磁気駆動アーク溶接におけるアークの回転挙動* についての実験的研究

佐藤次彦**, 片山襄一**, 井岡誠二***, 大谷真博****

An Experimental Study on Rotating Behavior of Arc during Magnetically Impelled Arc Butt Welding*

by Tsugihiko Satoh**, Joichi Katayama**, Seiji Ioka*** and Masahiro Otani****

This study intends to make clear experimentally physical reasons why in the case of the steel pipe with thicker wall thickness the arc rotates at low speed in the initial stage of heating and does at high speed in the final stage, why the arc rotates on the inner side of the pipe edge surface in the initial stage, and why the rotating position of the arc moves from the inner side to the outer side of the pipe edge surface as heating time passes. The results obtained were as follows:

- 1) The low speed rotation of the arc in the initial stage of heating is due to the lower driving force resulted from the lower flux density at the inner side of the pipe edge surface, and the high speed rotation of the arc in the final stage is due to the higher driving force resulted from the higher flux density at outer side.
- 2) The rotation of the arc on the inner side of the pipe edge surface in the initial stage is caused by the distribution of the magnetic field due to the heating current, according to the geometrical shape, the arrangement and the magnetic property of the pipe and other components for welding.
- 3) The reason for the moving of the rotating position of the arc from the inner side of the pipe edge surface to its outer side with the increase of heating time is the variation of the magnetic field due to the heating current, which is caused by the magnetic transformation due to temperature rising near the pipe edge.

Key Words: MIAB welding, Arc velocity, Rotating position, Magnetic blow, Magnetic transformation

1. はじめに

本研究は、パイプ、特に鋼管の磁気駆動アーク溶接におけるアークの回転中に起こる二、三の現象について、その原因を明らかにし、磁気駆動アーク溶接継手の溶接品質の改善を計るための基礎知識を得ることを目的としたものである。

かなり以前から、鋼管でパイプの肉厚が大きい場合、アークは最初パイプの内側を回転し、その後通電時間が増加すると外側に移動して回転することがわかっている^{1,2)}。さらに、われわれの研究室でこれまでにを行った実験から、鋼管の肉厚が小さい場合(その実験では1.4 mm以下)はアークは通電のごく初期から高速で回転するが、肉厚が大きい場合(1.8 mm以上)には最初アークはパイプの内側を低速で回転し、その後パイプの外側に移動してから高速で回転することが観察されている(Figs. 5, 6 参照)。アークが通電初期に、低速で回転することはアセット前の溶接部の温度分布の不均一の原因となり、ひいては溶接品質の低下につながると考えられる。

これまで磁気駆動アーク溶接について数多くの研究が

行われているが、上記の現象についてその原因の明確な説明はなされていないようである。ただ、安藤、西川ら³⁾は、アークが最初パイプの内側を回転する原因の第一はパイプ内面の酸化物の存在によるものとしているが、本研究の実験結果から見るとこの結論には疑問がある。

本研究は、鋼管で肉厚が大きい場合、なぜアークは最初パイプの内側を低速で回転し、その後通電時間の増加とともに外側に移動するのか、またそこで高速で回転するのかを実験的に明らかにしたものである。これらの現象の原因が明らかになると、本溶接法の改良につながる有用な知識が得られることが期待できる。

2. 実験方法

この研究のために特別に製作された磁気駆動アーク溶接機の外観を Fig. 1 に示す。アーク駆動用励磁コイルは巻数960のものを2個使用した(Fig. 2 参照)。被溶接パイプ材として、主として一般構造用炭素鋼鋼管(STK 41: JIS G 3444)を用い、一部比較のためにアルミニウム合金継目無管(A 1050: JIS H 4080)、鋼合金継目無管(C 1220: JIS H 3300)を用いた。パイプの寸法は外径60 mm、肉厚(t) 3.0 mmのものを標準としたが、比較のために肉厚が0.6, 1.0, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6 mmのものも用いた。また、特別の研究目的のため、鋼管端面に上記の銅合金のリングをろう付けしたものもある。使用した被溶接材の化学成分を Tables 1, 2, 3 に示す。

