

腐食ピットが発生している倉内肋骨ウェブの 衰耗量判定法に関する研究

技術研究所 中井達郎, 松下久雄, 山本規雄

1. 緒言

鉄鉱石及び石炭を積載するばら積み貨物船貨物倉の倉内肋骨には凹凸の激しい腐食ピットが発生する場合がある[1]-[5]。このような場合、腐食した部材表面の凹凸が激しいこと、また、腐食している部分と腐食していない部分が混在することなどから、残存強度や残存板厚の評価が難しいのが現状となっている。また、個々の腐食ピットは、ハンマーを用いても簡単には除去できないような硬い錆こぶに覆われていることなどを考えると、部材表面の錆こぶや腐食ピットの発生状況から衰耗量を推定する手法の開発が望まれる。本研究では、石炭及び鉄鉱石を運搬するばら積み貨物船の倉内肋骨ウェブに腐食ピットが発生している場合について、(1)実腐食部材調査、(2)実験による引張強度調査、(3)既提案[8],[9]の腐食の確率モデルの拡張、及び、(4)非線形 FEM 解析による最終強度調査を実施し、その結果に基づき、腐食ピット面積率 *DOP* (**Degree Of Pitting intensity** : 部材の全表面積に対する腐食ピットが発生している部分の面積の割合を%で示したもの)を用いた衰耗量の判定方法について検討した。

2. 倉内肋骨ウェブの腐食状況

2.1 実腐食部材

図1に、船齢13年の大型ばら積み貨物船から採取された倉内肋骨ウェブの例を示す。このばら積み貨物船は以前報告した文献[1]のものとは異なる。図1(a)及び(b)は、それぞれ、錆落としをする前後の状態である。また、図1(c)は、腐食している部分(黒)と腐食していない部分(白)に塗り分けたものである。錆落としをする前に錆こぶの直径を測定した結果とそれに対応する腐食ピットの直径を測定した結果を図2に示す。図2から分かるように、両者の値はほぼ一致している。以上のことより、このような錆こぶが発生している場合、錆こぶ面積率(錆こぶが発生している部分の面積の全表面積に対する割合)と腐食ピット面積率(以下 *DOP* と呼ぶ)はほぼ一致するものと考えられる。

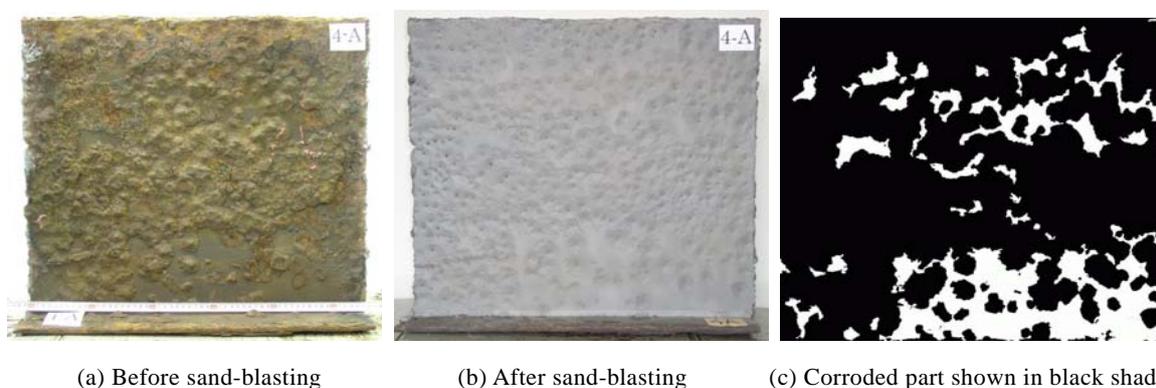


図1 Corroded web plate of 13-year-old bulk carrier

2.2 腐食ピットの形状

図3に、錆こぶ及び腐食ピットを含む断面の写真を示す。厚い錆こぶの下には、腐食ピットが発生していることが、この図からも分かる。腐食ピットの断面形状を型取り材を用いて調査した結果を図4に示す。図3及び図4から分かるように腐食ピットの断面形状はほぼ三角形であり、腐食ピットの形状はほぼ円錐形であるといえる。

図5に腐食ピットの直径と深さの関係を示す。これは、船齢12～20年の4隻のばら積み貨物船の倉内肋骨ウェブに発生していた腐食ピットを測定したものである。この図から、腐食ピットの直径と深さの比は、腐食ピットの大きさによらず、8:1～10:1程度の範囲にあることが分かる。

