

© 1992 ISIJ

論 文

# 高張力鋼の人工海水中陰極防食下における 応力振幅急変下の疲労き裂発生と伝播

丸 山 典 夫\*・角 田 方 衛\*<sup>2</sup>

## Effect of Stress Amplitude Transient on Fatigue Crack Initiation and Propagation of High Strength Steel in Synthetic Sea Water under Cathodic Protection

Norio MARUYAMA and Masae SUMITA

### Synopsis :

The effect of varying stress on fatigue life under cathodic protection by a zinc sacrificial anode and freely corroding condition in synthetic sea water and in air was investigated using 800 MPa grade high strength steel notched specimens ( $K_t=3.5$ ).

The main results obtained are as follows :

1) Under a constant stress amplitude (CSA), fatigue lives in sea water under cathodic protection are shorter than those in air. However, under two step stress amplitude (TSSA), fatigue lives under cathodic protection are rather longer than those in air.

2) In a low stress amplitude region, fatigue lives under TSSA are shorter than those under CSA in air and under cathodic protection.

3) Even when the higher stress amplitude in TSSA is much lower than the values shown by the S-N curves under CSA, the failure of notched specimens occurs.

4) Under the free corrosion potential, there is no difference in fatigue lives between under TSSA and under CSA, and Miners rule exists between them.

5) Under TSSA, macroscopic crack growth rate is retarded in air and under cathodic protection, and the effect of TSSA on macroscopic crack growth is in reverse to that on crack initiation and microscopic crack growth.

**Key words :** high strength steel ; notch ; fatigue life ; varying stress ; sea water ; cathodic protection ; in air.

## 1. はじめに

海水は鉄鋼材料にとって腐食性の強い苛酷な環境であるので、海洋構造物には通常陰極防食や塗装が施されている。海洋構造物に加わる動的荷重の原因として波浪、台風、潮流等が考えられる。これらはいずれも一定振幅ではなく、変動振幅である。

一般に海洋構造物には応力集中係数  $K_t=3.5$  程度の応力集中部が多数存在する。また、海洋構造物における破壊の原因のひとつに腐食を伴った疲労がある<sup>1)</sup>。上記のことを考慮すると、海水中陰極防食下における変動応力下の疲労破壊挙動を把握しておくことは重要である。しかしながら、応力集中部を有する材料の海水中陰極防

食下の疲労寿命に関する研究は少なく<sup>2)~5)</sup>、しかもそれらは一定応力振幅に関するものである。著者らは先に海水中で陰極防食を施した一定応力振幅下の切欠付き試験片は耐久限より低い応力振幅でも破断し、それらは応力比  $R$  や  $K_t$  の影響を受けることを報告した<sup>6)</sup>。

変動応力下の疲労に関しては大気中で多くの研究が行われているが、疲労損傷に対して線形加算則は成立しないことが多い。耐久限や、き裂伝播下限界値以下の過小応力が多数繰り返されるとき、線形加算則から推定される疲労損傷より大きい損傷になることが多い<sup>7)~9)</sup>。疲労き裂伝播速度への応力変動の影響はき裂先端の塑性域の残留応力<sup>11)</sup>や、き裂開閉口挙動<sup>12)</sup>により説明されている。これらの理論によれば疲労損傷は変動応力の順序の

昭和 62 年 10 月本会講演大会にて発表 平成 3 年 12 月 10 日受付 (Received Dec. 10, 1991)

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

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

Table 1. Chemical composition (wt%) and mechanical properties.

|      | C     | Si   | Mn   | P     | S     | Cu   | Ni   | Cr   | Mo   | V    | Al    | $\sigma_{0.2}$ (MPa) | $\sigma_B$ (MPa) | $\delta$ (%) |
|------|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|----------------------|------------------|--------------|
| HT80 | 0.105 | 0.24 | 0.82 | 0.007 | 0.004 | 0.25 | 0.96 | 0.45 | 0.41 | 0.04 | 0.072 | 780                  | 831              | 26.6         |

影響を著しく受けることになるが、線形加算則においてはこれらが考慮されていない。一方、き裂発生に対する変動応力の影響に関してはほとんど研究されていない。

本報告は上記のことを考慮して、市販の HT80 鋼を用いて、 $K_t=3.5$  の切欠付き試験片の海水中自然腐食下、Zn 犠牲陽極による陰極防食下、および大気中における 2 段多重変動応力振幅下の疲労寿命を解析することを目的とする。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用鋼種

