

---

---

**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**  
**重ね隅肉継手の疲労強度特性調査**

工学研究科 機械物理工学専攻 正路 弘樹

## 1 はじめに

2017年8月7日から同年9月7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最適化を研究対象としており、接合継手の作成や継手強度評価が盛んにおこなわれている。そこで今回、本研究室が保有するホットワイヤ法で作成した異材継手を対象に、派遣先の研究室が保有する継手の強度評価手法の知見をもとに評価を行った。

## 3 共同研究スケジュール

8月7日 出国  
8月8日～9月5日 研究、プレゼンテーション  
9月7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：Dr. Philippe Bocher

## 5 共同研究内容

### 5.1 概要

近年深刻化している地球温暖化への対応策として、自動車等の輸送機器の燃費向上によるCO<sub>2</sub>排出量削減が挙げられる。自動車の燃費を向上させる有効な手法としては車体重量の軽量化があり、その一例として、強度が必要とされる箇所には従来通り鋼材を使用し、強度を必要としない箇所にはアルミニウム合金を使用する、というハイブリット構造が提案され、異材接合技術に対する需要が高まっている。しかし、鋼とアルミを直接熔融溶接すると、接合界面に脆弱な金属間化合物が生成され、継手強度が低下することが知られている。

本研究室では、Fig. 5.1.1に示すようなホットワイヤ・レーザブレイジング技術を適用することで高能率施行と金属間化合物が抑制された、高い強度を有する継手の作成を目指している。昨年度、鋼 / アルミニウム合金重ね隅肉継手の強度支配因子を解明する目的で、せん断引張試験時の可視化による破断経路の調査を行った。Fig. 5.1.2に示す破断経路の可視化結果より、き裂は接合界面止端部において発生し、破断に至る様子が観察されたことから、止端部における金属間化合物の厚さが継手の静的強度を支配していることがわかった。しかしながら、金属間化合物が継手の疲労強度に及ぼす影響は明らかになっていない。そこで今回、ホットワイヤ・レーザブレイジング法にて作成した継手に対して、引張疲労試験を実施したのち破面観察を行うことで金属間化合物が疲労強度に及ぼす影響を調査した。

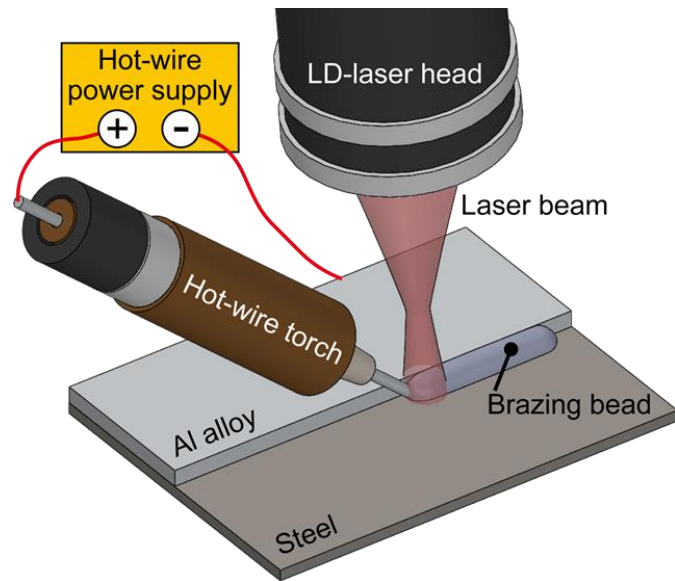


Fig. 5.1.1 Schematic illustration of Hot-wire laser brazing.

