

19. 5年海洋暴露された鋼アングル材の 腐食表面粗さ評価

Evaluation of surface roughness of a corroded steel angle exposed in oceanic environment for 19.5 years

*渡邊 尚彦, **伊藤 義人
Naohiko Watanabe, Yoshito Itoh

*工修, 名古屋大学大学院博士後期課程, 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1)

**工博, 名古屋大学教授, 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1)

This study evaluates surface roughness of a corroded steel angle member exposed to oceanic environments for 19.5 years. Three-dimensional surface roughness parameters are used on surface roughness components extracted from a multi-resolution analysis to identify a dominant scale. It is shown that the proposed analysis can characterize surface roughness peculiar to various corrosion environments including atmospheric, splash, tidal, and submerged zones. By several simulations of corroded surface with using normal probability field, the relationship between characteristics of variogram and roughness indexes are examined and the applicability of this simulation is discussed.

Key Words : corrosion, roughness, wavelet transformation, variogram

キーワード : 腐食, 粗さ, ウェーブレット変換, バリオグラム

1. はじめに

港湾鋼構造物は、沿岸海洋環境中に曝露されるため陸上鋼構造物に比較して激しい腐食環境下にあるといえる。従って構造特性低下に対する適切な補修と維持管理を行うことが必要とされる。港湾鋼構造物防食補修マニュアル¹⁾ではこうした必要に応じて海洋構造腐食の評価法、補修防食技術の最近の成果を取り入れたものとなっている。例えば腐食の形態に対して全面腐食と局部腐食とに大分類され、さらに細かく全8パターンに分類されている。また、腐食環境が海上大気部、飛沫帯、干満帯、海中部、海中土中部、背面土中部の6つのゾーンに分割されており、それぞれに特徴的な腐食の特徴が示されている。

しかし、腐食による鋼材表面の凹凸性状を定量的にかつ経済的に評価するにはまだ多くの課題がある。実構造物においてはマイクロ単位の間隔で全部材にわたって表面性状を計測することは困難であり、かつ経済的ではないため、文献1)では腐食部材を目視と重点箇所の肉厚計測を行うこととしているが、実際にはどの程度までの精密さをもって計測を行えば構造物性能評価が可能なのかは明確ではない。

一方、腐食表面形状が座屈耐力や疲労特性といった構造特性に影響を与えることが指摘されており、1990年代よりその関連を扱った研究も見られる。例えば文献2)~18)では腐食した板、鋼管といった構造要素について耐力実験と解析が行われており、腐食した部材の耐力評価手法が提案されている。また文献19)~28)ではバ

ラ積み貨物船の腐食ピットが発生している部材の局部強度の評価法確立を目指して人工ピットを施した供試体についての一連の耐力実験が行われている。文献29)では陸上鋼構造物の鋼材のコンクリート境界部腐食箇所の疲労特性の経時変化予測手法が提案されている。

これら耐力・疲労特性を評価するにあたり、実部材の腐食形状を現場で精密に測定することは困難であり、おおまかな測定値から表面性状を推定する適切な形状シミュレーション手法が必要となる。腐食形状を統計的手法により経時性も考慮に入れたモデルとしてピッティングや全面腐食に関わらず各種腐食表面を2次元 Filtered Poisson Process の腐食過程によるものとするモデル^{30),31)}、空間的自己相関を考慮したモデル^{32)~35)}、腐食ピット発生と成長を確率過程においたモデル³⁶⁾などがある。また、均一腐食を模擬した定常分布モデルに対し、腐食性状が外的環境条件と部位に依存することを考慮した、境界部、中間部、一般部で異なる腐食パラメータを適用するといったモデルも見られる³⁷⁾。これらは腐食性状をより正確に模擬するとともに、将来の腐食進展を予測する意味においても重要である。こうしたさまざまな腐食形状モデルに関しては、得られた形状の妥当性を評価する方法およびその適用限界を明確にする必要がある。

そこで本研究では、腐食形態の部位依存性がはっきりと観察される、19.5年海洋曝露試験された鋼アングル材の腐食形状データ³⁸⁾を用いて、腐食形状の分析・評価法を示した。まず、ウェーブレットによる多重解像度分解を通してうねりと粗さ成分に分解し、それぞれ3次元粗さ指標による評価を行った。そして、擬似腐食モデルを

作成し、そのモデルが模擬することのできる適用限界を示した。研究で用いた供試体は海洋・海岸環境における無塗装の矢板式および栈橋式係留施設を想定したものである。一般の土木構造物は被覆防食処理がなされているため状況は異なるが、海岸環境では劣化塗膜下での腐食が進行するため、腐食形状評価法に関する本研究の成果は一般土木構造物へ適用できる可能性がある。

本研究は、存在する様々な形状シミュレーション手法を耐荷力や疲労問題に適用するにあたって、実構造物側から採取が必要な形状情報を示したものであり、将来的には実構造物の合理的健全度評価手法の基礎的基準の確立を目指すものである。

2. 供試体

(1) 供試体条件

対象とした供試体は、初期板厚 $t_0 = 20\text{mm}$ の普通鋼 L 型アングル材(SS400, 裸材)で、静岡県大井川流域で 19.5 年間海洋環境下に裸曝露したものである。詳細は文献 37) に示されているが、以下に測定方法の概要を示す。海洋側と沿岸側とを結ぶ線に平行な位置にある面を、長さ 3800mm, 幅約 100mm の平板状に切り出した。図-1 は切り出した板の軸方向板厚分布と各部位での腐食形状を示す。このアングル材から図-2 に示すように長さ 200mm, 幅 100mm の 17 枚の小片 (No.0~No.16) に機械切断した。それぞれの試験体は、ケレン及びサンドブラスト後、JIS Z 2371「塩水噴霧試験方法」の腐食生成物除去方法に従い、化学的方法により素地を露出させた。腐食形状の測定に備えて、中和処理の後、表面にごく薄く油膜を引いた。

(2) 計測法

供試体の腐食量や腐食表面性状を把握するために、レーザ式表面形状計測装置を用いて表面形状を計測した。計測には LE-4010 卓上式レーザ式深度計測装置を用いた。性能は計測範囲 300×300(mm), 分解能 $0.1\mu\text{m}$ である。供試体周囲に板厚が既知である固定治具を設置し、表裏から供試体の表面形状を計測することで供試体板厚 t を算出した。

一般に計測間隔が小さくなるほど計測は精密になるが計測に時間を要する。さまざまな計測間隔について実形状との残差量を検討することによって、 $300\mu\text{m}$ の計測間隔で全面を計測することとした。

残存板厚分布は計測間隔 $d=10\text{mm}$ でもポイントマイクロメータにより別個計測されており、レーザ深度計とポイントマイクロメータとによる両者の結果の良い一致が確認されている。

(3) 全体の傾向

計算された残存板厚軸方向分布を図-1 に示す。満潮時水位のやや上側の $h=1000(\text{mm})$ 付近が腐食量の最も少な

い位置となっており、それより上側の飛沫帯が激しく板厚減少している部位となっている。満潮時水位から平均水面にかけてゆるやかに勾配を持って残存板厚が漸減しているが、平均水面以下海中部ではほぼ一定の残存板厚 18mm となっている。

