

# ノンガス半自動溶接に関する研究 (第1報)

— 溶け込みについて —

藤 盛 紀 明  
桐 生 栄 五 郎  
新 見 芳 男

## § 1. まえがき

ノンガス半自動溶接<sup>1)</sup>は高能率、かつ、機動性に富むために、建築工事現場における溶接方法として急速に普及しつつある。しかしながら、この溶接方法が実用に供されるようになったのはごく最近のことであり、その溶接機やワイヤはまだ完成されたものといえず、いずれも幾つかの問題を有している。

それゆえ、われわれはこの溶接方法を熟知して、建物の品質確保のために適切な管理を行なう必要がある。この報告は溶接にとってもっとも基礎となる溶け込みについてのものである。

## § 2. 実験計画

### 2.1 調査項目

調査項目は溶け込み深さ( $P$ )、溶け込み幅( $W$ )、溶け込み面積( $F_1$ ) (図-1 参照)と各種溶接条件の関係である。溶接作業方法、のど厚、開先形状、溶着金属の冶金的性質等を検討するためには、この $P \cdot W \cdot F_1$ を知らねばならない。

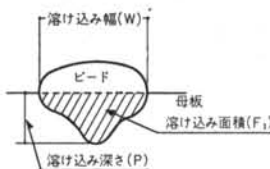


図-1 調査項目

### 2.2 試験体

試験体は条件を単純化するために、平鋼板にシングルビードを置いたものによった。鋼板は寸法100mm×300mm×25mmで、その上にシングルビードを2本置いた。この試験体から図-2に示す位置で測定用試験片を採取した。1条件につき1シングルビードを置き、3つの測定値を

得た。溶接に先きだち板表面の錆およびミルスケールをグラインダーで取り除いた。2列目のビード置きは試験体を完全に冷却し、スパッタ等を除去し、ひずみの有無を確かめてから行なった。溶接条件の概要を表-1に示す。

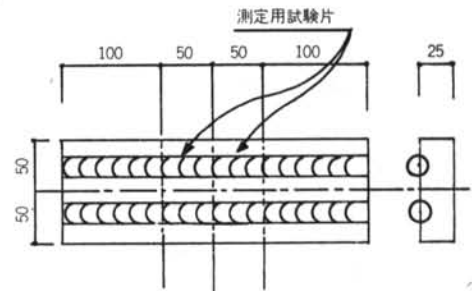


図-2 試験体概要

項 目	条 件
溶 接 機	大阪電気製B500型交流アーク溶接機 大阪電気製 DAIDEN AUTO A 4 —T型ノンガス半自動溶接機
溶 接 工	自動走行装置使用
溶 接 ワ イ ヤ	神戸製鋼所製OW-56 φ3.2
溶 接 電 流	150アンペア～500アンペア
溶 接 電 圧	20ボルト～34ボルト
ワイヤエクステンション	20mm～60mm
溶 接 速 度	10cm/min～50cm/min
作 業 方 法	下向、平板上一層盛り

表-1 溶接条件の概要

### 2.3 測定方法

測定方法の概要を表-2に示す。

溶け込み面積( $F_1$ )の測定のために太陽電池を利用した面積測定装置を試作した。図-3、図-4、にその概要を示す。太陽電池に一定の光量を与えれば得られる出力は受光面積に比例する。すなわち、太陽電池の上に測定物

を置き、太陽電池の出力の変化を測定することによって、測定物の面積を知ることができる。測定物の面積( $F_0$ )とその時の太陽電池の出力( $A$ )との間には(1)式のような関係がある。

$$F_0 = a - b \cdot A \quad \dots(1)$$

ここで、 $F_0$ : 測定物の面積(mm<sup>2</sup>)

$A$ : 太陽電池の出力(mA)

$a, b$ : 太陽電池の形状、測定物の光の透過度、周囲の状況等による係数

測定物の面積( $F_0$ )が太陽電池の全面積に一致した時(太陽電池の表面がすべて覆われた時)の太陽電池の出力( $A$ )が0 mAであれば、 $a$ は太陽電池の全表面積、 $b$ は単位面積当りの出力の逆数となるはずである。試作した装置による測定例を図-5に示す。測定物は写真用印画紙である。これに使用した太陽電池の全表面積は314mm<sup>2</sup>である。図中の実線は $a=314$ mm<sup>2</sup>とした時の(1)式である。実測値は実線より出力が大きくなっており、光源の光量の多いほどその傾向が大きい。これは周囲の乱反射や測定物の遮光の不完全さによると考えられる。

この実験では $F_0 = 0$ mm<sup>2</sup>の時  $A = 10$ mAとなる光量の場合の実験式  $F_0 = 324 - 32.4A \quad \dots(2)$ を採用した。

測定項目	測定方法(使用計器)	
溶接条件	(1) 溶接電流: $I$ (Amp)	変流器: Type2241, 0.2級貫通式. 交流電流計: Type 2013, 0.5級, CT外付用, 可動鉄片形(以上横河電機製)
	(2) アーク電圧: $V$ (Volt)	交流電圧計: Type 2014, 0.5級, 可動鉄片形(横河電機製)
	(3) 溶接速度: $S$ (cm/min)	ストップウォッチ
	(4) ワイヤエクステンション: $EXT$ (cm)	スケール
溶け込み	(1) 溶け込み深さ: $P$ (cm)	Scale Lupe( $\times 10$ )
	(2) ビード幅: $W$ (cm)	〃
	(3) 溶け込み面積: $F_1$ (cm <sup>2</sup> )	太陽電池式面積測定装置(自製, 詳細別記)

