

© 1988 ISIJ

 ///////////////
 論 文
 ///////////////

Ti-6Al-4V の低 ΔK 域における人工海水中 疲れき裂伝播特性

角 田 方 衛*・丸 山 典 夫*²

Fatigue Crack Growth Behavior in Lower ΔK for Ti-6Al-4V in Sea Water

Masae SUMITA and Norio MARUYAMA

Synopsis :

The factors which control fatigue crack growth behaviors in Ti-6Al-4V in the ΔK range less than 30 kgf/mm^{3/2} in sea water were discussed with respect to those in the air. The results obtained are as follows;

1) Fatigue crack growth rate, da/dN , is higher in sea water than that in the air at the stress ratios of 0.1 to 0.7. The trend is much remarkable at lower levels of stress ratio and ΔK .

2) The value of da/dN in sea water is not influenced by the crack tip closure at the stress ratios larger than 0.5, while da/dN in the air is influenced by the crack tip closure at stress ratios larger than 0.9.

The different crack growth behavior in sea water from that in the air is explained in terms of roughness of fracture surface. Rougher fracture in sea water is resolved into a smoother one.

3) The da/dN value plotted against ΔK_{eff} in sea water is higher than that in the air. However, maximum ratio of da/dN in both the environments is less than two.

4) Crack in sea water does not grow at ΔK levels less than the effective stress intensity threshold, $\Delta K_{th,eff}$, in the air.

5) Fracture surface consists of cleavage-like patterns in sea water and in the air, and it shows of α grain boundary cracking and transgranular cracking of β phase in both the environments at ΔK levels close to ΔK_{th} .

Key words : fatigue crack growth rate ; sea water ; Ti-6 Al-4 V ; effective low stress intensity range ; microstructure ; stress ratio.

1. は じ め に

チタンは鋼に比べて一般に耐食性に優れているので、海洋構造用材料としての需要の拡大が期待されている¹⁾。海洋構造物には波浪、台風、潮流の変化などに対応する繰返し荷重が加わるので、海洋構造用材料の疲れ特性を十分に把握しておくことは重要である。

チタン合金の腐食疲れ特性は2種類の Type A, B に分けられる²⁾³⁾。Type A は $K_{max} \geq K_{ISCC}$ ²⁾ あるいは $\Delta K \geq \Delta K_{SCC}$ ³⁾ で生じ、そして Type B は低い ΔK で生じる²⁾。ここで ΔK は応力拡大係数範囲、 K_{max} は応力拡大係数の最大値、そして ΔK_{SCC} は繰返し SCC の生じる ΔK の下限値である。Type A は高強度の材料で現れやすく、その疲れき裂伝播速度 (以後 da/dN と記す)

は繰返し速度 (以後 f と記す) に依存する。Type B は SCC に関係なく生じ、塩水中の da/dN は f に依存しないか²⁾、あるいは鋼などにみられる腐食疲れ特性とは逆に f の減少とともに遅くなる³⁾。Type B は大気中においても生じ、塩水中の da/dN は大気中の da/dN とほぼ同水準である²⁾³⁾。

しかしながら、これらの塩水中あるいは海水中の腐食疲れに関する研究には有効応力拡大係数 (以後 ΔK_{eff} と記す) の概念⁴⁾ が導入されていないので、 da/dN に影響を及ぼす因子に関しては不明な部分が多い。また、これらの研究はいずれも $\Delta K > 30 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ に関するものであり、それ以下の ΔK ではほとんど行われていない。

本報告は上記のことを考慮して $\Delta K < 30 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ における海水中腐食疲れ特性を ΔK_{eff} を介して把握すると

昭和 61 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 3 月 18 日受付 (Received Mar. 18, 1987)

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

Table 1. Heat treatment and mechanical properties.

	Heat treatment		σ_B (kgf/mm ²)	σ_y (kgf/mm ²)	Elongation (%)
SL	933°C×50min 545°C×6h	W. Q. A. C.	124	117	7
APL	720°C×2h	A. C.	100	95	27
AL	950°C×1h 720°C×2h	A. C. A. C.	102	96	14

同時に、海水中の da/dN を先に求めた大気中の da/dN ⁵⁾ と比較することにより、 da/dN を支配する因子について検討することを目的とする。

2. 実験方法

2.1 対象材料

使用した Ti-6Al-4V の化学組成は 6.54% Al-4.32% V-0.004% N-0.18% O-0.004% H-0.28% Fe-0.011% C である。熱処理条件および機械的性質を Table 1 に示す。試料 SL の組織は溶体化処理により球状化した初析 α 相、それと微細な α が析出した β 相から成る。試料 APL の組織は初析 α 相と α 界面に存在するフィルム状 β 相から構成されており、他の試料に比べて β 相の割合が低い。試料 AL の組織は球状化した初析 α 相と溶体化温度から空冷する際に針状に成長した α を有する β 相から構成される。

