高圧アルゴン気中におけるアーク特性*

西口 公之** 松縄 朗** 堀 正樹***

Arc Characteristics in High Pressure Argon Atmospheres*

by Kimiyuki Nishiguchi**, Akira Matsunawa** and Masaki Hori***

In this paper are described the arc behaviors, the electrical and thermal properties and the wire melting characteristics in GTA and GMA in high pressure argon atmospheres up to 10 atm.

In a high pressure atmosphere, an arc shrinks much which brings the considerable increase in arc voltage. This increase is almost comes from the rise in potential gradient of an arc column and the increase in cathode potential fall is a little. In a hot cathode mode arc (GTA), the area of cathode root concentrates greatly in higher pressures, which eventually accompanies the acceleration of plasma stream. Therefore, the heat transfer to a mother plate is much dependent on the hot plasma jet. In a cold cathode mode arc (GMA), on the other hand, the distribution of cathode spots is much concentrated in high pressures, while the active area of current at electrode wire is kept constant. Therefore, the generation of plasma stream is suppressed. Concentration of cathode spots wandering region also brings the arc stabilization independent on the surface conditions of a metal. Hence, even the electrode negative GMA is more stabilized in higher pressures. Both the threshold current of metal transfer mode and the wire melting rate in spray condition decrease as the pressure is increased, because the electromagnetic detachment force becomes smaller due to the reduction of divergent angle of the arc current flowing pattern.

1. 緒 言

近年、海洋開発技術に関連して水中あるいは海中における溶接技術の確立が注目されている。水中溶接についてはわが国でも最近多数の研究例が見られるが、大多数はごく浅い水深における実験で、大陸棚程度の水深(～200 m)を想定した研究はようやくその端緒に着いたところである。水中溶接用の熱源としては種々のものが検討されているが、その主体は陸上の場合と同様にアークである。溶接個所の水深増大にともない溶接部は不可避免地に高圧条件下に置かれることになるが、高圧力下のアーク溶接現象に関する研究報告は少く¹⁻³⁾、いまだ未知の分野といえる。

筆者らは上記のような状況に鑑み、水深の問題を想定して高圧気中におけるアーク溶接現象の系統的な解明に着手した。高圧条件下ではアークは著しく緊縮し、アーク力あるいはプラズマ気流が増大するため、これがアークの諸特性のみならずビード形成にも多大の影響を及ぼすことが考えられる。本稿は基礎段階としてガス-金属反応の無視できる高圧アルゴン気中(1～10気圧)での

TIG および MIG アークにおけるアーク挙動および諸特性を追究した結果を述べる。

2. 実験の要点

実験は特別に設計・製作したステンレス鋼製压力容器(1,000 mm×700 mmφ)内で行なった。容器内部にはトーチ(TIG, MIG)、ワイヤ供給機構および母板を移動させるためのx-y台車を装備している。トーチおよび台車は容器外部から自由に操作でき、台車は前後方向(x方向)に400 mm(移動速度:1～200 cm/min)、左右方向(y方向)に300 mm(手動)移動させることができる。また現象の観察は本体に設けられた4個の窓から行なわれる。実験に際しては、容器内をあらかじめ 10^{-2} Torr 程度まで排気した後、所定の圧力にまでガスを充填する。

なお TIG アークの場合には垂下特性の第3ブラン型直流発電機(200 A)を、MIG アークには定電圧特性の整流器型直流アーク溶接機(500 A)を使用した。

電極材料には TIG アークの場合、陰極に径 5 mmφの純タングステンおよび2%トリヤ入りタングステンを、陽極には径 100 mmφの水冷銅板および水冷軟鋼板を用いた。MIG アークの場合には径 1.6 mmφの鋼ワイヤ(DS-1, YM-26)およびアルミニウムワイヤ

*原稿受付 昭和51年12月27日(昭和46年度春季全国大会にて発表)

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

***正 員 滝上工業(株) Member, Takigami Engineering Ltd.

(1, 100) を用いた。また母板には主として軟鋼 (SS41, 16 mm ϕ) を使用し、適宜アルミニウム板 (1, 100, 25 mm ϕ) を用いた。