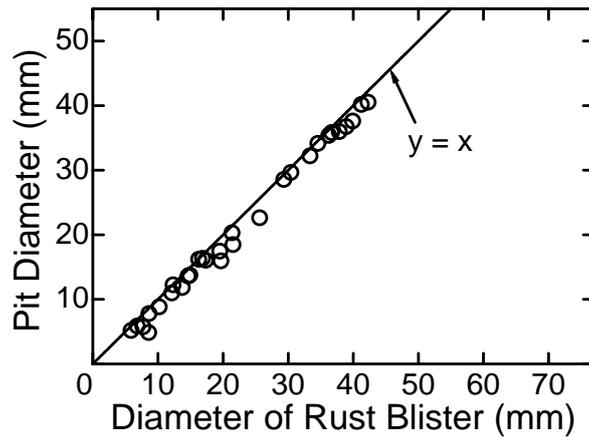


図2 Relationship between pit diameter and diameter of rust blister



図3 Corrosion pit covered with rust blister

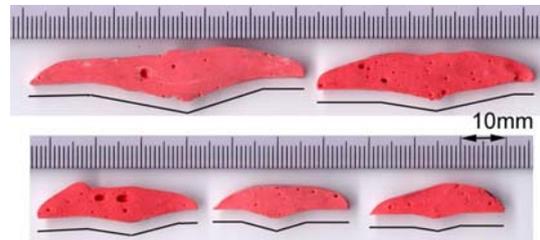


図4 Cross-sectional view of corrosion pit

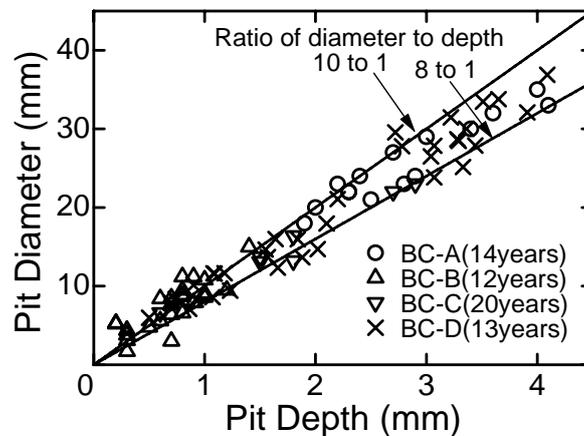


図5 Relationship between pit diameter and its depth

2.3 腐食状態統計量

上述の船齢 13 年のばら積み貨物船の倉内肋骨ウェブ及びフェイスの腐食表面状態の調査を行った。サンドブラストによる錆落としを行った後に、表面の凹凸状態をレーザ変位計で計測した。計測領域の大きさは、ウェブで 200mm×80mm あるいは 200mm×130mm で、フェイスは 200mm×50mm であり、1mm ピッチで計測した。なお、計測は複数の倉内肋骨について実施した。計測結果から、計測領域全体の片面における腐食量の平均値及び標準偏差、最小断面の平均腐食量及び最大腐食深さを統計量として求めた。これらの結果から、以下の傾向がうかがえる。

- (1) 腐食の進行 (*DOP* の増加) に伴い、腐食量の平均値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などの極値についてはばらつきが大きい。
- (3) 平均腐食量が片面で約 2mm を超えるあたりから全面腐食状態 (*DOP*=100%) となる。
- (4) 全面腐食状態でさらに腐食が進行するにつれて、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など、凹凸が激しい腐食状態から一様腐食状態に推移していく。

3. 腐食表面状態のシミュレーション [6], [7]

特に、本研究で取り扱っているような、腐食ピットがランダムに発生している腐食形態の場合、一般には、評価目的にあった腐食状態の実部材を入手するのは困難である。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、意図した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により、残存強度評価に関して一般化した結論を導くことが可能と考えられる。本章では、後述する板部材の圧縮最終強度に及ぼす腐食ピットの影響を FEM 解析により調査するための前段として、腐食表面状態のシミュレーション方法について述べる。

3.1 腐食ピット形状のモデル化

前述の通り、主として石炭及び鉄鉱石を積載するばら積み貨物船の倉内肋骨に発生する腐食ピットの形状は基本的には円錐形である。ただし、初期の小さな腐食ピットから成長するにつれて、その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様子が観察された。そこで、最大深さ z_0 が $z_{cr}=3.0\text{mm}$ を超える腐食ピットについては、図 6 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ものと仮定した。この場合、腐食ピットの形状関数は式(1)~(4)で表すことができる。

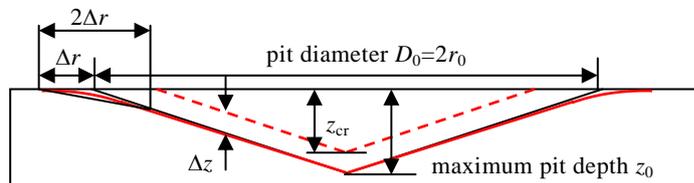


図 6 Schematic cross-sectional view of pit.

$$W(\mathbf{x}-\mathbf{x}_0, r_0, \delta_0) = \max\{W_0(\mathbf{x}-\mathbf{x}_0, r_0, \delta_0), W_d(\mathbf{x}-\mathbf{x}_0, r_0, \delta_0)\} \quad (1)$$

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

$$W_d(\mathbf{x}-\mathbf{x}_0, r_0, \delta_0, r_{cr}) = \frac{\delta_0}{2} \left(\max\left\{0, 2r_0 - r_{cr} - \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}\right\} \right) \quad (3)$$

$$\delta_0 = \frac{z_0}{r_0} = 2 \frac{z_0}{D_0} = \frac{\Delta z}{\Delta r}, \quad r_{cr} = \frac{z_{cr}}{\delta_0}, \quad \mathbf{x}_0 = (x_0, y_0), \quad \mathbf{x} = (x, y) \quad (4)$$

\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

3.2 腐食ピットの発生と進行[8], [9]

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

すなわち、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。

$$f_{T_0}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2 t}} \exp\left\{-\frac{(\ln t - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}\right\} \quad (5)$$

