

論説



Paper

溶滴移行現象に及ぼす自動車排気系部品用ステンレス鋼溶接ワイヤの組成の影響

上仲明郎*, 山田龍三*

Effects of Chemical Compositions of Stainless Steel Welding Wire for Automotive Exhaust System Components on Droplet Transfer Phenomenon

Akio Uenaka and Ryuzo Yamada

Synopsis

19 mass% Cr ferritic stainless steel welding wire has been used for automotive exhaust systems. In proportion as the change of usage condition and variation of base material, the technical need for welding wire has intensified.

With regard to solid welding wire, which achieves fine-grained weld metal in MIG welding for ferritic stainless steel, effect of chemical compositions of welding wires on droplet transfer phenomenon has been investigated. Followings were found and confirmed from image analysis and experimental works.

- (1) It is effective in suppressing the amount of spatter by gas emission from droplet that $\Delta N [\text{mass\%N} - \{0.519 \times (\text{mass\%Al}) + 0.292 \times (\text{mass\%Ti}) + 0.151 \times (\text{mass\%Nb})\}]$ value of welding wire is controlled under 0.01 mass%.
- (2) It is effective in suppressing the amount of spatter by irregular short-circuiting that total amount of Al and Ti content of welding wire is controlled under about 0.1 mass%.
- (3) Developed welding wire which chemical compositions are controlled appropriately is less spatter and fine-grained.

1. 緒 言

近年、地球環境問題が注目され、自動車メーカーは排気ガス浄化と軽量化による燃費向上に精力的にとりこんでいる。また、市場ニーズは、車体の長寿命化にもおよび、自動車メーカーはそれに応えるために、高性能なステンレス鋼製排気系部品の開発を行ってきた。この排気系においては、加熱および冷却が繰り返されるといふ厳しい使用環境に部品がさらされるため、オーステナイト系ステンレス鋼と比較して熱膨張率が小さく、熱伝導率が高いフェライト系ステンレス鋼が主流となって用いられている^{1)~6)}。

自動車排気系部品の溶接材料としては、被溶接物の材質と同様に耐熱性に優れたフェライト系のステンレス鋼溶接ワイヤが多用されている。この溶接ワイヤについても、

使用条件と被溶接物の材質の変化に応じて高度化が求められるようになってきており、組成や形態の異なる種々のワイヤが開発・市販化されている^{7)~10)}。例えば、合金成分の適正化により溶接金属の結晶粒を微細化することで高い強度と耐溶接割れ性を確保できるソリッドワイヤが開発され、積極的に実用化が進められている¹¹⁾。

一方、最近では、溶接後の部品品質のみならず、アーク溶接の低スパッタも重要視されている。スパッタは部品への付着だけでなく、溶接治具に付着しても外観不良になることがあり、またスパッタ除去という清掃工程が必要になり、溶接作業の効率を低下させてしまう。

このような背景から、フェライト系ステンレス鋼をミグ溶接した場合でも、低スパッタで微細な結晶粒の溶接金属が得られるソリッドワイヤの開発を行った。本報では、溶

滴移行現象に及ぼす溶接ワイヤの組成の影響について検討した結果を述べる。また、溶接作業性（スパッタ発生量、ビード形状）に関しても報告する。

2. 実験方法

2. 1 供試材

本実験に用いた供試ワイヤの化学成分を Table 1 に示す。この中で、Al, Ti, および N 量は、継手などを溶接した場合に母材により希釈された溶接金属の成分が、結晶粒微細化可能な成分範囲¹¹⁾となるように選定されている。なお、この希釈に関しては、自動車排気系材料としてエキゾースト・マニホールドなどに使用されるパイプの材質、板厚、および溶接条件などが十分考慮されている¹¹⁾。また、自動車排気系の母材には高温強度を向上させる目的で Nb が 0.2 mass% 弱以上添加され、本実験においても添加するが、過剰添加の場合は溶接金属の粒界に連続的に析出し高温割れの起点となることが知られているため^{9),11)}, 0.2 mass% 弱から 0.45 mass% 程度の含有量とした。

