

メソコスム実験による人工干潟の水質浄化機能の評価

桑江朝比呂*・細川 恭史**・木部 英治***・中村 由行****

1. ま え が き

干潟や浅場は海洋環境の中でもっとも高い生物生産力を有する場である。そこ生息する底生生物群集は、波や流れ・水質・底質などの物理化学環境と相互に作用し合いながら生態系を作り出し、様々な機能を我々に提供している。

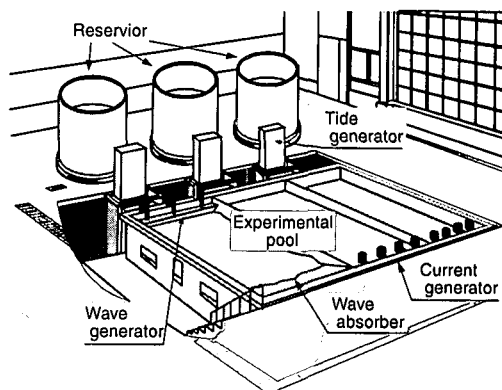
干潟が有する機能の中でも、富栄養化の低減すなわち窒素・リンの除去という水質浄化機能に寄せる期待は大きい。これまで、干潟での窒素・リンの動態が周辺海域に及ぼす影響について、現地観測・室内実験・モデル解析など様々な手法・切り口から検討されている（例えば青山・鈴木, 1996; 松梨, 1996; Montani ら, 1998; Kohata ら, 1999; 児玉ら, 2000）。また近年、自然干潟の保全・修復技術とともに、人工干潟の創造技術の重要性が高まってきている。これらの技術を確立させるためには、自然干潟と同様に人工干潟の機能を定量化することが重要である。しかしながら、人工干潟の水質浄化機能に関する本格的な研究例は少ない（例えば李ら, 1998 a; 1998 b）。本研究では、人工干潟における水質機能を検討するために、隔離実験生態系（メソコスム）を使用している。メソコスムの長所は、自然に近い生態系を作り出すことが可能であり、なおかつ生物や環境を目的に応じてコントロールしつつ比較実験を行える点である（西條・坂本, 1993）。

本研究の目的は、メソコスムおよび自然干潟（盤洲干潟）で得られた窒素・リンのフラックスに関する様々なデータを用いて両者を比較し、人工干潟の水質浄化機能について評価することである。

2. 干潟メソコスムおよび盤洲干潟の概要と環境条件

2.1 干潟メソコスム

本研究ではメソスケールの干潟実験生態系として、運輸省港湾技術研究所にある干潟実験施設を利用した。干



図一 干潟実験施設の見取り図

潟実験施設の見取り図を図一に示す。自然光を取り入れるため、上屋の全面が基本的にガラス張りになっている。1994年12月に実験水槽へ海水を導入し、潮汐を与えて実験生態系を創出した。自然の M_2 分潮とほぼ同周期の12時間30分で1潮汐が起きるように、潮汐周期を制御している。1週間に1〜3回の頻度で水槽中の海水と久里浜湾からポンプで汲み上げた未処理海水とを交換している。波や流れによって底泥への物理的攪乱を与えている。千葉県木更津市盤洲干潟産の底泥を各実験水槽へ泥深50cmになるように投入した。この底泥は、投入前に天日で乾燥させてあるため、成体の底生生物は初期条件として含まれていない。実験生態系の創出から現在まで、実験水槽へ生物を一切人為的に投入しなかった。すなわち、実験水槽に加入したすべての生物は、久里浜湾の海水（例えば卵・孢子・幼生・種子など）由来である。その他、干潟水槽の制御条件・仕様については、細川ら（1996 a）や桑江ら（2000）に述べられている。

2.2 盤洲干潟

干潟メソコスムにおける生態系と自然干潟のそれとを比較するための調査地として、東京湾の東岸に位置する盤洲干潟を選定した（図二）。盤洲干潟の地形的勾配は、岸沖方向で0.001と非常に緩い。潮差は大潮時で約1.6m、小潮時で約0.5mである。設置した定点はおよそ年平均水位より20cm高い位置にあるため、底泥は毎度の潮

* 農修 運輸省港湾技術研究所海洋環境部
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋環境部
*** 運輸省第四港湾建設局店津港湾工事事務所
**** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋環境部

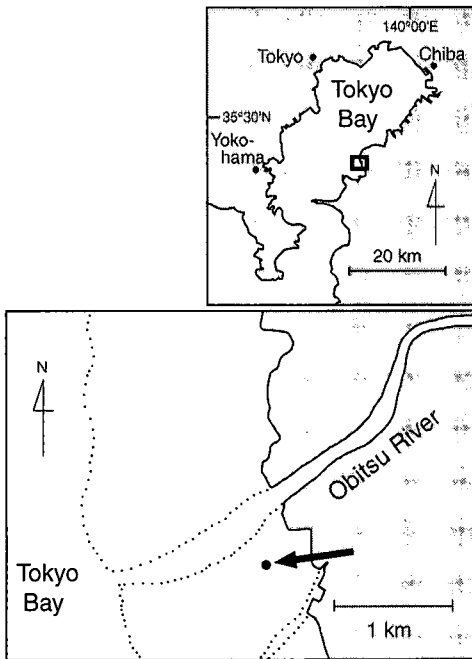


図-2 盤洲干潟の調査地点

汐周期により干出・冠水する。定点付近には植生はない。

2.3 環境条件の比較

干潟メソコスムにおける水温・泥温・塩分の観測結果を図-3に示す。観測された値の変動幅は、水温について4.9–32.0°C(平均18.7°C)、泥温について6.5–36.1°C、そして塩分について26.3–36.0 psu(平均32.1 psu)であり、いずれも盤洲干潟で観測された変動幅の範囲内である。しかし、東京湾の湾内に位置し、小樫川河口測定の盤洲干潟における塩分は、平均値と比較すると久里浜湾の海水を導入している干潟メソコスムより低い傾向がみられる。

