

腐食の予知と腐食現象の 数値モデリング

藤本 慎 司* 岡田 信 宏**

1. はじめに

金属材料の腐食に起因する設備・機器・施設の損傷は、消費財の機能喪失のみならず、生産設備の稼働停止、社会インフラの供用中断などを伴い、大きな経済的損失をもたらす。腐食損傷に起因する直接・間接の経済損失の推定は困難なため明らかでないが、腐食を防止するための経費、すなわち「腐食コスト」については調査があり、わが国においてはGDPの数%に達すると推定されている⁽¹⁾⁽²⁾。このように、金属材料の腐食損失の経済的波及効果は膨大であるので、腐食の予知あるいは寿命予測のための多くの努力がなされている。

腐食損傷の確率・統計的予知は局部腐食のばらつきを統計的に解析して、未来を確率的に予測するもので、わが国を中心として発展し、確立された技術となっている⁽³⁾。腐食の形態には表面がほぼ均一に腐食する全面腐食と局部的に浸食が進行する局部腐食とがあり、**図1**に示すように、局部腐食では表面の大部分が健全であるにもかかわらず、局部的に深い侵食を生じる。タンク・管等では最大深さとなる局部腐食の一箇所のみが貫通すれば、液漏れ等の障害が生じる。従って、局部腐食では平均的な侵食深さはあまり意味を持たず、最大侵食深さを知ることが重要である。一方、応力腐食割れ破断寿命などの材料損傷までの時間、あるいは材料の最も弱いところの強度によって全体の寿命や強度が決定されるので、最小値が問題となる。すなわち、応力腐食割れ寿命、孔食深さや材料強度などの分布は正規分布であることが多いが、その平均値は材料の優劣という観点では意味を持って、材料の寿命を考える際にはあまり役に立たず、むしろ最大値ないしは最小値を知ることが重要となる。これらを数学的に取り扱う極値分布の腐食工学への導入が行われた⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。ここで詳細は述べないが、実験室で得られた寿命を長期間の実機の損傷予測に適用したり、巨大設備の損傷の評価として、限られたサイズのサンプル調査から全体で最も大きな損傷を見積

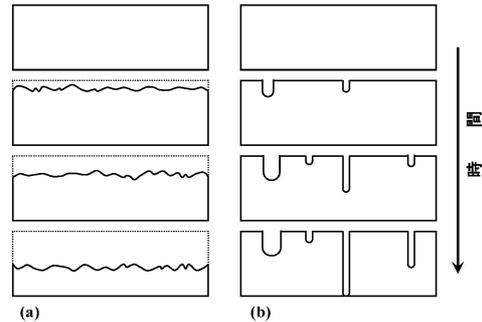


図1 腐食の形態 (a) 全面腐食 (b) 局部腐食。

もることなどに応用されている⁽⁶⁾。さらに最近では、リスク = 「故障・損傷の発生確率」×「損傷による損失の大きさ」ととらえて、経済的損失を最小とする、リスクベースメンテナンスの考え方がプラントの維持管理に導入されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

以上のように、個々の現象の詳細が不明でも類似の事象の経験あるは一部のサンプリング調査があれば腐食挙動の予測は可能であるが、現象の素過程がどのようなものであるかは解析の対象とはされていない。よって、新たな材料と環境の組み合わせに対して経験値なしで適用するには限界がある。

一方、数値モデルは電気化学反応や溶液化学あるいは物質移動などの素過程を基礎データに基づいて数学的に表現する。材料の耐環境性の長期にわたる判断のためには、実測値のみならず、数値計算から得られる知見が必要であるが、現象が複雑で、かつ不確定な要因が多いため実用の域に達している例は限られている。しかし、計算機技術の飛躍的発展、さらには様々な計算手法の開発によって、構造物の強度計算、破壊過程、気象予測や界面反応のシミュレーション、あるいは化学反応過程等、様々な分野で数値シミュレーションが実用化し、計算機実験として機械の設計、新材料開発や新規な化合物の探索等の効率化に多大な貢献をもたらしている。最近、米国を中心に第一原理計算に基づく腐食現象のナ

