
ケベック高等工科大学（カナダ）研修報告書

鋼/アルミニウム合金異材レーザーブレイジング継手の接合界面組織解析

工学研究科 機械物理工学専攻 高谷駿介

1. はじめに

本報告書では、2015年8月1日から同年8月25日までの期間で、カナダのケベック高等工科大学(ETS: École de technologie supérieure)において行われた共同研究内容および研究成果について報告する。

2. 共同研究テーマ

ケベック州は自動車部品、エレクトロニクス、航空宇宙産業をはじめとする工業地帯となっており、企業・大学共同での研究開発が活発に行われている。本共同研究の派遣先であるモンリオールのケベック高等工科大学(ETS)も、航空宇宙分野を中心としたケベック州の研究拠点のひとつとなっており、企業との共同研究が数多く実施されている。広島大学材料接合工学研究室では、2013年からETSのPhilippe Bocher教授の研究室であるLaboratoire d'Optimisation des Procédés de Fabrication en Aéronautique (LOPFA)と共同研究をスタートさせ、これまでに航空宇宙産業製品の溶接割れに関する研究を行ってきた。

本共同研究では、ホットワイヤ・レーザーブレイジング法により作製した鋼板/アルミニウム合金板重ね隅肉継手の、ろう材/鋼板接合界面に生成した金属間化合物の組織に関して研究を行った。継手の作成実験および観察準備を広島大学で行い、継手の接合界面組織の観察・分析をETSで行った。

3. 共同研究スケジュール

8/1: 出国

8/3 - 8/24: 派遣先での研究 (8/5, 8/14: ディスカッション, 8/20: 最終報告)

8/25: 帰国

4. 共同研究派遣先の概要

大学名: ケベック高等工科大学(École de technologie supérieure)

所在地: カナダ ケベック州 モントリオール

指導教員: Prof. Philippe Bocher

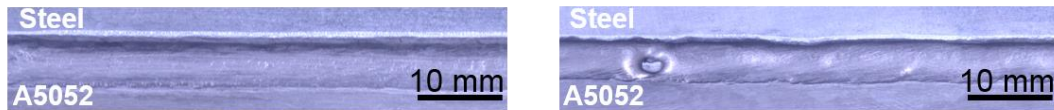
5. 共同研究内容

5.1 研究背景および共同研究の目的

近年、自動車重量の軽量化のため、自動車車体へのアルミニウム合金の適用拡大が求められており、従来材である鋼とアルミ合金の異材接合技術の需要が高まっている。しかし従来の溶融溶接等の冶金的接合法では、鋼/アルミ合金の接合界面に脆弱な Fe-Al 系金属間化合物(IMC: Intermetallic compound)が厚く生成する問題があり、当該異材継手の接合には接着や機械的接合が採用されている。また、自動車の製造には高能率な接合技術が求められる。本研究では、溶着金属の形成に用いる添加ワイヤを独立電源によって通電加熱した状態で送給するホットワイヤ法とレーザーブレイジングとを組み合わせた接合法を提案し、鋼/アルミ合金異材継手への適用を検討した。特に、当該接合法による高速施工と IMC 生成を抑制した高強度な鋼/アルミ合金異材継手の実現を目的とした。

本研究の先行研究では、当該接合法を用い、ブレイジング速度 4.0 m/min までの施工速度において Fig. 5.1.1 に示すような外観の概ね良好な継手が得られた。継手の接合界面観察の結果、Fig. 5.1.2 に示すように、層状および針状の IMC と思われる相が厚さ数 μm 以下で比較的小さく生成していることがわかった。また、得られた継手のせん断引張試験の結果、Fig. 5.1.3 に示すように、

母材鋼板の降伏後に破断する十分な接合強度を持った継手となっていることがわかった。しかし、IMCと思われる接合界面の生成相について詳細な調査が行えていない。そこで、本共同研究の目的を接合界面の生成相に関する調査として、ETS LOPFA が所有する高分解能電子顕微鏡を用いた生成相観察と、その元素分析を行った。



(a) Brazing speed: 2.0 m/min. (b) Brazing speed: 4.0 m/min.
Fig. 5.1.1 Examples of the appearances of brazing bead.

