U.D.C. 621.791.755.03

# 日立100Aプラズマ溶接機の開発 Development of HITACHI Plasma Arc Welder with 100A Current Capacity

Plasma arc welding process is being used for a number of industrial applications. The plasma arc process offers greater welding speeds and better weld quality. This report introduces some operation data for plasma welding by means of a Hitachi plasma arc welding torch with a current capacity of 100 amperes. A variety of materials including stainless steel, mild steel, titanium and copper have been sucessfully welded by plasma. Advantages of plasma welding in comparison with those of the conventional inert gas tungsten method are also discussed.

田口裕也*	Hiroya Taguchi			
今永昭慈**	Shôji Imanaga			
坂上光広***	Mitsuhiro Sakagami			
島田 実***	Minoru Shimada			

## 1 緒 言

-

1.4

10. 10

- 10

10 17

1 pr

- 11

÷

- 4

Sug

- - - and

- 34

14. M

X

D'

· b

- ×

14.

~ #

1 14

X 4

-

- 7

10

State and

プラズマ溶接法は、プラズマジェット トーチ内の小口径ノ ズルを通して、タングステン電極と母材間に発生するアーク を用いる融接法である。プラズマアークは、ノズル壁および シールドガスによって狭搾(さく)されるため、TIGアーク (Inertgas Tungsten Arc)と比べて電流密度が著しく高めら れている。従来の溶接法と比較してプラズマ溶接法の特長は、

# 2 プラズマ溶接機の概要

2.1 プラズマアーク発生機構

図1はプラズマアーク発生機構を示すものである。

プラズマトーチ内のタングステン製陰極と銅製陽極ノズル の間に小電流アーク(パイロットアークと呼ぶ)を発生させ、 超高温に加熱されたプラズマガスをノズルより噴出させる。 このパイロットアークによって、タングステン製陰極と母

(1) 溶接の高速化,高能率化が図れる。

(2) 熱影響部およびひずみの少ない溶接ができる。

(3) アークに指向性があり磁気吹がない。

(4) スパッタの発生がなく、美麗なビード外観を有する。

(5) アーク長の変動に対して溶け込みが安定している。

(6) タングステン電極の消耗が少ない。

日立製作所では、これらの特長を生かした日立100Aプラズ マ溶接機を開発した。本稿は、その性能および適用について 述べる。 材の間の絶縁を破りメインアークを母材に移行させる。メイ シアークは、ノズル壁およびシールドガスによるサーマルピ ンチ効果によってエネルギ密度が高められている。

## 2.2 プラズマ溶接機の仕様

表1は本機の仕様を示すものである。

直流電源は制御部,高周波発生装置,ガス制御部を内蔵す る一体形装置で,パイロットアーク回路とメインアーク回路 をそれぞれ別回路で構成し,パイロットアーク電流をメイン アーク電流に関係なく一定条件にするようにした。

パイロットアーク電流は、一定のため抵抗により垂下特性

#### 表 | プラズマ溶接機の仕様

Table I Specifications of Plasma Arc Welder

	形式	U R-M			
溶	定格出力電流	100 A			
	定格一次電圧	3 ¢200V 50/60Hz			
	定格一次入力	約10kvA			
接	定格負荷電圧	30 V 90 V			
	最高二次無負荷電圧				
電	定格使用率	60%			
源 -	出力電流調整範囲	5~100A			
	スタート電流調整範囲	"			
	クレータ電流調整範囲	"			
	重量	250 kg			
溶	形式	UW-II			
	定格電流	100A			
接	定格使用率	100%			
<b>k</b>	タングステン電極	2.4 <i>¢</i>			
	冷却方式	水冷(21/min, 3kg/cm2)			
1	ケーブル長さ	4 m			
F	溶 接 能 力	0.2~4.0 mm <sup>t</sup>			
	重量	250g(トーチ本体)			
冷却水装置	形式	UP-HB			
	電源	Ι φ100V 50/60Hz			
	出 カ	200W			
	タンク容量	約801			
E	重量	約60kg			

