
I 開先溶接技術 HIVAS 法の開発について

Development of a New Technique for I-Type Fusion Face Welding "HIVAS Process"

赤秀 公造(Kozo Akahide) 浮辺 輝男(Teruo Ukibe) 阿草 一男(Kazuo Agusa)

要旨：

厚板の I 開先両側溶接方法の開発を目的として、サブマージアーク溶接のビード形状について検討し、深溶け込み、低余盛高さのビードを得るには、高電流、高電圧、高速度の溶接条件が適していることを明らかにした。そして、先行電極を前記条件として、後行電極を低電流とする“HIVAS 法”の開発に成功した。HIVAS 法による溶接継手の機械的性能を軟鋼と 50kg/mm² 級高張力鋼で試験した結果は良好で、また同法の耐気孔性はとくにすぐれている。

Synopsis：

Bead shapes in submerged arc welding are examined for the purpose of developing a technique for I-type fusion face welding of plates. It is demonstrated that the welding parameter with a higher current, a higher arc voltage and a higher speed is suitable for a bead shape with deeper penetration and lower reinforcement. On the basis of this information, "HIVAS process" is newly developed. The process consists of the leading electrode under the above mentioned welding parameter and the trailing one under a low welding current. Mechanical properties of welded joints by this process are found satisfactory as the result of testing with either mild steel or 50kg/mm² high strength steel. HIVAS process provides the weld metal with particularly low sensitivity to the porosity forming.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

I 開先溶接技術 HIVAS 法の開発について

Development of a New Technique for I-Type Fusion Face Welding
"HIVAS Process"

赤 秀 公 造*

Kozo Akahide

浮 辺 輝 男**

Teruo Ukibe

阿 草 一 男***

Kazuo Agusa

Synopsis:

Bead shapes in submerged arc welding are examined for the purpose of developing a technique for I-type fusion face welding of plates.

It is demonstrated that the welding parameter with a higher current, a higher arc voltage and a higher speed is suitable for a bead shape with deeper penetration and lower reinforcement.

On the basis of this information, "HIVAS process" is newly developed. The process consists of the leading electrode under the above mentioned welding parameter and the trailing one under a low welding current.

Mechanical properties of welded joints by this process are found satisfactory as the result of testing with either mild steel or 50kg/mm² high strength steel.

HIVAS process provides the weld metal with particularly low sensitivity to the porosity forming.

1. ま え が き

サブマージアーク溶接による両側一層突合せ継手の開先は、板厚 12mm以下で I 型、12~16mm で Y 型、それ以上で X 型とするのが普通である。突合せ継手の多い造船工場では、25mm 以下の厚板は大型船で約 70%、中型船で約 95% を占めるから、もし 25mm 程度の厚板を I 開先で溶接できるならば開先加工が不要になり、溶接の原価低減、省力化、能率化などに大きなメリットがある。

今まで、I 開先溶接が厚板に適用できなかった

のは、深溶け込みのビード中央に発生する高温われと溶着量過多による余盛形状不良のためであった。

筆者らは厚板の I 開先両側溶接を可能とするために、自動溶接でもっとも汎用的な熱源であるサブマージアークをタンデム方式で用いて、先行を高電流・高電圧、後行を低電流とすることにより、高速溶接する方法「HIVAS 法」を開発した。

ここでは、この新しい方法に至る基本的検討結果と、HIVAS 法の諸性質について述べる。

* 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研究員

** 技術研究所溶接研究室研究員

2. I 開先溶接の基本的検討

2.1 溶け込み深さについて

2.1.1 溶接条件と溶け込み深さ

アーク溶接での溶け込み深さは種々の条件に支配されるが、おもに電流、電圧、速度で定まる。しかし、溶け込みの機構は高温でのゆらぎ現象であり、しかもサブマージアーク溶接では溶融池を目視できないので十分には解明されていない。溶け込み深さと溶接条件の関係については、多くの実験報告があるが、いずれも適用できる条件範囲が限定されている。

筆者らの目的とする開発では、深溶け込みが重要な要件の一つであるから、焼成型試作フラックスと低マンガンワイヤ (KW-43) を組合わせ、ワイヤ径を 4 mm ϕ 、その傾斜角度を 0 $^\circ$ 、突出し長さを 25mm として、おもに高速範囲で溶接条件と溶け込み深さの関係を平板上で求めた。

溶接電流 (I) と溶け込み深さ (P) の関係は、Fig. 1 に示すように、 I の増加につれて P は 100A あたり約 1.3 mm で直線的に大きくなる。

溶接電圧 (E) は、アークを安定にするために通常 30~40V で施工されるが、電源の無負荷電圧を 160V まで高くして実験したところ、70V 程度

まで実用しうるビードが得られることが確認できたので、従来試験されていない 50V 以上の場合も含めて溶け込み現象を調べた。

Fig. 2 に示すように、 P は E に対して 10V あたり 1.9 mm 程度の割合で直線的に減少する。

溶接速度 (v) と P の関係は、多くの要因に左右されやすく、一義的に定まらないが、高速範囲の実験結果 $1/\sqrt{v}$ で整理すると、Fig. 3 のようにほぼ直線関係が得られた。

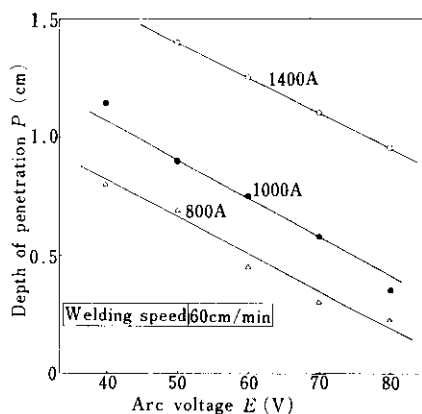


Fig. 2 Relation between arc voltage and depth of penetration

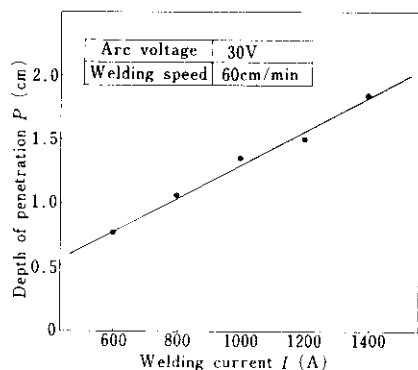


Fig. 1 Relation between welding current and depth of penetration

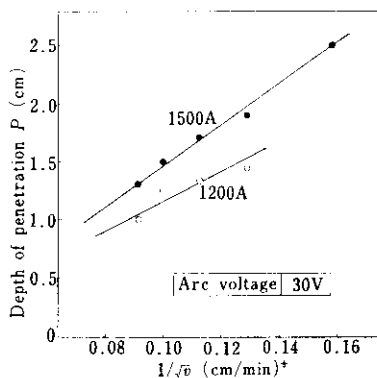


Fig. 3 Relation between welding speed and depth of penetration

2-1-2 溶け込み深さに関する実験式

サブマージアーク溶接の溶け込み深さを表わす一般式は、Jackson¹⁾や渡辺²⁾などにより、それぞれ(1)、(2)式で提案されている。

$$P = K \cdot \sqrt[3]{\frac{I^4}{v E^2}} \quad \text{.....(1)}$$

K : 定数

$$P = A \cdot \frac{I}{\sqrt{v}} + B \quad \text{.....(2)}$$

A, B : 定数

前の実験で、 P は I と $1/\sqrt{v}$ に比例したから、基本的には(2)式に一致するが、ここで高電圧範囲を含む E の寄与を考慮すると、 P は(3)式で示されるはずである。

$$P = A \cdot \frac{I}{\sqrt{v}} + B(E-30) + C \quad \text{.....(3)}$$

A, B, C : 定数

定数 A と C はFig. 4から、定数 B は、Fig. 5からそれぞれ求まり、溶け込み深さ P についての実験式(4)が得られる。

$$P = 1.09 \times 10^{-2} \frac{I}{\sqrt{v}} - 1.90 \times 10^{-2} E + 5.03 \times 10^{-1} \quad \text{.....(4)}$$