試料 SL, AL の初析 α 相の面積率はそれぞれ 40%, 82%, 58% である。

2.2 実験方法

2.2.1 疲れ試験片形状

40 mm 幅、5 mm 厚の片側切欠き付き板試験片を使用した。なお、試験片の長さ方向は圧延方向である。

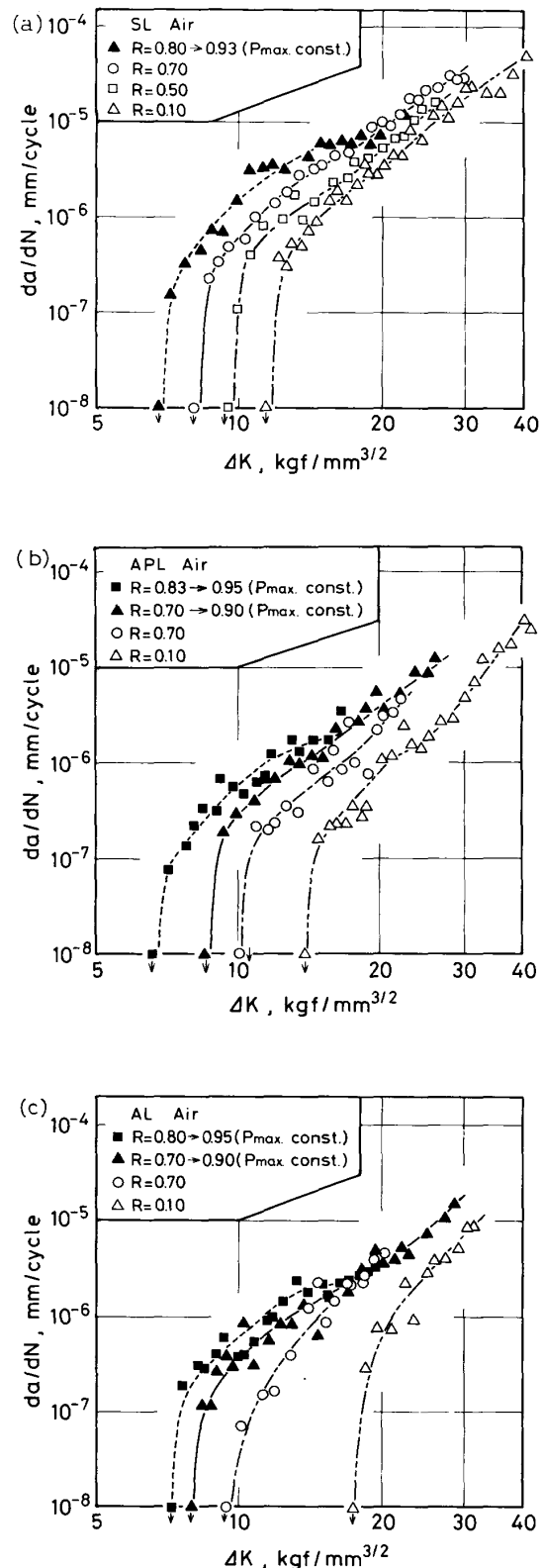
2.2.2 疲れ試験

(1) 試験機：±10 t 電気油圧型疲れ試験機を用いた。

(2) 応力比：応力比（以後 R と記す）は 0.1, 0.5, 0.7, 0.84, 0.90 および 0.93 を用いた。

$R=0.1, 0.5$ および 0.7 の場合、大気中においてそれぞれの R 値で ΔK 減少試験により疲れき裂伝播下限値（以後 ΔK_{th} と記す）近くまで ΔK 値を下げた後、あらかじめ試験片に取り付けてある試験槽に海水を注入し、2~300 μm き裂を進展させ、そのままの状態で一昼夜保持後 P_{max} 一定の ΔK 増加試験により海水中の da/dN を求めた。 $R=0.84, 0.90$ および 0.96 の場合、大気中で P_{max} 一定 ΔK 減少法⁶⁾ により、 ΔK を ΔK_{th} 近くまで下げた後、試験槽に海水を注入、以下 $R=0.1, 0.5$ および 0.7 の場合と同様にして da/dN を求めた。

(3) 応力繰返し速度：大気中、海水中とも 23 Hz, た

Fig. 1. da/dN as a function of ΔK in the air.

だし、海水中では一部 0.5 Hz を使用した。

(4) 応力波型：正弦波を用いた。

(5) き裂長さ測定：倍率 ×50 で読取顕微鏡により直

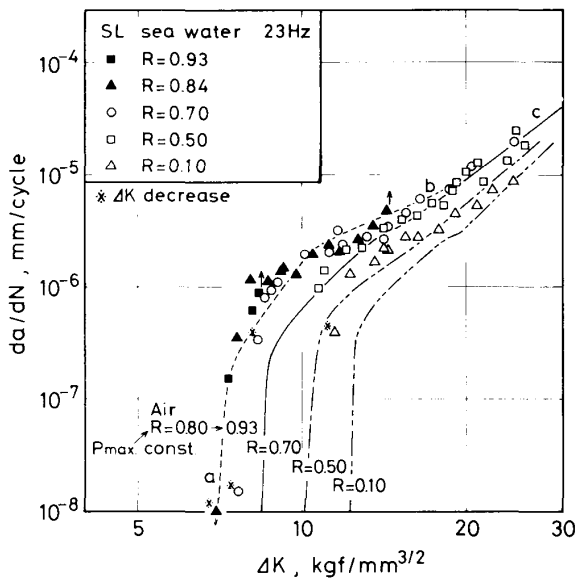


Fig. 2. da/dN as a function of ΔK in Specimen SL.

