特集

切断加工の最新技術

プラズマ切断の最新技術*

濱田 智**, 茂木 正裕**, 神田 晋**

濱田 智

茂木 正裕

神田 晋

The Latest Technology of Plasma Cutting*

by HAMADA Satoshi**, MOGI Masahiro** and KANDA Susumu**

キーワード

プラズマ切断, サーマルピンチ効果, IMO, フリーエッジ, バラストタンク, Y 開先, ルートフェイス

1. はじめに

鋼板の切断加工において効率の良い熱切断の方法は、最も歴史のあるガス切断と、近年急速に発達したプラズマ切断およびレーザ切断の3方法が主流である。

1901年ピカード&フューチャ（仏）によりアセチレンガスと酸素ガスを混合させた溶接トーチが発明され、これを元にガス切断方法が普及し始め、以後飛躍的な進歩を遂げた。1920年代にプラズマアークトーチが開発され、1955年にリンデ社（米）で近代的なプラズマトーチが開発され、主にアルミニウム合金やステンレス鋼等のガス切断が困難な材料の切断に使用され始めた。この製品は1955年ごろ日本にも導入された。

鋼板の切断用プラズマ切断装置としては、1975年頃に出力電流 150 A～250 A のエアプラズマ（プラズマ作動ガスにエアを使用）が東ドイツから輸入され、大手造船所に導入されたのが始まりである。1980年代初めに作動ガスに酸素を使用した酸素プラズマ切断機が開発された。高速切断による切断効率の向上とガス切断の弱点の一つである熱歪の解消による切断精度の向上を目的として NC 切断機に搭載されて大手造船所に導入され始め、以降の酸素プラズマの発展は著しく、鋼板切断の主流の切断設備に成長した。

プラズマ切断がガス切断のように普及したのは、低コ

ストで手軽に扱える小電流エアプラズマ切断機が1970年代後半に開発されてからである。1984年、手動切断目的の空冷式小電流エアプラズマが低価格で販売され始めてから急速な普及が始まり現在に至る。

2. プラズマ切断の適用分野

2.1 適用分野

プラズマ切断は、ガス切断が使用されている全ての鋼構造物製造分野で使用されているが、その適用範囲は、

図1 プラズマの適用分野

*原稿受付 平成 21 年 12 月 28 日

** 小池酸素工業(株) Koike Sanso Kogyo Co.,Ltd.

ガス切断が不得手とする薄板から 30 mm 程度の軟鋼板までの適用が一般的である。特に酸素プラズマ切断機は NC 切断機に搭載され、被切断材の熱歪み低減、滑らかな切断面、瞬時ピアシングや高速切断性能による生産性向上の特性により、重要な設備として普及している。図 1 に示すように、全ての鋼構造物製造業界において、様々なサイズの母材から切り出された部材は、建機車両、建築構造物、プラント構造物や船舶へと姿を変える。また、ガス切断では対応し難いステンレス鋼やアルミニウム合金など非鉄金属の切断加工分野には最も普及

している熱切断方法である。

2.2 プラズマ切断の特徴

物質は加熱され、温度が高温になるにつれて固体→液体→気体と状態変化するが、プラズマ状態とは、気体（水蒸気）となった状態をさらに 5000～7000℃ 以上に加熱する事により、気体が高温となった状態で分子が電離し、プラスイオンとマイナスイオンとに分離した状態の事を言う。全体的に見るとイオンのプラス・マイナスは同数あり、電気的に安定（中性という）しているが、イオン化している為に金属のように電流を流しやすい状態

表 1 プラズマ切断の特徴

切込 (切断開始)	切断開始時の予熱不要。アーク移行と同時にピアシング開始。 ピアシング時にも瞬時に貫通。移動しながらのアーク停止(ランニングオフ)可能。
切断形状	V、Y 開先や 3 次元切断にも対応可能。但し、切断材の端部を切断する場合、スクラップ量が少ないと[なめ切り]となり、アークが安定せず、切断不良や消耗品の損傷の原因となる。
導入 コスト	ガス切断より導入コストは高価だが、レーザ切断より安価。多本トーチの搭載が可能。付帯設備として集塵システムの費用発生。
切断条件	特殊な金属の場合を除いて、メーカ推奨の切断条件で切断可能。特殊なメンテナンスは不要。切断条件[速度][電流][ガス量設定]などが数値である為、切断条件の管理が容易。
自動化	自動化されつつあるが、消耗品(電極、ノズル)の寿命が短く、交換時に人手を要する。また、消耗品と材料の接触により、消耗品の溶損や切断不良となる場合があり、センサー等の対応が求められている。

