マグロの皮膚に学ぶ低摩擦船底防汚塗料

山 盛 直 樹^a

^a 日本ペイントマリン(株)(〒572-8501 大阪府寝屋川市池田中町 19-17)

Low Friction Anti-fouling Coatings, Learnt from Tuna Skin and Developed by Bionimetic Technology

Naoki YAMAMORI^a

^a Nippon Paint Marine Coatings Co., Ltd. (19-17, Ikeda-nakamachi, Neyagawa-shi, Osaka 572-8501)

Keywords : Biomimetic, Hyrodogel, Antifouling-Coatings, Low Friction

1. はじめに

アオノリ、シオミドロなどの藻類やフジツボ、ムラサキイガイなどの動物類などの付着生物が海洋を航行する船舶に付着すると、航行する船舶の海水面との摩擦抵抗を増加させ、運航スピードの低下や運航に必要な燃費の増大など多大な影響を与える(図1)。これらの付着生物は経済上の理由から汚損生物といわれ、生物学的意味はない。この付着生物は、そのライフサイクルの一部もしくは大半を、基盤へ固着した形で成長する。付着生物の繁殖には、基盤への付着が必須であり、付着することなしには子孫を残すことができない。今までの船底防汚塗料は生物付着による燃費増加を防止する目的で使用されていたが、近年、積極的に燃費削減を狙った船底防汚塗料が出現した。

ここでは、船底防汚塗料の技術と、生物の機能にヒントに開発した新規な低燃費型船底防汚塗料について紹介する。

図1 船底部に付着した緑藻類

2. 船底防汚塗料の歴史

人類は昔から海との関わりの中で船を利用してきた。16世紀の大航海時代になると、太平洋に長期間航海に出ようになり、これら付着生物の問題が一層クローズアップされ、船体に銅板を貼る船も出現した。19世紀になると、木造船から鋼鉄船に移るにともない「船底防汚塗料」が開発され、戦後、合成樹脂の進歩とともに性能が飛躍的に向上した。初期の船底防汚塗料の組成は、海水に対し不活性なバインダーとなる樹脂に、生物付着を防止するための化合物(防汚剤)を混合したものを基本としていた。1970年代になると、有機スズ化合物を組み込んだ樹脂をバインダーとする自己研磨型船底防汚塗料(SPC: Self-Polishing Copolymer)が出現した。これは海水に対して活性な樹脂を用いることで船舶が航行するにつれ塗膜表面の凸部が研磨され、塗膜の表面粗度が低下し燃費低減につながる(自己研磨作用、図2)。これは、防汚性能を有する有機スズ部が加水分解を受け、海水中に防汚剤を徐々に溶出させ、同時に加水分解を受けた樹脂が水溶性になり海水に溶出する(図3)。この作用で自己研磨性が発現し、表面粗度の低下による低燃費効果に結びついた。有機スズを

図2 自己研磨作用

図3 加水分解型樹脂の溶出機構

用いた自己研磨型塗料は高い防汚性と省エネ機能で全世界で使用されるようになったが、イボニシなどの巻貝に生殖異常を引き起こすなどの海洋汚染が顕在化し、日本国内では1990年より規制、国際的にもIMO（国際海事機構）で2001年10月「船舶の有害な防汚方法の規則に関する国際条約」として採択され現在使用できない。しかし、日本で1990年代に世界に先駆けて銅や亜鉛を組み込んだ樹脂が開発され、現在では有機スズを含まない加水分解型の船底防汚塗料が主流となっている。しかし、これらの船底塗料はあくまで生物付着による摩擦抵抗（＝燃費）増加を防止することが主目的であり、研究対象はいかに長期間にわたり生物付着を防止するかにあった。

3. 生物の知恵に学ぶ低摩擦塗料の開発

このように、船底防汚塗料の技術は付着生物との知恵比べで発展してきた。船舶が海洋を航行する際、種々の抵抗を受けるが、そのうち海水と接する船底部分の表面摩擦抵抗の割合が最も大きく、船舶が受ける全抵抗の50～80％程度を占めると言われている。この摩擦抵抗を低減することは、船舶の燃料消費の低減、排出される炭酸ガスの削減につながることから、この摩擦抵抗を低減しようという試みが以前から行われてきた¹⁾。

海洋生物が高速で泳ぐことは早くから知られ²⁾、イルカなどの哺乳類、マグロやサメなどの魚類、ペンギンなどの鳥類は、進化の過程でより速く、より効率的に少ないエネルギーで遊泳する方法を獲得してきたと考えられる。このような生物が進化の過程で獲得してきた知恵を塗膜に応用できれば、エネルギー消費を抑制することができる。生物が進化の過程で身につけた知恵を塗料に応用できれば画期的な低摩擦塗料が実現できる。

ペンギンは羽毛中に空気を溜め込み、この作用で摩擦抵抗を下げていていると考えられている。この応用例としては船体から空気泡を放出し摩擦抵抗を下げる船舶が出現した。また、サメはサメ肌と言われるように、表面がザラザラしており、このザラザラ表面で摩擦抵抗を下げていている。サメ肌水着が一世を風靡をしたことは周知の通りである。

