

討20

海洋構造物用鋼材の長時間腐食疲労強度

住友金属工業㈱ 中央技術研究所

○平川賢爾 北浦幾嗣

1. 緒 言

現在、腐食疲労に関して現象的に知られている特徴をまとめてみると次のようになる。

- (1) 大気中で疲労限度を示す鉄鋼材料も、腐食環境下では疲労限度を示さず、疲労強度は応力繰返し数とともに低下する。
- (2) 大気中の場合よりも腐食疲労強度は応力繰返し速度（すなわち、腐食環境にさらされる時間）の大きな影響を受ける。
- (3) 腐食疲労き裂は、疲労によって生じたすべり線あるいは腐食ピットを起点として進展している。したがって、き裂進展は結晶粒内が普通である。
- (4) 炭素鋼、低合金鋼はいずれも腐食疲労に敏感であって、微量元素の添加による腐食疲労強度の向上は期待できないことが多い。しかし、耐食性高合金鋼はやはり腐食疲労に対しても有利である。

以上の現象を説明するための、腐食疲労の機構については、

- (1) 腐食ピットによる応力集中源の発生
- (2) 繰返し応力（疲労）で生じた局所的な塑性変形（すべり線）がAnodeとなり、他の部分がCathodeとなって、腐食反応が促進される。
- (3) 表面皮膜の繰返し応力による破断部分が電気化学的にAttackされる。
- (4) 吸着による表面エネルギーの低下がき裂発生を促進する。
- (5) 切欠底（き裂）が繰返し応力を受けると、切欠底は切欠壁面に対してAnodeとなり、溶解によりき裂が進展しやすくなる。
- (6) Extrusion-Intrusion部の溶解による促進。

などの説があり、実際にはこれらが重畳した形で、腐食による疲労強度の低下をもたらしているものと考えられる。しかし、いずれにせよ腐食反応と疲労が同時に作用する重畳効果が重要であって、腐食されたものが疲労するのとは著しく異っている。

さて、以上に述べたように、腐食疲労強度は応力繰返し数と腐食にさらされる時間が重要であり、応力繰返し速度の影響が著しく大きい。しかしながら、従来行なわれた研究の多くは1000 cpm程度の早い速度での加速試験が行なわれており、設計に使用しうる定量的なデータは極めて小ないのが現状である。すなわち、波浪により繰返し荷重を受ける海洋構造物に作用する応力は7～10 cpm程度であり1000 cpmのデータでは同一の繰返し数までの腐食時間は1/100にすぎない。

腐食疲労の機構が定量的に十分に解明されていない現状では、加速試験は不可能であり、上の状況に対する設計データを得るためには、実際に近い環境での長時間の試験が必要である。

そこで、著者らは昭和45年に試験装置を設置して以来、約10年に亘り長時間低速度腐食疲労データの蓄積を行なって来た。ここでは、これまでに得られたデータの一部を報告し討論に供したい。

2. 試験方法

- (1) 試験装置は、腐食液中で板状試験片に両振の繰返し曲げ応力を与える方法である。負荷装置を図1に示す。低速度試験であるので、同時に約100枚の試験が行なえるようにした。試験片の形状を図2

に示す。

(2) 腐食液は3%食塩水で、図1の容積120ccの各試験片浸漬容器に毎分2ccの割合で循環させた。

(3) 電気防食は腐食液中に試験片と黒鉛電極を浸漬し、外部電源を接続して防食電位を与える方法である。

(4) 応力波形は正弦波で、繰返し速度は6, 30 cpmである。

(5) 試験は室温で行ない、温度制御は行なわなかった。

(6) 供試試験片の試験条件、供試材の機械的性質と化学成分を表1, 2に示す。

表1. 試験条件

Materials	Surface finish	Environment		
		Air	3% salt water + cathodic protection	3% salt water
SS 41	As-roll	○	○	○ ●
	Sand blast	○	○	-
SM 50A	as-roll	○	○ ●	- ●
	Sand blast (1)	○	○	○
	Sand blast (2)	○	-	○
	Al coating	○	-	○ ●
	Zn plating	-	-	○
	Notched	○	●	●
Anti-corrosion	As-roll	○	○ ●	○ ●
	Sand blast	○	○	-
Anti-corrosion	Sand blast	○	○	○
SUS 304	Polish	○	-	○
SUS 316	Polish	○	-	○
DP 3	Polish	○	-	○