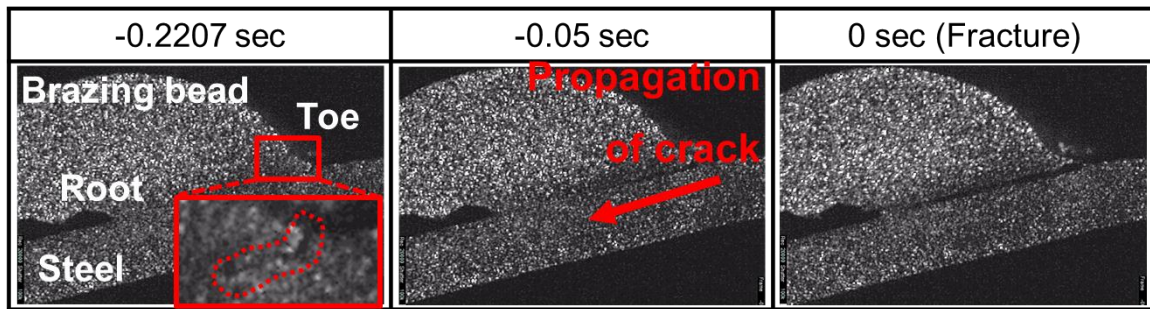


Fig. 5.1.2 Visualization result of the tensile shear test.

## 5.2 実験条件

継手作製における各種位置関係の模式図を Fig.5.2.1 に、実験条件表を Table 5.2.1 に示す。ブレイジング速度 4.0 m/min, ワイヤ送給速度 15.0 m/min とし、レーザ出力を 5.0, 6.0 kW と変化させ、作成した継手の定常部から幅 12.7mm の試験片を 4~5 つずつ取得し、引張疲労試験を実施した。実験外観および実験条件を Fig. 5.2.2 および Table 5.2.2 に示す。試験には MTS Landmark® 370 (MTS Systems Corporation 製) を使用し、応力比は 0.1, 繰り返し周波数は 15Hz とし、継手の降伏荷重の 75%, 50%, 30% の荷重を最大荷重とする 3 パターンの応力振幅を負荷し、疲労試験を実施した。

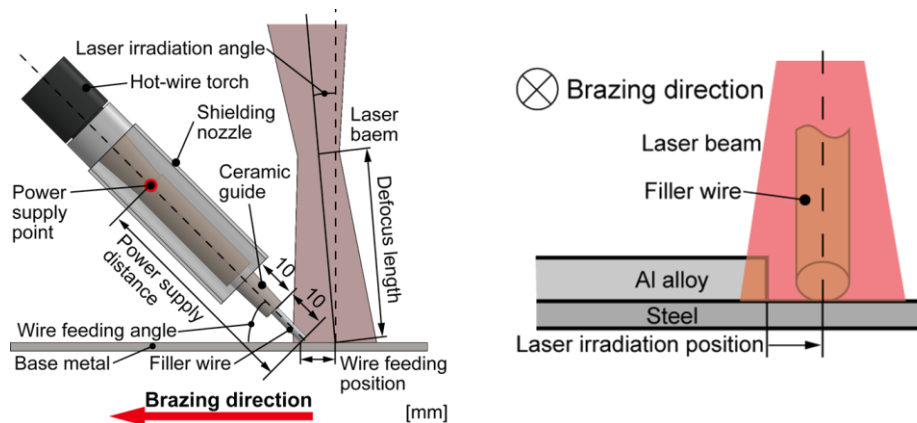


Fig. 5.2.1 Schematic illustrations of arrangement of the laser beam and filler wire.

Table 5.2.1 Brazing conditions for tensile fatigue test of GI, GA steel / A5052 lap-fillet joint.

Laser type		LD
Core, $\mu\text{m}$		1000
Focus lens		f400
Laser spot size, mm		$\phi$ 4
Brazing speed, m/min		4.0
Laser power, kW		5.0, 6.0
Laser irradiation angle, deg		5
Laser irradiation position, mm		0.5 (For brazing direction)
Wire feeding position, mm		1
Wire feeding speed, m/min		15.0
Wire current, A		213
Wire feeding angle, deg		45
Electrical distance, mm		80
Ar shielding gas, L/min	Coaxial	20
	Each side	15

