

# 生物付着と防汚

## —防汚システム開発の一つの捉え方—

Bio-fouling by Sessile Organisms and Antifouling Technology

～ Viewpoints to Develop New Anti-fouling Systems ～



汎用塗料本部  
船舶技術開発部  
舛岡 茂  
Shigeru  
Masuoka

### 1. はじめに

約40億年前に生物が発生して以来、地球規模での生物種は現在分類されているだけでも約200万ともいわれ、未だ知られていない生物種はその数倍から数十倍と予想されている。その中で生物の起源である“海”にはそれらの生物種の多くが生息している。当然個体総数も連動することになるが、その大半が陸地沿岸の大陸棚の範囲までに集中している。

これらの海棲生物の中には、幼生や孢子として海中に放出された後、幼生期に何か(岩、大型生物、人為的な海中構造物など)に付着して変態して成体となり、一生を付着した状態で過ごす付着生物の存在がある。例として、海岸の防波堤の喫水部から没水部にかけてよく観察される動物系のフジツボ類、蛎類、イガイ類、コケムシ類、海棲バクテリア、植物系のアオノリに代表される藻類や古生的な珪藻類などがあげられる。

彼らにとって海中の何かへの付着は生きる術であるが、その何かの一種でもある人為的な海洋構造物を利用する人間の経済活動の面から捉えれば、多大な経済損失(いわゆる汚損)をもたらす要因となっている。一例として船舶への付着による船体摩擦抵抗の増加による燃費の増大、スピードの低下、過度な負荷による推進器の劣化促進など人間の視点に立った損失があげられる。

その様な経済的損失を防止するためのシステムとして考察され、実用に供されて来た重要なものの一つが一般の塗料の機能・用途から見れば極めて特殊な防汚塗料(Anti-fouling paint)である。

本稿では長らく防汚塗料開発に関わって来た者として、生物付着とは何か、その生物付着を防止する防汚塗料とは何か、付着生物からの視点も踏まえながら、過去から現在、未来へと続く防汚システムの開発の捉え方を述べてみたいと思う。

### 2. 付着生物の特性

まず、海洋構造物への生物の付着を防止するためには、付着生物の特徴を把握することが必要である。

一般に付着生物の繁殖特性には以下の要因が影響を与える。

#### ① 海洋の栄養度・汚染度の影響

例えばフジツボ類でも大型のアカフジツボは、付着後の自らの生活圏を確保するために単独付着を行う。また、他との群れをなす付着生物との競争を避けるためか、近海の栄養が豊富な海域(得てして現代では化学物質による汚染度も高い)ではあまり観察されず、栄養度の低い外洋や比較的水質が清浄といわれる海域に見られる。

したがって、国内でも人口の多くない地域に設置されることが多い原子力発電所の発電システムの冷却水として用いる海水の導入設備に見られることがある。

一方、いま問題となっている大陸間移動外来種の典型であるヨーロッパフジツボに代表される群棲型の小型のフジツボやイガイ(東京湾では昭和初期の外来種であるムラサキイガイが多く見られる中で、新たな外来種であるミドリイガイも多く観察されるようになってきた)は、汚染海域での耐性が高く、また繁殖力も高く、集団で付着するため付着量も多く、東京湾、大阪湾などに代表される地域に入港・停泊する船舶への付着において大きな経済的影響を与えている。

なお、湾が隣接しているからといって、同じ生物付着状況を呈するとは限らない。それは河川からの栄養分の流入の有無、水温の違い、生物付着種間の生存競争の違い、海流による放出された幼生の漂い方の違いなどに因る。

その例として、国内各地で同時期に実施した防汚施工をしていない試験板の浸漬試験結果を図1に示す。

#### ② 海洋温度

一般に動物系は、同じフジツボでも寒冷地に生息するチシマフジツボや比較的温暖な地域に生息する外来種のヨーロッパフジツボや外洋性のアメリカフジツボなど地域差はあるものの、繁殖時期は概ね6月から9月にかけての夏場にピークがあるのに対して、アオノリを始めとする藻類は12月

