

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	軽水炉炉水模擬高温水中での炭素鋼・低合金鋼の疲労に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	樋口 洵
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第3371号, 授与年月日:1999年12月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:小林 英男
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第3371号, Conferred date:1999/12/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

軽水炉炉水模擬高温水中での炭素鋼・
低合金鋼の疲労に関する研究

1 9 9 9 年

樋 口 洵

軽水炉炉水模擬高温水中での炭素鋼・低合金鋼の疲労に関する研究

目次

表リスト	0-3
図リス	0-5
NOMENCLATURE	0-9
第1章 序論	1-1
1.1 研究の背景と目的	1-1
1.2 研究経過	1-2
1.3 他の研究動向	1-4
1.4 対外的な連携、共同研究、委員会活動等	1-5
1.5 規格化の動向その他	1-6
(1) 米国原子力規制委員会(N R C)	1-6
(2) 米国電力研究所(EPRI)	1-6
(3) 米国機械学会(ASME)	1-7
第2章 固定ひずみ速度条件での疲労寿命	2-1
2.1 目的	2-1
2.2 供試材	2-1
2.3 試験片	2-1
2.4 試験方法	2-2
2.5 試験結果	2-2
2.6 考察	2-3
(1) 力学因子の影響	2-3
a. ひずみ波形の影響	2-3
b. ひずみ速度の影響	2-4
c. ひずみ振幅の影響	2-5
(2) 環境因子の影響	2-6
a. 温度及び溶存酸素濃度の影響	2-6
(3) 材料因子の影響	2-7
a. 炭素鋼、低合金鋼及びヒートの違いの影響	2-8
b. 溶接金属、溶接熱影響部と母材の比	2-8
c. 熱時効の影響	2-10
d. 引張強さ及びS含有量がP値に及ぼす影響	2-11
(4) き裂発生寿命と進展寿命材料因子の影響	2-12
(5) 疲労寿命予測式の提案	2-13
2.7 まとめ	2-16

第 3 章	変動ひずみ速度条件での疲労寿命	3-1
3.1	目的	3-1
3.2	供試材	3-1
3.3	試験片	3-1
3.4	試験方法	3-1
3.5	試験結果	3-2
3.6	考察	3-2
	(1) 環境効果のないひずみ範囲の存在	3-2
	(2) 変動ひずみ速度と固定ひずみ速度での疲労寿命の相違	3-3
	(3) 有効ひずみ速度の概念と疲労寿命予測式の提案	3-4
3.7	まとめ	3-6
第 4 章	データベース構築と疲労損傷評価法の提案	4-1
4.1	目的	4-1
4.2	疲労データベース構築	4-1
4.3	室温大気中の疲労曲線	4-2
4.4	高温水中の疲労曲線	4-2
	(1) ひずみ速度の影響	4-3
	(2) P 値に及ぼすひずみ振幅及びヒートの影響	4-3
	(3) 温度及び溶存酸素濃度の影響	4-3
	(4) 高温水中での疲労寿命の予測	4-5
4.5	高温水中での疲労損傷評価法	4-7
4.6	まとめ	4-8
第 5 章	結論	5-1
謝辞		6-1
参考文献		7-1

表リスト

Table 2-1	Chemical compositions of steels
Table 2-2	Conditions of welding, PWHT and thermal aging
Table 2-3	Mechanical properties of steels
Table 2-4	Test conditions
Table 2-5(0)	Fatigue data table list
Table 2-5(1)	Fatigue test results for STS42(Hi-S)
Table 2-5(2)	Fatigue test results for STS410(Hi-S)
Table 2-5(3)	Fatigue test results for STS410(Lo-S)
Table 2-5(4)	Fatigue test results for SGV480(Lo-S)
Table 2-5(5)	Fatigue test results for SGV480(Lo-S) weld metal as welded
Table 2-5(6)	Fatigue test results for SGV480(Lo-S) weld metal as PWHT
Table 2-5(7)	Fatigue test results for SGV480(Lo-S) HAZ as PWHT
Table 2-5(8)	Fatigue test results for SA106B(Hi-S)
Table 2-5(9)	Fatigue test results for SFVV3(Lo-S) as PWHT
Table 2-5(10)	Fatigue test results for SQV2A(Hi-S) as PWHT
Table 2-5(11)	Fatigue test results for SQV2A(Hi-S) as aged in 66 days
Table 2-5(12)	Fatigue test results for SQV2A(Hi-S) as aged in 200 days
Table 2-5(13)	Fatigue test results for SQV2A(Hi-S) weld metal as PWHT
Table 2-5(14)	Fatigue test results for SQV2A(Hi-S) weld metal as aged in 200 days
Table 2-5(15)	Fatigue test results for SQV2A(Hi-S) HAZ as PWHT
Table 2-6	Effect of wave shape on environmental fatigue life
Table 2-7	Predicted P value (P_e) and experimental P value
Table 2-8	Test conditions and results for beach mark test
Table 2-9	Fatigue curve equations for tested steels in room temperature air
Table 3-1(1)	Fatigue test results for STS410(Hi-S) in step wise strain rate test
Table 3-1(2)	Fatigue test results for SA106B(Hi-S) in step wise strain rate test
Table 3-1(3)	Fatigue test results for STS410(Hi-S) in sine wave strain rate test
Table 3-2(1)	Results of data analysis on varying strain rate fatigue test (STS410(Hi-S))

Table 3-2(2)	Results of data analysis on varying strain rate fatigue test (SA106B(Hi-S))
Table 3-2(3)	Results of data analysis on sine wave strain rate fatigue test (STS410(Hi-S))
Table 3-3(1)	Effect of wave shape on fatigue life for fatigue data having the same rise time (STS410(Hi-S))
Table 3-3(2)	Effect of wave shape on fatigue life for fatigue data having the same rise time (SA106B(Hi-S))
Table 4-1	List of fatigue data source for room temperature air data
Table 4-2	List of fatigue data source for high temperature water data

図リスト

- Fig. 2-1 Groove geometry of weld joint
- Fig. 2-1 Dimensions of specimen
- Fig. 2-3 Sampling location
- Fig. 2-4 Outline of test apparatus
- Fig. 2-5(1) Sample fatigue data for STS42(Hi-S) (RT air + 250°C/8 ppm water)
- Fig. 2-5(2) Sample fatigue data for STS410(Hi-S) (RT air + 289°C/8 ppm water)
- Fig. 2-5(3) Sample fatigue data for SA106B(Hi-S) (289°C/0.8-8 ppm water)
- Fig. 2-5(4) Sample fatigue data for SFVV3(Lo-S) (RT air + 289°C/8 ppm water)
- Fig. 2-5(5) Sample fatigue data for SQV2A(Hi-S) (RT air + 289°C/8 ppm water)
- Fig. 2-5(6) Sample fatigue data for SQV2A(Hi-S) weld metal
(RT air + 289°C/8 ppm water)
- Fig. 2-6 Change of stress range on strain cycling for carbon steel in 290°C water
- Fig. 2-7 Effect of wave shape on environmental fatigue life
- Fig. 2-8(1) Relation between fatigue life and strain rate for STS42(Hi-S)
(250°C/8 ppm water)
- Fig. 2-8(2) Relation between fatigue life and strain rate for STS410(Hi-S)
(289°C/8 ppm water)
- Fig. 2-9 Effect of temperature on linear relation between fatigue life and strain
rate for STS42(Hi-S) (250°C/8 ppm water)
- Fig. 2-10 Effect of dissolved oxygen on linear relation between fatigue life and
strain rate for STS42(Hi-S) (250°C water)
- Fig. 2-11 Comparison of linear relations between fatigue life and strain rate for
four different steels (289°C/8 ppm water)
- Fig. 2-12 Relation between P value and strain amplitude for carbon steels
- Fig. 2-13 Relation between P_A value and temperature for carbon steels
- Fig. 2-14 Relation between P_A value and dissolved oxygen content for carbon steels
- Fig. 2-15 Relation between $R_{P(hdo)}$ value and temperature for carbon steels
- Fig. 2-16 Relation between $R_{P(htp)}$ value and dissolved oxygen content for carbon
steels
- Fig. 2-17 Relation between R_P , temperature and dissolved oxygen content for
carbon steels
- Fig. 2-18 Comparison of relations between fatigue life and strain rate for all base
metals in high temperature water

- Fig. 2-19 Comparison of relations between fatigue life ratio ($N_{25W/D}$) and strain rate for all base metals in high temperature water
- Fig. 2-20 Comparison of fatigue curves for base metal and weldments of carbon steel in high temperature water
- Fig. 2-21 Comparison of fatigue curves for base metal and weldments of low alloy steel in high temperature water
- Fig. 2-22(1) Comparison of relations between fatigue life and strain rate for base metal, weld metal and HAZ of carbon steel
- Fig. 2-22(2) Comparison of relations between fatigue life and strain rate for base metal, weld metal and HAZ of low alloy steel
- Fig. 2-23(1) Comparison of relations between fatigue life ratio ($N_{25W/D}$) and strain rate for base metal, weld metal and HAZ of carbon steel
- Fig. 2-23(2) Comparison of relations between fatigue life ratio ($N_{25W/D}$) and strain rate for base metal, weld metal and HAZ of low alloy steel
- Fig. 2-24 Hardness distribution in cross section of welded specimen and location of fatigue crack initiation
- Fig. 2-25 Effect of aging on environmental fatigue curve for SQV2A base metal
- Fig. 2-26 Effect of aging on environmental fatigue curve for SQV2A weld metal
- Fig. 2-27 Effect of aging on relations between fatigue life and strain rate for SQV2A base and weld metal
- Fig. 2-28 Effect of aging on relations between fatigue life ratio ($N_{25W/D}$) and strain rate for SQV2A base and weld metal
- Fig. 2-29 Relation between P_A value and sulfur content
- Fig. 2-30 Relation between P_A value and tensile strength
- Fig. 2-31 Relation between P_{S0} value and tensile strength
- Fig. 2-32 Comparison between predicted P value (P_e) and experimental P value
- Fig. 2-33 A sample of beach marks on fracture surface
- Fig. 2-34 Effect of strain amplitude on the relation between crack depth and CUF in 289°C, 1 ppm water
- Fig. 2-35 Effect of strain amplitude on the relation between crack depth and CUF in 289°C, 0.2 ppm water
- Fig. 2-36 Effect of strain amplitude on the relation between crack depth and CUF in 289°C, 0.05 ppm water
- Fig. 2-37 Effect of oxygen content on the relation between crack depth and CUF at 0.6% strain amplitude
- Fig. 2-38 Effect of oxygen content on the relation between crack depth and CUF

at 0.3% strain amplitude

Fig. 2-39 Effect of oxygen content on fatigue crack growth rate at 0.6% strain amplitude

Fig. 2-40 Effect of oxygen content on fatigue crack growth rate at 0.3% strain amplitude

Fig. 2-41(1) Comparison of predicted fatigue curves with test results for STS42(Hi-S) in 288°C, 8 ppm DO water

Fig. 2-41(2) Comparison of predicted fatigue curves with test results for STS42(Hi-S) in 250°C, 8 ppm DO water

Fig. 2-41(3) Comparison of predicted fatigue curves with test results for STS42(Hi-S) in 150°C, 8 ppm DO water

Fig. 2-41(4) Comparison of predicted fatigue curves with test results for STS42(Hi-S) in 100°C, 8 ppm DO water

Fig. 2-41(5) Comparison of predicted fatigue curves with test results for STS410(Hi-S) in 290°C, 8 ppm DO water

Fig. 2-41(6) Comparison of predicted fatigue curves with test results for STS410(Hi-S) in 150°C, 8 ppm DO water

Fig. 2-41(7) Comparison of predicted fatigue curves with test results for SFVV3(Lo-S) in 288°C, 8 ppm DO water

Fig. 2-41(8) Comparison of predicted fatigue curves with test results for SFVV3(Lo-S) in 288°C, 0.2 ppm DO water

Fig. 2-41(9) Comparison of predicted fatigue curves with test results for SFVV3(Lo-S) in 200°C, 0.2 ppm DO water

Fig. 2-41(10) Comparison of predicted fatigue curves with test results for SFVV3(Lo-S) in 150°C, 0.2 ppm DO water

Fig. 2-41(11) Comparison of predicted fatigue curves with test results for SQV2A(Hi-S) BM as PWHT in 288°C, 8 ppm DO water

Fig. 2-41(12) Comparison of predicted fatigue curves with test results for SQV2A(Hi-S) WM as PWHT in 288°C, 8 ppm DO water

Fig. 2-42 Comparison between predicted fatigue life and test result for all materials in high temperature water (using tested P_{max})

Fig. 2-43 Comparison between predicted fatigue life and test result for all materials in high temperature water (using calculated P_{max})

Fig. 3-1 Relation between De_I/De and F_{entest}

Fig. 3-2 Relation between rise time and fatigue life ratio

- Fig. 3-3 Relation between frequency and fatigue life
- Fig. 3-4 Relation between rise time and fatigue life
- Fig. 3-5 Relation between F_{entest} and F_{encal} for varying strain rate fatigue data
- Fig. 3-6 Relation between F_{entest} and F_{enav} for varying strain rate fatigue data
-
- Fig. 4-1 e - N relation for Japanese carbon steels in RT air
- Fig. 4-2 e - N relation for Japanese low alloy steels in RT air
- Fig. 4-3 e - N relation for Japanese carbon steels in high temperature water
- Fig. 4-4 e - N relation for Japanese low alloy steels in high temperature water
- Fig. 4-5 Relation between P_{max} and e_a for carbon steel
- Fig. 4-6 Relation between P_{max} and e_a for low alloy steel
- Fig. 4-7 Relation between $R_{P(htp)}$ and oxygen content for carbon and low alloy steels
- Fig. 4-8 Relation between $R_{P(hdo)}$ and temperature for carbon and low alloy steels
- Fig. 4-9 Relation between R_P , temperature and oxygen content for carbon steel
- Fig. 4-10 Relation between R_P , temperature and oxygen content for low alloy steel
- Fig. 4-11 Relation between N_W and N_P for carbon steel
- Fig. 4-12 Relation between N_W and N_P for low alloy steel
- Fig. 4-13 Relation between e_a and $N_{W1\%/s}$ for carbon steel
- Fig. 4-14 Relation between e_a and $N_{W1\%/s}$ for low alloy steel
- Fig. 4-15 Relation between N_W and N_{WPmean} for carbon steel
- Fig. 4-16 Relation between N_W and N_{WPmean} for low alloy steel
- Fig. 4-17 Flow diagram for environmental fatigue evaluation
- Fig. 4-18 Relation between N_W and N_{WPmean} for carbon and low alloy steel
- Fig. 4-19 Design fatigue curves for carbon steel in water
- Fig. 4-20 Design fatigue curves for low alloy steel in water

Nomenclature

N_{25} : ひずみ制御疲労寿命 (cycles)

(引張最大荷重が安定値から25%低下した時点の繰返し数)

N : ひずみ制御疲労寿命 (cycles)

(上記の25%低下の定義が明瞭でない場合の寿命)

N_{25A} 、 N_A : 室温大気中試験でのひずみ制御疲労寿命 (cycles)

N_{25W} 、 N_W : 高温水中試験でのひずみ制御疲労寿命 (cycles)

N_{25WP} 、 N_{WP} : 高温水中での予測疲労寿命 (cycles)

$NW1\%/s$: ひずみ速度を1%/sに外挿した時の高温水中疲労寿命 (cycles)

NWP_{mean} : 平均応力効果を最大に考慮した高温水中での予測疲労寿命 (cycles)

ε_a : 歪み振幅 (%)

ε_{aA} : 室温大気中試験での歪み振幅 (%)

ε_{aW} : 高温水中試験での歪み振幅 (%)

$\dot{\varepsilon}$: ひずみ速度 (%/s)

$\dot{\varepsilon}_T$: 引張ひずみ(ひずみ増加)速度 (%/s)

$\dot{\varepsilon}_C$: 圧縮ひずみ(ひずみ減少)速度 (%/s)

A 、 B 、 C : 疲労構成式の定数 ($\varepsilon_a = A(N_{25})^B + C$)

P : 疲労寿命の歪み速度依存性指数 ($N_{25W} = D(\dot{\varepsilon}_T)^P$ の指数項)

P_A : 高温水中疲労寿命1点から求めた P 値 ($N_{25W} = N_{25A}(\dot{\varepsilon}_T)^P$)

P_e : 予測 P 値

P_{So} : S を0%に外挿したときの P 値

$D =$ 最小自乗法で求まる $N_{25W} = D(\dot{\varepsilon}_T)^P$ の係数項

(D はひずみ速度を1%/sに外挿した時の寿命に相当し、同時に同一ひずみ振幅での室温大気中寿命(N_A)にほぼ等しい)

T : 温度 (°C)

DO : 酸素濃度 (ppm)

S : 鋼材の硫黄(S)含有量 (%)

UTS : 鋼材の引張強さ (MPa)

a : き裂深さ (mm)

da/dN : き裂進展速度 (mm/cycle)

P_{max} : 290 °C、 $DO \geq 0.8$ ppm における P

R_P : P/P_{max}

$R_{P(htp)}$: 290 °Cにおける R_P

$R_{P(hdo)}$: $DO \geq 0.8$ ppm における R_P

F_{en} : 疲労寿命の環境効果補正係数

(同一ひずみ振幅で $=A/N_{25W}$ or $=N_{25A}/N_{25W}$)

ε_{min} : ひずみサイクルにおける最小ひずみ (%)

ε_{max} : ひずみサイクルにおける最大ひずみ (%)

UF : 累積疲労損傷

$S_{a,threshold}$: 最大平均応力下で環境の影響がなくなるひずみ振幅のしきい値 (%)

S_a : 仮想応力振幅 ($=\varepsilon_a \times E$ 、 E : 縦弾性率) (MPa)

S_m : コードで決められた設計応力強さ (MPa)

第1章 序 論

1.1 研究の背景と目的

日本の原子力発電が総発電量の40%にも達する現今において、原子力発電プラントの安全性の確保は至上課題である。

原子力機器の疲労設計は、日本国内では通産省告示501号[1]に種々の材料の設計疲労曲線が与えられており、これに従っている。これらの曲線は ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III[2]に規定されている設計疲労曲線から導かれているとされている。炭素鋼やステンレス鋼のような構造材料においては、これらの設計疲労曲線は空气中での完全両振り疲労試験データのベストフィットカーブを修正 Goodman 法で平均応力の効果を補正し[3]、これに対してさらに寿命で1/20、応力で1/2してその低い方を滑らかに結んで決定されたとされている。この場合、寿命を除いた係数20はマージンではなく以下のような不明確なファクターに対する係数を掛け合わせた数字であるとされている[4]。

データのばらつき (minimum to mean)	2.0
試験片の寸法効果	2.5
表面荒さ、雰囲気の効果、その他	4.0

ここで、雰囲気(atmosphere)とは大気中の湿度や試験場所の大気の違いの影響であり、水中のような腐食性の環境を考慮したものではない。すなわち現行規格の設計疲労曲線では原子炉の炉水環境中での環境効果は考慮されていなかったことになる。しかしながら、実際には純水に近い原子炉の炉水中では疲労強度の低下は想定されなかったので、炉水に接する部位でもこの設計疲労線図がそのまま疲労設計に用いられてきた。

原子炉の冷却水中で原子炉圧力容器用の低合金鋼の疲労き裂の進展速度が著しく加速される現象は1972年に日本原子力研究所の近藤ら[5]が報告して以来、世界の注目を集め、多くの研究がなされて、その結果を基に ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI[6]に高温水環境中でのき裂進展速度のリファレンスカーブが規定された。このように疲労き裂進展速度が高温水の影響で著しく加速される現象は早い時期に発見されていた。しかしながら、疲労寿命に及ぼす高温水環境の影響についてはその後長い間注目されなかった。

1977年にはフランスの Garnier ら[7]が高温水中での炭素鋼の曲げ疲労試験結果を報告したが、この報告では疲労寿命の低下は見られず環境の影響はないと結論された。このときの試験速度は比較的速かった。

1970年代に、沸騰水型原子炉(BWR)で、配管に用いたオーステナイト系ステンレス鋼の応力腐食割れ(SCC)による冷却水漏洩事故が多発した。その際、対策の一つとして、ステンレス鋼配管から BWR 炉水中で SCC 感受性がない炭素鋼配管への取り替えが採用され、1970年代終わり頃から1980年代にかけて多くのプラントで実施された。炭素鋼を使用するに当たっては、BWR の冷却水である高温の加圧純水中で種々の試験が実施された。その試験の一つである配管テスト（内部に高温水を循環した状態で配管に繰返し台形波の負荷を加え、SCC 感受性を調べるテスト）で予測より早い繰返し数でリークが生じる事例が観察された。この現象は破面観察で SCC の所見がなかったことと、同時に行われた単軸定荷重 SCC 試験で割れが生じなかったことから、SCC の心配は無いと結論された。

筆者はこの現象は炭素鋼のこの種環境中での疲労寿命にも影響するのではないかと考え、1979年に BWR 炉水を模擬した高温高圧純水中で軸ひずみ制御低サイクル疲労試験ができる装置を開発し、研究に着手した。

1.2 研究経過

試験に着手した当時は高温高圧水を得られるオートクレーブの中で軸ひずみ制御疲労試験ができる装置は存在しなかったので、装置の試作から開始した。装置の開発に約1年を費やした後、原子炉配管に用いられる炭素鋼管(STS42)の高温水中軸ひずみ制御疲労試験を開始した。初期の試験条件は高温（250℃）高溶存酸素濃度（室温大気中での飽和濃度の約8 ppm）で比較的早いひずみ速度であった。その結果低サイクル疲労のS-N曲線は室温大気中でのそれと大差の無い物であった。その後、ひずみ速度を遅くすると顕著な寿命の低下が生じ、この寿命低下とひずみ速度の間には両対数で良好な直線関係があることを発見した[8]。この直線関係が高温水中での疲労寿命を評価する上で最も基幹の式となり、後に米国で Higuchi-Iida's Power Law と名づけられた。

その後環境条件の影響を見るため、温度と酸素濃度を変えた環境中での試験を実施し、温度が高いほど、酸素濃度も高いほど寿命低下が大きいことを見出し、これら環境因子の影響の定量的評価式を提案した[9]。さらにひずみ速度、温度及び酸素濃度の影響を定量化することによって、任意の環境条件及びひずみ速度条件での炭素鋼の疲労寿命を予測する式を提案した[10]。これらの成果をまとめて1985年に鉄と鋼に論文として発表した[11]。

炭素鋼に続いて、原子炉圧力容器のノズル部等に用いられている低合金鋼鍛鋼(SFVV3)について同様の試験を実施した。この研究は溶接協会原子力研究委員会のTFC小委員会（1983-1985、原子力研究所委託、委員長：飯田國廣東大教授(当時)）

の分担研究として実施した。その結果、低合金鋼においても炭素鋼と同様の挙動が見られるが、炭素鋼よりは環境に対する感受性が低いことが判明した。低合金鋼についても炭素鋼と同様に、任意の環境条件及びひずみ速度条件での疲労寿命を予測する式を提案した[12、13]。これらの成果は炭素鋼のその後の追加試験データとともにまとめて1988年北京での6th ICPVTにて発表し[14]、またさらに1991年に Nuclear Engineering and Design に論文として発表した[15]。

低合金鋼に関しては、その後、熱時効材及び溶接金属に関する試験を追加、熱時効は環境に対する感受性を多少高める傾向があるが、溶接金属では逆に環境に対する感受性が低くなる等の知見を見出した。この研究は前述の T F C 小委員会に引き続き溶接協会の LE 小委員会（1986-1988、同）での分担研究として実施した。またこれらの成果は1992年ドイツでの Post SMiRT Conference[16]で報告し、さらに、その後実施した炭素鋼の溶接金属に関するデータを加えて材料特性の影響の観点から再評価して1996年モントリオールでの8th ICPVT[17]及び IIW-XIII[18]に論文として発表した。

ここまでの試験は全て一定のひずみ速度条件下でひずみ速度の影響を調べてきた。しかしながら、実プラントでは応力変動を生じるトランジェントは全て刻一刻と速度を変えている。特にトランジェントの末期では無限に近い低速のひずみ速度が考えられる。このような状況を考慮すると、一定のひずみ速度条件の現有データだけで実プラントの損傷を評価できるか疑問となる。この問題に解答を与えるべく変動ひずみ速度の影響を確認する試験を実施した。その結果速度が変動する場合の評価は、微少範囲での平均速度に対応する環境効果係数とひずみ増分の積をひずみ変動範囲の間積分することで評価可能なことを見出した。この手法は修正レートアプローチ法と名づけられた。この研究は火力原子力発電技術協会 E F D 委員会（1993-1995、委員長：飯田國廣東大名誉教授）での分担研究として実施した。またこれらの成果の一部は1995年ハワイでの ASME/JSME Joint PVP Conference で報告し[19]、さらに全てをまとめて1996の ASTM シンポジウムで報告するとともに ASTM STP 1298に論文として発表した[20]。

EFD 委員会では温度及び溶存酸素濃度の影響の見直しも分担した。ここでは多量のデータを追加して、筆者が当初提案した評価式に多少の修正を加えた。この成果についても共著で1995年ハワイでの ASME/JSME Joint PVP Conference[21]、及び1996の ASTM シンポジウムで報告するとともに ASTM STP 1298に論文として発表した[22]。ASTM STP 1298の論文は1997年の ASTM Sam Tour Award(同年の ASTM STP で公表された腐食に関連する Best 論文1編に贈られる論文賞)を受賞し、1998年11月の ASTM Meeting で共著者とともに表彰された。

最後に、これまでの筆者らの成果に加えて、世に公表された有効な高温水中疲労データを集め、材料(ヒート)によるデータのばらつき等も考慮に入れて再評価を行

ない、得られた成果から高温水環境中における疲労損傷の評価手法を提案し、1999年 ASME PVP Conference に投稿した[23]。

1.3 他の研究動向

前述したように、高温水環境中での疲労に関しては、進展速度の加速についての研究が中心となったため、疲労寿命の観点からの研究は多くない。最も初期の Garnier ら[7]の研究結果が環境の影響を否定したことも一因と考えられる。しかしながら、米国ではかなり早い時期にいくつかの報告があり、また日本、ドイツ、ロシアでも断片的にデータが報告されている。

米国の Dresden 1 BWR プラントで、実際の原子炉水の一部を循環させる試験ループに設置された疲労試験装置で得られたデータとして、一部の材料（炭素鋼）で著しい疲労寿命の低下を物語るデータが報告された[24]。この試験は前述の Garnier らのケースに比べて繰返し速度が遅かったが、それが意識してのパラメータではなかったこととデータ数があまり多くなかったため、当初は特に注目されなかった。

前述の炭素鋼配管の BWR 炉水模擬環境中での配管テストで予測より早い繰返し数でリークが生じた事例では、米国 GE の Weistein らが疲労損傷の観点からデータをまとめ、1982年に米国の EPRI レポート[25]で報告している。また同じ GE の Ranganath らは類似の成果を ASTM STP 770に論文として発表している[26]。しかしこれらの研究はパラメトリックな試験をしておらず、現象を十分に解明していなかったためあまり注目されなかった。この試験は SCC を考慮したものであるため荷重負荷速度は非常に遅かった。

その少し後、1983年に GE の Prater らは dull notch を有する CT 試験片で炭素鋼(A333B)の高温水中での疲労試験を実施し、疲労寿命低下がひずみ速度、温度及び溶存酸素濃度に依存すること、またこのような環境効果はひずみ振幅があるレベル以上の時に生じることを報告した[27、28、29]。これらの結果は筆者の試験データと非常に良く一致した。

米国ではその後試験は途絶えていたが、1988年に筆者が日本の高温水中疲労データを ASME の規格委員会に紹介したことが大きな話題となった後（詳細後述）、1990年頃より米国アルゴンヌ国立研究所(ANL)の W. Shack、O. Chopra らが NRC の委託を受けて、日本のデータの検証をすべく大がかりな試験を開始した。彼らのデータは日本のものと良く一致した。これらの結果は3冊の NUREG[30、31、32]として NRC から出版されると共に、いくつかの論文となっている[例えば33、34、35]。ANL の試験は日本のデータの確認が当初の目的であったため、新たな知見は多くない。

日本国内では、1983年に炭素鋼についての北川らの研究[36]、低合金鋼について

の仲尾らの研究[37]があり、やはり高温水中での疲労寿命低下現象を報告している。また1989年には永田らが低合金鋼で同様の高温水中での疲労寿命低下現象を報告している[38]。しかしいずれも断片的な試験結果の報告であり、種々の因子をパラメトリックに評価して定量的な提案をするには至っていない。

1.4 対外的な連携、共同研究、委員会活動等

高温高圧水中での疲労試験は大がかりな装置を必要とするため、試験の実施は軽水炉のメーカ等に限られていた。また原子炉の特異性から、電力会社との共同研究の形を取る場合が多かった。前述の BWR 電力共同研究は1981年から1987年まで7年間にわたり、炭素鋼(STS42)、低合金鋼(SFVV2)、ステンレス鋼(SUS304、SUS316NG)、ニッケル基合金(インコネル600、インコネル X750)の高温水中での疲労データを採取した。筆者はこれらの約1/3の試験を分担した。溶接協会の原子力研究委員会の三つの小委員会(FRC 小委員会、TFC 小委員会、LE 小委員会)では1980年より合計10年間にわたり、その活動の一部として高温水中での疲労試験を実施してきた。これらの試験はいずれも筆者が提案者であり、全てのプロジェクトで多くの試験を分担すると共に、データのとりまとめ、解析、評価、報告書の執筆を担当した。

高圧力技術協会の DBA 臨時専門委員会(1985-1987、委員長：飯田國廣東大名譽教授)では日本原子力研究所の委託を受けて、原子炉材料の疲労に関する文献を調査すると共に、日本の疲労データを集めてデータベースを作る作業を実施した。その結果、大気中、高温水中での疲労寿命及び疲労き裂進展に関するその時点までのデータをほぼ網羅したデータベース FADAL を完成した。筆者はこの委員会では幹事としてとりまとめにあたった。FADAL はその後、筆者が英文版に改定、その後のデータを加えてメンテナンスしデータベース JNUFAD となっている。

FADAL が完成した年(1988年)の12月に ASME 規格委員会の Subcommittee on Design / Subgroup on Fatigue Strength (Chairman: W. O'Donnell)からの要請を受けて、FADAL の内容を中心に日本の疲労寿命データ特に高温水中でのデータをニューヨークでの同委員会で筆者から紹介した[39]。なおこのとき FADAL の高温水中データの半分以上が筆者の試験データであった。この報告は米国で非常な反響を呼び、規格の見直しを視野に入れて、疲労における高温水環境効果の評価をすべきであるとの動きとなった。

米国の PVRC (Pressure Vessel Research Council)はこの作業をするべく新たな委員会(Steering Committee on Cyclic Life and Environmental Effects in Nuclear Applications (CLEE 委員会) (Chairman: S. Yukawa))を1991年に設立した。同委員会は必要なデータの大部分が日本のデータであるため、データ提供を含めて強く日本に協力を求めてきた。日本では火力原子力発電技術協会に EFD 委員会(1991-

1995、委員長：飯田國廣（東大名誉教授）を設置しこれに対応してきた。筆者はこの委員会の幹事を務めると共に、米国 PVRC の CLEE 委員会の委員も兼務して、年 3 回の米国での PVRC の会合に参加し、日米協力に務めてきた。1998年2月に San Diego で開かれた PVRC の Winter Meeting で筆者のそれまでの活動の業績が評価されて PVRC Award が授与された。PVRC での検討状況は1995年と1998年の ASME PVP Conference で発表されている[40、41]。

EFD 委員会では3年間の電力共研を実施して、実プラントを評価するのに必要な緊急のデータ採取を実施し、その成果を公表してきた。具体的には、実プラントを想定したひずみ速度変動の影響[19、20]、温度変動の影響[42、43]、中温・低酸素濃度でのデータ取得と影響の評価[21、22]、環境効果の評価法の提案[44、45、46]の4テーマでまとめた。EFD 委員会は当初の目的を達成して1996年3月で終了し、その後の仕事は発電設備技術検査協会の EFT 委員会(1995-2007(予定)、委員長：飯田國廣（東大名誉教授））が引き継いでいる。

1.5 規格化の動向その他

(1) 米国原子力規制委員会(NRC)

米国の NRC (Nuclear Regulatory Commission)は日本での研究成果を知ると、いち早く寿命延長に際しての、疲労累積損傷係数(Usage Factor/UF)に乗ずるべき環境割増係数を提案した（例えば、BWR の炭素鋼で10倍、低合金鋼で3倍）。この案は十分に検討されたものではなかったため、その後の反論で再検討されている。また、炭素鋼／低合金鋼の環境中疲労に関して、米国独自のデータを採取するとともに、データ収集／解析／評価の作業をアルゴンヌ国立研究所(ANL)に委託実施しており、それらの成果は前述の3種類の NUREG として公開されている。また、暫定的な評価案を基に、米国内の実プラントでのモデル評価も試みられており、この結果は NUREG/CR6260[47]として公表されている。この試算では UF が1を大幅に越える箇所が配管を中心に数多く見られる。しかしながら、NRC は配管の設計手法には多くのマージンがあることから、このような結果が出ても疲労に及ぼす環境の効果は緊急の問題ではないと結論しており、運転中プラントへのバックフィットは要求しないとしている。しかしながら、ライセンスリニューアルに際しては環境効果の評価を要求するとしている。ただし、現段階では正式な評価手法は与えられていない。

(2) 米国電力研究所(EPRI)

EPRI は1995年に環境効果の評価法の開発とその手法を用いての BWR プラントの試評価を GE に委託して実施した。成果は EPRI Report TR-10579[48]で報告されている。同報告ではまた、環境効果の評価を ASME B & PV Code に追加する場

合の提案として Non-mandatory Appendix X “Fatigue Evaluations Including Environmental Effects”を巻末に添付している。

(3) 米国機械学会(ASME)

ASME B & PV Code, Section IIIでは SC on Fatigue Strength で環境疲労が話題になっているが、現状では環境効果を考慮した設計線図の見直しの動きにまでは至っていない。PVRC から規格化するための活動が提案されているが、ボード委員会ではこの活動を承認して予算を付けるまでには至っていない。ただし、前項にあるように環境効果の評価は Non-mandatory Appendix にすべきだとの意見が大勢であり、その試案も提案されていることから、近い将来規格化される方向で活動が開始されるものと思われる。

第2章 固定ひずみ速度条件での疲労寿命

2.1 目的

BWR の冷却水を想定した高温高圧の水中で炭素鋼及び低合金鋼の低サイクル疲労試験を実施し、疲労寿命に及ぼすひずみ速度、ひずみ振幅といった力学的因子の影響、温度及び溶存酸素濃度といった環境因子の影響及び材料の引張強さ、硫黄(S)含有量、溶接金属や溶接熱影響部(HAZ)の金属組織の違いといった材料因子の影響を評価し、任意の条件での疲労寿命の推定方法を確認する。ここでは、多くの因子が広い範囲にわたって試験されるが、試験中の条件は固定である。実プラントでは応力の変動を伴うトランジェント中にひずみ速度や温度条件が変動するのが普通であるが、ここでは影響の定量化を容易にするため条件を固定して単純化する。条件変動の影響は次章で述べる。

2.2 供試材

本章における供試材料は以下の通りである。

- ・ JIS G3455 STS42 (ASME SA333 Gr. 6相当) 炭素鋼管母材 (高 S、低 TS 材)
- ・ JIS G3455 STS410 (ASME SA333 Gr. 6相当) 炭素鋼管母材 (高 S、高 TS 材)
- ・ JIS G3455 STS410 (ASME SA333 Gr. 6相当) 炭素鋼管母材 (低 S、低 TS 材)
- ・ JIS G3118 SGV480 (ASME SA516 Gr. 485相当) 圧力容器用炭素鋼板母材及び溶接金属
- ・ ASME SA106B 炭素鋼管母材 (高 S、高 TS 材)
- ・ JIS G3204 SFVV3 (ASME SA508 cl.3相当) 圧力容器用調質型低合金鍛鋼母材
- ・ JIS G3120 SQV2A (ASME SA533B-1相当) 圧力容器用調質型低合金鋼板母材及び溶接金属

(JIS の記号は材料製造当時のものであり、現在とは異なるものがある)

このうち、SGV480は極低 S 材で、その溶接金属は TIG 溶接で、As welded と As PWHT の 2 種類を試験した。SQV2A の母材及び溶接材料は旧プラント材を模擬して S 含有量を増したもので、溶接金属は SAW で溶接し、母材、溶接金属とも As PWHT と熱時効材を試験に供した。各々の母材及び溶接金属の化学成分を Table 2-1 に示す。各々の溶接継手の開先形状を Fig. 2-1に、溶接条件、PWHT 条件及び熱時効条件を Table 2-2 に示す。母材及び溶接金属の機械的性質を Table 2-3 に示す。

2.3 試験片

試験片は中実平滑丸棒タイプとした。疲労試験部の剛性が高くないので、バックリングを防ぐため試験片の径は 8 mm 平行部長さは 10 mm (GL : 8 mm)と比較的小型なものとした。試験片の詳細を Fig. 2-2に示す。

試験片採取要領は以下とした。

- ・炭素鋼の管及び板の母材では板厚の中心から管軸または圧延方向と試験片軸を一致させて採取した。
- ・厚板低合金鋼の母材では板厚の1/4、3/4の位置から、試験片軸を主鍛造方向と一致させて試験片を採取した。これら2か所の採取位置による材質への影響は無視した。
- ・溶接金属では溶接方向と試験片軸を一致させて全溶接金属試験片を取れるだけ採取した。
- ・溶接熱影響部(HAZ)試験片では HAZ 部が試験片断面の中央に位置するようにして、溶接方向と試験片軸を一致させて採取した。この方法では母材部、溶接金属部及び HAZ 部に同一のひずみ振幅が負荷され、その結果最も弱い個所の疲労強度が測定できると想定した。溶接部からの試験片採取要領を Fig. 2-3に示す。

2.4 試験方法

疲労試験は脱イオン水循環ループ付きのオートクレーブ内で、油圧サーボタイプ疲労試験機を用いて、軸ひずみ制御で実施された。装置の概念図を Fig. 2-4に示す。試験温度は室温～289℃の間で選定され、圧力は試験温度で確実に水が液体である値に設定された。溶存酸素濃度は入口側調整槽内にアルゴンと空気を吹き込むことによって制御した。ひずみ比は-1（完全両振り）とし、制御波形は、三角波(fast-fast or slow-slow)、正鋸歯波（slow-fast）または逆鋸歯波（fast-slow）とした。ここで、三角波は負荷時と除荷時のひずみ速度($\dot{\epsilon}$)が等しい条件で、正鋸歯波はひずみ増加時のひずみ速度($\dot{\epsilon}_T$)がゆっくり(slow)でひずみ減少時のひずみ速度($\dot{\epsilon}_C$)が速い(fast)条件、また負鋸歯波は逆にひずみ増加時が速くひずみ減少時がゆっくりの条件である。fast のひずみ速度は0.4%/s、slow のひずみ速度は0.0001～0.04%/s の範囲で選定された。疲労寿命 N_{25} は最大引張り荷重が安定値の25%に低下した繰返し数として定義された。Table 2-4には主な試験環境条件がリストされている。

また一部の試験片ではひずみ繰返しの初期から適当な間隔でビーチマークが入るような繰返し履歴を与えた試験を実施した。この履歴は、適当な繰返し数の低ひずみ速度の主疲労サイクルと高ひずみ速度のビーチマークサイクルを交互に負荷する方式とした。試験後に破面上でビーチマークの数を数え、その数を試験終了時から逆算してき裂の発生時期を計測し、またビーチマーク間隔からき裂進展速度を計測した。

2.5 試験結果

大気中及び高温水中で実施した、ひずみ速度固定条件での全ての疲労試験のマトリックスを Table 2.5(0)に示す。また得られた全ての結果を材料別にまとめて Table

2.5(1)～(15)に示す。

一つの材料である程度データが揃っている STS42(Hi-S)、STS410(Hi-S)、A106B(Hi-S)、SFV3(Lo-S) as PWHT、SQV2A(Hi-S) base metal 及び weld metal の as PWHT の 6 種類について、250または289℃、酸素濃度0.8～8 ppm の高温水中で、種々のひずみ速度で得られた疲労寿命データをひずみ振幅と寿命の関係で材料別に Fig. 2-5(1)～(6)に示す。室温大気中で疲労寿命データが得られているものについてはこれらも図中に併記した。

図から分かるように速いひずみ速度(0.4%/s)では高温水中の疲労寿命は室温大気中でのそれと大差なく、わずかにこれを下回る程度であったが、ひずみ速度が遅くなるにしたがって、疲労寿命は顕著に減少した。Fig. 2-6に炭素鋼のひずみ繰返しに伴う応力振幅の変化の例を示した。同図では同じひずみ振幅で速度の異なる5データを比較しているが、速度が遅くなるほど応力振幅が高くなり、寿命が短くなる。速度の低下に伴う応力振幅の上昇は、この温度域で見られる鋼の動的ひずみ時効によって繰返し硬化が進行したためと推定される。しかしこのような応力上昇は激しい寿命低下を説明するには不十分であり、環境の影響が大きいと考えらる。

高温水中の疲労カーブを室温大気中のそれと比較すると、Fig. 2-5(1)及び(4)に見られるように、長寿命（低ひずみ振幅）側では高温水中の寿命低下が見られなくなる傾向があり、 $10E4 \sim 10E5$ サイクルの領域で両カーブは交差し、長寿命側では高温水中の方がカーブが上になる傾向であった。また低速になると、長寿命側でさらに疲労強度が高くなる現象が Fig. 2-5(1)のひずみ速度0.01%/s のデータで現れている。しかし、この種のデータ採取には非常に長時間を要するためデータ数は少ない。

高温水中ではひずみ速度の減少と共に疲労寿命が低下するが、疲労限強度は下がらず、逆にやや上昇する傾向があることが、筆者らの別の研究[49]でも確認されている。鋼は300℃前後の中温域で動的ひずみ時効で繰返し硬化し、それ故に疲労限が上昇する傾向がある。これが長寿命側での疲労強度上昇の理由と考えられる。すなわち、高温水中での疲労カーブはひずみ速度の低下と共に短寿命方向に移動するが、疲労限は低下しない傾向であるといえる。

2.6 考察

(1) 力学因子の影響

a. ひずみ波形の影響

STS410(Hi-S)材を、289℃、酸素濃度8 ppm の高温水中で、同一振幅(0.6%)条件で、高速三角波(Fast-Fast)、低速三角波(Slow-Slow)、正鋸歯波(Slow-Fast)、逆鋸歯波(Fast-Slow)の4種類の波形で試験した疲労寿命を比較して Table 2-6及び Fig. 2-7に示す。ひずみ速度は Fast が0.4%/s、Slow が0.004%/s とした。低速三角波(Slow-Slow)での寿命は正鋸歯波(Slow-Fast)の寿命とほとんど同じで、高速三角波

(Fast-Fast)での寿命の1/7以下であった。逆鋸歯波(Fast-Slow)の寿命はこれらの中間の値となった。これらの結果から、高温水中での疲労寿命はひずみ増加段階での速度が支配的に影響することが分かった。低速三角波(Slow-Slow)と正鋸歯波(Slow-Fast)で寿命が同じであることから、試験時間の節約のため、低速度試験は正鋸歯波で実施することとした。以後、ひずみ減少段階での速度と断らない限り、ひずみ速度とはひずみ増加段階での速度とする。

ひずみ減少段階での速度がひずみ増加段階での速度より遅い場合には、ひずみ減少段階での速度に依存した寿命低下が見られる。この影響の程度はひずみ増加段階での速度の影響に比べて小さく、減少ひずみ速度でのひずみ速度依存性指数 P 値は増加ひずみ速度でのその約1/2 であった。

h. ひずみ速度の影響

高温水中ではひずみ速度の低下に伴って疲労寿命が低下する。そこで疲労寿命とひずみ速度の関係を求めた。250°C、8 ppm 酸素濃度の高温水中での STS42(Hi-S) 鋼の疲労寿命データから同一ひずみ振幅でひずみ速度の異なるデータを集め、寿命とひずみ速度の関係で両対数表示で Fig. 2-8(1)に示す。同じように289°C、8 ppm 酸素濃度の高温水中での STS410(Hi-S)鋼のデータを Fig. 2-8(2)に示す。両図ではひずみ振幅で記号を区別して表示した。従って振幅が小さいほど図の上側(長寿命側)に位置することになる。両図で3点以上データがあるひずみ振幅についてみると、いずれの振幅でも寿命とひずみ速度の間に良好な直線関係が認められる。このような関係は炭素鋼・低合金鋼において一般的に見られるもので、最初の報告者である筆者らの名前で樋口・飯田の指数則(Higuchi-Iida's Power Law)と呼ばれている。このような知見を根拠に、2点のみのデータもこれらを直線で結び、3点以上の場合は最小自乗法で直線を求め、図中に記した。この直線の関係は一般的に次式で表される。

$$N_{25W} = D(\dot{\epsilon}_T)^P \quad (2-1)$$

ここで、 D は最小自乗法で求めた定数であるが、同時にひずみ速度が1%/sの時の疲労寿命に相当する。両図において、各振幅での室温大気中の疲労寿命をひずみ速度が1%/sの位置に同一記号の塗りつぶしでプロットした。0.3%以上のひずみ振幅では高温水中データを結んだ直線を1%/s へ外挿すると室温大気中の疲労寿命と良く一致していた。低ひずみ振幅では前述の繰返し硬化による疲労強度上昇があるため、室温大気中の寿命がやや低めになる。これらのことから1%/s 程度の速度となると環境の影響が無くなると考えることができる。

STS42(Hi-S)鋼について、8 ppm 酸素濃度の高温水中でひずみ振幅0.6%の疲労寿命データから温度別にひずみ速度の異なるデータを集め、寿命とひずみ速度の関係で両対数表示で Fig. 2-9に示す。多くの温度でデータが2点しかないが、前述の理由でこれらを直線で結んだ。図から分かるように、いずれの温度においても寿命とひずみ速度の間の直線関係は、これを1%/s へ外挿すると室温大気中の疲労寿命とほぼ一致する傾向は変わらなかった。直線の傾きは290°Cで最も大きく、温度が下がると共に小さくなる傾向であった。

同じように STS42(Hi-S)鋼について、250°Cの高温水中でひずみ振幅0.6%の疲労寿命データから溶存酸素濃度別にひずみ速度の異なるデータを集め、寿命とひずみ速度の関係で両対数表示で Fig. 2-10に示す。0.2及び0.01 ppm 酸素濃度の速い速度(0.4%/s)でのデータが室温大気中より長寿命でデータのばらつきと見られる。このため、これら酸素濃度での直線を1%/s へ外挿すると室温大気中の疲労寿命を大きく上回ってしまう。そこで遅い速度(0.01%/s)でのデータを中心に考えると、酸素濃度が下がると共に直線の傾きが小さくなる傾向が、温度の場合と同様に認められた。

Fig. 2-11には、289°C、8 ppm 酸素濃度の高温水中、ひずみ振幅0.6%の条件で、ひずみ速度の異なる疲労寿命データを、STS42(Hi-S)、STS410(Hi-S)、SQV2A(Hi-S) BM 及び WM の4鋼種について比較して示す。いずれの場合も寿命とひずみ速度の間に良好な直線関係があり、1%/s への外挿が室温大気中の疲労寿命と一致する傾向も同様であった。しかし、材料による直線の傾きの相違は明らかで、STS42(Hi-S)の傾きが最も大きく、SQV2A(Hi-S)溶接金属の傾きが最も小さかった。

このように、高温水中でのひずみ制御低サイクル疲労試験で、ひずみ速度を変えて試験して得られた疲労寿命とひずみ速度の間には常に式(2-1)が成り立つ。そして式(2-1)の係数項 D はその材料のその振幅での室温大気中での疲労寿命に相当し、直線の傾きを表す指数項 P は材質、環境条件等に依存して変化する。それ故に P は高温水中でのひずみ速度依存性指数であると共に、環境に対する感受性を定量的に表す最も良い指標となる。

c. ひずみ振幅の影響

Fig. 2-8(1)及び(2)でひずみ振幅別に引かれた傾向線は必ずしも平行ではない。すなわち、環境に対する感受性を表す直線の傾き(P)は必ずしも材料定数とはならない。Fig. 2-8(2)ではひずみ振幅が小さくなるにしたがい一方的に傾きが大きくなる傾向が見られるが、Fig. 2-8(1)でははっきりした傾向は見られない。Fig. 2-12に4種類の異なった炭素鋼について、環境の影響が顕著な高温(250または289°C)、高酸素濃度(8 ppm)水中での P とひずみ振幅の関係を示す。これらの P は同一ひずみ振幅で速度の異なる2点以上のデータから算出された。STS410(Hi-S)の場合は、前にも述べたように P はひずみ振幅の増加とともに一方的に減少する傾向が見られた。しか

しながら、他の鋼では必ずしも同様の傾向ではなかった。すなわち、STS42(Hi-S)で289°Cの場合は振幅0.3%より、0.6%の方が P 値は高く、また SA106B でも同様であった。STS42(Hi-S)の250°Cの場合は振幅の変化と共に P 値が増えたり減ったり複雑で、一定の傾向は見られなかった。これらの結果から、 P 値がひずみ振幅によって影響されるのは明かであるが、それらの間に定性的な傾向を求めるのは困難であった。

(2) 環境因子の影響

前項の Fig. 2-9及び-10に示したように、環境中での疲労寿命低下現象は温度及び溶存酸素濃度にも強く影響される。そこで、広い範囲の温度及び溶存酸素濃度条件でデータが得られている STS42(Hi-S)と STS410(Hi-S)の2鋼種のデータを使って、温度及び溶存酸素濃度の影響の定量的評価を試みる。

a. 温度及び溶存酸素濃度の影響

前項で述べたように、高温水中、同一ひずみ振幅でひずみ速度が異なる試験データの間では、疲労寿命とひずみ速度の間に式(2-1)が成り立つ。そして、係数項 D はそのひずみ振幅での室温大気中の疲労寿命にほぼ等しい。そこで、 D を大気中での疲労寿命 N_{25A} に置き換えて式(2-2)とする。

$$N_{25W} = N_{25A} (\dot{\epsilon}_T)^P \quad (2-2)$$

式(2-2)の N_{25W} に個々の高温水中疲労寿命、 N_{25A} にその材料の同一振幅での室温大気中疲労寿命を代入することによって、個々の高温水中データからパラメータ P が求められる。この際速度が速いデータはばらつきが大きいので、 $\dot{\epsilon}_T \leq 0.04\%/s$ のデータのみを用いた。この手法によって得た P 値は同一振幅で速度の異なるデータから最小自乗法で計算して得た P 値と区別するため P_A と記した。大量に得られるこの P_A を使って、 P に及ぼす温度及び酸素濃度の影響の評価を試みた。

データが多い STS42(Hi-S)と STS410(Hi-S)の2鋼種から得られた P_A と温度の関係を Fig. 2-13に、 P_A と酸素濃度の関係を Fig. 2-14に示す。両図においては材料による相違が大きいため、傾向を把握するのがむずかしい。

前項で述べたように、 P 値はひずみ振幅と材料ヒートにも依存する。そこで、これらの影響を除去するために、各 P データをそのデータと同一材料、同一ひずみ振幅の P_{max} (290°Cで高酸素濃度濃度条件での P 値)で除して P の比(R_p)とし、温度と溶存酸素濃度の影響を評価した。 R_p は式(2-3)で示される。

$$R_p = P / P_{max} \quad (2-3)$$

酸素濃度が0.8 ppm より高い条件のデータ($R_p(hdo)$)のみをあつめ、これらと温度の関係を Fig. 2-15に示す。同図では材料やひずみ振幅の相違の影響が無くなるため、きれいな相関が得られた。 $R_p(hdo)$ と温度の間には式(2-4)の関係が求まった。

$$R_p(hdo) = 0.198 \exp(0.00557 T) \quad (2-4)$$

この関係を図中に曲線で示す。

次に、温度が約290°C条件のデータ($R_p(htp)$)のみをあつめ、これらと酸素濃度の関係を Fig. 2-16に示す。同図でも前図と同様に材料やひずみ振幅の相違の影響が無くなるため、きれいな相関が得られた。 $R_p(htp)$ と酸素濃度の間には式(2-5)の関係が求まる。

$$R_p(htp) = 0.3 \ln(DO(\text{ppm})) + 1.13 \quad (2-5)$$

但し、 $0.2 \leq R_p(htp) \leq 1.0$

この関係を図中に折線で示す。

式(2-4)及び式(2-5)を統合して、任意の温度・酸素濃度における R_p が式(2-6)で与えられる。

$$R_p = 0.3 \ln(DO(\text{ppm})) + 1.13 \quad (2-6)$$

但し、 $0.2 \leq R_p \leq 0.198 \exp(0.00557 T)$

Fig. 2-17に前述の炭素鋼 2 鋼種で得られたデータを R_p と酸素濃度の関係で、温度別にプロットして示す。同図には式(2-6)の関係を折れ線で示した。全ての領域で、式(2-6)とデータの間にはそこそこの一致が見られた。そこで、 R_p に及ぼす温度及び溶存酸素濃度の影響は炭素鋼と低合金鋼のいずれにおいても式(2-6)で評価することとした。

(3) 材料因子の影響

前述の Fig. 2-11に示したように、環境中での疲労寿命低下の程度は材料によって異なる。そこで、これまでに得られている種々の材料について環境中での疲労寿命低下の程度を整理し、材料因子がどのように影響を及ぼしているかを検討する。具体的には、炭素鋼、低合金鋼の材料の違い及びそれぞれの材料のヒートの違いによる影響、溶接金属、溶接熱影響部と母材の比較、熱時効の影響、引張強さ及び S

含有量が P に及ぼす影響について検討する。

a. 炭素鋼、低合金鋼及びヒートの違いの影響

受入状態での炭素鋼母材5鋼種及び As PWHT 状態での低合金鋼母材2鋼種について、約290℃、高酸素濃度の高温水中、ひずみ振幅0.6%の条件でひずみ速度と疲労寿命の関係を比較して Fig. 2-18に示す。各々の材料別に Fig. 2-8と同様の直線関係を求め図中に記した。また各直線の傾き P と係数 D も図中に併記した。STS42(Hi-S)、STS410(Hi-S)の2炭素鋼及び SQV2A(Hi-S)、SFVV3(Lo-S)の2低合金鋼は速い速度(0.4%/s)での疲労寿命がほぼ同程度であるが直線の傾きは異なり、STS42(Hi-S)が最も大きく、STS410(Hi-S)と SQV2A(Hi-S)がほぼ同程度でこれに続き、SFVV3(Lo-S)が最も小さくなった。STS42(Hi-S)の P 値は0.623でSFVV3(Lo-S)の0.308の倍以上であり、鋼種によって環境の影響は大きく異なると言える。炭素鋼同士の比較では、S 含有量が少ない STS410(Lo-S)と SGV480(Lo-S)は遅い速度(0.004%/s)での寿命は STS410(Hi-S)とほぼ同じだが、速い速度(0.4%/s)での疲労寿命が大きいため P 値は大きくなった。一方米国材で S 量の高い SA106B(Hi-S)は全体的に短寿命であったが P 値は STS410(Hi-S)と同程度であった。このように炭素鋼同士であっても材料によってベースの疲労強度も異なるし、環境による疲労寿命の低下の程度も大きく異なることが明らかとなった。

Fig. 2-18では直線が輻輳して環境感受性を示す直線の傾きの比較が困難なため、縦軸を疲労寿命比(N_{25W}/D)に変えて無次元化することによって、材料の基本的な疲労特性の相違を取り除いて比較した結果を Fig. 2-19示す。ここで D は Fig. 2-18で各材料別に求めた直線関係での係数 D である。Fig. 2-19では全ての直線がひずみ速度1%/sで1.0の点(図の(1,1)の点)を通るので、傾きの比較が容易である。この結果環境依存性を示す直線の傾きの大きさは STS42(Hi-S) > STS410(Lo-S) > SGV480(Hi-S) > SA106B(Hi-S) > STS410(Hi-S) > SQV2A(Hi-S) > SFVV3(Lo-S)の順であった。

b. 溶接金属、溶接熱影響部と母材の比較

290℃の水中で、速いひずみ速度(0.4%/s)での SGV480(Lo-S)炭素鋼の母材及び溶接部の疲労データを振幅と寿命の関係で Fig. 2-20に示す。ここでは、受入れのままの母材、As-welded と PWHT での溶接金属及び As-welded での H A Z 部の疲労データが比較されている。溶接金属の疲労曲線は母材のそれに比べて振幅が大きな領域で短寿命となる傾向が認められるが、PWHT の有無による相違はほとんど見られなかった。HAZ 部の疲労寿命は短寿命である溶接金属のそれとほぼ同じであった。

同様の試験条件で得られた、PWHT した SQV2A(Hi-S)低合金鋼の母材、溶接金属及び H A Z 部の疲労データを振幅と寿命の関係で Fig. 2-21に示す。同図には各材

料について最小自乗法で求めたベストフィットカーブを併記した。図から分かるように、母材、溶接金属及び HAZ 部の比較では、HAZ 部の疲労強度が最も低く、母材が最も高い傾向であったが、その差は小さかった。ひずみ速度が0.4%/s と速い場合は、環境による寿命低下はわずかであるので、Fig. 2-20、-21の結果は材料の基本的な疲労特性と大差ないものと判断される。

SGV480(Lo-S)と SQV2A(Hi-S)の材料別に、290℃の高温水中、ひずみ振幅0.6%の条件で、ひずみ速度の異なる疲労データを集め、疲労寿命とひずみ速度の関係を母材、溶接金属及び HAZ の比較で Fig. 2-22(1)及び(2)に示す。各々の部材別に Fig. 2-8と同様の直線関係及び各直線の傾き P と係数 D を図中に記した。また直線の傾きを直接比較するために、Fig. 2-19と同様に縦軸を疲労寿命比に変えて無次元化して比較した結果を Fig. 2-23(1)及び(2)に示す。以上の4図の結果から以下のような所見が得られた。