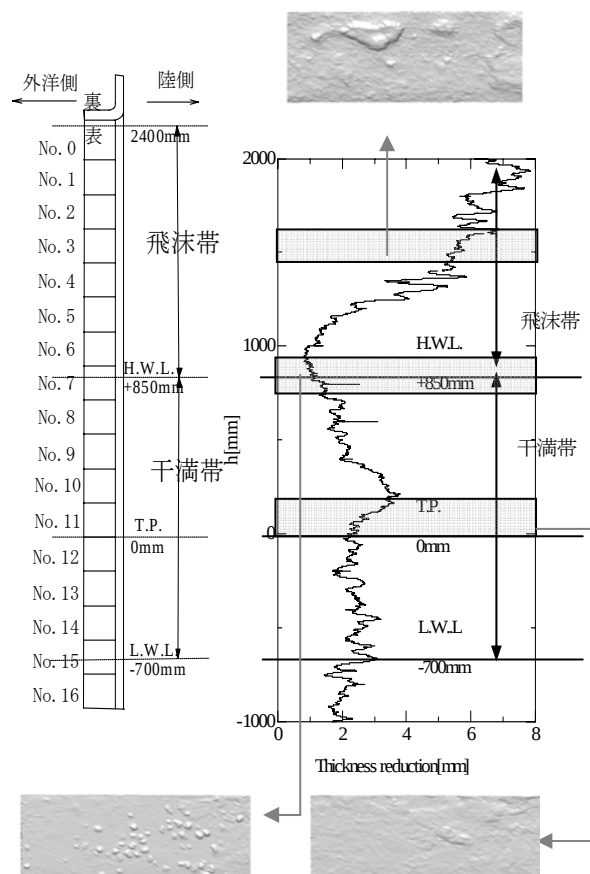


図-1 残存板厚分布と裏面の腐食形状

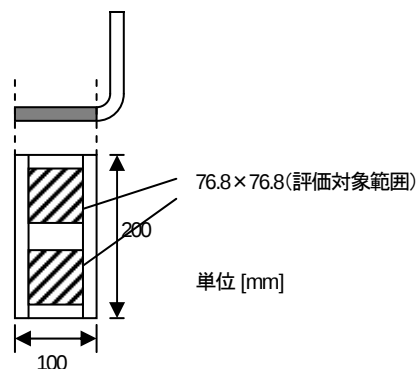


図-2 試験体切り出し法および評価対象範囲

T.P.から H.W.L.にかけて孔食の分散が見られるが、これはフジツボ付着などの生物起因によるものであることが確認されている。

3. 表面粗さの分析法

表面粗さの分析法として用いた3次元表面粗さ指標、バリオグラム分析、ウェーブレットによる多重解像度分解について以下に概要を示す。

(1)表面粗さ指標

表面粗さの指標は JIS B 0601(2001)で定められている。そこでは、まず断面曲線をガウシアンフィルタによって粗さ曲線とうねり曲線に分割し、断面曲線、粗さ曲線、うねり曲線のそれぞれに対し、定義されている粗さパラメータによって評価するというものである。そこでは、1)高さ方向のパラメータ、2)横方向のパラメータ、3)複合パラメータ、4)輪郭曲線の負荷曲線、そして 5)確率密度関数に関わるパラメータとして 14 種類定義されている。それぞれの粗さパラメータは疲労、耐食性、摩擦力、光沢度などの物理的性質との関連が指摘されている。しかし、これらのパラメータは曲線という2次元データを扱ったものである。

それに対し、近年欧米では曲面である3次元データを対象に粗さ指標が規格化されつつある。これは振幅パラメータ、空間パラメータ、混成パラメータ、機能パラメータといった4グループで全 14 種類のパラメータである。このうち、応力集中、疲労といった維持管理性能に深く関わる⁴⁾表-1で示す9種のパラメータを、本解析で扱うこととした。各パラメータの定義式は Appendix に示す。

(2)バリオグラム分析

本質的定常性を有する分布の空間的な自己相関構造の分析法としてバリオグラム^{4b)~4d)}がある。クリギングな

ど地球統計学分野で使用される手法であるが、貝沼ら^{3b)}は境界部腐食の供試体の疲労特性評価に対し、バリオグラム分析およびシミュレーションを行っている。

バリオグラム分析の手順は次のようなものである。

式(1)で与えられるような任意の位置 (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 $\gamma(h)$ について得られるバリオグラム雲から標本バリオグラムを作成し、レンジとシルというパラメータによって空間構造を特徴づけるというものである。

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

ここで

$N(h)$: ユークリッド距離 h ($=i-j$)

となる対の総数

z_i : i 点の腐食深さ、 z_j : j 点の腐食深さ

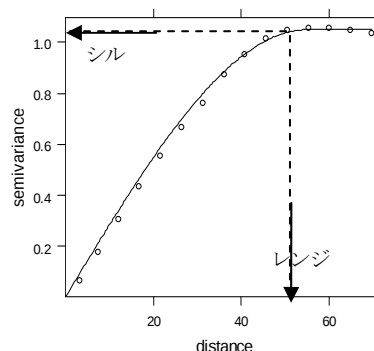


図-3 バリオグラム

典型的なバリオグラムの例を図-3 に示す。図の縦軸は分散 $\gamma(h)$ であり、横軸はユークリッド距離 h である。 $\gamma(h)$ が一定となるときの $\gamma(h)$ の値はシルと呼ばれ、シル

表-1 粗さ指標

振幅パラメータ	二乗平均粗さ	R.m.s	S_q	○
	歪度	Skewness	S_{sk}	○
	尖度	Kurtosis	S_{ku}	○
	十点平均高さ	Ten point height	S_z	
空間パラメータ	頂点密度	Density of summits	S_{ds}	
	異方性	Texture Aspect ratio	S_{tr}	
	最速低下自己相関長さ	Fastest decay autocorrelation length	S_{al}	
	方向性	Texture Direction	S_{td}	
混成パラメータ	二乗平均平方根傾斜	R.m.s. slope	$S_{\Delta q}$	○
	頂点曲率の算術平均	Arithmetic mean summit	S_{sc}	○
	界面の展開面積比	Developed surface area ratio	S_{dr}	○
機能パラメータ	ベアリング指標	Surface bearing index	S_{bi}	○
	中核部流体保持指標	Core oil retention index	S_{ci}	○
	凹部流体保持指標	Valley oil retention index	S_{vi}	○

の存在は、腐食深さに空間的自己相関性があることを意味する。シルまでの最小距離 h はレンジである。これらの値は、2 次定常性が成立する領域のバリオグラムが球型モデルであると仮定して非線形最小二乗法により求めた。その結果を図中に曲線で示す。