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。

$$g_{T_r}(t) = \alpha \exp\{-\alpha \cdot t\} \quad (6)$$

孔食点（腐食ピット）の成長は孔食点生成以後の経過時間 τ を用いて、次式で表されるとする。

$$z(\tau) = a \cdot \tau^b \quad (7)$$

ここで、係数 a が以下の対数正規分布に従う確率変数と考える。

$$h_a(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_a^2 x}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu_a)^2}{2\sigma_a^2}\right\} \quad (8)$$

確率モデルを同定するパラメータの値は、石炭と鉄鉱石を積載するばら積み貨物船の倉内構造部材の板厚計測データの解析結果を参考にして決定した。

3.3 シミュレーション結果

200mm×80mmの領域を対象とし、上述の腐食モデルを用いてシミュレートした表面状態の統計量の腐食進行に伴う推移を図7及び図8に示した。これらの図には前述の測定結果のうちウェブを測定した結果もプロットしている。いずれの統計量も実腐食表面の測定結果と比較して、概ね良好に再現されており、石炭及び鉄鉱石を積載するばら積み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。

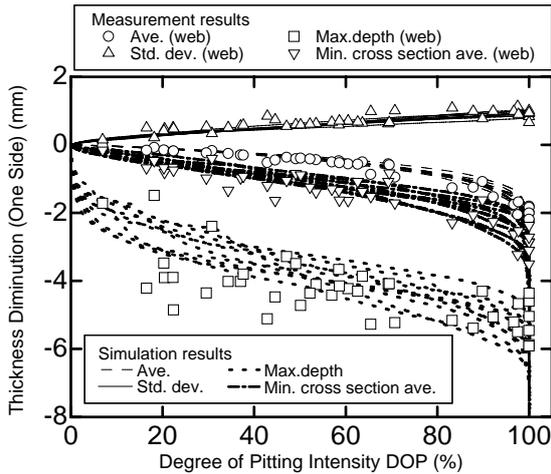


図 7 Thickness diminution vs. average diminution

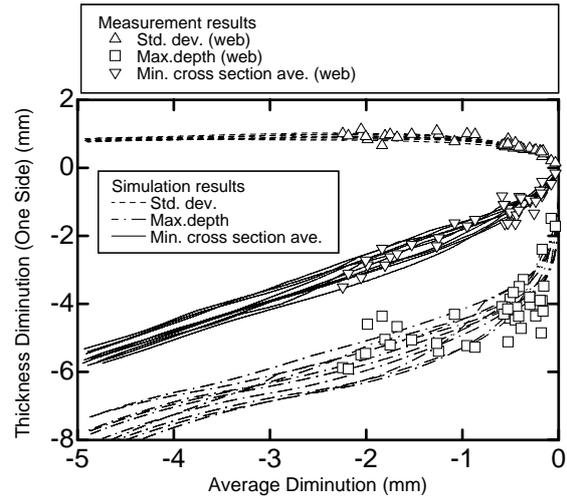


図 8 Thickness diminution vs. average diminution

4. 板部材の引張強度に及ぼす腐食ピットの影響について

4.1 実腐食部材の引張強度

板部材の引張強度に及ぼす腐食ピットの影響を調査することを目的として、上述の船齢13年のばら積み貨物船から採取された倉内肋骨ウェブ（建造時板厚 t_0 ：10mm）から小型試験片（供試部：80mm×200mm）及び幅広試験片（供試部：160mm×300mm）を切出し引張試験に供した。

引張試験の結果を整理するにあたり、公称引張強度 σ_u を下式により定義する。

$$\sigma_u = \frac{P_{\max}}{A_0} \quad (9)$$

ここで、 P_{\max} 及び A_0 はそれぞれ最大荷重及び腐食前の荷重軸に垂直な断面の面積である。図9に引張強さ比 σ_u/σ_{u0} と平均衰耗量の関係を示す。ここで、 σ_{u0} は材料の引張強さであり、平均衰耗量は試験後に標線間の重量を測定した結果から求めたものである。この図から腐食ピットの増加に伴う衰耗量の増加に伴い引張強さ比が低下することが分かる。図10に実験後の試験片の例を示す。

4.2 最小断面積を用いた引張強度の予測

ここでは、下式のように公称引張強度 σ_u を材料の引張強さ、荷重軸に垂直な最小断面の面積 A_{\min} 、及び、腐食前の荷重軸に垂直な断面の面積 A_0 を用いて予測した結果について述べる。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{u0}} = \frac{A_{\min}}{A_0} \quad (10)$$

小型引張試験片の供試部は、腐食表面の凹凸状態をレーザ変位計で計測しており、その計測結果から荷重軸に垂直な最小断面の面積を算出した。図11に上記の方法により引張強さ比を予測した結果を示す。この図から分かるように、荷重軸に垂直な最小断面の面積を用いることにより、公称引張強度を精度良く予測可能である。

なお、腐食ピットが発生している板部材の引張強度については、機械加工により円錐形の模擬腐食ピットを設けた引張試験片を用いたシリーズ実験も行い、板厚やピットの大きさなどによらず公称引張強度が式(10)で精度良く予測されることが示されている[3],[4],[10]。

