

論 文

種々の水環境下における高張力鋼の疲れき裂伝播挙動

角田 方衛*・丸山 典夫*²・内山 郁*

Behaviour of Fatigue Crack Growth of High Yield Strength Steels in Various Kinds of Water Environments

Masae SUMITA, Norio MARUYAMA, and Iku UCHIYAMA

Synopsis :

A parameter $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ which means the degree of the effect of water environment on fatigue crack growth rate has been evaluated using six kinds of 80~120 kgf/mm² grade steels at the stress ratio of 0.10. $\gamma_{0.167\text{Hz}} \equiv (da/dN)_{\text{cor}} / (da/dN)_{\text{air}}$, where $(da/dN)_{\text{cor}}$ is fatigue crack growth rate in each water environments at the frequency of 0.167 Hz and 30°C, and $(da/dN)_{\text{air}}$ is that in air. Air-bubbling sea water, N₂ gas-bubbling pure water, air-bubbling pure water, air-bubbling 3% NaCl solution, and air-bubbling 3% NaCl solution with zinc sacrificial anode have been used as environments. The following results are mainly obtained.

1) When the maximum value of $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ is less than 3~4, fracture surface almost shows transgranular. When the value is more than 3~4, fracture surface shows intergranular.

2) The maximum value of $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ less than about 2 is not obtained for six kinds of high yield strength steels used and under the above five water environments.

3) Under the zinc sacrificial anode condition, the effect of corrosion control against fatigue crack growth is observed when $\Delta K < 30 \sim 40 \text{ kgf/mm}^{3/2}$.

However, the value of $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ is higher under the condition than under another water environments when $\Delta K > 30 \sim 40 \text{ kgf/mm}^{3/2}$. This fact can be explained by hydrogen arised due to cathodic reaction.

4) Under the zinc sacrificial anode condition, the maximum value of $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ are 5~13 depending on prior austenitic grain sizes, which is explained by relating to cyclic plastic deformation size at the tip of crack.

1. はじめに

海洋資源開発、海洋エネルギーの利用などの必要性の増大に伴って、鉄鋼材料が海洋環境で使用される機会は増加する。海水は鉄鋼材料にとっては腐食性の強い、苛酷な環境である。さらに、鉄鋼材料の強度水準の増加とともに、腐食反応や電気防食の結果生じる水素の影響も無視できなくなる¹⁾。したがって、海洋環境では、通常、低い強度の鋼が使用されるが、石油掘削装置の脚部²⁾、係留用チェーンなどのように高張力鋼の使用が避けられない場合がある。

高張力鋼が海洋環境下で使用される場合、機械的性質として靱性、加工性、溶接性などが十分に備わっていないければならないことは当然として、それら以外に耐腐食疲れ性に対しても注意が払わなければならない。なぜならば、海洋には 1 min に 5~10 回の波の周期に対応する繰り返し荷重、さらに潮流の変化や台風などによる低周期の比較的大きい繰り返し荷重などがある、そしてこ

のような繰り返し荷重が加わる場合、鉄鋼材料においてはき裂は、大気中に比べて、極めてはやく発生し、伝播するからである^{2)~5)}。そして鉄鋼材料の海水による疲れ強さの低下は強度水準の増大とともに著しくなる¹⁾²⁾。しかしながら、それが海水中の塩素イオンに関係するののか、溶存酸素量に関係するののか、あるいは水素によるののか、その他に原因があるのか明らかでない。また、腐食疲れ強さと化学組成、結晶粒径などの関係についても不明な点が多い。

本報告は上記のことを考慮して、引張強さ 105~120 kgf/mm² の高張力鋼 5 種類、それに比較材として市販の 80 kgf/mm² 鋼 (HT 80) を用いて、5 種類の水環境下で、疲れき裂伝播速度、 da/dN 、を求め、それぞれの環境の da/dN への影響度合およびその鋼種間での相違について検討した。その際、環境の da/dN への影響度合を相対比するために、大気中における da/dN を基準にしたパラメータを用いた⁴⁾。

昭和 56 年 11 月本会講演大会にて発表 昭和 56 年 12 月 4 日受付 (Received Dec. 4, 1981)

* 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)