* 大阪大学教授；大学院工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

** 住友金属工業株式会社総合技術研究所；主任研究員

Prediction and Numerical Modeling of Corrosion; Shinji Fujimoto*, Nobuhiro Okada** (*Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita. **Corporate Research and Development Labs, Sumitomo Metals Industries, Ltd., Amagasaki)

Keywords: electrochemistry, simulation, finite element method, Laplace equation, probabilistic model

2011年3月30日受理

ノスコーピックな計算シミュレーションが試みられるようになった。これらは、物質移動・反応や確率的要素と組み合わせることにより、腐食現象の総合的な数値モデル化に発展することが期待される。

まえがきが長くなってしまったが、本稿では、腐食現象の数値モデル化について、これまでの経過を述べるとともに、著者らが最近行った事例や最近の諸外国の動向を紹介する。

2. 腐食の電気化学過程の数値モデル

腐食現象は、電気化学、金属組織学、化学平衡論、物質移動、電磁気学、など様々な要素を持ついわゆる複雑系であり、さらに偶発的要素も支配的であるため、現象全体の数値モデル化は大規模なものとなる。

腐食現象の数値モデルの手法を図2に整理した。連続体モデルは後述の基礎支配式に基づく決定論モデルであるが、モンテカルロ法、セルオートマトンなどは個々の過程を単純化した確率モデルである。また、分子動力学、分子軌道法は第一原理計算であるが、統計力学的な確率的要素を含む。

3. 決定論の数値モデル

(1) 電気化学的腐食現象の支配方程式

腐食現象の素過程を確率的要素なく記述する決定論的モデルとしてこれまでに試みられてきたものには、大きく分類すれば

- (a) すき間(局部腐食)内化学種、電位-電流分布
- (b) マクロな電位-電流分布

がある。前者は局部腐食に見られる局部アノードのみに注目したモデルで、後者は腐食現象特有のアノード反応とカソード反応との両方を含むモデルであるが、何れも電解質中の電位分布と濃度分布に基づく物質移動と電気化学反応を組み合わせ

させている。ここでは、電気化学と物質移動の数学的取り扱いの基礎となる支配方程式について簡単に紹介する。

電解質溶液中では荷電粒子であるイオンが電位分布と濃度勾配によって移動する。すなわち、

$$\text{質量流束} : N_i = -z_i u_i F c_i \nabla \phi - D_i \nabla c_i + c_i v \quad (1)$$

ここで、 z_i はイオンの価数、 u_i は移動度、 v は対流速度である。右辺の第3項は対流によるもので、無視できる場合が多い。さらに、電解質中あるいは電極界面での反応による物質収支があり、

$$\text{質量バランス} : \frac{\partial c_i}{\partial t} = -\nabla \cdot N_i + R_i \quad (2)$$

ここで R_i は反応速度である。このとき、電解質溶液中では正負のイオンのバランスが保たれている必要があり、電荷密度 ρ について

$$\text{電気的中性} : \rho = \sum_i z_i c_i = 0 \quad (3)$$

が成り立つ。一方、電解質中ではオームの法則が成り立つので、電流密度ベクトル、 \mathbf{J} 、と電位、 ϕ 、との関係は σ を導電率とすると

$$\mathbf{J} = -\sigma \nabla \phi \quad (4)$$

となり、両辺の発散をとって電流の保存則を適用すると

$$\text{ラプラス方程式} : \nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot (-\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (5)$$

が得られ、これが電解質中の電位分布の支配方程式となる。

さらに、電極反応の速度基礎式として、分極と反応速度の対数とが比例関係となることをあらわす、

$$\text{Tafel の式} : J = J_0 \exp \left\{ (\phi - \phi_0) \frac{\alpha n F}{RT} \right\} \quad (6)$$

が支配方程式に加わる。ここで、 α は対称因子、 n は反応電子数である。これらの関係を満たすような解析解が得られれば、腐食に限らず電気化学反応の数値モデルを構築できる。

(2) 局部腐食の一次元数値モデル

孔食やすき間腐食、あるいは応力腐食割れなどの局部腐食では、閉塞された空間で溶液組成、pH、溶存酸素が変化するとともに、局部腐食に伴う大きな電流によって生じるIR降下により、局部腐食の内部の電気化学反応は外部のそれとは大きく異なる。このような系については、金属にあけた小孔あるいは、樹脂などの絶縁体にあけた小孔の底に埋め込んだ微小金属電極をモデル孔食として、内部のpH、 Fe^{2+} 、 Cl^- などのイオン、および電位の分布が測定されている⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾とともに、有限要素法を用いた数値シミュレーションも同時期に多数試みられている⁽¹²⁾⁻⁽¹⁸⁾。

