

© 1989 ISIJ

論 文

高張力鋼溶接継手の人工海水中疲労強度におよぼす温度，溶存酸素およびカソード防食の影響

大内博史*・征矢勇夫*・江原隆一郎*²・山田義和*³

Effects of Temperature, Dissolved Oxygen and Cathodic Protection on Fatigue Strength of Welded Steel Joint in Synthetic Seawater

Hiroshi OUCHI, Isao SOYA, Ryuichiro EBARA and Yoshikazu YAMADA

Synopsis :

With offshore structures being increasingly installed in frigid regions and deeper waters, it is important to clarify the effects of temperature and dissolved oxygen (DO) content of seawater on fatigue strength. The effect of applied potential for high tensile strength steel should also be clarified, as hydrogen can be introduced under cathodic protection (CP).

In this study, fatigue tests were conducted on welded Tee joints of a 600 MPa-strength steel, by controlling temperature and DO concentration in synthetic seawater with and without CP. The temperature was kept at 30 or 4°C, and the DO concentration was 0 ppm, 5 ppm or of air-saturated state. In the tests with CP, the potential of -0.8, -1.0 or -1.2 V (vs. SCE) was applied on the toes of welded joints.

While the effect of temperature was not remarkable, lowering DO content increased the fatigue strength for the steel under free corrosion. In longer fatigue endurance region, CP of -0.8 or -1.0 V (vs. SCE) improved the fatigue strength in seawater to exceed that in the air. However, cathodic protection at -1.2 V decreased the fatigue strength regardless of DO content.

Key words : corrosion fatigue ; seawater ; temperature ; dissolved oxygen ; cathodic protection ; high tensile strength steel.

1. 緒 言

近年，寒冷海域，大水深海域に設置される海洋構造物が増加してきている。それらの環境中での鋼材の性能評価，構造物の安全性評価にとって，海水温度および海水中溶存酸素濃度（以下，[DO]）が腐食疲労特性におよぼす影響を明らかにすることは重要である。温度や[DO]は，腐食速度に大きな影響を与える¹⁾が，これらの環境因子が海水中疲労強度におよぼす影響について，海洋構造物での鋼材の使用条件を模した実験によつて調べた系統的な研究例は見当たらない。なお，[DO]は，水深1000 mで海面付近の10分の1以下にまで低下する場合がある²⁾といわれている。

一方，海洋構造物の大型化にともない，軽量化，溶接時間の短縮などの観点から高張力鋼のより広範な適用が期待されている。ところで，海洋構造物にはカソード防

食が広く適用されており，鋼材の海水中適正防食電位は-0.77 V (vs. SCE)³⁾といわれている。しかし，実構造物において防食電位の分布が一様であるとはいいがたい。犠牲アノードに近接した鋼表面はいわゆる過防食状態になり，カソード反応により多量の水素が発生し，高張力鋼の腐食疲労特性が悪影響を受けるおそれがある。

著者らは，すでに，海洋構造物の円筒継手部を模した高張力鋼溶接継手の大気開放4°C人工海水中腐食疲労実験結果を報告している⁴⁾が，そのなかで適正な電位でのカソード防食により腐食疲労強度は増大し，比較的長寿命域では大気中疲労強度を上回ることを明らかにした。本報でも同様の高張力鋼溶接継手試験片を用い，温度・溶存酸素濃度を制御した人工海水中において腐食疲労試験を行い，これらの環境因子の影響およびさまざまな電位でのカソード防食の相乗効果について調べた。

昭和61年10月本会講演大会にて発表 昭和63年3月17日受付 (Received Mar. 17, 1988)

* 新日本製鉄(株)厚板・条鋼研究センター 工博 (Plate, Bar, Shape & Wire Rod Research Lab., Nippon Steel Corp., 5-10-1 Fuchinobe Sagamihara 229)

*² 三菱重工業(株)広島研究所 工博 (Hiroshima Technical Institute, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

*³ 三菱重工業(株)広島研究所 (Hiroshima Technical Institute, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of tested steels.

Steel	Specimen	Chemical composition (wt%)									YP (MPa)	TS (MPa)	El (%)
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	B			
HT 60	Welded joint Rotating bending CCT	0.14	0.28	1.37	0.014	0.008	—	—	—	—	598	657	37
HT 50		0.13	0.28	0.96	0.018	0.005	0.02	0.03	—	—	382	510	27
HT 56		0.09	0.27	1.45	0.005	0.002	0.28	0.30	0.02	0.0010	464	550	33

Table 2. Welding condition for welded joint specimens.