2. 実験方法

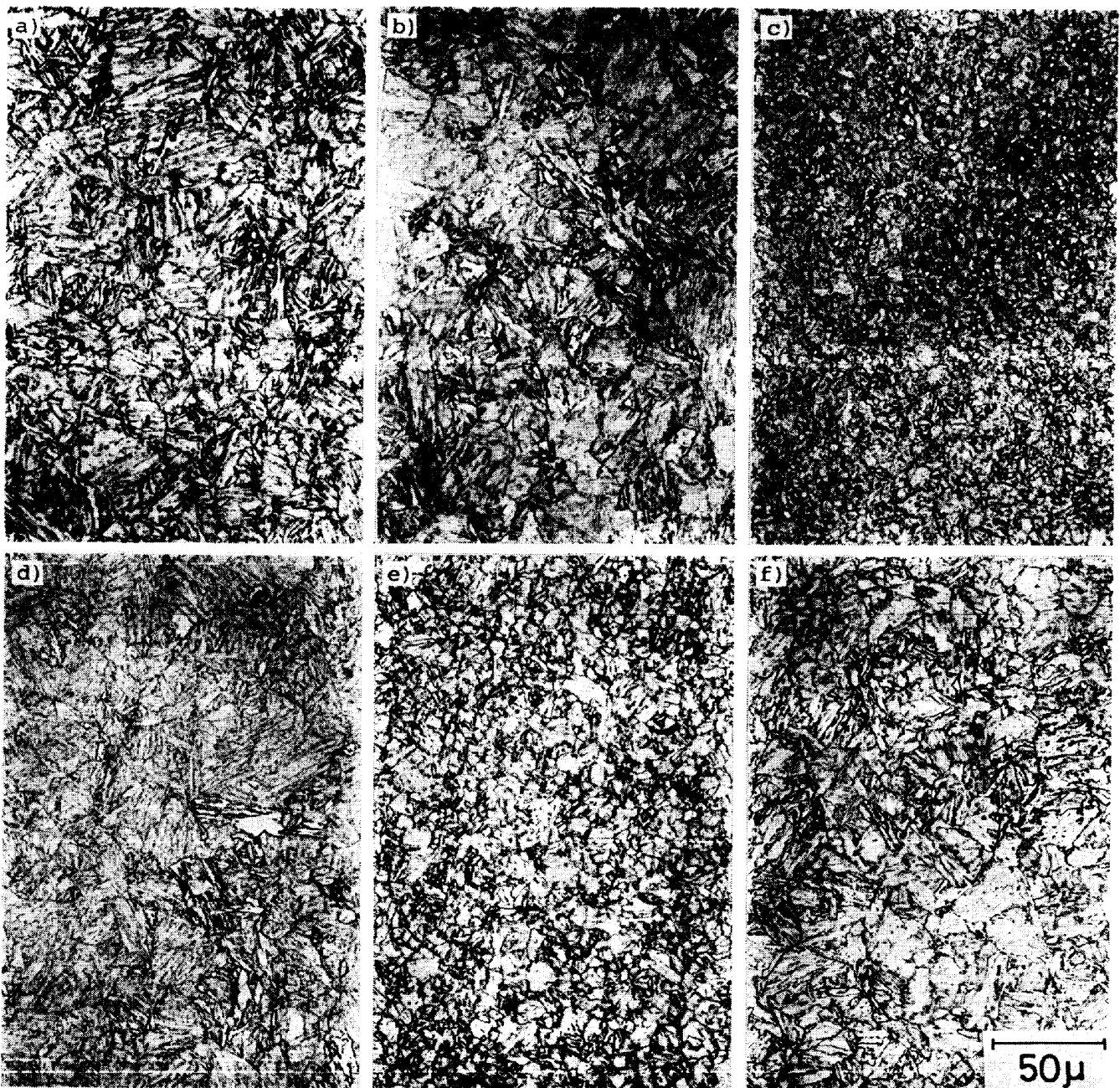
2.1 使用鋼種

化学組成を Table 1 に示す. 市販鋼である HT 80

鋼以外の鋼は 20 kg 高周波真空溶解炉で溶解し, 鍛造, 圧延により 7 mm 厚の板材にした. その後, 900°C で 2 h 保持後水冷, 850°C から水焼入, 615°C で焼もどし処理を施した. 光学顕微鏡写真を Photo. 1 に示す.

Table 1. Chemical composition (wt%).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	
HT 80	0.13	0.27	0.87	0.015	0.004	1.0	0.5	0.44	0.18	0.04	0.0012B
104	0.13	0.45	4.91	0.006	0.005	2.59	0.59	0.76	0.99	0.09	
118	0.13	0.25	1.90	0.003	0.005	4.55	0.50	0.73	0.99	0.10	0.023N 0.15Al
123	0.16	0.92	1.82	0.008	0.005	1.63	2.79	0.35	2.93	0.10	
139	0.17	0.31	0.82	0.002	0.005	1.57	2.11	0.48	0.15	0.10	
141	0.14	0.26	1.03	0.003	0.005	5.57	0.51	0.78	0.99	0.10	



a) HT80 steel, b) 104 steel, c) 118 steel, d) 123 steel, e) 139 steel, f) 141 steel

Photo. 1. Microstructures of steels

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⁴⁾.

2) 疲れ試験

(i) 試験機: 疲れ試験は ±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) 応力比: 0.10 (引張-引張)

(iii) 繰り返し速度: 大気中では約 20 Hz, その他の環境中では 0.167 Hz (10 cpm)

(iv) 波型: 正弦波

(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) 応力拡大係数範囲 (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 410⁶⁾ より求めた.

(vii) 疲れ試験環境の種類

a) 大気

b) 人工海水 (ASTM-D 1141-52)⁷⁾ + 酸素飽和 (溶存酸素量 8 ppm, pH 7.8~8.2)

c) 純水 (イオン交換水) + 酸素飽和 (溶存酸素量 1~2 ppm)

d) 純水 + 酸素飽和

e) 3% 塩水 + 酸素飽和

f) 3% 塩水 + 酸素飽和 + Zn 犠性陽極

なお, 主タンク水量は 100 l, 試験槽への流量 1 l/min, 水温 30°C.

3) 破面観察

破面は走査型電子顕微鏡により観察した.

2.3 $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の定義

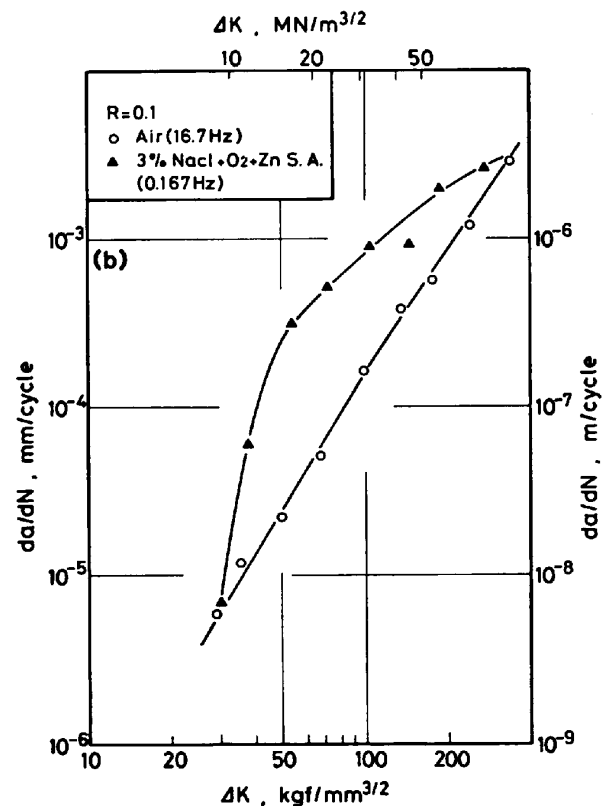
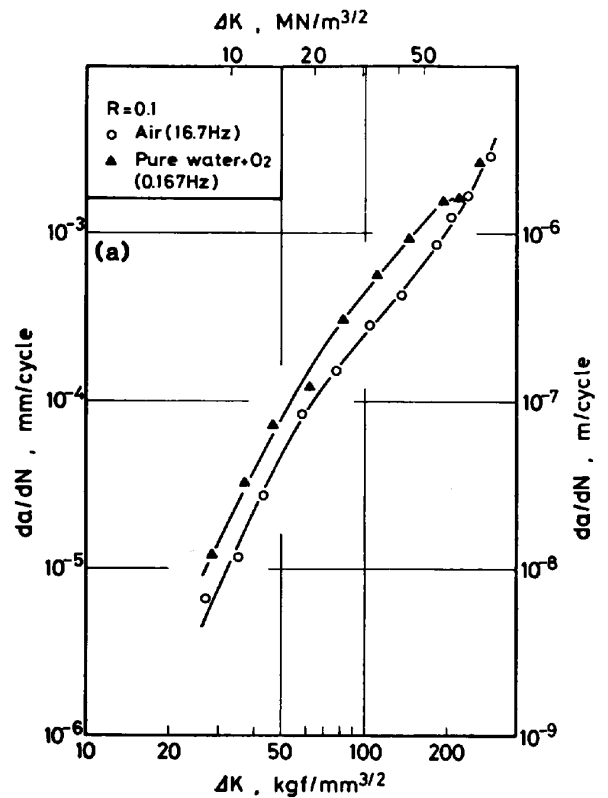
各種環境の da/dN への影響度合を相対的に表示するためのパラメータとして $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ ⁴⁾ を使用した.

