土佐湾の外海域に設置した人工礁上に着生する海藻類の遷移

芹澤如比古, 大野正夫

(1994年11月24日受付)

Succession of Seaweed Communities on Artificial Reefs in Tei, Tosa Bay, Japan

Yukihiko Serisawa*¹ and Masao Ohno*²

A total of 18 artificial reefs (3 tons each of concrete trapezoid blocks) were placed in *Ecklonia* and *Sargassum* community on the gravelly patch about 7 m in depth on the coast of Tosa Bay.

The quantitative survey of seaweed community was carried out on the artificial reefs for 3 years. *Colpomenia sinuosa* dominated 1 month after their placement, but disappeared 3 months later. A total number of 19 species including *Sargassum siliquastrum* and *S. micracanthum*, *Ecklonia cava* and *Corallina* spp. were identified after 11 months and then the number of species was stabilized. The average of seaweed biomass was about 4,000 g wet weight m⁻² from 17 months to 28 months and then about 7,000 g wet weight m⁻² until 36 months on the blocks.

The dominant species through the succession changed from *Colpomenia sinuosa* into *Ecklonia cava* as follows: *Colpomenia sinuosa* → *Zonaria diesingiana* → *Sargassum* spp. → *Ecklonia cava*. It took one and half years for this community on the artificial reefs to achieve the climax phase, which were well comparable to the neighboring area.

キーワード: 人工礁, 遷移, 極相群落, 藻場造成

近年, 海岸域開発や環境汚染, 磯焼けなどに対する環境保全の見地から人工藻場造成が重要視されるようになった。そこで人工礁を投入してから藻場が形成されるまでの海藻植生の遷移過程の研究が注目されている。

これまでに海藻植生の遷移に関する研究は, Wilson¹⁾からはじめまり, Kitching,²⁾ Rees,³⁾ Northcraft,⁴⁾ 片田,⁵⁾ 斎藤ら,⁶⁾ Murray and Littler,⁷⁾ Niell⁸⁾など多くの研究者によって潮間帯の海藻植生について行われてきた。

潮下帯の海藻植生の遷移については, 最近になってコンクリート製の人工基質あるいは人工礁を用いて, Kain,⁹⁾ 谷口,^{10,11)} 綿貫・山本,¹²⁾ Watanuki and Yamamoto,¹³⁾ 山田ら¹⁴⁾などによって報告されている。

土佐湾でも潮下帯へ人工礁を設置した報告があるが, それらは外海域の磯焼け地帯 (Ohno *et al.*,¹⁵⁾ Ohno¹⁶⁾) や, 周辺に大型の海藻群落のない内湾域の湾口部付近 (芹澤・大野, 未発表¹⁷⁾) のように海藻植生の貧弱な場所について行われていた。

そこで今回は土佐湾でカジメ *Ecklonia cava* などの大

型多年生褐藻の生育帯である潮下帯の砂礫地に人工礁を設置し, その上に出現した海藻類の遷移について調査を行ったので報告する。

材料と方法

実験海域は高知県夜須町手結山の沖約 300 m の地点 (Fig. 1) である。1991 年 12 月に人工礁 (登録名 M 型 磯根礁 2.5×1.5×1.5 m) 18 基を水深約 7 m の岩礁域の狭間で海藻類の生育の乏しい砂礫地 (約 200 m²) を選り, 南北 9 基ずつに分けて配置した。周囲の岩礁にはカジメやトゲモク *Sargassum micracanthum*, ヨレモク *S. siliquastrum* などの大型多年生褐藻群落が形成されていた。

調査は 1992 年 1 月から 1994 年 12 月までの 3 年間にわたりスキューバ潜水により実施した。人工礁上に出現した海藻類の種類相の調査と被度測定を行った後, 1~3 基の人工礁の上段テラス上で 25 cm と 50 cm 枠を用いて刈り取りを行った。刈り取りした海藻は種類別に湿重量を測定し, 単位面積 1 m² に算出した。また, 表層と

*1 東京水産大学藻類学研究室 (Laboratory of Phycology, Tokyo University of Fisheries, Konan, Minato, Tokyo 108, Japan).

*2 高知大学海洋生物教育研究センター (Usa Marine Biological Institute Koch University, Inoshiri, Usa, Tosa, Kochi 781-11, Japan).

Fig. 1. Map showing experimental site (●), Tosa Bay, Japan.