- ・SGV480(Lo-S)の母材はS含有量が0.002%と極めて低いレベルであるが、 P 値が比較的大きく環境効果は大きいと言える。ただし材料本来の疲労寿命（高速試験での寿命）が長いので、低速試験での寿命は溶接金属のそれを下回ることにはなかった。
- ・SGV480(Lo-S)の溶接金属は母材に比べて P 値が小さく環境効果は大きくないと言える。しかしながら、高速試験での寿命が短いので低速試験での寿命は母材のそれより短くなった。
- ・SQV2A(Hi-S)の場合は母材と溶接金属で高速試験での寿命に差がなかったので、低速試験での寿命は P 値が小さい溶接金属の方が上になった。
- ・SGV480(Lo-S)炭素鋼、SQV2A(Hi-S)低合金鋼とも母材に比べて溶接金属では P 値が小さい。溶接金属部は急凝固組織であるため、高温水中でき裂進展を加速するといわれる MnS が微細に分散してその影響が小さくなるのが一つの原因と考えられる。
- ・炭素鋼溶接金属でPWHTの有無の比較ではPWHT無しの方がわずかに P 値が大きい。
- ・低速度試験での母材、溶接金属及び HAZ の寿命を比較すると、炭素鋼、低合金鋼とも HAZ の寿命が最も短くなった。

長手 HAZ 試験片では、試験後の観察で、HAZ 部の疲労き裂の起点は全て母材部で、特に炭素鋼では単独の試験では溶接金属の寿命が母材のそれより短いにもかかわらず、起点は全て母材部となった。このことから HAZ 試験片では、降伏点の低い母材部でひずみ集中が生じた可能性が考えられる。SGV480の溶接部の硬さ分布と疲労き裂の起点を Fig.2-24に示す。SGV480 (Lo-S)の HAZ は As-welded 状態であるため、硬さが通常の母材に比べて高かったが、その部分が破壊の起点とはなら

なかった。HAZ 部の高温水中での疲労強度が母材や溶接金属に比べて特に低いということはないと考えられる。

c. 熱時効の影響

すでに運転されているプラントの寿命を正確に評価するためには、むかしの材料の特性を把握するとともに、長時間の運転で劣化した材料の特性についても把握しておく必要がある。そこで、古いプラントの材料を模擬して製造し、さらに長時間運転での熱時効劣化を模擬した熱処理を施した低合金鋼を用い、高温高圧水中での疲労強度特性を調べた。

As PWHT 状態と 2 種類の異なる時効熱処理 ($375^{\circ}\text{C} \times 66$ 日時効、 $375^{\circ}\text{C} \times 200$ 日時効) を施した SQV2A(Hi-S) の母材について、 290°C 、8 ppm 酸素濃度の高温水中で速い速度 ($0.4\%/s$) で試験した場合の疲労データをひずみ振幅と寿命の関係で Fig. 2-25 に示す。これら 3 種類のデータに差は見られず、速いひずみ速度では熱時効は高温水中疲労特性に影響を及ぼさないと判断される。そこでこれら全てのデータに対して最小自乗法で傾向線を求め、図中に実線及び式で表示した。同図には参考として、室温大気中での疲労曲線を破線と式で示した。高温水中での曲線は、室温大気中での曲線に比べて短寿命側でやや低く、長寿命側ではやや高くなる傾向であった。

As PWHT 状態と時効熱処理 ($375^{\circ}\text{C} \times 200$ 日時効) を施した SQV2A(Hi-S) の溶接金属について、母材と同じ条件で試験した場合の疲労データをひずみ振幅と寿命の関係で Fig. 2-26 に示す。この場合もこれら 2 種類のデータに差は見られず、溶接金属でも速いひずみ速度では熱時効は高温水中疲労特性に影響を及ぼさないと判断される。そこでここでも全てのデータに対して最小自乗法で傾向線を求め、図中に実線及び式で表示した。同図には参考として、室温大気中での疲労曲線を一点鎖線と式で示した。母材の場合と同様に高温水中での曲線は、室温大気中での曲線に比べて短寿命側でやや低く、長寿命側ではやや高くなる傾向であった。同図には参考として、Fig. 2-25 で得られた母材の高温水中での疲労曲線を破線で示した。破線と実線の間にほとんど差がなく、母材と溶接金属の高温水中疲労強度はほぼ同じであった。

As PWHT 及び時効熱処理状態の SQV2A(Hi-S) 低合金鋼母材及び溶接金属の計 5 種類について、約 290°C 、高酸素濃度の高温水中、ひずみ振幅 0.6% の条件でひずみ速度と疲労寿命の関係を比較して Fig. 2-27 に示す。各々分類別に Fig. 2-8 と同様の直線関係を求め図中に記した。また各直線の傾き P と係数 D も図中に併記した。図から分かるように鋼種及び熱時効処理によって直線が異なっていた。溶接金属より母材のほうが傾きが大きく、また熱時効することによって傾きが大きくなる傾向であった。

直線の傾きを直接比較するために、Fig. 2-19と同様に縦軸を疲労寿命比に変えて無次元化して比較した結果を Fig. 2-28に示す。環境に対する感受性を示す直線の傾きは、母材、溶接金属共に熱時効の進行にともなって大きくなる傾向であった。Fig. 2-28での高温水中での疲労寿命のひずみ速度依存性の序列は SQV2A(Hi-S)BM 200 日時効材 > SQV2A(Hi-S)BM 66 日時効材 > SQV2A(Hi-S)BM PWHT 材 > SQV2A(Hi-S)WM 200日時効材 > SQV2A(Hi-S)WM PWHT 材の順となる。

d. 引張強さ及びS含有量が P 値に及ぼす影響

これまでに述べたように、 P 値は材料によって異なる。しかしながら材料の何の因子が影響しているかは明らかでない。同様の高温水中で低合金鋼の疲労き裂進展速度が鋼中の S 含有量によって著しく加速されることが報告されている。このことから鋼中の S 含有量は一つの影響因子と考えられる。また、これまでのデータを見ると比較的引張強さ (UTS) が高い材料は P 値が小さくなる傾向が認められる。そこでこの二つのパラメータについて P 値への影響を評価した。

2.6(2)項で行ったのと同様の手法で、種々の材料に関して、約290℃、高酸素濃度でひずみ速度が遅いデータから各々の P_A 値を求める。この P_A 値は各材料の P_{max} となる。この P_{max} と S 含有量との関係を Fig. 2-29に示す。この中で UTS が比較的近い値で、S 含有量が大きく異なる炭素鋼母材 2 チャージと低合金鋼母材 2 チャージに注目すると、 P_{max} 値は S 含有量の増大にともなって増大する傾向が明らかに認められる。S 含有量に依存する P_{max} 値の増加の割合は、炭素鋼と低合金鋼で大差ないようである。UTS が等しい炭素鋼 2 チャージで、ひずみ振幅 0.6%、0.3% の 2 点の P_{max} 値の平均値を直線で結んで S 含有量と P_{max} 値との関係を求めると式(2-7)のようになる。

$$P_{max} = 0.408 + 14.6 \times S(\%) \quad (2-7)$$

ここで、係数 14.6 は P_{max} 値の S 量依存性を示し、定数 0.408 は S 量が 0 の時の P_{max} 値を示す。S 含有量が 0 の時の P_{max} 値を P_{so} と表示すると、 P_{so} は (2-8) 式で示される。

$$P_{so} = P_{max} - 14.6 \times S(\%) \quad (2-8)$$

P_{max} 値と UTS の関係を Fig. 2-30に示す。概ね P_{max} 値は UTS の増大にともなって減少する傾向が認められる。但し、炭素鋼の溶接金属で PWHT で強度を低下させた場合は、傾向が異なった。各データ点には S 含有量を数値で併記した。S 含有量が同程度で UTS が大きく異なるデータがなく、この図から UTS の影響の

定量化は困難であった。そこで式(2-8)を用いて P_{So} に置き換えて評価を試みた。係数14.6は材料に共通と仮定して各材料の P_{So} を求め、これらと UTS の関係を Fig. 2-31に示す。Fig. 2-30のデータバンドは Fig. 2-30より狭くなった。Fig. 2-31の全データに対して最小自乗法で直線近似した結果、式(2-9)が得られた。また直線は図中に併記した。

$$P_{So}=0.864 - 0.00092 \times UTS \quad (2-9)$$

式(2-8)、(2-9)から、S量と UTS から予測される計算値 P_c は式(2-10)で導かれる。

$$P_c = 0.864 + 14.6 \times S(\%) - 0.00092 \times UTS \quad (2-10)$$

(2-10) 式で求めた P_c と実測のP値を比較して Table 2-7及び Fig. 2-32に示す。母材でやや非保守側、溶接金属でやや保守側の予測となり、分散が大きい、両者の間には一応の相関が認められた。

(4) き裂発生寿命と進展寿命

高温水中ではひずみ速度の低下とともに疲労寿命が著しく低下する。この寿命低下がき裂発生寿命の低下に依存するものか、き裂進展寿命の短縮に依存するものか確認するため、ビーチマーク法によって、き裂発生時期と進展挙動を調べた。試験のひずみ速度は0.004%/sとし、ビーチマークは予測寿命の約1/10の繰返し数毎に、ひずみ速度を0.4%/sに変えた繰返しを与えることによって付与した。このようにして付与したビーチマークの例を破面のフラクトグラフで Fig. 2-33に示す。写真から分かるように、破面でビーチマークが明瞭に観察された。実施した9本の試験の試験条件と結果を Table 2-8に示す。同 Table には付与したビーチマークステップ数と試験後の破面から観察されたビーチマークの本数を示した。この数の差が発生までに要したステップ数となる。同じであれば、最初のステップの内にき裂が発生したことになる。

ビーチマークから計測したき裂の深さ及び長さ、と累積疲労損傷率との関係におよぼすひずみ振幅の影響を酸素濃度別に比較して Fig. 2-34～-36に示す。また同じ関係に及ぼす酸素濃度の影響をひずみ振幅別に比較して Fig. 2-37～-38に示す。

寿命低下が顕著な高酸素濃度(1 ppm)では、Fig. 2-34に示すようにき裂の発生はいずれの振幅でも1st ステップで観察されており、振幅に関わらず非常に早い時期(開始から数サイクル)で発生している。図中のき裂深さ(または長さ)と累積疲労損傷率の関係をき裂深さゼロに外挿すると、き裂の発生は繰返しの極初期であろうと推察される。環境の影響が強くない低酸素濃度(0.05 ppm)条件では、Fig. 2-36に示す

ようにき裂の発生はひずみ振幅に依存し、振幅0.6%では2nd ステップ(寿命の約20%)からビーチマークが観察されたが、振幅0.3%では寿命の末期(N_{25W} の約80%)までビーチマークによるき裂の発生の確認はできなかった。酸素濃度が0.2 ppm の条件では、Fig. 2-35に示すように1 ppm と0.05 ppm の中間の挙動、すなわち振幅0.6%では2nd ステップで、振幅0.3%では寿命の約50%でき裂が発生した。

き裂発生挙動をひずみ振幅別に比較した場合は、振幅0.6%では Fig. 2-37に示すようにき裂の発生はいずれの酸素濃度でも寿命の20%以内の早い時期であったが、振幅0.3%では Fig. 2-38に示すようにき裂発生時期は強く酸素濃度に依存し、1 ppm では初期、0.2 ppm では寿命の約50%、0.05 ppm では寿命の約80%と変化した。

ビーチマーク間隔から主き裂の進展速度の算出を試みた。軸力の低サイクル疲労試験で毎サイクル全断面降伏するため線形破壊力学的な取り扱いが出来ないが、ビーチマークの間隔を繰返し数で除しき裂の進展速度(da/dN)を算出し、それに及ぼす酸素濃度とひずみ振幅の影響を調べた。き裂の進展速度とき裂深さの关系到及ぼす酸素濃度の影響をひずみ振幅別に比較して Fig. 2-39～-40に示す。いずれの振幅でも高酸素濃度の方が進展速度が速くなる傾向であるが、詳細に見ると多くの知見が得られる。振幅0.6%の場合、Fig. 2-39に示すように酸素濃度0.20及び1 ppm では da/dN は10～30 $\mu\text{m}/\text{cycle}$ であまり差がないのに対して、0.05 ppm では1～6 $\mu\text{m}/\text{cycle}$ で一桁近く低速であった。振幅0.3%の場合は、Fig. 2-40に示すように酸素濃度0.20及び0.05 ppm では da/dN は1～4 $\mu\text{m}/\text{cycle}$ であまり差がないのに対して、1 ppm では10 $\mu\text{m}/\text{cycle}$ と大きく加速していた。また別の見方をすると、環境効果が大きい酸素濃度1 ppm ではひずみ振幅に比較的鈍感にき裂進展速度が速く、環境効果がほとんどない0.05 ppm では振幅に依存せずに進展速度が遅く、中間の0.2 ppm では振幅に強く依存して1 ppm では0.6%に近い速度、0.3%では逆に0.05 ppm に近い速度となった。

高温水中でのき裂の発生と進展挙動を総合的にまとめると以下のようなになる。

- ・酸素濃度1 ppm ではひずみ振幅に関係なくき裂発生寿命は繰返しの極初期(開始から数サイクル)で、進展速度も速く、その結果著しい寿命低下となる。
- ・酸素濃度0.05 ppm ではき裂発生寿命はひずみ振幅に依存するが、進展速度は遅く、結果として寿命低下は小さい。
- ・酸素濃度0.2 ppm の場合はやや複雑で、き裂発生寿命と進展速度の両方がひずみ振幅に依存し、結果として振幅0.6%では寿命低下が大きく、振幅0.3%では寿命低下が小さかった。これは2.4(2)節で述べたように0.2 ppm の酸素濃度が遷移領域であるためデータのばらつきが出たためと推定される。

(5) 疲労寿命予測式の提案

ここまでに述べてきたように、炭素鋼及び低合金鋼の高温水中での低サイクル疲

疲労寿命は歪み速度、温度及び溶存酸素濃度に強く影響されること、またその影響の程度は鋼種、ヒートによっても異なること等が分かった。各々のパラメータと寿命の関係はこれまでの考察でほぼ定量的に求められてきた。これらの式と、その材料の室温大気中の疲労曲線を用いて、任意の条件の高温水中環境で、任意のひずみ速度での疲労寿命予測が可能となる。

前述の2.6(1)b.項で述べたように、高温水中では同一振幅でひずみ速度を変えて試験して得られた疲労寿命とひずみ速度の間には両対数で良好な直線関係があり(式(2-2))、その関係をひずみ速度1%/sに外挿して得られる疲労寿命はほぼその振幅における室温大気中における疲労寿命に一致する。それゆえ、各々の鋼における室温大気中での疲労曲線が基準曲線と見なされる。

室温大気中での疲労曲線は Stromeier 式にあてはめて、一般的に式(2-11)で与えられる。

$$\varepsilon_a = A(N_{25A})^B + C \quad (2-11)$$

ここで、 A 、 B 、 C は材料によって決まる定数で、各々の材料の室温大気中疲労データに対して最小自乗法によって決定される。供試の各材料で、室温大気中の疲労曲線が求まったものについてはその A 、 B 、 C の値をまとめて Table 2-9に示す。

これまでに述べたように、高温水中で疲労寿命のひずみ速度依存性を示す式(2-2)の指数項 P は温度、溶存酸素濃度に依存して変化し、またひずみ振幅、材料の種類(炭素鋼、低合金鋼、母材、溶接金属等)、ヒートの違い等によっても異なる。そこで、 P 値の定量化は以下の手法による。

290°Cで高酸素濃度条件での P 値(P_{max})が基準となる。各材料の P_{max} が与えられれば、式(2-3)及び式(2-6)によって、任意の温度及び酸素濃度条件でのその材料の P 値が求まる。この P 値を式(2-2)に代入すれば、任意の速度での寿命が算出される。この関係を式(2-11)に代入することによって、各材料の任意の温度、酸素濃度及びひずみ速度条件での疲労曲線は式(2-12)のように書くことができる。

$$\varepsilon_a = A(N_{25W}(\dot{\varepsilon}_T)^{-P})^B + C \quad (2-12)$$

ここで、

$$P = R_P * P_{max} \quad (2-3)$$

$$R_P = 0.3 \ln(DO(\text{ppm})) + 1.13 \quad (2-6)$$

但し、 $0.2 \leq R_P \leq 0.198 \exp(0.00557 T)$

なお、 P_{max} に及ぼすひずみ振幅の影響については2.6(1)c.項に述べたように定量的評価はできない。各振幅毎に別々の P_{max} を求めて用いれば精度の高い予測は可能であるが、非常に複雑な手法となるし、膨大な試験データが必要となる。そこで、ひずみ振幅の影響に関しては無視することとし、Table 2-7に示した採取されている P_{max} データの平均値(P_{maxav})を用いることとする。

材料別に P_{maxav} が与えられた場合の予測疲労曲線と試験結果の比較を、比較的数据の多い下記の12例について実施し、Fig. 2-41(1)-(12)に示す。

- ・ STS42(Hi-S) : 288°C、8 ppm DO
- ・ STS42(Hi-S) : 250°C、8 ppm DO
- ・ STS42(Hi-S) : 150°C、8 ppm DO
- ・ STS42(Hi-S) : 100°C、8 ppm DO
- ・ STS410(Hi-S) : 290°C、8 ppm DO
- ・ STS410(Hi-S) : 150°C、0.2 ppm DO
- ・ SFVV3(Lo-S) : 288°C、8 ppm DO
- ・ SFVV3(Lo-S) : 288°C、0.2 ppm DO
- ・ SFVV3(Lo-S) : 200°C、0.2 ppm DO
- ・ SFVV3(Lo-S) : 150°C、0.2 ppm DO
- ・ SQV2A(Hi-S)BM As PWHT : 288°C、8 ppm DO
- ・ SQV2A(Hi-S)WM As PWHT : 288°C、8 ppm DO

いずれの図においても、長寿命域の一部データを除いて、予測曲線と試験結果の間には良好な一致が認められた。

式(2-12)の N_{25W} を予測疲労寿命 (N_{25WP}) に置き換えれば、式(2-13)となり任意の条件での与えられたひずみ振幅に対する予測疲労寿命 (N_{25WP}) が計算できる。

$$\varepsilon_a = A(N_{25WP}(\dot{\varepsilon}_T)^{-P})^B + C \quad (2-13)$$

実施した全ての高温水中疲労試験について、試験条件から式(2-13)で予測疲労寿命 (N_{25WP}) を算出し試験結果 (N_{25W}) と比較して Fig. 2-42に示す。同図中には1:1の関係を示す直線とファクター2のバンドを示した。10E5サイクルを越える長寿命領域で一部データの分散が大きくなるが、大部分のデータはファクター2のバンド内に納まっており、全体としては良く一致していると言える。

長寿命領域での分散の原因は以下の2点に分かれる。250～290°Cの高温長寿命域

では実際の疲労寿命の方が予測値より大きくなる。これは青熱脆性温度領域における動的歪み時効に起因した繰返し硬化で材料の疲労限が上昇するため推定される。150～200℃では逆に予測寿命の方がやや小さくなる傾向があり、これはこの温度での材料のわずかな強度低下に起因すると推定される。10E5サイクルを越える長寿命領域では、設計疲労線図は応力でファクター2の裕度をとるため、寿命の裕度は20より大きくなる。従ってこの程度の非保守性は無視し得る。

各材料の P_{maxav} が試験データとして与えられていない場合は、その材料のS含有量と引張強さから式(2-10)を使って P_C を計算しこれを P_{maxc} として計算に用いる。この P_{maxc} を用いて式(2-13)で算出した全データの予測疲労寿命 (N_{25WP}) を試験結果 (N_{25W}) と比較して Fig. 2-43に示す。この場合は式(2-10)による P_{maxc} の予測精度は比較的ラフなものであるため、データの分散幅が多少広がる傾向はあるが、なお大部分のデータはファクター2のバンド内に納まっており前の図に比べて大差ないと言える。

$$P_C = 0.864 + 14.6 \times S(\%) - 0.00092 \times UTS \quad (2-10)$$

2.7 まとめ

固定速度の疲労試験で得られた高温水中での炭素鋼、低合金鋼の疲労寿命に関する所見をまとめると以下の通り。

- (1) 高温水中での疲労寿命はひずみ速度の減少とともに低下する。そして、ひずみ速度と寿命の間には両対数表示で良好な直線関係が存在する。この関係は下式で示される。同式の指数項 P は環境効果の強さを表す良いパラメータとなる。

$$N_{25W} = D(\dot{\epsilon}_T)^P \quad (2-1)$$

- (2) 寿命に強く影響するのはひずみ増加速度である。それゆえ、slow-slowの三角波形とslow-fastの正鋸歯波形で寿命低下は最も大きく、またこの両波形では寿命は変わらない。fast-slowの逆鋸歯波形の場合はfast-fastの三角波形より短寿命になるが、その寄与は小さいのでプラント寿命評価に際してはひずみ増加速度を考慮すれば良い。
- (3) 環境効果を示す P 値はひずみ振幅によって変動するが、その影響を定量的に評価するのは困難なため、平均値で評価することとする。
- (4) P 値は温度と溶存酸素濃度に強く依存し、高温、高酸素濃度になるほど大きくなる。これらの間には定量的評価式が提案された。
- (5) P 値は炭素鋼、低合金鋼及びそれらのヒートの違いによっても異なる。一般的に低合金鋼の P 値は炭素鋼に比べて小さい傾向である。
- (6) 溶接金属の P 値はそれぞれの母材より小さい傾向である。これは溶接金属が急

冷凝固組織であるため、高温水中でき裂進展を加速するといわれる MnS が微細に分散してその影響が小さくなるのが一つの原因と考えられる。

- (7) 長手 HAZ 試験片では破壊の基点は全て母材部であった。炭素鋼の溶接部では溶接のままで試験を行ったので熱影響部が硬化していたが、その部分が基点となることはなく、HAZ 部の疲労寿命の特別な低下は見られなかった。
- (8) 長期運転を考慮した熱時効によって、通常の疲労強度は変化しないが、環境感受性を表す P 値は多少大きくなる傾向が見られた。
- (9) 引張強さの高い材料は P 値が小さい傾向で、また、S 含有量の高い材料は P 値が大きい傾向があった。 P 値に及ぼす引張強さ及び S 含有量の影響の定量的評価を試み、 P 値の予測式を提案したがばらつきが大きく予測はラフなものであった。
- (10) 高酸素濃度(1 ppm)ではき裂発生は繰返しの極初期(開始から数サイクル)で、進展速度も速く、その結果著しい寿命低下となる。低酸素濃度(0.05 ppm)ではき裂発生も進展速度も遅く、結果として寿命低下は小さい。酸素濃度 0.2 ppm の場合は遷移領域であるためデータのばらつきが大きい。
- (11) ひずみ速度、温度、酸素濃度の影響を定量化して、材料別に室温大気中での疲労寿命と P_{max} を与えることによって任意の条件での高温水中疲労寿命を予測する式を提案した。この式は以下で示される。

$$\varepsilon_a = A(N_{25W}(\dot{\varepsilon}_T)^{-P})^B + C \quad (2-12)$$

ここで、

$$P = R_P * P_{max} \quad (2-3)$$

$$R_P = 0.3 \ln(DO(\text{ppm})) + 1.13 \quad (2-6)$$

但し、 $0.2 \leq R_P \leq 0.198 \exp(0.00557 T)$

Table 2-1 Chemical compositions of steels

Steel	Metal	Sulfur	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
STS42	BM	Hi-S	0.20	0.31	0.93	0.020	0.015			
STS410	BM	Hi-S	0.21	0.31	1.14	0.016	0.012			
STS410	BM	Lo-S	0.15	0.20	1.25	0.019	0.006			
SGV480	BM	Lo-S	0.23	0.24	1.11	0.012	0.002	0.05		
SGV480	WM	Lo-S	0.09	0.75	1.35	0.015	0.005			
A106B	BM	Hi-S	0.29	0.25	0.88	0.013	0.015	0.019	0.09	0.05
SFVV3	BM	Lo-S	0.20	0.29	1.45	0.003	0.003	0.12	0.68	0.55
SQV2A	BM	Hi-S	0.19	0.27	1.45	0.020	0.010	0.13	0.60	0.50
SQV2A	WM	Hi-S	0.07	0.25	1.30	0.015	0.011	0.10	0.86	0.53

BM: Base Metal, WM: Weld Metal, Lo-S: Low Sulfur Material, Hi-S: High Sulfur Material

Table 2-2 Conditions of welding, PWHT and thermal aging

Steel (Plate Thickness)	SGV480 (40mm)	SGV480 (40mm)	SQV2A (150mm)
Welding Process	TIG	TIG	SAW
Welding Current (A)	200	130	650
Arc Voltage (V)	11	9	30
Travel Speed (cm/min)	8	8	20-30
PWHT	620°C × 3h	No	615°C × 45 h
Aging #1	-	-	375°C × 66 days
Aging #2	-	-	375°C × 200 days

Table 2-3 Mechanical properties of steels

Steel	Metal	Sulfur	Condition	0.2%YS (Mpa)	UTS (Mpa)	Elong. (%)	R. A. (%)
STS42	BM	Hi-S	AR	302	489	41	80
STS410	BM	Hi-S	AR	383	549	35	-
STS410	BM	Lo-S	AR	314	490	41	-
SGV480	BM	Lo-S	AR	330	526	30	-
SGV480	WM	Lo-S	AW	483	702	-	73
SGV480	WM	Lo-S	PWHT1	413	579	-	75
A106B	BM	Hi-S	AR	301	572	24	44
SFVV3	BM	Lo-S	PWHT2	471	606	30	74
SQV2A	BM	Hi-S	PWHT2	488	642	28	65
SQV2A	BM	Hi-S	HT1				
SQV2A	BM	Hi-S	HT2				
SQV2A	WM	Hi-S	PWHT2	513	611	24	65
SQV2A	WM	Hi-S	HT2				

AR: As Received, AW: As Welded, PWHT1: 620°C × 3h, PWHT2: 615°C × 45h
HT1: 375°C × 66days, HT2: 375°C × 200days

Table 2-4 Test conditions

Environmental Conditions		Fatigue Test Conditions	
Medium	: Deionized Water	Control Mode	: Axial Strain
Temperature	: RT-290°C	Wave Shape	: Triangle/Saw Tooth
Pressure	: 8.0 MPa	Strain Rate	
Electrical Conductivity	: <0.2 μ S/cm	Rising Phase	: 0.4-0.0001%/s
pH	: 5-7	Falling Phase	: 0.4-0.004%/s
Dissolved Oxygen Content	: <0.01-20 ppm	Strain Ratio	: -1
Water Flow Rate	: 60 little/h		

Table 2-5(0) Matrix of fatigue test in constant strain rate conditions

Steel	Metal	Sulfur	Condition	Number of test		Test Temp. °C	DO ppm	Strai Rate %/s
				Air	Water			
STS42	BM	Hi-S	AR	23	71	25-290	0.01-8	0.4-0.0001
STS410	BM	Hi-S	AR	16	41	100-288	8	0.4-0.004
STS410	BM	Lo-S	AR	1	5	288	8	0.4-0.001
SGV480	BM	Lo-S	AR		3	288	8	0.4-0.004
SGV480	WM	Lo-S	AW		5	288	8	0.4-0.004
SGV480	WM	Lo-S	PWHT1	1	5	288	8	0.4-0.004
SGV480	HAZ	Lo-S	PWHT1		2	288	8	0.4-0.004
A106B	BM	Hi-S	AR		7	288	0.8-8	0.4-0.004
SFVV3	BM	Lo-S	PWHT2	11	62	100-288	0.01-8	0.4-0.0004
SQV2A	BM	Hi-S	PWHT2	9	11	290	8	0.4-0.0004
SQV2A	BM	Hi-S	HT1		5	290	8	0.4-0.0004
SQV2A	BM	Hi-S	HT2		13	290	8	0.4-0.0004
SQV2A	WM	Hi-S	PWHT2	11	8	290	8	0.4-0.0004
SQV2A	WM	Hi-S	HT2		8	290	8	0.4-0.0004
SQV2A	HAZ	Hi-S	PWHT2		5	290	8	0.4-0.004

AR: As Received, AW: As Welded, PWHT1: 620°C×3h, PWHT2: 615°C×45h

HT1: 375°C×66days, HT2: 375°C×200days

Table 2-5(1) Fatigue test results for STS42(Hi-S) in constant strain rate test
Material: STS42(Hi-S) $R\epsilon = -1$

No.	Environ.	Temp. °C	DO ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_c$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
1	Air	290	-	0.4	0.4	0.6	549.8	1830	
2	Air	290	-	0.01	0.4	0.6	420.4	3360	
3	Air	290	-	0.01	0.4	0.3	387.1	26170	
4	Air	250	-	0.4	0.4	1	405.2	1650	
5	Air	250	-	0.4	0.4	0.6	365.5	4380	
6	Air	250	-	0.4	0.4	0.4	334.2	10175	
7	Air	250	-	0.4	0.4	0.4	341	17000	
8	Air	250	-	0.4	0.4	0.3	299.9	45000	
9	Air	250	-	0.01	0.2	1	515.5	852	
10	Air	250	-	0.01	0.2	0.6	449.8	2590	
11	Air	25	-	0.4	0.4	1.8	481.7	248	
12	Air	25	-	0.4	0.4	1.6	461.6	408	
13	Air	25	-	0.4	0.4	1.6	481.2	371	
14	Air	25	-	0.4	0.4	1.4	460.6	420	
15	Air	25	-	0.4	0.4	1.2	447.9	656	
16	Air	25	-	0.4	0.4	1	411.6	1081	
17	Air	25	-	0.4	0.4	1	415.5	946	
18	Air	25	-	0.4	0.4	0.8	401.3	1496	
19	Air	25	-	0.4	0.4	0.6	369	3170	
20	Air	25	-	0.4	0.4	0.6	365.1	3362	
21	Air	25	-	0.4	0.4	0.4	318.5	8088	
22	Air	25	-	0.4	0.4	0.3	292	21430	
23	Air	25	-	0.4	0.4	0.2	269.5	51150	
24	Water	290	8	0.4	0.4	0.6	367.5	2065	
25	Water	290	8	0.4	0.4	0.3	344.5	8460	
26	Water	290	8	0.01	0.4	0.6	431.2	207	
27	Water	290	8	0.01	0.4	0.3	371.9	938	
28	Water	290	0.4	0.01	0.4	0.6	411.6	377	
29	Water	290	0.2	0.4	0.4	0.6		2530	
30	Water	290	0.2	0.01	0.4	0.6	418.9	430	
31	Water	290	0.1	0.4	0.4	0.6		3140	
32	Water	290	0.1	0.01	0.4	0.6	445.9	1005	
33	Water	290	0.01	0.4	0.4	0.6		3060	
34	Water	290	0.01	0.01	0.4	0.6		1896	
35	Water	250	20	0.01	0.4	0.6	363.6	544	
36	Water	250	8	0.4	0.4	1.8	444.9	221	
37	Water	250	8	0.4	0.4	1	412.1	523	
38	Water	250	8	0.4	0.4	0.6	353.3	1930	
39	Water	250	8	0.4	0.4	0.4	323.4	4625	
40	Water	250	8	0.4	0.4	0.3	285.2	14100	
41	Water	250	8	0.4	0.4	0.25	259.7	56400	
42	Water	250	8	0.4	0.4	0.2	207.7	97000	
43	Water	250	8	0.04	0.4	0.6	360.1	938	
44	Water	250	8	0.01	0.4	1	408.7	247	
45	Water	250	8	0.01	0.4	0.6	372.9	418	
46	Water	250	8	0.01	0.4	0.4	350.8	994	
47	Water	250	8	0.01	0.4	0.3	310.2	1840	
48	Water	250	8	0.01	0.4	0.25	292.5	3700	

Table 2-5(1) Fatigue test results for STS42(Hi-S) (continued)
Material: STS42(Hi-S) $R\epsilon = -1$

No.	Environ.	Temp. °C	D0 ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_C$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
49	Water	250	8	0.01	0.4	0.2	270.5	7700	
50	Water	250	8	0.01	0.4	0.19		>42343	Run out
51	Water	250	8	0.004	0.4	1	437.6	93	
52	Water	250	8	0.004	0.4	0.6	388.6	255	
53	Water	250	8	0.001	0.4	0.6	422.4	112	
54	Water	250	8	0.001	0.4	0.3	350	370	
55	Water	250	8	0.001	0.4	0.25	329.3	545	
56	Water	250	8	0.0001	0.4	0.6	418.5	50	
57	Water	250	0.2	0.4	0.4	0.6		4220	
58	Water	250	0.2	0.01	0.4	0.6	359.2	530	
59	Water	250	0.2	0.01	0.4	0.6	365.1	452	
60	Water	250	0.2	0.01	0.4	0.6	376.8	515	
61	Water	250	0.1	0.01	0.4	0.6	422.9	2126	
62	Water	250	0.05	0.01	0.4	0.6	420.9	1850	
63	Water	250	0.05	0.01	0.4	0.6	419.9	2239	
64	Water	250	0.01	0.4	0.4	0.6		4520	
65	Water	250	0.01	0.01	0.4	0.6		2239	
66	Water	200	8	0.4	0.4	0.6	306.7	2800	
67	Water	200	8	0.4	0.4	0.17	221.3	73220	
68	Water	200	8	0.01	0.4	0.6	349.9	2100	
69	Water	200	8	0.01	0.4	0.3	267.5	13200	
70	Water	200	1	0.01	0.4	0.6	363.3	1725	
71	Water	200	0.2	0.4	0.4	0.6		4280	
72	Water	200	0.2	0.4	0.4	0.17	218.1	237000	
73	Water	200	0.2	0.01	0.4	0.6		1664	
74	Water	200	0.01	0.01	0.4	0.6	359	2680	
75	Water	200	0.01	0.01	0.4	0.6	359.7	1574	
76	Water	150	8	0.4	0.4	0.6	334.4	1840	
77	Water	150	8	0.01	0.4	0.6	336.6	948	
78	Water	150	8	0.4	0.4	0.4	304	7375	
79	Water	150	8	0.4	0.4	0.2	233.9	46900	
80	Water	150	8	0.4	0.4	0.17	224.1	54950	
81	Water	150	8	0.4	0.4	0.15	214.4	309800	
82	Water	150	8	0.4	0.4	0.14	192	398000	
83	Water	150	0.2	0.01	0.4	0.6	324	1580	
84	Water	150	0.2	0.4	0.4	0.6	317.8	3070	
85	Water	150	0.2	0.4	0.4	0.17	216.9	119500	
86	Water	150	0.01	0.4	0.4	0.6	308	3260	
87	Water	150	0.01	0.4	0.4	0.6	331.1	2298	
88	Water	100	8	0.4	0.4	0.6		2980	
89	Water	100	8	0.4	0.4	0.6		2570	
90	Water	100	8	0.4	0.4	0.17	224.7	64050	
91	Water	100	8	0.01	0.4	0.6	340.1	1065	
92	Water	100	0.2	0.4	0.4	0.6		2325	
93	Water	100	0.2	0.01	0.4	0.6		1385	
94	Water	25	8	0.4	0.4	0.6	350.8	2425	
95	Water	25	8	0.01	0.4	0.6	350.8	2214	

Table 2-5(2) Fatigue test results for STS410(Hi-S) in constant strain rate test
Material: STS410(Hi-S) $R\epsilon = -1$

No.	Environ.	Temp. °C	DO ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_c$ %/s	ϵa %	σa MPa	N25 Cycles	Remarks
1	Air	200	-	0.4	0.4	0.8	348	1328	
2	Air	200	-	0.4	0.4	0.6	336	4980	
3	Air	200	-	0.4	0.4	0.4	283	8895	
4	Air	200	-	0.4	0.4	0.3	251	22500	
5	Air	200	-	0.4	0.4	0.22	218	147000	
6	Air	100	-	0.4	0.4	0.8	349	990	
7	Air	100	-	0.4	0.4	0.6	331	3210	
8	Air	100	-	0.4	0.4	0.4	287	6009	
9	Air	100	-	0.4	0.4	0.3	252	18712	
10	Air	100	-	0.4	0.4	0.22	214	232000	
11	Air	25	-	0.4	0.4	0.8	389	1331	
12	Air	25	-	0.4	0.4	0.6	359	2580	
13	Air	25	-	0.4	0.4	0.4	320	8641	
14	Air	25	-	0.4	0.4	0.3	278	39500	
15	Air	25	-	0.4	0.4	0.25	253	59900	
16	Air	25	-	0.4	0.4	0.22	237	182560	
17	Water	288	8	0.4	0.4	0.6	404	1875	
18	Water	288	8	0.4	0.4	0.6	398	1826	
19	Water	288	8	0.4	0.4	0.4	374	4570	
20	Water	288	8	0.4	0.4	0.3	330	10627	
21	Water	288	8	0.4	0.4	0.25	273	46830	
22	Water	288	8	0.4	0.004	0.6	447	548	
23	Water	288	8	0.04	0.4	0.6	432	624	
24	Water	288	8	0.04	0.4	0.4	392	1654	
25	Water	288	8	0.04	0.4	0.3	377	2334	
26	Water	288	8	0.004	0.4	0.6	473	258	
27	Water	288	8	0.004	0.4	0.6	470	242	
28	Water	288	8	0.004	0.4	0.4	431	393	
29	Water	288	8	0.004	0.4	0.3	414	618	
30	Water	288	8	0.004	0.4	0.25	391	2032	
31	Water	288	8	0.004	0.004	0.6	473	236	
32	Water	288	0.8	0.4	0.4	0.4	388	4450	
33	Water	288	0.8	0.004	0.4	0.4	430	344	
34	Water	288	0.4	0.004	0.4	0.6	468	415	
35	Water	288	0.2	0.004	0.4	0.6	478	430	
36	Water	288	0.15	0.004	0.4	0.6		658	
37	Water	288	0.1	0.004	0.4	0.6		972	
38	Water	288	0.05	0.004	0.4	0.6	497	1141	
39	Water	150	0.3	0.004	0.4	0.6	386	984	
40	Water	150	0.2	0.4	0.4	1	394	608	
41	Water	150	0.2	0.4	0.4	0.6	353	2247	
42	Water	150	0.2	0.4	0.4	0.4	331	6382	
43	Water	150	0.2	0.4	0.4	0.3	295	27460	
44	Water	150	0.2	0.4	0.4	0.25	283	46285	
45	Water	150	0.2	0.4	0.4	0.2	258	114380	
46	Water	150	0.2	0.004	0.4	0.6	376	1124	
47	Water	150	0.2	0.004	0.4	0.4	346	3014	
48	Water	150	0.2	0.004	0.4	0.3	308	9268	
49	Water	150	0.15	0.004	0.4	0.6		1182	
50	Water	150	0.1	0.004	0.4	0.6		1295	
51	Water	150	0.05	0.004	0.4	0.6		1275	
52	Water	100	0.3	0.004	0.4	0.6	380	1054	
53	Water	100	0.05	0.004	0.4	0.6	384	1246	

Table 2-5(3) Fatigue test results for STS410(Lo-S) in constant strain rate test
Material: STS410(Lo-S) $R\epsilon = -1$

No.	Environ.	Temp. °C	DO ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_c$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
1	Air	25	-	0.4	0.4	0.6	348	4856	
2	Water	288	8	0.4	0.4	0.6	364	3480	
3	Water	288	8	0.004	0.4	0.6	426	258	
4	Water	288	8	0.001	0.4	0.6	466	140	
5	Water	288	8	0.4	0.4	0.3	302	12840	
6	Water	288	8	0.004	0.4	0.3	448	1632	

Table 2-5(4) Fatigue test results for SGV480(Lo-S) in constant strain rate test
Material:SGV480(Lo-S)B.M $R\epsilon=-1$

No.	Environ.	Temp. °C	DO ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_c$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
1	Water	288	8	0.4	0.4	0.6		3065	
2	Water	288	8	0.4	0.4	0.3		11855	
3	Water	288	8	0.004	0.4	0.6		263	

Table 2-5(5) Fatigue test results for SGV480(Lo-S) weld metal as welded
Material:JIS SGV480(Lo-S)W.M As Weld $R\epsilon=-1$

No.	Environ.	Temp. °C	DO ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_c$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
1	Water	288	8	0.4	0.4	0.6		685	
2	Water	288	8	0.4	0.4	0.4		3465	
3	Water	288	8	0.4	0.4	0.3		8280	
4	Water	288	8	0.4	0.4	0.2		86732	
5	Water	288	8	0.004	0.4	0.6		167	

Table 2-5(6) Fatigue rest results for SGV480(Lo-S) weld metal as PWHTed
Material:SGV480(Lo-S)W.M 620°C×3h F. $R\epsilon=-1$

No.	Environ.	Temp. °C	DO ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_c$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
1	Air	25	-	0.4	0.4	0.6		848	
2	Water	288	8	0.4	0.4	0.6		714	
3	Water	288	8	0.4	0.4	0.4		2350	
4	Water	288	8	0.4	0.4	0.3		7140	
5	Water	288	8	0.4	0.4	0.2		67350	
6	Water	288	8	0.004	0.4	0.6		262	

Table 2-5(7) Fatigue test results for SGV480(Lo-S) HAZ as PWHTed
Material: SGV480(Lo-S)HAZ 620°C×3h F $R\epsilon=-1$

No.	Environ.	Temp. °C	DO ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_c$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
1	Water	288	8	0.4	0.4	0.6		790	
2	Water	288	8	0.004	0.4	0.6		122	

Table 2-5(8) Fatigue test results for SA106B(Hi-S) in constant strain rate test
Material:ASME SA106-B $R\epsilon=-1$

No.	Environ.	Temp. °C	DO ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_c$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
1	Water	288	8	0.4	0.4	0.6		1185	
2	Water	288	8	0.04	0.4	0.6		433	
3	Water	288	8	0.004	0.4	0.6		148	
4	Water	288	8	0.4	0.4	0.3		6480	
5	Water	288	8	0.004	0.4	0.3		797	
6	Water	288	0.8	0.4	0.4	0.4		1765	
7	Water	288	0.8	0.004	0.4	0.4		342	

Table 2-5(9) Fatigue test results for SFVV3(Lo-S) as PWHTed
Material:SFVV3(Lo-S) 615°(R ϵ =-1

No.	Environ.	Temp. °C	D0 ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_C$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
1	Air	25	-	0.4	0.4	1	484	935	
2	Air	25	-	0.4	0.4	0.9	465	1283	
3	Air	25	-	0.4	0.4	0.8	447	1377	
4	Air	25	-	0.4	0.4	0.7	443	1907	
5	Air	25	-	0.4	0.4	0.6	427	2780	
6	Air	25	-	0.4	0.4	0.5	433	3580	
7	Air	25	-	0.4	0.4	0.5	411	4860	
8	Air	25	-	0.4	0.4	0.4	395	8711	
9	Air	25	-	0.4	0.4	0.3	388	22396	
10	Air	25	-	0.4	0.4	0.2	355	98775	
11	Air	25	-	0.4	0.4	0.2	359	134071	
13	Water	288	8	0.4	0.4	0.6	445	1660	
14	Water	288	8	0.4	0.4	0.6	449	1920	
15	Water	288	8	0.4	0.4	0.6	470	1250	
16	Water	288	8	0.4	0.4	0.4	426	5702	
17	Water	288	8	0.4	0.4	0.3	399	8080	
18	Water	288	8	0.4	0.4	0.25	372	25450	
19	Water	288	8	0.4	0.4	0.24	370	400000	Runout
20	Water	288	8	0.4	0.4	0.225	369	355770	
21	Water	288	8	0.4	0.4	0.2	357	380000	Runout
22	Water	288	8	0.01	0.4	0.6	465	780	
23	Water	288	8	0.004	0.4	0.6	483	355	
24	Water	288	8	0.004	0.4	0.4	433	1383	
25	Water	288	1	0.01	0.4	0.6	467	788	
26	Water	288	0.5	0.01	0.4	0.6	470	1190	
27	Water	288	0.2	0.4	0.4	0.6	460	3625	
28	Water	288	0.2	0.4	0.4	0.6	458	3435	
29	Water	288	0.2	0.01	0.4	0.6	467	2054	
30	Water	288	0.2	0.01	0.4	0.6	481	593	
31	Water	288	0.2	0.01	0.4	0.6	480	495	
32	Water	288	0.15	0.01	0.4	0.6	451	1924	
33	Water	288	0.1	0.01	0.4	0.6	468	1990	
34	Water	288	0.01	0.4	0.4	0.6	451	3540	
35	Water	288	0.01	0.01	0.4	0.6	471	2343	
36	Water	288	0.01	0.01	0.4	0.6	473	886	
37	Water	200	8	0.4	0.4	0.6	394	3480	
38	Water	200	8	0.01	0.4	0.6	421	1880	
39	Water	200	1	0.4	0.4	0.6	404	1865	
40	Water	200	1	0.01	0.4	0.6	420	1020	
41	Water	200	0.3	0.01	0.4	0.6	432	1100	
42	Water	200	0.2	0.4	0.4	0.6	393	2680	
43	Water	200	0.2	0.4	0.4	0.6	416	1875	
44	Water	200	0.2	0.4	0.4	0.6	416	1850	
45	Water	200	0.2	0.01	0.4	0.6	419	2115	
46	Water	200	0.2	0.01	0.4	0.6	392	819	
47	Water	200	0.1	0.01	0.4	0.6	423	2065	
48	Water	200	0.01	0.4	0.4	0.6	394	4160	
49	Water	200	0.01	0.01	0.4	0.6	417	3218	
50	Water	150	8	0.4	0.4	0.6	395	1420	

Table 2-5(9) Fatigue test results for SFVV3(Lo-S) as PWHTed (continued)
Material:SFVV3(Lo-S) 615°R $\epsilon=-1$

No.	Environ.	Temp. °C	D0 ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_C$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
51	Water	150	8	0.01	0.4	0.6	402	720	
52	Water	150	1	0.4	0.4	0.6	379	1850	
53	Water	150	1	0.04	0.4	0.6	384	1820	
54	Water	150	1	0.01	0.4	0.6	409	930	
55	Water	150	1	0.004	0.4	0.6	399	878	
56	Water	150	1	0.0004	0.4	0.6	417	542	
57	Water	150	0.2	0.4	0.4	0.6	387	2700	
58	Water	150	0.2	0.4	0.4	0.6	385	2745	
59	Water	150	0.2	0.4	0.4	0.6	385	3004	
60	Water	150	0.2	0.4	0.4	0.2	305	117400	
61	Water	150	0.2	0.01	0.4	0.6	420	1043	
62	Water	150	0.2	0.01	0.4	0.6	417	1150	
63	Water	150	0.1	0.01	0.4	0.6	404	1376	
64	Water	150	0.01	0.4	0.4	0.6	384	2130	
65	Water	150	0.01	0.4	0.4	0.6	382	2240	
66	Water	150	0.01	0.01	0.4	0.6	411	1556	
67	Water	150	0.01	0.01	0.4	0.6	805	1745	
68	Water	100	1	0.4	0.4	0.6	402	2480	
69	Water	100	1	0.01	0.4	0.6	393	1177	
70	Water	100	0.2	0.4	0.4	0.6	384	3400	
71	Water	100	0.2	0.01	0.4	0.6	385	1400	
72	Water	100	0.2	0.01	0.4	0.6	385	1940	

Table 2-5(10) Fatigue test results for SQV2A(Hi-S) as PWHTed
Material:SQV2A(Hi-S) B.M 61 R ϵ =-1

No.	Environ.	Temp. °C	D0 ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_c$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
1	Air	25	-	0.4	0.4	1.5	513	465	
2	Air	25	-	0.4	0.4	1	486	771	
3	Air	25	-	0.4	0.4	0.7	445	1750	
4	Air	25	-	0.4	0.4	0.5	416	6407	
5	Air	25	-	0.4	0.4	0.4	398	7702	
6	Air	25	-	0.4	0.4	0.3	381	15688	
7	Air	25	-	0.4	0.4	0.25	367	39958	
8	Air	25	-	0.4	0.4	0.2	356	134227	
9	Air	25	-	0.4	0.4	0.18	342	336816	
10	Water	290	8	0.4	0.4	1	496	632	
11	Water	290	8	0.4	0.4	0.75	446	850	
12	Water	290	8	0.4	0.4	0.6	418	1600	
13	Water	290	8	0.4	0.4	0.5	395	3380	
14	Water	290	8	0.4	0.4	0.4	372	9400	
15	Water	290	8	0.4	0.4	0.3	348	32084	
16	Water	290	8	0.4	0.4	0.25	332	59802	
17	Water	290	8	0.04	0.4	0.6	450	670	
18	Water	290	8	0.004	0.4	0.6	483	232	
19	Water	290	8	0.001	0.4	0.6	493	122	
20	Water	290	8	0.0004	0.4	0.6	503	80	

Table 2-5(11) Fatigue test results for SQV2A(Hi-S) as aged in 66 days
Material:SQV2A(Hi-S) B.M 615°C×45h, 375°C×66days

No.	Environ.	Temp. °C	D0 ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_c$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
1	Water	290	8	0.4	0.4	0.6	439.2	1690	
2	Water	290	8	0.04	0.4	0.6	473.7	688	
3	Water	290	8	0.004	0.4	0.6	481.6	175	
4	Water	290	8	0.001	0.4	0.6	499.9	113	
5	Water	290	8	0.0004	0.4	0.6	505.8	59	

Table 2-5(12) Fatigue test results for SQV2A(Hi-S) as aged in 200 days
Material:SQV2A(Hi-S) B.M 615°C×45h, 375°C×200days

No.	Environ.	Temp. °C	D0 ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_c$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
1		290	8	0.4	0.4	1	492.3	640	
2		290	8	0.4	0.4	0.75	468.9	1060	
3		290	8	0.4	0.4	0.6	433.5	1640	
4		290	8	0.4	0.4	0.5	404.5	3550	
5		290	8	0.4	0.4	0.4	385.4	6340	
6		290	8	0.4	0.4	0.35	360.7	11257	
7		290	8	0.4	0.4	0.3	349	28700	
8		290	8	0.4	0.4	0.225	321.7	109600	
9		290	8	0.4	0.4	0.25	337.3	54370	
10		290	8	0.04	0.4	0.6	459.9	620	
11		290	8	0.004	0.4	0.6	482.2	148	
12		290	8	0.001	0.4	0.6	503	70	
13		290	8	0.0004	0.4	0.6	508.4	49	

Table 2-5(13) Fatigue test results for SQV2A(Hi-S) weld metal as PWHTed
Material:SQV2A(Hi-S) W.M 615°C×45h

No.	Environ.	Temp. °C	DO ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_C$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
1	Air	25	-	0.4	0.4	1.5	528	293	
2	Air	26	-	0.4	0.4	1	484	880	
3	Air	27	-	0.4	0.4	0.7	453	2144	
4	Air	28	-	0.4	0.4	0.5	425	4611	
5	Air	29	-	0.4	0.4	0.4	437	6007	
6	Air	30	-	0.4	0.4	0.3	398	14470	
7	Air	31	-	0.4	0.4	0.25	380	30071	
8	Air	32	-	0.4	0.4	0.2	358	101981	
9	Air	33	-	0.4	0.4	0.18	354	160122	
10	Air	34	-	0.4	0.4	0.16	329	160221	
11	Air	35	-	0.4	0.4	0.14		10000000	Runout
12	Water	290	8	0.4	0.4	0.75	477.7	910	
13	Water	290	8	0.4	0.4	0.6	467.9	1810	
14	Water	290	8	0.4	0.4	0.4	422.5	5610	
15	Water	290	8	0.4	0.4	0.3	497.7	18500	
16	Water	290	8	0.4	0.4	0.25	384	72600	
17	Water	290	8	0.04	0.4	0.6	493.7	857	
18	Water	290	8	0.004	0.4	0.6	505.9	336	
19	Water	290	8	0.0004	0.4	0.6	519.2	184	

Table 2-5(14) Fatigue test results for SQV2A(Hi-S) weld metal aged 200 days
Material:SQV2A(Hi-S) W.M 615°C×45h, 375°C×200days

No.	Environ.	Temp. °C	DO ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_C$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
1	Water	290	8	0.4	0.4	0.75	478	950	
2	Water	290	8	0.4	0.4	0.6	469	1774	
3	Water	290	8	0.4	0.4	0.4	384	5855	
4	Water	290	8	0.4	0.4	0.3	401	14800	
5	Water	290	8	0.4	0.4	0.25	398	62355	
6	Water	290	8	0.04	0.4	0.6	498	785	
7	Water	290	8	0.004	0.4	0.6	511	304	
8	Water	290	8	0.0004	0.4	0.6	527	134	

Table 2-5(15) Fatigue test results for SQV2A(Hi-S) HAZ as PWHTed
Material:SQV2A(Hi-S) HAZ 615°C×45h

No.	Environ.	Temp. °C	DO ppm	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_C$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
1	Water	290	8	0.4	0.4	0.6	467	1320	
2	Water	290	8	0.4	0.4	0.4	426	3520	
3	Water	290	8	0.4	0.4	0.3	389	11300	
4	Water	290	8	0.4	0.4	0.25	380	25710	
5	Water	290	8	0.004	0.4	0.6	501	146	

Table 2-6 Effect of wave shape on environmental fatigue life of STS410(Hi-S)
 (Material: STS410(Hi-S) Environment: Water Temperature: 289°C DO: 8 ppm R: -1)

No.	Wave Shape	$\dot{\epsilon}_T$ %/s	$\dot{\epsilon}_C$ %/s	ϵ_a %	σ_a MPa	N25 Cycles	Remarks
17	fast-fast	0.4	0.4	0.6	404	1875	
26	slow-fast	0.004	0.4	0.6	473	258	
22	fast-slow	0.4	0.004	0.6	447	548	
31	slow-slow	0.004	0.004	0.6	473	236	

Table 2-7 Experimental P value ($P_{\max}$, $P_{\max av}$) and predicted P value ($P_{\max c}$)

Steel	Metal	Sulfur	Condition	Sulfur (%)	0.2%YS (Mpa)	UTS (Mpa)	Strain Amp. (%)	Experiment		
								$P_{\max}$	$P_{\max av}$	$P_{\max c}$
STS42	BM	Hi-S	AR	0.015	302	489	0.6	0.660	0.627	0.633
							0.3	0.594		
STS410	BM	Hi-S	AR	0.012	383	549	0.6	0.435	0.569	0.534
							0.4	0.543		
							0.3	0.617		
							0.25	0.681		
STS410	BM	Lo-S	AR	0.006	314	490	0.6	0.543	0.496	0.501
							0.3	0.448		
SGV480	BM	Lo-S	AR	0.002	330	526	0.6	0.533	0.541	0.409
							0.3	0.548		
SGV480	WM	Lo-S	AW	0.005	483	702	0.6	0.306	0.349	0.291
							0.3	0.391		
SGV480	WM	Lo-S	PWHT1	0.005	413	579	0.6	0.217	0.309	0.404
							0.3	0.400		
SA106B	BM	Hi-S	AR	0.015	301	572	0.6	0.435	0.529	0.557
							0.4	0.534		
							0.3	0.617		
SFVV3	BM	Lo-S	PWHT2	0.003	471	606	0.6	0.331	0.320	0.350
							0.4	0.308		
SQV2A	BM	Hi-S	PWHT2	0.010	488	642	0.6	0.437	0.437	0.419
SQV2A	WM	Hi-S	PWHT2	0.011	513	611	0.6	0.339	0.339	0.462

AR: As Received, AW: As Welded, PWHT1: 620°C×3h, PWHT2: 615°C×45h

$$P_{\max c} = 0.864 + 14.6 \times S(\%) - 0.00092 \times \text{UTS}(\text{Mpa})$$

Table 2-8 Test conditions and results for beach mark tests
(STS410 H-S, 288°C, R=-1, wave shape: saw tooth or triangle)

Test No.	DO	Step	Strain Amp. ϵ_a (%)	Strain Rate ϵ (%/s)	Num. of Cyc./ 1 Step	Num. of Steps	Num. of Beach Marks	Cycles at N_{25} (cycles)	N_{25} by Const. Cndtn. (cycles)	Cum. Damage at N_{25}
1	1	Main	0.6	0.004	25	8	8	104	242	0.439
		B.M.	0.3	0.4	25			100	10627	
5		Main	0.6	0.004	10	16	16	118	242	0.513
		B.M.	0.3	0.4	25			275	10627	
6		Main	0.6	0.004	10	5	5	-	242	
		B.M.	0.3	0.4	25				10627	
2		Main	0.3	0.004	60	7	6	370	618	0.633
		B.M.	0.3	0.4	60			360	10627	
7		Main	0.3	0.004	20	10	9	-	618	
		B.M.	0.3	0.4	60				10627	
8	0.2	Main	0.6	0.004	30	7	5	186	470	0.409
		B.M.	0.3	0.4	30			180	13699	
9		Main	0.3	0.004	60	32	16	1530	1303	1.284
		B.M.	0.3	0.4	60			1500	13699	
3	0.01	Main	0.6	0.004	100	9	8	702	1208	0.619
		B.M.	0.3	0.4	100			700	18430	
4		Main	0.3	0.004	200	14	4	2830	3028	1.011
		B.M.	0.3	0.4	100			1400	18430	

Table 2-9 Fatigue curve equations for tested steels in room temperature air

Steel	Metal	Sulfur	Condition	*	*	*
				A	B	C
STS42	BM	Hi-S	AR	23.1	-0.472	0.108
STS410	BM	Hi-S	AR	34.5	-0.56	0.182
STS410	BM	Lo-S	AR			
SGV480	BM	Lo-S	AR			
SGV480	WM	Lo-S	AW			
SGV480	WM	Lo-S	PWHT1			
A106B	BM	Hi-S	AR			
SFVV3	BM	Lo-S	PWHT2	41.9	-0.568	0.14
SQV2A	BM	Hi-S	PWHT2	32.3	-0.545	0.155
SQV2A	BM	Hi-S	HT1			
SQV2A	BM	Hi-S	HT2			
SQV2A	WM	Hi-S	PWHT2	24.3	-0.51	0.121
SQV2A	WM	Hi-S	HT2			