市販の HT80 鋼を使用した。化学成分および機械的性質を Table 1 に示す。

### 2.2 疲労試験

#### 1) 試験片形状

a) 切欠付き試験片<sup>6)</sup>:  $K_t=3.5$  の環状切欠付き。

b) 平滑試験片<sup>6)</sup>: 砂時計型。試験片は 0 番エメリー紙で試験片軸方向に最終研磨を施し、アセトンで脱脂した。

c) 標準 CT 試験片<sup>13)</sup>: 厚さは 1/2T。

#### 2) 疲労試験

a) 試験機: 疲労試験は  $\pm 10$  t の電気油圧サーボ型疲労試験機を用いた。

b) 応力比:  $R=0.1$  および  $0.7$  (引張り-引張り)。

c) 繰返し速度: 海水中では 5 Hz, 大気中では 20 Hz。

d) 波形: 正弦波。

e) 2 段多重変動応力条件。

i) 応力振幅比: 高い方の 2 次応力振幅  $\sigma_{a,2}$  と低い方の 1 次応力振幅  $\sigma_{a,1}$  の比は 1.5 とした。

ii) 変動応力のパターン: 次の 2 種類の変動応力振幅パターンを使用した。

[パターン 1]:  $\sigma_{a,1} \times 9$  回 +  $\sigma_{a,2} \times 1$  回

[パターン 2]:  $\sigma_{a,1} \times 900$  回 +  $\sigma_{a,2} \times 100$  回

$R=0.1$  および  $0.7$  の各変動応力振幅パターンを Fig. 1 a) および b), そして Fig. 2 a) および b) に示す。

f) 環境:

i) 人工海水中 (ASTM-D1141-75) 自然腐食下 ( $-685$  mV vs. Ag/AgCl) および人工海水中陰極防食下 ( $-1030$  mV vs. Ag/AgCl)。後者は Zn 犠牲陽極用 Zn 板をリード線で試験片に溶接した。水温  $30^\circ\text{C}$ , 空気飽和, 流量は 1 l/min で行った。

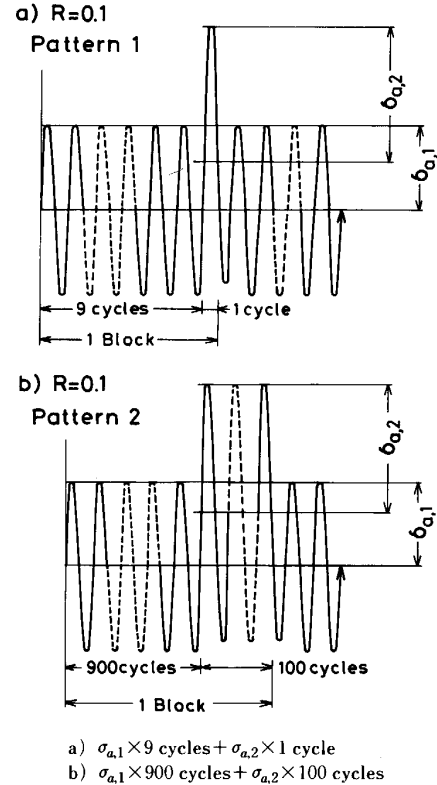


Fig. 1. Varying stress pattern at a stress ratio of 0.1.

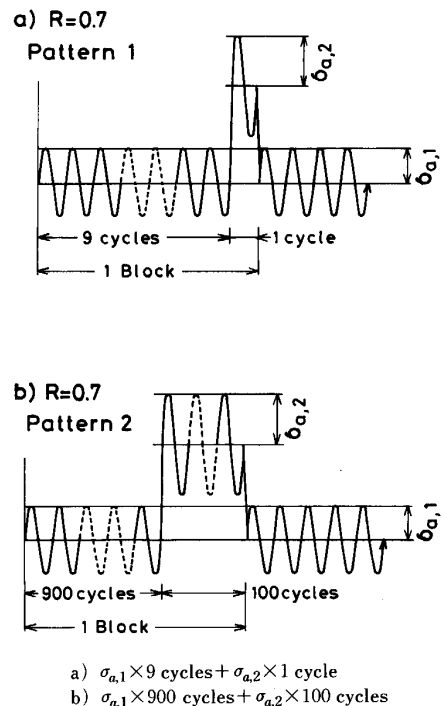


Fig. 2. Varying stress pattern at a stress ratio of 0.7.

ii)大気中.

3)粒界破面率測定

鋳をドータイト試薬で除去後走査型電子顕微鏡により撮影した破面写真より, 粒界破面率を測定した.

2.3 変動応力試験結果の整理法

変動応力試験結果には線形累積損傷仮説である Miner 則を適用し, 等価応力振幅  $\sigma_{a,eq}$  および等価繰返し数  $N_{eq}$  で整理した<sup>10)</sup>.

$$\sigma_{a,eq} = \sqrt{\sum(\sigma_{a,i}^\alpha \cdot n_i) / \sum n_i} \dots\dots\dots(1)$$

$$N_{eq} = \sum n_i \dots\dots\dots(2)$$

ここで  $\sigma_{a,i}$  および  $n_i$  はそれぞれ各段での応力振幅および繰返し数, そして  $\alpha$  は一定応力振幅試験による S-N 曲線,

$$\sigma_a^\alpha \cdot N_f = C \dots\dots\dots(3)$$

の指数である. ここで  $\sigma_a$  は応力振幅,  $N_f$  は破断繰返し数,  $C$  は定数である. なお, 本報では, 2 段多重変動応力条件を用いたので  $i=1, 2$  である.