これら 7 鋼種を真空誘導炉にて溶製し、160 mm 角の鋼片に熱間圧延した後、線材圧延、焼鈍、冷間線引き加工、

焼鈍、めっき処理、冷間線引き加工を行い、線径 1.2 mm の溶接ワイヤとした。なお、めっきについては、芯線の表面に Ni めっきし、さらに Cu めっきを施した。

2. 2 溶接条件

パルスミグ溶接の溶滴移行現象を観察するため、Fig.1 に示す実験装置を用いた。溶接電源はパルス制御しているダイヘン製デジタルパルス CPDP-350 を用いて、下向き姿勢によるビード・オン・プレートで行った。溶接条件およびパルス条件を Table 2 に示す。基本的には短絡移行が生じないプロジェクト移行での実験とし、それに合せてアーク電圧を選定した。

Table 2. Welding conditions.

Shielding gas	97.5 % Ar + 2.5 % O ₂
Shielding gas flow rate	3.3×10^{-4} m ³ /s
Wire feeding rate	93.3 mm/s
Arc voltage	23.5 V
Pulse peak current	425 A
Pulse peak time	1.0 ms
Base current	40 A
Welding speed	10 mm/s
Contact tip to work distance	15 mm

Table 1. Chemical compositions of welding wires (mass%).

Welding wire	C	Si	Mn	Cr	Al	Ti	Nb	N	O
Wire A	0.01	1.0	0.5	18.6	0.04	0.05	0.16	0.09	0.004
Wire B	0.01	1.0	0.5	18.8	0.04	0.05	0.16	0.17	0.005
Wire C	0.01	1.1	0.5	18.4	0.04	0.05	0.40	0.09	0.007
Wire D	0.01	1.0	0.5	18.8	0.04	0.05	0.46	0.18	0.006
Wire E	0.01	1.0	0.5	18.9	0.04	0.10	0.46	0.13	0.005
Wire F	0.01	1.0	0.5	18.6	0.07	0.04	0.40	0.11	0.004
Wire G	0.01	1.1	0.4	18.6	0.07	0.10	0.18	0.13	0.005

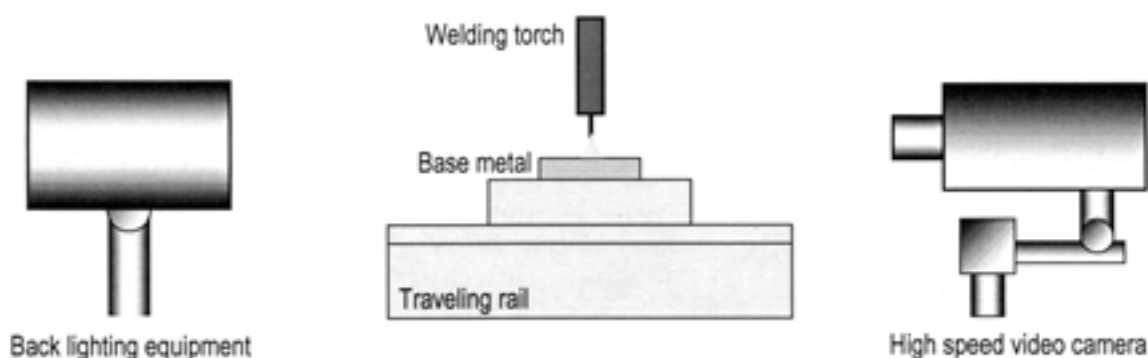


Fig.1. Experimental setup.

