極値統計の適用性評価における留意点および 局部腐食深さデータの活用

永井 崇昭*, 蔵屋 英介*, 朝倉 祝治*

* 横浜国立大学工学部

Critical Discussion on Applicability of Extreme Value Statistics to Localized Corrosion

—Use of Individual Depth Data for Evaluation of the Applicability—

Takaaki Nagai*, Eisuke Kuraya* and Shukuji Asakura*

* Faculty of Engineering, Yokohama National University

The applicability of extreme value statistics to localized corrosion was studied based on a actual case. The localized corrosion under tubercles on inner surface of the steel channel in which river water flowed was investigated. Their depths obeyed the distribution of exponential type, while the maximum depths did the double exponential distribution. When the similar data appeared in the previous papers, extreme value statistics was often assumed to be applicable. However, according to the theory of extreme value statistics, the maximum depths are necessary to be sampled from a single population.

Then, it was evaluated by calculating the confidence intervals for the population mean whether the data belong to the same population or not. Moreover, the theoretical distribution of maximum depths was calculated and was compared with the measured one. The results of these analyses showed that extreme value statistics was inapplicable to the present case. Thus, the present case study demonstrates that extreme value statistics is not always applicable to the maximum depths of localized corrosion, even if the depths obey the distribution of exponential type and the maximum depths do the double exponential distribution.

Key words : localized corrosion, extreme value statistics, statistical estimation, maximum depths, individual depths, steel channel, river water, tubercle

1. 緒 言

大面積を持つ装置や構造物に生じた最大の局部腐食深さを極値統計を用いて推定する手法は、多くの事例解析により、その有用性が示されてきた。この手法では、極値統計の理論に基づいて、小面積の測定区画内の最大局部腐食深さデータに2重指数分布を当てはめるという操作をする。ただし、最大局部腐食深さデータに対して2重指数分布を当てはめるとは、推定対象の全面に生じている腐食孔の深さが指数タイプの分布に従っていることが前提となる。また、極値統計が適用できるのは、推定対象範囲を分割したすべての区画について、その区

画内に存在する腐食孔の深さが同一の母集団からの標本と見なせる場合に限られる。従って、腐食条件の差異などにより腐食孔深さの分布が場所によって異なり、測定位置によってはデータが同一の母集団からの標本と見なせない場合には、それぞれを別の母集団に分類することが必要とされている^{1), 2)}。

データの分類を必要とする事例については、今川ら³⁾の報告がある。ただし、その分類は腐食条件についての情報と腐食様態に関する経験的な知識に基づいている。それに対して、一般的な基準を設けてデータを分類する手順を確立することが必要であるとの指摘もある⁴⁾。一方、どの場所においても腐食反応を決める腐食条件が均一で、データの属する母集団が同一であれば、極値統計は厳密に適用できる。しかし、腐食条件が各々の区画で

* 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 (79-5, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501 Japan)

均一であるかどうかを厳密に判断することは一般に容易ではない。このために、多くの場合、局部腐食深さデータの属する母集団はすべての区画において同一であると仮定するか、もしくは厳密な議論を行わないで極値統計が用いられてきた。そのかわりに適用性の判断は、局部腐食深さが指数タイプの分布に従うか、あるいは最大局部腐食深さデータが2重指数分布に従うことを目安としてきた。全長が長い配管^{5),6)}や面積が大きなタンク底板⁷⁾に適用された場合でも同様である。しかし、局部腐食の進展速度は様々な要因に影響される。また、局部腐食の平均的な進展速度が同じであっても局部腐食発生までの期間が場所によって異なれば、ある時刻における局部腐食深さの分布も違ってくる。従って、腐食条件に差が見いだせない場合であっても、局部腐食深さデータに対しては、母集団が同一であると仮定することは常に適当とは限らない。この点は、極値統計を適用する際の大きな問題であると思われる。特に、長大な構造物では局部腐食深さの分布が多様化していると考えられる。