接測定した。

(6) ΔK の計算: $\Delta K = f(a_i) \Delta \sigma \sqrt{\pi a_i}$

ここで a_i はき裂長さ, $\Delta \sigma$ は応力範囲, $f(a_i)$ は a_i に依存する補正項で ASTM STP 410⁷⁾ より求めた。

(7) 環境: 30°C の ASTM 人工海水⁸⁾ を使用した。

2.2.3 破面観察

SEM を使用した。

3. 結果および考察

3.1 da/dN - ΔK 曲線

大気中の da/dN 曲線⁵⁾ を Fig. 1(a), (b) および (c) に示す。試料 SL の海水中の da/dN と ΔK の関係を Fig. 2 に示す。同図に大気中の da/dN - ΔK 曲線を併記する。大気中の da/dN - ΔK 曲線において $R=0.80 \rightarrow 0.93$ の da/dN - ΔK 曲線は da/dN - ΔK_{eff} ⁵⁾⁶⁾ 曲線である。また $R=0.80 \rightarrow 0.93$ と $R=0.7$ の da/dN がほぼ同じになる ΔK , すなわち $30 > \Delta K > 20 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ の da/dN は ΔK_{eff} によつて表示されている。したがつて図中 a, b, c を結ぶ大気中の da/dN - ΔK 曲線は da/dN - ΔK_{eff} 曲線である。同図から次のことがわかる。

(1) $R=0.1$ および 0.5 の場合, $\Delta K < 20 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ において, そして $R=0.7$ の場合 $\Delta K < 13 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ において,

$$(da/dN)_{s.w.} > (da/dN)_{air}$$

ここで $(da/dN)_{s.w.}$ は海水中の da/dN , そして $(da/dN)_{air}$ は大気中の da/dN である。

(2) 海水において $R=0.7$ の場合図中*○印で, そして $R=0.1$ の場合*△印で示されているようにき裂は

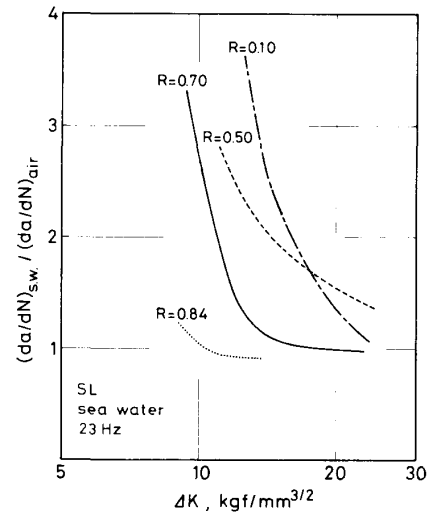


Fig. 3. Comparison of da/dN in sea water with that in the air in specimen SL.

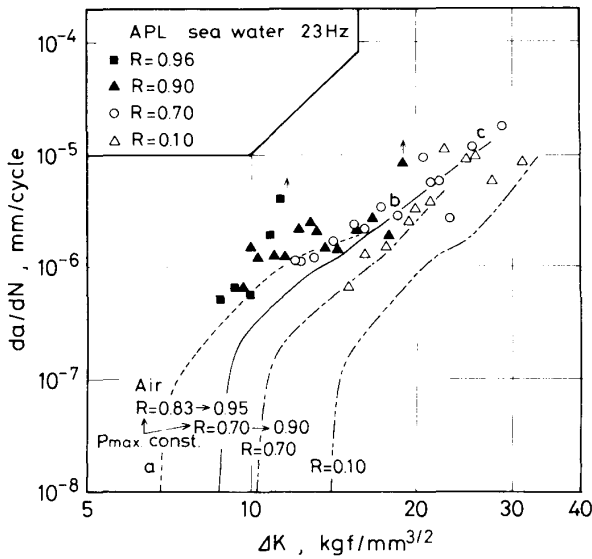
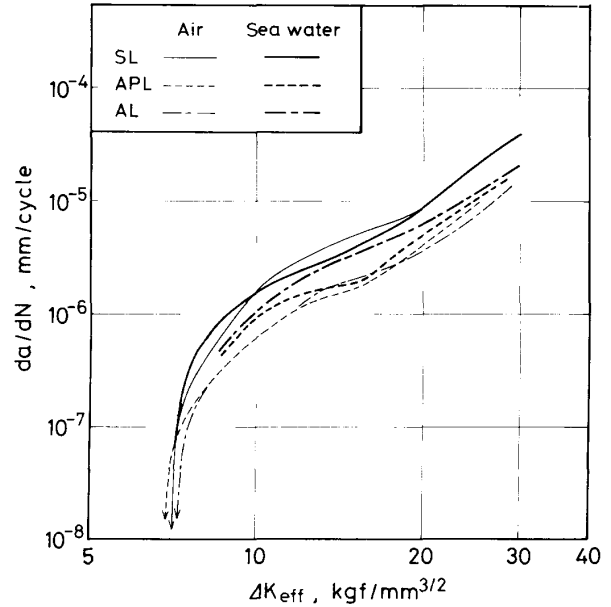
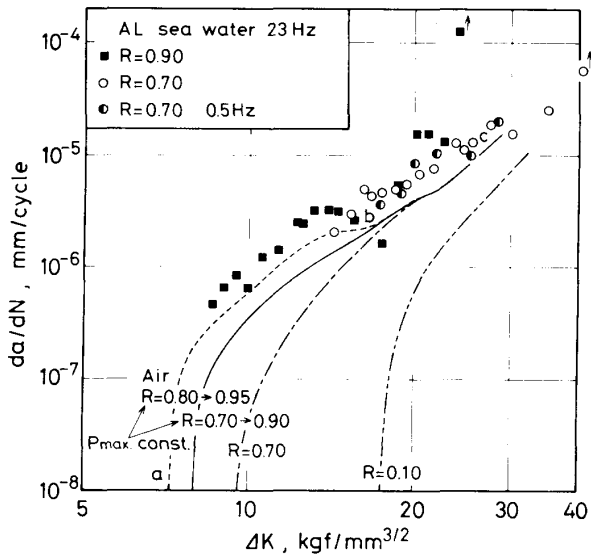
大気中の ΔK_{th} より低い ΔK でも伝播する。しかしながら, 海水中のき裂は*▲印で示すように大気中の有効応力拡大係数の下限値(以後 $\Delta K_{th,eff}$ と記す)より低い ΔK では伝播しない。

