

平成21年度

外来生物の船体付着総合管理に関する調査 報告書

平成22年10月

海洋政策研究財団
(財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団)

はじめに

本報告書は、ボートレースの交付金による日本財団の平成 21 年度助成事業として実施した「外来生物の船体付着総合管理に関する調査」の成果をとりまとめたものです。

近年、港湾等の沿岸域では外来の海生生物が侵入し繁殖することで従来の生態系を破壊したり、経済被害や人への健康被害をもたらすことが問題になっております。その原因として船舶のバラスト水を経由するものと船体付着によるものがあり、我が国にとってこれらの問題の解決は大変重要なものとなってきております。

この外来生物の侵入防止対策として、前者のバラスト水については、2004 年 2 月にバラスト水管理条約が国際海事機関（IMO）において採択され、その後バラスト水処理技術の開発も進んでいますが条約の発効までには至っていない状況にあります。後者の船体付着によって侵入する生物については、2011 年 2 月に開催予定の IMO 海洋環境保護委員会（MEPC）第 15 回ばら積み液体・気体小委員会（BLG15）会合において、最終化および早期の採択を目指し、現在ガイドラインの策定作業が進められている状況にあります。

船体に付着する生物量を減らす技術としては、防汚塗料などにより生物の付着を防止する技術と、付着した生物を除去する技術があります。一般的に使われている防汚塗料については、防汚性能を上げると化学的環境リスク（化学物質の残留毒性などによる沿岸生態系への危険性）が大きくなり、防汚性能を下げると生物移入リスク（他国水域の生物が船体に付着して侵入することによる沿岸生態系等への危険性）が大きくなるという相反する問題を解決する必要があります。また、除去技術としては、船舶の停泊中に船体に付着した生物を掻き落とす技術がありますが、掻き落とされた生物が海中に放出されるので生物移入リスクが大きくなるという心配と防汚塗料が掻き落とされた場合に化学的環境リスクが大きくなるという懸念があり、現時点では水中洗浄を禁止している国もあります。

そこで当財団では、沿岸域の海洋環境の保全と世界の人々の暮らしを支える海運の発展に寄与することを願い、船体付着に起因する外来生物の侵入の防止に関して、具体的な方法の検討を行い、総合的な管理システムの構築のための事業を実施いたしました。

本事業では特に、外来生物の移入リスクに対する定量的評価方法の一つとして、生物の産卵数をもって比較評価する方法を初めて提案し、いくつかのモデルケースでの試算を行いました。その結果、生物移入リスクの最小化を図るため、付着防止技術または除去技術の最適なものを適時に適所で採用し、さらに除去物質を回収することができる新規の水中洗浄技術を積極的に活用するという外来生物の船体付着に関する総合管理システムを提案しました。

海生生物の全体や化学物質の影響に関してはまだ明らかにされていないことが数多くあり、本報告書で想定している規制については、将来における一例を示したものであります。外来生物移入リスクの定量的評価方法については、世界で初めての方法であることか

ら、専門家の間でさらに深く検討していただくことが必要であります。本事業で提案した外来生物の船体付着に関する総合管理システムが外来生物移入問題の解決策の一つとして、今後の国際議論の中で大いに活用されることを願っております。

本事業は、東京大学アジア生物資源環境研究センター福代康夫教授を委員長とする「外来生物の船体付着総合管理に関する調査委員会」各委員の熱心なご審議とご指導、また、国土交通省海事局をはじめ、関係機関の多くの皆様からのご協力をいただき完遂することができました。今回の難しい課題に対し、豊富な知識と経験をもって真摯に取り組んでいただきました委員及び関係者の皆様、並びに本事業にご協力いただきました皆様に対しまして、心から厚くお礼申し上げます。

平成 22 年 10 月
海 洋 政 策 研 究 財 団
会 長 秋 山 昌 廣

外来生物の船体付着総合管理に関する調査委員会名簿

(順不同、敬称略)

(()内は前任者)

委員長	福代 康夫	東京大学アジア生物資源環境研究センター長
委員	高田 秀重	東京農工大学農学部環境有機地球化学研究室 教授
	小島 隆志	独立行政法人海上技術安全研究所環境影響評価研究グループ 研究員
	松田 泰英	社団法人日本船主協会海務部 課長
	吉川 栄一	社団法人日本舶用工業会 塗装専門家
	原 猛也	財団法人海洋生物環境研究所中央研究所 所長代理
	堀口 慎也	社団法人日本中小型造船工業会塗装委員会 委員
	大谷 道夫	株式会社海洋生態研究所 主任研究員
	華山 伸一	海洋政策研究財団海技研究グループ 主任研究員

オブザーバー

	塩入 隆志	国土交通省海事局安全基準課 専門官
	丸田 晋一	国土交通省総合政策局海洋政策課 海洋涉外調査官
	黒川 忍	環境省地球環境局環境保全対策課 審査係長
	北本 剛	環境省地球環境局環境保全対策課 審査係
	池永 宜弘	国土交通省海事局安全基準課環境基準室 基準係長
	大森 正雄	国土交通省総合政策局海洋政策課 専門官
	山崎 辰彦	社団法人日本塗料工業界 国際部長
	鈴木 美和	社団法人日本海難防止協会 主任研究員
	川原 和三	財団法人化学物質評価研究機構 安全評価技術研究所 研究第二部 研究第三課 副長
	奈良志ほり	財団法人化学物質評価研究機構 安全評価技術研究所 研究第二部 研究第三課 主任
	陶山 和民	郵船ナブテック株式会社 代表取締役社長
	山口 保徳	郵船ナブテック株式会社海技事業グループ 部長
	森岡 将光	郵船ナブテック株式会社海技事業グループ 課長
	北村 徹	日本エヌ・ユー・エス株式会社環境科学研究所 副所長
	永井 則安	日本エヌ・ユー・エス株式会社 TRM ユニット 主任コンサルタント

関係者

高野 泰隆	株式会社水圏科学コンサルタント	代表取締役
吉田 勝美	株式会社水圏科学コンサルタント	企画開発室室長
長濱 幸生	株式会社水圏科学コンサルタント	研究員

事務局

(工藤 栄介	海洋政策研究財団	常務理事)
三木 憲次郎	海洋政策研究財団	海技研究グループ長
池田 陽彦	海洋政策研究財団	海技研究グループ長
(石原 彰	海洋政策研究財団	海技研究グループ長)
森 勝美	海洋政策研究財団	技術開発グループ長代理
(大川 光	海洋政策研究財団	海技研究グループ 技術開発チーム長)
南島 るりこ	海洋政策研究財団	技術開発グループ 海事研究チーム長

目 次

1.	外来海生生物による生物汚損と船体付着生物	1
1.1	外来海生生物による生物汚損の影響と環境被害	4
1.2	船体付着による外来海生生物の侵入	5
1.2.1	船体付着生物と付着メカニズム	5
(1)	Micro biofouling の形成	5
ア)	Micro biofouling の構成物	5
イ)	形成メカニズム	6
(2)	Macro biofouling の形成	7
ア)	構成生物	8
イ)	形成メカニズム	9
1.2.2	船体付着生物の生態特性	10
(1)	生物種	10
(2)	生物種の生態特性	14
1.2.3	船体付着生物の生態特性に基づく侵入メカニズム	19
1.2.4	船体付着生物の管理のポイント	22
(1)	生物のサイズに着目した管理における留意点	23
(2)	産卵に関する生態特性に着目した管理	23
2.	国際海事機関 (IMO) における外来生物の侵入を防止するための議論の動向	25
2.1	船体付着生物に関する IMO における議論とその背景	27
2.1.1	船体付着生物に関する IMO における議論	27
(1)	AFS 条約	27
(2)	バラスト水管理条約	27
2.1.2	IMO に対する船体付着生物に関する問題提起	28
2.2	船体付着生物の規制に関する議論の経緯	30
2.2.1	2010 年までの議論	30
(1)	BLG12 (2008 年 2 月) における議論	30
(2)	BLG13 (2009 年 2 月) における議論	30
(3)	BLG13 における合意事項	31
2.2.2	2010 年の BLG14 における議論と合意事項	32
(1)	BLG14 における議論	32
(2)	BLG14 における合意事項	34
2.3	作成途中の「外来水生生物の移動を最小とするための船体への生物付着の抑制及び 管理に係わるガイドライン案」	36
2.4	船体付着の外来生物侵入に対する各国の見解	39
3.	付着防止を目的とした AFS の装置・技術の現状と将来の改良の可能性	40
3.1	付着防止技術の種類	43
3.2	AFCS による付着防止技術	46
3.2.1	種類と導入現状	46
3.2.2	現在用いられている一般的な防汚塗料	50
(1)	付着防止原理	50
(2)	付着防止性能	50

(3)	コスト	52
(4)	活性物質による環境生物へのリスク	52
(5)	シリコン型防汚塗料	53
3.2.3	防汚塗料の改良の可能性	53
(1)	付着防止原理と性能	53
(2)	コスト	54
3.3	海水電解装置及びそれ以外の海洋生物付着防止装置 (MGPS)による付着防止技術	55
3.3.1	現在実用化されている海水電解装置	55
(1)	付着防止原理	55
(2)	付着防止性能	57
(3)	コスト	57
3.3.2	その他の現在実用化されている海洋生物付着防止装置	57
3.3.3	海水電解装置の改良の可能性	59
(1)	付着防止原理	59
(2)	付着防止性能	59
ア)	注入箇所の変更	59
イ)	高濃度電解液の注入	59
(3)	コスト	60
3.4	課題	60
4.	付着生物の除去を目的とした AFS 装置・技術の現状と将来の改良の可能性	61
4.1	付着生物除去技術の種類	64
4.2	入渠時の船体清掃	66
4.2.1	現状での入渠時の船体清掃	66
(1)	清掃方法	66
(2)	除去性能	66
(3)	コスト	66
(4)	除去物質の処理	67
4.2.2	入渠時における船体清掃の改良の可能性	67
(1)	清掃方法	67
(2)	除去性能	67
(3)	コスト	67
(4)	除去物質の処理	67
4.3	船体外板に対する水中洗浄 (IWC)	68
4.3.1	船体外板に対する IWC の現状	68
(1)	現状での IWC 実施方法	68
(2)	IWC の除去性能	68
(3)	コスト	69
(4)	除去物質の処理	69
(5)	IWC による剥離片の実態調査	69
4.3.2	船体外板に対する IWC 装置の改良の可能性	70
(1)	将来における IWC の改良のコンセプト	70
ア)	効率的な IWC 装置の開発・運用	70
イ)	適切な IWC 実施間隔の設定	70
ウ)	生物被度の程度に応じたソフトなブラシの採用	71
エ)	回収装置	71
オ)	回収後の陸上処理	71

(2)	IWC 装置の改良の検討.....	71
ア)	IWC 装置の改良点.....	71
イ)	IWC 実施方法の改良点.....	72
ウ)	IWC 装置の改良効果の検証.....	73
(3)	IWC 装置の改良後の性能とコスト.....	79
ア)	除去性能.....	79
イ)	コスト.....	79
ウ)	除去物質の処理.....	80
4.4	その他の部位に対する付着生物除去技術.....	81
4.4.1	現状の除去方法.....	81
(1)	シーチェストにおける付着生物の除去.....	81
ア)	除去方法.....	81
イ)	除去性能.....	81
ウ)	コスト.....	81
エ)	除去物質の処理.....	81
(2)	プロペラにおける付着生物の除去.....	81
ア)	除去方法.....	81
イ)	除去性能.....	81
ウ)	コスト.....	82
エ)	除去物質の処理.....	82
4.4.2	その他の部位に対する付着生物除去技術の改良の可能性.....	83
(1)	シーチェストにおける付着生物の除去と回収装置.....	83
ア)	除去方法.....	83
イ)	除去性能.....	84
ウ)	コスト.....	84
エ)	除去物質の処理.....	84
(2)	プロペラにおける付着生物の除去（プロペラポリッシング）と回収装置.....	84
ア)	除去方法.....	85
イ)	除去性能.....	85
ウ)	コスト.....	85
エ)	除去物質の処理.....	86
4.5	課題.....	86
5.	化学的環境リスク.....	87
5.1	化学的環境リスクの評価方法.....	90
5.1.1	リスク評価方法の概要.....	90
5.1.2	リスク評価のための PEC の算出.....	91
(1)	暴露シナリオ.....	92
(2)	モデル港湾.....	92
(3)	PEC の算出に用いたシミュレーションモデルとパラメータ設定.....	92
ア)	モデル港湾の環境パラメータ.....	92
イ)	防汚塗料の使用において船体表面から溶出する化学物質の 物理化学的性状・環境運命.....	93
5.1.3	リスク評価のための PNEC の算出.....	94
(1)	生態毒性試験データの調査と評価方法.....	94
(2)	PNEC 算出のためのアセスメント係数の設定.....	95
(3)	PNEC の算出.....	96

5.1.4	環境生物への化学的リスク評価の判定	96
5.2	現状のベース技術のリスク評価	97
5.2.1	防汚塗料の使用において船体外板から溶出する化学物質による環境生物への リスク評価	97
(1)	評価対象の化学物質	97
(2)	PNEC の算出	97
(3)	暴露シナリオの設定	98
ア)	入港船舶数と停泊時間	98
イ)	船体の浸水面積と防汚塗料より溶出する化学物質の溶出量の算出	98
ウ)	化学物質の溶出速度と排出量	99
(4)	PEC の算出	100
(5)	リスク評価 (PEC/PNEC) 結果	101
(6)	防汚塗料の使用において船体表面から溶出するその他の化学物質の 環境リスク評価	102
ア)	環境生物に対するリスクの懸念が無いと推察された化学物質	102
イ)	環境生物に対するリスクの懸念が小さいと推察された化学物質	102
ウ)	今後の使用に関して留意が必要と考えられる化学物質	102
5.2.2	防汚塗料の使用過程において船体の各部位から溶出する化学物質の 環境生物へのリスク	103
(1)	船体部位別の PEC 算出方法	103
(2)	船体部位別のリスク評価結果	104
5.2.3	船体外板等の水中洗浄 (IWC) 実施による化学物質の環境生物へのリスク	105
(1)	水中洗浄 (IWC) 技術の実施過程において生じるリスク	105
(2)	評価対象の化学物質	105
(3)	暴露シナリオの設定	106
ア)	IWC を実施する船体浸水面積の算出	106
イ)	IWC 実施による化学物質の排出量の算出	107
(4)	MAM-PEC モデルによる PEC 算出のためのパラメータ	109
(5)	IWC の実施により排出される化学物質の PEC 算出結果	109
5.2.4	防汚塗料の使用による溶出と IWC 実施で追加して排出される化学物質の 合計 PEC による環境リスク	110
(1)	IWC 実施による環境生物へのリスク評価 (PEC/PNEC) 結果	110
(2)	防汚塗料の使用と IWC 実施による合計 PEC でのリスク評価	110
5.2.5	海水電解装置の使用による現状技術のシナリオでのリスク評価 (冷却水内部配管に 0.3 mg/L の塩素化合物濃度を適用)	114
(1)	暴露シナリオの設定	114
ア)	モデル港湾	114
イ)	海水電解装置の稼動条件と塩素化合物の排出シナリオ	114
(2)	副生成物の同定	114
(3)	排出量の算出	115
(4)	PEC の算出	116
ア)	PEC 算出に用いるシミュレーションモデル	116
イ)	MAM-PEC モデルでの環境パラメータ	116
ウ)	評価対象化学物質の物理化学的性状と環境運命	116
(5)	PEC の算出結果	118
(6)	PNEC の算出	119
(7)	リスク評価 (PEC/PNEC) 結果	120
(8)	結果と考察	121

ア)	海水電解装置の使用によって排出される残留塩素（塩素化合物）による環境生物へのリスク	121
イ)	副生成物による環境生物へのリスク	121
ウ)	リスク評価結果の不確実性分析	121
エ)	クロラミンによる環境生物へのリスク	122
5.3	改良を含む新規技術のリスク評価	123
5.3.1	防汚塗料からの溶出によるリスク	123
5.3.2	水中洗浄（IWC）のリスク	123
(1)	暴露シナリオ	123
(2)	将来（改良後）の IWC 実施による環境リスク	125
(3)	IWC の実施により剥離した塗膜片から溶出する化学物質の溶出継続時間の推定	125
(4)	IWC の実施により剥離した塗膜片の底泥中濃度と挙動	126
5.3.3	海水電解装置をシーチェスト等の開放系部位に適用したケースのリスク	126
(1)	暴露シナリオの設定と塩素化合物の PEC の算出	126
(2)	PEC の算出結果	127
(3)	PNEC の算出	128
(4)	リスク評価（PEC/PNEC）結果	128
(5)	結果と考察	128
5.4	化学的環境リスク評価結果のまとめ	130
6.	生物移入リスク	131
6.1	生物移入リスクの評価手法	133
6.1.1	リスク評価手法の考え方	133
6.1.2	生物移入リスク計算モデルの概要	135
(1)	生物移入リスク計算モデルの基本条件	135
(2)	モデル基本式	136
ア)	自己研磨型防汚塗料による幼生付着防止効果の設定	137
イ)	自己研磨型防汚塗料による航海中の付着生物幼体の剥落効果の設定	138
ウ)	付着防止効果に剥落効果を加えた時の付着個数の設定	139
エ)	船体に付着した個体の性成熟の設定	139
オ)	性成熟個体からの産卵の設定	140
カ)	付着幼生の付着数、成長速度及び付着面積	140
(3)	生物移入リスク計算ケース	141
6.2	適用技術の生物移入リスク評価	143
6.2.1	付着防止技術（AFS: Anti-Fouling System）	143
(1)	AFCS（Anti-Fouling Coating System）の評価	143
ア)	現状で使用されている AFCS の評価	143
イ)	性能向上防汚塗料の評価	145
(2)	MGPS（Marine Growth Prevention Systems）の評価	148
ア)	現状の海水電解装置の評価	148
イ)	将来における改良後の海水電解装置の評価	148
6.2.2	付着生物除去技術	152
(1)	現状の IWC（In-water cleaning）評価	152
(2)	将来における改良後の IWC 評価	152
ア)	IWC 実施の有無による産卵数の違いの評価	153
イ)	IWC 実施国の違いによる産卵数の違いの評価	156
ウ)	IWC 実施間隔による産卵数の違いの評価	158

エ)	IWC 除去物質の回収の評価	160
6.2.3	船舶運用上の影響 (沖待ちの評価)	165
(1)	沖待ちの評価	165
(2)	沖待ちした場合における IWC の評価	167
6.3	適用技術の生物移入リスク評価のまとめ	171
6.3.1	付着防止技術	172
(1)	付着防止技術としての AFCS 中の防汚塗料の評価	172
ア)	防汚塗料の現状評価	172
イ)	改良後の防汚塗料の評価	172
(2)	付着防止技術としての海水電解装置の評価	172
ア)	海水電解装置の現状評価	172
イ)	改良後の海水電解装置評価	173
6.3.2	付着生物除去技術	173
(1)	IWC の現状評価	173
(2)	改良後の IWC の評価	173
6.3.3	船舶運用上の影響 (沖待ちの評価)	174
7.	外来生物の船体付着総合管理と運用	175
7.1	総合的な付着生物管理システムで使用する用語の定義と管理技術、評価の対象	178
7.1.1	用語の定義	178
(1)	本報告書における用語の定義	178
(2)	管理システムに関する用語	180
7.1.2	本報告書における各管理技術 (AFS: Anti-Fouling System) の関係	181
7.1.3	本報告書において評価対象とした管理技術、化学リスク、生物侵入リスク	182
7.2	総合的な付着生物管理システムの概要	183
7.2.1	背景	183
7.2.2	総合的な付着生物管理システムのコンセプト	183
(1)	性能基準、搭載基準及び運用基準の使い分け	183
(2)	性能基準と搭載基準の考え方	184
ア)	国際的統一性	184
イ)	防汚性能と化学的リスクの両立	184
ウ)	船体部位別の構成	184
(3)	運用基準と特別海域	185
(4)	沖待ちに対する対策	185
7.2.3	総合的な管理システムの概要	185
(1)	管理システムを構成する要素技術	185
ア)	付着防止技術	186
イ)	除去技術	186
(2)	管理システムが要求する基準の概要	187
ア)	性能基準	187
イ)	搭載基準	190
ウ)	運用基準	190
7.3	総合的な付着生物管理システムの課題	192

参考資料

引用文献

略語・用語集

1. 外来海生生物による生物汚損と船体付着生物

1.0.1 本章では、外来海生生物による生物汚損(biofouling)を引き起こす大きな要因と考えられている、船体付着を經由した海生生物の移入及び侵入のメカニズムと、このような biofouling による被害を防止するための付着生物管理に係わるポイントを取りまとめた。ここで、外来海生生物とは、何らかの人的要因によって本来の生息地から他国海域へ運ばれ定着した海生生物のことである。また、生物侵入(bio invasion)リスクとは、海生生物が移入し定着した結果、人・動物・植物、経済・社会活動及び海洋環境に影響や脅威を与える危険性のことである。

1.0.2 我が国においては、外来海生生物の移入・定着問題が顕在化する以前から、付近の海域にもともと分布していた海生生物(在来種)による影響や環境被害の問題は存在した。第二次世界大戦が終結して以降、昭和時代の末までは、沿岸域利用が急速に進められた時代であり、また海生生物の付着による問題が大きくクローズアップされた時代でもある。例えば、冷却水として大量の海水を必要とする火力及び原子力発電所においては、冷却水の導水管内あるいは熱交換器に海生生物が大量に付着して、導水効率もしくは熱交換効率を低下させ、最悪の場合発電所を運転中止に追い込むことが大きな問題となった。この背景として、第一には同じ時代に盛んに行われた沿岸域の埋め立て及び港湾施設の拡充、そして第二に経済発展に伴う沿岸海域の富栄養化が挙げられる。前者は、付着性の海生生物に適した生息基盤となりうる人工護岸を増加させることで被害の拡大を引き起こし、後者は、在来種間の淘汰と環境の極端な変化に適応可能な海生生物の増加を容易にしたと考えられる。このような状況は、日本だけでなく沿岸に産業施設を立地する国々で少なからず見られた。

1.0.3 他方、この時代は、海運による国際貿易が盛んになり、物流手段としてタンカーなどの大型船及びコンテナ船などの高速船が多く使われ出した時代と重なる。このため、日本だけでなく海運が発達した全ての国々において、外来海生生物の移出入の機会が増加したと考えられる。付着生物の被害を受けやすい産業施設の増加と、移入の機会の増加が複合的に重なった結果、これまでの在来種に加え、外来から移入した海生生物による影響や環境被害が世界各地で顕著化してきた。

1.0.4 外来海生生物による影響や環境被害は、世界の沿岸国共通の問題であり、全ての国が同様に危険にさらされているのが現状である。被害事例は世界各国から多数報告されており、例えば米国における年間の被害額は24億ドル(約2,160億円)との報告もある。このような状態を放置した場合には、生物多様性の喪失による環境被害だけでなく、沿岸立地産業や水産業に対する社会経済的な被害を増大させることになる。IMO(国際海事機関)においても、外来海生生物による biofouling の結果引き起こされる影響や環境被害及びこれに対する対策の必要性が既に認識され、活発な議論が行われている(2章参照)。

1.0.5 船体外板、海水取水管及び海洋構造物の浸水表面など、水中の数 cm²以上の面積をもつ固体表面(付着基盤と呼ばれる)に形成される付着生物群集は、初めに単細胞微生物を主体とする被膜形成(micro biofouling と呼ばれる)のステージを経る。次に、海藻やフジツボなどの多細胞生物が付着して群集を形成しているステージ(macro biofouling と呼ばれる)へと遷移する過程をたどる。

1.0.6 Micro biofouling は、①バクテリアや珪藻類等の顕微鏡を用いなければ見えない単細胞原生生物、②単細胞原生生物が生成したスライム状物質(通常は細胞外の多糖類)等の微小生物とそれらが生成

したスライム層(slime layer)が船体表面を被覆している状態である。Micro biofouling が形成されると、やがてその上に海藻やカンザシゴカイ類、フジツボ類、ホヤ類のような固着不動性の多細胞生物群集、及びムラサキイガイなどのように足糸によって付着する可動性の多細胞生物群集の発達が見られるようになる macro biofouling のステージへ進行する。一般に、岸立地産業や水産業に対して影響や環境被害を引き起こすのは、macro biofouling のステージである。

1.0.7 このような macro biofouling の状態においては、空間がより複雑に、しかも立体的になるため、エビ、カニ類、ヨコエビ、ワレカラ類や巻き貝など、単体では船体に付着できないような動植物(ヒッチハイカーとも呼ばれる)が隙間に生息するようになる。本来付着性を持たない生物の侵入も世界各地で発見されているが、上記の過程をたどることによって、船体への付着経路で移入している可能性が考えられる。

1.0.8 これまで述べたような外来海生生物の生態特性を考慮しながら、船体に付着して日本国から他国の海域に侵入し、社会的経済的影響や環境被害を生じる可能性が高い海生生物種の選定を行った。選定方法としては、日本ないし周辺海域に生息する生物種の水温及び塩分の生存至適環境条件と、海外の代表的な港湾における環境条件を比較し、類似している場合に侵入する可能性が高い生物と評価した。次に、侵入する可能性が高いと評価した生物種について、過去に引き起こした被害事例を基に、事例数や被害額が多いほど、社会経済及び沿岸生態系への影響や被害が高い生物種と評価し、抽出を行った。検討の結果、侵入する可能性が高く、かつ社会的経済的影響や環境被害を引き起こす可能性が高い生物として、海藻やカンザシゴカイ類、フジツボ類、ホヤ類などの固着生物と足糸によって強い付着力を持つ二枚貝類に属する 13 種が選定された。

1.0.9 本調査においては、この 13 種を特に高い侵入リスクを有する生物の代表種と考え、その生態特性、移入・侵入メカニズムの整理及びそれらに基づく管理方法の検討を行った。選定された 13 の生物種は、いずれの成体も付着基盤に固着して生活するが、それ以前のライフステージでは、浮遊期(水中に漂っている時期)を持っている。浮遊期は、性成熟個体から産卵あるいは配偶体として放出された後に数日から 2 ヶ月の期間であり、その後付着期を迎え船体等の基盤に付着する。付着後は、一生を基盤に付着した状態で過ごすと考えられる。このような生態特性を考えた場合、船体に付着した外来生物の付着・侵入の主なメカニズムは次の過程をたどっていると想定される。①港湾付近に生息する海生固着生物が産卵し浮遊幼生が港湾海域に分布、②船舶が港湾に停泊時に浮遊幼生が船体に付着、③船体に付着した状態で成長して性成熟、④性成熟後に産卵に適した他国の環境で卵を放出、⑤卵が放出された海域の環境が生息に適している場合、卵から発生した幼生が基盤に付着、⑥付着した個体が成長して性成熟し、その次の世代となる卵を放出することで他国の海域への定着に成功する。このような侵入過程を考えた場合、外来海生生物の移入、定着に関する影響や被害を防止するためには、②で示した船体への付着を防止することに加え、④で示した産卵機会を可能な限り奪うことが重要である。②で示した船体への付着を防止するための方策としては、自己研磨型の塗料に代表される AFCS(Anti-Fouling Coating System、3 章参照)等の技術として古くから検討されてきた。しかし、④で示した産卵機会を奪う方策として最も有効な入渠時の清掃行為は本船の活動に与える影響が大きく、実施頻度を増加することには大きな困難を伴う。そこで、④の産卵機会を奪うために、使用中に外板などに生物が付着したかどうかを目視などで確認することや、入渠時だけでなく既に行われている水中洗浄時においても、生物を回収することが重要になると考える。

1.0.10 このような観点から、付着生物の大きさは船体付着生物の管理との関連において重要となる。本

調査において、性成熟個体の最小サイズや、動植物の付着初期における最小サイズの調査を行った。例えば、付着生物の除去においては、安全係数を考慮すると、サブミリサイズの付着物の回収が望まれると推定された。ただし、海藻の配偶子を含めて全ての生物侵入プロセスを防止するためには、回収対象とする生物のライフステージとその最小サイズを把握することが必要であるが、現状においては生物学的にも十分に解明できていない。したがって、検査において認知すべき生物とその最小サイズ、あるいは回収において必要な生物とその最小サイズを、生物学的な見地から導くことは現時点では困難であると考え。このため、現実的かつ実効性のある成体付着の総合的管理方策は、このような生物学的な見地からではなく、管理システムに適用する製品や装置の将来における技術的な限界（例えば回収のための網の編み目サイズ、試験において認知すべき生物のサイズなど）から設定することが合理的であると考えられた。

1.1 外来海生生物による生物汚損の影響と環境被害

外来海生生物とは、何らかの人的要因によって本来の生息地から他国海域へ運ばれ、移入し、さらに定着した海生生物のことである。また、生物汚損 (biofouling) とは、海生生物が自然物あるいは人工物に大量に付着することで、人間活動、産業活動及び海洋利用に対して何らかの損害を与えることである。

海生生物の biofouling による影響や環境被害は、我が国においても明治時代から発生している古くからの問題である。この時代は、国際海運も未発達であり、外来海生生物の侵入はほとんどなかった。当時の海生生物による biofouling は、元来我が国の海域に分布していた在来種が主な原因であり、被害の対象は主に船舶と棧橋であったと考えられる。付着生物による船舶に対する影響や被害は、船舶と棧橋が木造であった時代と鋼鉄船出現以降の時代で対象種と被害が大きく異なる。前者における影響や被害は、船喰い虫や木喰い虫が船舶や棧橋に穴を開ける事例が主体である一方、後者における影響や被害の主な要因はフジツボ類であり、船速を低下させることが主な被害であった。

第二次大戦が終結して以降、昭和時代末までの我が国は、沿岸域利用の多角化が急速に進められた時代である。その代表としては、火力及び原子力発電所に代表される大量の海水を冷却水として使用する沿岸の工業施設が挙げられる。これら工業施設で問題となった生物汚損による被害としては、冷却水の導水管内及び熱交換器に大量に生物が付着し、冷却水の導水が阻害されるとともに、熱交換効率が低下することであり、最悪の場合施設の運転停止に繋がることもありうる。

また、同じ時代に盛んに行われた沿岸域の埋め立て及び港湾施設拡充は、海生生物の生息基盤となるコンクリート等の人工護岸を増加させ、侵入に好都合な環境を提供した。加えて、経済発展に伴う海域に放出される排水等の富栄養化も、在来種の淘汰と繁殖能が優れた付着生物の寡占化を容易にした要因になったと考えられる。このような状況は、日本だけでなく沿岸に産業施設を立地する国々で少なからず見られた。

他方、この時代は、海運による国際貿易が盛んになり、物流手段としてタンカーなどの大型船及びコンテナ船などの高速船が多く使われ出した時代と重なる。このような変化は、日本に対してだけでなく海運が発達した国々の全てに、外来海生生物の移入の機会を増加させたと考えられる。付着生物の被害を受けやすい産業施設の増加と移入の機会の増加が複合的に重なった結果、これまでの在来種に加え、外来から移入した海生生物の生物汚損による影響や環境被害が世界各地で顕著化してきた。

生物汚損被害を引き起こし顕著化させた外来海生生物は、ムラサキイガイやフジツボ類が主体であるが、これらは、産業施設に対する悪影響だけでなく、水産業に対する経済被害も引き起こした。例えば、広島湾のカキ養殖場では養殖施設に大量の管棲ゴカイ類が付着し、カキの成長を阻害する経済被害を引き起こしている。

以上のように、海生生物は、古くから生物汚損被害を引き起こしていた。船舶による輸送のグローバル化に伴い、外来海生生物の侵入機会が増加することで、在来種だけでなく外来生物による生物汚損が増加・拡大し、その物理的・経済的被害は顕著化した。外来海生生物による汚損被害は、世界の沿岸国共通の問題となっており、全ての国が同様に危険にさらされているのが現状である。被害事例は、現在でも、我が国だけでなく、世界各国から多数報告されており、例えば米国における年間の被害額は、24億ドル (約 2,160 億円) にのぼるとされている (岩崎 2009)。このような状態にある外来海生生物による生物汚損をそのまま放置した場合には、生物多様性の喪失による環境被害だけでなく、沿岸立地産業や水産業に対する社会経済的な被害の可能性を増大させることになる。我が国にとっても早急に外来生物種による生物汚損に対する方策を検討する時期にきていることは論を待たない。同時に、IMO (国際海事機関) においても、①外来海生生物による生物汚損の被害及び②これに対する方策の必要性が既に認識され、議論が活発に行われている (2章参照)。

本章では、外来海生生物の生物汚損問題を引き起こす大きな要因と考えられている船体付着生物の侵入メカニズムと付着生物管理に係わるポイントを取りまとめた。

1.2 船体付着による外来海生生物の侵入

1.2.1 船体付着生物と付着メカニズム

船体など水中の付着基盤に形成される付着生物群集は、大きく 2 段階の経過をたどって形成される。初期には、単細胞生物等による微生物被膜 (biofilm) が形成され、次いで海藻、フジツボなどの多細胞生物の付着へと遷移する過程をたどる。以下に各段階に分けて記述する。

(1) Micro biofouling の形成

IMO (国際海事機関) で現在策定が進められている“外来水生生物の移動を最小とするための船体への生物付着の抑制及び管理に係わるガイドライン案” (以下、ガイドライン案) では、細菌、珪藻類等の顕微鏡を用いなければ見えない単細胞原生生物や、それらに由来する物質 (通常は細胞外の多糖類) が形作るスライム状物質を micro fouling と定義している。なお、本報告書においては、被覆の程度によらず、細菌、珪藻類等の顕微鏡を用いなければ見えない単細胞原生生物及びそれらが生成したスライム状物質が船体表面を被覆している段階 (ステージ) を micro biofouling として表記する (7.1、Table 7.1-1 参照)。

