

縦磁場を利用したステンレスバンド肉盛り溶接法 —マグレイ(MAGLAY)法—

MAG-LAY Process—Electro-Magnetic Controlled Overlay Welding Process with ESW

中野 昭三郎*
Shozaburo Nakano

西山 昇*
Noboru Nishiyama

広 紀 治**
Toshiharu Hiro

坪井 潤一郎***
Jun-ichiro Tsuboi

Synopsis:

Surfacing with electro-slag welding process is found superior to that with submerged arc welding process in view of the smaller dilution of base metal and stable welding phenomena even with such a wide electrode as 150mm.

The formation of under-cutting is found to be in close relations to the flow of molten slag and metal which is driven by the electro-magnetic force induced by the welding current. To counteract this force, two solenoids are equipped adjacent to the edges of the electrode. The Lorentz force based on the interaction between welding current and the electro-magnetic field forces molten slag and metal to flow toward the side edges of weld pool. The electro-magnetic control technique can improve flatness of the bead surface at the overlap area adjacent to two weld passes.

Welds deposited on SA 533 B Cl.1 steel with type AISI 309 strip electrode fully meet the mechanical and chemical requirements of JIS Z 3221, G 0575, and AEC Regulatory Guide 1.43.

1. 緒 言

化学反応容器や原子炉炉心管の内面は、耐食性を確保するために、SUS308、SUS347などのステンレス鋼が内張りされる。内張りの方法としては、鋼板厚が40mm以下の場合には、経済的見地から、ロールクラッド法や爆接クラッド法が用いられることが多く、板厚が50mmをこえると、溶接による肉盛りクラッド法が大半を占める。

現用されている肉盛り方法としては、

(1) SAWバンド肉盛り溶接、

(2) 多電極MIG肉盛り溶接、

(3) プラズマアーク肉盛り溶接、

(4) 溶射肉盛り

などがあるが、(3)、(4)の方法は溶着速度が数kg/hであって能率上問題があり、特殊な用途にのみ用いられている。多電極MIG法は、電極数を増せば能率面での問題はないが、その特性上、大気からの窒素吸収が多い、溶け込みが大きいなどの欠点がある。SAWバンド肉盛り法は、溶け込み率が15~20%であり、75mm幅電極まで使用できて能率も良いので、ビード側端部に欠陥が発生しやすい欠点を伴うものの、現在もっとも多用されている。

* 技術研究所溶接研究室主任研究員

** 技術研究所溶接研究室

*** 技術研究所溶接研究室室長・工博

(昭和54年12月6日原稿受付)

肉盛溶接技術の評価は、つぎの観点で行われる。

- (1) 電極組成の低減、および母材からのCピックアップの低減のため、母材溶け込み率を低値に保つ。
- (2) 能率を高めるため、電極幅をなるべく広くする。
- (3) 溶接手直しを低減するため、パス間継目部を含むビードの平滑度を高める。

これらの点を考慮して、当社ではマグレイ法と称する肉盛溶接法を開発した。このマグレイ法は、熱源をアークからスラグのジュール発熱に換えたESW法の適用によって溶け込み率を10%程度に低減し、使用可能な電極幅を150mmまで拡大し、さらに外部磁界を作用させて、熔融スラグ、メタルの流動をコントロールしてビードの平滑度を高め、従来の肉盛法を大幅に改善したものである。

2. ESW肉盛法について

ESW肉盛溶接法は、Fig.1に示すように、電極直下から後方に形成された熔融スラグ浴の抵抗発熱を利用するもので、10mm程度の浅い熔融池内で安定したスラグ通電を行う必要がある。スラグの電気伝導度を高くしてアークを発生させないためには、多量の弗化物添加によるカチオン伝導と、

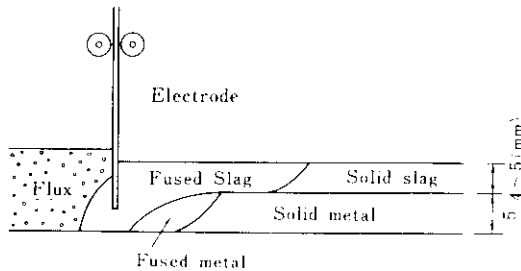


Fig. 1 Schematic view of ESW overlay

TiO₂など半導体を利用した電子伝導が考えられる。しかし、TiO₂を多量に添加するとスラグのはくり性が劣化するので、弗化物添加のほうが好ましい。

Fig.2は、CaO-SiO₂-Al₂O₃系フラックスにCaF₂あるいはNaFを添加して導電の形式およびスラグの比電気伝導度を調べた結果である。弗化物量が40%以下ではアーク導電、50%以上ではスラグ導電となり、40~50%では溶接条件によって

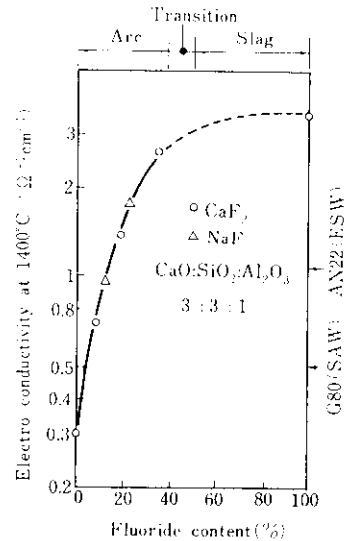


Fig. 2 Effect of fluoride content in flux on electro-conductivity and conduction type of welding current.

