

株式会社 IHI	正会員	○橋本 和朗
広島大学大学院	正会員	藤井 堅
広島大学大学院	学生会員	時乗 良彦
広島大学大学院	フェロー会員	中村 秀治

1. はじめに

鋼構造物の腐食という問題に関して、これまで腐食促進試験や曝露試験による腐食のメカニズム、進展についての研究や、実際の腐食構造を用いた耐荷力実験、腐食表面測定データをもとにした数値シミュレーションによる耐荷力の検討等が行われてきたが、腐食進展が及ぼす将来的な影響について説得力を持って予測するに至っていない。そのため、腐食に対しては対症療法的な維持管理しか行えていないのが現状であり、実用性をもつ信頼できる維持管理手法の開発が望まれる。

このような背景をもとに、本研究では腐食表面生成モデルを用いた構造物の強度低下予測手法を提案する。まず構造物の将来の腐食表面を予測することが可能な腐食表面生成モデルを開発し、それを用いて作成された将来の腐食表面をもとに、海洋環境における円形鋼管の圧縮耐力低下の将来予測を行う。また、通常、腐食対策として施工されている防食工の劣化を将来予測に盛り込むことで、防食工の管理状況が円形鋼管の残存耐力にどのような影響を及ぼすかをモデルにより再現する。

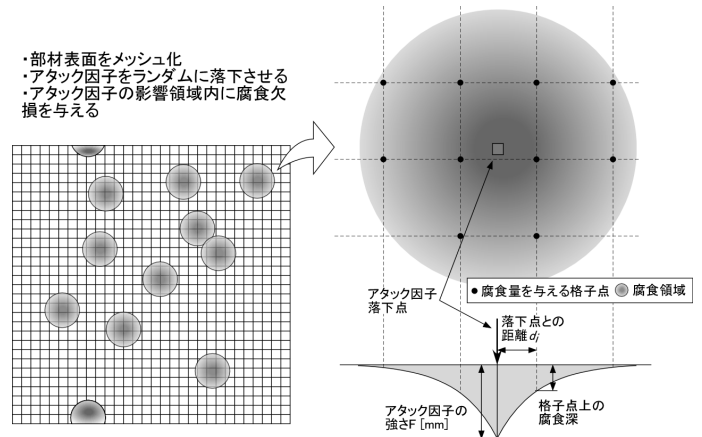
2. 腐食表面生成モデル

モデルの概要

本モデルは藤井ら¹⁾により提案された腐食表面作成モデルを改良したものである。

本モデルでは水・酸素・塩分といった腐食を発生させる因子による電気化学的な現象を考慮せず、それらの因子を単純に鋼表面に欠損を与える因子（本論文ではアタック因子と呼ぶ）としてシミュレーションを行う。以下にこのアタック因子による腐食進展過程を示す。

1)実際の腐食表面は空間的に連続であるが、これを離散化して、対象とする鋼部材の表面を Fig.1 a)のようにメッシュ状に区切る。この格子点上に腐食深さを与え、凹凸を表現する。2)アタック因子は鋼表面のランダムな座標上に落下し、その座標周囲の一定領域内にある深さだけ掘り下げる。3)アタック因子は、毎年 n 個、 T 年間落



a) 鋼部材表面イメージ

b) 欠損イメージ

Fig.1 アタック因子による欠損イメージ

下し、鋼表面に n 個の腐食欠損ができ、その腐食深は加算される。

このとき、アタック因子が落下した座標の周囲には Fig.1 b)の薄墨部に示すような空間的な広がりをもつ腐食欠損できると考える。その腐食深さは、実現象の再現性を考慮すると、落下座標との距離が離れるほど小さくするのが妥当であると思われる。腐食孔の形状を次式のように定義する。

$$V_i = F \exp(-\beta d_i) \quad (1)$$

ここに、 V_i は1つのアタック因子によって発生する格子点 i の腐食深、 F はアタック因子の与える最大腐食深さ(mm)、 d_i は格子点 i とアタック因子落下座標との距離、 β は距離減衰定数である。この腐食深が上記過程 3)に示すように加算されるので、格子点 i の最終的な腐食深 Z_i は次式のように表すことができる。

$$Z_i = \sum_T \sum_n V_i \quad (2)$$

実測した腐食表面の平均腐食深・腐食深の標準偏差・腐食表面を波形とみなして得られるパワースペクトル密度分布といった指標が一致するように上式中の各パラメータを選択することで、実際の腐食深を再現でき、さらに経過年数 T 年を増加させることで将来の腐食表面を予

測することができる．このような手法によりこのモデルは腐食表面がもつ空間的自己相関性を再現でき，統計的に説明力の高い腐食表面を作成できる．

19 年暴露鋼管の腐食表面の再現

本研究ではケーススタディとして 19 年間海洋環境において無防食状態で暴露され，腐食した円形鋼管をあつかう．まず，モデルを用いて計測時点での腐食表面の再現を行う．