雰囲気ガスは純アルゴン (99.99%) のみを使用し、圧力範囲は 1~10 kg/cm 2 abs で実験した。

3. TIG アークの特性

3.1 非溶融陽極を用いた場合の静止アークの挙動とアーク特性

Fig. 1(a), (b) は大気圧 (1 kg/cm 2 abs) および高圧 (7 kg/cm 2 abs) のアルゴン気中における水冷銅母板上 TIG アークの外観形状の代表例である。アーク形状は高圧気中においても高電流域では釣鐘状の形を呈するが、高圧になるほど周囲ガスの冷却効果によってアーク柱は緊縮し、アークの輝度が上昇するとともに陰極点形成域も著しく減少する。高圧気中 TIG アークのもう一つの特徴は低電流側の広範囲にわたって明瞭な陽極輝点をもつアーク形態が出現しやすいことである。これは電流条件によっては Fig. 1(c) に示すように多数の極点となることがある。このような陽極輝点が形成される場合には陰極炎と陽極炎とが互いに衝突して図にみるごとくアーク形状は非対称となりやすい。以下 陽極点が形成されるアーク形態をアノード・スポット・モード (A.S.M.), 陽極点の認められない通常の釣鐘型アークをノーマル・アノード・モード (N.A.M.) と区別する。一方 陰極形態については 1 気圧でカソード・スポット・モード (C.S.M.) を示すアークは高圧条件でも同形態を示すが、ノーマル・モード (N.M.) の場合の変化については次項にて述べる。

Fig. 1 Shapes of TIG arc on a water-cooled copper anode in low and high pressure atmospheres

Fig. 2 はいくつかの雰囲気圧力における TIG アークの静的電流-電圧特性を示す。雰囲気圧が増すとアーク電圧は上昇し、またアーク電圧 V_a の負抵抗特性から上昇特性に移行する電流域は低電流側へ移る。一方、A.S.M. が出現する電流域は高圧力雰囲気になるほど大電流域にまで拡大する。なお A.S.M. の出現電流域はア

Fig. 2 Volt-ampere characteristics in high pressure TIG arcs (A.S.M. : Anode Spot Mode, N.A.M. : Normal Anode Mode)

Fig. 3 Effect of ambient pressure on arc voltage, plasma drop, minimum voltage and anode heat in TIG arc

ーク長によっても大いに影響され、短アーク長では低電流側へ移行する。

Fig. 3 は N.A.M. におけるアーク電圧 V_a 、陽極吸収エネルギー V_a^* 、および V_a-I 特性から求めた最小電圧 + V_{min} ($\approx V_a + V_0$) とアーク柱電圧降下 V_p ($= V_a - V_{min}$) の雰囲気圧力 p に対する変化を $l=10$ mm の場合について示す。アーク電圧 V_a は圧力上昇とともにほぼ直線的に増加しているが、アーク柱電圧降下 V_p および最小電圧 V_{min} の変化から分るように、このアーク電圧の増大はほとんどアーク柱電圧降下の上昇によるものである。すなわち高圧雰囲気中では周囲ガスによるアークの冷却作用が大気圧下のそれに比較して大いに増し、アーク柱の電位傾度が著しく増大するためである。一方 V_{min} も V_p に比しては増加程度が低いものの、圧力上昇とともに次第に増加する。高圧気中 TIG アークでは

↑ V_{min} はアークの電圧-アーク長特性曲線 (V_a-I 特性) を $l=0$ に内挿した値。これは近似的に陽極降下 V_a および陰極降下 V_0 の和と考えるとよい。

前掲 Fig. 1 に見たごとく陰極域が著しく電極先端部に集中して C.S.M. の程度が強まるとともに、先端の白熱部が同一電流値でも拡大すること、および大気圧下 TIG アークで許容される電流値でも高圧条件ではタングステン先端の溶融・損傷が生じやすくなる。これらの事実より、 $V_{\min}$ の増加は主として陰極降下 V_c が上昇するためと推論される。また陽極吸収エネルギー V_A^* も圧力上昇とともに大いに増大するが、この増大はアーク柱よりの入熱、すなわちプラズマ気流からの伝熱によるものと判断される。以上、高圧気中 TIG アークではアーク柱の特性がアークの電氣的特性および母板への伝熱特性に主導的な役割をはたしていることが明らかとなった。

