

論 文

高強度鋼の海水環境各種条件下における
疲労強度丸山 典夫*・角田 方衛*²・堀部 進*²Fatigue Strength of a High Strength Steel in Various Sea Water
Environments

Norio MARUYAMA, Masae SUMITA and Susumu HORIBE

Synopsis:

The fatigue life was investigated in synthetic sea water at a constant flow rate (condition 1) and in the environment of repetition of the sea water and air for every 1 min (condition 2) using a 80kgf/mm² grade high strength steel at the frequency of 0.5Hz and 20Hz and at the stress ratio of 0.10. The following results are mainly obtained.

At the frequency of 0.5Hz and at the stress amplitude of about 35 kgf/mm² the fatigue life in condition 2 was only a half of that in condition 1. In condition 2, many cracks initiated at the root of the pits with spike-like shape which were about 50–60μm deep, and some of these cracks propagated and linked each other to failure. But in condition 1, many pits with cup-like shape which were less than 10μm deep hardly influenced the crack initiation.

The difference in fatigue life between condition 1 and condition 2 decreased with decrease of stress amplitude. At the stress amplitude of about 10 kgf/mm², pits with cup-like shape existed in conditions 1 and 2 which were about 10μm and 50–60μm deep respectively. They hardly influenced the crack initiation.

The same trend was observed at the frequency of 20Hz as at that of 0.5Hz.

1. は じ め に

海洋は鉄鋼材料にとつては腐食性の強い苛酷な環境である。さらに海洋構造物には波浪や台風などによる繰返し荷重が加わる。したがって実際の海洋構造物が破壊する場合、腐食を伴った疲れが重要な役割を演じている場合が多い¹⁾。海洋環境下における鉄鋼の腐食は海中あるいは海上に比べて飛沫帯において顕著であるという報告がある²⁾。しかし、疲れ強度と海洋環境との関わり方は明らかではない。海洋構造物用材料として普通 40–50 kgf/mm² 級鋼が使用されているが、海底石油掘削装置、沖合係留設備などさらに高強度の高張力鋼が使用される場合がある。

そこで市販の 80 kgf/mm² 級高張力鋼を用いて、一定流速下の海水中および 1 分周期で海水中と大気の繰返しの 2 種類の環境下で疲れ試験を行い、両環境間の疲れ寿命を比較検討した。

2. 実 験 方 法

2.1 使用鋼種

使用した鋼は市販の HT 80 鋼で、その化学成分と機械的性質を Table 1 に示す。

2.2 疲れ試験

2.2.1 試験片形状

疲れ寿命試験は直径 6φ, 7φ, 8φ の砂時計型試験片を使用した。また、き裂進展試験は 5mm 厚, 40mm

Table 1. Chemical compositions (wt%) & mechanical properties.

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	P	S	σ_y (kgf/mm ²)	σ_B (kgf/mm ²)	δ (%)
HT80	0.104	0.23	0.76	0.02	0.79	0.45	0.27	0.051	0.008	0.004	81.5	86.2	23.0

昭和 59 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 3 月 24 日受付 (Received Mar. 24, 1986)

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

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

幅の片側切欠付き板試験片を使用した³⁾。海水中的の疲れ試験に先立ち、大気中で予き裂を挿入した。

2・2・2 疲れ試験

(1) 試験機: ± 10 t 電気油圧サーボ型疲労試験機で3本の試験片を直列につなぐマルチタイプである。概略図を Fig. 1 に示す。

(2) 応力比 $R=0.10$

(3) 繰返し速度: 大気中では 20 Hz, 海水中では 0.5 Hz と 20 Hz

(4) 波形: 正弦波

(5) 環境

(a) 大気中

(b) 一定流速下の人工海水中, 人工海水の成分は ASTM D1141-75⁴⁾ に従った。主タンクの海水量 170 l に毎分 3~4 l の空気吹込みをした。試験槽への流量は 1 l/min, 水温は 30 °C, pH は 7.8~8.2, そして溶存酸素濃度は約 8 ppm であった。

(c) 人工海水と大気の 1 分周期の繰返し(実海域飛沫帯のシミュレーション) 環境の切替えは Fig. 1 に示すように試験槽の両側の電磁弁の開閉によつて行つた。な

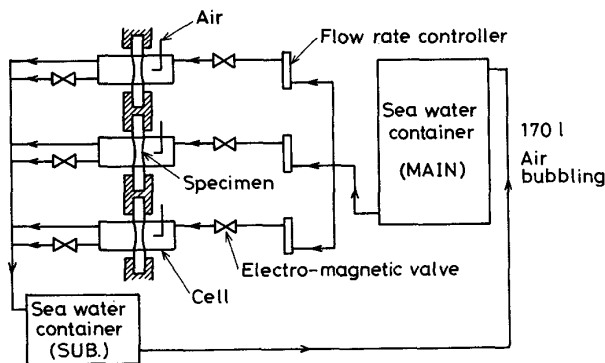


Fig. 1. Fatigue testing system.

