No. 7

- 3) 小野, 寺本, 小幡: “狭間先 MAG 溶接における溶滴の平均保有熱量”, 溶接学会誌, Vol. 51 (1982), No. 4
- 4) 小野, 寺本, 松田: “狭間先 MAG 溶接における溶込み形状の観察”, 溶接学会論文集, Vol. 1 (1983), No. 1
- 5) 西口, 松嶋, 堀: “高圧アルゴン気中におけるアーク特性”, 溶接学

会誌, Vol. 46 (1977), No. 8

- 6) 安藤, 西口: “MIG 溶接における溶接ワイヤ端の形状についての論考”, 溶接学会誌, Vol. 36 (1967), No. 11
- 7) 例えば, 関口春次郎: “被覆棒置き $\text{CO}_2\text{-O}_2$ アーク溶接法 (略して NOW 法)”, 溶接学会誌, Vol. 39 (1970), No. 6

炭酸ガスアーク溶接用フラックス入りワイヤの溶滴移行現象*

菅 哲 男**, 小 林 実**

Droplet Transfer Phenomena in CO_2 Arc Welding by Flux-cored Wire*

by Tetsuo Suga** and Minoru Kobayashi**

The effects of welding parameters and wire compositions on the droplet transfer of CO_2 arc welding by flux-cored wire, have been examined by means of photograph by a high speed camera.

As the welding current and the argon content in CO_2 shielding gas are increased, the droplet transfer becomes more preferable; the average droplet diameter decreases and the transfer frequency increases.

The wire cross-sectional shape has almost no influence on the droplet transfer. Increase of flux percentage in wire is effective in the improvement of the droplet transfer.

As the increase of TiO_2 , Fe-Si and Al_2O_3 or the decrease of CaF_2 content in flux, the droplets become smaller and transfer more frequently. The effect of iron powder and Fe-Mn content is almost none. These variations of droplet transfer can be mainly explained by the repulsive force of slag vaporization in the droplet suspended at the tip of the wire.

1. 緒 言

炭酸ガスシールドアーク溶接用フラックス入りワイヤは, ①溶接能率が良好である, ②スパッタが小粒で少ない, ③ビード外觀が平滑で美しい, などの優れた性能を有している。一方, フラックス入りワイヤの作業性, 溶接性能上の諸特性を把握するためには, 溶滴移行現象に関する検討が必要である。しかし, CO_2 溶接用フラックス入りワイヤの溶滴移行現象に関する研究は少なく¹⁻³⁾, まだ未検討の領域が多いと思われる。そこで, 本報では CO_2 溶接用フラックス入りワイヤの溶滴移行現象に及ぼす溶接条件及びワイヤ組成の影響について, 高速度カメラを使用して調査し, その機構について考察した。

2. 実験方法

2.1 実験操作

*原稿受付 昭和59年1月9日 (昭和57年度春季全国大会及び第68回溶接アーク物理研究委員会にて発表)

**正 員 (株)神戸製鋼所溶接事業部 Member, Welding Division
Kobe Steel, Ltd.

溶滴移行現象は, 高速度カメラで撮影した。その撮影条件を Table 1 に示す。撮影法は, アークに対してカメ

Table 1 Photographic parameters of high-speed photographs

Parameters	Values
Camera	HIMAC-16HM (Hitachi)
Lamp	6KW Xe Lamp
Picture speed	2000 f.p.s.
Lens	f = 135mm (52mm ϕ)
Filter	ND8 + ND4 + R60 + L39
Iris	22
Film	7224 - 4XN430 (Kodak)
Method of photographing	