$$\gamma_{0.167\text{Hz}} \equiv (da/dN)_{\text{cor}} / (da/dN)_{\text{air}}$$

ここで $(da/dN)_{\text{cor}}$ は大気以外の各種環境下での荷重繰り返し速度 0.167 Hz の da/dN , $(da/dN)_{\text{air}}$ は大気中の da/dN である. パラメータ $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ を用いたのは

Table 2. Mechanical properties.

Steel	σ_B (kgf/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kgf/mm ²)	δ (%)	ψ (%)
HT 80	83	77	32	
104	111.1	105.1	16.5	66.5
118	119.1	118.0	10.1	60.3
123	106.6	94.7	15.9	64.6
139	104.5	95.2	15.2	73.7
141	116.8	112.0	15.1	71.4



a) 118 steel, in pure water bubbling air
b) HT80 steel in 3% NaCl solution bubbling air with zinc sacrificial anode

Fig. 1. Examples of da/dN vs ΔK curves.

種々の水環境の da/dN への影響度合を相対的に比較するためである。

2.4 引張試験

直径 4 mm, 標点間距離 20 mm の丸棒試験片を用いて, クロスヘッド速度 0.10 cm/min で試験した. 結果を Table 2 に示す.

3. 結果および考察

3.1 da/dN - ΔK 曲線の例

118 鋼の O_2 飽和純水中および HT 80 鋼の 3% 塩水中 Zn 犠牲陽極下の da/dN - ΔK 曲線を Fig. 1 に示す. 大気中および各環境下の da/dN - ΔK 曲線は一枚の試験片により求められている⁴⁾. 各種 da/dN - ΔK 曲線より $\gamma_{0.167Hz}$ - ΔK 曲線を求め, 各環境の da/dN への影響度合を比較した.

3.2 耐腐食疲れき裂伝播特性の比較的高い 104 鋼のき裂伝播挙動

104 鋼は HY 140 鋼の Ni の一部を Mn に置き換えた鋼である. 同鋼は, 著者がこれまでに O_2 飽和の人

工海水環境 (自然腐食電位) 下で疲れき裂伝播速度を測定した, 引張強さ 100~120 kgf/mm² 級鋼約 30 種⁸⁾ 中, 環境の da/dN への影響が最も小さい鋼の一つである. $\gamma_{0.167Hz}$ - ΔK 曲線を Fig. 2 に示す. 同図より下記のことかわかる.

a) $\gamma_{0.167Hz}$ の最大値はどの環境においても $\Delta K=50$ ~100 kgf/mm^{3/2} で現れる⁴⁾.

b) $\gamma_{0.167Hz}$ の最大値は O_2 飽和人工海水, N_2 飽和純水, および O_2 飽和 3% 塩水においてだいたい等しく, その値は 2 である. これらの環境下では, 破面はだいたい粒内破壊を示している. しかしながら, 大気中ではストライエーション機構で伝播 (Photo. 2(a)) する場合でも, これらの環境下では, 凝へき開とみられる比較的平坦な領域を示す場合 (Photo. 2(b)) がある.

c) $\Delta K < 40$ kgf/mm^{3/2} では, Zn 犠牲陽極下の $\gamma_{0.167Hz}$ はこれ以外の環境 (自然腐食電位) 下の $\gamma_{0.167Hz}$ より低い. したがって, 低 ΔK 領域では Zn 犠牲陽極法は da/dN に対して防食効果があると言える. その他の鋼においても同様の傾向が見られる.

d) Zn 犠牲陽極下では, $\gamma_{0.167Hz}$ の最大値は約 8 であり, 破面はこの最大値附近では, 粒界およびへき開割れ (Photo. 3) である. これは, カソード反応の結果生じた水素に原因していると思われる.

e) $\Delta K \geq 200$ kgf/mm^{3/2} の高 ΔK 領域では, N_2 飽和純水中の $\gamma_{0.167Hz}$ は O_2 飽和人工海水あるいは 3% 塩水中の $\gamma_{0.167Hz}$ よりも高くなっている. これは, 104 鋼においてだけではなく, 後述する 123 鋼あるいは 118 鋼などにおいても見られる現象である.

3.3 耐腐食疲れき裂伝播特性の比較的低い 123 鋼のき裂伝播挙動

本鋼は, 人工海水自然腐食電位下で疲れき裂伝播挙動を調べた約 30 鋼種中⁸⁾, 最も環境の影響を受けやすい鋼のうちの一つである. 本鋼は, Table 3 に示すように, 使用した 6 鋼種中, 前オーステナイト粒径は最も大きく, それは 25~30 μ である. $\gamma_{0.167Hz}$ - ΔK 曲線を Fig. 3 に示す.