*原稿受付 平成元年5月9日 昭和62年度秋季全国大会で発表

**正員 大阪工業大学 Member, Osaka Institute of Technology

***学生員 現村田機械(株) Member, Murata Machinery Ltd.

****学生員 現三菱電機(株) Member, Mitsubishi Electric Corp.

Fig. 1 MIAB welding machine used

Table 1 Chemical composition of STK41 (JIS G 3444) (%)

Material	C	Si	Mn	P	S
STK 41	0.093	<0.010	0.478	0.0138	0.0082

Table 2 Chemical composition of A1050 (JIS H 4080) (%)

Material	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
A 1050	0.05	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	<0.03	>99.50

Table 3 Chemical composition of C1220 (JIS H 3300) (%)

Material	P	Cu
C 1220	0.015-0.040	>99.9

Fig. 2 Measuring method of arc velocity

アークの回転挙動を調べるために以下の量を測定した。(1)アークの回転速度は Fig. 2 に示す位置にフォトトランジスタを配置し、そのフォトトランジスタからの信号を電磁オシロスコープに記録して求めた。(2)パイプの肉厚方向におけるアークの回転位置は2つの方法で調べた。1つは Fig. 3 に示すように電圧検出用プローブ(直径 1.0 mm のタングステン棒)をパイプの内側と外側とに配置し、各プローブとパイプ間の電圧の差 ($E_o - E_i$) からアークの位置を推測することである。すなわち、アークがパイプ端面の外側に位置するときは外側の探針電圧の方が、内側に位置するときは内側の探針電圧の方が高くなることを利用したものである。もう1つは通電を途中で中止し、そのときのパイプ端面の上のアークの痕跡からアークの回転位置を確認することである。(3)アークの回転駆動力に関係する半径方向の磁界の磁束密度 (B_r) は直径 5 mm のアキシアル・プローブをもつガウスメータによって行った (Fig. 4 参照)。測定は Fig. 4

Fig. 3 Observation method of the rotating position of the arc on the pipe edge surface

Fig. 4 Measuring method of flux density in the arc-driving magnetic field

Fig. 5 Measuring method of temperature

に示すような方法で行ったが、測定器具の都合でパイプ間のギャップは 6.0 mm と実際のアークの回転実験の場合より大きくなっている。

その他、溶接中のパイプ端面付近の温度を測定したが、Fig. 5 に示すようにパイプの外周面上の3ヶ所、内周面上の3ヶ所においてアルメル・クロメル熱電対を用いて行った。

なお本研究では、アークのスタートはすべてスチールワークによって行った。この方法によるとアークのスタート位置を特定させることができ、またその位置を任意に変えることができるためである。

3. 実験結果および考察

3.1 アークの回転速度の変化

鋼管の肉厚によってアークの回転速度 (V_a) が通電時間 (t_a) とともにどのように変わるかを調べた結果を Fig. 6 に、そしてそのときの肉厚方向のアークの回転位

置を調べるために測定した E_o と E_i の差 (2.節参照) を Fig. 7 に示す。これらの図中、 I_w は溶接電流、 I_c は励磁電流、 L_g はアークギャップである。Fig. 6 から、パイプの肉厚が 1.4 mm 以下では通電の初期からアークは高速で回転するが、肉厚が 1.8 mm 以上になると通電初期にアークの低速回転期間があり、その後アークは加速され (肉厚によってその時期は変わる)、それ以降は高速で回転することがわかる。また、Fig. 7 から、肉厚が 1.8 mm 以上の場合、通電の初期ではアークはパイプ端面の内側を回転し、その後外側へ移動することがわかる。さらに、Figs. 6, 7 から、パイプの肉厚が大きい場合にアークの回転速度が低速から高速側に急に立上る時期と、 E_o-E_i の値が急に変わる時期とはほぼ一致しており、両者の間には強い相関関係があることが予測される。

