# ケベック高等工科大学(カナダ) 研修報告書 溝加工によるステンレス鋼/アルミニウム合金の異材接合強度の向上

先進理工系科学研究科 機械工学プログラム 日浦 皐月

### 1. はじめに

2024年8月1日から同年9月3日の間,カナダのケベック高等工科大学において研究を行った. 以下に結果を報告する.

#### 2. 研修/共同研究課題の決定

本研究では、ステンレス鋼の基材の表面に溝加工を行い、その上にアルミニウムの造形を行う マルチマテリアル AM の手法を開発した.鉄とアルミニウムを接合すると脆弱な金属間化合物 (IMC)を生じる.接合強度において IMC の厚さを制御することが非常に重要であるが、ステン レス鋼 (SUS304)とアルミニウム合金 (A5183)との組み合わせにおいて、ホットワイヤ・レー ザ AM 技術の適用とフラックスの効果的な活用により、IMC の制御に成功し高強度な直接積層造形 が実現されている.そこで、さらなる高強度化のため、基材となるステンレス鋼の表面にパルス レーザを用いて溝加工を行った.形成された溝に造形されるアルミニウムが入り込むことで、ア ンカー効果と IMC の破壊メカニズムの複雑化による接合強度の向上が期待できると考えられる. この度の海外共同研究では、接合界面において溝形状に沿って生成した IMC を詳細に分析する ことを目的とした.具体的には SEM を用いて IMC の厚さや生成形状を取得し、EDX を用いて界面 に生じた IMC の化学組成を予測し、その結果から EBSD による結晶の分析を行うことを目標とし た.

## 3. 研修/共同研究スケジュール

8月1日 出国 8月2日~9月3日 研究 9月4日 帰国

### 4. 研修先/共同研究派遣先の概要

大学名: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. 研修/共同研究の内容

### 5.1 研究背景

近年,自動車・航空機・船舶業界では地球温暖化抑制の観点から CO2 の排出量を低減すること が求められており,高強度を保ちながら軽量化によって燃費を向上させる技術が重要となってい る.そこで,車体や機体には,特性の異なる材料を組み合わせ適材適所に活かすマルチマテリア ル化が必要となる.材料の特性からステンレス鋼とアルミニウム合金によるマルチマテリアル化 の需要が高まりこれらの接合技術が重要となっている.しかし,鉄系合金とアルミニウム合金を 接合すると,接合界面に非常に脆い金属間化合物(IMC)が形成され,接合強度が低下するとい う課題がある.そのため,ステンレス鋼とアルミニウム合金の接合では,IMC の生成をいかに最 小限にするかということが重要となっている.本研究では,ホットワイヤ・レーザ AM 技術とフ ラックスを用いて IMC の抑制を試み,基材への表面加工による接合強度向上の検討を行った.

# 5.2 先行研究

直接接合・造形が困難なステンレス鋼(SUS304)とアルミニウム合金(A5183)の異材組み合わせにおいて、ホットワイヤ・レーザ AM 技術を用いた高強度積層造形に成功している. Additive manufacturing (AM) 技術は、マルチマテリアル化において近年注目を浴びており、従来の鋳造や切削加工に比べて複雑な形状の造形が可能である.そこで、加熱したワイヤを溶融地に供給するホットワイヤ法と高出力半導体レーザを組み合わせ、より高能率・高精度に AM を行うことを目的とし、ホットワイヤ・レーザ AM 技術が研究・開発された.ホットワイヤ・レーザ AM 技術が研究・開発された.ホットワイヤ・レーザ AM 技術とフラックスを活用することで、IMC を 2 µm 以下に抑制でき、引張試験では非常に高い強度を得ることが確認されている.<sup>(1)</sup>

本研究では, Fig. 5. 2.1 に示すように, 基材となるステンレス鋼に溝加工を行うことで, さら なる接合強度向上の可能性を検討した.



Fig. 5. 2. 1 Difference between surface processing and non-surface processing

### 5.3 分析に用いた試験片

今回の海外共同研究では、事前に試験片を作成し、接合界面観察用の試験片を派遣先で分析した. 溝加工を施した基材にフラックスの条件の異なる2種類の手法で、それぞれ1層だけ造形を行った. 溝加工を行った表面の外観を Fig. 5.3.1 に示す. 1つ目が、フラックスを基材(ステンレス鋼)に塗布して造形を行う手法、2つ目がフラックスコアードワイヤを使用する手法で作成した試験片で分析を行った.

母材にはオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)を使用し、フラックスを基材に塗布する条件では塩化物系フラックスを使用した.造形はFig.5.3.1に示すイラストのように行った.フラックスを塗布する実験では、添加ワイヤに 5000 系アルミニウム合金製のワイヤを使用し、フラックスコアードワイヤを用いた実験では 4000 系アルミニウム合金を使用したワイヤを使用した. 母材とワイヤの組成を以下の Table5.3.1, 5.3.2 に示す.



