

プラズマジェットの電気的特性とAl板の切断条件について

Electric Character of Plasma Jet and Cutting Condition of Aluminum Plate

坂部 昭*
Akira Sakabe

秋山 修*
Osamu Akiyama

佐藤 博*
Hiroshi Satō

内 容 梗 概

アルゴン水素混合ガスを用いた非移行式プラズマジェットにつき、ガス流量およびガス混合比を変えた場合の電気的特性とジェットの長さを測定した。また水素混入率 20%、アーク電流 300 A のジェットを用いた Al 板の切断条件を考察して実験式を誘導し、切断板厚さ、切断速度およびガス流量の相関関係を明らかにした。

1. 緒 言

比較的簡単に得られる超高温源としてプラズマジェットが注目されその特性ならびに応用が研究されつつある。

プラズマジェットの応用面は金属および非金属の切断、熔射、熔接をはじめ、超高温熱源として、あるいは高速噴流として広範囲な用途が見込まれている。

ここに実験用の非移行式小容量ガンによるプラズマジェットの電気的特性と Al 板の切断条件について報告する。

2. プラズマジェット実験装置の概要

プラズマジェットとはプラズマ化されたガスを噴出させたものでアーク放電にサーマルピンチ効果を与えて発生させる。すなわち第 1 図のような棒状電極と小孔を有するノズル電極との間にアーク放電を起こさせ、アークの周囲を通して小孔から流出するようにガスを流す。このときアークの周囲が冷却されるためアークがしぼられ温度が上るとともに圧力が高まりプラズマ化されたガスが小孔から噴出される。

プラズマジェットの形状は第 2 図のとおりでその温度は 10,000～30,000°C といわれている。

本実験に用いたプラズマジェット発生装置の構成は第 3 図のとおりである。アーク用電源として垂下特性を有するシリコン整流器式直流電源を用い、タングステン製棒状電極を負極、銅製ノズル電極を正極とし、アークの起動には高周波電圧の瞬時印加を行なうものである。またガスとしてアルゴンならびにアルゴン水素混合ガスを用い、その割合を任意に調節できるようにしてある。

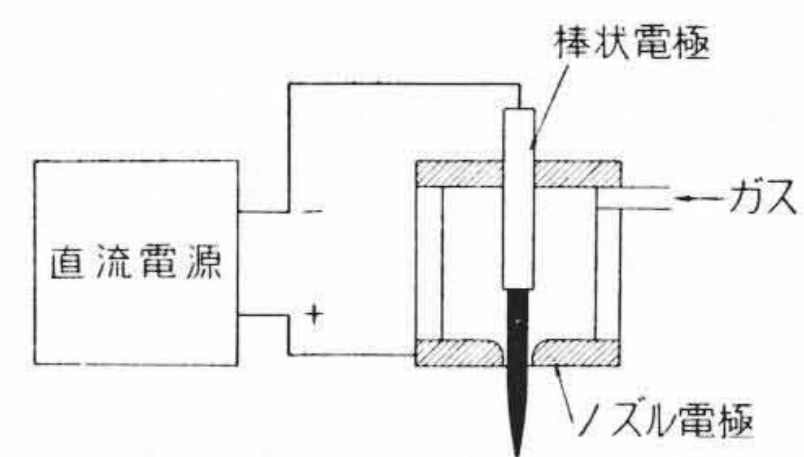
以下のデータはガンのノズル口径 5 mmφ の場合でガス流量は大気圧に換算した値を示しており、直流電源の外部特性は第 4 図のとおりである。

3. プラズマジェットの電気的特性

プラズマジェットの電気的特性として、アークにピンチ効果を与えるガス流量とガス混合割合を変えてアークの電圧電流特性を測定した。その結果が第 5 図である。

アーク電圧は電流に対して負特性であり、水素の混入により大きく上昇し、水素混入率の高いほど、かつガス流量の大きいほど高くなる。

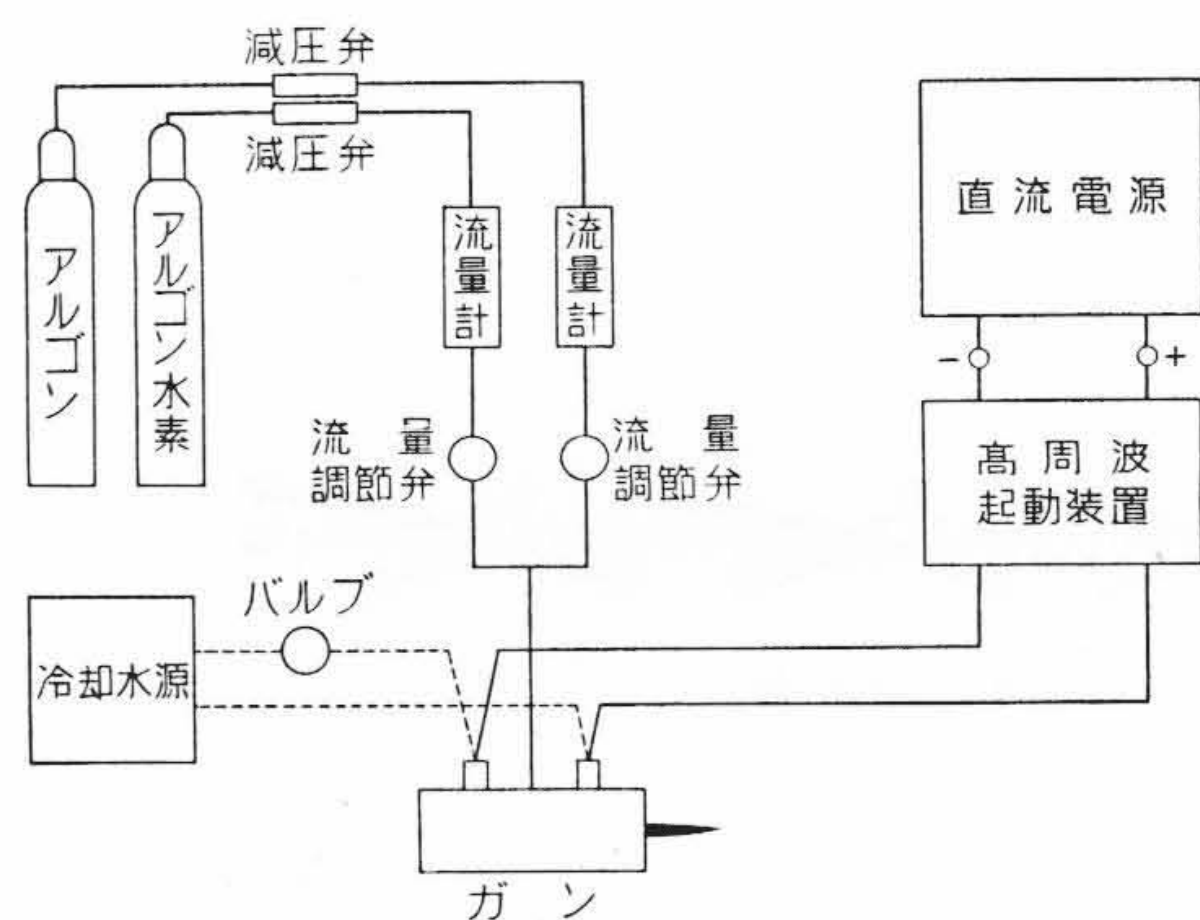
なお第 5 図で○印はアークの切れる点を示す。この消弧はアーク自身の特性に起因するものと、直流電源の外部特性に起因するものとがある。すなわちガス流量 40 l/min の消弧点はアーク電圧が電流に対して比較的急激に変化するところであり、アーク自身の不安定領域にあるものと考えられる。一方アーク電圧 100 V 以上の消弧点は、第 4 図の外部特性のゆるい傾斜部が動作点であり、アークの特



