

# 最新の板厚計測データに基づく腐食予備厚の設定

杉本 友宏\*, 山本 規雄\*, 石橋 公也\*

## 1. 緒言

従来、本会の船体構造規則である鋼船規則C編で考慮される腐食予備厚は、原則2.5 mmが腐食環境にかかわらず構造部材寸法算式に足されている<sup>1)</sup>。一方で、船体構造強度を有限要素解析により評価する手法がまとめられている船体構造強度に関するガイドライン<sup>2) 3)</sup>においては、建造板厚から船舶の設計寿命(25年)の間に腐食するであろう数値(腐食予備厚)を予め控除したネット寸法を用いて構造強度を評価する手法が採用されており、国際船級協会連合(以下、IACS)の共通構造規則(Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers)であるCSR-BC、CSR-OT及びCSR-BC&OTにも同手法が取り入れられている<sup>4)~6)</sup>。合理的な構造規則を策定するにあたっては、船舶が25年間に腐食する衰耗量を適切に見積もる必要がある。船体構造部材の腐食衰耗量は、それらが曝される環境や防食塗装の状態に依存するため、腐食の発生及び進行の過程に対する確率モデルを設定し、長年にわたって蓄積している板厚計測データを、そのモデルに当て嵌めて統計的に解析することにより、腐食衰耗量を推定する。本報告では、比較的新しい船の板厚計測データを用いて、腐食衰耗量の推定を行い、腐食予備厚を設定する。また、CSR-BC&OTに規定される腐食予備厚と比較を行う。

## 2. 腐食に影響を及ぼす要件の変遷

船体構造部材の腐食衰耗量は、その部材が曝される環境での塗装状態やメンテナンスの程度に依存するため、それらを要求するような規則が改正された場合、腐食衰耗量に大きな影響を与える。表1に塗装やメンテナンス等腐食環境に影響を与えるような規則改正の一覧を示す。

1983年に海洋汚染防止条約(MARPOL条約)<sup>7)</sup>が適用されたことにより、油タンカーに分離バラストタンクの設置が要求された。それまでは荷下ろし後は油タンカーの貨物倉にバラスト水を積載して航行していたのが、本要件により、貨物油タンク、バラ

ストタンクが専用の使われ方をし始めたため、貨物油タンクの腐食状況が劇的に改善された。その後、老齢ばら積貨物船が経年劣化に起因する損傷により、立て続けに沈没する事故が発生したことを受け、ばら積貨物船、油タンカー、ケミカルタンカーに対して国際海事機関(以下、IMO)で検査強化プログラム(Enhanced Survey Programme: 以下、ESP)<sup>8)</sup>が採択された。ここでは、バラストタンクの塗装状態がGOOD、FAIR、POORの三段階で判断されるようになり、もしPOORと判断された場合はその後毎年の内部検査が要求されるため、就航後のメンテナンスの程度が改善された。なお、三段階の塗装状態の判断基準を表2に示す。また、上述の事故の中には腐食が原因だったものもあったため、国際的にも塗装状態の確認、腐食状況の改善に対する機運が高まり、その後、IACSにおいても統一規則(UR) Z7 (Rev.5)<sup>9)</sup>が採択され、ESP同様、塗装状態が三段階で評価されるようになった。これらの規則が適用された1996年、1998年から腐食状況は大きく改善された。最近では、2008年にバラストタンク、2013年に貨物油タンクに対して、塗装性能基準(PSPC)<sup>10) 11)</sup>が適用開始され、建造段階において、15年経過時までGOODの状態を保つような塗装性能が要求されるようになった。構造規則では、本会が開発した船種毎の船体構造強度に関するガイドラインやIACS CSRにおいて、ネット寸法手法が採用され、設計寿命間の腐食衰耗に対する構造健全性が維持されるようになった。