2. 3 溶滴移行現象の観察

溶滴移行現象の観察には高速度ビデオカメラを用いた。高速度ビデオカメラはナック製ハイスピードカメラ MEMRECAM fx 6000 を使用して、撮影フレーム数を 6000 フレーム /sec とした。また、光源としてキセノンランプを用い、影絵を撮影する背光法で行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 溶滴移行現象とスパッタ発生状況の把握

マグ・ミグ溶接では、アークによって溶接ワイヤ先端に形成された溶滴が母材に向かってさまざまな形状や大きさで移行し、短絡、短絡の開放、アーク再生の現象を主に繰り返している。この溶接におけるスパッタの発生形態については既にいくつかの報告がなされている^{12)～14)}。そこで、このスパッタ発生形態に着目して高速度ビデオカメラ画像を解析したところ、スパッタ発生の経緯などは幾分異なるものの通常のマグ・ミグ溶接とはほぼ同様な形態のスパッタ発生状況が2種類観察された。

その2種類の内の1つの溶滴移行現象を Wire A を例として Fig.2 に示す。ここでは、溶滴が成長する過程で、溶滴中に生成したガスの急激な膨張によって、まるで風船の破裂のように、溶滴内でガス爆発が発生している。そして

ガス放出が生じ、溶滴が激しく変形するとともに一部がスパッタとなり周囲に飛散している。

もう一方の溶滴移行現象について Wire E を例として Fig.3 に示す。これは溶滴が熔融池と短絡し、短絡の開放時にスパッタが発生している。溶接ワイヤ先端では、再生したアークの押し上げ作用によって先端に残った溶滴が上方に強く押し上げられ、その溶滴の一部がスパッタとして飛散している。また、熔融池ではアーク再生に伴うアーク圧力の急激な増加によって下方に強く押し下げられて振動し、熔融池の一部がスパッタとして飛散している。短絡の直前では、成長した溶滴が1パルス前の先行している溶滴に追いついてしまい、ワイヤ先端は細長く連なっている¹⁵⁾。つまり、溶滴の離脱のタイミングが不規則になり、パルス溶接法の狙いとする溶滴の自由移行化が実現できていないことが分かる。

3. 2 溶滴のガス放出によるスパッタ発生に及ぼすワイヤ成分の影響

爆発移行に分類される溶滴のガス放出という現象は、例えば吸湿している被覆溶接棒やフラックス入り溶接ワイヤを用いた場合に、水素や酸素がワイヤ先端から発生するという形で見られる¹⁶⁾。または、炭酸ガス溶接あるいはマグ溶接において、炭酸ガスから解離した一酸化炭素および酸素が熔融池から発生するという形で、この現象が見ら

