

溶接部の低温割れに関する熱因子および硬度の推定式の検討

寺崎 俊夫*

Study of Predictive Equations of Thermal Factor and Hardness
Related with Weld Cold Cracking

Toshio TERASAKI

Synopsis :

This report deals with the relationship of welding conditions, such as cooling times, chemical compositions, vs. the maximum hardness at the neighbourhood of bond line in the heat affected zone and the thermal factor, which is connected with the residual diffusible hydrogen content accepted welding thermal cycle, being main factors for cold cracking. Relationships of thermal factor and hardness vs. cooling times and chemical compositions are not able to be shown as function formulae. Therefore, the regression equations are derived by the stagewise regression analysis from many data of thermal cycles and CCT diagrams containing hardness data. The results are summarized as following :

(1) The predicted value $(\Sigma D\Delta t)_{100}$ of thermal factor is connected with cooling times by following formula.

$$(\Sigma D\Delta t)_{100} = (4.2t_{200} + 2.73t_{150} - 13) \times 10^{-5} (\text{cm}^2)$$

t_{θ} ; cooling time from melting temperature to $\theta^{\circ}\text{C}$ at the neighbourhood of bond line (sec)

(2) The relationship of predicted value of hardness Hv vs. cooling time and chemical compositions is estimated by following formula.

$$\tau \leq \tau_M \quad \widehat{Hv} = 812C + 293$$

$$\tau > \tau_M \quad \widehat{Hv} = (992C - 230P_V + 250) \exp\left\{-\frac{3t_{800-500}}{(310)^{P_V}}\right\} + 188P_V + 80$$

where $\tau = t_{800-500}$; cooling time from 800°C to 500°C at the bond line

$$\log \tau_M = 2.5P_V - 1.21$$

$$P_V = C + \text{Mn}/3 + \text{Ni}/8 + \text{Cr}/12 + \text{Mo}/2 + \text{Cu}/5$$

The unit of chemical compositions is weight %.

1. 結 言

鋼の溶接部における低温割れの3大因子として①水素濃度 ②靱性値(低温割れ抵抗値) ③応力 が示され、これらの3大因子と低温割れの関係を取り扱った報告が多くなされている。その結果として、JIS法またはIIW法で測定された水素濃度、HAZの最高硬さ、拘束度より決定される拘束応力が重要であることが示された。

著者はJIS法またはIIW法で測定された水素濃度よりも溶接熱サイクルを受けた後に残留する拡散性水素濃度(残留拡散性水素濃度と呼称)を用いれば、低温割

れの実験値をさらに定量化できることを示し、拘束応力よりも低温割れ発生部近傍の局部応力を用いれば、開先形状の異なる低温割れの実験値の相関関係が説明できることを示した^{1)~3)}。

一方、工学的な立場から低温割れを眺めた場合、溶接条件、板寸法、材料などの溶接諸条件の情報より低温割れ防止の溶接施工条件が決定されることが望ましい。著者はこの点を最終目標にして、3大因子中の水素濃度の重要因子である熱因子と靱性値の重要因子であるHAZの最高硬さ(以後、硬度と呼称)を取り上げ、冷却時間、化学組成と熱因子、硬度の関係を数学的手法により研究した。

昭和55年10月本会講演大会にて発表 昭和55年11月4日受付 (Received Nov. 4, 1980)

* 九州工業大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui-cho Tobata-ku Kitakyushu 804)

2. 計 算 手 法

熱因子および硬度は次式に示すように右辺の変数により決定される。

$$\begin{aligned} \text{熱因子 } (\Sigma D \Delta t)_{100} &= \int_{\theta_M}^{100} D(\theta) \frac{dt}{d\theta} d\theta \\ &= \int_0^{t_{100}} D\{\theta(t)\} dt = g\{D(\theta), t_{\theta}\} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

HAZ の最高硬さ $Hv = f(\text{組成}, t_{800 \sim 500}) \dots\dots (2)$

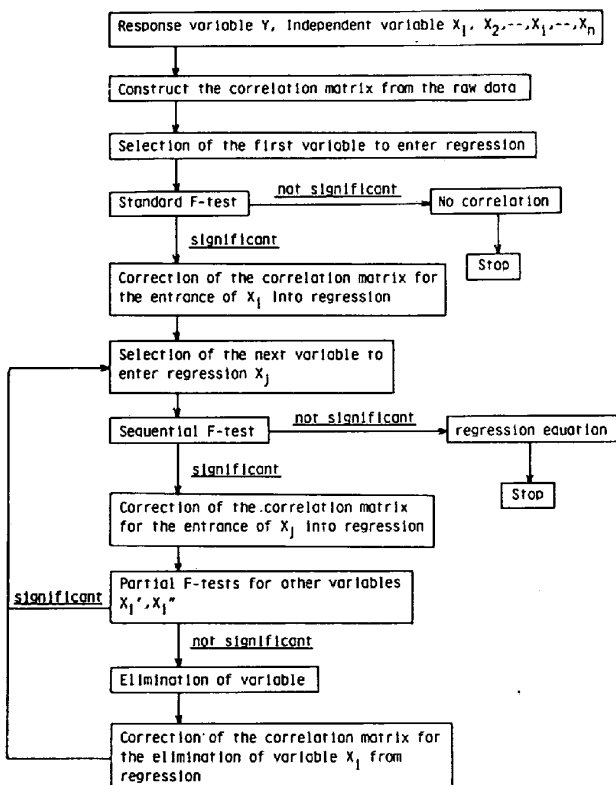
ただし θ_M : 溶融温度 t_{θ} : 溶接金属の凝固から θ ($^{\circ}\text{C}$) まで冷却するのに要する時間 D : 水素の拡散定数 $t_{800 \sim 500}$: 800°C から 500°C に冷却するのに要する時間

しかし、その関数の形は複雑であつて不明である。このような場合には回帰分析 (Regression Analysis) という統計的手法を用いて、熱因子と冷却時間および硬度と化学組成・冷却時間の実験値を整理すれば、工学的に利用しやすい実験式が導かれる。

本論文では Table 1 に示す M. A. EFROYMSON により考案された Stagewise regression procedure を用いて計算を行つた⁴⁾。以下にその手法の要点を列挙する。

① 応答変数 (または、目的変数) Y として熱因子 (または、硬度) を取り、独立変数 X_1, X_2, \dots, X_n とし

Table 1. Flow chart for stagewise regression analysis.



