

© 1983 ISIJ

高張力鋼の海水中 Zn 犠牲陽極下での疲れき裂伝播とその下限界値

論文

角田 方衛*・丸山 典夫*²・内山 郁*

Fatigue Crack Growth Rates and Their Thresholds of High Strength Steels in Sea Water at the Zinc Potential

Masae SUMITA, Norio MARUYAMA, and Iku UCHIYAMA

Synopsis :

Fatigue crack growth rates, da/dN , and their thresholds, ΔK_{th} , have been examined in sea water at zinc potential, sea water, and air, using seven kinds of 102–165 kgf/mm² grade steels at the frequency of 0.167 Hz and 20 Hz and at the stress ratio of 0.10 and 0.70. The following results are mainly obtained.

1) At the zinc potential, the effect of corrosion control against fatigue crack growth of 100–120 kgf/mm² grade steels is observed to be beneficial when $\Delta K < 55\text{--}60$ kgf/mm^{3/2} at the stress ratio of 0.10 and at the frequency of 0.167 Hz. The value of ΔK , however, decreases to 30 kgf/mm^{3/2} for the 165 kgf/mm² steel.

2) At the zinc potential, the effect of hydrogen on $da/dN\text{--}\Delta K$ curves is classified into two; one is that for the plateau behavior (intergranular failure) which is sensitive to temper brittleness and the other is for the threshold ΔK_{th} (transgranular failure) which is insensitive to that.

3) The value of ΔK_{th} gradually decreases with increase of yield strength. At the zinc potential, the value decreases catastrophically at the yield strength of more than about 120 kgf/mm² due to hydrogen.

1. はじめに

海洋構造物の建造が、将来、増加することが予想される今日、海洋構造物用材料に関する腐食疲れ特性を十分に把握しておくことは重要である。なぜならば、海水中では、疲れき裂は大気中に比べて極めてはやく発生し、そして伝播するが、海洋構造物には 1 min に 5~10 回の波の周期に対応する荷重が働くからである。

著者らは高張力鋼について海水中腐食疲れに関する系統的研究を行っている^{1)~3)}。本報では、引張強さが 102 から 165 kgf/mm² の間の 7 種類の鋼を用いて、人工海水中 Zn 犠牲陽極下および大気中における疲れき裂伝播速度とき裂伝播下限界値を求め、それらと鋼種、繰り返し速度、および応力比との関係を検討した。また、海水中自然腐食下での疲れき裂伝播挙動も調べた。

2. 実験方法

2.1 供試鋼

化学組成を Table 1 に示す。146 鋼は HP9-4-20 鋼である。各鋼は 20 kg 高周波真空溶解炉で溶解し、鍛造、

Table 1. Chemical composition (pct. by wt).

	D	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Co
151	0.10	0.30	0.66	1.50	0.44	0.52	0.16	0.11	—
152	0.31	0.29	0.65	1.48	0.44	0.49	0.16	0.11	—
146	0.21	0.14	0.37	9.82	0.74	1.13	—	0.10	4.48

圧延により 7 mm 厚の板材とし、Table 2 の熱処理を施した。

2.2 疲れ試験

1) 試験片形状：5 mm 厚、40 mm 幅の片側切り欠き付き板試験片を使用した。

2) 疲れ試験：(i)試験機；±10 t 電気油圧サーボ型疲れ試験機（インストロン社製）を用いた。(ii)波型；サイン波。(iii)応力比 (R)；0.10 および 0.70 (引張り-引張り)。(iv)繰り返し速度 (f)；0.167 Hz および 20 Hz。(v)き裂長さ測定；倍率×50 で読取顕微鏡により直接測定した。(vi) ΔK の計算⁴⁾； $\Delta K = f(a_1) \Delta \sigma \sqrt{\pi a_1}$ 。ここで a_1 はき裂長さ、 $\Delta \sigma$ は応力範囲、 $f(a_1)$ は a_1 に依存する補正項。(vii)き裂伝播下限界値 (ΔK_{th}) の求め方；段階的荷重減少法。(viii)環境の種類；a) 大気、

昭和 57 年 9 月本会講演大会にて発表 昭和 57 年 12 月 14 日受付 (Received Dec. 14, 1982)

* 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 Sakuramura Niihari-gun 305)

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

Table 2. Heat treatment conditions and mechanical properties.

	Q. Temp. (°C)	T. Temp. (°C)	σ_B (kgf/mm ²)	σ_y (kgf/mm ²)	δ (%)	ϕ (%)	σ_y/σ_B
151-1	850×1h	615×1h	102	98	13	74	0.96
151-2	850×1h	400×1h	112	102	11	73	0.91
151-3	850×1h	200×1h	122	106	11	72	0.87
152-1	850×1h	615×1h	122	114	12	67	0.93
152-2	850×1h	400×1h	141	127	11	66	0.90
152-3	850×1h	200×1h	165	142	10	65	0.86
146	815×1h	550×5h	152	135	12	70	0.89

b) 酸素飽和人工海水 (ASTM-D1141-52)⁵⁾, 溶存酸素量 8 ppm, pH 7.8~8.2, c) 酸素飽和人工海水+Zn 犠牲陽極 (-1.00V) なお, 海水環境は主タンク水量は 100 l, 試験槽への流量 1 l/min, 水温 30°C.

2.3 $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の定義¹⁾

各種環境のき裂伝播速度 da/dN への影響度合いを相対的に表示するためのパラメータとして $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ を使用した. $\gamma_{0.167\text{Hz}} \equiv (da/dN)_{\text{cor}} / (da/dN)_{\text{air}}$. ここで $(da/dN)_{\text{cor}}$ は大気以外の各種環境下での $f=0.167\text{ Hz}$ における da/dN , $(da/dN)_{\text{air}}$ は大気中の da/dN である.

