

## 討25 種々の高張力鋼の海中での腐食疲れき裂伝播挙動

金属材料技術研究所筑波 ○角田方衛, 内山郁  
丸山典夫

### 1. はじめに

海水環境下での疲れ試験においては、普通、低繰返し速度が使用される。そのために疲れき裂伝播速度、 $da/dN$ 、の多くは応力拡大係数範囲、 $\Delta K$ 、が50~60  $\text{Kg}/\text{mm}^{3/2}$ 以上で求められているので、低 $\Delta K$ 領域でのき裂伝播挙動には不明な点が多い。さらに海水の $da/dN$ への影響割合は海水の温度、成分、PH、などにより異なると考えられるにもかかわらず、海水の条件は個々の研究者により異なっている。それらの海水下での疲れき裂伝播速度、 $(da/dN)_{cor}$ 、の相互比較に際しては誤ちをおかす恐れがある。

本報告は上記のことを考慮して、種々の高張力鋼を用いて、広い $\Delta K$ 領域にわたって、応力比 $R=0.1$ および $0.5$ について大気中および人工海水下での $da/dN$ を求め、さらに破面を検討することにより、海水環境下での高張力鋼の疲れき裂伝播特性を明らかにすることを目的とする。

### 2. 実験方法

#### 2.1 対象材料

HT80, HP9-4-20, HY140, HY180 および18Ni(200) maraging鋼を用いた。市販のHT80鋼以外の各鋼は20kg高周波真空溶融炉で溶製し、鍛造、圧延により7mm厚の板材にした。各鋼の化学組成をTable 1に示す。

Table 1 化学組成(%), (S含有量は各鋼とも0.006以下)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Co	V	Cu	$\sigma_b, \text{Kg}/\text{mm}^2$
HT80	0.13	0.27	0.87	1.0	0.5	0.44	—	0.04	0.18	83
HP9-4-20	0.21	0.12	0.22	9.3	0.81	0.94	4.89	0.1	—	155
HY140	0.13	0.25	0.70	5.5	0.48	0.74	—	0.1	0.98	120(615T) 135(200T)
HY180	0.13	0.13	0.17	9.8	1.68	0.90	7.81	—	—	140
18Ni Maraging	<0.01	—	—	18.0	—	2.04	7.46	—	—	138

各種鋼板に対して 下記のような熱処理を施した。

HP9-4-20 : (900°C×1hr)→(AC)→(815°C×1hr)→(WQ)→(550°C×5hr)→(WQ)

HY140 : (900°C×2hr)→(AC)→(850°C×1hr)→(WQ)→(615°C×1hr)→(WQ)

↳(200°C×1hr)→(WQ)

HY180 : (925°C×2hr)→(WQ)→(830°C×2hr)→(WQ)→(510°C×10hr)→(WQ)

18Ni maraging : (815°C×1hr)→(AC)→(482°C×3hr)→(AC)

(※HT80鋼 930°C焼入, 650°C焼もどし)

#### 2.2 疲れ試験

(a) 試験片形状 ~ 5mm厚, 40mm幅の片側切欠付板試験片を使用。

(b) 疲れ試験

(i) 試験機 ~ ±10t 電気油圧サーボ型疲れ試験機 (インストロン社製)

(ii) 雰囲気 ~ 大気および人工海水。人工海水成分はASTMによる。水温 30°C, PH 7.8~8.2

(iii) 応力比 ~ 0.1 および 0.5, 引張-引張。

(iv) 繰返し速度 ~ 16.7Hz (1000cpm), 0.5Hz (30cpm), 0.167Hz (10cpm)

(Ⅳ)  $\Delta K$  の計算  $\sim \Delta K = f(a) \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$ ; ここで  $\Delta \sigma$  は応力範囲,  $f(a)$  はき裂長さ  $a$  に依存する補正項で, ASTM-STP 410 より求めた。