バリオグラムはレンジとシルというパラメータによって空間構造を特徴づけ、またそれらの性質を持った空間構造をシミュレートすることができる。

(3)ウェーブレットによる多重解像度分解

JIS で定められる表面粗さ指標は曲線形状のフィルタ処理後に適用されるものである。また、バリオグラム分析は形状データに本質的定常性を仮定するため、ゆるやかな勾配を持ったものには適用できず、やはり特定の曲面除去という操作が必要となる。こういった幾つかの曲面成分の分解に、ウェーブレット変換を利用した。表面の形状評価にウェーブレット変換を利用した例は文献 46) などに見ることができる。

変換を行うために一つのファザーウェーブレット Φ と 3 つのマザーウェーブレット Ψ^v , Ψ^h , Ψ^d に基づいてできたウェーブレット基底を用いる。対象とする 3 次元形状 $z(x,y)$ を式(2)のように分解する。

$$z(x, y) = A_j(x, y) + D_j(x, y) + D_{j-1}(x, y) + \cdots D_1(x, y) \quad (2)$$

図-4に操作のイメージを示す。ここで、 j はスケール添字であり、 A_j , D_j はウェーブレット係数 Ca , Cd を用いて式(3),(4)のように表される (k は位置添字である)。

$$A_j(x, y) = \sum_k Ca_{j,k} \Phi_{j,k}(x, y) \quad (3)$$

$$D_j(x, y) = D_j^h(x, y) + D_j^v(x, y) + D_j^d(x, y) \\ = \sum_k Cd_{j,k}^h \Psi_{j,k}^h(x, y) + \sum_k Cd_{j,k}^v \Psi_{j,k}^v(x, y) + \sum_k Cd_{j,k}^d \Psi_{j,k}^d(x, y) \quad (4)$$

それぞれの係数は式(5)のようになる。

$$Ca_{j,k} = \langle A_{j-1}(x, y), \Phi_{j,k}(x, y) \rangle \\ Cd_{j,k}^h = \langle A_{j-1}(x, y), \Psi_{j,k}^h(x, y) \rangle \\ Cd_{j,k}^v = \langle A_{j-1}(x, y), \Psi_{j,k}^v(x, y) \rangle \\ Cd_{j,k}^d = \langle A_{j-1}(x, y), \Psi_{j,k}^d(x, y) \rangle \quad (5)$$

本解析では Daubechies のウェーブレットの対称性を高めた LA(4) をウェーブレット基底に用いた。

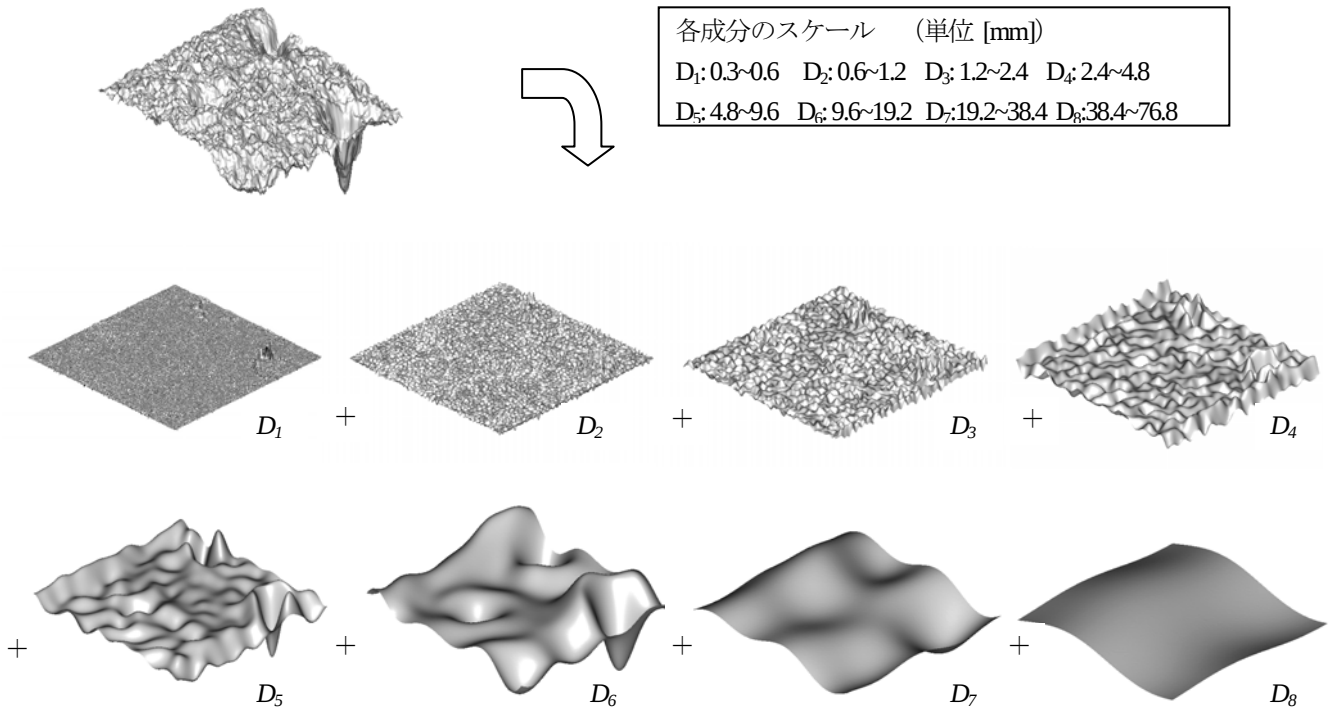


図-4 ウェーブレットによる多重解像度分解

4. 形状解析結果

No.0 から No.16 までの供試体それぞれにおいて $76.8 \times 76.8(\text{mm})$ の正方形 (データ点 256×256) を 2 つずつ取り出しそれらを解析対象とする. このとき, 材端からの腐食, アングル材の冷間曲げ加工による板厚変化の影響として図-2 に示すように幅両端のデータを切り落としていた. 0.3mm スケールまで $D_1 \sim D_8$ 成分に分解した. 今回の解析におけるそれぞれの成分の具体的なスケールを図-4 の右に示す.

今, ウェーブレットにより多重解像度分解された各成分を重ね合わせた式(6) によって定義される粗さ成分 η_R とうねり成分 η_W についてその粗さ指標に着目する.

$$\eta_R = \sum_{i=1}^J D_i(x, y) \quad (6)$$

$$\eta_W = \sum_{i=1}^J D_i(x, y)$$

ここで, 粗さ成分とうねり成分の閾値である式(6)における J を変化させ, それぞれの粗さ指標に応じて閾値をどう設定すればよいかを検討する.

以降, 振幅パラメータ, 混成パラメータ, 及び機能パラメータの各粗さ指標に関して, スケール閾値の設定, 支配的なスケール, パラメータ間相互関係, 及びバリオグラムとの関係について検討する.

なお, 頂点曲率の算術平均 S_{sc} は凹部での頂点曲率で計算した.

(1) 振幅パラメータ

1) 二乗平均粗さ (S_q)

図-5 は仮定した閾値によって粗さ成分とうねり成分に対する S_q の軸方向分布を示したものである. それぞれグラフの横軸はアングル材の平均水位(T.P.)からの位置を示し, 縦軸に各パラメータ量を示す.