ここで、

P : 溶け込み深さ (cm)

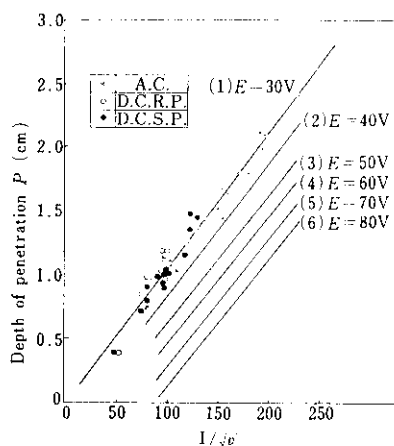


Fig. 4 Relation of arc voltage and $I/\sqrt{v}$ with depth of penetration

I : 溶接電流 (A)

v : 溶接速度 (cm/min)

E : 溶接電圧 (V)

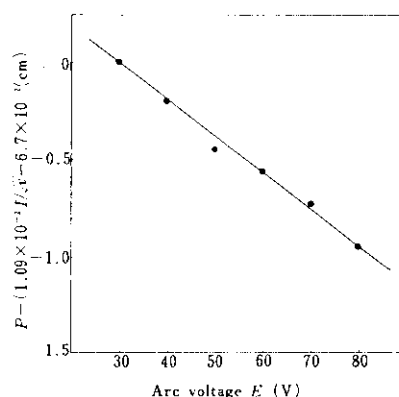


Fig. 5 Effect of arc voltage on depth of penetration

2-2 余盛形状について

ワイヤの比溶融量 (g/A·sec) は、突出し部でのジュール熱を無視すれば、ほぼ一定である。

いっぽう、この溶接法では、ルート間隔がなく開先面積がゼロであるから、余盛量は溶着量と等しくなり、単位長さ当りのビード余盛量は、溶接電流と速度で決定される。したがって、余盛断面積 (S) は、実験で求めた Fig. 6 から(5)式であらわれ、この場合の比溶融量は 4.2 mg/A·sec であった。

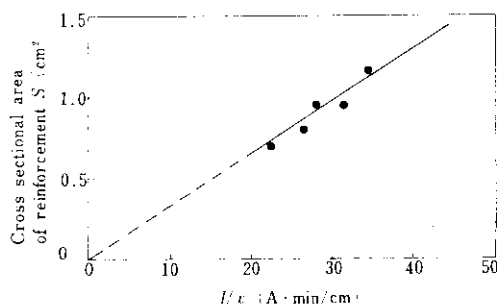


Fig. 6 Relation between I/v and cross sectional area of reinforcement

$$S = 3.2 \times 10^{-2} \frac{I}{v} \quad (5)$$

ここで、

S : 余盛断面積 (cm^2)

I : 溶接電流 (A)

v : 溶接速度 (cm/min)

ビード形状からいえば、この溶着量はできるだけ少ないことが望ましいが、溶け込みも I, v によって変化するので、I 開先溶接ではこの両者を含めて考えねばならない。つまり、溶着量は I/v に比例して増大し、溶け込みは電圧を一定とすれば、 $I/\sqrt{v}$ に比例して深くなるから、小溶着量、深溶け込みにするには電流、速度とも大きくしたほうがよく、電圧は溶着量には関係せず、溶け込みには負に作用するから当然低いほうがよい。

ビードの余盛形状は、外観や応力分布の点からある限界高さ以下で、かつ母材に対する接触角が小さいほどよい。ビード高さには明確な基準はないが、一般に 3mm 程度で施工されている。本溶接法で、 P を満足して S を低下させることはきわめて困難であり、余盛を規定高さ以下にするには、ビード幅をかなり広くしなければならない。余盛を単純に高さ 3mm の長方形に仮定すれば、 I_1 (先行電極溶接電流)、 I_2 (後行電極溶接電流) および v で定まる S に対して必要なビード幅が計算でき、板厚 25, 32mm の I 開先両側溶接を想定して、重ね代 3mm, $E_1=30\text{V}$, $v=60\text{cm/min}$, $I_2=800\text{A}$ とおけば、その溶接条件、ビード形状などは Table 1 のように計算できる。

この結果からビード幅は板厚 25mm で 33mm, 32mm で 37mm となり、これまでの X 型開先でも板厚 25mm で約 30mm 程度であるから、厚板の I 開先溶接では I_1 , v を大、 I_2 を小にするとともに、

ビード幅を広げる技術を考える必要がある。

2.3 後行電極のアーキ形態

低電圧、高電流の深溶け込みビードは、幅が狭く、余盛が高くなり、内部にいろいろな欠陥を生じやすい。これらの欠点を修正し、ビード幅を広くするには、後行電極の熱源形態を考慮する必要がある、ここでは (1) 揺動法、(2) トランスバース法、(3) 高電圧法の 3 方法を試みた。

2.3.1 揺動法

後行電極の簡単な揺動装置を試作し、先行条件を板厚 38mm が溶接可能な $I_1=1500\text{A}$, $E_1=30\text{V}$, $v=60\text{cm/min}$ とし、後行条件をワイヤ径 $d_2=4\text{mm}\phi$, $E_2=40\text{V}$ 一定とする以外は、下記範囲に変化して試験した。なお、極間距離 (D_{12}) は 50mm とした。

溶接電流 (I_2): 800~1400A

電極揺動幅 (f_w): 0~45mm

揺動サイクル (f_c): 184~215 cpm

揺動幅 (f_w) によるビード形状などの変化が Fig. 7 であり、 f_w の増加にしたがってビード幅は増大し、余盛高さは減少しており、ビード形状の改善にこの方法は効果的であることがわかる。

しかし、このような高速溶接では、ビード端部への入熱量が不足し、溶融金属が急冷されるために、アンダカット、オーバーラップ、あるいはスラグ巻き込みなどの欠陥が発生しやすく、とくに、揺動幅が増すにつれてアンダカットの増加が著しい。

揺動サイクル (f_c) によってもビード形状は変化し、Fig. 8 に示すように f_c の増加にしたがってビード幅は若干増加し、余盛高さは減少するが、

Table 1 Tentative calculation of bead shapes and welding parameters

Plate thickness t (mm)	Depth of penetration p (cm)	$I/\sqrt{v}$	Welding speed v (cm/min)	Welding current at leading electrode I_1 (A)	Welding current at trailing electrode I_2 (A)	Cross sectional area of reinforcement S (cm^2)	Bead width W (mm)
25	1.40	135	60	1050	800	0.99	33
32	1.75	167		1290		1.11	37

