

海洋環境下における長尺鋼部材の腐食挙動 の評価・予測に関する基礎的研究

貝沼 重信¹・細見 直史²・後藤 淳³・伊藤 義人⁴

¹正会員 九州大学大学院准教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)
E-mail:kai@doc.kyushu-u.ac.jp

²正会員 (株)東京鐵骨橋梁 橋梁事業本部設計部設計課 (〒302-0038 茨城県取手市下高井1020)

³正会員 (株)大林組 広島支店 (前九州大学大学院 工学府博士前期課程)
(〒730-0041 広島県広島市中区小町1-25)

⁴フェロー会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

海洋環境下における鋼構造物を腐食損傷に対して適切に維持管理するためには、その部材の腐食挙動の経時性を明らかにする必要がある。そこで、本研究では19.5年間海洋暴露された長尺鋼アンクル材の腐食表面を回帰樹分析することで、腐食表面性状に対する平均腐食深さと最大腐食深さの関係を明らかにした。また、鋼アンクル材に対する腐食表面性状をバリオグラム分析することで、その空間統計量と平均腐食深さの関係を明らかにした。さらに、この統計量を用いて空間統計学的数値シミュレーションを行うことで、海洋環境における長尺鋼部材の経時腐食挙動の評価・予測手法を提案した。

Key Words : corrosion, steel member, marine environment, regression tree, variogram, numerical simulation

1. はじめに

海洋環境下における鋼矢板や鋼管杭等の長尺の鋼部材は、海上大気帯、飛沫帯、干満帯、海水帯および海泥帯の腐食環境に曝される¹⁾。特に、飛沫帯では乾湿が頻繁に繰り返され、部材に付着する薄い海水膜に大気中の酸素が十分に供給されるため、腐食が著しく進行する²⁾。

鋼矢板においては、飛沫帯で腐食が進行した結果、矢板に穴が生じる損傷事例が報告されている³⁾。この穴から裏込め土砂が流出し、裏込め土が空洞化・沈下することで、構造物が供用できなくなる場合がある。また、鋼管杭を用いた構造物では、飛沫帯の腐食により断面減少した結果、鋼管杭が局部変形した事例や、平均干潮面直下部の局部腐食により穴が生じ、鋼管杭が破断に至った事例も報告されている⁴⁾。これらの事例のように、長尺鋼部材の腐食損傷が構造物に致命的なダメージを与える場合がある。そのため、既往の研究では海洋環境における長尺鋼部材の腐食挙動に関して、海洋暴露試験を主とした様々な検討が行われてきた⁵⁾⁹⁾。しかし、構造物を適切に維持管理する上で重要となる経時的な腐食表面性状については、明らかにされていない。また、実部材の

腐食深さの実測結果に基づく経時腐食挙動を簡便に評価・予測する手法も確立されていない。

本研究では19.5年間海洋暴露された長尺鋼アンクル材の腐食表面性状の測定データ⁸⁾を回帰樹分析した。その結果に基づき、様々な腐食形態の表面性状に対して、平均腐食深さと最大腐食深さの相関を明らかにする。また、これらの腐食表面性状のバリオグラム分析を行なうことで、平均腐食深さと腐食表面性状の特性値(レンジおよびシル)の関係を定量的に明らかにする。さらに、この特性値を用いた腐食表面性状の数値シミュレーションを行うことで、海洋環境下における長尺鋼部材の経時腐食挙動の評価・予測手法を提案する。

2. 海洋暴露試験

(1) 試験方法の概要⁷⁾⁹⁾

試験体に用いられた鋼材は、ブラスト処理されたJIS G 3101 SS400材の長尺の鋼アンクル材(板厚:20mm)である。海洋暴露試験は駿河湾大井川沖合約250mに位置する海洋技術総合研究施設で19.5年間実施された⁹⁾。

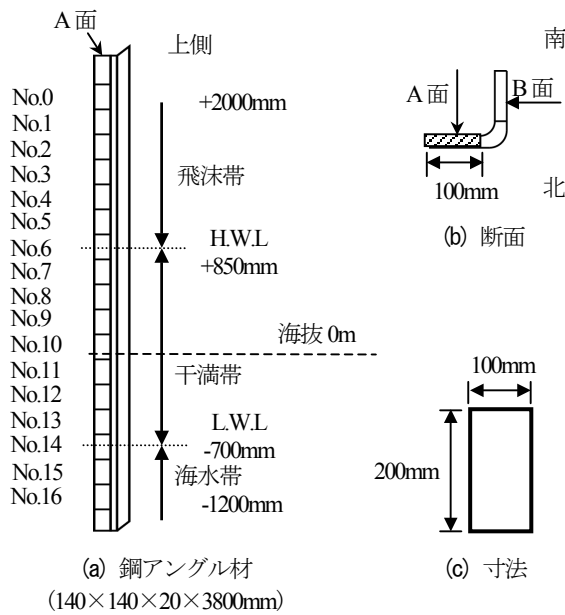


図-1 試験体の腐食帯域と形状・寸法

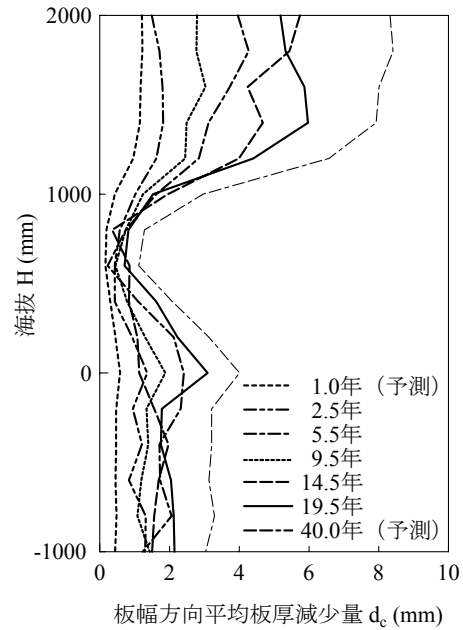


図-2 試験体の板幅方向の平均板厚減少量(予測)

アングル材の形状・寸法を図-1に示す。図-1(a)の図中に示す破線は、海洋暴露時の海拔0mを示しており、点線は平均満潮面(H.W.L.)および平均干潮面(L.W.L.)の位置を示している。本研究では満潮位よりも上側の帯域を飛沫帯とし、満潮位から干潮位までの帯域を干満帯、干潮位よりも下側の帯域を海水帯とする。試験体は図-1(c)に示すように、アングル材のA面から100×200mmの寸法で計17体(No.0～No.16)切り出すことで製作された。試験体に生成されたさび層は、サンドブラスト処理および化学処理により除去された。

(2) 試験結果

a) 各腐食帯域における平均板厚減少量

海洋技術総合研究施設では、本研究で対象とした19.5年間曝露されたアングル材以外に同アングル材で2.5年、5.5年、9.5年および14.5年間の曝露試験を実施している。これらのアングル材の板厚は、マイクロメータを用いて測定されている。その測定位置はアングル材のA面およびB面に対して、海拔-1000mm～2000mmまでを200mm毎に材端から40mmおよび80mmの各2点、計32点である⁹⁾。

海拔Hと板幅方向の平均板厚減少量 d_c の関係を図-2に示す。 d_c は文献⁹⁾と同様な位置で測定した。なお、図中の1.0年後および40.0年後については、5. (1)で後述する予測手法による推定結果を示している。アングル材は曝露期間によらず、Hが850mm以上となる飛沫帯で d_c が著しく大きくなっており、干満帯では小さくなっている。また、腐食量は飛沫帯、海水帯、干満帯の順に増加する傾向にある。これは、干満帯に位置する鋼部材では、大気部と海水帯において溶存酸素濃度の差による通気差電

池が形成され、干満帯に位置する部分がカソードとなることで、アノード反応する飛沫帯の腐食量が大きくなるためである。また、海水帯では、溶存酸素の供給量が安定しており、海拔によらず腐食環境がほぼ同様であるため、通気差電池は形成されない。

b) 各腐食帯域における平均腐食深さの経時性

海拔1600mm(飛沫帯)、海拔600mm(海拔0mよりも上部の干満帯)および海拔-1000mm(海水帯)における試験体の平均腐食深さ d_{mean} と暴露期間Tの関係を図-3に示す。試験体の平均腐食深さは、表裏面の腐食量が同じであると仮定し、板厚減少量の1/2とした。図中の実線は、Tに対する d_{mean} の累乗回帰曲線である。図-3(a)は海拔1600mmにおける d_{mean} を示している。回帰曲線と測定データとの相関係数Rは0.99であり、データと高い相関を示している。したがって、以下の累乗回帰曲線の式から d_{mean} を算出できると言える。

$$d_{mean,1600} = 1.17 T^{0.523} \quad (1)$$

$d_{mean,1600}$: 海拔1600mmにおける平均腐食深さ(mm)
T: 暴露期間(年)