3. 結 果

3.1  $K_t=3.5$  の切欠付き試験片の一定応力振幅下における S-N 曲線

S-N 曲線を Fig. 3 に示す. 全般に陰極防食下の疲労寿命は大気中に比べて短い. この傾向は前報の 0.5 Hz の結果<sup>6)</sup>と同じである.  $R=0.7$  の場合大気中, 陰極防食下ともに  $R=0.1$  の場合に比べて短くなる. 海水中自然腐食下では S-N 曲線上には  $10^7$  回までに折れ曲がり点および耐久限度は存在しない.

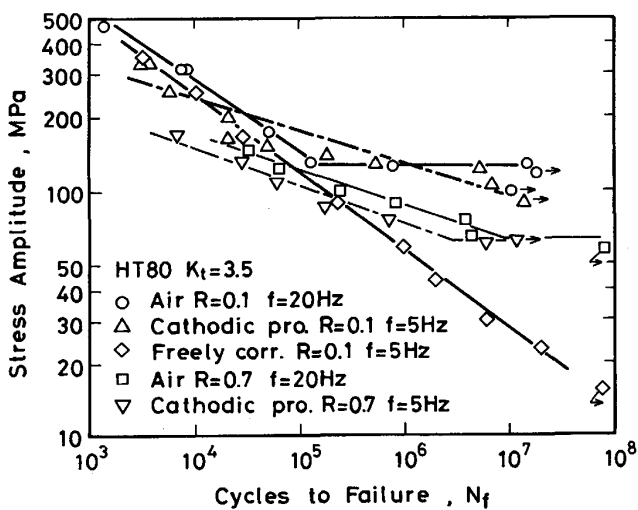


Fig. 3. Relation between stress amplitude and cycles to failure at a constant stress amplitude.

3.2  $K_t=3.5$  の切欠付き試験片の変動応力振幅下における S-N 曲線

3.2.1  $R=0.1$

1)大気中

大気中における  $K_t=3.5$  の切欠付き試験片の S-N 曲線を Fig. 4 に示す. 同図中破線は S-N 曲線を疲労限度  $\sigma_w$  以下に延長した, 修正 Miner 則を適用のための仮想破断繰返し数である. 高応力および低応力振幅域において, 変動応力振幅パターン 1 の寿命は一定応力振幅の寿命に比べて短い. 低応力振幅域ではパターン 2 の寿命はパターン 1 の寿命に比べて短い. パターン 1 およびパターン 2 において, 低応力振幅域ではそれぞれの変動応力振幅パターン中の大きい方の応力振幅 (2 次応力振幅) が一定応力振幅下の S-N 曲線より十分低くてもそ

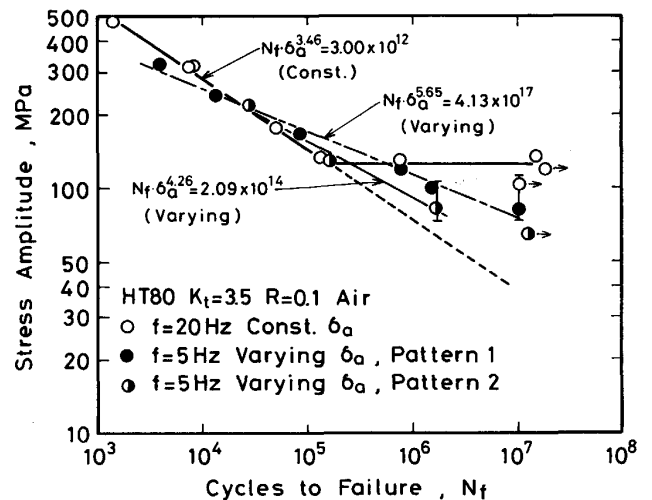


Fig. 4. Relation between stress amplitude and cycles to failure at a stress ratio of 0.1 in air.

