プラズマ・アーク切断現象に関する基礎的研究(第1報)*

—母板における極点の基本的挙動—

西口公之** 黄地尚義** 松山欽一***

Fundamental Studies on Cutting Phenomena in Plasma
Arc Cutting (1st Report)*

—Behaviour of Spots on the Work Piece in a Plasma Arc Cutting—

Kimiya Nishiguchi**, Takayoshi Ohji**, Kinichi Matsuyama***

Abstract

In a plasma arc cutting, the behaviour of anode or cathode spots in a cutting kerf affects not only the distribution of heat input in the work piece but also the quality of the kerf or cut surface. Using a stack plate of water-cooled copper, the current in each plate was measured with arc voltage in order to clarify the fundamental behaviour of such a spot. Moreover, the spot motion in actual cutting was observed by an optical method, and analyzed from the correlation of the fluctuations between radiation intensity from the spot and arc voltage.

Essentially, the spot is carried away from the upper to lower side on the front surface of the cutting zone or the edge surface of the work piece due to the momentum of plasma and cold surrounding gas streams and due to the magnetic force acting on the spot and arc column. When the voltage between the arc column and the front surface of the kerf reaches a breakdown voltage, a new spot is suddenly made on the upper side. Consequently, the spot periodically repeats such a motion, so that the arc voltage fluctuates as sawtooth waves in several kHz to several 10 kHz corresponding to the spot motion.

The above consideration shows that the wandering region of the spot is governed by the breakdown voltage of the sheath and the potential gradient of the arc column. Especially, effect of the former is considerably large. At reverse polarity, the breakdown voltage is higher than at straight polarity, because the voltage to make a new cathode spot can not be neglected as well known from the restrike phenomena in A.C. arc. Thus, the spot wandering region at reverse polarity is extended in comparison with that at straight polarity.

It is a noticeable fact that the cathode spot motion is remarkably affected by the condition of the plate surface and surrounding gas. If air mixing into the plasma stream increases, the cathode spot seeks out an oxide film, and behaves the same as in cleaning phenomena at reverse polarity of TIG arc welding. Arc voltage, therefore, shows the characteristic triangle waves in several 100 Hz.

1. 緒 言

プラズマ切断法¹⁾は高エネルギー密度のアーク・プラズマを主たる熱源として溶断する方法であるから、各種の金属材料のみならず コンクリートなどの非金属材料の加工にも適用できる利点をもっている。このプラズマ切断法のうち、電極と被切断材との間に点じたアークを拘束して高温プラズマ流を得る いわゆるプラズマ・アーク切断法は 酸素切断の行なえないステンレス鋼、アルミニウム合金、銅合金などの高能率な切断・加工法とし

て 最近急速に発達・普及をみせている。さらに現今では この切断法の軟鋼に対する適用化研究が進められており、ますますその重要性を増している。

プラズマ・アーク切断法を酸素切断の容易な軟鋼材に適用するに際しては 単に溶断が可能というだけでは魅力に乏しく、切断面の品質、切断溝形状ないしは切断速度などの諸点で 酸素切断の場合と同等以上のものが得られなければ 今後の飛躍的な発展は期待できない。従来の研究結果によると^{2)~4)}、プラズマ・アーク切断法では 酸素切断の場合のような化学反応に伴う切断速度の限界が存在しないので、入熱を増すことによって容易に切断の高速化が達成される長所はあるが、厚板の切断には基本的に不向きであると判断される。しかも 切断面に傾きが生じやすく、また上縁部に肩だれが認められる

*原稿受付 昭和47年1月11日(45年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka Univ.

***学生員 大阪大学工学部 Student Member, Faculty of Engineering, Osaka Univ.

など 切断面品質の点でもかなりの難点が見受けられる⁵⁾。このような問題点は軟鋼についてだけではなく、ステンレス鋼あるいはアルミニウム合金などすでに本法の実用されている金属材料に対してもまったく同様に認められており、何らかの解決策が迫られている。

この難題を処理するための研究は 今日まである程度精力的に進められてきたが⁶⁾⁻¹⁰⁾、いずれも当面の対策を示すにとどまり、抜本的な施策を与えるには至っていない。この重要な課題を消化するには プラズマ切断現象そのものを機構的な立場から解明し、得られた成果を施工面に活用するものが早道であろう。しかし この切断現象¹¹⁾⁻¹³⁾ に関して、切断速度が減少すれば 平均アーク電圧が増大し、かつベベル角が小さくなること、また 被切断材への熱効率は切断速度の増加とともに増大すること、さらに 切断溝内での極点形成位置を境に 電流通路たるアーク柱に接する領域と高温のプラズマ気流のみによって溶断が進む領域とで入熱形態が異なると想定されることなど、いくつかの断片的な資料が提示されているにすぎない。

著者らはこれらの報告および酸素切断現象について明らかにされた事項を参考に検討を進め、切断形状は主に切断溝内における極点の挙動に関連する入熱特性によって規制されるものとの判断に達した。そこで 切断形状と極点の挙動との相関性を出発点として、切断溝の形成機構を解明すべく一連の研究に着手した。まずその手始めとして 入熱特性を支配する主因子たる極点の挙動について究明した結果を2報に分けて報告する。すなわち第1報では アーク観察の容易な水冷銅板および軟鋼の板端切りなどの手段を用いて 極点の基本的な挙動を究明した結果を、第2報では 切断溝内における極点の挙動を切断進行面形状との対応性をもとに検討した事項を中心に記述することとする。

2. 実験方法の要点

本研究では切断中の極点の挙動を解明しようとするものであるが、その存在場所である切断溝は狭く しかも熔融金属流を伴うため、計測上種々の制約を受ける。そこで まず観察の容易な水冷銅の板端面にアークを点じた場合の極点の基本的な挙動を調べることにした。Fig. 1はこの実験に用いた水冷銅重ね板(重ね電極)およびこれと切断トーチとの配置状況を模式的に示したものである。

板端面では 極点は後述のように上→下へ高速で移動する現象を繰返すが、この移動状況を適格に知るため予備実験により 水冷銅重ね板の総板厚は極点の移動しう

Fig. 1 Arrangement of the plasma torch and the water-cooled copper plate of divided type used for observing the behaviour of spot

Fig. 2 Material and shape of the electrode in the plasma torch

(a) Copper electrode at R.P.

