磁気駆動アーク溶接におけるアーク回転速度の解析*

種子 彰**, 荒木田 史穂**, 高木 健治**

Analysis of Arc Rotation Velocity in Magnetically Impelled Arc Butt Welding*

by Akira Taneko**, Fumiho Arakida** and Kenji Takagi**

The arc rotation velocity in the magnetically impelled arc butt welding of a steel pipe was measured using the probe method and a high speed camera and the condition of arc plasma inside the pipe was photographed. The following is the conclusion thus obtained.

- (1) The arc rotation velocity and arc angle were measured by the probe at each position on the pipe circumference immediately after an arc is ignited and the relationship between these and the method of supplying power was analyzed. With the steel pipe (60.5 mm in OD, 3.8 mm in wall thickness) used for the experiment, it was necessary to supply power at least two or more points to prevent excessive local fusion or arc extinction.
- (2) The arc rotation velocity was measured using a high speed camera, and the arc rotation velocity was classified into three regions of the low velocity region, high velocity region and speed fluctuation region.
- (3) It was surmised that both the time t_h and t_f that divide the above three regions are physical property values, and the time t_h is the time required for the area 1.0 mm from the pipe end exceeds the Curie temperature and the time t_f is the time required for the entire surface of the pipe end to reach the melting temperature.
- (4) Changes in the arc rotation velocity in the high velocity region and the velocity fluctuation region were analyzed by using the equation of motion to surmise the virtual mass, saturation magnetic flux density, and drive force.

Key Words: MIAB welding, Arc rotation velocity, Probe method, High speed camera, Power supply method

1. 緒 言

磁気駆動アーク突合せ溶接法の原理は次の通りである。管の外周円周上に巻かれた励磁コイルにより磁界が形成され、所定の間隔をあけて向かい合った管の間にアークを点弧すると、アークはフレミングの左手の法則に従う力を受け、円周上を回転し始める。このアークがある時間回転すると、両管端はアークのエネルギーによって加熱溶融し、適当な溶融状態のときに両管端を突合せると接合が行われる。

本研究は、鋼管の磁気駆動アーク突合せ溶接のアーク回転速度を解析したものである。

アーク点弧直後における管周各位置のアーク回転速度と溶接電流の管体への給電方法との関係を解析し、アーク切れや局部溶融過大の原因を解明した。

ついで、アーク回転速度の経時変化を解析し、3つの領域に分け、各領域の移行時刻における管端の温度を推定した。また、アーク回転速度が低速から高速へ移行する高速回転領域について、運動方程式で解析し、仮想質量、飽和磁束密度および駆動力を推定した。

2. 実験方法

2.1 探針法による測定方法

鋼管の磁気駆動アーク突合せ溶接の初期における管周位置別のアーク回転速度と溶接電流の鋼管への給電方法との関係を調べる実験を行った。アーク・プラズマの吹き出し方向も同時に測定した。

Fig. 1 に、アーク回転速度およびアーク・プラズマ吹き出し方向測定の原理図を示す。管内面に銅製の探針を設置し、鋼管と探針間の電圧（以下探針電圧という）を測定すると、アークが探針の設置位置を通過するたびに探針電圧のオシログラムは、山形の波形を示す。磁気駆動アーク突合せ溶接の初期には、アーク・プラズマは、Fig. 2 に示すように鋼管の中心方向に向かって吹き出ししており、その先端が通過する位置の探針も微弱ながら探針電圧のオシログラムは変動を示す。アーク・プラズマは、Fig. 1 b に示すように回転前方に傾いている。同図において、アークがA点（管周時計目盛表示12時の位置）を通過するときアーク・プラズマの先端はC点にあり、アーク・プラズマの先端がD点（管周時計目盛表示6時の位置）を通過するとき、アークはB点に移動している。鋼管の中心線ADとアーク・プラズマACのなす角度を以下アーク角度 α という。

Fig. 3 に探針法によるアーク回転速度およびアーク角度 α の測定構成図を示す。探針を鋼管内面の管周時計目盛表示12時、3時、6時および9時（アークの回転と同じ方向）の位置に絶縁物で保持し、それぞれの探針電圧をフォトコーダーで測定記録した。Fig. 4 に探針電圧のオシログラムの一例を示す。 t_h はアークが管周を1/4回転する時間であり、同図では12時の位置と3時の位置の探針