図-3(b)および図-3(c)に海拔600mmおよび-1000mmにおける d_{mean} を示す。暴露期間と干満帯および海水帯の累乗回帰曲線は、相関係数が低いものの、暴露データの傾向を示している。したがって、干満帯および海水帯の d_{mean} についても、次式に示す累乗関数で表すことができると考えられる。

$$d_{mean,600} = 0.279 T^{0.260} \quad (2)$$

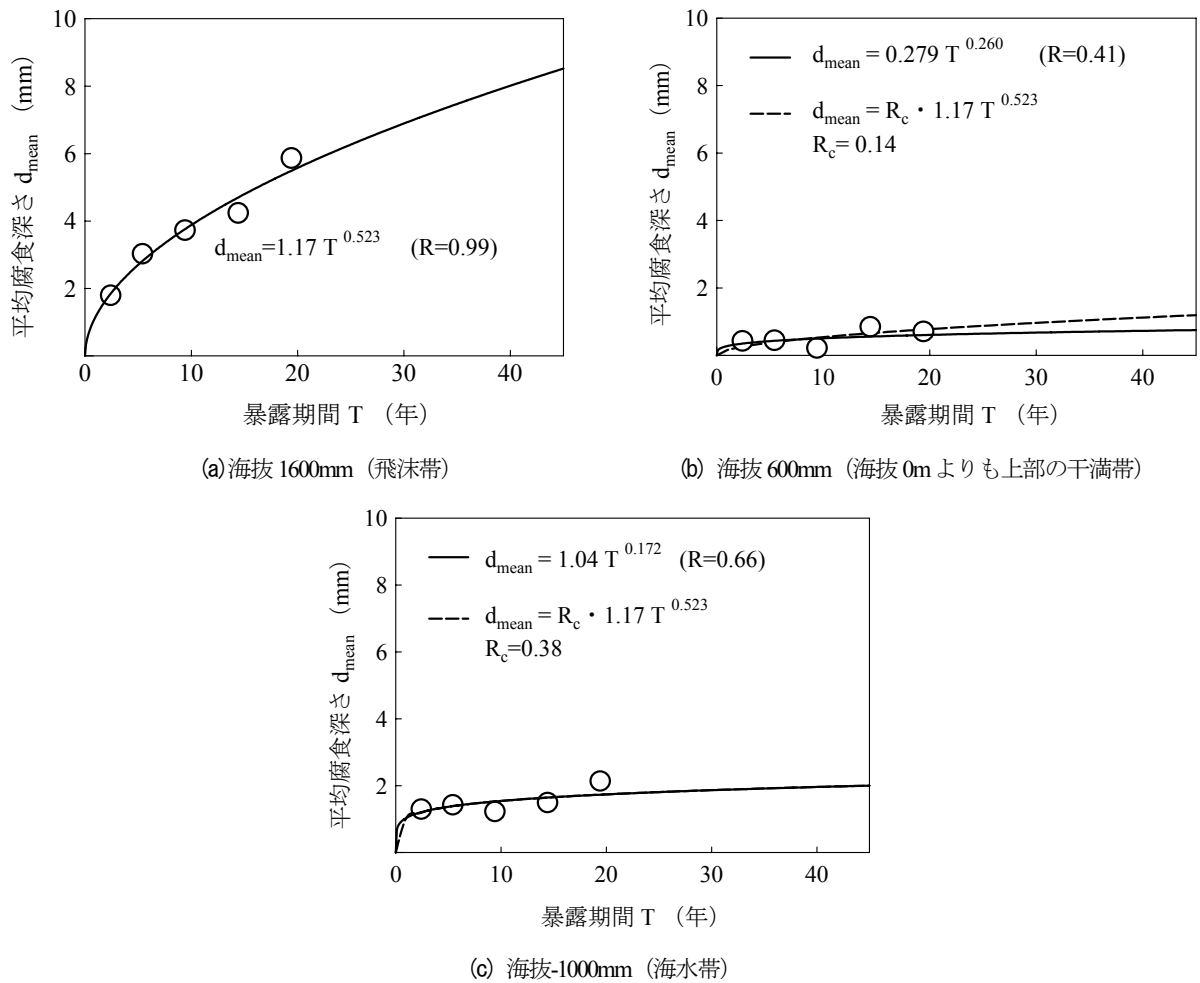


図-3 平均腐食深さ経年変化

$$d_{mean,1000} = 1.04 T^{0.172} \quad (3)$$

$d_{mean,600}$: 海拔 600mmにおける平均腐食深さ (mm)
 $d_{mean,1000}$: 海拔-1000mmにおける平均腐食深さ (mm)
 T : 暴露期間 (年)

以上の d_{mean} と T の累乗関係は、他の海拔についても同様であった。これらの結果から、腐食環境帯域（飛沫帯、干満帯および海水帯）によらず、平均腐食深さ d_{mean} と暴露期間 T の関係は、累乗関係にあると考えられる。

3. 試験体の腐食表面性状および腐食深さ

試験体の腐食表面形状は、さび層の除去後にレーザーフォーカス深度計(分解能: 0.1 μ m)により測定間隔は0.3 \times 0.3mmとして測定された^{7,8)}。その結果、各試験体から約20万点の腐食表面性状のデータが取得された。なお、試験体の腐食前の基準面が不明であるため、表裏面の腐食量は同様と仮定し、平均板厚減少量の1/2が表裏面の平均腐食深さになるように測定結果が補正された⁷⁾。

試験体のA面の北面における腐食表面性状を図-4に示す。飛沫帯 (No.0~No.5) の腐食深さは、他の試験体に比べて大きくなっている。また、海拔0mよりも上側に位置する干満帯 (No.6~No.9) については、ほぼ一様に腐食しているものの、飛沫帯に比べて腐食深さが小さくなっている。また、腐食が海拔0mよりも下側の干満帯および海水帯 (No.10~No.16) については、全面腐食と局部腐食とが混在している。

(1) 板幅方向の平均腐食深さ

アンクル材の海拔に対する試験体の板幅方向の平均板厚減少量 d_c を図-5に示す。飛沫帯の d_c が最も大きく、その値は最大で8mm程度となっている。一方、干満帯における d_c は2mm程度であり、T.P.近傍が最も大きく、H.W.L.近傍で最小となっている。

海水中に暴露された鋼材のマクロセル腐食は、干潮から満潮に変化したときに急激な電位の変化が生じ、満潮時には干満帯をカソード、海水帯をアノードとしたマクロセルが生じるとの報告がある¹⁰⁾。また、干潮時にはL.W.L.直下部をアノード、それよりも深い海中部をカソ

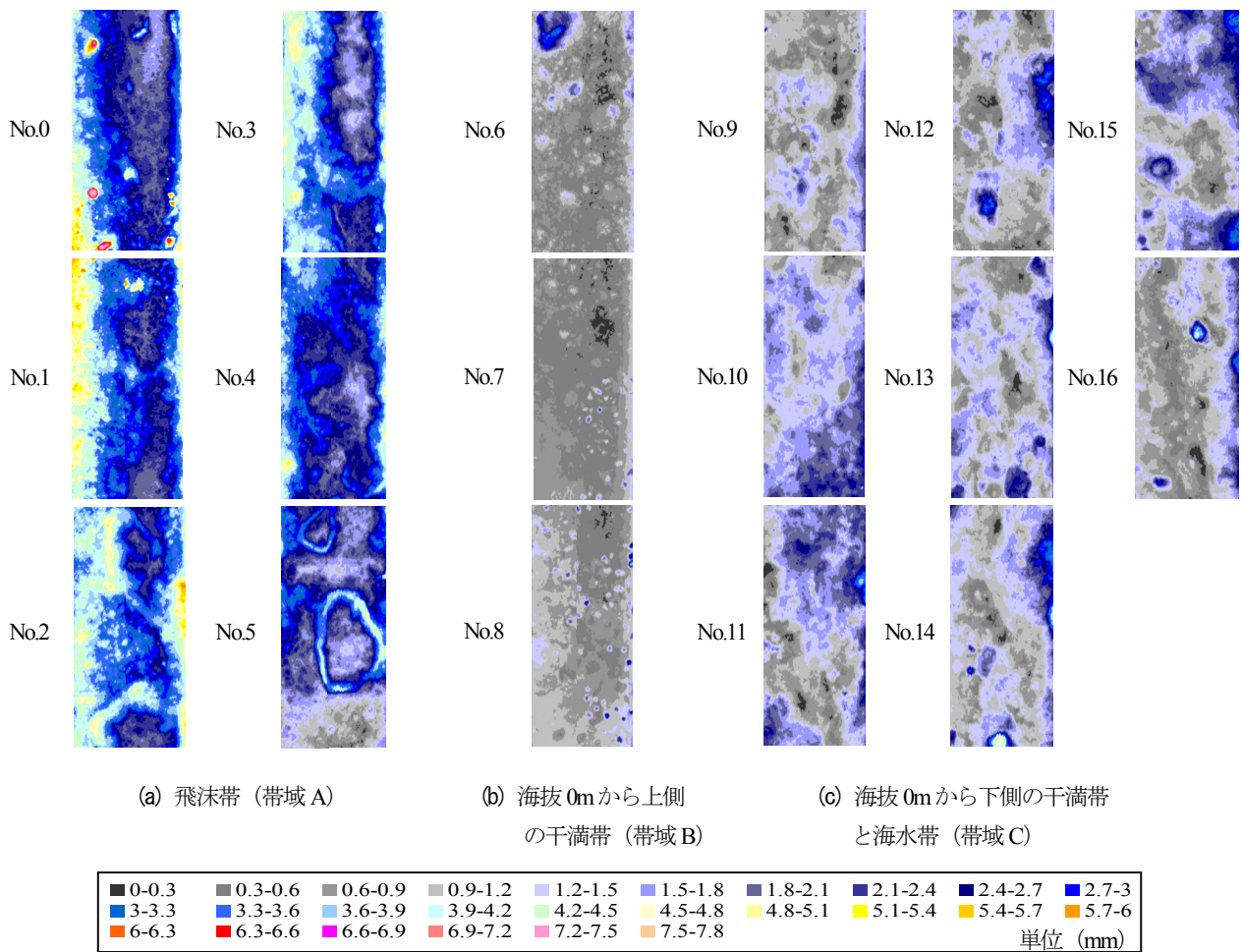


図4 試験体の腐食表面性状(A面, 北面)