この問題に対しては、統計的手法の利用が考えられる。岡村⁸⁾は、化学装置のプロセス配管から得た最大局部腐食深さデータについて、等分散検定および分散分析を適用した。これらの統計的検定により、使用場所や形状の異なる配管から採取したデータ群が互いのグループ間で母集団に差があるかどうかの評価されている。統計的手法にはデータの解析のみから母集団の同一性を客観的に議論できるという利点がある。また、最大局部腐食深さデータのグループ間の差だけでなく、データ一つ一つについて同一の母集団からの標本であるかどうかを評価することもできる。つまり、データを分類すべきかどうかを判断するために必要な腐食条件や腐食様態に関する情報が不十分であっても、個々のデータについて母集団の同一性を判別できるということになる。従って、統計的手法を適切に利用すれば、母集団の同一性が不明確な場合にも極値統計の適用性をより正確に判別できる可能性があると考えられる。

そこで本研究では、母平均の信頼区間を推定することによって、最大局部腐食深さデータ一つ一つについて母集団の同一性を評価した。また、測定したすべての局部腐食深さデータを活用することにより、極値統計の適用性の判断をより厳密に行うことを試みた。これらの議論に基づいて、極値統計が適用できるとしてきた従来の判断基準の妥当性も検証した。解析した事例は、水道水として利用される河川水（水道原水）を送水する鋼製水路内面に生じたさびこぶ下の局部腐食である。この鋼製水路は、全長が約400 m、接水面積が約3100 m²で、従来の報告事例と比較して特に規模が大きい部類に入る。

2. 事例および調査

2.1 事例の概要

浄水場が河川などの取水場所から離れている場合、取水された水道原水は地中に埋設されたコンクリート製の水路によって浄水場まで送水される。しかし、峡谷部では水位を谷の部分まで下げずに送水するために鋼製の水路が渡されている。鋼製水路には水管橋と水路橋があるが、本研究で解析した事例は、全長が約400 m、断面の幅および高さが2.8 m、3.4 mの箱型水路橋である。この水路内部には水道原水が通流しており、調査時点までの使用期間は32年である。水道原水の水質をTable 1に示す。水路橋の構造材はSS 400鋼で、平均水位時における水路内面の接水面積は約3100 m²である。水路橋施工時には内面に膜厚0.3 mm以上のコールタールエポキシが塗装された。ただし、水路橋施工時以降現在に至るまで、内面全体の再塗装やその他の防食は施されていない。内面全体の再塗装ができないのは、流速1.8 m/秒で流れている水路内部の水道原水を長期にわたって停止できないためである。

2.2 腐食状態および調査方法

鋼製水路内面は、さびこぶが発生しており局部腐食状態にあった。さびこぶの下に生じていた腐食孔はすり鉢状で、開口部の直径は大きいもので約3 cmであった。局部腐食深さはデプスゲージを用いて0.05 mmの精度で測定した。また、水路内面は局部腐食を受けた部分以外には黒い被覆物が残存していた。これは状況から塗装の一部分と考えられるものであった。ただし、この被覆物は十分に水分を含んでおり防食機能はないと考えられる状態であった。

腐食調査は、全長約400 mの箱型水路において、40 m間隔の11か所の両側面を調査地点とし、合計22の区画で測定を行った。ただし、水路の底面は排水が完全でなかったために調査できなかった。各測定地点では、測定区画面積を1.8 m四方とし、測定区画内のさびこぶの数とさびこぶ下の局部腐食深さを測定した。1つのさびこぶの下に複数の腐食孔があった場合には、最大深さの測定値だけを解析に用いた。すなわち、1つのさびこぶに対して1つの局部腐食深さデータを得るようにし

Table 1 Water quality (Average through 1995)

Electric conductivity	200 μ S/cm
pH	7.9
[Cl ⁻]	11 mg/ ℓ
[SO ₄ ²⁻]	20 mg/ ℓ
Langelier index	-0.6

た。以上の手順によって、22の測定区画で合計191個のさびこぶをはがして191点の局部腐食深さデータを得た。

2.3 調査結果

Fig. 1に水路の片側側面における調査結果を示す。横軸は水路の端からの位置で測定地点を示している。棒グラフは 1 m^2 あたりのさびこぶの発生個数で、○プロットは各地点で測定された局部腐食深さの最大値である。本事例では、さびこぶの発生個数および局部腐食の最大深さが場所によって様々に異なっていた。なお、本論文の中では各地点で測定された局部腐食深さの最大値を最大値データと呼び、その他の局部腐食深さデータと区別する。

測定した局部腐食深さの全データ191点のヒストグラム

Fig.1 Maximum depth of localized corrosion and number of tubercles at each of investigated sites. Distance appearing in coordinate was measured from the entrance end of the channel.

