

論 文

1 000~1 200 MPa 級高張力鋼の化学成分と
人工海水中疲れき裂伝播速度に関する
重回帰分析

丸山典夫*・角田方衛*²・(故)内山 郁*³

Multiple Regression Analysis between Fatigue Crack Growth Rates in
Sea Water and Chemical Compositions of 1 000-1 200 MPa Grade Steels

Norio MARUYAMA, Masae SUMITA and (late) Iku UCHIYAMA

Synopsis:

The relationship between the degree of the effect of synthetic sea water in the freely corrosive condition on fatigue crack growth rate (FCGR) and alloying elements has been examined by the multiple regression analysis using 32 kinds of 980-1 176 MPa grade steels which were quenched from 850°C and were tempered at 615°C. The maximum value of the ratio of FCGR in sea water at 0.167 Hz to that in air was used as the degree of the effect of sea water on FCGR. The stress ratio of 0.10 was used. The following results are obtained.

1) FCGR of the steel containing more than 1% Cr or containing more than 0.8% Mo is relatively high in sea water because cracks propagate through grain boundaries. However, the addition of less than 1% Cr or of less than 0.8% Mo has no influence on FCGR in sea water.

2) The addition of Si has detrimental influence and the addition of Cu, Mn or Al has beneficial influence on FCGR in sea water.

1. はじめに

将来、高張力鋼が海洋開発用材料として使用される機会が増えると予想されるので、高張力鋼の海水環境下での疲れき裂伝播特性を把握し、さらに各鋼種間での相違を明らかにしておくことは重要である。

著者らは、先に^{1)~3)}、784~1 176 MPa の高張力鋼を用いて、人工海水の腐食疲れき裂伝播速度への影響度合を相対的に比較した。応力比、 $R=0.10$ そして繰返速度、 $f=0.167$ Hz の場合、人工海水のき裂伝播速度への影響が大きいのは、応力拡大係数範囲、 $\Delta K=15\sim 35$ MN/m^{1/2} においてであり、 $\Delta K<6\sim 12$ MN/m^{1/2} および $\Delta K>80$ MN/m^{1/2} では、見掛上あまり影響しないことなどを明らかにした。

鋼の海水中腐食疲れ強さへの合金元素の影響に関して統計的に検討した報告はあまりない。引張強さ 294~980 MPa 級の炭素鋼 48 種類について、清水中で回転曲げ疲れ試験を行い、10⁷ 破断寿命と化学成分、熱処理条件などに関して重回帰分析を行つた結果によれば、清水中の鋼の 10⁷ 破断寿命と化学成分の間にはほとんど相関

性はないようである⁴⁾。

本報告は、引張強さ 980~1 176 MPa の高張力鋼 32 種類を用いて、海水の疲れき裂伝播速度への影響度合と合金元素との関係について重回帰分析を行つたものである。

2. 実験方法

2.1 対象鋼種

Table 1 に示すような HY 130, HT 100 および 4320 鋼を基本鋼として、合金元素の添加量を変化させた 32 鋼種を使用した。各鋼は 20 kg 高周波真空炉で溶解し、鍛造・圧延により 7 mm 厚の板材にし、次のような熱処理を施した。



なお、組織はすべて焼もどしマルテンサイトであつた。

2.2 疲れ試験

2.2.1 試験片形状

5 mm 厚、40 mm 幅の片側切り欠き付き板試験片を使

昭和 57 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 59 年 7 月 23 日受付 (Received July 23, 1984)

* 金属材料技術研究所筑波支所 (Tsukuba Laboratories, National Research Institute for Metals, 1-2-1 Sengen Sakuramura Niihari-gun Ibaraki pref. 305)

*² 金属材料技術研究所筑波支所 工博 (Tsukuba Laboratories, National Research Institute for Metals)

*³ 金属材料技術研究所 工博 (National Research Institute for Metals)