表-2 測定方法の概要

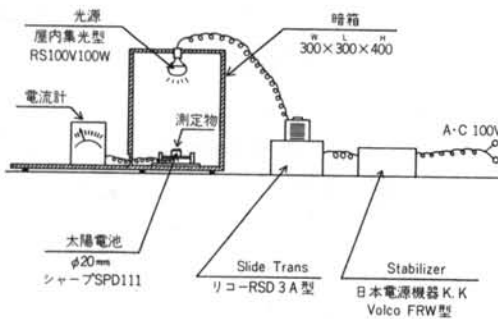


図-3 太陽電池式面積測定装置

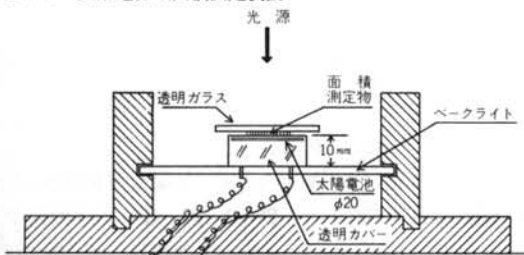


図-4 太陽電池詳細

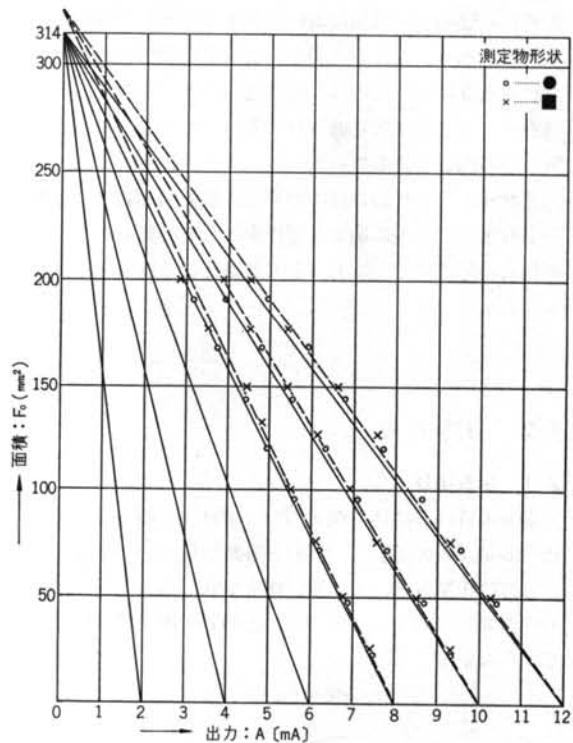


図-5 太陽電池式面積測定装置のキャリブレーション

### § 3. 溶け込み深さ

#### 3.1 実験結果

溶け込み深さ( $P$ )と溶接電流( $I$ ), 溶接電圧( $V$ ), 溶接速度( $S$ ), ワイヤエクステンション( $EXT$ )単位時間当りの供給熱量( $Q$ )との関係を図-6から図-10に示す。その概要を表-3に示す。

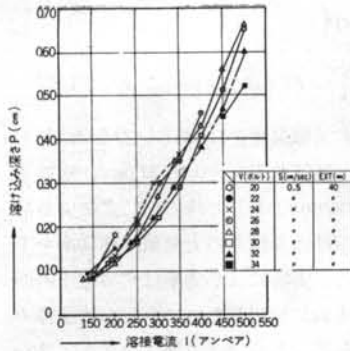


図-6 P~I

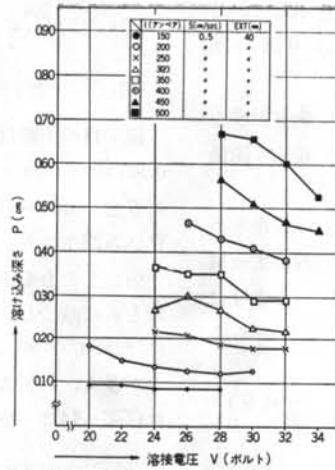


図-7 P~V

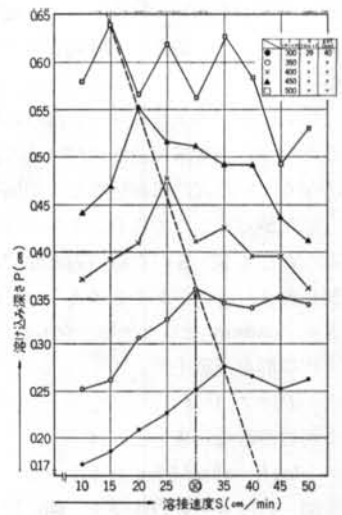


図-8 P~S

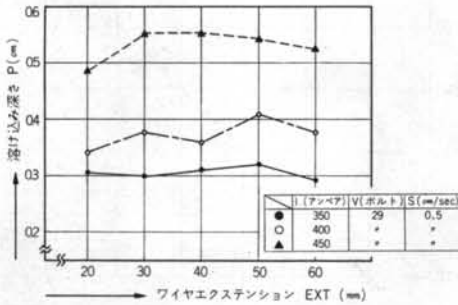


図-9 P~EXT

溶接条件	各溶接条件値が増加した時の溶け込み深さ(P)の変化	
	増・減	説明
溶接電流 (I)	増	ほぼ二次曲線的に増加する(詳細は表-4参照)
溶接電圧 (V)	減	—
溶接速度 (S)	増から減	ある速度までは増加するが、それ以後は減少する
ワイヤエクステンション (EXT)	変化なし	明瞭な影響は認められない
供給熱量 (Q)	増	—

表-3 溶接条件と溶け込み深さの関係

### 3.2 実験式

溶け込み深さ(P)と各種溶接条件との間には、従来次の形の実験式が提唱されている。

$$P = K \cdot I^\alpha \cdot S^\beta \cdot V^\gamma \cdot h^\delta \quad \dots(3)$$

ここで h : 板厚

K, α, β, γ, δ : 定数

よく利用される Jackson の実験式<sup>2)</sup>では、 $\alpha = \frac{4}{3}$ ,

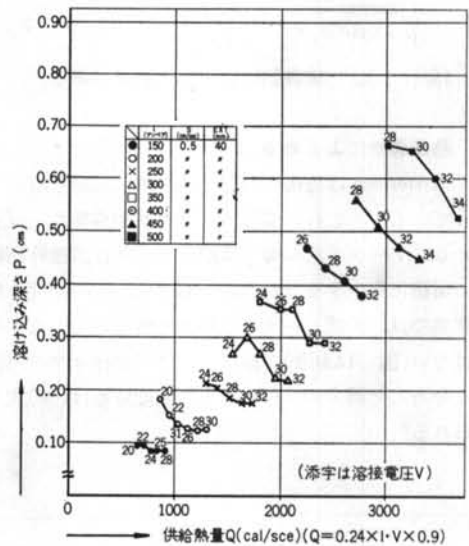


図-10 P~Q (添字はV, 熱効率をIとする)

$$\beta = -\frac{1}{3}, \quad \gamma = -\frac{2}{3}, \quad \delta = 0 \quad \text{である。}$$

溶接協会のディープフィレット研究委員会は深溶け込み溶接の場合は次の形の実験式が良いとしている<sup>3)</sup>。

$$P = a + bS + c \frac{I}{\sqrt{S}} \quad \dots(4)$$

単位時間当りの供給熱量(Q)や単位溶接長当りの供給熱量(Q/S)は、I, V, Sの条件を含有しているため、実験式のパラメータとしては便利はらずであるが、溶接の熱効率(η)が溶接条件によって複雑に変化する(例えば一般に溶接電圧が上がればηは減少する)ため、実験式のパラメータとしては余り有効ではない。図-10では