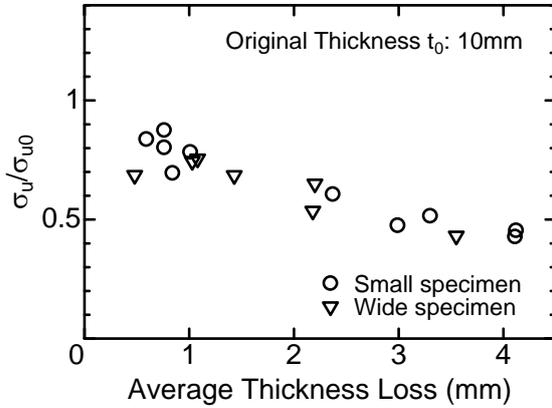


図9 Nominal tensile strength vs. average thickness loss 図10 Example of tensile test specimens after test

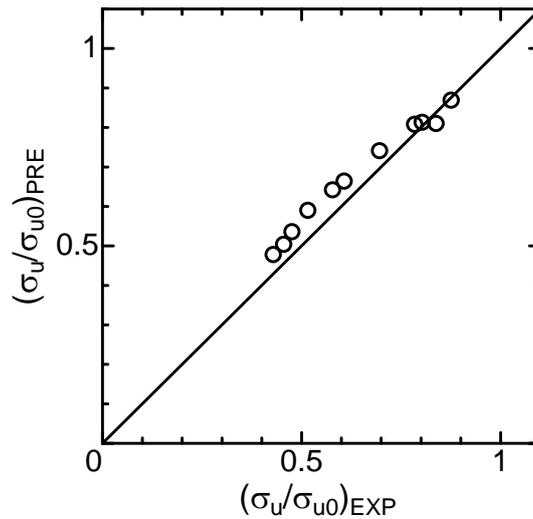


図11 Prediction of tensile strength of small specimens

4.3 等価板厚を用いた残存強度評価

腐食ピットが発生している部材の衰耗量を考える場合、一様衰耗した部材の許容衰耗量と直接的に比較するためには、強度そのものを評価するよりも、等価板厚 t_e （腐食ピットが発生している部材と同等の強度を有する、一様衰耗した部材の板厚）を評価した方が現場検査において利便性が高いと考えられる。前節の検討により公称引張強度は最小断面の面積に比例する、すなわち最小断面の平均板厚に比例する。したがって、腐食ピットが発生している板部材の引張強度に対応する等価板厚は最小断面の平均板厚 $t_{ave,min}$ に等しいことから下式が成り立つ。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{u0}} = \frac{A_{\min}}{A_0} = \frac{t_e}{t_0} = \frac{t_{ave,\min}}{t_0} \quad (11)$$

また、等価衰耗量 t_{el} を下式で定義すると、

$$t_{el} = t_0 - t_e \quad (12)$$

等価衰耗量 t_{el} は下式のように最小断面の平均衰耗量 $t_{al,\min}$ と等しくなることが分かる。

$$t_{el} = t_0 - t_{ave,\min} = t_{al,\min} \quad (13)$$

5. 板部材の圧縮最終強度に及ぼす腐食ピットの影響 [7]

5.1 解析対象

大型ばら積み貨物船の倉内肋骨ウェブと同程度の板厚・板幅を有し、腐食ピットがランダムに発生している正方形板を対象として、FEMを用いた弾塑性大たわみ解析を実施した。解析コードはMSC.Marcを用い、要素には4節点厚肉シェル要素 (Element Type 75) を用いた。

解析対象モデルは、図12に示す一軸圧縮を受ける正方形板であり、長さ $a=450\text{mm}$ 、幅 $b=450\text{mm}$ 、板厚 $t_0=10, 13, 16\text{mm}$ とし、板の両面の腐食状態は、前述の腐食モデルにより計算されたものを仮定し、腐食ピットの分布及びDOPを変化させて解析を実施した。

境界条件は、面外変位については周辺単純支持とし、面内変位については周辺が直線を保持しながら変位するという条件を設けた。

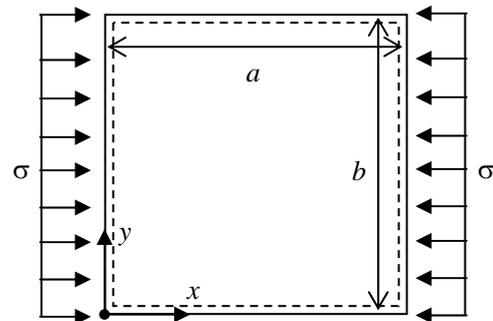


図12 Analyzed square plate

5.2 腐食ピット分布

倉内肋骨ウェブは両面が同様な腐食環境にあることから、両面に腐食ピットが発生している場合を想定した。両面のDOPの値は等しいものとしたが、それぞれの面のピット分布は異なるものとした。解析に用いた腐食ピットの分布の例を図13に示す。

5.3 腐食ピットのモデリング

腐食ピットをモデリングするためには、細かいメッシュを使用する必要があるため、正方形板の長さ方向、幅方向ともに75分割した。すなわち、個々のシェル要素は一辺の長さが6mmの正方形である。各節点の位置における板厚を求め、各要素を構成する節点における板厚の平均値をその要素の板厚とした。本モデリング手法は、限られた条件下のみではあるが、ソリッド要素を用いてモデリングした場合とほぼ同様な解析結果が得られることを確認している[11],[12]。

5.4 解析結果

図 14 に板厚 $t_0=10\text{mm}$ の場合について解析により得られた平均応力-平均ひずみ曲線を示す。この図から分かるように、**DOP**の増加に伴い最終強度は低下する。また、この図には示されていないが、最終強度の低下割合は板厚が小さい方が大きい。

