
ケベック高等工科大学（カナダ） 研修報告書

ホットワイヤ・レーザブレイ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

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

2022年7月25日から同年8月13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. 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なっている。現在、本施工法における添加ワイヤの違いが鋼/ろう材間の金属間化合物の生成形態に与える影響を調査している。一方、カナダのケベ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製した2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. 共同研究スケジュール

7月25日 出国

7月26日～8月11日 研究

8月12日～8月13日 帰国

4. 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. 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。本施工法を用いることで、鋼/アルミニウム合金フレア継手の高速施工が可能となった。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に2種類のワイヤを使用した継手の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M4043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。

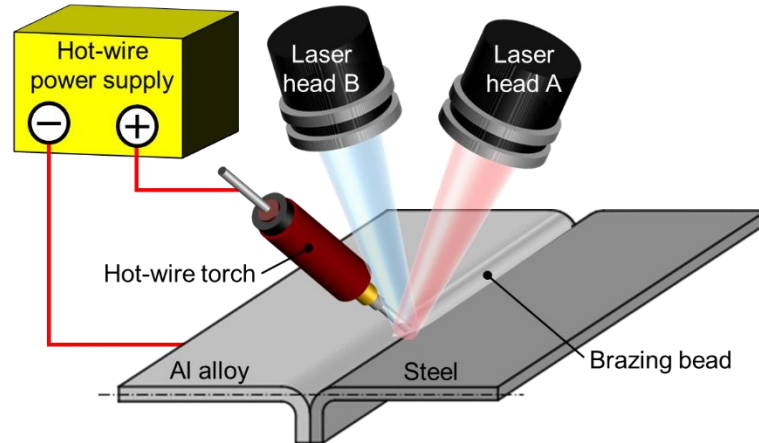
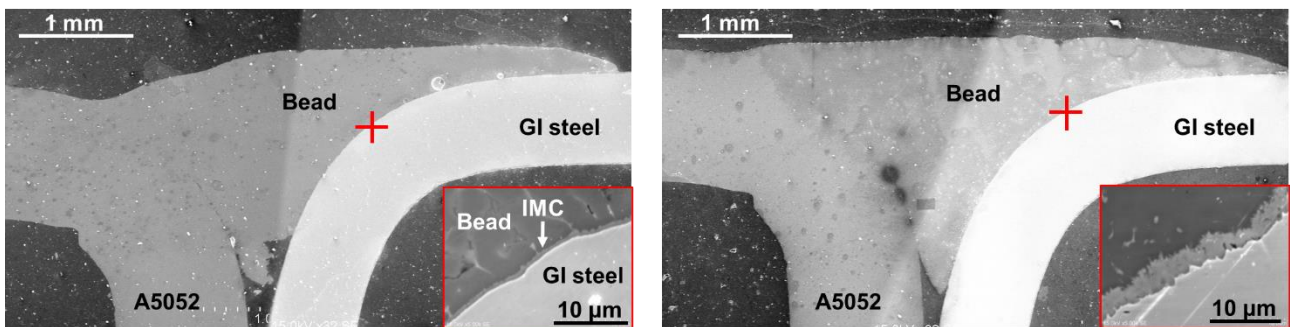


Fig. 5.1 Schematic illustration of Hot-wire laser brazing for flare joint.



(a)M4043 wire

(b)A5183-WY wire

Figs. 5.2 Cross-sections of 270MPa steel / AA5052 flare joint.

5.2 供試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(100mm^l×100mm^w×0.8mm^t)を使用し、熔融亜鉛めっき鋼板(GI 鋼板)、合金化熔融亜鉛めっき鋼板(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 3 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 入りワイヤとして Alu19 ワイヤ(JIS BA4047)を、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 Table 5.3 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φ5 の丸形ビームと 5×11 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、エネルギー分散型 X 線分光法(EDX)により IMC の成分分析を実施した。

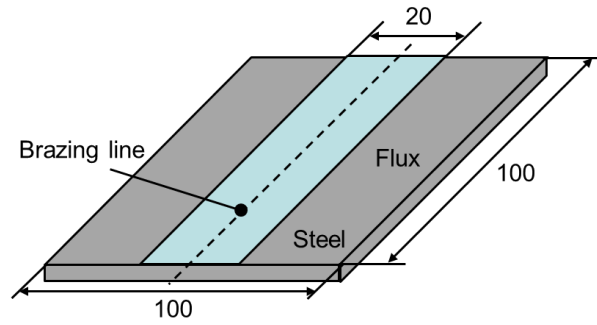


Fig. 5.3 Schematic illustration of the specimen.