(b) Thoriated tungsten electrode at S.P.

る距離をじゅうぶんに満たすように選定した。また この重ね板の作成に当っては、極点が3枚以上にわたって移動できるように 厚さ 3 mm の銅板を 1 mm 厚の絶縁材(ゴム板)を介して重ね合せ、それぞれの板を流れる電流を独立的に測定できるようにしている。

板端面での極点の挙動は アーク電圧および各重ね銅板を流れる電流の相対的な時間変化の測定結果をもとに究明している。この場合 各板を流れる電流の変化はかなり急峻であるので、その測定には いずれも無誘導シャントを製作・使用した。

図示の切断用トーチは Fig. 2 (b) に示すタングステン棒を陰極とする正極性用のものであるが、逆極性に対しては 電極(陽極)としてかなりの大電流が許容で

きる Fig. 2 (a) のような水冷銅陽極棒*を開発・使用している。また トーチの構造としては 正極性用のものについては可動電極-単独-旋回流式**, 逆極性用では可動電極-単独-軸流式**と多少異なるが、ノズル(水冷銅)は いずれも直径 $d=3\text{ mm}\phi$ 、拘束長 $l=7\text{ mm}$ のものを選定している。動作ガスには主としてアルゴンをうい、プラズマ・アーク切断に常用されている窒素は現象の普遍性の検討その他必要のある場合にのみ利用した。アルゴンをういたのはこれが単原子ガスで、しかも不活性なため 現象の解析が容易であること、また逆極性の切断では クリーニング作用など母板陰極点の特徴的な挙動が適確に把握できるためである。

実際の切断における極点挙動の追跡に上記のような重ね板による方法を用いると、熔融金属流による板間の短絡現象のために 各板についての電流変化を正確に測定できないので、適切な方法として採用できない。そこで Fig. 3 のように プラズマからの輻射充を、スリット

Fig. 3 Measurement of radiation from arc at a position along the groove depth

を通じて ほぼ切断線後方に設けた光電子回路に導き、このようにして得られるプラズマの輝度変化を切断部の数ヶ所について測定する方法を用いることとした。極点の移動状況は 後掲 Fig. 8 について述べるように、各位置に対するプラズマ輝度の時間変化とアーク電圧波形の相対関係を求めることによって究明できる。

プラズマからの輻射光の測定器への導入には 光電子子の前にスリット取付用の 60 cm 長さのパイプを設け、その先端部に 板厚方向すなわちほぼアーク・プラズマ流の方向に対して垂直に 幅 2 mm、長さ 10 mm の平行スリットを、測定側端部に径 2 mm ϕ の円形スリット

*タンダステン棒を陽極に用いると、その大なる陽極発熱のために 低電流で電極端は溶融してしまい、電極ホルダの焼損あるいはアークの不安定がおこる⁴⁾。アーク不安定はプラズマ・アークの指向性をそこなうとともに、ダブル・アーク発生の限界電流を著しく低下させる。このため 水冷によって棒端の溶融が阻止できる水冷銅棒を逆極性トーチの電極として採用したのである。

**これは「プラズマ切断トーチ能力の標準表示例」(日本溶接協会ガス溶断部会技術委員会プラズマ分科会編集)に準じてトーチ構造を示したものである。この表示法の第1項「可動電極」は電極位置の調整可能なことを、第2項「単独」は動作ガスとして単一または混合気体を1個のホースを通じてアーク発生室に供給することを、第3項「旋回流式または軸流式」はトーチ内での動作ガスのアークへの供給点における流線方向を区別して示したものである。

を取付けたものを用いている。したがって 測定原理からはプラズマ流の 2 mm 長についての受光量を測定したことになる。しかし 電流通路たるアーク柱部は通常のアークの場合よりも緊縮していているとはいえ、極点部ではさらに強く緊縮して高温となっているので、極点が測定位置にあれば これによる輻射光が極点自身の強い発光と相まって、計測信号は大幅に上昇する。このため上の方法による受光量変化の測定は 結果的には極点に関する輝度変化を求めることになる。

被切断材としては軟鋼 SS-41 材を用いており、アークの基本的な挙動が水冷銅板端での結果と比較検討できるよう、ここでは板端部の切断を中心に実験を進めている。

3. 母板における極点の基本的挙動

3.1 アークの形態とアーク電圧波形の特徴

プラズマ・アーク切断中のアーク電圧波形には 通常実用されている正極性切断、母板側を陰極にした逆極性切断を問わず、数〜数十 V 程度の周期性の高い鋸歯状波的な脈動が認められる。Fig. 4 (a) は正極性(母板

Fig. 4 Typical oscillograms of arc voltage corresponding to the anode spot motion ($I=100\text{ A}$, $Q=30\text{ l/min}$, $d=3\text{ mm}\phi$)

