

特集

海洋生態系における 防汚物質の生物影響

●文・写真:大地 まどか (東京農工大学大学院)

1980年代、船や漁網などへの付着生物による汚損防止のために使われてきた有機スズ化合物による生物影響は大きな社会問題となりました。国際的に使用が規制されて10数年と聞きますが、果たしてこの問題は解決したのでしょうか。今号では、防汚物質による生物影響の実態と今後の課題について、東京農工大学の大地まどか先生に解説いただきました。

地球環境と海洋

水惑星といわれる地球では、その表面の約70%を海洋が占めており、地球全体の環境に大きな影響を与えています。地上では、海洋と大気は一体となって機能し、その間に物質やエネルギーの循環があります。海洋には海流が存在し、大気とともに、地球上の物質やエネルギーの循環に重要な役割を果たしています。海洋は陸域と接し、主に水循環を通してつながっています。また、海洋には陸域と同様に、豊かな生態系が形成されています。地球史の中で、海洋や生物を含む地球環境は、その複合的な構成要素の間でバランスをとりながら、恒常性を維持してきました。

しかし、近年、地球規模で様々な海洋環境問題が発生しています。海洋環境問題の中でも、人間活動に由来する人工化学物質は、海洋生態系に多くの負の影響を及ぼしています。

人工化学物質による海洋環境問題

人工化学物質には、重金属や有機塩素系化合物など、多様な種類が存在します。人間活動により使用されたこれらの人工化学物質は、川や地下水、大気経由で、最終的に海洋に到達します。また、海で使用される人工化学物質については、直接的に海洋環境に流入します。このように、様々な経路で最終的に海洋にたどり着いた人工化学物質は、海水中や海底の堆積物に広がっていきます。また、海洋には多種の生物が棲息して

おり、人工化学物質は海洋生物にも取り込まれていきます。微量でも毒性が高い物質や、体内のホルモンと類似した働きをもつ、いわゆる環境ホルモンとして機能する物質も多くあります。

こうした様々な人工化学物質のうち、「防汚物質」とよばれる物質についてご紹介します。

付着生物と防汚物質

海洋には、藻類や貝類などの付着生物とよばれる生物が存在します。付着生物は、船舶や海洋構造物などの海水に浸っている部分に付着する生活形態をしています。これらの生物が、船舶の浸水部分に付着した場合、船舶が航行する際に摩擦抵抗が生じます。それによって、船舶の航行速度が低下し、化石燃料の消費量が増加することにより、結果的に二酸化炭素などの温室効果ガス(GHG)の発生が増加します。さらに、船舶の底部に付着した生物が、航行先の海域に移入することによって、その海域の生態系の均衡が乱れるという、付着生物の越境移動による生態系攪乱の問題も発生します。そこで、化石燃料の消費量やGHGの排出量の増加など、多くの環境問題の発生の原因となる、船底などの浸水部分への生物付着を防止するために、防汚物質を含む塗料が世界的に開発・使用されてきました。

船底防汚物質の使用の歴史

船底防汚物質のうち、有機スズ化合物のトリブチルスズ

化合物(TBT)とトリフェニルスズ化合物(TPT)は(図1)、動植物に対する高い毒性と、溶出量の制御ができること、持続性も高いという点で、船舶や漁網に対して優れた防汚効果があります。そこで、これらの有機スズ化合物は、1960年代から世界的に広く使用されるようになりました。ところが、有機スズ化合物は、二枚貝のカキの形態異常(殻の肥厚)や、巻貝(新腹足類)の雌が雄化するなどの、いわゆる環境ホルモンとしての作用があることが、世界的に数多く報告されました。そこで、1980年代より、欧米など先進国を中心に、環境目標値の設定や使用の規制が行われました。日本では、「化学物質による審査および規制に関する法律(化審法)」によって、有機スズ化合物のTBTとTPTの使用が規制されました。その後、国際海事機関(IMO)によって、「船舶についての有害な防汚方法の管理に関する国際条約(AFS条約)」が2001年に採択、2008年に施行され、国際的に有機スズ化合物の船舶への使用が禁止となりました。

しかし、有機スズ化合物による汚染の問題は、その使用が禁止となった現在も続いています。過去に使用され、海底の堆積物に蓄積した有機スズ化合物は、その分解速度が遅いことから、海底の堆積物が二次汚染源となり、生態系を通じた再循環も懸念されています。現在も、有機スズ化合物は、沿岸域のみならず、外洋や深海に至るまで、地球規模で海洋に残留していることが明らかになっています。

有機スズ化合物の国際的な使用禁止に伴って、現在、有機スズ化合物に取って代わる、代替防汚物質が世界的に開発・使用されています。代替防汚物質として、亜酸化銅、イルガロール1051(2023年に使用禁止)、デオロン、シーナイン211、金属ピリチオン化合物(図2)などがあります。それらの海洋環境での汚染状況や生物影響についても研究が行われており、世界的に汚染が広がっていることや、毒性があることが明らかになっています。ま

