局部腐食の確率統計的性質とその評価*

柴田 俊夫**

** 大阪大学大学院工学研究科マテリアル応用工学専攻

Statistical and Stochastic Aspects and Evaluation of Localized Corrosion*

Toshio Shibata**

** Department of Materials Science and Processing,
 Graduate School of Engineering, Osaka University

Statistical and stochastic aspects of localized corrosion such as pitting corrosion and stress corrosion cracking have been reviewed and discussed. Stochastic theory was introduced to rationalize time dependent pitting process and distribution of pitting potential. A birth and death stochastic process was found properly to describe the generation and repassivation process of pitting. The stochastic analysis could provide rational estimates of the pit generation rate and repassivation rate, which, in turn, decide pitting potential. Statistical analysis of spatial distribution of pits for evaluation of atmospheric exposure test and recent advances of extreme value analysis were discussed.

Key words : localized corrosion, statistical analysis, stochastic theory, extreme value analysis,

1. はじめに

局部腐食の示す確率統計的性質に興味と関心をもつようになったのは、腐食防食協会に孔食電位の測定法に関する分科会¹⁾ (久松敬弘教授主査) が設けられて、それに加わるよう岡田秀弥博士からお誘いを受けたときにさかのぼる。この分科会での活動は JIS 規格の原案を作成するのに大きな貢献をしたことで知られているが、当時北大にいた私は旅費もままならず分科会に出席したのは1回かあるいは出席しなかったようにも記憶している。出席はできないが、委員としての責任を果たそうと、分科会で提案された測定法に従って SUS 304 ステンレス鋼の孔食電位を何回か測定してみた。ところが実験手順を吟味して測定をしてみても、実験を繰り返すたびに異なった値しか得られない。かなりの回数の実験を行ったが、ばらつきはおさまらない²⁾。そこでばらつきを何とかしなければと考えて、多数回の実験をまとめて行う多点式孔食試験装置を開発^{3), 4)}するとともに、確率統計的性質に関する文献を勉強し始めた。平田森三⁵⁾や横堀武夫⁶⁾教授らの論文や著書などが大変参考になったし、

増子昇教授⁷⁾が当時すでに不均一組織の評価という観点から局部腐食の確率統計的性質について論文を発表しておられたことも大きな刺激となった。岡本剛教授が東京理科大で始められたノイズの研究⁸⁾も局部腐食の確率統計的性質に関係することが明らかとなり、これも研究のモチベーションとなった。

またオハイオ州立大学の R. W. Steahle 教授のもとで応力腐食割れに関連して急速ひずみ電極法の開発に携わったが、このとき Steahle 教授の研究室では多数個の線状試験片を用いて応力腐食割れ寿命値分布を測定していた。確率分布としての取り扱いまでは行っていなかったが、寿命平均値とそのばらつきが鋼種に依存することが示されていた。腐食防食討論会や鉄鋼協会の西山記念技術講座で応力腐食割れの確率統計的性質⁹⁾についてまとめる機会に、実際のデータも測定することとしたが、このときにオハイオ州立大学での見聞が大いに役立った。

極値統計についても局部腐食の定量的評価の観点から興味をもっていたが、本協会のアクティブメンバーの方々とともに装置材料の寿命予測分科会活動^{10), 11)}を通じて、実際面への適用に多少の貢献をすることができた。

いずれにしても局部腐食の確率統計的性質の研究の始

* 材料と環境 '98 (東京, 1998 年) で発表

** 〒565-0871 吹田市山田丘2-1 (2-1, Yamadaoka, Suita, 565-0871 Japan)

めから、本協会に関係する方々に関心をお寄せいただき、またご激励を頂いたことに深甚なる謝意を表する次第である。

2. 確率現象としての孔食発生

図1は、SUS 304 ステンレス鋼を不動態化した後に、 $MgCl_2$ 溶液中で孔食を発生させたときの孔食発生点の分布を示した電顕写真¹²⁾である。大小のピットが分布しているが、このピットの個数分布を解析してみると図2のようにランダム現象で特徴的にみられるポアソン分布

$$P(x) = (m^x / x!) \exp(-m) \quad (1)$$

に従っていることがわかる。ここで $P(x)$ は単位区画中に x 個のピットの発生した確率で、 m は平均値である。このことから孔食の発生はランダムな確率統計的現象

