

# 船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響（第9報）

—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—

正員 中井達郎\*      正員 松下久雄\*  
正員 山本規雄\*

Effect of Corrosion on Static Strength of Hull Structural Members (9th Report)

by Tatsuro Nakai, Member      Hisao Matsushita, Member  
Norio Yamamoto, Member

## Summary

The aim of this research project is to establish a method of evaluating the effect of pitting corrosion with a circular cone shape on local strength of hold frames of bulk carriers. In the present study, an empirical formula for predicting ultimate strength of plates with pitting corrosion is proposed based on the results of FE analyses with pitted plates under uni-axial compression. In the formula, equivalent thickness for ultimate strength of pitted plates is expressed as a function of *DOP* (degree of pitting intensity), pit diameter and original thickness of pitted plates. Equivalent thickness predicted by the proposed formula has been compared with the results of FE analyses with pitted plates under various loading conditions and it has been revealed that the proposed formula could well predict the equivalent thickness for ultimate strength of pitted plates under uni-axial compression, shear, bi-axial compression, combined uni-axial compression and shear, combined bi-axial compression and shear, in-plane bend and combined in-plane bend and compression.

## 1. 緒 言

本研究は、石炭と鉄鉱石を運搬するばら積み貨物船の腐食ピットが発生している構造部材の局部強度の評価法確立を目的として実施している<sup>[1][4]</sup>。上記のばら積み貨物船の倉内肋骨に発生している典型的な腐食ピットは円錐形であり、その直径と深さの比は8:1~10:1の範囲にある<sup>[1][5]</sup>。IACS統一規則 S-31<sup>[1][5]</sup>で、腐食ピットが発生している場合を含めた倉内肋骨の切替え基準が規定されているものの、腐食ピットの程度と残存強度の関係について十分に明らかにされているとは言えない状況にある。腐食ピットが発生している船体構造部材の強度に関する研究例は文献[16]-[19]などに見られるが、そのほとんどは深さ一定（円筒形、あるいは直方体）の腐食ピットを仮定しており、部材強度に及ぼす円錐形の腐食ピットの影響について検討した例<sup>[20]</sup>は少ないようである。本研究では、上記のような円錐形の腐食ピットが部材強度に及ぼす影響について系統的に検討を進めている。これまでに、1)腐食の実態調査<sup>[1][5]</sup>、2)腐食ピットが発生している板要素の強度調査<sup>[1][5]</sup>、3)構造強度に及ぼす腐食ピットの影響調査

<sup>[5][11]</sup>、を実施してきた。さらに、前報<sup>[4]</sup>では、円錐形の模擬腐食ピットを設けた試験片を用いた引張試験結果に基づき、円錐形の腐食ピットが発生している部材の引張強度評価式を提案した。

大型ばら積み貨物船の倉内肋骨ウェブは、船側外板やフェイスと比較して板厚が小さく腐食の影響が最も大きい<sup>[21]</sup>。したがって、倉内肋骨ウェブの強度に及ぼす腐食ピットの影響について評価方法を確立することが急務である。そこで、本報では、過去に実施したFEMを用いた弾塑性大たわみ解析結果<sup>[2]</sup>をもとに、大型ばら積み貨物船の倉内肋骨ウェブと同程度の板厚・板幅をもつ板を対象として、円錐形の腐食ピットが発生している鋼板の圧縮最終強度に対する等価板厚評価式を提案する。ここで、等価板厚とは、腐食ピットが発生している部材と同等の強度をもつ、一様衰耗（板厚一定で衰耗が進むと仮定した場合）の部材の板厚である。さらに、純せん断、2軸圧縮、1軸圧縮とせん断の組合せ荷重、2軸圧縮とせん断の組合せ荷重、面内曲げ、及び、面内曲げと圧縮の組合せ荷重を受ける円錐形の腐食ピットが発生している鋼板のFEMを用いた弾塑性大たわみ解析を実施し、その結果得られた最終強度に対応する等価板厚を評価することにより、各荷重条件に対する提案式の適用性について検討する。本研究の最終目的は、実部材のように異なる直径の腐食ピットがランダムに分布する場合に対して適用可能な評価

\* (財)日本海事協会 技術研究所  
原稿受理 平成17年10月12日

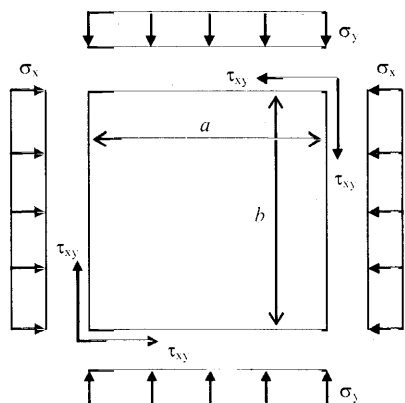


Fig. 1 Square plate under combined loads

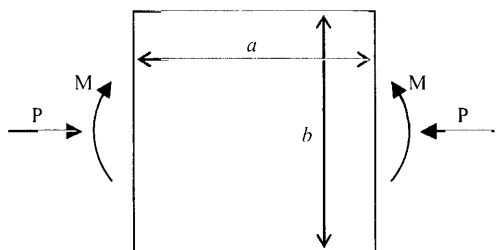


Fig. 2 Square plate under bending moment and compressive load

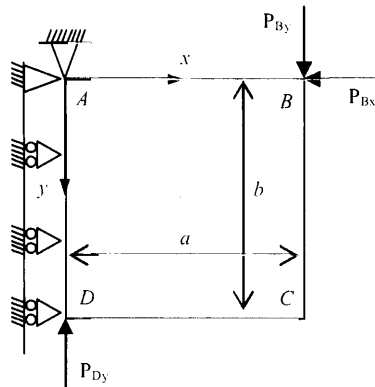


Fig. 3 Boundary conditions for square plate under shear

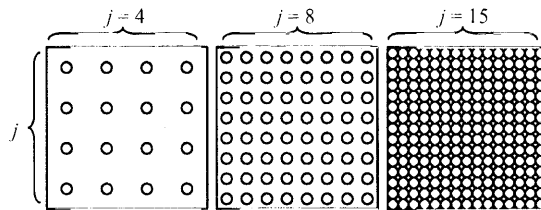
式を確立し、実際の切替え基準検討のための基礎データとすることにあるが、本論文では、まず基本的な場合として、直径一定のピットが規則的に分布する場合について検討した。

2. 解析対象および解析手法

本章では、円錐形の腐食ピットの発生している鋼板の最終強度をFEMを用いた弾塑性大たわみ解析により計算する際の解析対象や腐食ピットの形状モデリング方法について述べる。

