FRP 材のプラズマジェット切断*

榎原実雄**, 松岡 敏**

Plasma Jet Cutting of Fiber Reinforced Plastic (FRP)*

by Jitsuo Sakakibara and Satoshi Matsuoka

Cutting of FRP by plasma jet was studied for dismantling the used FRP boats. The plasma jet cutting conditions such as plasma gas composition, gas flow rate, current, cutting speed and so on were cleared to estimate the cutting ability of FRP. The burning of resin was prevented and the narrow and parallel kerf was achieved by the wet cutting method.

The main results obtained are as follows.

- 1) The cutting ability was lowered with increasing of the glass content in FRP.
- 2) The cutting ability was affected with the gas composition and the gas flow rate. The maximum cutting was performed by the mixed gas of Ar+30% H_2 .
- 3) The cutting ability of FRP was lower than mild steel.
- 4) The recommended ratio of nozzle length and nozzle diameter was 3-4 in the plasma jet cutting compared with about 2 in the plasma arc cutting.
- 5) By the wet cutting method, the burning of resin was prevented and the narrow and parallel kerf was obtained.
- 6) The plasma cutting was able to apply to the dismantling of the used FRP boats.

Key Words: Plasma jet cutting, FRP, Glass content, Wet cutting method, Cutting ability

1. は し が き

金属材料, 特にステンレス鋼の切断方法としてプラズママーク切断法が実用化され, 切断能力及び切断面品質の向上に関する研究が進められてきた¹⁻⁴⁾. また, エアプラズマや酸素プラズマなど活性ガスプラズマ切断法⁵⁾及び小電流プラズマ切断機の開発⁶⁾によって鉄鋼材料の高速切断も可能となり, 適用範囲は次第に広がっている. 一方, プラズマジェット切断法は本質的に切断効率が悪く, 金属材料に対する適用がないばかりか, 非導電性材料に対する適用例も極めて少ない⁷⁾.

本研究は, 社会問題化しつつある FRP 船廃船の切断解体処理技術の一環として, プラズマジェット切断法を取り上げ, FRP 材の切断性能に及ぼすプラズマジェット切断条件を明らかにし, 適用の可能性について検討したものである. 湿式法の採用によって, 樹脂の燃焼を防止し, 比較的良好な切断面が得られたので報告する.

2. 実 験 方 法

2.1 供試材

実験に使用した FRP (Fiber Reinforced Plastic) 材は, ガラス含有率 30, 40, 50, 60%, 板厚 5, 10, 20 mm の平板及びガラス含有率 35% のクサビ型試験片で, チョップドストランドによる手積み法で製作したものである.

2.2 プラズマジェット切断装置

電源として容量 500 A の垂下特性電源 4 台を直, 並列に接続して用いた. ノズル径は 2~5 mm ϕ , 電極径は主に 3.2 mm ϕ のものを使用した. ノズル拘束長さはい

れも 11 mm である. 湿式法においては, Fig. 1 に示すようにノズルの周囲にドリル孔を設け, 冷却水の一部を流出した.

2.3 実験方法

プラズマガスとしてアルゴン及び, アルゴン+窒素, アルゴン+水素の混合ガスについて検討した. ガス流量はノズル径によって異なるものの 10~120 l/min の範囲で変化させた. ノズル径, プラズマ組成, ガス流量, 電流, スタンドオフ等の諸因子が切断性能に及ぼす影響について検討した. クサビ型試験片により最大切断板厚を求め, 結果を平板の切断に適用した. プラズマジェットの長さや径は同一の露出条件で撮影したカラー写真により求めた.