Table 2 Experimental wires

No.	Wire cross-sectional shape	Flux percentage in wire (%)	Flux compositions (%)						
			TiO ₂	Fe-Si	Fe-Mn	Iron powder	CaF ₂	Al ₂ O ₃	Others
1	Abutting cross-section	15	40	8	20	20	0	1	11
2	"	"	30	"	"	30	"	"	"
3	"	"	20	"	"	40	"	"	"
4	"	"	40	1	"	27	"	"	"
5	"	"	"	15	"	13	"	"	"
6	"	"	"	8	10	30	"	"	"
7	"	"	"	"	30	10	"	"	"
8	"	"	45	9	22.5	10	"	1.1	12.4
9	"	"	35	7	17.5	30	"	0.9	9.6
10	"	"	40	8	20	15	5	1	11
11	"	"	"	"	"	10	10	"	"
12	"	"	"	"	"	16	0	5	"
13	"	"	"	"	"	11	"	10	"
14	"	10	"	"	"	20	"	1	"
15	"	20	"	"	"	"	"	"	"
16	Single-folded cross-section	15	"	"	"	"	"	"	"

Fig. 1 Type of wire cross-sectional shape

ラと反対側から強力な Xe ランプで照射し、溶滴を影絵で撮影する方法を採用した。この際、アークは溶接トーチ固定の下向ビードオンプレート溶接を行うことにより発生させた。

供試ワイヤとしては、Table 2 に示すような 1.6 mm ϕ のチタニア系のもの (JIS Z3313 YFW24) を、16 種類作製し実験に供した。ワイヤ断面形状は、Fig. 1 に示すような Abutting 断面と Single-folded 断面を用い、フラックス率は 10、15、20% の 3 種類に変化させた。そして、フラックス成分としては、TiO₂、Fe-Si、Fe-Mn、鉄粉、CaF₂ 及び Al₂O₃ の 6 種類に着目し、着目成分を鉄粉置換によって 3 段階に増減させた (鉄粉の場合には、その変化に応じて他の成分を全体的に増減させた)。ここで、溶滴移行に及ぼす溶接条件の影響を検討する際には、Table 2 の No. 1 のワイヤを使用した。なお、母材としては 12 mm^t の SM41B を用いた。

溶接条件は、Table 3 に示すようなものを標準として、電流、電圧及びシールドガス組成を、それぞれ 200～350 A、30～34 V 及び 100/0～20/80 (CO₂/Ar) の範囲に変化させた。

又、溶接装置は、直流定電圧特性電源 (500 A) を用いた。なお、ワイヤ組成の影響を検討する場合には、

Table 3 Welding parameters (standard)

Parameters	Values
Welding current	300A
Arc voltage	32V
Welding speed	30 cm/min
CO ₂ flow rate	20 l/min
Tip-plate distance	17 mm
Torch angle	0° (Vertical)
Electrode polarity	Electrode positive

① Droplet Diameter	d (mm)
② Droplet-transfer Frequency	f (c/s)
③ Standard Deviation of Droplet-transfer Interval	σ (ms)

Fig. 2 Examination items about droplet-transfer characteristic

Table 3 の条件で一定とした。

2.2 溶滴移行現象の解析法

溶滴移行性の特性値としては、Fig. 2 に示すような①溶滴粒度 d (mm)、②溶滴移行回数 f (回/s)、③溶滴移行間隔の標準偏差 σ (ms) を取り上げた。それらの特性値は、高速度写真の撮影で得られたフィルムをモーシ

Fig. 3 Typical pattern of droplet transfer (1.6 ϕ , YFW24, 300A)

ョン・アナライザーにより解析して求めた。ここで、溶滴粒度は、溶滴がワイヤから離脱（開始）する直前の溶滴径であり、溶滴移行回数は毎秒当たりの溶滴の移行回数である。そして、溶滴移行間隔の標準偏差は、溶滴が離脱して後、次の溶滴離脱が起こるまでの時間の標準偏差である。溶滴移行性が良好であることは、スプレー移行領域に近いという意味で、溶滴粒度が小さく溶滴移行回数が多いこと、及び溶滴移行状態が安定しているという意味から溶滴移行間隔の標準偏差が小さいということに対応している^{*)}。