変化する遷移域を生ずる。したがって、安定したESW溶接を行うためには50%以上の弗化物を添加すれば良いが、 $\text{CaF}_2 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{SiF}_4 \uparrow$ の反応によって生じる弗化物系ガスの発生を抑制するため、マグレイ法用フラックスKFS-150ではCaF₂を50%弱にとどめ、残余の組成の調整によって電導性を確保している。KFS-150の比電気伝導度は約 $3.0 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ で、通常のSAW用フラックスの $0.5 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ に比べはるかに大きく、ソ連におけるESR、ESW用フラックスのAN-22に比べてもさらに高伝導性である。

ESW肉盛溶接法の特徴は、母材の溶け込み形成機構にある。すなわち、アーク溶融の場合には、Fig.3に示すように、アークは電極の一部から発生し、それが電極幅方向に移動することによって溶け込みが完成する。しかし、アークの移動は必

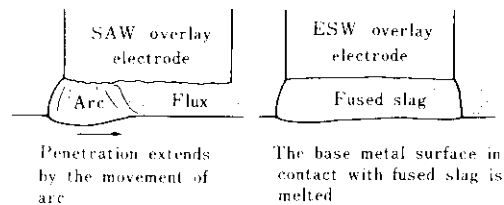


Fig. 3 Penetration characteristics of SAW and ESW overlays

ずしも均一ではなく、母材を溶融させずに移動することもあって、溶け込み不良を招きやすい。この現象は電極幅が広いほど顕著となるので、電極幅は実用上75mmに制限されている。また前パスのスラグが完全に除去されていない部分にはアークが発生せず、スラグ巻き込みとして欠陥となる。

これに反しESW肉盛溶接の場合には、高温スラグが接触した母材は前パスのスラグ残りの有無にかかわらず溶融し、安定した溶け込みが得られる。とくにマグレイ法の場合には溶融池中央部の高温スラグを、外部磁界の作用により、欠陥の発生しやすい溶融池側端部に流動させて溶け込み不良を防止している。

150mm幅の電極を用いマグレイ法で肉盛中の状況を **Photo. 1** に示す。溶融スラグからの輻射熱による過熱を防ぐため、コンタクトジョー周辺は水冷されている。また溶融池の形状、スラグの流動状況は目視観察できるので、溶融中に欠陥防止対策を実施できる。



Photo. 1 View of depositing by using 150mm wide electrode

3. 外部磁界によるアンダーカットの防止

ESW肉盛溶接法では、**Fig. 4** に示すように、電流は電極から溶融池後方に平行に流れる。このような平行電流は、通電されているスラグに近接力を与えて、溶融スラグや溶融金属を溶融池側端から内部に流動させる。このため溶融池端部の溶融金属は不足して、アンダーカットを生成しやすい。

溶接電流によって生じるこの流動力 F (dyn/cm) は、

$$F = iB = i\mu_0 H \quad \dots\dots\dots (1)$$

i : 電流の線密度 (abamp/cm)

B : 磁気誘導 (G)

μ_0 : 透磁率 (H/m)

H : 磁界の強さ (A/m)

となる。ここで、 H は電極端から内部への位置 r の関数であって、

$$H(r) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{I}{W} \right) \int_r^{W-r} \frac{dr}{r} \\ = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{I}{W} \right) \ln \left(\frac{W-r}{r} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

I : 溶接電流 (A)

W : 電極幅 (cm)

で与えられ、 $W = 15\text{cm}$ 、 $I = 2500\text{A}$ においては、**Fig. 5** のように、平均700 dyne/cm程度で電極端ほど大きな分布となる。

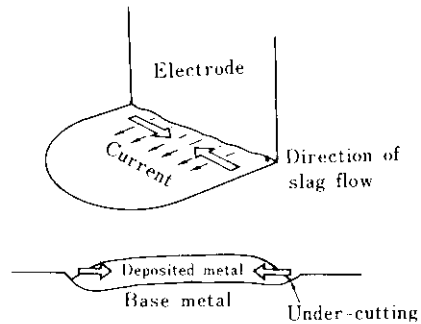


Fig. 4 Schematic mechanism of under-cutting caused by parallel welding current

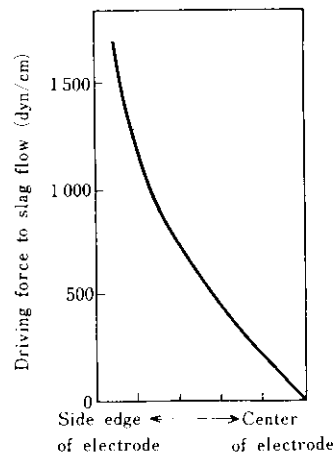


Fig. 5 Calculated driving force to slag flow caused by parallel welding current

アンダーカットを防止するには、この流動力にきつ抗もしくはやば上まわる流動力を外部から付与すれば良い。そこでマグレイ法では、外部磁界を溶接電流に重畳し、溶融スラグおよび溶融金属の流動速度と方向をコントロールしている。その原理をFig. 6に示す。ソレノイドコイルによる、母材に垂直な外部磁場と溶接電流の間にLorentz力を生じさせ、溶融池中央から側端部に向う流動を溶融スラグ、溶融金属に与えるものである。