底層の採水を行い、環境要因として水温、塩分、栄養塩類の測定を行った。栄養塩類の測定は海洋観測指針¹⁸⁾に従って行った。

結 果

環境要因 調査地点での1992年1月から1994年12月までの環境要因の変動を水温、塩分、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度、DIN ($\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$) 濃度について Fig. 2 に示した。調査地点での水温の変化は、表層では15.2~29.4°C、底層で15.8~28.3°Cであった。水温は冬季でも15°C以下にはならず、夏季には30°C近くまで上昇する季節的変動を示した。また、夏季には表層と底層の水温差2.8°Cという顕著な差を示した。塩分は表層で31.22~36.04 PSU、底層で33.16~36.10 PSUの間を推移した。塩分は冬季に高く、夏季に低下するという季節的変動を示した。特に梅雨の時期には表層の塩分は著しく低下し、31.00 PSU 近くまで低下することがあった。

$\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は表層、底層とも $0.5 \mu\text{g-at}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下であった。DIN 濃度の変化は表層で $0.17\sim 2.67 \mu\text{g-at}\cdot\text{l}^{-1}$ 、底層で $0.20\sim 2.80 \mu\text{g-at}\cdot\text{l}^{-1}$ であった。DIN 濃度に占める $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ の割合は、表層、底層とも $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度が最も高く、次に $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度であり、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度の割合は低かった。これらの栄養塩類は年によって異なった季節的変動を示した。

種類の変動 調査期間中に人工礁上に出現した海藻種の種数変動を Fig. 3 に示した。調査期間中には緑藻類4種、褐藻類13種、紅藻類18種の計35種が確認され

Fig. 2. Seasonal changes in environmental factors at the study area.

A, temperature; B, salinity; C, $\text{PO}_4\text{-P}$; D, DIN. (○, surface; ●, bottom).

Fig. 3. Seasonal variation in the number of species on the artificial reefs at the study site.

た。人工礁投入後3ヶ月目に緑藻類2種, 褐藻類6種, 紅藻類2種の計10種となり, 褐藻類はこの後5~7種の間で安定していた。人工礁設置から1年間は主に紅藻類の種の増加により, 全体の種数は増加傾向を示し, 1992年11月に緑藻類2種, 褐藻類6種, 紅藻類11種の計19種に達し最大となった。その後の2年間は緑藻類が0~2種, 褐藻類が5~7種, 紅藻類が9~12種, 全体は16~19種と種数は安定し, 一定の種組成を示した。

現存量の変動 人工礁上に出現して優占種となったフクロノリ *Clopotenia sinuosa*, シマオオギ *Zonaria diesingiana*, トゲモク, ヨレモク, カジメの5種の現存量の変動をFig. 4に示した。人工礁投入2ヶ月後からフクロノリが高い現存量を示し, 1992年3月には1681 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ に達したが, 4月には8 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ に激減した。そして6月からはトゲモク, ヨレモク, シマオオギの現存量が増加した。11月にシマオオギの現存量は846 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ に達したが, この後減少した。1993年からはカジメの現存量が増加しはじめ, 1994年5月には8138 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ に達し最大となった。トゲモク, ヨレモク, カジメの現存量は人工礁の部位や位置によって少しばらついていて, 1993年5月からは現存量の中でカジメの割合が最も大きくなり, 次いでヨレモク, トゲモクの順となった。1993年5月から1994年4月までの一年間は各月の平均現存量が3908 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ であり, 1994年5月以降12月までの8ヶ月間は各月の平均現存量が7044 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ であった。また, カジメの現存量は夏季には高い値を示し, 冬季には低下した。

海藻植生の遷移 調査期間中に人工礁上に出現した海藻類を被度40%以上の優占種, 被度10~40%の準優占種, 被度10%以下の種に分け, その推移をTable 1に示した。種レベルでの同定が困難な海藻種は属の分類群にまとめて記載した。1991年12月に設置した人工礁の上段のテラス上に, 褐藻類のフクロノリが1ヶ月

後にいちはやく着生し, 3ヶ月間被度80%以上のほぼ完全な純群落を形成した後, 直径4 cm以下の藻体のまま人工礁上から消失した。その間, 緑藻類のシオグサ属 *Cladophora* sp. や褐藻類のクロガシラ属 *Sphacelaria* sp. などの小型海藻の生育も確認された。1992年3月からは褐藻類のシマオオギや, 大型多年生のカジメやトゲモク, ヨレモクなどの幼体が多数確認された。上記の大型多年生褐藻はその後成長して樹冠を形成した。1992年4月~5月にかけての短期間は紅藻類のウシケノリ *Bangia atropurpurea* が被度40%の割合で人工礁上を覆った。5月から10月にかけては紅藻類のイワノカワ属 *Peyssonelia* sp., 有節サンゴモ類のカニノテ *Amphiroa dilatata*, ウスカワカニノテ *A. zonata*, ヒメモサツキ *Jania adhaerens*, プリヒバ *Corallina pilulifera*, 無節サンゴモ類のコシカイシモ *Mastophora pacifica* の着生が確認された。これらのサンゴモ類は褐藻群落の下草となり, 被度5~20%で生育していた。また, 同じ時期にマクサ *Geleidium elegans* やタマイタダキ *Delisea fimbriata* などの紅藻類の着生も見られた。1993年2月には有節サンゴモ類のキブリモサツキ *Jania arborescens*, 5月にはヘリトリカニノテ *Marginisporum crassissimum* の着生が確認され, これらの有節サンゴモ類も下草としてその後生育し続けた。