5.5 等価板厚を用いた残存強度評価

前述の通り、等価板厚 t_e （腐食ピットが発生している部材と同等の最終強度を持つ、同様衰耗した部材の板厚）を評価した方が現場検査において利便性が高いと考えられる。図 15 に等価衰耗量 t_{el} と板全体の平均衰耗量 t_{al} の関係を示す。この図から分かるように、等価衰耗量は板全体の平均衰耗量を用いて下式で良好に予測できる。

$$t_{el} = 1.25 \times t_{al} \tag{14}$$

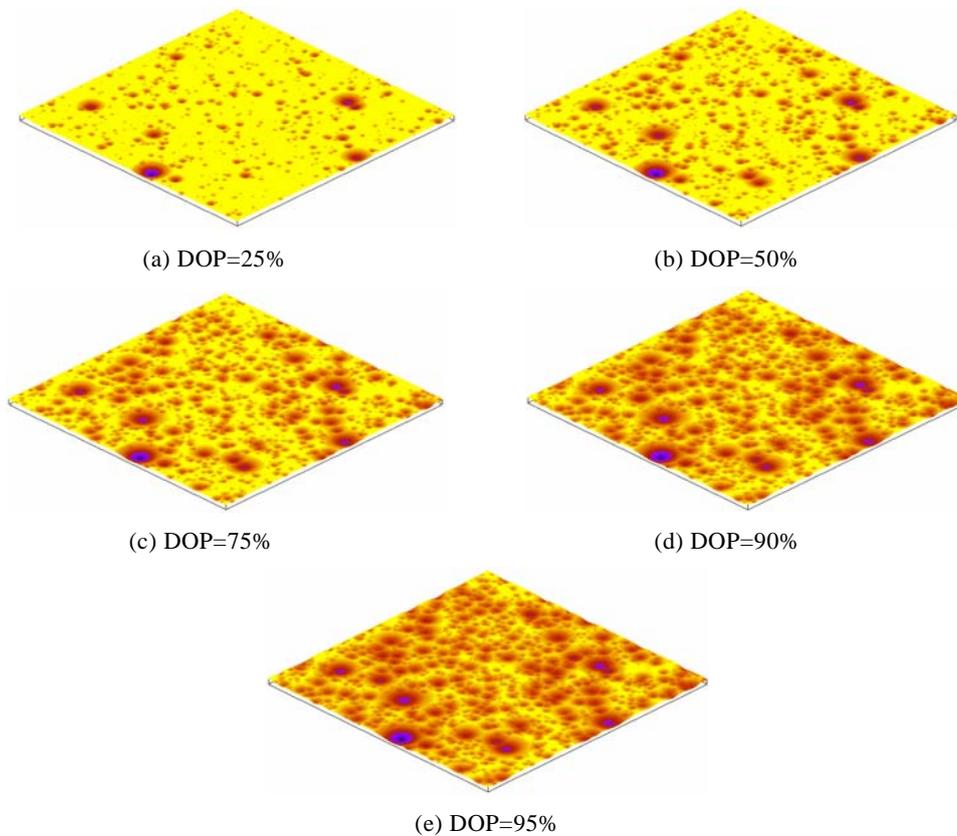


図 13 Simulated pitted surface

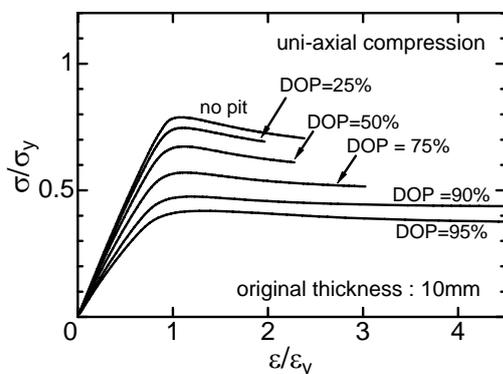


図 14 Average stress-average strain curves

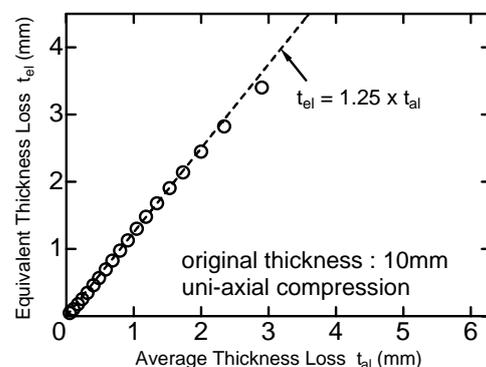


図 15 Equivalent thickness loss vs. average thickness loss

6. 構造物モデルの最終強度に及ぼす腐食ピットの影響

ばら積み貨物船の倉内肋骨は水圧や貨物荷重による曲げを受けることを考慮し、著者らは、外板、ウェブ及びフェイスからなる構造物モデルを用いた各種曲げ試験を実施する[5],[13]-[19]とともに、同様なモデルを用いて FEM による弾塑性大たわみ解析を実施し[20]、最終強度に及ぼすウェブに発生している腐食ピットの影響について検討している。ここでは、横倒れを伴い最終強度に至るような場合を例にとり、その解析結果及び等価板厚を用いた残存強度評価について説明する。

