

© 1990 ISIJ

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

高張力鋼の海水中フレッティング疲労に 及ぼすカソード防食の影響

 中沢 興三*・角田 方衛*・丸山 典夫*²

Effect of Cathodic Protection on Fretting Fatigue of High Strength Steels in Seawater

Kozo NAKAZAWA, Masae SUMITA and Norio MARUYAMA

Synopsis:

The effect of cathodic protection on the fretting fatigue of high strength steels in synthetic seawater was studied. The fretting fatigue life in seawater under freely corroding condition was much shorter than that in air. Using cathodic protection, the fretting fatigue life in seawater was greatly increased, and became longer than that in air, and the lower the frequency, the longer the life. The improvement in fretting fatigue life by cathodic protection resulted mainly from the increase in crack propagation life not influenced by fretting. This increase was probably caused by crack closure effect of calcareous deposits produced under the cathodic potential employed. In stainless steel used to compare with the high strength steels, the fretting fatigue life in seawater under freely corroding condition was almost the same as that in air.

Key words: fretting fatigue; high strength steel; stainless steel; seawater; free corrosion; cathodic protection; calcareous deposits; crack closure effect.

1. 緒 言

海水中自然腐食下における鋼のフレッティング疲労寿命は、通常の腐食疲労寿命と比べて著しく短い¹⁾。その寿命低下は初期のフレッティング損傷による腐食ピット形成の加速が原因の一つと考えられる場合²⁾もあり、フレッティング損傷部の腐食挙動が重要な役割を演じている。したがって損傷部の防食はフレッティング疲労寿命向上に寄与するものと予想される。

海洋環境下における鋼構造物は腐食を防止するために一般に塗装や電気防食が施される。適正なカソード防食は鋼の海水中疲労寿命を著しく改善することが知られている。しかし、切欠きの有無や応力振幅、応力比などの試験条件によってはカソード防食の効果が少なく、かえってカソード防食下の疲労寿命は自然腐食下のそれよりも低下することがある³⁾。

腐食環境下の鋼のフレッティング疲労に及ぼすカソード防食の影響に関しては、ステンレス鋼の塩化ナトリウム (NaCl) 水溶液中フレッティング疲労寿命がカソード防食によって向上したという報告⁴⁾がある。また、

0.64% 炭素鋼線の海水中フレッティング疲労がカソード防食によって向上したという結果が示されている⁵⁾。しかし、カソード防食による寿命向上の原因については不明の点が多い。ところで高張力鋼に及ぼすカソード防食の効果に対比させて、耐食性の優れたステンレス鋼のフレッティング疲労を検討することは、重要な影響因子である腐食の役割を明らかにする上で有効であろう。本研究は海水中における高張力鋼のフレッティング疲労に及ぼすカソード防食の影響、および比較材としてステンレス鋼のフレッティング疲労挙動を検討したものである。

2. 実 験 方 法

高張力鋼として前報¹⁾で用いた 880 MPa 級高張力鋼および 580 MPa 級高張力鋼 (HT60) を用いた。またステンレス鋼としては HT60 鋼と強度のほぼ等しい JIS 規格 SUS329JI 相当の二相ステンレス鋼 (DPSS) を用いた。これらの化学成分を Table 1 に示す。880 MPa 級高張力鋼および DPSS 鋼は高純度原材料を用いて真空高周波溶解で 20 kg 鋼塊に溶製した。これら鋼塊は

平成 2 年 1 月 19 日受付 (Received Jan. 19, 1990)

* 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. Chemical composition of steels used (mass%).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Al	Fe
880 MPa grade	0.18	0.32	1.26	0.001	0.003	1.04	0.60	0.26	0.46	0.059	Bal.
HT60	0.12	0.30	1.26	0.014	0.002	0.49	0.12	0.15	0.15	—	Bal.
DPSS	0.002	0.50	2.99	<0.002	0.005	5.67	24.32	—	2.97	0.005	Bal.

Table 2. Mechanical properties of steels used.

