

閉鎖性海域の生物付着特性に着目した海水浄化に関する研究

橋本宏治*・金子文夫*・勝井秀博**

1. はじめに

東京湾や大阪湾等の大都市を後背地に持つ閉鎖性海域では、水質は依然として改善されず、さらに生息環境の変化(干潟、岩礁等→鉛直コンクリート護岸等)により、環境耐性の強い生物が優占し単純な生態系が形成されている。わずかに残った干潟には豊富な有機物を餌に多種多様な生物が生息し、閉鎖性海域の大きな自浄機能を担っている。著者らは、このような閉鎖性海域の生物生息環境に注目し、これまでに生物付着基盤として多孔質コンクリート等を用いた実験から生物付着特性等の知見を得ている。ここでは新たに軽くて取扱が容易で、接触面積が大きくとれる高分子材料(繊維)を用いて生物の付着特性を利用した海水浄化について検討した。本論文は、各種形状の繊維を用いて実海域における生物付着特性を把握し、優占種であったムラサキガイ(*Mytilus edulis*)の変遷から富栄養化の要因の一つである窒素の除去方法の検討を行ったものである。

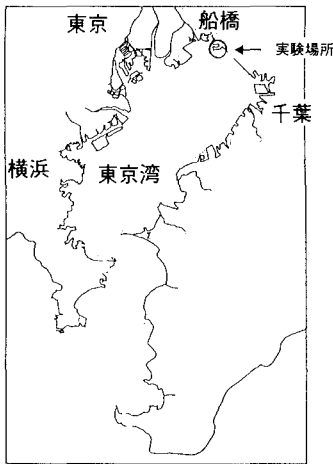


図-1 実験場所

2. 実験方法

実験は、東京湾の最奥部に位置する千葉県習志野市の護岸近傍で行った(図-1参照)。

実験に使用したサンプルの概要を表-1に示す。各サンプルの形状は1(ひも状)を除いて幅約5cm、厚さは、1(ひも状)が直径で約4mm、2(モール状)がモール部で約1mm、3(布状)が約0.4mm、そして4(ハニカム状)、5(立体網状)がいずれも内部に空隙を持ち4で約6mm、5で約30mmである。

これらのサンプルを護岸から5m程度の位置に、長さ50cmに切断したものを干満にともない上下するように海面から懸垂した。設置期間は平成5年4月27日から11月25日とし、5(立体網状)のみ9月14日から10月18日の期間追加した。4月(春)に設置したものは約1ヵ月後の6月7日(42日目)、約4ヵ月後の8月18日(114日目)、約7ヵ月後の11月25日(213日目)の3回、9月(秋)に設置したものは約1ヵ月後の10月18日(35日目)の1回実海域から引き上げた。そして代表的な生物付着状況を把握するために海面から約20~35cmの位置で長さ15cmに切断し、一旦中性ホルマリン濃度10%の人工海水に付着生物を固定した。付着生物の分析は1mmメッシュ上の残査を対象とし、種の同定、個体数の計数および湿重量の測定を行った。

表-1 サンプル概要

番号	形状	模式図	ファイバーの直径	備考
1	ひも状		0.023mm	直径2.2mmの繊維4本で構成
2	モール状		0.023mm	中心部から左右に1cm当たり約45本の繊維を配置
3	布状		0.007mm	短繊維紡績糸の丸編地
4	ハニカム状		0.008mm	ダブルラッセル編み
5	立体網状		1.4mm	空隙率約95%

* 正会員 大成建設(株) 技術研究所生物工学研究グループ

** 正会員 工博 大成建設(株) 技術研究所土木構造・水理研究グループ

3. 実験結果・考察

(1) 実験期間中の水質概況

図-2 に実験期間中(5月~10月)の海水の水質分析結果を示す。実験期間中の海水の水質概況は、実験を開始した5~6月にかけて赤潮が頻繁に発生した。また、青潮は6月下旬から7月上旬にかけて視覚的に確認できるものが3回発生した。その後7月に赤潮が2回、8月上旬には青潮が1回発生した。

