

大気環境における構造用鋼材の腐食表面性状とその経時性予測

貝 沼 重 信

九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 ☎ 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

(2014年8月30日受付; 2014年10月17日掲載決定)

Characteristics of Corrosion Surface of Structural Steel under Atmospheric Environment
and Its Time-dependent Prediction

Shigenobu KAINUMA

Graduate School of Engineering, Kyushu University,
744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395

(Received August 30, 2014 ; Accepted October 17, 2014)

Many severe corrosion damages have been observed in steel structures constructed in a period of high economic growth. To ensure the safety of such structures, it is important to devise a method how corrosion develops in the service. In our research, semi-variogram analyses were carried out on time-dependent corrosion surfaces of unpainted steel plates exposed to atmospheric environment in order to quantitatively clarify the spatial autocorrelation structures and their time-dependence. In addition, by using the spatial statistics and an ordinary kriging technique, numerical simulation for the time-dependent corrosion surfaces in atmospheric environments was proposed and the validity was confirmed by comparing with corrosion surfaces obtained in various exposure fields.

KEYWORDS : corrosion surface, atmospheric environment, structural steel, simulation, spatial statistics

1. は じ め に

大気中における鋼構造物が曝される腐食環境は、部位レベルで異なるため、その腐食損傷の経時性が著しく異なることも少なくない。これまで、供用中の鋼道路橋において、主部材がマクロセル腐食することで破断し、崩壊に繋がる致命的損傷に至った事例も報告されている¹⁾。鋼構造物を安全かつ経済的に供用するためには、その腐食損傷の経時性を定量的に予測し、その残存耐力や疲労寿命を評価した上で、適切な時期に対策を講じることが重要になる。また、高耐食性の構造用鋼材の開発に際して、平均腐食深さのみではなく、腐食表面性状にも着目することで、各種構造物で要求性能が異なる耐荷性、密閉性や耐疲労性などに対して、より優れた鋼材の開発が期待できる。しかし、大気環境における各種構造用鋼材の腐食表面性状は、人工的に制御された環境下

とは異なり、様々な諸因子の影響を受けるため、その経時性の予測のためのモデリングには十分な検討が必要とされる。

これまで、著者らは構造用鋼材の全面腐食、全面腐食と局部腐食の混合腐食、地際部の局部腐食や塗膜劣化を考慮した腐食について、それらの腐食表面性状の分析方法やその経時性を予測するためのシミュレーション手法を提案し、その有用性を明らかにした^{2~8)}。

本稿では大気暴露で全面腐食させた一般構造用鋼材の腐食表面性状を空間統計学的手法により分析・定量化した結果について、その一例を紹介する。また、その分析で得られた統計量に基づき、大気環境における無塗装鋼材の経時的な腐食表面性状を空間統計数値シミュレートする手法について紹介する。

2. 大気暴露した鋼材の腐食表面性状⁹⁾

著者らは、これまで様々な大気腐食環境と鋼材の腐食表面性状の相関性を検討するため、降雨の影響の有無や

飛来海塩の多少に着目した大気暴露試験を様々な暴露地点や実構造物で実施してきた。ここでは、橋梁などの鋼構造物に一般に用いられる JIS G 3106 SM490A 材 (400×60×9 mm, ブラスト処理 (ISO Sa2.5): 研磨剤を空気圧により対象表面に衝突させ、酸化物や異物を除去し、表面を粗す方法) を飛来海塩と降雨の影響を受ける環境で大気暴露した後の腐食表面性状について述べる。

試験体は一つの暴露地点で6種類のマイクロ腐食環境における鋼板の経時腐食挙動のデータを効率良く収集するため、水平に対して、0°, 45° および 90° の角度に設置した。また、試験体の対空面と対地面を検討対象とした。大気暴露試験は沖縄本島の東側海岸線から約 2.3 km, 西側海岸線から約 4.4 km に位置する琉球大学千原キャンパス構内で約 4 年間 (2006 年 7 月~2010 年 6 月)

実施した。試験体は 0.5 年, 1 年, 2 年, 3 年および 4 年の暴露後にそれぞれ回収した。暴露地点の気温, 相対湿度, 降水量および飛来塩分量 (JIS Z 2382 (ドライガーゼ法)) の平均値は, それぞれ 296 K, 74%, 2103 mm および 0.29 mdd である。