3. 実験結果及び考察

3.1 フラックス入りワイヤの溶滴移行形態

Fig. 3 に、本実験範囲内における代表的な溶滴移行状態の例を示す。このグラフに示す如く、アーク中にワイヤ先端部から伸びたフラックス柱が認められ、溶融金属

は外皮金属に集まり溶滴を形成している。この溶滴は、ワイヤ径と同程度の径になるとフラックス柱上部のワイヤ溶融部から分離し、短絡を生じることなく溶融池側へ移行している。なお、アークは外皮先端及び懸垂溶滴の下部から発生している。以上の如く、ここでの溶滴移行形態は、IIW 分類⁴⁾の中の Free flight 移行に属するものである。

ここで、興味あることは、溶滴は進行方向の外皮端から形成し始め、その後ビード側の外皮端に移動しそこで最大溶滴径となって溶融池の方へ落下する場合が多いことである。この現象の機構については未検討であるが、ソリッドワイヤによる CO₂ 溶接における「溶融塊の偏り現象」と類似しており、安藤ら⁵⁾が指摘しているような懸垂溶滴へのアーク力の作用方向の変化が一因と思われる。

3.2 溶滴移行性と溶接条件の関係

3.2.1 溶接電流の影響

溶滴移行性及び溶接電流の影響についての結果を Fig. 4 に示す。このグラフに示す如く、電流が増加すると、溶滴粒度の減少、溶滴移行回数の増加及び溶滴移行

*) 溶滴移行性の主要な特性値は、 d , f であり、 σ は補助の意味で追加した。故に、3 項の考察は d , f に着目して検討している。ただし、後述のデータが示すように d の減少及び f の増加によって σ は減少する傾向にあり、スプレー化の方向で溶滴移行は安定化されている。

Fig. 4 Relation between welding current and droplet transfer

Fig. 6 Relation between arc voltage and droplet transfer

Fig. 5 Pinching force acting on suspending droplet

間隔の標準偏差（以下 σ 値とする）の減少が認められ、溶滴移行性は良好化している。この現象は、Alov⁶⁾、Greene⁷⁾ が提唱しているピンチ力と関係があると考えられる。すなわち、Greene らは、ソリッドワイヤの場合を対象として、ワイヤ端の懸垂溶滴に働く下向の力（離脱力） F は、溶滴の上端面（溶滴がワイヤ表面と接している面）の寸法 R と下端面（電流がアーク柱へ流出する有効面積）の寸法 R' 、及び電流 I とに関係があり、それらの間には次の関係式が成り立つとしている（Fig. 5 (a) 参照）。

$$F = I^2 \log(R'/R) \quad \dots\dots\dots (1)$$

この考え方は、フラックス入りワイヤの場合にも適用でき、上述の R 、 R' は Fig. 5 (b) の如く対応するものと考えられる。

一方、高速度写真を観察すると、電流の増加と共に溶滴上のアークの足の領域がはい上がる（Fig. 5 (b) の(1)→(2)）傾向にあることが認められる。故に、電流が増加すると、(1) 式における I が増加すると共に R'/R も大きくなり、離脱力として働く下向のピンチ力 F が増大するため、溶滴移行が促進される（スプレー化の方向にいく）ものと考えられる。

なお、溶接電流の影響についての結果は、ステンレス鋼用フラックス入りワイヤについての松田ら³⁾ の報告と一致している。

3. 2. 2 アーク電圧の影響

Fig. 6 にアーク電圧の影響についての結果を示す。本実験範囲内においては、電圧は溶滴移行現象にあまり影響を及ぼさないことが把握される。ソリッドワイヤの場合には、電圧の増加によって溶滴粒度が増大し、溶滴移行回数（短絡数）が減少することが報告されている⁸⁾。その一因は、最小電圧の原理に基づく溶滴下部におけるアークの収縮によって、上向のピンチ力が増大することと思われる。しかし、フラックス入りワイヤの場合には、そのような現象が発生しないため（アークのはい上がり）に顕著な変化はない、アーク電圧の増減によって溶滴移行現象はあまり変化しないものと考えられる。このことが、フラックス入りワイヤの適正電圧の範囲が、ソリッドワイヤに比較して大きい原因と思われる。

