

ウォータールー大学（カナダ） 研修報告書

狭開先ホットワイヤ・レーザ溶接法の全姿勢施工への適用

先進理工系科学研究科 機械工学プログラム 中村成貴

1. はじめに

本報告では 2024 年 7 月 24 日から 8 月 28 日までの間、カナダのウォータールー大学において実施した実験及び分析について報告する。

2. 共同研究課題の決定

本研究では、ホットワイヤ・レーザ溶接法を用いた全姿勢施工への適用を目指し、まずは、横向き姿勢における施工の検討を行っている。広島大学では、ホットワイヤ・レーザ溶接法を用いて施工を行い、その様子を高速カメラで撮影し、断面を鏡面仕上げまで行った後に欠陥の有無を確認している。また、この研究は無欠陥継手を作製することだけでなく、継手の性能評価も行なわなければならない。しかし、当研究室にて実施可能な継手の性能評価を行える試験は限られているため、性能評価が行いづらい。

そこで、ウォータールー大学では、ほぼ欠陥なく積層が行えた 3 つの条件の断面を持参し、CAMJ の高精度な EBSD および EDS を用いて、結晶分析及び化学組成を分析することによって継手の性能評価を行うことを目標とした。

3. 研修/共同研究スケジュール

7 月 24 日 出国

7 月 25 日~8 月 26 日 研究

8 月 28 日 帰国

4. 研修先/共同研究派遣先の概要

大学名: University of Waterloo

所在地: カナダ オンタリオ州

指導教員: Prof. Adrian Gerlich

5. 研修/共同研究の内容

5.1 研究概要

ステンレス鋼は優れた耐食性を持ち、タンクや配管など広く使用されている。特にオーステナイト系ステンレス鋼は高温強度、靱性にも優れており、ステンレス鋼の中でも最も広く用いられている。タンクや配管の溶接には、裏側にも溶接を施したようなビードを表側からの施工のみで形成する裏波溶接が求められるため主に TIG 溶接が用いられる。しかし、TIG 溶接は溶接速度が遅く、開先内に電極を入れる必要があることから開先幅が広がり、それに伴う溶着量の増加や引張残留応力発生領域が大きくことが問題として挙げられる。一方、ホットワイヤ・レーザ溶接法は、キーホールを発生させず、熱伝導によって形成された熔融池に融点近傍まで加熱したワイヤを送給する溶接法 (Fig.5.1) であるため、開先幅が小さくなり、溶着量が少なくなることによる能率の改善や低希釈であるため継手の品質も向上させることができる。また、熔融池が薄いことから、横向き姿勢といった様々な姿勢で懸念される熔融池の垂れ落ち防止も期待ができる。

溶接部に要求される特性は、その用途に応じてさまざまだれど、多くの場合でビッカース硬さや引張試験といった強度に関する試験が行われる。強度は結晶粒径が影響を及ぼすため CAMJ の高精度な EBSD を用い、ミクロな領域での結晶粒径の分析を行った。

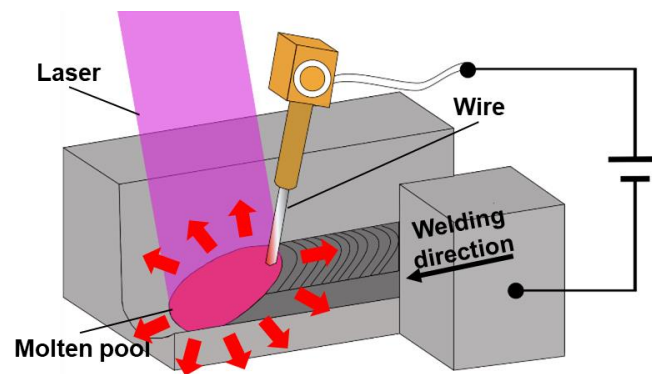


Fig.5.1 Illustration of Hot-wire laser welding method.