便宜上  $\eta=1$  としているため、一定の傾向を示しているが、ばらつきが多く、実験式を求めることは困難である。

ワイヤエクステンションは溶け込み深さに余り影響を与えない、また溶接速度は溶け込み深さと一義的な関係がなく、実験式に組み込むことが困難である。

したがってここでは  $P$  と  $I$  および  $V$  との関係式を求める。ただし 図-8 の点線の右と左では溶け込みの生成機構に大きな違いがあると考えられるが(後述)、ここでは  $S=30\text{cm/min}$  としたデータをもとに実験式を求める。

次の形を仮定する

$$P = f(V)I^\alpha \quad \dots(5)$$

両辺の常用対数をとれば

$$\log P = \alpha \log I + \log f(V) \quad \dots(6)$$

図-11 に  $\alpha \sim V$  の関係を、図-12 に  $\log f(V) \sim V$  の関係を示す。この図より次の実験式が導かれる。

$$P = \frac{I^{(0.3716V+0.7044)}}{10^{(0.0993V+2.13)}} \quad \dots(7)$$

図-13 は(7)式を実験値に適用した結果である。

### 3.3 熱伝導論による考察

N. Christensen は母板の溶融寸法を熱伝導論を用いて計算している<sup>4)</sup>。これは溶接アークを移動点熱源と仮定している。アーク手溶接等では溶接アークは溶接棒径に等しい面積に集中するといわれており<sup>5)</sup>、この程度の熱分布状態では、溶接アークを点熱源と仮定しても大きな誤差はない(図-14参照)。溶接アークが半径  $a$  cm の円に均一に分布した場合のアーク直下の温度分布は(8)式で与えられる<sup>6)</sup>。

$$T = \frac{2q\kappa}{\pi a^2 \lambda S} \left\{ \exp\left(-\frac{S}{2\kappa} R\right) - \exp\left(-\frac{S}{2\kappa} \sqrt{R^2 + a^2}\right) \right\} \quad \dots(8)$$

図-14の実線は銅の熔融温度を1,535°C、熱伝導率 $\lambda$ を0.85cal/cm $\cdot$ sec $\cdot$ °C、熱拡散率 $\kappa$ を0.07cm<sup>2</sup>/sec、溶接速度 $S$ を0.5cm/sec(30cm/min)とした時の(8)式による溶け込み深さである、溶け込み深さの実測値は熱効率を1と仮定したものである。実際には熱効率は溶接電圧の増加と共に減少し、当実験に使用したワイヤと溶接条件ではほぼ80%~95%の範囲である。(実験データにバラつきが多く、当報告には採用出来なかった。)これを考慮すれば図-14はバラツキはより少ないものになると予想さ

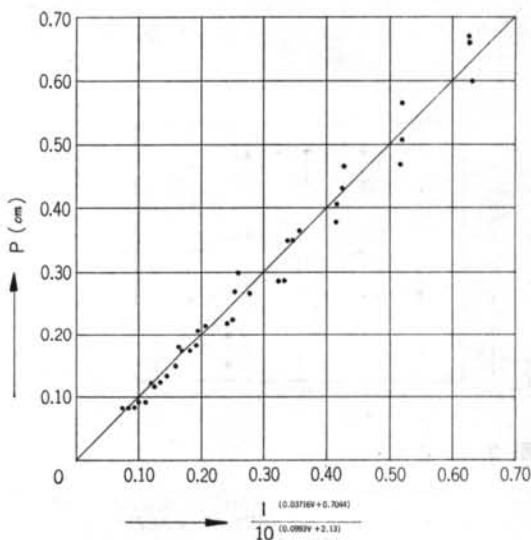


図-13 (7)式の実験値への適用

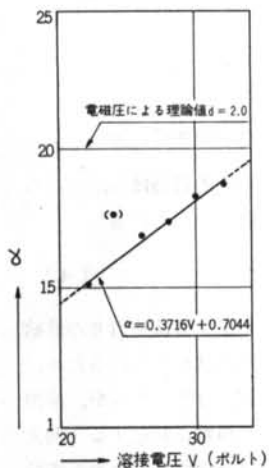


図-11  $\alpha \sim V$

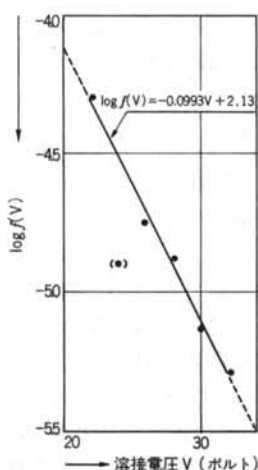


図-12  $\log f(V) \sim V$

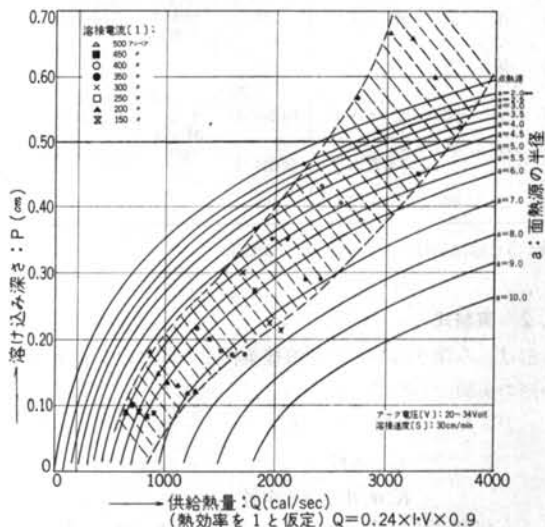


図-14 熱伝導による理論値と実験結果

れる。

傾向として溶接電流が300A以下では、熱伝論的解釈が可能であるが、350A以上では全く違った傾向を示す。これは高電流範囲ではアークの掘り下げ作用が溶け込み深さを決定する主要な要因になっているためと推定される。なお、溶接電圧20~34ボルトの範囲での熱効率が95%~80%とすれば、溶接アークの分布の大きさは半径4.5mm~6.5mmと推定される。使用したワイヤの半径は1.6mmなので、アークの分布領域はワイヤ径よりかなり広い。これはノンガス半自動溶接用ワイヤはフラックスがコアとなっており、このフラックスの発生するガスによってアークが押し広げられ円錐状になるためと考えられる。

