

構造材料の腐食疲労問題と今後の課題

三菱重工業(株)広島研究所

江原隆一郎

1. はじめに

1858年のWöhlerの論文¹⁾以来、材料の疲労に関しては数多くの研究成果が報告され、各種の機械、構造物の設計及び寿命予測等に反映されてきた。

しかしながら、最近の試験装置、解析手法及び観察手段の格段の進歩にもかかわらず、疲労き裂発生メカニズム、疲労き裂発生強度や疲労寿命の評価法等未だに明確とは言い難く、新しい発見や斬新なアイデアに基づいた提案が少ないように思われる。これは、疲労が時間に依存し、多くの因子の影響を複雑に受ける難攻不落の現象であるためである。

腐食疲労に関しても、製品をとり囲む環境が益々苛酷になり、複雑かつ多様化している状況下で未解決の問題が多い。ここでは、腐食疲労き裂の発生、長寿命腐食疲労強度の評価方法及び腐食疲労破損防止法にしばって問題点と今後の研究課題について要点をとりまとめた。

2. 腐食疲労き裂の発生

線形破壊力学、フラクトグラフィの活用によって、腐食疲労き裂の伝播機構に関しては有効な知見が得られつつある。しかし、腐食疲労き裂発生機構に関しては、1)腐食ピット底での応力集中、2)塑性変形域がアノードになって電気化学的にアタックされる、3)保護被膜の破断部分が電気化学的にアタックされる、4)吸着による表面エネルギーの低下などの諸説が提案されているが未だ明確にされていない点が多い。

実機では、タービン動翼、抄紙機ロール、乾燥機、自動車板ばね等腐食ピットから発生し、伝播したき裂による腐食疲労破損が多いことが報告されている²⁾。また、図1に示すように腐食疲労寿命は、微小な腐食ピットの発生、成長及び腐食ピットからの微小き裂の発生、短いき裂の成長に支配されることが報告され³⁾、腐食疲労過程における腐食ピットの重要性が明らかにされている。したがって、腐食ピットの成長挙動については最近少なからず研究がなされ、腐食ピットの深さ a は $a = (\text{定数}) \times t^n$ で与えられ、実験室試験では $n=1/3$ であることが多いとされており⁴⁾、実機の寿命予測に適用されている。

しかしながら、腐食ピットの発生及び成長挙動は材料と環境の組み合わせにより異なるので腐食疲労寿命

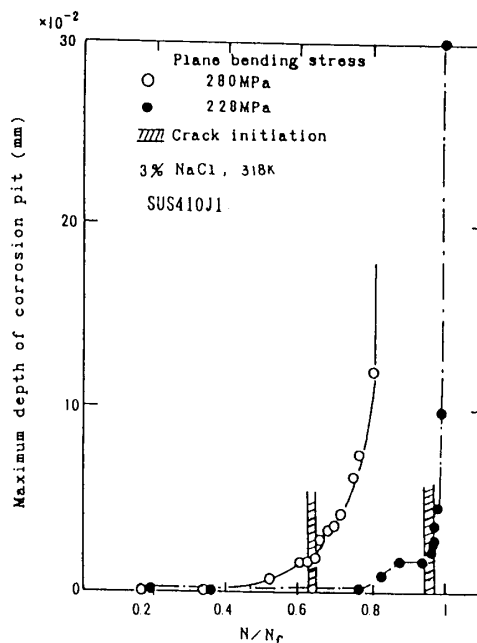


図1 腐食ピットの最大深さと N/N_f の関係

〔江原ほか³⁾〕

に及ぼす腐食ピットの影響の程度は機種によって当然異なる。蒸気タービンのロータや動翼と船体構造の溶接継手部における腐食ピットの評価は工学的に異なるものである。今後特に、角廻し溶接継手部のような不連続部における腐食疲労き裂発生工学的定義の確立が必要である。そのためには、腐食ピットや腐食疲労き裂の確実な検出手法の開発が必要である。

3. 長寿命(長時間)腐食疲労強度

腐食環境中では疲労限度が存在しないので腐食環境中で稼働する機器の設計のためには長時間腐食疲労強度の見積りが重要である。現状では、長時間腐食疲労強度の理論的推定方法および実験による把握方法(加速試験方法)はまだ確立されていない。したがって、設計に必要な長時間腐食疲労強度は可能な限り長時間試験を実施して得た $S-N$ 曲線を外挿して求めざるを得ない。しかしながら、図2に示すように、 $S-N$ 曲線の長寿命側に折点が出現することが炭素鋼、高張力鋼、ステンレス鋼等について報告されている²⁾。

折点出現現象は長寿命腐食疲労強度を外挿法により求める際にその精度に大きな影響を与えることになる。特に、高強度鋼のように、環境によっては比較的高い

短時間強さを有する材料に関しては外挿により得られる長時間強度と折点出現後の長時間強度に大差が生じる恐れがある。折点現象出現の要因と言われている腐食溶解や腐食ピット等不連続部における不純物の濃縮機構を解明し、長寿命腐食疲労強度を精度良く推定する手法の開発が望まれる。特に、見かけはmildな環境中における不純物の濃縮機構の解明にあたっては、環境因子の経時変化の定量解析手法の開発が必要である。