Pickering⁽¹⁹⁾は図3に示すように、孔食を一定断面を持つ深さ方向に1次元の孔と仮定した解析モデルを報告している。塩より解離したイオンを A^+ と B^- とし、溶解した金属イオンを M^+ とすると、解くべき変数は、それぞれのイオン濃度 C_A 、 C_B 、 C_M と、電位 ϕ となる。これらの仮定に基づき、孔食内の電位分布とイオン濃度を解析的に算出している。溶液内の反応が考慮されていないことや、腐食電流が金属イオンのみ計算されているなど、解析的な解を得るために

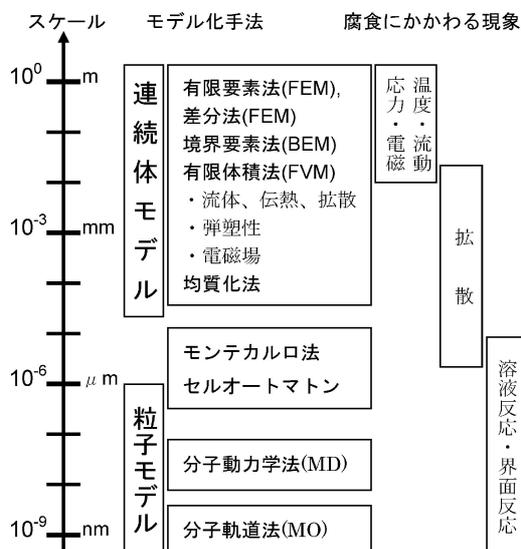


図2 腐食現象の解析に用いられる数値モデル化手段。

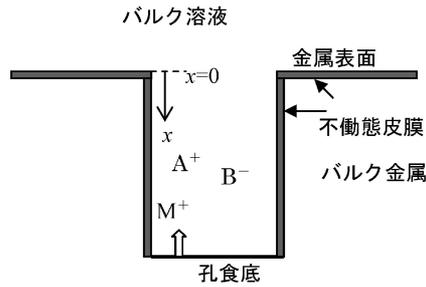


図3 Pickeringによる孔食の1次元数値解析モデル.

現象は単純化されている.

1次元モデルは孔食やすき間腐食をかなり正確に再現できるので、1970-1980年頃に盛んに検討された⁽²⁰⁾⁻⁽²²⁾. しかしながら、計算の多くは定常状態であり、それ以前の過渡状態のシミュレーション⁽²³⁾にはかなりの計算量を要し、すき間腐食を模擬する2次元モデルとなると、現在でも大規模計算となる. さらに、濃厚溶液中での化学平衡が不明なことが多いとともに、平衡状態でない化学種の状態、あるいは固体腐食生成物をどのように取り扱うかなど、まだまだ課題は多い.

(3) アノードとカソードがマクロに分離したときの解析

異種金属接触腐食やひとつの金属材料が部位によって酸素濃度が異なる水溶液・土壌中にある通気差腐食など、金属の溶解が起きるアノード部分と溶存酸素などの酸化剤が還元されるカソード部分とがマクロに分離する場合がある. また、犠牲陽極等を用いる電気防食の場合でもアノードとカソードはマクロに分離している. これらの事象では、先に述べた支配方程式の定常状態に近い状態となり、数値モデル化によって現象をかなり正確に記述できる. すなわち、図4(a)に示すようにアノード部とカソード部がマクロに分離し、それぞれの部位でのアノード、カソード分極挙動が図4(b)のように明らかとなっている場合、図4(a)中に示された電流分布は形状が複雑であっても、有限要素法等の要素分割によって解析可能である. しかし、複雑形状の大きな溶液空間を扱う場合、有限要素法は計算量が膨大となるが、境界要素法による効率よい計算法が開発され、海洋中⁽²⁴⁾⁻⁽²⁶⁾や土壌中のガルバニック腐食あるいは電気防食を対象とした計算に用いられている. 電気化学現象の境界要素法によるモデル化に関しては、青木らの著書に詳しい⁽²⁷⁾.

