研究論文

プラズマアーク切断現象に関する基礎的研究(第3報)*

— 切断溝の形成現象 —

西口 公之** 松山 欽一**

Fundamental Studies on Cutting Phenomena in Plasma
Arc Cutting (3rd Report)*

—Kerf Formation Phenomena in Plasma Arc Cutting—

by Kimiyuki Nishiguchi** and Kin-ichi Matsuyama**

The kerf formation in a plasma arc cutting is influenced by the behavior of molten metal within the cutting groove in addition to the heat distribution on the cutting front described in the report 2, as well as known in welding bead formation. So, the authors deduced the kerf formation mechanism by the investigations of heat input character and molten metal flow pattern from analysis of the cutting front shapes and the traces of insert metal flow, respectively.

The heat distribution within the groove in a plasma arc cutting can be roughly approximated to that in a plasma jet cutting, in which heat flux from plasma stream to the cutting groove exponentially decreases along the center of cutting front in regardless of division into three regions I-III described in the report 2, since the most of energy given to the groove is generated in the constricted nozzle part within torch.

While, the molten metal within the groove indicates complex flow patterns in each region I-III contrary to the expectation from the plasma stream. In the region I and II, the molten metal flows toward side-and-downward due to surface tension in addition to the momentum of plasma stream. Especially, in the region II at straight polarity, the sideward metal flow is remarkable, since the most of anode spot locates on the center part of cutting front. The region III is divided into two parts from the difference in flow pattern. In the upper part of III (region III-a), the molten metal flows along or slightly toward the cutting front. In the lower part of III (region III-b), the molten metal strongly flows toward sideward, too, because of the momentum change of the stream due to change inclination of cutting front.

Such metal flows toward and in sideward act to spreading the kerf width, so that the kerf width in the region II is wider than that in the region I or III-a, and lower part widening kerf is formed in the region III-b. The kerf spreading phenomenon in the region I is suppressed by using the reverse polarity torch, since the cathode spot wanders near and on the solidification line (drag line).

1. 緒 言

プラズマアーク切断溝内の極点分布域を境に切断前面が板厚方向に3領域に区分でき、ガウジング限界速度近くの高速切断条件になるとこの極点分布域は切断溝の上部側に移動し、狭くなることを前報(第2報)¹⁾では明らかにした。

通常、切断溝内の極点分布域は、前報で示したように、最大切断厚さ(ガウジング深さ)の $\frac{2}{3}$ ~ $\frac{1}{2}$ 程度のかなり広い範囲を占めている。また熱授受に関しては、全

発生エネルギーの95%近くがノズル部とトーチ高さ部で得ており、アークが板の裏面まで貫通しないいわゆるガウジング条件ではその60%程度が溶融部と残存母材部に与えられることが報告されている^{2,3)}。一方母板の極点エネルギーは溶融の等価電圧⁴⁾で高々6~9V程度に過ぎず、この値はアーク電圧の100~200Vに比べて微々たる量である。したがって、通常の良質切断域(限界分離切断速度の60~80%程度^{5,6)})およびそれ以上の速度域では、上記の熱効率と前報で求めた極点分布域の広さを考慮するとき、この極点分布域における単位板厚当りの入熱に占める極点エネルギーの割合は数~30%程度にしかない。しかも通常の正極性切断ではこの極点が切断

*原稿受付 昭和51年12月21日(昭和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 University

前面の中央部側に主に存在し、側面の直接溶融にはそれほど寄与していないと推察される。しかしこの切断溝では常にプラズマ流エネルギーの減衰につれて板の下方ほど溝幅が狭くなるわけではなく、たとえば極点分布域での溝幅が他に比べて広がったり、あるいは前報で定義した領域Ⅲ（主として高温プラズマ流のエネルギーで母材を溶断する領域）の下部で板の裏面にゆくほど溝幅が広がる下広りの切断溝が形成されることもある。

このような溝形成現象は、極点エネルギーの直接投与に基づく単純な熱伝導論的な修正のみでは説明できず、通常の溶接ビード形成の場合と同様に溶融金属流による二次溶融を考慮せねばならないことを意味している。このような考え方に立って、著者らはまず切断溝への熱投与形態およびこれに対する極点エネルギーの効果を検討し、ついで溝中での溶融金属挙動と極点分布域との関係を明らかにし、さらにこの極点分布と切断溝形成機構との関連性について論考を進めることにした。