調査期間中, 上記以外の海藻類の着生も時々確認されたが, すぐに消失するか, 生育していても優占するまでにはいたらなかった。また, 人工礁の中・下段テラスと側面にはタマイタダキ, サンゴモ類, シマオオギなどが生育し, 大型褐藻類の着生は少ないことが観察された。人工礁投入から1年半後にはカジメ, ヨレモク, トゲモクが樹冠を形成し, サンゴモ類が下草となる群落が成立し続けた (Fig. 5)。

考 察

調査地点の人工礁周辺の環境は, 水温が15~28°C, 塩分が33~36 PSUであり, $\text{PO}_4\text{-P}$ は富栄養化の基準値1.0 $\mu\text{g-at} \cdot \text{l}^{-1}$ を越えず0.6 $\mu\text{g-at} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下であり, DINも富栄養化の基準値3.0 $\mu\text{g-at} \cdot \text{l}^{-1}$ を越えず2.8 $\mu\text{g-at} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下であった。したがって, 調査海域は安定した外海的性質が強く, 富栄養海域ではないことが確認された。

当初の予想では, 人工礁上に周辺海藻 (大野・石川¹⁹⁾) のカジメや, トゲモク, ヨレモク, マクサ, タマイタダキなどがそのまま着生すると考えられた。しかし, 人工礁設置後すぐに周囲にはほとんど見られないフクロノリが著しく繁茂し, 池ノ浦の報告 (芹澤・大野, 未発表¹⁷⁾) と同様の結果となった。冬季にはカジメ, ヨレモク, トゲモクなど多くの海藻が成熟しており, 周

Fig. 4. Seasonal variation of biomass on the artificial reefs at the study site.

	1992												1993												1994												
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	F	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D			
<Chlorophyta>																																					
<i>Ulva</i> sp.																																					
<i>Enteromorpha</i> sp.	○	○	○	○							○																										
<i>Chaetomorpha crassa</i>													○	○	○	○																					
<i>Cladophora</i> sp.	○	○	○	○	○	○					○	○	○	○	○																						
<Phaeophyta>																																					
<i>Ectocarpus</i> sp.																																					
<i>Sphacelaria</i> sp.	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Dictyopteris prolifera</i>																																					
<i>Distromium decumbens</i>																																					
<i>Zonaria diesingiana</i>	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Padina arborescens</i>																																					
<i>Colpomenia sinuosa</i>	●	●	○	○																																	
<i>Ecklonia cava</i>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
<i>Sargassum siliquastrum</i>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
<i>Sargassum micracanthum</i>	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
<i>Sargassum nigrifolium</i>																																					
<i>Sargassum yendoii</i>																																					
<i>Sargassum duplicatum</i>																																					
<Rhodophyta>																																					
<i>Bangia atropurpurea</i>	○	●	●	○																																	
<i>Delisea fimbriata</i>																																					
<i>Gelidium elegans</i>																																					

辺の岩礁では幼体も観察されているにもかかわらず、フクロノリが初期群落を形成し、土佐湾の内湾域で見られるような 20 cm 前後の藻体まで成長せずに 4 cm ほどで消失したことは、大変興味深い。潮間帯では成長の速い先行群落が後続種の着生を波浪や乾燥からの保護という

点で助け、その結果後続種に先行群との競争を可能にし、短命な先行群が減びた後は後続種が密生してその後の新植生を阻害すると報告されている (Rees³⁾)。成長速度の違いによってフクロノリが先行群落となった可能性は充分考えられるが、消失した原因については後続種

Fig. 5. Photographs showing the succession of seaweeds appeared on the M-type artificial reefs made of concrete.

A, Artificial reefs placed on gravelly patch. B, *Colpomenia sinuosa* on the artificial reef after 2 months of its placement. C, *Zonaria diesingiana*, *Ecklonia cava*, and *Sargassum* spp. on the artificial reef after 7 months of its placement. D, Climax phase of *Ecklonia cava* and *Sargassum* spp. on the artificial reef after 19 months of its placement.