環境基準値に比較すると、COD(化学的酸素要求量)は、5月では3.0 mg/lを上回りC類型(環境保全)に、それ以降は3.0 mg/l以下となりB類型(水産2級)に該当した。また、全窒素は、8~10月では0.6~1.0 mg/lとなりC類型となったが5~7月では1.0 mg/l以上となった。全リンは5月で0.09 mg/l、9月で0.07 mg/lとC類型となったが、他の時期では0.09 mg/lより高くなった。

以上より、実験期間中の海水の水質は、春から初夏(5~7月)にかけてCOD値が高く、赤潮が発生したように水質は悪化したが、夏以降は幾分回復した。ただし、全窒素、全リンは期間を通して高く富栄養化状況であると

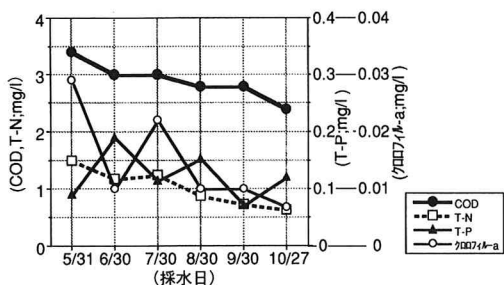


図-2 海水の水質分析結果

言える。

(2) 合成高分子材料の構造形態による生物付着特性

図-3 に各浸漬期間でのサンプル15cmあたりの付着生物状況を示す。湿重量、個体数については各サンプルの構造形態が異なり単純な比較が難しいので、付着生物の成長度合をみるために1個体平均湿重量に換算した結果を図-4に示す。約1ヵ月後には春に設置したサンプルはムラサキガイの稚貝が大量に付着し、秋に設置したサンプルより個体平均湿重量は約4分の1となった。約4ヵ月後の8月には1ヵ月後に比べ個体平均湿重量は30~100倍に増加した。この大部分はムラサキガイの成長量である。そして約7ヵ月後には1(ひも状)で約3%、5(立体網状)で約30%、他のサンプルで15~20%に減少した。これは8月以降に付着していた生物が脱落したことが考えられる。5(立体網状)の減少度合は比較的少なく、生物の脱落が少なかったといえる。

種数(図-3)についてみると、春に取り付けたサンプルには約1ヵ月後の6月に8~15種となり、5(立体網状)が15種と最大であった。約4ヵ月後の8月には12~18種と1ヵ月後と大きな違いはなかった。また、サ

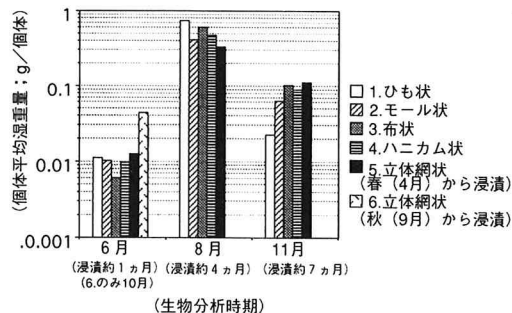


図-4 各サンプルの浸漬期間別の個体平均湿重量

浸漬期間	1ヵ月	2ヵ月	3ヵ月	4ヵ月	5ヵ月	6ヵ月	7ヵ月	8ヵ月	9ヵ月	10ヵ月
湿重量(g)	4.7	48.5	4.1	7.9	55.3	277.7	836.5	877.8	739.0	741.5
種数(種)	8	13	8	10	15	16	12	15	18	12
個体数(体)	420	4,705	677	799	4,455	380	2,042	1,440	1,560	2,242
10月	1,815	5,832	988	1,286	3,083	1,464				

