

---

# ケック高等工科大学（カナダ） 研修報告書

## ホットワイヤ・レーザブレイジング法による鋼/アルミニウム合金異材接合現象の解明

先進理工系科学研究科 機械工学プログラム 森田 祐平

### 1. はじめに

2023年7月30日から同年9月2日の間、カナダのケ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

本研究室では、添加ワイヤを融点直下まで通電加熱した状態で送給するホットワイヤ法と、高精度な入熱が可能な半導体レーザを組み合わせた、ホットワイヤ・レーザブレイジング法による鋼/アルミニウム合金異材ろう付け技術の開発を行っている。現在、本施工法における添加ワイヤの違いが鋼/ろう材間の金属化合物の生成形態に与える影響を調査している。一方、カナダのケック高等工科大学では航空機製造プロセスの最適化を研究しており、継手の分析・評価において優れた知見を有する。そこで、今回は本研究室で作成した2種類の試験片を用い、鋼/ろう材界面の詳細な観察および分析を行うことにした。

### 3. 研修/共同研究スケジュール

7月30日 出国

7月31日～9月1日 研究

9月1日～9月2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、温室効果ガスの排出量削減のため、自動車車体の軽量化による燃費向上が行われている。この方法として、自動車車体に複数種類の材料を適用するマルチマテリアル化が行われており、従来の鋼材に代わって軽量のアルミニウム合金の適用が進んでいる。このため、鋼とアルミニウム合金を接合する技術が求められているが、一般的な熔融接合法で両者を接合すると、接合界面に脆弱な金属間化合物(IMC)が生成し、接合強度が著しく低下する。従って、現在は機械的接合や摩擦攪拌接合が主流となっているが、前者は部品点数が増加し、後者はツールの摩耗が激しいといった点で、効率が悪いという指摘がなされている。

本研究では、高能率な鋼/アルミニウム合金異材接合技術として、ホットワイヤ・レーザブレイジング法の開発を行なっている。Fig. 5.1に本施工法の概略図を示す。本施工法は、ワイヤを融点直下まで通電加熱して供給するホットワイヤ法と入熱範囲を高精度に制御できる半導体レーザを組み合わせることで、IMCの生成を極薄に抑制しつつ、高速施工が可能なプロセスである。現在、添加ワイヤには2種類のワイヤを使用している。Figs. 5.2(a)Alu19を、(b)A5053-WYワイヤを使用した断面観察結果を示す。IMCの生成はどちらも非常に薄く抑制されているが、同一入熱条件で作製したにもかかわらず、(b)の継手の方が厚く生成していることが分かる。これは(a)のAlu19ワイヤに含まれるSiが影響していると考えられる。Fe, Al, Siによる反応時には、Fe-Al-Siの三元系IMCが生成し、その後のIMCの成長を妨げることが知られている。従って、本

---

施工法でも同様の現象が生じていると考え、Figs. 5.2 で示した 2 種類のワイヤに加え Si 含有量の異なる M4043 ワイヤを使用した試験片を作製し、生成した IMC の成分を比較することで、Si による IMC 生成抑制効果を確認した。

