

© 1991 ISIJ

論 文
Ti-6Al-4V 合金のフレッティング疲労強度に
及ぼす試験環境の影響Ti-6Al-4V 合金のフレッティング疲労強度に
及ぼす試験環境の影響丸山 典夫*・角田 方衛*²・中沢 興三*²Effect of Testing Environments on Fretting Fatigue
Strength of Ti-6Al-4V

Norio MARUYAMA, Masae SUMITA and Kozo NAKAZAWA

Synopsis:

The analysis of factors controlling fretting fatigue life has been tried using a Ti-6Al-4V alloy under a number of environments. The failure mechanism of fretting fatigue was related to friction force and the environments.

At a contact pressure of 50 MPa in air and argon, "elastic slip" arose between the pad and the contacting surface and the main crack was initiated at the outer area of the contacting surface.

At a contact pressure of 50 MPa under liquid environments such as pure water, synthetic sea water, CH₃OH, and LiCl-CH₃OH, and at a contact pressure of 20 MPa in air, "macro slip" arose and the main crack was initiated at the middle area of the contacting surface. The fretting fatigue life in synthetic sea water or CH₃OH from which the effect of friction force was eliminated was the same as that in air. The life in pure water, however, was longer and the life in LiCl-CH₃OH was shorter, compared with the life in air. It seemed that the former was caused by the removal of micro cracks due to wear particles in fretting and the latter was caused by the stress concentration due to the adhesion of wear debris to the contacting surface.

Key words: fretting fatigue; Ti-6Al-4V; in air; in pure water; in LiCl-CH₃OH; elastic slip; macro slip.

1. は じ め に

繰返し荷重が加わっている構造物にボルト結合部のような接触箇所があると、そこでフレッティングを生じ、き裂が発生、伝播することがある。長寿命側のフレッティング疲労強度は大気中では一般に、通常の疲労強度に比べて低く、半分以下になる場合もある^{1)~3)}。フレッティング損傷は接触している二つの部材とそこをとりまく環境が相互作用している箇所であるので、大気以外の環境下のフレッティング疲労挙動は大気中のフレッティング疲労挙動からは予測できないような挙動を示すことがある⁴⁾⁵⁾。

チタン合金は高比強度で耐食性の優れた構造材料であるが、焼付きを生じやすいなどトライボロジー特性に問題がある。しかし将来チタン合金が他の構造材料に比べて有している優れた特性を生かすために苛酷な環境下で

使用される機会が増加していくと考えられる。トライボロジー特性に関係のあるフレッティング疲労に関する研究はこれまでに主として大気環境下で行われている¹⁾が、上記のことを考えるとチタン合金について苛酷な環境下のフレッティング特性を把握しておくことは重要である。

そこで Ti-6Al-4V 合金を用いて 6 種類の環境下のフレッティング疲労特性を比較、解析した。

2. 実 験 方 法

2.1 対象材料

Ti-6.34%Al-4.11%V-0.14%Fe-0.20%O-0.007%N-0.008%C 合金を使用した。同合金は 940°C で 2 h 保持後水冷、さらに 540°C で 5 h 保持後空冷が施されている。組織は球状化した初析 α および微細 α が析出した β から成る。試験片方向は L 方向である。ASTM E8

平成元年 9 月 本会講演大会にて発表 平成 2 年 5 月 24 日 受付 (Received May 24, 1990)

* 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. Mechanical properties.

0.2% P.S. (MPa)	T.S. (MPa)	EL. (%)	R.A. (%)
1 006	1 104	14.5	29.5

試験片による引張試験結果を Table 1 に示す。

2.2 フレット疲労試験

(1) フレット疲労試験片およびパッドの形状は別報⁴⁾に記したので省略する。

(2) 試験機: ± 10 t の電気油圧型疲労試験機を用いた。パッドの押付け力は試験機本体の油圧源から分岐した。フレット疲労試験法は別報⁴⁾と同様である。

(3) 試験片表面およびパッド接触面は 0 番エメリー紙で研磨した後アセトンで脱脂した。試験中におけるパッドと試験片間の摩擦力はパッド中心部側面に貼ったひずみゲージより求めた。パッド端部と試験片間の相対すべり振幅は特殊な小型伸び計を用いて測定した。

(4) 繰返し応力振幅: 200 MPa を用いた。相対すべり振幅は約 20 μm である。

(5) 応力比: $R=0.1$ とした。(軸荷重)

(6) 繰返し速度: 1 Hz および 20 Hz とした。

(7) 応力波形: サイン波を用いた。

(8) パッド接触面圧: フレット疲労試験における押付け応力 p は 20 および 50 MPa を用いた。

(9) 環境

(i) 室内大気

(ii) 人工海水 (約 28°C, 空気飽和)

(iii) イオン交換水 (約 28°C, 空気飽和)

(iv) CH_3OH (約 28°C, 空気飽和)

(v) 0.6 M $\text{LiCl}-\text{CH}_3\text{OH}$ (約 28°C, 空気飽和) チタン合金の表面に不動態被膜を生成しないと考えられる環境である⁶⁾。

(vi) アルゴン (H_2O 40~50 ppm)