て冷却時間 (または、組成) を取る。

② 応答変数と最も相関の強い独立変数 X_1 を選択する。

③ 選択された独立変数 X_1 が回帰方程式に導入する価値があるかどうかを F 検定により判定する。

④ ②, ③の手法を繰り返して、回帰方程式に導入される独立変数を選択していくが、すでに導入された独立変数でも価値がなくなれば、切り捨てる。

⑤ 回帰方程式に導入する価値のある独立変数が無くなったときに、計算を終了する。

3. 計 算 結 果

3-1 熱因子と冷却時間の関係

熱因子は熱サイクルを受けた後の水素濃度を決定する重要な因子であり、溶接部における低温割れと水素濃度の関係を取り扱つた論文で使用されている¹⁾²⁾³⁾。そして、溶接金属の温度が凝固温度から 100°C に冷却するまでの時間 t_{100} が熱因子と密接な関係があるとして、使用されている。しかし、熱因子と冷却時間の関係を詳細に研究した論文はあまりない。

Fig. 1 は熱因子 $(\Sigma D \Delta t)_{100}$ を求めるのに使用した試験片寸法の代表値と溶接諸条件 (単位溶接長当たりの入熱 $Q = 17000 \sim 33000 \text{ J/cm}$, 試験片の初期温度 $\theta_1 = R. T. \sim 150^{\circ}\text{C}$, 試験片の板厚 $h = 15 \sim 50 \text{ mm}$) を示している。この種々の諸条件で溶接を行い、ポンド部の熱サイクルを測定し、JOHNSON, HILL⁵⁾ の水素拡散定数

$$T \geq 473 \quad D = 1.4 \times 10^{-3} \exp(-3200/GT)$$

$$T < 473 \quad D = 0.12 \exp(-7820/GT)$$

ただし $T = 273 + \theta (^{\circ}\text{K})$ G : ガス定数

を用いて、熱因子 $(\Sigma D \Delta t)_{100}$ を式(1)により求めた。なお、 $t_{\theta_M} (=0) \sim t_{500}$ の間の式(1)の積分値は小さいので、 $t_{500} \sim t_{100}$ の間で積分を行つた¹¹⁾。

実験で得られた熱因子 $(\Sigma D \Delta t)_{100}$ の 117 個の実験値

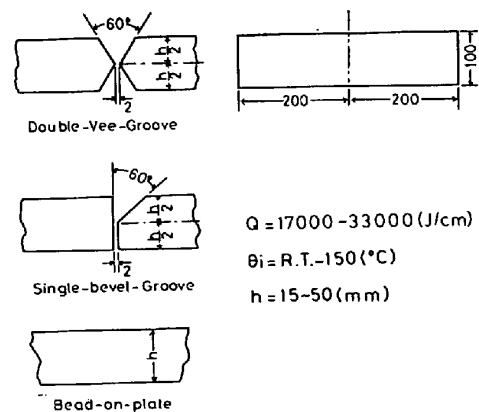


Fig. 1. Experimental conditions.

を応答変数とし、冷却時間 $t_{500}, t_{400}, t_{300}, t_{200}, t_{150}, t_{100}$ を独立変数として、第2項の手法で計算した結果をFig. 2に示す。図の縦軸には回帰方程式で実験値が何%説明できるかを示す多重決定係数 R^2 (重相関係数 R の2乗)、実験値と回帰方程式とのずれの尺度である残差標準偏差 s を取り、横軸には応答変数と相関関係の強い順番に選択された独立変数を取っている。図より、熱因子 $(\Sigma D\Delta t)_{100}$ と最も相関の強い冷却時間は t_{150} であり、次に t_{200} であることがわかる。

Fig. 3(a)は t_{150} を独立変数とする回帰方程式

$$\widehat{(\Sigma D\Delta t)}_{100} = (4.51 t_{150} + 41) \times 10^{-5} (\text{cm}^2) \dots\dots (3)$$

$$R^2 = 97.37\% \quad s = 1.5 \times 10^{-3} (\text{cm}^2)$$

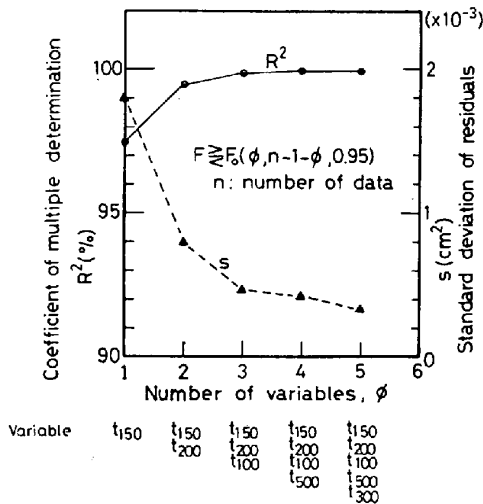


Fig. 2. Relation among coefficient of multiple determination, standard deviation of residuals, and selected variables.

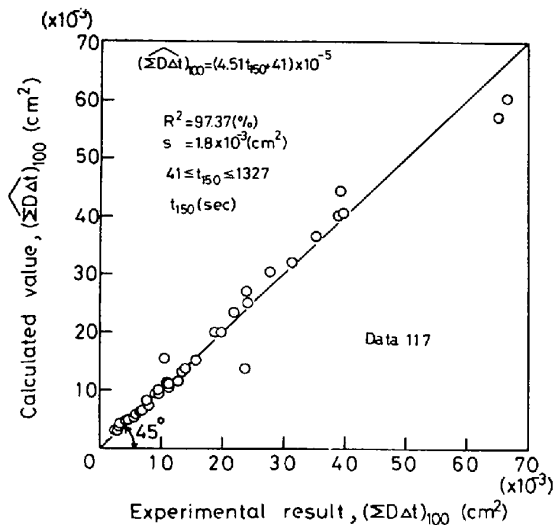


Fig. 3(a). Experimental results vs. predicted values obtained from cooling time t_{150} .

