

## 討14 自動入熱制御装置と電縫溶接条件の最適化

新日本製鐵(株) 第二技術研究所 ○芳賀博世  
名古屋技術研究部 田中徳雄  
光製鐵所 鶴田秀雄

### 1. 緒言

アーク溶接と異なり、電縫溶接においては入熱の定義がはっきりしない。良く使われるのが発振管陽極電圧  $E_p$  と陽極電流  $I_p$  の積で表わされる電力であるが、溶接に利用される真電力を表わしているものでないことは良く知られている。しかしたとえ真電力を求めたとしても、それをもって直ちに入熱の指標とすることはできない。電縫溶接においては給電点と溶接点とが離れており、その間での電力の分布状態によって溶接状態がいくらかでも変りうるからである。そこで、電力投入の結果として得られる溶接状態そのものによって入熱を評価しなければならない。電縫溶接は一種の溶融圧接であり、突合せ面が肉厚全面に亘って溶融することが溶接欠陥発生を防止する必要条件であるから、基準状態を溶融限界におくことは合理的な考え方である。基準状態を実現する溶接条件が分っているならば、任意の溶接条件で実現される溶接状態を基準との比較によって評価できる。すなわち入熱が定量的に決定される。

一方多くの場合、特に中径管の電縫溶接においては、溶融条件は第2種溶接現象の出現条件と一致する。従って溶接現象を把握することによって基準状態を知ることができる。第2種溶接現象は中径管の溶接にとって溶接欠陥発生を極小にする現象であるという特別な意味を持っている。

以上の諸知見に基いて自動入熱制御装置を開発し、その基本的構成については紹介した。<sup>1), 2)</sup> 本装置による合理的な入熱の設定制御は溶接欠陥発生 of 著しい減少をもたらした。更に入熱の定量的把握により、入熱以外の他の溶接条件に関してもその意義を明確にすることができた。このようにして溶接条件は全体として最適化され、溶接部信頼性の極めて高い電縫管の製造が可能になった。

### 2. 入熱当量制御と溶接現象制御

溶接電流の大きさを  $I$  とすると溶接温度  $T$  は次の式で表わされる。<sup>3)</sup>

$$T = k_1 \cdot I^2 \cdot v^{-0.6} \cdot \ell^{0.2} \cdot \theta^{-0.4} \cdot t^{-1.6} \quad (1)$$

上式で  $v$  : 溶接速度,  $\ell$  : 給電点～溶接点間距離,  $\theta$  :  $V$  収束角度,  $t$  : 板厚,  $k$  : 定数, である。

溶接電流  $I$  は溶接電力 (真電力)  $P$  と次式の関係があるから,<sup>4)</sup>

$$I^2 = P/R = k_2 \cdot P \cdot \ell^{-0.75} \cdot t^{0.75} \cdot \theta^{0.25} \quad (2)$$

これを (1) 式に代入し定数を  $k$  と置いた関係式を  $Q$  とすると,

$$Q = k \cdot P \cdot v^{-0.6} \cdot \ell^{-0.55} \cdot \theta^{-0.15} \cdot t^{-0.85} \quad (3)$$

この式の導き方から明らかなように、 $Q$  は本質的には溶接温度を表わしている。 $v$ ,  $\ell$ ,  $\theta$ ,  $t$  などの溶接条件が変化しても  $Q$  さえ一定であれば同一溶接温度、従って同一溶接状態の実現が期待できる。そこで  $Q$  を入熱当量と呼ぶことにする。あえて  $Q$  を温度と呼ばないのは、溶接温度は実際には融点以上に上昇することはほとんどないからである。

