浚渫土を利用した藻場生育基盤造成による 藻場生態系の長期評価

杉本 憲司¹・中野 陽一²・土田 孝³・岡田 光正⁴

¹正会員 宇部工業高等専門学校講師 物質工学科 (〒755-8555 山口県宇部市常盤台2-14-1)

E-mail:k-sugimoto@ube-k.ac.jp

²正会員 宇部工業高等専門学校教授 物質工学科 (〒755-8555 山口県宇部市常盤台2-14-1)

E-mail:ynakano@ube-k.ac.jp

³正会員 広島大学大学院教授 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail:ttuchida@hiroshima-u.ac.jp

⁴正会員 放送大学教授 (〒261-8586 千葉県千葉市美浜区若葉2-11)

E-mail:okada.mitsumasa@ouj.ac.jp

広島県尾道市高根島地先において、1995年8月～2007月3月に中詰材として浚渫土を利用し、覆土材として砂と石材を用いて、約17ヘクタールの藻場生育基盤造成を行った。本研究の目的は、造成完了後の2008年～2015年において基盤地盤高や海藻の着生状況などの追跡調査から藻場生態系形成と維持の検証を行った。

浚渫土を材料にして造成された藻場生育基盤は、8年経過しても覆土として石材を使用した範囲では地盤高はほとんどが維持されていた。しかしながら海砂覆土範囲における底質の粒径はやや小さくなっていた。藻場造成区域では、生育基盤には造成1年目と同様に8年経過しても海藻が着生し、海藻には魚類の餌となる付着生物が確認され、魚類が生息していた。このことから、造成直後に形成された藻場生態系が、長期間にわたって維持されており、浚渫土を用いた藻場生育基盤の有効性が示唆された。

Key Words : *artificial seagrass bed, seagrass ecosystems, dredged soil, long term evaluation*

1. はじめに

1990年代の瀬戸内海における藻場・干潟は、1960年代と比べると減少しており、その原因として埋立などの沿岸域開発が挙げられる。藻場・干潟は生物の多様な生息場所や水質浄化として役立っているため、これらの再生は全国で行われている。人工的に藻場・干潟の再生方法として、生育基盤の整備が実施されている¹⁾²⁾。その方法として、原地盤を嵩上げすることにより、生物が生育できる適地を作る方法があるが、大量の嵩上げ材料が必要となる。

一方、瀬戸内海では航路や泊地維持のための浚渫だけでなく、近年はタンカー大型化に伴い浚渫をする必要があり、それによって発生する浚渫土の有効利用が求められている。浚渫土は、浚渫する場所によって粒径や有機物量などの性状が大きく異なっており、その有効利用方法が限られている。そのため、近年、藻場・干潟生育基盤造成における地盤嵩上げの中詰材として利用されることがあり、瀬戸内海においてもこれらの造成工事が行わ

れている³⁾。造成完了後に生育基盤の維持や生態系の形成状況などのモニタリングは実施されているが、期間は2～3年程度であり、長期にわたってこれらが調査されている事例⁴⁾⁵⁾は少ない。特に藻場生態系について長期にわたったモニタリング事例は見当たらない。

本研究の目的は、浚渫土を中詰材として利用し、覆土材として砂と石材を用いた藻場生育基盤について、長期的な海藻草の着生やそれによる藻場生態系形成と維持について検証することとした。

2. 藻場生育基盤造成と調査方法

(1) 藻場生育基盤造成

浚渫土を利用した藻場生育基盤造成場所は、広島県尾道市高根島地先(図-1)であり、約40mの幅で海岸線に沿って天然岩礁性藻場が存在していた。潮流は海岸線に沿った南北の往復流であり、周辺には瀬戸が多くあることから、造成場所の南西1.5km沖では大潮時には $80\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度の流速になる。高根島地先はDL-4mまでは1:15

図-1 藻場生育基盤造成場所

表-1 藻場生育基盤の造成内容

造成材料	浚渫土：約 1,483,000m ³ 海砂：約 30,000m ³ 石材：約 40,000m ³ 潜底捨石：約 380,000m ³
施工面積	約 174,000m ²
施工地盤高	DL-2m～-10m(潜底を除く)