で予測した熱因子の値 $\widehat{(\Sigma D\Delta t)}_{100}$ と実測値 $(\Sigma D\Delta t)_{100}$ の関係を示し、Fig. 3(b)は従来から用いられている冷却時間 t_{100} を独立変数とする回帰方程式

$$\widehat{(\Sigma D\Delta t)}_{100} = (1.95 t_{100} - 20) \times 10^{-5} (\text{cm}^2) \dots\dots (4)$$

$$R^2 = 87.51\% \quad s = 10.4 \times 10^{-3} (\text{cm}^2)$$

で予測した $\widehat{(\Sigma D\Delta t)}_{100}$ と実測値 $(\Sigma D\Delta t)_{100}$ の関係を示している。Fig. 3の図中の45°の直線は実測値と予測値が一致することを示す。図には予測値と実測値の差が大きいデータのみを約30点プロットしている。図より t_{150} の回帰方程式(3)が t_{100} のみの回帰方程式(4)よりすぐれていることがわかる。また、多重決定係数も式(3)で97%、式(4)で88%であり、式(3)が式(4)よりすぐれていることがわかる。

Fig. 4, 5はFig. 2に示す選択された独立変数 t_{150}, t_{200} を用いた回帰方程式

$$\widehat{(\Sigma D\Delta t)}_{100} = (4.2 t_{200} + 2.73 t_{150} - 13) \times 10^{-5} (\text{cm}^2) \dots\dots (5)$$

$$R^2 = 99.52\% \quad s = 0.8 \times 10^{-3} (\text{cm}^2)$$

$t_{200}, t_{150}, t_{100}$ を独立変数とする回帰方程式

$$\widehat{(\Sigma D\Delta t)}_{100} = (4.9 t_{200} + 1.6 t_{150} + 0.4 t_{100} - 56) \times 10^{-5} (\text{cm}^2) \dots\dots (6)$$

$$R^2 = 99.85\% \quad s = 0.4 \times 10^{-3} (\text{cm}^2)$$

による予測値 $\widehat{(\Sigma D\Delta t)}_{100}$ と実測値 $(\Sigma D\Delta t)_{100}$ の関係を示している。Fig. 4, 5では $R^2=99\%$ より精度のよい回帰方程式が得られている。また、独立変数を2個か

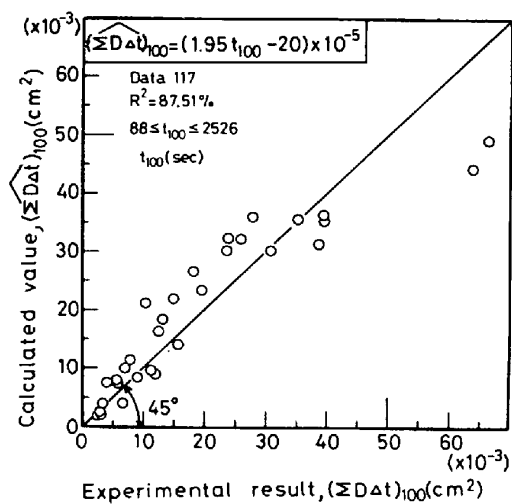


Fig. 3(b). Experimental results vs. predicted values obtained from cooling time t_{100} .

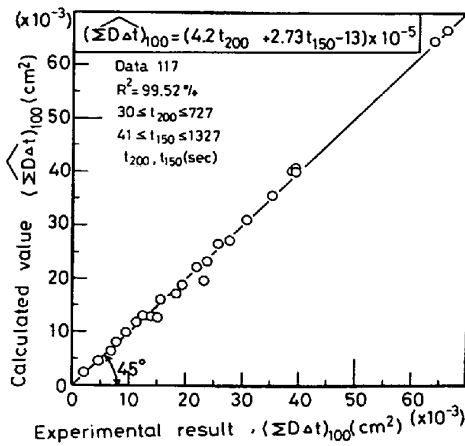


Fig. 4. Experimental results vs. predicted values obtained from cooling time t_{150} , t_{200} .

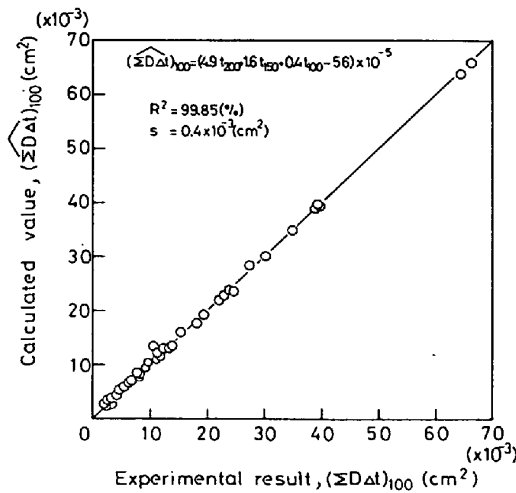


Fig. 5. Experimental results vs. predicted values obtained from cooling time t_{100} , t_{150} , t_{200} .

ら3個へ増やしても R^2 はあまり改善されていないこと、独立変数2個の回帰方程式(5)で熱因子 $(\Sigma D\Delta t)_{100}$ が十分に予測できることがわかる。以上より、溶接金属が 100°C に冷却したときの熱因子 $(\Sigma D\Delta t)_{100}$ は従来よく使用されていた冷却時間 t_{100} よりも t_{150} と密接な関係にあり、冷却時間 t_{200} , t_{150} を使用した回帰方程式がすぐれていることが結論として得られる。

3.2 硬度と化学組成・冷却時間の関係

溶接熱影響部の組織、硬度を対象として、稲垣⁶⁾らによつて求められた最高温度 1350°C の CCT 図によると、マルテンサイト量が100%のときと、0%のときの硬度はそれぞれあまり変化せず、マルテンサイト量が100%から0%に変化すると共に硬度が低下している。そこで、Fig. 6に示すように次の仮定を設定した。

(1) マルテンサイト $M=100\%$ の硬度 $(Hv)_{\max}$ は最高硬さを示す。

(2) マルテンサイト 0% の硬度 $(Hv)_0$ は最低硬さ

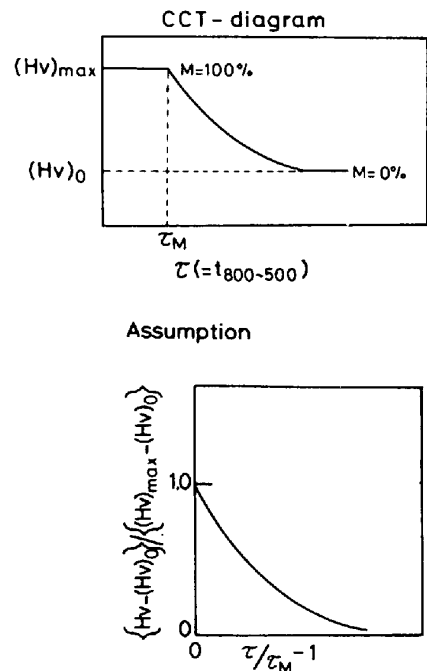


Fig. 6. Assumption.

