

鉄鋼構造物の腐食寿命評価法に関する研究の進展

柴田 俊夫*

Recent Progress in Corrosion Life Prediction of Steel Structures

Toshio SHIBATA

1. はじめに

さきごろの阪神大震災に遭遇して、電気、ガス、水道、電話、TVなどの日常生活を支えるいわゆるライフラインの途絶が、如何に甚大な影響を与えるかを改めて認識されたところである。現代の高度工業文明は、エネルギー、情報、交通などのインフラストラクチャーが安全かつ十分な信頼性をもって維持管理されることによって、はじめて円滑に機能することはいうまでもない。

鋼構造物はライフラインである高速道路橋、発電所、電力ライン、通信網などを支えるハードの主要部であって、これまでの高度成長経済では新しい鋼構造物建設の主役として量的拡大や新機能にもつばら関心がもたれてきた。しかしながら我が国をはじめ安定成長期に入った先進工業国では、鋼構造物の長期安全性、信頼性や維持管理などが、重要課題としてクローズアップされてきた。また建設当初から安全性、信頼性あるいは寿命評価などが要求され、維持管理のしやすさや寿命延伸などが要求されるようになってきた。

潮風にさらされる厳しい環境に建設された瀬戸大橋では100年の寿命を考えた重防食塗装が採用されており、最近建設されている東京湾岸道路橋¹⁾でも100年の寿命が想定されているという。また海上に浮かぶ浮体式空港や石油備蓄基地²⁾などでも100年の寿命を想定しているという。

ECの腐食連合³⁾では専門委員会を結成して、種々の構造物の寿命がどのように考えられているかを整理しているが、これらを日本での最近の例を含めてTable 1に示した。表にも示されているように、原子力発電所の寿命は30-40年と考えられていて、初期に建設された発電所は最終寿命期に入りつつあり、今後年をおってその数が増加してゆくため、設備更新や寿命延伸が重要課題となっている。原子力発電に関していえば、使用済み燃料の再処理に伴って生成する放射性廃棄物を、地下埋設環境において安全かつ長期にわたって保存管理する技術の開発⁴⁾が進められている。この場合も長期健全性を如何にして保証するかが最大の工学的課

Table 1. Desired life time in years for various structures and systems.

Structure	year
Nuclear power plants	30-40
Offshore platforms	20
Highway bridges	50
Office buildings	20-30
Commercial ships	20
Reactors for chemical industry	10-20
Automobiles	6-10
Seto bridge	100
Tokyo bay bridge	50-100
Floating airport	100
High level radioactive waste storage	300-

題である。これらの課題を討論することを目的として最近国内外でシンポジウム^{5)~9)}が開かれている。筆者の関係した「構造物の腐食寿命予測」⁸⁾および「プラント経年劣化と腐食寿命予測」⁹⁾の国際シンポジウムでの話題を中心として、以下に筆者の関心のある確率統計的手法を取入れた腐食寿命評価法の進歩について述べる。

2. 寿命予測への確率統計視点の導入

さまざまな分野で寿命に関心がもたれているが、分野が異なると寿命に対する考え方も異なり、さまざまな分野で多様なアプローチでこの課題に挑戦しているのが現状であろう。

Fig. 1は腐食疲労分野で著名なLehigh UniversityのWei教授¹⁰⁾が「設計に対する挑戦」と題して寿命予測手法確立に向けての課題をまとめたものである。図中の横軸は設計に要求される寿命をとってあって、すでにTable 1に述べた種々のシステム、構造物のうちから、エネルギー関連や石油掘削の海洋構造物(Energy, Offshore)に要求される寿命として最低30年¹¹⁾が、また鋼橋(Bridge, etc)については80年以上¹²⁾が、さらに高レベル廃棄物貯蔵施設(HLWS: High Level Waste Storage)については300年以上¹³⁾が要求されていることを示すとともに、これらを設計する基礎データを得るために行われる試験¹⁴⁾が、設計に要求される寿命にくらべてはる

平成7年6月21日受付 平成7年7月24日受理 (Received on June 21, 1995; Accepted on July 24, 1995) (依頼解説)

* 大阪大学工学部教授 (Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565)

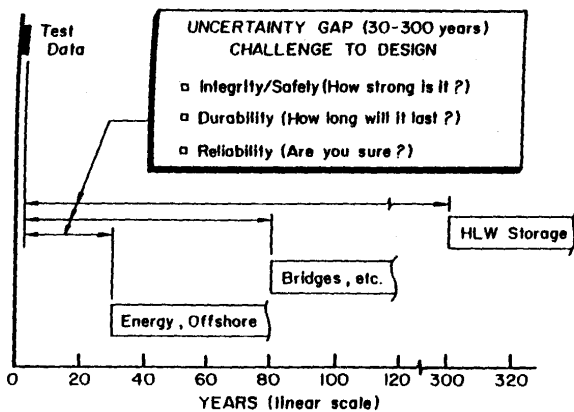


Fig.1. The design challenge. Schematic illustration of the time gap between design data and desired service life.