ア) Micro biofouling の構成物

Micro biofouling は、以下の 2 つが主な構成物である。

- ① バクテリアや珪藻類等の顕微鏡で観察可能な単細胞原生生物及びそれら微小生物群集の遺骸
- ② バクテリアや単細胞原生生物が生成したスライム状物質 (通常は細胞外の多糖類)

この他、有機分泌物や被膜に捕捉された有機残渣、無機沈殿物、腐食生成物などを含んでいるとされる。微小生物群集は、粘性のある物質により船体表面に強固に付着していると考えられ、通常の船速程度の流速では、シリコーン系塗料など一部の撥水性の高い塗装面に付着したものなどを除いて剥離しないと考えられている。このような micro biofouling の微生物皮膜 (スライム層またはスライム状物質) には、一般的には細菌や珪藻類しか含まれていないが、10 ミクロンからミリ単位の海藻の配偶体や初期の発芽体 (Figure 1.2-1 参照) が含まれるという報告もある (川井ら 2010)。なお、micro biofouling については、海水中の船体が緑色に見えるほどに発達することがあることも知られている。

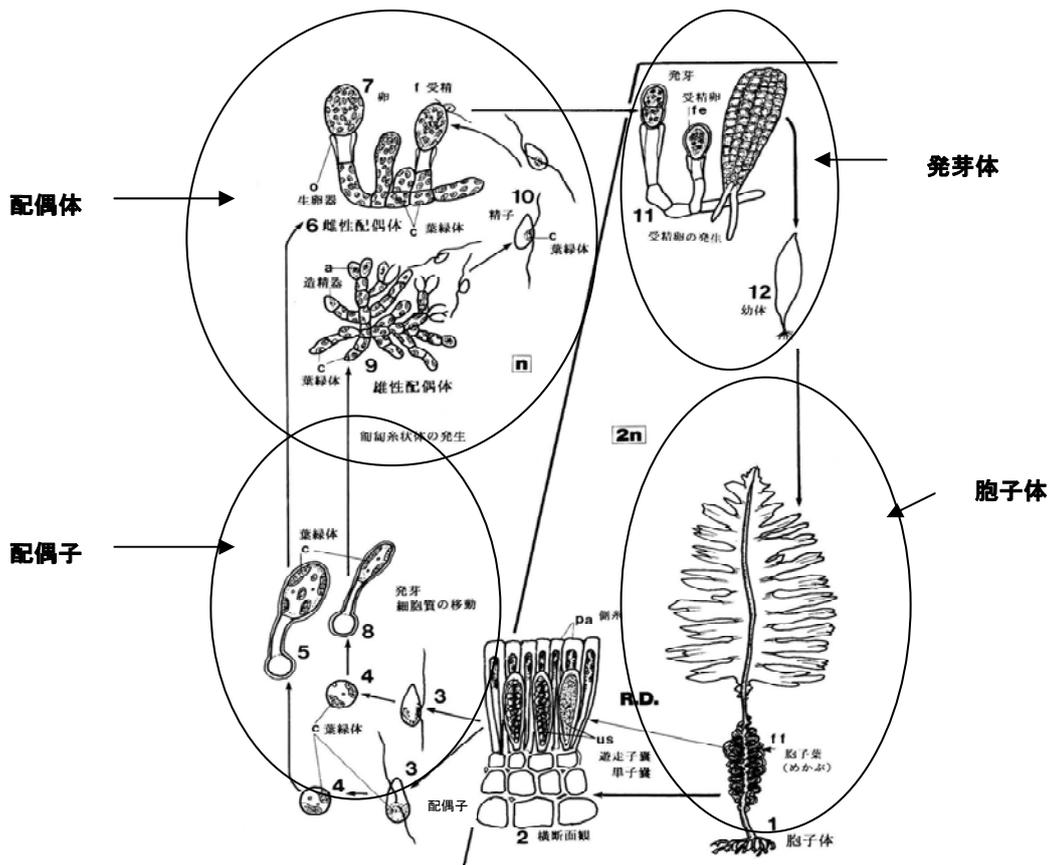


Figure 1.2-1 海藻（ワカメ）のライフステージにおける配偶体及び発芽体
 (堀 1993 より一部変更)

イ) 形成メカニズム

この micro biofouling の形成過程については、調整段階、先駆的バクテリアによる薄いスライム状の層の初期形成段階、それに続く珪藻その他の微小藻類、原生動物などの単細胞微生物付着段階、それらの増殖段階の 4 段階が認められるとの報告がある (Lewis 1998)。

微生物被膜形成の最初の調整段階では、水中の有機及び無機物質が基盤に吸着し、被膜が形成される。これは基盤が水に漬けられて数秒で起こる。この被膜は基盤表面の物理化学的性質を変え、それに続く微生物の付着に好適な新たな基盤表面を作り出す。そして次の段階が、この被膜上への微生物の付着である。最初に付着する微生物は棒状のバクテリアで、海水への基盤浸水後数時間で起こる。これらの初期バクテリアは栄養を得て新しい細胞を作り出し、また細胞表面に分泌された多糖類からなる細胞外ポリマーが基盤との間隙を架橋結合で結んで強固な付着が起こる。第 3 段階は、棒状以外の繊維状のバクテリアや珪藻などの微小藻類、原生動物等の単細胞微生物の付着、加えて海藻の配偶体の付着と次の生育ステージである初期発芽体である。これに続く第 4 段階は第 3 段階までに発達したスライム層の増殖過程であり、群集はより複雑になって多細胞生物が付着する前段階を形成する (Figure 1.2-2 参照)。なお、第 4 段階まで進行した場合、海水中の船体が緑色に見えるほどに発達することも知られている。

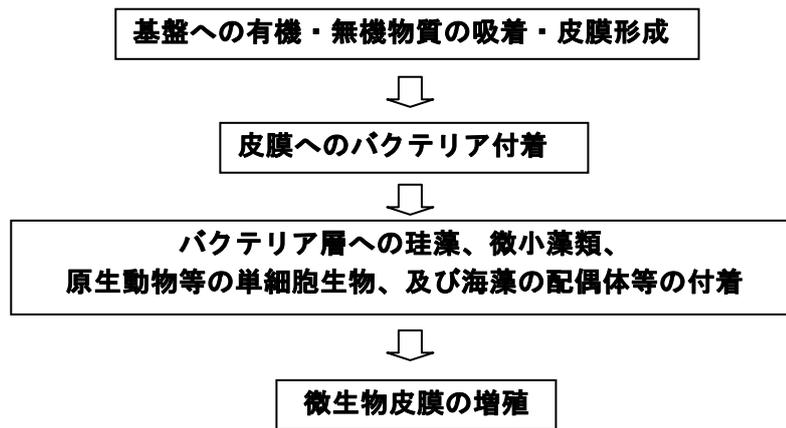


Figure 1.2-2 船体への微生物皮膜形成メカニズム

スライム層の形成は、その組成や発達速度は最初に作られる調整段階の被膜の状態や、水質、微生物群集の種組成、基盤の性状などに影響され、さまざまに変化する。スライム層の発達速度に影響をおよぼす主な要因は、水質の栄養塩濃度である。栄養塩濃度が高い内湾では発達速度が速く、濃度が低い外洋では遅くなることが知られている (Mitchell et al. 1984)。また、biofilm の発達と水温の関係については、低水温ではその発達は遅いが、水温が高くなるほど発達は速くなると考えられている (Pedersen 1982, Susan 2005, Molino et al. 2009)。

船体表面に適用される汚防塗料の違いによる影響については、バイオサイドと呼ばれる活性物質を含む汚防塗料が使用されている場合、その毒性に耐えうる生物種だけが付着するため、バイオサイドを含まない塗料に比べて付着する生物種の組成が単調になるなどの違いがあると考えられる (Yebra et al. 2006)。一方、フロリダで行われた実験 (Cassé et al. 2006) では、基盤浸水後 60 日には汚防塗料の種類に関わらず生物種組成、付着量とも似通った状態になるとの指摘がある。季節や場所による違いはあるかもしれないが、一定時間の経過後は活性物質の有無及びその種類による差が少なくなるものと考えられる (Yebra et al. 2006)。これは、汚防塗料が塗布された表面であっても、一定時間の経過後は次の macro biofouling (次項(2)参照) に移行することを防止できない可能性のあることを指し示していると考えられる。

Biofilm の発達速度については、銅化合物を活性物質とした汚防塗料では、浸水後 1 ヶ月以内に珪藻による biofilm が形成されるが、有機スズ化合物 (TBT) 系の汚防塗料ではその形成に 1 年を要するなど、用いられる活性物質の成分によって速度に差があることが知られている (Yebra et al. 2006)。

(2) Macro biofouling の形成

IMO で現在策定が進められているガイドライン案では、船体に付着し、目視で確認可能な大きさの群集を形成した大型の多細胞生物を macro fouling と定義している。なお、本報告書においては、船体の浸水表面へ目視可能なサイズの大型多細胞生物の付着・成長が生じている段階 (phase) を macro biofouling として表記する (Table 7.1-1 参照)。

Macro biofouling を構成する大型の多細胞生物の付着には、以下の要因が関係すると考えられている (内海 1947)。

- ① スライム層は大型の多細胞の付着生物の浮遊幼生にその付着を容易にする足場を与える。
- ② 大型の多細胞の付着生物の幼生に食餌を供給する。
- ③ 汚防塗料の表面をスライム層で覆うことにより塗料の汚防成分の溶出を阻害し、汚防効果を弱

めて大型の多細胞生物の付着を容易にする。

- ④ biofilm を形成するバクテリアによる蛋白性物質の分解、亜硝酸塩あるいは硝酸塩の還元、あるいは有機酸の利用がアンモニアを生成し、これによって防汚塗料表面のアルカリ度が増すと、大型の多細胞の付着生物から分泌される石灰性膠着物質（セメント質）の沈積が起こりやすくなる。

すなわち、macro biofouling は、micro biofouling が遷移（succession）した次の段階である。別の言い方をすれば、一定の micro biofouling が生じていない限り、macro biofouling の段階は原理上発生しないことになる。なお、海藻であるワカメは、配偶子の段階での付着は micro biofouling であるが、船体表面において孢子体に成長した以降は macro biofouling として定義される。

ア) 構成生物

船体に付着して侵入する外来海生生物は、海藻やカンザシゴカイ類、フジツボ類、ホヤ類などの固着生物と足糸によって強い付着力を持つ二枚貝類が主体である。これらの生物の多くは付着性であり、性成熟期の成体の多くは基盤に固着して移動しない。しかし、幼生期に浮遊期間を持つため、この時期に水中を移動し、新たな基盤へ移動することが可能である。

Macro biofouling の状態が進行すると、このような生物が形作る空間がより複雑に、しかも立体的になるため、エビ、カニ類、ヨコエビ、ワレカラ類や巻き貝など、単体では船体に付着できないような動植物（ヒッチハイカー生物とも呼ばれる）も間隙に生息するようになる。

ここで、macro fouling による被害を考えてみる。同被害としては、人的健康被害、経済被害、生態系破壊が知られている。我が国における macro fouling による主な影響や環境被害については、Table 1.2-1 に示した。同表に示したように、生物の付着による影響や被害としては、水産養殖施設等に付着して成長を遅らせ、発電所冷却水の取水路に付着して冷却効率を低下させる等の被害が発生している。一方で、人的健康被害に関する被害事例は現在までに報告例はない。

ここで重要な点は、macro fouling が人間活動、産業活動及び海洋利用に対して何らかの影響・被害を与える場合、その構成生物は必ずしも外来生物であるとは限らない点である。これは、我が国に限らず各国において沿岸の産業施設に対しても同様であると考えられる。

Table 1.2-1 我が国における macro fouling による被害の概要

生物種	被害の概要	備考
海藻類	船底等に付着、成長して船速の低下や燃料消費量の増大、在来海藻類との競合による生物相の変化	1 個体から再生産可能な藻類が侵入(定着)した場合、極めて速やか、かつ広範囲に生息域を拡大する可能性がある
海綿類	水産養殖施設や海水取水施設に付着し、養殖対象生物への被害や、取水/排水効率の低下を招く	フジツボ類、ムラサキガイ、海藻類と比較すると被害は少ない
ヒドロ虫類	水産養殖施設に付着して潮通しの悪化、海水取水施設への被害	フジツボ類、ムラサキガイ等と同様に、主要な汚損生物の一つである
クラゲ類	大量の浮遊性ミズクラゲによる取水施設への被害	-
管棲ゴカイ類(ゴカイ類、カンザシ類等)	養殖生物や有用海藻に付着し、生育の妨害、船体に付着して船速の低下や構造物の沈降を招く	主要な汚損生物の一つである
苔虫類(ホンダワラコケムシ等)	同上	同上
二枚貝(ムラサキガイ、カキ類等)	養殖施設に付着し、潮通しや水質の悪化、施設の沈降を招く 餌等の競合による養殖生物の生育悪化 発電所や船の冷却水の閉塞、腐食 海上の灯浮標の視認妨害や沈降 船速の低下や燃料消費量の増大	我が国において、最も主要な汚損生物である
フジツボ類	同上	同上
ホヤ類	同上	主要な汚損生物の一つである
ヒトデ類	護岸及び取水施設フィルターに付着し、取水/排水効率の低下を招く。魚網を詰まらせる漁業被害を招く。	わが国においても漁業被害を引き起こしている。

注; 付着生物研究会, 1986.から改変

イ) 形成メカニズム

Micro biofouling を構成する biofilm が船体表面に形成されると、やがてその上に海藻やカンザシゴカイ類、フジツボ類、ホヤ類のような固着生物群集やムラサキガイなどのように足糸によって付着する生物群集の発達が見られるようになる。この段階を macro biofouling と呼ぶ。Macro fouling が発達するにつれ、それを構成する付着生物群集はより複雑に、しかも立体的になるため、前述したように、エビ、カニ類、ヨコエビ、ワレカラ類や巻き貝など、通常では船体に付着できない生物が空間を利用して生息するようになる。

以上のように、biofilm 形成後、時間の経過と共に船体にはさまざまな多細胞生物による macro biofouling が見られるようになる。具体的には、初期に付着する macro biofouling は小型で成長と成熟が速く、しかも繁殖期が長い傾向にある。Micro biofouling がより進行した段階では、例えばホヤ類のように比較的大型で寿命が長い生物も見られるようになる。ただし、初期に付着する macro biofouling やその後のステージの進行は、船舶の運航状態、船体部位の形状、光や流れ等の環境条件、及び出渠時期などによって異なる。

1.2.2 船体付着生物の生態特性

(1) 生物種

船体付着による外来海生生物の侵入を整理するためのケース・スタディーとして、日本の港湾で船体に付着し、他国の海域に侵入し、何らかの影響や環境被害を引き起こす可能性がある付着生物種を選定した。選定した生物種については、それぞれの生態特性を調査、整理した。本調査においては、日本から、①豪州、②北米西岸、③中東への生物移入を評価対象とした。Figure 1.2-3 に、これらの生物種の選定に使用したフローを示す。なお、この選定フローは、本調査において独自に設定したものである。

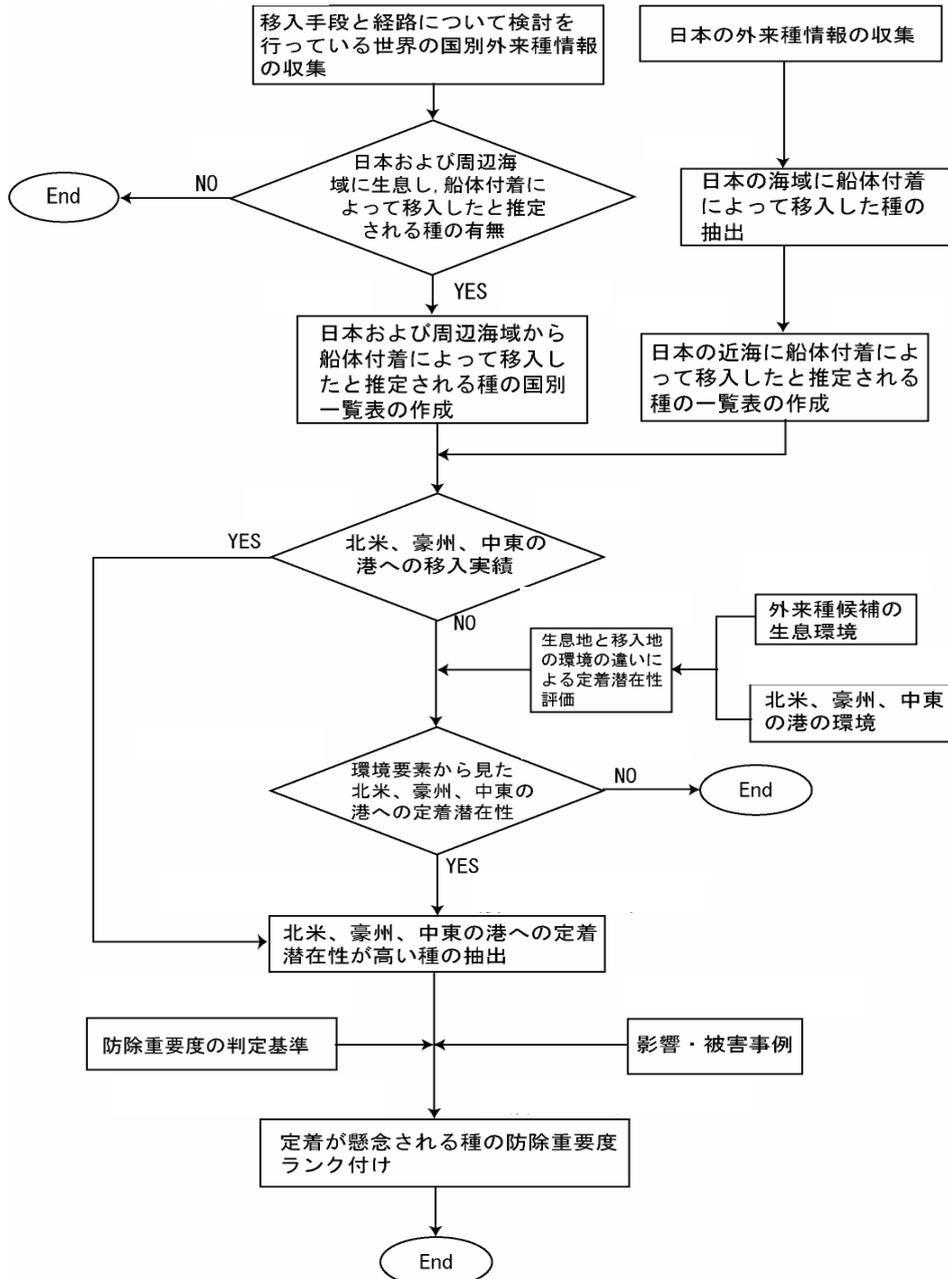


Figure 1.2-3 生物侵入による影響・被害を生じる外来生物の選定フロー

この場合の侵入とは、生物が本来の分布域から、海上輸送など人為的機構により他の海域に移入し、定着した、あるいは定着しつつあることである。定着とは、侵入した生物種が新しい生息地で、継続的に生存可能な子孫を作ること的成功することを指す。それに対して移入（移出入）とは、海上輸送など人為的機構により、本来の分布域から生物が移動することを意味する。生物移入の後、生物が定着に成功した場合に侵入となる。

既に前項までに示した一般的に侵入する可能性が高い生物のうち、侵入する可能性が高い、または可能性が考えられる生物に関して、過去に人の健康被害、経済的な被害及び生態系への影響を及ぼした事例の有無、すなわち外来生物の侵入リスクによる影響や環境被害についての発生基準を設定し、リスクが高いと考えられる生物種を選定した。

選定に用いた侵入リスクの評価方法は以下の通りである。

- ① 日本から生物が侵入する可能性がある対象港として、我が国を經由する主な航路である北米航路のコンテナ船の寄港地であるロングビーチ、豪州航路のバルクキャリアーの寄港地であるダンピアとニューキャッスル港、中東航路の原油タンカーの寄港地としてイランのカーグアイランドの4港を選出。
- ② 日本から侵入する可能性がある外来種候補として、これまで諸外国で外来種として記録された日本ないし周辺海域に生息する種をピックアップし、それらの種が4港へ侵入する潜在性の高さを評価した。なお、ここでは、既に侵入している種についても、以下に掲げる理由によって検討の対象に含めた。
 - a. 既に侵入した種に対して規制や撲滅の対策が取られている場合、その種の新たな持ち込みは実施中の対策への障害となる。
 - b. 既に侵入した種が日本のものとは別の遺伝子集団に属する場合、同一種であっても日本からの持ち込みは新たな侵入になる。
 - c. 既に侵入した種の個体群が小規模で問題を起こしていない場合でも、持ち込みの繰り返しは個体群の大規模化とそれに伴う種々の問題を引き起こす恐れがある。
- ③ 侵入の可能性は、水温から判断される気候帯と海水塩分の2つの環境要素を用い、生物生息地域と対象港間の両要素の類似性を評価基準とした。
- ④ 侵入する可能性が高いと評価された種は、影響・被害事例をもとにした危険性評価基準を加味し、侵入と影響や環境被害を発生する可能性についてランク付けを行った（Table 1.2-2 参照）。

以上の手順により①で選定した4港湾間で生物侵入による影響や環境被害の発生ランクが高いと評価された生物種は13種である（Table 1.2-3 参照）。人間に対する健康被害も被害の対象に含めた選定フローとしたが、今回の調査においては人への健康被害の事例は確認されなかった。

なお、エボヤの侵入によって健康被害が生じる可能性があるとの報告がある（Hayes et al. 2005）。この報告では、過去においては日本のカキ養殖において殻に付着したホヤからの分泌液が、ぜん息などのアレルギー症状を起こすとの事例が紹介されている。しかし、実際に豪州などにおいて同様の労働環境下において症例が確認されたわけではなく、あくまでも将来におけるリスクの可能性について言及したものである。本事業では、このような症例はカキ剥き業者の劣悪な労働環境下における特殊な労働暴露における事例であり、既に他の要因から改善された労働環境においてはたとえエボヤが移入定着したとしても健康被害を及ぼす可能性が非常に低いと判断する。

カーグアイランドでは、生物侵入による影響や環境被害を引き起こす最高ランクの9を超えるスコアの生物種は該当なしであった。このため、生物侵入による影響や環境被害発生ランクを9以上で選定した場合、カーグアイランドにおける被害・環境影響ランク8のタテジマフジツボとサラサフジツボの2種が除外され、計11種となった。この結果から、カーグアイランドでは、選定の対象とするランクを8とし、検討した4港におけるそれぞれの最高ランクに該当する生物種を全て選定することにした。

Table 1.2-2 生物侵入による影響・被害事例ランク

侵入リスクの評価基準	影響・被害事例の危険性評価基準	影響・環境被害発生ランク
高い	重大	10
	危険	9
	要警戒	8
	注意	7
	不明	6
やや高い	重大	5
	危険	4
	要警戒	3
	注意	2
	不明	1

影響・被害事例の危険性評価基準は、「人の健康被害」、「経済被害」、「生態系影響」、「侵入」の事例が4つ全てある場合「重大」、3つ該当で「危険」、2つ該当で「要警戒」、1つ該当で「注意」、該当無しで「不明」とした。ただし、全ての対象種において、「人の健康被害」の報告事例は確認されなかった。

生物侵入による影響・環境被害発生ランクは、侵入した後で、影響被害が発生することから、侵入性の評価基準を優先した。例えば、影響評価基準が同じ「重大」の場合においては、侵入性が「高い」及び「重大」は移入リスク10、侵入性が「やや高い」及び「重大」は生物移入リスク5とした。

Table 1.2-3 4 港湾において影響・環境被害発生ランクが最上位にランクされた生物種

生物種	日本から生物が侵入する可能性がある対象港として選定した港湾			
	北米: ロングビーチ	豪州: ダンピア	豪州: ニューキャッスル	イラン: カーグアイランド
エゾカサネカンザシ	●		●	
ムラサキイガイ	●		●	
マガキ	●	●	●	
タテジマフジツボ				●
サラサフジツボ				●
マヒトデ	●		●	
カタユウレイボヤ	●		●	
シロボヤ	●		●	
エボヤ	●		●	
マンハッタンボヤ	●	●	●	
ミル	●		●	
ワカメ	●		●	
タマハハキモク	●		●	

●は各港湾における最上位の影響・環境被害発生ランク該当生物種。ロングビーチ、ダンピア、ニューキャッスルは生物移入リスクのランクが9、カーグアイランドは生物移入リスクのランクが8に相当する。

以上より、本調査においては、豪州、米国西岸、中東地域への生物侵入リスクが高い生物種として以下に示す13種を選定した。なお、これら13種には、ヒッチハイカーは含めなかった。その理由は、固着生物が一度固着状態になった後は一生船体に付着して生活するのに対し、ヒッチハイカーは、船体周りの流れやその他の理由で自ら離脱することがあり、二次的な移動の可能性があるためである。よって、本調査においては、選定された13種に代表される固着生物を以降の各種検討の対象とすることにした。

Table 1.2-4 生物侵入リスクが高い生物種

海藻類	ミル、ワカメ、タマハハキモク
海綿類	—
ヒドロ虫類	—
クラゲ類	—
管棲ゴカイ類 (ゴカイ類、カンザシ類等)	エゾカサネカンザシ
苔虫類 (ホンダワロケムシ等)	—
二枚貝 (ムラサキイガイ、カキ類等)	ムラサキイガイ、マガキ
フジツボ類	タテジマフジツボ、サラサフジツボ
ホヤ類	カタユウレイボヤ、シロボヤ、エボヤ、マンハッタンボヤ
棘皮動物	マヒトデ

(2) 生物種の生態特性

日本の港湾で船体に付着し、他国の海域に侵入して生物汚損を引き起こす可能性が高い生物種として選定した 13 種の分布域、生活史及び産卵から付着までの時間、サイズ、生殖方法及び生殖期、寿命等に関する情報を Table 1.2-5～Table 1.2-8 に取りまとめた。なお、引用文献は付属資料に一括して記載した。

船体付着を引き起こす生物種について、特に重要な情報として各生活史におけるサイズと産卵数が挙げられる。前者は、視認による確認及びネットなどでの回収によって産卵機会を奪うために重要であり、一般にサイズが小さい生物ほど、対策をすり抜けて生物移入をする可能性が高いと考えられる。後者は、移入後に定着する際の基本情報として重要であり、一般に産卵数が多い方が移入のリスクが高まるとともに、移入後に定着する可能性も高くなる。

サイズ情報に関しては、船体付着による生物侵入リスクに関連する次の 3 情報に区分して整理した。

- ・ 付着時幼体の最小サイズ: 付着生物の生活史の中で、船体等の基盤に最初に付着する幼体でのライフステージにおける最小サイズ
- ・ 性成熟個体の最小サイズ: 卵を抱卵するなど性的に成熟するライフステージにおける最小サイズ
- ・ 成体のサイズ: 性的な成熟を含め、生物としての発育が完成したライフステージにおける平均的なサイズ

一般に、性成熟個体の最小サイズは、成体になる前に性成熟に至る生物種が多いことから、成体のサイズよりも小さい。船体への付着による生物侵入は、船体に付着した個体からの産卵が大きな要因であると考えられる。このため、本調査においては性成熟個体の最小サイズ以上の個体を産卵する対象とした。性成熟個体の最小サイズを管理対象とすることは、成体と比べてより小さいサイズから産卵する個体に着目することとなる。このため、性成熟個体の最小サイズを用いた管理基準は、成体のサイズに比べより安全サイドで検討することになる。

付着生物の他国海域への侵入に関連する生態特性としては、産卵数も重要であると考えられるが、本調査では、十分な生物学的な情報を収集することができなかった。一般的に、付着生物 1 個体が 1 年間あるいは生涯に産卵する数は、 $10^4 \sim 10^6$ 個以上である場合が多い。しかし、1 回の産卵機会や 1 産卵シーズンでの産卵数は、海域や個体の大きさなどで異なるため、特定できない種類が多い。なお、対象の 13 種の中では、養殖されているマガキに関しては、1 個体当たり 1 産卵シーズンにおける総産卵数が 5.58×10^5 個との情報があった。

Table 1.2-5 侵入リスクが高い生物種の生態特性 (1)

生物種	生態特性	
エゾカサネカンザシ	分布域	オホーツク海 北海道から九州の天草
	生活史及び産卵から付着までの時間	浮遊期間と付着期間があり、産卵後 7~10 日を経て付着
	サイズ	付着時幼体の最小サイズ: 0.23 mm 性成熟個体の最小サイズ: 12 mm 成体のサイズ: 40 mm
	生殖方法及び生殖期	有性生殖 日本での生殖 (産卵) 時期は 4~11 月、生殖 (産卵) 盛期は 7 月上旬~9 月上旬の夏期
	寿命	--
	その他 (環境要因との関連等)	塩分耐性、20 psu 程度の低塩分域でも生息可能
ムラサキイガイ	分布域	世界中の温帯域、原産は地中海
	生活史及び産卵から付着までの時間	浮遊期間と付着期間があり、産卵後 3 ヶ月を経て付着
	サイズ	付着時の幼体の最小サイズ: 0.30 mm 性成熟個体の最小サイズ: 15 mm 成体のサイズ: 60 mm
	生殖方法及び生殖期	有性生殖 日本での生殖 (産卵) 時期は 10~4 月、東京湾では 11~4 月の冬期中心
	寿命	2~3 年
	その他 (環境要因との関連等)	--
マガキ	分布域	日本及び東アジア
	生活史及び産卵から付着までの時間	浮遊期間と付着期間があり、産卵後 2 週間
	サイズ	付着時の幼体の最小サイズ: 0.3 mm 性成熟個体の最小サイズ: 30 mm 成体のサイズ: 60 mm
	生殖方法及び生殖期	有性生殖 日本での生殖 (産卵) 時期は 6~9 月の夏期
	寿命	2~5 年
	その他 (環境要因との関連等)	--

--: 公表データが見られなかった項目

Table 1.2-6 侵入リスクが高い生物種の生態特性 (2)

種 類	生態特性	
	分布域	世界中の熱帯から温帯域の沿岸域
タテジマフジツボ	生活史及び産卵から付着までの時間	浮遊期間と付着期間があり、産卵後 1～3 週間を経て付着
	サイズ	付着時の幼体の最小サイズ: 0.41 mm 性成熟個体の最小サイズ: 7 mm 成体のサイズ: 10 mm
	生殖方法及び生殖期	有性生殖 日本での生殖 (産卵) 時期は周年
	寿命	1～1.5 年
	その他 (環境要因との関連等)	水温 15℃以上で生殖活動が活発化し、28℃を超えると阻害
	分布域	日本 (本州以南)
サラサフジツボ	生活史及び産卵から付着までの時間	浮遊期間と付着期間があり、産卵後 5 日ないし 2 週間を経て付着
	サイズ	付着時の幼体の最小サイズ: 0.41 mm 性成熟個体の最小サイズ: 7 mm 成体のサイズ: 15 mm
	生殖方法及び生殖期	有性生殖 日本での生殖 (産卵) 時期は 5～11 月
	寿命	—
	その他 (環境要因との関連等)	—
	分布域	日本、朝鮮半島、中国、サハリン、千島列島、オーストラリア、ニュージーランド
マヒトデ	生活史及び産卵から付着までの時間	浮遊期間と付着期間があり、産卵後 1.5～2 ヶ月を経て付着
	サイズ	付着時の幼体の最小サイズ: ミリレベル* ¹ 性成熟個体の最小サイズ: 36 mm 成体のサイズ: 100 mm
	生殖方法及び生殖期	有性生殖 日本 (北海道) での生殖 (産卵) 時期は 5～7 月で春期が中心
	寿命	4 年
	その他 (環境要因との関連等)	生殖は水温 10℃前後で行われ、低塩分と高温に弱く、幼体は塩分 24 psu が下限で、25℃以上では生息できない。
	分布域	世界中の沿岸域
カタユウレイボヤ	生活史及び産卵から付着までの時間	浮遊期間と付着期間があり、産卵後 6～36 時間で付着
	サイズ	付着時の幼体の最小サイズ: 1 mm 程度* ¹ 性成熟個体の最小サイズ: 20 mm 成体のサイズ: 100 mm
	生殖方法及び生殖期	有性生殖 生殖 (産卵) は周年
	寿命	1～1.5 年
	その他 (環境要因との関連等)	—

—: 公表データが入手できなかった項目

サラサフジツボとタテジマフジツボは殻底径、他の種類は全長値によるサイズ

Table 1.2-7 侵入リスクが高い生物種の生態特性 (3)

生物種	生態特性	
シロボヤ	分布域	世界中の沿岸域
	生活史及び産卵から付着までの時間	浮遊期間と付着期間があり、産卵後 12 時間～2 昼夜以内に付着
	サイズ	付着時の幼体の最小サイズ: 1 mm 程度* ¹ 性成熟個体の最小サイズ: 30 mm 成体のサイズ: 70 mm
	生殖方法及び生殖期	有性生殖 生殖 (産卵) 盛期は夏期であるが、厳冬期を除く周年生殖 (産卵)
	寿命	1 年以内
	その他 (環境要因との関連等)	---
エボヤ	分布域	沖縄を除く日本近海と極東水域、カリフォルニア、オーストラリア及びヨーロッパ大西洋岸
	生活史及び産卵から付着までの時間	浮遊期間と付着期間があり、産卵後 1～4 日を経て付着
	サイズ	付着時の幼体の最小サイズ: 1 mm 程度* ¹ 性成熟個体の最小サイズ: 85 mm 成体のサイズ: 150 mm
	生殖方法及び生殖期	有性生殖 厳冬期を除く周年生殖 (産卵)
	寿命	2 年
	その他 (環境要因との関連等)	---
マンハッタンボヤ	分布域	北大西洋、太平洋 (サンフランシスコ湾、オーストラリア南東岸、中国大陸沿岸、日本)
	生活史及び産卵から付着までの時間	浮遊期間と付着期間があり、産卵後 24～48 時間を経て付着
	サイズ	付着時の幼体の最小サイズ: 1 mm 程度* ¹ 性成熟個体の最小サイズ: 10 mm 成体のサイズ: 25 mm
	生殖方法及び生殖期	有性生殖 春から秋に生殖 (産卵)
	寿命	1 年
	その他 (環境要因との関連等)	低塩分や汚濁した海域にも生息可能で、付着した幼生が何らかの要因で剥離しても再度付着することが可能