	0.2% P.S. (MPa)	U. T. S. (MPa)	R. A. (%)	El. (%)
880 MPa grade	917	1 010	70	15
HT60	618	669	—	41
DPSS	528	647	79	35

1 473 K-3.6 ks 加熱後鍛造により 60 mm 角とし、さらに 1 473 K-7.2 ks 加熱後熱間圧延により直径 25 mm の丸棒にした。さらにソルトバスを用いて、880 MPa 級鋼は 1 173 K-7.2 ks 加熱後水冷→1 153 K-3.6 ks 加熱後水冷→838 K-3.6 ks 加熱後水冷の焼入れ焼もどし処理を行った。また DPSS 鋼は 1 273 K-3.6 ks 加熱後水冷の二相化熱処理を行った。これにより γ 相を約 16% 含む γ - δ 二相組織を得た。HT60 鋼は厚さ 25 mm の素材メーカー製板材を入手まま用いた。これら素材の機械的性質を Table 2 に示す。

試験片はその長さ方向が圧延方向に一致するように切り出した。フレット疲労試験方法および用いた試験片の寸法形状は前報¹⁾と同様である。パッドの接触面圧を 80 MPa (8.2 kgf/mm²) 一定とし、繰返し負荷は、正弦波形、繰返し速度 1, 5 および 20 Hz, 片振りの応力比 $R = 0.1$ の荷重制御で行った。相対すべり振幅は単位応力振幅当たり約 0.05 $\mu\text{m}/\text{MPa}$ である。海水は ASTM D1141-75 による人工海水 (以下、海水) を用い、pH を 8.2 とし、空気をバブリングにより飽和溶解させた。海水の温度は $298 \pm 0.2 \text{ K}$ ($25 \pm 0.2^\circ\text{C}$) に制御した。カソード防食には Zn 犠牲陽極 ($-1 030 \text{ mV vs. Ag/AgCl}$) を用いた。大気中の試験は温度 298 K, 相対湿度 40-70% の実験室雰囲気で行った。なお、海水中試験に用いるフレット疲労試験片の肩 (R 部) の部分はシリコンゴムで被覆した。繰返し数に伴う損傷累積挙動からき裂の発生および伝播挙動を調べるため、ある繰返し数だけフレット疲労試験をした後、フレット疲労用パッドを取りはずし、引き続き同一応力振幅で通常の疲労試験に移行する寿命試験を行った。以後、この疲労試験を中断フレット疲労試験と呼ぶ。なお、パッドと試験片間の摩擦力は、パッド中心部の側面にひずみゲージを貼り付けて測定した。摩擦力振幅を F , 押付け力を P とすると摩擦係数 μ は $\mu = F/P$ で定義される。

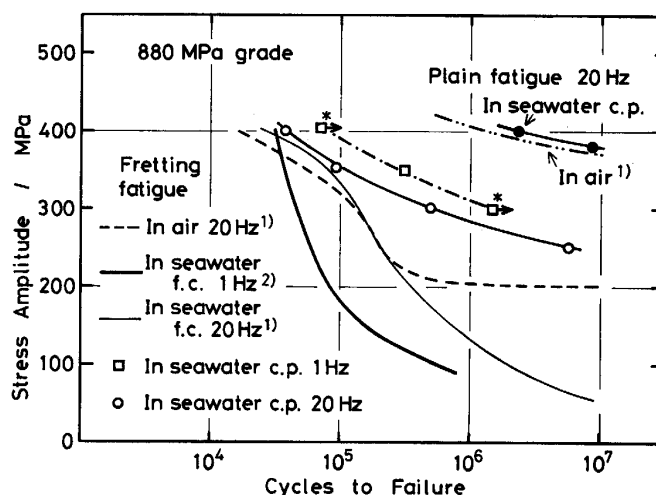


Fig. 1. S-N curves of fretting fatigue and plain fatigue in seawater under cathodically protected condition (c.p.) for 880 MPa grade steel. The data with * represent specimens fractured in such a manner as main cracks initiated at shoulders coated with silicone rubber. For comparison, the data in air and in seawater under freely corroding condition (f.c.) obtained in the previous papers¹⁾²⁾ are shown.

3. 実験結果

3.1 高張力鋼のフレット疲労に及ぼすカソード防食の影響

880 MPa 級鋼の 1 および 20 Hz における海水中カソード防食下のフレット疲労の S-N 曲線を Fig. 1 に示す。比較のために前報¹⁾²⁾ で求めた大気中および海水中自然腐食下のフレット疲労の S-N 曲線も併せて示す。また通常疲労についても、大気中および海水中カソード防食下 20 Hz における S-N 曲線を示す。まず通常疲労において、カソード防食下の疲労寿命は大気中のそれよりやや長寿命側にある。またカソード防食下の 10^7 回の疲労強度は約 380 MPa で、前報¹⁾ で示した海水中自然腐食下の疲労強度約 150 MPa の 2 倍以上となっており、カソード防食の効果が大きい。20 Hz における海水中カソード防食下のフレット疲労寿命は自然腐食下および大気中のそれと比べて、高応力振幅ではほぼ同じであるが、低応力振幅では著しく長寿命で