(Ⅴ) き裂長さの測定  $\sim$  倍率  $\times 50$  で顕微鏡により直接測定

### 3 結果および考察

#### 3.1 $R=0.1$ の場合の大気中および海水下での疲れき裂伝播挙動の比較

大気中での疲れき裂伝播速度  $(da/dN)_{air}$  および海水下での疲れき裂伝播速度  $(da/dN)_{cor}$  と  $\Delta K$  との関係の一例を Fig. 1 および 2 に示す。さらに繰返し速度  $f=0.167$  Hz (10cpm) における  $(da/dN)_{cor}$  と  $(da/dN)_{air}$  との比,  $\gamma_{10}$ , と  $\Delta K$  との関係を Fig. 3 に示す。これらの図から両環境下での  $da/dN$  の違いに関して次のことがわかる。

(1)  $f=16.7$  Hz の場合 測定した全  $\Delta K$  領域にわたって  $(da/dN)_{cor} \approx (da/dN)_{air}$

(2) HY180, 18Ni maraging, および HY140-200T (200°C 焼きもどし) 鋼においては  $\Delta K < 20 \sim 40 \text{ kg/mm}^{3/2}$  の低  $\Delta K$  領域において  $\gamma_{10} \leq 1$  であるが,  $\Delta K$  の増加とともに  $\gamma_{10}$  は急激に増加する。そして  $\Delta K = 80 \sim 100 \text{ kg/mm}^{3/2}$  において最大値 ( $\gamma_{10} \approx 3$ ) を示した後,  $\gamma_{10}$  は  $\Delta K$  の増加とともに減少する。  $\Delta K > 250 \text{ kg/mm}^{3/2}$  では  $(da/dN)_{cor} \approx (da/dN)_{air}$ 。すなわち, 海水の疲れき裂伝播速度への影響は中間  $\Delta K$  領域では顕著であるが, 低  $\Delta K$  および高  $\Delta K$  領域ではほとんどないことを示している。

(3) HT80 鋼は (2) の鋼と同じ傾向であるが, 本鋼においては低  $\Delta K$  領域においても影響は顕著である。

(4)  $\gamma_{10}$  の最大値に対して SCC はほとんど影響しないと考えられる。それは以下の理由による。海水環境下での  $(da/dN)_{cor}$  には SCC が影響すると考えられている。繰返し荷重下の  $K_{ISCC}$  は定荷重下の  $K_{ISCC}$  より低い。18Ni maraging 鋼の定荷重での  $K_{ISCC}$  は  $150 \sim 250 \text{ kg/mm}^{3/2}$  であり, SCC は  $(da/dN)_{cor}$  に影響していると思われる。HP9-4-20 鋼のそれは  $400 \text{ kg/mm}^{3/2}$ , HY180 鋼のそれは  $500 \sim 600 \text{ kg/mm}^{3/2}$  であり, これらの鋼においては SCC は  $(da/dN)_{cor}$  にはほとんど影響していないと思われる。また, HT80 鋼は最大引張強さが  $83 \text{ kg/mm}^2$  であるので SCC の  $(da/dN)_{cor}$  への影響はほとんどないと思われる。SCC の  $(da/dN)_{cor}$  への影響の有無に関係なく,  $\gamma_{10}$  の最大値は (2) および (3) における 4 鋼種において約 3 である。したがって SCC は  $\gamma_{10}$  の最大値へはほとんど影響しないといえる。

(5) HY140-615T (615°C 焼きもどし) および HP9-4-20 鋼においては,  $\gamma_{10}$  は  $150 > \Delta K > 40 \text{ kg/mm}^{3/2}$  ではない一定値を示す。その値は前者においては約 1.6, 後者においては 1.9 である。低  $\Delta K$  および高  $\Delta K$  領域での  $\gamma_{10}$  は中間  $\Delta K$  でのそれらに比べて低い。本 2 鋼種は (2) および (3) における鋼種に比べて全般に  $\gamma_{10}$  は低い。したがって HY140-615T 鋼は使用した 6 鋼中で最も優れた耐腐食疲れき裂伝播特性を有していると言える。

(6) (2), (4) および (5) より海水の  $da/dN$  への影響度合は鋼の化学組成および微視組織 (焼きもどし温度) に依存するが静的強度レベルにはあまり関係しないことがわかる。(引張強さは Table 1 参照)