2.4 引張試験

直径 4 mm, 標点距離 25 mm の丸棒試験片を使用した. 結果を Table 2 に併記する.

3. 結果および考察

3.1 da/dN - ΔK 曲線の鋼種間の比較

3.1.1 大気中の da/dN - ΔK 曲線と海水中 Zn 犠牲陽極下のその比較

各種環境下の da/dN は次の記号で表す.

$da/dN(\text{air}, 20\text{ Hz})$: 大気中, 20 Hz での da/dN ,

$da/dN(\text{Zn}, 0.167\text{ Hz})$: 海水中 Zn 犠牲陽極下, 0.167 Hz での da/dN ,

$da/dN(\text{free}, 0.167\text{ Hz})$: 海水中 自然腐食下, 0.167 Hz での da/dN ,

$da/dN(\text{Zn}, 20\text{ Hz})$: 海水中 Zn 犠牲陽極下, 20 Hz での da/dN .

da/dN - ΔK 曲線の例を Fig. 1(a)~(d) に示す. $da/dN(\text{air}, 20\text{ Hz})$ と $da/dN(\text{Zn}, 0.167\text{ Hz})$ を比較した場合, 比較的高 ΔK 側では $da/dN(\text{Zn}, 0.167\text{ Hz}) > da/dN(\text{air}, 20\text{ Hz})$, 低 ΔK 側では逆になる.

$da/dN(\text{air}, 20\text{ Hz})$ と $da/dN(\text{Zn}, 20\text{ Hz})$ との大小関係は低 ΔK 側では $da/dN(\text{air}, 20\text{ Hz}) > da/dN(\text{Zn}, 20\text{ Hz})$ であるが, 高 ΔK 側 ($R=0.10$ の場合 $\Delta K > 50\text{ kgf/mm}^{3/2}$, $R=0.70$ の場合 $\Delta K > 10\sim 20\text{ kgf/mm}^{3/2}$) では鋼種によつて異なり, 次の 3 種類にわけることができる.

(1) $da/dN(\text{air}, 20\text{ Hz}) \approx da/dN(\text{Zn}, 20\text{ Hz})$: Fig. 1(a) を参照. 大部分の鋼はこの傾向を示す.

(2) $da/dN(\text{air}, 20\text{ Hz}) < da/dN(\text{Zn}, 20\text{ Hz})$: Fig. 1(b) および(c)を参照. この傾向の程度は鋼種により異なる. 他には 151-2 および 152-3 鋼でみられるが, R はすべて 0.70 の場合である. これらの鋼は, σ_y が比較的高いか, あるいは脆性域に焼もどされたものである.

(3) $da/dN(\text{air}, 20\text{ Hz}) > da/dN(\text{Zn}, 20\text{ Hz})$: Fig. 1(d)参照. この傾向は, R に関係なく高合金の 146 鋼にのみ見られる.

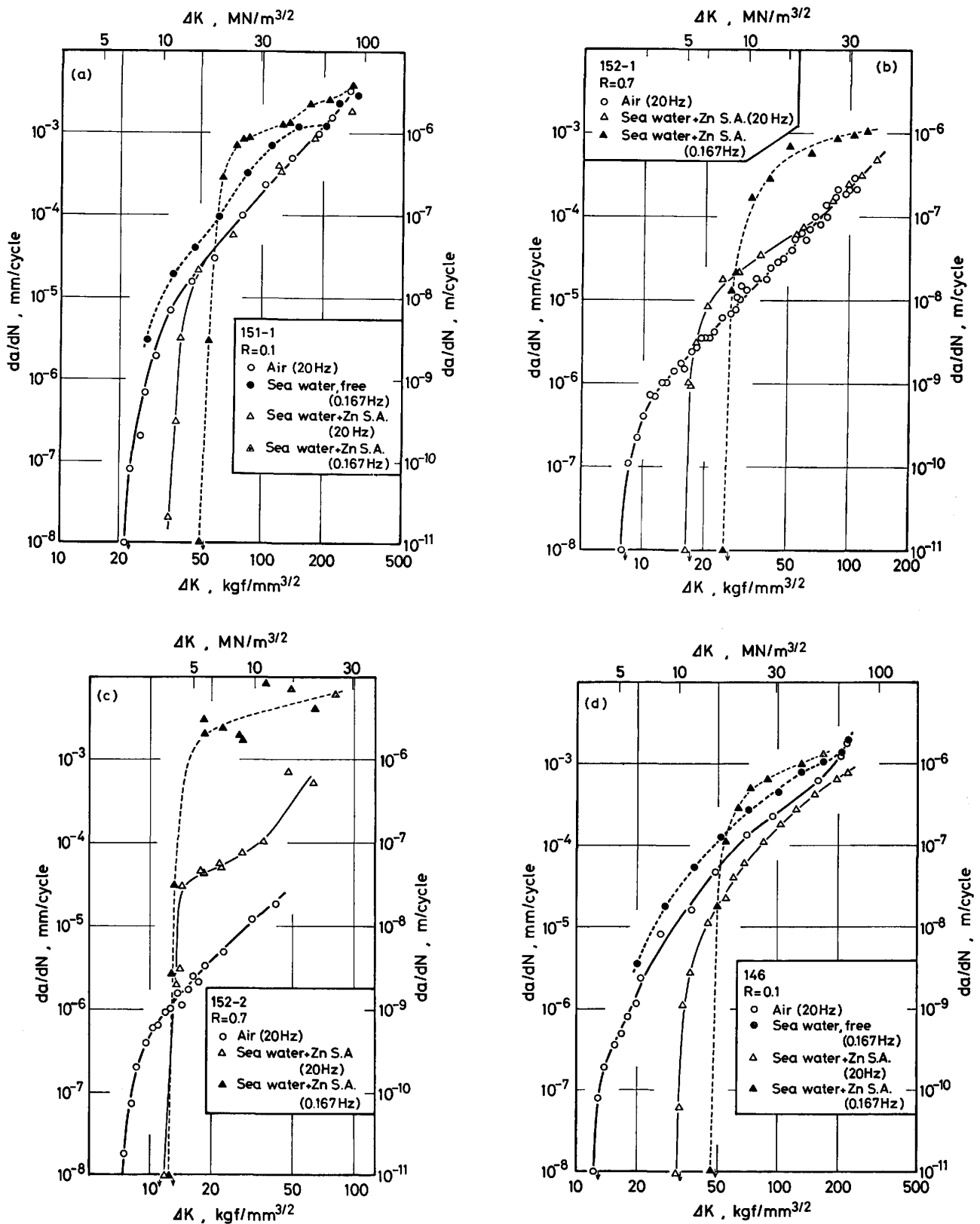
海水が da/dN を高くする原因は活性経路割れ (APC) と水素脆性 (HE) に大別できるが, Zn 犠牲陽極下では後者のみが原因である. 一方, 海水が da/dN を低くする主な原因はき裂先端に付着する炭酸カルシウム, 水酸化マグネシウム⁶⁾ などの電解生成物によるき裂閉口と考えられる.

