ケベック高等工科大学（カナダ）　研修報告書
ホットワイヤ継手の接合界面解析

先進理工系科学研究科　機械工学プログラム　伊藤　環

1. はじめに

2024 年 7 月 19 日から同年 8 月 22 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．以下に成果を報告する．

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させた状態で溶融池へ送給するホットワイヤ法と，エネルギ密度分布と出力の制御が容易な半導体レーザとを組み合わせ，高能率な鋼/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，本施工法での鋼/アルミニウム合金製ろう材間の接合現象解明を目的に，添加ワイヤに含まれる成分が鋼/ろう材間での金属間化合物 (IMC) 生成現象に与える影響を調査している．一方，カナダのケベック高等工科大学 (ÉTS) の LOPFA (先端製造プロセス最適化研究室) では航空機製造プロセスの最適化を研究しており，金属材料や継手の分析・評価において優れた設備・知見を有している．今回は本研究室で作製した 3 種類の試験片を用い，鋼/ろう材界面の詳細な観察・分析を行うこととした．

3. 研修/共同研究スケジュール

2024 年 7 月 18 日　出国
2024 年 7 月 19 日～8 月 22 日　共同研究
2024 年 8 月 24 日　帰国

4. 研修先/共同研究派遣先の概要

大学名 : École de technologie supérieure (ÉTS)
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 研究背景および目的

温室効果ガスの排出削減のため，自動車の燃費向上が叫ばれている．そのため，車体の軽量化が進められており，構造部材ごとに材質を変更して強度と軽量化を両立させるマルチマテリアル化もその手法の一つである．この取り組みにおいては，従来の鋼製部品から軽量なアルミニウム合金製へ置換したり，板厚を削減するために高張力鋼板へ置換する動きがみられる．ここで，鋼/アルミニウム合金異材接合の需要が生じるが，両材料を溶融接合した場合，接合界面に脆弱な続巻化合物 (IMC)が生成し，強度が低下する問題が生じる．溶融接合によって十分な接合強度を得るためには，IMC の生成を非常に薄く抑制する必要がある．

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・レーザブレージング法と呼ばれるろう付け技術の開発を行っている．本施工法の概略図を Fig. 5.1 に示す．本施工法では，ろう材である添加ワイヤを融点直下まで通電加熱させるホットワイヤ法と，ビーム形状および出力を容易に制御できる半導体レーザを組み合わせることで，母材およびろう材への入熱を抑制することができる．これにより，本施工法では IMC の生成を 1μm 程度まで抑制させ，十分な強度を持った継手を作製することができる．

現在本研究では，本施工法特有の鋼/ろう材間接合現象の解明を目指している．これまでの研究，および 2022 年度に本プログラムで行った研修の結果 [1)]から，添加ワイヤに含まれる Si の有無が IMC の生成現象に影響することが分かった．2 種類の添加ワイヤを作製して継手を作製し，接合界面に対し元素分析を行った結果，Fig. 5.2 に示すように Si 入りワイヤを用いた場合は界面に Fe-Al-

Si の 3 元系 IMC が薄く生成した．一方，Si を含まないワイヤを使用した場合は Fig. 5.3 に示すように Fe-Al の 2 元系 IMC が比較的厚く，そして 2 層生成していた．この結果から，Si が IMC の生成を抑制する効果があることが分かった．そこで今回は，ワイヤに含まれる Si が IMC 生成現象に与える影響を定量的に評価するため，Si 添加量が異なる 2 種類のワイヤで継手を作製し，接合界面の詳細な分析を実施した．

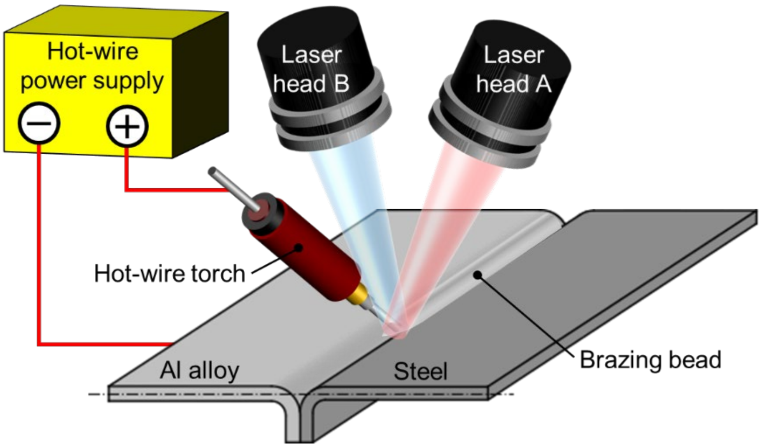


Fig. 5.1 Schematic illustration of Hot-wire laser brazing.