(10) 破面およびフレット表面観察: 光学顕微鏡および表面形状測定器を用いた。

3. 結 果

3.1 各種環境下の摩擦係数

摩擦応力振幅 f は繰返し数 N とともに多少増加するが, $N=2000\sim 3000$ で飽和し, ほぼ一定になるので, f は $N \approx 3000$ で求められている。

$f = \mu p$ であるから, f への環境の影響は μ への環境の影響と同じである。ここで μ は摩擦係数である。

(1) 摩擦係数と応力振幅との関係

μ と応力振幅 σ_a との関係を Fig. 1 a) および b) に示す。 μ は σ_a とともに増加するが, ある σ_a で一定になる。

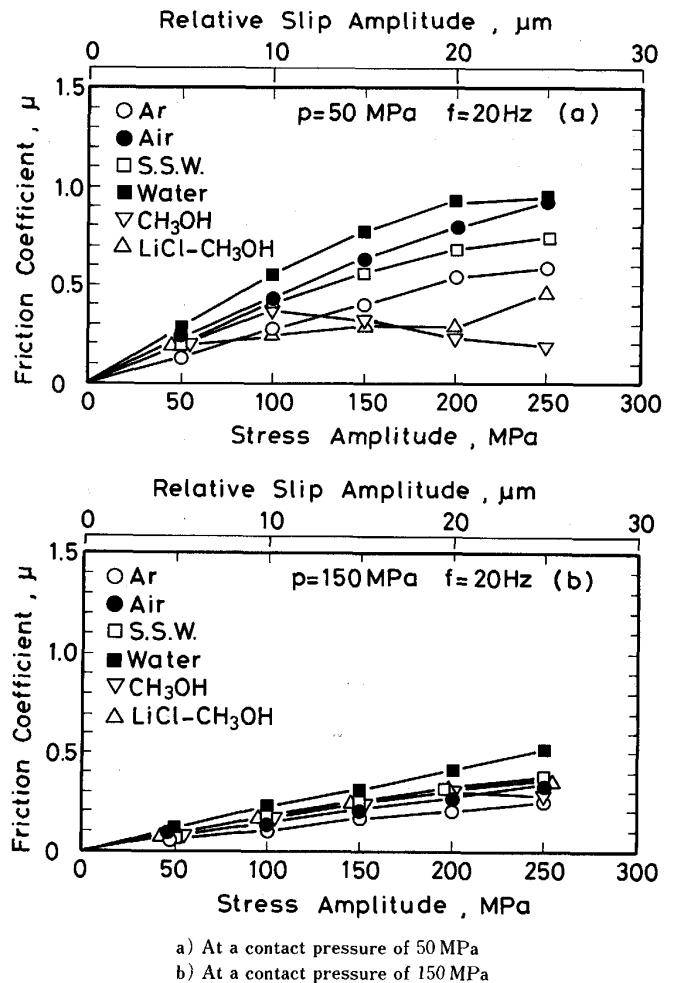


Fig. 1. Friction coefficient as a function of stress amplitude in various environments.

p が低い場合 μ は環境の影響を著しく受ける。例えば, $p=50$ MPa で $\sigma_a=200$ MPa の場合 μ は純水中では 0.9 大気中では 0.8, 人工海水中では 0.7, そして CH_3OH および $\text{LiCl}-\text{CH}_3\text{OH}$ 中では 0.2~0.3 である。しかし $p=150$ MPa の場合 μ は環境にあまり依存せず, $\sigma_a=200$ MPa においていずれの環境下でも 0.3 前後である。

(2) 摩擦係数と押付け力の関係

純水中と $\text{LiCl}-\text{CH}_3\text{OH}$ における μ と p との関係を Fig. 2 a) および b) に示す。純水中の μ は σ_a が高いほど, そして p が低いほど大きい。しかし $\text{LiCl}-\text{CH}_3\text{OH}$ 中の μ は σ_a および p にほとんど依存しない。

各種環境下の $\sigma_a=200$ MPa における μ と p との関係を Fig. 3 a) および b) に示す。アルゴン, 大気, 海水, 純水中では μ は p とともに減少する。しかし CH_3OH および $\text{LiCl}-\text{CH}_3\text{OH}$ 中では μ の p への依存性は弱い。 μ の環境依存性は低 p 域で大きい。20 Hz における μ 値は 1 Hz における μ 値に比べて多少高いが, 全般的には繰返し速度依存性はみられない。