かに短期間に行われている現状を示している。したがって試験データと要求される寿命との間には、30-300年にわたる極めて大きなギャップが存在しており、これを埋めるための方法論の確立が求められている。しかも完全性/安全性(十分な構造強度をもつか)、耐久性(何年もつか)、信頼性(どの程度確実か)について、設計に反映できる答えを与えることが要求されている。原子力発電所での高温高圧水環境におけるステンレス鋼の応力腐食割れ(SCC)¹¹⁾や腐食疲労(CF)¹⁰⁾分野では破壊力学および電気化学の導入によって決定論的モデルに大きな進展がみられ、このモデルによって寿命予測がなされている。しかしながら現在のデータから将来における期待寿命を論じようとするとき、現象の示す確率統計的性質のため、従来の決定論モデルに加えて、統計モデルを導入する必要があることをFig. 2では強調している。統計モデルに基づく寿命評価方法はすでに信頼性工学で確立されているが、現象論的アプローチが基本であるためミクロな損傷機構との対応には、他分野での考え方の導入が必要となってきた。

このような確率統計的アプローチがなされるようになった背景には、すでに述べた寿命評価を要求するようになった社会的背景があるが、さらにこれに加えて環境強度分野

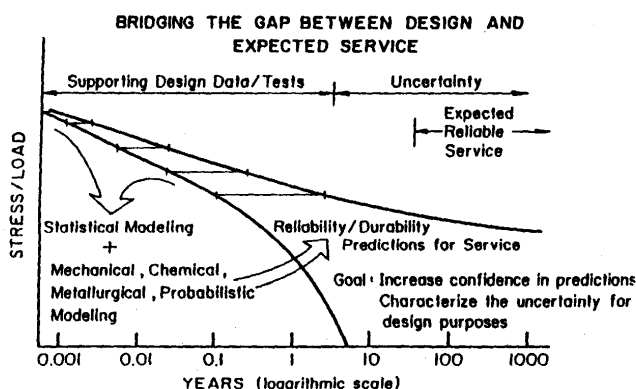


Fig.2. The design problem and need for mechanistic/probabilistic models.

における破壊力学の華々しい成功と成熟、あるいは腐食分野における電気化学腐食理論の確立と普及があり、いずれもパラダイム確立後のある種の飽和感が背景に存在している。確率統計的視点は現在のパラダイムを超える新しい視点の探求の大きな流れの一つともいえることができよう。

3. 寿命予測における確率統計的手法

信頼性工学においては、システムやそれらを構成するコンポーネントの寿命、あるいは故障率を解析し、確率統計的手法を用いて信頼性評価を行っている。寿命解析においてはWeibull分布が用いられることが多く、材料分野でもセラミックスの強度のばらつきの解析に用いられてよく知られている。Weibull分布はもっとも弱い強度の箇所の分布を表す分布、いわゆる再弱リンクモデルに対応する分布であって、したがってこの分布は最小値分布である。最小値分布は、元の分布から採取した最小値標本からの新しい分布であって、標本数が増大するとともに一定の漸近分布をとることが、極値統計学によって証明されている。しかも漸近分布はI, II, III型の3型式のみであって、最大値についても同様な分布が存在するので、最大値分布と最小値分布を合せて6つの極値分布がある。このうち、寿命分布や強度分布の解析に第III型の最小値分布であるWeibull分布が、また孔食深さ最大値の推定には第I型の最大値分布であるGumbel分布が適用されている。またGumbel分布を極値分布と呼ぶ場合も多い。

3・1 Weibull分布による寿命解析

組成や組織などの材料因子、あるいは環境因子や溶接方法の改善によってSCC寿命を延伸させた場合に、その改善効果は実験室あるいは実地寿命分布に基づいて、Fig. 3¹²⁾のように、改善度指数, F , や実験室加速係数, L , によって定量的に評価される。ところで応力腐食割れ寿命はかつては対数正規分布に従うとして解析された例が多かったが、

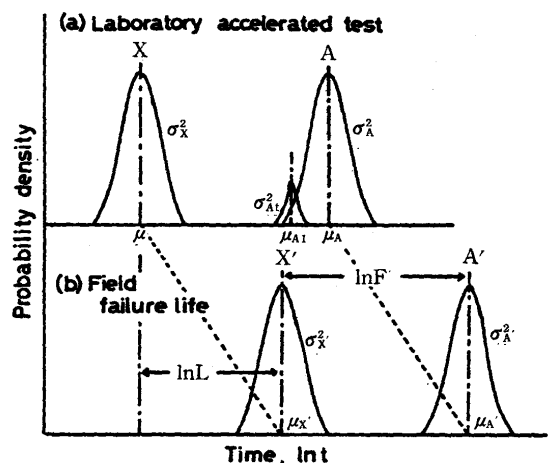


Fig.3. Reliability assessment and life estimation based on the probability distribution.

最近ではWeibull分布に従うとして解析される例が多くなってきた。1981年までの例はすでに報告¹³⁾したので、ここでは1981年以降の進歩を中心に紹介する。Weibull分布の性質の詳細については信頼性工学の教科書に述べられているので、後の説明に必要とされる項目のみを示す。よく知られているように、Weibull分布の累積分布関数、 $F(t)$ 、は、寿命、 t 、の関数として、

$$F(t) = 1 - \exp(-(t-a)/\theta)^m) \dots\dots\dots (1)$$

で表される。ここで a 、 θ 、 m は、それぞれ位置、尺度、形状パラメータと呼ばれ、平均寿命や故障率、あるいは分布の形状を決定するパラメータである。式(1)を書き換えると

$$\ln(-\ln(1-F(t))) = m \ln(t-a) - m \ln(\theta) \dots\dots\dots (2)$$

となる。Weibull確率紙は累積確率を寿命、 t 、の関数としてプロットすると、直線となり、直線の傾きは形状パラメータ m を与えるように作成されている。

Fig. 4¹⁴⁾はステンレス鋼の実験室加速試験である沸騰MgCl₂における定荷重下でのSCC寿命分布をWeibull確率紙にプロットした例である。応力の減少とともにSCC破断寿命分布は長時間側に移動するとともに、形状パラメータが