#### 3.2 大気および人工海水環境下での $R=0.5$ の場合の疲れき裂伝播挙動と $R=0.1$ の場合のそれとの比較

$R=0.5$  の場合の  $(da/dN)_{cor}$  および  $(da/dN)_{air}$  と  $\Delta K$  との関係の一例を Fig. 4 に示す。  $\gamma_{10}$  と  $\Delta K$  との関係に整理しなおして, それを Fig. 5 に示す。同図には  $R=0.1$  の場合の関係も併記してある。これらの図より下記のことがわかる。

(1) 低  $\Delta K$  領域では  $R=0.5$  の場合の  $\gamma_{10}$  は  $R=0.1$  の場合のそれより高いが, 高  $\Delta K$  領域では  $\gamma_{10}$  は  $R=0.5$  と  $0.1$  の間で大きな相違はない。

(2)  $R=0.5$  の場合の  $\gamma_{10}$  の最大値は  $R=0.1$  の場合のそれらに比べて約  $20 \sim 40 \text{ kg/mm}^{3/2}$  低い  $\Delta K$  で生じる。

(3)  $R=0.1$  で高い  $\gamma_{10}$  の最大値 ( $\approx 3$ ) を示す 18Ni maraging および HY140-200T 鋼の  $R=0.5$  に

おける  $r_{10}$  の最大値は  $R=0.1$  のそれとだいたい同じである。しかしながら、 $R=0.1$  と比較的低い  $r_{10}$  の最大値 ( $\approx 1.9$ ) を示す HP9-4-20 鋼の  $R=0.5$  における  $r_{10}$  の最大値は約 3 である。

Fig. 5 を  $r_{10}-K_{max}$  曲線に整理しなおして Fig. 6 に示す。同図より a)  $r_{10}$  の最大値を示す  $\Delta K$  値は  $R=0.1$  の場合と  $R=0.5$  の場合でだいたい一致する、b) 低  $\Delta K$  領域において、 $r_{10}-\Delta K$  曲線の場合と異なり、 $R=0.1$  の  $r_{10}$  が  $R=0.5$  の  $r_{10}$  より大きい、および c) 高  $\Delta K$  領域において、 $R=0.5$  の  $r_{10}$  が  $R=0.1$  の  $r_{10}$  より大きいことがわかる。

以上の結果より  $r_{10}$  は低  $da/dN$  においては  $K_{max}$  および  $\Delta K$  に依存し、そして高  $da/dN$  領域においては主として  $\Delta K$  に依存していると考えられる。

$r_{10}$  の最大値は SCC の影響の有無、 $R=0.1$  あるいは  $0.5$ 、そして鋼種あるいは微視組織に關係なく約 3 が最大である。そして  $f=16.7 \text{ Hz}$  の場合  $r_{1000} \approx 1$  であることを考へ合せると本実験した鋼種の範囲では  $r_{10}$  の最大値は繰返し速度によりだいたいきまってしまうと言える。

### 3.3 破面特性

海水の  $da/dN$  への影響は Fig. 3 に示したように  $\Delta K = 80 \sim 100 \text{ Kg/mm}^{3/2}$  で最も大きく、 $\Delta K$  がそれより低くなるか高くなるにしたがって減少する。本実験で使用した鋼中、海水の影響を比較的受けやすい 18Ni maraging 鋼について  $da/dN$  と破面との対応を調べた。

大気中での破面破面特性を Fig. 7 に示す。  $\Delta K < 70 \text{ Kg/mm}^{3/2}$  では、 $30 > \Delta K > 20 \text{ Kg/mm}^{3/2}$  において粒界割れがセットが見られる以外は、全般に Photo. 1 に示すように微細な延性破面である。  $\Delta K > 70 \sim 80 \text{ Kg/mm}^{3/2}$  になるとプラト-状破面上に striation 模様が現われるようになり、striation の割合は  $\Delta K$  の増加とともに増加する。

$f=0.167 \text{ Hz}$  における海水下での破面特性を Fig. 8 に示す。  $\Delta K = 50 \text{ Kg/mm}^{3/2}$  では破面は Photo. 2 に示すように粒界割れあるいは縦へき割れと思われる比較的平坦な破面を一部呈しているが、破面の半分近くは大気中の破面に類似した延性破面を呈している。  $r_{10}$  は同図に併記したように  $\Delta K \approx 50 \text{ Kg/mm}^{3/2}$  から増加しはじめる。