$\gamma_{0.167Hz}$ の最大値は, O_2 を飽和した人工海水, 3% 塩水, および純水, あるいは N_2 を飽和した純水中において 6~8 であり, 前述の 104 鋼に比べて 3~4 倍高い. この最大値附近では, 破面は, 最もマイルドな環境と思われる N_2 飽和の純水中でも, 粒界割れ (Photo. 4) が大部分を占めている. したがって, 本鋼は, 上記のようなマイルドな環境下でもわずかな腐食反応の結果生じた水素により da/dN は容易に加速されており, 水素に対して極めて敏感な試料であると考えられる. そして,

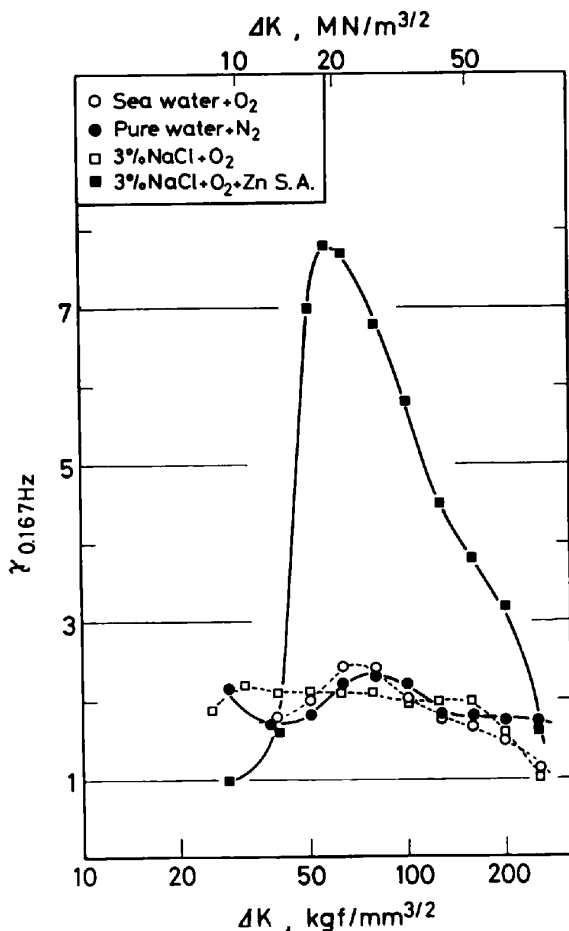
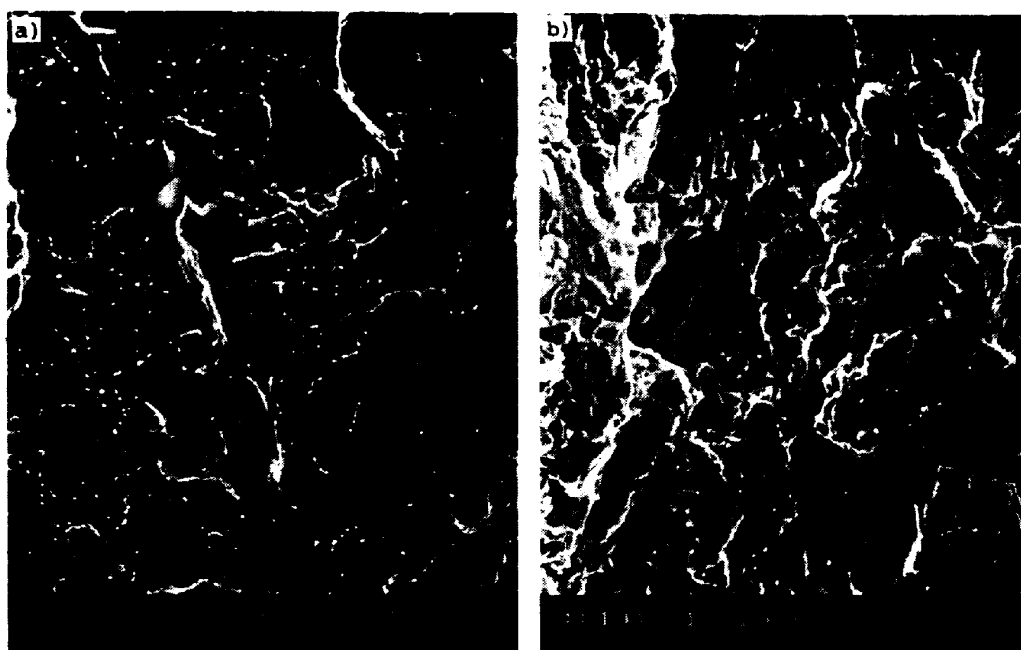


Fig. 2. $\gamma_{0.167Hz} \equiv (da/dN)_{cor} / (da/dN)_{air}$ vs ΔK curves of 104 steel.



a) $\Delta K=195 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ in air, b) $\Delta K=175 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, in pure water bubbling N_2 gas, 0.167Hz

Photo. 2. Fractographs of 104 steel.



Photo. 3. Fractograph of 104 steel. $\Delta K=56 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, in 3% NaCl solution bubbling air with zinc sacrificial anode, 0.167 Hz.

水素の供給量の多い Zn 犠牲陽極下では、他の環境に比べて $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の最大値は高く、約 13 である。なお、本鋼の大気中の da/dN - ΔK 曲線は他の 5 鋼種と同じであり、粒内破壊であり、ストライエーションがみられる。

3.4 その他の鋼のき裂伝播挙動

118 鋼は HY 140 鋼系に N および Al を添加した鋼

Table 3. Prior austenitic grain size and others.

Steel	Prior austenitic grain size (μ)	ΔK_{oc}^{*1} ($\text{kgf/mm}^{3/2}$)	$r_{c.p.}^{*2}$ for ΔK_{oc} (μ)	$\Delta K_{Zn>F.C.}^{*3}$ ($\text{kgf/mm}^{3/2}$)
HT 80	20~25	90	35	32
104	15~20	80	15	40
118	6~7	65	7~8	35
123	25~30	170	80	50
139	10~15	—	—	—
141	10~20	80	13	35

*1 ΔK_{oc} is a value of ΔK over which no intergranular cracks are observed.

