4.7 Dependence of joint efficiency and elongation rate on the stirring stroke.

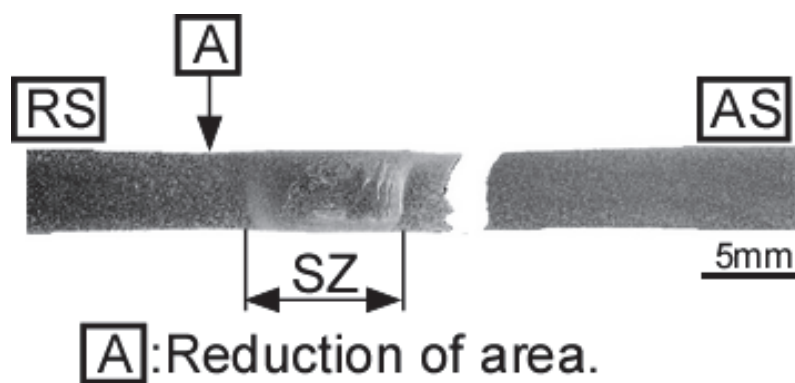


Fig. 4.8 Macrostructure of a fractured tensile testpiece.

(welding condition: 1000rpm, 10mm/s)

4.4 結言

半熔融成形した AC4CH アルミニウム合金を用いて摩擦攪拌接合を行い、得られた継手の機械的性質を検討し、以下の結論が得られた。

- (1) 接合速度の上昇および工具回転数の低減に伴いばりの発生量は小さくなり、表面性状は良好となる。
- (2) 攪拌部は半熔融成形材特有の粒状 α -Al が消滅し微細化分散する。Si も同様に分散し、 α -Al と混合した組織となる。接合速度の低減、または工具回転数の増加に伴って攪拌部内部の組織は均一に分散されるようになる。TMAZ 組織は α -Al が塑性流動の影響を受けて攪拌部に沿う形で引き延ばされるように変形し、接合速度の低減により変形は大きくなる。共晶組織に存在する Si は攪拌により分散はするものの、破碎・凝集することはない。
- (3) 工具回転数には依存せず、接合速度が増加するのに伴い継手の軟化割合は低減する。攪拌部の硬さ分布は接合速度に関わらずほぼ一定となる。
- (4) 継手効率および伸び率は、接合速度が上昇するのに伴って上昇する。最高で継手効率 82% が得られ、伸びは母材を上回る。
- (5) 半熔融成形特有の粒状 α -Al と共晶組織からなる供試材を FSW したが、攪拌による組織への影響により

参考文献

- 4-1) 仲間 大, 加藤数良, 時末 光: 軽金属, 61(2011), 95-99.
- 4-2) W. Boonchouytan, T. Ratanawilai, P. Muangjunburee: Procedia Engineering., 32(2012), 1139-1146.

第5章 半溶融成形 AC4CH と A6061 の異種材摩擦攪拌接合

5.1 緒言

半溶融成形した AC4CH と展伸材の A6061 の異種で FSW を行い、FSW 継手の状態と性能を把握する。接合条件による外観上の欠陥の有無、接合断面組織の欠陥の有無の調査により、この供試材における健全な継手が接合可能な接合条件を明らかにする。両材料とも熱処理型アルミニウム合金であることから、熱影響部を排除することは不可能であることから硬さ試験を実施し、接合条件による継手の軟化割合、攪拌部の硬さを調査する。各接合条件の継手の機械的性質を調査し、接合条件と機械的性質を明らかにして最高強度になる継手効率を求める。前章同様に半溶融成形したアルミニウム合金組織は、他の鋳造アルミニウム合金と異なりこれまでに FSW した研究例は少ない。展伸材との攪拌により、初晶 α -Al や共晶組織が攪拌の影響を受けて変質する可能性があるため、攪拌部やその周辺組織にも着目して評価する。また異種での FSW は材料配置における機械的性質や組織形成に差異が生じるため、AC4CH を AS に配置した場合および RS に配置した場合の両方について接合を試みて評価する。

これらのことから半溶融成形した AC4CH 材が A6061 との異種 FSW に有効であるか、また A6061 をインサート材に使用することが有効であるかを判断する。

5.2 供試材および実験方法

供試材は、第3章に示した形状に機械加工した半溶融成形した AC4CH アルミニウム合金板および A6061 アルミニウム合金板を使用した。

供試材を Fig. 2.3 に示した治具により固定し、3.2.1 で示した接合装置を使用した。回転工具は第4章の実験結果では特に低接合速度の条件において、ショルダ一部が供試材に過剰に挿入されることによりばりの発生が大きくなった。これを抑えるため、Fig. 3.2 に示す形状のプロープ長さを 4.5 mm から 4.7 mm に変更した。ツールの回転方向は反時計回りとした。継手においてビードの回転工具

の回転方向と接合方向が同一となる AS, およびその逆側の RS では一般的な溶融溶接と異なり左右非対称の接合組織となるため, AC4CH を AS に配置した場合および RS に配置した場合の両方について接合を試みた. また, 異種材料を接合する際には回転工具中心と供試材の突合せ面をずらすオフセット量を与えて攪拌の影響を検討する場合もあるが, 本研究ではオフセット量は 0 として, 回転工具中心を供試材突合せ面に合わせて接合した. 接合条件は, A6061 は接合可能範囲が広いことから⁵⁻¹⁾, 第 4 章の研究成果をもとに **Table 5.1** に示す条件とした.

得られた継手は第 3 章で示す方法で外観および組織観察, マイクロビッカース硬さ試験, 引張試験をいずれも室温で行った.

Table 5.1 Friction stir welding conditions.

Parameters, Symbol (unit)	Value or range
Rotational speed, N (rpm)	1400
Welding speed, V (mm/s)	1,5,10,15
Tilt angle, θ (deg.)	3
Preheating time, t (s)	15
Tool insertion depth, h (mm)	4.9

5.3 実験結果

5.3.1 継手外観

種々の接合条件で接合した継手外観の一例を **Fig. 5.1** に示す。接合方向は紙面左から右であり、供試材上部が RS、下部が AS となるように配置している。左列は AS に AC4CH、RS に A6061 を配置した条件、右列は AS に A6061、RS に AC4CH を配置した条件であり、接合速度は外観写真の下に記載している。

全ての接合条件において AS、RS にばりの発生が認められ、接合速度の低い条件ではばりが大きくなり、接合速度 1 mm/s の条件 (Fig. 5.1(a1), 5.1(a2)) ではどちらの材料配置においても写真中「A」に示すように RS に大きなばりが発生する。また、全条件において、プローブ挿入過程および予熱中に回転工具全周にばりが発生し、接合開始とともに写真中「B」に示すように工具前縁のばりが RS に押し流されて形成された。接合開始点の RS に尖ったばりが発生して残されている。

接合部表面には FSW 特有の円弧状の様子が観察される。接合速度が低い条件ほど明瞭に観察される。

接合速度 10 mm/s までは接合部表面に欠陥等は観察されなかったが、接合速度 15 mm/s の条件 (Fig. 5.1(d1), 5.1(d2)) ではいずれの材料配置においても、写真中「defect」に示すように接合開始直後に AS のプローブ通過領域境界付近に表面に開口した欠陥が形成される。

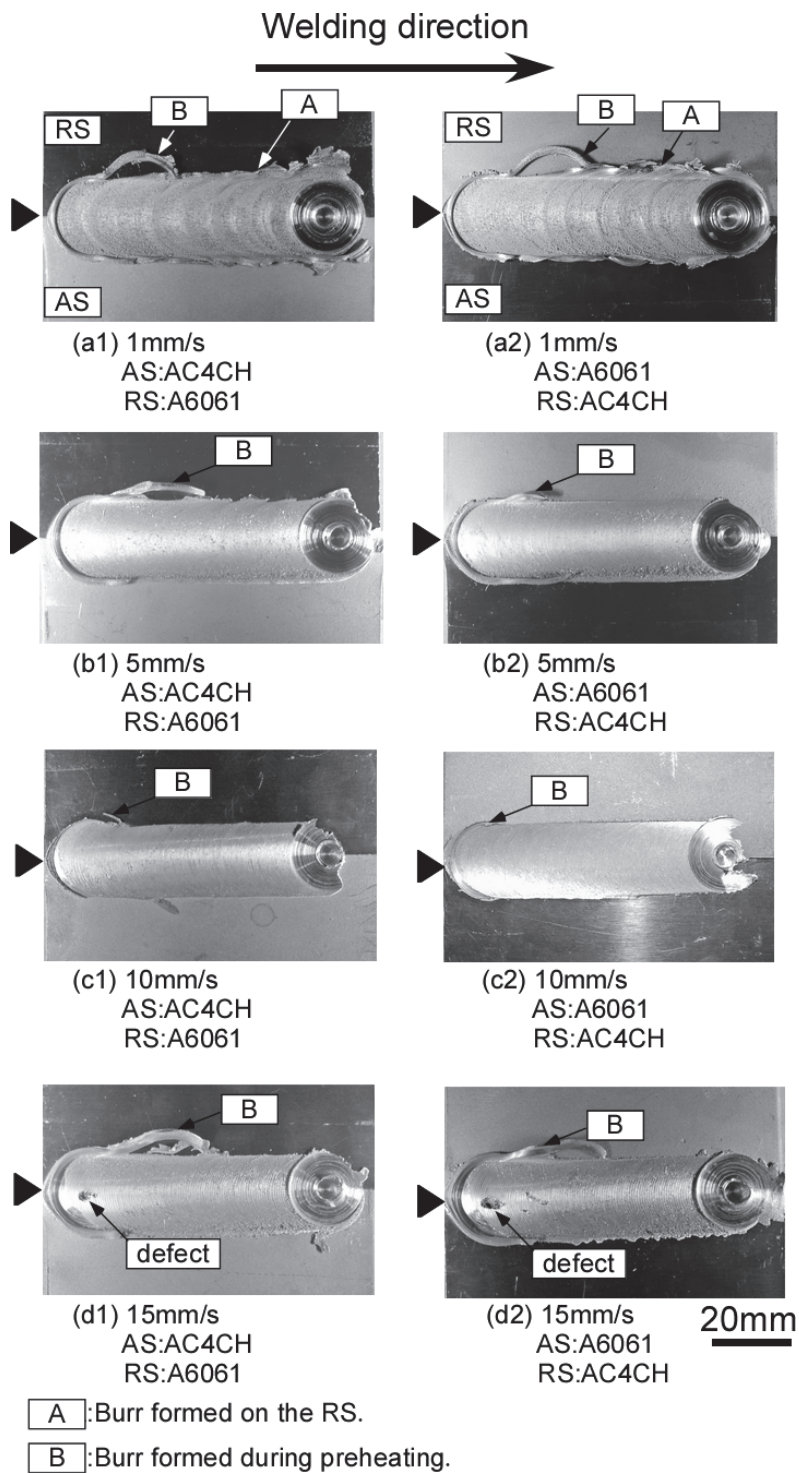


Fig. 5.1 Appearances of FSW joints welded under various conditions.

The triangles indicate the positions of the welding interfaces.

5.3.2 巨視的組織

種々の接合条件で接合した継手横断面の巨視的組織を **Fig. 5.2** に示す。接合方向は紙面に垂直に手前から奥へ向け、材料配置と接合速度は各組織写真の下に記載している。各写真の暗い部分が A6061 で、明るい部分が AC4CH である。中央部で観察される明暗が入り混じった領域が工具による攪拌を受けて組織が微細化した SZ である。SZ の形状は 4.3.2 で示したのと同様に接合部中央に丸い形状に存在するプローブによって攪拌された部分と接合部上部にある前進角 3 度によって供試材に挿入されているショルダー後縁及びプローブによって攪拌された扇形部分が存在する。プローブのみでの攪拌された組織は全ての条件で上部が AS 方向の板上部へ流れるような形状になる。また、この変形領域は AS の供試材の影響が大きくなり、AS に AC4CH を配置した条件(**Fig. 5.2(a1)**, **5.2(b1)**, **5.2(c1)**, **5.2(d1)**)では暗い領域が大きくなり、AS に A6061 を配置した条件(**Fig. 5.2(a2)**, **5.2(b2)**, **5.2(c2)**, **5.2(d2)**)では明るい領域が大きくなる。SZ の断面積は、接合速度が高くなるほど小さくなる。接合条件とプローブによって攪拌された SZ の最大幅 W の関係を **Fig. 5.3** に示す。SZ の幅は接合速度が高くなるほど小さくなり円形に近い形状となる。プローブは **Fig. 3.3** で示す M6 ねじ形状でありその最大直径はねじ山頂部の 6.0 mm である。接合速度の低い 1 mm/s の条件では SZ 幅が AS に AC4CH を配置した条件は 10.4 mm、AS に A6061 を配置した条件では 9.4 mm とプローブ径の 1.7 倍以上になる。AS に AC4CH を配置した条件の SZ 幅が大きくなるが、接合速度が高くなるのに伴い SZ 幅は減少するとともに材料配置による差は小さくなり、15 mm/s では SZ 幅は両条件とも 6.8 mm とほぼプローブ直径と等しくなる。

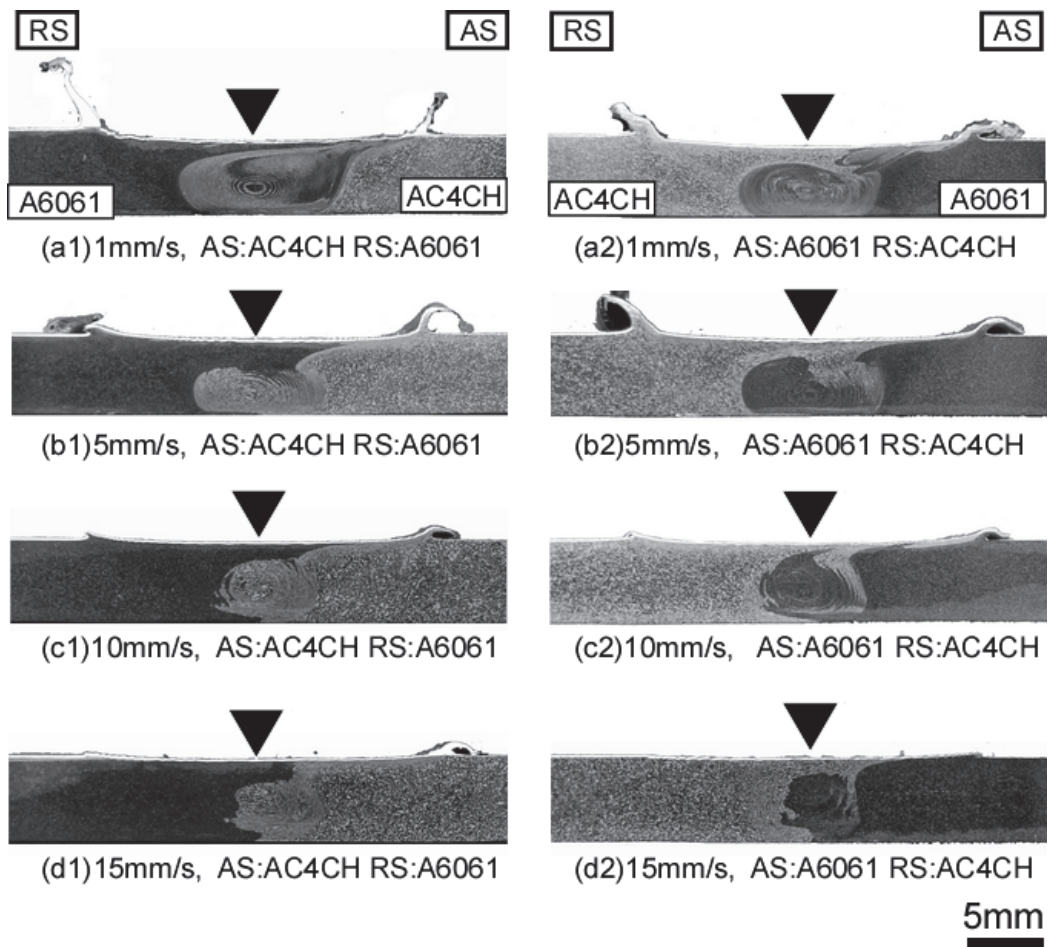


Fig. 5.2 Cross-sectional macrostructures of FSW joints welded under various conditions. The triangles indicate the positions of the welding interfaces.

