

経年劣化構造のモデル化と局部強度変化

海上安全研究領域 構造安全性研究 G * 田中 義照

〃 〃 佐久間正明

輸送高度化研究領域 インテリジェント加工法研究 G 安藤 孝弘

1. まえがき

ダブルハルトンカーが導入され始めてから数年が経過し、ダブルハルトンカー特有の腐食衰耗、疲労損傷等の発生が憂慮される時期となってきた。ダブルハルトンカーの経年劣化による腐食衰耗としては、板材の全面腐食、孔食、及びグルーピング腐食等が一般的である。(財)日本海事協会は、船体の主要構造部材の腐食衰耗限度について、船体が縦強度上の衰耗限度に達していないことを条件(例えば、1987年版以降の適用規則では、乾舷用長さ130m以上の船舶に対して、船体横断面係数が適用規則における要求値の90%以上)に、許容衰耗量を部材ごとに元厚に対して規定している。しかしながら、これらの規定値は、部材が均一に衰耗していることを仮定しており、グルーピング腐食あるいは孔食等の局部的な腐食に対しては統一された基準がなく、検査員の判断に委ねられている。その結果、船体構造の縦強度(上甲板あるいは内底板の座屈・最終強度や船体中央断面の断面係数)の経年変化については、腐食衰耗データベース等から得られる平均衰耗率を用いて、板の一樣減厚を仮定して評価され、孔食の影響については評価の対象外になる場合が多い。したがって、経年ダブルハルトンカーの強度変化をより厳密に評価するためには、これらの腐食による表面不規則凹凸が引き起こす局部的な応力集中や、それに伴う座屈、最終強度等に及ぼす影響も確認しておく必要がある。

そこで、本研究では、経年ダブルハルトンカーの全面腐食及び孔食による局部強度変化について、より精度の高い強度解析を行うことを目的として、板表面の不規則凹凸をFEMメッシュ上に適切にモデル化する手法を提案する。また、本手法を用いて周辺単純支持矩形板のFEM圧縮強度計算を行い、全

面腐食による表面凹凸、並びに孔食の大きさ及び個数が矩形板の圧縮強度に及ぼす影響を検討した。

2. 経年劣化構造のモデル化

全面腐食は均一腐食とも呼ばれ、板表面がほぼ一様に衰耗する腐食であるが、微視的には非常に細かい不規則凹凸が存在する。この表面凹凸を正確に計測することは、技術的には可能であるが、検査ステージにおける板厚計測を考えると無意味である。しかしながら、板表面の不規則凹凸が強度に及ぼす影響を検討することは、経年劣化構造の強度変化をより精度良く把握するためには意味がある。

一方、孔食は板表面に不規則に発生する球面状あるいはすり鉢状の孔であり、大まかな位置及び大きさの情報がピットマップに記録される場合が多い。

これら全面腐食や孔食の形状を忠実に有限要素モデルに再現するためには、1/100 ~ 1/10 mmサイズのsolid要素が必要となり、甲板パネル1枚であっても要素数が膨大となり現実的でない。したがって、板骨構造である船体構造において一般的に使用されるshell要素により、全面腐食及び孔食をモデル化する必要がある。

そこで、本研究では全面腐食及び孔食のモデル化に以下の方法を試みた。まず、一般に座屈、最終強度計算に供される甲板パネル等のshell要素1メッシュサイズ程度の領域を対象に、solid要素により全面腐食あるいは孔食を再現する。このモデルによりFEM強度計算を実施し、全面腐食の場合は平均板厚を、また孔食の場合は元厚を基準とした見かけの応力-ひずみ関係を算出する。得られた応力-ひずみ関係をshell要素によりモデル化された矩形板に適用して、圧縮強度計算を実施する。

2.1 全面腐食

2.1.1 全面腐食のモデル化方法

腐食速度（年平均衰耗率）と経過年数との積で求められる平均衰耗量を一様な板厚減少として、経年ダブルハルタンカーの全体強度あるいは局部構造の座屈、最終強度を検討することは比較的簡便である。しかしながら、全面腐食（均一腐食）といっても、表面が平滑であるわけではなく、不規則な凹凸が存在する。したがって、板厚の平均値が等しい部材であっても、表面が平滑面であるか凹凸面であるかによって強度に違いがあると考えられるため、腐食平面の不規則凹凸のモデル化が必要となる。