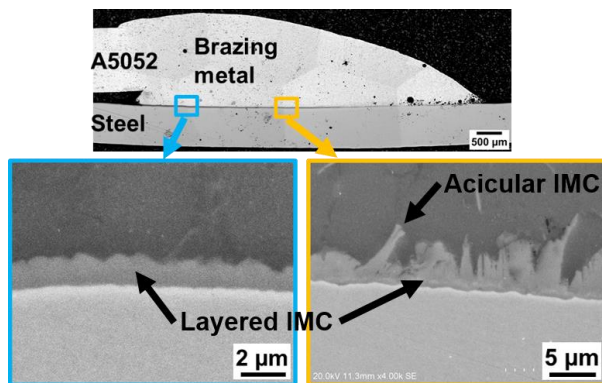


Fig. 5.1.2 Examples of the observation of joint interface.

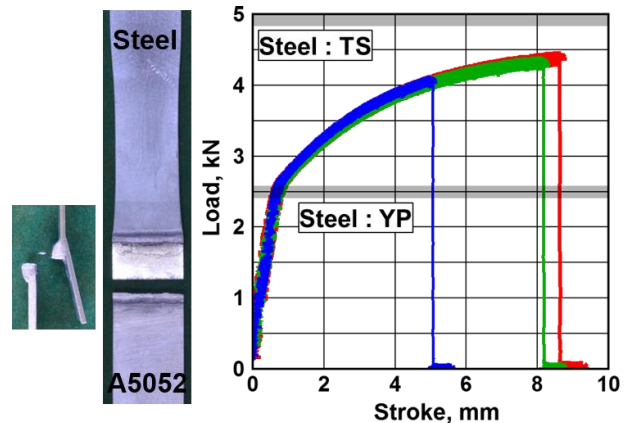


Fig. 5.1.3 Examples of the tensile shear tests.

5.2 供試材料および実験条件

本共同研究では、前項 5.1 で述べたような観察・分析は、広島大学において複数の条件で作製した継手に対して行ったが、本報告書では研究成果の一例として全ての条件の結果のうち 1 条件の結果のみを報告する。当該条件の継手の供試材料とその化学組成を Table 5.2.1 に示す。母材には板厚 0.8 mm の 270MPa 級溶融亜鉛めっき冷延鋼板(GI 鋼板: Galvanized steel)および板厚 1.2 mm の A5052 板を使用した。添加ワイヤには Al-12%Si ワイヤ Alu19(JIS BA4047, 直径 1.2 mm, neis(株)製)を使用した。フラックスは Cs 添加塩化物系粉末フラックス F19Cs(neis(株)製)を使用し、水と重量比 2:1 で混合したペーストを試験片に塗布した。試験片寸法は、鋼板および A5052 板ともに 150 mm^l×100 mm^w とし、鋼板上に A5052 板を 10 mm 重ねた重ねすみ肉継手とした。

継手の作成実験について、実験時のレーザ照射とホットワイヤ送給の位置関係を示す模式図を Fig. 5.2.1 に、実験条件を Table 5.2.2 に示す。主熱源には半導体レーザを使用し、ジャストフォーカスで直径 4 mm の丸型スポットとなるレンズ系を用いて、デフォーカス長を 30 mm とした。ホットワイヤの送給量について、ブレイジング速度とホットワイヤ送給速度との比を 1:5 と設定した。ブレイジング速度を 3.0 m/min, レーザ出力を 6.0 kW とした。ホットワイヤは前方から送給し、ワイヤ電流値には、ワイヤが溶断しない状態で十分に加熱される適正值を用いた。

