論説



チタン MIG(Metal Inert Gas) 溶接におけるコンタクトチップ融着に及ぼす諸因子の影響について

堀尾浩次*,南川裕隆*

Effects of Welding Parameters on Meltback in Titanium Metal Inert Gas Welding Process

Hirotsugu Horio and Hirotaka Minamikawa

Synopsis

A noble titanium welding wire for Metal Inert Gas Welding has been developed. The wire has oxygen-enriched surface layer which contributes to improve the arc stability and the regular droplet transfer in pure argon shielding gas. The shape and appearance of weld bead are excellent and the spattering is very few. However the meltback of contact tip is concerned during MIG welding process for titanium, because of the higher electric resistance of titanium.

The effects of oxygen content of oxygen-enriched layer of welding wire, contact tip temperature, mean arc voltage and contact tip to work distance (CTWD) on meltback were investigated, while phenomenon of meltback was observed by digital high speed camera (4000 frames/sec).

Meltback phenomenon was occurred along the following steps.

- a) Sparking was generated between titanium welding wire and inner surface of contact tip.
- b) Feeding of welding was stopped.
- c) The length of welding arc was increased very rapidly and finally the contact tip was burned off.

The welding wire with higher oxygen content in oxygen-enriched layer showed stable arc voltage and did not generate meltback, although the welding wire with lower oxygen content in oxygen-enriched layer arc voltage was unstable and meltback was sometimes observed.

The lower mean arc voltage and longer CTWD can provide stable arc and improve meltback phenomenon.

1. 緒 言

MAG(Metal Active Gas) 溶接および MIG(Metal Inert Gas) 溶接においては、コンタクトチップから給電を受ける溶接 ワイヤと母材との間にアークを発生させる. 連続的に送給 される溶接ワイヤは常にコンタクトチップと接触するので、コンタクトチップの孔内面の摩耗を招来し、溶接狙い位置のズレ、通電不良によるアーク切れ、溶接アーク現象 の乱れなどが発生する. また、コンタクトチップの孔内面の摩耗のみならず、コンタクトチップへのスパッタ付着に

よるコンタクトチップと溶接ワイヤの融着も発生する場合 ¹⁾ がある.このような現象が発生すると溶接能率が低下するばかりでなく,溶接手直し工程も追加され,生産能率が大幅に低下する.それらを抑制するために,コンタクトチップの交換時期の検討 ²⁾,コンタクトチップの摩耗を低減する研究 ^{3),4)},コンタクトチップの摩耗を検出する研究 ⁵⁾ などが報告されている.

しかし、上述の報告はいずれも軟鋼溶接ワイヤに関する ものであり、チタンに関する同様の研究はほとんど報告さ れていない.

JIS	Welding wire	Whole wire						surface layer
		Н	0	N	С	Fe	Ti	0
YTW270	Wire A	0.0031	0.088	0.005	0.012	0.03	Bal.	0.055
YTW340	Wire B	0.0038	0.105	0.005	0.010	0.03	Bal.	0.069
	Wire C	0.0031	0.105	0.006	0.011	0.03	Bal.	0.078
	Wire D	0.0031	0.114	0.006	0.017	0.03	Bal.	0.080
	Wire E	0.0029	0.117	0.005	0.013	0.03	Bal.	0.044
	Wire F	0.0030	0.131	0.005	0.010	0.03	Bal.	0.081
	Wire G	0.0036	0.143	0.006	0.009	0.03	Bal.	0.105
YTW540	Wire H	0.0027	0.160	0.006	0.011	0.03	Bal.	0.084
TP340H	Base metal	0.0020	0.110	< 0.005	< 0.005	0.03	Bal.	_

Table 1. Chemical composition of welding wires and base metal (mass%).

Table 2. Welding conditions.