## 3. 腐食衰耗量の推定方法

本報告で用いた腐食衰耗量の推定法は、山本らの統計的アプローチによる。山本らは、腐食の発生・進行を次の3つの連続する過程で表せるとして、それぞれに対して確率モデルを導入している<sup>12)</sup>。

Phase I: 孔食活性点が生成されるまでの期間  $f_{T_0}(t)$

\* 開発本部 船体開発部

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

ここで、

$T_0$  : 孔食活性点が生成されるまでの時間

$\mu_0, \sigma_0$  : それぞれ  $\ln T_0$  の平均値及び標準偏差

Phase II : 孔食活性点が成長を開始する孔食点へと推移するまでの期間  $g_{T_r}(t)$

$$g_{T_r}(t) = \alpha \exp(-\alpha t) \quad (2)$$

ここで、

$T_r$  : 孔食活性点が孔食点に遷移するまでの時間

$\alpha$  : 平均推移時間の逆数

Phase III : 孔食点が成長する期間  $z(t)$

$$z(t) = a(t - t_0)^b \quad (3)$$

ここで、

$a, b$  : 腐食進行挙動を特徴づけるパラメータ

$t_0$  : 孔食点が生成されるまでの時間

これらの過程を図示すると、図1のようになる。

Phase IからPhase IIIまでの確率モデルの確率変数を、板厚計測データを用いて、最尤推定法により推定することで、腐食衰耗量を統計的に導出する。

表1 腐食環境及びメンテナンスに関連する規則

規則名	適用開始年	発行元	腐食環境又はメンテナンスへの影響
MARPOL	1983	IMO	分離バラストタンクの設置による油タンクの腐食状況が劇的に向上
ESP	1996	IMO	板厚計測による状態監視、塗装状態の点検、早期メンテナンスによる船体構造の腐食状況の改善
IACS UR Z7 (Rev.5)	1998	IACS	
PSPC(WBT) PSPC(COT)	2008 2013	IMO	バラストタンク/タンカーの貨物油タンクの塗装品質の向上
構造強度ガイドライン	2001 2002	NK	ネット寸法手法により、設計寿命間の腐食衰耗に対する構造健全性を維持
CSR-BC, CSR-OT	2006	IACS	
CSR-BC&OT	2015	IACS	

表2 塗装状態の判断基準

判定	判定基準
GOOD	ごく一部にだけ薄い錆が発生している状態で、具体的には塗膜に破損がなく、考慮している箇所の3%未満に点状の錆が発生、部材の自由端、溶接継手の20%未満に錆が生じている状態
FAIR	部材の自由端、溶接継手において部分的な塗装の破損があり、考慮している箇所の20%以上の範囲にわたって薄い錆が発生している状態で、POORよりも状態がいいもの
POOR	考慮している箇所の20%以上にわたり全般的な塗膜破損がある状態で、10%以上にわたり厚い錆が発生している状態

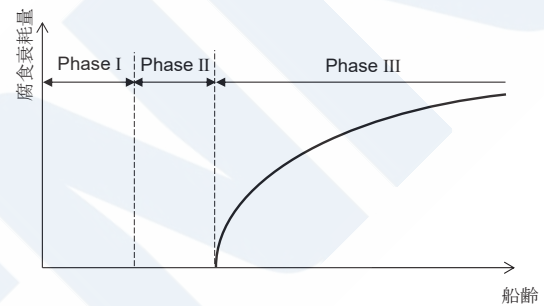


図1 船齢と腐食衰耗量の関係

#### 4. 板厚計測データ

腐食衰耗量を推定するにあたり板厚計測データを収集する必要があるが、本報告においては、ESPやUR Z7 (Rev.5)が適用開始されてからの船のデータを多く収集することを目的に、次の条件を設定し、285隻から、合計211,866か所の板厚計測データを収集した。なお、収集した板厚計測データは本会に登録される船舶の定期検査の際に計測されたものである。