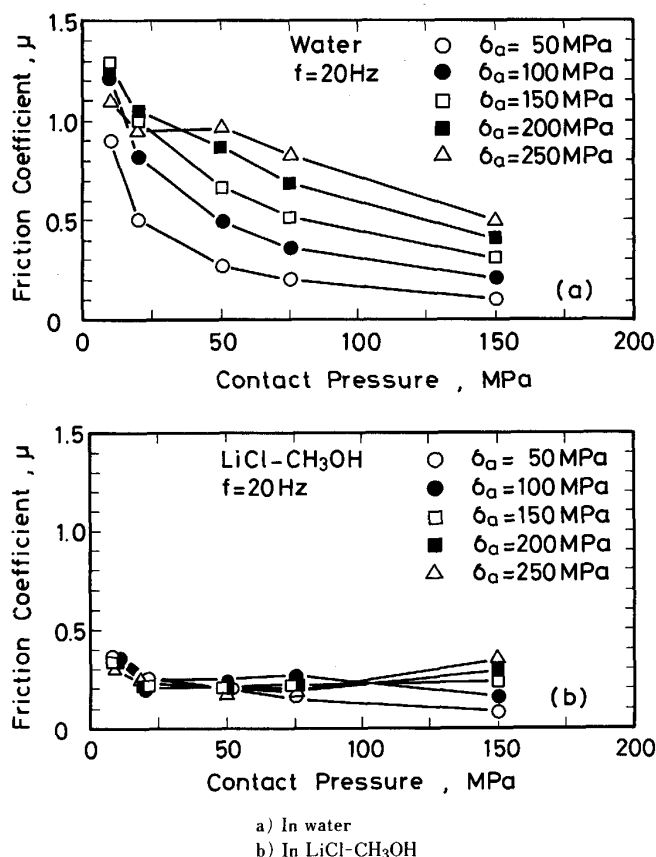


Fig. 2. Friction coefficient as a function of contact pressure at a frequency of 20 Hz.

3.2 フレッシング疲労試験結果

フレッシング疲労試験は $\sigma_a = 200$ MPa, $p = 50$ MPa で、そして一部 $p = 20$ MPa で行った。

$p = 50$ MPa のフレッシング疲労寿命を Fig. 4 a) に示す。各試験条件当たり 2~4 本の試験片を使用し、その平均値が示されている。フレッシング疲労寿命は全般に 1 Hz および 20 Hz において環境間で大きな相違はみられず、 $10^5 \sim 2 \times 10^5$ である。ただし CH₃OH および LiCl-CH₃OH 中では 20 Hz の寿命は 1 Hz の寿命に比べて長い。

$p = 20$ MPa のフレッシング疲労寿命を Fig. 4 b) に示す。 $p = 20$ MPa の寿命は Fig. 4 a) の $p = 50$ MPa の寿命に比べて全般に長い。また純水中の寿命は大気中の寿命に比べて長い。ただし大気中の 20 Hz の場合は $p = 50$ MPa と 20 MPa で寿命はほとんど変わらない。

$p = 50$ MPa における試験片破断の主な裂発生箇所は全般に液体環境下ではパッド接触面中央部、そして気体環境下ではパッド接触面外端部である。その例を Photo. 1 に示す。一方 $p = 20$ MPa における主な裂発生箇所は液体環境下、気体環境下ともにパッド接触面中央部である。

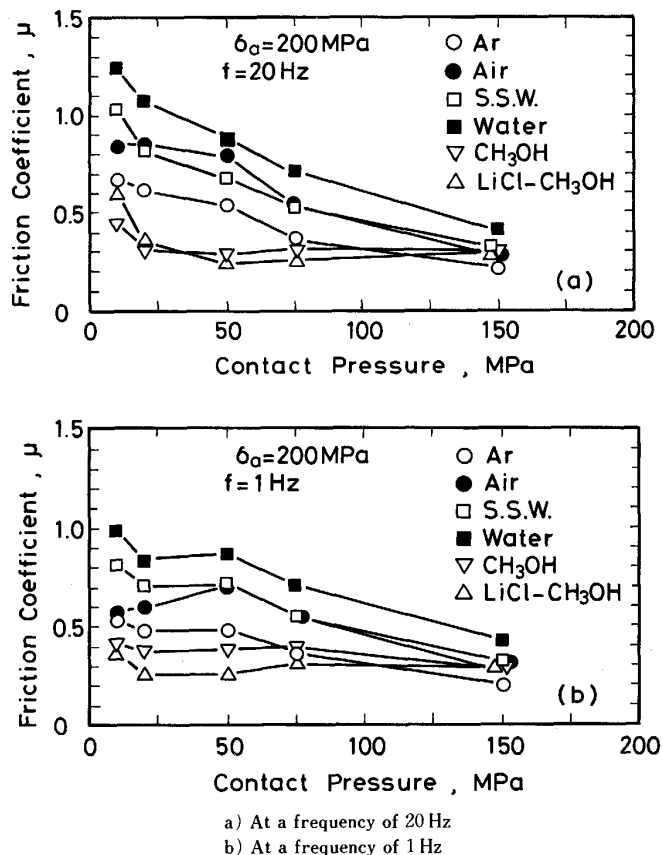


Fig. 3. Friction coefficient as a function of contact pressure in various environments.