*2 $r_{c.p.}$ is cyclic plastic deformation zone size at the tip of crack.

*3 $\Delta K_{Zn>F.C.}$ is a value of ΔK for which the $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ -value in 3% NaCl solution under zinc sacrificial anode exceeds the $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ -value in sea water under free corrosion.

で、前オーステナイト粒径は、使用 6 鋼種中、最も小さく、6~7 μ (Table 3 参照) である。同鋼の $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ - ΔK 曲線を Fig. 4 に示す。同図より下記のことがわかる。

a) $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の最大値は O_2 飽和した人工海水中では 3.3 である。一方、 O_2 あるいは N_2 を飽和した純水中では約 2 であり、両環境間で異なつた影響度合を示す。このように Cl イオンの有無により $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の最大値が異なるのは、先に述べた 104 あるいは 123 鋼の場合とは異なつた現象である。Fig. 2~4 を比較することにより、118 鋼の疲れき裂伝播挙動は 104 鋼よりは環境の影響を受けやすく、123 鋼よりは環境の影響を受けにくい鋼と言える。破面はこれらの環境下では粒内破壊である。

b) 低 ΔK 域では、Zn 犠牲陽極下の da/dN は自

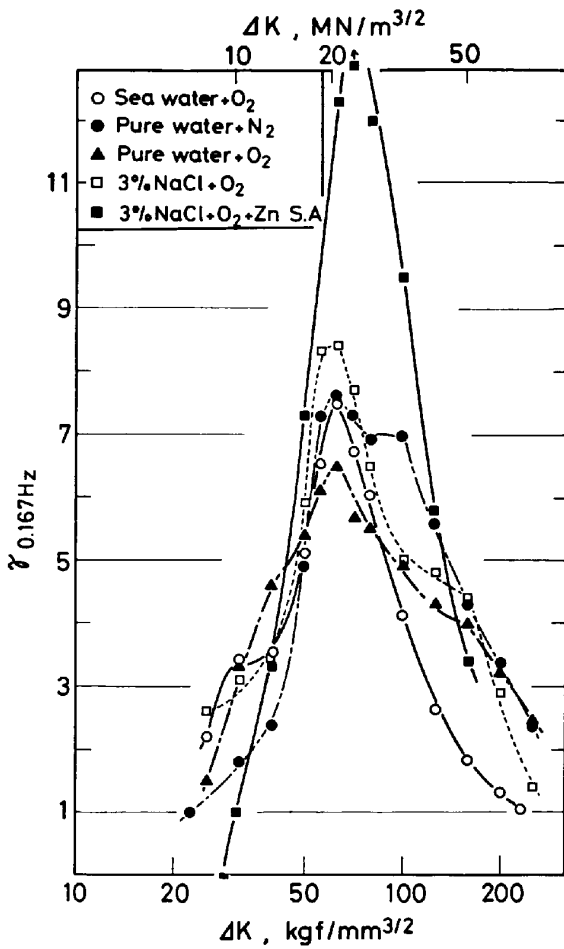


Fig. 3. $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ vs ΔK curves of 123 steel.



Photo. 4. Fractograph of 123 steel. $\Delta K=108\text{kgf/mm}^{3/2}$, in pure water bubbling N_2 gas, 0.167 Hz.

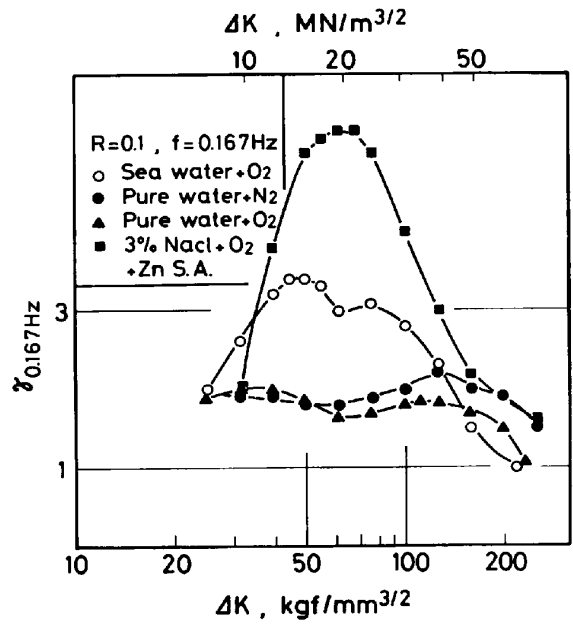


Fig. 4. $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ vs ΔK curves of 118 steel.

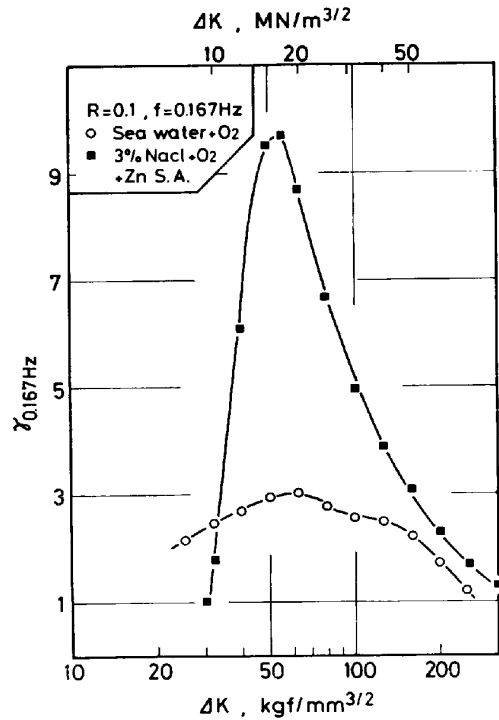


Fig. 5. $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ vs ΔK curves of HT 80 steel.