- ・船の長さが90m以上の船（鋼船規則C編適用船）
- ・新造時から本会に入級している船
- ・2004年1月1日以降に定期検査が行われた船
- ・検査時の船齢が14年以上の船
- ・船体横断面の板厚計測データ

板厚計測データを収集した船舶の建造年の分布を図2に示す。ESPやUR Z7 (Rev.5)の適用が開始されて以降に建造された船のデータが多く含まれていることがわかる。なお、データ収集時にPSPC適用後14年以上経過している船舶がなかったため、PSPC適用船のデータは含んでいない。

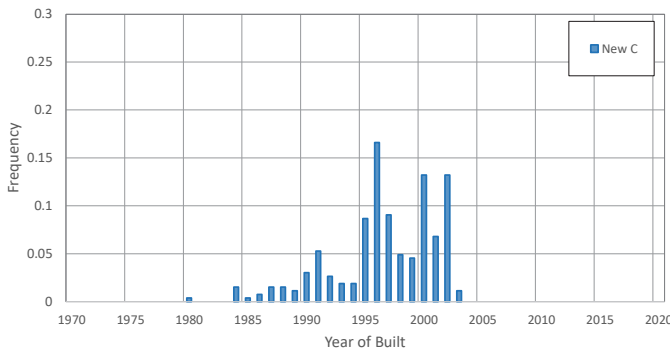


図2 板厚計測データを収集した船舶の建造年

## 5. 腐食衰耗量の推定結果

3章の考え方及び4章で収集した板厚計測データにより、腐食衰耗量の推定を行った。腐食衰耗量は、原則として、腐食環境の組合せ毎に求めている。例えば、バラスト環境と海水環境の境界をなす板としては、船底外板や船側外板があるが、部材毎に区別はせず、1つの腐食環境の組合せとして取り扱っている。ただし、同じ腐食環境の組合せであっても、部材によって著しく腐食衰耗量の異なっていた部材、例えば、貨物ホールド環境とバラスト環境の境界をなす部材のうち内底板は、その他の部材とは区別した。

得られた腐食衰耗量の推定値の例として、両面がバラスト環境に曝される部材、チップ船・一般貨物船・タンカーの貨物ホールドと海水に曝される部材及び両面がチップ船・一般貨物船・タンカーの貨物ホールドに曝される部材に対する値をそれぞれ図3、図5及び図7に示す。グラフの横軸が経過年数、縦軸が腐食衰耗量、黒点が板厚計測データから得られた腐食衰耗量、赤点が経過年数毎の腐食衰耗量の平均値、色付きの線が腐食衰耗量の累積確率に応じた値で、それぞれ50%、75%、90%、95%、平均値に対応する値である。

本報告では、腐食予備厚を決定するにあたり、25年経過時における累積確率90%に対応する値を用いており、この考え方はCSRと同じである。25年経過時における累積確率90%に対応する値は、両面がバラスト環境に曝される部材で0.61 mm、チップ船、一般貨物船及びタンカーの貨物ホールド及び海水暴露環境に曝される部材で0.84 mmであった。板厚計測データの腐食衰耗量が累積確率90%に対応する値を超えているものが多くあるように見えるが、図4、図6及び図8に示すような板厚計測データの腐食衰耗量のヒストグラムを確認すると、大きく腐食しているデータの頻度はゼロに近いということがわかる。本報告で考慮した腐食環境の組合せの一

