

(技術資料)

ステンレス鋼フラックス入りワイヤの開発動向

Current Developments in Stainless Steel Flux-cored Wire



渡辺博久*

Hirohisa Watanabe



丸山敏治*

Toshiharu Maruyama



松下行伸*

Yukinobu Matsushita

The use of flux-cored wire has expanding rapidly in stainless steel weldings. Many types of flux-cored wire have been developed to suit various situations and applications. In this paper, the features of newly developed flux-cored wires are introduced. Examples in the paper include flux-cored wire for thin plate welding at a low welding current, for high temperature service, for duplex stainless steel, and for welding fumes characterized by low soluble Cr()

まえばき = ステンレス鋼は、優れた耐食性や耐熱性を有することから、各種工業分野で広く適用されており、その使用量は年々増加している。これらステンレス鋼の溶接においては、炭素鋼の溶接と同様に、被覆アーク溶接 (SMAW)、ティグ溶接 (GTAW)、ミグ溶接 (GMAW)、サブマージアーク溶接 (SAW) 及びフラックス入りワイヤアーク溶接 (FCAW) が適用されており、炭素鋼の場合と比べ、とりわけ FCAW 法の適用比率が高いのが特徴である。近年では、全ステンレス鋼溶接材料中の 50% 近くがフラックス入りワイヤによって占められている。

当社のステンレス鋼フラックス入りワイヤ (DW ステンレスワイヤ) は、大きくわけて 3 種類あり、下向・水平すみ肉用の「低ヒューム・低スパッタシリーズ」、全姿勢溶接用の「LP シリーズ」と極細径の「0.9mm シリーズ」によって構成されており、用途目的に応じて各工業分野において広く使用されている。これら 3 種類の DW ステンレスワイヤに加えて、昨今の各分野の新たなニーズに対応する DW ステンレスワイヤの開発も進められており、市場拡大の大きな戦力となっている。

ここでは、薄板の溶接に適したステンレス鋼フラックス入りワイヤ (DW-T シリーズ)、高温用フラックス入りワイヤ (Bi フリータイプ) や高靱性二相ステンレス鋼用フラックス入りワイヤなどの開発状況と、それら新フラックス入りワイヤの技術的特性を解説する。

1. ステンレス鋼フラックス入りワイヤ (DW-T シリーズ)

ステンレス鋼の溶接では、炭素鋼の場合と比べると薄板が多いため、低電流域で溶接するケースが多い。このため、ワイヤ径 1.2mm のフラックス入りワイヤが主流になっている。しかし、4 ~ 5mm 以下の薄板を溶接しようとする溶接電流は 150A 以下になり、アークの不安

定やスパッタ発生などの問題が生じやすくなる。この問題を回避するため、薄板の溶接の場合には、従来高価な

0.9mm の極細径のフラックス入りワイヤが使用されていた。今回開発した新タイプの DW-T シリーズワイヤは、高フラックス率化とスラグ組成の最適化によりアーク安定性が格段に向上しているため、1.2mm ワイヤでありながら 130A 以下の低電流域であってもスパッタ発生量が少なく、良好なビード形状が得られる製品である。これによって、高価な 0.9mm ワイヤの適用域の多くの部分を、安価な 1.2mm ワイヤでカバーすることが可能になった。

DW-T シリーズの適正溶接条件範囲と水平すみ肉溶接における断面マクロ写真を、図 1 に示す。DW-T シリーズは、従来の 1.2mm 及び 0.9mm ワイヤが一般的に使用される電流範囲をほぼカバーすることが可能であり、80A から 240A の電流域で良好な溶接作業性を得ることができる。また、各溶接条件においても平滑なビード形状や溶込みが得られている。