(a) Cutting of mild steel
(b) On a water-cooled copper plate

が陽極)にて軟鋼板をプラズマ・アーク切断した場合のアーク電圧波形の一例であって、20 kHz 程度の鋸歯状波が重畳しているのが認められる。このような特徴的な電圧波形はステンレス鋼、アルミニウム合金などいずれの金属材においても、さらには動作ガスの種類を変えても 全く同様に観察される。ただ鋸歯状波の周期は切断条件によって異なり、実験した範囲では数〜数十 kHz にわたっている。(逆極性の場合の例は後掲 Fig. 13 (a) 参照。)

このプラズマ・アークを (a) 図の場合と同一設定条件にて 平板表面に点じた場合には、陽極点はアーク直下の付近で多少の移動を行なっているにもかかわらず、

Fig. 4 (b) のように 電圧の脈動はほとんどみられない。逆極性の場合にも 母板上の陰極点の移動範囲(クリーニング域)を強く抑制すれば, 正極性の場合と同様に 非常に小さな脈動となる。この結果は 極点の移動が生じてても電流が一定であれば, 陽極降下 V_A あるいは陰極降下 V_K はあまり影響されないことを意味しているものと理解できる。この実験装置では (a) 図のようにアーク電圧が変動しても, 電源の特性上 電流はほぼ一定であるため, V_A あるいは V_K はほとんど変化しないと考えられる。さらに アーク柱の電位傾度 E も電流がほぼ一定であるため (a) 図にみるような高速度の変化を行なっているとは考えられない。したがって (a) 図のようなアーク電圧の脈動は プラズマ・アーク柱の硬直性を考えると, 極点の移動に伴うアーク長の変動に起因するものと判断される。

Fig. 5 は 上記と同様な鋸歯状の電圧波形が認めら

Fig. 5 Behaviour of plasma arc on the edge surface of the water-cooled copper plate ($I=100$ A, $Q=30$ l/min, $d=3$ mm ϕ , $L=6$ mm, $L'=2$ mm)

れる 水冷銅板端面にプラズマ・アークを発生させた場合のスナップ写真の例であり, 極点の観察が容易のようにトーチ中心軸と板端面間の距離 L' を 2 mm に選んで撮影したものである。正, 逆いずれの極性においても, 附記した模式図に示すように アーク柱と銅板端面を結ぶ数本の条光がみられ, 板端面上にはこれら各条光に対応して 強く緊縮した極点が観察される。この極点の存在していた部分の痕跡を 観察の容易な正極性の場合について顕微鏡にて調べてみると, 直径数~数十 μ の円錐状クレータが多数存在し, これは磁気駆動アークなどにみられる陽極点の痕跡とよく一致している。

以上に検討した結果は プラズマ・アーク切断における母板極点のアーク柱に沿って 切断溝面を上から下に移動していることを推測させる。

3.2 極点移動現象の基礎的観察

前項に述べた極点の移動現象をさらに詳しく究明する

ため, Fig. 1 のように分割水冷銅板を陽極(正極性)として アーク電圧と同時に各板を流れる電流の時間的変化を測定した。正極性を選んだのは, 陽極点は陰極点のように母板の表面状況あるいは雰囲気ガスなどによって極点の挙動が左右されるおそれが少なく, 現象が比較的簡明に把握できるからである。

実験は アーク電流 30~70A, 動作ガス流量 10~100 l/min の範囲で行ない, 水冷銅板はその冷却能力の関係から(水冷端までの距離: 約 20 mm) 長時間点弧に伴う板の焼損あるいは変形を防止するため, 一定速度(35 cm/min)で移動させている。Fig. 6 はこのような条件範囲において得られた多くのアーク電圧および各板を流れる電流のオシログラムを整理して, これらの相対関係を模式的に示したものである。(b) 図にみるように 電流は上板→中板→下板へと 順次移行した後, 急激に上板へ帰る現象を繰り返している。このように電流すなわち極点位置が板の上→下へ移動することに対応して, ア

Fig. 6 Schematic diagram of arc voltage and current in each plate at arcing on the edge surface of a stack copper plate ($I=30\sim50$ A, $Q=10\sim80$ l/min, $d=3$ mm ϕ , $L=6$ mm, $L'=4$ mm)
(a) Arc voltage
(b) Current in each plate

ーク電圧は(a)図のA→Fのように上昇^{*}、上板での極点の再生に伴って再びAにほぼ等しいA'電圧となることを繰返す。このAFA'の鋸歯状電圧波形の繰返しはFig. 4において述べた切断中の電圧波形と同様であって、この実験結果よりプラズマ・アーク切断における鋸歯状電圧波形は極点が上→下へ高速で移行してアーク長が伸び、再び上部で極点の再生をみて同様な現象を繰返すことの結果として現われたものと判定してよからう。

さてこのような極点の上→下移動に対する原因力としては、つぎの2つが考えられる。すなわち、その1つはプラズマ気流ならびにアーク柱を取巻いて流れる比較的冷たいガス流の力によって極点とその近傍のアーク柱の部分が吹き流される。いわゆる気流による吹き流し作用^{15,16)}であって、とくに陽極点はこの力によって容易に移動する性質がある。いま1つは磁気駆動アークあるいは磁気吹きなどで特徴的に認められる極点とアークの彎曲部に強く働くローレンツ力^{14,17)}によって極点が板の下方へ押下げられる作用である。つぎに極点がこのような力によって移動し、F点に達した後、中板を経由せずに上板に復帰する現象は図にみるようにF点ではアーク電圧がかなり高くなっているため、アーク柱と上板との間に絶縁破壊が起こり、ここに新たな極点が形成されて電流の肩がわりを起こしたものと考えられる。

