

プラズマ・ジェットによる金属の切断について

Plasma-Jet cutting of several metals

坂部 昭* 佐藤 博* 秋山 修*
Akira Sakabe Hiroshi Satō Osamu Akiyama

内 容 梗 概

アルゴン・水素混合ガスを使用した非移行式プラズマ・ジェットにより、アルミニウム、ステンレス、軟鋼ならびに鋳銅板の切断実験を行ない、前二者については実験式の導入によって、ガス流量、アーク電流と切断速度の間の関係について検討を加えた。また、軟鋼板については、アセチレン・酸素切断法と対比して実験を進め、30mm以下の板厚では実用性のあることを明らかにした。

切断実験とともに、経済性の点についても考察を加え、プラズマ・ジェット・ガンの進むべき一指針を与えた。

1. 緒 言

現在実用化されている金属材料切断法としては、のこあるいはシヤーによる純粋な機械的切断法と、高温熱源を利用する溶融切断法をあげうるが、前者の方法では、板厚、素材の大きさその他に多くの制約を受ける。後者の方法に対する熱源としては、アセチレン・酸素のような燃焼炎、あるいはアーク放電によるアーク熱などが利用されているが、これらの方法で得られる温度は、高々 3,000°C 程度であって、高融点材料の溶融は困難であり、特に、燃焼炎の場合、軟鋼のように、化学反応熱を利用する材質はよいが、他の金属にはこれを応用できない。

最近実用化の域にはいったプラズマ・ジェットは、比較的簡単な装置で、10,000~30,000°C という、従来の方法で得られる温度より一けた高い温度を発生することができ、高温熱源として一躍脚光を浴びはじめたものである。かかる高温においては、物質はすべて溶融、蒸発するはずで、したがって、溶融困難とか、溶融不可能ということがなくなってしまう。さらに、今一つの特長として、その噴出速度が音速以上であるという性質を有しており、この性質は、切断時に、溶融物質を飛散せしめる上において、きわめて好都合である。

以上のように、プラズマ・ジェットは、従来の熱源にくらべ、数段まさる性質を有することから、高融点材料の切断、穿孔、耐熱、耐食、耐摩耗材料の溶射あるいは高速度の溶接などを初めとして、種々の応用分野が開拓されはじめている。われわれも、各種の応用研究を開始し、第一段階として、プラズマ・ジェットの特長を100%活用する切断に対する応用を取り上げ、非移行式プラズマ・ジェットによる切断実験を行なった。その一部についてはすでに発表した⁽¹⁾、その後ガンに改良を加えるとともに、切断実験対象の材質を拡張して研究を一步進めた。今回の実験に取り上げた材質としては、軟鋼板に次いで使用面が広いにかかわらず、適切な溶融切断法がないため、機械的切断法に頼っていた、アルミニウム板、ステンレス鋼板を主体とし、これらについては従来発表されている諸データが断片的なきらいのある点から^{(2)~(4)}、各種板厚の切断実験データを基に、アーク電流、ガス流量および切断速度の間の関係について、実験式の導入を試みるとともに、軟鋼板については、従来の燃焼炎切断法と対比せしめながら実験を進めた。さらに、銅材の実験結果についても若干述べ、最後に経済性について、一部考察を加えた点について報告する。

2. プラズマ・ジェットの概要

2.1 プラズマ・ジェットの歴史的背景

プラズマ・ジェットなる言葉は、比較的耳新しい言葉であり、

* 日立製作所亀戸工場

また、実用化の域にはいったのも、近年のことであるが、その研究歴史の過程はかなり古く、1922年に H. Gerdien および A. Letz が、炭素電極間に、アーク被包用の壁を設け、アークの周囲を水で冷却することによって、アークの電流密度ならびにアークの輝度を高めようとの実験を手がけたことに端緒を發しているのである⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これが、今日 Gerdien アークと呼ばれるもので、彼らはかかる装置で 6,000~7,000°C の温度のアークを発生せしめている。もちろん、彼らの装置では、ジェット状のプラズマ放電は得られていないが、これは、その目的とするところが光源用を目ざしたため、水のフィルムでアークを狭くしようとする考え方は、今日のプラズマ・ジェット発生法に、一脈相通するものである。

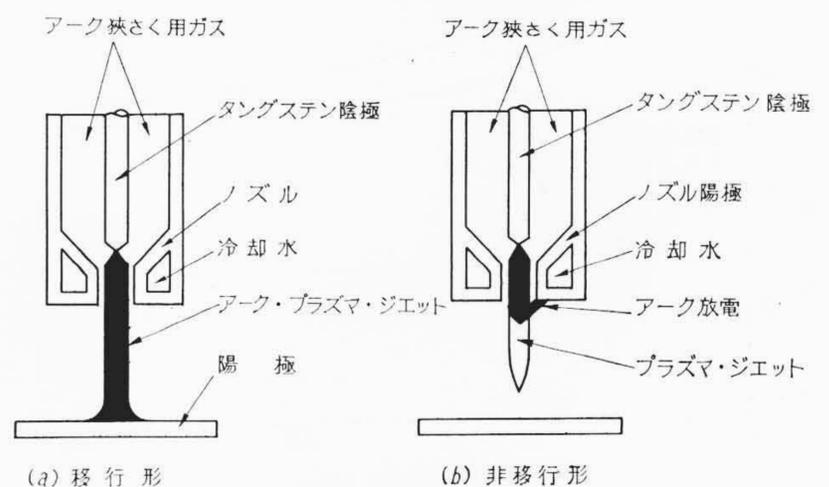
その後、H. Maecker, F. Burhorn, T. Peters, R. W. Larentz らは、Gerdien アークあるいはこれの変形装置で、アーク放電内の温度測定に専念し、50,000°C までの温度の得られる可能性を見いだしている^{(7)~(9)}。

1955年に至り、R. M. Gage は不活性ガス・アーク溶接装置のセラミック・ノズル部分を、水冷した銅ノズルに交換して、アーク・プラズマを不活性ガスの流れと、水冷した銅ノズルによって狭くしようとする装置を案出したが、これが現在工業的応用のなされているプラズマ・ジェット・ガンの前身とみなしうるものである。

狭くされたアーク・プラズマは、前述のように、従来得られなかったような高温を容易に発生しうるとともに、この際の高温を利用して、プラズマをノズルから噴出せしめることによって、非常に高速の噴出速度が得られる。この方面の研究は、T. Peters, A. Schüter らが行ない、数マツハの噴出速度の得られることを報告している^{(10)~(13)}。

2.2 プラズマ・ジェットの発生方式

現在実用化されているプラズマ・ジェットは、ノズル内のアーク・プラズマの周囲をガスで被包し、狭くするものであるが、電極配置の点で二つの形式に大別される。第1図は、これらの概要を図



第1図 プラズマ・ジェットの発生方式

示したもので、(a)に示したものは移行形 (Transferred type)、(b)に示したものは非移行形 (Non-Transferred type) とそれぞれ呼称されている。前者の形では、ノズルが電氣的に浮遊しており、ノズルとは別な陽極と陰極との間にアーク放電を行なわせるものであるのに対し、後者の形では、ノズルが同時に陽極となり、陰極とノズルの間にアーク放電が生ずる。移行形は、電極間間げき長をかなり任意に設定でき、アーク長を比較的大きくとすることが可能であり、したがって、プラズマ・ジェットへの供給エネルギーを大きくしうるといふ利点のある反面、ガン対向物が導電性の材料に限定されるという欠点がある。これに対し、非移行形では、発生したプラズマ・ジェットを任意に利用できるが、ガンの構造、大きさなどの制約から、電極間間げき長をある程度以上大きくとることが困難で、このため、出力の大きいプラズマ・ジェットが得がたい。

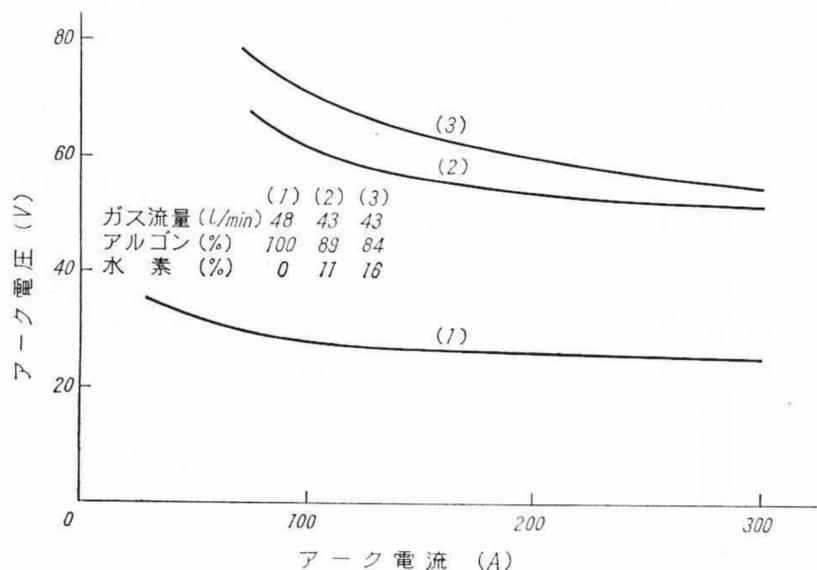
2.3 サーマル・ピンチ効果とアーク狭さく用ガス

2.2 で述べたように、プラズマ・ジェットは、アーク・プラズマの周囲を気流によって冷却し、これによってアーク放電内の電流密度を上昇せしめているが、これがいわゆる“サーマル・ピンチ効果”と呼ばれる現象で、このピンチ効果によってアーク・プラズマの径は縮小し、同時に、アーク電圧が上昇してアーク・プラズマへの入力が増大する。第2図は、アルゴン・ガスの流量を変えてピンチ効果を変化せしめた実験例で⁽¹⁴⁾、流量が増すにつれてピンチ効果が大きくなって、アーク・プラズマの径が減少し、逆にアーク電圧の上昇して行くことが示されている。