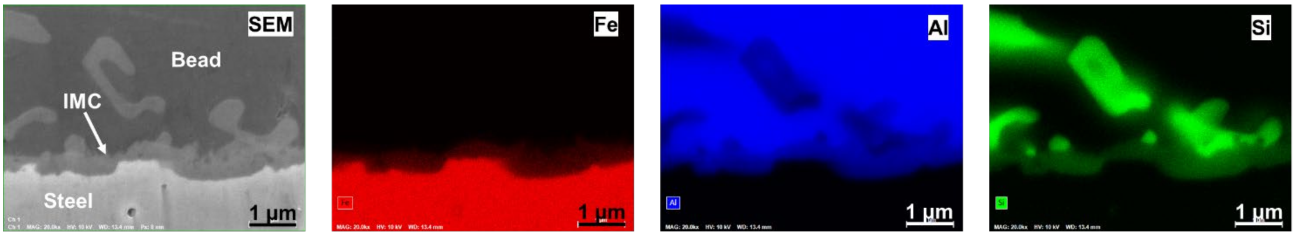


Fig. 5.2 Cross-section at 270 MPa steel / Alu19 (Al-Si) bead interface.

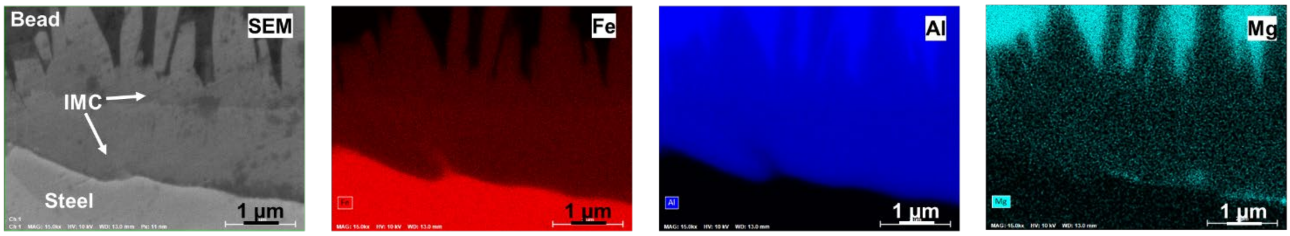


Fig. 5.3 Elemental analysis result of 270 MPa steel / A5183-WY (Al - Mg) bead interface.

5.2 供試材料および実験・分析条件

接合界面の分析に使用する試験片は，母材鋼板にろう材を供給するビードオンプレートブレージングにより作製した．母材鋼板には270MPa級冷間圧延鋼板（$100^{l}\times100^{w}\times0.8^{t}$ mm)を使用し，ろう材の濡れ性を確保するためにブレー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. 5.4に，鋼板の化学組成をTable 5.1に示す．ろう材として使用したワイヤは，Si量が異なる3種類を用い，各ワイヤを使用して3種類の継手を作製した．ワイヤの化学組成をTable 5.2に示す．なお，Alu19ワイヤの組成は本プログラムの研修期間中，マギル大学のLang Shi教授の協力の元，電子線マイクロアナライザ（EPMA）を用いたワイヤの成分分析を行って得られた値を示している．

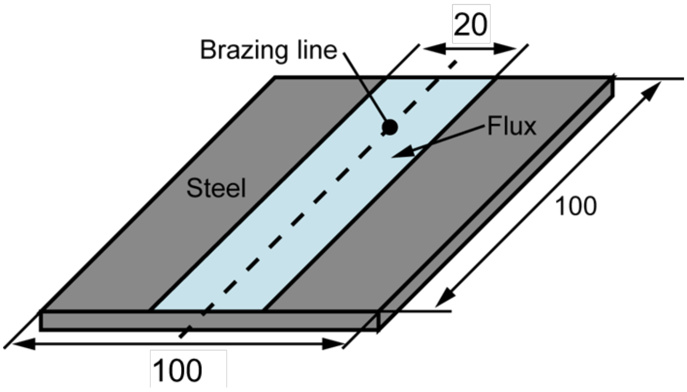


Fig. 5.4 Schematic illustration of base steel sheet.

Table 5.1 Chemical compositions of base steel sheet.

Material	Chemical compositions, mass %					
	C	Si	Mn	P	S	Fe
270 MPa class cold-rolled steel	0.002	0.004	0.09	0.016	0.004	Bal.

Table 5.2 Chemical compositions of filler wire.

Material	Chemical compositions, mass %								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Alu19	13.18	0.082	0.017	0.008	0.02	0.005	-	-	Bal.
M4043	4.5~6	0.80	0.30	0.05	0.05	-	0.10	0.20	Bal.
A5183-WY	≤0.40	≤0.40	≤0.10	0.50~1.0	0.05~0.25	0.17	0.25	≤0.15	Bal.