2. プラズマアーク切断溝での入熱形態

プラズマアーク切断溝における切断前面の中央部では通常母材への入熱量のほぼ全てが溶融に費やされ、しかもその溶融金属層は非常に薄くて固体面に近い状況にあることが観察される。またこの切断前面中央部での定常切断進行に必要な熱量は切断前面とアーク柱の高温部との間隔ないしはこの前面の傾きを自己調整して得ているものと考えられる。したがって切断溝での入熱形態はこの切断前面中央部の板厚方向の形状で代表できる。

Photo. 1(a) は、プラズマアーク切断での前面中央部形状の代表例を (b) 図の高温プラズマ流の保有エネルギーのみを用いるいわゆるプラズマジェット切断の場合と対比して示したものである。試料は、同板厚の軟鋼板を同速度で、しかもほぼ同ドラッグ遅れ距離となる入熱条件で切断して得た。切断の停止はアークの瞬断によって行なっているので、写真は切断中の前面形状に近いものと判断される。さて、両者を比較すると、(a) ではC点を境にして板の上下で多少の曲率変化が認められるものの、全体的にはよく似ている。この事実は切断前面への伝達

Photo. 1 Characteristics of cutting front shape in a plasma arc cutting

熱密度の溝深さ方向への減衰状況が両者で大差ないことを意味している。

上はアルゴンを動作ガスとする正極性切断の場合であるが、このような類似性は窒素やアルゴン水素を動作ガスに用いても、また逆極性を採用しても同様であった。

プラズマジェット切断における切断溝内での入熱減衰特性について、林は Fig. 1(a) 中の模式図に示す方法でプラズマ流中心軸に同心な管壁への吸収熱量を測定している⁷⁾。(a) 図中の各直線はこの測定結果をもとに、高温プラズマ流から管壁面への伝達熱の減衰状況を整理し直したものである。図から、電流通路の影響を直接受けるノズル出口部極近傍を除けば、管壁（切断前面）へ伝達する熱量はプラズマ流の下流に進むにつれてほぼ指数関数的に減衰していることが判る。

Fig. 1 Estimation of heat input character in a plasma arc cutting

- (a) Heat transfer character from plasma jet stream
- (b) Comparison of heat input characters in plasma arc cutting and plasma jet cutting

この減衰特性は、切断前面形状からも確かめられる。すなわち、(b) 図は切断前面中央部の溶融に必要な熱量を切断前面の傾きを自己調整し得ているとの考えのもとに、Photo. 1(b) から切断前面に沿う座標 l_f 上の距離と各位置での傾き角の余弦との関係を求めたものである。この前面の中央部に注目する限り、単位板厚当りの溶融に必要な熱量 q_0 量は一定と想定されるので、プラズマ流から前面への伝熱密度 $q_1 = q_0 \cos \theta$ ((b) の模式図

参照)より $q_1 \propto \cos \theta$ となる. このようにして求めた q_1 は, (b) 図にみるように指数関数的に減衰した.

(b) 中○印は Photo. 1(a) に示したプラズマアーク切断における各溝深さ位置での前面の傾き角の余弦を示したものである. これより, 切断板厚, ドラグ遅れ距離がほぼ同じであれば, 極点の存在の有無によらず溝内での入熱減衰特性に大差ないことが判る.

上に述べた切断前面への熱投与形態から推定すると, 溝形状は入熱減衰特性に対応して単純な下すばまり形となるものと考えられる. しかし, 実際の切断溝では Photo. 2 に示すように切断前面の領域区分点 A~E に対応して溝形状も A'~E' と複雑な変化を示し, プラズマジェット切断の場合のような常に単純な下すばまり形状とはならない. とくに図は領域 II (BC 区間) の前壁中央部に極点集中がみられ, B'C' 部の溝幅拡大の著しい正極性アルゴンプラズマ切断の場合であって, これは極点エネルギーの直接投与による単純な熱伝導では理解できず, 溶融金属流による溝側方への熱輸送を想定せねばならない. 同様な熱輸送現象は D'E' 区間についても想定される.