3. 2. 3 シールドガス組成の影響

CO_2 のシールドガス中に Ar を添加して、溶滴移行性の変化を検討した結果を Fig. 7 に示す。溶滴移行性は、Ar 添加量の増加と共に良好化（溶滴粒度の減少、溶滴移行回数の増加、 σ 値の減少）している。この現象は、安藤ら⁹⁾ がソリッドワイヤの場合について報告しているのと同じく、ピンチ力の大小によって説明されるものと思われる。すなわち、シールドガス中に Ar を添加した場合、アーク柱の電位傾度（電位傾度の比： $\text{CO}_2/\text{Ar}=3/1$ ）が減少し、最小電圧の原理に則って溶滴下部におけるアークのはい上がりが生じる。そのため、3. 2. 1 項でも述べた如く、下向のピンチ力が有効に働いて、溶滴移行が促進化される（スプレー化の方向にいく）ものと考えられる。

Fig. 7 Relation between shielding gas composition (Ar- CO_2 system) and droplet transfer (1.6 ϕ , YFW24, 300A)

Fig. 8 Effect of wire cross-sectional shape on droplet transfer (1.6 ϕ , YFW24, 300A)

なお, Lucey¹⁰⁾は, CO_2 ガスを Ar- CO_2 ガスシールドにすることにより, フラックス入りワイヤのスパッタが減少することを報告しているが, この現象の一因は上述の溶滴移行性の良好化であると考えられる。

3.3 溶滴移行性とワイヤ組成の関係

3.3.1 ワイヤ断面形状の影響

溶滴移行性に及ぼすワイヤ断面形状の影響についての結果を Fig. 8 に示す。この結果では, Abutting 断面と Single-folded 断面の間には, 溶滴移行性の顕著な差は認められない。一方, 松田ら⁹⁾は, ステンレス鋼用フラックス入りワイヤの溶滴粒度は, ワイヤ断面形状の複雑化により減少することを報告している。ワイヤ断面形状の影響については, フラックス成分の交互作用も考えられるので, 今後さらに検討を進めて行きたい。

ただし, Fig. 8 より, Single-folded 断面の場合, 通常の Abutting 断面の場合に認められるフラックス柱の顕著な突出しがなくなることが把握される。これは, アークがワイヤ先端内部 (ワイヤ内部の外皮金属部分) にも発生し, フラックス柱の消滅に寄与しているものと考えられる。この結果は, スラグ・メタル反応の促進化の面で, 複雑な断面形状の採用が有効であることを示唆している。なお, ノーガス溶接用フラックス入りワイヤの場合, ワイヤ断面形状の複雑化によってフラックス柱が消滅し, その結果, 溶接金属の窒素量が低減するという報告¹¹⁾もあり, 上述の結果と類似していると考えられる。

3.3.2 フラックス率の影響

Fig. 9 にフラックス率の影響についての結果を示す。フラックス率の増加は, 溶滴移行性の向上に多少効果があることが把握される。この現象の一因は, 表面張力による支持力の減少であると思われる。すなわち, 懸垂溶滴は外皮端に形成されるため, 表面張力による支持力は溶滴と外皮端の接触面積に依存し, その接触面積は外皮端の厚さと比例関係にあると考えられる。一方, 外皮金属の厚さはフラックス率の増加により減少している (本実験系の外皮金属の厚さは, フラックス率が 10, 15, 20% のときで, それぞれ 0.32, 0.28, 0.22 mm である)。故に, フラックス率が増加すると表面張力による支持力が減少して, 溶滴移行は良好化 (スプレー化) の方向に向うものと考えられる。又, その他の因子としては, フラックス率の増加により外皮金属側の電流密度が増大して, ピンチ力が有効に働いているこ

Fig. 9 Effect of flux percentage in wire on droplet transfer (1.6 ϕ , YFW24, 300A)