### コントロール板の浸漬結果例(4,5ヶ月後)

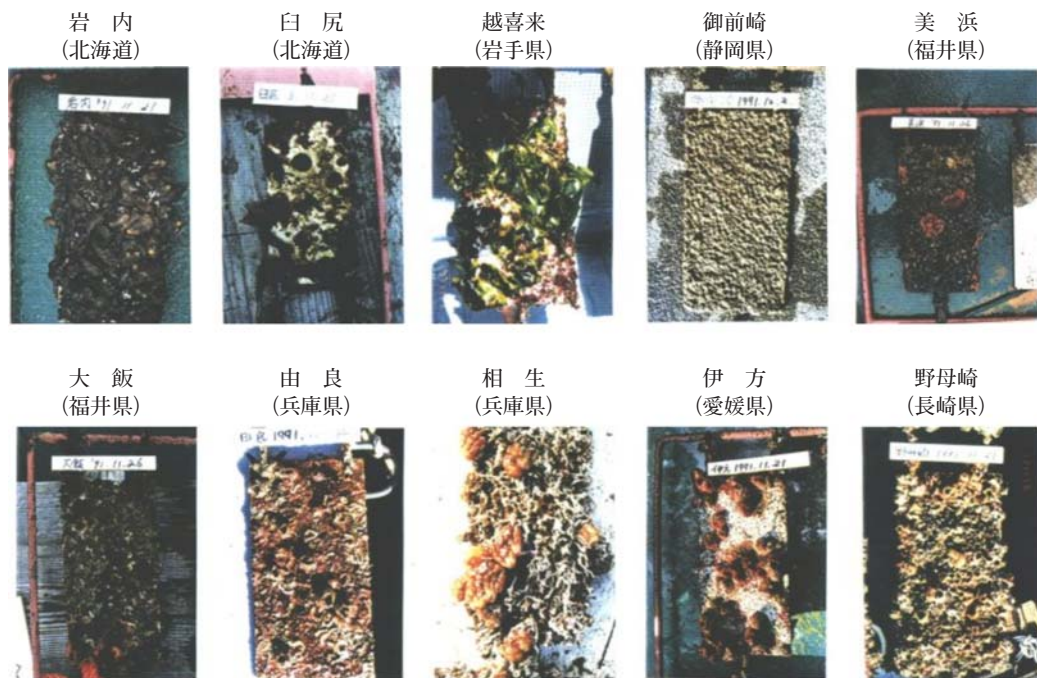


図1 全国汚損状況

総説・解説

前後の冬場にピークを持っている。

#### ③ 種間での生存競争

一般に1~2 kn (1 kn; 1.852 km/h) 以下の海流域である湾内および沿岸部での船舶や発電所の冷却水系では、付着競争において植物系は動物系に劣るものの、流速や船舶の航速が5 kn前後まで増加すると動物系の付着は極端に低下し、これと入れ替わるように流速耐性のある植物系の付着が増加する。

#### ④ 幼生の行動性

付着はまず、動物系であれば親から放出された幼生が海流に漂う中で何度かの変態を繰り返し、最終的に成体として何かに付着する前の段階(フジツボであれば7齢目のキブリス幼生)の幼生が一生を過ごすことになる付着面を選択する。

特にフジツボやイガイなどでは、定められた変態期間の中で、触手を動かしながら移動しサーチする様子が顕微鏡下でも観察されている。また、付着面に先行する海中の有機物(海棲生物の死骸の分解物が多い)の吸着、海棲バクテリアや付着珪藻類の付着が、フジツボやイガイの付着を誘引することが10数年前行ったガラス板の波状的な浸漬試験によって観察されている。

### 3. 付着程度の一検証

以前、北海道地区の発電所で採取したチシマフジツボの幼生数の実績値(最大285個体/l)から付着状況を検証した

ので、それを示す。

観察時期、採取場所によって、この数値は大きく変動するため、計算上単純化して極端に1個体/l(実数値からはかなり低い)、夏冬の年間を通しての変動も考慮して設定した)と仮定しても、50万kwの発電ユニットにおける取水量を20 l/sとすると、冷却用の海水取水路、導入管には1秒間に20,000個体の幼生が入ってくることになる。年間では $20,000(\text{個体/s}) \times 60(\text{s}) \times 60(\text{min}) \times 24(\text{h}) \times 365(\text{d}) \approx 6,300$ 億個体となる。

このうち10,000分の1(0.01%)が付着すると仮定すると6,300万個が付着する計算になる。その付着可能面積が10,000 m<sup>2</sup>あり、そこに均一に付着するとして、1 m<sup>2</sup>当たり6,300個体が付着することになる。その付着幼生1個体が直径2 cm、高さ1.5 cmの大きさに成長したとすると面積で約3 cm<sup>2</sup>となり、計算面積は実面積の2.1倍となり実面積を上回るため上方へ積み上がるものと考え、これが高さ方向の1.5 cmの倍数となる。したがって、厚み約3 cmになる計算である。