全面腐食平面のモデル化手法に関する研究については、角ら¹⁾の第一摂動法による表面凹凸に基づく表面応力計算法、山本²⁾の確率モデルに基づく腐食平面のモデル化手法等の研究がある。また、Mateusら³⁾は、板表面の凹凸を無限個の座屈波形の和で表現し、座屈、最終強度計算を行っている。

本研究では、図-1 に示すように、全面腐食を均一な板厚衰耗と板表面の不規則凹凸の和と考え、不規則凹凸は微小な孔食で表現することによりモデル化を行う。すなわち、ナホトカ号のデッキプレートのように、全面腐食が十分に進行した状態を表面衰耗飽和状態と仮定し（表面衰耗飽和状態に達するま

での時間を T_0 とする）、次式に示すように、板厚衰耗量を位置 (x,y) の関数とした表面凹凸量 $C(x,y)$ と経過時間 t に依存する一様衰耗量 $C_0(t)$ との和で表されるものと仮定する。

$$\begin{aligned}\text{腐食衰耗量} &= (t/T_0) \cdot C(x,y) \quad ; t < T_0 \\ &= C_0(t) + C(x,y) \quad ; t \geq T_0\end{aligned}$$

つまり、表面衰耗が飽和状態になるまでは、不規則凹凸量は飽和状態の表面凹凸量 $C(x,y)$ の (t/T_0) 倍であるとし（具体的には表面凹凸量の平均値及び標準偏差が (t/T_0) 倍）、表面衰耗が飽和状態に達した後は表面凹凸量 $C(x,y)$ が一定で、一様衰耗量 $C_0(t)$ のみが増加するものとする。

上記の表面凹凸量 $C(x,y)$ は、辻らが提案している Filtered Poisson Process^{4,5)} によるモデル化手法を参照し、板厚計測結果等目的とする凹凸量の平均値及び標準偏差を満足するように、微小孔食を不規則に発生させて生成する（微小孔食の密度、位置及び深さをパラメータとする）。

2.1.2 全面腐食モデル化の例

全面腐食モデル化の例として、ナホトカ号（船齢26年）から採取した腐食材の板厚計測値を用い、モデル化の結果を3章で述べる全面腐食による表面凹凸が矩形板の最終強度に及ぼす影響の検討に適用する。ナホトカ号のデッキプレートの平均衰耗量は、7.19～8.65mm、標準偏差は 0.573～0.715mm で、ほぼ正規分布に従うことが報告されている（5mm 間隔の計測結果による）⁶⁾。ここでは、経過年数 $t = 26$ 年における平均衰耗量を 8.0mm、表面凹凸量の標準偏差を $\sigma = 0.60$ mm と仮定する。表面凹凸量の頻度分布の広がりを $\pm 3\sigma$ 以内に限定すると（図-2 参照）、一様衰耗量 $C_0(t) = 8.0 - 3\sigma = 6.2$ mm となり、表面凹凸による板厚衰耗のばらつきの範囲は、6.2～9.8 mm 程度となる。

図-2 に示した衰耗量の頻度分布を満足する表面凹凸量 $C(x,y)$ を作成するためには、板表面上に半球面状の微小孔食を不規則に発生させ、その板の格子点上で板厚を抽出し、設定した表面凹凸量の頻度分布が得られるまで繰り返す。