表 2 各種切断法の比較

分類		熱切断方法			機械的切断方法	
切断方法		ガス切断方	プラズマ切断方法	レーザ切断方法	ウォータージェット切断方法 アブレイシブタイプ	
切断現象		切断酸素気流と、予熱炎により、燃焼温度に加熱された素材との酸化反応熱により溶融された素材及び酸化物を切断酸素気流が除去して、切断溝を形成する。	プラズマ気流及びアーク熱で素材を溶融し、高速のプラズマ気流で溶融物を除去し切断溝を形成する。	レーザ光の熱エネルギーで素材及び酸化物を溶融しアシストガスで溶融物を除去し切断溝を形成する。	超高圧水の運動エネルギーを与えられた研磨剤が素材に衝突して組織を破壊し超高圧水が破壊された組織を除去し切断溝を形成する。	
特徴	長所	低合金鋼の切断に多用されている。多本吹管の同時使用が容易である為、同時に同形の切断が可能。	ガス切断が困難なステンレス鋼やアルミ合金の切断に最適。切断速度は速く、低合金の切断ではガス切断に比べ歪みが少ない。	切断溝幅が狭く、精密切断に最適。熱切断の中では、切断歪みが最も小さい。切断可能な素材の種類は熱切断の中では多様である。	素材に熱を加えない切断方法である為、変質歪みが発生しない。硬脆材の切断にも適用できる。これまでの切断方法に比べ適用される材料は多様である。	
	問題点	製品の熱歪みが多い。逆火の危険がある。	有害光線、ヒュームおよび粉塵の対策が必要。	厚板の切断が困難。	金属の切断では、切断速度が熱切断よりも遅い。	
各種材料への適用	金属材料	合金鋼	軟鋼 t16mm: 500mm/min ステンレス鋼: 切断不能。パウダ切断で対応。	切断速度が最も速い。 軟鋼 t16mm: 1600 mm/min ステンレス鋼 t10mm: 1200 mm/min	ガス切断に比べ切断速度が遅く、歪みがほとんどない。熱影響部の深さも小さい。 軟鋼 t16mm: 900 mm/min ステンレス鋼 t9mm: 500 mm/min	切断可能であるが速度が遅い。熱切断で見られるスラグあるいはドロスの付着は無い。 軟鋼 t16mm: 20 mm/min ステンレス鋼 t10mm: 40 mm/min
	非金属材料	非鉄金属	切断不能。	各種材料の切断が可能で速度も速い。 アルミニウム合金 t20mm: 1600mm/min	プラズマ切断に比べ切断速度は速い。 アルミニウム合金 t10mm: 250mm/min	上記に同じ。 アルミニウム合金 t20mm: 200mm/min 黄銅 t10mm: 250mm/min
切断装置の構成	切断装置本体		ガス制御装置 酸素供給装置 燃料ガス供給装置	プラズマ切断装置 高周波発生装置 切断用電源 制御装置 ガス制御装置	レーザ発振器 レーザ制御装置 冷却水循環装置 ガス制御装置 レーザ制御盤	超高圧水発生装置 増圧機 アキュムレータ 電動機 油圧ポンプ 給水ポンプ 制御盤 アブレイシブ供給装置
	構成と設備費		低	中	高	中
	切断用ノズル		切断トーチブロック 切断吹管 切断火口	切断トーチブロック プラズマトーチ 電極 ノズル	切断ノズルヘッド ノズル センサーユニット	水ノズル アブレイシブ供給ノズル 切断ノズル
	周辺装置		切断定盤	切断定盤 排煙及び粉塵処理装置が必要となる場合が多い。	切断定盤	切断定盤 場合によりキャッチャータンクの設置が必要。同時に排水処理装置の設置も必要な場合あり。

となっている。

プラズマ切断は、切断対象材（又はトーチ内ノズル）とトーチ内の電極間でアーク放電を行い、その熱を利用してガスを高温・高速のプラズマジェットとして切断対象材を溶融・切断する方式であり、プラズマアークは、拘束ノズルで絞り込む効果（サーマルピンチ効果）を巧みに利用して20000～30000℃程度のプラズマアークを生成し、これを溶断熱源として加工物を切断する。従来のガス切断（酸素切断）が金属の酸化反応を利用し、強いと言うなら化学切断であるのに対し、超高温のプラズマアークによって加工物を溶断する一種の物理切断と言えるものである。従って、ガス切断では主に鉄しか切断できないが、プラズマ切断では、原理的にはほぼ全ての金属や一部の非金属も切断可能である。

2.3 熱切断の種類

熱切断で代表的な手法は、前述したようにガス切断、プラズマ切断、レーザ切断である。

ガス切断法は、高純度の酸素で鉄を燃やし、その熱が伝達して鉄自体を溶融させ、さらに供給されてくる酸素の噴出力で溶融物を吹き飛ばすことの繰り返しにより、切断を行う。

プラズマ切断は、電気を熱に変えた高温ガス（プラズマ）により、切断材を溶融させ、プラズマガスの噴出力で溶けた材料を吹き飛ばすもので、特に鉄を切断する場合は、酸素を使用し、酸素と鉄の燃焼熱を積極的に利用している。

レーザ切断は、太陽の光のようなエネルギーを持った光をレンズで集光させ、切断材料に高密度の光を照射することで、その光の持つエネルギーを吸収した材料の温度が上昇し（表面の一部は蒸発する）溶融する。この溶融した材料をアシストガスで吹き飛ばして切断する。

現在では、各々、熱切断法の特徴を生かし機械化されており、ガス切断は多量生産用として多数本トーチを機上に搭載、プラズマ切断は大型切断部材で生産性を重視、レーザ切断は精度を要求する場合、小型の複雑形状を切断する場合、切断品質を特別に追求する場合と用途によって使い分けがされている。今後もこのテリトリーはそれほど大きく変わらないであろうが、プラズマとレーザの切断法の改善が何処まで進むかによって、多少の変化はあるものと推定できる。

3. プラズマ切断機の構成と活用方法

プラズマ切断機の基本的な構成を示す。

①受電部・・・プラズマ切断では、プラズマアークが熱源となる為に、板厚の厚い材料の切断や切断速度に於いて高速を求められる場合には、それに見合う電源設備が必要になる。プラズマ電源の入力電源としては、三相200Vだけでなく、単相200Vや単相100Vにも使用可能なプラズマ切断装置があり、それぞれに使用可能な最大電流と共に切断板厚も制限される。