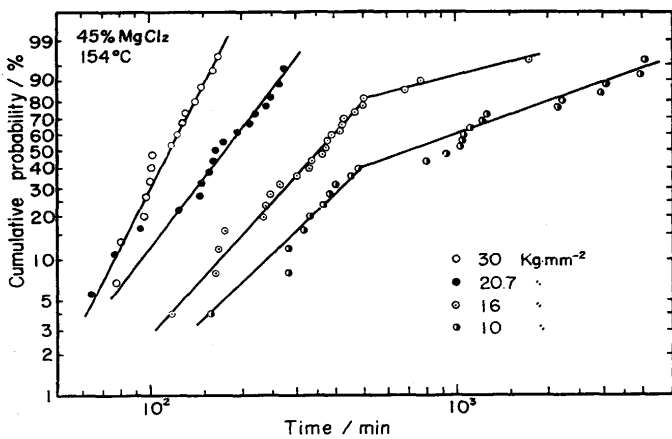


Fig. 4. Weibull plots of cumulative probability of SCC failure time of 17Cr-11Ni stainless steel in boiling MgCl₂ solution.

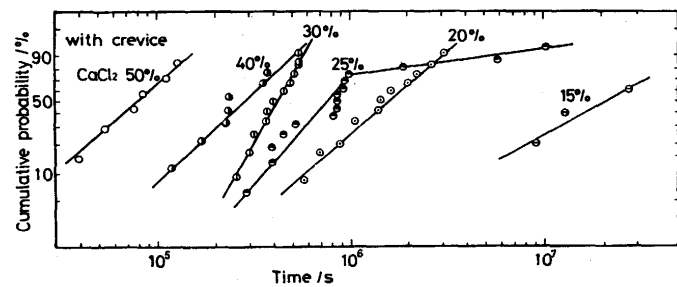


Fig. 5. Effect of CaCl₂ concentration on the probability distribution of SCC failure time of Type 304 stainless steel.

減少し、 $m=1$ の指数分布に近づいてゆく様子が示されている。Fig. 5¹⁵⁾は荷重および温度を一定として、CaCl₂濃度を変化させた場合の304ステンレス鋼の定荷重下のSCC寿命分布であるが、この場合には濃度の減少とともに、SCC寿命分布は長時間側に移行し、分布の形状パラメータは $m>1$ から $m=1$ へと変化する。また $m=1$ への変化はき裂密度の減少にも密接に関係¹⁶⁾していることがわかっている。すなわちき裂密度が減少ともななって、き裂発生が偶発的に生じることが示唆される。このように実験室試験の結果は、SCCを生じさせる要因である応力レベル、あるいはCl⁻イオン濃度が低下すると、寿命分布はランダム発生現象に現われるポアソン過程の特徴である $m=1$ の指数分布

$$F(t) = 1 - \exp(-t/\theta) \dots\dots\dots (3)$$

に従うようになることを示している。

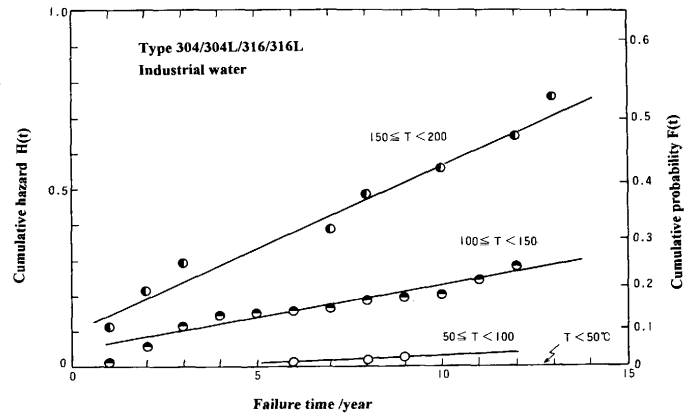


Fig. 6. Exponential probability distributions of field failure time of SCC observed for stainless steel heat exchanger tubes in the chemical plants using industrial water.

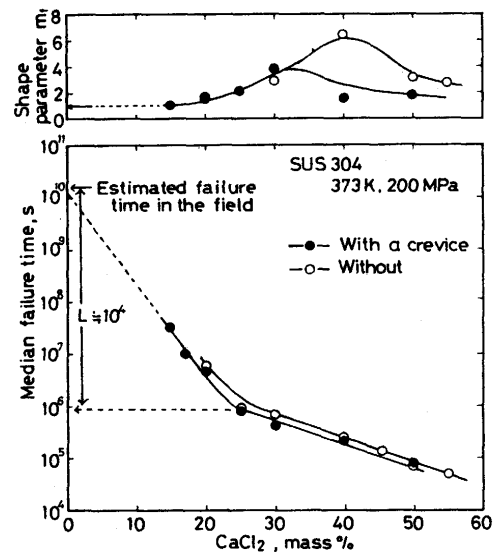


Fig. 7. The shape parameter and median failure time of SCC of Type304 stainless steel as a function of CaCl₂ concentration.