Fig.2 Histogram of all corrosion depths.

ラムをFig. 2に示す。炭素鋼に生じたさびこぶ下の局部腐食深さに関しては、正規分布⁹⁾や指数分布¹⁰⁾に従うという報告がある。それに対して本事例の場合は、最頻値が中央より左側にあって右裾が指数的に減少していることから、正規分布と指数分布の中間的な分布をしている。これを2重指数確率紙にプロットするとFig. 3に示すように良い直線性が得られた。従って、局部腐食深さは2重指数分布に従っていることがわかる。

一方、測定1区画内の局部腐食深さは正規分布に従った。平均ランク法により正規確率紙プロットした一例をFig. 4に示す。3種のプロットはそれぞれ別の測定地点のデータであるが、いずれも良い直線性を示してい

Fig.3 Double exponential probability plot for all the depths included in Fig.2.

Fig.4 Normal probability plots of the depths measured at a few investigated sites.
 x : Distance of the site from the entrance of the channel.

Fig. 5 Double exponential probability plot of maximum depth data.

Fig. 6 Depths plotted against the rank of 191 samples.

る。ただし、平均はそれぞれ異なっている。

各測定地点で実測した最大値データの2重指数確率紙プロットをFig. 5に示す。ただし、22の測定地点のうち1地点ではさびこぶが生じていなかったため、最大値データ数は21である。良い直線性を示していることから、最大値データは2重指数分布に従っていることがわかる。

3. 極値統計の適用性の解析

3.1 最大値データの理論分布の導出

本事例では、測定1区画の面積を1.8 m 四方としたにもかかわらず1区画内のさびこぶ数は平均で9個であった。1区画の測定数が少ないために、この調査から得られた最大値データを極値の漸近分布であるGumbel分布に当てはめて最大深さを推定することは適切ではない。しかし、極値統計の理論を適用するための条件が成立しているかどうかについては議論できる。すなわち、1.8 m 四方の各測定区画から得られたデータが、すべての区画について同一の母集団からの標本と見なせるかどうかについて検定し、極値統計の適用性評価に関する留意点を考察する。

まずはじめに、得られた最大値データについて検討する。本事例では、測定位置によって局部腐食のメカニズムが異なるほどの腐食条件の差異はなく、局部腐食深さの分布はFig. 2に示したように一山の単峰型であった。従って、一見すると局部腐食深さデータは単一の母集団から得られていることが期待される。しかし、Fig. 1に示したように、本事例では局部腐食深さの最大値データが測定地点によって著しく異なっていた。このばらつきが統計誤差でなく母集団の違いによるものであれば、極値統計を適用することはできない。

Fig. 6に、測定した局部腐食深さの全データ191点を深さの順にプロットした結果を示す。22の測定区画から得た全データ191点は折れ線で示し、そのうち各測定区画における最大値データには○を記した。横軸に示した順位が1のデータは、実測した局部腐食の中で最も深い腐食孔のデータである。また、縦軸はその深さが5.6 mmであることを示している。図の横軸の順位から読み取れるように、○で記した最大値データは全体の上位50位以内に半数しか入っていない。極値統計を適用する場合、最大値データは最大値分布を与えるものでなければならない。しかし、得られた最大値データの順位は、全データの最大値側に位置しているとはいえない。このことは、最大値データに極値統計を適用できない可能性があることを示唆している。従って、本事例については、極値統計の適用性を何らかの方法で評価する必要があるといえる。しかし、極値統計の適用性を厳密に解析した報告は見あたらない。そこで、最大値データが従うべき理論分布を計算により導出し、実測した最大値データの分布と比較することで、極値統計を適用できるかどうかを評価することとした。