初めに、表面凹凸量の平均値 μ 及び標準偏差 σ がそれぞれ 1.8mm 及び 0.60mm であることから、表

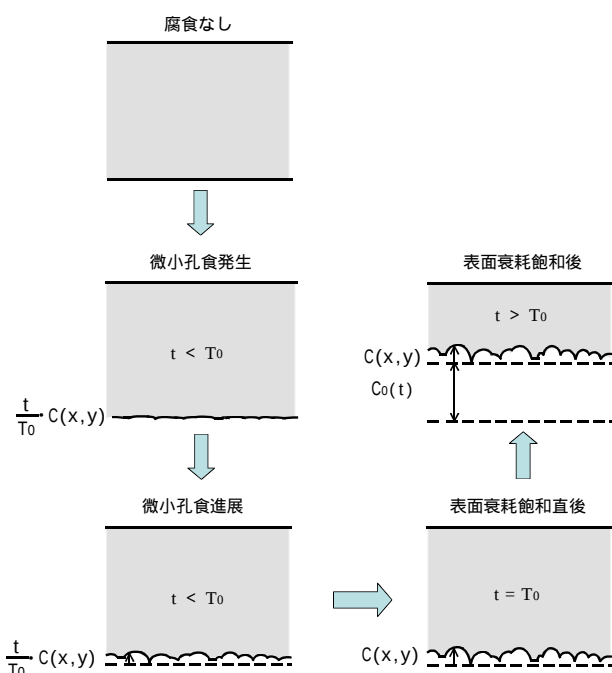


図-1 全面腐食のモデル化方法

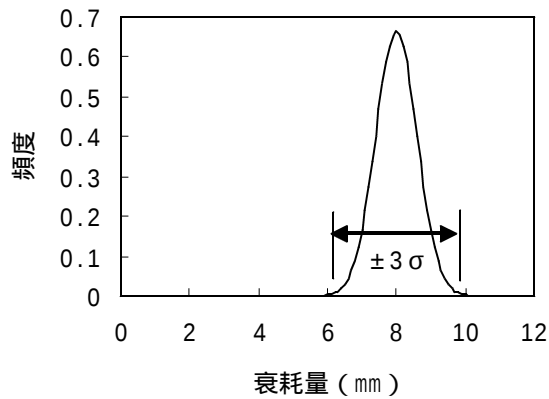


図-2 想定した表面凹凸による衰耗の頻度分布

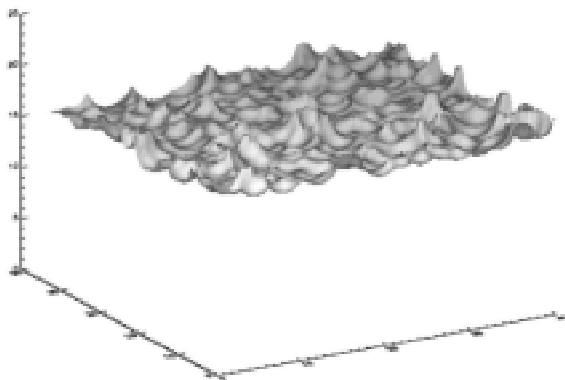


図-3 モデル化した全面腐食平面の鳥瞰図

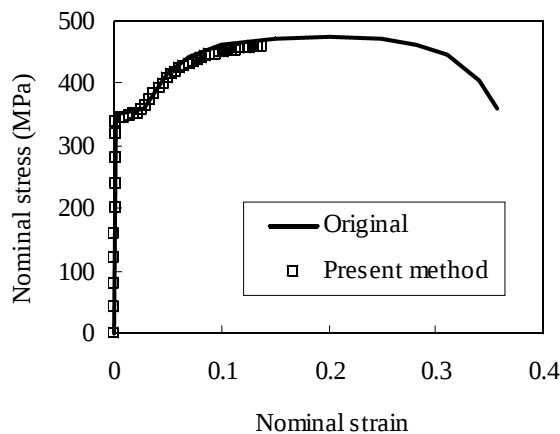


図-4 全面腐食状態の見かけの
応力 - ひずみ関係

面凹凸の基になる微小孔食の深さの平均値 μ を固定し、標準偏差 σ 及び孔食密度 v をパラメータとして正規分布に従う微小孔食深さ h を不規則に発生させた。その結果、 $v = 0.39$ 個/mm²、 $\sigma = 0.51$ mm のとき、表面凹凸量の頻度分布が図-2 と一致した。こ