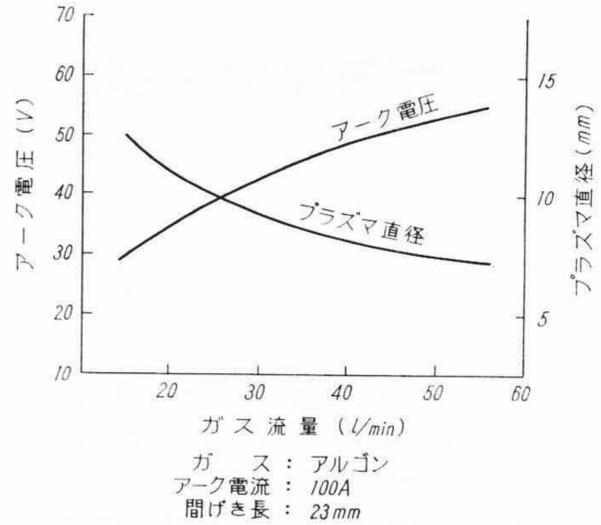
アーク・プラズマを冷却して、サーマル・ピンチ効果を生ぜしめる狭さく用ガスとして種々のものが実用化されているが、アルゴン、ヘリウムのごとき単原子分子ガスと、水素、窒素のごとき二原子分子ガスとでは、プラズマ温度とプラズマ含有熱量の関係に大きな相異点がある。第3図は、アルゴン、水素および窒素ガスについてのプラズマ温度と熱量の関係を示したものであるが、アルゴン・ガスに比較して、水素および窒素ガスの同一温度に対する含有熱量が非常に大きい。これは、アルゴン・ガスのような単原子分子ガスでは、イオン化時に必要なエネルギーを吸収するのみであるのに対し、水素あるいは窒素ガスのような二原子分子ガスでは、電離に先だて、分子がまず原子に解離する段階を経る際に大きな解離エネルギーを吸収するため、第3図においても、分子の解離領域で熱量の急激に増加することが示されている。なお、同図から、たとえばアルゴンと窒素ガスでは 12,000°K と 5,000°K でほぼ同一の熱量を有することが直ちに認めうる。また、第1表は代表的狭さく用ガス使用時のプラズマ・ジェットの特性を例示したものである⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。

2.4 プラズマ・ジェットの二・三の電氣的特性

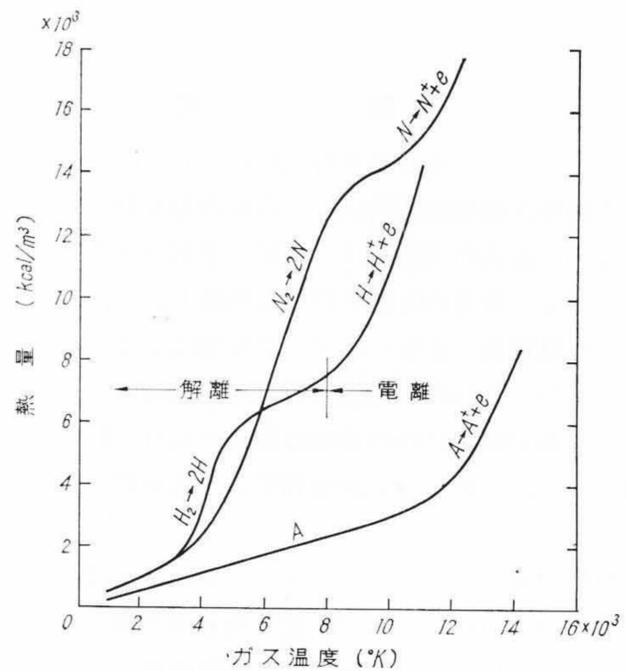
プラズマ・ジェットは元来がアーク放電であるから、電流-電圧特性は第4図のように負性抵抗特性を示す。また、アーク電圧絶対



第4図 電流-電圧特性の一例



第2図 ガス流量とアーク電圧、プラズマ径の関係⁽¹⁴⁾
(サーマル・ピンチ効果)

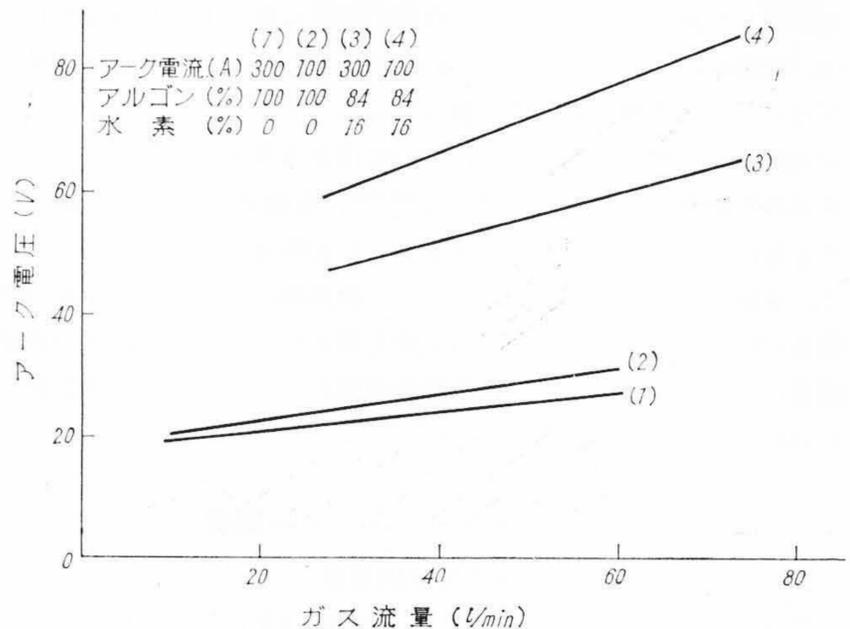


第3図 水素、窒素およびアルゴン・ガスの温度と熱量の関係⁽¹⁵⁾

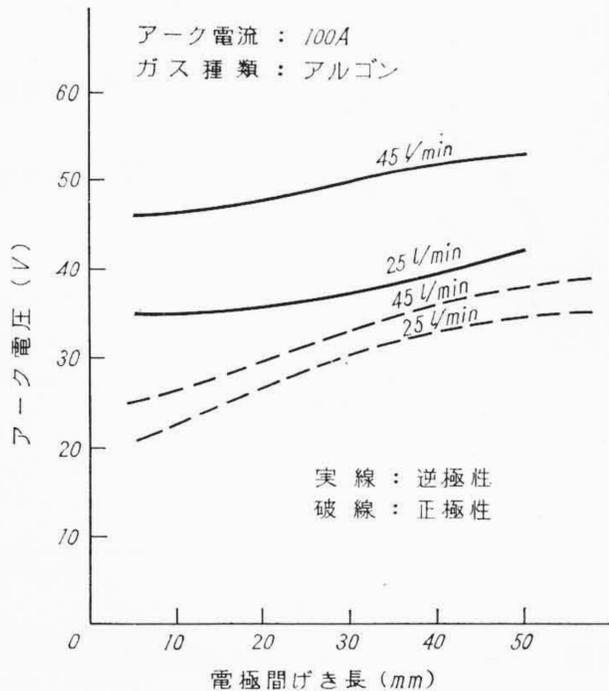
第1表 プラズマ・ジェットの特性例⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾

ガス種別	電氣の入力 (kW)	プラズマ温度 (°K)	エンタルピ (kcal/kg)	アーク電圧 (V)	エネルギー変換効率 (%)
N ₂	60	7,500	9,930	65	60
H ₂	62	5,400	76,600	120	80
He	50	20,300	51,060	47	48
A	48	14,700	4,660	40	40

値は狭さく用ガスによっていちじるしく異なり、同図から直ちにわかるように、アルゴン・ガス単独の場合に比べ、水素ガスを混入するとアーク電圧が急激に上昇し、水素混入率の大きいほど、この上昇傾向が大きくなる。第5図はガス流量とアーク電圧の関係の一例