程度であるが、DL-4 m より深い場所では 1:10 程度の勾配であり、海藻草が着生できる範囲が限られていた。

藻場生育基盤造成工事は 1995 年 8 月～2007 年 3 月に実施された。工事は地盤高が DL-25 m 程度で護岸から約 300 m の位置に護岸と平行になるように約 700 m の長さで潜底を設置し、その護岸の岸側に広島県内で発生した浚渫土(シルト・粘土分 4～91%)を主な中詰材料として投入した。また中詰材料投入後に、覆土材料として、DL-2m～-5 m の範囲には石材(15 cm～40 cm)、DL-5 m～-10 m の範囲には海砂($d_{50}=0.8\text{mm}$)を約 50 cm の覆土厚で投入し、約 17 ヘクタールの藻場生育基盤の施工を行った。施工内容は表-1 のとおりである。

(2) 調査項目および調査方法

造成した藻場生育基盤の調査地点を図-2 に示す。藻場生育基盤の形状を確認するために 2008 年 5 月、2009 年 5 月、2010 年 5 月、2015 年 4 月に H-1～H-7 の 7 ラインにおいて船上からソナーで 20 m ピッチに測深し、測定時刻の潮位から地盤高を算出した。藻場造成区域内の砂面変動を調べるために、2008 年 2 月に鉄筋棒($\phi=10\text{mm}$)を底面から 20 cm 出して設置し、2008 年 5 月、8 月、2009 年 2 月、5 月、8 月、2010 年 2 月、5 月、7 月、2015 年 2 月に鉄筋棒の長さを計測した。水質調査として藻場造成区域

図-2 調査地点図

表-2 水質及び底質調査における分析項目と分析方法

分析項目	分析方法
SS(浮遊物質)	JIS K 0102.14.1
全窒素	JIS K 0102.45.4
全リン	JIS K 0102.46.3.1
粒度組成	JIS A 1204

内 2 地点、造成区域外 2 地点において中層(水深の 1/2)で採水をし、実験室で浮遊物質、全窒素、全リンの分析を行った。底質調査として、藻場造成区域内 2 地点において潜水によってコアで海底面 10 cm を採泥し、実験室で強熱減量、粒度組成の分析を行った。水質及び底質調査における各項目の分析方法は表-2 のとおりである。

海藻草調査として、藻場造成区域内の分布状況を調べるために、2010 年 5 月においては船上から海藻草の外縁位置をハンディーGPS によって記録を行った。2015 年 4 月においてはマルチコプター(Phantom2 vision+ : DJI 社製)によって空撮を行い、画像解析ソフトウェア(ERDAS IMAGINE 2015 : Hexagon Geospatial 社製)を用いて藻場分布の推定を行った。2008 年 5 月、2009 年 5 月、2010 年 5 月、2015 年 4 月において藻場造成区域内に護岸に対して垂直となる 3 ライン(L-1～L-3 : 水平距離 300 m、地盤高 DL+1 m～-13 m)と対照藻場として周辺天然藻場の 1 ライン(L-4 : 水平距離 100 m、地盤高 DL+1 m～-4 m)において、10 メートルピッチで 1 m×1 m 内の海藻草の種類と被度を潜水観察した。また、L-1、L-3、L-4 の各ライン 3 箇所 50 cm×50 cm の範囲に着生している海藻を剥ぎ取り 1 mm 目のネットに入れ、船上においてホルマリンで固定した。剥ぎ取った実験室に持ち帰って海藻と付着生物の同定を行った。

藻場生育基盤による有用魚類等の増集効果を調べるために、2008 年 2 月、8 月、2009 年 2 月、8 月、2010 年 2 月、7 月、2015 年 2 月に護岸に対して平行となる 2 ライン(F-1 : 300 m、F-2 : 400 m)において、潜水によって移動

性動物と固着性動物の種類と数量を観察した。

3. モニタリング調査結果と考察

(1) 藻場生育基盤の環境調査

藻場造成区域内における地盤高測定結果を図-3に示す。覆土として石材を使用した範囲では、2008年5月～2010年5月及び2008年5月～2015年4月における地盤高の変化(絶対値の差)はそれぞれ 0.31 ± 0.29 m(平均値 $\pm$ 標準偏差)及び 0.39 ± 0.36 mであり、ほとんど差はなかった。一方、覆土として海砂を使用した範囲では、2008年5月～2010年5月及び2008年5月～2015年4月における地盤高の変化(絶対値の差)はそれぞれ 0.34 ± 0.24 m及び 0.97 ± 0.75 mであり、有意な差があった。また、2008年5月～2015年4月の石材及び海砂の覆土範囲における地盤高変化の平均値はそれぞれ-0.19 m及び-0.55 mであり、海砂の覆土範囲のほうが地盤高の低下が大きかった。これは石材が海砂と比較して粒径が大きく、潮流や波浪に対して流出しなかったと考えられる。鉄筋棒を用いた砂面変動調査結果を図-4に示す。藻場造成区域内の中央付近の岸側におけるSM-3で2009年2月～2010年5月に15cm程度の堆砂と洗掘が繰り返された。また、SM-4では2009年8月以降は洗掘傾向にあった。SM-3とSM-4以外の地点では砂面変動は10 cm以内であり、海藻草が着生できない大きな砂面変動はなかった。