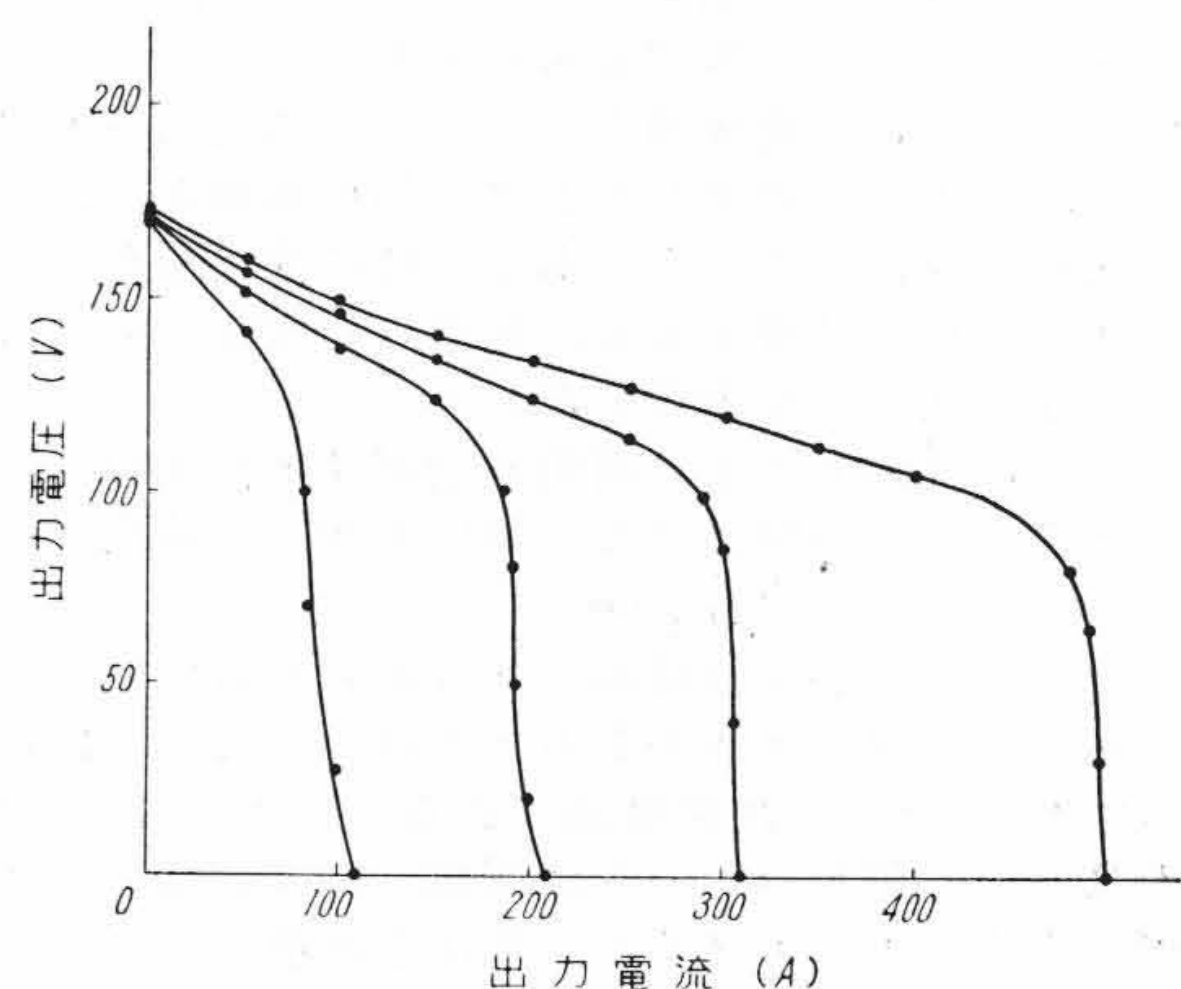
第 1 図 プラズマジェットの発生原理



第 2 図 プラズマジェットの形状



第 3 図 プラズマジェット実験装置の構成



第 4 図 直流電源の外部特性

* 日立製作所亀戸工場

性が負特性であるため直流電源の外部特性から生ずる不安定領域にあるものと思われる。したがってこの消弧点は直流電源の無負荷電圧を上げることにより小電流域に移すことが可能である。しかしこの場合でも消弧点付近でアークの電圧電流特性の傾斜が大きいと消弧電圧は低い値となっている。

4. プラズマジェットの長さ

プラズマジェットの長さの測定法としてフィルタを用いた写真撮影法を採用した。フィルタは No.4 と No.6 を重ねて使用し、絞り 5.6, 露出 1/25 秒で、アーク電流およびガス混合割合を変えてジェットの長さを測定した。その結果が第6図で写真の一例が第2図である。

またジェットの変動を調べるためアーク電流 300 A, ガス流量 70 l/min, 水素混入率 20% のプラズマジェットを高速度カメラにより撮影した。その一部を第7図に示す。撮影条件はフィルタ No.6, 絞り 4, スピード 700 コマ/秒でジェットの右側に長さの推定をするため金属片を入れてある。

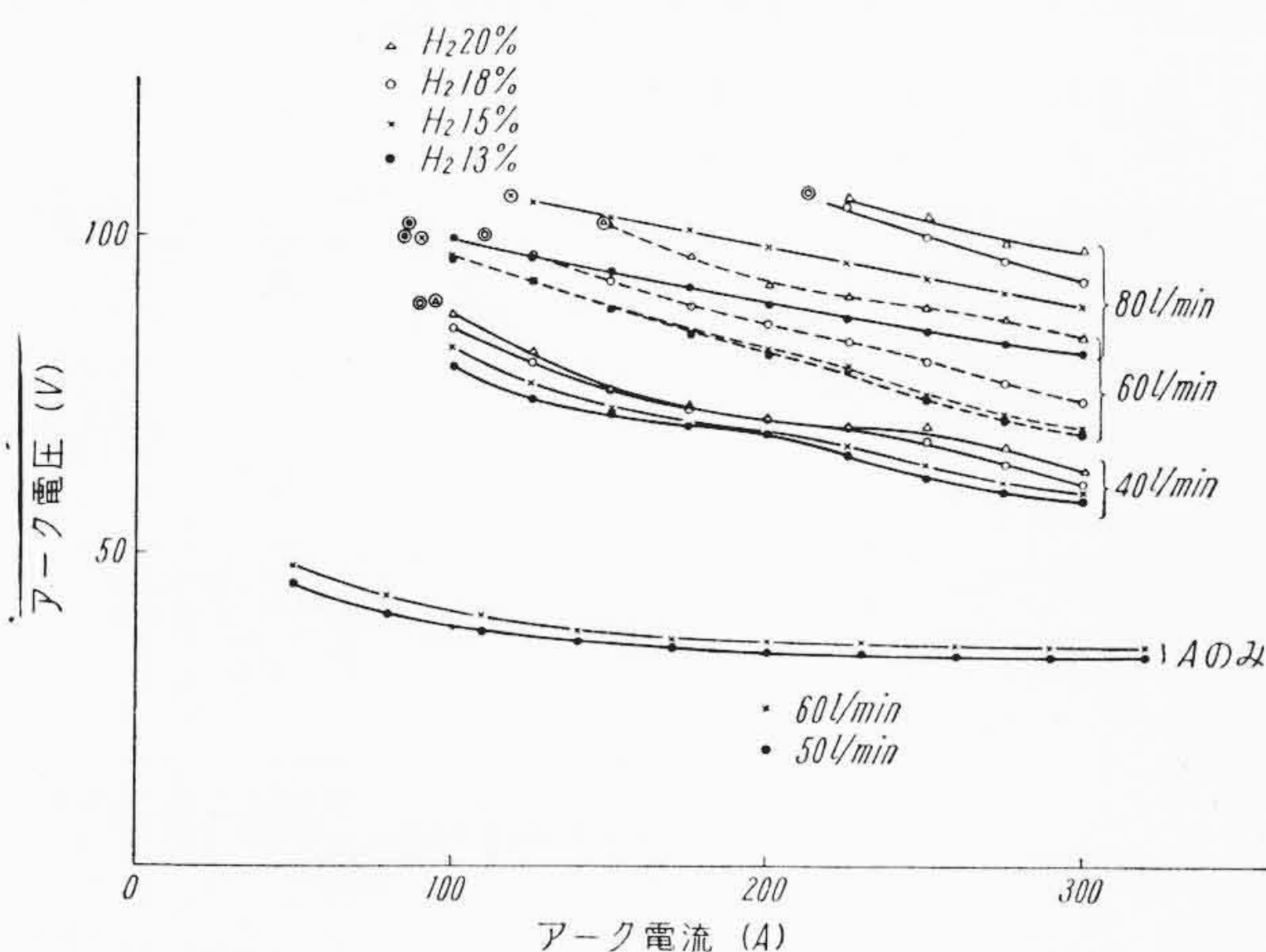
高速度カメラによる試験結果ではジェットの変動はあまりなく写真撮影によるジェットの長さの測定は十分可能である。