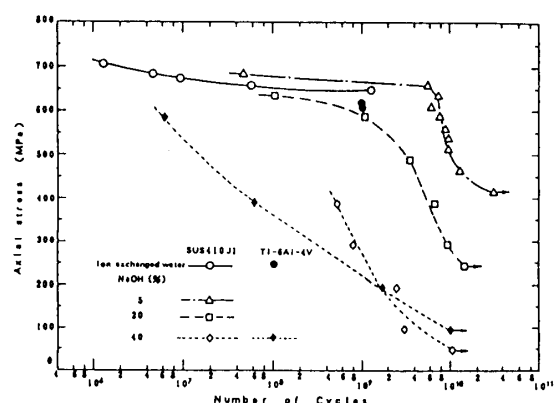


図2 種々の濃度のNaOH水溶液中における
S-N曲線（江原ほか⁵⁾）

最近、鉄鋼協会の環境強度部会（1982～1987 主査 京大駒井教授）や造船研究協会の共同研究（SR220, 1993～1995 部会長 東大藤田名誉教授）で最長0.5～1.5年に及ぶ長寿命試験データが整備されつつある。しかしながら、まだ十分でなく今後は少なくとも数年に及ぶ長時間試験データの蓄積が必要と思われる。

4. 腐食疲労破損防止対策

材料、環境、応力等の腐食疲労強度への影響因子を考慮し、各種の腐食疲労破損防止対策及び腐食疲労強度向上策に関する検討がなされている。

現状では、構造変更等による応力低減が最も確実かつ効果的な手段であると言われているが、電気防食、表面处理、及びインヒビタ等有効な手法が実用化されている。例えば、電気防食に関しては、実際の海洋構造物ではAl, Znを用いた流電陽極法により、以下のように防食されている。1) 応力分布は考えていない。2) 電極の寸法（表面積）と間隔で所定の電流密度を保持するように決める。3) 電極寿命は防食期間に応じて電極の重量（電極の容量）を決める。今後は、応力勾配によって電流密度を適正に保つ方法などを検討し、20年程度のメンテナンス・フリーを目指した防食手法の確立を急ぐ必要がある。

先述のSR220研究においては、バラストタンクに適用しているタール・エポキシ塗料について、塗膜厚さを

50, 100, 200, 300 μm と変えて腐食疲労試験を実施し、塗膜厚さの効果について調査すると共に、腐食疲労過程における塗膜劣化のメカニズムについて検討した。その結果、母材（切欠試験片）の腐食疲労寿命の改善効果は低応力長寿命側で認められ、膜厚は200 μm 以上が必要であることが明らかになった。また、静的及び繰返し荷重下におけるタール・エポキシ塗膜の吸水性の経時変化が測定され、塗膜試験片の疲労強度改善効果は塗膜の破断および塗膜の劣化により塗膜による環境遮断効果が消失すれば認められなくなることが明らかにされている⁶⁾。今後は、溶接継手趾端部等の応力集中部における改善効果を確認にする局部的施工法の開発とともに、塗膜に関する基礎データの蓄積が必要である。

この他、金属メッキ、溶射被膜等の各種表面处理及びインヒビタの効果については他²⁾を参照願いたい。

船舶、海洋構造物用鋼の腐食疲労挙動に関しては、焼戻し後の冷却速度、TMCP、ミクロ組織、焼戻し温度等の影響について検討されているが、今後何よりも腐食疲労強度の高い鋼材の開発が望まれる。

5. おわりに

SinesとWaismanが述べているように、疲労が工学の進歩に対して最重要な分野の一つである⁷⁾ことは今日でも変わっていない。21世紀に向けて発想豊かに、限り無き挑戦が必要である。そのためには、1) 過去の疲労強度推定法の検証、2) 実機への適用方法の検討、3) ケーススタデーを通じて製品に適用し評価するという流れの結びつけ⁸⁾を常に念頭に置くことが重要である。産、学、官の研究者、技術者の連絡を密にした協力が益々重要になることは述べるまでもない。

〈参考文献〉

- 1) Wöhler: Zeitschrift für Bauwesen 8 (1858), 641
- 2) 江原, 機論 59A (1993), 1
- 3) 江原: 腐食損傷を受ける鉄鋼材料の寿命, 余寿命評価マニュアル, 日本鉄鋼協会, (1991), 156.
- 4) 駒井: 同上, 95.
- 5) 江原, 山田: 日本材料学会第34期学術講演会前刷 (1985), 31.
- 6) 江原ほか, SR220, バラストタンクの腐食疲労強度に関する研究, 平7報告書 (1996), p.81, p.350
- 7) G. Sines and J. L. Waisman, Metal Fatigue, (1959), 3, McGraw-HILL, 1959.
- 8) R. W. Landgraf, 機械学会 高サイクル疲労に関する調査研究分科会資料, (1995)