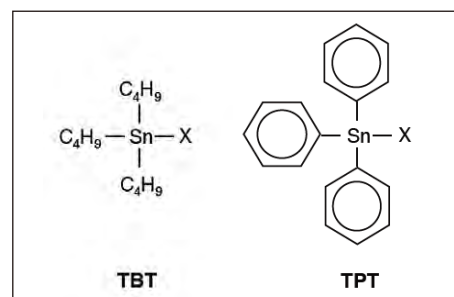


図1 有機スズ化合物

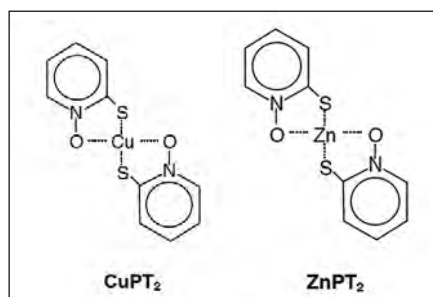


図2 代替防汚物質の一種である金属ピリチオン化合物

た、代替防汚物質については、除草剤などとして陸域(淡水域)で使用される物質もあります。そこで、沿岸生態系、さらには水圏生態系全体の保全を考える上で、防汚物質の水圏における実態把握と生物影響の調査は重要です。

これまで著者らは、海草、微生物、小型甲殻類、魚類などの様々な栄養段階の生物を対象に、有機スズ化合物および代替防汚物質の生物影響評価と汚染実態調査を実施してきました。ここでは、著者らがこれまで取り組んできた小型甲殻類と海洋微生物に対する防汚物質の生物影響の研究について紹介します。

有機スズ化合物による生物影響

有機スズ化合物はスズを中心に、アルキル基などが共有結合した有機金属化合物です。毒性が高いTBTは、ジブチルスズ(DBT)、モノブチルスズ(MBT)と分解し、最終的に無機スズになります。甲殻類に対するTBTの毒性は、重金属よりも高く、PCBなどの有機塩素系化合物と同程度であり、有機スズ化合物は海洋に存在する人工化学物質の中でも毒性が高い物質であるといえます。有機スズ化合物などの人工化学物質は、主に、経鰓濃縮と経口濃縮という2つの過程で、水生生物の体内に取り込まれます。TBTなどの有機金属は、免疫毒性、神経毒性、遺伝毒性、肝臓毒性などの数多くの毒性を示します。例えば、沿岸生態系の生物のうち、TBTの小型甲殻類の生物影響として、ミジンコ類では遊泳阻害、カイアシ類では遊泳阻害や産卵障害、ヨコエビ類では忌避行動、十脚類では脱皮、足の再生速度の遅延などがみられ、低濃度の暴露でもTBTは海洋生物に高い毒性を示します。

生態系内の有機スズ化合物の蓄積特性として、岩手県大槌湾をモデル海域として、様々な栄養段階の生物における有機スズ化合物の濃度が調査されています。有機

スズ化合物は、海水から生物に数千～数万倍に濃縮されますが、栄養段階の上昇に伴う濃縮はみられず、食物連鎖を通して生物濃縮する重金属や有機塩素系化合物とは異なる蓄積傾向となっています。しかし、有機スズ化合物は、低次の生物の小型甲殻類のワレカラ類に高い濃縮がみられました。

そこで、TBTの代謝能力と毒性について、本生物種(写真1)に着目して生物影響評価の実験を行いました。その結果、この小型甲殻類は、沿岸生態系の他の生物生物と比較して、TBTの代謝能力が低く、TBTに対する感受性が高い(毒性の影響を受けやすい)生物であることが明らかになりました。さらに、本種の生活史を卵発生期(5日間)と孵化後(50日間)に分けて、それぞれTBTを低濃度で暴露しました。その結果、生残、成熟および生殖に影響を及ぼすことが分かりました(図3)。特に、卵発生期の暴露で特有の現象として、雌の比率が高くなり、TBTが性比を攪乱することが示されました(図4)。一方、孵化後の暴露特有の現象としては、成長と形態形成に影響を及ぼすことが分かりました。

これまでに報告されている性の攪乱についての野外調査では、ニジマスやワニの雌化など、多くが女性ホルモンの作用を示す化学物質とされており、性ホルモンレセプターを介したものです。TBTでは、巻貝(新腹足類)の雌の雄化が知られており、核内受容体の一種のレチノイドX受容体が深く関わっているといわれています。小型甲殻類のワレカラ類でみられた雌の比率の増加については、TBTが性決定機構を攪乱した可能性が考えられます。また、実際にこの小型甲殻類の野外の個体群減少も報告されています。食物連鎖の低次に位置する小型甲殻類の個体群変動は、これらを捕食する高次の消費者の生残にも影響し、沿岸生態系の均衡にも影響を及ぼすと考えられます。種の存続に影響するTBTの性の攪乱機構は、今後、分子生物学的・内分泌学的手法による解明が必要です。