各試験体の表裏面の腐食環境における平均腐食深さ d_{mean} (mm) と暴露期間 t の関係を Fig. 1 に示す。図中の実線は累乗回帰曲線であり, 対空面を細線, 対地面を太線で示している。 d_{mean} は暴露角度や対空面と対地面で異なっている。このように, 同じ暴露地点であっても, 暴露角度や対象面により, それらのマイクロな腐食環境が異なるため, 試験体の腐食表面性状も異なる。この傾向は板組みが複雑な鋼構造物では一層著しくなるため, 部位レベルの腐食性が大きく異なる。

大気暴露した試験体の腐食生成物除去後にレーザーフォーカス深度計 (スポット径: 30 μm , 分解能: 0.05 μm) で測定した腐食表面性状の例を Fig. 2 に示す。試験体の設置角度により腐食環境が異なることで, d_{mean} だけではなく, 腐食表面性状についても異なっている。次に, これらの腐食表面性状を空間統計学的手法を用いて分析し, その結果に基づき構築した数値シミュレーションのモデルについて述べる。

3. 腐食表面性状の空間統計分析²⁾

3.1 分析方法

試験体の腐食表面をセミバリオグラム (以下, バリオグラム) 解析することで, 腐食表面性状を表す空間統計量 (レンジとシル) を抽出し, 空間的自己相関構造を把握できる。バリオグラムとは腐食表面における任意位置の腐食深さとその位置から離れた位置の腐食深さとの空

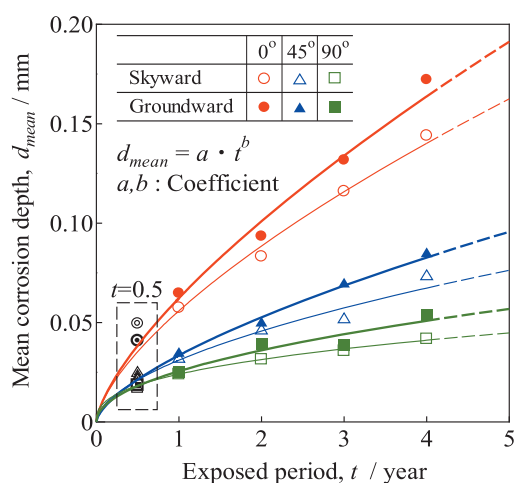


Fig. 1. (color online). Mean corrosion depth d_{mean} of each tested surface as a function of exposed period t .

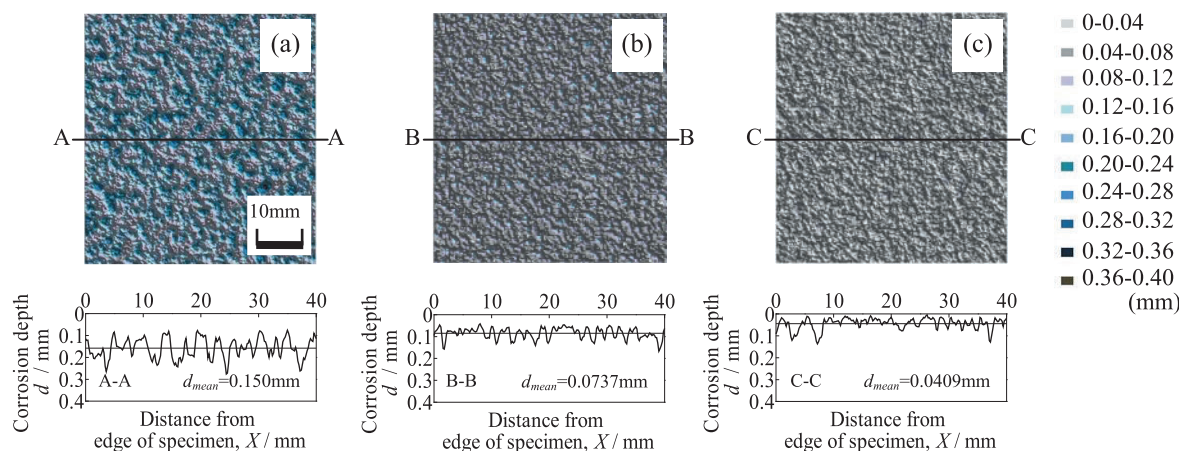


Fig. 2. (color online). Laser measurement results of corrosion depth at skyward-facing surface specimens exposed at angle of (a) 0°, (b) 45° and (c) 90° for 4 years in Okinawa main island.