* 原稿受付 昭和60年10月15日 昭和60年7月 アーク物理研究委員会て発表（第80回）

** 正 員 日本鋼管工事株式会社 Member, Nippon Kokan Koji K. K.

Fig. 1 Diagram showing the principle of measurement of arc rotation velocity and arc plasma blowing direction

Fig. 2 Arc plasma inside the pipe (photographed time a: 0.15 s, shutter speed: 1/1,000 s)

Fig. 3 Configuration for measurement of arc rotation velocity and arc angle by the probe method

Fig. 4 Oscillogram of probe voltage (an example)

電圧が、それぞれ、上昇を開始する時刻の間の時間として示してある。 t_m は、アークがある位置の探針箇所を通過する時刻とアーク・プラズマの先端が管の中心線の反対側の探針箇所を通過する時刻との間の時間であり、同図では、12時の位置の探針電圧が上昇を開始する時刻と、その時刻よりわずかに遅れて発生する6時の位置の探針電圧の微小な変動の開始時刻との間の時間として示してある。

アーク回転速度 v およびアーク角度 α は、それぞれ、 t_k および t_m 間では一定と仮定すると、両者は次式によって求められる。

$$\text{アーク回転速度 } v = (\pi \cdot r) / (2 \cdot t_k) \quad \cdots (1)$$

$$\text{アーク角度 } \alpha = (45 \cdot t_m) / t_k \quad \cdots (2)$$

実際に使用した鋼管は、配管用炭素鋼鋼管 SGP 50 (外径 60.5 mm, 管厚 3.8 mm) である。溶接電流は 460~500 A, 磁束密度は、 $8.0 \times 10^{-2} \text{ T}$, 管端面間の距離は 2.5 mm を採用した。磁束密度は、鋼管外面における管端面間隔の法線方向成分の測定値である。

溶接電流の鋼管への給電方法は、管時計目盛表示 1.5 時および 7.5 時に、それぞれ、1 箇所給電とした場合および 1.5 時と 7.5 時の 2 箇所給電とした場合の 3 種類とした。いずれも管端からの軸方向の距離は 40 mm である。

2.2 高速度カメラによる測定方法

経時的なアーク回転速度の解析を行うために、磁気駆動アーク突合せ溶接を鋼管の法線方向から高速度カメラで撮影し、アークの一回転の時間と管周長より計算で求めた。高速度カメラは、1,000 コマ/秒で撮影した。撮影したフィルムについて、ビューラーによるアーク一回転毎にマーク孔をあけ、1/1,000 秒のタイミングマークより時間を測定した。同時に、鋼管内面のアーク・プラズマの状態を写真撮影した。シャッタースピードは 1/1,000 秒とした。

実験に使用した鋼管および管端面間距離は、前項と同一とし、溶接電流として 450 A, 500 A および 550 A の 3 水準と、磁束密度に $6.0 \times 10^{-2} \text{ T}$, $8.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ および $10.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ の 3 水準を組合せて、9 種類の実験を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 給電方法とアーク回転速度およびアーク角度の関係

3 種類の給電方法について、アーク回転速度およびアーク角度の測定結果を、Fig. 5~Fig. 7 に示す。

Fig. 5 は、管時計目盛表示 1.5 時の位置で 1 箇所給電の場合である。図において管周の位置を示す時

Fig. 5 Relationship between arc rotation velocity, arc angle and power supply method (power is supplied at one location at the CW position of 1.5 hours)

Fig. 6 Relationship between arc rotation velocity, arc angle and power supply method (power is supplied at one location at the CW position of 7.5 hours)

刻のアーク回転速度およびアーク角度は、それぞれ、その位置から $\frac{1}{4}$ 周および角度 α だけ移動する間の平均値として示されている。例えば12時のアーク回転速度は、12時から3時までの平均アーク回転速度であり、同じく12時のアーク角度は12時から角度 α だけ移動する間の平均アーク角度である。