うねり成分に着目すると, D_6 以下の成分を含んだものは, ほぼ $D_6 \sim D_8$ 成分と同じであることから Δ ($D_6 \sim D_8$) と $\square$ ($D_7 \sim D_8$) との間が閾となっているといえる. 実際, バリオグラム解析に当たって D_7 と D_8 を除去して初めて全ての部位におけるバリオグラムにシルが存在するようになった. 従って D_7 と D_8 成分 (20mm 以上のサイズ) は粗さ解析をする際に除くべきゆるやかな勾配のスケールということができる.

粗さ成分に再び着目すると, h の 1000mm 以上の部分で, $\blacktriangledown$ ($D_4 \sim D_8$) と $\circ$ ($D_5 \sim D_8$) でまた閾をなしていることが分かる.

図-6 に D_7 , D_8 成分を除去した各表裏面データについてバリオグラム解析結果のシル値と S_q 関係を示す. 横軸にシルの値, 縦軸に二乗平均粗さ (S_q) の値を示しており, 相関が確認される. 一般に, シルは凹凸の粗さを示すため, シルが大きければ S_q が大きいことが予想されるが, 各プロット点は $S_q = \sqrt{\text{Sill}}$ 上 (図上の実線) 付近に分布

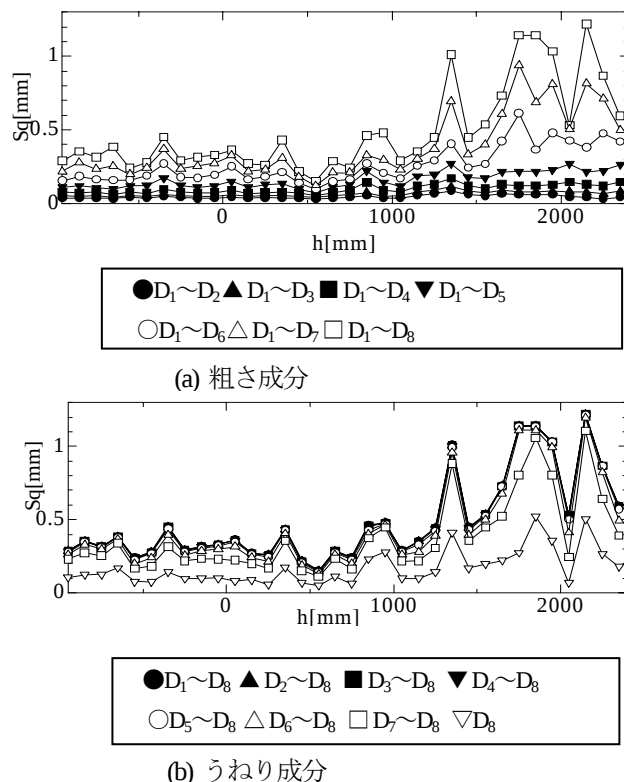


図-5 二乗平均粗さの (S_q) 軸方向分布

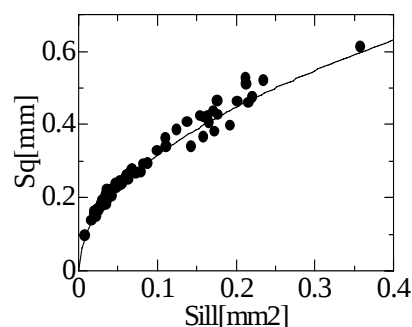


図-6 シル-二乗平均粗さ (S_q) 関係

している.

2) 歪度 (S_{sk}), 尖度 (S_{ku})

次に歪度 (S_{sk}) と尖度 (S_{ku}) に着目する. 図-7 は重ねあわされた $D_1 \sim D_i$ 成分 ($i=2,3,\dots,8$) について S_{sk} と S_{ku} の軸方向分布を示したものである. S_{sk} は凹凸の方向性, S_{ku} は穴の鋭さを示すので, これらの値が大きい部位は図-8 の形状に示されるように孔食の存在を示唆するものである.

飛沫帯の T.P.(2000mm) 以上で, H.W.L. 付近 (500 ~ 1000mm), および L.W.L. 上側 (-500mm 付近) において S_{sk} と S_{ku} の大きな値が見られる. その卓越成分は H.W.L. 付近と L.W.L. 上側では $\blacksquare$ ($D_1 \sim D_5$), 飛沫帯付近では $\blacktriangledown$ ($D_1 \sim D_6$) とスケールが異なっている. つまり, H.W.L. 付近では 4.8 ~ 9.6mm スケール, 飛沫帯付近では 9.6 ~ 19.2mm スケールの孔食であることが分かる. なお, T.P. ~ H.W.L. までの孔食はフジツボの付着など生物起因によるものもあることが確認されている.

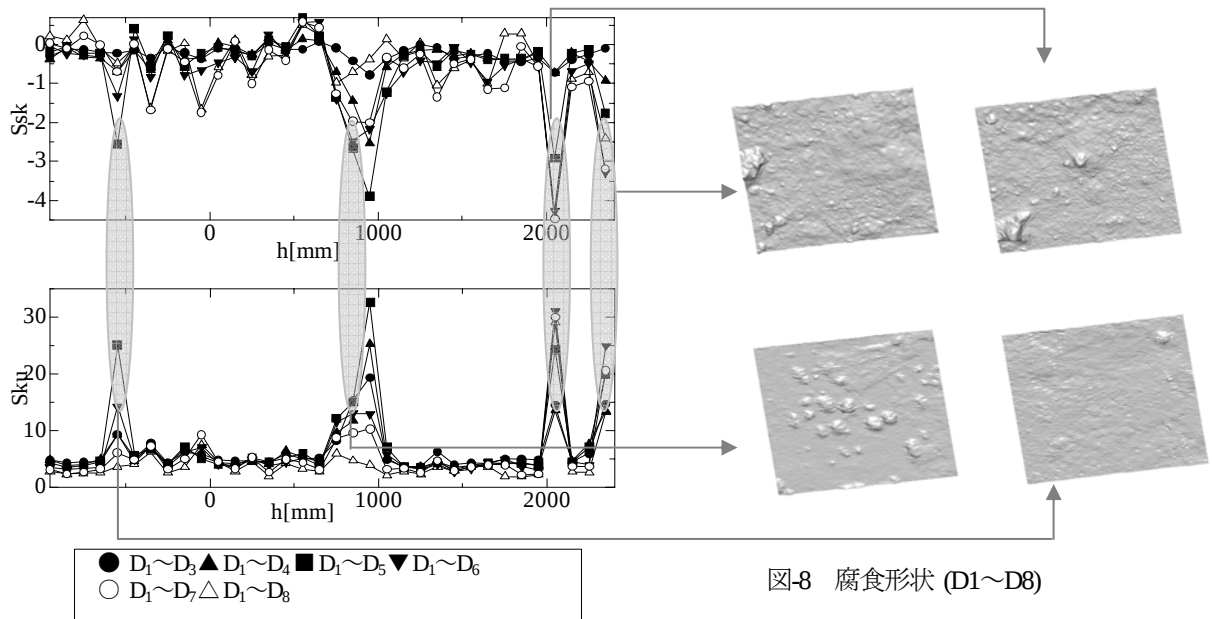


図-7 歪度(S_{sk}), 尖度(S_{kku})の軸方向分布

図-8 腐食形状 ($D_1 \sim D_8$)

