

4. 腐食の影響

4.1 概要

腐食が材料の疲れ強さに大きな影響を及ぼす現象として、腐食環境下で応力が繰り返し負荷された場合に疲れ強さが著しく低下する腐食疲労がある。近年、海洋構造物が北海などの海象条件の厳しい海域で稼働するに至り、腐食疲労に対する検討が必要となってきた。

腐食疲労は、大気中における疲労とは異なり、応力繰り返し数と同時に腐食にさらされる時間の影響が大きい。腐食疲労の研究は多大な時間を要する。しかし、従来、行われた研究の多くは1,000 cpm 程度の早い加速試験であり、波浪荷重の繰り返し速度が7~10cpm と比べ、同一の繰り返し数までの腐食時間は1/100 にすぎない。このため、海洋構造物の設計に必要な低速度腐食疲労試験による研究が各方面で行われている。特にEC5ヶ国は海洋構造物用鋼の疲労および腐食疲労に関する研究を共同で実施し、海洋構造物鋼に関する国際会議 (International Conference for Steel in Marine Structures-1981. 10) に於いて、その成果を発表している。腐食疲労はPLENARY SESSION 4 EFFECTS OF MARIN ENVIRONMENT で扱われており、ここでの報告は鋼板母材および溶接部に関する研究が多く、鋼管接合部に関する研究としてはノールウェーのT継手に関する電気防食効果とオランダの鋼管継手の腐食疲労試験が発表されている。

海洋構造物の設計では腐食疲労に対し、AWS-X, BS153F などの設計曲線を修正し、使用されてきたが、その後、1981年 AWSの改訂、1982年 BS6235 の制定により新たな設計曲線が示されたが、腐食疲労について十分考慮されたものとはいえず、さらに多くの研究が望まれている。

4.2 腐食疲労挙動

腐食疲労挙動は非常に複雑なため、その研究は個々の因子をパラメータとした腐食環境下での疲労強度特性を求めている。これらの実験結果はS-N曲線として表される場合と、疲労きれつ進展速度と応力拡大係数の関係 $da/dN - \Delta K$ 曲線として表わされる場合が多い。

以下に各方面で行われた低速度腐食疲労試験 (7~10 cpm) の内、数種の実験結果を材料、環境および力学的因子に分類し示す。

(1)材料因子

図4.1 に引張強さ40~100 kg/mm² の鋼材について平川らの実験結果を示す。また図4.2 に腐食疲労強度と引張強さとの関係について平川らおよび石黒らの実験結果を一括して示す。

図4.1 では、低サイクル域において高引張力鋼は軟鋼よりも高い腐食疲労強度を示しているが、図4.2 に見られる様に高サイクル域では材料強度によらず、ほぼ同じ程度の値である。このことは引張強さが高い程、腐食疲労による強度低下の割合が大きいことを表わしている。

図4.3 に HT80 母材の腐食疲労きれつ進展曲線について、江原らの実験結果を示す。図より da/dN は大気中に比べ海水中では最大 4 倍程度加速されている。これと同様な結果が角田⁶⁾ や Vosikovsky⁵⁾ により得られている。

図4.4、図4.5 に SM50、HT80 の突合せ継手について平川らの実験結果を示す。3%食塩水中の継手の疲労強度は大気中に比べ $N = 2 \times 10^6$ 時で SM50 は35%程度低下し、また、HT80 は63%程度と大きな低下率を示している。

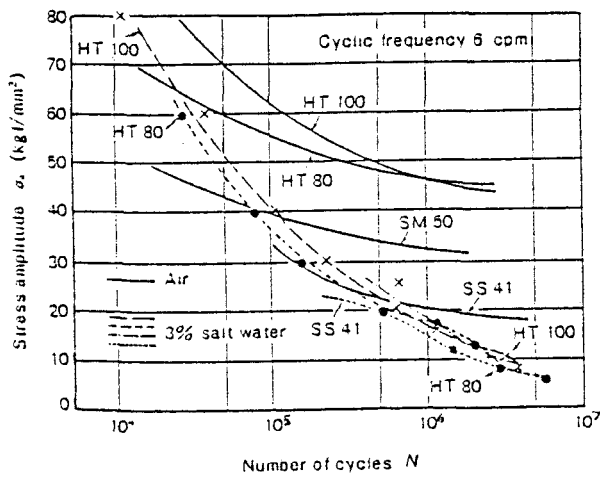


図4.1 S-N curves of carbon and low alloy steels (平川ら)

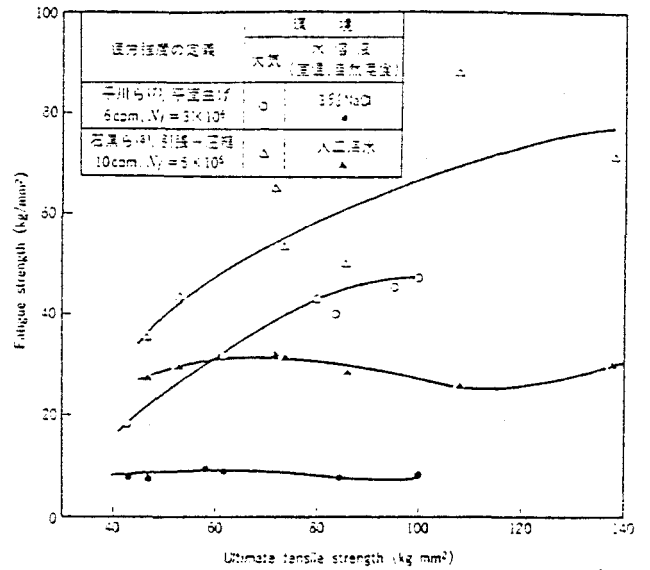


図4.2 最大引張強さと腐食疲労強度との関係 (平川ら, 石黒ら)

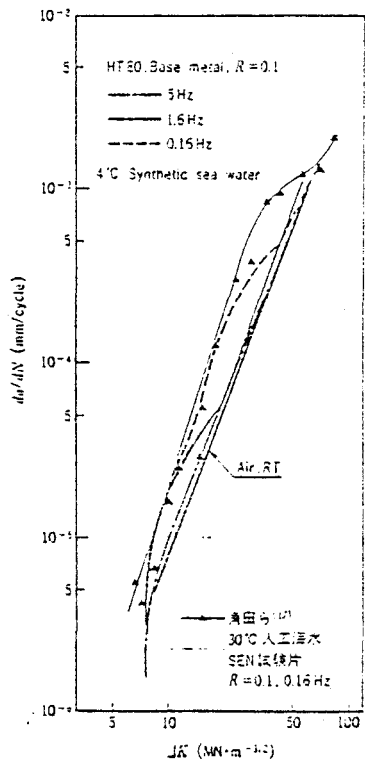


図4.3 HT80 母材の腐食疲労き裂進展曲線 (Ebara et al.)