図1 不動態化した SUS 304 鋼に生成したピットの分布

図2 図1のピットの二次元分布の実測値(—○—)とポアソン分布に従うとしたときの理論値(—●—)の比較

象として取り扱う必要があることが示唆される。

図3は、多点式孔食試験装置で測定した孔食電位の測定例²⁾である。図中には私が同一の手順で繰り返し実験を行って測定したデータの分布と、実験条件のそろった多点式孔食試験装置による測定データの分布、および異なる研究機関が同一の手順でラウンドロビンテストを行った結果の分布とが正規確率紙にプロットしてある。分布のプロットが直線となることから、ほぼ正規分布に従うとみてよい。直線の傾きから得られる標準偏差がいずれの場合もほぼ等しいことから、孔食電位の分布はこの程度のばらつきを示すのは避けられないことがわかる。

3. 出生死滅確率過程としての孔食発生

孔食がランダムに発生することは、図1、図2や図3の例からも明らかであるが、これらの発生およびその時間的変動は簡単な確率過程として表すことができる。すなわち、単位時間あたりの平均孔食発生速度を λ とすると、 t 時間後には、 $m = \lambda t$ の孔食が発生する。したがって、式(1)に $m = \lambda t$ に代入して、

$$P(x) = ((\lambda t)^x / x!) \exp(-\lambda t) \quad (2)$$

となる。また区画に最初にピットの発生するまでの時間の確率は、 $x = 0$ において、

$$P(t, x = 0) = \exp(-\lambda t) \quad (3)$$

である。また $P(t)$ の時間的变化は、式(3)の微分によ

図3 正規確率紙にプロットした孔食電位分布。(g)と(f)は11の機関の測定値、(e)は多点式孔食試験装置を用いて測定した値、(b)は繰り返し実験による測定値

て与えられ,

$$dP(t)/dt = -\lambda P(t) \quad (4)$$

である。上の例は、一つの試験片に多数の区画のある場合の発生時間分布であるが、これは多数 (N) 個の試験片についての孔食発生時間分布に、そのまま適用される。すなわち N 個の試験片が時間と共に一定の確率で孔食を発生するとすると、まだ孔食を発生していない試験片の存在確率 (残存確率), P , の時間的变化は,

$$dP/dt = -\lambda P \quad (5)$$

のように P に比例して減少する出生確率過程¹³⁾ である。ただし n を孔食の発生した試験片数として, $P = 1 - n/(N+1)$ であり, λ は孔食発生速度に対応する発生推移確率である。

一方孔食発生のみでなく, 再不働態化による孔食の死滅を考えると, 式(5)に死滅過程が加わり,

$$dP/dt = -\lambda P + \mu(1-P) \quad (6)$$

と表される¹⁴⁾。ここで μ は孔食死滅の推移確率であり, 再不働態化速度に対応する。 $t = t_0$ のとき $P = 1$ の条件で式(6)を積分すると, 出生死滅確率過程の残存確率分布の式

$$P = \mu / (\lambda + \mu) + \lambda / (\lambda + \mu) \exp(-(\lambda + \mu)(t - t_0)) \quad (7)$$

が得られる。

図4はFe-17Cr フェライトステンレス鋼の3.5% NaCl 水溶液中の定電位における孔食発生誘導時間の実測分布を解析した例¹⁴⁾ である。横軸は孔食発生誘導時間であり, 縦軸は N 個の試験片のうち孔食を発生していない試験片の割合—残存確率 (P)—である。図にみられるように, 定電位に設定した初期には全く孔食を発生しない潜伏時間, t_0 , が認められ, その後時間の経過とともに孔食を発生した試験片の数は増えて残存確率は小さくなるが, 長時間後には式(7)の予測とおり一定の値に漸近する。実測分布を式(7)に当てはめることによって, 分布を決定する三つのパラメータ (λ , μ , t_0) を一