を示す。

(3) 硬度は冷却時間 $\tau (=t_{800-500}$: ボンド近傍の温度が 800°C から 500°C に冷却するのに要する時間) と次式の関係にある。

$$\left. \begin{aligned} \tau \leq \tau_M \quad & Hv = (Hv)_{\max} \\ \tau > \tau_M \quad & \frac{Hv - (Hv)_0}{(Hv)_{\max} - (Hv)_0} = \exp\left\{-\frac{a(\tau - \tau_M)}{\tau_M}\right\} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ただし τ_M : マルテンサイトが100%から減少し始める時間 τ

以上の仮定のもとにK社のCCT図の硬度を式(7)にしたがって整理すると Fig. 7 となつた。図中の実線は a を0.2として求めた。Fig. 7より式(7)の a を0.2とする。

次に、Table 2に示す化学成分範囲にある102枚のC

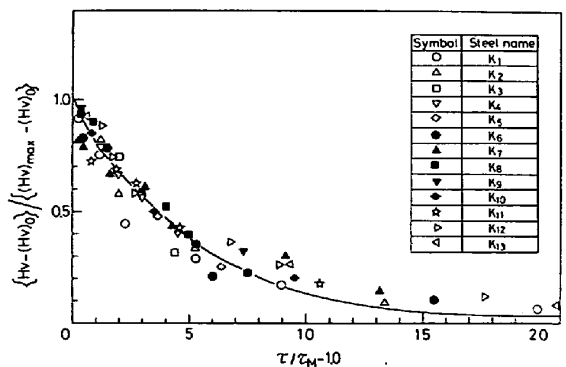


Fig. 7. Relation between cooling time and the change of hardness.

Table 2. Range of chemical compositions of steel used for regression analysis.

Chemical composition	Range (wt%)
C	0.05~0.40
S	0 ~0.14
P	0 ~0.15
Si	0 ~1.76
Mn	0 ~1.52
Ni	0 ~9.33
Cr	0 ~4.75
Mo	0 ~1.24
V	0 ~0.56
Cu	0 ~1.42
Nb	0 ~0.05
Al	0 ~0.72
B	0 ~0.004
Ti	0 ~0.04

CT図の硬度のデータを用いて、第2項に示した手法により、応答変数 $(Hv)_{max}$, $(Hv)_0$, τ_M と独立変数である化学成分 (C, B, P, Si, Mn, Ni, Cr, Mo, V, Cu, Nb, Ti) の関係を調べた。計算結果を Fig. 8 に示す。

Fig. 8(a), (b), (c)の縦軸は多重決定係数 R^2 , 残差標準偏差 s で、横軸は選択された順に独立変数を示す。Fig. 8(a)よりマルテンサイト100%の組織が減少し始める冷却時間 τ_M は化学成分 Mo, Ni, Mn, C, Cr, Cu, B の順に密接な関係がある。これらの化学成分すべてを独立変数としたとき

$$R^2=81.79\% \quad s=0.2086$$

であり、Bを除いたとき

$$R^2=81.11\% \quad s=0.211$$

である。そこで、 τ_M の回帰方程式としてBを除いた次

式を使用した。

$$\log \hat{\tau}_M = 2.5P_v - 1.21 \dots\dots\dots (a)$$

$$\text{ただし } P_v = C + \frac{Mn}{3} + \frac{Ni}{8} + \frac{Cr}{12} + \frac{Mo}{2} + \frac{Cu}{5}$$

係数 2.5 は炭素の係数であり、 P_v 中の C の係数を1にするためである。

Fig. 8 (b) よりマルテンサイト 100% での硬度 $(Hv)_{max}$ は化学成分 C, Si, B, Cu の順に密接な関係がある。C, Si, B, Cu を使用した回帰方程式では

$$R^2=75.71\% \quad s=19.1$$

となり、炭素Cのみを使用した回帰方程式では

$$R^2=71.93\% \quad s=20.2$$

である。そこで、 $(Hv)_{max}$ の回帰方程式として、炭素Cのみの次式を使用した。

$$\hat{(Hv)}_{max} = 812C + 293 \dots\dots\dots (b)$$

なお、計算結果ではBと $(Hv)_{max}$ の母数推定値はCと $(Hv)_{max}$ の母数推定値より大きく、Bが重要な因子であることを示唆しているが、同時にBと $(Hv)_{max}$ の母数推定値の約 1/2 が標準誤差であつて、今回使用したデータを用いるかぎり、Bを独立変数として選択する価値があまりないことを示している。従つて、今後、Bの化学分析値が示されたデータが多く集められれば、C, B を独立変数とした回帰方程式で R^2, s がかなり改善されるものと思われる。Fig. 8(c)よりマルテンサイト0%での硬度 $(Hv)_0$ は化学成分 Si, Mo, Cr, Ni, V, C, Ti, B の順に密接な関係にある。これらの化学成分すべてを独立変数としたとき