Table 1. Chemical compositions (wt%) &

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Al	Ti	B	Nb
1 HY 130	0.13	0.29	0.58	5.08	0.53	0.36	0.14	0.100	0.030			
2 HT 100	0.16	0.29	0.59	1.82	0.55	0.36	0.15	0.098	0.037			
3 4320	0.21	0.29	0.59	1.54	0.89	0.36	0.15	0.100	0.065			
4	0.13	0.45	4.91	2.59	0.59	0.76	0.99	0.093	0.053			
5	0.14	0.45	0.89	5.64	0.85	0.80	0.96	0.044	0.074		0.002	
6	0.13	0.97	1.09	5.50	3.01	0.78	1.00	0.092	0.073			
7	0.13	0.96	1.06	5.47	3.11	0.76	2.79	0.110	0.067			
8	0.13	0.28	1.99	4.62	0.51	0.79	1.05	0.100	0.061			
9	0.13	0.26	1.94	4.48	0.51	0.76	1.01		0.052	0.160		
10	0.13	0.25	1.90	4.55	0.50	0.73	0.99	0.100	0.150			
11	0.16	0.92	1.82	1.63	2.79	0.35	2.93	0.100	0.053			
12	0.15	0.30	1.72	1.60	0.61	0.37	0.15	0.098	0.060	0.044	0.0004	
13	0.21	0.96	0.58	1.49	2.69	0.35	0.15	0.100	0.085		0.0010	
14	0.22	0.30	0.57	1.44	0.97	0.36	2.88	0.110	0.080	0.044		
15	0.14	0.30	0.83	1.50	0.51	0.49	0.16	0.097	0.053			
16	0.18	1.00	0.82	1.52	0.51	0.48	0.16	0.100	0.055			
17	0.18	0.29	2.19	1.49	0.50	0.48	0.15	0.100	0.058			
18	0.17	0.26	5.68	1.51	0.49	0.47	0.15	0.100	0.058			
19	0.16	0.25	0.91	1.50	0.52	0.49	2.88	0.100	0.049			
20	0.17	0.30	0.83	1.50	0.50	0.49	0.16	0.100	0.050		0.0006	
21	0.17	0.31	0.81	1.52	0.51	0.49	0.15	0.100	0.090			
22	0.17	0.31	0.82	1.57	2.11	0.48	0.15	0.100	0.068			
23	0.16	0.33	0.81	1.57	0.61	0.47	0.15	0.100	0.056			0.36
24	0.10	0.30	0.66	1.50	0.44	0.52	0.16	0.110	0.048			
25	0.31	0.29	0.65	1.48	0.44	0.49	0.16	0.110	0.053			
26	0.18	0.29	2.13	1.60	0.48	0.48	0.16	0.110	0.065	0.370		
27	0.18	0.30	0.66	1.49	0.18	0.49	0.16	0.093	0.067			
28	0.17	0.29	0.67	1.52		0.49	0.15	0.110	0.047			
29	0.16	0.29		1.49	0.44	0.49	0.15	0.100	0.045			
30	0.17	0.29	0.67	1.55	0.44	0.50		0.099	0.057			
31	0.17	0.09	1.99	1.55	0.51	0.91	1.99		0.950			
32	0.16	0.27	0.66	1.50	0.38	0.50	0.16	0.100	0.042			

用した¹⁾。海水中の疲れ試験に先立ち、大気中で予き裂を挿入した。

2.2.2 疲れ試験

1) 試験機：±10 t 電気油圧サーボ型疲労試験機（インストロン社製）

2) 応力比：（最小応力と最大応力の比）0.10（引張り-引張り）

3) 繰返速度：大気中では 20 Hz、海水中では 0.167 Hz

4) 波形：サイン波

5) き裂長さの測定：倍率 × 40 で読取顕微鏡により直接測定した。

6) 応力拡大係数 ΔK の計算： $\Delta K = f(a_i) \Delta \sigma \sqrt{\pi a_i}$ ここで a_i はき裂長さ、 $\Delta \sigma$ は応力範囲、 $f(a_i)$ は a_i に依存する補正項で ASTM-STP 410⁵⁾より求めた。

7) 環境：大気中および人工海水中、人工海水の成分は ASTM-D1141-52⁶⁾ によつた。主タンク海水量 100 l、試験片セルへの流量 1 l/min、水温 30°C、pH 7.8 ~ 8.2 で行つた。

2.2.3 破面観察

人工海水中で破断した破面は、超音波洗浄後、走査型電子顕微鏡により観察した。

2.2.4 引張試験

直径 4 mm、標点間距離 25 mm の丸棒試験片を用いて、クロスヘッド速度 1 mm/min で試験した結果を Table 1 に併記する。 σ_B の最高値は 1192 そして最低値は 989 MPa である。

2.2.5 $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の定義

海水中での疲れき裂伝播速度 da/dN への影響度合を定量化するために、パラメータ $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ ¹⁾ を使用した。

$$\gamma_{0.167\text{Hz}} \equiv (da/dN)_{cor.} / (da/dN)_{air}$$

ここで $(da/dN)_{cor.}$ は海水中での da/dN 、 $(da/dN)_{air}$ は大気中の da/dN である。なお、各大気中および海水中の da/dN - ΔK 曲線は一枚の試験片より求めている。

それは、試験片の違いによるき裂伝播挙動のばらつきを除去するためである。また、き裂長さ測定の際、荷重範囲変動により生じる残留応力の da/dN への影響を消去するために、荷重範囲の増加のたびに、き裂先端の塑性

mechanical properties.