図-9に表裏面データについて S_{sk} と S_{kku} の関係性を示した。使用した形状データはD8成分まで重ね合わされたものである。図で×は孔食の生じていないデータであり、■, ○, ▲は、飛沫帯, H.W.L.付近及びL.W.L.上側の孔食の生じている部位における S_{sk} - S_{kku} 関係をそれぞれ示したものである。孔食の生じていない部位では S_{sk} は-1.0~0.5, S_{kku} は5.0付近の値をとっている。飛沫帯, H.W.L.付近及びL.W.L.上側での S_{sk} - S_{kku} はそれぞれ領域を持っており、飛沫帯では S_{sk} : -4.5~-2.5, S_{kku} : 12~32, H.W.L.付近, L.W.L.上側では S_{sk} : -1.0~-2.2, S_{kku} : 8~15の領域にある。また、飛沫帯とL.W.L.上側での S_{sk} - S_{kku} 関係は直線関係が認められるが、H.W.L.付近の S_{sk} - S_{kku} 関係はばらつきが見られる。これは、面に1,2箇所という局所的な孔食の見られる飛沫帯, L.W.L.上側と、孔食が分布して見られるH.W.L.付近という分布形態の違いに起因するものと考えられる。

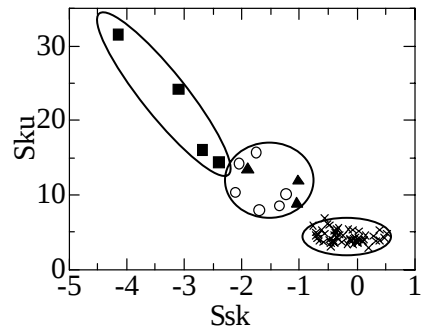


図-9 部位による歪度(S_{sk})-尖度(S_{kku})関係

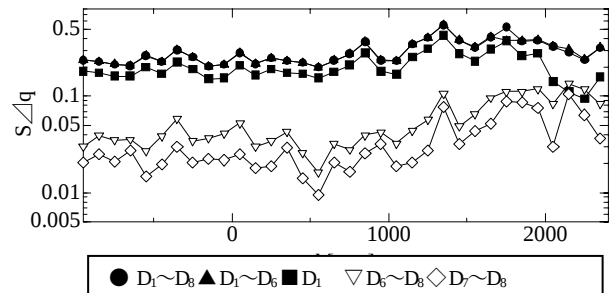


図-10 二乗平均平方根傾斜($S_{\Delta q}$)の軸方向分布

(2) 混成パラメータ

1) 二乗平均平方根傾斜 ($S_{\Delta q}$), 頂点曲率算術平均 (S_{dr}), 界面の展開面積比 (S_{dr})

図-10に $D_1 \sim D_8$ 成分, $D_1 \sim D_6$ 成分, D_1 成分, $D_6 \sim D_8$, $D_7 \sim D_8$ 成分について, $S_{\Delta q}$ の軸方向分布を示した。縦軸は対数軸をとっている。 $D_1 \sim D_8$ 成分, および $D_1 \sim D_6$ 成分及び D_1 成分がほぼ近いことから、全体の $S_{\Delta q}$ は最も細かい成分の $S_{\Delta q}$ によって決定されるということが分かる。 $D_6 \sim D_8$, $D_7 \sim D_8$ 成分といううねり成分はほとんど総和の $S_{\Delta q}$ に寄与していないことも分かる。

図-11は表裏面 $D_1 \sim D_6$ 成分について全データについて $S_{\Delta q}$ と S_{dr} の関係性を示したものである。一本の曲線状に載ることから, $S_{\Delta q}$ と S_{dr} は等価な指標と考えることができる。

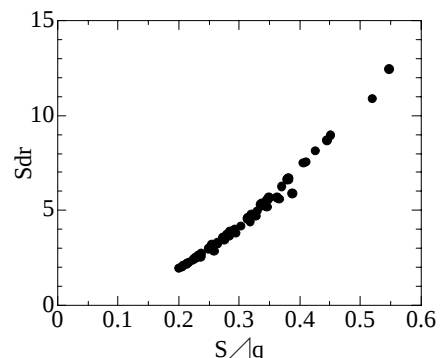


図-11 二乗平均平方根傾斜($S_{\Delta q}$)と界面の展開面積比(S_{dr})の関係

図-12, 図-13はシル/レンジ値と混成パラメータにつ

いて、実測値と正規確率場モデルと比較したものである。バリオグラムシミュレーションはシルを 0.1 から 1.0 まで 0.1 刻み、レンジを 5 から 50 まで 5 刻みの計 100 パターンについて行った。図-12 はシル/レンジの値と二乗平均平方根傾斜 ($S_{\Delta q}$) の関係、図-13 は二乗平均平方根傾斜 ($S_{\Delta q}$) と頂点曲率算術平均 (S_{κ}) の関係である。図-12 はバリオグラム特性であるシル/レンジ値を横軸に、粗さ指標 $S_{\Delta q}$ を縦軸にとり、それぞれの相関について、実測値 (●) と正規確率場シミュレーション値 (×) とで比較したものである。一方、図-13 は粗さ指標 $S_{\Delta q}$ と S_{κ} とをそれぞれの軸にとり、相関の仕方を実測値とシミュレーション値で比較したものである。図-12 に着目すると、シミュレーションではシル/レンジの値と $S_{\Delta q}$ の値には強い相関が見られる。実際のシル/レンジと $S_{\Delta q}$ 関係はばらつきが見られるが、ほぼ正規確率場モデルの曲線の下側に納まっている。図-13 に着目すると、正規確率場分布では $S_{\Delta q}$ と S_{κ} の間に線形関係が見られることが分かる。実際の $S_{\Delta q}$ と S_{κ} 関係はやや勾配が緩やかでシミュレーションモデルの下側に分布している。

以上のように混成パラメータ $S_{\Delta q}$, S_{κ} , $S_{\Delta t}$ とバリオグラムのシル/レンジ値には正規確率場モデルでは一本の曲線で結ばれる関係になり、実測値はその曲線の下側に分布する。つまり正規確率場モデルは実測値の包絡線となっている。