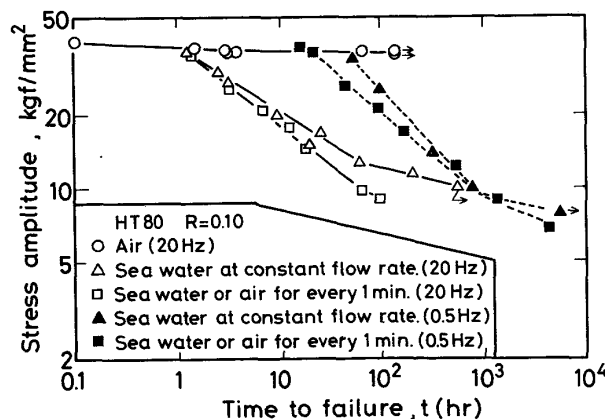


Fig. 2. Relation between stress amplitude and cycles to failure.

お大気の場合, 試験片中心部に空気を吹き付けることによつて, 試験槽から海水が流出した後, 試験片表面に付いた比較的均一な水の層を不均一にし, より苛酷な腐食環境とした。

2・2・3 破面観察

人工海水中で破断した破面は, 超音波洗浄後, 走査型電子顕微鏡で観察した。

3. 結 果

3・1 海水の試験片への関わり方および繰返し速度の疲れ寿命への影響

「一定流」および「1分周期」の S-N 曲線を Fig. 2 に示す。同図より下記のことからわかる。

1) 応力振幅と破断寿命との関係は使用した5種類の試験条件下とも直線で表される。10⁶~10⁷ 回で S-N 曲線上に折れ曲がり点が存在し, その折れ曲がり点より短寿命側の S-N 曲線の勾配は長寿命側の勾配に比べて負の勾配が急である。このような傾向は日本鉄鋼協会のラウンドロビンテストにおける回転曲げによる試験結果⁵⁾にはほとんどみられない。

2) 0.5 Hz の場合, 高応力振幅では「1分周期」の寿命は「一定流」の寿命の約半分であるが, 応力振幅の減少とともにその差は少なくなり, 応力振幅が 10 kgf/mm² 以下では両者はほぼ等しくなる。

一方, 20 Hz の場合, 0.5 Hz の場合とは異なつた傾向を示している。すなわち, 高応力振幅における破断寿命は「一定流」と「1分周期」で差がないが, 応力振幅が低くなるに従つて「一定流」の寿命が「1分周期」に比べて長くなり, 両者の間の差がしだいに大きくなる。

3) 2) における 20 Hz と 0.5 Hz の間の相反する傾向は, Fig. 3 のように横軸に破断までの時間をとることにより理解できる。すなわち, 20 Hz の場合「一定流」と「1分周期」の間で寿命の差が約 2 倍になるのは応力振幅が約 14 kgf/mm² のときであり, 試験開始後 30~60 h 経過してからである。一方, 0.5 Hz の場合「一定流」と「1分周期」の間で同様の差がでるのは応力振幅が約 35 kgf/mm² のときであり, やはり試験開始後 30~60 h 経過してからである。この事実から「1分周期」環境による疲労寿命低下は, 腐食時間依存性を有することが示唆される。

4) 「一定流」の場合, 高応力側において破断寿命は 20 Hz と 0.5 Hz の間ではほとんど差がない。しかし応力振幅が低くなるとともに両者間の差は大きくなる。「1分周期」の場合, 20 Hz の破断寿命は 0.5 Hz の破断寿命に比べて応力振幅に関係なく 2~3 倍である。

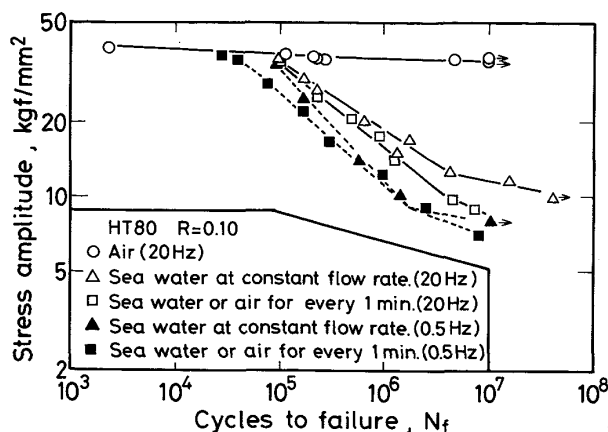


Fig. 3. Relation between stress amplitude and time to failure.