Fig. 7は極点移動に関するこれらの論考と板端面におけるアークの形状観察の結果をまとめて、極点および電流通路たるアーク柱の挙動を図解したものである。すなわちアークはプラズマ気流のモーメントおよび極

Fig. 7 Illustration of periodic anode spot motion

*A→Fのアーク電圧の上昇過程において、BCあるいはDEにみる上板→中板、中板→下板への極点の移行時にアーク電圧の多少の低下が認められる。これは板間を絶縁したこと起因しており、極点が上方の板の下端部に来ると、その電流回路のインダクタンスのためにそれ以前におけるよりも相対的にアーク長が伸びてつぎの板の上端に極点を形成するに必要な電圧より多少大なる値にならねば、電流の急激な肩がわりが実現しないことによる。

点と極点付近で彎曲したアークに働く磁気力のために、板の上方①から順次下方③へと吹き流される。PQSのように伸びたアークではQR付近での電位差が過大となって絶縁破壊し、再びPQRなるアークが再生する。このようにして①→②→③→①の繰返しが起こる。

上に述べた所は1個の陽極点移動している場合についてであるが、陽極点では複数個が同時に上下間に存在している場合もまま見受けられる。このような場合について検討してみても、それぞれの陽極点の挙動は基本的には上記と異ならない。なお逆極性にて水冷銅板端面にプラズマ・アークを発生させた場合には、本実験における条件範囲内では1個の陰極点での上下の繰返し移動しか見られなかった。

3.3 溶融金属流を伴う場合の極点の挙動

水冷銅板を用いたプラズマ・アーク切断のモデル実験によって、極点移動の基礎現象を明らかにすることができた。同様なアーク電圧波形を示す実際の切断にも前項の結論がそのまま適用できるか吟味する必要がある。そこで2節に述べた光電素子による切断進行面で

Fig. 8 Anode spot motion on the cutting zone in mild steel

- (a) Measuring position for radiation
(b) Arc voltage and photocell-output

の輝度変化を測定して, 極点の挙動を解析することとした。

Fig. 8 は低切断速度での軟鋼板端切りにおいて, 図中に示す各位置での測光ができるよう測定装置を順次ずらして輝度信号 P をアー電圧 V_a と同時に記録したオシログラムの例である。輝度信号の脈動は 1 および 5 のように明らかに極点の存在し得ないアーク柱部あるいは高温ガスだけのプラズマ・ジェット部ではほとんど認められず, 板内の測定位置で明瞭に生じている。この輝度信号のピークは測定位置が図の 2→3→4 と板の下方へ移るにつれて, たとえば (b) 図中の A, B, C 点で比較すればわかるようにアーク電圧の高い側に移行している。一方アーク柱のみ, あるいはプラズマ・ジェットのみによる切断法では切断溝部においても輝度信号に大した脈動は認められない。このような事実から, 熔融金属流の存在する通常のプラズマ・アーク切断においても極点は水冷銅板端の場合と全く同様な上→下移動の繰返しを行なっているものと結論される。

軟鋼板端切りにおける陽極点の移動速度を Fig. 8 から推算すると, 100~200 m/sec となる。これはプラズマ気流速度の実測値 1~5 km/sec¹²⁾ に比べるとかなり小さいが, 熔融金属流の測定値 20~40 m/sec¹³⁾ よりは大いに速い。なお水冷銅板を用いたモデル実験においても, 陽極点の移動速度はほぼ上記の値となっている。

3.4 アーク柱-板端面間の絶縁破壊と極点の挙動

母板切断溝での極点の挙動は前掲 Fig. 7 からわかるように, アーク長の QR→QS の伸びやすさと, QR 付近での絶縁破壊の起こりやすさによって支配されるものと想定される。通常のプラズマ・アーク切断では動作ガス流量その他の切断条件を変えても, ノズルより下流側のアーク柱電位傾度にはあまり大幅な変化が期待できず, これによってアーク長を大いに伸ばすことは困難である。これに対し板上方での絶縁破壊の難易さは切断諸条件によって大いに変えうるものと考えられる。そこでつぎに Fig. 1 の分割水冷銅板による方法を採用し, この絶縁破壊の難易さと極点の挙動について基礎的な検討を進めることにした。実験に際し, ここでは極点の存在状況を知るため, 各板の電流は平滑回路を通じ時間平均値として測定している*。またアーク電圧の鋸歯状波的な脈動も極点の挙動と密接な関連があるので, 平均アーク電圧 V_a とともに脈動分のみの平均電圧 V_f も実測している。

*極点の上→下の繰返し移動の不均一さを平均化して取り扱うため, 溶融に関する重要事項たる入熱特性については平均的な挙動が問題となることによっている。

Fig. 9 Increasing of the anode spot wandering region with length L' between arc column and the edge surface of a copper plate

Fig. 9 (a) は水冷銅板端面とアーク柱との間隔 L' を調整して板上方での絶縁破壊の難易さを変えた場合の陽極点の分布状態を調べた結果である。図にみるように L' を増大させると, 上板の電流 I_1 は減少し, 逆に下方の板の電流 I_3, I_4 が増加して, 極点の分布領域は下方へ拡張されてくる。アーク電圧 V_a およびその脈動分 V_f もこれに対応して (b) 図のように上昇する。これらの結果は L' を大にすると, アーク柱と板端面間の絶縁層が厚くなるので, アーク長がかなり伸びて Fig. 7 の QR 間電圧がある程度増さねば絶縁破壊しがたいことを意味している。いま Fig. 7 のような電流通路を想定して, これを実質のアーク長とすると, Fig. 9 (a) の電流分布から求められる極点存在の平均位置は (b) 図のアーク電圧およびノズル以降のアーク柱における平均アーク柱電位傾度から算出される極点位置にほぼ一致している。