のときの表面腐食状態の鳥瞰図を図-3 に示す。

次に、得られた表面凹凸形状を solid 要素を用いてモデル化し、FEM 強度計算を実施して見かけの応力 - ひずみ関係を求める。例えば、3章で扱うダブルハル VLCC の甲板パネル（元厚 19mm）を対象に、ナホトカ号デッキプレートを想定した図-2 に示す表面凹凸量を設定した場合の見かけの応力 - ひずみ関係を、元の材料と比較して図-4 に示す。計算結果によると、全面腐食材の見かけのヤング率及び降伏応力は、それぞれ 8.6%及び 4.0%低下した。

2.2 孔食

2.2.1 孔食のモデル化方法

3章で実施する矩形板（長さ×幅×板厚 = 5,000 × 860 × 18.5mm）の FEM 圧縮強度計算では shell 要素を用いるが、1 要素の大きさは、長さ×幅 = 40 × 43mm である。本研究では、孔食が 1 つの要素中央に 1 つだけ存在すると仮定して、MSC.Marc の solid 要素（#7）を用いた圧縮計算を行い、平均圧縮ひずみと平均圧縮応力（孔食による板厚減少を無視した見かけの応力）の関係を導く。この関係を shell 要素により作成した矩形板のメッシュのうち、孔食を設定する要素に適用する。

2.2.2 孔食モデル化の例

孔食の形状は半球面、すなわち直径 d と深さ h の

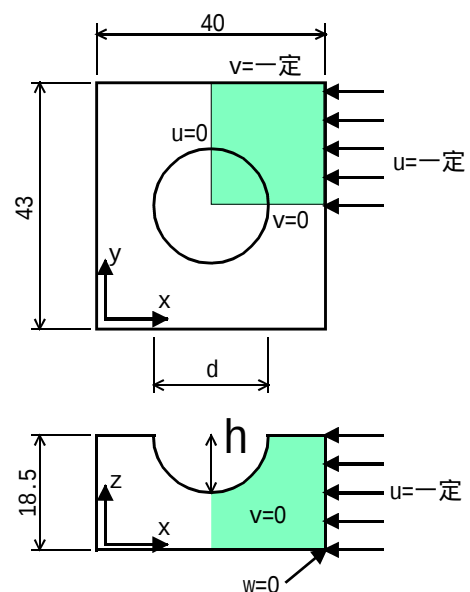


図-5 計算モデルの境界条件

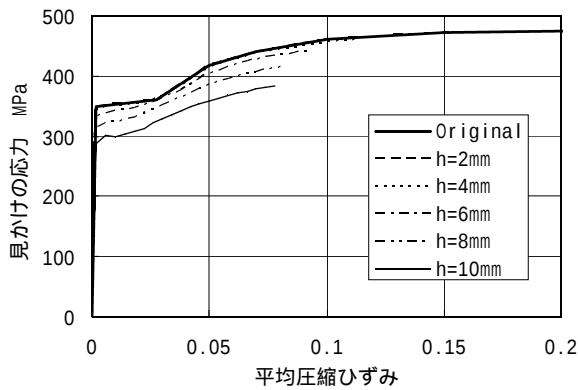


図-6 孔食を有する要素の見かけの
応力 - ひずみ関係

比 $d/h=2$ のみとし、深さ h を 2、4、6、8、10mm の 5 通りとする。FEM 計算に用いたモデルの境界条件を図-5 に示す（計算領域は網掛け部分）。

FEM 計算の結果得られた孔食を有する要素の見かけの応力 - ひずみ関係を元の応力 - ひずみ関係と比較して図-6 に示す。孔食の深さが 4mm 以下ではほとんど影響は見られないが、6mm 以上になると等しい圧縮ひずみに対する応力の低下が著しい。

3．局部腐食が板の圧縮強度に及ぼす影響

縦強度部材（上甲板あるいは内底板）が腐食衰耗した場合の圧縮強度変化について、全面腐食あるいは孔食による表面の不規則凹凸が、矩形板の圧縮強度に及ぼす影響を 2 章で述べたモデル化方法を用いて検討する。