6.1 構造物モデル

図 16 に解析に用いた構造物モデルを示す。断面形状は大型ばら積み貨物船の倉内肋骨の縮尺 1/2 を想定したものである。また、荷重条件は図 17 に示すような 4 点曲げであり、同図のウェブの黒塗りの部分の両面に腐食ピットが発生している場合について解析を実施した。解析に用いた腐食ピット分布の例を及び FEM 解析に用いた形状モデルを図 18 及び図 19 に示す。ウェブの両面で腐食ピットの分布は同じであると仮定した。すなわち、両面の同じ位置に腐食ピットが存在する。

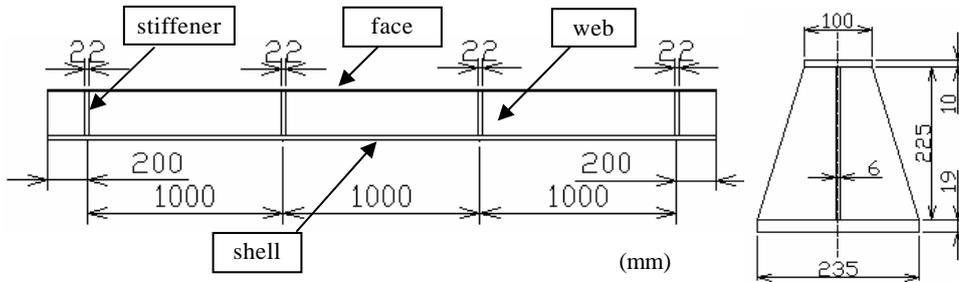


図 16 Lateral-torsional buckling model

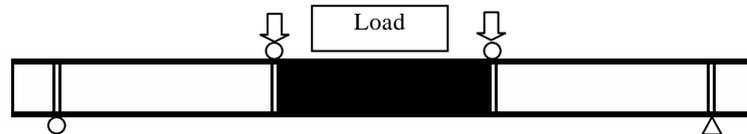


図 17 Loading condition and pitted area

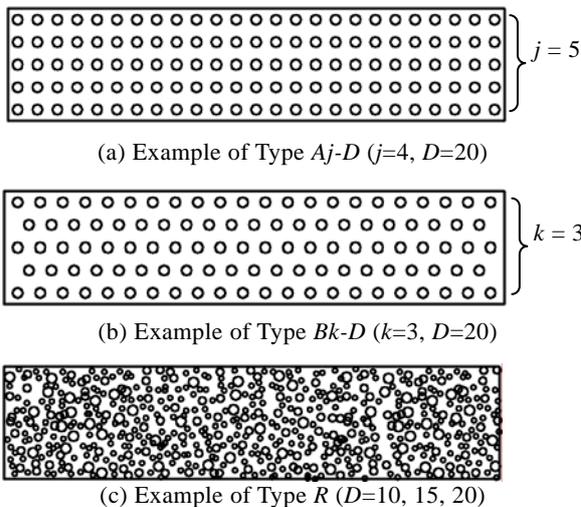


図 18 Examples of pit distribution

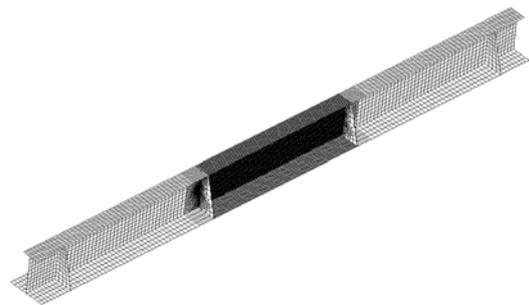


図 19 Geometrical model in FE-analysis

6.2 解析結果

本解析条件では、横倒れ変形を伴い最終強度に至ったあと荷重は徐々に低下する。図 20 に解析により得られた荷重変位曲線の例を示す。ここで、変位は構造物モデル下部（外板）中央部鉛直方向のものである。この図より、当然のことながら、ウェブに発生している腐食ピットが多くなるにつれて最終強度が小さくなるのが分かる。

6.3 等価板厚を用いた残存強度評価

ここでは、前章で述べた板部材の圧縮最終強度の評価の場合と同様に、等価板厚を用いた評価を試みる。図 21 に等価衰耗量と平均衰耗量の関係の例を示す。この図から分かるように、等価衰耗量は板全体の平均衰耗量を用いて下式でほぼ安全側に予測できる。

$$t_{el} = 1.44 \times t_{al} \quad (15)$$

横倒れを伴い最終強度に至るような場合の他に、座屈を伴わず崩壊する場合、局部座屈を伴い最終強度に至るような場合、集中荷重に対してウェブが圧壊する場合（web crippling）についても上記と同様な検討を実施し、式(15)により安全側の評価が可能となることが明らかとなっている[20]。ただし、ウェブのせん断強度が問題となる場合には、腐食ピットが発生しているウェブで早期に破断が生じる場合があるため（図 22 参照）、ウェブの引張強度に基づき評価を行わないと安全側の評価とならない場合がある[19],[20]。

