船底防汚塗料と海洋環境問題

千田哲也

独立行政法人海上技術安全研究所 〒181-0004 東京都三鷹市新川6-38-1

Marine environmental issues caused by anti-fouling paints for ships' hull

Tetsuya Senda

National Maritime Research Institute, 6-38-1, Shinkawa, Mitaka-shi, Tokyo, 181-0004, Japan

Corresponding author: senda@nmri.go.jp

(Accepted January 7, 2008)

Key words: ship, anti-fouling, paint, biocide, environmental risk assessment

1. はじめに

船舶による海上輸送は、経済の基盤である物流を担う輸送機関として、単位輸送量（トンマイル）当たりの燃料消費が航空機や自動車と比較すると低く、その意味では、鉄道と並んで環境適合性のよい輸送機関といえる。また、船舶は、生活の場から遠い大洋上を航行することから人の健康への影響が及びにくく、環境影響が問題とされることが従来は少なかった。しかし、船舶運航が海洋汚染に対して責任の一端を有すると考えるのは当然であり、環境意識の高まりや陸上での環境対策が進むなかで、船舶の環境影響の問題にも注目されるようになった。海難事故に伴う油流出による海洋汚染が注目されたほか、1980年代には、船底塗料に使用されたトリブチルスズ（TBT）の影響が大きな問題となった。また、自動車や工場等の陸上の環境規制が進むなかで、海洋上で排出される物質の陸上への影響が、沿岸域などで問題となっている。本稿では、船舶に起因する環境問題の概要を述べた後、船底塗料の環境問題について、まずTBTに代表される有機スズの問題を振り返り、防汚塗料に起因する環境問題の現状と今後の展望について考えることにする。

2. 船舶の環境問題

船舶の活動は国際的であり、海運業は世界単一市場を形成している。また、近代国家が法制度を整備するより前から、貨物にかかる保険の査定の必要から第三者機関による安全性の審査が行われていた。このような社会的、

歴史的背景から、特に国際間の物流を担う外航船舶の安全や環境の規制・基準は、まず国際機関で定められた条約に従うことになっている。各国で個別に異なる基準が制定され、後に国際間の調整をはかっている自動車分野と大きく異なる点である。

海事分野の国際問題を審議する機関は、国際海事機関（International Maritime Organization, IMO）である（IMO HP, 2007）。IMOは国際連合の専門機関の一つとして設立され、1959年に第1回総会が開かれた。現在、167カ国が加盟しており、英国のロンドンに本部がある。IMOの活動は海運の安全性確保と環境保護のための基準策定が中心であり、安全関係の問題は海上安全委員会（Maritime Safety Committee, MSC）で、また環境関係は海洋保護委員会（Marine Environment Protection Committee, MEPC）でそれぞれ審議され、合意を得たものは国際条約や決議（Resolution）として採択される。決議は強制力をもたないが、条約は締約国に対して法的な拘束力を持つものである。現在、審議されている環境に関する案件には、地球温暖化ガス（Green House Gas, GHG）排出の抑制、エンジンからの排ガスの有害成分（窒素酸化物や硫黄酸化物）の規制、バラスト水による生物の越境移動抑制及びリサイクルに伴う環境問題への対処等がある。なお、事故に伴う油流出の防止は、油漏洩を防止するタンク壁の二重化などの措置がMSCにおいて合意されている。

地球温暖化に対して、国単位でGHG排出制限を課すと

いう京都議定書が発効しているが、これには国際航海をする船舶が含まれておらず、国際航海船舶へのGHG排出抑制策についてはIMOで審議されている。また、窒素酸化物 (NO_x) などのエンジン排ガス中に含まれる有害ガスは、g/kWhで表される単位出力当たりの排出率が自動車エンジンより高い。船用エンジンは、熱効率が高く低質の燃料でも許容するという優れた特性をもっているが、そのことが有害成分を多く排出する原因にもなっている。また、低質燃料を使用できることも船用エンジンの特徴であるが、その結果として硫黄酸化物 (SO_x) の排出率も高い。IMOでは、低燃費・低質燃料という優れた特性を保持しつつNO_xやSO_xの害を効果的に抑制する方策を検討している。

また、オーストラリアの沿岸での日本産のワカメの繁茂などが指摘される外来生物の侵入の問題では、主要なルートは船舶のバラストタンクからの海水の排出であるとされる。船舶は、空荷状態の時に喫水が浅くなりすぎないように船体を少し沈めるために、バラストタンクとよばれる海水貯蔵タンクをもっている。海水は、荷下ろしをした場所で積み込み、貨物を積載するときに排出する。このような海水の積み込みと排出に伴って海生生物が越境移動するとされる。船舶の運航に伴う生物の移動を完全に阻止することはきわめて困難であるが、バラスト水中の生物を殺滅する処理を行うことを義務づける条約が採択され (中村, 2004)、各国で技術の開発が行われている。