図4 17Cr ステンレス鋼の定電位における孔食発生誘導時間分布

図5 式(7)を用いて孔食発生誘導時間分布を解析して求めた λ と μ の電位依存性

義的に求めることができる。

図5に実験的に求められた λ , μ の電位依存性を示した。図から明らかなように, 孔食発生速度, λ , は大きな電位依存性を示し,

$$\lambda = \lambda_0 \exp(-\beta E) \quad (8)$$

あるいは

$$\lambda = \alpha(E - E_{crit}) \quad (9)$$

によって表される。これに対して, 孔食再不働態化速度, μ , は, これまで解析したいずれの場合においても電位依存性を示さないことがわかっている。また潜伏時間, t_0 , は

$$t_0 = t_{00} \exp(-\gamma E) \quad (10)$$

に従う。

3.1 孔食電位の電位移動速度依存性

動電位法を用いて孔食電位を測定する場合を考えると, 初期電位, E_0 , から貴方向へ一定速度, v , で変化させるときの電位は

$$E = E_0 + vt \quad (11)$$

で与えられる。すなわち

$$dE/dt = v \quad (12)$$

である。ここで式(5)の単純出生確率過程について残存確率の電位依存性を考えると,

$$dP/dE = (dP/dt)(dt/dE) = (-\lambda P)(1/v) \quad (13)$$

となる。さらに孔食電位分布の最頻値を孔食電位と定義すると, 孔食電位は残存確率密度分布の頂点の値となるので,

$$d^2P/dE^2 = 0 \quad (14)$$

における E の値が孔食電位, E_m , となる。式(13)を再度 E で微分すると,

$$d^2P/dE^2 = (1/v)(-Pd\lambda/dE - \lambda dP/dE) \quad (15)$$

となるので、式(14)の条件から

$$d\lambda/dE = (-\lambda/P)(dP/dE) = (-\lambda/P)(-\lambda P)(1/v) = \lambda^2(1/v) \quad (16)$$

が得られる。ここで λ の電位依存性が式(8)に従う場合には、式(16)に式(8)を代入し積分することによって、孔食電位の電位移動速度依存性が

$$E_m = (1/\beta)\ln(v\beta/\lambda_0) \quad (17)$$

のように導かれ、 λ の電位依存性が式(9)に従う場合には、

$$E_m = (v/\alpha)^{1/2} + E_{crit} \quad (18)$$

となることが導かれる。

図6は孔食電位の電位移動速度依存性を $v^{1/2}$ の関数としてプロットしたもので、いずれの場合も直線となって式(18)の関係が成立しているとみることができる。したがって孔食発生速度, λ , の電位依存性は式(9)に従っていると考えられる。

3.2 孔食電位の表面積依存性¹⁵⁾

ふつう孔食電位は環境を指定すれば材料固有の特性値となると考えられているが、孔食発生が発生点の分布に依存するランダム現象であることを考慮すると、発生点の分布は表面積に依存するので孔食電位も表面積に依存すると考えなければならない。すなわち孔食発生速度を単位面積について定義し、これを κ とすると、表面積, S , の孔食発生速度は

$$\lambda = S\kappa \quad (19)$$

によって与えられる。式(17)あるいは式(18)に式(19)を代入することによって、孔食電位の表面積依存性は

$$E_m = (1/\beta)\ln(v\beta/S\lambda_0) \quad (20)$$

$$E_m = (v/S\kappa\alpha)^{1/2} + E_{crit} \quad (21)$$

となる。図7は式(20)および(21)の孔食電位の表面積依存性を図示したものであって、いずれの場合も表面積の増加にともなって孔食電位は卑の値をとるが、式(21)の場合には下限値, E_{crit} , に漸近する。これらの関係の成立することは実験的にも確認⁹⁾ されている。いずれにしても実験室で小面積試験片について測定された孔食電位の値よりも、表面積の大きな実際の装置では低い孔食電位の値をとることに留意する必要がある。

3.3 λ と μ によって決定される孔食電位

出生死滅確率過程に従う場合には、図8¹⁶⁾ に示したように、孔食電位は

$$\lambda = \mu \quad (22)$$

のときの電位として定義される。すなわち $\lambda < \mu$ の場合

図7 孔食電位の表面積依存性

図6 孔食電位の電位移動速度依存性

図8 λ と μ によって決定される E_{crit} , および合金元素の効果

には、孔食発生速度よりも再不動態化速度が大きいので、マクロの孔食は発生しないが、 $\lambda > \mu$ となると孔食発生速度が再不動態化速度よりも大きくなってマクロの孔食が発生することになる。したがって式(22)の条件が出生死滅確率過程から見た孔食発生臨界電位、 E_{crit} 、を与えることになる。この臨界電位は通常測定されている孔食電位に一致する。