ある。1 Hz におけるカソード防食下のフレットング疲労寿命は 20 Hz よりも長寿命で、これは、1 Hz の方が 20 Hz より短寿命になっている自然腐食下の結果と対照的である。なお図中*を付したデータは、破断が海水環境と接していないシリコンゴム被覆した試験片肩部(R部)で生じた場合を示し、1 Hz の場合のみに認められた。R部での破断はカソード分極により試験片中に侵入した水素が静水圧的な3軸応力の働くR部へ拡散することによって起こる水素脆化によるものと考えられる。

HT60 鋼の 5 Hz における大気中、海水中自然腐食下およびカソード防食下のフレットング疲労の S-N 曲線を Fig. 2 に示す。寿命は自然腐食下で最も短く、カソード防食下で最も長い。カソード防食による寿命向上は顕著で、大気中の寿命の3倍以上である。このように、880 MPa 級鋼および HT60 鋼ではともに、カソード防食によってフレットング疲労寿命は著しく向上し、大気中のそれより長寿命である。

3.2 二相ステンレス鋼のフレットング疲労

DPSS 鋼の 5 Hz における大気中および海水中自然腐食下における通常疲労およびフレットング疲労の S-N 曲線を Fig. 3 に示す。通常疲労は大気中の方が海水中よりわずかに長寿命の傾向を示す。フレットング疲労寿命は両環境下で通常疲労寿命より著しく低下している。大気中の方が海水中よりわずかに長寿命の傾向を示すが、大差はない。

3.3 摩擦係数

フレットング疲労において、接触面での摩擦力は重要な力学的因子である。880 MPa 級鋼の大気中、海水中自然腐食下およびカソード防食下 1 Hz における摩擦係数の応力振幅に対する変化を Fig. 4 に示す。横軸に相対すべり振幅も併記する。応力振幅が低いとき、摩擦

係数は各環境下で変わらない。応力振幅が高いとき、摩擦係数の大きさは大気中、海水中自然腐食下、カソード防食下の順になり、それぞれ応力振幅の増加とともに飽和して一定値に近づく傾向を示す。摩擦係数の小さい環境下ほど飽和に至る応力振幅は低い。摩擦係数の飽和値は、海水中自然腐食下で約 0.4、カソード防食下で約 0.3 である。大気中の場合、摩擦係数は完全な飽和には至ってはいないが、飽和値は約 0.7 前後と推定される。880 MPa 級鋼の 20 Hz における各環境下の摩擦係数は、Fig. 4 に示した 1 Hz のそれとほぼ同じで、繰返し速度依存性がなかった。また HT60 鋼の 5 Hz における各環境下の摩擦係数も、測定した 250 MPa 以下の応力振幅では、Fig. 4 の摩擦係数とほぼ同じであった。海水中自然腐食下の摩擦係数が小さいのは、海水および腐食生成物の潤滑効果によると考えられる。海水中カソード防食下では、Ca や Mg を含む白色の電解生成物が生じ試験片表面に付着する。カソード防食下では海水の効果に加

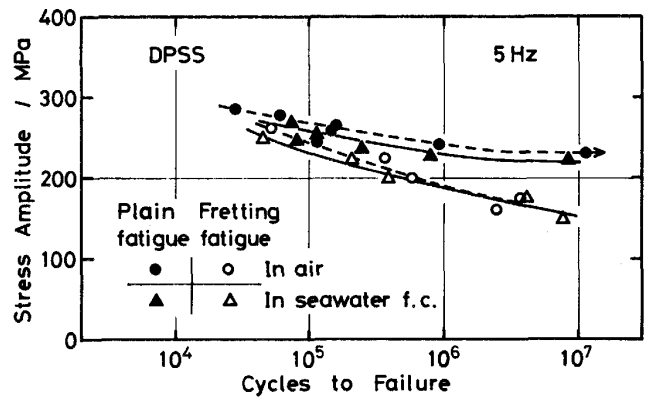


Fig. 3. S-N curves of fretting fatigue and plain fatigue in air and in seawater f.c. for DPSS steel.