Steel	Welding rod	Current (A)	Voltage (V)	Heat input (kJ/cm)	Preheat temperature (°C)	Number of passes
HT 60	AWS E 8016-G ($\phi 4$ mm)	170	24	16	100	4

2. 実験方法

溶接継手試験片製作に供した鋼材は板厚 16 mm の高張力鋼 HT60 である。供試材の化学成分と機械的性質を Table 1 に示す。これを両面黒皮付きの元厚まま用いて、Table 2 に示す溶接条件で手溶接により T 型継手

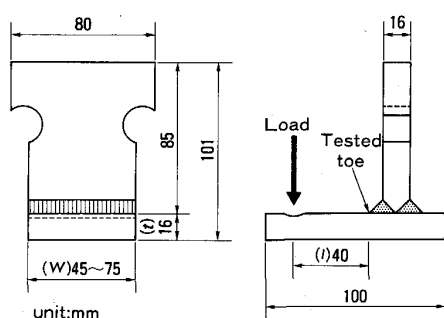


Fig. 1. Geometry of welded joint specimen.

を製作した。そして、Fig. 1 に示す形状、寸法の試験片を採取した。試験部である主板側溶接止端部以外での破断を防ぐとともに、カソード防食条件下で対極での電流密度を小さく保つて発生する塩素ガス量を最小限に抑えるために、リブ板側の溶接止端をグラインダー仕上げ (R5 mm) し、試験部以外はアセトン脱脂後、タール・エポキシ塗料を塗布した。

実験装置を Fig. 2 に示す。試験片は、疲労試験機に設置した密閉型試験水槽内に取り付け、所定の環境に完全浸漬するとともに繰返し荷重を加えた。試験片と荷重伝達治具は、ガラスエポキシ樹脂により絶縁した。

環境は ASTM 規格 (D1141-75) 準拠人工海水 (以下、単に海水という) とし、比較のために大気中でも実験した。海水は、タンクと密閉型試験水槽との間で保留粒子径 150 μm の樹脂製フィルターを介して流量 0.5 l/min で循環した。試験水槽内の海水温度は熱電対により測定、記録し、タンク内に設置したクーラーあるいはヒーターの自動断続運転により制御した。溶存酸素濃度 [DO] はタンク内でガルバニックセル方式溶存酸素計 (横河北辰電機 DO Σ シリーズ) を用いて測定し、酸素ガスと窒素ガスの交互バブリングにより自動制御した。この精度は、 ± 0.5 ppm 程度である。また、試験部に相対して白金対極を試験水槽内に設置し、ポテンシostatを用いて定電位カソード防食を行った。試験部の電位は塩

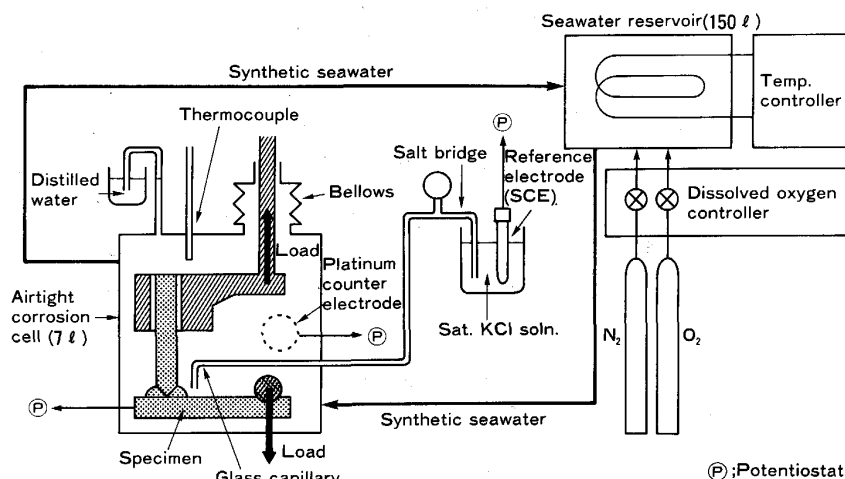


Fig. 2. Schematic of apparatus for corrosion fatigue test of welded joint specimens.

Table 3. Environmental conditions for fatigue tests of welded joint specimens.

Sr.	Environment	Temperature (°C)	[DO] (ppm)	Potential (V vs. SCE)
1	Air	RT	—	—
2	SSW	30	6*	F. C.
3	SSW	4	10*	F. C.
4	SSW	4	5	F. C.
5	SSW	4	0	F. C.
6	SSW	4	5	-0.8
7	SSW	4	5	-1.0
8	SSW	4	5	-1.2
9	SSW	4	10*	-1.2