Fig. 1 Schematic drawing of wet type nozzle

*原稿受付 昭和63年1月11日 昭和62年度秋季全国大会で発表

**正 員 通産省, 工技院, 四国工業技術試験所 Member, Govt. Industrial Research Inst., Shikoku

3. 実験結果及び考察

3.1 切断性能に及ぼす切断条件の検討

プラズマガスの流量を変化して適正流量を求めた。Fig. 2 は 4φ ノズルについてプラズマ電流 250 A の条件で得られたガス流量と最大切断板厚の関係を示す。ガス流量の増加によって最大切断板厚は増加するが、60 l/min 以上の流量では飽和傾向を示している。この間、アーク電圧は Fig. 3 に示すように流量の増加と共に上昇しており、プラズマに加えられる熱量の増加及びプラズマ気流のモーメントの増加が最大切断板厚の増加の主因になっているものと考えられる。また、ガス組成によって切断性能はかなり異なっている。

Fig. 4 はガス流量を 60 l/min として、ガス組成を変化した場合の切断性能の一例を示す。アルゴン+水素系では約30%、アルゴン+窒素系では約60%の混合率において最大切断板厚が得られた。水素及び窒素ガスの添加によって、アーク電圧は上昇し、入熱量が増加するにもかかわらず、一定の添加率以上で切断板厚は減少している。

これらの切断性能にはプラズマジェットの形状が関与

Fig. 2 Relation between gas flow rate and maximum cut thickness

Fig. 3 Plasma arc voltage correspond to Fig. 2

していると考えられる。Fig. 5 は窒素及び水素の添加によるプラズマジェット形状の変化例を示す。純アルゴンにおける太鼓形から、それぞれのガス添加率が増加するに従い、円筒形を経て逆円錐形へと変化している。添加率が増加するとノズルの外側に陽極点が発生するのが明瞭である。

ノズルから噴出したプラズマジェットは外気との拡散によって減速すると共に温度も低下する。プラズマガスの質量あるいは保有する熱量が大きくなるほどプラズマジェットの到達距離は増加することになる。プラズマジェットへの入熱量が増加するにもかかわらず、最大切断板厚あるいはプラズマジェットの到達距離に最大値が存在するのは以下の二つの理由によると考えられる。

第一はガス質量の減少によって、運動速度が上昇し、ノズル内での陽極点の形成範囲が広がり、ついにはノズル外にまで陽極点が発生することに起因する。陽極点が発生しているとき、プラズマジェットはノズルに拘束され、ほぼ平行流として噴出するが、陽極点が発生する条件ではプラズマジェットの

Fig. 4 Effects of plasma gas composition on cutting ability

Fig. 5 Appearance of plasma jet

乱れが大きく、速度の減衰も激しくなると予想される。

第二はガス質量の減少によって、ノズル外での拡散速度が速くなり、急速に減衰すること起因する。質量の小さい水素ガス添加時のプラズマ長の最大値が約30%にあり、窒素ガス添加時には約60%にあるのはこのためと考えられる。

プラズマジェットは最大切断板厚の得られる上記の添加率において最も長く伸びており、プラズマジェットの形状の変化が切断性能に、より大きな影響を与えたものと考えられる。また、ガス流量を増加した場合もノズルの外側に陽極点が形成され、プラズマジェットの形状が変化するため、切断能力に飽和傾向が生じたと考えられる。ガス流量が増加するほど、また、水素や窒素の混合率が增加するほど材料表面での燃焼が激しくなる傾向が認められた。

以上の実験結果に基づき、以下の実験においては、最大切断板厚が得られた上記の混合率を基準として切断性能を検討している。

Fig. 6 はガス組成が異なる場合の切断速度と最大切断板厚の関係を示す。図には軟鋼 (SS 41) クサビ型試験片を用いて求めた、プラズマジェット切断時の軟鋼材の切断性能も併せて示している。軟鋼材に比べて FRP 材の切断性能が悪いこと、特に高速切断になるほど切断性能の低下の著しいことがわかる。しかし、FRP 材切断時においても切断厚さと切断速度の積は、切断速度が速くなるほど大きくなり、高速切断ほど効率が低いことを示している。薄板ほどノズル近傍の高温、高速のプラズマジェットが切断に関与するためと考えられる。また、プラズマガス組成の影響は高速になるほど小さくなるが、相対的な切断性能は変化していない。Fig. 7 に 4φ ノズルにおける切断速度、電流及び最大切断板厚の関係を示す。