Fig. 6¹⁷⁾は化学工場の工業用水を用いる多数のステンレス鋼製熱交換器の実際の故障寿命データを解析した例であるが、この場合にも指数分布が認められ、平均寿命は使用温度の関数となっている。Fig. 7¹²⁾に、われわれの得た実験室試験の結果とFig. 6で解析された実地寿命との比較を示した³⁾が、この実験室試験の加速係数が約 10^4 であることが示されている。佐藤ら¹⁸⁾は乾湿繰り返しSCC加速試験法を用いて、ステンレス鋼のSCC寿命を測定し、Fig. 6の実地寿命分布と比較し、この実地をシミュレートした乾湿加速試験法の加速係数が約 10^2 であることを示している (Fig. 8)。この場合にも比較的厳しくない条件で長寿命分布を得ると実験室試験でも $m=1$ の指数分布が得られることが示されている。

明石ら¹⁹⁾は高温高圧水環境で行った加速試験において、ステンレス鋼やNi合金のSCC寿命分布が指数分布に従うことを明らかにし (Fig. 9)、しかもパラメータ θ と a の比、 θ/a が、合金に依存せずほぼ一定の値をとることを見出している。山内ら²⁰⁾も高温高圧水環境のステンレス鋼や高合金のSCC寿命分布が指数分布に従い、また θ/a =一定の関係のみられることを報告している。

明石ら¹⁹⁾は θ/a =一定の場合には、基準材の寿命に対する代替材の寿命改善度、 F 、を

$$\ln(F) = \ln(t_T) - \ln(a_R) - \ln [1 - (\theta_R/a_R/n_A) \ln(1-\gamma)] \dots \dots \dots (4)$$

によって、定量的に評価する手法を提案している。ここで、 t_T は試験時間、 a_R と θ_R はそれぞれ基準材の位置パラメータおよび尺度パラメータであり、 n_A は代替材の試験本数、 γ は信頼水準である。基準材の寿命を測定し、寿命分布の解析によって θ_R と a_R を求めておけば、長寿命の代替材については、ある程度の試験片本数、 n_A 、で、一定の試験時間、 t_T 、試験することによって、Fig. 3に述べた寿命改善度、 F 、を評価することができる。山内ら²¹⁾は、指数分布に従う場合について、SCC寿命に寄与する材料や環境因子などさまざまな因子を分布パラメータ(a あるいは θ)によって評価し、全寿命に対する各因子の寄与を定量的に表すことを試みている。

実地寿命分布の解析例は、Fig. 6に示した例以外にはあま

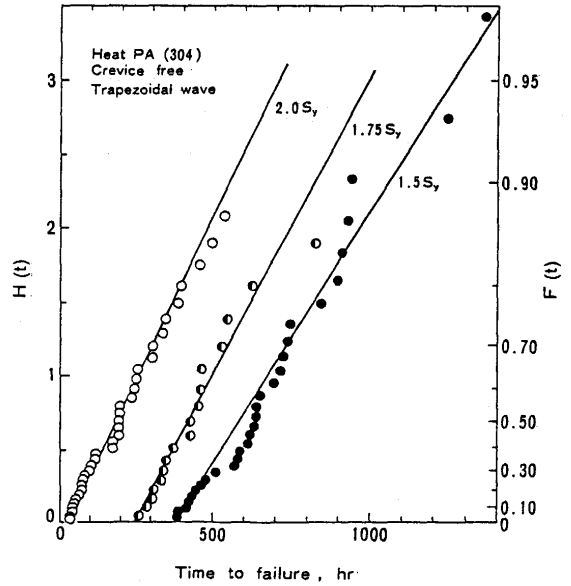


Fig. 9. Exponential distribution for the SCC failure time observed for Type 304 stainless steel in high temperature and high pressure water environment.

り知られていないが、Staebleら²²⁾による加圧水型原子炉 (PWR)の熱交換器チューブ (Inconel 600, Inconel 690, Incolloy 800)の損傷寿命解析が注目される。Staebleらは、ベルギー、フランス、日本、スペイン、スウェーデン、アメリカの原子力発電所を訪問し、さらに公開文献等から、損傷データを手出し、これをWeibull分布に従うとして、SCC、粒界損傷 (IGA: Intergranular attack) など損傷モード別の寿命解析を行い、環境改善効果、熱処理やショットピーニングによる耐SCC改善効果などを定量的に解析している。

Fig. 10²²⁾はフランスのPWRの熱交換器 (Inconel 600, LTMA: low temperature mill anneal at 980°C)における一次側のSCC寿命分布であって、この分布は比較的大きな形状パラメータ ($m=4.5$)を示す、いわゆる摩耗故障型の分布である。他の例についてのパラメータも摩耗故障型の $m > 1$ の形状パラメータであると報告されている。いずれにしてもInconel 600の熱交換器チューブの寿命分布は、故障率が時間的に増大する摩耗故障型であるので、早急に対策をと

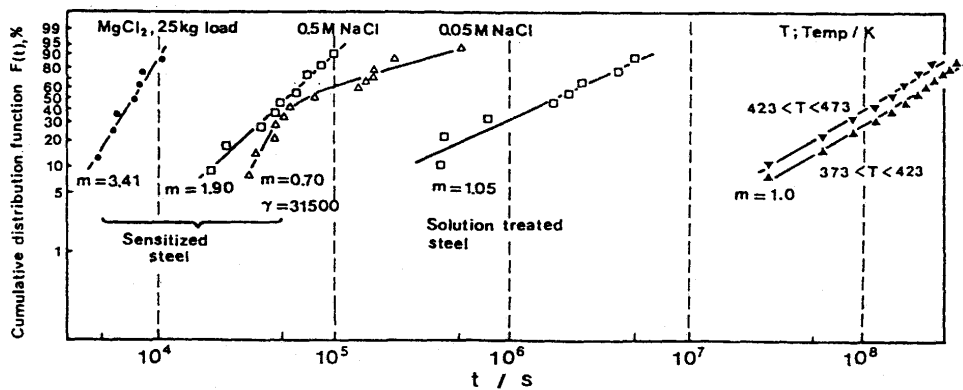


Fig. 8. Weibull plots for the SCC failure time distribution obtained by various acceleration tests and field failure.