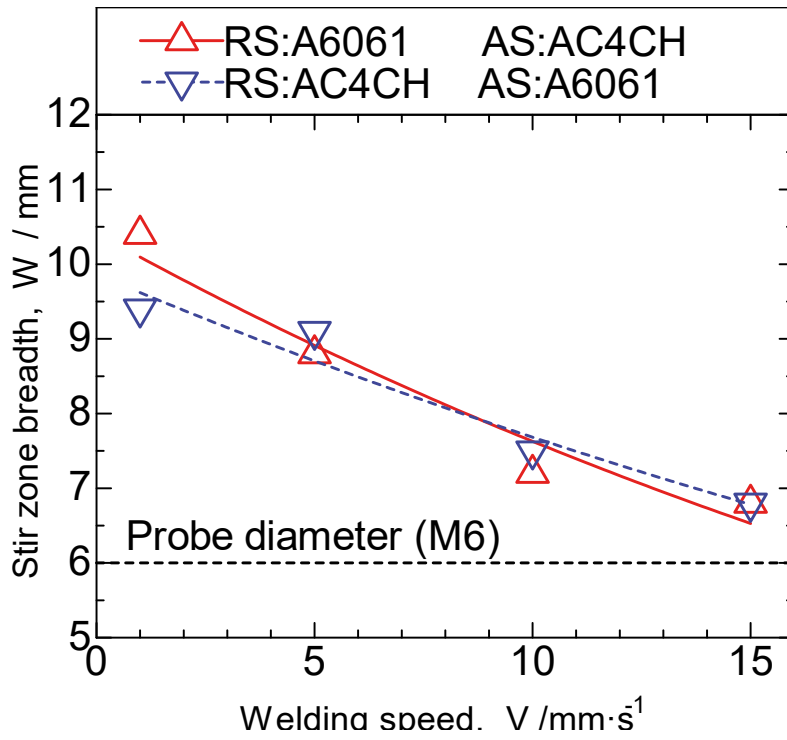


Fig. 5.3 Relationship between welding speed and stir zone breadth.

Fig. 5.4 に第 3 章式 (2) で示した攪拌量 L と最大 SZ 幅の関係を示す。攪拌量 $L=500$ mm 付近まで最大 SZ 幅は比例的に上昇するが、 500 mm を超えてからは緩やかな上昇となる。接合速度 5mm/s で攪拌量 $L \approx 500$ mm になることから、これ下回る接合速度では攪拌部幅への影響は小さくなる。また、材料の塑性流動性の差により AS に AC4CH を配置した条件で攪拌量 L の大きい条件で SZ が大きくなる。一方で、接合速度が高く攪拌時間が短くなることで、攪拌量 L が小さくなることから SZ 幅も小さくなり、材料配置による SZ の幅の差も小さくなる。

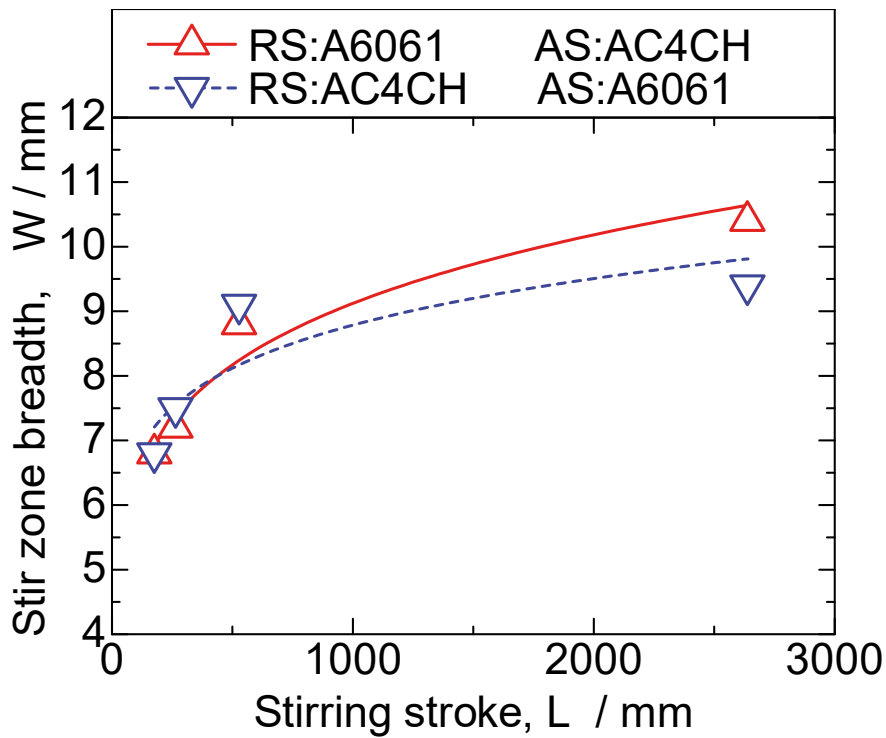


Fig. 5.4 Relationship between stirring stroke and stir zone breadth.

5.3.3 微視的組織

種々の接合条件で接合した継手横断面の微視的組織を Fig. 5.5 および Fig. 5.6 に示す。観察試料，観察方向は 5.3.2 巨視的組織と同様である。観察位置は板厚中央の SZ 中心，AS，RS の SZ/TMAZ 境界部であり，図の最上部に，接合速度および材料配置は図の最左端に記載している。

全ての条件で SZ/TMAZ 境界部の AC4CH 組織は，4.3.3 で示した AC4CH どうしで FSW した場合と同様に，母材として存在する半熔融成形材特有の組織である粒状の α -Al が塑性流動の影響を受けて SZ に沿う形で引き伸ばされるように変形する。さらにその外側には塑性流動の影響を受けず摩擦熱だけの影響を受けた HAZ となる。

AS に AC4CH を配置して接合速度を変化させた条件の AS 境界部(Fig. 5.5(a1a), 5.5(a2a), 5.5(a3a))で比較すると，接合速度の低い 1 mm/s (Fig. 5.6(a1a)) では境界部から TMAZ 側の粒状であった α -Al が大きく引き伸ばされた形状となっている。接合速度が高い 10 mm/s (Fig. 5.5(a2a)), 15 mm/s (Fig. 5.5(a3a))の条件では 1 mm/s のように α -Al が大きく変形している領域は境界部から 100~200 μ m であるが，それより外側においても板厚方向に SZ に沿う方向にわずかな変形がみられる。逆側である RS の A6061 組織(Fig. 5.5(a1r), 5.5(a2r), 5.5(a3r))は AC4CH に比較し母材組織が微細であるため AC4CH のように流動挙動が明瞭ではないが，境界部には板厚方向に SZ に沿う方向の流動は観察される。

RS に AC4CH を配置して接合速度を変化させた条件の RS 境界部(Fig. 5.6(b1r), 5.6(b2r), 5.6(b3r))は AS に AC4CH を配置した AS 境界部と同接合条件で比較すると， α -Al が大きく変形している領域は 10 mm/s (Fig. 5.6(b2r))でも 500 μ m 以上となり，15 mm/s (Fig. 5.6(b3r))では境界部が不鮮明となっている。逆側である AS の A6061 組織(Fig. 5.6(b1a), 5.6(b2a), 5.6(b3a))は，RS に A6061 組織を配置した条件(Fig. 5.5(a1r), 5.5(a2r), 5.5(a3r))と同様に流動挙動が明瞭ではないが，境界部近傍で板厚方向に SZ に沿う方向の流動は観察される。

SZ 中央の組織 (Fig. 5.5(a1c), 5.5(a2c), 5.5(a3c), 5.6(b1c), 5.6(b2c), 5.6(b3c))

では、母材に存在した AC4CH の粒状 α -Al は攪拌により微細化されて観察されなくなり、粒状 α -Al 組織周辺に存在した共晶 Si も攪拌により微細化して分散分布している。材料配置により攪拌流動によるそれぞれの材料の混合割合が異なるため、この観察位置においては、AS に AC4CH を配置したものは AC4CH が多くなり、AS に A6061 を配置したものは A6061 が多くなる。また、AS に AC4CH を配置した場合の組織は接合速度の低い条件では同一地点での攪拌量が多いため、 α -Al と Si は微細かつ均一に分散分布しているが、接合速度の高い条件では Si の分散が不均一となり、組織の流動方向を示すようなマーブル状に観察される。AS に A6061 を配置した組織は、接合速度の大小で明瞭な差異は見られない。

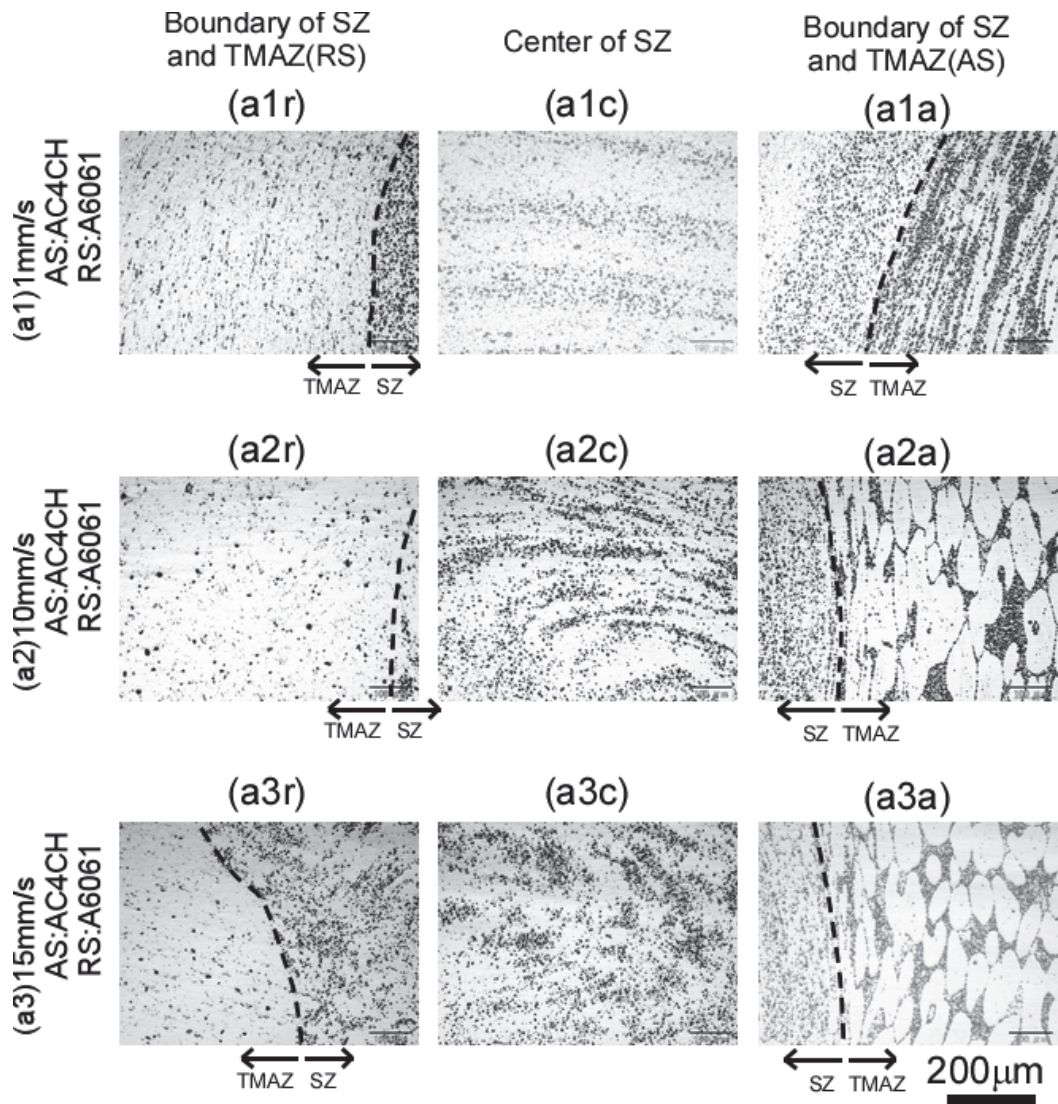


Fig. 5.5 Microstructures of FSW joints. The dotted lines indicate the boundary between SZ and TMAZ. (AS: AC4CH, RS: A6061)

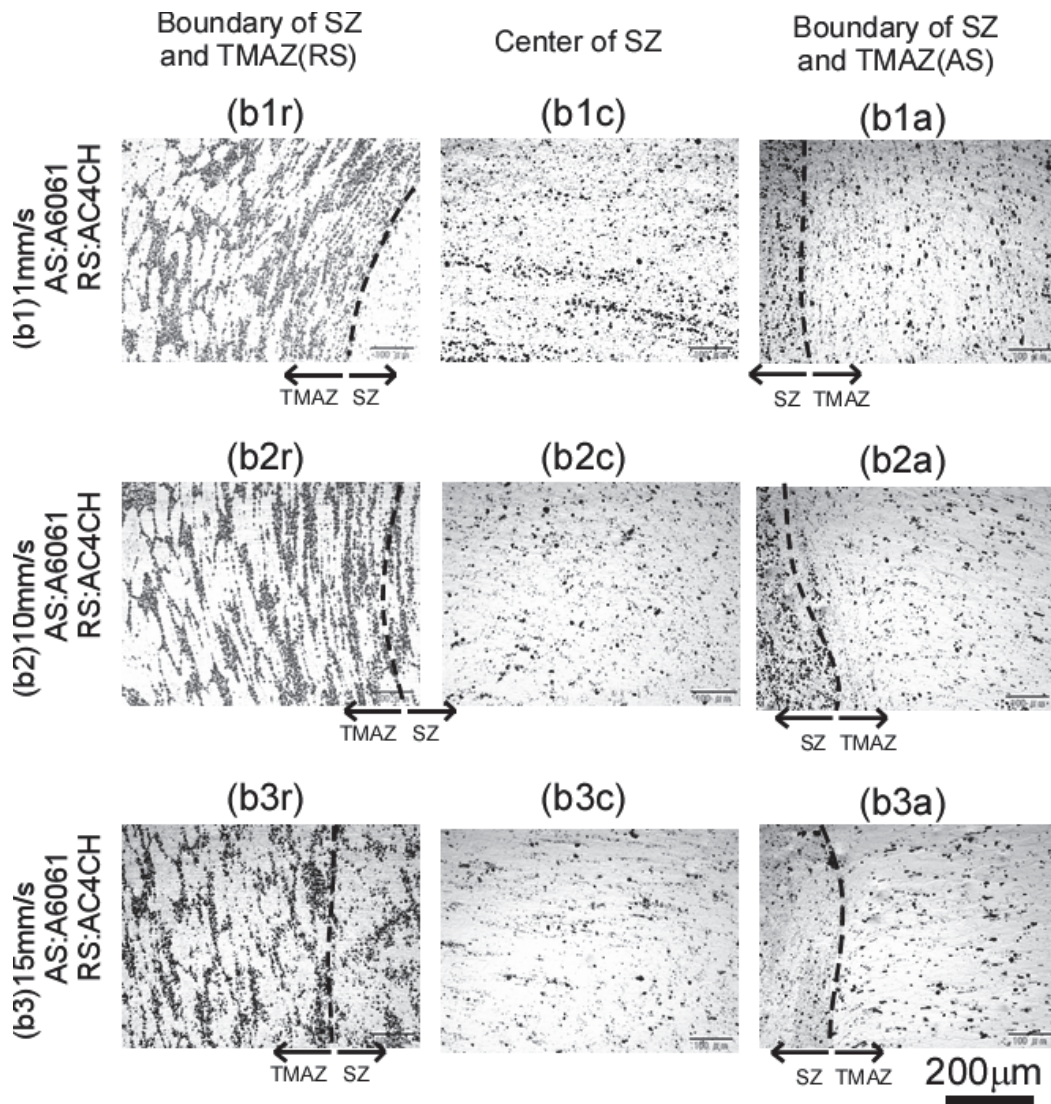


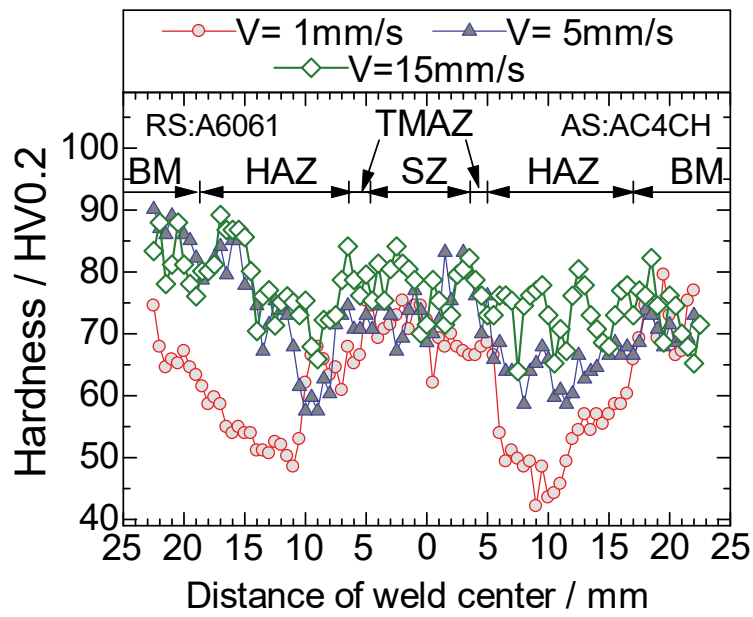
Fig. 5.6 Microstructures of FSW joints. The dotted lines indicate the boundary between SZ and TMAZ. (AS:A6061, RS:AC4CH)