	Test 1	Test 2		
Welding wire	Wire A — H	Wire C		
Mean welding current	230 — 235 A	250 — 300 A		
Mean arc voltage	27 V	25 — 29 V		
Contact Tip-to-Work Distance (CTWD)	25 mm	20 mm, 23 mm, 25 mm		
Wire feed rate	14010 mm/min			
Welding speed	300 mm/min			
Arcing time	Max. 80 s			
Shielding gas flow rate	Pure Ar 15 L/min			
Trailing shielding gas flow rate	Pure Ar 40 L/min			
Conduit tube	Metal liner 1500 mm			

一方,著者らはワイヤ表面に酸素濃化層を形成させることにより、ワイヤ送給性が優れ、かつ、アークが安定し、美麗な溶接ビードが得られるチタン MIG 溶接ワイヤを開発 6° し、各種産業分野においてチタンの溶接工程の能率向上に貢献している.

軟鋼溶接ワイヤと比較して、チタンの体積抵抗率は 53 × 10-8 Ω·m と鋼の体積抵抗率 (13 × 10-8 Ω·m) の約 4 倍 と大きく、コンタクトチップの給電部から溶接ワイヤ先端 部までのチタン溶接ワイヤの抵抗発熱量が大きいことから、コンタクトチップとチタン溶接ワイヤの融着、コンタクトチップの溶損などによる溶接能率低下が懸念される。そこで、本研究では、チタンの MIG 溶接におけるコンタクトチップの融着、溶損現象に及ぼす溶接パラメータの影響を調査するとともに、コンタクトチップの長寿命化の方法を検討した。

2. 実験方法

2. 1 供試材

本実験に使用した溶接ワイヤおよび母材の化学成分を Table 1 に示す. 供試溶接ワイヤの表面には酸素濃化層が 形成され, その酸素含有量は 0.044-0.105 mass% の 8 種類 で, Wire A は YTW270, Wire B-G は YTW340, Wire H は YTW540(JIS Z 3331) 相当である. 溶接ワイヤは全て公称径 1.2 mm(実測値 1.19 mm) である. また, 母材は TP340H(JIS H 4600) 相当で, 幅 50 mm, 長さ 500 mm, 厚さ 6 mm のチタン板を用いた.

Oxygen-enriched

2. 2 溶接ワイヤの酸素濃化層の影響調査 およびコンタクトチップと溶接ワイ ヤとの融着現象の観察

溶接ワイヤの酸素濃化層の影響を調査するため、Table 1 に示す 8 種類の溶接ワイヤを用い、ビード・オン・プレート溶接を実施した。 コンタクトチップはトーキン製 TOKINARC(長さ 45 mm、材質 Cr-Cu) ϕ 1.2 mm 用を使用した。母材のサイズによるアーク時間の制約上、溶接トーチはコンタクトチップと溶接ワイヤとの融着を促進させるために空冷トーチを用いた。溶接電源はダイヘン製デジタルパルス CPDP-350 を使用した。

溶接条件およびパルス条件をそれぞれ Table 2 (Test 1), Table 3 に示す. ワイヤ送給量を 14010 mm/min, チップ母

Table 3. Pulse condition.

Pulse peak current	410 A		
Pulse peak time	2.0 ms		
Base current	110 A		
Upper time	1.0 ms		
Down time	1.5 ms		

材間距離を 25 mm に調整し, 平均アーク電圧を 27 V 一定 とした. また, 溶接速度は 300 mm/min, 溶接長 400 mm としたので, アーク時間は最大 80 s になった.

コンタクトチップと溶接ワイヤとの融着現象はデジタル高速度カメラ(ナック製ハイスピードカメラシステム MEMRECAM fx-6000)を用いて 4000 画像 /s で観察した.また,同時にパルス溶接電流およびパルスアーク電圧をライブラリー製波形入力・表示システム COSMOS を用いて,0.125 ms ごとに測定した.

2.3 コンタクトチップの温度測定

Table 1 に示す溶接ワイヤ C を用いて, コンタクトチップ先端の側面に白金/白金ロジウム熱電対を取付け, アーク発生中のコンタクトチップ温度を 1 s ごとに測定した.

Table 2 (Test 2) に示す溶接条件で、コンタクトチップ、溶接施工方法、溶接電源、パルス条件は 2.1 と同様である。チップ母材間距離を 20 mm、23 mm、25 mm と、平均アーク電圧を 25 V、27 V、29 V と変化させた.

本実験においても、溶接アーク現象を 4000 画像 /s で撮影するとともに、パルス溶接電流およびパルスアーク電圧を波形入力・表示システムを用いて 0.125 ms ごとに測定した.

