人工リーフ周辺の流れと海藻群集の関係

RELATION BETWEEN WAVE-INDUCED CURRENT AND ALGAE COMMUNITY ON ARTIFICIAL REEF

井上公人¹・田中 仁²・西村 修²・馬場 聡³

Kimihito INOUE, Hitoshi TANAKA, Osamu NISHIMURA and Satoshi BABA

¹正会員 工修 国際航業株式会社 水域環境部 (〒983-0852 仙台市宮城野区榴岡5丁目1番23号)

²正会員 工博 東北大学教授 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

³正会員 岩手県大船渡地方振興局 (〒029-2502 岩手県気仙郡住田町下有田字中上333)

In recent years, the social demand toward ecological aspect of coastal area has been increasing. However, very little things have been known about the relationship between ecosystem and coastal environment. The objective of the present study is to investigate the transition of algae community on artificial reefs after construction, and the relationship between algae community on artificial reefs and intensity of wave-induced current around artificial reefs is discussed. It is concluded that the algae community on the artificial reefs on Takada Coast is influenced by the intensity of the wave-induced current around the artificial reef. Thus it might be possible to construct a nature-friendly artificial reef by using the relationship between algae community and wave-induced current revealed herein.

Key Words : *artificial reef, wave-induced current, ecosystem, algae*

1. はじめに

これまで我が国における海岸保全施設の建設にあたっては、防災を主な目的として事業等が進められてきた。しかし、近年の内湾や沿岸域を取り巻く社会的状況の変化は大きく、良好な海岸環境および生態系の保全に対する要望が増大しており、波浪の低減などの防災機能や海岸等への良好なアクセスなどの親水機能に加え、自然生態系と共生できる自然共生型の施設整備が望まれている。よって、今後海岸等に設置する施設については、施設の設置が生物環境にどの程度影響するのか、正確な予測が望まれるところであるが、海藻の植生についても生息域の環境条件によって変化し、同一地域においても地形や着生基質の違いなどによって、異なる分布がみられるなど、現段階で予測を行うことは難しい状況にある。

このような背景の中で、筆者ら¹⁾は先の研究において生態系の基礎を支えている海藻に着目し、人工リーフと海藻の出現、遷移及び定着について検討を行った結果、人工リーフが海藻の生息場として有効であることが確認された。また、海藻の分布が人工リーフ及びその周辺における流れに影響されている可能性について言及した。

そこで、本研究では人工リーフに生息する海藻に着目し、現地調査を実施して、人工リーフ設置に伴う海藻の

群落形成について整理した。また、人工リーフ周辺の流れについて数値モデルを用いた計算を実施し、流れと海藻の群落形成の関係について検討を行った。

2. 調査場所の概要

調査は岩手県の南部に位置する高田海岸を対象に実施した。調査位置を図-1に示す。本海岸は陸前高田市に位置し、日本百景にも数えられる白砂青松の風光明媚な海岸である。近年、本海岸は侵食が問題となり海岸の侵食防止に加え、良好な景観の保全を目的として人工リーフが設置されている。人工リーフの平面配置を図-2に示すが、堤長が各400mであり隣接する人工リーフとの開口幅は100mである。施工は平成2年度から2号リーフの東側より天端幅を暫定の60mで施工が進められており、平成5年度には1号リーフが実施され、現在は3号リーフの施工が暫定幅60mでほぼ完成している。また、断面形状の計画値については、図-3に示すとおり天端高がT.P. -2.90mであり、天端幅が120m、法勾配は1:3となっており、堤体は自然石で被覆されている。

図-1 現地調査位置図

図-2 人工リーフ平面配置図

図-3 人工リーフ断面図

3. 調査方法

(1) 調査測点

調査は1～3号リーフを対象に実施し、調査測点は図-4に示すとおり、人工リーフ上における海藻の分布状況を把握するために、人工リーフの縦断方向に6測線設定し、測線毎に横断方向に7測点配置した。

調査は全部で5回実施し、第1回調査から第4回調査までは3号リーフの施工が実施されていたことから、1号、2号リーフを対象に全28測点で、第5回調査では1～3号リーフを対象に全42測点で調査を実施した。

(2) 調査期間

調査は1995年1月から2001年の2月までの6年間に1998年、2000年を除く年1回の調査を実施し、全体で計5回の調査を実施した。また、調査は1～2月の冬季に実施した。なお、調査した各測点の基質（自然石）は人工リーフの施工の関係から、水中での放置期間が異なるため、各調査測点と基質の施工年月日（放置期間）につ