第5図 ガス流量-電圧特性の一例



第6図 正極性時と逆極性時の特性比較⁽¹⁴⁾

を示したもので、アーク電圧はガス流量にほぼ比例して上昇する。

以上の結果は、いずれもタングステン電極を陰極とした、いわゆる正極性時の結果であって、逆極性時には特性がやや異なり、たとえば第6図に例示したようにアーク電圧が高くなる。これは、逆極性時の陰極点の挙動に起因するものとして説明されるが⁽¹⁴⁾、この際には、一般にアークが不安定になりやすいため、逆極性で使用されることはほとんどない。

3. 実験装置の概要と電流-電圧特性

実験に使用したプラズマ・ジェット発生装置の系統図は、第7図に示したとおりで、プラズマ・ジェット発生用ガン、整流器式直流電源、電気系統制御装置部ならびにガス、水冷用冷却水制御装置部の四ブロックから構成されている。

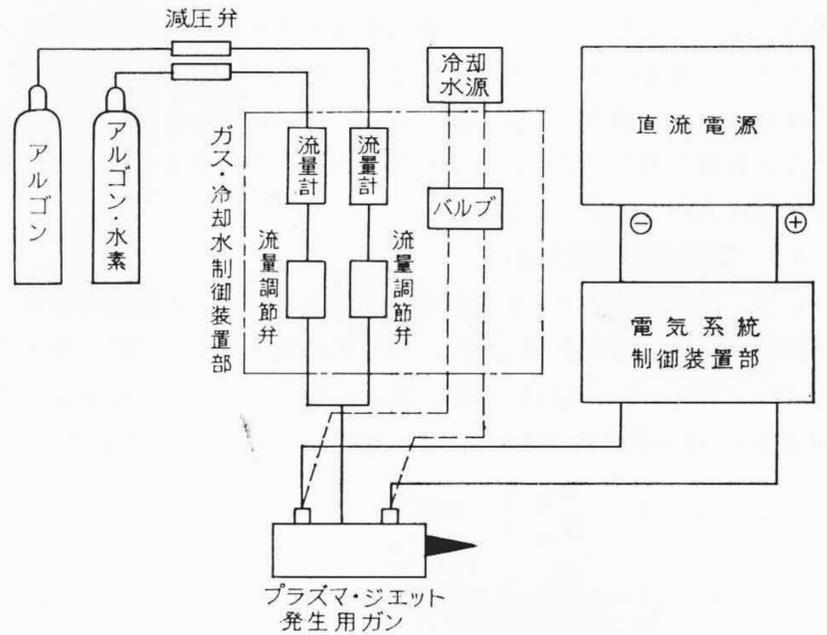
プラズマ・ジェット発生用ガンの方式に二方式のあることは、すでに2.2において述べたとおりで、金属のような導電性材質の切断応用には、ガンの出力を大ならしめうる点で、移行形が有利と考えるが、今回の実験が広範囲な応用面の一角をなすものであり、非導電性材質の切断、穿孔あるいは種々の材質の溶射応用実験など、今後の応用面を考慮し、われわれの実験には非移行形ガンを用いることとした。ガンの動作はすべて正極性とし、陰極材質はタングステン、ノズル陽極材質は銅を用い、もちろん、水によって強制冷却している。なおノズル口径は5mmで、これの交換は容易に行ないうるよう配慮してある。

直流電源の回路構成としては、プラズマ・ジェットの動作電圧が普通の溶接アークのそれに比べ高いため、無負荷電圧を高く設計してあるほかは、一般の直流溶接機の回路構成とほとんど同一である。参考までに、直流電源の外部特性曲線の一例を第8図に示しておいた。

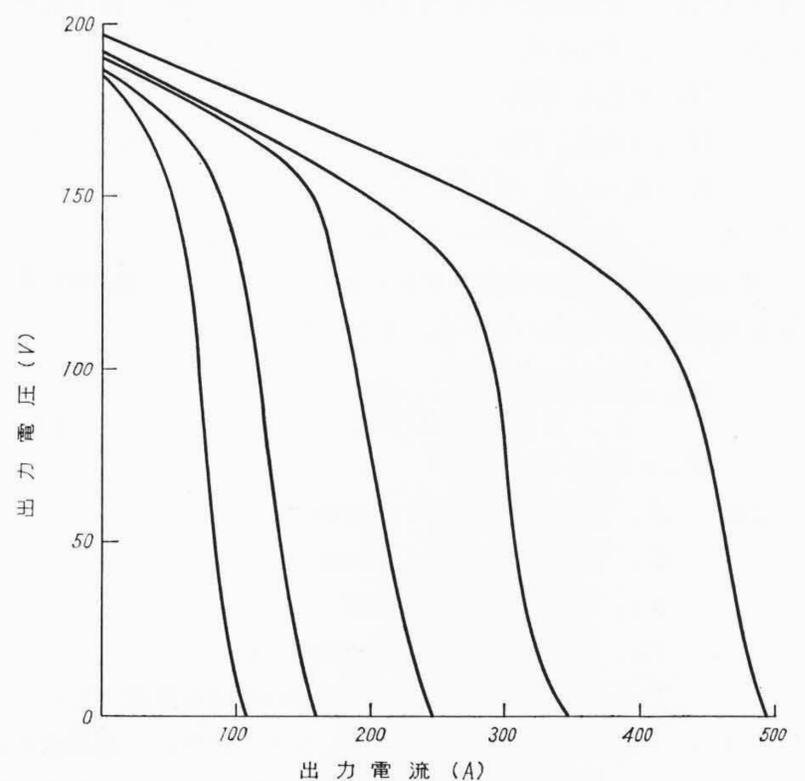
電気系統制御部には、プラズマ・ジェットの発生を容易ならしめるため、高周波発生装置が組み込まれており、起動時のみ押ばたんによって高周波電圧を陰、陽極間に印加して、瞬時起動を行ないうるようになっている。

最後に、狭さく用ガスとしては、放電の安定性とプラズマ・ジェットの熱量の点を勘案して、アルゴン・水素混合ガスを用いることとした。これらのガスは、ガス制御部で圧力、流量を適宜調整することができ、任意の混入率のもとでプラズマ・ジェットを発生しうるようになっている。

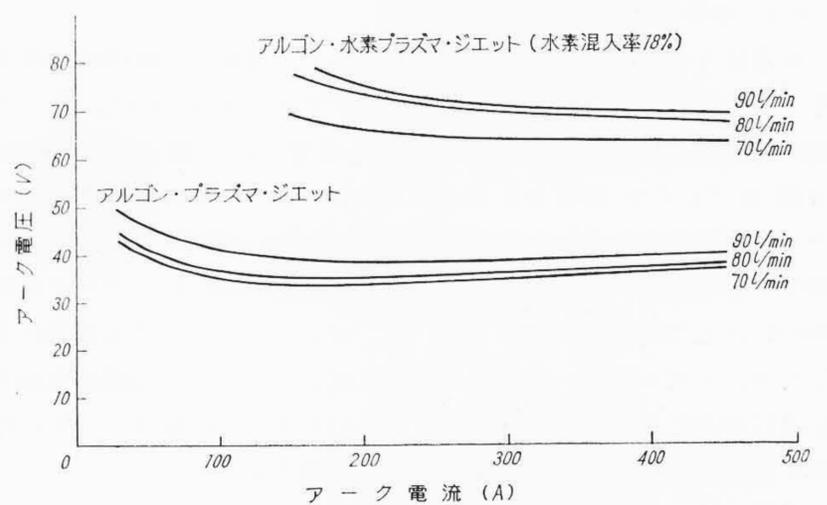
以上が実験装置の概要であって、この装置により得られるプラズマ・ジェットの電流-電圧特性の測定例を第9図に示した。この図



第7図 プラズマ・ジェット発生装置系統図



第8図 直流電源の外部特性曲線



第9図 電流-電圧特性

は、ガス流量をパラメータとし、アルゴンおよびアルゴン・水素混合ガスを狭さく用ガスとして用いた場合の結果を取りまとめたもので、アルゴン・水素ガスの場合、アーク電流300A以上ではアーク電圧がほぼ一定し、450Aまで安定に動作せしめうる事が示されている。同図の結果から、ガス流量90l/minの場合、アーク電圧の一定領域でのガンに対する電氣的入力 $P = I \times V$ は21~31kW程度と計算される。

4. エネルギー変換効率算定結果

プラズマ・ジェットは熱エネルギーの形態で利用されるものであ

るが、もともとのエネルギー形態は電気エネルギーであって、ガン内のアーク放電によって熱エネルギーに変換される。この際、陰、陽極点における損失、高温の陽光柱からの輻射損失あるいは伝導損失など各種の損失を伴い、ガン動作に当たってエネルギー変換効率を考慮に入れる必要がある。

