

腐食データベースによるDHタンカーの全体強度の経年劣化予測

海上安全研究領域 構造安全性研究グループ *岡 正義

油流出防止構造プロジェクトチーム

(財)日本海事協会

平方 勝、川野 始

山本 規雄

1. まえがき

1992年のMARPOL73/78議定書改正⁽¹⁾により、新造タンカーの2重船殻(ダブルハル:DH)化が義務化され現存シングルハル(SH)タンカーのフェーズアウトが求められたことで、DHタンカーの比率は加速的に増加している。DH構造は、衝突や座礁による油流出を防止する構造として有効で、ここ数年の油流出量の低減に繋がったことで海洋環境の保全に寄与している。しかし、ナホトカ号のような経年劣化に伴う船体強度の低下に起因した折損事故⁽²⁾を考えたとき、近い将来、経年化したDHタンカーにも同様の事故が発生することが考えられ、また、老朽化により折損し沈没に至る事故での大規模油流出に対して、DH構造はSH構造に比べて必ずしも有効なものではない。現在、条約改正当時に建造されたDHタンカーの船齢は10年を超えており、経年化したDHタンカーの強度評価や船体検査の確立が求められている。

そのような社会情勢を背景に、海上技術安全研究所では、国土交通省海事局からの受託研究プロジェクト「タンカーによる大規模油汚染の防止対策に関する研究」(平成13年度～16年度)の一環として、「ダブルハルタンカーの構造の経年劣化に関する研究」が実施されている⁽³⁾。

本研究では、プロジェクトの研究課題である経年DHタンカーの折損事故や重大損傷の未然防止を目的として、日本海事協会(NK)の過去の研究^{(4),(5)}で、部材の板厚計測データを整理し作成された「腐食データベース(Corrosion Database)」を活用して、DHタンカーの構造の経年劣化に伴う全体的な強度(縦強度)の経年特性を定量的に評価し、さらに経年船の強度推定手法について検討した。

2. 評価対象船

2.1 主要目

評価の対象とした個船の主要目を表 - 1 に示す。同程度のサイズの DH/VLCC と SH/VLCC を比較・評価の対象とした。

表 - 1 評価対象船の主要目

	DH VLCC	SH VLCC
L(m)	320	322
B(m)	60	58
D(m)	28.6	28.8
d(m)	18.8	19.3
DWT	258000	258000

2.2 船体構造

図 - 1 に DH タンカーと SH タンカーの中央断面図を示す。DH タンカーは中央断面の構造上、以下のような特徴を有している。

SH に比べ、構造部材の数が多い。

SH に比べ、縦曲げ中立軸が低い位置にある。このような構造上の特徴から生じる DH の縦強度の経年特性を数値シミュレーションによって確認する。



図 - 1 SH タンカー(左)と DH タンカー(右)の中央断面

3. 腐食進行モデル

縦強度の経年劣化を予測するためには、船体構造部材の腐食に伴う板厚衰耗量が入力データとして必要となる。過去の船級検査で得られた腐食データベースによる板厚衰耗量の例(図 - 2)から分かるように、腐食

現象は多くの要因が関与しあう複雑な現象であるため板厚計測データが大きくばらつき、腐食による板厚衰耗量を定量的に得るためには板厚計測データを確率統計的に扱う必要がある。

そこで本研究では、過去にNKで腐食予備厚や衰耗限度の基準値を設定する際に、腐食データベースを基に同定された確率モデル(腐食進行モデル)^{(4),(5)}を使用した。

