

# 孔食部材の表面調査と腐食状態シミュレーション

正員 山本規雄\* 正員 中井達郎\*

Investigation on Pitting Corroded Condition and the Simulation of Corrosion Surface Condition

by Norio Yamamoto, Member Tatsuro Nakai, Member

## Summary

Pitting corrosion is a great concern when the integrity of ship's hull structures such as the hold frames in way of cargo holds of bulk carriers which exclusively carry coal and iron ore is considered. The strength of actual pitting corroded member is depending on the pitting corroded surface condition which varies according to the progress of pitting corrosion. In order to investigate the practical strength evaluation method, a serial strength evaluation for various pitting corroded conditions is necessary. However it is difficult to obtain pitting corroded members which meet the purpose of analysis from existing ships. Therefore the strength analysis of simulated pitting corroded members is an alternative procedure. In this case, simulated pitting corrosion surface must well represent an actual pitting corrosion condition. In this paper, the investigation on the pitting corroded surface condition of the hold frames in way of cargo holds of bulk carriers is made to comprehend the statistical nature of pitting corroded surface. Then the simulation procedure is proposed to generate an optional pitting corroded surface. It is confirmed that the simulated pitting corrosion condition is similar to the actual condition.

## 1. 緒言

著者らは、石炭と鉄鉱石を運搬するばら積み貨物船倉内部材に生じる腐食ピットと局部強度の関係について、人工的に円錐形の模擬腐食ピットを設けた試験片の実験結果に基づき、ピット状の腐食が発生している部材と等価な引張り強度を有する等価板厚の評価式<sup>[1]</sup>、FEMを用いたシリーズ計算結果に基づき、ピット状の腐食が発生している部材と等価な圧縮・せん断最終強度を有する等価板厚の評価式<sup>[2]</sup>を提案した。さらに、ばら積み貨物船倉内肋骨等の構造強度に対する評価式の適用性について検討し、その適用性を確認した<sup>[3]</sup>。

このような等価板厚評価手法を実用化するためには、実構造部材のピット状腐食状態に見られるような、発生位置及び大きさが異なる腐食ピットがランダムに発生している場合に対する評価式の適用性について検討する必要がある。このような検討を行うためには、実際の腐食部材を用いた強度検討が望ましいが、評価目的に合った腐食状態の実部材を入手することは困難である。一方、実際の腐食状態を再現できるシミュレーション手法を開発し、意図する腐食状態をシミュ

レートした部材の強度評価を行うことで、一般化した結論を導くことが可能と考えられる。

本報では、ピット状腐食が発生した各種状態の実部材の表面調査を行いその特徴を把握し、特徴を再現できるシミュレーション手法を検討した結果を報告する。

## 2. 孔食部材の表面調査

### 2.1 調査材と腐食状態統計量

ピット状に腐食した実際のばら積み貨物船の倉内肋骨のウェブ及びフェイス部の腐食表面状態の調査を行った。調査は、船齢13年のばら積み貨物船倉内肋骨の切り替え工事の際の廃材から試験片を採取し、錆落としを行った後に、表面の凸凹状態をレーザー変位計(測定精度 0.008mm)で計測した。調査材は、ウェブ材 200×80mm(元厚 10mm)及び 200×130mm 各7枚、フェイス材 200×50mm(元厚 15mm)13枚である。試験材の表面腐食状態の例を写真1に示す。

各調査材の表面及び裏面の計測を、幅(短辺)方向及び長さ(長辺)方向 1mmピッチで行った。計測結果から、全領域の腐食量の平均値、標準偏差及び最大腐食深さ、幅(短辺)方向断面における腐食量の最も多い断面(最小断面)の平均腐食量を統計量として求めた。

