
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成した
鋼 / アルミニウム合金継手における継手強度特性調査

工学研究科 機械物理工学専攻 高野 彬

1. はじめに

2019年8月7日から8月29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。その報告を以下に示す。

2. 共同研究課題の決定

本研究室では、鋼/アルミニウム合金の異材接合を、レーザブレイジングにて行う方法に、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を組み合わせたホットワイヤ・レーザブレイジング技術の開発を行っている。他方、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対象としており、接合継手の作製や分析、継手強度評価が盛んに行われている。そこで、今回は本研究室においてホットワイヤ法を用いた異材接合継手において実施した継手強度評価をもとに、継手強度に重要な接合状態や接合箇所の分析を行った。

3. 共同研究のスケジュール

8月7日 出国
8月8日～8月29日 研究
8月30日 帰国

4. 共同研究派遣先の概要

大学名：Ecole de technologie superieure
所在地：カナダ ケベック州 モントリオール
指導教員：Prof. Phillippe Bocher

5. 共同研究内容

5.1 概要

近年地球温暖化の問題が重要視されている。このため自動車業界では燃費の向上によるCO₂の削減が重要な課題とされている。この課題に対して自動車業界では電気自動車などの使用も積極的に行われている。しかし、電気自動車や従来の化石燃料を消費して走行する自動車において走行に必要なエネルギーの削減は重要な課題である。このため自動車業界では自動車車体重量の軽量化が進められている。この方法として自動車車体における使用材料のマルチマテリアル化が行われている。この中でもとりわけ一般鋼板とアルミニウム合金による車体構造材料の適正化が見込まれている。このため一般鋼板とアルミニウム合金における直接異材接合技術の開発が行われている。しかし、一般的に溶接を用いた溶融接合法では接合界面において脆弱な金属間化合物(以下 IMC, Inter Metallic Compound とする)が厚く生成する問題が挙げられており実用化されておらず、機械的接合方法、摩擦攪拌接合、またろう付けといった方法にて行われている。

本研究ではホットワイヤ・レーザブレイジング法を用いることで薄板一般鋼板およびアルミニウム合金におけるフレア異材継手の作製を行っている。Fig 5.1.1 に本施工法の概略図を示す。本研究では作製した継手に対して定常部において外観評価を行った後に、外観上無欠陥であるものに対して、せん断引張試験を実施することで継手強度評価を行っている。Fig 5.1.2 には継手評価に用いた試験片の所得場所および継手強度評価用の試験片サイズ、断面観察用試験片の所得場所の模式図を示す。現段階では継手強度に重要な因子の特定や分析を行うことが出来ていない。このため今回の海外共同研究ではフレア継手における接合状態の分析を行ったものを以下で報告する。

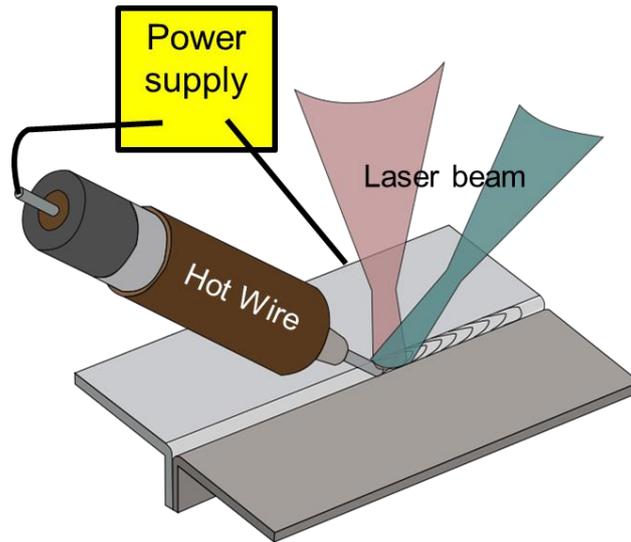


Fig 5.1.1 Schematic illustration of Hot-Wire Laser Brazing for Flare joint.

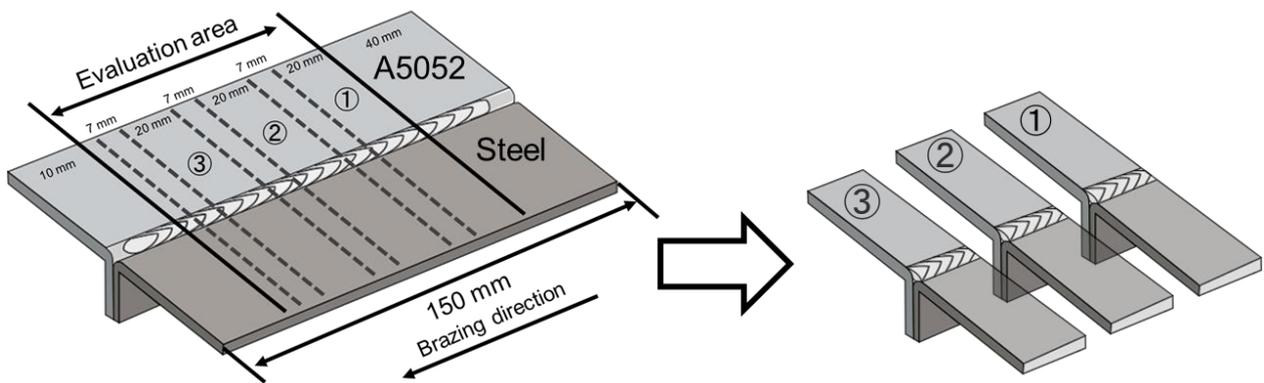


Fig 5.1.2 Schematic illustration of joint for evaluation.