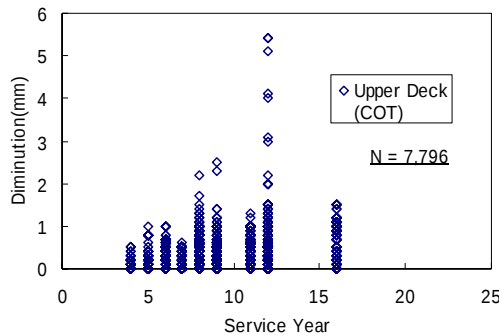


図 - 2 板厚計測データの例

図 - 2の板厚計測データを腐食進行モデルに適用して得られた板厚衰耗量の経年変化曲線と、ある船齢での板厚衰耗量の頻度分布を図 - 3に示す。ある船齢での板厚衰耗量の頻度は対数正規分布の確率密度関数に従うとされており、対数正規分布の形状パラメータから板厚衰耗量がある値以上になる確率(累積確率)を求めることができる。

本研究では、腐食進行モデルを使用して以下の2つの項目を検討する。

累積確率50%の板厚衰耗量を適用し、平均レベルの腐食衰耗状態にあるタンカーの縦強度の経年傾向を予測する。

船齢25年における頻度分布に従って部材の衰耗量を確率変動させることにより、経年船の縦強度を確率統計的に評価する。

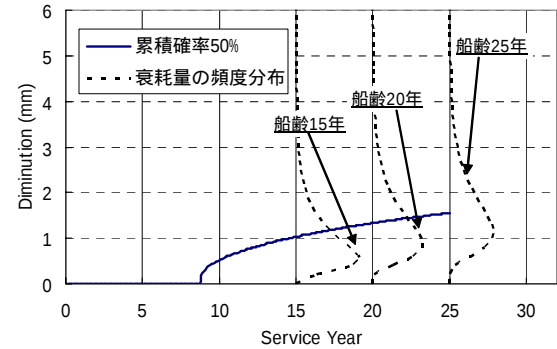


図 - 3 腐食進行モデル(上甲板 COT 環境)

4. 縦強度の経年劣化予測

DH タンカーの構造の経年劣化に伴う縦強度の低下について、就航後 25 年までの予測を行った。

4.1 DH タンカーの板厚衰耗量の推定

腐食進行モデルは、表 - 2 に示すように「強度部材の箇所(デッキ、ボトム、船側外板等)」「部材の種類(パネル、ロンジ等)」「曝される環境(貨物油タンク: COT、ウォータバラストタンク: WBT)」などの要素で整理されており、補強材についてはさらに、ウェブとフェイスに分類されている。また、表中に縦強度部材の板厚衰耗量の統計値を示す。

SH タンカーの板厚計測データを基に作成された腐食進行モデルには DH 特有の構造部材(表内の ~)の確率モデルが含まれない。そのため、それらの構造部材が曝されている環境を考慮して、以下の仮定の下に板厚衰耗量を決定した。

表 - 2 縦強度部材の衰耗量及び腐食環境適用表 (船齢 20 年を想定)

		ダブルバル				シングルバル			
		環境		衰耗量(mm)*		環境		衰耗量(mm)*	
		面1	面2	95%	50%	面1	面2	95%	50%
アッパーデッキ		COT	大気	3.14	1.33	COT	大気	3.14	1.33
デッキロンジ		COT	COT	1.95	1.06	COT	COT	1.95	1.06
ボトムパネル		WBT	海水	2.96	1.28	COT	海水	3.27	1.43
ボトムロンジ	WEB	WBT	WBT	1.77	0.91	COT	COT	1.94	1.01
	FACE	WBT	WBT	1.85	1	COT	COT	1.85	1
サイドシェル		WBT	海水	2.09	1.2	COT	海水	1.92	1.03
サイドロンジ	WEB	WBT	WBT	1.75	0.89	COT	COT	1.8	0.94
	FACE	WBT	WBT	1.78	0.87	COT	COT	1.81	0.94
ロンジバルクヘッド		COT	COT	1.96	1.1	COT	COT	1.96	1.1
ロンジバルクロンジ	WEB	COT	COT	1.82	0.96	COT	COT	1.82	0.96
	FACE	COT	COT	1.79	0.92	COT	COT	1.79	0.92
インナーボトムパネル		COT	WBT	2.2	1.18	-	-	-	-
インナーボトムロンジ	WEB	WBT	WBT	1.77	0.91	-	-	-	-
	FACE	WBT	WBT	1.85	1	-	-	-	-
サイドロンジバルクヘッド		COT	WBT	1.96	1.07	-	-	-	-
サイドロンジバルクロンジ	WEB	WBT	WBT	2.45	0.94	-	-	-	-
	FACE	WBT	WBT	1.79	0.92	-	-	-	-
サイドガーダー		WBT	WBT	1.89	1.03	-	-	-	-