②プラズマ電源・・・交流の入力を直流に変換する部分であり、プラズマ切断機の心臓部である。制御方式として過飽和リアークトル式、サイリスタ制御式、トランジスタチョップ式、トランジスタインバータ式の4種類が主流である。

過飽和リアークトル式は、磁気増幅型とも呼ばれ古くからある方式である。出力電流が500～1000A程度の中・大電流機に使用される。機器の構成が簡単である利点があるが、電流波形の歪みが小さい反面、入力電圧補正が困難で応答性（レスポンス）が劣る。この為、アーク電圧値の変化に対して電流値が変化する欠点を持つ。

サイリスタ制御式は現在の大電流機の主流とも言える電源であり、出力電流が200～700A程度の中・大電流機に使用される。過飽和リアークトル式の欠点であった定電流特性を解消し、実用上十分な定電流特性を持つ。但し、商用周波数をそのまま利用する為、電流波形に脈動（リップル）が現れる欠点がある。

トランジスタチョップ式は出力電流が100～300A程度の小・中電流機に使用される。直流化した電流を高速でON/OFFして出力電流を調整する為にサイリスタ式の欠点を解消した制御電源である。電源内変圧器に流れる電流が商用周波数である為に変圧器の小型化には役立たず、小電流機でも重くて持ち運びには適さない。

トランジスタインバータ式は1980年代後半から使われ始め、最近急速に採用され始めた方式である。交流電流を一度直流化し、パワートランジスタで数十～100kHz程度の矩形波交流に変え、さらに直流化して出力電流と

図2 プラズマ切断機の構成

する制御方式である。高速で出力電流を制御する為応答性が良い利点がある。現在では小電流から大電流機まで利用されている。

③冷却装置・・・冷却装置はプラズマ切断トーチの冷却機器として必要なものであり、空冷と水冷がある。空冷冷却はプラズマ切断ガスと併用されることが多い。冷却ガスは100～150l/minと流量的に多くなる為、安価なエアが使用されることが多い。空冷の場合、水分や油分の混入はプラズマトーチ内の絶縁不良に繋がりトーチ焼損の原因となる為、コンプレッサからプラズマ切断機間にエアフィルタを数段設けるのが望ましい。

水冷冷却の場合はプラズマトーチへ冷却水を循環させる圧送ポンプと冷却水タンク、トーチから奪った熱で温度上昇した冷却水を冷やす装置（ラジエタやチラー）で構成される。水冷式冷却装置には、冷却水を熱交換器内に循環させ、ファンにより冷却するラジエタ方式とフロン等の冷媒を使用した冷却器内を循環させて冷却するチラー方式がある。ラジエタ方式は、圧送ポンプ、冷却水タンクに熱交換器が追加された構造となっており、小・中電流プラズマ切断機に使用される。ラジエタ方式は小型で安価であるが、冷却水温度は室内温程度までしか下げられず、冷却水温度管理が困難である。反面、チラー方式は圧送ポンプ、冷却水タンクを一体構成したものと別構成にしたものがあり、ラジエタ方式と比較して高価であるが冷却水の温度設定が可能で、温度管理に優れる長所がある。設置上の注意点として、冷却装置は雨・水に曝されない場所に設置することと、放熱が伴う為、装置の能力発揮の為にも風塵通しの良い場所に設置することなどが挙げられる。また、保守上の注意点としては水質の汚れが装置故障や能力低下の原因と

なる為、半月～1ヶ月度に水質確認、補充・交換を行うことが望ましい。

④ガス供給系・・・プラズマ切断に必要なガスを供給する設備を指し、空気（エア）や酸素、アルゴン水素、窒素などの気体を封入したボンベや集合タンクなどをいう。機器への供給として、ガスの供給圧損が極力少なくなる方法が望ましい。また、配管や調整器は信頼性の高い物を選択し、ガス漏れが起きないように配管接合部などの定期点検を怠らないことが重要である。

⑤切断機本体・・・大きく分けてアイ・トレサタイプ（図3）とNCタイプがある。アイ・トレサタイプは製品実物大の型紙の輪郭線をセンサで倣いながらプラズマトーチが連動して同一形状を切断する。派生型として、一度輪郭線を倣った形状データをNCデータとして記憶し、繰り返し多数個取りの機能や、簡単な形状を操作画面上でパターン選択することでNCプログラムを製作できるパターン入力機能付きのものもある。昨今は、型紙作成や保管管理の手間がかからないCADデータを基にしたNCプラズマ切断機に置き換わりつつある。

NCプラズマ切断機には大きく分けてテーブルタイプ（図4）とガントリータイプ（図5）に分けられる。テーブルタイプNC切断機は、現在の主流と言えるタイプで、テーブルサイズにより外見は異なる。切断テーブルとXYZ駆動軸が一体となっている為、省スペース向きである。簡易に端材等から小物形状を切り出すのに適しており、切断した部材の取り出しも容易である。主に製罐板金など少量多品目切断に適する。

次に、ガントリータイプNCプラズマ切断機（図5）は、小・中サイズの定尺板を複数枚切断する場合や、さらに大判の定尺板を切断する場合に活躍する。このタイプは、切断定盤の両側に軌条レールを配置して切断定盤を跨ぐ

図3 アイ・トレサタイププラズマ切断機

図4 テーブルタイプNC切断機

図5 ガントリータイプNC切断機

図6 開先対応トーチ傾斜機構

形になっている。また、プラズマトーチを傾斜させる機能を搭載した開先切断が可能なもの（図6）や1つの機体に複数本のプラズマトーチを搭載して、同時多数個の製品を切り出すタイプ（図7）も存在する。これらはシャーリング、造船、建機を初めとする多業種で活躍している。