---: 公表データが入手できなかった項目

Table 1.2-8 侵入リスクが高い生物種の生態特性 (4)

生物種	生態特性	
ミル	分布域	日本、朝鮮半島、マライ諸島、豪州、北米太平洋、ベーリング海、インド洋、大西洋の沿岸域
	生活史及び産卵から付着までの時間	浮遊期間と付着期間があり、配偶体の放出から付着期までの期間に関する情報は見あたらない
	サイズ	付着時の発芽体の最小サイズ: ミリレベル 性成熟個体の最小サイズ: 50 mm 成体 (胞子体) のサイズ: 300 mm
	生殖方法及び生殖期	有性生殖 瀬戸内海では夏期から秋期に性成熟
	寿命	多年藻
	その他 (環境要因との関連等)	---
ワカメ	分布域	日本、朝鮮半島、中国、ヨーロッパ、豪州、ニュージーランド、アルゼンチンの沿岸域
	生活史及び産卵から付着までの時間	浮遊期間と付着期間があり、配偶体放出から付着期までの期間は2~3日
	サイズ	付着時の発芽体の最小サイズ: ミリレベル 性成熟個体の最小サイズ: 100 mm 成体 (胞子体) のサイズ: 500 mm
	生殖方法及び生殖期	有性生殖 日本では春期に配偶体を放出
	寿命	一年藻
	その他 (環境要因との関連等)	生育下限の塩分は、配偶体着底期が 10.3~15.4psu、配偶体成長期が 7.1 psu であり、配偶体の成熟と胞子体の発芽・成長は 15 psu 以下で阻害
タマハハキモク	分布域	日本、朝鮮半島、東シナ海、北米西岸、イギリス南岸、ヨーロッパ大西洋岸、地中海の沿岸域
	生活史及び産卵から付着までの時間	浮遊期間と付着期間があり、配偶体放出から付着期までの期間は約2週間
	サイズ	付着時の発芽体の最小サイズ: ミリレベル 性成熟個体の最小サイズ: --- 成体 (胞子体) のサイズ: 100 mm
	生殖方法及び生殖期	有性生殖 日本での生殖時期は冬から初夏
	寿命	多年藻
	その他 (環境要因との関連等)	水温塩分等の変化に対して広く適応

---: 公表データが入手できなかった項目

1.2.3 船体付着生物の生態特性に基づく侵入メカニズム

日本から他国海域に侵入し、生物汚損をもたらす可能性が高い生物種は、全て固着生物かあるいはそれらに近い付着力を持った種類である。これら付着力の強い生物が船体に付着して他国に侵入するメカニズムの推定を試みる。ポイントは、これらの生物が全て発生初期に浮遊期（水中に漂っている時期）を有することである。

一般には港湾等の付着基盤に付着した成長個体が、再度水中を浮遊して船体に再付着する可能性は想定できない。このため、動物の場合には、繁殖期において護岸もしくは天然の付着基盤上にある性成熟個体から産卵され孵化した浮遊幼生が船体に付着し、その後成長する過程が考えられる。マンハッタンボヤのように付着した幼生が何らかの要因で剥離しても再度付着する種も確認されているが、垂直またはそれ以上の傾斜をもつ船体のことを考えるとそのような再付着は想定しにくい。海藻の場合では、護岸もしくは天然の付着基盤上の性成熟した孢子体から配偶体が放出され、受精した接合子が発芽体となって船体に付着するものと考えられる。

船体に付着したこれらの動植物個体は、性成熟前であっても付着力が強いため、他国の海域において船体から剥落する確率は非常に小さい。従って、これら生物の外国への侵入は、船舶に付着した性成熟個体が、卵や配偶体の放出に適した環境と遭遇した場合に、次世代群となる卵や配偶体を放出し、それらの一部が同地に定着することで起きると推定される。この推定を模式図化すると、Figure 1.2-4 及び Figure 1.2-5 に示すようなものとなる。なお、13種の生態特性で記述したように、船体付着生物はそのライフステージの一つである浮遊幼生期を除けば、沿岸域の何らかの基盤上で付着生活を送っている。すなわち陸から離れた外洋域では、付着生物の密度は非常に小さいと考えられる。また、航海中の船舶の速度を考えた場合、航海中における浮遊幼生の付着もほとんどないと考えられることから、船体への付着は荷役時等の港湾近傍での停泊中に限定されると考えられる。同時に、たとえ産卵期であっても対象船舶が外洋中を航行している場合は、対象となる付着基盤が付近に存在しないことから、繁殖にまで至る可能性は少ない。

なお、港湾の荷役スケジュール調整のために、港湾近傍で長時間沖待ちする場合は、生物が付着する機会及び既に性成熟を迎えた船体上の個体が産卵を行う機会はいずれも増加することになる。想定される侵入メカニズムは概ねこのようなものであると推定される。

なお、ワカメの場合はこのようなメカニズム以外にも侵入の可能性がある。ワカメの場合、船体表面等に付着した状態で他国に運ばれた後、繁殖期以外においては、栄養体の状態で何らかの要因で船体表面から剥離（物理的に切れる）し、その破片がそこで成長して周辺海域に定着、侵入に成功することも考えられる。一方、ミルやタマハハキモク等の小型の海藻の場合、栄養体の破片からの再生産はないと考えられている。

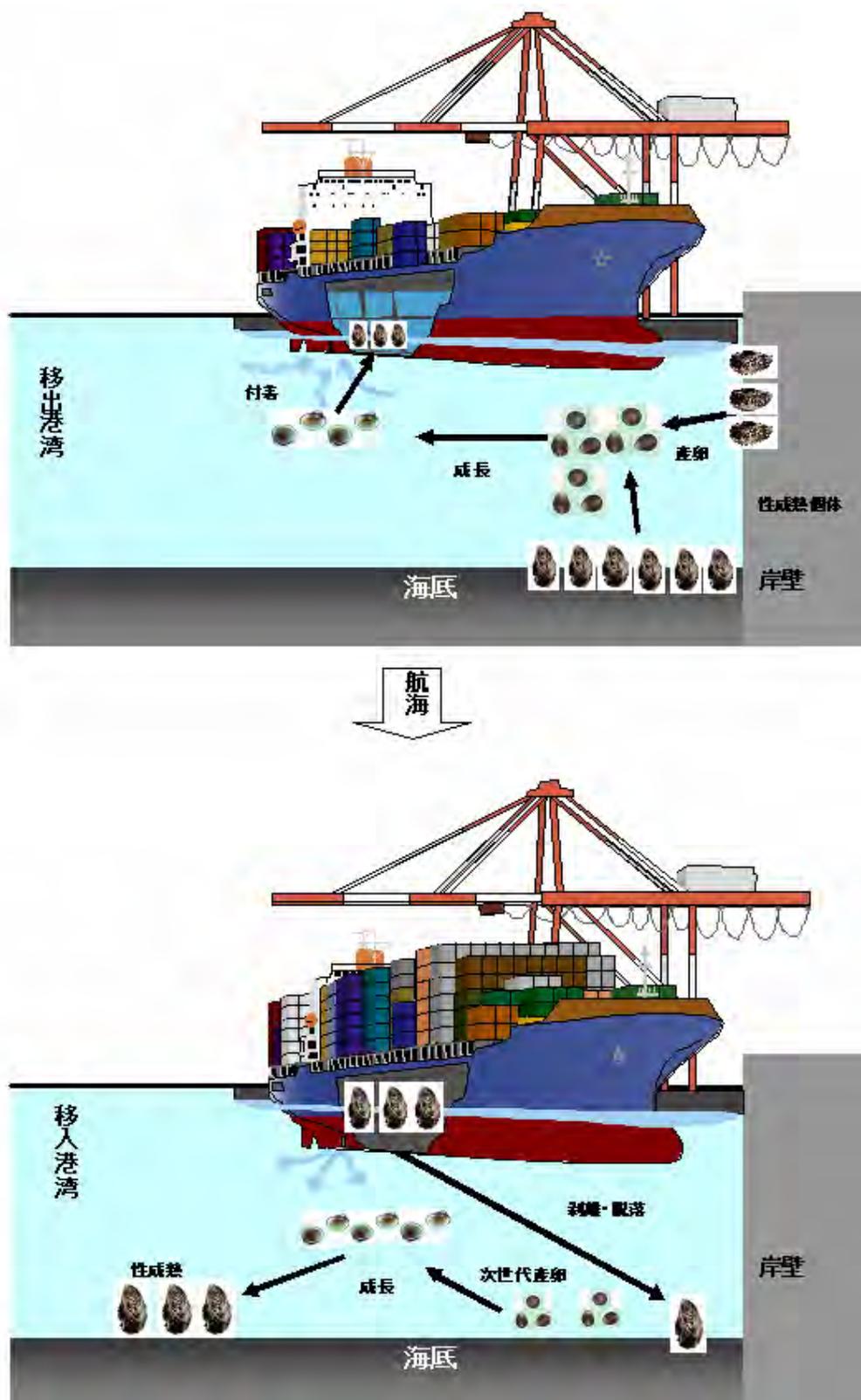


Figure 1.2-4 想定される付着生物の移入メカニズム(1): 剥離・脱落による移入

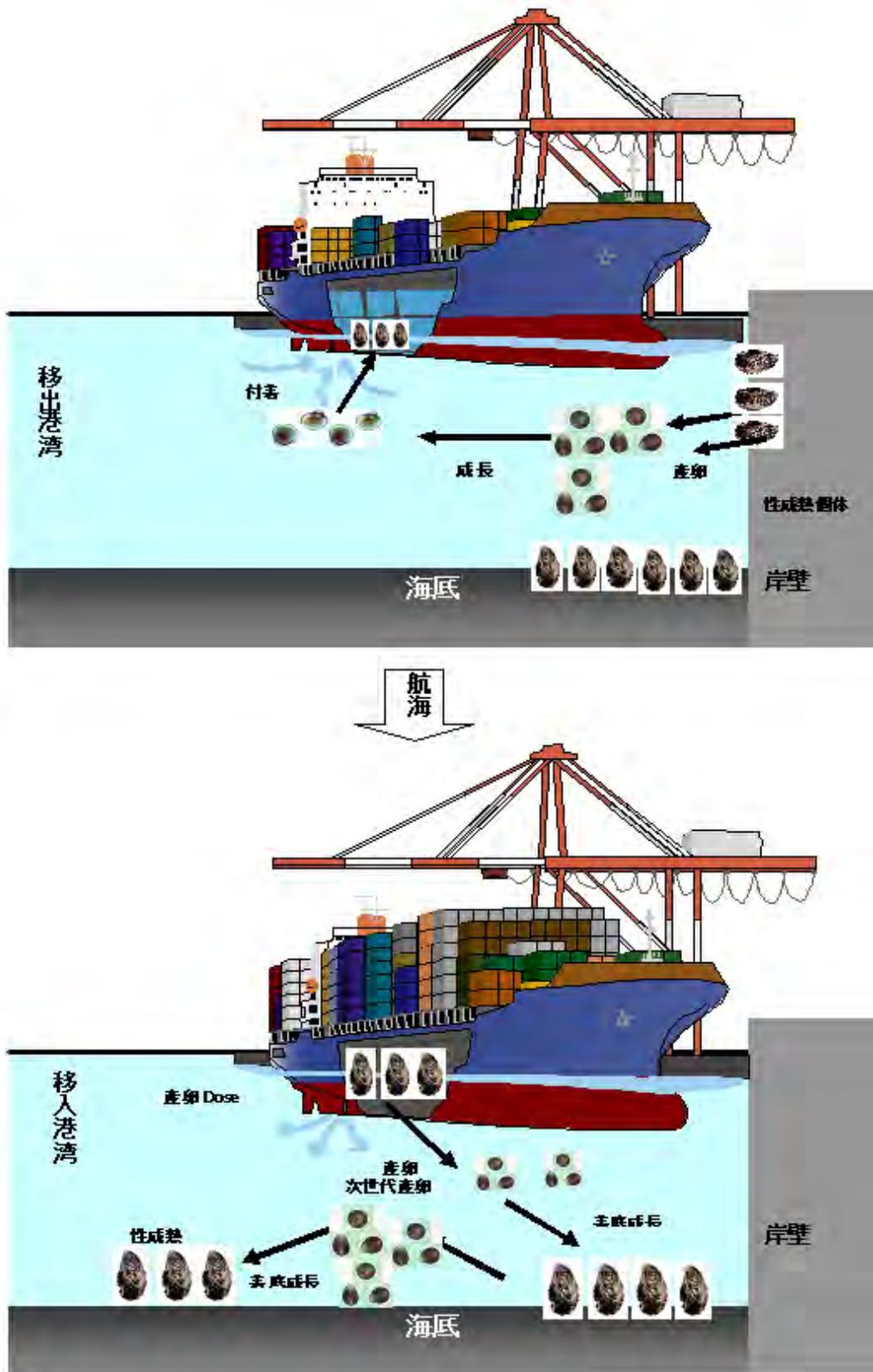


Figure 1.2-5 想定される付着生物の移入メカニズム(2): 付着個体の産卵による移入

1.2.4 船体付着生物の管理のポイント

以上から、付着生物は、以下に示す侵入メカニズムをたどっていると想定される。

- ① 港湾に生息する固着生物等が産卵して浮遊幼生が港湾海域に浮遊
- ② 船舶が港湾に停泊している時に浮遊幼生が船体に付着
- ③ 船体に付着した状態で成長し性成熟
- ④ 性成熟後、産卵に適した環境に遭遇した場合に卵を放出
- ⑤ 放出海域の環境が生息に適している場合に、放出された卵から発生した幼生が護岸等の基盤に付着
- ⑥ 付着した個体が成長して性成熟しその次の世代となる卵を放出
- ⑦ 成熟-卵放出の繰り返しにより他国の海域に侵入

上記の侵入メカニズムを考えた場合、上記のステージのうち②において船体への浮遊幼生の付着防止と、④において性成熟後の産卵機会を可能な限り奪うことの2つが、最も有効、かつ重要な管理上のポイントである。後述する付着防止技術では、②の船体への浮遊幼生の付着防止の観点から一般的に使用されている防汚塗料の種類や効果、付着防止のメカニズムについて記載する。仮に、周辺環境に存在する生物への影響を考慮しない場合、生物の船体への付着を完全に防止できる防汚塗料や対策技術を開発し利用すれば、付着生物による生物侵入リスクは生じないかも知れない。しかし、実際には生態影響を考慮した製品や技術の利用が不可欠であり、このためある程度の生物付着は許容せざるを得ない。

他方、④における性成熟後の産卵機会を可能な限り奪うことは、現時点では積極的な方策として用いられていない。例えば、4章で述べる入渠時における徹底的な船体清掃は、その一つとして位置づけられるが、産卵機会を奪うことを目的として、一定量以上の生物が付着している場合に入渠のタイミングを早めると言った方策は全く用いられていない。現時点においては、同じく4章で述べる水中洗浄(IWC)がこのパスに対する将来の有効な対策として位置づけられる。

また、micro-及びmacro biofoulingの2つのステージに対して、それぞれ適切な対策を取るという整理方法も成り立つ。すなわち、前者の付着防止の観点からは、船体付着の初期のステージであるmicro biofoulingそのものを防止するという考え方もできる。さらに、単細胞原生生物やスライム状物質が付着しているこの段階は、生物侵入の脅威には直接的には繋がらないという整理の仕方もある。したがって、3章で述べるAFSはmicro foulingは許容するとしてもmacro biofoulingへの遷移を防止することを目的にするべきだとして位置づけることができよう。これまで、AFSの使用目的は生物学的な観点から明確に整理されていない。今後AFSの性能や化学的なリスクとの両立を考える際には、このような生物学的な観点からの使用目的を明確にすることが重要である。

さらに、このような整理方法に基づき、後者のmacro foulingにおいては、生物学的な視点からどのような管理が、性成熟後の産卵機会を奪うために有効かを整理するために、生物のサイズに着目した管理と、性成熟までの期間とそのタイミングなど産卵に関する生態特性に着目した管理を考えることが重要である。

(1) 生物のサイズに着目した管理における留意点

船体への生物の付着が生じた場合、何らかの方法で付着生物を除去する対策は、現在においても実施されている。一方、付着生物の除去技術の結果、船体より剥離された生物は、その海域で生存、または産卵する可能性がある。この結果、付着生物の除去技術を実施することは、その海域への生物の移入リスクの増加に繋がる場合がある。後述する船体表面の水中洗浄（IWC: In-water cleaning）の場合、付着物の除去を主目的として実施されるが、生物移入リスクの観点からは、除去生物を周辺海域へ放出させないことが重要である（6章参照）。このため、付着生物の除去のためのIWC実施時においては、除去された生物の回収が必要である。

Table 1.2-9には、本調査における付着生物のサイズと生殖特性等について示した。

生物移入リスクに直接的に関係するこれらの性成熟個体の最小サイズは、Table 1.2-9に示したように、タテジマフジツボやサラサフジツボでは7 mmであるという報告もあるが、このサイズを付着生物管理におけるサイズの目安とすることには注意が必要である。その理由は、本調査で把握できなかった付着生物には、より小さいサイズの生物が含まれている可能性があること、さらには性成熟以前のより小さい個体であっても、除去後に個体から卵が放出される場合も想定されるためである。このような観点から、付着生物の大きさは船体付着生物の管理との関連において重要となるため、付着生物の除去においては、安全係数を考慮すると、サブミリサイズの付着物の回収が望まれると推定される。ただし、海藻の配偶子を含めて全ての生物侵入プロセスを防止するためには、回収対象とする生物のライフステージとその最小サイズの情報が必要であるが、現状においては生物学的にも十分に解明できていない。したがって、検査において認知すべき生物とその最小サイズ、あるいは回収において必要な生物とその最小サイズを、生物学的な見地から導くことは現時点では困難であると考えられる。このため、現時点の現実的かつ実効性のある成体付着の総合的管理方策は、このような生物学的な見地からではなく、管理システムに適用する製品や装置の将来における技術的な限界（例えば回収のための網の編み目サイズ、試験において認知すべき生物のサイズなど）から設定することが合理的であると考えられる。

(2) 産卵に関する生態特性に着目した管理

付着生物は、それぞれ固有の産卵期間や産卵数、生存に適した環境条件を有する。このような産卵に関する生態特性をTable 1.2-9に示した。同表で明らかのように、対象とする生物を限定するならば船舶の使用過程において産卵機会を奪う最適なタイミングは設定可能であるように思われる。例えば、産卵期間中あるいは付着幼生期には港湾への入港を自粛する、産卵期間前にIWCを実施する、あるいは特定の種に限定して付着状況を観察する等の方策である。しかし、生物種に固有の産卵期間や産卵数、生存に適した環境条件は、船舶の移動という外的な環境要因によって攪乱される可能性が高い。特に性成熟に至るまでの最小時間は、船舶の移動という人工的な要因によって早められる可能性が高く、これまでの生物学的な知見に基づく予想は困難である。

さらに、船舶運航上の都合からも全ての船舶を対象にしてこのような不確定要素の大きい生物学的な情報を基にした対策を行うことは現実的でないと考えられる。

以上のことから、このような産卵に関する生態特性に基づく管理は、世界全体に共通な管理の枠組みとしては適切でないと考えられ、ボランティアな上乘せの対策として位置づけるべきと考える。

Table 1.2-9 付着生物の侵入に係わるサイズ（大きさ）と生殖特性

生物種	大きさ			生殖（産卵）特性等
	付着初期	性成熟個体の 最小サイズ	成体のサイズ	
エゾカサネカ ンザシ	0.23 mm	12 mm	40 mm	産卵期: 4～11月、産卵盛期: 7月上旬 ～9月上旬 産卵後の付着までの期間: 7～10日
ムラサキ イガイ	0.30 mm	15 mm	60 mm	産卵期: 10～4月 産卵後の付着までの期間: 3ヶ月
マガキ	0.3 mm	30 mm	60 mm	産卵期: 6～9月 産卵後の付着までの期間: 2週間 産卵数: 5.58×10^5 個/シーズン
タテジマ フジツボ	0.41 mm	7 mm	10 mm	産卵期: 周年 産卵後の付着までの期間: 1～3週間
サラサ フジツボ	0.41 mm	7 mm	15 mm	産卵期: 5～11月 産卵後の付着までの期間: 5日
マヒトデ	ミリレベル	36 mm	100 mm	産卵期: 5～7月 産卵盛期: 春期 産卵後の付着までの期間: 1.5～2ヶ月
カタユウレイ ボヤ	1 mm	20 mm	100 mm	産卵期: 周年 産卵後の付着までの期間: 6～36時間
シロボヤ	1 mm	30 mm	70 mm	産卵期: 厳冬期を除く周年 産卵盛期: 夏期 産卵後の付着までの期間: 12時間～2 昼夜以内
エボヤ	1 mm	90 mm	150 mm	産卵期: 厳冬期を除く周年 産卵後の付着までの期間: 1～4日
マンハッタン ボヤ	1 mm	10 mm	25 mm	産卵期: 厳冬期を除く周年 産卵後の付着までの期間: 24～48時間 以内
ミル	ミリレベル	50 mm	300 mm	性成熟期: 夏期から秋期
ワカメ	ミリレベル	100 mm	500 mm	配偶体放出期: 春期 配偶体放出から付着期: 2～3日
タマハハキモ ク	ミリレベル	1,000 mm	1,000 mm	配偶体放出期: 冬期から初夏 配偶体放出から付着期: 2週間

2. 国際海事機関（IMO）における外来生物の侵入を防止するための議論の動向

2.0.1 現在、国際海事機関(IMO: International Maritime Organization)では、「外来水生生物の移動を最小とするための船体への生物付着の抑制、及び管理に係わるガイドライン」の策定作業が進められている。本章では、このガイドラインが策定されることになった経緯、現在のガイドライン案及び IMO での議論内容から規制に対する各国の考え方を整理した。

2.0.2 IMO において、船舶運航に伴う生物の非意図的な移入のメカニズムが初めて意識されたのは、2001年に採択されたAFS条約である。その後、同問題が本格的に議論されるのは、船舶バラスト水規制の制定時であった。その後、バラスト水問題は、1997年のIMO総会における「バラスト水の規制・管理のガイドライン」の採択を経て、2004年に強制的な規制である「船舶のバラスト水及び沈殿物規制及び管理に関する国際条約」(バラスト水管理条約)が採択されている。しかし、バラスト水管理条約は条約制定後に6年経過した現在(2010年)においても各国の批准が進まず、発効には至っていない。この未発効の状態は、生態系保護策を積極的に進めている国に対して、自国水域への生物侵入リスクが増大する強い懸念を与えたと考えられる。この懸念に加え、船体付着生物由来の生物移入が多いことが明らかになったことで、豪州は早期に規制の議論を開始する必要性を感じ、船体付着生物由来の生物移入の問題提起を行ったものと推察される。

2.0.3 船体への付着による外来生物の侵入の問題は、2006年3月にIMOで開催された海洋環境保護委員会(MEPC: Marine Environment Protection Committee)第54回会合においてはじめて議題として取り上げられた。豪州政府が1999年から実施した調査を紹介し、豪州水域に移入した外来海生生物のうち77%が船体付着由来による移動が要因であり、既に条約が採択されているバラスト水由来の生物の移出入よりも生物移入に関する寄与が大きい旨を報告した。さらに豪州政府は、各国に対して管理方針に関するアドバイスを求めた。これを受け、MEPCは同様の情報の提供を各国に要請した。この報告と要請がIMOにおける規制の議論の始まりである。

2.0.4 船体付着問題に対する議論は、その後、MEPC第56回会合において、「船体付着による有害水生生物の移動を最小限化する国際方策の開発」をばら積み液体・気体小委員会(Sub Committee on Bulk Liquid and Gas: BLG)第12回会合における優先議題とすることが承認され、本格的な規制の議論が開始された。2008年2月開催のBLG第12回会合においては、「船体付着による有害水生生物の移動を最小限化する国際的な方法の策定に関する諸問題を議論する通信部会」が設置された。さらに2009年2月のBLG第13回会合では、通信部会が再設置され、BLG第14回会合に向けて「外来水生生物の移動を最小とするための船体への生物付着の抑制及び管理に係わるガイドライン(案)」を策定することとなった。

2.0.5 2010年2月のBLG14回会合では、作業部会が設置されて、通信部会から報告されたガイドライン(案)をベースに詳細な議論が行われ、ガイドラインの内容は最終化に近いレベルのものとなった。我が国からも、このガイドラインがボランティアベースであることから、本文中の義務的な表現と内容を削除すること及び実行可能な内容にすることを中心とした提案が行われ、基本的に多くの国の支持を得ている。そして、2011年の最終化及び早期の採択を目指して、2011年2月に開催予定のBLG第15回会合に向けて、再度設置された通信部会の下で作業の進展を図ること及びBLG15での作業部会の設置が承認されている。なお、今回IMOで作成が検討されているガイドラインは、あくまでもボランティアベースのものであり、

船主、造船所及び運航業者に対して強制力はない。ただし、強制力を持つ規制には、バラスト水管理条約の制定過程の例に見られるように、ボランティアなガイドラインにおける枠組みや閾値が採用されることが多い。本調査事業では、これらのことを十分考慮して、本事業で検討した結果が、将来的に国際的な枠組みにおけるガイドライン等の作成の一助となるように努めた。

2.0.6 本章では、IMO での議論の内容を中心に、各国の規制に関する考え方についても取りまとめた。我が国を含む海運を主要な産業としている国は、船舶の運航に影響する規制及びコスト増加につながる規制には基本的に反対する立場である。ただし、それら海運国は、既に生物侵入リスクが発生している現状を考慮して、現状の海運システムに過度な影響を及ぼさない規制内容である範囲においては、規制実施を受け入れる立場でもありと考えられる。規制実施を希望する各国の考え方の中で注目されるのは、船体付着生物問題の提起国である豪州の考えである。豪州は近い将来の強制規制の導入を考えていると思われる。また、豪州は、IWC (In-water cleaning: 船体外板に対する水中での付着生物の物理的除去) の実施に伴う生物侵入と、化学的環境リスク(活性成分である化学物質の残留毒性などによる沿岸生態系への影響)に関して、科学的根拠に基づく評価の必要性を感じている。このため、上記ガイドラインの枠組みにも、これらリスク評価の結果を反映させることを強く望んでいる。その一方で、これらのリスク評価については、国際的に信頼性があるとされる標準的な評価モデル、評価のための試験方法やツールは現時点では定まっておらず利用可能ではない。このため、本事業で開発した化学的及び生物学的移入リスクモデル(5章及び6章)は、将来における規制の枠組みを考える上において、重要なツールになると考えている。米国はIWCに関して、化学的環境リスクの評価に十分に留意した上で、各国が判断する事項であると考えている。また、IWCの実施時期は、付着防止塗料の劣化と関係するため、入渠あるいはIWCを実施した後、一定期間経過後に水中検査を行って、その結果で次のIWCの実施を判断するのが適切であると考えている。なお、ヨーロッパの多くの国は、IWCに関するこの米国の考えに賛同している。

2.1 船体付着生物に関する IMO における議論とその背景

2.1.1 船体付着生物に関する IMO における議論

船舶を媒体とする生物移入（海上輸送などによる非意図的な移入により、本来の分布域から、生物が移動することを意味する）と、その侵入（定着）によって動物・植物の生命、経済・社会活動及び海洋環境に脅威を与える可能性が国際海事機関（IMO: International Maritime Organization）において認識されるのは船体付着の場合が初めてではない。

IMO において、船舶運航に伴う生物の非意図的な移入のメカニズムが意識されたのは、2001 年に採択された AFS 条約¹⁾ が初めてと言ってよいであろう。AFS 条約の主目的は、3 章で解説するように、AFS で使用される活性物質について、生態系及び人の健康に影響のある有害な物質の使用を禁止することであった。ただし、その前文には、「船体表面における生物群集の形成防止を目的に AFS を使用することは、有害な海生生物の拡散の防止のために重要である」と記述されており、当時から海生生物の移入の問題は重視されていた。

船舶運航に伴う生物の非意図的な移入が本格的に議論されるのは、船舶のバラスト水規制が検討された時である。バラスト水問題に関しては、1997 年の IMO の総会における「バラスト水の規制・管理のガイドライン」の採択を経て、2004 年に強制的な規制である「船舶のバラスト水及び沈殿物規制及び管理に関する国際条約」（バラスト水管理条約）が採択された。ここでは、この 2 つの既存の条約における生物移入リスク及びこれに関連する環境問題に対する規制と背景を整理する。

(1) AFS 条約

AFS 条約は、その目的として生物移入を防止または抑制することを目的としているが、その条約の中身は、活性物質（活性物質）の使用制限にとどまっており、AFS の効果の認定あるいは移入量の抑制にまで踏み込んだものではない。ただし、防汚塗料（AFCS）だけを対象とするのではなく、surface treatment を含めた AFS をその対象としている。

(2) バラスト水管理条約

バラスト水問題に関しては、約 10 年間の議論を経てバラスト水管理条約が採択された。しかし、6 年経過した現在（2010 年）においても、各国の批准が進まず、発効には至っていない。バラスト水管理条約が発効に至らない現状は、生物侵入リスクを低減する国際的な規制を実施することの困難さを表している。

バラスト水管理条約が発効に至らないのは、次の理由のためと考えられる。

- ・ バラスト水管理で最も重要な要素技術であるバラスト水管理システム（処理装置）に対する要求性能（基準）が厳しく、またバラスト水管理システムの型式承認のための試験実施には多大な労力と時間が必要である。その結果、現時点で型式承認された管理システム数がまだ少なく、条約が問題なく実施されるには不十分である。
- ・ バラスト水管理システムの型式承認に必要な試験では、生物の生死判定が求められている。この生物の生死判定方法を含め、試験の詳細は各国で独自の方法で行われており、国際的に統一された方法が確立されていない。その結果、各国で型式承認されているバラスト水管理システムの処理性能が不均一である可能性が高い。

¹⁾ AFS 条約: 2001 年の船舶の有害な防汚方法の規制に関する国際条約 (The International Convention on Control of Harmful Anti-Fouling Systems on Ships, 2001) は、海洋環境及び人の健康を保護するため、船体に貝などの海生生物が付着するのを防止するために用いられる TBT (トリブチルスズ) などの有機スズ化合物を含む船底防汚塗料の使用を段階的に禁止。2001 年 10 月に国際海事機関 (IMO) で採択。

- ・ バラスト水管理システムに要求される性能基準は、排出時のバラスト水中の生物濃度に対して定められている。ただし、この基準との適合性を検査する寄港国による外国船舶の監督（PSC: Port State Control）で実施する現実的な検査方法が、まだ見いだせていない。
- ・ バラスト水管理システムの型式承認試験方法と PSC の方法は、同一性が担保されるべきである。しかし、現時点では同一性を担保する国際的に統一された PSC での検査方法が見いだせていない。もし、同一性が担保されていない検査方法で PSC が実施された場合、その結果は、型式承認されたバラスト水管理システムで処理された排水水であっても不適合と判定される可能性がある。PSC で不適合と判定された場合には、船舶の運航に大きな支障を招く可能性がある。

バラスト水管理条約はこのような課題を抱えており、主に船主を管轄する国の批准が遅れている。また、バラスト水管理条約がこのような状況に至ったのは、条約の策定作業が生物侵入リスクに懸念を持つ環境先進国の主導で行われ、海運界の現状が軽視された状態で進められたことも大きい。その結果として、規制内容は海運界にとって従来の規制の枠組みと大きく異なる点も多く、受け入れが困難な内容となった。

船体付着生物の管理システムの検討においては、このバラスト水管理条約の反省から、海運界に対しても受け入れやすい内容にすることが重要であると考えられる。海運界が受け入れやすい規制内容になることは、規制の早期開始と生物侵入リスクの早期低減につながり、環境先進国及び海運界の両者によって有益になると考える。

2.1.2 IMO に対する船体付着生物に関する問題提起

バラスト水管理条約が発効しない現実には、生態系保護策を積極的に進めている環境先進国に対して、自国水域への生物侵入リスクが増大するという強い懸念を与えたと考えられる。この懸念に加え、船体付着由来の生物移出入が多いことも調査などから明らかになり、環境先進国は早期に規制の議論を開始する必要性を強く感じたものと推察される。

IMO において、はじめて船体付着生物が議題として取り上げられたのは、2006 年 3 月に開催された海洋環境保護委員会（MEPC: Marine environment Protection Committee）第 54 回会合（以下、MEPC54 のように記述する）である。

豪州政府が MEPC54 に提供した 1999 年からの調査情報によれば、豪州水域に移入した海生生物のうち 77% は船体付着由来で、既に条約が採択されているバラスト水よりも大きな影響があると報告されている。同報告では、特にシーチェスト等の複雑部位に付着する生物が問題であると指摘している。また、豪州政府は、同国の海運界と共同で生物侵入リスク低減のための管理方策の策定を目指しており、IMO 関係者に対して、管理方策に関するアドバイスを求めた（MEPC 54/inf.5）。