AR: As Received, AW: As Welded, PWHT1: 620°C×3h, PWHT2: 615°C×45h

HT1: 375°C×66days, HT2: 375°C×200days

*: $\epsilon_a = A (N_{25A})^B + C$

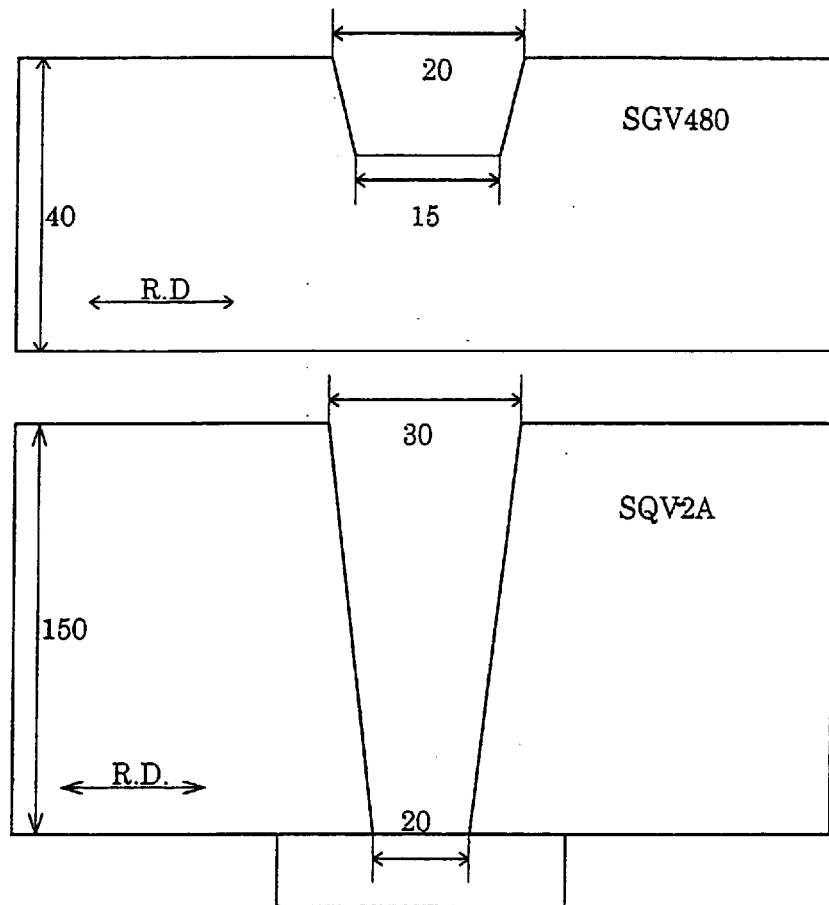


Fig. 2-1 Groove geometry of weld joint

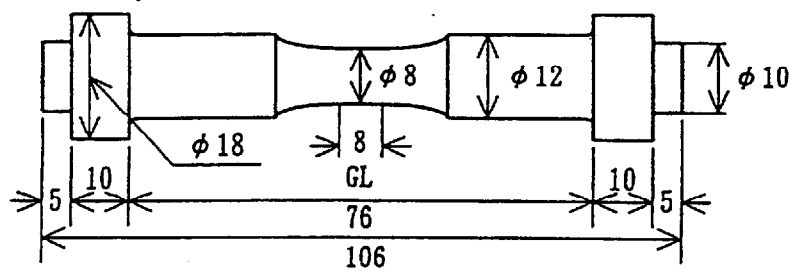


Fig. 2-2 Dimensions of Specimen

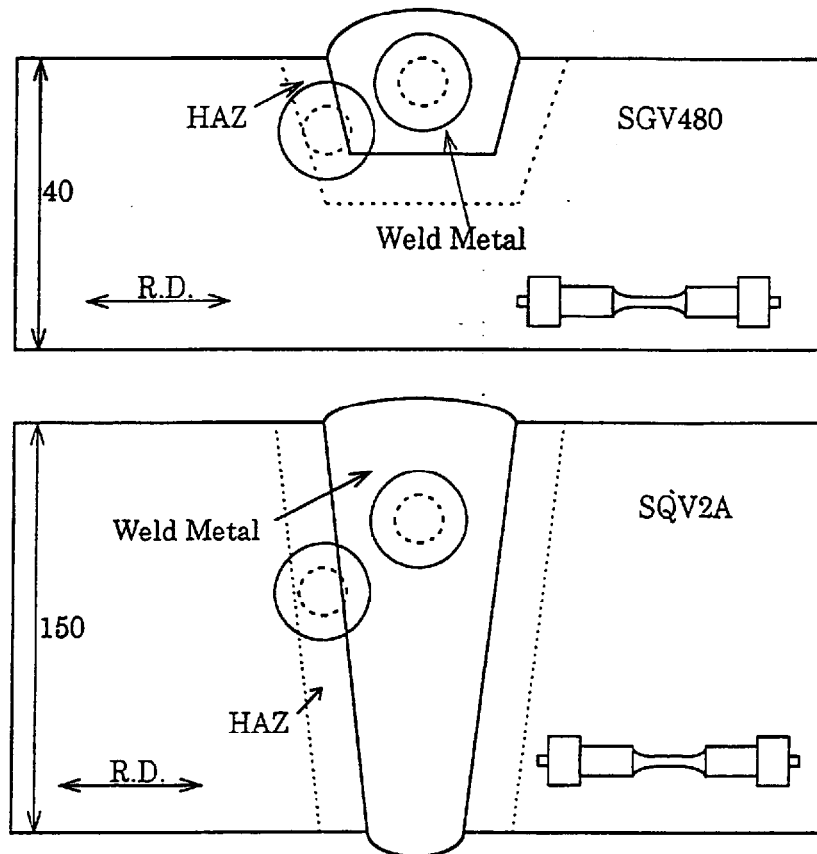


Fig. 2-3 Sampling location

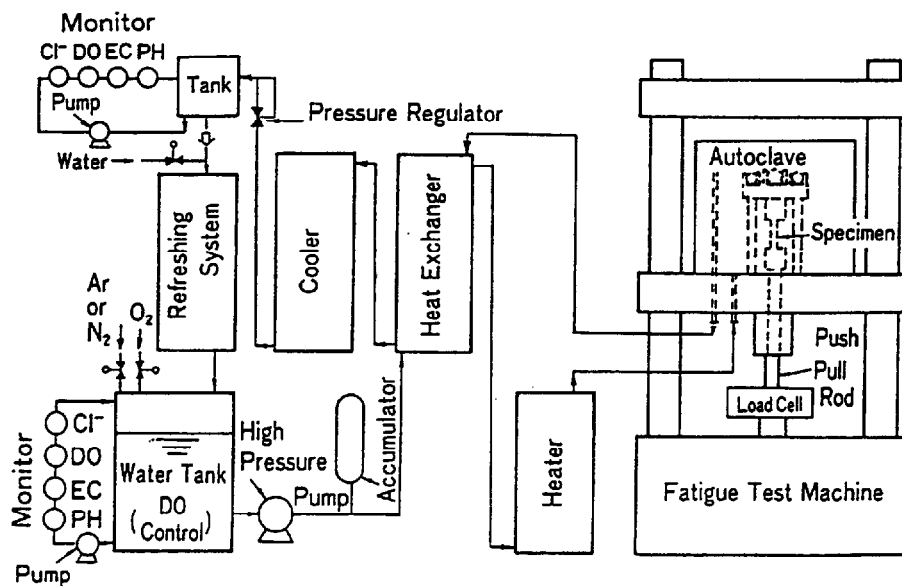


Fig. 2-4 Outline of test apparatus

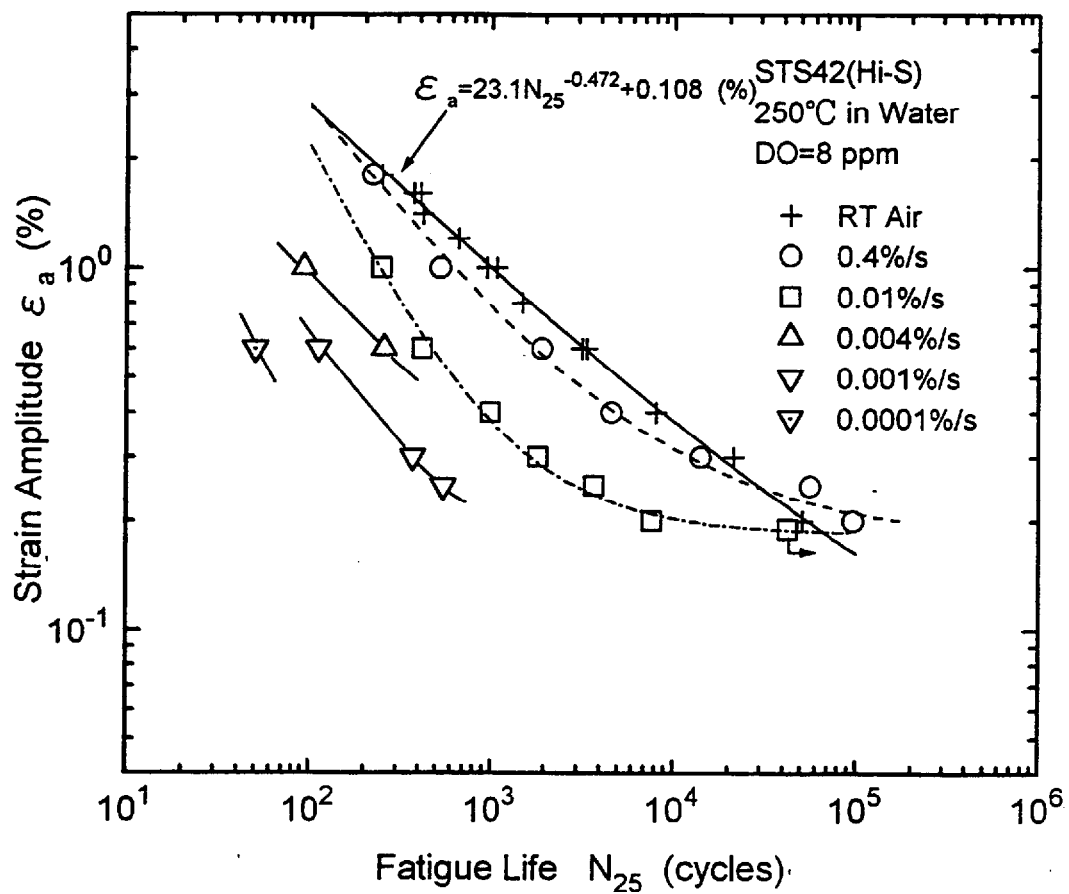


Fig. 2-5(1) Sample fatigue data for STS42(Hi-S) (RT air + 250°C/8 ppm water)

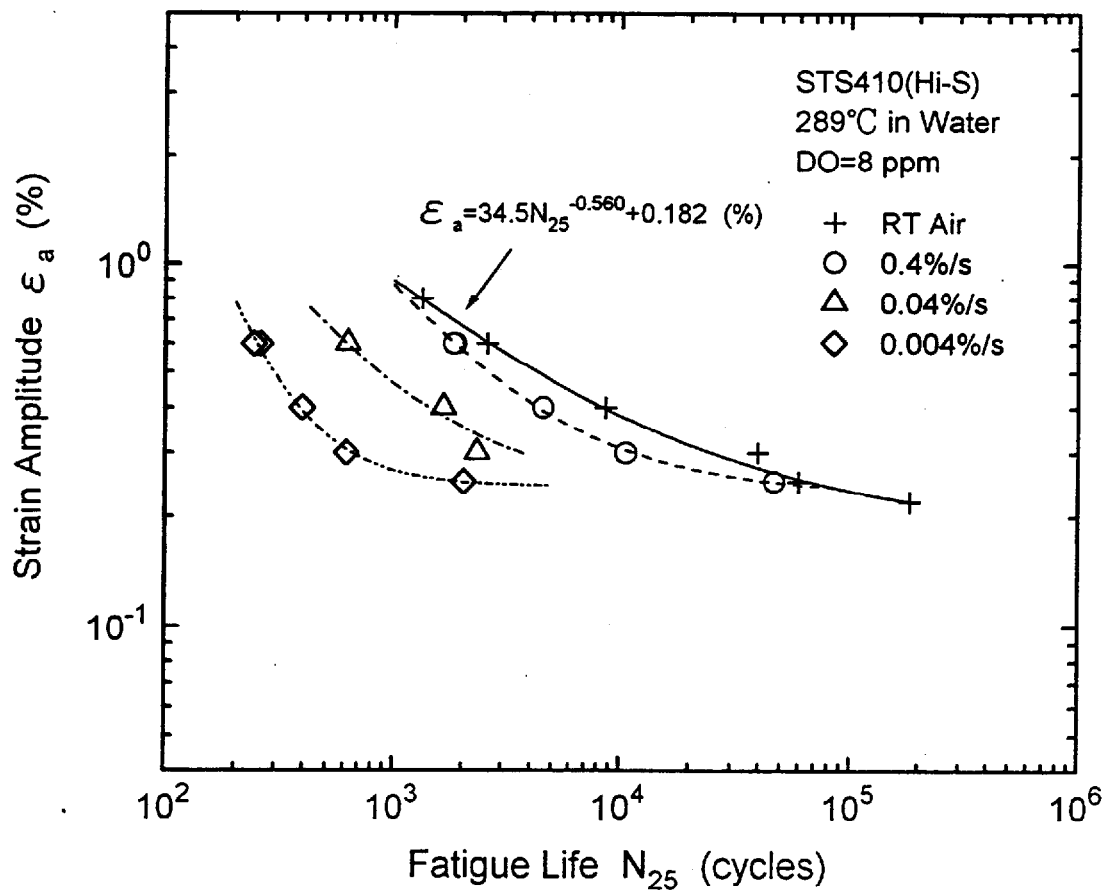


Fig. 2-5(2) Sample fatigue data for STS410(Hi-S) (RT air + 289°C/8 ppm water)

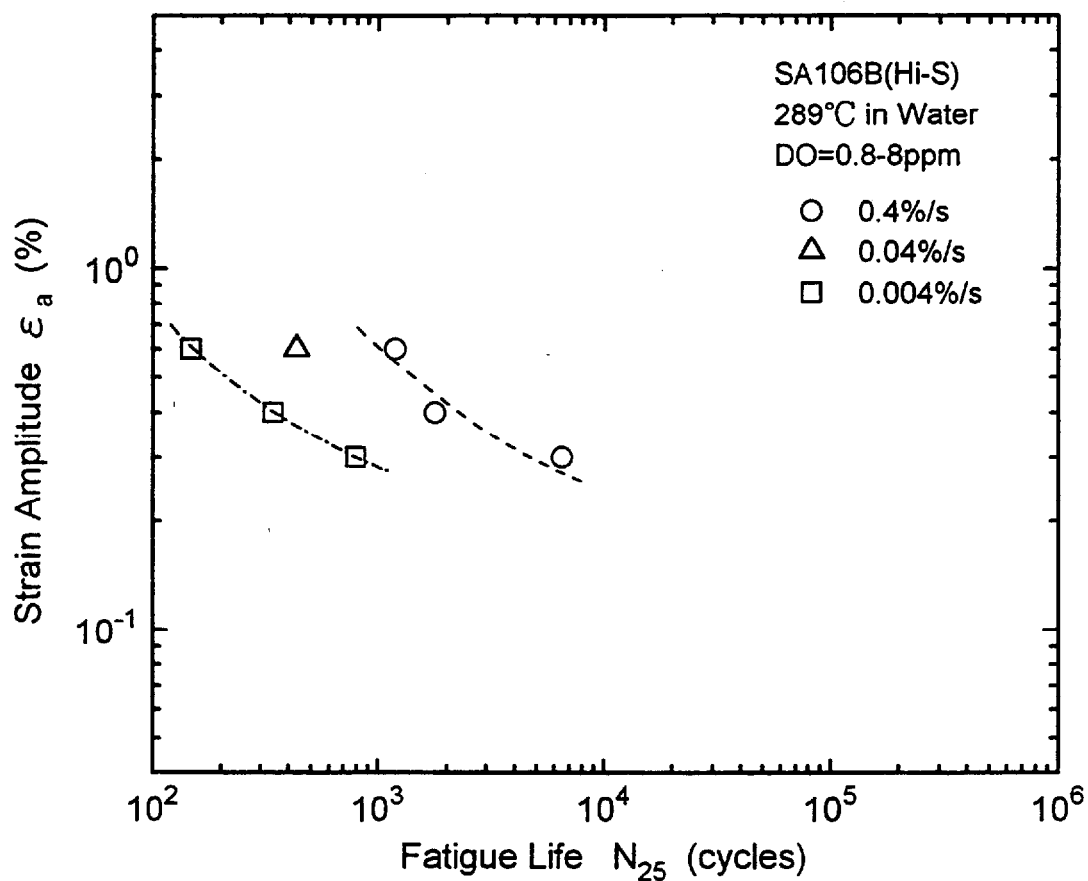


Fig. 2-5(3) Sample fatigue data for SA106B(Hi-S) (289°C/0.8-8 ppm water)

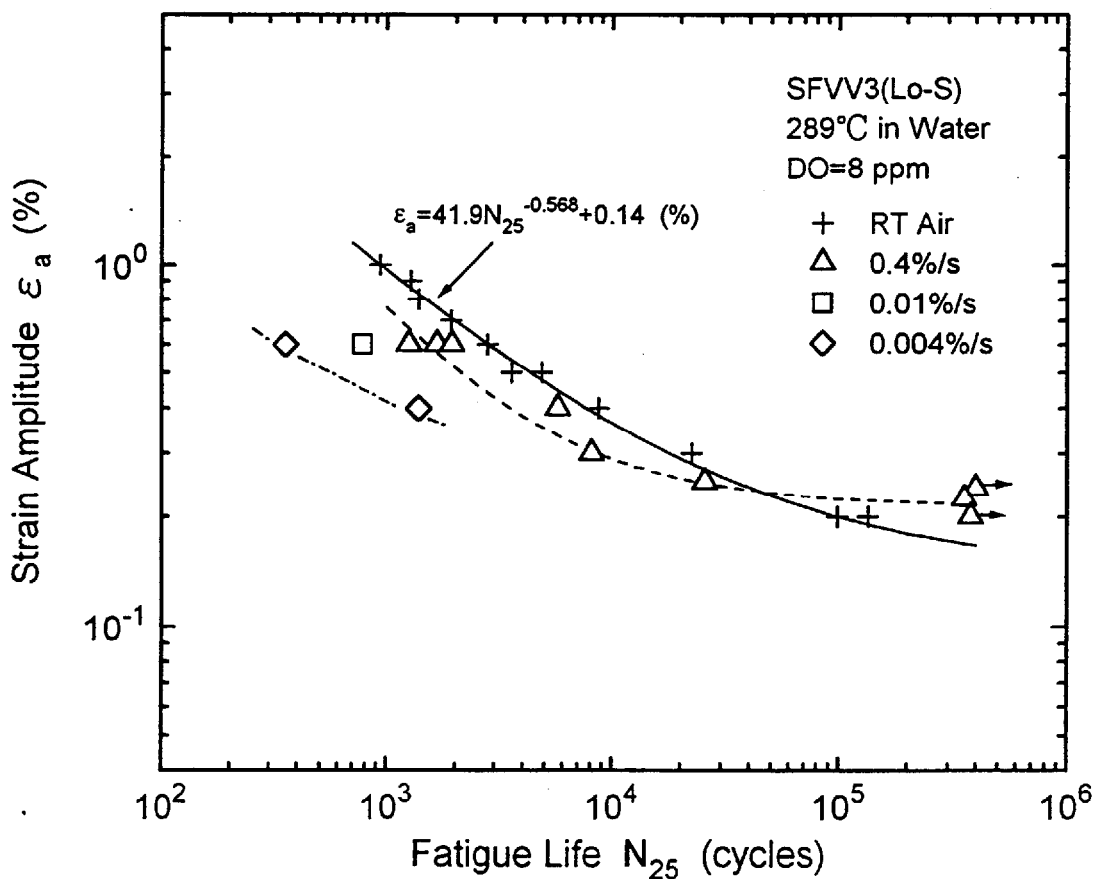


Fig. 2-5(4) Sample fatigue data for SFVV3(Lo-S) (RT air + 289°C/8 ppm water)

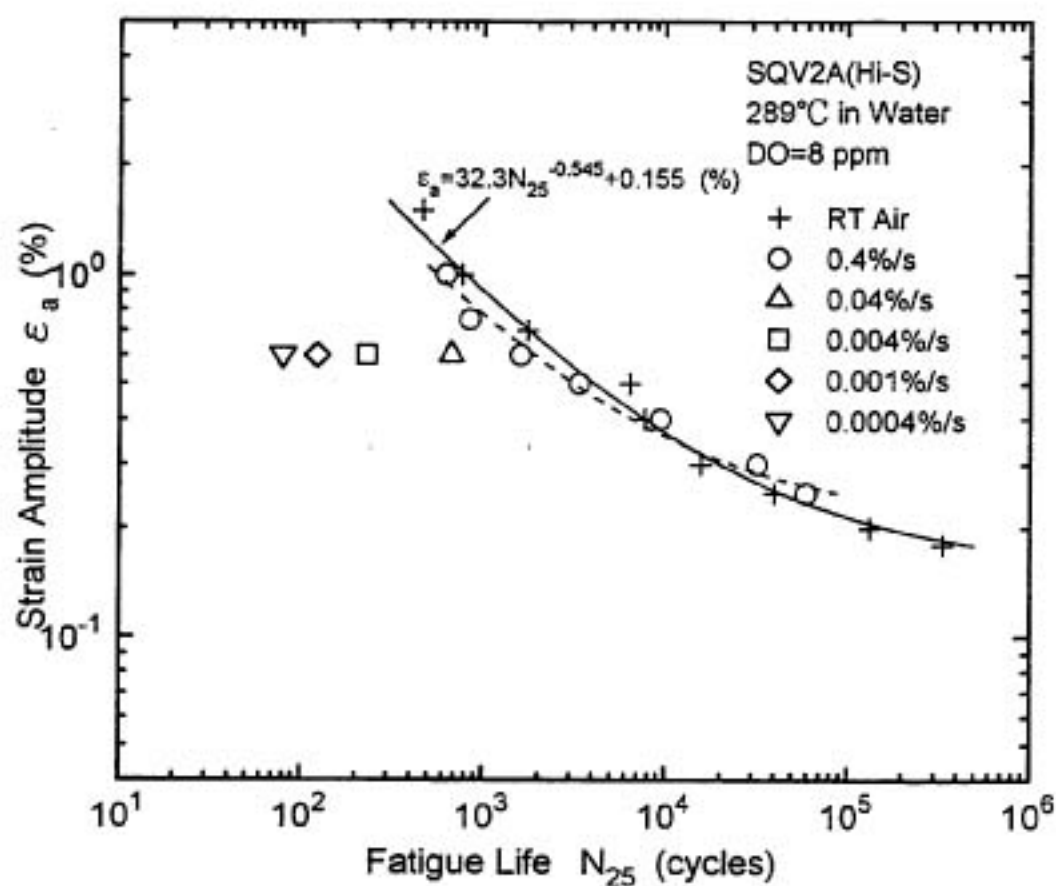


Fig. 2-5(5) Sample fatigue data for SQV2A(Hi-S) (RT air + 289°C/8 ppm water)

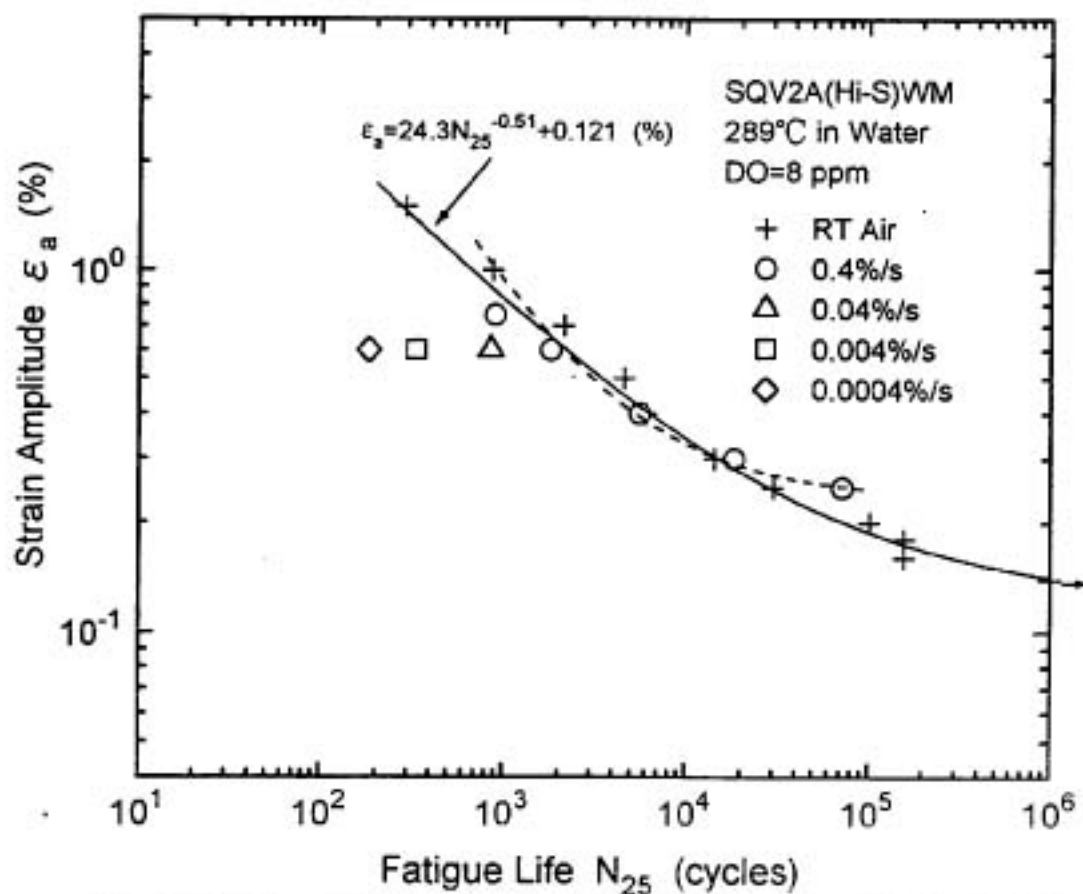


Fig. 2-5(6) Sample fatigue data for SQV2A(Hi-S) weld metal (RT air + 289°C/8 ppm water)

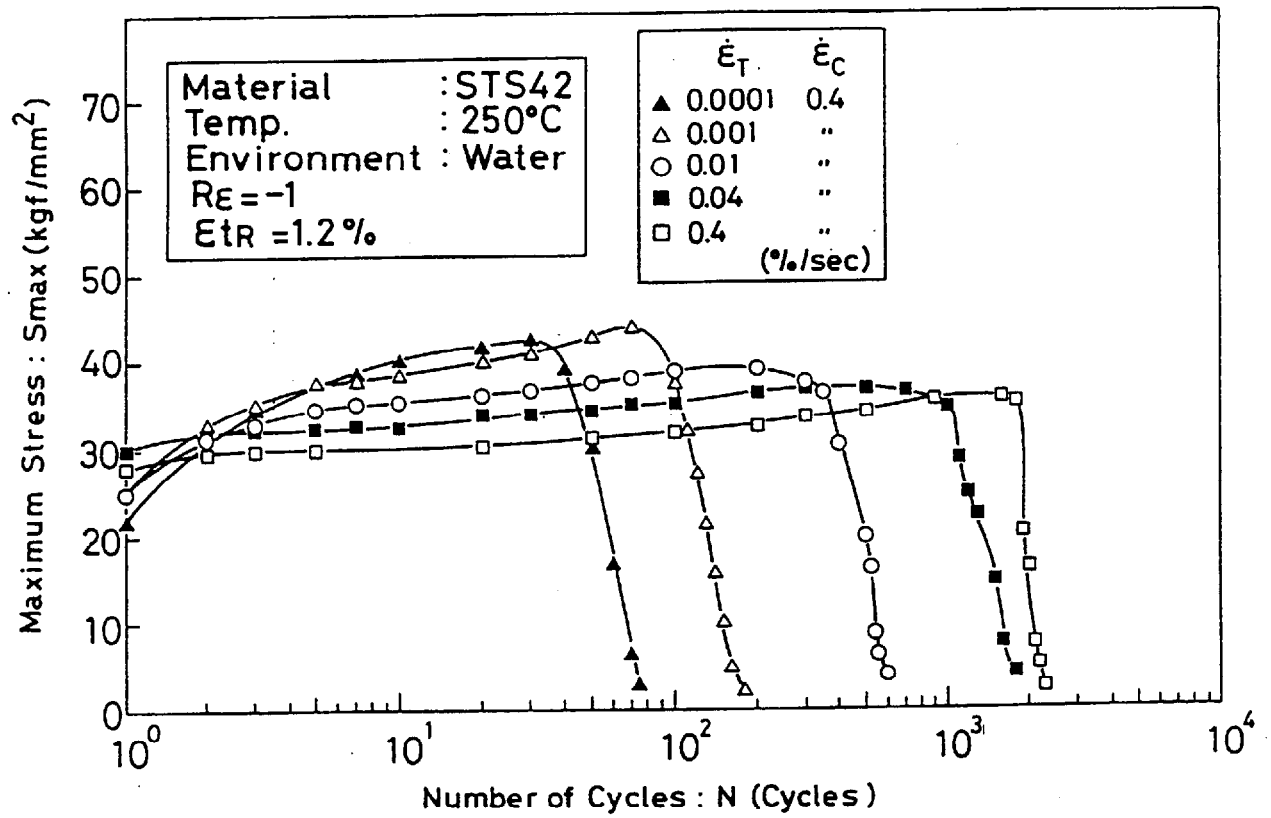


Fig. 2-6 Change of stress range on strain cycling for carbon steel in 250°C water

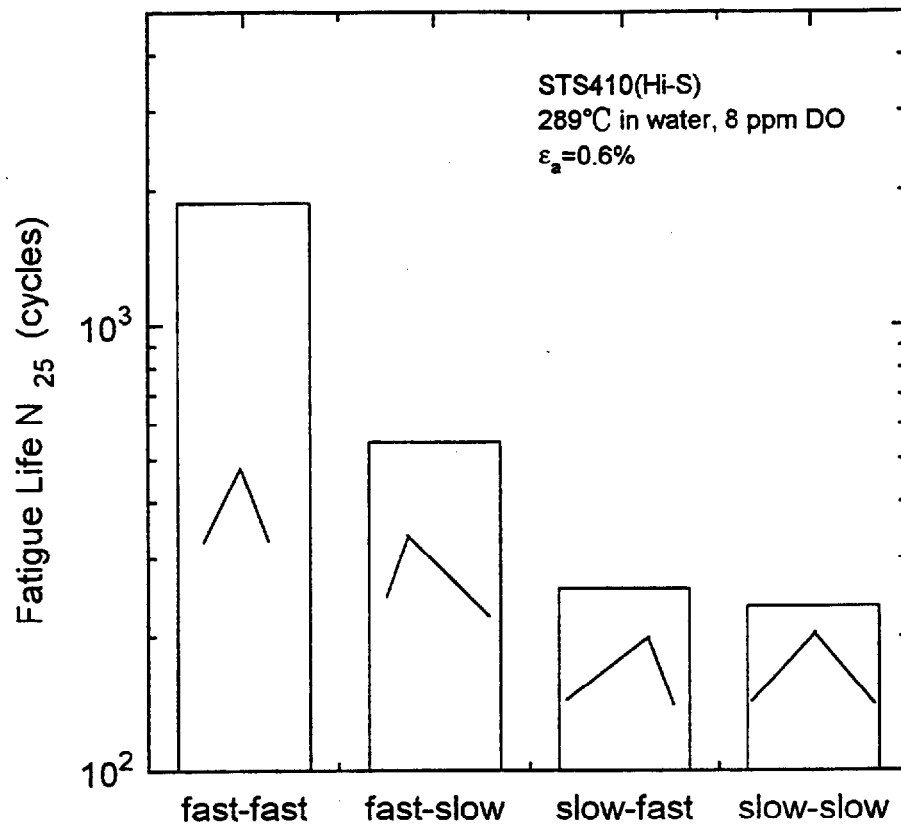


Fig. 2-7 Effect of wave shape on environmental fatigue life

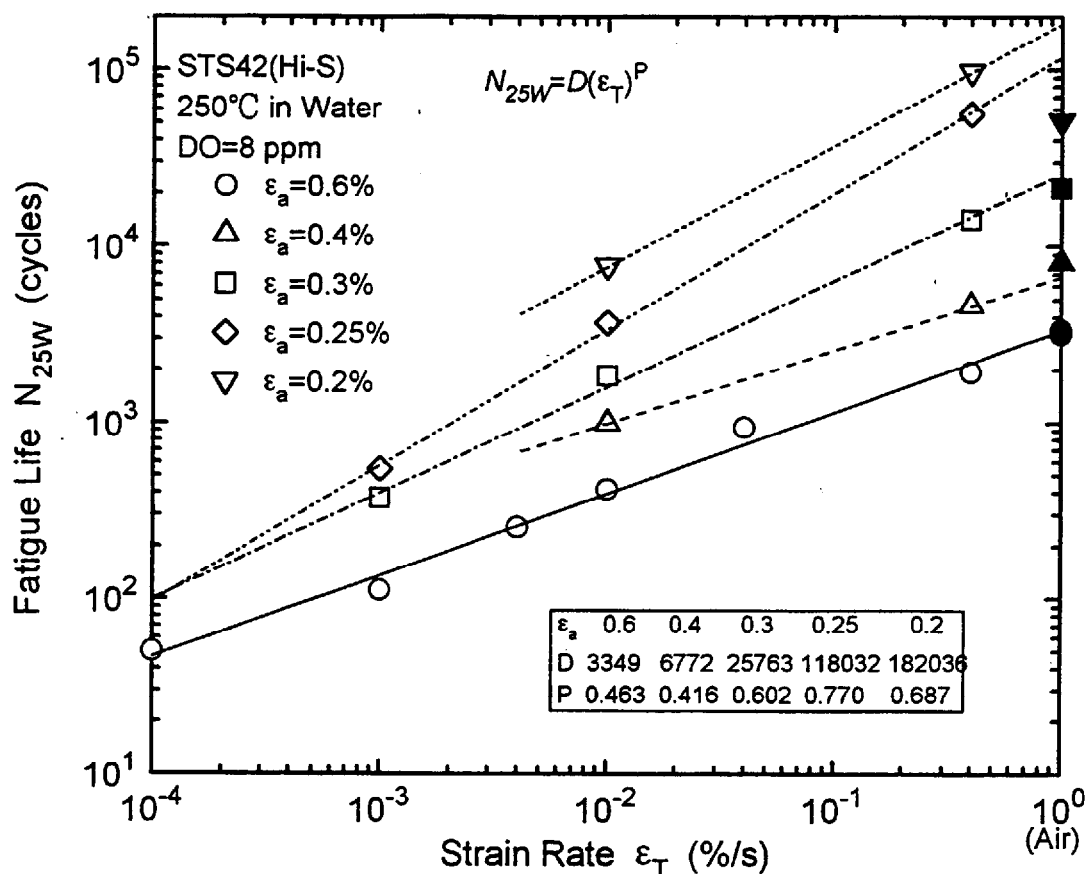


Fig. 2-8(1) Relation between fatigue life and strain rate for STS42(Hi-S)
(250°C/8 ppm water)

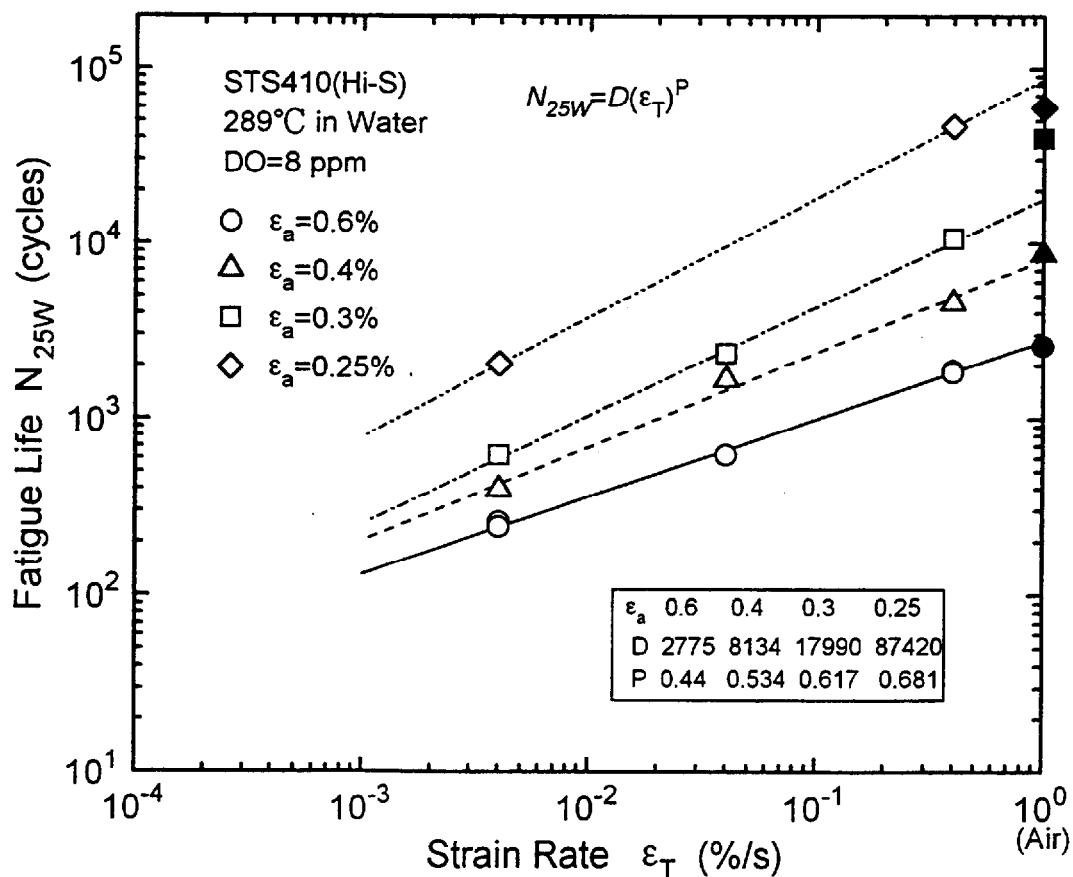


Fig. 2-8(2) Relation between fatigue life and strain rate for STS410(Hi-S)
(289°C/8 ppm water)

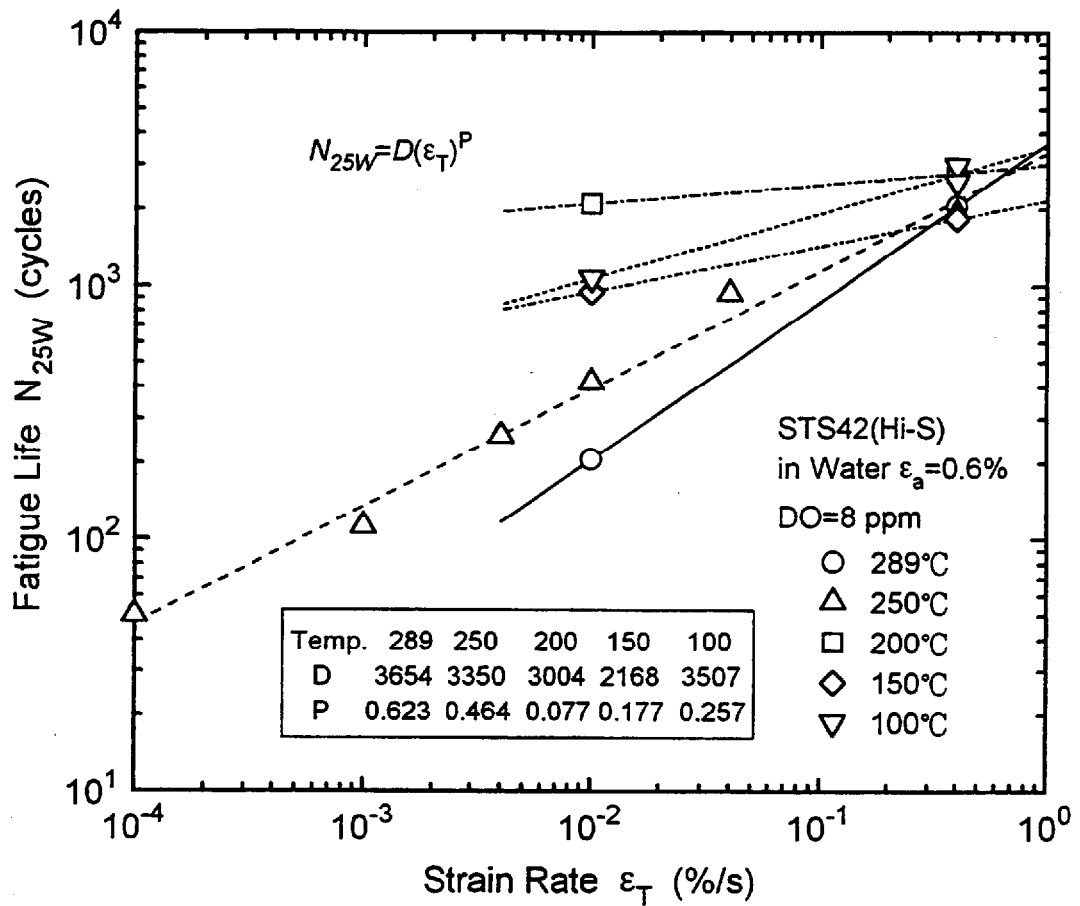


Fig. 2-9 Effect of temperature on linear relation between fatigue life and strain rate for STS42(Hi-S) ($\epsilon_a=0.6\%/8$ ppm DO water)

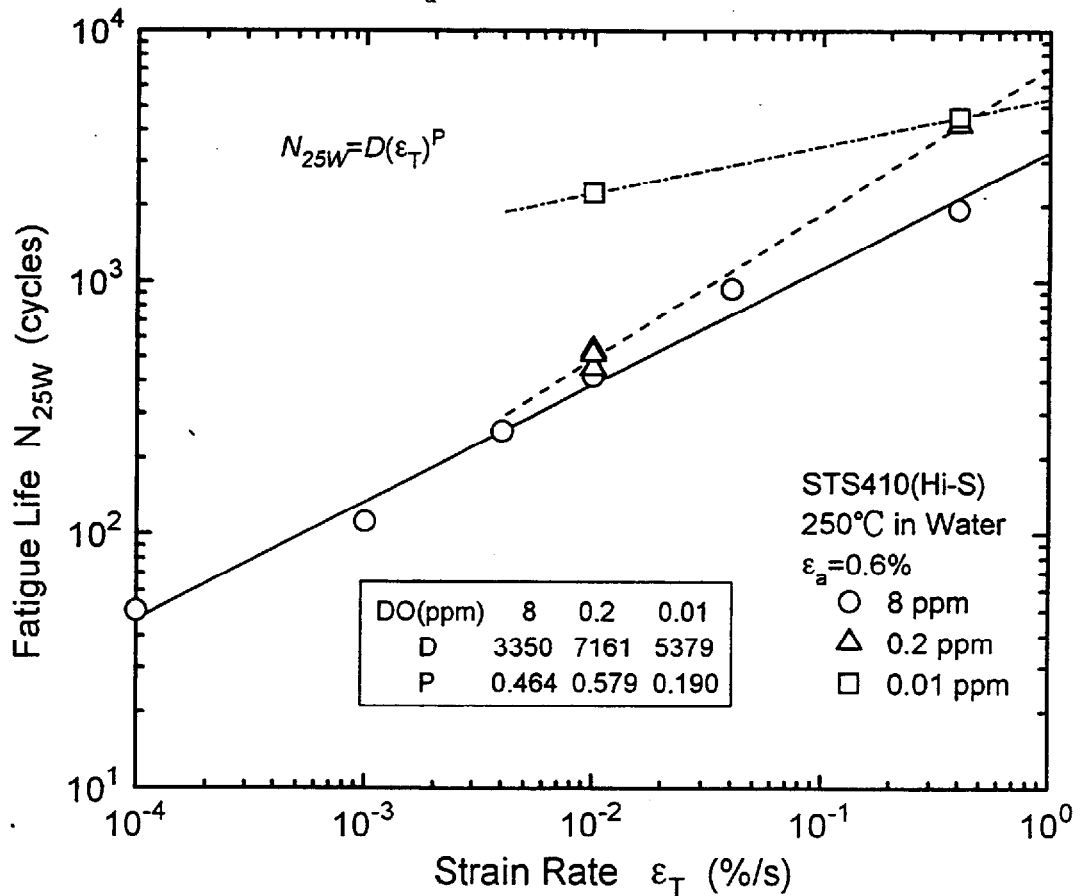


Fig. 2-10 Effect of dissolved oxygen on linear relation between fatigue life and strain rate for STS42(Hi-S) (250°C water)

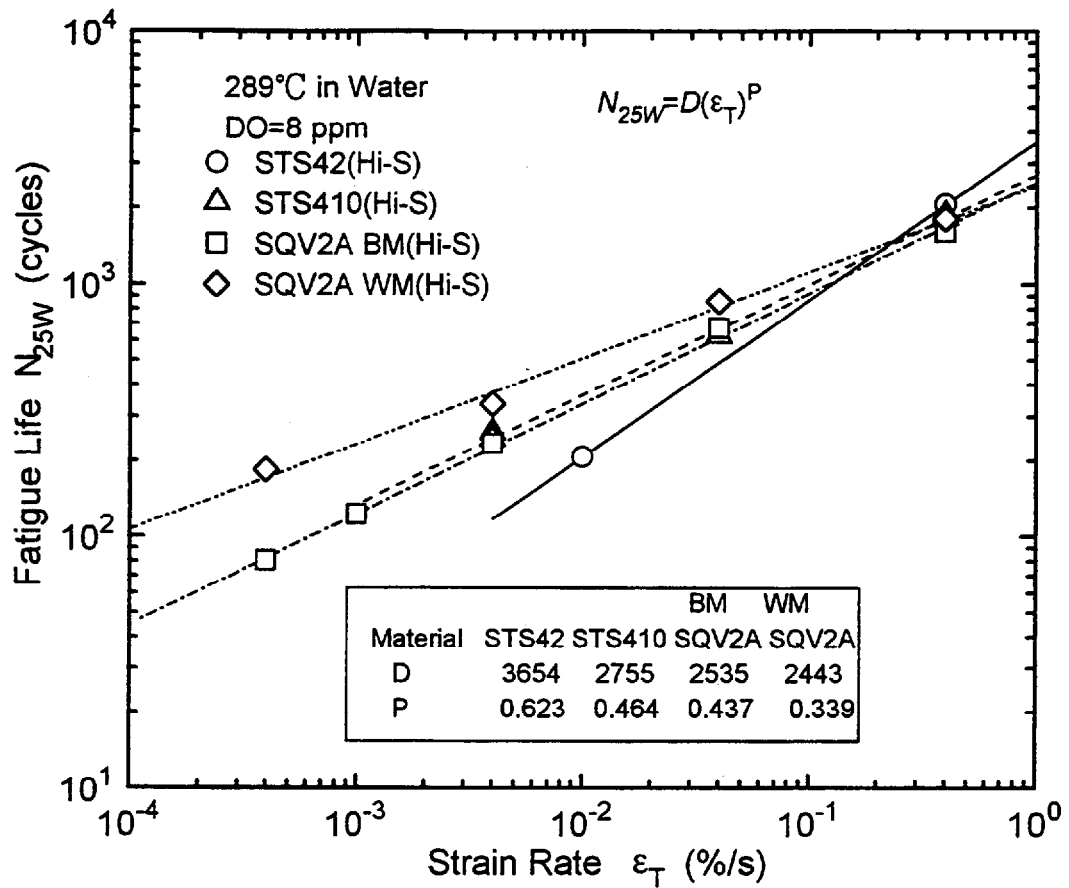


Fig. 2-11 Comparison of linear relations between fatigue life and strain rate for four different steels (289°C/8 ppm water)

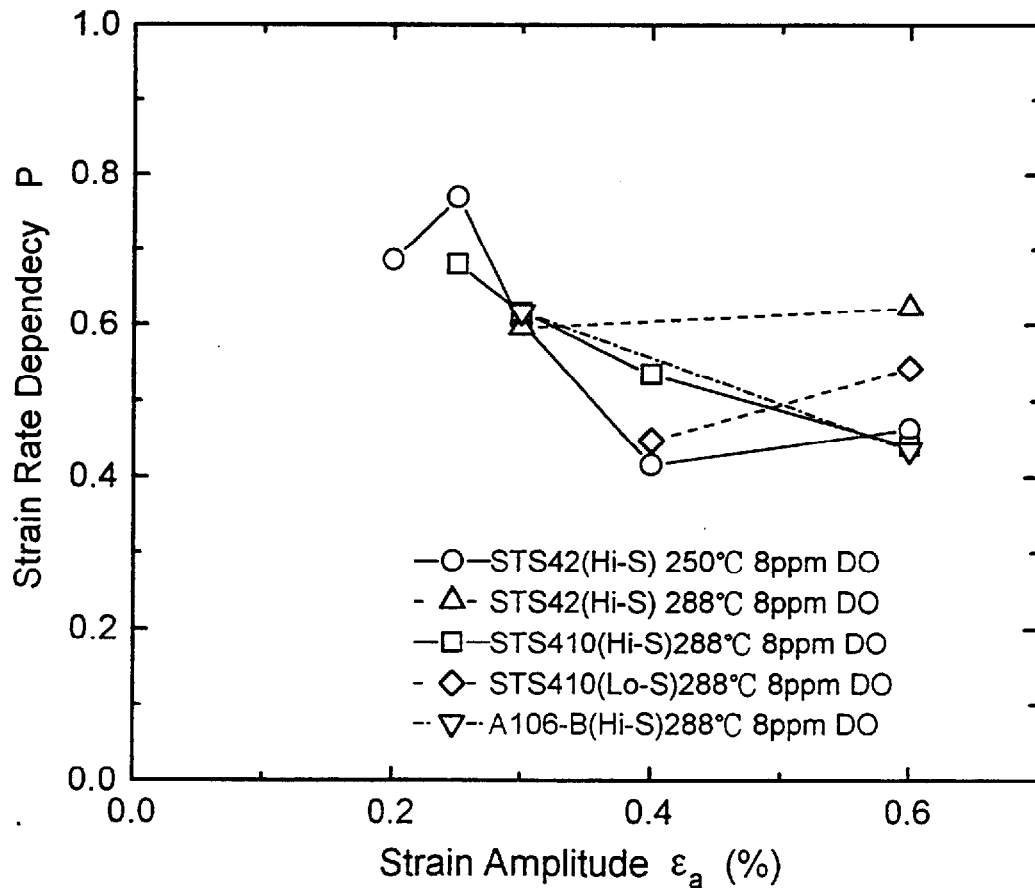


Fig. 2-12 Relation between P value and strain amplitude for carbon steels

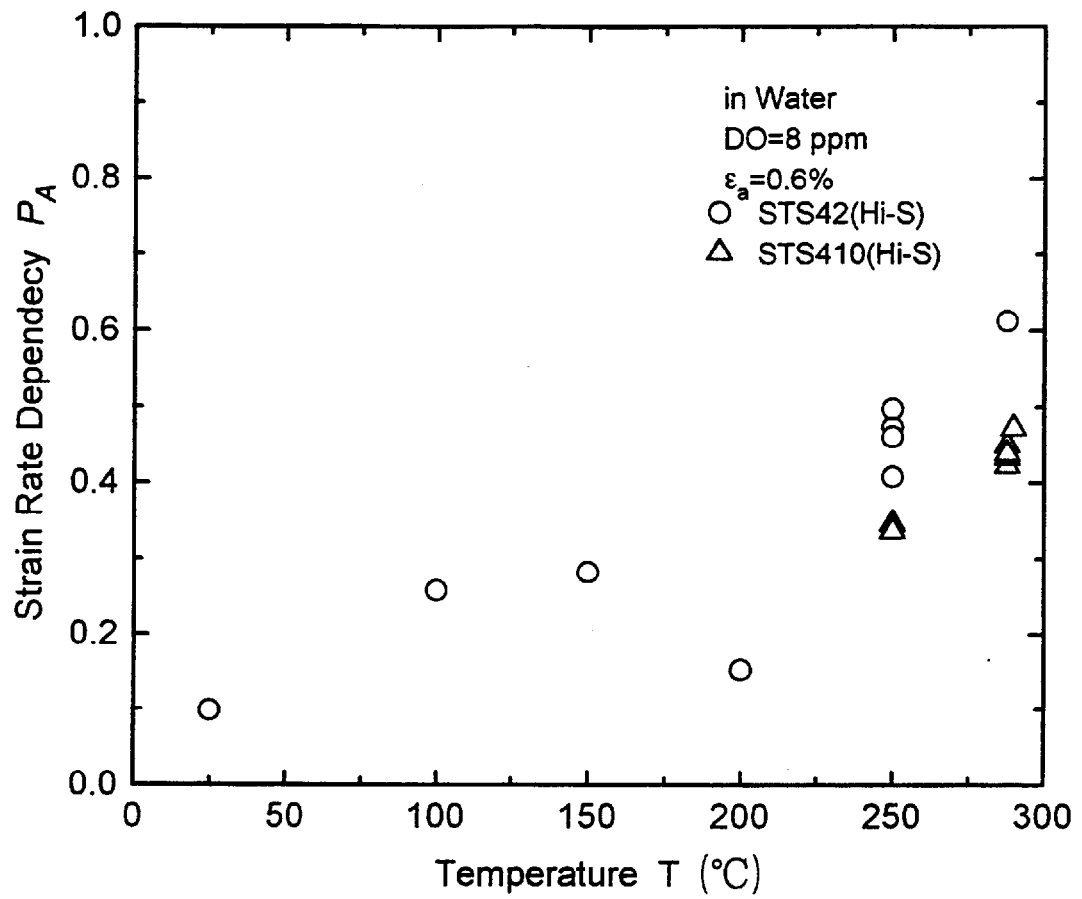


Fig. 2-13 Relation between P_A value and temperature for carbon steels

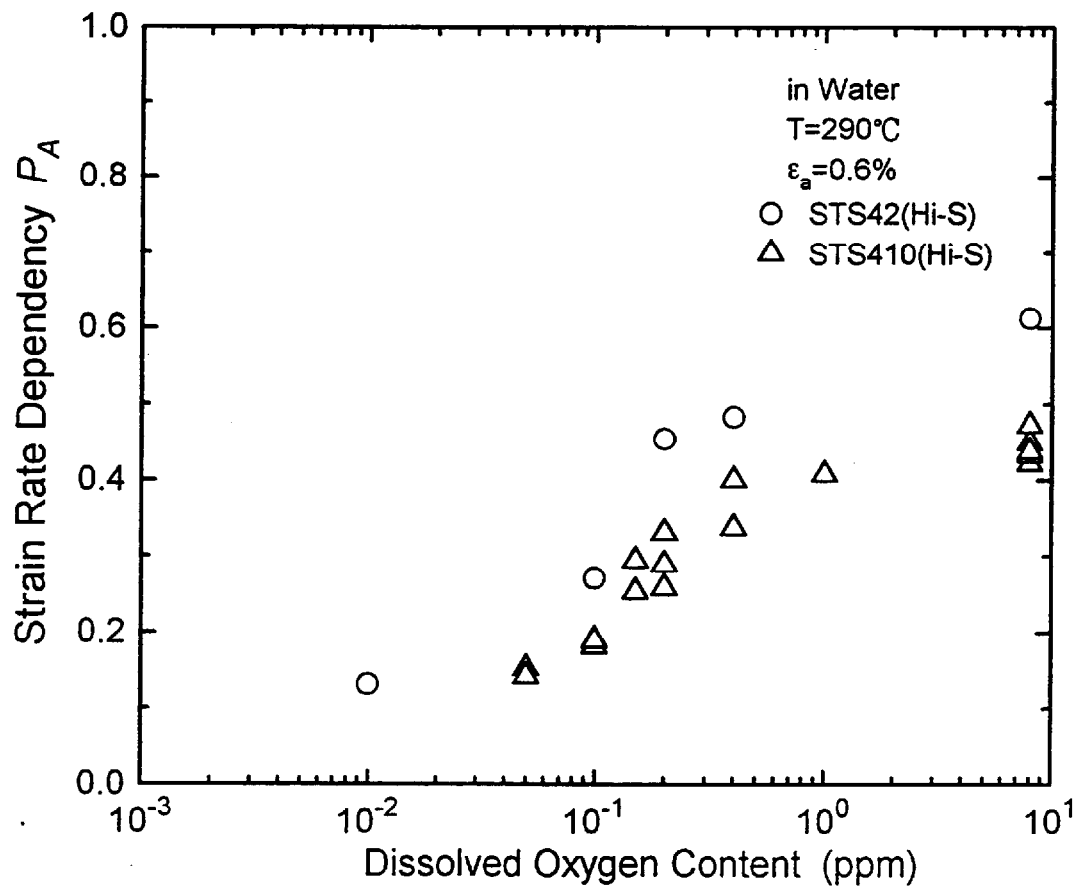


Fig. 2-14 Relation between P_A value and dissolved oxygen content for carbon steels