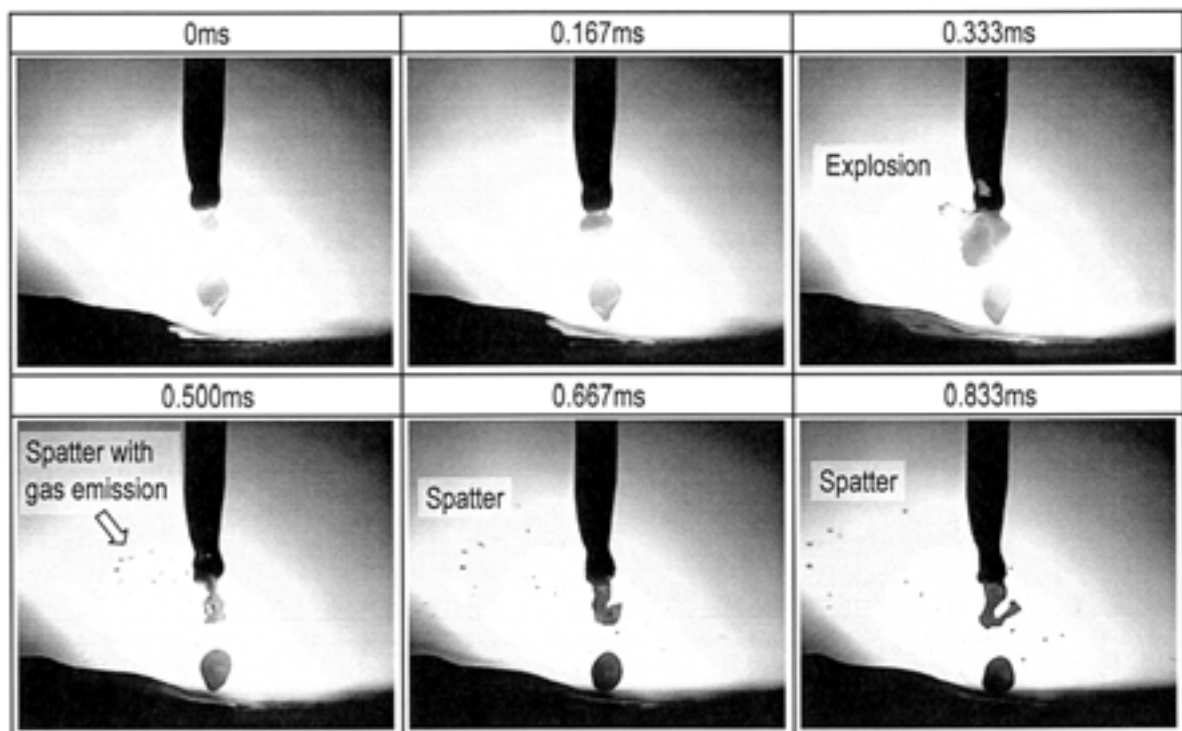


Fig.2. Occurrence of spatter with gas emission of wire A taken by the high speed video camera (every 0.167 ms).

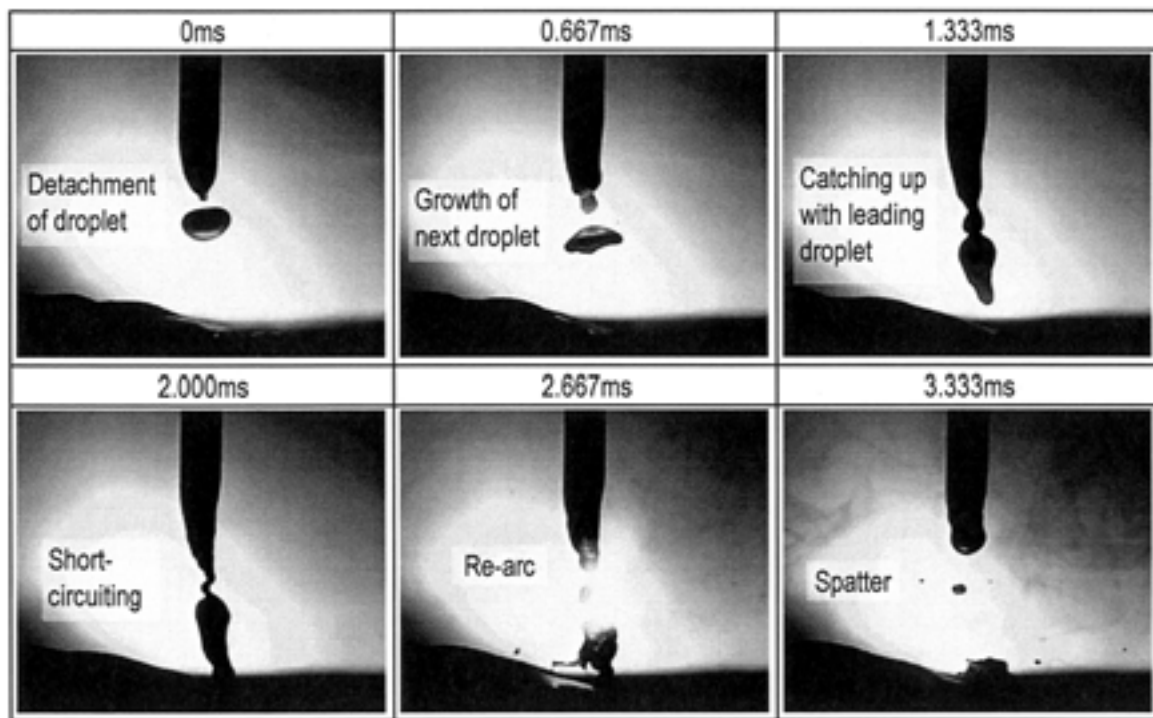


Fig.3. Occurrence of spatter with irregular transfer of droplet of wire E taken by the high speed video camera (every 0.667 ms).