そこで、アークの回転速度と回転位置との関係を明らかにするため、いろいろの肉厚のパイプについて、励磁電流のみを流した状態でパイプ端面付近でのアークの回転駆動力に関係する半径方向の磁界の磁束密度 (B_r) の分布を調べてみた。その結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 の測定結果から、パイプの内側は外側に比べて磁束密度は肉厚に関係なく低くなっており、その差は肉厚が大きいものほど大きくなっていることがわかる。そしてこの結果は肉厚にはほとんど関係していない。

以上の結果から、肉厚が大きい場合、アークが通電初期において低速回転するのはアークが磁束密度の低いパイプの内側を回転するためで、その後アークが高速回転するのはアークが何らかの原因でパイプ端面の外側へ移動し、磁束密度の高いパイプの外側を回転するためであ

Fig. 6 Variation of arc velocity with time for various wall thicknesses

Fig. 7 Variation of the rotating position of the arc with time for various wall thicknesses

ると考えられる。

一方、肉厚が小さい場合にはアークは通電初期から高速回転するが、Fig. 8 の結果は肉厚が小さい場合にはパイプ内外の磁束密度の差は小さく、またアーク柱がパイプの肉厚に比べて相対的に大きいため、アーク柱が磁束密度の高いパイプの外側を含む肉厚全体をカバーするためと考えられる。

3.2 端面における通電初期のアークの回転位置

3.1項の結果から、鋼管の肉厚が大きい場合、アークの回転速度はアークの回転位置に関係することがわかった。そこで、本項ではアークがなぜ最初パイプの内側を回転するのか、そしてその後外側へ移動するのか、その原因を実験的に調べてみた。

まず、その原因がアークのスタート位置に関係しているのではないかと考え、肉厚 8.3 mm の鋼管を使ってアークのスタートをパイプ端面の外側で行い、1.5 秒通電した後のアークの軌跡を調べてみた。Fig. 9 はその結果である。アークは通電直後、パイプの外側から直ちにパイプの内側へ移動して回転しており、アークが通電初期パイプの内側を回転するのはアークのスタート位置とは直接関係がないことがわかった。

Fig. 8 Distribution of flux density in the arc-driving magnetic field on the welding gap for various wall thicknesses

Fig. 9 Traces of the molten zone due to the arc on the edge surface of the steel pipe in the initial stage of heating with the arc-driving magnetic field (Arc starts at the outer side) $I_w = 300A$, $I_c = 2.0A$, $L_g = 2.0$ mm, $t_a = 1.5s$

次に、その原因が励磁コイルの磁界によるものではないかと考え、励磁コイルの電流を 0 にしてアークをパイプ端面の外側からスタートした場合と内側からスタートさせた場合について、アークの軌跡を調べてみた。Fig. 10 はパイプ端面の外側からアークをスタートさせた場合の結果、Fig. 11 は内側からスタートさせた場合の結果である。外側からスタートさせた場合はアークは直ちに内側に移動し、内側からスタートさせた場合はそのままの位置を保っており、アークが鋼管端面の内側を回転するのは励磁コイルの磁界の影響によるものではないことがわかった。

さらに、その原因が被溶接材の材質によるものではないかと考え、被溶接材を非磁性体であるアルミニウム合金と銅合金とし、励磁コイルの電流を 0 にした場合について、アークの軌跡を観察してみた。Fig. 12 はパイプ端面の外側からアークをスタートさせた場合の結果、Fig. 13 は内側からスタートさせた場合の結果である。これらの結果から、非磁性体のパイプの場合には鋼管の場合とは逆に、アークは外側からスタートさせた場合はそのままの位置に、内側からスタートさせた場合には直ちに外側に移動していることがわかる。

以上の結果から、われわれは、アークが通電初期パイプの内側を回転するのは被溶接材のパイプおよびその他の溶接機部品などの幾何学的な形状・配置、磁気的性質によるアークの磁気吹き現象⁹⁾によるものではないかと考えた。すなわち、鋼管の場合のアークの自己磁界分布