Table 5.1 Chemical composition of base 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.
GA steel sheet	45/45	0.002	0.009	0.09	0.011	0.005	Bal.
CR steel sheet	-	0.002	0.004	0.09	0.016	0.004	Bal.

Table 5.2 Chemical composition of filler wire.

Material	Chemical compositions, mass %									
	Si	Fe	Mg	Sn	Mn	Cr	Cu	Zn	Ti	Al
Alu19	12	0.6	0.10	-	0.15	-	0.3	0.2	0.15	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.

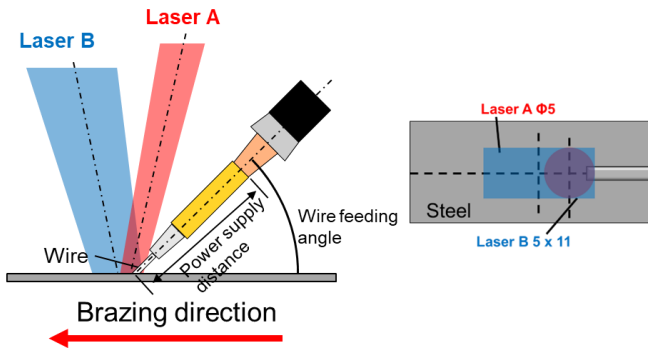


Fig. 5.4 Schematic illustration of arrangement.

Table 5.3 Brazing condition.

Laser power (A + B), kW	3 + 3	
Brazing speed, m/min	5	
Wire feeding speed, m/min	12.5	
Wire feeding direction	Backward	
Ar shield gas, L/min	Coaxial	30
	Backward	40