上記(3)の 146 鋼の場合は電解生成物によるき裂閉口がより大きいと考えられる. 同鋼の $da/dN(\text{air}, 20\text{ Hz})$ と $da/dN(\text{Zn}, 20\text{ Hz})$ との差が $R=0.10$ の場合 (Fig. 1(d)) に $R=0.70$ の場合 (Fig. 2) より大きいことからもうかがわれる. この際, き裂先端に存在する海水によるくさび効果⁷⁾ は考えられない. もし, そうならば, 他の鋼についても同様の現象が見られるはずである.

3.1.2 da/dN - ΔK 曲線の自然腐食下と Zn 犠牲陽極下間の比較

Fig. 1(a) からわかるように, 高 ΔK 側では $da/dN(\text{Zn}, 0.167\text{ Hz}) > da/dN(\text{free}, 0.167\text{ Hz})$ であるが, 低 ΔK 側では逆になる. これは 151-1 鋼のみならず, すべての鋼において見られる現象であり, 低 ΔK 側では Zn による防食効果があるが, それが有効となる ΔK 値は鋼種により異なる.

$R=0.10$ において $da/dN(\text{Zn}, 0.167\text{ Hz}) < da/dN(\text{free}, 0.167\text{ Hz})$ となる ΔK 範囲は, 152-2 および 152-3 鋼以外の鋼では $\Delta K < 55\sim 60\text{ kgf/mm}^{3/2}$, 152-2 鋼では $\Delta K < 45\text{ kgf/mm}^{3/2}$, Fig. 3 に示すように 152-3 鋼では $\Delta K < 30\text{ kgf/mm}^{3/2}$ である. 152-2 および 152-3



a) 151-1 steel, R=0.10 b) 152-1 steel, R=0.70 c) 152-2 steel, R=0.70 d) 146 steel, R=0.10

Fig. 1. Fatigue crack growth rate, da/dN , as a function of the range of stress intensity factor, ΔK .

鋼は自然腐食下でも $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の最大値は4をこえ、旧オーステナイト粒界破壊する水素に敏感な鋼²⁾³⁾であり、

このような鋼は Zn 犠牲陽極による防食効果は相対的に小さい。

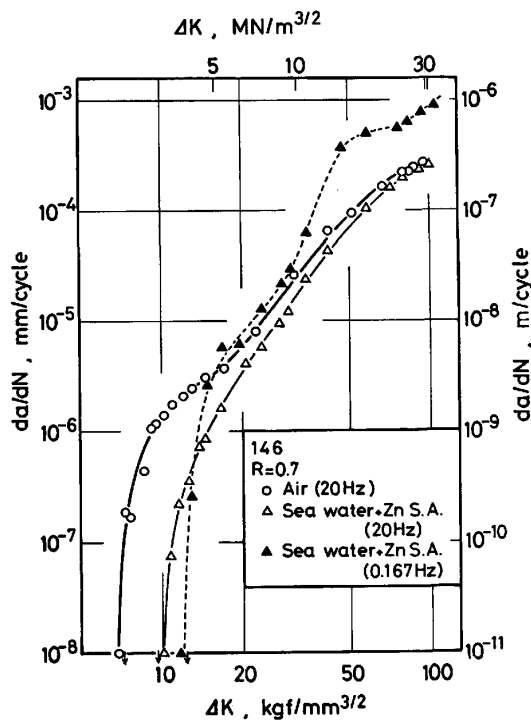


Fig. 2. Fatigue crack growth rate, da/dN , as a function of the range of stress intensity factor, ΔK , of 146 steel at the stress ratio of 0.70.