船舶は巨大な鉄鋼の塊であり、廃棄されてもその部材の再利用率は高い。老朽船舶の解撤とリサイクルは労働集約型の作業である。現在は主にアジアの発展途上国でなされており、2005年の解撤量の割合は、載貨重量トンベースで、バンラデシュで56%、インドで30%、中国及びトルコでそれぞれ4%であったと報告されている (日本船主協会HP, 2007)。この作業は環境や作業安全への配慮が十分でない状況で行われており、船舶に積載されている有害物質 (たとえば耐火壁のアスベストやトランス中のPCBなど) による周辺海域の汚染が問題となっている。このため、IMOでは、リサイクルに伴う有害物質の扱いについて審議を続けている。

環境問題といえば、これまでは経済効率を優先する産業側が有害物質を垂れ流し、住民や環境保護団体が対策を求めるという構図であった。しかし、世界的な環境意識の高まりは、企業にとって先進的な環境対策を講じることが営業上も得策になるような状況が生まれつつある。また、環境対策を重視する地域においては、IMOによる規制だけでは不十分として局地的な規制が実施され、その政策の一環として、環境対策を施した船舶や環境適合性の高い船舶には入港料を割引くなどの制度を設けるところもある。こうした状況のなかで、今後は、船舶の環境対策も一段と進展することが期待される。

3. 防汚塗料

3. 1 船体への生物付着の防止

船舶の推進動力のうち、50~70%が船体表面と海水と

の間に生じる摩擦抵抗で消費される。この摩擦抵抗は、船体表面の粗度に非常に強く依存し、船体表面を清浄に保持することが燃料消費抑制の重要なカギになる。船体外板に生物付着があると船体表面の粗度 (つまり凹凸) を著しく増大させる。たとえば、30万トン級の超大型原油タンカー (VLCC) の1日の燃料消費量は100トンであるという。中東と日本の間の航海は往復で15,000マイル (海里) あり平均速度を15ノット (約28km/h) とすると約42日を要する。たとえば、機関出力 (燃料消費) を一定とした場合、船底への生物付着により船速が低下することになるが、これが14ノットに下がるとすると航海日数が3日程度長くなる。つまり、燃料消費が300トン増大することになると計算される (太田垣, 2005)。

船底の汚れによる燃料消費の増大は、経済性の悪化をもたらすほか、地球温暖化の原因とされる二酸化炭素の排出を増大させる。また、生物の付着は塗装表面に損傷を与えることで防食効果を低下させ、付着生物により狭い隙間が形成されることにより腐食を促進する。さらに、船体に付着して生物が越境移動すると、バラスト水で問題になっている海洋生態系の攪乱を促進する (岩崎, 2006, 木村・大谷, 2007)。

すなわち、生物付着を防止することは、経済的にだけでなく環境面でも重要な意味がある。通常用いられる防汚システムは、防汚機能を有する塗料、すなわち防汚塗料 (anti-fouling paint) を塗装することである。防汚機能を示す成分は、バイオサイド (biocide、殺生物剤) とよばれ、動物、植物、菌類などの多様な生物に対応するために複数のバイオサイドを含有する塗料が多い。

人類が防汚物質を使い始めたのはかなり古く、フェニキア人は紀元前に防汚技術を持っていたといわれる。19世紀後半に活躍して現在はロンドン郊外に保存されている帆船カティサークの船体の没水部には、図1に示すように銅板が貼られているが、その目的の一つは生物付着防止である。また、日露戦争におけるロシアのバルチック艦隊は、長距離を遠征してくる途中に生物付着のために船速が低下したことが、日本海海戦の敗因の一つとさ

図1 カティサーク号の船体に貼られた銅板

(2004年撮影)

れている。

これまでに防汚目的で使用された物質には、銅のほかタール、ピッチ、鉛などがあり、ヒ素化合物、水銀化合物、DDT（ジクロロジフェニルトリクロエタン）なども使用された。日本の特許制度ができて第1号の特許を取得したのは船舶塗料であり、そのなかにも防汚成分とされる物質（フェノール系物質を含むショウガが防汚物質に相当するとされる）が含まれている（朝日新聞、2007）。

3. 2 有機スズ系防汚塗料の開発と普及

1960年代になって、有機化学物質による防汚システムが開発され、その代表的な防汚物質はTBTという略称で知られるトリブチルスズ（tributyltin）とTPTとよばれるトリフェニルスズ（triphenyltin）で、これらは3つのブチル基（ C_4H_9- ）またはフェニル基（ C_6H_5- 、ベンゼン環）が結合したスズ原子を含む化合物である。これらの物質は優れた防汚機能を示すうえ、ヒ素や水銀の化合物と比較してヒトへの毒性は相対的に低い物質であり、塗装作業者の安全面でも問題の少ない防汚剤と考えられていた。