5.2 供試材料および実験条件

この度の海外共同研究では、事前に継手を作製し、断面を切断した後、樹脂込め・研磨・琢磨を行い、断面観察用試験片を作製した。継手作製に使用した母材およびワイヤの化学組成、寸法と開先形状をそれぞれ Table.5.2.1, Fig.5.2.1 に示す。母材・ワイヤともに材質は SUS316L を使用し、ワイヤ径は 1.6mm とした。開先形状は、板厚 20mm、ベベル角 3°、ルートフェイス 3mm とした。

実験条件を Table.5.2.2 に示す。スポット径は 1.6×6.0mm を使用し、4 パスでの施工を行った。分析用の断面は、レーザパワー 6, 5, 4kW の 3 条件で作製した。Fig.5.2.3, Fig.5.2.4 にそれぞれ断面、および欠陥部分の光学顕微鏡による観察結果の画像を示す。断面を見る限りマクロな視点では、欠陥は見当たらない。また、光学顕微鏡による観察によってレーザパワー 6kW の条件において僅かな欠陥が確認された。しかし、曲げ試験を行ったとしても目標である亀裂の発生が 3mm 以内という基準は十分に満たすと考えられるため、こちらも条件として使用できると思われる。

Table.5.2.1 Chemical composition(mass%).

Material		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
Base material Filler wire	SUS316L	0.011	0.69	0.90	0.032	0.004	12.13	17.41	2.10	Bal.

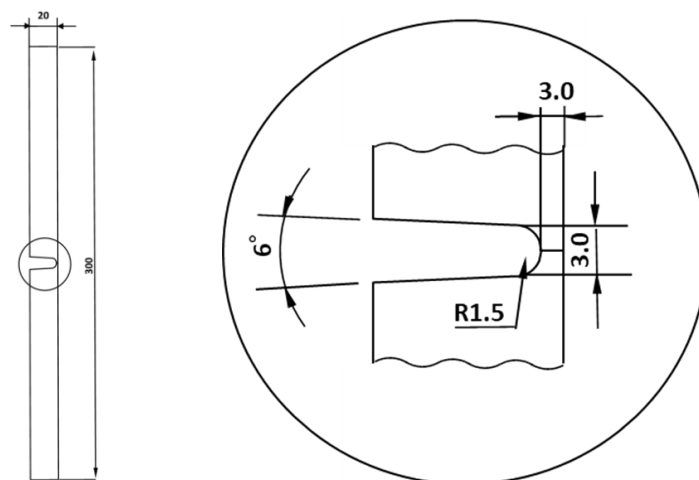


Fig.5.2.1 Specimen.

Table.5.2.2 Experiment conditions.

	1 pass	2 pass	3 pass	4 pass
Laser oscillator	LD			
Laser power, kW	6.0	5.0	4.0	
Spot shape, mm	1.6x6.0			
Defocus length, mm	0			
Laser irradiation angle, deg	10			
Welding speed, m/min	0.5			
Wire feeding angle, deg	80			
Wire feeding position, mm	+1			
Wire feeding speed, m/min	3.3			
	3.3			
	3.3			
	2.7			
Wire current, A	131			
	129			
	129			
	115			
Energization distance, mm	80			
Ar shielding gas, L/min	45			
Weaving function	Trapezoidal 2:3			
Weaving frequency, Hz	10			
Weaving voltage, V	1.6			

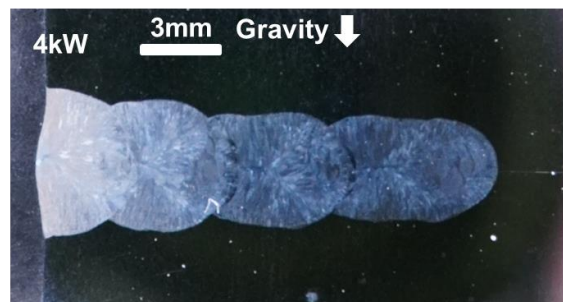
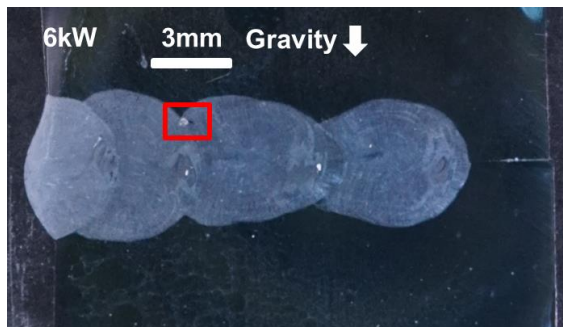


Fig.5.2.3 Cross section.