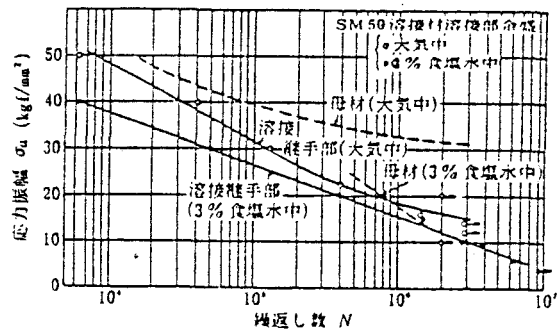


図4.4 SM50 溶接継手の腐食疲労試験結果 (平川ら)

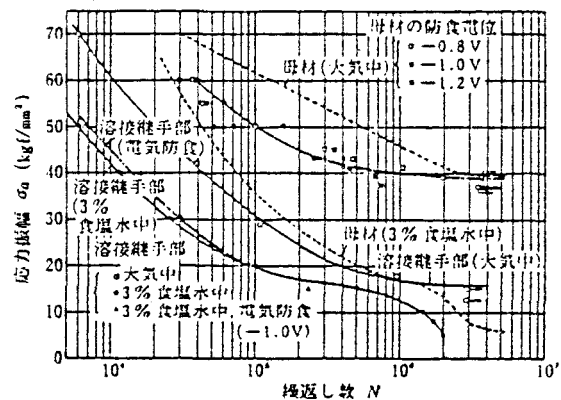


図4.5 HT80 の溶接継手および電気防食下の腐食疲労試験結果 (平川ら)

8)
 図4.6 に HT80 熱影響部の腐食疲労きれつ進展曲線について江原らの実験結果を示す。図4.3 と比較すると熱影響部の da/dN は残留応力の影響で母材よりも小さくなっている。

9)
 図4.7 にT形溶接継手のS-N曲線について、また、図4.8 に溶接ビードの仕上げ角度に対するS-N曲線について、海洋構造物用鋼に関する国際会議(1981)での発表論文を示す。図4.7 (a)と(b)を比較することにより後熱処理(PWHT)の効果があることがわかる。

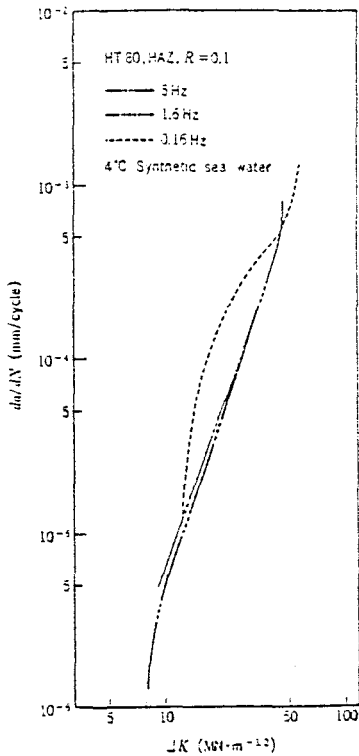


図4.6 HT80 熱影響部の腐食疲労
 きれつ進展曲線 (Ebara et al.)

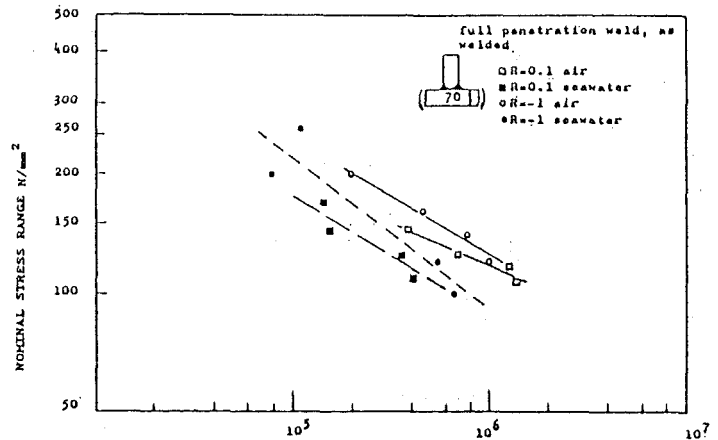


図4.7 (a) Number of cycles
 Fatigue behaviour of 70mm T-shape specimens
 (as welded) in air and seawater at stress
 ratios $R=0.1$ and $R=-1$