○ 30 cpm

● 6 cpm

表2. 供試材の化学成分と機械的性質

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Y.P. kg/mm ²	T.S. kg/mm ²	E.L. %
SS41	0.18	0.01	0.35	0.006	0.011	-	-	-	-	30.6	42.9	36.8
SM50	0.17	0.35	1.35	0.023	0.025	-	-	-	-	53.0	61.6	23.7
HT80	0.12	0.33	0.81	0.008	0.008	0.95	0.44	0.40	0.04	79.0	84.0	32.0
Drill pipe	0.35	0.16	1.60	0.008	0.007	-	0.01	0.13	0.058	64.0	80.0	23.0
HT100	0.09	0.11	0.74	0.011	0.010	2.46	0.57	0.51	0.06	97.2	101.7	16.0
Anti-corrosion A	0.08	0.58	0.80	0.108	0.013	0.25	0.35	-	Cu 0.35	40.4	50.1	35.0
Anti-corrosion B	0.09	0.53	0.94	0.010	0.010	-	-	-	Cu 0.27	35.9	51.1	39.4
SUS304	0.06	0.63	0.99	0.030	0.007	9.27	18.45	-	-	28.0	62.0	61.0
SUS316	0.05	0.54	0.97	0.027	0.004	12.20	16.20	2.16	-	29.0	59.0	57.0
DP 3	0.02	0.60	0.93	0.018	0.005	6.34	25.20	3.27	W 0.30	62.0	83.1	36.0

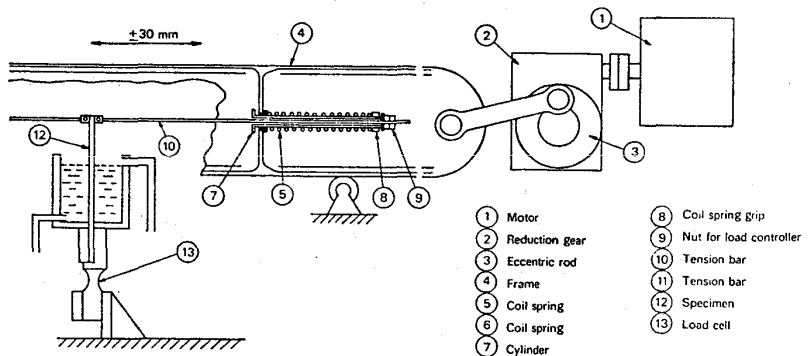
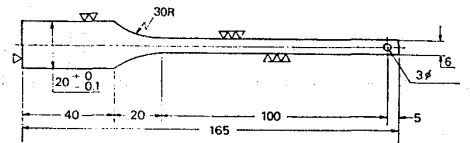
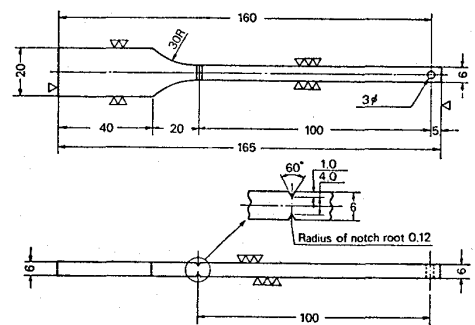


