人工干潟と自然干潟における マクロベントス相の比較

東 和之¹・大田 直友²・河井 崇³・山本 龍兵⁴・丸岡 篤史⁴
橋本 温⁵・上月 康則⁶

¹ 阿南工業高等専門学校 技術部 (〒774-0017 徳島県阿南市見能林町青木 265)
E-mail: higashi@anan-nct.ac.jp

² 正会員 阿南工業高等専門学校准教授 建設システム工学科
(〒774-0017 徳島県阿南市見能林町青木 265)
E-mail: ota@anan-nct.ac.jp

³ 琉球大学 亜熱帯島嶼科学超域研究推進機構 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地)
E-mail: h118081@lab.u-ryukyu.ac.jp

⁴ 阿南工業高等専門学校 (〒774-0017 徳島県阿南市見能林町青木 265)

⁵ 正会員 県立広島大学准教授 生命環境学部 環境科学科
(〒727-0023 広島県庄原市七塚町 562 番地)
E-mail: atsushi@pu-hiroshima.ac.jp

⁶ 正会員 徳島大学大学院教授 ソシオテクノサイエンス研究部
(〒770-8507 徳島市南常三島町 2 丁目 1 番地)
E-mail: kozuki@eco.tokushima-u.ac.jp

代償措置として創出された人工干潟と模倣した自然干潟においてマクロベントスの定量調査を行い、干潟中下部生態系を再現できているかを検討した。マクロベントスの個体数は、自然干潟の方が人工干潟を大きく上回っており、種数についても自然干潟の方が多い傾向であった。干潟へ流入してくる栄養塩や底生珪藻量も自然干潟の方が高く、自然干潟の豊富な生物量はこれらの栄養塩や一次生産に支えられているようであった。両干潟の決定的な違いは、ホソウミナナの有無であったが、直達発生により分散能力が乏しいため、人工干潟にはほとんど加入していないこと、安定した自然干潟では爆発的な増加力を発揮していることが示唆された。以上のように、造成から約 5 年が経過した人工干潟であるが、潮間帯中下部の干潟生態系は模倣した干潟とは全く異なっていた。

Key Words: : *created tidal flat, compensation, macro benthic assemblage*

1. はじめに

ミティゲーションにより、やむを得ず創出された環境は、no net loss を追及するのが国際的なコンセンサスであり¹⁾、代償目的以外の生物や環境にも目を向ける包括的な生態系の創出が求められている。

徳島市沖洲地区に造成された人工干潟は、マリンピア沖洲第 2 期事業に関連した環境影響評価によるミティゲーションにより代償創出された。マリンピア沖洲第 2 期事業とは、四国横断自動車道の用地造

成、臨港道路、公共緑地ならびに人工海浜などの整備を目的として計画されたものである。計画当初は現存する海浜や干潟を全面埋め立てて行われる予定であったが、徳島県環境影響評価条例に基づき、環境影響評価を実施した。その結果、特に問題とされたのがルイスハンミョウ(*Cicindela lewisi*)であった。ルイスハンミョウは、国内に生息する海浜性ハンミョウ 6 種のうちの 1 種である。これらの海浜性ハンミョウは、埋め立てなどによる海岸の消失や護岸工事による海岸線の改変によって著しく個体数が減少

し、絶滅の危機が増大している種（環境省レッドリスト絶滅危惧Ⅱ類）となっている。

2001 年 12 月に取りまとめられた環境影響評価書では、「埋立地の存在に伴い沖洲海岸は消失し、そこを生息環境とするルイスハンミョウに与える影響の程度は極めて小さいとは判断されない」とされ、「ルイスハンミョウに与える環境影響を回避し、又は低減させることが困難であり、損なわれる環境が有する価値を代償する必要がある」とされた²⁾。この提言を受け徳島県は、ルイスハンミョウの生息地確保を目的の一つに、代償措置として人工干潟の創出を決定した。人工干潟は、ルイスハンミョウの生息地である自然干潟の物理環境を模倣して造成された^{3,4)}。さらに、埋め立て工事工程を大幅に見直し、ルイスハンミョウや海浜の植物が人工干潟に定着するのを確認したうえで、残りの埋め立て作業を行うという計画に変更された。