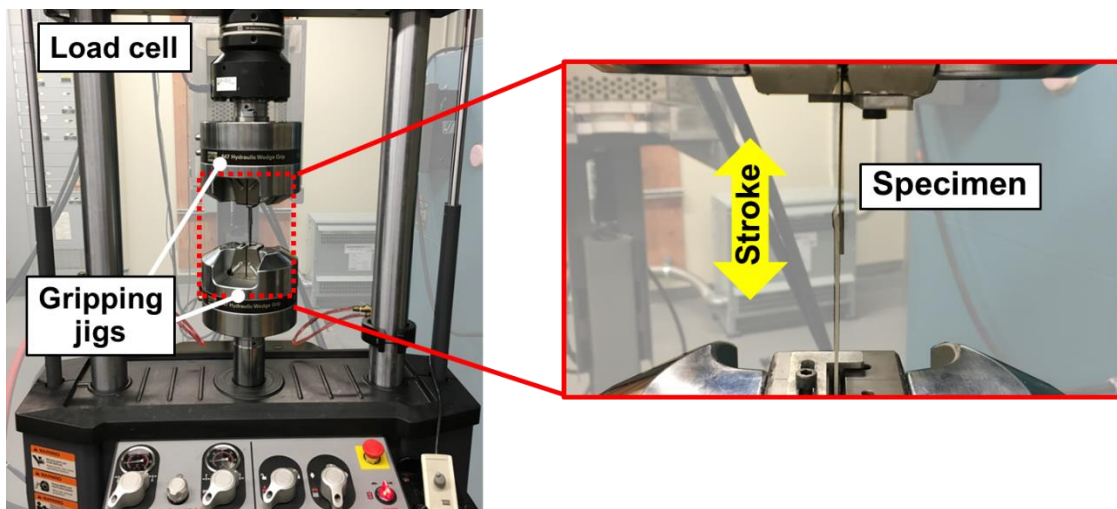


Fig. 5.2.2 Appearance of tensile fatigue test machine.

Table 5.2.2 Experiment conditions of tensile fatigue test.

Frequency, Hz	15
Grip distance, mm	94
Stress ratio	0.1
$\sigma_a$ , N/mm	18.0 ( $F_{\max} = 30\%F_{\text{yield}}$ )
	30.0 ( $F_{\max} = 50\%F_{\text{yield}}$ )
	45.0 ( $F_{\max} = 75\%F_{\text{yield}}$ )

### 5.3 実験結果および考察

横軸に破断までの繰り返し数, 縦軸に応力振幅を取った S-N 線図を Fig. 5.3.1 に示す. 応力振幅 30 N/mm での結果に関して, GI 鋼板を用いた場合においては疲労寿命のばらつきは小さく, すべての継手が母材アルミとろう材の界面近傍において破断していた. 一方で GA 鋼板を用いた場合では疲労寿命に大きなばらつきが見られ, 低寿命で破断したものはろう材/鋼板での接合界面破断, 長寿命で破断したものは母材アルミ/ろう材界面での破断となっていた. 疲労寿命, 破断形態ともに差異が見られた GA 鋼板, レーザ出力 5.0 kW の条件で作製した継手に対して破面観察を実施した.

Fig. 5.3.2 に, 最も短寿命での接合界面破断となった継手の鋼板側の破面の観察結果を示す. ルート部から中央部破面への変遷部では何らかの物質がルート部に堆積している様子と, 中央部では平坦な破面が見られた. Fig. 5.3.3 に, ろう材側の観察結果を示す. 未接合部と思われる箇所では母材アルミとろう材の界面近傍において荷重方向と垂直な方向に亀裂が進展していた. ルート部から止端部にかけては鋼板側と同様の破面が観察された.

Fig. 5.3.4 に, 最も長寿命で母材アルミ/ろう材界面近傍において破断した継手の母材アルミ側の破面を示す. 赤で囲んだ範囲からは介在物を起点とした放射状の模様が見られ, また青で囲んだ箇所を詳細に観察するとストライエーションが観察された. また緑で囲んだ範囲より, ルート部に多くのブローホールが生じており, その周囲には放射状の模様が観察された. Fig. 5.3.5 に示す, ろう材側の破面からも同様の破面が観察された.

以上の結果をもとに, 2つの破断形態が見られた原因を Fig. 5.3.6 のように考察した. 鋼/アルミ合金重ね隅肉接手に対して引張の疲労荷重を負荷した場合, 荷重方向と垂直な方向の亀裂が優先的に成長する一方で, 応力集中部であるルート部においても接合界面に沿った亀裂が生じることが考えられる. ルート部において金属間化合物が厚く生成している場合, 図中上に示すように亀裂が化合物内に到達した後に脆性的にき裂が化合物内を進展し, 短い寿命での界面破断となることが考えられる. 一方でルート部の化合物が薄い場合, 母材アルミとろう材の界面において疲労き裂が進展していき, ある程度の繰り返し数を経て破断するものと考えられる.