部とそれに対応する25年経過時における累積確率90%の値を表3に示す。

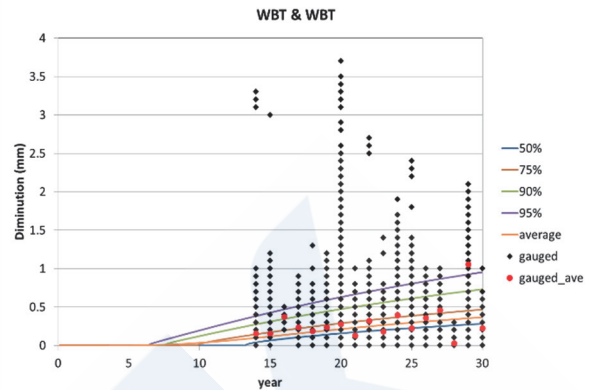


図3 両側がバラスト環境に曝される部材の腐食衰耗量の推定値

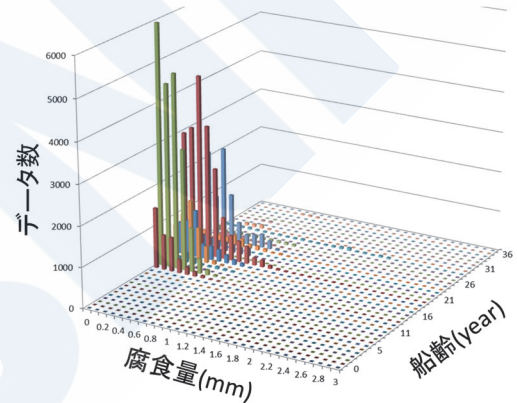


図4 両側がバラスト環境に曝される部材の板厚計測データのヒストグラム

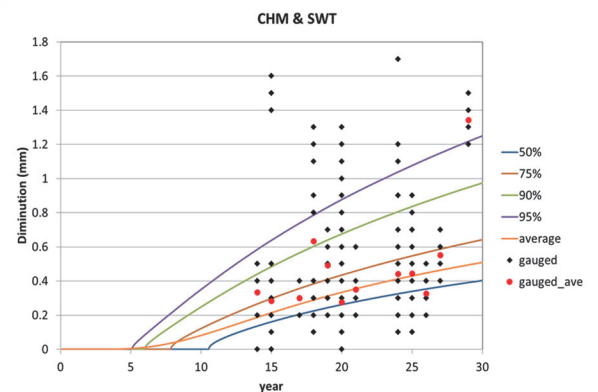


図5 チップ船、一般貨物船、タンカーの貨物倉と海水環境に曝される部材の腐食衰耗量の推定値



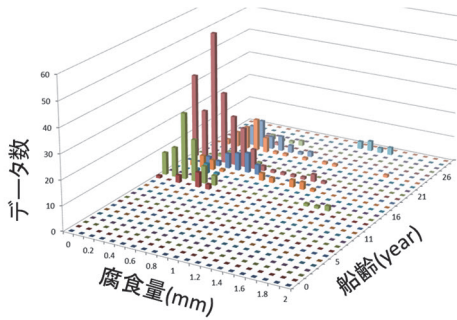


図6 チップ船，一般貨物船，タンカーの貨物倉と海水環境に曝される部材の板厚計測データのヒストグラム

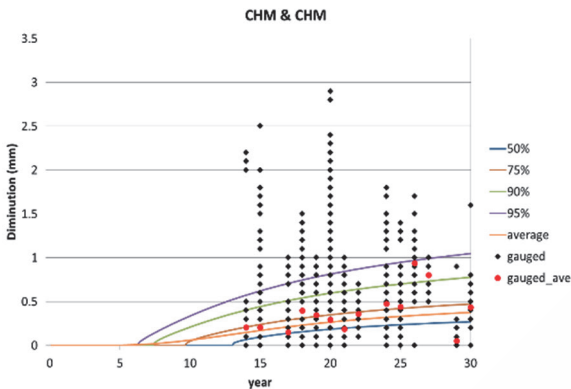


図7 両側がチップ船，一般貨物船，タンカーの貨物倉に曝される部材の腐食衰耗量の推定値

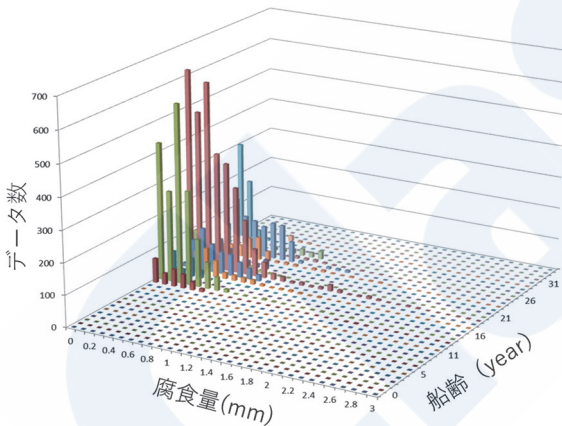


図8 両側がチップ船，一般貨物船，タンカーの貨物倉に曝される部材の板厚計測データのヒストグラム

表3 腐食環境の組合せ毎の25年経過時90%累積確率値に対応する腐食衰耗量の推定値の例

腐食環境の組合せ		腐食衰耗量 (mm)
大気環境 (高温)	バラスト環境	0.67
	低温 Cargo Hold	0.59
	貨物ホールド (その他)	1.08
大気環境 (高温以外)	大気環境 (高温以外)	0.71
	バラスト環境	0.45
	低温貨物ホールド	0.46
燃料油タンク	燃料油タンク	0.52
	海水環境	0.57
	バラスト環境	0.81
海水環境	空所環境	0.65
	バラスト環境	0.53
	貨物ホールド (その他)	0.84
バラスト環境	バラスト環境	0.61
	貨物ホールド (その他)	0.53
貨物ホールド (その他)	貨物ホールド (その他)	0.70
PCC 貨物ホールド	PCC 貨物ホールド	0.45
常温 Type C 貨物ホールド	常温 Type C 貨物ホールド	0.46