(3) $R \geq 0.5$ において, 海水中の da/dN と ΔK との関係には R 依存性はほとんどない。したがつて $R \geq 0.5$ の海水中の da/dN - ΔK 曲線は da/dN - ΔK_{eff} 曲線を表している。

Fig. 3 に試料 SL の $(da/dN)_{s.w.}$ と $(da/dN)_{air}$ の比と ΔK との関係を示す。同図で $R=0.84$ の曲線は大気中の値として $P_{max, const}$ の da/dN を用いている。同図より $R \leq 0.7$ において海水中の da/dN は大気中の ΔK_{th} 近くでは大気中の da/dN の数倍であること, しかし $\Delta K > 20 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ では海水中大気中の da/dN の差がほとんどないことが分かる。また da/dN が両環境下で ΔK_{eff} で表されている $R=0.84$ の場合, 両者の da/dN の差は少ない。

試料 APL の海水中の da/dN と ΔK との関係を Fig. 4 に示す。同図に大気中の da/dN - ΔK 曲線を併記する。図中の a, b, c を結ぶ線は Fig. 2 の場合と同様に大気中の da/dN - ΔK_{eff} 曲線である。Fig. 4 は Fig. 2 と類似した傾向を示すが, 以下の点が異なる。なお, 海水中の da/dN の R 依存性がない部分は Fig. 2 の場合と同様に ΔK_{eff} に対応する da/dN と見なせる。

試料 APL の場合, 大気中の da/dN - ΔK_{eff} 曲線に比べて, $\Delta K < 13 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ では $(da/dN)_{s.w.} > (da/dN)_{air}$ であり, $\Delta K > 13 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ では $(da/dN)_{s.w.} \approx (da/dN)_{air}$ である。

Fig. 4. da/dN as a function of ΔK in specimen APL.Fig. 6. da/dN - ΔK_{eff} curves.Fig. 5. da/dN as a function of ΔK in specimen AL.

試料 AL の海水中の da/dN と ΔK との関係を図 5 に示す。大気中の da/dN - ΔK 曲線を併記する。同図中 a, b, c を結ぶ線は大気中の da/dN - ΔK_{eff} 曲線である。また、海水中の $R=0.9$ および 0.7 の da/dN は Fig. 2 の場合と同様に ΔK_{eff} に対する da/dN と見なせる。同図が試料 SL の Fig. 2 あるいは試料 APL の Fig. 4 と異なるのは、海水中の da/dN が $\Delta K < 30 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ で大気中の da/dN - ΔK_{eff} 曲線より高くなることである。同図には海水中で 0.5 Hz で da/dN を測定した結果が併記されているが、 23 Hz の da/dN とほぼ同じであり、 da/dN に繰り返し速度依存性は測定範囲内でない。これ

は MEYN²⁾ が $\Delta K > 30 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ で示した ($\alpha + \beta$) 型で試料 APL の組織に類似した Ti-8Al-1Mo-1V における腐食疲れき裂伝播の特徴と同じである。

3.2 da/dN - ΔK_{eff} 曲線

da/dN に影響を及ぼす因子として下記の (1)~(3) が考えられている。さらにき裂伝播方向が応力軸に対して直角方向から傾いている場合、その角度を β とすると ΔK は $\cos^2 \beta$ に比例する⁹⁾ ので、き裂伝播方向の変動が大きいと da/dN に影響を及ぼす因子として下記の (4) も考えられる。

