ウォータールー大学（カナダ）　研修報告書
WAAM を用いたアルミニウム AM プロセスとレーザワイヤ AM 造形体の分析

先進理工系科学研究科　機械工学プログラム　児玉久実

1. はじめに

2025 年 7 月 30 日から 2025 年 9 月 2 日まで，カナダのウォータールー大学にて研究を行った．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，ワイヤを融点直下近傍まで加熱して溶融池に供給するホットワイヤ法と，半導体レーザを組み合わせた AM プロセス開発を行っている．昨年度この手法で造形した高強度アルミニウムの A6061 の分析を熱処理後の試験片を用いて行った．熱処理前の試験片の分析が未実施のために行うことに決定した．また，AM 手法で MIG 溶接を応用した WAAM 方式が派遣先大学では施設が整っており，AM の経験を得るために実験を行うことにした．

3. 研修/共同研究スケジュール

2025 年 7 月 29 日　出国
2025 年 7 月 30 日～9 月 1 日　共同研究
2025 年 9 月 3 日　帰国

4. 研修先/共同研究派遣先の概要

大学名：ウォータールー大学
所在地：カナダ　オンタリオ州　ウォータールー
概要：学生数は学部・大学院を合わせて約 41,000 名に達し、工学、数学、科学、環境学、芸術など幅広い分野を有する。最大の特色は、学期と有給の実務経験を交互に行う「Co-op 教育プログラム」であり、卒業までに豊富な職業経験を積むことが可能である。研究面ではコンピュータサイエンス、量子コンピューティング、ナノテクノロジー分野で国際的に高い評価を受けており、産学連携や国際協力を通じて研究成果を発信している。

5. 研修/共同研究の内容

5.1　研究背景および目的

現在，AM（Additive Manufacturing）とよばれる積層造形の研究を行っている．AM 製品は，高付加価値な製品を対象に研究，及び適応が進んでいる．AM 手法としては大きく 2 つに分類することができ，金属粉体を使用するもの，ワイヤを使用するものである．金属粉末を使用するものは，高精細に造形ができるが造形速度が遅く，高価である．一方で，ワイヤを使用するものは，造形精度は劣るが高能率に造形でき，比較的安価である．ワイヤを使用するものは，最終形状に近い形状に造形して，後処理として切削することが前提のため，材料の使用料を抑えることが可能となる．また，造形能率が高いので，大型の製品適応を対象としている．

ワイヤを使用した AM 手法に、WAAM（Wire-Arc Additive Manufacturing）がある。MAG 溶接や MIG 溶接の技術を応用しており、レーザ等の高価な機材を使用しないため安価に造形することが可能であり、能率も高い。一方で、形状自由度が低くアークの安定性を考慮しないといけないため、材料の自由度が低い。広島大学で行っているレーザワイヤ AM は、融点直下近傍までワイヤを加熱しているため、レーザ吸収率の低い材料でも使用可能である。また、熱源にアークを用いていないため、アークの安定性などを考慮する必要がなく、様々な材料で使用可能である。また，半導体レーザのスポット形状の自由度を生かして、ニアネットシェイプでの造形が可能となる。

海外共同研究では、WAAM を使用して低入熱かつ高能率造形を行い、AM の経験を積む。また、広島大学で造形した高強度アルミニウムの A6061 の EBSD 分析を実施し、考察を行う．

5.2.1　供試材料

A5356 を対象に WAAM で積層造形を行った。ワイヤの化学組成を Table5.1 に示す。

Table 5.1　Chemical Composition of A5356.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A5356	≦0.25	≦0.40	≦0.10	0.05 ~0.20	4.5 ~5.5	0.05 ~0.20	≦0.10	0.06 ~0.20	Bal.

5.2.2　実験条件

実験の外観を Fig. 5.2 に示す。LINCOLN の Power Wave R500 を用いて実験を行った。実験条件は、リンカーンのプログラム 76 を使用して行った。また、ワイヤ送給速度は、高能率の 500cc/h を達成する条件に設定し、軸速度を変更して入熱量を変化させた。実験条件を Table 5.3 に示す。母材は A5053 を使用した。



Fig. 5.2　Experimental setup.

Table 5.3　Experimental conditions of WAAM.

Experiment number	001	002	003
Total Layer	20		30
Waveform	Pulse		
Wire feeding speed [inch/min]	291		
Heat input [kJ/min]	0.25	0.125	0.083
Travel speed [inch/min]	20	40	60
Ar shielding gas [L/min]	40		

5.2.3　実験結果

Table 5.3 の条件で造形した造形体外観を Fig. 5.4 に示す。



(a) 001



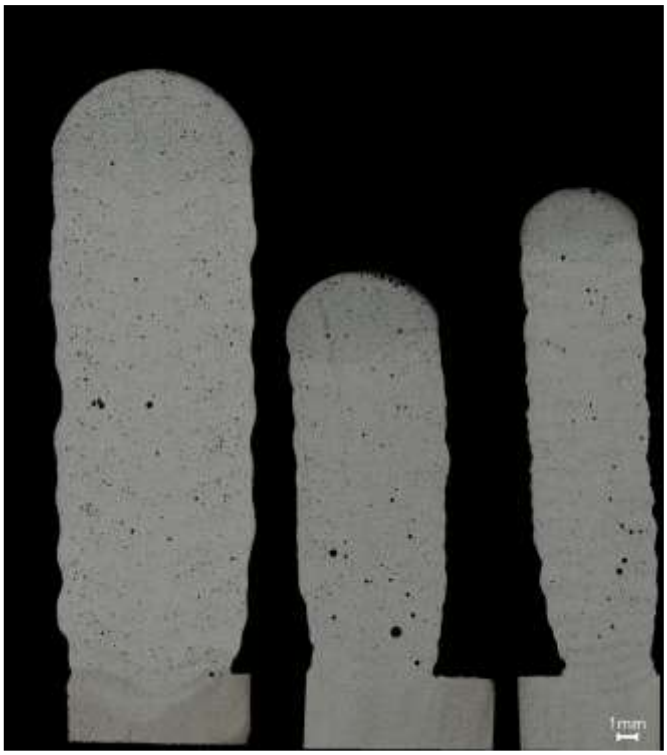
(b) 002



(c) 003

Fig. 5.4　Appearance of the fabricated body.