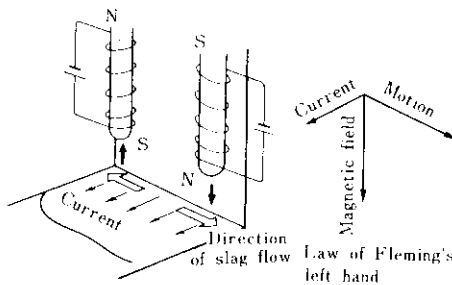


Fig. 6 Control of slag flow with outer magnetic field

Table 1に400巻のコイルの直下15mmに発生する磁界の強さの実測値と、それによって生じるLorentz力の計算値を示す。コイル電流2Aで700 dyn/cmの力が発生し、Fig. 5で得た溶接電流による溶融スラグ、溶融金属の流動力に、十分きつ抗し得ることがわかる。

Photo. 2はソレノイドコイルの装着状況を示すもので、コイルは溶融池からの熱輻射を避けるためコンタクトジョーの前方に設置され、左右独立にコントロールできる。

Photo. 3に得られたビードの断面形状を示す。

4. 外部磁界によるクレータ形状の制御

外部磁界の強さはクレータ形状(溶接中は溶融ス



Photo. 2 Feature of MAGLAY welding machine

ラグの凝固線)を目安に制御すれば良い。Photo. 4は、コイル電流とクレータ形状の関係を示すもので、磁界を付与しない場合にはクレータ後縁中央部が大きく突出して溶融池側端から中央部への流れが強いことを示しており、連続した微細なアンダーカットが見られる。1Aの励磁電流では溶接電流が不均一に分布していたため、クレータが偏って磁界も弱く、アンダーカットは防止されていない。励磁電流2Aではクレータ後縁部は二つの山をなして電極中央から溶融池側端に向う流動が生じたことを示し、アンダーカットは防止される。さらに3Aから5Aと電流が増すにしたがってクレータ後縁の山と谷の間隔が広くなり、流動がより速くなることが示唆される。

Photo. 5は左右対称でない磁界を作用させた場

Table 1 Relation between current through solenoid coil and electro-magnetic force of Lorentz

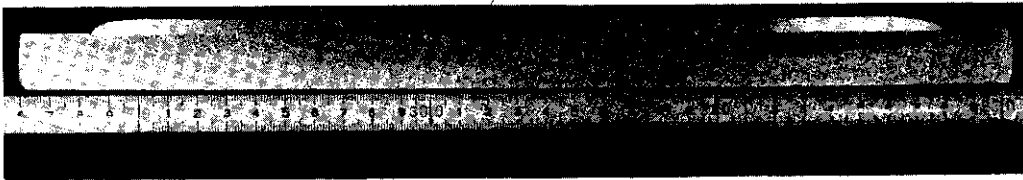
Current through solenoid coil *	1	2	5	10
Magnetic field (measured) (G)	12.5	42	105	215
Lorentz force (calculated) (dyn/cm)	200	700	1743	3600

* 400 turns



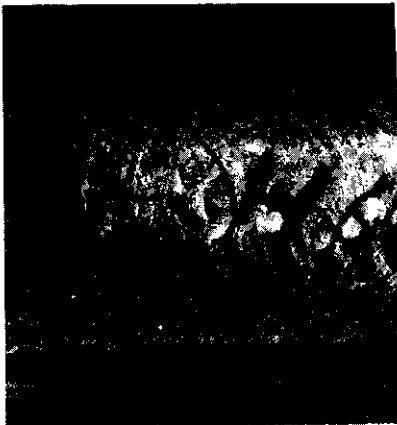
1 pass bead

Location of overlap

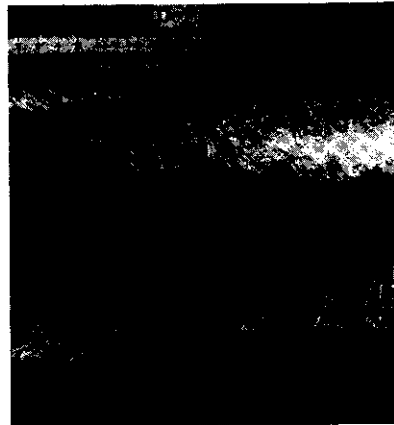


2 passes are laid in parallel

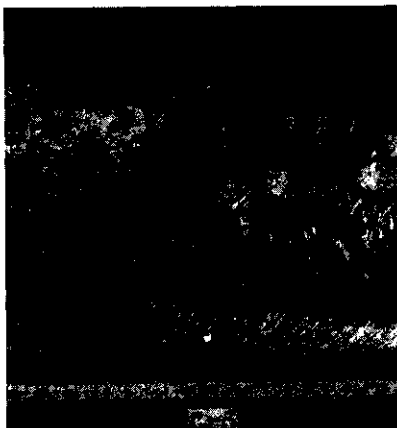
Photo. 3 Examples of transverse section of weld bead