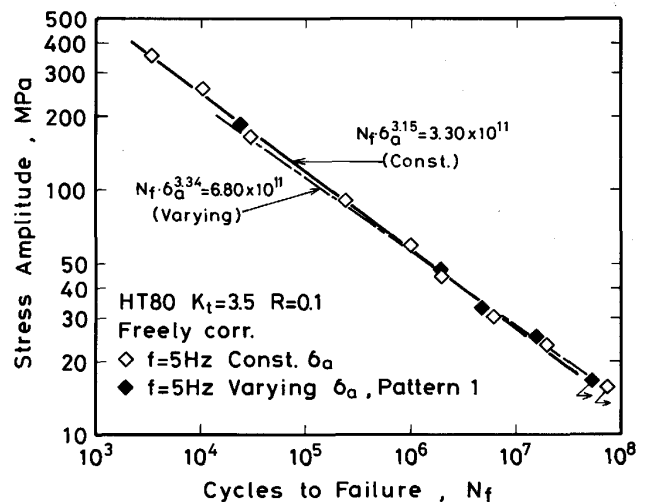


Fig. 5. Relation between stress amplitude and cycles to failure at a stress ratio of 0.1 in sea water under freely corroding condition.

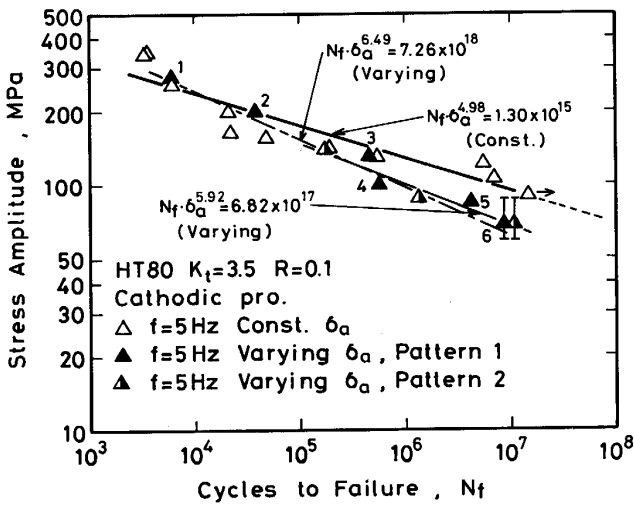


Fig. 6. Relation between stress amplitude and cycles to failure at a stress ratio of 0.1 in sea water under cathodic protection.

の試料は破断する。図中に変動応力振幅範囲が棒線で示されている。

2) 海水中自然腐食下

$K_t = 3.5$  の切欠付き試験片の S-N 曲線を Fig. 5 に示す。一定応力振幅下では  $10^8$  回までに耐久限度は存在しない。変動応力振幅パターン 1 の寿命は一定応力振幅下の寿命とほぼ同じである。

3) 海水中陰極防食下

$K_t = 3.5$  の切欠付き試験片の S-N 曲線を Fig. 6 に示す。一定応力振幅下では  $10^7$  回までに耐久限度は存在しない。同図中破線は S-N 曲線を高繰返し数側に延長した、修正 Miner 則を適用するための仮想破断繰返し数である。

低応力振幅域において、変動応力振幅パターン 1 の破断寿命はパターン 2 の寿命とほぼ同じであり、そして両者とも Fig. 4 に示した大気中の場合と同様に一定応力振幅下の寿命より短い。

$3 \cdot 2 \cdot 2 \quad R = 0.7$

大気中および陰極防食下の S-N 曲線を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。高応力振幅域では変動応力振幅下の寿命は一定応力振幅下の寿命より長くなる傾向にある。一方、低応力振幅域では変動応力振幅下の寿命は、一定応力振幅下の寿命に比べて短くなる傾向にある。変動応力振幅パターン 2 の寿命がパターン 1 の寿命より短いのは  $R = 0.1$  の場合と同様である。

3.3 破面観察

大気中と陰極防食下では破面上に現れる粒界割れの挙動は異なる。

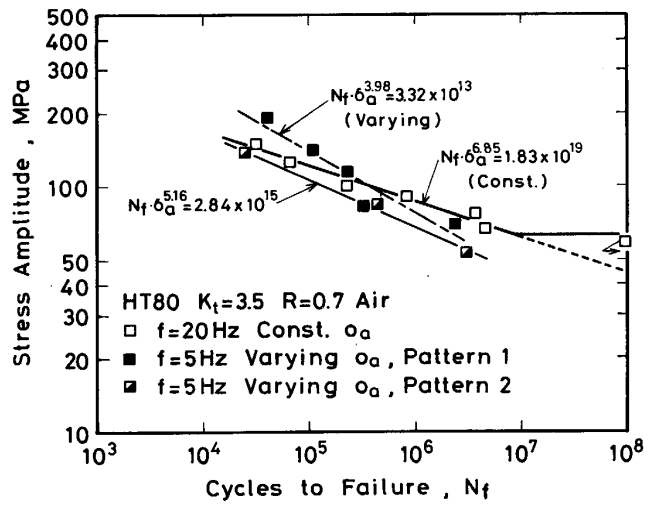


Fig. 7. Relation between stress amplitude and cycles to failure at a stress ratio of 0.7 in air.