いても考慮に入れながら調査を実施した。

(3) 調査内容および方法

潜水観察は海岸域生物環境調査マニュアル²⁾にならない、塩化ビニールパイプで作成した正方形1m×1mのコドラートをを用いて、枠内に確認された海藻および付着動物の種別ごとに、1m²あたりに出現する海藻の被度(%)を観察した。また、被度の観察の際、海藻が重なって分布している場合は、それぞれの海藻の重複部分も被度として考慮に入れた。なお、海藻の種同定には新崎ら³⁾にならない実施した。

4. 解析および考察

(1) 出現海藻の種類と着生状況

本調査海域に出現した海藻は緑藻が7種、褐藻が16種、紅藻が40種となっており、基質設置後、半年以内の箇所では珪藻綱が全面に着生していた。その後、基質の設置期間の増加に伴って、珪藻綱に加え緑藻綱のアオノリ属

図-4 調査測点位置図 unit : m

やアオサ属、1年生小型海藻のイギス科などがみられるようになり、設置期間が4年程度を経過した測点では1年生大型のワカメ、多年生小型のツノマタ、サビ亜科、多年生大型のアラメなどが繁茂する植生へと変化していた。

ここで、片田ら⁴⁾によれば、新しい基盤には、はじめ付着珪藻類が全面に繁茂し、その後にアオノリ、アオサ類の短命な緑藻類が着生し、次に、1年生小型海藻と直立石灰藻がみられるようになり、1年生の大型海藻、多年生大型海藻の順に優占群が遷移すると述べている。

本調査測点でみられた優占種交代の経過は、この遷移過程とよく一致していた。しかし、基質設置後4年程度経過した区域において付着状況をみると、大型海藻のアラメが広く分布する測点や、サビ亜科、イワノカワ科などの多年生小型海藻が広く覆っている測点など、基質設置後4年程度経過し、生態系の変化が安定したと考えられる測点間で海藻の群集を構成している種に違いがみられ、この相の違いが人工リーフ上の流速に関係しているものと考えられた。

そこで、以下に人工リーフおよび周辺区域における流れと海藻の出現状況の関係について検討を行った。

(2) 人工リーフ周辺の流れの検討

人工リーフ周辺における流れの状況を把握するため、数値モデルを用いて人工リーフ及びその周辺区域における平均流速の再現計算を実施した。まず、当該地区の物理環境を検討するため、下式に示すエネルギー平衡方程式を基礎式とした波浪場の計算を実施した。

$$\frac{\partial}{\partial x}(SV_x) + \frac{\partial}{\partial y}(SV_y) + \frac{\partial}{\partial \theta}(SV_\theta) = 0 \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} V_x &= C_g \cos \theta \\ V_y &= C_g \sin \theta \\ V_\theta &= \frac{C_g}{C} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial C}{\partial y} \cos \theta \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 S : 方向スペクトル、 C : 波速、 C_g : 波の

群速度、 x : 岸沖方向の座標、 y : 沿岸方向の座標、

θ : x 軸となす波向角を示す。

なお、上式で計算される波高には碎波の影響を考慮していないため、合田の碎波指標⁵⁾を用いて水深に対応した碎波限界波高を求め、その位置での波高が碎波限界波高より大きくならないようにして碎波を考慮した。

次に、海浜流の計算を実施した。基礎式は平均流に関する連続式と外力としてラディエーションストレス項を加えた運動量の保存式からなっている。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [(h+\eta)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(h+\eta)v]}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + F_x - M_x + R_x + g \frac{\partial \eta}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + F_y - M_y + R_y + g \frac{\partial \eta}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 η : 静水面からの平均水位の高さ、 h : 静水時の水深、 u, v : 流れの x, y 成分、 F_x, F_y : 底面摩擦項、 M_x, M_y : 水平拡散項、 R_x, R_y : ラディエーションストレス項、 g : 重力加速度である。なお、底面摩擦項については、西村⁶⁾にならい波による水粒子の軌道運動に伴う底面の摩擦を次のように与えている。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \frac{C_f}{h+\eta} \left\{ \left(W + \frac{w_b^2}{W} \cos^2 \theta \right) u + \frac{w_b^2}{W} (\sin \theta \cos \theta) v \right\} \\ F_y &= \frac{C_f}{h+\eta} \left\{ \frac{w_b^2}{W} (\sin \theta \cos \theta) u + \left(W + \frac{w_b^2}{W} \sin^2 \theta \right) v \right\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$W = \left[\{u^2 + v^2 + w_b^2 + 2(u \cos \theta + v \sin \theta) w_b\}^{1/2} + \{u^2 + v^2 + w_b^2 - 2(u \cos \theta + v \sin \theta) w_b\}^{1/2} \right] / 2$$