3.2 破面観察

疲れ寿命はき裂発生寿命と、き裂伝播寿命に分けることができる。き裂伝播寿命と関係ある da/dN (き裂伝播速度) - ΔK (応力拡大係数範囲) 曲線は Fig. 4 に示すように「一定流」と「1分周期」の間ではほぼ等しい。したがって、両環境間の破断寿命の違いは主としてき裂発生寿命の違いによると考えられるので、破面観察に際してはき裂発生に着目した。

3.2.1 0.5 Hz の場合

「一定流」と「1分周期」の間で破断寿命 N_f の差が大きい高応力振幅域 (低寿命域) における破断箇所近くの試験片表面写真を Photo. 1 a) および b) に示す。「一定流」の場合試験片表面は比較的均一な外層錆に被われていて内部への腐食は少なくほぼ全面腐食であるが、「1分周期」の場合局所的な内部腐食が激しくピットが見られ、ピット底にはき裂が観察される。(外層錆の大部分は試験過程および超音波洗浄時に、はく離している。破面近くの試験片表面の縦断面写真を Photo. 2 a) および b) に示す。Photo. 1 に対応して「1分周期」の場合深さ約 70~150 μm のスパイク状のピットが観察されるが、「一定流」の場合試験片表面の凹凸は少なく、ピットの深さは 10 μm 以下である。また、「1分周期」のピット数の密度は「一定流」に比べて相対的に少ない。破面上のき裂発生箇所は「一定流」の場合 Photo. 3 a) に示すように1箇所であったが、「1分周期」の場合 Photo. 3 b) に示すように多数 (4~5箇所) 存在する。破面形状から考えて、これらのき裂はほぼ同じ時期に発生したものである。き裂発生箇所近辺の破面上には「一定流」の場合 Photo. 4 a) に示すように結晶粒界割れはほとんど見られないが、「1分周期」の場合 Photo. 4 b) に示すように多数の粒界割れが見られる。