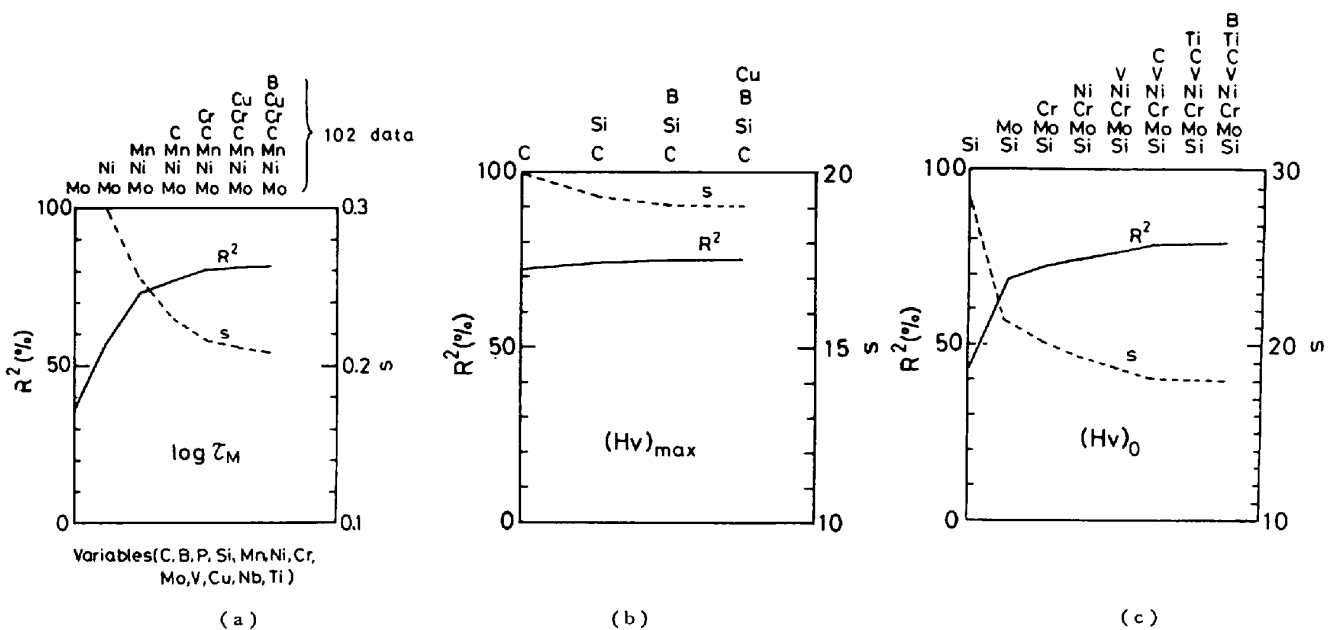


Fig. 8. Relation among coefficient of multiple determination, standard deviation of residuals, selected variables.

$R^2=79.11\%$ $s=18.01$
 であり, B, Ti を除いたとき

$R^2=78.49\%$ $s=18.08$
 である. そこで, $(Hv)_0$ の回帰方程式として, Si, Mo, Cr, Ni, V, C を独立変数とした次式を使用する.

$$\widehat{(Hv)}_0 = 188C_{eq} + 150 \quad \dots\dots\dots (c)$$

$$C_{eq} = C + \frac{Si}{3} + \frac{Ni}{26} + \frac{Cr}{9} + \frac{Mo}{3} + V$$

なお, B の母数推定値は C の母数推定値より大きい, 標準誤差が母数推定値と同程度であつた.

式(a), (b), (c)を式(7)に代入して, 120 枚の CCT 図の硬度を予測し, 実測値を比較すると, 硬度は

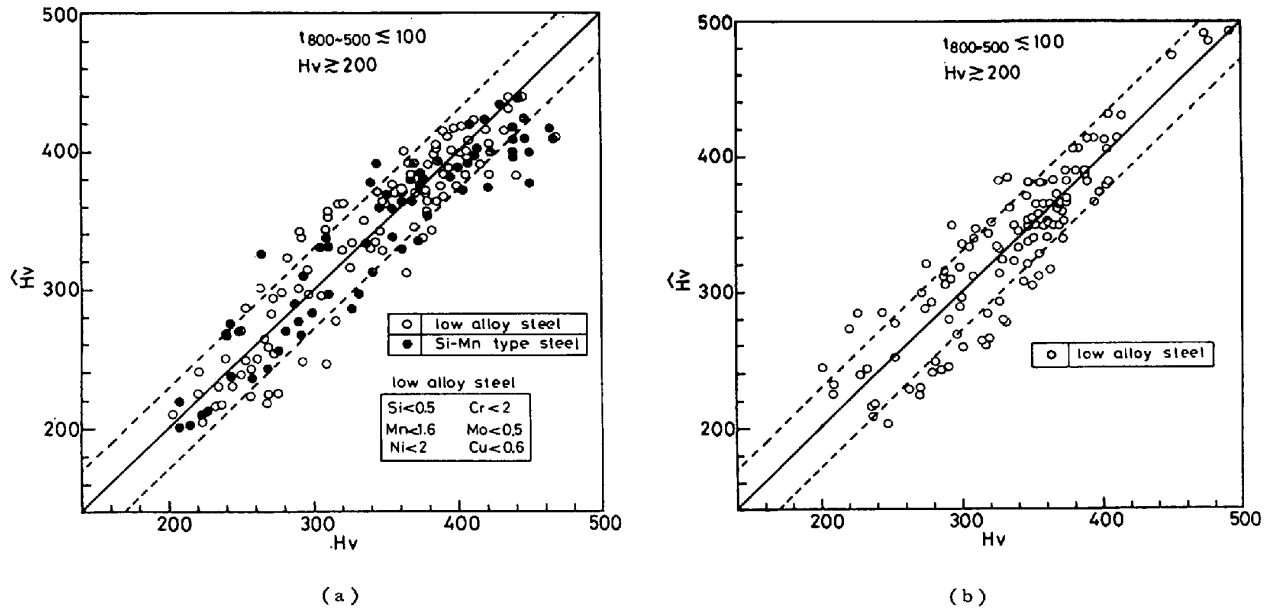


Fig. 9. Experimental results vs. predicted values of hardness.

Table 3. Experimental conditions and results of thermal factor.

Specimen No.	Thickness h (mm)	Heat input Q (J/cm ²)	Preheat temp. θ_1 (°C)	t_{200} (s)	t_{150} (s)	t_{100} (s)	$(\sum D\Delta t)_{100}$ (cm ²)	$(\sum D\Delta t)_{100}^*$ (cm ²)	$(\sum D\Delta t)_{100}^{**}$ (cm ²)	$(\sum D\Delta t)_{100}^{***}$ (cm ²)		
1	25	17 000	25	52	70	115	3.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}	3.6×10^{-3}	2.0×10^{-3}		
2				32	50	115	2.3	2.6	2.7	2.0		
3			100	83	279	1211	13.6	11.0	13.0	23.4		
4				82	482	1546	18.3	16.5	22.2	29.9		
5			150	17 000	150	373	1057	2245	43.8	44.4	48.1	43.6
6						581	1189	2253	55.7	56.7	54.0	43.7
7	25	33 000	25	98	180	842	11.2	8.9	8.5	16.2		
8				80	158	781	9.3	7.5	7.5	15.0		
9			100	209	608	1625	26.2	25.2	27.8	31.5		
10				252	948	2262	36.6	36.3	43.2	43.9		
11			150	33 000	150	480	1282	2626	53.8	55.0	58.2	51.0
12						648	1434	2796	64.3	66.4	65.1	54.3
13	50	17 000	25	33	44	70	2.0	2.5	2.4	1.2		
14				35	46	71	2.0	3.3	2.5	1.2		
15			100	54	186	1978	13.8	7.2	8.8	38.4		
16				59	339	2211	17.7	11.6	15.7	42.9		
17			150	17 000	150	456	1668	2992	59.4	64.6	75.6	58.1
18						104	992	2912	34.6	31.5	45.2	56.6
19	50	33 000	25	49	67	163	3.8	3.8	3.4	3.0		
20				49	70	133	3.4	4.0	3.6	2.4		
21			100	94	428	2508	22.1	15.5	19.7	48.7		
22				102	474	2690	23.8	19.2	21.8	52.3		
23			150	33 000	150	348	1696	3912	59.9	60.8	76.9	76.1
24						213	1289	3461	45.9	44.1	58.5	67.3