Photo. 2 Comparison between cutting front and kerf shape in plasma arc cutting ($I=110$ A (S.P.), $Q=20$ l/min (Ar), $d=3$ mm ϕ , $v=2$ cm/min, $h=50$ mm (SS41))

3. 溝内での溶融金属挙動と基本切断溝形成機構

3.1 切断溝内での溶融金属挙動

切断溝内における溶融金属の挙動を直接観察するのは強力なアーク光による妨害その他のために困難である. そこで Fig. 2 に例示する埋込み金属の溶融流の痕跡* (写真の切断前壁上で白く見える部分) からこれを推定

* 埋込み金属の溶融流線を明確にするため, 切断前面部を希塩酸で腐食後, 観察している.

Fig. 2 Observation of molten metal flow patterns by the trace of insert metal flow

した. 実験に際しては, 埋込み金属として鋼に対して識別の容易な銅 (1.6 mm ϕ ワイヤ) を用い, これを図中破線のように切断溝の前方側から板厚方向に垂直に埋込んだ. 埋込み金属の位置および溶融長さ, 切断速度を種々変えることによって入熱形態をいくつか変えた. なお, 銅はその比重, 溶融温度が比較的母材の鋼の値に近いので用いた. この銅流線の痕跡を総合・整理すれば, 溝内での溶融金属挙動が的確に把握される.

Fig. 3 にこのようにして求めた溶融流線の測定結果の典型例 (正極性・アルゴン) を示す. ノズルから噴出するプラズマ流の流速は $1\sim 5$ km/sec⁸⁾ と非常に速いにもかかわらず, 図中矢印群のように切断前面の中央部から凝固線方向への流れ成分が認められる. この側方への流線成分は I, II, III 各領域で強弱に差があり, この影響は図にみるように凝固面でのリップルを示すドラグライン形状にも現われた. なお領域 III は図の溶融流線方向の差異から a, b 2つの領域に細分できる.

Fig. 3 Typical molten metal flow pattern within the cutting groove in argon plasma arc cutting at straight polarity

上記のような凝固線方向成分をもつ湯流れは, 切断前面の中央部と凝固部との温度差 したがって表面張力差に起因して溶融金属に働く凝固線向きの力 (表面張力), 前面中央部の傾き変化が大となり, この結果生じるプラズマ流のモーメントチェンジに伴う側方への気流成分による力のいずれかに原因するものと想定される. 板上部の領域 I および II では前面中央部の傾きが小さ

く、気流による力はさほど有力とは考えられないので、表面張力差に起因する力が主因となるものと判断される。この考え方に立てば、切断前面中央部での温度すなわち入熱密度が局部的に高くなる程側方への湯流れ成分が大となるはずである。事実極点が前面の中央部に集中する Fig. 3 では A B 区間に比べ極点存在域の B C 区間の方が溶融金属はより凝固面方向へ向って流れており、これは上の論考の妥当性を示している。C D 区間ではこの前面中央部での極点の存在量が少なく、しかもプラズマ流からの入熱密度も低下しているので、前面中央部と側面の凝固部との温度差が減少して表面張力流は弱くなり、この領域では溶融金属はほぼプラズマ流に押し流されて流下する。この状態からさらに入熱密度が低下して切断前面中央部の傾き角の変化が顕著になる D 点付近以降では、気流のモーメントチェンジによる側方への湯流れ成分が強力となる。この結果 Fig. 3 にみるような凝固線側へ向う溶融金属流が発生する。

上の考察から、D E 区間の湯流れパターンは動作ガスの種類やトーチ極性などによって変らないが、B C 間での流れは極点分布状態によってかなり影響され、これに伴って切断溝の形成状況も変わってくるものと予想される。そこでまず出発点として現象の簡明な上記正極性アルゴンプラズマ切断における溝形成現象を究明することにした。

3.2 切断溝形成の基本現象—正極性アルゴンプラズマアーク切断溝の形成現象

切断溝内の極点分布域をもとにして分割した各領域での特徴的な湯流れ現象は、切断前面中央部への直接入熱を金属流によって側方へ熱輸送する状況すなわち溝の拡大状況にかなりの影響を与える。Photo. 3 は、板厚各部で切断進行部を薄く切り出し、その溶融・開拓状況を調べた例である。A B 区間以外の切断前面形状は、直接入熱だけを考えると熱伝導論から求まる形よりも最大溶融幅位置が後退した楕円形となっている。とくに領域Ⅲの D 点付近以降で顕著である、これは Fig. 4 中の矢印で示す金属流による溶融・開拓作用の著しいことを表わしている。すなわち切断溝を一点鎖線方向に薄く切り出した Fig. 4 中の写真 (1) と (3) の溝底部の形状を比較すると、後者で大いに丸味を生じていることからこの現象がうなづける。このように溝側面後方向向う溶融金属流が有効に働けば、たとえアークからの直接入熱が少なくても溝幅は拡大されるのである。この結果 D E 区間でも溝幅が板中部と同等あるいは極端には板下部が下広がり状となる切断溝さえ得ることができる。

