（マヒドン大学（タイ））　研修報告書
（ダブルパルス GMAW を用いた，アルミニウム合金接合技術の検討）

先進理工系科学研究科　機械工学プログラム　渡辺陽

1. はじめに

2025 年 7 月 24 日から 8 月 25 日までの間，マヒドン大学で共同研究した結果について報告する．

2. 研修/共同研究課題の決定

広島大学では,直流 GMAW とホットワイヤ法を用いたアルミニウム合金の接合技術の研究を行っている．しかし，直流 GMAW では高入熱による溶接変形が問題となる．そこで，本研究では入熱量を制御可能であるダブルパルス GMAW を用いて,溶接変形の小さい高品質な継手の作製を目的とした V 型開先における初層の溶接条件を検討した．

3. 研修/共同研究スケジュール

7 月 23 日 出国
7 月 24 日～8 月 25 日 研究
8 月 26 日 帰国

4. 研修先/共同研究派遣先の概要

大学名：Mahidol University
所在地：999Phuthamonthon 4Road, Salaya, Nakhon Pathom 73170 Thailand
指導教員：Prof. Eakkachai Warinsiriruk

5. 研修/共同研究の内容

5.1 概要

現在，大型液化水素運搬用タンクの技術開発が進められており，候補材料の一つとしてアルミニウム合金が注目されている．アルミニウム合金は低温環境においても高い靭性を保持し，軽量かつ比較的高強度であるという特長を有する．しかし，圧力を受けるタンクに適用する場合には，必然的に厚板が使用されることになる．

厚板アルミニウム合金の溶接においては，溶接変形やポロシティ，さらには凝固割れなどの欠陥が生じやすいことが知られている。これまで LNG や LPG タンクなどの製造では,大電流を用いた GMAW(Gas Metal Arc Welding) が主流であったが，入熱量が大きく，結果として非常に大きな溶接変形を伴うという問題があった。

そこで本研究では，派遣先であるマヒドン大学において，二種類のパルス波形を一定周期で組み合わせる DP-GMAW（ダブルパルス・ガスメタルアーク溶接）を適用した。DP-GMAW は低スパッタ・低入熱で，かつ均一なビード形成が可能であるという利点を持つ。本研究では特に，V 型開先を有するアルミニウム合金厚板継手の初層溶接条件に着目し，その最適化を検討した。

5.2.1　供試材料

母材にアルミニウム合金 A5083，添加ワイヤに ER5356（φ1.2)を用いた．以下にそれぞれの化学成分と，開先形状を示す．

Table 5.2.1 Chemical composition of specimens.

Material	Chemical composition, mass %								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A5083	0.40≤	0.40≤	0.10≤	≤0.40	0.40~1.0	≤0.40	0.25≤	0.15≤	Bal
ER-5356	0.05	0.11	0.10	0.16	5.00	0.05	0.10	0.07	Bal