4.1 変換効率算定方法

いま、直流電源とガンを直結する水冷ケーブル内の損失を含めた負荷回路内の全損失を W_{l0} (W), ガン内の損失を W_{lG} (W), 全入力を W_{ino} (W), ガン入力を W_{inG} (W) とすると、全効率 η_0 およびガン効率 η_G はそれぞれ (1), (2) 式で定義しうる。すなわち

$$\eta_0 = \left(1 - \frac{W_{l0}}{W_{ino}}\right) \times 100 (\%) \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta_G = \left(1 - \frac{W_{lG}}{W_{inG}}\right) \times 100 (\%) \dots\dots\dots (2)$$

また、電源の出力電圧を E_0 (V), アーク電圧を E_G (V), アーク電流を I_a (A) とすれば、(1), (2) 式中の W_{ino} , W_{inG} は下式のように表しうる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} W_{ino} &= E_0 I_a \quad (W) \\ W_{inG} &= E_G I_a \quad (W) \\ E_G &= E_0 - I_a R \quad (V) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに R : 水冷ケーブル内の全抵抗 (Ω)

一方、水冷用冷却水の温度上昇がわかれば、(1), (2) 式中の W_{l0} , W_{lG} を次式のように表わしうる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} W_{l0} &= \frac{J C m (T_2 - T_1)}{t} \quad (W) \\ W_{lG} &= W_{l0} - I_a^2 R \quad (W) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

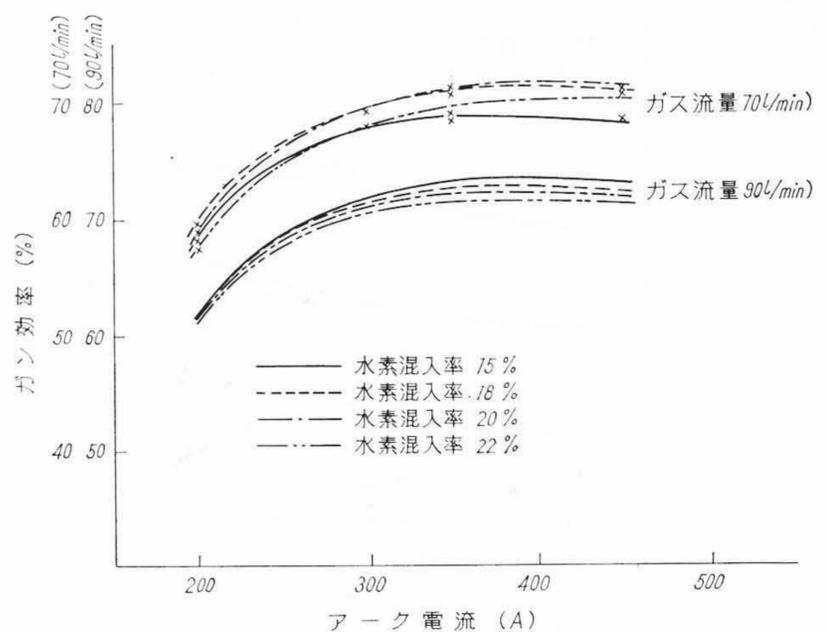
- ここに J : 熱の仕事当量 (=4,186 J/cal)
- C : 冷却水の比熱 ($\cong 1$ cal/g $^{\circ}$ C)
- t : ガンの動作時間 (秒)
- T_1 : ガン始動前の冷却水温度 ($^{\circ}$ C)
- T_2 : ガンを t 秒間動作した後の冷却水温度 ($^{\circ}$ C)

以上より、所要各部の電流、電圧の大きさと同時に、冷却水の出口において、 T_1 , T_2 を測定することによって、(1)~(4) 式を用い、全効率およびガン効率の算定が可能となる。

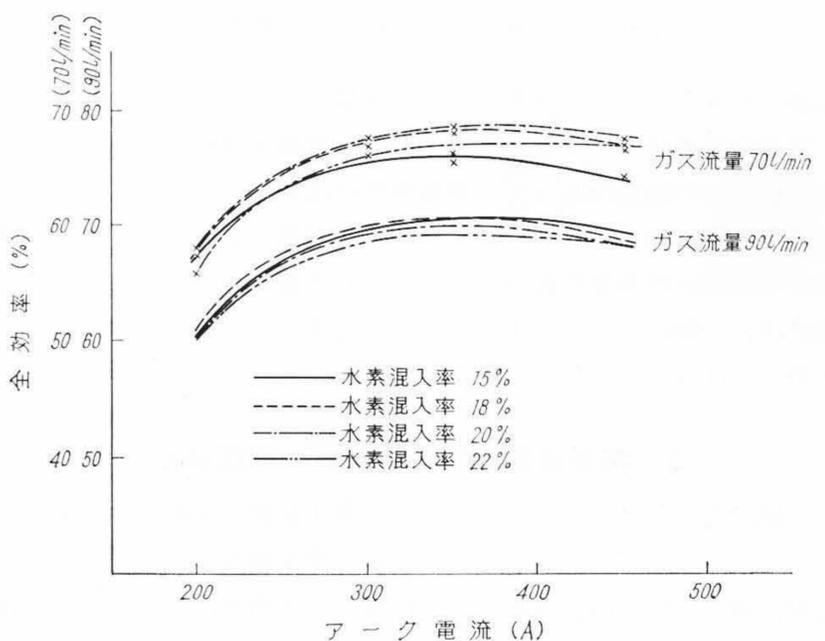
4.2 効率算定結果および検討

水素混入率 15, 18, 20 ならびに 22%, ガス流量 70, 90 l/min の条件下におけるアルゴン・水素プラズマ・ジェットについて、アーク電流を変数として、全効率、ガン効率を算定した。測定結果は第10, 11 図のごとくで、両者とも水素混入率をパラメータに、第10 図はケーブル内損失を含めた全効率を、第11 図はガン効率を示している。図中に示されているように、エネルギー変換効率は、アーク電流 300 A 以上で飽和傾向を示している。ガンの内部に生ずる損失分としては、ノズル陽極へ流入する電子流による、いわゆる陽極点損失をはじめとして、陰極点損失、アーク柱の半径方向の温度こう配に起因する熱伝導損失、アーク柱からの輻射損失などが考えられる。この実験では、これらを分離して測定し得なかったが、一般に、アーク電流の大きい範囲では、陰極側の損失は陽極側の損失に比べて小さく、損失を支配するものは、アーク柱よりの熱伝導、輻射損失を含めた、陽極側に生ずる損失であり、この損失はアーク電流にほぼ比例するものであるため⁽¹⁴⁾、アーク電流の十分大きな領域では、(1), (2) 式中の W_{l0}/W_{ino} あるいは W_{lG}/W_{inG} の値がほぼ一定値を保つため、第10, 11 図に示す傾向が生じたものである。

次に、ほぼ飽和値に達した変換効率絶対値を見ると、ガス流量が 70 l/min の場合には、水素混入率 18~20% 程度の場合にもっとも大きな値を示し、また、90 l/min の場合には 15~18% 程度の場合に大きな値が得られている。これらの事実は、サーマル・ピンチ効



第 10 図 プラズマ・ジェット発生装置全効率算定結果



第 11 図 プラズマ・ジェット・ガス効率算定結果

果を生ぜしめる場合に、水素ガスはアルゴンガスより熱伝導率が良好なため、伝導損失を伴いやすくなり、水素流量が大き過ぎると変換効率が低下するものと推測される。

以上のように、エネルギー変換効率はアーク電流あるいはアーク入力と同時に、ガス流量、水素混入率に関係し、これらすべてを考慮に入れる必要のあることが認められるが、一方、エネルギー応用の面からは熱出力の絶対値が大きな因子となるので、切断実験時には、ガス流量 70~90 l/min, 水素混入率 18%, アーク電流 300~450 A の動作条件でプラズマ・ジェットを発生せしめることとした。

5. 切断実験結果とその検討

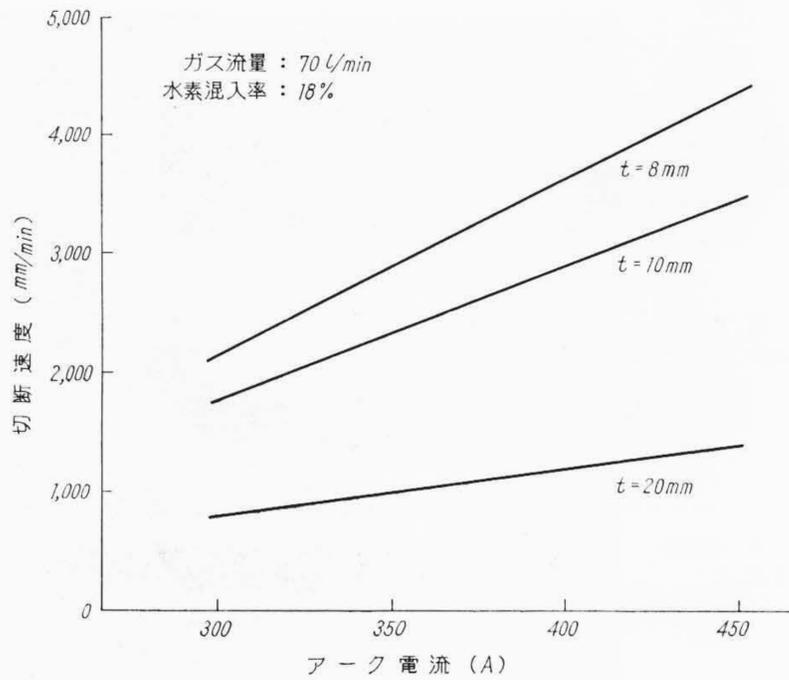
5.1 実験方法と切断条件

切断実験は、厚さの異なる幅 100 mm, 長さ 300 mm の母材を、移動台車によってプラズマ・ジェット・フレームと直角な方向に移動せしめ、切断母材端面より約 25 mm 長さの位置を切断し、各試料について切断最高速度を求めるといった方法によった。なお、ノズルの径はすべて 5 mm, ガンの動作条件は前述のとおり、ガス流量 70~90 l/min, 水素混入率 18%, アーク電流 300~450 A である。以下に各種材質の実験結果を述べる。