SSW : Synthetic seawater
F. C. : Free corrosion

* Air-saturated condition

橋を介した室温の飽和カロメル電極 (SCE) 基準で制御した。実験環境条件をまとめて Table 3 に示す。

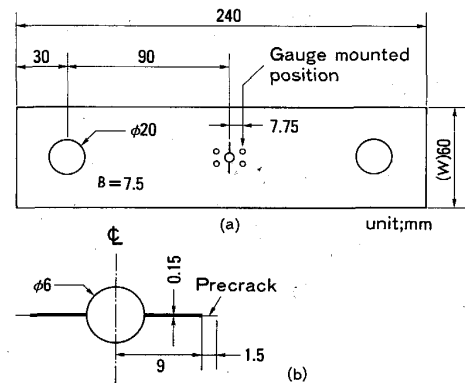
荷重は、正弦波形、繰返し速度 $f=10$ cpm (0.17 Hz), 最大荷重 850~2500 kgf, 最小荷重 100 kgf の片振り引張りとした。したがって、応力比 R (=最小応力/最大応力) は、 $0.04 < R < 0.12$ の範囲であった。大気中の実験においては、 $f=600$ cpm (10 Hz) とした。試験部にかかる公称曲げ応力範囲は、(1)式で表される。

$$\Delta\sigma_B = 6\Delta Pl / t^2 W \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\Delta\sigma_B$; 曲げ応力範囲, ΔP ; 荷重範囲, l ; 曲げスパン, t ; 板厚, W ; 試験片幅, である。

ところで、後述するように、溶接継手を用いた腐食疲労試験ではデータにばらつきが生ずることがある。そこで、海水温度の影響をより明らかにするために試験部直径 10 mm, 平行部長さ 10.6 mm の平滑丸棒試験片を用いた海水中回転曲げ疲労試験を行った。この試験片は、TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 法によって製造した板厚 20 mm の高張力鋼 HT50 母材から圧延方向に採取した。化学成分および機械的性質を Table 1 に示す。環境は大気開放状態の人工海水であり、試験部を海水中に完全浸漬した。海水温度は 4°C から 50°C の範囲で変えた。荷重繰返し速度は 10 rpm (0.17 Hz) とし、応力振幅を 245.2 MPa とした。

また、[DO] が腐食疲労特性におよぼす影響を考察するために、[DO] を変えた 4°C 人工海水中での疲労き裂伝播速度を測定した。これには、TMCP 法により製造した板厚 30 mm の高張力鋼 HT56 を用いた。化学成分および機械的性質は Table 1 に示した。試験片は、Fig. 3 に示すような厚さ $B=7.5$ mm, 幅 $W=60$ mm の CCT (Center-Cracked-Tension) 試験片とし、き裂が圧延方向と垂直になるような方向 (L-T 方向) で板厚中央部から採取した。試験片中央切欠き部に防水仕様 COD クリップゲージを取り付け、弾性コンプライアンスを計測することによりき裂長さを推定した。これには、



(a) Outline (b) Notch detail

Fig. 3. Geometry of CCT fatigue crack propagation specimen.

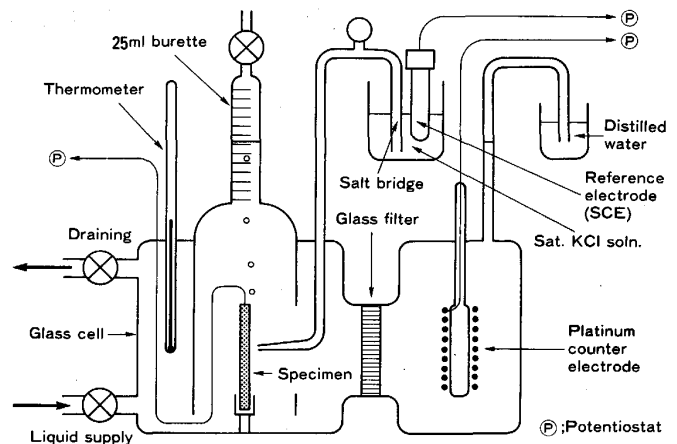


Fig. 4. Schematic of apparatus for measurement of the amount of hydrogen gas evolved under cathodic protection.

A. SAXENA ら⁵⁾により提案された推定式を修正して用いた。この修正のために、大気中で随時ピーチマークを導入する実験をあらかじめ行った。応力拡大係数範囲 ΔK の算出には、ASTM の推奨式⁶⁾を用いた。データ収集および解析には、パーソナル・コンピューターを用いたシステムを開発して用いた。

さらに、[DO] を制御した人工海水中カソード防食状態での H_2 発生量を Fig. 4 に示す装置を用いて測定した。この場合は、表面を機械研削した $2t \times 25w \times 40l$ mm の矩形試験片を用い、白金対極に面した側の中央部約 3 cm^2 を除き防食テープで覆い、アセトン洗浄後、実験に供した。

破断後の試験片破面および未破断き裂断面は、X線マイクロアナライザー (EPMA) により観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 海水温度の影響