イルカが海中を高速で泳ぐことは昔から知られていたが、1938年、 그레이の報告によれば、イルカは自身が持つ筋肉、自身が受ける抵抗からは想像できない速度で泳いでいるというのである。この報告以降、この現象は 그레이のパラドックスと呼ばれ、これに触発された様々な研究が行われ、数々のメカニズムが提唱されてきた。しかしながら、そのメカニズムに関しては、未だ明確に解明されていない^{3),4)}。

マグロやカジキなどの大型の魚類の瞬間的な速度は、時速100 kmを超えとも言われている。このような高速で海水中を遊泳するためには、これら魚類に流線型の体系や、推進力の源となる筋肉の生理的なメカニズムが大きく関与しているが、さらに体表の表面状態や表面に存在する物質が、摩擦抵抗を低減している可能性も考えられる。

ある種の高分子ポリマーや界面活性剤を添加した溶液により、流体の抵抗が低減することが知られている（トムズ効果）。この現象はポリエチレンオキサイドなどの合成高分子だけで

はなく、マグロやカジキではないドジョウなどの魚の体表からの分泌物である粘液でも確認されている³⁾。

このような粘液状の物質は、粘性のある糖や蛋白質の複合体で、水と非常に親和性の高い化合物であると考えられる。

我々は、これらの生物からヒントを得て、水と新和性の高いヒドロゲル構造を持つ物質に注目した（図4）。ヒドロゲルとは、水中で高分子が相互作用し、共有結合や非共有結合で架橋された網目状の構造を持つ物質で、一般的には、タンパク質や多糖類のゼリー、寒天やこんにゃくのような材料である。このヒドロゲルを特殊技術でもって塗膜中に組み込み、従来の船底塗料より摩擦抵抗を低減する船底防汚塗料（LFC：Low Friction Coatings, 低摩擦塗料）を開発した。このLFCは塗膜中に組み込まれたヒドロゲルの作用により、塗膜表面に存在する水を捕捉する層（Water Trap Layer）を形成して塗膜面の表面粗さを減少させ、水との摩擦抵抗を減少させているのではないかと考えている⁵⁾。

4. 低摩擦塗料の性能試験

このLFCの性能を把握するため、数式模型船での検証試験を実施した（図5）。数式模型船として全長3 mのWigley船型3隻〔①無塗装船（FRP材質）、②SPC塗装船（RzJIS = 160 μm ）、③LFC塗装船（RzJIS = 153 μm ）〕を用い、曳航試験（水槽長：100 m、大阪大学にて実施）で全抵抗を測定した（図5）。LFCはSPCに比べ、全抵抗で約4％低下した⁶⁾。

また、神戸大学の練習船：深江丸（449 t）を用い、瀬戸内海の播磨灘西部：播磨灘航路第1号から第4号灯浮標間（航程16.0 海里的往復路）での定点実験でもSPCに比べて6％以上の燃費低減効果を確認できた（表1）⁷⁾。これらの知見をもとに従来の自己研磨型塗料（SPC）を上回る低燃費型船底防汚塗

図4 ヒドロゲル構造による低摩擦のイメージ

図5 曳航水槽を用いた模型船試験結果

表 1 深江丸での検証結果(定点実験)

塗料の種類	平均速力(年間)		燃料消費量		試験回数	平均速力 上昇率	燃料削減 率
	Knt	比率	量	比率			
従来型(SPC)	12.41	100.00	242.06	100.00	24 往復	(基準)	(基準)
低摩擦型(LFC)	12.57	101.29	226.99	93.77	23 往復	1.29%	6.23%

料(商品名：LF-Sea)を市場に導入し、すでに 600 隻以上の船舶に塗装され、低燃費効果を検証している。我々はこの LFC の知見をもとに、さらに低摩擦を目指した塗料の開発にも取り組んでいる。

5. おわりに

低摩擦型船底防汚塗料：LFC は 2010 年に第 7 回エコプロダクツ大賞審査委員長特別賞を受賞した。この受賞を機に LFC がより多くの船舶に塗装され、炭酸ガス削減と地球温暖化防止に寄与できることを望む。

(Received October 15, 2012)

文 献

1) 山盛直樹; 表面科学, **27**, 669 (2006).
2) 種子田定俊; 日本物理学会誌, **28**, 552 (1973).
3) 永井 實; イルカに学ぶ流体力学, (オーム社, 1999).
4) 小濱泰昭; バリティ, **17**, (10), 39 (2002).
5) 山盛直樹, 島田 守; *TECHNO-COSMOS*, **22**, 30 (2009).
6) 富永 宏, 山盛直樹, 島田 守, 竹本 勲, 荒木英治, 黒川哲次, 先田仁志, 松岡 宏, 戸田保幸, 鈴木敏夫; 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第4号, p.301 (2007).
7) 矢野吉治, 戸田保幸, 山盛直樹; 日本航海学会論文集, **125**, 221 (2011).