Fig.1 に表面の腐食ピット面積率 (Degree of Pitting Intensity; DOP) (全領域に対する腐食部分の割合) に対する

\* (財) 日本海事協会技術研究所  
原稿受理 平成 18 年 10 月 23 日

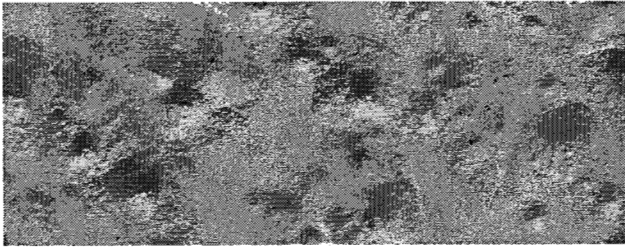


Photo 1 Example of the Pitting Corroded Surface

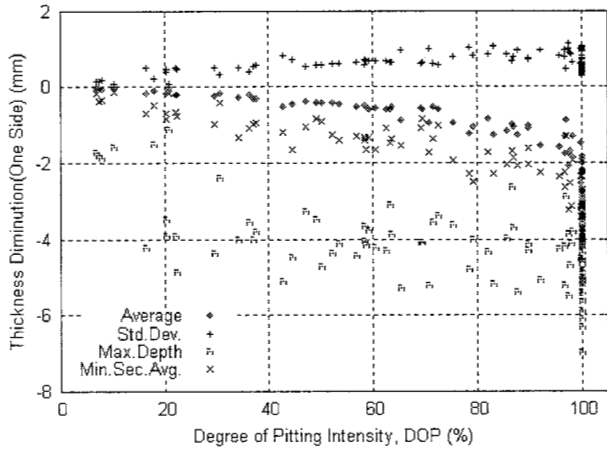


Fig.1 Relation among the DOP and the Statistics of Pitting Corroded Surface

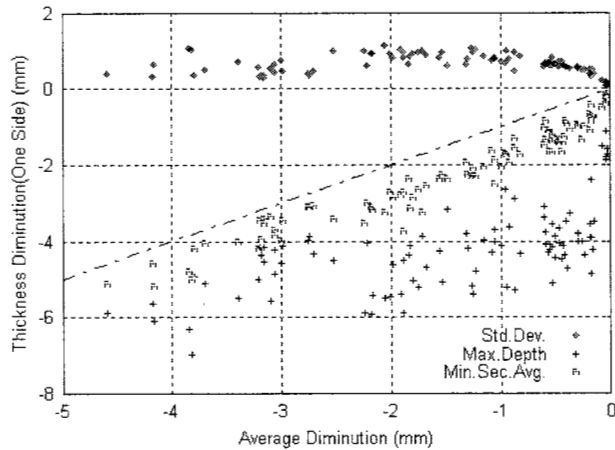


Fig.2 Relation among the Average Corrosion Diminution and the Statistics of Pitting Corroded Surface

統計量の変化を、また、Fig.2 に全領域の平均腐食量に対する統計量の変化を図示する。

これらの結果から、以下の傾向が窺える。

- (1) 腐食量の平均及び標準偏差は小さいばらつきの範囲にまとまって変化する。
- (2) 最大ピット深さ及び最小断面の平均腐食量等の極値についてはばらつきが大きい。
- (3) 平均腐食量が約 2mm を超える辺りから全面腐食状況となる。

- (4) 全面腐食状態で更に腐食が進行するに連れて、最大ピット深さと最小断面の平均腐食量の差が小さくなる、最小断面の平均腐食量が全体の平均腐食量に近くなる等、孔食状態から一様腐食状態に推移していく。

2.2 腐食表面の凸凹状態

2.2.1 表面腐食深さの分布

各試験片について、腐食量の 0.1mm 刻みの頻度分布を、腐食部分の割合で正規化して求めた。求められた頻度分布は、腐食の進行程度 (DOP、平均腐食量) により異なった傾向を示す。ほぼ同程度の DOP ではほぼ同じ分布形状の頻度分布が得られたので、Fig.3 には、幾つかの区分 (全面腐食以前では DOP での区分、全面腐食以降では平均腐食量の区分) 毎に代表的な分布形状を示す。

DOP の増加に伴い腐食深さの分布が指数分布に近い形から正規分布に近い形へと推移していく傾向が窺える。また、DOP=100%の全面腐食状態で更に腐食が進行していくと、ばらつきの程度がほぼ同じで平均値が増加する正規分布形状で推移していく傾向を示している。

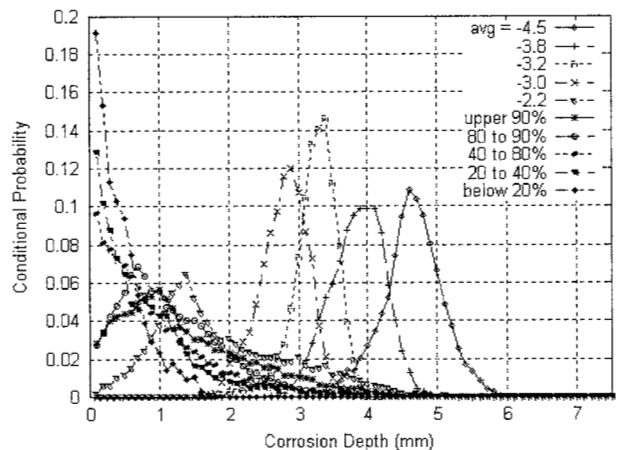


Fig.3 Probability Distribution of the Corrosion Diminution for various Corrosion Conditions

2.2.2 自己相関関数

腐食環境が均一な場合、塗膜の劣化、孔食点の生成及び孔食の進行過程は定常確率過程と考えることができるとして、次式の自己相関関数を表面の凸凹状態を表現する尺度として用いることの有効性を辻ら<sup>14,5)</sup>が示している。

$$R(\lambda) = E[z(\mathbf{x}) \cdot z(\mathbf{x} + \lambda)] \tag{1}$$

$z(\mathbf{x})$  は、平面内のベクトル  $\mathbf{x} = (x, y)$  で表される位置における腐食深さ

Fig.4 に、Fig.3 で示した区分毎の代表的な自己相関関数を示す。DOP の小さい、即ち、孔食の発生数が少ない初期の

段階では強い局所相関性が認められるが、腐食状態の進行に伴い局所相関性は弱くなり、平均腐食量が3mmを超えるような更に腐食が進行した状態では、一定（平面）状態の自己相関関数に近い形へと推移する傾向を示す。即ち、孔食による凸凹表面状態が一樣腐食状態に近くなる傾向が窺える。