(4) 水膜下での亜鉛めっきのガルバニック腐食

亜鉛メッキ鋼板では端面は下地鋼が露出するため、防食上の弱点となっているが、端面腐食の機構は十分には明らかになっていない. 岡田らは⁽²⁸⁾⁻⁽³¹⁾薄膜状の電解質下での亜鉛と鉄とのガルバニック腐食について、酸素拡散、亜鉛イオンの加水分解と酸素還元に伴うpH変化を計算モデルに組み込んだ数値モデル化を行った. 式(3)で示した電気的中性条件が従来の計算モデルでは局所的には成立せず、大きな計算

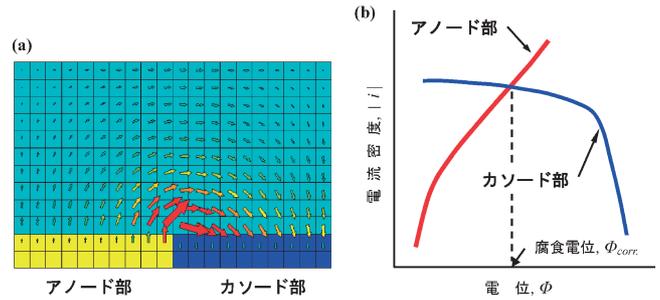


図4 (a) 水溶液中のイオン電流と(b) アノード部とカソードでの電位と電流関係の模式図.

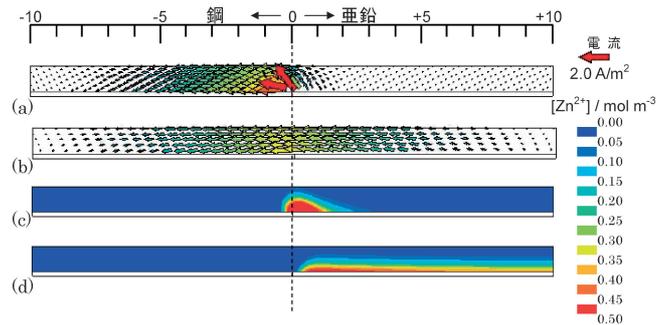


図5 厚さ1 mmの50 ppmまたは50,000 ppmのNaCl水溶液膜に覆われた亜鉛/鋼対の100 s後の電流分布と溶液中Zn²⁺イオン濃度の分布. (a)(b)電流分布, (c)(d) Zn²⁺イオン分布. (a)(c) 50 ppm NaCl, (b)(d) 50,000 NaCl.

誤差を生んでいた. すなわち,

$$\rho = \sum_i^n z_i c_i \quad (7)$$

に示す局所的な電荷密度 ρ は零とならず、電位 ψ を生じる. 電気的中性条件を満たすためには、この電位 ψ を打ち消すようにイオンを再移動する必要がある. 電荷密度により生じる電位 ψ は

$$\nabla^2 \psi = -\frac{F}{\epsilon} \rho \quad (8)$$

として表される. ここで、 F はファラデー定数、 ϵ は誘電率である. 電位差によるイオンの移動量 η を式(9)とし、さらにイオン濃度分布を式(10)のように補正した.

$$\eta_i = -\frac{t_i \sigma}{z_i F} \nabla \psi \quad (9)$$

$$c'_i = c_i - \nabla \eta_i \quad (10)$$

図5は左右それぞれ10 mmのFeとZnが平面的に接している平板上に厚さ1 mmの50 ppm、または50000 ppm NaCl水溶液の液膜が存在するとき、100秒後の電流密度分布と溶出したZn²⁺イオンの分布を示している. このとき、Znが溶解し、Feが防食されているが、NaClが希薄で電気伝導度が低い場合は境界付近のZnのみが溶解している. 一方、NaCl濃度が高い場合はZn全体から均一に溶解している. その結果、図5(c)、(d)に示すように希薄なときは境界

付近の Zn のみが消費していることがわかる。さらに、同様な計算を NaCl と MgCl₂ とを比較して行ったところ、NaCl 水溶液下では、Fe 面上に生成する腐食生成物は少ないが、MgCl₂ 水溶液下では Fe 面上に Mg(OH)₂ が大量に生成した。従って、Mg(OH)₂ が Fe 面の防食に寄与していることを明らかとなった。