3.4 λ , μ および孔食電位に及ぼす諸因子の効果

図8には、ステンレス鋼における λ , μ および E_{crit} に及ぼす合金元素効果を図示した。Cr, Ti, Nbなどは、再不動態化速度, μ には影響を与えず、もっぱら孔食発生速度, λ , を減少させることによって孔食電位を上昇させていると解析された。一方Moは λ を減少させるとともに μ を増大させることによって孔食電位を上昇させていることが明らかとなった。また層流域における流速の増大は λ には影響せず μ を増大させることによって孔食電位を増大させる。 λ および μ はともに温度依存性を示すが、 μ の依存性は小さい。 λ および μ におよぼす諸因子の影響をまとめて表1¹⁶⁾に示した。

4. 孔食出生死滅確率過程のモンテカルロシミュレーション^{17), 18)}

出生死滅確率過程モデルから導かれた式(7)に基づいて λ および μ を求めることによって孔食電位に及ぼす諸因子の効果を定量的に解析することができる。しかしながらこのアプローチは基本的には現象論的である。出生死滅確率過程をモデル化し、モンテカルロシミュレーションによって測定結果を再現することができるならば、この確率モデルの妥当性を確認することができる。さらにこのモデルを用いてパラメータを広範囲に変化させることによって、孔食電位に及ぼす諸因子の影響をより明確にすることができる。

図9は定電位における孔食発生の出生と死滅の確率モ

図9 ミクロピット発生と再不動態化による死滅およびマクロピット生成への変化に伴う電流変化の模式図

デルである。塩素イオンの存在しない溶液中においてステンレス鋼を定電位に保つと不動態皮膜の成長に伴ってアノード電流は低下する。ほぼ定常状態となったところで塩素イオンを添加すると、一定の誘導時間を経過した後にミクロピットの発生と再不動態化によるミクロピットの死滅に伴う電流ノイズが生じる。発生も再不動態化もともにランダムなポアソン過程に従うが、再不動態化が生じないうちにミクロピット内の酸性化が進行するとマクロピットとなり、これが孔食発生として観測される。マクロピットへの変化はピット内部への溶解電気量が特定の臨界値を超えると生じると考えられる。以上の孔食出生死滅確率過程のシミュレーションを図10に示した。ここで発生時間, K , および再不動態化時間, L , はともに指数分布に従うと仮定し、 λ および μ は実験事実に基づく電位依存性を仮定している。またミクロピットが成長し、その電気量が臨界値, G , を超えるとき、マクロピットとなると仮定する。

上記の定電位モデルによって再現した孔食発生誘導時間分布を図11に示したが、このシミュレーション結果は図4の実験結果を正確に再現している。さらにこの定電位モデルに電位の時間的変化を導入することによって、動電位法による孔食電位分布を再現することができる。電位移動速度依存性をシミュレーションした結果を図12に示した。

5. RN による耐候性評価¹⁹⁾

めっきや塗装などの表面被覆材、あるいはステンレス鋼やアルミニウム合金などの耐食性材料を建材や景観材

表1 λ , μ および t_0 に及ぼす諸因子の影響

	Potencial	[H ⁺]	[Cl ⁻]	[Mo]	[Cr]	Temp.	Aging	Flow
λ	↑	—	↑	↓	↓	↑larger	↓	—
μ	—	—	↓	↑	—	↑smaller	—	↑
t_0	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↑	↓

(A) (↑) increase, (↓) decrease, and (—) no effect.

図10 シミュレーションにおける基本仮定

図11 シミュレーションによって得られた孔食発生誘導時間分布

図12 シミュレーションによって得られた孔食電位分布

料として使用するとき、表面劣化や劣化速度の定量的評価が求められる。表面の美観に関係するのは、しみ、さび、くもりなどもっぱら腐食の局在化と分布などであって、重量減少や肉厚減少などでは評価できない項目である。

JIS や ASTM などの規格では、試験片の表面を目視によって判定する際に標準図形と見比べて RN によって等級をつける方法が行われているが、分布の詳細にまで論ぜられることはない。実は RN の数値は腐食面積率, S , と直接関係していて、

$$RN = A - B \log(S) \quad (23)$$

となるように決められている。ここで S は、腐食発生点の個々の面積を s_i とすると、

$$S = \sum s_i \quad (24)$$

のように個々の面積の総和によって与えられる。海浜環境に暴露後のステンレス鋼の表面についての結果をみると、初期の表面美観の劣化(RNの減少)は主として腐食発生点の個数の増加によって生じ、後期になると発生点の合体によって生じることが明らかになっている。