に成長を阻害されたような形跡は見られなかった。その後シマオオギが優占し、大型褐藻類が人工礁上に被度を拡大していくまで小型褐藻類が遷移の中間相を形成するという土佐清水の結果 (Ohno *et al.*¹⁵⁾) と一致した。最終的に優占したカジメの現存量は、5~7月に高い値を保ち、冬季にかけて低下する季節的な傾向を示し、伊豆下田の報告 (Yokohama *et al.*²⁰⁾) と同様の結果となった。冬季の現存量の低下は、成熟により子嚢斑をつけた葉片の流失に起因していると考えられた。

投入した人工礁上の優占種はフクロノリ⇒ウシケノリ⇒シマオオギ⇒トゲモク⇒ヨレモク⇒カジメと交代した。フクロノリやウシケノリなどの短命な小型海藻から、カジメなどのより多年生の大型海藻への優占種の交代は、潮間帯で確認された海藻類の小型から大型へ、短命から長命への遷移系列 (Northcraft,⁴⁾ 片田,⁵⁾ 斎藤ら⁶⁾) と一致した。また、人工礁投入から1年半後の1993年7月の群落の状態は、カジメなどが樹冠を形成し、サンゴモ類を下草にもつ周囲の極相群落 (大野・石川¹⁹⁾) に種形成や主要種の被度の割合が類似しており、人工礁上の植生はこの時点で極相になっていると考えら

れた。潮間帯における海藻群落の遷移では、裸地からの一次遷移については極相に到達するまでに2~5年 (片田⁵⁾)、あるいは3~4年 (Saito *et al.*²¹⁾) を要すると報告されている。また、海藻群落削除後にはじまる二次遷移については、Kim *et al.*²¹⁾ の18ヶ月で極相に達したと報告されている。今回の実験では、従来の一次遷移における極相到達年数の見解より多少速い結果となった。人工礁の投入時期がトゲモク、ヨレモク、カジメなどの大型褐藻類の孢子放出時期に合致していれば、最終的にそれらの群落に到達するまでの時間が短縮されるものと推察された。

同じタイプの人工礁を設置した土佐清水地先の外海域では、他の地域からフタエモク *Sargassum duplicatum* を含む多くの海藻類の移植が試みられた結果、人工礁上にフタエモクによる群落が形成され、ウニによる食害と黒潮暖流の影響で磯焼け状態であった周辺の天然岩礁域へも群落が拡大して行った。これは、多数のウニや貝類の生育していない砂地に人工礁を形成したためと推察されている (Ohno *et al.*¹⁵⁾ Ohno¹⁶⁾)。ウニや貝類などの食害によって海藻植生が重大な影響を被るという指摘は

多くなされており (Jones,²³ Foster,²⁴ Vance,²⁵ 新井²⁶), これらの藻食動物の生息数の比較的小さいと考えられる砂礫地に人工礁を設置することが, 今回の実験からも有効であると推察された。

また, 池ノ浦湾では周辺に大型の海藻群落のない湾口部付近に同じタイプの人工礁を投入したところ, 緑藻類を中心とした季節的に消長する一年生の海藻群落が形成された。この海藻植生は土佐湾の内湾域の海藻植生 (大野,²⁷ 大野ら²⁸) と類似しており, 長い年月を経ても環境に変化のない限り大型多年生褐藻類による群落は形成されないものと推察されている (芹澤・大野, 未発表¹⁷)。池ノ浦と手結では, 距離的に 40 km 弱とそれほど離れてはいない。しかし両地点での最高水温と最高塩分, 最低水温と最低塩分はいずれも手結の方が高く外海的であった。また, 手結では DIN 濃度が年間を通して $3 \mu\text{g-at}\cdot\text{l}^{-1}$ を越えることなく安定しているのに対して, 時として池ノ浦では $6 \mu\text{g-at}\cdot\text{l}^{-1}$ 以上となるなど顕著な違いがみられた。したがって, 藻場造成の観点からは比較的環境の安定した外海域に人工礁を設置することが有効であると推察された。

今回の実験から, 大型多年生の褐藻群落の成立している岩礁域周辺の砂地に人工礁を設置することによって, 藻場を拡大していくことができる可能性が示唆された。また, 人工礁を設置する際には周辺植生を調査した上で大型藻類の胞子放出時期に合わせることが必要であろう。