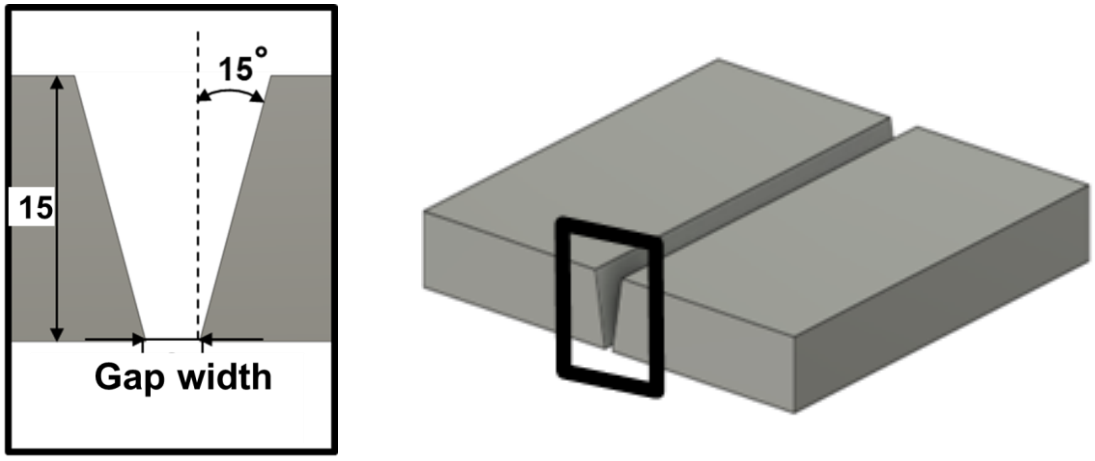


Fig. 5.2.1 Shape of V-groove.

5.2.2 実験機器

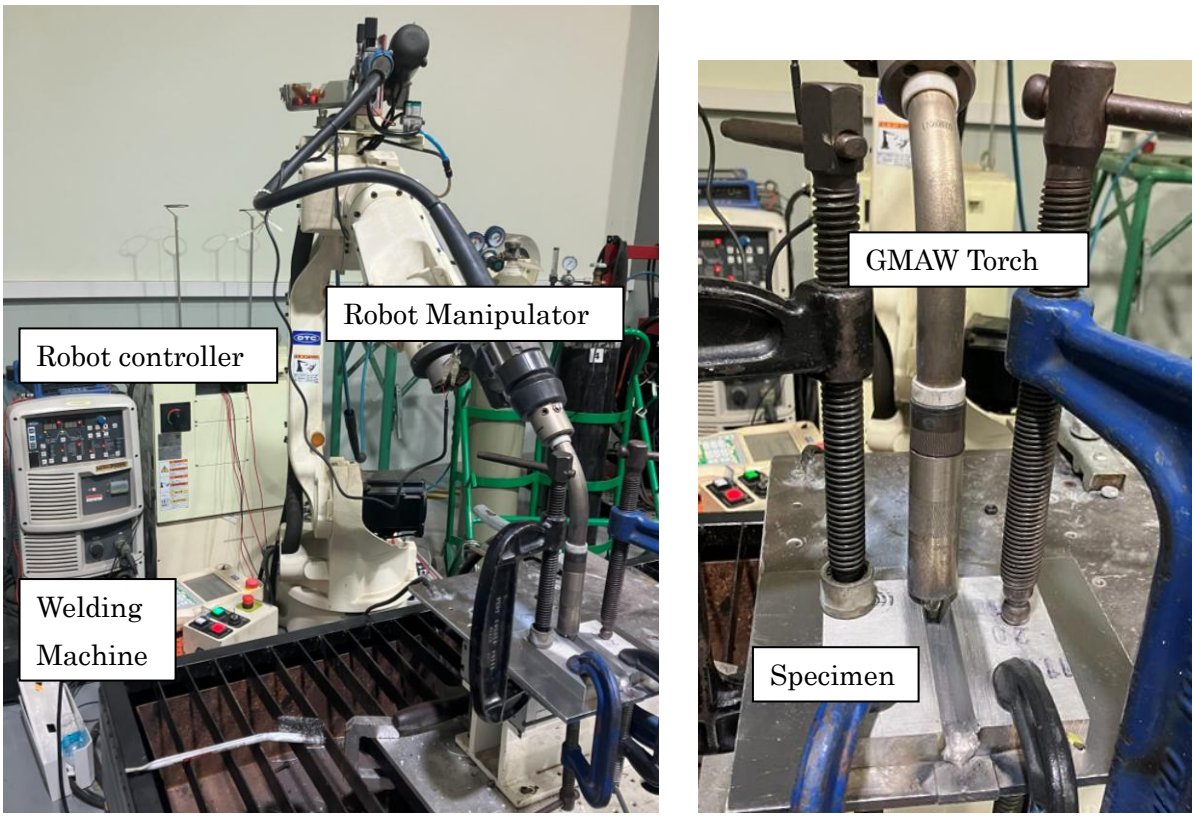
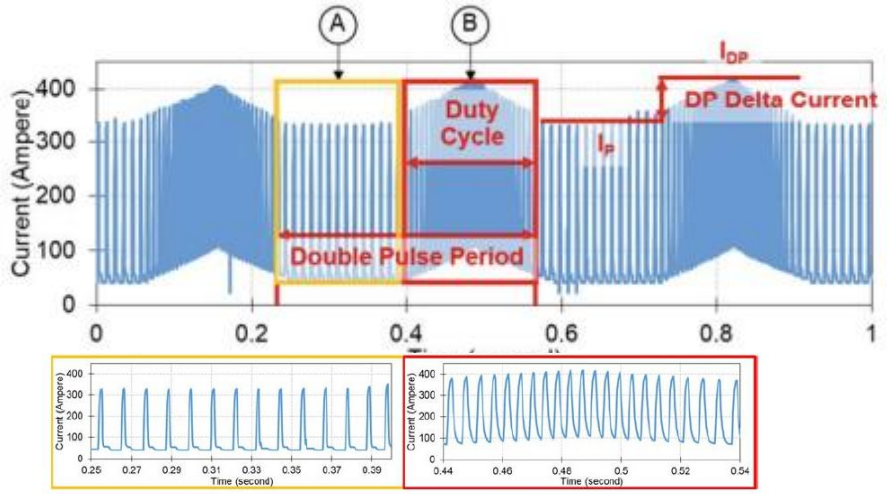


