減圧気中のアーク溶接現象に関する研究 (第1報)*

—アルゴン気中におけるタングステンアークの電気的特性—

山本 利雄** 島田 弥**

A Study of the Arc Welding Phenomena at Reduced Gas Pressures (Report 1)*

—Electric Characteristics of the Tungsten Arc in Argon Atmosphere—

by Toshio Yamamoto** and Wataru Shimada**

Abstract

An arc with straight polarity is formed between a 2% thoriated tungsten electrode and a water-cooled copper plate in argon atmosphere of 18 to 760 mm Hg, and the electrical characteristics of the arc is examined under the following conditions.

Pressure of atmosphere	P : 18 to 760 mm Hg
Arc current	I : 250, 450 A
Distance between electrodes	L : 1 to 25 mm

The facts revealed are as follows.

- (1) At reduced gas pressures a radiant sphere, so called "cathode zone", is observed in the arc just below the cathode. Though it is brighter and has higher energy density than the arc column, its potential gradient does not differ from that of the arc column. The radius of the cathode zone increases with decreasing gas pressure and is the same order of the mean free path of an electron at $P=32$ mm Hg and $I=10$ A.
- (2) With the decrease in gas pressure, the arc is extended both upwards and sideways and its brightness decreases. Moreover the plasma stream from the cathode to the anode is weakened since electromagnetic pinch force decreases.
- (3) Potential gradient of the arc column E decreases linearly with the decrease in $\log P$. The measurement shows that the difference between E near the cathode tip and E at the other place of the arc column is reduced with the decrease in gas pressure.
- (4) The sum, V_{A+K} , of cathode drop V_K and anode drop V_A increases with the decrease in gas pressure. V_{A+K} increases from 7 to 14 volts as P decreases from 760 to 18 mm Hg at $I=250$ A.

1. 緒 言

高融点金属材料あるいは化学的に活性な金属材料を溶接する方法の一つとして、不活性ガスなどの特殊気体を封入した容器中で溶接を行なう いわゆる“可変雰囲気溶接法”があり、通常大気圧雰囲気中で溶接が行なわれているが 本報告の中で述べるように雰囲気圧力を減少させると、陰極直下にアーク柱よりエネルギー密度の高い球状発光部が認められるようになり、他方アーク柱電位傾度は雰囲気圧の低下に伴って小さくなり アークのエネルギーの分散の傾向が認められる。これらの特性は溶接およびそれ以外の用途にも応用できるものと考えられる。

このような減圧雰囲気中の溶接現象については、MIG 溶接に関して二、三の報告^{1), 2)}がある以外ほとんど研究がなされておらず、とくに減圧雰囲気中におけるアークの特性と、そのアークを熱源とした場合の溶接部の溶込み形状との関係についてはまったく研究されていない。著者らはこの点に注目して 大気圧、あるいはそれ以下の減圧アルゴン雰囲気中におけるアークの電気的および熱的特性を求め、それらとそのアークを熱源とした場合の各種金属材料の溶込み形状との関係について研究を行なった³⁾。

この報告では 溶接条件の選定が容易でしかも再現性の良いタングステンアークを取扱い、まずアルゴン気中においてタングステン電極と水冷銅板の間に直流正極性のアークを発生させ、電流を一定に保ちながら 雰囲気圧力を 760 mmHg から 18 mmHg の範囲に、電極間距

* 原稿受付 昭和43年8月13日 (40年度秋季全国大会にて発表)

** 正 員 三菱電機 (株) 中央研究所 Member, Mitsubishi Electric Corporation

離を 1 mm から 25 mm の範囲に変化させ、その時のアーク外観およびアーク電圧の変化を求め、主として減圧アークの電気的特性について検討した結果について述べる。

2. 実験装置, 供試材料および 実験方法

2.1 実験装置

本実験に用いた実験装置の概略図は Fig. 1 に示すようであり、真空容器中に水冷銅板陽極と水冷 W 電極（陰極）を備えている。

真空容器：直径 400 mm、高さ 500 mm のステンレス鋼製で 内容積は約 60 l であり、300 l/min の回転真空ポンプおよび 400 l/s の油拡散真空ポンプを備えている。アーク外観を観察するための観察窓が設けてあり、また容器と容器内ガスの温度上昇を測定するための水銀温度計がとりつけてある。実験中は容器内ガスを置換するが、この場合置換ガスの流れが直接アークの近傍を通らないよう配慮してある。