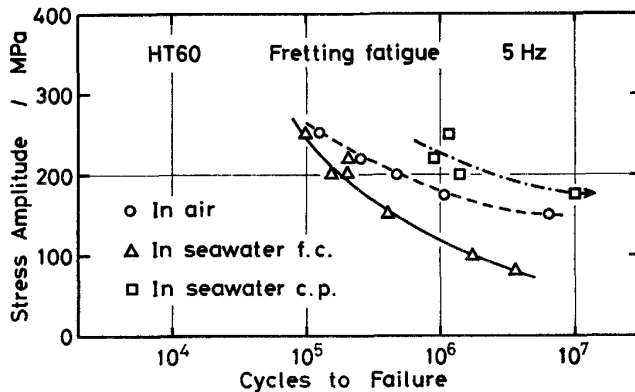


Fig. 2. S-N curves of fretting fatigue in air, in seawater f.c. and in seawater c.p. for HT60 steel.

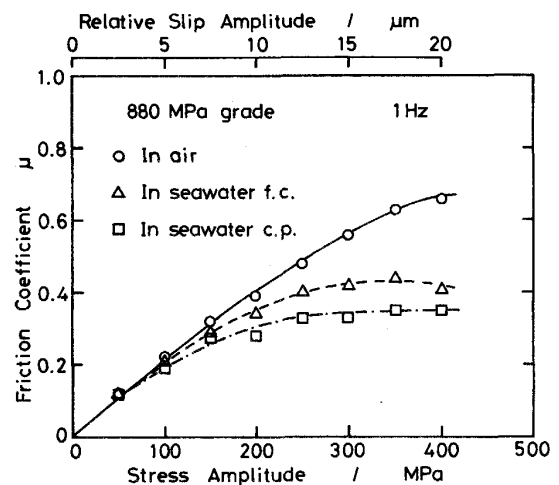


Fig. 4. Friction coefficient during fretting in three environments for 880MPa grade steel.

えてこの電解生成物の潤滑効果が大きいので摩擦係数が自然腐食下よりも低下すると考えられている⁶⁾。

DPSS 鋼の大気中および海水中自然腐食下 5 Hz における摩擦係数の応力振幅に対する変化を Fig. 5 に示す。DPSS 鋼の摩擦係数変化は両環境下ともに Fig. 4 の 880 MPa 級鋼の応力振幅 250 MPa 以下のそれらとほぼ同じで、HT60 鋼の摩擦係数変化ともほぼ一致した。

3.4 疲労寿命に及ぼすフレッティング損傷繰返し数の影響

880 MPa 級鋼の応力振幅 300 MPa (相対すべり振幅 15 μm)、繰返し速度 20 Hz、大気中、海水中自然腐食下およびカソード防食下における中断フレッティング疲労試験の結果を Fig. 6 に示す。横軸はフレッティング疲

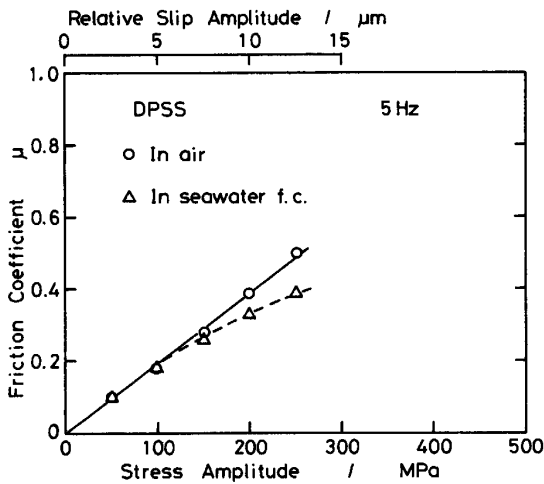


Fig. 5. Friction coefficient during fretting in air and in seawater f.c. for DPSS steel.

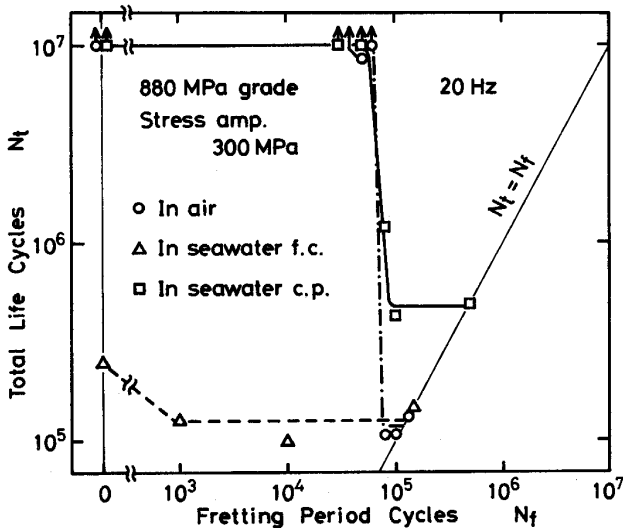


Fig. 6. Effect of fretting period cycles on total life cycles in three environments for 880MPa grade steel.