突き合せ面が溶融すると溶融金属は電磁力によって突き合せ面から帯板表面に排除される。そのため突き合せ面は幾何学的には溶接速度と  $V$  収束角度の積  $v\theta (=v_a)$  の速さで接近しているにもかかわらず、溶融金属が排除される速さ  $v_r$  で後退する成分を持つことになる。 $v_r$  は次の式で表わされる。<sup>5)</sup>

$$v_r = \alpha \cdot (I/t)^2 \quad (4)$$

$\alpha$  は物質定数のみで決る定数である。

溶融金属が突き合せ面から排除されるために溶接温度は融点以上に上昇しないのであるが、更に  $v_a$

と  $v_r$  の大小関係,  $>$ ,  $=$ ,  $<$ , によって電縫溶接現象の型を3種類に分類できる。<sup>5)</sup> 入熱当量と溶接現象の型は共に溶接欠陥発生率と密接な関係を持っている。

図1は, 溶接速度, 溶接入力を変えて溶接現象と溶接欠陥を調査した結果である。図で溶融溶接は,  $v^{0.6}$  に比例する直線より高い溶接入力で実現している。直線より下側では溶接現象は第1種で, 溶接線方向に連続して冷接欠陥が発生した。これは冷接欠陥を防止するには  $Q$  が一定値以上にならないことを示している。第2種溶接現象の出現条件は低速域では溶融条件と一致しているが, その溶接入力範囲は限られている。高速域では  $v$  に比例する直線の上側の極めて広い入力範囲で第2種溶接現象が出現する。この範囲で高入力にすると2段収束型第2種溶接現象が見られる。<sup>6)</sup> 低速域と高速域を分ける2直線の交点における速度を限界溶接速度  $v_m$  と呼ぶ。

全速度域において第2種溶接現象の場合に溶接欠陥発生率が極小になっている。これは少なくとも直接通電溶接においては普遍的な事実であることが調査の結果明らかになった。これ等の知見に基いて,

入熱当量式を制御式とするフィード・フォワード制御

第2種溶接現象を実現するフィード・バック制御を基本構成とする自動入熱制御装置を開発し実用化した。<sup>5)</sup>

図2に示すようにこの装置の適用により溶接欠陥の発生は著しく減少した。

### 3. 限界溶接速度と溶接条件の最適化

自動入熱制御装置の導入によって最適溶接入力を容易に実現できるようになった。これは入熱の合理的な定量化指標が得られたことを意味し, 溶接入力以外の溶接条件の意義の把握と最適化への指針が得られた。

図3は限界溶接速度の前後で溶接欠陥発生率が著しく異なることを示す実機データである。図1からも明らかなように限界溶接速度を越えて溶接速度が高速になるに従い, 入熱変動, 溶接入力のみでなく速度・板厚などの変動を含む実質的な入熱変化, に対して溶接品質が安定する。

これは高速溶接になるほど  $v_a$  が大となるため, 第2種溶接現象を特徴づける量,  $V$  収束点~溶接点間距離, を単位長変化させるに必要な溶接入力が,  $v$  に比例して大きくなるためであると考えられる。

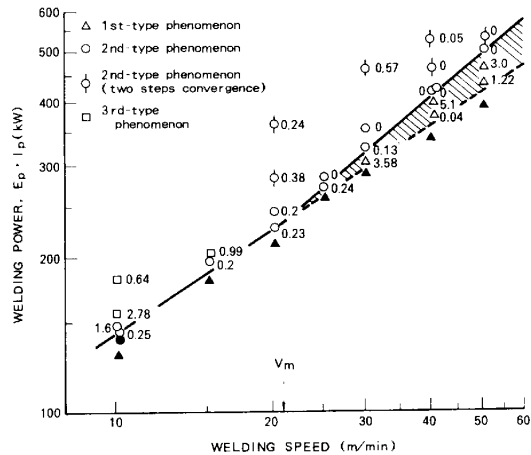


Fig. 1 Relation between welding condition, welding phenomena and weld defect ratio (CPD diagram). Thickness = 5 mm, V-convergence angle = 5.2°. Figures adjacent to marks show weld defect area ratio (%). Solid marks show cold weld occurred along weld line.