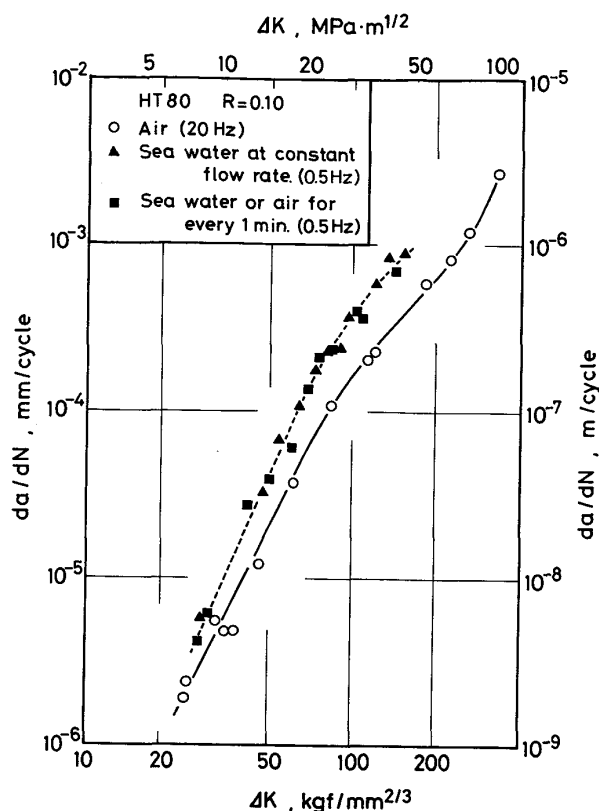
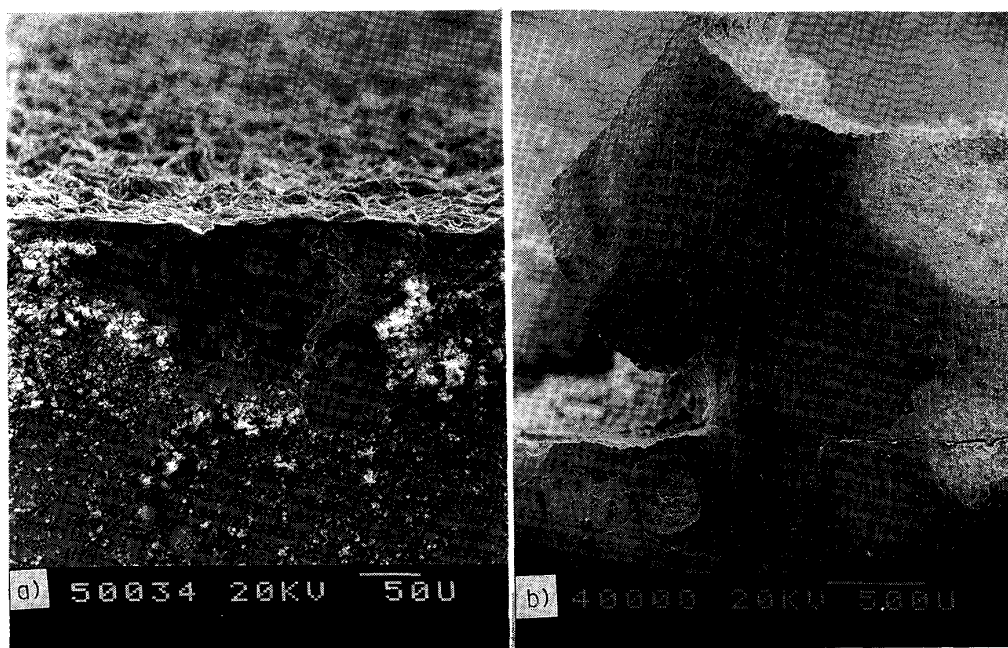
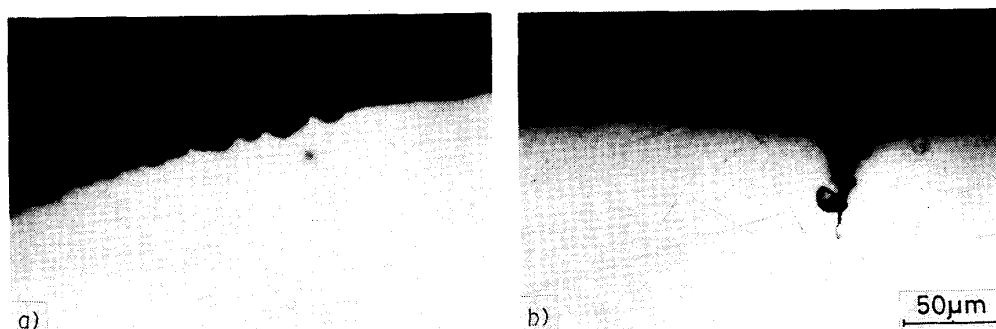


Fig. 4. Fatigue crack growth rates at the stress ratio of 0.10.

両環境間で N_f の差が少ない低応力振幅域 (高寿命域) の場合、両環境下とも試験片の腐食が著しく、両者間の表面形態の相違を見いだすことは困難であった。破面近辺の試験片表面の縦断面写真を Photo. 5 a) および b) に示す。「1分周期」の表面は「一定流」の表面に比べて局所的凹凸が激しく、同写真に示したような深さ数十 μm のカップ状のピットが観察された。「一定流」の場合深さ 10 μm 以下のピットが多数観察された。両環境間で N_f の差が大きい高応力振幅域の場合と同様に、低応力振幅域の場合も「1分周期」ではき裂発生点付近に多数の粒界割れが観察されたが、「一定流」では粒界割れは観察されなかった。「1分周期」の Photo. 5 b) ($N_f = 1.0 \times 10^6$) を「1分周期」の Photo 2 b) ($N_f = 7.5 \times 10^4$) と比較すると、後者のピットは前者に比べて鋭い、しかし、後者の寿命は前者のその約 13 分の 1 であるにもかかわらず、ピットの深さは両者ともほとんどが 50~60 μm である。この事実より「1分周期」下のピットは試験開始後比較的短い時間内に試験片表面より深さ数十 μm の鋭いピットとなり、それ以後はピットの深さ方向よりはむしろピット側面の腐食が著しくなり、その結果、Photo. 5 b) に示したようにほとんどのピットがカップ状になったものと思われる。(詳細は考察で述



a) Sea water at constant flow rate ($\Delta\sigma_a=34.5 \text{ kgf/mm}^2$, $N_f=9.4 \times 10^4$)
 b) Sea water or air for every 1 min ($\Delta\sigma_a=29.5 \text{ kgf/mm}^2$, $N_f=7.5 \times 10^4$)
 Photo. 1. Specimen surface near fracture surface at the frequency of 0.5 Hz.



a) Sea water at constant flow rate ($\Delta\sigma_a=34.5 \text{ kgf/mm}^2$, $N_f=9.4 \times 10^4$)
 b) Sea water or air for every 1 min ($\Delta\sigma_a=29.5 \text{ kgf/mm}^2$, $N_f=7.5 \times 10^4$)
 Photo. 2. Fracture section at the frequency of 0.5 Hz.