### 3.4 掘り下げ作用による考察

溶接中、溶融池には電礎圧力、プラズマ気流、溶接棒

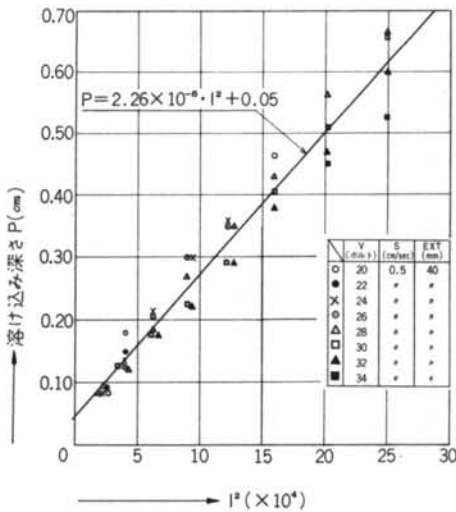


図-15  $P \sim I^2$

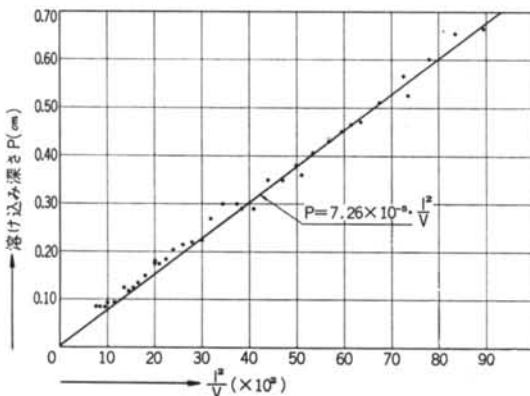


図-16  $P \sim I^2/V$

の溶融粒子の衝突力等による下向きの力が働らき溶融池が掘り下げられる<sup>7)</sup>。

溶融池に働らく全電礎圧力はアーク柱が円錐状ならば  $I^2$  の関数となる<sup>7)</sup>。プラズマ気流は陰極前面およびアーク柱各断面間の圧力差によって発生する<sup>7)</sup>。円錐状アーク柱の中心軸へ向う圧力も  $I^2$  の関数となる。

従来溶け込み深さを  $I^\alpha$  の関数とした場合の  $\alpha$  は  $1 \sim 1/3$  程度とみられていたが、今回の実験ではノンガス半自動溶接の  $\alpha$  は溶接電圧が増大するほど大きくなり、溶接電圧22~32ボルトの範囲では1.5~1.9となる。通常使用される溶接電圧では1.8~1.9でほぼ2に近い。これから考えて、今回使用したノンガス半自動溶接用ワイヤによるアーク柱形状は円錐に近く、溶接電圧が大きいほど円錐状に近づくものと推定される。

図-15は  $P=KI^2+b$  とした時のものである。当実験におけるKはほぼ  $2.26 \times 10^{-6}$  である。図-16は  $P=K_1 I^2/V$  とした時のものである。当実験における  $K_1$  はほぼ  $7.26 \times 10^{-6}$  である。この式におけるVの取り扱いには物理的根拠はないが、この式でかなり近似できる。

### 3.5 溶接速度およびワイヤエクステンションの影響について

溶け込み深さと溶接速度の関係が図-8に示すような傾向を示すのは、溶着金属量と掘り下げ作用力のバランスによる。図-8における溶け込み深さにピーク値を与える溶接速度は、溶融池に未融部の露出する境界速度を示していると考えられる。すなわち図-8における点線の左がわでは溶接速度が遅いため単位溶接長当りの溶着金属量が多く、そのため掘り下げ力が未融金属部に到達しない。したがって溶け込み深さは掘り下げ力よりもむしろ、熱伝導によって決定される。例えば溶接速度30cm/minの場合、溶接電流350アンペアがその境界電流となる。写真-1~写真-8は溶接速度30cm/minの場合の各種溶接電流におけるマクロ写真である。写真から分かるように溶接電流350アンペアを境として、これより低電流では単純溶け込み形（熱伝導に支配される溶け込み形状）となり、高電流では中央溶け込み形（掘り下げ作用に支配される溶け込み形状）となる。（図-17参照）



図-17 溶け込み形状の3タイプ



写真-1

$I = 150$ アンペア  
 $V = 28$ ボルト  
 $S = 0.5$ cm/sec.  
 $EXT = 40$ mm



写真-2

$I = 200$ アンペア  
 $V = 28$ ボルト  
 $S = 6.5$ cm/sec.  
 $EXT = 40$ mm

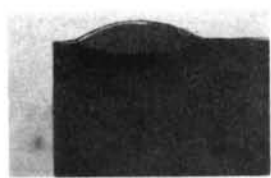


写真-3

$I = 250$ アンペア  
 $V = 28$ ボルト  
 $S = 0.5$ cm/sec.  
 $EXT = 40$ mm



写真-4

$I = 300$ アンペア  
 $V = 28$ ボルト  
 $S = 0.5$ cm/sec.  
 $EXT = 40$ mm

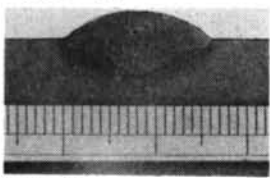


写真-5

$I = 350$ アンペア  
 $V = 28$ ボルト  
 $S = 0.5$ cm/sec.  
 $EXT = 40$ mm

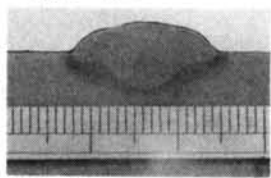


写真-6

$I = 400$ アンペア  
 $V = 28$ ボルト  
 $S = 0.5$ cm/sec.  
 $EXT = 40$ mm

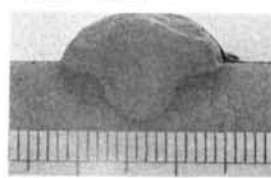


写真-7

$I = 450$ アンペア  
 $V = 28$ ボルト  
 $S = 0.5$ cm/sec.  
 $EXT = 40$ mm

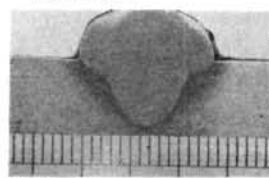


写真-8

$I = 500$ アンペア  
 $V = 28$ ボルト  
 $S = 0.5$ cm/sec.  
 $EXT = 40$ mm

## § 4. 溶け込み幅

### 4.1 実験結果

溶け込み幅( $W$ )と溶接電流( $I$ ), 溶接電圧( $V$ ), 溶接速度( $S$ ), ワイヤエクステンション( $EXT$ ), 単位時間当りの供給熱量( $Q$ )との関係を図-18~図-22に示す。