	N	P	γ_{max}	σ_y (MPa)	σ_B (MPa)	ϕ (%)	δ (%)
1	0.0030	0.003	2.6	1006	1064	68.0	15.5
2	0.0030	0.003	2.9	1000	1065	68.0	15.3
3	0.0030	0.003	2.9	1049	1122	66.6	15.2
4	0.0140	0.003	2.4	1023	1089	66.5	16.5
5	0.0140	0.003	3.2	1022	1080	68.4	16.1
6	0.0014	0.003	8.6	883	1008	68.7	15.9
7	0.0014	0.003	8.6	969	1071	66.5	15.6
8	0.0240	0.003	5.0	1123	1152	65.0	12.5
9	0.0230	0.003	2.9	1076	1101	62.3	12.7
10	0.0230	0.003	3.5	1156	1167	60.3	10.1
11	0.0030	0.003	7.5	928	1045	64.6	15.9
12	0.0030	0.003	3.4	1016	1056	65.3	14.7
13	0.0030	0.003	6.1	945	1065	68.3	15.6
14	0.0030	0.003	2.3	1135	1170	61.1	14.1
15	0.0030	0.003	2.6	1004	1052	73.6	14.3
16	0.0030	0.003	3.6	1072	1142	69.8	15.6
17	0.0030	0.003	2.5	1019	1073	70.4	15.9
18	0.0030	0.003	2.4	1000	1073	68.7	15.9
19	0.0030	0.003	2.3	1094	1142	65.8	14.4
20	0.0030	0.003	2.7	1067	1091	72.7	14.9
21	0.0030	0.003	2.5	902	1009	73.2	16.3
22	0.0030	0.003	4.1	933	1024	73.7	15.2
23	0.0030	0.003	3.0	1030	1059	70.8	14.3
24	0.0030	0.003	2.7	957	1002	73.5	12.9
25	0.0030	0.003	2.7	1121	1193	67.4	12.4
26	0.0030	0.003	3.6	981	989	66.9	11.1
27	0.0030	0.003	2.8	1023	1073	72.0	12.8
28	0.0031	0.001	2.7	1049	1079	71.5	13.2
29	0.0015	0.001	2.9	1069	1099	74.2	12.4
30	0.0017	0.001	2.8	1032	1094	72.0	13.6
31	0.0013	0.001	4.1	979	1044	66.6	14.8
32	0.0018	0.090	3.1	1041	1105	68.5	13.8

変形域の大きさの3~4倍の大きさに相当するき裂長さ以上のき裂長さを測定から除外している。

3. 結果および考察

海水の da/dN への影響が大きい場合と小さい場合の da/dN - ΔK 曲線の例を Fig. 1 に示す。各鋼の da/dN - ΔK 曲線より $\gamma_{0.167Hz}$ - ΔK 曲線を求めた。 $\gamma_{0.167Hz}$ - ΔK 曲線の例を Fig. 2 に示す。海水の da/dN への影響の大きさを表す値として、以降の解析に $\gamma_{0.167Hz}$ の最大値、 γ_{max} を使用した。各鋼の γ_{max} の値を Table 1 に併記する。なお、すべての鋼において γ_{max} は $15 < \Delta K < 35 \text{ MN/m}^{1/2}$ で生じている。

また、Fig. 3 に示すように、引張強さ σ_B が 980~1176 MPa では、 γ_{max} と σ_B のあいだには相関関係は見られない。

3.1 整理分析法

従属変数 y 、独立変数 x_i を下記のように定義し重回帰分析を行った。

y : γ_{max}

x_1 : C 含有量 (wt%)

x_2 : Si 含有量 (wt%)

x_3 : Mn //

x_4 : Ni //

x_5 : Cr //

x_6 : Mo //

x_7 : Cu //

x_8 : V //

x_9 : Al //

x_{10} : Ti //

x_{11} : B //

x_{12} : Nb //

x_{13} : N //

x_{14} : P //

ここで y は

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_ix_i + \dots + b_nx_n$$

b_0 : 回帰定数 b_i : 偏回帰係数

独立変数を選択しない場合 (一般型重回帰分析) と変数選択する場合 (階段的重回帰分析) について重回帰分析を行った。後者の M. A. EFROYMSON⁷⁾ によつて考案された階段的重回帰分析の要点を下記に示す。

- 1) 従属変数 y として γ_{max} 、独立変数 x_1, x_2, \dots, x_n として化学成分をとる。
- 2) 従属変数と最も相関の強い独立変数 x_i を選択する。
- 3) 選択された独立変数 x_i が回帰方程式に導入する

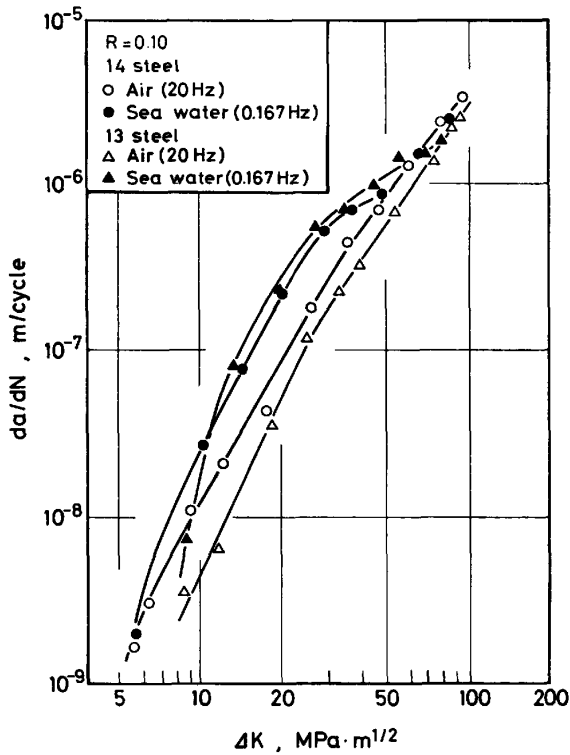


Fig. 1. Examples of da/dN vs ΔK curves.