Fig. 10 はこのような極点の挙動をさらに詳しく調べるために示した Fig. 9 の $L'=2, 3, 4$ mm における

Fig. 10 Anode spot motion vs. parameter L'
($I=50$ A, $Q=50$ l/min, $d=3$ mm ϕ ,
 $L=6$ mm)

アーク電圧のオシログラムである。陽極点の平均存在位置が下方に移る (L' が $2 \rightarrow 4$ mm) につれて、鋸歯状波の振幅が大になるのは Fig. 9(b) にみた通りであるが、いずれの場合にも 鋸歯状電圧の上昇速度がほぼ等しく、したがって極点の移動速度そのものが変らないのは注目される。また 鋸歯状波の最低電圧にも大した差異が認められず、極点の平均存在位置が下方に移行しても極点再生の上限位置はほとんど変らない。

このように 極点の移動速度および極点再生の上限位置がほぼ一定であるにもかかわらず、その平均存在位置が比較的大幅に移行する現象は 極点の移動範囲が拡張されるにつれて 板端面の中途位置でも絶縁破壊・極点再生が行なわれることを暗示するものである。事実 (c) 図の I 期間にみるように、アーク電圧の平均値付近で 振幅の狭い脈動波形も多くみかけられることから容認される。このような中途での極点再生は 板の上端部より下方にゆくにつれてプラズマ拡散程度が大きくなり、絶縁に対する L' の効果が薄れることによるとし

Fig. 11 Relation between current I_1 and gas flow rate Q in various working gases

て理解される.

Fig. 11 は板上方で絶縁破壊の難易さを動作ガスの種類およびその流量によって変えた場合について 上板電流 I_1 の測定によって陽極点の挙動を調べたものである。窒素ガスを用いると 流量 Q が大いに少ない領域では Q の増加につれて I_1 は急速に減少し、陽極点の平均存在位置は下方の板へと移行するが、さらに Q が大になると I_1 の減少割合ははなはだ小さくなる特徴を有している。これはつぎのように説明・理解できる。すなわち P 点付近における低流量のプラズマ・アークでは、ノズル以降のアーク柱はかなり拡がっていて 板上部での絶縁破壊はきわめて容易であり、アーク長しがつて極点はあまり移動しなくても 再生できる。この状態から Q が増すと、アークの緊縮性は大いに進み¹⁹⁾、絶縁破壊が困難となって 極点移動範囲は急速に拡がり、平均存在位置が下方に移行する (PQ 領域)。さらに流量の増した Q 付近では 絶縁層は強化されるが、アーク柱電位傾度が増すので、極点存在域の下方への移行は抑制されて I_1 の減少割合は低減する。R 付近の大流量では プラズマ・アークを取巻いて流れる冷たいガス流はノズル以降で急速に拡がり、そのかなりの部分は母板上縁部で遮られるようになるので、流量増加の極点挙動におよぼす効果はほとんど認められなくなる。

アルゴンを動作ガスに用いた場合には 図の曲線 A B C にみるように流量に対する極点の挙動は複雑になる。すなわち 小流量の A B 付近では窒素の場合と同様に、 Q の増加とともに I_1 は減少している。この場合 P と A 点に比較されるように、窒素よりも絶縁破壊しやすいアルゴンで かえって I_1 が低い値となっており、これはアーク柱の電位傾度がアルゴンで低いことの効果が現われたのではないかと 考えられる。しかし B 点の場合と同一のアーク発生条件で ただ板の上端部付近をアルゴン・シールドした B' の場合には、ほとんどすべての電流が上板に集まっており、A→B のような I_1 の低減はプラズマ流への空気の巻き込みが主因であると判断せざるを得ない*。このような事実から、 Q がある程度増した BC 部分で I_1 が上昇しているのは ノズル部から拡って流れる冷たいアルゴン流がシールドの役割を果たし、 Q の増大とともにアルゴン本来の絶縁破壊現象に近づいてゆくためであるとして理解される。したがって常にアルゴンでシールドされている場合の I_1 は窒素の PQR と同様な傾向をもって、B' から C の方向に低減してゆくものと想定される。

*窒素を動作ガスとした正極性プラズマ・アークでは、巻き込んだ空気が絶縁破壊およびアーク柱電位傾度などに対して 窒素とほぼ同等に作用するものと考えられる。このため低流量域における空気巻き込み効果は無視できる。

上に述べる所は I_1 についてであるが, 極点の平均存在位置も定性的には I_1 の減少につれて下方に移る. アルゴンの場合 X_1 と X_2 とでは平均存在位置はほぼ等しいが, アーク柱電位傾度の多少低い X_2 の場合の方が極点はやや下方にまで移動して, 上記の考察と矛盾しない現象となっている. 以上に述べたように, 板の上方での絶縁破壊の難易は切断溝内での極点の侵入深さがって入熱の直接投与状態に大きな影響をおよぼすわけである.

なお Fig. 11 の実験において, アーク電圧のオシログラムより 前記と同様にして陽極点の移動速度を求めると, いずれの動作ガスについても その流量の増加とともに速くなっている.