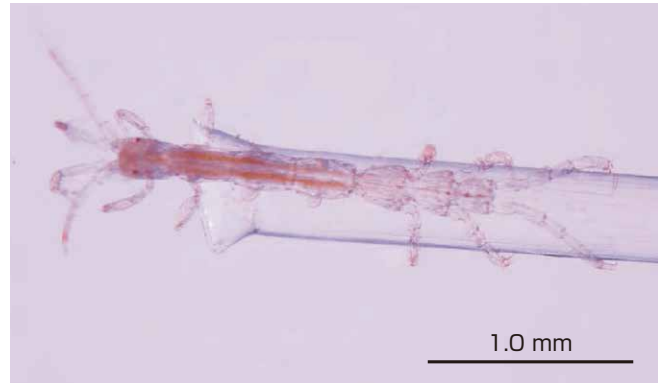


写真1 小型甲殻類のワレカラ類の幼体

代替防汚物質による生物影響

海洋微生物(バクテリア)は分解者や一次生産者として、沿岸生態系で重要な生態学的地位にある生物であり、微生物における影響が生態系全体へ及ぼす影響は大きいと考えられます。微生物は環境変化に対して素早く応答するため、微生物の応答を調べて生態系のストレスを初期の段階で把握する手法が存在します。しかし、人工化学物質に対する海洋微生物の感受性についての研究は少ない状況です。そこで著者らは、海洋微生物を対象に、防汚物質が海洋微生物の増殖に及ぼす影響に焦点を当て、生物実験を行いました(写真2)。

暴露実験では、有機スズ化合物のTBTとTPT、代替防汚物質の金属ピリチオン化合物とそれらの分解産物を、海洋微生物に7日間暴露し、増殖への影響を調べました。その結果、代替防汚物質の金属ピリチオン化合物は、使用禁止となった有機スズ化合物と同様の毒性があることが明らかになりました。さらに、金属系ピリチオ

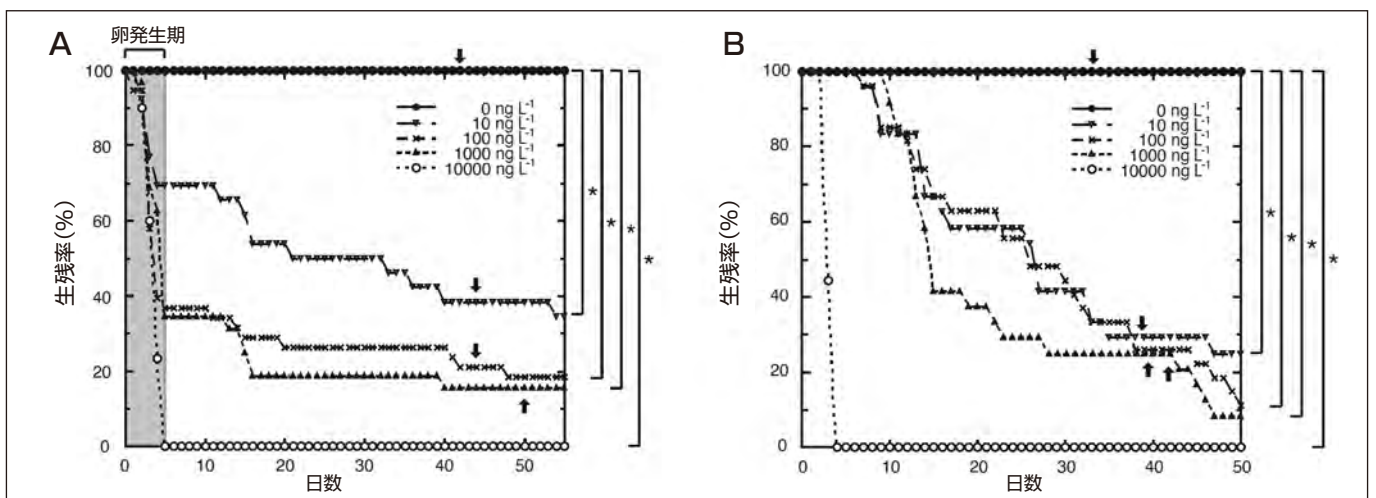


図3 卵発生期(A)および孵化後(B)にTBT暴露した小型甲殻類(ワレカラ類)の生残率の変化
矢印は成熟到達日を示す Log-rank test, * $p < 0.0001$