W 電極：0.8 l/min の流水で冷却しており、通常の TIG 溶接の条件を標準にして 電極としては直径 4 mm の 2% Th-W 電極（以下 W 電極と略称する）の先端を約 25° の鉛筆状にとがらせ、さらに電極先端の消耗、変形を防ぐため先端を直径 0.5 mm ほど平端にしたものを使用した。電極間距離を調整するため、真空容器の外側からモーター駆動により W 電極を上下に移動できるようにしてある。また大気圧以下の雰囲気圧力では アーク起動時にアークが W 電極の側面を“はい昇って”トーチ

を焼損する恐れがあり、これを防ぐため W 電極の水冷チャックからの突出長を 48 mm に保ち、トーチの前面に耐熱セラミック材料をとりつけた。

水冷銅板：直径 60 mm、厚さ 3 mm の銅板で、Fig. 1 に示すように裏面を 4.0 l/min の流水で冷却している。アークの電気的特性および次報で述べる熱的特性の測定は W 電極とこの水冷銅板間に発生させたアークについて行なった。

溶接機：定格電流 500 A の三相全波整流自己飽和形直流アーク溶接機を使用した。この溶接機は垂下特性を有しており、電流調整は可飽和リアクトルの制御によって行なわれる。溶接機の二次側回路に直列に高周波アーク起動装置を接続した（クリーニングユニットをも付属）。

水冷銅板および TIG トーチの冷却水の流量と温度をそれぞれ浮遊式流量計および水銀温度計で測定し、陽極板および W 電極の吸収熱量を測定できるようにした。

2.2 実験方法

実験方法としては まず真空容器を 2×10^{-4} mmHg 程度の真空度に排気した後、溶接用アルゴンガス（純度 99.99%）を所定の圧力まで封入し、アルゴンガスを 3 l/min の割合で置換しながら高周波起動により直流正極性のアークを発生させた。

高周波電圧重畳によるアーク起動は 雰囲気圧力が 180 mmHg 以上の場合は W 電極先端より鋭い高周波火花放電が起こって直ちにアーク起動が行なわれるが、雰囲気圧力が低下するにしたがって高周波火花放電の集中度が低減し、これにともなってアーク起動が困難にな

Fig. 1 Schematic diagram of the apparatus

A: D.C. ammeter

V: D.C. voltmeter

H.F.: H.F. starter

M: Motor

C: Heat-proof ceramics

W: Glass window

S: Color filter

P: Photographic camera

$F_1 \sim F_3$: Rotameter

$T_1 \sim T_4$: Mercury thermometer

り, かりに起動しても起動後アークがW電極の側面を一度はい昇ってから降下してW電極先端に安定するという現象が認められた. そして圧力が低くなるほどW電極側面をはい昇る距離が長くなり, アークがW電極先端に安定するまでの時間が長くなる傾向がみられ, (例えば 32 mmHg の場合約 4 秒程度) 18 mmHg 以下の圧力ではアークがW電極側面をはい昇ったまま降下せず, 場合によってはトーチを焼損することがあった. このような条件の場合は比較的高い雰囲気圧力のもとでアーク起動を行なった後, 所定の圧力まで減圧する方法をとった. また電極間距離が長い条件では高周波印加電圧の関係上アーク起動が困難であるため, 電極間距離を短く保って起動を行なった後モータ駆動により直ちに所定の電極間距離に調節した.

予備実験の結果 アークの形状およびアーク電圧は約 2 分後に完全に安定し, 冷却水の温度上昇は条件設定後約 1 分後に平衡に達することがわかったので, 本報におけるアーク電圧および次報における冷却水の温度の測定は 条件設定後 3 分以上経過してから行なうことにした.

実験条件を要約するとつぎの通りである.

雰囲気圧力 P : 18~760 mmHg

アーク電流 I : 250, 450 A

電極間距離 L : 1~25 mm

3. 実験結果および考察

3.1 アーク外観およびアーク発生状況

溶接用緑色フィルタを通して観察したアークのプロファイルを Fig. 2 に, またアークの幾何学的諸寸法を測定した結果を Fig. 3 に示す. 図に見るように雰囲気圧力 P の減少とともに アークが横および上方に拡がり, W電極の赤熱長さが長くなるのが観察された.