3.2 溶融陽極を用いた場合の母板への伝熱特性

母板が溶融する場合の TIG アークの特性も基本的には非溶融母板の場合と同じと考えられるが、アーク力により溶融池が掘り下げられるため母材への熱輸送特性に若干の差異が予想される。そこで陽極に軟鋼板 (100 mmφ×20 mmf) を用い、裏側より強力水冷した場合の TIG アーク特性について検討した。なお、ここではアーク点弧後十分に時間が経過して溶融池の大きさおよび冷却水の温度上昇が定常になってから全ての計測を行っている。またこの実験では A.S.M. 形態は溶融池の形成されている場合には全実験電流域 (10~200 A) にわたって認められなかった。

Fig. 4 は水冷鋼板上の静止 TIG アークの形態および溶融池表面の観察結果を示す代表例である。陰極先端角の小なる場合 ($\theta=20^\circ$ 、なお先端部は 1 mmφ 程度平坦に加工してある)、いずれの圧力においても典型的な C.S.M. を呈するが、アーク柱は水冷銅陽極の場合と全く同様に圧力上昇とともに著しく緊縮して輝度を増し、また陰極点領域は電極先端部にますます集中する。アーク発生中の溶融池表面は 1 気圧ではアーク直下でわずかに凹んでいるのみであるが、高圧力条件では同一アーク電流値でも凹みが著しくなるとともに、アーク炎の裾の部分は母板表面から跳ね返るようになる。一方、電極先端が平坦な場合 ($\theta=180^\circ$)、低圧条件ではいわゆるノーマル・モード (N.M.) の陰極形態をとり、溶融池表面の凹みはきわめてわずかであるが、圧力増大とともに陰極点の緊縮が著しく、しだいに C.S.M. 的な様相を示す。溶融池の凹みも圧力上昇とともに大きくなるが、その程度は $\theta=20^\circ$ の場合に比して小さい。なおこの場合の陰極点形成箇所は電極先端の円周エッジ部に固定されやすく、その結果アークは Fig. 4 (b-2) にみるごとく偏心しやすい。

Fig. 4 Schematic view of TIG arc and molten pool (Anode: Water-cooled steel plate)

Fig. 5 は電極先端形状の異なる場合のアーク電圧および陽極母板の吸収エネルギーの圧力変化を示したものである。電極先端が鋭角の場合にはアーク電圧 V_a の圧力上昇に対する増加傾向は Fig. 3 と同様であるが、陽極吸収の等価電圧 V_A^* は非溶融母板の場合と異なってほぼ一定値を示す。これは Fig. 4 (b-1) から判るように雰囲気圧力上昇にともなうアーク圧力の増大によって溶融池が深く凹み、高温のプラズマ気流が跳ね返って母板上での熱伝達が減少し、結果的に V_A^* が上昇しなくなったものと理解される。一方、陰極先端が平坦な場合 ($\theta=180^\circ$) には圧力上昇にともなう N.M. から C.S.M. への放電形態の移行につれてプラズマ気流の発生が著しくなり、 V_a , V_A^* ともに次第に $\theta=40^\circ$ の場合に近づく。

Fig. 5 Effect of ambient pressure on arc voltage and anode heat (Anode: Water-cooled steel plate)

以上述べたごとく、高圧アルゴン気中 TIG アークでは周囲ガスによる冷却能の増加にともない陰極点およびアーク柱の著しい緊縮 (電流密度および電位傾度の増加) が全体のアーク特性に大きく寄与している。また陽

極母板への入熱特性には高温プラズマ気流による伝熱効果が大きく影響するが、溶融陽極の場合には電流密度増大によるアーク圧力の上昇によって溶融金属が深く押し下げられてプラズマ気流の跳ね返り現象が生じ、全体のアーク入力が増すにもかかわらず母板入熱量はほとんど増加しない。