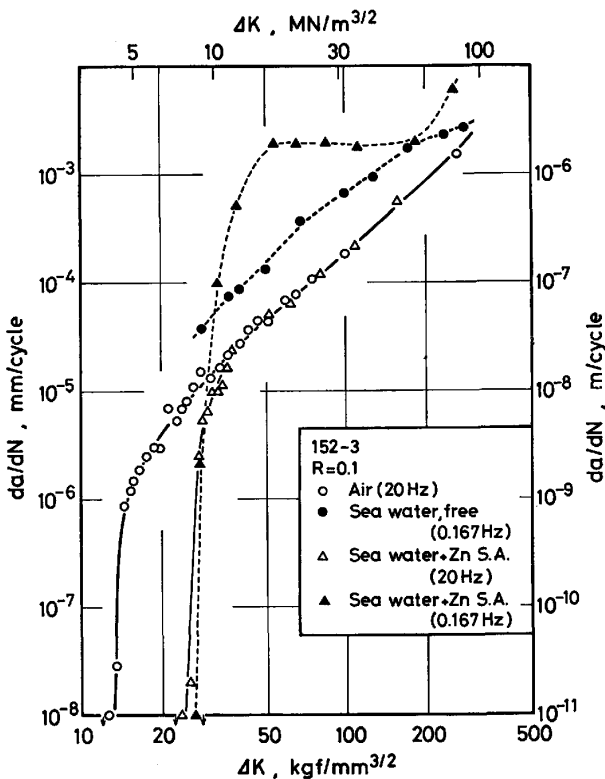


Fig. 3. Fatigue crack growth rate, da/dN , as a function of the range of stress intensity factor, ΔK , of 152-3 steel at the stress ratio of 0.10.

なお、151系鋼と同じ強度水準の鋼の3%NaCl水中

Zn 犠牲陽極下で防食効果があらわれるのは $\Delta K < 30 \sim 40 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ においてであり³⁾、本報の人工海水の場合に比べて約 $20 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ ΔK 値が低くなっている。これは、海水の場合き裂先端に炭酸カルシウムなどの電解生成物が付着し、有効 ΔK を低くしているためと考えられる。

3.1.3 Zn 犠牲陽極下 $da/dN-\Delta K$ 曲線への応力比、繰返し速度および降伏強さの影響

Zn 犠牲陽極下の $da/dN-\Delta K$ 曲線を Fig. 4 (a) ~ (d)に示す。同図から次のことがわかる。なお、 ΔK_{th} に関しては 3.2 で述べる。

(1) $R=0.10, f=20 \text{ Hz}$ の場合、 $da/dN-\Delta K$ 曲線は鋼種間で大差はなく、 da/dN は ΔK とともに増加する。この試験条件下の da/dN は $\Delta K > 40 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ では大気中のそれとほぼ同じである (Fig. 4(a))。

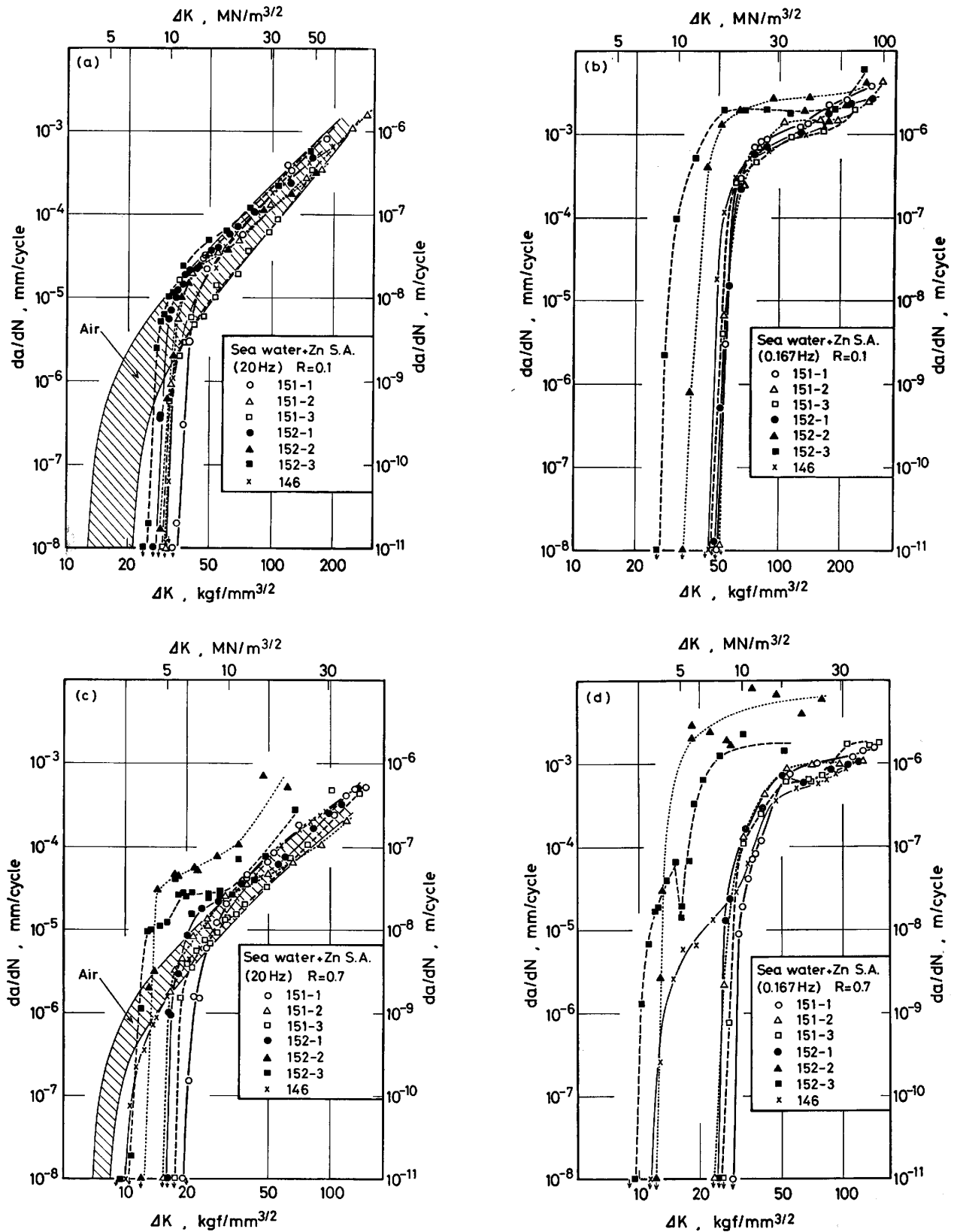
(2) $R=0.10, f=0.167 \text{ Hz}$ の場合、使用したすべての鋼において水素が関与した応力腐食割れ (SCC) における第2段階き裂伝播挙動と類似した、 da/dN の ΔK 依存性が弱い領域 (DII 領域と呼ぶ) が存在する (Fig. 4(b))。152-2 および 152-3 鋼の da/dN は、他の鋼に比べて、 $150 \text{ kgf/mm}^{3/2} > \Delta K > \Delta K_{th}$ の範囲で高い。