5.2 実施項目

5.2.1 レーザ共焦点顕微鏡を用いたフレア継手破面観察

本項目では本研究において実施したせん断引張試験による破断後の試験片に関して破面の観察を行ったものについて報告する。Fig 5.2.1.1 には観察場所に関する模式図を示す。今回は派遣先研究室が所有しているレーザ共焦点顕微鏡(OLYMPUS 製)を使用した。本使用機器を用いることで破面の凹凸などの情報や画像の取得を行った。

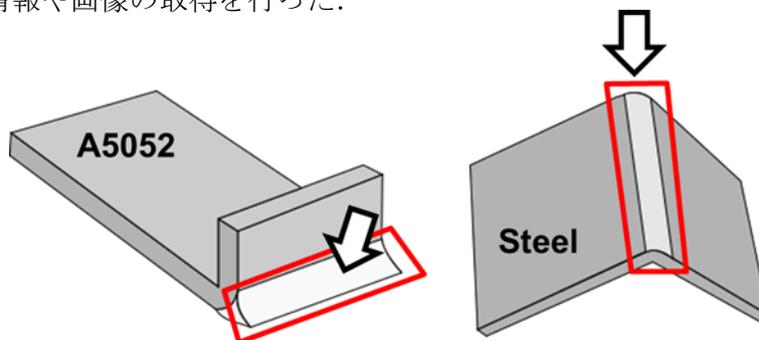


Fig 5.2.1.1 Schematic illustration of observation area for fracture surface

5.2.2 卓上顕微鏡を用いたフレア継手断面観察

本項目では派遣先研究室の所有している卓上顕微鏡(HITACHI 製)を使用し試験片の接合状態の調査として継手断面の観察を行った結果について報告する. 今回の観察対象としては各種鋼板における IMC 生成厚さについて調査することを目的に観察を行った. Fig 5.2.2.1 に観察対象部の模式図を示す. 観察対象に関しては鋼板の表面を基準面として任意の 5 か所の IMC 厚さの測定を行った. それぞれの観察箇所における基準面からの距離を計測することで継手接合界面全体に渡って IMC の生成について調査を行った結果を報告する.

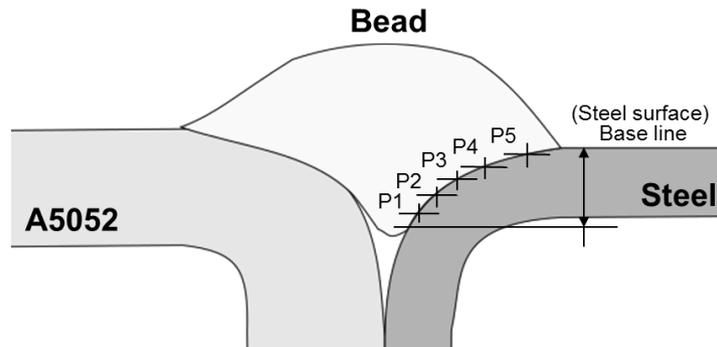


Fig. 5.3.1 Schematic illustration of the measurement area for the lap fillet joint's cross-section.

5.3 実験条件

Fig 5.3.1 に本研究で作製を行ったフレア継手の試験片形状を示す. 鋼板, A5052 板ともに幅 100 mm, 長さ 150 mm とし, 幅 20mm の箇所において直角に曲げ, 鋼板および A5052 板の中立軸を一致させた状態で突き合わせた. 本研究ではこれまで一般鋼板側に 270 MPa 級軟鋼板($t=0.8$ mm)として, 溶融亜鉛めっき鋼板(GI 鋼板), 合金化溶融亜鉛めっき鋼板(GA 鋼板, $t=0.8$ mm), ならびにめっき処理されていない冷延鋼板(Cold-rolled steel sheet : CR 鋼板)を用い, アルミニウム合金板には A5052 板($t=1.2$ mm)を用いている.

継手作成時における各種位置関係の模式図を Fig 5.3.2 に, 継手の作製条件表を Table 5.3.1, 5.3.2 に示す. $V_b:V_f=1:2.5$, ワイヤをブレイジング方向前方からの送給, ワイヤ送給位置を丸形スポット中心からブレイジング方向前方に 2.0 mm の位置とし, ブレイジング速度ならびにレーザ出力を変化させ継手の作製を行った. 左右のレーザ加工ヘッドに関して, Table 5.3.2 に示すような構成を用いて $\phi 3$ の丸形と 2.5×8 mm の矩形スポットとした. 各母材の高さ方向の位置関係については, それぞれの表面の高さに 0.2 mm の差を設けることで各母材の中立軸を一致させた状態で施工を行った.

以下の報告項目では上記の実験条件にて作製した継手に対して調査した結果を報告する.

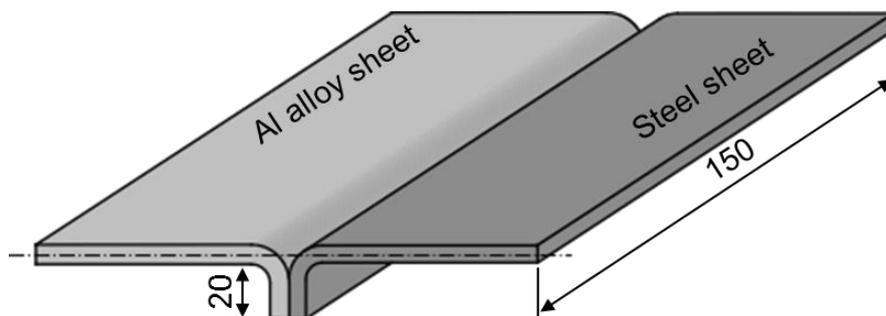


Fig. 5.3.1 Schematic illustration of the specimen for the lap fillet joint.

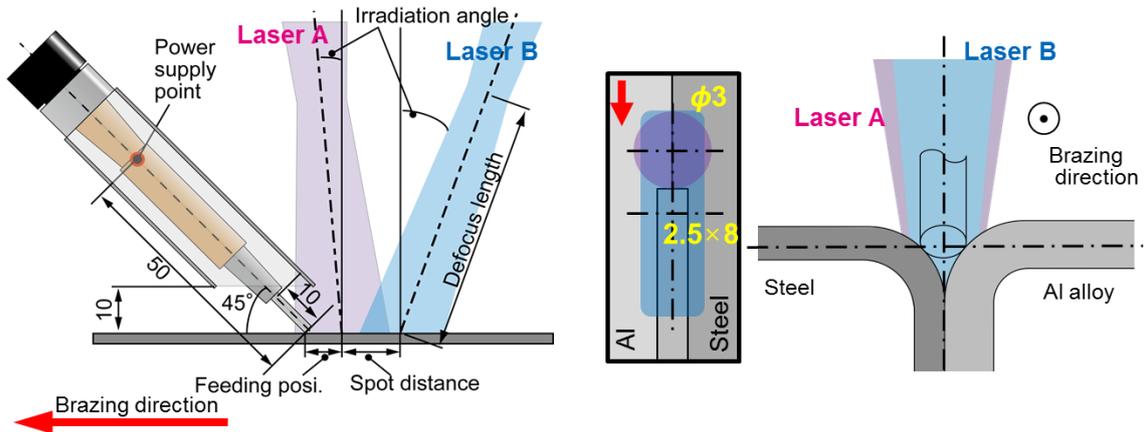


Fig. 5.3.2 Schematic illustrations of arrangement of the laser beam and filler wire.