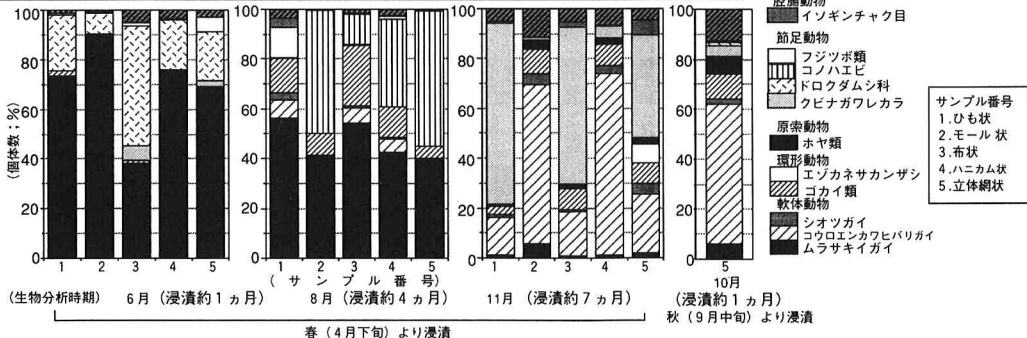


図-3 各サンプルの浸漬期間別の付着生物の湿重量、種数、個体数、および種の構成割合

ンプル間では2 (モール状) と5 (立体網状) が種数12種と他に比べて少なく, ムラサキガイとコノハエビ (*Nebalia bipes*) で9割以上を占めた. 約7ヵ月後の11月には20~29種とこれまでの約2倍の種数となり, 1 (ひも状) と3 (布状) ではクビナガワレカレ (*Caprella equilibrata*) が, 2 (モール状) と4 (ハニカム状) ではコウエンカワヒバリガイ (*Limnoperna fortunei kikuchii*) が約6~7割を占めた. なお, 5 (立体網状) には多くの種類の生物が混在した. また, 秋 (9月) に浸漬した5 (立体網状) では, 10月に外来種であるコウエンカワヒバリガイが出現し, 種数は28種と春 (4月) に比べて約2倍となった.

以上より, 合成高分子材料の構造形態による生物附着特性は, 内部に空隙を持ち比較的太い繊維で構成された5 (立体網状) が, 夏から秋にかけて附着生物の脱落が少なく, また附着生物も多様であった. このような構造形態は, 多様な生物を安定的に生息させるのに優れているといえる.

(3) 生物附着変遷

ここでは, 生物の変遷をより詳しく見るために5 (立体網状) の結果についてさらに考察した. 図-5にサンプル15cmあたりの附着生物湿重量の結果を示す. 春(4月27日) から浸漬したケースでは, 約1ヵ月後の6月に湿重量が約55gであったが, 約4ヵ月後の8月に約742gと約13倍に増加した. さらに約7ヵ月後の11月には約347gに半減した. また, 秋(9月14日) に浸漬したサンプルでは, 約1ヵ月後の10月に約65gとなり, 春に浸漬したサンプルとほぼ同程度の湿重量がみられた. 軟体動物のムラサキガイは, 6月と8月で全湿重量に占める割合が大きく, 6月で80%, 8月で99%を占めた.

次に, 図-3に示した各浸漬期間別の生物種の構成割合より, 春 (4月) に浸漬したサンプルについては, 湿重量でもみられたように6月, 8月にムラサキガイの割合が多く, 特に6月では約7割を占めた. 8月のみエビの原始的な仲間である節足動物のコノハエビ (体長5~6mm) が優占した. 毎年7~8月頃にかけて底層の貧(無)酸素水塊 (DO 1mg/l以下) が表層に湧昇する, いわゆる青潮が大規模に発生する. このため, 底泥中に生息するコノハエビは, 溶存酸素を求めて底泥中から大量に遊泳し始め, 実海域の表層付近に浸漬したサンプルに新たな生息場を求め附着したためと推定される. 一方, 11月には多くの種類の生物が附着する傾向がみられた. また, 秋 (9月) に浸漬したサンプルでは, 軟体動物のコウエンカワヒバリガイが約6割を占めた.