アーク回転速度およびアーク角度ともに、3時の位置の値が、際立って大きくなっている。

Fig. 6 は、管周時計目盛表示 7.5 時の位置で 1 箇所給電の場合である。アーク回転速度は、9 時の位置の値が際立って大きくなっている。アーク角度は、Fig. 5 と比較してアーク角度の変化巾が縮小しており、1 回転の間で最大を示す位置も 6 時と 9 時に分かれている。

Fig. 7 は、管周時計目盛表示 1.5 時および 7.5 時の位置

Fig. 7 Relationship between arc rotation velocity, arc angle and power supply method (power is supplied at two locations at the CW position of 1.5 hours and 7.5 hours)

で 2 箇所給電の場合である。アーク回転速度およびアーク角度ともに、 $\frac{1}{4}$ 回転の間の管周各位置の値が平均化されている。

1 箇所給電の場合、給電点から遠ざかる位置でアーク回転速度が最大となり、アーク角度も多くの場合その位置で最大となっている。これは給電点からアークに流れる溶接電流によって形成される磁界の影響であると考えられる。

給電点を管端に近い位置に設置（装置を小型化するため）しているため、給電点からアークへの溶接電流の管周方向の流れが十分に大きく、アークの回転がその管周方向の電流の流れによって生ずる磁界の影響を受ける。給電点からアークへ流れる電流の大きさは、給電点とアークとの距離に反比例する。すなわち、アークが給電点に近づく場合には、給電点に近づくにつれて、前方からの電流が増大し、遠ざかる場合には後方からの電流が減少する。その結果、アークは給電点の直前で最大の減速力を、また、給電点の直後で最大の加速力を受けるものと推察される¹⁾。したがって、給電点の数をふやせば給電点とアーク間の距離が平均化され、アーク回転速度およびアーク角度ともに平均化されることが考えられる。実験の結果、1 箇所給電の場合、給電点の直前に局部溶融過大の発生が観察された。また、2 箇所給電の場合には、アーク切れは発生しなかった。実験に使用した鋼管（外径 60.5 mm、管厚 3.8 mm）の場合、局部溶融過大やアーク切れ現象をなくすためには、少なくとも 2 箇所以上の給電が必要であることが確認された。

3.2 アーク回転速度の変化における 3 つの領域

Fig. 8 に、アーク回転速度の変化の一例を示す。回転速度は管端一周の平均速度である。同図は、管端面間距離 2.5 mm、溶接電流 500 A、磁束密度 8.0×10^{-2} T の場合である。図に見られるように、アーク回転速度の経時変化は、低速回転領域 I、高速回転領域 II および回転速度変動領域 III の 3 つの領域に分けられる。低速回転領域 I では、アーク回転速度は 0~10 m/s の範囲で徐々に増加している。高速回転領域 II では、曲線を描いて増加

Fig. 8 Change in arc rotation velocity with time (an example)

Fig. 9 Arc plasma inside the pipe (photographed time b: 0.53 s, shutter speed: 1/1,000 s)

しており、アーク回転速度の変動はそれほど顕著ではない。回転速度変動領域Ⅲでは、アーク回転速度は激しく変動している。

高速度カメラの観察においても、低速回転領域Ⅰおよび高速回転領域Ⅱにおいては、アークは管端面に沿って規則正しく回転するのに対して、回転速度変動領域Ⅲにおいては、アークは管端面を蛇行し、減速と加速を繰り返す、極端な場合には、1箇所停滞し、そこから急に飛び出し、更に両管端の溶融鋼が短絡してアークが消滅し、短絡した溶融鋼がゆるやかに回転し、短絡が切れて再びアークが点弧し回転を始めるなど不規則な現象が見られる。

図の時刻 *b* から時刻 *g* までの管内面の状態を Fig. 9 ~ Fig. 14 に示す。前掲 Fig. 2 は、時刻 *a* の管内面の状態を撮影したものである。