3. 実験結果

3. 1 コンタクトチップと溶接ワイヤとの 融着現象

酸素濃化層の酸素含有量が最も低い溶接ワイヤEのみ、アーク発生後約 14 s でアークが停止し、コンタクトチップと溶接ワイヤが融着した. 融着したコンタクトチップの外観を Fig.1 に示す. コンタクトチップ先端部は溶損していた. また、高速度カメラで撮影したアーク停止直前の溶接ワイヤの挙動を Fig.2 に示す. アーク発生からアーク時間 13.762 s までは同程度のアーク長であったが、それ以降、アークが発生するたびに、アーク長がしだいに長くな



10 mm

Fig.1. Appearance of contact tip meltback.

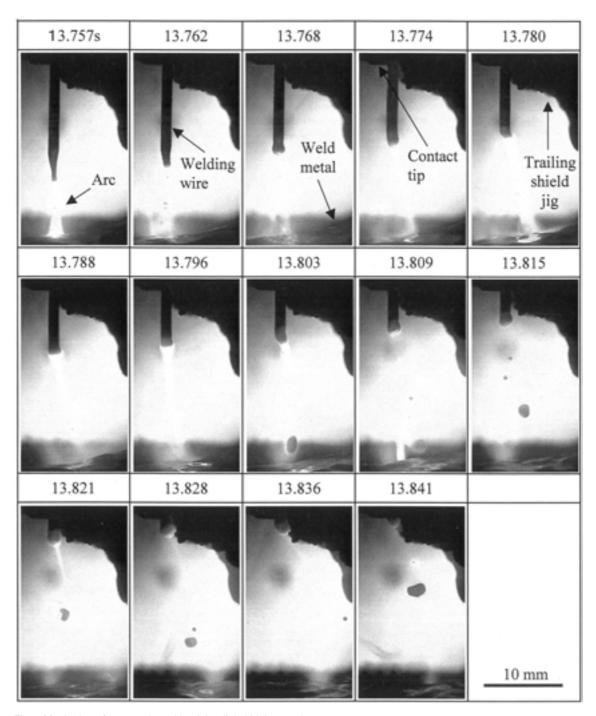
り,アーク発生から13.836 s 後に,溶融し溶接ワイヤ先端がコンタクトチップ先端に接触し,融着した.さらに,アークは溶接ワイヤ先端からではなく,コンタクトチップ先端部 付近にはスパッタ付着およびスパッタの堆積などは認められなかった. Fig.3 にアーク電圧波形を示す.アーク発生から13.762 s 以降,時間の経過とともにしだいにアーク電圧が上昇した.

3. 2 溶接ワイヤの酸素濃化層の酸素含有量とコンタクトチップ融着の関係

3.1 で上述したように、酸素濃化層の酸素含有量が最も 低い溶接ワイヤ E のみ, コンタクトチップと溶接ワイヤ が融着し、それ以外の溶接ワイヤでは、融着は発生せず、 良好な溶接ビードが得られた. 融着する前のアーク電圧の 波形を Fig.4 (a) に示す. Fig.4 (b) には、融着しなかった 例として, 溶接ワイヤ D のアーク電圧波形を示す. 溶接 ワイヤEおよび溶接ワイヤDのいずれにおいても、急激 にピーク電圧が上昇する現象が認められたが, 融着が発生 した溶接ワイヤ E では、融着が発生しなかった溶接ワイ ヤDに比べ、その程度および頻度が顕著であった。Fig.5 (a), Fig.5 (b) に溶接ワイヤEおよび溶接ワイヤDのリサー ジュ図形をそれぞれ示す. 融着した溶接ワイヤ E のピー ク電圧の乱れは融着しなかった溶接ワイヤ D に比べ大き かった. ピーク電圧が 40 V および 45 V 以上となる頻度を 測定した結果を,溶接ワイヤ表面の酸素濃化層の酸素含有 量で整理し、Fig.6 に示す. 溶接ワイヤ表面の酸素濃化層 の酸素含有量が増加するにつれてピーク電圧が40Vおよ び 45 V 以上となる頻度が低下する傾向を示した. なお, パルス周波数は 155-165 Hz であった.