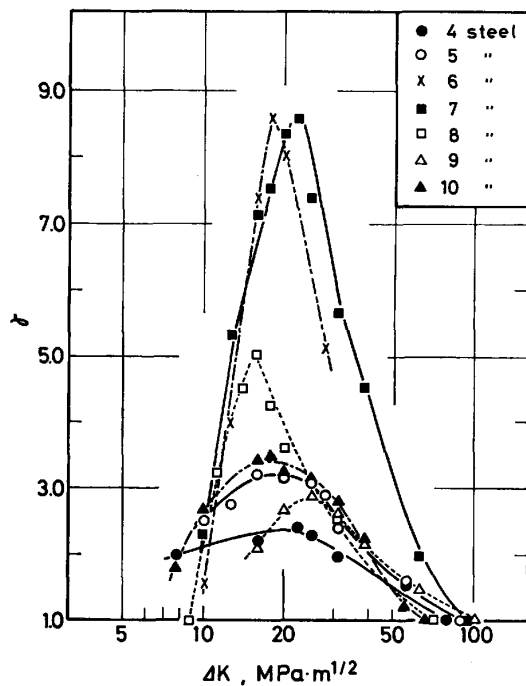


Fig. 2. Examples of $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ vs ΔK curves.

値があるかどうか F 検定により判定する。それは、各計算段階において回帰式中に存在する各変数に対する偏 F 値の基準を作り、適当な F 分布パーセント点と比較することによって各変数の寄与の程度を判断することができる。本分析の場合この偏 F 値の導入除去基準、

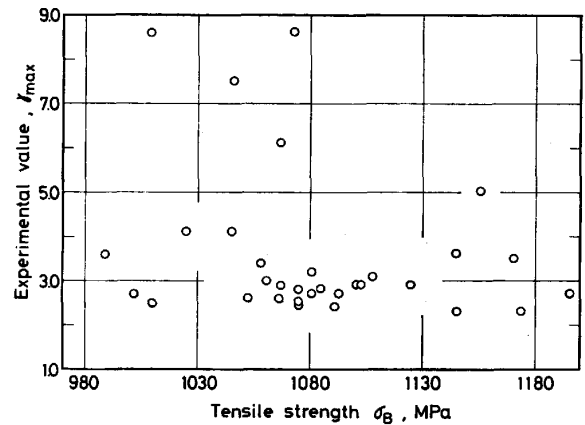


Fig. 3. Effect of tensile strength on the experimental values γ_{max} .

$F_{IN} = F_{OUT} = F_0$ として通常使われている $F_0 = 2.0^9$ とした。

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、すでに導入された変数でも値がなくなれば除去する。

なお、回帰寄与率 L は次の式より求めた。

$$L = R^2 = 1 - (S_e / S_{yy})$$

S_e : 残差平方和

S_{yy} : 全体の平方和

R : 重相関係数

計算は NEC ACOS-4 により、そのプログラム STAPAC-4 MLTREG (一般型重回帰分析) また、STPREG (段階的重回帰分析) により行つた。なお、計算の方法はすべて一次結合として求めた。

3.2 32 鋼種による重回帰分析

32 鋼種のデータの内容および一般型重回帰分析の結果を Table 2 (MLTREG) に併記する。下記の回帰式が得られる。

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 0.0089 - 1.33(C) + 1.72(\text{Si}) - 0.11(\text{Mn}) \\ & + 0.067(\text{Ni}) + 1.35(\text{Cr}) + 2.86(\text{Mo}) - 0.015(\text{Cu}) \\ & + 4.17(\text{V}) + 0.33(\text{Al}) + 1.94(\text{Ti}) - 501(\text{B}) \\ & + 0.013(\text{Nb}) - 5.48(\text{N}) + 4.54(\text{P}) \end{aligned}$$

この回帰式より推定される $\hat{\gamma}_{max}$ と実験値 γ_{max} の関係を Fig. 4 に示す。図中の直線は推定値と実験値が一致することを示している。このときの回帰寄与率は 90.0% である。すなわち、実験値 γ_{max} はこの回帰式によつて 90% が説明できることを示している。

次に、段階的重回帰分析の結果を Table 2 (STPREG) に併記する。Cr, Mo, Si, B の順で影響が大きいことがわかる。下記の回帰式が得られる。

$$\hat{y} = 0.31 + 1.75(\text{Si}) + 1.40(\text{Cr}) + 2.68(\text{Mo}) - 526(\text{B})$$

Table 2. Summary of multiple regression analysis.