労繰返し数 N_f 、縦軸は N_f を含んだ破断までの全寿命 N_t を表す。 $N_f=0$ 上の実験点は通常疲労寿命を、 $N_t = N_f$ 上の点は純フレッティング疲労寿命を示す。海水中自然腐食下では 10^3 回 (全寿命の 1% 未満) の N_f によって寿命は低下し、純フレッティング疲労寿命に一致する。すなわち、損傷はわずかなフレッティング繰返し数で飽和し、前報²⁾ で示した海水中自然腐食下における損傷飽和挙動のグループ 1 に対応する。一方、カソード防食下では、 5×10^4 回以下の N_f では、 N_t は 10^7 回より大きい。 N_f が 8×10^4 になると N_t は急激に低下し、 N_f が 1×10^5 では N_t は約 5×10^5 に低下し、純フレッティング疲労寿命に等しくなる。すなわち、損傷は 1×10^5 回 (全寿命の約 20%) で飽和する。大気中の場合、損傷は 8×10^4 回 (全寿命の約 66%) で飽和する。 N_t の急激な低下は、後述するようにフレッティングによるき裂の発生とき裂伝播の加速に対応する。

DPSS 鋼および HT60 鋼の応力振幅 200 MPa (相対すべり振幅 10 μm)、繰返し速度 5 Hz、海水中自然腐食下における中断フレッティング疲労試験の結果を Fig. 7 に示す。比較のために DPSS 鋼の大気中の結果も示す。

DPSS 鋼において、 N_f の増加に伴う N_t の急激な低下は、海水中自然腐食下では N_f が 5×10^4 回、大気中では 1×10^5 回で起こり、それ以上の N_f で N_t はそれぞれ純フレッティング疲労寿命に一致する。すなわち、全寿命に対する損傷飽和繰返し数の割合は海水中自然腐食下では約 10%、大気中では約 17% である。高張力鋼

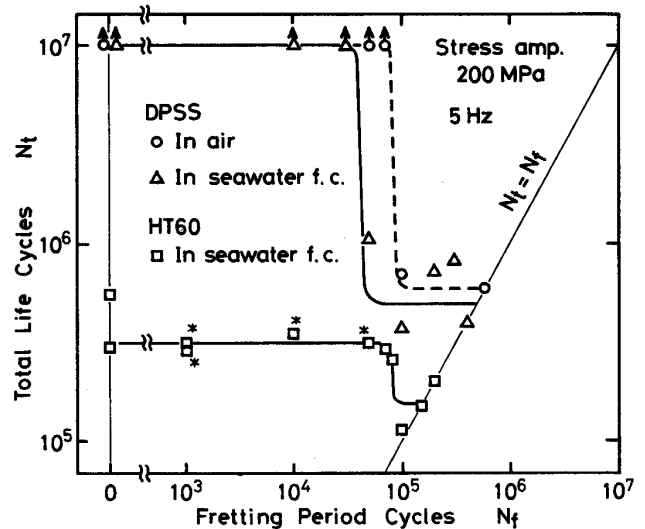


Fig. 7. Effect of fretting period cycles on total life cycles for HT60 and DPSS steels. The data with * represent specimens fractured in such a manner as main cracks initiated at different sites from fretted areas.

の海水中自然腐食下におけるフレットング損傷のように、わずか 10^2 - 10^4 回の N_f で腐食ピットの形成が加速され、全寿命 N_t が低下する現象¹⁾ は、本実験の範囲内で認められず、海水中における損傷飽和挙動は大気中と同様である。