4. 極点の挙動に関する陰極点の特異性

4.1 逆極性プラズマ・アーク切断における母板陰極部の特徴

逆極性プラズマ・アーク切断では 正極性で問題となっている切断上縁の肩だれおよびベベル角の難点が大幅に改善されるすぐれた特徴を有している. これらは母板切断溝内での陰極点の挙動に帰因するものと想定されるので, Fig. 2 について述べたような逆極性用のトーチを開発し, 極性の差異に注目して 極点の挙動を追究することとした.

Fig. 12 は動作ガスとしてアルゴンを用いた軟鋼板の逆極性切断におけるプラズマ・アークを切断溝後方から写したスナップ写真である. 陰極点は TIG 溶接などの場合とはまったく異なって 切断溝内に形成されており, 板の表面にはその痕跡 (クリーニング域) も認められない. アルミニウムの MIG 溶接などでは 溶融池に酸素あるいは酸化物が混入すると, 陰極点はこの酸化物を求めて板表面から溶融池底部に移り, クリーニング作用の失われることが パッカリング現象²⁰⁾に関連して明らかにされている. 逆極性切断における特徴的な陰極点

Fig. 12 Observation of plasma arc in R.P. cutting ($I=100$ A, $Q=30$ l/min, $d=3$ mm ϕ , $v=9$ cm/min, $L=6$ mm $h=16$ mm SS41)

の挙動も 切断溝への多量の空気の巻込みに起因し, 上述の MIG 溶接におけるクリーニング作用の消失と同様な現象が起きているためと考えられる. 事実 母板の表・裏面をアルゴンにてじゅうぶんにシールドすると, 母板表面に陰極点が形成され, 幅の広いクリーニング域が認められるようになる.

なお 切断溝内における陰極点の形成状況を詳細に観察すると, 陰極点は凝固境界部 (ドラッグ・ライン形成境界部) 付近まで 溶融全域を覆って溝上下のある区間に分布している. これは 正極性の場合の陽極点が切断進行前面部で, 横幅狭く集中しているのと大いに異なる.

Fig. 13 は軟鋼の逆極性切断におけるアーク電圧波形

Fig. 13 Characteristic perturbation of arc voltage in R.P. cutting

- (a) $I=100$ A, $Q=80$ l/min, $d=3$ mm ϕ , $v=13$ cm/min, $L=10$ mm, $h=16$ mm SS41
 (b) $I=100$ A, $Q=80$ l/min, $d=3$ mm ϕ , $v=9$ cm/min, $L=10$ mm, $h=16$ mm SS41
 (c) $I=100$ A, $Q=30$ l/min, $d=3$ mm ϕ , $v=5$ cm/min, $L=10$ mm, $h=28$ mm SS41

の典型例を示したものである. (a) 図のように動作ガス流量および切断速度が比較的大なる場合には, 逆極性でもアーク電圧には正極性の場合と似た数 KHz の鋸歯状波が認められる. これに対し 動作ガス流量 (アルゴン) が少ない場合には, (c) 図のような数百 Hz の特徴的な三角波状の脈動が生じ, これは正極性ではみられないものである. このような三角波の発生は Fig. 11 の実験事実および陰極点の特性から推して, 空気の巻込みすなわち酸素の混入による酸化物の形成に起因するものと考えられる. (b) は (a) と (c) の中間の場合であって, アーク電圧波形における両者の特徴が重畳して現われている例である. Fig. 13 のようなアーク電圧の脈動幅は (a) 図の場合には切断条件によっては数十 V に達しており, (c) 図ではせいぜいその $\frac{1}{2}$ 程度に留まっている.

4.2 陰極点の基礎的挙動

上記のことからもわかるように, 逆極性切断では逆極性を採用した溶接の場合と同様に 母板の表面状況およびシールド条件などが 陰極点の挙動に大きく影響することが予見される. そこで 再び Fig. 1 の分割水冷銅

Fig. 14 Two types of cathode spot motion ($I=40$ A, $Q=30$ l/min, $d=3$ mm ϕ , $L=6$ mm, $L'=1$ mm)

板による方法で、各板の電流およびアーク電圧の変化を測定し、陰極点の基本的な挙動を究明することとした。ここでは板端部のシールドに特別な配慮を行っていないが、板端面への酸化物の付着状況はアークの発生に先立って種々に変えている。なお重ね銅板は正極性の場合と同じくアークに対して 35 cm/min で移動させている。

Fig. 14 は本装置による逆極性プラズマ・アークのアーク電圧 V_a および各板の電流 $I_1 \sim I_4$ の電磁オシログラムの例であり、(a) および (b) 図にみるように陰極点は 2 形式の挙動を示している。すなわち (a) 図は板端面が比較的清浄な場合であって、正極性の場合と同様アーク電圧に鋸歯状の繰返しが見われ、この電圧上昇に対応して電流通路したがって陰極点が板の下方に移動する形式のものである。いま 1 つの特徴的な形式を示す (b) 図では、アーク電圧に鋸歯状の脈動が認められず、陰極点 (電流通路) は 1 つの板端面内に止まろうとする性質を有している。この形式の挙動は板端面にある程度以上の酸化物が存在している場合にみられるもので、図では陰極点は通常上板に存在していて、極点付近のクリーニング域が拡大して酸化物の不足をきたすと、Q 点にみるように第 2 の板に移る。しかし母板が移動してアーク線上の上板面に酸化物が存在するようになると、R 点にみるように極点は再び上板に復帰してしまう。試みに上板を清浄にし、第 2 あるいは 3 の板端面以下に酸化物を積極的に附着させておくと、陰極点はこの酸化物の存在する最上板 (2 あるいは 3) に定着する。また AB 間に変動する電圧波形をブラウン管オシロスコープで観察すると、Fig. 13 (c) のような三角波となっている。

Fig. 15 Effect of oxide film on the behaviour of plasma arc ($I=50$ A, $Q=30$ l/min, $d=3$ mm ϕ , $L=10$ mm, $L'=1$ mm)
(a) With little oxide at R.P.
(b) With thick oxide film at R.P.
(c) At S.P.