Fig. 7 の結果と同じく、欠陥の発生率が高くて実用性にとぼしい。さらに、後行電流を変えてもこれらの欠点は完全には改善できず電流が小さい場合はアンダカットが、大きい場合にはオーバーラップが発生する。

この方法での欠陥例を Photo. 1 に示す。

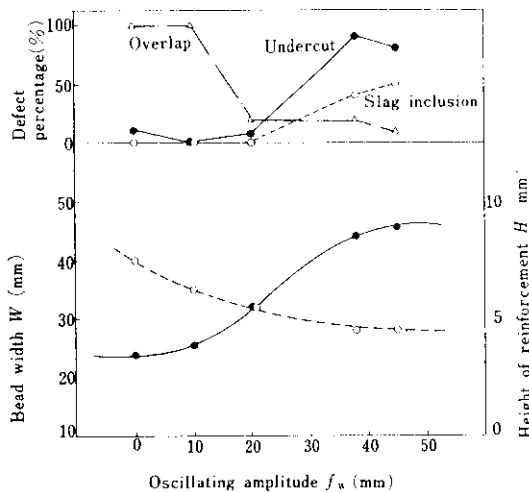


Fig. 7 Effect of trailing electrode oscillating amplitude on bead shapes
(Trailing electrode welding current: 800A)
(Oscillating cycle: 133 cpm)

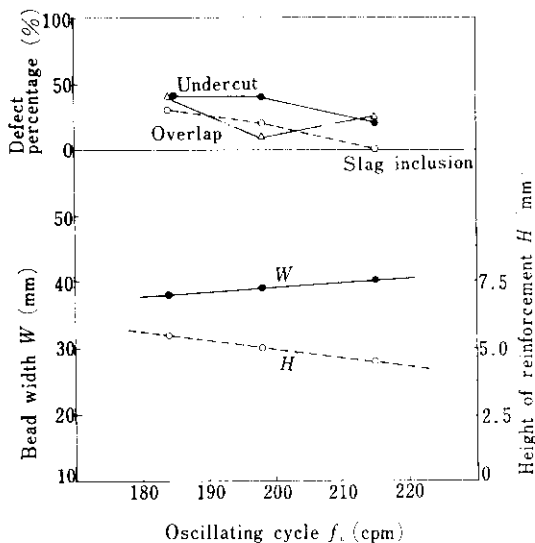
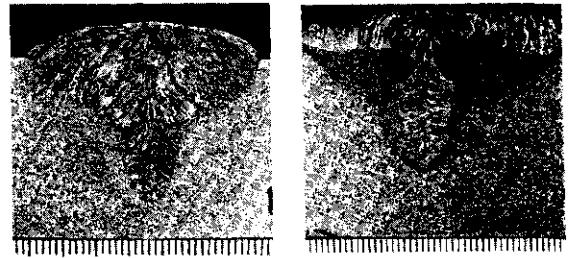


Fig. 8 Effect of trailing electrode oscillating cycle on bead shapes
(Trailing electrode welding current: 800A)
(Oscillating amplitude: 30 mm)



(a) Undercut, overlap (b) Overlap, slag inclusion

Photo. 1 Examples of weld defects at oscillating trailing electrode

2.3.2 トランスバース法

電極の配置を Fig. 9 に示すように後行を同一

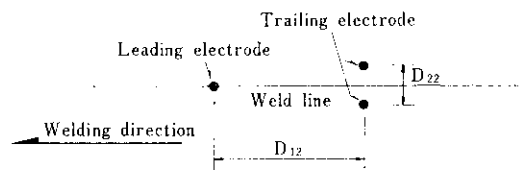


Fig. 9 Electrodes shift of tandem submerged arc welding with transverse trailing one

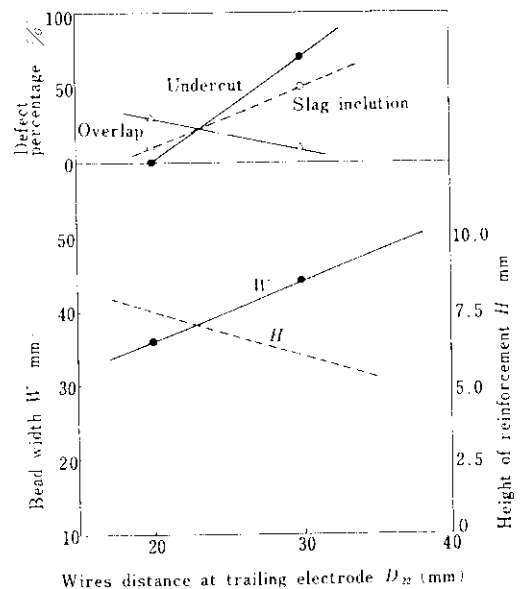


Fig. 10 Effect of wires distance at trailing electrode on bead shapes

(Trailing electrode dia.: 3.2 mm ϕ)
(Trailing electrode welding current: 1200A)
(Trailing electrode arc voltage: 45V)
(Distance of poles: 80 mm)
(Welding speed: 60 cm/min)

給電部より2本の細径ワイヤに通電するトランスバースとして、その電流値(I_2)と間隔(D_{22})を変えて前項と同じ先行条件で、ビード形状などを調べた。

D_{22} を大きくすればビード形状は改善できるが、揺動法と同じく Fig. 10 に示すようにアンダカットなどの欠陥が多く発生する。

いっぽう、電流値を大きくすればビードの両端に与えられる熱量が増大して、Fig. 11 に示すように、欠陥は減少するが、溶着量も増して、余盛高さが6mmを越え、実用的でない。Photo. 2はこの方法によるビード外観と断面マクロ組織の一例である。

したがって、トランスバース法もビード形状と溶接欠陥をとともに満足させられず、I 開先溶接法の後行電極の熱源形態として十分ではない。

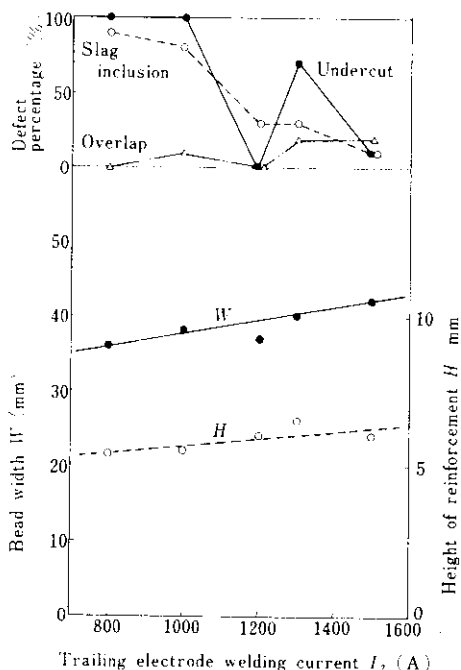


Fig. 11 Effect of welding current of transverse trailing electrode on bead shapes

(Trailing electrode dia.: 4 mm ϕ
Trailing electrode arc voltage: 40V
Distance of trailing electrode wires: 24 mm
Distance of poles: 50 mm
Welding speed: 60 cm/min)



Photo. 2 An example of bead appearance and macro structure at transverse trailing electrode