有機スズが防汚剤として効果が高いというだけでなく、有機スズを化学結合で樹脂自体に導入した加水分解樹脂の開発が、防汚性能向上に大きな効果があった。一般に、塗料は樹脂に顔料、添加剤、反応触媒等を混合したものであり、防汚塗料では、顔料の一種として生物付着忌避

作用を有する防汚物質が添加されている。過去の一般の防汚塗料では、図2(a)に示されるように、防汚物質は塗料樹脂中に粒子として分散していた。塗膜中には海水が侵入するため、表面近傍の防汚物質が順次海水に溶出することで防汚効果が発現する。溶出が進むと表面近傍の防汚物質は溶出してしまい、樹脂のみがスケルトン構造となに残る。そのため、表面における防汚物質の濃度は低下し、防汚効果は減衰する。

この問題に対して、図2(b)に示すように、自身も水に接することで分解、消耗していく樹脂を用い、常に表面近傍に防汚物質が十分な濃度で存在するように設計されたのが、自己研磨型塗料である。有機スズ系塗料では、図3に示すように、トリブチルスズメタクリレート共重合体（TBTポリマー）といわれるアクリル系樹脂が加水分解性を有するため、樹脂の分解が防汚物質の溶出と同時に起き、きわめて効果的に防汚性能を維持することができた（高橋、2005）。この塗料では、防汚機能を担うTBTが樹脂中に分子レベルで分散していることも防汚効果の効率的な作用を助長している。さらに、塗膜表面が自己研磨作用により常に平滑に保持されることから、それまでの防汚塗料に比較して船体抵抗を著しく低減したとされる。

ポリ塩化ビフェニル（PCB）、塩化フルオロカーボン（フロン）などの優れた性質を有する化学物質が、カネミ油症やオゾン層破壊などの環境問題を引き起こしている。これらに共通するのは、優れた（理想的な）性能を

図2 防汚物質の海水への溶出と塗膜断面構造の変化

図3 TBTポリマーとその加水分解過程
(自己研磨型塗料に用いられた加水分解樹脂)

示す物質であることから、広く市場に受け入れられて多量に使用されたことである。有機スズも、比較的安価でもあったことから、理想的な防汚塗料として、ほとんどの船舶でTBTポリマーが使用されるようになった。1980年における有機スズ化合物の世界における生産量は35,000トンに達したといわれる。広く普及したことにより有機スズは海洋環境中に多量に溶出し、問題を顕在化させたと考えられる。つまり、それ以前の防汚物質と比較して相対的に毒性が低い化学物質であっても、消費量が増加したために予期しない影響が現れたともいえ、環境問題では量的な考慮が必要があることを示唆している。

有機スズ化合物は毒性だけでは防汚物質として特に危険な物質とはいえないが、海中（特に海底の土砂）に長期間残留し、イルカなどのほ乳類を含む多くの海生生物に蓄積することが問題である（山田，1999）。分解性が低く残留性があり、生物に蓄積しやすい物質は環境影響を起こしやすい。具体的に特定された影響には、メスの巻貝（イボニシ）にオスの生殖器が形成される現象（インポセックス）があり、内分泌攪乱作用の例としてよく知られている（Horiguchi, et al., 1994）。

3. 3 有機スズの規制

TBTの船底防汚塗料としての使用開始は1970年代であるが、すでに1976年にカキの殻の成長異常が観察され、1980年代半ばにはカキ生産への経済的被害が報告されているという。英仏の研究者がTBTと海生生物に不可逆的影響の関係を示唆しているのも1980年代半ばである。その対策として、まず1982年、フランスは大西洋岸と英国海峡沿岸における25m以下の船を対象に有機スズ塗料の使用を禁止した。イギリスでは1985年に、アメリカでは1988年に連邦レベルでのTBTの規制法が成立した。このほか、カナダ、スイス、オーストリア、ドイツと規制が広がっていった。

わが国では、日本船主協会が1990年にドック間隔が1年程度と短い船舶について、有機スズ含有塗料を全面的に自粛し、その他の船舶については船側部分のみ低含有率の有機スズ塗料を使用するが船底部へは使用を禁止することを骨子とする自主規制を開始した。さらにいくつかの有機スズ化合物が、化学物質の審査および製造等の

規制に関する法律（化審法）の「第二種特定化学物質」に指定されたことや、運輸省が使用自粛の通達を出すなどの措置を受けて、産業界は自主規制を強化し、日本船主協会と日本造船工業会は、国内造船所での有機スズ系船底塗料の使用を全面的に禁止する自主規制を実施するに至った。日本塗料工業会でも、1989年にTPT化合物を含む船底防汚塗料の製造中止を決め、1997年にはTBTを含む有機スズ系防汚塗料の国内製造を完全に中止した。