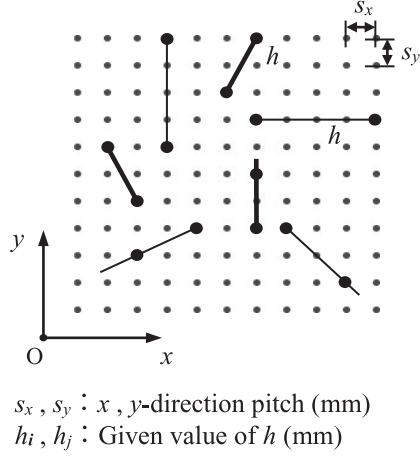


Fig. 3. Area of corrosion discretized in grid-like coordinate for semi-variogram analyses.

間的相関性を表す指標を意味する。

バリオグラム解析に際して、まず、任意の腐食領域を Fig. 3 に示すように、レーザー測定時の格子状座標に基づき離散化する。腐食表面の自己相関構造を表すレンジとシルは、式(1)を用いて $\gamma(h)$ を求めることで、バリオグラムから算出することができる。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z_j - z_k)^2 \quad (1)$$

h : ユークリッド距離

$N(h)$: ユークリッド距離 h となる全点のペア

z_j, z_k : ユークリッド距離 h となるペア内の点の腐食深さ (mm)

レンジとシルの空間統計量は、経験バリオグラムを用いることで算出する。なお、Fig. 2 で示した腐食表面性状は特定の方向に空間変動がほとんどないことから、等方性と仮定し、全方向に対してバリオグラム解析ができる。そのため、バリオグラムは距離のみの関数で表わすことができる。

4年間暴露した試験体の 45° 対空面に対する経験バリオグラムの例を Fig. 4 に示す。図中の実線は、経験バリオグラムを理論バリオグラムでモデリングした結果を示している。理論バリオグラムには経験バリオグラムの傾向に基づき、球型バリオグラムモデル（以下、球型モデル）を適用している。なお、レンジは理論バリオグラムモデルの関数 $\gamma(h; \theta)$ が一定となった位置のユークリッド距離 h 、シルはその点における $\gamma(h; \theta)$ の値で定義できる。

経験バリオグラムに理論バリオグラムモデルを適用する際には、次式の非線形最小二乗法を用いる¹⁰⁾。

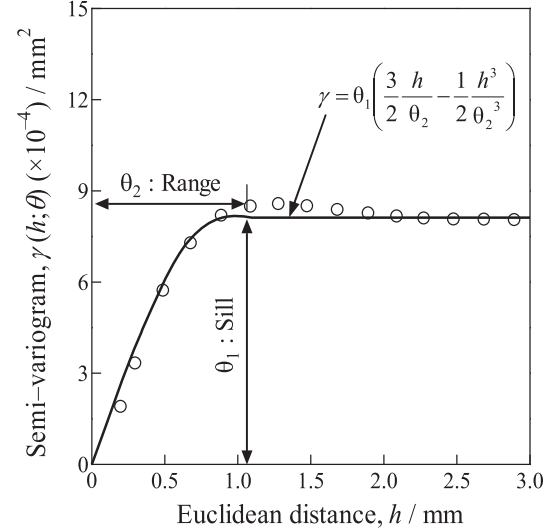


Fig. 4. Example of spherical model for semi-variogram (Skyward-facing surface, 45° , exposed for 4 years).