内底板(インナーボトムパネル)

内底板については、上面(COT 環境の面)は SH タンカーの COT 内のボトムパネルの上面の衰耗量、下面(WBT 環境の面)は SH タンカーの WBT 内のホリゾンタルガーダの下面の衰耗量として、それらを合計したものを内底板の板厚衰耗量(両方の面の衰耗量の和)とした。腐食進行モデルによりボトムパネルとホリゾンタルガーダの板厚衰耗量は求まるので、以下の計算手順に従い片面ずつの衰耗量を求めた。

まず、上記の仮定により内底板の衰耗量は下式で表せる。

$$t_{IBP} = t_{BP_COT_1} + t_{HG_WBT_2} \quad (1)$$

数式の 1 番目の添え字の意味は以下のとおりである。

IBP : インナーボトムパネル

BP : ボトムパネル

HG : ホリゾンタルガーダ

最後の添え字については、1 がパネルの上面、2 がパネルの下面を意味し、添え字の無いものは部材の板厚衰耗量である。

BP の上面と HG の下面の衰耗量は、板厚衰耗量からもう片方の衰耗量を引いて、

$$t_{BP_COT_1} = t_{BP_COT} + t_{BP_COT_2} \quad (2)$$

$$t_{HG_WBT_2} = t_{HG_WBT} - t_{HG_WBT_1} \quad (3)$$

ここで、 HG の上面 $t_{HG_WBT_1}$ と BP の上面 $t_{BP_WBT_1}$ は同じ環境と見なせるので衰耗量は等しいとして、

$$\begin{aligned} t_{HG_WBT_1} &= t_{BP_WBT_1} \\ &= t_{BP_WBT} - t_{BP_WBT_2} \end{aligned} \quad (4)$$

これを(3)に代入して、

$$t_{HG_WBT_2} = t_{HG_WBT} - t_{BP_WBT} + t_{BP_WBT_2} \quad (3)'$$

(2),(3)'を(1)に代入して、

$$\begin{aligned} t_{IBP} &= t_{BP_COT} - t_{BP_COT_2} + t_{HG_WBT} \\ &\quad - t_{BP_WBT} + t_{BP_WBT_2} \end{aligned} \quad (5)$$

右辺 2 項と 5 項は、ともに外板の海水の環境で等し

いので、キャンセルされ、

$$t_{IBP} = t_{BP_COT} + t_{HG_WBT} - t_{BP_WBT} \quad (6)$$

となり内底板の板厚衰耗量が求まる。

インナーボトムロンジ

インナーボトムロンジには SH の WBT のボトムロンジのデータを使用した。

サイドガーダ

バラスタタンク内のサイドガーダについては、SH タンカーのバラスタタンクのホリゾンタルガーダのデータを使用した。

4.2 縦強度の経年変化特性

DH タンカーの縦強度の経年変化特性を確認するため、腐食進行モデルから得られた平均レベルの衰耗量を使用して、縦強度の数値的指標である断面係数の減少量を DH タンカー、SH タンカーについてそれぞれ計算した。

甲板(Deck)側の断面係数(Z_D)と底板(Bottom)側の断面係数(Z_B)の経年変化を図 - 4.5 にそれぞれ示す。建造時の断面係数を 100%として、低下した断面係数を割合でプロットしている。