3.3 コンタクトチップの温度測定結果

平均アーク電圧 29 V の場合のコンタクトチップ表面の温度測定結果を Fig.7 に示す.チップ母材間距離が短いほど,コンタクトチップの温度は急激に上昇した.チップ母材間距離 20 mm ではアーク時間 27 s でコンタクトチップと溶接ワイヤが融着した.融着したときのコンタクトチップ表面の温度は 700 ℃であった.チップ母材間距離を 25 mm一定とした場合のコンタクトチップ表面の温度測定結果を Fig.8 に示す.平均アーク電圧が高いほど,コンタクトチップの温度は急激に上昇した.溶接時間 80 s の場合のコンタクトチップ表面の最高到達温度に及ぼすチップ母材間距離および平均アーク電圧の影響を Fig.9 に示す.チップ母材間距離が短く,平均アーク電圧が高いほど,コンタクトチップ表面の最高到達温度が上昇する傾向を示した.



 $\label{prop:contact} \mbox{Fig.2. Monitoring of contact tip meltback by digital high-speed camera.}$

4. 考 察

4. 1 コンタクトチップと溶接ワイヤとの 融着現象

溶接時間は 80 s と短く,溶接ワイヤとの摩耗によるコンタクトチップの孔に変形が認められないこと,コンタクトチップ先端部付近にスパッタ付着およびその堆積が認

められないこと (Fig.2), および, 融着したときのコンタクトチップの表面温度は 700 ℃ (Fig.7) であり, コンタクトチップが溶融する温度ではないことから, コンタクトチップ孔内部に溶接ワイヤと融着した原因が存在していると考えられる. そこで, 融着したコンタクトチップの孔内面の状況を確認するため, 長手方向に切断した. Fig.10 に融

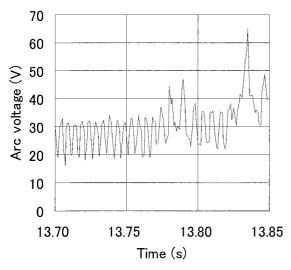
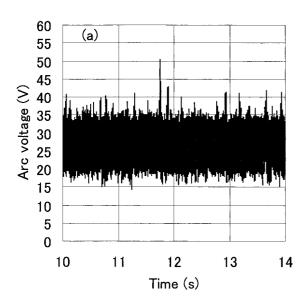


Fig.3. Monitoring of arc voltage just before contact tip meltback.



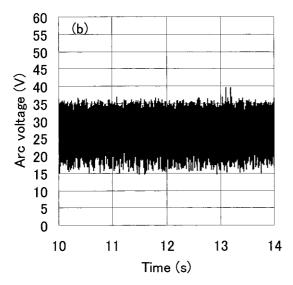
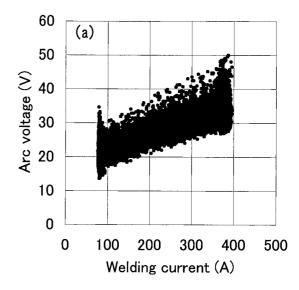


Fig.4. Result of measuring arc voltage. (a) Wire E, (b) Wire D



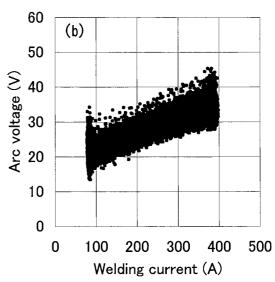


Fig.5. Result of Lissajou's figure.(Chart of pulsed welding current -pulsed arc voltage)

(a) Wire E, (b) Wire D

着したコンタクトチップの孔内面の外観を示す. コンタクトチップ先端に溶接ワイヤが融着した痕跡が認められた. また, Fig.11 にコンタクトチップと融着した溶接ワイヤの 先端の外観を示す. 溶接ワイヤ表面には銅が付着した痕跡が認められた. 溶接ワイヤとコンタクトチップ孔内面との間にスパークが発生し, それによってコンタクトチップ孔内部で融着したと考えられる.

また, Fig.1 のようなコンタクトチップの溶損はアークがコンタクトチップから発生したことが要因と考えられる.