3.1 計算対象

3.1.1 計算対象矩形板の寸法及び材料特性

全面腐食及び孔食が発生する縦強度部材は、それぞれ、主に上甲板及び内底板と考えられる。そこで、あるダブルハル VLCC の上甲板（板厚 19mm）及び内底板（板厚 18.5mm）を計算対象とした。本研究では、防撓材の腐食は考慮しないものとし、パネル部分を長さ $a \times$ 幅 $b = 5,000 \times 860$ mm（アスペクト比 $\alpha = 5.81$ 、細長比 $\beta = 1.87$ （板厚 19mm、ヤング率 $E = 204.3$ GPa、降伏応力 $\sigma_y = 350$ MPa の場合））の周辺単純支持矩形板と仮定した。

計算対象材は、500MPa 級高張力鋼板（日本海事協会規格 KA32）とした。計算に用いたある鋼板の

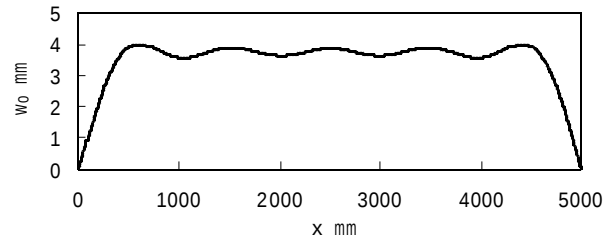


図-7 設定した初期撓み形状

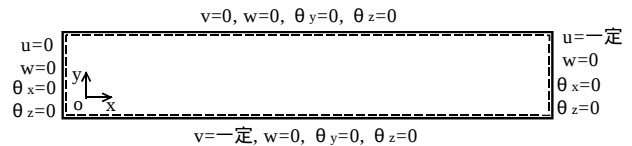


図-8 周辺単純支持矩形板の境界条件

応力 - ひずみ関係は図-6 中に Original で示されたものである。

3.1.2 初期不整量の設定

計算対象矩形板に設定した初期撓み形状は、真能ら⁷⁾が計測したシングルハルタンカーの甲板パネル（ $a \times b \times t = 4,350 \times 767 \times 16.0$ mm）の計測結果に準じ、長さ方向に 1、3、5、7、9 半波、幅方向に 1 半波の正弦波を重ね合わせたものを仮定した。初期撓みの最大値 $w_{\max}$ を JSQS の強力甲板中央部の初期撓み標準範囲 4mm に設定し、各波形成分の振幅 w_{01} 、 w_{03} 、・・・を、

$$\begin{aligned} w_{01} &= 4.732\text{mm}, & w_{03} &= 1.4878\text{mm}, \\ w_{05} &= 0.7917\text{mm}, & w_{07} &= 0.4681\text{mm}, \\ w_{09} &= 0.2779\text{mm} \end{aligned}$$

とした。設定した初期撓み形状を図-7 に示す。なお、残留応力の影響は考慮しない。

3.1.3 計算モデル及び計算条件

対象矩形板の圧縮強度計算は、汎用有限要素法プログラム MSC.Marc Ver.2000 を用い、弾塑性大撓み計算を行った。使用要素は bi-linear thick shell element（#75）である。周辺単純支持矩形板 1 枚を対象とし、長さ方向に 125 分割、幅方向に 20 分割した。1 要素の大きさは 40×43 mm である。境界条件を図-8 に示す。 $x=0$ の短辺の x 方向変位 u を拘束し、 $x=a$ の短辺で一様な圧縮強制変位を与えた。 $y=0$ 及び $y=b$ の長辺は直線を保つものと仮定した。

3.1.4 対象矩形板の圧縮強度

腐食のない場合、計算対象パネルは細長比 $\beta = 1.87$ の比較的厚板であり、変形挙動は初期撓み形状の影響を強く受ける。この場合、図-7 に示したように、最大曲率の位置がパネルの両短辺から 600mm であったため、最大曲率を含む半波が圧縮強制変位の増大とともに最も成長する。最大平均圧縮応力 σ_u は 309MPa で、 $\sigma_u / \sigma_Y = 0.883$ であった。座屈応力計算値 σ_{cr} は、塑性座屈を示す 361 MPa である。