4. MIG アークの特性

4.1 陰極点の挙動とアークの安定性

溶滴移行を伴う MIG アークでも静的な電気的特性におよぼす雰囲気圧力の影響は定性的には TIG アークの場合と同一傾向を示す。Fig. 6 は逆極性 MIG アークの一例を示すものである。スプレー移行（ストリーミング移行）およびグロービュラー移行（ドロップ移行）のいずれの場合にもアーク電圧（電極の抵抗降下も含む）は圧力上昇とともに増大するが、TIG アークの場合に比してその増加率（ $\partial V_a / \partial p$ ）は若干低い。ワイヤ溶融速度特性あるいは $V_a - I$ 特性などの間接的測定では圧力上昇とともに陰極降下 V_c あるいは陽極降下 V_a が著しく増大する明確な証拠は認められず、アーク電圧の増大は TIG アークの場合と同様にアーク柱の電圧上昇にあるものと判断される。事実、スプレー移行条件（ $I = 320$ A）でアーク柱の平均電位傾度を検討した結果、1 気圧での約 10 V/cm が 5 気圧では約 23 V/cm となる。すなわち平均電位傾度は絶対圧力値の 5 乗にほぼ比例して増加し、Fig. 6 のアーク電圧の変化傾向とよく一致している。このようにアークの静的電気特性に関するかぎり TIG および MIG アークに特別な差異は見られないが、以下に述べるように高圧気中 MIG アークでは陰極点の挙動あるいはワイヤ溶融・移行特性に特徴が認められる。

Fig. 7 は圧力変化にともなう逆極性 MIG アークの形態とクレータ部の様相をストリーミング移行している場合（ $I = 350$ A）について示す。圧力上昇によるアーク形態の変化は基本的には TIG アークと同様で、アーク全体は緊縮する。MIG アークでもっとも特徴的なことは、ストリーミング移行の場合 圧力上昇とともにワイヤ溶融端の尖り角度が鈍くなること、およびいずれの移行形態においても母板上の陰極点は 3 気圧程度まではクレータ前方の固体酸化膜上に分布しながらも圧力上昇とともにクレータ前縁部に集中する。この結果、溶接後のクリーニングは圧力増加とともに著しく減少する。Fig. 7 のアーク条件では 5 気圧以上の雰囲気中で陰極点はもはや母板表面上には認められなくなり、アーク直下の溶融池表面もしくはクレータ前方のガウジング壁上に形成されるようになって、溶接後の近傍にクリーニング

Fig. 6 Effect of ambient pressure on arc voltage in MIG arcs (Electrode: Steel (DS-1), 1.6 mmφ)

Fig. 7 Behaviors of MIG arc in low and high pressure atmospheres

領域は認められない。このように高圧気中 MIG アークにおける母板上陰極点の挙動は大気圧下におけるヘリウム気中あるいは炭酸ガス気中アークの場合と類似している。なお極点がクレータ内に形成されるとき、溶融池からのヒューム発生が格段に著しくなる。

陰極点は一般に清浄な金属表面よりも仕事関数の低い金属酸化物上に形成されやすい性質を有する。これは仕事関数が低いほど陰極降下が低くなるためである^{4,5)}。大気圧中アルゴンアークのごとくアーク柱電位傾度が低いと、電極直下の清浄な金属面からアークが発生するよりも遠方の酸化物上からアークが発生する方が結果的にアーク電圧が小さくなって、いわゆるクリーニング中の広いアークが形成される。高圧条件では前述のごとくアーク柱電位傾度が顕著に増大するので、たとえ遠方に陰極降下を低下せしめる酸化物が存在してもアーク長増加による電圧上昇の関係で陰極点は遠方にまで分散・形成され難くなり、ついには陰極降下は大となるにもかかわらず最短距離の純粋金属上に極点が形成されるようになると理解される。さらに極点が溶融金属面に集中形成されるようになると、金属蒸気の発生が促進され、電離電