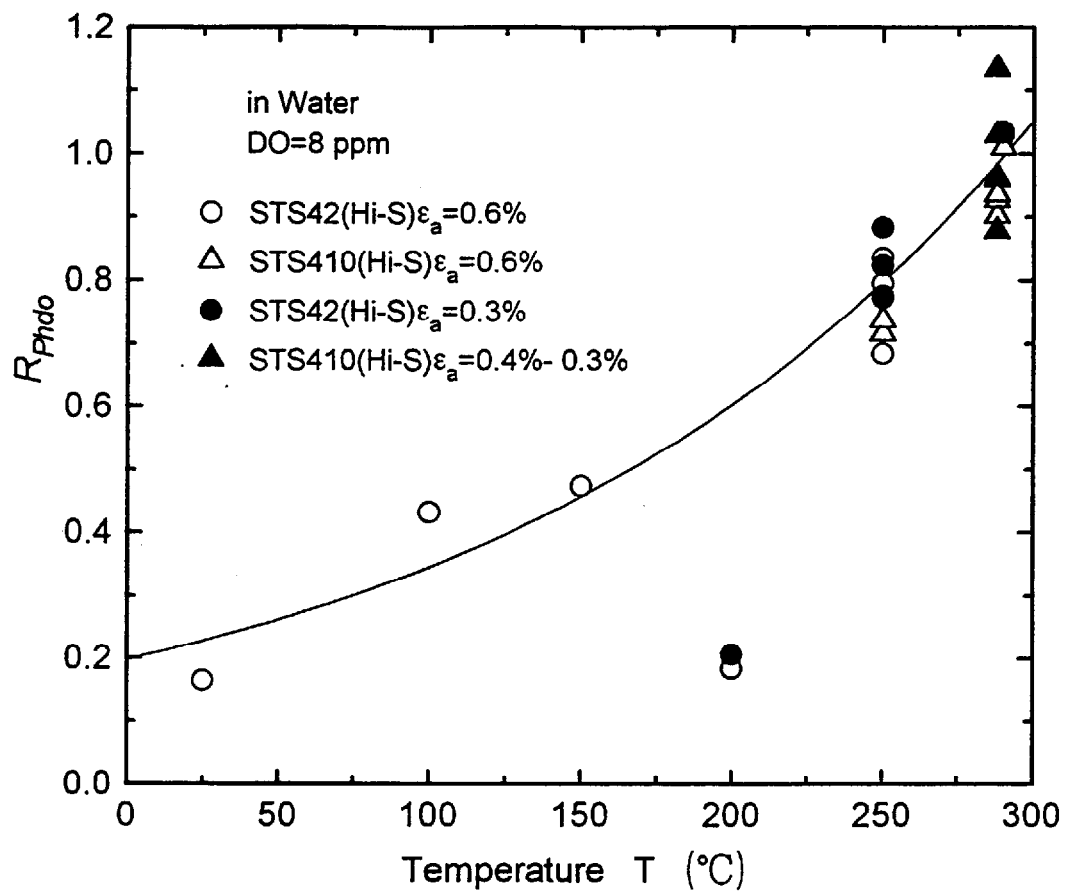


Fig. 2-15 Relation between R_{Phdo} value and temperature for carbon steels

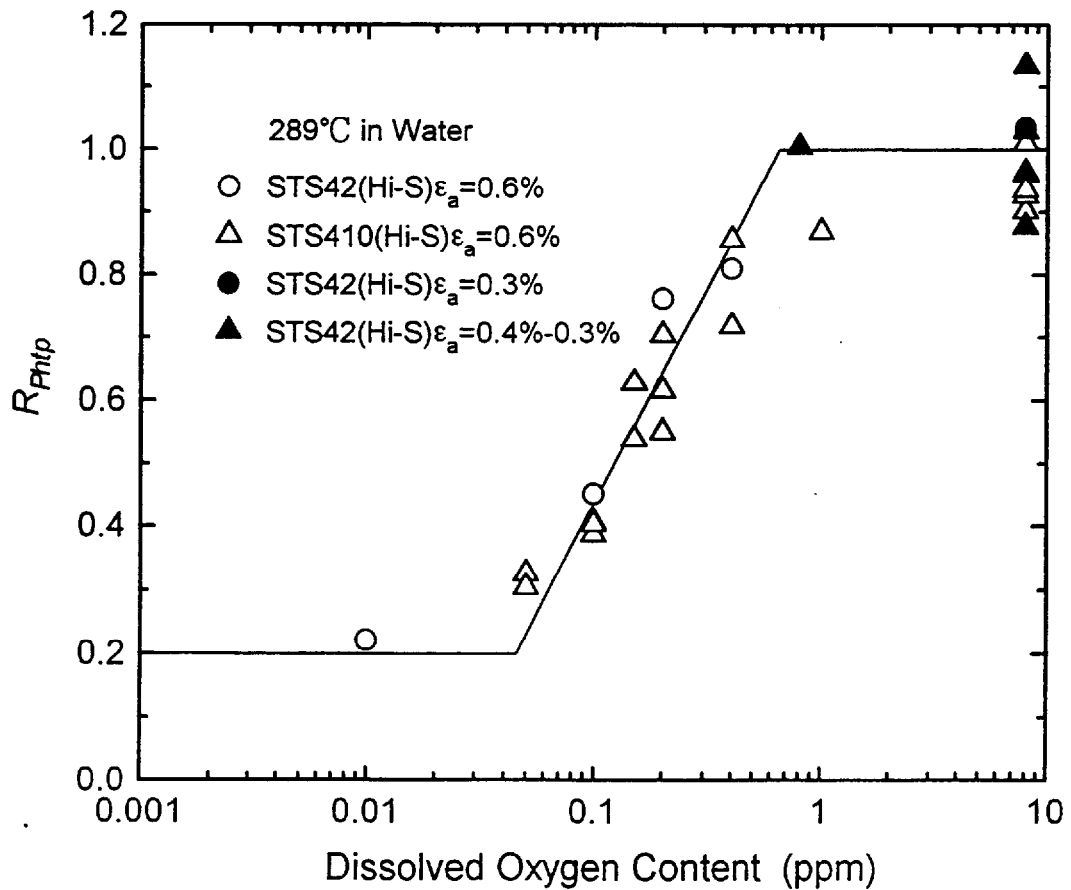


Fig. 2-16 Relation between R_{Phtp} value and dissolved oxygen content for carbon steels

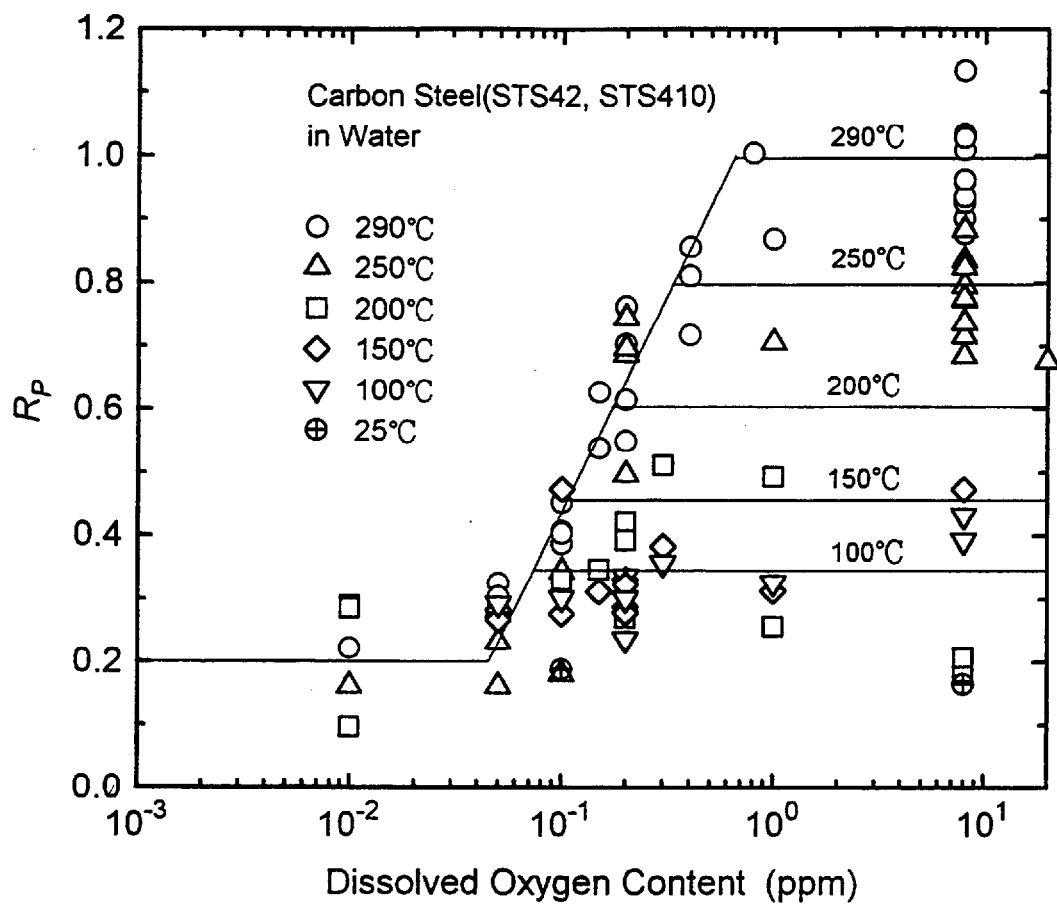


Fig. 2-17 Relation between R_p , temperature and dissolved oxygen content for carbon steels

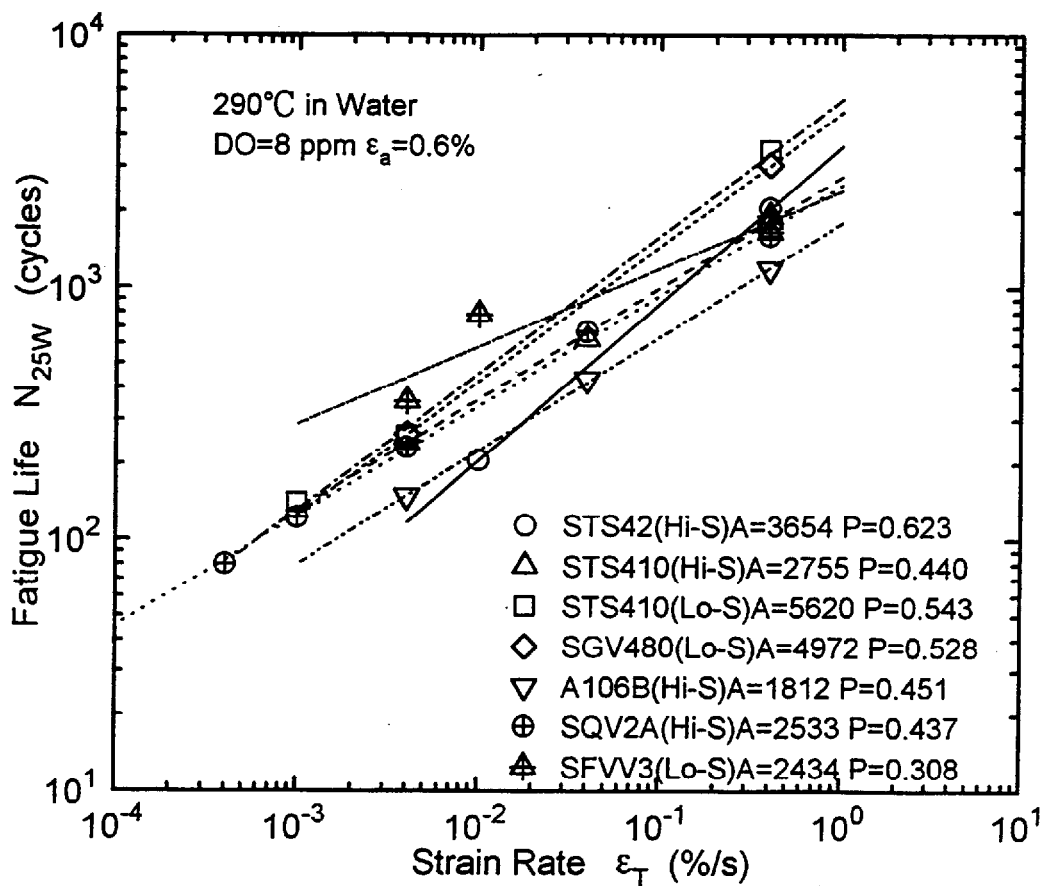


Fig. 2-18 Comparison of relations between fatigue life and strain rate for all base metals in high temperature water

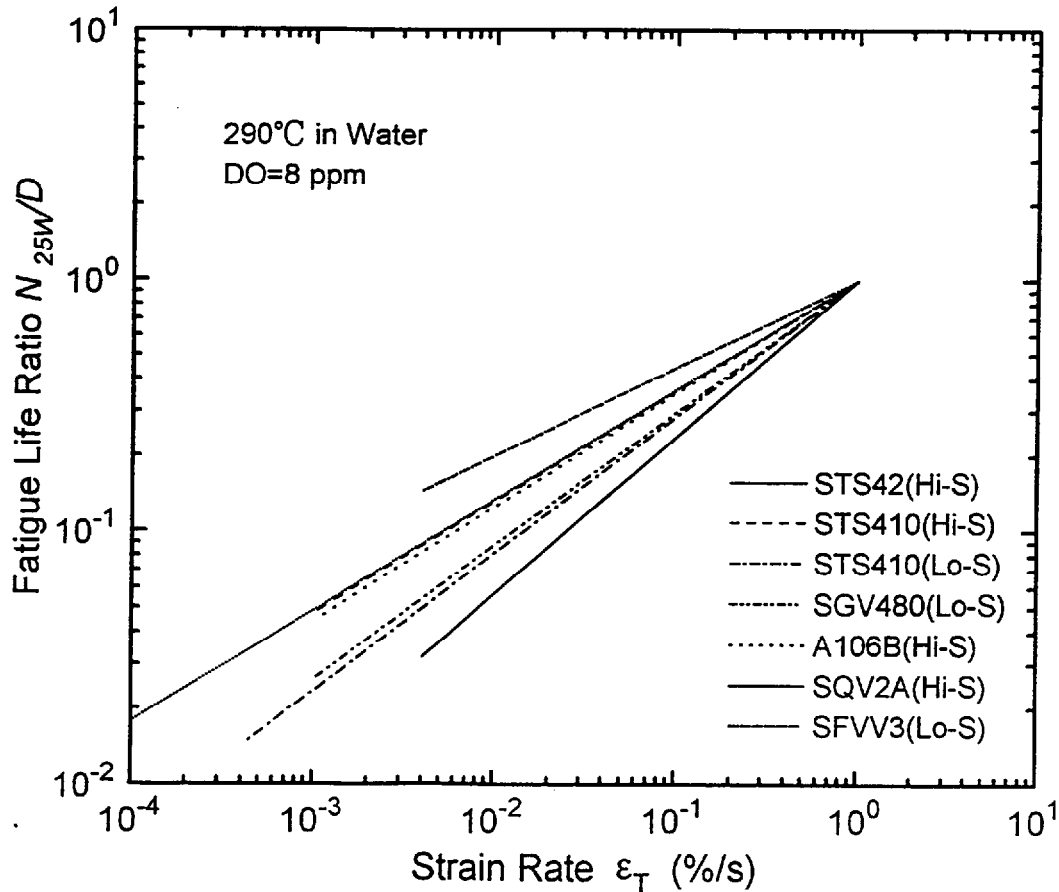


Fig. 2-19 Comparison of relations between fatigue life ratio (N_{25W}/D) and strain rate for all base metals in high temperature water

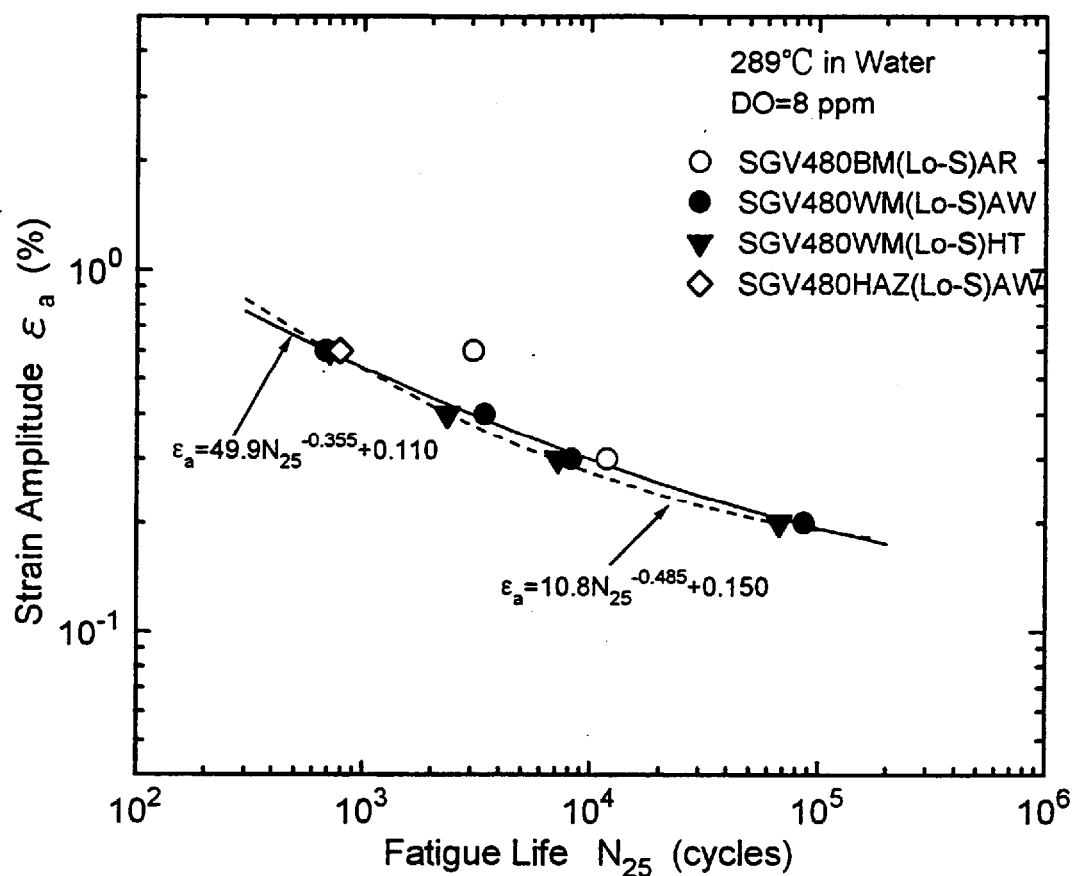


Fig. 2-20 Comparison of fatigue curves for base metal and weldments of carbon steel in high temperature water

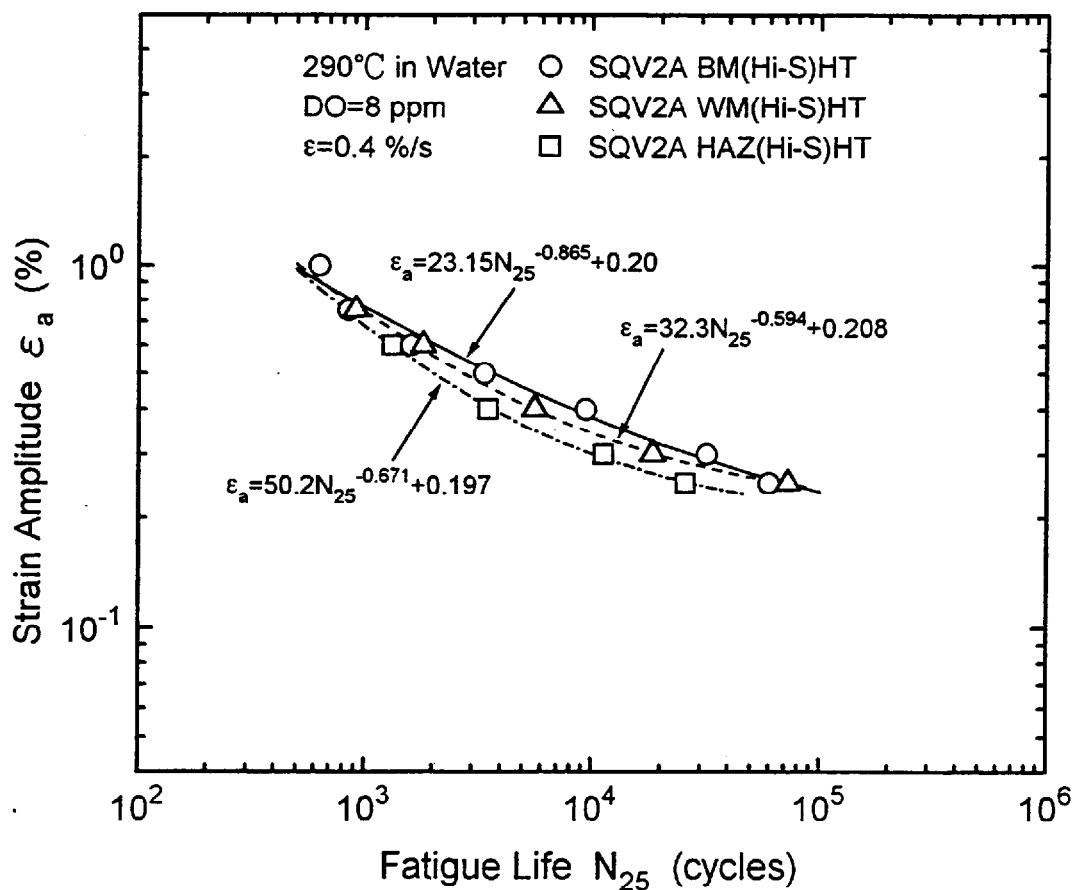


Fig. 2-21 Comparison of fatigue curves for base metal and weldments of low alloy steel in high temperature water

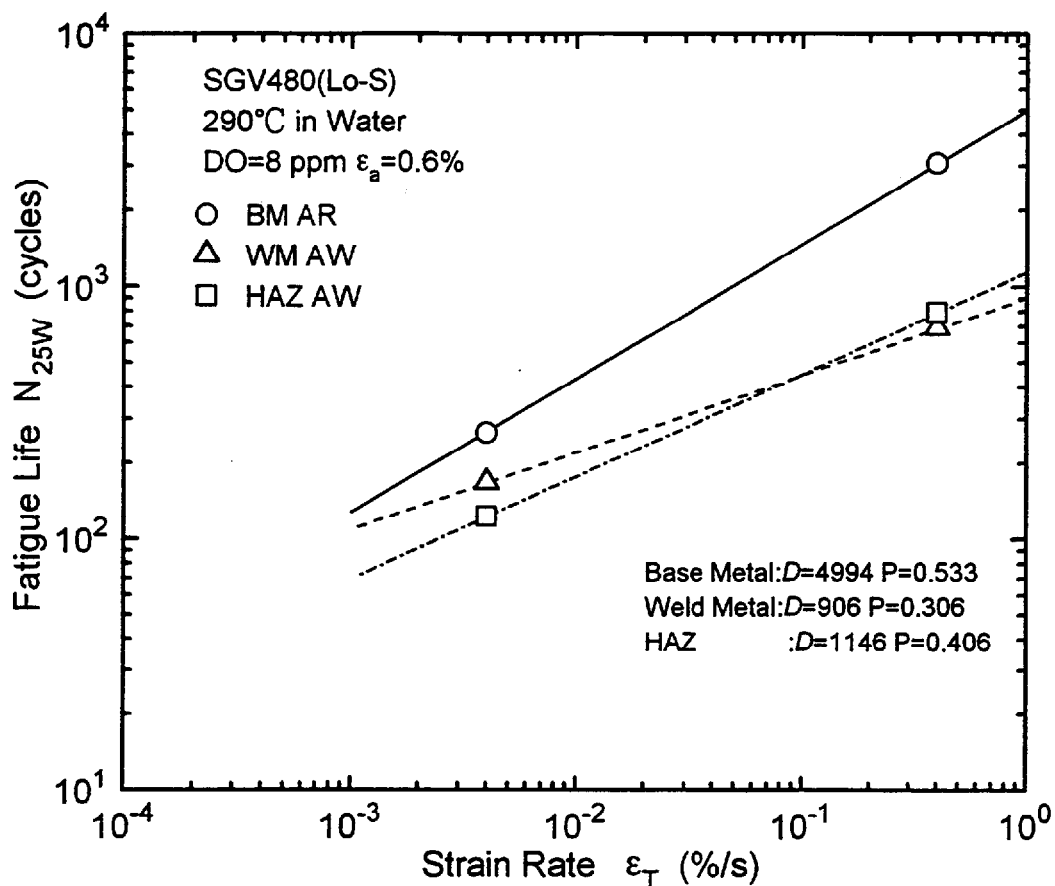


Fig. 2-22(1) Comparison of relations between fatigue life and strain rate for base metal, weld metal and HAZ of carbon steel

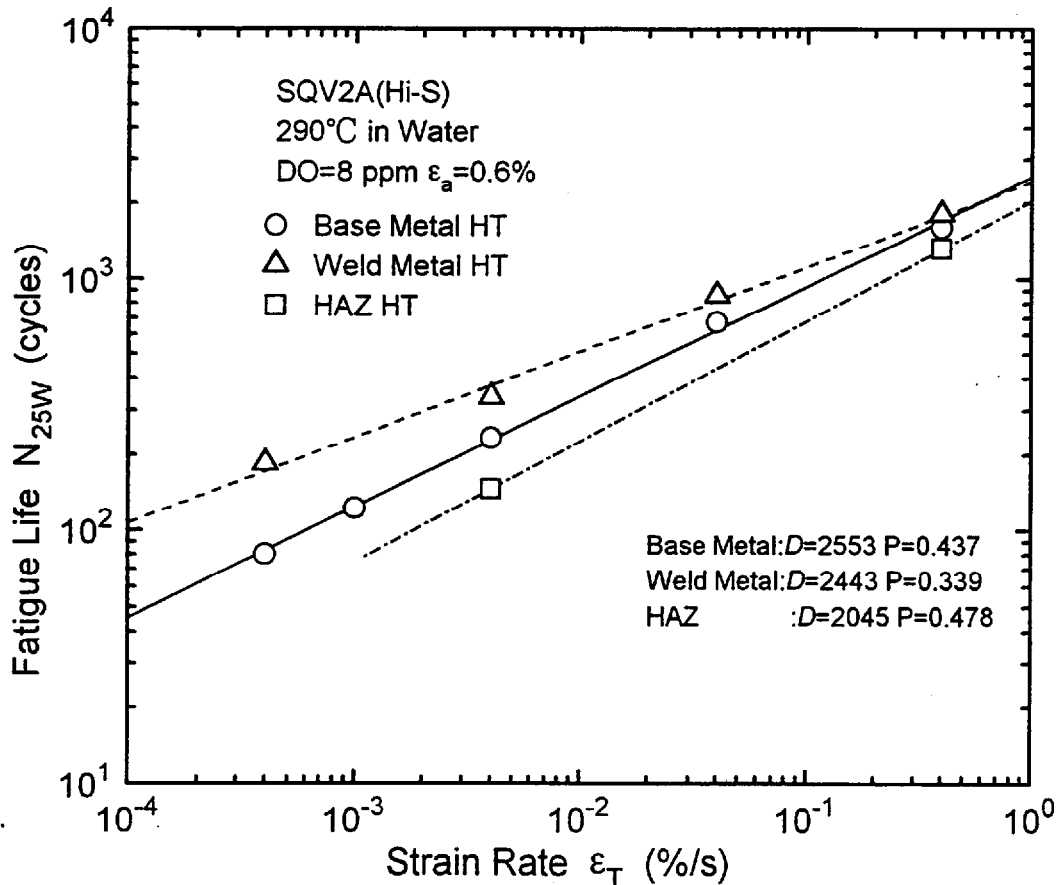


Fig. 2-22(2) Comparison of relations between fatigue life and strain rate for base metal, weld metal and HAZ of low alloy steel

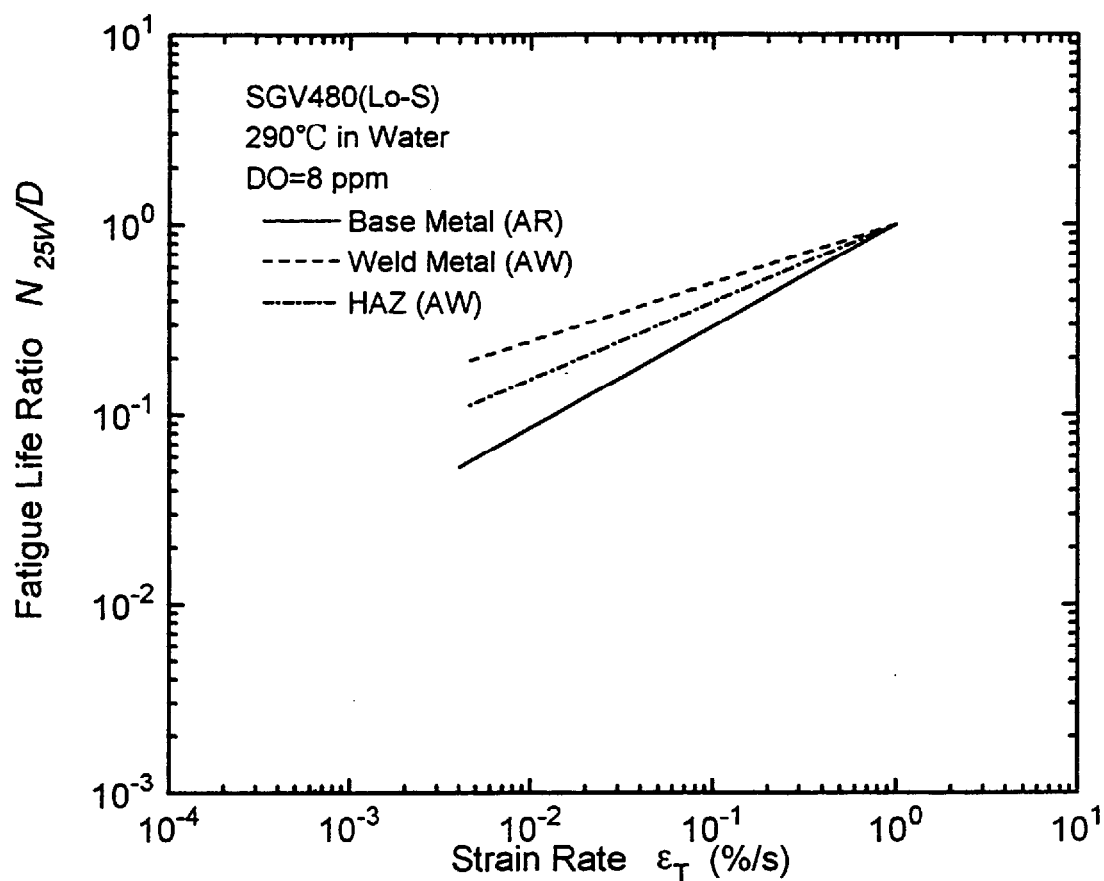


Fig. 2-23(1) Comparison of relations between fatigue life ratio (N_{25W}/D) and strain rate for base metal, weld metal and HAZ of carbon steel

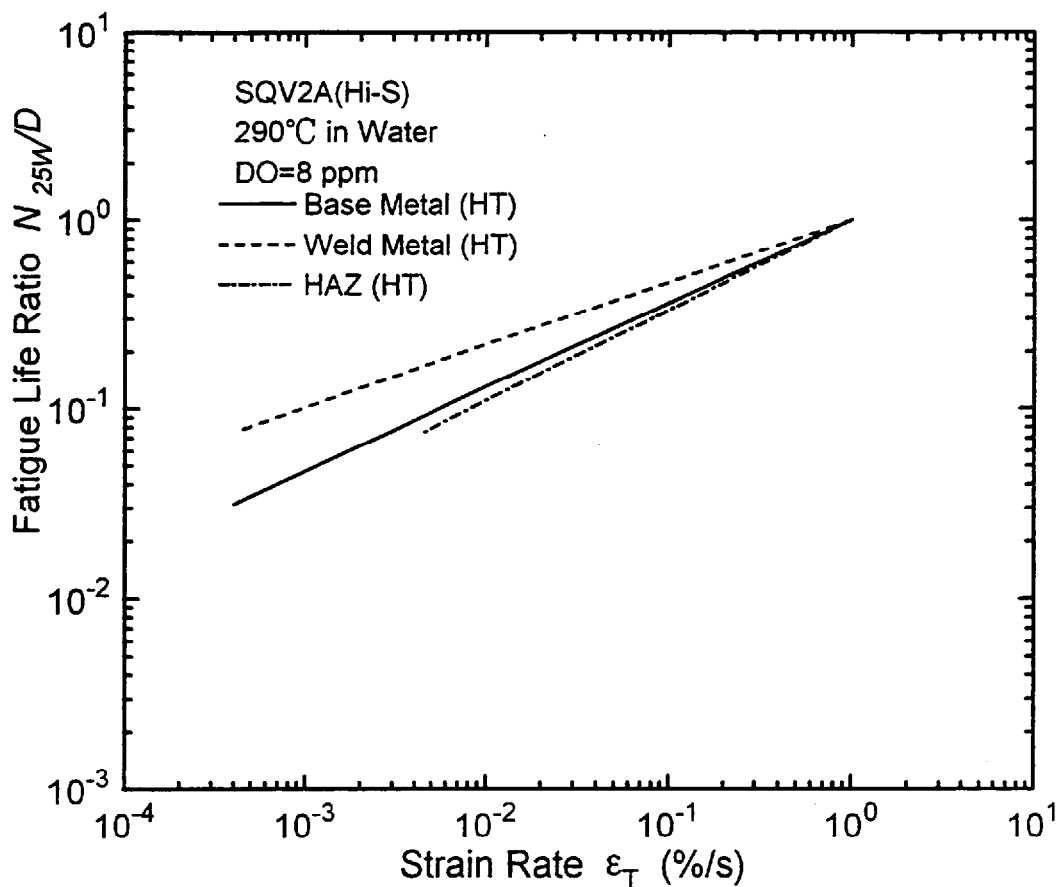


Fig. 2-23(2) Comparison of relations between fatigue life ratio (N_{25W}/D) and strain rate for base metal, weld metal and HAZ of low alloy steel

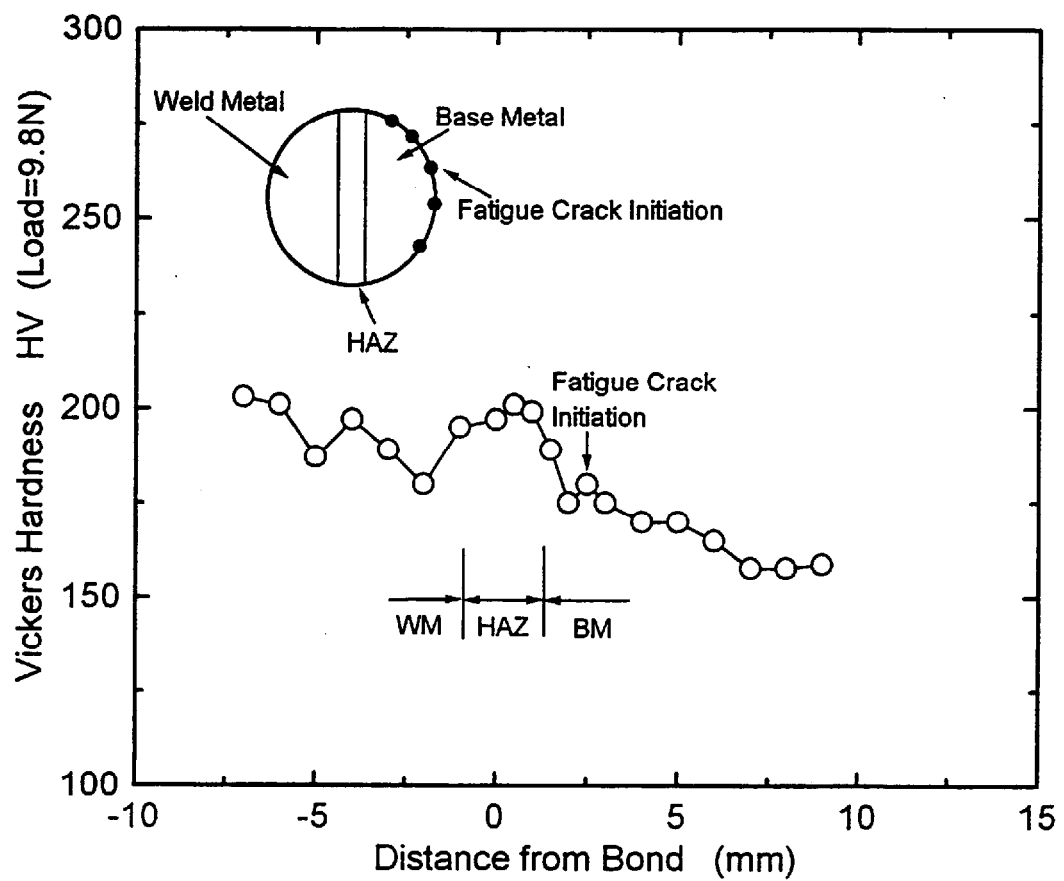


Fig. 2-24 Hardness distribution in cross section of welded specimen and location of fatigue crack initiation

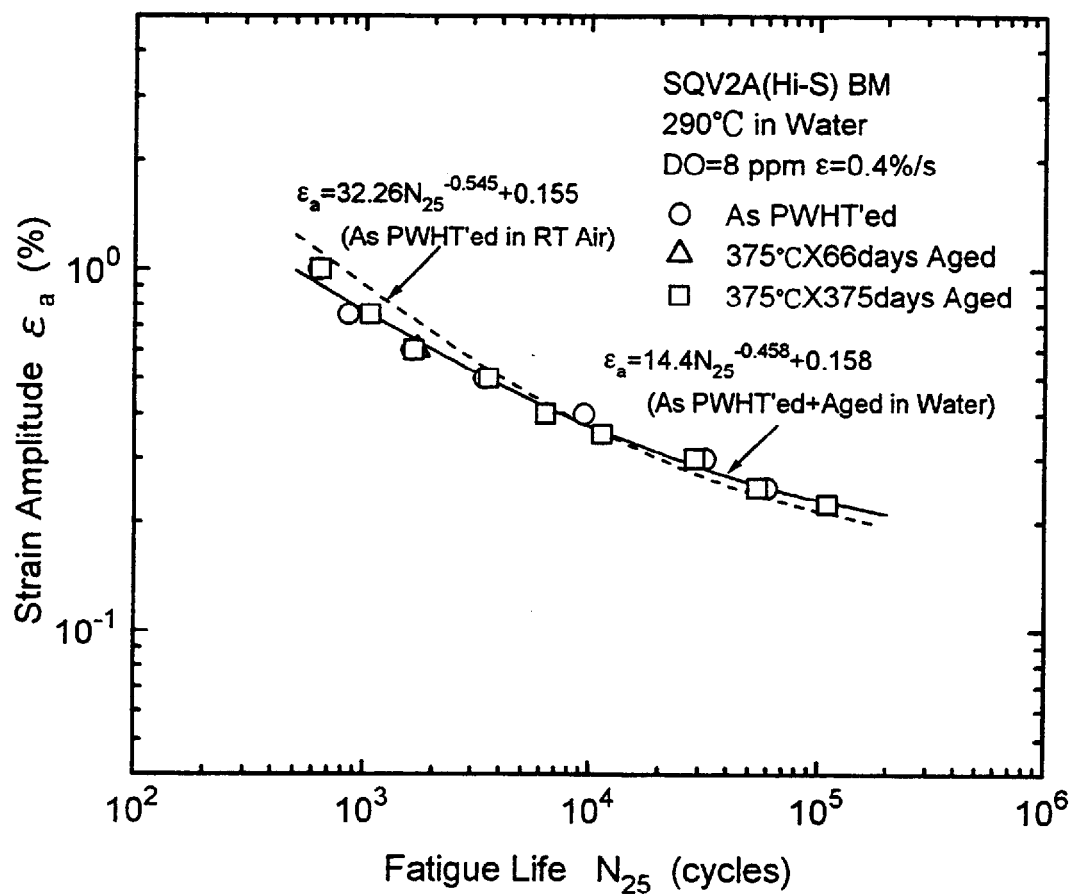


Fig. 2-25 Effect of aging on environmental fatigue curve for SQV2A base metal

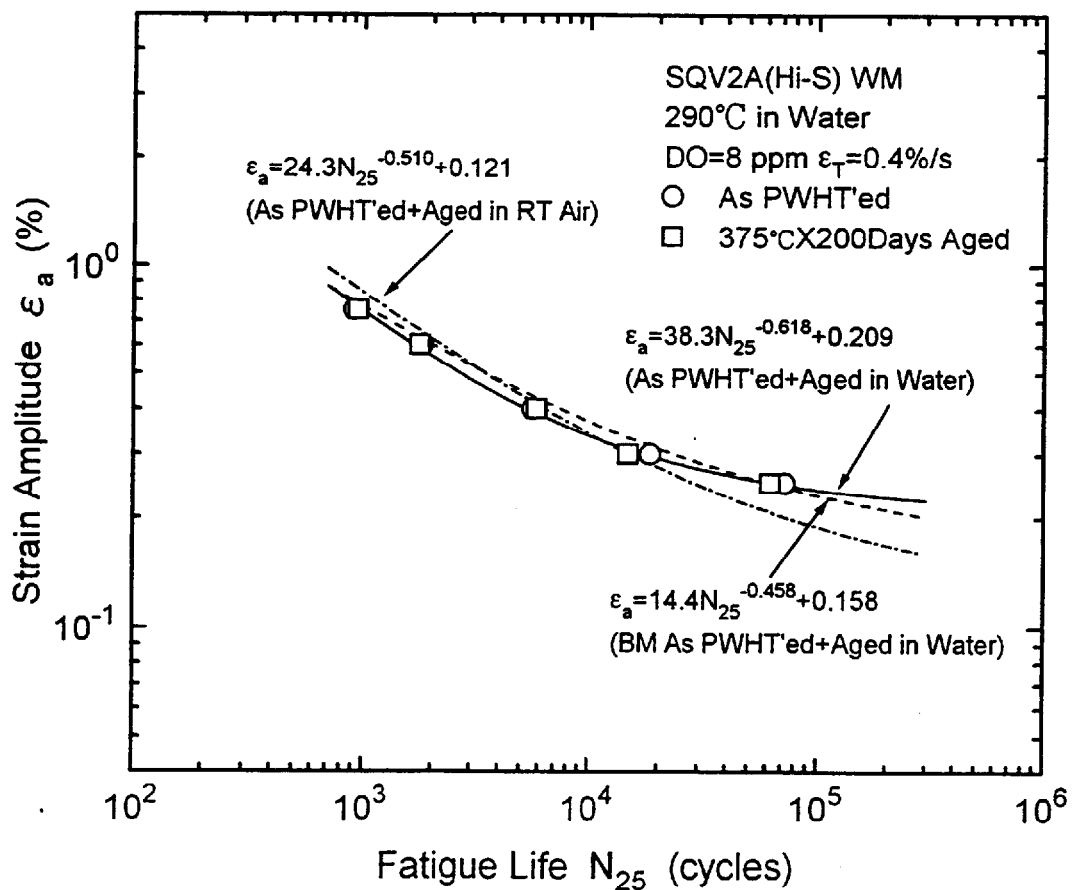


Fig. 2-26 Effect of aging on environmental fatigue curve for SQV2A weld metal

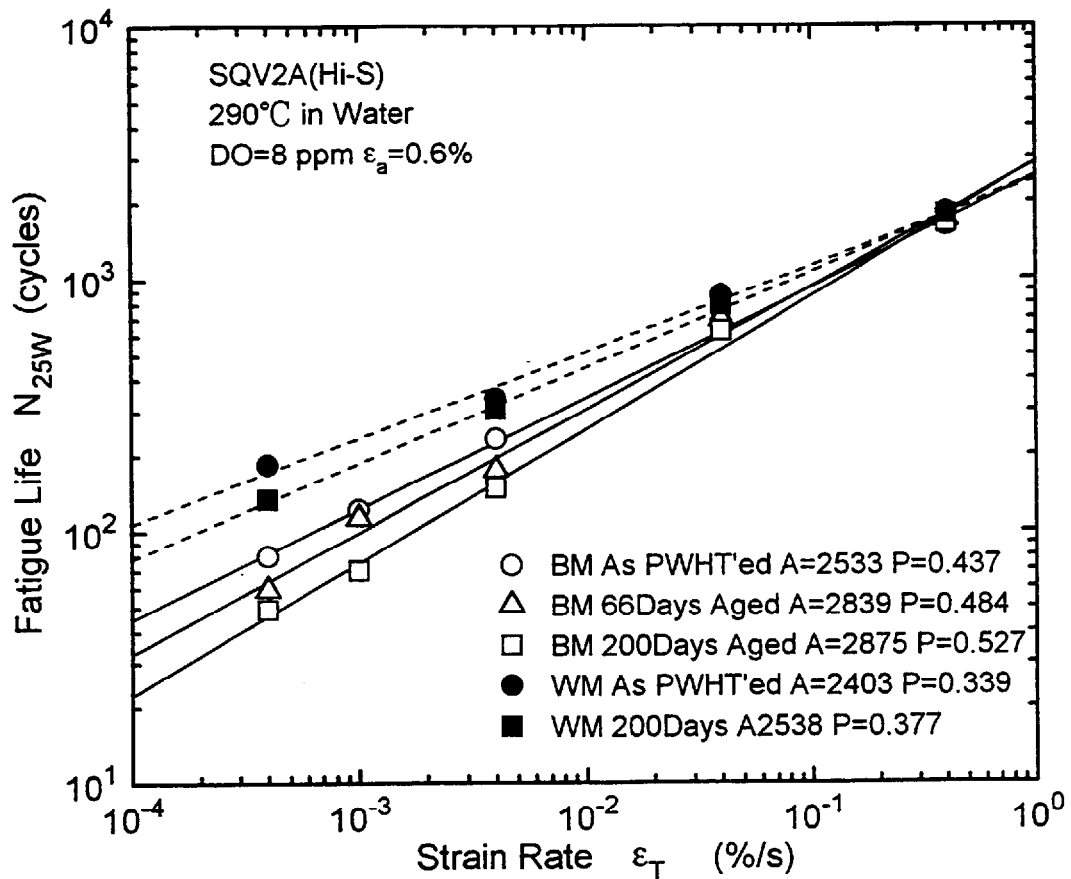


Fig. 2-27 Effect of aging on relations between fatigue life and strain rate for SQV2A base and weld metal

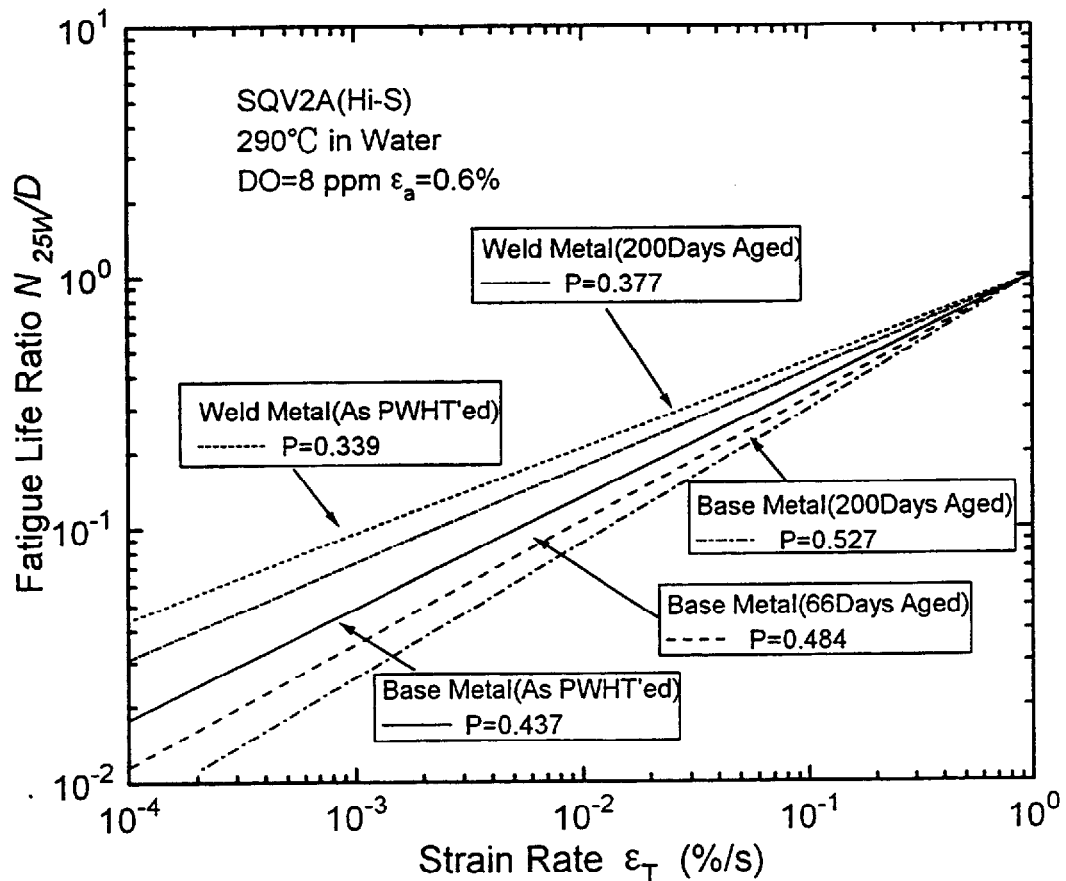


Fig. 2-28 Effect of aging on relations between fatigue life ratio (N_{25W}/D) and strain rate for SQV2A base and weld metal

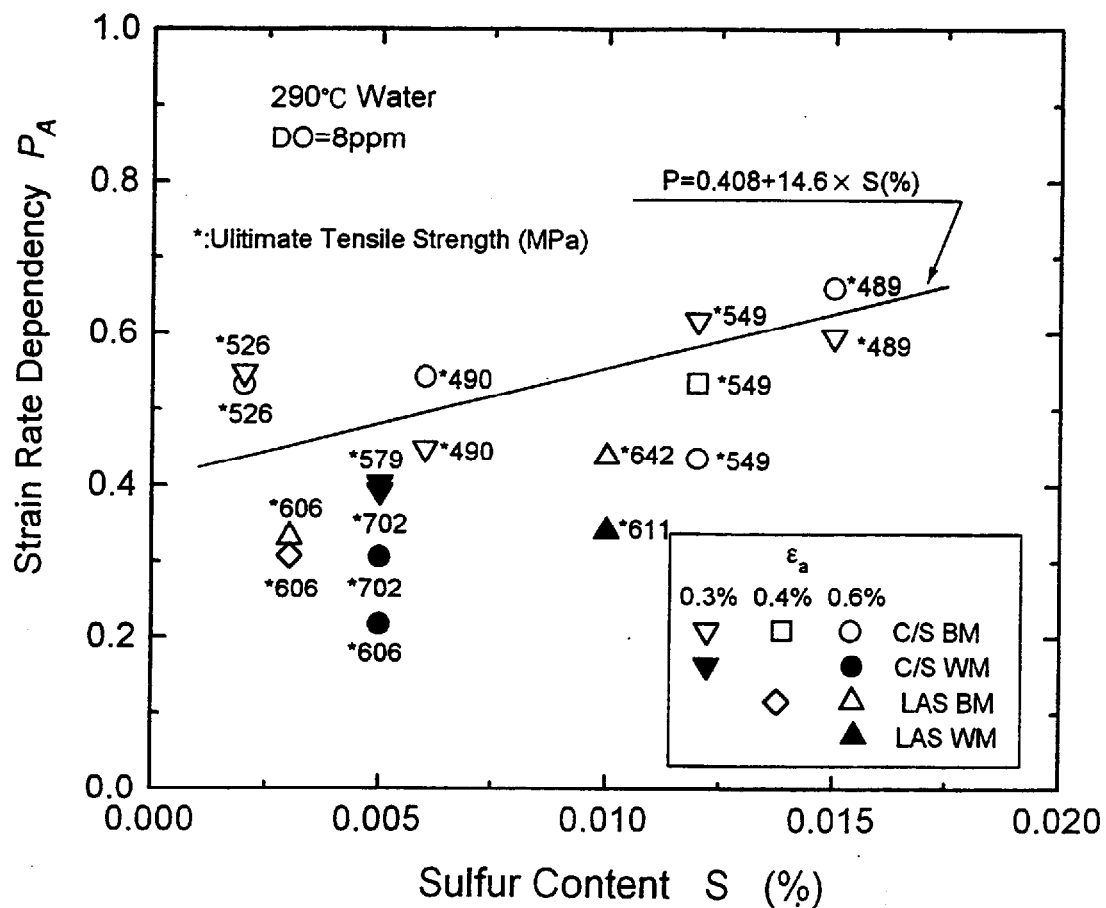


Fig. 2-29 Relation between P_A value and sulfur content

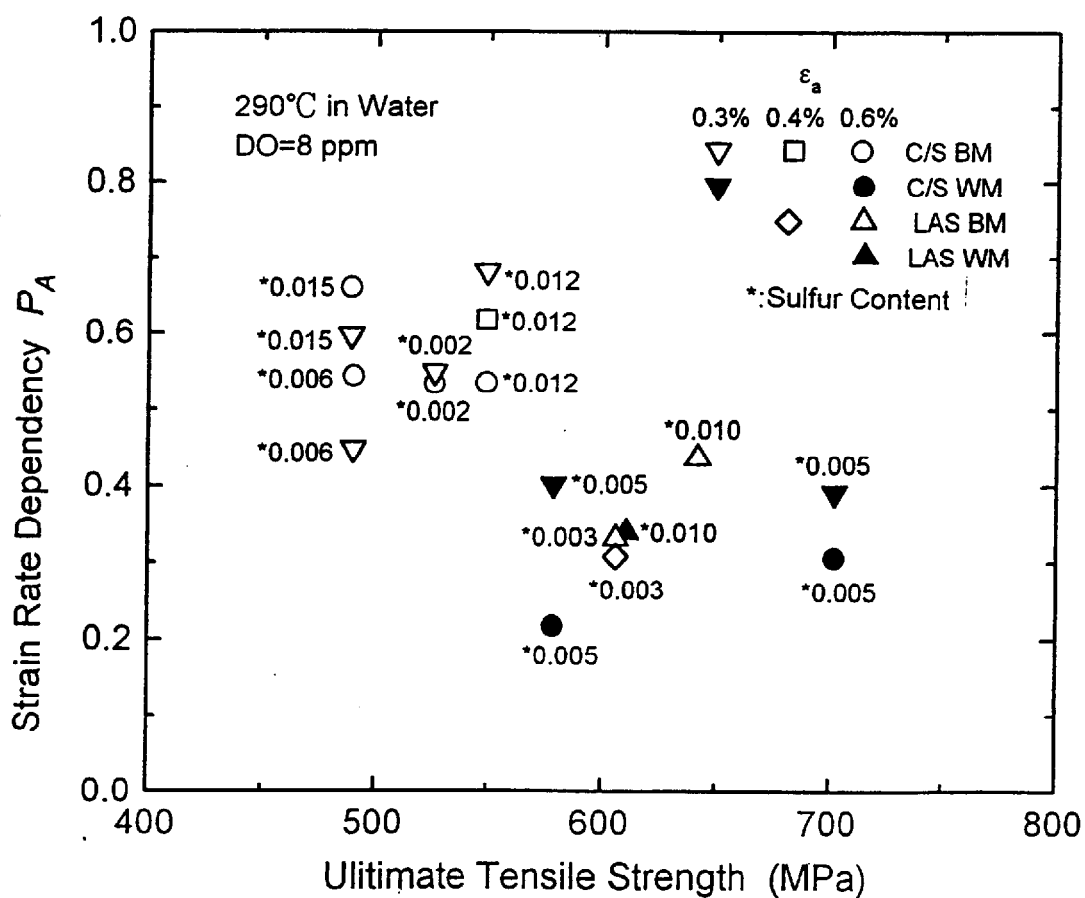


Fig. 2-30 Relation between P_A value and tensile strength

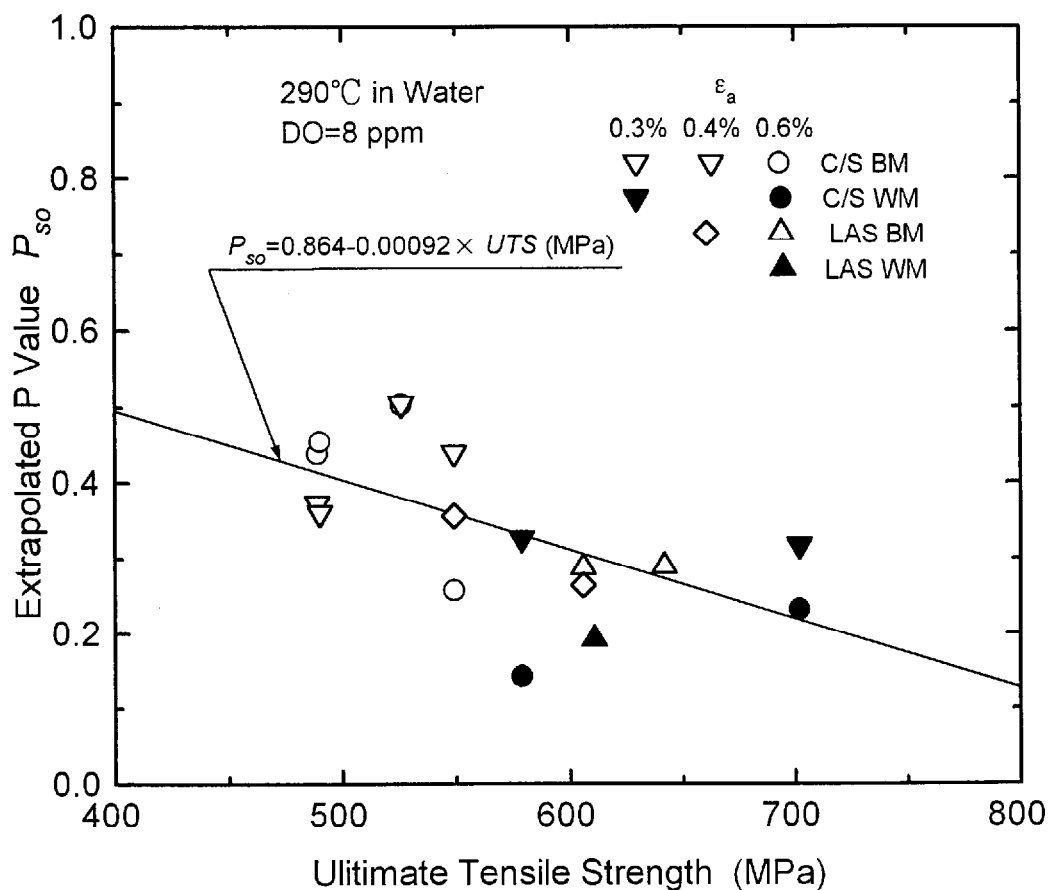


Fig. 2-31 Relation between P_{so} value and tensile strength

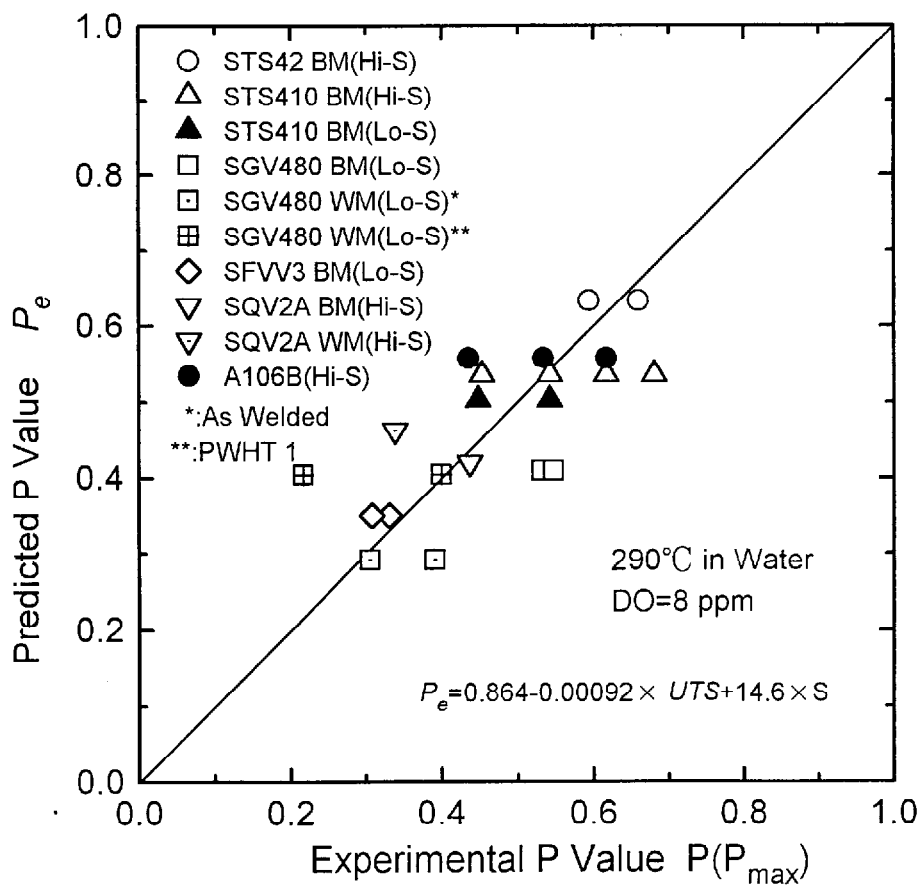
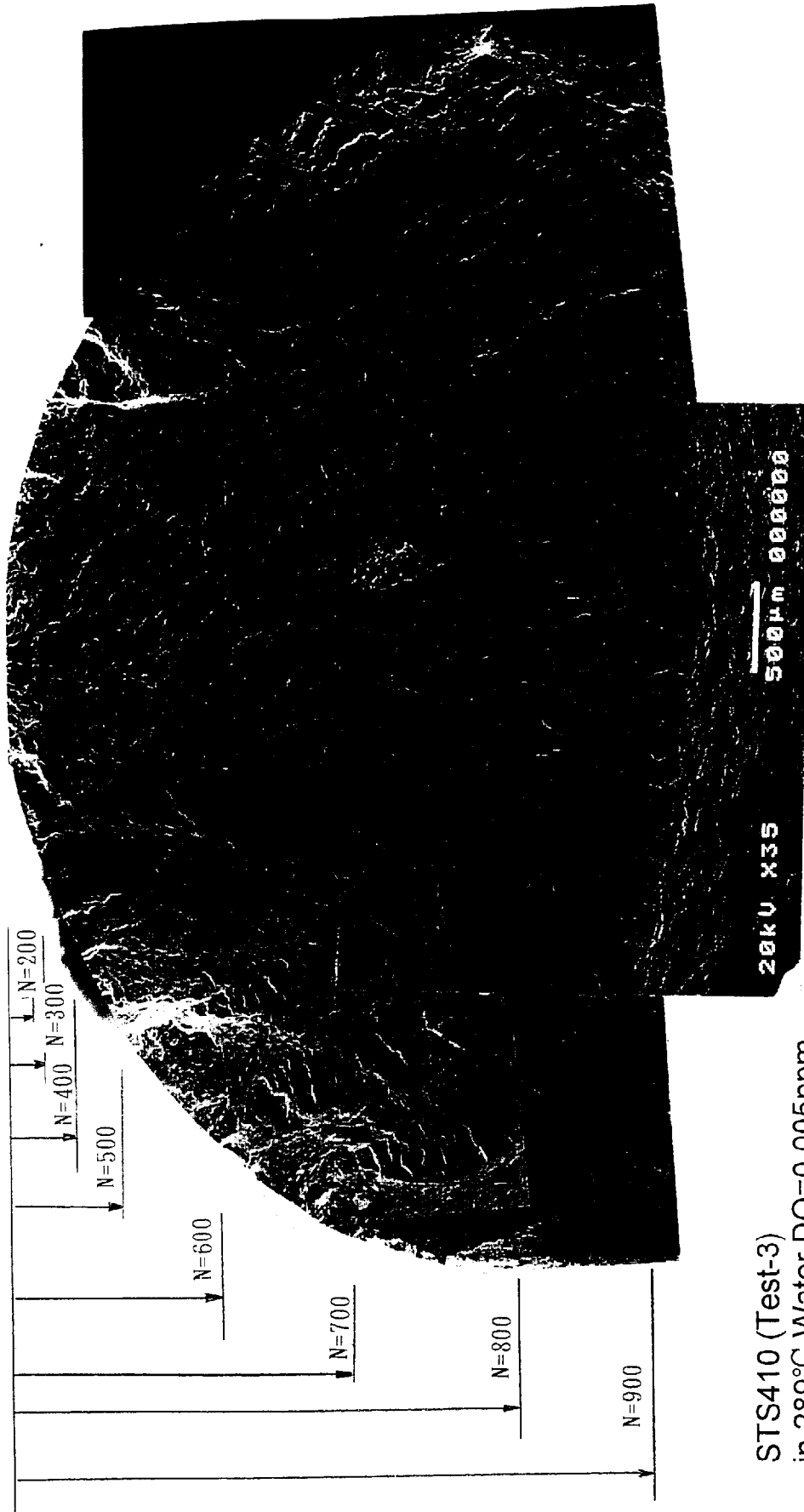