$\Delta K = 80 \text{ Kg/mm}^{3/2}$  では海水下の破面の大部分は Photo. 3 に示すようにへき割れあるいは縦へき割れのような平坦な破面を示す。この傾向は試験片板厚方向の中心に近いほど強く、試験片表面近くでは striation 状の腐食破面がみられる。この  $\Delta K$  領域は  $r_{10}$  の最も大きい、すなわち海水の疲れき裂伝播速度への影響の最も大きい  $\Delta K$  領域である。

$\Delta K > 120 \sim 130 \text{ Kg/mm}^{3/2}$  になると海水下の破面においても Photo. 4 に示すようにへき割れあるいは縦へき割れ以外に striation 破面も示すようになり、 $r_{10}$  は  $\Delta K$  の増加とともに低下しはじめる。そして  $\Delta K \approx 250 \text{ Kg/mm}^{3/2}$  ではほとんど striation 破面となり、 $r_{10} = 1$  となる。上記の Fig. 7 および 8 から striation の現われる  $\Delta K$  下限値は海水下においては大気中より  $30 \sim 50 \text{ Kg/mm}^{3/2}$  高いことがわかる。

これまで述べてきたへき割れ、縦へき割れあるいは粒界割れのような脆性割れ破面の割合と  $\Delta K$  との関係は Fig. 9 のようになる。この図および  $r_{10}-\Delta K$  曲線 (Fig. 3 参照) より脆性割れ破面率と  $r_{10}$  との間に明白な相関性が存在することがわかる。

