生物共生護岸における生息場としての機能の変遷

Change in the Habitat values on the Habitable Seawalls for Marine Organisms

田中ゆう子¹・鈴木秀男²

Yuko TANAKA and Hideo SUZUKI

A seawall construction project aiming at habitat creation in inner Tokyo Bay was described. In this project, various seawalls such as a rubble-type seawall with a slope and vertical seawall with precast plates were designed for providing a new habitat. The habitat values of the seawalls were evaluated on the basis of various ecological characteristics of attached organisms on the seawalls, which included biological interaction and its spatial and temporal changes.

1. はじめに

我が国の生物多様性国家戦略2010では、森、里、川、海のつながりを確保しつつ、海洋の保全・再生を強化することが基本戦略の一つとされる。最近、老朽化した護岸や耐震強化が必要な護岸などを生物共生護岸へ転換させ、海域環境の改善を図る取り組みが推進されている。生物共生護岸には、周辺海域における生物多様性や水産資源の保全、市民の憩いの場、環境学習の場などの機能が期待されている。これまでに生物との共生を目的とした環境創出についてはさまざまな報告があるが、護岸を利用して創出した生息場が、造成後長い期間を経てどのように変遷したのかを報告している事例はほとんど無い。

図-1に示す横須賀港内の埋立護岸では、1992～1994年度に、生物の生息・生育に配慮した構造を取り入れた生物共生護岸が造成された。生物共生護岸は、付着生物の

生息を促す凸凹のあるプレキャストコンクリート板を取り付けた図-2の護岸（以後、棚護岸）と図-3に示す海藻の繁茂を考慮して傾斜を設けた石積護岸の2タイプである。施工直後の1995～1996年にモニタリング調査を実施し、護岸の形状による効果の違いを定量的に比較した。その結果、プレキャスト板を設置していない直立護岸部や棚護岸ではムラサキガイが大量に付着し、生物多様性は低い状況にあった。一方、石積護岸では海藻が繁茂し、それにより多様な生物が生息し、良好な生物の生息環境として観察された。しかし、その後は継続して調査を行っていないかった。本研究では造成直後の調査から約15年を経て、生物共生護岸における形状の違いが生物群

図-1 調査護岸の位置

図-2 棚護岸形状 (a：プレキャスト板位置，b：正面・断面)

図-3 石積護岸の形状

集の変遷にどのような影響を及ぼしているのかを明らかにすることを目的とした。

2. 調査の方法

生物共生護岸の調査を2010年9月、2011年3月および6月に実施した（以後 造成から15年後調査）。異なる形状の護岸ごとに調査点を設け、付着生物の目視観察およびC.D.L.-1mとC.D.L.-3mの護岸前面における付着動物、海藻を採取（50cm×50cm）した。調査の対象としたのはプレキャスト板を付けていない「直立護岸」、柵状にプレキャストコンクリート板を取り付けた「柵護岸」、そして石積みの傾斜護岸である「石積護岸」の3つである。また、各生物の観察時に護岸前面の海域において水温、塩分、DOなどを同時に計測した。なお、施工直後の1995～1996年に実施したモニタリング調査（以後造成直後調査）では、1995年8月、10月、1996年1月、5月の計4回、造成から15年後調査と同様に異なる形状の護岸において付着生物の目視観察および採取、ならびに水質調査を行っている。

3. 調査の結果と考察

生物共生護岸の前面海域における水温とDOの調査結果を図-4に示す。下層におけるDOの季節変化は4.0～8.8 mg/Lであった。塩分は30～33psu、SSは1～4mg/Lで1996年の5月が最も高かった。

(1) 造成直後と造成15年後の生物種組成変化

直立護岸、柵護岸および石積護岸における付着動物の個体数、種類数、多様度指数についてC.D.L.-1mとC.D.L.-3mの平均を、造成直後ならびに造成から15年後について図-5～図-7に示す。造成直後の1995年8月は直立護岸部や柵護岸においてムラサキガイが全個体数の約6割を占め、他の季節と著しく個体数が異なった。ま

図-4 生物共生護岸前面海域の水質

図-5 護岸別付着動物の個体数変動

た、ムラサキガイにはヒトデが群がり、新たな生息場の出現という攪乱に対する応答の様子が捉えられた。しかし、造成から15年後の調査では1995年8月のように個体数で大差が生じる状況はなく、ムラサキガイが優占種になる護岸がほとんどなかった。むしろ、直立護岸、柵護岸ではムラサキガイに変わり、サンカクフジツボが優占種となるケースが増えた。図-5に示すように2011年3月はいずれの護岸でも個体数が多くなっているが、これはヨコエビ類の出現によるものである。しかし、造成から15年後では年間を通じて優占種となる付着動物は、いずれの護岸にもみられなかった。