継手作製時の実験装置概略図をFig. 5.5に，ブレージング条件をTable 5.3に示す．ワイヤをブレージング方向後方から送給し，レーザスポットサイズはφ5 mmの丸形ビームと5×11の矩形ビームを照射した．

作製した継手をFig. 5.6に示すように切断し，樹脂込め・研磨・琢磨を行い断面観察を行った．走査型電子顕微鏡（SEM)を用いて高倍率でIMCの生成形態を観察し，エネルギ分散型X線分光法(EDS)によりIMCの成分分析を実施した．

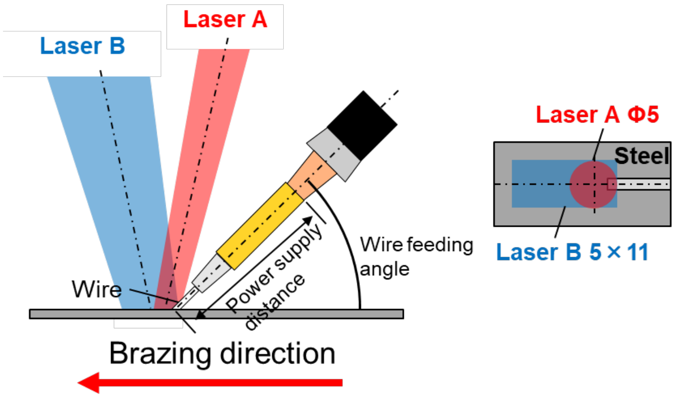


Fig. 5.5 Schematic illustration of bead-on-plate brazing.

Table 5.3 Brazing conditions.

Laser power (A + B), kW		3 + 3
Brazing speed, m/min		5
Wire feeding speed, m/min		12.5
Wire feeding angle, deg		45
Power supply distance, mm		50
Ar shield gas, L/min	Coaxial	30
	After	40

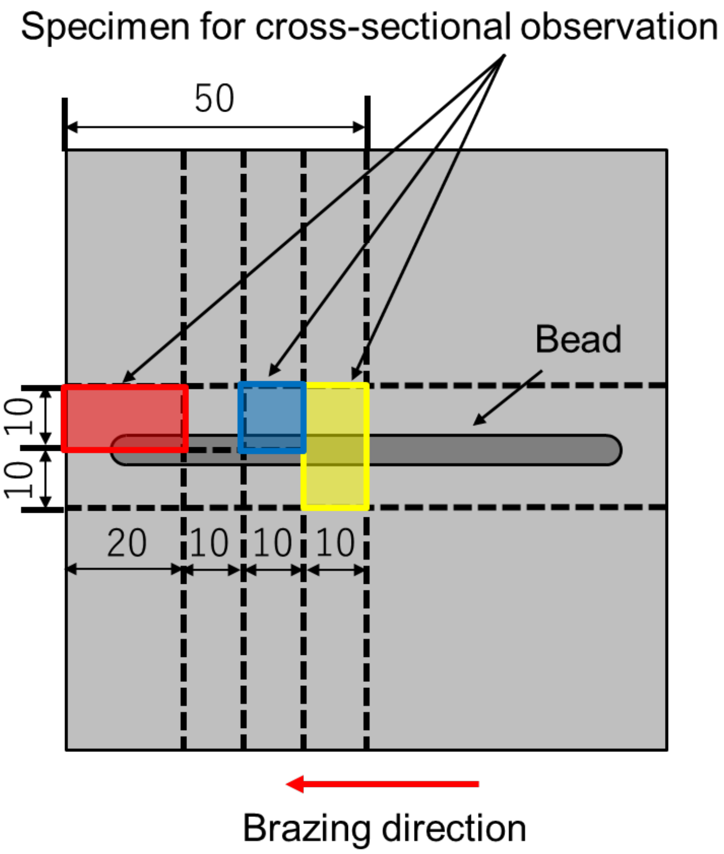
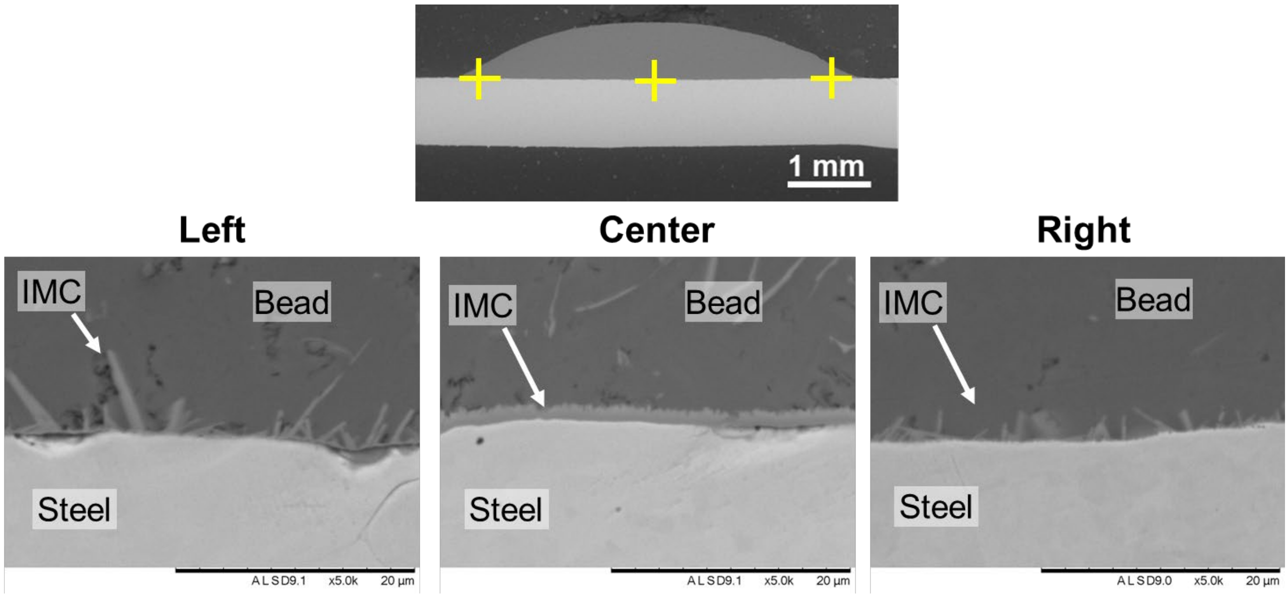