### 4.2 考察

溶け込み幅( $W$ )の生成機構は次のように考えられる。まず溶接アークから供給される熱とその伝導によって母板はある幅に溶融する。その後溶融池内の対流作用によってさらに幅広く溶融する。最終的には余盛部分の流動による広がりによってさらに幅広く溶融する。

以下に各溶接条件について定性的な考察を加える。実験式および理論的考察は2報以下に報告する。

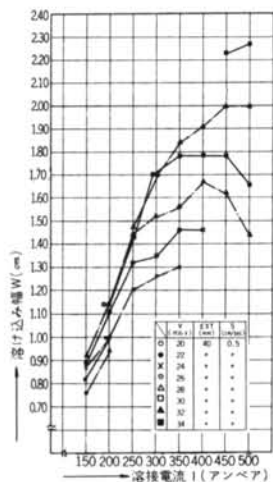


図-18  $W \sim I$

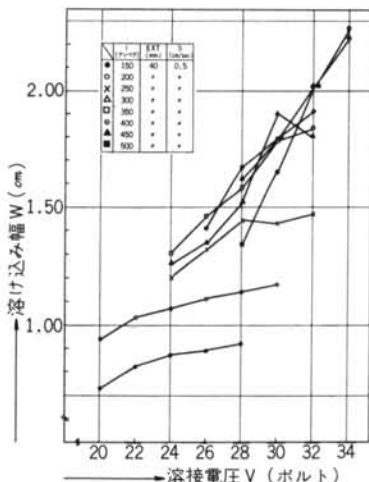


図-19  $W \sim V$

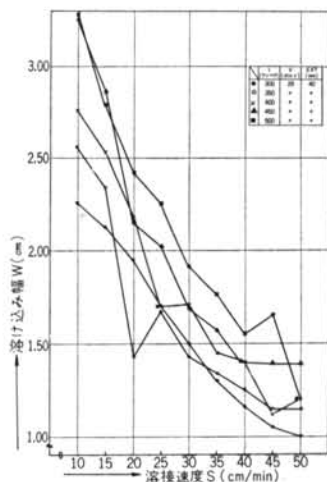


図-20  $W \sim S$

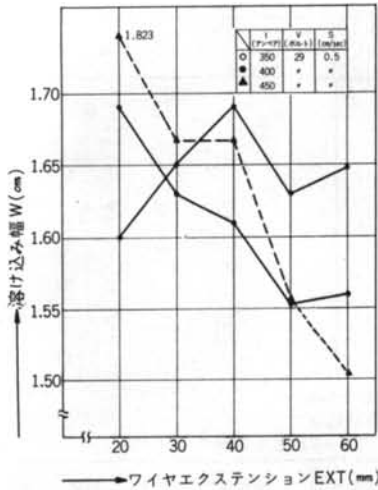


図-21 W~EXT

(1) 溶接電流の影響について

一般的には溶接電流が増すと供給熱量が増すので、溶け込み幅は増すはずである。しかし実験によれば溶け込み幅にピークを与える溶接電流値があり、電流がそれより高くなると溶け込み幅は逆に減少する。溶け込み幅にピーク値を与える溶接電流値は溶接電圧が高いほど高電流となる。高電流となると溶接アークの掘り下げ作用が大きくなり、溶接アークからの熱は母板表面よりも下方に与えられる。そのため母板表面の温度は供給熱量に比して上昇せず、低下する。溶接電圧が高いと溶接アークの掘り下げ作用が小さくなるから、溶け込み幅にピークを与える溶接電流値は高電流へと移行する。

(2) 溶接電圧の影響について

溶け込み幅(W)は溶接電圧(V)にほぼ比例して増大す

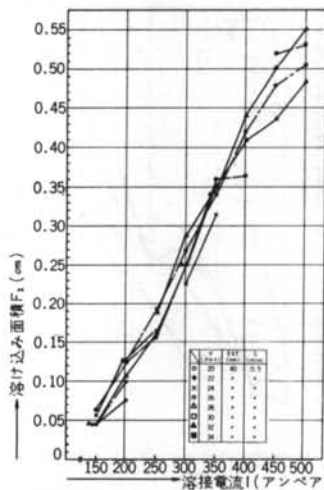


図-23 F<sub>1</sub>~I

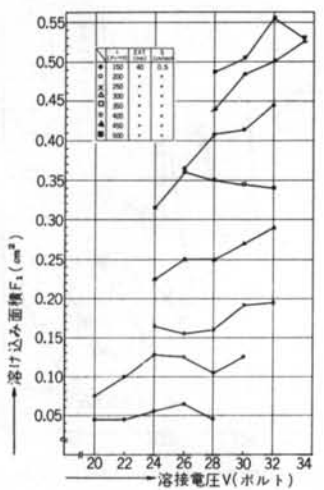


図-24 F<sub>1</sub>~V

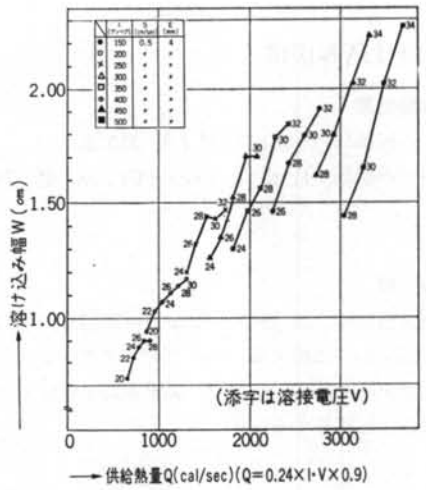


図-22 W~Q (添字はV, 熱効率をIとする)

(3) 溶接速度の影響

溶接速度(S)が大きくなると溶け込み幅(W)は減少するが、その傾向は熱伝論的である。

(4) ワイヤエクステンションの影響

ワイヤエクステンション(EXT)が長くなると溶け込み幅(W)は減少する傾向にある。ワイヤエクステンションが長いとワイヤは溶融するまでに予熱される。したがって溶融金属およびフラックはワイヤエクステンションが長いほど高温になると予想され、それによって溶融物の粘性が変化するのはないかと考えられる。

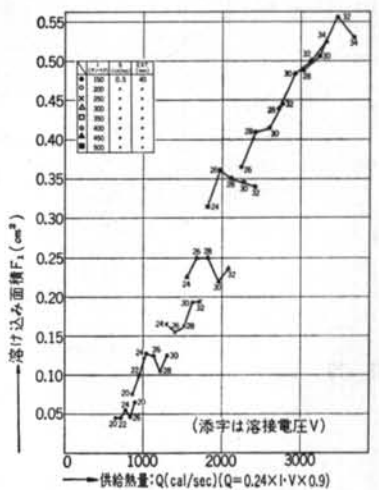


図-25 F<sub>1</sub>~Q (添字はV, 熱効率をIとする)