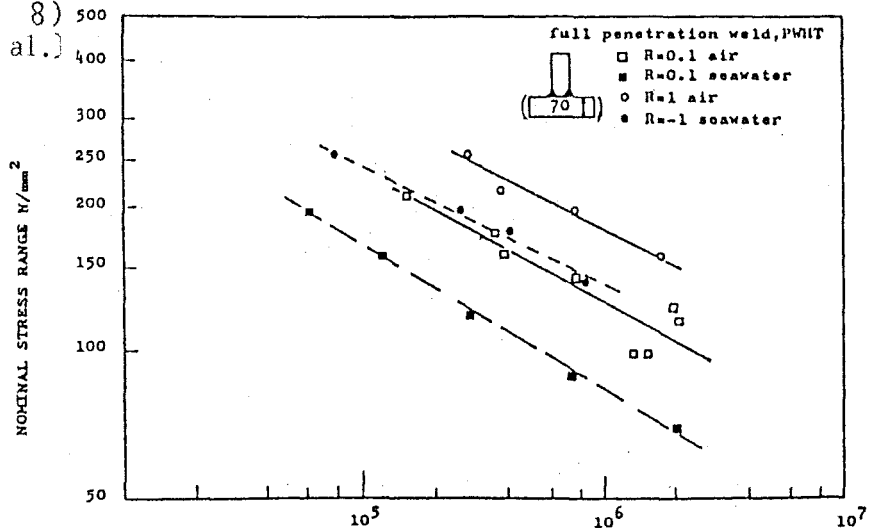
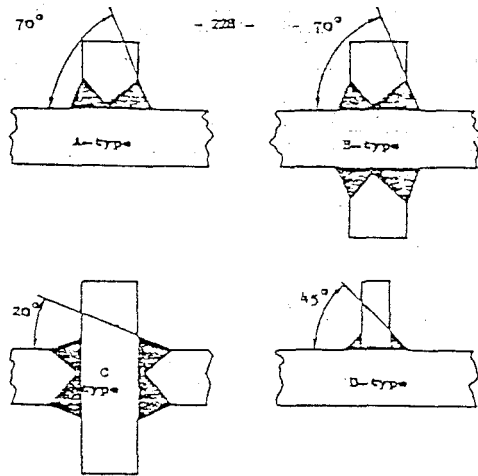
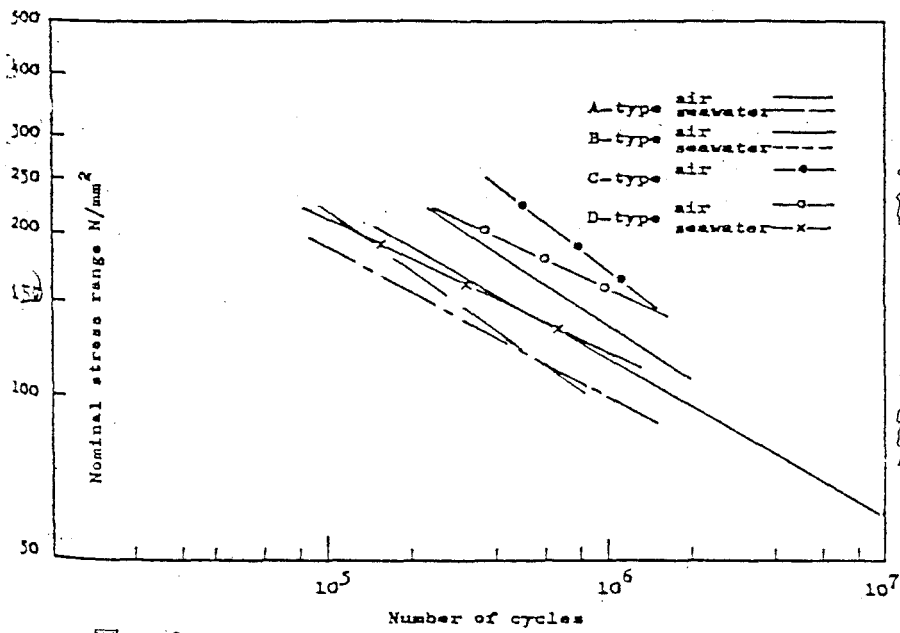


図4.7 (b) Number of cycles
 Fatigue behaviour of 70mm T-shape specimens
 (stress relieved) in air and seawater at
 stress ratios $R=0.1$ and $R=-1$.



4.8 Possible effect of Weld Transition Angle on Fatigue Performance 9)

(2) 力学的因子

10) 8)
 図 4.9 に遠藤らまた、図 4.10 に江原らが行った繰り返し速度の影響に関する実験結果を示す。図 4.9 では 1 cpm 以下の低速では速度効果は小さいことを示している。

9) 8)
 図 4.11 に海洋構造物用鋼に関する国際会議 (1981) のレポートより BS436 Grade 50D (50キロ鋼) の応力比と da/dN に関する実験結果、また図 4.12 に江原らが行った HT 80 についての同様な実験結果を示す。図 4.12 では $R=0.4$ の場合、 $R=0.1$ に比べ da/dN が 60% 程度加速されていることがわかる。

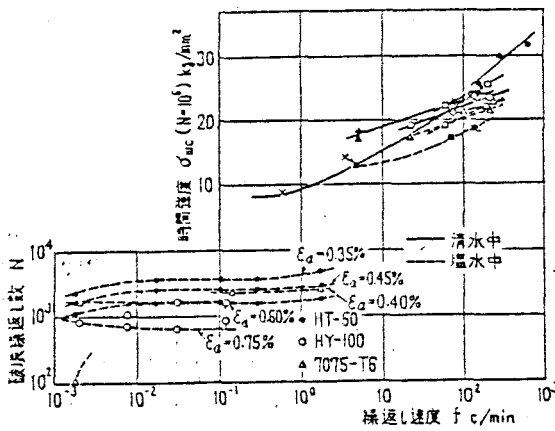


図 4.9 速度効果 (清水中, 塩水中) [遠藤ら] 10)