ここで式(4)の中で、 C_f : 底面の摩擦係数、 w_b : 底面における波の軌道流速の最大値を示している。また、式(3)の M_x, M_y は式(5)のとおりである。

$$\begin{aligned} M_x &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ M_y &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

さらに、式(5)の ε は渦拡散係数であり、Longuet-Higgins⁷⁾ による次式を用いた。

$$\varepsilon = Nl \sqrt{g(h+\eta)} \quad (6)$$

ここに、 N : 無次元パラメータ (= 0.01)、 l : 離岸距離を示す。式(3)に示すラディエーションストレス項は、以下の示すとおりである。

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{1}{\rho(h+\eta)} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) \\ R_y &= \frac{1}{\rho(h+\eta)} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $s_{xx}, s_{xy}, s_{yx}, s_{yy}$ はラディエーションストレス、 ρ は海水の密度であり、上記の計算結果より、当該地区の平均流速を算出した。平均流速 $\bar{U}$ は海浜流の u, v 成分から次式で求めた。

$$\bar{U} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (8)$$

計算条件は計算範囲を2,580m×1,350mとし、計算点間隔を5.0mとした。また、計算に用いた波浪は当該地区近傍の江ノ島波浪観測所のデータをもとに、当該地区に

年数回程度発生する可能性がある有義波浪 $H_o' = 2.13\text{m}$ 、 $T=10.3\text{s}$ を算出し、シミュレーション計算に用いた。計算結果を図-5に示す。この結果より、人工リーフ上において速い流速がみられ、特に、1号リーフ上で20cm/s程度の流速が分布していた。また、1号リーフ背後において河口部方向からの流入がみられ、逆に、2号リーフ堤内側から堤外側に向けて流出がみられた。

(1) 人工リーフ周辺の流れと海藻の群集構成

(a) 人工リーフ上に生息する海藻の群集分類

次に、海藻の現地観察結果を用いて、調査毎に人工リーフに生息する海藻を数種の群集に分類するため、出現種別の被度から各調査測点の類似度を求め、群集分析を行った。

類似度は式(9)に示すKimoto⁸⁾のMorisitaによる修正式 $c\Pi$ 指数を用いた。

$$c\Pi = \frac{2 \sum_{i=1}^S n_{1i} \cdot n_{2i}}{\left(\sum \Pi_1^2 + \sum \Pi_2^2 \right) N_1 \cdot N_2} \quad (9)$$

$$0 \leq c\Pi \leq 1$$

但し、式(9)の $\sum \Pi_1^2, \sum \Pi_2^2$ は式(10)に示すとおりである。

$$\sum \Pi_1^2 = \frac{2 \sum_{i=1}^S n_{1i}^2}{N_1^2}, \quad \sum \Pi_2^2 = \frac{2 \sum_{i=1}^S n_{2i}^2}{N_2^2} \quad (10)$$

ここで、 N_1, N_2 : 第1組および第2組におけるサンプル総数であり、 n_{1i}, n_{2i} : それぞれの組における第 i 番目の区分に属するサンプル数、 S : 測点間の組数である。

図-5 海浜流計算結果

($H_o' = 2.13\text{m}$, $T=10.3\text{s}$ 人工リーフ2基設置時)

る。

また、算出した類似度を用いてウォード法による群集分類を行い、算出結果の1.0を基準に各調査測点の群集構成種を検討した。

(b) 人工リーフ上の海藻群集と流れの関係

次に、人工リーフ周辺の流れと上記に分類した海藻の群集の関係を検討した。筆者らは先の研究¹⁾の中で、基質設置後4年程度経過すると人工リーフに生息する海藻の遷移が安定することを示した。そこで、海藻の群集と人工リーフ周辺の流れの関係について、施工後4年以上経過している調査測点の海藻群落を対象に検討を行った。

今回実施した群集の分類より、基質設置後4年以上経過している測点の群集は、全部で22の群集に分類された。また、それら群集の構成種をみると、22群集の内19群集がツノマタ属、サビ亜科、アカバギンナンソウ、アラメ、イワノカワ科の5種により構成されており、5種のうち1種で構成されている群集や、2種あるいは3種で構成される群集に分類された。そこで、上記に示す5種が当該海域の主構成種として、どの流速範囲にどの海藻が群集として生息可能か検討するため、平均流速と各海藻の分布範囲について検討した。検討結果を図-6に示す。

この結果、サビ亜科、イワノカワ科の2種については平均流速が3-30cm/sの広い範囲で群集を構成していたが、ツノマタ、アカバギンナンソウについては、平均流速が7-24cm/sの範囲で群集を構成しており、サビ亜科やイワノカワ科に比べて、ツノマタ、アカバギンナンソウの出現範囲は若干狭くなる傾向にあった。また、アラメについては3-25cm/sの範囲にあり、サビ亜科やイワノカワ科のような、速い流速での出現はみられず、遅い流速域で群集を構成していた。