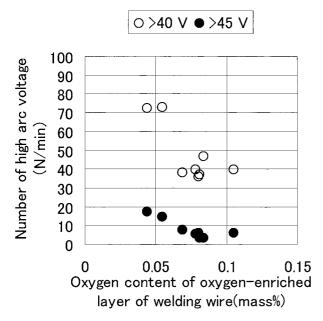


Fig.6. Relationship between oxygen content of oxygen-enriched layer of welding wire and pulsed peak arc voltage.

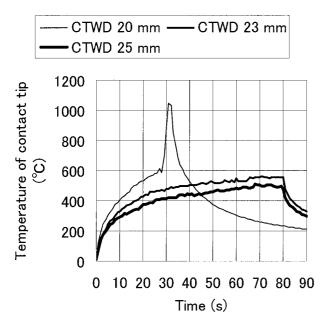


Fig.7. Effect of contact tip to work distance (CTWD) on contact tip temperature in arc voltage 29 V.

4. 2 コンタクトチップと溶接ワイヤの融 着に及ぼすワイヤ表面酸素濃化層酸 素含有量の影響

Fig.4 に示すアーク電圧波形の中でピーク電圧が急激に上昇した場合の溶接アーク現象を Fig.12 (a) に,通常のピーク電圧の溶接アーク現象を Fig.12(b) に示す. ピーク電圧が急激に上昇した場合のアークは,指向性および集中

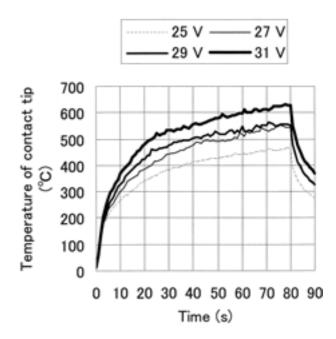
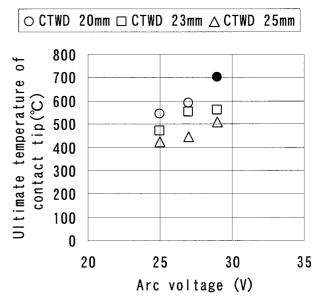


Fig.8. Effect of arc voltage on contact tip temperature (CTWD: 25 mm).



Close; Fusing of the wire and contact tip

Fig.9. Effects of contact tip to work distance and arc voltage on ultimate contact tip temperature.

性に乏しく、方向性も不安定であった. Fig.13 にスパークが発生するモデル図を示す. 通常のアークは真下付近に向けてアークが出ており、給電点は変化していない. 一方、アークが他方向に向けて発生すると、溶接ワイヤもその方向に向かい、給電点が変動し、その瞬間にコンタクトチップと溶接ワイヤの間にスパークが発生していると考えられる. そして、アーク放電とスパーク放電が同時に発生す

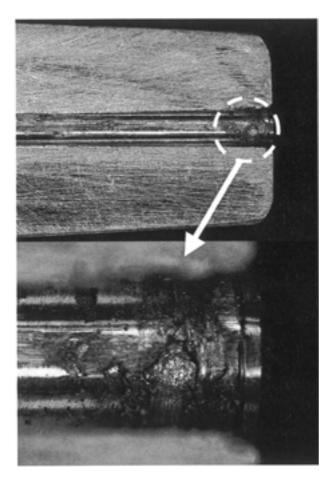


Fig.10. Sparked trace on contact tip top of meltback.

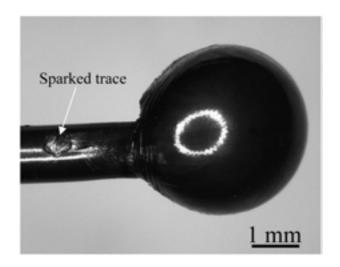


Fig.11. Sparked trace on welding wire of meltback.

ることとなるため,通常より高いピーク電圧が生じたと考えられる。Fig.3 においても,通常より高いピーク電圧が観察された。

ワイヤ表面の酸素濃化層は溶融池に移行したときに酸

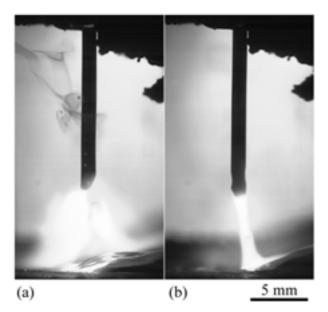


Fig.12. Comparison of welding arc phenomenon. (a)Irregular and higher peak arc voltage. (b)Stable peak arc voltage.