その結果、DH タンカーの縦強度の経年変化の傾向は就航 25 年間に於いて SH とほぼ同程度であることが確認された。また、DH 構造、SH 構造に関わらず平均レベルの腐食衰耗状態のタンカーであれば、(仮に建造時に IACS の縦強度統一規則に対する強度余裕がゼロであったとしても)IMO の要求する縦強度(建造時の IACS 要求値の 90%)に対し、就航 25 年経過後も強度余裕を有することが確認された。

Z_D と Z_B を比較すると、減少率は Z_D の方が大きく、また、DH 構造はその構造上の特徴から、設計時の Z_B は規則の要求値に対して大きくなる⁽⁶⁾ため、DH タンカーの縦強度評価においては Z_D を優先的に扱うことが適当であるとみなし、以下の結果については、主に Z_D に対する評価を行う。

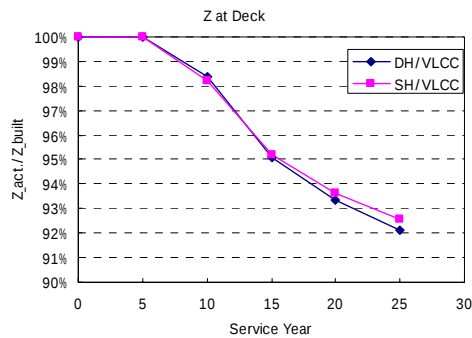


図 - 4 縦強度の経年変化(甲板断面係数)

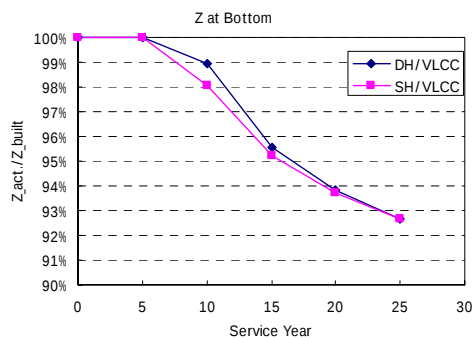


図 - 5 縦強度の経年変化(底板断面係数)

5 . 確率手法による縦強度の評価

腐食進行モデルに従い構造部材ごとの板厚を確率変数として与えて断面係数を繰り返し計算することにより、著しい衰耗状態にある DH タンカーの存在確率を予測し SH タンカーと比較して評価した。さらに、経年船の事故を未然に防ぐために、縦強度の推定法について検討した。

5 . 1 計算条件

個船内の腐食衰耗状態

腐食データベースの板厚衰耗量は、大きく分けて、

- ）個船毎の腐食衰耗状態によるばらつき
- ）個船内の計測個所によるばらつき

を含んでいる。 ）の影響を計算に反映させるためには、船体横断面にある板材をある範囲（例えば、ロンジスペース間）で要素に区切り、かつ、桁材は 1 本 1 本を要素として、全ての要素について板厚を決めるための乱数を発生させる必要がある。

る。しかし、過去の研究⁽⁷⁾によると衰耗量の個船内でのばらつきによる縦強度への影響は少なく、また、板厚のばらつきは、 ）による影響がはるかに大きいので、本解析では、個船内の衰耗状態は一樣と仮定し、一隻の断面係数の計算では表 - 2 の区分について乱数を発生させて、各区分の板厚を与えられた確率分布に従う値として求めた。

部材区分間の相関

曝される温度環境や応力状態が同様な部材については、部材間で衰耗量に相関があると思われるが、実際には、板厚計測データ自体のバラツキが大きいので、検査データからはそれほど良い相関が得られていないのが現状である。そのため、本解析では各部材の種類の間に衰耗量の相関は無いと仮定した。

保守管理履歴の反映

板厚を決めるために発生させた乱数の値によっては、板厚が衰耗限度（板切替基準）にかかることがあるが、腐食進行モデルが板切替後の板厚計測データを排除していることから、本計算では切替基準による閾値を設けずに、就航後に統計的に発生する腐食衰耗状態を仮定して縦強度の経年劣化を評価した。即ち、板取替えしない仮想的ケースを想定しており、幾分厳しい目の推定を与える。

