

福井大学工学部  
富士通テン(株)

岡田 庸敬 ○服部 修次  
鈴木 良英

1. 緒言

金属材料の腐食疲労き裂進展は、非常に低速の領域を除いて、繰返し速度が小さくなるにつれて加速することが一般に知られている。こうした速度効果について、水素脆化、腐食溶解あるいはくさび効果などの観点から種々説明されているが、材料・環境によっては10倍近く加速するものもあればほとんど加速しない場合もあり未だ不明な点が多い。本報告では、イオン交換水中・海水中で水素脆化が起こりにくくしかも腐食性が異なると考えられるHT50とS35Cの供試材料について、腐食性環境中のき裂進展に及ぼす繰返し速度の影響について検討した。

表1. 化学成分(%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Al
HT50	0.15	0.44	1.42	0.009	0.001	0.27	0.19	—	0.036
S35C	0.37	0.24	0.77	0.019	0.023	0.01	0.02	0.04	—

表2. 機械的性質

	$\sigma_y$ MPa	$\sigma_B$ MPa	$\delta$ %	Hv
HT50	392	539	27	181
S35C	350	648	38	213

2. 供試材料および試験方法

供試材料は高張力鋼HT50と機械構造用炭素鋼S35Cで、HT50は鉄鋼協会環境強度部会の共通試験用材料として提供を受けたものである。両材料の化学成分を表1に示す。試験片は中90の丸棒(S35C)と板材(HT50, 試験片採取方向LT)から図1に示す試験片形状に機械加工した。両面はエメリー紙600番まで研磨後バフ仕上げをしたが、熱処理は一切行っていない。試験環境は実験室大気中、比抵抗1M $\Omega$ cm以上のイオン交換水中及びASTM人口海水中で、25 $\pm$ 1 $^{\circ}$ Cに保持した。

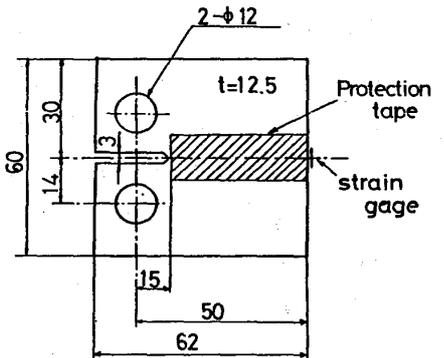


図1. 試験片形状

試験機は容量49 kNの電気油圧サーボ疲労試験機で、応力比0.05の正弦波荷重を負荷した。き裂長さは図1に示す位置にゲージ長さ2 mmのみすみゲージを貼付し、コンプライアンス法を用いて測定すると同時に、30倍の光学顕微鏡でも測定した。また引算回路を用いてき裂の開閉口挙動も測定した。

試験機は容量49 kNの電気油圧サーボ疲労試験機で、応力比0.05の正弦波荷重を負荷した。き裂長さは図1に示す位置にゲージ長さ2 mmのみすみゲージを貼付し、コンプライアンス法を用いて測定すると同時に、30倍の光学顕微鏡でも測定した。また引算回路を用いてき裂の開閉口挙動も測定した。