図1. 腐食疲労試験装置



(a) 平滑試験片



(b) 切欠試験片

図2. 試験片の形状

3. 疲労試験結果

代表的なS-N曲線を図3~7に示す。図から次の一般的傾向が認められる。

- (1) 炭素鋼，低合金鋼の腐食疲労強度は，いずれも大気中の強度より低下しており，低サイクル域ではその低下量は小さく，高サイクル域で大きい。
- (2) 2×10^6 サイクルで疲労強度は急に低下しており，S-N曲線が2段になる傾向を示す。
- (3) 電気防食(-1V)は極めて有効で，3%食塩水中でも大気中の強度と余り変らない。
- (4) Al溶射，Znメッキも有効である。
- (5) 6 cpmと30 cpmで得られる強度は余り変らず，3%食塩水中の強度は30 cpmで飽和する傾向にある。
- (6) ステンレス鋼304，316，二相合金鋼DP3は炭素鋼と異って，腐食疲労に対して著しい耐食性を有する。

4. 引張強さと腐食疲労強度

図6に見られるようにHT鋼は軟鋼よりも低サイクル域では高い強度を示すが， 10^6 域では引張強さによらず，応力振幅で 10 kg/mm^2 程度となる。

図8は引張強さと 3×10^6 回の疲労強度を示したもので，炭素鋼・低合金鋼は引張強さによって変らず，ステンレス鋼，二相合金鋼は腐食疲労強度も大気中の強度と同様に引張強さとともに高くなることからわかる。