$(\sum D\Delta t)_{100}^* = (4.2t_{200} + 2.73t_{150} - 13) \times 10^{-5}$ $(\sum D\Delta t)_{100}^{**} = (4.51t_{150} + 41) \times 10^{-5}$ $(\sum D\Delta t)_{100}^{***} = (1.95t_{100} - 20) \times 10^{-5}$
 $(\sum D\Delta t)_{100}$: Experimental result

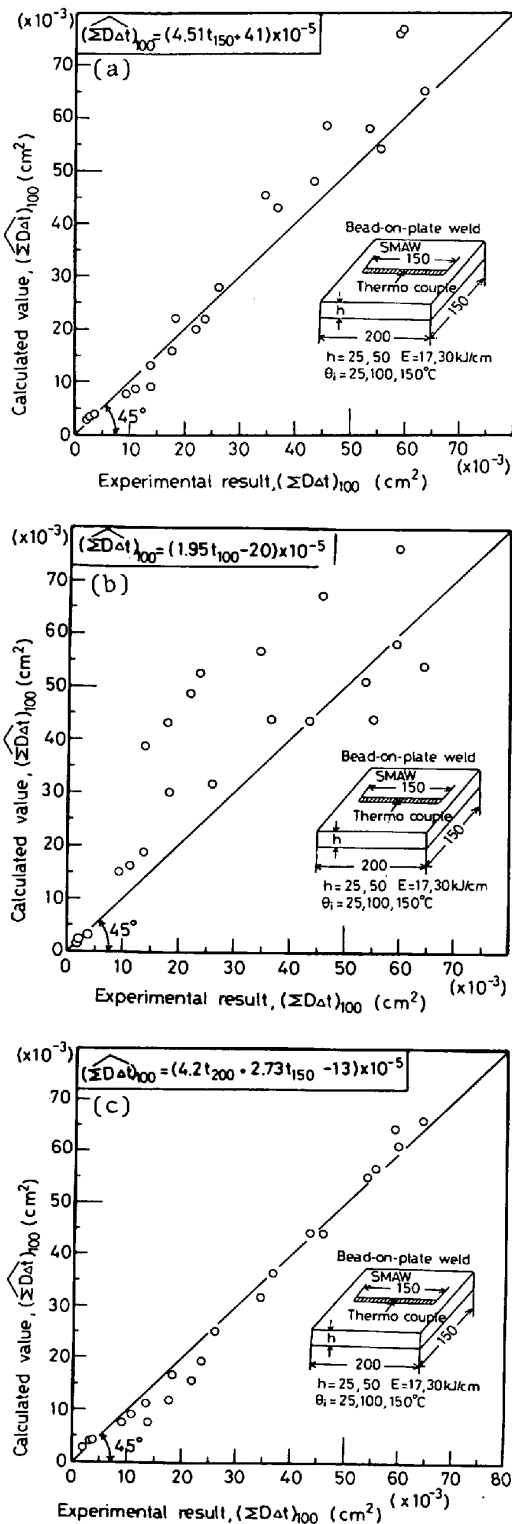


Fig. 10. Examinations of regression equations for thermal factor.

偏差 27 で予測できた。

さらに P_v と C_{eq} の差 $\frac{Si}{3} - \frac{Mn}{3} + V + \frac{Cr}{36} - \frac{Ni}{12} - \frac{Mo}{6} - \frac{Cu}{5}$ は

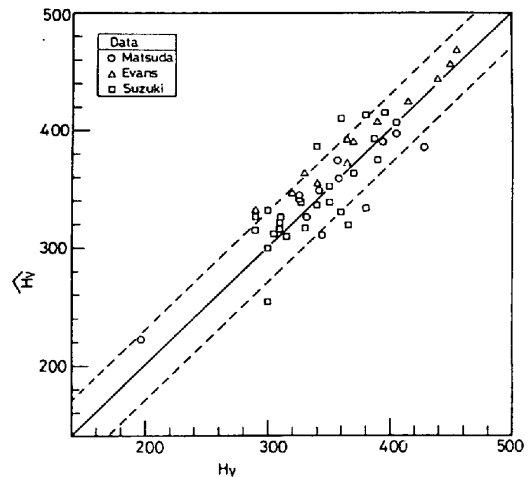


Fig. 11. Examinations of regression equations for hardness.

Table 2 の化学成分の範囲で 0.4 の附近に分散していることを考慮して、

$$C_{eq} = P_v - 0.4$$

と置いて、硬度予測式を次式のように簡略化する。

$$\hat{H}_v = (992C - 230P_v + 250)$$

$$\exp\left\{-\frac{3t_{800-500}}{(310)P_v}\right\} + 188P_v + 80 \dots\dots\dots (8)$$

式(8)を用いて、120 枚の CCT 図の硬度を予測し、実験値と比較すると、硬度は偏差 30 で予測できた。

Fig. 9 は普通の溶接では $t_{800-500} \leq 100s$ であることを考慮して、 $t_{800-500} \leq 100$ とし、しかも硬度 $H_v \geq 200$ の条件を満足する CCT 図の硬度のデータ H_v と予測値 \hat{H}_v を示している。Fig. 9(a) は Si-Mn 型の鋼と化学成分が図中の範囲内にある低合金鋼の実測値 H_v と予測値 \hat{H}_v 、Fig. 9(b) は化学成分が Fig. 9(a) の図中に示す範囲外に一つでもある低合金鋼の実測値 H_v と予測値 \hat{H}_v を示す。Fig. 9 の実線は $\hat{H}_v = H_v$ を示し、破線は $\hat{H}_v = H_v \pm 30$ を示す。Fig. 9 より硬度予測値はおおむね ± 30 の誤差で硬度を予測しているものと思われる。

4. 検 定

Stagewise regression procedure により導かれた熱因子の回帰方程式(3)、(5)および HAZ の最高硬さの回帰方程式(8)の妥当性を検討する。

4.1 熱因子

Table 3 は原沢⁷⁾が行った実験条件、実験結果および式(3)、(4)、(5)による熱因子の予測値である。試験体は Fig. 10 の図中に示すように長さ 200、幅 150、板厚 25、50 の板で、溶接熱サイクルは板の中央に SMAW で 150mm のビード・オン・プレート溶接を行って、溶接

Table 4. Experimental data used for examinations.