ここで、最大値データが従う理論分布の導出手順を示しておく¹¹⁾。局部腐食深さを確率変数 X とする母集団がある累積分布関数 $F(x)$ に従っているとすると、 $F(x)$ からの n 個の標本 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ の最大値を $x_{\max}$ とすると、 $x_{\max}$ もまた確率変数である。この確率変数をあらためて Y とおくと、 $Y = \max \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ であって、その累積分布関数 $\Phi(y)$ は

$$\Phi(y) = \{F(y)\}^n \quad (1)$$

で与えられる。 $F(x)$ が指数分布や正規分布のように指数タイプの分布であれば、(1)式は $n \rightarrow \infty$ で

$$\Phi(y) = \lim_{n \rightarrow \infty} \{F(y)\}^n = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{y-\lambda}{\alpha}\right)\right\} \quad (2)$$

の2重指数分布 (Gumbel 分布) に漸近する。ここで α は尺度パラメータ, λ は位置パラメータである。これは, 元の分布 $F(x)$ が明らかでない場合でも, 最大値データを2重指数分布に当てはめて解析できることを示している点で重要である。ただし, $F(x)$ がわかる場合には, (1)式により最大値データが従う理論分布の厳密形が求められる。例えば $F(x)$ が2重指数分布の場合には, (1)式を解析的に計算することができる。Fig. 3 に示したように, 本事例では実測した局部腐食深さが2重指数分布に従っていたので, 母集団の分布 $F(x)$ も2重指数分布であるとして解析することとした。2重指数分布の累積分布関数は,

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{x-\lambda}{\alpha}\right)\right\} \quad (3)$$

で表されるから, 確率変数 X を Y に置き換えて(1)式に代入すると $\Phi(y)$ は(4)式のように求められる。

$$\begin{aligned} \Phi(y) &= \left[\exp\left\{-\exp\left(-\frac{y-\lambda}{\alpha}\right)\right\} \right]^n \\ &= \exp\left\{-\exp\left(-\frac{y-\lambda-\alpha \ln n}{\alpha}\right)\right\} \end{aligned} \quad (4)$$

これを变形すると

$$-\ln[-\ln\{\Phi(y)\}] = \frac{y}{\alpha} - \frac{\lambda + \alpha \ln n}{\alpha} \quad (5)$$

となる。(4)式からわかるように, n 個のデータを測定して得られる最大値の分布は, 尺度パラメータが元の分布と同じで, 位置パラメータが $\alpha \ln n$ だけ大きくなる。また, (5)式からわかるように, 縦軸に $-\ln[-\ln\{\Phi(y)\}]$, 横軸に y をとった2重指数確率紙においては, 元の分布の直線と傾きが同じで, 横軸方向に $\ln n$ だけ平行移動した直線となる。

3.2 実測したすべての最大値データに対する適用性

Fig. 7 に, 実測したすべての最大値データ 21 点および最大値データの理論分布の2重指数確率紙プロットを示す。○が実測した最大値データのプロットで, 破線が理論分布である。最大値データの理論分布は, (1)式に示したように母集団分布 $F(x)$ が与えられれば計算により求められる。そこで, Fig. 3 に示した局部腐食深さの実測分布が母集団分布に等しいと仮定して, この理論分布を導出した。Fig. 7 では例として, $n=1, 3, 5, 10, 20$ とそれぞれに Fig. 3 の当てはめ線より読みとった $\alpha=0.94$, $\lambda=1.2$ を(5)式に代入して求めた結果を5本の破線で示した。最大値データの従う分布は標本数 n の大きさに依存し, n が大きいほど右に平行移動した直線となることがわかる。なお, $n=1$ として求めた分布は Fig. 3 に示した局部腐食深さの実測分布と同じであ

Fig.7 Comparison of practical and theoretical maximum depths plotted on double exponential probability paper. Dashed lines show theoretical extreme value distributions with different sample sizes (number of pits), ranging $n=1$ to 20.