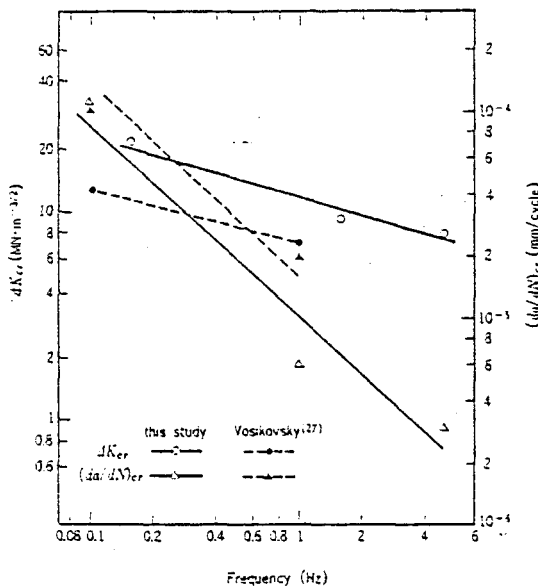
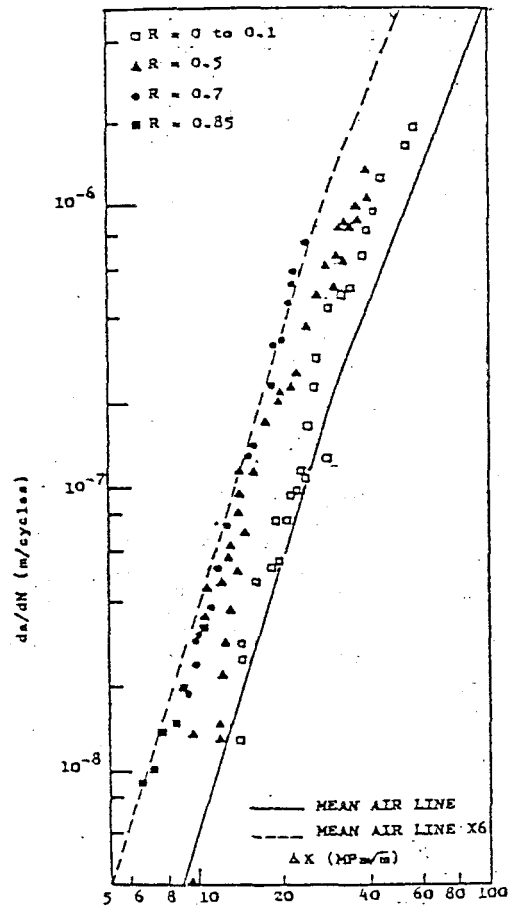


図 4.10 試験速度と ΔK_{Ic} および $(da/dN)_{Ic}$ の関係 [Ebara et al.] 2) 8)



Corrosion Fatigue crack growth in BS4360 Grade 50D Steel 38mm Plate Tests in Seawater at $R=0$ to 0.85 9)

図 4.11

図 4.13 に応力波形による影響に関し、遠藤らが行った実験結果を示す。波形A～Dは図 4.9に示した速度効果が小さい範囲にあるにもかかわらず、波形Bによる疲労強度が波形Aによる疲労強度より大きいのは、応力波形の影響を表している。図 4.14 に Vosikovsky らが行った同様な実験結果を示す。

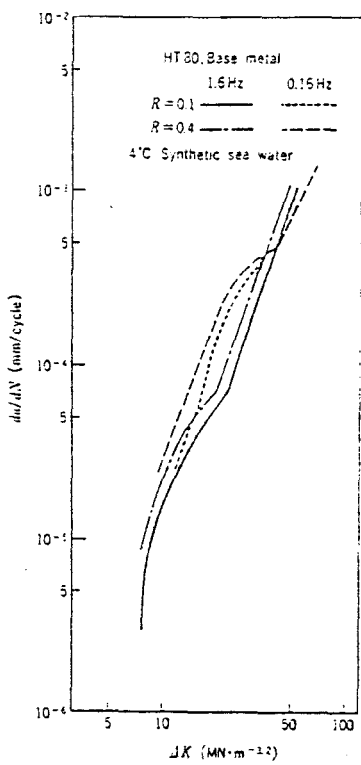


図 4.12 HT 80 母材の腐食疲労き裂進展速度に及ぼす応力比 (R) の影響 (Ebara et al.)

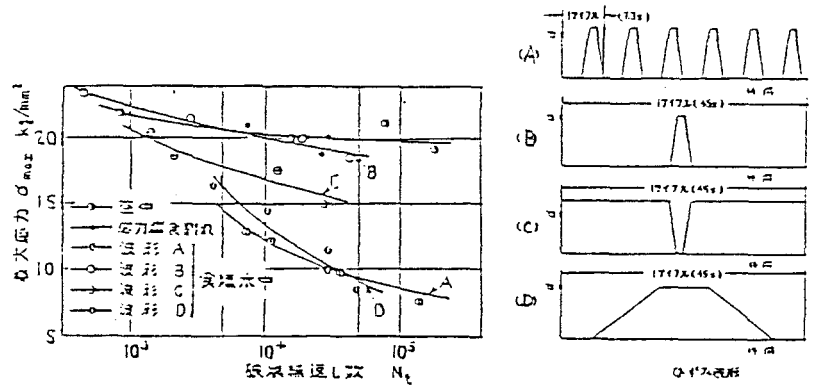


図 4.13 ひずみ波形によるS-N 曲線 (7075-T6 1%NaCl中) (遠藤ら)

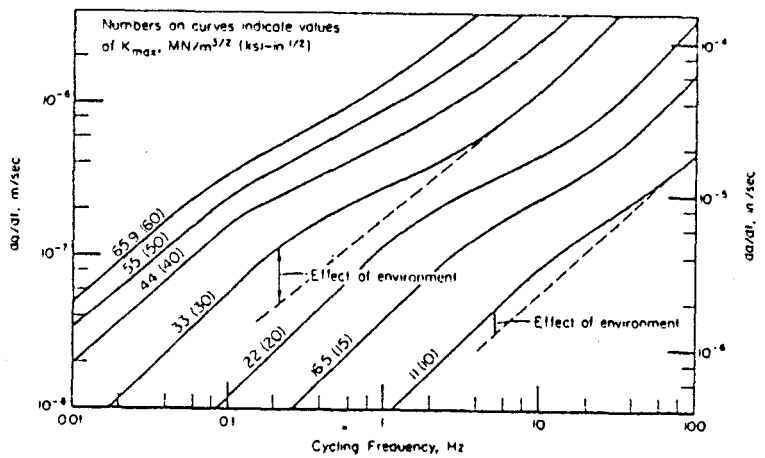
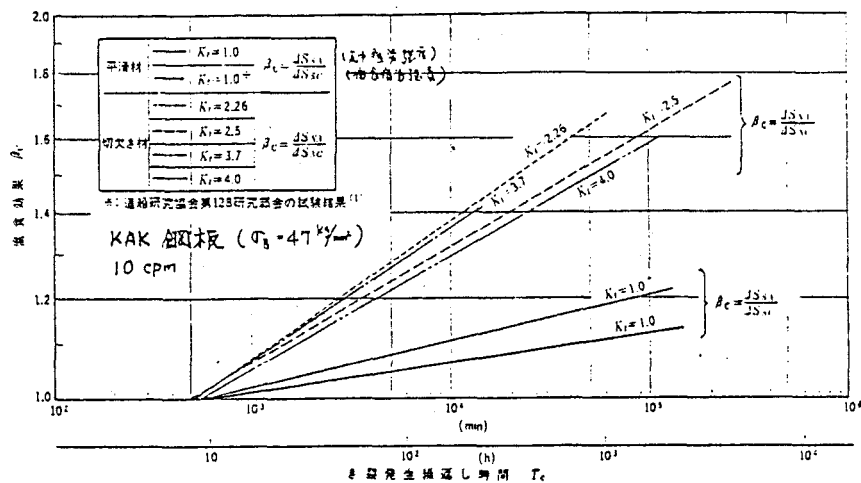