## § 5. 溶け込み面積

### 5.1 実験結果

溶け込み面積( $F_1$ )と溶接電流( $I$ ), 溶接電圧( $V$ ), 単位時間当りの供給熱量( $Q$ )との関係を図-23~図-25に示す。

### 5.2 考察

溶け込み面積は溶接電流および単位時間当りの供給熱量にほぼ直線的に比例する。ワイヤエクステンション, 溶接速度のデータが不足なので, 実験式および理論的考察は2報以下に報告する。

$V$ (ボルト)	20	22	24	26	28	30	32	34
150	○	○	○	○	○			
200		○	○	○	○	○		
250			?	?	?	○	○	
300			▽	▽	?	?	?	
350			▽	▽	▽	▽	▽	
400			▽	▽	▽	▽	▽	
450				▽	▽	▽	▽	▽
500				▽	▽	▽	▽	▽

○: 単純溶け込み形  
 ▽: 中央溶け込み形  
 ?: ○, ▽のいずれとも判断できないもの

表-4 溶接電流および溶接電圧と溶け込み形状

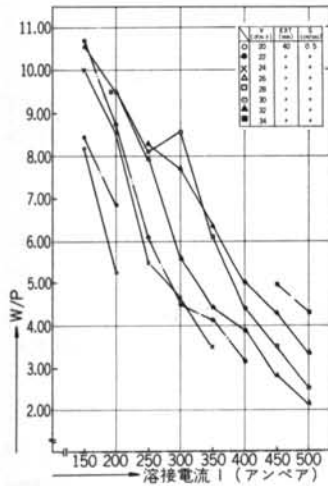


図-26  $W/P \sim I$

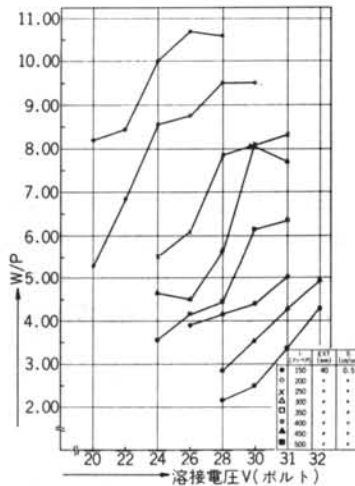


図-27  $W/P \sim V$

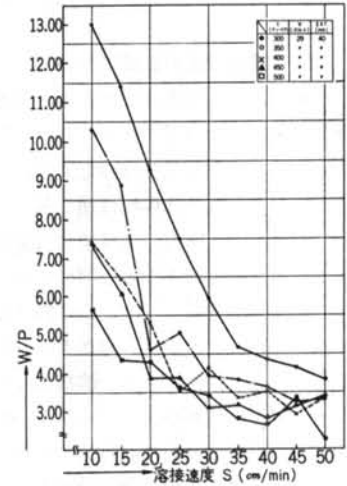


図-28  $W/P \sim S$

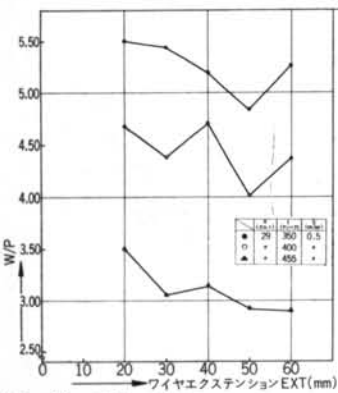


図-29  $W/P \sim EXT$

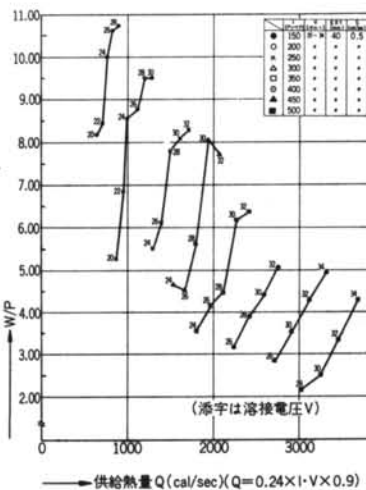


図-30  $W/P \sim Q$  (添字はV, 熱効率をIとする)

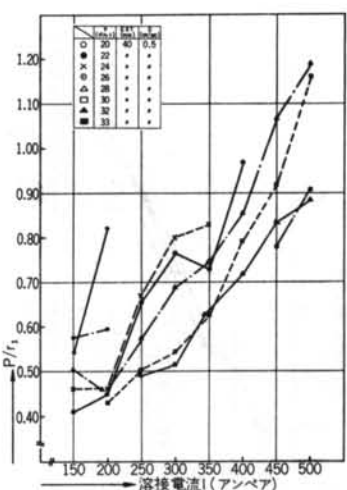


図-31  $P/r_1 \sim I$



## § 6. 溶け込み形状

溶け込み形状を表示するパラメータとして次のものを考える。

- (1)  $W/P$  (2)  $W/r_1$  (3)  $P/r_1$  (4)  $W/r_0$   
 (5)  $P/r_0$  (6)  $(r_1/r_0)^2$

ここで、 $W$ ：実測された溶け込み幅(cm)

$P$ ：実測された溶け込み深さ(cm)

$$r_1 : \sqrt{\frac{2F_1}{\pi}} \text{ (cm)}$$

$F_1$ ：実測された溶け込み面積(cm<sup>2</sup>)

$r_0$ ：溶接アークを移動点熱源と仮定し、かつ、板厚が半無限で板表面からの熱放散の無い場合の溶け込み深さ(cm)

パラメータ  $W/P$  は溶け込み幅と溶け込み深さの比を示す。 $W/r_1$  と  $P/r_1$  は半円形からの隔りを示す。 $W/r_0$ ,  $P/r_0$ ,  $(r_1/r_0)^2$  は溶接アークを移動点熱源とした時の溶け込み形状との相違を示す。