水平すみ肉溶接では、板厚が薄くなればそれに応じて

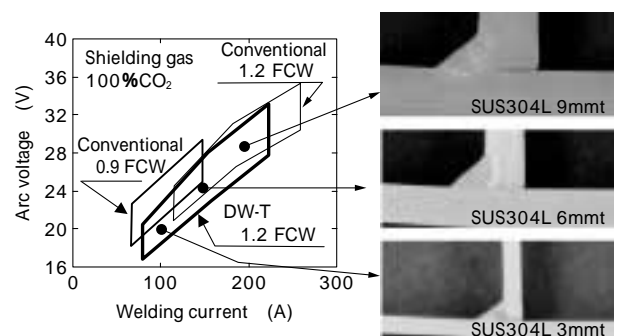


図 1 DW-T シリーズの適正溶接条件範囲とすみ肉断面マクロ
Fig. 1 Applicable welding parameters and cross sectional macro structures of DW-T FCW in horizontal fillet welding

*溶接カンパニー 技術開発部

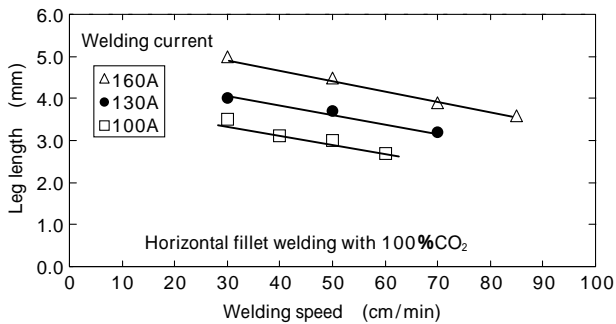


図2 溶接条件と脚長の関係

Fig. 2 Relation between welding parameters and leg length

溶接脚長を小さくすることが求められ、特に熱膨張係数の大きなステンレス鋼では、歪の観点からも小脚長溶接のニーズが高い。DW-T シリーズワイヤは、低電流域でも優れたアーク安定性を維持できることから、比較的高速での溶接が可能であり、板厚 2mm 程度の薄板のすみ肉溶接へも十分に対応することができる。DW-T シリーズの溶接速度と脚長の関係を図 2 に示す。これより、100A 程度であれば 50cm/min 以上の溶接速度で、脚長 3.0mm 以下のすみ肉溶接が可能である。

また DW-T シリーズワイヤは、再アークスタート性能も優れている。低電流域でも溶滴移行がスムーズであるため、アークを切った際にワイヤ先端部で固まる溶滴が小さく、再スタート時の先端除去作業はほとんど必要ない。また、アークスタート直後からもアークが安定するため、仮付けやタック溶接などの短い溶接でも良好なビードを得ることができる。

このように、DW-T シリーズは広範囲の溶接条件で使用が可能であり、特に小脚長 / 低電流域での溶接に適したフラックス入りワイヤである。

2. 高温用フラックス入りワイヤ(Bi フリータイプ)

現在市販されている汎用ステンレス鋼用フラックス入りワイヤの多くの中には、溶接時のスラグはく離性を改善する目的で、低融点酸化物である Bi_2O_3 をごく少量添加することが多い。ところが、700 以上の高温環境で使用されたフラックス入りワイヤによる溶接金属において、長時間使用後に割れが発生する事例が頻発した。1990 年代の研究¹⁾²⁾ によって、ビスマス (Bi) を含有す

る溶接金属は、700 を超える温度に加熱されると延性が著しく低下することが確認され、粒界に偏析した Bi が割れ発生の一因であることが明らかになった。その後、該当する高温用途に対しては、Bi を含有しない (Bi-free) フラックス入りワイヤの開発が要望されるようになった。

このような技術背景と市場ニーズに基づき、当社では最近の研究開発により、 Bi_2O_3 を添加せずに、従来の DW ステンレスワイヤと同等以上のスラグはく離性を確保し、かつ良好なアーク安定性が得られる新たなスラグ組成を他社に先がけ開発し、実用化している。更に 2003 年の JIS Z 3323 の改正では、全溶着金属中の Bi 含有量を 10ppm 以下 (これは、実質的に Bi を添加しないのと同義である) に規定したワイヤに対しては、その種類を示す記号の後に BiF の記号を付加 (例: YF308C-BiF) して、Bi-free であることが識別できるようになった。