5 . 2 縦強度の分布特性

船齢 25 年の DH タンカー、SH タンカーそれぞれ 10,000 隻について、 Z_D を計算して得られた頻度分布を図 - 6 に示す。全体的に捉えると船齢 25 年での DH タンカーの断面係数の減少率は SH タンカーに比べて大きい。経年船の折損事故防止を目的とした評価の対象となるのは、経年劣化の著しい（超過確率が低いレベルの）タンカーである。そこで、超過確率の低い部分を拡大して示すと、DH と SH は同程度であることが確認できる。以上から、経年劣化の著しいタンカーの存在確率についても、DH と SH で有意となる差はないといえる。

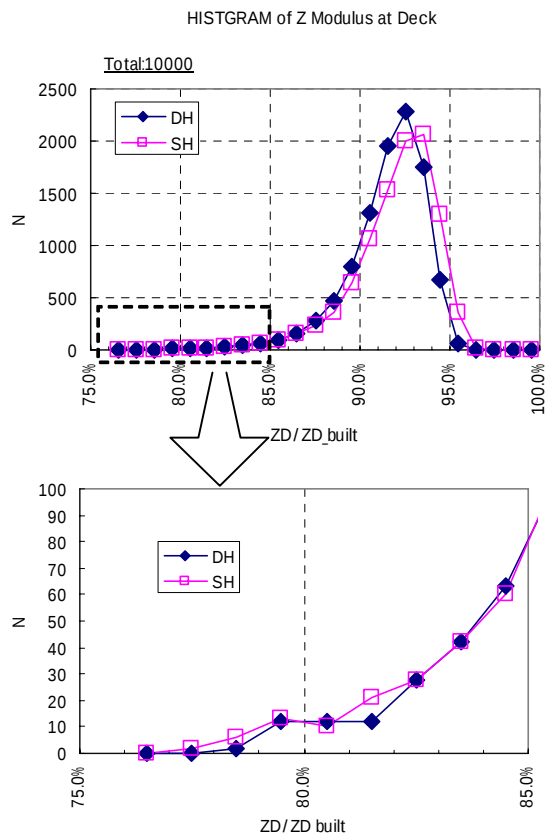


図 - 6 甲板断面係数の頻度分布 (船齢 25 年)

5.3 縦強度の推定法の検討

各々の部材が縦強度に及ぼす感度を計るために、DH タンカー及び SH タンカーの断面係数の繰り返し計算を行った中で、 Z_D の減少率が大きい方から 10 隻 (超過確率 $Q=10^{-3}$) を取り出し、各部材の板厚衰耗量を比較した。結果を図 - 7(a),(b) に示す。上甲板の板厚衰耗量が他に比べて大きく、このことから経年劣化の著しいタンカーの縦強度については上甲板の板厚衰耗量が大きく影響することが伺える。

図 - 8(a),(b) に Z_D と上甲板の板厚衰耗量の相関を DH タンカー、SH タンカーについてそれぞれ示す。図 - 10 には断面係数の計算を行った 10,000 隻全ての結果をプロットしている。この図から、例えば船齢 25 年の DH タンカーでデッキの板厚衰耗量が平均 2mm であったとすると、当該船齢の断面係数は建造時の 87% から 93% の間にある

と見当がつく。この推定手法は一様衰耗状態を仮定した数値計算によるもので、局部腐食やロンジ材の脱落など全体強度の評価に反映しなければならない要素がまだまだ多く残されているため、様々な経年状態にある実存タンカーの縦強度を定量的に判定・評価するのに十分な信頼性を有しているとはいえないが、著しい腐食衰耗状態にある船体の縦強度を把握するための手法として、甲板の板厚を計測することは有効であると考えられる。