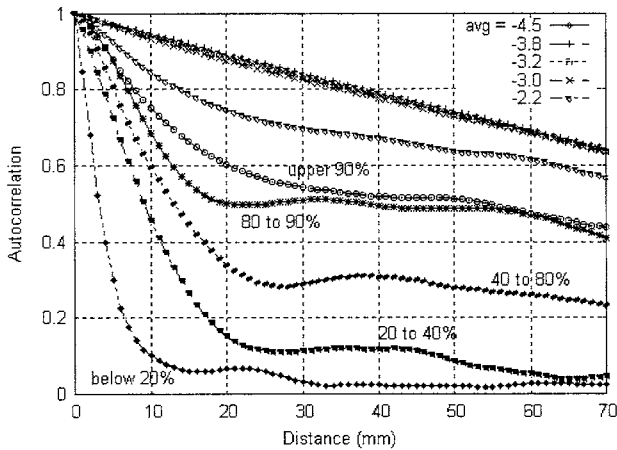


Fig.4 Auto-correlation of the Pitting Corroded Surface for various Corrosion Conditions

### 3. 孔食腐食状態のシミュレーション

#### 3.1 腐食ピット形状のモデル化

主として石炭及び鉄鉱石を積載するばら積貨物船の塗装された倉内部材に発生する腐食ピットの形状は、いずれの場合についても基本的には円錐形である。ただし、初期の小さなピットから次第にピットが成長するに連れて、腐食ピットの表面付近における周縁部は鋭角的ではなく、丸みを帯びた形状となっていることが観察された。そこで、ピットの最大深さが  $z_{cr} = 3.0\text{mm}$  を超えるピットについては、Fig.5 に示すように周縁部において、相似形を保ちつつ腐食が進行する場合の2倍の進行速度で腐食範囲が広がっていく、即ち、周縁部では  $r_0 - r_{cr} = \Delta r$  の範囲の分だけ広がるものと仮定した。この場合、腐食ピット形状、即ち、ピットの腐食深さを表す形状関数は次式で表すことができる。

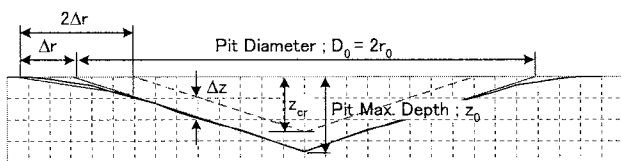


Fig.5 Corrosion Pit observed in a Cargo Hold Structural Members of Bulk Carrier carrying Iron Ore & Coal

$$W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0, r_0, \delta_0) = \max\{W_0(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0, r_0, \delta_0), W_d(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0, r_0, \delta_0)\} \quad (2)$$

$$W_0(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0, r_0, \delta_0) = \delta_0 \left( \max\left\{0, r_0 - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}\right\} \right)$$

$$W_d(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0, r_0, \delta_0, r_{cr}) = \frac{\delta_0}{2} \left( \max\left\{0, 2r_0 - r_{cr} - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}\right\} \right)$$

$$\delta_0 = \frac{z_0}{r_0} = 2 \frac{z_0}{D_0} = \frac{\Delta z}{\Delta r} = \frac{z_{cr}}{r_{cr}},$$

$$\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0), \quad \mathbf{x} = (x, y)$$

$\mathbf{x}_0$  及び  $\mathbf{x}$  は、ピット中心及び評価位置のベクトル  
 $z_0$  は、中心位置での深さ

但し、周縁部の平滑化に伴い腐食による溶解範囲が拡大するが、同一腐食環境下での単位時間内における溶解量の変化は小さく、深さ方向の腐食進行速度が鈍化することが考えられる。従って、平滑化が始まった時点から  $z_{cr} < z < 3z_{cr}$  の範囲で腐食進行速度が次第に20%まで鈍化すると仮定する。

腐食ピットの基本的な形状として、ピットの直径 ( $D_0$ ) と最大深さ ( $z_0$ ) の関係を Fig.6 に示す。直径と深さの比は8程度で、大凡、 $D_0/z_0 \approx 6 \sim 10$  の範囲にばらついていることが窺える。Fig.6 の結果から、 $\delta_0$  は以下の正規分布に従う確率変数と考え、 $\mu_\delta = 0.25$  及び  $\lambda = 0.125$  とした。

$$f_\delta(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda\mu_\delta}} \exp\left\{-\frac{(x - \mu_\delta)^2}{2(\lambda\mu_\delta)^2}\right\} \quad (3)$$