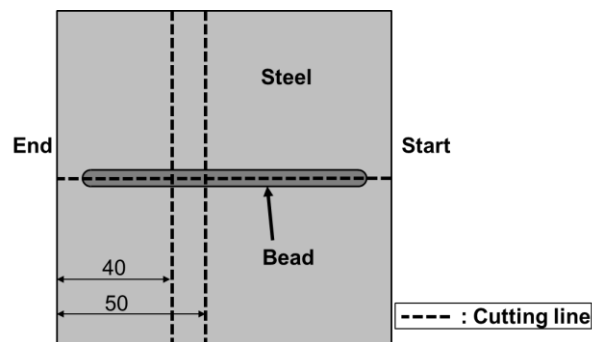


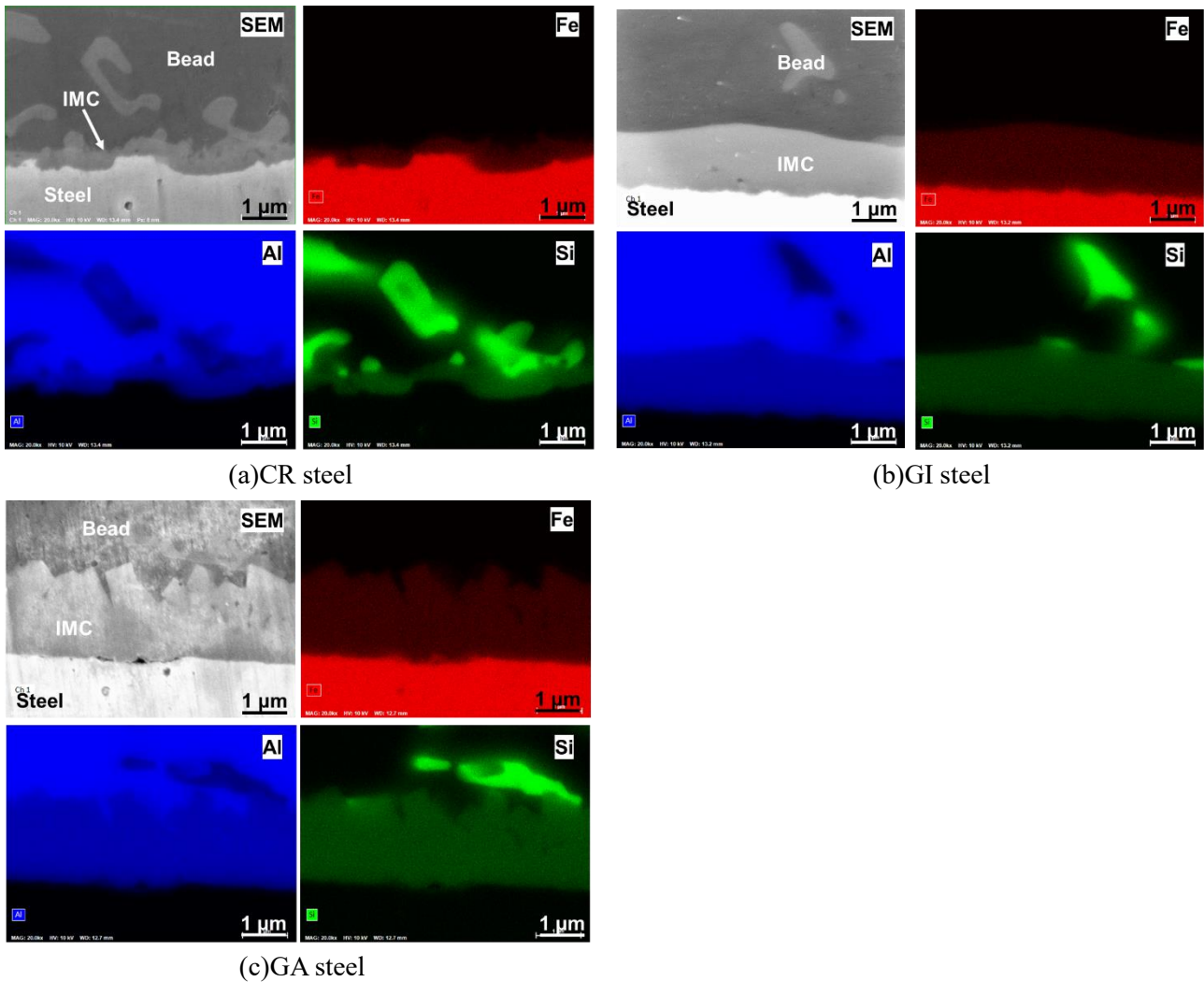
Fig. 5.5 Cutting line of the bead-on-plate brazing specimen.

5.3 実験結果および考察

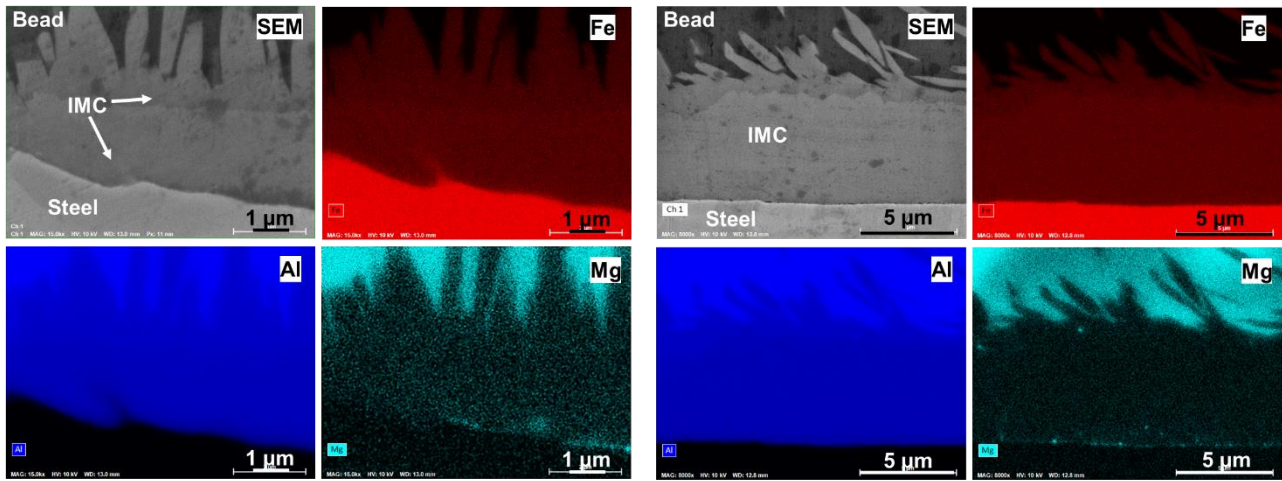
Figs. 5.6 に Alu19 ワイヤを使用した試験片の元素マッピングを, Figs. 5.7 に A5183-WY ワイヤを使用した試験片の元素マッピングを示す. Si 入りワイヤを使用した試験片では, Fe, Al, Si からなる薄い IMC の生成が確認された. 一方, Si を含まないワイヤを使用した試験片では, 2 層の Fe-Al 系 IMC に加えて柱状の IMC が確認され, これらの厚さは Si 入りワイヤを使用した試験片より厚くなっていた. この結果から, Si 入りワイヤを使用することで IMC 生成厚さが抑制されていることを再確認できた.