B C 区間では極点分布状況によって溶融金属流の方向が影響されるので一概にはいえないが、正極性アルゴン

Photo. 3 Characteristics of cutting front shapes in each region I, II, III ($I=150$ A (S.P.), $Q=30$ l/min (Ar), $d=3$ mm ϕ , $v=13$ mm/cm/min, $h=28$ mm (SS41))

Fig. 4 Kerf spreading process by the molten metal flow in the region III-b ($I=200$ A (S.P.), $Q=50$ l/min (Ar), $d=4$ mm ϕ , $v=24$ cm/min, $h=28$ mm (SS41))

プラズマ切断の場合には、Fig. 3(a) にみた凝固線へ向う強力な金属流によって切断前面中央部に投与されたエネルギーが能率よく側面方向へ輸送され、結果として切断溝は Photo. 3(b) にみるように大幅に拡大される。このように、B C および D E 区間での溝側面向う溶融金属流による顕著な溝開拓の結果、切断前面中央部のプロフィールの単純な反映として予想される形とはかなり異なる

複雑な形状をした断溝が形成されるのである。

上では切断溝形成の基本特性を示した。しかし実際の切断溝ではこれらⅠ～Ⅲの全ての領域を同時に含むわけではない。Photo. 4 に種々の入熱条件で軟鋼材を切断した場合の典型例を示す。(a) は板上部を領域Ⅰ(アーク柱エネルギーによる領域)、その下部を領域Ⅱ(極点の主分布域)のみで切断したものである。Fig. 3(b)の溝上部形状を極端にした下広がり形状を示す。この条件より切断速度または板厚を増して板下部に領域Ⅲ-a(主に高温プラズマ流で切断する領域)が現われるようになると、(b)にみるように Fig. 3(b)の上半分の形状そのままの太鼓形を示す。なおこの胴部の脹らみが小さい場合には(c)にみるように平面度、ベベル角とも良好な切断溝となる。さらに切断速度を増すなどして領域Ⅰをほぼ消失させると、(d)にみるように(b)のA'B'区間が消失した下すばり形の切断溝となる。さらに切断速度を増すなどして板下部に領域Ⅲ-b(前面中央部の傾きが顕著な領域)が出現すると、(e)にみるようにつづみ形の切断溝となる。

このような特性は動作ガスの種類、極性、被切断材の材質を変えても基本的には同様に認められた。ただ極点

分布状況の差異に起因する溶融金属流挙動の影響を受け、具体的な形状はある程度修正される。

4. 切断溝形成に対する極点分布状況の影響

4.1 動作ガスの種類による影響

窒素などの二原子ガスを多量に混入した動作ガスでは、アルゴンの場合と異なり切断前面のC点以降にもかなりの比率の陽極点が存在し、しかもこの極点は前報 Fig. 2(b)で述べたように¹⁾、凝固線近くまで広く切断前面を覆って分布する。Fig. 5はこの正極性窒素切断における極点分布域および溶融金属流観察の結果をまとめたものである。図にみるように、アルゴンの場合に比べると陽極点は前面中央部側へのみは集中せず、かなり後方にまで分散して存在しており、BC区間での凝固線側へ向う湯流れ成分は弱い。このためC点以降のⅢ-a領域では凝固線側を流れる溶融金属量が減少し、凝固が急速に進む。この結果湯流れ方向が変化し、かえって切断前面の中央部側へ向う湯流れ現象さえ示すようになる。この結果、溶融金属流による溝側面の溶融・開拓が低減し、ノズル部からの直接投与エネルギーの減衰率が大きいこと*と相まって、B'C'D'にみられるようにアルゴンの場合よりも下すばり形となる。もちろん、B'点より板の上方でカーフ幅が減少し、D'点以降で増大する現象はアルゴンの場合と基本的には変わらない。

Fig. 5 Molten metal flow pattern and characteristics of kerf shape in nitrogen plasma arc cutting at straight polarity