表 1 に、当社のビスマスフリーステンレス鋼フラックス入りワイヤの一覧を示す。高温環境での長時間使用が想定される 308 系と、同じく高温用途で、かつ溶接後に安定化熱処理を施す可能性のある 347 系の高温引張試験結果を、図 3 に示す。Bi-free の溶接金属は、Bi 入りの溶接金属と比較し、高温延性が優れていることがわかる。これら高温用途以外のワイヤでも、溶接後に固溶化熱処理を施す場合や熱間曲げ加工を受ける溶接部に対しても、付加される応力レベルによっては Bi の影響を受けることがあるため、Bi を含有しないフラックス入りワイヤを適用すべきと考える。

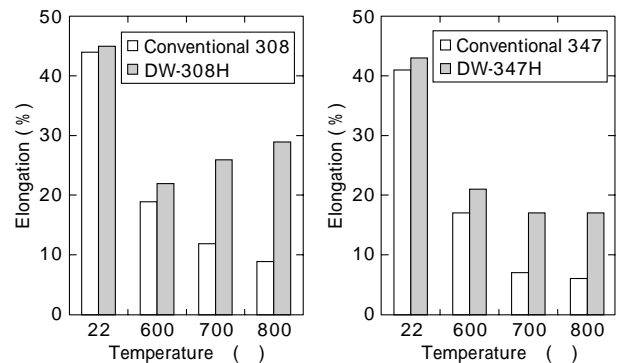


図3 DW-308H, DW-347H の高温延性

Fig. 3 Elongation property at elevated temperatures of DW-308H and DW-347H

表 1 Bi フリーフラックス入りワイヤの性能一例

Table 1 Typical properties of Bi free type FCW

	Chemical composition of all weld metal (mass%)								Tensile properties	
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Bi	FN*	TS (MPa)	El. (%)
DW-308H	0.060	0.42	1.50	9.62	18.68	-	<0.001	6	575	48
DW-308LH	0.026	0.41	1.35	10.20	18.70	-	<0.001	8	540	52
DW-316H	0.050	0.38	1.10	11.60	18.75	2.40	<0.001	8	570	42
DW-316LH	0.023	0.45	1.08	11.94	18.47	2.45	<0.001	9	540	45
DW-347H	0.027	0.38	1.18	10.20	18.87	Nb : 0.57	<0.001	7	602	43
DW-309LH	0.028	0.47	1.24	12.58	24.17	-	<0.001	20	578	39
DW-310	0.12	0.48	2.15	20.56	25.48	-	<0.001	-	618	36

*FN : Ferrite number by Delong's diagram

このような新しい Bi-free タイプのフラックス入りワイヤの開発により、フラックス入りワイヤの適用範囲拡大に大きく寄与できると考える。

3. 高靱性二相ステンレス鋼用フラックス入りワイヤ

二相ステンレス鋼は、オーステナイト相とフェライト相をほぼ 1 対 1 の割合で含有し、耐応力腐食割れ性や耐孔食性に優れるとともに、高強度でかつ良好な靱性を有する鋼種である。これらの特性を利用して、ケミカルタンカ、海洋構造物、製紙用の化学プラントなどに適用されている。特に海洋構造物分野において、溶接金属に対する低温靱性要求値が厳しくなる傾向にあり、従来の二相ステンレス鋼用のフラックス入りワイヤでは、対応できないレベルとなってきた。

当社では、このような二相ステンレス鋼溶接部の低温靱性要求に対して、適用可能なフラックス入りワイヤの検討を進めた結果新たな技術的知見を見出し、従来の二相ステンレス鋼フラックス入りワイヤよりワンランク上の靱性を有するワイヤを商品化することに成功している。