この豪州政府の情報に基づき、MEPC は同様の情報の提供を各国に要請した。

MEPC54 における情報提供の要請に対して、同年 10 月に開催された MEPC55 では、国際地球友の会（FOEI: Friends of the Earth International）が、レクリエーションに利用する小型ボート及び同様の小型ボートにおける水生生物の移出入を最小限化するために、次の内容を規制の骨子とする提案を行った（MEPC 55/13/1）。

- ・ 付着防止性能の高い防汚塗料の使用
- ・ 複雑部位に対する特殊塗料の採用
- ・ IWC（In-water cleaning: 水中洗浄）の禁止と海中への放出を防ぐことができる施設での船体清掃の実施
- ・ アンカーやチェーン清掃の励行等

2007 年 7 月に開催された MEPC56 においては、国際ヨット連盟（ISAF: International Sailing Federation）が MEPC55 における FOEI の提案を受け、その規制する考えには同意するものの、強制規制ではなく、

ガイダンス的な規制とすることを提案している (MEPC 56/13)。

一方、FOEI は MEPC 55/13/1 で提案した規制内容に、寄港国での検査のために防汚塗料の種類、塗装の実施場所及び日時を記録すること等を加えた修正版を提示し、各国に建設的なコメントとアドバイスを求めている。なお、この修正案は強制力のないガイダンスとして提案されている (MEPC 56/13/1)。

そして豪州は、MEPC54 に提出した継続情報として、2007 年 10 月から施行する IWC を禁止する等の管理方策の要件の概要及び規制の要求事項は、National System for the Prevention and Management of Marine Pest Incursions (the National System) の一部として運用されると報告している (MEPC 56/INF.11)。

また、以上の経緯を受け、ニュージーランド、豪州、英国、FOEI 及び世界自然保護連合 (IUCN: The World Conservation Union) は、船体付着による外来海生生物の侵入問題を、2008 年 2 月に開催される「ばら積み液体・気体小委員会 (BLG: Sub-Committee on Bulk Liquids and Gases)」第 12 回会合 (以下、BLG12 のように記述する) で、優先議題として取り扱うよう共同で提案を行った (MEPC 56/19/3)。

MEPC は、この提案を受けて、「船体付着による有害水生生物の移動を最小限化する国際方策の開発」を BLG 第 12 回会合における優先議題とすることを承認し、各代表団に適切な文書の提出を要請し、本格的な議論が開始された。

2.2 船体付着生物の規制に関する議論の経緯

前述した背景と問題提起を受けて、船体付着生物規制の議論は BLG12（2008 年）から実質的に行われてきた。当初は各国や業界団体の興味も薄かったが次第に関心を集め、2010 年に行われた BLG14 においては、バラスト水管理条約での教訓を生かすという各国の共通認識もあり、議論は建設的に進んだ。また、日本国は、議論の当初から中心的な存在となり、用語の定義、ガイドラインの枠組みの骨格、ガイドラインの位置づけなどについて、多大な役割を果たしている。

ここでは BLG における議論を紹介するとともに、主な議論のポイントを整理する。

2.2.1 2010 年までの議論

(1) BLG12（2008 年 2 月）における議論

2008 年 2 月開催の BLG 第 12 回会合においては、次の 4 つのグループや国からそれぞれ文書が提出された。そして、審議の結果、BLG は「船体付着による有害水生生物の移動を最小限化する国際的な方法の策定に関する諸問題を議論する通信部会」を設置し、次回 2009 年の BLG 第 13 回会合で、通信部会の報告書を基に再度議論することとした。

- ① ニュージーランド及び豪州（BLG 12/11）
船体付着生物の侵入リスク及び問題点を整理し、対策案を提案
- ② ISAF（BLG 12/11/1）
プレジャーボートの船体付着生物による生物移動を最小限化するガイドライン案を提案
- ③ ニュージーランド及び英国（BLG 12/11/2）
船体付着生物管理の法制化に関する下記のオプションについて、それぞれのメリット及びデメリットを整理
 - ・ ガイドラインの策定
 - ・ AFS 条約 とリンクする方法
 - ・ バラスト水管理条約 とリンクする方法
 - ・ 新条約として策定
 - ・ MARPOL 条約 の新附属書として策定
- ④ ニュージーランド（BLG 12/INF.4）
ニュージーランドのバイオセキュリティにおいて船体付着生物のリスクを評価するために実施している調査プログラム及び中間結果を紹介

(2) BLG13（2009 年 2 月）における議論

2009 年 2 月に開催された BLG 第 13 回会合では、通信部会のコーディネーターを努めたニュージーランドから通信部会の活動報告書が提出された（BLG 13/9）。なお、関連する文書として、船体付着生物の移入経路、リスクのプロファイルと船舶特有の問題、及び船体付着生物の影響に関する詳細な情報と参考文献リストも提出された（BLG 13/INF.3）。

通信部会の報告書の概要は、次の通りである。

- ① AFS（Anti-fouling system）搭載証明の導入は、再検討となった。

- ② IWC については、船体付着を管理するオプションとしての必要性がノートされた。
- ③ 通信部会は、船体付着による有害水生生物の移動を最小化する規制の実施について、下記の 5 つのオプションについて議論した。

- ・ MEPC または総会決議として採択するガイドラインを策定
- ・ AFS 条約にリンクする方法
- ・ バラスト水管理条約にリンクする方法
- ・ 新条約を策定
- ・ MARPOL 73/78 条約 (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973/1978: 1973 年の船舶による汚染の防止のための国際条約に関する 1978 年の議定書、現在 6 つの附属書で構成されている) に船体付着に関する附属書を策定

全てのメンバーはガイドラインを策定することに好意的であった。ただし、ガイドラインの策定について、それ自体を目的とみなすか、あるいは強制的な方法に至る中間的性格とするかについて意見が分かれた。なお、強制的な方法を策定するならば、新条約を策定することが好ましいとされた。

- ④ 通信部会を延長することによって、より確かなガイドラインを策定ことができると考え、BLG13 での通信部会の再設置を下記の付託事項のもと提案する。また、BLG14 でのワーキンググループ設置を提案する。

付託事項 (抄) :

- ・ 船体付着生物の影響を最小化する最も現実的な方法の策定
- ・ 現行または提案されている船体付着生物に関する規制について潜在的な影響を議論及び環境への影響のみならず、海運業、他の産業への影響も議論
- ・ 船体付着生物の管理規制のガイドラインの更なる策定
- ・ ガイドラインを MEPC または IMO 総会決議として採択することのメリットを議論
- ・ 船体付着生物による有害水生生物移動を最小化する国際的な方法の策定に向けて、今日までの進展を踏まえた作業計画改定案の策定

(3) BLG13 における合意事項

BLG13 では、この通信部会の報告書を基に議論され、次の内容が合意された (BLG 13/18)。

- ・ 通信部会については、当初より設立期間が 2 年と予定されていたことから、付託事項のもとに再設立を承認
- ・ 次回 BLG14 にてワーキンググループまたはドラフティンググループを設立することに合意
- ・ MEPC または IMO 総会決議として採択することのメリット及びガイドラインを規制の第 1 段階とするか暫定的方策するかの方策の更なる検討

なお、本議題に関し、バラスト水管理条約に関するワーキンググループは、BLG 小委員会に対し、次回 BLG にて合同ワーキンググループ (Bio-fouling & BWM (B&B) WG) を設置することを提案し、BLG 小委員会はこの提案を承認した。

2.2.2 2010 年の BLG14 における議論と合意事項

(1) BLG14 における議論

2010 年 2 月に開催された BLG 第 14 回会合では、BLG13 で再設立された通信部会の活動報告書が提出された (BLG 14/9)。なお、この報告書に対して、豪州 (BLG 14/9/1、BLG 14/9/2)、及び日本 (BLG 14/9/3) からコメントが寄せられ、FOEI からは小型船に対する強制的な予防処置に関する文書の提出があった (BLG 14/INF.2)。それら文書の概要は、次の通りである。

① ニュージーランド: 通信部会の活動報告書 (BLG 14/9)

・ AFS 導入に係る証明 (書) 及び記録:

証明 (書) については、現在はガイドラインの策定を目指している。これに対して、船体付着生物の管理ツールとしての証明 (書) は義務的要件になる。よって、現在の議論の対象とならないことから、更なる検討を行っていない。なお、記録の保持については、義務的要件としない場合でも、船体付着対策に有用な情報であることを確認している。また、バラスト水管理計画をモデルとして、船主や運航者が各船に適用している船体付着管理システムの情報を船体付着管理計画に取り入れる方法についてはガイドラインに含むことが提案された。

・ IWC:

IWC は、発生する生物学的、化学的、物理的な残渣物の環境中への放出を最小限にする必要がある。また、IWC の適切な実施に関するガイダンスをガイドラインに含むことが提案され、IWC のガイダンスでは、残渣物の環境中への放出を確実に最小とする必要性が指摘された。

・ Clean ship の定義:

船体付着の受け入れ可能レベルを定義するのは現時点では困難である。一方、船体付着を管理する目的に照らし、加盟国や海運業に対しては明快な定義を提示する必要がある。

ガイドライン案では、有害水生生物の移動を最小化するため、受け入れ可能な船体付着レベルの基準を定義する試案を策定した。なお、今後実効性の確保に向け精査が必要である。

・ 海運業への影響:

船体付着物管理手法に一貫性がない場合、特に、メンバー国が受け入れ可能と考えるリスクレベル及びリスク低減に必要な設備や管理手法に一貫性がない場合には、海運業に重大な影響を与える可能性があることで意見が一致した。

提案される方法によっては、入渠回数、IWC の頻度が増加し、その結果、貿易量の減少による経済的損失、入渠による運航スケジュールの遅れ、寄港スケジュールの混乱が生じる可能性についても概ね意見が一致した。一方で、効果的な船体付着防止手法の導入による、運航・燃費効率の改善効果も考えられる。

・ 船舶の設計への影響:

既存船の設計変更が可能かどうかについては、意見が分かれた。新造船の設計変更は、適切なリードタイム (例えば 2 年程度) があれば実施できる可能性があると考えられた。

・ 更なる議論が必要とされた項目:

ガイドラインの適用範囲、ガイドラインの勧告 (recommendation) 対象者 (沿岸国、船主等)、用語・表現の問題、ガイドラインにおける定義 (例えば、水生生物移動リスク低減の観点からの clean ship の程度)、IWC により発生する残渣物の管理等の運用基準のガイドラインへの導入

・ ガイドラインを MEPC 決議とすべきか IMO 総会決議とすべきか:
ガイドラインは以下の理由で MEPC 決議での採択が適切であると考えられた。
IMO 総会決議はステータスが高い。ただし、IMO 総会は、2年に1度しかなく、ガイドラインを策定・採択するにあたり時間面での融通が利きにくい。一方、2年に3回開催される MEPC での決議は、時間面での融通が利く上、改正が必要になった場合も対応しやすい。なお、バラスト水のガイドラインは、最初に MEPC 決議 (MEPC.50 (31)) を採択し、次に、総会決議 (A.774 (18) 及び A.868 (20)) を採択している。

・ ガイドラインを国際的な生物付着の第一次対策とすべきか暫定措置とすべきか:
ガイドライン導入による効果の評価のために、所定の期間はガイドラインを実施すべきである。その結果、もし、ガイドラインが十分に機能しない場合には、強制的手段の検討を開始すべきと考える。

・ 今後のワーキンググループへの付託事項の提案:
ガイドライン案の修正、及びガイドライン決議に向けての課題、ガイドライン採択後の効果の評価のための時間 (time frame)、基準、過程の議論、ガイドラインの最終化を促進するための通信部会再設置の要否、BLG15 の前のワーキンググループ中間会合の要否

② 豪州: 通信部会報告書へのコメント、その 1 (BLG 14/9/1)

IWC のリスクアセスメントに関するガイダンスをガイドラインに含むことの提案である。

③ 豪州: 通信部会報告書へのコメント、その 2 (BLG 14/9/2)

ガイドライン案にある船舶の設計及び建造に対するコメントである。コメントの概要は、次の通りである。

- ・ 付着防止塗料は、船体付着物を管理する上で唯一の方法ではないが、重大な管理方法であると考えられる。複雑部位では、器具や開口部の設計や配置が、船体付着のしやすさの主要な決定要素であり、管理方法の有効性に影響する。複雑部位には、その設計や機能により、多くの船で効果的な付着防止塗料が適用されていない。それゆえ、船舶の設計段階において、複雑部位の減少、船体付着を少なくする複雑部位の設計や検査、清掃及び管理をやすくする方法について取り組む必要がある。
- ・ 現ガイドライン案には、設計と建造の問題について簡潔なガイダンスが記載されているが、次の部位には、船体付着を最小限にするための設計についてのガイダンスを策定すべきである。また、船体外板の船体付着の可能性を減らすその他の方法についてもガイダンスを策定すべきである。

シーチェスト、格納式器具及び設備、突出部・張り出し部、内部海水系統、浸水可能な装置及び設備

- ・ 設計に関するガイダンスには、シーチェスト、スラスタートンネル、格納式器具及び設備、突出部・張り出し部、船尾シール及びロープガードの検査を容易にする内容を含める。

④ 日本: 通信部会報告書へのコメント (BLG 14/9/3)

- ・ ガイドラインは、ステークホルダーの活用を促す、実用可能なものにすることが重要である。また、ガイドラインは、限定されたステークホルダーしか活用できない厳格なガイドラインであるよりも、多くのステークホルダーが活用でき、環境の保全に役立つほうが望ましいと考える。

- ・ 現存かつ普及している技術では、長期間にわたって「clean state」を保証するのは困難である。ガイドライン策定においては、実用性を考慮に入れ、究極的な目標と実用性のバランスをとることが重要である。
- ・ ガイドラインは、柔軟性を確保すべきである。これにより、AFSの種類や航行経路によって「clean ship」を満たすためのさまざまな方法をとることが可能になる。
- ・ ガイドラインの目的に鑑み、「clean ship」な状態を船舶に課すものと解釈すべきではなく、船体付着に伴う有害水生生物の移動を最小限にする一般的な方法を提供するものと理解されるべきである。
- ・ 生物付着防止技術と IWC のような方法の推奨される組み合わせについて情報提供することは有用である。例えば、認め得る IWC の間隔は、防汚塗料の効力がどれくらい維持するかによって依存する。それゆえ、我が国は、防汚塗料の有効性についての世界的な評価基準の要否について問題提起する。
- ・ 通信部会の報告書では、明らかにガイドラインは、ボランティアなものとして実施すべきで、義務的な方策を策定する前にその実用性を検証することとされている。しかし、ガイドライン案には、「enforcement」、「compliance」、「mandatory application」といった表現が含まれている。これらの表現は、混乱と誤解をもたらすため、該当するパラグラフ及びセクションの削除を提案する。
- ・ 船舶（船体及び他の部品）に適用される生物付着防止技術については、生物付着防止技術及び他の管理手法により、入渠の周期を通じ、可能な限り clean な状態を保つことを定めている代案のほうを支持する。
- ・ 入渠周期は、包括的な船舶管理に基づいており、メーカーの推奨には基づかない。よって、計画している入渠周期に関しては、「入渠周期は船舶調査のシステムと強制要件を参照すべき。」に修正すべきである。

⑤ FOEI: 小型船に対する強制的な予防処置に関する提案 (BLG 14/INF.2)

- ・ 大型商船と区別して策定する理由:

現在の AFS は大型商船向きでありレジャー船には不向きである。

また、レジャー船は、特異な生態系に入り込むことが多く、停泊期間も長いため、侵入生物（ヒト・動物・植物の生命、経済・社会活動及び海洋環境に脅威を与える可能性がある生物で、本来の分布域から、海上輸送など人為的機構で自然に広がるよりも急速に分布を広げ、従来分布していなかった水域に定着しつつある、または既に次世代が発生した生物）が付着しやすい。レジャー船に適用されている生物付着防止技術は、6～9 ヶ月で性能が低下する。

- ・ 強制的な予防措置の内容:

レジャー船は、ヨットハーバー等での停泊の状態に応じ、可能な限りの多頻度で、強制的に船体付着防止措置を施す。25 メートル以下の船については、可能な限りの多頻度で、out-of-water hull cleaning を強制する。関係主管庁は、使用物質、日付、塗装番号、主な停泊港等の証明書を作成する。

(2) BLG14 における合意事項

BLG14 では、これらの文書を基に議論され、次の内容が合意された (BLG 14/17)。

① ワーキンググループでの確認事項:

- ・ ガイドラインにおける強制的な表現については、多くの国が削除すべきとの考えから、ガイ

- ドラインから全て削除することとする。
- IWC のリスクアセスメントについては、生物学的リスクと化学的リスクを分けて考慮する必要があること、将来的に各国より情報が提供されることが望ましく、引き続き審議及びレビューする。
 - レジャー船等の小型船舶に係るガイダンスは、ガイドラインの付録として取り扱う。

② BLG での合意事項:

- ガイドラインが進展したことをノートする。
- 2011 年でのガイドラインの最終化及び採択を担保するため、ニュージーランドをコーディネーターとする通信部会を再設置する。
- 引き続き、2011 年 2 月開催予定の BLG15 においてバラスト水及び Biofouling（生物汚損：水生生物が、船体の浸水表面に蓄積（accumulation）している段階を指す）の作業部会を設置する。

2.3 作成途中の「外来水生生物の移動を最小とするための船体への生物付着の抑制及び管理に係わるガイドライン案」

BLG14 で進展した「外来水生生物の移動を最小とするための船体への生物付着の抑制及び管理に係わるガイドライン案」（船体付着による有害水生生物の移動を最小限化する国際的な方法の策定に関する諸問題を議論する通信部会、非公式文書）の目次構成は、下記の通りである。本項において使用されている各用語は IMO で定義されたものであり、本報告書における用語の定義（Table 7.1-1）とは異なるものである。以下に、ガイドライン（案）原文からの抜粋を示す。

DRAFT GUIDELINES FOR THE CONTROL AND MANAGEMENT OF SHIPS' BIOFOULING TO MINIMIZE THE TRANSFER OF INVASIVE AQUATIC SPECIES

2 DEFINITIONS

2.1 For the purposes of these Guidelines, the following definitions apply:

AFS Convention means the International Convention on Control of Harmful Anti-Fouling Systems on Ships, 2001.

Anti-fouling coating system means the combination of all component coatings, surface treatments (including primer, sealer, binder, anti-corrosive and anti-fouling coatings) or other surface treatments, used on a ship to control or prevent attachment of unwanted aquatic organisms.

Anti-fouling system means a coating, paint, surface treatment, surface, or device that is used on a ship to control or prevent attachment of unwanted organisms.

Biofouling means the undesirable accumulation of aquatic organisms such as micro-organisms, plants, and animals on surfaces and structures immersed in or exposed to the aquatic environment. Biofouling can include microfouling and macrofouling (see below) .

Clean ship means a ship on which there are no visible organisms attached to an immersed surface either on the main hull or in niche areas, except for microfouling (i.e. a slime layer) .

In-water cleaning means the physical removal of biofouling from a ship while in the water.

Invasive aquatic species means a species which may pose threats to human, animal and plant life, economic and cultural activities and the marine environment.

Marine Growth Prevention System (MGPS) means an anti-fouling system used for the prevention of biofouling accumulation in internal seawater systems and sea chests and can include the use of anodes, injection systems and electrolysis.

Member States means States that are Members of the International Maritime Organization.

Macrofouling means large, distinct multicellular organisms visible to the human eye such as barnacles, tubeworms, or fronds of algae.

Microfouling (slime layer) means a layer of microscopic organisms including bacteria and diatoms and the slimy substances (usually extracellular polysaccharides) that they produce.

Niche areas mean areas on a ship that are more susceptible to biofouling due to different hydrodynamic forces, susceptibility to coating system wear or damage, or being inadequately, or not, painted, e.g., sea chests, bow thrusters, propeller shafts, inlet gratings, dry-dock support strips, etc.

Organization means the International Maritime Organization.

Port State authority means any official or organization authorized by the Government of a Port State to verify the compliance and enforcement of standards and regulations relevant to the implementation of national and international shipping control measures.

Ship means a vessel of any type whatsoever operating in the marine environment and includes hydrofoil boats, air-cushion vehicles, submersibles, floating craft, fixed or floating platforms, floating storage units (FSUs) and floating production storage and off-loading units (FPSOs) .

States means Coastal, Port or Member States as appropriate.

Treatment means a process which may use a mechanical, physical, chemical or biological method to remove or render sterile, invasive or potentially invasive aquatic species fouling a ship.

3 APPLICATION

3.1 The Guidelines are intended to provide useful recommendations for all types of ships* and are directed to States, shipmasters, operators and owners, shipbuilders, ship cleaning and maintenance operators, port authorities, ship repair, dry-docking and recycling facilities, ship designers, classification societies, anti-fouling paint manufacturers and suppliers and any other interested parties. A State should determine the extent that the Guidelines are applied within that particular State.

3.2 States should inform the Organization of any relevant biofouling regulations, management requirements or restrictions they are applying to international shipping.

4 APPLICATION

4.1 The objectives of these Guidelines are to provide practical guidance to States, ship masters, operators and owners, shipbuilders, ship repair, dry-docking and recycling facilities, ship cleaning and maintenance operators, ship designers, classification societies, anti-fouling paint manufacturers and suppliers and any other interested parties, on measures to minimize the risk of transferring invasive aquatic species from ships' biofouling. It is important that biofouling management procedures be effective as well as environmentally safe, practicable, designed to minimize costs and delays to the ship, and based upon these Guidelines whenever possible. These Guidelines provide general measures to minimize the risks associated with biofouling for all ship types.

* Specific advice for small craft is provided in a separate document.

4.2 To minimize the transfer of invasive aquatic species, a ship should implement biofouling management practices, including the use of anti-fouling systems and other operational management practices to reduce the development of macrofouling. The intent of such practices is to keep the ships submerged surfaces, including internal seawater systems, in as clean a state as practicable

4.3 The management measures outlined within these Guidelines are intended to complement current maintenance practices carried out within the industry.

4.4 A ship following this guidance and maintaining a microfouling layer would be considered a clean ship and would have a very low potential for transferring invasive aquatic species.

2.4 船体付着の外来生物侵入に対する各国の見解

「2.2 船体付着生物の規制に関する議論の経緯」で記載したガイドライン策定作業がある一方で、現在、侵入生物として知られる多くの海生生物が **biofouling** をその経路としていることが記録されている (Rainer 1995, Lewis 2001, Gollasch 2002, Godwin 2003, Coutts et al. 2004, Coutts et al. 2007)。

既にいくつかの国または地域では、**biofouling** を介した侵入を防ぐため、さまざまな規制が行われるか、または行われようとしている。その内、豪州及びニュージーランドは原則として IWC を禁止し、IWC 実施による自国への外来生物の侵入リスクを予防する措置を講じている。

各国は、**biofouling** が要因となって、生物が侵入し、さまざまな侵入リスクが発生している現状を考慮して、**biofouling** に対して国際的に統一された何らかの規制が必要である点では共通している。しかし、規制の内容に関しては、国によって考え方が異なる。

早期の規制実施を望む国と対極なのは、我が国を含む海運を主要な産業としている国である。これら国々は、船舶の運航に影響する規制及びコスト増加につながる規制には反対の立場である。ただし、一方では、既に侵入リスクが発生している現状を考慮して、規制の実施は許容せざるを得ないとも考えている。これら海運国の規制実施に対する条件は、対策実施や PSC の実施等による船舶の遅延、入渠間隔の短縮や回数の増加及び各国の管轄する海域で対策基準が異なるなど、現状の海運システムに過度な影響を及ぼさないことであると考えられる。

本章の最後に各国の共通認識と、認識が分かれる点について整理しておく。

各国においてほぼ共通認識が得られている点

- ・ 防汚塗料の付着防止性能だけでは、出渠してから次の入渠までの間の **macro biofouling** を防ぐことが困難であるという技術的な認識
- ・ 多くの国は、船体表面が **micro biofouling** の状態であれば、対策は必要とされないと考えている。例えば、海藻の配偶子がスライム層に含まれている状態であっても対策は必要ない、もしくはその必要性は認識されていない。これに対して、**macro biofouling** の状態では、何らかの対策あるいはそこまでの状態に至らない対策が必要であるとの考えで一致している。
- ・ 規制を構成する技術としては、防汚塗料を主体とする生物付着防止技術及び IWC に代表される付着生物除去技術の 2 つがあるという共通認識がある。

各国間で認識が異なる点

- ・ IWC の使用による移入リスクの増大に対する懸念 (生物片と塗料片が放出される点については共通の認識を持ちつつも、その評価は異なる)

3. 付着防止を目的とした AFS の装置・技術の現状と将来の改良の可能性

3.0.1 AFS(Anti-Fouling System: 生物防汚システム)とは、生物の船体付着を防止またはコントロールするために使用される装置技術 (device) 及び処理技術 (treatment) と定義される。AFS の具体的な目的としては、①付着防止: 生物の付着そのものを阻害、もしくは抑制すること、②付着生物除去: 既に付着した生物の掻き落としなどによって①の性能を回復すること、が挙げられる。本章では、AFS のうち①を目的とした装置技術を対象に、その現状を、性能、リスク及びコストの観点から俯瞰するとともに、改良の可能性について整理する。

3.0.2 付着防止を目的とした技術については、船舶の適用部位に対応して整理するとその要求される性能がわかりやすい。すなわち、外板に適用される AFCS(Anti-Fouling Coating System、防汚塗料に使用に代表される)と外板以外の複雑部位に適用される MGPS(Marine Growth Prevention System、海水電解装置の使用に代表される)に大きく分けることができる。AFCS として最も使用頻度が高く、かつ効果が確認されているものは、生物の付着を防止する効果を有する化学物質(バイオサイドとも呼ばれる)を含んだ、自己研磨型の防汚塗料である。本章では、現在における代表的な付着防止技術である自己研磨型の防汚塗料及び海水電解装置を中心に、その付着防止原理、付着防止性能及びコストの現状を整理した。また、将来における付着生物管理システムの構成技術についても整理した。

3.0.3 現在における代表的な付着防止技術である自己研磨型の防汚塗料は、塗膜に海水が接すると、塗膜表面が加水分解して活性物質を含む防汚成分が溶出し、生物がこれを忌避する原理によって付着を防止するものである。かつては、非常に自己研磨性の高い有機スズ系の活性物質を含む防汚塗料が多用されていたが、現在ではその毒性及び生物体内への濃縮性の高さから危険と見なされ、製造・使用が禁止されている。自己研磨型防汚塗料の付着防止の対象は不特定生物であり、船体外板及び船体の様々な部位に同一の防汚塗料を施工する場合はほとんどである。また、塗膜表面は溶出により一定の速度で更新される性質によって、常に新しい塗膜表面が現れ、長期間の安定した付着防止性能を示す。現状では活性物質として亜酸化銅、亜鉛ピリチオン、銅ピリチオンが多くの自己研磨型防汚塗料に含まれている。

3.0.4 これらの自己研磨型防汚塗料については、我が国の船底塗料業界の製品の場合には、約3年のドック間隔あるいは5年間の効果が維持できる付着防止性能を有している。国内では、自己研磨型防汚塗料を塗布した試験板を海中に浸水して生物の付着状況を観察するのが防汚効果の維持性能の根拠となる付着防止性能試験の基本的な方式である。しかし、使用する試験板、海中への浸漬方法と期間、観察対象の生物や観察基準等が試験の実施者で異なっており、標準化されていない。また、国内と同様に海外でも各社独自の試験方法で防止性能が評価されている。このため、実際の使用においては、防汚塗料の維持性能よりも短い期間で塗料の塗り替えが行われることが多い。

3.0.5 防汚塗料の付着防止性能は、付着生物管理技術の主体となるものであるため、将来においては国際的に標準化された試験方法の整備が必須であると考えられる。理想的な試験法は、最も生物が付着しやすい条件を人工的に整え、同一条件下で試験をすることであるが、試験コストの問題がある。コスト以外にも最悪の試験条件を整理・統合するために、多大の時間と努力を要することなどが課題となる。このような観点から、無塗装板あるいは一定の性能を持つ同一塗料を塗布した同等の試験板における被

度面積などとの比較によって評価を均質化し、かつ被度面積の正規化などにより、試験場所や試験条件の違いを相殺することで、性能試験を標準化する方法が考えられる。今後は、日本塗料工業会から国際印刷塗料工業会 (IPPIC: International Paint and Printing Ink Council) などへの交渉等を通して、このような性能試験方法を早期にまとめ、高性能防汚塗料の普及に寄与することが望まれる。

3.0.6 我が国の防汚塗料メーカーへの聞き取り調査結果では、入渠間隔が 2.5 年の場合でも、外板、スラストトンネル、ビルジキール、シーチェストに対して入渠時に必ず付着生物の清掃作業を行っていることが報告されている。この聞き取り調査結果は、入渠時にはすべての船舶で何らかの生物が付着している状況を示すものである。聞き取り対象船の状態が、我が国における平均的な自己研磨型防汚塗料の状態を現していると考えられることから、我が国の船底塗料業界が設計している概ね 3 年の自己研磨型防汚塗料の付着防止性能が、現状の実使用においては達成できていないのではないかと推察される。なお、今回の調査から推察される、現在主に使用されている自己研磨型防汚塗料の 1 隻当たりの施工コストは、船舶の大きさ等によって異なるが、おおよそ 1,000 万円～1 億円程度と言える。

3.0.7 現状で使用されている自己研磨型防汚塗料に対して、さらに進んで生物の付着を阻害するとされる製品もある。これらは、含有する活性物質の種類や含有比率及び活性物質の溶出速度を工夫して、従来製品よりも付着防止性能を向上させているものと考えられる。また、シリコン型の防汚塗料も付着防止性能が高いことが知られている。これらの新規の防汚塗料は、将来においては導入が想定される製品に位置づけられる。ただし、現時点のコストは、現在普及している自己研磨型防汚塗料の 2～5 倍と推定され、船舶全体に導入する場合には億円単位のコストになる可能性もある。塗装コストは、今後の普及状況によって下がる可能性も考えられるが、現状では必ずしも現実的とは言えない。

3.0.8 今後、新規の高性能防汚塗料の低コスト化が進むことが望まれるが、現状においても大幅なコスト増加を招かずに船舶全体の生物付着量を少なくする方法もあると考える。それは、船体の部位別に、適用する防汚塗料を変える方法である。例えば、シーチェスト部のように生物付着が顕著な部位に関しては、生態毒性の強い活性物質の含有量を高めた防汚塗料、あるいは活性物質の溶出速度の速い防汚塗料を適用するなどが考えられる。このような限定部位での適用は、コスト高の防汚塗料であってもその面積が小さいため大幅なコスト増加とはならない。また、活性物質の生態毒性が強い場合または溶出速度が速い場合においても、適用される船体表面積が外板と比較して小さいことから、活性物質による環境生物へのリスクが大幅に高くなることは無いと考えられる。

3.0.9 海水電解装置は、防汚塗料の塗布が困難な冷却水系内部配管に対する生物の付着防止を目的とした技術として、既に実用化されている代表的な技術である。海水電解装置は、海水を電気分解することにより発生する塩素化合物を海水冷却管系統に注入し、塩素化合物の生態毒性により冷却水系内部配管へ吸い込まれた生物の管壁への付着を阻害する装置である。冷却水系内部配管用の海水電解装置の電解液注入時の残留塩素濃度は、0.15～0.3 mg/L(Cl_2 として)に設定されている。この濃度は、海産生物に対する急性毒性値 (LC_{50}) と同レベルであるが、注入から排出までの時間は通常は数秒から数十秒と極短時間である。このため、通常の海水電解装置の使用においては、内部配管内に入り込んだ生物を殺滅するのではなく、その作用は一次的に生物の付着力を喪失させる程度の効果を有していると考えられる。なお、海水電解装置の付着防止性能に関しては、明確なデータや情報は存在しなかった。自己研磨型防汚塗料と同様に標準化された性能試験での評価実施が望まれる。

3.0.10 冷却水系内部配管用に使用される海水電解装置の価格は、海水処理量の違いにより様々である。我が国のメーカーの場合には、一般的なコンテナ船で数百万円/隻、大型船(LNG・タービン船)の場合で約 1,000 万円/隻程度である。また、耐用年数はおよそ 15 年である。保守作業は、定期検査時に電解槽の白金陽極を交換する程度で、費用は数十万円～数百万円程度とのことである。

3.0.11 将来における海水電解装置の改良では、現在の冷却水系内部配管から、適用範囲を上流部でかつ生物付着が顕著なシーチェスト部に拡大することが考えられる。改良のポイントは、注入ノズルの改良と高濃度電解液の注入が考えられる。注入ノズルの改良は、ノズルの数を増やすことと、壁面全体に均一に噴出する方法が有効であると考えられる。高濃度電解液の注入は、生物の付着が主に停泊時に起こると考えられることから、停泊中に限定して使用するべきかもしれない。また、入り込む生物をすべて殺滅するのではなく、生物の付着を阻害することで付着量をかなり削減できると想定されることから、高濃度の電解液を停泊中に間欠的に注入する方式も考えられる。一方、高濃度の電解液注入に関しては、シーチェスト及び冷却水系内部配管の腐食影響について十分な検討が必要である。また、排出水中に含まれる残留塩素及び副生成物による周辺環境生物に対するリスクについても十分に検討し、許容できる条件での使用が必要である。なお、これらの海水電解装置の改良は、技術的には現状でも適用可能であると考えられる。

3.1 付着防止技術の種類

船体への生物防汚システム（AFS: Anti-fouling system）は、船体への生物の付着を防止する及び付着生物の除去を目的とする技術である。本報告書においては、船体の外板に対する AFS は AFCS（Anti-fouling coating system）、船体の外板以外の複雑部位に対しては MGPS（Marine Growth Prevention System）と定義する。AFCS の代表例として、防汚塗料の使用が挙げられる。一方、冷却水や発電機の内部配管の付着防止技術としては、MGPS の代表的な装置・技術である海水電解装置の導入例が多く見られる。その他、小型船舶では、電解装置の搭載が困難なことから、活性物質やスチーム噴出を使用している例もある。