さて (a) 図のような陰極点の挙動は Fig. 7 の陽極点の場合と同様な機構によって、陰極点が板端面を上へ移動し、上方で再生する現象を繰返しているものとして理解できる。ただ陰極点が板端面上部で再生するとき、正極性 (陽極点) の場合に比べ P 点にみるように著しく高電圧となっている。Fig. 15 (a) は清浄な水冷銅ブロック端面に逆極性プラズマ・アークを発生させた場合 (アーク電圧波形は鋸歯状波を示す) のアークのスナップ写真である。図にみるようにプラズマ・フレームは (c) 図の正極性 (陽極) の場合 (酸化物附着の多少にはほぼ無関係に一定) に比べて著しく伸びており、これに対応して陰極点もかなり下方にまで移動していることが観察される。

板端面が清浄な場合の逆極性プラズマ・アークでは上記のように板の上方での極点の再生すなわち絶縁破壊が困難で、必要な高電位差をアーク長の伸びによって得

ているわけであり, これは溶断の立場からは 入熱の投与長を大にできるすぐれた特性といえる. 極点再生を支配する主因子としてすでに検討したアーク柱と板端面との間の絶縁ガス層の点については 正, 逆いずれのプラズマ・アークにおいても大差ないと判断されるにもかかわらず, 逆極性で相対的にかなりの高電圧となっているのは 陰極点自身の形成に高い電圧が必要であると考えざるを得ない. すなわち 冷陰極材を用いた交流アークの再点弧時にはかなり高い再点弧電圧を必要とし, この高電圧のほとんどが 陰極部に集中している事実を考えると, 陰極点の再生はこのような再点弧現象と同様な機構によるものと結論される. したがって 逆極性プラズマ・アークにおける陰極点の挙動は正極性の場合の絶縁層の問題のほかに 陰極点の再生電圧 (再点弧電圧) によっても大いに規制される.

一方 Fig. 14 (b) のような極点の挙動は正極性の場合には認められないもので, 板端面に酸化皮膜が存在すると プラズマ・フレームは Fig. 15 (b) のように大いに短くなる. この場合 陰極点は Fig. 14 (b) のオシログラムからもわかるように, 板の上方に集中している. このように局部に止まる陰極点は1点に固定しているわけではなく, TIG アークその他で知られているクリーニング域での極点の挙動と同じく 酸化物を求めて走り廻っている. Fig. 13 (c) の電圧波形 (三角波) はこのような陰極点の移動に伴うアークの変動に対応したものと理解される.

このような陰極点に酸化物を求めて陰極降下の低減をはかる性質があること, 冷陰極材では陰極点の再生電圧がかなり高いことを活用すれば, 切断溝中での入熱分布の大幅な制御が可能となるわけで, ガス流量など単なる切断操作のみにたよる正極性切断に比べてはなほだ有利である.

5. 結 論

本研究は切断用プラズマ・アークにおける母板極点の基礎的な挙動を実験的に究明したものであり, 以下に列挙するいくつかの事項を明らかにした.

(1) 切断時 母板側極点は切断溝内に存在し, プラズマ気流のモーメントとアークに働く電磁力のために切断溝進行前壁部で上方→下方へ移動する. このアーク長の増大によるアーク電圧の上昇に起因して, 上方でアーク柱と切断溝面間に絶縁破壊を生じ, 上方に再び極点が形成されて 上記の移動現象が繰返される.

(2) 陽極点存在の分布は 上方での冷たいガス層の絶縁破壊の難易さとアーク柱の電位傾度によって主に支配される. 通常のプラズマ・アーク切断では 前者の効

果が大である.

(3) 陰極点 (逆極性) の場合には 極点の再生は上記のようなガス層の絶縁破壊の難易さばかりでなく, 再点弧電圧の大小にも著しく影響される. このため 普通には陰極点の方が陽極点よりもかなり下方にまで移動する.

(4) 陰極点の挙動は母板の表面状況および切断部のシールド条件によって大いに影響を受ける. 切断溝部に酸化物があまり存在しない場合には 陰極点は陽極点の場合と同様な上→下の繰返し移動を行なうが, 酸化物が多ければ その上層部を酸化物を求めて走り廻る挙動を示し, 大幅な上→下移動は起こらなくなる.

(5) 水冷銅板端における陽極点の上下移動の速度は 100~200 m/sec であり, プラズマ気流および溶融金属流の流速の中間の値を示している. 陰極点の場合の移動速度は 板の酸化状況によってかなり異なるが, 一般に陽極点の移動速度よりもかなり低い値となる.

(6) 正極性, 逆極性を問わず, 極点の上→下の繰返し移動に対応して, アーク電圧に特徴的な鋸歯状波が認められる. その繰返しの周波数は 陽極点では数~数十 kHz, 陰極点では1~数 kHz 程度である.

(7) 酸化物の附着が多い場合の逆極性プラズマ・アークでは, 局所的な陰極点の走り廻りに対応して アーク電圧に数百 Hz の三角波が現われる.

(8) 逆極性プラズマ・アーク切断においては 普通シールドガスを流さずに切断を行なうため 切断溝への酸素の混入があって, 陰極点は常に切断溝内に存在し, TIG 溶接などにみられるクリーニング帯を形成しない.