Fig. 5.2.2 Appearance of this experiment

実験外観を Fig. 5.2.2 に示す． Fig. 5.2.2 に示すように，DP-GMAW machine に Megmeet Electric Co.製の Astern 400 ADR を，溶接電源にダイヘン製の WB-P500L を使用した．また，アルミニウム合金は溶接変形が問題となるため，母材の A5083 に裏当て材として A5083 を敷き，点溶接を行った．また，母材の固定にはクランプを用いることで凝固収縮による変形の防止を試みた．

また，Fig. 5.2.3 にダブルパルス GMAW における電流値の一例を示す．ダブルパルスカレントとは，Fig.5.2.3 に示す様に，通常のパルス電流に加えて，ピーク値の大きい高電流パルスと低電流パルスを周期的に切り替える 2 重のパルス波形を使用した電流である．ダブルパルス GMAW では，高電流と低電流の周波数，デューティ比，ピーク値の差でアルΔ電流を独立に制御可能である．また，直流 GMAW と比較して，ビード幅・高さがより均一で安定した形状を形成できる．さらに，ダブルパルスにより平均入熱量を低減しつつ，溶滴移行を安定化できる．本研究では，Fig.5.2.2 に示す定義に従って溶接条件を決定した．



I_{DP}	Double Pulse Peak Current (Ampere)	I_{AVG}	Average Current (Ampere) ; $I_{AVG} = (I_{DP}T_{DP}+I_PT_P)/(T_{DP}+T_P)$
T_{DP}	Double Pulse Duration (ms)	Frequency	Double Pulse Frequency (Hz) ; F = 1/T (1/second)
I_P	Pulse Peak Current (Ampere)	Duty Cycle	Double Pulse Current Duration (%)
T_P	Pulse Duration (ms)	DP Delta Current	Double Pulse Delta Current $I_{DP} - I_P$ (Ampere)
T	Double Pulse Cycle Time (ms) ; $T = T_P+T_{DP}$;		

Fig. 5.2.2 Current of DP-GMAW.

5.2.3 実験条件（Ar ガス流量の検討）

Fig. 5.2.3 に Ar ガスの流量を検討した実験条件を示す．
Ar ガスの流量は，15，20，25 L/min の 3 種類で検討した．

Table 5.2.2 Experiment conditions (Effect of Ar gas volume).