43



図 | プラズマアーク発生機構 プラズマアークの発生原理およびその機構を示す。

Fig. I Schmatic Diagram of Plasma Arc Operation

\*日立製作所機械研究所 工学博士 \*\* 日立製作所機械研究所 \*\*\* 日立製作所亀戸工場



図2 プラズマ溶接機 日立100Aプラズマ溶接機の外観を示す。 Fig. 2 Appearance of Plasma Arc Welder

を出す簡単な形とし、メインアーク回路は可飽和リアクトルを使用し、連続調整の可能な電流制御方式を採用した。

トーチの保護のため冷却水,またはプラズマガスが接続されていないとアークが飛ばないように保護用の圧力スイッチを設けた。ガス流量計はプラズマガス用一本,シールドガス用



図 4 プラズマトーチ 100Aプラズマトーチは, 軽量小形で, 手動操作 も容易である。

Fig. 4 Appearance of Plasma Torch

ノズルの冷却面積を大きくとっている。

タングステン電極は、ノズル孔のセンターに合致する支持 構造として心ずれによるパイロットアークの不安定をなくす とともに、タングステン電極とノズル間寸法の調整も任意に 行なえる形とした。

一本とし、プラズマガスにはアルゴンガスを、シールドガスに は混合比が一定のアルゴン水素混合ガスを用いる形とした。

プラズマ溶接機の外観は図2に示すとおりである。

プラズマ溶接装置は、直流電源および制御部、溶接トーチ、 冷却水装置ならびに付属品から成り、図3のように接続される。 図4はプラズマトーチの外観を示すものである。

ノズル部は間接冷却式とし、ボデー金具に冷却水を送り、

シールドガスの流れ方は溶接結果を左右するので,特殊形状のシールドキャップによって,ガスの流れを整流して,ノ ズルに沿った層流を得る方式とし,シールド効果を増大させた。

本装置は、特にプログラム制御装置を内蔵し、図5のように操作方式は作業個所に見合った操作が選定できるように改善されている。





ガスホース (No.2シールドガス)を接続して 使用する。

図 3 プラズマ溶接装置の構成 プラズマ溶接装置は直流電源および制 御部,溶接トーチ,冷却水装置ならびに付属品から成っている。 Fig. 3 System of Plasma Arc Welder

44

図 5 操作法 スタート電流,溶接電流およびクレータフィラ電流の操作 法を示す。

Fig. 5 Operation of Plasma Arc Welder

また、スタート時の溶接材料の溶け落ち防止、終端部クレー タ防止のための電流調整(スタート電流、クレータフィラ電流) およびその時間を調整することができる。

したがって、溶接開始後は設定どおり、スタート電流、溶 接電流、クレータフィラ電流とプログラム制御する必要のあ る自動機などにも応用できる構造である。

## 3 アーク特性

+ +

1 1

- 9

- 26

100 W

t se

- A

A

ser.

1-4

in the

2 2

Sec.

11-de

2. 14

1. W.

14

- 7

20

Sta. and

溶接にプラズマアークを利用するためには,そのアーク特 性を十分明らかにする必要がある。本実験では,プラズマアー クおよびTIGアークの電圧-電流特性の測定およびアーク形 状の観察を行ない,両者のアーク特性の比較を行なった。

#### 3.1 実験方法

アーク特性の測定には、水冷銅板を陽極として用いた。ア ーク形状の観察は、同一フィルタ(ND4+ND8)、同一露 出の写真撮影によって行なったもので、相対的なアーク形状 の比較を目的としている。

### 3.2 パイロットアークの効果

図6は、プラズマアークおよびTIGアークに対する電圧・ 電流特性曲線である。電流15A以下でTIGアークは負特性 を示すが、プラズマアークはほぼ平たんな電圧・電流特性を 示しており、小電流範囲におけるプラズマアークの安定性は すぐれている。 と同一であり、パイロットアークのアーク柱もメインアーク の一部であるため、タングステン電極の陰極降下およびメイ ンアークのアーク柱の大部分にパイロットアークのエネルギ が供給されているため、メインアークは小電流でも安定なア ークを発生することができる。