5.3.4 硬さ試験

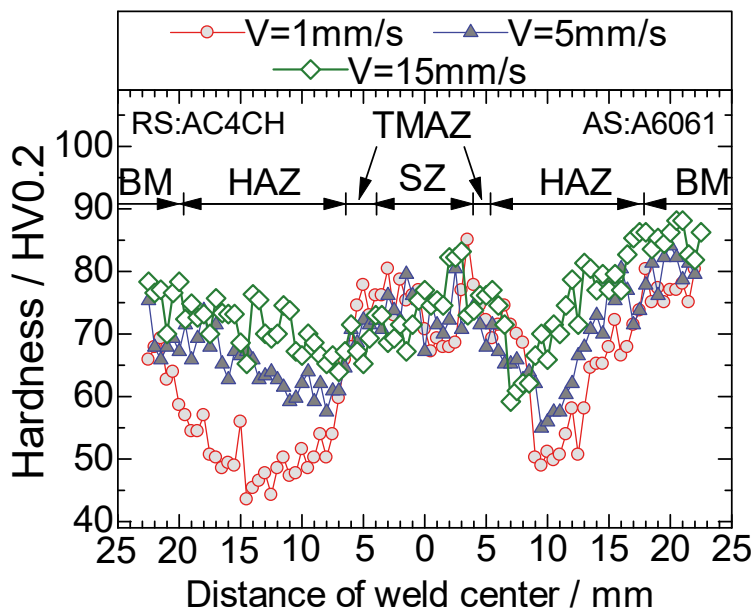
Fig. 5.7(a)は AS に AC4CH を配置した条件で接合速度を変化させた継手板厚中央における硬さ分布である。全ての接合速度の条件で SZ から TMAZ, HAZ に亘って軟化が認められる。特に、接合速度が低い 1 mm/s の条件では HAZ が拡大し、軟化域幅および軟化量も大きい。また、最軟化部の硬さは A6061 側より AC4CH 側の方が低くなる。接合速度 5 mm/s 以上の条件では、AS, RS ともに大きく軟化域幅および軟化量は減少し、最軟化部の硬さの差は小さくなる。どの接合条件においても AC4CH に存在する平均直径 107 μm の大きな等軸粒状 $\alpha\text{-Al}$ は SZ 内において細かく分散して共晶 Si と A6061 の組織が混在した組織となる。SZ は巨視組織や微視組織においてマーブル状になっているものの、この荷重の硬さ試験では差が出なかったものとする。

Fig. 5.8(b)は AS に A6061 を配置した条件で接合速度を変化させた硬さ分布である。この接合条件においても HAZ 及び TMAZ に軟化が認められる。特に接合速度の低い 1 mm/s で接合した継手の熱影響部付近の軟化が著しい。また、AS に比較して RS の軟化が大きくなっている。

熱影響部が軟化する原因として過時効が考えられる。接合速度が低い条件では高温に保持される時間が長くなるため顕著な軟化を示し、接合速度の高い条件では高温保持時間が短くなるため軟化が小さく抑えられたものと推察する。



(a) Placement of materials : A6061 on RS, AC4CH on AS.



(b) Placement of materials : AC4CH on RS, A6061 on AS

Fig. 5.7 Hardness distributions of FSW joint.

5.3.5 引張試験

継手の引張試験結果を **Fig. 5.8** に示す。継手効率は接合速度が高くなるのに伴って上昇する一方、材料配置には依存しない。接合速度 15 mm/s の RS に AC4CH を配置した接合条件において継手効率は AC4CH の 85% が得られた。伸び率も接合速度が高くなるのに伴って上昇し、AC4CH の 90% が得られた。硬さ分布でも述べたように攪拌の影響がない熱影響部は接合中の入熱によって過時効となる。接合速度が低い条件では高温に保持される時間が長くなるため過時効による強度低下が大きくなり、接合速度の高い条件でも過時効は起きるが、接合速度の低い条件よりも高温に保持される時間が短くなるため、過時効が生じる領域が狭くなる。これにより継手効率の低下が抑制され、伸び率が増加したと考える。

S. Lim らの研究⁵⁻¹⁾では板厚 4 mm の A356 (ASTM 規格) の鋳造板 (鋳造方法未記載) と A6061 板材の FSW を工具回転数 1200 rpm, 接合速度 3.3 mm/s で行った結果、継手効率は 84%, 伸びは母材 (A356) の 62% となっている。本研究より接合速度は低い条件ではあるが、継手効率は同等であり、伸びはかなり高い値を得られている。

M. Tehyo らの研究⁵⁻²⁾では板厚 4 mm のセミソリッド法で成形した 356 (ASTM 規格) 鋳造板と A6061 板材の FSW を工具回転数 2000 rpm, 接合速度 1.3 mm/s で行った結果、継手効率は 77%, 伸びは母材 (356) の 52% となっている。この接合条件も接合速度が本研究より大幅に低いが、継手効率や伸びは本研究の方が高い値が得られている。

引張試験後の破断部巨視組織の一例を **Fig. 5.10** に示す。接合速度 10 mm/s の試験片は AS 熱影響部で破断しているが、RS 熱影響部の矢印を付した部分も断面減少が起きている。また、接合速度 15 mm/s の試験片は RS 熱影響部で破断しているが、接合速度 10 mm/s と同様に AS 熱影響部の矢印を付した部分も断面減少が起きている。継手の破断は全条件で AS, RS いずれかの熱影響部であり、接合速度の低い 1 mm/s の条件においては材料配置に関係なく AC4CH 側の熱影響部で破断する。接合速度 5 mm/s 以上では材料配置に依存せず AS および RS の

いずれかで破断する。

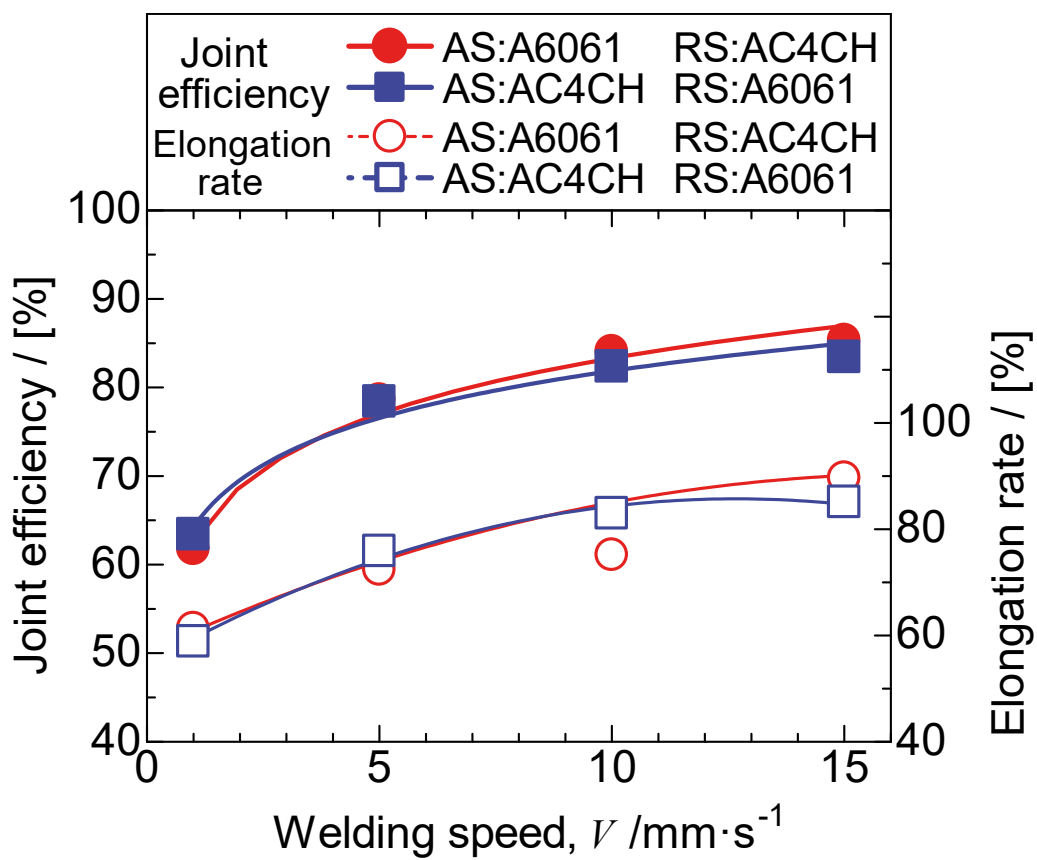


Fig. 5.9 Dependence of joint efficiency and elongation rate on the welding speed.

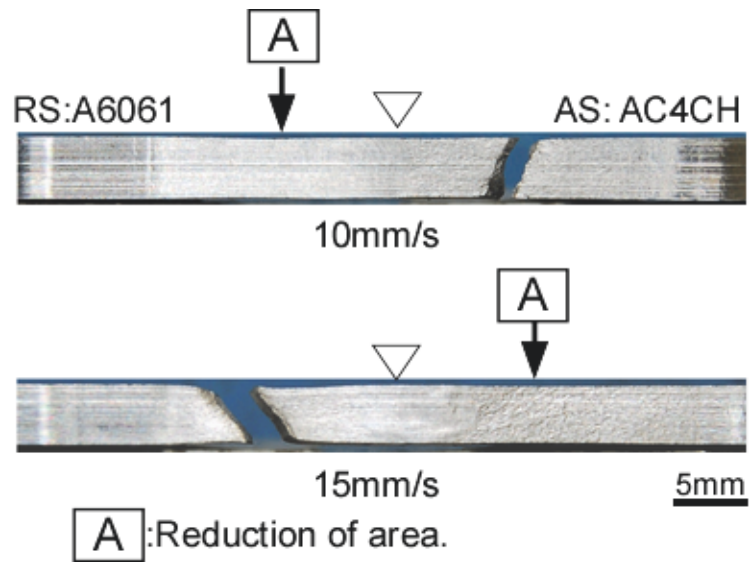


Fig. 5.10 Macrostructure of a fractured tensile testpiece. The triangles indicate the positions of the welding interfaces.

5.4 結言

半熔融成形した AC4CH アルミニウム合金と A6061 アルミニウム合金を用いて摩擦攪拌接合を行い，得られた継手の機械的性質を検討し，以下の結論が得られた．

- (1) 接合速度の増加に伴いばりの発生量は小さくなり，表面性状は良好となる．
- (2) SZ は，AC4CH は半熔融成形材特有の粒状 α -Al が消滅し微細化分散する．共晶 Si も同様に分散し， α -Al と混合した組織となる．接合速度の低減に伴って SZ 内部の組織は均一に分散されるようになる．A6061 は結晶粒が微細化分散し，AC4CH と混合した組織となる．TMAZ 組織は，AC4CH は α -Al が塑性流動の影響を受けて SZ に沿う形で引き延ばされるように変形し，接合速度の低減に伴って，変形量は大きくなり，TMAZ 域も拡大する．A6061 も結晶は塑性流動の影響を受けて SZ に沿う形で引き延ばされるように変形する．
- (3) 接合速度が増加するのに伴い継手の軟化割合は低減する．SZ の硬さ分布は接合速度に関わらずほぼ一定となる．
- (4) 継手効率および伸び率は，接合速度が増加するのに伴って上昇する．最高で継手効率(AC4CH) 85%，伸び率は AC4CH の 90%が得られる．
- (5) AC4CH および A6061 を使用した FSW では材料配置における組織や機械的性質への影響は非常に小さいためどちらに配置しても接合が有効である．
- (6) 以上より，半熔融成形した AC4CH 材が A6061 との異種 FSW に高い継手効率を得られることから有効であり，また A6061 をインサート材に使用することが有効であると判断する．

参考文献

5-1) 社団法人溶接学会編：摩擦攪拌接合-FSW のすべて-, 産業出版. (2006), 18.

5-2) S. Lim, S.Kim, C. Lee, S.Kim: Metallurgical and Materials transaction, 35A (2004), 2837-2843.

5-3) M.Tehyo, P.Muangjunburee, A.Binraheem, S.Chuchom, N. Utamarat:
Songklanakarin J.Sci.Technol., 34 (2012), 415-421.

第6章 A6061 インサート材を用いた半溶融成形 AC4CH-T6 の摩擦攪拌接合継手におけるインサート材幅と攪拌量の効果

6.1 緒言

第4章、第5章の結果をもとにインサート材を用いた半溶融成形した AC4CH の FSW を行う。接合条件による FSW 継手の状態と性能を把握する。外観上の欠陥の有無、接合断面組織の欠陥の有無の調査により、この供試材における健全な継手が接合可能な接合条件を明らかにする。インサート材幅、オフセット量および各接合条件を変化させて継手の機械的性質を調査し、接合条件と機械的性質を明らかにする。インサート材を使用することから接合界面が2つとなり、それを同時に接合することから接合界面底部に欠陥が発生する可能性があるため組織にも着目して評価する。本研究で定義した攪拌量とインサート材、オフセット量、機械的性質の関係性明らかにして機械的性質が良好な最大のインサート材幅が有効となる攪拌量と接合条件を調査する。

これらのことから半溶融成形した AC4CH 材が A6061 インサート材に使用することが有効であるかを判断する。

6.2 供試材および実験方法

供試材は、第3章に示した形状に機械加工した半溶融成形した AC4CH アルミニウム合金板を使用した。インサート材は第5章の研究結果より AC4CH と接合性がよいと示された A6061 材を使用した。使用した A6061 は第5章の供試材と同一厚さ、同ロットのものである。インサート材は長手方向を圧延方向と平行とし、板厚は 5 mm で元の厚さのまま、長さを供試材と同じ 90 mm、板幅（インサート材幅）を 2~4 mm に立フライス盤にて機械加工を行い使用した。

供試材を治具により固定し、第3章に示した接合装置を使用した。回転工具は第5章の実験結果より、ばりの排出の改善がみられ、欠陥も観察されなかったこ

とから、第5章と同様に Fig. 3.2 に示す形状のプローブ長さを 4.5 mm から 4.7 mm に変更した。ツールの回転方向は反時計回りとした。また、予備実験よりオフセットを与えた条件でより継手強度が高くなることが予想されることから、本実験ではオフセットを 0 および RS 方向へ 1 mm 与えた条件の実験も行った。オフセットについての説明は次項で説明する。接合条件は **Table 6.1** に示す条件を設定した。

得られた継手は第3章で示す方法で外観および組織観察、引張試験をいずれも室温で行った。

Table 6.1 Friction stir welding conditions.