Figs. 5.6, 5.7 の断面において, IMC の成分分析を複数点で行った. Figs. 5.8 に Alu19 ワイヤを使用した試験片の点分析結果を, Figs. 5.9 に A5183-WY ワイヤを使用した試験片の点分析結果を示す. Si 入りワイヤを使用した試験片は IMC 内で Fe, Al, Si が検出され, これら 3 元素の割合は鋼板の種類に関わらずほぼ同じであった. この結果から, Fe, Al, Si の反応によって薄い三元系 IMC が初出し, その後反応が進行せずに冷却されたと思われる.

一方, Si を含まないワイヤを使用した試験片は IMC 内で Fe, Al が検出され, 2 層の IMC の内, 鋼板側の層の方が Fe の割合が大きかった. この結果から, Fe, Al の反応によって Fe-Al 系 IMC が鋼板/熔融池界面で初出し, その後熔融池と初出 IMC が反応して, 初出 IMC より Al リッチな IMC が生成したと考察している.

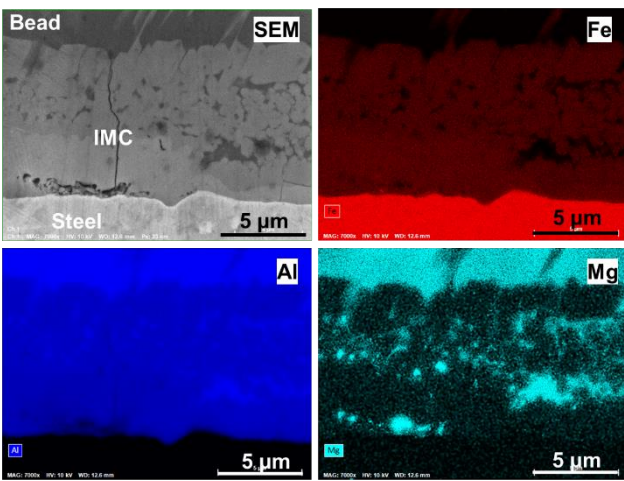


Figs. 5.6 EDX mapping of 270MPa steel / Alu19 specimens.



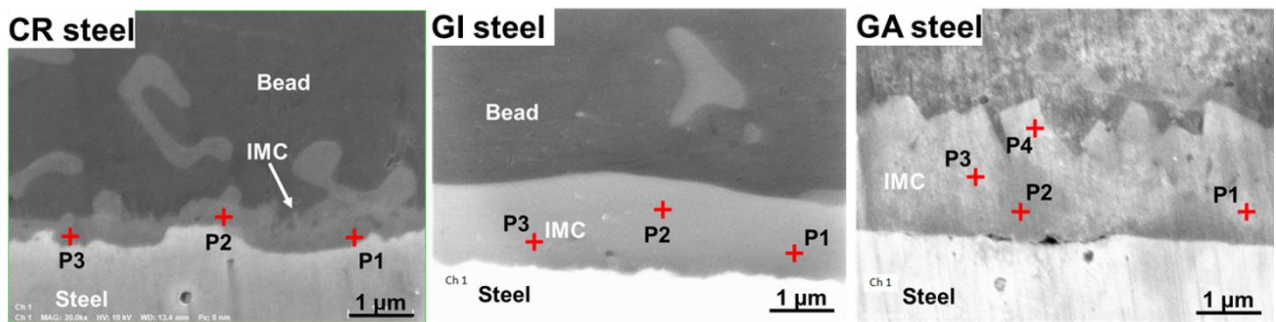
(a)CR steel

(b)GI steel



(c)GA steel

Figs. 5.7 EDX mapping of 270MPa steel / A5183-WY specimens.