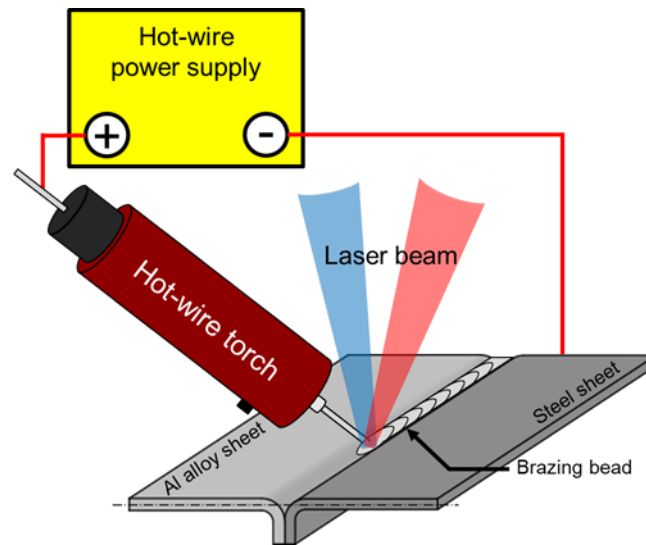
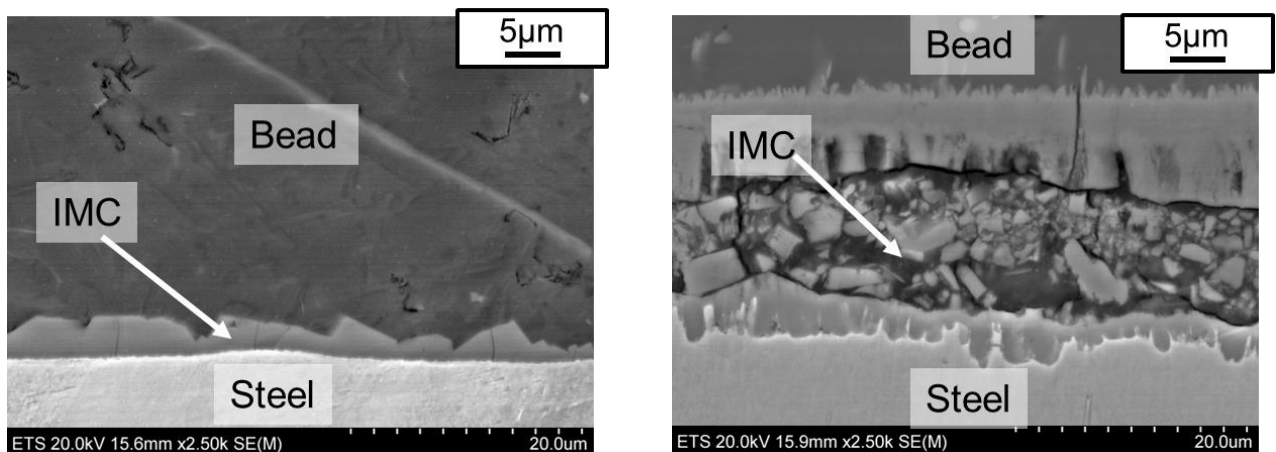


Fig.5.1 Schematic illustration of Hot-wire laser brazing for flare joint.



(a)Alu19 wire

(b)A5183-WY

Fig.5.2 Cross sections of 270MPa steel

## 5.2. 供給材料および実験条件

母材鋼板にろう材を供給するビードオンプレートブレイジングにより、鋼板/ろう材間の断面観察用試験片を作製した。母材鋼板には 270MPa 級鋼板 ( $100\text{mm}^1 \times 100\text{mm}^w \times 0.8\text{mm}^t$ ) を使用し、合金化溶解亜鉛めっき鋼板 (GA 鋼板)、ならびにめっき処理されていない冷延鋼板 (CR 鋼板) の 2 種類を用いた。鋼板の化学組成を Table 5.1 に示す。GA・CR 鋼板を使用する場合は、熔融池の鋼板への濡れ性を確保するため、ブレイジング部に塩化物系フラックス F19 を手作業で塗布した。フラックスを塗布した鋼板の概略図を Fig. 5.3 に示す。添加ワイヤは Si 含有量 12% の Alu19 ワイヤ (JIS BA4047)、Si 含有量 6% の M4043 ワイヤ、Si を含まないワイヤとして A5183-WY ワイヤを使用した。ワイヤの化学組成を Table 5.2 に示す。

実験時のホットワイヤ送給とレーザー照射の位置関係を示す模式図を Fig. 5.4 に、継手の作製条

件を Table5.3 に示す. ワイヤをブレイジング方向後方からの送給とし, レーザは  $\phi 5$  の丸形ビームと  $5 \times 11$  の矩形ビームを照射した.