AFS の主たる目的は、①付着防止: 生物の付着そのものを阻害、もしくは抑制すること、②付着生物除去: 既に付着した生物の掻き落としなどによって、生物付着が無い状態（macro biofouling でない状態）に回復すること、に大別される。本章では、AFS のうち、①を目的とした処理技術（以下、付着防止技術）を対象に、その現状を、性能、リスク及びコストの観点から俯瞰するとともに、改良の可能性について整理する。

これら AFCS と MGPS、付着防止技術と 4 章で後述する付着生物除去技術の関係を Figure 3.1-1 に整理した。また、Table 3.1-1 には、本報告書で使用される用語の定義を示した。

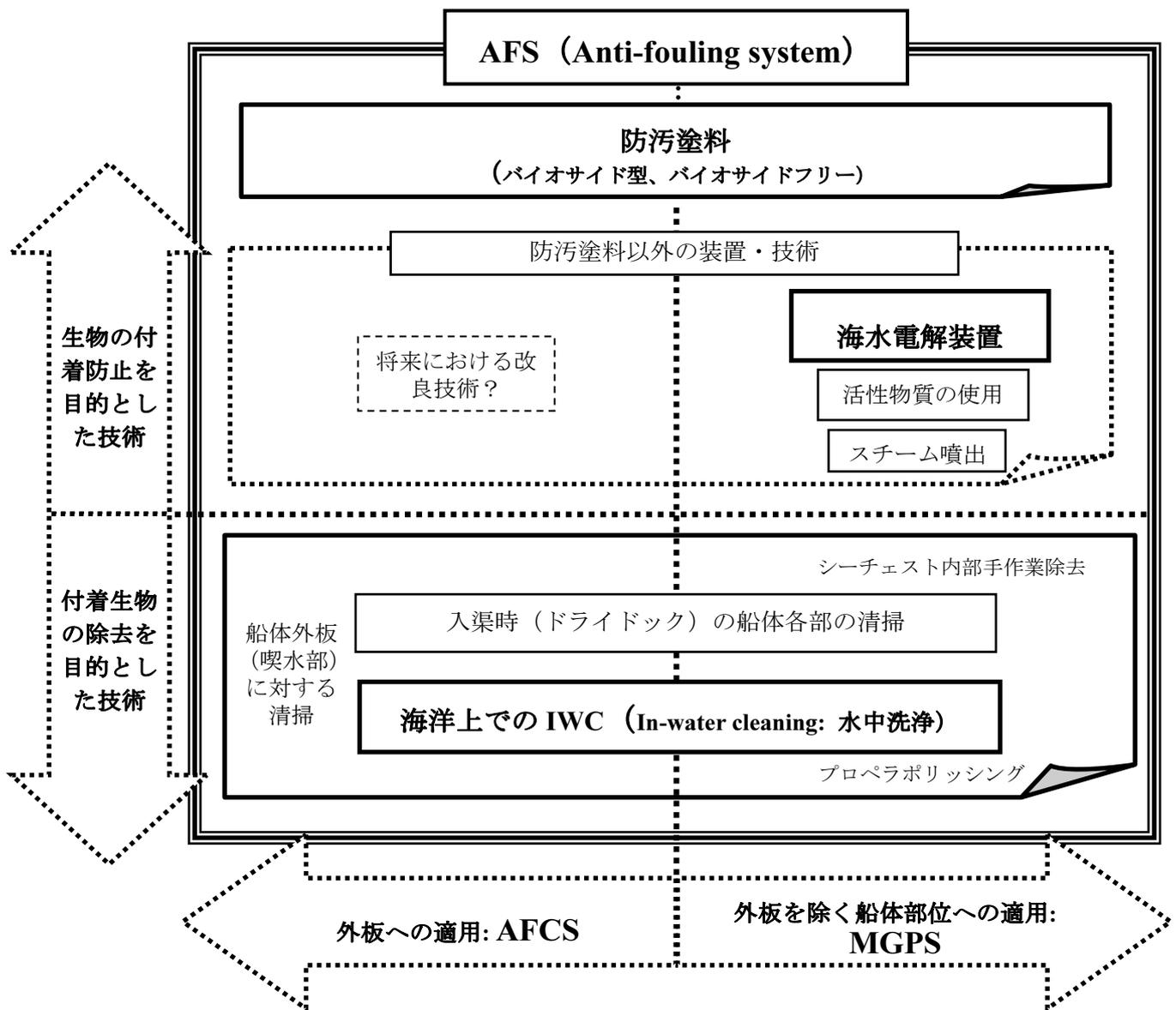


Figure 3.1-1 本調査における船体付着防止技術の関連図

Table 3.1-1 外来生物の船体付着総合管理に関する用語の定義

用語	本報告書での定義
Active substance (活性物質)	Active substance とは、有害な海生生物や細菌類に対して、殺生・増殖速度の抑制、付着幼生の忌避行為等の効果をもたらす化学物質、または調剤である。
Anti-fouling coating system (AFCS)	AFCS とは、船体外板に対する付着防止および除去を目的とした AFS 装置、及び技術であり、AFCS は MGPS と同様に AFS の主要な技術の一つとして構成される。 現状においては、生物の付着防止を目的とした AFCS 技術として、防汚塗料の使用が最も一般的に使用されている。外板における付着生物の除去や、防汚塗料の更新のために実施される入渠時の船体清掃と IWC についても、AFCS に分類される。 なお、船体外板以外の部位に対する同様の技術は、MGPS に分類される。
Anti-fouling system (AFS)	AFS は、生物の船体付着を管理する目的から、付着防止技術と付着生物の除去技術に大別することが出来る。船体の部位別に適用される装置 (device) 及び技術 (treatment) としては、AFS は AFCS と MGPS により構成される。
Biofouling	Biofouling (生物付着) とは、水生生物が、船体の浸水表面に蓄積 (accumulation) している段階 (phase) である。浸水表面には、喫水線下の部位だけでなく飛沫水に暴露される部位も含まれる。Biofouling (生物付着) は、micro biofouling と macro biofouling の段階に分けることができる。 [本報告書においては、浸漬ではなく浸水を使用する]
Clean ship	本報告書では使用しない。代わりに「macro biofouling の段階に移行していない船体表面」と表記する。
In-water cleaning (IWC)	IWC (In-water cleaning: 水中洗浄) とは、船体外板及び外板以外の部位に対する、海洋上での付着生物の物理的な除去技術である。 本報告書においては、船体外板に適用される IWC は AFCS、外板以外の部位に適用される IWC は MGPS に分類される。
Macro biofouling	Macro biofouling とは、船体の浸水表面に対して、目視で確認可能な大きさの大型多細胞生物 (visible multi-cellular organisms) の付着・成長が生じている段階 (phase) である。Macro biofouling は、micro biofouling が進行した段階である。 Macro biofouling は、フジツボ、管棲ゴカイ類、大型海藻等の多細胞生物及びその遺骸等により構成される。
Marine Growth Prevention System (MGPS)	MGPS とは、船体外板を除く船体内部の海水循環システム、又はシーチェスト等の複雑部位への生物の付着防止、及び除去のために使用される装置・技術である。本報告書では、MGPS を海生生物付着防止システムと和訳する。 海水電解装置は、生物付着防止のための MGPS の最も主要な装置であり、それ以外にはスチーム噴出、活性物質の使用等を含む。また、外板以外の船体部位に対する付着生物除去技術も MGPS に分類される。 なお、船体外板に対する同様の技術を AFCS と定義する。
Micro biofouling	Micro biofouling とは、被覆の程度によらず、バクテリア、珪藻類等の顕微鏡を用いなければ見えない単細胞原生生物 (unicellular protocista)、及びそれらが生成したスライム状物質 (通常は細胞外の多糖類) が船体表面を被覆している段階 (phase) である。

Table 3.1-1 外来生物の船体付着総合管理に関する用語の定義

用語	本報告書での定義
Risk of aquatic species transferring (生物の移出入リスク)	<p>Risk of aquatic species transferring とは、海上輸送などの人為的機構により、本来の分布域から遠隔地へ生物が移入することのリスク（確立）である。生物が移入した後、再生産（繁殖）に成功した場合が生物侵入と定義される。</p> <p>本報告書においては、生物の移出入リスクを量（dose = 生物数、または産卵数）を指標として評価を行った。</p>
Risk of invasion (侵入リスク)	<p>Risk of invasion とは、生物が本来の分布域から、海上輸送など人為的機構により他の海域に移出入し、定着した結果、ヒト・動物・植物の生命、経済・社会活動、及び海洋環境に脅威を与えるリスク（確立）である。</p>
Slime layer (スライム層)	<p>Slime layer とは、バクテリアや単細胞原生生物（unicellular protocista）、スライム状物質（通常は、細胞外多糖類等よりなる）等による層である。</p>
入渠時（ドライドック）の船体各部の清掃	<p>入渠時（ドライドック）の船体各部の清掃とは、IWC が水中、または船舶が海洋上に停泊時に実施される清掃に対して、船舶が入渠時に実施される船体各部の清掃である。</p> <p>本報告書においては、船体外板に適用される入渠時の船体各部の清掃は AFCS、外板以外の部位に適用される入渠時の船体各部の清掃は MGPS に分類される。</p>
防汚塗料	<p>防汚塗料とは、biofouling の防止を目的とした、船体の外板やその他の複雑部位に塗布される塗料である。</p> <p>防汚塗料には、水生生物に対する毒性を有する active substance の塗膜表面からの溶出によるバイオサイド型と、塗膜表面の平滑性・撥水性によるバイオサイドフリー型に大別される。現在、国内において主流であるバイオサイド型防汚塗料には、自己研磨型、自己崩壊型、旧来型が使用されているが、その中でも自己研磨型の防汚塗料が最も一般的である。</p>

注) 本報告書においては、IMO の最新の定義に留意しつつ、日本政府によるコメント、及び本報告書独自の定義を使用した。

3.2 AFCS による付着防止技術

3.2.1 種類と導入現状

船体外板に対する代表的な AFCS としての防汚塗料は、生態毒性を有する活性物質を含んだバイオサイド型と、活性物質を含まないシリコーン型の 2 つに大別することができる。バイオサイド型の AFCS は、さらに自己研磨型、崩壊型、塗膜表面の樹脂は減耗しない旧来型の 3 種に区別される。

生物に対する殺傷効果を持つ活性物質を使用した防汚塗料の使用の歴史は長く、既に紀元前においてフェニキア人やカルタゴ人は、その生態毒性からピッチや銅を活性物質として船底防汚に用いたと言われている。その後、活性物質の選定とともに、次第に活性物質の使用時の制御、特に塗装表面からの溶出速度を制御する方法に努力が払われるようになる。

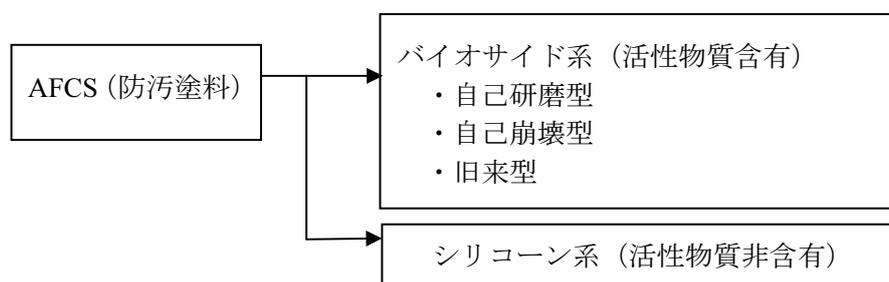


Figure 3.2-1 防汚塗料の種類

一般に、固体からの活性物質（水溶性物質であることが多い）の溶出を長期間にわたり一定に制御することは非常に困難である。1 年以上の長期間、一定程度以上の溶出速度を確保するには、活性物質がまだ十分に存在する塗装面の深層と表層水をいかに接触させるかに依存する。この対策として、既に活性物質が溶出してしまった表層部分（スポンジ層とも呼ばれる）を、受動的に剥離もしくは崩壊させる手段が取られてきた。上記の 3 種は、このような表層の更新により活性物質の溶出速度を一定以上に保つ手段に着目した分類といえる。

Figure 3.2-2 に各防汚塗料の塗膜表面でのこれら 3 分類の表層の更新の基本的なメカニズムを示とともに、Figure 3.2-3 には、これら 3 タイプを含む防汚塗料の種類別適用状況を示した。これは（社）日本塗料工業会で自主管理登録（平成 20 年 7 月 15 日時点）されている 407 種の防汚塗料製品を自己研磨型、崩壊型、旧来型、シリコーン型に分類し、分類別適用数を船種別に集計した結果である。この集計結果によれば、自己研磨型を適用している事例が多く、少なくとも国内では自己研磨型が防汚塗料の主流となっていることがわかる。なお、様々な活性物質が使用されており、1 つの塗料製品中に複数の活性物質を含有している防汚塗料製品が多い。

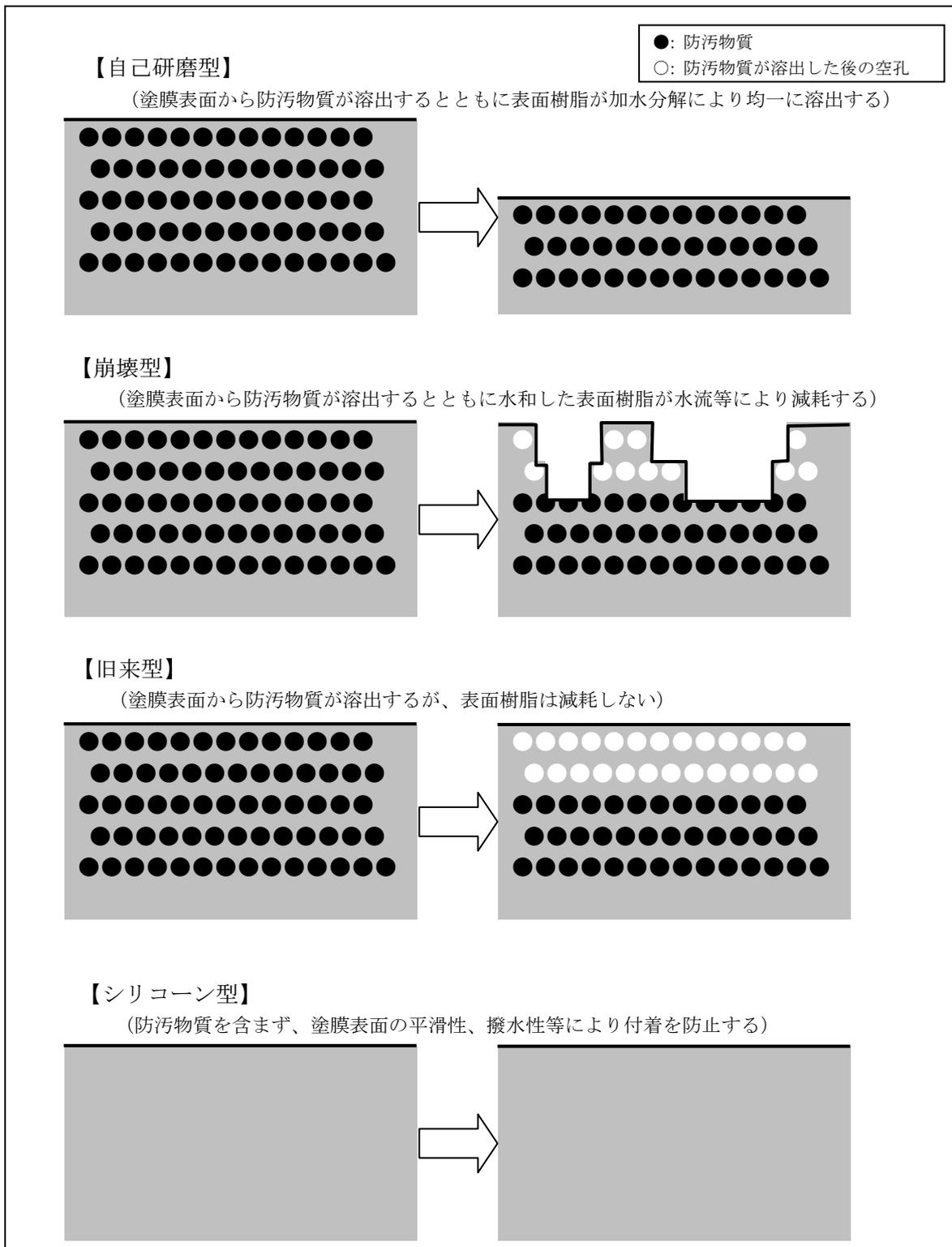


Figure 3.2-2 防汚塗料の種類による塗膜表面での作用メカニズム

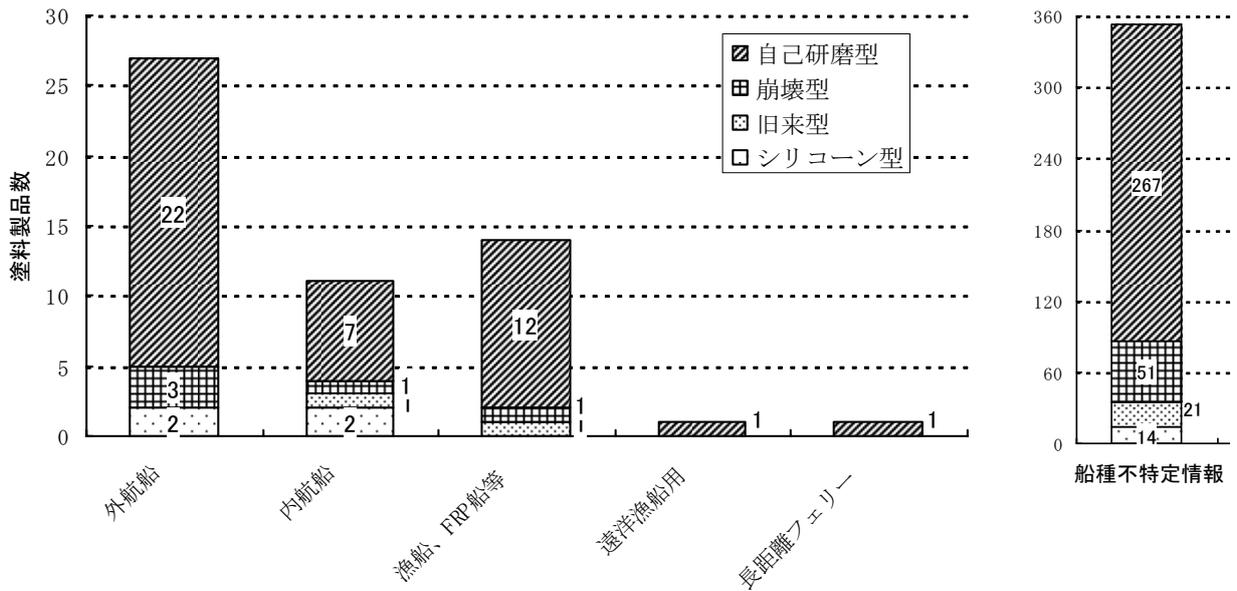


Figure 3.2-3 防汚塗料の種類別適用現状

他方、防汚塗料に使用される活性物質の種類の変更の歴史は、特定物質の使用禁止の歴史であるとも言える。毒性の強い活性物質を使用すれば、高い防汚性能を担保できることは自明であるが、この場合その物質が受容環境に残留して悪影響を及ぼすことが考えられる。

一例として、1970年には日本造船工業会において、高い毒性と高残留性のある化学物質を活性物質として用いた防汚塗料を使用しないことが決定されている。また、亜酸化銅を除く全ての活性物質については、毒性を調査研究した上で取り扱いを決定することになった。このため、有機ヒ素以外についても亜酸化銅を除き、強い生態毒性の疑いがある活性物質は事実上使用禁止となった。

その後、有機ヒ素・水銀以外の活性物質として大量に使用されてきたのはトリブチルスズ（TBT）に代表される有機スズ化合物である。しかし、この活性物質の原料であるビス（トリブチルスズ）＝オキシド（TBTO）は、長期にわたるその毒性の強さから国内では1989年に化学物質審査規制法（化審法）において第一種特定化学物質に指定され、実質的な製造・輸入が禁止となった。さらに、2008年のAFS条約¹⁾発効により、全世界的に同物質の使用が全面的に禁止された。既存船においても塗り替えなどが義務づけられており、同物質の使用は2008年以降、完全に禁止されている。このため、現在では非スズ系の活性物質を使用した防汚塗料が使用されている。Figure 3.2-4には、バイオサイド系の防汚塗料製品が含有している活性物質の適用数を船種別に示した。

これまでの毒性の強い物質の使用禁止は、単に毒性の強さだけで判断したものが多かったが、現在では港湾内の船舶の存在確率に比例した環境への負荷と環境中での活性物質の挙動に注目したリスク評価が行われるようになってきている。

¹⁾ AFS条約: 2001年の船舶の有害な防汚方法の規制に関する国際条約（The International Convention on Control of Harmful Anti-Fouling Systems on Ships, 2001）は、海洋環境及び人の健康を保護するため、船体に貝などの海洋生物が付着するのを防止するために用いられるTBT（トリブチルスズ）などの有機スズ化合物を含む船底防汚塗料の使用を段階的に禁止。2001年10月に国際海事機関（IMO）で採択。

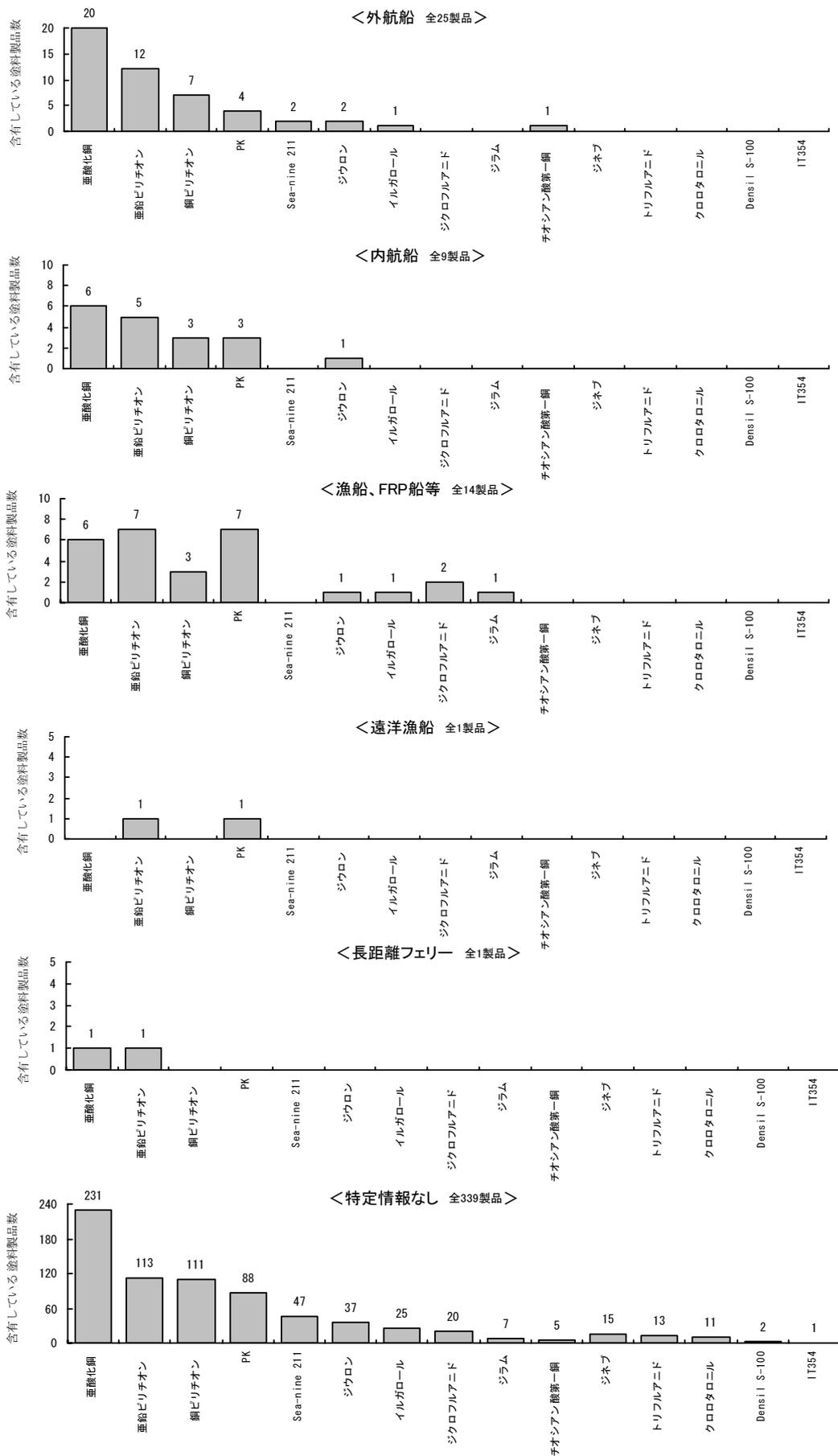


Figure 3.2-4 適用されているバイオサイド系自己研磨型防汚塗料の含有活性物質

3.2.2 現在用いられている一般的な防汚塗料

防汚塗料の中で最も使用頻度が高く、かつ効果が確認されているものは、生物の付着を防止する効果を有する化学物質（バイオサイドとも呼ばれる）を含んだ、自己研磨型の防汚塗料である。以下に、現在主流の防汚塗料である自己研磨型塗料の付着防止原理、付着防止性能、コスト、活性物質の溶出による環境リスクについて記述する。

(1) 付着防止原理

現在主流の自己研磨型防汚塗料は、塗膜に海水が接すると、塗膜表面が加水分解して活性物質を含む防汚成分が溶出し、同物質による急性的な生態影響（忌避）によって生物の付着を防止する原理である。1章で述べたように、micro biofouling を構成する主体である単細胞生物に対しては、忌避するための知覚力または物理的機能がほとんどないため忌避させることは不可能である。しかし、塗装表面に高濃度層をなしている活性物質の生態毒性によってバクテリアの付着後に付着基盤表面上における増殖や細胞外物質の分泌を抑制することが可能である（1.2.1 (1) イ）参照）。これに対して、macro biofouling を構成する付着生物（主に動物）は、付着幼生が塗装表面に接触した際に活性物質の高濃度層を知覚し忌避する効果があることが知られている。

3.2.1 で述べたように、自己研磨型塗料は、一定速度で漸次塗膜表面が更新される性質によって、常に新しい表面が表れ、長期間安定して塗膜表面から活性物質が溶出し、高濃度層を保つことから、付着防止性能が安定していると言われている（Figure 3.2-2 参照）。このような、自己研磨型塗料の表面更新は、micro 及び macro fouling とともに、初期段階であれば塗料の崩壊（剥落）に伴って剥離する効果も期待できる。

(2) 付着防止性能

Table 3.2-1 には、我が国の船舶用塗料業界から提供された自己研磨型防汚塗料の付着防止性能に関する情報を整理した。

これら自己研磨型防汚塗料の付着防止性能は、約3年の入渠間隔あるいは5年間維持するように設計されている。ただし、これらの設計の根拠となる付着防止性能試験については、自己研磨型防汚塗料を塗布した試験板を海中に浸水して生物の付着状況を観察する基本的な方式は同じであるものの、使用する試験板、海中への浸水方法と期間、観察対象の生物や観察基準等が各社で異なっており、標準化されていない。また、国内と同様に国際的にも各社独自の試験方法で防止性能が設計されており、現在導入されている製品の付着防止性能の不統一性を引き起こしている原因になっている。この設計上の付着防止性能に対しては、設計値を達成できず海藻やフジツボなどの動植物が期間内に付着してしまうケースがあることも、業界では認識されている。さらに、微生物被膜の形成防止はより困難なようである。

次に、海運会社を対象にした、入渠時の船体清掃頻度に関する聞き取り調査を行った。対象船舶は、日本/ペルシャ湾航路の原油タンカー6隻、日本/豪州航路のバルクキャリアー（石炭専用船、鉄鉱石専用船）6隻、日本/北米西岸航路のコンテナ船6隻、合計18隻である。その結果、入渠間隔は、2.5年が大半であった。Figure 3.2-5 には、これらの船舶が入渠時に実施している付着生物除去頻度を船体部位別に示した。この結果によると、外板、スラストトンネル、ビルジキール、シーチェストに関してはすべての船舶が入渠時に必ず付着生物の除去作業を行っている。すなわち、入渠時にはすべての船舶で生物が付着している状況にあることを示す。前記した我が国の船舶用塗料業界における自己研磨型防汚塗料の設計上の付着防止性能維持期間は、入渠から再入渠までの間隔を考えた3年間あるいは5年間である。聞き取り対象船においては、我が国の船底塗料業界の防汚塗料を適用していない可能性も考えられる。ただし、2.5年の入渠間隔ですべての船舶が付着生物の除去作業を実施しているという現状は、少なくとも我が国の船舶用塗料業界が設計している自己研磨型防汚塗料では、およそ3年間の付着防止性能の維持を達成できていない製品が多いことを示唆している。

Table 3.2-1 船底塗料業界の情報に基づく自己研磨型防汚塗料の付着防止性能

防汚塗料製品	種類と効果原理	主な対象生物と対象船体部位	設計上の付着防止性能
A社 Sシリーズ	<ul style="list-style-type: none"> ●自己研磨型 ●加水分解で溶出する活性物質の浮遊幼生及び付着幼生に対する忌避作用 	<ul style="list-style-type: none"> ●全付着生物が対象 ●全部位が対象 	<ul style="list-style-type: none"> ●設計上は5年間維持、また、目標として入渠間でのスライム形成防止 ●現実的には微小藻類等のスライム防止は困難で、海藻及びフジツボ等の動物が見えない状況が目標 ●実際には30~40ヶ月での塗り替えが望ましい
B社 Tシリーズ	<ul style="list-style-type: none"> ●自己研磨型 ●加水分解で溶出する活性物質の浮遊幼生及び付着幼生に対する忌避作用 	<ul style="list-style-type: none"> ●全付着生物が対象 ●全部位が対象 ●ただし、舷側部には、銅ピリチオンを含む製品、平底部には銅ピリチオンを含まない安価製品を選択される場合がある 	<ul style="list-style-type: none"> ●設計上は5年間維持、ただし、安価製品以外 ●シーチェスト等の生物汚損が激しい部位に選択使用される場合でも、設計上は入渠間あるいは5年間でのスライム形成防止性能を維持
C社 Eシリーズ	<ul style="list-style-type: none"> ●自己研磨型 ●加水分解で溶出する活性物質の浮遊幼生及び付着幼生に対する忌避作用 	<ul style="list-style-type: none"> ●全付着生物が対象 ●全部位が対象 ●ただし、舷側部には藻類防止製品を使用する場合がある 	<ul style="list-style-type: none"> ●設計上は、36ヶ月または5年維持 ●性能維持期間は、塗料の種類（SOLID分の違い）と塗膜厚により調整する
付着防止性能に関する総評	<p>設計上の性能は、すべての付着生物種に対して、3年程度の入渠間あるいは5年間の性能維持を基本としている。この設計上の設定は、各社で行われている試験結果に基づいていると考えられる。ただし、塗料業界としてもスライム形成、及び目に見える動植物が付着してしまうケースがあることも認識しているようである。</p>		

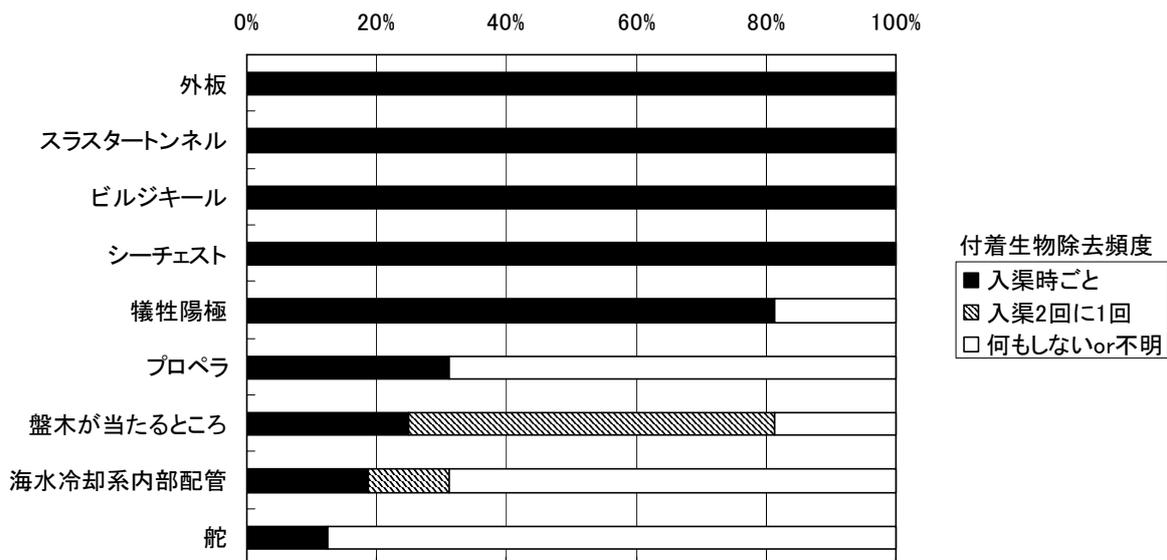


Figure 3.2-5 入渠時に実施している船体部位別の付着生物除去頻度

N: 18 隻、入渠間隔は多くの船が 2.5 年

(3) コスト

入渠時における防汚塗料の塗り替え作業の費用に関して、我が国の海運会社に聞き取り調査を実施した。対象船舶は、日本/パルシヤ湾航路の原油タンカー6隻、日本/豪州航路のバルクキャリアー（石炭専用船、鉄鉱石専用船）6隻、日本/北米西岸航路のコンテナ船6隻、合計18隻である。適用される防汚塗料は自己研磨型である。その結果によれば、1隻当たりの施工コストは船種や船の大きさ、顧客による施工条件などにより大きく異なり、最小で900万円、最大で8,000万円であった。