作製した継手の接合断面を取得し、接合界面の観察を行った。接合断面の取得方法としては、継手をブレイジング方向に対して垂直に切断したものを熱間樹脂埋め込みし、エメリー紙 #240~2000 を用いて研磨した後、粒度 6 μm と 1 μm のダイヤモンドペーストで琢磨を行い、仕上げに MgO 粉末を用いて水研磨を行った。研磨後の試験片はエタノール中で超音波洗浄を行った。観察には、LOPFA 所有の走査型電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscope)SU-70((株)日立ハイテクテクノロジー製)を用いた。IMC の元素分析には前述した SEM に付随するエネルギー分散型 X 線分析装置(EDX: Energy Dispersive X-Ray analysis)QUANTAX 400 EDS(Bruker 製)を用い、面分析、線分析による定量分析および点分析による定量分析を行った。

Table 5.2.1 Chemical compositions of test materials.

Material	Quantity of plating (mg/m ²)	Chemical compositions, mass %						
		C	Mn	Si	P	S	Fe	
GI steel sheet	60/60	0.001	0.09	0.007	0.007	0.008	Bal.	
Material	Chemical compositions, mass %							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
A5052 sheet	0.07	0.28	0.01	0.01	2.58	0.17	<0.00	Bal.

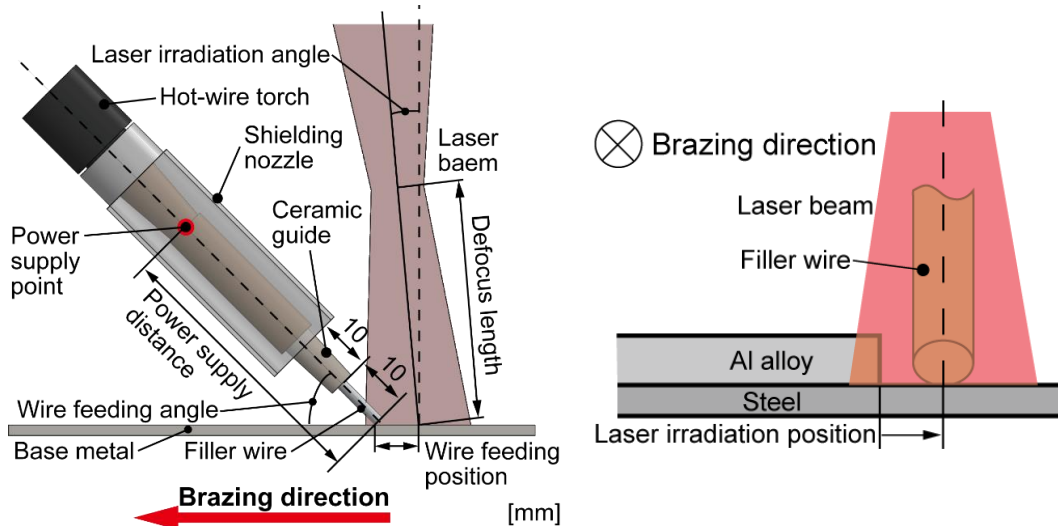


Fig. 5.2.1 Schematic illustration of arrangement of laser beam and filler wire.

Table 5.2.2 Experiment conditions.

Laser type	LD	
Core, μm	1000	
Focus lens	f400	
Brazing speed, m/min	3.0	
Defocus length, mm	30	
Spot size, mm	ϕ 6	
Laser power, kW	6.0	
Laser irradiation angle, deg	5	
Laser irradiation position, mm	0.5	
Wire feeding direction	Forward	
Wire feeding position, mm	2	
Wire feeding speed, m/min	15.0	
Wire current, A	220	
Wire feeding angle, deg	45	
Electrical distance, mm	80	
Ar shielding gas, L/min	Coaxial	20
	Each side	15