作製した試験片を, Fig. 5.5 に示すように切断し, 樹脂込め・研磨・琢磨を行い, 断面観察用試験片を作製した. 走査型電子顕微鏡 (SEM) により, 高倍率での IMC 生成形態の観察を行い, EDX 法による IMC の成分分析や EBSD 法による IMC の相同定を実施した.

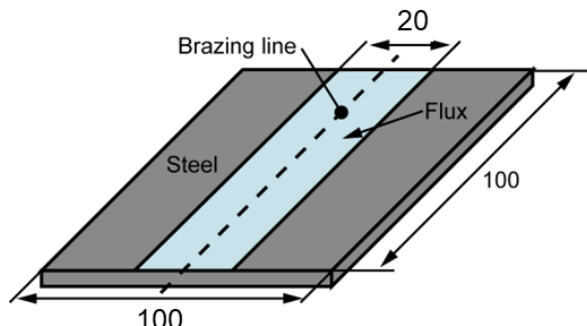


Fig.5.3 Schematic illustration of the specimen.

Table5.1 Chemical composition of the base materials

Material	Quantity of plating, mg/m <sup>2</sup>	Chemical compositions, mass %					
		C	Si	Mn	P	S	Fe
GA steel	45 / 45	0.002	0.009	0.09	0.011	0.005	Bal.
CR steel	-	0.002	0.004	0.09	0.016	0.004	Bal.

Table5.2 Chemical composition of filler wire

Material	Chemical compositions, mass %									
	Si	Fe	Mg	Sn	Mn	Cr	Cu	Zn	Ti	Al
Alu 19	12	0.6	0.10	-	0.15	-	0.3	0.2	0.15	Bal.
M4043	4.5~6	0.80	0.30	-	0.05	-	0.3	0.1	0.20	Bal.
A5183-WY	≤0.40	≤0.40	4.3~5.2	-	0.50~1.0	0.05~0.25	≤0.10	0.25	≤0.15	Bal.

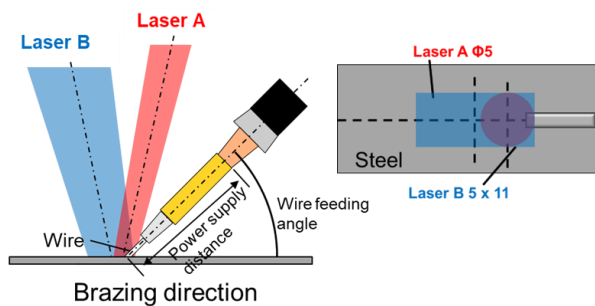


Fig.5.4 Schematic illustration of arrangement.

Table5.3 Brazing condition.

Laser power(A+B), kW	3+3	
Brazing speed, m/min	5.0	
Wire feeding speed, m/min	12.5	
Wire feeding direction	Backward	
Electrical distance, mm	50	
Ar shielding gas, L/min	Coaxial	30
	After	40

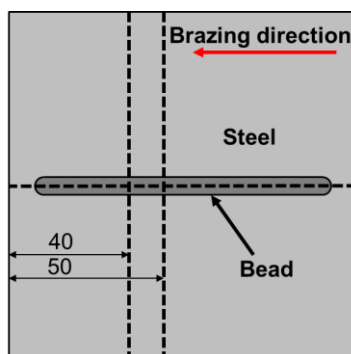


Fig.5.5 Cutting line of the bead on plate brazing specimen.

### 5.3. 実験結果および考察

Fig5.6 に GA 鋼板を使用した試験片の元素マッピングを示す. Si 入りワイヤを使用した試験片では, Fe, Al, Si からなる薄い IMC の生成が確認された. また, Alu19 と M4043 で比較するとビード内に析出する Si の量に違いはあるものの IMC の厚さにほとんど違いがないことが確認された. 一方, Si を含まないワイヤを使用した試験片では, 鋼板側の Mn を含まない Fe, Al からなる層とビード側の Mn を含む層の異なる 2 層の IMC の生成が確認され, 厚さは Si 入りワイヤを使用した試験片より厚くなっていた. この結果から, Si 入りワイヤを使用することで IMC 生成厚さが抑制されることを再確認できた. さらに, Si の含有量で IMC の厚さに大きな違いはなかったことから, Si 含有量 6% の M4043 でも十分に IMC 生成厚さを抑制することができると思われる.