れる。

本実験のようにソリッド溶接ワイヤでかつミグ溶接の場合では、溶滴から放出するガス成分の種類は限定され、2種類が考えられる。その1つは酸素であるが、溶接ワイヤにおける含有は微量でかつほぼスラグ化するため、またシールドガスの酸素も溶接ワイヤの脱酸元素の含有量の割には少量であるため除外できると考えられる。もう1つは溶接ワイヤに意図的に添加された窒素である。この場合、ガス放出の要因となるのは溶滴の段階で固溶している窒素である。一方、今回対象としている溶接ワイヤでは、ほとんどの窒素はAl, Ti, Nbの窒化物として固定されている。この溶接ワイヤが固相の状態からの溶滴の段階になると、ある程度の窒化物が固溶し、ガス放出の要因となる窒素も存在すると考えられるが、溶接のような極めて短時間の過渡的な反応では、その量を正確に求めることは困難である。そこで、溶接ワイヤのAl, TiおよびNb全てが窒化物として固定されたとし、ガス放出の要因となるフリーな窒素の量を ΔN の値として便宜的に整理した。(1)式で示すフリーな窒素量 ΔN は、添加窒素量と、Al, Ti, Nbがそれぞれ化学量論的に窒化物を形成すると想定し計算した窒素量との差分である。なお、窒化物は、AlN, TiN, NbNとした。また、Al, Ti, Nbは同時に酸化物としても一部存在するが微量なためこの計算には含めないことにした。

$$\Delta N = N - N_{eq.}$$

$$= N - \{0.519 \times (\text{mass\%Al}) + 0.292 \times (\text{mass\%Ti}) + 0.151 \times (\text{mass\%Nb})\} \dots \dots \dots (1)$$

それぞれの溶接ワイヤについて、溶滴のガス放出によるスパッタ発生頻度を画像の解析により測定した。なお、アークスタートして3秒後から1秒間のアークタイムについてのスパッタ発生頻度をカウントした。このスパッタ発生頻度と ΔN 量との関係をFig.4に示す。

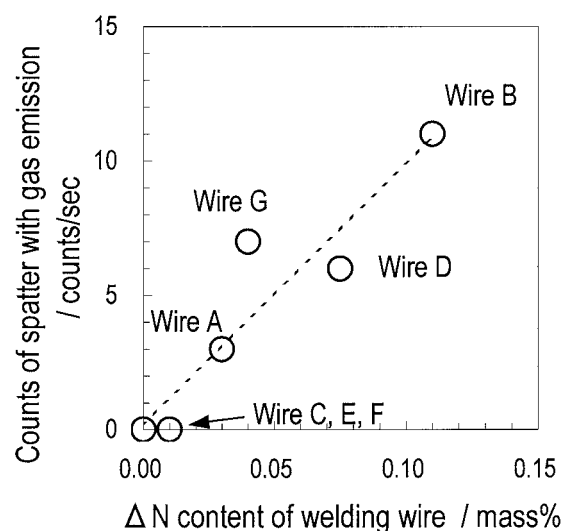


Fig.4. Relationship between counts of spatter with gas emission and ΔN content of welding wire.