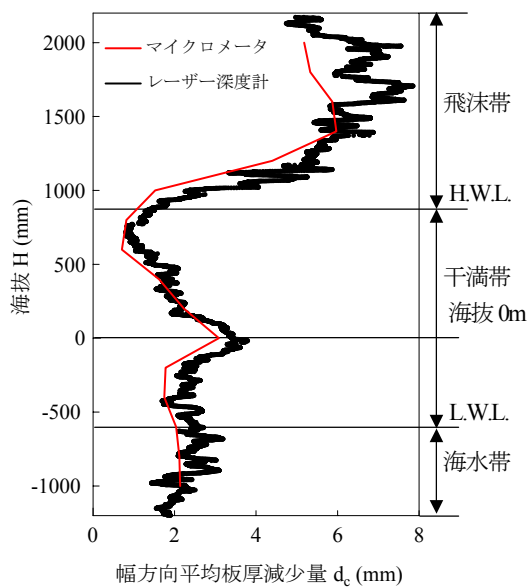


図5 板幅方向平均板厚減少量

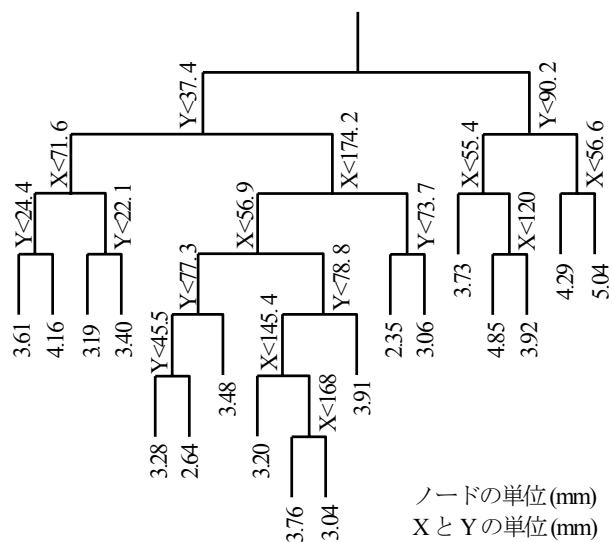


図6 樹形図 (No.2試験体 (A面, 北面))

ードとしたマクロセルが生じることが報告されている¹⁰⁾。
 図-5)に示す本試験データは干満帯以下の帯域において、
 海拔0m近傍の腐食深さが、他の位置よりも約2倍大きく、
 H.W.L.近傍の干満帯では、1/2程度となっている。この結

果は、文献10)の結果と腐食が著しく生じる位置が若干
 異なっている。これは、駿河湾と文献10)の平均海面が
 異なるためと考えられる。

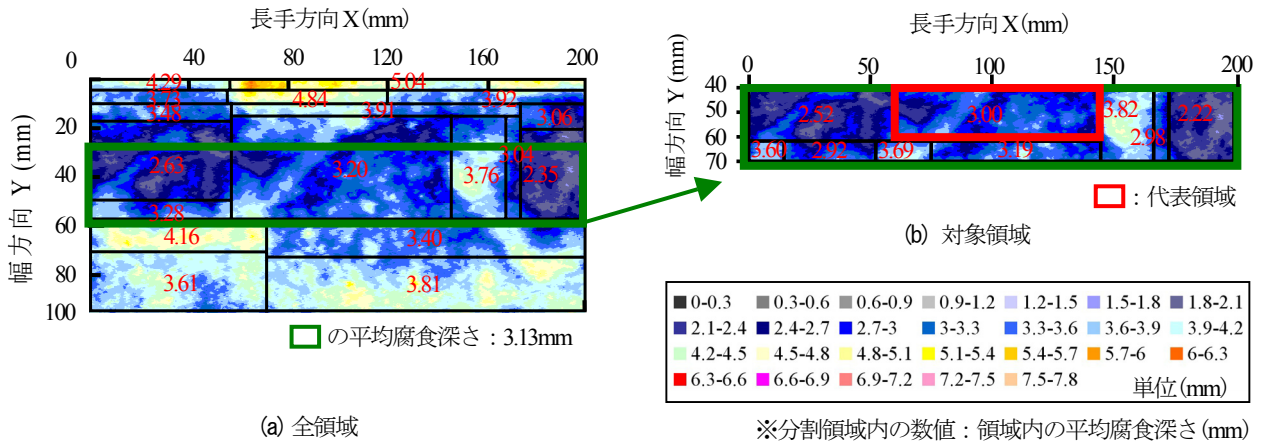


図-7 腐食領域の回帰樹分割の例および各腐食領域の定義 (No.2 試験体 (A 面, 北面))

(2) 腐食領域の分割

図-4に示すように、試験体の腐食深さは、腐食帯域によらず、板幅方向の材端部における腐食深さが中央部に比べて大きい傾向にある。これは、材端部やアングル材のコーナー部による影響を受けるためである。本研究では、これらの影響を受けない一般部の腐食挙動を検討する。そこで、これらの腐食表面性状が一般部と空間的に異なる領域を回帰樹分析¹¹⁾⁻¹³⁾により分割・抽出することで、材端部やコーナー部の影響を除外することとした。

a) 回帰樹分析

試験体の腐食表面の回帰樹分析に際し、その分割回数は複雑度パラメータおよび尤離度を用いて決定した^{11), 14)}。

回帰樹分析により得られた樹形図の例を図-6に示す。また、この樹形図から得られた腐食領域の回帰樹分割の例を図-7(a)に示す。板幅方向 Y の分割数は、長手方向 X に比べ多くなっている。これは、前述したように、材端部やアングル材のコーナー部の腐食量が板幅方向の中央部と異なるためである。この傾向は試験体によらず同様であった。そこで、本研究では材端部およびコーナー部の影響範囲が最も大きい試験体を基準として、全試験体からそれらの影響範囲を除外した領域を「対象領域」とした。なお、除外した領域は、材端から 30mm およびコーナー側の切断線から 40mm の範囲である。

対象領域に対する回帰樹分析の結果を図-7(b)に示す。回帰樹分析の分割数は、板幅方向 Y に比べ長手方向 X の方が多くなっている。この結果から、対象領域に対して回帰樹分析を行うことで、アングル材の材端部やコーナー部の影響を除去できたとと言える。

次に、対象領域内についても海洋生物の付着の影響を受けて特異な腐食特性を示している領域があった。そこで、回帰樹分析により対象領域をさらに細分化することとした。以下では、それらの領域を「任意領域」と呼ぶ。また、任意領域の中でその平均腐食深さが対象領域の平均腐食深さに最も近い領域は、対象領域の腐食特性を最も良く表していると考え、「代表領域」と呼ぶこととす

る。

b) 腐食表面性状のヒストグラム

腐食帯域は 3. (2) a) で定義した対象領域に対する腐食深さのヒストグラムの分布形状、すなわち腐食深さの最大値と最小値の差に対する最頻値の相対度数の比に基づき分類した。この比が 0.5~1.5 程度 (ヒストグラムの刻み幅：0.02mm) となり、腐食深さのばらつきが比較的大きい試験体を腐食帯域 A の腐食表面と定義した。また、2~4 程度 (ヒストグラムの刻み幅：0.02mm) の場合については、腐食深さのばらつきが比較的小さい試験体を腐食帯域 B とした。さらに、腐食帯域 A において、局部腐食と全面腐食が混在している試験体を腐食帯域 C と定義した。

以上の定義で分類した結果、腐食帯域 A に相当する試験体は、飛沫帯に位置する No.0~No.5 となり、腐食帯域 B については、海拔 0m よりも上側の干満帯に位置する No.6~No.8 となった。また、腐食帯域 C については、海拔 0m よりも下側に位置する干満帯および海水帯に位置する No.9~No.16 となった。

腐食帯域 A および B に分類された飛沫帯 (No.2 試験体)、および海拔 0m よりも上側の干満帯 (No.6 試験体) に位置する対象領域の腐食深さのヒストグラムを図-8に示す。これらのヒストグラムの平均腐食深さは大きく異なるものの、いずれも実線で示す正規分布とほぼ一致している。