Fig5.6 の断面において, 成分分析を複数点で行った結果を Fig5.7 に示す. Si 入りワイヤを使用した試験片では, IMC 内で Fe, Al, Si が検出されていることから, Fe-Al-Si の三元系 IMC が初出し, その後反応が進行せずに冷却されたと考えられる. 一方, Si を含まないワイヤを使用した試験片では, IMC 内で Fe, Al とビード界面では微量の Mn が検出された. 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-Al の二元系 IMC が鋼板/溶融池界面で初出し, その後溶融池と初出 IMC が反応し, わずかな Mn を含む Al リッチな IMC が生成したと考えている.

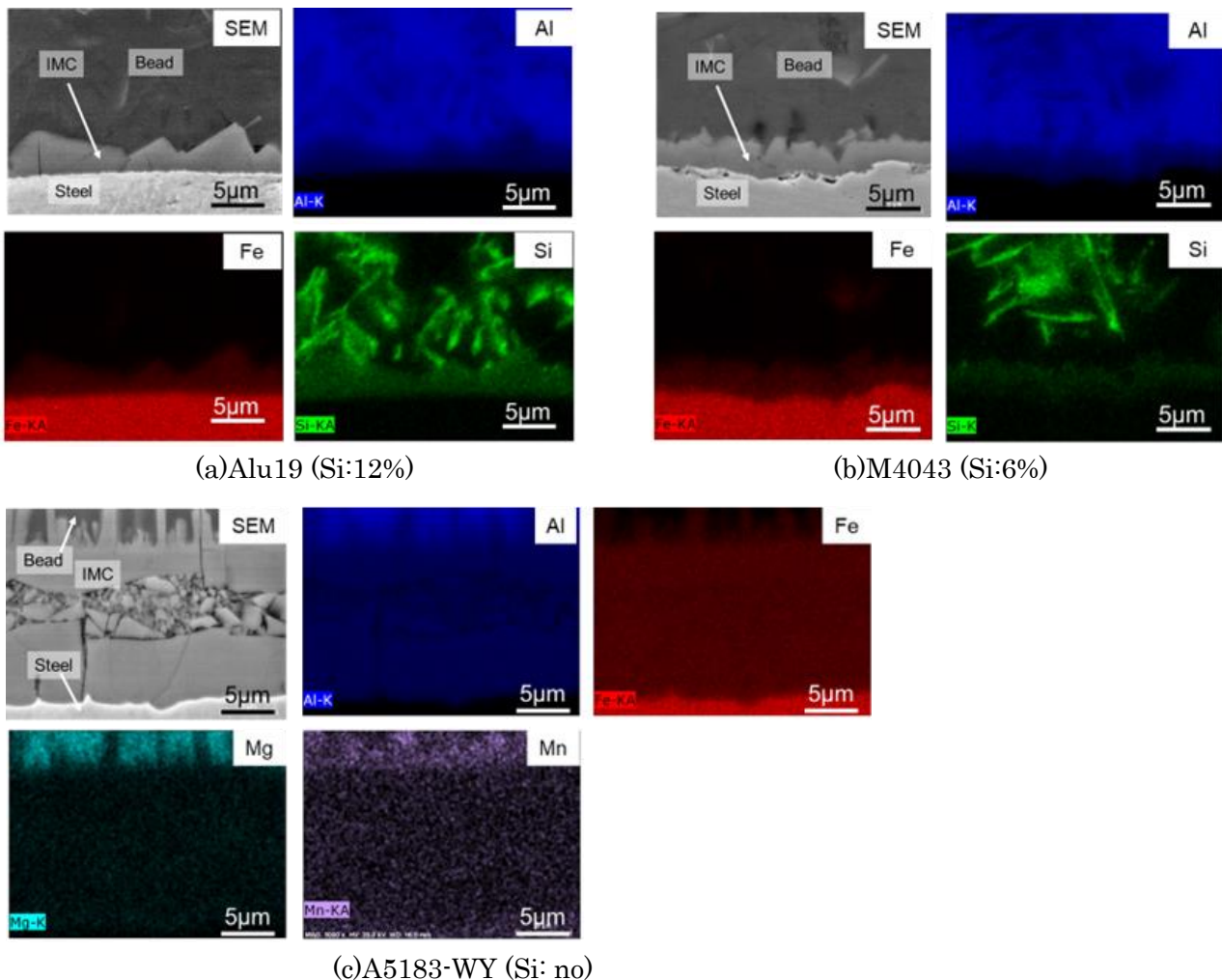
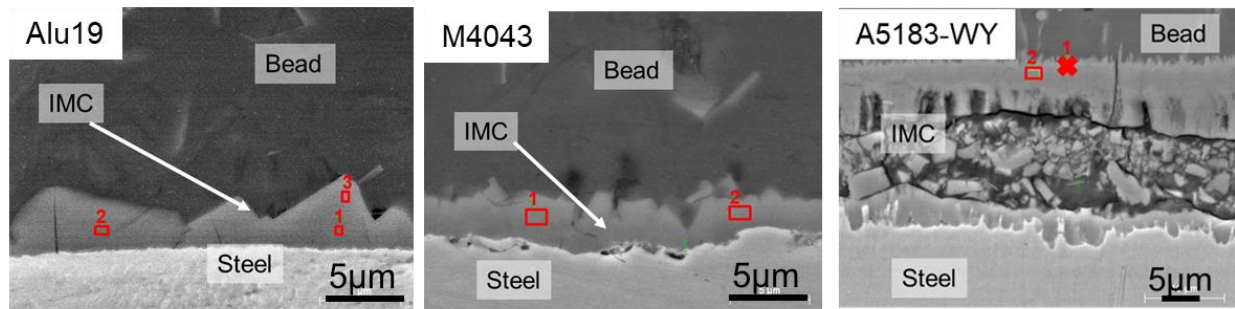