Parameters, Symbol (unit)	Value or range
Rotational speed, N (rpm)	1400
Welding speed, V (mm/s)	5, 10
Tilt angle, θ (deg.)	3
Preheating time, t (s)	15
Tool insertion depth, h (mm)	4.9
Offset distance, d (mm)	0, RS1

6.3 オフセット量

FSW は回転工具を使用し，その工具を移動させて接合するため AS, RS での攪拌状態および攪拌力も異なる．継手断面を観察すると通常の溶融溶接と異なり AS, RS で左右非対称となる組織形態を示す．そこで，オフセットを与えることで，AS, RS での攪拌力が異なることを利用して接合を行う場合がある．例えば融点の差が大きい金属どうしの接合である．無酸素銅と A6061 の接合の場合⁶⁻¹⁾，オフセットなしの条件では外観ビードは粗く，断面には粗大なポロシティが認められる．オフセットを A6061 側に与えて，プローブがわずかに銅側に接触させる程度にすることで良好な継手が得られている．

今回の選定した供試材とインサート材は融点や強度の差が大きい材料ではない．しかし，AS, RS の攪拌力の差により予備試験の結果，インサート材幅が大きいほど引張試験を行うと試験片は RS の SZ と TMAZ の境界部で破断し，継手効率さおよび伸び率が非常に小さくなった．そこで，本実験ではオフセットを RS につけることにより RS の攪拌量を増やすことで AS, RS ともに良好な攪拌量を得ることを目的とした．

Fig. 6.1 にオフセットの模式図を示す．一般的に FSW では接合線は開先線上を接合線としてプローブ中心線を合わせて接合を行う．接合条件のひとつとして接合線をインサート材幅中心から RS 方向へ 1 mm 移動させた位置で接合した．この条件を RS1 と表記する．

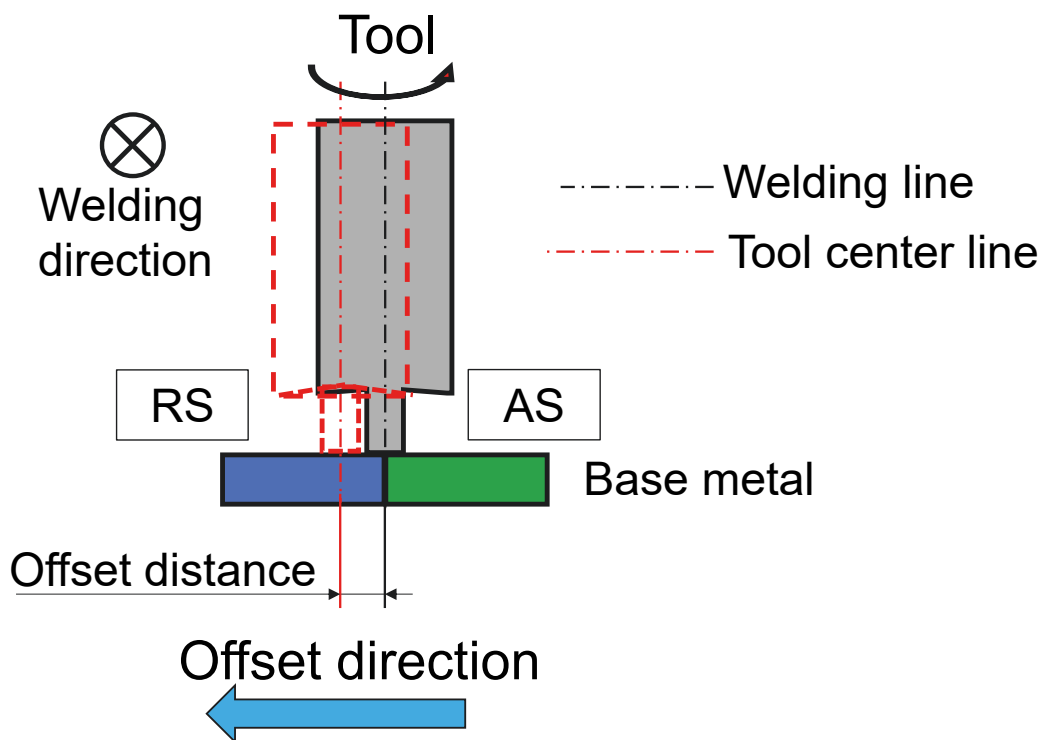


Fig. 6.1 Schematic illustration of offset distance for FSW.

6.4 攪拌量

第5章で示した接合線をプローブが通過する際の攪拌量 L は、攪拌部幅の大小の関係を示すために使用した。このインサート材を用いた接合にも当てはめて考え、供試材とインサート材の混合の度合の指標とする。第5章での攪拌量 L は接合線上のある点にプローブが通過する際の接合パラメータを入力して求めた。

Fig. 6.2 にインサート材を用いた場合の接合線とプローブの関係の模式図を示す。インサート材を挟むことにより、AS, RS の2つの接合線が発生する。接合線はインサート材を挟まない場合の接合線であった直径に相当する長さより小さくなる。プローブを円とするとインサート材を挟んだ場合の接合線が弦(赤線部)となる。この弦をみなし接合線とする。弦の長さを求めるため、プローブ中心とインサート材幅端までの距離を AS, RS でそれぞれ G_A , G_R とする。弦の長さはオフセットがない場合、プローブはインサート材の中央を通過するため

$$G_A = G_R = \frac{1}{2}B \quad (3)$$

となる。但し、 B はインサート材幅(mm)である。AS 弦を C_A , RS 弦を C_R とするとそれぞれ

$$C_A = 2 \sqrt{\left(\frac{1}{2}D\right)^2 - G_A^2} \quad (4)$$

$$C_R = 2 \sqrt{\left(\frac{1}{2}D\right)^2 - G_R^2} \quad (5)$$

となる。但し、 D はプローブ直径(mm)である。

相対運動があるため C_A と C_R は長さが同じであっても攪拌力が異なり、それ

によって攪拌量も異なると考えられるが、後述するオフセットを RS 方向に与えることで AS の攪拌量が小さくなることからここでは AS を基準に考える。よってオフセットなしの条件の攪拌量 L は

$$L = C_A \quad (6)$$

として計算する。

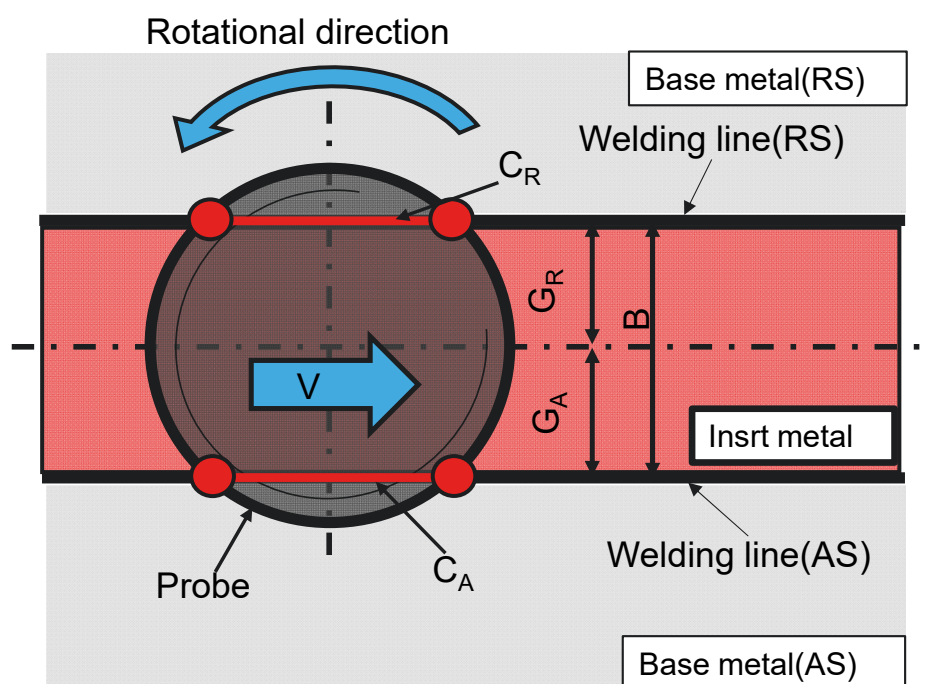


Fig. 6.2 Relationship between welding line and probe when using insert metal.

Fig. 6.3 にツールにオフセットを与えた場合の模式図を示す。一点鎖線をインサート材幅中心，点線をプローブが通過する中心を示す。攪拌量 L を求めるにあたりプローブ中心と AS, RS それぞれのインサート材幅までの距離は

$$G_A = \frac{1}{2}B + d \quad (7)$$

$$G_R = \frac{1}{2}B - d \quad (8)$$

となる。 d は RS 方向のオフセット量(mm)である。

オフセット AS 弦を C_A ，RS 弦を C_R とするとそれぞれ

$$C_A = 2 \sqrt{\left(\frac{1}{2}D\right)^2 - \left(\frac{1}{2}B + d\right)^2} \quad (9)$$

$$C_R = 2 \sqrt{\left(\frac{1}{2}D\right)^2 - \left(\frac{1}{2}B - d\right)^2} \quad (10)$$

となる。

オフセット量 d が大きくなるのに伴い，式(9)の C_A は減少し，式(10)の C_R は増大する。攪拌量 L はオフセット量 d が大きくなるのに伴い減少するものと考えため，攪拌量 L の計算に使用するみなし接合線にあたる弦の長さ C_A を使用する。

オフセットを与えた攪拌量 L は第 3 章の式 (2) の接合線にあたる D に C_A を代入し

$$L = \frac{\pi D C_A N}{60V} \quad (11)$$

とする。

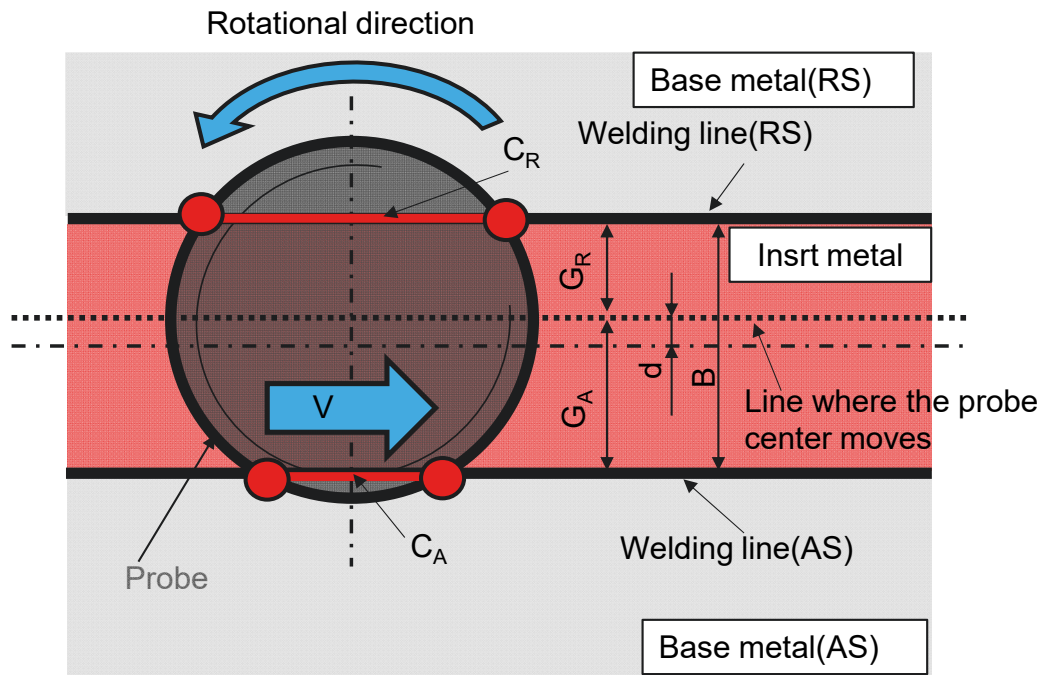


Fig. 6.3 Relationship between welding line and probe when using insert metal with offset distance for RS.

本研究においてのプローブ径 6 mm を使用した場合のオフセットなしおよびオフセットを RS へ 1 mm 与えたときのインサート材幅とみなし接合線との関係を Fig. 6.4 に示す。オフセットなしの場合、前述したようにインサート材幅中央をツール中心が通過するため AS・RS のみなし接合線は同一となる。最も長くなるみなし接合線はインサート材なしの条件であり、インサート幅が大きくなるのに伴いみなし接合線は短くなる。オフセットを与えた場合、AS と RS でみなし接合線は一致せず、RS のみなし接合線はインサート材なし状態ではオフセットなしの条件よりは短くなるが、インサート材幅が大きくなるのに従いみなし接合線は長くなりインサート幅 2 mm までは増大し、2 mm を超えると減少する。一方、AS はインサート材なしの状態では RS と同一値になるがインサート材幅が広くなるのに伴い減少し、インサート材幅 4 mm ではみなし接合線は 0 mm となる。

インサート材幅と攪拌量 L の関係を Fig. 6.5 に示す。ここではオフセットなし

の条件でのみなし接合線およびオフセットを与えた AS のみなし接合線をもとに計算した攪拌量である。インサート材幅とみなし接合線同様にオフセットなしの条件はインサート幅が広くなるのに伴い攪拌量は小さくなる。攪拌量は接合速度に反比例し、接合速度 10 mm/s は 5 mm/s に対し 1/2 の攪拌量となるため、インサート材幅が大きくなるのに伴い 5 mm/s と 10 mm/s での攪拌量の差は小さくなる。オフセットを与えた条件では、インサート材幅 0 mm においてオフセットなしよりオフセットつけた分だけみなし接合線が短くなるため攪拌量も小さくなる。インサート材幅が狭くなるのに伴い攪拌量が小さくなり、みなし接合線が 0 mm となるインサート幅 4 mm においては攪拌量も計算上 0 mm となる。

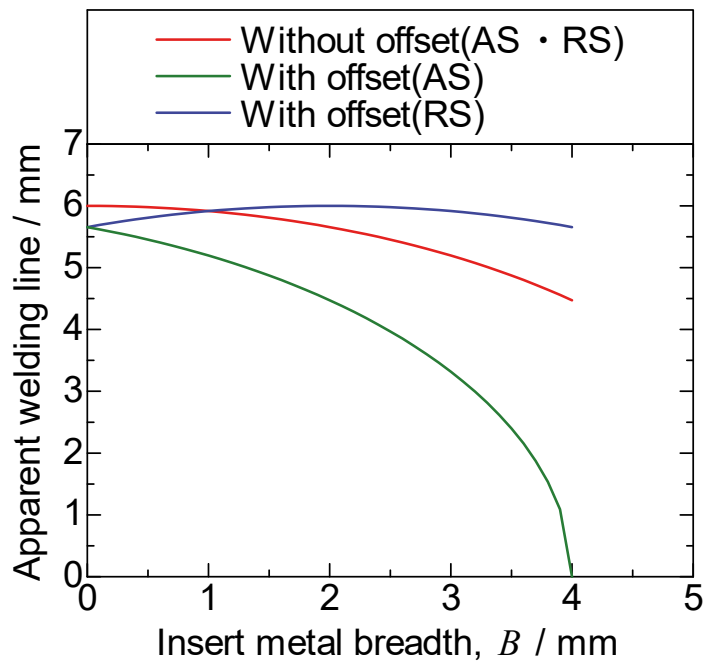


Fig. 6.4 Relationship between insert metal breadth and apparent welding line.

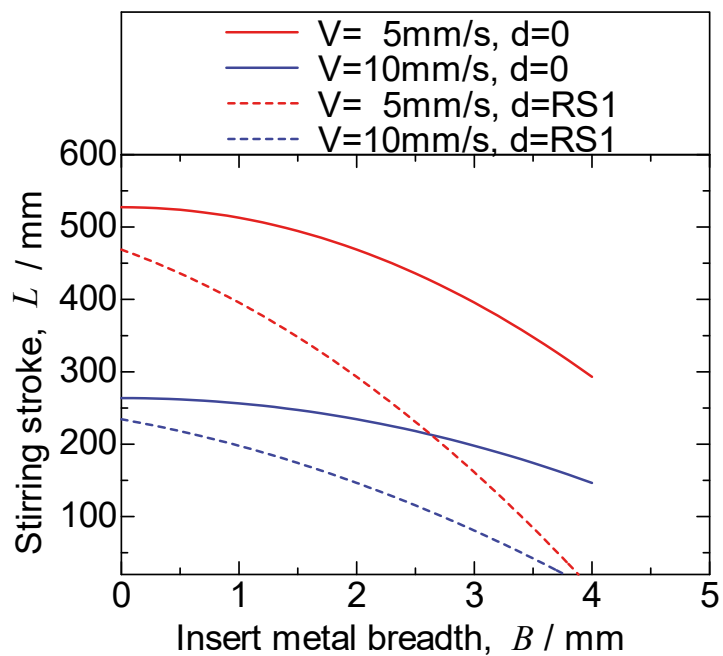


Fig. 6.5 Relationship between insert metal breadth and stirring stroke.