(1) き裂閉口

- (i) 塑性誘起き裂閉口⁴⁾
- (ii) 摩耗酸化物誘起き裂閉口¹⁰⁾
- (iii) 破面粗さ誘起き裂閉口¹¹⁾
- (iv) 電解生成物誘起き裂閉口¹²⁾
- (v) 腐食生成物誘起き裂閉口¹³⁾

(2) 環境¹⁴⁾

- (i) 吸着
- (ii) 腐食溶解
- (iii) 水素

(3) 2次き裂¹⁵⁾

(4) 微視き裂伝播方向の変化

da/dN が ΔK_{eff} で表されていれば、上記の因子のうち (1) を除外することができる。そこで、Fig. 2, Fig. 4 および Fig. 5 の中で海水および大気中の da/dN のうち、 ΔK_{eff} で表されていると考えられる部分だけを取りだしてそれを Fig. 6 に示す。同図より、海水中のき

裂は大気中の $\Delta K_{th,eff}$ 以下の ΔK では進展しないこと、試料 SL の da/dN は他の試料に比べて海水中および大気中とも速いこと、大気中の試料 APL および AL の da/dN はほとんど差がなく、そして試料 APL の da/dN は大気中と海水中ではほとんど差がないことが分かる。

$(da/dN)_{s.w.}/(da/dN)_{air}$ と ΔK_{eff} との関係を Fig. 7 に示す。同図より下記のことが分かる。

(a) 試料 SL および APL の da/dN は大気中と海水中でほとんど差がないが、APL においては $\Delta K \approx 10 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 近くでは海水中の da/dN は大気中の da/dN に比べてやや速くなっている。

(b) 試料 AL は他の試料に比べて海水中の da/dN は大気中の da/dN より速く、その傾向は $\Delta K = 30 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 近くまで続く。

Fig. 7 のように da/dN を ΔK_{eff} で表した場合、 da/dN への海水の影響が最も大きい試料 AL でさえ $(da/dN)_{s.w.}/(da/dN)_{air}$ の最大値は 2 以下であり、き裂

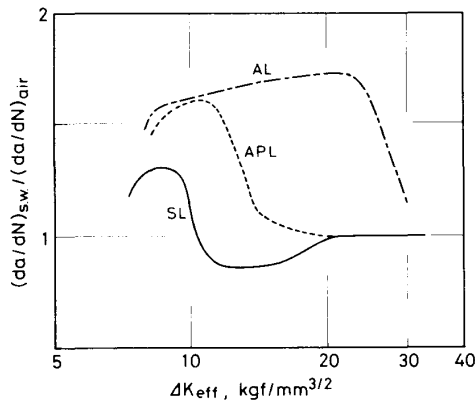


Fig. 7. Comparison of da/dN for ΔK_{eff} in sea with that in the air.

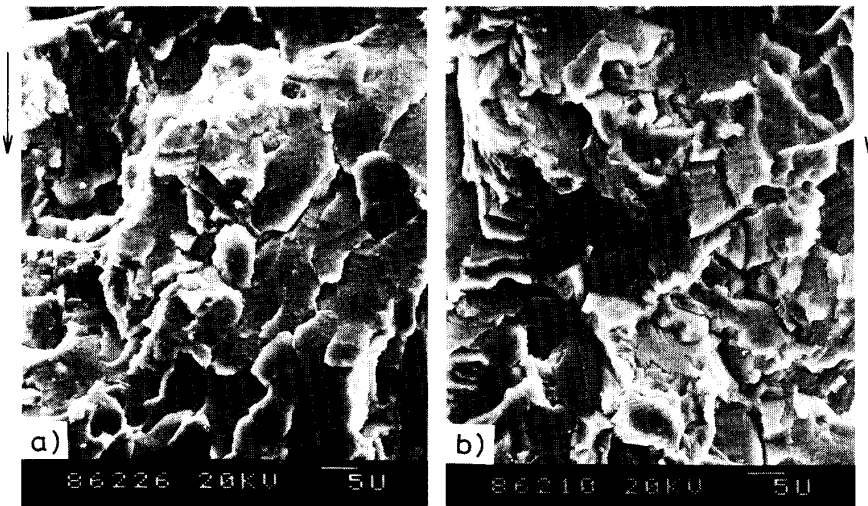
閉口の da/dN への影響が除去されていない $(da/dN)_{s.w.}/(da/dN)_{air}$ の最大値が約 3 である (Fig. 3 参照) ことを考え合わせると、き裂閉口の da/dN への影響をとり除いた海水の da/dN への影響はごく軽微であると言える。これは大気中の da/dN の R 依存性が $R=0.95$ まで存在する⁵⁾ のに対して、海水中では da/dN の R 依存性が $R \geq 0.5$ では存在しないことと関係している。これは以下に述べる理由により海水中では破面の腐食溶解のためにき裂閉口効果が低減したことに起因していると考えられる。すなわち、上記の da/dN に影響を及ぼす因子のなかに：