Fig.5.6 EDX mapping of GA steel



Atomic concentration (IMC) [%]

	AN	1	2	3	Ave
Al	13	64.33	68.24	71.97	68.18
Fe	26	26.84	22.34	17.56	22.25
Si	14	8.83	9.17	10.33	9.44
Zn	30	0.00	0.16	0.15	0.10
SUM		100.00	100.00	100.00	100.00

	AN	1	2	Ave
Al	13	77.74	80.23	78.99
Fe	26	16.21	12.56	14.39
Si	14	5.35	5.54	5.45
Zn	30	0.64	0.57	0.61
Ar	18	0.07	0.09	0.08
SUM		100.00	100.00	100.00

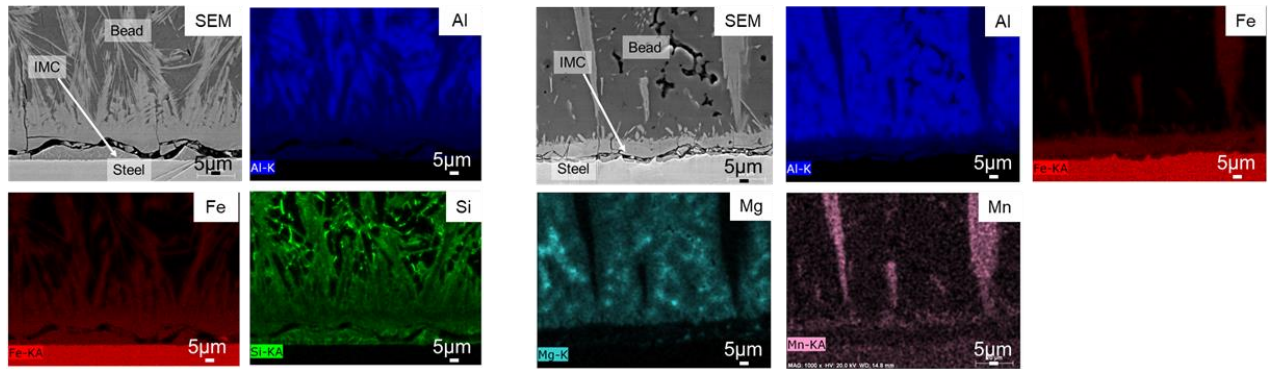
	AN	1	2	Ave
Al	13	79.72	76.42	78.07
Fe	26	15.33	21.38	18.36
Mg	14	3.60	1.47	2.54
Mn	25	0.85	0.00	0.43
Zn	30	0.50	0.73	0.62
SUM		100.00	100.00	100.00