6.5 実験結果

6.5.1 継手外観

種々の接合条件で接合した継手外観の一例を **Fig. 6.6** および **Fig. 6.7** に示す。接合方向は紙面左から右であり，供試材上部が RS，下部が AS となるように配置している。Fig. 6.6 はオフセットなし，Fig. 6.7 はオフセットを RS 方向へ 1 mm 与えたもので，接合速度とインサート材幅は各継手の下に記載している。Fig. 6.6(a1), 6.6(b1), 6.6(c1), 6.6(d1) は接合速度 5 mm/s でインサート材を挟んだ状態での接合結果である。黒三角はインサート材幅中央およびツール中心が走行した位置を示す。比較として Fig. 6.6(r1) は同接合速度のインサート材を挟んでいない接合結果を示す。インサート材を挟んでの接合において，インサート幅 4 mm の接合においても外観上溝状欠陥等は観察されず，インサート材を挟んだ影響はみられない。全条件において，プローブ挿入過程および予熱中に回転工具全周にばりが「A」で示すように発生し，接合開始とともに工具前縁のばりが RS に押し流されて形成される。Fig. 6.6(a2), 6.6(b2), 6.6(c2), 6.6(d2) は接合速度 10 mm/s でインサート材を挟んだ状態での接合結果である。比較として Fig. 6.6(r2) は同接合速度のインサート材を挟んでいない接合結果を示す。5 mm/s の結果と同様にインサート幅 4 mm の接合においても外観上溝状欠陥等は観察されず，インサート材の影響はみられない。回転工具全周にばりも 5 mm/s 同様に「A」で示すように発生し，接合開始とともに工具前縁のばりが RS に押し流されて形成される。

Fig. 6.7(a1), 6.7(b1), 6.7(c1), 6.7(d1) は接合速度 5 mm/s で，Fig. 6.7(a2), 6.7(b2), 6.7(c2), 6.7(d2) は接合速度 10 mm/s で，それぞれ RS 方向に 1 mm オフセットを与えて，インサート材を挟んだ接合結果である。黒三角はインサート材幅中央を示し，白三角はツールの中心走行位置を示す。各接合速度でオフセットを与えた条件では，同接合速度のオフセットなしと比較して外観上の差異は見られず，また欠陥も観察されない。回転工具全周にばりもオフセットなしの条件と同様に「A」で示すように発生する。

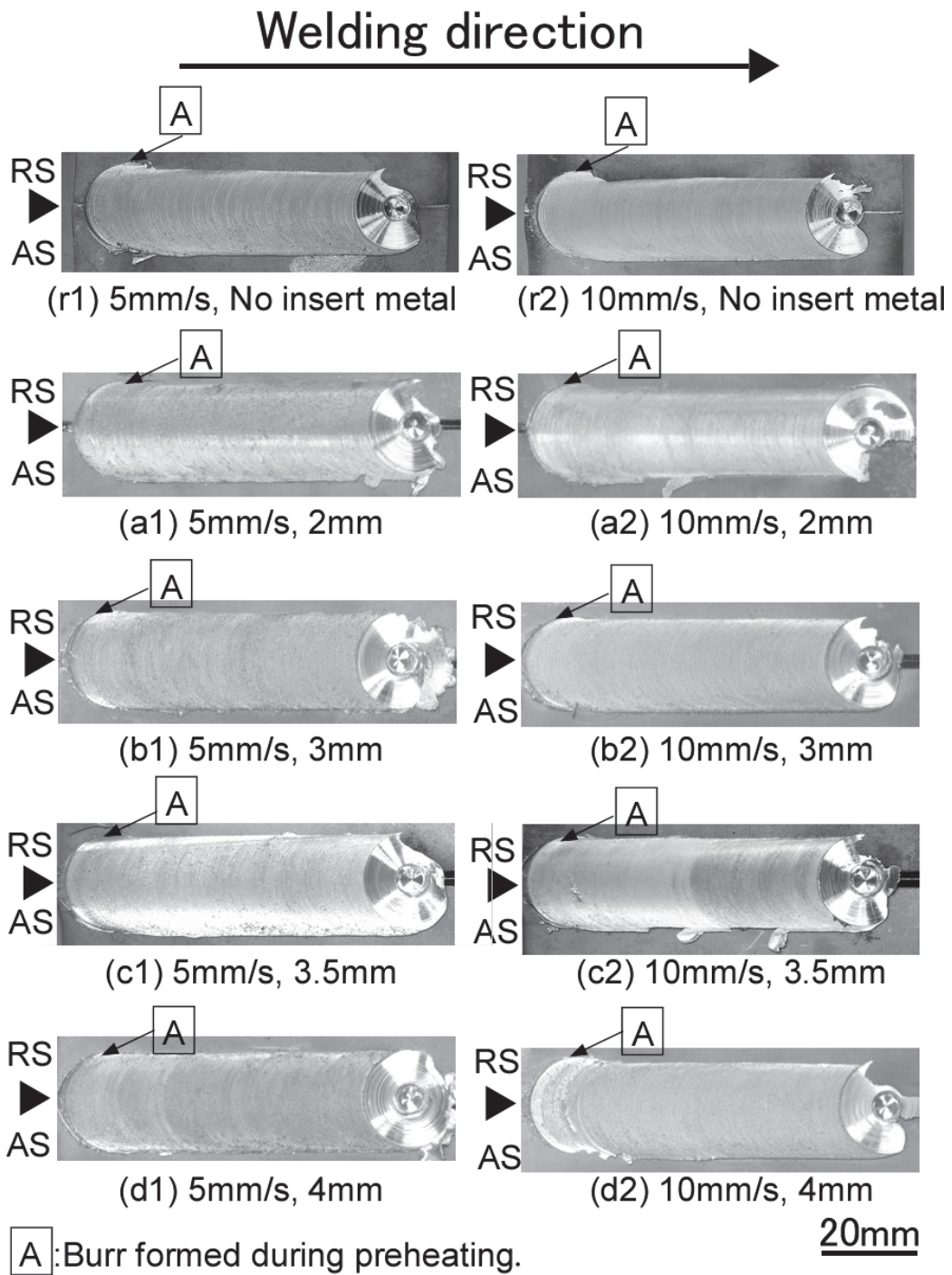


Fig. 6.6 Appearances of FSW joints welded under various conditions. (Without offset. $d=0$) The black triangles indicate the positions of the welding interfaces.

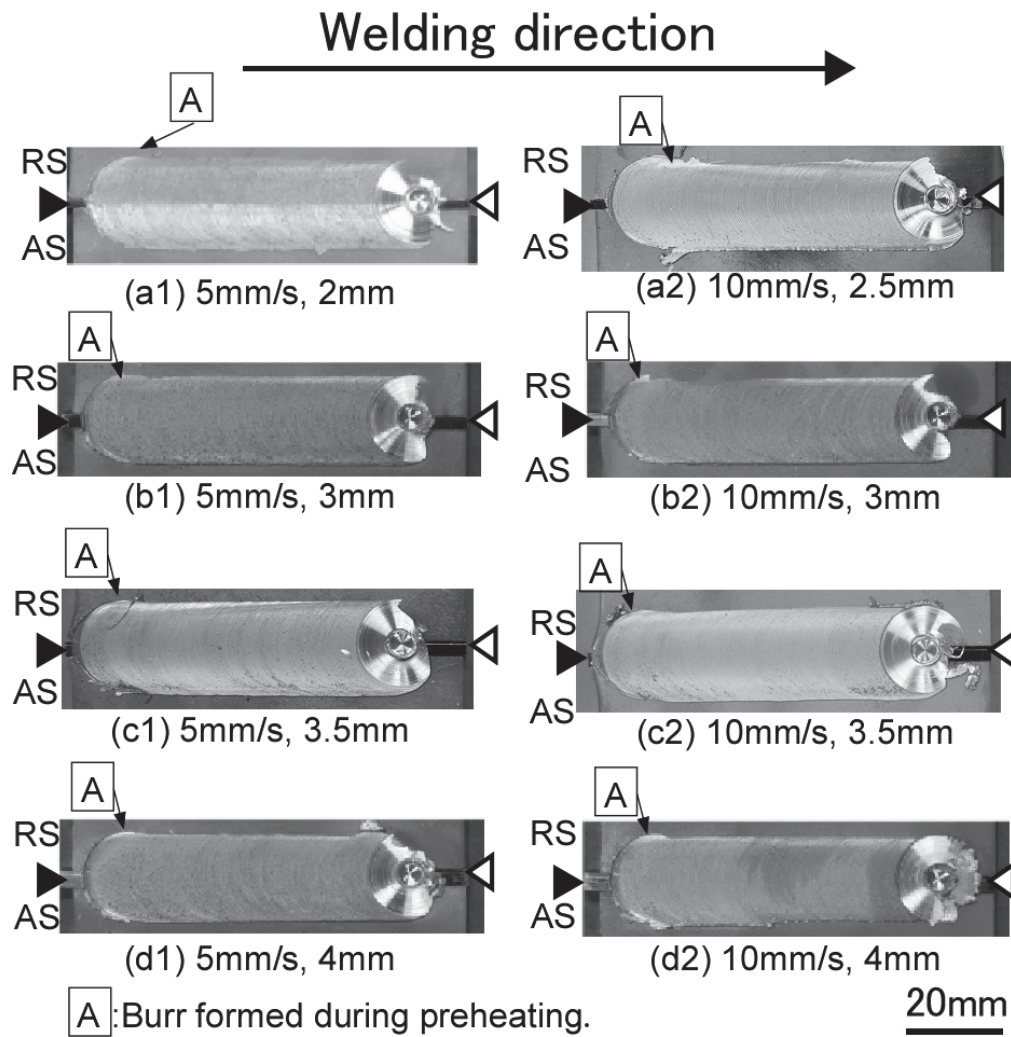


Fig. 6.7 Appearances of FSW joints welded under various conditions. (With offset. $d=RS1$)

The black triangles indicate the positions of the welding interfaces. The hollow triangles indicate the positions of the tool center path.

6.5.2 巨視的組織

種々の接合条件で接合した継手横断面の巨視的組織を **Fig. 6.8** に示す。接合方向は紙面の手前から奥方向，図の左が RS，右が AS である。Fig. 6.8(A)はオフセットなしの条件，Fig. 6.8(B)はオフセットを与えた条件で，接合速度とインサート材幅は各組織写真の下に記載している。

Fig. 6.8(Aa1), 6.8(Ab1), 6.8(Ac1), 6.8(Ad1) に接合速度 5 mm/s，各インサート材幅の組織を示す。Fig. 6.8(r1) には比較としてインサート材を挟まない条件を示す。第4章の AC4CH どうしを接合した研究結果と同様に，攪拌部は接合部中央に丸い形状に存在するプローブによって攪拌された部分と接合部上部にある前進角 3 度によって供試材に挿入されているショルダー後縁及びプローブによって攪拌された部分が存在する。SZ において，インサート材を挟んだものは，インサート材の A6061 (SZ 内で特に明るく白く見える部分) との混合により層状に観察され，インサート材を挟んでいない条件 (Fig. 6.5(r1)) より SZ が鮮明に観察される。

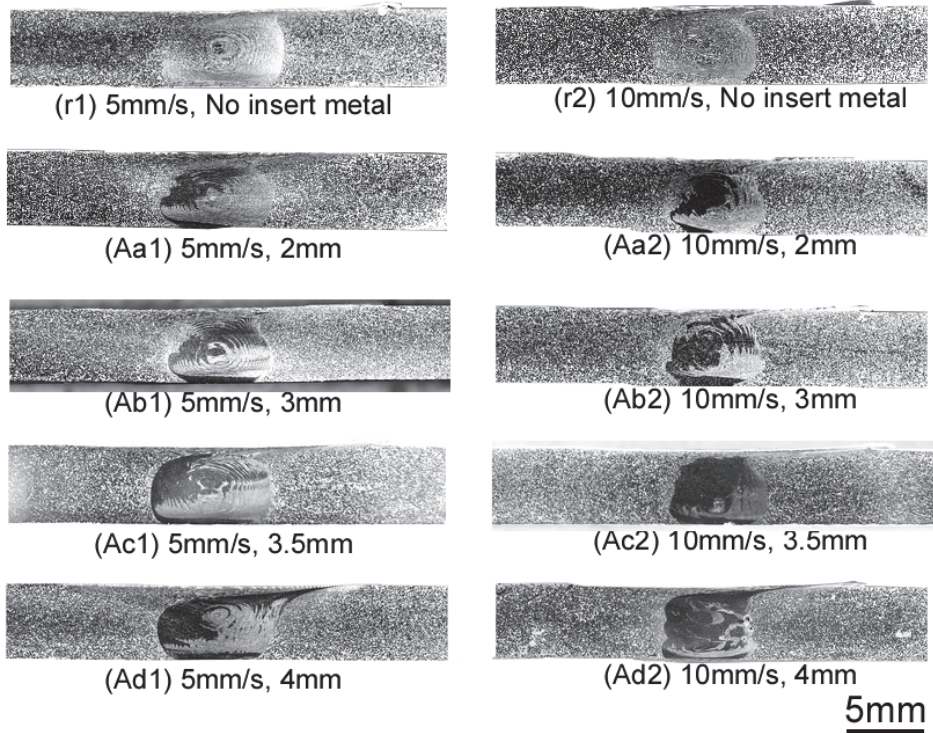
Fig. 6.8(Aa2), 6.8(Ab2), 6.8(Ac2), 6.8(Ad2) に接合速度 10 mm/s，各インサート材幅を用いた条件の組織を示す。Fig. 6.8(r2) に比較としてインサート材を挟まない条件を示す。接合速度 5 mm/s と比較すると SZ 幅は狭くなる傾向にあり，インサート幅 4 mm の条件 (Fig. 6.8(Ad2)) では SZ 形状が正方形に近い状態となっている。SZ 幅については後述する。

Fig. 6.8(Ba1), 6.8(Bb1), 6.8(Bc1), 6.8(Bd1) に接合速度 5 mm/s，Fig. 6.8(Ba2), 6.8(Bb2), 6.8(Bc2), 6.8(Bd2) に 10 mm/s でそれぞれオフセットを RS 方向へ 1 mm 与えた各インサート材幅の組織を示す。オフセットなしの条件と同様に，SZ において，インサート材の A6061 (SZ 内で特に明るく白く見える部分) との混合により層状に観察される。接合速度の高い 10 mm/s の条件はオフセットなしの条件と同様に接合速度の低い 5 mm/s より SZ が小さくなる。

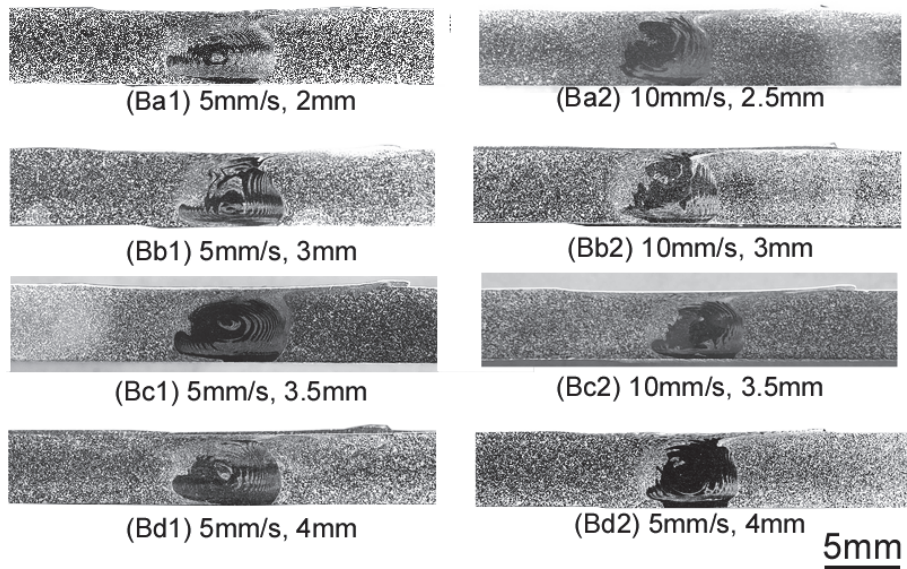
インサート材幅と最大攪拌部幅の関係を **Fig. 6.9** に示す。オフセットの有無に関係なく接合速度の低い条件の方が攪拌部幅は大きくなる。オフセット有無で

比較すると、オフセットなし条件では接合速度 5, 10 mm/s 両条件ともインサート材幅による攪拌部幅の変動はほとんどない。一方、オフセットを与えた条件は、インサート材幅が大きくなるのに伴い攪拌部幅が大きくなる傾向にあるが、インサート幅 3 mm 付近の値は安定していない。基準となるインサート材を挟まない条件(B=0)と比較すると、接合速度 5 mm/s ではインサート材を挟んだ条件はインサート材なしよりほとんどの条件で最大攪拌部幅は大きくなる。接合速度 10 mm/s でオフセットを与えた条件では、最大攪拌部幅はインサートなしと同等以上がほとんどであるが、オフセットなしの条件はインサートなしを下回っている。オフセットを与えることにより、オフセットなしの条件と比較し、AS, RS での攪拌量のバランスが変動するため安定せず、オフセットを与えた条件ではこのようなばらつきが出たものと考えられる。


Welding direction



(a) Without offset(d=0)



(b) With offset(d=RS1)

Fig. 6.8 Cross-sectional macrostructures of FSW joints welded under various conditions.