図 4.14 Effect of freely corroding saltwater on crack-growth rates in AP1X65 steel. triangular 5) waveform (up=down), R = 0.2, from data of Vosikovsky

12)
 図 4.15 に形状係数の影響に関し、永井らが行った実験結果を示す。Ktが2以上ではBcが
 12)
 ほぼ一定になる傾向があると述べている。しかし一般には腐食効果と応力集中効果は相乗する
 17)
 ものであり、このことは切欠きを有する鋼材の塩水中または海水中での疲労強度は大気中
 での疲労強度より小さいと言われている。

12)
 図 4.16 に平均応力の影響に関し、永井らが行った実験結果を示す。3%食塩水中での
 da/dNにおよぼす平均応力の影響はほとんど認められないと述べている。



12)
 図 4.15 腐食効果ときれつ発生繰り返し時間の関係 (永井ら)

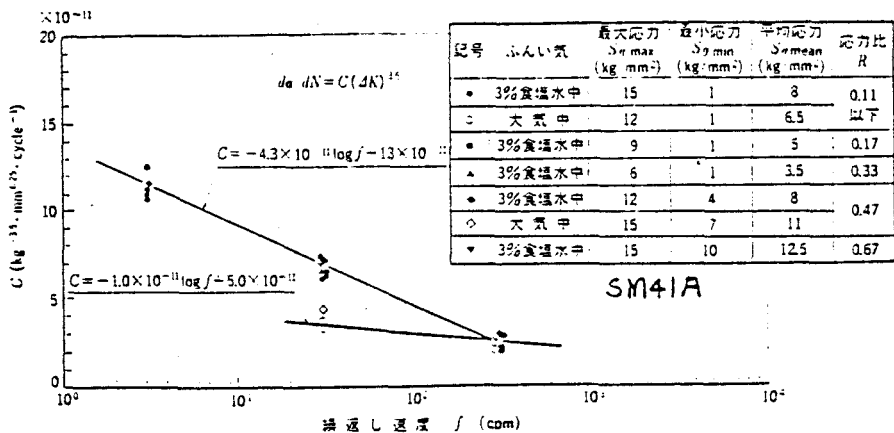


図 4.16 きれつ伝ば速度式の係数C値に及ぼす荷重繰り返し速度
 12)
 および平均応力の影響 (永井ら)

(3) 環境因子

13)

図 4.17 に Bogar らが行った自然海水と 3.5% NaCl 水溶液とでの da/dN に関する実験結果を示す。3.5% NaCl 水溶液中に比較し、自然海水中での da/dN は 66% 程度加速されている。

Bogar らはまた、17-4PH 鋼の da/dN は自然海水、NaCl 水溶液、人工海水の順に遅くなることを実験的に明らかにしている。

12)

図 4.18 に温度の影響について永井らの実験結果を示す。繰返し速度が低いほど、温度の影響が大きいことを示している。

14)

海水中の溶存酸素濃度の影響および pH の影響に関して Duquette らの研究がある。

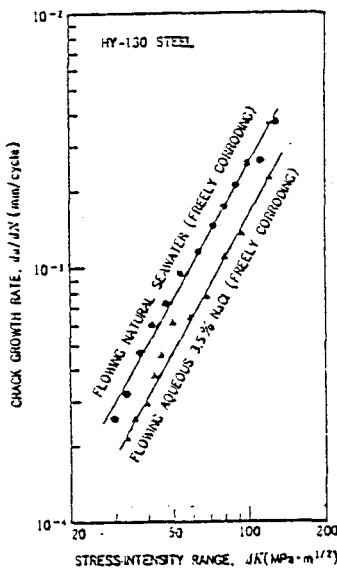


図 4.17 自然海水および 3.5% NaCl 水溶液環境中における腐食疲労き裂進展速度の相違 (Bogar ら)

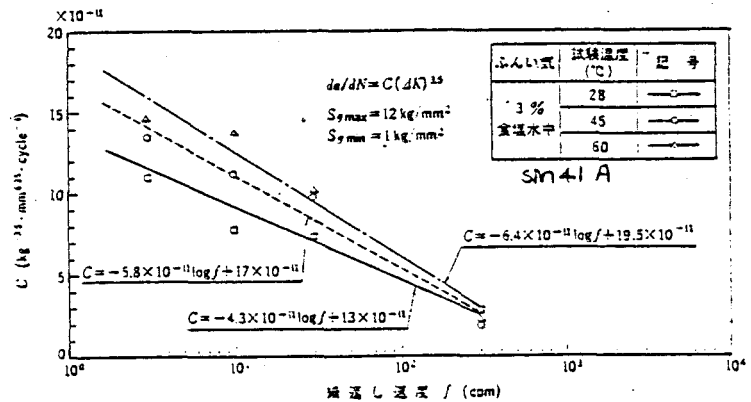


図 4.18 き裂伝ば速度式の係数 C 値に及ぼす荷重繰返し速度および温度の影響 (永井ら)