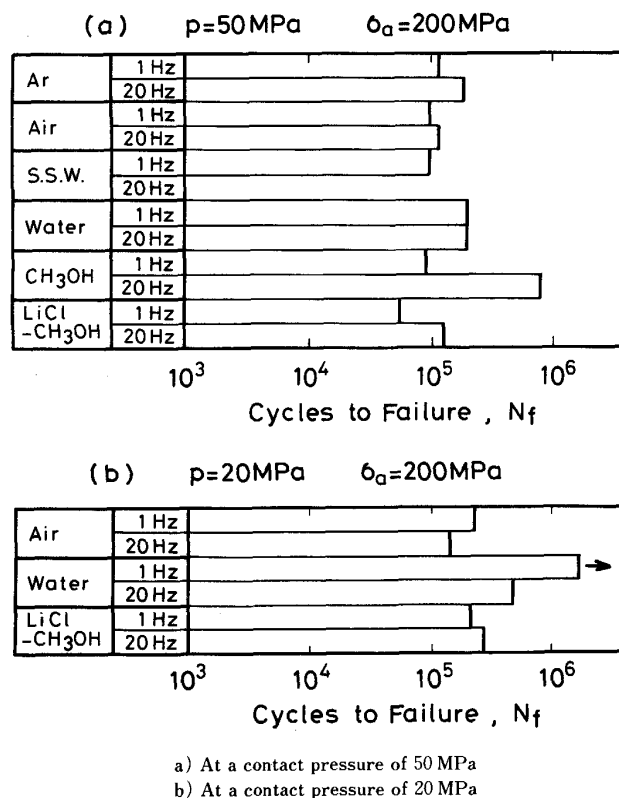
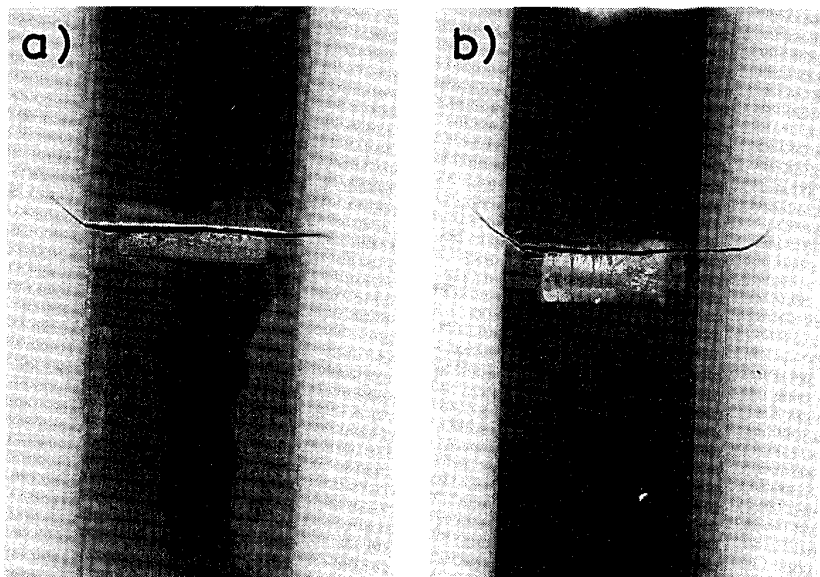


Fig. 4. The fretting fatigue life in various environments.



a) In LiCl-CH₃OH ($\sigma_a = 200$ MPa, $p = 50$ MPa, $N_f = 1.0 \times 10^5$)
 b) In air ($\sigma_a = 200$ MPa, $p = 50$ MPa, $N_f = 1.0 \times 10^5$)

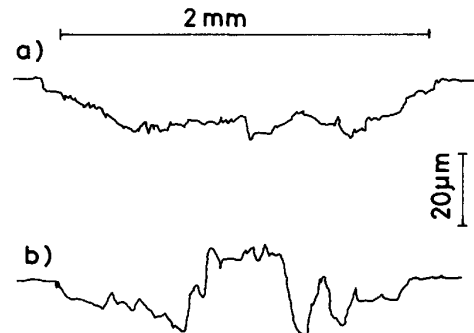
Photo. 1. Fretted surface.

4. 考 察

4.1 摩擦係数と環境

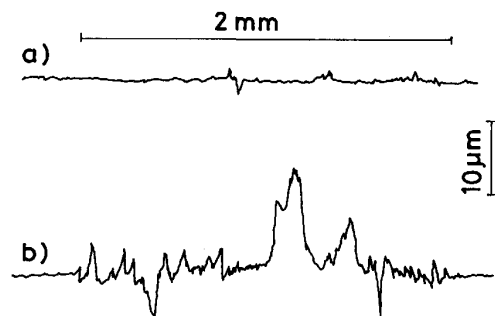
摩擦係数 μ は環境の影響を強く受ける。用いた 6 種類の環境中、押付け力 $p = 50$ MPa で最も高い μ を示す環境は (Fig. 3 参照), 純水中で, $\mu = 0.9$ である。一方最も低い μ を示す環境は CH₃OH であり $\mu = 0.3$ である。フレッティング疲労試験中における摩耗粉の脱落状況を観察した結果, 純水中では他の環境下に比べて微細な摩耗粉の脱落が顕著であった。Fig. 5 a) および b) に示すように純水中と CH₃OH でパッド接触面における摩耗損傷部の最大深さには, 大きな相違はみられない。しかし前者中では損傷部は脱落しており, 一方後者中では損傷部の脱落は少ない。これは純水中では表面層の疲労破壊のために剝離した小片が細かい摩耗粉となりパッド接触面より脱落しているのに対して CH₃OH 中では剝離片あるいは摩耗粉が凝着しているためと考えられる。むしろ Fig. 6 a) に示すように大気中において摩耗損傷は相対的に少ない。大気中で $p = 20$ MPa の μ は $p = 50$ MPa における μ とほぼ同じ (Fig. 3 参照) であるが, 接触面の摩耗損傷は Fig. 6 b) に示すように Fig. 6 a) に比べて大きい。したがって摩耗損傷の大小, 摩耗粉のパッド接触面への凝着の多少は μ に対して大きな影響を及ぼしていないように思われる。