第6図よりジェットは水素の混入により長くなるが、混入率が 15~20% の範囲では水素量の多いほど長さが減少し、アーク電流を増すとジェットは長くなる。またガス流量を増すとジェットの長さが減少する傾向がある。

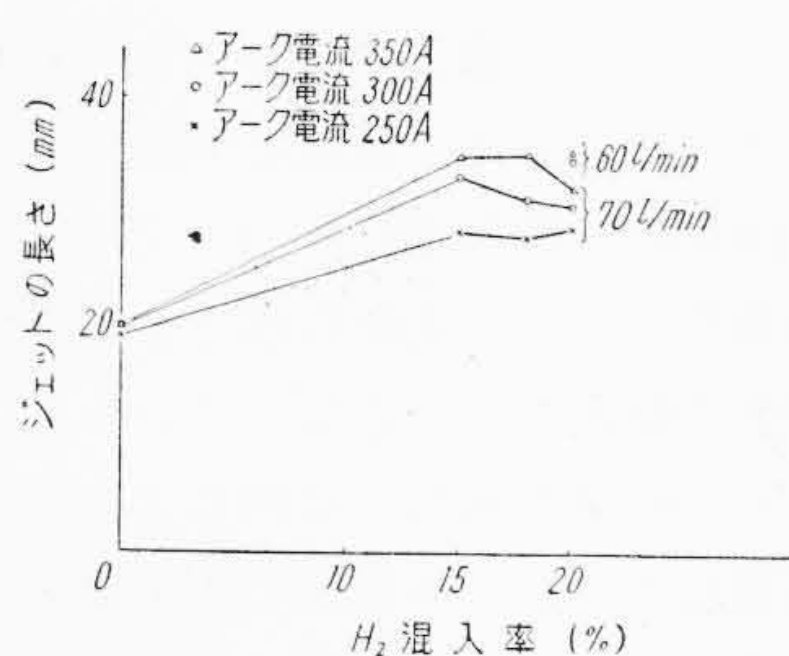
5. Al 板の切断

5.1 三角材による切断実験

プラズマジェットによる切断特性を調べるため Al の三角材による切断実験を行なった。すなわち第8図のようにガンを固定して三角材を定速度で矢印の方向に送り込む。このとき三角材の薄肉部からプラズマジェットによる切断が始まるが、切断厚さが逐次増すために厚肉部では切断限度を越えて斜辺部が残り点線で示した形状に



第5図 プラズマジェットのアーク電圧電流特性



第6図 ジェットの長さ和水素混入率との関係

切断される。このときの切断深さ t をその速度における切断板厚さとした。

プラズマジェットの条件はアーク電流 300 A, 水素混入率 20% とし、ガス流量および切断速度を変えて実験した。その結果は第9図のとおりである。

切断板厚さは切断速度の低いほど大きくかつガス流量により最大値が表われている。なお第6図の写真撮影によるジェットの長さより厚いところまで切断されている。

5.2 実験式による切断特性の検討

第9図により切断板厚さはガス流量により最大値が生じているが、このような形状を表わす関数として次の式があげられる。

$$\frac{1}{t} = \frac{A}{l^n} + Bl^n \dots (1)$$

ここに t : 切断板厚 (mm)

l : ガス流量 (l/min)

A, B, n : 定数

(1)式の t が最大になる条件として $dt/dl=0$ とすると

$$\frac{nA}{l_m^{n+1}} = nBl_m^{n-1} \dots \dots \dots (2)$$

ここに l_m は t の最大値 t_m を与えるガス流量である。

(1)式, (2)式より

$$A = 2 t_m l_m^n$$

$$B = \frac{2 t_m}{l_m^n}$$

したがって(1)式は次のようになる。

$$\frac{2 t_m}{t} = \left(\frac{l_m}{l} \right)^n + \left(\frac{l}{l_m} \right)^n$$

また第9図より l_m と t_m , t_m と切断速度との関係を求めると第10図, 第11図のとおりで直線で近似できる。

したがって

$$t_m l_m^{K_1} = K_2$$

$$t_m = K_3 \log_{10} \frac{K_4}{v}$$

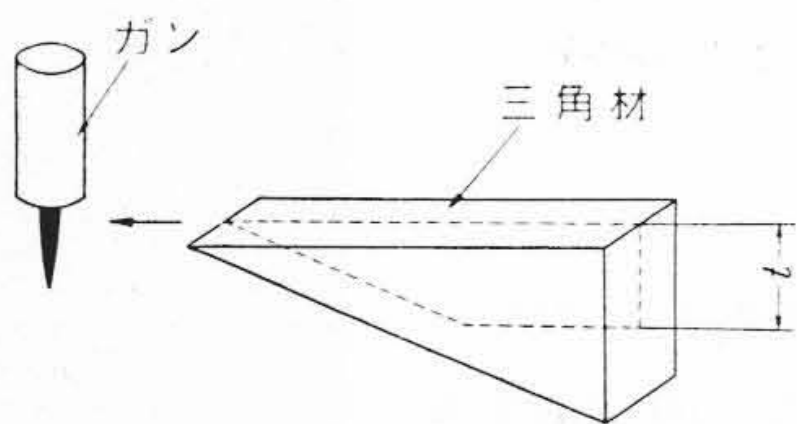
ここに v : 切断速度 (mm/min)