Fig. 2-32 Comparison between predicted P value (P_e) and experimental P value



STS410 (Test-3)
 in 289°C Water, DO=0.005ppm
 Main: $\epsilon=0.004\%/s$, $\epsilon a=0.6\%$
 B.M.: $\epsilon=0.4\%/s$, $\epsilon a=0.3\%$

Fig. 2-33 A sample of beach marks on fracture surface

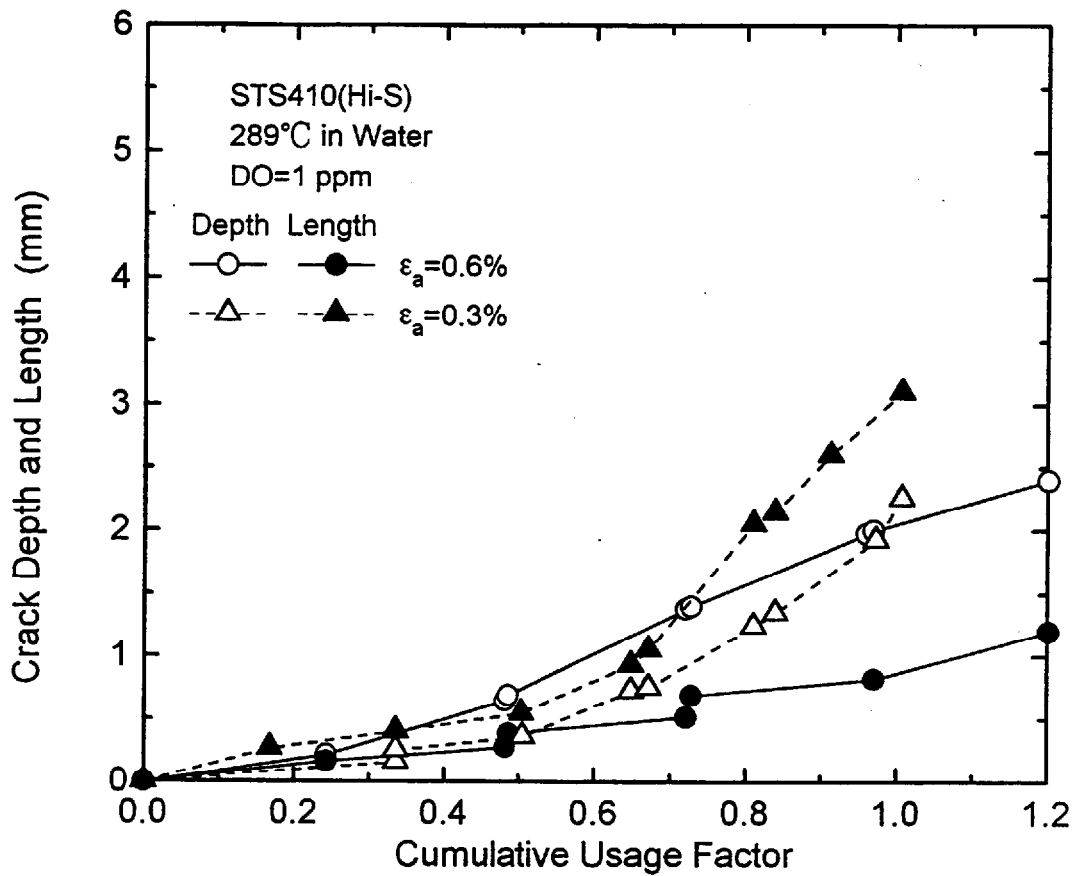


Fig. 2-34 Effect of strain amplitude on the relation between crack depth and *CUF* in 289°C, 1 ppm water

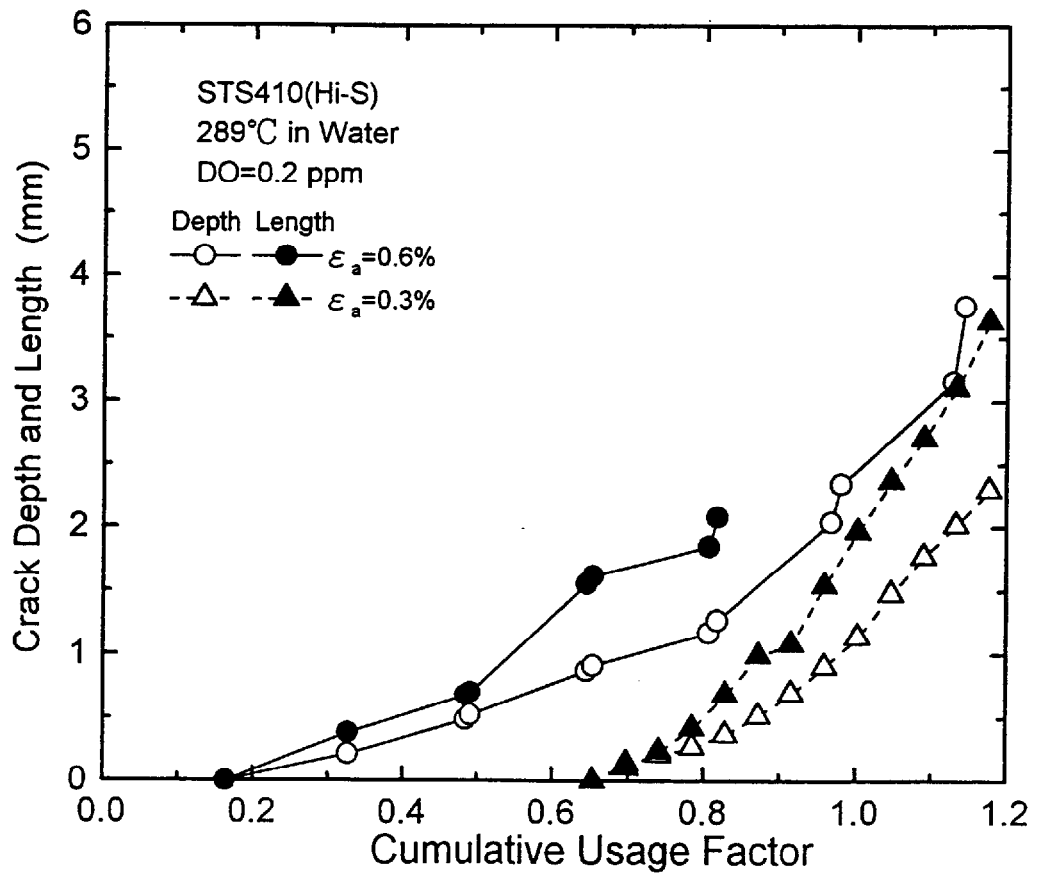


Fig. 2-35 Effect of strain amplitude on the relation between crack depth and *CUF* in 289°C, 0.2 ppm water

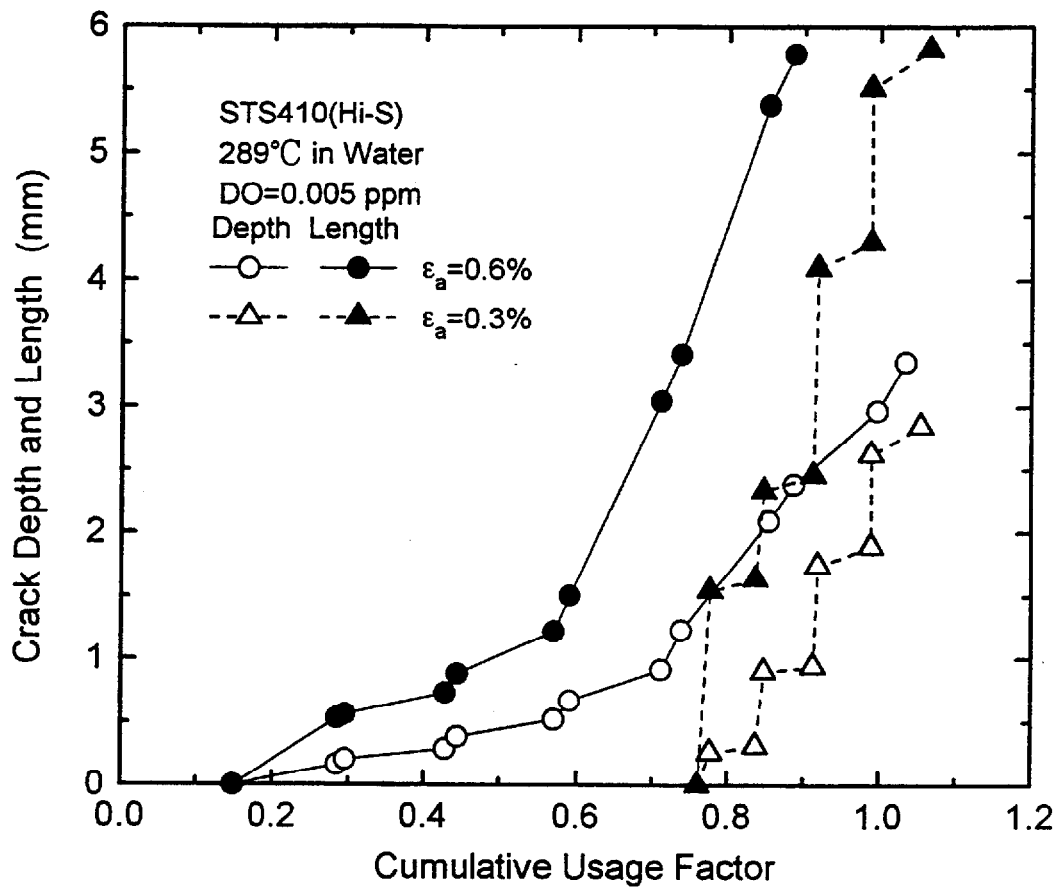


Fig. 2-36 Effect of strain amplitude on the relation between crack depth and *CUF* in 289°C, 0.005 ppm water

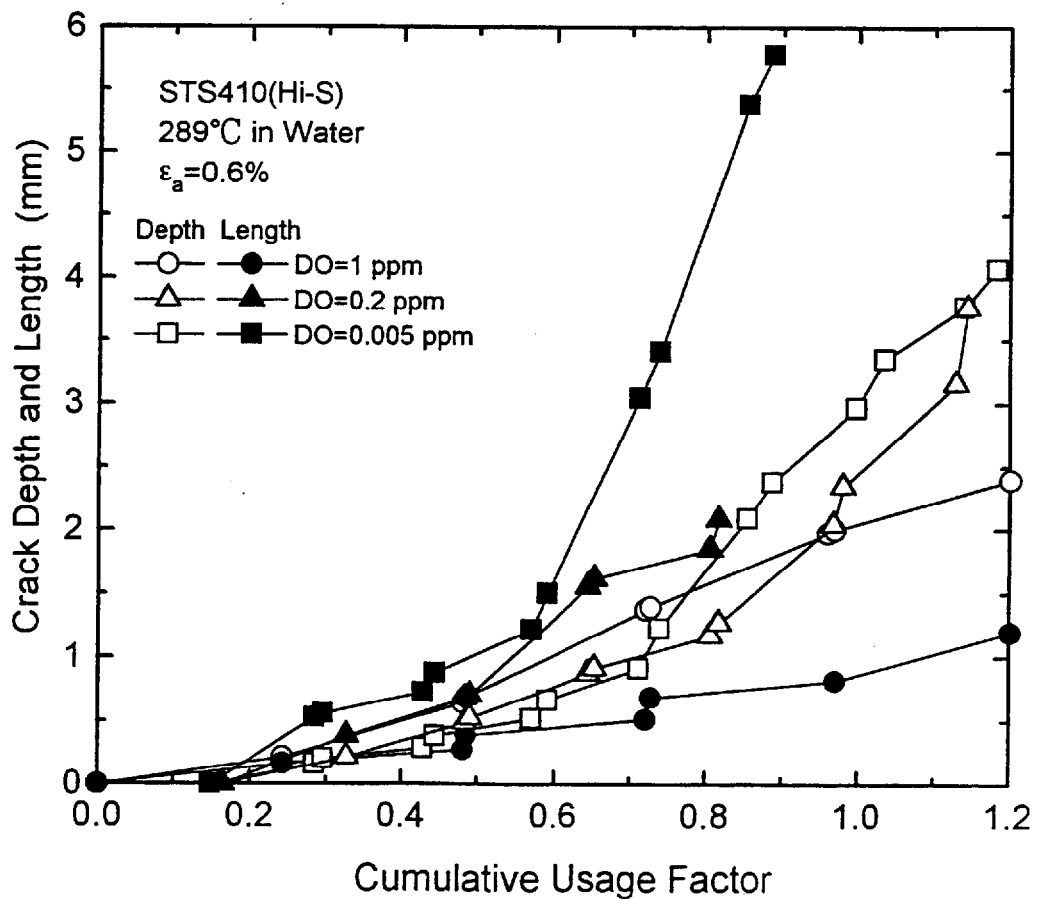


Fig. 2-37 Effect of oxygen content on the relation between crack depth and *CUF* at 0.6% strain amplitude

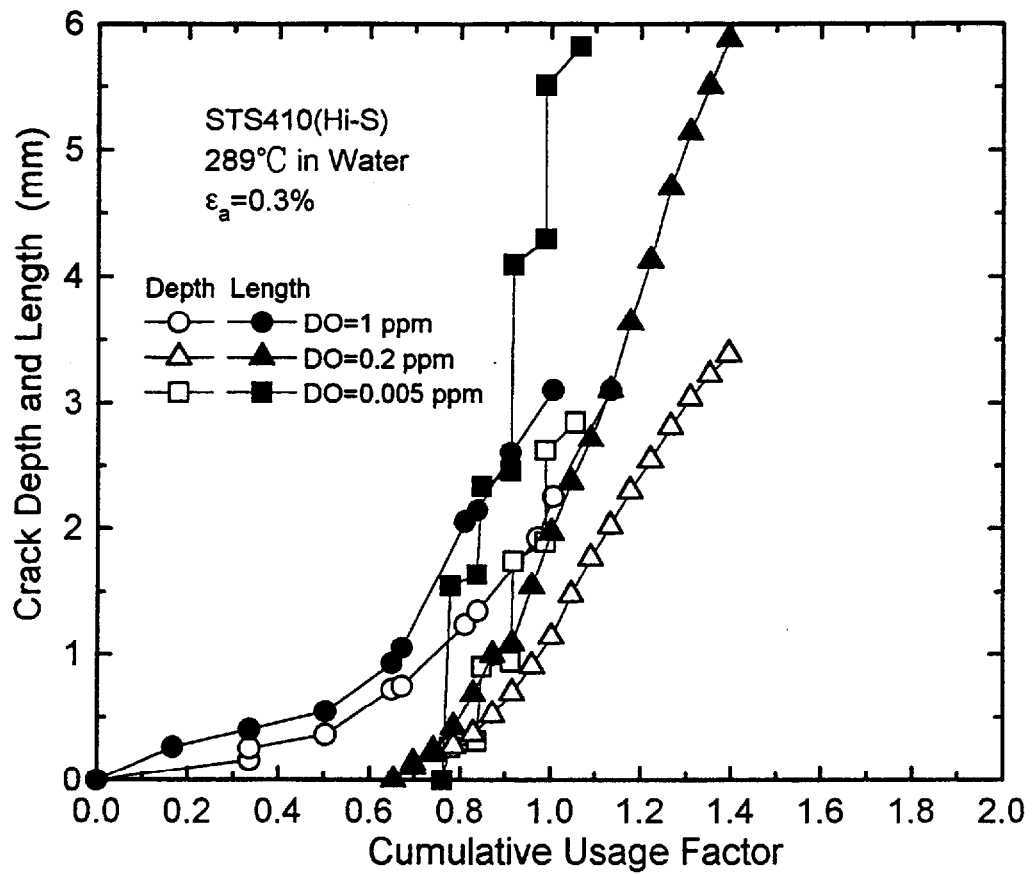


Fig. 2-38 Effect of oxygen content on the relation between crack depth and *CUF* at 0.3% strain amplitude

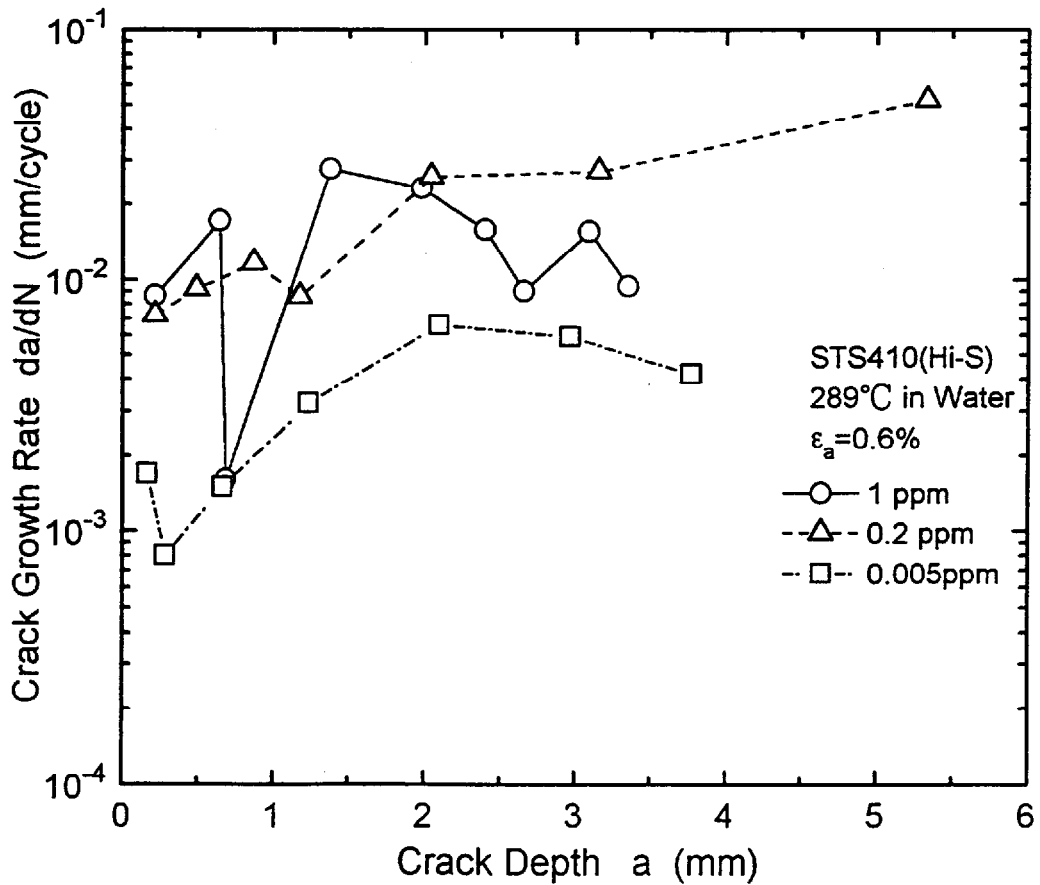


Fig. 2-39 Effect of oxygen content on fatigue crack growth rate at 0.6% strain amplitude

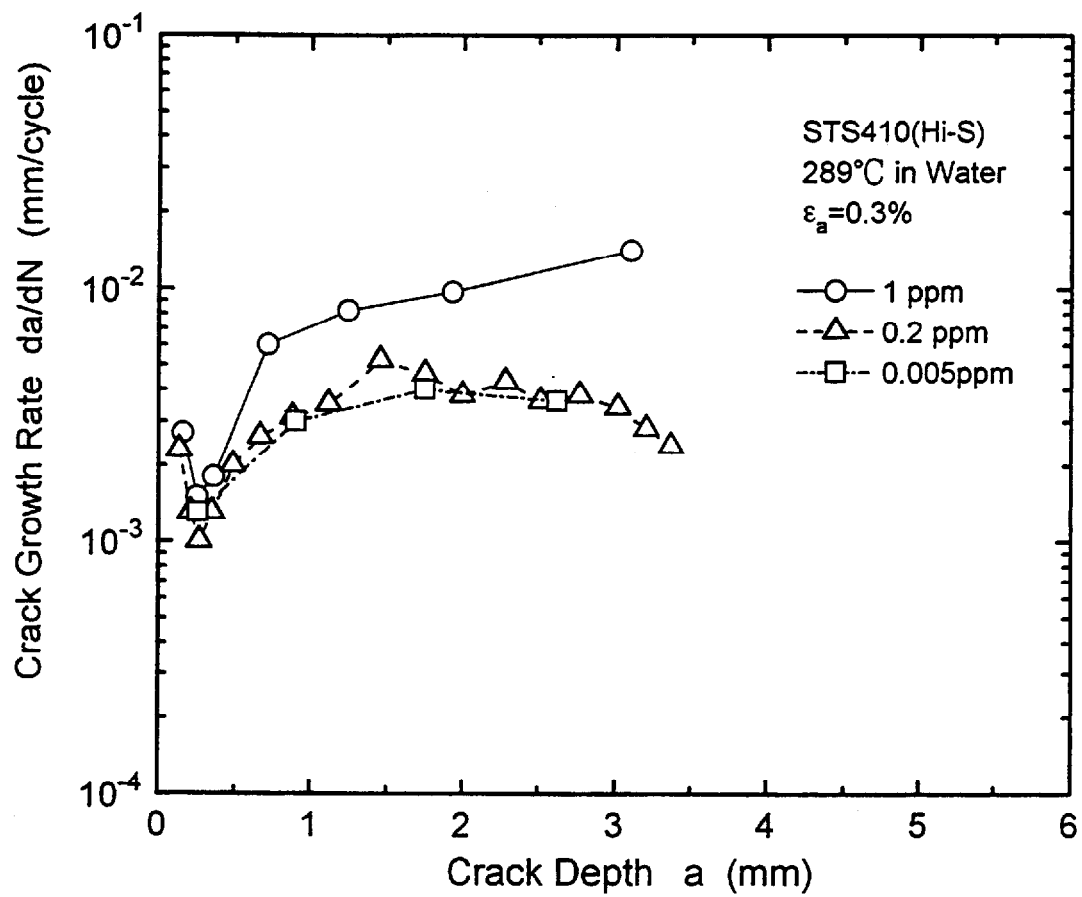


Fig. 2-40 Effect of oxygen content on fatigue crack growth rate at 0.3% strain amplitude

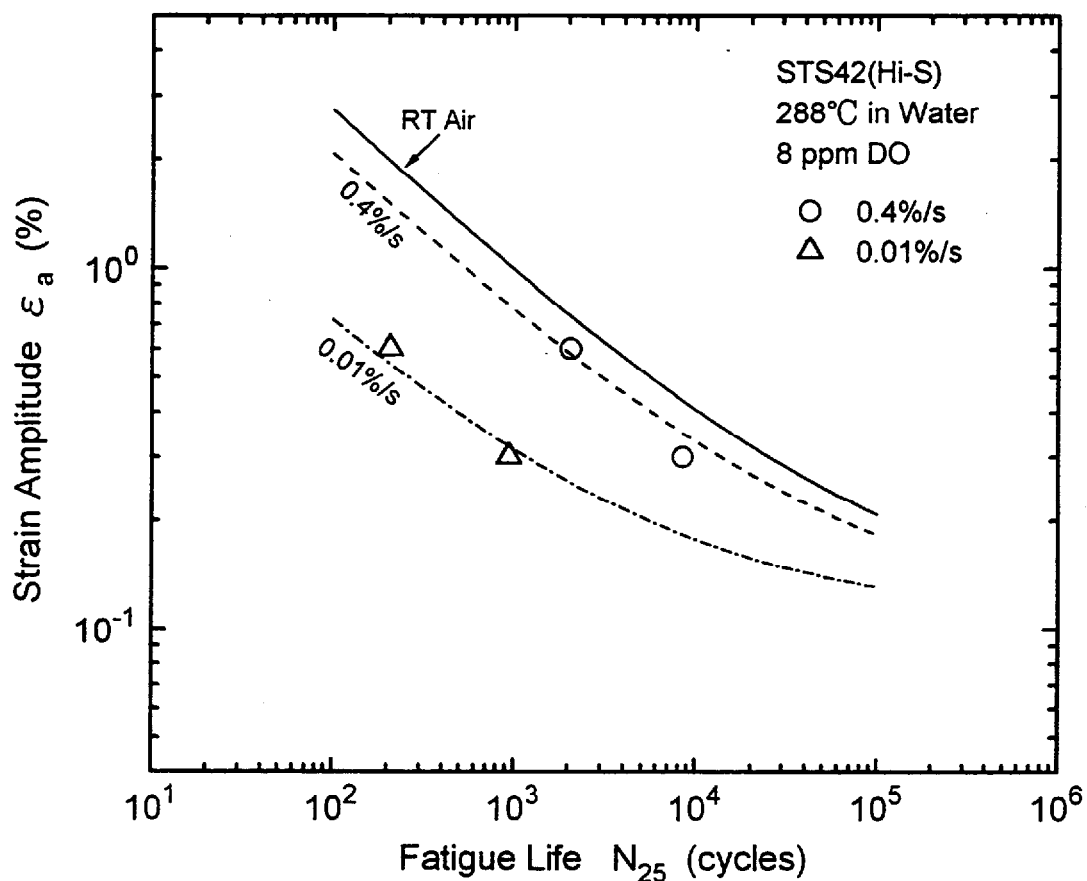


Fig. 2-41(1) Comparison of predicted fatigue curves with test results for STS42(Hi-S) in 288°C, 8 ppm DO water

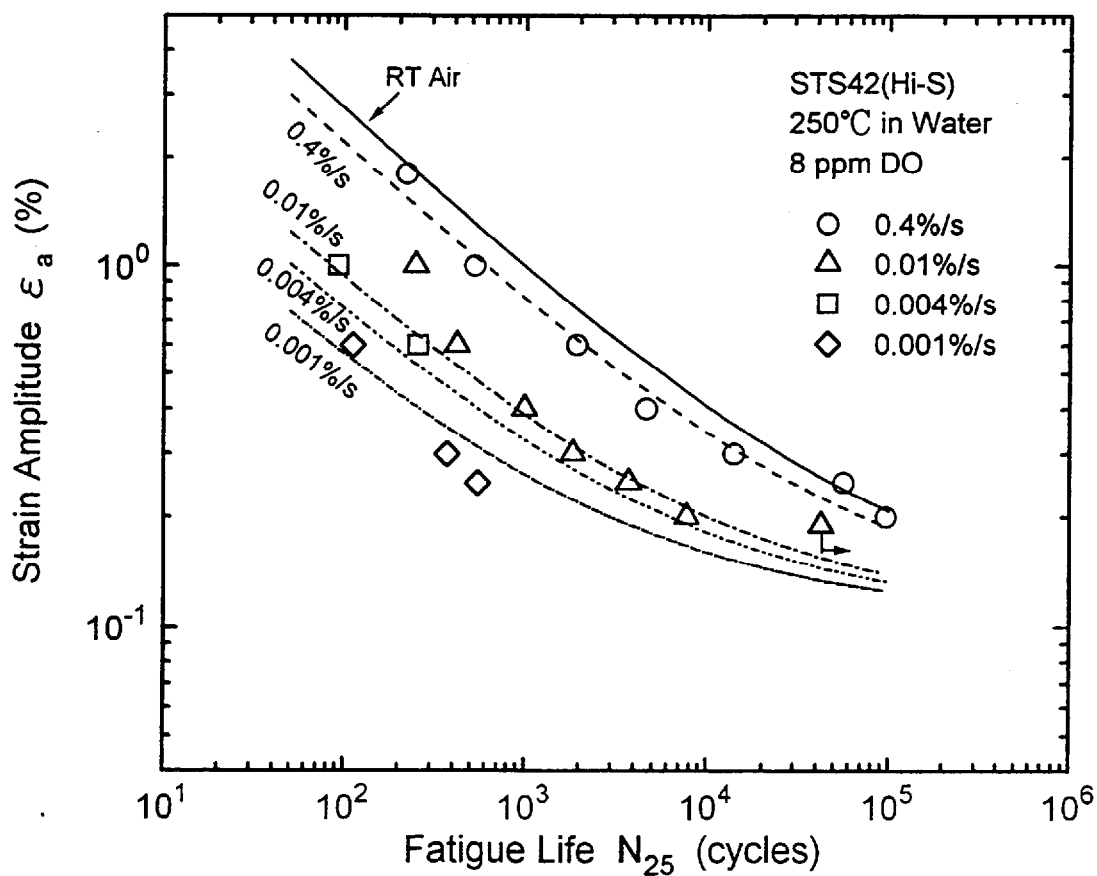


Fig. 2-41(2) Comparison of predicted fatigue curves with test results for STS42(Hi-S) in 250°C, 8 ppm DO water

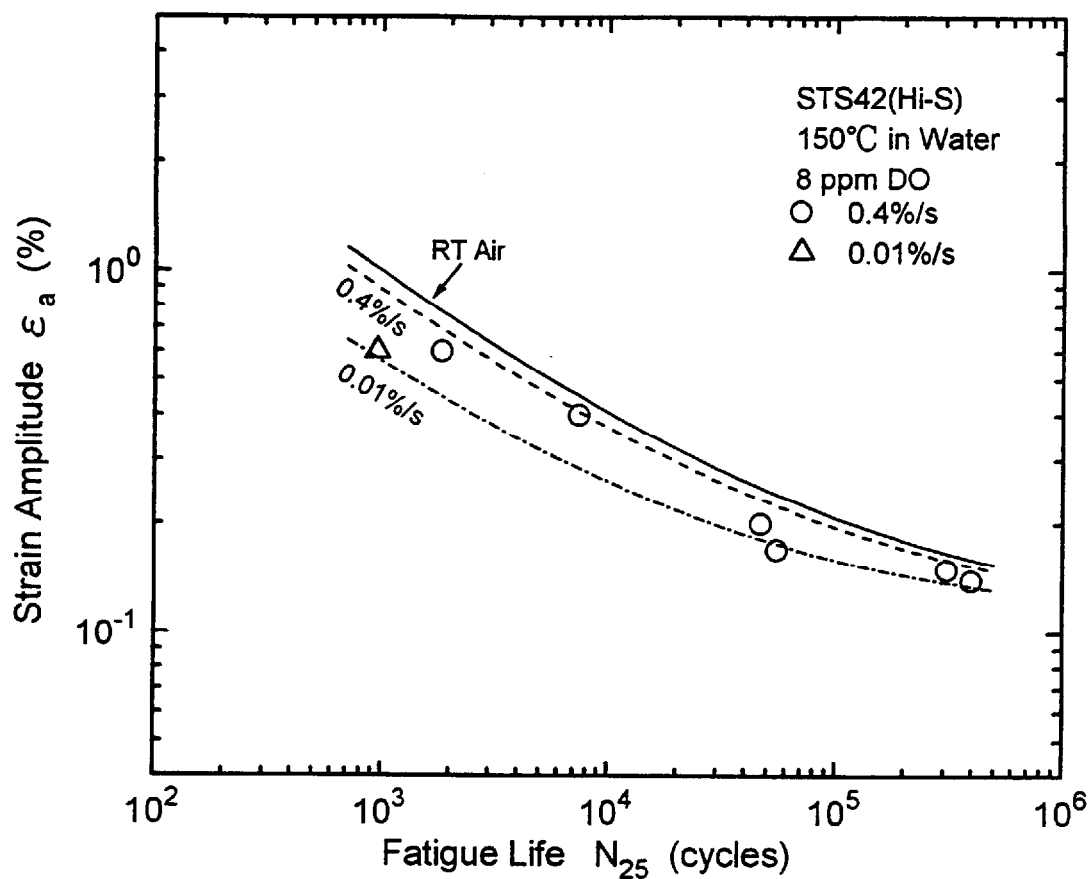


Fig. 2-41(3) Comparison of predicted fatigue curves with test results for STS42(Hi-S) in 150°C, 8 ppm DO water

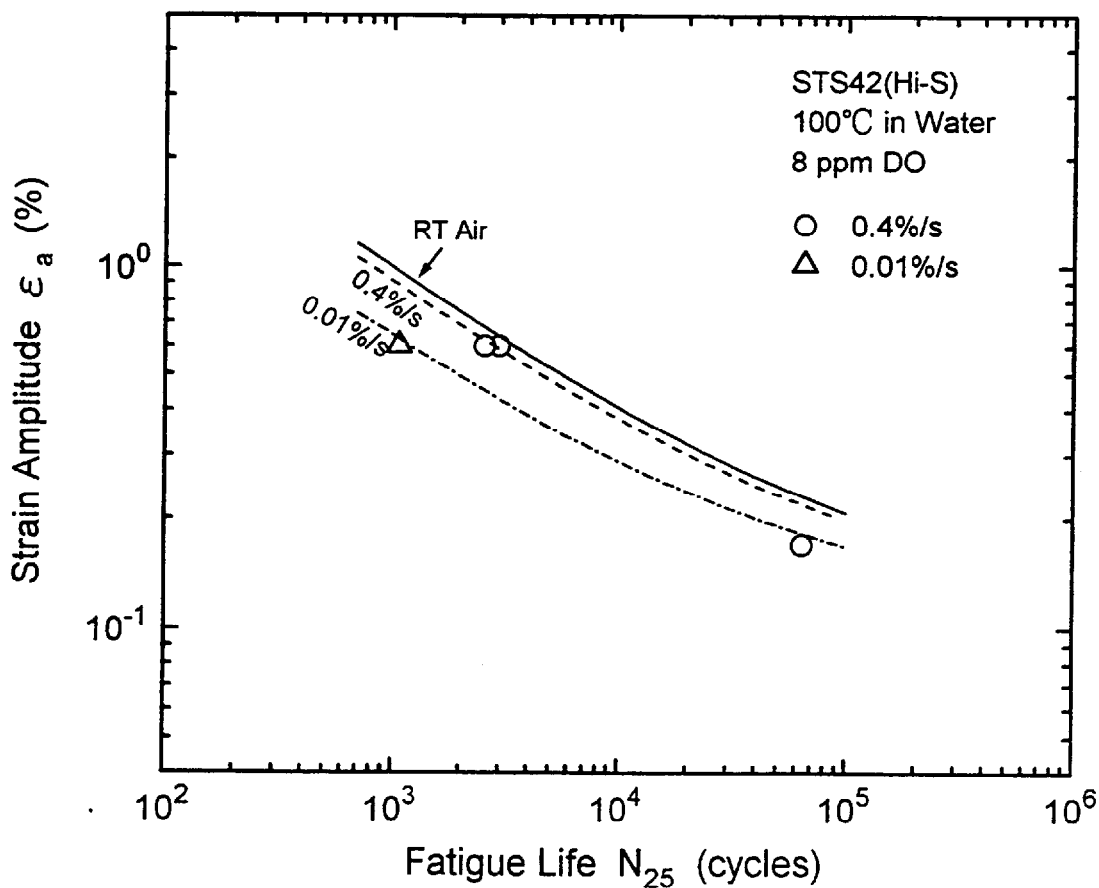


Fig. 2-41(4) Comparison of predicted fatigue curves with test results for STS42(Hi-S) in 100°C, 8 ppm DO water

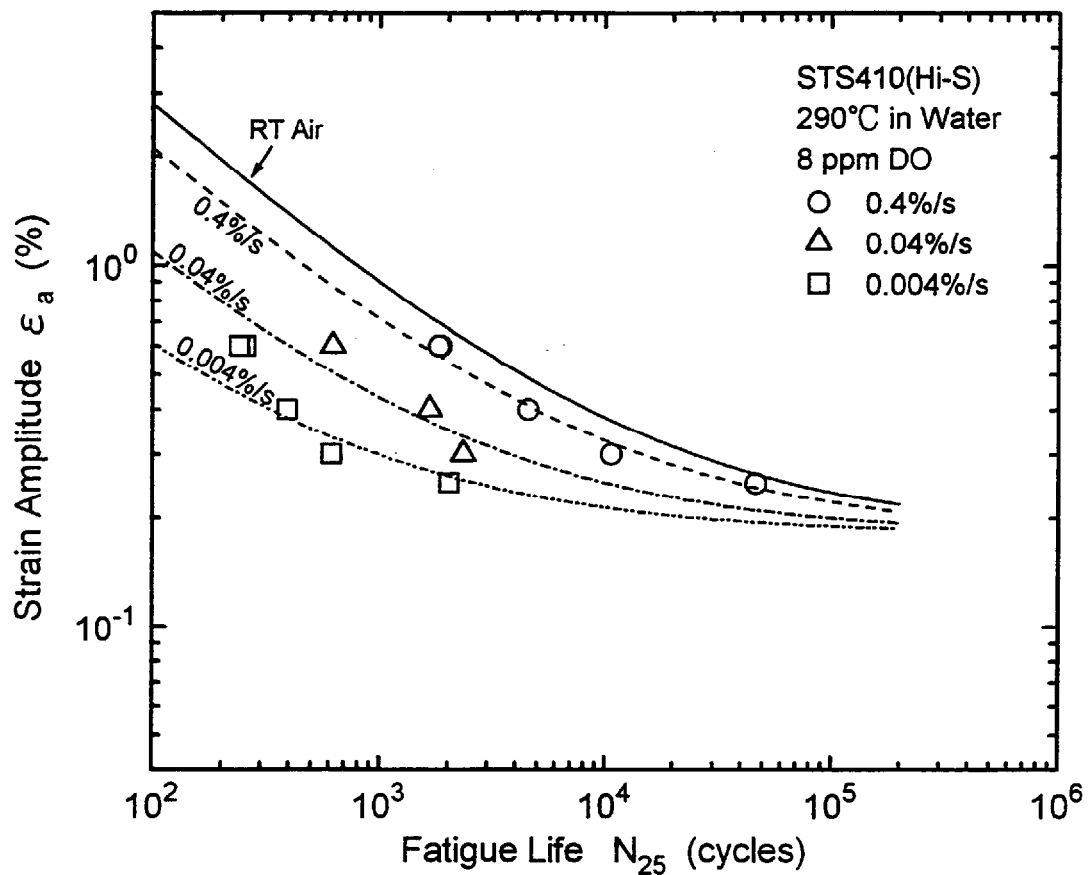


Fig. 2-41(5) Comparison of predicted fatigue curves with test results for STS410(Hi-S) in 290°C, 8 ppm DO water

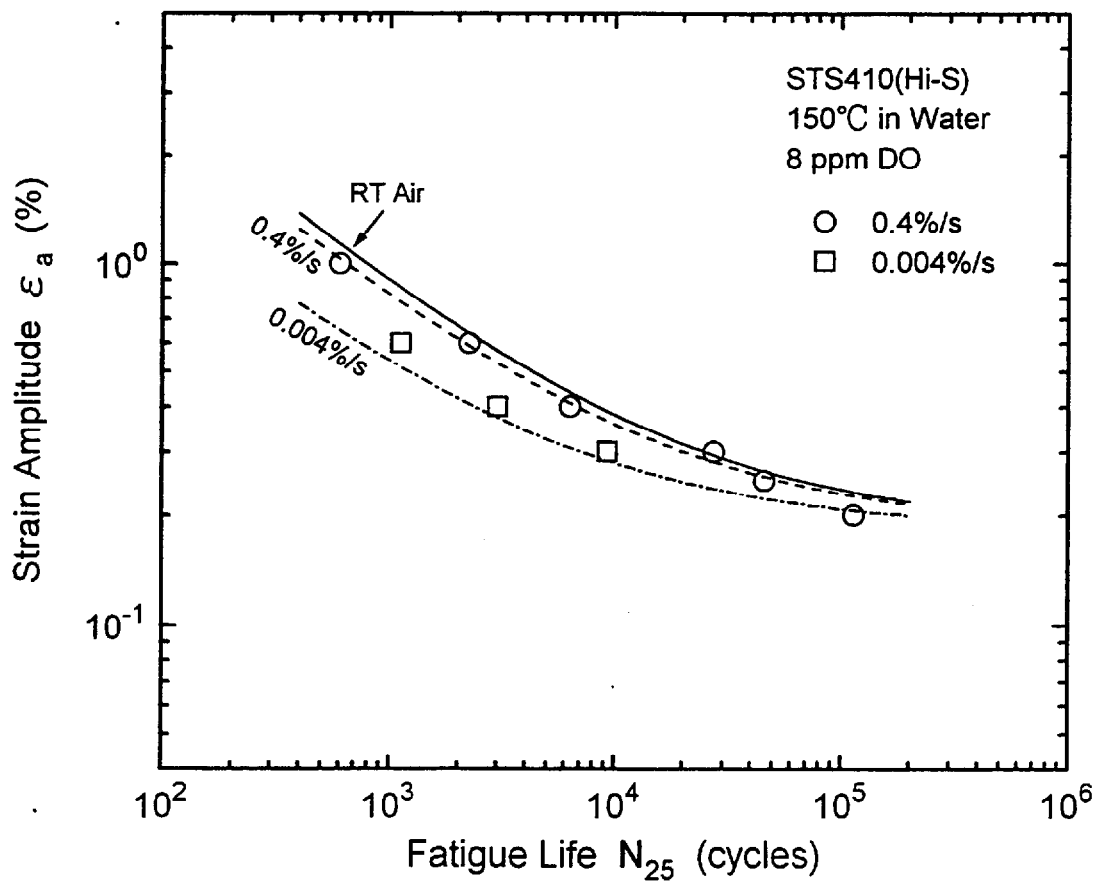


Fig. 2-41(6) Comparison of predicted fatigue curves with test results for STS410(Hi-S) in 150°C, 8 ppm DO water

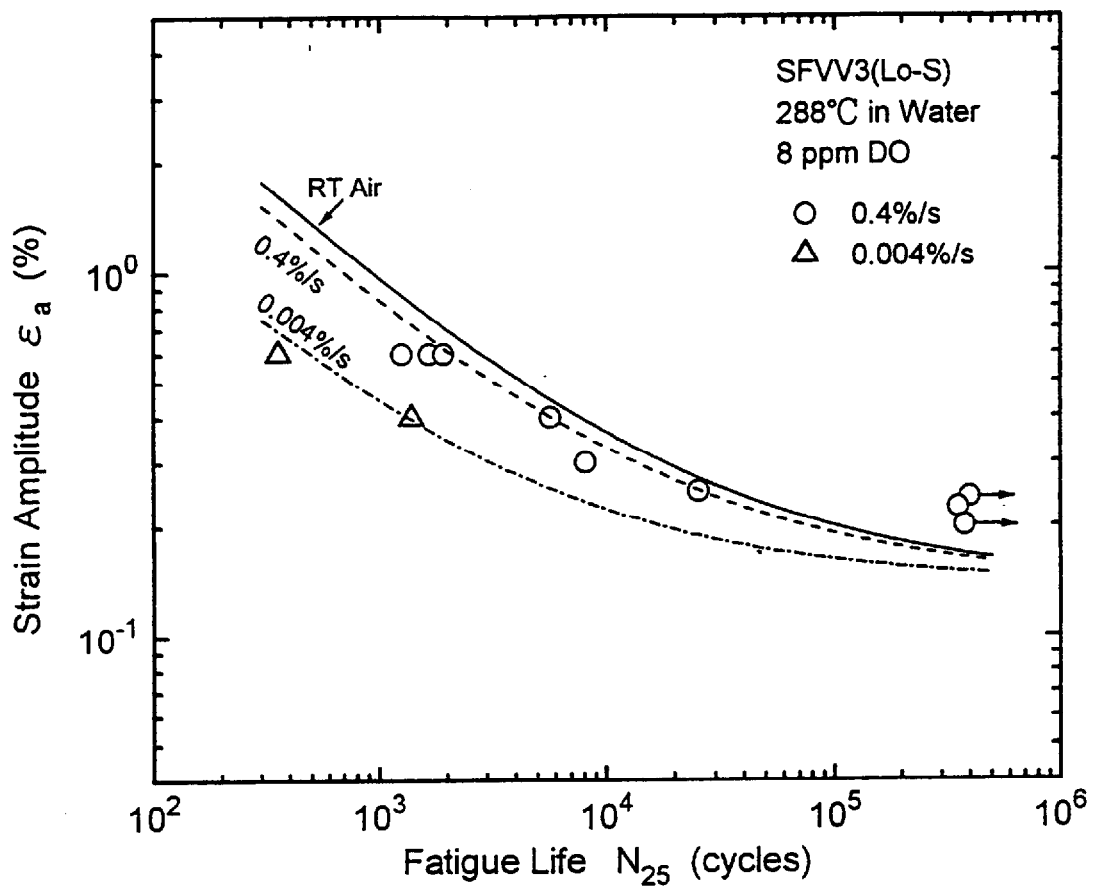


Fig. 2-41(7) Comparison of predicted fatigue curves with test results for SFVV3(Lo-S) in 288°C, 8 ppm DO water

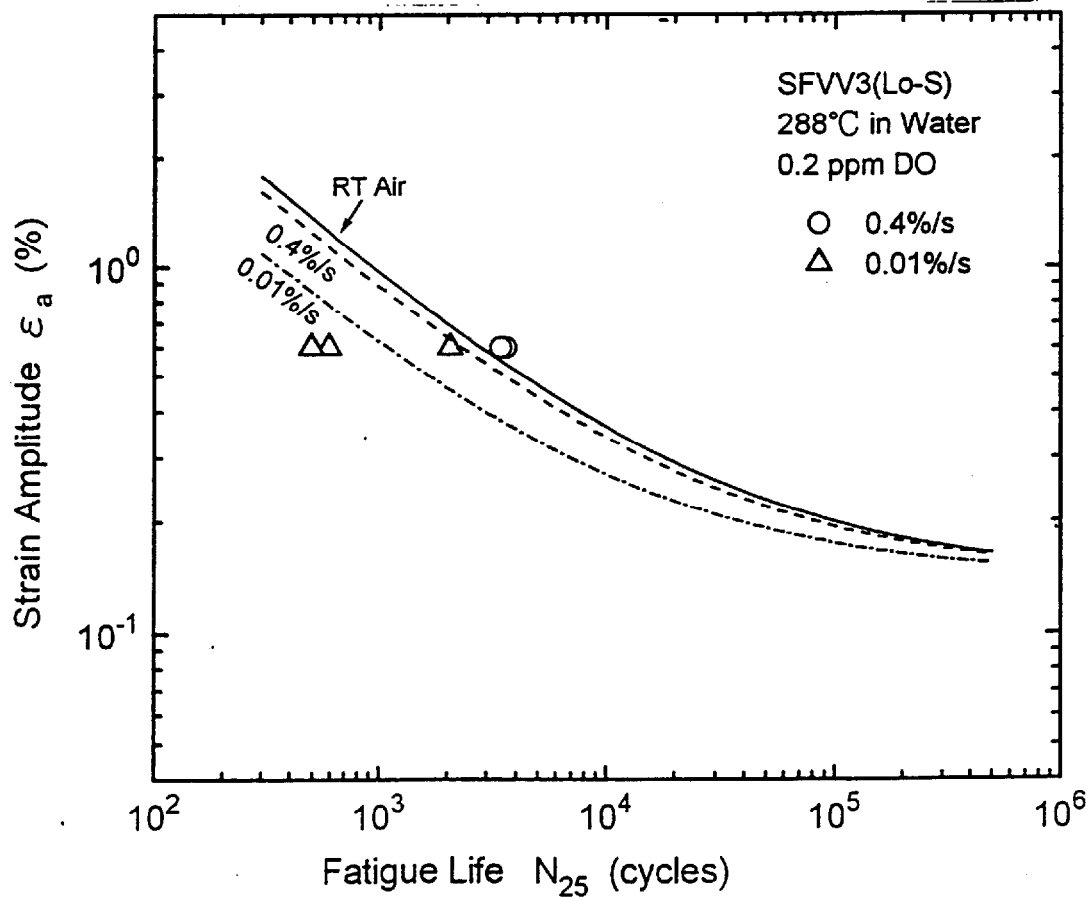


Fig. 2-41(8) Comparison of predicted fatigue curves with test results for SFVV3(Lo-S) in 288°C, 0.2 ppm DO water

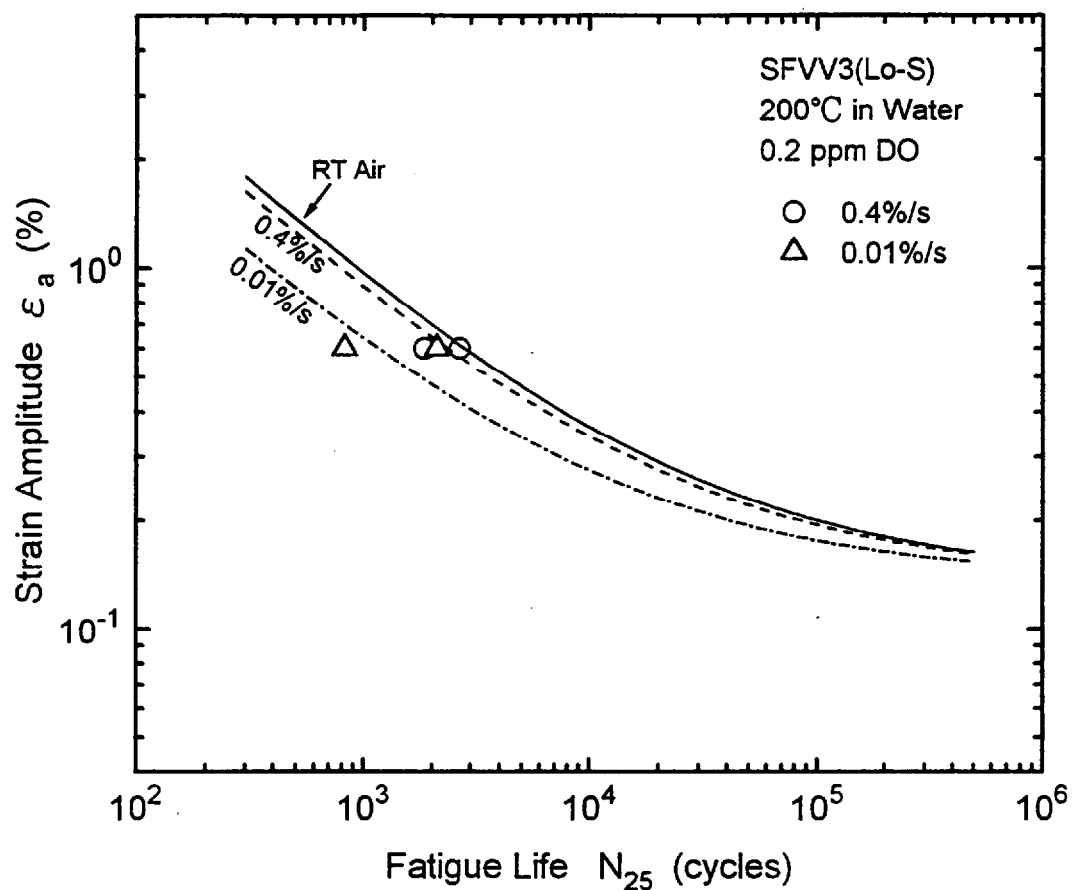


Fig. 2-41(9) Comparison of predicted fatigue curves with test results for SFVV3(Lo-S) in 200°C, 0.2 ppm DO water

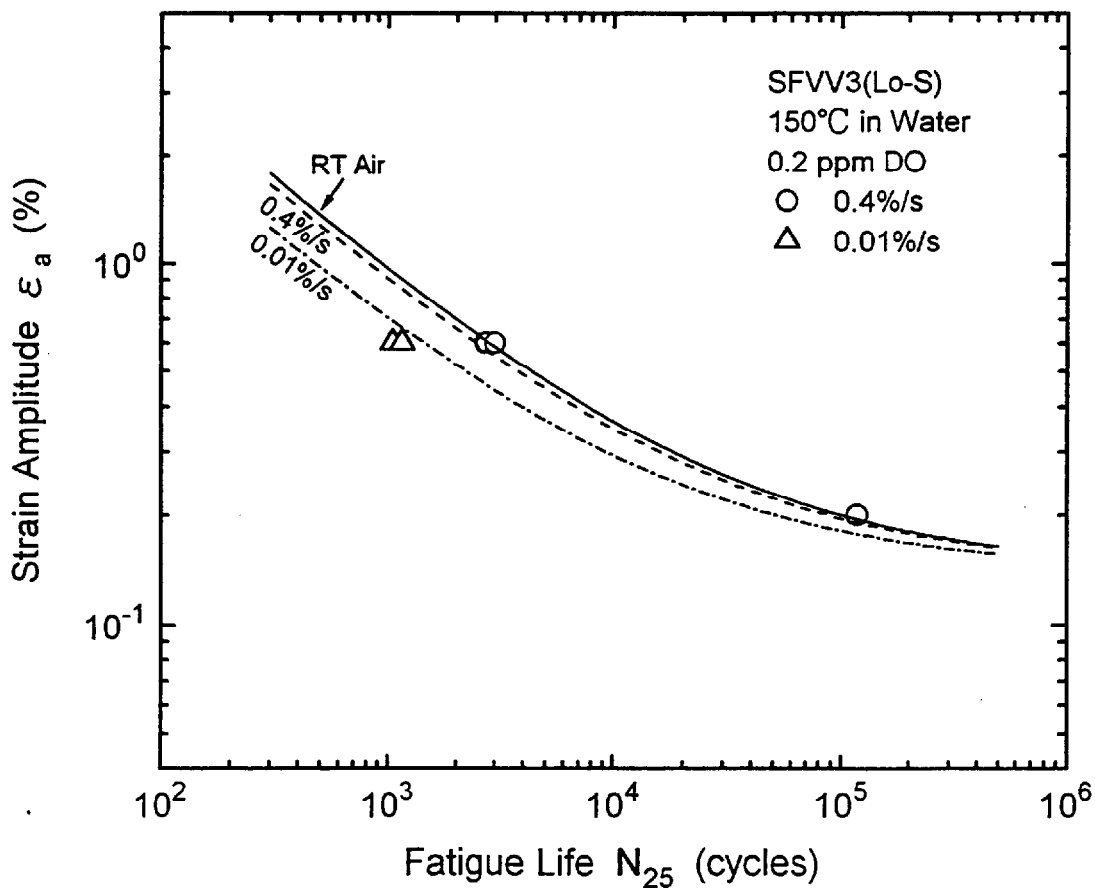


Fig. 2-41(10) Comparison of predicted fatigue curves with test results for SFVV3(Lo-S) in 150°C, 0.2 ppm DO water