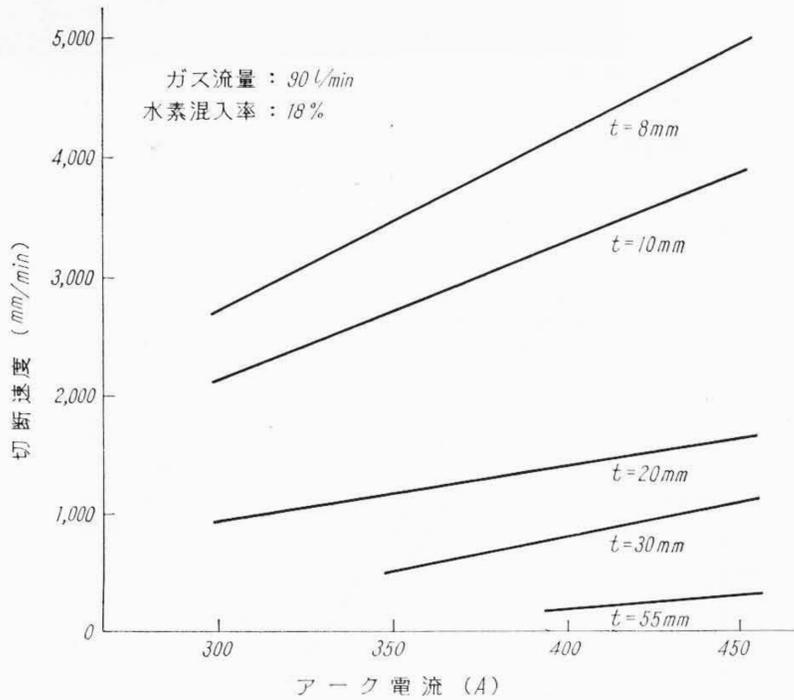
5.2 切断実験結果

5.2.1 アルミニウム板

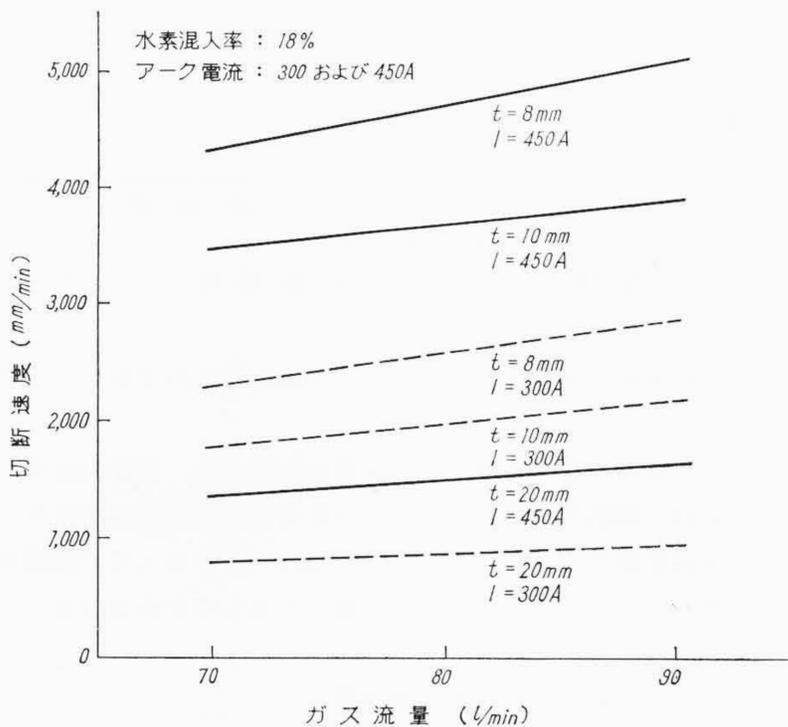
アーク電流を変数にした場合の実験結果を第12, 13 図に取りまとめて示したが、第12 図はガス流量 70 l/min, 第13 図は 90 l/min の場合である。なお、ガス流量を変数として取りまとめた結果を第14 図に示しておいた。



第12図 アルミニウム板の切断特性 (その1)

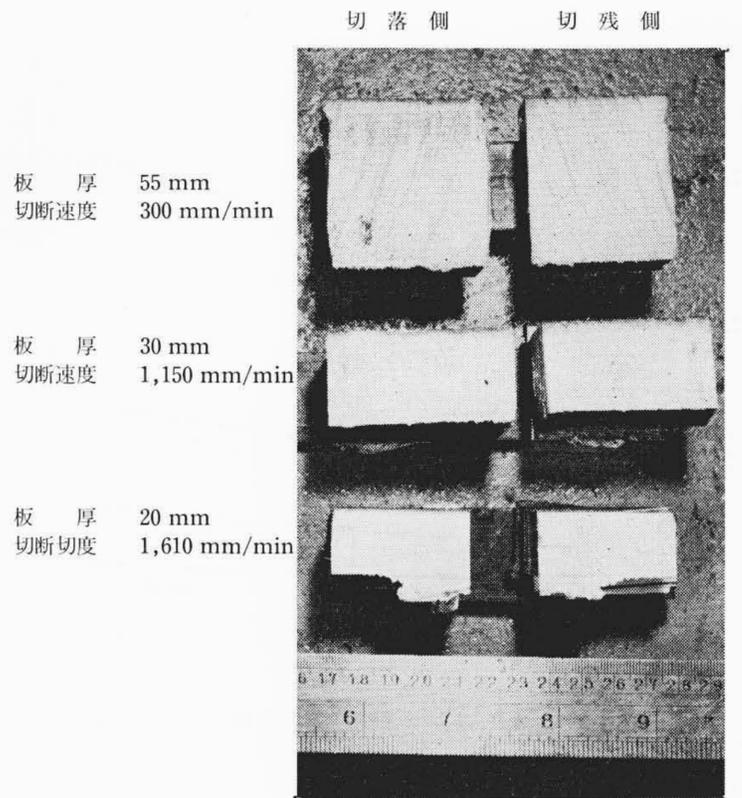


第13図 アルミニウム板の切断特性 (その2)



第14図 アルミニウム板の切断特性 (その3)

第12~14図の結果に図示されているように、実験範囲内では、板厚のいかんにかかわらず、アーク電流あるいはガス流量に対して、切断速度が直線的に上昇している。この際、広く用いられると思われる8~20mmの板厚の範囲では、板厚のうすいほど直線の傾斜が急になっており、また、同一の板厚について、第12図



切断条件 ガス流量：90 l/min
水素混入率：18%
アーク電流：450A

第15図 アルミニウム板切断面写真の一例

あるいは第13図の結果と第14図の結果を比較すると、前二者中の直線の傾斜が大きく、アーク電流を増加せしめる方が切断速度を向上せしめる上に得策と見なしうる。なお、20, 30ならびに55mmの各板厚の切断面状態を示したものが第15図で、写真中、左側が切断時に切り落される側を、右側が母材側に切り残される側をそれぞれ示している。写真から直ちにわかるように、板厚が30mm以上になると、切断面の粗さがやや目だつと同時に、プラズマ・ジェット・フレームが垂直になっていない傾向にあることが認められる。特に55mmの板厚のものでは、切断面に生ずる筋が弯曲するか、あるいは折線状になっており、ガンに近い側と遠い側では時間的遅れの大きい結果となっている。遮光フィルタを併用して測定した結果では、プラズマ・ジェット・フレーム長が35~40mm程度であった点を考慮すると、55mmの板厚の場合には、ガンに近い側に比べ遠い側は低い温度で溶断されるものと思われ、このため上述のような傾向が生ずるものと推測される。