これらの措置により、わが国の港湾周辺における有機スズ（TBT）の海水中濃度は、1989年には0.1 μg/L（ppb）のレベルにあったものが、1995年には0.01 μg/Lのレベルに低下するなど一定の効果はみられたものの、さらなる低下は進まなかった。また、底泥中のTBT濃度は、1990年の0.5mg/kg dryから0.2mg/kg dryと、あまり顕著な低下をしなかった（張野，2005）。これらは、有機スズが底泥中では比較的安定であり分解されにくいこととともに、海外の造船所では有機スズが引き続き使用されていたために、外航船舶が入港することで有機スズの溶出が続いていることが原因とされていた。

船舶に対しては国毎の規制では限界があり、国際的に強制力のある措置が必要との認識から、有機スズ問題がIMOに提起された。まず、1990年4月の第29回MEPCで有機スズと海洋環境、人の健康に関する情報収集を開始することが提案され、同年11月の第30回MEPCでは25m未満の小型船舶への有機スズ系船底塗料による影響を抑制する手段をとることを加盟国に呼びかけるMEPC決議46（30）が採択された。具体的には、平均溶出速度4 μg/（cm² day）を超えるTBT塗料の使用中止、塗布・洗浄の作業マニュアルの作成、代替塗料の開発、モニタリング実施と全面禁止に向けた適切な対応の検討を呼びかける内容であった。なお、日本などは上記の暫定的な手段は不十分であり、可能な限り早期にTBT含有防汚塗料の使用を完全に禁止すべきであると指摘した。

1996年7月の第38回MEPCで、日本と欧州諸国から有機スズ系塗料の世界規模での使用規制の提案がなされ、その具体的な方法の検討がMEPCの作業計画に取り上げられることになった。まず、条約原案を作成する作業を行うコレスポンデンスグループが結成された。同グループにおいて、有機スズ化合物規制のための強制力のある手段

が必要という見解が多数を占め、その最終報告書を受けて、第42回のMEPCに、10年間かけてTBTをフェーズアウトさせる強制措置を含む提案が日本を中心になされている。会議では、規制対象に有機スズ以外の防汚物質を含めるか、開発中の非スズ系塗料の利用可能性との関連から実施の時期をどうするか等の議論がかわされ、2003年以降の新たな塗布を禁止し、5年の猶予の後に船体に存在自体を禁止するという、後の条約の骨格になる規制内容が合意された。山場は1999年の第43回MEPCであり、条約採択のための閣僚レベルが出席する外交会議の開催を要請するか否かの審議がなされ、一部の船主を代表する国から、適切な代替塗料がないことを理由として禁止時期について再考を求める意見がだされた。明確な多数意見が形成されず、IMOの間では異例のRoll Call Vote（議長が点呼を取りながら賛否を確認する）となり、その結果、賛成35、反対12、棄権・欠席25で、理事会に対し条約会議開催を要求することになり、条約採択の道筋ができた。そして、2000年10月の第45回MEPCで新条約案を承認、2001年10月の外交会議で新条約が採択されるに至った（本田，2005）。

採択された「2001年の船舶の有害な防汚方法の規制に関する国際条約」（International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships, 2001）、通称AFS条約は、有害な防汚方法（防汚塗料の塗布のことである）を禁止するものであるが、条文中では有害な防汚方法を特定せず、附属書1（Annex 1）に規定する構成となっている（第4条(1)）。附属書1には、禁止される内容として「防汚方法において殺生物剤として作用する有機スズ化合物（Organotin compounds which act as biocides in anti-fouling system）」と規定されている。「殺生物剤として」という限定は、防汚物質を含まない（non-biocide）シリコン系船底塗料のなかにはジブチルスズなどが樹脂の硬化剤として用いられることがあり、これらを除外するための措置である。

附属書1で規定される規制内容は、MEPC 42の決定に沿って、(1) 2003年1月1日以降、全ての船舶において有機スズ化合物を含む防汚塗料を新たに塗布してはならない、(2) 2008年1月1日以降、船舶は有機スズ化合物を含む防汚塗料を船体等の表面に帯びてはならない、とされている。ただし、既存の塗装に含まれる有機スズが溶出しないように上からコーティング塗装（シーラーコート）を施すことは認められている。実際には2008年1月時点では条約は発効しておらず、発効時から(2)が適用されることになる。これらの履行義務は国にあり、締約国の管理の下で運航されるすべての船舶が規制対象となる。軍艦、補助艦艇、政府艦艇は除かれるが、これらも条約に準拠することを求めている（第3条(2)および附属書1）。また、造船所などの塗装の作業場などで発生する廃棄物の安全性に関しては締約国が自国内で適切な措置をすることとなっている。（第5条）

この条約は、有機スズ以外でも、有害と判断される物質が認められた場合には、附属書1の規制対象に追加することができる。まず、対象物質の環境へのリスクに関

する情報を「当初提案（Initial proposal）」としてIMOへ提出する。IMOは条約締約国へこれらの情報を周知し、MEPCにおいて詳細検討の必要性の有無を審議する。必要と判断された場合は、提案国は詳細な「包括的提案（Comprehensive proposal）」を提出し、MEPCの下に設けられる技術グループで人の健康及び環境への影響、規制の効果、規制の可能性や費用対効果、代替方法の有効性等について検討を行いMEPCへ勧告する。MEPCは締約国および関連諸機関に技術グループの勧告を周知し、附属書1の改正の決定を行う（第6章、7章）。