2.3.3 高電圧法

後行電極を高電圧にして溶接すれば、アークが長くなって母材溶融域が広がり、さらに同一溶着量で入熱が増大するなどの効果が期待できる。そこで、従来試みられたことのない高電圧で溶接を行なったところ、80V程度でも電源特性を適当に選べば、アークは安定に発生することがわかった。したがって、先行条件を板厚25mmの両側溶接ができる $I_1=1100A$, $E_1=30V$, $v=60cm/min$ とし、後行条件を $I_2=1000A$ で、 $E_2=40\sim80V$ に変化して試験したところ、ビード形状は Fig. 12

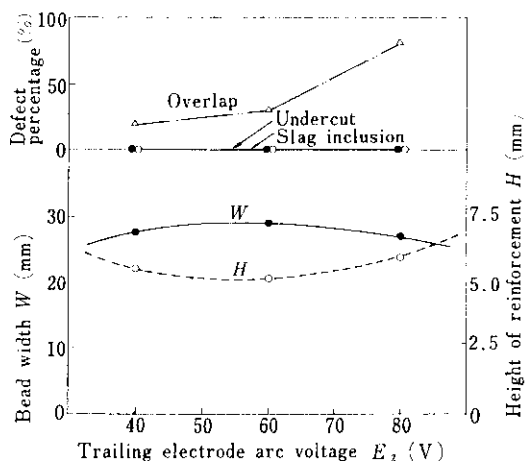


Fig. 12 Effect of trailing electrode arc voltage on bead shapes

に示すように予想に反して電圧が上昇しても幅は増加しなかった。これは、電圧の上昇にしたがってアーク長は大きくなるが、先行電極で溶着された高温のビードにのみ放電されるためと考えられ、後行高電圧法も本溶接法の熱源形態として適当ではない。

2.4 先行高電圧法 (HIVA[®]法)

前述のように、先行電極で溶け込みを確保し、後行電極で表面ビード形状を整える方式を試み、溶け込みは十分に確保できたが、良好なビード形状は得られなかった。したがって、溶け込みは若干犠牲にしても、欠陥防止に重点をおき、先行電極でビード形状をほぼ定める先行高電圧法を検討した。

2.4.1 高電圧とビード幅

多電極溶接での先行電圧は、溶け込みを出すために低く選定され、普通は35V前後で、この場合のビード幅はせまい。これを高電圧にすればアーク長の増大によってビード幅 (W) は当然増加するが、溶け込みは2.1で述べたように、10Vあたり1.9mmの割合で減少する。溶接速度60cm/minとし、ほかの条件を2.1.1の場合と同じにして求めた電圧とビード幅の関係が Fig. 13 であり、実

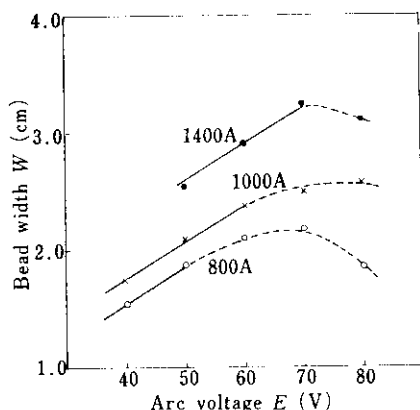


Fig. 13 Relation between arc voltage and bead width

線で示すある限界電圧までは、その上昇につれて W は直線的に増加し、その増加率は電流に関係なく 0.30mm/V であった。また、同じ実験データから電流とビード幅の関係を求めると、電圧に関係なく W は 100A あたり 1.1mm の割合で増加した。したがって、一定速度での I , E と W の関係は (6) 式であらわされ、この計算値と実験値はよく一致した。

$$W = 1.1 \times 10^{-3} I + 3.0 \times 10^{-2} E - 0.50 \quad (6)$$

W : ビード幅 (cm)

いっぽう、限界電圧以上では、ビード幅は逆に減少するとともに、ビードの蛇行などが発生して外観は不安定になる。この理由は明らかでないが、アーク長が大きくなりすぎてステイフネスが失われたためと考えられ、実用しうる溶接電圧の上限値は 1400A で 70V, 1000A で 60V 程度であった。

2.4.2 高電圧と余盛高さ

電圧上昇による溶け込み減少分を電流増加で補なう考えで、 $v=60\text{cm/min}$ として、高電流で高電圧にしたときのビード形状の変化を (4), (5), (6) 式を用いて検討するとつぎのようになる。

同一の溶け込みを得るためには、(4) 式より溶接電流と電圧は (7) 式の関係为满足して変化させねばならない。

$$\Delta I = 13.5 \Delta E \quad (7)$$

ΔI : 溶接電流の変化量 (A)

ΔE : 溶接電圧の変化量 (V)

ΔI による余盛断面積の変化量 $\Delta S (\text{cm}^2)$ は (8) 式で表わせる。

$$\Delta S = 5.3 \times 10^{-4} \Delta I = 7.2 \times 10^{-3} \Delta E \quad (8)$$

いっぽう、 ΔI , ΔE によるビード幅の変化量 $\Delta W (\text{cm})$ は (9) 式で示される。

$$\begin{aligned} \Delta W &= 1.1 \times 10^{-3} \Delta I + 3.0 \times 10^{-2} \Delta E \\ &= 4.5 \times 10^{-2} \Delta E \quad (9) \end{aligned}$$

溶着鋼の増加分 ΔS が、増加したビード幅 ΔW に平均されるとすると、その余盛高さ $H (\text{cm})$ は、(10) 式で求まり、1.6mm になる。これをもとのビードの余盛高さが 5mm 前後であることと対比すれば、高電圧、高電流にするほど、その余盛高

さを減少できることがわかる。

$$H = \frac{\Delta S}{\Delta W} = \frac{7.2 \times 10^{-3} \Delta E}{4.5 \times 10^{-2} \Delta E} = 1.6 \times 10^{-1} \quad \dots (10)$$

2.4.3 後行熱源の効果

先行電極でビード形状を決めるとすると、溶着量からいえば後行電極の意義はなくなるが、高速条件でのアンダカット防止効果は大きい。そこで溶接条件を **Table 2** に示すように先行を1200A, 55V一定とし、後行電流を0~600Aに変化して、後行熱源の効果を確認めた。**Fig. 14** に示すように、後行電流500~600Aではビード幅が著しく増加し、さらにアンダカットの防止にきわめて有効であることも認められ、I 開先溶接法の熱源形態