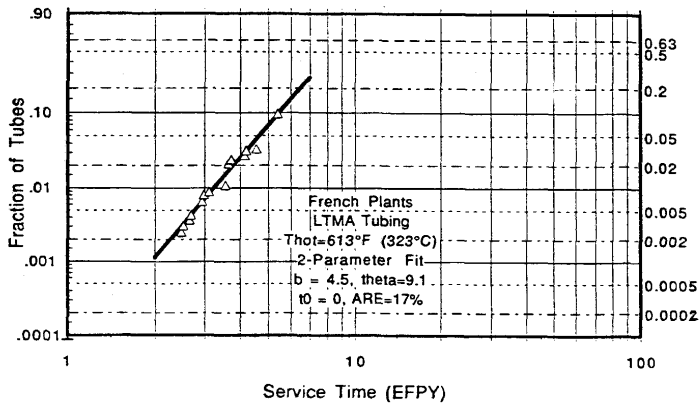


Fig. 10. Weibull plot of the SCC failure time observed for the Alloy 600 heat exchanger tubes of PWR.

る必要のあったことは、この分布解析からも明らかである。

3・2 Gumbel分布による孔食深さ分布解析

石油タンクやパイプラインでは、腐食によって孔食が生じるが、この孔食深さが板厚やパイプ肉厚を貫通すると油の漏洩が起これ、製品の喪失や環境汚染など、場合によっては大事故を引き起こすことがある。したがってこの孔食深さ値を正確に推定することが必要とされている。孔食の発生はランダムに生じ、深さ値はポアソン分布など特定の分布をとることが観測されている。油の漏洩をもたらす孔食は、その深さ値がもっとも大きなものであるから、孔食深さ最大値の推定が重要となる。

孔食最大値分布に対しては、I型の漸近分布であるGumbel分布がよく適合することが知られており、石油タンク底板²³⁾²⁴⁾の最大値推定およびその成長速度の推定に有効であることが報告されている。

Gumbel分布は

$$F(x) = \exp(-\exp(-(x-\lambda)/\alpha)) \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表される。ここで α 、 λ はそれぞれ尺度および位置パラメータである。両辺について二回対数をとると、

$$-\ln(-\ln(F(x))) = (x-\lambda)/\alpha \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。 $-\ln(-\ln(F(x)))$ を x に対してプロットして直線となるように目盛られているGumbel確率紙を用いて、実測データのGumbel分布への適合性を調べることができる。Fig. 11は石油タンク底板についての孔食深さ値の分布をGumbel確率紙にプロットした例であるが、直線となっていることから実測データはGumbel分布に従うことがわかる。ただし厳密には分布の適合度検定が必要である。また直線の傾きと切片から分布パラメータ(α 、 λ)を推定することができるが、統計学的には分布パラメータ推定には、重み付き最小二乗法、最尤法、モーメント法、最小分散線型不偏推定子(MVLU: minimum variance linear unbiased estimator)法などが用いられる。少数標本の場合には最後に

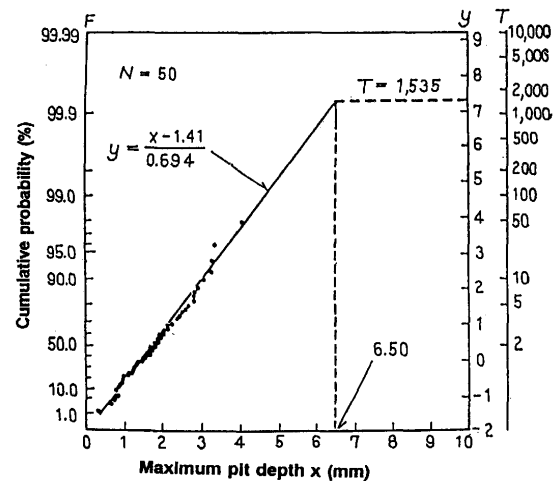


Fig. 11. Gumbel plot of the maximum depth of pits observed in the bottom plate of a large oil tank.

あげたMVLU法が優れているので、腐食防食協会装置材料の寿命予測分科会の推奨マニュアル²⁵⁾では、このMVLU法を推奨しており、この方法を用いてパラメータを推定するコンピュータソフト(EVAN)²⁶⁾も作成されている。

Fig. 11中の α および λ の値はMVLU法によって推定した値を用いて直線を引いている。図中の T は再帰期間と呼ばれ、検査した面積の T 倍の面積で生じると推定される孔食最大値を求めるために用いられる。すなわち全体のタンク底板面積を S 、ランダムに採取した少数の小面積標本の面積を s とすると、

$$T = S/s \quad \dots\dots\dots (7)$$

である。再帰期間、 T 、はもともと水文学の分野で用いられていた用語であって、過去に観測される年間最大流量の分布を解析して、 T 年間に1回生じる流量を推定するために導入された用語である。たとえば100年に1回生じる流量を100年確率流量と呼び、この値に基づいて河川の堤防高さが設計される。腐食の場合には、石油タンクの底板について全面検査するのではなく、少数個の小面積についてのみ精密検査をして、測定された少数個の最大値分布のデータから全体の面積で生じる最大孔食深さ値を推定し、この値に基づいて底板を取り替えるべきか否かを決定する。

Fig. 12は設置後7.7年及び12.8年において検査して、孔食最大値を推定し、これを設置からの時間経過の関数としてプロットしたものであって、図から孔食の成長速度は約0.51 mm/yearであり、底板の厚さ、9 mmを貫通するのは17.6年後と推定された。他にも多くの例が報告されているが、これについてはまとめて報告してある²⁷⁾²⁸⁾ので参照されたい。

福田ら²⁹⁾は、放射性廃棄物を貯蔵する炭素鋼製容器が地中に埋設される状況をシミュレートした場合の孔食の成長を極値解析法によって解析している。淡水環境を想定し、微量の HCO_3^- 、 Cl^- を含む溶液中にて自然浸漬あるいは炭素鋼