	Data used (n=32)				MLTREG			STPREG ($F_0=2.0$)	
	min	max	mean	S.D	Coefficient	t-Value	t-test	Coefficient	F to remove
C	0.10	0.31	0.164	0.0375	-1.33	0.31			
Si	0.09	1.00	0.398	0.253	1.72	1.96		1.75	5.87
Mn	0.00	5.68	1.31	1.20	-0.11	0.84			
Ni	1.44	5.64	2.34	1.49	0.067	0.42			
Cr	0.00	3.11	0.865	0.850	1.38	4.81	**	1.40	43.1
Mo	0.35	0.91	0.534	0.159	2.86	1.91		2.68	14.0
Cu	0.00	2.88	0.704	0.942	-0.015	0.091			
V	0.00	0.11	0.0929	0.0268	4.17	0.59			
Al	0.03	0.97	0.117	0.222	0.33	0.43			
Ti	0.00	0.37	0.0193	0.0706	1.94	0.99			
B	0.00	0.001	0.00013	0.0004	-501	1.33		-526	3.36
Nb	0.00	0.36	0.0113	0.0636	0.013	0.006			
N	0.0015	0.024	0.0053	0.0065	-5.48	0.18			
P	0.001	0.09	0.0055	0.015	4.54	0.51			
γ_{max}	2.3	8.6	3.59	1.72					
const.					0.0089	0.0046		0.31	

* t-test 5% significant.
** t-test 1% significant.

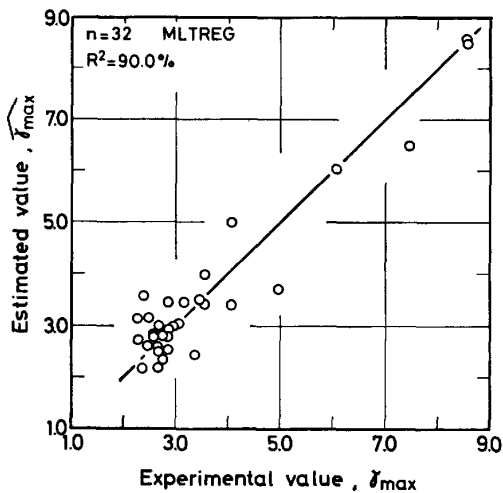


Fig. 4. Comparison between the estimated values $\hat{\gamma}_{max}$ and the experimental values γ_{max} (MLTREG). The solid line represent that the latter coincide with the formers.

この回帰式より推定される $\hat{\gamma}_{max}$ と実験値 γ_{max} の関係を Fig. 5 に示す。このときの回帰寄与率は 88.4% である。これは前述の全元素を使用した場合の回帰寄与率 90.0% とほぼ同じであり、この 4 元素の影響が大きいことを示している。その中でも Cr の影響が特に大きく、Cr だけの場合の回帰式は $\hat{y} = 2.03 + 1.81(\text{Cr})$ でこのときの回帰寄与率は約 80% である。いずれの回帰分析においても F 検定では有意でない。

Cr 含有量と実験値 γ_{max} の関係を Fig. 6 に示す。

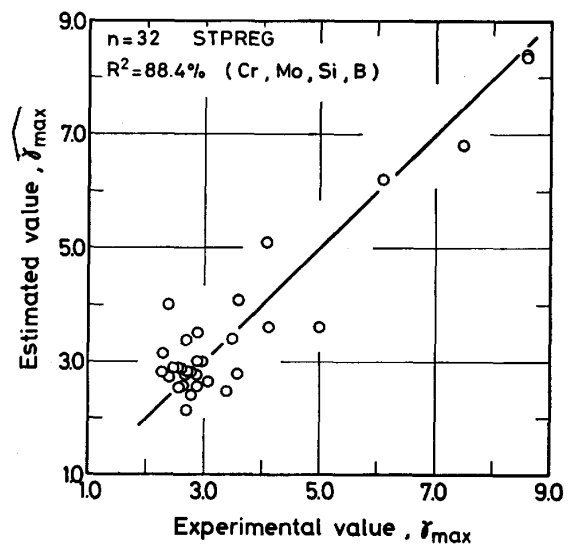


Fig. 5. Comparison between the estimated values $\hat{\gamma}_{max}$ and the experimental values γ_{max} (STPREG). The solid line represent that the latter coincide with the formers.