これは海水中に上記のフジツボのみが観察された場合であって、実際にはフジツボ以外の付着生物も共存し、総付着量は数倍以上になる。また、同箇所でも部位による流れの緩急の違いにより付着量が異なり、結果として付着しやすい部位には上記計算の数十倍以上の付着量となって様々な生物が付着することになる。北海道以南では海水の水温、栄養度ともに高く、一般的に生物の繁殖力も旺盛となることから、上記結果はむしろ低い数値を示しているといえる。実際、東京湾にある発電所の取水路では、防汚塗料の無塗装部において1年でムラサキイガイを中心として、生物付着が厚さ20

cm以上に達した例も観察されている。これら生物付着が取水量の減少による冷却効率の低下やポンプを始めとする各設備への負担増をもたらしている。船舶への付着では、摩擦係数の増加による運航速度の低下、や速度維持のための燃費増大などの影響が、如実に現れる。

## 4. 防汚塗料とは

### 4.1 防汚塗料の機能

防汚塗料は通常の塗料とはかなり機能を異としている。一般に塗料は人間にとって有用な構造物や道具の表面に多く塗装されている。その目的はそれらの構造物や道具の素材である鉄に代表される金属、その他木材やコンクリートなどを腐食・劣化から守ること、物体の美観を容易に際立たせること、その美観を維持させることなどにある。このことは塗料から形成される塗膜が可能な限り初期塗膜と同じ状態を保つ、いわば不変追求の考え方の中でひたすら外的因子に耐えるように塗料、塗膜設計がなされているといえる。

一方、防汚塗料は、一部シリコンゴム系を除けば、大半が塗料を塗付することで形成された塗膜を、界面となる海水との積極的な関わりの中で化学的に、物理的に自身が変化する機能を付与されるよう設計されている。即ち、海水に接触する界面から積極的に塗膜中の防汚成分を徐々に放出すると同時に塗膜自身も界面から消耗し、塗膜中に配合される防汚成分が常に有効な状態で塗膜表面に存在するように再生するシステムを有している。そのことにより、防汚性能とユーザーより望まれる防汚期間を塗膜厚にて維持する設計となっている。

### 4.2 防汚塗料の開発の歴史

船舶の没水部である船底部や海中構造物の表面においては、自然状態では極めて短期間に海洋バクテリアや珪藻などによるスライム層の形成が始まる。その後、その膜に誘引される様に海洋付着生物であるフジツボ、カキ、イガイ、アオノリなどの付着が起り易い傾向があることは前述した。一般にスライムによる汚損をMicro-foulingといい、フジツボ、イガイなど大型付着生物による汚損をMacro-foulingという。これら生物の付着により船体抵抗の増加や重量増加などが発生し、船舶の航行速度の低下や燃費の増大などの経済的諸問題がもたらされる。このような海洋生物の付着による経済的損失、いわゆる汚損を防止する有効な手段のひとつが防汚塗料を船体へ塗装することである。

歴史的には、古代ギリシャ人、フェニキア人やカルタゴ人の軍船などにおいて、材木の防腐と共に、船そのものへの防水、防汚をも考えて、タール、アスファルト、ワックスが用いられていたことから、防汚に対する意識や技術が紀元前より存在したことは確かといえる。

初期の防汚塗料には、アスファルト、タール、ワックス、さらにはロジンなどの天然素材をそのまま使用していたが、歴史

的な変遷を経て、とりわけ第二次大戦後、人類自ら作り出した素材である合成樹脂と無機銅に代表される防汚剤を主体とした防汚塗料が提案されてきた。

1960年代までは、世界的に環境に対する意識も現在ほどは高くなく、毒性も明らかでなかったので、防汚性能やコストといった経済性が重視され、現在では全く使用されていない水銀、ヒ素といった高い毒性を有する化合物が使用されたこともあった。現在から考えれば、結果として人類生存の源である海洋への影響に対する配慮が欠けていたことを示している。

その後、TBT (Tributyltin) 共重合体、所謂加水分解性樹脂の一種が登場した。そのTBT共重合体自体は本来水に馴染み難い疎水性という性質を有しているが、アルカリ領域の水(海水は本来 pH=8.2である)に浸漬されると加水分解することで、水に馴染み易い親水性という性質を有するようになる。その変化が塗膜表面からの塗膜自体の溶解をもたらす。そして、その機能は一般にSelf-Hydrolyzing (自己加水分解)あるいはSelf-Polishing (自己研磨)と呼ばれている。