Table 5.3.1 Brazing condition of 270 MPa steel / A5052 flare joint using FCW.

Laser type		LD
Laser power, kW		4.0 ~ 5.6
Collimator, mm		80
Brazing speed, m/min		5.0 ~ 9.0
$V_b : V_f$		1:2.5
Power supply distance, mm		50
Wire feeding direction		Forward
Wire feeding angle, deg		45
Ar shielding gas, L/min	Coaxial	20
	After	40

Table 5.3.2 Laser irradiation condition of $\phi 3 / 2.5 \times 8$.

	A	B
Core, μm	400	
Focus lens	f600	f500
Homogenizer	none	LL2.146
Defocus length, mm	0	0
Spot size, mm	$\phi 3$	2.5×8
Laser irradiation angle, deg	6.0	-10.5
Laser spot distance, mm	2.5	
Wire feeding position, mm	2.0 (from $\phi 3$)	
Wire feeding position 2, mm	root	
Laser irradiation position, mm	root	

5.3.1 レーザ共焦点顕微鏡を用いたフレア継手破面観察

今回の観察対象としては試験片の準備の関係上 GA, CR 鋼板を用いた継手のみの観察を行った。観察倍率としては最も小さい 50 倍を用いて観察, またデータの取得を行った。今回の観察を行った試験片の実験条件としては比較的入熱の大きい施工速度 5.0 m/min, レーザ出力 5.6 kW, また入熱の小さい条件である施工速度 6.0 m/min, レーザ出力 4.0 kW, さらに施工速度の速い 7.0 m/min, レーザ出力 5.6 kW の 3 条件とした。

5.3.2 卓上顕微鏡を用いたフレア継手断面観察

今回の観察対象として GI, GA, CR 鋼板を用いた試験片の観察を行った。今回の観察を行った試験片の実験条件としては比較的入熱の大きい施工速度 5.0 m/min, レーザ出力 5.6 kW, また入熱の小さい条件である施工速度 6.0 m/min, レーザ出力 4.0 kW の 2 条件とした。

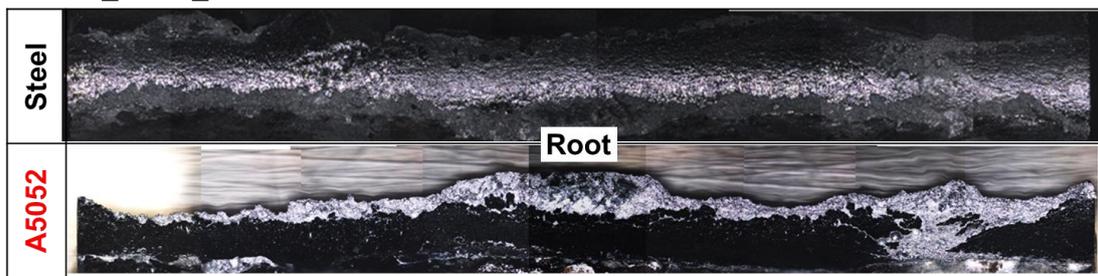
5.4 実験結果および考察

5.4.1 レーザ共焦点顕微鏡を用いたフレア継手破面観察

破面観察の 1 例として, 270MPa 級 GA 鋼板 / A5052 のうち $V_b = 5.0, 7.0$ m/min においてレーザ出力 5.63kW における実験を行った際の継手破面を Fig.5.4.1.1 に示す。同様に CR 鋼板 / A5052 のうち $V_b = 6.0, 7.0$ m/min においてレーザ出力 4.0, 5.63kW における実験を行った際の継手破面を Fig.5.4.1.2 に示す。

本検討によって GA 鋼板を用いた場合においては入熱の低下によって破面に気泡状の欠陥の発生が見受けられ, CR 鋼板の場合ではこのような欠陥は見受けられないものの入熱の低下によって母材 Al 側とビードの接合部の面積が小さくなっていることが継手強度に影響していることが考えられた。

190511_030-3_GA : 5m12.5m6kW



190624_017-1_GA : 7m17.5m6kW

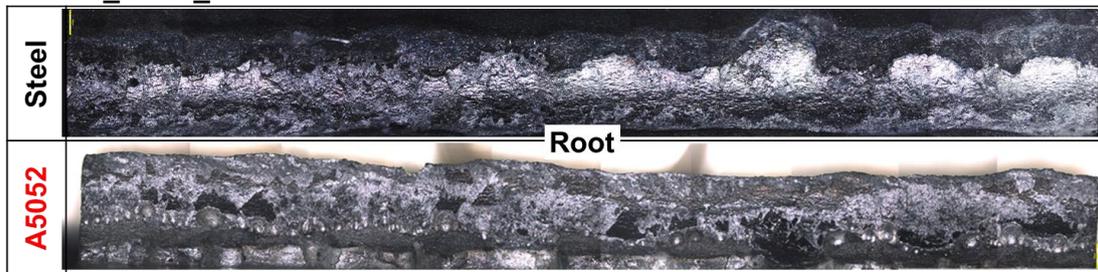
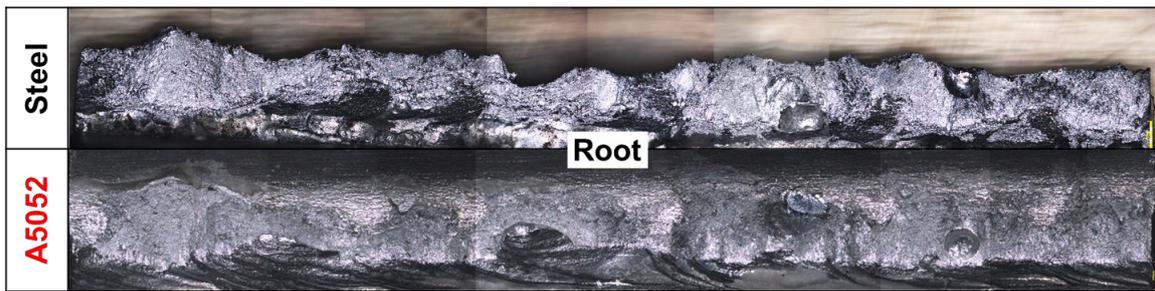


Fig.5.4.1.1 Fracture surface of 270 MPa class GA steel / A5052 flare joint in forward wire feeding,

$V_b:V_f = 1:2.5$, using FCW Alu S4Le, $\phi 3 / 2.5 \times 8$ spot.