### 3.4 最後に

海水の疲れき裂伝播速度への影響度合は鋼種、応力比などにより異なること、脆性破面率とよく対応することなどを明らかにした。

### 3.5 文献

省略する。

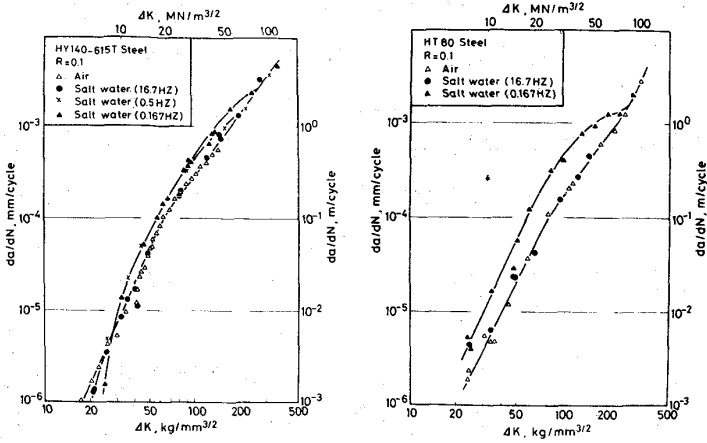


Fig. 1

Fig. 2

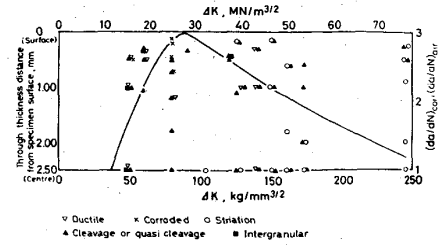


Fig. 8

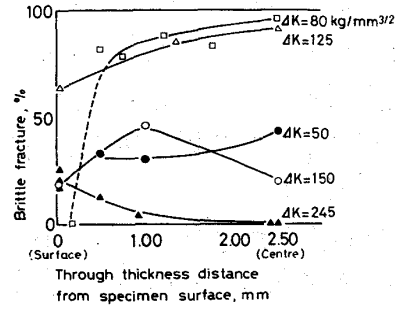


Fig. 9

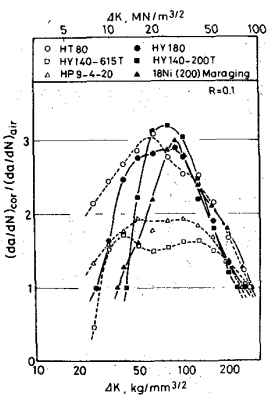


Fig. 3  $r_{10}$  と  $\Delta K$  との関係

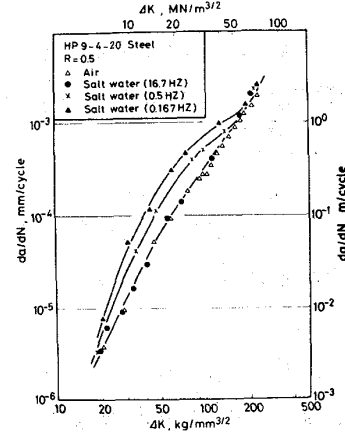


Fig. 4

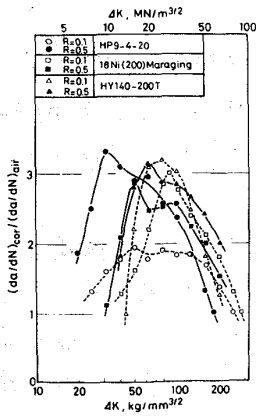


Fig. 5

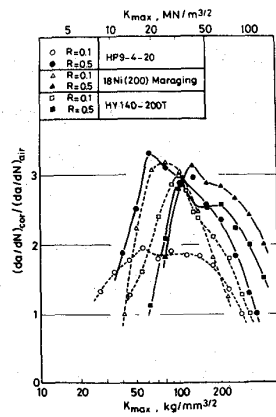


Fig. 6

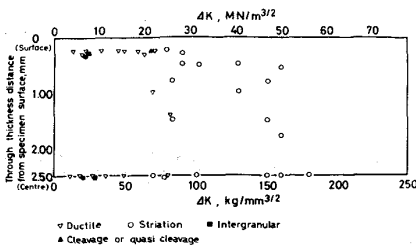


Fig. 7

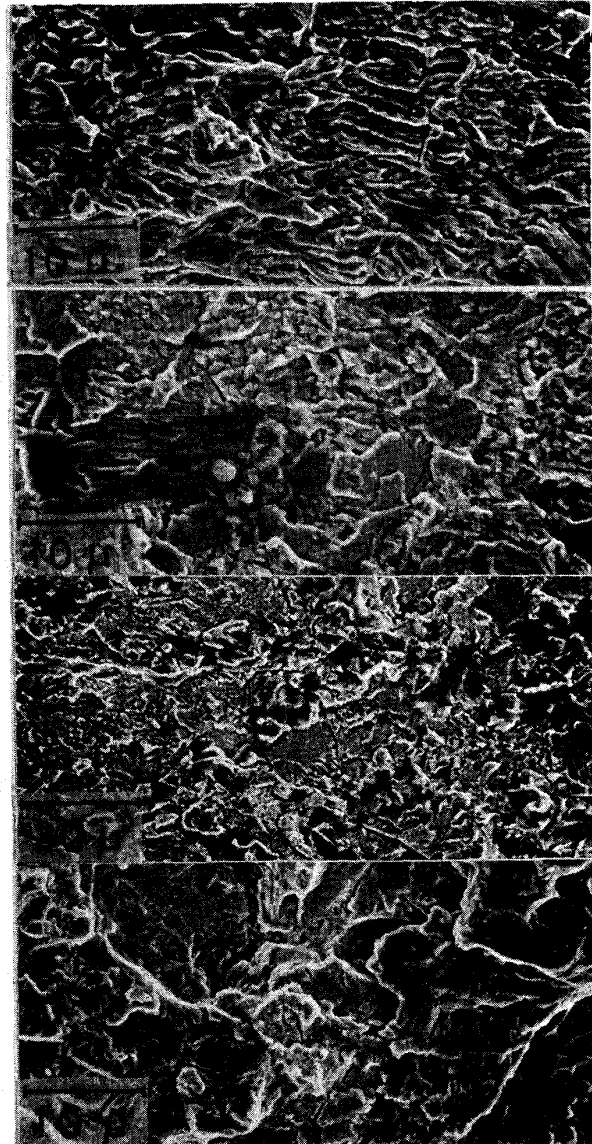


Photo. 1  
大気  
 $\Delta K = 50$   
kg/√mm

Photo. 2  
海水  
 $\Delta K = 50$   
kg/√mm

Photo. 3  
海水  
 $\Delta K = 80$   
kg/√mm

Photo. 4  
海水  
 $\Delta K = 150$   
kg/√mm