生物種と個体数の関係を図-6に示した. 春 (4月) に浸漬したサンプルについては, 6月に15種, 8月に12種と11月の26種に比較して少なかった. 個体数は, 6月

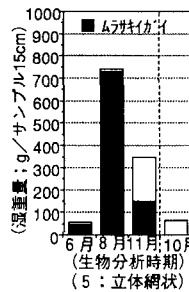


図-5 附着生物湿重量

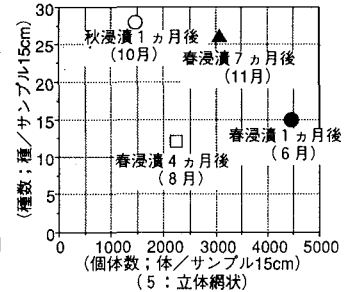


図-6 生物種と個体数の関係

に4455体と最も多く附着し, 8月に2242体と半減した後, 11月には再び3083体と増加した. 6月はムラサキガイが優占したため, 個体数は多くなったが種数は少なかった. 8月の個体数が少なくなったのは, ムラサキガイの個体数が約3分の1に減少したことによる. これは, 脱落したものと推定される. 秋 (9月) に浸漬したサンプルでは, 春 (4月) と比較して個体数は少ないが種数は約2倍の28種となり, 比較的多種多様な環境であったといえる.

高分子材料を附着基盤とした今回の実験から, 生物附着変遷をまとめると以下になる. 春にムラサキガイが優占的に附着し, 他の生物はあまり附着しない. 夏にかけてムラサキガイの成長が進み重量的に大きな割合を占めるようになり, 単純な生態系が形成される. 夏を過ぎるとムラサキガイが脱落し, 秋には多種多様な生物が附着するようになる.

4. ムラサキガイ (*Mytilus edulis*) の変遷

ムラサキガイは繊維状の海藻にまず附着し (第一次附着), ここで1~1.5mmに成長した後, ふたたび浮遊して (第2次浮遊期), 最終附着 (第2次附着) するとされている. 実験場所である東京湾の最奥部では, 前述したように護岸等の構造物にムラサキガイが優占する. そして, 単純な生態系になり, 見た目も悪くまた青潮等の影響によりそれらが死滅して, 腐敗, 分解に伴うDO消費などの原因ともなる. ここでは, ムラサキガイに注目し, 実験場所である東京湾の最奥部での附着変遷について検討した.

梶原 (1978) は横浜港, 藤田 (1970) は鹿児島港でのムラサキガイの成長過程を殻長で示している. 今回の実験で春 (4月) に浸漬したサンプルについて各浸漬期間に附着していたムラサキガイの殻長を図-7に示した. 殻長は各サンプルに附着していたものうち無作為に30体抽出し測定したものである. 殻長は, 平均ではほぼ横浜港や鹿児島港の場合と同じ成長曲線となった. 浸漬期間別にみても, 6月では5mm前後でほぼ同じ

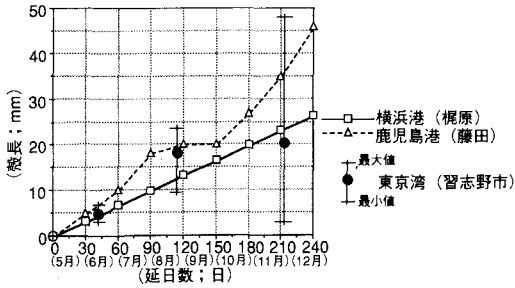


図-7 ムラサキガイの成長曲線

表-2 ムラサキガイの殻長と生育期間

殻長(mm)	生育期間 (4/27より)	着床時期		
		生物分析時期		
		6/7(42日目)	8/18(114日目)	11/25(213日目)
0~6	1ヵ月	5月	8月	11月
6~12	2ヵ月	—	7月	10月
12~18	3ヵ月	—	6月	9月
18~24	4ヵ月	—	5月	8月
24~32	5ヵ月	—	—	7月
32~38	6ヵ月	—	—	6月
38~46	7ヵ月	—	—	5月