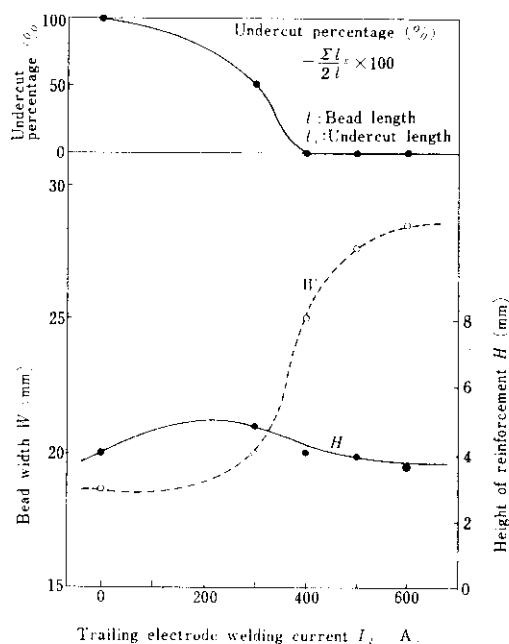


Fig. 14 Effect of trailing electrode welding current on bead shapes

としては、後行500~600Aとした比較的低電流の2電極サブマージアークがとくにすぐれている。

2.4.4 基本溶接条件

先行高電圧、高電流、後行低電流としたタンデム溶接でI 開先溶接の可能性が得られたので、各板厚に対する溶接条件とビード形状について調べた。

後行条件は600A, 50V, 溶接速度は予備実験で選定して70cm/minとし、ワイヤ径、傾斜角およ

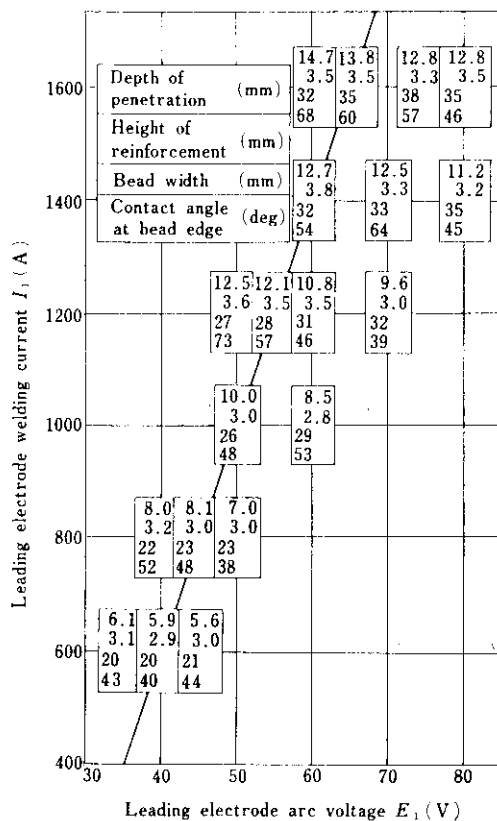


Fig. 15 Relation between welding parameters of leading electrode and bead shapes

Table 2 Welding parameters

Pole	Electrode dia. (mm)	Electrode extension (mm)	Electrode inclination (deg)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed v (cm/min)	Distance of poles (mm)
Leading	4	50	+15	1200	55	70	30
Trailing		40	-10	Variable	50		

び突き出し長さと極間距離は Table 2 に同じくした。先行電極の電流と電圧のいろいろの組合せによるビード形状の変化を Fig. 15 に示す。

図中、斜線上はビード形状を総合的に判断して適正条件と考えられるものであり、1600Aで溶け込みは14 mmになり、25 mm 厚の両側溶接が可能である。

3. HIVAS 法の諸性質

前章で述べたように、HIVAS法は、2電極サブマージアークで先行を高電流、高電圧、後行を低電流として高速溶接する両側I開先溶接法である。ここでは、この新技術の諸性質について述べる。

3.1 溶接方法と特徴

HIVAS法は、(1)特徴的な溶接条件、(2)専用溶接材料、(3)高電圧で安定な専用電源の3つの組合せからなり、これによって、ルートギャップなしで25mmまでの厚板のI開先両側溶接ができる。この溶接法に用いる溶接材料は、高電流、高電圧、高速度の苛酷な条件下で安定した作業性と性能を保持できるようにとくに開発した焼成型フラックスと中マンガンワイヤで、その組合せを Table 3 に示す。

溶接装置は、専用の2電極サブマージアーク溶

Table 3 Welding materials

	Flux	Wire
For mild steel	KB-115	KW-43B
For 50 kg/mm ² high strength steel	KB-155	

接機と電源（大阪変圧器KK製）を組合わせる。

この溶接法には、以下に列挙するように種々の特徴がある。

- (1) 開先加工作業が簡単で能率的である。
- (2) I開先であるから、開先加工でのガス消費量はX開先の場合の1/2以下になる。
- (3) 重ね切断やNC切断で開先加工ができる。
- (4) 溶接条件の選定が簡単で板厚に応じて先行の電流と電圧を変えるだけでよい。
- (5) 高速で溶接ができ、高能率である。
- (6) 溶接材料の消費量が少なく経済的である。
- (7) 溶け落ちの発生が少なく、開先精度を緩和できる。
- (8) さび、プライマーなどに起因する気孔は、ほとんど発生しない。

3.2 溶接条件と溶け込みについて

Table 4 は板厚ごとの標準溶接条件であり、これは溶け込みの重ね代を約3 mm、鋼板の表、裏面を同じ条件で溶接するとして決めたものである。表から明らかなように、先行電極の電流と電

Table 4 Standard welding parameters

Plate thickness t (mm)	Leading electrode		Trailing electrode		Electrode dia. (mm ϕ) (L 4.0 T 4.0)
	Welding current I_1 (A)	Arc voltage E_1 (V)	Welding current I_2 (A)	Arc voltage E_2 (V)	
12	800	45	500	40	Electrode extention (mm) (L 35 T 40)
14	900	47			
16	1000	50			Electrode inclination (deg) (L +15 T -20)
18	1100	52			
20	1200	55	600		Distance of poles 30 mm
22	1400	58			
25	1600	60			Welding speed 70 cm/min

圧が板厚によって変化する以外はほとんど同じ条件で溶接できる。

板厚 12, 20, 25 mm の場合のビード外観と断面マクロ組織の例を **Photo. 3~5** に示す。

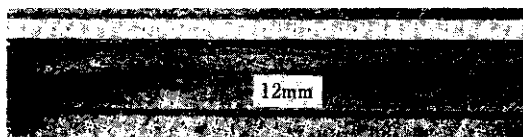


Photo. 3 An example of bead appearance and cross sectional macro structure (plate thickness 12 mm)

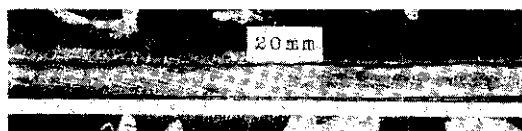


Photo. 4 An example of bead appearance and cross sectional macro structure (plate thickness 20 mm)



Photo. 5 An example of bead appearance and cross sectional macro structure (plate thickness 25 mm)

溶け込みは溶接条件や開先形状の変化で変動するが、両側溶接では重ね代でこれらを緩和している。

同一条件での溶け込みの変動を調べた結果、代表例を **Photo. 6** に示すように、HIVAS 法は高速溶接であるから、その変動が少なく ± 1 mm 程度であった。**Table 4** の標準条件では重ね代を 3 mm にしたが、これは一例であって、各工場の設備、作業管理状況、要求品質などを勘案して作業標準を決める必要がある。

溶接条件と溶け込みの関係を実験式(4)で求めたが、これと 2・2・4 の HIVAS 法での実測値とを比較すると、**Fig. 16** の実線範囲で示すように後者のほうが 0.5~1.5 mm 程度大きい。これはおもに電極の傾斜角の違いによるものであり、HIVAS 法で先行電極の傾きだけを変えた実験でも、ほぼ同程度の差が確かめられた。