32 mmHg 程度の低圧条件ではアーク柱は横および上方に著しく拡がり, その輝度は極めて弱い, とくに注目すべきことは W電極先端にアーク柱より輝度が高く色の異なる発光体が観察されることで, その輝度は発光体内部ではほぼ均一である. この発光体は低圧条件ではアーク柱の輝度が弱いので明瞭に観察され, P が低下するにつれて球形に近くなりしかも大きくなる特徴を有している. しかし外周アーク柱の形および大きさが電極間距離 L の変化に対して著しく変化するのに対し, この発光体の形および大きさはほとんど変化しない. この発光体はこの程度の低圧気中ではアーク電流 I が 250 A の場合にはほぼ球形をしているが, $I=450$ A の場合にはアークの軸方向にかなり伸びている. しかし $P=18$ mmHg ではほとんど軸方向に伸びずほぼ球形になっ

Fig. 2 Profile of arc at different gas pressures

Fig. 3 Geometrical sizes of arc at various gas pressures observed through a green welding filter

ている. この発光体は溶接用緑色フィルタを通して観察した場合 外周アークと比較的に識別できるが, 実際の色を知るためにピンホールを通して光量を減じて観察した結果では, 外周アーク柱は薄い紫色, 発光体は空色にみえ, この色が実際の色に近いと考えられる. なお陰極として純タングステン, ジルコニウム入りタングステン電極を用いた場合も 球形発光の色および大きさに変わりはない.

P を 320 mmHg 程度まで上げるにしたがい, アーク柱は次第に収縮して小さくなり, アーク柱中央部, とくに陰極近傍の輝度が高くなる. 陰極直下の発光体は P の上昇につれて次第にアークの軸方向に卵形に伸びるとともに小さくなり しかも陰極近傍のアーク柱の輝度が高くなるのでその形は次第に判別しにくくなる.

$P=760$ mmHg の場合には アーク柱の中央部が極め

て高輝度であり、そのうちでもW電極直下の輝度が著しく高くなっており、W電極の先端を鉛筆状に整形してあるのでいわゆる“Cathode Spot Mode”のアーキとなっている。W電極直下のアーキの輝度がもっとも高いことはアーキ外観を撮影する際に写真機の光量を絞ってゆくと陰極直下のアーキ柱のみ撮ることからも確認される。注目すべきことは外周アーキの輝度が高く、発光体そのものが小さいので判別しにくくはあるが、この場合にも低圧条件と同様の発光体がみられることで、この発光体が低圧条件のみで発生するものではないことは注目に値する。760 mmHg のアルゴン気中におけるアーキを同一電流、同一電極間距離における大気中のアルゴン TIG アーキと比較すると、やや輝度が低く、アーキ柱の収縮の度合も多少少ないようであるが顕著な差はみられず、アーキ電圧もほとんど変わらない。

陰極直下の発光体に注目して撮影したアーキ外観写真の一例を Photo. 1 に示すが、W電極直下の球状の高輝度部分が Fig. 2 のハッチで示した陰極域に相当しており、低圧条件では写真にみるように外周アーキと明確に識別できる。

Photo. 1 Appearance of arc at different gas pressures
Arc Current: 450A
Distance between Electrodes: 15 mm

以上のような P の変化に伴うアーキ外観の変化の傾向について考察してみる。まずアーキ柱については圧力が低下するとアーキ柱からの熱伝導損失が少なくなり、アーキ柱の電位傾度も小さくなるので、アーキは横および上方に拡がりうようになり、Fig. 3 に示すように $P=18$ mmHg の場合はW先端より約 10 mm もはい昇っている。Photo. 1 から明らかなようにアーキ柱中央部と陽極板近傍のアーキ以外は極めて電離度の低い状態にあると考えられ、実際の有効電流経路はFig. 2 に示したアーキ外観ほどには拡がっていないものと考えられる。なおこのようにアーキ柱の電流密度が小さいため、電磁ピンチ力の差にもとづくプラズマ気流は極めて弱いようである。しかしアーキ電流 I が大きくなるとFig. 2 および Photo. 1 に示すように多少は電磁力によるアーキの収縮およびプラズマ気流の存在がみうけられるようになり、Photo. 1 の $P=32$ mmHg の場合の陽極板近傍の比較的輝度の高いアーキ部分は