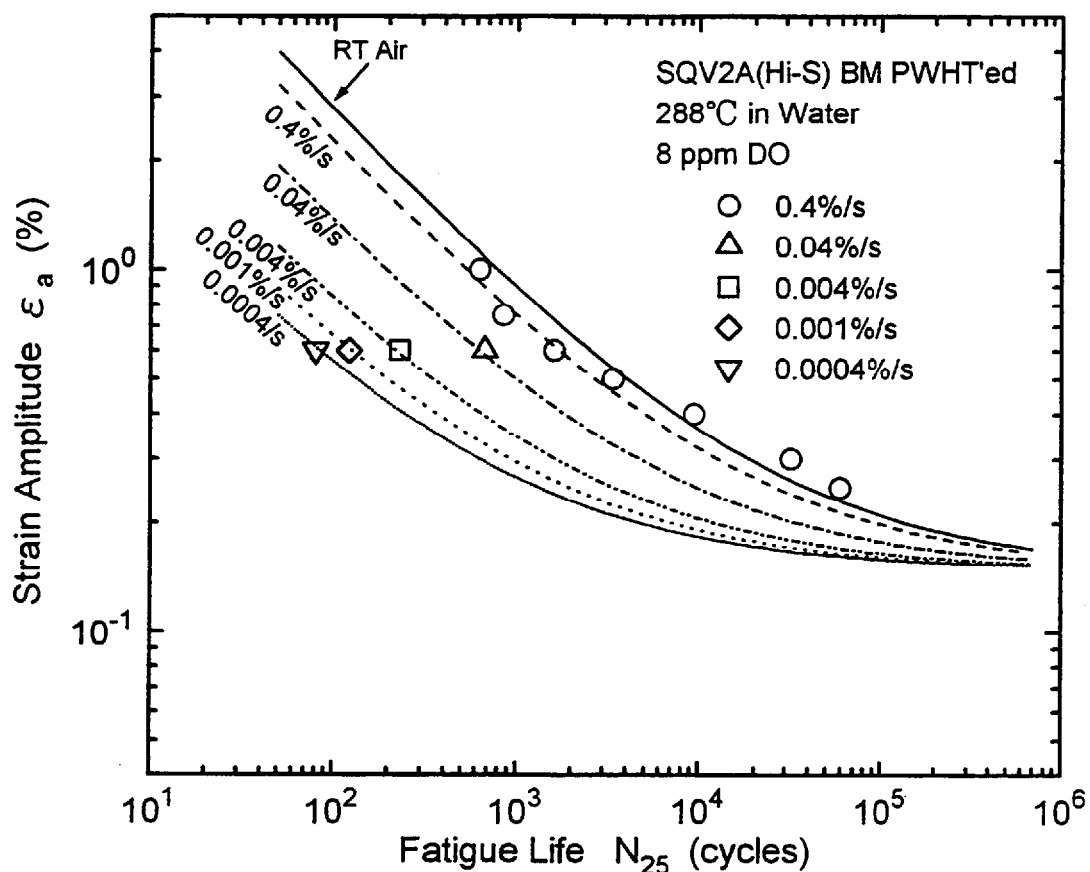


Fig. 2-41(11) Comparison of predicted fatigue curves with test results for SQV2A(Hi-S) BM as PWHT in 288°C, 8 ppm DO water

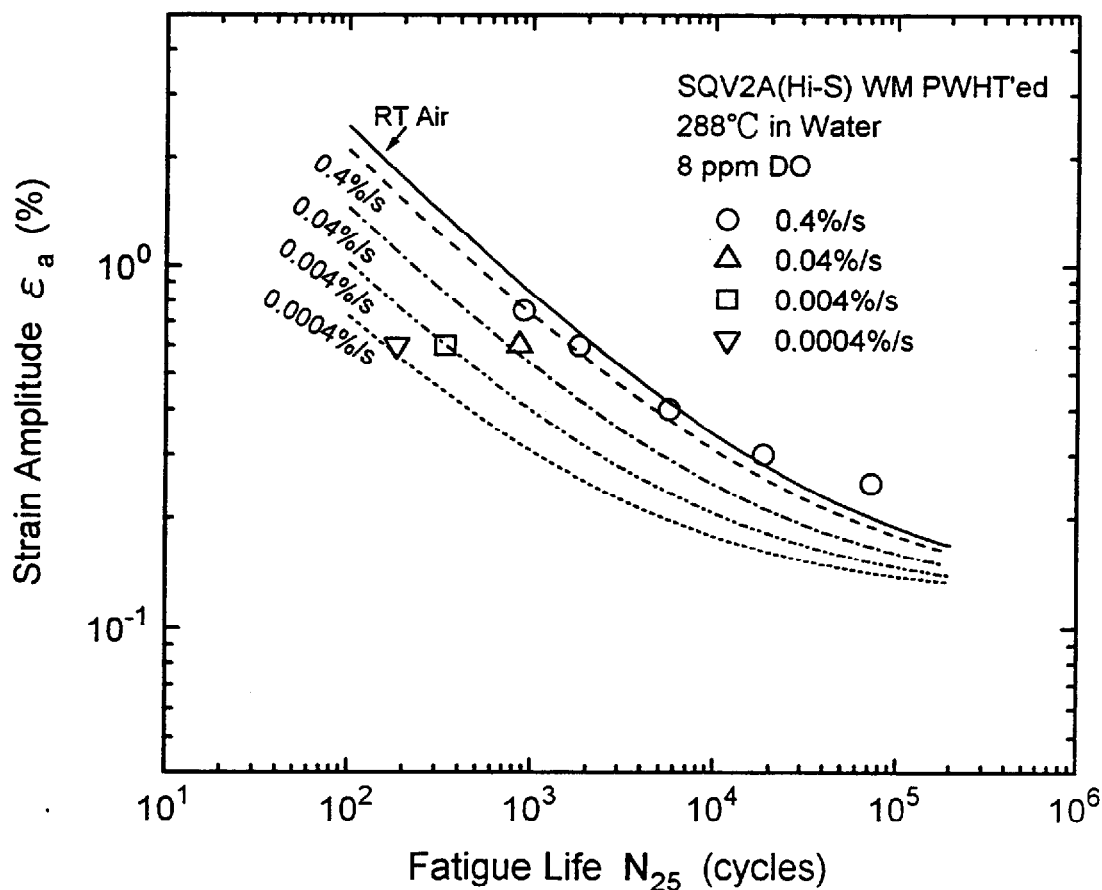


Fig. 2-41(12) Comparison of predicted fatigue curves with test results for SQV2A(Hi-S) WM as PWHT in 288°C, 8 ppm DO water

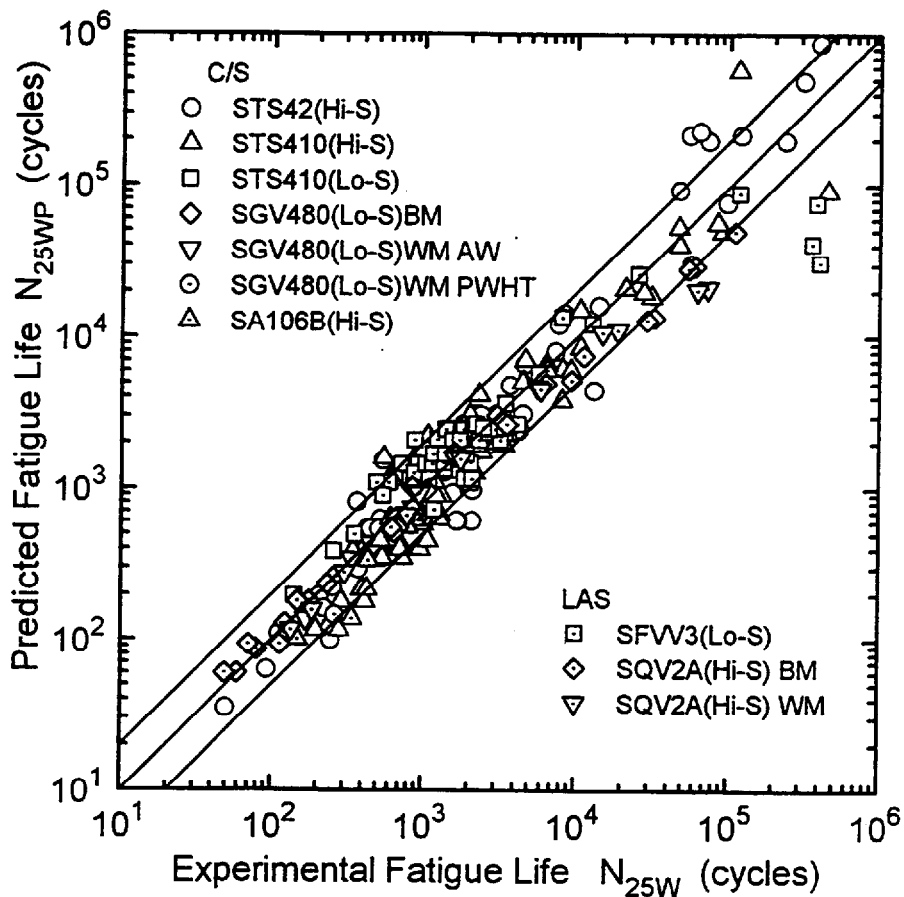


Fig. 2-42 Comparison between predicted fatigue life and test result for all materials in high temperature water (using tested P_{max})

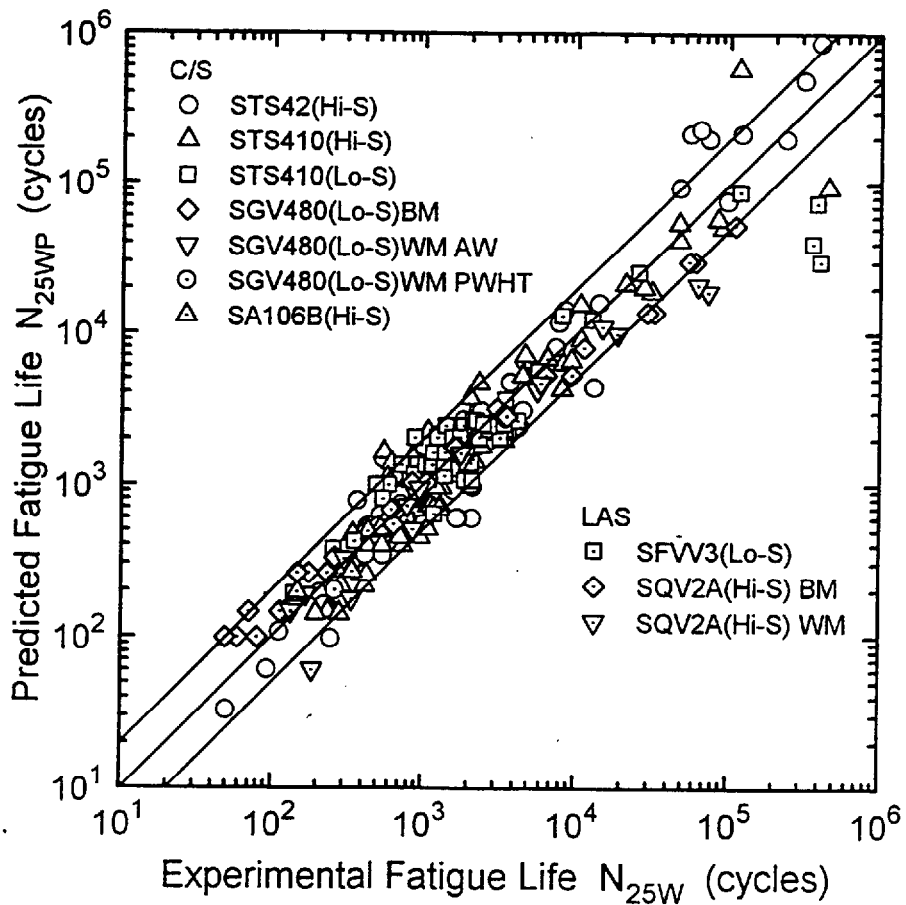


Fig. 2-43 Comparison between predicted fatigue life and test result for all materials in high temperature water (using calculated P_{max})

第3章 変動ひずみ速度条件での疲労寿命

3.1 目的

第2章で、高温水中での炭素鋼、低合金鋼の疲労寿命に及ぼすひずみ速度、温度、溶存酸素濃度の影響が定量的に評価され、また材料に依存した影響についても現象が明らかにされてきた。これらの結果を基に、材料、環境条件、ひずみ速度が決まれば寿命の予測ができる手法の提案が行われた。ただし、これらは全てひずみ速度が変動しない一定の条件での手法である。実プラントでは応力の変動を伴う過渡事象中にひずみ速度や温度条件が変動するのが普通である。このように条件が変動する場合の評価には第2章の手法では十分ではない。たとえば、過渡事象の一部で遅い速度がある場合、その速度で損傷を評価すると、累積損傷が著しく増大してプラントの設計が困難になる。また平均速度で評価した場合に非保守性がないか確認されていない。そこで筆者らは、種々のひずみ速度変動条件で高温水中での炭素鋼の疲労試験を実施し、その結果から、ひずみ速度変動条件下でのひずみ速度の影響を定量的に評価する手法を開発した。

3.2 供試材

本章における供試材料は、第2章の材料の一部である以下の2種類とした。

- ・ JIS G3455 STS410 (ASME SA333 Gr. 6相当) 炭素鋼管母材 (高S、高TS材)
- ・ ASME SA106B 炭素鋼管母材 (高S、高TS材)

化学成分と機械的性質は Table 2-1及び Table 2-2中に記載されている。

3.3 試験片

試験片形状、採取要領とも第2章と同じで、中実平滑丸棒試験片を用い、受入れ状態の管の肉厚中央から、試験片軸と管の軸を一致させて採取した。

3.4 試験方法

試験装置も第2章と同じで、完全両振軸ひずみ制御疲労試験を、加圧高温水が循環するオートクレーブ中で実施した。試験装置の概要を Fig. 2-4に示す。試験温度及び溶存酸素濃度は環境の影響が顕著な高温(290℃)、高酸素濃度(8または0.8 ppm)条件とした。変動ひずみ速度試験では、ひずみ波形をひずみ増加段階でステップ状に速度を変化させるステップ状変速波及び正弦波の疲労試験を実施して、波形の影響を調べた。

ステップ状変速試験では大部分は変速点が1点のみの2段ステップ試験であるが、一部変速点が2点の3段ステップ試験も実施した。また2段ステップ試験では第1段/第2段のひずみ速度が fast/slow の凸型変速試験と、逆に slow-fast 凹型変速試験を実施した。ひずみ速度は fast が0.4%/s、slow が0.004%/sを基本とし、変速点の位

置をパラメータとした。

3. 5 試験結果

STS410(Hi-S)について22本のステップ状変速試験と4本の正弦波試験、SA106-B材について6本のステップ状変速試験を実施した。得られた結果の内、STS410(Hi-S)のステップ状変速試験結果をTable 3-1(1)に、SA106-B材のステップ状変速試験結果をTable 3-1(2)に、STS410(Hi-S)の正弦波試験の結果をTable 3-1(3)にそれぞれ示す。これらの表には試験した波形の形状を参考に記した。また変速試験結果を評価する基礎データとなる定ひずみ速度での試験結果は、それぞれの材料について第2章のTable 2-5(2)及び2-5(8)に示す。

3. 6 考察

(1) 環境効果のないひずみ範囲の存在

炭素鋼、低合金鋼では高温水環境中でも疲労限は低下しないことから、環境効果にはひずみ振幅のしきい値(Threshold)が存在すると考えられる。このことはひずみ振幅がしきい値を越えても最小ひずみ側に環境効果が無い領域（例えば圧縮応力の作用下、あるいは応力が降伏点以下の領域）が存在する可能性を示唆する。このような領域が存在する場合は、プラントの評価の際にそれを考慮する必要がある。そこで環境効果のないひずみ範囲の存在を確認するため、一定ひずみ振幅(0.6%)で変速点の位置を変えた数種類のfast/slow凸形ステップ状変速波形での疲労試験を実施した。これらの試験では、ひずみ増加過程を2段階に分け、第一段階では0.4%/sの高ひずみ速度、第二段階では0.004%/sの低ひずみ速度とし、第一段階と第二段階のひずみ増加範囲の和が全ひずみ範囲となるようにした。また第一段と第二段ひずみ範囲の割合(変速点の位置)をパラメトリックに変化させた。

第2章で述べたように、高温水中では疲労寿命はひずみ速度に強く依存し、両者の間には式(2-1)の関係が存在する。

$$N_{25W} = D(\dot{\epsilon}_T)^P \quad (2-1)$$

ここで、 D は最小自乗法で求まった定数で、ひずみ速度が1%/sの時の疲労寿命に相当するとともに、同一振幅での室温大気中寿命にほぼ等しい。この性質を利用して、高温水中での各試験における疲労寿命減少の程度を示すパラメータとして疲労寿命減少係数 F_{en} を式(3-1)のように定義して導入した。

$$F_{en} = N_{25A} / N_{25W} \quad \text{or} \quad = D / N_{25W} \quad (3-1)$$

F_{en} のうち特に試験結果から直接得られたものを F_{entest} と記述する。式(2-1)の指数

項 P は第2章2.6(1)c.項で述べたようにひずみ振幅によっても異なる。ここでは各ひずみ振幅でひずみ速度変動の効果を確認するために、振幅別に速度の異なる定速度試験を実施して P を求めた。また同じ理由から式(3-1)においても室温大気中寿命 N_{25A} でなく各振幅ごとに式(2-1)で求めた D を用いることとした。定速試験結果も含めて解析の課程を材料別に Table 3-2(1)及び(2)に示す。ひずみ振幅別の P 、 D もこれらの表の欄外に記した。各試験データにおける F_{entest} は D と N_{25W} の比として求め、Table 3-2(1)及び(2)中に記した。

STS410(Hi-S)で、ひずみ振幅0.6%でのステップ状変速試験結果を、 F_{entest} と全ひずみ範囲 ($\Delta\epsilon$) に対する第一ステップ (高ひずみ速度) ひずみ範囲($\Delta\epsilon_1$)の割合($\Delta\epsilon_1/\Delta\epsilon$)との関係で Fig. 3-1に示す。試験した典型的なひずみ波形の例を Fig. 3-1の中に示す。図から分かるように F_{entest} は最小ひずみ(ϵ_{min} , $\Delta\epsilon_1/\Delta\epsilon=0$)から最大ひずみ(ϵ_{max} , $\Delta\epsilon_1/\Delta\epsilon=1.0$)まで直線的に変化していた。もし環境効果がない環境不感のひずみ領域が存在するならば、 F_{entest} の値は図中に破線で示したように最小ひずみ近傍の応力がある値 (例えば圧縮領域あるいは引張の降伏点) 以下の領域で飽和するはずである。しかしながら、実際には F_{entest} は最小ひずみから最大ひずみまで直線的に変化しており、環境不感のひずみ領域を考慮する必要がないことを示している。なおこの結果は SA106B 炭素鋼で類似の試験を実施し、圧縮の領域で環境不感帯があるとした Chopra らの報告[33]とは一致していない。

(2) 変動ひずみ速度と固定ひずみ速度での疲労寿命の相違

高温水中での疲労寿命はひずみ速度の関数であるため、変動ひずみ速度試験での寿命と固定ひずみ速度試験での寿命を直接比較するのは困難である。そこで1サイクルでの引張(ひずみ増加、 $\epsilon_{min} \rightarrow \epsilon_{max}$)に要する時間(Rise time、 t_r)をパラメータとして比較を試みた。各試験における t_r は Table 3-1(1)、(2)あるいは Table 3-2(1)、(2)中に示す。TS410(Hi-S)の変動ひずみ速度試験と固定ひずみ速度試験での試験結果を疲労寿命比(N_{25W}/N_{25A})と Rise time の関係で両対数表示で Fig. 3-2に示す。第2章で述べたように、高温水環境中では同一ひずみ振幅、定ひずみ速度のデータの寿命とひずみ速度の間には両対数表示で良好な直線関係がある。Rise time はひずみ速度の逆数であるから、ひずみ速度の代りに Rise time を用いれば傾きは逆になるが同様の直線関係が認められるはずである。Fig. 3-2において、0.3、0.4、0.6%の3種類のひずみ振幅の定ひずみ速度のデータが黒印で示されている。3種類のひずみ速度でデータが得られている0.6%の場合、やはり良好な直線関係が認められる。これらの状況から、データが2点しかない他の0.3、0.4%の場合も直線関係が成立していると判断し、各々の2データを直線で結んで表示した。

同図には変動ひずみ速度試験データを振幅別に白印で示した。変速試験データはいずれの場合も同一形状で黒シンボルの定速試験データを結ぶ直線より上(長寿命

側)に分布していた。このことは、定ひずみ速度試験での疲労寿命が同一 Rise time の疲労データの中で最も短寿命になることを示している。すなわち、実プラントでひずみ速度が変動する場合は、平均ひずみ速度(ひずみ範囲/Rise time)で評価すれば保守側の評価が出来ることになる。但し、2段ステップの変速試験結果を平均速度で評価した場合には、最大2倍程度保守側の評価(寿命を半分程度に予測)となる可能性がある。

ひずみ振幅0.6%の正弦波試験で得られた疲労試験結果を疲労寿命と周波数の関係で両対数表示で Fig. 3-3に示す。図から分かるように、寿命と周波数の間にも、ひずみ速度の場合と同様の良好な直線関係が見られた。この直線の関係式を同図中に示す。直線の傾きであり、高温水中での疲労寿命低下のひずみ速度依存性指数である式の指数項 P は0.223であり、同じひずみ振幅、環境条件での定ひずみ速度試験(三角波あるいは正鋸歯波)から得られた $P=0.435$ の半分程度であった。すなわち正弦波試験での寿命低下は定ひずみ速度試験より小さいことになる。

同じ試験結果を疲労寿命と Rise time の関係で両対数表示で Fig. 3-4に示す。同図には定ひずみ速度試験結果及び2段ステップ変速試験結果も示した。正弦波試験と定速試験での寿命の相違は Rise time が長くなるとともに増大し、Rise time が500 sec では正弦波試験の寿命は定速試験の寿命の3倍程度となった。このことは、連続的に速度が変わる実プラントでの疲労損傷を平均速度で評価した場合には過度に保守性を持たせてしまうことを示唆している。

(3) 有効ひずみ速度の概念と疲労寿命予測式の提案

変動ひずみ速度下でのひずみ速度の効果の定量的評価を試みる。

疲労寿命減少係数 F_{en} は式(3-1)と第2章の式(2-2)とから式(3-2)のように導かれる。

$$F_{en} = N_{25A} / N_{25W} = (\dot{\epsilon}_T)^{-P} \quad (3-2)$$

式(3-2)でわかるように P を与えられた場合、 F_{en} はひずみ速度のみの関数となる。ステップ状にひずみ速度を変化させた場合の疲労寿命をこの F_{en} を使って以下のように評価する。

- a. ひずみ増加課程を速度を変えたステップ数に分割する。
- b. 各ステップにおけるひずみ速度に見合った F_{en} を計算する。
- c. 各ステップでの F_{en} にそのステップでのひずみ増分($\Delta \epsilon_n / \Delta \epsilon$)を掛け合わせる。
- d. c項の積を ϵ_{min} から ϵ_{max} まで積分したものをそのひずみ変動における F_{en} とする。
- e. このようにして計算で求めた F_{en} を F_{encal} とする。

この手法を式で示すと式(3-3)となる。

$$F_{encal} = \sum_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} \{(\dot{\varepsilon}_T)^{-P} \times \Delta\varepsilon_n / \Delta\varepsilon\} \quad (3-3)$$

STS410(Hi-S)及び SA106B(Hi-S)の2鋼種について、各試験データから求めた F_{entest} と試験条件から算出された F_{encal} をそれぞれ Table 3-2(1)及び3-2(2)に併記する。STS410(Hi-S)の場合、ひずみ振幅0.3%で F_{entest} が F_{encal} より多少大きくなる例が見られたが、全体的にはステップ状変速試験での F_{entest} と F_{encal} とは良く一致していた。また SA106B(Hi-S)の場合は、多少ばらつきが大きくなったが、やはり F_{entest} と F_{encal} はある程度の良い一致を示していた。

同一 Rise time を有する3種類の異なった波形 (fast/slow 凸状波、slow/fast 凹状波及び定速鋸歯波)の試験から得られた疲労データを Table 3-3(1)及び3-3(2)に集めて、波形の影響を比較した。同表には F_{entest} と F_{encal} も併記した。STS410(Hi-S)でひずみ振幅が0.6%と0.3%の場合は、fast/slow 凸状波の疲労寿命は slow/fast 凹状波のそれと良く一致したが、ひずみ振幅が0.4%の場合は、fast/slow 凸状波の疲労寿命は slow/fast 凹状波のそれよりやや短かった。この傾向は SA106B(Hi-S)の場合にも見られ、ここではいずれの振幅でも凸状波の疲労寿命が凹状波のそれよりやや短くなった。

Table 3-2(1)及び3-2(2)に記した全てのステップ状変速ひずみ速度疲労データの F_{entest} と F_{encal} の関係を Fig. 3-5に示す。比較的小さなひずみ振幅の場合に、 F_{entest} が F_{encal} よりやや大きくなる傾向が見られるが、全体的にはこれらの関係は1:1の直線の周囲に分布しており、 F_{entest} と F_{encal} の間には良い一致が見られると言える。

前に述べたように、ステップ状変速試験の場合、パラメータ F_{encal} は、式(3-3)に示すように各ステップでのひずみ速度での環境効果とひずみ増分との積を最小ひずみから最大ひずみまで積分して算出される。これをより一般化し、単位時間当たりの平均ひずみ速度での環境効果とその間のひずみ増分の積を最小ひずみから最大ひずみまで積分することによって、任意の連続的にひずみ速度が変化する場合の F_{encal} の計算が可能となる。この式は式(3-4)で示される。

$$F_{encal} = \int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} ((\dot{\varepsilon}_T)^{-P} / (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})) d\varepsilon \quad (3-4)$$

この手法を修正 Rate Approach 法と名付ける。この方法は実プラントの過渡事象による疲労損傷における環境効果を評価する手法となり得る。

Fig. 3-4で示したように、比較的ひずみ振幅が小さい場合、 F_{encal} はしばしば非保守的予測を与える。そこでこのような非保守性を取り除くために、以下の方法を提案する。式(3-4)の F_{encal} は P 値が1.0 より小さい条件では、最小ひずみから最大ひずみまで一定速度で変化する場合に最も大きくなる。得られた試験データでは P 値は常に1.0 より小さい。それゆえ、平均ひずみ速度を用いる方法が保守的評価とな

る。平均ひずみ速度を用いた場合の F_{en} を F_{enav} とするとこのパラメータ F_{enav} は式 (3-5) で示される。

$$F_{enav} = (\Delta\varepsilon / t_T)^{-P} \quad (3-5)$$

ステップ状変速試験結果から計算された F_{enav} の値は全て Table 3-2(1) 及び (2) に併記する。また F_{enav} と F_{entest} の関係を Fig. 3-6 に示す。表及び図からわかるように F_{enav} は F_{encal} より大きくなるので、 F_{entest} に対する非保守性は減少する。この手法はより簡便であるが、ある条件では過度に保守的な評価となることがある。Table 3-2(3) には正弦波の試験結果から計算した F_{enav} を示した。遅い速度の試験において、それは過度に保守的値を与えた。

本研究成果とは直接関係はないが、ここで示した修正 Rate Approach 法がひずみ速度の変動だけでなく温度の変動に対しても有効な評価法であることが他の研究者 (金崎ら [42、43]) によって報告されている。

3. 7 まとめ

本章で得られた結論をまとめて以下に示す。

- (1) 0.6% を越えるひずみ範囲では、環境不感のひずみ領域が最低ひずみの近傍に存在せず、また疲労寿命への環境の効果は最小ひずみから最大ひずみまでのいずれの領域でも同様であった。
- (2) 単位時間内での平均ひずみ速度での環境効果とひずみ増分との積を最小ひずみから最大ひずみまで積分して算出される F_{encal} と試験結果から求まる F_{entest} との間に、比較的良好な一致が見られた。この手法は修正 Rate Approach 法と名付けられ、実際の過渡事象における環境効果を詳細に評価する手法として提案される。この一般式は以下で与えられる。

$$F_{encal} = \int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} ((\dot{\varepsilon}_T)^{-P} / (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})) d\varepsilon$$

- (3) 上昇過程のひずみ速度一定試験から得られた環境疲労寿命は、同一の rise time のデータの中で最も短寿命になる傾向である。計算においても、 F_{encal} は、 P が 1.0 より小さい条件では、一定速度の時、最も大きな値となる。

Table 3-1(1) Fatigue test results for STS410(Hi-S) in stepwise strain rate test
Material: STS410(Hi-S) $R\epsilon = -1$

No.	Temp. °C	DO ppm	Strain Rate (%/s)				Strain (%)			σ_a MPa	Rise Time t_r s	N25 Cycles
			$\dot{\epsilon}_{T1}$	$\dot{\epsilon}_{T2}$	$\dot{\epsilon}_{T3}$	$\dot{\epsilon}_C$	ϵ_a	ϵ_1	ϵ_2			
1	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.6	0.527	-	417	21	1426
2	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.6	0.5		403	28	1056
3	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.6	0.491		409	30	1085
4	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.6	0.4		415	53	754
5	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.6	0.4		417	53	795
6	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.6	0.2		418	102	686
7	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.6	0		431	152	496
8	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.6	-0.1		430	176	438
9	288	8	0.4	0.04	-	0.4	0.6	-0.2		415	21	942
10	288	8	0.4	0.004	0.4	0.4	0.6	-0.2	-0.127	400	21	1284
11	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.6	-0.2		450	201	328
12	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.6	-0.3		443	226	386
13	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.6	-0.3		438	226	326
14	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.6	-0.4		452	251	305
15	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.6	-0.491		458	273	286
16	288	8	0.004	0.4	-	0.4	0.6	-0.491		412	30	1146
17	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.4	0.327		405	20	1208
18	288	8	0.004	0.4	-	0.4	0.4	-0.327		408	20	1839
19	288	8	0.4	0.004	-	0.4	0.3	0.245		369	15	2684
20	288	8	0.004	0.4	-	0.4	0.3	-0.245		379	15	2746
21	288	0.8	0.4	0.004	-	0.4	0.4	0.327		414	20	1460
22	288	0.8	0.004	0.4	-	0.4	0.4	-0.327		407	20	2265

Table 3-1(2) Fatigue test results for SA106B(Hi-S) in stepwise strain rate test
Material:SA106-B(Hi-S) $R\epsilon=-1$

No.	Temp. °C	DO ppm	Strain Rate (%/s)				Strain (%)			σ_a MPa	Rise Time	N25 Cycles
			$\dot{\epsilon}_{T1}$	$\dot{\epsilon}_{T2}$	$\dot{\epsilon}_{T3}$	$\dot{\epsilon}_C$	ϵ_a	ϵ_1	ϵ_2		t_r (s)	
1	288	8	0.4	0.004		0.4	0.6	0.491			30	378
2	288	8	0.004	0.4		0.4	0.6	-0.491			30	524
3	288	8	0.4	0.004		0.4	0.3	0.245			15	2975
4	288	8	0.004	0.4		0.4	0.3	-0.245			15	5320
5	288	0.8	0.4	0.004		0.4	0.4	0			101	418
6	288	0.8	0.004	0.4		0.4	0.4	0			101	682

Table 3-1(3) Fatigue test results for STS410(Hi-S) in sine wave strain rate test
Material:STS410(Hi-S) $R\epsilon=-1$

No.	Temp. °C	DO ppm	Wave Shape	Frequency Hz	Strain Amplitude	σ_a MPa	Rise Time	N25 Cycles
					ϵ_a %		t_r s	
1	288	8	Sine Wave	0.5	0.6	390	1	2160
2	288	8	Sine Wave	0.1	0.6	404	5	1575
3	288	8	Sine Wave	0.01	0.6	421	50	968
4	288	8	Sine Wave	0.001	0.6	451	500	536

Table 3-2(1) Results of data analysis on varying strain rate fatigue test
(STS410(Hi-S), 288°C, R=-1, wave shape:triangle, saw tooth, stepwise changed)

Test DO	Strain Amp. (%)			Strain Rate (%/s)				N _{25W}	*1	*2	*3	*4	
No.	ϵ_a	ϵ_1	ϵ_2	$\dot{\epsilon}_{T1}$	$\dot{\epsilon}_{T2}$	$\dot{\epsilon}_{T3}$	$\dot{\epsilon}_C$		t_T	F _{entest}	F _{encal}	F _{enav}	
ppm								cycles	(s)				
I-1	8	0.6	-	-	0.4	-	-	0.4	1875	3	1.47	1.49	-
I-9		0.6	-	-	0.4	-	-	0.4	1826	3	1.51	1.49	-
I-2		0.6	-	-	0.004	-	-	0.4	258	300	10.68	11.04	-
I-8		0.6	-	-	0.004	-	-	0.4	242	300	11.38	11.04	-
I-11		0.6	0.5	-	0.4	0.004	-	0.4	1056	28	2.61	2.29	3.92
I-7		0.6	0.4	-	0.4	0.004	-	0.4	754	53	3.65	3.08	5.17
I-10		0.6	0.4	-	0.4	0.004	-	0.4	795	53	3.47	3.08	5.17
I-3		0.6	0.2	-	0.4	0.004	-	0.4	686	102	4.02	4.67	6.91
I-6		0.6	0	-	0.4	0.004	-	0.4	496	152	5.55	6.27	8.20
I-13		0.6	-0.1	-	0.4	0.004	-	0.4	438	176	6.29	7.06	8.76
I-4		0.6	-0.2	-	0.4	0.004	-	0.4	328	201	8.40	7.86	9.28
I-12		0.6	-0.3	-	0.4	0.004	-	0.4	386	226	7.14	8.66	9.76
I-14		0.6	-0.3	-	0.4	0.004	-	0.4	326	226	8.45	8.66	9.76
I-5		0.6	-0.4	-	0.4	0.004	-	0.4	305	251	9.03	9.45	10.21
I-19		0.6	-0.491	-	0.4	0.004	-	0.4	286	273	9.63	10.18	10.60
I-15		0.6	0.527	-	0.4	0.004	-	0.4	1426	21	1.93	2.07	3.48
I-16		0.6	-0.2	-0.127	0.4	0.004	0.4	0.4	1284	21	2.15	2.07	3.47
I-17		0.6	-0.2	-	0.4	0.04	-	0.4	942	21	2.92	3.20	3.47
I-18		0.6	0.491	-	0.4	0.004	-	0.4	1085	30	2.54	2.36	4.05
I-20		0.6	-	-	0.04	-	-	0.4	624	30	4.42	4.06	-
I-21		0.6	-0.491	-	0.004	0.4	-	0.4	1146	30	2.40	2.36	4.05
I-27	8	0.4	-	-	0.4	-	-	0.4	4570	2.0	1.78	1.63	-
I-28		0.4	-	-	0.04	-	-	0.4	1654	20	4.92	5.58	-
I-34		0.4	-	-	0.004	-	-	0.4	393	200	20.70	19.08	-
I-32		0.4	0.327	-	0.4	0.004	-	0.4	1208	20	6.73	3.22	5.59
I-25		0.4	-0.327	-	0.004	0.4	-	0.4	1839	20	4.42	3.22	5.59
I-29		0.3	-	-	0.4	-	-	0.4	10627	1.5	1.69	1.76	-
I-30		0.3	-	-	0.04	-	-	0.4	2334	15	7.71	7.29	-
I-31		0.3	-	-	0.004	-	-	0.4	618	150	29.11	30.17	-
I-33		0.3	0.245	-	0.4	0.004	-	0.4	2684	15	6.70	4.36	7.32
I-26		0.3	-0.245	-	0.004	0.4	-	0.4	2746	15	6.55	4.36	7.32
I-41		0.25	-	-	0.4	-	-	0.4	46830	1.25	1.87	1.87	-
I-35		0.25	-	-	0.004	-	-	0.4	2032	125	43.02	42.95	-
I-42		0.6	-	-	0.004	-	-	0.004	236	300	11.67	11.04	-
I-37	0.8	0.4	-	-	0.4	-	-	0.4	4450	2.0	1.66	1.66	-
I-36		0.4	-	-	0.004	-	-	0.4	344	200	21.53	21.54	-
I-39		0.4	0.327	-	0.4	0.004	-	0.4	1460	20	5.07	3.48	6.00
I-38		0.4	-0.327	-	0.004	0.4	-	0.4	2265	20	3.27	3.48	6.00

*1: $t_T = \sum \Delta \epsilon_n / \dot{\epsilon}_{Tn}$

*2: $F_{entest} = D / N_{25W}$

*3: $F_{encal} = \sum (\dot{\epsilon}_{Tn})^{-P} \times \Delta \epsilon_n / \Delta \epsilon$

*4: $F_{enav} = (\Delta \epsilon / t_T)^{-P}$

DO	8	8	8	8	0.8
ϵ_a	0.6	0.4	0.3	0.25	0.4
D	2755	8134	17990	87426	7405
P	0.435	0.534	0.617	0.681	0.556

Table 3-2(2) Results of data analysis on varying strain rate fatigue test
(SA106-B, 288°C, R=-1, wave shape: triangle, saw tooth, stepwise changed)

Test No.	DO	Strain Amp.		Strain Rate (%/s)			N _{25W}	*1	*2	*3	*4
		ε_a	ε_1	$\dot{\varepsilon}_{T1}$	$\dot{\varepsilon}_{T2}$	$\dot{\varepsilon}_C$		t_T	F _{entest}	F _{encal}	F _{enav}
	ppm	(%)	(%)				cycles	(s)			
11	8	0.6	-	0.4	-	0.4	1185	3.0	1.53	1.51	-
10		0.6	-	0.004	-	0.4	148	300	12.24	12.06	-
7		0.6	-	0.04	-	0.4	433	30	4.18	4.27	-
6		0.6	0.491	0.4	0.004	0.4	378	30	4.79	2.47	4.27
9		0.6	-0.491	0.004	0.4	0.4	524	30	3.46	2.47	4.27
1	0.8	0.4	-	0.4	-	0.4	1765	2.0	1.39	1.39	-
2		0.4	-	0.004	-	0.4	342	200	7.16	7.14	-
5		0.4	-	0.00792	-	0.4	553	101	4.43	5.60	-
3		0.4	0	0.4	0.004	0.4	418	101	5.86	4.26	5.60
4		0.4	0	0.004	0.4	0.4	682	101	3.59	4.26	5.60
12	8	0.3	-0.245	0.004	0.4	0.4	5320	15	1.85	2.51	4.34
13		0.3	0.245	0.4	0.004	0.4	2975	15	3.30	2.51	4.34
14		0.3	-	0.004	-	0.4	797	150	12.34	12.33	-
15		0.3	-	0.4	-	0.4	6480	1.5	1.52	1.52	-

*1: $t_T = \Sigma \Delta \varepsilon_n / \dot{\varepsilon}_{Tn}$

*2: $F_{entest} = D / N_{25W}$

*3: $F_{encal} = \Sigma (\dot{\varepsilon}_{Tn})^{-p} \times \Delta \varepsilon_n / \Delta \varepsilon$

*4: $F_{enav} = (\Delta \varepsilon / t_T)^{-p}$

DO	8	0.8	8
ε_a	0.6	0.4	0.3
D	1812	2450	9832
P	0.451	0.356	0.455

Table 3-2(3) Results of data analysis on sine wave strain rate fatigue test
(STS410, 288°C, R=-1, wave shape:sine wave)

Test	ε_a	f	Stress at N			N ₂₅	*1	*2	*3
			N	$\sigma_{max.}$	$\sigma_{min.}$		t _T	F _{entest}	F _{enav}
No.	(%)	(Hz)	cycles	MPa	MPa	cycles	(s)		
I-43	0.6	0.5	1100	383	-396	2160	1	1.28	0.92
I-22	0.6	0.1	800	399	-409	1575	5	1.75	1.86
I-23	0.6	0.01	500	417	-425	968	50	2.85	5.07
I-24	0.6	0.001	300	445	-456	536	500	5.14	13.79

*1: $t_T = 1/2f$

*2: $F_{ent} = 2755/N_{25}$

*3: $F_{enav} = (\Delta \varepsilon / t_T)^{-0.435}$

Table 3-3(1) Effect of wave shape on fatigue life for fatigue data having the same rise time
(STS410(Hi-S), 288°C, R=-1, wave shape:triangle, saw tooth, stepwise changed)

Test No.	DO	Strain Amp. (%)			Strain Rate (%/s)				N _{25W}	*1	*2	*3	*4
		ε_a	ε_1	ε_2	$\dot{\varepsilon}_{T1}$	$\dot{\varepsilon}_{T2}$	$\dot{\varepsilon}_{T3}$	$\dot{\varepsilon}_C$		t _T	F _{entest}	F _{encal}	F _{enav}
		ppm							cycles	(s)			
I-15	8	0.6	0.527	-	0.4	0.004	-	0.4	1426	21	1.93	2.07	3.48
I-16		0.6	-0.2	-0.127	0.4	0.004	0.4	0.4	1284	21	2.15	2.07	3.47
I-17		0.6	-0.2	-	0.4	0.04	-	0.4	942	21	2.92	3.20	3.47
I-18	8	0.6	0.491	-	0.4	0.004	-	0.4	1085	30	2.54	2.36	4.05
I-20		0.6	-	-	0.04	-	-	0.4	624	30	4.42	4.06	-
I-21		0.6	-0.491	-	0.004	0.4	-	0.4	1146	30	2.40	2.36	4.05
I-28	8	0.4	-	-	0.04	-	-	0.4	1654	20	4.92	5.58	-
I-32		0.4	0.327	-	0.4	0.004	-	0.4	1208	20	6.73	3.22	5.59
I-25		0.4	-0.327	-	0.004	0.4	-	0.4	1839	20	4.42	3.22	5.59
I-30	8	0.3	-	-	0.04	-	-	0.4	2334	15	7.71	7.29	-
I-33		0.3	0.245	-	0.4	0.004	-	0.4	2684	15	6.70	4.36	7.32
I-26		0.3	-0.245	-	0.004	0.4	-	0.4	2746	15	6.55	4.36	7.32
I-39	0.8	0.4	0.327	-	0.4	0.004	-	0.4	1460	20	5.07	3.48	6.00
I-38		0.4	-0.327	-	0.004	0.4	-	0.4	2265	20	3.27	3.48	6.00

*1: $t_T = \Sigma \Delta \varepsilon_n / \dot{\varepsilon}_{Tn}$

*2: $F_{entest} = D / N_{25W}$

*3: $F_{encal} = \Sigma (\dot{\varepsilon}_{Tn})^{-P} \times \Delta \varepsilon_n / \Delta \varepsilon$

*4: $F_{enav} = (\Delta \varepsilon / t_T)^{-P}$

DO	8	8	8	8	0.8
ε_a	0.6	0.4	0.3	0.25	0.4
D	2755	8134	17990	87426	7405
P	0.435	0.534	0.617	0.681	0.556

Table 3-3(2) Effect of wave shape on fatigue life for fatigue data having the same rise time
(SA106-B, 288°C, R=-1, wave shape: triangle, saw tooth, stepwise changed)

Test No.	DO	Strain Amp.		Strain Rate (%/s)			N _{25W}	*1	*2	*3	*4
		ε_a	ε_l	$\dot{\varepsilon}_{T1}$	$\dot{\varepsilon}_{T2}$	$\dot{\varepsilon}_C$		t _T	F _{entest}	F _{encal}	F _{enav}
	ppm	(%)	(%)				cycles	(s)			
7	8	0.6	-	0.04	-	0.4	433	30	4.18	4.27	-
6		0.6	0.491	0.4	0.004	0.4	378	30	4.79	2.47	4.27
9		0.6	-0.491	0.004	0.4	0.4	524	30	3.46	2.47	4.27
5	0.8	0.4	-	0.00792	-	0.4	553	101	4.43	5.60	-
3		0.4	0	0.4	0.004	0.4	418	101	5.86	4.26	5.60
4		0.4	0	0.004	0.4	0.4	682	101	3.59	4.26	5.60
12	8	0.3	-0.245	0.004	0.4	0.4	5320	15	1.85	2.51	4.34
13		0.3	0.245	0.4	0.004	0.4	2975	15	3.30	2.51	4.34

*1: $t_T = \sum \Delta \varepsilon_n \dot{\varepsilon}_{Tn}$

*2: $F_{entest} = D/N_{25W}$

*3: $F_{encal} = \sum (\dot{\varepsilon}_{Tn})^{-P} \times \Delta \varepsilon_n / \Delta \varepsilon$

*4: $F_{enav} = (\Delta \varepsilon / t_T)^{-P}$

DO	8	0.8	8
ε_a	0.6	0.4	0.3
D	1812	2450	9832
P	0.451	0.356	0.455

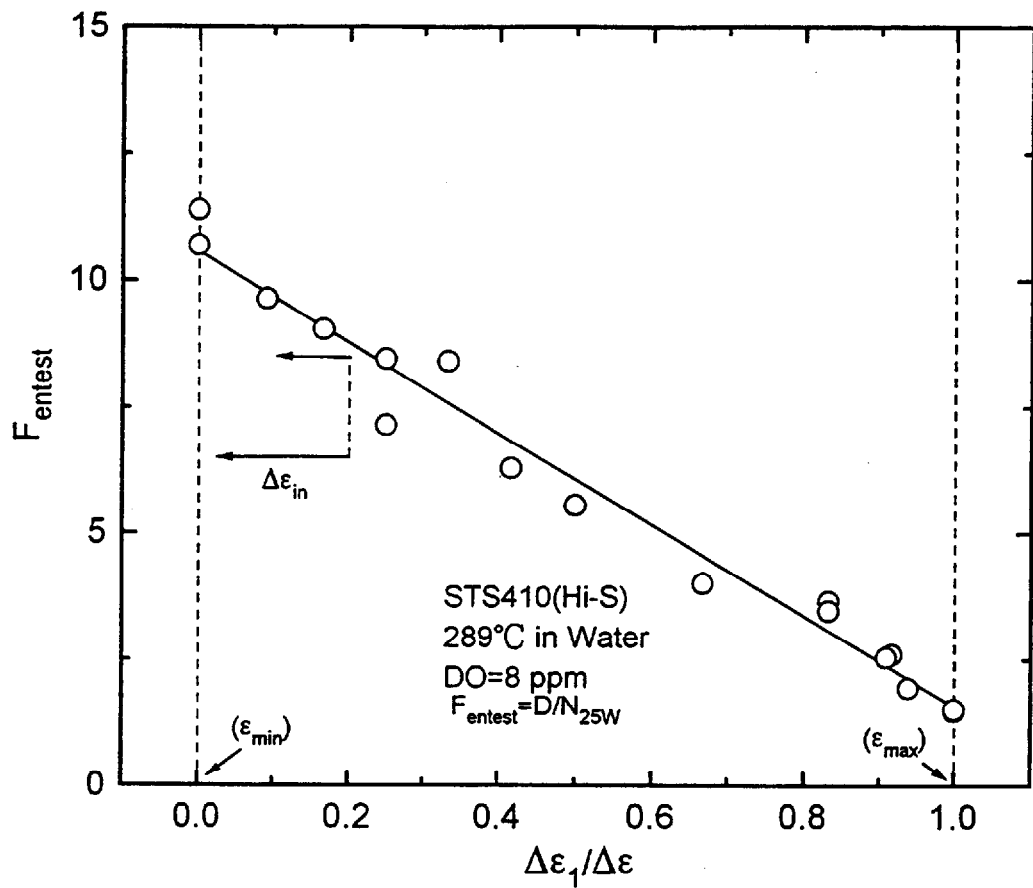


Fig. 3-1 Relation between $\Delta\epsilon_1/\Delta\epsilon$ and F_{entest}

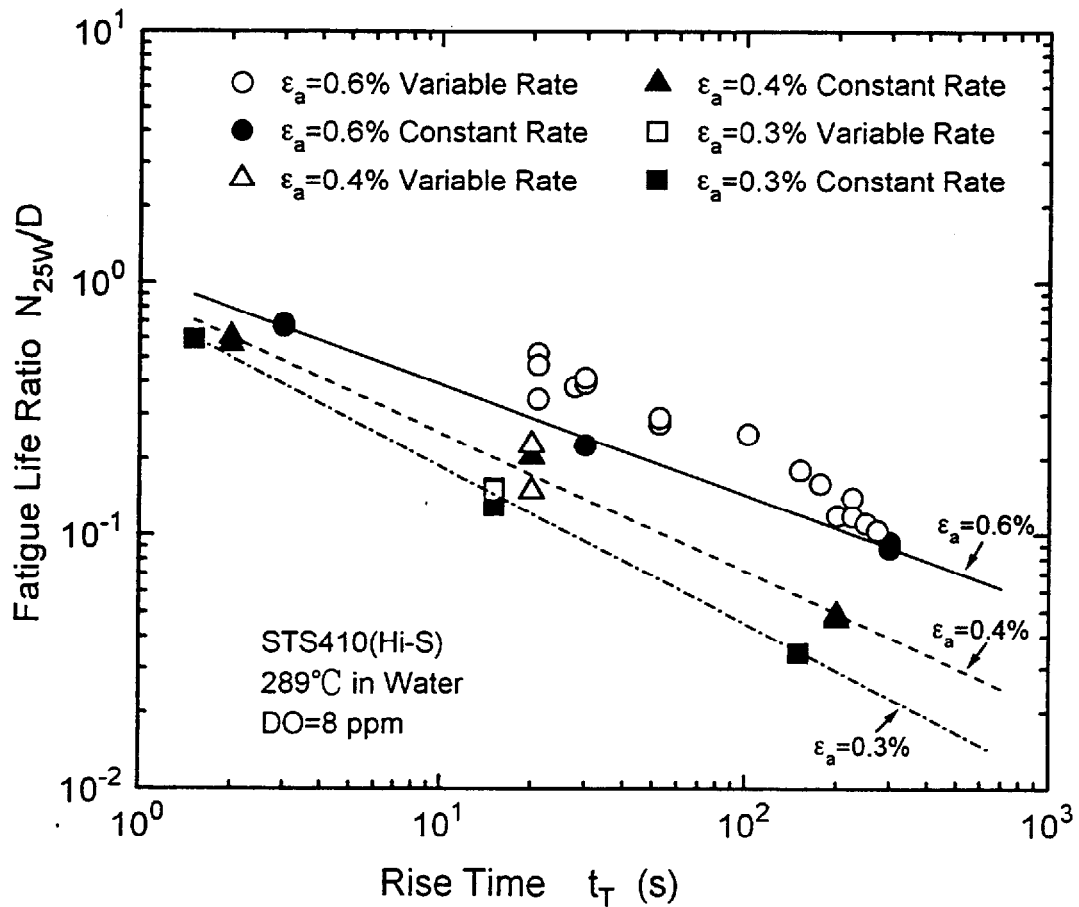


Fig. 3-2 Relation between rise time and fatigue life ratio

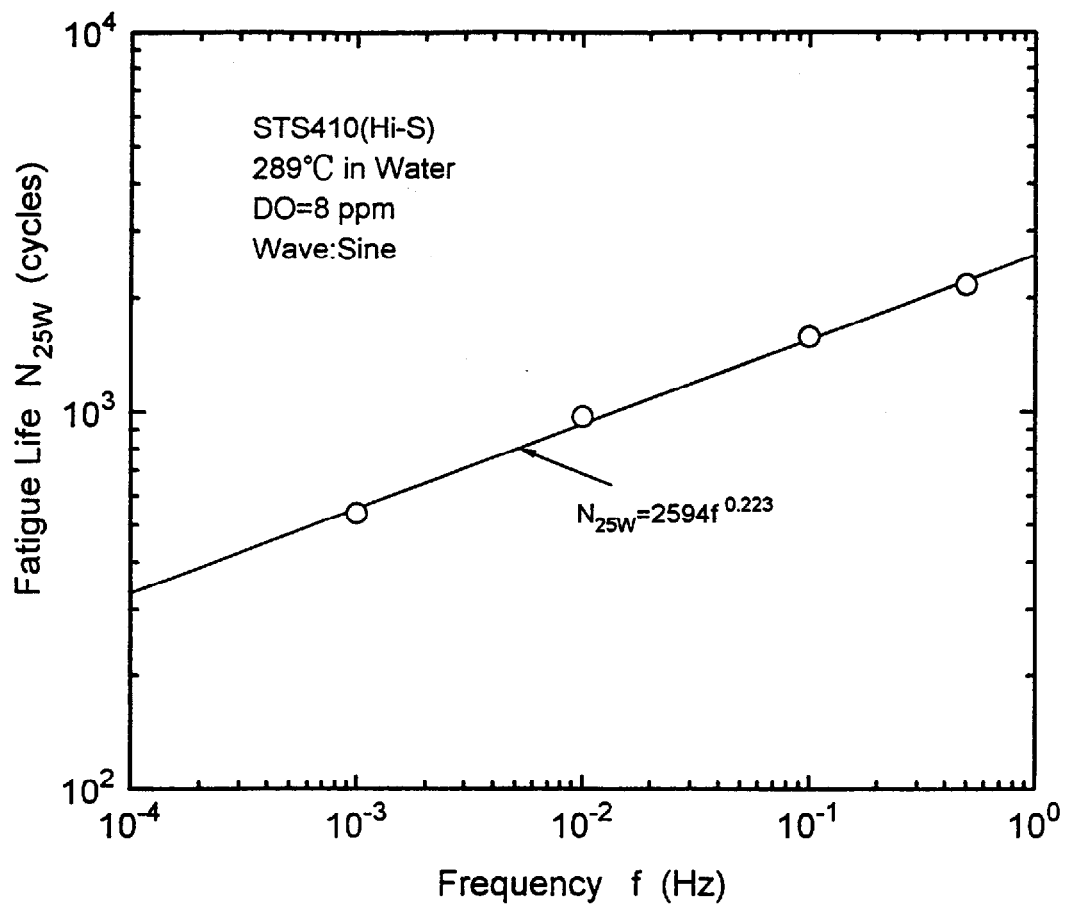


Fig. 3-3 Relation between frequency and fatigue life

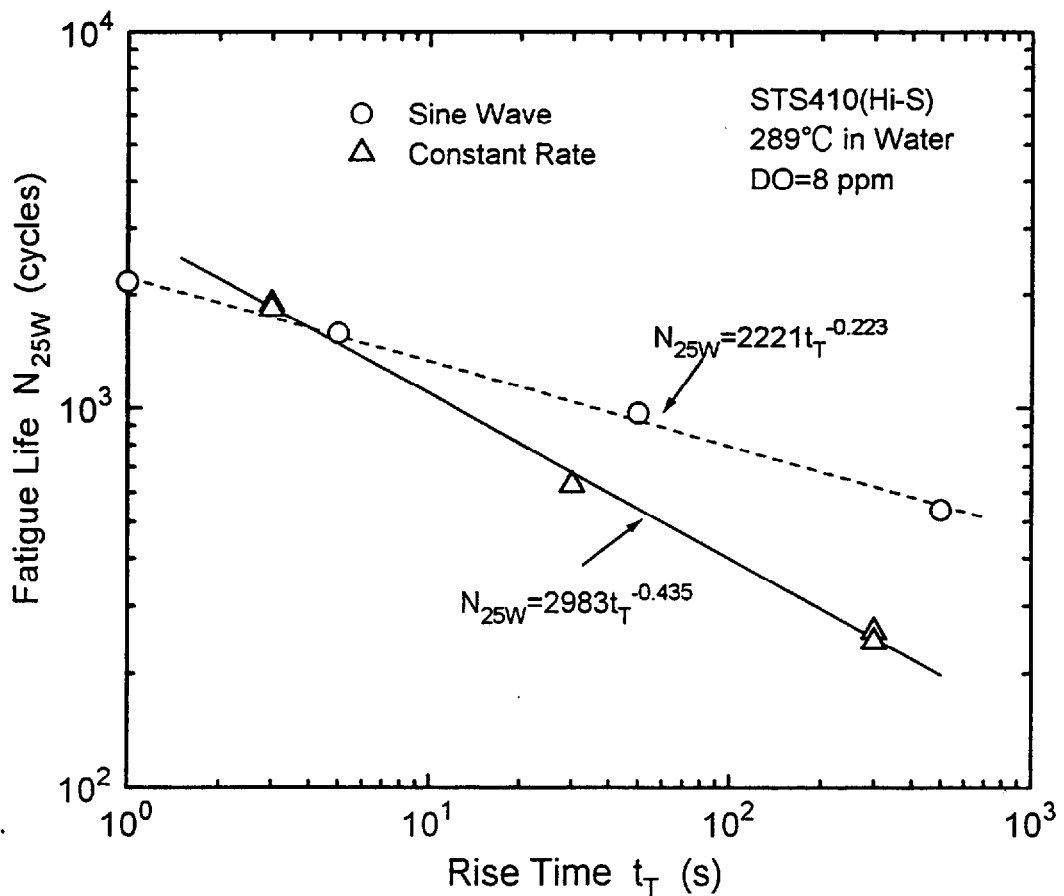


Fig. 3-4 Relation between rise time and fatigue life

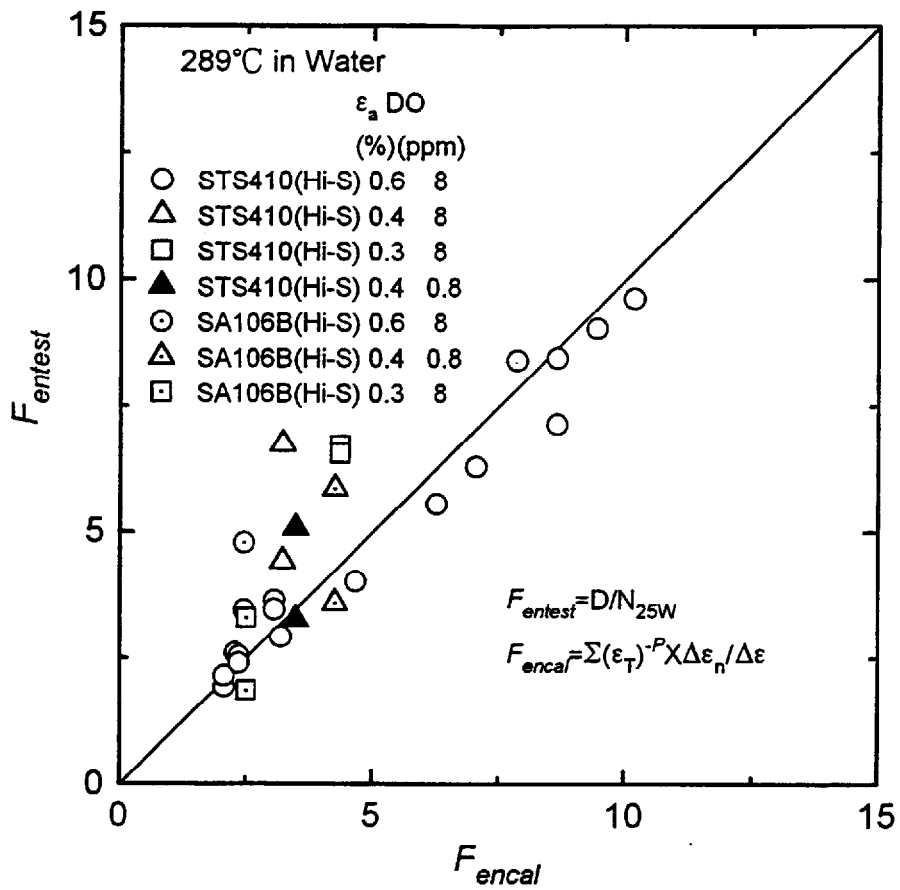


Fig. 3-5 Relation between F_{entest} and F_{encal} for varying strain rate fatigue data