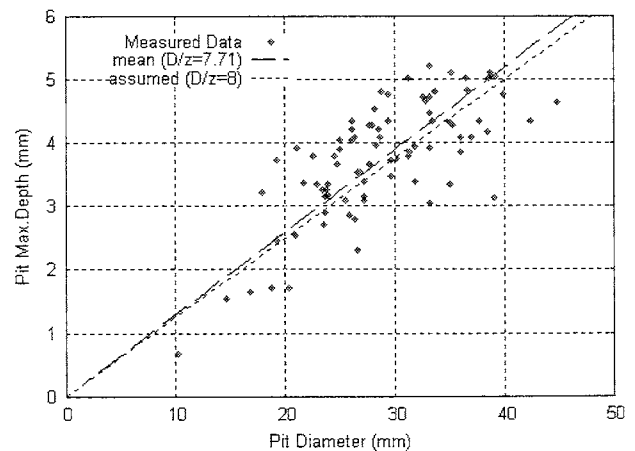


Fig.6 Relation between Pit Diameter and Pit Maximum Depth

#### 3.2 腐食ピットの発生と進行

腐食の発生と進行過程は確率過程であるが、以下の3つの連続する確率過程によりモデル化<sup>10)</sup>できる。

- (1) 孔食活性点の生成過程(防食塗膜の有効寿命期間)
- (2) 孔食活性点から孔食点への遷移過程
- (3) 孔食点の成長過程

即ち、孔食活性点が生成されるまでの時間 (防食塗膜の有効寿命期間)  $T_0$  は、以下の対数正規分布に従う確率変数と考えられる。

$$f_{T_0}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0 t} \exp\left\{-\frac{(\ln t - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}\right\} \quad (4)$$

次いで、生成された孔食活性点が孔食点へと遷移するまでの時間  $T_r$  は、以下の指数分布に従う確率変数と考えられる。

$$g_{T_r}(t) = \alpha \exp\{-\alpha \cdot t\} \quad (5)$$

孔食点(腐食ピット)の成長は孔食点生成以後の経過時間  $\tau$  を用いて、次式で表されるとし、係数  $a$  が対数正規分布に従う確率変数と考える。

$$z(\tau) = a \cdot \tau^b \quad (6)$$

$$h_a(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_a x} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu_a)^2}{2\sigma_a^2}\right\} \quad (7)$$

確率モデルを同定するパラメータの値は、専ら鉄鉱石と石炭を積載するばら積貨物船の倉内構造部材のうち、顕著なピット状腐食の認められる横隔壁下部、下部スツール及び内底板の板厚計測データの解析結果を参考にして、Table 1 の値を用いた。

Table 1 Identification of the Probabilistic Corrosion Models

Process	Parameter	Value
Coating Effective Life	$\mu_0$	0.000
	$\sigma_0/\mu_0$	0.400
	$E[T_0]$	1.077
Generation of Pitting Point	$\alpha$	0.360
	$E[T_r]$	2.781
Corrosion Progress Behavior	$\mu_a$	0.300
	$\sigma_a$	0.400
	$E[a]$	1.462
	$b$	0.333

### 3.3 シミュレーション要領

ある同一の腐食環境下においては、部材の塗膜劣化状態、孔食点の生成状況及び腐食の進行状態は、それぞれ統計的に同等な確率過程に従うと考えられる。そこで、以下の要領に従い腐食状態のシミュレーションを行った。

- (1) 単位面積中に発生する孔食活性点の期待値を設定し、孔食点数が Poisson 分布に従うとして、材料の表面上に孔食活性点の位置を対象面内に一様ランダムに設定する。
- (2) 孔食活性点に対して、①塗膜の有効寿命、②孔食点への遷移時間、③腐食成長則の係数、④腐食ピットの形状パラメータを、それぞれ独立に、前述の確率モデルに従い設定する。
- (3) 単位時間を設定し、初期状態から単位時間ずつ時間を進めて孔食点を生成させる。
- (4) 生成された孔食点について単位時間ごとに腐食の進行量を求める。このとき、複数の孔食点の腐食範囲が重なる場合には、複数の孔食点のうち成長の早い方で代表させる。

### 3.4 シミュレーション結果

腐食表面調査材の 200mm×80mm の領域に対して、腐食の発生進行確率過程をシミュレートし、腐食表面状態の生成を行った。シミュレーションは Table 1 の値のパラメータを用いて 10 ケースについて行った。

腐食量の分布或いは自己相関関数で特徴が表現できる、シミュレートされた腐食表面状態は、Table 1 のパラメータの値の設定により異なったものとなるが、先に記述したピット周縁部の広がりモデル化及び領域内の孔食活性点の数に大きく依存することが分った。特に影響の大きかった孔食活性点数の期待値については、幾つかの値を想定してシミュレートした結果求められる腐食量の分布及び自己相関関数と、計測結果との適合度から 300 個とした。

#### 3.4.1 表面状態の統計量

シミュレートした表面状態の統計量の腐食の進行に伴う推移を Fig.7 及び Fig.8 に示す。Fig.7 において◇、+、□及び>で示されるプロットは、同寸法の調査材の腐食量の平均値、標準偏差、最大腐食量及び最小断面の平均腐食量をそれぞれ示す。また Fig.8 において◇、+及び□で示されるプロットは同寸法の調査材の腐食量の標準偏差、最大腐食量及び最小断面の平均腐食量をそれぞれ示す。何れの統計量も実腐食表面からの計測結果と比較して、概ね良好な結果を示しており、今回用いたシミュレーション条件により、専ら鉄鉱石と石炭を積載するばら積貨物船の倉内肋骨ウェブの腐食状態を良好に再現できることが分かる。