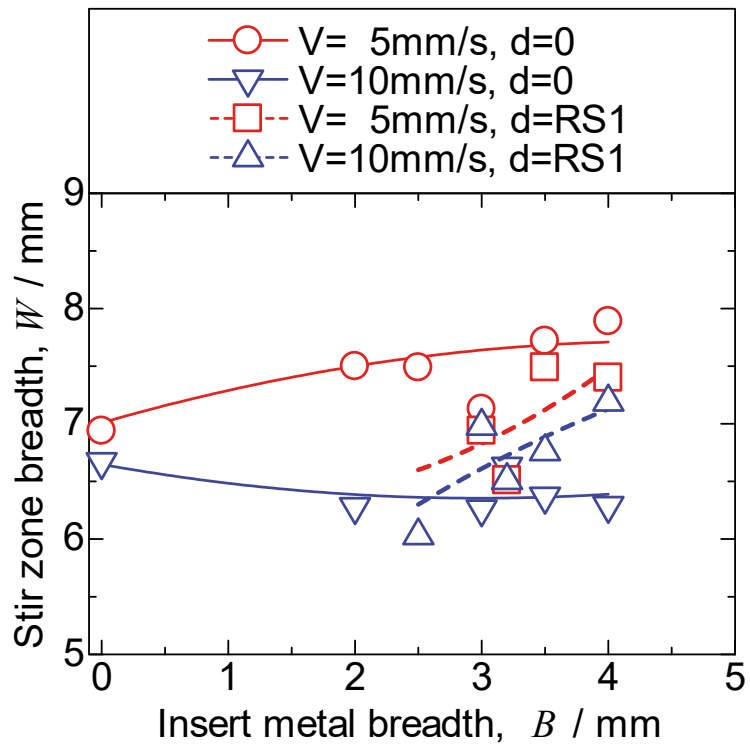


Fig. 6.9 Relationship between insert metal breadth and stir zone breadth.

6.5.3 微視的組織

種々の接合条件で接合した継手横断面の微視的組織を Fig. 6.10～Fig. 6.13 に示す。観察試料，観察方向は前項と同様である。観察位置は接合面底部の AS, RS の SZ/TMAZ 境界部を観察し，観察位置は最上部に，接合速度および材料配置は図の最左端に記載している。通常の FSW において，ルートフローと称される接合部界面に発生する未接合部が観察される場合がある。不適切なプローブ長さや挿入量，攪拌不足によるものであるが，インサート材を挟んだ場合インサート材と供試材の AS, RS それぞれの接合面で観察される可能性があるため，微視観察はそれぞれの接合面底部で行った。Fig. 6.10 および Fig. 6.11 はオフセットなしでそれぞれ接合速度 5 mm/s, 10 mm/s の条件，Fig. 6.12 および Fig. 6.13 はオフセットを与えてそれぞれ接合速度 5 mm/s, 10 mm/s の条件である。また，比較のためインサート材を挟んでいない接合速度 5 mm/s および 10 mm/s でオフセットなしの条件の微視写真を Fig. 6.10(a1r), 6.10(a1a), 6.11(a2r), 6.11(a2a)に示す。

オフセットなしの接合速度 5 mm/s (Fig. 6.10(b1r), 6.10(b1a), 6.10(c1r), 6.10(c2a), 6.10(d1r), 6.10(d1a)) の条件では，インサート材幅が大きくなるほど底面の SZ が小さくなる。プローブ，特にねじ部からの攪拌の影響は板面には届きにくくなり，インサート材幅が大きくなるほど顕著になると考える。インサート材幅 3 mm (Fig. 6.10(c1r)) および 4 mm (Fig. 6.10(d1r)) の条件で「A」で示すように RS 底部にルートフローと思われる境界部が観察される。接合速度 10 mm/s (Fig. 6.11(b2r), 6.11(b2a), 6.11(c2r), 6.11(c2a), 6.11(d2r), 6.11(d2a)) では攪拌量が接合速度 5 mm/s より小さくなるため，インサート材幅が大きくなると底部の SZ 幅がより小さくなる。10 mm/s においてもインサート材幅 3 mm (Fig. 6.11(c2r)) および 4 mm (Fig. 6.11(d2r)) の条件で「A」で示すように RS 底部にルートフローと思われる境界部が観察される。また，インサート幅 4 mm の AS 底部 (Fig. 6.11(d2a)) には穴欠陥が観察される。

オフセットを与えた条件では，接合速度 5 mm/s (Fig. 6.12(e1r), 6.12(e1a), 6.12(f1r), 6.12(f1a), 6.12(g1r), 6.12(g1a))はオフセットなしの条件に比較してオフ

セットを与えた分だけ RS への攪拌が大きくなり、RS の底部での TMAZ 領域が大きく観察される。AS はオフセットなしの条件では供試材が SZ 底部に食い込むような形状をしていたが、オフセットを与えた場合その食い込むような形状が小さくなり、攪拌の影響が少なくなったと考えられる。接合速度 10 mm/s (Fig. 6.13(e2r), 6.13(e2a), 6.13(f2r), 6.13(f2a), 6.13(g2r), 6.13(g2a)) においては、5 mm/s 同様に RS への攪拌の影響が大きくなっており、攪拌量が小さいためインサート材幅 4 mm の条件の RS (Fig. 6.13(g2r)), AS (Fig. 6.13(g2a)) とともに底面 SZ 境界部は攪拌の影響をほとんど受けてないように観察され、「A」で示すように底部に板厚方向に延びるように攪拌の影響を受けていないルートフローと思われる境界部が観察される。

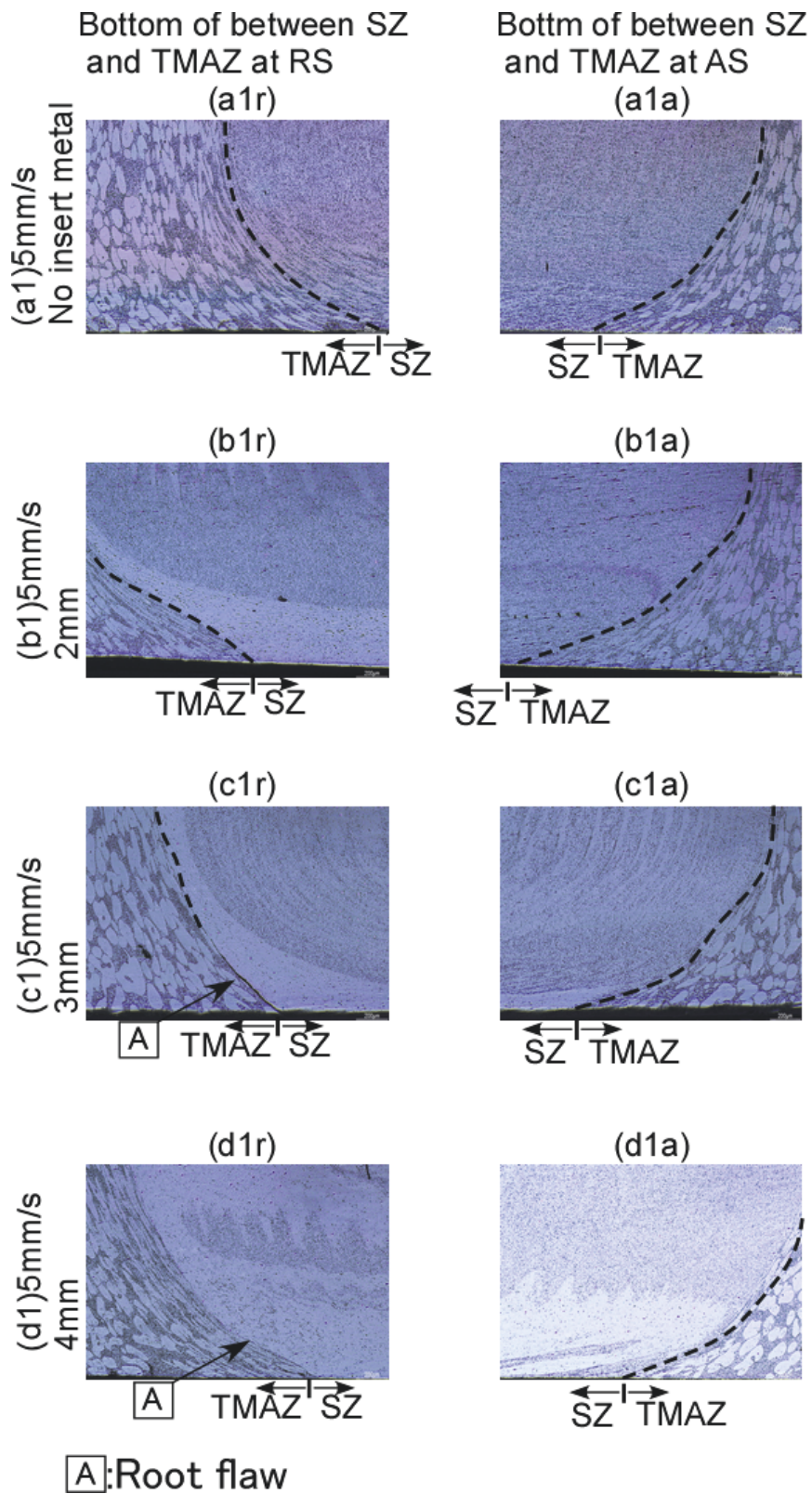


Fig. 6.10 Microstructures of FSW joints. The dotted lines indicate a boundary from SZ and TMAZ. (Without offset. $d=0$, $V=5$ mm/s.)

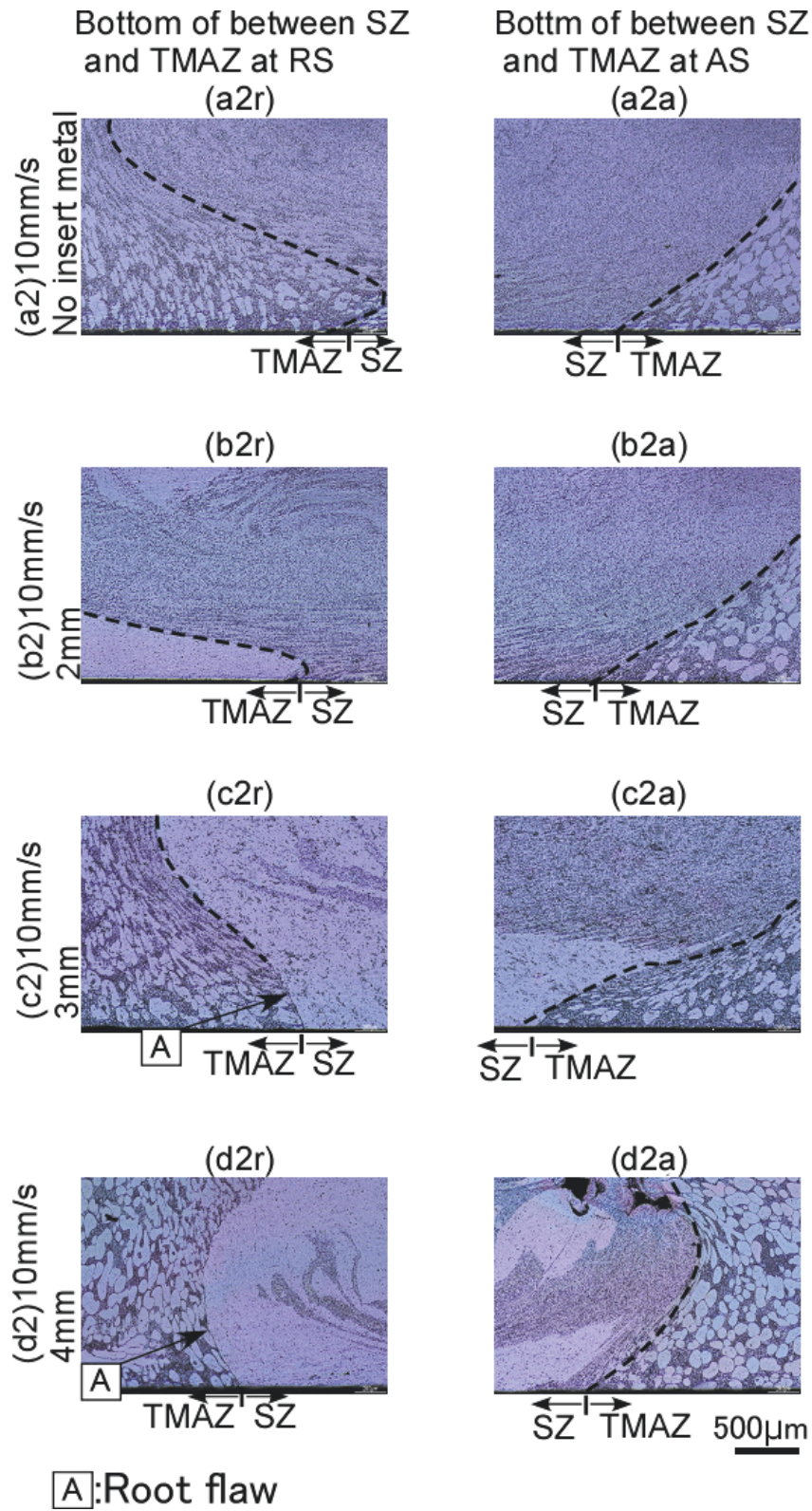


Fig. 6.11 Microstructures of FSW joints. The dotted lines indicate a boundary from SZ and TMAZ. (Without offset. $d=0$, $V=10$ mm/s.)

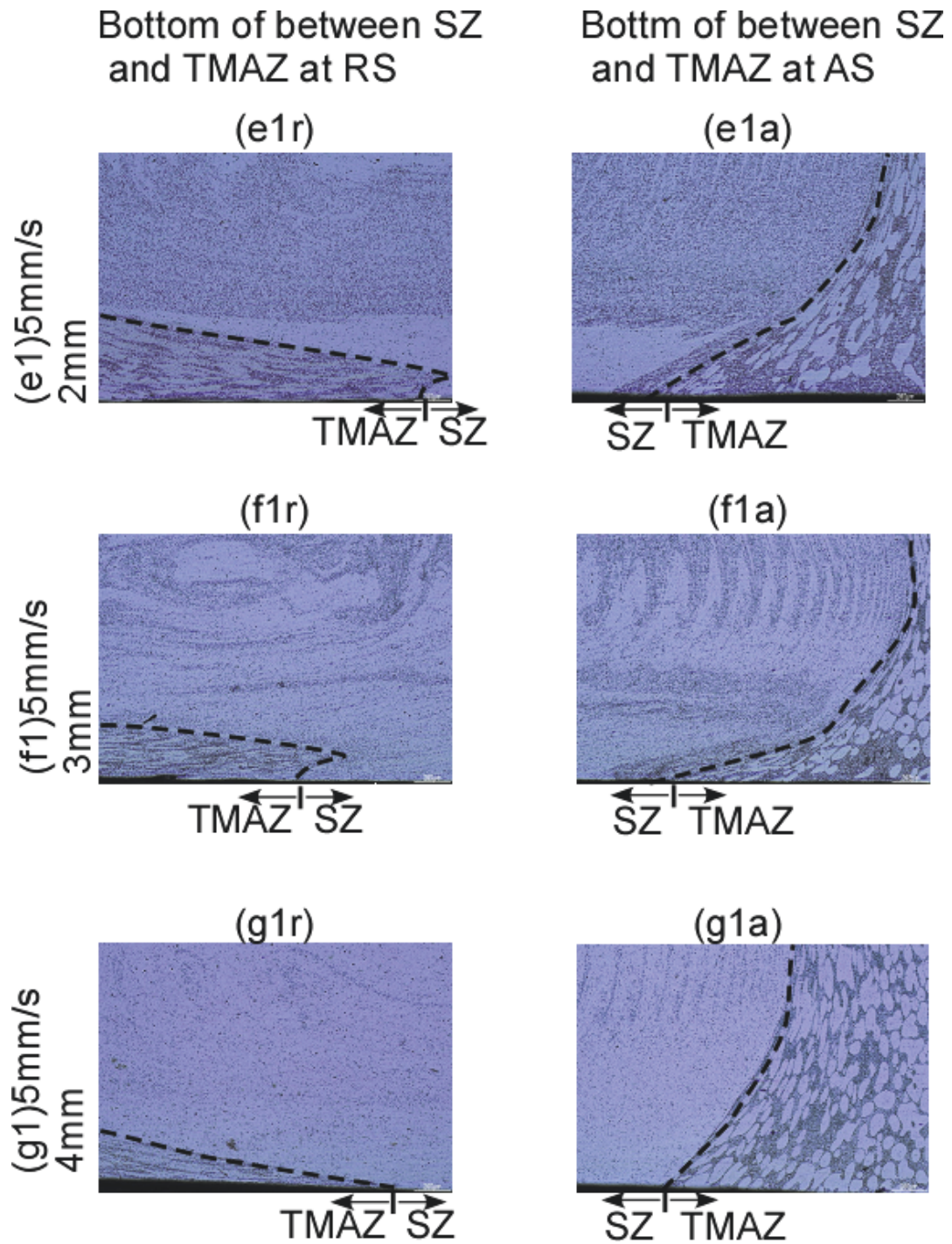


Fig. 6.12 Microstructures of FSW joints. The dotted lines indicate a boundary from SZ and TMAZ.(With offset. $d = RS1$, $V = 5\text{mm/s}$.)