190624_015-1_CR_7m17.5m5.6kW



190624_028-1_CR_6m15.0m4.0kW

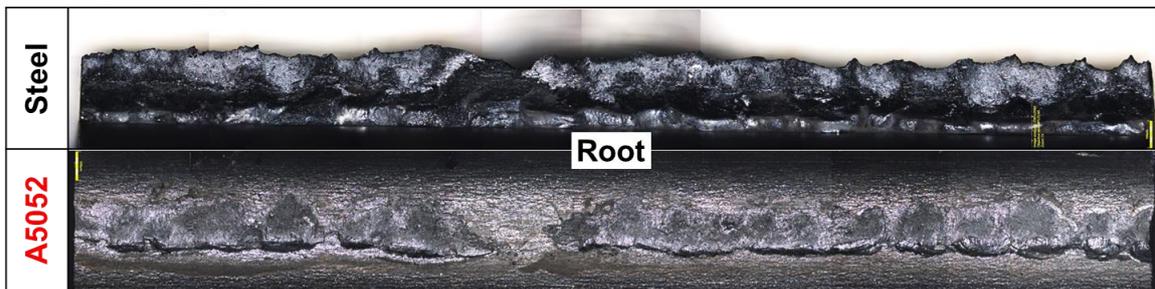


Fig. 5.4.1.2 Fracture surface of 270 MPa class CR steel / A5052 flare joint in forward wire feeding, $V_b:V_f = 1:2.5$, using FCW Alu S4Le, $\phi 3 / 2.5 \times 8$ spot.

5.4.2 卓上顕微鏡を用いたフレア継手断面観察

GI 鋼板を用いた際の観察結果としては入熱の大きい $V_b = 5.0$ m/min, $LP = 5.6$ kW における断面の結果を Fig 5.4.2.1 に示す. さらに $V_b = 6.0$ m/min, $LP = 4.0$ kW における断面の結果を Fig 5.4.2.2 に示す. GA 鋼板を用いた際の観察結果としては入熱の大きい $V_b = 5.0$ m/min, $LP = 5.6$ kW における断面の結果を Fig 5.4.2.3 に示す. さらに $V_b = 9.0$ m/min, $LP = 5.6$ kW における断面の結果を Fig 5.4.2.4 に示す. CR 鋼板を用いた際の観察結果としては入熱の大きい $V_b = 5.0$ m/min, $LP = 4.8$ kW における断面の結果を Fig 5.4.2.5 に示す. さらに $V_b = 6.0$ m/min, $LP = 4.0$ kW における断面の結果を Fig 5.4.2.6 に示す.

Fig 5.4.2.1 ~ 5.4.2.6 までに示した条件において各種鋼板における鋼板表面からの距離と IMC 厚さのグラフをそれぞれ Fig 5.4.2.7 ~ 5.4.2.9 に示す. これらのグラフより GA 鋼板が GI, CR 鋼板に比べ IMC 厚さが多いことがわかった. さらに GA 鋼板では, SEM の観察結果から何種類かの IMC の層が存在していることが SEM の画像よりわかった. さらに EDX を用いて GA 鋼板を用いた際の中央部の IMC の元素分析を行った結果を Fig 5.4.2.10 に示す. CR 鋼板を用いた際の観察結果を Fig 5.4.2.11 に示す. この際の結果よりメッキ層の無い CR 鋼板を用いた際には均等に Al-Fe の金属間化合物が生成されていることがわかった. その一方で GA 鋼板では IMC 生成層に関しては何種類かの IMC が生成していることから鋼板表層のめっき層の影響が IMC 厚さに影響しているのではないかと考えられる. 今後の検討課題として GA 鋼板においてどの種類の IMC 厚さが継手強度に影響的であるのかに関して調査する必要があると考察している.

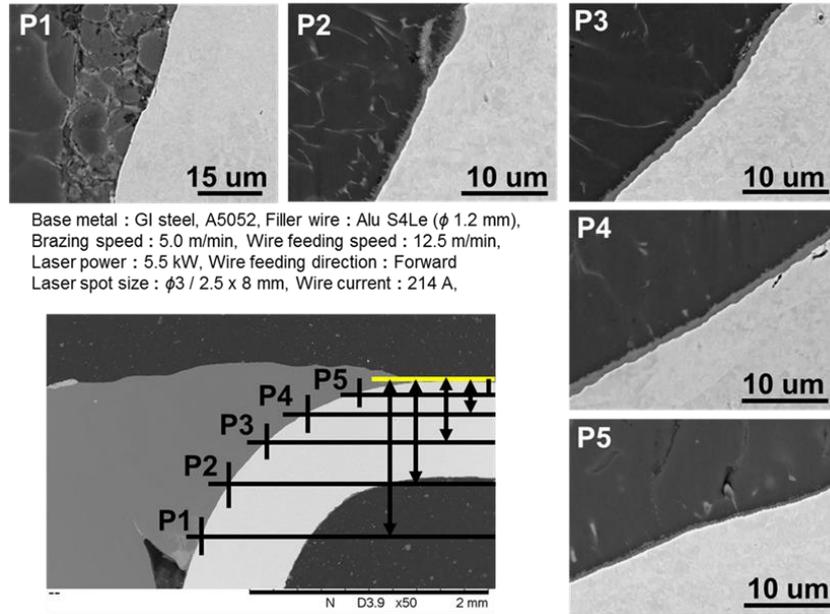


Fig. 5.4.2.1 SEM micrographs of 270 MPa class GI steel / A5052 flare joint in forward wire feeding,
 Vb = 5.0 m/min, LP = 5.5 kW, using FCW Alu S4Le, ϕ 3 / 2.5 \times 8 spot.