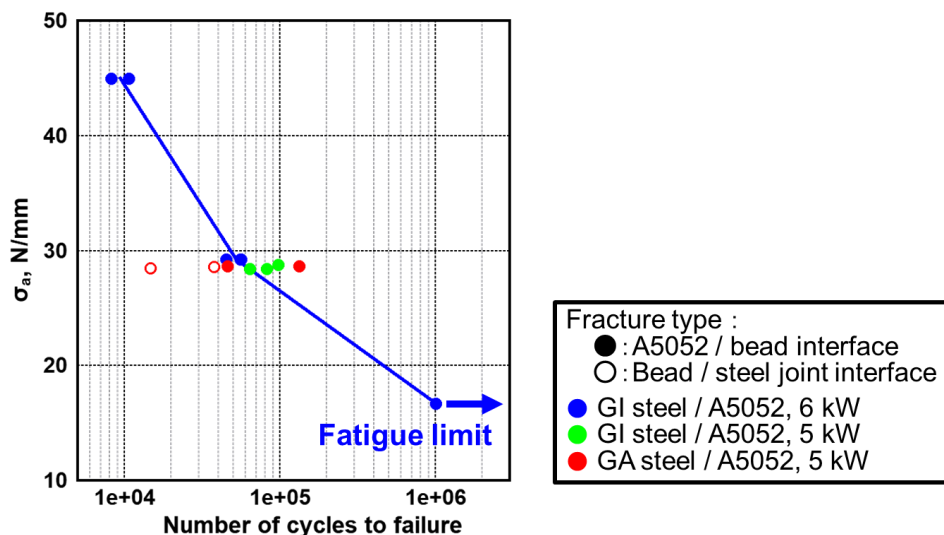


Fig. 5.3.1 S-N curve of GI, GA steel / A5052 joint in  $V_b = 4.0$  m/min,  $V_f = 15.0$  m/min, Laser power = 6.0, 5.0 kW,  $\phi 4$  spot, forward wire feeding.