Experiment number	16	8	9
Robot	OTC		
Wire feeding speed, [cm/min]	1800		
Torch angle, [deg]	90		
V-groove Gap width, [mm]	4		
CTWD, [mm]	25		
MIG current type	DP		
Idp, Double pulse(High) peak current, [A]	380		
Tdp, Double pulse duration, [ms]	0.1		
Ip, Pulse(Low) peak current, [A]	350		
Tp, Pulse duration, [ms]	0.1		
DP delta current, [A]	30		
Iavg, Average current, [A]	310		
Double pulse cycle time, [ms]	0.4		
DP frequency, [Hz]	5		
DP duty cycle, [%]	50		
Welding speed, [cm/min]	24		
Arc voltage, [V]	28		
Ar shielding gas, [L/min]	15	20	25

5.2.4 実験結果（Ar ガス流量の検討）

Fig. 5.2.3 に，Ar ガス流量を変化させた際のビード外観を示す.
Fig.5.2.3 の Ar ガス流量が 15, 20 L/min ではビード高さが大きく変化していることが確認できる. 一方，25 L/min では概ね均一な高さで比較的安定したビードが得られた. 以上より，Ar ガス流量は 25 L/min が適正な条件とした.

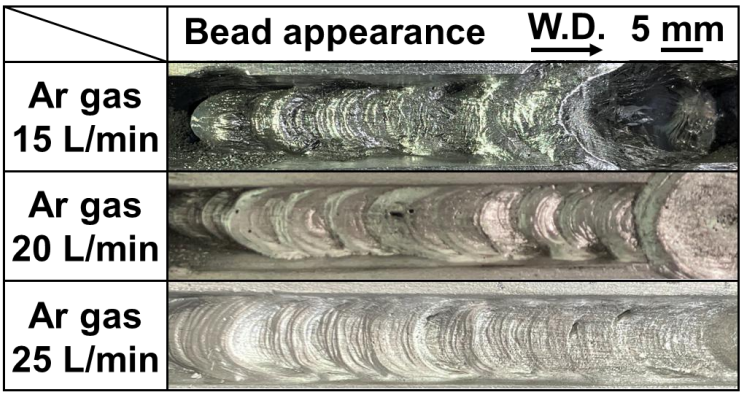


Fig. 5.2.3 Bead appearance (Effect of Ar gas volume).

5.2.5 実験条件（ギャップ幅の検討）

Table 5.2.3 に V 型開先のギャップ幅を 4, 6 mm と変更させた際の実験条件を示す.

Table 5.2.3 Experiment conditions (Effect of gap width).

Experiment number	9	10
Robot	OTC	
Wire feeding speed, [cm/min]	1800	
Torch angle, [deg]	90	
V-groove Gap width, [mm]	4	6
CTWD, [mm]	25	
MIG current type	DP	
Idp, Double pulse(High) peak current, [A]	380	
Tdp, Double pulse duration, [ms]	0.1	
Ip, Pulse(Low) peak current, [A]	350	
Tp, Pulse duration, [ms]	0.1	
DP delta current, [A]	30	
Iavg, Average current, [A]	310	
Double pulse cycle time, [ms]	0.4	
DP frequency, [Hz]	5	
DP duty cycle, [%]	50	
Welding speed, [cm/min]	24	
Arc voltage, [V]	28	
Ar shielding gas, [L/min]	25	

5.2.6 実験結果（ギャップ幅の検討）

Fig. 5.2.4 にギャップ幅を変更させた際のビード外観と断面写真を示す.
ビード外観より，ギャップ幅 4，6 mm においてビード高さが概ね均一で適正なものが得られている. また,断面写真からはギャップ幅が 4 mm においては裏当て材への溶け込みが全く見られなかった一方, 6 mm においてはよりアークが底部まで届いたことで裏当て材に十分な溶け込みが得られた. しかし, 両断面において壁面底部においてほとんど溶け込みが見られず，融合不良が見られた. さらに，ポロシティも多く見られた. ポロシティが見られた原因として，ワイヤが水素を吸収したことが挙げられる.