動作ガスの代表例として窒素とアルゴンを用い、切断速度のみを変えて溝形状を対比した結果を Fig. 6 に示す。上図に表(W_T)および裏カーフ幅(W_B)を、下図にこの両者の比率を表わす。図中のC、D点は切断前面での区分点、C、Dの位置が板の下端と一致する速度を示している。前述のように通常のプラズマアーク切断では限界分離切断速度の60~80%の良質切断面が得られており、この速度域(D点付近)での W_T/W_B は窒素の方が最大5割程度も大となっていた。この結果はアルゴンの方がC E部での湯流れの作用でベベル角の小さな切断

Photo. 4 Essential relation between the heat input characters within the groove and kerf shapes ($I = 100 \sim 200$ A (S.P.), $Q = 10 \sim 50$ l/min (Ar), $d = 3$ mm ϕ , $v = 2 \sim 70$ cm/min, $h = 16$ mm (SS41))

* これは同一の切断速度、電気入力で切断すると、アルゴンを用いた場合に比べ通常窒素の方が切断可能板厚が薄いことより確認される。

Fig. 6 Comparison of kerf shapes in argon and nitrogen plasma arc cutting at straight polarity

溝が得られることを表わしている。

上記は二原子ガスと単原子ガスの各典型例について比較したものであるが、通常の混合ガスを用いた場合にはこのアルゴンの場合と窒素の場合の中間に位置する溝形成現象を示すことを確かめている。

4.2 トーチ極性の影響

逆極性切断では第1報⁹⁾で述べたように母板陰極点が溝内の凝固線側にまで広がって存在するため、領域Ⅱでの表面張力流が抑制され、正極性の場合よりも平行性の良い切断溝が得られる。Photo. 5 にアルゴンを動作ガスに用いて軟鋼を逆極性切断した場合の切断前面の中央部形状と溝形状の典型例を示す。試料は Photo. 2 の正極性の例と同板厚を用いた。逆極性では、正極性の場合に比べて B'C' 区間での溝幅の広がりか緩やかでしかも切断前面中央部と凝固線（ドラグライン）との間隔も狭い。この特徴は、領域Ⅱでの凝固線方向への溶融金属流がこの凝固線にまでも広がって存在する陰極点の加熱によって大いに抑制されることとして説明・理解できる。なお、極点のあまり存在しない領域Ⅲでの溝形成状況は正極性の場合と大差なく、Ⅲ-b 域では凝固線側を流れる溶融金属のため溶融形状はやはり下広がり状になる。しかし写真ではこの凝固線側を流れる溶融金属の一部が凝固して切断面に付着しているため切断溝幅は溝の下方がど狭くなって見える。

Photo. 6 は逆極性切断における切断溝形状を、同条件で切断した正極性の場合と対比して示したものである。上述領域Ⅱでのドラグ・ライン側へ向う溶融金属流が大幅に抑制されること、陽極点に比べ陰極点の方が溝下部にまで分布しやすいことに起因して逆極性の方が入熱を板下方に与えやすくなる。このため低速では逆極性の方

Photo. 5 Characteristics of kerf formation at reverse polarity ($I=120$ A (R.P.), $Q=20$ l/min (Ar), $d=3$ mm ϕ , $v=5$ cm/min, $h=50$ mm (SS41))

Photo. 6 Comparison of kerf shapes at straight and reverse polarities

Photo. 7 Improvement of quality of cut surface with cleaning effect by cathode spot ($I=150$ A, $Q=30$ l/min (Ar), $d=3$ mm ϕ , $v=9$ cm/min, $h=30$ mm (1100))

が切断溝は下広がりとなる。また限界分離切断速度近くの高速度域 ($v=13\sim16$ cm/min) では逆極性の方がベベル角が小さく、平面度も良好で、しかも上縁の肩だれの

少ない切断面となる。

上は軟鋼材切断についてであったが, このような特徴はステンレス鋼やアルミニウム合金でも全く変らなかった。ただ高融点酸化物が多量に生成されるアルミニウム合金の切断では, この凝固線側にも分布する陰極点のクリーニング作用に起因して, Photo. 7 にみるように切断面の滑らかさが著しく改善された。

5. 結 論

本稿は切断溝内での入熱形態と熔融金属挙動との観測結果をもとにプラズマアーク切断溝の形成機構を検討した結果をまとめたもので, 以下に列挙するいくつかの事項を明らかにした。