### 6.1 実験結果

表-4 に溶接電流、溶接電圧と溶け込み形式の関係を示す。図-26～図-47に各パラメータと各種溶接条件の関係を示す。

### 6.2 考察

当実験における各パラメータの概要について述べる。詳細については各種ノンガスワイヤのデータを収集した後、第2報以下に報告する予定である。

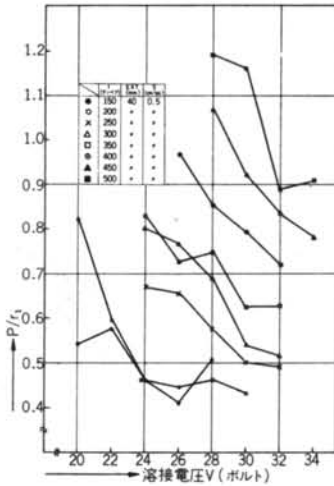


図-32  $P/r_1 \sim V$

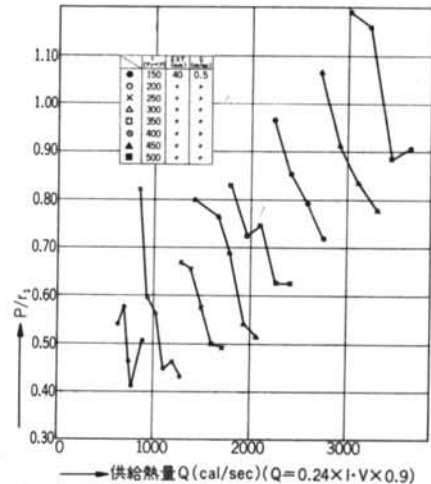


図-33  $P/r_1 \sim Q$  (熱効率を  $I$  とする)

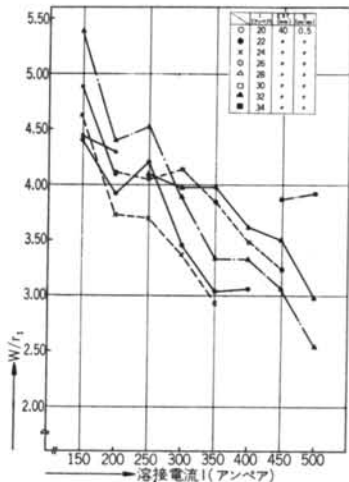


図-34  $W/r_1 \sim I$

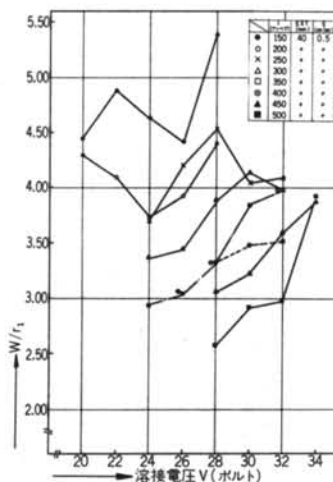


図-35  $W/r_1 \sim V$

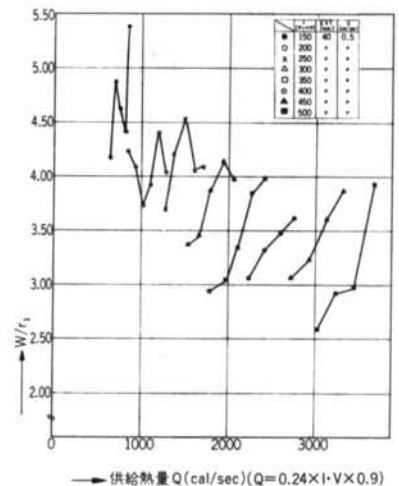


図-36  $W/r_1 \sim Q$  (熱効率を  $I$  とする)

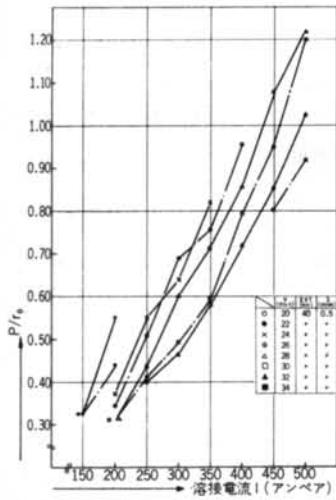


図-37  $W/r_0 \sim I$

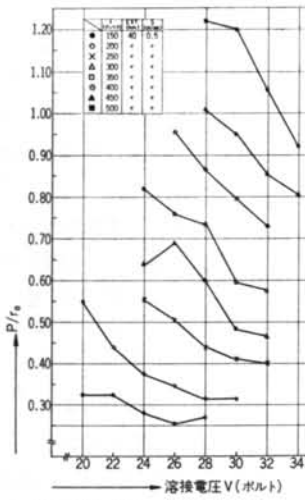


図-38  $W/r_0 \sim V$

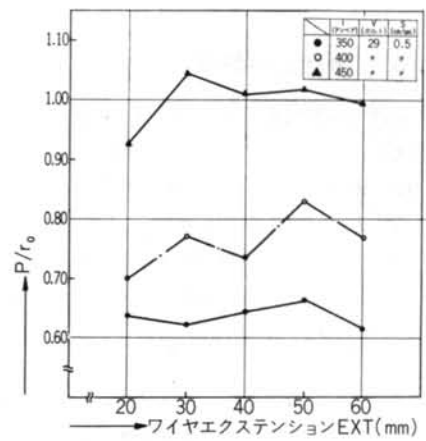


図-39  $P/r_0 \sim EXT$

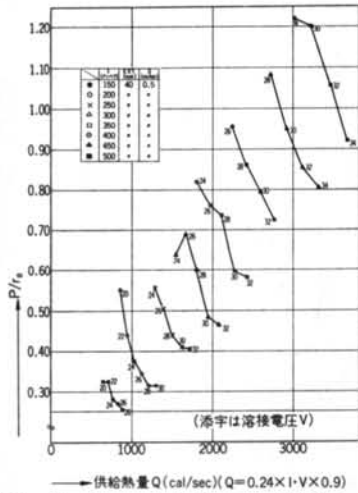


図-40  $P/r_0 \sim Q$  (添字は V, 熱効率を I とする)