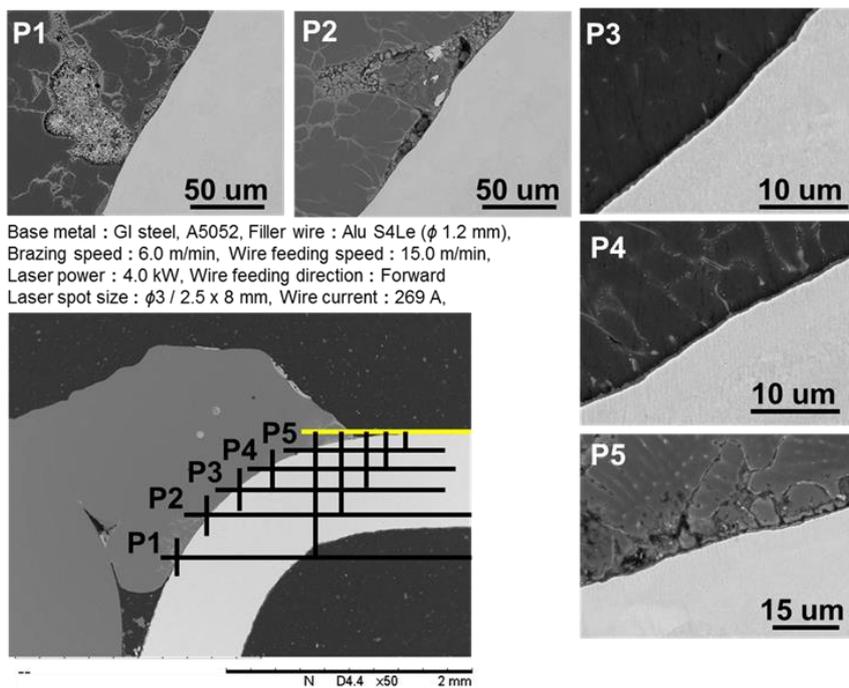


Fig. 5.4.2.2 SEM micrographs of 270 MPa class GI steel / A5052 flare joint in forward wire feeding,
 Vb = 6.0 m/min, LP = 4.0 kW, using FCW Alu S4Le, ϕ 3 / 2.5 \times 8 spot.

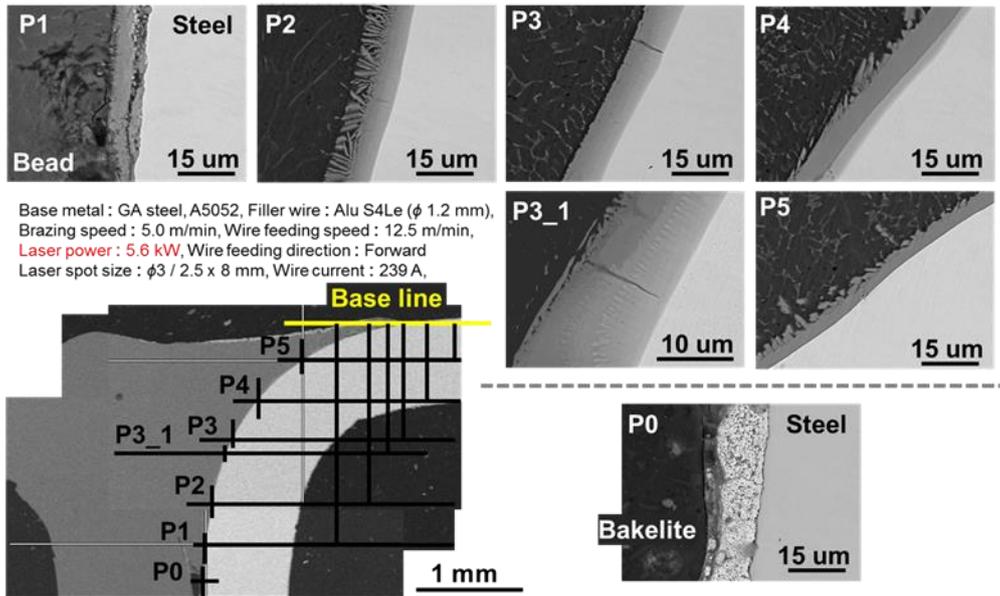


Fig. 5.4.2.3 SEM micrographs of 270 MPa class GA steel / A5052 flare joint in forward wire feeding,

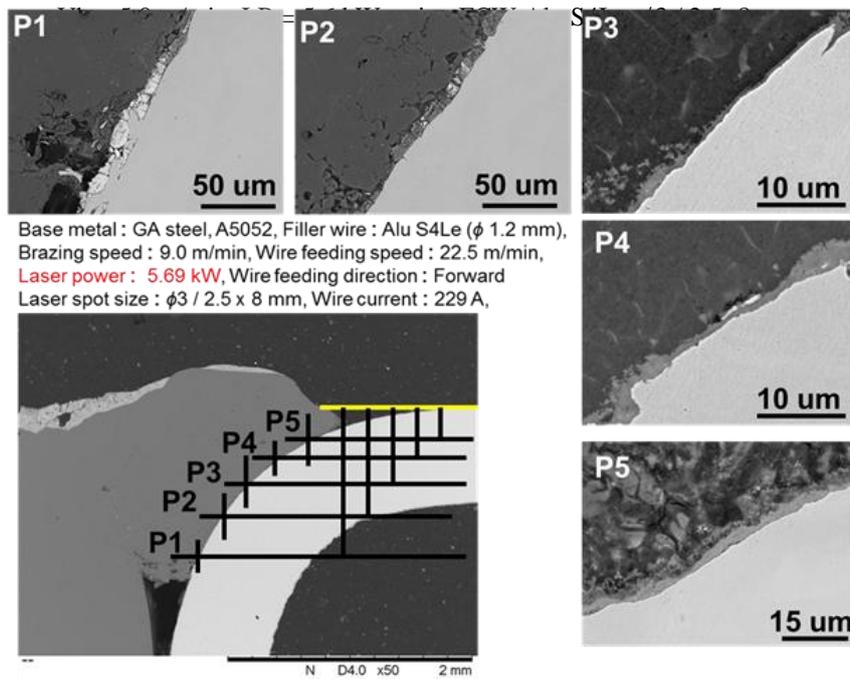


Fig. 5.4.2.4 SEM micrographs of 270 MPa class GA steel / A5052 flare joint in forward wire feeding,

Vb = 9.0 m/min, LP = 5.6 kW, using FCW Alu S4Le, ϕ 3 / 2.5 \times 8 spot.