K_1, K_2, K_3, K_4 : 定数

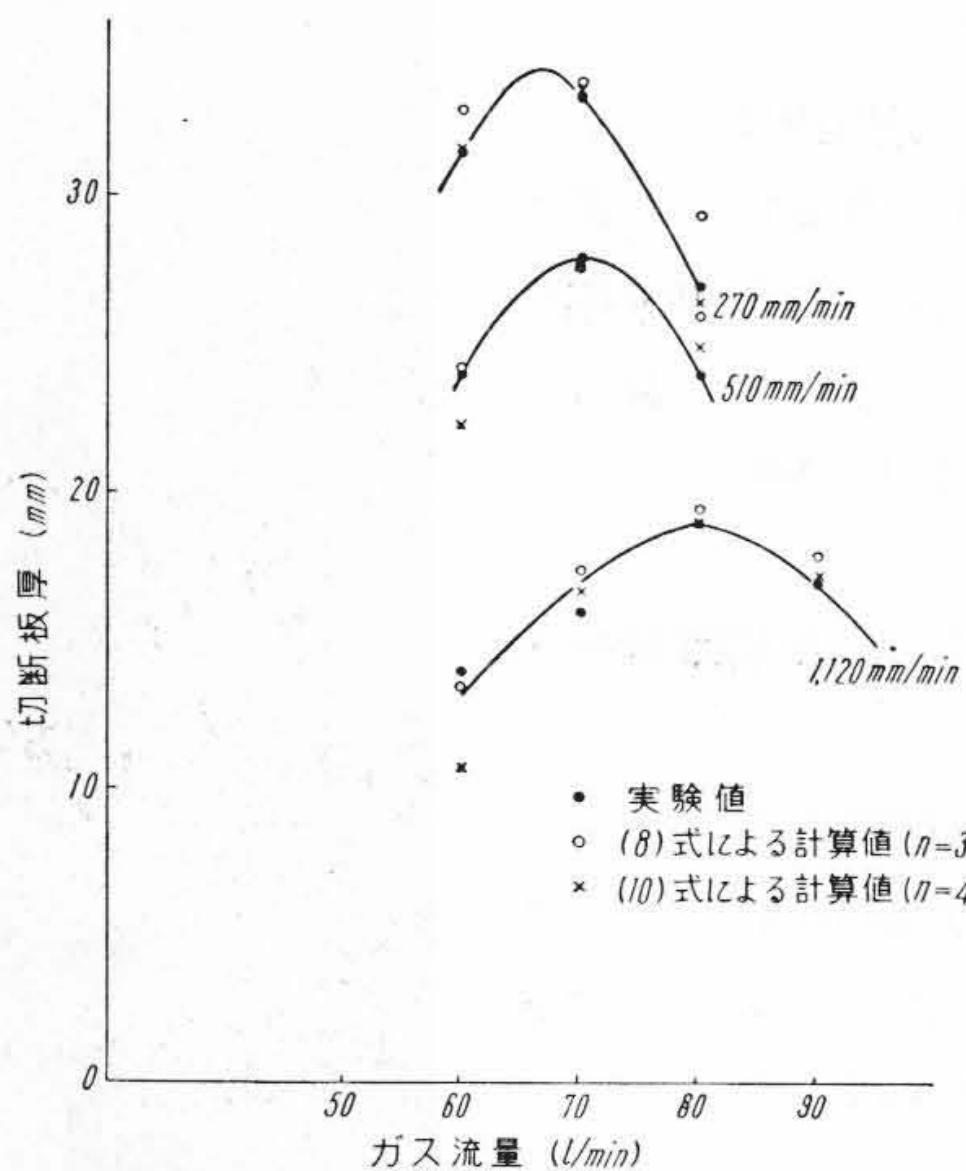
ゆえに切断特性を表わす一般式として次式が求められる。



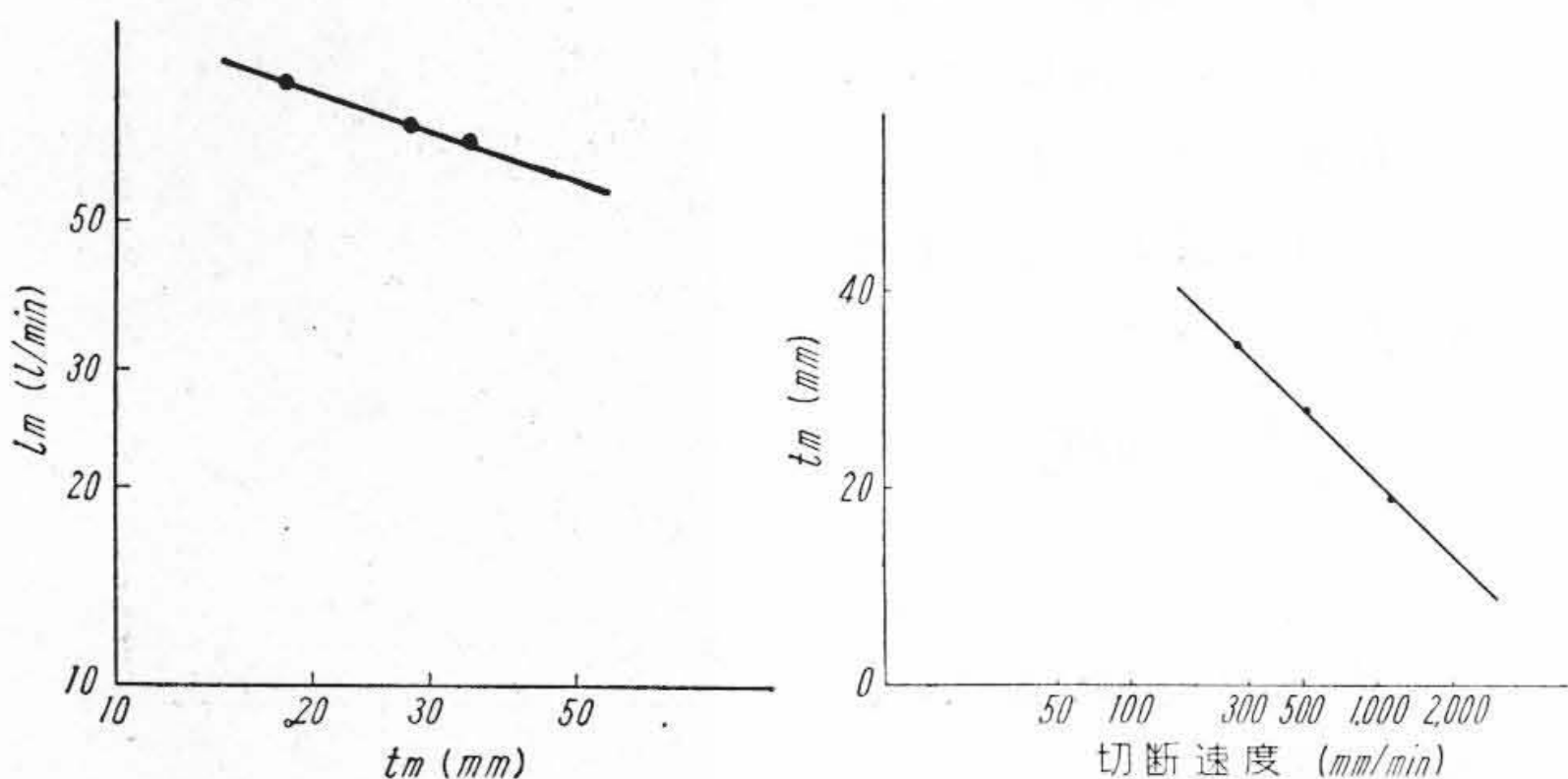
第7図 高速度カメラによるプラズマジェットの撮影



第8図 三角材の切断実験



第9図 三角材による切断実験結果



第10図 l_m と t_m との関係 第11図 t_m と切断速度との関係

$$\left. \begin{aligned} \frac{2 t_m}{t} &= \left(\frac{l_m}{l} \right)^n + \left(\frac{l}{l_m} \right)^n \\ t_m l_m^{K_1} &= K_2 \\ t_m &= K_3 \log_{10} \frac{K_4}{v} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