(4) 防食方法と腐食疲労

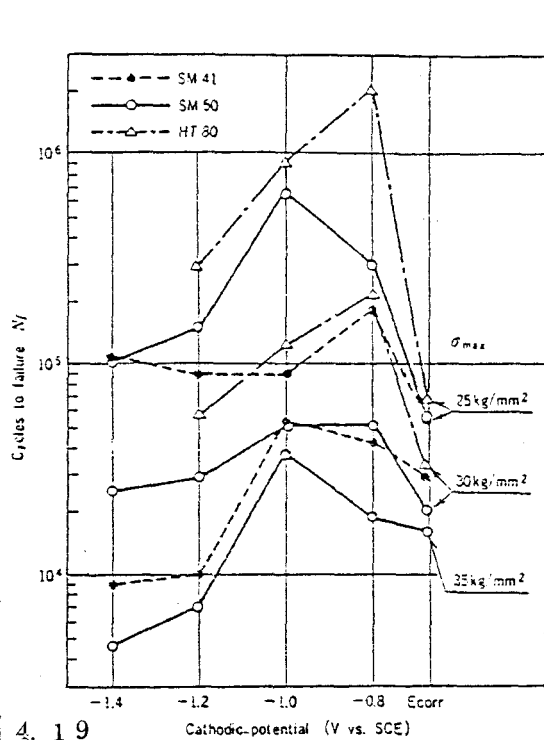
4)
図 4.19 に陰極防食法と腐食疲労寿命について石黒らの実験結果を示す。適正な陰極防食電位は $-0.8 \sim 1.0 \text{ V (SCE)}$ であると述べている。

15)
図 4.20 に Vosikovsky が行った陰極防食法と da/dN に関する実験結果を示す。 da/dN は最適防食電位下では遅くなるが、過電位下では加速される。しかし、低 ΔK 領域では防食電位の値にかかわらず da/dN は大気中とほぼ等しいと述べている。²⁾

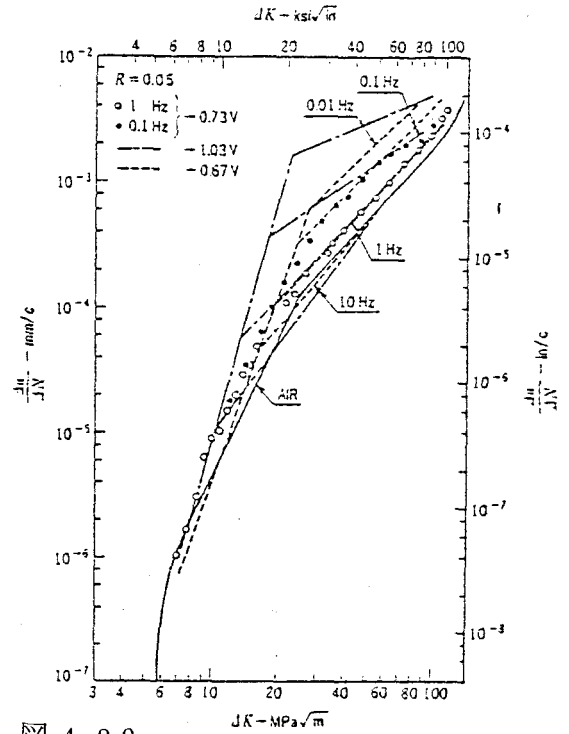
12)
図 4.21 に塗装の効果について永井らの実験結果を示す。大気中の疲労限以上の繰り返し応力下では、塗装の効果は著しいが、疲労限以下では塗膜が劣化し、塗装の効果は落ちると述べている。

9)
図 4.22 に海洋構造物用鋼に関する国際会議 (1981) でのレポートより TIG 処理、Plasma 処理等の効果に関する実験結果を示す。TIG 処理の効果は優れており、石黒らの研究でも同様な結果が得られている。⁴⁾

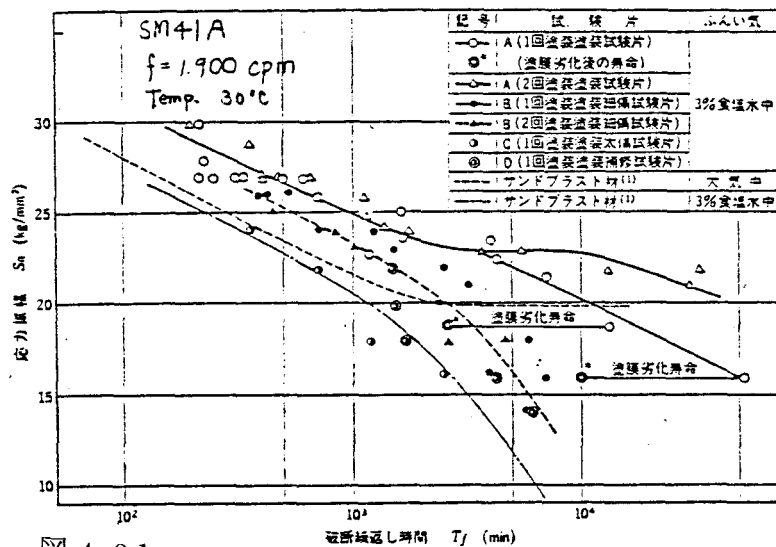
3)
図 4.23 に Al 溶射および Zn メッキの効果に関する平川らの実験結果を示す。Al 溶射や Zn メッキは有効であるが、Zn メッキは 2×10^6 回繰り返し後、Zn 被膜が溶解してしまったために腐食疲労強度は急激に低下したと述べている。



4. 19 陰極防食電位と腐食疲労寿命の関係 [石黒ら⁴⁾]