徳島県は、代償目的であるルイスハンミョウの生息地周辺（海浜植生域、高潮位域）のモニタリングは 2012 年度まで継続予定である。ルイスハンミョウの生息状況は造成以来 4 年間順調であり⁴⁾、現状では代償ミティゲーションは成功といえる。しかしながら、ベントスが長く生息し、生物多様性が高い中～低潮位域の状況は十分に把握されておらず、多面的な観点が不足している。また、人工干潟の創出には多くの課題が指摘されており、人工干潟を造成したものの、予想した結果を大きく下回る結果が示されている場所も多い⁵⁾。

そこで本研究では、創出より約 5 年が経過した人工干潟が、模倣した自然干潟の生態系を代償できているかを明らかにすることを目的とした。なお、埋

め立て予定の自然干潟も高速道路の着工遅延により、未だ存在しているため、潮間帯中下部のマクロベントスに着目し、両干潟で定量調査を行った。

2. 研究方法

人工干潟は、自然干潟の波浪条件、底質粒度、海浜勾配および海浜植生の 4 つの物理環境を模倣して造成された⁶⁾。波浪条件は静穏度を 30cm 以下とし、底質表土は自然干潟の潮間帯表土を移動させ、シルト分を約 3% とすることを管理目標として造成された。また、海浜勾配は、DL= +2.0 m 以上で 1/12.5 程度、DL= +2.0 m 以下で 1/25 程度を管理目標とし、海浜植生は自然干潟から人工干潟へ移植された。このように、自然干潟の物理環境を模倣して造成された人工干潟と、模倣元の自然干潟において、マクロベントスの種組成および個体数を比較するために

2011 年 3 月、6 月および 10 月の計 3 回の定量調査を行った。調査地点は両干潟とも 2 地点ずつとした(図-1)。さらに、潮位による生物相の違いを明らかにするために、各地点において DL=+1.0 m（中潮位域）および DL=+0.5 m（低潮位域）の 2 潮位について調査を行った。

各潮位に 33×33×15 cm のコドラートを 8 個ランダムに設置し、底質を採集した。底質は 2 mm 目でふるい、ふるい上に残った生物を 10% 中性ホルマリンで固定し、実験室へ持ち帰り体サイズを測定した。調査対象は干潟環境への依存度が高く、取り扱いが容易な貝・カニ類に限定した。

両干潟での物理化学環境を比較するために、徳島県によって 2007 年 4 月より月 1 回定期的に行われている環境調査の結果（水質および底質）から 48 か月分の平均値を求め、*t*-検定により平均差の検定を行った。また、多くの貝・カニ類の餌資源となる底生珪藻現存量は Chl.a で評価した。Chl.a 分析試料は、2011 年 11 月に干潮時に干潟表面から 0.5 cm までの深さの底質をシリンジ(φ=16 mm)にて採取して、実験室において 90% アセトンで抽出後、吸光度法⁷⁾により求めた(n=18/干潟)。底質の粒度については、2011 年 9 月の干潮時に干潟表面から 1cm までの深さ

図-1 人工干潟とルイスハンミョウ生息地の自然干潟。図中の●は調査地点を示す。

の土壌を採取して、JIS A 1204 : 土の粒度試験にのっとりふるい分析を行った (n=6/干潟)。

3. 結果

(1) マクロベントスの生息状況

マクロベントスの個体数、湿重量および種数を表-1に示した。マクロベントスの個体数は、3回の調査全てで自然干潟が人工干潟を大きく上回っており、最大21.8倍(10月)であった。湿重量はさらに差が大きく、自然干潟は人工干潟の最大112倍(10月)であった。また、種数についても自然干潟が多い傾向であり、両干潟ともに出現した種は12種、自然干潟のみに出現した種は7種、逆に人工干潟のみに出現したのは3種であった。ベントスの種組成は、自然干潟でホソウミニナが常に80%以上を優占してい

たが、人工干潟ではトリウミアカイソモドキが25～66%を優占しつつも比較的多様な種組成が確認された(図-2)。

(2) 物理化学環境の比較

2007年4月から48か月間の物理化学環境の平均値を表-2に示した。水質については、全ての項目で自然干潟において高い傾向が示され、特にT-NおよびT-Pの栄養塩類に有意差が確認された。底質についてはT-Nおよび硫化物において有意な差が確認された。また、Chl.aについては、自然干潟が $7.00 \pm 1.65(\pm \text{SD}, \mu \text{g}/\text{cm}^2)$ 人工干潟が 2.59 ± 0.27 であり、その差が特に顕著(2.7倍)であった($p < 0.05$, t -test)。