同図より Cr 含有量が 1% 以下の場合、実験値 γ_{max} とのあいだには相関はないが、1~2% 以上では Cr 量が増すにつれて γ_{max} は急激に増加する。

次に、Mo 含有量と実験値 γ_{max} の関係を Fig. 7 に示す。同図より Mo 含有量 0.7~0.8% を境にして γ_{max} の増加傾向が見られる。したがって本実験鋼においては、多量の Cr あるいは Mo の添加は海水中腐食疲れのき裂伝播挙動に対して好ましくないといえよう。

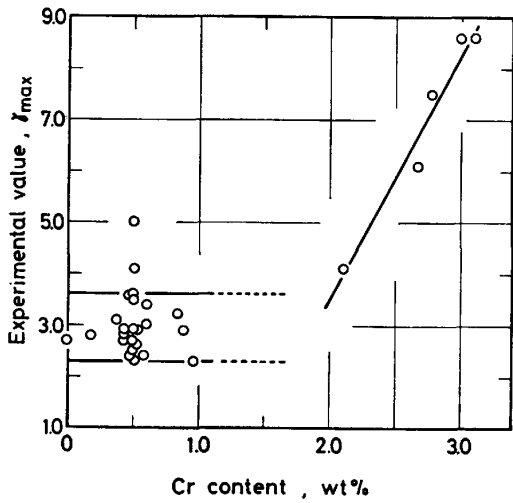


Fig. 6. Effect of Cr content on the experimental values γ_{max} .

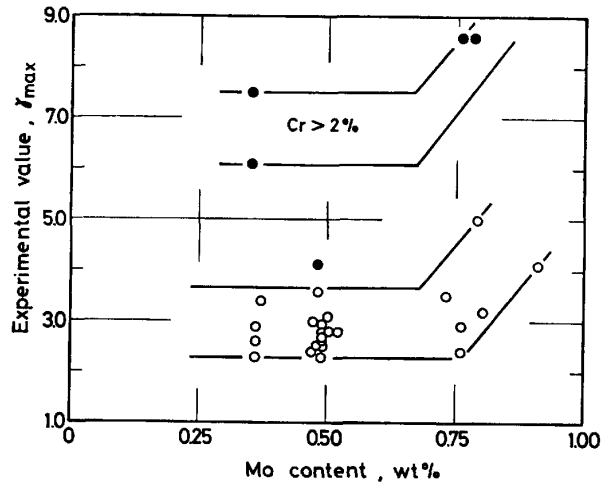


Fig. 7. Effect of Mo content on the experimental values γ_{max} . (○ Cr < 1%, ● Cr > 2%)

破面観察では全般に Photo. 1 a) および b) に示すように、 γ_{max} が 4 以上のときには粒界割れを呈し、 γ_{max} が 4 以下のときには粒内割れを呈している。

3.3 25 鋼種による重回帰分析

次に、粒内割れを呈している γ_{max} が 4 以下の 25 鋼種を使用して重回帰分析を行った。Table 3 にデータの内容および結果を示す。一般型重回帰分析では回帰寄与率は 85.7% である。独立変数の導入除去基準を $F_0=2.0$ で変数選択した場合の回帰寄与率は 79.8% であり、いずれの場合の回帰分析とも F 検定では有意でない。変数選択した場合の回帰式を下記に示す。

$$\hat{y} = 2.27 + 1.14(\text{Si}) - 0.086(\text{Mn}) - 1.48(\text{Mo}) - 0.22(\text{Cu}) + 7.26(\text{V}) + 2.48(\text{Ti}) + 330(\text{B}) + 64.0(\text{N}) + 5.60(\text{P})$$

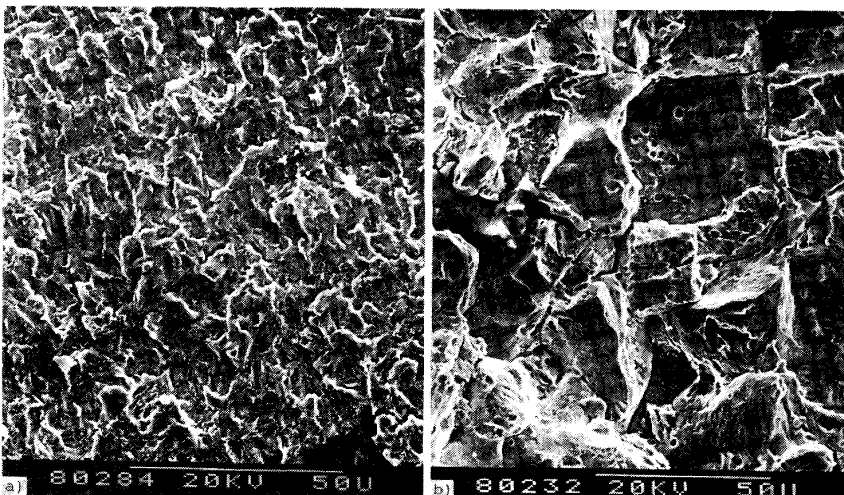
Ti, N, Cu, Si, B, V, Mn, P, Mo の順で影響が大きいことがわかる。この回帰式より推定される $\hat{\gamma}_{max}$ と