Fig. 5. 3. 1 Surface photograph



Fig. 5. 3. 2 Schematic illustration of experiment<sup>(1)</sup>

Table5.3.1	Chemical	composition	of	the	base	material
------------	----------	-------------	----	-----	------	----------

Material		Chemical composition, wt%										
		С	C Si Mn P S Ni				Cr	Fe				
Base metal	ase metal SUS304 0.0		0.53	0.89	0.031	0.002	8.08	18.2	Bal.			

Matorial			Chemical composition, wt%											
Iviat	eriai	Si	Fe	e Cu Mn		Mg	Cr	Zn	Ti	AI				
Filler wire A5183WY <0.40		<0.40	<0.10	0.5~1.0	0.05~0.25	0.17	0.25	<0.15	Bal.					

った試験片の接合界面で、EDX による成分分析を行った.

# 5.4.1 フラックス塗布による造形

フラックスを塗布した条件の造形体を,溝加工と同じ方向で切断し,その断面を Fig. 5.4.1.2 に示す. 図中の白枠の部分を高倍率で SEM で観察し EDX による分析を行った. Fig. 5.4.1.3 に示 すように,倍率1万倍で IMC の厚さを計測したところ,2~3 µm の厚さの IMC が確認できた. また,ところどころ針状の形状のものも確認できた. Fig. 5.4.1.3 の右の SEM 画像では,IMC が2 層構造になっていると考えられる.

Fig. 5.4.1.4, Fig. 5.4.1.5 に元素マッピングを示す. それぞれ, 倍率1万倍, 2万倍で分析したもので, IMC のワイヤ側に Mn が固まって検出された. Fig. 5.4.1.6 に成分分析を複数点で行った結果を示すが, IMC のワイヤ側に微量の Mn が検出されていることが分かる. Mn を含む層と含まない層では, Fe の割合がかなり異なることが確認でき, この結果から, Fe-A1 の二元系 IMC が初出し, その後溶融地と初出した IMC が反応し, Mn を含む IMC が生成したと考えている.





Fi	i <u>g 5 4 1 4</u>	<u>Elemental m</u>	anning has	sed on EDX	(Magnificat	ion: 10 Ok	5 μm
		AI		Fe		Cr	
MAG: 10000 x HV: 20.0 KV WD: 16.3 mm	2 µm	MAG: 10000 x HV: 20.0 kV WD: 16.3 mm	2 µm	MAG: 10000 x HV: 20.0 kV WD: 16.3 mm	2 µm	MAG: 10000 x HV: 20.0 KV WD: 16.3 r	nm
Si		Mn		Mg		Ni	
	2 µm		2 µm	MAG- 10000 v MV- 20.0 MV MD- 16.3 mm	2 µm		2µm





cross the interface (Magnification: 10.0k)

			Atomic percent , %												
去十		AI	Fe	Si	Mn	Mg	Cr	Ni							
事ハ して	1	2.27	70.49	0.89	0.91	0.43	17.54	7.48							
IC.	2	77.14	13.57	0.34	0.82	3.22	3.98	0.92							
T	3	85.44	4.37	0.05	1.87	4.58	3.10	0.23							
Ĵ	4	93.51	0.33	0.02	0.16	5.76	0.20	0.01							
1.1	- 1 L							,							

はれた.





Fig. 5, 4, 1, 1	0 Elemental man	ning based on EDX (Ma	agnification: 10.0k)	5 µm
	AI	Fe	Cr	
MAG (1000) 5 (V) 20 5 V WD (15 6 m.	MAG: 10000 x HV: 20.0 kV WD: 15.6 mm	2 gm MAG: 10000 ¥ HV: 20 8 W WO: 155 mm	2 2 10 1000 1000 100 100 100 100 100 100	2 µm
Si	Mn	Mg	Ni	
Sector and a sector of				

## 5.4.2 フラックスコアードワイヤによる造形

フラックスコアードワイヤを使用した条件の造形体を,溝加工と同じ方向で切断し,その断面 を Fig. 5. 4. 2.1 に示す. 図中の白枠の部分を高倍率で SEM で観察し EDX による分析を行った. Fig. 5. 4. 1.2 では,倍率 1.5 万倍での SEM 画像を,Fig. 5. 4. 2.3 では倍率 2 万倍での SEM 画像を 示し,それぞれで IMC の厚さを計測したところ,およそ 1.5 µm の薄い IMC が確認できた.フラ ックス塗布の条件とは異なり,針状の IMC はほとんど確認できなかった.

Fig. 5. 4. 2. 4, Fig. 5. 4. 2. 5 にそれぞれ倍率 1. 5 万倍, 2 万倍での元素マッピングを示す. フラ ックス塗布の条件とは異なり, Si が検出された. これは, フラックス塗布の条件よりも添加ワイ ヤに Si が多く含まれているからであると考えられる. Fig. 5. 4. 2. 6, 5. 4. 2. 7 に成分分析を複数 点で行った結果を示しており, それぞれ, IMC の真ん中, 上部と底部で分析を行った結果である. Fe は, 上部から底部にかけて増加しており, A1 は減少している. また, Si は IMC の真ん中と底 部と比較して上部で若干減少している. この結果から, フラックスコアードワイヤを使用した条 件では, Fe-A1-Si の三元系 IMC が生成しており, 上部と底部では, Si の割合が異なっているこ とから, 2 種類の三元系 IMC が生成していると考えている.