Fig. 8 はプラズマ電流 150 A において、切断性能に及ぼすノズル径及びガス流量の影響を示す。同一電流ではノズル径が小さくなるほど、少ないガス量で同じ厚さの板が切断できることになる。Fig. 2 で得られたガス流量条件を参照し、4φ ノズルに対する 60 l/min、即ち標準状態におけるノズル内流速が 80 m/s になる点を破線で

結んで示す。3φ ノズルまではノズル径が小さくなるほど同一電流でも切断性能は上昇する傾向にあるが、2φ では逆に低下している。これはノズル拘束比 (ノズル拘束長さ/ノズル径) が各々のノズルで異なることにより、プラズマジェットの形状が異なることに起因する。即ち、ノズル径が 5φ 及び 4φ の場合にはノズルの外側に陽極点が形成され、プラズマ径が広がるのに対して、3φ 及び 2φ ではノズル内に陽極点が形成され、プラズマ径はノズル径を越えない。特に 2φ ノズルではノズル人口近傍に陽極点が形成され、プラズマジェットがノズル内を通過する過程でエネルギーが減衰するため、切断板厚が減少したのと考えられる。プラズマアークにおける

Fig. 7 Relation among cutting speed, current and maximum cut thickness

Fig. 6 Relation between cutting speed and maximum cut thickness

Fig. 8 Effect of nozzle diameter and gas flow rate on cutting ability

標準的なノズル拘束比が2である⁷⁾のに対して、プラズマジェットではノズル拘束比を3~4に選択の方がより効率的な切断が期待できることを示している。電流の増加やガス量の増加によって電極やノズルの消耗が激しくなり、ノズル径に応じて電流やガス量には限界が生じるため、切断板厚に適したノズル径及び切断条件の選択が必要である。

Fig. 9 はスタンドオフが切断性能に及ぼす影響を示す。いずれのノズル径、ガス組成においてもスタンドオフが5 mm 以上ではその距離に逆比例して最大切断板厚は減少しているが、5 mm 以下では切断板厚の増加は認められず、ノズルを接触させた場合には切断性能はむしろ低下している。接触状態で切断面にドラッグが形成され始めるとノズルや電極の消耗が激しくなる傾向が認められ、ノズル内に背圧が生じることを起因すると考えられる。

Fig. 10 はノズル傾斜角と最大切断板厚の関係を示す。

Fig. 9 Effect of stand-off on cutting ability

Fig. 10 Effect of nozzle inclination angle on cutting ability

FRP の切断においては、切断限界近傍でドラッグの形成が著しく、前進角の採用による切断性能の改善を期待したが、大きな改善は認められなかった。実際の切断においては傾斜角の影響は無視して差し支えないと考えられる。

Fig. 11 はガラス含有率の異なる平板材について、完全分離切断が可能な切断速度領域を示す。ガラス含有率が高くなるほど、切断速度が低下しており、切断性能を律速しているのはガラス繊維であると言える。

FRP 切断におけるドロスは極めて少ない。切断前面には僅かに溶融層が認められ、その一部がドロスとして飛散しているのが観察されるものの、大部分は溶融状態を経ずに蒸発しているようである。ガラス繊維の軟化

Fig. 11 Effect of glass content in FRP on maximum cutting speed

Fig. 12 Appearances of cut surface and macro section in dry and wet cutting

温度は比較的低いにもかかわらず、軟鋼材に比べて FRP 材の切断性能が劣るのは、蒸発エネルギーを消費しているためと考えられる。また、Fig. 6 に示したように高速切断になるほど FRP 材の切断性能が低下するのは、鋼材の熱伝導度が $0.162 \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ であるのに対し、FRP を構成する不飽和ポリエステル及びガラス繊維の熱伝導度がそれぞれ 4×10^{-4} 及び $9.7 \times 10^{-5} \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ と極端に悪いことに起因すると考えられる。