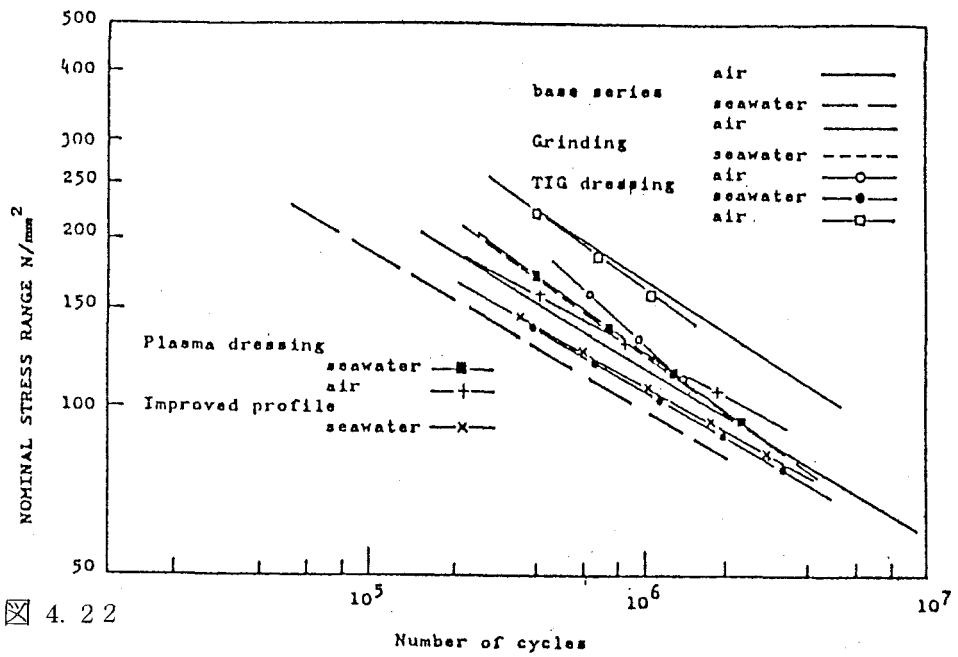


4. 20 陰極防食電位を与えた 3.5% NaCl 水溶液環境中における HY 130 鋼の腐食疲労進展速度²⁾ [Vosikovsky¹³⁾]



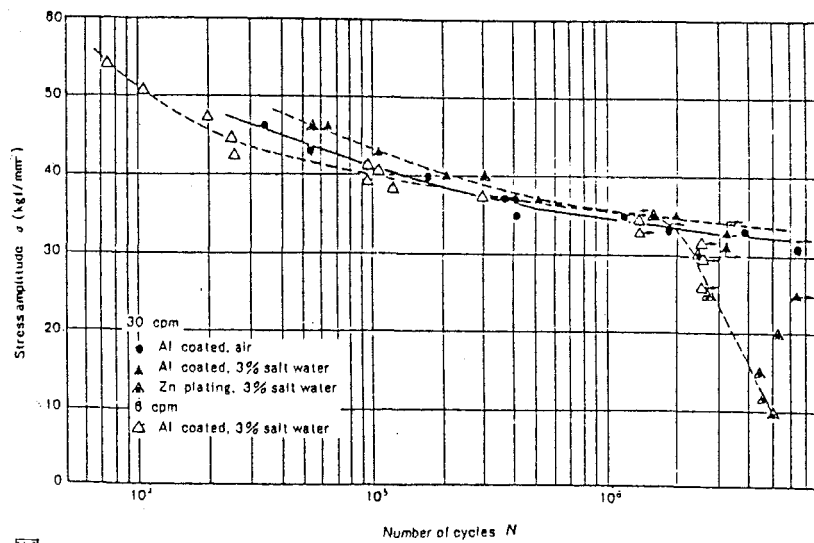
4. 21 塗装材の試験結果
Results of fatigue tests used paint coated specimens

[永井ら¹²⁾]



4.2.2

Comparison of the four improvement techniques 9)



4.2.3

S-N curves of SM50A (Al coating, Zn plating) [参考33]

4.3 設計規準に於ける腐食疲労

従来、海洋構造物の疲労設計は、橋梁などの構造物の設計に用いられる規準AWS-X、BS153F曲線を適用し、腐食疲労を考慮する場合は、これ等の設計曲線を修正した値を用いてきた(図4.24)すなわち

- AWS-X-Modified曲線

海水中の長時間データにより AWS-X曲線の 2×10^6 以上を $N=10^{11}$ まで直線で延長した。

- AWS-X-Improved曲線

その後の研究によりAWS-X-Modified曲線の 10^8 以上は下げすぎであるとして、 $N=10^8 \sim 10^{12}$ の勾配を緩やかにした。

- BS153 F/3 曲線

腐食疲労を考慮し、Class F曲線の許容応力範囲を大気中の $1/3$ にした曲線である。

AWSは1981年に大幅な改訂が行われ、設計曲線も図1.1の如くになった。

BS153は1978年に廃止され、それと同時に海洋構造物としてはBS DD55 (Fixed Offshore Structure) が制定された。DD55では海洋構造物は塗装、被覆、電気防食などの防食が行われることを前提に、海水中での疲労強度は $N=2 \times 10^7$ までは大気中と同じとし、 $N=2 \times 10^7 \sim 2 \times 10^8$ まで延長し、 $N=2 \times 10^8 \sim 4 \times 10^8$ までを水平にしている。このDD55も1982年に内容をほぼ改正することなくBS6235に移行した(図1.17)。

以上の如く、設計規準の改訂が行われたが、最近、ヨーロッパで鋼管継手に関する系統的な疲労試験が行われた結果、新しい規準が提案されている。その1つにUKのNew Design Guidance¹⁸⁾がある。これは、実際の鋼管継手の板厚を用いた一連の疲労試験より、図4.25(a)に示す如く板厚16mmの寿命の標準偏差の2倍 (2σ) を板厚32mmの平均寿命から減じた線図を許容設計線図 (T-Curve) としている。腐食については図4.25(b)の如く、防食が完全であれば大気中と同じ疲労強度と考え、Free Corrosionの場合は寿命を $1/2$ とし、さらに $N=10^7$ 以上でもS-N線の勾配は $m=-3$ のまま延長している。