(1) プラズマアーク切断溝の形成では, 溶接ビード形成の場合と同じく, 母材への直接投与熱の分布状況だけでなく, 熔融金属流による二次溶融作用の影響も受ける。すなわち, 切断溝への直接投与熱は切断前面に沿って指数関数的に減衰する熱源によるものに近似されるにもかかわらず, 現実の切断溝はこれから想定される単純な下すばり形とはならない。

(2) 切断溝内での熔融金属流の方向は母板での極点分布域を境に区分した領域Ⅰ～Ⅲに対応して変化し, 領域Ⅰでは多少凝固線(ドラグ・ライン)向きに流れる。領域Ⅱでは溝内での極点分布状態によって流れの方向が変わるが, 例えば極点が切断前面中央部に比較的集中する正極性では領域Ⅰより凝固線向きの流れとなる。領域Ⅲは流線の差より上下に2分され(Fig. 3のD点を境とする。), 流れは板の上方の領域Ⅲ-aではほぼ切断前面に沿い, 下方の領域Ⅲ-bでは凝固線向きとなる。

(3) 切断溝幅は上記各領域にはば対応して変化し, 基本的には, 領域Ⅰ→Ⅱにつれて拡大, 領域Ⅲ→Ⅲ-aにつれて減少, 領域Ⅲ-bでは板下方ほど拡大という変遷をたどる。

(4) 領域Ⅲ-bでの溝幅拡大現象は, この領域での切断前面中央部の傾き変化が著しいことに起因して気流のモーメントチェーンが無視できなくなり, 凝固線向きの熔融金属流が生じることに原因して生じる。また正極性の領域Ⅱでの溝幅拡大現象は, 切断前面中央部と凝固線との温度差に基づく表面張力成分がこの領域で

比較的強力となり, この結果切断前面中央部へ直接投与された極点エネルギーが素早く凝固線側へ輸送され, 溝が開拓されるものとして理解される。

(5) 正極性の窒素切断では, 領域Ⅲ-aにおける熔融金属がアルゴンを用いた場合に比べ多少切断前面中央部側向きの成分をもつ流れとなる。これは, 窒素切断ではこの領域Ⅲにもかなりの比率の陽極点が分布し, この陽極点が凝固線付近まで広がって存在するため凝固線側を流れる熔融金属量が少なくなり, ここでの凝固が急速に進んで湯流れの方向を変えるためとして理解できる。

(6) 逆極性切断では正極性と違って陰極点が凝固線にまで広がって分布しているのので, 領域Ⅱでの凝固線方向へ向う表面張力成分が小さくなり, 正極性に比べ平面度, ベベル角とも良好な切断溝が形成される。

(7) 逆極性アルゴン切断では凝固線付近に形成される陰極点によってクリーニング作用が生じ, 切断面は滑らかとなる。この特徴は高融点酸化物が多量に生成されるアルミニウム合金の切断に際して顕著に認められる。

(8) ドラグライン(凝固線)の形成位置は溝内での熔融金属流の影響を大いに受けるため, その形状は切断前面中央部形状とは一致しない。

参 考 文 献

- 1) 西口, 松山: “プラズマアーク切断現象に関する基礎的研究 (第2報)”, 溶学誌, Vol. 46 (1977), No. 8
- 2) 後藤: “プラズマ切断現象の研究”, 溶接学会 溶接アーク物理委員会資料 70-98 (1970)
- 3) K. V. Vasilev; “The Prospects for Plasma Arc Cutting of Steel”, Svar. Proiz., 1966, No. 3, 18-21
- 4) 安藤, 長谷川: “溶接アーク現象増補版”, 産報, 昭和42年, p. 321
- 5) 西口, 松山: “高速切断現象”, 溶学誌, Vol. 42 (1974), No. 8, 55-67
- 6) D. G. Bykhovskii, I. V. Nedorezov; “Possible Methods of Increasing the Speed of Air-Plasma Cutting” Art. Svarka, 1972, No. 3, 32-33
- 7) 林: “拘束ノズル付プラズマ Torch における熱輸送現象およびプラズマ流特性”, 大阪大学工学研究科溶接工学専攻修士論文, 昭和41年度
- 8) 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 溶接アーク物理委員会資料, 70-99 (1970)
- 9) 西口, 黄地, 松山: “プラズマ・アーク切断現象に関する基礎的研究 (第1報)”, 溶学誌, Vol. 41 (1972), No. 7, 21-31