(3) $R=0.70, f=20 \text{ Hz}$ の場合、152-2, 152-3 および 146 鋼以外の σ_y が相対的に低い鋼の da/dN は ΔK とともに増大し、その挙動は $R=0.10$ の場合と類似している (Fig. 4(c))。152-2 および 152-3 鋼の $da/dN-\Delta K$ 曲線には「DII 領域」が存在する。146 鋼の da/dN は、高 ΔK 側では、低 σ_y 鋼の da/dN と同じ挙動を示すが、低 ΔK 側では高 σ_y 鋼 (152-2 あるいは 152-3 鋼) の da/dN と同じ挙動を示す。

(4) $R=0.70, f=0.167 \text{ Hz}$ の場合、 $da/dN-\Delta K$ 曲線は(2)の場合と同じ傾向を示す (Fig. 4(d))。152-2 および 152-3 鋼の「DII 領域」の da/dN 値は $R=0.70$ および 0.10 の場合ともに $2 \sim 5 \times 10^{-3} \text{ mm/cycle}$ である。20 Hz (Fig. 4(c)) の場合、同鋼の「DII 領域」の da/dN は 0.167 Hz の場合に比べて2桁ほど小さく $3 \sim 5 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$ であり、これは繰返し速度の違い ($20 \text{ Hz}/0.167 \text{ Hz} \approx 10^2$) に対応している。したがって、上記両鋼の「DII 領域」におけるき裂伝播は時間依存型と言える。146 鋼の $da/dN-\Delta K$ 曲線は(3)の試験条件の場合と同じ傾向を示す。

(1)~(4)の結果より、 da/dN への水素の影響は2つに分けられる。

- (a) da/dN (主として「DII 領域」) への影響
- (b) ΔK_{th} への影響



a) 20 Hz, R=0.10 b) 0.167 Hz, R=0.10 c) 20 Hz, R=0.70 d) 0.167 Hz, R=0.70

Fig. 4. Fatigue crack growth rate, da/dN , as a function of the range of stress intensity factor, ΔK , in sea water at zinc potential.

(a)に関してはさらに(i) da/dN への静的 SCC の 影響, および(ii) da/dN への動的 SCC の影響²⁾に分け

られる。

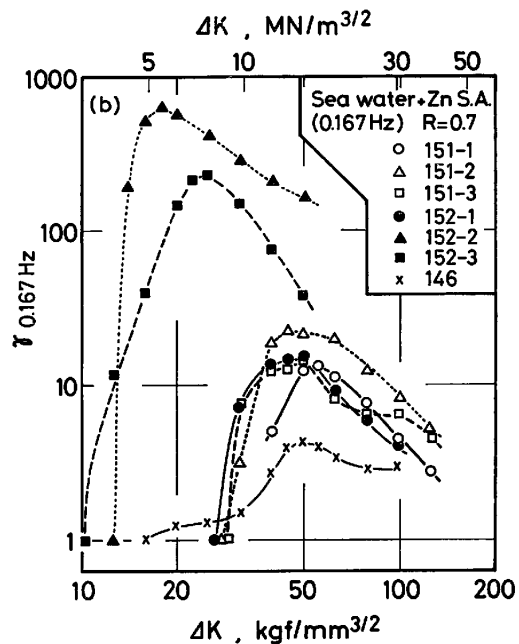
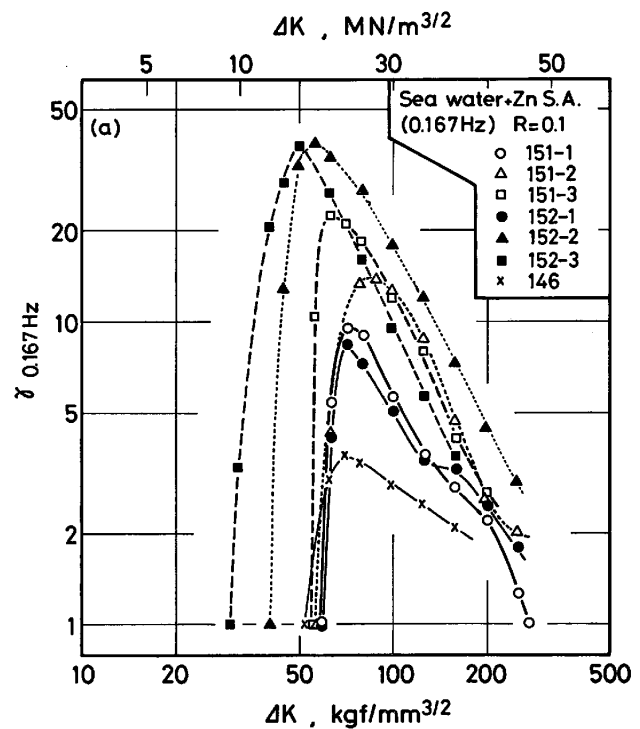
(i)は、0.167 Hz の場合、152-2 および 152-3 鋼において、そして 20 Hz の場合 152-2 鋼において見られる。これらの鋼の $da/dN-\Delta K$ 曲線の ΔK を K_{max} で整理しなおすと、 $R=0.70$ の da/dN は $R=0.10$ の da/dN より大きいか等しい。高 R の場合に応力状態は静的 SCC のそれに近づくので、これらの鋼においては da/dN は静的 SCC により律されていると言える⁸⁾。その他の鋼に関してはこのような現象は見られず、(ii)に分類される。