Fig. 5.6 Cutting line of the specimen.

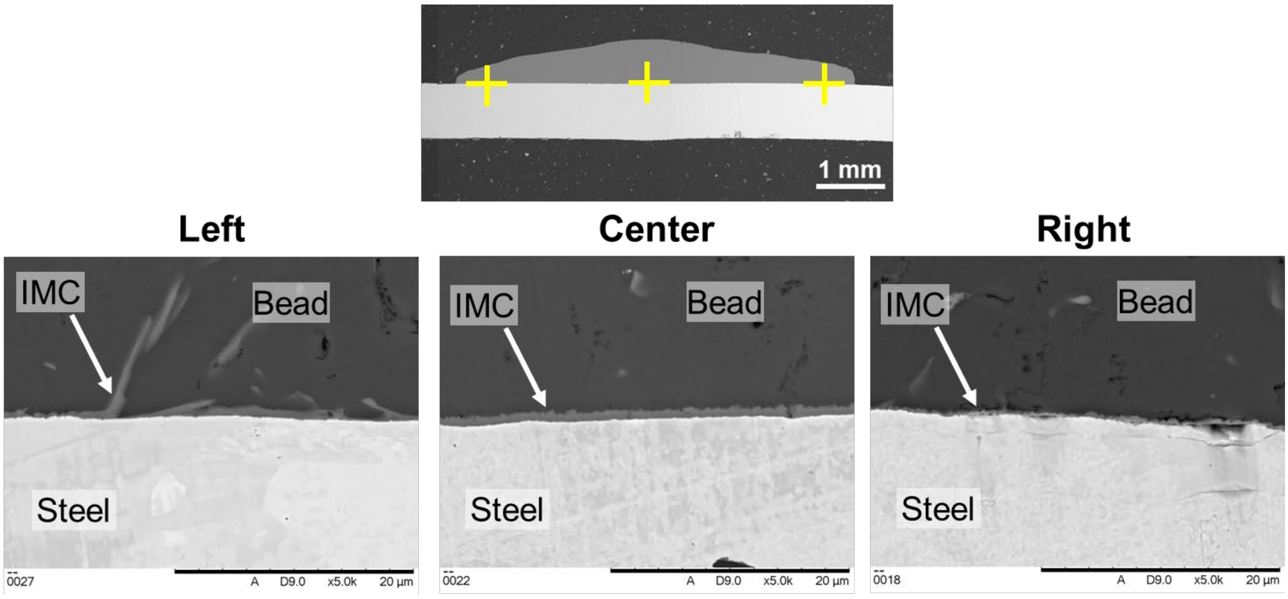
5.3 分析結果および考察

5.3.1 IMC 生成厚さ測定結果

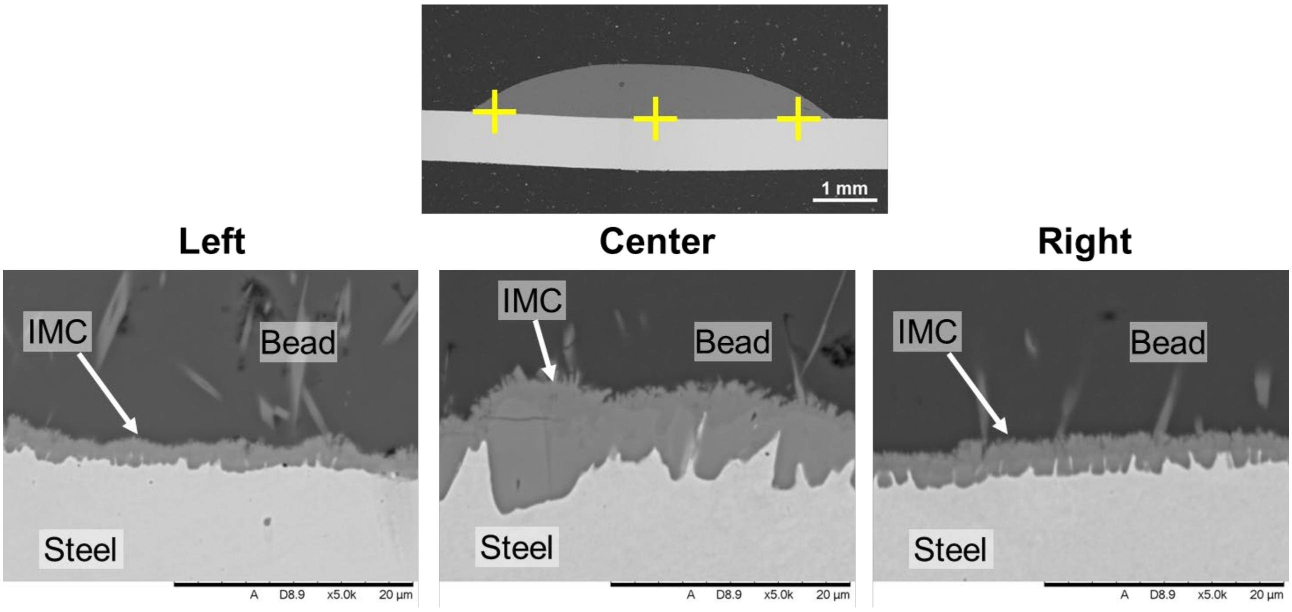
各試験片のビードをブレージング方向と直角に切断した断面を Fig. 5.7 に示す．Si を含む Alu19 および M4043 ワイヤを使用した試験片ではビード中央の接合界面に薄い IMC 層が生成している一方，ビード端部では層状の IMC は生成しておらず，針状の IMC が生成していた．Si を含まない A5183-WY ワイヤを使用した試験片では，ビード端部でも層状の IMC が生成しており，ビード中央部では色の異なる 2 層の IMC が生成していた．また，Si 入りワイヤを使用した 2 種類の試験片では鋼板/IMC 界面が平滑だが，Si なしの A5183-WY ワイヤを使用した試験片では凹凸の激しい界面が見られた．これ A5183-WY ワイヤを使用する場合には，Si 入りワイヤを使用する場合より多くの Fe が IMC 生成に供されるためであると思われる．



(a) Alu19 (Al-13%Si)



(b) M4043 (4.5~6%Si)



(c) A5183-WY (Al-Mg, no Si)