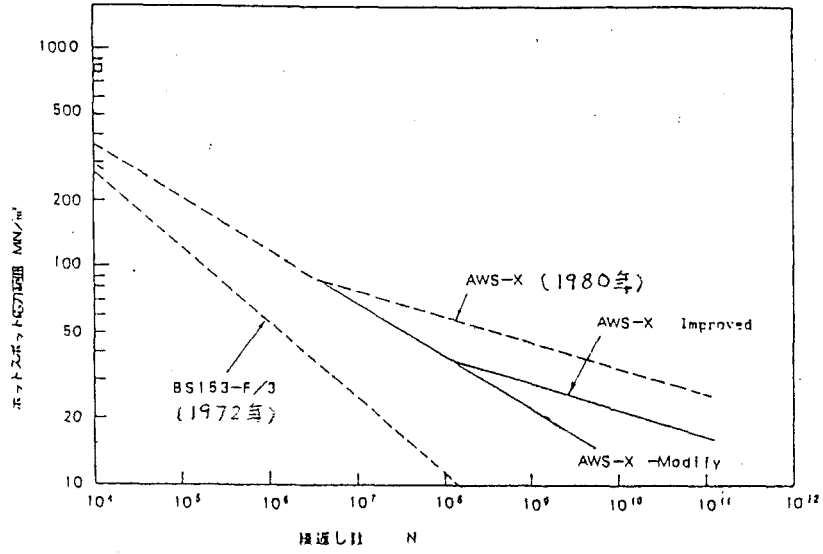


図4.24 海洋構造物の疲労設計に用いられる各種S-N線図

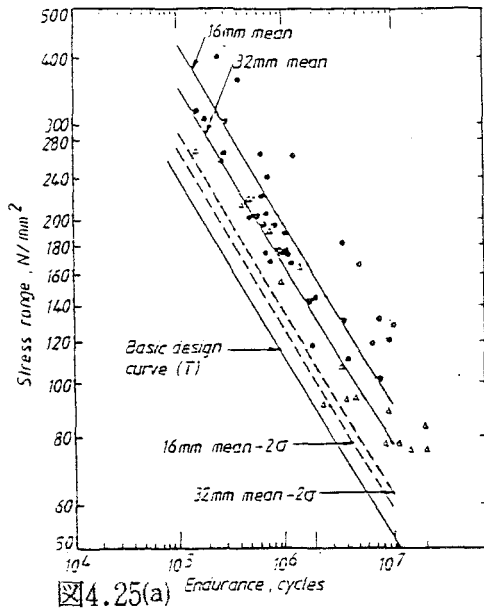


図4.25(a) 板厚16.32 mmの鋼管継手の実験結果と許容応力線図 (18)

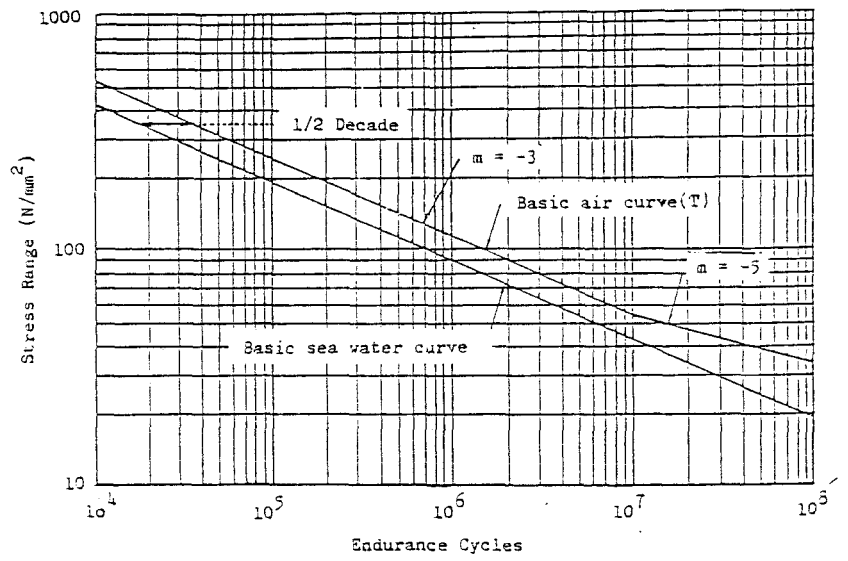


図4.25(b) U. K. 提案の疲労設計曲線 (18)

板厚16.32 mmの鋼管継手の実験結果と許容応力線図 (18)

参 考 文 献

1. K. Hirakawa, I. Kitaura : The Sumitomo Search No. 26 p.p 136~151, 1981
2. 江原・山田・藤島・小沢・石黒・半沢 : 三菱重工技報 Vol. 18, No. 5 p.p 31~36, 1981-9
3. 平川・北浦 : 鉄と鋼 66, A73~A76, 1980
4. 石黒・轟・関口 : 鉄と鋼 65, A197~A200, 1979
5. O.Vosikovsky : Journal of Engineering Materials and Technology, Trans of the ASME 97 p.p 298~304, 1975
6. 角田・丸山・内山 : 鉄と鋼 66, p.p 1669~1678, 1980
7. 平川・小松・北浦 : 住友金属Vol. 31 No. 4, p.p 35~54, 1979
8. R. Ebara, H. Kino, S. Nakano, M. Hanzawa, H. Yokota : Materials Experimentation and Design in Fatigue, Westbury House, p.p 424~430, 1981
9. International Conference for Steel in Marine Structures (1981. 10. in Paris) , Plenary Session 4 Effects of Marine Environment
10. 遠藤・駒井 : 日本機械学会誌, 第77巻 第 670号, p.p 46~51
11. C. E. Jaske, D. Broek, J. E. Slater, W. E. Anderson : ASTM STP-642, p.p 19~47
12. 永井・竹内・森・矢島・山木・井上 : 三菱重工技報 Vol. 13 No. 4, p.p 41~51, 1976-7
13. F. D. Bogar, T. W. Crooker : Journal of Testing and Evaluation, p.p 155~159, 1979-7
14. Duguet, D. J., Uhlig, H. H., Transactions : American Society for Metals, Vol. 61 (1968) p.p 449~456, and Vol. 62, p.p 839~845, 1969

15. Vosikovsky : Journal of Testing and Evaluation, p.p 175 ~182, 1978-6
16. N. W. Snedden : Guidance on Design and Construction, Proposed New Design Rules for Steel Welded Joint in Offshore Structures, 1981
17. C. E. Jaske, J. H. Payer, V. S. Balint : Corrosion Fatigue of Metals in Marine Environments
18. Guidance on Design and Construction, Proposed New Fatigue Design Rules for Steel Welded Joints in Offshore Structure ; U. K. Dept. of Energy, June 1981