代表領域における腐食深さのヒストグラムを図-9に示す。代表領域の腐食深さのヒストグラムは、図-8に示す対象領域の場合と腐食深さの範囲は若干異なっているものの、その平均腐食深さは良く一致している。そのため、代表領域は対象領域の腐食特性を表しており、試験体の腐食表面性状を代表する領域であると言える。

図-10に腐食帯域 C に分類された海拔 0m よりも下側の干満帯に位置する試験体 (No.11) のヒストグラムを示す。図-10(a)に示す対象領域では、ヒストグラムに 2 つのピークがある。これは、全面腐食あるいは局部腐食

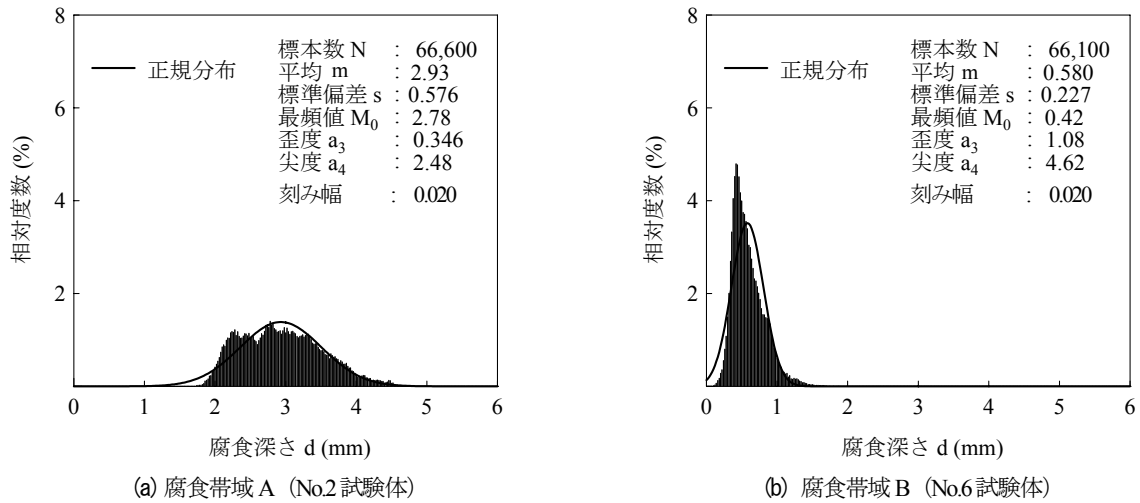


図-8 対象領域のヒストグラム

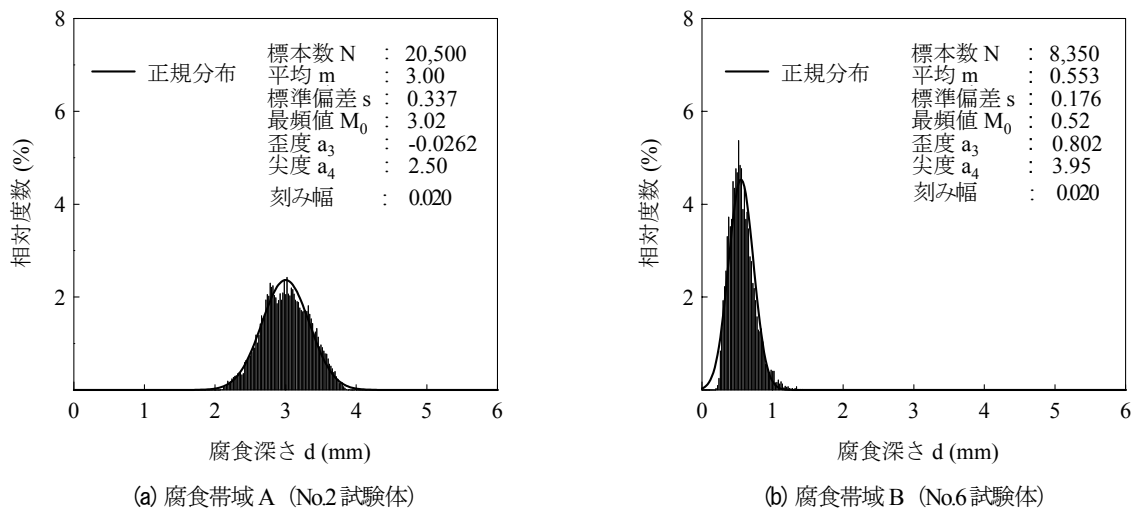


図-9 代表領域のヒストグラム

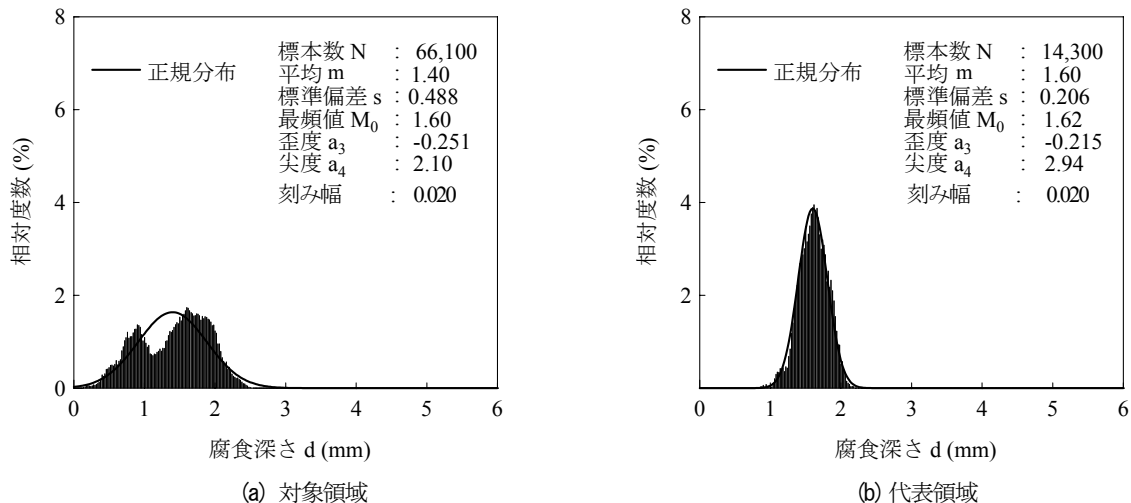


図-10 対象領域および代表領域のヒストグラム 腐食帯域 C (No.11)