30°C および 4°C 人工海水中での溶接継手試験片についての実験結果を室温大気中での結果とともに Fig. 5 に示す。これによると人工海水中腐食疲労強度は大気中疲労強度に比べてかなり低いことがわかる。しかし、温度の影響は明らかではない。

本研究では、後述の実験も含め結果のばらつきが比較的大きい。この原因は、溶接継手試験片の場合、止端部など個々の形状が完全に同一とはいえないためであると思われる。このようなばらつきは実構造物においても予想され、試験結果をもとに構造物の安全性を評価する場合に安全率をどのように見込むかという非常に重要な問題に関係する。しかし、本報においてはこの問題は取り

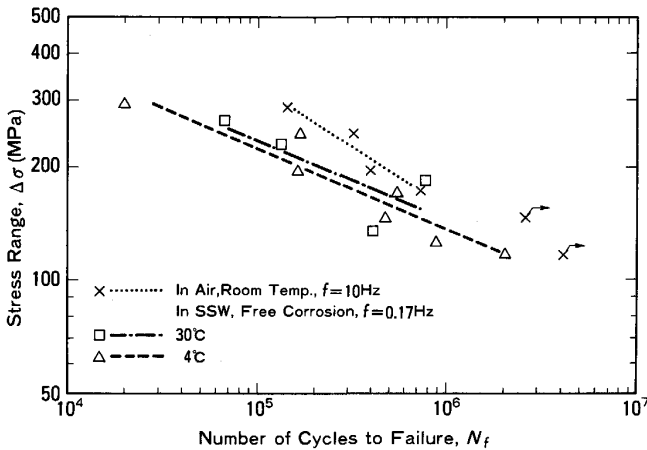


Fig. 5. Effect of seawater temperature on fatigue strength of welded joint specimens.

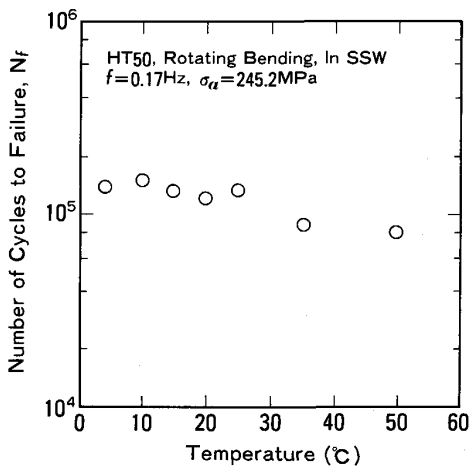


Fig. 6. Effect of seawater temperature on fatigue strength of smooth specimens under rotating bending load.

扱わない。ここでは、参考に、溶接継手試験片と比較して結果のばらつきが小さい平滑試験片(母材)を用いた人工海水中回転曲げ疲労試験を行った。その結果を Fig. 6 に示す。この図によると、同一応力振幅(245.2 MPa)の腐食疲労寿命におよぼす温度の影響は、25~50°C の範囲では認められるが、4~25°C の範囲ではほとんど認められない。

以上より、本実験範囲での温度の影響は、結果のばらつきの程度と比較して無視できるほど小さいと考えられる。

3.2 低温海水中における [DO] の影響

溶接継手試験片についての溶存酸素濃度 [DO] = 0 ppm および 5 ppm の 4°C 人工海水中での実験結果を大気開放状態の 4°C 人工海水中および室温大気中での結

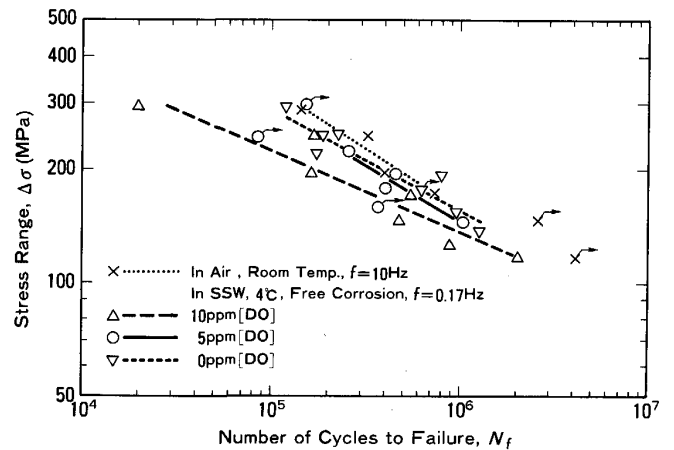


Fig. 7. Effect of dissolved oxygen contents on fatigue strength of welded joint specimens in 4°C seawater.