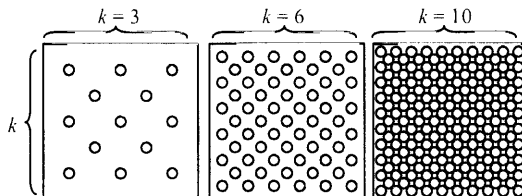
2.1 解析対象

大型ばら積み貨物船の倉内肋骨ウェブと同程度の板厚・板幅をもつ、円錐形の腐食ピットが発生している正方形板を対



(a) A4-30 (b) A8-30 (c) A15-30

Fig. 4 Example of pit distribution in FE analysis (Type Aj)



(a) B3-30 (b) B6-30 (c) B10-30

Fig. 5 Example of pit distribution in FE analysis (Type Bk)

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、Fig.1に示す1軸圧縮、2軸圧縮、純せん断、1軸圧縮とせん断の組合せ荷重、及び、2軸圧縮とせん断の組合せ荷重を受ける正方形板とFig.2に示す面内曲げ、及び、面内曲げと圧縮の組合せ荷重を受ける正方形板で、長さ  $a=450\text{mm}$ 、幅  $b=450\text{mm}$ 、板厚  $t=10, 13$  及び  $16\text{mm}$  とし、腐食ピットの直径と分布を変化させて解析を実施した。上記の正方形板の幅と板厚は、大型ばら積み貨物船の倉内肋骨ウェブの深さと板厚を考慮して決定したものである。

境界条件は、面外変位については全てのモデルで周辺単純支持とし、面内変位については、面内曲げ及び面内曲げと圧縮の組合せ荷重を受けるモデルを除き、周辺が直線を持しながら変位するという条件を設けた。面内曲げ及び面内曲げと圧縮の組合せ荷重を受けるモデルでは、載荷辺は直線を持して変位するものとし、非載荷辺は面内変位を拘束していない。また、純せん断、1軸圧縮とせん断の組合せ荷重、及び、2軸圧縮とせん断の組合せ荷重を受けるモデルにおいて、面内せん断力を導入するにあたっては、既報<sup>[12]</sup>と同様に文献[22]-[24]を参考にして、Fig.3のような境界条件とともに、下式で表される拘束条件を与えた。

$$\text{点 AB 間} : u = \frac{x}{a} u_B \cdots(1-1), \quad v = \frac{x}{a} v_B \cdots(1-2)$$

$$\text{点 BC 間} : u = u_B \cdots(2-1), \quad v = v_B + \frac{y}{b} v_D \cdots(2-2)$$

$$\text{点 CD 間} : u = \frac{x}{a} u_B \cdots(3-1), \quad v = v_D + \frac{x}{a} v_B \cdots(3-2)$$

$$\text{点 DA 間: } u = 0 \quad \cdots(4-1), \quad v = \frac{y}{b} v_D \quad \cdots(4-2)$$

ここで、 $u$ 、 $v$ は、それぞれ $x$ 、 $y$ 方向変位であり、添え字の $B$ 及び $D$ は、それぞれ点 $B$ 及び $D$ における変位であることを示す。Fig.3において、純せん断の場合には点 $B$ に $P_{By}$ を負荷し、1軸圧縮とせん断の組合せ荷重の場合には点 $B$ に $P_{Bx}$ と $P_{By}$ を負荷し、2軸圧縮とせん断の組合せ荷重の場合には点 $B$ に $P_{Bx}$ と $P_{By}$ を、点 $D$ に $P_{Dy}$ を負荷した。

本研究で取り扱う腐食ピットの形状は円錐形である。石炭と鉄鉱石を運搬する大型ばら積み貨物船の倉内肋骨に見られる典型的な腐食ピットは円錐形であり、その直径と深さの比は8:1~10:1程度の範囲にある<sup>[11][5]</sup>。ここでは、より厳しい条件すなわち同じ直径に対してより深い腐食ピットを想定して直径と深さの比は8:1とし、その直径は20、30あるいは40mmで一定とした。腐食ピットの分布例をFig.4及びFig.5に示す。以上のように、解析対象モデルは腐食ピットの直径とその分布、及び、板厚を主なパラメータとしており、以下のように表記するものとする。

$Aj-D$  あるいは  $Bk-D$

$Aj-D$ : Fig.4に示すように、ピットを格子状に板の両面の同じ位置に配置し、全てのピットの直径を同じにしたもの。

$Bk-D$ : Fig.5に示すように、ピットを格子状に配置するとともに、正方形をなす4つの格子点の中間部にもピットを配置したもの。板の両面の同じ位置に配置し、全てのピットの直径を同じにしている。

ここで、 $j$ 及び $k$ は、それぞれFig.4及びFig.5に示す位置の腐食ピットの個数である。 $D$ は腐食ピットの直径( $D=20$ 、 $30$ または $40$ )である。

一般に、工作时に生じる溶接変形などの初期不整の分布は複雑であると言われている。本解析は、最終強度に及ぼす腐食ピットの影響について調査することを主目的としているため、初期不整は下式に示す単純なたわみ波形を仮定した。

$$w = w_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad \cdots(5)$$

ここで、 $w_0$ は元厚(腐食ピットが発生する前の板厚) $t_0$ の1/100とした。なお、溶接残留応力は考慮していない。

材料は、YP32鋼を想定して、ヤング率 $E$ は205.8GPa、降伏応力 $\sigma_y$ は313.6MPaとし、加工硬化率 $H'$ は $E/75$ と仮定した。

## 2.2 腐食ピットのモデリング

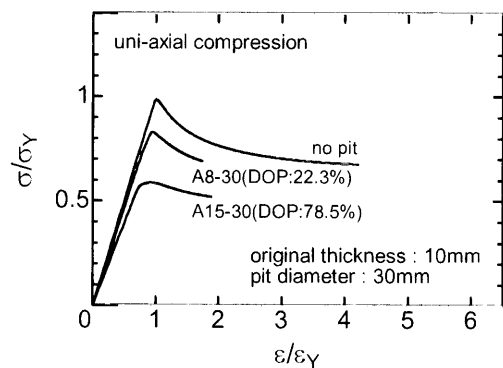
腐食ピットをモデリングするためには、細かいメッシュを使用する必要があり、正方形板の幅方向、長さ方向ともに75分割した。すなわち、個々の要素な一辺の長さが6mmの正方形である。腐食ピットの位置と直径、直径と深さの比、及び、ピット形状が円錐形であることから各節点における板厚を求め、各要素を構成する節点における板厚の平均値をその要素の板厚とした。上記のモデリング手法は、既報<sup>[12][13]</sup>で用いたものと同様であり、限られた条件下のみではあるが、ソリッド要素を用いて個々の腐食ピットをモデリングした場合とほぼ同様の解析結果が得られることを確認している<sup>[12][13]</sup>。