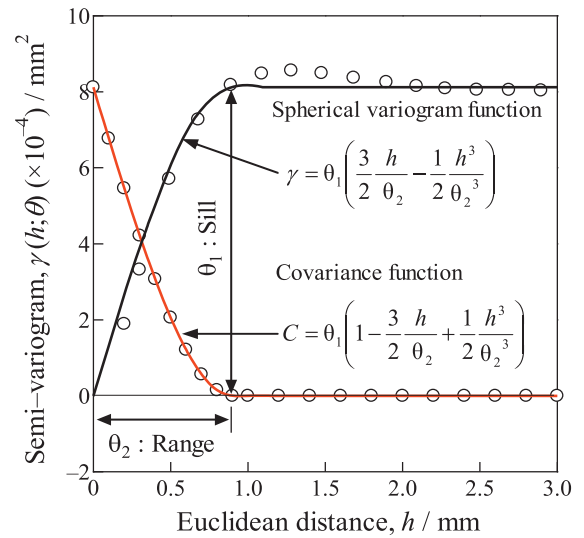


Fig. 5. (color online). Covariance function and theoretical semi-Variogram corresponding Fig. 4.

$$WRSS(\theta) = \sum_{k=1}^K \frac{|N(h_k)|}{\gamma(h_k; \theta)^2} (\gamma(h_k) - \gamma(h_k; \theta))^2 \quad (2)$$

$|N(h_k)|$: ユークリッド距離が h_k となるペアの総数

K : バリオグラムのラグ数

$\gamma(h_k)$: ラグ k の経験バリオグラムの値 (mm^2)

$\gamma(h_k; \theta)$: 理論バリオグラムモデル（球型モデル）のラグ k における値

Fig. 5 中に実線で示す理論バリオグラムには、縦軸の切片値がほぼ 0、すなわちナゲット効果がほとんど無いため、2 次定常性があると言える。

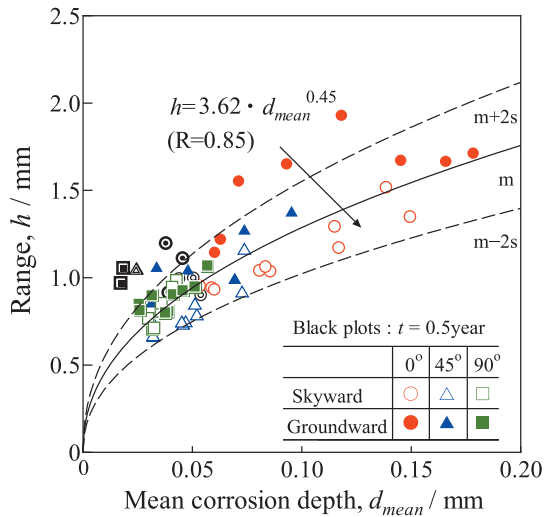


Fig. 6. (color online). Range h of each tested surface as a function of mean corrosion depth d_{mean} .

Fig. 4 の理論バリオグラムの球型モデルと球型モデルの形状を表す共分散関数 $C(h; \theta)$ を Fig. 5 に示す。図中の γ の実線は球型モデルであり、 C の実線は次式に示す共分散関数 $C(h; \theta)$ を示している。

$$C(h; \theta) = \theta_1 - \gamma(h; \theta) \quad (3)$$

$$C(h; \theta) = \begin{cases} \theta_1 \left(1 - \frac{3}{2} \frac{h}{\theta_2} + \frac{1}{2} \frac{h^3}{\theta_2^3} \right) & (0 \leq h \leq \theta_2) \\ 0 & (h > \theta_2) \end{cases} \quad (4)$$

θ_1 : シル (mm^2)

θ_2 : レンジ (mm)

前述したように、鋼材が全面腐食した腐食表面性状の空間的自己相関構造は、大気腐食環境が異なる場合であっても、球型モデルによる理論バリオグラムから算出される空間統計量（レンジとシル）により定量評価できる。