Fig. 5.7 Cross-section of 270 MPa steel / bead joint.

各断面の左端部，中央部，右端部の IMC 層の厚さの計測結果を Fig. 5.8 に示す．なお，層状の IMC が生成していなかった地点の厚さは 0 としている．Si 入りワイヤを使用することで IMC 生成抑制効果が表れていることが分かる．Si 量が異なるワイヤを使用した 2 種の試験片で比較すると，IMC 厚さに大きな差は見られなかった．

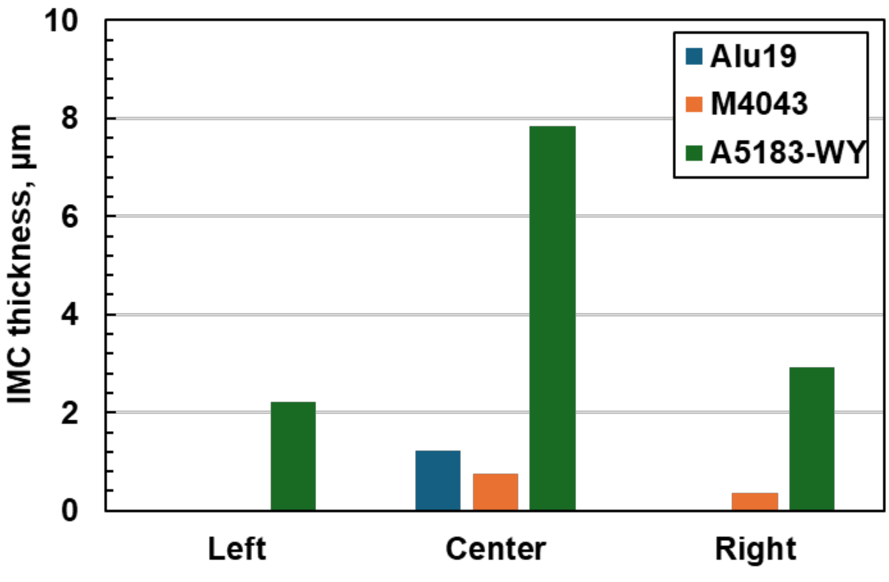


Fig. 5.8 IMC thickness at 3 areas.

5.3.2 IMC の成分分析結果

各試験のビード中央部に生成した層状 IMC に対し，EDS による成分分析を行った．各断面における分析点を Fig. 5.9 ~ 5.11 に，それぞれの分析結果を Table 5.4 ~ 5.6 に示す．Si 入りワイヤを使用した 2 種類の試験片では，Fe-Al-Si の 3 元系 IMC が生成していることが分かる．一方，Si なしワイヤを使用した試験片では Fe-Al の 2 元系 IMC が生成していることが分かる．Si 入りワイヤを使用した 2 種類の試験片の分析結果を比較すると，IMC に含まれる Si 量は Alu19 使用時の方がわずかに多くなっていた．この結果から，ワイヤの Si 含有量を変化させることで，生成する IMC の相が変化することが示唆された．