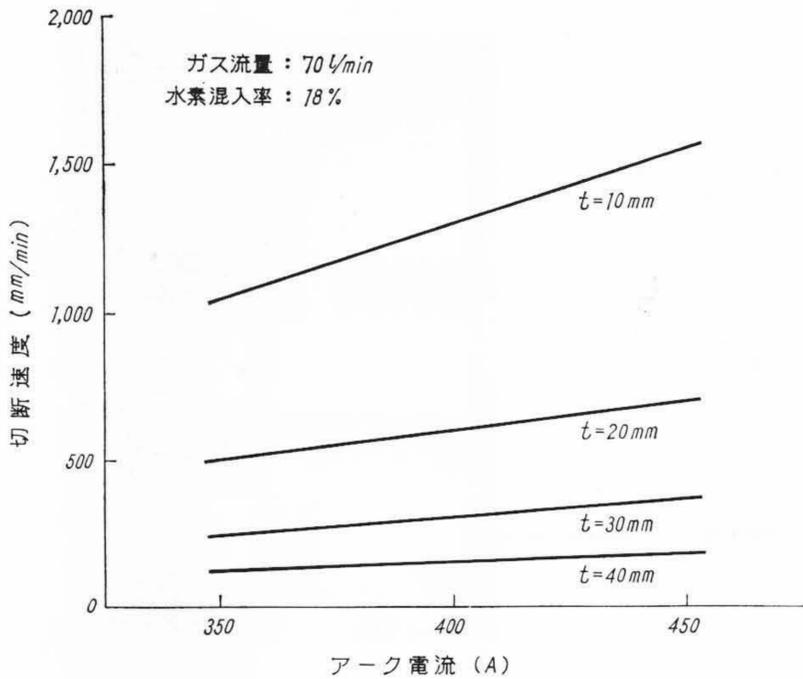
以上の結果に示されているように、アルミニウム板の場合、やや粗さの点に問題点が残るが55mmの板厚まで切断可能であり、20mm以下の板厚については、切断面の粗さはほとんどなく、半光沢面状で実用的な切断が可能である。

5.2.2 ステンレス鋼板

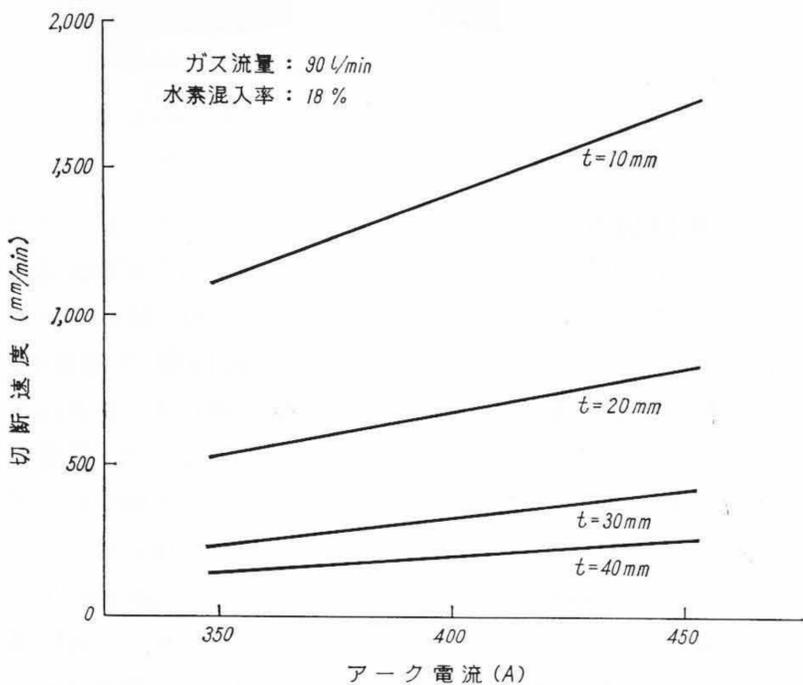
アルミニウム板と同様のまとめ方を行なった結果を第16~18図に示した。なお、第18図の結果では測定点が二点ずつであるが、アルミニウム板の結果を勘案して直線で近似した。ステンレス鋼板の場合も、切断速度の絶対値、直線の傾斜が異なるだけで、アーク電流あるいはガス流量と切断速度の関係はアルミニウム板の場合のそれと全く同一である。また、切断面の状態は第19図に示したとおりである。

5.2.3 軟鋼板

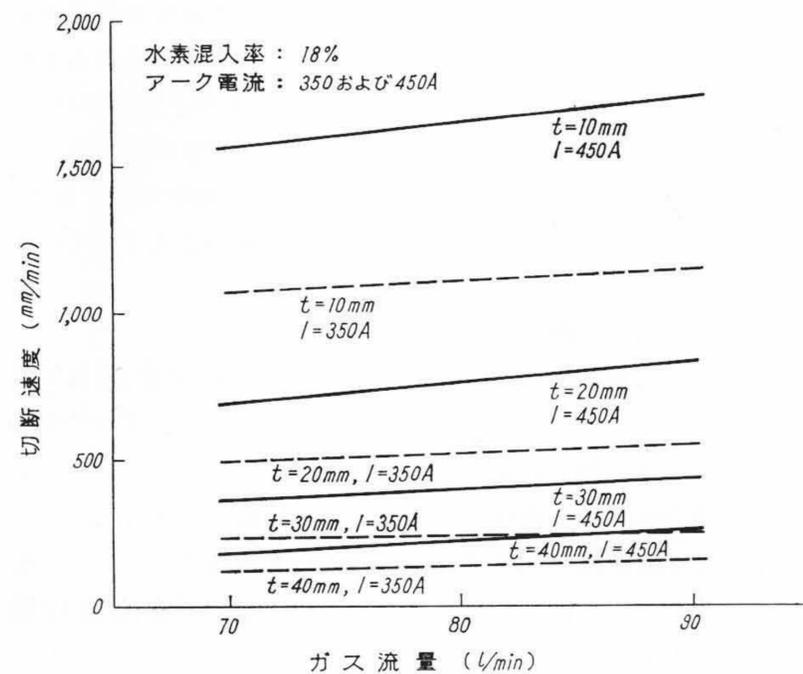
ガス流量70 l/min, 水素混入率18%, アーク電流350 Aおよびガス流量90 l/min, 水素混入率18%, アーク電流450 Aの条件下のプラズマ・ジェットによる、軟鋼板切断実験結果を第20図に示した。なお、アセチレン・酸素切断法による切断結果を破線にて併記しておいた。同図からわかるように、プラズマ・ジェット切断による直線と、ガス切断による直線とは板厚24mm付近および29mm付近で交差し、交差点より板厚のうすい場合には



第 16 図 ステンレス鋼板の切断特性 (その 1)

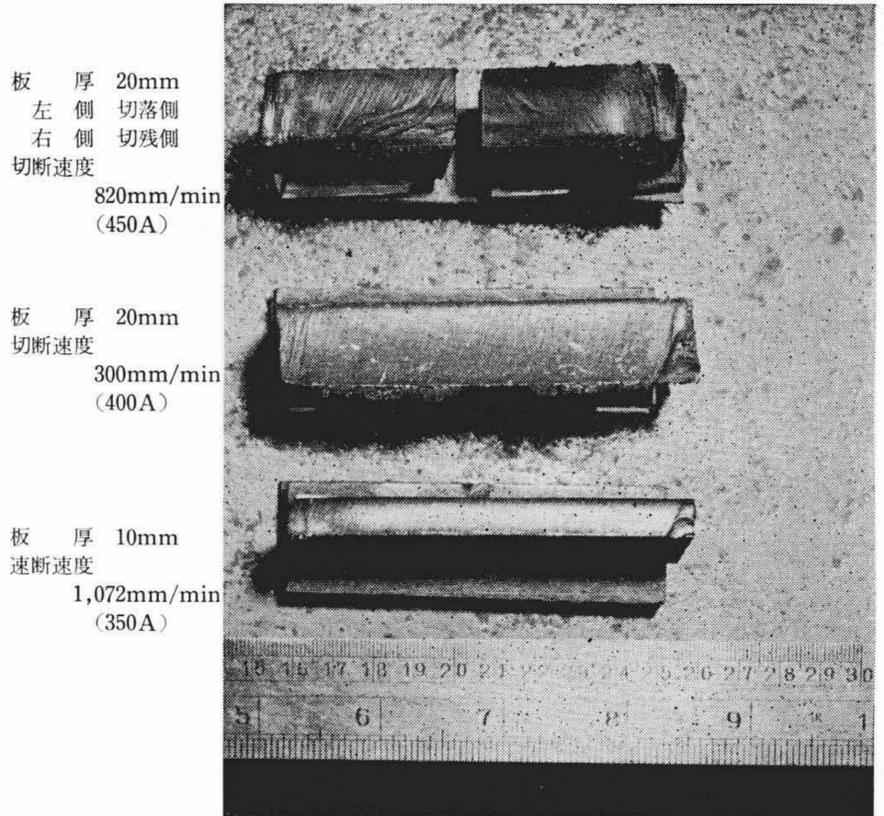


第 17 図 ステンレス鋼板の切断特性 (その 2)