底質粒度分布の測定結果を表-3に示した。人工干潟において、比較的中砂分が多く、細砂が少ない傾向が確認された。また、シルト分については、管理目標とされている約3%の値が得られた。

表-1 マクロベントス個体数および種数

	自然干潟			人工干潟		
	総個体数	湿重量(g)	種数	総個体数	湿重量(g)	種数
3月	1969	667.5	15	89	16.3	13
6月	2389	626.9	13	220	16.3	13
10月	2551	934.7	13	117	8.3	11
計	6909	2229.1	19	426	40.9	15

(3) 干潟間で共通して確認された種

干潟間のマクロベントス現存量には大きな違いが見られた一方で、両干潟共通の生物が12種確認された。そのうち比較的個体数が多かったのがアラムシロとオキシジミであった。そこで、アラムシロの出

図-2 a)自然干潟, b)人工干潟におけるマクロベントスの種組成

表-2 a)海水, b)底質の物理化学環境 (±SD, * : 有意差有り t test ($p < 0.05$))

a)						
	T-N(mg/L) *	T-P(mg/L) *	DO(mg/L)	COD(mg/L)	TOC(mg/L)	
自然干潟	0.423±0.119	0.063±0.019	7.88±1.64	2.30±0.548	1.46±0.652	
人工干潟	0.339±0.104	0.048±0.017	7.49±1.45	1.95±0.430	1.36±0.665	
b)						
	T-N(mg/g) *	T-P(mg/g)	硫化物(mg/L) *	COD(mg/g)	TOC(mg/g)	強熱減量(%)
自然干潟	0.633±0.295	0.542±0.084	0.292±0.198	8.281±2.783	1.065±0.259	4.397±0.711
人工干潟	0.545±0.247	0.586±0.058	0.162±0.125	7.481±2.623	1.088±0.210	4.682±0.511

表-3 底質の粒度組成 (単位%, $\pm$ SD)

分類	自然干潟	人工干潟
細礫 (2 - 4.75 mm)	0.000	0.000
粗砂 (0.85 - 2 mm)	0.510 $\pm$ 0.237	0.740 $\pm$ 0.110
中砂 (0.25 - 0.85 mm)	37.2 $\pm$ 5.66	45.5 $\pm$ 3.65
細砂 (0.075 - 0.25 mm)	60.0 $\pm$ 4.81	51.1 $\pm$ 1.20
シルト・粘土 (< 0.075 mm)	2.31 $\pm$ 1.20	2.58 $\pm$ 1.44

図-3 アラムシロの体サイズ分布 (3回の合計)

図-4 オキシジミの体サイズ分布 (3回の合計)

現個体の体サイズ分布 (3回の合計) を図-3 に示した。アラムシロは両干潟において、稚貝から成貝までの生息が確認されたものの、人工干潟の個体群では、ピークは 16~18 mm に見られ、逆に自然干潟では 6~8 mm に見られた。一方、オキシジミについては、両干潟とも小型個体にピークが見られたが、自然干潟に出現した 40 mm 台の大型個体は人工干潟では確認されなかった (図-4)。

4. 考察

(1) 両干潟のベントス生息状況

両干潟のマクロベントス現存量には大きな違いがあり、特に湿重量でその差は顕著で、最大 112 倍 (10 月) の差があった。種数についても自然干潟が多い

傾向であった。この違いの要因を推察すると、自然干潟は栄養塩の供給が有意に高く、それに起因したと考えられる底生珪藻の現存量(Chl.a)も 2.7 倍高かった。なお、現場で底質を 10 cm ほど掘ると還元層が確認され、底層への酸素の供給が少ないことを示唆していたが、有機物含有量が高い干潟では底質が還元化することが一般的であり⁸⁾、自然干潟の底質の硫化物が有意に高かった事実とつじつまが合っていた。以上のことから、自然干潟の豊富なベントス現存量は豊かな栄養塩類および底生珪藻の一次生産により支えられていると考えられた。

(2) ホソウミニナとヘナタリ

本調査で特に注目すべき種として、近縁種巻き貝のホソウミニナとヘナタリが挙げられる。両種は自然干潟に高密度に分布していたが、人工干潟ではほとんど確認されなかった。両干潟間のマクロベントス現存量には、湿重量で最大 112 倍(10 月)の差があったが、自然干潟ではホソウミニナとヘナタリの 2 種で総湿重量の 95% 以上を占めており、その卓越した優占状況がうかがえる。この 2 種を除いて湿重量を比較してみると、その差は 3 倍程度 (10 月) とかなり縮小する。人工干潟においては、ホソウミニナは 2 個体のみ確認されており、ヘナタリは確認されていないが、この 2 種が人工干潟に加入してくれば、両干潟の生物相が大きく近づいてくることも考えられる。