#### 3.3 アーク形状

アーク長を変えた場合のアーク電圧およびアーク形状写真 はそれぞれ図8、9に示すとおりである。プラズマアークの 場合は、アーク長が増すほどアーク電圧の増加率が大きくな り、その場合のアーク形状はアーク長が長くなるほどアーク の裾(すそ)=(アーク幅)が狭くなり、アーク柱が円筒形に近 くなる傾向がある。一方、TIGアークの場合は、シールドガ スにArまたはAr+H<sub>2</sub>を用いたいずれの場合も、つり鐘状のア ーク形状を呈しており、アーク長の増加に従い、アークの裾 が広がる傾向にある。

プラズマアークの広がり角度は、**TIG**アークのそれの約4 程度であり、アーク長の変化に対して陽極近傍での電流密度 の変化が少ないことを示している。

図10は、プラズマガス流量を変えた場合のプラズマアーク を示すものである。プラズマガス流量を多くするほどアーク の広がりが大きくなっている。この理由は、プラズマガス流 量を多くすると、アークの陽極点付近に噴出するプラズマジ ェット流速が増大し、シールドガスが陽極点近傍から周囲へ

これは、プラズマアークではパイロットアークを発生させてメインアークを安定させているためである。

図7はパイロットアーク電流を変化させた場合のメインア ークの電圧・電流特性を示すものである。

同図から明らかなように、パイロットアーク電流を増加させていくと、メインアーク電圧・電流曲線は負特性より定電圧特性に変わっていき、ほぼ10~15A以上になるとメインアーク電圧はほとんど一定となり、パイロットアーク電流による変化も微少となる。

このプラズマアークの平たんな電圧・電流特性は、パイロ ットアーク電流の助けによるもので、パイロットアーク電流 が少なくなると、TIGアーク特性に近づきアークの不安定 が生ずる。

すなわち、パイロットアークの電極はメインアークの電極

押しやられるのでアーク柱へのシールドガスの冷却効果が弱 められるものと推察される。したがって、この状態で溶接を 行なうとジェット力によって溶融池が掘られ穴が生ずる結果 となる。また、プラズマガス流量が少なすぎると、図中のよ うに陽極点近傍のアークがくびれて不安定になりやすい。

3.4 各ノズルの許容範囲

図11は各ノズルロ径に対するプラズマガス流量とアーク電流の許容範囲を示したものである。各ノズルに対してわく内が許容範囲となる。許容範囲外は、次の四つの領域に分けられる。

A領域:アーク不安定またはスタート不安定領域 B領域:アーク不安定領域 C領域:母材に穴があく不良溶接領域 D領域:ダブルアーク領域





図 6 プラズマとTIGアークの性質 プラズマアークおよびTIGアー クの電圧-電流特性曲線を示す(図中のSはシールドガス)。 Fig. 6 Characteristics of Plasma Arc and TIG Arc 図7 メインアーク電圧,電流特性 パイロットアーク電流を変化さ せた場合のメインアークの電圧-電流曲線は,パイロットアーク電流が増すほど 定電圧特性に変わって行き安定することがわかる。 Fig. 7 I-V Curve for Plasma Arc

45

A領域は、プラズマガス流量不足により、アークの硬直性 に乏しくアークが不安定となる。

B領域は、電流不足により入熱が少なく溶け込み不足となる。 C領域は、高電流、ガス流量過多により入熱が多すぎるために、極度のアンダカットまたはガウンジング状態となる。 D領域は、高電流のために、アーク柱がノズル壁に接触し てノズルよりダブルアークが発生し、ノズルを溶損したり、 またダブルアークによりメインアークの電流が不安定となり 局部的に溶け込み不良を起こす領域である。

これらのことから,電流,ノズル径およびプラズマガス流 量の選定は,被溶接部の形状,材質,板厚,溶接速度などに より最適条件を選ぶ必要がある。



図9 アーク電圧とアーク長の関係 プラズマアークおよびTIGアークのアーク電圧とアーク長の関係を示す。

Fig. 9 Relationship between Arc Voltage and Arc Length

46

図11 各ノズルの許容範囲 5種類のノズルに対する電流の許容範囲 を示す。

Fig. II Ranges of Operation for Nozzles

# 4 適正溶接条件

- 3

Y

- 19

- 26

1-2

- 10

de.