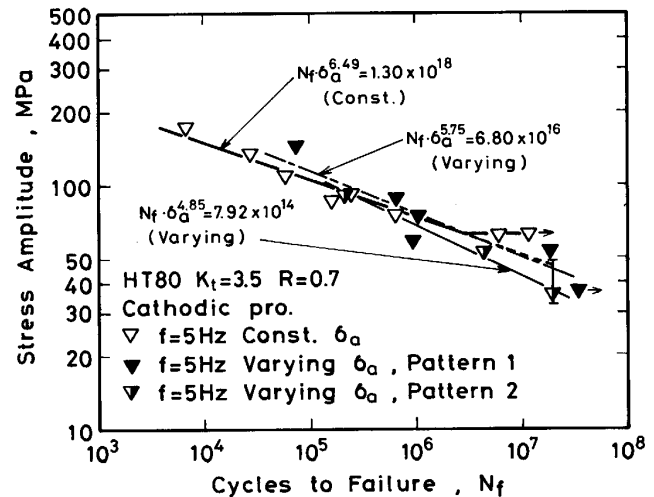


Fig. 8. Relation between stress amplitude and cycles to failure at a stress ratio of 0.7 in sea water under cathodic protection.

Fig. 4 に示した大気中の S-N 曲線の折れ曲がり点より短寿命側で破断した試料の破面上には粒界割れはほとんど観察されない。しかし折れ曲がり点より長寿命側で破断した試料の破面上にはき裂発生箇所から 1~2.5 mm にかけて粒界割れが観察される。

一方、Fig. 6 に示した陰極防食下で破断したほぼ全試料の破面上には粒界割れが観察される。その量は高応力振幅域で少なく、低応力振幅域で多い。例えば、Fig. 6 中試料 1 の破面上では粒界割れはき裂発生箇所から 0.3 mm まで観察され、試料 4 においては 2.26 mm まで観察され、そして試料 6 においては 3.5 mm まで観察される。

$10^7$  回近くで破断した試料破面上の粒界破面率を Fig.

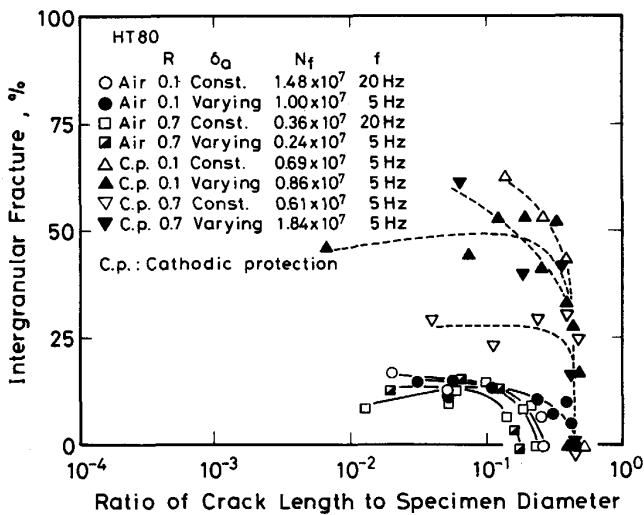


Fig. 9. Area fraction of intergranular fracture versus ratio of crack length to specimen diameter.

9に示す。同図より下記のことがわかる。

(a) 粒界破面率は大気中では10~15%,そして陰極防食下では40~60%である。

(b) 陰極防食下で粒界破面の現れる領域は大気中のその領域に比べて1.5~2倍広い。

(c) 陰極防食下および大気中において粒界破面率は一定応力振幅下と変動応力振幅下でほぼ同じである。

## 4. 考 察

### 4.1 疲労寿命への陰極防食の影響

陰極防食下における高張力鋼の疲労に対してカソード分極下で発生する水素と電解生成物が影響を及ぼす。水素は切欠きからのき裂発生寿命を短縮し、き裂伝播速度を加速する。これに対してすべり帯やき裂面へ付着した電解生成物はすべりの阻止<sup>2)</sup>と、き裂閉口を誘起して、き裂発生寿命およびき裂伝播速度を遅延させる。この水素と電解生成物の疲労に対する効果はともに時間依存型であるが、両者は相殺する関係にある。Fig. 10に示すように一定応力振幅下において平滑試験片では陰極防食下と大気中で疲労寿命はほぼ等しいこと<sup>6)</sup>、そして $K_t = 3.5$ の切欠付き試験片では陰極防食下の寿命は大気中の寿命より短いこと (Fig. 3 参照) を考慮すると、き裂発生寿命に対しては電解生成物による遅延効果がより大きく、き裂伝播に対しては水素による加速効果がより大きく作用していると考えられる。なぜならば平滑試験片においてはき裂発生寿命が全寿命の大半を占めているのに対して、切欠付き試験片では全寿命に対するき裂発生寿命の割合が少なくなるからである。