どの条件でも始端から終端まで大きな崩れなく良好な造形体を造形することができた．始終端部での形状制御では，どの条件も変更せずに行ったため，002，003 では過剰になったが，始終端部での待機時間を変更すればよりよい形状制御を行うことが可能となる．500cc/h の高能率条件でも，問題なく造形可能であることが確認できた．



(a)001　(b)002　(c)003

Fig. 5.5　Cross section.

溶接欠陥であるブローホールが多く確認された。1 断面しか見れていないので断定できないが，入熱量を変化させてもブローホールの発生傾向は特に確認されなかった。また、特に 002 と 003 の造形体で顕著に下層が十分に蓄熱されていないため、幅が狭くなり、蓄熱した上層では幅が広がる結果となった。ニアネットシェイプの造形を行う際に、下層の造形速度を落として幅広の造形体を作製し、上層は速度をあげて造形体の形状を制御するなどの応用ができることがわかる。また、今回は行えていないが、蓄熱を抑制するために待機時間を設けて造形物を冷却する方法も検討の余地があると考えている。

5.3.1　供試材料および実験条件

広島大学で高強度アルミニウム A6061 を対象に半導体レーザとホットワイヤ法を組み合わせて積層造形を行った。ワイヤの化学組成を Table 5.6 に示す。また，実験条件を Table 5.7 に示す.

Tabel 5.6　Chemical Composition of A6061.

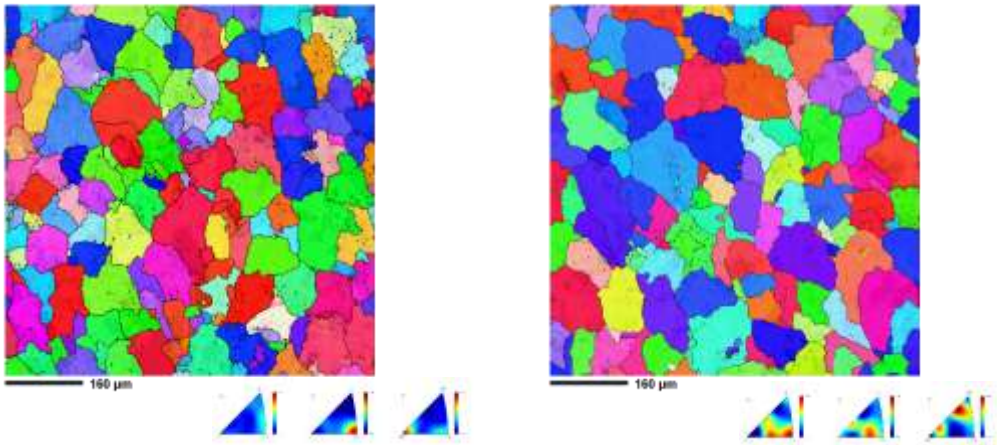
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A6061	0.07	0.12	0.35	0.02	1.03	0.13	0.00	0.06	Bal.

Table 5.7　Laser wire AM experimental conditions.

Experiment name	Cold-wire	Hot-wire
Total layer	20	
Laser oscillator	LD	
Laser power, kW	3.0	2.5-3.0
Spot shape, mm	2.5x5.0	
Defocus length, mm	+10	
Laser irradiation angle, deg	10	
Process speed, m/min	0.5	
Wire feeding angle, deg	40	
Wire feeding position, mm	0	
Wire feeding speed, m/min	5	
Feeding amount, cc/h	339.1	
Wire current, A	0	95-111
Energization distance, mm	70	
Ar shielding gas, L/min	45	

5.3.2　分析結果

Fig. 5.8 に熱処理前のコールドワイヤとホットワイヤの EBSD 分析結果を示す.



(a) Cold-wire　　(b) Hor-wire

Fig. 5.8　EBSD results of A6061.

分析範囲は，造形体トップである．コールドワイヤでも，ホットワイヤでも等軸晶の微細な結晶を確認した．コールドワイヤの平均結晶粒径が 46.5μm，ホットワイヤでは，53.3μm であり，ホットワイヤの方が若干粒径が大きい結果となった．この要因として，冷却速度や溶融池の温度履歴が影響していると考えているが，造形中に温度計測を行っていないので確実な考察を行うことができないため，今後は温度計測に挑戦したい．

6. まとめ

1 か月と短い期間ではあったが，一人で海外の大学に派遣されて研究を行うことは大変貴重な経験になった．カナダは世界中から多くの学生が集まっており，熱心に研究を行っている様子に刺激を受けることができた．また，どこを歩いても国際色豊かであり，現地の人が尊重しあい生活していることを実感した．

カナダの研究室の学生と会話する中で，日本の文化や歴史について説明できない，知らないことが多く，恥ずかしさを感じた．グローバル化社会の中で，自身の課題であると感じ，教養を深める必要性を感じた．本プログラムの経験は，自身の成長機会を与える貴重な経験となった．

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・協力をしていただいたウォータールー大学 Adrian Gerlich 教授，Xiaoye Zhao 様，Kelvin Huynh 様，Mahyar Hasanabadi 様ならびに CAMJ の皆様に厚く御礼申し上げます．また，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の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．