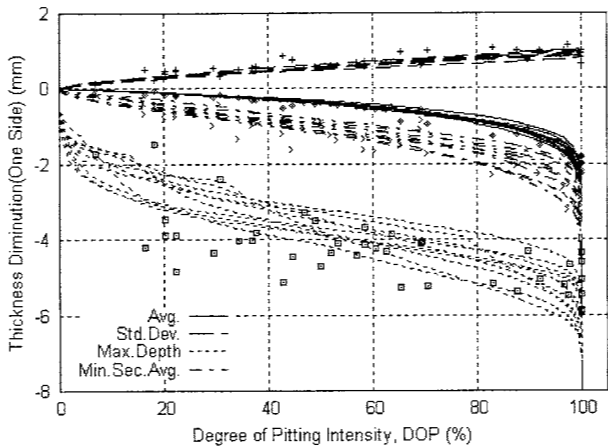


Fig.7 Relation among the DOP and the Statistics of Simulated Pitting Corroded Surface

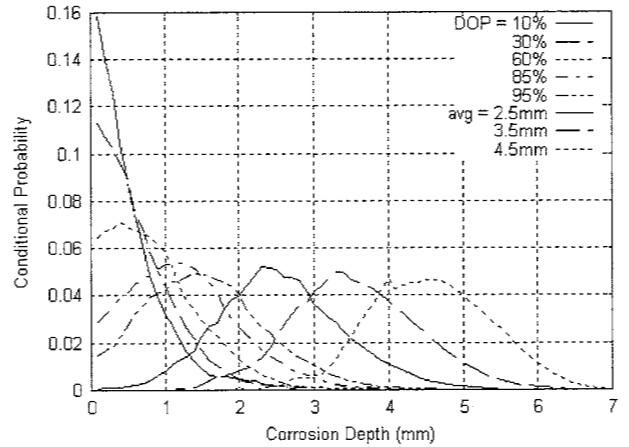


Fig.9 Probability Distribution of the Simulated Pitting Corrosion Diminution for various Corrosion Conditions

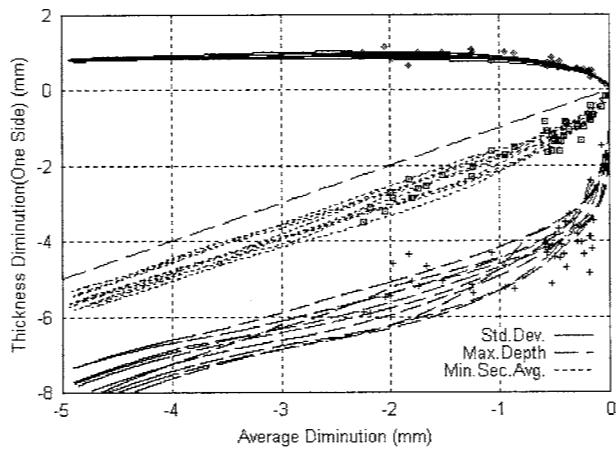


Fig.8 Relation among the Average Corrosion and the Statistics of Simulated Pitting Corroded Surface

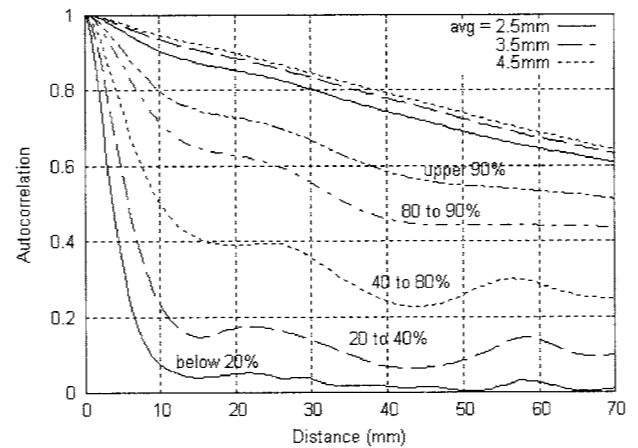


Fig.10 Auto-correlation of the Simulated Pitting Corroded Surface for various Corrosion Conditions

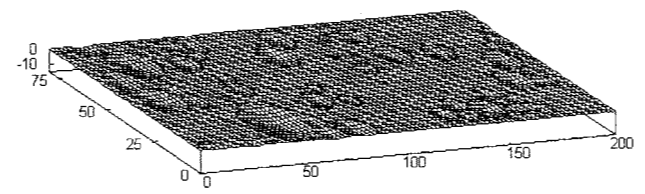
### 3.4.2 表面の凸凹状態

孔食による表面の凸凹状態を表現する方法として、腐食量の頻度分布と自己相関関数が考えられる。そこで、或る一つのシミュレーションケースについて、腐食表面における腐食量の頻度分布を腐食部分について標準化して求めた結果を Fig.9 に示す。また、腐食表面の自己相関関数を求めた結果を Fig.10 に示す。