上述した一定応力振幅下における陰極防食下の疲労き

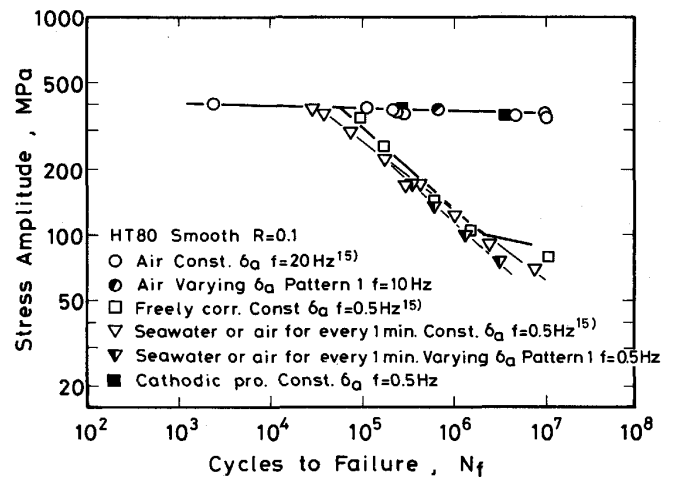


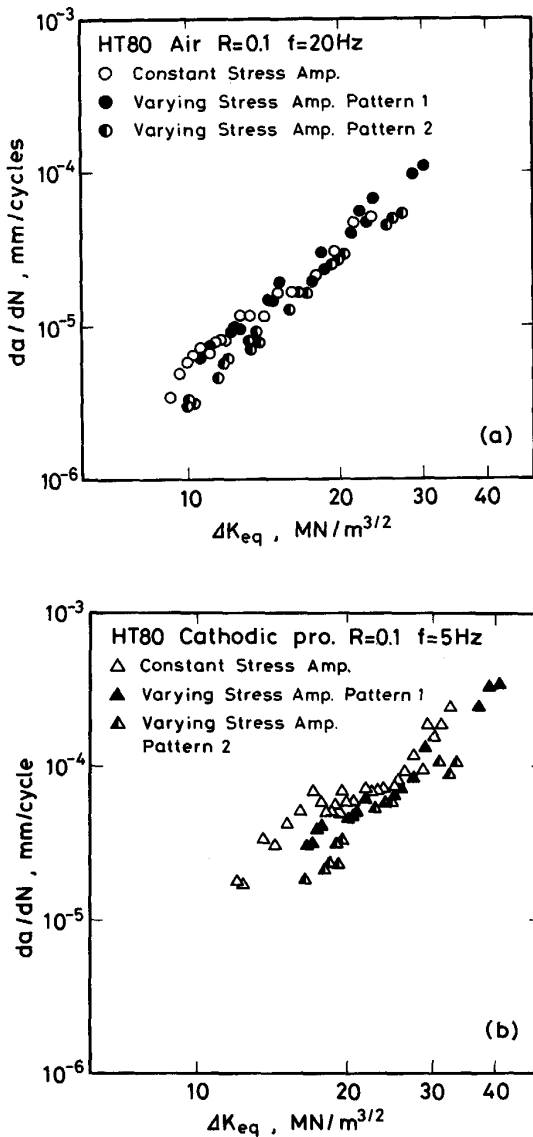
Fig. 10. Relation between stress amplitude and cycles to failure for smooth specimens at a stress ratio of 0.1.

裂発生と伝播に対する効果が変動応力振幅下でも同様に生じているかどうかに関しては不明である。一定応力振幅下では $K_t = 3.5$ の切欠付き試験片の陰極防食下の疲労寿命は大気中の寿命より短い。変動応力振幅下では陰極防食下の疲労寿命は大気中の寿命に比べて、同じかやや長くなる傾向にある (Fig. 4 と 6 および 7 と 8 参照)。これより一定応力振幅下では水素のき裂伝播に対する加速効果がみられるが、一方、変動応力振幅下では電解生成物付着による遅延効果が疲労寿命に対して強く影響を及ぼしていると考えられる。

標準 CT 試験片を用いて、Fig. 1 a) および b) に示す応力変動と同様の変動荷重下におけるき裂伝播速度を測定した結果を Fig. 11 a) および b) に示す。なお、変動応力拡大係数範囲  $\Delta K_{eq}$  は (1) 式の等価応力を用いて求めた。巨視的き裂伝播速度は変動応力振幅下では大気および陰極防食下で遅延するが、その遅延は陰極防食下で水素によるき裂伝播速度の加速がある  $\Delta K$  が  $10 \sim 20 \text{ MN/m}^{3/2}$  の領域で特に著しい。したがって変動応力振幅下で陰極防食下の疲労寿命が大気中の寿命よりやや長くなる傾向にあるのは、電解生成物の付着によるき裂発生および伝播の遅延、それに変動応力による水素のき裂伝播速度の加速効果の低減が原因していると考えられるが、これに関しては今後詳細な研究が必要である。

### 4.2 疲労寿命への変動応力の影響

変動応力下の疲労寿命をより明確にするためには、それをき裂発生への影響とき裂伝播への影響に分けて検討することが必要である。しかしき裂発生繰返し数を明確にすることは困難である。そこで切欠付き試験片に比べてき裂発生寿命の割合が高い平滑試験片による疲労試験



(a) In air (b) In sea water under cathodic protection

Fig. 11. Fatigue crack growth rate,  $da/dN$ , as a function of the variable stress intensity factor range,  $\Delta K_{eq}$ .