圧および拡散速度の低い物質がアーク柱に供給されて、アーク柱電位傾度の上昇を抑制する効果が生じ、清浄金属（溶融金属）上での極点形成がますます容易となる。

酸化皮膜を除去した鋼板上の MIG アークでは板表面上にわずかに残存する酸化物を求めて陰極点が不規則に移動するためアークは不安定となり、ビードおよびクリーニング領域は不整となりやすい。これを抑制する方法として、通常はアルゴンガス中に数%の酸素、炭酸ガスなどの酸化性ガスを混入して極点形成の安定化をはかっている。しかし高圧アルゴン気中では上述のごとくアーク柱電位傾度の増加により陰極点分散領域が規制されるので、とくに外部的に酸化物を供給しなくてもアークの安定化ははかれるはずである。Fig. 8 は一枚のテストピースの半分のみ酸化皮膜（ミルスケール）を除去した板上に置きビード MIG 溶接を行なった場合のビード表面外観および電流・電圧のオシログラムである。1 気圧の場合、酸化皮膜付の部分ではビード巾およびクリーニング巾ともに斉一で、電流・電圧波形ともに安定しているが、皮膜を除去した部分ではクリーニング領域（陰極点分散域）は大きく変動しビードのリップルも粗く、

(a) $p = 1$

(b) $p = 3$

Fig. 8 Effect of ambient pressure on stability of arc and bead formation (Same conditions with Fig. 7)

かつ電流・電圧の変動も大きくアークが不安定なことが判る。事実、ワイヤ送給速度を一定に保持しているにもかかわらず、ワイヤ先端は陰極点の不規則移動に応じて上下に激しく変動するのが観察される。一方、高圧気中では酸化皮膜の有無にかかわらずビードおよび電流・電圧波形に変化はなく、アークは安定している。このような高圧アルゴン気中の場合と等価な現象は大気圧不活性ガス気中でも再現可能である。例えばアルミニウムの MIG 溶接において、アルゴンよりも電位傾度の高いヘリウムあるいはアルゴン-ヘリウムの混合ガスをシールドガスに用いるとクリーニング域のない安定な溶接*が可能となる。

MIG 溶接ではもっぱら直流逆極性が用いられるが、これは正極性では特別に活性化されたワイヤ⁶⁾の場合を除いて一般にワイヤ上の陰極点が不規則に移動し、アークおよび溶滴移行が不安定になることに起因している。しかし上記のごとく逆極性アークにおける母板上陰極点の挙動から推して、高圧気中では正極性 MIG アークも十分安定化することが予測される。Fig. 9 は通常ワイヤにおける陰極点の挙動を模式的に示したものである。1 気圧のアルゴン気中では、極点は電極側面の固体壁上（図中の A-B 部分）および溶融金属の下部（C-D 部）に形成され、それぞれ不規則に移動する。このような状態ではワイヤ先端に大きな溶滴が形成され、反発移行状態を呈してスパッタリングが著しく、また電流・電圧の変動が激しい。しかし雰囲気圧力が上昇すると、Fig. 9(b) に見るごとく極点分散領域、とくに AB 部分が著しくワイヤ先端部に集中し、同時にアーク変動も少なくなる。さらに高圧条件下では、極点は (c) 図に示すごとく溶融先端部のみ形成されるようになり、アークはますます安定化する。この状態での溶滴移行形式は大電流アルミニウム MIG アークにおけるスプレー移行（プ

Fig. 9 Cathode spots behaviors in electrode negative polarity

*ヘリウム気中アークではクリーニング作用は無いとする説⁷⁾があるが、著者らはクリーニング作用はアルゴン気中と同様に生じるものの、極点分散域がビード巾に比して狭いためにクリーニング領域としての痕跡が残らないにすぎないと解釈している。

ロジックテッド移行)に類似しているが、オープンアーク状態ではスパッタリングは完全には解消しない(詳細は別報)。なお(c)の状態ではワイヤ端からのヒューム発生が著しい。

ある種の市販軟鋼ワイヤでは、Fig. 10 に示すように1気圧の純アルゴン中正極性アークでも Fig. 9(a)とは全く極点挙動の異なるものがある。この種のワイヤでは大電流条件で Fig. 10(a)にみるごとく陰極点は安定して分布し、ストリーミング移行を呈する*。また低電流条件(低い電位傾度)では極点は(b)のようにワイヤ側壁を広い範囲に分布するが、この場合も極点の不規則移動は見られず安定したドロップ移行を示す。このようにワイヤの種類によって全く異なる極点挙動を示すのは電極組成(合金元素, ガスなど)の差異によるものと思われるが、現段階ではその機構は不明である。さてこのような特殊なワイヤも高圧気中では前掲 Fig. 9(c)と全く同じ挙動を示す。