Atomic concentration (IMC) [%]

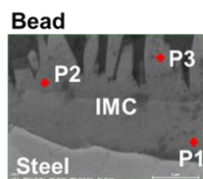
CR	Fe	Al	Si
P1	29.49	50.25	20.26
P2	25.30	57.91	16.79
P3	26.60	59.33	14.07

GI	Fe	Al	Si
P1	22.36	61.77	15.82
P2	20.09	62.20	17.65
P3	22.42	61.69	15.87

GA	Fe	Al	Si
P1	26.39	58.69	14.79
P2	27.28	57.60	15.01
P3	25.65	59.29	15.02
P4	26.22	58.51	15.20

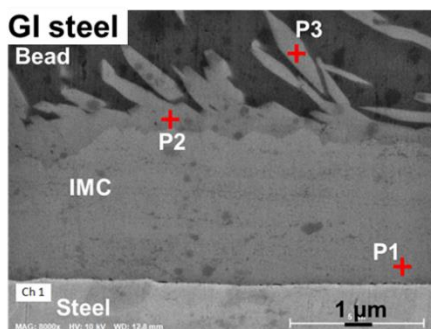
Figs. 5.8 Result of spot-scan of 270MPa steel / Alu19 specimens.

CR steel



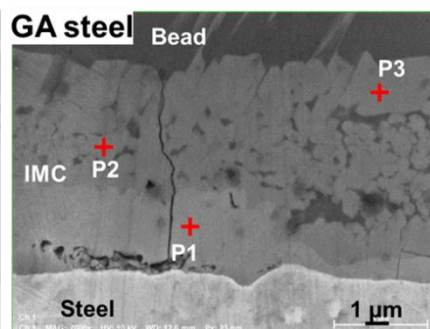
1 μm

GI steel



1 μm

GA steel



1 μm

Atomic concentration [%]

CR	Fe	Al	Mg
P1	32.08	67.22	0.69
P2	27.33	71.85	0.82
P3	22.46	76.18	1.36

GI	Fe	Al	Mg
P1	35.43	63.42	0.57
P2	28.93	69.92	0.70
P3	25.20	74.01	0.08

GA	Fe	Al	Mg
P1	52.84	45.60	0.32
P2	47.90	50.96	0.57
P3	48.46	50.24	0.32

Figs. 5.9 Result of spot-scan of 270MPa steel / A5183-WY specimens.

6. まとめ

今回の海外共同研を通して、海外の研究機関で自身の研究に取り組むという貴重な機会を頂いた。異文化の生活や、英語で研究について議論するなど、慣れない環境に初めは戸惑ったが、次第に日本との文化や研究スタイルの違いに気付くようになり、その違いを楽しむことができるようになった。モントリオールの人々は非常に親切で、明るい人柄の方が多く印象を受けた。おかげで、初めて訪れた土地だったが快適に過ごすことができた。派遣先の研究室 LOPFA では、積極的に学生や教授とコミュニケーションをとり、自身の研究を理解してもらうことの重要性を実感した。LOPFA には世界中から学生が集まっているため、カナダ以外の国についての理解を深めることもでき、彼らのような様々な人種の人々が研究活動に適応しやすい環境が整っているとも感じた。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に必要な経験ができ、今後の自身の研究活動に活かしていきたいと考えている。

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、支援をしてくださいましたケベック高等工科大学 Philippe Bocher 教授、Yasser Zedan 研究員、Mohsen Mokhtabad Amrei 研究員、研究助手 Mohammad Saadati 氏に厚く御礼申し上げます。

このような貴重な機会を与えてくださるとともに、本研究への助言、準備をしてくださいまし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。

派遣前の手続きから派遣後の研修に至るまで、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ならびに学生支援グループ国際事業担当の皆様にご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。