次に図-6に示す種類数では、造成直後の調査では直立護岸や柵護岸が石積護岸に比べて相対的に小さい値を示したが、造成から15年後の調査では全体に高い値で推移した。この理由として石積護岸ではヨコエビ類やモエビ類、オウギガニ類など甲殻類の増加が影響している。直立や柵護岸においてもこれら甲殻類の増加が影響しているものの、石積護岸のように通年の出現は、みられなかった。

図-7はShannon-Wienerの多様度指数 (H') により算出したものである。図-7に示す多様度指数 (H') の変動では、造成直後および造成から15年後の調査ともに石積護岸の値が、3つの護岸の中で最も変動の幅が小さかった。

$$H'(S) = -\sum_{i=1}^S (ni/N) \log_2 (ni/N) \quad \dots\dots\dots (1)$$

S : 種類 ni : i 番目の種の個体数 N : 全個体数

これに対し、直立護岸や柵護岸では2010年9月には低い値を示したものの、2011年3月には石積護岸を上回る値

図-6 護岸別付着動物の種類数変動

図-7 付着動物の護岸別多様度指数の変動

を示した。さらに柵護岸では、2011年6月に再び低い値となり、最も変動が大きかった。2010年9月に直立および柵護岸で多様度指数 (H') が低かったのは、サンカクフジツボの全個体数に対する割合が52%~63%を占めたことがその一因と考えられる。さらに2011年6月に再び柵護岸で多様度指数 (H') が低くなったのは、ムラサキガイ、ミズヒキゴカイおよびヒメボヤの3種が全個体数の約6割を占めたことが、要因と考えられる。

(2) 生物群集の機能に着目した評価

柵護岸および直立護岸においては、これらの造成直後の1995年8月と2010年9月の多様度指数 (H') は大きな違いが無いように捉えられる。しかし、1995年8月に観られた「大量のムラサキガイとそれに群がるヒトデ」という特異な状況は2010年9月には認められなかった。そこで次に図-7に示す多様度指数が、どのような生物相互の関係に起因しているのかを、各護岸の付着動物をレイシガイなどの肉食者、ムラサキガイなどの懸濁物食者、ゴカイなどの堆積物食者、そしてヨコエビなどの腐食雑食者に分けて解析した。とくに1995年8月のムラサキガイとヒトデの関係が、新たな生物共生護岸創出という環境変化に対する応答として特徴的であったことから、ムラサキガイやサンカクフジツボなどの懸濁物食者と、ヒトデなど肉食者に着目した。同じ食性内の生物群は、同様の機能を有すると考えられることから、同じ機能を果たす生物群が多様であれば、護岸の生態系におけるその機能が維持されやすいと捉えた。懸濁物食者内の多様度指数の変化を相互に比較したものが図-8である。造成直後の調査では、柵護岸および直立護岸は石積護岸よりも低く抑えられている。これに対して、造成から15年後では石積護岸が柵護岸および直立護岸よりも徐々に低くなり、直立護岸では逆に高まる傾向がみられた。図-9に示すように懸濁物食者の全個体数に占める優占種の割合が、造成直後および造成から15年後の2010年9月にかけて高いことから、柵護岸および直立護岸における懸濁物食者の機能としては、まだ十分整っていないように捉えられた。次に肉食者の多様度指数の変化を図-10に示す。造成直後は肉食者としてはヒトデだけが出現していたため、柵護岸および直立護岸の多様度指数はゼロとなっている。しかしながら、造成から15年後の調査では柵護岸および直立護岸にレイシガイなどの肉食者が複数出現するようになった。とくに2010年9月以降継続してレイシガイなどがみられるようになった直立護岸では、図-7に示すように、2011年6月も高い多様度指数が維持されている。一方、石積護岸で懸濁物食者内の多様度指数が造成から15年後の調査で減少傾向にあったが、この点に関しては海藻との関係に着目した。図-11は海藻の種類数と湿重量の関係を示したものである。直

図-8 護岸別懸濁物食者内の多様度指数

図-9 懸濁物食者における優占種の割合

図-10 護岸別肉食者内の多様度指数

図-11 護岸別海藻の出現状況 (造成から15年後)

立護岸や柵護岸では出現しているものの、出現量としては石積護岸の0.1%~3.0%程度である。石積護岸では2010年3月から2011年6月にかけて増加傾向になっている。これに対し、図-8では同期間、懸濁物食者の減少が認められる。よって、直立護岸や柵護岸では海藻の出現がごく限られたものであるのに対し、石積護岸では海藻の繁茂が著しく、懸濁物食者との間に生息空間を奪い合う関係があったと考えられる。また、造成直後では石積護岸において懸濁物食者の多様性は高い。これは造成直