HT60 鋼の海水中自然腐食下の場合、 N_f が 1×10^5 回以上で N_t は純フレットング疲労寿命に一致する。損傷飽和繰返し数は、全寿命の約 60% である。しかし、 N_f が 5×10^4 回以下では破断の原因となった主き裂の発生起点について、特異な現象が認められた。Fig. 6 の結果および前報¹⁾ で示した 490, 690 および 880 MPa 級高張力鋼の結果も含めて、海水中自然腐食下の中断フレットング疲労試験においては、 N_f が 10^2 - 10^4 と少ない場合でも、すべての破断はフレットング部を起点として起こった。これは、フレットング損傷によって腐食ピットの形成が加速され、そのピットに生じたき裂が主き裂となったためである。HT60 鋼の場合、 N_f が 7×10^4 回以上では、損傷が飽和していなくとも、主き裂はフレットング損傷部を発生起点としたが、 5×10^4 回以下の N_f では、主き裂はフレットング損傷部に限定されず、海水環境下にある試験片平行部のフレットング部と無関係な場所に発生した (Fig. 7 中の *印を付したデータ)。しかし、この破断試験片のフレットング損傷部を観察した結果、その損傷部にき裂の存在が認められた。腐食疲労におけるき裂発生の起点としては試験片表面に存在する介在物などの欠陥が考えられる。そこで HT60 鋼および 880 MPa 級鋼の介在物を観察した。HT60 鋼では Photo. 1 に示すように、20-25 μm 大の球状介在物が存在し、ポイントカウントによる介在物総量は約 0.03% であった。これに対し、880 MPa 級鋼では、そのような大きな介在物は存在せず、介在物総量は約 0.003% であった。このように HT60 鋼における介在物は、880 MPa 級鋼と比べてその大きさが大きく、

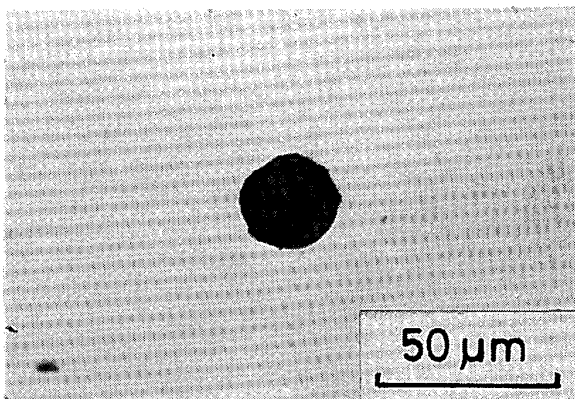


Photo. 1. Inclusion observed in HT60 steel.

その量も 1 桁ほど多い。HT60 鋼の中断フレットング疲労試験で N_f が小さい場合、フレットング部分でき裂の発生が促進されるが、それよりも優先して表面近傍のランダムな位置に存在する介在物で発生したき裂が主き裂に成長したものと考えられる。 N_f が大きい場合、フレットングによってき裂が発生し、伝播が加速され、それが介在物を起点とするき裂より長くなり、主き裂に成長したと考えられる。HT60 鋼の損傷飽和挙動は、 N_f の小さい場合を除き、前報のグループ 2 に相当する。