4. モンテカルロシミュレーション、セルオートマトンなどの確率モデル

モンテカルロ法とセル・オートマトン法を用いた孔食の解析モデルも報告されている⁽³²⁾⁻⁽³⁶⁾。モンテカルロ法では孔食の発生位置や不動態化の判断に確率が用いられている。セル・オートマトン法は、格子状に作成した計算セルに成長のルールを設けて計算を行う方法であり、腐食速度を与えて隣接するセルが腐食されていく様子を再現している。Williams⁽³²⁾は、セルを Fe と Cr の 2 相に区別してランダムに配置し、Fe のセルが優先的に腐食進行するとした単純なセル・オートマトン法での計算を行った。Nagatani⁽³³⁾は、Williams のモデルにアニオンの拡散を考慮して 2 相合金の孔食進行の解析を行った。一方、Fe-Cr 合金の耐食性が Cr 量が 12% ないしは 17% 付近で急変する現象について、Newman⁽³⁷⁾らはパーコレーションモデルによる Fe-Cr の不動態化モデルとして解析している⁽³⁷⁾⁻⁽³⁹⁾。たとえば、図 6⁽⁴⁰⁾に示すように、格子点に存在する黒点がランダムに配置しているとき、黒点の存在確率が低いと図 6(a), (b) のように黒点は単独あるいは隣接する黒点とで有限サイズのクラスターを形成している。しかし、格子の形態で決まる臨界値(2次元の正方形格子では $p_c = 0.593$ を越すと図 6(c) のように無限大のクラスターが生成する。すなわち、合金中にランダムに分布する Cr が酸素を介して連結すると仮定したときに、ある臨界濃度以上で Cr 酸化物が無限大のクラスターを生成しそれがステンレス鋼の不動態化につながるとの考え方で、第 2 および第 3 近接での連結がそれぞれ臨界値を持つため段階的に Fe-Cr 合金の耐食性が增大するという、3次元の空間配置に基づくモデルである。一方、MaCafferty⁽⁴¹⁾も酸化物の空間的配置から Fe-Cr 合金の不動態化をグラフ理論として展開している⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾。

応力腐食割れについては、発生の予測は困難なのでき裂進展速度を予測するためのモデルが提案されている。Parkins⁽⁴³⁾, Andresen と Ford⁽⁴⁴⁾, Newman⁽⁴⁵⁾, Shoji⁽⁴⁶⁾ は代表的な材料特性と環境よりき裂進展速度を算出する数値モデルを構築した。一方、応力腐食割れの発生過程については、統計モデルの導入が不可欠である。明石⁽⁴⁷⁾らは高温水中でのオーステナイト系ステンレス鋼の応力腐食割れ発生過程の詳細な観察より、微小き裂の発生から進展性のき裂形成に至る過程を考察している。すなわち、最初期過程は単独では進展しない微小なき裂が発生し、さらに近接する微小き裂の合体が進行し、これらの空間分布はポアソン分布に従う。したがって、応力腐食割れ発生にいたる潜伏期間は指数分布に従

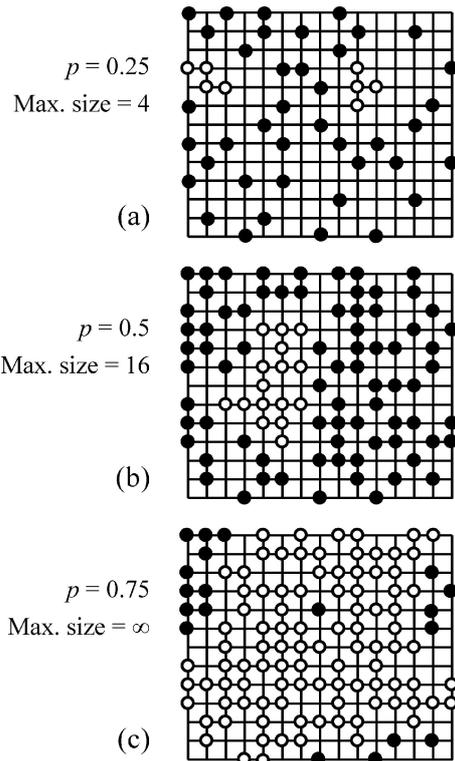


図 6 正方形格子のパーコレーションモデルの模式図。黒点が占める格子点の存在割合 p が、(a), (b) では少なく、有限サイズの相互連結(クラスター)しか存在しない。(c) 存在割合 p が臨界値を越すと、無限大のクラスターが出現する。図中、白スキで示した黒点は最大サイズのクラスターに属する格子点。