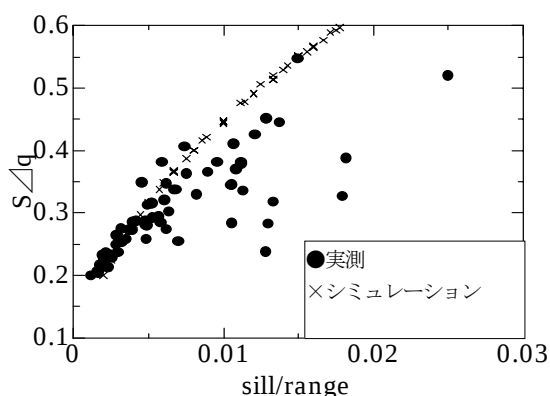


図-12 シル/レンジ- $S_{\Delta q}$ 関係

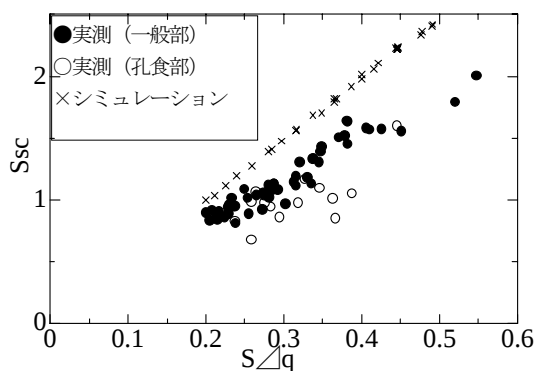


図-13 $S_{\Delta q}$ - S_{κ} 関係

(3) 機能パラメータ

1) ベアリング指標 (S_{bi}) , 中核部流体保持指標 (S_{ci}) , 凹部流体保持指標 (S_{vi})

機能パラメータは粗い成分によって決定されているといえ、 D_6 まで考慮されていれば、あとは細かい凹凸成分を考慮してもあまり値は変わらない。パラメータ間ではそれぞれ関係性があるが、特にベアリング指標 (S_{bi}) と中核部流体保持指標 (S_{ci}) 同士に強い関係があり、ほぼ等価な指標とみなすことができる。成分によっては S_{bi} , S_{ci} は孔食部位で高い値という S_{sk} の分布特性に近いものが見られる。

以上をまとめると以下ようになる。

- 1) 粗さを考える場合、波長約 20mm 以上の成分をうねり成分として除去した表面形状を対象にすればよい。
- 2) 孔食は歪度 (S_{sk}) と尖度 (S_{ku}) といったパラメータによって指標化できる。孔食のスケールは飛沫帯では 10mm~20mm, H.W.L. 付近, 海底部では 5~10mm である。従って、孔食部位はこれらのスケールにあわせた計測が必要となる。
- 3) 混成パラメータはもっとも細かい成分によって決定されるので、0.3mm 以下の細かい計測が必要であるが、実際的には不可能である。しかし、粗い計測結果との間に相関性はあるため、それとの補正を取ることができる例えば図-10 において全成分を重ね合わせたものと D_6 以上のうねり成分との相関係数は 0.72 である。また、バリオグラム解析でシル/レンジ値と $S_{\Delta q}$ との間には関係があり、正規確率場を仮定した場合、それは実際のシル/レンジと $S_{\Delta q}$ 関係の包絡線を描くため、粗い計測によるバリオグラム特性値によって $S_{\Delta q}$ の上限値を推定することができる。また、 $S_{\Delta t}$ は $S_{\Delta q}$ と一対一対応しており、 S_{κ} も $S_{\Delta q}$ と関係があるため、これらの指標値も予測することができる。

5. 空間モデルによる形状シミュレーション

これまでの研究で、腐食形状を模擬するために、ポアソン過程に従ったピット分布をしたものや、自己相関性を利用したバリオグラムによるシミュレーションなどが試みられている。これらシミュレーションは、1) 計測された形状データ以外の発生しうるさまざまな形状を作成できること、2) 不十分な計測情報を補完すること、3) 将来の腐食形状予測、といった点で有用である。しかし、適用に際して各シミュレーションの適用範囲を明らかにする必要がある。以下に不十分な計測情報から真値を予測するという観点からシミュレーションの適用性を検討し、シミュレーションによって再現可能な形状特性を検証する。

ここでは、例として粗い計測点情報から抽出されたバ

リオグラム特性をもとに作成された正規確率場モデルの形状再現性を確認する。正規確率場モデルは、孔食が支配的でないような腐食部位の形状をモデル化するのに適していると考えられる。

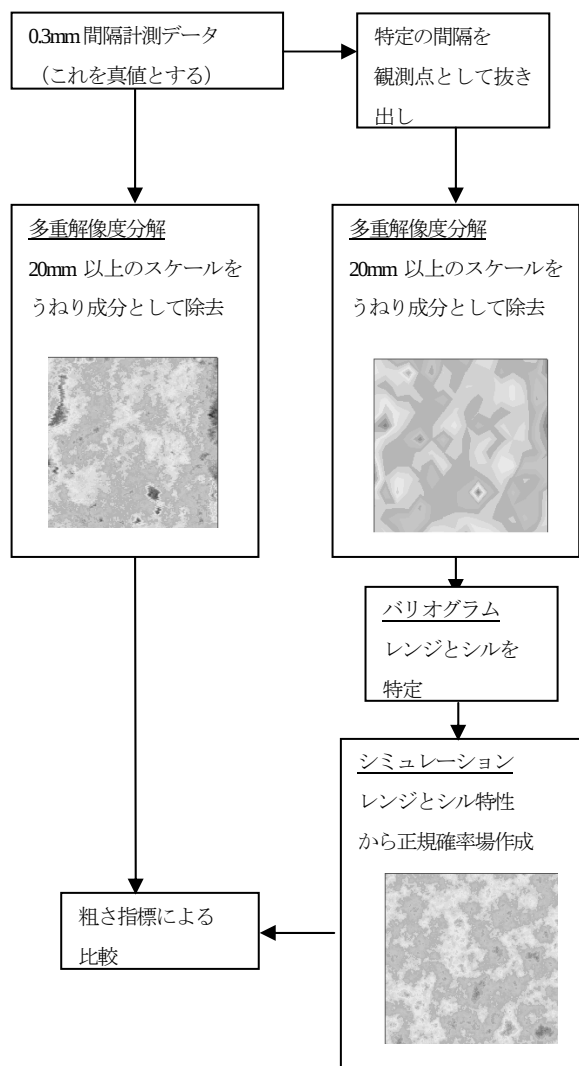


図-14 シミュレーション検証の手順

図-14 に検証手順を示す。0.3mm 間隔で測定された形状データを真値とし、特定間隔（ここでは 4.8mm）観測点データの値をもとに作成された正規確率場シミュレーションと各粗さ指標を比較することで、粗さに関する再現性を明らかにする。なお、両者とも多重解像度分解によって 20mm スケールのうねり成分を除去した粗さ成分を対象とする。特に 4.(2)において図-10 から観察されていたように、最も細かいスケールの成分によって規定されていた混成パラメータに関して検討を行う。

図-15 は裏面の腐食粗さ形状に対し、混成パラメータ $S_{\Delta q}$ の指標からシミュレーションの再現性を示したものである。横軸に高さ位置、縦軸に 0.3mm 間隔で計測された実測値と、4.8mm 間隔計測されたデータをもとに作成されたシミュレーションそれぞれに対する二乗平均平方根傾斜 ($S_{\Delta q}$) の値を示している。