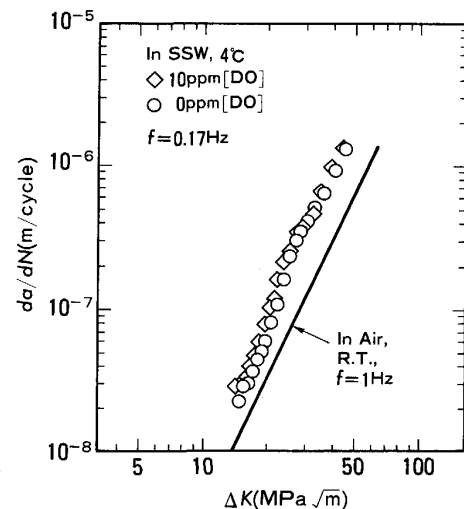


Fig. 8. Effect of dissolved oxygen contents on fatigue crack growth rates in 4°C seawater.

果とともに Fig. 7 に示す。なお、大気飽和状態における 4°C の $[\text{DO}]$ は 10 ppm であつた。これによると、 $[\text{DO}]$ を低減したことにより腐食疲労強度は増大し、大気中疲労強度に近づいたことがわかる。

$[\text{DO}] = 0\text{ ppm}$ および 10 ppm の 4°C 人工海水中での疲労き裂伝播速度測定結果を Fig. 8 に示す。これによると、応力拡大係数範囲 $\Delta K > 15\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の領域では、き裂伝播速度への $[\text{DO}]$ の影響は小さいことがわかる。なお、引張強度 667 MPa の高張力鋼の 25°C 人工海水中疲労き裂伝播試験においても同様の結果が得られている⁷⁾。

従つて、 $[\text{DO}]$ の低減による疲労寿命の増大は、ある程度長くなつてからのき裂の伝播速度は $[\text{DO}]$ に依存しないのでき裂の発生の遅延、あるいはき裂が短い間の伝播速度の低下によるものであるといえる。これは、酸素拡散型カソード反応が $[\text{DO}]$ の低減によつて抑制されて腐食速度が低下したことが原因であると考えられる。

3.3 低温、低 $[\text{DO}]$ 海水中におけるカソード防食の影響

溶接継手試験片を用いた $[\text{DO}] = 5\text{ ppm}$ の 4°C 人工海水中における印加電位 -0.8 、 -1.0 及び -1.2 V の実験結果を Fig. 9 に示す。比較のために、自然腐食状態での実験結果及び室温大気中疲労実験結果も示した。

この図によると、長寿命域において、いわゆる適正防食電位付近の -0.8 V および -1.0 V でのカソード防食は有効であり、大気中と同等あるいはそれ以上の疲労強度をもたらしたことがわかる。ただし、短寿命域ではカソード防食の効果はまったく認められない。これらの結果は、すでに報告した大気開放状態の 4°C 人工海水中における実験結果⁴⁾ と同様であり、適正電位付近でのカ

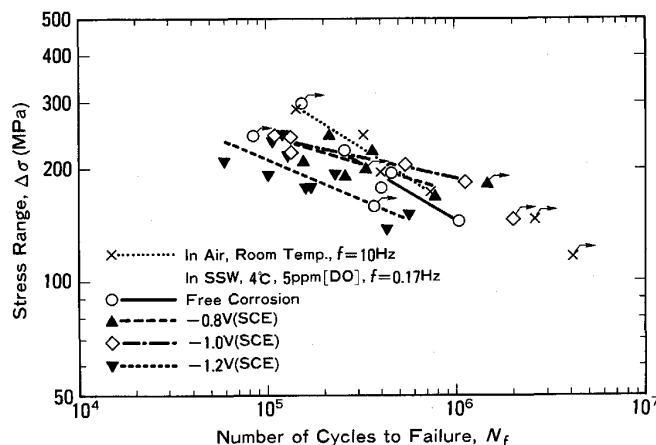


Fig. 9. Effect of applied potentials on fatigue strength of welded joint specimens in 4°C seawater containing 5 ppm $[\text{DO}]$.

ソード防食は、深海域で予想される低 $[\text{DO}]$ 環境においても、高張力鋼溶接継手の長寿命域での腐食疲労強度改善に有効であるといえる。

高張力鋼の海水中疲労き裂伝播速度におよぼすカソード防食の影響については、すでに多くの実験結果が報告されている。それらによると、比較的高い ΔK の領域では、カソード防食によつてき裂伝播速度を低下させることは期待できない⁸⁾。ただし、比較的低い ΔK 領域では、カソード防食は有効でありき裂伝播速度は大気中程度にまで低下する⁹⁾。