図-3 造成後の地盤高測定結果

図-4 造成後の砂面変動調査結果

図-5 水質調査結果

図-6 造成前後における底質粒径の変化

藻場造成区内及び区外における水質及び底質調査結果を図-5に示す。造成後における藻場造成区域内のSSは $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ であり、造成前の $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ と大きな変化はなかった。これはT-N、T-Pについても同様の傾向であった。

藻場造成区内のうち海砂覆土範囲における底質粒径の変化を図-6に示す。両地点で2010年2月には粗砂分が主体であったが、2015年2月においては細砂分($0.425 \text{ mm} - 0.075 \text{ mm}$)が主体となり、やや粒径が小さくなった。2010年2月ではW-2はW-3よりも粒径が小さかったが、2015年2月には両地点で粒径に差はほとんどなくなった。造成に使用した中詰材はシルト・粘土分が4～91%であったが、2015年2月においてはシルト・粘土分は1%以下であり、覆土材が流出して中詰材が出てきたことは考え難い。また、浚渫ヘドロを用いて干潟造成を行った底質を4年

間観察したところ、波浪によって潮間帯の泥分は少なくなり、細粒分が沖側に移動することで、潮下帯の泥分が多くなった事例がある⁹⁾。粒径が小さくなった原因として今回実施した底質調査地点はDL-7m付近であり、造成区域の岸側で粒度組成を調べていないため直接的なデータはないが、造成区域の岸側からの細粒分が堆積した可能性が考えられた。

このように、浚渫土を材料にして造成された藻場生育基盤は、8年経過しても覆土として石材を使用した範囲では地盤高はほとんどが維持されていた。しかしながら海砂覆土範囲における底質の粒径はやや小さくなっていた。

(2) 海藻草分布及び生育調査

藻場造成区域内における海藻草推定分布結果を図-7に示す。2010年5月及び2015年4月では推定藻場面積が68,800 m²及び60,100 m²であった。海藻草分布推定方法が2010年5月と2015年4月で異なるため比較はできないが、ほとんど分布位置に変化はないと考えられる。また、海藻草が分布していた範囲は、覆土材として石材を投入した場所であった。

藻場造成区域内と周辺天然藻場に着生した海藻草の種類数の変化を図-8に示す。2008年5月～2015年4月で周辺天然藻場の海藻草の種類は11～37種であった。一方、藻場造成区域内に着生した海藻草の種類数は、造成が完了して1年程度の2008年5月には39～44種、2009年5月には50～53種、2010年5月には48～51種であり、周辺天然藻場を上回っていた。また、2015年4月には41～45種であり、造成が完了して9年程度経過しても、着生している海藻草の種類数はほとんど変わっておらず、主に出現した大型海藻はホンダワラ類、ワカメ、クロメであり、瀬戸内海で出現する一般的な海藻であった⁷⁾。(写真-1)。

調査期間中の海藻草被度を図-9に示す。藻場造成区域内では護岸から200mよりも沖側では海藻草がほとんど

図-7 藻場造成区域内における推定海藻草分布

図-8 藻場造成区域と周辺天然藻場に出現した海藻種類数

(左：2010年5月，右：2015年4月)

写真-1 L-1(岸から100m地点)における海藻着生状況

確認できなかった。周辺海域の2010年1月から2013年12月までの透明度が 5.0 ± 1.7 mであり、透明度から海藻草の分布下限水深はDL-5m程度であると推察される^{8),9),10),11),12)}。このことから護岸から200mよりも離れると地盤高がDL-5mよりも低くなり、海藻がほとんど確認できなくなったと考えられる。藻場造成区域内における護岸から200mまでの範囲における海藻草の着生被度は、2008年5月、2009年5月、2010年5月、2015年4月でそれぞれ $36 \pm 22\%$ 、 $40 \pm 26\%$ 、 $34 \pm 20\%$ 、 $36 \pm 29\%$ であり、年による統計的

図-9 造成場所と周辺天然藻場における海藻着生被度

図-10 海藻刈り調査結果(湿重量)