る。

ここで, ○プロットと破線を比較してわかるように, 実測した最大値データの分布は, 傾きが理論分布と異なっている。また, 最大値データは各測定区画において平均で9個の局部腐食深さを測定して得たものである。しかし, 標本数 $n=9$ の理論分布とは一致せず, むしろ n の小さい側において最大値の分布を与えているとはいえないことがわかる。このような最大値データの実測分布と理論分布の不一致は, 局部腐食深さデータと最大値データの間に, (1)式の関係が成立していないことを示している。この不一致の原因としては, 最大値データが同一の母集団から得られた標本でないことが考えられる。その場合には, 極値統計を本事例に対して適用することはできない。

3.3 母集団の同一性の評価

あるいくつかのデータ群がいずれも同じ母集団からの標本と見なせるかどうかは, 統計的手法により判別できる。その1つが, 標本から母集団の平均である母平均の区間を推定するという手法である。この手法により推定された母平均の区間が異なれば, 各データ群は互いに異なる母平均を持つ母集団からの標本と見なされる。すなわち, 母集団は同一ではないと判断できる。本事例では, Fig. 4 に示したように測定1区画における局部腐食深さデータは正規分布に従った。そこで, 測定1区画における局部腐食深さデータは正規分布に従う母集団からの標本であるとして, 各測定区画ごとのデータについて母平均の信頼区間を推定した。信頼度 0.99 で推定された区間を Fig. 8 の棒グラフで示す。ただし, 標本数が少

Fig. 8 99% confidence interval for population mean.

ないと精度が低下し推定される区間が広くなるため、結果は1区画の測定数が10~17個の範囲にあった12の地点についてのみ示した。母平均の信頼区間は、測定区画によっては互いに重なる部分がないことから、この12か所の測定区画から得られたデータは、すべてについて同一の母平均を持つ母集団からの標本とは見なせないことがわかる。

3.4 同一の母集団に分類した最大値データに対する適用性

次に、母平均の信頼区間の推定結果を用いて、母集団が同一と見なせるデータを分類する。Fig. 8において、例えば母平均が1.1 mmの位置に引いた点線は、各棒グラフと8か所の測定区画について重なる。これにより、母平均の信頼区間に1.1 mmが含まれる8か所の測定区画を選び出し、データを分類した。分類した局部腐食深さデータ93点と最大値データ8点の2重指数確率紙プロットをFig. 9に示す。局部腐食深さデータについては▲プロットで、最大値データについては○プロットで示した。いずれも良い直線性を示しており、2重指数分布に従っていることがわかる。破線は、最大値データの理論分布である。これは、▲プロットの当てはめ線より読み取った $\alpha = 0.58$, $\lambda = 0.57$ と1区画の測定数の平均値 $n = 12$ を(5)式に代入して求めた。○プロットで示した実測の最大値データの分布は理論分布とよく一致している。この一致は、局部腐食深さデータと最大値データの間に、(1)式に示した関係が成立していることを示している。従って、分類したデータについては極値統計の理論が成立していることがわかる。

Fig. 7とFig. 9を比較してわかるように、Fig. 8に示した方法で母集団が同一と見なせるデータを分類することにより、極値統計の理論が成り立つように改善された。このことは逆に、分類前のFig. 7に示したデータに関しては、母集団の同一性という前提条件が満たされ

Fig. 9 Comparison of practical maximum depths (○) and theoretical ones (---) on double exponential probability paper. Line ▲ is the distribution of the individual depths obtained by practical measurements.

ていなかったために、極値統計の理論が成立していなかったことを示している。従って、本事例に対しては極値統計を適用できないと判断できる。

ここで、もう1つ重要なことは、Fig. 7で示したデータが極値統計理論の成立しないデータであるにもかかわらず、Fig. 7の○プロットで示したように最大値データが2重指数分布によく従っているという点である。従来、最大値データが2重指数分布に従っているかどうかは、極値統計の適用性を判断する1つの目安であった。しかし、以上の解析結果は、最大値データが2重指数分布に従っても、極値統計を適用できない場合があることを示している。