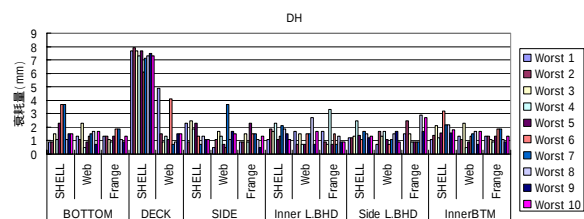


図 - 7(a) 甲板断面係数に及ぼす各部材の衰耗量の感度 (DH タンカー)

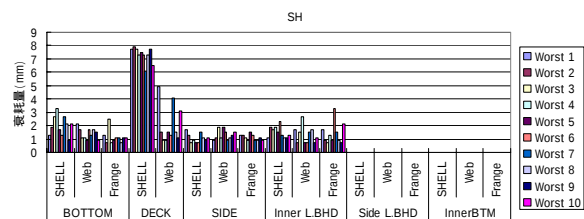


図 - 7(b) 甲板断面係数に及ぼす各部材の衰耗量の感度 (SH タンカー)

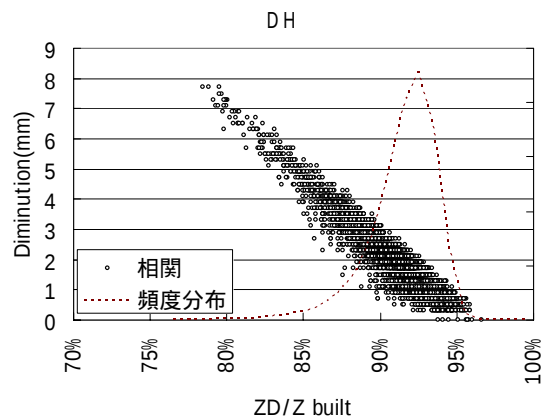


図 - 8(a) 甲板断面係数と甲板衰耗量の相関 (DH タンカー、船齢 25 年)

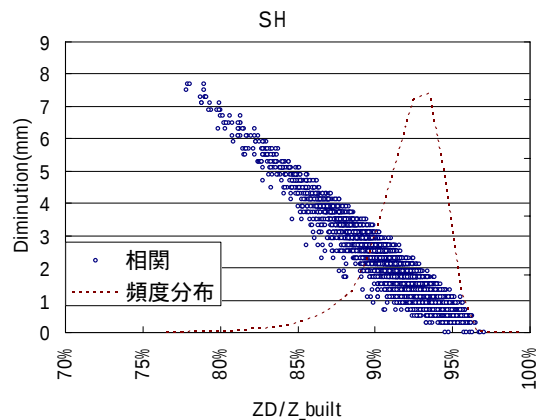


図 - 8(b) 甲板断面係数と甲板衰耗量の相関
(SH タンカー、船齢 25 年)

6 . まとめ

- 平均レベルの腐食衰耗状態の DH タンカーについて縦強度の経年変化の傾向をシミュレートした結果、SH タンカーと比べて有意となる差は発生しないことが確認された。
- 構造部材の板厚衰耗量を確率変動させて甲板断面係数の繰り返し計算を行い、経年劣化の激しいタンカーの存在確率について評価した結果、DH タンカーと SH タンカーで有意となる差はないことが確認された。
- 著しい劣化状態にある経年船の縦強度を把握するための手法として、甲板の板厚計測は有効であると考えられる。

参考文献

- (1) MARPOL73/78議定書改定
- (2) ナホトカ号事故原因調査報告書、平成9年7月、運輸省
- (3) 海上技術安全研究所：ダブルハルタンカーの構造の経年劣化に関する研究報告(2002)
- (4) 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.24-29.
- (5) Yamamoto, N. and Ikegami, K., "A Study on the Degradation of Coating and Corrosion of Ship's Hull based on the Probabilistic A

pproach", Trans.ASME, JOMAE, Vol.120, No. 3, pp.121-128, 1998

- (6) 海上技術安全研究所：ダブルハルタンカーの構造の経年劣化に関する研究報告書第7.2章、(2003).
- (7) 山本規雄、腐食衰耗に関する最近の調査結果とその強度検討、損傷に学ぶ(平成13年12月)