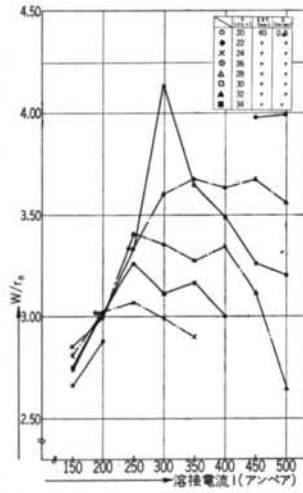


図-41  $W/r_0 \sim I$

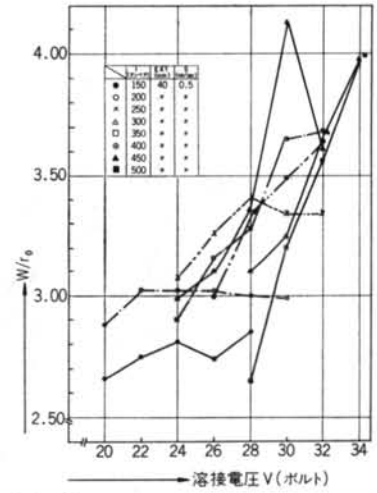


図-42  $W/r_0 \sim V$

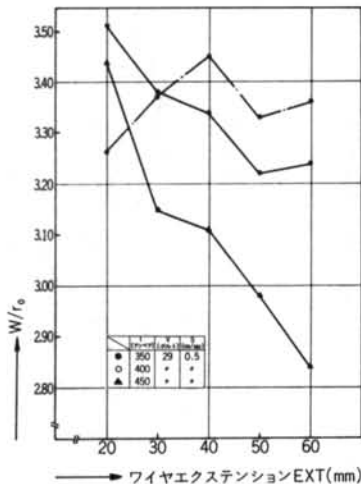


図-43  $W/r_0 \sim EXT$

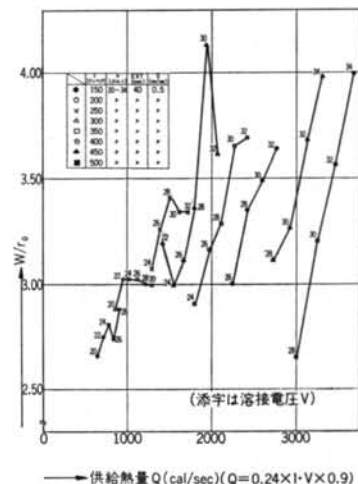


図-44  $W/r_0 \sim Q$  (添字は V, 熱効率を I とする)

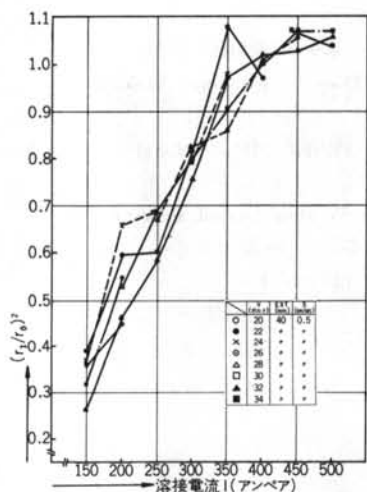


図-45  $(r_1/r_0)^2 \sim I$

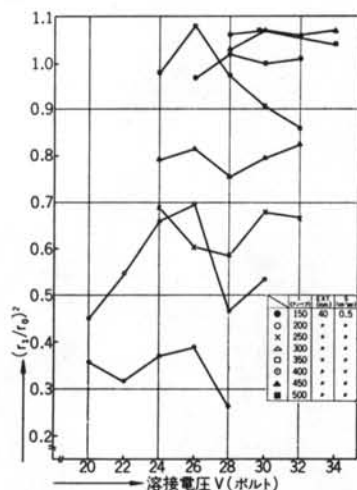


図-46  $(r_1/r_0)^2 \sim V$

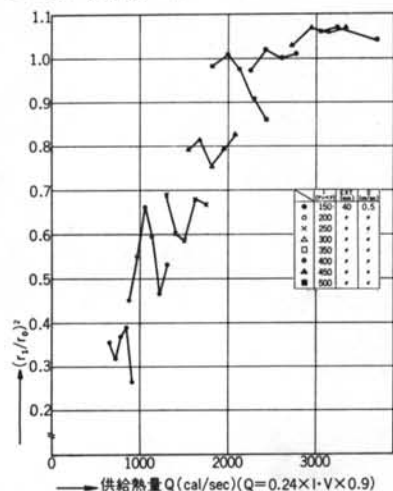


図-47  $(r_1/r_0)^2 \sim Q$

### (1) $W/P$ について

$W/P$ は、ほぼ2~11の範囲にあり、かなり幅広く溶けていることがわかる。 $W/P$ と各種溶接条件との関件は、溶接アークの掘り下げ作用、溶接アークの広がり、熱効率、熱伝導から説明することができる。ただワイヤエクステンションの影響については、今のところ説明できない。

### (2) $P/r_1$ について

$P/r_1$ はほぼ0.4~1.2の範囲にあり、そのほとんどが1以下である。これからみて溶け込み深さは溶け込み面積に比して、余り大きくないことが分かる。

### (3) $W/r_1$ について

$W/r_1$  はほぼ2.5~5.5の範囲にあり、かなり幅広く溶けていることがわかる。

### (4) $P/r_0$ について

$P/r_0$ はほぼ0.3~1.2の範囲にあり、そのほとんどが1以下である。溶け込み深さは溶接アークを移動点熱源としたものよりかなり小さな値であることが分かる。ただし熱効率を考慮に入れば、 $P/r_0$ はもう少し大きな値になると思われる。

### (5) $W/r_0$ について

$W/r_0$  はほぼ2.6~4.1の範囲にあり、かなり幅広く溶けていることがわかる。

### (6) $(r_1/r_0)^2$ について

$(r_1/r_0)^2$  はほぼ0.25~1.1の範囲にある。

## § 7. あとがき

今回使用したノンガス半自動溶接用ワイヤにおいては、フラックスがコアとなっているためか、溶接アークによって供給される熱の板表面上における分布領域は、ワイヤの断面より、かなり広い範囲にわたっていると推定される。

そのため母板の溶け込み状態は、溶接アークを移動点熱源と仮定した熱伝導計算結果とかなり異なった様相を呈している。

この報告では主として溶け込み深さについて考察を加えたが、溶け込み幅、溶け込み面積、各種パラメータについては、第2報以下で詳細な考察を加えたい。

<参考文献>

- 1) 藤盛, 桐生, 親見: “建築工事におけるノンガス半自動溶接” 清水建設研究情報 第9号 (昭和44年2月)
- 2) C. E. Jackson: “The Science of Arc Welding. Part III; What the Arc Does (Penetration)” Welding Journal, June 1960
- 3) 溶接協会ディープフィレット研究委員会: “船体建造におけるディープフィレット溶接法実用化に関する研究” 日本溶接協会 (昭和29年12月)
- 4) N. Christensen: “Distribution of Temperatures in Arc Welding” British Welding Journal, February 1965
- 5) 橋本達哉, 松田福久: “熔融金属池の温度測定法と測定例について” 溶接学会誌第34巻 (1965) 第7号
- 6) 藤盛, 桐生, 親見: “溶接の溶け込みに関する一考察” 清水建設研究所報 Vol. 13 (1969. 4)
- 7) 安藤弘平, 長谷川光雄: “溶接アーク現象《増補版》” 産報