## 3. 一軸圧縮および純せん断を受ける板

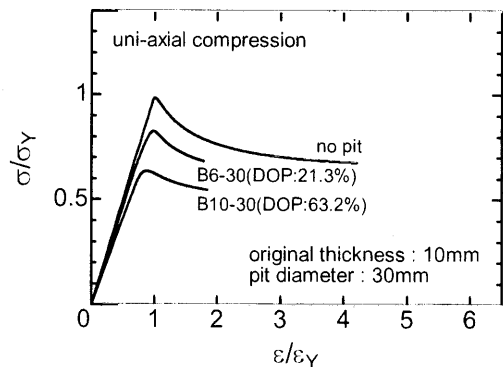
本章では、過去<sup>[12]</sup>に解析を実施した1軸圧縮および純せん断を受ける板の基本的な変形挙動と最終強度に及ぼす円錐形の腐食ピットの影響についてその概要を述べる。この解析結果は、次章で円錐形の腐食ピットが発生している鋼板の最終強度評価式を検討する際に使用する。

### 3.1 基本的な変形挙動

Fig.6、Fig.7及びFig.8に、それぞれ板厚 $t_0=10$ 、13及び16mmの1軸圧縮を受ける板の平均応力-平均ひずみ曲線を示す。



(a) Type Aj

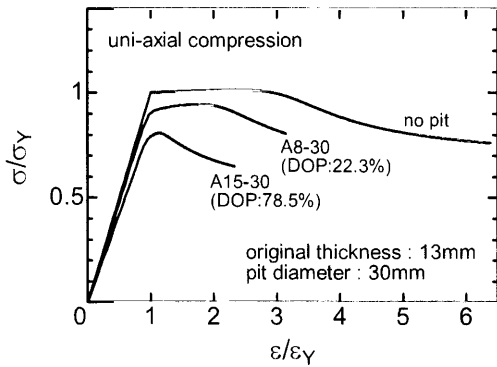


(b) Type Bk

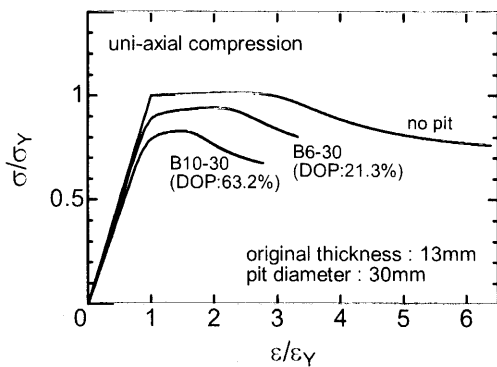
Fig. 6 Average stress-average strain relationships (uni-axial compression,  $t_0 = 10\text{mm}$ )

各図の(a)及び(b)は、それぞれ腐食ビット分布を Type Aj 及

び Type Bk とした場合の解析例である。これらの図から、板厚が大きくなるほど最終強度時の変形量が大きくなること  
 が分かる。板厚が 13 あるいは 16mm で腐食ビットが存在し  
 ない場合には、塑性変形が進んでから最終強度に達し荷重低  
 下が生じるのに対して、板厚が 10mm の場合で腐食ビット  
 が存在しない場合には、平均応力がほぼ降伏応力に達した時  
 点で最終強度に達し荷重低下が生じ始める。また、各ビット  
 分布タイプにおける平均応力-平均ひずみ曲線を見てみる  
 と、ビット面積率 (DOP: Degree of Pitting Intensity) が大き  
 くなるにつれて最終強度が低下していることが分かる。こ  
 こで、ビット面積率とは、全表面積に対する腐食ビットの占  
 める面積の割合を百分率(%)で表したものである。



(a) Type Aj



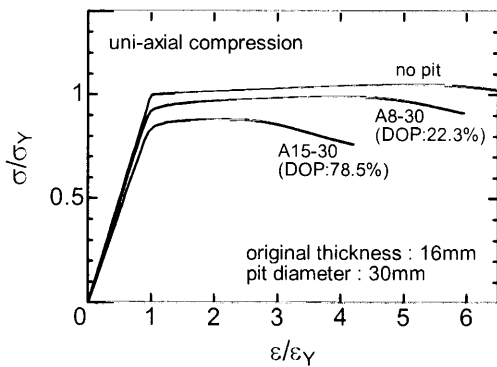
(b) Type Bk

Fig. 7 Average stress-average strain relationships (uni-axial compression,  $t_0 = 13\text{mm}$ )

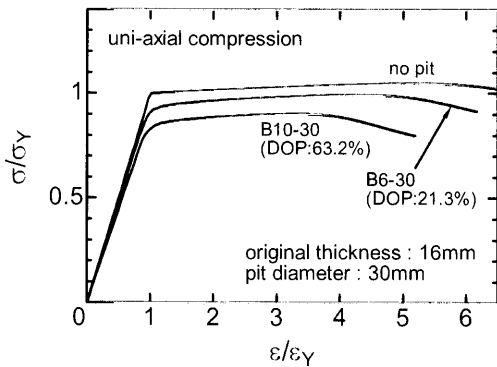
Fig.9 に板厚  $t_0=10\text{mm}$  の純せん断を受ける板の平均応力-  
 平均ひずみ曲線を示す。図の(a)及び(b)は、それぞれ腐食ビ  
 ット分布を Type Aj 及び Type Bk とした場合の解析例である。  
 これらの図から分かるように、腐食ビットが存在しない場合  
 には塑性変形が進んでから最終強度に達し荷重低下を生じ  
 る。また、各ビット分布タイプにおける平均応力-平均ひず  
 み曲線を見てみると、ビット面積率 DOP が大きくなるにつ  
 れて最終強度が低下していることが分かる。

3.2 最終強度に及ぼす腐食ビットの影響

まず、1 軸圧縮を受ける場合について、Fig.10(a), (b)及び  
 (c)にそれぞれの板厚 ( $t_0=10, 13$  及び  $16\text{mm}$ ) における腐食

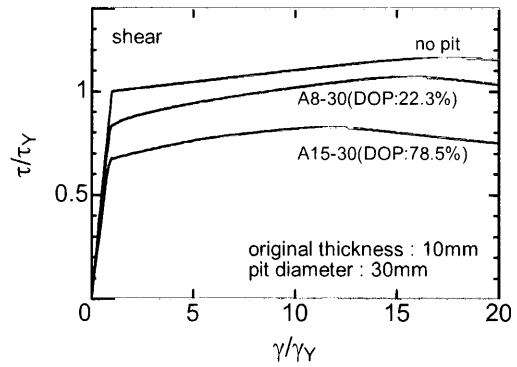


(a) Type Aj

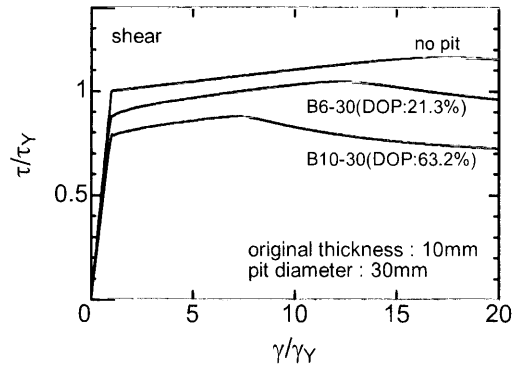


(b) Type Bk

Fig. 8 Average stress-average strain relationships (uni-axial compression,  $t_0 = 16\text{mm}$ )