Steel	C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Nb	Al	B	Hv	P_V	Hv	$t_{800-500}$ (s)
1	0.21	0.051	0.013	0.05	0.42	0.06	0.03	0.01		0.31				196	0.43	221	7
2	0.32	0.019	0.027	0.22	0.67	0.02	0.03	0.01		0.01				357	0.56	374	7
3	0.49	0.026	0.028	0.21	0.78	0.02	0.03	0.01		0.02				627	0.76	652	7
4	0.16	0.009	0.012	0.50	1.39	0.02	0.01			0.02				342	0.63	348	7
5	0.13	0.004	0.011	0.27	0.86	1.08	0.50	0.43	0.04	0.25				405	0.86	397	7
6	0.14	0.015	0.015	0.31	1.28	0.02	0.03		0.05	0.02				344	0.58	310	7
7	0.11	0.009	0.004	0.31	0.84	4.93	0.50	0.46	0.06	0.04				394	1.29	390	7
8	0.08	0.009	0.008	0.25	0.61	3.49	0.14	0.01		0.23				326	0.78	344	7
9	0.04	0.007	0.008	0.23	0.55	8.76	0.04	0.01		0.03				332	1.33	325	7
10	0.15	0.003	0.010	0.60	0.55	0.03	1.38	0.55		0.01				429	0.73	385	7
11	0.08	0.004	0.009	0.23	0.50	0.15	2.25	0.96		0.03				358	0.94	358	7
12	0.54	0.021	0.022	0.31	0.79	0.05	0.13			0.02				707	0.83	730	7
13	0.52	0.013	0.019	0.25	0.84	0.02	0.11	0.01		0.02				698	0.82	715	7
14	0.38	0.002	0.018	0.19	0.69	0.02	0.94	0.17		0.03				599	0.78	579	7
15	0.42	0.025	0.017	0.31	0.70	1.71	0.75	0.15		0.14				655	1.03	634	7
16	0.109	0.014	0.005	0.43	1.61						0.021	0.032		290	0.65	332	6.6
17	"	"	"	"	"						"	"		320	"	347	5.1
18	"	"	"	"	"						"	"		330	"	363	3.6
19	0.140	0.016	0.005	0.42	1.57						0.021	0.034		340	0.66	355	6.6
20	"	"	"	"	"						"	"		365	"	372	5.1
21	"	"	"	"	"						"	"		370	"	390	3.6
22	0.170	0.014	0.005	0.43	1.59						0.021	0.030		365	0.70	392	6.6
23	"	"	"	"	"						"	"		390	"	407	5.1
24	"	"	"	"	"						"	"		415	"	424	3.6
25	0.215	0.014	0.005	0.43	1.59						0.021	0.035		440	0.75	443	6.6
26	"	"	"	"	"						"	"		450	"	457	5.1
27	"	"	"	"	"						"	"		455	"	468	3.6
28	0.17	0.019	0.028	0.40	1.28					0.19				310	0.63	320	10
29	0.14	0.023	0.015	0.36	1.20					0.18				360	0.58	330	5.5
30	0.18	0.022	0.022	0.50	1.54	0.04	0.40	0.01	0.01	0.20		0.047		300	0.78	332	25
31	0.20	0.006	0.017	0.23	1.38	0.10	0.04			0.15				290	0.71	327	18
32	0.21	0.007	0.011	0.53	0.62	0.18	0.08		0.10	0.24		0.016		300	0.49	253	8
33	0.16	0.015	0.021	0.46	1.12	0.19	0.11		0.09	0.17		0.025		350	0.60	338	6.5
34	0.14	0.011	0.029	0.38	1.26	0.18	0.12		0.10	0.21		0.037		310	0.63	326	8
35	0.15	0.010	0.011	0.94	1.15	0.03	0.07	0.01	0.01	0.13				315	0.57	289	8.5
36	0.15	0.011	0.023	0.47	1.27	0.03	0.07	0.02	0.02	0.15				290	0.62	315	9
37	0.13	0.010	0.024	0.28	1.51	0.03	0.07	0.01	0.01	0.11				340	0.67	336	8.5
38	0.13	0.010	0.020	0.69	1.49	0.03	0.07	0.01	0.01	0.11				365	0.66	319	10
39	0.12	0.010	0.023	0.82	1.48	0.03	0.06	0.01	0.01	0.14				325	0.66	341	6.7
40	0.11	0.010	0.018	0.37	1.34	0.07	0.07	0.01	0.01	0.14				305	0.60	311	6.5
41	0.15	0.014	0.021	0.40	1.30	0.04	0.08	0.01	0.01	0.11				310	0.62	315	9
42	0.17	0.012	0.022	0.40	1.66	0.04	0.06	0.01	0.01	0.15				340	0.77	387	11
43	0.16	0.009	0.010	0.36	1.06	0.60	0.24	0.15	0.14	0.20		0.027		300	0.72	299	22
44	0.16	0.010	0.012	0.53	1.34	0.45	0.09	0.01	0.10	0.20		0.024		330	0.72	317	18
45	0.10	0.003	0.013	0.40	0.98	0.81	0.23	0.23	0.23	0.59		0.010		350	0.76	352	7.8
46	0.10	0.007	0.014	0.45	1.62	0.08	0.08	0.32	0.016					380	0.82	333	18
47	0.15	0.011	0.013	0.35	1.10	0.065	0.19	0.21		0.24				370	0.69	363	7.8
48	0.15	0.011	0.009	0.45	1.27	0.07	0.05	0.02		0.21				325	0.64	339	7.8
49	0.15	0.014	0.011	0.33	1.03	0.80	0.38	0.44		0.25				360	0.90	410	10
50	0.15	0.008	0.010	0.35	1.06	0.81	0.43	0.40		0.25				405	0.89	406	11
51	0.16	0.031	0.025	0.26	0.75	0.79	0.51	0.46	0.05	0.32			0.005	395	0.85	415	8.5
52	0.14	0.008	0.004	0.27	0.77	0.91	0.49	0.45	0.08	0.19			0.003	385	0.81	393	8
53	0.15	0.018	0.016	0.28	0.92	0.80	0.49	0.46	0.04	0.32			0.006	380	0.89	413	8.7
54	0.12	0.015	0.015	0.25	0.87	0.85	0.58	0.45	0.08	0.25			0.003	390	0.84	375	10