然腐食電位下の da/dN より低い。この傾向は、先の 104 および 123 鋼以外に HT 80 鋼 (Fig. 5) あるいは 141 鋼においても見られる。Zn 犠牲陽極下の da/dN が自然腐食電位下の da/dN より高くなる JK ($JK \text{ Zn} > \text{F.C.}$) を Table 3 に示す。使用したどの鋼種においても、防食効果があるのは $JK < 30 \sim 40 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ であり、この値は使用鋼種の化学成分に依存しない。

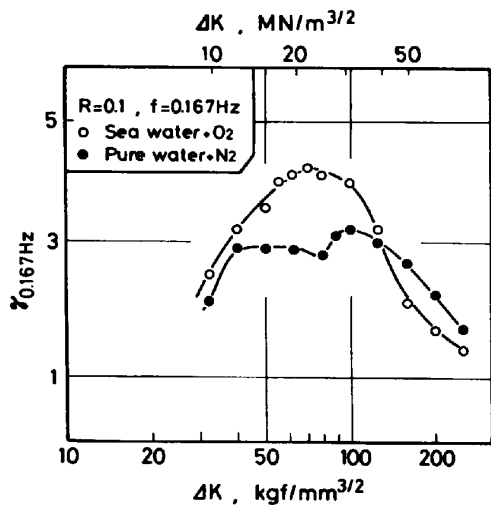


Fig. 6. $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ vs ΔK curves of 139 steel.

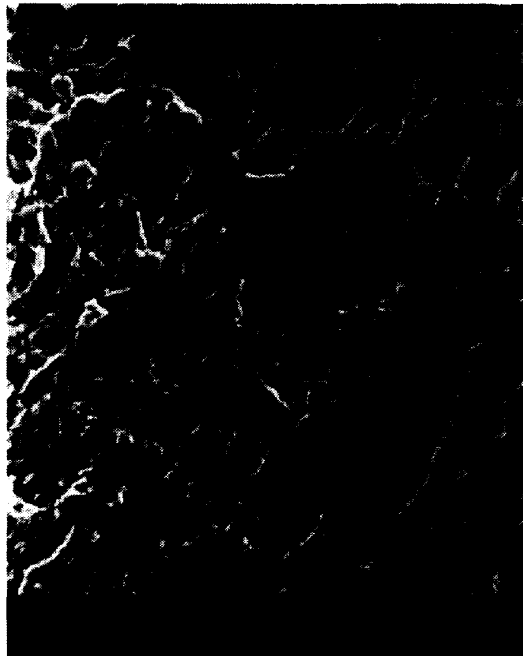


Photo. 5. Fractograph of 139 steel. $\Delta K=68 \text{ kgf/mm}^3/2$, in pure water bubbling N_2 gas, 0.167 Hz.

c) Zn 犠牲陽極下の $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の最大値は約5であり、最大値近辺の破面はほとんど粒界割れである。104あるいは123鋼の場合と同様にこの環境下では、き裂伝播は水素によつて影響されていると言える。ただ、最大値は鋼種により異なっている。

上記(a)の傾向はFig. 6に示すように、139鋼においても見られる。この鋼の場合、 N_2 飽和純水中の $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の最大値は約3であり、その付近ではPhoto. 5に示すように、粒界破面が観察されるが、割合としては多くない。

3.5 O_2 飽和人工海水下でのき裂伝播挙動

O_2 を飽和した人工海水下における $\gamma_{0.167\text{Hz}}-\Delta K$ 曲線

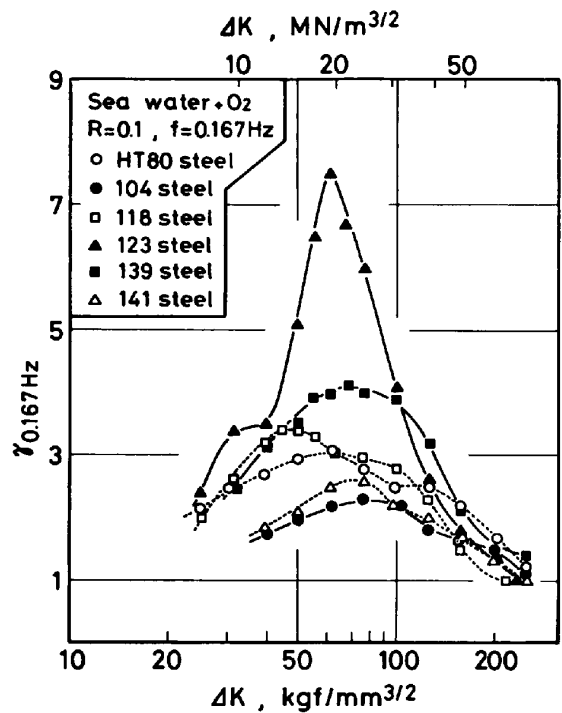


Fig. 7. $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ vs ΔK curves in sea water bubbling air under free corrosion.

をFig. 7に示す。 $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の最大値は鋼種間で大きな差が見られるが、これと、Table 2に示した機械的性質、あるいはTable 3に示した前オーステナイト粒大きさとの相関性はない。この最大値が相対的に大きい123および139鋼においては、他の鋼種に比べてCr含有量はそれぞれ6倍および4倍と高い。

3.6 Zn 犠牲陽極下での疲れき裂伝播挙動

Zn 犠牲陽極下における $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ は、Fig. 2~5に示したように、他の自然腐食電位下の $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ に比べて次の特徴がある。

a) $\Delta K < 30 \sim 40 \text{ kgf/mm}^3/2$ では、Zn 犠牲陽極下の $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ はその他の環境下での $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ に比べて低く、防食効果が認められる。後述するように、この領域では粒界破面は比較的少ない。

b) $\Delta K > 40 \sim 50 \text{ kgf/mm}^3/2$ では、Zn 犠牲陽極下の $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ は他の環境下の $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ に比べて急激に高くなり、そしてその最大値を示す ΔK 附近の破面は粒界割れあるいはへき開割れを示している。

Zn 犠牲陽極下の $\gamma_{0.167\text{Hz}}-\Delta K$ 曲線を総括してFig. 8に示す。この場合の $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の最大値 ($\gamma_{\text{max}, \text{Zn}}$) は鋼種により異なる。123鋼の $\gamma_{\text{max}, \text{Zn}}$ が最も高く、約13であり、118鋼のそれが最も低く、約5である。また、全般的傾向として、 $\gamma_{\text{max}, \text{Zn}}$ が高いほど、それが生じる ΔK は高くなる。