低速回転領域Ⅰの時刻 *a*, *b* および *c* では、アーク・プラズマが管の中心方向に向かって吹き出しており、時刻 *a* および *b* においては、回転前方に傾いているのに対して、時刻 *c* では管の中心に向かってい。高速回転領域Ⅱの初期にあたる時刻 *d* では、アーク・プラズマの管内面への吹き出しはなくなり、管内のヒュームがアークに引きずられている感じである。高速回転領域の中期にあたる時刻 *e* においては、管内面のヒュームは減少し、アークの回転方向に回っているように見られる。回転速度変動領域Ⅲの初期にあたる時刻 *f* においては、管内面のヒュームは殆んどなくなり、スパッターの飛散が見ら

Fig. 10 Arc plasma inside the pipe (photographed time c: 1.78 s, shutter speed: 1/1,000 s)

Fig. 11 Fume inside the pipe (photographed time d: 2.58 s, shutter speed: 1/1,000 s)

Fig. 12 Fume inside the pipe (photographed time e: 3.19 s, shutter speed: 1/1,000 s)

れるようになる。回転速度変動領域の中期にあたる時刻 *g* においては、激しいスパッターの飛散が観察される。

すなわち、低速回転領域Ⅰにおいては、アーク・プラズマは、管の中心線方向に強く吹き出しており、高速回転領域Ⅱへの移行とともに、アーク・プラズマの管内面への吹き出しは見られなくなる。このアーク・プラズマの管の中心方向への吹き出しの原因としてアークの自己磁場の影響が考えられ(電源と導線と鋼管とアークからなる閉回路が、鋼管の外周側に構成されている場合には、閉回路の鎖交磁束が増加するようにアークに鋼管内面側への力が働く²⁾)、低速回転領域Ⅰから高速回転領域Ⅱへの移行時間は、このアークの自己磁場の影響に変化

Fig. 13 Fume and spatter inside the pipe (photographed time f: 3.97 s, shutter speed: 1/1,000 s)

Fig. 14 Spatter inside the pipe (photographed time g: 4.62 s, shutter speed: 1/1,000 s)

が現われる時期であると推察される。

3.3 アーク回転速度の変化の3つの領域における移行時刻の考察

Fig. 15 は、溶接電流を 450 A と同一とし、磁束密度を 6.0×10^{-2} T, 8.0×10^{-2} T および 10.0×10^{-2} T と 3 水準に変化させた場合のアーク回転速度の変化を、アークが低速回転領域Ⅰから高速回転領域Ⅱに移行する時刻 t_h で重ねて図示したものである。

磁束密度の違う 3 本のアーク回転速度の変化曲線が、ほぼ一致している。時刻 t_h で重ねたために、アーク時間の原点 (図中△印で表示) は、磁束密度の水準によってずれている。図の横軸は、時刻 t_h を原点として表示した。図中 t_f は、高速回転領域Ⅱから回転速度変動領域Ⅲへの移行時刻を示す。

Fig. 16 および Fig. 17 は、溶接電流 500 A および 550

Fig. 15 Change in arc rotation velocity with time at a welding current of 450 amperes (velocities at magnetic flux densities of 6.0×10^{-2} T, 8.0×10^{-2} T and 10.0×10^{-2} T were overlapped by time t_h)

Fig. 16 Change in arc rotation velocity with time at a welding current of 500 amperes (velocities at magnetic flux densities of 6.0×10^{-2} T, 8.0×10^{-2} T and 10.0×10^{-2} T were overlapped by time t_h)

Fig. 17 Change in arc rotation velocity with time at a welding current of 550 amperes (velocities at magnetic flux densities of 6.0×10^{-2} T, 8.0×10^{-2} T and 10.0×10^{-2} T were overlapped by time t_h)

Fig. 18 Change in arc rotation velocity with time at a magnetic flux density of $6.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ (velocities at welding currents of 450 amp., 500 amp., and 550 amp. were overlapped at time t_h)

Aについて同様に処理したものである。

Fig. 18～Fig. 20 は、磁束密度 $6.0 \times 10^{-2} \text{ T}$, $8.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ および $10.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ に対して、それぞれ、溶接電流 450 A, 500 A および 550 A のアーク回転速度の変化を時刻 t_h で重ねて図示したものである。

Fig. 15～Fig. 20 から、アーク回転速度が低速から高速に変化し始める時刻 t_h は、溶接電流に反比例しているように見受けられ、時刻 t_h におけるアーク回転速度は、8～10 m/s とほぼ一致している。