あるいは

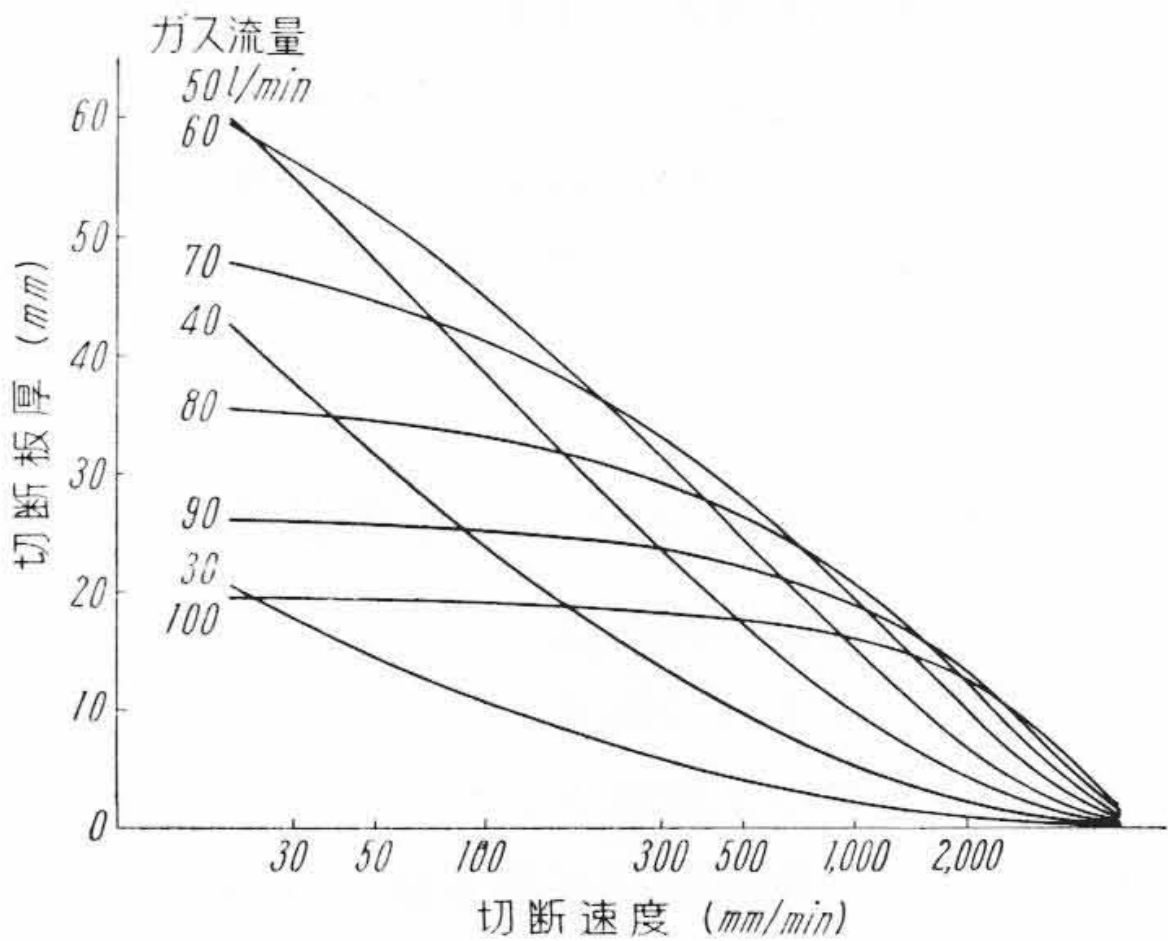
$$\frac{2 K_3 \log_{10} \frac{K_4}{v}}{t} = \frac{\left(\frac{K_2}{K_3 \log_{10} \frac{K_4}{v}} \right)^{\frac{n}{K_1}}}{l_n} + \left(\frac{K_3 \log_{10} \frac{K_4}{v}}{K_2} \right)^{\frac{n}{K_1}} l^n \dots\dots\dots (6)$$

この式の n, K_1, K_2, K_3, K_4 はガンの構造, アーク電流, ガス混合比, 被切断物の材質などにより決まる定数である。

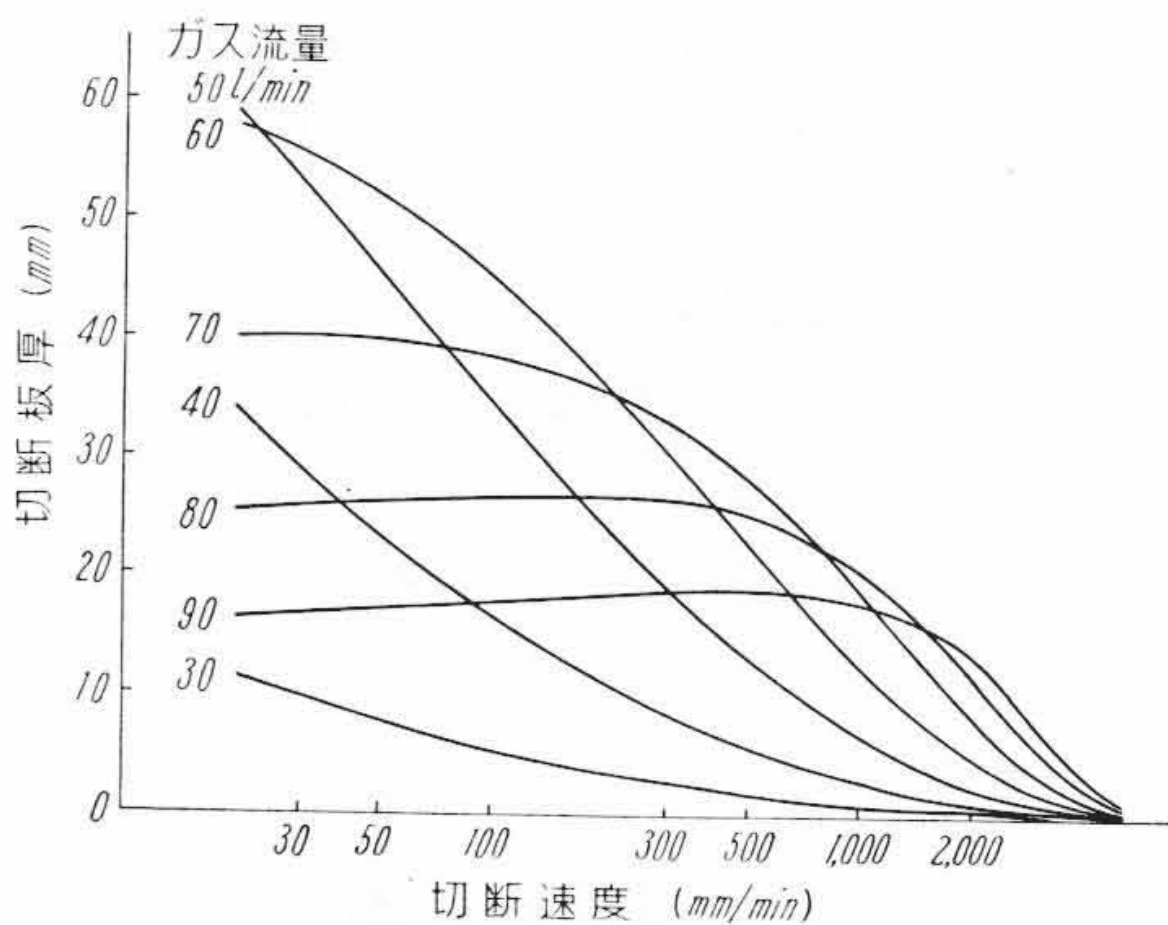
本実験条件では $K_1=3, K_2=10^7, K_3=24.4, K_4=7,000$ とし n を 3 または 4 とすると実験値の傾向によく近似する。