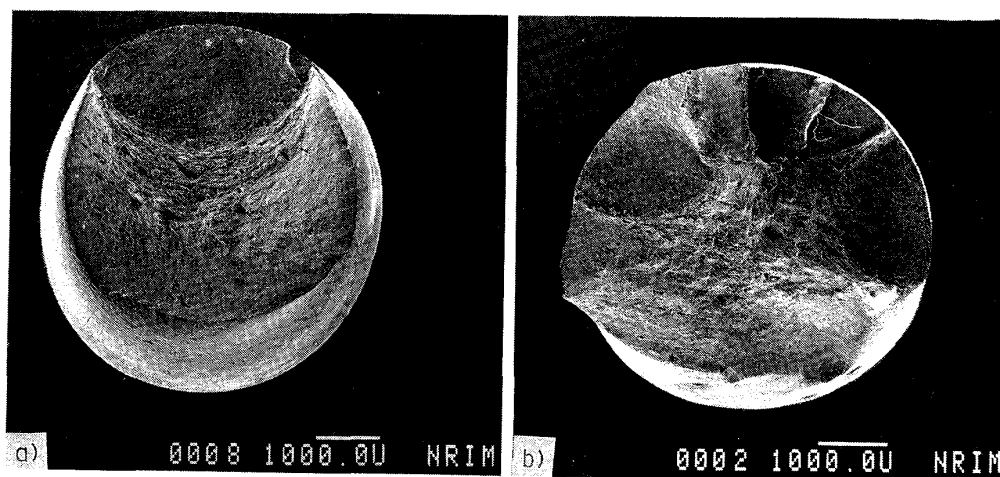
べる) なお観察された最大ピット深さは $N_f=1.0 \times 10^6$ の場合 $60 \sim 70 \mu\text{m}$ であり, $N_f=7.5 \times 10^4$ の場合約 $150 \mu\text{m}$ であつた。

3・2・2 20 Hz の場合

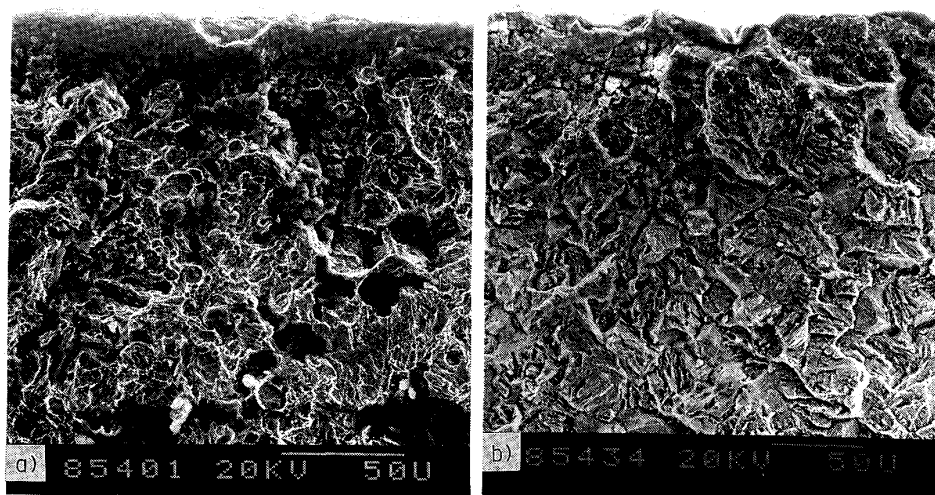
「一定流」と「1分周期」の間で N_f の差が大きいのは、低応力振幅域の場合であり、0.5 Hz の場合と同様に試験開始後 30~60 h 経過したときである。両環境下の破面付近の試験片表面写真を Photo. 6 a) および b) に示す。「一定流」の場合厚い外層錆で比較的均一に被わっていて内層への腐食は少ないが、「1分周期」の場合外層錆は少ないが局所的内部腐食が激しく、深いピットお

よびピット底にき裂が観察される。これに対応して破面上のき裂発生個所は前者の場合1個所であるが、後者の場合4~5個所である。この傾向は前述の0.5 Hz の場合の高応力振幅下の腐食傾向と同じである。き裂発生個所近辺の破面上には0.5 Hz の場合と異なり、「一定流」および「1分周期」の場合ともに粒界割れは観察されなかつた。しかし、き裂発生点から1~1.5 mm 内側では両環境とも多数の粒界割れが観察された。