5. 切欠効果

SM50鋼の切欠効果を表3に示す。

表に見られるように，3%食塩水中の疲労強度に及ぼす切欠効果は大気中よりもかなり大きくなることがわかる。

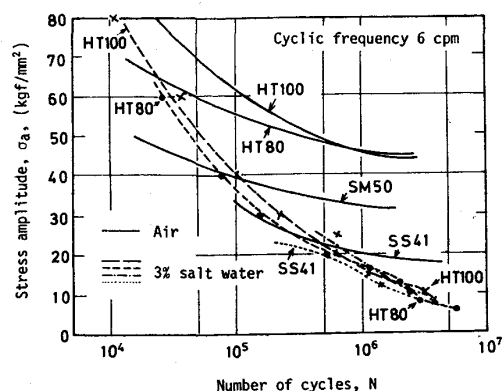


図6. 高張力鋼の疲労強度

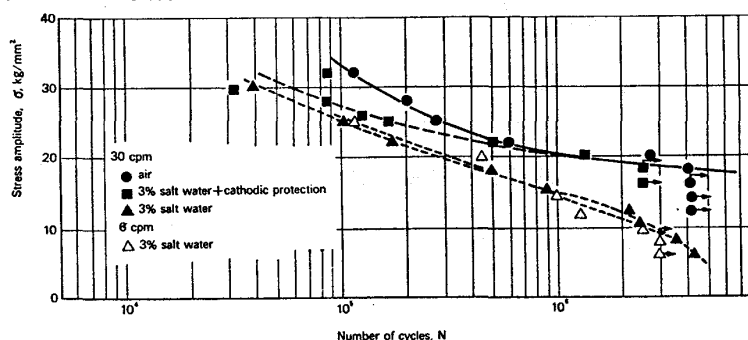


図3. SS41 (As Roll) のS-N曲線

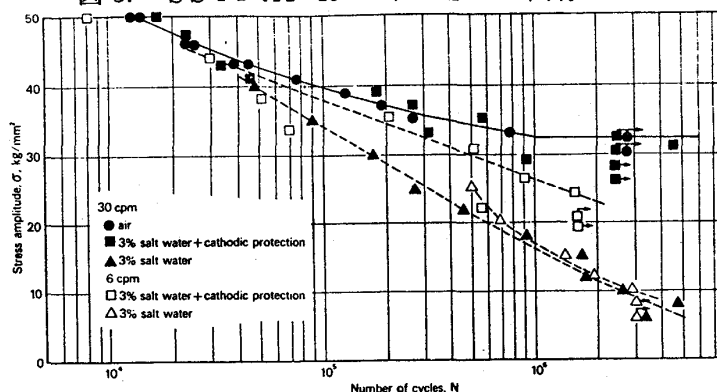


図4. SM50A (As Roll) のS-N曲線

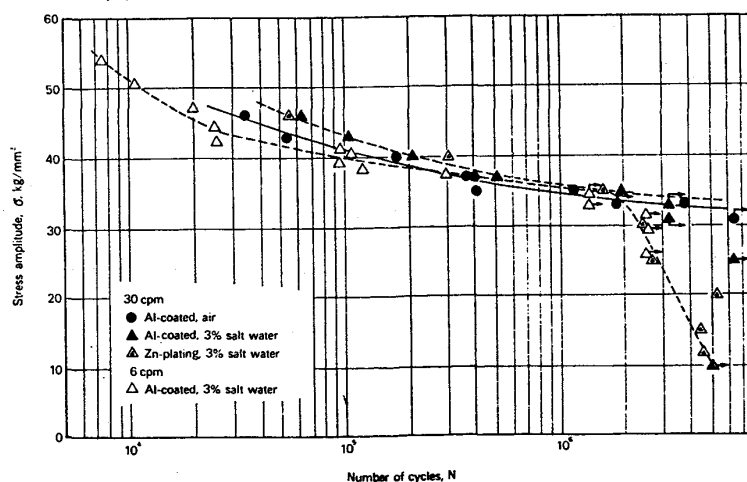


図5. Al溶射，Znメッキの効果 (SM50)

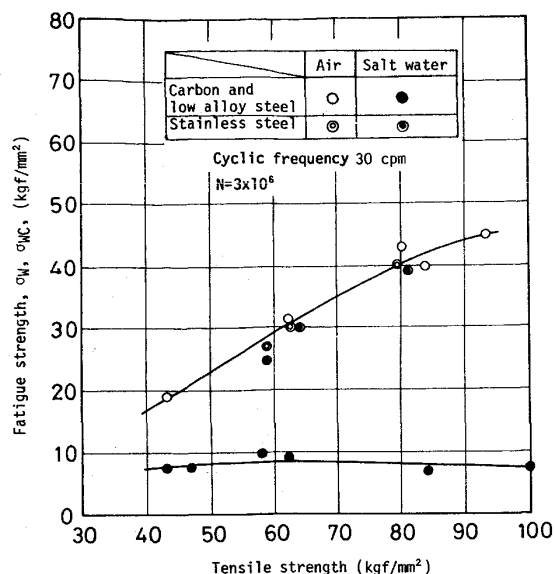


図 8. 引張強さと疲労強度

6. 耐食鋼の S-N 曲線

SUS304, 316, DP3 のいずれも低サイクル域で、大気中より 3% NaCl 中の方が短寿命になっているが、これは疲労限度域で強度が変わらないことを考えれば、3% NaCl 中の方がき裂の進展がやや早いことを示している。