3.2 分析結果

大気暴露した試験体の中央部 $40 \times 40 \text{ mm}$ の領域に対して、バリオグラム解析で算出したレンジ h (mm) と平均腐食深さ d_{mean} (mm)、およびシル γ (mm^2) と平均腐食深さ d_{mean} の関係をそれぞれ Fig. 6 および Fig. 7 に示す。 h と d_{mean} の関係は、試験体の設置角度や表裏面による腐食環境の相違により若干異なるが、局部腐食が生じた 0° 対地面を除いて、同様の傾向になっている。この傾向は、他の大気暴露環境についても同様になる。図中の実線は、0.5 年のデータを除く全データから算出した次式の回帰曲線 m である。破線は m の $\pm 2s$ (s : 標準偏差) である。

$$h = 3.62 \cdot d_{mean}^{0.45} \quad (5)$$

$\gamma^{1/2}$ と d_{mean} の関係を Fig. 7 と式 (6) に示す。全プロッ

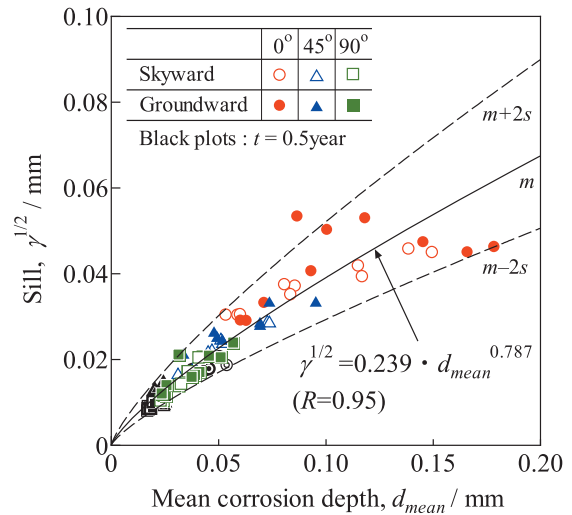


Fig. 7. (color online). Sill γ of corrosion surface as a function of d_{mean} based on all tested specimens.

トのばらつきは、比較的小さくなっている。 $\gamma^{1/2}$ と d_{mean} の関係は、 h の場合と同様に、腐食環境によらず、ほぼ同様となり、次式で表すことができる。

$$\gamma^{1/2} = 0.239 \cdot d_{mean}^{0.787} \quad (6)$$

暴露試験体の腐食表面性状に対する空間統計量レンジ h とシル γ は、式 (5) と式 (6) に d_{mean} を与えることで算出できる。また、 d_{mean} は時間 t の関数式で与えられることから、これらの式を用いることで、空間統計量の経時変化を評価できる。

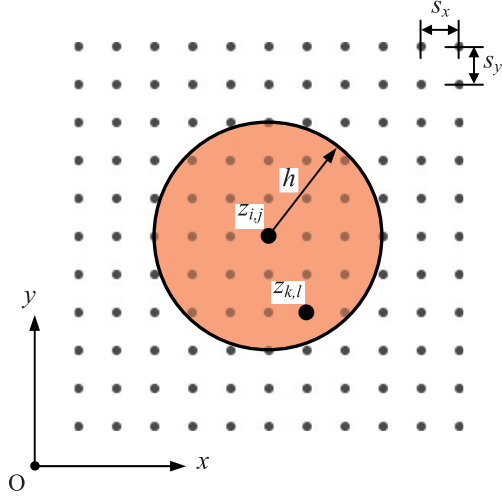
4. 腐食表面の数値シミュレーション²⁾

4.1 数値シミュレーションの方法

任意の位置における腐食深さ z_{ij} は、空間計量的手法の一つである Kriging¹¹⁾ を腐食表面生成のためのシミュレーションを適用することで推定する。

Kriging とは空間現象を連続空間の確率場でモデル化することで、既知データに基づき、任意の位置における確率場の値を空間内挿により推定する補間法である。Kriging には通常型 Kriging や普遍型 Kriging などの手法があるが、腐食表面のシミュレーションでは任意の位置における腐食深さを推定する必要があるため、この目的などを考慮して、通常型 Kriging (以下、Kriging) を用いる。

シミュレーションでは任意の位置における腐食深さ z_{ij} を Kriging の手法を用いて、Fig. 8 中の式に示すように、その位置から半径 θ_2 離れたすべての点 ($N(\theta_2)$ 点) の腐食深さ $z_{k,l}$ の重み付き線形和から算出する。なお、重み係数には Fig. 5 で示した球型モデルの関数を用いる。Kriging の概念図を Fig. 8 に示す。



$$z_{i,j} = \sum_{N(\theta_2)} C(h; \theta) z_{k,l}$$

s_x, s_y : x, y -direction pitch (mm)
 $N(\theta_2)$: All points within θ_2 radius (point)
 $\gamma(h; \theta)$: Value of spherical variogram model (mm^2)
 $z_{i,j}$: Corrosion depth of a point for object (mm)
 $z_{k,l}$: Corrosion depth of a point within h radius (mm)

Fig. 8. (color online). Calculation of corrosion depth using kriging method.