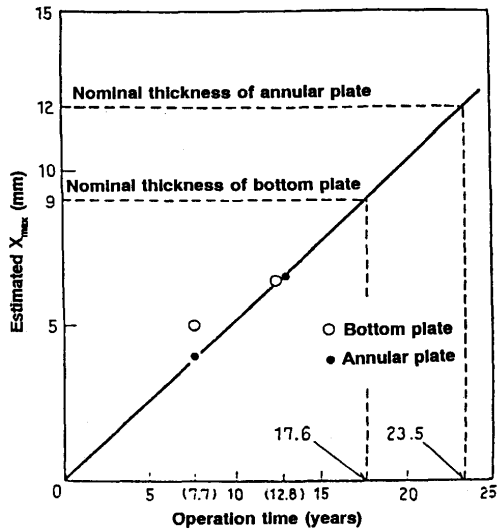


Fig.12. Growth of the estimated maximum pit depth of the bottom plate of the oil tank.

試験片にアノード電流を付加して腐食を加速し、このときの試験片板厚の分布を高周波点集束超音波探触子を用いて測定した。10個の試験片について長時間実験を行い、時間経過とともに最大侵食深さ値を極値解析によって推定した。Fig.13に加速試験において観測された平均侵食深さに対する最大侵食深さ値をプロットした例であって、平均深さ値が大きくなるとともに最大深さ値も大きくなることが認められるが、ばらつきも大きくなることわかる。これは分布パラメータに反映されており、Fig.14にみられるように、 λ および α は平均深さ、 \bar{a} 、の増加とともに大きくなる。しかしながら、Fig.15にみられるように、 α/λ はほぼ一定の値を示しており、このように α/λ が一定となることは炭素鋼/土壌²⁷⁾についても認められている。また他にも多くの例があり、 α/λ が一定となることの統計学的意味は今後さらに検

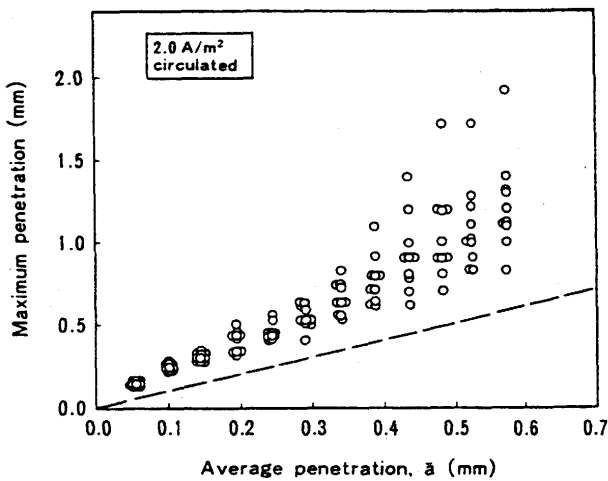


Fig.13. Change in the maximum pit depth with increase of the average thickness loss of the carbon steel in a simulated ground water.

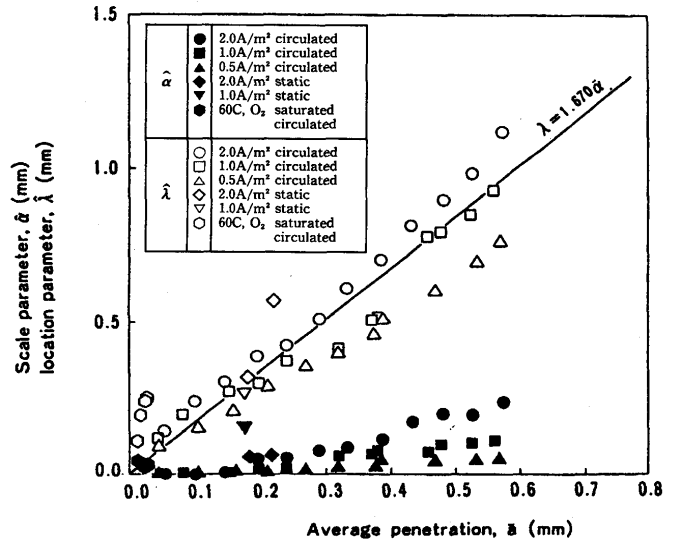


Fig.14. Change in the shape and location parameters with increase of the average thickness loss.

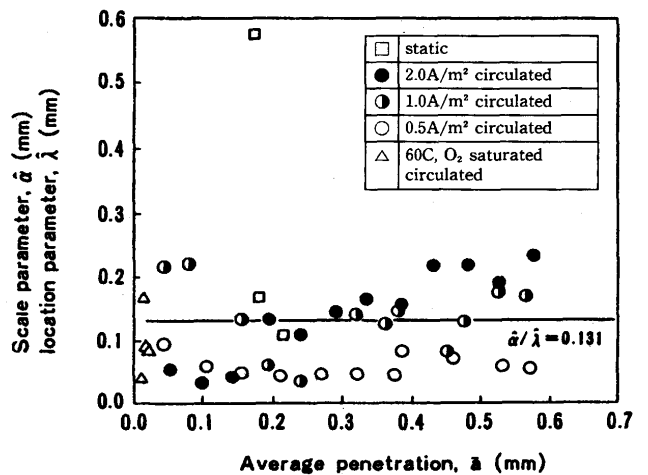


Fig.15. The ratio of α/λ shows almost a constant value.