(a) Type Aj



(b) Type Bk

Fig. 9 Average stress-average strain relationships (shear,  $t_0 = 10\text{mm}$ )

ピットが存在する場合の等価板厚比  $t_e/t_0$  (等価板厚  $t_e$  を元厚  $t_0$  で無次元化したもの) とピット面積率  $DOP$  の関係を示す。ここで、等価板厚  $t_e$  とは、腐食ピットが存在する場合と同等の最終強度を持つ一様衰耗の場合 (板厚一定で衰耗が進むと仮定した場合) の板厚である。加工硬化のない場合の厚板の座屈強度は降伏強度に等しいが、加工硬化があると座屈ひずみに応じて座屈強度は上昇する<sup>[25]</sup>。そのため、加工硬化を考慮した場合、一様衰耗の場合の最終強度は必ずしも板厚には比例しない。従って、まず、一様衰耗の場合について解析を実施し、残存板厚と最終強度の関係を求めた。そして、この関係と FEM 解析により得られた最終強度を用いて、腐食ピットが発生している場合の等価板厚を算定した<sup>[12]</sup>。Fig.10 から、ピット面積率及びピット直径が大きいほど等価板厚が

小さくなる傾向が明確であり、この傾向は元厚が小さいほど大きいことが分かる。

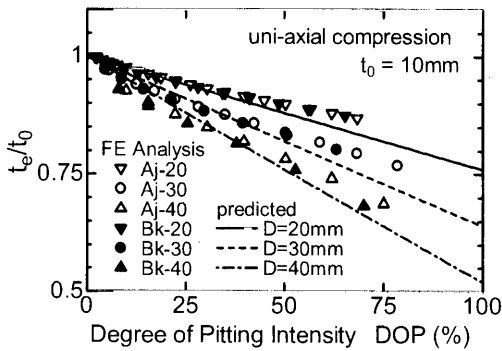
次に、純せん断を受ける場合について、Fig.11 に等価板厚比とピット面積率の関係を示す。この図から、ピット面積率及びピット直径が大きいほど等価板厚が小さくなる傾向が明確であることが分かる。

#### 4. 最終強度評価式の提案

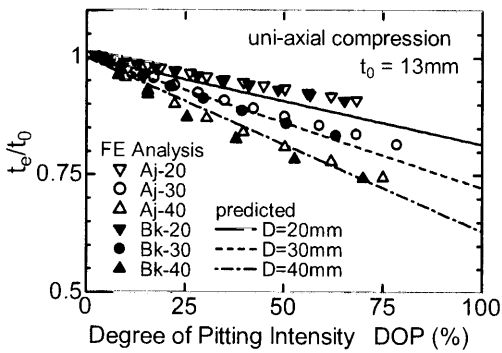
本章では、前章で説明した円錐形の腐食ピットが発生している鋼板の最終強度の解析結果をもとに、腐食ピットが発生している鋼板の最終強度評価式を提案する。

##### 4.1 従来の研究例

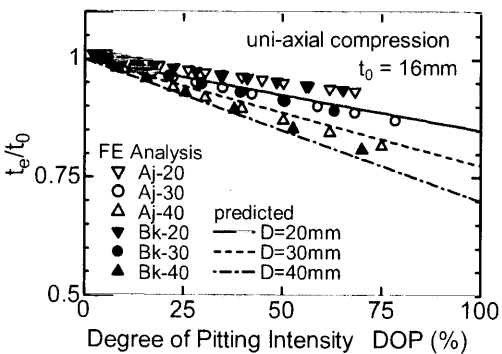
腐食ピットが発生している鋼板の最終強度評価式について検討した研究例としては、Paik らのものがある<sup>[17][18]</sup>。彼らは、円筒形の模擬腐食ピットを設けた正方形板の圧縮試験を実施する<sup>[17]</sup>とともに、FEM 解析により圧縮<sup>[17]</sup>及び純せん断最終強度<sup>[18]</sup>に及ぼす円筒形の腐食ピットの影響について検討し、それぞれの荷重条件について最終強度の評価式を検討しており、円筒形の腐食ピットが発生している鋼板の圧縮最終強度については、等価板厚評価式として式(6)を、最終強度評価式として式(7)を提案している<sup>[17]</sup>。



(a)  $t_0 = 10\text{mm}$



(b)  $t_0 = 13\text{mm}$



(c)  $t_0 = 16\text{mm}$

Fig. 10 Relationship between equivalent thickness and degree of pitting intensity under uni-axial compression

$$\frac{t_e}{t_0} = \left( \frac{A_0 - A_r}{A_0} \right)^{1.6} \quad \dots(6)$$

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{u0}} = \left( \frac{A_0 - A_r}{A_0} \right)^{0.73} \quad \dots(7)$$

ここで、 $A_0$  及び  $A_r$  は、それぞれ腐食ピットが発生する前の断面積及び最小断面における断面積の減少量であり、 $\sigma_u$  及び  $\sigma_{u0}$  は、それぞれ腐食ピットが発生している鋼板の圧縮最

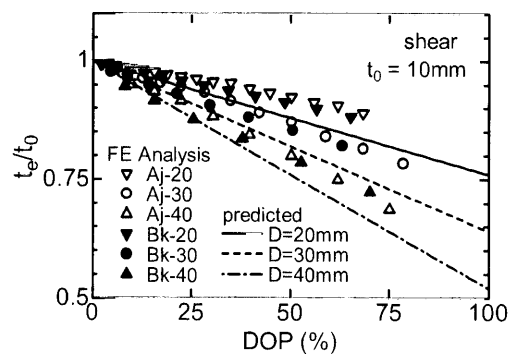


Fig. 11 Relationship between equivalent thickness and degree of pitting intensity under shear ( $t_0 = 10\text{mm}$ )

終強度及び腐食ピットが発生していない鋼板の圧縮最終強度である。また、円筒形の腐食ピットが発生している鋼板のせん断最終強度については、評価式として式(8)を提案している<sup>[18]</sup>。

$$\frac{\tau_{u0}}{\tau_{u0}} = \begin{cases} 1.0 & \text{for } DOP \leq 1 \\ 1.0 - 0.18 \ln(DOP) & \text{for } DOP > 1 \end{cases} \quad \dots(8)$$