のいずれかが卓越している場合、ヒストグラムはほぼ正規分布となるため¹⁵⁾、全面腐食と海洋生物の付着などによる特異な局部腐食が混在していると考えられる。一方、

図-10(b)に示す代表領域については、ヒストグラムはほぼ正規分布となっているため、回帰樹分析により海洋生物による特異な腐食領域が除去できたと言える。

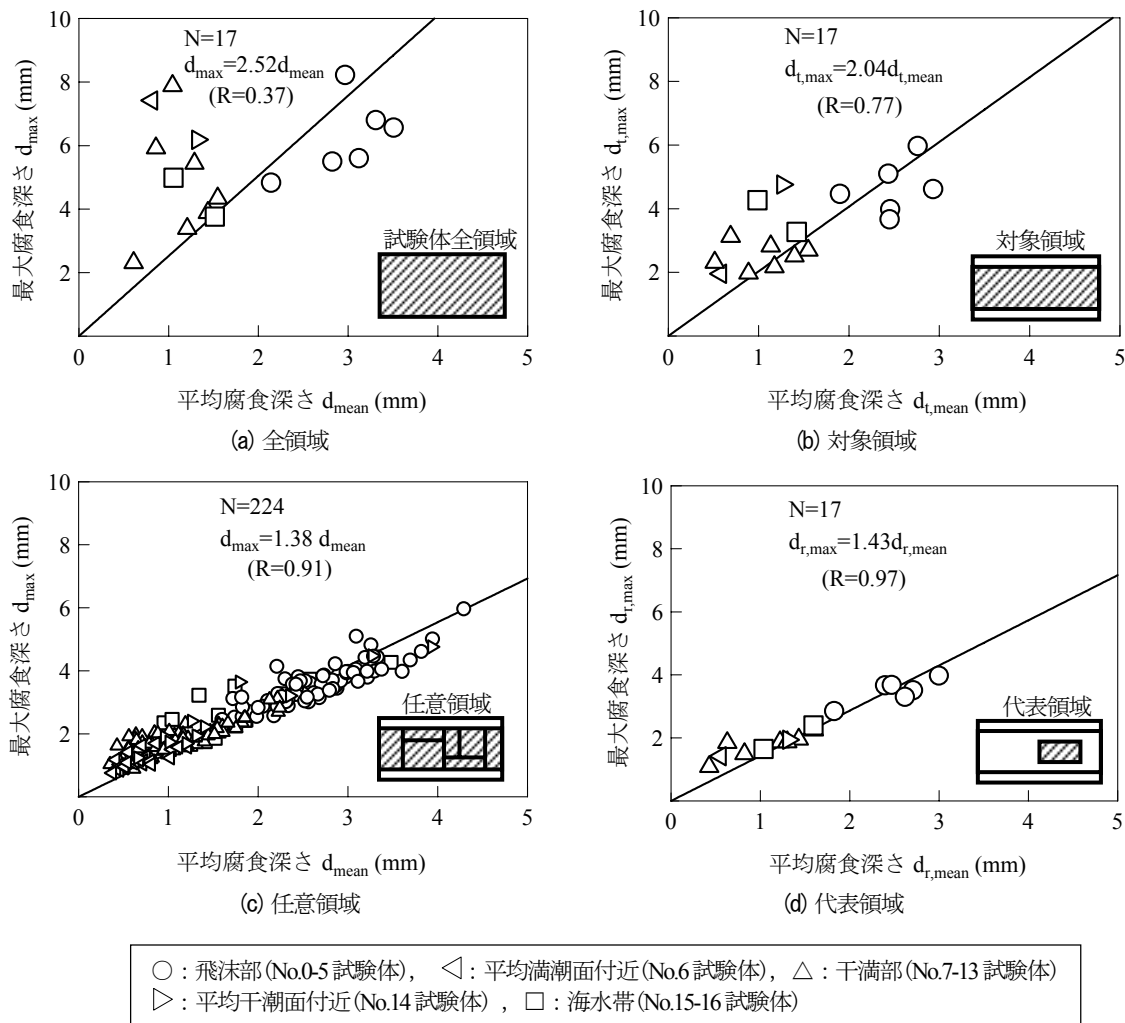


図-11 各腐食領域における平均腐食深さと最大腐食深さの関係

(3) 平均腐食深さと最大腐食深さの相関関係

1. で前述したように、実構造物では全面腐食による部材の様な断面減少による損傷のみではなく、腐食により部材に穴が生じることで致命的な損傷に至った事例が報告されている。そこで、実測の平均腐食深さから最大腐食深さを簡便に評価・予測可能とするために、(2) で定義した試験体の全領域、対象領域および代表領域における平均腐食深さと最大腐食深さの相関関係を検討する。

平均腐食深さと最大腐食深さの関係を図-11に示す。図中の実線は、平均腐食深さに対する最大腐食深さの回帰直線である。図-11(a)は試験体の全領域について示している。相関係数 R が0.37と低く、全領域では平均腐食深さと最大腐食深さには相関はほとんど無い。

次に、材端部やコーナー部からの腐食の影響を除外した対象領域における関係を図-11(b)に示す。対象領域については、図-11(a)の全領域の場合に比べ、データのばらつきが小さくなるため、相関性が図-11(a)の全領域に比べ高くなっている。

図-11(c)および図-11(d)は、海洋生物の付着などによる特異な局部腐食の領域を除外した任意領域および代

表領域について示している。腐食環境帯域によらず、平均腐食深さに比例して最大腐食深さが増加している。相関係数 R は0.9以上となっており、平均腐食深さと最大腐食深さの関係には、高い相関がある。これは、回帰分析を行うことで腐食表面性状を均一と見なせる領域に細分化し、材端部やアンクル材のコーナー部による腐食の影響や海洋生物による腐食の影響を除去したためと考えられる。以上から、任意領域および代表領域には、腐食環境帯域（飛沫部、干満部および海水帯）によらず、平均腐食深さと最大腐食深さに、比例関係があると言える。

4. 腐食表面性状の数値シミュレーション

ここでは、各試験体の腐食表面性状を把握するため、バリオグラム分析により空間統計量（レンジおよびシル）を明らかにする。また、この空間統計量と平均腐食深さの関係を明らかにすることで、任意の平均腐食深さに対する腐食表面性状をシミュレートするための数値シ

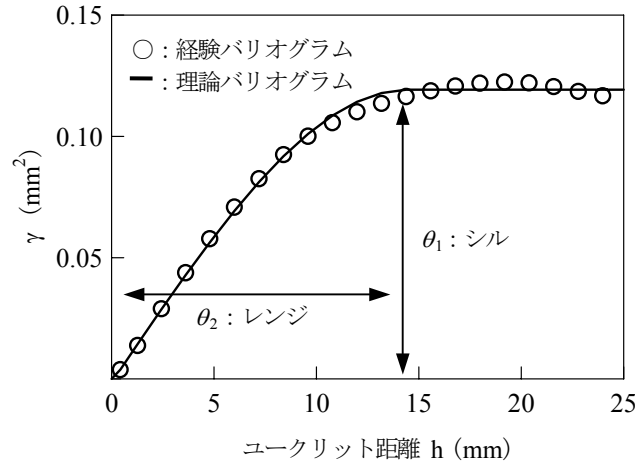


図-12 代表領域におけるバリオグラム分析結果の例

ミュレーションの手法について検討する。

(1) バリオグラム分析^{11),15)}

3. (2) a)では、回帰樹分析により各試験体の腐食表面性状の代表領域を特定した。ここでは、代表領域を対象として、バリオグラム分析することで、その腐食表面の空間的自己相関構造を明らかにする。

任意の位置*i*点の腐食深さ Z_i と距離 h 離れた位置(*j*点)の腐食深さ Z_j のバリオグラム $\gamma(h)$ は、次式で示すことができる^{16),17)}。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} (z_i - z_j)^2 \quad (4)$$

- $\gamma(h)$: 経験バリオグラム
- $N(h)$: ユークリット距離 ($i-j=h$)となるすべての対の総数
- Z_i : *i*点の腐食深さ
- Z_j : *j*点の腐食深さ

なお、代表領域は回帰樹分析により腐食深さの分散が均一とみなせる領域に分割されている。そのため、その領域内においてはデータの方向依存性が低いと考えられる。しかし、代表領域は試験体の形状・寸法の影響により、幅方向に比べ長手方向の寸法が長くなる傾向にある。そこで、本研究では試験体の幅方向の影響を除去するため、長手方向に対するバリオグラムを算出した。式(4)を用いて分析した代表領域のバリオグラム分析結果の例を図-12に示す。図の縦軸は、腐食深さの共分散を表す γ であり、横軸はデータ間のユークリット距離 h である。図中のプロットは、試験体の腐食表面測定データから得られた経験バリオグラムである。このバリオグラムに共分散関数を適用することで、理論バリオグラムにモデル

化した。その結果を図中に実線で示す。また、図中の θ_1 は、空間的従属性を示すシルであり、 θ_2 は空間的自己相関の影響範囲を示すレンジである。なお、シルは腐食深さの程度を示し、レンジは腐食深さの影響範囲を意味する。共分散関数には腐食データのバリオグラムに最も適合する次式の球型モデルを適用した^{16),17)}。

$$\gamma(h; \theta) = \begin{cases} \theta_1 \left(1 - \frac{3|h|}{2\theta_2} + \frac{1}{2} \frac{|h|^3}{\theta_2^3} \right) & (0 \leq |h| \leq \theta_2) \\ 0 & (|h| > \theta_2) \end{cases} \quad (5)$$

- h : ユークリット距離
- $\gamma(h; \theta)$: 球型モデルの共分散関数
- θ_1 : シル
- θ_2 : レンジ

この共分散関数を用いた非線形最小自乗法により、バリオグラムを空間回帰し、レンジおよびシルを算出することで、空間的自己相関構造を推定した。なお、非線形最小自乗法には、次式の重み付き最小自乗基準 $WRSS(\theta)$ を用いた¹⁸⁾。

$$WRSS(\theta) = \sum_{k=1}^K \frac{|N(h_k)|}{\gamma(h_k; \theta)^2} (\gamma(h_k) - \gamma(h_k; \theta))^2 \quad (6)$$

- $|N(h_k)|$: ユークリット距離 h がラグ k となるペアの総数
- K : バリオグラムのラグの数
- $\gamma(h_k)$: ラグ k の経験バリオグラムの値
- $\gamma(h_k; \theta)$: 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

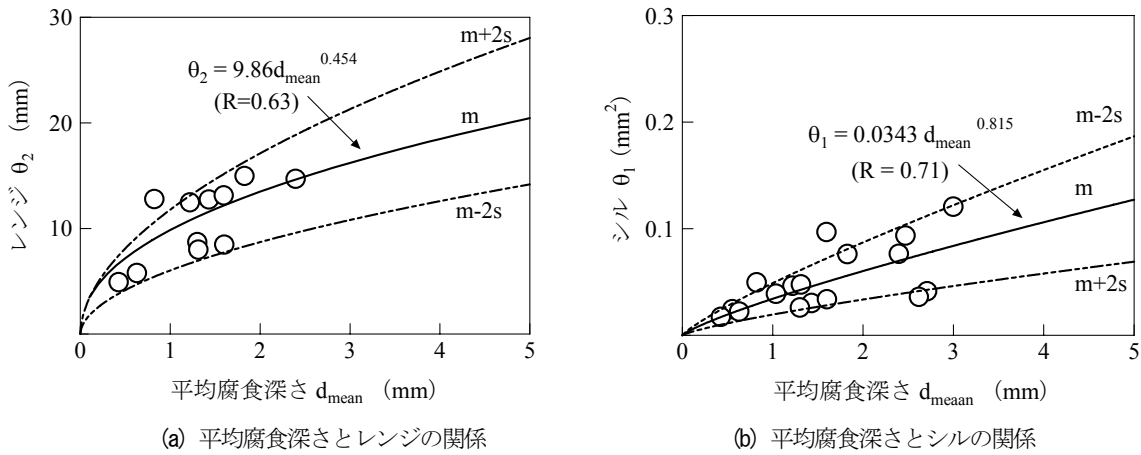


図-13 平均腐食深さと空間統計量の関係

(2) 腐食表面性状の特性値と平均腐食深さ

ここでは、4. (1) で推定した代表領域の空間的自己相関構造を示す特性値（レンジおよびシル）と平均腐食深さとの関係について検討する。代表領域はバリオグラム分析で算出されるレンジよりも小さな領域では、腐食表面の2次定常性が得られない。そこで、バリオグラム分析における解析精度と必要データ数の関係を考慮し、対象領域の10%以上となる領域を選定した。