図から分かるように ΔN 量が多いとスパッタの発生頻度も高くなっている。 ΔN 量が 0.11 mass% と高い Wire B では、スパッタの発生も 1 秒間あたり 11 回と頻度が高い。溶接電流が約 170 A でパルス周波数はおよそ 200 Hz であることから、20 パルスに 1 回の割合でスパッタが発生していることになる。つまり溶滴の形成時に、フリーの N が局部的に集合する場合があります、その際に急激な膨張に至ったと考えられる。一方、 ΔN 量が 0 mass% あるいは 0.01 mass% の Wire C, E, F の場合、スパッタの発生は認められなかった。

3. 3 不規則な短絡によるスパッタ発生に及ぼすワイヤ成分の影響

溶接ワイヤ先端で成長した溶滴が、1 パルス前の先行して落下している溶滴に追いつくという現象は、先行した溶滴の離脱が遅れた、つまり溶滴の変形能が阻害されていることに起因すると考えられる。この溶滴の挙動は、粘度・表面張力などの物性に依存していると考えられており、これらの物性値に影響を及ぼす主な因子として、成分的には P, S, O の 3 種類が、また成分以外では温度が挙げられる。それらの中で元素としては特に酸素 (O) の影響が大きい。溶滴表面の酸素量が多い場合、表面張力が低下し、溶滴は容易に変形しアーク力により吹き飛ばされやすくなる。そのため、例えば高電流の炭酸ガス溶接用の溶接ワイヤでは、Si, Mn の他に Al, Ti の脱酸素元素を添加し、溶滴表面の酸素量を下げることにより溶滴の変形能を適度に保っている。ただし、仕事関数が低い Al や Ti の場合、過剰な添加は溶滴移行の規則性を阻害してしまうことが知られている¹⁷⁾。これは、アークプラズマの電位傾度が低下することでアーク長が増大し、アーク自身も緊縮しアークが溶滴下端部に集中して発生することになり、そのアークによる反力で溶滴が押し上げられるためである。一方、Si や Mn については、仕事関数が高いこともありマグ・ミグ溶接における溶滴の移行にはあまり悪影響とはならない。

従って、溶接ワイヤの Al, Ti に着目し、Al 量および Ti 量の総量とスパッタの発生傾向を比較調査した。前項と同様に、それぞれの溶接ワイヤについて、不規則な短絡によるスパッタ発生頻度を画像の解析により測定した。このスパッタ発生頻度と Al+Ti 量の関係を Fig.5 に示す。

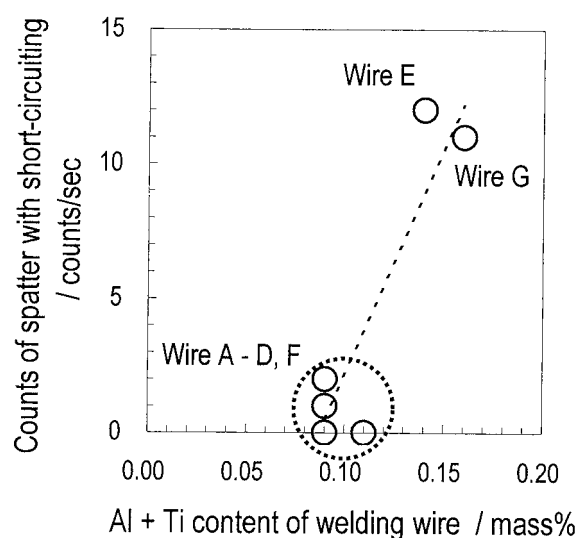


Fig.5. Relationship between counts of spatter with short-circuiting and Al+Ti content of welding wire.