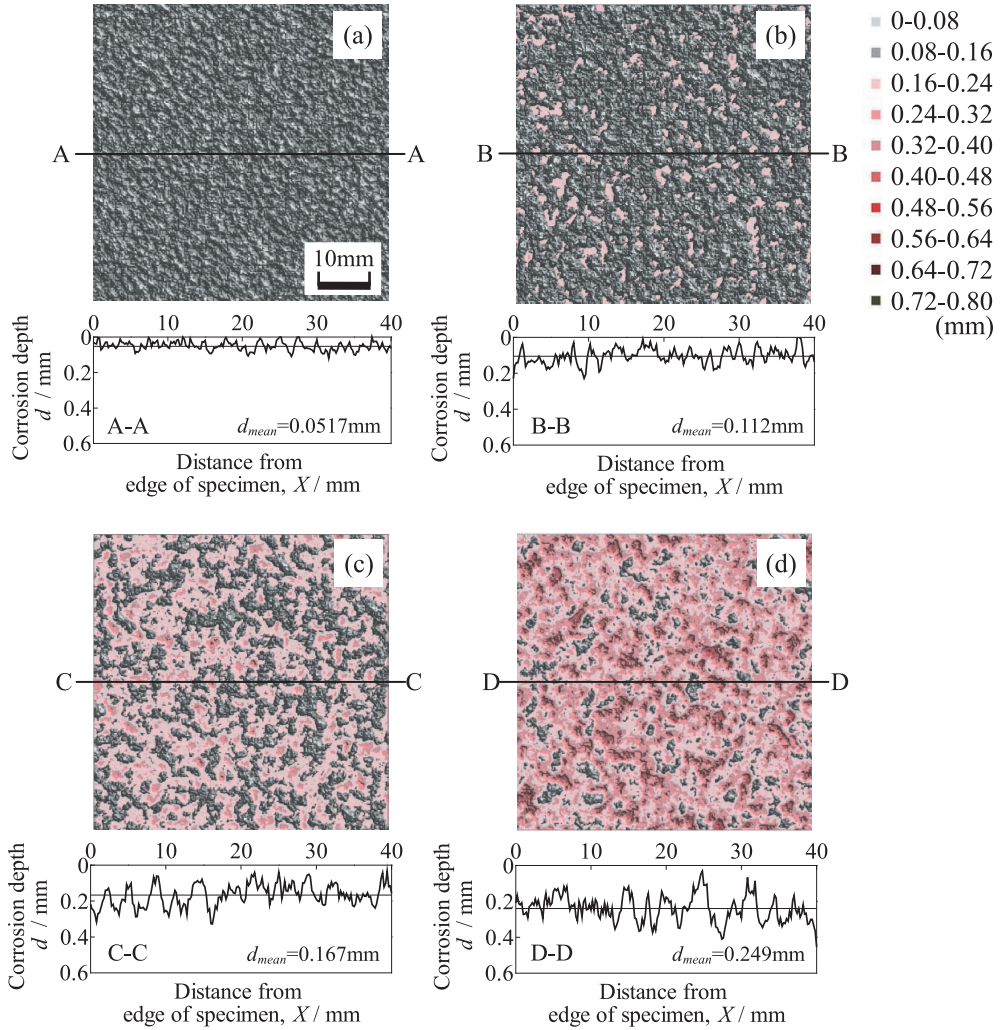


Fig. 9. (color online). Simulated corrosion surfaces corresponding skyward-facing at a mounted angle of 45° after exposed for (a) 2.5, (b) 10, (c) 20 and (d) 40 years in exposure test field.