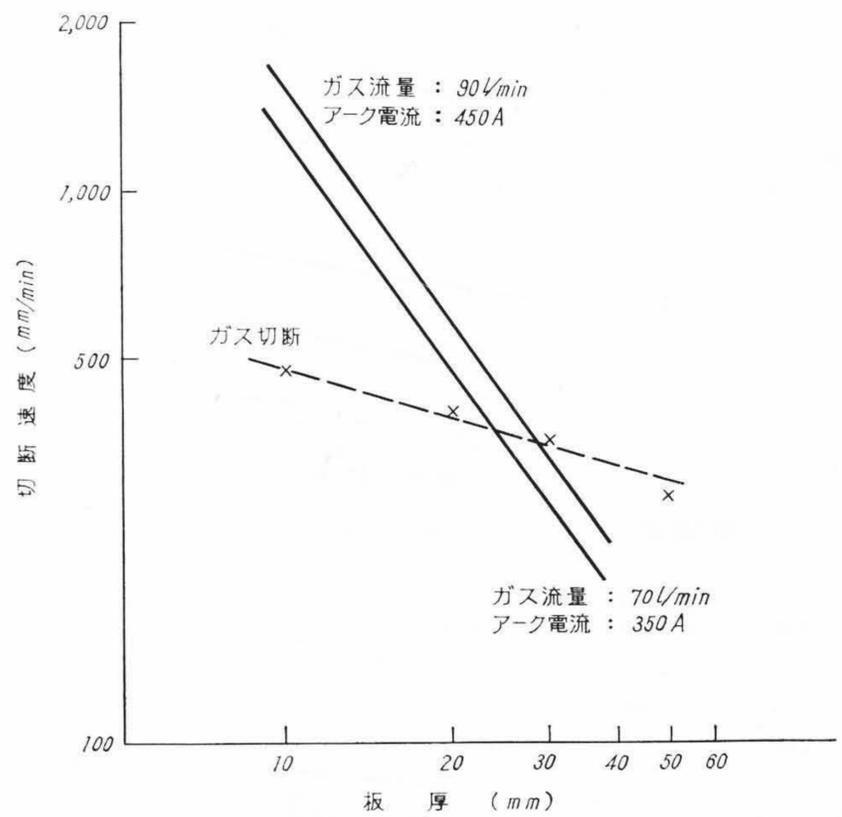
第 18 図 ステンレス鋼板の切断特性 (その 3)

プラズマ・ジェット切断時の切断速度の方が大きく、板厚が交差点以上の場合には、逆にガス切断時の速度が大きい。かかる傾向は、空気プラズマ・ジェット切断時においても認められることが一部報告されており⁽¹⁸⁾、これらの事実には、プラズマ・ジェット・フレーム長が関係すると同時に、フレームの軸方向に温度こう配が生じているためと思われるが、いずれにしても、30mm 以上



切断条件 ガス流量 : 90 l/min
水素混入率 : 18%

第 19 図 ステンレス鋼板切断面写真の一例



第 20 図 軟鋼板の切断特性

の板厚の軟鋼板を高速度で切断することはかなりむずかしい現状にある。

次に、切断時に受ける熱影響の程度を知るため、切断面近傍の顕微鏡組織、熱影響層の厚さ、ならびに各層の硬度測定を行なった。顕微鏡組織の一例を示したものが第21図であって、組織変化の状態から、一応下記の4層に分離しうるものとみなせる。

すなわち

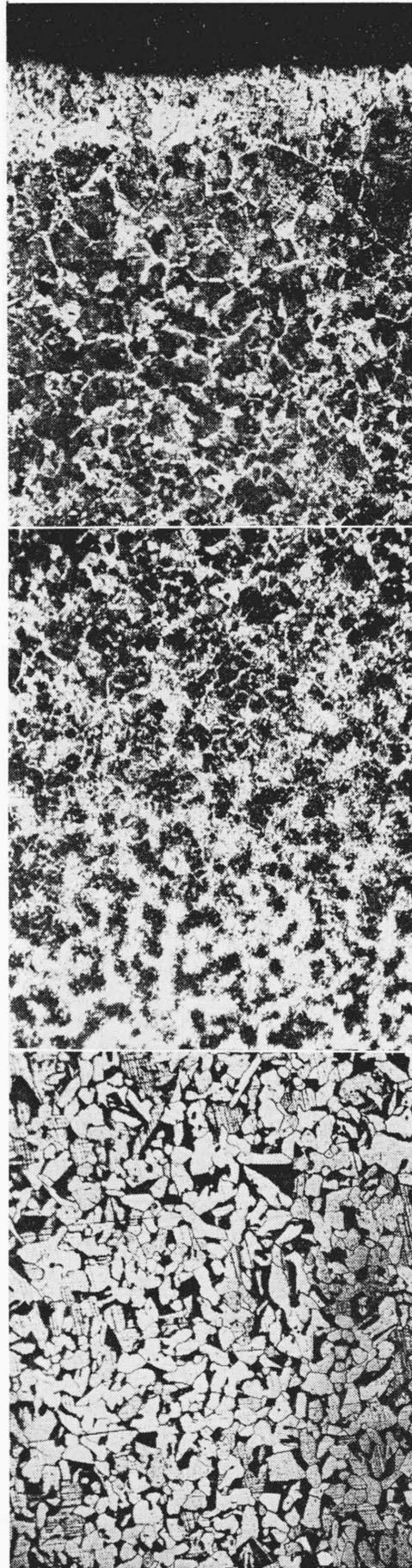
第1層: 脱炭組織となった白地の層

第2層: 結晶粒が粗大化し、フェライトがパーライト中に針状に発達した層

第3層: 中間組織で、母材組織と第2層組織の混在した層

第4層: 母材層

以上4層の分離区分を基に、各層の大略の厚みと、ビッカース硬度を測定し、アセチレン・酸素切断試料のそれらと比較して示したものが第2表である。第2表の結果を見ると、熱影響層の厚さ



切断面側

母材内部側

第 21 図 軟鋼板切断部顕微鏡組織の一測定例 (×80)

は切断速度の速い板厚 10 mm の場合を除き、予期されるようにプラズマ・ジェットによる切断試料の方が大きい。一方、硬度は必ずしもプラズマ・ジェットによる切断試料の方がかたいとは断じ得ず、ほぼ同等とみなすのが妥当と思われる。

以上の実験結果から、軟鋼板の場合にも、少なくとも 30 mm 以下の比較的薄い板厚に限定して考えるならば、切断速度の向上という点に立脚して、プラズマ・ジェット切断法は有効な切断法であるとみなしうる。

5.2.4 鋳 銅

最後に、いまだ十分な実験データは得られていないが、以上三種の材質とともにごく一般的材質の部類に属する銅材の切断実験例として、鋳銅の実験結果を第 3 表に示した。この実験時のプラズ

第 2 表 熱影響部測定結果の諸元

測定項目	熱影響部区分				板厚 (mm)	切断速度 (mm/min)	切断方式
	第 1 層	第 2 層	第 3 層	第 4 層			
厚さ (mm)	0.05	0.30	0.24	—	10	1,560	プラズマ・ ジェット
硬度 (kg/cm ²)	179	185	165	118	19	620	
厚さ (mm)	0.10	0.60	0.85	—	32	300	切 断
硬度 (kg/cm ²)	188	203	172	122	10	350	
厚さ (mm)	0.07	1.13	1.40	—	19	290	ガ ス 切 断
硬度 (kg/cm ²)	192	207	173	129	32	240	
厚さ (mm)	0.15	0.30	0.46	—	19	290	ガ ス 切 断
硬度 (kg/cm ²)	177	162	155	117	32	240	
厚さ (mm)	0.06	0.25	0.50	—	19	290	ガ ス 切 断
硬度 (kg/cm ²)	212	155	146	114	32	240	
厚さ (mm)	0.20	0.45	0.60	—	19	290	ガ ス 切 断
硬度 (kg/cm ²)	192	173	154	119	32	240	

注 1. 切断条件
 プラズマ・ジェット切断 ガス切断
 ガス流量: 90 l/min 使用ガス: アセチレン・酸素
 水素混入率: 18% ガス圧力: アセチレン 0.7 kg/cm²
 アーク電流: 450 A 酸素 6 kg/cm²
 2. 硬度測定値は 5 点の平均値

第 3 表 鋳銅板の切断特性

板 厚 (mm)	30	40	50
切断速度 (mm/min)	120	105	95

第 4 表 (5) 式中の定数算定結果の一例

板 厚 (mm)	8	10	20	30	55
a	14.67	11.83	4.67	6.25	2.50
b	-1,650	-1,450	-475	-1,687.5	-825

(注) 材 質: アルミニウム板
 ガス流量: 90 l/min

第 5 表 (6) 式中の定数算定結果の一例

板 厚 (mm)	8	10	20
c	33.75	22.50	13.75
d	1,962.5	1,850	387.5

マ・ジェット発生条件は、ガス流量 90 l/min、水素混入率 18%、アーク電流 450 A である。なお、第 22 図がこの実験試料の切断面写真であって、ドロスは除去してある。