$n=3$ としたとき切断特性を表わす式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{2 t_m}{t} &= \left(\frac{l_m}{l} \right)^3 + \left(\frac{l}{l_m} \right)^3 \\ t_m l_m^3 &= 10^7 \\ t_m &= 24.4 \log_{10} \frac{7,000}{v} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$



第12図 実験式 ($n=3$) による切断板厚さと切断速度との関係



第13図 実験式 ($n=4$) による切断板厚さと切断速度との関係

あるいは

$$\frac{2 \times 10^7}{t} = \frac{1}{\left(24.4 \log_{10} \frac{7,000}{v} \right)^2} \frac{1}{l^3} + l^3 \dots\dots\dots (8)$$

また $n=4$ としたときには次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} \frac{2 t_m}{t} &= \left(\frac{l_m}{l} \right)^4 + \left(\frac{l}{l_m} \right)^4 \\ t_m l_m^3 &= 10^7 \\ t_m &= 24.4 \log_{10} \frac{7,000}{v} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

あるいは

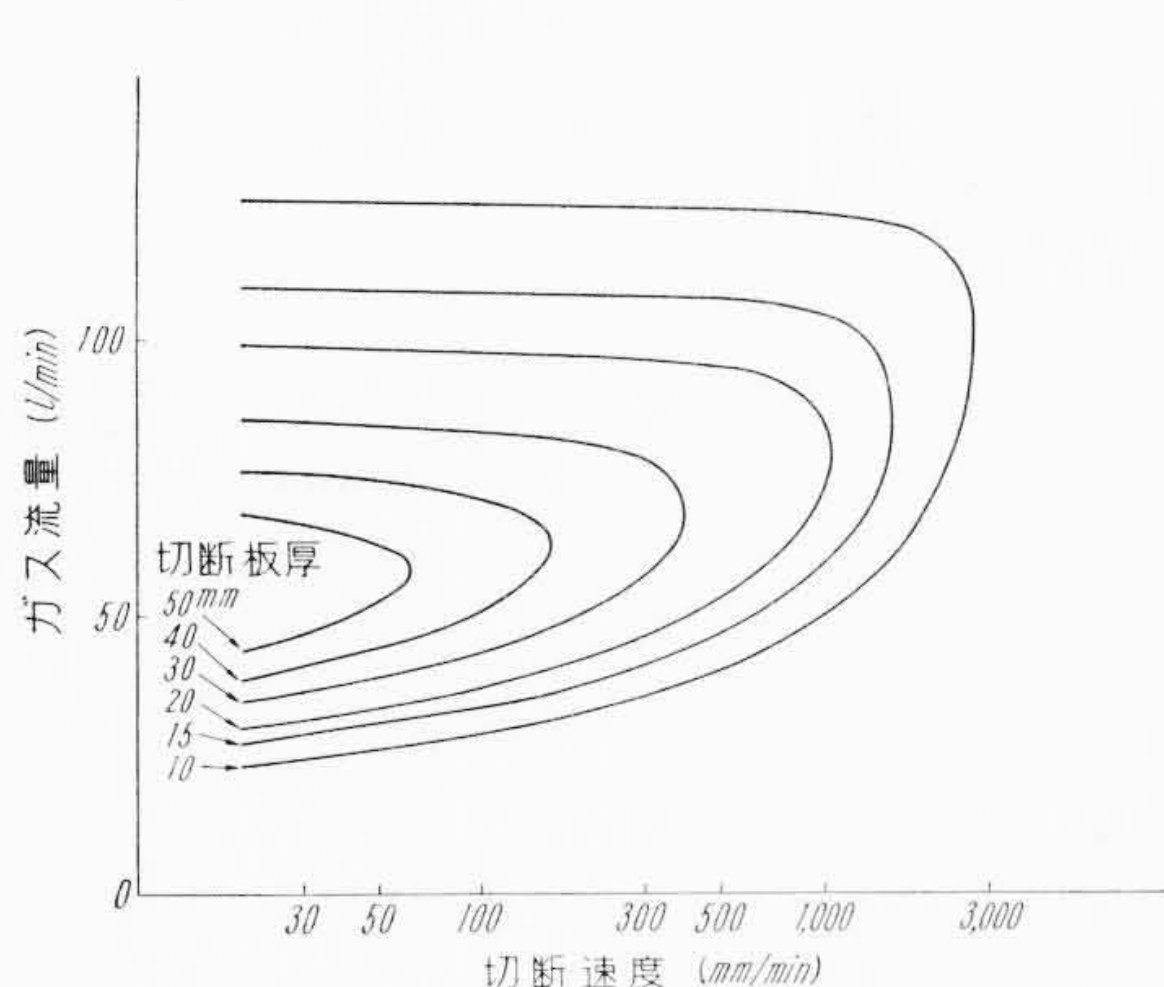
$$\frac{48.8 \log_{10} \frac{7,000}{v}}{t} = \left\{ 0.01346 \left(\log_{10} \frac{7,000}{v} \right)^{\frac{1}{3}} l \right\}^4 + \frac{1}{\left\{ 0.01346 \left(\log_{10} \frac{7,000}{v} \right)^{\frac{1}{3}} l \right\}^4} \dots\dots\dots (10)$$

これらの式は切断板厚さ, 切断速度およびガス流量の関係を総括的に表わすもので, ガス流量をパラメータとし切断板厚さと切断速度との関係を図示したものが第12図 ($n=3$), 第13図 ($n=4$) で, 切断板厚さをパラメータとしガス流量と切断速度との関係を図示したものが第14図 ($n=3$), 第15図 ($n=4$) である。

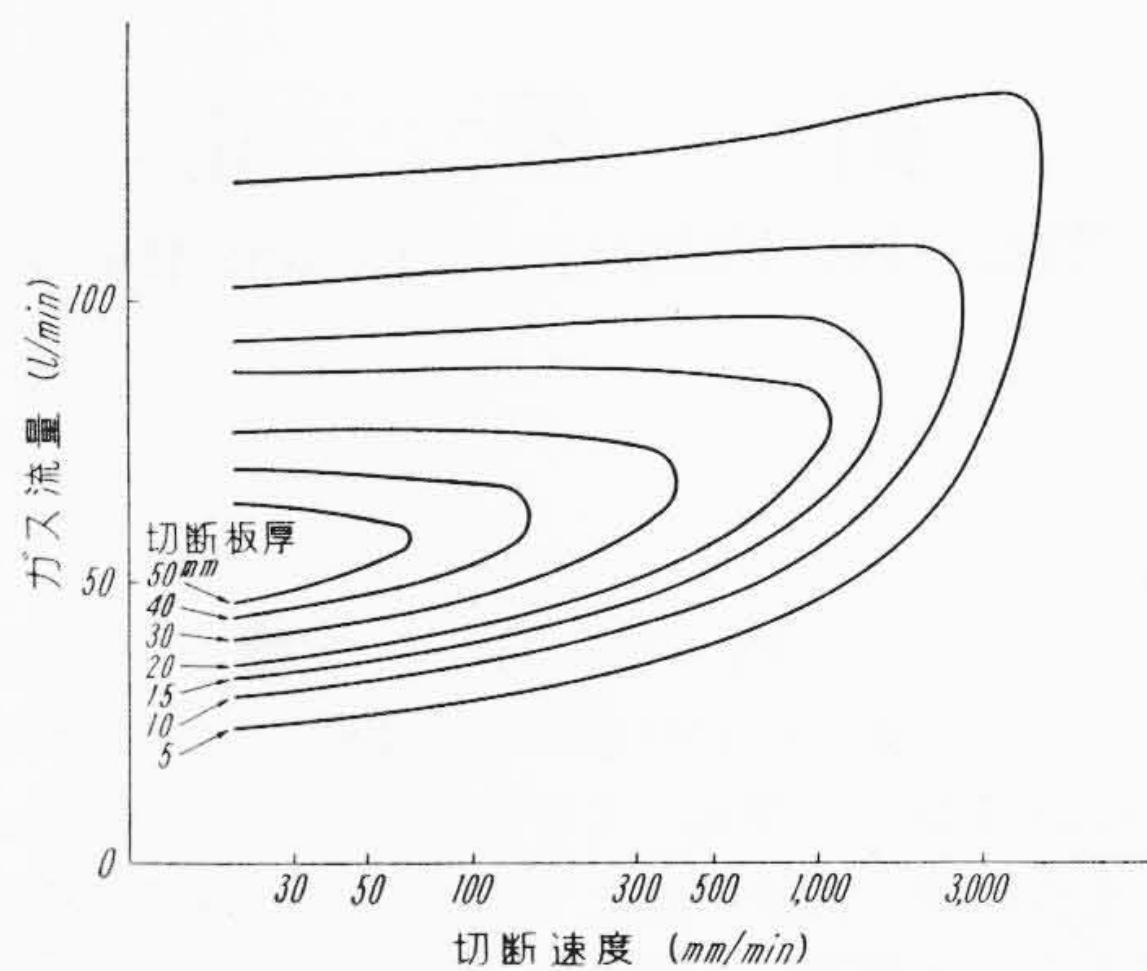
これらから実験条件における切断板厚さを求めた値が第9図に併記してあるが実験値の傾向をよく近似している。