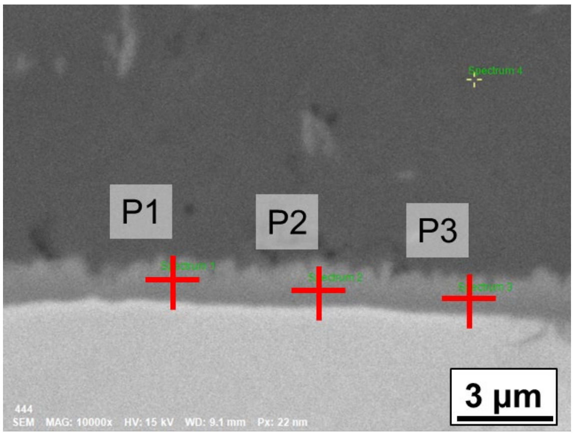


Fig. 5.9 Analysis points at steel/Alu19 interface.

Table 5.4 EDS result at steel/Alu19 interface.

	Composition, mass%				
	Fe	Al	Si	Mg	Mn
P1	38.67	47.08	7.41	0.00	0.03
P2	41.22	42.19	8.03	0.00	0.10
P3	40.44	51.20	7.89	0.14	0.10

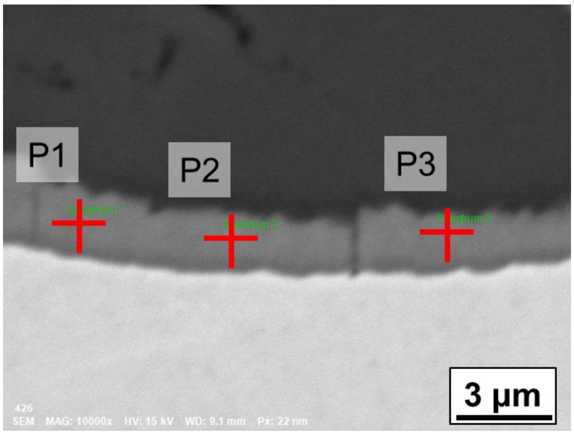


Fig. 5.10 Analysis points at steel/M4043 interface.

Table 5.5 EDS result at steel/M4043 interface.

	Composition, mass%				
	Fe	Al	Si	Mg	Mn
P1	32.51	54.69	5.47	0.11	0.01
P2	34.37	48.58	4.37	0.00	0.02
P3	31.32	60.98	5.78	0.22	0.00

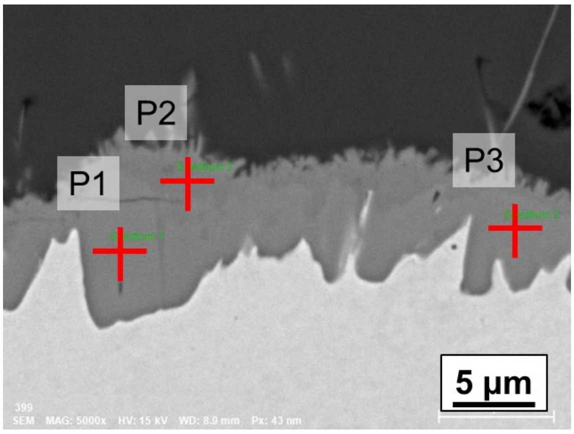


Fig. 5.10 Analysis points at steel/A5183-WY interface.

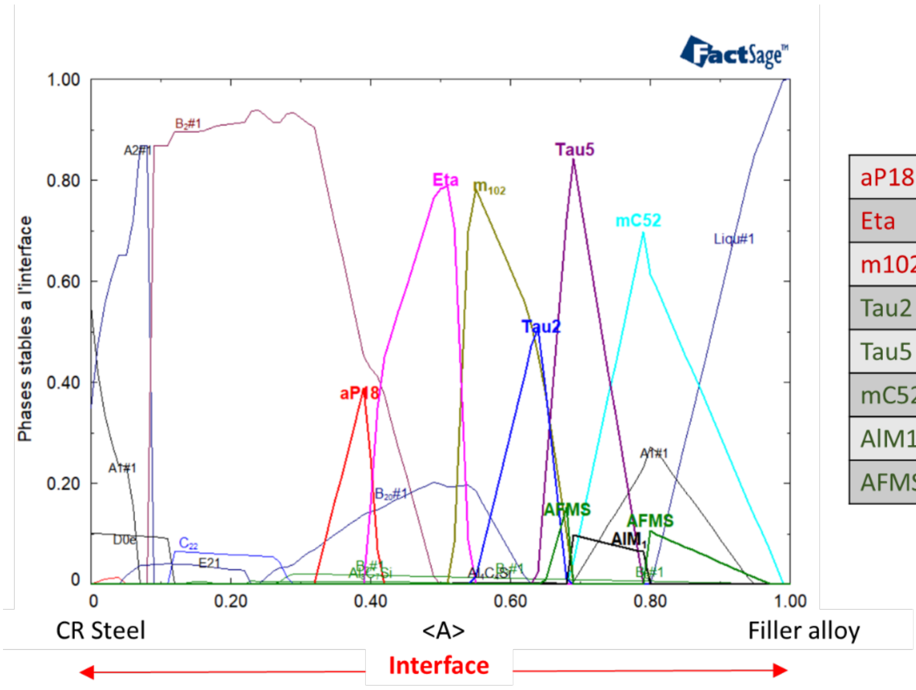
Table 5.6 EDS result at steel/A5183-WY interface.