うことになる。データの蓄積により応力腐食割れ発生進展の確率過程モデルの構築が期待されている。

5. おわりに

腐食の発生・進展の機構の解明は発達しているが、実際の腐食現象は形状、表面状態、化学的環境の不確実性と変動など不確定要素がたくさんあり、単純なモデルでは予測不可能である。したがって、モデル化に際しては、様々な変数を組み込む必要があって、現象を正確に再現できる数値モデルの構築はきわめて困難である。作った計算シミュレーションにより、腐食の発生予知、あるいは寿命予測にいたることが期待されるが、「いつどこで発生するか」という最も良く問われることに対しては、まだまだ回答が困難である。いまや、様々な分野で高度なハードウェアと各種推論アルゴリズムを用いた数値シミュレーションがごく当たり前のことのように行われ、実用の域に達しているのも多数存在するが、腐食現象についてはまだまだ満足できるものはほとんどない。しかし、数値シミュレーションに必要な腐食現象の要素データと、ツールとなる計算手法は概ねすでにそろっており、世界的には盛んに研究開発が進められている。たとえば、第一原

理計算に基づく原子サイズの計算モデルも開発が始まっている⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾。我国における腐食現象の数値モデル化は歴史的には早く開始したにもかかわらず、その後の発展が遅延したように感じる。国際的プレゼンスを高めるためにも、再び本格的に取り組むことが望まれる。

本稿をまとめるにあたり、グローバル COE プログラム「構造・機能先進材料デザイン教育研究拠点(大阪大学)」の支援を受けた。

文 献

(1) 腐食コスト調査委員会：材料と環境, **50**(2001), 490-512.
 (2) 腐食コスト調査委員会：わが国の腐食コスト, 腐食防食協会, 日本防錆技術協会(2001).
 (3) 柴田俊夫：材料と環境, **47**(1998), 742.
 (4) 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 (1984). 本書はすでに絶版となっているが, 文献(5)の CD-ROM に全文が収録されている.
 (5) 腐食防食協会監修：極値統計法を用いた装置材料の寿命予測パッケージソフトウェア「EVAN-II CD-ROM 版」, 丸善(2001). 本パッケージには EVAN-II ソフトウェア本体以外に, 文献(1)を含む多数の参考文献, ならびに $N=45$ までの MVLUE 表が収録されている.
 (6) 腐食防食協会 60-1 分科会：防食技術, **37**(1988), 768-769.
 (7) 酒井潤一, 久保内昌敏：化学工学, **69**(2005), 629-630.
 (8) 小林英男：圧力技術, **44**(2006), 102-109.
 (9) 小川洋之, 伊藤 功, 中田潮雄, 細井裕三, 岡田秀弥：鉄と鋼, **63**(1977), 605.
 (10) 松島 巖, 酒井潤一：鉄と鋼, **63**(1977), 598.
 (11) 水流 徹, 洪 文涛, 春山志郎：防食技術, **33**(1984), 649.
 (12) J. R. Galvele: J. Electrochem. Soc., **123**(1976), 465.
 (13) J. W. Oldfield and W. H. Sutton: Brit. Corros. J., **13**(1978), 104.
 (14) H. W. Pickering and R. P. Frankenthal: J. Electrochem. Soc., **119**(1972), 1297.
 (15) J. R. Galvele: Corros. Sci., **21**(1981), 551.
 (16) S. M. Sharland: Corros. Sci., **28**(1988), 603.
 (17) S. M. Sharland: Corros. Sci., **28**(1988), 621.
 (18) S. M. Sharland, C. P. Jackson and A. J. Diver: Corros. Sci., **29**(1989), 1149.
 (19) H. W. Pickering and R. P. Frankenthal: J. Electrochem. Soc., **119**(1972), 1297.
 (20) S. M. Sharland: Corros. Sci., **33**(1992), 183.
 (21) A. Turnbull: Brit. Corros. J., **28**(1993), 297.
 (22) 辻川茂男：防食技術, **31**(1982), 488.
 (23) T. Shinohara, S. Fujimoto, N. J. Laycock, A. Masallem, H. Ezuber and R. C. Newman: J. Electrochem. Soc., **144**(1997), 3791.
 (24) J. C. F. Telles, W. J. Mansur, L. C. Wrobel and M. G. Marinho: Corrosion, **46**(1990), 513.
 (25) P. Cicognani, F. Gasparoni, B. Mazza and T. Pastore: J. Electrochem. Soc., **137**(1990), 1689.
 (26) 宮坂松甫, 高山博和, 天谷賢治, 青木 繁：材料と環境, **46**(1997), 378-383.
 (27) 青木 繁, 天谷賢治, 宮坂松甫：境界要素法による腐食防食