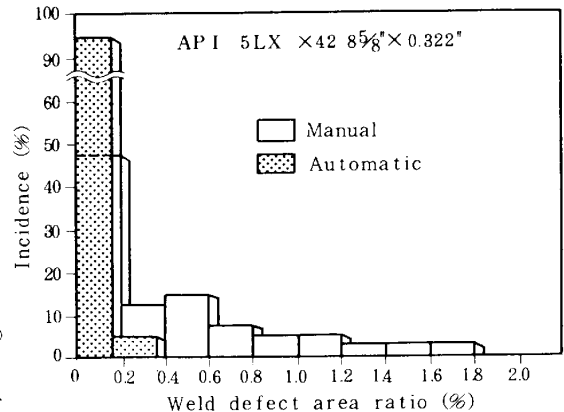


Fig. 2 Example of reduction of weld defects by automatic control

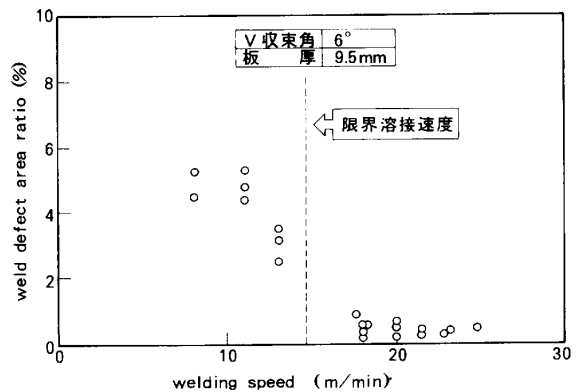


Fig. 3 Influence of welding speed on the incidence of weld defect

限界溶接速度  $v_m$  は、溶融条件(1)式と、 $v_a = v_r$  の関係を連立させることにより求められる。すなわち、

$$v_m = \beta \cdot \theta^{-1.5} \cdot t^{-1} \cdot \ell^{-0.5} \quad (5)$$

従って  $v_m$  は V 収束角度と板厚が大なるほど低速になることが予想される。

図4は限界速度に及ぼす V 収束角度と板厚の影響を調査した実験室データである。特に V 収束角度の影響が顕著に認められる。板厚は(5)式から期待される程ではないがやはり厚肉になる従がい  $v_m$  が低速になる傾向が認められる。

図5は溶接欠陥発生率に及ぼす V 収束角度の影響を調査した結果である。 $\theta$  の拡大に従い欠陥発生は顕著に減少する。図6は溶接入力を変えて V 収束点～溶接点間距離の変化を測定した結果で、V 収束角度を拡大すると溶接点の移動が抑えられること、すなわち入熱変動に対する溶接現象の安定化を示している。V 収束点～溶接点間距離を単位長変化させるに必要な溶接入力は何幾学的には  $\theta$  に比例すると考えられるが、図6の結果は、 $\theta$  の拡大がそれ以上に溶接現象の安定化に有効であることを示している。

電縫溶接における V 収束角度拡大の意義は限界溶接速度を低速にして第2種溶接現象を実現する最適溶接入力における溶接欠陥発生率をほとんど0にすると共に、最適入力範囲を著しく拡大することにある。特に中径管の造管においては In Line 熱処理などで溶接速度が制限される場合が多いので、V 収束角度の拡大は溶接品質を著しく向上させる。

アプセットの第1義的な意義が余分な溶融金属を板厚面外に押し出し、凝固収縮孔のないほぼ均一な溶融層巾の溶接部を形成することにあることは云うまでもない。写真1に示したように、アプセットが不足すると凝固収縮孔が板厚面内に残る場合がある。これは突き合せ面における高周波電流分布の不均一とコーナー部の過溶融によって生じたコーナー部のダレを矯正するだけのアプセット量が最低限必要であることを示している。

V 収束角度の大きい場合アプセット量は溶接部品質に著しい影響を及ぼす(図7)。 $\theta$  小の場合はアプセットの影響は  $\theta$  大に比べれば少ないようである(図8)。同一アプセット量でも  $\theta$  大の場合溶接点はスクイズロール中心線の近くに位置することは幾何学的にも明らかである。