ような高温気流が陽極板によってはね返ったものであると考えられる。 P が高くなるにつれて、(したがって気体の密度が高くなるにつれて)アーキ柱は収縮して中央部の輝度が高くなり、それに伴ってプラズマ気流が発生するようになるが、このため本来球形であるべき陰極直下の発光体はアーキの軸方向に長くのびるものと考えられる。この場合、後掲の Fig. 7 にみるようにアーキ柱の電位傾度が高くなることからわかるようにアーキ柱からの熱損失も大きくなり、いわゆる Thermal Pinch 効果が同時にこの傾向を強めていると考えられる。 P を変えた場合のアーキの状態についてはE.W. Johnson等によるA, He 気中の鋼のアーキ溶解に関する報告⁴⁾ T.E. Butler等による Ti, Nb, Ta, W 電極を用いた実験⁵⁾ などがあるが、大略の傾向は本実験の場合と同じである。E.W. Johnson の報告ではアルゴン気中における鋼棒の消耗電極溶解の場合のアーキは陰極先端より $1\frac{1}{2}$ " (at 100 mmHg), 2" (at 50 mmHg), 4" (at 15 mmHg) の高さまではい昇って安定しており、10 mmHg 以下では位置的に不安定になると述べられている。このような消耗電極の場合には電極表面酸化物とアーキ柱電位傾度のかねあいでアーキの上昇位置が決まるが、本報告の場合のアーキの上方への拡がりはいむしろ陰極部の電流密度とアーキ柱電位傾度の関係で決まるものと考えられる。

つぎに陰極直下の球状発光体について考察する。写真撮影の結果ではこの発光部分の輝度はアーキ部分よりも高く、しかも比較的均一である。また3.2で述べるように本実験における測定法ではこの部分の電位傾度 E はアーキ柱の E と大差ないが、この発光に接したW電極部分が白熱している事実や後報に述べる溶込み実験の結果などから考えると、この発光部分はアーキ柱より明らかに高エネルギー密度の状態にある。この発光がSkolnik と Jones の報告⁶⁾にある陰極発光と同じ性質のものかどうかは不明であるが、本報告では便宜上“陰極域”(Cathode Zone)と称することにする。これは本質的には球状であり、例えば Maecker 等によって報告されているような⁷⁾陰極から陽極に向かう気流の一種である“陰極焰”ではないと考えられる。Fig. 3 に示すように陰極域の直径は大体 P に反比例する傾向にあるので、いま電子の中性気体粒子に対する平均自由行程 λ をとって32 mmHgにおける陰極域の直径について検討してみる。電子の半径を気体粒子の半径に対して無視した場合の電子の平均自由行程 λ_e は

$$\frac{\lambda_e}{\lambda} = 4\sqrt{2}$$

で与えられる。アルゴンガスの平均自由行程 λ_a は標準状態では 10×10^{-5} mm であるが、仮にアーキの温度を

10,000°K であるとする、この温度では電離による気体粒子密度の変化は小さいので理想気体として取扱っても差しつかえないと考えられ、この場合には

$$\lambda_e = 10 \times 10^{-5} \times 4\sqrt{2} \times \frac{760}{32} \times \frac{10,000}{273} \\ \approx 0.5 \text{ m}$$

となる。P=32 mmHg, 120 mmHg, 760 mmHg の条件のもとでアークを発生させ、アーク電流 I の変化に対する陰極域の直径の変化を測定した結果を Fig. 4 に示すが、I が減少するにしたがって陰極域の直径はW電極の先端をその中心としながら次第に減少し、P=32 mmHg では I=450 A の場合に約 10 mm であったものが、

Fig. 4 Variation of the diameter of cathode zone with arc current

I=10 A の場合には約 1 mm に減少しその半径は電子の平均自由行程に近い値になっている。これらの結果からこの陰極域は陰極から飛び出した高エネルギー状態の電子が衝突によって気体粒子を高度に電離する減衰領域に対応するものと考えられる。P=32 mmHg, I=10 A の場合の陰極域の半径を基準にして、陰極域の半径が 1/P に比例すると仮定して P=760 mmHg, I=10 A の場合の半径を計算すると、約 $2.5 \times 10^{-3} \text{ cm}$ となるが、この値は陽イオン流説における陰極前面の収縮領域の長さ (空間電荷領域: $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ cm}$, 0 電離領域: $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm}$) に近く、興味ある値である。