Fig.5.24 Observation by OM.

5.3 実験結果および考察

Fig.5.31 にそれぞれの条件で取得した断面のどの箇所で分析を行ったかを番号とともに示す. 一層目を分析対象に選んだ理由は, 2層目以降は, 母材からだけでなくその前の層からの結晶の成長も影響するため, 母材からのみの結晶の成長の仕方を確認したかったからである. また Region1 から Region3 まで母材も含めた画像を取りたかったが, 最大スキャン領域でも母材をスキャン範囲内に入れることは難しく, 条件が 4kW のものしか母材まで写すことが出来なかった. Fig.5.3.2 に Region1 の結果を示す. レーザパワー6, 5kW では結晶粒径に大きな違いは見られない. 一方, レーザパワー4kW では結晶粒径がレーザパワー6, 5kW よりも小さくなっていることが確認できる. Fig5.3.3.に Region2 の結果を示す. Region2 は Region1 とは左右対称の位置にあり, 傾向も Region1 と同等の結果が得られた. Fig5.3.4 に Region3 の結果を示す. Region3 においてもレーザパワー6, 5kW での違いは見られない. しかし, レーザパワー4kW の条件では, 母材からエピタキシャル成長した柱状晶がビード中央まで届いておらず, 中央にはたくさんの微細組織が確認できる. この微細組織は, 急速に加熱されるホットワイヤ法由来の組織であることが分かっており, ワイヤが熱源からの熱を受けにくい状態で送給, または, ワイヤの送給速度が高い場合にワイヤが完全に溶け切らずにワイヤの組織がそのままの状態が残ることで発生する. この条件下では, ワイヤの通電加熱状態や送給速度は同じであるため, レーザパワーの違いによる差が出た可能性が高い.

今回の分析では EBSD のみを行ったが, 時間に余裕があれば微小硬さや DIC による引張試験も行いより詳細に分析を行うことを目標としていた. しかし, そもそも研究室での継手の作製が上手くできなかったため EBSD のみを行った.