152-2 および 152-3 鋼において、「D II 領域」の da/dN は σ_y のより低い 152-2 鋼のほうが高く、鋼の水素感受性が σ_y の増大とともに高くなるという一般的傾向とは逆になっている。これは、152-2 鋼の焼もどし温度 400°C が多少焼もどし脆性温度域にかかった結果、旧オーステナイト粒界が脆化したためと考えられる。しかしながら、低 ΔK 側では、 σ_y のより高い 152-3 鋼の da/dN が σ_y のより低い 152-2 鋼のそれより高くなっており、この傾向は Fig. 4(b)~(d) において見られる。このように da/dN への水素の影響は ΔK の大きさ、すなわち、き裂先端の繰り返し塑性変形域の大きさ ($r_{c.p.}$) によつて異なる³⁾。 $r_{c.p.}$ が旧オーステナイト粒の大きさと同じオーダーの際、き裂は旧オーステナイト粒界を伝播しやすい³⁾。このような場合焼もどし脆性はき裂伝播を促進させる働きを有する。

一方、 ΔK_{th} 近くで da/dN が低く、 $r_{c.p.}$ が旧オーステナイト粒の大きさに比べてかなり小さい場合、き裂は主に旧オーステナイト粒内を伝播する。このような場合、焼もどし脆性は da/dN にあまり影響しない。

σ_y が上記鋼と同じレベルの 146 鋼においては「D II 領域」のき裂伝播挙動は低 σ_y 鋼のそれと同じであり、水素感受性はそれほど高くない。

$\gamma_{0.167\text{Hz}}-\Delta K$ 曲線を Fig. 5(a) および (b) に示す。152-2 および 152-3 鋼以外の鋼の da/dN は静的 SCC の影響を受けないが、それらの $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の最大値 ($\gamma_{0.167\text{Hz,max}}$) は、 $R=0.10$ あるいは 0.70 に関係なく²⁾、10 前後である。ここで、146 鋼の $\gamma_{0.167\text{Hz,max}}$ は他の鋼のそれに比べて小さく約 4 であるが、これは本鋼の大気中の da/dN が他の鋼に比べて全般に高いためである。一方、静的 SCC が da/dN に影響を及ぼす 152-2 および 152-3 鋼においては、 $R=0.10$ の場合両者とも $\gamma_{0.167\text{Hz,max}}=40$ 、そして $R=0.70$ の場合前者は 640 そして後者は 230 であり、 $\gamma_{0.167\text{Hz,max}}$ は R 値に依存する。応力状態が静的 SCC のそれにより近い $R=0.70$ の場合 $\gamma_{0.167\text{Hz,max}}$ はより大きくなっている。



a) $R=0.10$, b) $R=0.70$

Fig. 5. The ratio of $(da/dN)_{cor}$ at the frequency of 0.167Hz in sea water at zinc potential and $(da/dN)_{air}$ in air, $\gamma_{0.167\text{Hz}}$, as a function of the range of stress intensity factor, ΔK .

3.2 疲れき裂伝播下限値と降伏強さとの関係

ΔK_{th} と σ_y との関係を Fig. 6 に示す。同図より下記のことがわかる。

(1) 6種類の試験条件のどの場合においても、 ΔK_{th} は σ_y とともに減少する。その傾向は大気中と海水中

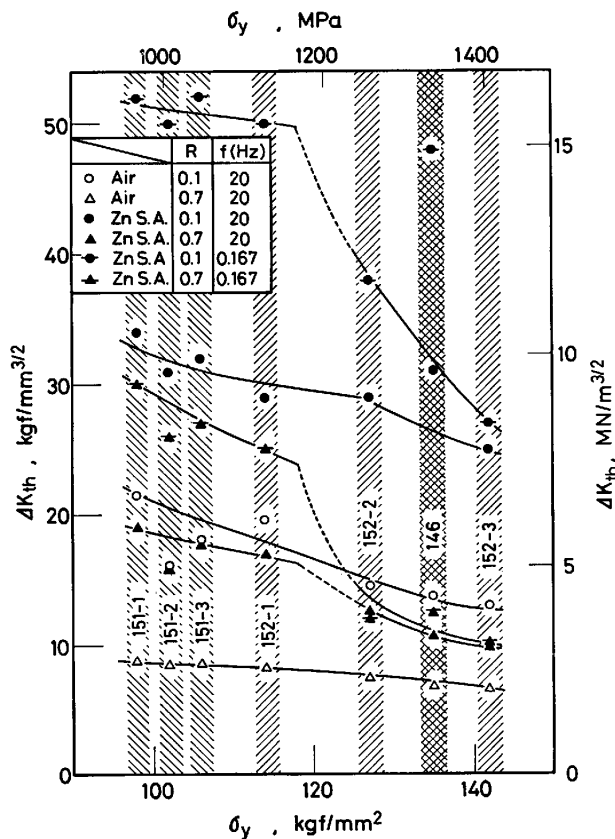


Fig. 6. The threshold for fatigue crack growth, ΔK_{th} , as a function of yield strength σ_y .