なお、このTBT共重合体は、樹脂本来の機能を発現する加水分解という性質と加水分解した後塗膜界面に放出されるTBTH (Tributyltinhydroxide)が付着生物の幼生の付着に対して有効な薬効性を有していたことから、従来の防汚薬剤と併用されることにより、常にリフレッシュされた塗膜表面を確保できることで飛躍的に防汚性が長期間持続し、また、塗膜表面が船舶の運航によるスムーズな溶解をすることで平滑化し、その結果船体摩擦抵抗を低減させ、燃費低下にも効果をもたらした。

1970年代に入ってからTBT共重合体を含む塗料は防汚塗料の主流を占めるようになったが、20世紀末に有機錫の難分解性からくる海洋への蓄積性と環境ホルモン(内分泌攪乱物質)作用によるインボセックス(雄性形質誘導及び生殖不全症候群;雌の雄化)が巻貝であるイボニシに見られたことから、環境に影響を与える物質として議論され、いち早く国内では日本塗料工業会による使用自主規制の形ではあるが、防汚塗料を生産している塗料各社が日本塗料工業会に参加していることから実質禁止の措置となった。

世界的には、IMO主導の下、2003年末を持って製造、施工の禁止が謳われ、2008年末を持ってその存在の禁止(塗膜として残存していても塗膜表面に有機錫化合物が出ない様にシールする形は認められた)が、規定数以上の国における各国法律の批准のもとに施行された。

世界的にもいち早く禁止の方向に動いた日本では、その禁止に至る過程で代替の防汚技術の開発が同時スタートで各塗料メーカーにより実施され、現在、市場から評価される品質を世界に先駆けて確立している。

その一例が図2に示す加水分解性樹脂を用いた防汚塗料の市場展開である。その中で、当社(関西ペイント/NKMコーティングス)においては、ケイ素樹脂(ケイ素ポリマーあるいはシリルポリマー)に着眼し、さらに付着しようとする生物幼生を塗膜表面で忌避させる考え方のもと、市場の要求(外



洋を運航する大型外航船では5年間の連続運航に適應できる防汚性能の維持)に應えるものとして、「タカタ クォンタム (TAKATA QUANTUM)」を開発し、市場展開を通して多数の実績を得てきた。その一例を図3に示す。

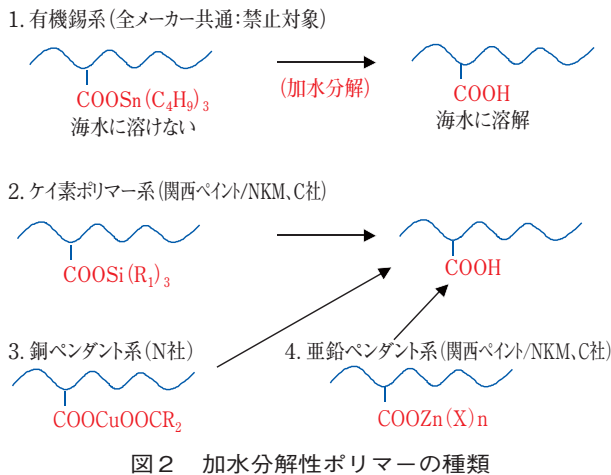


図3では船舶運航に多大な影響を与えるMacro-foulingといわれるフジツボやアオノリなどの大型付着生物の付着は見られず、さらにMicro-foulingといわれるバクテリアや珪藻の付着も見られえず、新たな防汚塗料を塗装する前に必要な船体表面の洗浄も軽減された。また、塗膜の溶解も塗装時のオーバーラップを反映したスプレーパターンの発現により目視にて容易に観察され、ユーザーにも好評を得ている。

### 4.3 世界の船舶塗料の防汚に関連する主な規制の現状

#### 4.3.1 防汚薬剤

防汚薬剤の規制はEUのBPD (The Biocide Product Directive) で検討されていて、認可されそうな候補として10種(無機化合物3種、有機化合物7種)が上がっている。その中には銅化合物で現在の防汚塗料における主要防汚薬剤で

ある亜酸化銅 ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) も含まれている。予定より遅れてはいるが、今年から来年に掛けて認められる動きとなっている。

#### 4.3.2 AFS条約の履行

AFS条約 (International Convention on the Control of Harmful Anti-Fouling Systems on Ships, 2001; 2001年の船舶の有害な防汚方法の規制に関する国際条約) によって、上述のTBT共重合体に代表される有機錫化合物を含有する防汚塗料の塗装は禁止されているため、新たに塗装される防汚塗料に有機錫化合物が含有されていないことを証明する公的な認定書の携帯が対象となる該当船へ義務付けられている。