鋼管は海洋環境において 19 年間暴露されたスパイラル鋼管（公称寸法：直径 406.4mm × 板厚 9mm）から切り出したものである．ここでは，海中部（DL-1.5 ～ 2.7m）におかれていたものを対象とした．鋼管の全長 1200mm のうち，最も腐食の激しい 500mm 区間を抜き出してモデル化の対象とした．また，鋼管は海洋環境に露出する外表面のみ腐食すると仮定した．Table 1 に鋼管の計測結果および作成した腐食表面の各パラメータを示す．また Fig.2 に鋼管の対象とした領域の腐食表面および作成した腐食表面の残存板厚等高線図を示す．等高線図は鋼管の長手方向 500mm × 円周方向を展開した 1256mm の領域を示している．

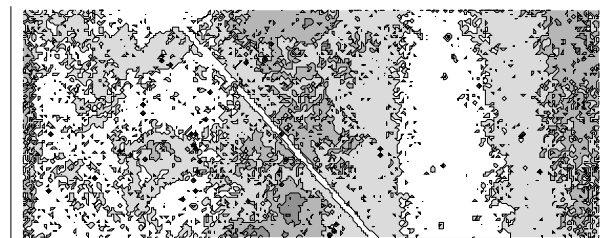
3. 防食工を考慮した鋼管の劣化予測

海洋環境におかれる鋼構造物では，腐食による劣化は避けられない問題であり，近年では建設初期段階から防食工などの対策をなされた状態で施工されるのが普通である．そのため，維持管理のための将来予測を行うならば，鋼材の劣化のみではなく，防食工の劣化についても同時に考慮するべきである．

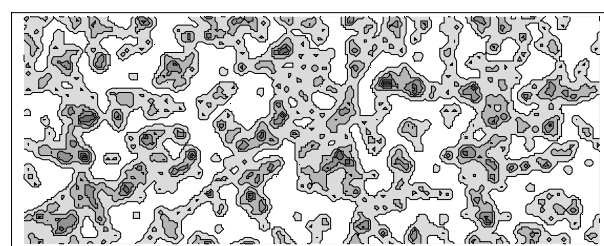
ここでは，これまでに示した腐食表面生成モデルの考えをそのまま応用している．鋼材を劣化させるアタック因子の代わりに，塗膜を劣化させる劣化因子を塗膜表面に落下させることで，塗膜の劣化を再現する．また，塗膜の欠損部から塗膜下に腐食が進展する現象を再現するため，塗膜が失われた領域にアタック因子が落下した場合，そのアタック因子の影響範囲内にある塗膜は，鋼表面側からその性能が低下するものとした(Fig.3)．このような過程により塗膜を劣化させ，塗膜能力値が 0 になった格子点では腐食が生じ始めるようにする．また，一定の期間が過ぎると劣化が生じた塗膜能力を初期値に再設定することで，塗膜の塗り替えを表現することも可能である．この塗膜劣化モデルを用いた例として，Fig.4 に塗膜欠損の状態を等高線図として示す．図中の黒い部分

Table 1 腐食表面パラメータ

	平均板厚 t_{ave} [mm]	最小断面 平均板厚 [mm]	板厚標準 偏差 σ [mm]	F [mm]	n	β
実測結果	7.53	7.31	0.88	-	-	-
腐食モデル	7.53	7.19	0.87	2.28	34	0.1



a) 実計測結果



b) 腐食モデル

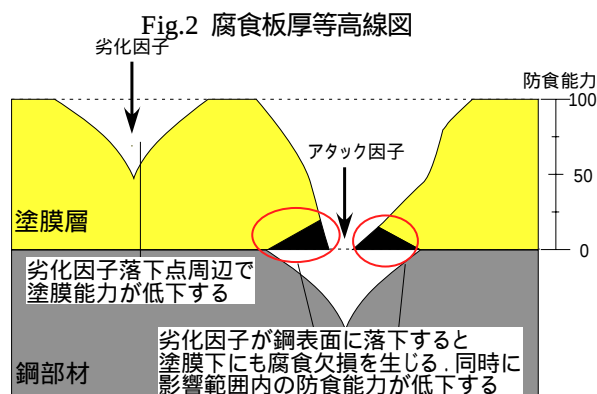


Fig.3 塗膜劣化モデルイメージ



Fig.4 塗膜劣化状態 50 年経過 (黒い部分が鋼露出部)

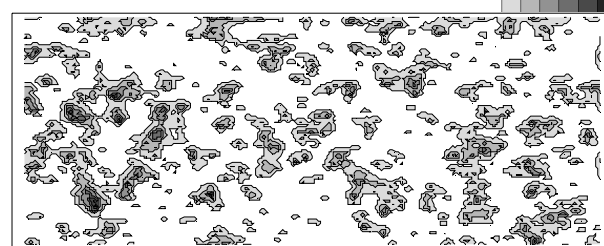


Fig.5 塗膜モデル 50 年経過

は塗膜が欠損し鋼表面が露出している領域である．このような防食能力の劣化を適応して作成した腐食表面の残存板厚等高線図を一例として Fig.5 に示す．腐食表面と塗膜欠損状態対比させて見ると，塗膜欠損部周辺のみが腐食していることがわかる．また，塗り替え期間を 10 年・30 年・50 年と変化させた場合の残存板厚の経年変化を Fig.6 に示す．なお，アタック因子パラメータは Fig.2 の腐食表面を作成したときのものと同様のものを使用している．