結果および巨視き裂伝播速度試験結果を切欠付き試験片の試験結果と比較する。なお、 $K_t = 3.5$  の切欠付き試験片による大気中一定応力振幅下の疲労試験では約 20  $\mu\text{m}$  のき裂長さに対するき裂発生寿命とき裂伝播寿命は同じ水準にある<sup>14)</sup>。

#### (a) 平滑試験片の疲労寿命

Fig. 10 に示したように大気中における変動応力振幅パターン 1 の寿命は一定応力振幅下の寿命とほぼ一致する。この場合、S-N 曲線の傾きが小さいので両試験条件下の寿命の差は現れにくい。1 min 周期で大気中と海水中を繰り返した疲労試験<sup>15)</sup>において、変動応力振幅パターン 1 の寿命は一定応力振幅下の寿命よりやや短

い。

#### (b) $K_t = 3.5$ の切欠付き試験片の疲労寿命

大気中および陰極防食下では変動応力振幅 (パターン 1) 下の寿命は高応力および低応力振幅域において一定応力振幅下の寿命より短い (Fig. 4 および Fig. 6 参照)。

#### (c) 巨視き裂伝播速度

き裂伝播速度は変動応力振幅により遅延する (Fig. 11 参照)。遅延の度合いは変動応力振幅パターン 1 よりパターン 2 において著しく、そして大気中より陰極防食下で水素による加速を生じる領域で著しい。

(c) より変動応力振幅下のき裂伝播寿命は一定応力振幅下のき裂伝播寿命より長いと推定される。これは (b) および全寿命のうちき裂発生寿命および微視き裂伝播寿命の割合が高い (a) における変動応力振幅下と一定応力振幅下での疲労寿命の長短関係とは逆である。すなわち今回の変動応力振幅は一定応力振幅に比べてき裂発生寿命および微視き裂伝播寿命を減少させ、そして巨視き裂伝播寿命を増加させると考えられる。

本実験では巨視き裂と微視き裂は区別されていない。微視き裂伝播に及ぼす変動応力の影響に関する研究によれば、過大応力振幅によるき裂伝播速度の加速は巨視き裂と微視き裂で同じ傾向を示す<sup>16)</sup>。一方、2 次応力振幅から 1 次応力振幅に応力が下降するときに、巨視き裂で生じる遅延が微視き裂でも同様に生じるかどうか明らかでない。

変動応力振幅の疲労損傷への影響に関する研究では 2 次応力振幅は一定応力振幅下の耐久限度より高く、そして 1 次応力振幅はそれより低い条件で行われている<sup>7-9)</sup>。そして 1 次応力振幅の疲労損傷へ与える影響が大きいことが明らかにされている。今回の切欠付き試験片において Fig. 4 および Fig. 6 に示したように、2 次応力振幅が一定応力振幅下の S-N 曲線より十分低くても大気中および陰極防食下でその試料は疲労破断する。これは一定応力振幅下では停留するき裂が変動する応力振幅下では停留しにくいことを意味する。切欠き底から発生した微視き裂の伝播限界応力は変動応力によって低められていると考えられる。

#### 4.3 疲労寿命への応力振幅トランジェントの影響

今回の実験で用いた変動応力振幅パターン 1 とパターン 2 では 1 次応力振幅の繰返し数と 2 次応力振幅の繰返し数の比および両応力振幅の比は一定である (繰返し数比は 9/1, そして応力振幅比は 1.5) が、その配列の仕方が異なっている。したがって、もし両パターン間で疲労寿命に違いがあれば、それは応力振幅トランジェント

数の違いに起因していると考えられる。パターン1の応力振幅トランジェント数はパターン2の応力振幅トランジェント数の100倍である。

$K_t = 3.5$ の切欠付き試験片の変動応力振幅パターン2の疲労寿命は、大気中および陰極防食下においてパターン1の寿命より短い (Fig. 4, 6, 7, 8 参照)。一方、パターン2の巨視き裂伝播寿命はパターン1の寿命より長いと推定される (Fig. 11 参照)。