謝 辞

本稿をまとめるに当たり, M 型磯根礁を設置していただいた「人工肥沃を加えた海藻磯根資源開発グループ (大旺建設他)」, 藻場管理をしていただいた高知県手結漁業協同組合, 潜水調査に御協力いただいた当センターの井本善次技官と, 高知大学大学院生の田井野清也氏, 富永春江氏などの方々に深謝する。

文 献

- O. T. Wilson: Some experimental observation of marine algal successions. *J. Ecol.*, **6**, 303-311 (1925).
- J. A. Kitching: Studies in sublittoral ecology. II. Recolonization at upper margin of the sublittoral region, with a note on the denudation of *Laminaria* forest by storms. *J. Ecol.*, **25**, 482-495 (1937).
- T. K. Rees: Algal colonization at Mumbles Head. *J. Ecol.*, **28**, 403-437 (1940).
- R. D. Northcraft: Marine algal coronization on the Monterey Peninsula. *Amer. J. Bot.*, **35**, 396-404 (1948).
- 片田 実: 海藻の生活型と遷移 (総述). 日水誌, **29**, 798-808 (1963).
- 斎藤 謙, 長縄三郎, 宮坂広司: 潮間帯の海藻植生における極相とその査定. 日本生態学会誌, **27**, 33-43 (1977).
- S. N. Murray and M. M. Littler: Patterns of algal succession in a perturbed marine intertidal community. *J. Phycol.*, **14**, 506-512 (1978).
- F. X. Neill: Structure and succession in rocky algal community of temperate intertidal system. *J. exp. mar. Bio. Ecol.*, **36**, 185-200 (1979).
- J. M. Kain: Algal recolonization of some cleared subtidal areas. *J. Ecol.*, **63**, 739-765 (1975).
- 谷口和也: 潮間帯に設置したコンクリート面上の海藻群落. 東北水研報, **44**, 61-65 (1982).
- 谷口和也: プラメ海中林の造成. 海洋科学, **20**, 362-368 (1988).
- 綿貫 啓, 山本秀一: 海岸構造物への海藻類の着生. 海洋科学, **20**, 388-394 (1988).
- A. Watanuki and H. Yamamoto: Settlement of seaweeds on coastal structures. *Hydrobiologia*, (**204**) / (**205**), 275-280 (1990).
- 山田秀秋, 河村知彦, 浅野昌充, 谷口和也: 牡鹿半島沿岸潮間帯に設置した人工岩礁上における海藻群落の遷移. 東北水研報, **54**, 89-95 (1992).
- M. Ohno, S. Arai, and M. Watanabe: Seaweed succession on artificial reefs on different substrata. *J. Appl. Phycol.*, **2**, 327-332 (1990).
- M. Ohno: Succession of seaweed communities on artificial reefs in Ashizuri, Tosa Bay, Japan. *Kor. J. Phycol.*, **8**, 191-198 (1993).
- 芹澤如比古, 大野正夫: 水産増殖, **43**, (印刷中).
- 日本海洋学会: 海洋観測指針, 気象庁, 東京, 1970, pp. 1-427.
- 大野正夫, 石川美樹: 土佐湾産カジメ類の生理生態学的研究. *Rep. Usa Mar. Biol. Inst.*, **4**, 59-73 (1982).
- Y. Yokohama, J. Tanaka, and M. Chihara: Productivity of *Ecklonia cava* community in a bay of Izu Peninsula on the Pacific coast of Japan. *Bot. Mag., Tokyo*, **100**, 129-141 (1987).
- Y. Saito, H. Sasaki, and K. Watanabe: Succession of algal communities on the vertical substratum faces of breakwaters in Japan. *Phycologia*, **15**, 93-100 (1976).
- Y. H. Kim, J. S. Yoo, and J. H. Kim: Marine algal succession in a perturbed intertidal community. *Kor. J. Phycol.*, **7**, 131-137 (1992).
- N. S. Jones: Browsing of *Patella*. *Nature*, **158**, 557-558 (1946).
- M. S. Foster: Algal succession in a *Macrocystis pyrifera* forest. *Mar. Biol.*, **32**, 313-329 (1975).
- R. R. Vance: Effects of grazing by the sea urchin, *Entostephanus coronatus*, on prey community composition. *J. Ecol.*, **60**, 537-546 (1979).
- 新井章吾: 海藻の遷移におよぼす採食の影響 I. *Jpn. J. Phycol.*, **32**, 43-51 (1984).
- 大野正夫: 緑藻アオサ場の季節的消長. 付着生物研究, **7**, 13-17 (1988).
- 大野正夫, 寺脇利信, 本多正樹: 南日本のから藻場の生態と藻場造成. 沿岸海洋研究ノート, **22**, 127-135 (1990).