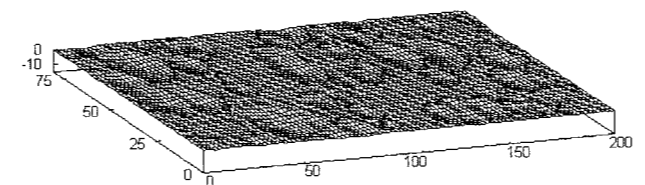
Fig.9 に示されるシミュレートされた腐食表面の腐食量分布を Fig.3 に示した調査材の結果と比較すると、全面腐食状態に移行した状態における腐食量のばらつきが若干大きい結果となっている。このことは、実部材の腐食状況では全面腐食状態になるに連れ、ピットの成長に伴う周縁部の平滑化に加え、平滑化の度合いが全領域に広がるためと考えられる。

Fig.3 及び Fig.4 で示された実部材の腐食状態に応じた腐食深さ分布の特徴的な傾向、並びに、腐食状態に応じた自己相関関数の特徴的な傾向と推移を良好に再現できていることが窺える。

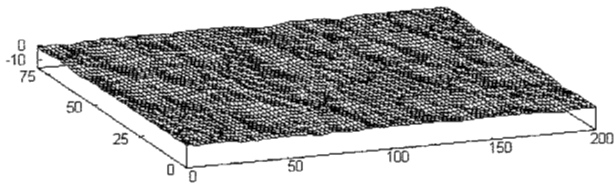
或る一つのシミュレーションケースについて、腐食表面形状の推移を、DOP=25%、50%、75%、99%及び平均腐食量=3.5mmの状態について示すと Fig.11.(a)~Fig.11.(e)のようである。図は、200mm×80mm×10mmの板の片面からの腐食状況をシミュレートした結果である。



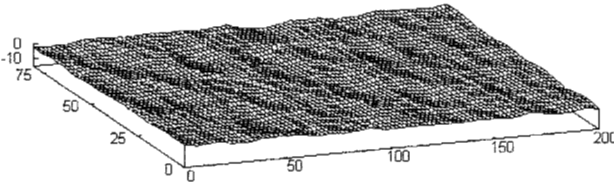
(a) DOP=25% (Average Diminution = 0.15mm)



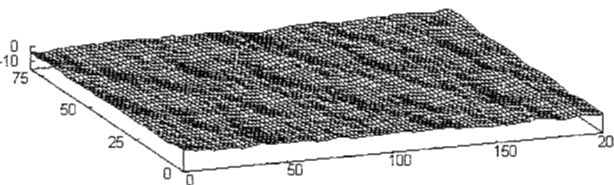
(b) DOP=50% (Average Diminution = 0.38mm)



(c) DOP=75% (Average Diminution = 0.76mm)



(d) DOP=99% (Average Diminution = 1.93mm)



(e) Average Diminution = 3.5mm (DOP=100%)

Fig.11 Simulated Pitting Corroded Surface

部材表面の腐食領域の拡がりや、孔食の進行状態が時間の推移と共に変化する様子がほぼ良好にシミュレートされている様子が窺える。

#### 4. 最小断面の平均腐食量

##### 4.1 腐食状態の寸法影響

材料の腐食領域における腐食量の分布は、Fig.3 或いは Fig.9 に示したように、腐食状態の進行に伴い指数分布に近い形から正規分布に近い形へと変化する傾向が窺える。ある非常に狭い領域を考えた場合、ピットの発生個数が限られるので、腐食状態は局所的に強い相関性を有する。しかし、比較的広範囲な領域を考える場合には、同一腐食環境下におけるピットの発生位置が領域内で一様ランダムと考えることができること、腐食量はピット形状が幾何学的にほぼ同じであることから、領域内の位置に依存しない定常な確率事象と考えて差し支えない。

今、或る状態(或る DOP)における腐食量の統計的性質が場所によらず同等で、平均及び分散が  $\mu$  及び  $\sigma^2$  であるとすると、このとき、幅  $X$  長さ  $Y$  の部材の長さ方向の任意位置の断面の平均腐食量は確率変数であり、断面位置の違いによらず統計的に同等と考えることができる。

一般に、長さ方向の位置  $y$  における断面の平均腐食量は次式で求められる。

$$E[z_X(y)] = \frac{1}{X} \int_0^X z(x,y) dx \cong \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M z(x_m, y) \quad (8)$$

ここで(8)式の評価は離散的なデータに基づき行うことが一般的であるが、この評価を一定の規則により行う場合、 $M$  は断面の幅  $X$  に依存する量で、断面の幅を代表する数と考えることができる。一般に、 $M$  が十分大きいとき断面の平均腐食量  $\bar{z}_M \equiv E[z_X(y)]$  は中心極限定理により、元の腐食量の分布形状によらず、以下の正規分布に従うと近似できる。

$$f_{\bar{z}_M}(z) = \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{M(z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (9)$$

$$E[\bar{z}_M] = \mu_M = \mu \quad V[\bar{z}_M] = \sigma_M^2 = \left(\frac{\sigma}{\sqrt{M}}\right)^2$$

次に、断面の平均腐食量について、長さ方向に幾つかの断面を考慮した場合の最大値について考える。考慮する断面の数を  $N$  とすると、 $N$  は部材の長さ  $Y$  に依存する量で、断面の長さを代表する数と考えることができる。