4. 極値統計を適用する場合の留意点

4.1 極値統計の適用性の判断基準

本事例では、最大値データが2重指数分布によく従っていたこと以外にも、極値統計を本事例に対して適用できると判断されるような要件が満たされていた。第1に、局部腐食のメカニズムが本質的に異なるような腐食条件の差異は無く、かつFig. 2に示したように局部腐食深さの分布は単峰型であった。従って、一見すると局部腐食深さデータは単一の母集団からの標本と見なせる状況にあった。第2には、局部腐食深さは指数タイプの分布に従っており、最大値データを2重指数分布に当てはめるための前提条件が成り立っていた。従来の多くの報告事例では、これらの要件が満たされていれば、極値統計が適用されてきた。しかし、Fig. 8に示したように母平均の信頼区間を推定すると、測定区画によっては局部腐食深さ分布の母集団が異なると判断された。さら

に、Fig. 7 に示したように、最大値データの実測分布と理論分布を比較することによって、極値統計が適用できないことが示された。以上の解析結果は、極値統計が適用できるかどうかについての従来の判断の目安は、常には妥当ではないことを示している。従って、極値統計の適用性は、母集団の同一性を考慮して、より厳密に評価する必要があるといえる。本論文で示した母平均の信頼区間の推定および最大値データの実測分布と理論分布の比較は、その一例である。

4.2 母集団が異なる原因

本事例では、さびこぶの発生個数と局部腐食深さ分布の両方が測定位置によって著しく異なっていた。この理由については明らかではないが、水路の構造との対応はなく、水路内面が接している溶液環境はどの場所でも同じであることを考慮すると、内面塗装が原因と考えられた。塗装の状態は場所によって不均一で、良好な部分と不良な部分がランダムに存在するであろうから、局部腐食の程度が測定位置によって様々であったことを説明できる。例えば、塗膜の欠陥部分が局部腐食の起点となつたとすると、さびこぶの発生個数が多い場所では、塗膜の欠陥部分が多かったと考えられる。また、深い腐食孔が生じているのは、局部腐食発生までの誘導期間が短かったか、強いカソードにより局部腐食の進展速度が速かったためと考えることができる。誘導期間やカソードの強さについても、塗装の状態が影響するものと思われる。従って、局部腐食深さの分布が場所によって様々に異なった原因は、局部腐食のメカニズムが異なるためではなく、塗装の初期状態およびその後の劣化の程度が違っていたためと推察した。ただし、内面調査時点における外面観察からは塗装状態と局部腐食の程度の間接関係は見いだせなかった。

ところで、塗装の不均一性は一般に避けることができない。しかも、場所によって様々に異なりうる。従って、塗装された事例に対して極値統計を適用しようとする場合には、十分な配慮が必要になるとと思われる。

4.3 測定1区画の最小面積の決定

極値統計解析による最大局部腐食深さの推定手法を適用する場合、1区画の面積は少なくともその区画内に局部腐食個数が20個程度はあるような大きさであることが必要とされている²⁾。これは、極値の漸近分布であるGumbel分布に最大値データを当てはめるための前提条件である。ただし、本事例のように場所によって局部腐食深さの分布が様々に異なる場合には、1区画の面積についてはさらに注意して決定する必要がある。本事例の腐食状態を模式的に表すと Fig. 10 のようになる。Fig. 10 は、局部腐食深さの程度が4段階に異なっており、かつその配置がランダムである場合を示している。

Fig. 10 Illustration for non-uniform distribution of severity of localized corrosion.

このような場合には、1区画の面積が小さいと区画ごとによって局部腐食深さの分布が異なるので極値統計を適用できない。しかしながら、Fig. 10 の四角枠で示したように測定区画の面積を十分に大きくとれば、区画ごとの分布の差は次第に小さくなるので極値統計が適用できるようになると考えられる。実際、局部腐食深さの程度が場所によってランダムに異なる場合でも、1区画の面積を大きくとることによって極値統計解析を適用できたという報告がある³⁾。従って、推定対象範囲を分割したすべての区画について、その区画内の局部腐食深さの分布が均質となるように、すなわちデータが同一の母集団からの標本と見なせるという条件を満たすように測定1区画の最小面積を決定する必要があるといえる。