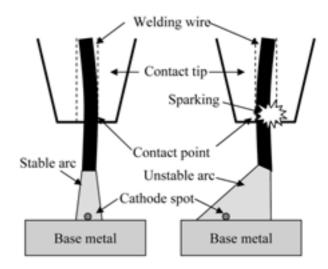


Fig.13. Schematic diagram of sparking in contact tip hole.

化物としての機能を発揮し、陰極点を安定させている. 従って、ワイヤ表面の酸素濃化層酸素含有量の多い溶接ワイヤの方が、アーク電圧波形の乱れが少なくなり、コンタクトチップと溶接ワイヤとの融着現象が発生しなかったと考えられる.

4. 3 コンタクトチップと溶接ワイヤとの 融着に及ぼすコンタクトチップの温 度の影響

高速度カメラの撮影画像より、ワイヤ突出し長さを測定した. コンタクトチップの温度をワイヤ突出し長さで整理した結果を Fig.14 に示す. チップ母材間距離および平均アーク電圧に関係なく、ワイヤ突出し長さが長くなるほど

コンタクトチップの温度上昇は抑えられた. アークから遠ざかり, 輻射熱を受けにくくなったことが要因と考えられる. しかしながら, 融着したときのコンタクトチップの表面温度は700 \mathbb{C} で, コンタクトチップの融点(1083 \mathbb{C})には到達していないので, 溶接ワイヤの融着に及ぼすコンタクトチップ先端部温度の影響は少ないと考えられる. そこで, パルスアーク電圧に注目し, Fig.15 にチップ母材間距離 20 mm, 平均アーク電圧 29 V の融着が発生したリサージュ図形を示す. そのリサージュ図形はワイヤ表面酸素濃化層の酸素含有量が少なく, 融着が発生した Fig.5 (a) と類似の形状で, ピーク電圧の乱れが大きかった. 従って, 4.2 と同様に溶接ワイヤとコンタクトチップ孔内面との間にスパークが発生していたと考えられる.

4. 4 ピーク電圧の乱れに及ぼす平均アーク 電圧の影響

チップ母材間距離20 mm, 平均アーク電圧27 Vのリサージュ図形を Fig.16 に示す. 平均アーク電圧29 V のリサージュ図形Fig.15に比べるとピーク電圧の乱れが低減しており, 平均アーク電圧が低いほどピーク電圧が安定していた. その傾向はチップ母材間距離23 mm,25mmにおいても認められた. Fig.17 に溶接ビード幅に及ぼす平均アーク電圧の影響を示す. 平均アーク電圧の増大とともに溶接

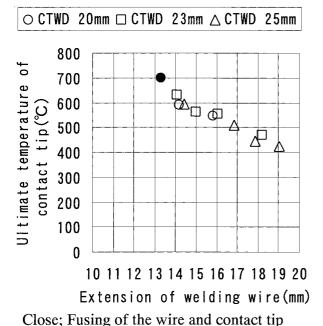


Fig.14. Effect of wire extension on contact tip temperature. (CTWD; contact tip to work distance)

ビード幅も広くなった.また,チップ母材間距離が短くなるほど,溶接ビード幅は広くなる傾向を示した.最も幅の

広い溶接ビードでコンタクトチップと溶接ワイヤの融着が発生した.溶接ビード幅が広くなったことは溶融池の幅も広がったことを意味しており、それによって、溶融池に形成される陰極点の変動が大きくなり、それに伴って、不

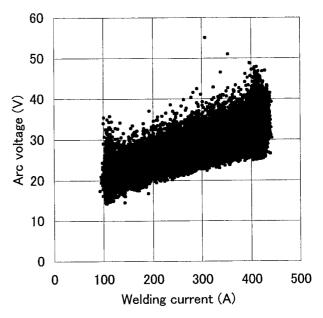


Fig.15. Lissajou's figure (chart of pulsed welding current - pulsed arc voltage) of arc voltage 29 V and CTWD 20 mm before meltback.