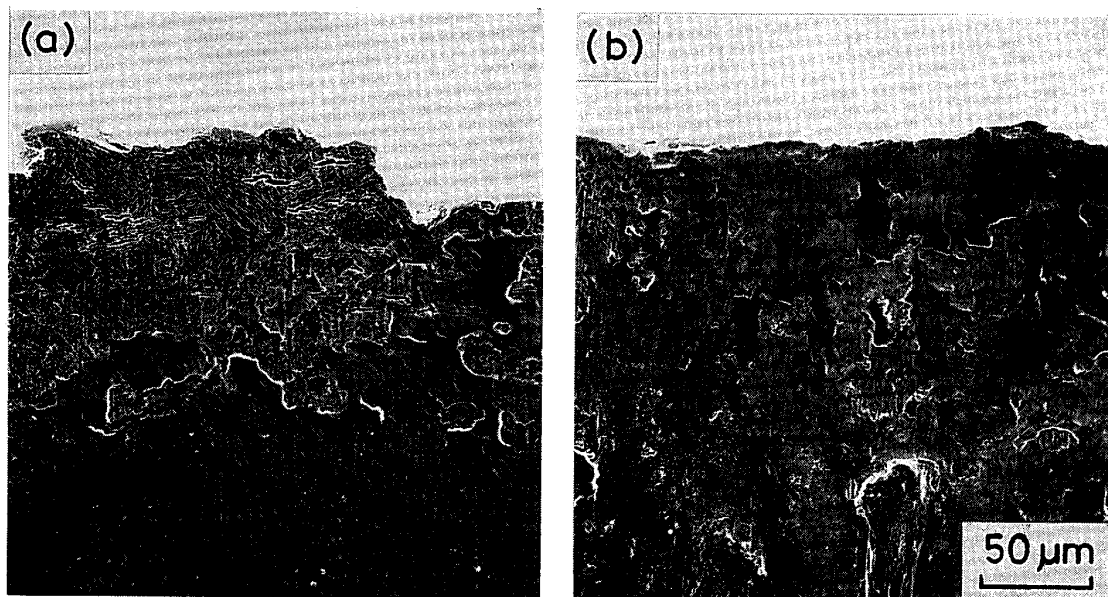
4. 考 察

4.1 カソード防食の影響

適正なカソード防食下では腐食が阻止される。さらに本実験のように Zn 犠牲陽極を用いたカソード防食電位 ($-1.030 \text{ mV vs. Ag/AgCl}$) 下では、試験片表面に電解生成物が付着し、そのため Fig. 4 に示したようにフレットング時の摩擦係数は自然腐食下より低下した。また、この電解生成物はき裂内に堆積して、き裂閉口 (Crack closure) を生じさせ、き裂伝播速度を低下させる⁷⁾ ことが知られている。

高張力鋼の海水中自然腐食下のフレットング疲労は、フレットングにより腐食ピットの形成が加速され、その分だけ通常疲労と比べ寿命が低下する場合 (グループ 1) と、フレットングによるき裂の発生とき裂伝播の加速によって寿命が低下する場合 (グループ 2) に分類され、どちらに属するかは鋼種および繰返し速度に依存することを前報²⁾ で示した。Fig. 6 において、880 MPa 級鋼の海水中自然腐食下 20 Hz におけるフレットング疲労はグループ 1 に属する。Photo. 2 (a) および (b) はそれぞれ Fig. 6 中の海水中自然腐食下およびカソード防食下において純フレットング疲労で破断した試験片の主き裂発生点近傍のフレットング損傷の SEM 写真である。自然腐食下では、主き裂発生点近傍は腐食が加速され、主き裂の外に多数の微小クラックが存在しているのに対し、カソード防食下ではこのような腐食は起こっていない。

自然腐食下では、 10^3 - 10^4 回のフレットング繰返し数で腐食ピットの形成が加速され、それが寿命を支配した。カソード防食下では、腐食ピットの形成が阻止され、 7×10^4 回までのフレットング繰返し数で 10^7 回以上の寿命を示し、 1×10^5 回以上のフレットング繰返し数で純フレットング疲労寿命に一致した。したがって、フレットングによる腐食ピット形成加速→ピット底にき裂発生というグループ 1 の過程を経ずに、カソード防食によって大気中同様、直接フレットングによるき裂



(a) In seawater f. c. (b) In seawater c. p.

Photo. 2. Scanning electron micrographs of fretted surfaces near the initiation sites of fracture in 880MPa grade steel specimens tested at a stress amplitude of 300MPa.

発生へと遷移した。

Fig. 6 中, カソード防食下および大気中において, N_f が $\sim 10^5$ 回付近の N_i の急激な低下はフレッティングによるき裂の発生とそのき裂伝播の加速に対応するもので, N_f が 1×10^5 回以上での損傷飽和は, き裂が長くなってフレッティングの影響域を脱したことを意味し, それ以上のフレッティングはき裂伝播に何ら影響を与えないことを示している. カソード防食下の損傷飽和繰返し数 (1×10^5 回) は大気中のそれ (8×10^4 回) よりやや大きく, これは両環境下の摩擦係数の相違によってき裂発生とそのき裂伝播の加速が影響を受けたためと考えられるが, 両者に大差はない. 損傷飽和後の破断までのき裂伝播繰返し数は, 大気中において約 4×10^4 回, カソード防食下において約 4×10^5 回であり, カソード防食下の方が大気中より著しく長い. したがって, カソード防食によるフレッティング疲労寿命の向上は主にき裂伝播寿命が長くなったためである. この伝播寿命の増加は, 大気中におけるき裂伝播寿命より著しく長いことから, 主に電解生成物によるき裂閉口効果に起因したと考えられる. またカソード防食下では, 繰返し速度 1 Hz におけるフレッティング疲労寿命は 20 Hz のその数倍で, 繰返し速度が低いほど寿命が長い傾向を示した. 摩擦係数は, 1 Hz と 20 Hz でほぼ同じであったことから, 1 Hz におけるフレッティング損傷の飽和は 20 Hz の場合と同様に 1×10^5 回程度で起こると推測され, フレッティング疲労寿命の繰返し速度依存性は主にき裂伝

播寿命の違いによって生じたものと考えられる. HT60 鋼についてもカソード防食の効果は同様の機構によるものと考えられる.