ここで、 $\tau_u$  及び  $\tau_{u0}$  は、それぞれ腐食ピットが発生している鋼板のせん断最終強度及び腐食ピットが発生していない鋼

Table 1 Geometric and material properties of plate in FE analysis

	This study	Paik et al. <sup>[17],[18]</sup>
plate breadth <i>b</i>	450 mm	800 mm
plate aspect ratio <i>a/b</i>	1	1, 2 and 3
plate thickness <i>t</i>	10, 13 and 16 mm	10, 15 and 20 mm
pit diameter <i>D</i>	20, 30, 40 mm	40 mm
pit shape	circular cone*	cylinder**
<i>DOP</i>	0 to 78.5 %	0 to 33.2 %
Young's modulus <i>E</i>	205.8 GPa	205.8 GPa
Poisson's ratio $\nu$	0.3	0.3
yield stress $\sigma_Y$	313.6 MPa	352.8 MPa

Note:  
 \* The ratio of pit diameter to maximum pit depth is 8 to 1.  
 \*\* pit depth : 0.25t, 0.5t, 0.75t and t (through thickness)

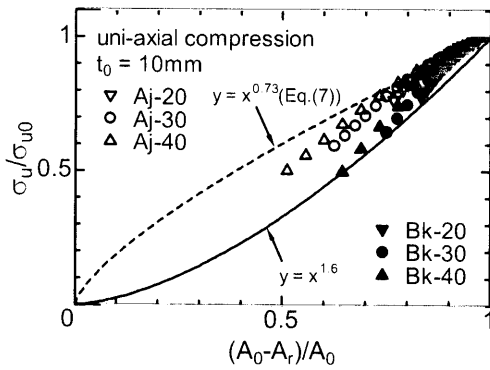


Fig. 12 Relationship between ultimate strength and  $(A_0 - A_r)/A_0$  under uni-axial compression ( $t_0 = 10\text{mm}$ )

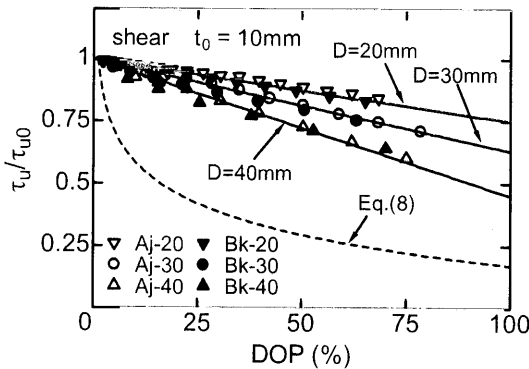


Fig. 13 Relationship between ultimate strength and degree of pitting intensity under shear ( $t_0 = 10\text{mm}$ )

板のせん断最終強度であり、ピット面積率 *DOP* の単位は% である。

本研究と Paik らの研究<sup>[17],[18]</sup>で用いられた板の寸法、ピット形状及び材料特性を比較のため Table 1 に示す。この表から、Paik らは薄板でピット形状が円筒形の場合を解析対象としているのに対して、本研究では、大型ばら積み貨物船倉内肋骨ウェブと同程度の板厚・板幅をもつ板でピット形状が円錐形の場合を解析対象としていることが分かる。

藤久保<sup>[20]</sup>が述べているように、腐食ピットの発生している部材の最終強度評価式については、対象とする腐食ピットの面積率や深さ分布の違いにより、適用範囲について吟味する必要がある。また、その適用性は、板厚や幅厚比などの部材寸法や腐食ピットの形状や大きさにも依存する可能性がある。以下、本研究で得られた結果と上記の研究例を比較した結果について簡単に述べる。

まず、前章で説明した円錐形の腐食ピットが発生している鋼板の圧縮最終強度の FEM 解析結果を最終強度と最小断面積比  $(A_0 - A_r)/A_0$  の関係で Fig.12 に示す。これは、板厚 10mm の場合の解析結果である。図中の実線は、データの下限値を式(9)により評価したものである。 $\alpha$  は定数であり、その値は図中に示した通り 1.6 である。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{u0}} = \left( \frac{A_0 - A_r}{A_0} \right)^\alpha \quad \dots(9)$$

Paik らの研究<sup>[17]</sup>では、式(7)及び図中の破線で示した通り、 $\alpha=0.73$  となっており、本研究で取り扱っている大型ばら積み貨物船の倉内肋骨ウェブと同程度の板厚・板幅をもつ板で腐食ピットの形状が円錐形の場合とは異なる傾向を示している。この原因としては、前述のように、本研究とは取り扱っている部材寸法や腐食ピットの形状及び大きさが異なることなどが考えられる。解析結果を詳しく見てみると、白抜きシンボルで示したデータ、すなわち、ピット分布を Fig.4 に示す Type Aj とした場合のデータは、式(7)で表される破線に近い値となっている。それに対して、黒塗りシンボルで示したデータ、すなわち、ピット分布を Fig.5 に示す Type Bk とした場合のデータは、式(7)で表される破線から下側に大きく外れる傾向がある。Paik らの研究<sup>[17]</sup>で扱っているピット分布は主に本研究における Type Aj に対応することを考えると、最小断面積比  $(A_0 - A_r)/A_0$  で整理した場合、圧縮最終強度は、部材寸法や腐食ピットの形状及び大きさよりも、ピット分布の差異の影響の方が大きく受けることが分かる。

次に、前章で説明した円錐形の腐食ピットが発生しているせん断最終強度の FEM 解析結果を最終強度とピット面積率の関係で Fig.13 に示す。これは、板厚 10mm の場合の解析結果である。この図から分かるように、せん断最終強度は、

ビット直径に依存し、ビット直径が同じ場合、ビット面積率の増加とともに直線的に低下する。各ビット直径における最終強度の低下傾向を直線(実線)で表したものを図中に合わせて示す。Paikらの研究<sup>[18]</sup>では、式(8)及び図中の破線で示した通り、せん断最終強度はビット面積率の増加とともに指数関数的に低下しており、本研究で取り扱っている大型ばら積み貨物船の倉内肋骨ウェブと同程度の板厚・板幅をもつ板で腐食ビットの形状が円錐形の場合とは異なる傾向を示している。これは、前述のように、本研究とは取り扱っている部材寸法や腐食ビットの形状及び大きさが異なるためと考えられる。例えば、 $DOP$ が等しく、また、円筒形と円錐形のビットの直径と深さが等しいと仮定すると、円筒形のビットが発生している板の体積欠損は円錐形のビットが発生している板の場合の3倍となる。従って、 $DOP$ をパラメータとして整理した場合、せん断最終強度はビットの形状や大きさに強く依存するものと考えられる。