本実験結果においてカソード防食が長寿命域での腐食疲労強度改善をもたらした理由は、つぎのように推測される。まず、アノード溶解の抑制によつて、前節の $[\text{DO}]$ 低下の場合と同様に、き裂発生および比較的小き裂が短く ΔK が低い期間のき裂伝播を抑制したと考えられる。さらに、EPMA による分析によると、印加電位 -0.8 V では Photo. 1 に示すように Ca 、 O を含む沈殿物が破面に点在しており、また、 -1.0 V では、Photo. 2 に示すように Mg 、 Ca 、 O 、 C を含む沈殿物が破面を覆つ

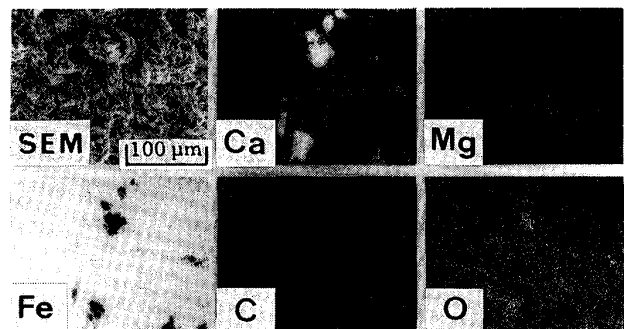


Photo. 1. EPMA images of fracture surface of welded joint specimen tested at -0.8 V (SCE) in 4°C synthetic seawater containing 5 ppm $[\text{DO}]$.

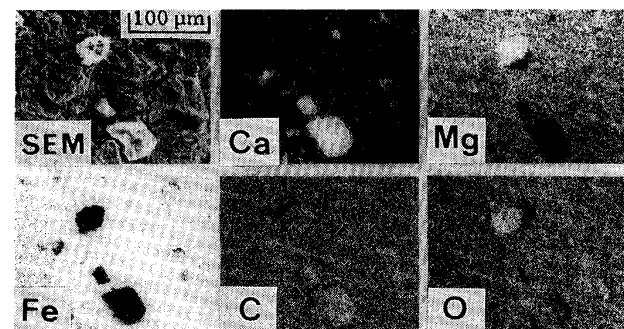


Photo. 2. EPMA images of fracture surface of welded joint specimen tested at -1.0 V (SCE) in 4°C synthetic seawater containing 5 ppm $[\text{DO}]$.

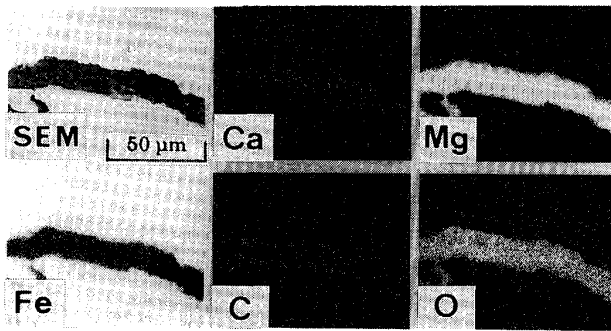


Photo. 3. EPMA images of fatigue crack at 0.3 mm from crack mouth in midwidth cross section of welded joint specimen tested at -1.0 V (SCE) in 4°C synthetic seawater containing 5 ppm [DO].

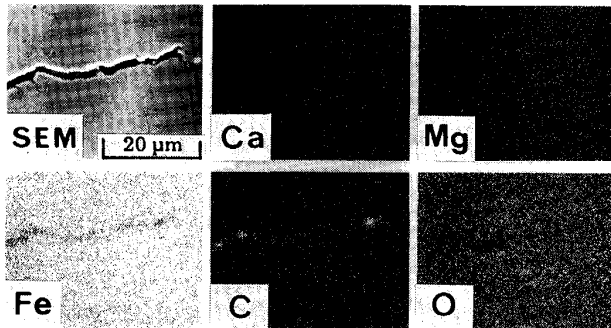


Photo. 4. EPMA images of fatigue crack at crack tip in midwidth cross section of welded joint specimen tested at -1.0 V (SCE) in 4°C synthetic seawater containing 5 ppm [DO].

ていた。これらがき裂閉口現象、いわゆるくさび効果¹⁰⁾を引き起こして、き裂伝播寿命を増加させた可能性がある。

Fig. 9 中、印加電位 -1.0 V, $N_f = 2.0 \times 10^6$ 回の矢印付きデータは未破断のまま実験を中止したものであるが、試験部には試験片中央部断面で長さ 2.4 mm 以上のき裂が存在した。このき裂内を EPMA によつて観察したところ、き裂開口部から中央部にかけて Photo. 3 に示すように Mg および O を主成分とし、わずかに Ca や C を含む沈殿物が詰まっていることが確認された。ただし、き裂先端部には、Photo. 4 に示すようにこのような沈殿物は見られなかった。従つて、石灰質沈殿物は、き裂先端部を完全に閉じさせるのではなく、き裂後方に詰まることによつてき裂進展に有効な ΔK を減少させ、き裂伝播速度を低下させる働きをされると考えられる。