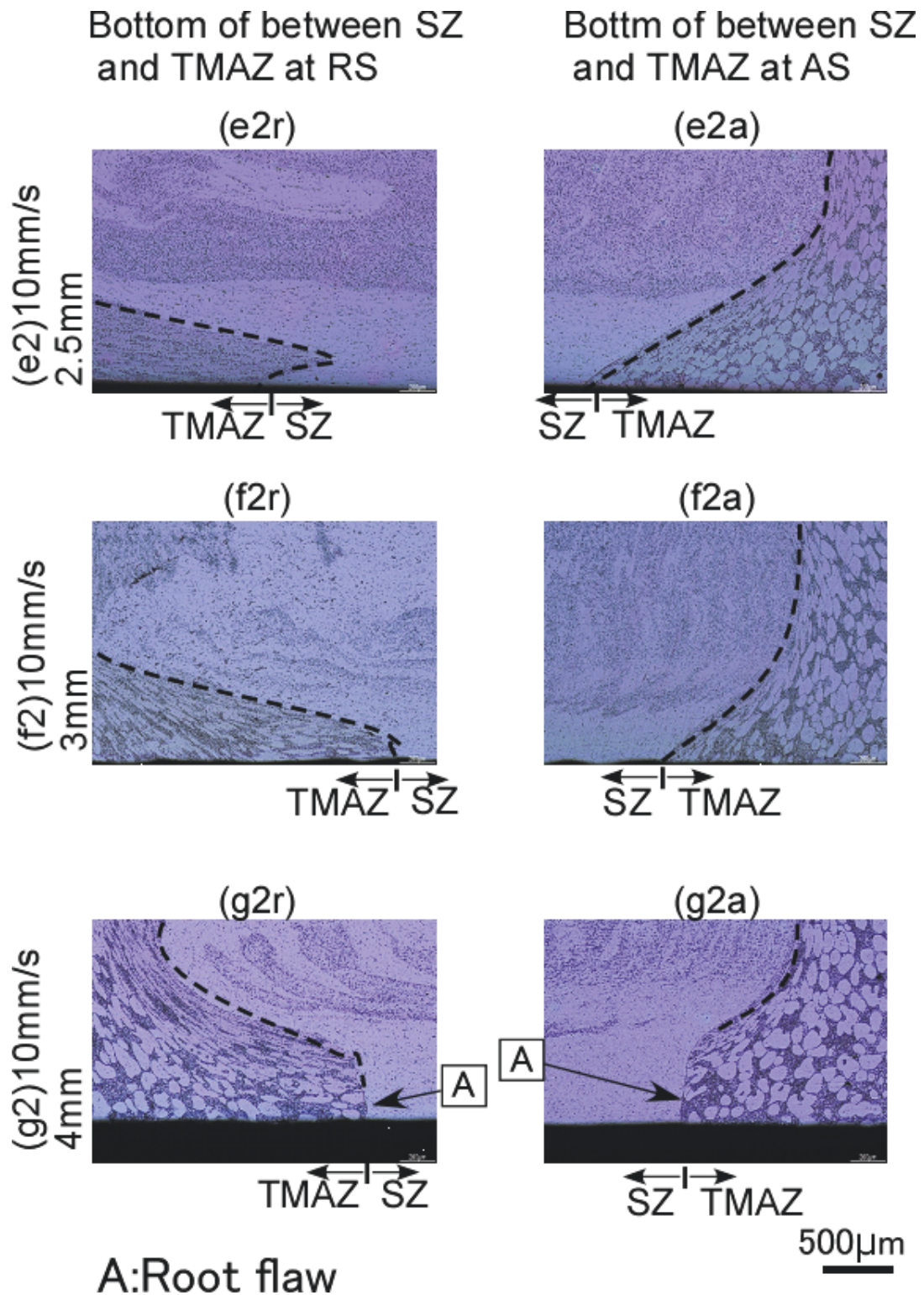


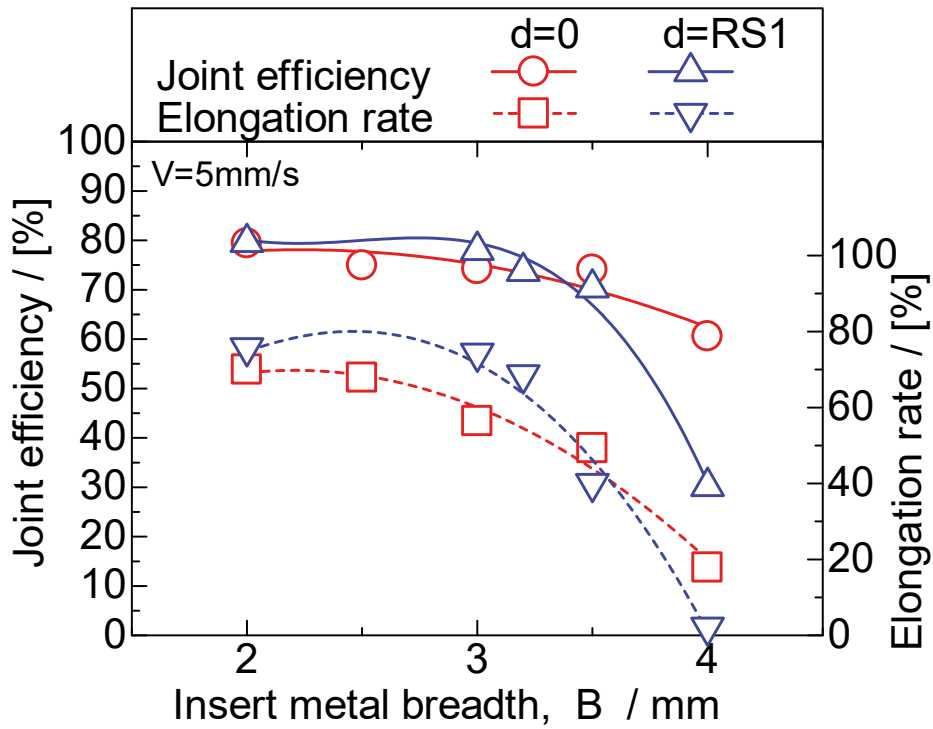
Fig. 6.13 Microstructures of FSW joints. The dotted lines indicate a boundary from SZ and TMAZ. (With offset. $d=RS1$, $V=10$ mm/s.)

6.5.4 引張試験

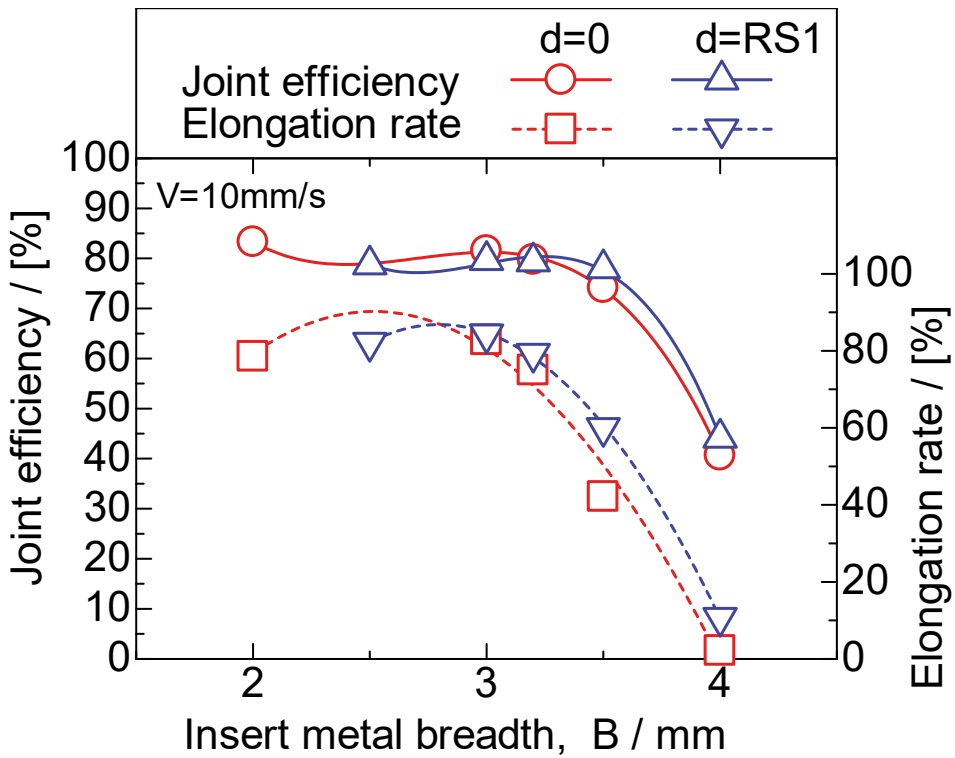
インサート材幅と機械的性質の関係を **Fig. 6.14** に示す。接合速度 5 mm/s においては、オフセットなしの条件はインサート材幅が大きくなるに伴い継手効率および伸び率は低下する。継手効率はインサート幅 3.5 mm までは横ばいであるが、4 mm から大きく低下する。伸び率はインサート幅 3 mm から低下が大きくなる。オフセットを与えた条件は、継手効率はオフセットなしの条件と同様にインサート幅 3.5 mm までは横ばいであったが、3.5 mm を超えると大きく低下する。伸び率はインサート幅 3 mm 付近までは横ばいであるが、3.5 mm から大きく低下する。オフセットの有無で比較すると、インサート幅 3 mm を超えると両条件とも継手効率、伸び率ともに大きく低下し、オフセットを与えた条件の方が低下は大きい。インサート幅 3 mm までの条件ではほぼ同等かオフセットを与えた条件がわずかに高くなる。

接合速度 10 mm/s において継手効率はオフセットの有無にかかわらずインサート幅 3.5 mm を超えると大きく低下する。伸びもオフセットの有無にかかわらずインサート幅 3 mm を超えると低下する。

攪拌量と機械的性質の関係を **Fig. 6.15** に示す。攪拌量 L は式(11)を用いて計算した。**Fig. 6.15(a)**に示す接合速度 5 mm/s の場合、オフセットなしの条件では継手効率は攪拌量 350 mm、伸び率は 440 mm を下回ると低下が大きくなる。オフセットを与えた場合、継手効率は攪拌量 80 mm、伸び率は 140 mm を下回ると低下が大きくなる。**Fig. 6.15(b)**に示す接合速度 10 mm/s の場合、オフセットなしの条件では継手効率は攪拌量 170 mm、伸び率は 200 mm を下回ると値は大きく低下し、オフセットを与えた条件では、継手効率は攪拌量 40 mm、伸び率は 70 mm を下回ると大きく低下する。これらのことからオフセットを与えることにより攪拌量の小さい条件となる幅の広いインサート材を使用が有効であり、今回の研究結果においてはオフセットを RS1 与えることにより接合速度 5mm/s は 3.2mm を 2.5mm に、接合速度 10mm/s においては 3.2mm を 3.0mm のインサート材幅を使用しても継手効率および伸び率が低下することない接合が遂行される。

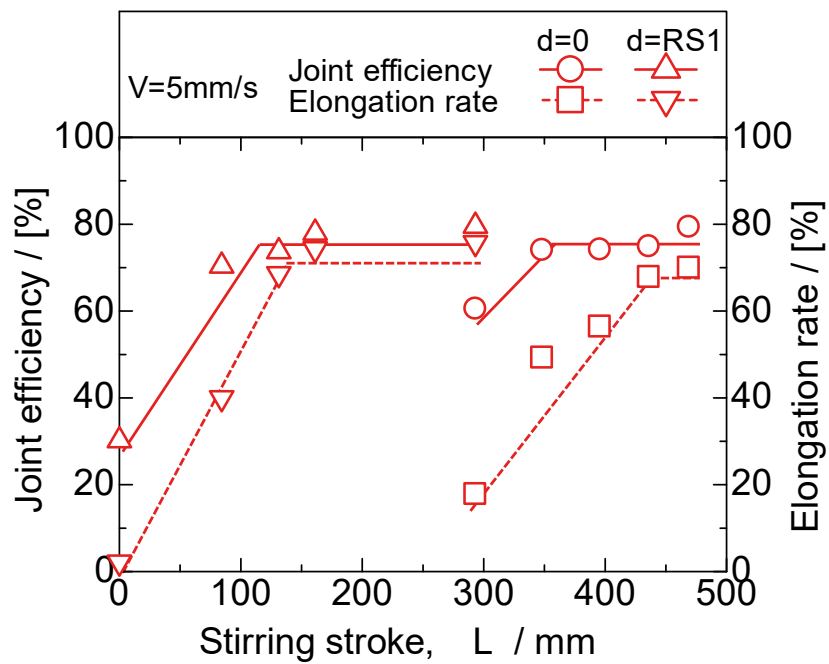


(a) V=5mm/s

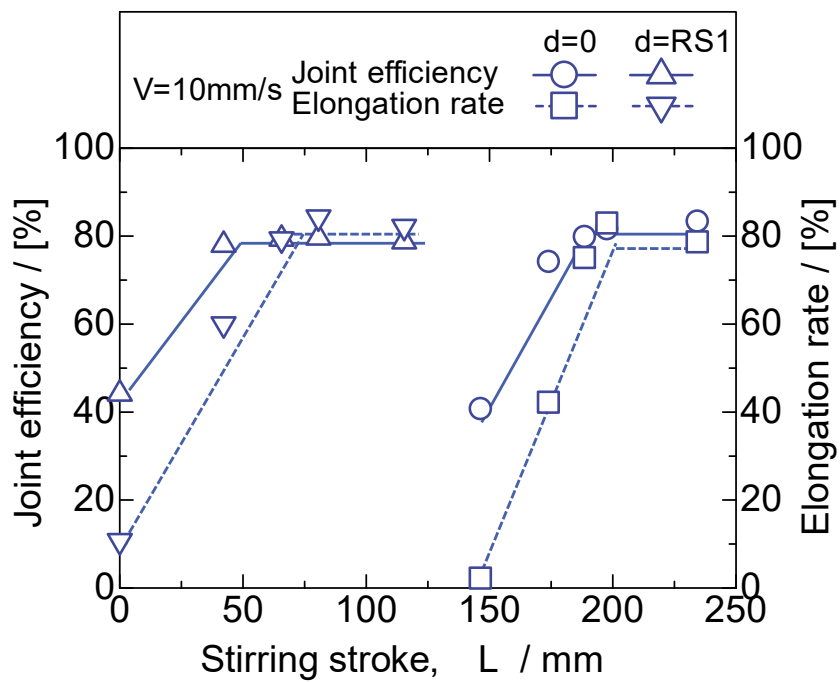


(b) V=10mm/s

Fig. 6.14 Dependence of joint efficiency and elongation rate on the insert metal



(a) $V=5\text{mm/s}$



(b) $V=10\text{mm/s}$

Fig. 6.15 Dependence of joint efficiency and elongation rate on the stirring stroke.