問題の解析, 東京, 裳華房, (1998).
 (28) 岡田信宏, 竹林美樹, 松本雅充, 木本雅也, 工藤越夫：鉄と鋼, **92**(2006), 667-675.
 (29) 岡田信宏, 松本雅充, 西原克浩, 木本雅也, 工藤越夫, 藤本慎司：鉄と鋼, **95**(2009), 144-153.
 (30) 岡田信宏, 松本雅充, 西原克浩, 木本雅也, 工藤越夫, 藤本慎司：鉄と鋼, **97**(2011), 108-116.
 (31) 岡田信宏, 松本雅充, 西原克浩, 木本雅也, 工藤越夫, 藤本慎司：材料と環境, (投稿中).
 (32) D. E. Williams, R. C. Newman, Q. Song and R. G. Kelly : Nature, **350**(1991), 216.
 (33) T. Nagatani: Phys. Rev. A, **45**(1992), 2480.
 (34) B. Malki and B. Baroux: Corros. Sci., **47**(2005), 172.
 (35) F. D. A. A. Reis, J. Stafiej and J. P. Badiali: J. Phys. Chem. B, **110**(2006), 17554.
 (36) R. M. Pidaparti, L. Fang and M. J. Palakal : Comput. Mat. Sci., **41**(2008), 255.
 (37) K. Sieradzki and R. C. Newman: J. Electrochem. Soc., **133**(1986), 1979-1980.
 (38) R. C. Newman, T. M. Foong and K. Sieradzki: Corros. Sci., **28**(1988), 523-527.
 (39) S. Fujimoto, R. C. Newman, G. S. Smith, S. P. Kaye, H. Kheyrandish and J.S. Colligon: Corros. Sci., **35**(1993), 51-55.
 (40) R. Zallen: The Physics of Amorphous Solids, John Wiley & Sons, (1983), p.143.
 (41) E. McCafferty: Corros. Sci., **42**(2000), 1993-2011.
 (42) E. McCafferty: Corros. Sci., **47**(2005), 1765-1777.
 (43) R. N. Parkins: Corrosion, **20**(1980), 147-166.
 (44) F. P. Ford, D. F. Tylor, P. L. Andresen and R. G. Ballinger: Corrosion Assisted Cracking of Stainless and Low Alloy Steels in LWR Environments, EPRI Contract RP2006-6, Report NP5064M, February, (1987).
 (45) R. C. Newman: Corrosion, **50**(1994), 682.
 (46) T. Shoji, S. Suzuki and R. G. Ballinger: Proc. 7th Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, Breckinridge, (1995), pp. 881-889.
 (47) 明石正恒：材料と環境, **59**(2010), 312-319.
 (48) A. Bouzouba, B. Diawara, V. Maurice, C. Minot and P. Marcus: Corros. Sci., **51**(2009), 941-948.
 (49) C. Taylor, R. G. Kelly and M. Neurock: J. Electrochem. Soc., **153**(2006), E207-E214.

★★

藤本慎司
 1987年 大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了, 工学博士
 1987年より大阪大学工学部冶金工学科(現大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻)
 2002年より現職
 専門分野：金属材料の腐食・防食, 電気化学, 表面改質・分析

★★



藤本慎司

岡田信宏