日本は2003年6月の国会で批准し、合わせて国内法規の改正を実施している。大型外航船では防汚塗料の再塗装を行う間隔が2.5年～5年と長いこともあり、条約採択を見越した対応が進んでいる。主要な塗料メーカーが有機スズ系塗料の製造を中止するなど、非スズ化の実効はあがりつつある。

4. 非スズ系防汚塗料

4. 1 非スズ系防汚塗料の開発

防汚塗料は、バイオサイドを溶出させるため環境影響が懸念されるものであるが、一方で、燃料消費を抑制し、船体付着による生物の越境移動を防止するなど、環境に寄与するものである。したがって、適当な代替品がない限り、有機スズの禁止の合意を得ることは難しかった。有機スズ系塗料の特徴が、加水分解樹脂による効果の持続と表面の平滑化にあったことから、非スズ系防汚塗料の開発においても、有効な防汚物質の探索とともに、加水分解性樹脂の開発が重要であった。先行して有機スズの使用を中止したわが国の塗料メーカーは、スズに代わる金属の錯体をターゲットに研究を進め、銅や亜鉛を含む金属アクリレート、シリコンを含むシリルアクリレートなどが製品化された（山盛，2005）。有機スズに近い防汚性能を示す塗料が製造されるようになり、有機スズを全面禁止とするための技術的裏付けができたと言われる。

有機スズポリマーと異なり、これらの樹脂自体は防汚効果を示さないため、防汚物質は顔料として添加される。現在、わが国で販売される防汚塗料の多くは、AFS条約に適合すること（すなわち有機スズを含まないこと）を日本塗料工業会が認証しており、ホームページに活性成分（防汚剤）が公表されている（日本塗料工業会HP，2007）。AFS条約に適合する（すなわち有機スズを含まない）防汚剤は表1に示すように17種類あり、代表的な物質は、表2に示す亜酸化銅、亜鉛ピリチオン、銅ピリチオン、ピリジントリフェニルボラン（PK）などである。非スズ系防汚物質としてもっとも使用量が多いのは亜酸化銅（Cu₂O）である。亜酸化銅は、TBTより古くから使われ続けている防汚物質で、有機スズ全盛の時代にも有機スズと併用されてきた。フジツボなどの動物系の付着生物には高い効果を示すが、藻類や菌類には効果が十分でなく、補助的な防汚剤（booster biocide）として有機化学物質が併用されるのが普通である。

一方、防汚剤（biocide）を使わない防汚塗料として、シリコン系やフッ素樹脂系の塗料が開発されており、

表 1 日本塗料工業会に登録されている防汚物質

CAS 番号	物質名	通称	含有塗料 品種数
1317-39-1	Cuprous oxide	亜酸化銅	264
13463-41-7	Zinc-2-pyridinethiol-1-oxide	亜鉛ピリチオン	129
14915-37-8	Copper, bis(1,hydroxy-2(1H)-pyridinethionato O,S)-T-4	銅ピリチオン	117
971-66-4	Pyridine-triphenylborane	PK	91
330-54-1	3-(3,4-Dichlorophenyl)-1,1-dimethyl urea	ディウロン	48
64359-81-5	4,5-Dichloro-2-n-octyl-4-isothiazolin-3-one	シーナイン 211	46
28159-98-0	2-methyltio-4-tert-butylamino-6-cyclopropylkamin-triazine	イルガロール 1051	36
1085-98-9	N,N-dimethyl-N'-phenyl-N'-(dichlorofluoromethylthio) sulphamide		24
1897-45-6	2,4,5,6-Tetrachloroisophthalonitrile		12
12122-67-7	Zinc ethylenebis (dithiocarbamate)		10
1111-67-7	Cuprous thiocyanate		8
137-30-4	Zinc dimethyl dithiocarbamate		4
13108-52-6	2,3,5,6-Tetrachloro-4-(methylsulphonyl)pyridine		3
1338-02-9	Naphthenic acids, copper salts		2
137-26-8, 1634-02-2	Tetramethylthiuram disulphide		1
13167-25-4	N-(2,4,6-Trichlorophenyl) maleimide		1
731-27-1	Methanesulfenamide, 1,1-dichloro-N-((dimethylamin sulfonyl)-1-fluoro-N-(4-methylphenyl)		1

(2007 年 9 月現在、含有塗料数は製品の数であり量ではない)