以上のことから、腐食ビットが板要素の最終強度に及ぼす影響は、板厚や幅厚比などの部材寸法や腐食ビットの形状や大きさに依存することが分かる。そのため、本研究で取り扱っている大型ばら積み貨物船倉内肋骨ウェブと同程度の板厚・板幅をもつ板でビット形状が円錐形の場合について、新たな最終強度評価式を検討する必要がある。

#### 4.2 等価板厚評価式の提案

Paikらの提案式(式(6)~(8))に見られるように、最終強度を評価する方法としては、最終強度を直接評価する方法と等価板厚を評価する方法の2通りが考えられる。元厚 $t_0$ と等価板厚 $t_e$ の差 $t_0-t_e$ を考えれば、一樣衰耗の場合の許容衰耗量との直接的な比較が可能であることから、現場検査での利便性を考え、本研究では、等価板厚の評価方法について検討することとする。また、評価パラメータとしては、最小断面の断面積、平均衰耗量、ビット面積率やビット直径といったものが考えられるが、最小断面の断面積や平均衰耗量は、凹凸の激しい腐食ビットが発生している場合、現場検査での同定が困難なことから、現場検査での利便性を考えると、部材表面の観察結果から決定できるパラメータによる評価の方が望ましい。そこで、本研究では、部材表面の観察結果から決定できるビット面積率やビット直径といったパラメータを用いることとした。

Fig.10に示した解析結果をもとに、円錐形の腐食ビットが発生している鋼板の圧縮最終強度に対する等価板厚の評価式として下式を提案する。

$$\frac{t_e}{t_0} = 1.0 - B \times \frac{D}{t_0} \times DOP \quad \dots(10)$$

ここで、 $B$ は定数である。Fig.10に示した通り、圧縮最終強度に対する等価板厚 $t_e$ の低下量は、ビット面積率 $DOP$ に比例し、また、ビット直径 $D$ 及び元厚 $t_0$ に依存する傾向が明確に見られる。この結果をもとに実験データを精査した結果から、上式の $D$ 、 $t_0$ 及び $DOP$ に対する $t_e$ の依存性を表す項(右辺第2項)を決定した。Fig.10には式(10)による等価板厚の予測結果を合わせて示した。これらの図から、式(10)は円錐形の腐食ビットによる圧縮最終強度に対する等価板厚の減少傾向を精度良く表現できることが分かる。これらの予測結果は、 $B$ の値を $1.2 \times 10^{-3}$ とした場合のものである。ビット個数が片面で $n$ 個、両面で $2n$ 個存在すること、ビット深さがビット直径 $D$ の1/8であることを考えると、

$$\text{ビット1個の体積} = \frac{\pi D^3}{96} \quad \dots(11)$$

$$\text{ビット面積率 } DOP = \frac{n\pi D^2}{4ab} \times 100 \quad \dots(12)$$

$$\text{平均衰耗量 } t_{av} = \frac{n\pi D^3}{48ab} \quad \dots(13)$$

と表すことができる。式(11)~(13)を式(10)に代入し、 $B$ の値を $1.2 \times 10^{-3}$ として整理すると、式(14)が得られる。

$$t_0 - t_e = 1.44 t_{av} \quad \dots(14)$$

式(14)は、円錐形の腐食ビットが発生している鋼板の圧縮最終強度に対する等価板厚を精度良く予測するには、腐食ビットによる平均衰耗量を1.44倍して評価する必要があることを示している。

次に、圧縮最終強度に対する等価板厚の解析結果から提案した式(10)を用いて、せん断最終強度に対する等価板厚評価への適用性を検討する。式(10)による等価板厚の予測結果をFig.11に示した。この図から、式(10)は円錐形の腐食ビットによるせん断最終強度に対する等価板厚の減少傾向についても精度良く予測できることが分かる。

以上のことから、本評価式は、円錐形の腐食ビットが発生している鋼板の圧縮及びせん断最終強度に対する等価板厚を精度良く予測可能であることが分かる。

#### 5. 等価板厚評価式の適用

本章では、2軸圧縮、1軸圧縮とせん断の組合せ荷重、2軸圧縮とせん断の組合せ荷重、面内曲げ、及び、面内曲げと1軸圧縮を受ける円錐形の腐食ビットが発生している鋼板の最終強度に対応する等価板厚を前章で提案した評価式に

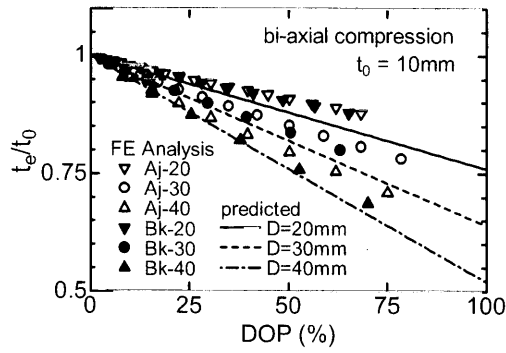
より予測し、その適用性について検討した結果について述べる。

5.1 2軸圧縮を受ける板

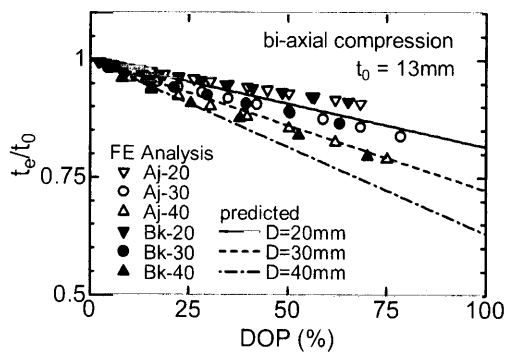
下式で示されるような2軸圧縮を受ける場合について解析を実施した。

$$\sigma_x = \sigma_y \quad \dots(15)$$

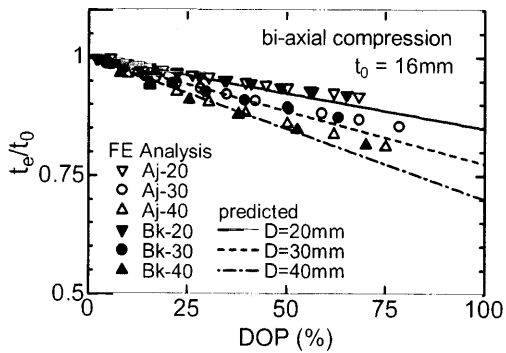
ここで、 $\sigma_x$ 及び $\sigma_y$ はFig.1に示す圧縮応力である。Fig.14(a)、(b)及び(c)にそれぞれの板厚 ( $t_0=10$ 、13及び16mm) における腐食ピットが存在する場合の等価板厚比  $t_e/t_0$  とピット面積率  $DOP$  の関係を示す。これらの図には、式(10)による予測結果を合わせてプロットしてある。これらの図から、式