(5) 破面の腐食溶解によるき裂開口を入れるべきである。

3.3 海水中における疲れ破面の腐食溶解

チタンは海水のような塩素イオンを含む水溶液による全面腐食に対しては耐食性を示すが、すきま腐食に対しては必ずしも強くない¹⁶⁾。チタンのすきま腐食はすきま内で酸素濃淡電池形成により pH が低下し、不動態皮膜が溶解消失して腐食を起こすと考えられている¹⁷⁾。この脱不動態化 pH は純チタンで約 1、耐食チタン合金である Ti-0.8%Ni-0.3%Mo で 0.2 である¹⁸⁾。しかし、工業用純チタンのすきま腐食の発生は水溶液温度および NaCl 濃度に依存し¹⁹⁾、NaCl 濃度が 3~4% の室温の海水環境下ではすきま腐食が生じるとは考え難い²⁰⁾。

したがって本実験におけるような人工海水中の疲れき裂伝播過程においては、き裂が存在するだけでき裂先端で酸素濃淡電池形成により pH が低下するとは考えられない。しかし、疲れにおいては荷重が繰り返されるごとにき裂先端で新生面が形成されるから、それが活性化したアノードとなり、その他の不動態表面がカソードとなり、溶存酸素還元による Passive-active cell を形成、



a) Sea water, $\Delta K = 30 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, $R = 0.7$
 b) Air, $\Delta K = 25 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, $R = 0.7$
 Photo 1. Fractographs of specimen APL.

アノード溶解が進行すると考えられる。Photo. 1a) に示すように海水中の破面は腐食しており、各ファセットは Photo. 1b) の大気中の破面（へき開状）に比べて平坦である。

以上のように海水中の疲れ破面は腐食のために大気中の疲れ破面に比べてより平坦になるので、海水中の da/dN の R 依存性が大気中の R 依存性に比べて少ないものと考えられる。しかしながら腐食の程度は試料により異なり、試料 APL と AL は Photo. 1a) のような腐食した破面を示すが、試料 SL においては海水中での腐食の程度は比較的弱い。

MEYN は $(\alpha + \beta)$ 型の Ti-8Al-1Mo-1V を用いて $\Delta K \leq \Delta K_{SCC}$ で生じる Type B の疲れ破面は大気中では (0001)_a あるいは (0001)_a から 15° 傾いたへき開面であり、3.5% NaCl 溶液中では大気中とは異なり Grainy である²⁾ と述べている。しかし (i) 上述のように海水中の破面はへき開状の新生面がアノード溶解したと考えられること、そして (ii) Photo. 1 において a) の海水中の破面単位の大きさは b) の大気中のへき開状破面のファセットの大きさと同じであることから、破面は大気中と海水中で本質的に同じであると考えられる。

3.4 da/dN へ影響を及ぼすき裂開閉口以外の因子

da/dN へ影響を及ぼす因子のうち、き裂開閉口因子が除去された da/dN (Fig. 6 および Fig. 7 を参照) とその他の因子との関係を検討する。

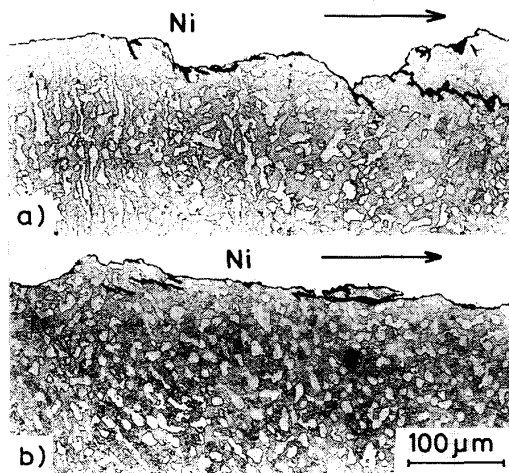
試料 SL の破面縦断面写真を Photo. 2 に示す。海水中の疲れ破面と大気中の疲れ破面の間で微視的き裂伝播方向の変化および2次き裂の数あるいは大きさに大きな

相違は見られない。Fig. 6 に示したように海水中と大気中の da/dN はほぼ等しい。このことは海水の da/dN への影響と大気の da/dN への影響がほぼ等しいことを意味している。ここでは前述の da/dN への影響因子のうち (2) 以外の因子は消去されている。さらに (2) の環境因子のうち (ii) の腐食溶解は大気中疲れでは無視できるので、最終的には吸着と水素が残る。すなわち da/dN への吸着あるいは水素の影響が海水中と大気中で等しいことを意味している。

チタン合金に関して海水中あるいは塩水中におけるき裂先端の生成物を直接調べた報告はない。Wei らは STOA 処理した Ti-6Al-4V を用いて水蒸気中で疲れ試験を行い、 da/dN の水蒸気による加速は新生面と水蒸気の反応によつて生じた水素による脆性のためであり、 da/dN はき裂先端への水蒸気の輸送速度により律速されていると考えた²¹⁾。その際、新生面と水蒸気あるいは酸素との反応により TiO 層が形成されていることをオージェ分光法により検出している。一方、Ti-8Al-1Mo-1V を用いた 3% NaCl 水溶液中の SCC 試験では、SCC は α -plate 内でへき開状に生じており、破面上にはチタン水素化物が検出されている²²⁾。