⑥定盤部・・・作業の効率化と安全性向上の観点からも不可欠な装備であるが、切断品質を事実上左右する重要部分である。切断定盤は切断対象物形状や作業効率によりスラットバータイプ、ピンタイプ、スラットコンベアタイプなど各種類存在する。プラズマ切断に限らず切断機に対する定盤のレベル（状態）は安定した切断品質を得る為に一定であることが要求される。特に経年変化や熱による変形を伴うので定期的な保守が必須である。また、プラズマ切断では多量の粉塵が発生する為、粉塵対策として水定盤を使用することがあるが、粉塵が溶け込んだ汚水は沈殿槽を設けるなどして適切な処理をする配慮が必要となる。

⑦集塵装置・・・プラズマ切断時には粉塵発生を伴うが、発生する粉塵と有害ガスを切断定盤下部に排気口を設けて集塵装置で吸引する。集塵装置には、バフフィルタ方式やサイクロン集塵方式、電気集塵方式などがある。集塵及び廃棄は必ず行うことがWES9007溶接作業管理基準により義務付けられている。

バグフィルタ方式とは、粉塵を円筒形または平板状のフィルタで濾過・分離する方式である。応用面の極めて広い方式であり、プラズマ切断向けの集塵法として多く利用されている。フィルタは一般に繊維製で集塵効果が高いほど性能低下も早くなる。バグフィルタ方式は1回/2～3年という保守周期であるが、集塵効率が高い方式と

して知られている。

サイクロン集塵方式は粉塵を含んだガスを円筒内で旋回させ、その遠心力で粉塵を筒体内壁に集めて落下させて集塵する方式である。この方式は構造が簡単で安価であることが利点として挙げられるが、粉塵の粒子径が $5\mu\text{m}$ 以下になると集塵効果が低下する不利な点がある。故に、微小粉塵を含むプラズマ切断の集塵方式としてはあまり向かないものである。

次に電気集塵方式であるが、粉塵を15000～70000Vの高電圧を印加した電極間を通過させることにより、荷電した粒子として集塵極に分離・吸着収集する方式である。装置が大型で高価であることが難点であるが、バグフィルタ同様に集塵効率が良く $1\mu\text{m}$ 以下の粒子径にも適する。集塵方式の選択に関しては、切断材質や切断定盤の大きさ、プラズマ切断機の種類に応じて検討項目が多く集塵装置にも特徴がある為、事前にプラズマ切断メーカーと協議することを推薦する。

⑧トーチ部・・・分類としては、プラズマアークの発生方式による区分と運行方式、作動ガスの供給方式による区分がある。トーチの冷却方式として、空冷、水冷がある。

プラズマアークの発生方式に則って分類すると、移行式と非移行式に分かれる。

殆どの切断機のトーチがこのタイプに分類される移行式であるが、アークを切断材とトーチ内部の電極間で放電させる方式である。（図8）この方式は、アーク周辺に供給されるガスをアークによって高温・高速化させて材料を切断する方式である。切断材に調節アーク放電を行う為にエネルギー効率が低い。但し、切断材がアーク放電の電気回路の一部となる為、導電性のある対象物しか

図7 多本トーチ対応ガントリー NC プラズマ切断機

図8 移行式プラズマ

図9 非移行式プラズマ

切断できない。

非移行式はプラズマジェット方式とも呼ばれ、加熱用プラズマシステムなどがこのタイプに属する。この方式は、アーク放電をトーチ内の電極とノズル間で放電させるものである。移行式と比較してエネルギー効率が低い、その理由としてアークのエネルギーが直接切断材に供給されない、ノズル下流では急速にエネルギーが失われる為である。非切断材に直接アークを流す必要がない為、非金属の切断に使用されるが、利用例は少ない。

即ち、移行式とは、電極からノズルに流れていたアーク（非移行式はこのままの状態）をノズルから切断材に電気の流れを切り替えて移行したものと表現できる。

次にプラズマトーチの運行形態の観点から分類すると、非接触式と接触式に分かれる。

非接触式（図10）には殆どの大型電源切断機のトーチがこれに属する。文字通り切断中にトーチ先端が切断材と接触しない方式である。切断電流の大・小に関わらず、プラズマシステムが切断機本体に搭載されて使用される場合は、ノズルが切断材と接触しているとトーチの走行が安定しないことからこの方式が主流である。

接触式（図11）は切断中にノズルを切断材に接触させて切断を行う方法である。接触させてもシリーズアークが発生しない比較的電源容量の小さな電源を用いるプラズマシステムで用いる。（切断電流が50A以下）この方式は切断材との接触による為、ノズルの磨耗といった傷みが早いのが欠点として挙げられる。逆に、トーチがペンシル型にデザインされているものなどは操作性が良いことで知られている。切断材とノズル間の間隔（ノズル

高さ）の制御も不必要な為、切断作業が楽になることで手持ち切断では広く利用される方式である。

次にトーチの冷却方式の観点から分類すると、空冷式と水冷式に分かれる。いずれの方式もプラズマアークの発生に伴い、トーチの電極・ノズルが高温になる為、冷却が必要になる。

ガス（空冷）冷却式トーチ（図12）は主に小・中電流プラズマ切断機に使用され、冷却効率は水冷式に劣るが、システムとしてプラズマ電源、トーチの構造が簡単であることが利点として挙げられる。切断のメインガスとして用いるプラズマガスと冷却ガスは同一ガスを用いる事が多い。冷却ガスは100～150l/min程の比較的大流量なので、コスト的に安価なエア（空気）が用いられる反面、共用で用いられるプラズマ切断ガスの流量は切断電流が小さい用途である為10～50l/minと少ない。このシステムの能力の目安として、適用切断電流は10～70A、切断可能板厚は0.1～30mm位である。