Fig.5.7 EDX spot-scan of GA steel

GA 鋼板を使用するにあたり、普段は Fig. 5. 3 に示す通り塩化物系フラックス F19 をブレイジング部に塗布しているが、フラックスを塗布せずにブレイジングを行うと IMC がかなり厚く生成されることがわかっている。そのため、フラックスの有無による IMC 生成に違いがあるのか検討するために、EDX を用いて観察を行った。Fig. 5. 8 にフラックスを塗布しなかった試験片の元素マッピングを示す。ワイヤの Si の有無にかかわらず、ビード内に柱状の IMC が生成していることが確認された。これはフラックスを塗布せずにブレイジングを行ったため、鋼板への入熱量がより大きくなり、亜鉛メッキ内の Fe および Fe 素地を多く巻き込んで IMC を生成しているためだと考えている。また、フラックスを塗布した場合と同様に、Si 入りワイヤを使用した試験片では、Fe, Al, Si からなる IMC の生成が確認され、Si を含まないワイヤを使用した試験片では、鋼板側の Mn を含まない Fe, Al からなる層とビード側の Mn を含む層の異なる 2 層の IMC の生成が確認された。

Fig. 5. 8 の断面において、成分分析を複数点で行った結果を Fig. 5. 9 に示す。Si 入りワイヤを使用した試験片では、鋼板界面の IMC およびビード内柱状の IMC 内で Fe, Al, Si が検出されていることから、Fe-Al-Si の三元系 IMC が初出し、その後反応が進行せずに冷却されたと考えられる。一方、Si を含まないワイヤを使用した試験片では、鋼板界面の IMC 内で Fe, Al とビード界面およびビード内柱状の IMC では微量の Mn が検出された。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-Al の二元系 IMC が鋼板/熔融池界面で初出し、その後熔融池と初出 IMC が反応し、わずかな Mn を含む Al リッチな IMC が生成したと考えている。

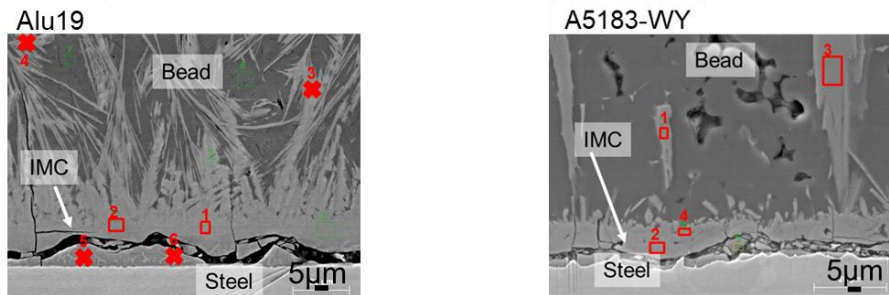
Si をほとんど含まない A5183-WY ワイヤを使用した試験片ではビード界面に Mn を含んだ IMC 層が生成されるが、Table 5. 2 に示す A5183-WY ワイヤに含まれる Mn 含有量が 0. 5-1%、Cr 含有量が 0. 05-0. 25% であり、試験片に含まれる Mn が約 2%、Cr が約 0. 3% であるため、ワイヤの影響でビード界面に Mn が析出しているのと考えている。