したがって、HIVAS 法での溶け込み深さは

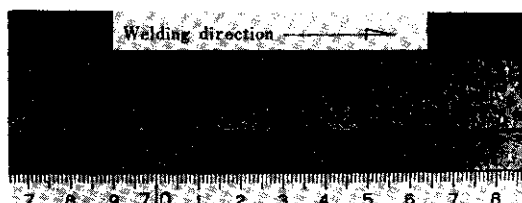


Photo. 6 An example of change in penetration

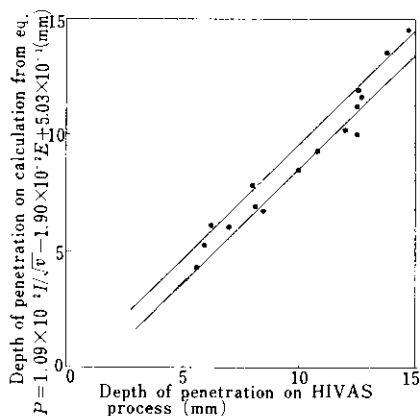


Fig. 16 Relation between HIVAS process and calculation at depth of penetration

(4) 式での計算値に約 1mm 加えればよく、電流、電圧、速度を変えたときの標準条件からの溶け込み深さの増減を計算すると、Table 5 のようになり、施工条件の選定やトラブル時の処置などに利用できる。

つぎに、この溶接では後行電極は電流も低く溶け込みに関係しないから、溶接線からの電極のずれによる溶け込みの変化は先行電極で調べればよい。

HIVAS法のビード横断面形状は半円に近いので、電極のずれによる溶け込みの減少は少なく、Fig. 17 に示すようにずれ 2mm に対して全電流

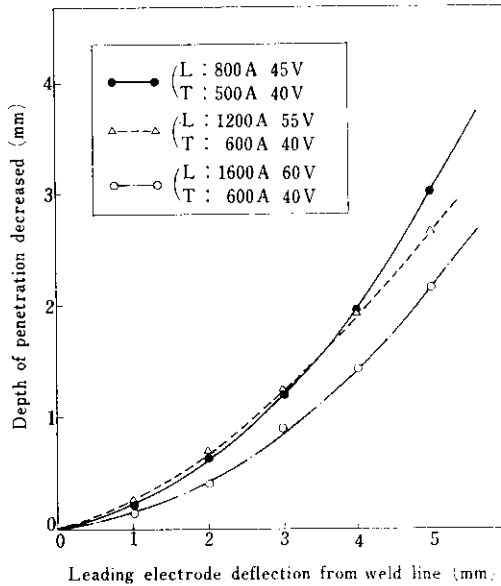


Fig. 17 Effect of leading electrode deflection from weld line on depth of penetration

範囲で溶け込み深さの減少は 1mm 以下である。したがって、この溶接方法では、I 開先溶接であるにもかかわらず、溶接線と電極位置の合致はほかの深溶け込み溶接ほど厳密に制御する必要がない。

3.3 継手性能について

Table 6 に示す板厚 25mm の軟鋼と 50kg/mm² 級高張力鋼を用いて、Table 3 の溶接材料、Table 4 の標準溶接条件で継手溶接を行なった。

Table 6 Chemical compositions of base plates used (%)

Plate	C	Si	Mn	P	S
Mild steel	0.14	0.08	1.19	0.008	0.020
50 kg/mm ² high strength steel	0.15	0.36	1.28	0.011	0.018

継手引張試験と継手から採取した溶接金属引張試験 (JIS-Z3111 A2 号試験片) の結果を、Table 7 と Photo. 7, 8 に、自由曲げおよび側



Photo. 7 An appearance of fractured tensile test specimens of mild steel welded joint

Table 5 Depth of penetration changed by the variation of welding parameters (mm)

ΔI (A)	Δv (cm/min)			ΔE (V)			Δv (cm/min)			ΔE (V)		
	-5	0	+5	-5	0	+5	-5	0	+5	-5	0	+5
-100	+0.4~ -0.1	-0.5~ -1.0	-1.5~ -2.0	-0.3	-1.3	-2.2	-1.0~ -0.7	-1.9~ -1.6	-2.9~ -2.6			
0	+1.8~ +1.3	+0.8~ +0.4	-0.1~ -0.6	+1.0	0	-0.9	+0.3~ +0.6	-0.7~ -0.4	-1.6~ -1.3			
+100	+3.1~ +2.7	+2.2~ +1.7	+1.2~ +0.8	+2.3	+1.3	+0.4	+1.5~ +1.9	+0.6~ +0.9	-0.4~ 0			

ΔI : Variation of leading electrode welding current

ΔE : Variation of leading electrode arc voltage

Δv : Variation of welding speed

Table 7 Tensile test results

Plate	Tensile properties of welded joint		Tensile properties of weld metal (JIS Z 3111)			
	T.S. (kg/mm ²)	Fracture location	Y.P. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	El. (%)	R.A. (%)
Mild steel	49	Base metal	32	47	37	66
	49	Base metal	32	48	39	66
50 kg/mm ² high strength steel	56	Base metal	—	56	30	63
	57	Base metal	—	56	30	63

曲げ試験結果を Table 8 と Photo. 9~12 に、衝撃試験結果を Table 9 に示す。

溶接部の強度は、溶接金属引張での結果から明らかのように、軟鋼、50kg/mm² 級高張力鋼ともに適正な値であり、曲げ延性は両鋼種とも良好で、いずれの試験でも180°の曲げ角度でわれはまったく認められない。

この溶接法では、母材の稀釈率が大きくなり、溶接金属の炭素量が従来より若干多くなるが、衝撃値は造船でのNK規格グレード2を満足する。

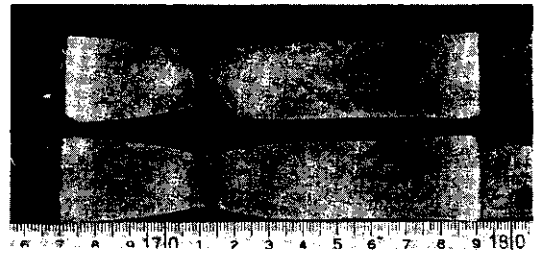


Photo. 8 An appearance of fractured tensile test specimens of 50 kg/mm² high strength steel welded joint

Table 8 Bend test results

Plate	Free bend*		Side bend
	G.L. (mm)	El. (%)	
Mild steel	28.1	45	Good
	28.7	43	Good
50 kg/mm ² high strength steel	29.9	40	Good
	30.2	41	Good

* Bending angle : 180°

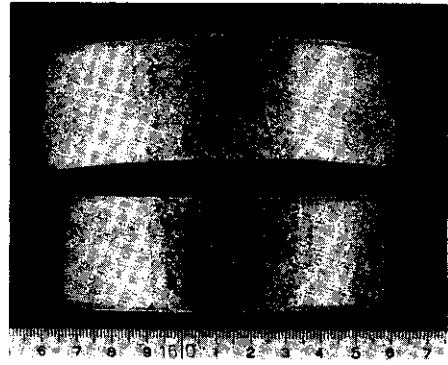


Photo. 9 An appearance of free bend test specimens of mild steel welded joint

Table 9 Charpy impact test results

Plate	Tested temperature (°C)	V-notch Charpy impact value (kg·m)
Mild steel	0	7.9, 6.6, 6.4, 5.3 (6.6)*
	-10	6.1, 4.7, 3.8, 3.6 (4.6)*
50 kg/mm ² high strength steel	0	7.5, 7.2, 7.2, 6.2, 5.0 (6.6)*
	-7	7.5, 7.4, 6.6, 5.7, 4.8 (6.4)*