平均腐食深さ d_{mean} と空間統計量の関係を図-13に示す。図中に示す実線は、空間統計量に対する d_{mean} の累乗回帰曲線 m であり、破線はその $\pm 2s$ (s : 標準偏差) を示している。 θ_1 および θ_2 は、 d_{mean} を用いて次式で近似できると考えられる。

$$\theta_1 = 3.43 \times 10^{-2} d_{mean}^{0.815} \quad (7)$$

$$\theta_2 = 9.86 d_{mean}^{0.454} \quad (8)$$

θ_1 のばらつきは、 d_{mean} が増加するにしたがって増大しており、その値は θ_2 に比べて大きい。これは θ_1 が腐食深さの分散を表しているためである。以上から、式(1)、式(7)および式(8)を用いることで、任意の供用年数に対する鋼部材の腐食表面性状がシミュレートできると考えられる。ただし、本研究では鋼板に穴が生じる前の腐食表面性状を対象としているため、穴が生じた後については適用できない。

(3) 腐食表面性状の数値シミュレーション¹⁵⁾

a) 数値シミュレーションの方法

腐食表面性状の数値シミュレーションは 4. (2) で示した平均腐食深さおよび空間統計量を用いて行った。このシミュレーションは、前述したように腐食により鋼板に穴が生じる前までを対象としている。以下に数値シミュレーションの手順を示す。

- 1) 腐食データを生成する代表領域を設定する。
- 2) 式(1)により、暴露期間 T に対する平均腐食深さを算出する。
- 3) 式(7)および式(8)により、2)で求めた平均腐食深さに対するシル θ_1 とレンジ θ_2 を算出する。
- 4) 1)の領域に 3)のレンジとシルに基づき、球型モデルの共分散関数により、平均 0 mm、共分散 Σ の空間的自己相関構造を有する正規乱数を発生させる。この際、経験バリオグラムと理論バリオグラムとの相関係数の誤差が1%以下になるまでシミュレーションを繰り返す。
- 5) 4)の結果に 2)で求めた平均値 μ を加算することで、平均 μ 、共分散 Σ の空間的自己相関構造を有する正規確率場を生成する。

本シミュレーションに用いた仮定を以下に示す。

- 1) 腐食深さの自己相関構造は、球型モデルの共分散関数に従う。
- 2) 腐食深さの確率分布は、正規分布に従う。
- 3) 領域内では、2次定常性が成立する。

b) 数値シミュレーションの妥当性の検討

ここでは、腐食の進行が最も著しい飛沫帯のNo.2の試験体の腐食表面を対象として、数値シミュレーションを実施した。このシミュレーションの結果と試験体の腐食表面の測定結果を比較することで、数値シミュレーションの妥当性を検証する。

代表領域における腐食表面性状の例を図-14(a)に示す。この試験体の表面性状から抽出した試験体の平均腐食深さは2.99mmであり、シルおよびレンジは、それぞれ 0.12mm^2 および 14.5mm であった。なお、これらの値はNo.2の試験体における平均腐食深さと、腐食表面性状における腐食の特性値を示している。これらの空間統計量に基づき、腐食表面性状の数値シミュレーションを実施した。

試験体の腐食表面性状と数値シミュレーションの結果

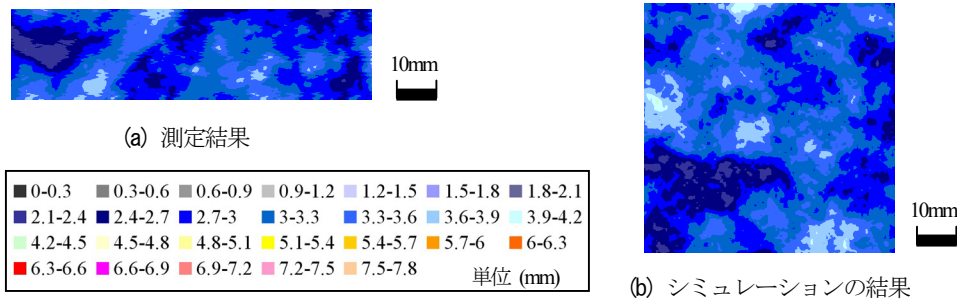


図-14 腐食表面性状の測定結果およびシミュレーション結果 (No.2 試験体)

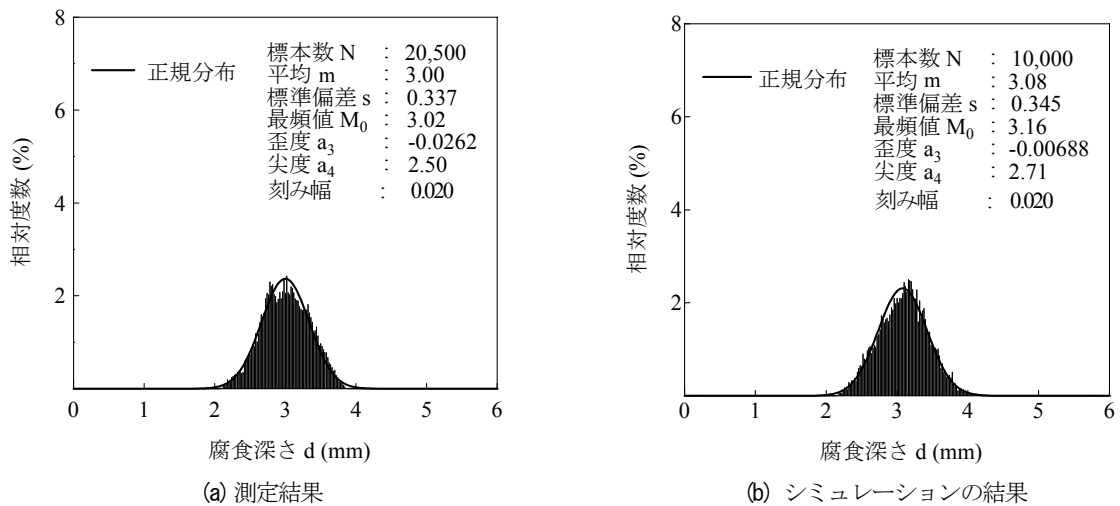


図-15 測定結果およびシミュレーション結果のヒストグラム (No.2 試験体)

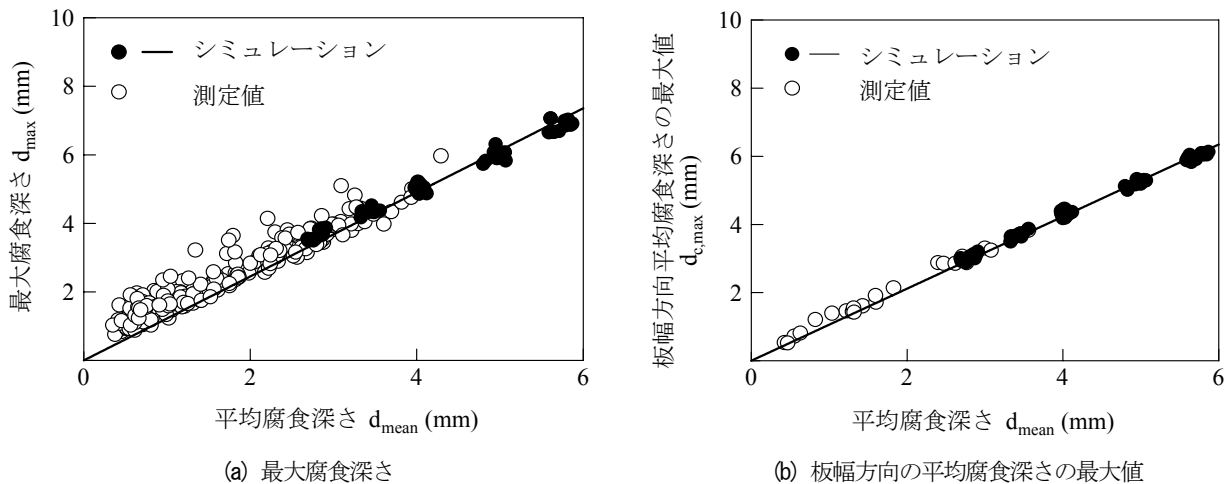


図-16 平均腐食深さと板幅方向の平均腐食深さ、および最大腐食深さとの関係

を図-14 に示す。図-14(b)に示すシミュレーション結果は、図-14(a)に示す試験体の腐食表面の腐食深さとその分布の性状の傾向を良く表している。

図-15 に試験体の腐食表面の測定結果とシミュレーションの結果のヒストグラムを示す。シミュレーションの平均値 m 、標準偏差 s 、最頻値 M_0 、歪度 a_3 および尖度 a_4 は、試験体の測定結果と良く一致している。