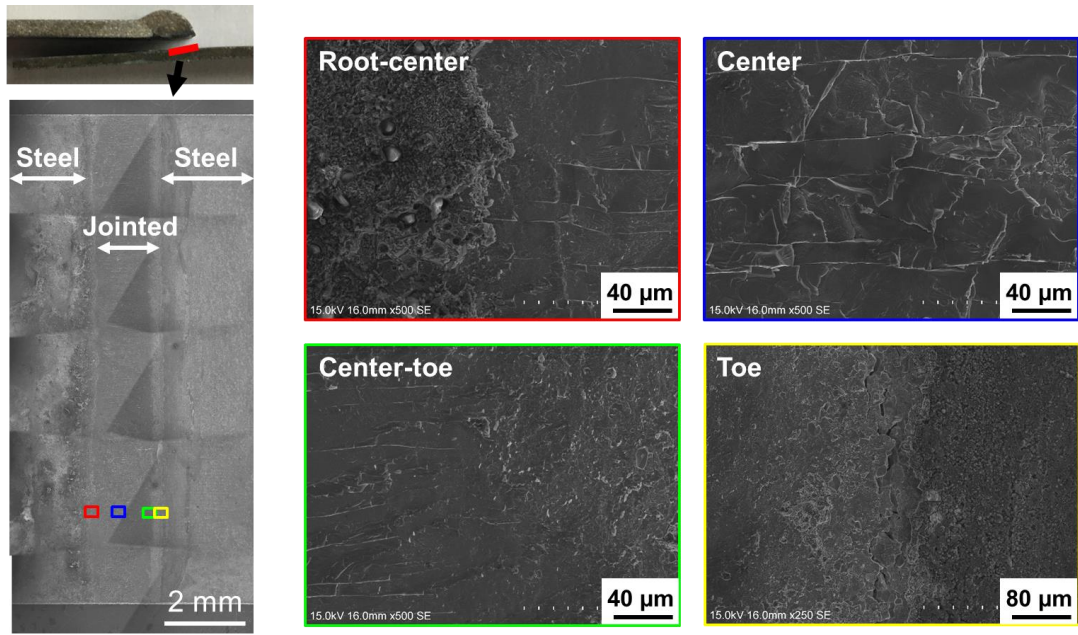


Fig. 5.3.2 SEM images of the fracture surface at steel side in short fatigue life GA steel / A5052,  $V_b = 4.0$  m/min,  $V_f = 15.0$  m/min, Laser power = 5.0 kW,  $\sigma_a = 30$  N/mm.

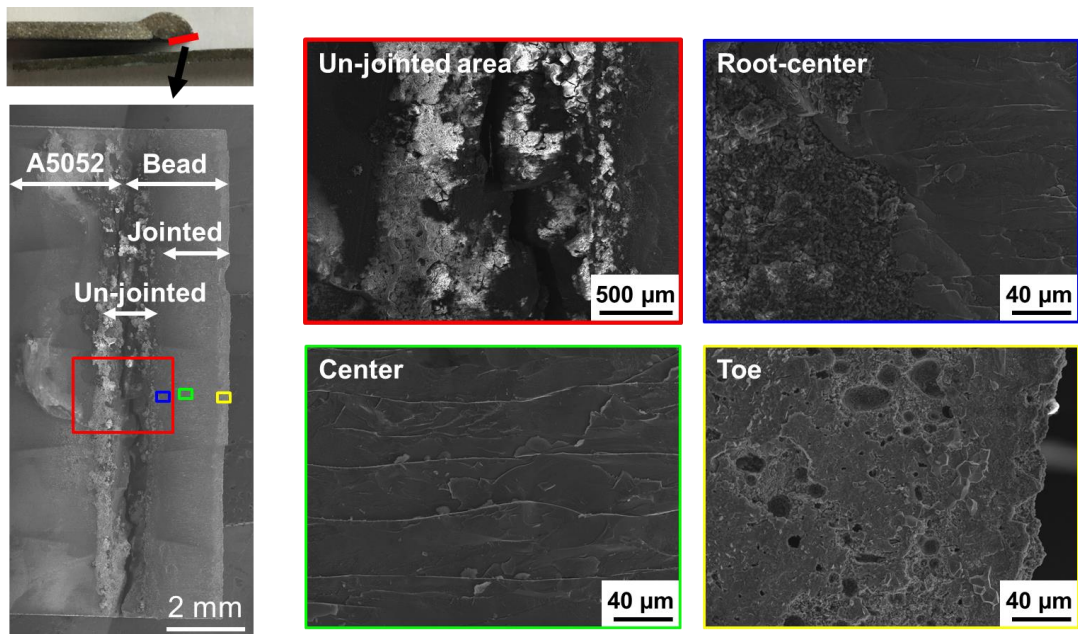


Fig. 5.3.3 SEM images of the fracture surface at bead side in short fatigue life GA steel / A5052,  $V_b = 4.0$  m/min,  $V_f = 15.0$  m/min, Laser power = 5.0 kW,  $\sigma_a = 30$  N/mm.