3. 試験結果および考察

図2, 3にS35CおよびHT50の応力拡大係数幅 $\Delta K$ とき裂進展速度 $da/dN$ の関係を示す。S35Cではイオン交換水中の

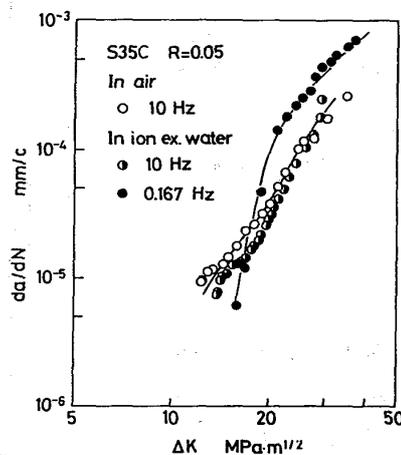


図2.  $\Delta K$ - $da/dN$ 線図

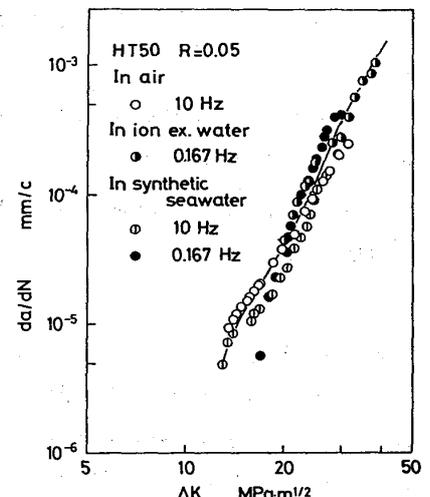


図3.  $\Delta K$ - $da/dN$ 線図

0.167 Hz の場合,  $\Delta K \geq 18$  MPa $\cdot$ m $^{1/2}$  の領域において著しく加速されるが, HT50 では環境, 速度の影響はほとんど認められない。

図4に  $\Delta K = 20$  MPa $\cdot$ m $^{1/2}$  における繰返し速度と  $da/dN$  の関係を示す。図中には他の研究者によって行われた  $\Delta K$ - $da/dN$  線図

より読み取った結果も併せ示した。材料, 実験者によってその挙動は大きく異なるが, 全体的に 10 Hz 以上ではほぼ大気中のき裂進展速度と同じになる。しかし, 繰返し速度が低下すると, き裂進展速度は増加し, 0.1 Hz 付近で飽和値に達するようであるが, き裂進展速度の増加は食塩水中・人口海水中よりも腐食性の弱いイオン交換水中の方が著しい場合も多い。また図1で加速の生じたイオン交換水中 0.167 Hz の S35C と, 加速しなかった HT50 の破面を比較しても, 図5に示すように S35C の方があまり腐食してなくて, 腐食の効果が小さいようにみうけられる。さらに, 腐食環境中ではき裂内の腐食生成物などの効果が大きいと有効応力拡大係数幅  $\Delta K_{eff}$  が小さくなることが報告されているので,  $\Delta K_{eff}$  と  $\Delta K$  の比 ( $U$  値) の挙動を測定した。しかし, 図6に示すように HT50 は S35C に比べ  $U$  値の低下が著しく, しかも1サイクル当りの腐食時間が長い程  $U$  値は大きく低下している。すなわち, 腐食されやすい HT50 のほうが腐食の影響を大きく受けていることになる。一方, 腐食生成物の効果を除去した  $\Delta K_{eff}$ - $da/dN$  の関係を求めると, 逆に図11のように HT50 でも 0.167 Hz でき裂の加速効果が認められる。

このような相違点をさらに検討するために  $\Delta K_{eff}$  を一定にして各繰返し速度を段階的に変える実験を行い, 併せてき裂長さの影響も調べた。 $\Delta K_{eff}$  の値は図2を参考にして 0.167 Hz での加速が大きい 21 MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ , 18 MPa $\cdot$ m $^{1/2}$  を

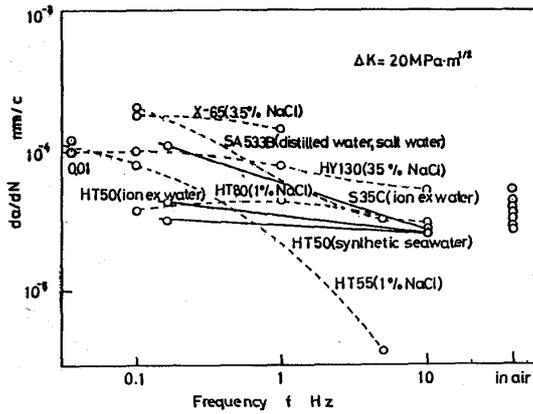


図4.  $\Delta K$ -一定のときの繰返し速度とき裂進展速度の関係

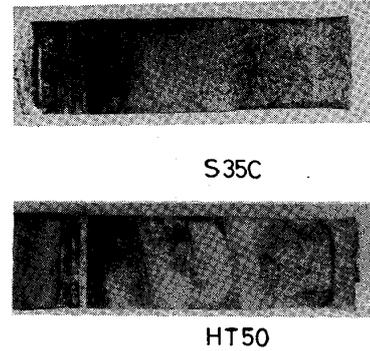


図5. 試験片の破断面 (イオン交換水中, 0.167 Hz)