Fig. 15～Fig. 17 は、アーク回転速度が大きく変動し始める時刻 t_f は溶接電流に反比例し、時刻 t_f におけるアーク回転速度は、50～55 m/s とほぼ一定していることを示している。

時刻 t_f 以後では、アーク回転速度の変動が発生しており、時間の経過とともに変動巾は増大している。

極端な場合には停滞(回転速度 0)を示している。

低速回転領域 I から高速回転領域 II に移行する時刻 t_h および高速回転領域 II から回転速度変動領域 III に移行する時刻 t_f では、アーク回転速度は、それぞれ、8～10 m/s および 50～55 m/s とほぼ一定しており、ある物性値を予想させる。

そこで、時刻 t_h および時刻 t_f における管端の温度を、熱伝導理論による計算式から求めると Table 1 が得られた³⁾。時刻 t_h においては、管外面の管端から 1.0 mm の位置の温度が溶接電流(加熱速度)の水準の違いにかかわらず、ほぼ一様であり、キューリー温度 760°C となる時刻であり、時刻 t_f においては、管外面の管端から 1.0 mm の温度が、ほぼ一様であり、融点 $1,440^\circ \text{C}$ となる時刻であると推定される(管端から 1.0 mm の温度の計算には、熱効率 $\eta = 0.72$ を、管端から 0.1 mm の温度の計算には、熱効率 $\eta = 0.85$ を採用した。前者は温度の実測値との対比から採用した値であり³⁾、後者については、時刻 t_f は管体がある物性値—溶融温度に達する時刻と推定して算出した値である。管端に極めて接近した位置の熱効率は、特に短時間加熱の場合、管端よりやや離れた位置の熱効率よりも若干高くても不自然ではないと判断した。また、管端が溶融温度に達し、溶

Fig. 19 Change in arc rotation velocity with time at magnetic flux density of $8.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ (velocities at welding currents of 450 amp., 500 amp., and 550 amp. were overlapped at time t_h)

Fig. 20 Change in arc rotation velocity with time at magnetic flux density of $10.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ (velocities at welding current of 450 amp., 500 amp., and 550 amp. were overlapped at time t_h)

Table 1 Temperature value of pipe end calculated by equation derived from thermal conductance theory

I_w (A)	t_h (s)	T_h (D=1.0) ($^\circ \text{C}$)	t_f (s)	T_f (D=0.1) ($^\circ \text{C}$)	T_f (D=0.1) ($^\circ \text{C}$)
450	2.54	790	4.11	1,259	1,486
500	2.23	808	3.38	1,266	1,495
550	1.92	808	2.82	1,270	1,499
$\eta = 0.72$			$\eta = 0.72$		$\eta = 0.85$

融鋼の薄膜で覆われる時刻以後、アークの回転速度が変動し始めることは V. D. Taran らの指摘とも良く一致する⁴⁾。

すなわち、時刻 t_h には、両管端面に非磁性部が形成され、磁性体部の高密度の鎖交磁束のアークへの影響が間接的となり、アークに働く鋼管内面への力が弱まる。そのため、アークが励磁コイルによる磁界内の位置で発生するようになり、アークの円周方向の回転速度が増大し始めると考えられる。

また、時刻 t_f には、管端内面側の溶融が管端外面に達し、それ以後管端面の溶融が全面的に進行すると考えられる。これは、適正圧接時刻が、時刻 t_f の直後であることを示唆している。

3.4 アーク回転速度の変化曲線の考察

Fig. 15 の高速回転領域Ⅱおよび回転速度変動領域Ⅲの回転速度の変化を図式的に描くと Fig. 21 が得られる。図において、 t_f-t_h 曲線の延長が横軸と交わる点を t_h' とし、 t_h' を時刻 0 として示してある。また、 t_h-t_f 曲線の延長は、終えんと仮定し終えん速度を V_∞ として示してある。すなわち、回転速度変動領域Ⅲの平均回転速度は、 $t=\infty$ において終えんと仮定した。