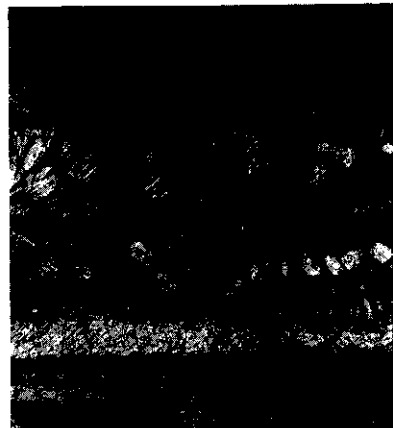
0 A



1 A



2 A



5 A

Photo. 4 Effect of magnetic field (exciting current is indicated) on solidification pattern of deposit metal surface

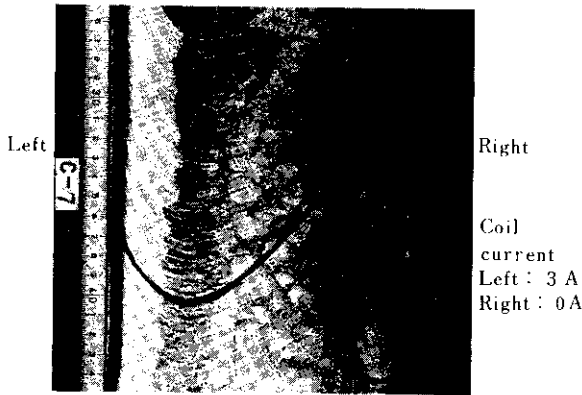


Photo. 5 Irregular solidification pattern of deposit metal surface and under-cutting caused by unbalanced magnetic field

合のクレータ形状を示すもので、溶融スラグは一方方向に回転して磁界の弱い側にアンダーカットが生じる。

Fig. 7に示すように、スラグ流動が速いほど溶

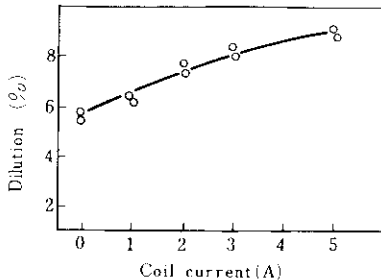
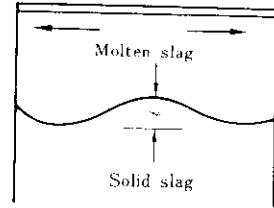


Fig. 7 Effect of magnetic field on dilution of base metal

け込み率は増加する傾向にあるので、アンダーカットを生じない範囲で外部磁界は弱いほうが望ましく、Fig. 8のクレータ形状を目安として外部磁界を制御すれば良い。

5. 電極幅による溶け込み率・ビード形状の変化

Fig. 9に電流密度、電圧、溶接速度を一定にし



- (1) Molten slag should be forced to flow toward the side edges of a weld pool
- (2) The distance l must be controlled between 0 to 40 mm

Fig. 8 Guide to magnetic control of slag flow

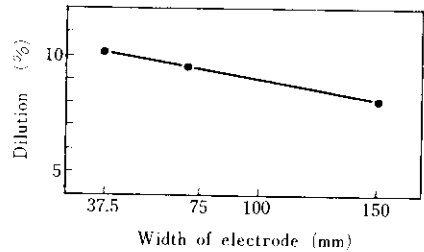


Fig. 9 Influence of electrode width on base metal dilution

た場合の溶け込み率を示す。本溶接法ではビード端部の溶け込みが大きいので、電極幅が狭いほど溶け込み率は大きい。しかしながら後述のごとく溶け込み率は溶接条件によっても大きく変化するので、適当な溶接条件を選べば、電極幅にかかわらず一定の溶け込み率を得ることも可能である。ビードの断面形状は、Photo. 6に示すように、電極幅が狭くなるとやや凸になる傾向があるが、いずれにしても欠陥の発生はない。なお、37.5 mm幅以下の電極では使用電流が小さくクレータも小さいので、磁界の付与は不要である。