Zn 犠牲陽極下とは著しく異なる。

大気中では ΔK_{th} は σ_y の増加に伴って多少減少する。これは、 σ_y の増加に伴ってき裂先端の塑性変形が少なくなり、それをとりまく弾性部分からの拘束が少なくなること、あるいは $R=0.10$ の場合には fretting oxidation が少なくなるためにき裂閉口が減少するためである⁹⁾。

海水中 Zn 犠牲陽極下では、 ΔK_{th} が σ_y とともに減少する傾向は $\sigma_y=120 \text{ kgf/mm}^2$ で不連続になる。特に $f=0.167 \text{ Hz}$ の場合 $f=20 \text{ Hz}$ の場合に比べて急激に減少する。これは、Zn 犠牲陽極下でき裂先端に発生する水素の ΔK_{th} への影響が $\sigma_y=120 \text{ kgf/mm}^2$ を境にして顕著になるためと考えられ、各種高張力鋼の遅れ破壊強度の σ_B 依存性¹³⁾あるいは高力ボルト用鋼の遅れ破壊強度の σ_y 依存性¹⁰⁾と類似した傾向を示している。

(2) 大気中および海水中 Zn 犠牲陽極下で、繰り返し速度が同じ場合、 $R=0.10$ の ΔK_{th} は $R=0.70$ のそれより高い。

大気中では $R=0.10$ と 0.70 の間の ΔK_{th} の相違は $6\sim 13 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ である。これは、 $R=0.10$ の場合き裂先端で fretting oxidation によるき裂閉口のために

ΔK_{th} が高められるが、 $R=0.70$ ではき裂閉口があまり期待できない⁹⁾からである。

海水中 Zn 犠牲陽極下、 $f=20 \text{ Hz}$ での ΔK_{th} の $R=0.10$ と 0.70 の相違は、大気中での相違に比べて2倍近く大きく、 $14\sim 21 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ である。大気中および海水中 Zn 犠牲陽極下の両環境間の ΔK_{th} の $R=0.10$ と $R=0.70$ の相違の比較から、前者における酸化物の ΔK_{th} への影響より後者における炭酸カルシウムなどの電解生成物の ΔK_{th} への影響の方が大きいと言える。

さらに、海水中 Zn 犠牲陽極下、 $f=0.167 \text{ Hz}$ での ΔK_{th} の $R=0.10$ と 0.70 の相違は $17\sim 36 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ であり、同じ条件の $f=20 \text{ Hz}$ の場合に比べて $20\sim 100\%$ 高くなっている。これも電解生成物が 0.167 Hz の場合に、より多くき裂先端に附着し、それが ΔK_{th} を見かけ上高めていると考えられる。

(3) 同一 σ_y 値で ΔK_{th} を比較した場合、 $R=0.10$ および 0.70 において；

$$\Delta K_{th}(\text{Zn}, 0.167 \text{ Hz}) > \Delta K_{th}(\text{Zn}, 20 \text{ Hz}) > \Delta K_{th}(\text{air}, 20 \text{ Hz})$$

R.O. RITCHIE ら⁹⁾によれば、水素ガス中 $R=0.75$ 、 $f=50 \text{ Hz}$ の試験条件下では、 $\sigma_y=30\sim 80 \text{ kgf/mm}^2$ の圧力容器鋼の ΔK_{th} は水素の影響を受けず、大気中のそれと同じである。例えば、 $\sigma_y=80 \text{ kgf/mm}^2$ の場合、 $\Delta K_{th}=9 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ である⁹⁾。これと類似した著者らの試験条件、すなわち大気中 $R=0.70$ 、 $f=20 \text{ Hz}$ においては $\sigma_y=100 \text{ kgf/mm}^2$ クラスの鋼で $\Delta K_{th}=8\sim 9 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ であり、 ΔK_{th} は σ_y とともに減少することもあること¹¹⁾および ΔK_{th} は大気中では R が高くなるほど低くなること¹²⁾を考慮すると、この場合も ΔK_{th} は水素の影響を受けていないと言える。

$R=0.70$ の場合、 $\sigma_y < 120 \text{ kgf/mm}^2$ では $\Delta K_{th}(\text{Zn}, 20 \text{ Hz})$ は $\Delta K_{th}(\text{air}, 20 \text{ Hz})$ に比べて $10 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ ぐらい高い。これも、前述のように、Zn 犠牲陽極下では電解生成物のために ΔK_{th} が見かけ上高められているためである。しかしながら、 $\sigma_y > 120 \text{ kgf/mm}^2$ になると、 $\Delta K_{th}(\text{Zn}, 20 \text{ Hz})$ は水素のために急激に減少する。

$R=0.70$ 、 $\sigma_y < 120 \text{ kgf/mm}^2$ においては、 $\Delta K_{th}(\text{Zn}, 0.167 \text{ Hz})$ は $\Delta K_{th}(\text{Zn}, 20 \text{ Hz})$ に比べて、さらに $10 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ ぐらい高い。この ΔK_{th} の増加分は、繰り返し速度が遅くなつたために、き裂先端の生成物の附着量が増えたためである。

$\Delta K_{th}(\text{Zn}, 0.167 \text{ Hz})$ の場合も、 $\Delta K_{th}(\text{Zn}, 20 \text{ Hz})$ の場合と同様に $\sigma_y > 120 \text{ kgf/mm}^2$ になると ΔK_{th} は急激に減少し、両者の差はほとんどなくなる。これは、 σ_y

<120 kgf/mm² においては水素の ΔK_{th} への影響はあまり大きくなく、生成物による ΔK_{th} の見かけ上の増大効果が著しかつたが、一方、 $\sigma_y > 120$ kgf/mm² になると水素の ΔK_{th} への影響が顕著になり、それは時間に依存するので、20 Hz に比べて 0.167 Hz の場合により著しく、その結果、 ΔK_{th} への生成物の影響と水素の影響が相殺したためであると考えられる。したがって、 $\sigma_y > 120$ kgf/mm² で $\Delta K_{th}(Zn, 0.167 \text{ Hz}) = \Delta K_{th}(Zn, 20 \text{ Hz})$ となるのは偶然の結果である。