討する必要がある。

Fig.15から $\alpha=0.131\lambda$ であり、また平均深さは $\lambda=1.67\bar{a}$ であるので、試験片のT倍の面積についての最大侵食深さを、信頼水準を考慮して推定すると

$$F_m(x) = \exp(-\exp(-(x - (\lambda + \alpha \ln(T)))/\alpha)) \quad \dots \dots \dots (8)$$

であるので、 $F_m(x)$ の100%点を必要腐食しろ、 d 、として、試験片面積の1000倍の面積で生じるときの腐食しろは

$$d = 4.48\bar{a} \quad \dots \dots \dots (9)$$

と推定することができる。すなわちこの淡水/炭素鋼系では、平均腐食侵食深さの4.48倍の腐食しろをとるとよい。したがって平均侵食深さを実験室試験あるいは過去のデータから推定することができれば、局部腐食を考慮した腐食しろ

を与えることができ、設計に反映させることができる。

3・3 Gumbel分布による最大介在物径推定

最近村上ら³⁰⁾³¹⁾は、Gumbel分布を用いて介在物径の最大値を推定し、推定された介在物最大径が疲労寿命の下限値を決定していることを立証している。この方法は実際の肌焼鋼の酸化物系介在物の評価³²⁾に用いられて威力を発揮している。

3・4 一般化極値分布

孔食深さ値分布の分布としては、Gumbel分布以外に、II型漸近分布であるFréshe分布に従うとする報告もある。分布がI, II, III型のいずれの分布に従うかは、あらかじめいずれかの分布に従うと仮定し、その適合度検定を行うのが通例である。しかしながら最近、あらかじめ分布を仮定せずに解析できる一般化極値分布(GEV: Generalized Extreme Value Distribution)を用いる方法が提案されている。一般化極値分布は

$$F(x) = \exp(-(1-k(x-u)/\alpha)^{1/k}) \dots\dots\dots (10)$$

$$kx \leq \alpha + uk, k \neq 0 \dots\dots\dots (11)$$

$$k=0 \text{ Type I}, k < 0 \text{ Type II}, k > 0 \text{ Type III} \dots\dots (12)$$

である。ここで k, u, α は分布パラメータであるが、とくに k の値は分布がI, II, IIIのいずれの分布となるかを決定するので重要である。また $k=0$ であるか否かによって、実測分布のGumbel分布へ適合度を検定することができて有用である。

Laycockら³³⁾は、GEVを用いて、酸性 FeCl_2 溶液中のステンレス鋼の孔食深さ分布が、I型のGumbel分布ではなく、III型の最大値分布に従うことを明らかにしている。またBuxtonら³⁴⁾も、GEVを用いて、空気飽和脱イオン水中における低合金鋼の孔食深さ分布が、同様にIII型の最大値分布に従うことを示している。I型の最大値分布であるGumbel分布では、面積の増大とともに最大値がいつまでも大きくなる性質をもつが、このようなことは実際には起こりえない。酸素の還元反応がカソード反応となる場合には、溶液中の酸素拡散速度以上の速度でアノード溶解が進行することはできない。一個の孔食に対して、周辺部の面積がカソード反応を受け持つとしても、酸素拡散速度の10-100倍かの速度が、起こりうる溶解速度の最大であろう。したがって最大値に限界値の存在するIII型の最大値分布が物理的意味からみても妥当であると考えられる。

3・5 腐食モニタリング

腐食寿命予測には、設計時の予測と、供用時の診断による余寿命予測、ならびに補修、保全による寿命延伸などが含まれている。腐食モニタリングは時々刻々の状態を知り、これを補修、保全に反映させるために、腐食寿命予測にとってきわめて重要である。電気化学的手法は腐食速度を直接測定できる利点があるので、これを利用した腐食モニタリング手法が開発されており、なかでも最近注目されてい

るのは、腐食電位あるいは腐食電流のノイズ解析、あるいはノイズモニタリングによる腐食診断³⁵⁾である。ノイズは局部腐食の確率統計的性質から発生するので、これをモニターすることで、孔食やSCCの発生を検知できる可能性がある。ノイズスペクトラムの形状や振幅は腐食事象の確率統計的性質によって決定されているので、ノイズの解析には局部腐食の確率統計的性質への理解が必要である。

3・6 非破壊検査と極値解析

非破壊検査は、腐食モニタリングと同様に寿命診断のために重要であり、ルーチンに行われている。石油タンクでは開放時に全面検査を行って、その費用も莫大である。熱交換器パイプの検査等では抜き取り検査も行われているが、その結果の判定には経験的な手法が用いられているようである。経験的判定に極値解析による判定を加えることによって、抜き取り検査の合理的判定が可能となるものと考えられる。炭素鋼製熱交換器に対する極値解析の適用については詳細な報告³⁶⁾があり、分布パラメータに及ぼす操作条件についての解析³⁷⁾も報告されている。また非破壊検査データを測定すると同時に極値解析を行って最大値推定を行うシステムが開発³⁸⁾³⁹⁾されている。

4. おわりに

最近寿命予測に対する関心が高まってきている。過去および現在のデータに基づいて、不確かな将来を予測するのであるから、どのくらい確実なことがいえるかは、予測の前提条件にかかっているともしよう。将来のことは前提条件がどのように変化するか明らかでないので、予測など不可能であるという立場から、条件を不変として、決定論的に予測する立場まで、極めて広いスペクトルの存在するのがこの分野の特徴であろう。

不確かであるけれども、予測が要求されるのが現実である。これまで腐食の場合には、定性的な話が主で、設計に使える定量的データに欠けるといわれてきた。これに答えるために、少しでも定量的な予測をしようとするのが、ここで述べた確率統計的腐食寿命予測であって、本文中に述べたように実際問題にうまく適用できた例も増えてきた。今後は実際問題に適用した場合の問題点を極値統計の専門家に投げかけ検討いただき、これをフィードバックすることによって、これらの手法がよきツールとして一層発展することを期待したい。