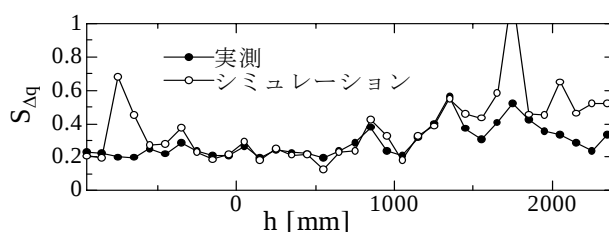


図-15 混成パラメータ $S_{\Delta q}$ 軸方向分布の実測値とシミュレーションの比較

図-15より、-300mm～1500mmの区間にかけてはほぼシミュレートできているが、L.W.L付近と飛沫帯上部区間で実測より高めの値が示されていることが分かる。表の面では実測とシミュレーションの差は小さくなるものの同様の傾向が見られた。L.W.L付近と飛沫帯上部区間といった部位では正規確率場モデルでは形状シミュレーションが適切に行われていないといえる。

そのほかの指標に関しては、シミュレーションの優位性が特に見られなかった。振幅パラメータについては 4.8mm 間隔計測点データをそのまま用いた形状で実際の値に近い指標値が示されていた。

6. まとめ

本研究では 19.5 年間海洋環境下に曝露された L 型アングル材を対象とし、ウェーブレットによる多重解像度分解、粗さ指標による評価を行った。またバリオグラム特性に基づく正規確率場モデルの適用範囲を示した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 緩やかな勾配を持つ形状に対し、ウェーブレットによる多重解像度分解を行うことでうねり成分を除去することができる。今回の場合、粗さ成分とうねり成分とを分ける閾は部位によってその最適値が異なるが、20mm 以上のスケールをうねり成分として除去すれば、残った成分で粗さ評価を行うことができる。
- 2) 振幅パラメータである二乗平均粗さ (S_q)、歪度 (S_{sk})、尖度 (S_{ku}) に関しては、細かな凹凸成分は影響しない。
- 3) 腐食表面形状に対し歪度 (S_{sk})、尖度 (S_{ku}) は孔食を特徴付けるパラメータであり、9.6～19.2mm の飛沫帯、4.8～9.6mm の H.W.L.付近と部位によって異なるスケールの孔食が存在することが示された。
- 4) 腐食表面に関する混成パラメータの値はもっとも細かい成分によって決定される。従って指標値を算定するにあたり細かな凹凸が無視できないが、粗い形状データとの相関から推測可能なことを示した。また、正規確率場シミュレーションによって得られるシル/レンジ

値-二乗平均平方根傾斜 ($S_{\angle q}$) 関係, 二乗平均平方根傾斜 ($S_{\angle q}$) -頂点曲率の算術平均 (S_{∞}) 関係は実際の値の外側包絡曲線を描くことから粗い計測点データから $S_{\angle q}$ S_{∞} の上限値を推測できることを示した.

- 5) 正規確率場モデルにより, 飛沫帯上部と L.W.L 付近を除く区間で $S_{\angle q}$ のシミュレーションを行うことができることを示した.

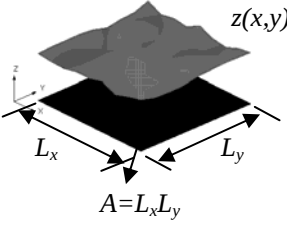
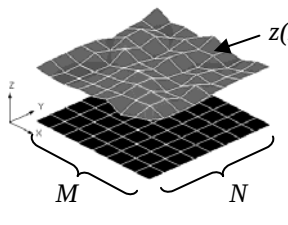
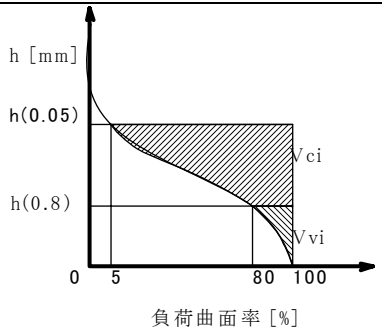
謝辞

本研究の一部は(社)日本鉄鋼連盟の研究の助成のもとに行われたものである. ここに記して謝意を示します. また, 首都大学東京の野上先生および九州大学の貝沼先生にご助言を頂きました. ここに深謝いたします.

付録 粗さ指標

中央面からの高さ $z(x,y)$ によって与えられている
形状データについて各種粗さパラメータは次のよう
に定義される。

表 A-1 粗さ指標の定義

	連続表現	離散表現
		
Sq	$\sqrt{\iint_A z^2(x,y)dx dy}$	$\sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^2(x_i, y_j)}$
Ssk	$\frac{1}{S_q^3} \iint_A z^3(x,y)dx dy$	$\frac{1}{MNS_q^3} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^3(x_i, y_j)$
Sku	$\frac{1}{S_q^4} \iint_A z^4(x,y)dx dy$	$\frac{1}{MNS_q^4} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^4(x_i, y_j)$
S△q	$\sqrt{\frac{1}{A} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \left(\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \right) dy dx}$	$\sqrt{\frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{j=2}^N \sum_{i=2}^M \rho_{i,j}^2}$ $\rho_{i,j} = \left[\left(\frac{z(x_i, y_j) - z(x_{i-1}, y_j)}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{z(x_i, y_j) - z(x_i, y_{j-1})}{\Delta y} \right)^2 \right]^{1/2}$
Ssc	$\frac{1}{2N} \iint_{summits} \left(\frac{\partial^2 z(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(x,y)}{\partial y^2} \right) dx dy$	$-\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{N} \left(\frac{z(x_{i+1}, y_j) + z(x_{i-1}, y_j) - 2z(x_i, y_j)}{\Delta x^2} + \right.$ $\left. \frac{z(x_i, y_{j+1}) + z(x_i, y_{j-1}) - 2z(x_i, y_j)}{\Delta y^2} \right)_{summits}$
Sdr	$\frac{\text{展開面－投影面}}{\text{投影面}} \cdot 100\%$	$\frac{\sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^{M-1} A_{i,j} - (M-1)(N-1)\Delta x \Delta y}{(M-1)(N-1)\Delta x \Delta y} \cdot 100\%$ $A_{i,j} = \frac{1}{4} \left([\Delta y^2 + (z(x,y) - z(x,y))^2]^{1/2} + [\Delta y^2 + (z(x,y) - z(x,y))^2]^{1/2} \right.$ $\left. ([\Delta x^2 + (z(x,y) - z(x,y))^2]^{1/2} + [\Delta x^2 + (z(x,y) - z(x,y))^2]^{1/2}) \right)$
Sbi	$\frac{1}{h(0.05)}$	
Sci	$\frac{V_{ci}}{S_q}$	
Svi	$\frac{V_{vi}}{S_q}$	