表 2 現在使用されている主要な防汚物質

物質	亜酸化銅	亜鉛ピリチオン	銅ピリチオン	PK
	Cu_2O	$\text{C}_{10}\text{H}_6\text{O}_2\text{S}_2\text{Zn}$	$\text{C}_{10}\text{H}_6\text{O}_2\text{S}_2\text{Cu}$	$\text{C}_{23}\text{H}_2\text{OBN}$
分子式
分子量	143.09	317.68	315.9	321.22

日本塗料工業会に登録された395種の防汚塗料の内、防汚物質（バイオサイド）を含まない塗料は19種である。テフロンやシリコン樹脂のように、表面自由エネルギーが低く接触角の大きい素材では、付着生物が基盤を形成しにくく結合力が弱い。そのため、付着しても航行に伴う水流で容易に脱落する（山盛，1999）。停泊時間が長い場合や低速の船舶では効果が不十分であったり、塗装施工に技術と費用を要することなどがあるが、表面粗度が加水分解塗料より低いために摩擦抵抗が低く、燃料消費の低減に効果があるとされ、今後の普及が期待される。

4. 2 非スズ系防汚塗料の環境影響

シリコン系塗料の普及が進むものの、防汚塗料の主流は依然防汚物質（バイオサイド）を含む塗料である。環境に影響を与える可能性のある物質の評価では、リスク評価手法が用いられる。リスクとは、健康被害や生態系攪乱などの「よくない出来事」が起きる可能性とその出来事の重大さを組み合わせて害を生じる可能性を表現するものである。よく似た言葉にハザードがあり、これは悪い影響を起こす可能性を有する物質（あるいは活動）である。従来の化学物質の規制はハザード評価に基づき、

毒性の強い物質の使用を制限するものであったが、リスク評価ではその物質の暴露量（摂取量）を考慮して、害を引き起こす確率を基礎に置いている。リスク評価では、まずハザードつまりリスクの根源を特定し、つぎにエンドポイント（影響判断点）、すなわち想定される「よくない出来事」を決定する。さらに、暴露解析により暴露量の推定を行い、毒性試験等に基づく有害性評価から得られる用量反応関係を使って、暴露量に対応するリスクが計算される（中西ほか，2003）。

化学物質のなかでも農薬、殺虫剤、防腐剤、防ばい剤（カビの防止）等として使われているバイオサイドは、何らかの環境影響がありうることを承知して使用するものである。使用量が増えると環境影響が顕在化するという点を考慮して、有害性が顕れない程度に使用量を抑制するか、何らかの防除措置を講じるなどの対策をとるといったのがリスク管理の考え方であり、こうした管理のツールが、リスク推定に基づく環境影響評価である。

防汚塗料に関する環境リスク評価において、ハザードは防汚物質（及びその反応生成物）であり、エンドポイントは塗装作業者の健康被害、食用海生生物経由の人の摂取による健康被害、そして海生生物の殺傷による海洋

図4 船底防汚塗料の環境リスク評価のフロー

生態系の破壊などである。ここでは、海洋生態系破壊をエンドポイントとする場合を例に、リスク評価の手法を紹介する。まず、図4に示すように、暴露解析と有害性評価からなるフローを考える。暴露解析として、排出シナリオに基づき環境中の濃度がどの程度になるかという予測値（PEC＝Predicted Environmental Concentration）を、また有害性評価として生態系に対して影響を及ぼさないと予測される濃度（PNEC＝Predicted No Effect Concentration）を推定する。二つのパラメータの比PEC/PNECの値が1を越える場合には、環境濃度の予測

値が影響が懸念されるレベルであることを意味するから、何らかの対策が必要となる。なお、用いるデータについては不確実性を考慮しておく必要がある。

こうした考え方に基づいた防汚塗料の規制は現実に始まっている。もっとも体系的に整備されているのは、1998年に制定された欧州共同体（EU）におけるバイオサイド指令（BPD＝Biocidal Products Directive）である（European Commission, 1998）。これは、殺虫剤や防腐剤などを含むバイオサイド全般の包括的な規定とともに個々の製品群について詳細な規制が示されている。BPDに沿って防汚物質のリスク評価の具体的方法をみると以下になる。影響評価では、残留性、生物蓄積性、毒性（急性毒性、慢性毒性）等のデータをもとにPNECを算出する。生物は多様であるが試験できる種数は限定されているため、得られた無作用濃度を不確実性を考慮するための評価係数（assessment factor）で除する。その値は10から1,000程度の範囲で、得られているデータの種類と数から決められるもので、試験された生物種が多様であるほど小さい値を用いることができる。一方、暴露解析では、防汚物質の塗膜からの溶出速度をラボ試験等により求め、対象海域への海水の流入・流出や海洋中での挙動を考慮してシミュレーションモデルを使ってPECを求める。海洋中の挙動は、図5に示すように複雑なプロセスである。防汚物質の底泥への吸着や光分解、加水分解、微生物分解等のプロセスはまだ研究段階であるが、ある程度のデータが得られれば、MAM-PEC（Antifoulingpaint HP, 2007）などのソフトウェアによりPECを計算することができる。