以上のように, 高張力鋼の海水中フレッティング疲労に及ぼすカソード防食の主な効果として, フレッティングによる腐食ピットの形成加速→ピット底にき裂発生→主き裂に成長という過程を阻止すること, 海水および電解生成物によりフレッティング部の摩擦係数を小さくしてき裂の発生と伝播の加速を抑制すること, き裂先端における腐食の抑制および電解生成物によるき裂閉口によりき裂伝播寿命を増加させることが挙げられる. TAKEUCHI および WATERHOUSE⁵⁾ は 0.64% 炭素鋼線の海水中フレッティング疲労寿命は $-950 \sim -1000$ mV (SCE) のカソード防食電位下で著しく向上することを示し, その原因としてフレッティング接触面において電気化学的な反応が除去され力学的作用の寄与だけになったこと, および海水による摩擦係数低下の効果を挙げている. また別報⁶⁾ でカソード防食がき裂伝播初期の伝播速度を著しく低下させることを報告している. 本報の場合, カソード防食電位は -1030 mV vs. Ag/AgCl でやや過防食ぎみであり電解生成物の生成量も多くその寄与が大きい. 寿命向上は主に電解生成物によるき裂閉口によってもたらされた.

4.2 高張力鋼とステンレス鋼の比較

両鋼の強度水準はほぼ同じであり, 摩擦係数変化もほぼ同様であった. Fig. 2 と Fig. 3 に示したように大気

中における両鋼の S-N 曲線はほぼ一致している。海水中自然腐食下では、摩擦係数がほぼ同じであるにもかかわらず HT60 鋼の方が DPSS 鋼より寿命が著しく低い。Fig. 7 に示したように、海水中では両鋼ともフレットング損傷は $5 \times 10^4 - 1 \times 10^5$ 回の繰返し数で飽和し、き裂発生寿命に大差はない。フレットング損傷飽和後の繰返し数すなわちフレットングの影響を受けないき裂伝播寿命は HT60 鋼では約 1×10^5 回であるのに対し、DPSS 鋼では約 4×10^5 回で、DPSS 鋼の方がはるかに長い。したがって海水中における両鋼のフレットング疲労寿命の差は主にき裂伝播寿命の差から生じたもので、両鋼の海水中における耐食性の違いを反映したものと考えられる。

5. 結 言

高張力鋼の海水中フレットング疲労に及ぼすカソード防食の影響および比較材としてステンレス鋼のフレットング疲労を検討し、次の結果を得た。

(1) 高張力鋼の海水中自然腐食下のフレットング疲労寿命は大気中より著しく低下するが、カソード防食によって著しく向上し、大気中のそれより長くなる。またカソード防食下の寿命は繰返し速度が小さいほど長い傾向を示す。

(2) カソード防食下におけるフレットング損傷部の摩擦係数は自然腐食下よりも低い。しかし、カソード防食による寿命向上に対するこの摩擦係数低下の寄与は小さい。

(3) カソード防食による寿命向上は、主にき裂内の電解生成物のき裂閉口効果によってき裂伝播寿命が増加したためである。

(4) ステンレス鋼の海水中自然腐食下のフレットング疲労寿命は大気中のそれとあまり変わりはない。これと強度のほぼ同じ HT60 鋼のフレットング疲労寿命は、大気中ではステンレス鋼のそれとほぼ同じであるが海水中ではステンレス鋼より著しく短い。両鋼の海水中におけるフレットング疲労寿命の差は主にそれらのき裂伝播寿命の差から生じたと考えられる。

文 献

- 1) 中沢興三, 角田方衛, 丸山典夫, 河部義邦: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 725
- 2) 中沢興三, 角田方衛, 丸山典夫: 鉄と鋼, **76** (1990), p. 917
- 3) 角田方衛, 丸山典夫: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 349
- 4) R. B. WATERHOUSE: Fretting Fatigue, ed. by R. B. WATERHOUSE (1981), p. 159 [Applied Science Publishers Ltd.]
- 5) M. TAKEUCHI and R. B. WATERHOUSE: EVALMAT 89 Proc. International Conference on Evaluation of Materials Performance in Severe Environments-Toward the Development of Materials, ed. by Iron Steel Inst. Jpn., Kobe, Japan (1989) 印刷中
- 6) B. R. PEARSON and R. B. WATERHOUSE: Wear of Materials 1985, ed. by K. C. LUDEMA, Proc. International Conference on Wear of Materials, Vancouver (1985), p. 79 [ASME]
- 7) 駒井謙治郎, 野口昌利: 日本機械学会論文集 (A 編), **52** (1986), p. 1770
- 8) 竹内正明, R. B. WATERHOUSE, 宮川浩臣: 日本潤滑学会 第 33 期春季研究発表会予稿集 (1989), p. 117