(4) 活性物質による環境生物へのリスク

バイオサイド型防汚塗料の場合、その使用目的である生物の付着を防止するため、生態毒性を有する活性物質が塗膜表面から溶出する。このため、付着防止性能（効果）が高い塗料ほど生態毒性が強い活性物質を含むことになる。または、同程度の付着防止効果を持つ活性物質を使用する場合、塗膜からの溶出量（速度）が大きい塗料ほど、防汚効果は高い。バイオサイド型防汚塗料の場合、ある程度の生態毒性を有する活性物質の使用は不可欠であるが、環境生物への影響を無視することはできない。生態毒性に関して新たな知見が得られると、既に多く使用されていた活性物質が禁止されるという過程が繰り返されてきた。塗料業界、船主協会、その他の業界団体では、防汚効果の向上（防汚効果の持続期間の延長）と周辺環境生物への影響の両面から、その評価と技術開発に取り組んでいる。

防汚塗料中の活性物質による環境リスクは、塗膜表面からの溶出に加え、付着生物の除去によってもそのリスクの懸念が大きくなると予想される。すなわち、付着生物の除去のための船体の洗浄において塗膜の一部が剥離し、通常の塗装表面から溶出する量に上乗せして周辺海域へ排出されることが考えられる。このため、5章においては、防汚塗料からの活性物質の溶出に加え、水中洗浄による環境生物へのリスクの上乗せ効果についての検討を行っている。

(5) シリコン型防汚塗料

バイオサイド型防汚塗料と比較してその利用は多くはないが、シリコン型防汚塗料も船体への付着防止のために使用されている。

シリコン型防汚塗料は、その名前の通りシリコン樹脂を用い、平滑な塗膜表面を形成させることにより塗膜への生物の付着を防止する。また、停泊時等に塗膜表面に生物が付着、または接触しても、船舶の航行や波や風による海水の物理的な流体力により容易に付着生物が脱離することで、防汚効果が発揮される。バイオサイド型防汚塗料と比較して、シリコン型防汚塗料の使用例が少ない理由は、コストに加え、塗膜の物理的な脆弱性にあると考えられる。コストについては、国内塗料業界によるとシリコン型防汚塗料は、自己研磨型防汚塗料の約5倍である。さらに、シリコン型防汚塗料は、接岸時に船体表面が接触する部位や、ロープ等が接触する箇所では、バイオサイド型防汚塗料と比較して顕著な塗膜の剥離、損傷が見られている。

シリコン型防汚塗料では、シリコン樹脂以外にも、複数の化学物質が使用されている。一般にこれらの化学物質の含有量はバイオサイド型と比較して少なく、塗膜表面からの溶出は想定されていない。

Table 3.2-2 に、一般的なシリコン型防汚塗料で使用される化学物質を示す。

Table 3.2-2 シリコン型防汚塗料中の化学物質

CAS No.	物質名	製品番号				PRTR対象物質		想定される物質の役割
		1	2	3	4	日本	他国	
77-58-7	ジブチル錫ジウレート	○	○	○	○	第一種、政令番号：176	-	触媒
78-10-4	テトラエチルシリケート	○	○	○	○	-	-	
100-41-4	エチルベンゼン	○	○	○	○	第一種、政令番号：40	米国、豪州、オランダ等	溶媒
123-54-6	アセチルアセトン	○	○	○	○	-	-	
1330-20-7	キシレン	○	○	○	○	第一種、政令番号：63	米国、豪州、オランダ等	
13463-67-7	酸化チタン	○		○	○	-	-	色素
1317-61-9	四三酸化鉄	○				-	-	
1309-37-1	三酸化二鉄		○			-	-	
64-19-7	酢酸	○	○			-	豪州、韓国	-
-	(錫)				○			

3.2.3 防汚塗料の改良の可能性

(1) 付着防止原理と性能

現在の防汚塗料としては、亜酸化銅、亜鉛ピリチオン、銅ピリチオンを主な活性物質とする自己研磨型防汚塗料が主流である。ただし、前述したように、それらの付着防止性能は必ずしも付着防止性能の設計上の3年や5年あるいは入渠間隔を通して生物付着を防止する性能を維持しているとは限らない。自己研磨型防汚塗料には、さらに改良されたメカニズムで生物の付着を阻害するとされる製品も存在する。これらは、含有する活性物質の種類や含有比率及び活性物質の溶出速度を工夫して、従来製品よりも付着防止性能を向上させているものと考えられ、現状よりも長期間の生物付着防止効果が期待される。また、シリコン型の防汚塗料も表面状態の改良や、防汚効果がより長期間維持できる製品への改良が想定される。現在の問題点は、試験時の性能と実海域との性能間に直接の相関がないこと、異なったメーカー間の性能を直接比較できないことである。この結果、上記のような高性能塗料の採用にユーザーである造船所や船主は積極的でない。このような状況は、造船においては、例えば省エネのための船体付加物などでも見られる傾向であり、国際的に標準化された試験方法の整備が望まれるものである。

理想的な試験方法は、最も生物が付着しやすい条件を人工的に整え、同一条件下で試験をすることであるが、試験コストの問題がある。コスト以外にも最悪の条件を整理・統合するために、多大の時間と努力を要することなどが課題となる。このような観点から、無塗装板あるいは一定の性能を持つ同一塗

料を塗布した試験板における被度面積などとの比較によって評価を均質化し、かつ被度面積の正規化などにより、試験場所や試験条件の違いを相殺することで、性能試験を標準化する方法が考えられる。

また、試験方法は、含まれる活性物質の生態毒性を利用する自己研磨型と撥水性等を利用するシリコーン型では、その付着防止メカニズムが異なることから、例えば、シリコーン型の場合には、流水条件を加えた試験とするなどの工夫が必要となる。

今後は、日本塗料工業会から国際印刷塗料工業会（IPPIC: International Paint and Printing Ink Council）などへの交渉等を通して、このような性能試験方法を早期にまとめ、高性能防汚塗料の普及に寄与することが望まれる。

これらの将来における新たな防汚塗料は、その効果が期待されるが、現時点においてはその防汚効果のメカニズムや有効性、効果の維持期間、活性物質の溶出速度等が明確ではない。このため、本調査では後述する化学的環境リスク、及び生物移入リスクにおけるの評価対象には含めなかった。

(2) コスト

国内塗料業者への聞き取り調査の結果、自己研磨型防汚塗料中の活性物質の溶出を速め、付着防止性能を向上させた高性能の自己研磨型塗料製品は、現状主流製品の2倍程度のコストであった。また、シリコーン型は、現在普及している自己研磨型防汚塗料の5倍程度のコストであるとのことであった。

これらの情報を総合すると、3～5年の入渠間隔において生物付着を十分に防止可能な防汚塗料は、現状での普及製品と比較して約2～5倍程度のコストアップになると推測される。

このコストアップは、新製品の普及によって下がる可能性もあるが、船舶全体に適用する場合には億円単位のコストになる可能性もあり、必ずしも現実的とは言えない。

今後、これら高性能の防汚塗料の低コスト化が進むことが望まれるが、現状においても大幅なコスト増加を招かない方法もあると考える。それは、船体の部位別に適用する防汚塗料を変える方法である。現状においても、生物が付着しやすい舷側部には高性能の防汚塗料を、付着しにくい船底部には性能が低い防汚塗料を使用している事例が見られる。この方法を応用し、例えば、シーチェスト等の生物付着が顕著な部位に関しては、防汚効果が高い（生態毒性が強い）活性物質を多く含有した防汚塗料、あるいは活性物質の溶出を速めた防汚塗料を使用するなどが考えられる。このような限定部位での使用は、高コストの防汚塗料であっても使用面積が外板と比較して非常に限られることから、大幅なコスト増加にはならないと予想される。

面積が広い外板に適用する防汚塗料に関しては、既に開発されている高性能防汚塗料の低コスト化と共に、より低コストの新規製品の開発が望まれる。

現状においても併用されているが、防汚塗料の設計上の付着防止期間内において生物付着が確認された場合には、IWC: (In-water cleaning: 水中洗浄) 等の除去技術の適用との組み合わせによる管理が適していると考えられる。付着生物を除去することにより、船体表面に汚損が無い状態（macro biofoulingでない状態）に保つことが出来れば、船体表面への付着による外来生物の移動量を小さくできると共に、塗膜表面が更新されることで船体の平滑性及び付着防止性能が回復し、燃費等のトータルコストの抑制につながる可能性がある。

3.3 海水電解装置及びそれ以外の海洋生物付着防止装置（MGPS）による付着防止技術

海洋生物付着防止装置（MGPS: Marine Growth Preventive System）の代表的な装置・技術である海水電解装置は、防汚塗料の塗布が困難な冷却水系内部配管に対する生物の付着防止を目的とした技術として、既に広く実用化されている技術である。MGPSには、海水電解装置で船上において活性物質を生成して適用する技術以外にも、船外から補給される薬剤を活性物質として使用する技術、あるいは高温の蒸気の吹きつけ等の技術があるが、海水電解装置が最も一般的に使用されている。さらに、犠牲陽極による付着防止技術も利用されている。本調査においては、外板以外の船体部位に適用される代表的なMGPSの一つである海水電解装置（船上で塩素化合物を生成し活性物質として使用する装置）について、その原理、性能、コストを以下に整理した。

3.3.1 現在実用化されている海水電解装置

(1) 付着防止原理

海水電解装置は、海水を電気分解することにより発生する次亜塩素酸を主成分として利用する装置である。電気分解により生成した残留塩素として測定される塩素化合物を冷却水配管系統に注入し、同物質の持つ生態毒性で生物の付着を阻害する。Figure 3.3-1 に海水電解装置の模式図を示した。

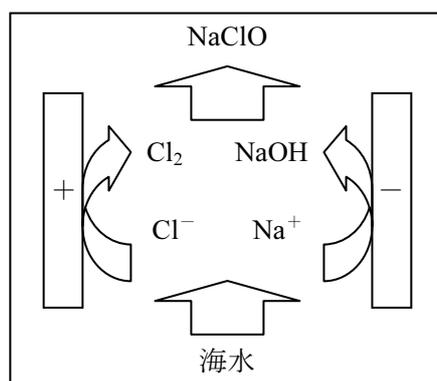


Figure 3.3-1 海水電解装置の模式図

海水電解装置は、海水ポンプの吐出口側から海水の一部をバイパスして電解槽に導き、模式図に示す原理で塩素化合物を含む電解液を作る。この電解液は、各シーチェストへ配分後、ノズルから噴出される。なお、現状では噴出ノズルはシーチェストに配置されているが、その理由は下流側にあたる内部配管に効率的に電解液を作用させて生物付着を防止するためである。これは、現状の技術はシーチェストへの生物付着を防止するために設計されたものではなく、あくまで冷却水系内部配管に対して適用されているためである。

現状においては、電解液注入後の配管内海水中の残留塩素濃度は、0.15～0.3 mg/L に設定されている。この濃度は、下記に示す代表的な海産生物あるいは汽水生物に対する残留塩素濃度の急性毒性値と同程度である（SIDS 2004）。ただし、注入から排出までの時間が数秒から数十秒と極短時間であることを考慮すると、内部配管に入り込んだ生物を殺滅するのではなく、その作用は一次的に生物の付着力を喪失させる効果に留まっているものと考えられる。

- 魚類; *Gasterosteus aculeatus*（汽水産魚のイトヨ）の 96-h LC₅₀ = 0.167 mg/L
- 甲殻類; *Pandalus goniurua*（エビ類）の 96-h LC₅₀ = 0.09 mg/L
- 藻類; *Thalassiosira rotula*（珪藻）の 24h-IC₅₀ = 0.33 mg/L

我が国で市販されている代表的な海水電解装置（MGPSの商品名で流通）のシステム構成とスペックを以下に示す。主な構成機器は、電解に必要な海水を電解槽に送る海水ポンプ、電解液を生成する電解槽、残留塩素濃度が1,000～2,000 mg/Lの電解液を一次的に貯留する電解液貯留槽、電解液をシーチェストに注入する注入ノズルである。

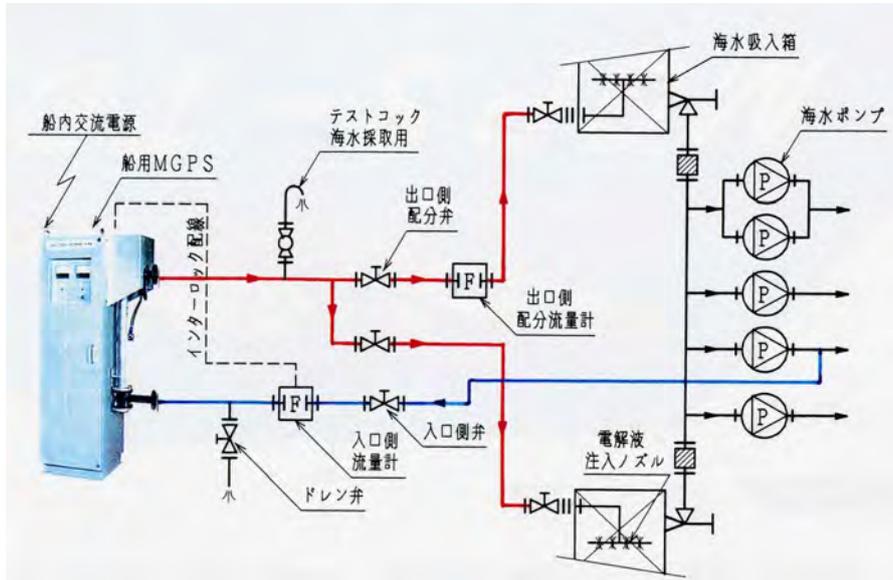


Figure 3.3-2 代表的な海水電解装置のシステム構成

Table 3.3-1 代表的な海水電解装置のシステムスペック

型番	TD-180P	TD-1200P	TD-2400P
海水処理量 (m ³ /h) 注1	180	1,200	2,400
電気消費量 (KVA/AC)	0.7	4.0	7.7
外形寸法 (mm)	W	500	650
	D	350	600
	H	1,000	1,500
重量 (kgs)	75	165	215
配管サイズ	5K-40A	5K-50A	5K-65A
本体設置場所	エンジンルーム		
注入場所	海水取水口		
注入残留塩素濃度	0.3 mg/L 注2		
推定排出残留塩素濃度	0.02～0.05 mg/L		

注1: 海水処理量は現状での使用条件である残留塩素が0.3 mg/L時の値

注2: 現状での標準的な使用条件は、外航船の停泊時0.20 mg/L以上、航海時0.15 mg/L以上、内港船では0.30 mg/L

(2) 付着防止性能

付着防止性能に関する定量的なデータは確認できなかった。注入時の残留塩素濃度 0.3 mg/L は、前述のように残留塩素の海生生物に対する急性毒性値と同等のレベルである。ただし、排出濃度が設計上では 0.02~0.05 mg/L という想定値であることから推定されるように、残留塩素濃度は注入後速やかに減衰すること、また暴露される時間が非常に短いことから、一時的に付着機能を阻害することで付着を防止していると考えられる。

(3) コスト

現在船舶で使用されている海水電解装置の価格は、海水処理量の差により様々である。前述の装置の場合、一般的なコンテナ船で数百万円/隻、大型船（LNG・タービン船）の場合で約 1,000 万円/隻程度とのものである。設置工事、電源供給、配管等の費用は、造船所側の負担となっているので、コストには含まれない。また、耐用年数は概ね 15 年である。主に入渠時に実施される保守作業では、定期検査時に電解槽の白金陽極を交換する。費用は、処理容量により異なるが、数十万円～数百万円程度とのものである。

3.3.2 その他の現在実用化されている海洋生物付着防止装置

ここでは、参考までに現在適用されているその他の付着防止技術とその適用状況を紹介する。なお、これらの技術の付着防止性能及びコスト等に関しては十分な情報が得られなかった。

Table 3.3-2 には、我が国の海運会社に対する聞き取り調査結果に基づくシーチェスト等の複雑部位を対象にした防汚塗料以外の付着防止技術の採用状況を示した。付着防止技術を採用していると回答があった船舶のうち、半数以上の船舶がスラスタートンネル以外の概ね 50%以上の部位で、MGPS として定義される船体付着防止技術を採用していた。中でもシーチェストと海水冷却水系内部配管での適用率が高く、9 割に迫る高率となっている。なお、犠牲陽極は 25 から 80%程度の割合の船舶で使用されていた。

Table 3.3-2 船種別に見た防汚塗料以外の船体付着防止技術の船体部位別採用隻数

付着防止技術の採用部位	原油タンカー (6)	石炭専用船 (4)	鉄鉱石専用船 (2)	コンテナ船 (6)	合計
シーチェスト	6 (100.0)	4 (100.0)	2 (100.0)	4 (66.7)	16 (88.9)
スラスタートンネル	—	—	—	4 (66.7)	4 (66.7)
盤木があたる場所	6 (100.0)	2 (50.0)	1 (50.0)	4 (66.7)	13 (72.2)
海水冷却内部配管	6 (100.0)	4 (100.0)	2 (100.0)	4 (66.7)	16 (88.9)

注) () は調査対象隻数 (表内では対象隻数と表記) に対する割合 (%)

Figure3.3-3 には、複雑部位の代表としてシーチェストを取り上げ、防止技術の採用状況を示した。

海水電解装置以外では、スチーム射出、壁面角部の丸み化及びグレーチングバー開閉が行われていた。何らかの技術を採用している合計 16 隻のうち、スチーム射出は 7 隻、壁面角部の丸み化及びグレーチングバー開閉は 6 隻で実施されていた。なお、グレーチングバーに丸みを付けて生物の付着を防止する技術を採用する船舶はなく、グレーチングへの付着対策はとられていなかった。

また、これらの技術の併用は、Figure 3.3-4 に示すように、電解液注入を単独で行い、他の技術との併用が見られない船舶が全体の 56%と最も多く、電解液注入、スチーム射出、角部の丸み付け、グレーチング開閉の 4 つの技術をすべて併用している船舶は 38%、電解液注入とスチーム射出の 2 つの技術を併用する船舶が 6%であった。なお、それらの技術の概要は、以下の通りである。

- ・ スチーム噴出: シーチェスト内にスチームを噴出して生物付着を防止する技術である。海水電解装置と併用されている場合が多い。豪州の船級協会が推奨しているとの情報がある。
- ・ 角部の丸み付け: シーチェスト壁面の角部を面取りして丸みを持たせて防汚塗料の剥離を防ぎ、その付着防止性能を維持させる技術である。
- ・ グレーチング開閉: 本技術は、グレーチングに丁番を付けて開閉可能とし、シーチェスト内の付着生物を除去できるようにした技術である。

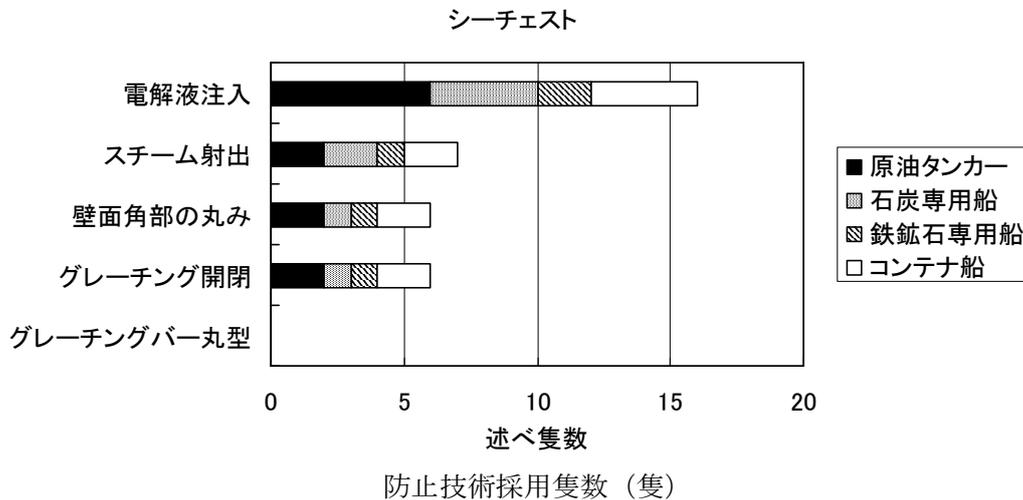


Figure 3.3-3 シーチェストで採用されている付着防止技術

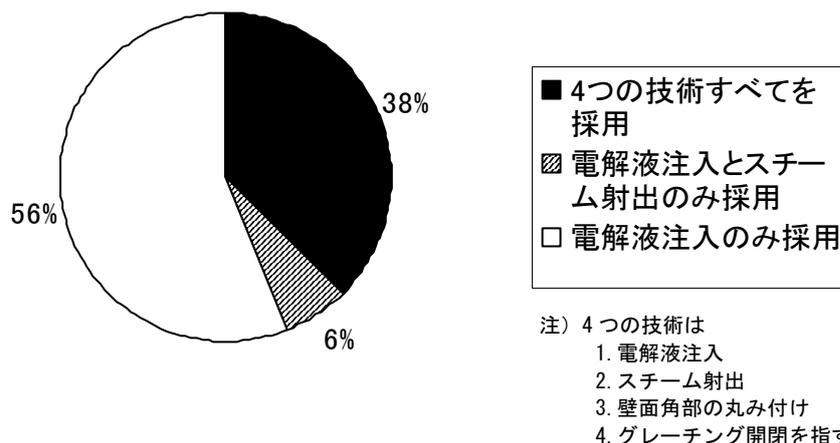


Figure 3.3-4 シーチェストで採用されている付着防止技術の併用状況(全船種合計)

3.3.3 海水電解装置の改良の可能性

海水電解装置の改良の可能性として、適用部位の拡大が考えられる。海水電解液の適用範囲を、現在の冷却水系内部配管用から、配管の上流部でかつ生物付着が顕著なシーチェストの内側（グレーチングの裏側）に拡大することが考えられる。

(1) 付着防止原理

シーチェストに適用した場合の付着防止原理は、内部配管の場合と同じで、海水を電気分解することにより発生する塩素化合物をシーチェストの壁面に効率良く注入し、残留塩素の持つ生態毒性で生物の付着を阻害（忌避）させることである。

(2) 付着防止性能

シーチェストの付着防止対策として活用する場合には、次の2点について改良を検討する必要があると考える。どちらにしても技術的には改良の可能性は十分にあると考えられる。

ア) 注入箇所の変更

現在の装置は、冷却水系内部配管の生物付着防止を対象にしているため、電解液はシーチェスト内奥の配管入り口付近に設置されている。付近の海水とともに電解液は全量取り込まれるため、その影響がグレーチング内側に及ぶことはない。この注入ノズルの数を増やし、かつ、注入ポイントをグレーチング直下に変更することで、グレーチングと前泊本体の間隙全体に拡散するように変更することで、シーチェストの付着防止技術としても機能することは技術的に容易である。

イ) 高濃度電解液の注入

シーチェストは、生物の付着量が多い部位である。理由は、その構造から外板に比較して、航行時に、海水が滞留するか、あるいは流速が遅くなる部位が多いためと考えられる。このように生物付着量の多いシーチェストにおいて付着を防止するためには、注入する電解液中の残留塩素濃度を現在の約 0.3 mg/L よりも高くする必要があると考えられる。

なお、この高濃度の電解液の注入は、生物の付着が主に停泊時に起こると考えられることから、停泊中に限定しても良いかもしれない。また、入り込む生物をすべて殺滅するのではなく、生物の付着を阻害することで、付着量をかなり削減できると想定されることから、高濃度の電解液注入は停泊中に連続して行うのではなく、間欠的な注入でも効果が得られる可能性もある。

一方、高濃度の電解液注入に関しては、シーチェスト及び冷却水系内部配管の腐食影響について十分な検討が必要である。また、排出水の化学的環境リスクに関しても十分に検討し、安全な濃度を設定する必要がある。

(3) コスト

上記、改良後のコスト増加は、注入方法の改良と塩素化合物濃度を高めるための電力消費（燃料費）の増加に限られ、大幅なコスト増加にはならないと推察される。

3.4 課題

将来求められる付着防止技術は、防汚塗料製品における生物付着防止性能の向上技術と海水電解装置等の適用技術である。しかし、一方では、例えば防汚塗料から溶出する活性物質の生態毒性及び海水電解装置から排出される塩素化合物等による沿岸生態系への影響等の化学的環境リスクが許容されるレベルにあることも同時に求められる。

これら付着防止性能及び化学的環境リスクに関する試験及び評価方法は、ISO（国際標準化機構: International Organization for Standardization）による標準化が進められているが、様々な課題が指摘されている。例えば、防汚塗料からの活性物質の溶出速度（leaching rate）を推定または測定する方法は、ISO や ASTM（米国材料試験協会: American Society for Testing and Materials）による、マスバランス法や実験室試験法が使用されてきた。一方、実際に防汚塗料を使用している船舶の海水中に浸水している部位での活性物質の溶出を測定したフィールド法との比較では、特に実験室試験法では活性物質の溶出速度が非常に大きいことが明らかとなっている。防汚塗料からの活性物質の溶出は、海水の塩濃度、pH、温度、水の抵抗、その他の要因で大きく異なること、フィールド法を日常的に実施することは困難であることなどから、更なる試験方法の改良が議論されている。防汚塗料からの活性物質の溶出は、周辺環境への化学的リスクと同時に、防汚塗料の防汚効果の持続時間の推定においても重要である。このため、できるだけ早期に国際的に標準化された方法を整備し、統一的な評価が実施されることが望まれる。なお、これら試験方法は、科学的に正確な試験・評価であるとともに、事業者への過度な負担とならない試験コストレベルに抑制することにも配慮する必要がある。

また、製品及び装置の低コスト化も課題である。防汚塗料に関しては、現在の高性能製品の低コスト化及び高性能で安価な新製品の開発が望まれる。

4. 付着生物の除去を目的とした AFS 装置・技術の現状と将来の改良の可能性

4.0.1 AFS (Anti-fouling System: 生物防汚システム) とは、生物の船体付着を防止またはコントロールするために使用される装置技術 (device)、及び処理技術 (treatment) と定義される。AFS の具体的な目的としては、①付着防止: 生物の付着そのものを阻害、もしくは抑制すること、②付着生物除去: 既に付着した生物の掻き落としなどによって生物の付着が無い状態に回復すること、が挙げられる。本章では、AFS のうち、②を目的とした除去技術 (以下、付着生物除去技術) を対象に、その現状を、性能、リスク及びコストの観点から俯瞰するとともに、改良の可能性について整理する。付着生物除去技術とは、防汚塗料や海水電解装置等の付着防止技術が適用されているにも係わらず、船体外板やシーチェスト等に生物が付着してしまった場合に、それらの生物を物理的に取り除く表面処理技術である。これは、付着防止の処理が施されている表面を、原状もしくはそれに近い状態に戻すことも意味しており、①の防止技術と共に AFS の重要な役割を担っている。

4.0.2 AFCS に定義される船体の外板に対する付着生物除去技術には、入渠時に行う船体清掃及び水中洗浄 (IWC: In-Water Cleaning) が含まれる。入渠時の船体清掃は、主に 2.5 年間隔の定期的な防汚塗料の塗り替え作業の一部として実施され、通常は全ての船舶で行われている。他方、IWC は防汚塗料の入渠間のメンテナンスとして実施されており、生物の船体への付着による燃料消費の増加を最小限に食い止めるための技術的方策として用いられてきた。しかし、現在 IWC の実施内容は、生物侵入を引き起こす可能性がある付着生物を船体から除去する技術そのものになると言える。すなわち、IWC の実施によって、外来生物の生物移入量 (dose) が低減することが科学的に証明され、かつ国際的な合意を得た場合、総合的な付着生物管理システムにとって将来有効な要素技術の一つになると考えられる。このため、本調査では、IWC の実施を生物移入量の低減技術として位置づけることとする。本章では、上記の船体清掃と水中洗浄の 2 つの主な付着生物除去技術に関して、清掃方法、除去性能、コスト、除去物質の処理方法及び課題について整理した。

4.0.3 入渠時の船体表面の清掃は、付着生物除去のために現状ではほぼ全ての船舶が行っている。その手順は船体清掃 (付着生物の除去)、下地処理、錆止め (タッチアップ)、防汚塗料の上塗りの順番である。船体清掃は、主にスライム層や海藻が付着する舷側部と船底及びフジツボや貝類、管棲ゴカイ類が付着しやすい複雑部位において、付着生物が目視で確認されなくなるまで行われる。清掃で除去された付着生物は、他の付着物と共にブルドーザー等の収集機械で回収され、陸上処分される。この際、清掃時に除去された付着生物や同時に船体表面から剥離した活性物質を含む防汚塗料片は、その極一部が回収されずに周辺海域へ排出される可能性がある。ただし、その量は周辺海域への生物移入や化学的環境リスクの懸念が生じるほど大きいものではない。このため、現状において入渠時に実施される船体清掃による環境リスクは小さいと考えられるが、現状と将来の両方において、清掃時に発生するドック排水中に含まれる除去物質を極力小さくする方策は必要であろう。船体清掃時の現状におけるコストは、防汚塗料や下地塗料のコストを含め、船舶の大きさ、下地処理の面積、再塗装面積によって大きく異なるが、900 万円～8,000 万円と報告されている。

4.0.4 船体への生物付着が原因である燃料消費の増大は、船体外板に生物が付着することによって航行時の船体摩擦抵抗が増加することと、プロペラに生物が付着し同じ回転数 (機関出力) であっても実効推進力が低下することの両方により生じる。このため IWC が実施される主な船体部位は、船体外板とプロペラ

であり、燃料消費との関連性が小さいシーチェスト等の複雑部位を対象に実施されることはまれである。現状での IWC の実施頻度は平均して 2 年に 1 回程度である。IWC は、付着している生物に応じて固さの異なるブラシを装着した特殊な装置を用いて行われている。IWC のコスト、船舶の大きさ、IWC 実施面積、付着の程度により異なるが、原油タンカー(VLCC)、石炭専用船(パナマックス)、鉄鉱石専用船(ケープ)といった大型船の場合で約 300 万円/隻/回であると推定される。

4.0.5 現状での IWC の実施状況を検分するため、自己研磨型の防汚塗料を使用しているコンテナ船に対して、IWC を実施した際の実態調査を行った。その結果、生物付着が激しい船舶に対する IWC では、付着物の完全除去の目的から非常に固い(除去効率が低い)ブラシが使用され、付着生物だけではなく、下塗りを含めた塗膜表面にもダメージを与えていることが明らかとなった。なお、かしめブラシ等の非常に固いブラシを使用する IWC は、生物被度が顕著な船体部位に限定されており、通常は IWC 実施面積の 10%程度である。残りの、生物被度が顕著でない約 90%の面積に相当する部位では、ソフトなナイロンブラシが採用される。

4.0.6 現状においては、IWC による除去物質の回収はほとんど実施されていない。従って、環境の影響を考えた場合の改良の重要な要素として、IWC 実施によって剥離される付着生物及び防汚塗料片の水中拡散防止と回収が挙げられる。現状の技術から推定すると、IWC 装置に回収機構及び網を適用することにより、0.3 mm 以上の剥離物はほぼ 100%回収することが可能であると考えられる。この回収サイズは、付着生物のうちフジツボや貝類、管棲ゴカイ類の付着初期サイズと同じレベルであり、船体から除去したほとんどの生物を IWC 実施海域に廃棄投入せずに回収することになる。すなわち、本章で提案する改良 IWC が、処理技術として適切に実施されれば、生物移入量と化学物質による環境リスクは大幅に低減されるものと予想される。

4.0.7 IWC で使用されるブラシに関しては、防汚塗料の剥離を考慮する場合、ソフトなブラシの使用が好ましいと考えられる。ソフトなブラシを使用することにより防汚塗料表面に対するダメージを抑えて、防汚塗料の減耗を最小限に食い止めると同時に、生物付着防止効果の短縮を防ぐためである。ソフトなブラシによる IWC を実施する場合には防汚塗料の剥離損傷も減少し、化学的環境リスクの低減と防汚塗料の付着防止効果の継続にも貢献することが期待される。

4.0.8 IWC 実施による環境リスク低減の手法として、除去物質を回収できる網を適用することは有効な手段の一つと考えられる。回収網を用いた IWC 除去物質の回収は、除去物質に含まれる生物の海域放出数を減らすだけでなく、除去物質に含まれる防汚塗料中の活性物質の周辺環境への排出量を減らすことに繋がる。すなわち、回収は IWC 実施による生物移入量と化学的環境リスクの両方の減少に貢献すると考えられる。また、回収によるこれらの低減効果は、ネットの網目の大小に影響されるため、IWC 装置の運用上で実施可能な回収網の最小メッシュサイズと回収可能な除去物質の粒子サイズについて測定・検討を行って確認した。測定・検討の結果、IWC 装置で運用上の面で問題なく回収できる粒子サイズは 0.3 mm 以上であると結論された。回収網の使用以外で付着生物の移入量を低減する手法としては、生物を含む除去物質をポンプで陸上の処理装置に導き処理する方式も考えられる。ただし、そのシステムはかなり大型になると予想される。