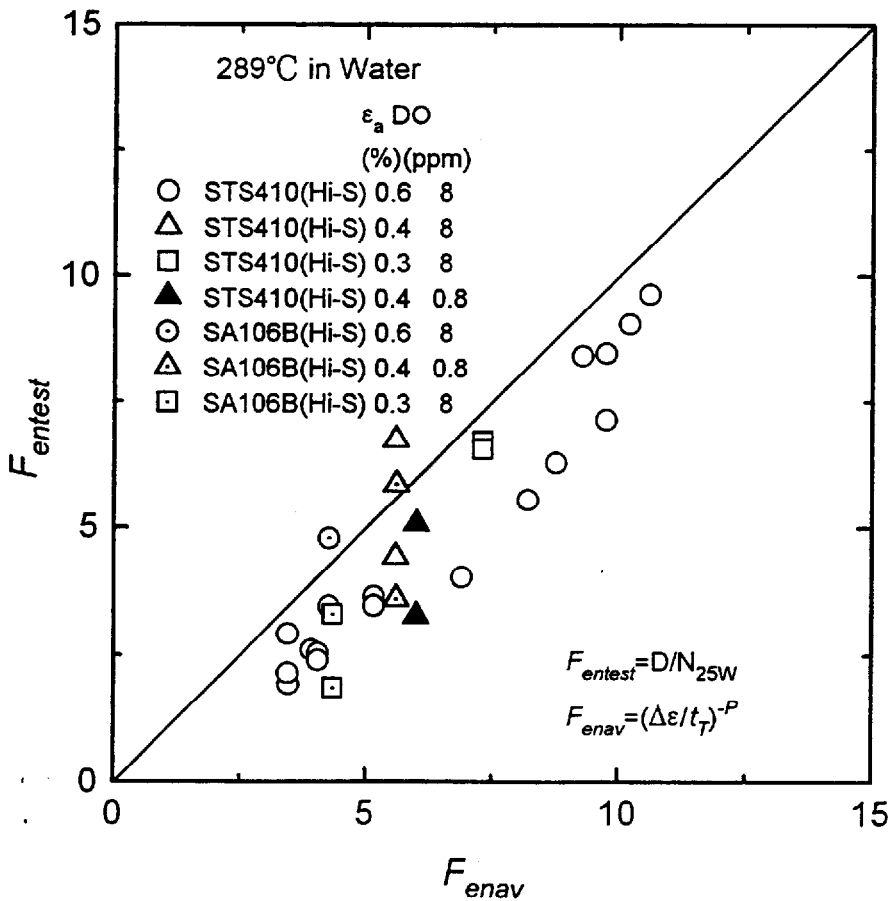


Fig. 3-6 Relation between F_{entest} and F_{enav} for varying strain rate fatigue data

第4章 データベース構築と疲労損傷評価法の提案

4.1 目的

第2章で、高温水中での炭素鋼、低合金鋼の疲労寿命に及ぼすひずみ速度、温度、溶存酸素濃度の影響が定量的に評価され、また材料に依存した影響についても現象が明らかにされ、第3章ではひずみ速度が変動する場合の高温水中疲労損傷の評価手法が提案された。しかしながら、これらの解析評価は限定された材料に対するものであった。このような評価手法を将来プラントの設計、余寿命評価等に適用してゆくためには材料データを増やし、提案式をより普遍化する必要がある。最近高温水中の疲労データが増え、試験材のヒート数も増えてきて、ヒートによる疲労特性の相違が大きいことが明らかになってきた。本章では、本研究で得られたデータに加え、これまでに国の内外で発表された炭素鋼及び低合金鋼の大気中及び高温水中での疲労データを集めてデータベースを作成し、これらのデータを基に、材料ヒートによるデータの変動も含めて、種々の因子を考慮して高温水中での疲労寿命を推定する一般式を提案する。さらにこの寿命予測手法と現行の ASME 設計疲労曲線を組合せて、高温水中での疲労損傷評価手法を提案する。

4.2 疲労データベース構築

これまでに原子力用材料の疲労データベースを構築してきた。最初は日本原子力研究所の委託で実施された、日本高圧力技術協会の DBA 臨時専門委員会(委員長：飯田國廣東大名誉教授、副委員長：小林英男東工大教授、幹事：筆者)において、1988年に製作された「日本の原子力用材料の疲労データベース」"FADAL"である。このデータベースはその時点で入手可能であった日本の原子力用材料の疲労データをほぼ網羅し、疲労寿命データと疲労き裂進展データに分けて整理されている。またデータベースの操作言語はベーシックが用いられた。"FADAL"の内容のうち疲労寿命データに関しては1992年に JAERI-M Report[50]として公開された。

1991年頃からの米国の強い提供要請に依って、"FADAL"の疲労寿命データの部分は筆者の手によって英文化され、さらに1988年以降のデータを追加して"JNUFAD"と名を変え、1992年に火力原子力発電技術協会の EFD 委員会(委員長：飯田國廣東大名誉教授、副委員長：朝田泰英東大教授、幹事：筆者)及び米国 PVRC の CLEE 委員会に提供された。PVRC は日本のデータに米国及び欧州のデータを加え、PVRC データベースを作成し、日本に提供した。

当初の"JNUFAD"は"FADAL"と同様ベーシックで記述されていたためメンテナンスとデータ解析が複雑であったので、その後、1995年に筆者自身によって、表計算ソフト EXCEL のブックタイプに移植され、さらに PVRC データベースの米国及び欧州のデータも加えて"JNUFAD Ver. II"となった。現在のものは、その後のデータを加えてメンテナンスしているものである。

”JNUFAD Ver. II”には多くの米国及び欧州のデータが含まれているが、高温水中のデータに限っては、古いデータは大分部がひずみ速度、溶存酸素濃度、水の電気伝導度といった重要な情報の一部が抜けていたり、曲げ試験のデータだったり、解析、評価に使えないと判断された。結局日本のデータが出た後に採取された ANL のデータのみを解析、評価の対象に加えることとした。

4. 3 室温大気中の疲労曲線

ここでの室温大気中の疲労曲線は高温水中疲労寿命の基準カーブとして設定する。従って、高温水中疲労データを採取したものと同一材料のデータを基本とした。データベース”JNUFAD Ver. II”の中から該当するデータを検索した結果、炭素鋼の室温大気中軸ひずみ制御疲労データは5 ヒート 47 データが、また低合金鋼の室温大気中軸ひずみ制御疲労データは20 ヒート 177 データが採録されていた。これらをそれぞれ Fig. 4-1及び Fig. 4-2にひずみ振幅－寿命の関係で示す。図中のヒートナンバーに対応する材料名、著者、出典を Table 4-1に示す。いずれの場合もデータは比較的狭いバンドで分布していた。最小自乗法で求めた炭素鋼、低合金鋼それぞれの材料のベストフィットカーブ (Stromeyer 式) は式(4-1)及び式(4-2)に示す。またカーブは各々の図中に示す。以後これらを炭素鋼、低合金鋼の室温大気中の基準疲労曲線とする。

$$\varepsilon_a = 25.71 N_A^{-0.490} + 0.113 \quad (\text{Carbon Steel}) \quad (4-1)$$

$$\varepsilon_a = 38.44 N_A^{-0.562} + 0.155 \quad (\text{Low alloy Steel}) \quad (4-2)$$

4. 4 高温水中の疲労曲線

前述のように”JNUFAD Ver. II”に含まれる米国及び欧州の高温水中データの多くが、重要な情報の欠落で解析、評価に使えず、結局 ANL のデータのみを日本データに加えて解析、評価することとした。

試験条件の記録が整った高温水中軸ひずみ制御疲労データは、炭素鋼で日本データが12ヒート227データ、米国データが2ヒート27データ、また低合金鋼で日本データが17ヒート291データ、米国データが2ヒート28データであった。これらをそれぞれ Fig. 4-3及び Fig. 4-4にひずみ振幅－寿命の関係で示す。図中の材料ヒートナンバーに対応する材料名、著者、出典を Table 4-2に示す。図中に参考として大気中データのカーブを示す。いずれの場合もデータは大気中カーブから短寿命側に非常に広い範囲に分散しており、バンドの幅は2桁程度となっている。これは試験条件によって寿命が大きく変動するためである。

(1) ひずみ速度の影響

第2章で述べたように、高温水中では、疲労寿命はひずみ速度に強く依存し、寿命の対数はひずみ速度の対数に比例して直線的に減少する傾向が認められている。この関係は樋口・飯田の指数則として知られており、式(4-3、2-1)で示される。

$$N_W = D(\dot{\epsilon}_T)^P \quad (4-3、2-1)$$

式(4-3、2-1)の指数項 P は疲労寿命のひずみ速度依存性を示す係数で、環境効果を最も端的に表すパラメータである。また係数 D はひずみ速度を1%/s に外装した時の疲労寿命であり、この値がその材料の同一振幅での室温大気中の寿命にほぼ等しいことが多くの材料で確認されている。そこで式(4-3、2-1)を式(4-4、2-2)のように書き換える。

$$N_W = N_A(\dot{\epsilon}_T)^P \quad (4-4、2-2)$$

式(4-4)の N_A に式(4-1)または式(4-2)で求まる大気中の疲労寿命を代入することによって、各々の高温水中データからパラメータ P が求められる。この際速度が速いデータはばらつきが大きいので、 $\dot{\epsilon}_T \leq 0.04\%/s$ のデータのみを用いた。この手法によって得た多くの P 値のデータを使って、 P に影響する種々の因子の再評価を試みた。

(2) P 値に及ぼすひずみ振幅及びヒートの影響

第2章で述べたように高温水中での疲労寿命はひずみ速度以外にも、温度と溶存酸素濃度に強く依存する。いずれも高い条件で寿命の低下は大きい。すなわち P 値が大きくなる。特に酸素濃度の影響は1 ppm 付近より高い領域で飽和する傾向にある。そこで P が最大となる($P=P_{max}$)温度約290°Cで酸素濃度(DO) ≥ 0.8 ppm の条件のデータのみを集めて、 P_{max} とひずみ振幅の関係で、炭素鋼について Fig. 4-5 に、低合金鋼について Fig. 4-6 にそれぞれ示す。これらの図は限定されたデータでプロットした第2章の Fig. 2-11 とはやや異なった傾向を示し、いずれの図も P_{max} は振幅の増加とともに減少する傾向が見られたが、データのばらつきも大きい。ばらつきはヒートの違いに因っている。 P 値は材料の硫黄含有量や引張強さに影響されるが[9]、ばらつきが大きく現状では定量的な評価は困難である。両図の結果についても、ひずみ振幅と材料因子の影響を定量的に分離することは困難である。それゆえ、ここでは簡単化のために材料因子及び振幅の影響は無視して、寿命推定のための材料別の P_{maxav} は平均値(炭素鋼：0.56、低合金鋼：0.496)を用いることとした。

(3) 温度及び溶存酸素濃度の影響

前項でも述べたように、 P 値はひずみ振幅と材料ヒートにも依存する。そこで、これらの影響を除去するために、各 P データをそのデータと同一材料、同一ひずみ振幅の P_{max} で除して P の比 (R_P) とし、温度と溶存酸素濃度の影響を評価した。 R_P は式(4-5、2-3)で示される。

$$R_P = P / P_{max} \quad (4-5, 2-3)$$

酸素濃度が 0.8 ppm より高い条件のデータ ($R_{P(hdo)}$) のみをあつめ、これらと温度の関係を Fig. 4-7 に示す。同図には炭素鋼と低合金鋼データを一緒にプロットした。Fig. 4-7 は第 2 章で限定されたデータに対して実施した同様の比較 Fig. 2-14 に比べてデータ点は多少増えているが $R_{P(hdo)}$ と温度の関係を変更するほどの所見はなく、これらの間の関係は第 2 章と同様に以下の式(4-6、2-4)をそのまま適用することとした。

$$R_{P(hdo)} = 0.198 \exp(0.00557 T) \quad (4-6, 2-4)$$

この関係を図中に曲線で示す。図中特に低合金鋼で下側にばらつくデータが見られるが、この曲線が両材料の上限領域のデータの傾向線として比較的良くデータと合う。

次に、温度が約 290°C 条件のデータ ($R_{P(htp)}$) のみをあつめ、これらと酸素濃度の関係を Fig. 4-8 に示す。同図には炭素鋼と低合金鋼データを一緒にプロットした。Fig. 4-8 は第 2 章で限定されたデータに対して実施した同様の比較 Fig. 2-15 に比べてデータ点は多少増えているが $R_{P(htp)}$ と酸素濃度の関係を変更するほどの所見はなく、以下の式(4-7、2-5)をそのまま適用することとした。

$$R_{P(htp)} = 0.3 \ln(DO(\text{ppm})) + 1.13 \quad (4-7, 2-5)$$

但し、 $0.2 \leq R_{P(htp)} \leq 1.0$

この関係を図中に折線で示す。図中やはり低合金鋼で下側にばらつくデータが見られるが、この曲線が両材料の上限領域のデータの傾向線として比較的良くデータと合う。

式(4-6)及び式(4-7)を統合して、任意の温度・酸素濃度における R_P が式(4-8、2-6)で与えられる。

$$R_P = 0.3 \ln(DO(\text{ppm})) + 1.13 \quad (4-8, 2-6)$$

但し、 $0.2 \leq R_P \leq 0.198 \exp(0.00557 T)$

Fig. 4-9に炭素鋼で得られたデータを R_P と酸素濃度の関係で、温度別にプロットして示す。同様に Fig. 4-10に低合金鋼における同様の関係を示す。両図には式(4-8)の関係を折れ線で示した。いずれの場合も、式(4-8)とデータの間にそこそこの一致が見られた。そこで、 R_P に及ぼす温度及び溶存酸素濃度の影響は炭素鋼と低合金鋼のいずれにおいても式(4-8)で評価することとした。

(4) 高温水中での疲労寿命の予測

炭素鋼の高温水中の任意の条件（ひずみ振幅、ひずみ速度、温度及び酸素濃度）での予測疲労寿命 N_{WP} とひずみ振幅の関係は、式(4-1)に式(4-4)及び式(4-5)を代入しさらに P_{max} として平均値0.56を入れた式(4-9)で与えられる。

$$\varepsilon_a = 25.71(N_{WP}(\dot{\varepsilon}_T)^{(-0.560 \times R_P)})^{-0.490} + 0.113 \quad (\text{Carbon steel}) \quad (4-9)$$

また、低合金鋼に関しては同様に式(4-2)に式(4-4)及び式(4-5)を代入しさらに P_{max} として平均値0.496を入れた式(4-10)で与えられる。

$$\varepsilon_a = 38.44(N_{WP}(\dot{\varepsilon}_T)^{(-0.496 \times R_P)})^{-0.562} + 0.155 \quad (\text{Low alloy steel}) \quad (4-10)$$

いずれの場合も、 R_P は式(4-8)で与えられる。

データベースにある全ての高温水中データについて、炭素鋼に関しては式(4-9)で、低合金鋼に関しては式(4-10)でもとめた予測寿命をそれぞれ試験で得られた寿命と比較して材料別に Fig. 4-11及び Fig. 4-12に示す。両図には1:1の直線とその両側にファクター5の直線を併記した。長寿命側の米国データの一部を除いて、ほとんどのデータはファクター5の範囲に入っていた。

高温水中での疲労寿命データから式(4-11)及び式(4-12)を使って、ひずみ速度1%/sにおける外挿疲労寿命を炭素鋼及び低合金鋼それぞれについて求めることが出来る。ひずみ速度1%/sの外挿寿命は室温大気中寿命に相当する。

$$N_{W1\%/s} = N_{II}(\dot{\varepsilon}_T)^{-(0.560 \times R_P)} \quad (\text{Carbon steel}) \quad (4-11)$$

$$N_{W1\%/s} = N_{II}(\dot{\varepsilon}_T)^{-(0.496 \times R_P)} \quad (\text{Low alloy steel}) \quad (4-12)$$

データベースにある全ての高温水中データについて、炭素鋼に関しては式(4-11)で、低合金鋼に関しては式(4-12)でもとめた $N_{W1\%/s}$ をひずみ振幅との関係でそれぞれ材料別に Fig. 4-13及び Fig. 4-14に示す。両図にはそれぞれの材料の室温大気中疲労曲線、ASME 設計疲労曲線(UTS ≤ 80 ksi)、平均応力効果を補正した ASME Mean Data Curve 及びこれを寿命で1/5した曲線を併記した。ASME Mean Data Curve は設計疲労曲線を応力で2倍、寿命で20倍し、その高い方を滑らかに結んで

求めた。これを寿命で1/5にした曲線は、ほとんどのデータに対して保守側のカーブとなった。従って、最も低いデータでも設計曲線に対してはなおファクター4程度の余裕があることになる。

ASME 設計疲労曲線が設定された当初、Mean Data Curve に対して寿命で20のファクターを適用した。この20は、以下のサブファクターの積として与えられた[4]。

データのばらつき：2
 サイズ効果：2.5
 表面粗さや試験環境の影響等：4

Fig. 4-13及び Fig. 4-14におけるデータのバンドは大きなヒート間のばらつきと環境効果のばらつきを含んでおり、ファクター8(=2×4)が考慮されるべきである。Mean Curve からのファクター5の低下は、これに比べて小さい。

平均応力効果を補正した ASME Mean Data Curve は、室温大気中曲線よりやや下に位置し、特に低ひずみ振幅側で差が大きくなる傾向であった。前者は昔の材料との疲労強度の差であり、後者は平均応力効果の補正の有無の差である。昔の材料の疲労強度と平均応力効果を考えると、ASME Mean Data Curve を基準にして、高温水中疲労寿命を推定すべきである。最小自乗法でフィットして求めたこの曲線の式は式(4-13)で示される。

$$\varepsilon_a = 21.981 N_{f,T}^{-0.465} + 0.050 \quad (4-13)$$

式(4-9)と式(4-10)の炭素鋼及び低合金鋼の室温大気中疲労式の代わりに式(4-13)を用いて最大平均応力下での高温水中の疲労式を作ると式(4-14)、式(4-15)となる。これらの式で予測される寿命は平均応力効果が最大の場合であり、 N_{WPmean} で表される。

$$\varepsilon_a = 21.98 (N_{WPmean} (\dot{\varepsilon}_T)^{(-0.560 \times R_p)})^{-0.465} + 0.050 \quad (\text{Carbon steel}) \quad (4-14)$$

$$\varepsilon_a = 21.98 (N_{WPmean} (\dot{\varepsilon}_T)^{(-0.496 \times R_p)})^{-0.465} + 0.050 \quad (\text{Low alloy steel}) \quad (4-15)$$

いずれの場合も、 R_p は式(4-8)で与えられる。

データベースにある全ての高温水中データについて N_{WPmean} を求め、 N_{WPmean} と試験結果の関係を炭素鋼及び低合金鋼に関してそれぞれ Fig. 4-15及び Fig. 4-16に示す。両図には1:1の直線とその両側にファクター5の2直線を併記した。これらの図では Fig. 4-11、Fig. 4-12に比べてデータ点が上にシフトし、特に長寿命側でそれが顕著となる。

現在のデータベースにある高温水中疲労データは全て平均応力が無い条件で採取

されており、高温水中での平均応力効果を検証することは出来ないが、この手法で予測した高温水中寿命に大きな非保守性は無いであろうと判断した。

4. 5 高温水中での疲労損傷評価法

本論文では高温水中での疲労損傷評価に、補正係数 F_{en} の適用を提案する。この係数は式(4-16)で定義され、材料別に式(4-17)、式(4-18)で与えられる。

$$F_{en} = N_{\cdot A} / N_{\cdot \Pi} = (\dot{\epsilon}_T)^{-P} \quad (4-16, 3-2)$$

$$F_{en} = (\dot{\epsilon}_T)^{-0.560 \times R_p} \quad (\text{Carbon steel}) \quad (4-17)$$

$$F_{en} = (\dot{\epsilon}_T)^{-0.496 \times R_p} \quad (\text{Low alloy steel}) \quad (4-18)$$

いずれの場合も、 R_p は式(4-8)で与えられる。

係数 F_{en} は通常のコードの手法と現行の設計疲労曲線から求めた累積疲労損傷 UF に乗じて評価する。従って、設計疲労曲線自体は現行のものを用いる。割増式(4-17)、式(4-18)はひずみ速度、温度、酸素濃度が一定の場合に算出可能である。しかしながら、実プラントの過渡事象ではこれらは時間と共に変化する。この場合、温度とひずみの時間履歴があるのなら、第3章で述べた修正レートアプローチ法によって詳細評価が可能である。時間履歴がない場合は想定される平均値で評価することになる。

Fig. 17に高温水中での疲労損傷を実際に評価する場合のフローを示す。基本的には岸田及び筆者らが提案した手法である[44、45、46]。図中の F_{ensc} は環境効果を考慮した疲労解析を行うかどうかの判断をするスクリーニングの係数で、当面以下を提案する。

BWR : 10

PWR : 5

DO 濃度が0.01 ppm 以下のデータのみ選択して、Fig. 4-15、4-16と同じ関係でプロットして Fig. 4-18に示す。PWR 並の低 DO でもファクター5のバンドの下限近いデータが存在するので、PWR の F_{ensc} は5とする。 $S_{a,threshold}$ は平均応力が最大に作用した場合でも環境効果を受けない応力（ひずみ）振幅のシュレッシュホールドで、ASME Mean Data Curve の 10^6 サイクル寿命強度にほぼ相当する165 MPa (0.08%) と推定した。

これらの手法に基づいて、任意の水中条件での設計疲労曲線を引くことができる。一例として290℃、0.2 ppm DO、ひずみ速度0.001%/sでの炭素鋼と低合金鋼の設

計疲労曲線を Fig. 4-19に示す。同図には Chopra ら[56]が提案している同一条件での設計疲労曲線と現行の ASME Code の設計疲労曲線を比較として併記した。本論文での提案は、従来材を考慮して現行の設計線図を上側に書き換えることはしないため、長寿命側で Chopra らの提案曲線と異なるが、それを除くと比較的良く一致する。なお、Chopra らの提案は解析の元となったデータの大部分が筆者を中心とした日本のデータであるため、当然の結果といえる。

4. 6 まとめ

データベース JNUFAD に採録されている、炭素鋼254、低合金鋼319の高温水中データから、ひずみ速度、温度、酸素濃度の影響を定量化し、任意の条件での疲労寿命を予測する式をそれぞれの鋼種について提案した。その結果予測寿命はファクター5のバンド内に収まった。ヒートの違いと環境効果が重畳しているため、データバンドの幅は比較的広いが、ASME 設計クライテリアの寿命で20のファクターに含まれるとされる、材料のばらつき(ファクター2)と試験雰囲気の影響(ファクター4)の積(ファクター8)に比べれば小さい。

昔の材料の疲労強度と平均応力効果の補正を考えると、設計疲労曲線には現行の ASME Curve を採用するべきである。ひずみ振幅と繰返し数を現行の設計疲労曲線に当てはめて得られた累積疲労損傷 UF に、環境効果の割増係数 F_{en} を乗じて評価する、高温水中での疲労損傷評価手法を提案した。

Table 4-1 List of fatigue data source for air data

Sheet No.	Steel Code	Author	Sulfur (%)	Reference No.
CSA1	STS42	Higuchi	0.015	[15]
CSA2	STS42	Higuchi	0.014	[49]
CSA4	STS410	Nakao	0.012	[49]
CSA5	STS410	Abe	0.008	[51]
CSA6	STS410	Abe	0.016	[51]
LASA1	SFVV3	Nagata	0.003	[52]
LASA2	SQV2A	Nagata	0.007	[52]
LASA3	SQV2A	Toyama	0.001	[53]
LASA4	SQV2A	Toyama	0.001	[53]
LASA5	SQV2A	Toyama	0.001	[53]
LASA6	SQV2A	Toyama	0.001	[53]
LASA7	SQV2A	Toyama	0.001	[53]
LASA8	SQV2A	Narumoto	0.003	[54]
LASA9	SQV2A	Narumoto	0.002	[54]
LASA10	SFVV3	Narumoto	0.002	[54]
LASA11	SFVV3	Narumoto	0.003	[54]
LASA12	SFVV3	Iwadate	0.005	[50]
LASA13	SFVV3	Ikemoto	0.005	[50]
LASA14	SFVV3	Kou	0.005	[50]
LASA15	SFVV3	Nihei	0.005	[50]
LASA21	SFVV3	Nihei	0.003	[50]
LASA26	SFVV3	Higuchi	0.003	[50]
LASA27	SFVV2	Nakao	0.003	[49]
LASA28	SFVV2	Higuchi	0.003	[49]
LASA31	SQV2A	Iida	0.010	[50]
LASA32	SQV2A	Iida	0.010	[50]

Table 4-2 List of fatigue data source for water data

Sheet No.	Steel Code	Author	Sulfur (%)	Ref. No.
CSW1	SFVV1	Kitagawa	0.008	[50]
CSW2	STS42	Higuchi	0.015	[15]
CSW3	STS42	Higuchi	0.014	[49]
CSW5	STS410	Higuchi	0.012	[20]
CSW6	STS410	Nakao	0.012	[22]
CSW7	STS410	Higuchi	0.006	[20]
CSW8	SA106B	Higuchi	0.015	[20]
CSW9	STS480	Kanasaki	0.007	[22]
CSW10	SGV480	Higuchi	0.002	[17]
CSW11	SGV480 WM	Higuchi	0.006	[17]
CSW12	SGV480 WM	Higuchi	0.006	[17]
CSW13	SGV480 HAZ	Higuchi	0.002	[17]
UCSW1	SA106B	Chopra	0.015	[55]
UCSW2	SA106B	Chopra	0.015	[55]
LASW1	SFVV3	Nagata	0.003	[52]
LASW2	SQV2A	Nagata	0.007	[52]
LASW3	SFVV3	Kasai	0.003	[50]
LASW4	SFVV3	Endou	0.003	[50]
LASW5	SFVV3	Higuchi	0.003	[50]
LASW6	SFVV2	Nakao	0.003	[49]
LASW8	SQV2A	Nakao	0.010	[50]
LASW9	SQV2A	Nakao	0.010	[50]
LASW10	SQV2A Aged	Nakao	0.010	[50]
LASW11	SQV2A WM	Nakao	0.010	[50]
LASW12	SQV2A WM Aged	Nakao	0.010	[50]
LASW13	SQV2A	Higuchi	0.010	[50]
LASW14	SQV2A Aged	Higuchi	0.010	[50]
LASW15	SFVV3	Higuchi	0.010	[50]
LASW16	SQV2A WM	Higuchi	0.010	[50]
LASW17	SQV2A WM Aged	Higuchi	0.010	[50]
LASW18	SFVQ2A	Kanasaki	0.011	[22]
ULASW1	SA533B	Chopra	0.012	[55]
ULASW2	SA533B	Chopra	0.012	[55]

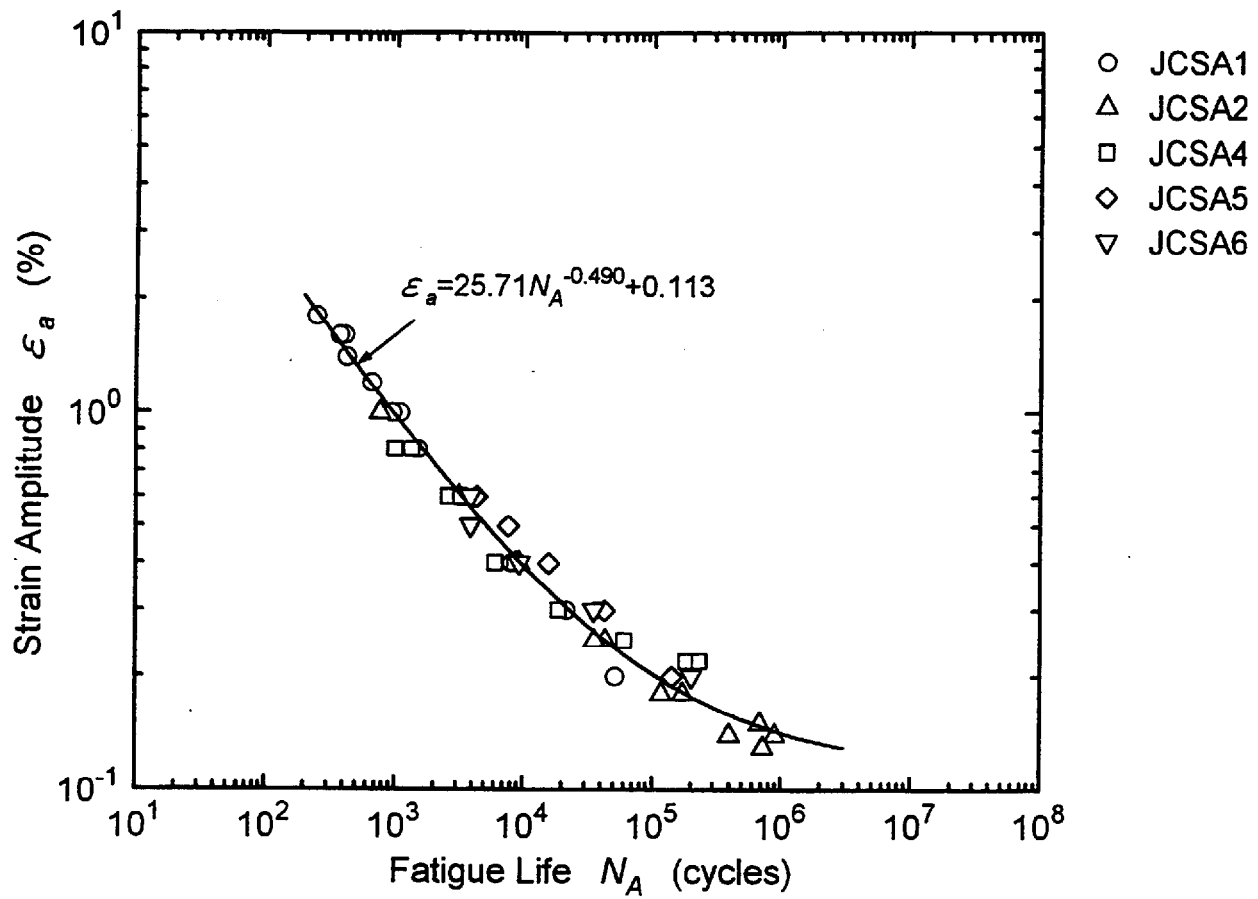


Fig. 4-1 ε_a - N relation for Japanese carbon steels in RT air

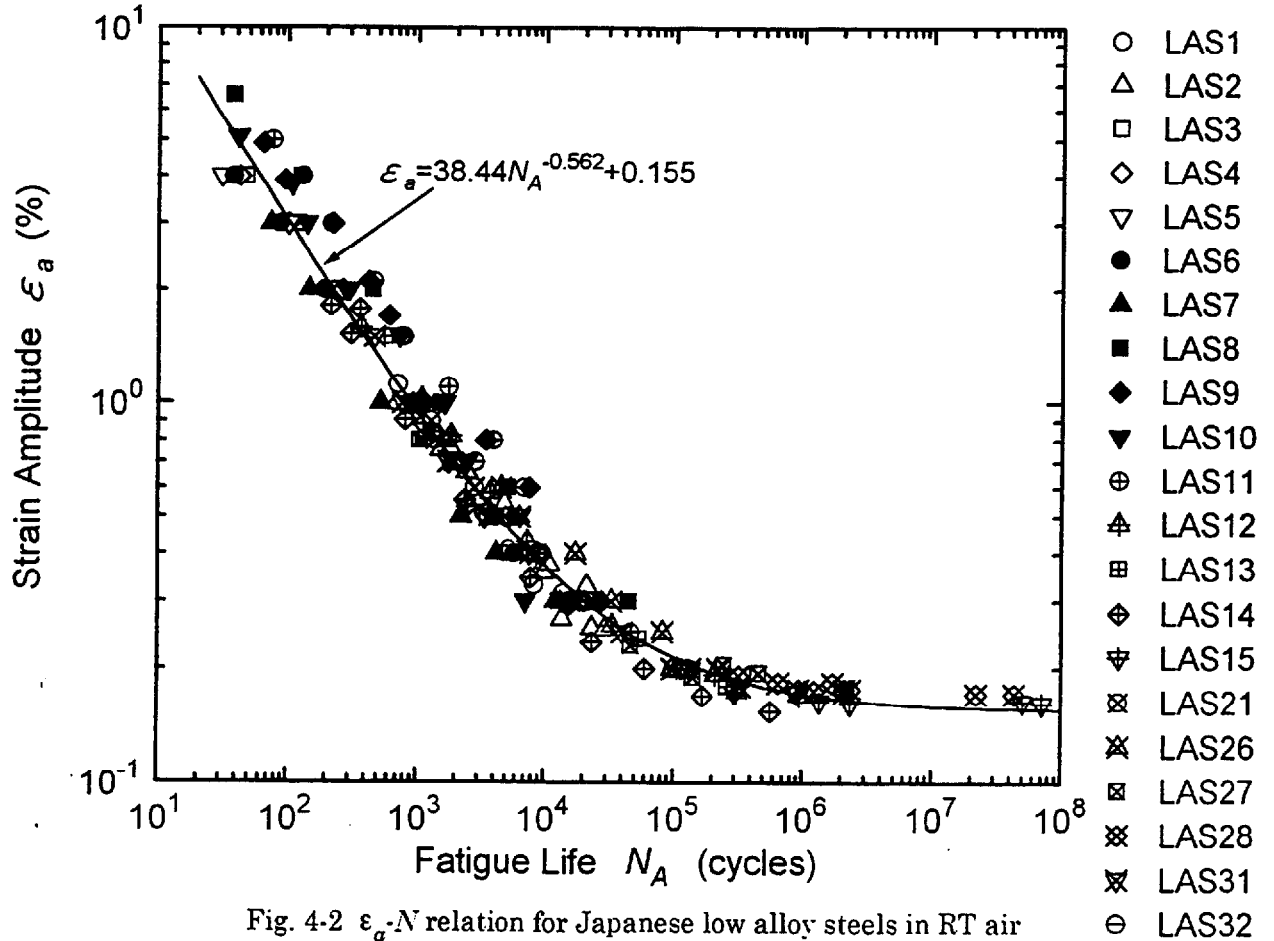


Fig. 4-2 ε_a - N relation for Japanese low alloy steels in RT air

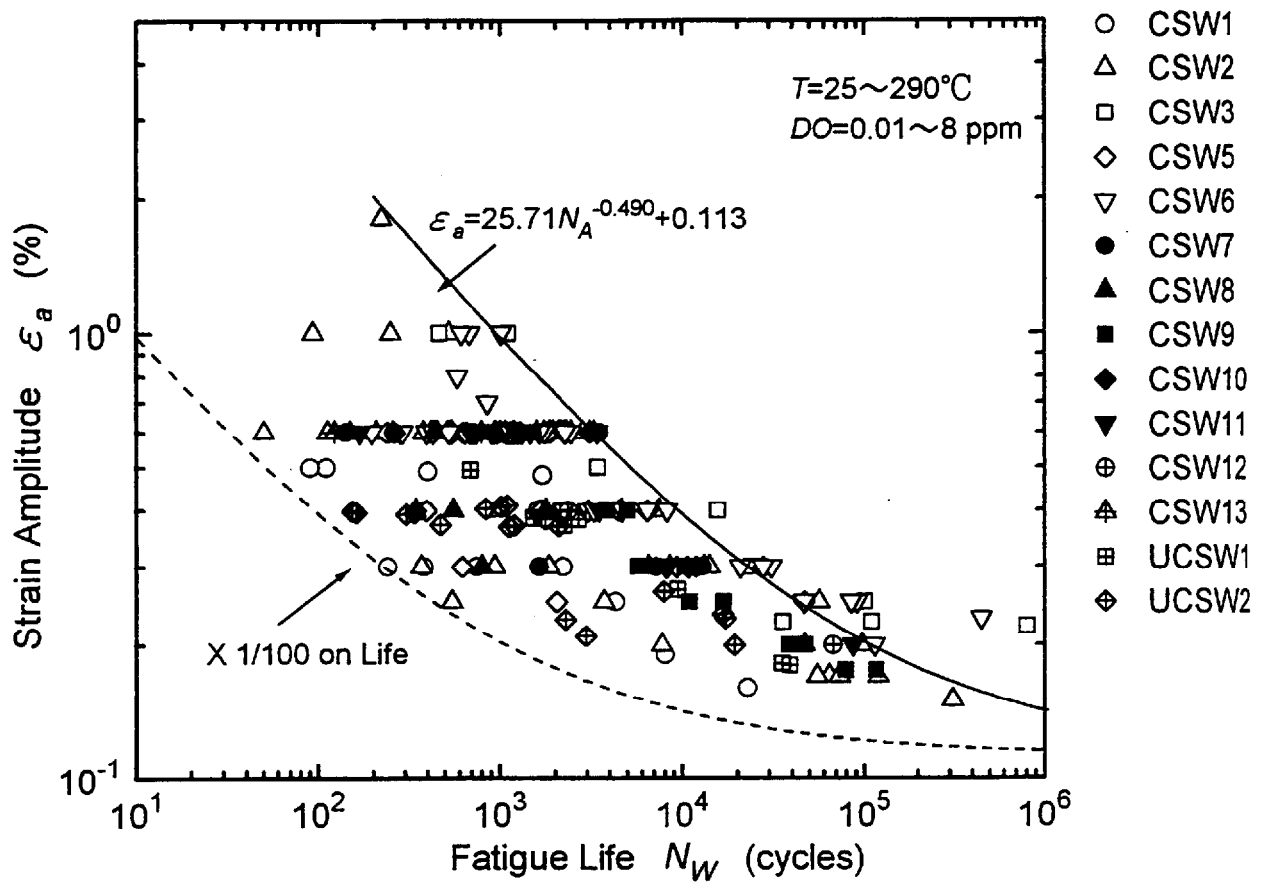


Fig. 4-3 ε - N relation for Japanese carbon steels in high temperature water

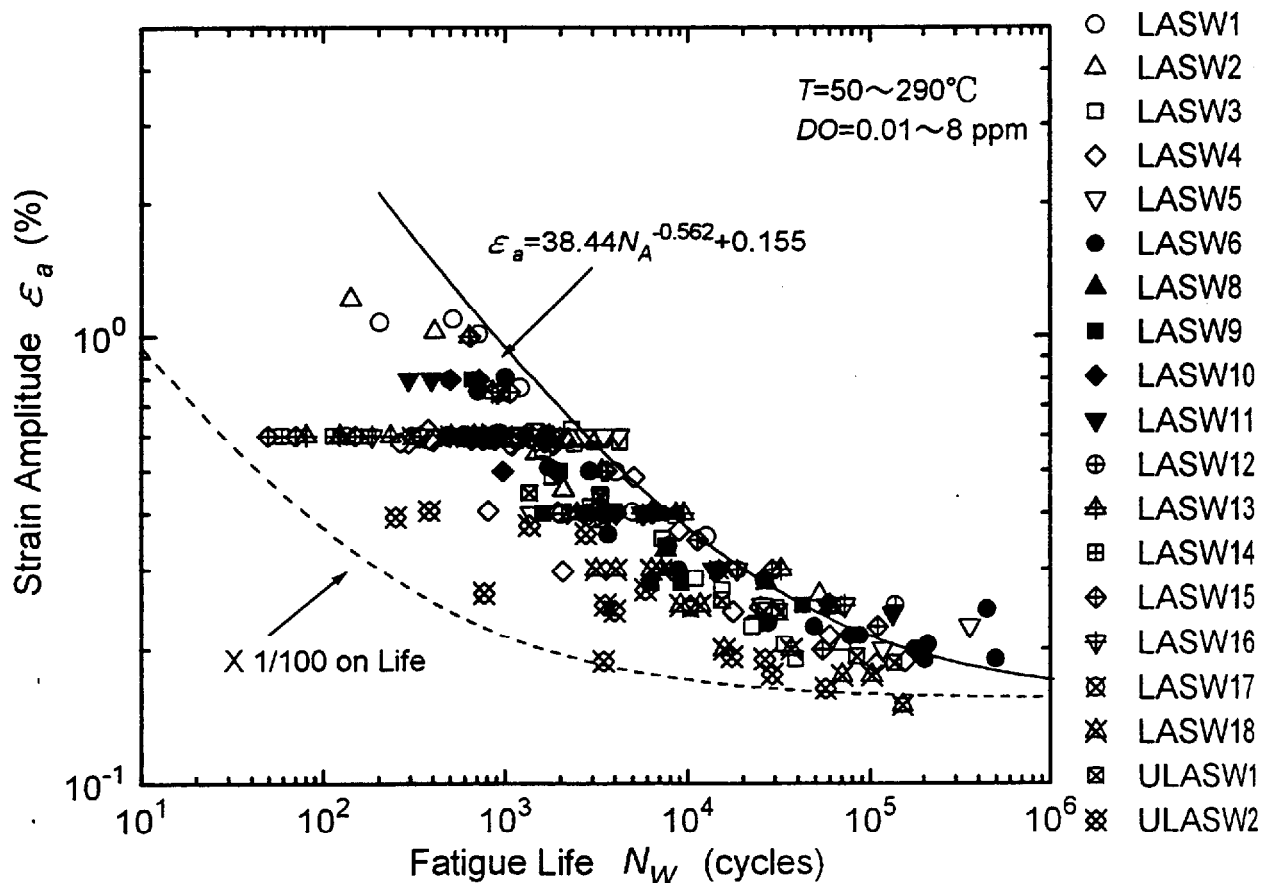


Fig. 4-4 ε - N relation for Japanese low alloy steels in high temperature water

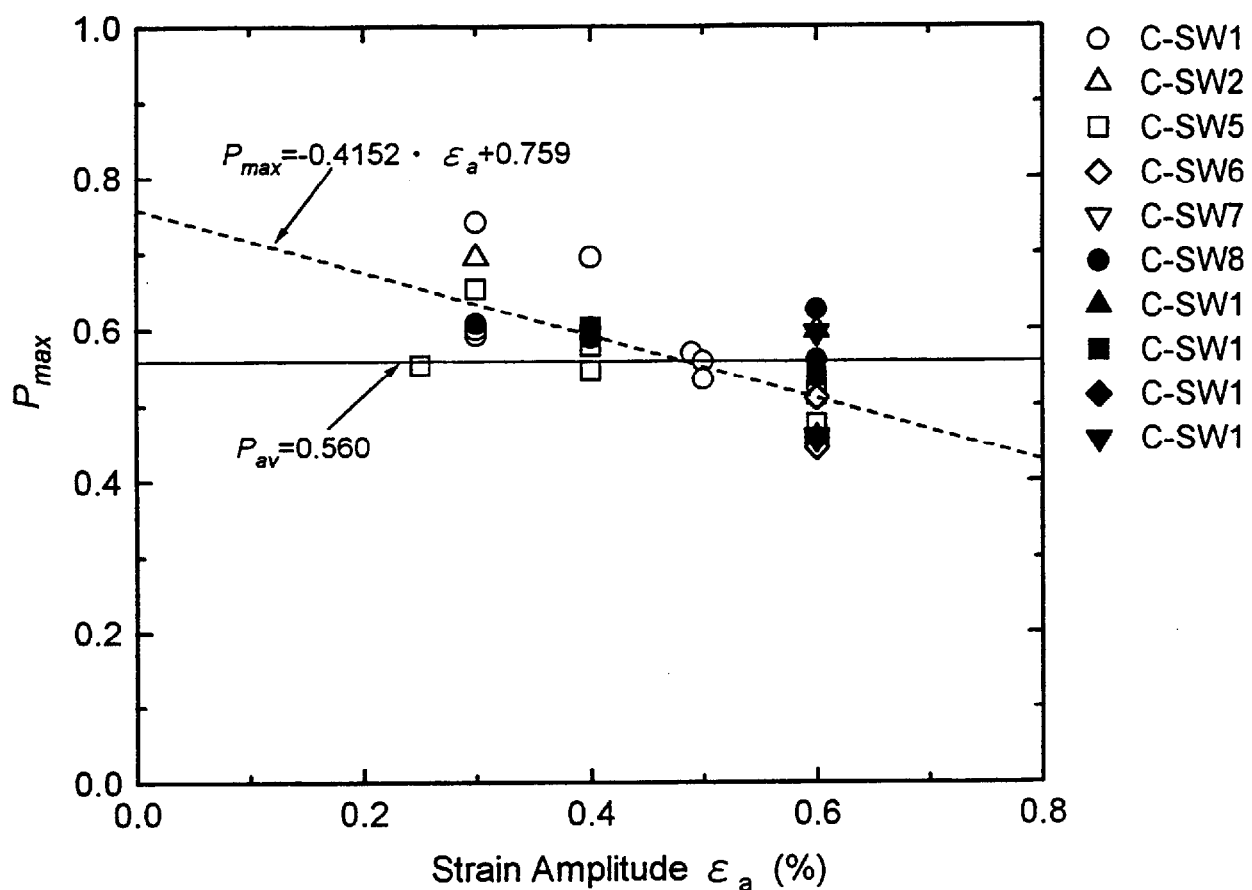


Fig. 4-5 Relation between P_{max} and ε_a for carbon steel

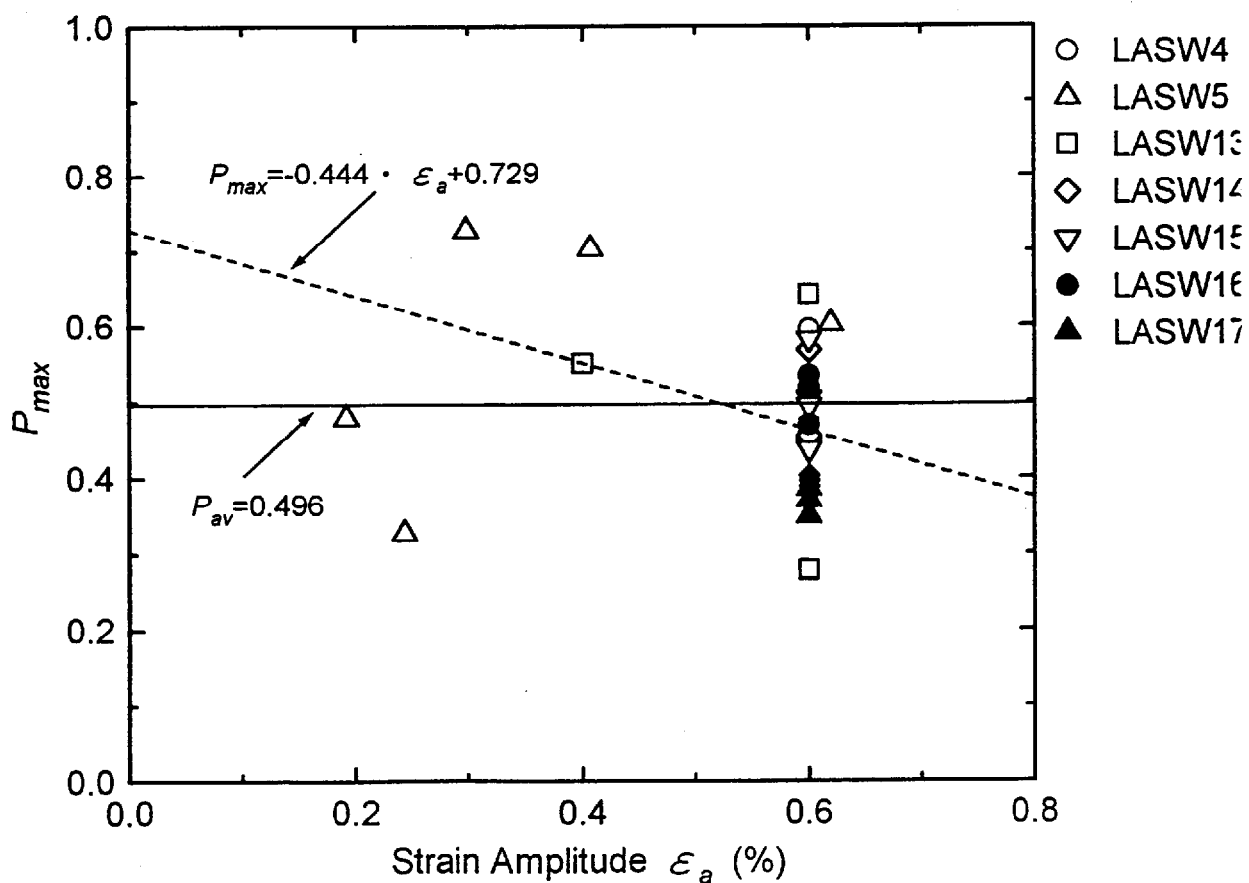


Fig. 4-6 Relation between P_{max} and ε_a for low alloy steel

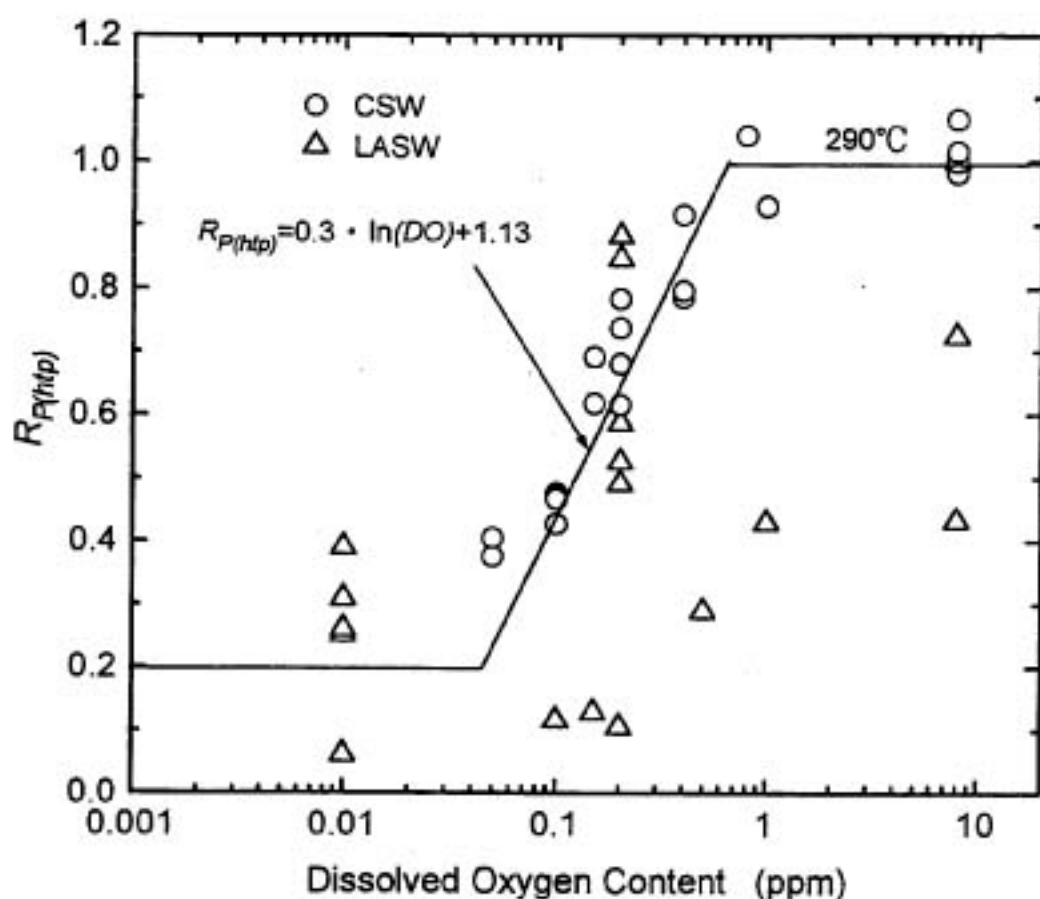


Fig. 4-7 Relation between $R_{P(htp)}$ and oxygen content for carbon and low alloy steel

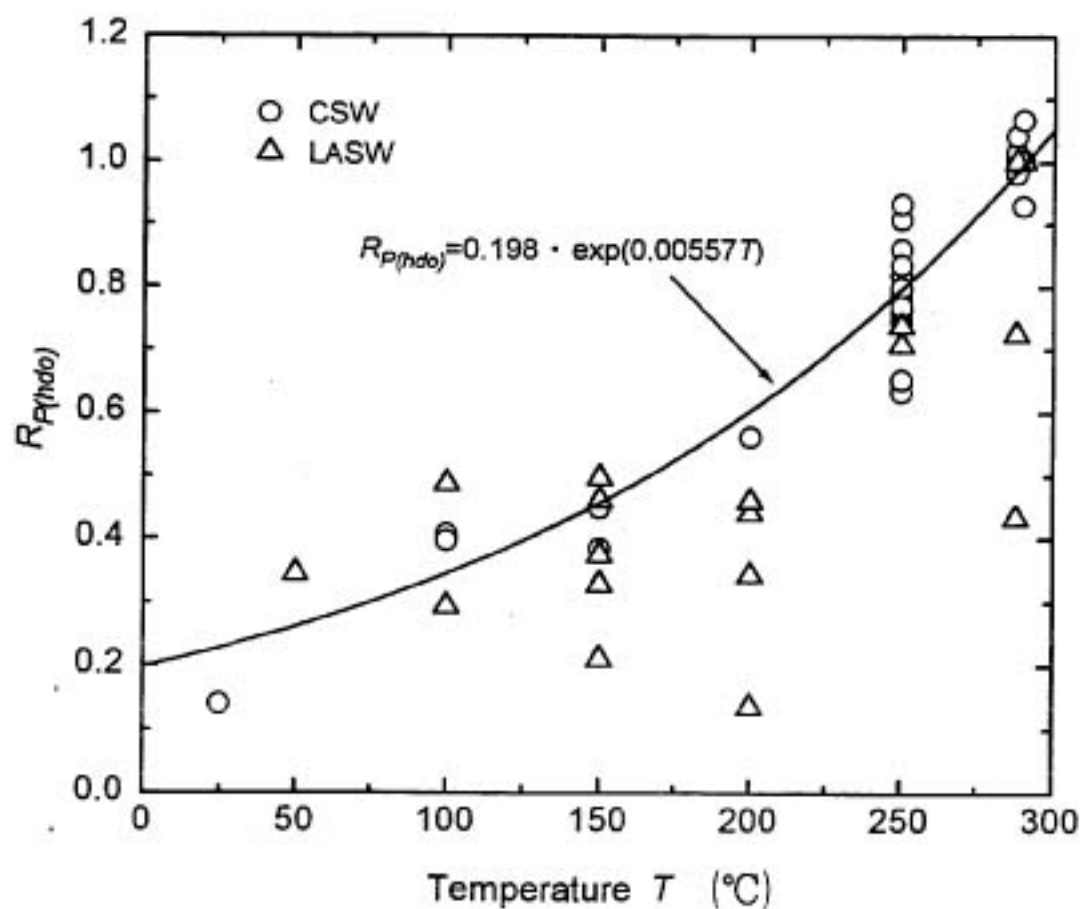


Fig. 4-8 Relation between $R_{P(hdo)}$ and temperature for carbon steel and low alloy steel