Fig. 10 Some specific features of electrode negative arc at 1 atm

4.2 電極ワイヤの溶融特性

高圧気中でのアーク形態変化とともなって電極ワイヤの溶融特性も雰囲気圧力の影響を受ける。Fig. 11 はいくつかの雰囲気気での軟鋼ワイヤの溶融速度とアーク電流との関係を逆極性オープンアークの場合について示す。いずれの圧力においても低電流域ではグロービュラー移行、高電流域ではスプレー移行(ストリーミング移行)を呈するが、ここで特徴的なことは両移行形態の臨界電流が圧力上昇とともに高電流側へ移行する点である。またグロービュラー移行の場合、1気圧ではドロップ移行形式を示すが、高圧条件ではしだいに反発移行の様相を呈してスパッタリングが激しくなる。しかし圧力変化に対して溶融速度に有意差は認められない。一方、ストリーミング移行形態の場合にはワイヤ溶融速度は圧力増加とともに若干低下する。

Fig. 12 は大気圧および高圧気中 MIG アークにおけるワイヤ突き出し長さと溶融速度との関係を示す例である。グロービュラー移行の場合にはいずれの圧力において

*正極性アークにおけるストリーミング移行ではワイヤ端の尖りが同一条件の逆極性の場合に比して著しい。この原因はワイヤ側方に広く分散する陰極点による直接加熱によるものと考えられる。

Fig. 11 Wire melting characteristics in high pressure argon atmosphere with electrode positive polarity

Fig. 12 Effect of wire extension on melting rate of steel wire

も突き出し長変化によっては溶融速度に差異は認められない。一方、スプレー移行の場合にはワイヤの抵抗加熱を無視する l_{ext} の小なる範囲ではいずれの圧力においても溶融速度はほぼ同じ値を示し、陽極発生熱量は雰囲気圧力によって大差はないことを示している。突き出し長の増加とともに溶融速度は次第に増大するが、低圧と高圧とで溶融速度に次第に差が生じ、十分に大きな l_{ext} となってその差はほぼ一定になる。もし突き出し長変化による溶融速度の変化が単に抵抗加熱効果に起因するものとするれば、陽極発生熱量が同じであるかぎり圧力の高低に無関係に両曲線はほとんど一致しなければならない。しかるに上述のごとく高圧になると 10 mm 以上の突き出し長で溶融速度の増大が抑えられる事実は予熱効果以外に原因を求めねばならない。いまストリーミング移行中のワイヤ端形状に着目するとき、Fig. 13 に示す

Fig. 13 Effect of wire extension and ambient pressure on shapes of wire tip end

ごとく先端部の尖り長さは突き出し長さの増加とともに長くなるが、高圧中ではこれが相対的に著しく短くなっている。比抵抗の大きい材料におけるこの尖り現象は予熱されたワイヤの側壁がアークにより直接に加熱・溶融される結果である⁹⁾。したがって周囲ガスによるアークの冷却効果が著しい高圧気中ではワイヤ上でのアークの分散面積が減少するため当然の結果として尖り長さが短くなり、同時にアーク柱も収縮する。このような状態でのワイヤ先端に作用する電磁ピンチ力について考察する。

低圧および高圧におけるワイヤ先端部を Fig. 14 に示すようにモデル化して考える。ここで AB および A'B' はアーク電流の開きとし、図中の斜線部は溶融金属で、電流分布は円錐台内において等斉であると仮定する。周知のごとく末拵がり状に電流が流れる場合には電磁圧力差により電流密度の高い方から低い方に向けて力を生じる。Fig. 14 の場合、区間 A-A' および B-B' の円錐台全体に作用する F_T 力は全電流を I (C.G.S.e.m.u.) とすると

$$F_T = I^2 \ln(R_B/R_A) = I^2 \ln \alpha \text{ (dyne)} \quad (1)$$

Fig. 14 Effect of taper index of current flowing pattern on electromagnetic forces around electrode tip