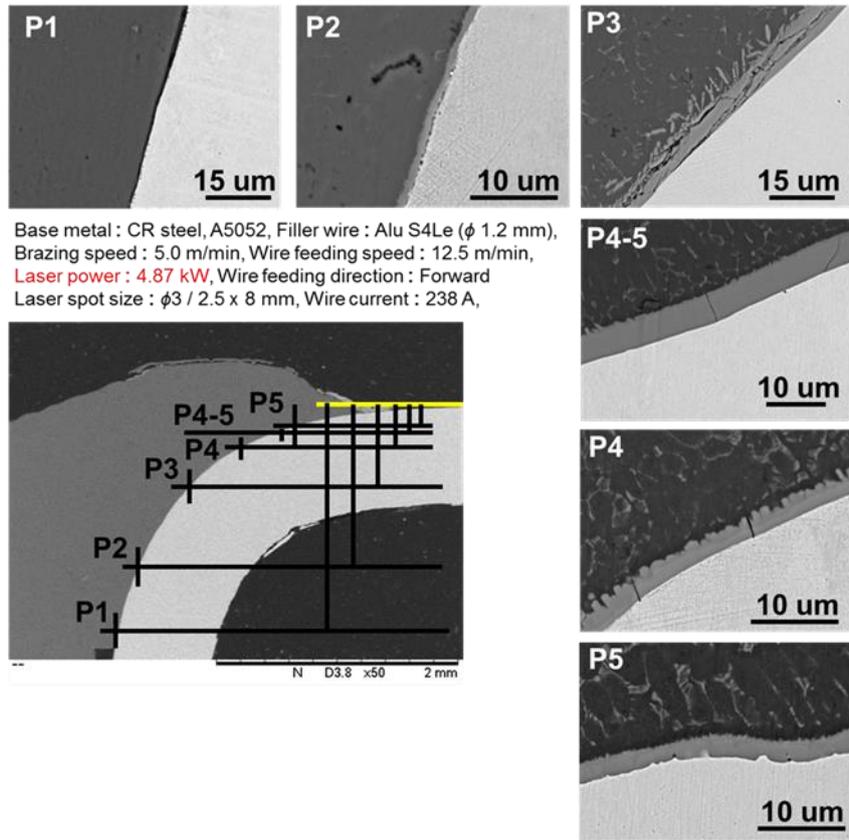


Fig. 5.4.2.5 SEM micrographs of 270 MPa class CR steel / A5052 flare joint in forward wire feeding,
 Vb = 5.0 m/min, LP = 4.8 kW, using FCW Alu S4Le, ϕ 3 / 2.5x8 spot.

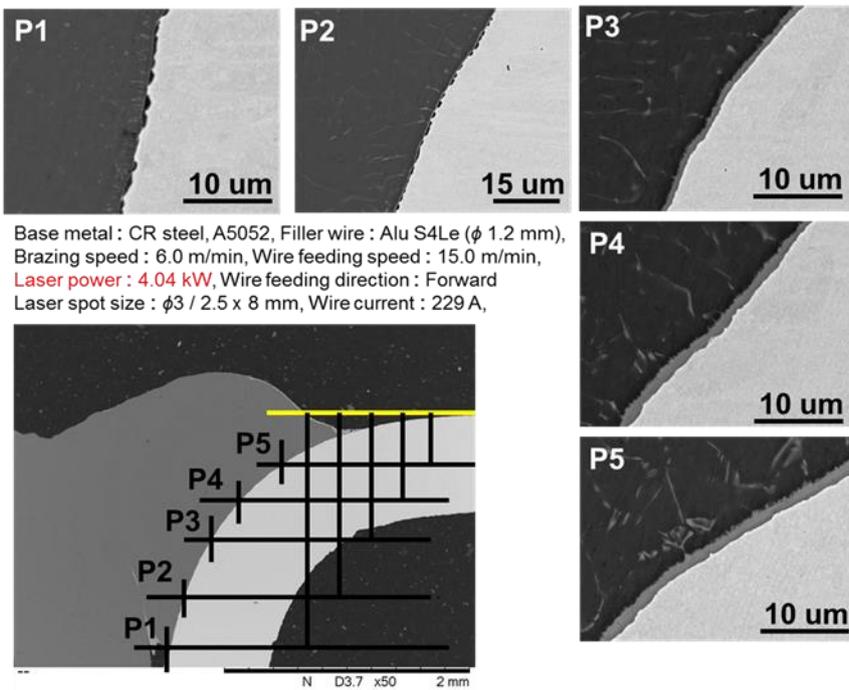


Fig. 5.4.2.6 SEM micrographs of 270 MPa class CR steel / A5052 flare joint in forward wire feeding,
 Vb = 6.0 m/min, LP = 4.0 kW, using FCW Alu S4Le, ϕ 3 / 2.5x8 spot.

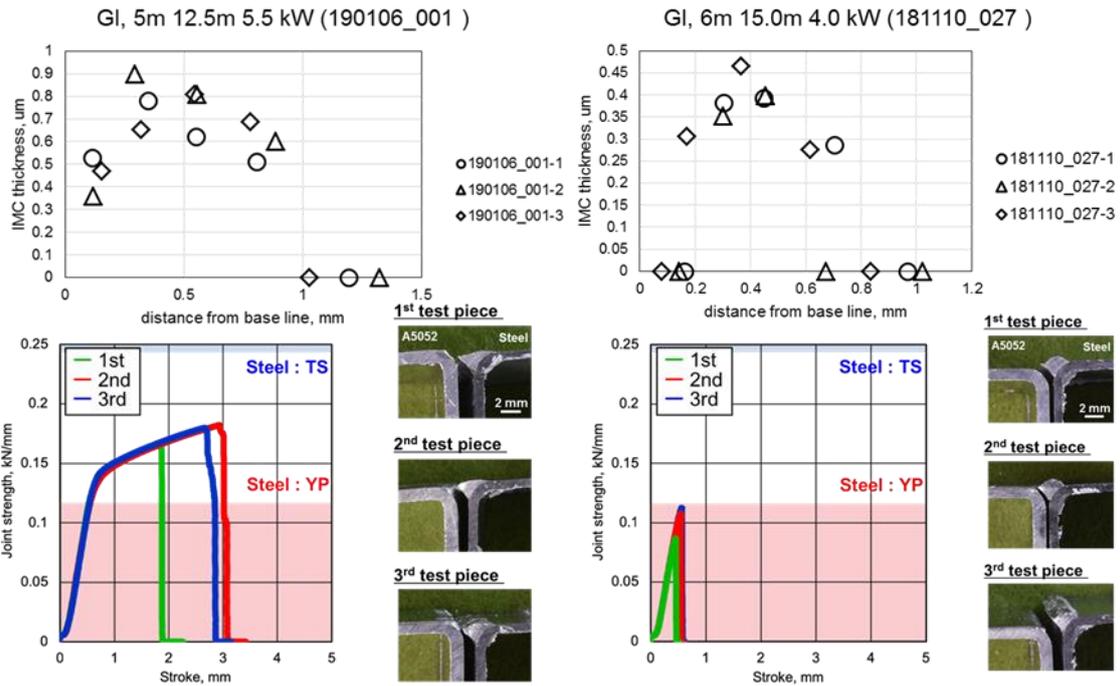


Fig. 5.4.2.7 Graph of distance of base line and IMC thickness 270 MPa class GI steel / A5052 flare joint in forward wire feeding, using FCW Alu S4Le, $\phi 3 / 2.5 \times 8$ spot.