(a)  $t_0 = 10\text{mm}$



(b)  $t_0 = 13\text{mm}$



(c)  $t_0 = 16\text{mm}$

Fig. 14 Relationship between equivalent thickness and degree of pitting intensity under bi-axial compression

(10)は2軸圧縮を受ける場合の最終強度に対する等価板厚を精度良く予測可能であることが分かる。

5.2 1軸圧縮とせん断の組合せ荷重を受ける板

下式で示されるような1軸圧縮とせん断の組合せ荷重を受ける場合について解析を実施した。

$$\frac{\frac{\tau_{xy}}{\tau_{xy0}^*}}{\frac{\sigma_x}{\sigma_{x0}^*} + \frac{\tau_{xy}}{\tau_{xy0}^*}} = 0.5 \quad \dots(16)$$

ここで、 $\tau_{xy}$ はFig.1に示すせん断応力であり、また、 $\sigma_{x0}^*$ 及び $\tau_{xy0}^*$ はそれぞれ、圧縮あるいはせん断のみが負荷された条件における腐食ピットが発生していない場合の最終強度である。Fig.15に板厚  $t_0=10\text{mm}$  における腐食ピットが存在する場合の等価板厚比  $t_e/t_0$  とピット面積率  $DOP$  の関係を示す。この図には、式(10)による予測結果を合わせてプロットしてある。これらの図から、式(10)は1軸圧縮とせん断の組合せ荷重を受ける場合の最終強度に対する等価板厚を精度良く予測可能であることが分かる。

5.3 2軸圧縮とせん断の組合せ荷重を受ける板

下式で示されるような2軸圧縮とせん断の組合せ荷重を

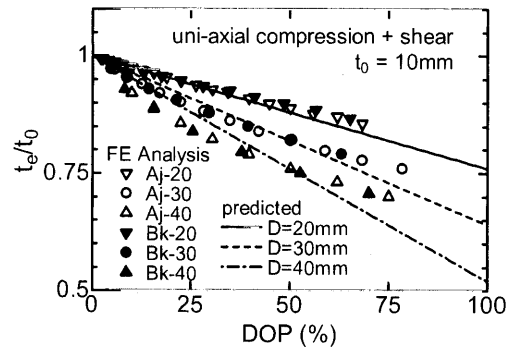


Fig. 15 Relationship between equivalent thickness and degree of pitting intensity under uni-axial compression and shear ( $t_0 = 10\text{mm}$ )

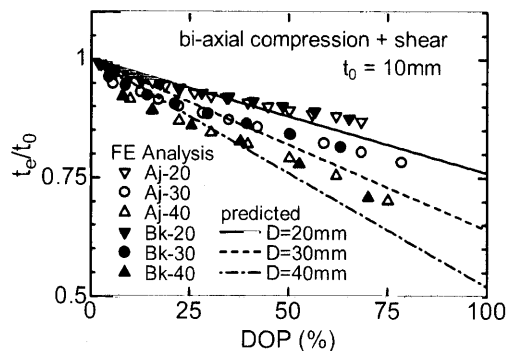


Fig. 16 Relationship between equivalent thickness and degree of pitting intensity under bi-axial compression and shear ( $t_0 = 10\text{mm}$ )



受ける場合について解析を実施した。

$$\sigma_x = \sigma_y \quad \dots(17)$$

$$\frac{\frac{\tau_{xy}}{\tau_{xyu0}^*}}{\frac{\sigma_x}{\sigma_{xu0}^{**}} + \frac{\tau_{xy}}{\tau_{xyu0}^*}} = 0.5 \quad \dots(18)$$

ここで、 $\sigma_{xu0}^{**}$ はそれぞれ、前節で説明した2軸圧縮のみが負荷された条件における腐食ピットが発生していない場合の最終強度である。Fig.16 に板厚  $t_0=10\text{mm}$  における腐食ピットが存在する場合の等価板厚比  $t_e/t_0$  とピット面積率  $DOP$  の関係を示す。この図には、式(10)による予測結果を合わせてプロットしてある。これらの図から、式(10)は2軸圧縮とせん断の組合せ荷重を受ける場合の最終強度に対する等価板厚を精度良く予測可能であることが分かる。

5.4 面内曲げを受ける板

面内曲げを受ける場合について、Fig.17 に板厚  $t_0=10\text{mm}$  における腐食ピットが存在する場合の等価板厚比  $t_e/t_0$  とピット面積率  $DOP$  の関係を示す。本解析は既報<sup>[13]</sup>で報告したものである。この図には、式(10)による予測結果を合わせてプロットしてある。これらの図から、式(10)は面内曲げを受ける場合の最終強度に対する等価板厚を精度良く予測可能であることが分かる。

5.5 面内曲げと圧縮の組合せ荷重を受ける板

面内曲げと圧縮の組合せ荷重を受ける場合について、Fig.18 に板厚  $t_0=10\text{mm}$  における腐食ピットが存在する場合の等価板厚比  $t_e/t_0$  とピット面積率  $DOP$  の関係を示す。本解析結果は既報<sup>[13]</sup>で報告したものであり、面内曲げと圧縮の組合せを表すパラメータ $\varphi$ を式(19)のように定義した場合に、 $\varphi=1.0$ とした場合のものである。

$$\varphi = \frac{2M/M_Y}{M/M_Y + P/P_Y} \quad \dots(19)$$

$$M_Y = \sigma_y b^2 t_0 / 6 \quad \dots(20)$$

$$P_Y = \sigma_y b t_0 \quad \dots(21)$$

ここで、 $M$ 及び $M_Y$ はそれぞれ曲げモーメント及び降伏曲げモーメントであり、 $P$ 及び $P_Y$ はそれぞれ圧縮荷重及び降伏圧縮荷重である。Fig.18には、式(10)による予測結果を合わせてプロットしてある。これらの図から、式(10)は面内曲げと圧縮の組合せ荷重を受ける場合の最終強度に対する等価板厚を精度良く予測可能であることが分かる。

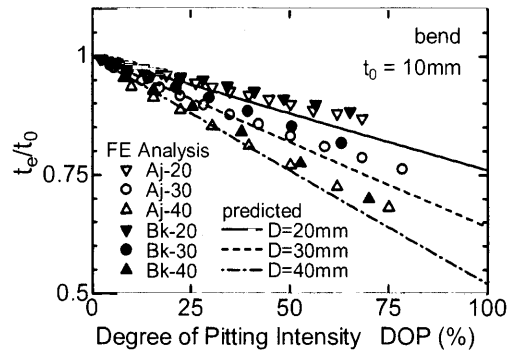


Fig. 17 Relationship between equivalent thickness and degree of pitting intensity under in-plane bend ( $t_0 = 10\text{mm}$ )