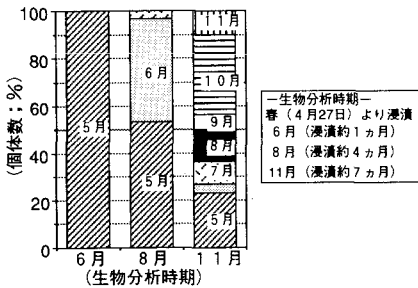


図-8 殻長によるムラサキガイの着床時期

であったが、8月では9.5~23.5 mmとややばらつきがみられ、11月には2.9~47.9 mmとばらつきが大きくなった。これは、浮遊稚貝がサンプルに付着した時期が異なることによると考えられる。

ムラサキガイは付着、脱落、死滅をその生活史のなかで行っている。そこで図-7での殻長について、今回の実験結果の最大値での成長曲線からその貝の殻長の長さを生育期間として算出した浮遊稚貝の着床時期を表-2に示す。また、生物分析時に付着していたムラサキガイの着床時期を図-8に示した。8月では5月および6月に着床した貝がほぼ半々となった。11月では、5月から着床していた貝は約4分の1となり、10月に付着した

ものが約3分の1を占めていた。期間で区切ると7月までに着床した貝はほぼ3分の1であり、約3分の2が脱落したものと考えられる。この原因は、この時期(6月下旬から7月上旬)に今回青潮が3回発生したことにより無酸素水による死滅、また7月ごろの貝の付着状況は、貝の上に貝が重なるようになっており自重により脱落にしたといえる。

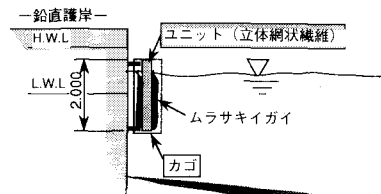
以上より、今回の実験で用いた高分子材料基盤上でのムラサキガイの春から秋にかけての生活史は、春付着した貝は成長を続け、初夏にかけては貝の上に次々重なるようにして増殖していく。夏になると自重や青潮の影響により脱落するものが半分以上となり、秋には、春から秋にかけてさまざまな時期に着床した貝が混在する状況になる。夏に脱落するムラサキガイは海底に蓄積し、その腐敗による酸素の消費等が起こっているといえる。

5. 浄化システムの試案

今回の実験結果および矢持(1994)の大阪湾での事例等より、東京湾に代表される閉鎖性海域の鉛直護岸では、春から秋にかけてムラサキガイが優占的に付着し、それが夏の青潮や自重により半分程度が脱落し、その後秋にかけて多様な生物が住む傾向がみられた。ここでは、ムラサキガイが優占種となっている現在の東京湾の生息環境、および現実の沿岸域が港湾施設として利用されていることを考慮し、この特性を生かした浄化システムについて検討した。

(1) 浄化システムの試案

システムの概要は、現在の鉛直護岸に今回の実験で使用したサンプル(5:立体網状)を図-9に示すように、海水の接触を考慮し護岸から0.5 m程度離れた潮間帯部分にカゴを取り付け、カゴに縦2 m、横2 m、厚さ50 mmのユニットを設置する。ユニットの取り付けは、3~4月の春に行う。その後ムラサキガイ等の付着が進み7月ごろにその付着量はかなり大きくなる。青潮の発生状況や付着の割合により7~8月にユニットを取り外して、系外に除去する。そして新たにユニットを設置する。秋からの生物の付着は比較的多様な生物種の付着が



春(3~4月)に取り付け、夏期(7~8月)にムラサキガイが大量に付着した浄化ユニットを取り外し、処分する。

図-9 浄化システムの概要

期待でき、多様な生物の食物連鎖による水質の浄化、また春から夏にかけてムラサキイガイが優占する悪い景観も改善される。そして春(3~4月)にユニットを交換しそれを繰り返す。