実験値 γ_{max} の関係を Fig. 8 に示す。

3.4 15 鋼種による重回帰分析

前記 25 鋼種中、データの少ない Ti, B, Nb, N, P を添加した鋼を除き、基準鋼である HY 130, HT 100 および 4320 鋼の共通成分である C, Si, Mn, Ni, Cr, Mo, Cu, V, Al および P, S, N を含む 15 鋼種を使用して重回帰分析を行った。Table 4 にデータの内容および結果を示す。ただし、V 含有量は 15 鋼種とも 0.1% と一定であり、また、P, S, N も 0.003% と一定であるので独立変数から除外した。その結果一般型重回帰分析では回帰寄与率は 95.4%、そして独立変数の導入除去基準を $F_0=2.0$ で変数選択した場合の回帰寄与率は 89.7% である。いずれの回帰分析とも F 検定では有意でない。変数選択した場合の回帰式を下記に示す。

$$\hat{y} = 2.47 + 1.22(\text{Si}) - 0.073(\text{Mn}) - 0.14(\text{Cu}) - 0.27(\text{Al})$$



a) 14 steel ($\gamma_{max}=2.3$) $\Delta K=20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
 b) 11 steel ($\gamma_{max}=7.5$) $\Delta K=19 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
 Photo. 1. Fractographs of 11 and 14 steels in sea water at the frequency of 0.167Hz, $R=0.10$.

Table 3. Summary of multiple regression analysis.

	Data used (n=25)				MLTREG			STPREG ($F_0=2.0$)	
	min	max	mean	S.D	Coefficient	t-Value	t-test	Coefficient	F to remove
C	0.10	0.31	0.166	0.04	-0.77	0.57			
Si	0.25	1.00	0.330	0.148	1.17	3.52	**	1.14	13.2
Mn	0.00	5.68	1.31	1.33	-0.089	2.15		-0.086	5.18
Ni	1.44	5.64	2.12	1.29	-0.094	1.34			
Cr	0.00	0.97	0.518	0.194	-0.24	0.67			
Mo	0.36	0.80	0.507	0.125	-2.18	2.19		-1.48	3.69
Cu	0.00	2.88	0.499	0.782	-0.20	2.84	*	-0.22	13.3
V	0.00	0.11	0.095	0.023	7.23	2.38	*	7.26	6.17
Al	0.03	0.97	0.095	0.184	-0.22	0.83			
Ti	0.00	0.37	0.025	0.079	2.48	4.03	**	2.48	17.6
B	0.000	0.0006	0.00012	0.0004	506	2.70	*	330	6.21
Nb	0.00	0.36	0.014	0.072	0.65	0.96			
N	0.0015	0.023	0.005	0.006	87.2	3.78	**	64.0	15.5
P	0.001	0.09	0.006	0.017	5.69	2.05		5.60	4.46
γ_{max}	2.3	3.6	2.84	0.384					
const.					2.93	6.37	**	2.27	

* t-test 5% significant.

** t-test 1% significant.

Table 4. Summary of multiple regression analysis.

	Data used (n=15)				MLTREG			STPREG ($F_0=2.0$)	
	min	max	mean	S.D	coefficient	t-Value	t-test	coefficient	F to remove
C	0.10	0.31	0.173	0.046	-0.96	0.15			
Si	0.25	1.00	0.336	0.184	1.23	8.21	**	1.22	51.8
Mn	0.00	5.68	1.090	0.920	-0.074	3.66	*	-0.073	9.90
Ni	1.48	5.08	1.770	0.920	-0.094	2.40			
Cr	0.00	0.89	0.463	0.190	-0.059	0.32			
Mo	0.36	0.52	0.464	0.055	-1.53	1.96			
Cu	0.00	2.88	0.325	0.708	-0.13	3.33	*	-0.14	9.91
Al	0.03	0.97	0.113	0.237	-0.26	2.18		-0.27	4.44
γ_{max}	2.3	3.6	2.73	0.303					
const.					3.38	14.7	**	2.47	

* t-test 5% significant.

** t-test 1% significant.

Si, Cu, Mn, Al の順で影響が大きいことがわかる。この回帰式より推定される $\hat{\gamma}_{max}$ と実験値 γ_{max} の関係を Fig. 9 に示す。

Table 2 に示した範囲で化学成分を動かした 32 鋼種に対して同一の熱処理を施すことは、各鋼にとって必ずしも最適な熱処理条件ではないと思われる。例えば、高 Cr 添加鋼が粒界脆化を生じやすくなったことはその証拠であろう。しかしながら、海水中の腐食疲れ挙動に対して影響を与える因子をなるべく少なくして、化学成分の影響のみを調べるためにはやむを得ない処置と考えている。

本実験鋼に施した熱処理 (850°C 焼入れ, 615°C 焼

もどし) 下では、ある量以上の Cr あるいは Mo の添加は、海水環境下の繰返荷重下では、粒界破壊を起こしやすくするので好ましくないことがわかった。そして、上記のような種々の重回帰分析を試みた結果、海水中の疲れき裂伝播挙動に対して、Cr (<0.97%) および Mo (<0.80%) はほとんど影響しないこと、Si は悪い影響を与えること、Mn, Cu, Al は良い影響を与えることが明らかになった。ただし、成分範囲は 0.089% < Si < 1.00%, 0.00% < Mn < 5.68%, 0.00% < Cu < 0.93%, 0.003% < Al < 0.97% である。