従来より、二相ステンレス鋼溶接金属の靱性を向上させるためには、フェライト量の低減が有効であること、またフェライト量を低減しようとして Cr や Mo 量を低減させると耐食性が低下するために、Ni や N などを増量することが有効であることが明らかになっている。しかしこの手法では十分な靱性が得られないばかりか、高窒素化による気孔欠陥発生リスクが高くなることが明らかになっており、従来技術では手詰りの状態であった。

これに対して今回見出した新たな技術的知見は、溶接金属中の Bi-free 化によって、靱性を劣化させる溶接金属中の酸素量の低減化が図れるという点にある。Bi は、2 章に記載したように高温での粒界延性の低下要因にあげられる元素であるが、Bi-free 化によって溶接金属中の酸素量も大きく低減し、従来材 (Bi 入り) と比較して 200ppm 前後の低酸素化を達成することに成功した。図 4 に、衝

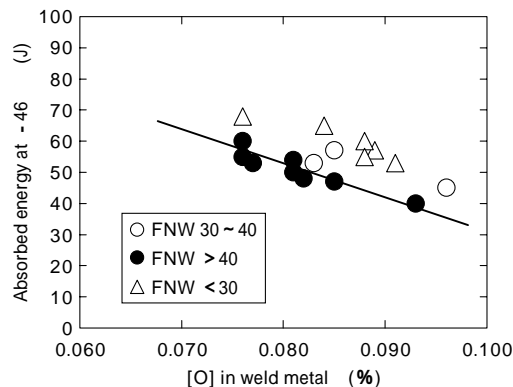


図 4 二相ステンレス鋼溶接金属の衝撃値に及ぼす酸素の影響
Fig. 4 Effect of oxygen content on absorbed energy of duplex stainless steel weld metal

撃性能に対するフェライト量と溶接金属中の酸素量との関係を示す。耐食性の観点から、フェライト量 (FNW) をある程度確保した状態であっても低酸素化 (Bi-free 化効果を含む) により、衝撃吸収エネルギーは向上することが確認されている。また、表 2、表 3 に従来材と開発材の溶着金属の化学成分と機械的性質の一例を示す。従来材と比較し、顕著な靱性改善が得られていることがわかる。

4. ヒュームからの 6 価クロム溶出を抑制したフラックス入りワイヤの開発

ステンレス鋼フラックス入りワイヤを溶接する際に発生する溶接ヒューム中には、Cr 酸化物が 10% 前後含まれており、一部は六価 Cr (以下、溶出 Cr () と記す) として存在している。この溶出 Cr () は有害物質に指定されており³⁾、作業者に対する影響やその毒性に関する報告⁴⁾がある。

このため以前より、溶接ヒューム中の溶出 Cr () 低減について、被覆アーク溶接棒では多くの研究及び報告がされている^{5) 6)}が、フラックス入りワイヤについての研究は非常に少ない。そこで当社では、ステンレス鋼用フラックス入りワイヤにおける溶接ヒューム中の溶出

表 2 二相ステンレス鋼溶接金属の成分一例
Table 2 Typical composition of all weld metal

	Chemical composition (mass%)									PRE	FNW
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N	Bi	O		
Improved	0.024	0.55	0.89	9.68	22.96	3.28	0.14	<10ppm	0.075	36.0	41
Conventional	0.027	0.58	0.78	9.42	23.34	3.42	0.14	200ppm	0.100	36.9	48

PRE : $Cr + 3.3 \times Mo + 16 \times N$ (Pitting resistant equivalent)
FNW : Ferrite number by WRC diagram (1992)

表 3 二相ステンレス鋼溶接金属の機械的性質一例
Table 3 Typical mechanical properties of all weld metal

	Tensile test (at 20)			Impact test		
	YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	${}_{20}E_0$ (J)	${}_{20}E_{-20}$ (J)	${}_{20}E_{-40}$ (J)
Improved	617	808	31	73, 74, 73 Avg.73	67, 67, 68 Avg.67	60, 57, 62 Avg.60
Conventional	620	830	29	Avg.52	Avg.45	Avg.37