一般に、考慮する  $N$  断面中の最大値の分布は、

$$g_{N \max}(z) = N \left\{ F_{\bar{z}_M}(z) \right\}^{N-1} f_{\bar{z}_M}(z) \quad (10)$$

で表すことができる。最大値分布のモード値を  $\xi$  とすると、 $g'_{N \max}(\xi) = 0$  の関係から、 $\xi = F_{\bar{z}_M}^{-1}\left(1 - \frac{1}{N}\right)$  を得るので、 $N$  断面中の最大値(モード値)を次式により推定することができる。

$$\bar{z}_{MN \text{ mod}} = \mu + \frac{\sigma}{\sqrt{M}} \Phi^{-1}\left(1 - \frac{1}{N}\right) \quad (11)$$

ここで、 $\Phi(\bullet)$  は標準正規分布関数

即ち、最小断面の平均腐食量は、考慮する領域の幅及び長さ依存する量であり、考慮する領域が大きくなるに従って平均腐食量に収束する量であることが分る。

##### 4.2 幅及び長さの影響

最小断面お平均腐食量の寸法影響は(11)式により表現されるが、影響度を評価する場合には、幅及び長さに関連する量  $M$  及び  $N$  を具体的な物理量と関連付ける必要がある。両者の関係は腐食の形態(一様腐食か孔食か、或いは、孔食形

状が円錐型かお椀型か 等)により異なってくると考えられる。そこで、対象としているばら積貨物船の倉内部材に生じる孔食状態における、断面の平均腐食量、或いは、最小断面の平均腐食量を評価する場合の幅及び長さの代表寸法と幅及び長さの物理量の関係について、シミュレーションにより検討を行った。

即ち、長方形板の1辺の寸法を400mmと固定し、他方の寸法を200、400、600、800、1000mmと変化させた場合に対し、100ケースの腐食状態推移のシミュレーションを行い、各状態での腐食量の平均及び分散が $\mu$ 及び $\sigma^2$ を求めると共に、断面の平均腐食量及び断面の平均腐食量の最大値を求めることにより、(12)式及び(13)式で示される幅及び長さの代表数を求め、幅及び長さの物理量との関係を求めた。

$$M = \frac{\sigma^2}{\sigma_M^2} \tag{12}$$

$$N = \frac{1}{1 - \Phi\left(\frac{\sqrt{M}(\bar{z}_{MN\text{mod}} - \mu)}{\sigma}\right)} \tag{13}$$

考慮する幅の物理量と代表数、及び、長さの物理量と代表数の関係について、100ケースの平均値と線形近似した結果を Fig.12 及び Fig.13 に示す。平均的に見れば相関関係を示している。

### 4.3 最小断面の平均腐食量への寸法影響

最小断面の平均腐食量は、考慮する領域全体の腐食量の平均値及び標準偏差を用いて(11)式のように表すことができる。即ち、最小断面の平均腐食量は、全体の平均腐食量の平均 $\mu$ から考慮する領域の寸法に応じた量だけ離れた量として求められ、この偏差量は標準偏差 $\sigma$ の係数倍として評価できる。Fig.12 及び Fig.13 の結果を用いて、寸法影響に及ぼす幅及び長さの影響を表す下式の係数を評価した結果を Fig.14 に示す。

$$\text{size effect coeff.} = \frac{1}{\sqrt{M}} \Phi^{-1}\left(1 - \frac{1}{N}\right) \tag{14}$$

図で示されるように、最小断面の平均腐食量には考慮する幅の影響が大きく、長さの影響が比較的小さいことが分る。また、寸法影響は考慮する幅が小さい場合に大きく現れるが、或る程度の大きさの領域を対象とする場合、寸法影響は一定値に近づく傾向にある。実構造の寸法程度の大きさでは寸法影響は小さいといえる。

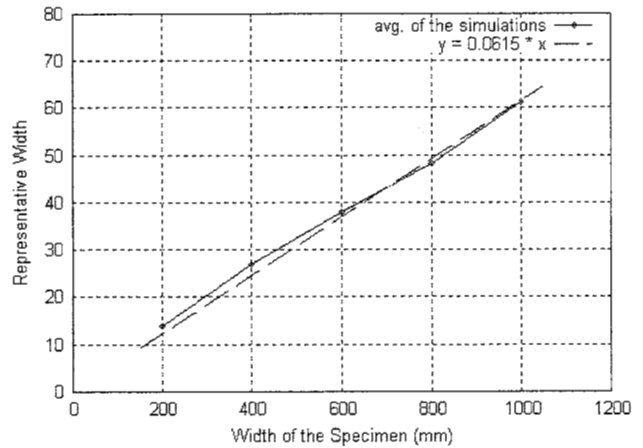


Fig.12 Relation between an Actual and a Representative Width when Evaluating an Average Corrosion Diminution in a Section