ホソウミニナは、プランクトン幼生期を持たない初期生活史であり⁹⁾、分散能力が低いため、造成から約 5 年が経過しても人工干潟にほとんど加入していないと考えられる。人工干潟への巻貝類の加入には分散能力が重要であると報告があり¹⁰⁾、分散能力の高低は、ベントスの加入において重要な役割を果たすと言えよう。一方、ヘナタリはプランクトン幼生期を有するものの¹¹⁾、人工干潟への加入は確認されなかった。この理由としてヘナタリは、ホソウミニナやウミニナと比較して、より粒子の細かい泥質を好む結果が報告されており¹²⁾、中砂の多い人工干潟の底質は適さないのかもしれない。また、ヘナタリは本調査地で唯一の希少種 (環境省レッドリスト

準絶滅危惧)であり、繊細な性質がうかがえる。すなわち、全国的にも減少が懸念されており、ホソウミニナとは別の理由(初期死亡率の高さや餌要求量・質の違いなど)で人工干潟に加入していない可能性がある。

自然干潟でこれほどホソウミニナが増加し、優占している理由の一つとしては、直達発生であることが影響していると考えられる。直達発生は分散能力に欠ける一方、確実に現在の生息域に加入できる。沖洲自然干潟は埋立地に囲まれた非常に波浪の穏やかな地点であるため、台風などによる流出や大規模な土壌の攪乱が発生しにくいことも、ホソウミニナが増加していった理由の一つであると考えられる。

干潟メソコスム水槽を用いた実験で、6年間加入していなかったホソウミニナを水槽に投入したところ、2か月後には小型の個体が確認され、3年以上経過した後でも安定した生息が見られたとの報告がある¹³⁾。さらにホソウミニナは北米カリフォルニアで外来種として定着し、在来種を駆逐しており¹⁴⁾、旺盛な生存力がうかがえる。また、生息環境の悪化した東京湾においても、ホソウミニナはウミニナ類の中で唯一安定した個体群が確認されている¹⁵⁾。以上のように、ホソウミニナは順応力や生存力が高く、好適な環境下では爆発的に増加する能力を持つ種だと言える。

(3) 自然干潟の代償

人工干潟においては、徳島県が代償目的としているルイスハンミョウの生息については良好な結果が得られている⁴⁾。一方、潮間帯中下部においては生物相が大きく異なっていた。また、底質の中砂分の割合や栄養塩の流入状況といった物理化学環境が両干潟間で異なっていた。以上のように4つの物理環境を模倣して造成された人工干潟であるが、模倣した物理環境以外での差異が見られ、自然干潟を十分再現しているとは言えなかった。しかしながら、新規創出干潟へのベントス定着には10~20年必要だという報告もあり¹⁶⁾、造成後約5年の沖洲人工干潟の評価について現状だけで結論を出すのは時期尚早と言える。例えば人工干潟では、ホソウミニナが2

個体確認されており、今後ホソウミニナが増加してくることも考えられる。よって、今後もモニタリングを継続し、人工干潟生態系の推移を評価していく必要がある。

両干潟の決定的な違いはホソウミニナの有無であったため、人工干潟の代償を促進するための工学的対策として、ホソウミニナの移植が挙げられる。ただし、安易な人工移植は外来種導入との批判も受けかねず、慎重な判断が必要となろう。せめて、ホソウミニナが生態系においてどのような機能や役割を果たすかを明らかにし、その存在意義を示した上で、移植についての是非を検討すべきであると考えられる。

5. 結論

本研究では自然干潟と、自然干潟を模倣して造成された人工干潟において、マクロベントス(貝・カニ類)および物理化学指標の比較観察を行い、次のような結果を得た。

- 1) マクロベントスの現存量は自然干潟が人工干潟を大きく上回っており、種数についても自然干潟の方が多い傾向であった。
- 2) 干潟に流入してくる栄養塩類は自然干潟の方が有意に高かった。底生珪藻量も自然干潟の方が2倍以上高く、自然干潟の豊富な生物量はこれらの栄養および底生珪藻の一次生産により支えられていると考えられた。
- 3) ホソウミニナは自然干潟で非常に高密度に分布しているが、その理由は初期生活史が直達発生であることと、波浪環境が穏やかであることが要因であると考えられた。一方で、人工干潟にほとんど加入していないのも、分散能力に乏しい直達発生によるものと思われた。
- 4) 創出から5年後の人工干潟中下部のベントス集団は、模倣した自然干潟のそれを再現できていなかった。しかしながら、人工干潟は時間の経過とともに変化するものであり、現状において結論を出すのは時期尚早である。
- 5) 人工干潟を自然干潟に近づける直接的な対策と