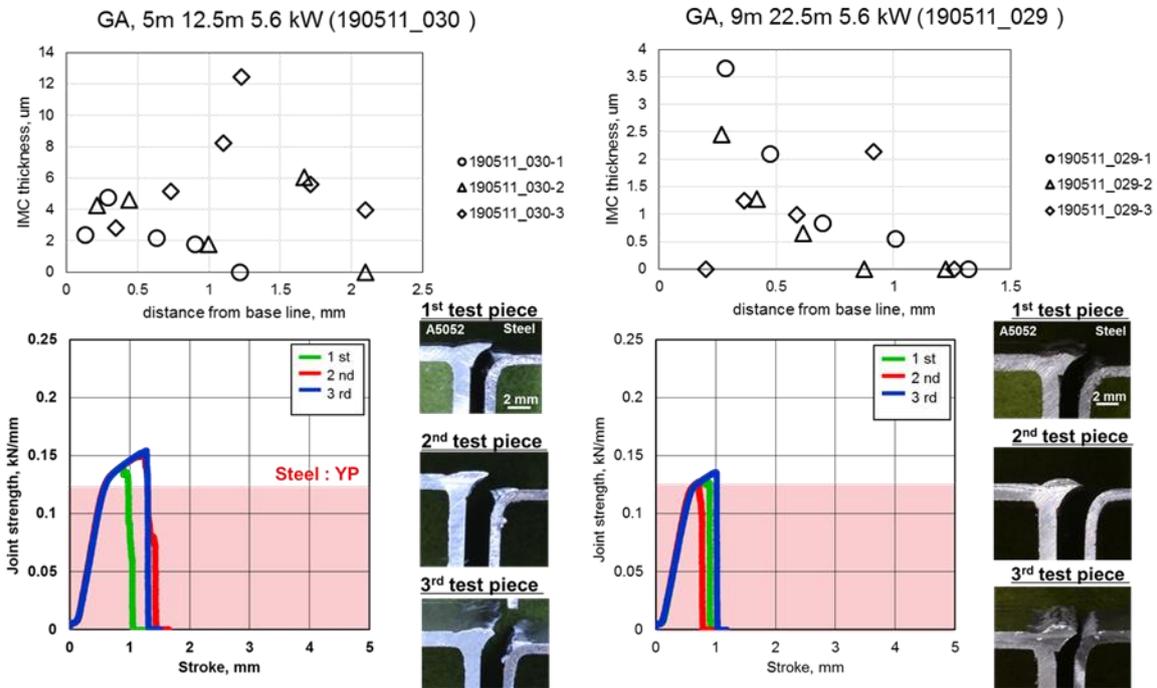


Fig. 5.4.2.8 Graph of distance of base line and IMC thickness 270 MPa class GI steel / A5052 flare joint in forward wire feeding, using FCW Alu S4Le, $\phi 3 / 2.5 \times 8$ spot.

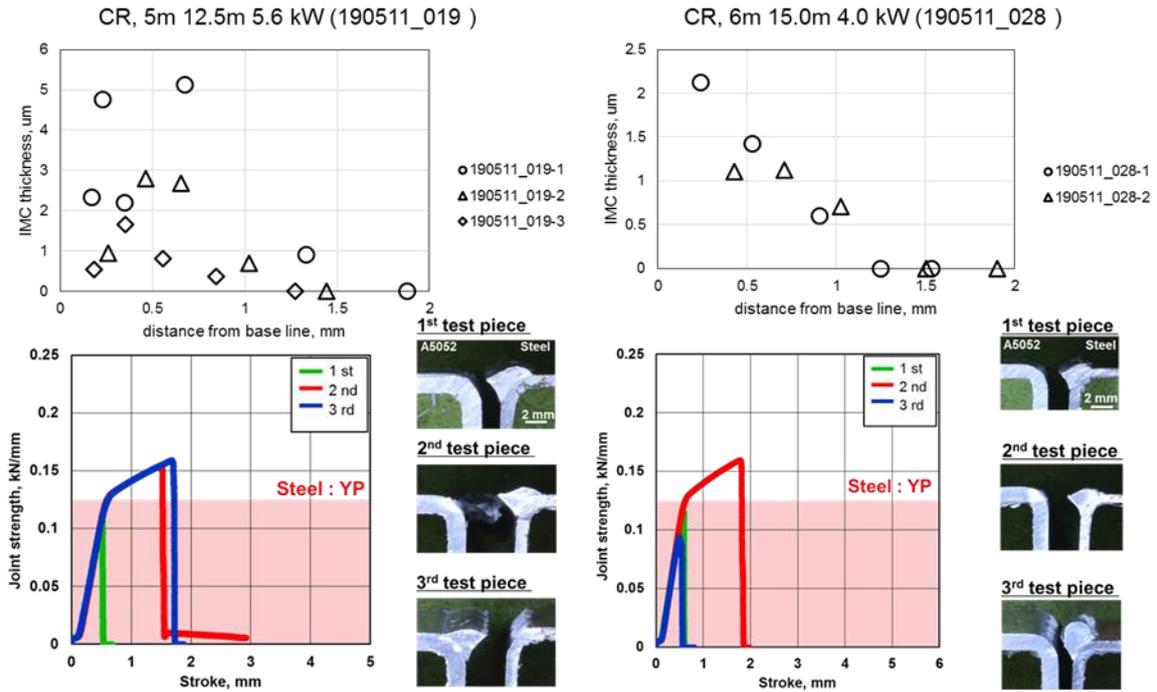


Fig. 5.4.2.9 Graph of distance of base line and IMC thickness 270 MPa class CR steel / A5052 flare joint in forward wire feeding, using FCW Alu S4Le, $\phi 3 / 2.5 \times 8$ spot.