対して水冷式トーチ（図13）であるが、殆どの中・大電流プラズマ切断機のトーチがこのタイプに属する。ガス（空冷）冷却式と比較して冷却効率が高く、電極・ノズルといった消耗品寿命が向上する利点がある反面、冷却水循環の為にトーチ・電源を初めとするプラズマシステムが複雑・高価になる欠点がある。また、特に大電流プラズマ切断機では別途冷却装置（チラー）が必要となる。このトーチ冷却システムを搭載した切断機の能力の目安として、適用切断電流は30～1000A、切断可能板厚は0.5～200mm位である。

最後に作動ガスの供給方式の観点から分類を試みる

図10 非接触切断

図11 接触切断

図12 空冷式

図13 水冷式

図14 軸流方式

図15 旋回流方式

図16 デュアルフロー方式

図17 旋回流とベクトルの関係

と、軸流式と旋回流式に分類される。

まず軸流方式（図14）であるが、電極の軸方向に対してガスを平行に供給する方式である。電極棒の先端が鉛筆のように尖っているタンクステンなどの電極棒が用いられる。特徴として、アーク発生源を電極先端部に固定することが出来、断面形状は360°対象形状である。作動ガスはアルゴンを主とした気体を用いる。

旋回流方式（図15）は、エアや酸素、窒素を作動ガスとして使用する電極の周囲に対して渦を巻くようにガスを供給する方式である。電極・ノズル間に挿入されているガス制御部でガスの流れを渦状にすることでアーク発生源を電極中央部に固定する構造となっている。断面形状は左右非対称で、2次流体が付加できるデュアルフロータイプ（図16）も存在する。これらは切断能力の向上を目的として開発されたものであるが、垂直が望ましい切断面につくテーパ角（後述）の解消を始めとする切断面質向上を目的にさらに発展した形状のものも存在する。

プラズマガスが右旋回の場合、進行方向右側の速度が遅く、左側で早く切断する現象がポイントとなるが（図17）、この現象により、切断面右側のテーパ角がより垂直に近くなる。但し、プラズマガスの旋回を強くし過ぎると、ガス流が壁流効果を起こし、ノズル壁に沿って流れるようになる為、ノズル内部でガス旋回流を強くするには限界があることも覚えておかなければならない。

これらの現象は、気流のベクトルによるものであるが、トーチを垂直にして切断した結果、切断面の垂直性は切断全域に渡り $\pm 1.5^\circ$ 以内に入る結果が得られている。

4. プラズマ切断の品質

4.1 プラズマ切断の品質

プラズマ切断では切断電流とガス流量の関係として、電流が大きくなれば切断可能な板厚も増加する。切断電流の増加に伴い、ノズル径も大きくなり、必要とされる作動ガス流量も多くなる。

ノズル径と切断電流の関係は、使用するノズル径により適正な切断電流値が決まっており、適正電流値を超えた場合、ノズルの消耗を早めるだけでなく、ノズルの溶損を誘発する。また、ノズル径と作動ガスの供給圧力と安定切断の関係は、供給圧力は規定値に従うべきであり、低すぎるとインタロック（圧力異常検知）が作動し、機体が停止してしまい、少ない流量により消耗品寿命を早める結果となる。供給圧が極端に高い場合、流量計のガラス管破裂に繋がる恐れがある。加工材の観点から言えば、良質な切断面を得たい場合や適正な切断能力で処理したい場合は、適正值（表3）である事が基本条件である。

現在の所、プラズマ切断面に関する公的機関の切断面基準は、アルミニウム合金以外はない。ゆえに代替として、一般的にはガス切断の規格に準じて評価している。但し、本来対象切断方法が違うモノの評価である為、プラズマ切断特性については正当な評価方法とは言えない。現在、公的機関が設定している代表的な切断面（ガス切断を含む）の基準は以下の4種類である。

表3 使用ガスと各材料の面質

	軟鋼	ステンレス	アルミニウム
酸素	良好	面粗さ大	面粗さ大
17	窒化発生	面粗さ大	面粗さ大
窒素	窒化・スラグ発生	比較的良好	若干面荒れ
酸素+2次流体17	良好	面粗さ大	面粗さ大
17+2次流体17	窒化発生	面粗さ大	面粗さ大
アルゴン+2次流体水素	スラグ不良	良好	良好

図18 プラスターパ

図19 R形状

図20 エグレ形状

図21 切断速度・トーチ高さとの関係

- 1) ISO 9013 (国際標準化規格)
- 2) WES 2801 (日本溶接協会規格)
- 3) JIS B-0417 (日本工業規格)
- 4) LIS (軽金属溶接技術開規格)

プラズマ切断の面粗さは、ガス切断とは異なり切断の基本原則から発生する粗さが主となる。これは、プラズマガスと切断材の組み合わせの関係で生じる場合が多く、基本的に、良質な切断が可能なプラズマガスと切断材の組み合わせでは、他の要素（機械振動、ガス気流の乱れ、ノズルの変形など）が要因となる場合が多く、条件設定に起因して面粗さが変化する事は少ないと考える。

切断時に反応する上縁の R 形状（肩ダレ）は、ガス切断の場合、予熱による溶融状態の評価となるが、プラズマ切断では予熱が無い為に単純な丸みの評価となる。切断速度が極端に遅い場合（厚板切断時や薄板を特別に低