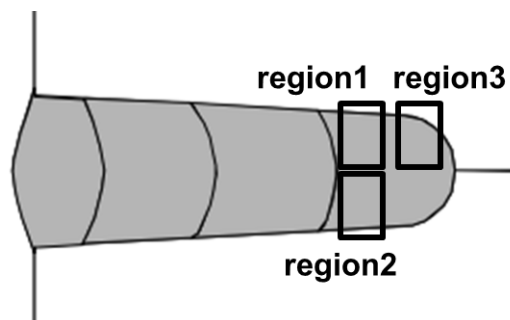
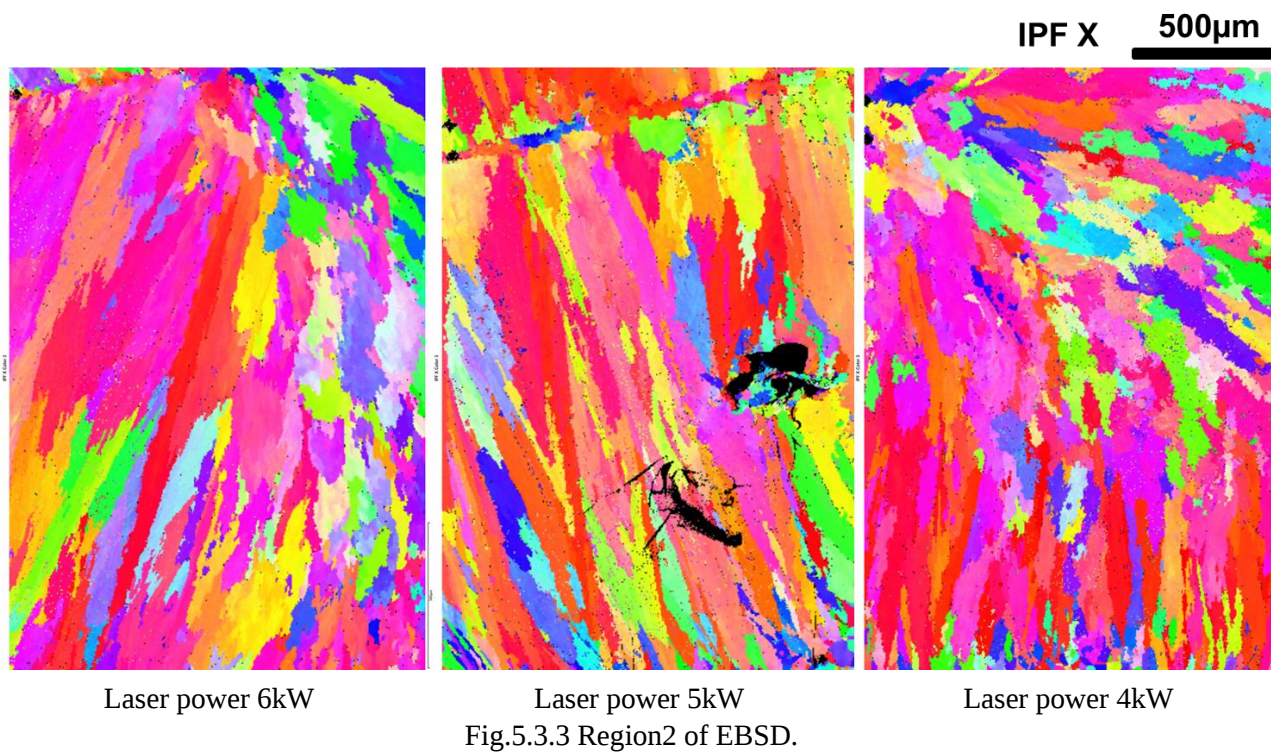
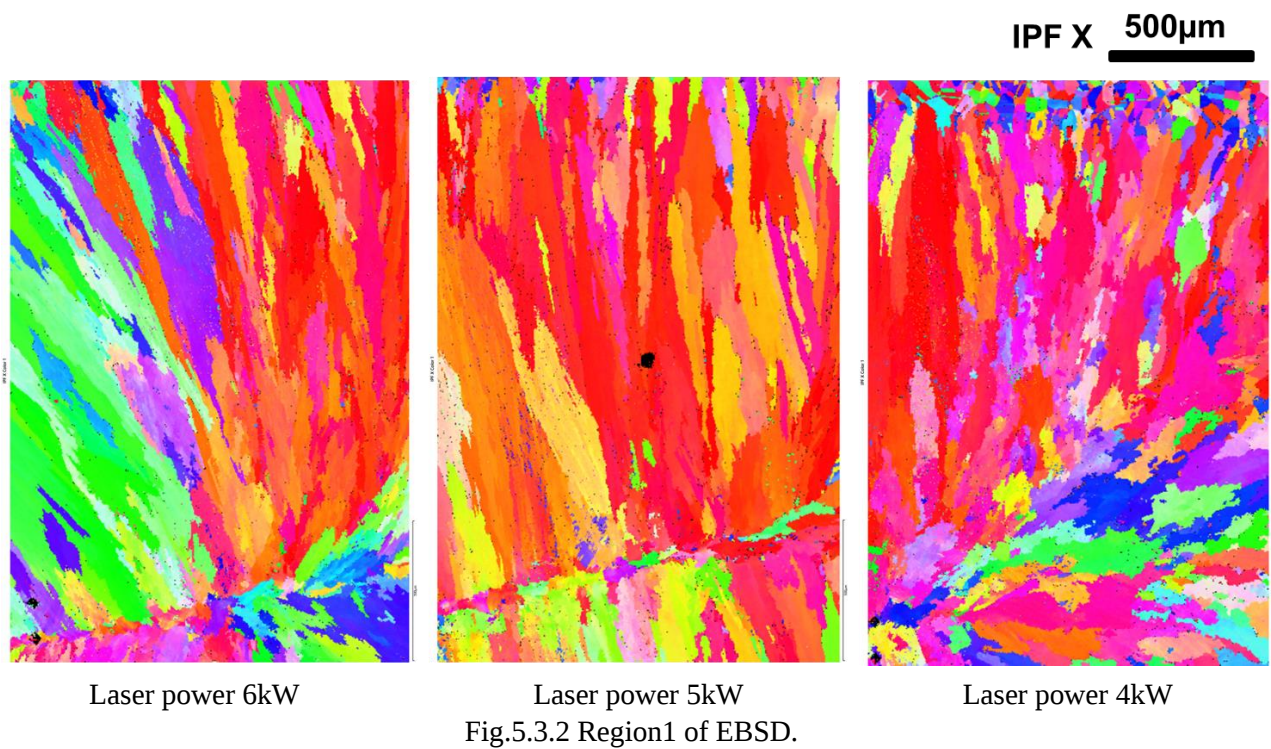