貨物ホールドの内底板 (ばら積船)	バラスト環境	4.20
貨物ホールドの内底板 (チップ船)	燃料油タンク	4.05
	バラスト環境	3.94
貨物ホールドの内底板 (一般貨物船)	燃料油タンク	3.26
	バラスト環境	3.24
貨物ホールドの内底板 (タンカー)	バラスト環境	0.47

(備考) 貨物ホールド (その他) は，チップ船，一般貨物船，タンカー等の貨物ホールドを意味する。

## 6. 腐食予備厚

腐食予備厚  $t_c$  (mm) は，(4)式により設定する。

$$t_c = \text{Roundup}_{0.5}(t_{c1} + t_{c2}) + t_{res} \quad (4)$$

ここで，

$t_{c1}$ ,  $t_{c2}$  : 片面の腐食予備厚

$t_{res}$  : 検査間隔の間に腐食が進行する量で 0.5 mm

Roundup は，0.5 mm 単位で値を切上げるとい

ことを意味している。

片面の腐食予備厚 $t_{c1}$ 、 $t_{c2}$ は、前5章で求めた各環境の組合せに対する腐食衰耗量の推定値から導出する。導出にあたっては、設定する片面の腐食予備厚 $t_{c1}$ 、 $t_{c2}$ を足し合わせた場合に、表3に示すような腐食環境の組合せに対する値を下回らないように安全側の値とした。本報告で求めた腐食予備厚を、全面的な改正を行った鋼船規則C編（以下、新C編）に規定しており、その値を付録に示す。なお、チェーンロッカ等、十分な量の板厚計測データが収集できなかった部材の腐食予備厚は、従来、本会の鋼船規則C編やCSRにおいて考慮していた値や考え方を参考として設定している。

## 7. CSRに規定される腐食予備厚との比較

CSRで規定される腐食予備厚も3章で述べた腐食衰耗量の推定法を用いている。表4に代表的な区画におけるCSRと新C編の片面の腐食予備厚の比較結果を示す。

表4から、ほとんどの腐食環境で、新C編の腐食予備厚はCSRの腐食予備厚よりも小さくなっているのがわかる。例えば、バラスト環境はCSRでは1.2 mmであるのに対して新C編では0.5 mmである。