引張試験後の試験片を Fig. 6.16 に示す。写真は接合の横断面にあたる方向からの撮影で、紙面手前から奥に向かって接合し、図の左が RS、右が AS である。Fig. 6.16(a) はオフセットなしの条件、Fig. 6.16(b)はオフセットを与えた条件で、Fig. 6.16(a1), 6.16(a2)は比較のためにインサート材なしの接合速度 5 mm/s および 10 mm/s で、そのほかの写真はそれぞれ接合速度とインサート材幅を下部に記載している。Fig. 6.16(b1), 6.16(b2), 6.16(e1), 6.16(e2)は引張試験の結果より継手効率および伸び率が良好な条件、Fig. 6.16(c1), 6.16(c2), 6.16(f1), 6.16(f2)は、継手効率は良好であるが伸び率が低下する条件、Fig. 6.16(d1), 6.16(d2), 6.16(g1), 6.16(g2)は継手効率および伸び率ともに低下する条件である。継手効率および伸び率が良好な条件の引張試験片の破断は、AS または RS どちらかの HAZ で破断する。一方、継手効率は良好であるが伸び率が低下する条件、継手効率および伸び率ともに低い試験片は TMAZ と SZ の境界付近で破断し、特に値の低い試料は SZ の形状に沿うような破断形状(Fig. 6.16(c1), 6.16(d1))となる。これらの条件では攪拌量が足りず板厚方向全体、もしくは板底部付近での密着度が小さく HAZ よりも強度が低いいためこのような破断位置および破断形状となっていると考える。

インサート材を用いた FSW 継手では最も良好だった結果はオフセットなしの接合速度 10 mm/s、インサート幅 2 mm であり継手効率は 84%、伸び率 77%となる。第 4 章でのインサート材を挟んでいない研究結果では工具回転数 1000 rpm および 1400 rpm、接合速度 10 mm/s の条件で継手効率 82%、伸びは母材を超える値を示した。結果を比較すると、継手効率はほぼ同等となり、伸びは母材を超える結果とはならなかったものの、第 4 章で使用した供試材の母材伸び(10.1%)は超えている。

接合速度 5 mm/s ではオフセットなしの条件ではインサート幅 2.5 mm、オフセットを与えた条件では 3.2 mm、接合速度 10 mm/s ではオフセットなしの条件では 3.2mm、オフセットを与えた条件ではインサート幅 3.0 mm を用いることで良好な継手効率および伸び率が保たれる。

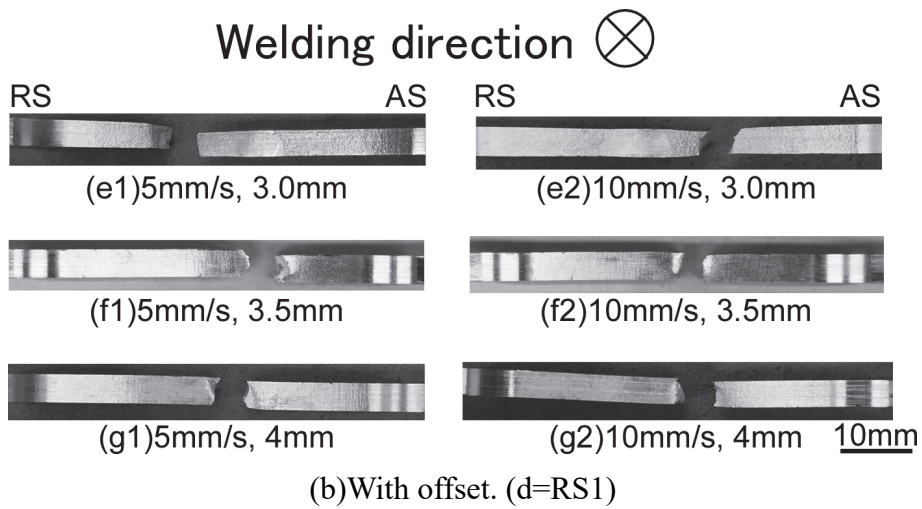
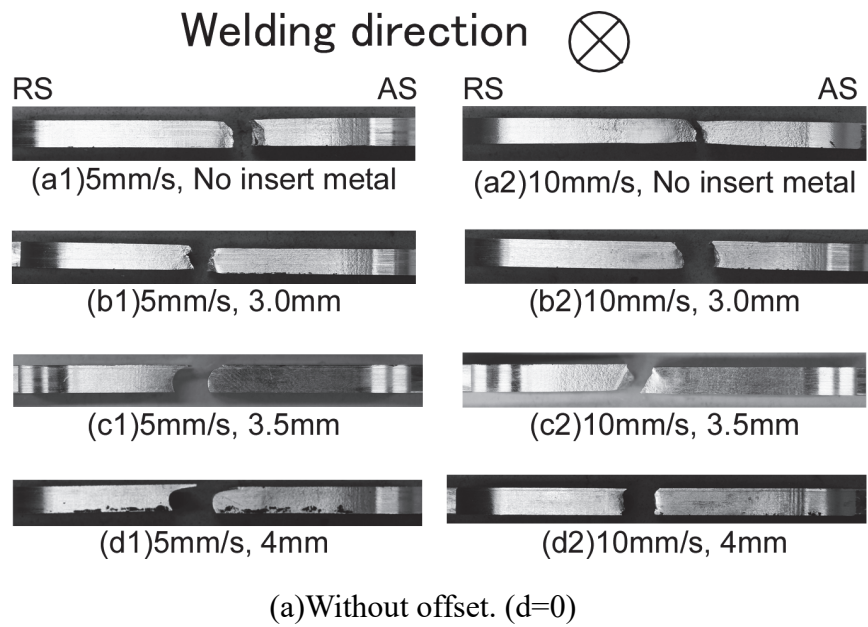


Fig. 6.16 Macrostructure of a fractured tensile testpiece.

6.6 結論

A6061 インサート材を用いた半溶融成形した AC4CH アルミニウム合金板で摩擦攪拌接合を行い、得られた継手の機械的性質を検討し、以下の結論が得られた。

- (1) インサート幅およびオフセットの有無による継手外観に変化はない。また、インサート材を用いないものと比較しても変化はない。接合速度による変化は第 4 章の結果と同様である。
- (2) 攪拌部は、インサート材を挟んだ条件では第 4 章の挟まないものと比較し、A6061 が混合して層状の組織が観察される。攪拌部幅は接合速度の低い条件ではインサート材を挟むと大きくなり、接合速度の高い条件では小さくなる。オフセットを与えると、攪拌部の幅は接合速度に関係なく安定せずばらつく。ルートフローとみられる SZ と TMAZ の境界部は オフセットなしの条件では、接合速度 5 mm/s および 10 mm/s のインサート材 3 mm の条件で RS 底部に、オフセットを与えた条件では接合速度 10 mm/s のインサート材 4 mm の条件で AS・RS 底部で観察される。
- (3) インサート材を用いた FSW 継手では最も良好だった結果はオフセットなしの接合速度 10 mm/s、インサート幅 2 mm であり継手効率は 84%、伸び率は 77%である。継手効率および伸び率の良好な値が保たれるインサート幅は、接合速度 5 mm/s ではオフセットなしの条件では 2.5 mm (L=440mm)、オフセットを与えた条件では 3.2 mm (L=140mm)、接合速度 10 mm/s ではオフセットなしの条件では 3.0 mm (L=200mm)、オフセットを与えた条件では 3.2 mm (L=70mm) である。
- (4) 攪拌量を使用することでインサート材幅およびオフセットを与えることでの FSW 継手の評価が明瞭になり、適切なインサート材幅を選定できる指標となることが明らかになった。

参考文献

- 6-1) 社団法人溶接学会編：摩擦攪拌接合-FSW のすべて-, 産業出版.(2006), 160-162.

第7章 結論

7.1 本研究の結論

本研究では半溶融成形した AC4CH の同種材, A6061 と組合せた異種材および A6061 をインサート材として使用した場合の AC4CH に摩擦攪拌接合を行い, 各接合条件が組織および機械的性質におよぼす影響を検討し以下の結論を得た.

- (1) セミソリッド法を用いたアルミニウム合金鋳物は種々あるが, 本研究で使用したステンレス製の円筒鋳型を用いて溶製したビレットで半溶融成形した AC4CH も摩擦攪拌接合を適用することが有効であり, 良好な継手が得られる.
- (2) 半溶融成形した AC4CH 同種材の FSW 継手において, 接合速度の増加および工具回転数の低減に伴いばりの発生量は小さくなり, 表面性状は良好となる. 攪拌部は半溶融成形材特有の粒状 α -Al が消滅し微細化分散する. Si も同様に分散し, α -Al と混合した組織となる. 接合速度の低減, または工具回転数の増加に伴って攪拌部内部の組織は均一に分散されるようになる. TMAZ 組織は α -Al が塑性流動の影響を受けて攪拌部に沿う形で引き延ばされるように変形し, 接合速度の低減により変形は大きくなる. 工具回転数には依存せず, 接合速度が増加するのに伴い継手の軟化割合は低減する. 攪拌部の硬さ分布は接合速度に関わらずほぼ一定となる. 継手効率および伸び率は, 接合速度が増加するのに伴って上昇する. 最高で継手効率 82% が得られ, 伸びは母材を上回る.
- (3) 半溶融成形した AC4CH と A6061 異種材の FSW 継手において, AC4CH 同種材と同様に接合速度の増加に伴いばりの発生量は小さくなり, 表面性状は良好となる. SZ は, AC4CH は半溶融成形材特有の粒状 α -Al が消滅し微細化

分散する。共晶 Si も同様に微細化分散し、 α -Al と混合した組織となる。接合速度の低減に伴って SZ 内部の組織は均一に分散されるようになる。A6061 も同様に微細化分散し、AC4CH と混合した組織となる。TMAZ 組織は、AC4CH は α -Al が塑性流動の影響を受けて SZ に沿う形で引き延ばされるように変形し、接合速度の低減に伴って、変形量は大きくなり、TMAZ 域も拡大する。A6061 も結晶は塑性流動の影響を受けて SZ に沿う形で引き延ばされるように変形する。接合速度が増加するのに伴い継手の軟化割合は低減する。SZ の硬さ分布は接合速度に関わらずほぼ一定となる。継手効率および伸び率は、接合速度が増加するのに伴って上昇する。AS、RS の材料配置による機械的性質の差はほとんどないため、材料配置に制約はない。最高で継手効率(AC4CH) 85%、伸び率は AC4CH の 90%が得られる。

- (4) 異種材接合において良好な継手を得られた A6061 をインサート材として用いて半溶融成形した AC4CH 材の FSW 継手においてインサート幅およびオフセットの有無による継手外観に変化はない。また、インサート材なしと比較しても変化はない。接合速度による変化はインサート材なしの同種材接合（第 4 章）結果と同様である。SZ は、インサート材を挟んだ条件では同種材を挟まないものと比較し、A6061 が混合して層状の組織が観察される。攪拌部幅は接合速度の低い条件ではインサート材を挟むと大きくなり、接合速度の高い条件では小さくなる。オフセットを与えると、攪拌部の幅は接合速度に関係なく安定せずばらつく。ルートフローとみられる SZ と TMAZ の境界部は オフセットなしの条件では、接合速度 5 mm/s および 10 mm/s のインサート材 3 mm の条件で RS 底部に、オフセットを与えた条件では接合速度 10 mm/s のインサート材 4 mm の条件で AS・RS 底部で観察される。また、インサート材幅が大きくなるほど板底部での攪拌の影響が小さくなり SZ および TMAZ が小さくなる。インサート材を用いた FSW 継手では最も良好だった結果はオフセットなしの接合速度 10 mm/s、インサート幅 2 mm であり

継手効率は 84%、伸び率は 77%となる。継手効率および伸び率の良好な値が保たれるインサート幅は、接合速度 5 mm/s ではオフセットなしの条件では 2.5 mm (L=440mm)、オフセットを与えた条件では 3.2 mm (L=140mm)、接合速度 10 mm/s ではオフセットなしの条件では 3.0 mm (L=200mm)、オフセットを与えた条件では 3.2 mm (L=70mm) である。

7.2 総括

以上の結果から、本実験範囲内での半溶融成形した AC4CH の同種材、A6061 との異種材、A6061 をインサート材として用いた同種材の FSW における適切な接合条件が明らかとなった。

半溶融成形した AC4CH の同種材 FSW は、接合速度が高いほど HAZ の軟化が小さくなり、高い継手効率が得られる。但し、工具回転数が低い条件（本実験では 600 rpm）において接合速度の高い条件でプローブが破損、工具回転数が高い条件（本実験では 1800 rpm）において接合速度の高い条件で接合開始点に溝状欠陥が観察される。これらのことから、適切な工具回転数（本実験においては 1000~1400 rpm）の中で本実験の最高速度である接合速度 10 mm/s において継手効率 82%、伸びは母材を上回る結果が得られる。

FSW 適正接合条件範囲が広く、AC4CH の機械的性質に近い A6061 と AC4CH の異種材 FSW は、接合速度が高いほど HAZ の軟化が小さくなり、高い継手効率が得られる。但し、接合速度 15 mm/s において接合開始点に溝状欠陥が観察される。FSW は AS、RS で材料の流動性、入熱、攪拌組織が異なることから異種材の材料については配置についての検討が必要となるため、AC4CH の配置を AS とした場合と RS とした場合の両方の実験を行ったが、機械的性質の差はみられなかったため材料をどちらにおいても接合可能であると結論づけることができる。最も機械的性質が高かった条件は RS に AC4CH を配置して工具回転数 1400 rpm、接合速度 15mm/s の条件で、継手効率(AC4CH) 85%、伸び率は AC4CH の

90%が得られる。

A6061 をインサート材として用いた AC4CH の FSW は、AS、RS での攪拌挙動が異なるためオフセットなしの場合はインサート材の幅の狭いものを余儀なくされる。本研究ででの最も良好な結果はオフセットなしの接合速度 10 mm/s、インサート材幅 2 mm の条件で継手効率 84%、伸び率は 77%である。継手効率および伸び率の良好な値が保たれるインサート幅は、接合速度 5 mm/s ではオフセットなしの条件では 2.5 mm (L=440mm)、オフセットを与えた条件では 3.2 mm (L=140mm)、接合速度 10 mm/s ではオフセットなしの条件では 3.0 mm (L=200mm)、オフセットを与えた条件では 3.2 mm (L=70mm) である。これらのことからオフセットを与えることが有効であること、攪拌量 L を接合の指標にできることを明らかとした。

7.3 今後の展望

本研究において、半熔融成形した AC4CH 材を本来の特性を低下させることなく接合することに成功、展伸材で使用頻度の高い A6061 との接合も可能であることを示し、今後の接合頻度の増加や供試材への Fe 混入を抑える方法としてのインサート材を用いた接合にも成功した。

今回の実験では実施できなかったが、長距離の接合を行うことでのプローブの AC4CH 材への摩耗試験・耐用試験、この試験による供試材への不純物の混入調査が必要であると考ええる。

また、第 4 章、第 5 章において接合速度の高い条件で接合開始点に溝状欠陥が発生している。これは初動の接合速度が高すぎるため攪拌による材料の充填が間に合わないために発生していると考ええる。接合開始点で発生した溝欠陥は接合開始点直後にはなくなり、接合終了点に至るまでその後発生しない。また接合中央部の組織観察や引張試験片にも欠陥は観察されていない。これらのことから、接合装置に初動の接合速度を下げ、安定した途中から接合速度を徐々に高くする機能を有すれば、これらの欠陥が消失すると考える。

今回の実験では FSW 適正接合条件範囲が広く，機械的性質が AC4CH に近い A6061 を異種材の相手材，インサート材として採用した．今後半溶融成形した AC4CH 材をより多く使用できるようにするためには，他の展伸材にも適用して評価し適切な接合条件を把握する必要があると考える．

謝辞

本研究を遂行するにあたり、本研究題目の選択、実験の進め方、研究を行う上での姿勢や研究者としての心得など全般にわたり、終始熱心なご指導、ご助言を賜りました日本大学教授 前田将克博士に深甚な感謝の意を表します。

また、本論文をまとめるにあたり、数々のご指導、ご助言を賜りました日本大学教授 松島均博士、日本大学教授 安藤努博士に深く感謝いたします。

実験の遂行に際し、親切なご指導、ご助言を賜りました日本大学教授 久保田正広博士および機械工場の先生方に深く感謝いたします。

研究に対しご助言を賜りましたほか、研究室生活においてさまざまなことで大変お世話になりました大学院生石井翔太さん、宮崎泰輔さん、瀧名晃平さん、松平寛文さん、学部学生相澤勇樹さん、清水聡士さん、浅野史也さん、岡崎諒さん、そして平成30年度から令和3年度の前田研究室所属の皆様に深く感謝いたします。

社会人として大学院に入学し研究するという大変貴重な機会を与えてくださいました株式会社浅沼技研代表取締役社長 浅沼進様、業務と研究の両面で支えていただいた株式会社浅沼技研技術顧問 杉浦泰夫様、研究開発室室長 上久保佳則様、研究開発室 山本健介様、そして株式会社浅沼技研社員の皆様に深く感謝いたします。