(9) 陽極点は切断溝進行前面に集中して存在するのに対し, 陰極点は切断溝側面の凝固線付近まで幅広く移動している.

文 献

- 1) R.M. Gage: "The principle of the modern arc torch" W.J., Vol. 38 (1959), No. 10, 959-962
- 2) G.R. Spies: "A Comparison of Plasma and Oxyfuel Gas Cutting" W.J., Vol. 44 (1965), No. 10, 815-828
- 3) D.I. VAINBOIN et al.: "Plasma Arc Cutting with Compressed Air and a Zirconium Cathode" Svar. Proiz., 1967, No. 8, 1-2
- 4) K.V. VASIL'EV: "The Prospects for Plasma Arc Cutting of Steel" Svar. Proiz., 1966, No. 3, 18-21
- 5) 黒川: "プラズマジェットによる 軟鋼板切断" 溶学誌, Vol. 33 (1964), No. 9, 703-709
- 6) J.A. Browning and C. Hazade: "Quality Determinants in the Plasma Cutting Process" B.W.J., Vol. 10 (1963), No. 9, 426-469
- 7) M.L. Levin: "Plasma Cutting and Gouging" B.W.J., Vol. 11 (1946), No. 5, 213-221
- 8) G.M. Skinner and R.J. Wickham: "High Quality Plasma Arc Cutting and Piercing" W.J., Vol. 46 (1967), No. 8, 657-664

- 9) 丸山: “チェコスロバキアのウォータ・プラズマ切断装置” 溶接, Vol. 19 (1971), No. 6, 57-61
- 10) R. W. Couch JR.: “High Quality Water-Arc Cutting” W. J., Vol. 50 (1971), No. 4, 233-237
- 11) 豊岡: “アルミおよびアルミ合金のプラズマアーク切断”, 溶接, Vol. 16 (1968), No. 9, 26-31
- 12) K. V. VAIL'EV: “The plasma Arc, the New Means of Thermal Cutting” Svar. Proiz., 1967, No. 11, 57-61
- 13) 後藤: “プラズマアーク切断現象の研究”, 溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料, 70-98 (1970)
- 14) 安藤, 長谷川: “溶接アーク現象”, 産報 (1967)
- 15) V. F. SIVIRKIN et al.: “Experiments on the Shunting Mechanism of the Anode Spot of an Arc with an Axial Flow of Gas” Svar. Proiz., 1968, No. 10, 12-13
- 16) E. R. G. Eckert and E. Pfender: “Plasma Energy Transfer to a Surface With and Without Current” W. J., Vol. 46 (1967), No. 10, 417s-480s
- 17) 安藤, 西川, 五十嵐: “パイプの磁気駆動アーク溶接におけるアークの挙動”, 溶接誌, Vol. 40 (1971), No. 6, 93-98
- 18) 伊藤: “窒素プラズマアークの特性と水シールドプラズマアークの研究”, 溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料, 70-100 (1970)
- 19) 岡田, 荒田: “プラズマ工学” 日刊工業新聞社, (1965)
- 20) 長谷川, 後藤: “High Current MIC-Arc Welding of Aluminium” I. I. W., Doc. 212-212-71 (1971)

第 4 回 真 空 冶 金 国 際 会 議

Fourth International Conference

on

Vacuum Metallurgy (ICVM)

期 日 1973年6月4日—8日
 会 場 東京, 経団連会館, 国際会議場
 主 催 日本鉄鋼協会・日本金属学会・日本真空学会
 共 催 アメリカ真空学会・真空冶金国際連合
 概 要 本会議は, 次の8分科会において, 討論が行なわれます。

- 1) Physical Chemistry of Vacuum Metallurgy (Kinetics, Thermodynamics, etc.)
- 2) Vacuum Melting and Refining Processes (Induction, VAR, Electron Bombardment, Plasma, Vacuum Degassing of Metals, etc.)
- 3) Process Metallurgy in Vacuum (Pidgeon Process, Vacuum Distillation, Thermal Decomposition, Reduction in Vacuum, etc.)
- 4) Behaviour of Materials in a Vacuum Environment
- 5) Vacuum Deposition of Coatings and Self-supported Structures
- 6) Properties and Application of Vacuum Metallurgical Products
- 7) Vacuum Equipment for Metallurgical Processes
- 8) Welding and Casting under Vacuum, Economics of Vacuum Metallurgical Operations and Products, Other Topics in Vacuum Metallurgy

なお第4回 エレクトロスラグシンポジウム (ESRシンポジウム) ICVMと併行して, 1973年6月17日—8日まで, 同会場にて, 開催されます。

- 投稿規定
- 1) 論文は未発表であること。
 - 2) 投稿申込書に, 図表を含め約500語の概要2部を添えて, 1972年11月30日までに事務局 (日本鉄鋼協会) 宛お送り下さい。
 - 3) 申込みの諸否は, 1973年1月15日までに連絡します。
 - 4) 受付けられた論文は, さらに論文概要を1973年4月10日までに提出して下さい。概要の執筆要領は, 諸否の通知の際, 連絡します。なお, この概要は, 前刷集として出席者に配布されます。

- 登 録 料
- ① 28,000円 (前刷, プロシーディングス, パーティーの費用を含む)
 - ② ICVMとESRシンポジウムの両会議に出席する場合は, 5,000円追加して下さい。

申込先 (問合せ先) 東京都千代田区大手町1-9-4
 日本鉄鋼協会 田 畑 新太郎
 電話 03-279-6021 (代)