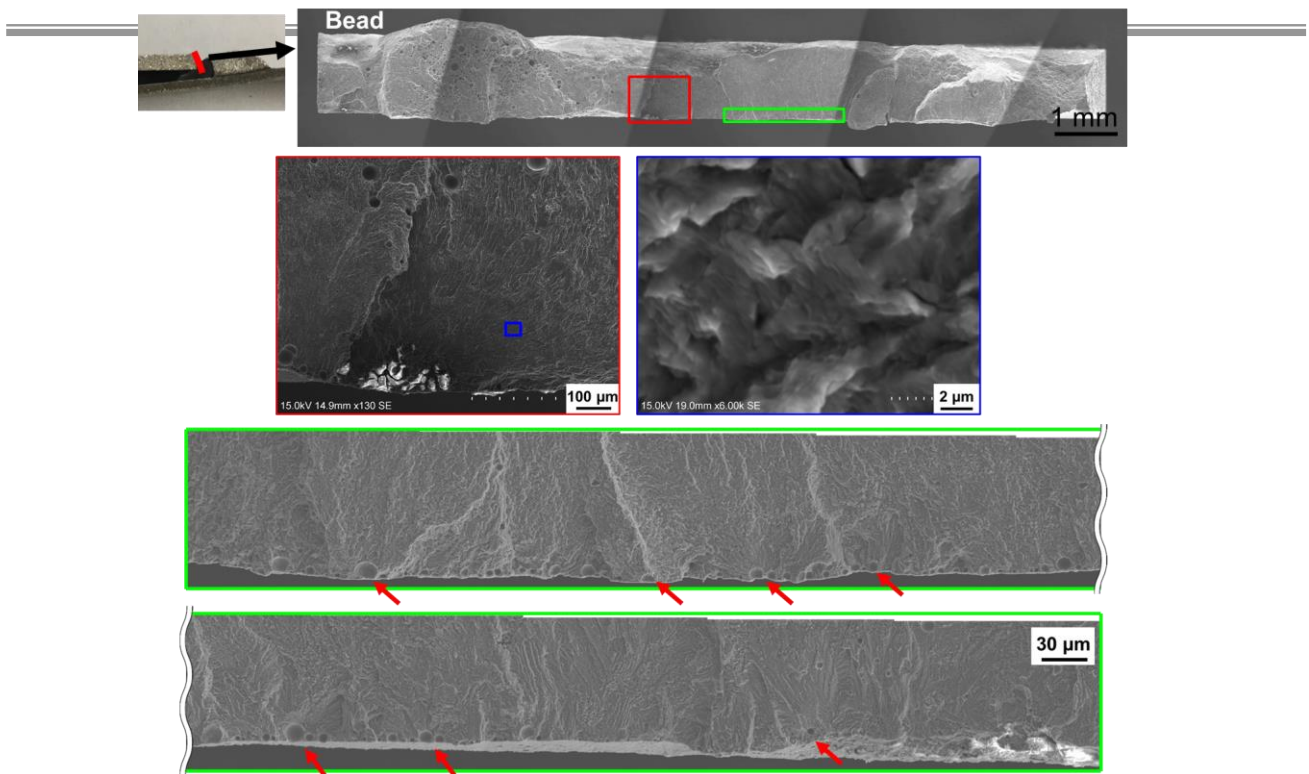


Fig. 5.3.4 SEM images of the fracture surface at A5052 side in long fatigue life GA steel / A5052,  $V_b = 4.0$  m/min,  $V_f = 15.0$  m/min, Laser power = 5.0 kW,  $\sigma_a = 30$  N/mm.