参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食補修マニュアル, pp.9-18, 1997.
- 2) 岡, 北田, 渡辺：腐食材の静的強度に関する実験的考察, 日本造船学会論文集, 第 167 号, pp.229-236, 1990.
- 3) 松本, 白井, 中村, 白石：腐食鋼材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.
- 4) 北本, 神藤, 氏家：鋼材の腐食・孔食が強度特性に与える影響に関する研究, 電力土木, No.273, pp.14-19, 1998
- 5) 村中, 皆田, 藤井：腐食鋼板の表面性状と残存耐力, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1063-1071, 1998.
- 6) Bruneau, M and Zahrai, S.M : Effect of Severe Corrosion on cyclic Ductility of Steel, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.123, No.11, pp.1478-1486, 1997.
- 7) Sadovsky, Z. and M. Drdacky : Buckling of plate strip subjected to localized corrosion- a stochastic model, Thin-Walled Structures, 39, pp.247-259, 2001.
- 8) Kayer, J.R. and Nowak, A.S : Capacity loss due to corrosion in steel-girder bridge, journal of structural Engineering, ASCE, Vol.115, No.6, pp.1525-1537, 1989 .
- 9) Vo Thanh Hung, 永澤, 佐々木, 市川, 名取：腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.141-151, 2002.
- 10) 野上, 山沢, 小栗, 加藤：腐食減厚に伴う合成 I 桁及び I 断面柱の残存耐力評価に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.93-102, 2001.1.
- 11) 梅田, 藤井, 中村：腐食したフランジの簡易な圧縮強度評価方法, 土木学会論文集, No.766/I-68, pp.59-71, 2004.3.
- 12) 梅田, 藤井, 原, 中村, 上野：腐食鋼板のせん断耐力とその評価法, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.50A, pp.121-130, 2004.3.
- 13) 梅田, 藤井, 宮下, 上野, 中村：腐食したプレートガーダーの残存曲げ強度に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.139-148, 2005.3.
- 14) 田村, 渡邊, 伊藤, 藤井, 野上, 杉浦, 永田, 岡：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, 2005.3.
- 15) 藤井, 近藤, 田村, 渡邊, 伊藤, 野上, 永田：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, 2006.3.
- 16) 杉浦, 田村, 渡邊, 伊藤, 藤井, 野上, 永田, 岡：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
- 17) 山沢, 野上, 森, 塚田：腐食鋼部材の腐食形状計測と曲げ耐力実験, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.689-700, 2006.3.
- 18) 杉浦, 田村, 渡邊, 伊藤, 藤井, 野上, 永田：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.043-55, 2007.1.
- 19) 中井, 松下, 山本, 荒井：船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響(第2報)ー人工ピット材を用いた強度調査ー, 日本造船学会論文集, 176号, pp.281-289, 2004
- 20) 中井, 松下, 山本, 荒井：船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響(第3報)ー模擬腐食ピットを有する構造モデルを用いた4点曲げ試験ー, 日本造船学会論文集, 195号, pp.233-242, 2004.
- 21) 中井, 松下, 山本：船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響(第4報)ー横倒れ座屈強度に及ぼす腐食ピットの影響ー, 日本造船学会論文集, 196号, pp.151-159, 2004.
- 22) 中井, 松下, 山本：船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響(第5報)ー局部座屈強度に及ぼす腐食ピットの影響ー, 日本造船学会論文集, 196号, pp.161-167, 2004.
- 23) 中井, 松下, 山本：船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響(第6報)ーウェブのせん断強度に及ぼす腐食ピットの影響ー, 日本船舶海洋工学会論文集, 第1号, pp.159-167, 2005.
- 24) 中井, 松下, 山本：船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響(第7報)ー圧縮最終強度, せん断最終強度に及ぼす腐食ピットの影響ー, 日本船舶海洋工学会論文集, 第1号, pp.170-179, 2005.
- 25) 中井, 松下, 山本：船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響(第8報)ー腐食ピットが発生している部材の引張強度評価式の提案ー, 日本船舶海洋工学会論文集, 第2号, pp.303-309, 2005.
- 26) 中井, 松下, 山本：船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響(第9報)ー腐食ピットが発生している鋼板の最終強度評価法の提案ー, 日本船舶海洋工学会論文集, 第2号, pp.311-321, 2005.
- 27) 中井, 松下, 山本：海洋環境下の腐食鋼管部材の耐力評価について, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 2 号, pp.243-251, 2005.
- 28) 中井, 松下, 山本：腐食ピットが発生している構造部材の等価板厚評価に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 3 号, pp.293-301, 2006.
- 29) 貝沼, 細見, 金, 伊藤：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特性に関する研究, 土木学会論文集, No.780, I-70, pp.97-114, 2005.
- 30) 辻, 久田, 北川：腐食表面の三次元的不規則性のスペクトル解析による評価, 日本機械学会論文集(A 編), 49 巻 439 号, 1983.
- 31) 辻, 久田, 北川：Filtered Poisson Process に基づく全面腐食形状のモデル化とその評価, 日本機械学会論文集(A 編), 50 巻 453 号, 1984.
- 32) 奥村, 藤井, 塚井：空間的自己相関を考慮した鋼板腐食形状のモデル化, 土木学会論文集, No.672, VI-50, pp.109-116, 2001.
- 33) 藤井, 梅田, 平井, 奥村：腐食鋼板表面形状モデル作成における空間的自己相関モデルの適用性, 構造工学論文集, Vol.48A, 2002.
- 34) 藤井, 梅田, 中村, 有尾：経年変化を考慮した腐食表面生成モデル, 構造工学論文集, Vol.50A, 2004.
- 35) 貝沼, 細見：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, Vol.62, No.2, pp.440-453, 2006.
- 36) 山本, 中井：孔食部材の表面調査と腐食状態シミュレーション, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 4 号, pp.287-294, 2006.
- 37) 山沢, 野上, 伊藤, 渡邊, 杉浦, 藤井, 永田：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, 投稿中
- 38) Thomas, T. R., Rough Surface, Longman, 1982.
- 39) Stout, K.J. : Development of methods for the cracterization of roughness in three dimensions, Penton Press, 2000.
- 40) BRC contract 3374/1/0/170/90/2 An integrated approach to 3D surface measurement, University of Birmingham and L'Ecole Centrale de Lyon

- 41) Parasantzas, G.: Roughness effects on the critical fracture toughness of materials under uniaxial stress, Journal of Applied Physics, Vol.83, No.10, 1998.
- 42) Serra, J.: Image analysis and mathematical morphology, Academic Press, 1988.
- 43) McBratney, A.B. and Webster, R.: Choosing function for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates, Journal of soil science, 37, pp.617-639, 1986.
- 44) 間瀬, 武田: 空間データモデリング, 共立出版, 2001
- 45) Wackernagel, H. (地球統計学委員会訳): 地球統計学, 森北出版, 2003.
- 46) Jiang, X. Q., Blunt, L. and Stout, K.J.: Three-dimensional surface characterization for orthopaedic joint prostheses, Proc Instn Mech Engrs Vol .213 Part H, pp.49-68, 1999 .

(2007/09/18 受付)