(2) 窒素除去量の試算

一連の実験結果から、上記のシステムを鉛直護岸に設置した場合、富栄養化の要因の一つである窒素をどの程度除去できるかを試算した。

まず、上記ユニットに付着するムラサキイガイの湿重量を5~7月の3ヵ月間実験データより算出した。

本実験データ：ムラサキイガイの付着湿重量 (w) は、

$$w = 730 \text{ gf} / (5 \times 15 \text{ cm}^2) \\ = 9.7 \text{ gf/cm}^2$$

ユニット1枚当たりの付着湿重量 (W) は、

$$W = 200(\text{cm}) \times 200(\text{cm}) \times w(\text{gf/cm}^2) \\ \approx 400,000(\text{gf/l ユニット}) = 0.4(\text{tf/l ユニット})$$

となる。ここで、このユニットを鉛直護岸1km(500ユニット)に設置するとすれば、湿重量で200tのムラサキイガイが回収できることになる。

矢持(1994)は、ムラサキイガイ湿重量より窒素の量を算出(湿重量：窒素量 $\approx 1:0.0085$)している。この値を浄化システムを1km設置した場合に適用すると、5~7月の3ヵ月間では約1.7tf/kmの窒素が除去できることになる。この量は、東京湾に1日に流入する窒素約320tfの0.5%程度だが、脱落による水質悪化防止およびムラサキイガイを代表とする貝類などによるろ過作用も期待でき、護岸周辺の透明度の向上にもつながり、トータル的にはその効果は大きいといえる。

6. まとめ

東京湾の最奥部で合成高分子材料を用いた生物付着等の実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

①今回の実験場所では、合成高分子材料の構造形態による生物付着特性から、内部に空隙を持ち比較的太い繊維で構成された構造形態が多様な生物を安定的に生息させるのに優れているといえる。

②高分子材料を付着基盤とした生物付着変遷は、春からムラサキイガイが優占し、夏には重量的に大きな割合を占める。夏前後にムラサキイガイは脱落し、秋には、生物種からみると多種多様な生物が付着するようになる。

③優占種であったムラサキイガイの春から秋にかけての生活史は、春付着した貝は成長を続け、夏前後に自重や青潮の影響により脱落するものが半分以上となり、秋には春から秋にかけてさまざまな時期に着床した貝が混在する状況になる。

④③の結果を基に、現在の鉛直護岸に今回の実験で使ったサンプル(立体網状)を潮間帯部分に春に取り付け8月に取り外して、系外に除去する方法を行った場合、富栄養化の要因である窒素の除去量は、1km(縦2m, 横2m, 厚さ50mmのユニット500枚)設置したと仮定すると窒素量で1.7tfと試算した。

今後ユニットの回収法、再利用法、ムラサキイガイの有効利用法等を検討して経済性のあるシステムを提案していく予定である。

なお、この実験は、マリンテキストラクチャー研究会(会長：酒匂敏次東海大学教授)の活動で行われたものである。この研究に当たって、林壽郎京都大学生体医療工学研究センター助教授(当時)に御助言頂いたことを付記し、謝意を表するものである。

参考文献

- 小倉紀雄編(1993): 東京湾—100年の環境変遷—, 恒星社厚生閣, pp. 54-59, 94-101.
- 梶原 武・浦野 徳・伊藤信夫(1978): 東京湾の潮間帯におけるムラサキイガイの付着, 成長, および死亡について, 日本誌 44 (9), pp. 949-953.
- 坂口勇(1986): ムラサキイガイの生態と付着機構に関する文献調査, 電力中央研究所報告, 17 p.
- 藤田征作・瀬戸口勇(1970): 鹿児島湾におけるムラサキイガイの生態について, 鹿児島水試事誌報.
- 矢持進(1993): 護岸構造物の優占生物が内湾の富栄養化に及ぼす影響, 生態系工学第13回シンポジウム講演要旨, pp. 29-42.