なお P, L の変化に対する陽極板上のエネルギー密度、電流密度の変化に関しては Nestor⁹⁾ が報告しており、上述の傾向と大体合致しているが、これによると P の低下に対して周辺部のアークのエネルギー密度および電流密度の分布は高圧条件よりさほど広がっておらず、低圧条件で横に広がったアーク部分のエネルギー密度および電流密度がさほど高くないことを示している。

3.2 アークの電気的特性

電極間距離 L を変えた場合の各雰囲気圧力におけるアーク電圧 V の変化を Fig. 5 に示す。ただし次報で

Fig. 5 Variation of arc voltage with gas pressure

述べるように W 電極の抵抗電圧降下および抵抗発熱量はかなり複雑であり、また以下の考察ではこれらの値を考慮しなくても定性的には矛盾しないので、ここではこれらの値を差引かない電圧値を示している。L が 1 mm 以上の場合の V の測定値は W 電極先端の形状がまったく変化しない状態で測定したものであるが、L=0 mm の場合の値は L の変化に対する V の変化を直記式オシログラフに記録して、短絡直前の V より求めたものである。Fig. 5. では L=0 mm の場合の V は P が低いほど大きくなっており、L の変化に対する V の変化は P が低いほど小さくなっている。

これらの傾向はつぎのように考察できる。一般に L のみを変化させた場合の V の変化はアーク柱電圧降下 V_P の変化のためであり、陰極電圧降下 V_K と陽極電圧降下 V_A の和 V_{A+K} はほぼ一定であるとされている⁹⁾。C.E. Jackson は 1 気圧アルゴン気中で発生させた Normal Mode の W 電極と水冷銅板間のアークにおいて、アークの温度測定から求めた V_P を V から差引くことにより求めた V_{A+K} が L が 0.2" 以下の場合に多少低下することを報告しているが¹⁰⁾、その値は小さく、本実験では V_{A+K} は L の変化に対し不変であると考えても定性的にはさしつかえないと思われる。Fig. 5 中の電極間距離が零の場合の曲線は V_{A+K} を示すことになる。この値は P が低いほど大きくなるのに反し、 V_P (アーク電圧より V_{A+K} を差引いた値) は P が低いほど小さくなる傾向が認められる。ただしこの場合の V_{A+K} は W 電極の抵抗電圧降下を含んでいるので、実際の V_{A+K} はもう少し小さいと考えられる。P の変化に対する V_{A+K} の変化を V_K と V_A とに分けて考えてみる。まず V_A については陽極前面のアークの温度が低いほど大きくなることが報告されているが¹¹⁾、3.1 で述べたように P が低下すると陽極前面のアー

クの温度は低下すると考えられるので、 V_A は P の低下につれて大きくなる傾向があると考えられる。つぎに V_K については 前述の陰極域を アークが維持されるに必要な電子流の一部を補給するための熱電離領域であると考え、 P の低下につれてこの領域が大きくなるのでここからの熱損失も大きくなり、それを補うため V_K も大きくなるという説明がなされている^{12), 13)}。 P の変化に対する V_A , V_K の個々の値の変化は実験的には確認していないが、以上述べたように P の低下に伴ない V_A , V_K はともに大きくなるものと推定される。なお W 電極—水冷銅板間の大気中アルゴンアークでは、 I が充分大きい場合の V_K の値は大体 7 V 程度の値を示すといわれているので¹⁴⁻¹⁶⁾、本報の 760 mmHg の場合の V_K もその程度の値であって、この場合の V_A は 0 V に近い値を示していると考えられる。

つぎに L の変化に対する V_A , V_K の変化については以下のように考えられる。まず V_K については 陰極近傍のアークの形態および W 電極の赤熱状態は L を変化させても変化しないのでは、ほぼ一定であると考えられるが、これに対し V_A の方は L を変化させると陽極前面のアークの温度が変化するので 変化する可能性があると考えられる。しかし Fig. 5 の $P=18$ mmHg の条件における V は L が 0 mm の場合と 25 mm の場合でわずかに 1.4 V しか違っておらず、かりにアーク柱電位傾度 E が零であるとしても V_A は 1.4 V しか変化していないことになり、これらの結果から アーク電流が 250 A 程度であれば、 L の変化に対して V_A もほとんど変化しないと考えてさしつかえない。