$R=0.10$ の場合も $R=0.70$ の場合と同じ傾向が見られる。

$R=0.10$ および 0.70 の場合とも、 $\Delta K_{th}(Zn, 20 \text{ Hz}) = \Delta K_{th}(Zn, 0.167 \text{ Hz})$ となる 152-3 試料の場合、 K_{max} に換算すると前者では約 30、後者では約 33 kgf/mm^{3/2} となり、ほぼ等しくなる。この場合 ΔK_{th} は見かけ上 K_{max} により律されている。

(4) 151 系あるいは 152 系鋼と化学成分を大幅に異にする 146 鋼の Zn 犠牲陽極下での ΔK_{th} は他の鋼の傾向と異なる場合が多い。特に、 $R=0.10$ 、そして $f=0.167 \text{ Hz}$ の場合に Fig. 6 の全般的傾向からのずれが大きいことから、この鋼は他の使用鋼に比べて Zn 犠牲陽極下での生成物によるき裂閉口が顕著であると言える。同鋼の Fig. 1(d) あるいは Fig. 2 における $da/dN-\Delta K$ 曲線において、Zn 犠牲陽極下の $f=20 \text{ Hz}$ の da/dN が大気中の da/dN を大きく下回っていることから理解できる。

4. 結 論

(1) $R=0.10$ 、 $f=0.167 \text{ Hz}$ において、人工海水中自然腐食下疲れき裂伝播速度に対する Zn 犠牲陽極(-1.00V)による防食効果は $\sigma_y = 100 \sim 120$ kgf/mm² の鋼では $\Delta K < 55 \sim 60$ kgf/mm^{3/2} で生じる。しかし、 σ_y の増加とともにその ΔK は減少し、 $\sigma_y = 142$ kgf/mm² (152-3 鋼)になると、それは $\Delta K < 30$ kgf/mm^{3/2} となる。

(2) Zn 犠牲陽極下における水素の $da/dN-\Delta K$ 曲線への影響は 2 つに分けられる。一つは、水素が原因してき裂が旧オーステナイト粒界を伝播する際に生ずる、 ΔK にほとんど依存しない一定き裂伝播速度領域への影響である。この領域は、全般に R が高いほど、 f が低いほど、そして σ_y が高いほど、低 ΔK 側で生じ、そしてその da/dN 値は高くなる。この領域は焼もどし脆性に敏感である。

他方は ΔK_{th} への影響であり、 $\sigma_y > 120$ kgf/mm² で顕著になる。 ΔK_{th} 附近の破面は主として粒内破壊であり焼もどし脆性にはあまり敏感でない。

(3) ΔK_{th} と σ_y 、 R あるいは f との間には次のような関係がある。

(a) ΔK_{th} は大気中では σ_y の増大とともに連続的に多少減少するが、Zn 犠牲陽極下では $\sigma_y > 120$ kgf/mm² で不連続的に急減する。

(b) ΔK_{th} は $R=0.10$ におけるより $R=0.70$ において低い。この両者間の相違は、大気中では 6~13 kgf/mm^{3/2}、Zn 犠牲陽極下 $f=20 \text{ Hz}$ では 14~21 kgf/mm^{3/2}、そして Zn 犠牲陽極下 $f=0.167 \text{ Hz}$ では 17~36 kgf/mm^{3/2} である。

(c) 同一 σ_y 値で ΔK_{th} を比較すると

$\Delta K_{th}(Zn, 0.167 \text{ Hz}) > \Delta K_{th}(Zn, 20 \text{ Hz}) > \Delta K_{th}(\text{air}, 20 \text{ Hz})$

上記(a)、(b)および(c)は、大気中では酸化物によるき裂閉口、Zn 犠牲陽極下では炭酸カルシウムなどの電解生成物によるき裂閉口、およびカソード反応による水素によるき裂成長促進の結果として説明することができる。

(4) Zn 犠牲陽極でき裂先端に付着する電解生成物の da/dN あるいは ΔK_{th} への影響は、同一強度水準でも、化学成分により異なる場合があるので化学成分を制御することにより、見かけ上 da/dN を下げ、 ΔK_{th} を上げることが可能である。

最後に溶解、加工、熱処理に御協力いただいた高橋順二、谷治治男、斎藤正、本多均一、小島重信、浅井義一、清水哲夫の諸氏に感謝します。

文 献

- 1) 角田方衛, 丸山典夫, 内山 郁: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1669
- 2) 角田方衛, 丸山典夫, 内山 郁: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 420
- 3) 角田方衛, 丸山典夫, 内山 郁: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 428
- 4) W. F. BROWN Jr. and J. E. SRAWLEY: ASTM STP 410 (1966), p. 12
- 5) ASTM D1141-52 (1971), p. 180
- 6) 金属防食技術便覧 (日本学術振興会編) (1975), p. 581
- 7) H. ISHII, Y. SAKAKIBARA, and R. EBARA: Metall. Trans., 13A (1982), p. 1521
- 8) 遠藤吉郎, 駒井謙治郎, 松田良信: 日本機械学会論文集, 47 (1981), p. 257
- 9) S. SURESH, G. F. ZAMISKI, and R. O. RITCHIE: Metall. Trans., 12A (1981), p. 1435
- 10) 日本鋼構造協会 JSSC, 9 (1973), p. 40
- 11) R. O. RITCHIE: Metall. Trans., 8A (1977), p. 1131
- 12) R. J. COOKE, P. E. IRVING, G. S. BOOTH, and C. J. BEEVERS: Eng. Fracture Mech., 7 (1975), p. 69
- 13) 山本俊二: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 326