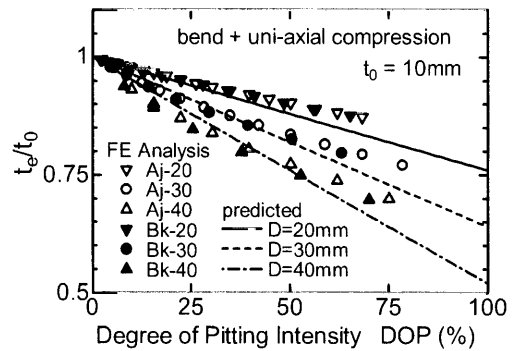


Fig. 18 Relationship between equivalent thickness and degree of pitting intensity under in-plane bend and compression ( $t_0 = 10\text{mm}$ )

以上のことより、本報で検討した腐食ピット分布 (均等分布、Fig.4 及び Fig.5 参照) の場合、第4章で提案した圧縮最終強度に対する等価板厚評価式は、2軸圧縮、1軸圧縮とせん断の組合せ荷重、2軸圧縮とせん断の組合せ荷重、面内曲げ、及び、面内曲げと1軸圧縮の各荷重条件下における最終強度に対する等価板厚評価に対しても適用可能であることが分かった。

6. 結 言

本研究は、石炭と鉄鉱石を運搬するばら積み貨物船の円錐形の腐食ピットが発生している構造部材の局部強度の評価法確立を目的として実施している。本報では、大型ばら積み貨物船の倉内肋骨ウェブと同程度の板厚・板幅をもつ板を対象として、円錐形の腐食ピットが発生している場合の圧縮最終強度を FEM 解析により求めた結果に基づき、式(10)で表される最終強度評価式を提案した。本評価式は、検査の際の利便性を考慮し、円錐形の腐食ピットが発生している鋼板の最終強度に対応する等価板厚を式(10)のように、ピット面積率、ピット直径及び部材の腐食前の板厚の関数で表したものである。

$$\frac{t_e}{t_0} = 1.0 - B \times \frac{D}{t_0} \times DOP \quad \dots(10)$$

本評価式により、円錐形の腐食ピットが均等に分布している鋼板が1軸圧縮、純せん断、2軸圧縮、1軸圧縮とせん断の組合せ荷重、2軸圧縮とせん断の組合せ荷重、面内曲げ、及び、面内曲げと圧縮の組合せ荷重を受ける場合の最終強度に対する等価板厚を良い精度で予測可能である。

本報では、基本的な場合として、直径一定のピットが規則正しく分布する場合について検討した。今後、実際の腐食ピットの発生状況と残存強度の関係を考慮した合理的な代替基準検討のための基礎データとするため、著者らの一人が開発した腐食の確率モデル<sup>[27]</sup>により作成した腐食ピットのランダム分布を用いた解析を実施し、異なる直径のピットがランダムに分布する場合に、本評価式中のピット直径  $D$  の値をどのようにとればよいかを検討する予定である。緒言で述べた通り、倉内肋骨ウェブの強度に及ぼす腐食ピットの影響の評価方法を確立することが急務であることから、本論文では、倉内肋骨ウェブと同程度の板厚、板幅をもつ部材を対象とした。これとは異なる寸法を持つ部材に対する本評価式の適用性については、本論文のようなシリーズ計算を実施することにより検討可能であるが、その優先順位は低いと考えている。

### 参考文献

- 1) T. Nakai, H. Matsushita, N. Yamamoto and H. Arai : Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers (1st report), *Marine Structures*, 17(2004), pp.403-432
- 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) 中井達郎, 松下久雄, 山本規雄: 腐食ピットが発生している船体構造部材の引張強度特性, 日本機械学会関東支部第11期総会講演会講演論文集(2005), pp.385-386
- 5) T. Nakai, H. Matsushita and N. Yamamoto : Pitting corrosion and its influence on local strength of hull structural members, *Proceedings of 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME, OMAE2005-67025 (2005)
- 6) T. Nakai, H. Matsushita and N. 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*, 17(2004), pp.612-641
- 7) T. Nakai, H. Matsushita and N. Yamamoto : Effect of pitting corrosion on strength of web plates subjected to patch loading, *Thin-Walled Structures*, accepted for publication
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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.161-168
- 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
- 12) 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
- 13) T. Nakai, H. Matsushita and N. 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*, accepted for publication
- 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8報) -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-, 日本船舶海洋工学会論文集, 掲載予定
- 15) IACS, Unified Requirements S-31, Rev.2, 2004
- 16) J. C. Daidola, J. Parente, I. R. Orisamololu and K. T. Ma : Residual strength assessment of pitted plate panels, *Ship Structure Committee Report SSC-394* (1997)
- 17) J. K. Paik, J. M. Lee and M. J. Ko : Ultimate compressive strength of plate elements with pit corrosion wastage, *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 217,

- M4(2004), pp.185-200
- 18) J. K. Paik, J. M. Lee and M. J. Ko : Ultimate shear strength of plate elements with pit corrosion wastage, *Thin-Walled Structures*, 42 (2004), pp.1161-1176
- 19) H. K. K. Amlashi and T. Moan : On the strength assessment of pitted stiffened plates under biaxial compression loading, *Proceedings of 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME, OMAE2005-67232 (2005)
- 20) 角洋一 (研究代表者), 腐食鋼板の表面形状と応力・強度・変形能の関係に関する研究 (研究課題番号 14350519), 科学研究費補助金 (基盤研究(B)(2)) 研究成果報告書, (2005)
- 21) 検査技術部: 高齢大型ばら積貨物船に関する調査—高齢大型ばら積貨物船調査報告から—, *日本海事協会会誌*, No.219(1992), pp.79-117
- 22) 奈良敬, 出口恭司, 福本啓士: 純せん断応力を受ける鋼板の極限強度特性に関する研究, *土木学会論文集*, 第 392 号/1-9(1988), pp.265-271
- 23) 天野麻衣, 渡辺智彦, 宇佐美勉, 葛漢彬: 繰返しせん断力を受ける鋼板の強度と変形能, 第 3 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, (2000), pp.57-62
- 24) 葛西昭, 渡辺智彦, 宇佐美勉, P. Chusilp: せん断力を受ける無補剛箱型断面部材の強度と変形能, *土木学会論文集*, 第 702 号/1-59(2002), pp.129-140
- 25) 矢尾哲也, 宮川佳夫, 藤久保昌彦: 加工硬化が板の座屈・塑性崩壊強度に及ぼす影響に関する研究, *西部造船会々報*, 第 82 号(1991), pp.191-198
- 26) 藤久保昌彦: 最終強度に関する研究動向, *TECHNO MARINE 日本造船学会誌*, 第 882 号(2004), pp.743-746
- 27) N. Yamamoto and K. Ikegami : A Study on the Degradation of Coating and Corrosion of Ship's Hull Based on the Probabilistic Approach, *Transactions of the ASME, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 120(1998), pp.121-128
-