文 献

- 1) 田所 裕, 本間宏二, 等 俊一, 長谷泰治: 腐食防食'95講演集, D103 (1995), p.379
- 2) 岡村秀夫: 腐食防食'95講演集, D102 (1995), p.375
- 3) C.Cabrillac, J.S.L.Leach, P.Marcus and A.Pourbaix: Metals and Materials, 3 (1987), p.543
- 4) 大和愛司, 佐々木憲明: 原子力工業, 30 (1993), p.15
- 5) Larry W.Masters: Problems in Service Life Prediction of

- Building and Construction Materials, NATO ASI Series E : Applied Sciences - No.95, (1985), [Martinus Nijhoff Publishers]
- 6) 佐藤栄次, 村田朋美: 実環境における構造材料の信頼性評価技術の現状と課題, 第124・125回西山記念技術講座, (1988), [日本鉄鋼協会]
 - 7) 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(日本鉄鋼協会特定基礎研究会, 構造材料の信頼性評価技術部会編), (1991), [日本鉄鋼協会]
 - 8) Proc. Life Prediction of Corrodible Structures, ed. by R.N. Parkins, (1994), [NACE]
 - 9) Draft Proc. Plant Aging and Life Prediction of Corrodible Structures, Sapporo, (1995)
 - 10) D.G.Harlow and R.P.Wei : Proc. Life Prediction of Corrodible Structures, ed. by R.N.Parkins, Vol.1, (1994), p.120
 - 11) P.Andresen and P.Ford : Materials Science and Engineering, **A103** (1988), p.167
 - 12) T.Shibata : Localized Corrosion ed. by F.Hine, K.Komai and K.Yamakawa, (1987), p.197 [Elsevier Applied Science]
 - 13) 柴田俊夫: 鉄と鋼, **67** (1981), p.891
 - 14) 柴田俊夫, 竹山太郎: 鉄と鋼, **66** (1980), p.693
 - 15) 柴田俊夫, 藤本慎司, 麻田篤志, 中田淳二: 材料, **36** (1987), p.65
 - 16) T.Shibata, J.Nakata and S.Fujimoto : Proc. Life Prediction of Corrodible Structures, ed. by R.N.Parkins, Vol.2 (1994), p.1064 [NACE]
 - 17) 多管式ステンレス鋼熱交換器の応力腐食割れ-第2次使用実績調査と寿命解析(化学工学協会化学装置材料委員会編), (1984), [化学工業社]
 - 18) 佐藤栄次, 村田朋美: 実環境における構造材料の信頼性評価技術の現状と課題, 第124・125回西山記念技術講座, (1988), p.119 [日本鉄鋼協会]
 - 19) 明石正恒, 大友 暁: 材料, **36** (1987), p.59
 - 20) K.Yamauchi, T.Katori, Y.Sakaguchi, T.Ozaki, S.Kimura and H.Yamazaki : 172nd Society Mtg, The Electrochemical Soc. Extended Abstracts 87-2, (1987), p.338
 - 21) K.Yamauchi, S.Hattori, T.Shindo and J.Kuniya : Draft Proc. Plant Aging and Life Prediction of Corrodible Structures, **AI04** (1995)
 - 22) R.W.Staehle, J.A.Gorman, K.D.Stavropoulos and C.S.Welty, Jr : Proc. Life Prediction of Corrodible Structures, ed. by R.N.Parkins, Vol.2, (1994), p.1374 [NACE]
 - 23) 柴田俊夫, 岡本勝群: 防食技術, **30** (1981), p.404
 - 24) 荒木了一, 三浦昭夫, 堺 松成, 横山二郎, 横矢重治: 圧力技術, **24** (1986), p.124
 - 25) 防食技術(腐食防食協会装置材料の寿命予測(II)分科会編), **37** (1988), p.768
 - 26) 極値統計法による寿命予測パッケージ(EVAN)(腐食防食協会装置材料の寿命予測(II)分科会WG編), (1989), [丸善]
 - 27) T.Shibata : ISIJ Inter, **31** (1991), p.115
 - 28) T.Shibata and J.Res : Natl. Inst. Stand. Technol., **99** (1994), p.327
 - 29) T.Fukuda and M.Akashi : Proc. Life Prediction of Corrodible Structures, ed. by R.N.Parkins, Vol.1 (1994), p.419 [NACE]
 - 30) 村上敬宜, 宇宿尚史: 日本機械学会論文集(A), **55-510** (1989), p.213
 - 31) 村上敬宜: 金属疲労微小欠陥と介在物の影響, (1993), [養賢堂]
 - 32) 林 亮二, 濱田兼彰, 小林一博, 佐藤紀男: 山陽特殊鋼技報, **2** (1995), p.22
 - 33) P.J.Laycock, R.A.Cottis and P.A.Scarf : J.Electrochem. Soc., **137** (1990), p.190
 - 34) D.C.Buxton and P.A. Scarf : Proc. Life Prediction of Corrodible Structures, ed. by R.N.Parkins, Vol.2, (1990), p.1273 [NACE]
 - 35) J.L.Dawson : Life Prediction of Corrodible Structures, ed. by R.N.Parkins, Vol.2, (1994), p.38 [NACE]
 - 36) 日本材料学会腐食防食専門委員会資料, **No.44** (1994) Oct.19
 - 37) M.Nakahara : Draft Proc. Plant Aging and Life Prediction of Corrodible Structures, **AI16** (1995)
 - 38) 安齋利男, 山本洋信, 分部恵生: 防錆管理, **34** (1990), p.135
 - 39) 木村政信: 配管技術'87増刊号, (1987) p.142