6. 溶接金属組成について

溶接金属組成 $X_{depo}(\%)$ は、電極組成 $X_{elec}(\%)$ 、母材組成 $X_{base}(\%)$ 、溶け込み率 α 、スラグ-メタル反応量 β を用いると、次式で与えられる。

$$X_{depo} = (1 - \alpha) X_{elec} + \alpha X_{base} + \beta \quad \dots (3)$$

電極、母材、溶着金属の分析値から求めた β の値を Table 2 に示す。SAW に比べ、C の増分が少

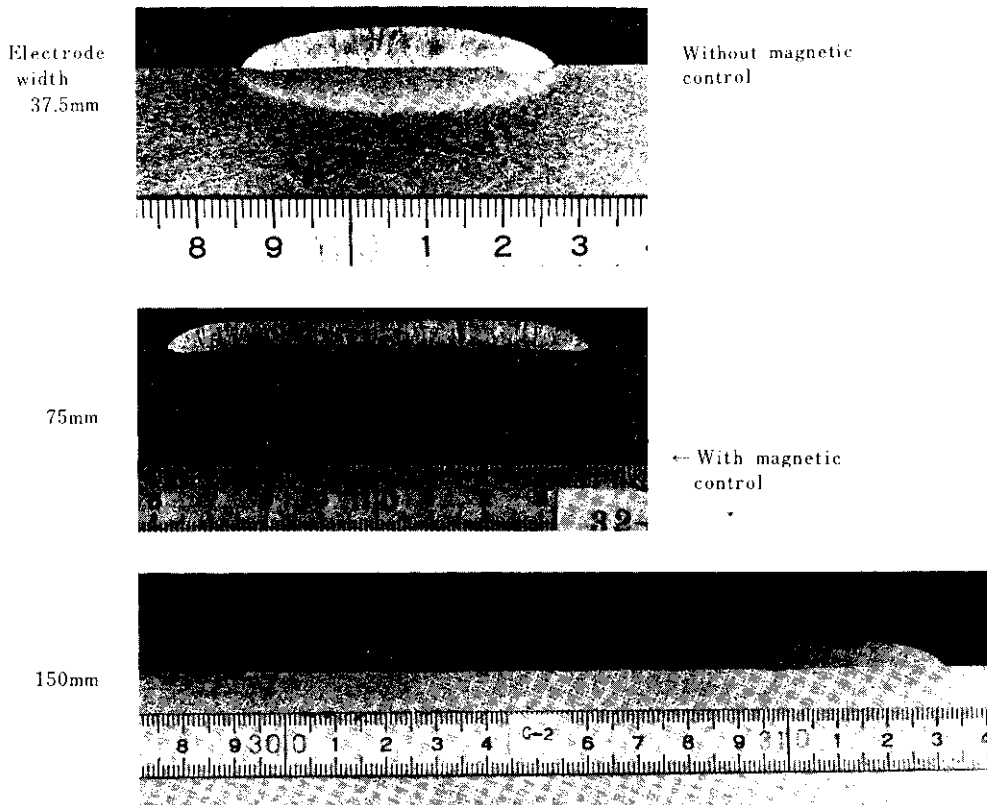


Photo. 6 Transverse section of weld bead deposited with either 37.5, 75 or 150mm wide electrode

Table 2 Increment, β (%), of chemical contents by slag-metal reaction

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	N	O
ESW overlay	0.005	0.15	0.5	0.004	0	0	0.4	0.2	0	0.01
SAW overlay	0.02	--	--	0.004	0	0	--	0.2	0	0.06

$$X_{depo} = (1 - \alpha) X_{elec} + \alpha X_{slag} + \beta$$

ないこと、スラグからの酸素移行が非常に少ないことが特徴である。このため溶着金属はTable 3, Photo. 7に示すように、きわめて清浄なものとなる。

スラグ組成が変化すれば、 β も変化する。たとえば、フラックスに Cr_2O_3 を添加することによって、Fig. 10に示すようにCrの歩留りが向上する。

7. 溶着金属のフェライト量について

溶着金属のフェライト量は、高温われ感受性、耐粒界腐食性、 σ 脆化感受性を知るうえで重要な指標であり、通常、化学プラントに使用される場合に4~8%、原子力材に対しては7~15%が推

Table 3 Comparison of cleanliness between ESW and SAW overlay deposit metal

	Oxygen content (%)	Cleanliness*** (%)
SAW overlay *	0.0637	0.43
ESW overlay **	0.0167	0.12

- * Flux : KBS-200
- ** Flux : KFS-150
- *** Magnification : 3 000

奨されている。溶着金属組成とフェライト量 δ (%)との関係は、Fig. 11に示すDe Longの線図から得られるが、使用の便宜上これを数式化すると、次式が得られる。

$$\delta_1 = 3.2Cr_{eq} - 2.5Ni_{eq} - 24.7$$

Deposited with MAGLAY (flux: KFS-150)

Deposited with SAW (flux: KBS-200)

Photo. 7 Comparison of nonmetallic inclusion content between ESW and SAW overlay deposit metal (×400)

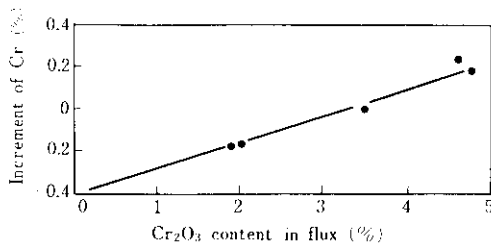


Fig. 10 Influence of Cr₂O₃ content in flux on Cr amount transferred to deposit metal