な有意な差はなかった。また、周辺天然藻場における海藻草の着生被度は、2008年5月、2009年5月、2010年5月、2015年4月においてそれぞれ $57 \pm 33\%$ 、 $26 \pm 26\%$ 、 $36 \pm 24\%$ 、 $21 \pm 16\%$ であり、藻場造成区域と統計的に有意な差はなかった。調査期間中に藻場造成区域で出現した海藻の刈り結果を図-10に示す。2008年から2010年のL-1及びL-3における海藻着生量は $5828 \pm 4659 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $2496 \pm 1062 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ であり、2015年におけるL-1及びL-3の着生量と比較して、統計的に有意な差はなかった。調査期間中の2008年から2015年までL-1及びL-3において優占している着生海藻は褐藻のホンダワラ類やワカメと変わっておらず、周辺天然藻場も同様な傾向であった。

このように藻場生育基盤を造成して1年程度で海藻草の着生量や出現種類数は周辺天然藻場と同等かそれ以上となっていた。また、海藻草の構成種は8年経過してもほとんど変わっていなかった。

(4) 藻場内動物調査

刈りで採取した海藻や生育基盤に付着していた生物の個体数、湿重量の結果を図-11に示す。2008年～2010年では、造成区域(L-1、L-3)と周辺天然藻場(L-3)の個体数はそれぞれ $4395 \pm 2299 \text{ 個} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $8816 \pm 30009 \text{ 個} \cdot \text{m}^{-2}$ 、湿重量はそれぞれ $25 \pm 9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $52 \pm 17 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ であり、それぞれ統計的に優位な差があった($p < 0.05$)。一方、2015年の調査では、造成区域ではヨコエビやワレカラなどの端脚類が優占種となり、周辺天然藻場を大きく上回っていた。

藻場造成区域と周辺天然藻場における底生生物の結果を図-12に示す。調査期間中、藻場造成区域と周辺天然藻場における種類数と湿重量はそれぞれ $55 \pm 23 \text{ 種}$ 、 $102 \pm 23 \text{ 種}$ 及び $4.19 \pm 3.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $8.39 \pm 3.30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ であり周辺天然藻場が藻場造成区域を上回っていた($p < 0.01$)。個体数についても統計的な有意な差はなかったものの周辺天然藻場が藻場造成区域を上回っていた。なお、2010年、2015年における優占種は、藻場造成区域と周辺天然藻場ともにウミボタル類であった。

藻場造成区域における潜水観察による魚類等の出現密

図-11 付着生物の個体数と湿重量

図-12 底生生物の調査結果

図-13 魚類等の出現密度

度の結果を図-13に示す。2009年8月を除いて、海藻が着生しているF-1で潜堤のF-2を上回っていた。また、魚類の出現密度は、7月もしくは8月の夏場の調査時には $0.22 \pm 0.20 \text{ 個} \cdot \text{m}^{-2}$ 、2月の冬場の調査時には $0.04 \pm 0.03 \text{ 個} \cdot \text{m}^{-2}$ であり、夏場で高かった。一方、冬場の調査時にはサザエやナマコなどの固着性有用生物の出現密度は、魚類を上回っていた。

このように藻場造成区域における付着生物は、魚類の餌となるワレカラやヨコエビが多く生息し、周辺天然藻場を上回ることがあった。底生生物は種類数、個体数、湿重量ともに周辺天然藻場が藻場造成区域を上回っていたが、造成完了1年後から8年後まで種類数と湿重量に大きな差はなかった。藻場造成区域には魚類や固着性有用生物が確認され、魚類等の生息場となる藻場機能を有し

た。藻場造成区域では、生育基盤には造成1年目と同様に8年経過しても海藻が着生し、海藻内には魚類の餌となる付着生物が確認され、魚類が生息していた。このことから、造成直後に形成された藻場生態系が、長期間にわたって維持されてきたことが示唆された。