なお、SUS304 の長寿命域で腐食疲労強度が低下しているのは、長時間の腐食によってピットが発生し、疲労き裂が発生し易くなったものと考えられる。

図 9 はピットを起点とする疲労破面の一例である。

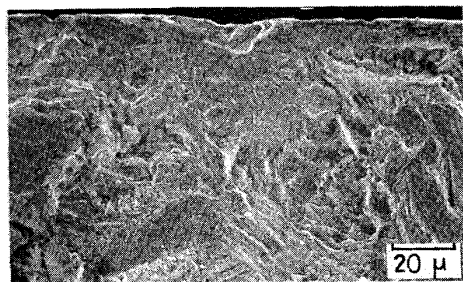


図 9. 腐食ピットから発生したき裂の例

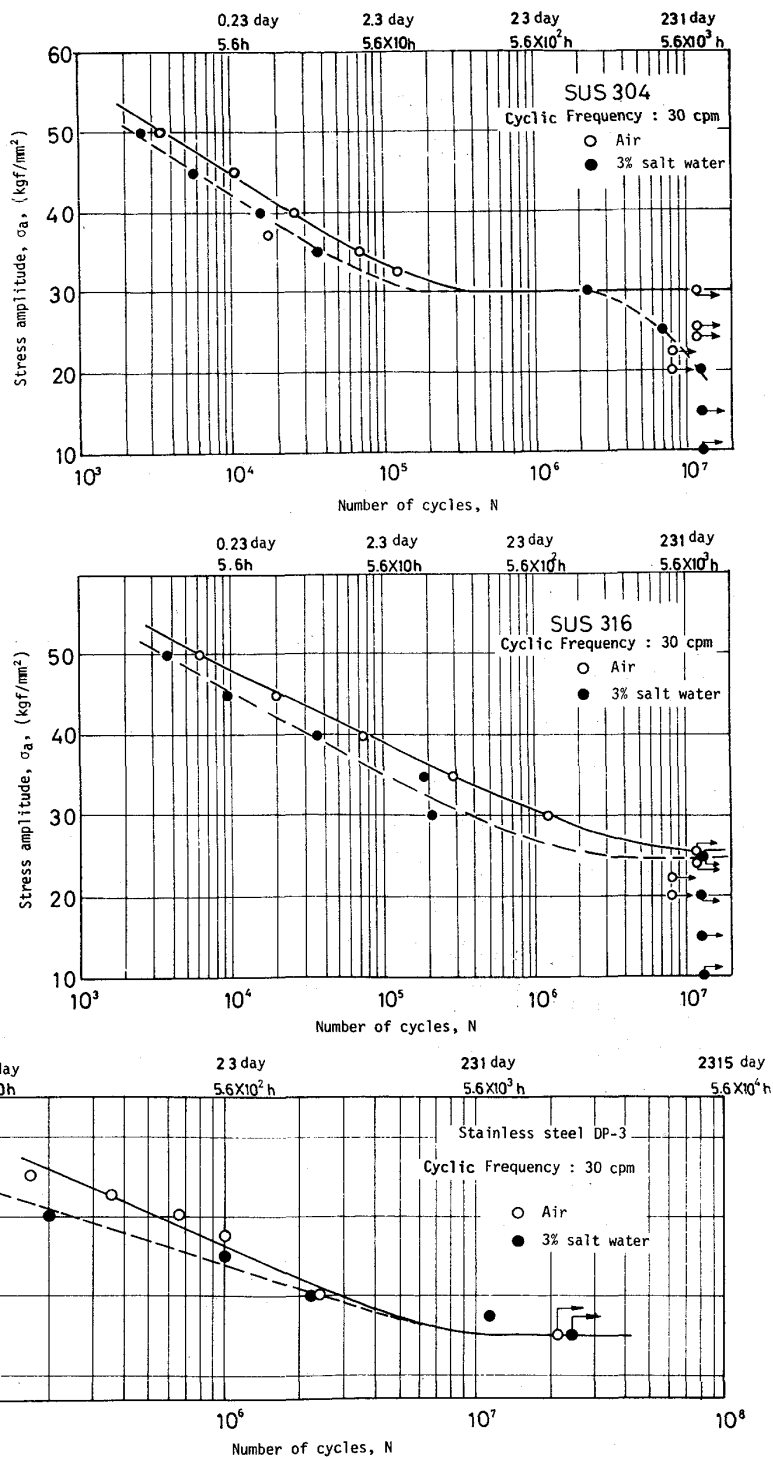


図 7. SUS 304, 316, DP3 の疲労強度

表 3. 切欠効果

Environment	Fatigue strength (kg/mm ²) (N = 2 x 10 ⁶)		Fatigue strength reduction factor* K _f
	Plain	Notch	
air	32	20	1.6
3% salt water	11.5	4	2.8
K _{fc} **	2.8	5.0	-

* K_f = fatigue strength reduction factor due to notch

** K_{fc} = fatigue strength in air/corrosion fatigue strength