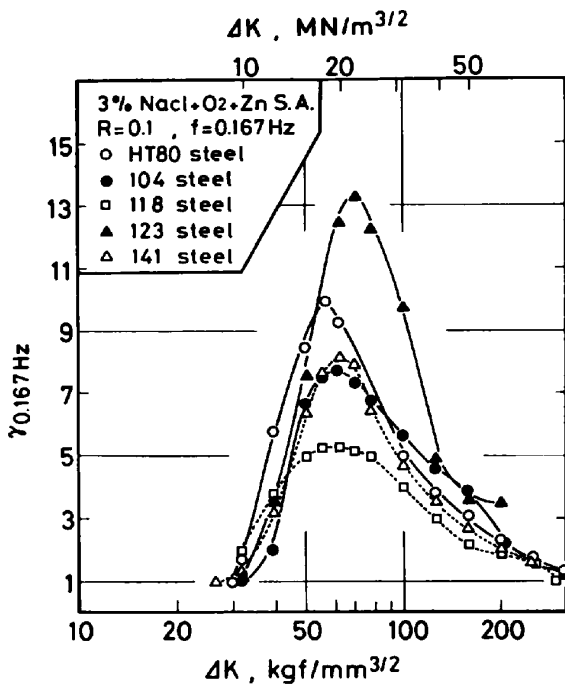


Fig. 8. $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ vs ΔK curves in 3% NaCl solution bubbling air with zinc sacrificial anode.

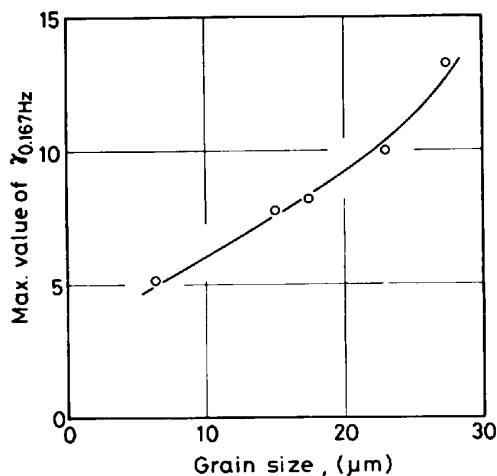


Fig. 9. The maximum value of $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ as a function of prior austenitic grain size.

$\gamma_{\text{max, Zn}}$ の値と前オーステナイト粒径 (Table 3) とは相関性がある。前オーステナイト粒径の大きい鋼ほど $\gamma_{\text{max, Zn}}$ は大きく、それは高 ΔK 側で生じる (Fig. 9 参照)。

Zn 犠牲陽極下での da/dN - ΔK 曲線 (Fig. 8 の元図) を Fig. 10 に示す。 $\Delta K < 50 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ では鋼種間の相違はあまりみられない。しかし、 $\Delta K > 50 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ では、鋼種により異なつたき裂伝播挙動を示す。なお、123 鋼は、低 ΔK 領域で、他の鋼に比べて da/dN は多少低くなつている。

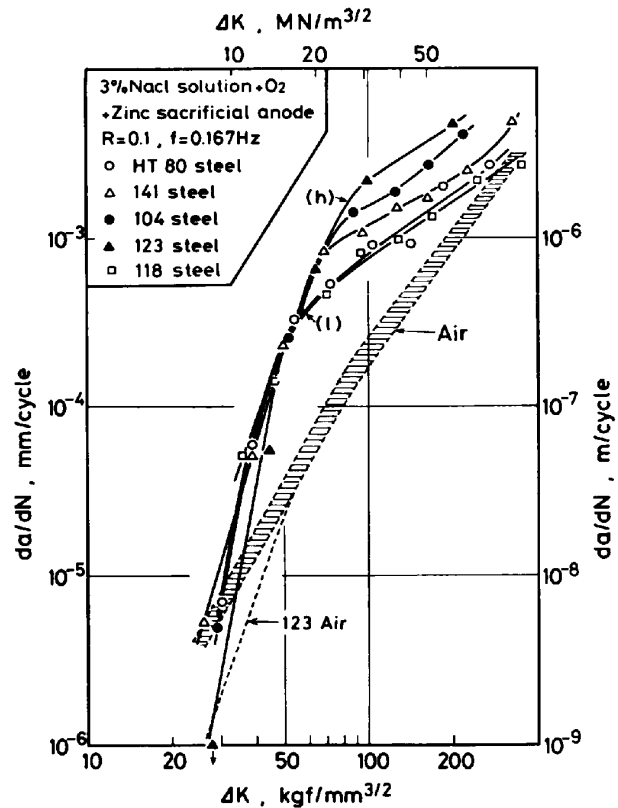


Fig. 10. da/dN vs ΔK curves in 3% NaCl solution bubbling air with zinc sacrificial anode.

Zn 犠牲陽極下での da/dN - ΔK 曲線の勾配 [$(da/dN)/\Delta K$] $_{\text{Zn}}$ と大気中での同曲線の勾配 [$(da/dN)/\Delta K$] $_{\text{air}}$ との比を L とする。

$$L \equiv \frac{[(da/dN)/\Delta K]_{\text{Zn}}}{[(da/dN)/\Delta K]_{\text{air}}}$$

Fig. 10 より低 ΔK 側では $L > 1$ 、そして高 ΔK 側では $L < 1$ であるから、 $L = 1$ で $\gamma_{\text{max, Zn}}$ が生じる。 $L = 1$ となる ΔK は粗粒鋼の場合、細粒鋼に比べて高くなる。例えば、使用した 6 鋼種中、最細粒である 118 鋼の場合、 $L = 1$ は $\Delta K = 55 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ (Fig. 10 中 (l) で示す) で、最粗粒である 123 鋼の場合、 $L = 1$ は $\Delta K = 80 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ (Fig. 10 中 (h) で示す) である。 $L = 1$ になる ΔK が高くなるほど、 $\gamma_{\text{max, Zn}}$ の値は大きくなる。これが、粗粒鋼の $\gamma_{\text{max, Zn}}$ が細粒鋼のそれより高くなる (Fig. 9) 理由である。