CH₃OH 中と LiCl-CH₃OH 中で μ はほぼ同じである。この両環境のチタン合金に対する相違は前者中では新生面は容易に不動態被膜を生成するが, 後者中では不動態被膜を生成したとしても不安定なことである⁶⁾。したがってチタン合金の不動態被膜の安定性は μ に対して



a) In water ($\sigma_a = 200$ MPa, $p = 50$ MPa, $f = 20$ Hz, $N_f = 2.0 \times 10^5$)
 b) In CH₃OH ($\sigma_a = 200$ MPa, $p = 50$ MPa, $f = 20$ Hz, $N_f = 3.9 \times 10^5$)

Fig. 5. Fretted surface.



a) In air ($\sigma_a = 200$ MPa, $p = 50$ MPa, $f = 20$ Hz, $N_f = 1.0 \times 10^5$)
 b) In air ($\sigma_a = 200$ MPa, $p = 20$ MPa, $f = 20$ Hz, $N_f = 1.2 \times 10^5$)

Fig. 6. Fretted surface.

ほとんど影響を及ぼさないと言える。

4.2 フレッティング疲労寿命の ($\sigma_a + 2\mu p$) による整理

フレッティング疲労破壊に寄与する応力振幅は σ_a と $2\mu p$ である⁷⁾。前報の大気中のフレッティング疲労試験

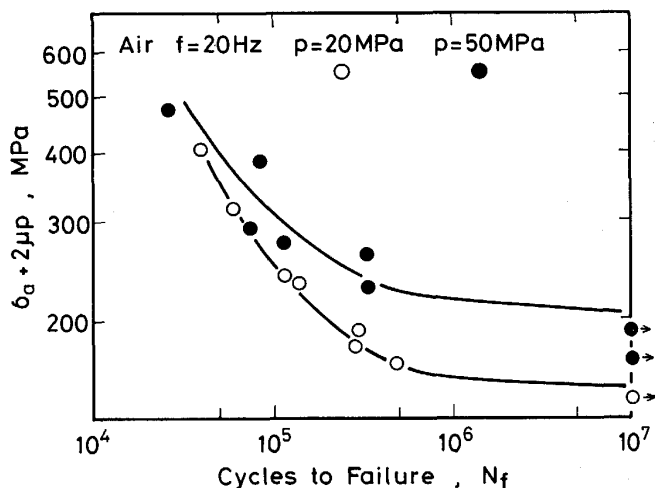


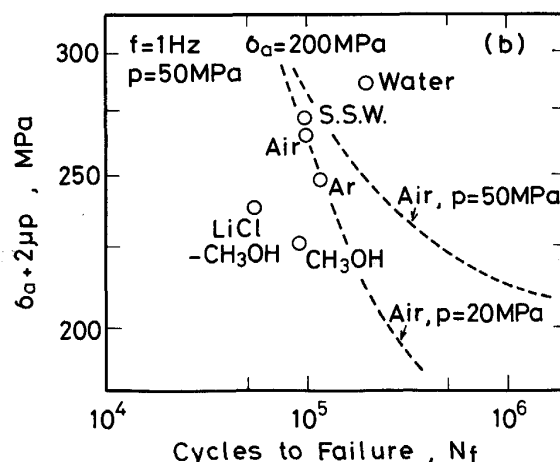
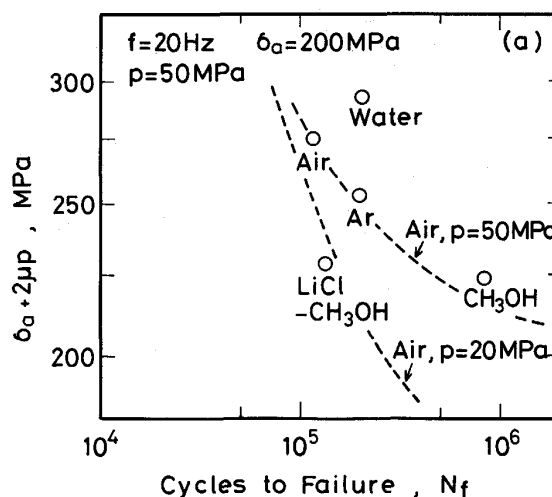
Fig. 7. Stress amplitude and friction stress amplitude as a function of cycles to failure in air.

結果²⁾を応力振幅 σ_a の代わりに $(\sigma_a + 2\mu p)$ で整理し直した図を Fig. 7 に示す。試験片破断の主き裂発起始点 (以後破断箇所とよぶ) がパッド接触面の外端部 (以後“外端部”とよぶ) かあるいは中央部 (以後“中央部”とよぶ) により $(\sigma_a + 2\mu p) - N_f$ 曲線の傾向は異なる。低 $(\sigma_a + 2\mu p)$ において、破断寿命は破断箇所が“中央部” ($p = 20$ MPa) の方が“外端部”の場合 ($p = 50$ MPa) より短い。これはフレット疲労におけるき裂発生機構の違いを反映している²⁾。 $p = 50$ MPa の場合き裂は応力集中の大きい外端部近くの局所的に損傷を受けたところで発生し伝播する。一方、 $p = 20$ MPa の場合外端部にあるせん断応力の高い固着域とすべり域との境界で微小き裂が発生しその結果応力集中が緩和されて境界は接触面中央へ移動していき、最終的に中央部で主き裂が発生、伝播したと考えられる²⁾。