Fig. 10 Traces of the molten zone due to the arc on the edge surface of the steel pipe in the initial stage of heating without the arc-driving magnetic field (Arc starts at the outer side) $I_w=300\text{ A}$, $I_c=0\text{ A}$, $L_g=2.0\text{ mm}$, $t_a=0.3\text{ s}$

Fig. 11 Traces of the molten zone due to the arc on the edge surface of the steel pipe in the initial stage of heating with the arc-driving magnetic field (Arc starts at the inner side) $I_w=300\text{ A}$, $I_c=0\text{ A}$, $L_g=2.0\text{ mm}$, $t_a=0.3\text{ s}$

は、Fig. 14 のモデル図のようにアークの内側に作られる磁力線が鋼管に吸収されるためパイプの内側の磁束密度が低くなり、内外の磁束密度の差によって生じる磁気吹き現象によってアークはパイプの内側方向への力を受けると考えた。

このことを確かめるために、Fig. 15 のような磁気駆動アーク溶接部をシミュレートしたモデルを作り、鋼、アルミニウム合金、銅合金のパイプについて、アークの自己磁界によって生じるパイプの外側と内側との磁束密度の差を調べてみた。このモデルは実際の磁気駆動アーク溶接において、アークを直径 2 mm の銅の導電体に置き換えたものである。磁束密度の測定はガウス・メータのプロブを Fig. 15 のように配置し、導電体がパイプ端面の外側にある場合 (Position 0) と内側にある場合 (Position 1) について実験を行った。測定結果を Table 4 に示す。この表から、鋼管の場合にはわれわれの予測通り導電体の位置に関係なく、パイプの外側の方

Fig. 12 Traces of the molten zone due to the arc in the case of non-magnetic materials in the initial stage without the arc-driving magnetic field (Arc starts at the outer side) $I_w=200\text{ A}$, $I_c=0\text{ A}$, $L_g=2.0\text{ mm}$, $t_a=0.1\text{ s}$

Fig. 13 Traces of the molten zone due to the arc in the case of non-magnetic materials in the initial stage without the arc-driving magnetic field (Arc starts at the inner side) $I_w=200\text{ A}$, $I_c=0\text{ A}$, $L_g=2.0\text{ mm}$, $t_a=0.1\text{ s}$

Fig. 14 Imaginative picture of the magnetic arc blow in the case of the steel pipe

Fig. 15 Model produced to simulate the MIAB welding

Table 4 Measuring results of the magnetic field due to the heating current for pipes made of various materials

Material	Position of Conductor	Magnetic flux density ($\times 10^{-3} \text{T}$)		
		Bo	Bi	Bo-Bi
Mild steel (STK 41)	Position O	14.0	10.2	3.8 ± 0.4
	Position I	16.2	10.0	6.2 ± 0.2
Aluminium alloy (A 1050)	Position O	9.4	14.5	-5.1 ± 0.4
	Position I	9.8	13.4	-3.6 ± 0.5
Copper alloy (C 1220)	Position O	9.3	15.0	-5.7 ± 0.2
	Position I	9.8	13.8	-4.0 ± 0.4

Test current: $I_w = 300 \text{A}$

Bo: Magnetic flux density at outside of pipe
Bi: Magnetic flux density at inside of pipe

が磁束密度が高くなっており、通電初期、アークがパイプ端面の内側を回転するのは Fig. 14 のモデル図に示した理由によるものであることがわかった。

一方、被溶接材がアルミニウム合金管および銅合金管の場合には、鋼管の場合とは逆にパイプ端面の内側の磁束密度の方が外側のそれよりも高くなっている。したがって、このような磁界分布であれば当然鋼管の場合とは逆方向の磁気吹き現象が起きる。このことは Figs. 12, 13 の結果から明らかで、Fig. 14 のモデルの裏付けにもなっている。

なお、このような磁界分布の定性的傾向にパイプ以外の部分の形状、配置が影響する可能性がある当初考えたが、実験により私どもの装置ではほとんど影響がないことを確かめている。