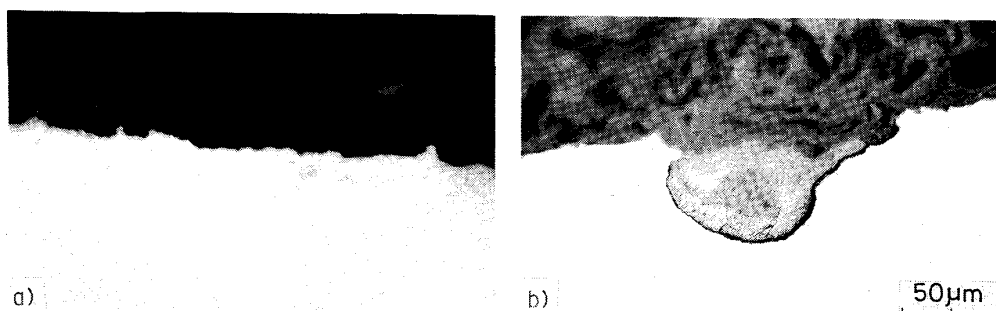
両環境間で N_f の差が小さい高応力振幅域の場合、両環境とも内部への腐食は少なく、全般に腐食の程度に差は見られなかつた。これは破断までに要した時間が10



a) Sea water at constant flow rate ($\Delta\sigma_a=34.5 \text{ kgf/mm}^2$, $N_f=9.4\times 10^4$)
 b) Sea water or air for every 1 min ($\Delta\sigma_a=29.5 \text{ kgf/mm}^2$, $N_f=7.5\times 10^4$)
 Photo. 3. Fractographs at the frequency of 0.5 Hz.



a) Sea water at constant flow rate ($\Delta\sigma_a=34.5 \text{ kgf/mm}^2$, $N_f=9.4\times 10^4$)
 b) Sea water or air for every 1 min ($\Delta\sigma_a=29.5 \text{ kgf/mm}^2$, $N_f=7.5\times 10^4$)
 Photo. 4. Fractographs at the frequency of 0.5 Hz.



a) Sea water at constant flow rate ($\Delta\sigma_a=10.3 \text{ kgf/mm}^2$, $N_f=1.4\times 10^6$)
 b) Sea water or air for every 1 min ($\Delta\sigma_a=12.3 \text{ kgf/mm}^2$, $N_f=1.0\times 10^6$)
 Photo. 5. Fracture section at the frequency of 0.5 Hz.



a) Sea water at constant flow rate ($\Delta\sigma_a=12.5 \text{ kgf/mm}^2$, $N_f=4.3 \times 10^6$)
 b) Sea water or air for every 1 min ($\Delta\sigma_a=9.7 \text{ kgf/mm}^2$, $N_f=4.5 \times 10^6$)

Photo. 6. Specimen surface near fracture surface at the frequency of 20 Hz.

h 以内と短いと思われる。

4. 考 察

繰返し速度が 0.5 Hz の場合に、「一定流」と「1 分周期」の間で S-N 曲線の差が大きい高応力振幅域（低寿命域）と S-N 曲線の差が少ない低応力振幅域（高寿命域）でそれぞれ破断した試験片から得られたき裂発生および初期き裂伝播に関する情報を Table. 2 に示す。

同 Table において「一定流」と「1 分周期」の間の相違のうち、腐食ピットの深さの違いおよびき裂発生個所近くの前オーステナイト粒界割れの有無は、高応力振幅域と低応力振幅域で共通している。したがって、この場合腐食ピットが深いこと、および局部的内部腐食が激しく前オーステナイト粒界割れが生じやすいことは疲労寿命にはほとんど影響していない。

Table 2 における「一定流」と「1 分周期」の間の相違のうち、高応力振幅域と低応力振幅域で共通していない相違は次のとおりである。高応力振幅域においてピットの形状は「1 分周期」の場合深いスパイク状 (Photo. 2 a) 参照) をしているのに対して「一定流」の場合浅いカップ状 (Photo. 2 b) 参照) をしている。前者においては破面上のき裂発生個所が 4 個所であるのに対して後者においては 1 個所である。

上記の事実より高応力振幅域において、「1 分周期」の破断寿命が「一定流」の破断寿命の約半分になる理由

は、前者において疲れき裂は局部的に存在する鋭くて深いスパイク状（応力集中係数の大きい）のピットから比較的早い時期に発生し、それらが合体しながら伝播をして最終的破断に至るのに対し、後者においてはピットの密度は前者に比べて相対的に高いにもかかわらず、ピットの応力集中係数が小さいのでき裂発生源としての役割が小さく、したがって前者に比べてき裂発生時期が遅れ、さらにき裂発生個所も少ないためと考えられる。