速で切断した場合など）、ガス切断に近い形状の肩ダレが発生する場合もある。逆に切断速度が速い場合や、トーチ高さが高い場合にも上縁 R が大きくなる事がある。形状が一律の R 円弧となることが少ない為、R ゲージ等を用いた測定でもある程度の誤差を伴うのは覚悟しなければならない。

切断に対する傾き（直角度）を評価するのにテーパ角がある。上面に対して下面が出ている場合、プラスターパ（切り溝上開き）（図18）となり、上面に対して下面が足りない場合、マイナステーパ（切り溝下開き）となる。プラズマ切断の場合、テーパ角が R 形状（図19）や凹形状（図20）となる場合があり、測定誤差を生じやすい。このような切断面形状を直角断面に近づける方法として、切断速度の低速化や切断高さを下げる方法が挙げられるが、テーパ角の緩和には限界がある（図21、表

表4 切断高さとアシストガスがテーパ角に与える影響

切断高さ	切断断面	二次気流	切断断面
低い テーパ角 -1度		なし テーパ角 5度
適正 テーパ角 0度		かなり 少ない テーパ角 9度 (エグレ)
少し高い テーパ角 3度		少ない テーパ角 1.5度
高い テーパ角 5度		適正 テーパ角 0.5度
かなり 高い テーパ角 6度		多い テーパ -4度

4).

ドラグラインは、本来ガス切断面に発生する切断面上の小さな溝（筋）のことであるが、プラズマ切断の場合でもプラズマガスの成分によって、比較的明確に発生する場合がある。明確なドラグの痕跡が認められない場合でも、注意深く観察するとアークの痕跡を判別する事が出来る。ガス切断の場合、ドラグの遅れが最も少ない条件と品質良好な切断条件がほぼ一致するが、プラズマ切断の場合は、切断方向に対し、若干遅れ気味のドラグ発生時の場合に品質良好となる場合が多い（図22）。ドラグの遅れはコーナ部下面の溶け込みや、小円の変形、テーパ発生の原因となる為、総合的な判断（スラグ付着の有無など）の上、適正条件（諸元）を設定する必要がある。

プラズマ切断では、切断材とトーチ先端との距離が変わると切断能力（品質）が変化する欠点があり、切断能力を維持する為に両間隔（以降、切断高さと記す）を一定に保つ必要がある。切断高さを一定に保つ事を「倣う」と言い、高さ倣いの方法は、①極間電圧倣い（アーク電圧倣い）方式、②ガス（空気）排圧倣い方式、③レーザ倣い方式等がある。

現在、最も広く使われているのは①極間電圧倣い方式で、プラズマ切断時のアーク電圧を検出し、NC側で設定されている基準電圧とアーク電圧値が一定になるように制御してトーチ高さを一定に保つ方式である。プラズマトーチ自身が検出器となる為、他の機器を使用しない利点があるが、プラズマアークが発生していない切断開始前の高さを倣う事はできない。最近では、切断速度や電極、ノズルの消耗によるプラズマアークの変化に対して補正機能のついた装置が開発されている。切断中のリ

図22 ドラグラインの遅れ

アルタイムな電圧を切断高さに反映することが出来る点で、他の2装置よりも正確に切断高さを維持できる為、一般的に利用されている。

ガス（空気）排圧倣い方式は、トーチの周辺にガスを噴出するノズルを取付け、このノズルに切断材に接近した場合に現れる排圧の変化を検出する方式である。この方式は、プラズマアークの発生に関係なく常にトーチ高さを管理できる利点があるが、切断位置とは異なった点で検出している所が弱点である。

レーザ倣い方式は、レーザ光を材料に投光し、その反射光を受光部で検出してトーチ高さを制御する方式である。センサと切断材との距離が離れていても検出可能で、トーチ近傍が煩雑にならない。しかし、鋼板表面の状態やレーザ投光部、受光部が汚れると精度が悪くなる事がある。現在は、型鋼切断機など特殊な場面で利用さ

れている。

4.2 ステンレス鋼の切断

切断面品質的には、アルゴン-水素を用いた切断が最も切断面品質が良い。特にステンレス切断業界では、約90%がアルゴン-水素プラズマで切断している。しかし、最近では窒素プラズマに水を添加したウォーターインジェクションプラズマ切断や窒素プラズマの2次気流にアルゴン、水素の混合ガスを用いたドライプラズマ切断が取り入れられ、切断速度・切断面品質・スラグフリーにおいて実績をあげている。

以下にステンレス切断時のガス種と切断面品質について紹介する(表5)。

- ①酸素プラズマによるステンレス切断は、窒素+アルゴン水素よりも切断速度は速いが、色は黒く粗い切断面となる。
- ②エアプラズマによるステンレス切断は、切断時に大気中の空気を巻き込む為、切断上縁が粗くなり、灰色の切断面となる。
- ③窒素プラズマによるステンレス切断は、切断時に大気中の空気を巻き込む為、切断上縁は粗くなるが、黒色の滑らかな切断面となる。
- ④窒素+水プラズマ切断によるステンレス切断は、水中切断の為、熱ひずみや鋼板の変形が少なく、寸法精度が確保しやすい。切断面は白色で滑らかになる。反面、ドラグラインの遅れが大きく、コーナ部下面の溶融反応が大きくなることもある。
- ⑤窒素+アルゴン水素+炭酸ガス水素によるステンレス切