3.2 湿式切断

FRP 材のプラズマ切断における問題は、樹脂の燃焼を伴い、黒煙とヒュームの発生が著しいことである。この問題に対処するため、湿式法の採用を試みた。Fig. 12 は乾式法及び湿式法による切断部の表面及び断面形状の一例を示す。湿式法の採用により、表面の燃焼は完全に防止され、カーフ幅もほぼ平行になる。乾式法においては切断面から数 mm の範囲にわたって燃焼面が認めら

れ、燃焼はプラズマ気流による切断終了後、後方において進行していることがわかる。Fig. 13 は Fig. 1 に示した湿式切断用ノズルの冷却水流出孔の配置径 D あるいは流出孔径 d や孔数を変化し、水の流出位置及び水量の変化が切断性能に及ぼす影響を示したものである。流出孔がノズルに近づくほど、水量が増加するほど切断板厚は減少した。また、小電流ほど、高速になるほど切断性能が低下した。これらのことから、切断進行面にも直接に水が作用し、冷却を促進しているものと判断できる。

Fig. 14 は 板厚 10 mm の FRP 材を切断した際のカーフ形状を示す。乾式法における表面側の溝の広がり極めて大きい。湿式法においても、ノズル径が大きくなるほど表面側の幅が広がる傾向にあるが、適正なノズルの選択によって平行でカーフ幅の小さい切断が可能となることがわかる。

FRP 船の最大板厚部は約 30 mm であり、金属材料との複合構造体であることを考慮すれば、プラズマジェット切断法は湿式切断法と適正切断条件の採用によって、FRP 船の解体技術として十分適用可能であると判断できる。

4. 結 言

プラズマジェット切断法によって FRP 材の切断を行い、各種切断条件が切断変能に及ぼす影響について明らかにすると共に、以下の結論を得た。

- (1) FRP 材のガラス含有率の増加にともない、切断性能は低下した。
- (2) FRP 材の切断性能はプラズマガス組成によって異なり、アルゴン+約30%水素の混合ガスで最大の切断性能が得られた。
- (3) FRP 材の切断性能は軟鋼材に比べて低く、特に高速切断になるほど低下した。
- (4) プラズマジェット切断におけるノズル拘束比は 3~4 に選択すれば効率的切断が期待できる。
- (5) 湿式法の採用により、切断性能はやや低下するものの、樹脂成分の燃焼を抑制し、ほぼ平行なカーフ幅の切断面が得られた。
- (6) プラズマ切断法は FRP 船の解体技術として適用可能である。

参 考 文 献

- 1) R. L. O'Brien, R. J. Wickham, W. P. Keane : Advance in Plasma Arc Cutting, Welding J., 43-12(1964), 1015-1021
- 2) G. M. Skinner, R. J. Wickham : High Quality Plasma Arc Cutting and Piercing, Welding J., 46-8(1967), 657-664
- 3) J. A. Hogen : Plasma arc cutting with water injection, Welding & Met. Fab., 51-3(1978), 98-101
- 4) 西口, 松山 : 鋼材切断へのプラズマアーク切断法の導入実情, 溶接技術, 24-8(1976), 69-76, 24-9(1976), 79-85
- 5) 松山 : 酸素カーテンを利用した高純度酸素プラズマ切断法による薄板の高品質切断について, プラズマ分科会資料, G4-82-183(1982)
- 6) 西口, 松山 : 小電流プラズマアーク切断機の導入実情, 溶接技術, 35-11(1987), 36-46
- 7) 日本溶接協会編 : プラズマ切断の基礎と実際, 産報, (1983), p.20

Fig. 13 Effects of water flow rate and flow position on cutting ability

Fig. 14 Relation between nozzle diameter and kerf width.