	Composition, mass%				
	Fe	Al	Si	Mg	Mn
P1	43.63	56.18	0.13	0.03	0.03
P2	39.83	59.47	0.08	0.39	0.23
P3	45.22	54.43	0.11	0.19	0.05

5.3.3 IMC 生成の熱力学的シミュレーション結果

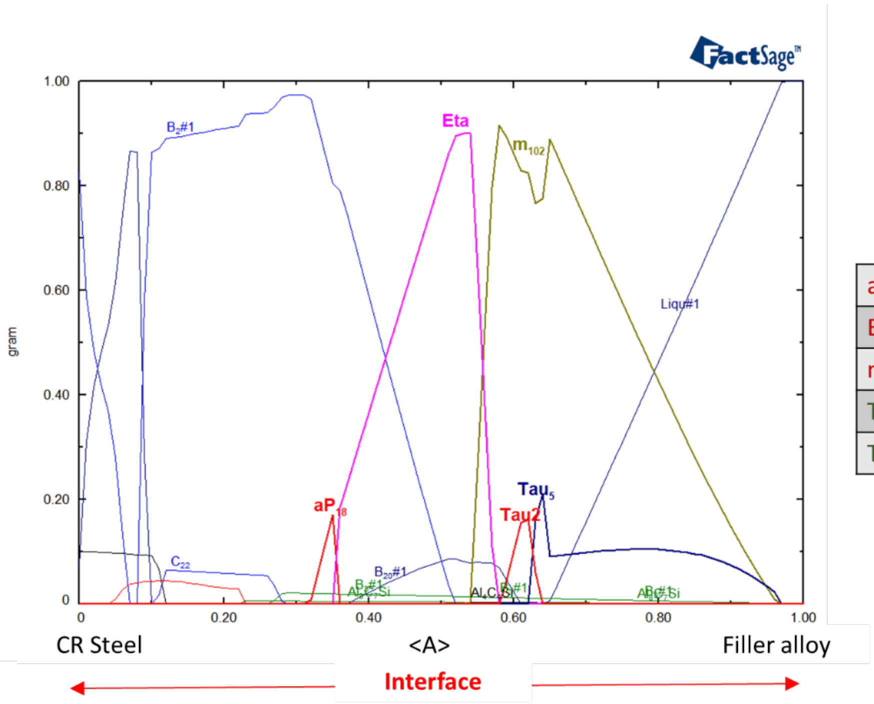
ÉTS の LIPPS (製品・プロセス・システムエンジニアリング研究室) Elmira Moosavi 教授の協力の元，本施工法での鋼とろう材の反応を熱力学的計算によりシミュレーションし，生成する IMC の相を予測した．多元系熱力学計算ソフト FactSage に鋼板，ワイヤの化学組成，ワイヤの融点を入力し，各ワイヤの融点より 5 度高い環境で鋼板/ろう材界面において生じる反応を計算した．なお，ワイヤの融点は Alu19 を 583℃，M4043 を 633℃，A5183-WY を 660℃とした．

各ワイヤ使用時に接合界面で生成しうる IMC の相，およびそれらの生成安定度を Fig. 5.10～5.12 に示す．3 元系 IMC に着目すると，Alu19 使用時には AlFeSi-α や AlFeSi-β の安定性が高く，M4043 使用時には AlFeSi-α や AlFeSi-γ の安定性が高いことが分かる．この結果から，添加ワイヤを変更することで，生成する IMC の相も変化する可能性が示唆された．ただし，IMC 生成相の違いにはワイヤの融点の違いなど，Si 以外の要素も原因として絡んでいると考えられ，より詳細な分析・考察が求められる．