4. 簡易評価法による強度低下予測

簡易評価式を用いて，海洋環境で腐食した円形鋼管の残存圧縮強度評価を行う．この評価法では残存板厚の統計量(平均板厚と標準偏差)と鋼構造物設計指針による座屈強度曲線を用いて，

$$\left. \begin{aligned} P_u &= 2\pi t_R \sigma_y & (R_t \leq 0.119) \\ P_u &= 2\pi t_r \left(0.723 + \frac{0.0330}{R_t} \right) \sigma_y & (0.119 \leq R_t \leq 0.355) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

で評価できるとしている．

ここに， r は鋼管の半径， t_R は強度を評価するための板厚， σ_y は鋼管の降伏応力， R_t は径厚比パラメータで，

$$R_t = 1.65(\sigma_y / E) \cdot (r / t_R) \quad (4)$$

である．強度評価のための板厚 t_R は腐食した鋼管の断面積が最小となる断面を中心とした軸方向座屈波長 $3\sqrt{rt_{\min}}$ (ここで $t_{\min}$: 最小断面平均板厚) の領域の平均板厚 t_{ave} と，その領域の板厚の標準偏差 s を用いて次式で与えられる．

$$t_R = t_{ave} - 0.8s \quad (5)$$

これらの式を用いた評価法を，作成した腐食表面に適用することで，簡易に残存強度の将来予測を行うことができる．前節で作成した塗膜モデルでの腐食表面について評価を行うと，Fig.7 に示すような結果が得られる．塗り替え期間を短くするほど最終的な残存強度が高くなるという，防食能力が発揮されている様子が再現できている．

5. まとめ

1) 3つのパラメータを設定することで簡単に使用することができる腐食表面作成モデルを提案した．これにより，凹凸形状を表現した腐食表面を作成できる．作成される腐食表面は，支配指標(平均腐食深・腐食深の標準偏差等)をよく満たし，実際の腐食の特徴をよく捉える

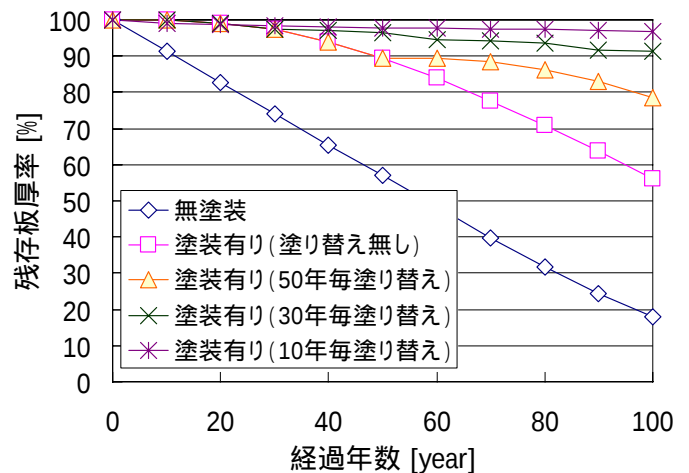


Fig.6 残存板厚変化

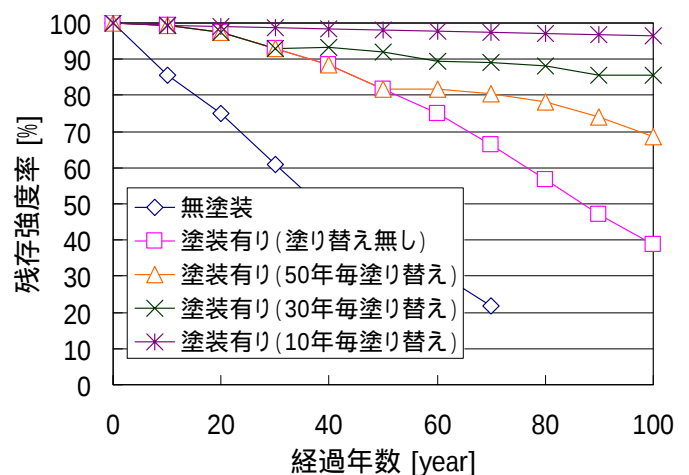


Fig.7 強度低下予測

ことができている．

2) 作成した腐食表面に対し，簡易評価法を用いることで海洋環境において腐食した円形鋼管の強度評価を行うことが可能である．さらに将来的な強度低下についても，その整合性について検証不可能ではあるが一定の説明力を持って評価可能である．

3) 塗膜劣化をモデル化し，腐食表面作成時に導入することにより，塗装の更新が将来の残存耐力低下に与える影響について表現可能である．

6. 謝辞

なお，本研究では日本鉄鋼連盟の 2007 年度「鋼構造研究・教育助成事業」による研究助成金を頂いております．ここに記して深く謝意を表します．

7. 参考文献 1) 藤井堅，山本治，原考志，中村秀治：鋼表面の腐食進展に基づく鋼板圧縮強度低下の経時予測 構造工学論文集 Vol52A, 2006 年 3 月.