本報告で収集した板厚計測データの対象船の建造年分布は図2で示した通りであるが、CSRの腐食予備厚を定めるにあたり収集した板厚計測データの対象船は、ESP及びUR Z7 (Rev.5)が適用開始される前の船舶である。このことから、適用規則が変わったことで、船舶の塗装性能が向上したり、メンテナンスが向上したりしたことが、本報告で得られた腐食予備厚がCSRのものよりも小さくなった要因であると考えられる。また、塗装技術そのものが向上していることも一因として考えられる。

一方で、ばら積貨物船の内底板はCSRと新C編の結果で違いはなかった。当該部材は機械ダメージも想定され、本来の腐食現象とは様相が異なることから、塗装状態の改善が難しい箇所であることが原因と考えられる。

表4 CSRと全面改正後の鋼船規則C編の  
片面腐食予備厚の比較

区画の種類	CSRの片面腐食予備厚	新C編の片面腐食予備厚
バラストタンク	1.2 mm	0.5 mm
ばら積貨物倉（ホッパ斜板，内底板）	3.7 mm	3.7 mm
大気暴露（暴露甲板）	1.7 mm	0.6 mm
海水暴露（喫水付近）	1.5 mm	1.0 mm
燃料油タンク	0.7 mm	0.5 mm
清水タンク	0.7 mm	0.5 mm
空所	0.7 mm	0.5 mm
ドライスペース	0.5 mm	0.5 mm

## 8. 結言

検査強化プログラムESPが適用され始めた1996年以降に建造された船舶の板厚計測データを多く用いて腐食衰耗量の推定を行った。また、その結果を用いて、種々の腐食環境に対して腐食予備厚を設定した。CSRに規定される腐食予備厚と比較したところ、ほとんどの腐食環境において、CSRの値よりも小さい値であった。ただし、ばら積貨物船の内底板についてはCSRの値と変わらなかった。CSRよりも腐食予備厚が小さくなった理由としては、船舶に適用される規則が改正されたことにより、建造時の塗装性能の向上、就航船に対する腐食環境の改善やメンテナンス程度の向上が図られたためであると考えられる。

なお、本報告で求めた腐食予備厚には、PSPCの影響が含まれていない。3回目の定期検査を終えたPSPC適用船の板厚計測データが十分に集まってから、再度同様の検討を行い、PSPC適用バラストタンクや貨物油タンクに対する腐食予備厚の設定を行う予定である。

本報告で得られた腐食予備厚は、全面改正された鋼船規則C編に用いられている。この腐食予備厚を用いることにより、より合理的に構造強度評価を行えることが期待される。

## 参考文献

- 1) 日本海事協会：鋼船規則C編，2021.
- 2) 日本海事協会：タンカーの構造強度に関するガイドライン，2001.
- 3) 日本海事協会：ばら積貨物船の構造強度に関するガイドライン，2002.

- 4) 日本海事協会：鋼船規則CSR-B編，2021.
- 5) 日本海事協会：鋼船規則CSR-T編，2021.
- 6) 日本海事協会：鋼船規則CSR-B&T編，2021.
- 7) IMO: International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto.
- 8) IMO: Resolution A.744(18) – Guidelines on the Enhanced Programme of Inspections During Surveys for Bulk Carriers and Oil Tankers, 1993.
- 9) IACS: Unified Requirement Z7 (Rev.5), 1998.
- 10) IMO: Resolution MSC.215(82) - Performance Standard for Protective Coatings for Dedicated Seawater Ballast Tanks in All Types of Ships and Double-side Skin Spaces of Bulk Carriers, 2006.
- 11) IMO: Resolution MSC.288(87) - Performance Standard for Protective Coatings for Cargo Oil Tanks of Crude Oil Tankers, 2010.
- 12) N. Yamamoto et.al. : 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, Vol.120, pp 121-128, 1998.