図-6 平均流速と主要群集構成海藻の関係

(c) 流速の変化に対する各海藻の被度の分布

次に、図-6に示した上記5種の海藻が群集を構成している流速範囲において、各海藻の出現被度の分布状況の検討を行った。検討グラフを図-7に示す。

この結果、各種の被度の状況を見ると、イワノカワ科、ツノマタ属で平均流速7cm/s付近に多く出現する傾向にあり、サビ亜科では12cm/s、アラメで20cm/s、アカバギンナンソウで24cm/s付近で出現被度が多くなる傾向にあった。この結果、サビ亜科やイワノカワ科では群集を構成する流速範囲が、他の3種に比べ広い傾向にあるが、被度としては遅い流速範囲で多く出現する傾向にあり、逆に、アラメについては他の4種に比べ低い流速範囲で群集構成する傾向にあるものの、速い流速で多く出現する傾向がみられた。

(d) 人工リーフ上の流速の違いに対する海藻群集の変化

以上の結果をもとに、平均流速に対する各海藻の生息可能範囲と被度の変化を定量的に把握するため、平均流速を5cm/s毎に区分し、それぞれの平均流速範囲における各海藻の出現確率について検討を行った。なお、海藻

図-7 各群集構成海藻の平均流速と出現被度の関係

図-8 各群集構成種の出現確率

の出現確率は、上記5種の海藻について被度が10%以上になる確率、30%以上になる確率、50%以上になる確率を計算した。検討結果を図-8に示す。

この結果、被度が10%以上になる確率では、アカバギンナンソウ以外の4種で平均流速0-30cm/sの範囲で出現がみられており、アカバギンナンソウ以外の4種については、広い流速範囲で生息することが可能であることが確認された。

次に、被度が30%あるいは50%となる確率は、平均流速0-5cm/sの範囲で、アラメ、サビ亜科、イワノカワ科が出現していた。次に、平均流速5-30cm/sの範囲では、アラメ、アカバギンナンソウで20-25cm/sの早い流速範囲で高い傾向にあるが、イワノカワ科は5-10cm/s、ツノマタ属は10-20cm/s、サビ亜科は15-20cm/sで高い傾向にあり、アラメやアカバギンナンソウに比べて低い傾向にあった。その結果、図-9に示すとおり、平均流速0-5cm/sの低流速区域ではサビ亜科、イワノカワ科、アラメの小群集により構成されているが、平均流速10-20cm/sの範囲ではツノマタ属の群集が増加し、平均流速20cm/s以上の範囲になると、ツノマタ属が減少しサビ亜科、アラメの群集が増加する傾向にあり、人工リーフ上の流速の違いが、生息する海藻の群集を変化させている可能性が考えられた。

以上のとおり、人工リーフ上の海藻と流速との関係を検討した結果、人工リーフの広い範囲で、施工後（海藻の付着基質設置後）始めは珪藻綱などが付着し、その後、1年生小型海藻、多年生小型海藻と生息する海藻が変化するが、4年程度経過した箇所に出現する海藻は、流速の違いにより繁茂する海藻が異なる可能性が考えられた。

5. おわりに

今回の海藻群集を構成した種は、アラメを除いて全て小型の海藻であり、流れによる影響がアラメに比べて小さいと想定される海藻であった。しかし、アラメはこれら4種の海藻より速い流速範囲で多く生息する結果と

図-9 平均流速に対する被度30%以上出現する確率

なっており、アラメの形状が速い流速範囲で生息しやすいことなどが考えられる。よって、今後アラメの形状等と流れの関係についてより詳細な検討が必要と考えられた。

参考文献

- 井上公人・田中 仁・西村 修・馬場 聡：人工リーフに生息する海藻の遷移，環境工学研究論文集，第37巻，pp.379-387，2000。
- 建設省河川局防災・海岸課海岸室：海岸域生物環境調査マニュアル（試行案），161pp.，1996。
- 新崎盛敏：原色海藻検索図鑑，北隆館，217pp.，1964。
- 片田 実・今野敏徳：植物生態学講座4，朝倉書店，306pp.，1977。
- 合田良實：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，pp.57，1997。
- 西村仁嗣：海浜循環流の数値シミュレーション，第29回海岸工学講演論文集，pp.333-337，1982。
- Longuet-Higgins, M.S.: Longshore currents generated by obliquely incident wave, J. Geophys. Res., Vol.75, No.33, pp.6778-6789, 1970。
- 木元新作：生態学研究法講座14，共立出版，192pp.，1976。

(2001. 10. 1受付)