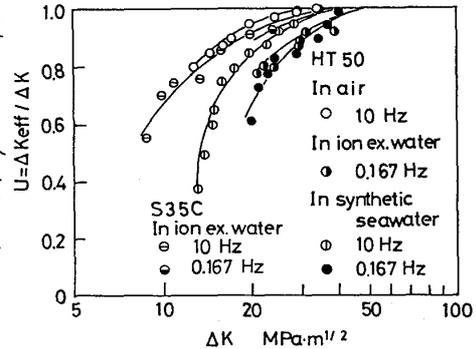


図6. 開口比率と  $\Delta K$  の関係

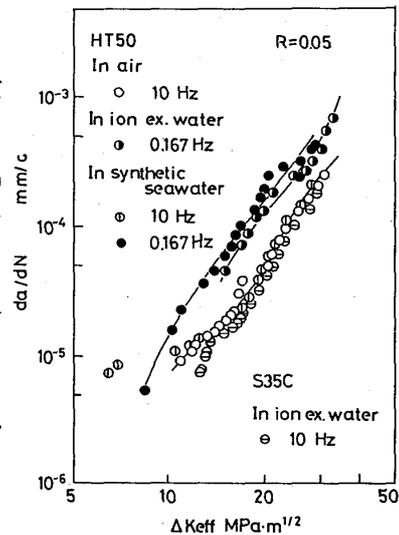


図7.  $\Delta K_{eff}$ - $da/dN$  線図

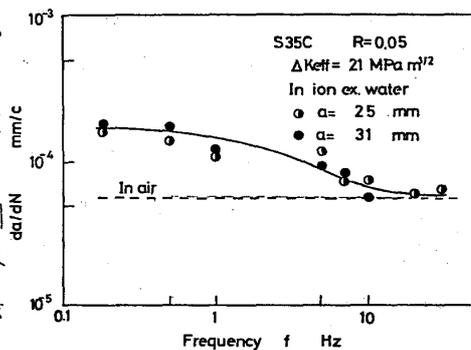


図8. 繰返し速度とき裂進展速度の関係 (S35C)

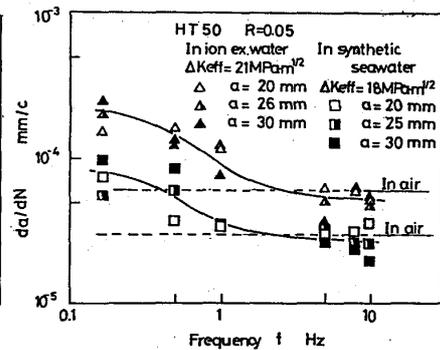


図9. 繰返し速度とき裂進展速度の関係 (HT50)

用いた。この結果を図8,9に示す。腐食性が異なると考えられるHT50とS35Cで同じような挙動が観察される。両図とも高繰返し速度(10 Hz)の場合大気中の速度に近づくことから、それぞれの  $\Delta K_{eff}$  に対応した大気中の速度と