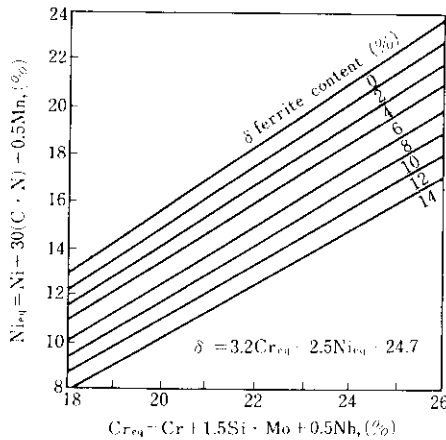


Fig. 11 De Long's diagram

$$= 3.2(Cr_{depo} + Mo_{depo} + 1.5Si_{depo} + 0.5Nb_{depo}) - 2.5[Ni_{depo} + 30C_{depo} + N_{depo}] + 0.5Mn_{depo} - 24.7 \quad (4)$$

KFS-150フラックスを用いる場合は、これに(3)式および表2のβを代入すると、

$$\delta_2 = (1 - \alpha) \{3.2Cr_{elec} + 3.2Mo_{elec} + 1.6Nb_{elec} - 2.5Ni_{elec} + 4.8Si_{elec} - 75(C_{elec} + N_{elec})$$

- 1.25Mn_{elec}\} + \alpha \{3.2Cr_{base} + 3.2Mo_{base} + 1.6Nb_{base} - 2.5Ni_{base} + 4.8Si_{base} - 75(C_{base} + N_{base}) - 1.25Mn_{base}\} - 25.3 \quad (5)}

が得られる。さらに、フラックスにCr₂O₃を添加した場合には、(7)式を用いればよい。

$$\delta_3 = \delta_2 + 1.6(\%Cr_2O_3) \quad (6)$$

Fig. 12に、SA533鋼を用いて行った実験の一例を示す。通常の溶け込み率8～12%では、計算値とフェライトスコープによる測定値は一致している。

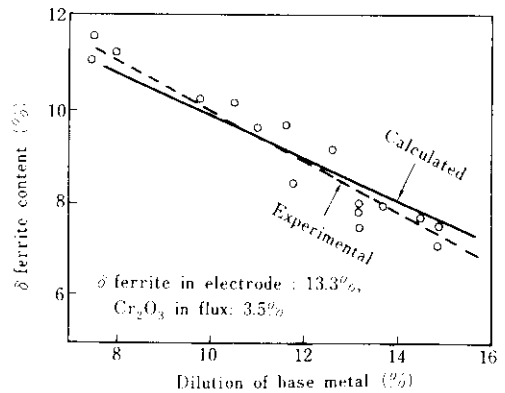


Fig. 12 Comparison between calculated and observed values of ferrite content

Fig. 13は電極のフェライト量と溶着金属のフェライト量との関係調べたもので、電極のフェライト量がきわめて多い場合を除き、計算値と実測値は一致する。さらに電極のフェライト量が8～15%の範囲では、溶着金属のフェライト量は電極に比べ4%近く低いことがわかる。

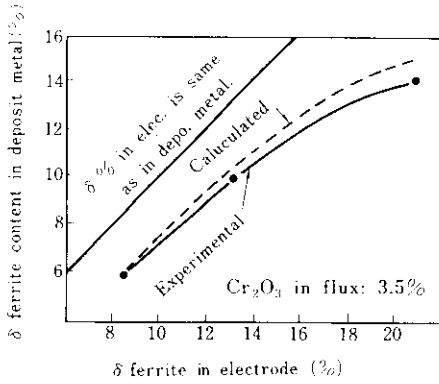


Fig. 13 Comparison of δ ferrite content in deposit metal and that in electrode

8. 溶接条件とビード形状, フェライト量の関係

Fig. 14, 15, 16に溶接条件と余盛高さ, 溶け込み率, フェライト量の関係を示す。溶接条件によって母材の溶け込み深さはそれほど変化しないので, 余盛高さが大きくなる条件ほど, 溶け込み率は小さくなる。