Cr ()量について、溶接条件による影響や、溶接ヒュームの形態を調査し、フラックス設計の変更による溶出Cr ()低減化の可能性について検討を行い、環境対応型溶接材料の商品化を進めている。

4.1 ヒューム粒子のTEM (透過型電子顕微鏡) 観察

溶接条件 (200A-30V-100%CO₂, ext.20mm) のもとで、発生した溶接ヒュームのTEM 観察 (加速電圧 200kV) を行った。写真 1 に、このヒューム粒子のTEM 観察像及び回折像を示す。また、表 4 には、各ヒューム粒子 (制限視野部) における EDX 成分分析結果を示す。ヒューム粒子の一部は Cr, Mn, Fe が多い結晶質であり、その他の部分は Na, K, Si が多い非晶質である。また、溶出試験液中には、可溶性 Cr () とともに Na, K が多く検出されることから、Cr () は Na, K, Si が多い非晶質部分 (粒子) から優先的に溶出するものと考えられる。このことから、ヒューム中の溶出 Cr () 低減方法としては、ワイヤ中の Na, K の低減によるヒューム非晶質部の減少、または Si 源添加によるヒューム非晶質部の耐水性向上をはかることが有効であると推察した。

4.2 ワイヤ中の Na + K 量 / Si 量と溶出 Cr () 量

図 5 に、各ワイヤ中の Na + K 量と溶接ヒューム中の溶出 Cr () 量を示す。基準ワイヤ (Na + K = 0.24wt%) からワイヤ中の Na + K 量を減少させていくと、ヒューム中の溶出 Cr () 量が低減し、ワイヤ中の Na + K = 0.06wt% では、2 種のシールドガスにおいてヒューム中の溶出

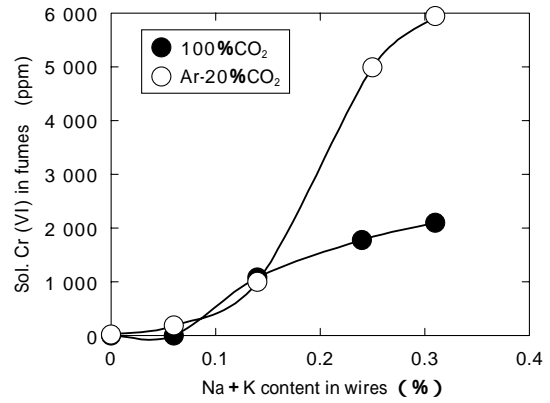


図 5 ワイヤ中の Na + K 量とヒューム中の溶出 Cr (VI) 量の関係
Fig. 5 Relationship between Na + K content of wires and sol Cr (VI) in fumes

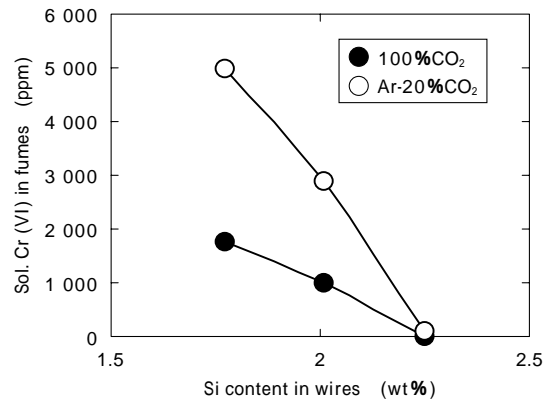
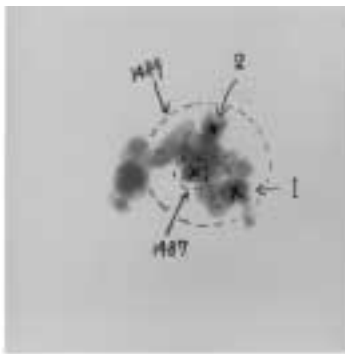


図 6 ワイヤ中の Si 量とヒューム中の溶出 Cr (VI) 量の関係
Fig. 6 Relationship between Si content of wires and sol. Cr (VI) in fumes