リスク評価としては、PEC/PNEC比を算出し、1以下であれば環境影響評価の観点からは問題がないという判定となる。また、生物への蓄積しやすさを示す係数（生物濃縮係数）や、分解性（水中や堆積物中濃度の半減に要する日数）、生殖毒性、内分泌攪乱作用に関してもそれ

図5 想定される防汚物質の海水中での挙動

表3 使用禁止を提案する際に要求されるデータ
(AFS条約附属書3)

物理的及び化学的特性	環境内運命及び影響	水生生物等への影響
融点	分解又は消散のモデル	急性毒性
沸点	(加水分解/ 光分解 / 生物分解)	慢性毒性
密度 (相対密度)	関連する媒体中の残留性	発育上及び生殖上の有毒性
蒸気圧	(水質、底質、生物相)	内分泌かく乱作用
水可溶性/ pH / 分離平衡(pKa)	底質 / 水分配	底質における有毒性
酸化/還元電位	殺生物剤又は活性成分の溶出速度	生物学的利用能、生物学的濃縮等
分子量	質量平衡	食物網、汚染影響
分子構造	生物蓄積、分配係数	悪影響の観察結果(魚の死等)
	オクタノール / 水分配係数及び分散	食餌魚介類中の残留物

ぞれ基準が設定されている。PEC/PNEC比が1以上となる場合は、別の種に対する毒性試験等の追加データを取得することで評価係数を小さくして再評価することができる。また、予測値による評価であるから、使用可の判定であっても実態のモニタリングを継続することが必要である。

PECとPNECの値について、実際に精度のよい予測をすることにはたいへんな困難が伴う。たとえば、PNECは急性毒性や慢性毒性の試験から求めるが、現在使われている防汚物質のように分解性の高い物質は、毒性試験の水槽中でも変化するため、濃度一定の試験は容易ではない。また、有機スズ問題に比較して非スズ系の防汚物質の環境影響に関する研究はまだ少なく、使用できる公開データも限られている。それでも、現在、防汚物質として使用される物質のなかにも、毒性試験の結果や実海域でのモニタリングから、問題が指摘される物質がある（岡村，2005）。PECは、船舶からの溶出速度（単位面積、単位時間当たりの溶出量）を推測し、対象海域の拡散モデルを用いたシミュレーションによるのが普通である。分解過程や底泥への吸着等を含めたプロセス全体を予測することには大きな困難が伴う。ASTMやISO規格として整備されつつある溶出試験法により塗膜からの溶出速度の測定を行うが、ASTMやISOの溶出試験法は方法は溶出速度を過大に評価して実態を反映していないという指摘もある（Finnie, 2006）。さらに、防汚物質やその多様な分解生成物には分析が難しい物質が多く、分析方法が確立していなかったり、測定下限値が毒性値と比較して高いものがある。

4. 3 認証制度の必要性

AFS条約の審議過程でも、他の防汚物質にも憂慮すべき環境影響があるという指摘があったが、当面、有機スズの禁止が最優先であるとの認識から、他の物質については新たに提案を受けて追加することになった。このため、AFS条約の締約国は、新たな禁止物質を提案することができ、3. 3で述べた包括的な提案に必要なデータのリストが附属書に示されている（表3）。また、条約の付帯決議（Resolution）として、防汚物質の環境影響を評価する手法の開発、認証あるいは登録制度の確立と

情報の相互利用などを各国が推進することを求めている。

わが国には、化学物質一般を規制する法律として化審法があり、新規の化学物質に対して分解性、蓄積性、ヒトへの長期毒性及び生態毒性を考慮した審査が行われている。しかし、化審法は本来はヒトへの安全性が基準であり、海洋生態系に対する配慮は十分ではない。有機スズの使用中止措置により防汚塗料の環境問題で世界に先んじたわが国も、新規防汚物質を含む包括的な環境保全のための公的制度の確立では立ち後れているのである。EUのBPDによる規制は理念として一貫したものがあり、説得力をもつシステムであるが、認証を得るためには多くのデータが必要であり、莫大な費用を要するといわれる。環境保護の立場からはより厳しいルールは望ましいことかもしれないが、一方で、それほど大きいとはいえない市場規模を考慮すると、過剰に厳しい要求は、より環境負荷の低い新製品の開発の意欲さえもそぐことになる。わが国においても、海洋環境保護を基本に据えつつ、環境影響を低減する意欲的な新製品開発にも配慮した制度を検討すべき時期にある。