Fig 5 4 2 4	Flomontal mapping bas	od on FDY (Magnificati	op: 15.0k) <b>3 µm</b>
	AI	Fe	Cr
and Marshan			
767 2 ym	. 2µm	2 pm	2µm
BSE MAG: 15000 x HV: 20.0 kV WD: 16.0 mm	MAG:15000 x HV: 20.0 kV W0:16.0 mm	Mad: 15000 x HV: 20.0 kV WD: 16.0 mm	MAG: 15000 x HV; 20.0 KV WD: 16.0 mm

Fig 5 4 2 5	Flement	al manning	hase	d on F	DX (Ma	gnific	ation:	20 0k)	2	μm
	AI		1 µm	Fe			ſm	r		1µn
	Mn	/ 153 MM	1. pre	Mg	V WD: 183		тµт на	11 1		190
		2 µm				Atom	nic perce	nt , %		
				AI	Fe	Si	Mn	Mg	Cr	Ni
			1	76.19	12.41	6.31	0.13	0.69	3.63	0.64
1224		A SHE MARK	2	75.51	12.72	6.64	0.10	0.67	3.68	0.68
	6	7	3	75.04	13.61	6.55	0.15	0.74	3.69	0.67
			4	75.18	13.12	6.44	0.12	0.70	3.74	0.69
	See See		5	75.43	12.71	6.79	0.12	0.68	3.78	0.50
		6	6	75.68	12.77	6.53	0.10	0.66	3.62	0.63

Fig.	5.	4.	2.	7	0b	iective	anal	vsis	at	the	top	6



				Ator	nic perce	nt,%		
Fig. 5. 4. 2. 7 Objective analysis at the top	s	AI	Fe	Si	Mn	Mg	Cr	Ni
	1	85.89	6.88	4.55	0.08	0.66	1.72	0.23
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	2	85.65	6.82	4.67	0.08	0.72	1.82	0.24
2 μm	3	85.18	6.72	5.28	0.10	0.66	1.85	0.21
the second se	4	86.75	6.22	4.35	0.08	0.72	1.65	0.23
1	5	85.61	6.92	4.80	0.09	0.63	1.75	0.20
2345678	6	85.66	6.71	4.94	0.13	0.68	1.63	0.25
· · · + + + + + + + + + + + + + + + + +	4 <b>7</b>	85.01	7.34	5.06	0.07	0.62	1.68	0.24
	8	85.91	6.53	5.11	0.08	0.64	1.53	0.21
*** * * * * *	C O	上部と	底部で	は予憲	の風が	異ない	E EMC	が地成
9 10 11 12 13 14 15 16	清9加	72.40	15.25	6.17	0.11	0.72	4.40	0.96
	1MC	69.55	17.32	6.38	0.10	0.73	4.77	1.16
the second s	えた	71.44	15.68	6.63	0.11	0.66	4.58	0.89
取復に、今回収御外共回御先にぬいて、権	[夕12で	71.73	15.66	6.43	0.15	0.73	4.35	0.95
った、言語も文化も異なる地で生活すること	の繁	71.67	15.56	6.51	0.12	0.65	4.55	0.94
語を流ちょうに話すことができない私に対し	/귀4]	71.44	16.04	6.35	0.12	0.65	4.38	1.01
を感じることができた。この経験から、さら	15番	71.18	16.12	6.40	0.11	0.64	4.57	0.97
していきたいと思う	16	72.70	14.69	6.87	0.12	0.67	4.13	0.81

# 7. 謝辞

していきたいと思う.

本研究において熱心なご指導を頂きました Philippe Bocher 教授,研究活動および現地での生 活をサポートしてくださった LOPFA 研究室の方々に厚く御礼申し上げます.また、このような機 会を与えてくださった広島大学接合プロセス工学研究室 山本元道教授に厚く御礼申し上げます. 最後に、海外共同研究をサポートしていただきました諸先生方、工学系総括支援室の皆様に厚く 御礼申し上げます.

# 8. 参考文献

- Keita Marumoto, Development of Hot-Wire Laser Additive Manufacturing for Dissimilar Materials od Stainless Steel/Aluminum Alloys, Journal of Manufacturing and Material Processing, 2024, 8,93
- 2) L. Peng, G. Zeng, J. Xian, C.M. Gourlay, Al-Mn-Fe intermetallic formation in AZ91magnesium alloys: Effects of impurity iron, Intermetallics 142(2022)
- Martin C. J. Marker, Barbara Skolyszewska-Kühberger, Herta S. Effenberger, Clements Schmetterer, Klaus W. Richter, Phase equilibria and structural investigation in the system Al-Fe-Si, Intermetallics 19(2011) 1919-1929
- Wei-Jen Cheng, Chaur-Jeng Wang, EBSD study of crystallographic identification of Fe-Al-Si intermetallic phase in Al-Si coating on Cr-Mo steel, Applied Surface Science 257 (2011) 4637-4642