また $n=3$ の場合と $n=4$ の場合では同じような傾向を示しており切断板厚さ, 切断速度およびガス流量の相関関係を明確には握ることができる。そのおもなものを列記すると次のとおりである。

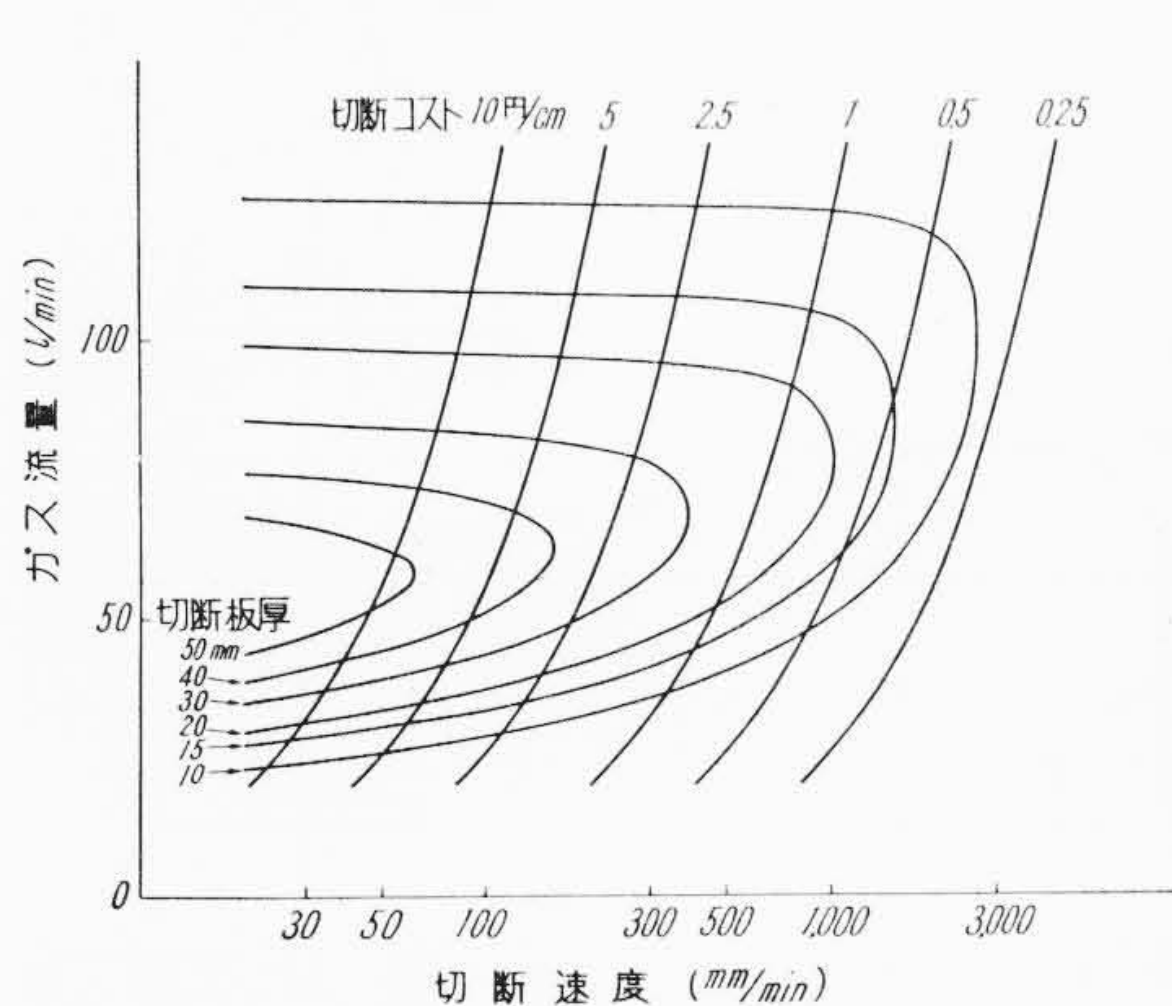
(1) ガス流量を一定としたときの切断板厚さと切断速度 (対数



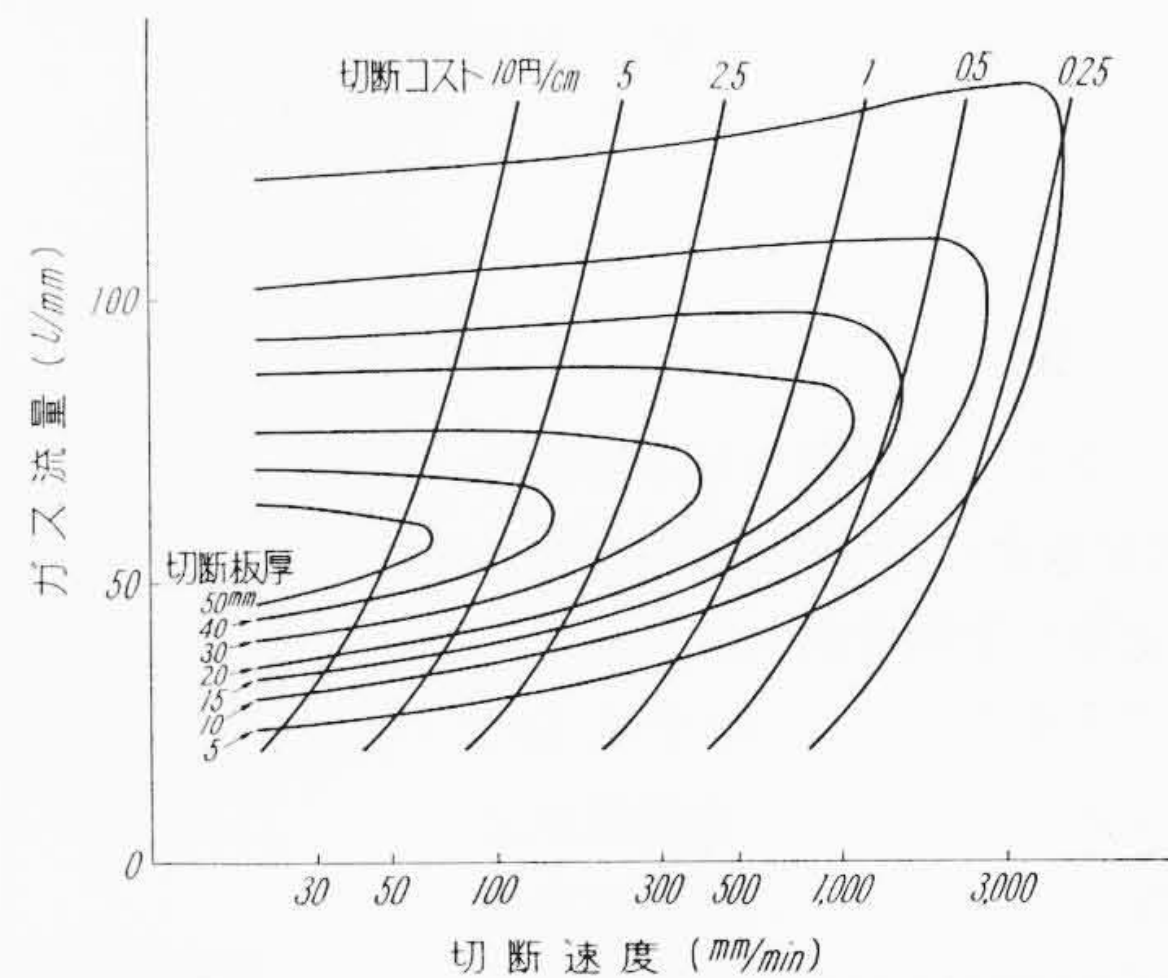
第14図 実験式 ($n=3$) によるガス流量と切断速度との関係



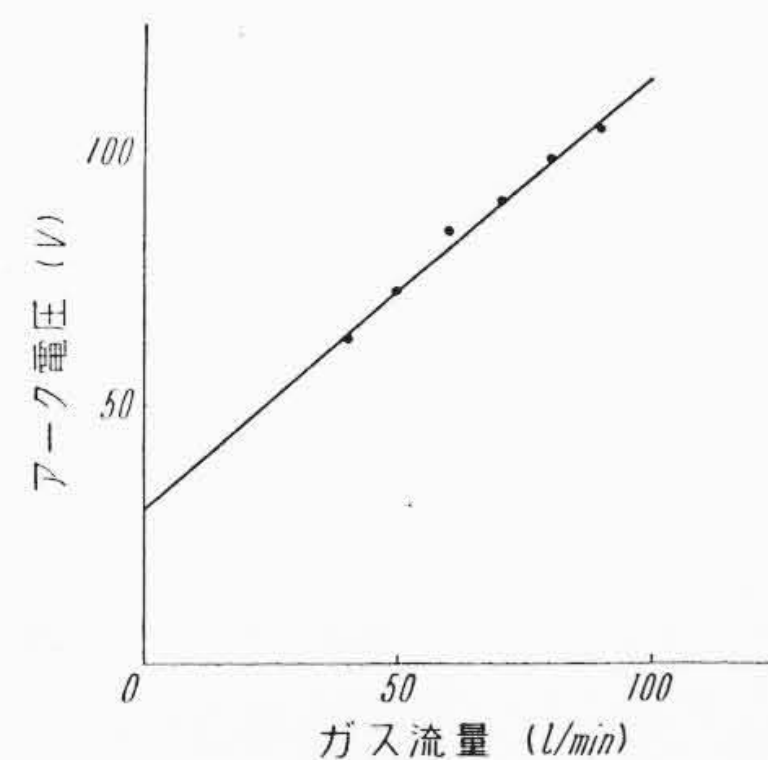
第15図 実験式 ($n=4$) によるガス流量と切断速度との関係



第17図 実験式 ($n=3$) による切断条件と切断コスト



第18図 実験式 ($n=4$) による切断条件と切断コスト



第16図 アーク電圧とガス流量の関係

したがって単位長あたりの切断コストは次式で表わされる。

$$\frac{p}{10} = \frac{aI(a_1l+a_2)}{\eta v} + b \frac{l}{v} + \frac{c}{v} \quad \dots (11)$$

ここに

p : 単位長あたりの切断コスト (円/cm)

a : 電気料金 (円/W・min)

b : ガス料金 (円/l)

c : 工賃 (円/min)

20% 水素入アルゴンの単価を 0.79 円/l, 電気料金 5 円/kWh,

工賃 3 円/min とし第16図より $a_1=0.84$, $a_2=30$, $I=300$ A, $\eta=0.7$ とすると (11) 式は次のようになる。

$$p = \frac{1}{v} (8.2l + 40.7) \quad \dots (12)$$

この式より単位長あたりのコストをパラメータとしたガス流量と切断速度との関係を切断特性と併記したものが第17, 18図である。

第17図および第18図より切断板厚さを一定とした場合最も経済的な切断条件は最大切断速度を与える条件とほぼ一致する。

(12)式で最も大きな効果を示すのはガス代で電気代と工賃の影響は小さい。したがって水素入アルゴンを使う限り電気料金および工賃が多少異なったとしてもガス量を増して切断速度を増すほど経済的であるといえることができる。