図から分かるように Al+Ti 量が多いとスパッタの発生頻度も高くなっている。Al+Ti 量が約 0.15 mass% と高い Wire E および Wire G では、スパッタの発生も 1 秒間あたり 12 回と頻度が高い。ミグ溶接の場合、Ar ガスがバランスで酸素は通常 2～5% の含有となっており、炭酸ガスに比べて溶滴表面の酸素量は少ない。従って、炭酸ガス溶接用ワイヤでは Al+Ti 量は 0.15 mass% 程度が一般的な値であるが、それと同量の Wire E および Wire G では脱酸過剰になっていると考えられる。一方、これらの溶接ワイヤ以外の Al+Ti 量が約 0.1 mass% の溶接ワイヤの場合、スパッタの発生は少なくなっていた。

4. 開発溶接ワイヤの特性

4. 1 成分設計

これまでの溶接ワイヤ組成に関する検討結果から、フェライト系ステンレス鋼をミグ溶接した場合でも、低スパッタで微細な結晶粒の溶接金属が得られるソリッドワイヤの組成を Table 3 に示す。また、 ΔN 量および Al+Ti 量を、従来溶接ワイヤについても併記する。

4. 2 開発溶接ワイヤの溶接作業性の調査

4. 2. 1 試験方法

前述の溶接ワイヤを用いて Table 4 に示す溶接条件で重

Table 3. Chemical compositions, ΔN and Al+Ti content of welding wires (mass%).

Specimen	C	Cr	Al	Ti	Nb	N	ΔN	Al+Ti
Developed welding wire	0.01	18.4	0.04	0.05	0.50	0.08	-0.031	0.09
Conventional welding wire	0.01	19.0	0.06	0.11	0.16	0.13	0.043	0.17

Recommendation range ≤ 0.01 ≤ 0.11

Table 4. Welding conditions of lap joint.

Shielding gas	97.5 % Ar + 2.5 % O ₂
Shielding gas flow rate	3.3×10^{-4} m ³ /s
Base metal	SUS430 t2 mm
Torch angle	Up/down angle 45° - Forward/backward angle 0°
Wire feeding rate	93.3 mm/s
Arc voltage	21 ~ 24 V
Welding speed	10 mm/s
Contact tip to work distance	15 mm

ね継手のすみ肉溶接を行った。アーク電圧を変化させてスパッタを捕集してトータル発生量を測定し、さらに溶接金属の組織観察を行った。

4. 2. 2 試験結果

スパッタ発生量の測定結果を Fig.6 に示す。いずれのアーク電圧においても、開発溶接ワイヤは従来溶接ワイヤよりも低スパッタで絶対量としても少なかった。

アーク電圧が 23 V における溶接ビードの断面組織を Fig.7 に示す。開発溶接ワイヤは従来溶接ワイヤと同様に

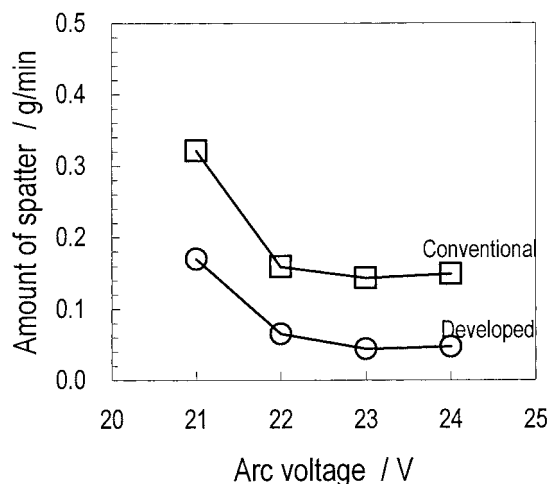


Fig.6. Relationship between amount of spatter and arc voltage.

フラットな形状で十分な溶込みが得られていることが分かった。また、溶接金属は微細な結晶粒になっていることが確認できた。

以上より、開発溶接ワイヤは、低スパッタで微細な結晶粒の溶接金属が得られることが分かった。

5. 結 論

ソリッドワイヤでフェライト系ステンレス鋼をミグ溶接した場合でも、微細な結晶粒の溶接金属が得られることを前提に、溶滴移行現象に及ぼす溶接ワイヤの組成の影響について検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 溶滴のガス放出によるスパッタ発生現象が観察され、フリーのガス成分 N (ΔN : 添加 N 量と窒化物を形成すると想定し計算した N 量との差分) が起因していることが分かった。 ΔN 量が 0.01 mass% 以下の場合、スパッタの発生は認められなかった。
- (2) 不定期的な短絡によるスパッタ発生現象が観察され、脱酸元素の添加量の影響を受けていることが分かった。Al+Ti 量を約 0.1 mass% に抑えた場合、溶滴移行が規則的になり、スパッタの発生は認められなかった。
- (3) 溶接ワイヤに Al, Ti, Nb, および N 量を適正量添加することで、低スパッタでかつ溶接金属の結晶粒が微細化されることが確認された。