1

本機の適正溶接条件を確立するた めに、今回ステンレス鋼、チタン、 軟鋼などの材料に対して溶接実験を 行なった。プラズマ溶接は、板厚3mm 程度を境にして、特徴のあるキーホー ル(Key-hole)現象が生ずることが知 られている。すなわち,板厚3.0mm程 度より薄い板厚に対しては、 プラズ マアークの高いエネルギ密度を利用 して溶接部を溶け合わせる、いわゆ るなめ付溶接が行なわれる。板厚3.0 mm程度より厚い板厚に対しては、キ ーホール現象(溶接中に溶融池に小さ な穴が生じ,深い溶け込みが得られ る)による高速溶接が可能である。

表2は、各種材料の適正溶接条件 を示すものである。

ここで, 適正溶接条件とは次のよ うな溶接ができる条件である。

(1) 裏面ビード幅が1.0~2.0mmで均 一である。





47

図12 プラズマ溶接ビード外観 ステンレス鋼,板厚1.6mmの突合せ溶接ビードの表(a) 裏(b)外観を 示す(溶接速度=500mm/min, 溶接電流=65A)。

Fig. 12 Plasma Welding Bead





(2) 表面ビードの酸化がほとんどな く, 光沢を有する。

(3) X線透過試験で欠陥がない。

(4) ビードの蛇(だ)行およびアンダ カットがない。

図12は、ステンレス鋼1.6mmに対す るビード外観を、また図13は、ステ ンレス鋼1.6mmの角溶接部の断面を示

図13 溶接部の断面 ステンレス鋼1.6mmの角溶接部の断面写真を示す。(b)のプラズマ溶接の場合は, (a)に比べ均一な Rを有する角溶接部が得られることがわかる。

Fig. 13 Cross Section of Weld Beads

表2 各種材質の溶接条件 ステンレス鋼, 軟鋼, チタンおよび銅に対する適正溶接条件を示す。

Table 2 Welding Conditions for Metals

材質	板 厚 溶 接 (mm) (A)	溶 接	ガ ス 流 量 ( <i>l</i> /min)			母材トーチ		
		電 流 (A)	速度 (mm/min)	プラズマ ガ ス	シールドガス	ノ ス ル ロ 1全 (mm ø)	先端間距離 (mm)	溶接形状
	0.3	6.0	600	Ar 0.35	4.0 H <sub>2</sub> 5 %	0.8 1.2	2.0	突合せ
	0.5	17.0	850	"	5.0 "	"	"	(I形突合せ)
	0.8	40.0	300	0.5	6.5 H <sub>2</sub> 7.5%	1.6 2.0	"	"
	"	65.0	1,000	"	8.0 "	2.0	"	"
フテンレフタ	Ι.Ο	32.0	400	"	6.5	1.2	"	"
(SUS27)	"	20.0	350	0.35	" H <sub>2</sub> 7.5%	0.8 1.2	3.0	"
(0001)	1.2	50.0	500	0.5	" "	1.6 2.0	"	"
	1.5	80.0	"	"	" "	2.0 2.4	"	"
	2.0	100.0	"	"	" "	2.4	"	"
	"	"	400	"	10.0 "	"	"	"
	3.0	"	200	0.7	7.0	" 2.8	"	"
	0.3	14.0	400	0.3	10.0 Ar	1.2	3.0	突合せ
	0.5	30.0	700	"	" "	1.6	"	(I形突合せ)
<b>南</b> 尔 全岡 -	"	28.0	300	"	5.0 "	"	"	"
(SPC-C)	0.8	35.0	"	0.5	10.0 "	2.0	4.0	"
	1.6	45.0	200	0.35	" "	"	"	"
S BREET STORES	"	60.0	100	0.65	" "	1.6	3.0	"
	2.3	80.0	400	1.0	" "	2.0	"	(キーホール溶接)
	0.2	7.0	130	0.3	10.0 Ar	0.8		突合せ
7 A V	"	5.0	150	"	" He 50%	"		(I形突合せ)
F & /	0.4	10.0	130	11	" He 75%	"		"
	0.6	12.0	250	"	" "	"		"
銅	0.1	13.0	200	0.3	10.0 He 100%	0.8		突合せ(フランジ継手
	0.5	55.0	500	0.5	" "	2.0	4.0	(I形突合せ)
	1.0	85.0	"	0.75	<i>II II</i>	"	"	"