後に石積護岸に繁茂していた優占種が1年生のアカモクであったのに対し、造成から15年の調査では、優占種が多年生のマタボウに変わり、造成直後よりも年間を通じて懸濁物食者と生息空間において競合する関係にあったと考えられる。

次に生物共生護岸における形状の違いが生物群集の変遷にどのような影響を及ぼしているのかを分析した。

4. 生物共生護岸における機能の変遷

(1) 棚護岸の生息場としての機能の変遷

棚護岸では造成直後の1995年8月や10月に直立護岸と同様にムラサキガイの大量の発生により、図-7に示すように多様度指数は低く推移したが、その後は徐々に高まる傾向が捉えられた。造成から15年後では、ヨコエビ類の増加により、造成直後にはみられなかった高い多様度指数を2011年3月に示した。しかし、その後は低下し、調査対象の護岸の中でもっとも変動が大きかった。これについては、例えば懸濁物食者に着目した場合、図-8に示すように直立護岸に比べ懸濁物食者の多様性が低く、すなわち護岸の生物群集の中で懸濁物食者が果たすべき機能が相対的に低いため、環境変化への適応が不安定であったことが一因と考えられる。一方、肉食者は造成直後はヒトデの出現に限られ多様度指数がゼロであったが、造成から15年後の調査では、図-10に示すようにレイシガイやイボニシなどの出現により肉食者の多様性が高まる様子もみられた。よって、造成直後に比べ造成から15年後では、肉食者による懸濁物食者の分布拡大を抑制する機能は向上していると考えられる。また、付着面としては同じ垂直面でありながら、直立護岸と違う傾向を示した理由には、ムラサキガイなどの付着後の落下が、関係していると考えられる。直立護岸では付着したムラサキガイが成長し、重量が高まるとともに、重みに耐えかねて垂直面に付着していたムラサキガイの群れが海底に落下する。一方、棚護岸ではひさし状のコンクリート板により、同様に落下したムラサキガイがコンクリート板上に蓄積される。このため、ムラサキガイはコンクリート板上から、調査対象としている垂直面に再び生息範囲を拡大できるチャンスが生じる。したがって、直立護岸ではムラサキガイの付着が拡大しても、海底に落下することで、護岸の垂直面には他の生物が移入するチャンスが発生するが、棚護岸では直立護岸に比べ、長い期間ムラサキガイが生息しやすい環境が維持される。このため、他の生物の侵入が制限され、全体としての多様度指数が向上しにくい構造にあったと考えられる。

しかし、評価指標を変えると棚護岸には興味深い機能が認められた。付着動物の分析結果には反映されていないが、

棚護岸のコンクリート板の上には、15cm以上のマナマコに加え、5cm程度の小型のマナマコも確認されており、水産資源の保全に寄与することが捉えられた。また、コンクリート板上に落下したムラサキガイ等が堆積するということは、海底への有機物付加量を低減する役割も果たしていると考えられる。いずれも造成直後には捉えられなかった特徴である。生物共生護岸における生態系サービスを維持するためには、さまざまな角度からの評価が必要である。

(2) 石積護岸の生息場としての機能の変遷

石積護岸では他の護岸に比べると図-7に示すように、比較的多様度指数の変動が小さかった。この点については、2つの要因が考えられる。まず、1つ考えられることは、石積以外の護岸では造成直後は肉食者の出現がヒトデに限られ、多様度指数がゼロであったことから、懸濁物食者の分布拡大を抑制する機能が低かったと考えられる。これに対し、石積護岸では図-10に示すように造成直後および15年後とも常にほかの護岸よりも肉食者の多様性が維持されており、直立護岸や棚護岸で特徴的であった懸濁物食者の分布拡大に対して抑制機能が高かったと考えられる。さらにもう一つの要因として、海藻の存在が関係していると考えられる。棚護岸では造成から15年後の2010年9月および2011年3月には肉食者内の多様性が石積護岸に近いにもかかわらず、全体としての多様度指数は石積護岸のように安定しなかった。これについては、海藻の存在が大きいと考えられる。図-11に示すように石積護岸では、海藻の増加に伴い図-8の懸濁物食者内の多様性が低下する傾向が読み取れる。石積護岸では、海藻の繁茂がムラサキガイやサンカクフジツボの拡大抑制として機能したと考えられる。したがって、石積護岸の多様度指数の変動が他の護岸に比べて小さく抑えられていた背景には、ムラサキガイやサンカクフジツボなどの懸濁物食者の分布を抑制する機能として肉食者による捕食と、海藻による生息空間の奪い合いの複数の機能が維持され、全体としての多様性維持に大きく寄与していると考えられる。造成直後には石積護岸で最も繁茂した海藻は1年生のアカモクであったが、造成から15年後では多年生のマタボウが優占種であった。よって、石積護岸では、海藻の優占種の変遷により、海藻の生育量の季節変化が1年を通じて付着動物の生息に影響を与え続ける環境が形成されたと考えられる。これが他の護岸との大きな違いである。したがって、海藻が光を受けて繁茂しやすくなるよう傾斜を設けた石積護岸は、この形状の特徴が造成から15年経った現在も石積み護岸の生息場としての特徴を形成し続けていると言える。また、石積護岸の付着動物の多様度指数は他の護岸に比べて安定しているが、この点については図-11に示すように季