してホソウミニナの移植が考えられるが、慎重な対応が必要であり、ホソウミニナの生態的役割や機能を明らかにした上で検討を行うべきである。

6. 参考文献

- 1) 田中章：HEP 入門，p.266，朝倉書店，2006.
- 2) 徳島県：徳島県小松島港沖洲（外）地区整備事業に関わる環境影響評価書，p.1270，2001.
- 3) 中村聡志，中川康之，桑江朝比呂：沖洲海岸におけるルイスハンミョウ幼虫の生息物理条件調査，海洋開発論文集，20，pp.323-328，2004
- 4) 徳島県：H21 徳土 徳島小松島港 徳・北沖洲 4～南沖洲 4 環境調査(13)，2011
- 5) 花輪伸一，古南幸弘：人工干潟の問題点と課題，海洋開発論文集，18，pp.43-46，2002
- 6) 徳島県：H17 港開 徳島小松島港（沖洲地区）徳・北沖洲 4～南沖洲 4 業務委託 報告書，2007
- 7) Whitney D.E. and Darley W.M.：A method for the determination of chlorophyll a in samples containing degradation products, *the American Society of Limnology and Oceanography*, 24, pp.183-186, 1979
- 8) 中野陽一，石井亮，中井智司，西嶋渉，岡田光正：浚渫土を活用して造成した干潟生態系の評価，水環境学会誌，31，10，pp.603-607，2008
- 9) 足立尚子，和田恵次：ホソウミニナの卵と発生様式，ちりぼたん，28，2，pp.33-34，1997
- 10) Armitage A.R. and Fong P.：Gastropod Colonization of a Created Coastal Wetland: Potential Influences of Habitat Suitability and Dispersal Ability, *Restoration Ecology*, Vol.12, No.3, pp.391-400, 2004
- 11) 網尾勝，海産腹足類の比較発生学ならびに生態学的研究，水産大学校研究報告 12，pp.15-144，1963
- 12) 真木英子，大滝陽美，富山清升，ウミニナ科 1 種とフトヘナタリ科 3 種の分布と底質選好性：特にカワアイを中心にして，*Venus : journal of the Malacological Society of Japan*, 61(1-2), pp.61-76, 2002
- 13) 桑江朝比呂：造成された干潟生態系の発達過程と自律安定性，土木学会論文集 No.790，VII-35，pp.25-34，2005
- 14) Byers J E.：Competition Between Two Estuarine Snails: Implications for Invasions of Exotic Species: *Ecology*, 81(5), pp.1225-1239, 2000
- 15) 風呂田利夫：内湾の貝類，絶滅と保全—東京湾のウミニナ類衰退からの考察—月刊海洋，号外，20，pp.74-82，2000
- 16) Broome S.W. and Craft C.B.：Tidal marsh creation. In Perillo G.M.E., Wolanski E., Cahoon D.R. and Brinson M.M 2009(Eds.), *Coastal wetlands: An integrated ecosystem approach*, Amsterdam, Netherlands, Elsevier, pp.715-736, 2009

A comparative study of macro benthic assemblage pattern between a created and a natural tidal flat.

Kazuyuki HIGASHI, Naotomo OTA, Takashi KAWAI, Ryuhei YAMAMOTO,
Atsushi MARUOKA, Atsushi HASHIMOTO and Yasunoi KOZUKI

Seasonal quantitative sampling was conducted to compare benthic assemblage (mollusks and crabs) between a created and a natural tidal flat after ca. 5 years of creation. The number of individuals and species were lower in the created habitat and the dominant species composition completely differed between the two habitats. In particular, a mud snail *Batillaria cumingi* that was overwhelmingly dominant species in the natural habitat was almost not observed in the created habitat. Judging from the benthic assemblage, therefore, the created habitat was not enough to compensate for the losing natural habitat. Continuous survey was needed for a better ecological understanding of the artificially created tidal flat.