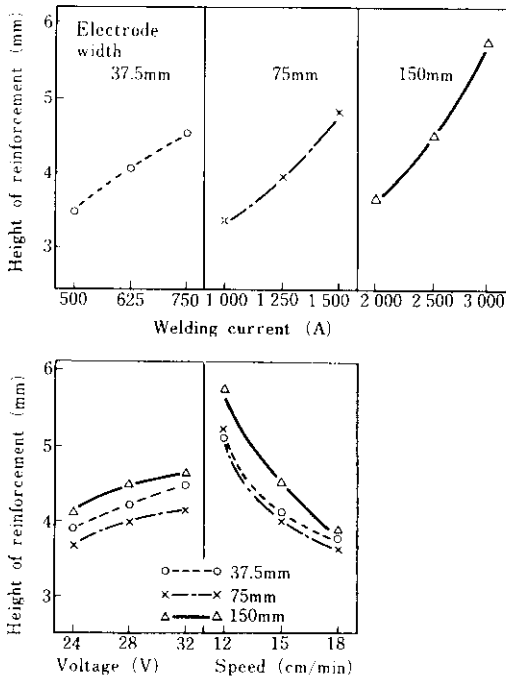


Fig. 14 Effect of welding conditions on height of reinforcement

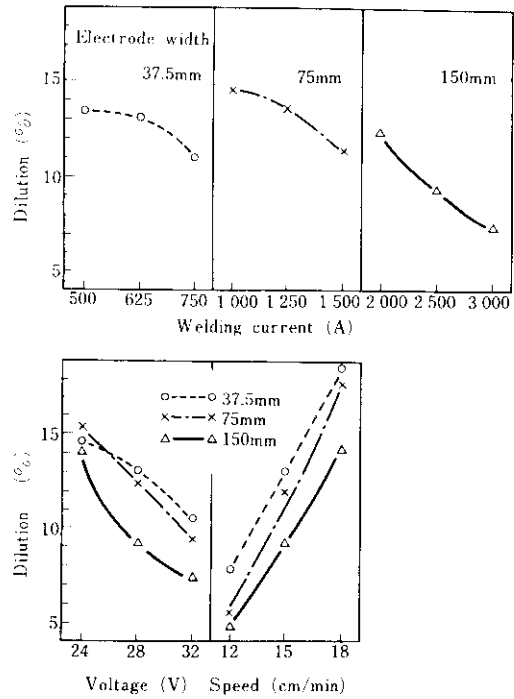


Fig. 15 Effect of welding conditions on dilution of base metal

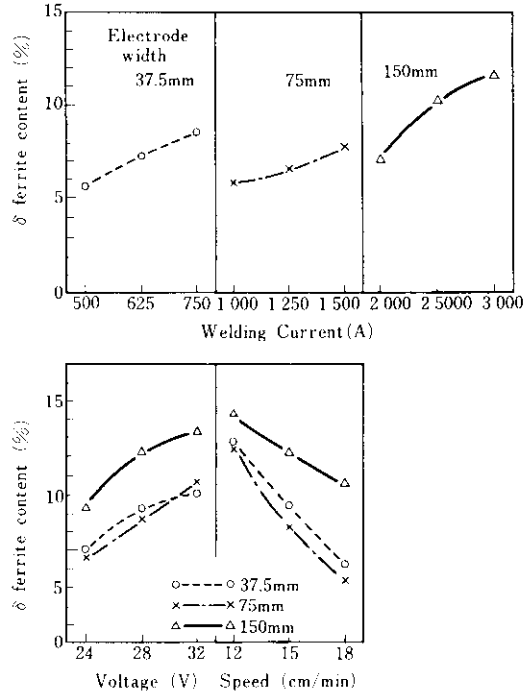


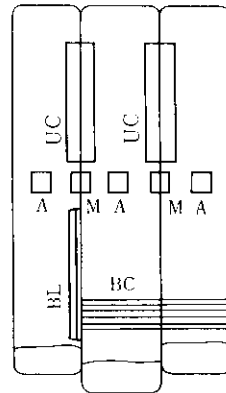
Fig. 16 Effect of welding conditions on δ ferrite content in deposit metal (δ ferrite content in electrode: 13.3%)

9. 溶着金属の確性試験

溶着金属の確性試験の一例として、SA533鋼に SUS308系溶着金属を溶着した場合の試験結果を以下に示す。

Table 4, 5に母材と電極の諸元を、Table 6に溶接条件を示す。Fig.17のように3パスのビードを溶着後、615°Cで45hの後熱処理を行い、試験片を採取した。

試験結果は、Table 7, Photo.8~11に示すように、いずれも良好であった。



BL: Side bend (L)
BC: Side bend (C)
UC: UCC test
M: Micro structure and hardness test
A: Chemical analysis

Fig. 17 Sampling location

Table 4 Base metal used in chemical and mechanical test of MAGLAY deposit metal

Specification	Thickness (mm)	Chemical analysis (%)								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
SA533 B C1.1	163	0.18	0.21	1.41	0.006	0.002	0.68	0.09	0.49	0.009

Table 5 Electrode used in chemical and mechanical test

Specification	Size (mm)	Chemical analysis (%)								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	δ
KWB-309L	0.4×150	0.021	0.50	2.28	0.019	0.002	11.15	21.35	0.0055	13.3

Table 6 Welding condition

Current	DCRP 2500A	Extension	35mm
Voltage	28V	Height of flux	15mm
Speed	15cm/min	Post heat	100°C, 10h
Pre-heat	95~200°C		

Table 7 Test results

Item	Result				Specification						
	Chemical composition of deposit metal (%)	C	Si	Mn	P	JIS Z 3221					
	0.032	0.33	1.39	0.022	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
	0.002	10.07	18.73		≤0.04	≤0.9	≤2.5	≤0.04	≤0.03	9~12	18~21
Ferrite content	As weld : 9.0~10.2 After SR : 5.7~6.5				≥ 5, after SR						
Side bend	L : No crack C : No crack (cf. Photo. 8)				No crack, no inclusion after bending						
Corrosion test	No crack (cf. Photo. 9)				JIS G 0575, No crack after bending						
UCC test	No crack (cf. Photos. 10, 11)				AEC Regulatory Guide 1.43 No crack after removing deposit metal						