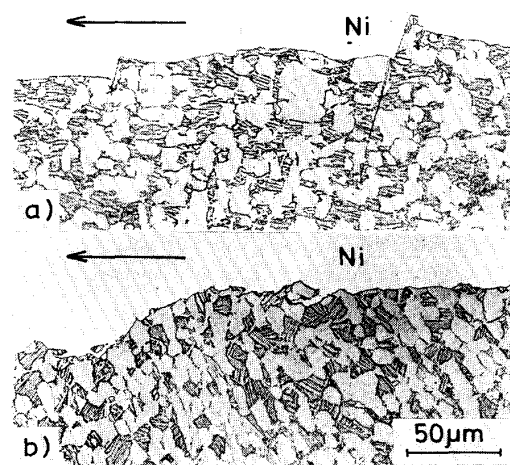
以上のことを考慮すると、本実験における Ti-6Al-4V の低 ΔK 域海水中疲れき裂伝播試験においても破面はへき開状であることから、き裂伝播に水素が関与している可能性が強い。

試料 AL の破面縦断面写真を Photo. 3a) および b) に示す。海水中の破面は大気中の破面に比べて微視的には凹凸が少ない。これは Photo. 4 に示すようにへき開



a) Sea water, $\Delta K = 14 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, $R = 0.84$
b) Air, $\Delta K = 16 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, $R = 0.74$

Photo. 2. Metallographic crack-path sections of specimen SL.



a) Sea water, $\Delta K = 17 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, $R = 0.9$
b) Air, $\Delta K = 15 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, $R = 0.8$

Photo. 3. Metallographic crack-path sections of specimen AL.

Sea water, $\Delta K = 32 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, $R = 0.7$

Photo. 4. Fractograph of specimen AL.

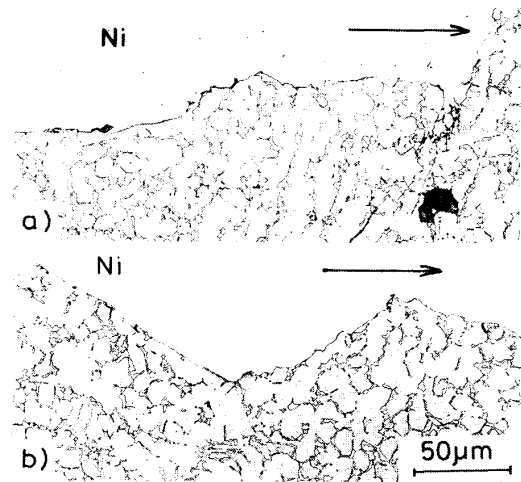
a) Sea water, $\Delta K = 16 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, $R = 0.9$
b) Air, $\Delta K = 15 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, $R = 0.8$

Photo. 5. Metallographic crack-path sections of specimen APL.

状破面が腐食溶解しているためと思われる。両環境下の破面の大きな相違は海水環境下では Photo. 3a) に見られるように、き裂は伝播方向を応力軸に対して垂直方向とほぼ同一方向に交互に変えながら進展することである。き裂が応力軸に平行方向から通常の伝播方向に伝播方向を変える際、2次き裂を形成している。この異常き裂は微視組織とは全く無関係である。このようなき裂は950°Cで溶体化処理空冷後720°Cで時効した試料ALの海水中のき裂伝播においてのみ現れるが、その理由は不明である。試料ALの海水中の da/dN の大気中の da/dN に対する加速割合は Fig. 7 に示したように最も大きいことからして、Photo. 3a) のようなき裂伝播傾向はき裂伝播速度を特に遅らせることはない。

Fig. 6 において試料SLの海水中の da/dN が大気中の da/dN とほぼ等しいのは、試料SLの大気中の da/dN が他の試料の da/dN に比べて高いためであると思われる。試料SLの引張強さは他の試料の引張強さに比べて20 kgf/mm²以上高く、124 kgf/mm²であるために疲れき裂伝播に対する水素感受性が高くなっており、大気中の水蒸気による水素脆化は海水中の水素脆化と同程度になつていふと考えられる。

試料APLの破面縦断面写真を Photo. 5a) および b) に示す。両環境間で微視き裂伝播方向および2次き裂形成傾向に大きな相違は見られない。しかし Photo. 5 と Photo. 3 を比較すると試料APLのき裂は試料ALに比べて微視的き裂伝播方向の変動が大きい。これが原因で大気中と海水中の da/dN の差が少ないものと思われ

る。この試料APLは溶体化処理を施すことなく圧延後720°Cで焼鈍しただけの試料なので、微視組織に圧延の影響が残留している可能性が高い。

なお、前報で述べたように大気中においては微視組織は低 ΔK 域の da/dN に影響を及ぼす⁵⁾。すなわち、 α 量、 β 中への α の析出状態、残留圧延組織に依存する伝播方向の変化、水素脆性感受性の高低を介してである。一方、海中における微視組織の da/dN への影響は大気中のそれに比べて特に異なつたものではない。