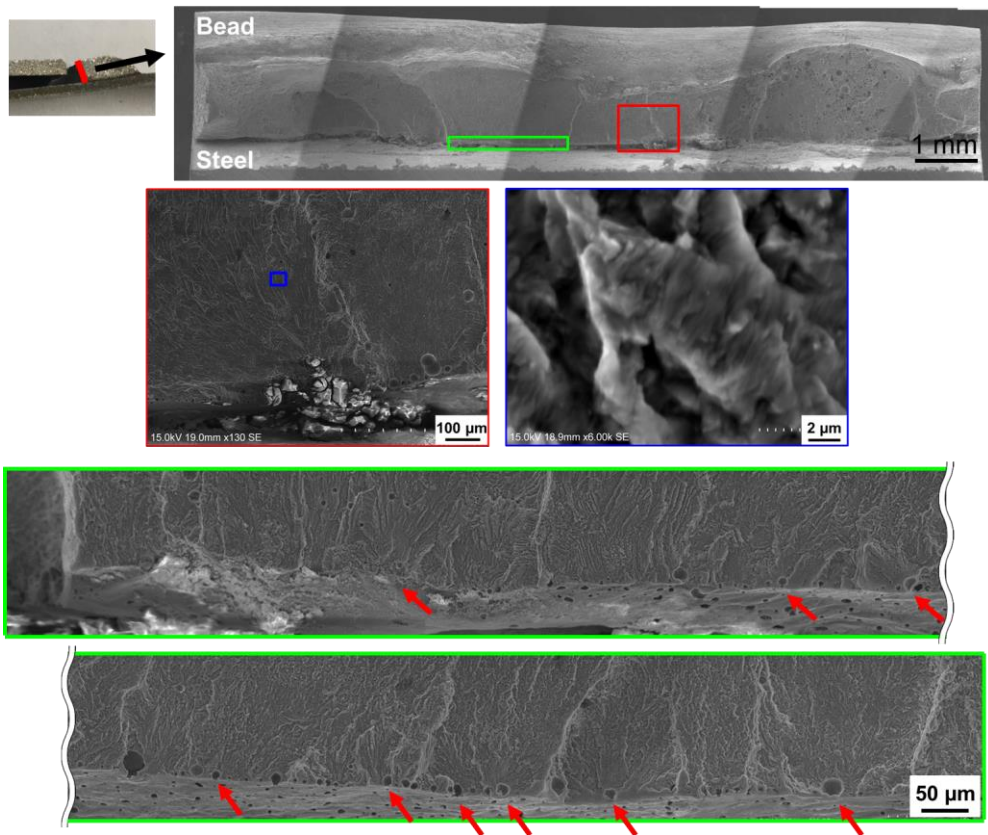


Fig. 5.3.5 SEM images of the fracture surface at bead side in long fatigue life GA steel / A5052,  $V_b = 4.0$  m/min,  $V_f = 15.0$  m/min, Laser power = 5.0 kW,  $\sigma_a = 30$  N/mm.

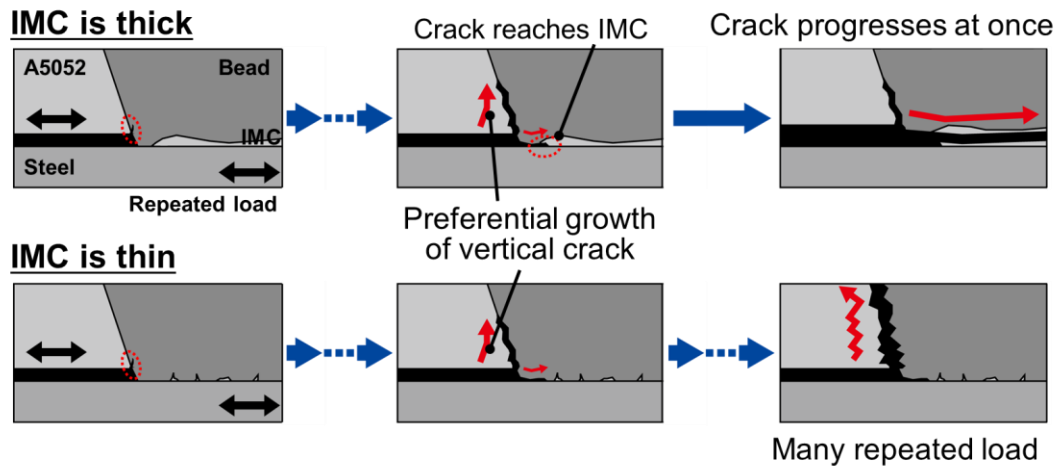


Fig. 5.3.6 Schematic illustration of the fatigue crack path.

## 6 まとめ

渡航してすぐはわからないことだらけで、現地人の喋る速度も速く、研究活動を行っていきけるか不安でしたが、聞き取れないことや疑問に思ったことはすぐに質問することを心掛けながら過ごすことで、充実した留学経験になったと思います。若いうちに単身で海外に行く、という貴重な体験が出来たというのは今後の研究のみならず社会人になってからも大きなアドバンテージになると思います。

## 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設備や宿泊施設についても便宜を図っていただきましたケベック高等工科大学 Philippe Bocher 教授，研究助手 Hossein Monajati 氏に厚く御礼申し上げます。また、現地での研究室生活，日常生活ともに多大なご協力を頂きました，ケベック高等工科大学博士課程 Hamid Javadi 氏をはじめとする学生の皆様に感謝の意を表します。

このような大変貴重な機会を与えて下さるとともに、本共同研究への御助言を頂いた広島大学工学研究科 篠崎賢二教授，山本元道准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を頂きました実行委員会の諸先生方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。