図-12 柵護岸の懸濁物食者に関わる効果の模式

図-13 石積護岸の懸濁物食者に関わる効果の模式

節とともに変化する海藻の出現量にも着目すべきである。海藻の形状も含めて石積護岸と捉えたとき、護岸形状は常に変化を含んでいる。安定した形状が必ずしもそこに生息する生物の多様性を高めるとは限らない。規模としては小さいが生長による海藻の形状変化が攪乱として多くの生物の生息チャンスを広げている可能性がある。さらに海藻は形状の多様性だけでなく、自ら餌となり、物質循環において重要なデトリタス供給源ともなる。その意味において、護岸を利用して創出した生息場の生態系サービスを維持する上で海藻は重要な役割を果たしていると考えられる。

5. 生息場としての機能評価について

図-12、図-13は柵護岸、石積護岸における懸濁物食者をめぐる生物相互の模式である（図中 肉：肉食者、懸：懸濁物食者）。肉食者と懸濁物食者の円は、食性ごとの多様度指数を造成直後、15年後の各平均値に応じた大きさで示しており、実線は直接効果、破線は間接効果を示す。図-12の柵護岸では造成15年後に肉食者の多様性が高まることにより、造成直後には無かった物質の流れが捉えられる。また、図-13では肉食者による懸濁物食者の捕食、海藻との空間の奪い合い、肉食者による懸濁物食者の分布拡大抑制が間接的に海藻へ空間を提供するという関係を示している。懸濁物食者の多様性が造成直後よりも15年後に低下した理由として、肉食者の多様性向上に伴う相互バランスの変化の影響が図-13からうかがえる。よって、食性別の多様性の変化を各生物群の機能の変化として捉えることで、物質の流れやバランスの変化が見やすくなると考える。

生物共生護岸に期待される生態系サービスには、付着基盤や隠れ場の提供や、物質循環による水質浄化、漁獲対象となる水産資源の保全などさまざまな側面があり、いろいろな角度からの評価が必要となる。本研究では本サービスを支える護岸の機能を評価するため、生息する生物種の多様性の把握に加え、食う食われる関係や競争からなる複雑な相互関係のネットワークの一部の解析を試みた。生物群集の上位に位置する生物種が安定的に維持されていれば、その場所の群集構造はある程度豊かで安定していることが知られている。このため、生物共生護岸に生息する肉食者と、とくに造成直後に肉食者との関係や環境変化に対する応答が速かったムラサキガイなどの懸濁物食者に着目して、生息場としての評価を試みた。その結果、石積護岸は、生物種の多様性が比較的安定しており、また肉食者が通年安定して機能し、海藻の繁茂が懸濁物食者との競争を通年維持していることから、柵護岸に比べ、石積護岸の群集構造は相対的に安定していると考えられる。多様度指数だけでなく、生物相互の関係に着目することにより、生息場の生態系サービスを維持する上で、注目すべき対象種や相互関係が明らかになると考える。また本生物共生護岸の創出時には、とくにムラサキガイによる大きな応答があった。これは東京湾ではムラサキガイの産卵期が長く、他の種に比べて短い期間で環境変化へ対応できる状況があったからだと思われる。よって、環境の変化に直ちに応答する生物種の予測は、生息場の創出において重要である。

6. おわりに

本研究では造成直後の調査から約15年を経て、生物共生護岸における形状の違いが生物群集の変遷にどのような影響を及ぼしたのか、生物多様性に加え生物相互の関係に着目して調査・分析した。その結果、石積護岸では海藻が繁茂しやすい構造が、また柵護岸ではひさし状のコンクリート板の存在が、造成後15年経った現在も生息する生物群集の構造に影響を与え続けていることが捉えられた。よって、生息域の構造変化が生物群集にもたらす影響を捉えるとき、対象とする生物相互の作用をどのような空間・時間スケールで捉えるか十分検討した上で、生物群集の機能など、生物相互の関係を考慮することが重要である。

参考文献

- 秋山章男・松田道生（1984）：干潟の生物観察ハンドブック，東洋館出版社，pp.91-180.
- 大串隆之・近藤倫生・椿 嘉高（2009）：新たな保全と管理を考える，京都大学学術出版会，pp.159-168.
- 沼田 誠・風呂田利夫（1997）：東京湾の生物誌，築地書館，pp.76-85.