長中央のボンド部で測定された。実験値には入熱 $Q=17, 33\text{kJ/cm}$ 、板の初期温度 (予熱温度) $\theta_1=25, 100, 150^\circ\text{C}$ 、板厚 $h=25, 50\text{mm}$ が変化したものが含まれている。

Fig. 10 は縦軸に予測値 $(\Sigma D\Delta t)_{100}$ を取り、横軸に実測値 $(\Sigma D\Delta t)_{100}$ を取って、Table 3 の結果をプロットしたものである。Fig. 10(a) は冷却時間 t_{150} による

予測式(3)の結果であり、Fig. 10(b) は冷却時間 t_{100} による予測式(4)の結果であり、Fig. 10(c) は冷却時間 t_{200}, t_{150} による予測値の結果である。Fig. 10(b) より従来から溶接熱サイクル後の水素濃度を示す因子と考えられていた冷却時間 t_{100} は熱因子 $(\Sigma D\Delta t)_{100}$ の予測に適していないこと、Fig. 10(a), (b) の比較より冷却時間

t_{150} を用いた予測式(3)は t_{100} を用いた予測式(4) よりすぐれていること, Fig. 10(c) より冷却時間 t_{200} , t_{150} を用いた予測式(5)がかなりよく熱因子を予測していることがわかる。

4.2 硬度

Table 4 は硬度予測式(8)の検討に使用した鋼の化学成分, 測定された硬度 Hv, 予測硬度 \hat{H}_v , 冷却時間 $t_{800-500}$ を示している。1 から 15 の鋼は松田⁸⁾ の, 16 ~27 の鋼は EVANS⁹⁾ の, 28~54 の鋼は鈴木¹⁰⁾ の実験結果である。鈴木の実験結果では $t_{800-500}$ が示されていない, 540°Cでの冷却速度 R_{540} が示されていた。そこで, 鈴木により導かれた R_{540} と $t_{800-500}$ の関係を用いて, $t_{800-500}$ を類推した。

Fig. 11 は Table 4 の硬度の実測値と予測値の関係を示している。図中の破線は $\hat{H}_v = H_v \pm 30$ を示している。硬度 Hv が予測式(8)によりおおむね ± 30 の誤差で予測されていることがわかる。

5. 結 論

1) 統計解析の手法である Stagewise regression procedure と多くの研究者のデータを用いて, 次式に示す熱因子, 硬度と冷却時間, 化学組成の関係を導いた。

熱因子 $(\Sigma D\Delta t)_{100}$ の予測式

$$(\Sigma D\Delta t)_{100} = (4.2 t_{200} + 2.73 t_{150} - 13) \times 10^{-5} (\text{cm}^2)$$

硬度 Hv の予測式

$$\tau > \tau_M \quad \hat{H}_v = (992C - 230P_v + 250)$$

$$\exp\left\{-\frac{3t_{800-500}}{(310)P_v}\right\} + 188P_v + 80$$

$$\tau \leq \tau_M \quad \hat{H}_v = 812C + 293$$

$$\text{ただし } \log \tau_M = 2.5P_v - 1.21$$

$$P_v = C + \frac{\text{Mn}}{3} + \frac{\text{Ni}}{8} + \frac{\text{Cr}}{12} + \frac{\text{Mo}}{2} + \frac{\text{Cu}}{5}$$

2) 冷却時間 t_{100} は熱因子 $(\Sigma D\Delta t)_{100}$ と密接な相関関係がないため, 溶接熱サイクル後の水素濃度を示す因子としては適していない。

3) 硬度予測式は硬度を ± 30 の誤差でおおむね予測している。

4) ボロン B は硬度の重要な因子であるが, 今回用いた資料では B の分析値を示したデータが少なく, 硬度予測指標 P_v に必要な化学成分として選択されなかつた。しかし, 今後, B を含んだ CCT 図のデータが多くなれば, 硬度予測指標 P_v に含まれるものと思われる。

CCT 図の硬度について討論をして下さいました, 阪大工学部の黄地助教授に感謝致します。

文 献

- 1) T. TERASAKI, R. KARPPI, and K. SATOH: Trans. JWS, 10(1979)1, p. 53
- 2) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫: 溶接学会誌, 48(1979)5, p. 44
- 3) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫: 溶接学会誌, 48(1979), 7 p. 82
- 4) N. R. DRAPER and H. SMITH: Applied Regression Analysis, [John Wiley Sons, Inc.] 中村慶一訳, 応用回帰分析 [森北出版]
- 5) E. W. JOHNSON and M. L. HILL: AIME, Trans., 218 (1960) Dec., p. 1104
- 6) 稲垣道夫, 宇田雅広: 金属材料技術研究所報告, 6 (1963) 1, p. 32
- 7) 原沢秀明, 寺崎俊夫, 佐藤邦彦: 溶接学会全国大会講演概要第 24 集 (1979)
- 8) F. MATSUDA and H. NAKAGAWA: Trans. JWRI, 7(1978), p.47
- 9) G. M. EVANS and N. Christensen: Correlation of Microstructure with HAZ Embrittlement, IIW, Doc. IX-823-73
- 10) 鈴木春義: 金属材料技術研究所報告, 5 (1962) 6, p. 19
- 11) 藤井忠臣, 白木良典: 日立造船技報, 36(1975) 4, p. 70
- 12) 藤井忠臣, 中島宏幸: 溶接冶金委員会資料, WM-668-77 (1974)
- 13) H. SUZUKI: Cold Cracking and Its Prevention in Steel Welding (Report 2 Root Cracking), IIW Doc. IX-1110-79