以上の考察にもとづき、 V_{A+K} が L の変化に対して一定であるとして、任意の L における V から $L=0$ mm の場合の V を差引いて求めたアーク柱電圧降下 V_P を Fig. 6 に示す。また Fig. 6 において L の変化に対する V_P の勾配をアーク柱電位傾度 E として求めたものを Fig. 7 に示す。Fig. 7 から P が高いほど E が大きくなる傾向が認められるが これは P が高いほど気体粒子密度が高くなり アーク柱からの損失エネルギーも増大するためと考えられる。また W 電極近傍のアーク柱の E の方が W 電極からはなれたアーク柱部の E より大きい傾向が認められ、とくに P が高い条件では顕著であるが この傾向は通常の大気圧アークの場合と定性的には同じであり、大気圧アークの場合になされていると同じ様¹⁷⁾に説明されると考えられる。なお Fig. 7 では $P=760$ mmHg の場合の E は L が大きくなると一定値に近づきはするがやはり減少しており、他文献¹⁰⁾のように一定にはなっていないが L の増大に伴ない陽極前面のアークは拡がり、かつ輝度も低下する

Fig. 6 Variation of the potential drop of arc column with gas pressure

Fig. 7 Variation of the potential gradient of arc column with gas pressure

ことから、 E も小さくなると考えられ、Fig. 7 の傾向は妥当であると考えられる。低圧条件におけるアーク柱の E は非常に小さくなっているが、例えば $P=18$ mmHg の場合などからわかるように、 E は L の変化に対し大体連続的に変化しており、本実験における測定方法では 陰極域の電位傾度が外周アーク柱のそれと同程度の値になっていることが注目される。

2.2において アーク起動時にアークが W 電極の側面をはい昇る現象について述べたが、この現象は Fig. 7 に示すように P の低下につれてアーク柱の電位傾度が小さくなるため および陰極点形成の機構の性質のためにおこると考えられる。すなわち起動直後には W 電極はまだ加熱されておらず、熱電子放出能力が小さいのでアークは電極表面の酸化物を求めて移動するが、アーク柱電位傾度が小さい条件では 酸化物がありさえすればアークがかなり長くなってもアークが維持され、そのアーク長はアーク柱電位傾度の小さい低圧雰囲気中ほど長くなりうる。

電極の温度が上昇すると 熱電子放出が盛んになり 電極表面に酸化物がなくてもアークは安定に維持出来るようになるので、アーク長を短くする方向、すなわち

W電極先端へ移動して安定するものと考えられる。なお 18 mmHg 以下の圧力条件において、アークが電極側面をはい昇ったまま降下しなくなるのは アークの足がトーチ部分で拘束されてそれ以上移動できなくなり、しばらく固定されるうちに電極のその部分の温度が上昇して熱電子放出能力が大きくなり、CathodeSpotを形成してアークがその位置で安定するためと考えられる。

4. 総 括

以上述べたように 減圧アルゴン気中において、先端を鉛筆状にした 4mmφ の 2% Th-W 電極と水冷銅板の間に正極性のアークを発生させ、下記の実験条件におけるアークの電気的特性について検討した。

雰囲気圧力 P : 18~760 mmHg

アーク電流 I : 250, 450 A

電極間距離 L : 1~25 mm

その結果 つぎの事柄を明らかにすることができた。

(1) 低圧条件では 陰極の先端にアーク柱より輝度が高くしかも色の異なる卵形の発光が観察されるが、ここではこの発光を“陰極域”とよぶことにする。これは本実験の全ての圧力範囲で観察されるが、特徴的な点を列挙すると下記の通りである。

・雰囲気圧力 P が大気圧程度の場合には 電磁収縮力およびプラズマ気流のため卵形に長く伸びているが、 P の低下に伴ない球形に近くなり、その直径は P に反比例して大きくなる。(Fig. 2, Fig. 3)

・アーク電流 I を減少させるとその半径は小さくなり、 $P=32$ mmHg, $I=10$ A の条件では約 0.5 mm になってこの圧力における電子の平均自由行程と大体一致するようになる。(Fig. 4)