#### 4.3.3 大陸間生物移動禁止

現在、ある地域で船舶が荷揚げした際、船体重量が軽くなり船体の安定性を欠くため、荷揚げした地域で海水をそのままバラスタタンクに引き入れ、船の安定性を確保して他地域に運航し、他地域で荷積みして船体重量が重くなる際、荷揚げ時に他地域でバラスタタンクに引き入れていた海水をそのまま排出している。その海水を一般にバラスタ水と呼んでいる。

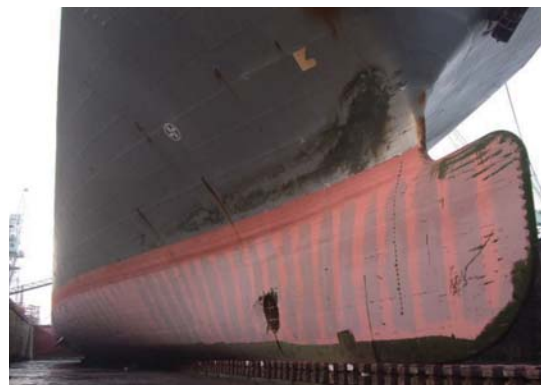
しかしながら、それでは荷揚げ地域の手付生物を他地域での海水排出により移動させていることになるため、バラスタ水の取り扱いとして、今までの単純放出ではなく、バラスタタンク内の手付生物をろ過による完全除去か紫外線照射、衝撃付与などの方法で死滅させてから排出させる検討ならびに規制が論議されている。

また、船体の外側没水部 (いわゆる船底部) への生物付着が起こったままの船舶を世界の地域に寄港させれば、そこで新たな付着生物の幼生放出が起こり、大陸間の生物移動を助長することになるため、それを防止するための規制がIMO (International Maritime Organization: 国際海事機関) で検討されている。

その方策の一つが、船体表面に生物の付着を起こさせない良好な防汚塗料の認定化である。



VLCC (Very Large Crude Oil Carrier: 超大型石油タンカー)  
29ヶ月就航後



PCC (Pure Car Carrier: 自動車運搬船)  
29ヶ月就航後

図3 「タカタ クォンタム」を塗装した船

## 5. 加水分解型防汚塗料の開発の視点

加水分解型防汚塗料の開発において技術的に重要な要素は、防汚性能を発揮し得る定常的な防汚薬剤の徐放であり、その適正な徐放を可能とする加水分解性樹脂の均一な消耗性の確保である。概ね初期防汚力が強すぎるものは持続性が得られない。それは塗膜中に含有される防汚薬剤量が膜形成条件から限定され、現状期待される3～5年の連続運航期間を網羅できないためである。逆に初期防汚力が生物付着に抗し得ない程度の防汚薬剤を如何に均一に放出させる場合には、絶対的な防汚力を発揮できない以上、意味が無い。長期間 (Long Life) と防汚力 (Power) の一見相反する機能を同時に発揮させてはじめて防汚塗料は意味のあるものとなる。

## 6. 次世代型防汚塗料に求められる要素

今後の課題として、生物の忌避作用をより意識して、防汚薬剤の放出を低減し、海洋への負荷を回避することは必須である。また、可能な限り、環境負荷のない脱防汚薬剤型への志向することも重要となる。一方、同時に防汚性能の品質低下は燃費増大および炭酸ガス、 $\text{NO}_x$ や $\text{SO}_x$ の排出を増加させる最大要因であることから市場に受け入れられないのも事実である。今さかんに燃費低減効果を発揮して経済性と環境負荷低減が可能との謳い文句が喧伝されているが、防汚性能を低下させては全く意味の無いものとなる。したがって、上述のIMOが求める良好な防汚塗料の機能に対する規定化への動きに連動するものだが、防汚性能の確保は最大の開発命題となる。

現在、無毒型防汚塗料として市場に展開されているシリコン系防汚塗料は、素材が持つ表面特性のみを利用したものであるが、何れも現状の5年仕様に対して十分な再現性のある効果を発揮しているとは思われない。今後さらに長期の7.5年仕様も求められる状況のもと、真の次世代型防汚塗料となり得るか否かを技術的に見極めると同時に、新たな視点に立って次世代型防汚塗料の開発を志向する思いを、その可能性の芽を幾分は感じながら、強くしている。それが技術の世界に身をおく人間の責務と喜びと考えている。