5.3 結果

Fig. 5.3.1 に作製した継手のブレイジングビード外観を示す。これより、外観上ほぼ良好に継手が作成できたことがわかる。Fig. 5.3.2 にこの継手から取得した接合断面のマクロ写真と、ルート部(図中 a, b)および中央部(図中 c, d)でそれぞれ 2 視野ずつ取得した SEM の拡大写真を示す。これより、ルート部から中央部にかけて接合界面に層状および針状の IMC とと思われる相が生成厚さ $2\ \mu\text{m}$ 以下で非常に薄く生成していることがわかる。Fig. 5.3.3 に中央部付近の接合界面の定性元素分析結果を示す。これより、生成相からは層状部、針状部ともに Al, Fe, Si が同時に検出されており、生成相は Fe, Al, Si を含む金属間化合物であることがわかる。Fig. 5.3.4 にルート部の針状 IMC および中央部の層状 IMC の SEM 像と定量元素分析の分析点位置、Table 5.3.1 に定量分析結果として各分析位置の化学組成と可能性のある相を示す。なお、可能性のある相については、得られた化学組成から Table 5.3.1 に示す文献記載の 600°C における Al-Fe-Si 3 元系状態図を用いて推定した。この結果から、Point 1, 2 に示す針状 IMC では、2 点で近い組成が得られているが Al, Fe の値に若干の差異がみられ、それぞれ異なる組み合わせの Al-Fe-Si 系 IMC が推定された。Point 3, 4 に示す層状 IMC では、2 点でほぼ同様な組成が得られ、同じ Al-Fe-Si 系および Al-Fe 系 IMC が推定された。また、針状 IMC では層状 IMC に比べて Si 量が多く、層状 IMC では針状 IMC に比べて Si 量が少なく Al, Fe 量が多い傾向があることがわかる。ただし、今回の定量元素分析と生成相の推定結果は、微小部測定によるバックグラウンドの信号の影響が大きいと考えられるため、可能性のある相の推定にとどまる。



Fig. 5.3.1 Appearance of the brazing bead.

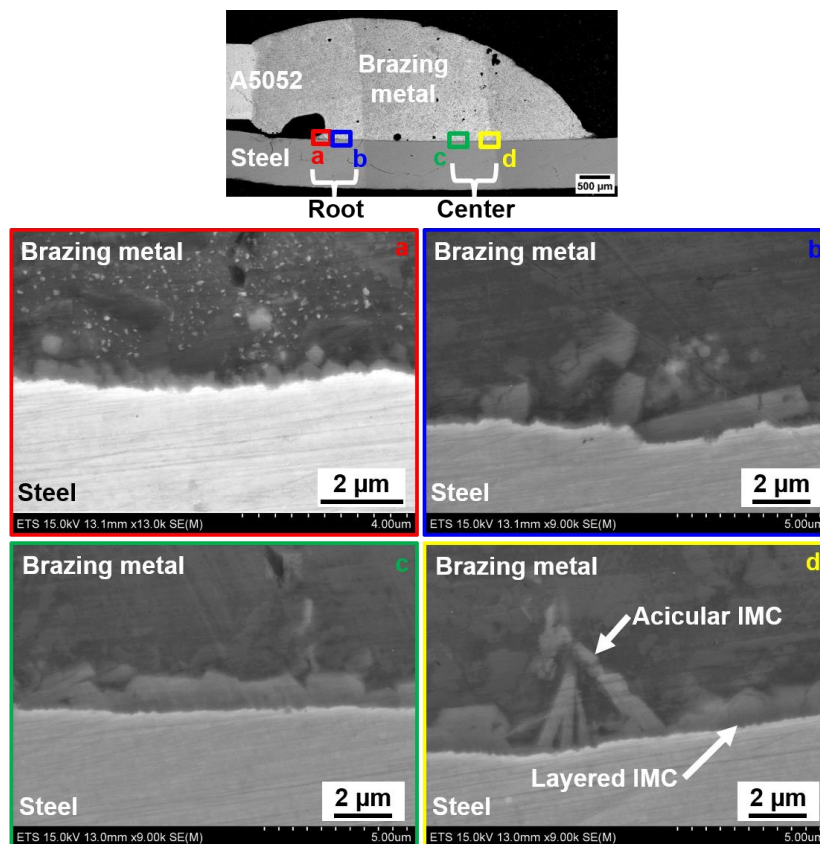


Fig. 5.3.2 Joint cross section and SEM images of the joint interface.