ところで、表面の見た目による違いは、上に述べた発生点の数だけではなく、発生点の分布も大きな影響を与える。増子⁷⁾は金属格子のような規則的配列とランダムおよびクラスター状パターンを識別するために、次のような均一度関数, H , を導入した。

$$H = \sum (q_j / q_T) \log_2(q_j / q_T) \quad (25)$$

q_j は j 番目の面積における数密度であって、 q_T は全面積についての発生点の数である。この関数は発生点が一の分散をするとき最大値をとり、一箇所に集まると $H = 0$ となる性質をもつ。また発生点分布が完全にランダムなポアソン分布に従うときを H_0 として、この分布との差を新たに D 関数として

$$D = H - H_0 \quad (26)$$

定義して、任意の分布の完全なランダム分布からの偏りを表した。

また Martin & Mcknight²⁰⁾ は、ポアソン分布の平均, m , と分散, V , が等しいことに着目し、 $V/m = 1$ のとき完全にランダム、 $V/m < 1$ のとき規則化、 $V/m > 1$ のときクラスター化パターンと分類することを提案している。われわれ¹⁹⁾ は V/m による判定基準によってステンレス鋼の発錆点分布が暴露初期のランダムから合体によってクラスター化する変化を解析できることを明らかにした。

6. 極値統計の局部腐食評価への適用

極値統計手法が局部腐食の深さの解析に適用できるこ

とは Gumbel の解説²¹⁾ および著書²²⁾ にふれられていたが、これを実際問題へ適用してその有用性が明確にされたのは、腐食防食協会の装置材料の寿命予測分科会に参加された関係者の精力的な活動による賜物である。とくに最初の寿命予測分科会(小若正倫主査)によって公開された入門書²³⁾の極値統計普及への貢献は大きい。引き続いて設置された寿命予測分科会(Ⅱ)による解析手順のマニュアル化²⁴⁾とパソコンソフト(EVAN)の開発²⁵⁾、寿命予測分科会(Ⅲ)による Windows 95-Excel 上で動くパソコンソフト(EVAN-Ⅱ)の開発²⁶⁾も本方法の普及に大きく貢献した。また日本材料学会腐食防食部門委員会の活動²⁷⁾や今川²⁸⁾の実際面への適用の貢献は大きい。ガンベル分布を用いた局部腐食深さの最大値の面積依存性と最大値推定の手順はマニュアル²⁴⁾に述べられているとおりであるので、ここでは適用に当たったの問題点についてのみ述べることにする。

極値統計手法を適用するに当たって、まず問題となるのは、対象とする装置の面積から、どのような大きさの小面積試験片を何個採取すべきかである。これについては、マニュアルの付録に若干の考察が述べられており、また装置材料の寿命予測分科会(Ⅲ)での検討をふまえると、次のような手順が妥当と考えられる。

1. 一定の腐食条件の部位を選んで解析対象とする。
2. 採取する小面積試験片の面積, s , を, 20~30 個の孔食を含むように定める。
3. 対象とする装置の面積, S , は既知であるので, $T = S/s$ によって再現期間を求める。
4. T vs. N の曲線は与えられているので, この曲線から T に対応する採取する小試験片の数, N , を求める。ただしこの場合, α/λ の値が既知である必要があるが, これまでのデータから $\alpha/\lambda = 0.3$ としてよい。

7. 応力腐食割れ寿命分布^{9), 27)}

極値分布には上記のガンベル分布のほか最小値分布に適用されるワイブル分布がある。この分布は材料分野ではセラミックスの強度分布の解析に用いられことで知られているが、むしろ信頼性工学で寿命分布の解析に用いられその有用性を発揮している。

応力腐食割れ寿命はもっとも短い寿命が問題となるので最小値分布としてのワイブル分布が当てはまる²⁹⁾。図13に MgCl_2 溶液中の 17Cr-11Ni ステンレス鋼の応力腐食割れ寿命分布³⁰⁾をワイブル分布によって解析し