表5 切断ガスの違いによるステンレス切断

プラズマ名	切断面
① 酸素プラズマ 2次気流 エア
② エアプラズマ 2次気流 エア
③ 窒素プラズマ 2次気流 窒素
④ 窒素プラズマ 水添加
⑤ 窒素プラズマ 2次気流 アルゴン、水素 3次気流 炭酸ガス、水素
⑥ アルゴン-水素プラズマ

断は、切断面硬さは、アルゴン水素や水プラズマよりも軟らかいが、金色の金属光沢のある切断面となる。

- ⑥アルゴン+水素(+窒素)によるステンレス切断は、ガスの混合比率により切断性能が変化し易く、切断条件の設定が難しい。条件設定より垂直切断面を得ることが出来るが、赤褐色となり、スラグ付着が見られる。薄板切断時、スラグフリー目的でプラズマガスに窒素を添加する方法もある。

5. プラズマ切断の最新技術

5.1 フリーエッジ切断について

5.1.1 IMOの塗装基準規定

平成18年4月IMO(International Maritime Organization)において、ハイグレードな下地処理を強制化すること等が採択された塗装基準で、バラストタンク内(写真1)のフリーエッジは、「2R、又は、3パスグラインダ、若しくはこれらと同等以上の処理を塗装前に処理すること」とする旨規定された。従来のフリーエッジ処理はグラインダ等による手作業に依存せざるを得ない状況であり、現在も造船業にとっては塗装基準導入に伴う工数増大の最小化が大きな課題である。

この為、既存の切断技術の応用により、鋼材の自動切断の工程において、塗装基準で要求されるエッジ処理を確保する、或いは、エッジ処理の工程を大幅に抑制出来る程度のエッジ処理を行うことを可能とするプラズマ切断技術が一部実用化された。

バラストタンクとは、空荷の際に船体のバランス・姿勢を保つ為に海水を注入するタンクである。異なる海域に棲息する海洋生物を一緒に運んでしまうことから、地球規模で生態系に悪影響を与える可能性があり、近年問題視されている。

5.1.2 プラズマによるフリーエッジ切断の特徴

バラストタンク内や非溶接面では、鋭角にそのまま塗装すると塗料が剥げやすくなり、錆び発生を誘発する。従って、塗料剥げによる錆びを抑止する目的で、塗装前にグラインダ等で稜線を削って丸みを付けるエッジ緩和処理が一般的に行われている(写真1)。

フリーエッジでは部材の上下両面にエッジ処理を行い、丸みを付ける必要があるが、プラズマ切断の特性上、下面部は角が鋭角に、上面部は丸くなりやすい傾向がある。

さらにプラズマ切断パラメータの中で切断高さを上げ、

写真1 グラインダによる手作業

表6 通常切断とフリーエッジ切断の比較

	通常切断	上面フリーエッジ切断
表面処理	ジンクリッチプライマー材	
板厚	12mm	
写真

アシストガス量を低減させる事により上面に対して高い稜線緩和効果（フリーエッジ）が得られる。

この特性を生かし、効果の高い切断パラメータを組み合わせることにより、上面部においてはフリーエッジに要求される品質に限りなく近い R 形状を得られる（表 6）。

ただし、板厚や塗装膜の厚さ、鋼種の影響により切断面に厚い酸化膜の層が形成されたり、少量の上バリが付着する場合がある為、実際の製品加工においては、プラストなどにより除去が必要な場合がある。

なお、両面フリーエッジ切断については、下面部が鋭角になりやすい傾向にあることやプラズマ切断のパラメータを大幅に変えても両面に対する丸みの効果が極小である為、既存技術の応用では求められる水準には達しない。

しかしながら、上面部だけであってもこれまで手作業に依存していた工数の約半分を抑制できる為、上面フリーエッジ切断は実用化され、現在、一部の造船ユーザに導入されている。

5.1.3 フリーエッジ切断のユーザ運用

ユーザにおけるフリーエッジ切断の運用は、NC 切断機のデータベース上へのフリーエッジ切断パラメータの追加、及び、上位 CAD の NC データをコンバータにてフリーエッジ用に変換して行う。

なお、本稿で述べるコンバータとは上位 CAD データを、それぞれの切断機の仕様に準じた NC データに変換する為の機能を指す（図23）。

一般的なコンバータの汎用例は、主に旧機種用として使われていた上位 CAD データを新機種用の NC データへ変換する場合に使用される。また、1 種類の上位 CAD データで複数の新旧切断機を運用するには不可欠な機能である。フリーエッジ切断の運用においても同様で、コンバータ変換を使用した場合は、上位 CAD データの編集は不要になり、切断機オペレータは新たな操作や勘所を覚える必要はない。

ただし、上位 CAD データはユーザの CAD ソフトの仕様によりプログラム形式が異なる場合が多い為、コンバータを使う場合は各ユーザの CAD ソフト形式に合わせ、機種毎に個別作成する必要がある。なお、上位 CAD 編集でフリーエッジ用の NC データを作成することは可能だが、造船業ではコンバータによる NC データ変換が主流である為、現状フィールドにおける実績はない。

また、既設の切断機にフリーエッジ機能を付加する場合は、機種によってその対応方法は異なる。切断機側に

図23 コンバータ運用例の模式図

データベースを持っている新しい NC を搭載した機種では、切断プログラム修正とデータの追加インストールにより行うが、データベースを持っていない古い NC の機種では現在のシステムに合わせた機体改造が必要とされる。

5.1.4 フリーエッジ切断の今後の課題

IMO の塗装基準規定の影響により、今後は両面フリーエッジ切断の要望が高くなることが予想される。

しかしながら、両面フリーエッジ切断を確立する為には、上面と下面のパラメータ条件が相反する傾向にあること、又、既存の技術の応用では、両面に対するフリーエッジ効果が少ない事など、幾つかの要件が課題となっている。