3.2 全面腐食による表面凹凸が矩形板の圧縮強度に及ぼす影響

2.1 の全面腐食のモデル化に従い、経年劣化後の上甲板を想定した矩形板の FEM 計算を行い、全面腐食による表面凹凸が矩形板の圧縮強度に及ぼす影響を検討する。今回実施した計算は表-1 に示す 6 ケースである。Case-1、3 及び 5 では、板表面の不

表-1 全面腐食を有する矩形板の計算条件

記号	経過年数 t(年)	モデル化 の方法	一様 衰耗量 (mm)	表面凹凸量		
				$C_0(t)$ (mm)	$\mu_{C(x,y)}$ (mm)	$\sigma_{C(x,y)}$ (mm)
Case-1	$t=T_0$	一様衰耗	1.8	-	-	-
Case-2		表面凹凸	-	0	1.8	0.6
Case-3	$T_0 < t < 26$	一様衰耗	4.9	-	-	-
Case-4		表面凹凸	-	3.1	1.8	0.6
Case-5	$t=26$	一様衰耗	8.0	-	-	-
Case-6		表面凹凸	-	6.2	1.8	0.6

表-2 全面腐食を有する矩形板の見かけの機械的性質

記号	ヤング率 (GPa)	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)
Original	204.3	350.0	473.9
Case-2	191.0	343.9	469.2
Case-4	189.7	341.5	465.1
Case-6	186.7	336.0	459.1

表-3 全面腐食を有する矩形板の最終強度

記号	σ_u (MPa)
Case-1	286.5
Case-2	277.8
Case-3	233.4
Case-4	225.3
Case-5	197.1
Case-6	188.1

規則凹凸を均した一様衰耗を仮定している。また、Case-2、4 及び 6 では、平均衰耗量は、それぞれ Case-1、3 及び 5 に等しいが、不規則凹凸をモデル化した場合である。

まず、Case-2、4 及び 6 の場合について、2.1.2 で述べた手法に基づき、solid 要素を用いた圧縮強度計算を行い、見かけの応力 - ひずみ関係を求めた。結果を表-2 に示すが、ナホトカ号デッキプレートの板厚計測結果（経過年数 26 年）を想定した case-6 の場合で、見かけのヤング率、降伏応力及び引張強度の低下率は、それぞれ 8.6%、4.0%及び 3.1%であった。表-2 の見かけの機械的性質を用いて shell 要素により圧縮強度計算を実施した結果を表-3 に示す。全面腐食により板厚の平均値が変わっても（細長比 β の変化に伴い圧壊挙動が変わっても）、表面凹凸の影響による強度低下は、3.0～4.6%程度であった。

3.3 孔食が矩形板の圧縮強度に及ぼす影響

2.2 の孔食のモデル化方法に従い、孔食を半球形状と仮定し、孔食の深さ h 及び孔食数 n をパラメータとしてシリーズ計算を行った。ただし、1 枚の矩形板上に複数の深さの孔食は発生しないものと仮定した。また、孔食は必ず要素中央に 1 個発生するものとし、見かけの応力 - ひずみ関係として図-6 を用いた。計算結果を図-9 に示す。5,000×860×18.5mm の板に深さ 6mm の孔食が 1,000 個（0.57 % の重量減少）発生しても、強度低下は 2%程度であ

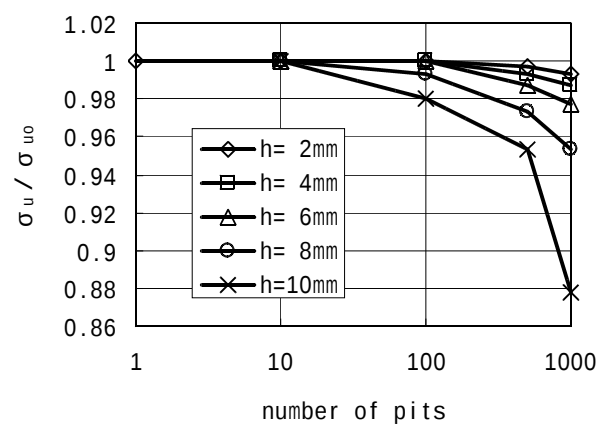


図-9 矩形板 1 枚当たりの孔食数と最終強度低下率の関係

り、各パネルの初期撓みや残留応力の違いによるばらつきの範囲内と考えられる。しかしながら、孔食深さが 8mm、10mm と大きくなるに従い、強度低下も顕著になり、今回対象とした矩形板では、最大で 12%低下した。孔食の補修対象は深さ 7mm 以上とされているが、本計算結果はこの閾値の妥当性を示しているといえる。