Fig. 4 のデータを $(\sigma_a + 2\mu p) - N_f$ で整理し直した図を Fig. 8a) および b) に示す。同図中に Fig. 7 の結果が破線で併記されている。破断箇所が“外端部”の場合の寿命が大気中 $p = 50$ MPa の曲線近くに、そして破断箇所が“中央部”の場合の寿命が大気中 $p = 20$ MPa の曲線近くにこないならば、それは巨視的力学因子である $(\sigma_a + 2\mu p)$ 以外の因子によるものと考えられる。アルゴン中、人工海水中、大気中の値は Fig. 7 の結果とほぼ同じ寿命である。純水中の破断寿命は $p = 50$ MPa の曲線に比べて長寿命であり、LiCl-CH₃OH 中の破断寿命は $p = 20$ MPa の曲線に比べて短寿命である。CH₃OH 中では破断寿命は繰返し速度依存性が大きい。

4.3 パッド接触面における破断箇所

$p = 50$ MPa, $\sigma_a = 200$ MPa の本実験において純水、人工海水、CH₃OH, LiCl-CH₃OH の各液体環境下では



a) At a frequency of 20 Hz
b) At a frequency of 1 Hz

Fig. 8. Stress amplitude and friction stress amplitude as a function of cycles to failure in various environments.

破断箇所はパッド接触部の“中央部”である。この場合繰返し摩擦応力波形は正弦波を示さずくずれており、“Macro slip”⁸⁾を生じている。一方、大気およびアルゴンの気体環境下では破断箇所は Photo. 1 に示したように“外端部”近くである。この場合摩擦応力波形はほぼ正弦波を示し“Elastic slip”⁹⁾を生じている。大気中でも $p = 20$ MPa の場合は $p = 50$ MPa の場合とは異なり、“Macro slip”を生じ破断箇所は“中央部”である。したがってパッド接触部のどこで破断するかは“Elastic slip”であるか、“Macro slip”であるかに依存する。そして“Macro slip”は p が低いほどそして気体環境よりも液体環境で生じやすい。

4.4 フレット疲労強度と環境

フレット疲労寿命に影響を及ぼす力学因子を M とすれば、

$$M = \sigma_a + 2\mu p + X \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで X は固着域とすべり域の境界の移動²⁾や疲労による剥離片やその摩耗粉の接触面への凝着などに起因する微視的応力集中の度合いである。フレッティング疲労強度への環境の影響は μ と X を通して与えられる。もしも腐食性環境下でパッド接触部ですきま腐食を生じるならば、それは X に関与する力学因子であり、 X のフレッティング疲労寿命への影響は大きくなる。 $(\sigma_a + 2\mu p + X)$ の影響を受けて発生したき裂は伝播し、あるき裂長さに達するとそれ以降は $2\mu p$ と X の影響は受けなくなり、 σ_a だけに依存する普通の疲労き裂伝播に移る。

フレッティング疲労破断繰返し数 N_f は次式で表される。

$$N_f = N_{i,f} + N_p \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで $N_{i,f}$ は N_f のうちフレッティングが関与する繰返し数、 N_p は N_f のうちフレッティングが関与せず、 σ_a だけでき裂が伝播する繰返し数である。 $N_{i,f}$ はさらにき裂発生までに必要な繰返し数 (N_1) とき裂伝播に関する繰返し数 (N_2) にわけられる。すなわち、

$$N_{i,f} = N_1 + N_2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

N_1 はパッド接触面におけるマクロ的応力集中の影響すなわち $2\mu p$ の影響を受ける。き裂が外端部で発生する場合と中央部で発生する場合で力学的条件に大きな相違はみられない。Fig. 7 における $p = 20$ MPa (中央部で発生) の N_f と $p = 50$ MPa (外端部で発生) の N_f の相違は N_1 が両者間で異なるためと考えられる。両者間で力学的条件が類似しているため、 N_2 と N_p の相違は大きくないと思われる。 N_1 は Slip の種類 (Macro slip であるか Elastic slip であるか) 接触面の腐食ピットの発生場所とその形状⁴⁾、後述する摩耗速度の影響をうける。パッド接触面にミクロ的き裂が生じても摩耗速度が大きければ、それはき裂伝播には至らないであろう。S45C 鋼およびアルミニウム合金のフレッティング疲労試験において大気中 $p = 80$ MPa の da/dN は、き裂が長くなるとともにフレッティングの影響が減少するので、一時的に低下し、極小値を示した後大きくなるが、その極小値は $10^{-6} \sim 10^{-5}$ mm/Cycle である⁹⁾¹¹⁾。

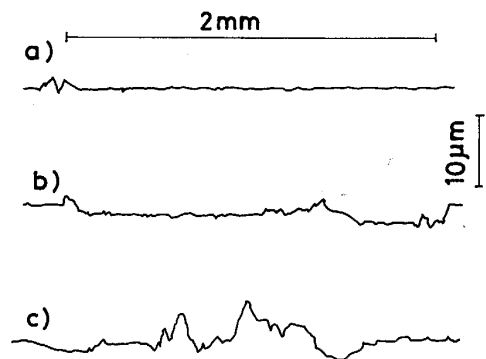
このように N_2 および N_p への環境の影響は比較的速い疲労き裂伝播速度 (da/dN) への環境の影響と同じことであり、通常疲労の $da/dN - \Delta K$ 曲線からその影響度合いは推測できる。