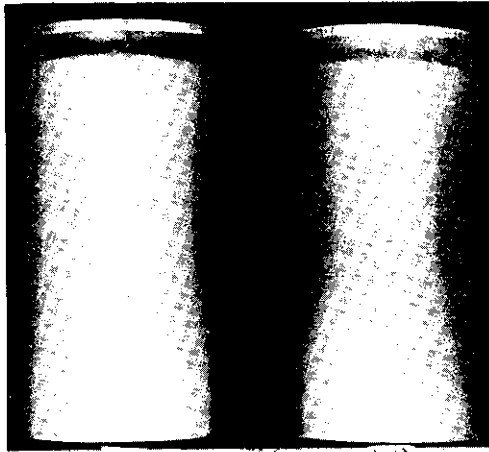


Photo. 8 Results of side bend test (L)

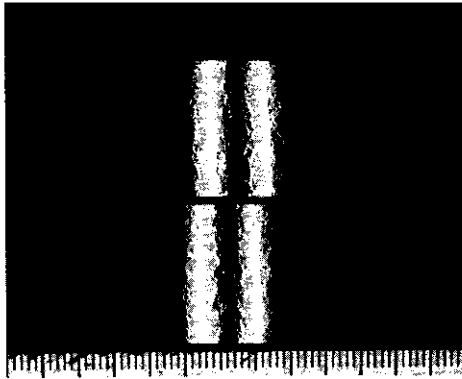
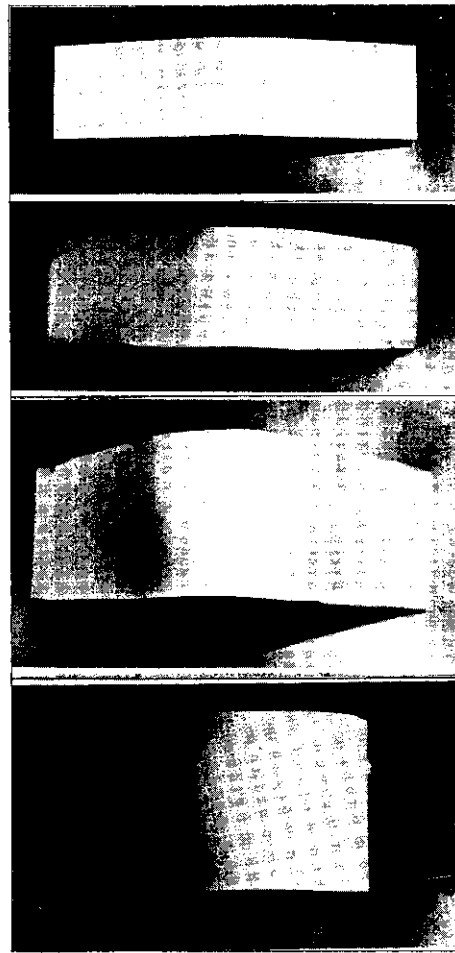
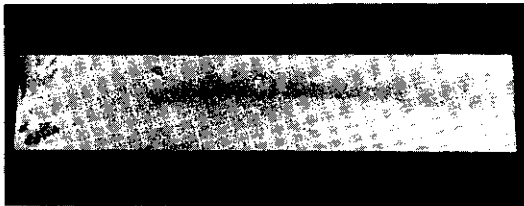


Photo. 9 Corrosion test results conforming to JIS G 0575

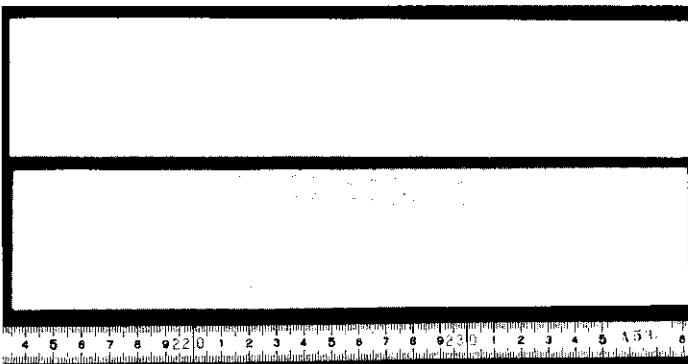


Bend El. angle
45° 6%
90° 16%
135° 18%
180° 21%

Photo. 11 Results of UCC test after bending (G. L. : 50mm)



After removal of cladding



Die penetration test

Photo. 10 Results of UCC test

10. 結 言

高能率、高品質肉盛法として、マグレイ法を開発した。本法では、新開発の特殊組成のフラックスを用い、熱源をアークからスラグのジュール熱に換えることによって、溶け込み率を10%程度に低減し、かつ使用可能電極幅を150mmまで拡大できる。さらに、外部磁界を作用させて熔融スラグ、

熔融金属の流動を制御することにより、ビード重ね部を含め、きわめて平滑な肉盛表面が得られる。またマグレイ法用に開発されたフラックスKFS-150を用いると、溶着金属の δ フェライト量が電極に比べ4%程度低くなり、鋼中酸素は、SAW法の600ppm程度に比し、160ppmと低くなることがわかった。

本法をSA533極厚鋼に適用した確性試験結果は良好であった。