3.5 ΔK_{th} 近くの破面

大気中の低 ΔK 域における破面は熱処理の異なる3種類のTi-6Al-4Vすべてにおいてへき開状を呈していたが、 ΔK_{th} のごく近くではへき開状割れはほとんど存在しなくなり、これにかわつて α 粒界割れと β 相内割れが支配的であることを前報⁵⁾で述べた。この傾向は海中の疲れ破面においても同様である。試料SLの例を Photo. 6 に示す。き裂は主として α 粒界面と β 相内を伝播している。このように ΔK_{th} のごく近くでは海中と大気中の破壊様式は同じである。そのために両環境間で $\Delta K_{th,eff}$ はほぼ等しくなつたものと思われる。したがつてTi-6Al-4Vの場合、海中の疲れき裂は大気中の $\Delta K_{th,eff}$ 以下の ΔK では進展することはないと考えられる。

なお、鋼の場合粒界割れはき裂先端の塑性変形域大きさが前オーステナイト粒径とほぼ等しくなつたときに現れやすく、 ΔK_{th} 近くでは現れない²³⁾。これは本報のTi-6Al-4Vの場合とは異なるが、その理由は不明であ



Sea water, $\Delta K = 9 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, $R = 0.77$
Photo. 6. Fractograph of specimen SL.

る。

4. 結 論

熱処理条件の異なる3種類の $(\alpha+\beta)$ 型Ti-6Al-4Vを用いて人工海水中低 ΔK 域の疲労き裂伝播特性を調べた。結果は次のとおりである。

1) 応力比が0.1~0.7において海水中の da/dN は大気中の da/dN より速い。その傾向は応力比が低いほどそして ΔK が低いほど著しい。

2) 大気中では da/dN は応力比が0.9以上でもき裂閉口の影響を受ける。一方、海水中の da/dN は応力比が0.5以上になるとき裂閉口の影響をほとんど受けない。これは海水中では腐食溶解してより平坦になるためであると考えられる。

3) 海水中の $da/dN-\Delta K_{eff}$ 曲線は大気中の $da/dN-\Delta K_{eff}$ 曲線より全般に高くなるが、両者の比は最大でも2以下である。

4) 海水中の疲れき裂は大気中の $\Delta K_{th,eff}$ 以下の ΔK で進展することはない。

5) 低 ΔK 域における海水中および大気中の破面は全般にへき開状である。しかし ΔK_{th} のごく近くの破面は海水中、大気中ともに、 α 粒界割れおよび β 相内割れである。

最後にTi-6Al-4Vの海水中腐食について有益な討論を賜った金属材料技術研究所藤井哲雄博士に感謝する。

文 献

- 1) 池島俊雄: チタニウム・ジルコニウム, 32 (1984), p. 139
- 2) D. A. MEYN: Metall. Trans., 2 (1971), p. 853
- 3) D. B. DAWSON and P. M. PELLOUX: Metall. Trans., 5 (1974), p. 723
- 4) W. ELBER: ASTM STP 486 (1971), p. 230
- 5) 角田方衛, 丸山典夫, 中沢興三: 鉄と鋼, 74 (1988), p. 365
- 6) 松岡三郎, 西島 敏, 下平益夫, 升田博之, 竹内悦男: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 55
- 7) W. F. BROWN and J. E. SRAWLEY: ASTM STP 410 (1966), p. 12
- 8) ASTM D 1141-52 (1971), p. 180
- 9) 石田 誠: き裂の弾性解析と応力拡大係数 (1977), p. 140 [培風館]
- 10) S. SURESH, G. F. ZAMISKI and R. O. PITCHIE: Metall. Trans. A, 12 (1981), p. 1435
- 11) K. MINAKAWA and A. J. McEVILY: Scr. Metall., 15 (1981), p. 633
- 12) 角田方衛, 丸山典夫, 内山 郁: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 1479
- 13) 小林英男, 石崎哲行, 高鴻 斌: 日本機械学会論文集A, 52 (1986), p. 1778
- 14) 駒井謙治郎: フラクトグラフィとその応用 (1981), p. 189 [日刊工業新聞社]
- 15) G. R. YODER, F. H. FROES and D. EYLON: Metall. Trans. A, 15 (1984), p. 183
- 16) G. BOMBARA, M. CAVALLINI and S. MAISANO: Anti-Corros Method Mater., 33 (1986), p. 4
- 17) 佐藤広士, 上窪文生, 下郡一利, 福塚敏夫: 防食技術, 32 (1983), p. 69
- 18) 津森芳勝, 成田憲二, 児山佑二, 上窪文生: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 693
- 19) 志岐史章, 辻川茂男: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 292
- 20) 山内重徳, 永田公二, 佐藤史郎: 防食技術, 29 (1980), p. 558
- 21) S. J. GAO, G. W. SIMMONS and R. P. WEI: Mater. Sci. Eng., 62 (1984), p. 65
- 22) C. H. KOCH, A. J. BURSLE, R. LIU and E. N. PUGH: Metall. Trans. A, 12 (1981), p. 1833
- 23) 角田方衛, 丸山典夫, 内山 郁: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 428