Fig. 10 Effect of TiO_2 content in flux on droplet transfer

とも考えられるが、この点についてはワイヤ内部の電流分布の調査などを通して今後検討していきたい。

なお、以上のフラックス率に関する現象は、ソリッド

Fig. 11 Effect of Fe-Si content in flux on droplet transfer

Fig. 12 Effect of Fe-Mn content in flux on droplet transfer

Fig. 13 Effect of iron power content in flux on droplet transfer

ワイヤの場合において、ワイヤの細径化によって溶滴の離脱が容易になること⁹⁾と対応していると思われる。

3.3.3 フラックス成分の影響

Fig. 14 Effect of CaF_2 content in flux on droplet transfer

Fig. 15 Effect of Al_2O_3 content in flux on droplet transfer

溶滴移行性とフラックス成分の関係について検討した。結果を Fig. 10~15 に示す。このグラフより、 TiO_2 、 Fe-Si 、 Al_2O_3 の増加、 CaF_2 の減少によって、溶滴移行性は良好になる（溶滴粒度の減少、溶滴移行回数の増加、 σ 値の減少）傾向にあるが、鉄粉、 Fe-Mn の影響は顕著ではないことが把握される。

この現象の原因について、以下に考察してみたい。一般に、溶滴移行を支配する力としては、①表面張力、②ピンチ力、③アーク力、④プラズマ気流による力を考える必要がある。まず、②、④の力が主因であるならばアーク形状に有意な差が認められるとの観点から高速度写真を種々に解析したが、溶滴粒度等とアーク形状の間に顕著な相関関係を見出すことはできなかった。又、表面張力についても、その測定値¹²⁾と溶滴粒度の間に一定の関係を認めることは困難であった。

次に、アーク力であるが、安藤らの著書⁹⁾にも見られ

Fig. 16 Relation between vapor pressure and droplet diameter change per unit flux percentage

る如く、この因子としては種々のものが考えられる。その中で、Cooksey ら¹³⁾、渡辺ら¹⁴⁾も指摘しているように、電極物質（特にスラグ）の蒸発による Repulsive force が重要と考える。ここでは、フラックス成分の蒸気圧がスラグの蒸発による Repulsive force に対応すると考え、その蒸気圧^{15,16)} (at 2000°C) と溶滴移行形態との関係を検討した結果を Fig. 16 に示す。このグラフでは、溶滴移行形態として各成分の単位重量比率当りの溶滴粒度の変化傾向（この値は、Fig. 10~15 の回帰計算より求めた）をとっている。Fig. 16 より、フラックス成分の蒸気圧と溶滴粒度の間には、一定の比例関係があることが認められ、溶滴移行形態にスラグ成分の蒸発による Repulsive force が大きく寄与していることが類推できる。すなわち、フラックス成分の影響についての結果は、蒸気圧の低い成分（ TiO_2 等、 CaF_2 は逆のケース）がスラグの構成成分となると、蒸発による Repulsive force が減少して、溶滴移行が促進される（スプレー化の方向にいく）ということにより説明されると考える。なお、この機構についての検討はまだ不十分な所も多いので、今後さらに考察を深めて行きたい。

4. 結 言

本報では、 CO_2 溶接用フラックス入りワイヤの溶滴移行現象に及ぼす溶接条件及びワイヤ組成の影響について検討し、本実験範囲内において以下の結果を得た。

(1) フラックス入りワイヤの溶滴移行は、電流の増加及びシールドガス中への Ar 添加量の増加によって良好化（スプレー化）の方向に向うが、電圧の影響は顕著ではない。

(2) ワイヤ断面形状の差（Single-folded 断面と Abutting 断面の場合）は、溶滴移行にあまり影響を及ぼさな

いが, フラックス率の増加はその改善に多少効果がある。

(3) フラックス成分中の TiO₂, Fe-Si, Al₂O₃ の増加, CaF₂ の減少によって, 溶滴移行は良好化される(スプレー化の方向にいく)が, Fe-Mn, 鉄粉の影響は顕著ではない。この現象の主因は, スラッグの蒸発による Repulsive force であると考えられる。すなわち, TiO₂ などが溶滴移行のスプレー化に効果があるのは, それらの蒸気圧が低いことに関係があると思われる。