5.3 切断特性の実験式表示

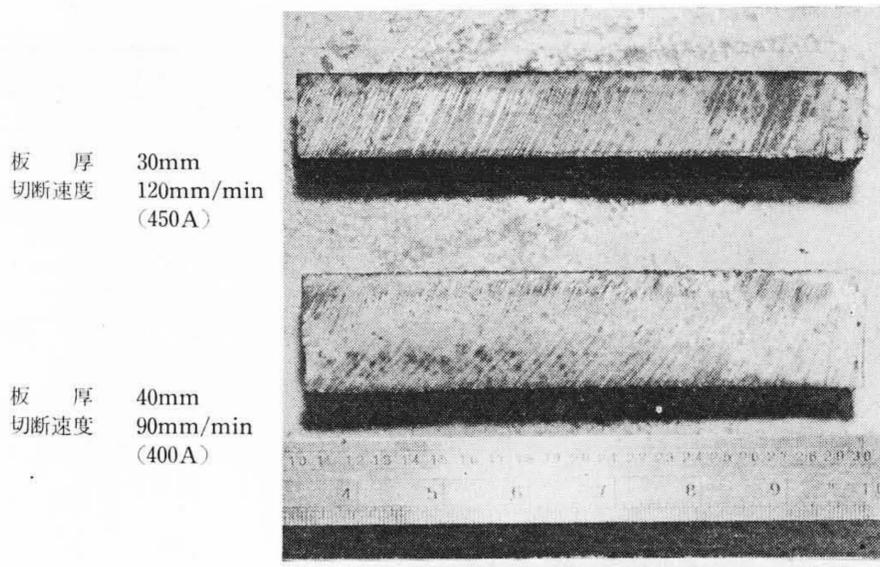
切断特性に関係する要因としては、ガンの構造、ガス種類、ガス流量、ガス混合比、アーク電流、プラズマ・ジェット・フレームから切断母材への熱移行率、その他もろもろの複雑な因子が関係するものと思われ、これらすべてを考慮の対象として理論的考察を行なうことはかなりむずかしい。一方、5.2.1~5.2.3 に示した切断実験結果を見ると、今回の実験範囲内においては、ガス種類、ガス混合比を一定とし、熱移行率その他の因子が一定条件下にあるものと仮定した場合、アーク電流と切断速度あるいはガス流量と切断速度の関係を直線で表示することがほぼ可能である。実験結果の範囲内で、ごく小範囲に止めることを避け得ないが、切断特性の実験式表示を試みた。

5.3.1 アーク電流と切断速度

第 12, 13 図あるいは第 16, 17 図から、少なくとも実験範囲内においては(5)式が成立する。

$$v = aI_a + b \dots\dots\dots (5)$$

ここに v: 切断速度 (mm/min)



切断条件 ガス流量：90 l/min
水素混入率：18%

第22図 鋳銅板切断面写真の一例

板厚 30mm
切断速度 120mm/min
(450A)

板厚 40mm
切断速度 90mm/min
(400A)

I_a : アーク電流 (A)

a, b : 定数

第4表は第12図の実験結果についての定数算定例を示したもので、板厚の薄い場合ほど a の値が大きく、したがって、同一のアーク電流増加分に対し、薄い板ほど切断速度の大きな向上を期待しうる事となる。切断実験範囲において、アーク電圧は第9図に、また、エネルギー変換効率も第10図に示されているように、いずれもほぼ一定した値となっている。アーク内では、陽光柱内の電位降下がアーク電圧の大部分を占め、この部分の電位傾度は一般に直線的である。かつ、イオン化に役だつのは陽光柱であるので、放電エネルギーは必然的に電流に比例することとなり、さらに、エネルギー変換効率も一定であるため、プラズマ・ジェット・エネルギーがアーク電流に比例して増加することとなる。この結果、母材への熱移行率、母材の物理定数等の因子がアーク電流に無関係に一定と見なせる範囲内においては、アーク電流に対し、切断速度が直線的に変化するものと考えうる。一方、第4表の結果によると、定数 b が0となっていないが、これは(5)式によって、非常に小さなアーク電流範囲にまで考察対象を拡張したことに起因したもので、実際には、アーク電流がある値以上にならないと、プラズマ・ジェット・フレームの不安定なこと、エネルギー変換効率が一定化しないことなど、当初の仮定を無視したためにかかる矛盾が生じたものである。

5.3.2 ガス流量と切断速度

第14, 18図の結果から、この場合にも直線に近似して実験式表示が可能である。すなわち

$$v = cQ + d \dots\dots\dots(6)$$

ここに Q : ガス流量 (l/min)

c, d : 定数

一例として、第14図中のアーク電流 450A の際の実験結果に対する定数算定結果を示すと第5表のとおりである。

6. 切断費用に対する考察

プラズマ・ジェット切断法では、前述の実験経過に示されているように、かなり多量のガスを使用する必要がある。切断費が電力料、ガス料ならびに工賃の三部から構成されるものと考えれば、単位長当たりの切断費は(7)式で与えうる。すなわち

$$C = \left(\alpha \frac{P}{\eta} + \beta Q + \gamma \right) \frac{1}{v} \dots\dots(7)$$

ここに C : 単位長当たりの切断費 (円/cm)

α : 電力料金 (円/W・min)

β : ガス料金 (円/l)

γ : 工賃 (円/min)

P : プラズマ・ジェットへの所要電気入力 (W)

η : プラズマ・ジェット直流電源の効率

Q : 所要ガス流量 (l/min)

v : 切断速度 (cm/min)

いま、市販価格をもとに、 $\alpha = 8.33 \times 10^{-5}$, $\beta = 0.65$, $\gamma = 5$, $\eta = 0.7$ とし、(7)式にこれらの値を代入すれば

$$C = \frac{1}{v} (1.18 \times 10^4 P + 0.65 Q + 5) \dots\dots\dots(8)$$

となる。毎分当たりの所要経費は(7)あるいは(8)式中の括弧内の数値に支配されるので、たとえば、ガス流量 90 l/min, プラズマ・ジェットの電気入力 40 kW の場合について、(8)式中の括弧内の第一、二項を求めると、それぞれ 4.72 および 58.5 という数値が得られ、したがってガス料金の方が電気料金に比べけた高いこととなる。ガス流量を増せば、サーマル・ピンチ効果が大きくなって、アーク電圧が上昇し、プラズマ・ジェットの出力を増大せしめることとなるが、上記のように経費の点を含めて考えると、アーク電流を増すか、間げき長の調整によってアーク電圧を上昇せしめることによって、プラズマ・ジェット出力の増大を図るほうがはるかに得策であることが理解される。したがって、今後はかかる観点に立脚の上、ガンの構造を考えることが急務と思われる。

7. 結 言

以上、ガンのエネルギー変換効率の算定結果をもとに、効率の一定した範囲内でガンを動作せしめて、一般的な数種の金属材料について切断実験を行ない、この際のアーク電流と切断速度あるいはガス流量と切断速度の間の関係を実験式によって表示し、これらの相関々係について検討を加え一部を明らかにすることができた。

また、定性的な域を脱し得ないが、切断費用に対し考察を加えた結果、プラズマ・ジェットの出力を増大して切断能力を高める際には、ガス流量を増してアーク電圧を高めるという手段は経済的にきわめて不利であることがは握され、ガンに対する考え方の一指針を与え得たものと考ええる。

参 考 文 献

- (1) 坂部, 秋山, 佐藤: 日立評論 44, 854 (昭37-6)
- (2) 中村: 溶接技術 9, 169 (昭36-3)
- (3) 原谷: 溶学誌 30, 74 (昭36-9)
- (4) J. Fairlie: Welding Engr., 47, 41 (1962-11)
- (5) H. Gerdien: Siemens Koazern., 2, 489 (1922)
- (6) A. Lotz: Siemens Koazern., 14, 25 (1935)
- (7) H. Maecker: Verlag Chemi., (1958)
- (8) F. Burhorn, H. Maecker, T. Peters: Z. Physik., 131, 28 (1951)
- (9) R. W. Larenz: Z. Physik., 129, 343 (1951)
- (10) T. Peters: Z. Physik., 135, 573 (1953)
- (11) T. Peters: Naturwiss., 41, 571 (1954)
- (12) A. Schülter: Z. Naturforsch., 5a, 72 (1950)
- (13) A. Schülter: Z. Naturforsch., 6a, 73 (1951)
- (14) 岡田: 溶接技術 9, 88 (昭36-2)
- (15) E. Witting: Schweißen, Schneiden., 14, 193 (1962-5)
- (16) O. Frodl: Schweißen, Schneiden., 14, 48 (1962-1)
- (17) I. Wendler: E. T. Z.-A., 83, 773 (1962-5)
- (18) J. A. Browning: Welding J., 41, 453 (1962-5)