一方、Fig. 9 によると印加電位 -1.2 V での腐食疲労強度は、ばらつきは大きいものの全寿命域で自然腐食状態より低下した。実験中は H_2 と思われる多量の気泡が

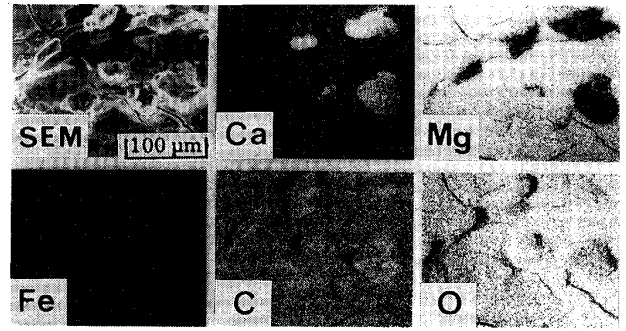


Photo. 5. EPMA images of fracture surface of welded joint specimen tested at -1.2 V (SCE) in 4°C synthetic seawater containing 5 ppm [DO].

発生した。破面は Photo. 5 に示すように Mg, O, C を含む石灰質沈殿物で全面が覆われ Ca も検出された。

高張力鋼の大気開放人工海水中疲労き裂伝播特性によよぼすカソード防食の影響について報告された実験結果⁸⁾¹¹⁾によると、比較的高 ΔK 領域におけるき裂伝播速度は印加電位を卑にするほど大きい。ところが、 -1.2 V の場合の石灰質沈殿物の生成量は -1.0 V の場合と比較して明らかに多く、き裂閉口現象によつてき裂伝播速度を低下させる効果ははるかに大きいはずである。したがつて、印加電位 -1.2 V においては石灰質沈殿物によるき裂伝播速度低下効果を打ち消し、さらにき裂伝播速度を増大させる現象が起こつたと考えられる。これは、電位を卑にするほど発生量が増加する水素の寄与と考えられる。

ところで、SM41, SM50 および HT80 の切欠き付き丸棒試験片を用いた大気開放人工海水中疲労試験においても、印加電位 $-0.8 \sim -1.0$ V (SCE) では寿命特性が改善された一方、 $-1.2 \sim -1.4$ V (SCE) では自然腐食状態と同等かそれ以下にまで寿命が低下したと報告されている¹²⁾。それに対し、引張強度 667 MPa 高張力鋼平滑丸棒試験片を用いた大気開放人工海水中疲労試験では、印加電位 -1.2 V (SCE) においても疲労強度は改善され、大気中と同等になつている¹¹⁾。本実験結果と比較すると、溶接止端部や切欠きのような応力集中部を有する試験片の場合には過防食の悪影響が現れ、応力集中部のない場合には過防食の悪影響が現れないと予想される。このことから、き裂の伝播だけではなく、応力集中部からのき裂の発生に対しても過防食の悪影響があると考えられる。したがつて、海洋構造物において犠牲アノード配置を設計する場合には、格点部など応力集中部からは犠牲アノードを遠ざけ、いわゆる適正防食電位程度になるようにし、平滑部分にアノードを設置すべきであるといえる。

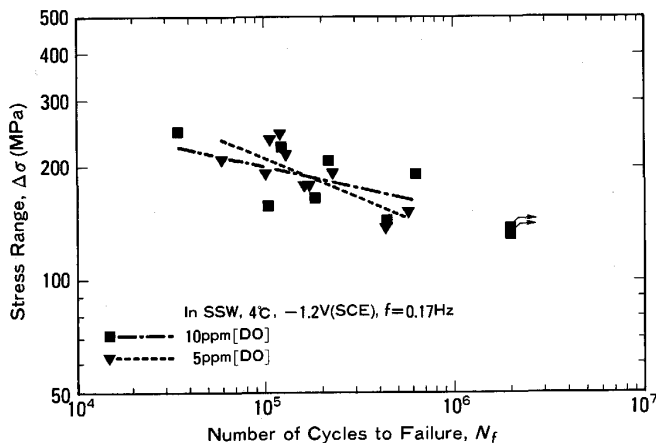


Fig. 10. Effect of dissolved oxygen contents on fatigue strength of welded joint specimens at -1.2 V (SCE) in 4°C seawater.