() * Mean value

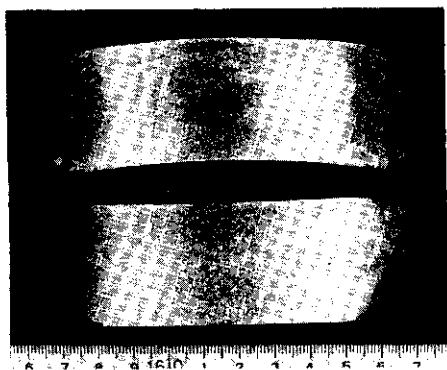


Photo. 10 An appearance of free bead test specimens of 50 kg/mm² high strength steel welded joint

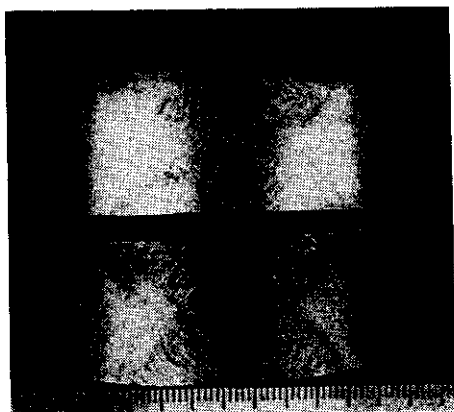


Photo. 11 An appearance of side bend test specimens of mild steel welded joint

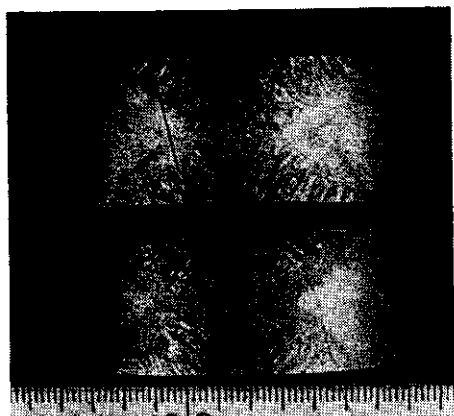


Photo. 12 An appearance of side bend specimens of 50 kg/mm² high strength steel welded joint

溶接金属のマクロおよびミクロ組織を **Photo. 13~16**に示す。

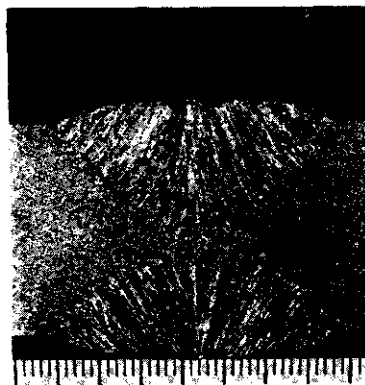


Photo. 13 Macro structure of mild steel weld metal

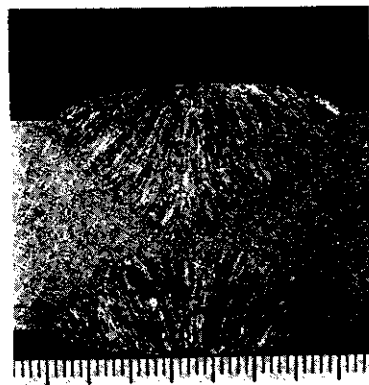


Photo. 14 Macro structure of 50 kg/mm² high strength steel weld metal

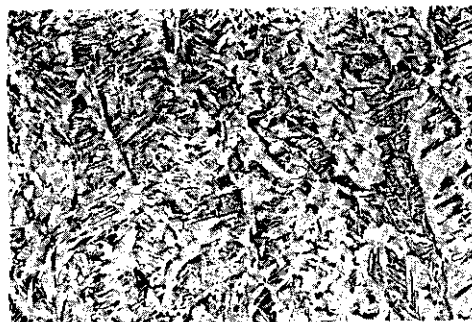


Photo. 15 Micro structure of mild steel weld metal $\times 100 \left(\times \frac{13}{16} \right)$

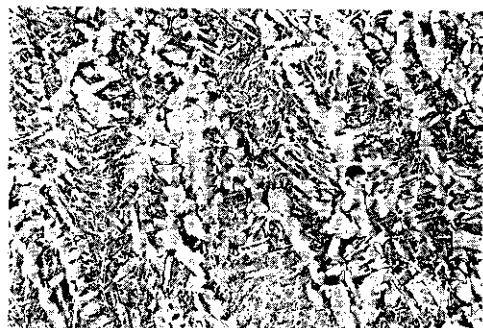


Photo. 16 Micro structure of 50 kg/mm² high strength steel weld metal $\times 100 \left(\times \frac{13}{16} \right)$

継手部の硬さは Fig. 18, 19 に示すとおりで、いずれも溶接金属、熱影響部とも異常は認められない。

以上のとおり HIVAS 法による溶接継手は良好な性能を備えている。

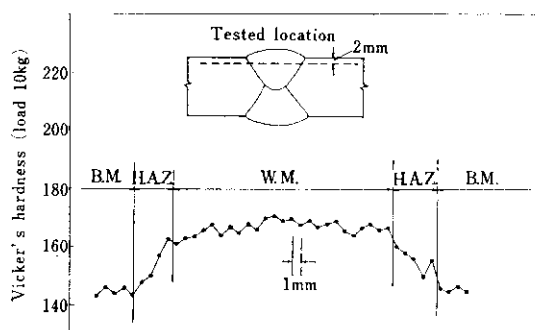


Fig. 18 Hardness of mild steel welded joint

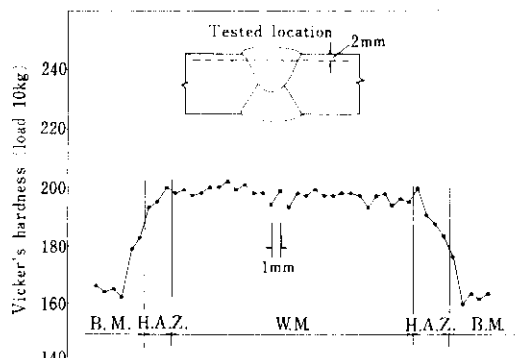


Fig. 19 Hardness of 50 kg/mm² high strength steel welded joint

3.4 気孔について

3.4.1 プライマーと気孔

気孔は溶接ビードに発生する欠陥のうちでもっとも多く、高速溶接でとくに発生しやすいから、能率上その発生率の低い溶接方法や材料が要求されている。

HIVAS 法は、高速にもかかわらず入熱が大きいので気孔は発生しにくい、実用上の限界を調べる目的でウォッシュプライマー（エバボンド）とジंकリッチプライマー（ジッキー #8000）の2種類を選び、膜厚 20, 30 μ に塗布した鋼板で気孔発生傾向を調べた。

母材には板厚 16 mm の軟鋼（SM41）と 50 kg/mm² 級高張力鋼（SM50）を用いて Table 10 の溶接材料と組み合わせ、Table 4 の板厚 16 mm の条件で片側だけ溶接した。

Table 10 Materials used for test

Wire	Flux	Plate						
		Kind	Thickness (mm)	Chemical compositions(%)				
				C	Si	Mn	P	S
KW-43B	KB-115	Mild steel	16	0.19	0.03	1.00	0.011	0.027
	KB-155	50 kg/mm ² high strength steel	16	0.15	0.34	1.32	0.019	0.031

Table 11 Effect of primer on porosity sensitivity of weld metal

Plate	Kind of primer	Thickness of primer (μ)	Porosity	
			Pit (No./m)	Blow hole (No./400mm)
Mild steel	Wash primer	20	0	0
		30	0	0
	Zinc rich primer	20	0	0
		30	0	0
50 kg/mm ² high strength steel	Wash primer	20	0	0
		30	0	1 (1mm ϕ)
	Zinc rich primer	20	0	0
		30	0	0