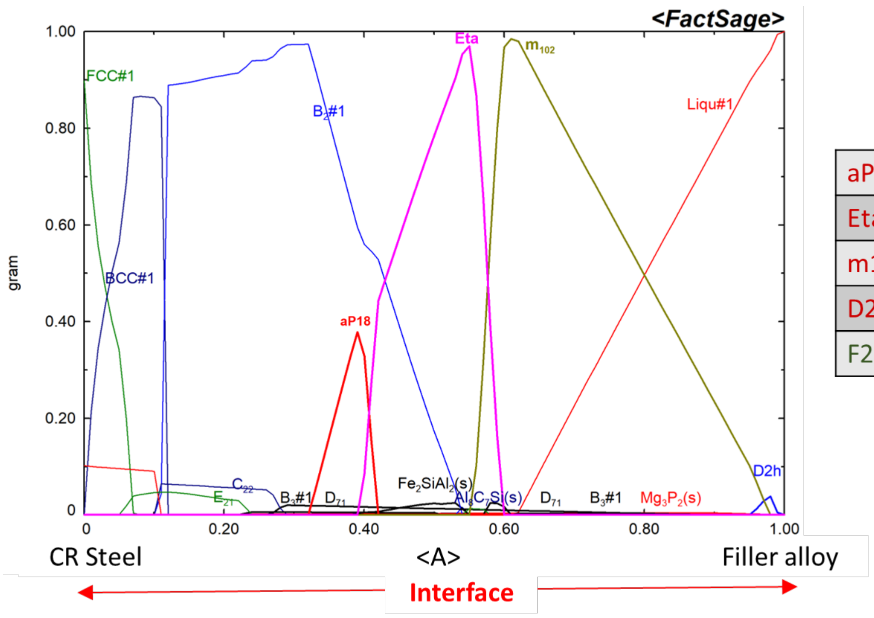
aP18	Al2Fe (ζ)
Eta	Al5Fe2 (η)
m102	Al13Fe4 (θ)
Tau2	AlFeSi-γ
Tau5	AlFeSi-α
mC52	AlFeSi-β
AlM1	AlMnSi
AFMS	AlFeMnSi-α

Fig. 5.10 Thermodynamic calculation result of steel/Alu19 brazing.



aP18	Al2Fe
Eta	Al5Fe2
m102	Al13Fe4
Tau2	AlFeSi-γ
Tau5	AlFeSi-α

Fig. 5.11 Thermodynamic calculation result of steel/M4043 brazing.



aP18	Al2Fe
Eta	Al3Fe
m102	Al13(Fe,Mn)4
D2h	Al6(Fe,Mn)
F2SA2	Fe2SiAl2

Fig. 5.12 Thermodynamic calculation result steel/A5183-WY brazing.

5.4 結言

添加ワイヤの Si 含有量が IMC 生成現象に与える影響を解明するため，3 種類の継手の鋼/ろう材間の詳細な分析を行った結果，Si 量が 4.5~6%の場合と 13%の場合で IMC の生成厚さに大きな違いはないが，IMC に含まれる Si 量にわずかな違いがあることが示された．本施工法を模擬した熱力学的シミュレーションを行った結果，使用する添加ワイヤによって生成する IMC の相が異なることが示唆され，分析結果とシミュレーション結果の傾向が一致していた．このように，ワイヤの Si 量が変化することで IMC 生成現象に影響を与える可能性が示された．今後はこのような現象の違いが発生する仕組みをより詳細に調査する必要がある．

6. まとめ

今回は自身にとって 2 回目の海外共同研究であり，前回と同じ派遣先で研究生活を送ったが，前回以上の貴重な経験を積むことができた．研究面では，日本の研究生活で使用する機会がなかった高性能な分析装置を新たに利用でき，これまでとは違った角度から研究を進めることができた．LOPFA の研究者には溶接以外を専門としている方も多い中，彼らと議論することで他分野からの知見を得ることができ，今後の研究活動にとって有意義な経験となった．また，現地の学生や各国から集まったインターン生と共に研究生活を過ごしたことで，自身のグローバルな視点をさらに成長させることができた．加えて今回は他研究室や他大学とも協力して研究を遂行することができ，自身の研究をさらに進歩させたとともに，交流の幅を広げることができた．生活面では，感染症の影響が消え，人々の往来が活発となったモントリオールの本来の姿を感じることができた．特に，日本よりも人々が積極的に会話をしている様子が印象的であり，会話によるコミュニケーションが重要であることを実感した．また，複数の文化が混ざり合い，共存している様子に感心したとともに，共存する故の問題を知ることもできたため，国際教養に対する理解を深めることができたと考えている．本プログラムで得た経験値は，研究面・生活面ともに自身にとって非常に重要なものであり，今後国際的な舞台で活躍するためにこの経験を活かしていきたいと思う．

7. 参考文献

1) 伊藤環: ケベック高等工科大学（カナダ）研修報告書 -ホットワイヤ・レーザブレージング法により作製した鋼/アルミニウム合金継手の IMC 成分分析-, 2022 年度派遣学生最終報告書 (2022).

8. 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施設や宿泊施設，そして派遣先での生活に関して手厚い準備・協力をしていただいたケベック高等工科大学 Philippe Bocher 教授，Yasser Zedan 研究員，Julien Milanese 研究員，コミュニケーション・プロジェクトマネージャーの Aude Ségur 様，ならびに LOPFA の皆様に厚く御礼申し上げます.

本共同研究において，研究室の垣根を越えて研究遂行に協力していただいた LIPPS およびマギル大学の皆様に深く感謝申し上げます.

このような貴重な機会を提供してくださるとともに，本研究への助言，準備をしていただいた広島大学先進理工系科学研究科　山本元道教授に深く感謝申し上げます.

派遣前の手続きをはじめ，本プログラムに対して多大なご協力をいただいた実行委員会の諸先生ならびに学生支援グループを国際事業担当の皆様に心より感謝の意を表するとともに，本プログラムの益々のご発展をお祈り申し上げます.