Fig.5.3.1 Illustration showing the analyzed area.



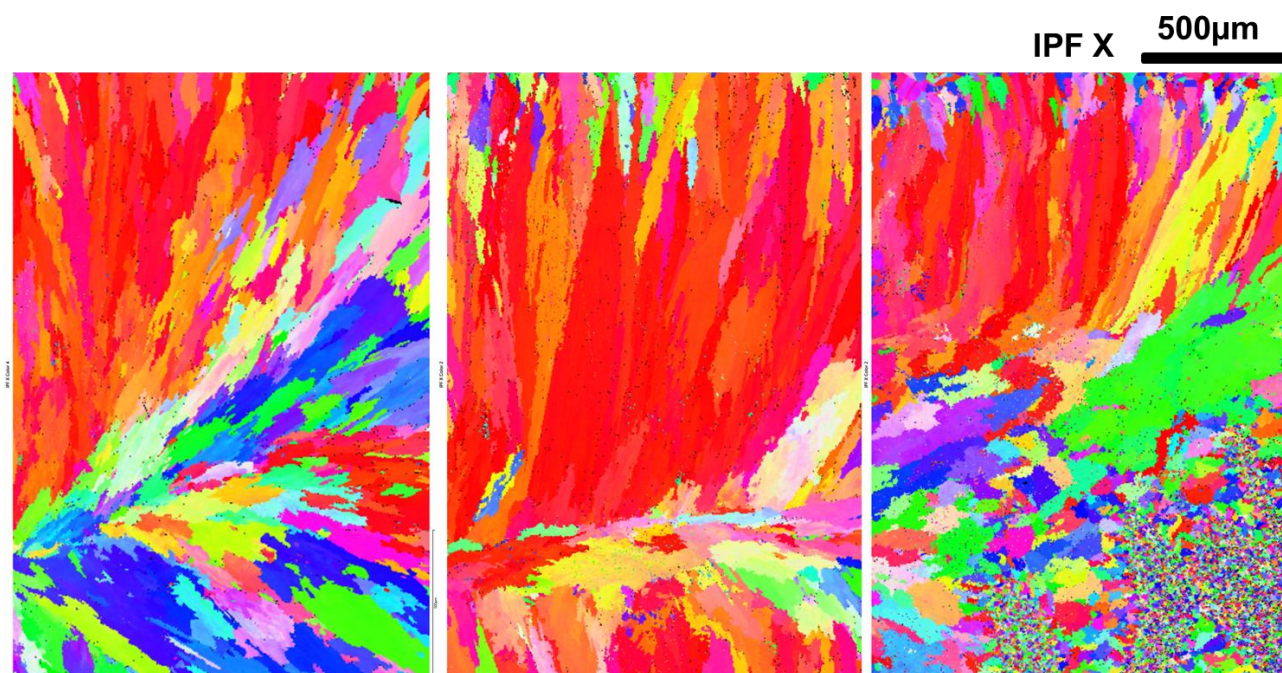


Fig.5.3.4 Region 3 of EBSD.

6. まとめ

この海外共同研究は約1か月と短期間だったが、すべて英語でコミュニケーションをとらなければいけない環境や生活しづらい環境で生活することで非常に重要な経験をする事ができた。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。特に印象的だったのが、一つのテーマに対して教授と学生がディスカッション形式で研究について語っていたことや学生同士での会話やディスカッションが活発であったことである。英語を用いてコミュニケーションを取らなければならないことから、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研究に協力をしてくださっている上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 Adrian Gerlich 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 CAMJ 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。