5.2 プラズマ Y 開先切断

5.2.1 Y 開先切断の需要

現在、Y 開先切断に対する需要は、業界を問わず様々な分野で存在し、垂直切断や V 開先切断で切り出された部材へ追加工したり、プラズマトーチを 2 本搭載した切断機で Y 開先形状を作り出している。しかし、近年、様々な複雑形状への需要が高まり、高精度・高品質化が進んでいる為、開先切断に対応した NC プラズマ切断機での実現が要求されている。

特に造船・建機業界では、実現に対する要求が多く、各切断機メーカーの技術競争は激化している。

ここでは、1 本トーチで 2 パスにより複雑形状にも対応した Y 開先切断について述べる。

5.2.2 切断順序

1 本トーチによる 2 パス切断で Y 開先形状を実現する切断順序は、①ルートフェイスを形成する垂直（0 度狙

図24 Y開先形状

写真2 プラズマ2本トーチ Y開先切断機

＜オフセット式＞

＜リンク式＞

図25 オフセット式とリンク式の違い

い) 切断, ②開先面を形成するV開先切断, の組み合わせである。切断順序の違いにより, 切断面品質に違いが現れることから, 切断条件や切断形状により, 切断順序を検討する事から始まる。(突き合わせるルーフフェイス精度を重視するのか, また, 開先面品質を重視するのか) 以下に表Y開先, 裏Y開先を示す(図24)。

既存の製品では, プラズマトーチを2本搭載した切断機がある。この切断機によるY開先の切断手順は, 2本のトーチに間隔を持たせ, 連続で切断し, Y開先形状を実現する方法である。

この2本トーチで切断する場合, 2本が同時に切断を行う為, 切断材の移動や変形の影響を受け難く, 切断時間が短いという長所がある。反面, プラズマユニットが2セット必要で構造が複雑・大型化となりコスト増大や, 2本トーチの間隔寸法が大きい為, 曲線切断時は小さい緩曲線切断に限られ, 複雑形状に対応できないという短所もある(写真2)。

そこで, 各メーカーが「オフセット式」や「リンク式」と呼ばれる開先トーチを開発し, 複雑形状に対応可能となるばかりでなく, 1本トーチで2パスによるY開先形状を実現している(図25, 写真3)。

写真3 プラズマ開先切断機

写真4 ブリッジ切断技法

5.2.3 ブリッジ切断技法(写真4)

Y開先切断でルーフフェイス精度を重視する場合, 切断高さを一定に倣い続ける事が重要であり, 切断中の鋼板のズレや熱変形による歪みで切断高さを一定に倣う事が困難になる場合がある。これらの原因によるルーフフェイス精度の不安定さを低減させる為, ブリッジ切断技法が有効である。

ブリッジ切断技法では, 部材の角や辺の一部を切断せずに枠板と固定された状態にする事で, 部材のズレを防ぎ安定した切断を実現させるものである。

最後にブリッジ固定している部分を枠板から切り離して製品切断完了となる。

5.2.4 切断順序の工夫

切断プログラムを作成する際, 部材中のルーフフェイス部と開先形状部の切断順序を検討する事でルーフフェイス精度の不安定さを最低限に留めるのも1つの方法である。

5.2.5 ソフト開発

近年の複雑化する切断形状を実現する為には, NC切断機を動かす為の「ソフト」に依存する部分が非常に大きく, 先の切断技法同様に重要な位置を占める。Y開先切断の場合, 2パス切断を行うことで「Y」形状を作り出す為, 形状軌跡で同じ軌跡を2度切断する局面が多々存在する。その際, 先行/後行切断のどちらが垂直切断/開先切断とするか判断させ, 切断プログラムに条件(速度・角度・補正量など)を反映できるソフト開発もしくは既存ソフトの改造が必要となる。

さらに, オペレータの操作性向上を考慮した切断機側のNCソフトの開発も伴う。メーカーにより, Y開先切断時のルーフフェイス調整機能が搭載されている機種があ

るが、切断順序の選定やブリッジの有無、切断開始時に行う銅板検出ポイントなどをオペレータが状況に応じて対応しやすくなるよう現場目線での開発がより一層望まれる。

様々な要求や利便性を追及するあまり、便利な機能を追加しても全体的な操作性が悪ければ、作業全体の効率アップには繋がらないのは明白であり、今後も切断プログラムを作成するアプリケーションソフトと現場のNC切断機側ソフト、両方の開発が求められる。

6. おわりに

今回は、プラズマ切断全般に渡り、基礎的な部分から最新技術として、切断面上縁を“R形状”とするフリーエッジ切断とY開先切断について紹介した。基礎的な部

分は、普段“切断”に馴染みのない方々にもご理解頂ければ幸いである。また、フリーエッジ切断技術やY開先切断技術は、既に一部で実用化されており、今後の更なる普及が期待される技術である。

その他、複雑形状を実現するソフト開発も切断技術同様に進化が望まれる。「機体・切断技法・ソフト」が密接な状態にあることで、これからも多くの難問を解決し、複雑形状切断を実現することが期待されている。

参考文献

- 1) 要説 熱切断加工の“Q&A” 社団法人日本溶接協会 ガス溶断部会技術委員会 溶接小委員会。
- 2) 溶接技術 2008年3月号 産報出版。
- 3) 溶接技術 2009年5月号 産報出版。
- 4) 切断 1998年10月 小池酸素工業株式会社。