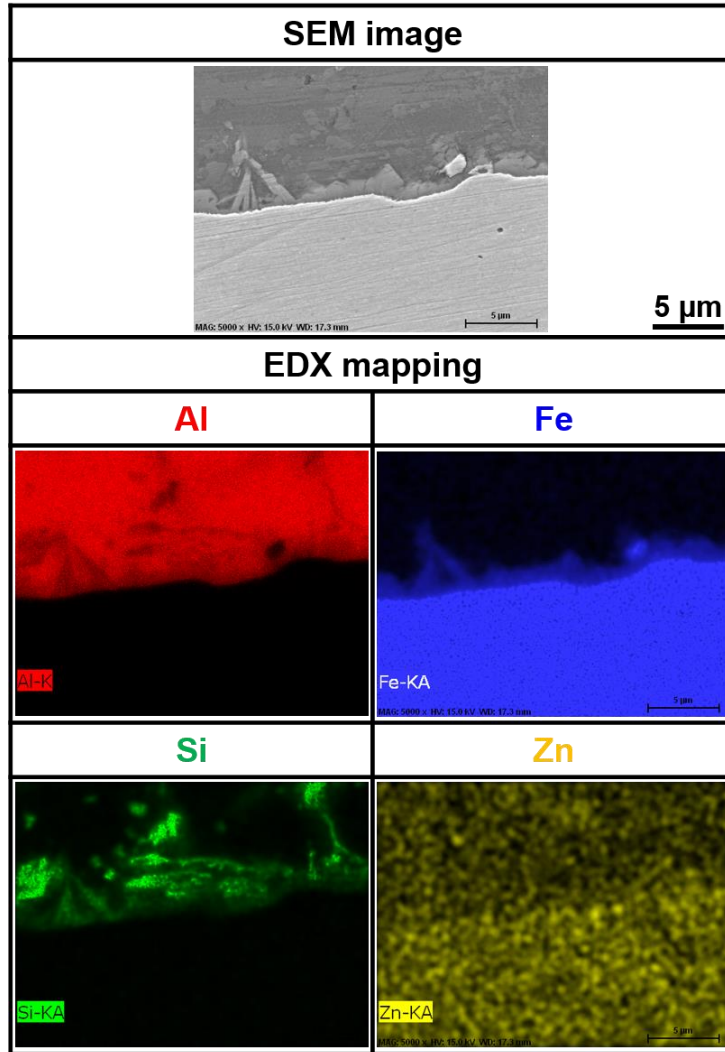


Fig. 5.3.3 Results of the mapping analysis of EDX.

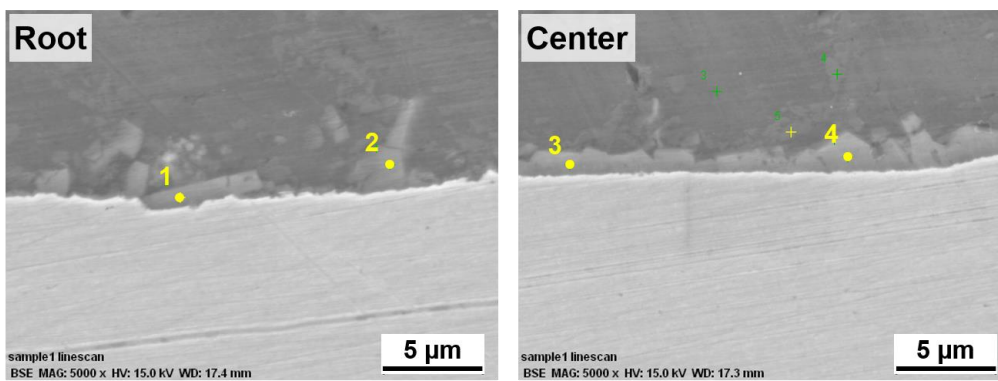


Fig. 5.3.4 SEM images and analyzing points of the quantitative analysis of EDX.