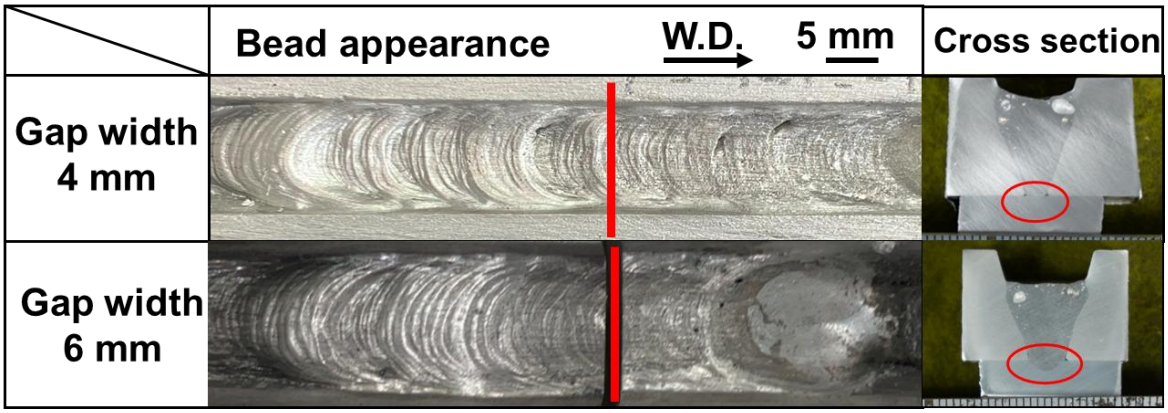


Fig. 5.2.4 Bead appearance and cross section (Effect of gap width).

5.2.7 実験条件（ウィービング周波数の検討）

Table 5.2.4 にトーチをウィービングさせ，その周波数を変化させた際の実験条件を示す.
ウィービング関数は Fig. 5.2.5 に示す様な直線形状のものを用いた.

Table 5.2.4 Experiment condition
(Effect of weaving frequency).

Experiment number	9	14	11
Robot	OTC		
Wire feeding speed, [cm/min]	1800		
Torch angle, [deg]	90		
V-groove Gap width, [mm]	4		
CTWD, [mm]	25		
MIG current type	DP		
Idp, Double pulse(High) peak current, [A]	380		
Tdp, Double pulse duration, [ms]	0.1		
Ip, Pulse(Low) peak current, [A]	350		
Tp, Pulse duration, [ms]	0.1		
DP delta current, [A]	30		
Iavg, Average current, [A]	310		
Double pulse cycle time, [ms]	0.4		
DP frequency, [Hz]	5		
DP duty cycle, [%]	50		
Welding speed, [cm/min]	24		
Weaving form	Liner		
Weaving freaquency, [Hz]	0	2	3
Arc voltage, [V]	28		
Ar shielding gas, [L/min]	25		

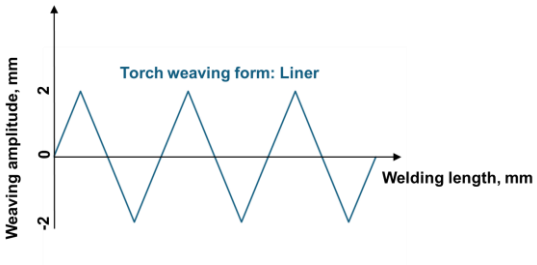


Fig. 5.2.5 Weaving form.