3.3 パイプ端面の内側から外側へのアークの移動

先に述べたように、鋼管で肉厚が大きい場合、通電時間が増加するとアークはパイプ端面の内側から外側へ移動して回転する。われわれはこの原因がパイプ端面の温度上昇による鋼管の磁気変態によるものではないかと考えた。Fig. 16 は純鉄の自発磁化の温度に対する変化⁵⁾を示したものである。すなわち、この図に示すように、鋼管端面は温度上昇とともに磁化率が減少し、磁気変態点 (770°C) で強磁性が消失するため、鋼管の場合でもパイプ端面の温度が上昇すると非磁性体であるアルミニウム合金、銅合金の場合と同様の磁界に対する環境になる。その結果、アークの自己磁界分布においてパイプの外側の磁束密度よりも内側の磁束密度の方が高くなり、それによる磁気吹き現象によってアークがパイプの外側に移

Fig. 16 Variation of spontaneous magnetization with temperature for iron⁵⁾

Fig. 17 Measuring results of the magnetic field due to the heating current for width of the copper in the magnetic transformation model

動するものと考えた。

このことを確かめるため、Fig. 17 の図中に示すようなモデルを使って、鋼管端面が温度上昇し、磁気変態した場合のアークの自己磁界によって生じるパイプの外側と内側との磁束密度の差を調べてみた。このモデルは Fig. 15 と同様、アークを直径 2 mm の銅の導電体に置き換え、さらに鋼管端面の磁気変態点を越えた部分に相当する部分を非磁性体である銅のリングに置き換えたものである。このとき、アークは最初パイプ端面の内側を回転するので、実際は外側より内側の方が温度上昇が大きいと考えられるため、アークが外側へ移動する直前の磁気変態部分を近似して、銅リングと鋼管との接合部には 45° の角度を持たせている。なお、実際の場合、温度上昇部が接合面に対してはほぼ 45° の角度になることは接合部断面の腐食試験によって確かめている。銅リングと鋼管とはろう付けによって接合した。測定は Fig. 15 の場合と同じ方法で行った。

Fig. 17 は測定結果で、銅リングの幅を変えた場合のパイプの外側と内側とのアークの自己磁界の磁束密度の差 (Bo-Bi) を示す。導体はパイプ端面の内側 (Position I) と外側 (Position O) とに配置して実験を行ったが、

実際の場合には通電初期のアークの位置は Position I の位置に相当する。銅リングの幅が小さい場合は外側の方が磁束密度が高いが、銅リングの幅が増加するにつれ内外の磁束密度の差が小さくなり、Position I の場合は銅リングの幅が約 3 mm 以上 (Position 0 の場合は 1.5 mm 以上) になると内側の磁束密度の方が高くなっている。

なお、念のため銅リングと鋼管との接合部に角度のない円筒状の銅リングについても実験を行ったが、内外の磁束密度の差が逆転する銅リングの幅の値はかなり変わっていた。

次に、実際の磁気駆動アーク溶接の場合について、アークの回転位置が鋼管端面の内側から外側へ移動する時期と溶接電流との関係を調べてみた。これはパイプ端面付近の温度分布とアークの回転位置の変わる時期との関係を調べるとともに、上記の推論の裏付けを行うためである。Fig. 18 はその結果で、溶接電流が 250, 350, 450 A の場合、アークがパイプ端面の内側から外側へ移動し始める時期はそれぞれ通電開始後約 5.8, 3.2, 2.5 秒後で、溶接電流が大きくなるとその時期は早くなっており、アークの移動する時期とパイプ端面の温度とは密接な関係があることがわかる。

Fig. 19 は Fig. 18 から求めたアークの回転位置がパイプ端面の内側から外側へ移動し始める時期 (それぞれ

Fig. 18 Variation of the rotating position of the arc with time for various heating currents