4. あとがき

本研究では、経年ダブルハルタンカーの局部強度変化を明らかにするため、全面腐食及び孔食を対象として、それらのモデル化手法を提案するとともに、表面凹凸が矩形板の圧縮強度に及ぼす影響を検討した。以下に得られた結論を示す。

- 1) 全面腐食に対して表面衰耗飽和状態の考え方を導入し、全面腐食による衰耗を一樣衰耗と不規則凹凸の和とした。この不規則凹凸を solid 要素を用いてモデル化し、FEM 強度計算を行うことにより、全面腐食材の見かけの応力 - ひずみ関係を導く方法を示した。
- 2) 孔食を有する要素に対して、あらかじめ solid 要素による強度計算を実施し、孔食材の見かけの応力 - ひずみ関係を導く方法を示した。その結果、深さが 4mm 以下の孔食は、応力 - ひずみ関係にほとんど影響を与えないことが明らかになった。
- 3) VLCC ダブルハルタンカーの上甲板を対象に、ナホトカ号（船齢 26 年）のデッキプレートの板厚計測結果から得られた全面腐食状態を設定し、単純支持矩形板の圧縮強度解析を実施した。その結果、表面凹凸をモデル化した場合の最終強度の低下量は、一樣衰耗の場合の 4.6%程度であった。
- 4) 同様に内底板を対象に孔食が矩形板の最終強度に及ぼす影響を検討した結果、深さ 6 mm の孔食が 1 枚のパネルに 1,000 個あっても、最終強度低下は高々 2%であるが、深さ 10mm の孔食が 1,000 個存在すると、最終強度は約 12%低下することが確認された。

以上のように、全面腐食による板表面の不規則凹凸、及び現実的な大きさと数量の孔食が矩形板の圧縮強度に及ぼす影響は、それほど顕著ではなかった。しかしながら、今回の試計算では防撓材

及びその隅肉溶接部の腐食の影響は考慮されていないため、これらの影響評価を行うとともに、グルーピング腐食のモデル化手法及びそれが防撓板の圧縮強度に及ぼす影響を検討する予定である。

なお、本研究は、国土交通省海事局安全基準課からの受託研究「ダブルハルタンカー構造の経年劣化に関する研究」の一部として実施された。研究の実施に当たり、多大なご助言をいただきました横浜国立大学角洋一教授をはじめとするダブルハルタンカー検討委員会の先生方、並びに油流出防止構造プロジェクトチームの川野始 PT 長と平方勝主任研究員に御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Yoichi Sumi, Ahmad Rahbar-Ranji: Stress Analysis of an undulated plate by the Combined First Order Perturbation and Alternating Method, Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol.189, pp.225-230, (2001) .
- 2) 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、No.245、pp.29-49、(1998) .
- 3) A. F. Mateus and J. A. Witz: On the Post-buckling of Corroded Steel Plates Used in Marine Structures, Transactions RINA, pp.165-183, (1997) .
- 4) 辻恒平、久田俊明、北川英夫：腐食平面の三次元的不規則性のスペクトル解析による評価 (Filtered Poisson process による腐食形態のモデル化と解析方法の構成) 日本機械学会論文集 (A 編) 49 巻、439 号、pp.331-340、(1983) .
- 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モデル化とその評価、日本機械学会論文集 (A 編) 50 巻、453 号、pp.1035-1041、(1984) .
- 6) 日本造船研究協会第 74 基準研究部会：老朽船対策の推進に関する調査研究、平成 12 年度報告書、(2001) .
- 7) 真能創、河辺寛、正岡孝治、伊藤隆章：甲板パネルの圧壊強度に関する統計的性質について、関西造船協会誌、第 214 号、pp.145-156、(1990) .