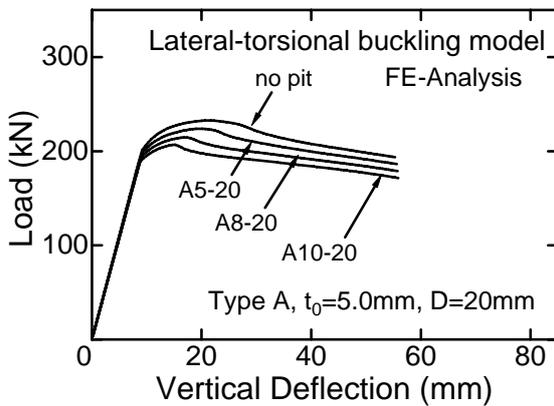


図 20 Load-vertical deflection curves

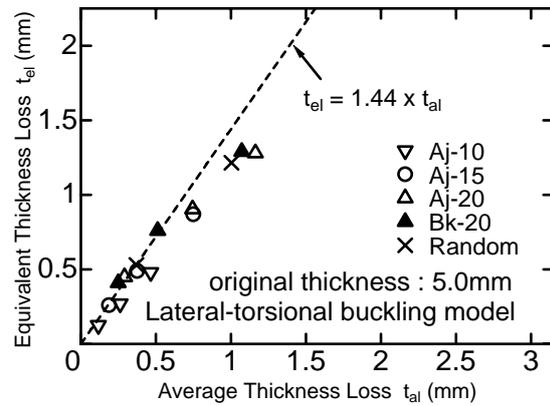


図 21 Equivalent thickness loss vs. average thickness loss



図 22 Shear buckling model after test

7. 腐食ピットが発生している部材の衰耗量判定法の検討

7.1 衰耗量評価に用いるパラメータについて

腐食ピットが発生している部材の残存板厚や残存強度を評価するパラメータとして、平均衰耗量や最小断面の面積といったものが考えられる。しかし、これらのパラメータを実際の検査で直接的に求めるのは、部材表面の凹凸が激しいことなどを考えると困難である。従って、部材表面の観察結果から決定できる腐食ピット面積率 DOP が評価パラメータとして有望である。また、第2章で述べたように、 DOP と錆こぶ面積率がほぼ一致することから、典型的な錆こぶが発生している場合には、錆落としをしなくても錆こぶ面積率を求めることにより DOP を決定できると考えられる。等価板厚と DOP の関係を前述の腐食の確率モデルにより求めておけば、 DOP を用いて残存強度を考慮した衰耗量の推定が行える。

7.2 衰耗量と腐食ピット面積率 DOP の関係について

倉内肋骨ウェブの $450\text{mm} \times 450\text{mm}$ の領域を想定し、領域全体の平均衰耗量と DOP の関係を求めた。その結果を図23に示す。これは、第5章で板部材の圧縮最終強度を解析した際に用いた腐食ピット分布を用いた場合の結果である。この図には、式(13)で表される引張強度に対応する等価衰耗量（最小断面における平均衰耗量）、式(14)で表される板部材の圧縮最終強度に対応する等価衰耗量（ $1.25t_{al}$ ）、及び、式(15)で表される構造モデルの最終強度に対応する等価衰耗量（ $1.44t_{al}$ ）を合わせてプロットしてある。この図から分かるように、各衰耗量とも $DOP=75\%$ 程度までは DOP にほぼ比例して増加する傾向にあるが、 DOP が 75% 以上となると急激に増加する傾向にある。また、構造モデルの最終強度に対応する等価衰耗量は、 DOP が 80% 程度までは、引張強度に対応する等価衰耗量より小さいが、 DOP が 80% 程度以上となると最小断面における平均衰耗量とほぼ等しくなっていることが分かる。従って、前章までに検討した各種強度（板部材の引張強度、圧縮最終強度、及び、構造物モデルの最終強度）に及ぼす腐食ピットの影響を合わせて考えると、板部材の引張強度に対応する等価衰耗量（最小断面における平均衰耗量）を一様衰耗に対する許容衰耗量以下に抑えれば、倉内肋骨ウェブの構造健全性を保つことができると考えられる。

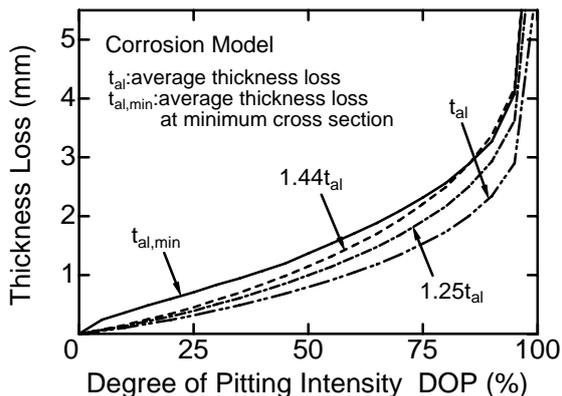


図23 Thickness loss vs. DOP

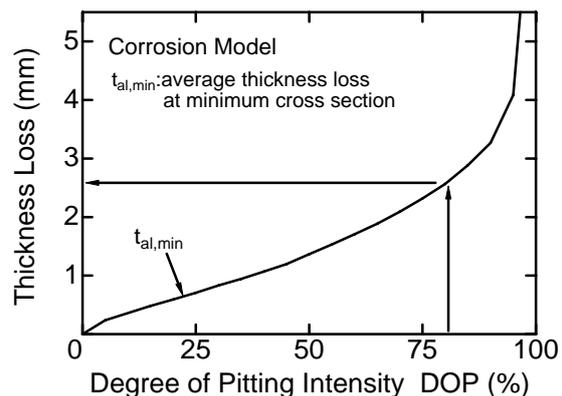


図24 $t_{al,min}$ vs. DOP

7.3 衰耗量判定法

目視により腐食ピット面積率 DOP を判定すれば、図24に示した関係から最小断面における平均衰耗量を推定することができ、残存引張強度を考慮した衰耗量の推定が行える。また、倉内肋骨ウェブで腐食ピットの発生が激しい方の面について判定した DOP の値を用いれば安全側の評価となる。その際、