・本実験における測定方法では、陰極域の電位傾度は外周アーク柱のそれと同程度の値である。(Fig. 7)

(2) P の低下に伴なってアークは輝度を減じつつ横および上方に拡がり、また電磁ピンチ力が小さくなって陰極から陽極へ向かうプラズマ気流は弱くなる。(Fig. 2) その結果 陽極表面におけるアークのエネルギー密度は低下すると考えられる。

(3) アーク柱電位傾度 E は P が低下するに伴なって $\log P$ に対しほぼ直線的に減少するが、その値を求めた。一般に陰極近傍のアークの E は他部分の E よりかなり大きい、その差は P の低下に伴なって減少する。(Fig. 7)

(4) 陰極電圧降下 V_K と陽極電圧降下 V_A の和 V_{A+K} は P の低下につれて大きくなり、 $I=250$ A の

場合 P が 760 mmHg から 18 mmHg に変化すると V_{A+K} は 7 V から 14 V に変化する。本実験の圧力範囲では V_{A+K} は電極間距離 L の変化に対しほぼ一定であるとして矛盾なく説明できる。(Fig. 5)

謝 辞

本研究の遂行にあたっては 大阪大学工学部 安藤弘平教授、西口公之教授、西川淳講師の御指導を仰いだ。

また 本研究の内容に関しては 溶接アーク物理研究委員会において種々御討論いただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) J.C. Amson, G.R. Salter, "Analysis of the Gas-Shielded Consumable Metal-Arc Welding System" British W.J. 1953 p. 472~483
- 2) G.R. Salter, "The Effect of Pressure on the Gas Metal-Arc Welding of Aluminum Alloys" W.J. 1955 p. 107s~115s
- 3) 山本, 島田, "低圧気中の溶接現象に関する研究" 溶接学会, 溶接アーク物理研究委員会資料 No. 65—31 (1965), No. 65—37 (1965), No. 66—54 (1965), No. 67—68 (1967)
- 4) E.W. Johnson, G.T. Hahn, R.Itoh, "Characteristics of Consumable Electrode D.C. Arcs in Argon, Helium and Vacuum" Arcs in Inert Atmospheres and Vacuum, Wiley, New York 1956 p. 19~40
- 5) T.E. Bulter, R.P. Morgan, "The Oscilloscopic Analysis of Arc Behavior in Consumable Electrode Furnaces" Transactions of the Vacuum Metallurgy Conference, 1950 College of Engineering, New York Univ. p. 49~63
- 6) M.Skolnik, T.B. Jones, "High Current Tungsten Arc in Argon, Helium and Their Mixtures" W.J. 1953 p. 55s~64s
- 7) H. Maecker, "Plasmaströmungen im Lichtbogen inforge eigen magnetische Kompression" Z. Phys. 141 1955 s. 198
- 8) O.H. Nester, "Heat Intensity and Current Density Distributions at the Anode of High Current, Inert Gas Arcs" J. of Applied Physics 33 May 1952 p. 1638~1648
- 9) 安藤, 長谷川, 溶接アーク現象 産業図書株式会社, 1962年 p. 38~39
- 10) C.E. Jackson, "The Science of Arc Welding" 1959 Adams Lecture, W.J. 1960 p. 129s~140s
- 11) G. Blsz, W. Finkelnburg, "Die, Abhängigkeit des Anodenfalles von Stromstärke und Bogenlänge bei Hochtemperaturbögen" Z. Phys 140 1955 s. 540 No. 68—76 (1968)
- 12) 安藤, 長谷川, 溶接アーク現象 産報, 1967, p. 409
- 13) 西口, 松縄, "低圧気中における電極の現象" 溶接学会, 溶接アーク物理研究委員会資料 No.68—76 (1968)
- 14) G. Busx, W. Finkelnburg, "Zum Anodemechanismus des thermischen Argonbogens" Z.Phys. 144 1959 244s
- 15) G. Busz, W. Finkelnburg, "Thermische Lichtbögen hoher Temperatur und niedriger Brennspannung" Z. Phys. 139 1954 s. 212
- 16) J.F. Lancaster, "Energy Distribution in Argon Shielded Welding Arcs" British W.J. Vol. 1 1954 p. 412
- 17) 安藤, 長谷川, 溶接アーク現象 株式会社産報, 1967, p. 115~119