Table 5.3.1 Results of the quantitative point analysis of EDX in Fig. 5.3.4.

Point	Type	at %				Possible phase※
		Al	Fe	Si	Zn	
1	Acicular	59.86	18.72	21.25	0.17	τ_{23} : Al_2FeSi
2		65.43	12.45	21.99	0.13	τ_4 : $\text{Al}_{2.7}\text{FeSi}_{2.3}$
3	Layer	71.18	19.21	9.61	-	τ_5 : $\text{Al}_{15}\text{Fe}_6\text{Si}_5$
4		72.50	19.33	8.17	-	τ_6 : $\text{Al}_{4.5}\text{FeSi}$

※Quoted from Al-Si-Fe phase diagram at 600 °C (Journal of Phase Equilibria, Vol. 23, No. 4, 2002)

5.4 結言

鋼板/アルミ合金板重ね隅肉継手の接合界面の生成相について、SEMによる観察、EDXによる定性元素分析を行うことで、生成相が Fe, Al, Si を含む金属間化合物であることが確認された。また、EDX の定量元素分析結果から、金属間化合物の化学組成と生成相を推定することができ、層状相および針状相で推定される組成、生成相に違いがみられることがわかった。以上のような、元素分析から生成相を推定する試みは、今後、金属間化合物の生成メカニズムの解明や生成の制御に活かすことができると考える。

6. まとめ

約 4 週間、派遣先の研究室 LOPFA の研究設備を実際に使用させていただき、自ら考え行動して研究を進めるという大変貴重な経験をすることができた。現地の先生や学生の方々と積極的にディスカッションを行いながら研究を行うことで、英語を研究活動の 1 つのツールとして用いる能力を大きく伸ばすことができたと感じた。また、現地での日常生活も自力で行うことで、海外の生活・文化の実際に触れることができた。特に、派遣先であるカナダ、モントリオールは非常に多くの人種が入り混じる多国籍な地域で、実際に様々な国の出身者の方々とコミュニケーションをとりながら生活することができた。そのなかで、カナダ、モントリオールは様々な人種の人々にとって言語、生活、ビジネス等の様々な面で適応しやすい環境になっていると感じた。本プログラムを通じて、国際的な視野が求められるエンジニアとして必要な経験ができ、将来への自信になった。

7. 謝辞

本共同研究を遂行するにあたり、現地での研究のみならず学内設備や宿泊施設についても便宜を図っていただきましたケベック高等工科大学 Philippe Bocher 教授、研究助手 Hossein Monajati 氏に厚く御礼申し上げます。また、現地での研究室生活、日常生活ともに多大なご協力を頂きました。ケベック高等工科大学博士課程 Hamid Javadi 氏をはじめとする学生の皆様に感謝の意を表します。

派遣期間中に研究室見学を受け入れてくださったモントリオール理工科大学(Polytechnique Montréal) Myriam Brochu 助教と研究室の学生の皆様に深く感謝いたします。

このような大変貴重な機会を与えて下さるとともに、本共同研究への御助言を頂いた広島大学工学研究科 篠崎賢二教授、山本元道准教授、門井浩太助教に深く感謝申し上げます。

派遣前の手続きから派遣後の研修まで、本プログラム全体を通して多大なご協力を頂きました実行委員会の諸先生方、藤原真様をはじめとする国際事業担当の皆様にご心より感謝を表すると共に、本プログラムの益々のご発展をお祈り申し上げます。