「1 分周期」の場合、局在するスパイク状のピットができる理由は次のように考えられる。試験片表面が海水につかることにより、不動態被膜が形成される。しかし、この被膜は本鋼の Cr 含有量が Table 1 に示したように 0.79 % であること、海水が試験槽に 1 分周期で流出と流入を繰り返すこと、空気吹付けによる水の層の不均一性、および Cl^- の濃縮等が原因して容易に破壊される。その結果、局部的に通気差電池が形成され、浅いピットができる。それに引き続き Passive-active cell を形成するとともに、高い応力が繰り返し作用するため、より深い鋭いピットへと急速に成長していく⁶⁾。これに対して「一定流」の場合、試験片は海水に浸漬された状態であるので、酸化膜は最初から比較的均一で安定な全面腐食に近く、したがって局部的腐食は進行しにくい。

三沢によれば同鋼の赤褐色の外層錆は $\gamma\text{-FeOOH}$ および $\alpha\text{-FeOOH}$ であり、そして黒色の内層錆は主として Fe_3O_4 である⁷⁾。鋼の飛沫帯の錆の組成は Fe_3O_4 、

Table 2. Fatigue damage morphology at the frequency of 0.5 Hz.

	Condition	Stress amp (kgf/mm ²)	Cycles to failure	Pit		Fracture surface	Number of crack initiation
				Shape	Depth (μm)		
Large difference in S-N curves between conditions 1 and 2	1) Sea water or air for every 1 min	29.5	7.5×10 ⁴	Spike	50-150	Intergranular (80%)	4
	2) Sea water at constant flow rate	34.5	9.4×10 ⁴	Cup	<10	Transgranular	1
No difference in S-N curves between conditions 1 and 2	1) Sea water or air for every 1 min	12.3	1.0×10 ⁶	Cup	50-70	Intergranular (30%)	1
	2) Sea water at constant flow rate	10.3	1.4×10 ⁶	Cup	<10	Transgranular	1

α -FeOOH, γ -FeOOH と報告されており⁸⁾, 本実験における錆の組成と一致する。

低応力振幅域においても「1分周期」の場合, 高応力振幅域におけると同様に通気差電池および Passive-active cell により比較的早く鋭いピットが形成される。しかし, 応力振幅が低い分だけピットは多少浅くなっていると考えられる。応力振幅が低いためにそれらのピットはき裂発生源としては作用しにくい。この鋭いピットの先端で局所的に繰返し塑性変形が生じ, そこがアノードとなり, そして塑性変形してない所がカソードとなつてガルバニ腐食電池を形成して腐食が進行し, ピット先端が鈍化すると考えられる⁹⁾。その結果, ピットの形状は Photo.5 b) に示したようなカップ状となる。このようにピットの形状がカップ状になる理由として, 上述の理由以外に, ピット内に電気的に運ばれた Cl^- と Fe^{++} とにより塩化物が作られ, これが加水分解して HCl となり, この HCl により溶解が促進することも考えられる¹⁰⁾。しかし HCl によるピット拡大であるならば深さ方向にも生じるはずであるが, Photo.2 b) と Photo.5 b) を比較すれば明らかなように, 深さ方向にはピットはほとんど拡大しておらず, したがって HCl 説により説明することは困難に思われる。このような低応力振幅域においては, カップ状の浅いピットが多数存在する「一定流」の場合はもちろんのこと「1分周期」においてもピットが直接疲れき裂発生に寄与するとは考えられず, したがって両環境間の疲れ破断寿命の差がなくなったものと考えられる。

以上のような傾向は 20 Hz の場合にも見られる。しかし, 0.5 Hz の場合と 20 Hz の場合と異なるところは, 低応力振幅域において前者は「一定流」と「1分周期」の間で破断寿命に差がないのに対して, 後者は両環境間で寿命に差があることである。この違いは次のように考えることにより説明できる。

「1分周期」下では 20 Hz の場合, 0.5 Hz の場合と同様に通気差電池および Passive-active cell のための鋭

いピットが形成されるが, 繰返し速度が高いとピット形成速度 (き裂進展速度) が高く, そのためにガルバニ腐食電池が形成されない。そして 2~30 h 後には Photo.7 に示すような深さ 50 μm 前後の鋭いピットが形成され, そこを起点として疲れき裂が発生する。