(a) Bright-field image (x 120 000)



(b) Diffraction pattern of 1489

(c) Diffraction pattern of 1487 area

写真 1 ヒューム粒子 TEM 観察像

Photo 1 TEM micrographs and electron diffraction patterns of fume particles

表 4 ヒューム粒子の化学成分 (EDX, %)

Table 4 Chemical composition of fume particles (EDX, %)

Selected area	Cr	Fe	Mn	Si	K	Na
1	18.4	18.2	19.1	13.1	10.8	8.9
2	13.6	38.8	13.5	9.6	9.6	1.0
1487	47.6	30.3	14.5	0.6	0.8	0.0

Cr () が 200ppm 以下となった。図 6 に、各ワイヤ中の Si 量と溶接ヒューム中の溶出 Cr () 量を示す。基準ワイヤ (Si = 1.77wt%) からワイヤ中の Si 量を増加させていくと、ヒューム中の溶出 Cr () 量が低減し、ワイヤ中の Si = 2.25wt% では、2 種のシールドガスにおいてヒューム中の溶出 Cr () が 150ppm 以下となった。

4.3 低溶出 Cr () フラックス入りワイヤ

前節で得られた知見をもとに、溶接ヒューム中の溶出 Cr () を格段に低減させたワイヤを試作し、評価を実施した。表 5 に、開発ワイヤの溶接電流 200A におけるヒューム発生量及びヒューム中の溶出 Cr () 量 (ヒューム中の濃度、発生量を併記) を示す。なお、比較のため基準ワイヤの数値を併記した。ヒューム中の溶出 Cr () 発生量は、基準ワイヤと比べて、シールドガス 100%CO₂ では 1/100 以下、Ar-20%CO₂ でも 1/20 以下に抑制できることを確認した。

むすび = 本稿では、最近開発したステンレス鋼用フラックス入りワイヤの新たな取組みについて紹介した。今後は、これらに加えて、環境問題を意識した技術開発がますます重要になるとと思われる。溶接材料の発展を顧みると、ユーザサイドから厳しい要求が出され、新たな技術開発によりそれをクリアするということの繰返しである。今後とも、発想の原点をユーザの立場に置いて、絶え間ない溶接材料開発への挑戦がなされていくものと思

表5 各フラックス入りワイヤの溶接ヒューム中の溶出Cr(VI)量とヒューム発生量

Table 5 Amounts of sol. Cr (VI) in welding fumes and fume emission rates of improved wires and standard wires

	AWS A5.22 classification	Shielding gas	Fume emission rate (mg/min)	Sol. Cr (VI) in fumes	
				Concentration (ppm)	Emission rate (mg/min)
Improved FCW	E308LT	100%CO ₂	480	4	0.002
		Ar-20%CO ₂	390	80	0.03
Standard FCW		100%CO ₂	450	620	0.28
		Ar-20%CO ₂	375	1 910	0.72
Improved FCW	E309LT	100%CO ₂	450	9	0.004
		Ar-20%CO ₂	355	70	0.02
Standard FCW		100%CO ₂	430	1 780	0.77
		Ar-20%CO ₂	340	4 990	1.70

われる。

参考文献

- 1) 松下行伸ほか：溶接学会全国大会講演概要，第55集（1994）p.144.
- 2) K. Nishimoto et al. : Effect of Bi on reheat cracking susceptibility in type 308 FCA weld metal, Welding in the world, 41（1998）p.220.
- 3) American Conference of Governmental Industrial Hygienists : 2002 TLVs and BEIs, ACGIH,（2001）p.23.
- 4) Perlebach : Massnahmen der arbeitsmedizinischen Vorsorge bei Schweißen, DVS Ber, 126（1989）p.33.
- 5) Kimura et al. : Investigations on Chromium in Stainless Steel Welding Fumes, Weld. Research Supplement, July（1979）p.195.
- 6) Stevenson et al. : Binder developments for stainless electrodes, Weld. Rev., 8（3）（1989）p.192.