5.2.8 実験結果（ウィービング周波数の検討）

Fig. 5.2.6 にトーチのウィービング周波数を変化させた際のビード外観，断面写真を示す．ビード外観より，ウィービングなし，2，3 Hz 全ての条件において，概ね安定したビードが得られていることが分かる．断面写真からは，ウィービング周波数が大きくなるにつれて，壁面底部付近において溶け込みが大きくなっていることが分かる．特に，ウィービング周波数 3 Hz では壁面，裏当て材に対して十分な溶け込みが得られた．以上より，溶け込み，ビード外観の観点から，最適な初層の条件は,Ar ガス流量 25 L/min，ギャップ幅 6 mm およびウィービング周波数 3 Hz であることが分かった．また，全ての条件においてポロシティの発生が確認された．原因として，先ほど述べた様にワイヤが水素を吸収したからであると考えられる．本実験で使用したワイヤは，頻繁に屋外と空気が循環される環境で保管されていた．また，実験を行ったマヒドン大学では雨期の際に湿度が高く，2025 年 8 月の平均湿度は 76 %程度であった．このような環境において長年ワイヤを保管していたために，ワイヤが水素を吸収してしまったと考えられる．

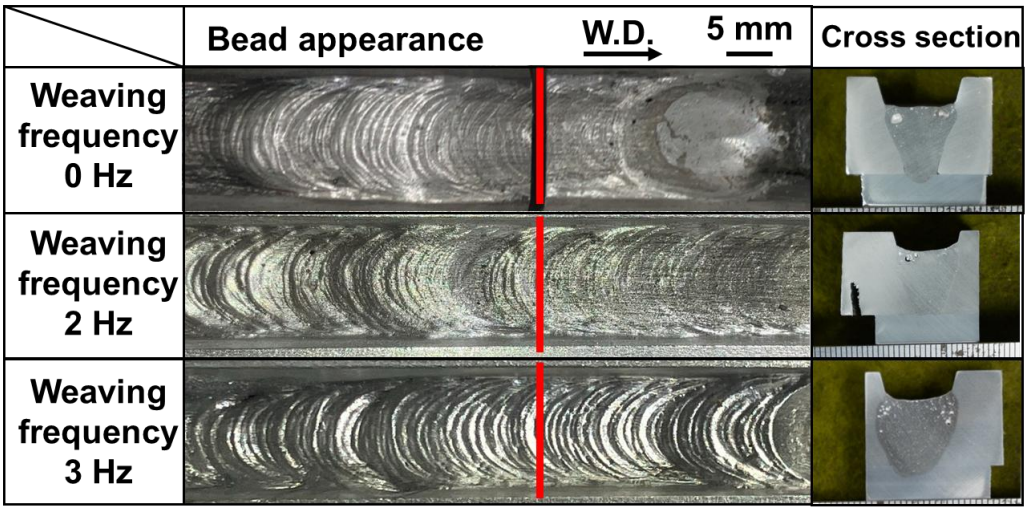


Fig. 5.2.6 Bead appearance and cross section (Effect of weaving frequency).

6. まとめ

1 か月という短い期間ではあったが，知り合いが誰もいない環境で研究活動および生活を送る経験は，非常に有意義なものとなった．

研究面では，これまで自分の研究で使用したことのなかったアーク溶接装置や材料を扱うことで，溶接に関する知識や理解が一層深まった．また，フライス盤や弓鋸，アーク溶接電源，ロボットなどの使用方法を英語で教わる中で，分からない点を自ら積極的に質問し，コミュニケーションを取る重要性を実感した．さらに，実験結果の考察を現地の学生と議論しながら進めることで，自分一人では得られなかった新たな視点や知見を得ることができ，研究は多様な意見を取り入れながら進めることの重要性を学んだ．

生活面においては，タイの人々の親切さやフレンドリーさを実感する機会が多く，飲食店の店員や学生など，さまざまな場面で温かく声をかけてもらった．現地の文化やマナーを尊重し，自ら積極的に挨拶を行い，伝統料理を楽しむなどの姿勢を示すことで，より良好な関係を築くことができ，タイの文化や習慣への理解を深めることができた．

本プログラムを通じて得た経験は，研究面・生活面の双方において自身にとってかけがえのない財産であり，将来，国際的な舞台で活躍するための大きな糧になると感じている．

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･協力をしていただいたマヒドン大学Eakkachai Warinsiriruk教授，ベル 様，ベン 様，ならびに FlEX LAB 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者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．