以上のように, ピットの形成傾向は応力振幅および繰返し速度に依存するように思われるが, これに関しては今後の検討が必要である。

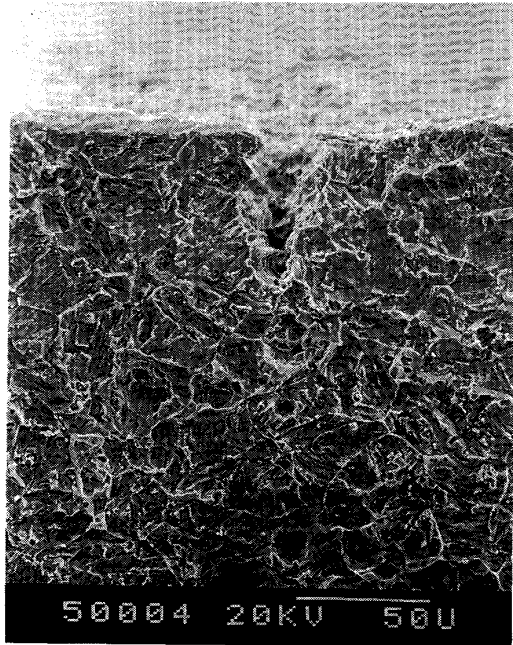
5. 結 論

80 kgf/mm² 級高張力鋼を用いて, 一定流速下の海水中および 1 分周期で海水中と大気の繰返しとの 2 種類の環境下で疲れ試験を行い, 両環境間の疲れ寿命を比較検討した結果, 次のことが明らかになった。

1) 0.5 Hz において「1分周期」の破断寿命が「一定流」の破断寿命の約 2 分の 1 になる応力振幅域 (約 35 kgf/mm²) がある。それは試験開始後, 前者が約 30 h そして後者が約 60 h 経過後試験片が破断するところである。「1分周期」の場合, き裂は多数の深さ数十 μm のスパイク状のピット底から発生し, 各き裂は合体しながら破断に至る。「一定流」の場合, 深さ 10 μm 以下のカップ状のピットが多数存在するが, き裂発生には寄与しない。

応力振幅の減少とともに「1分周期」と「一定流」の間の破断寿命の差は少なくなり, 試験開始後 500~1000 h で差はほとんどなくなる。「1分周期」の場合, 深さ数十 μm のカップ状のピットが, そして「一定流」の場合, 深さ 10 μm 以下のカップ状のピットがそれぞれ存在するが, これらはき裂発生にはほとんど寄与しない。

2) 20 Hz の場合, 0.5 Hz の場合とは異なり, 高応力振幅域では「1分周期」と「一定流」の間で破断寿命に差がない。しかし, 応力振幅の減少とともに両者間の差は増大し, 約 14 kgf/mm² では前者の破断寿命は後者の破断寿命の約 2 分の 1 になる。それは 0.5 Hz の場合



$$\Delta\sigma_a = 9.7 \text{ kgf/mm}^2, N_f = 4.5 \times 10^6$$

Photo. 7. Fractograph of in sea water or air for every 1 min at the frequency of 20 Hz.

と同様に、試験開始後、前者が約 30 h そして後者が約 60 h 経過後試験片が破断するところである。これらは各試験条件間のピット形成傾向から説明できる。

本研究結果の解析にあたり、有益な御助言と御討論を賜った名古屋工業大学・大塚陸郎教授および金属材料技術研究所腐食防食研究部・藤井哲雄室長に感謝の意を表します。

本研究は科学技術庁の昭和 58 年度科学技術振興費による「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」の一環として行われた。記して謝意を表する。

文 献

- 1) OTC 4236 Investigation of the "Alexander L. Kielland" Failure Metallurgical and Fracture Analysis (1982)
- 2) C. P. LARRABEE: Corrosion, **14** (1958), p.501
- 3) 角田方衛, 丸山典夫, 内山 郁: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1669
- 4) ASTM D1141-75 (1980), p.31
- 5) 西田新一, 稲垣裕輔: 鉄鋼の環境強度部会第 2 回シンポジウム前刷集—鉄鋼の海洋環境共通試験とその解析—(日本鉄鋼協会編) (1985), p.57
- 6) H. H. ユーリック: 腐食反応とその制御 (岡本剛監修) (1968), p.69, p.263 [産業図書]
- 7) 三沢俊平: 鉄鋼の環境強度部会第 2 回シンポジウム前刷集—鉄鋼の海洋環境共通試験とその解析—(日本鉄鋼協会編) (1985), p.134
- 8) 近藤達男: 第 20・21 回 西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1973), p.168
- 9) 内藤浩光, 堀田 渉, 岡田秀弥: 製鉄研究, **284** (1975), p.11393
- 10) 小若正倫: 金属の腐食損傷と防食技術 (1983), p.10 [アグネ]