(V) 残 (V) (V)

図14 アーク長-ビート幅比の関係 プラズマ溶接の場合は、アーク長の変化に対して溶け込みが変化しにくいことがわかる。

Fig. 14 Relationship between Arc Length and  $W_B/W_t$ 

図15 溶接速度の比較 プラズマ溶接とTIG溶接の溶接速度の比較を示す。 同一電流に対するプラズマ溶接の溶接速度は,TIG溶接の2倍以上であること がわかる。

Fig. 15 Comparison of Welding Speeds



図16 プラズマ溶接の応用例 (a)ステンレス鋼チューブの長手方向突合せ溶接, (b)熱電対の端末溶接, (c)ベローズをフランジに溶接 したものでフランジ突合せ溶接, (d)パイプと特殊ニップルの溶接を示す。

(b)

Fig. 16 Applications of Plasma Arc Welding

(a)

すものである。プラズマ溶接の場合は、**TIG**溶接と比較し て均一な**R**を有する角溶接部が得られており、溶接後の二次 加工を必要としない。

アーク長とビード幅比の関係は図14に示すとおりである。 ここで、ビード幅比とは、裏面ビード幅(*W*<sub>B</sub>)/表面ビード幅 (*W*<sub>t</sub>)の値である。

これらの結果は、電気入力および他の条件を一定にしてお き、種々のアーク長につき溶接実験をしたもので、溶接作業 中のアーク長が変動した場合に相当する。プラズマ溶接の場 合は、シールドガスの種類に関係なく、アーク長3.0~8.0mm の間で裏波が形成されているが、TIG溶接の場合は、アー ク長が増大するほど著しく溶け込みが浅くなる傾向を有し、 プラズマ溶接と同程度のビード幅比の変動範囲に押えるため には、アーク長は0.5~1.5mmの変化しか許されない。

図15は、TIG溶接とプラズマ溶接の溶接速度を比較した 結果を示すものである。TIG溶接の場合は、ステンレス鋼 (板厚1.6mm)に対して溶接速度を500mm/min以上にすると表面 酸化が著しくなる。

なお、同一電流に対する両溶接法の最高溶接速度を比較す るとプラズマ溶接はTIG溶接の2倍以上高速である。 図16は、プラズマ溶接の応用例を示すものである。図のように、トーチを自動送り台車などに搭(とう)載して高速溶接 することがプラズマ溶接の特長を生かす施工法である。

(d)

応用分野は,ステンレス鋼の溶接を主にしたものが多いが, その他チタン,銅、タンタル、ジルカロイなどの非鉄金属お よび高合金鋼,軟鋼など広範囲にわたって溶接が行なえる。

プラズマ溶接の応用製品をまとめると下記のとおりである。

- (1) 電子産業:半導体部品の端子,電子管の端子
- (2) 電機器産業:水中モーターのカバー,マイクロリレーの ケース、モータのコア

(3) 原子力産業:ステンレスパイプ,原子燃料棒スペーサ 化学産業:大形パイプの溶接,プラント部品フランジ

(4) 計測器産業: ベローズ, ダイアフラム, 液面計フロート, 熱電対カバーおよびリード線

(5) 航空機産業:ジェットエンジンケース

(6) 食器産業:洋食器,ナイフ,ポット,湯沸かし

# 6 結 言

以上, プラズマ溶接の特長について解説し, 日立100A プラ ズマ溶接機の性能および適用について述べた。

日立製作所では、すでにプラズマ溶接を実用化し、溶接の

# 5 プラズマ溶接の応用

**48** 

前述したように、微小電流においても安定なプラズマアー クは、従来、TIG溶接では困難とされていた薄板(板厚0.3mm 以下)の溶接を可能とした。また、プラズマ溶接は、薄肉パイ プの長手方向の高速溶接、あるいは溶接部外観を重要視する 製品などに適用されている。 合理化および溶接部の品質向上に役だてており、数多くの製品に適用した実績を有している。これらの経験をもとに、今後ともさらに大容量のプラズマ溶接機およびその施工法を開発してゆく所存である。
筆者らは本論がプラズマ溶接の実用化のためにいささかでも役だてば幸いと思うものである。