で表わされる。ところで領域 ABC の導体はプラズマであり、したがってこの部分に作用する力はプラズマ気流を発生させる。もしプラズマが完全な非粘性流体ならば、気流は溶融金属界面 AC に何ら力を及ぼさないで、(1) 式で与えられる力 F_T はその全てが溶滴離脱力とはならない。そこで以下に逆円錐状の溶融属にのみ作用する下向きの力 F_M について考える。

いま円錐台の内部を等斉に流れている電流の要素 di (線分 $\overline{ab}$) を考え、線分 $\overline{ab}$ の内側を流れる電流を i とする。 di の微小部分 dl に作用する力の下向き成分 df は次式で示される。

$$df = H \cdot di \cdot dl \sin \psi = H \cdot di \cdot dr \quad (2)$$

ここで 電流分布が等斉である条件

$$(r_b/r_a) = (R_B/R_A) \equiv \alpha \quad (3)$$

および

$$\left. \begin{aligned} i &= (r_a/R_A)^2 \cdot I, \quad di = 2(r_a/R_A^2) \cdot I \cdot dr_a \\ H &= 2i/r \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

を代入すると (2) 式は次のごとくになる。

$$df = 4(I^2/R_A^4) \cdot (r_a^2 dr_a) \cdot (dr/r) \quad (5)$$

したがって円錐状の溶融金属 (ACA') 全体に作用する下向きの力 F_M は (5) を積分すれば得られる。

$$F_M = 4(I^2/R_A^4) \int_0^{R_A} dr_a \int_{r_a}^{r^*} (r_a^2/r) dr \quad (6)$$

ここに r^* は電流 di と界面 AC との交点 P の半径で

$$r^* = \alpha r_a / \{R_A + (\alpha - 1)r_a\} \quad (7)$$

であるから、(7) を (6) に代入すれば F_M は次式で示される。

$$F_M = \begin{cases} I^2 \cdot \left\{ \frac{\ln \alpha}{(\alpha - 1)^4} + \frac{3\alpha^3 - 13\alpha^2 + 23\alpha - 25}{12(\alpha - 1)^3} \right\} & (\alpha \neq 1) \\ 0 & (\alpha = 1) \end{cases} \quad (8)$$

一方、(6) において r の積分範囲を $r = r^* \sim r_b (= \alpha r_a)$ とすれば、これはプラズマ部分に作用する力 F_P となり、結果は (9) 式のごとくになる。

$$F_P = \begin{cases} I^2 \cdot \left\{ \frac{\alpha(\alpha - 2)(\alpha^2 - 2\alpha + 2)}{(\alpha - 1)^4} \ln \alpha \right. \\ \quad \left. - \frac{3\alpha^3 - 13\alpha^2 + 23\alpha - 25}{12(\alpha - 1)^3} \right\} & (\alpha \neq 1) \\ 0 & (\alpha = 1) \end{cases} \quad (9)$$

なお (8) および (9) 式の和 ($F_M + F_P$) は簡単に $I^2 \ln \alpha$ となり、これは前述の (1) 式となる。

Fig. 14 の各曲線は (8) および (9) 式で与えられる各領域の下向きの電磁力とアークの開きとの関係を示したものである。溶融金属に作用する離脱力 F_M は α の増加とともに急速に増し、十分に大きい α では一定値 ($F_M/I^2 = 0.25$) に近づく。一方、プラズマに作用す

る力 F_P は $\alpha > 1$ では常に F_M より大きく, α の増加とともにほぼ対数的に増し, その増加傾向も F_M の場合より著しい。実際のアークではプラズマ気流の粒性により F_P の一部は溶滴離脱を促進するので, 溶滴離脱力は α の増加とともに (8) 式で示されるよりも急激に増大する。