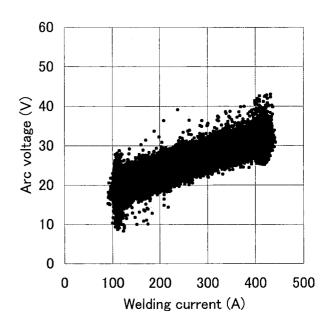
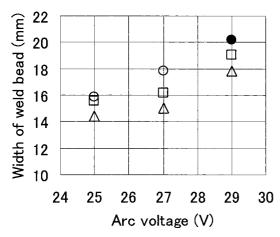


Fig.16. Lissajou's figure (chart of pulsed welding current - pulsed arc voltage) of arc voltage 27 V and CTWD 20 mm without meltback.

安定なアークが発生する頻度が多くなったことが, ピーク 電圧の乱れの原因であると考えられる. また、ピーク電圧の乱れに及ぼす溶接ビード幅の影響を確認するために、Fig.15 の溶接条件の溶接速度を 300 mm/min から 600 mm/min に変更して、溶接を実施した.溶接ビード幅は 1/2 程度となり、コンタクトチップと溶接ワイヤとの融着現象は認められなかった. Fig.18 にそのリサージュ図形を示すが、ピーク電圧の乱れは大幅に減少した.このことから、溶接ビード幅がピーク電圧の乱れに影響を及ぼしていることが確認された.





Close; Fusing of the wire and contact tip

Fig.17. Effect of mean arc voltage on width of weld bead.

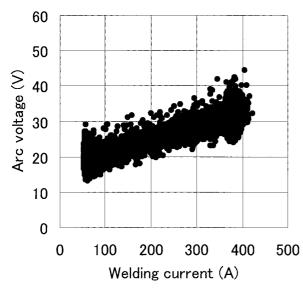


Fig.18. Lissajou's figure (chart of pulsed welding current - pulsed arc voltage) of arc voltage 27 V, CTWD 20 mm and welding speed 300 mm/min without meltback.

5. 結 論

チタンの MIG 溶接におけるコンタクトチップ融着に及ぼす溶接パラメータの影響を調査するとともに、コンタクトチップ融着の抑制方法を検討し、以下の結論を得た.

- (1) チタンの MIG 溶接におけるコンタクトチップと溶接ワイヤとの融着現象は, 下記プロセスを経て発生することが 観察された.
 - ・コンタクトチップ孔内面と溶接ワイヤとの間の放電に ともなう溶接ワイヤの融着.
 - ・溶接ワイヤの送給停止.
 - ・急激にアークが伸長し、コンタクトチップ先端部から アークが発生し、コンタクトチップ先端部が溶損.
- (2) ワイヤ表面の酸素濃化層酸素含有量の多い溶接ワイヤの方が、アーク電圧の乱れが少なく、コンタクトチップと溶接ワイヤとの融着現象は認められなかった.
- (3) コンタクトチップ先端温度がコンタクトチップの融点 以下の700℃で、コンタクトチップと溶接ワイヤとの融着 現象が発生したことにより、コンタクトチップ融着に及ぼ すコンタクトチップ先端温度の影響は少ないと考えられ る.
- (4) 平均アーク電圧を低く、チップ母材間距離を大きくすることにより、アーク電圧の乱れを抑制し、コンタクトチップと溶接ワイヤとの融着を防止できる.
- (5) 溶接ビード幅が狭いほどアーク電圧の乱れは抑制された.

(文献)

- 1) 岡崎勲夫:溶接技術,51(2003)4,112.
- 2) 田淵憲治:溶接技術,51(2003)6,124.
- 3) J. Villafuerte, : Weld. J, 79 (2000)5, 45.
- 4) J. Villafuerte, : Weld. J, 78 (1999)12, 29.
- 5) T.P.Quinn, R.B.Madigan, M.A.Mornis and T.A.Siewert: Weld. J, 74 (1995)4, 115.
- 6) 堀尾浩次,南川裕隆,山田龍三:チタン,53(2005),282.
- 7) 堀尾浩次, 豊田和洋:電気製鋼, 75(2004), 231.
- 8) T.Kostrivas, L.Smith, G.Melton, A.Plewka: The bulletin, jan/feb (2006), 8.