従って  $\theta$  大の場合スクイズロール曲率の影響を受け易く

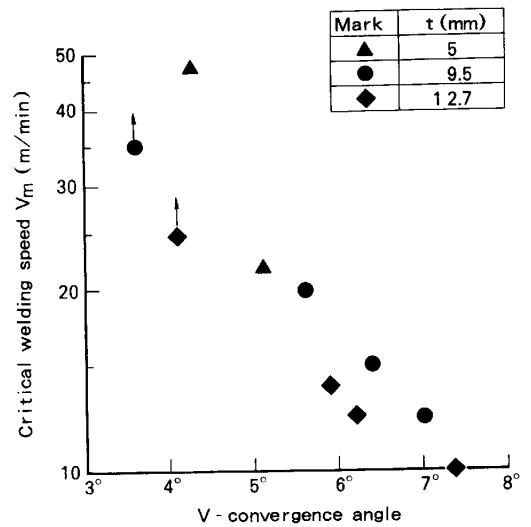


Fig. 4 Relation between V-convergence angle and critical welding speed.

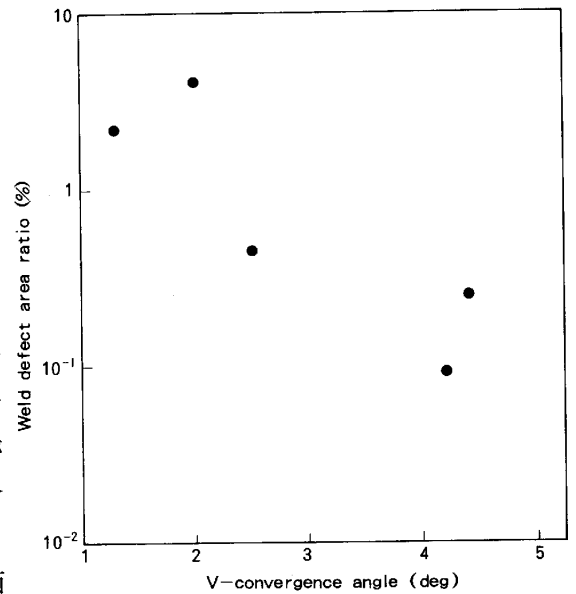


Fig. 5 Influence of V-convergence angle on the incidence of weld defect

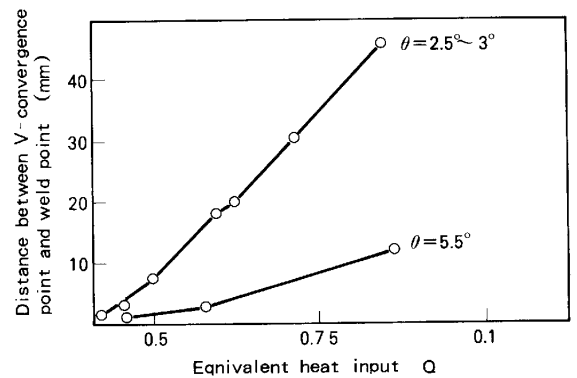


Fig. 6 Influence of V-convergence angle on the stability of welding phenomenon  
 $Q = E_p \cdot I_p \cdot v^{-0.6} \cdot \ell^{-0.55} \cdot \theta^{-0.15} \cdot t^{-0.85}$

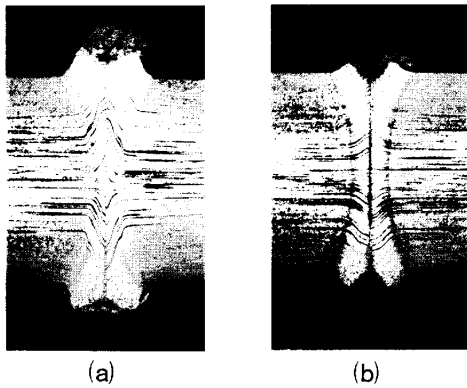


Photo.1 Macro structure of weld showing high upset (a) and low upset (b). thickness : 10mm

低アセットの場合V収束点におけるV収束角が小さくなる傾向が見られる。溶接現象に関する突き合せ面の接近速度  $v_a$  を支配する  $\theta$  はV収束点における値であるから、アセットは  $\theta$  と溶接現象の支配要因となることによっても溶接品質に影響を及ぼしていると考えられる。