次に、平均腐食深さ d_{mean} と腐食表面性状の特性値の関係式 (式(7)および式(8)) を用いて腐食表面性状の数値

シミュレーションを行った。数値シミュレーションは平均腐食深さが2.8, 3.5, 4.0, 5.0および5.8mmの腐食表面性状に相当する空間統計量を用いて、各11回実施した。なお、これらの平均腐食深さは、後述する腐食表面性状の予測において、暴露期間がそれぞれ20年, 30年, 40年, 60年および80年後の腐食表面性状に相当する。

平均腐食深さ d_{mean} と最大腐食深さ d_{max} 、および板幅方向の平均腐食深さの最大値 $d_{c,max}$ の関係を図-16に示す。図中の○印は図-11(c)で示した測定結果であり、●印は

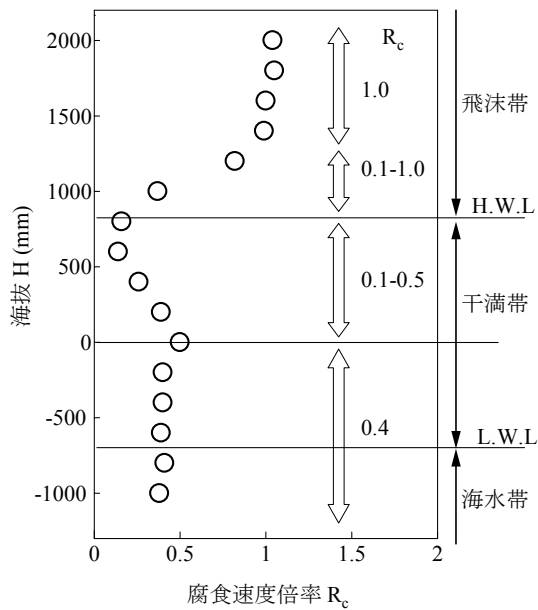


図-17 海拔と腐食速度倍率の関係

シミュレーション結果である。実線はその回帰直線を示している。測定結果とシミュレーションによる d_{max} および d_{cmax} は、 d_{mean} が増加するにしたがって、ほぼ線形的に増加する傾向にあり、シミュレーションは測定結果の傾向を良く表している。したがって、本研究の数値シミュレーションの手法により、任意の平均腐食深さに対する腐食表面性状をシミュレートできると考えられる。

5. 海洋環境における長尺鋼部材の腐食挙動の評価・予測

腐食鋼板の座屈耐荷力は、部分的に断面減少した場合には、圧縮強度を平均板厚で評価すると危険側の評価を与える場合があり、最小断面の平均板厚で評価することで安全側に評価できるとの報告がある¹⁹⁾。また、引張荷重を受ける腐食した鋼部材の耐力評価で用いる有効板厚についても、最小断面の部位の平均板厚で安全側に評価できるとの検討結果が示されている²⁰⁾²²⁾。以上のように、平均腐食深さのみならず、最小断面を与える板幅方向の平均腐食深さの最大値は、鋼部材の力学性能を評価する上で重要なパラメータであると言える。また、1.で前述したように、腐食により部材に穴が生じることで、構造物に致命的な損傷が生じた事例も報告されている。

そこで、本研究では4.(3)で前述した数値シミュレーションの結果を用いることで、海洋環境下における長尺鋼部材の板幅方向の平均腐食深さの最大値および最大腐食深さを評価・予測する手法について検討する。本研究で対象とした鋼アングル材の腐食挙動は、波浪や生物付着などの様々な要因より異なるが、概ね海洋環境下における長尺部材の腐食挙動を代表しているものと考えられ

表-1 腐食速度倍率

海拔 H (mm)	2000	1800	1600	1400	1200	1000
R_c	1.04	1.05	1.00	0.99	0.82	0.37
	800	600	400	200	0	-200
	0.16	0.14	0.26	0.39	0.50	0.40
	-400	-600	-800	-1000		
	0.40	0.39	0.41	0.38		

表-2 各腐食深さとパラメータの関係

	α	β	A
平均腐食深さ d_{mean} (mm)	0.585	0.523	1.00
板幅方向の平均腐食深さの最大値 d_{cmax} (mm)	0.678	0.499	1.06
最大腐食深さ d_{max} (mm)	0.930	0.456	1.23

る。

(1) 各腐食環境帯域における腐食速度倍率

図-3(a)に示す板幅方向の平均腐食深さが最大となる飛沫帯(海拔:1600mm)における暴露期間と平均腐食深さの関係を基準として、海拔による腐食速度の違いを腐食速度倍率 R_c を用いて検討する。

腐食速度倍率 R_c を用いて近似した干満帯における暴露期間 T と平均腐食深さ d_{mean} の関係を図-3(b)および図-3(c)の図中に破線で示す。実測値から算出した実線と、 R_c を用いて算出した破線は、ほぼ一致している。したがって、各海拔における d_{mean} は、 R_c を用いて次式で近似できる。

$$d_{mean} = 1.17T^{0.523} \cdot R_c \quad (9)$$

なお、 R_c は各海拔の実測値と式(9)から算出した推定値との残差が最小になるように決定した。

式(9)から求めた各海拔と R_c の関係を図-17および表-1に示す。飛沫帯(腐食帯域A)における R_c は1程度であり、海拔0mより上部の干満帯(腐食帯域B)では約0.15、海拔0mよりも下部の干満帯と海水帯(腐食帯域C)では0.4程度となっている。そのため、各環境帯域の腐食速度は、腐食帯域Aに対して、腐食帯域Bでは約0.15倍、腐食帯域Cでは約0.4倍になるものと考えられる。式(9)に表-1の R_c を用いて暴露期間 T が1年後と40年後の平均腐食深さ d_{mean} を算出した。各腐食環境帯域における平均腐食深さ d_{mean} を図-2に示す。飛沫帯の d_{mean} は、 T が1年で1mm程度となり、40年後には約8mmになるものと推測される。また、干満帯以下の海水帯の d_{mean} は、海拔0m近傍が最も大きく、 T が40年後には4mm程度になるものと考えられる。

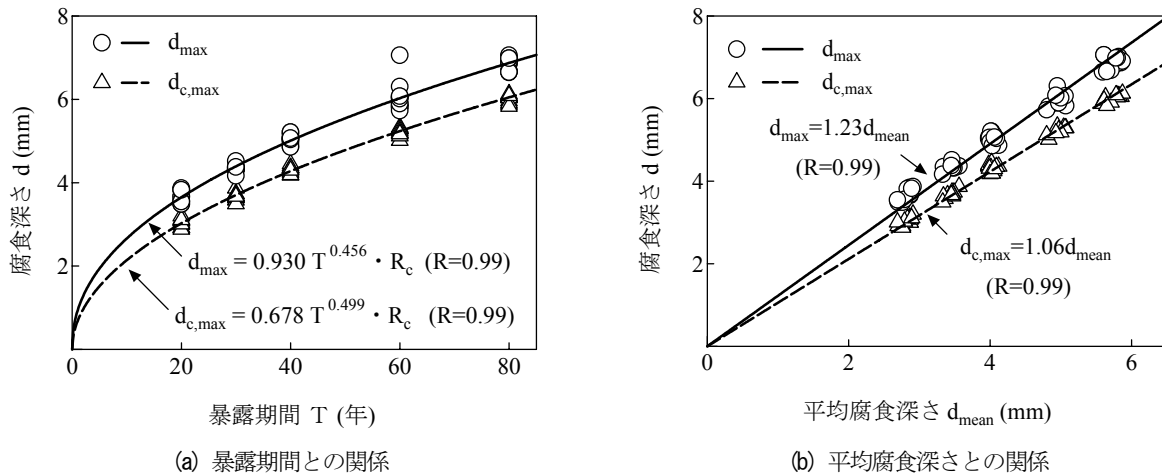


図-18 板幅方向の平均腐食深さの最大値と最大腐食深さの評価・予測

(2) 腐食深さの評価・予測方法

ここでは、(1)で示した腐食速度倍率 R_c を用いて供用期間 T あるいは実測した平均腐食深さ d_{mean} から、各種腐食深さを評価・予測する方法について検討する。

a) 腐食速度倍率と供用期間を用いた方法

まず、腐食速度倍率 R_c を用いて、各腐食深さを評価・予測する方法を検討する。4. (3) b)で前述した平均腐食深さは、最も腐食量が多かった海拔 1600mm の飛沫帯における暴露期間 T がそれぞれ 20, 30, 40, 60 および 80 年に相当する。暴露期間 T と各腐食深さの関係を図-18(a)に示す。図中の実線は、最大腐食深さ d_{max} であり、破線は板幅方向の平均腐食深さの最大値 $d_{c,max}$ を示している。腐食深さは R_c を用いて次式で与えられる。

$$d = \alpha \cdot R_c \cdot T^\beta \tag{10}$$

d : 腐食深さ (d_{mean} , d_{max} および $d_{c,max}$) (mm)