(a)Alu19 (Si:12%)

(b)A5183-WY (Si: no)

Fig.5.8 EDX mapping of GA steel without flux



Atomic concentration (IMC) [%]

	AN	1	2	3	4	5	6
Al	13	68.29	70.25	74.27	71.57	65.06	53.31
Fe	26	25.44	23.65	16.12	15.41	28.47	32.45
Si	14	6.08	5.85	9.12	12.74	6.16	14.13
Zn	30	0.19	0.24	0.48	0.29	0.31	0.12
SUM		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

	AN	1	2	3	4
Al	13	78.37	71.29	76.12	77.04
Fe	26	18.04	28.57	21.05	20.89
Mn	25	2.09	0.00	2.38	0.30
Mg	12	1.05	0.00	0.00	1.59
Cr	24	0.29	0.00	0.31	0.00
Ar	18	0.16	0.14	0.14	0.18
SUM		100.00	100.00	100.00	100.00

Fig.5.9 EDX spot-scan of GA steel without flux

EBSD を用いて相同定を行うために、フラックスを塗布した CR 鋼板に Si をほとんど含まない A5183-WY ワイヤを使用した試験片を用いて観察を行った。まず初めに、Fig. 5. 10 に本試験片の元素マッピング結果を示す。GA 鋼板を用いたときと同様に、鋼板側の Mn を含まない Fe, Al からなる層とビード側の Mn を含む層の異なる 2 層の IMC の生成が確認された。また、Fig. 5. 11 に Fig. 5. 10 の断面における成分分析を複数点で行った結果を示す。IMC 内で Fe, Al とビード界面では微量の Mn が検出された。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-Al の二元系 IMC が鋼板/熔融池界面で初出し、その後熔融池と初出 IMC が反応し、わずかな Mn を含む Al リッチな IMC が生成したと考えている。Al の原子量を Fe の原子量で割り算したところ、点 3, 4, 5, では Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> が点 1, 2 では Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> が生成されていると考えている。

Fig. 5. 12 に本試験片の EBSD 結果を示す。Fig. 5. 10 において、Mn が含まれていたビード界面の層では Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> が、Mn が含まれない層では Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> が検出された。これは Fig. 5. 11 の成分分析結果からの予想と合致しているが、現状ではこの化学組成が正しいとは言えない。そのため、透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いることで元素分析を行うなどして、正確な化学組成を出す必要がある。

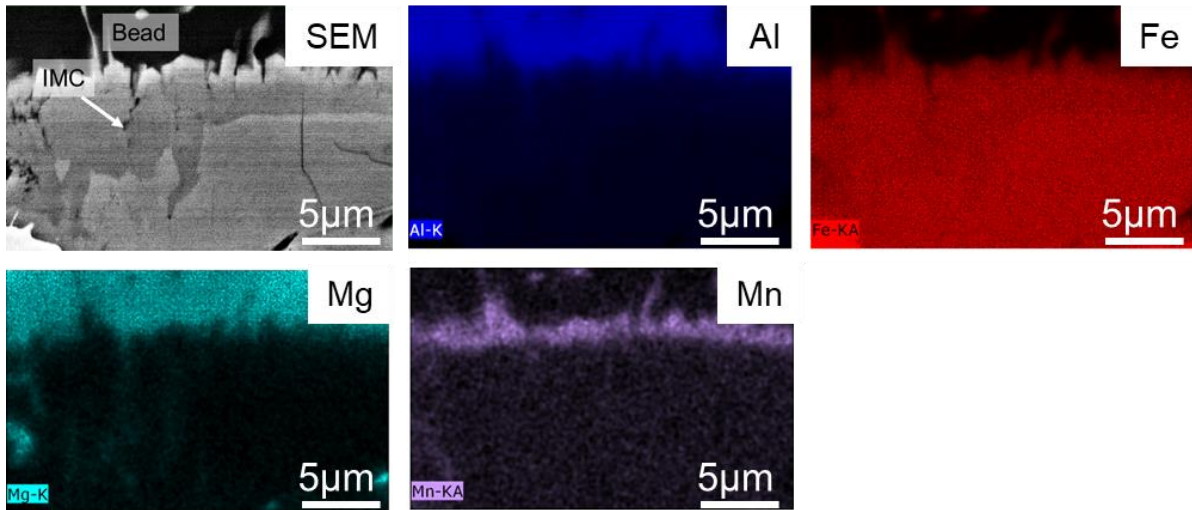
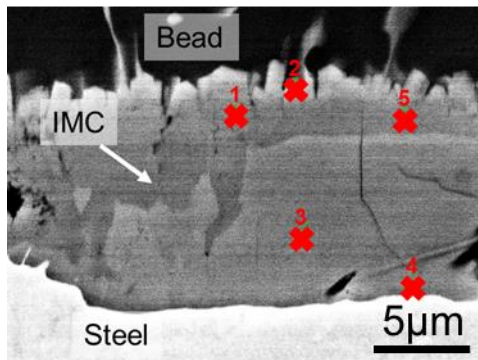