4. 結論

広島県尾道市高根島地先において、中詰材として浚渫土を利用し、覆土材として砂と石材を用いた藻場生育基盤造成完了後に、長期間にわたって基盤の維持や海藻の着生状況などの追跡調査から藻場生態系の形成の検証を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 浚渫土を材料にして造成された藻場生育基盤は、8年経過しても覆土として石材を使用した範囲では地盤高はほとんどが維持されていた。しかしながら海砂覆土範囲における底質の粒径はやや小さくなっていた。
- 2) 藻場生育基盤を造成して1年程度で海藻草の着生量や出現種類数は周辺天然藻場と同等かそれ以上となっていた。また、海藻草の構成種は8年経過してもほとんど変わっていなかった。
- 3) 2008年～2010年では、造成区域における付着生物の種類数、個体数、湿重量は周辺天然藻場を下回っていたが、2015年の調査では、造成区域ではヨコエビやワレカラなどの端脚類が優占種となり、周辺天然藻場を大きく上回っていた。
- 4) 藻場造成区域内の魚類等は、2009年8月の調査を除いて、海藻が着生している測線で潜堤を上回っていた。夏場の調査時には魚類などの移動性生物、冬場の調査時にはサザエやナマコなどの固着性有用生物の出現密度の比率が高くなった。
- 5) 藻場造成区域では、生育基盤には造成1年目と同様に8年経過しても海藻が着生し、海藻内には魚類の餌となる付着生物が確認され、魚類が生息していた。この

ことから、造成直後に形成された藻場生態系が、長期間にわたって維持されており、浚渫土を用いた藻場生育基盤の有効性が示唆された。

参考文献

- 1) 杉本憲司, 中野陽一, 高濱繁盛, 山本民次, 土田孝, 関根雅彦, 岡田光正: 製鋼スラグを用いた岩礁性藻場生育基盤の造成, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70(2), pp. I_1231-I_1235, 2014.
- 2) 杉本憲司, 平岡喜代典, 谷田和夫, 寺脇利信, 岡田光正: 浚渫跡地での埋め戻しによるアマモ場の回復, 水環境学会誌, Vol. 31 No. 4, pp. 217-221, 2008.
- 3) 潮見幸司, 高津宣治, 森宣夫, 首藤啓, 西土井誠, 中林孝之: アサリ漁場を目指した人工干潟の造成に関する実証的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp. I_1171-I_1175, 2012.
- 4) 宮田康人, 松永久宏, 藪田和哉, 林明夫, 山本民次: 広島県因島に造成した製鋼スラグ潜堤材の生物着生特性の長期評価, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp. I_564-I_569, 2012.
- 5) 春日井康夫, 久本忠則, 中山康二, 松本英雄: 広島県尾道糸崎港における干潟再生事業, 海洋開発論文集, 第 19 巻, pp.107-112, 2003.
- 6) 国分秀樹, 奥村宏征, 高山百合子, 湯浅城之: 英虞湾の浚渫ヘドロを用いた人工干潟とアマモ場における底質と底生生物の変遷, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.1251-1255, 2007.
- 7) 寺脇利信, 吉川浩二, 吉田吾郎, 内村真之, 新井章吾: 広島湾における大型海藻類の水平・垂直分布様式, 瀬戸内海区水産研究所研究報告, No. 3, pp.73-81, 2001.
- 8) Duarte, C.M.: Seagrass depth limits, *Aquatic Botany*, 40, 363-377, 1991.
- 9) 広島県: 平成 22 年度公共用水域水質測定結果, 燧灘北西部, 2011.
- 10) 広島県: 平成 23 年度公共用水域水質測定結果, 燧灘北西部, 2012.
- 11) 広島県: 平成 24 年度公共用水域水質測定結果, 燧灘北西部, 2013.
- 12) 広島県: 平成 25 年度公共用水域水質測定結果, 燧灘北西部, 2014.

(2015.3.18 受付)

LONG-TERM EVALUATION OF SEAGRASS ECOSYSTEMS CONCERNING THE CONSTRUCTION OF SEAGRASS BED SUBSTRATUM BY DREDGED SOIL

Kenji SUGIMOTO, Yoichi NAKANO, Takashi TSUCHIDA and Mitsumasa OKADA

From August 1995 to March 2007, in Onomichi Hiroshima Prefecture Konejima island, artificial seagrass bed substratum was constructed. For the construction, dredged soil, sand and stones used as covered soil were used in filled soil in a range of 17 ha. After the construction was completed, from 2008 to 2015, we carried out to verify the formation of seagrass ecosystems and maintenance by the height of the seabed and epiphytic of seagrass bed substratum. After eight years, the constructed seagrass bed substratum by the dredged soil had mostly been maintained by the sea bottom elevation, where stones have been used as covered soil. However, the particle size of the sediment in the range covered by sea sand had become slightly smaller. The constructed seagrass bed substratum after eight years, as well as the one after one year have been seagrass epiphytic, sessile organisms which becomes the prey of fish. Therefore, the seagrass ecosystems formed immediately after the construction is maintained over a long period of time. From that the effectiveness of the seagrass beds substratum by dredged soil was confirmed.