Fig. 8 に示したように各種環境下のフレッティング疲労強度の中で、純水中のフレッティング疲労強度は他の環境下のフレッティング疲労強度に比べて高く、

LiCl-CH₃OH 中のフレッティング疲労強度は低い。Fig. 8 においてフレッティング疲労強度への μ を通しての環境の影響は除去されている。また Ti-6Al-4V 合金は本実験で使用した環境下ではほとんど腐食しないので、(1)式中の X に関与する腐食ピットによる応力集中の影響も除去される。したがって Fig. 8 を説明するための因子として (i) 摩耗挙動と、(ii) 疲労き裂伝播速度が考えられる。

(i) アルゴン、人工海水、および LiCl-CH₃OH 中のパッド接触面の凹凸を Fig. 9 a), b), c) に示す。Fig. 5, 6 および 9 より $p = 50$ MPa の場合接触面の摩耗損傷は全般に気体環境下では軽微であり、液体環境下では顕著である。液体環境のうちでも CH₃OH (Fig. 5 b)) および LiCl-CH₃OH (Fig. 9 c)) 中の接触面は純水 (Fig. 5 a)) および人工海水 (Fig. 9 b)) 中のパッド接触面に比べてミクロ的凹凸が顕著である。同じような摩耗損傷を受けても摩耗によって剥離した部分が凝着してミクロ的応力集中箇所を形成する場合、(1)式の X の影響が大きくなりフレッティング疲労寿命を短くする可能性がある。すなわち (3) 式の N_1 が短くなる。使用した4種類の液体環境のうち海水中の摩耗損傷は相対的に少なく気体環境下の接触面形態に近い。

純水中では摩耗片の凝着は少なく、粉末化し脱落が著しい。Fig. 10 に示すように繰返し数が大きくなると



a) In air ($\sigma_a = 200$ MPa, $p = 50$ MPa, $f = 20$ Hz, $N_f = 2.0 \times 10^5$)
 b) In synthetic sea water ($\sigma_a = 200$ MPa, $p = 50$ MPa, $f = 1$ Hz, $N_f = 9.4 \times 10^4$)
 c) In LiCl-CH₃OH ($\sigma_a = 200$ MPa, $p = 20$ MPa, $f = 1$ Hz, $N_f = 4.8 \times 10^4$)

Fig. 9. Fretted surface.

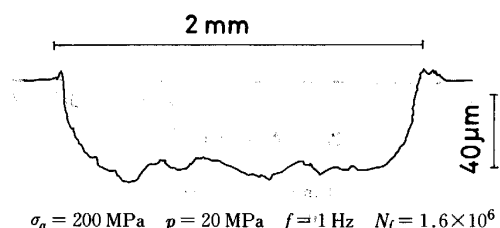


Fig. 10. Fretted surface in water.

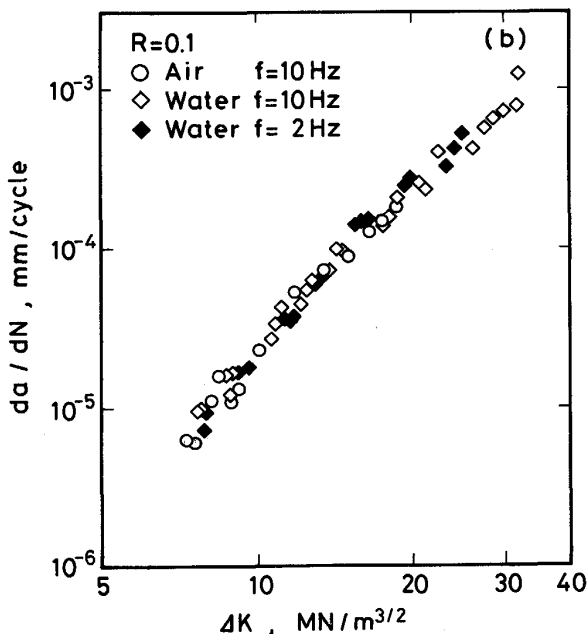
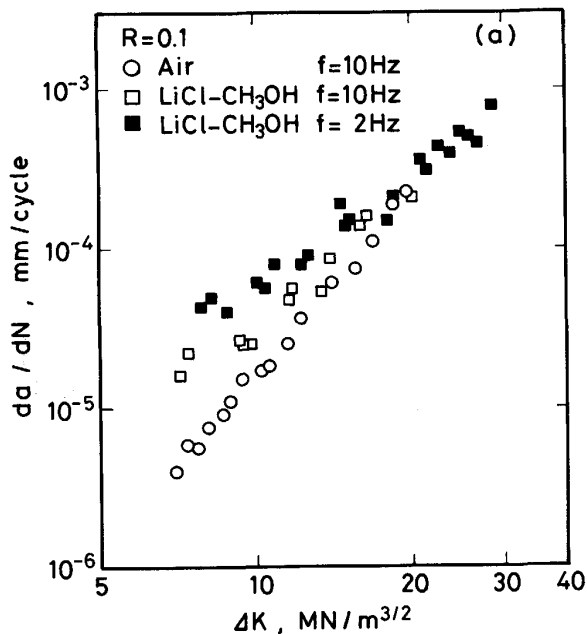
パッド接触箇所が凹みは深くなるが、摩耗はフレット疲労寿命に対しては延命効果を有している (Fig. 8 参照)。すなわちマイクロ裂がたとえ発生しても摩耗によって削除されるため、伝播可能な裂長さに達するまでの繰返し数が大きくなると考えられる。