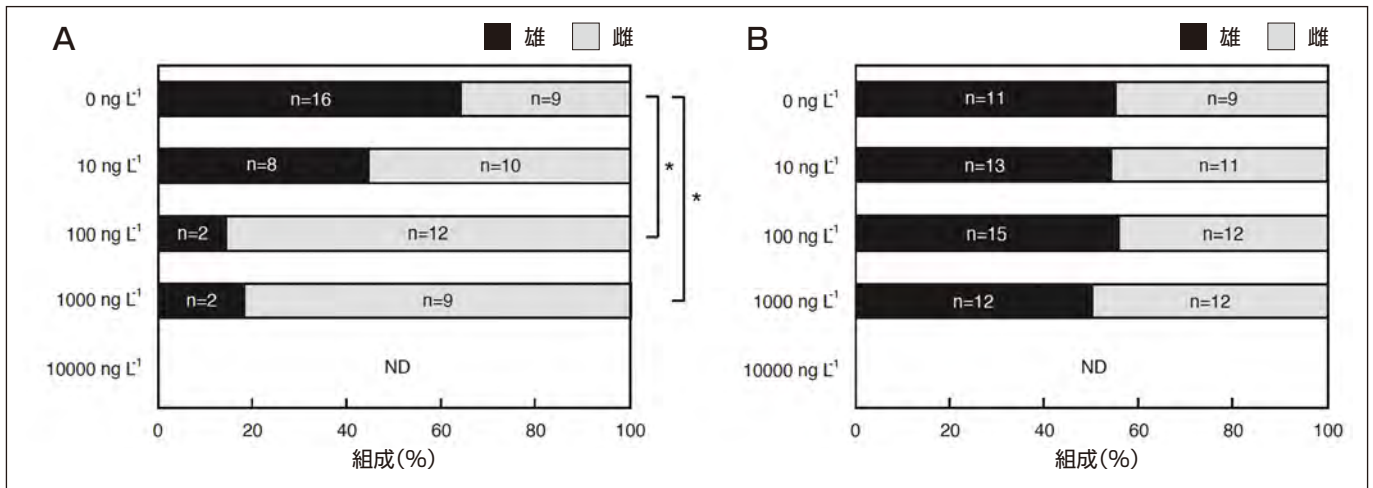


図4 卵発生期(A)および孵化後(B)にTBT暴露した小型甲殻類(ワレカラ類)の性比
 ND:データなし(全個体死亡のため) Chi-squared test, * $p < 0.05$



写真2 海洋微生物のコロニー形成

ン化合物の分解産物の中には、親化合物やTPTと同じかそれ以上の毒性があるものがありました。これは、現在、海洋環境に棲息する微生物が、有機スズ化合物のTBTやTPTと同様に、金属ピリチオン化合物とその分解産物による影響を受けている可能性があることを意味します。

今後の課題

有機スズ化合物は国際的に使用禁止となりましたが、現在も有機スズ化合物は世界の海洋に残留し、地球規模の汚染と生物影響が懸念されます。海底の堆積物中に長期間残留する有機スズ化合物については、生態系を通じた再循環も考えられます。近年、有機スズ化合物の代替防汚物質の開発・使用が進み、海洋への残留や生物影響も報告されています。現在、水圏には新旧の防汚物質が混在し、それらの生態系における複合影響も懸念さ

れます。水圏生態系全体を保全するために、今後も引き続き、新旧の防汚物質の水圏の汚染実態を継続的に調査するとともに、生物影響の解明が必要と考えられます。

このように、防汚物質は、生物影響などの問題を引き起こすことが多くの研究から示されていますが、防汚物質を使用しない場合、GHGの排出量の増加や、生物の越境移動による生態系攪乱などの地球規模の環境問題が生じます。船舶は国際輸送手段として重要であり、現在、世界貿易量の増加に伴い、国際海運によるGHG排出量も増加しつつあります。2050年のカーボンニュートラルの実現のために、海運を含めた様々な産業でGHGの排出削減が求められています。したがって、燃費性能の向上、ひいてはGHG排出の削減のためにも、防汚物質の存在は、地球環境を考える上で重要であるといえます。法規制によって、それらの使用についても管理が進むとともに、近年、海洋環境への負荷を少なくする、環境に優しい防汚物質や、防汚物質を使用しない防汚システムの開発も進んでいます。

今後、地球環境全体の保全のために、防汚物質の利点と欠点を踏まえつつ、海洋環境の均衡を考えながら、防汚システムに関する研究が進展することが望まれます。

大地 まどか おおじ・まどか

東京農工大学大学院准教授。
 東京大学大学院農学生命科学研究科水圏生物学専攻博士課程修了。博士(農学)取得。東京大学海洋研究所研究機関研究員、日本学術振興会特別研究員、米国メリーランド大学環境科学センター博士研究員、東京農工大学特任助教授、特任准教授を経て現職。日本マリンエンジニアリング学会海洋環境保全研究委員会委員長。専門は海洋環境学。