参 考 文 献

- 1) 森垣, 松本, 竹本; 高電流 CO₂ 溶接用塩基性フラックス入りワイヤ, 第50回溶接法研究(委)資料, SW-685-73 (1974)
- 2) F. Matsuda, M. Ushio, T. Tsuji and T. Mizuta; Arc Characteristics and Metal Transfer with Flux-cored Electrode in CO₂ Shielding (Report I), Trans. JWRI, 8-2 (1979), 187-192
- 3) F. Matsuda, M. Ushio, T. Tsuji and T. Mizuta; Arc Characteristics and Metal Transfer for Flux-cored Electrode in GMA Welding (Report II), Trans. JWRI, 9-1 (1980), 39-46
- 4) IIW XII Committee; Classification of Metal Transfer on Arc Electric Welding Processes, Welding in the World, 15-5/6 (1977), 113-118
- 5) 安藤, 山本, 西川; 炭酸ガス・アーク溶接のアーク現象について, 溶学誌, 30-9 (1961), 710
- 6) A. A. Alov; The Nature of Welding Arc, Welding Arc, Welding Industry, 9 (1940), 213-217
- 7) W. J. Greene; An Analysis of Transfer in Gas Shielded Welding Arcs, Trans. AIEE, 79-2 (1960), 194-202
- 8) 小林, 桑名, 武田; アーク現象に及ぼす鋼線の組成の影響, 第45回溶接アーク物理研究(季)資料, No. 76-324 (1976)
- 9) 安藤, 長谷川; 溶接アーク現象, 産報, (1973) 168, 259, 203
- 10) J. A. Lucey; Cored Wires-Recent Developments for High Quality Welding, Weld. & Met. Fab., 45-9 (1977), 443-451
- 11) O. Morigaki, T. Matsumoto and Y. Takemoto; Some Improvements in Self-shielded Flux Cored Electrodes for Arc Welding, Weld. J., 55-8 (1976), 241s-248s
- 12) 日本鉄鋼協会編; 溶鉄・溶滓の物性値便覧, いばらぎ印刷, (1972), 116
- 13) C. J. Cooksey and D. R. Milner; Metal Transfer in Gas-shielded Arc Welding, Inst. of Welding Symposium (Physics of the Welding Arc), (1962), 123-132
- 14) I. Watanabe, M. Suzuki and T. Kojima; The Arc Phenomenon in Large Current MIG Arc Welding, The Welding Institute International Conference (Arc Physics and Weld Pool Behavior), (1979), 177-192
- 15) ゲ・ヴェ・サムソフ監修; 最新酸化物便覧, 日ソ通信社, (1979), 151
- 16) 溶融塩(季)編; 溶融塩物性表, 化学同人, (1963), 341

CO₂ レーザ溶接における吹付ガスの役割*

—金属材料のレーザ溶接(第3報)—

丸尾 大**, 宮本 勇**, 荒田 吉明***

The Role of Assist Gas in CO₂ Laser Welding*

—Laser Welding of Metal (Rept. 3)—

by Hiroshi Maruo**, Isamu Miyamoto** and Yoshiaki Arata***

Optimum gas-assisting parameters have been determined to suppress plasma formation, and the role of the assist gas has been analyzed in CO₂ laser welding. Results obtained are summarized as follows:

(1) When the assist-gas pressure p is higher than p_b , which is slightly higher than vapor pressure or surface tension pressure the plasma formation is suppressed by forcing the vapor stream going up along the laser beam axis to eject along the rear wall of the cavity, providing increased penetration depth without weld defects. The value p_b decreases with increasing laser power and decreasing welding speed. The fluctuation of the penetration depth tends to increase with increasing p , since the cavity diameter is enlarged by the vapor pressure which exceeds the value for the surface tension pressure to keep the cavity stable.

*原稿受付 昭和59年3月21日(昭和57年度秋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 大阪大学溶接工学研究所 Member, Osaka University, Welding Institute