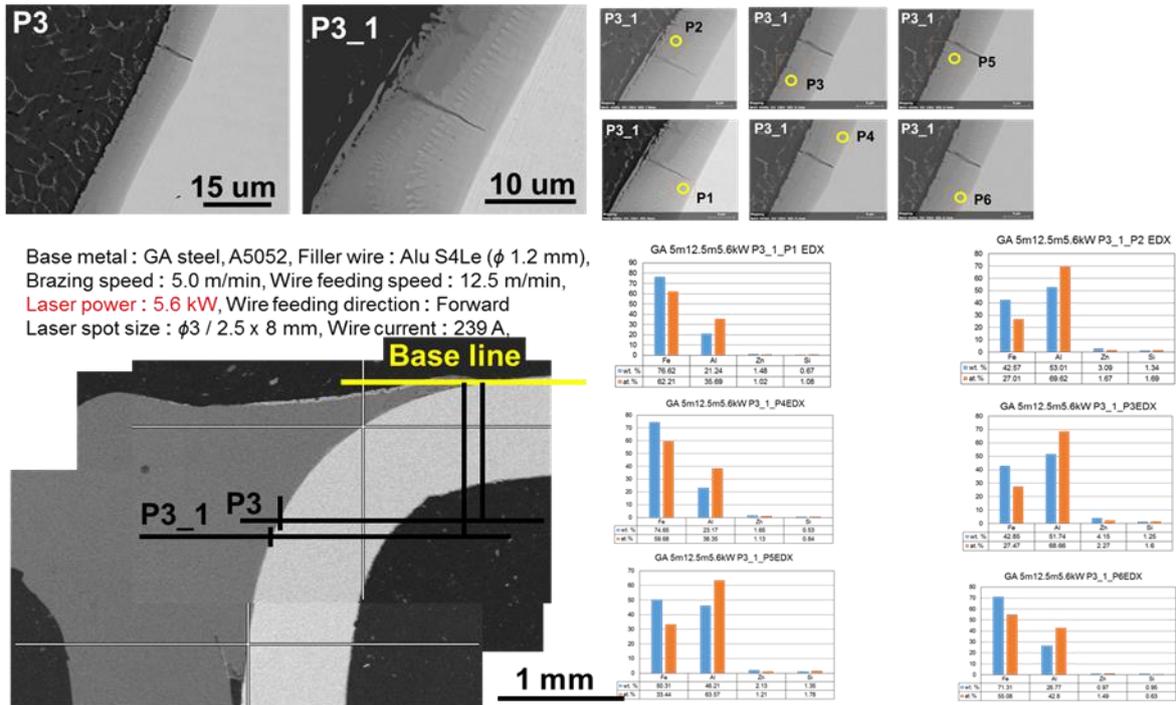


Fig. 5.4.2.10 EDX micrographs of 270 MPa class GA steel / A5052 flare joint in forward wire feeding, $V_b = 5.0$ m/min, $LP = 5.6$ kW, using FCW Alu S4Le, $\phi 3 / 2.5 \times 8$ spot.

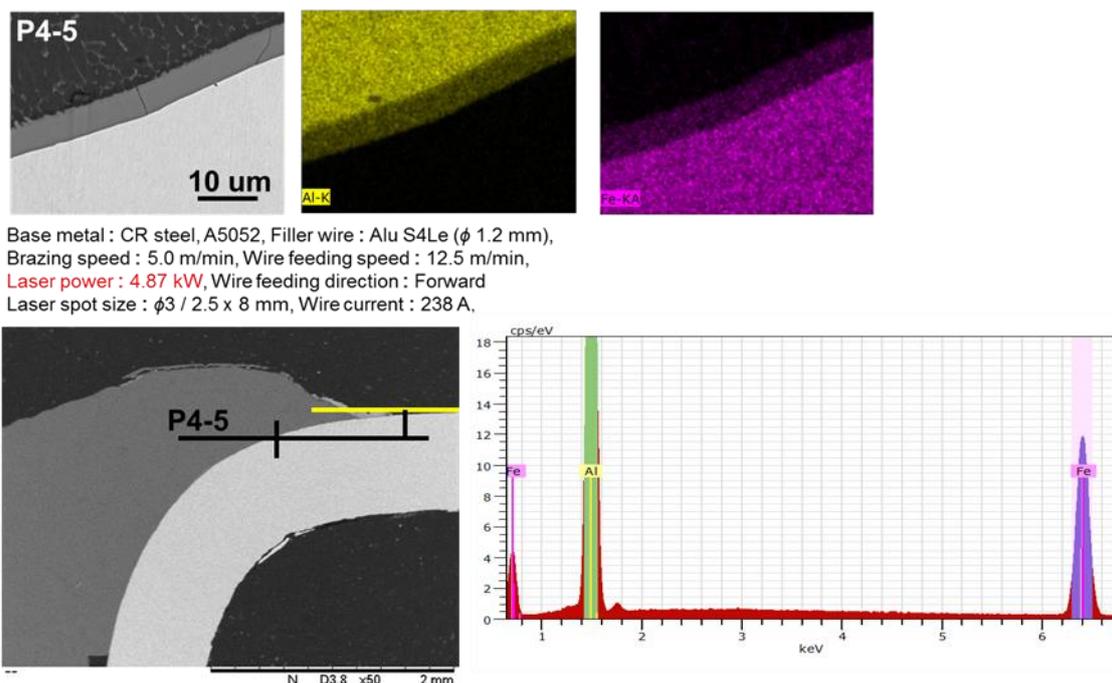


Fig. 5.4.2.11 EDX micrographs of 270 MPa class CR steel / A5052 flare joint in forward wire feeding,
 Vb = 5.0 m/min, LP = 4.87 kW, using FCW Alu S4Le, ϕ 3 / 2.5x8 spot.

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上で協力を得るといふ点に関しても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についても便宜を図っていただき、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、研究助手 Mohammad Saadati 氏、博士課程 Hamid Javadi 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、本研究への御助言を頂きました広島大学工学研究科 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まで、本プログラム全体を通して多大なご協力頂きました実行委員会の諸先生をはじめとする学生支援グループ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。