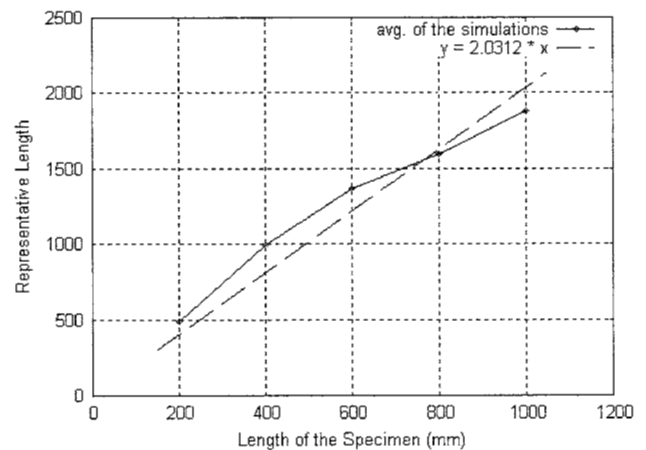


Fig.13 Relation between an Actual and a Representative Length when Evaluating an Average Corrosion Diminution in the Minimum Section

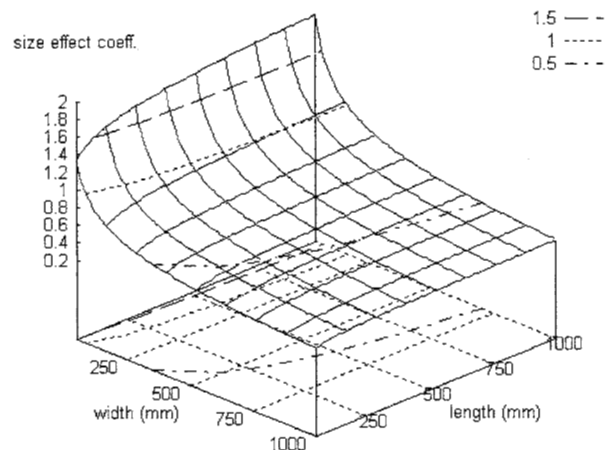


Fig.14 Size Effect Coefficient in the Evaluation of the Average Thickness Diminution in the Minimum Section

## 5. 結 言

孔食材の強度評価を実腐食部材を用いて行うことは、試験材の入手の観点から限界がある。一方、実際の腐食状態を再現できるシミュレーション手法を開発し、意図する腐食状態をシミュレートした部材の強度評価を行うことで、一般化した結論を導くことが可能と考えられる。

そこで、実際の腐食状態を把握するため、孔食状の腐食を生じた実部材の形状調査を行い、以下の知見を得た。

- (1) 孔食の生じる初期段階では表面の腐食量の分布は指数分布に近い形であるが、孔食範囲が増加するに連れ、表面の腐食量の分布は正規分布に近い形になる。
- (2) 表面の自己相関関数は、孔食の生じる初期段階では局所相関性が認められる形を示すが、表面の孔食範囲が増加するに連れ相関性は失われ、全面に腐食が発生した後は、全面一様腐食に近い相関関数の形となる。
- (3) 孔食の直径と深さの比は6~10の範囲にばらつき、平均は凡そ8程度である。
- (4) 孔食の成長に連れて、表面付近の孔食周縁部の平滑化現象が認められる。

このような調査結果を踏まえ、以下のシミュレーション法を提案した。

- (5) 孔食の発生は考慮する領域内における、2次元 Poisson 過程でモデル化される。
- (6) 孔食の発生時期、発生後の成長則は腐食の確率モデルに従う。
- (7) 成長する孔食の形状は基本的に、直径深さ比が平均8程度の円錐形状を保持する。
- (8) 成長が進行するに連れ、孔食周縁部の平滑化が生じ、深さ方向の成長速度が鈍る。成長速度の鈍化は腐食による溶解量がほぼ一定になるようにモデル化する。

このシミュレーション法により、実際の腐食状況をほぼ忠実に再現できることを確認した。実際に入手することが困難な実腐食部材に代わり、提案シミュレーション法により再現される任意の腐食状態にある部材の強度評価を行うことで、腐食状態と強度の関係をより詳細に検討することが可能となる。この場合、検討する部材の大きさの違いが結果に与える影響が懸念される。

- (9) 孔食部材の寸法影響について統計的に考察し、寸法の小さい場合に寸法影響が顕著であるが、ある程度の大きさ(500×500mm)以上になると寸法影響はほぼなくなることが分った。

このことにより、実構造の腐食による強度影響を評価する場合に用いる、シミュレートした部分モデルを適切に作る事ができる。

## 参 考 文 献

- 1) 中井達郎、松下久雄、山本規雄：船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響(第8報)、日本船舶海洋工学会論文集、第2号(2005)、pp.303-310
- 2) 中井達郎、松下久雄、山本規雄：船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響(第9報)、日本船舶海洋工学会論文集、第2号(2005)、pp.311-321
- 3) 中井達郎、松下久雄、山本規雄：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(2006)、pp.293-301
- 4) 辻恒平、久田俊明、北川英夫：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)、pp.331-340
- 5) 辻恒平、久田俊明、北川英夫：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)、pp.1035-1041
- 6) N. Yamamoto and K. Ikegami, "A Study on the Degradation of Coating and Corrosion of Ship's Hull Based on the Probabilistic Approach", Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Transactions of ASME, Vol. 120, pp.121-128, August 1998