2001年に採択されたAFS条約は、2007年9月にパナマが25番目の批准国となり、批准国に登録される商船の船腹量が世界の38%を占めるに至ったため、発効要件を満たし、2008年9月に発効することになった。これにより、国際航海をする商船は有機スズを使用することはほとんどなくなると予想され、有機スズ系防汚塗料の世界的な使用禁止が現実的となった。他の防汚物質（有機スズ代替物質）についても、環境影響評価を実施する必要がある、欧州のバイオサイド規制（BPD）をはじめ、国毎の認証制度は始まっている。これらの規制は、AFS条約が禁止物質を定めるnegative list方式であるのに対して、安全性を証明できるものを認証するpositive list方式である。安全性を調べる方法の確立が必要であり、その手法の国際規格（ISO）を制定することを日本が提案することを準備している。防汚塗料は、船舶の航行速度の低下を防ぎ燃料消費の増大を抑えるために、不可欠の技術である。また、船体付着による生物の越境移動を防止するためにも必要である。一般に、環境問題は、対立する問題の間のジレンマ、トリレンマの形をとる場合が多いものであるが、防汚塗料に関しても、効用と負の環境

影響をどう調和させるかが重要である。

5. おわりに

本稿の締めくくりとして、船体への生物付着を防止する防汚システムに関して、今後の課題についての考えを述べることにしたい。まず、防汚物質の環境影響を的確に評価する手法を確立しなければならない。分解生成物を含めた生態影響を評価するとともに、実海域での防汚物質及びその分解生成物のモニタリングが必要である。次に、環境への負荷のより低い物質の探索が必要である。海生生物がもつと考えられている防御機構の利用や、そのシステムあるいは物質を人工的に合成できれば、バイオサイドを使わない防汚システムの開発、普及が重要である。さらに、もう一つの課題は、防汚技術への総合的な戦略である。防汚システムというのは、本来の目的は船体抵抗を低く保つことにある。単なる生物付着防止ではなく、船体抵抗の一層の低下を目指す防汚システムの開発は、地球温暖化防止の観点からも意義がある。こうした状況を考えると、防汚システムの開発には、まだまだ多くの課題と可能性がある。塗料合成だけでなく、付着生物学、海洋生態学、環境化学、分析化学、船舶流体力学等の多くの分野にまたがる問題であり、戦略的な取り組みが必要な時期ではないだろうか。

参考文献

- Antifouling paint, <http://www.antifoulingpaint.com/downloads/mampec.asp>
- 朝日新聞（東京版）2007年6月17日，p. s2.
- European Commission (1998). Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council of 16 February 1998 concerning the placing of biocidal products on the market, Official Journal of the European Communities, L 123.
- Finnie, A.A. (2006). Improved Estimates of Environmental Copper Release Rates from Antifouling Products, *Biofouling*, Vol. 22, No. 5/6, 279-291.
- 張野宏也 (2005). 水環境中での船底防汚物質の分布，日本マリンエンジニアリング学会誌，40, 24-28.
- 本田芳裕 (2005). 船底防汚塗料国際条約（AFS）採択にいたるまでの経緯とその舞台裏，日本マリンエンジニアリング学会誌，Vol. 40, No. 1, 36-38.
- Horiguchi, T., Shiraisi, H., Shimizu, M. and Morita, M., (1994). Imposed and Organotin Compounds in *Thais Clavigera* and *T. Bronni* in Japan. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, Vol. 74, 651-669.
- IMO, <http://www.imo.org/>
- 岩崎敬二 (2006). 外来付着動物と特定外来生物被害防止法，日本付着生物学会誌，Vol. 23, No. 2, 13-24.
- 木村妙子，大谷道夫 (2007). 大型輸送船に付着する底性動物の実態とその起源の探索，*海洋と生物*，Vol. 29, No. 3, 221-230.
- 中村靖 (2004). バラスト水排出の規制—バラスト水管理条約について—，*Techno Marine*（日本造船学会誌），No. 879, 305-310.
- 中西準子，蒲生昌志，岸本充生，宮本健一 (2003). 環境リスクマネジメントハンドブック，579p，朝倉書店.
- 日本船主協会ホームページ，<http://www.jsanet.or.jp/data/>
- 日本塗料工業会ホームページ，<http://www.toryo.or.jp/jp/anzen/imo/index.html>
- 岡村秀雄 (2005). 有機スズ代替防汚剤の生態系影響，日本マリンエンジニアリング学会誌，40, 32-35.
- 太田垣二郎 (2005). ユーザーの立場から見た船底防汚塗料，マリンエンジニアリング，Vol. 40, No. 1, 22-23.
- 高橋一暢 (2005). 有機スズ系船底防汚塗料の開発と規制，日本マリンエンジニアリング学会誌，Vol. 40, No. 1, 14-16.
- 山田久 (1999). 有機スズ化合物の海域環境における挙動と魚類による生物濃縮に関する研究，瀬戸内海区水産研究所報告，No. 1, 97-162.
- 山盛直樹 (1999). シリコン系防汚塗料の開発動向，日本海水学会誌，Vol. 53, No. 4, 297-298.
- 山盛直樹 (2005). TBTポリマーに替わる新しい防汚塗料用樹脂，日本マリンエンジニアリング学会誌，Vol. 40, No. 1, 17-19.