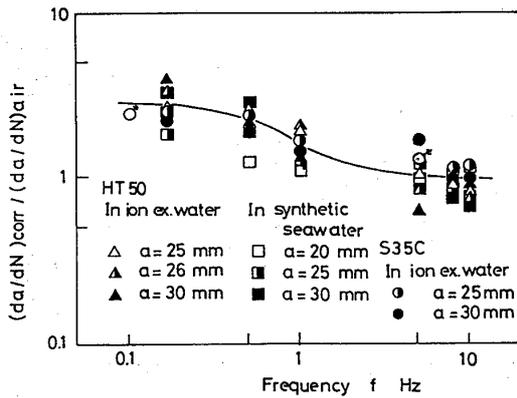


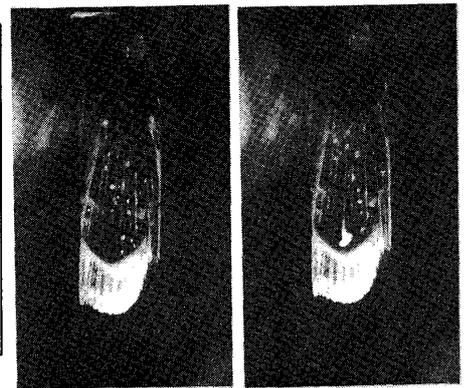
図10. き裂進展速度の大気中の値との比と繰返し速度の関係

各実験結果の比をとって整理すると、図10のようにほとんど一本の曲線で示すことができる。すなわち、材料の種類は勿論のことイオン交換水中、人工海水中の<sup>き裂長さの差</sup>差を問わず5 Hzから0.5 Hzぐらいの繰返し速度の範囲で、大気中のき裂進展速度から腐食環境中のき裂進展速度に移行する過渡現象のようなものがみられる。図には遠藤らのHT50の結果(○)もプロットしてみたが、やはり本実験の結果とよく一致している。

その一因を解明するために、き裂壁面内の液の挙動を実際に観察した。図11は図1とはほぼ同様な形状に機械加工したアクリル板試験片を用いて、き裂内の液の挙動を写真撮影したものである。図より、3 Hz程度の低速でもき裂内にキャビテーション気泡が発生し、繰返し速度が高くなるにつれて気泡の集団が大きくなることわかる。また図12はS35C、イオン交換水中の  $f=1$  Hzと10 Hzのき裂先端近傍の表面観察結果を示したものである。 $f=10$  Hzでは多数の気泡が発生している。また、 $f=1$  Hzでは表面には気泡が発生していないが、図11の3 Hzの場合から推定してき裂内には気泡が生じていると考えられる。このことは高繰返し速度ではき裂先端への環境液の出入りが困難となり、腐食環境中から大気中へ移行する図10の傾向と符合しているように思われる。さらに10 Hzでのき裂進展速度が大気中のき裂進展速度と変らなかったのも、キャビテーション気泡によってき裂先端が気相に近くなったためと考えれば理解できる。

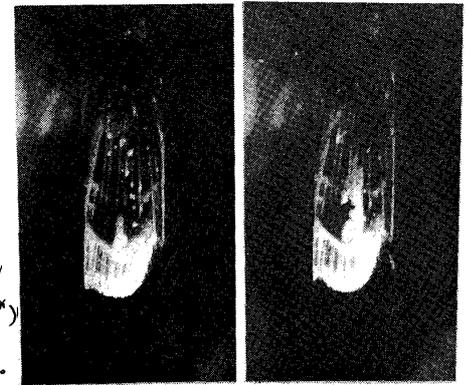
結局、こうしたき裂内のキャビテーション気泡の発生がき裂内の腐食状態を変え、図4に示すような腐食環境中のき裂進展に及ぼす繰返し速度の影響をより複雑なものにしているのではないかと考えられる。

(結言、参考文献略)



無負荷

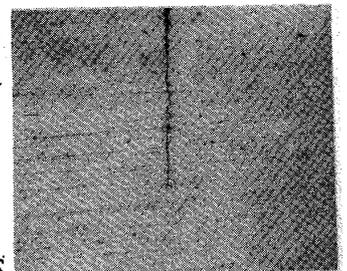
3 Hz



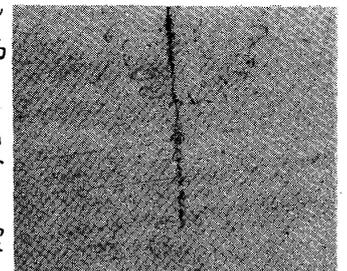
5 Hz

10 Hz

図11. き裂壁面内の液の挙動



$\Delta K_{eff} = 21 \text{ MPa}$ ,  $f = 1 \text{ Hz}$



$\Delta K_{eff} = 21 \text{ MPa}$ ,  $f = 10 \text{ Hz}$

図12. S35C, イオン交換水中のき裂先端近傍