今、アークが仮想質量 m (kg) をもち、一定の駆動力 F (N) を受け、速度 v (m/s) に比例する抵抗 $-k \cdot v$ ($\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$) を受けると仮定し、法線方向には、釣合っていると考えると運動方程式は、つぎの如くなる。

$$F - k \cdot v = m \cdot dv/dt \quad \dots\dots(3)$$

初期条件を $t=0$ のとき $v=0$ と仮定し、終えん速度を v_∞ とすると(3)式の解はつぎの如くなる。

$$v = v_\infty(1 - e^{-\gamma t}) \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 $\gamma = k/m$ (5)

$$v_\infty = F/k \quad \dots\dots(6)$$

とする。

Fig. 21 において、 v_∞ を 58 m/s とすると $\gamma = 2/\text{s}$ で(4)式から計算で得られる曲線を実験で得られた曲線は良く一致する。

高速回転領域Ⅱにおいて、アークを消弧した時、Fig.

Fig. 21 Schematic view of Fig. 8

Fig. 22 Hollow metal piece with tails

22 に示す空洞の頭部が尾を引きずったような金属片が両管端面の間隙に付着していた。管端面より簡単に剝離し、管端面の溶融鋼とは独立に走行していたことを推定させた。そこで、この金属片は、アークと共に走行していた溶融鋼の凝固したものであると仮定し、その重量 $0.309 \times 10^{-3} \text{ kg}$ をアークの仮想質量と仮におくと、(5)式および(6)式から駆動力 F は、 $3.584 \times 10^{-2} \text{ N}$ となる。

一方、磁気駆動アーク突合せ溶接において、アークに働く駆動力として次式が与えられる。

$$F = B \cdot I_w \cdot L_g / 100 \quad \dots\dots(7)$$

ここで、

F : アークに働く駆動力 (N)

B : 磁束密度 (T)

I_w : 溶接電流 (A)

L_g : 管端面間距離 (cm)

である。

溶接電流 I_w : 450 A, 管端面間距離 L_g : 0.25 cm およびアークに働く駆動力 F : $3.584 \times 10^{-2} \text{ N}$ として(7)式より磁束密度 B の値を求めると、

$$B \approx 3.2 \times 10^{-2} \text{ T}$$

となる。

Fig. 21 において、磁束密度の水準が変わっても、終えん速度 v_∞ が変わっていないことから、磁束密度は既に飽和していると考えられ、 $3.2 \times 10^{-2} \text{ T}$ という値は、おおむね妥当な値と考えられる。

すなわち、アークの仮想質量として、アークと共に走行したと推定される溶融鋼の重量を採用しても、それほど不自然ではないと考えられるが、この点は、今後更に研究する必要がある。

4. 結 言

(1) 探針法によりアークの点弧直後における管周位置別のアーク回転速度とアーク角度を測定し、給電方法との関係を解析した。実験に使用した鋼管(外径 60.5 mm, 管厚 3.8 mm)の場合、局部溶接過大やアーク切れを防止するためには、少なくとも2箇所以上の給電が必要であることが確認された。

(2) アーク回転速度を高速カメラで実測し、アーク回転速度の変化を、低速回転領域、高速回転領域および回転速度変動領域の3つの領域に分類した。

(3) 前記の3つの領域を区切る時刻 t_h および t_f は、ともに管端の状態が変化する時刻であり、前者は、管端から 1.0 mm の範囲がキュリー温度を超える時刻であり、後者は、管端全面が溶融する時刻であると推定された。

(4) 高速回転領域および回転速度変動領域のアーク回転速度の変化を運動方程式で解析し、仮想質量、飽和磁束密度および駆動力を推定した。

参 考 文 献

- 1) 高木外 “パイプラインの磁気駆動アーク溶接第2報” 昭和52年溶接学会春季全国大会
- 2) 高木外 “アーク揺動式磁気駆動アーク溶接法の研究” 昭和58年溶接学会秋季全国大会
- 3) 高木外 “コンピュータによる磁気駆動アーク溶接のバリ形状シミュレーション” 溶接学会論文集 第4巻第3号 (1986) 577-581.
- 4) V.D. Taran et al.; “The Movement of Arcs in Magnetic Fields”, Automatic Welding No. 10, 1966, p. 10-41