4.0.9 IWC の実施で海域に拡散する防汚塗料片によって上乘せされる化学的環境リスクの抑制にとって

も、除去物質の回収性能は重要である。一方、将来における総合的な付着生物管理システムにおいては、国際的に統一された判断により十分に管理された条件での IWC の実施は重要な要素技術の一つになり得ると考えられる。科学的根拠に基づく総合的な付着生物管理システムの構築のためには、IWC 実施による化学的リスク及び生物移入量の評価が不可欠である。さらに、除去性能及び回収性能に関しては、実際の IWC 実施船舶による検証試験等による確認の必要があると考えられる。将来において IWC の実施間隔を短くすれば、生物が船体に付着する期間が減少するため、付着する生物数そのものが少なくなると共に、船体に付着した後の成長期間も短くなるため、性成熟した個体数も少なくなると考えられる。このため、後述の 6 章においては、将来における管理された条件での IWC 実施として、例えば 1 年間隔あるいは半年間隔で IWC を実施した場合における海域に放出される生物数の変化を検討している。

4.0.10 更なる改良の可能性として、シーチェスト及びプロペラ等の複雑部位に対する付着生物の除去装置の適用について検討した。シーチェストは水中でのグレーチングの開閉が困難であること、生物が付着したとしても船舶運航時に船体抵抗が増えないことから、現状では付着物除去の実施頻度も低く、行われたとしても手作業で行われている。このシーチェストに対して、除去効率の向上や除去時の剥離片の回収のための新たな装置の開発、適用は付着生物の移入量の低減と同時に、化学的な環境リスクの低下にもつながることになる。検討の結果、現在利用可能な技術の改良により、シーチェストやプロペラ等の複雑部位についての回収装置の適用が可能であると推測される。

4.0.11 将来における除去技術としての IWC 装置としては、①動力を用いた IWC 装置によってダイバーへの負担を軽減し最大効率かつ最小時間内での作業が実施可能、②防汚塗料の塗膜を可能な限り傷つけないブラシ等の採用、③ IWC によって発生する除去生物及び剥離する塗膜片・粉末が、周辺海域に拡散しない装置、④回収した除去生物及び剥離した塗膜片は陸上で通常の廃棄物処理を行うことを想定、さらに、船舶の荷役中に IWC 作業が完結することが可能で、船舶の運航に支障を招かない現実的な装置が望まれる。

4.0.12 IWC を総合的な付着生物管理システムの要素技術に適用する場合の現実的、かつ大きな課題は、IWC 装置の普及と共に IWC 事業者の確保であると考えられる。例えば、将来において IWC が全世界で日常的に実施される場合、IWC の実施が可能な事業者、設備の確保及び一定以上の性能を有する回収機能を装備した IWC 装置の開発と普及が不可欠である。なお、我が国において、除去物質の回収もできる装置を保有している IWC 事業者は 2010 年現在 2 社確認された。

4.1 付着生物除去技術の種類

船体への生物防汚システム（AFS: Anti-fouling System）は、船体への生物の付着を防止する及び付着生物の除去を目的とする技術である。本報告書においては、船体の外板に対する AFS は AFCS（Anti-fouling coating system）、船体の外板以外の複雑部位に対しては MGPS（Marine Growth Prevention System）と定義する。AFCS の代表例として、防汚塗料の使用が挙げられる。一方、冷却水や発電機の内部配管の付着防止技術としては、MGPS の代表的な装置・技術である海水電解装置の導入例が多く見られる。その他、小型船舶では、電解装置の搭載が困難なことから、活性物質やスチーム噴出を使用している例もある。

AFS の主たる目的は、①付着防止: 生物の付着そのものを阻害、もしくは抑制すること、②付着生物除去: 既に付着した生物の掻き落としなどによって、生物付着が無い状態（macro biofouling でない状態）に回復すること、に大別される。本章では、AFS のうち、②を目的とした処理技術（以下、付着生物除去技術）を対象に、その現状を、性能、リスク及びコストの観点から俯瞰するとともに、改良の可能性について整理する。

付着生物除去技術には、船体の外板に対して実施される入渠時の船体清掃、及び水中洗浄（IWC: In-water cleaning）がある。また、外板以外の部位に対しては、シーチェスト等の複雑部位での手作業による除去や、プロペラポリッシングが実施されている（Figure 4.1-1 参照）。なお、本報告書では、外板及び複雑部位の両方において、水中での付着物除去の技術を IWC として取り扱う（Figure 4.1-1、Table7.1-1 参照）。

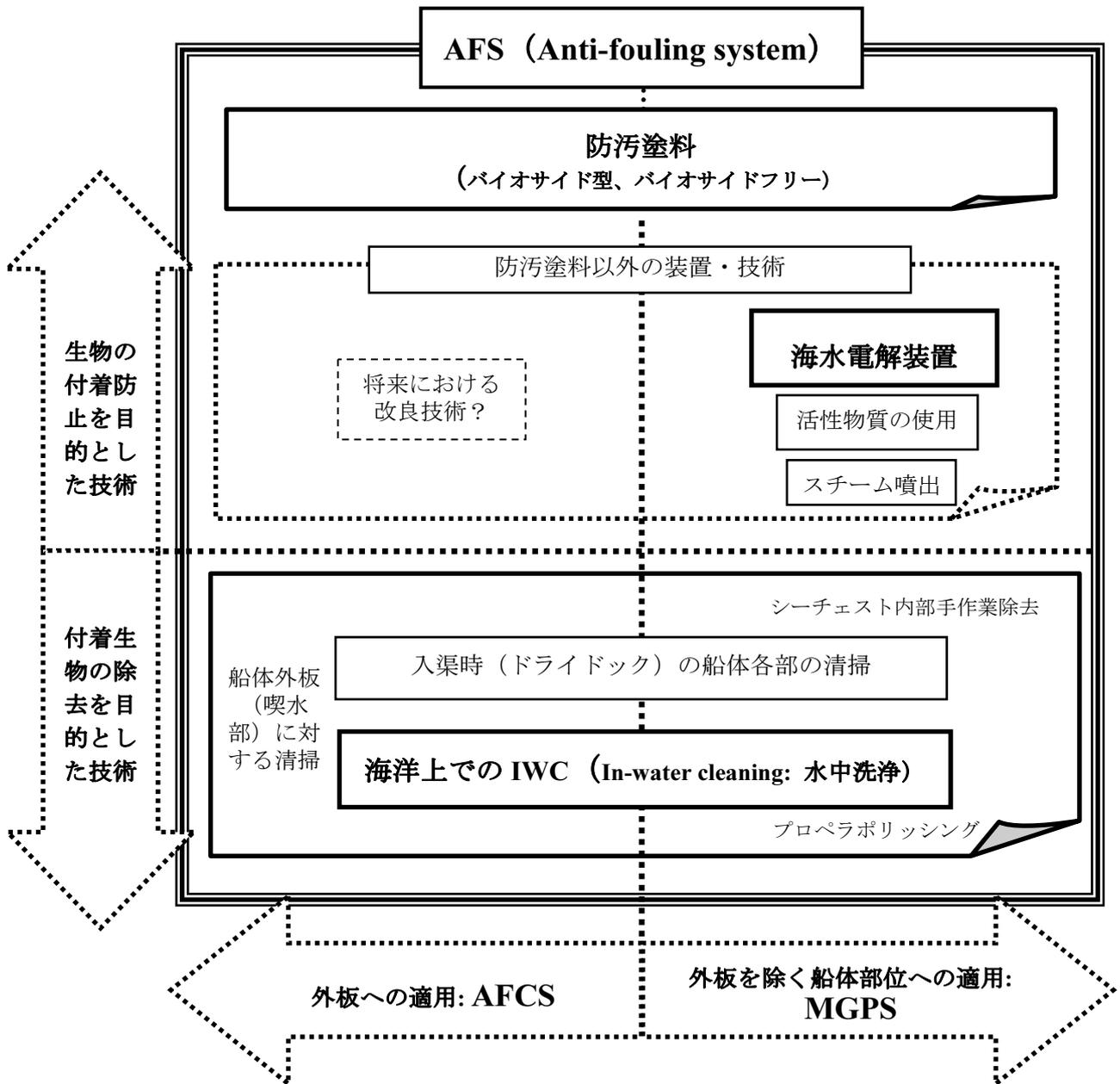


Figure 4.1-1 本調査における付着除去技術の相関図

入渠時の船体清掃は、主に 2.5 年間隔の定期的な防汚塗料の塗り替え作業として実施される。なお、生物被度の程度は異なるが、入渠時のほぼ全ての船舶に生物が付着している。このことは、防汚塗料の設計上の性能維持期間は 3 年から 5 年であるが、実際にはその性能が維持されていない場合が多いことを示している（「3.2.2 (2) 付着防止性能」参照）。現状での IWC は、燃料消費量の軽減のために実施されるため、主な対象部位は船体外板とプロペラとなる。本調査においては、Figure 4.1-1 に示したとおり、船体外板に対する水中洗浄を AFCS、外板以外の部位での対応は MGPS と位置づけることとする。これら付着生物除去技術と 3 章で記述した付着防止技術の関係を Figure 4.1-1 に整理した。また、Table 7.1-1 には、付着生物除去技術として使用される様々な用語の定義を示した。

4.2 入渠時の船体清掃

現状ではほとんどの船舶が入渠時に船体清掃、すなわち付着生物の除去を行い、防汚塗料を塗り替えている。本章では、船体清掃の方法、除去性能、コスト及び改良の可能性について以下に記載する。

4.2.1 現状での入渠時の船体清掃

(1) 清掃方法

我が国を代表するドック業者への聞き取り調査によると、入渠時の船体清掃の方法は、次の通りであった。

入渠後の実施手順は、船体清掃、下地処理、錆止め（タッチアップ）、防汚塗料の上塗りの順番である。船体清掃の実手順は、下記の通りである。この船体清掃は、舷側部（スライムや海藻が主体）、船底及び複雑部位（フジツボ、貝類や管棲ゴカイ類）の付着生物が目視で確認されなくなるまで行われる。

- ・ 船体の大部分を圧力: 100 kg/cm² の高圧洗浄機を用いて清掃する。
- ・ 生物付着が顕著なシーチェスト、シーチェストグレーチング、スラスタートンネルは、さらに高圧力の 200 kg/cm² の高圧洗浄機を用いて清掃する。

上記の清掃作業で除去されない付着物は、サンダー及びブラストを用いて除去する。まれに、スクレイパーを用いて手作業で除去することもある。除去した生物は、他の除去物質と共にブルドーザーで回収し、陸上処分する。サイズが小さくブルドーザーで回収できない極一部の除去物質は、海域に排出される可能性がある。

(2) 除去性能

入渠時の船体清掃は、前記したように海藻、フジツボ、貝類及び管棲ゴカイ類等の付着生物が目視されないレベルまで行われる。よって、可視範囲内の大型の付着生物（macro biofouling）や、劣化が進んだ塗膜表面は完全に除去されている。一方で、船体を支持するための部材に当たった部分については、作業上十分に除去できない可能性も指摘されている。

次に、入渠時の船体清掃は防汚塗料の塗り替えの前処理としても位置づけられる。防汚塗料の塗り替えを船体清掃後に行う場合は、高圧洗浄、サンダー及びブラストを用いた防汚塗料の完全除去を行うことから、目視できない微小なバクテリアや珪藻等で構成される微生物被膜もほとんど除去されると考える。

(3) コスト

入渠時の清掃コストは、船舶の大きさ、下地処理の面積、再塗装面積によって大きく異なる。聞き取り調査では、防汚塗料や下地塗料のコスト含めて最低で 900 万円、最大で 8,000 万円と報告されている。入渠業者からのコストに関連した情報は、次の通りであった。

- ・ 作業人員は、G/T 1,000 トン以上の場合で 6 人（まれに 9 人）
- ・ 作業日数は、3 日が基本
- ・ 一連の作業で最も高コストなのはサンダー及びブラストによる除去作業であり、約 50%をしめる。ブラストに用いる標準的な砂の単価は 7,000 円/トンである。
- ・ 使用機材のイニシャルコストは、高圧洗浄機が約 400 万円/台、ブラスト機が約 40 万円/台、塗装機が約 40 万円/台である。

(4) 除去物質の処理

現状の清掃方式では、除去物質のほとんどは、ブルドーザーで回収され陸上処分されている。よって、清掃作業による生物及び防汚塗料片の大部分は周辺海域に流出されないと推定される。回収量に対して極微量ではあるが、除去時に微細となった付着物は周辺海域への排出が生じている可能性があるかもしれない。ただし、船体清掃時に周辺環境へ排出される防汚塗料については、その評価結果がほとんど報告されていない。また、防汚塗料中の活性物質として広く使用されている銅及び銅化合物が船体清掃を行う周辺環境で高濃度検出されているとの報告も無いことから、入渠時の船体清掃については本調査における評価の対象には含めなかった。ただし、現状と将来においても、発生するドック排水中に含まれる除去物質を極力小さくする方策は必要であろう。

4.2.2 入渠時における船体清掃の改良の可能性

(1) 清掃方法

清掃方法に関しては、既に確立した方法で行われている。将来においても、船体清掃に伴う何らかのリスクの懸念、コストの削減等の課題が指摘されない場合、現状と同様の方法での船体清掃が実施されるものと思われる。ただし、将来において、防汚塗料の付着防止効果の継続時間が向上し、理想的な条件でIWCが実施されるのに伴い、よりソフトな方法での船体清掃が実施される可能性がある。

(2) 除去性能

除去性能に関しても、現在でも海藻、フジツボ、貝類及び管棲ゴカイ類等の付着生物が目視されないレベルまで行われており、将来においてもこの性能は維持されると考えられる。

(3) コスト

大きな経済変化が起きないことを前提とすれば、清掃方法に大幅な変更が無い場合には変化しないと予想される。

(4) 除去物質の処理

将来的に、入渠時の船体清掃で発生する除去物質は、現状と同様の方法で処理されると予想される。明確な報告データは公表されていないが、防汚塗料の主要な活性物質である銅及び銅化合物に関しては、欧州のボランティアの科学者会合による報告（SCHER 2009）、国内でも銅ピリチオンのリスク評価文書（AIST 2004）において、海域環境での銅及び銅化合物の濃度測定及び環境中濃度の推定が行われている。

その結果、船体清掃が実施されるドック近郊の海水及び底泥中の銅の濃度が、周辺環境中での濃度と比較して顕著に高いとの報告は無い。船体清掃時に除去され、微細となった生物、及び防汚塗料の周辺海域への排出を完全に無くすことは困難であるかもしれないが、その量が現状では微量であり、直ちに何らかの対策技術が必要とは判断されない。また、入渠時の船体清掃に関する規制は、陸上施設での作業のため、船体清掃が行われる各港湾の国内規制の対象であると考えられる。このため、本調査においては生物移入及び化学的環境リスク評価において船体清掃の寄与は考慮しなかった。ただし、将来においては、沈殿槽で処理するなどの方法で、ドック排水中に含まれる除去物質を極力小さくする方策を取る努力は継続していく必要がある。

4.3 船体外板に対する水中洗浄 (IWC)

4.3.1 船体外板に対する IWC の現状

IWC の実施は、船体外板に生物が付着することで増加する航行時の摩擦抵抗を軽減して燃料消費量を削減できるため、CO₂ ガス排出量の削減に密接に関連する。

2009 年 7 月に開催された MEPC 第 59 次会合においては、温室効果ガス排出規制に関連して運航的手法を管理・支援するツールとして「船舶エネルギー効率管理計画のためのガイダンス」(SEEMP: Guidance for the development of a Ship Energy Efficiency Management Plan) が承認され、2009 年 8 月に事務局から各国に回章されている (MEPC.1/Circ.683)。同ガイドラインは、個船のエネルギー効率向上のために船舶エネルギー効率管理計画 (SEEMP) のボランティアな作成・運用を目的としたものであり、船舶運航における最良な燃料効率のための対策の一つとして、入渠間隔を短縮して船体清掃を行うことと共に、外板に対する IWC が燃料効率を良くする技術として推奨されている。なお、温室効果ガス排出規制の議論に関連して、SEEMP に関する書類の携帯を各船舶に義務化することが検討されている (MEPC 61/5/3 annex 1)。

通常の運航においては、IWC が必要となるような重度の macro biofouling の付着は想定しにくいですが、実施が必要となる運航事例としては、沖待ちが挙げられる。沖待ちは、通常の運航では少ないが港湾施設の処理能力を入港隻数が上回ることによって生じる。沖待ちが 1 週間以上の長期間におよぶ事例は、現在、豪州等で多く見受けられる。

(1) 現状での IWC 実施方法

本調査においては、Figure 4.1-1 に示したとおり、船体外板に対する水中洗浄を AFCS の一部と位置づけることとする。船体外板で実施する場合には、太陽光が入射し藻類による微生物被膜が形成されやすく、引き続いて大型の海藻や動物の固着生物群集が形成されやすい舷側部が主な対象であり、平底部は実施の対象とならない。現状における IWC の実施は、船体浸水部分の約 5%程度と推定される。

なお、IWC を実施する船舶及びその実施頻度は、現時点ではあまり多くないと推定される。我が国の海運界及び IWC 事業者からの情報によると、その頻度は生物付着状況が顕著になり、燃料消費が増加してから実施され、その間隔は前回の入渠後概ね 2 年に 1 回程度とのことであった。

船体外板の清掃方法は、次の手順で行われる。

以上から、IWC による現状での船体清掃方法をまとめると次のようになる。

- ・ 潜水士による生物付着状況の観察
- ・ 観察結果に基づき、船体清掃場所と清掃ブラシの選定: 付着している生物が微小な藻類に留まる場合には除去力の弱いソフトなナイロンブラシ、海藻や動物が含まれる場合には、ワイヤー性のブラシ、フジツボ等の付着力が強固な生物が多く付着している場合には、ワイヤーを束ねて除去力を増したかきめブラシが選定される。
- ・ IWC 装置による水中洗浄の実施: 現状では、ほとんどの IWC 装置には除去物質を回収する回収網は装着されていない。

(2) IWC の除去性能

現状での IWC では、前述のように除去力の弱いナイロンブラシから除去力の強いワイヤーを束ねたブラシまでを使い分けている。これまで IWC の実施は、燃料消費効率を高めるために固着している生物を完全に除去することを目標としているため、通常は高い除去性能を持つ固いブラシの使用が多いと考えられる。その結果、IWC の実施は付着生物の除去のみではなく、防汚塗料や下塗り剤等も同時に剥離している可能性がある。

(3) コスト

現在の IWC のコストは、我が国の IWC 事業者からの情報によると原油タンカー (VLCC)、石炭専用船 (パナマックスサイズ)、鉄鉱石専用船 (ケープサイズ) といった大型船の場合で 300 万円/回/隻程度とのことである。

(4) 除去物質の処理

現在の IWC は、一部では回収網による除去物質の回収が行われ、陸揚げされた後に産業廃棄物処分されているとのことである。ただし、そのような処理を実施しているのは非常に稀であり、ほとんどは、IWC で剥離する除去物質はそのまま実施海域に放出されているのが現状である。

除去物質が回収されず海域に放出されている現状では、除去された生物に関して IWC の実施場所以外で付着した生物が含まれている場合には、生物移入リスク (他国の水域から生物が移入後定着し、人の健康被害あるいは経済被害を引き起こし、沿岸生態系を破壊するリスク) の原因になる可能性がある。

また、自己研磨型の防汚塗料に関しては、含まれる活性物質によって化学的環境リスク (活性物質等の生態毒性による沿岸生態系への影響) を増加させる要因になる可能性がある。ワイヤーを束ねた除去力の強いブラシを使用した場合にはプライマーまで剥離する可能性があるが、それら大型の破片は活性物質が溶出する前に速やかに海底に沈降すると考えられる。

なお、除去力が弱く防汚塗料片の表面に及ぼす影響が小さいソフトなブラシを使用すれば、剥離する塗料片は少なくなるため、除去物質を回収しない現在の方法でも化学的環境リスクを増加させる可能性は小さくなると考えられる。

(5) IWC による剥離片の実態調査

現状における IWC の実施状況と IWC により剥離される付着物及び下塗りを含めた防汚塗料について検証するため、2010 年 3 月に IWC の実態調査を行った。

IWC 実態調査の対象船舶は、自己研磨型の防汚塗料を使用している船齢 13 年のコンテナ船 (GT: 18, 602T, LOA: 193 m) であり、除去された生物と剥離した塗料片を回収した。実態調査を行った船体への生物付着量が多かったため、IWC で使用したブラシは、ワイヤーを束ねた生物除去力の強いブラシを使用した。その結果、IWC の実施によって船体表面への付着生物は、そのほとんどが除去された。また、除去された生物はフジツボ類や貝類の破片と海藻が主であった。

また、剥離した塗料片については、その厚さを計測した。計測の対象は、船体前部と後部に分けて IWC を実施した際の剥離片の回収物 2 サンプルとした。Table 4.3-1 には、除去した塗料片をメッシュでフルイ分けした後の各サイズ区分における塗料片の厚さの平均値を示した。計測にはマイクロメータ (計測下限値 1 μm) を用いている。除去された破片の中には、防汚塗料の塗膜に加え、下塗りのプライマー片も含まれていた。なお、以下の Table に示した剥離片の厚さは、開口径 0.25 mm 以上のフルイで捕集された破片だけであり、フルイを通過したより微細な剥離片の量と厚さは、今回の実態調査では確認できなかった。

実態調査で回収された剥離片の長径と短径を顕微鏡で計測したところ、平均的な粒径は概ね 0.1 mm 程度であった。開口径 0.25 mm 以上のフルイで捕集された破片の厚さは、最小が 0.141 mm、最大が 1.017 mm であった。これら計測結果から推定すると、ワイヤーを束ねた生物除去力の強いブラシを使用した IWC で剥離する塗料片の厚さは平均では約 0.1 mm (100 μm)、大型の破片については、プライマーの厚さを考慮すると自己研磨型の防汚塗料の塗膜の厚さは最大で 0.5 mm (500 μm) 程度と考えられる。なお、プライマーを含む大型の破片は、微細な破片と比較してより速やかに海底に沈降すると考えられる。

今回の IWC の実態調査の結果、付着物の除去効果が強いワイヤーを束ねたブラシを使用して IWC を実施した場合には、ある程度の防汚塗料の塗膜が剥離することが確認された。IWC 実施による防汚塗料中の化学物質の上乗せ分の環境中への溶出 (排出) 量の削減と、防汚塗料の付着防止効果の維持のためには、ソフトなブラシを使用する方が望ましい。なお、現状において、少なくとも国内においては、IWC

作業中に生物付着状況に応じて使用するブラシを使い分ける等の、できるだけ塗膜への影響を小さくした方法で IWC が実施されている。一般的には、実施場所の多く（約 90%）はソフトなナイロンブラシを使用し、固着生物が付着しやすい場所（残りの 10%）だけに対して、ワイヤー性の除去力の強いブラシを使用しているとのことである。

Table 4.3-1 IWC で剥離した自己研磨型防汚塗料の厚さ

単位: mm

フルイのメッシュサイズ	サンプル 1（船底前部）	サンプル 2（船底後部）
> 9.5 mm	—	0.954 (9)
9.5～4.75 mm	1.017 (2)	1.015 (50)
4.75～2 mm	0.556 (35)	0.781 (50)
2～0.85 mm	0.476 (50)	0.629 (50)
0.85～0.425 mm	0.236 (50)	0.324 (50)
0.425～0.25 mm	0.141 (50)	0.194 (50)

—: 破片が存在せず

() 内の数字: 計測破片数

4.3.2 船体外板に対する IWC 装置の改良の可能性

船体の生物付着総合管理における船体外板への IWC の適用を想定し、将来において改良すべき IWC の実施基準と方法についての各種検討を行った。仮に、IWC の実施を推奨することにより、現状よりも生物移入（量）が低減されるのであれば、防汚塗料の使用と組み合わせた付着生物管理システムの一部としての運用が考えられる。ただし、IWC の実施は、IWC により除去される防汚塗料の周辺海域への排出による化学的環境リスクの増大が懸念されるが、そのリスクの増大が許容されるレベルであることが前提である。

本調査では、将来における総合的な付着生物管理システムとしての IWC の定期的、かつ世界的に一律の基準での実施を前提として付着生物の移入量と化学的環境リスクについて現状との比較を行うこととする（5 章及び 6 章参照）。さらに、将来においては IWC 実施時に除去物質の回収を含めた評価についても検討した。

(6) 将来における IWC の改良のコンセプト

将来における IWC の改良のコンセプトを以下に示す。

ア) 効率的な IWC 装置の開発・運用

手動ではなく、動力を用いて効率的かつ最小の時間で作業可能な IWC 装置が望まれる。

本コンセプトは、船舶の運航に影響しない装置とするための設定である。特に船体外板用の IWC 装置については、現状装置の作業量及び作業時間に極端な増加がないこと、また接舷側の外板も支障なく作業できる大きさでかつホースなどの付帯物が作業の邪魔にならない設計が必要である。

イ) 適切な IWC 実施間隔の設定

現状では、約 1 回/2 年の頻度で IWC が実施されていると推定されるが、総合的な付着生物の管理の目的のためには、生物移入と化学物質による環境リスク評価結果から導かれる間隔での IWC の実施が

必要である。現状での防汚塗料の性能と IWC の実施実績により、より短い間隔での IWC 実施が適していると考えられる。生物移入を考慮する場合、より高頻度での IWC 実施が望ましいが、IWC で剥離される塗膜中の化学物質の環境リスクの面からは、頻繁な IWC 実施は化学物質による環境リスクの増加を招く結果となる。同時に、IWC を実施できる事業者、港湾等のインフラ整備を考慮する場合、将来における IWC 実施間隔は 2 回/年、または入渠時に生物の付着が確認された場合に実施することが生物移入、化学的環境リスク、IWC 実施のための環境整備の点から現実的な回数であると考えられる。入渠時の船体への生物の付着は、目視で確認することが現実的であろう。

ウ) 生物被度の程度に応じたソフトなブラシの採用

本コンセプトは、IWC 実施による防汚塗料の剥離と周辺環境への排出を最小限に抑えるための設定である。ソフトなブラシは、生物被度が大きく固い付着物に対しては適用が困難かも知れない。ただし、IWC 実施間隔を生物の被度が顕著になる前に設定することにより、目視できない付着初期の生物の除去が可能となることが期待される。なお、防汚塗料が適用されていないプロペラについては、ブラシの考慮は必要ないと考えられる。

エ) 回収装置

化学物質による環境リスク及び生物移入量を考慮した場合、IWC 実施によって発生する生物及び化学物質を含んだ剥離片の周辺環境への拡散や排出を可能な限り削減するための回収装置の使用が推奨される。

実態調査の結果から、現状の技術では 0.3 mm 以上を回収する設計であれば、IWC 装置及び人的負担から実施可能と考えられた。0.3 mm の回収サイズは、船体に付着する生物の最小サイズと同レベル (Table 1.2-5、エゾカサネカンザシの付着初期サイズを参照) であり、除去生物の海域への拡散防止、剥離する防汚塗料片の拡散量の低減、さらに IWC 装置の負荷を考慮した値である。

オ) 回収後の陸上処理

理論的には IWC 装置あるいは付帯する回収装置によって、除去した生物を殺滅したり繁殖不可能な状態にしたりすることや防汚塗料の活性物質を分解処理することが可能である。ただし、このような機能を備えた装置等を想定する場合には、装置の大型化、装置コストの増大及び運用時間の増大が考えられる。このため、IWC 実施時に回収された付着物は、現状と同様に陸上で廃棄物処理する方式が適していると考えられる。

(7) IWC 装置の改良の検討

ア) IWC 装置の改良点

将来適用が想定される IWC 装置は、除去された付着生物及び剥離された塗膜片の回収が重要である。そこで、現状の外板用 IWC 装置をベースに、回収効率の向上を目的に下記 2 点の改良を加えたものが適切であると考えられた。

- ・ 回収用ポンプの吸引力向上
吸引力を向上させるため、本体内蔵型から外付け型への改良。ただし、改良後においても岸壁に接する舷側サイドでの作業に支障が起きないように、装置本体の高さは、500 mm 以内とする。

- ・ 拡散防止ガードの装着
船体接触側の外周に除去生物及び防汚塗料片の拡散防止ガードを設置する。
ブラシの回転で除去した物質（生物及び防汚塗料）の拡散を防ぎ、確実に吸引する装置本体と船体間の隙間を設定。すなわち拡散防止ガードの外側から内側（吸引側）への海水流入面積を小さくし、線速度（流速）を上げた改良を行った。以上の改良により、除去生物及び防汚塗料片は確実に装置本体に吸引され、そのうち 0.3 mm 以上の粒子が回収されることになる。

上記の改良による回収効率への効果を検証するために、次の 6 項目についての検討ならびに検証試験を実施した。

- ① 清掃用ブラシの検討
- ② 回収ポンプの吸引流量試験
- ③ 除去物質の拡散防止効果の検討
- ④ 拡散防止ガードによる回収効果の検証
- ⑤ 拡散防止ガードの改良と再試験
- ⑥ 回収網のサイズ別による剥離片の回収性能試験

上記の各種検討及び試験の結果は後述するが、生物の付着状況（スライム層を含めた生物の付着状況、海藻レベルやフジツボ等の固着生物の種類）に応じたブラシの交換や回収装置の性能向上によって、十分な付着生物の除去が可能で、除去した生物及び防汚塗料の塗膜片を周辺海域に拡散することが無く、一定の大きさ（0.3mm 以上）の除去物質を回収できる装置となった。この改良装置を用いた場合の IWC 方法（IWC 手順）は、次のようになる。

イ) IWC 実施方法の改良点

- ・ IWC 装置運搬用のトラックに付属するクレーンで水中に装置を下ろす。
- ・ 装置の運転は潜水士 1 人で行う。なお、作業時間によっては、潜水士は適宜交代する。
- ・ 装置は交流（220 V）の携帯発電機とケーブル（200 m）と水中ユニット（耐水 3 気圧）で構成される。水中での作業中にも漏電、漏水は全く発生しない構造である。なお、もしも、漏電を感知した場合でも 50 mA の漏電遮断装置が働き、一瞬で送電が停止するシステムとなる。
- ・ 装置本体に取り付けられた 3 個の清掃ブラシは、各 5 馬力のモータで稼働させ、外板に付着した生物を除去する。なお、清掃ブラシは、IWC 作業前に実施する観察に基づき、付着している生物に応じて選択する。ただし、可能な限り防汚塗料に影響を与えないソフトなナイロン製のブラシを用いる。
- ・ 装置本体は、海水中における浮力が+2~+3 %になるように調整して作業する。よって、操縦者が手を離すとゆっくり浮きあがることになる。船体に吸着する力は回収ポンプの吸引力による負圧力（-圧力、吸着力）を応用する。装置の前進、後進、方向転換は、装置の前方に取り付けられる操舵輪（0.5 馬力モータ）で行う。
- ・ 除去物質の回収は、装置本体中央部の回収ポンプが清掃用ブラシの作動と同時に稼働し、除去された物質は回収網に導かれる。回収網は、サイズ 0.3 mm 以上の粒子を 100%近く回収するものを用いる。なお、装置の船体接地側の外周には拡散防止ガードを取り付け、除去物質は海域に拡散することなく確実に吸引される。
- ・ 回収網に回収された除去物の影響で、ポンプの吸引力が低下してきた場合には、作業を一旦中止して、水面上で適宜陸上のサポート要員と協力して交換し、交換後、IWC 作業を再開する。なお、除去物が入った回収網は、陸上に引き上げる。
- ・ IWC 作業が全て終了した後、外板用 IWC 装置は装置運搬用のトラックに付属するクレーンで陸上に引き上げる。

- ・ 全ての水中作業が終了した後、陸上に取り上げた回収物は、全体の IWC 作業が終了した後に、産業廃棄物として処分する。

ウ) IWC 装置の改良効果の検証

以下の方法により、改良後の IWC 装置の効果を検証した。

① 清掃用ブラシの検討

清掃用ブラシは、IWC 実施前の目視観察で確認される生物付着状況によって選定する。なお、各種ブラシの付着除去性能に関しては、現状装置における実績をベースに確認済みである。ブラシを付着生物状況に応じて選定する理由は、できるだけソフトなブラシを使用することで、IWC 実施による防汚塗料の不必要な剥離を最小限にするためである。生物付着の程度が軽微な場合、基本的には、最もソフトなナイロンブラシで IWC を実施する。

将来における運用では、IWC 実施間隔が 6 ヶ月以内程度であれば目視で十分に確認できる大型生物の付着がほとんど生じていない状況であると想定され、ほとんどの場合でソフトなナイロンブラシによる IWC が実施されると考えられる。このような IWC 実施は防汚塗料の塗膜の保全にも役立つと予想され、防汚塗料の生物付着防止性能の維持にも有効であると考えられる。ただし、大型の海藻が付着している場合には、ナイロンブラシで完全な除去ができないためワイヤーブラシを選定、さらにフジツボ等が固着している場合には、最も除去力が強いかきめブラシ（ワイヤーを金属バンドでかきめたもの）を選定しての清掃が必要であろう。なお、ワイヤーブラシ及びかきめブラシは、海藻やフジツボ等が付着している場所だけの使用に限定する。

使用するブラシは、生物の付着状況によって、基本的にナイロンブラシ（微生物皮膜が形成、あるいは小型の海藻が付着しているレベル）、ワイヤーブラシ（海藻及び付着力が比較的弱い二枚貝等の動物が付着しているレベル）、ワイヤーを束ねたかきめブラシ（フジツボ等の付着力が強い固着生物が付着しているレベル）の 3 種類が考えられる。

② 回収ポンプの吸引流量試験

Figure 4.3-1 に試験装置の概略（模式図）、Figure 4.3-2 には実際の試験の様子を示した。

試験は全て海面下で行った。使用した機器は、改良した回収ポンプを装備した IWC 装置の他、流量を計測するための貯水タンク（用量 = 2 m³）、装置本体から貯水タンクに吸引した海水を通水するためのホースである。