Fig. 19 Measuring results of temperatures near the welded surface

Ta=5.8, 3.2, 2.5秒)でのパイプ端面付近の温度の測定結果である。なお、Fig. 19において、パイプ内面側で端面からの距離が 1 mm の測定点ではいずれの場合も測定値がないが、これは測定時期以前に熱電対が溶融してしまったためである。Fig. 19の結果から、電流値が異なる場合でもアークの回転位置が移動し始める時期での溶接部の温度分布はよく似た値になっており、またその時期での溶接部の温度は内面側で少なくとも 3 mm 付近までは磁気変態点を越える温度に達していることがわかる。

以上の結果から、鋼管で肉厚が大きい場合、アークがパイプの内側から外側へ移動して回転するのは、溶接部端面付近の温度上昇によって引き起こされる鋼管の磁気変態によるもので、それによってアークの自己磁界の分布が変化するためであることがわかる。

なお、V. V. Syrovatka ら⁶⁾は、パイプ端面の内側から外側へのアークの移動の原因はパイプの軸方向の磁界(溶接電流の方向と同じ方向)による影響であるとしているが、軸方向の磁界はアークにはなんらの力も及ぼさないことからこの結論には疑問がある。

4. おわりに

本研究は、肉厚が大きい鋼管の磁気駆動アーク溶接において、なぜアークは最初パイプの内側を低速で回転し、その後通電時間の増加とともに外側へ移動するのか、またなぜそこで高速で回転するのか、その原因を実験的に明らかにしたものである。本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

1) 鋼管で肉厚が大きい場合、通電初期においてアークが低速回転するのは、アークがその時期、アークの回転の駆動力となる半径方向の磁界の磁束密度の低いパイプ端面の内側を回転するためである。

2) その原因は被溶接材およびその他の溶接機部品等の幾何学的形状・配置およびそれらの磁気的性質によって生じるアークの磁気吹き現象によるものである。すなわち、そのときにアークの自己磁界によってできるパイプ端面の内外の磁束密度の差によるもので、鋼管の場合には外側の磁束密度の方が内側のそれよりも大きくなるためである (Fig. 14 参照)。

3) その後、通電時間が増加するとアークは高速回転するのは、その時期、アークが磁束密度の高いパイプの外側を回転するためである。

4) 通電時間が増加するとアークがパイプの内側から外側へ移動して回転するのは、溶接部端面付近の温度上昇によって引き起こされるその部分の磁気変態によるものである。すなわち、3)項で述べたアークの自己磁界の分布が溶接部端面付近の磁気変態によって変わり、内外の磁束密度の分布が逆転し、2)項とは逆の磁気吹き現象が起きるためである。

5) 被溶接材が非磁性体であるアルミニウム合金管、銅合金管の場合、アークの自己磁界によってできるパイプ端面の内外の磁束密度の差は鋼管の場合とは逆になり、常に内側の方が大きくなる。これは被溶接材が非磁性体であるため、鋼管の場合の温度上昇した場合と同じ磁界環境になり、アークは通電初期からパイプ端面の外側を回転する。このことは2)項の結論の裏付けにもなっている。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、貴重なご討論を賜った大阪大学工学部生産加工工学科黄地尚義助教授に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) D. A. EDSON : Magnetically Impelled Arc Butt Welding of Thick Wall Tubes, IIW Doc. No. III-726-82 (1982)
- 2) 種子, 荒木田, 高木 : 磁気駆動アーク溶接におけるアーク回転速度の解析, 本論文集, 4-3 (1986) 570-576
- 3) 安藤, 西川, 五十嵐 : パイプの磁気駆動アーク溶接におけるアークの挙動, 本論文集, 40-6 (1971) 573-578
- 4) 例えば, 安藤, 長谷川 : 溶接アーク現象, 産業図書 (1962) 154-156
- 5) A. H. Morrish : The Physical Principles of Magnetism, John Wiley, (1965) 680
- 6) V. V. Syrovatka and P. V. Kuznetsov : Forge Weldingtube to Sheets using a Rotating Arc, Automatic Welding, No. 3 (1983) 44-46