## 付録

Corrosion addition specified in the new structural rules (new Part C) of ClassNK

## 付録 Corrosion addition specified in the new structural rules (new Part C) of ClassNK

区画の種類	詳細	$t_{c1}$ 又は $t_{c2}$ (mm)	
バラストタンク、ビルジタンク、排水貯蔵タンク、チェーンロッカ(注1)	タンク頂板から垂直方向下向きに3 m 以内の範囲(注2)	1.0	
	その他の箇所	0.5	
貨物倉又は貨物タンク	コンテナ運搬船	内底板	1.5
		その他	0.5
	ばら積貨物船、鉱石運搬船等の貨物倉(注3)	内底板及びホップ斜板(注4)	3.7
		ロワースツール	1.6
		横隔壁及び縦通隔壁(注5)	1.0
		その他	1.0
	チップ船	内底板、ホップ斜板及びロワースツール	3.5
		その他	0.7
	一般貨物船	内底板	3.0
		その他	0.7
	低温貨物ホールド(冷凍運搬船)		0.5
	空所環境の貨物倉(自動車運搬船)		0.5
	タンカー(注6)		0.7
	高温貨物タンク(アスファルト等)が格納されているホールドスペース		0.5
	独立型の高温貨物タンク(アスファルト等)		0.7
	独立型の低温貨物タンクが格納されているホールドスペース(独立型タンクを有する液化ガス運搬船)		0
	独立方形型の低温貨物タンク(独立方形タンクを有する液化ガス船)		0
	Type C方式の液化ガス運搬船(常温)のホールドスペース		0.5
	Type C方式の液化ガス運搬船(低温)のホールドスペース		0
	メンブレン方式の液化ガス運搬船のホールドスペース		0
その他の貨物ホールド(セメント専用運搬船等の貨物ホールド内にセルフアンローダを有する船舶の貨物ホールドを含む)		0.7	
大気暴露	甲板上の暴露部材	0.6	
	上記以外の部材	0.5	
海水暴露	設計最小バラスト喫水線と構造用喫水線の間の外板	1.0	
	その他の外板	0.5	
燃料油タンク(注7)及び潤滑油タンク		0.5	
清水タンク		0.5	
空所(注8)及びドライスペース(注9)(注10)		0.5	
居住区		0	
上記以外		0.5	
(注)			
(1) チェーンロッカの底板上面から垂直方向上向きに3 m 以内の範囲にある板部材の表面には、1.0 mm 追加しなければならない。			
(2) タンク頂板が暴露甲板である場合にのみ適用する。3 m の距離はタンク頂部と平行に、タンク頂部から垂直に測る。なお、ビルジタンク、排水貯蔵タンク及びチェーンロッカに対しては、「その他の箇所」とする。			
(3) ばら積貨物倉は、バラスト兼用倉を含む。			
(4) 鉱石運搬船にあっては、内底板から垂直方向上向きに3 m 以内の範囲にのみ適用する。なお、内底板から垂直方向上向きに3 m を超える範囲は1.0 mm とする。			
(5) 内底板から垂直方向上向きに3 m 以内の範囲にある隔壁に用いる板には、0.2 mm 追加しなければならない。			
(6) サクションベルマウス周辺の内底板及びサクションウェルには、サクションベルマウスの外周から1 ロングスペース程度の範囲で、2.0 mm 追加しなければならない。			
(7) ガス燃料タンクが設置される区画の腐食予備厚は、各種液化ガス運搬船のホールドスペースの腐食予備厚を準用する。			
(8) ボルト締めマンホールからのみ出入り可能な区画、パイプトンネル等の通常は出入りしない区画のことをいう。閉断面のピラー内部の区画も含む。			
(9) 機関区域、ポンプ室、貯蔵品室、操舵機室等の内部のことをいう。			
(10) 主機室の内底板には2.0 mm 追加しなければならない。ただし、事前に資料を提出して本会の承認を受けた防食措置を行う場合は、この限りではない。			