α, β : 経時的な腐食深さを表す定数 (表-2 参照)

b) 腐食速度倍率と平均腐食深さを用いた方法

腐食部材から実測した平均板厚を用いて、最大腐食深さ d_{max} および板幅方向の平均腐食深さの最大値 $d_{c,max}$ を評価する方法を検討する。図-16 で示したように、最大腐食深さ d_{max} および板幅方向の平均腐食深さの最大値 $d_{c,max}$ は、平均腐食深さ d_{mean} により、式(9)および(10)で表すことができる。図-18(b)に d_{mean} と各腐食深さ ($d_{c,max}$ および d_{max}) の関係を示す。図中の実線および破線は、それぞれ d_{max} および $d_{c,max}$ の d_{mean} に対する回帰直線を示している。この関係式に任意の腐食環境帯域で測定した d_{mean} を与えることで、その帯域の d_{max} および $d_{c,max}$ を推定することができる。 d_{mean} と d_{max} および $d_{c,max}$ の関係は、前述したように腐食環境帯域によらず成立する。したがって、任意の腐食帯域における d_{mean} と d_{max} および $d_{c,max}$ は、腐食速度

倍率 R_c を用いて、次式で与えられる。

$$d = A \cdot \frac{R_{c,j}}{R_{c,i}} \cdot d_{mean} \tag{11}$$

A : d に対する各腐食深さの比

$R_{c,i}$: 測定した腐食環境帯域の腐食速度倍率 (図-17 あるいは表-1 参照)

$R_{c,j}$: 評価・予測する腐食環境帯域の腐食速度倍率 (図-17 あるいは表-1 参照)

表-2 に式(11)の d に対する各腐食深さの比 A の値を示す。これらの定数を用いることで、海洋環境下における長尺鋼部材の最大腐食深さおよび最小断面を簡易に評価・予測できる。ただし、本研究の評価式は腐食帯域 C における海洋生物の付着による特異な腐食特性を示す腐食領域には適用できない。

6. まとめ

本研究では 19.5 年間海洋暴露された長尺の鋼アングル材における腐食表面性状の平均腐食深さと最大腐食深さの関係をバリオグラム分析を行うことで検討した。また、腐食表面性状の特性値である経時的な空間統計量について検討した。さらに、この統計量を用いて数値シミュレーションを行うことで、海洋環境における鋼矢板や鋼管杭などの長尺鋼部材に対する経時的な腐食挙動の評価・予測手法について検討した。

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 海洋暴露下における長尺鋼部材の平均腐食深さは、腐食環境帯域(飛沫部, 干満部, 海水帯)によらず、暴露期間と累乗関数で近似できる。

- (2) 長尺鋼部材の平均腐食深さは、腐食環境帯域によらず、最大腐食深さあるいは板幅方向の平均腐食深さの最大値とほぼ線形関係にあることを定量的に明らかにした。
- (3) 長尺の鋼アングル材の腐食表面性状における空間統計量（シルおよびレンジ）と平均腐食深さの関係を明らかにした。また、この統計量により、海洋環境下における長尺鋼部材の経時的な腐食表面性状を評価した上で、数値シミュレーション手法を提案した。
- (4) 腐食速度倍率（飛沫帯（海拔：1600mm）の平均腐食深さに対する任意の腐食帯域（海拔）の平均腐食深さの比）と供用期間の関係、および腐食速度倍率と平均腐食深さの関係を示した。また、この関係を用いて、海洋環境下における長尺鋼部材の腐食挙動を簡便に評価・予測する方法を提案した。

本研究では空間統計学的手法を用いることで、これまで把握困難とされてきた海洋環境における長尺部材の経時腐食挙動を検討し、その評価・予測手法を提案した。今後は、他の海洋環境における鋼部材の腐食挙動を本研究に則して分析することで、本研究で得られた知見、腐食挙動の分析方法や評価・予測方法の適用範囲について検討する必要がある。

謝辞：本研究の一部は、平成20年度 文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(C) (課題番号：20560444) (代表：貝沼重信)および日本鉄鋼連盟の研究助成金(代表：伊藤義人)を用いて実施した。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 防錆・防食技術総覧編集委員会編：防錆・防食技術総覧，産業技術サービスセンター，2000.
- 2) 松島巖：腐食防食の実務知識，オーク社，1993.
- 3) 善一章，阿部正美：港湾鋼構造物の腐食調査(第6報) 函館港，室蘭港，小樽港，根室港における腐食調査，港湾技研資料，運輸省港湾技術研究所，No.131，pp.1-104，1972.
- 4) 善一章，阿部正美：東京湾および小名浜港における鋼管杭の腐食調査，港湾技研資料，運輸省港湾技術研究所，No.190，pp.1-22，1974.
- 5) 田村功，渡邊英一，伊藤義人，藤井堅，野上邦栄，杉浦邦征，永田和寿，岡扶樹：海洋環境において腐食した鋼管の形状計測と残存耐力に関する検討，構造工学論文集，Vol.51A，pp.1103-1110，2005.
- 6) 藤井堅，近藤恒樹，田村功，渡邊英一，伊藤義人，杉浦邦征，

- 野上邦栄，永田和寿：海洋環境において腐食した円形鋼管の残存圧縮耐力，構造工学論文集，Vol.52A，pp.721-730，2006.
- 7) 渡邊尚彦，伊藤義人：19.5年海洋曝露された鋼アングル材の腐食表面粗さ評価，構造工学論文集，Vol.54A，pp.492-503，2008.
- 8) 山沢哲也，野上邦栄，伊藤義人，渡邊英一，杉浦邦征，藤井堅，永田和寿：19.5年海洋曝露された鋼アングル材の腐食形態，土木学会論文集A，Vol.64，No.1，pp.27-37，2008.
- 9) (独)土木研究所 材料地盤研究帯域 新材料チーム，(財)土木研究センター，(社)日本鉄鋼連盟，(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書 海洋曝露 20年の総括報告書，2006.
- 10) 松岡和巳，山本正弘，五戸清美：海水中に曝露された鋼材のマクロセル腐食現象の解析，材料と環境，Vol. 56，pp.99-105，2007.
- 11) 貝沼重信，細見直史，金仁泰，伊藤義人：鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食挙動に関する研究，土木学会論文集，No. 780I-70，pp.97-114，2005.
- 12) Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A. and Stone, C.J.: Classification and Regression Trees, Wadsworth International Group, California, 1984.
- 13) J. M. チェンバース, T. J. ヘイスティ編：Sと統計モデル～データ科学の新しい波～，共立出版社，1994.
- 14) Therneau, T.M. and Atkinson, E.J.: An introduction to recursive partitioning using the RPART routines, Technical report, Mayo Foundation, 1997.
- 15) 貝沼重信，細見直史：鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的腐食表面性状の数値シミュレーション，土木学会論文集A，Vol. 62，No. 2，pp.440-453，2006.
- 16) 間瀬茂，武田純：空間データモデリング，共立出版，2001.
- 17) Wackernagel, H. (地球統計学委員会訳)：地球統計学，森北出版，2003.
- 18) Cressie, N.: Fitting variogram models by weighted least squares, *J. Internat. Assoc. Math. Geol.*, No.17, pp.563-586, 1985.
- 19) 杉浦邦征，田村功，渡邊英一，伊藤義人，藤井堅，野上邦栄，永田和寿：腐食鋼板の圧縮強度の簡易評価法に関する検討，土木学会論文集A，Vol.63，No.1，pp.43-55，2007.
- 20) 松本勝，白井義昭，中村幾雄，白石成人：腐食鋼板の有効板厚評価法の一提案，橋梁と基礎，Vol.23，No.12，pp.19-25，1989.
- 21) 杉浦邦征，田村功，渡邊英一，伊藤義人，藤井堅，野上邦栄，永田和寿，岡扶樹：腐食鋼板の力学特性評価のための板厚計測および有効板厚に関する考察，構造工学論文集，Vol. 52A，pp. 679-687，2006.
- 22) 森猛，橘敦志，野上邦栄，山沢哲也：腐食鋼板の引張・降伏耐力評価法の検討，土木学会論文集A，Vol. 64，No.1，pp. 38-47，2008.

(2008. 6. 30 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON EVALUATION FOR TIME-DEPENDENT
CORROSION BEHAVIOR OF LONG STEEL MEMBERS
IN MARINE ENVIRONMENT

Shigenobu KAINUMA, Naofumi HOSOMI, Atsushi GOTO and Yoshito ITOH

It is necessary to clarify time-dependent corrosion behavior of a steel member in marine environment in order to carry out the appropriate maintenance to corrosion damage. In this study, corroded surface of an angle specimen exposed for 19.5 years in marine environment were analyzed using regression tree to investigate the relationship between mean and maximum corrosion depth for corrosion regions with various characteristics. In addition, variogram analyses were also carried out on the corroded surfaces to extract the spatial autocorrelation structures. Moreover, the corroded surfaces were numerically simulated using the autocorrelation structures. From these results, the evaluation method for the time-dependent corrosion depth of the long steel members was proposed.