Table 11 がその結果であり、気孔はウォッシュプライマー 30 μ 塗布で1個認められた以外はまったく発生していない。なお、ここで溶接金属表面まで現われた気孔をピットとし、内部に閉じこめられたものをブローホールとして区別した。

プライマーの膜厚は通常 30 μ 以下であるから、この溶接法では実用上プライマーに起因する気孔はほとんど発生しないと考えられる。

**Photo. 17** Examples of bead appearance on primer coated mild steel

膜厚 30 μ でのビード表面状況の例を **Photo. 17** に示す。

3.4.2 さびと気孔

鋼板に発生したさびを定量化することはむずかしいため、水酸化第二鉄を溶接線上に均一に散布してさびによる気孔発生傾向を調べた。また比較材として突き合わせ仮付後1日に3回塩水をかけながら海岸壁に15日間放置して **Photo. 18** のように極度にさびを発生させた試験片を加えた。

Table 12 の供試材料の組合わせで、**Table 4** の板厚 12mm と 20mm の条件で片側だけ溶接した。

水酸化第二鉄の散布量と気孔の関係を **Fig. 20** に、軟鋼での

Table 12 Materials used for test

Wire	Flux	Kind	Thickness (mm)	Plate				
				Chemical compositions (%)				
				C	Si	Mn	P	S
KW-43B	KB-115	SM 41	25	0.17	0.03	1.07	0.010	0.023
	KB-155	SM 50	25	0.17	0.40	1.38	0.021	0.019

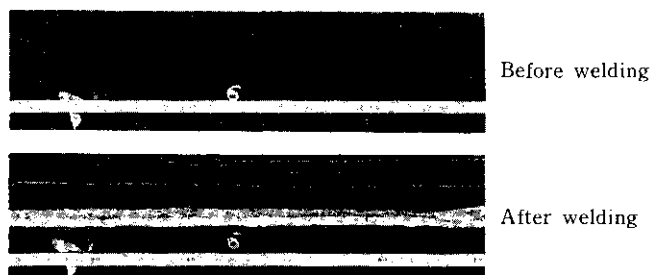


Photo. 18 An example of bead appearance on rusty steel

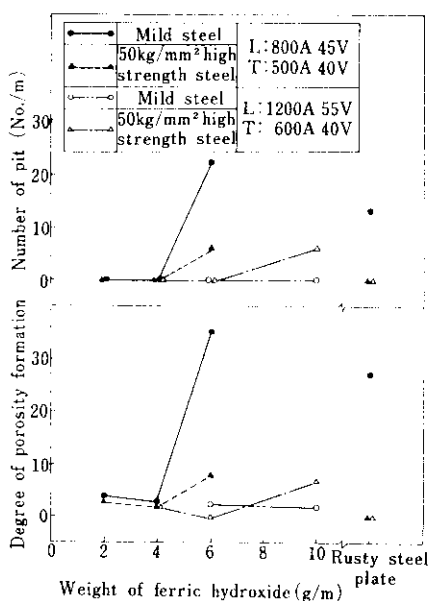


Fig. 20 Effect of rust on porosity sensitivity of weld metal

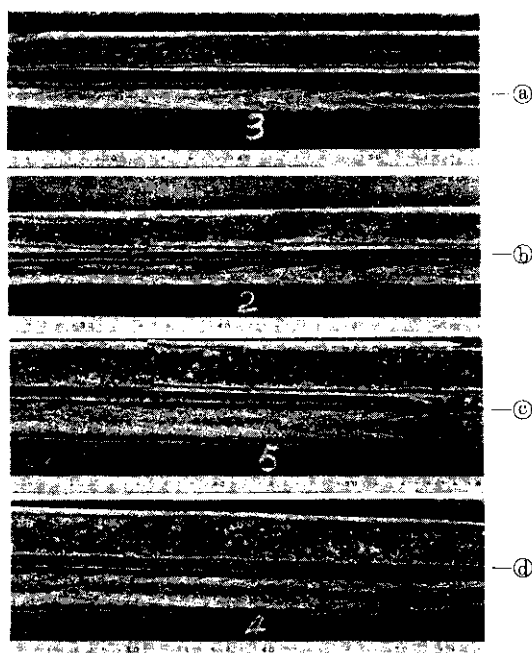
ビード表面状況の代表例を **Photo. 19** に示す。ここで気孔発生度はビード長さ 400 mm について X 線透過試験で検出された気孔を直径 1mm ϕ 以下, 1~2mm ϕ , 2mm ϕ 以上に分類し, その発生数におのおの係数 1, 2, 3 をかけて合計した数値で表わした。

気孔の阻止限界は両鋼種ともにほとんど同じで, 入熱が大きいほど広くなり, 12mm の条件で水酸化第二鉄は 4 g/m, 20mm の条件で 6 g/m である。これらの限界以下でも内部に若干気孔が認められ, その発生傾向はプライマー鋼板にくらべ

てやや強いが, JIS-Z3104によって判定すると, いずれも 1 級となり, この範囲であればとくに健全性を要求される場合以外は問題がない。

なお, さびの発生を極端に促進させた比較材での気孔数が水酸化第二鉄 4~6g/m 散布材のそれに相当することから, 実施工での鋼板のさびは, 多い場合でも水酸化第二鉄 2g/m 相当以下

と考えられるので, この溶接方法はさびに対しても強く耐気孔性は良好である。



- (a) Ferric hydroxide: 2 g/m L 800A, 45V
- (b) Ferric hydroxide: 6 g/m L 800A, 45V
- (c) Ferric hydroxide: 6 g/m L 1200A, 55V
- (d) Ferric hydroxide: 10 g/m L 1200A, 45V

Photo. 19 Examples of bead appearance on mild steel scattered ferric hydroxide

4. ま と め

HIVAS 法の特長について述べたが, 2 電極サブマージアークで先行高電流, 高電圧, 後行低電流として溶接できることを確認した。

- (1) 高速で行なうサブマージアーク溶接の溶け込み深さは次式で表わせる。

$$P = 1.09 \times 10^{-2} \cdot \frac{I}{\sqrt{v}} - 1.90 \times 10^{-2} E + 5.03 \times 10^{-1}$$

- (2) サブマージアーク溶接でのビード幅は、速度を一定とすれば電流と電圧に比例する。
 (3) 先行深溶け込み、後行広幅熱源による I 開先溶接法の開発は困難であり、後行熱源としての揺動電極、トランスバース電極は、いず

れも高速では欠陥の発生率が高い。

- (4) 先行高電流、高電圧、後行低電流で高速条件を選べば、板厚 25 mm まで良好な I 開先両側溶接が可能である。
 (5) HIVAS 法による軟鋼および 50 kg/mm² 級高張力鋼の継手性能は良好で、その衝撃値は造船での NK 規格グレード 2 を満足する。
 (6) HIVAS 法の耐気孔性は良好で通常程度のプライマー、さびでは気孔はほとんど発生しない。

参 考 文 献

- 1) Jackson C. E., Shrubbsall A. E. : Welding J., **32** (1953), 172 S
- 2) 渡辺, 佐藤 : 溶接学会誌, **24** (1955), 512, **25** (1956), 18