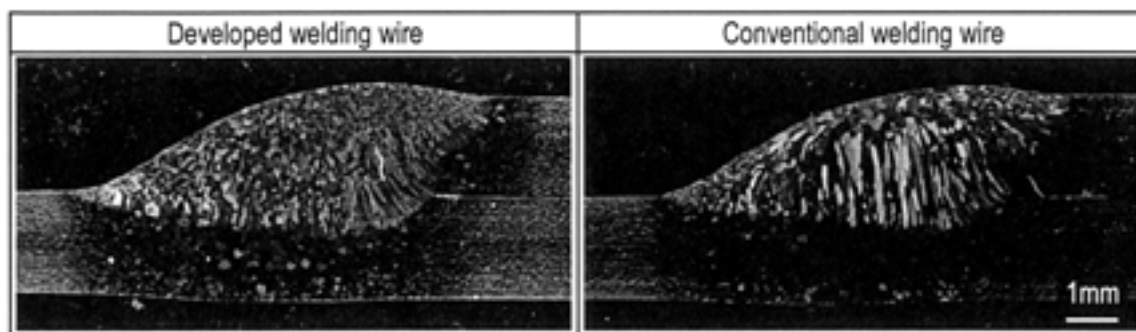


Fig.7. Macrostructures of welded joint.

(文 献)

- 1) 宮崎淳, 平澤淳一郎, 古君修:自動車技術, **55**(2001), 10, 25.
- 2) 井上宜治, 菊池正夫:新日鉄技報, **378**(2003), 55.
- 3) 宮崎淳, 石井和秀, 佐藤進:川崎製鉄技報, **30**(1998), 2, 99.
- 4) 奥学, 藤村佳幸, 中村定幸, 伊東健次郎, 名越敏郎, 植松美博:日新製鉄技報, **80**(2000), 32.
- 5) 藤田展弘, 大村圭一, 佐藤栄次, 山本章夫:新日鉄技報, **361**(1996), 20.
- 6) 宮崎淳, 平澤淳一郎, 古君修:JFE技報, **4**(2004), 53.
- 7) 村田義明:溶接学会誌, **72**(2003), 7, 561.
- 8) 山下賢:神戸製鋼技報, **47**(1997), 2, 58.
- 9) 上仲明郎, 永田 雅:電気製鋼, **67**(1996), 155.
- 10) N. Renaudot, P.O. Santacreu, J. Ragot, J.L. Moiron, R. Cozar, P. Pedarre and A. Bruyere:SAE Technical Paper Series, **1**(2000), 314.
- 11) 乾 圭吾, 永田 雅:電気製鋼, **72**(2001), 155.
- 12) 鈴木春義:最新溶接ハンドブック, 山海堂, 1960, 27.
- 13) 溶接学会編:溶接・接合便覧, 丸善, 1990, 195.
- 14) 溶接学会編:溶接・接合技術特論, 産報出版, 2005, 20.
- 15) 殖栗成夫, 田畑要一郎, 岩田明彦, 水野孝治:溶接学会論文集, **4**(1986), 4, 684.
- 16) 黒川剛志:神戸製鋼技報, **50**(2000), 3, 77.
- 17) 伊藤崇明, 輿石房樹, 佐藤正晴, 菅哲男, 牛尾誠夫:溶接学会論文集, **15**(1997), 3, 432.