試験は、回収ポンプを起動させ、貯水タンクに貯水される容量と時間を計測し、実作業に使用されている回収網を装着した状態で実施した。試験回数は 2 回である。

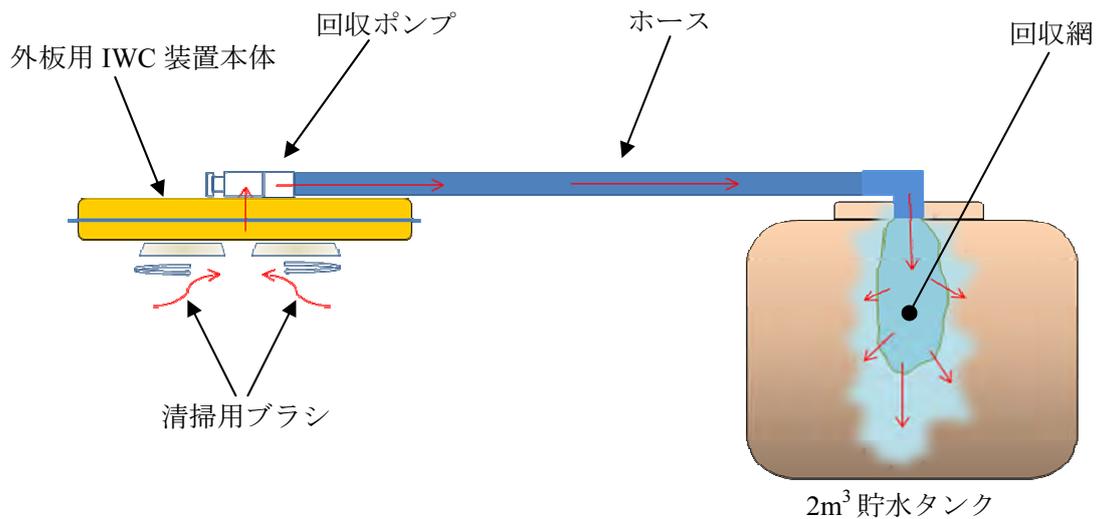


Figure 4.3-1 回収ポンプの吸引流量判定試験装置の概略（模式図）



外板用 IWC 装置



外板用 IWC 装置の設置



回収用網（試運転時）



全景

外板用 IWC 装置

Figure 4.3-2 IWC 回収試験時の風景

計測結果は、下記の通りである。

回収ポンプの能力（流量）は、2回の計測結果から約 1,900 L/min と判断された。

第1回目： 850 L/25sec = (2,040 L/min)

第2回目： 450 L/15sec = (1,800 L/min)

③ 除去物質の拡散防止効果の検討

次に、IWC で除去した付着物（生物及び防汚塗料片等）の拡散を防ぎ、確実に吸引・回収するための拡散防止ガードの設置方法の検討を行った。

拡散防止ガードは Figure 4.3-3 に示すように IWC 装置本体の船体側の外周にゴム性の膜状スカートを設置する方式である。この方式の場合、拡散防止ガードと船体間の隙間（距離）によって流量が変わるため、その隙間を通過する線速度（流速）も変化する。線速度が速いほど吸引力は大きくなる。以上により、線速度が大きいほど IWC により除去される生物及び剥離する防汚塗料片等が吸引されることになる。

線速度の計算は、回収ポンプの吸引流量 1,900 L/min を基に、次の 3 ケースで行った。

- ・ 拡散防止ガードを設置していない船体との隙間 100 mm のケース
- ・ 拡散防止ガードを船体との隙間 50 mm で設置したケース
- ・ 拡散防止ガードを船体との隙間 30 mm で設置したケース

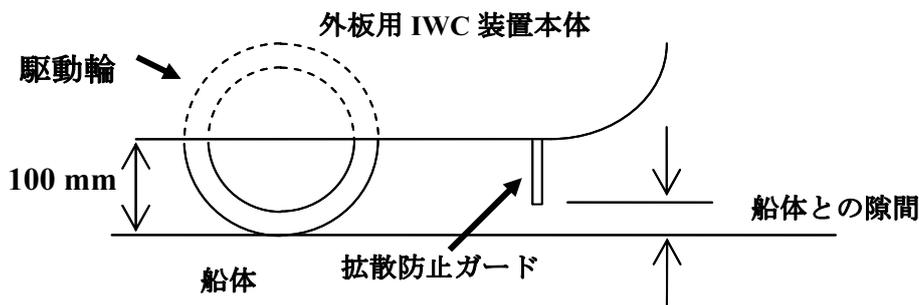


Figure 4.3-3 拡散防止ガードの設置イメージ

計算上では、拡散防止ガードと船体外板間の隙間を 50 mm 以下にすると線速度が 0.1 m/sec を超える結果となった。ただし、線速度がどのレベル以上であれば、確実な拡散防止になるかは、この計算だけでは明らかでない。また、外板用 IWC 装置に設置されている 3 個のブラシの回転による流れの発生、小判型をした外板用 IWC 装置の平面形状及び吸引口の位置との関係（Figure 4.3-6 参照）から、拡散防止ガードと船体間の全ての部位において同じ線流速にはならないと考えられる。これらの課題は、以下の拡散防止ガードの効果検証試験を実施して確認した。

拡散防止ガードを設置していない隙間 100 mm のケース

$$\text{断面積} = 0.1m \times 5.78m = 0.587m^2$$

$$\text{線速度(1秒あたり)} = \frac{1.8m^3}{0.587m^2} \div 60 \text{sec} = 0.051m / \text{sec}$$

拡散防止ガードを隙間 50 mm で設置したケース

$$\text{断面積} = 0.05m \times 5.87m = 0.2935m^2$$

$$\text{線速度} = \frac{1.8m^3}{0.2935m^2} \div 60 \text{sec} = 0.102m / \text{sec}$$

拡散防止ガードを隙間 30 mm で設置したケース

$$\text{断面積} = 0.03\text{m} \times 5.87\text{m} = 0.1761\text{m}^2$$

$$\text{線速度} = \frac{1.8\text{m}^3}{0.1761\text{m}^2} \div 60\text{sec} = 0.17\text{m/sec}$$

注; 5.87 m は拡散防止ガード設置部の外周延長

④ 拡散防止ガードの回収効果の検証

上記の除去物質の拡散防止の検討では、除去物質の拡散を防止し確実に回収するための方法として、外板用 IWC 装置と船体間の隙間を 50 mm 以内とする拡散防止ガードの設置が有効な可能性が示された。その可能性の確認のための検証試験を実施した。

拡散防止ガードの設置:

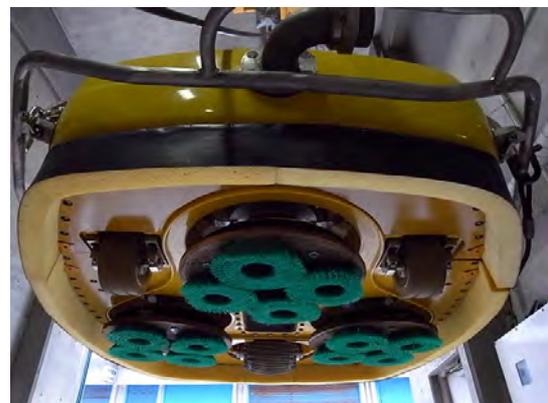
Figure 4.3-4 には、設置した拡散防止ガード及び設置後の IWC 装置の状況を示した。なお、拡散防止ガード設置後の外板用 IWC 装置と船体間の隙間は、30 mm になるように設置した。拡散防止ガードは、スポンジの外側にゴムを付着させた構造である。



拡散防止ガード



拡散防止ガード装着後 (側面)



拡散防止ガード装着後 (船体接触側)

Figure 4.3-4 拡散防止ガードと設置後の状況

試験は、外板用 IWC 装置による試験が実施可能な室内水槽で行った。

水槽内の水が外板用 IWC 装置に吸引される状況の確認は、拡散防止ガードの外周に糸状の吹き流しを設置し、また、任意の場所の吸引状況を確認するための棒状吹き流し（棒の先端に吹き流しを付けたもの）を用いて、回収ポンプ稼働前後の吹き流しの向きを目視観察することで行った。なお、試験は実作業と同様に清掃ブラシを回転させ、回収網を装着した状態で実施した。



糸状吹き流し設置状



ポンプ稼働後の回収網



ポンプ稼働前の糸状吹き流し



棒状吹き流し →

ポンプ稼働後糸状吹き流し

Figure 4.3-5 拡散防止ガード効果検証試験風景

試験の結果、多くの部位では順当に水槽内の水が外板用 IWC 装置内に吸引されることを確認した。ただし、Figure 4.3-6 に示す外板用 IWC 装置の左舷後方部約 80 cm と右舷前方部約 50 cm に、清掃ブラシの回転流の影響による外板用 IWC 装置内から外向きに出る流れが観察された。よって、実作業時に除去物質の拡散を完全に防止するためには、拡散防止ガードを一律に設置するのではなく、流れが外向きになる両部分に関しては、拡散防止ガードを船体に完全に接地させるなどの更なる改良が必要であることが明らかになった。

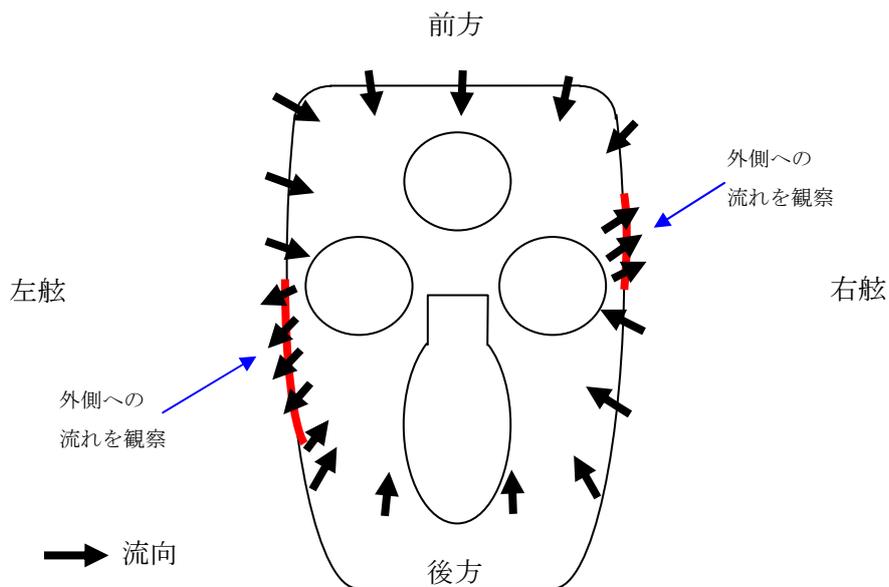


Figure 4.3-6 拡散防止ガード効果検証試験時の水流方向
(外板用 IWC 装置の上面外観: 模式)

⑤ 拡散防止ガードの改良と再試験結果

上記の試験結果において外板用 IWC 装置内から外側への流れが観察された箇所の対策として、拡散防止ガードを船体に完全に接地するように、外板用 IWC 装置と船体間の隙間を無くす方法を検討した。この目的のため、Figure 4.3-7 に示したように、拡散防止ガードの内側にゴムを貼り付け隙間を無くした。この修正を加え、試験を行ったところ、外板用 IWC 装置と船体間の隙間をなくした部分の水流はなくなり、他の部分は全て水槽内の水が外板用 IWC 装置内部に吸引されることを確認した。



Figure 4.3-7 拡散防止ガードの修正

⑥ 回収網の回収性能試験

さらに、IWC 実施時に回収のために使用される回収網のメッシュサイズによる捕集効率の検討を行った。0.1 mm～0.7 mm の粒径の異なる 4 種類のガラスビーズを用いて、メーカーの仕様で 0.5 mm 以上の粒子が捕集可能とされている回収網による実試験を行った結果では、0.3 mm から 0.420 mm の粒子は 100%、0.250～0.300 mm は 42%の回収率と計算された（参考資料-1 参照）。以上の結果により、IWC 実施時に使用される回収網は、メーカーによって捕集可能とされているサイズの破片をほぼ完全に回収できることが明らかとなった。

船体付着による生物侵入が問題となる生物中、付着初期の最小サイズはエゾカサネカンザシの 0.23 mm である（1.2.4 参照）。このため、今回使用した捕集網では完全には回収されないことになるが、固着基盤等を含めた大きさであれば、IWC により除去された生物の侵入が問題となる段階以降の生物に対して、かなりの割合で回収可能であることが期待された。また、今後更に網の物理的な構造と径の調整を行えば、更に 1/2 から 1/3 程度の粒子サイズのものについても、現装置の背面設置ポンプの性能によって回収可能と思われる。

なお、0.1mm より小さな粒子の回収を行う場合、IWC 装置からの排水をバージ上に設置された大型のサイクロンフィルターなどに導くことなどが考えられるが、この場合作業効率が大幅に下がることが予想される。

(8) IWC 装置の改良後の性能とコスト

ア) 除去性能

改良した IWC 装置の付着生物除去性能は、IWC 実施前に行われる生物付着状況の観察結果を基に、付着している生物の付着力からそれら生物を除去できる清掃用ブラシを適切に選定して実施される。よって、目視で確認される大型の付着（生）物は、基本的に全て除去されることになる。

イ) コスト

前記「(2) ア) IWC 装置の改良点」による IWC 実施の日本国内における運用コストは、監督官庁及び岸壁管理者への作業許可申請のための費用、IWC 作業費用及び作業者の旅費、作業船使用料等に区分される。入渠時の船体清掃及び IWC 実施時のそれぞれの基本的な経費を、バラスト水処理におけるコストと比較して、Table 4.3-2 に示す。バラスト水処理装置は、全ての船舶に搭載されるため、その償却費がかかり、他方ランニングコストでは、やや IWC 実施によるコストが高くなる可能性がある。総額では、バラスト水処理システムの運用にかかるコストが高いと推定される。少なくとも IWC の実施にかかるコストは、バラスト水処理にかかるコストとほぼ同等と考えられる。

Table 4.3-2 船体付着物の除去技術とバラスト水処理のコスト比較

	入渠時の船体清掃	IWC: 現状の2回/年のIWC実施 (VLCC)	バラスト水処理システムのコスト* (VLCC)
初期コスト	400万円: 高压洗浄機 40万円: ブラスト機 40万円: 塗装機	(聞き取りではIWC装置のコストは3,000万円) 300台/年、10年使用として 単純計算で1万円/隻/年	72,000 USD 30年償却として単純計算で 2,400 USD/年
ランニングコスト	入渠船舶当たり 900~8,000万円 1隻当たり平均2.5年に1度入渠の場合: 360~3,200万円/隻/年	IWCを実施する1船舶当たり約300万円/IWC (大型船の場合) 1隻当たり平均2年に1度のIWC実施の場合: 150万円/隻/年	11,700 USD

*バラスト水処理のコストは、以下のデータより算出

1. Lloyd's 2010 による、平均の初期費用 = 281 \$ (200 m³/h) ~ 863 \$ (200 m³/h)、ランニングコスト = 39 \$ (1,000 m³/h)。VLCC のバラスト水体積を 2.5 万 m³、年間 12 回の積み込みを仮定。
2. Van Niekerk, 2008. による、ロッテルダム港での合計のバラスト水排水量 = 2.76 million m³/月
3. 港湾統計によるロッテルダム港への年間の外航船の入港数 = 84,700 隻/年 (5章参照)

ウ) 除去物質の処理

本調査で想定する改良後の IWC 装置は、0.3 mm 以上の除去物質を回収する機能を持っている。そして、回収した除去生物及び剥離塗料片・粉末については陸上において通常の廃棄物処理を想定している。なお、技術的には海上、あるいは陸上に設置する水処理装置などで活性物質の無害化または排水に含まれる生物を船内に搭載したバラスト水処理装置で殺滅した後に海域に排出するシステムも考えられる。しかし、この方法ではシステムが大型/複雑化するとともに、作業効率が極端に落ちることが予想されるため、将来における管理システムにおいても適用されないと考えられる。

4.4 その他の部位に対する付着生物除去技術

4.4.1 現状の除去方法

(1) シーチェストにおける付着生物の除去

ア) 除去方法

現状では、シーチェストに付着した生物の除去は、スクレイパー等を用いた手作業で行われている。この理由は、グレーチングを外さない限り、シーチェストの内部に装置を挿入させることが困難なためである。仮に、IWCのためにグレーチングを外した場合には、再装着が困難になる場合が多く、船舶運航に支障をきたす可能性があるためでもある。

イ) 除去性能

除去作業は、グレーチングを外さず、スクレイパー等の手作業で行う。この際、除去性能は目視で付着生物がないことで確認される。

ウ) コスト

外板やプロペラの水中洗浄と同じ時に実施される場合が多いと考えられるため、シーチェストでの付着生物除去の運用コストは、前記、外板用 IWC 装置の経費等に原則含まれると考えられる。ただし、シーチェスト単独で加算される運用経費は、シーチェスト 1 ヶ所当たりの作業時間を 30 分前後と想定すると、¥30,000- /ヶ所となる。

エ) 除去物質の処理

現状では、除去物質の回収は行われていない。

(2) プロペラにおける付着生物の除去

ア) 除去方法

プロペラに対する付着生物の除去は、一般にプロペラポリッシングと呼ばれる。多くの場合、燃料消費の増大を防ぐため研磨機による付着生物の掻き落としと研磨が行われている。

プロペラに対する付着生物除去の基本的作業は、次の手順が適用されている。

- ① エアーでの駆動
- ② ワイヤ製等の固いブラシで確実に生物を除去
- ③ 研磨機による研磨作業

イ) 除去性能

前記ア)におけるプロペラでの付着生物の除去性能は、付着生物を完全に除去するワイヤ製の固いブラシで行うため、目視で確認される大型の付着生物は全て除去されることになる。また、引き続き行われる研磨作業によって、次の微生物が付着するまで一時的にせよ微生物皮膜も除去されることになる。

ウ) コスト

プロペラ用の除去装置の運用コストは、次のようになる。

プロペラの水中洗浄は、外板の水中洗浄と同時に行う場合もあるが、単独工事で実施される場合も多い。単独工事で実施される場合の運用経費のうち、監督官庁及び岸壁管理者への作業許可申請、旅費等及び作業船使用料等は、前記の外板用 IWC 装置による船体 IWC 工事の費用と同じである。本体工事となるプロペラにおける付着生物除去作業の船種毎の基本的な経費は、次のように想定される。

- | | | |
|-------------|------|---------------------|
| ・ コンテナ・VLCC | ———— | ¥750,000-~¥800,000- |
| ・ ケープサイズ | ———— | ¥650,000- |
| ・ パナマックスサイズ | ———— | ¥600,000- |

エ) 除去物質の処理

現状では、除去物質の回収は行われていない。

4.4.2 その他の部位に対する付着生物除去技術の改良の可能性

本調査では、現状で実用化されている船体外板用 IWC 装置に加え、MGPS に含まれるプロペラ用 IWC 装置及びシーチェスト用 IWC 装置を想定した評価・検討を行った。考慮したコンセプトは、(6)に示した外板用の IWC 装置に対するそれと同様である。

(1) シーチェストにおける付着生物の除去と回収装置

シーチェストに適用される装置は、シーチェストの形状及び構造が船舶毎に異なるため、外板用の IWC 装置のように平面を走らせるような装置を適用することが困難である。よって、どのような形状にも対応可能にすることも改良のポイントとなる。このため、シーチェストでの付着生物除去に用いられる装置は、動力を用いた装置として作業の効率化を図ると共に、除去物質を確実に回収できることを改良（開発）のポイントとした。Figure 4.4-1 にシーチェストに適用が想定される回収装置の仕様を示す。

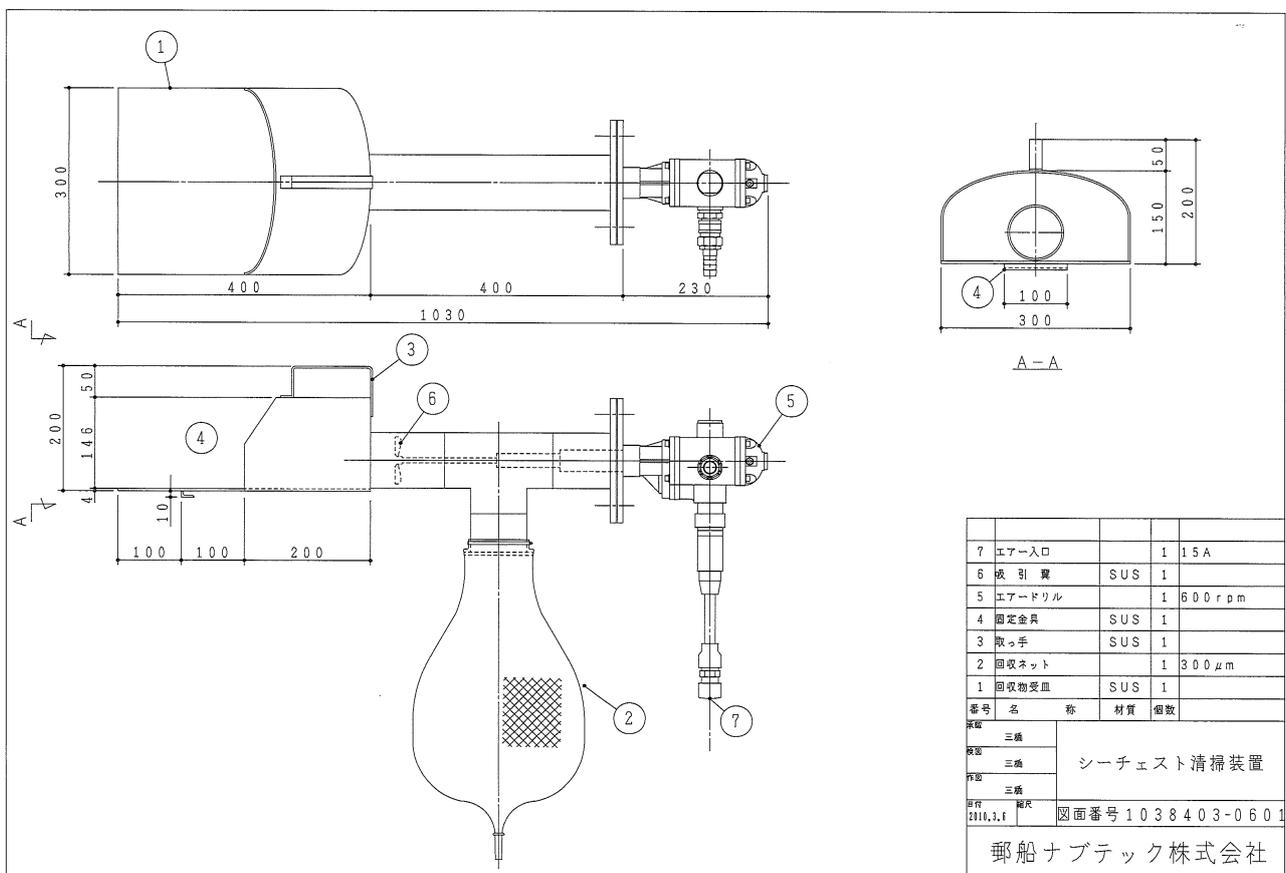


Figure 4.4-1 シーチェスト用除去物質の回収装置

ア) 除去方法

将来適用が想定されるシーチェストでの付着生物の除去作業としては、次の方法が考えられる。

- ① 潜水士がスクレイパーを用いて1人で1つのシーチェストの付着物除去作業を実施。
- ② 除去物質の回収用装置は、生物の除去（掻き落とし）作業時にはシーチェストの格子にかぎ型フックでぶら下げて置く。
- ③ 生物の除去（掻き落とし）作業終了後、上記の回収装置を使用して除去物質を回収する。回収

は、装置の先端（塵取り部の板状の先端部）をシーチェスト内に差し込み、空気圧縮機（50 ps）から供給される 7 kg/cm^2 の高圧エアで駆動するエアポンプの吸引力で回収網に誘導する方式である。回収網は、外板用 IWC 装置と同じ 0.3 mm 以上の除去物質を回収可能な網とし、交換可能な構造で作業中の 1 人の潜水士が自身で交換できるようにする。

- ④ 水中での IWC 作業終了後、回収物を陸上に引き上げる。回収物は全ての IWC 作業が終了後、陸上で処分される。

イ) 除去性能

上記のシーチェスト用の回収装置は、除去した生物を効率良く回収する装置である。除去作業自体は、現状と同様にグレーチングを外さず、スクレイパー等の手作業で行う。このため、シーチェストでの除去性能は、現状と同様であると考えられる。

ウ) コスト

シーチェストでの付着生物除去にかかわるコストは、現状の方法と同程度であると考えられる。一方、将来は除去物質の回収が実施されることから、回収装置本体の価格¥350,000- /台が想定され、運用コストにはその損料が加わる。

エ) 除去物質の処理

前記のシーチェストでの付着生物除去に適用される回収装置は、0.3 mm 以上の除去物質を回収する機能を持っている。そして、回収した除去生物及び剥離塗料片・粉末については陸上において通常の廃棄物処理を想定する。

なお、将来においては、回収装置の適用により、除去物質は効率よく回収されることになるため、除去作業で発生する防汚塗料の周辺環境への排出が低減すると考えられる。

(2) プロペラにおける付着生物の除去（プロペラポリッシング）と回収装置

プロペラ用の除去物質回収装置の改良（Figure 4.4-2 参照）については、現状の研磨機に対して次のポイントで見直すことにした。

- ① 動力を用いた装置とする
- ② 除去生物の拡散を防止する装置を付属する
- ③ 除去生物を回収する装置を付属する

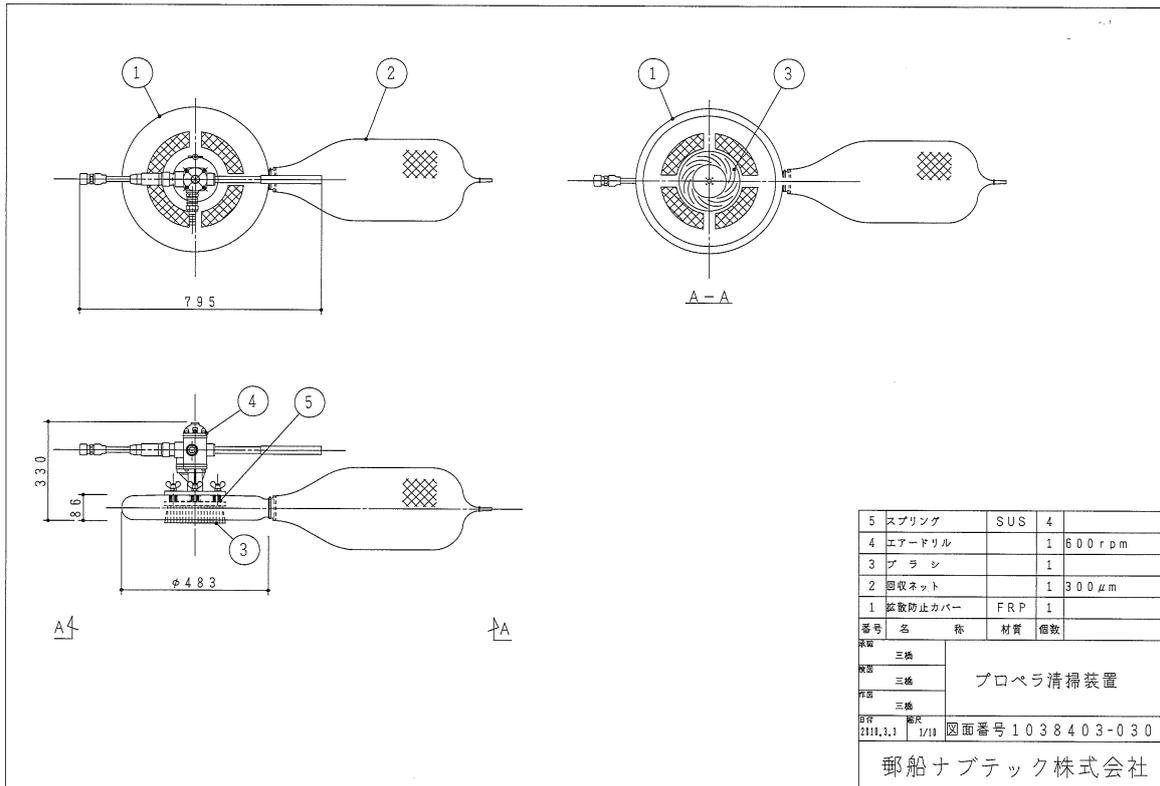


Figure 4.4-2 プロペラ用の除去物質回収装置

ア) 除去方法

将来適用が想定される、改良後のプロペラでの付着生物の除去手順としては、次の作業が想定される。

- ① 装置の操作は、潜水士1人が1台を担当する。
- ② ブラシはエアードリルで駆動し、除去物質の回収はブラシの回転で発生する流れを利用する。
- ③ よって、除去と除去物質の回収は同時に行われる。
- ④ 回収網は、外板用IWC装置と同じ、サイズ0.3 mm以上の粒子を100%近く回収するものを用いる。回収網は容易に交換が可能な構造とし、作業中の1人の潜水士が自身で交換する。
- ⑤ 水中での除去作業後、除去物質は陸上に引き上げる。
- ⑥ 全てのIWC作業が終了した後に、取り上げられた除去物質は陸上で処分される。
- ⑦ 付着状況が軽微の場合には、除去専用のブラシを用いずに、通常プロペラ研磨用に使用する研磨パッドで除去と研磨の両方を同時に行う。

イ) 除去性能

現状と同様であると考えられる。

ウ) コスト

プロペラ用の除去装置の運用コストは、現在実施されている装置を用いたコストと同レベルである。

- ・ コンテナ・VLCC ———— ¥750,000-~¥800,000-
- ・ ケープサイズ ———— ¥650,000-

- ・ パナマックスサイズ ——— ¥600,000-

ただし、除去物質の回収機能の付与により、多少のコスト増加が予想される。

エ) 除去物質の処理

プロペラでの付着生物の除去における IWC 装置は、0.3 mm 以上の除去物質を回収する機能を持っている。そして、回収した除去生物及び剥離塗料片・粉末については、陸上において通常の廃棄物処理を想定する。なお、プロペラには防汚塗料が塗布されていないため、周辺環境に対する化学的リスクの考慮は重要ではない。

4.5 課題

IWC 装置の将来における改良として 0.3 mm の回収網での除去物質の回収は可能であり、回収した場合の生物放出量と化学物質の排出量は大幅に削減されるものと思われる。

一方、このような細かい回収装置を装備した IWC 装置は技術の先端を行くものであり、世界的に普及するには時間が必要と考えられる。回収網のメッシュが細かいほど除去された生物と剥離した化学物質の排出量は小さくなるが、現実的な対策として考えた場合、例えば 10 mm、5 mm、0.5 mm メッシュなどの比較的大きなメッシュサイズの網による回収であっても、現在の除去物質の回収を行わない IWC よりも排出量削減効果は大きいと期待される。

IWC を総合的な付着生物管理システムの要素技術にする場合の最も大きな課題は、IWC 装置の普及と共に IWC 事業者の確保であると考えられる。我が国の IWC 事業者に対する聞き取り調査では、保有機材の関係で現在 1 社の最大実施可能隻数は約 300 隻/年程度とのことである。この最大実施可能隻数と世界の海上輸送に必要な船舶数を基にして、1 回/半年の IWC を実施するのに必要な事業者数を求めると約 80 社強となる。ただし、この最大実施可能隻数は、スケジュール重複を考慮せず、また、移動スケジュールや天候障害も正確には考慮していない。これら不確定要因を考慮して、例えば現実的な年間実施隻数を 100 隻/年とした場合には、必要な業者数は約 260 社となる。それらが、一定基準の除去及び回収性能を備えた装置を用いて IWC を実施することが必要になる。ちなみに、我が国において、現在、除去物質の回収もできる装置を保有している IWC 事業者は 2 社である。

除去物質の回収網による回収以外の改良手段としては、例えば生物を含む除去物質をポンプで陸上の無害化処理装置に運び、無害化（無生殖化、あるいは殺滅）した後に、海域に排出する方式も可能性としては考えられる。ただし、IWC 装置単独の場合に比べて、かなり大型のシステムになると予想される。

生物の放出のリスクと同様に、IWC 実施によって剥離する防汚塗料片の化学的環境リスクは、回収が難しくなる小さい塗料片サイズになるほど小さいと考えられる。現時点では、IWC で剥離する防汚塗料片中の活性物質質量及び回収網で回収される防汚塗料片中の活性物質質量は不明である。ただし、IWC を実施したとしてもメッシュサイズ以上の防汚塗料片を回収することになるため、回収網による回収機能を備えた装置は、IWC 実施由来の化学的環境リスクの低減に貢献すると考えられる。

なお、IWC 実施による化学的環境リスクの低減には、防汚塗料の性能も強く関連する。例えば、付着防止性能の高い防汚塗料を適用した場合には、IWC を実施するにしてもソフトなブラシでの除去作業が可能になる。当然ながらソフトなブラシの場合には防汚塗料の剥離も少なくなり、結果的に化学的環境リスクも低減することになる。

また、IWC の実施間隔によっても船体に付着する生物の状況や生物数が変わると予想される。その結果、IWC によって、海域に放出される生物数も変化すると考えられる。短い間隔で IWC を実施することはソフトなブラシの採用を飛躍的に多くし、ソフトなブラシは塗膜表面への影響が少ないため、新しい付着防止性能の高い塗料への更新を促進することも期待できる。よって、例えば半年間隔で IWC を実施したケースにおける化学的環境リスク及び生物付着状況等の検討も必要であると考えられる。