玉田らの低合金鋼による実海域浸漬試験結果の重回帰分析結果によれば⁹⁾、腐食減量および腐食ピット形成阻

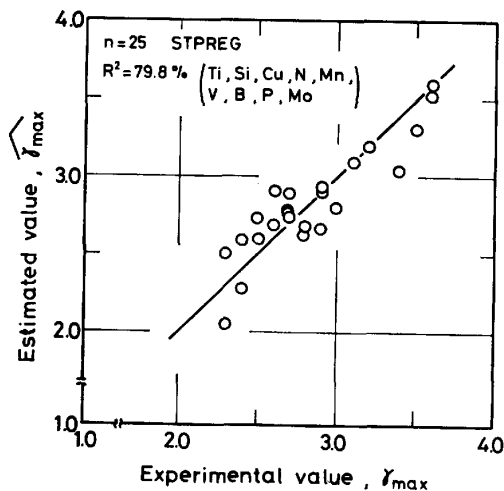


Fig. 8. Comparison between the estimated values $\hat{\gamma}_{max}$ and the experimental values γ_{max} (STPREG). The solid line represent that the latters coincide with the formers.

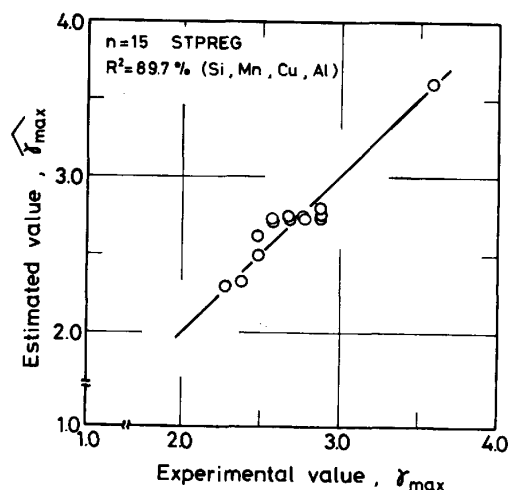


Fig. 9. Comparison between the estimated values $\hat{\gamma}_{max}$ and the experimental values γ_{max} (STPREG). The solid line represent that the latters coincide with the formers.

止の両者に対して、Cu は効果的であり、Si は有害である。これは、上記の腐食疲れき裂伝播速度に対する重回帰分析結果と部分的に一致している。したがって、耐腐食性に有効な合金元素は海水環境下の繰返荷重下でのき

裂伝播特性にも良い結果を与えると考えられる。

4. 結 論

850°C 焼入れ、615°C 焼もどしを施した HY 130, HT 100 および 4320 鋼を基本鋼とした 32 種類の 980~1176 MPa 級高張力鋼を用いて、海水中自然腐食下の疲れき裂伝播挙動と合金元素との関係を重回帰分析した結果、つぎのことが明らかになった。

1) Cr > 1% あるいは Mo > 0.8% の添加は粒界割れを生じることによりき裂伝播が加速される。しかしながら、Cr < 1% あるいは Mo < 0.8% 添加鋼においては Cr および Mo は海水中疲れき裂伝播挙動にほとんど影響しない。

2) Si は海水中のき裂伝播を加速し、一方、Cu, Mn あるいは Al は抑制する。

最後に溶解、加工、熱処理に御協力いただいた高橋順二、谷治治男、斎藤正、本多均一、小島重信、浅井義一、清水哲夫の諸氏に感謝いたします。また、重回帰分析について有益な討論をしていただいた中村森彦博士、藤田充苗博士および栗原豊氏に感謝いたします。

文 献

- 1) 角田方衛, 丸山典夫, 内山 郁: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1669
- 2) 角田方衛, 丸山典夫, 内山 郁: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 420
- 3) 角田方衛, 丸山典夫, 内山 郁: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 428
- 4) 遠藤吉郎: 金属材料疲れ強さの設計資料Ⅲ環境効果 (腐食疲れに関する調査研究分科会編) (1974) [日本機械学会]
- 5) W. E. BROWN Jr. and J. E. SKAWLEY: ASTM STP, 410 (1966), p. 12
- 6) ASTM D1141-52 (1971), p. 180
- 7) N. R. DRAPER and H. SMITH: Applied Regression Analysis [John Wiley and Sons, Inc]; 中村慶一訳: 応用回帰分析 (1968) [森北出版]
- 8) 奥野忠一, 久米 均, 芳賀敏郎, 吉澤 正: 多変量解析法 (1981) [日科技連出版社]
- 9) 玉田明宏, 谷村昌幸: 防食技術, 21 (1972), p. 513