(ii) 疲労き裂伝播速彼

LiCl-CH₃OH 中および純水中の da/dN を Fig. 11 a) および b) に示す。

同図より

(a) LiCl-CH₃OH 中の da/dN は $\Delta K \leq 20 \text{ MN} \cdot \text{m}^{3/2}$ で



a) In LiCl-CH₃OH
b) In water

Fig. 11. Examples of da/dN vs. ΔK curves.

大気中の da/dN より速い。

(b) 純水中の da/dN は大気中の da/dN とほぼ等しい。さらに前報¹⁰⁾より

(c) 人工海水中の da/dN は $\Delta K \leq 7 \text{ MN} \cdot \text{m}^{3/2}$ で大気中の da/dN より速い。

(a) がフレット疲労寿命の両環境間の相違に關与している可能性が強い。S45C 鋼およびアルミニウム合金の大気中のフレット疲労下の da/dN の極小値は $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ mm/Cycle}$ であり⁹⁾、これより類推して Ti-6Al-4V 合金において 10^{-4} mm/Cycle 以下で現れる両環境下の da/dN の相違 (Fig. 11 a) 参照) が両環境下のフレット疲労寿命の差に影響すると思われる。

(c) に示した人工海水中の da/dN と大気中の da/dN の相違は da/dN が遅い領域でのみあらわれるので両環境下のフレット疲労寿命に關係しているとは考えられない。摩擦係数 (Fig. 1 a) 参照) および接触面の凹凸状況 (Fig. 6 a) および Fig. 9 b)) は両環境下で類似している。これらの理由により両環境下のフレット疲労寿命はほぼ同じになったものと思われる。

5. 結 論

Ti-6Al-4V 合金を用いて 6 種類の環境下でフレット疲労試験を行い、環境のフレット疲労寿命に及ぼす影響について検討した。結果は次のとおりである。

(1) 応力振幅 200 MPa, (相対すべり振幅 $20 \mu\text{m}$) パッド押付け力 50 MPa におけるフレット疲労寿命は、大気、アルゴン、人工海水、純水、LiCl-CH₃OH 中で大きな相違はみられない。しかし CH₃OH 中では他の環境に比べて寿命は長い。

(2) 主き裂発生箇所は Macro slip を生じる場合、パッド接触面中央部から、Elastic slip を生じる場合、パッド接触面外端部である。そして Macro slip は p が低いほどそして気体環境より液体環境下で生じやすい。

(3) 摩擦力 (摩擦係数) は純水中、人工海水中および大気中、アルゴン中、CH₃OH、および LiCl-CH₃OH 中の順に小さくなる。

(4) 摩擦力の影響を除去したフレット疲労寿命 (摩擦係数を通しての環境のフレット疲労寿命への影響分が除去されているフレット疲労寿命) は人工海水中およびアルゴン中で大気中とほぼ同じである。しかし、これらの寿命に比べて純水中では長く、LiCl-CH₃OH 中では短い。その傾向は 20 Hz に比べて 1 Hz において顕著である。

(5)(4)において純水中でフレッティング疲労寿命が長いのはパッド接触面に生じるマイクロき裂が摩耗により研削されるためである。一方、LiCl-CH₃OH でフレッティング疲労寿命が短いのは、同環境下ではき裂伝播速度が他の環境下とのそれに比べて速いことおよび摩耗片の凝着によるミクロ的切欠きによる高応力集中のためと考えられる。

文 献

- 1) R. B. WATERHOUSE: Fretting Fatigue (1981) [Science Publishers LTD, London]
- 2) 丸山典夫, 角田方衛, 中沢興三: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 262
- 3) 武藤睦治, 田中紘一, 伊藤晋三: 材料, **37** (1988), p. 643
- 4) 中沢興三, 角田方衛, 丸山典夫, 河部義邦: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 725
- 5) K. NAKAZAWA, M. SUMITA and N. MARUYAMA: Proc. Int. Conference EVALMAT 89, Kobe, Japan (1989) [The Iron and Steel Institute of Japan] 印刷中
- 6) D. B. DAWSON: Metall. Trans. A, **12** (1981), p. 791
- 7) 西岡邦夫, 平川賢爾: 日本機械学会論文集 (第1部), **37** (1971), p. 1051
- 8) K. TANAKA, Y. MUTOH, S. SAKODA and G. LEADBEATER: Fatigue Engng. Mater. Struct., **8** (1985), p. 129
- 9) 佐藤建吉, 藤井 孟, 児玉昭太郎: 日本機械学会論文集 A, **52** (1986), p. 417
- 10) 角田方衛, 丸山典夫: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 1854
- 11) 佐藤建吉, 藤井 孟, 児玉昭太郎: 材料, **34** (1985), p. 1076