本事例で調査した1.8 m 四方の測定区画面積は、極値統計を適用した他の事例^{3), 6), 7)}における測定区画面積よりも大きい。このことは、従来の報告では1.8 m 四方以下の面積でもその区画内に十分な数の局部腐食個数が存在したというだけでなく、各測定区画において局部腐食深さの分布が均質であったということも示唆している。一方、本事例の場合では測定1区画を1.8 m 四方としたが各測定区画の分布は均質ではなく、極値統計を適用できなかった。従って、測定区画の面積は1.8 m 四方よりも相当大きくする必要があったといえる。ところで、本事例において局部腐食深さの分布が場所によって様々であった原因は塗装の不均一性と考えられた。従って、塗装の不均一性による影響が予想される局部腐食の事例に対して極値統計を適用しようとする場合には、従来の報告例以上に測定区画面積を大きくとることを考慮する必要があると思われる。また、1区画の局部腐食個数が20個以上となるように面積を決定したとしても、母集団分布が均質化したかどうかについては検定した上で、極値統計を適用することが望ましいと思われる。

5. 結 論

水道原水を送水する鋼製水路内面に生じたさびこぶ下

の局部腐食の事例を解析し、極値統計の適用性評価に関して以下の知見を得た。

(1) 局部腐食のメカニズムが異なるような腐食条件の差異がなく、局部腐食深さデータの分布が単峰型の場合でも、局部腐食深さの最大値データが同一の母集団からの標本と見なすことはできないことがある。

(2) 局部腐食深さデータが指数タイプの分布に従い、あるいはまた局部腐食深さの最大値データが2重指数分布に従う場合でも、極値統計を適用できないことがある。従って、局部腐食深さの最大値データに対する極値統計の適用性は、より厳密な手続きで評価する必要がある。

(3) 極値統計の適用性の評価には、局部腐食深さデータが有効に利用できる。本事例解析では、母集団の同一性を客観的に評価するために、母平均の信頼区間を推定する手法を用いた。また、極値統計の適用性は、最大値データの実測分布と理論分布を比較することでより厳密に評価した。その結果、信頼度0.99で推定された母平均の信頼区間が互いに一致しないデータに対しては、極値統計を適用できなかった。

(4) 本事例では測定1区画の面積を1.8 m 四方としたが、測定区画内の局部腐食深さの分布は場所によって様々であった。この原因としては、塗装状態の不均一性が考えられた。仮に、測定区画面積を大きくすることで

区画ごとの分布が均質化し、極値統計解析を適用できるようになるとしても、その面積は1.8 m 四方よりも相当大きくする必要があると予想された。本事例のように塗装状態の不均一性の影響があると考えられる事例では、測定区画面積についての十分な配慮が必要である。

(Manuscript received August 27, 1998;
in final form December 11, 1998)

参 考 文 献

- 1) 腐食防食協会編：「装置材料の寿命予測入門—極値統計の腐食への適用」, p. 20, 丸善 (1984).
- 2) 腐食防食協会60-1分科会：防食技術, **37**, 768 (1988).
- 3) 今川博之, 松野健三：材料, **38**, 823 (1988).
- 4) T. Shibata: *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, **99**, 327 (1994).
- 5) 小向 茂, 笠原晃明：材料と環境, **43**, 258 (1994).
- 6) 山本一雄：第58回腐食防食シンポジウム資料, p. 14, 腐食防食協会 (1984).
- 7) 荒木了一, 三浦昭夫, 堺 松成, 横山二郎, 横矢重治：圧力技術, **24**, 124 (1986).
- 8) 岡村辰夫：化学装置, **35**, 60 (1993).
- 9) 正村克己, 松島 巖：材料, **36**, 47 (1987).
- 10) 高崎新一, 紺谷武司：材料, **36**, 72 (1987).
- 11) 伊藤 學, 亀田弘行, 黒田勝彦, 藤野陽三 共訳：「土木・建築のための確率・統計の応用」, p. 207, 丸善 (1988).