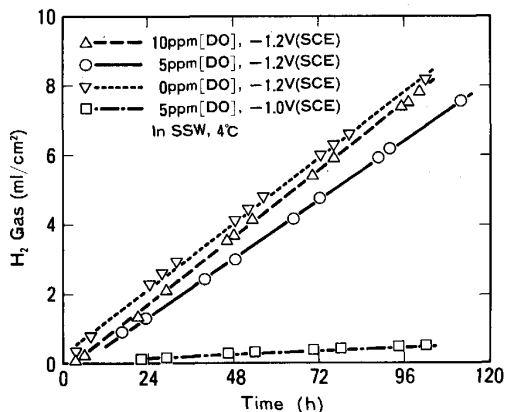


Fig. 11. Effect of dissolved oxygen contents on amount of hydrogen gas evolved during cathodic protection in 4°C seawater.

3.4 過防食電位における低温海水中 [DO] の影響

4°C 人工海水中印加電位 -1.2 V での大気開放状態 ([DO]=10 ppm) および [DO]=5 ppm における実験結果を Fig. 10 に示す。ともにばらつきはかなり大きいですが、両者の間に有意差は認められない。

-1.0 , -1.2 V での発生 H_2 量測定結果を Fig. 11 に示す。本実験の範囲では、 -1.2 V での発生 H_2 量は、[DO] に関係なく約 $0.08 \text{ ml/cm}^2\cdot\text{h}$ であつた。これに対し、 4°C 人工海水中、[DO]=5 ppm における -1.0 V での発生 H_2 量ははるかに少なく、約 $0.004 \text{ ml/cm}^2\cdot\text{h}$ であつた。カソード反応で発生する水素のうちの一部が鋼中に侵入し、残りが H_2 ガスとなるであろうが、 H_2 ガスとなる量が多いほど鋼中に侵入する水素量も多いと考えられる。印加電位 -1.2 V における H_2 発生量が [DO] の影響をほとんど受けないことから鋼中への水

素侵入量にも [DO] の影響はないと推測される。なお、P. E. HUDSON ら¹³⁾ は、カソード防食されている鋼材の水素透過の実験結果をもとに、酸素の存在は水素の発生、吸収を妨げず、与えられたカソード電位に達するのに必要な電流を増加させるだけであると述べている。

4. 結 論

本研究では、高張力鋼溶接継手の人工海水中疲労強度に及ぼす温度、溶存酸素濃度の影響、及び低温かつ低溶存酸素濃度におけるカソード防食の影響を明らかにするためのいくつかの実験を行い、以下のような知見を得た。

(1) 大気開放海水中自然腐食状態における疲労強度は大気中疲労強度にくらべてかなり低い。

(2) 海水中自然腐食状態における疲労強度におよぼす海水温度の影響は $4\sim 30^{\circ}\text{C}$ の範囲で無視できるほど小さい。

(3) 海水中自然腐食状態においては溶存酸素の低下によつて疲労強度は増大し、大気中疲労強度に近づく。

(4) 溶存酸素濃度の低い海水中における $-0.8\sim -1.0$ V でのカソード防食は、大気開放海水中と同様に比較的長寿命域では非常に有効であり、大気中以上の疲労強度が期待できる。

(5) 過防食電位 -1.2 V でのカソード防食は、溶接部の疲労強度を低下させる。

文 献

- 1) H. H. UHLIG 著, 松田誠吾, 松島 巖訳: 腐食反応とその制御 (第2版) (1984), p. 87, p. 91 [産業図書]
- 2) S. C. DEXTER and C. CULBERSON: Mater. Performance (1980年9月), p. 16
- 3) 蜂谷 実: 防食技術, 34 (1985), p. 635
- 4) R. EBARA, Y. YAMADA, K. FUJISHIMA, T. NAWATA and I. SOYA: Proc. 5th Int. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Sympo. (OMAE), Vol. II, Tokyo (1986年4月), p. 288
- 5) A. SAXENA and S. J. HUDAK, Jr.: Int. J. Fracture, 14 (1978), p. 453
- 6) ASTM: E647-81
- 7) 大内博史, 小林順一: 第34回腐食防食討論会講演集, (1987), p. 127
- 8) H. G. MORGAN: Proc. Int. Conf. Marine Structures, ST5.1, Paris (1981年10月)
- 9) 松岡三郎, 下平益夫, 升田博之, 竹内悦男, 西島 敏: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 707
- 10) 駒井謙治郎, 野口昌利: 日本機械学会論文集 (A編), 52 (1986), p. 1770
- 11) 小林順一, 武子康平, 関口 進, 山戸一成, 轟 理市: 溶接学会全国大会講演概要, 39 (1986), p. 392
- 12) 石黒隆義, 轟 理市, 関口 進, 鉄と鋼, 65 (1979), A197
- 13) P. E. HUDSON, E. S. SNAVELY, Jr., J. S. PAYNE, L. D. FIEL and N. HACKERMAN: Corrosion, 24 (1968), p. 189