以上の基本的考察より, アーク柱が収縮してアーク電流通路の開き角が小さくなる高圧気中 MIG アークでは溶滴離脱力は本質的に低下する。さらに高圧気中の軟鋼ワイヤでは前述のごとく極点集中により尖り長さが減少し, これはアークの開き角が同一でも $\alpha (=R_B/R_A)$ が減じたことと等価であり, 結果としての離脱力は大いに低下する。したがって Fig. 11 に示したように高圧条件ではスプレー臨界電流値が上昇するとともに, 同一電流値では溶滴離脱量 (ワイヤ溶融速度) は低下することになる。とくに軟鋼のごとくジュール加熱と極点加熱の両効果によって溶融・ストリーミング移行するものでは雰囲気圧力によって溶融先端部の長さが大巾に変化するため, 離脱力の変化が著しい。これをより端的に示したのが Fig. 15 の正極性アークにおけるワイヤ溶融速度と圧力との関係である。正極性アークでは Fig. 8 および 9 に示したように低圧条件では陰極点はワイヤ側壁にまで広く分散するが, 高圧下では急激にワイヤ端に集中して溶融端部の長さが著しく短くなり, 離脱力が急減するため, 図にみるごとく溶融速度は急速に低下し, $p=7$ では $p=1$ の場合に比して半減している。

Fig. 15 Pressure effect on wire melting rate in electrode negative MIG arc

上記のように高圧下での溶融速度の低下は必然的に溶滴保有エネルギーの増大を伴うはずであり, すでに述べた正極性 MIG アークで高圧になるほどワイヤ溶融端からのヒューム発生が著しくなる事実よりも溶滴は過熱状態にあることがわかる。また溶滴保有エネルギーが大きくなる事実はアルミニウムワイヤの場合に顕著に認められる。熱伝導の良い材料では溶滴の平均温度は熱伝導論的にも明らかなように高温となり, 大気圧アルゴン MIG (アルミニウム) での実測結果では $2,260^{\circ}\text{C}$ と沸点に近い⁹⁾。このようなアルミワイヤでは例えば 1.6 mm 径の場合, 5 気圧以上では全スプレー電流域 ($p=5$ では 160 A 以上) において溶融端は沸騰状態にあり, 溶滴部からは線香花火状の微細なスパッタ発生が観察される。

5. 結 言

以上 高圧アルゴン気中の TIG および MIG アークの挙動, 電気的・熱的特性およびワイヤ溶融特性について述べた。TIG, MIG 両アークとも高圧下では全体に著しく緊縮し, 巨視的な電気特性は類似の傾向を示す。しかし電極先端部における平均極点電流密度は TIG アークでは高圧下では著しく上昇してプラズマ気流の発生が促進されるのに対し, MIG アークでは平均電流密度がワイヤ径に規制され不変であるため気流の発生は抑制される。このため熱輸送特性あるいは溶滴離脱現象などは両アークで異なった傾向を示す。

参 考 文 献

- 1) Amson, J.C., et al.; "Analysis of the Gas-Shielded Consumable Metal-Arc Welding System, Effect of Ambient Pressure", B.W.J., 10 (9), (1963), p. 472.
- 2) Salter, G.R.; "The Effect of Pressure on the Gas Metal-Arc Welding of Aluminium Alloys", W.J., Vol. 44 (1965), p. 107-s.
- 3) Perlman, M., et al.; "Ambient Pressure Effects on Gas Metal-Arc Welding of Mild Steel", W.J., Vol. 44 (1965), p. 231-s.
- 4) 西川: 「TIG 溶接用タングステン電極のアーク特性に関する研究」, 学位請求論文 (大阪大学), 昭44
- 5) 西口, 松縄, 片山: 「低圧雰囲気におけるアーク現象 (第4報)」, 溶学誌, Vol. 44 (昭50), No. 12, p. 997
- 6) Cameron, E.; "Electrode for Spatter-Free Welding of Mild Steel in Carbon-Dioxide", W.J., Vol. 40 (1961), p. 14-s.
- 7) Pattee, H.E., et al.; "Theoretical and Experimental Study of Cathodic Cleaning with the Plasma Arc", W.J., Vol 47 (1968), p. 181-s.
- 8) 安藤, 長谷川: 溶接アーク現象, 産報, p. 425
- 9) 同上, p. 435