図7の結果は平均V収束角度が  $5^\circ$  以上の場合、最小2mm以上のアセット量を確保することが、欠陥低減のために必須であることを示している。

#### 4. 結 言

以上、自動入熱制御装置の開発を通じて、接合面における欠陥占有面積率を0.1%以下を実現する無欠陥溶接技術を確立した。 $v_m$  以上の高速溶接、 $5^\circ$  以上の高V収束角度、適正アセット量の設定をすれば、最適溶接入力において、少々の実質の入熱変動が生じていても無欠陥溶接状態を維持できる。自動入熱制御装置は最適溶接入力確保する手段であると共に、溶接立上り時の最適入熱実現手段となっている。

無欠陥溶接を実現した結果、溶接部品質、例えば靱性は図8に示すように著しく向上した。

#### 参 考 文 献

1. 芳賀他, 中径電縫鋼管電縫溶接における溶接現象監視と自動制御, 鉄と鋼 '83-A73
2. 芳賀他, 中径電縫鋼管の溶接自動入熱制御, 製鉄研究 第316号, 論文5
3. 芳賀他, 高周波電縫溶接の研究第2報 溶接学会講演概要第19集P344~P345, 1976
4. 芳賀他, 高周波電縫溶接の研究第1報 溶接学会講演概要第19集P342~P343, 1976
5. Haga, H. et al, Welding Phenomena and Welding Mechanisms in High-Frequency Electric Resistance Welding, Welding Journal 59(7)208-S~212-S
6. 芳賀, 水橋, 高速・大V収束角条件における高周波電縫溶接現象と溶接欠陥発生率, 鉄と鋼 '84-S1162

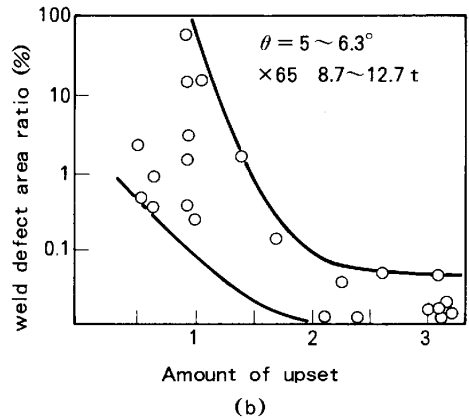
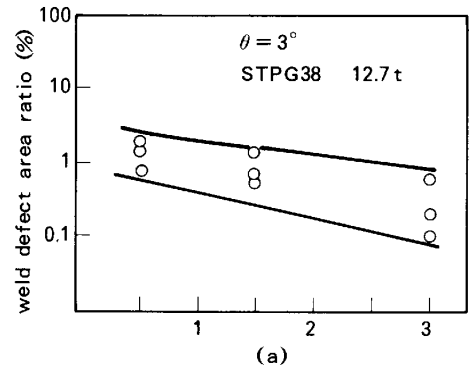


Fig. 7 Comparison of the influence of upset on the incidence of weld defect between small(a) and large V-convergence angle condition (b)

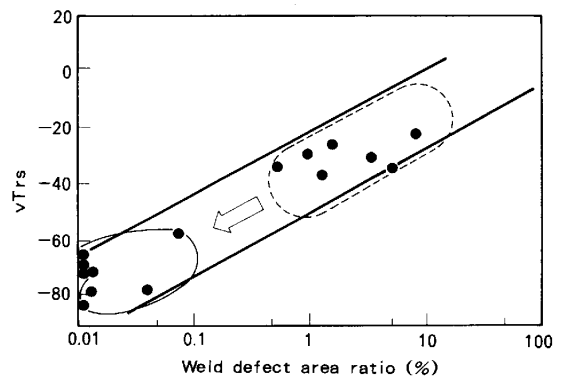


Fig. 8 Relation between the incidence of weld defect and  $v_{Trs}$ , showing the effect of flawless welding