$$z_{i,j} = \sum_{N(\theta_2)} C(h; \theta) z_{k,l} \quad (7)$$

ここで、空間的自己相関構造を用いた腐食表面のシミュレーションの手順を示す。腐食表面の生成に際して、まず、1) シミュレーションの対象領域を格子座標系に基づき離散化する。次に、2) 離散化した領域に対して、与える空間的自己相関構造を満たす正規乱数場²⁾を発生させる。この際、任意の位置の腐食深さを推定するために、前述した Kriging の手法を用いる¹¹⁾。3) 最後に、生成した乱数場にその領域の平均腐食深さを加えることで、4) 与えた自己相関構造を有する腐食表面が生成できる。

腐食表面に全面腐食や局部腐食の複数の腐食形態が混在し、ヒストグラムが正規分布でモデル化できない場合については、回帰樹分析を適用し、腐食表面を空間的に同等な腐食領域に分割することで、各領域のヒストグラムを正規分布にモデル化できる^{5,6)}。

4.2 腐食表面の経時性の予測

暴露期間を 2.5, 10, 20 および 40 年とし、全面腐食のみが生じると仮定することで、4.1 節と同様な方法および条件を用いて、45° 対空面の試験体の腐食表面性状をシミュレートした結果を Fig. 9 に示す。このように、レンジとシルの空間統計量の経時性に基づき数値シミュレートすることで、任意の年数における腐食表面性状を推定できる。

5. ま と め

本稿では大気暴露した無塗装の普通鋼材が全面腐食する場合の腐食表面性状を空間統計学的手法により分析・定量化する方法を紹介した。また、その空間統計量に基づき、大気環境における経時的な腐食表面性状を数値シミュレートする方法を紹介した。これらの方法は、構造物の塗膜が劣化し、無塗装になった鋼材を対象にしている。

今後は、実構造物の様々な部位における腐食表面性状

のデータをさらに収集・蓄積し、本シミュレーションモデルと比較・検討することで、シミュレーションの精度を向上させる予定である。また、構造物の部位レベルの腐食性を文献⁹⁾あるいは文献¹²⁾の手法により評価・定義し、その結果を文献⁸⁾のシミュレーション手法に導入することで、腐食性を考慮した塗膜劣化と腐食挙動の連成シミュレータを開発する。そのために、実構造物の塗膜劣化パターンと塗膜欠陥から進行する腐食挙動についてデータ収集・分析をするとともに、その電気化学特性と腐食挙動の関係についても検討する。

本稿は主として、文献²⁾を再編集することで執筆した。

文 献

- 1) 例えば、加藤光男：“木曾川大橋が破断した理由（維持管理時代への備え方）”（日経コンストラクション 7 月号, 2007）。
- 2) 貝沼重信, 鄭 映樹, 宇都宮一浩, 安 鎮熙：材料と環境 **61**, 283 (2012)。
- 3) Y.S. Jeong, S. Kainuma and J.H. Ahn : Constructional & Building Materials **43**, 87 (2013)。
- 4) S. Kainuma, Y.S. Jeong and J.H. Ahn : Materi. Sci. Eng., A **602**, 89 (2014)。
- 5) 貝沼重信, 細見直史, 後藤 淳, 伊藤義人：土木学会論文集 A **65**, 440 (2009)。
- 6) 貝沼重信, 細見直史：土木学会論文集 A **62**, 440 (2006)。
- 7) S. Kainuma and N. Hosomi : International Journal of Fracture **158**, 149 (2009)。
- 8) 小林淳二, 貝沼重信, 鄭 映樹：第 61 回材料と環境討論会予稿集 (2014) p. 59。
- 9) 貝沼重信, 山本悠哉, 伊藤義浩, 宇都宮一浩, 押川 渡：材料と環境 **61**, 535 (2012)。
- 10) N. Cressie : J. Int. Assoc. Math. Geol. **17**, 563 (1985)。
- 11) H. Wackernagel : “Multivariate Geostatistics” (Springer Berlin Heidelberg, 1998)。
- 12) 貝沼重信, 山本悠哉, 林 秀幸, 伊藤義浩, 押川 渡：材料と環境 **63**, 50 (2014)。