Zn 犠牲陽極下での 粒界破面率と ΔK との関係を示す Fig. 11 に示す。粒界破面率は低 ΔK 領域では低い、 ΔK とともに増大し、ある ΔK で最大値を示し、その後は ΔK とともに減少する。そして、 $\gamma_{\text{max, Zn}}$ に相当する ΔK を少しこえた ΔK で粒界割れは存在しなくなる。その ΔK ($\Delta K_{\text{G, c}}$) を Table 3 に示す。前オーステナイト粒径が小さいほど $\Delta K_{\text{G, c}}$ は低い。

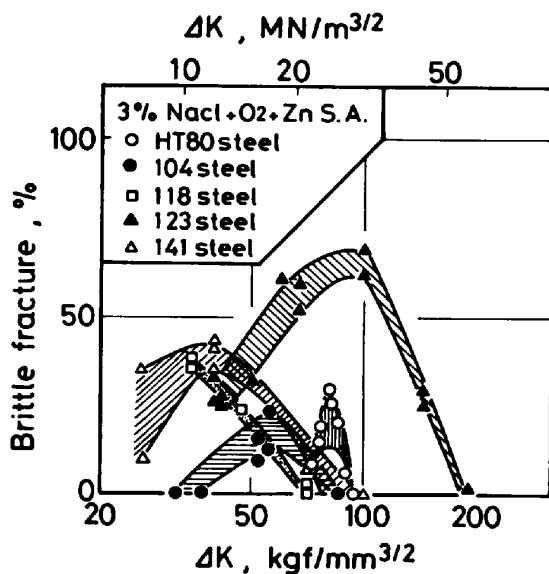


Fig. 11. Relationship between area fraction of intergranular fracture and stress intensity factor range, ΔK .

$\Delta K_{G.c}$ に対応するき裂先端の繰返し塑性変形域大きさ $r_{c.p}$ を Table 3 に示す。なお、 $r_{c.p}$ は次式より求めた。

$$r_{c.p} = \frac{1}{4} \times \frac{1}{10} \left(\frac{\Delta K_{G.c}}{\sigma_y} \right)^2$$

この $r_{c.p}$ と前オーステナイト粒大きさはだいたい同じ値を示している。すなわち、 $r_{c.p}$ が前オーステナイト粒大きさより大きくなると、粒界割れを生じなくなる。ただし、123 鋼は例外で、 $r_{c.p}$ が前オーステナイト粒大きさの3倍近くになるまで粒界割れを生じており、水素に敏感な材料の特徴と思われる。

以上の実験結果および考察より、水素が原因で粒界割れを起し、そのために疲れき裂伝播速度が高くなる現象を押えるためには、前オーステナイト粒大きさを極力微細化すればよいと推定できる。例えば、前オーステナイト粒大きさが 3μ になれば、 $r_{max, Zn}$ は $\Delta K = 35 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ で現れ、その値は約3と推定される。

4. 結 論

引張強さ $80 \sim 120 \text{ kgf/mm}^2$ 級の海水に対する腐食疲れき裂伝播感受性の異なる高張力鋼6種類を用いて、5種類の水環境 (O_2 飽和人工海水、 N_2 飽和純水、3% 塩水中 Zn 犠牲陽極など) 下で、環境のき裂伝播速度への影響度合 $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ ($= (da/dN)_{cor} / (da/dN)_{air}$) と ΔK との関係性を求め、鋼種間および環境間でのこの値の違いについて種々の検討を行った結果、次のことが明らかになった。なお、 $R=0.1$ である。

(1) $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の最大値はほとんどの場合 $\Delta K = 50 \sim 100 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ で生じる。

(2) $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の最大値が3~4以下の場合、主として粒内破壊である。一方、最大値が3~4以上の場合、粒界割れが多数みられる。

(3) $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の最大値の最も低い値は、耐腐食疲れ特性の優れた鋼において約2であり、その値は、自然腐食電位下では、溶存酸素量、塩素イオン量の影響をほとんど受けない。

(4) 水素に敏感な鋼の場合、 N_2 を飽和した純水中においてもき裂伝播は水素により加速され、 $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の最大値は8である。

(5) Zn 犠牲陽極によるき裂伝播に対する防食効果は、いずれの鋼においても $\Delta K < 30 \sim 40 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ において認められる。しかし、 $\Delta K > 30 \sim 40 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ では、カソード反応による水素のために、 da/dN は自然腐食電位下の da/dN に比べて著しく大きくなる。

(6) Zn 犠牲陽極下では、使用したすべての鋼において高い $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ の最大値 (5~13) を示し、その附近では破面は粒界割れである。その最大値は前オーステナイト粒径が大きいほど高く、そして高 ΔK 側で現われる。この現象はき裂先端の繰返し塑性変形域大きさと前オーステナイト粒径との関係により説明することができる。

(7) 高 ΔK 領域 ($\Delta K > 180 \text{ kgf/mm}^{3/2}$) において、 N_2 あるいは O_2 飽和純水下の $\gamma_{0.167\text{Hz}}$ は酸素飽和の人工海水あるいは3% 塩水下のそれより高い。

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いたします。

文 献

- 1) 江原隆一郎, 山田義和, 藤嶋和明, 小沢厚夫, 石黒隆義, 半沢 貢: 三菱重工技報, 18 (1981), p. 633
- 2) "Corrosion Fatigue of Steel in Sea Water" (Technical Paper) (1979) Sumitomo Metal Industries Ltd. Central Research Lab.
- 3) O. VOSIKOVSKY: J. Testing Evaluation, 6 (1978), p. 175
- 4) 角田方衛, 丸山典夫, 内山 郁: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1669
- 5) 角田方衛, 丸山典夫, 内山 郁: 69 (1983), p. 420
- 6) ASTM 410, (1966), p. 12
- 7) ASTM D1141-52, (1971), p. 180
- 8) 丸山典夫, 角田方衛, 内山 郁: 未発表
- 9) 梶本勝也: 第56回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1978), p. 19