図13 ワイブル分布に従う 17Cr-11Ni ステンレス鋼の応力腐食割れ破断寿命分布

た例を示した。荷重の低下とともに寿命分布は長寿命側へシフトし、同時に分布の傾きは1に近づいている。すなわち長寿命側ではランダムなポアソン過程の特徴である指数分布となる。これを信頼性工学では偶発故障型と呼んでいる。

8. おわりに

故岡本剛先生のご指導のもとで、博士課程学生として行った「ステンレス鋼の不動態皮膜の耐食機能に関する研究」を出発点として、ずっとステンレス鋼を対象として研究を行ってきたが、決定論的観点の研究に加えて、途中から局部腐食の確率統計的性質とその評価の研究に関わるようになって今日にいたった。冒頭にも述べたように、この研究の端緒もその後の展開もすべて腐食防食協会の会員の方々からの示唆、ご激励によっている。記して感謝申し上げる。またばらつきの多いデータを多数測定するという根気の必要な研究につきあって下さった多くの学生諸君また研究室の皆さんに深く感謝いたします。

(1998年8月17日受理)

文 献

- 1) 腐食防食協会, ステンレス鋼の局部腐食試験法分科会報告: 防食技術, **26**, 539 (1977).
- 2) 柴田俊夫, 竹山太郎: 防食技術, **26**, 25 (1977).
- 3) T. Shibata and T. Takeyama: *Corrosion*, **33**, 243 (1977).
- 4) 柴田俊夫, 竹山太郎: 防食技術, **27**, 71 (1978).
- 5) 平田森三: 機械の研究, **1**, 231 (1949).
- 6) 横堀武夫: 材料強度学, 技報堂 (1955).
- 7) H. Kawahara, N. Masuko and H. Yanagida: *J. Faculty of Engineering, The University of Tokyo*, (B), **29**, 715 (1972).

- 8) 岡本 剛, 杉田 徹, 西山貞雄, 橋 孝二: 防食技術, **23**, 439, 445 (1974).
- 9) 柴田俊夫: 第 78 回, 第 79 回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, p. 13 (1981).
- 10) 腐食防食協会, 装置材料の寿命予測分科会(Ⅱ): 防食技術, **37**, 639 (1988).
- 11) 腐食防食協会, 装置材料の寿命予測分科会(Ⅲ): 材料と環境, **45**, 684 (1996).
- 12) 柴田俊夫: 防食技術, **23**, 615 (1974).
- 13) T. Shibata and T. Takeyama: Nature, **260**, 5549, 315 (1976).
- 14) T. Shibata and T. Takeyama: Proc. 8th Int. Metallic Corrosion, DECHEMA, p. 146 (1981).
- 15) 柴田俊夫: 防食技術, **31**, 643 (1982).
- 16) T. Shibata: Corrosion, **52**, 813 (1996).
- 17) T. Shibata: Corros. Sci., **137**, 413 (1990).
- 18) T. Shibata: Proc. Plant Aging and Life Prediction of Corroddible Structures, NACE, p. 135 (1995).
- 19) 中田淳二, 柴田俊夫: 材料と環境, **45**, 467 (1996).
- 20) J. W. Martin and M. E. Mcknight: J. Coat. Technol., **57**, 724, 49 (1985).
- 21) E. J. Gumbel: Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Applications, NBS, Applied Mathematical Series, No.33, U. S. Government Printing Office, (1954).
- 22) E. J. Gumbel: Statistics of Extremes, Columbia Univ. Press, (1958).
- 23) 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—, 丸善 (1985).
- 24) 腐食防食協会, 装置材料の寿命予測分科会(Ⅱ): 防食技術, **37**, 768 (1988).
- 25) 腐食防食協会, 装置材料の寿命予測分科会(Ⅱ) WG: 極値統計法による寿命予測パッケージ, 丸善 (1989).
- 26) 山本正弘: 材料と環境, **45**, 625 (1996).
- 27) 日本材料学会腐食部門委員会 TG 編: 熱交換器の管理と余寿命予測, 日本材料学会 (1996).
- 28) 今川博之: 更新時期を決めるプラントの余寿命評価, 日本プラントメンテナンス協会 (1998).
- 29) T. Shibata: Localized Corrosion, Eds F. Hine, K. Komai and K. Yamakawa, Elsevier, p.197 (1988).
- 30) 柴田俊夫, 竹山太郎: 鉄と鋼, **66**, 693 (1980).