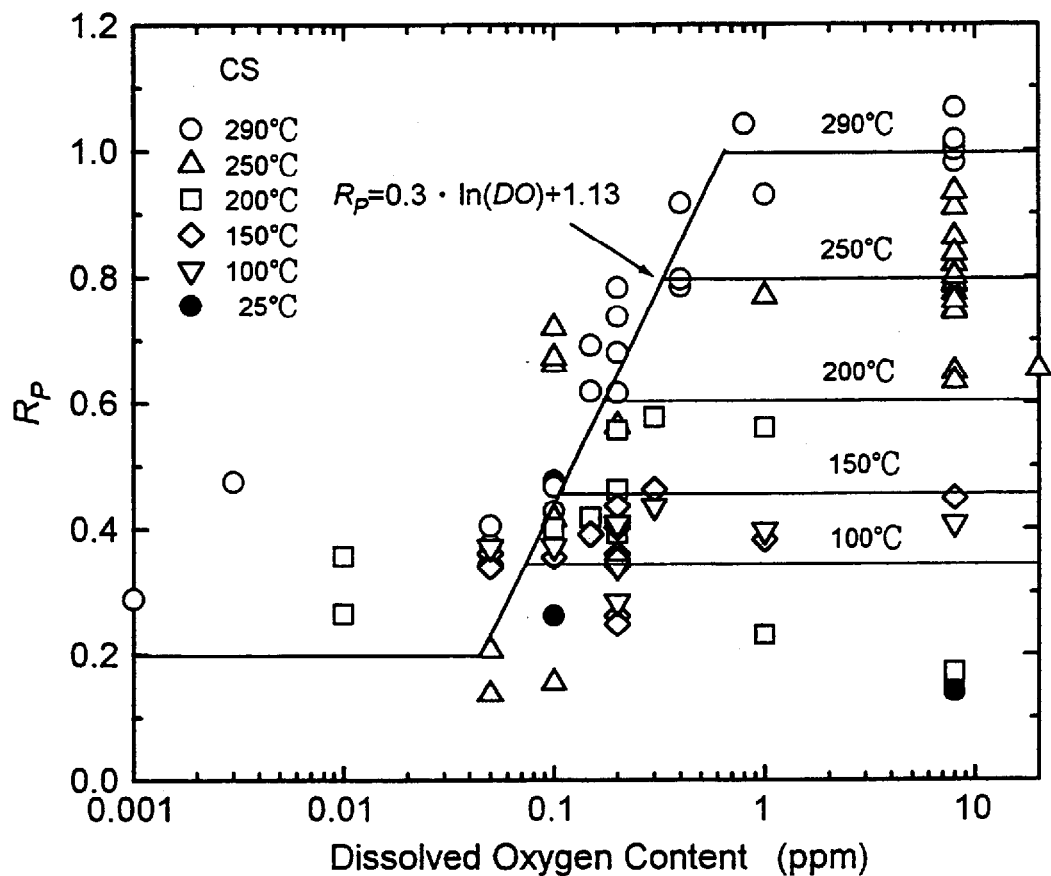


Fig. 4-9 Relation between R_p temperature and oxygen content for carbon steel

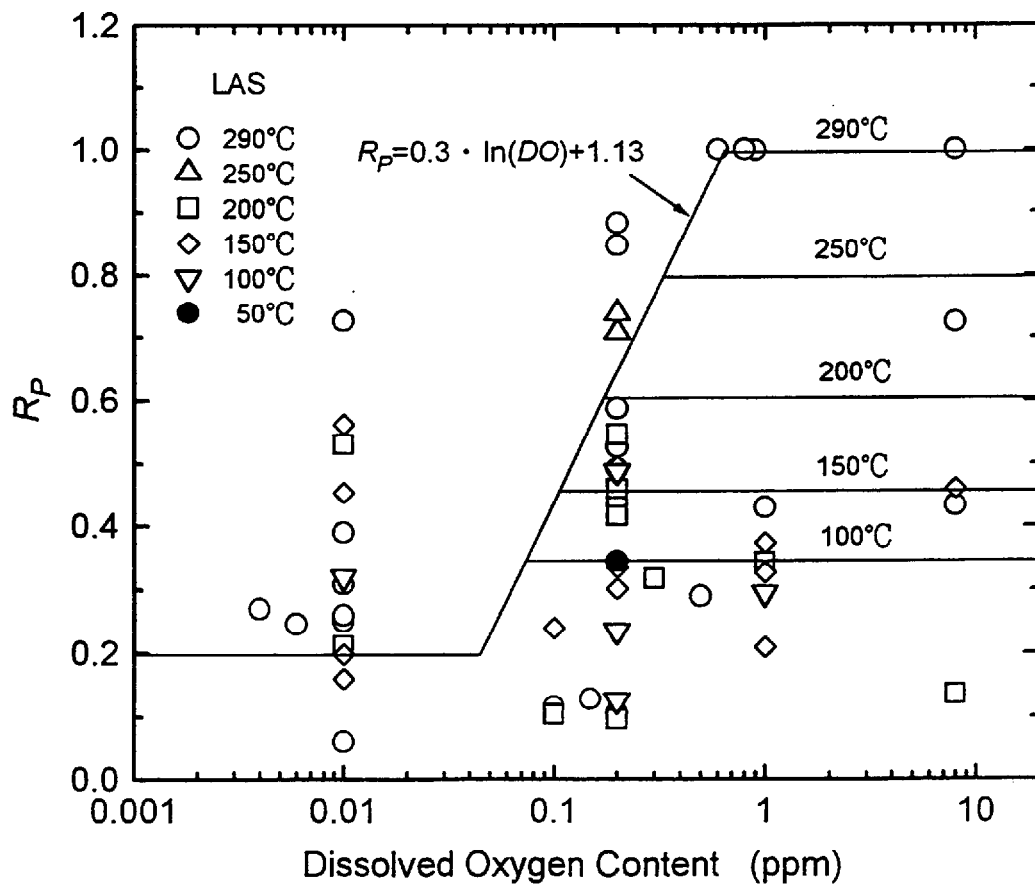


Fig. 4-10 Relation between R_p temperature and oxygen content for low alloy steel

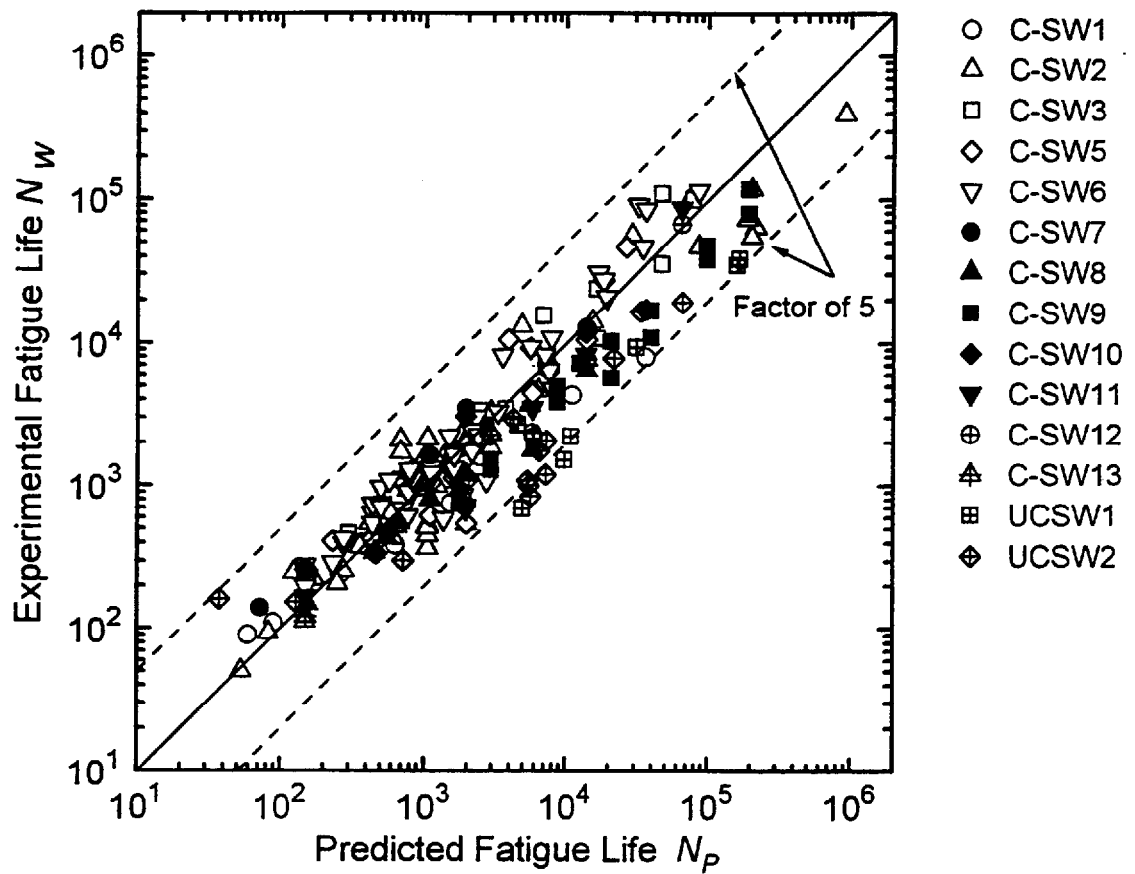


Fig. 4-11 Relation between N_W and N_P for carbon steel

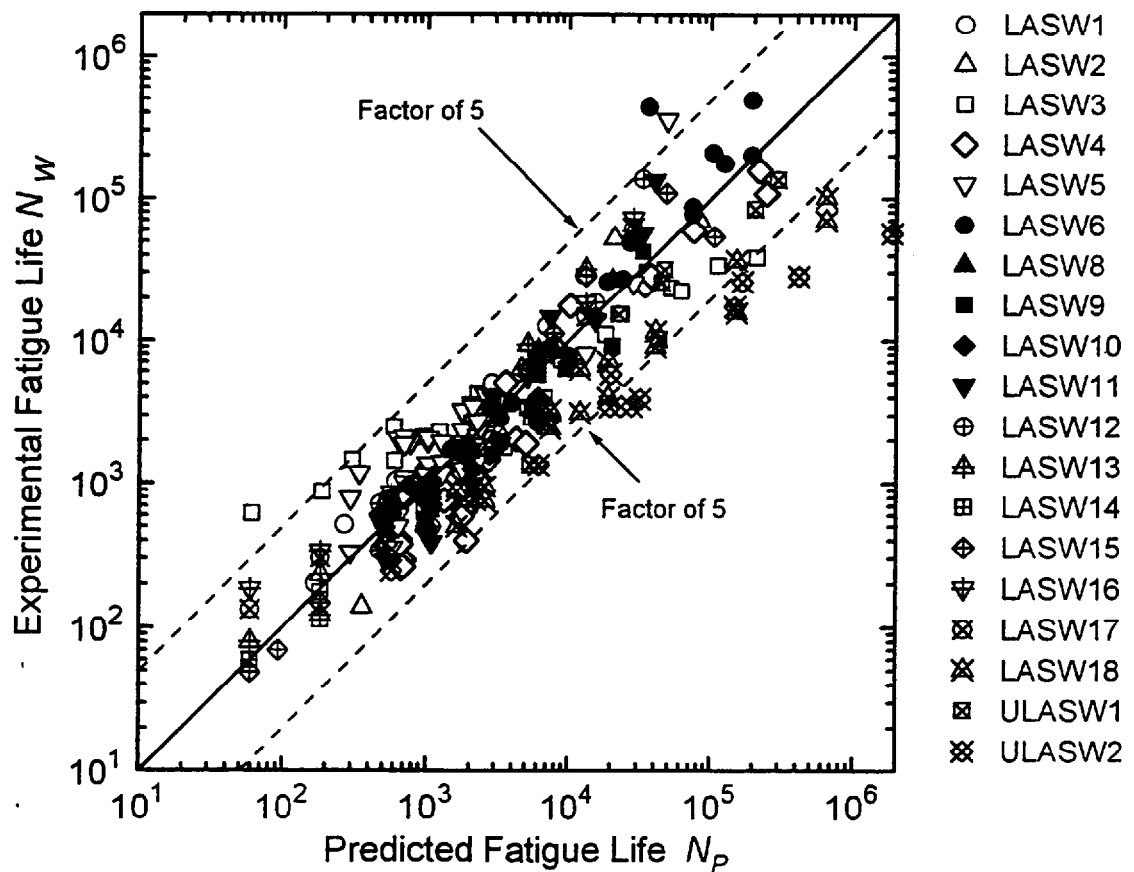


Fig. 4-12 Relation between N_W and N_P for low alloy steel

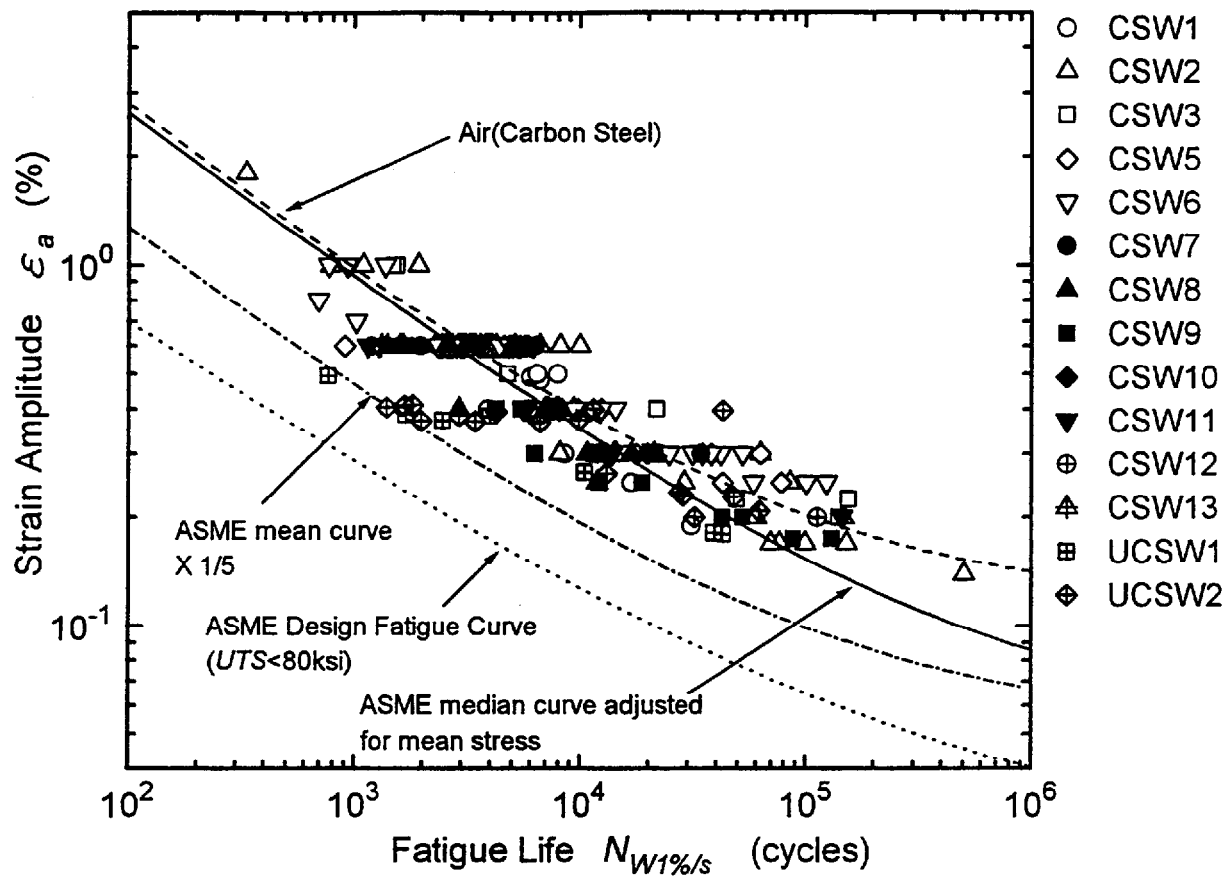


Fig. 4-13 Relation between ϵ_a and $N_{W1\%/s}$ for carbon steel

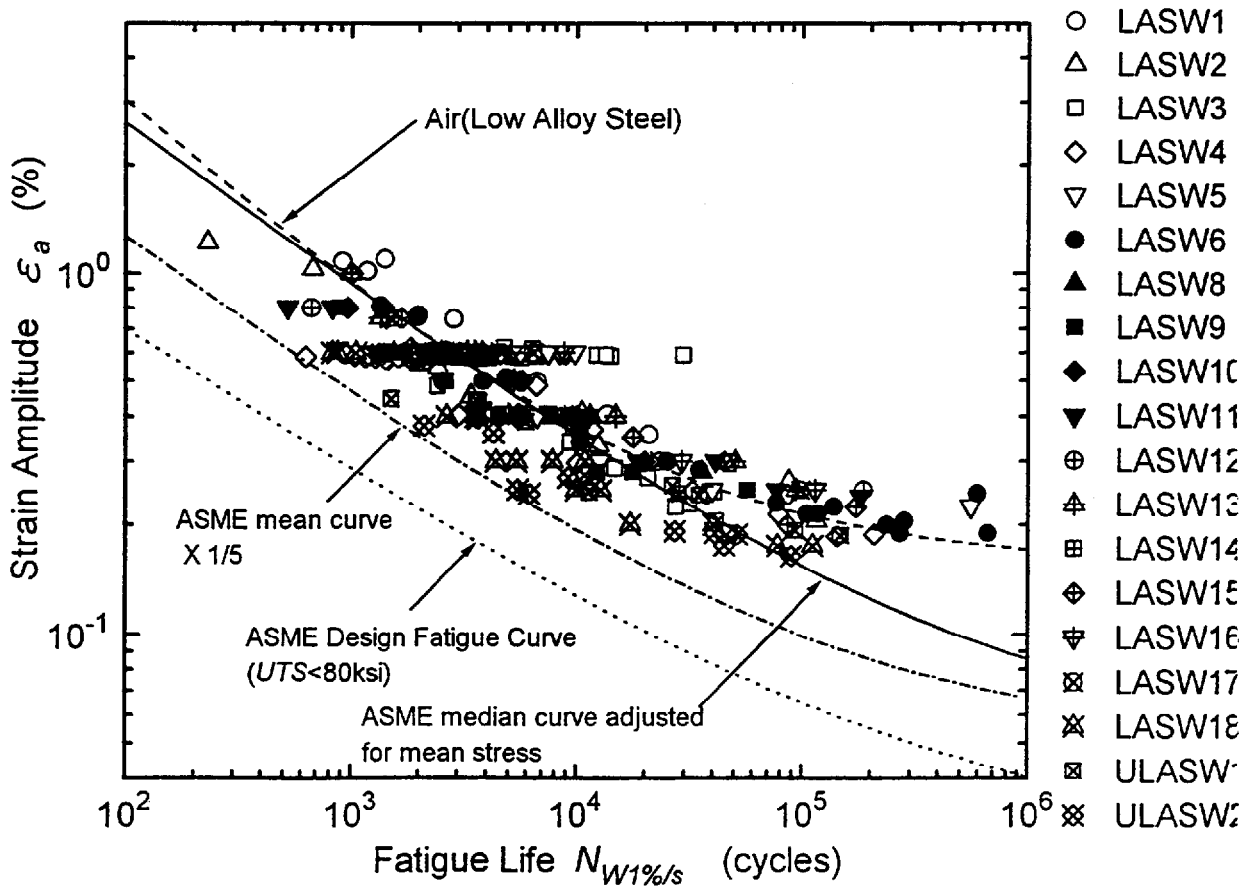


Fig. 4-14 Relation between ϵ_a and $N_{W1\%/s}$ for low alloy steel

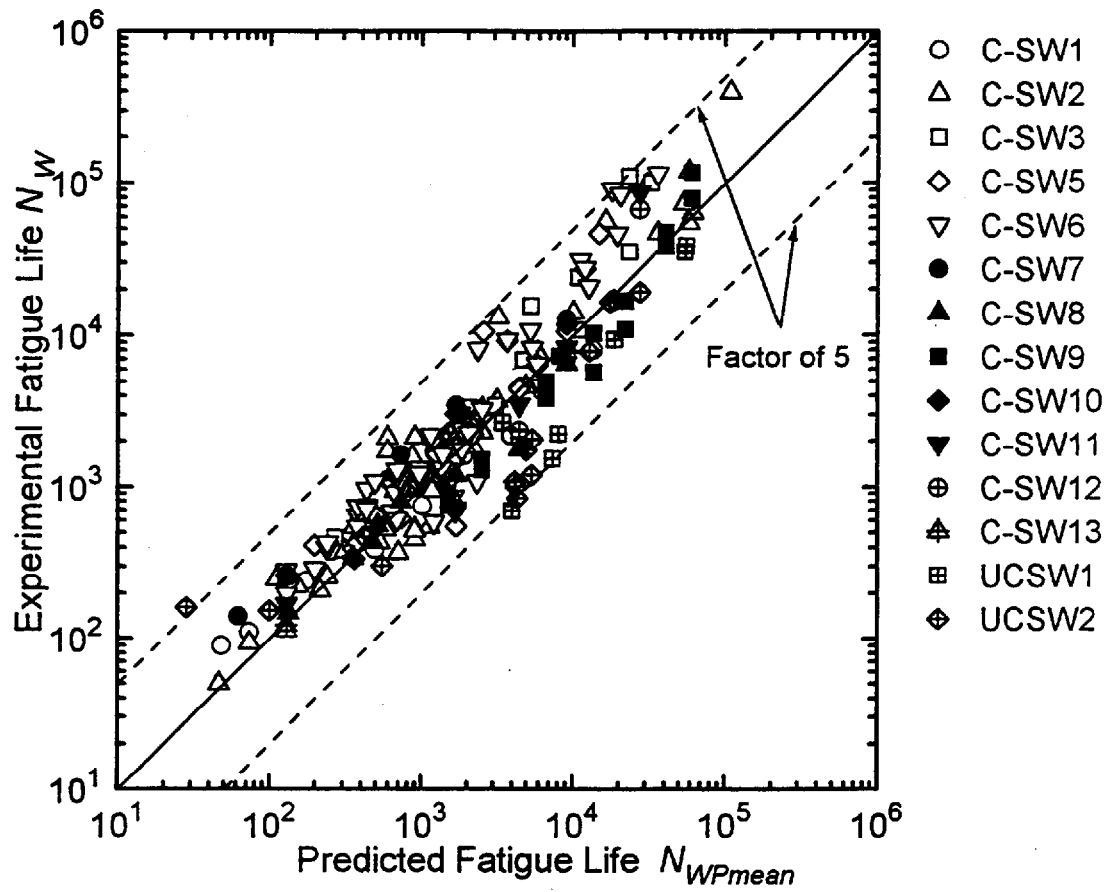


Fig. 4-15 Relation between N_W and N_{WPmean} for carbon steel

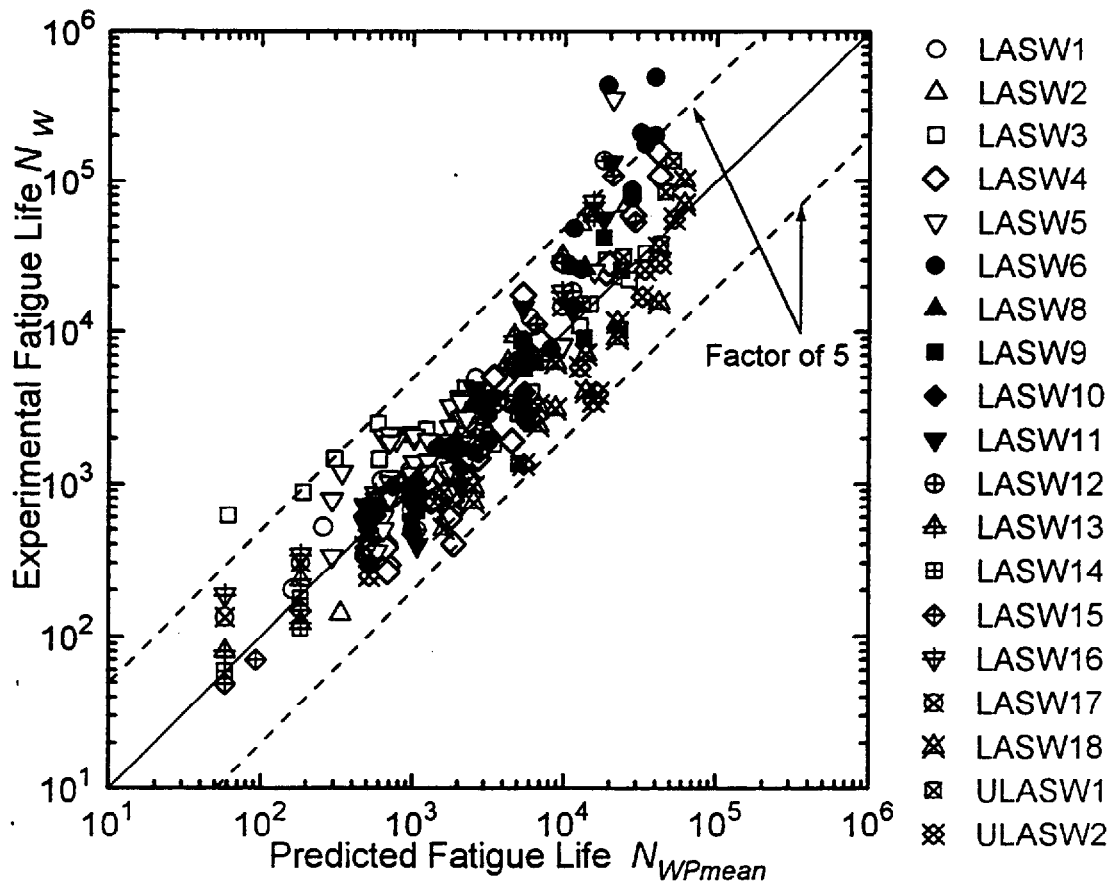


Fig. 4-16 Relation between N_W and N_{WPmean} for low alloy steel

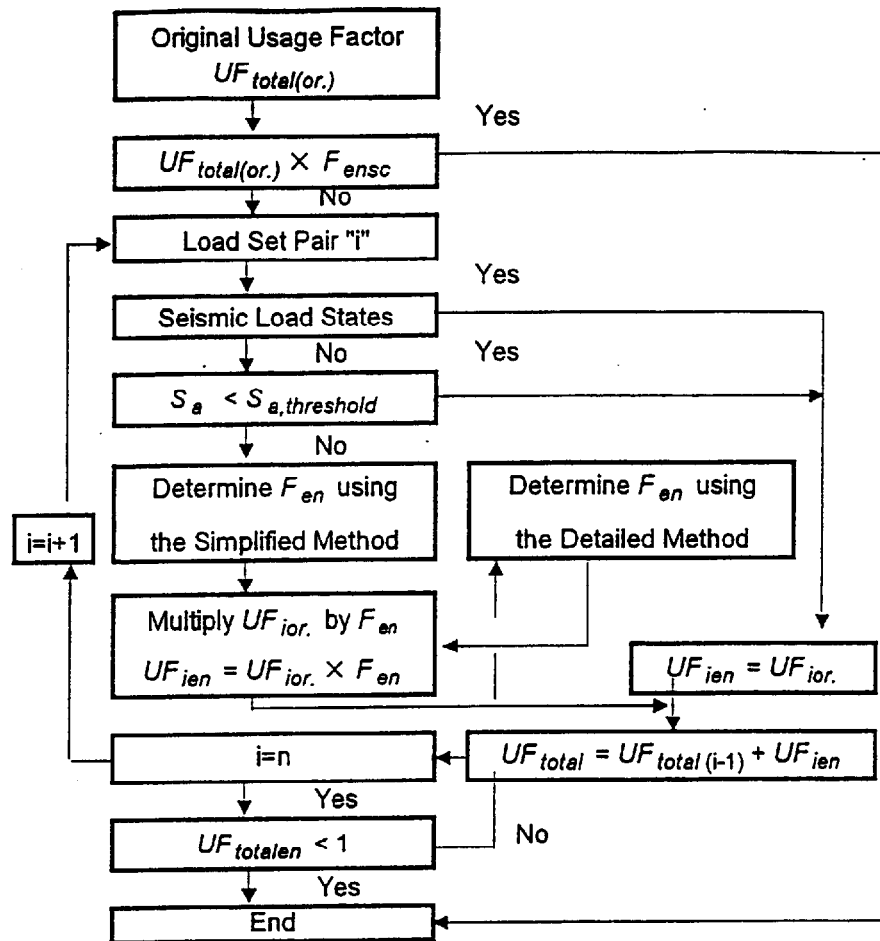


Fig. 4-17 Flow diagram for environmental fatigue evaluation

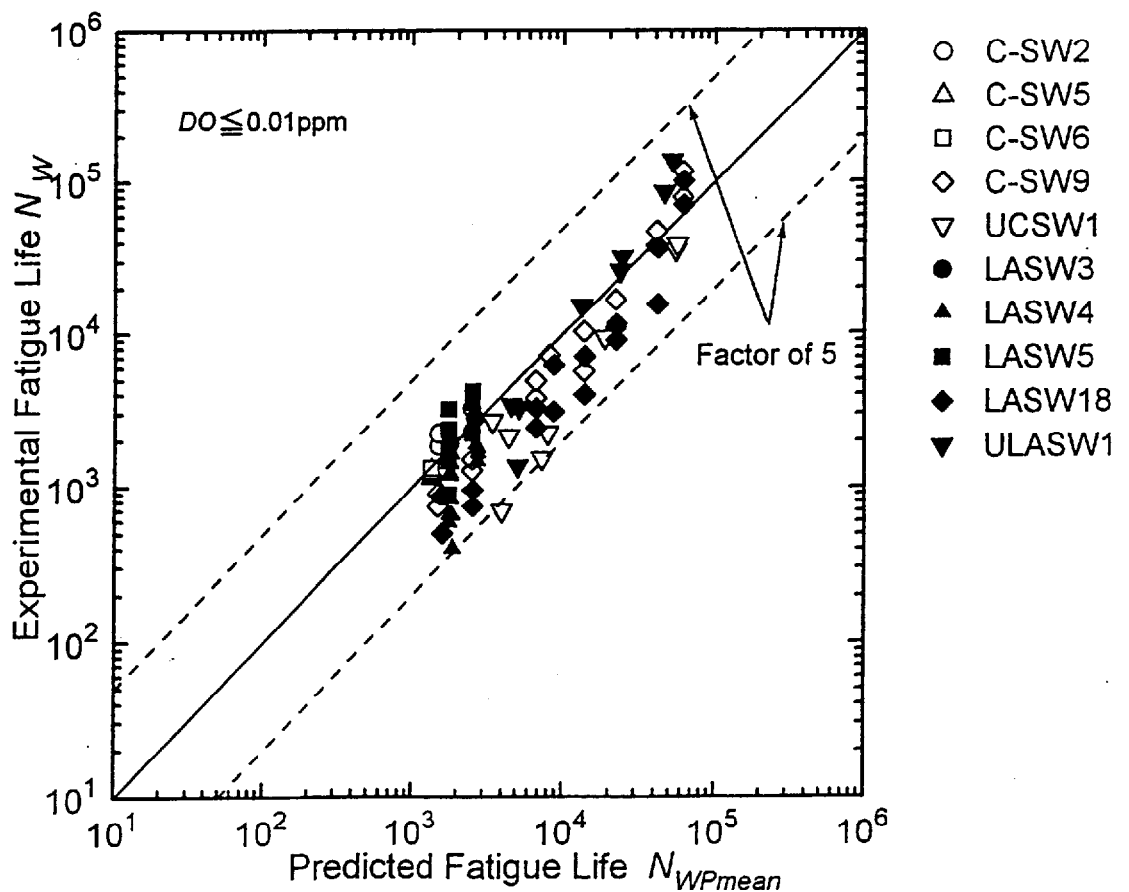


Fig. 4-18 Relation between N_W and N_{WPmean} for carbon & low alloy steel

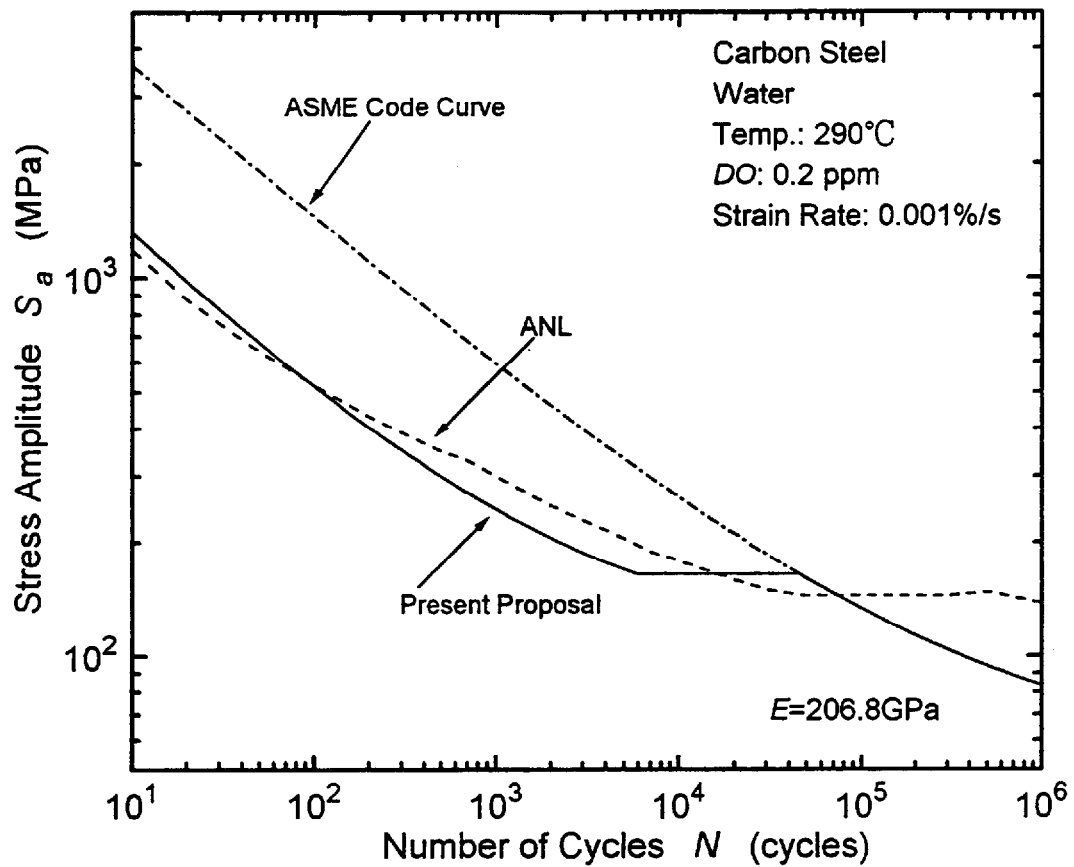


Fig. 4-19 Fatigue design curves for carbon steel in water

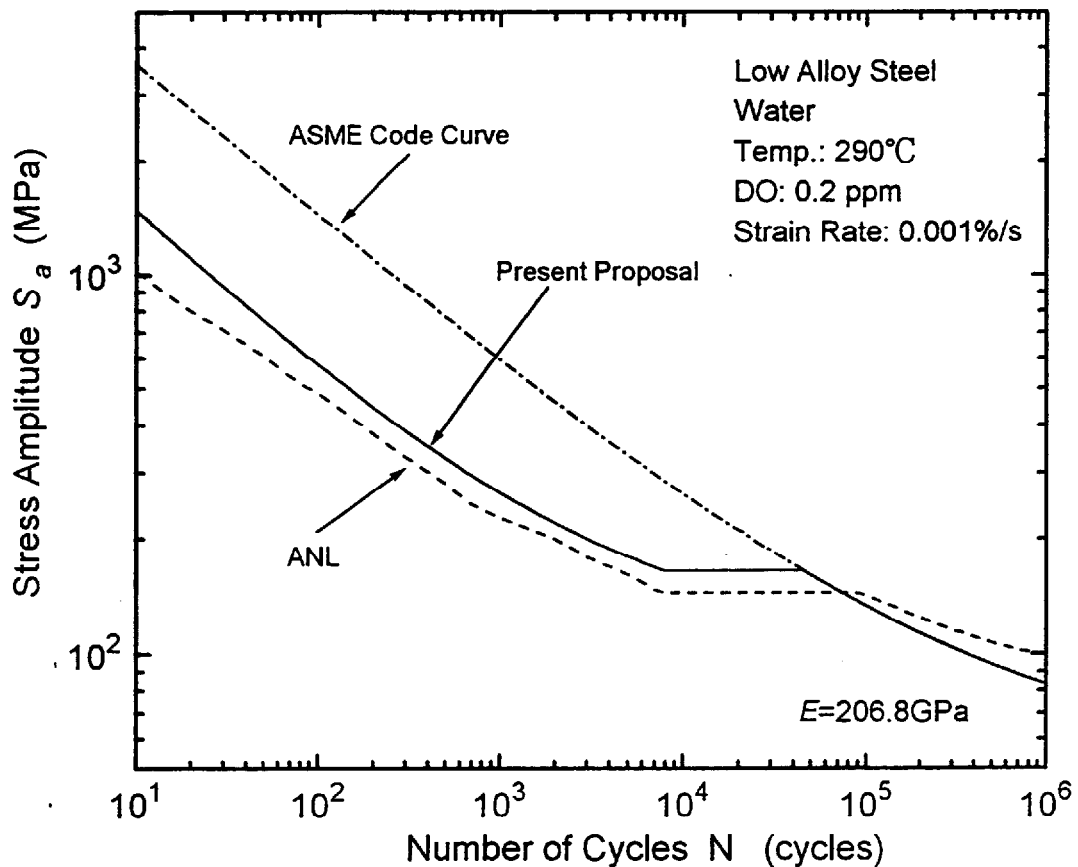


Fig. 4-20 Fatigue design curves for low alloy steel in water

第5章 結 論

日本の原子力発電が総発電量の40%にも達する現今において、原子力発電プラントの安全性の確保は至上課題である。原子力機器の疲労設計は、通産省告示501号あるいはASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section IIIに規定された設計疲労曲線に従っている。これらの曲線には腐食性環境の効果は考慮されていないが、高温高圧の純水の腐食性は強くないと考えられていたので、プラントの接液部もこれらの設計疲労曲線で評価されてきた。

著者はたまたま実施した高温水中での炭素鋼の繰返し台形波による SCC 試験で、予想より短い寿命となったことに注目し、この種環境中での低サイクル疲労挙動の研究に着手した。沸騰水型原子炉の冷却水を模擬した高温高圧純水中で炭素鋼・低合金鋼の低サイクル疲労試験を実施した結果、この種環境中で疲労寿命がひずみ速度の低下と共に著しく減少することを発見した。この挙動に及ぼす力学的因子、環境因子及び材料因子の影響を調べ、それらの結果を基に、任意の条件下での高温水中の疲労寿命を予測する式、さらには実プラントの疲労損傷を評価する手法を提案した。

以下に本論文の各章で得られた成果をまとめて結論とする。

第1章「序論」では、プラントにおける損傷等の状況を紹介し、本研究を始めるに至った背景を示した。また20年近くにおよぶ研究の進捗の経過を示すとともに、他の研究者の研究動向、対外的な連携、共同研究及び委員会活動等について紹介した。さらに最後に米国を中心とした本研究成果の規格化の動向について紹介した。

第2章「固定速度条件での疲労寿命」では、数種の炭素鋼及び低合金鋼母材及び溶接部について、ひずみ振幅、ひずみ速度、温度及び溶存酸素濃度をパラメータとして軸ひずみ制御低サイクル疲労試験を実施し、基本的な固定条件でのデータを採取して、種々のパラメータの影響を定量的に評価する手法の開発を試みた。得られた主な成果は以下の通り。

- (1) 高温水中での疲労寿命はひずみ速度の減少とともに低下する。そして、ひずみ速度と寿命の間には両対数表示で良好な直線関係が存在する。この関係は下式で示される。同式の指数項 P は環境効果の強さを表す良いパラメータとなる。また係数項 D はひずみ速度を1%/s に外装した寿命であると同時に、同一振幅での室温大気中寿命とほぼ等しくなる傾向があった。

$$N_{25W} = D(\dot{\epsilon}_T)^P$$

- (2) 寿命に強く影響するのはひずみ増加速度である。それゆえ、slow-slow の三角波形と slow-fast の正鋸歯波形で寿命低下は最も大きく、またこの両波形

では寿命は変わらない。fast-slow の逆鋸歯波形の場合は fast-fast の三角波形より短寿命になるが、その寄与は小さいのでプラント寿命評価に際してはひずみ増加速度を考慮すれば良い。

- (3) P 値は温度と溶存酸素濃度に強く依存し、高温、高酸素濃度になるほど大きくなる。これらの間には定量的評価式が提案された。
- (4) P 値は炭素鋼、低合金鋼及びそれらのヒートの違いによっても異なる。一般的に低合金鋼の P 値は炭素鋼に比べて小さい傾向である。また溶接金属の P 値はそれぞれの母材より小さい傾向である。溶接 HAZ 部で疲労寿命の特別な低下は見られない。熱時効によって P 値は多少大きくなる、等の定性的傾向が認められた。
- (5) 引張強さの高い材料は P 値が小さい傾向で、また、S 含有量の高い材料は P 値が大きい傾向があった。 P 値に及ぼす引張強さ及び S 含有量の影響の定量的評価を試み、 P 値の予測式を提案したがばらつきが大きく予測はラフなものであった。
- (6) 高酸素濃度(≥ 1 ppm)ではき裂発生は繰返しの極初期(開始から数サイクル)で、進展速度も速く、その結果著しい寿命低下となる。低酸素濃度(0.05 ppm)ではき裂発生も進展速度も遅く、結果として寿命低下は小さい。酸素濃度 0.2 ppm の場合は遷移領域であるため発生寿命進展速度ともデータのばらつきが大きい。
- (7) ひずみ速度、温度、酸素濃度の影響を定量化して、材料別に室温大気中での疲労寿命と P_{max} が与えられれば任意の条件での高温水中疲労寿命を予測する式を提案した。この式は以下で示される。

$$\varepsilon_a = A(N_{25W}(\dot{\varepsilon}_T)^{-P})^B + C$$

ここで、

$$P = R_P * P_{max}$$

$$R_P = 0.3 \ln(DO(\text{ppm})) + 1.13$$

$$\text{但し、 } 0.2 \leq R_P \leq 0.198 \exp(0.00557 T)$$

第3章「変動速度条件での疲労寿命」では、実プラントのトランジェントではひずみ速度や温度が変動することを考慮して、種々のひずみ速度変動条件下で高温水中での炭素鋼の疲労試験を実施し、その結果から、ひずみ速度変動条件下でのひずみ速度の影響を定量的に評価する手法を開発した。得られた主な成果は以下の通り。

- (1) 0.6%を越えるひずみ範囲では、環境不感のひずみ領域が最低ひずみの近傍に存在せず、また疲労寿命への環境の効果は最小ひずみから最大ひずみまでのいずれの領域でも同様であった。

- (2) 単位時間内での平均ひずみ速度での環境効果とひずみ増分との積を最小ひずみから最大ひずみまで積分して算出される F_{encal} と試験結果から求まる F_{entest} との間に、比較的良い一致が見られた。この手法は修正 Rate Approach 法と名付けられ、実際のトランジェントにおける環境効果を詳細に評価する手法として提案される。この一般式は以下で与えられる。

$$F_{encal} = \int_{\varepsilon_{min}}^{\varepsilon_{max}} ((\dot{\varepsilon}_T)^{-P} / (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min})) d\varepsilon$$

- (3) 上昇過程のひずみ速度一定試験から得られた環境疲労寿命は、同一の rise time のデータの中で最も短寿命になる傾向である。 F_{encal} は、P が1.0 より小さい条件では、一定速度の時、最も大きな値となる。

次に、実プラントのトランジェントを考慮して、種々のひずみ速度変動条件下で高温水中での炭素鋼の疲労試験を実施し、その結果から、ひずみ速度変動条件下でのひずみ速度の影響を定量的に評価する手法を開発した。得られた主な成果は以下の通り。

- (1) 0.6%を越えるひずみ範囲では、環境不感のひずみ領域が最低ひずみの近傍に存在せず、また疲労寿命への環境の効果は最小ひずみから最大ひずみまでのいずれの領域でも同様であった。
- (2) 単位時間内での平均ひずみ速度での環境効果とひずみ増分との積を最小ひずみから最大ひずみまで積分して算出される F_{encal} と試験結果から求まる F_{entest} との間に、比較的良い一致が見られた。この手法は修正 Rate Approach 法と名付けられ、実際のトランジェントにおける環境効果を詳細に評価する手法として提案される。この一般式は以下で与えられる。

$$F_{encal} = \int_{\varepsilon_{min}}^{\varepsilon_{max}} ((\dot{\varepsilon}_T)^{-P} / (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min})) d\varepsilon$$

- (3) 上昇過程のひずみ速度一定試験から得られた環境疲労寿命は、同一の rise time のデータの中で最も短寿命になる傾向である。計算においても、 F_{encal} は、P が1.0 より小さい条件では、一定速度の時、最も大きな値となる。

第4章「高温水環境中での疲労損傷評価法の提案」では、限定された材料についてこれまでに開発してきた高温水中疲労寿命の推定式を、世に公表されている全ての高温水中疲労データを包含して再評価し、材料ヒートによるデータの変動も含めて、種々の因子を考慮して高温水中での疲労寿命を推定する一般式を提案した。さらにこの寿命予測手法と現行の ASME 設計疲労曲線を組合せて、高温水中での疲労損傷評価手法を提案した。得られた主な成果は以下の通り。

データベース JNUFAD に採録されている、炭素鋼254、低合金鋼319の高温

水中データから、ひずみ速度、温度、酸素濃度の影響を定量化し、任意の条件での疲労寿命を予測する式をそれぞれの鋼種について提案した。その結果予測寿命はファクター5のバンド内に収まった。ヒートの違いと環境効果が重畳しているため、データバンドの幅は比較的広いが、ASME 設計クライテリアの寿命で20のファクターに含まれるとされる、材料のばらつき(ファクター2)と試験雰囲気の影響(ファクター4)の積(ファクター8)に比べれば小さい。

昔の材料の疲労強度と平均応力効果の補正を考えると、設計疲労曲線には現行の ASME Curve を採用するべきである。ひずみ振幅と繰返し数を現行の設計疲労曲線に当てはめて得られた累積疲労損傷 UF に、環境効果の割増係数 F_{en} を乗じて評価する、高温水中での疲労損傷評価手法を提案した。

第5章「結言」では、本研究の成果を総括した。

本研究で得られた成果は1988年に米国の ASME Code Committee、Sub-Committee on Design、Sub-Group on Fatigue Strength (Chairman: W. O'Donnell)で報告した。この成果はそれ以後米国で非常に注目され、Argonne National Laboratory が中心となって確認試験をやると共に、1991年から PVRC で設計疲労曲線を見直す必要性の検討が開始された。著者は当初からこれらの米国の活動に協力を求められ、委員として PVRC の検討委員会に参加してきた。

日本国内では火力原子力発電技術協会及び発電設備検査技術協会で委員会を組織し、その中で必要な追加データの採取及び基準化に向けての活動を実施している。近い将来、米国、日本共に具体的な基準化の動きが始まる状況である。

謝 辞

本論文をまとめるに当たり、懇切かつ的確なご指導を賜りました東京工業大学工学部機械宇宙工学科小林英男教授に深甚の謝意を表します。また20年近い研究の間、的確な御助言、御指導を賜りました東京大学名誉教授飯田國廣先生に深甚の謝意を表します。また本論文の作成、審査に際しまして、東京工業大学の肥後矢吉教授、恩沢忠男教授、中村春夫教授及び轟章助教授の諸先生方から有益な御助言、御教示をいただきましたことに心より感謝いたします。

本研究は石川島播磨重工業株式会社、技術開発本部、技術研究所及び生産技術開発センターにおいて、著者が約20年にわたり実施してきた研究をまとめたものである。まとめるに当たり、御認可、御鞭撻いただいた、生産技術開発センター長岡義宣主席技監、元生産技術開発センター副センター長酒井啓一博士、生産技術開発センター副センター長片山典彦博士に厚く御礼申し上げます。また、実験の遂行に当たり多くの疲労試験を実施していただいた生産技術開発部実験技術グループの坂本博氏、原子力プラントの評価手法に関し種々意見をいただいた原子力事業部容器設計部課長岸田和男氏に心より感謝いたします。

最後に、本研究の一部は社団法人溶接協会原子力研究委員会の FRC、TFC、LE 各小委員会の分担研究として、また財団法人火力原子力発電技術協会 EFD 委員会の分担研究として実施したことを付記しますとともに、関係各位に謝意を表します。

[参考文献]

- [1] 通商産業省告示 501 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III
- [3] B. F. Langer, "Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis in Section III and VIII, Division 2", ASME, 1969
- [4] "Tentative Structural Design Basis for Reactor Pressure Vessels and Directly Associated Components (Pressurized, Water Cooled Systems)", PB 151987, U.S. Dept. of Commerce, Office of technical Service, 1 Dec. 1958 Revision.
- [5] T. Kondo, T. Kikuyama, H. Nakajima, M. Shindo and R. Nagasaki, "Corrosion Fatigue of ASTM A302B Steel in High Temperature Water, The Simulated Nuclear Reactor Environment", Corrosion Fatigue, NACE-2, National Association of Corrosion Engineers. pp. 539-549, 1972
- [6] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI
- [7] C. Garnier, G. Kowalczyk, R. Roche and B. Barrachin, "Low Cycle Fatigue of Steels for Nuclear Pressure Vessels in Hot Water", International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 4), L, 8.8.1/8.8.9, 1977
- [8] 樋口 洵、坂本 博、谷岡 慎一「炭素鋼の高温純水中における低サイクル疲労特性」、鉄と鋼（講演概要集）、Vol. 68、No. 5、p. S647、1982
- [9] 樋口 洵、坂本 博、谷岡 慎一「高温純水中における炭素鋼の疲労特性に及ぼす環境因子の影響」、鉄と鋼（講演概要集）、Vol. 69、No. 5、p. S694、1983
- [10] 樋口 洵、坂本 博、谷岡 慎一「高温純水中における炭素鋼の疲労寿命予測」、鉄と鋼（講演概要集）、Vol. 69、No. 13、p. S1496、1983
- [11] 樋口 洵、坂本 博、「高温純水中における炭素鋼の低サイクル疲労特性」、鉄と鋼、Vol. 71、No. 8、p. 1025-1031、1985
- [12] Kunihiro Iida, Hideo Kobayashi and Makoto Higuchi, "Predictive Method of Low Cycle Fatigue Life of Carbon and Low Alloy Steels in High Temperature Water Environment" Proceedings of the Second International Atomic Energy Agency Specialists' Meeting on Subcritical Crack Growth, NUREG/CP-0067, MEA-2090, Vol. 2
- [13] Kunihiro Iida, Hideo Kobayashi and Makoto Higuchi, "Predictive Method of Low Cycle Fatigue Life of Carbon and Low Alloy Steels in High Temperature Water Environment" IIW Doc. XIII-1164-85
- [14] M. Higuchi and K. Iida, "An Investigation of Fatigue Strength Correction Factor for Oxygenated High Temperature Water Environment" Proceedings of 6 th ICPVT, September 11-16, 1988, Beijing, China

- [15] M. Higuchi and K. Iida, "Fatigue Strength Correction Factors for Carbon and Low-Alloy Steels in Oxygen-Containing High-Temperature Water" Nuclear Engineering and Design Vol. 129(1991) p. 293-306
- [16] M. Higuchi and K. Iida, "Effects of Isothermal Aging on Low Cycle Fatigue Properties of SA533B-1 Steel in High-Temperature Water Environment" Proceedings of Post SMiRT Conference, August, 1993, Forschungszentrum, Germany
- [17] M. Higuchi and K. Iida, "Effects of Strength and Sulfur Content on Fatigue Strength of Carbon Steel Weldments in Oxygenated High Temperature Water" Proceedings of 8 th ICPVT, July, 1996, Montreal, Canada
- [18] M. Higuchi and K. Iida, "Effects of Strength and Sulfur Content on Fatigue Strength of Carbon Steel Weldments in Oxygenated High Temperature Water" IIW Doc. XIII-1627-96
- [19] M. Higuchi, K. Iida and Y. Asada "Effects of Strain Rate Change on Fatigue Life of Carbon Steel in High-Temperature Water" ASME PVP Vol. 306, pp. 111-116, 1995
- [20] M. Higuchi, K. Iida and Y. Asada "Effects of Strain Rate Change on Fatigue Life of Carbon Steel in High-Temperature Water" in Effects of the Environment on the Initiation of Crack Growth, ASTM STP 1298, pp. 216-231, 1997
- [21] G. Nakao, M. Higuchi, H. Kanasaki, K. Iida and Y. Asada "Effects of Temperature and Dissolved Oxygen Contents on Fatigue Lives of Carbon and Low Alloy Steels in LWR Water Environments" ASME PVP Vol.306, pp. 123-128, 1995
- [22] G. Nakao, M. Higuchi, H. Kanasaki, K. Iida and Y. Asada "Effects of Temperature and Dissolved Oxygen Contents on Fatigue Lives of Carbon and Low Alloy Steels in LWR Water Environments" in Effects of the Environment on the Initiation of Crack Growth, ASTM STP 1298, pp. 232-244, 1997
- [23] M. Higuchi, "Fatigue Curves and Fatigue Design Criteria for Carbon and Low Alloy Steels in High-Temperature Water", ASME PVP-Vol. 386, 1999, pp. 161-169
- [24] D. A. Hale, S. A. Wilson, J. W. Kass and E. Kiss, "Low Cycle Fatigue of Commercial Piping Steels in a BWR Primary Water Environment", Trans. ASME, Journal of the Engineering and Material Technology, Vol. 103, No. 1 , pp. 15-25, 1981
- [25] D. Weinstein and A. E. Picket, "BWR Environmental Cracking Margins for Carbon Steel Pipings", EPRI Research Project 1248-1 Final Report "Fatigue Crack Initiation Margins of Carbon Steel Piping in High-temperature Water", No. NP-2406, 1982
- [26] S. Ranganath, J.N. Kass and J.D. Heald, "Fatigue Behavior of Carbon Steel Components in High-Temperature Water Environments", in Low-Cycle Fatigue and Life Prediction, ASTM STP 770, pp.436-459, 1982
- [27] T. A. Prater and L.F. Coffin, "Notched Fatigue Crack Initiation in High Temperature

- Water Environments; Experiments and Life Prediction”, ASME PVP-Vol. 71, 1983
- [28] T. A. Prater and L.F. Coffin, “The Use of Notched Compact-Type Specimens for Crack Initiation Design Rules in High Temperature Water Environments; Experiments and Life Prediction”, ASTM STP 801, pp. 423-444, 1983
- [29] T.A. Prater and L.F. Coffin, “Notched Fatigue Crack Initiation in High Temperature Water Environments; Experiments and Life Prediction”, Trans. ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 109, pp. 124-134, 1987
- [30] S. Mujumdar, O. Chopra and W. Shack, “Interim Fatigue Design Curves for Carbon, Low-Alloy, and Austenitic Stainless Steels in LWR Environments”, NUREG/CR-5999, ANL-93/3, 1993
- [31] J. Keisler, O. Chopra and W. Shack, “Statistical Analysis of Fatigue Strain-Life Data for Carbon and Low-Alloy Steels”, NUREG/CR-6237, ANL-94/21, 1994
- [32] J. Keisler, O. Chopra and W. Shack, “Fatigue Strain-Life Behavior of Carbon and Low-Alloy Steels, Austenitic Stainless Steels, and Alloy 600 in LWR Environments”, NUREG/CR-6335, ANL-95/15, 1995
- [33] O. Chopra and W. Shack, “Effects of LWR Environments on Fatigue Life of Carbon and Low-Alloy Steels”, ASME PVP Vol. 306, pp.95-109, 1995
- [34] O. Chopra and W. Shack, “Evaluation of Effects of LWR Coolant Environments on Fatigue Life of Carbon and Low-Alloy Steels”, ASTM STP 1298, pp.247-266, 1997
- [35] O. Chopra and W. Shack, “Fatigue Crack Initiation in Carbon and Low alloy Steels in Light Water Reactor - Mechanism and Prediction”, ASME PVP-Vol. 374, pp. 155-168, 1998
- [36] 北川正樹、藤本輝雄、大友暁、「炭素鋼の高温純水中における疲労強度に及ぼす繰返し速度の影響」、腐食防食協会 1983 年度春期学術講演大会予稿集、pp. 51-54, 1983
- [37] 仲尾元六、山崎均、木村征二、西岡章夫、山内正博、三浦康公、「圧力容器用低合金鋼の高温純水中低サイクル疲労に関する二三の検討」、第 30 回腐食防食討論会予稿集、pp. 20-23、1983
- [38] N. Nagata, S. Sato and Y. Katada, “Low Cycle Fatigue Behavior of Low-Alloy Steels in High-Temperature Pressurized Water”, in Transactions 10 th International Conference on SMiRT, 1989
- [39] M. Higuchi and K. Iida, “Effects of LWR Water Environment on Fatigue Strength of Several Nuclear Structural Materials”, Report presented at the ASME Code Committee Design, Sub-committee on Fatigue Strength, 1988. 12, New York
- [40] W. Van Der Sluys and S. Yukawa, “Status of PVRC Evaluation of LWR Coolant Environmental Effects on the S-N Fatigue Properties of Pressure Boundary Materials”, ASME PVP Vol. 306, pp. 47-57, 1995

- [41] W. Van Der Sluys and S. Yukawa, "S-N Fatigue Properties of Pressure Boundary Materials in LWR Coolant Environments", ASME PVP Vol. 347, pp. 269-276, 1998
- [42] H. Kanasaki, M. Hayashi, K. Iida and Y. Asada "Effects of Temperature Change on Fatigue Life of Carbon Steel in High-Temperature Water" ASME PVP Vol. 306, pp. 117-122, 1995
- [43] H. Kanasaki, A. Hirano, K. Iida and Y. Asada, "Corrosion Fatigue Behavior and Life Prediction method under Changing Temperature Conditions", in Effects of the Environment on the Initiation of Crack Growth, ASTM STP 1298, pp. 267-281, 1997
- [44] K. Kishida, S. Suzuki and Y. Asada, "Evaluation of Environmental Fatigue Life for Light Water Reactor Components" ASME PVP Vol. 306, pp. 139-147, 1995
- [45] M. Higuchi, K. Kishida, M. Honjin, S. Ishimoto, T. Karasawa and T. Tanaka "A Aging Issue of Japanese Research and Development Program for LWR Components and Materials" PSA 96 Meeting, September, 1996, Park City, USA
- [46] K. Kishida, T. Umakoshi and Y. Asada, "Advances in Environmental Fatigue Evaluation for Light Water Reactor Components" in Effects of the Environment on the Initiation of Crack Growth, ASTM STP 1298, pp. 282-297, 1997
- [47] A. Ware, D. Morton and M. Nitzel, "Application of NUREG/CR-5999 Interim Fatigue Curves to Selected Nuclear Power Plant Components", NUREG/CR-6260, INEL-95/0045, 1996
- [48] H. Mehta and S. Gosselin, "An Environmental Factor Approach to Account for Reactor Water Effects in Light Water Reactor Pressure Vessel and Piping Fatigue Evaluation", EPRI TR-105759, Work Order 3321-03, Final Report, 1995
- [49] 樋口 洵、他、日本原子力学会昭和 62 年春の大会予稿集(II)、1987、 p. 38
- [50] 飯田 國廣、芝田 勝之、植田 脩三、小林 英男、樋口 洵、高 允宝、片田 康行、深倉 寿一、笠井 憲一、仲尾 元六、船田 立夫、JAERI-M Report 91-224、「原子力構造材料の低サイクル疲労データ集」、日本原子力研究所、1992
- [51] H. Abe, A. Hirano, K. Sakaguchi and K. Iida, "Fatigue Lives of Carbon Steel STS410 in LWR Water Environments", ASME PVP-Vol. 386, 1999, pp. 241-247
- [52] 佐藤 俊司他、鉄と鋼（講演概要集）、Vol. 72、No. 5、p. S568、1986
- [53] 外山 和男他、住友金属、Vol. 36, No. 4, p. 3257, 1984
- [54] 小林、成本、他、川崎製鉄技報、Vol. 12, No. 1, p. 65, 1984
- [55] O. Chopra D. Gavenda and W. Shack, "Environmentally Assisted Cracking in Light Water Reactors", NUREG/CR-4667, ANL-95/41, Vol. 20, 1995
- [56] O. Chopra and W. Shack, "Effects of LWR Coolant Environments on Fatigue Design Curves of Carbon and Low-Alloy Steels", NUREG/CR-6583, ANL-97/18, 1998
- [57] M. Higuchi, K. Iida, M. Saito and K. Ogawa, "Evaluation of Environmental Effects

on Low Cycle Fatigue Life of Carbon Steel under Changing Strain Rate Conditions",
ASME PVP Vol. 374, pp. 175-182, 1998