6. 結 言

以上水素入アルゴンを用いた非移行式プラズマジェットにつき電気的特性とジェットの長さについての実験結果ならびに Al 板の切断条件に関して報告した。

ガス流量および水素混入率を変えたときのアークの電圧電流特性ならびにジェットの長さの変化の様相を明らかにし、限定された条件内ではあるが切断特性を実験式で表わすことにより切断板厚さ、切断速度ならびにガス流量の相関関係を明確にし、経済的な切断条件をは握ることができた。

なお本報告のデータは実験用小容量ガンによるものであり、切断能力をさらに向上させることは比較的容易である。

参 考 文 献

水津, 安田: 熔学誌, 29, 133~139 (昭35-2)

目盛) の関係は直線的でなく、ガス流量によって大きく変化する。

(2) 各切断板厚に対し最高切断速度を与えるようにガス流量を調節した場合の切断板厚さと切断速度 (対数目盛) との関係は直線的である (第12, 13図の包絡線で $t_m = K_3 \log_{10} \frac{K_4}{v}$ の関係)。

(3) 高速切断にはガス流量を増すことが有利であるがこの場合切断可能な最高板厚さは低下する。

(4) 切断板厚さの小さいほどガス流量ならびに切断速度は広範囲 (第14, 15図の一定板厚さ曲線内の領域) に選べるが、切断板厚さが大きくなるほど特定の小範囲のガス流量による低速切断に限定される。

5.3 経済的な切断条件

第14, 15図により切断条件は切断板厚さに応じてガス流量ならびに切断速度のある範囲内で任意に選定しうることになるが、実際の切断作業に当ってはその経済性が重要な要素となる。

切断コストを構成するものはガス代、電気代および工賃が主である。

このうち電気代はアーク電流、アーク電圧および直流電源の効率に影響されるが、本実験条件におけるアーク電圧とガス流量との関係は第16図のとおりで、簡略化のためこれを直線で近似し、かつ直流電源の効率を一定とみなす。このとき消費電力は次式で表わされる。

$$W = \frac{I(a_1l + a_2)}{\eta}$$

ここに W : 消費電力 (W)

I : アーク電流 (A)

η : 直流電源の効率

a_1, a_2 : 定数