巨視き裂伝播過程で過大応力が加わると応力上昇時にき裂伝播速度に加速が生じ、そして過小応力が加わると遅延が生じることが分かっている<sup>9)</sup>。変動応力振幅パターン2におけるように応力上昇後同じ応力振幅が100回繰り返されても加速に寄与するのは最初の1回だけであり、残りの99回には応力振幅のトランジェントがないので加速とは無関係である。一方、遅延は過大応力により生じたき裂先端の塑性変形の影響を受けた領域をき裂が通過するまで生じる。この加速と遅延は相殺する関係にある。Fig. 11をこの加速と遅延で説明することは可能である。しかし Fig. 11を説明する考え方と同じ考え方で Fig. 4, 6, 7, および8を説明することはできない。それはき裂発生へ及ぼす応力振幅トランジェントの影響が不明であること、そして微視き裂伝播に対する変動応力振幅による加速と遅延の効果が、前に述べたように巨視き裂伝播の場合とは逆になっている可能性があるからである。今後疲労き裂発生に関与するPSBおよび微視き裂へ及ぼす応力振幅トランジェントの影響についての研究が必要である。

## 5. 結 論

$K_t = 3.5$ の切欠付き800 MPa級高張力鋼試験片を用いて、海水中陰極防食下、自然腐食下および大気中で、そして一定応力振幅下および2種類の2段多重変動応力下で疲労試験を行い、下記の結論を得た。

(1)一定応力振幅下では陰極防食下の疲労寿命は大気中の寿命より短い。しかし変動応力振幅下では陰極防食下の寿命は大気中の寿命に比べて多少長い。

(2)大気中および陰極防食下において低応力振幅域では変動応力振幅下の寿命は一定応力振幅下の寿命より短い。変動応力振幅パターン2の寿命はパターン1の寿命より短い。

(3)大気中および陰極防食下で変動応力振幅の大きい方の振幅(2次応力振幅)が一定応力振幅下のS-N曲線より十分に低くてもその試料は疲労破断する。

(4)海水中自然腐食下では変動応力振幅(パターン1)下の寿命は一定応力振幅下の寿命とほぼ一致し、Miner則が成立する。

(5)大気中および陰極防食下では巨視き裂伝播速度は変動応力振幅下で遅延する。その傾向は変動応力振幅パターン2においてパターン1より著しく、また大気中より陰極防食下で水素によるき裂伝播速度の加速がある傾向で著しい。

(6)(2)および(5)より大気中および陰極防食下において、巨視き裂伝播に及ぼす変動応力の効果はき裂発生および微視き裂伝播に及ぼす効果とは逆である。

(7)約 $10^7$ 回で疲労破断した試験片破面において、陰極防食下で粒界破面の現れる領域は大気中のその領域に比べて1.5~2倍広い。粒界破面率は大気中で10~15%、そして陰極防食下では40~60%である。大気中および陰極防食下において粒界破面率は一定応力振幅下と変動応力振幅下ではほぼ同じである。

本研究結果の解析にあたり、有益な助言と討論を賜った金属材料技術研究所中沢興三博士および中曽根祐司博士に感謝する。

## 文 献

- 1) OTC 4236 Investigation of the "Alexander L. Kielland" Failure Metallurgical and Fracture Analysis (1982), p. 402
- 2) W. H. HARTT, P. E. MARTIN and W. C. HOPPER: Proc. Annu. off shore Technol. Conf. 11th, 2 (1979), p. 1331
- 3) Von R. POPERLING, W. SCHWENK and G. VOGT: Werkstoffe und Korrosion, 29 (1978), p. 445
- 4) 鉄鋼の海洋環境強度データベース (鉄鋼基礎共同研究会鉄鋼の環境研究部会編) 1 (1983)
- 5) 鉄鋼の海洋環境強度データベース (鉄鋼基礎共同研究会鉄鋼の環境研究部会編) 2 (1987)
- 6) 角田方衛, 丸山典夫: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 349
- 7) 岡崎章三, 中村 宏, 恒成利康: 材料, 27 (1979), p. 816
- 8) 村上敬直, 松田健次: 材料, 38 (1989), p. 1188
- 9) 小寺沢良一: 日本機械学会論文集 A 編, 49 (1983), p. 884
- 10) 中村 宏, 岡崎章三: 日本材料強度学会誌, 12 (1977), p. 57
- 11) S. MATSUOKA, K. TANAKA and M. KAWAHARA: Engg. Fracture Mech., 8 (1976), p. 507
- 12) W. ELBER: ASTM STP 486, (1971), p. 230
- 13) 鉄鋼の環境強度部会第1回シンポジウム, 鉄鋼の海洋環境共通試験とその解析 (日本鉄鋼協会編) (1983), 付15
- 14) S. PERSON: "Royal Aircraft Establishment" Technical Report 71109 (1971)
- 15) 丸山典夫, 角田方衛, 堀部 進: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 356
- 16) 藤田和孝, 小寺沢良一: 材料, 38 (1989), p. 520