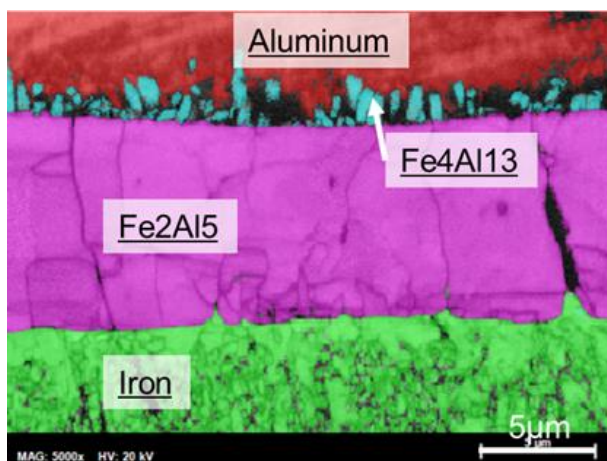
Fig.5.10 EDX mapping of CR steel/A5183-WY wire



Atomic concentration (IMC) [%]

	AN	1	2	3	4	5
Al	13	74.77	76.41	70.69	67.85	73.73
Fe	26	25.23	20.84	29.17	30.83	25.91
Mg	12	0.00	1.10	0.00	0.00	0.00
Mn	25	0.00	1.65	0.00	0.00	0.35
Si	14	0.00	0.00	0.14	1.32	0.00
SUM		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Fig.5.11 EDX spot-scan of CR steel/A5183-WY wire



	Phase name	Raw	Norm
■	Aluminum	16.1%	17.9%
■	Iron	27.6%	30.7%
■	Aluminum iron (5.4/2)	43.6%	48.4%
■	Iron aluminium (4/13)	2.64%	2.94%

Fig.5.12 EBSD analysis of CR steel/A5183-WY wire

---

## 6. まとめ

今回の海外共同研究において実際に海外の異文化において研究に集中して取り組む経験はこれからの人生においてとても貴重な経験となった。日本において研究を進めていくのとは異なり派遣先ならではの研究の考え方や進め方を体験できたと考えている。さらに、日本での研究に取り組む姿勢に関してもこれまで以上に改善すべき点を発見できる機会となった。特に自分の意見をしっかりと主張すること、他人の意見などを理解するまで何度でも確認することなどに関しては自分の研究を行っていくうえで協力を得るという点で非常に重要であると感じた。今後ともこの経験を活かしていきたいと思う。

## 7. 謝辞

本研究において熱心なご指導を頂きました **Philippe Bocher** 教授，研究面のみならず，現地での生活を助けていただいた **LOPFA** 研究室の学生の方々に厚くお礼申し上げます。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の山本元道教授に厚くお礼申し上げます。最後に，海外共同研究をサポートしていただきました実行委員会の諸先生方，工学系総括支援室の皆様に厚くお礼申し上げます。

---