- 腐食状態には確率的なばらつきがあること
- 腐食ピット面積率 *DOP* の目視判定結果にはばらつきがあることから安全率を考慮する必要がある。

8. 結 言

本研究では、鉄鉱石及び石炭を運搬するばら積み貨物船貨物倉の倉内肋骨ウェブの衰耗量を推定する手法を提案した。これは、目視により腐食ピット面積率 *DOP* を判定し、その値から腐食ピットが発生している倉内肋骨ウェブの等価衰耗量を推定する手法である。本手法は、腐食ピットが発生している部材の残存強度を考慮した合理的なものであるが、目視により腐食ピット面積率 *DOP* を判定する必要がある。この目視による判定を助けるために、実腐食部材と腐食ピット面積率 *DOP* の対応表などについても整備中である。

参考文献

- [1] 中井達郎, 松下久雄, 山本規雄, 荒井宏範: バルクキャリア倉内肋骨の腐食実態と強度, 平成 14 年度 ClassNK 研究発表会講演集, 2002, pp.49-58.
- [2] 松下久雄, 中井達郎, 山本規雄, 荒井宏範: 船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響 (第 1 報) - 実部材での腐食ピット影響調査 -, 日本造船学会論文集, 第 192 号, 2002, pp.357-365.
- [3] 中井達郎, 松下久雄, 山本規雄, 荒井宏範: 船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響 (第 2 報) - 人工ピット材を用いた強度調査 -, 日本造船学会論文集, 第 195 号, 2004, pp.221-231.
- [4] Tatsuro Nakai, Hisao Matsushita, Norio Yamamoto, Hironori Arai: Effect of Pitting Corrosion on Local Strength of Hold Frames of Bulk Carriers (1st Report), Marine Structures, Vol.17, No.5, pp.403-432, 2004.
- [5] Tatsuro Nakai, Hisao Matsushita, Norio Yamamoto: Pitting Corrosion and its Influence on Local Strength of Hull Structural Members, 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2005), Paper No.OMAE2005-67025, June 12-17, Halkidiki, Greece, 2005.
- [6] 山本規雄, 中井達郎: 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, 投稿中
- [7] Tatsuro Nakai, Norio Yamamoto: Pitting Corrosion - Probabilistic Modeling and Its Effect on the Ultimate Strength of Steel Plates Subjected to Uni-axial Compression, 10th International Conference on Applications of Statistics and Probabilities in Civil Engineering (ICASP10), July 31-August 3, Kashiwa Campus, The University of Tokyo, Japan, 2007, to be presented
- [8] 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
- [9] 山本規雄: 確率モデルに基づく腐食の発生及び進行の評価, 日本海事協会誌, 第 245 号, 1998, pp.193-213
- [10] 中井達郎, 角洋一, 斉木幸太郎, 山本規雄: 腐食ピットの確率モデルと腐食表面形状を模擬した再現試験, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 4 号, 2006, 掲載予定
- [11] 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 7 報) - 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 -, 日本船舶海洋工

- 学会論文集, 第 1 号, 2005, pp.169-179.
- [12] Tatsuro Nakai, Hisao Matsushita, Norio Yamamoto : Effect of Pitting Corrosion on the Ultimate Strength of Steel Plates Subjected to In-plane Compression and Bending, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol.11, No.1, pp.52-64, 2006
- [13] 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 3 報) - 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 -, 日本造船学会論文集, 第 195 号, 2004, pp.233-242.
- [14] 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 4 報) - 横倒れ座屈強度に及ぼす腐食ピットの影響 -, 日本造船学会論文集, 第 196 号, 2004, pp.151-159.
- [15] 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 5 報) - 局部座屈に及ぼす腐食ピットの影響 -, 日本造船学会論文集, 第 196 号, 2004, pp.161-168.
- [16] 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 6 報) - ウェブのせん断強度に及ぼす腐食ピットの影響 -, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 1 号, 2005, pp.159-167.
- [17] Tatsuro Nakai, Hisao Matsushita, Norio Yamamoto : Effect of Pitting Corrosion on Local Strength of Hold Frames of Bulk Carriers (2nd Report) - Lateral-Distortional Buckling and Local Face Buckling -, *Marine Structures*, Vol.17, No.8, pp.612-641, 2004.
- [18] Tatsuro Nakai, Hisao Matsushita, Norio Yamamoto : Effect of Pitting Corrosion on Strength of Web Plates Subjected to Patch Loading, *Thin-Walled Structures*, Vol.44, No.1, pp.10-19, 2006.
- [19] Tatsuro Nakai, Hisao Matsushita, Norio Yamamoto : Effect of Pitting Corrosion on Ultimate Strength of Web Plates Subjected to Shear Loading, *The 8th Asia-Pacific Symposium on Engineering Plasticity and Its Applications (AEPA2006)*, Paper No.J-003, September 25-29, Nagoya, Japan, 2006
- [20] 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.