1998年に測定された干潟メソコスムおよび盤洲干潟における底泥の粒度・TOC・TON・TOPの分析結果を表-1に示す。実験水槽の底泥は盤洲干潟産のため、実験開始当初は同質の粒径であった。しかし、実験開始4年後の結果では、中央粒径については両干潟に差がみられていないが、シルト・粘土分については、干潟メソコスムの方が10%以上盤洲干潟より高い値を示している。TOC・TON・TOPについても、干潟メソコスムの方が盤洲干潟より高い値を示している。このことは、台風などの大きな擾乱を経験しないメソコスムの底泥粒子が、自然干潟と比較し安定的であることを示していると思われる。したがって、底面境界せん断力が自然干潟よりも小さいメソコスムでは、シルト・粘土が堆積したり、底泥-直上水間の物質移動が低下する傾向が強いことを示唆している。

表-1 干潟メソコスムおよび盤洲干潟における底質の比較 (平均値±標準誤差)

Site	D_{50} (μm)	Silt/Clay (%)	TOC (mg g^{-1})	TON (mg g^{-1})	TOP (mg g^{-1})
Mesocosm	177±2	15.8±0.8	2.6±0.2	0.33±0.02	0.06±0.00
Banzu	175±5	2.6±0.6	0.9±0.0	0.14±0.01	0.04±0.00

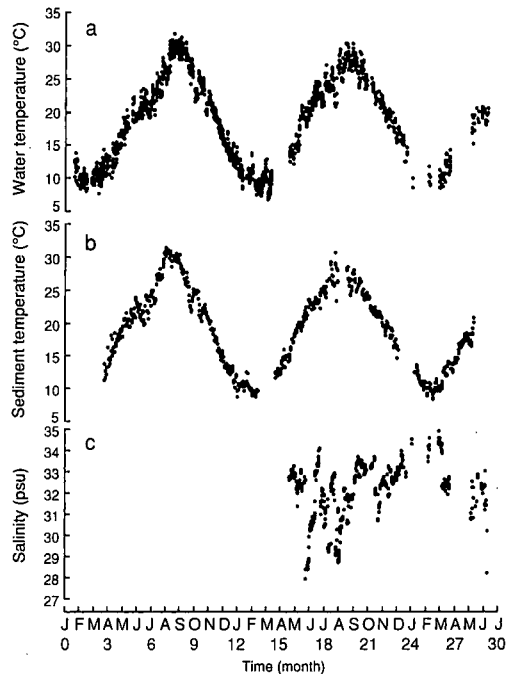


図-3 干潟メソコスムにおける水温 (a)・泥温 (b)・塩分 (c) の測定結果 (3 水槽の平均値)

3. 盤洲干潟と干潟メソコスムにおける水質浄化

3.1 定量的評価の手法

本研究では、干潟による水質浄化機能を「干潟底泥が富栄養化の原因物質である窒素・リンを海水(直上水)から除去する作用」と定義する。したがって重金属や炭素については議論しない。

干潟底泥による窒素・リンの除去プロセスを図-4に示す。①は底泥と直上水間でのDIN・DIP(溶存無機窒素・リン)の交換フラックスである。このプロセスには、間隙水中および直上水中のDIN・DIP濃度の勾配によって引き起こされる拡散フラックス、底生微細藻類によるDIN・DIPの取り込み、マクロベントスによる間隙水と直上水の能動的な混合などが含まれる(Kuwaeら, 1998)。②は底泥と直上水間でのPON・POP(粒状有機窒素・リン)の交換フラックスである。このプロセスに

は、懸濁物食者による取り込み、沈降、再懸濁などが含まれる。③は脱窒、④は鳥類や漁獲による底生物の取り上げを示している。③および④は直上水中の窒素・リンを直接除去するプロセスではない。しかし、これらは①や②によって直上水から流れてきた窒素・リンを不可逆的に干潟生態系外へ流すプロセスなので、長い時間スケールで見た浄化を考える上では本質的な部分を担っているといえる。

ここでは、2つの干潟において④以外のフラックスを比較し、水質浄化機能について評価する。

3.2 実験方法

アクリルパイプ (直径 8.6 cm, 長さ 30 cm) を用いて現地で採取したコアサンプルを培養することにより、①の DIN・DIP 交換フラックスを測定した (図-5)。②の PON・POP 交換フラックスについては、懸濁物食者の濾水速度を測定することにより推定した。地形が動的平衡で安定している干潟においては、沈降・再懸濁といった物理的過程は長期的にバランスしているとみなし、本研究では考慮しなかった。③の脱窒についてはアセチレン阻害法によって脱窒速度を測定した。DIN・DIP 交換フラックスおよび脱窒速度の測定については Kuwae ら (1998) に記述されている。懸濁物食者の濾水速度については、アサリを用いて測定された各サイズ (殻付き湿重量)・温度における濾水速度 (細川ら, 1996 b) を代表値として用いた (図-6)。

懸濁物食者による 1 m^2 当たり 1 時間当たりの PON・POP の取り込みフラックス $F (\mu\text{mol N or P m}^{-2} \text{ h}^{-1})$ は、次式で表せる。

$$F = v \times C \times B$$

ここに、 v は濾水速度 ($\text{liter g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)、 C は直上水中の PON・POP 濃度 ($\mu\text{mol N or P liter}^{-1}$)、 B は懸濁物食者量 (g m^{-2}) である。

3.3 実験結果

干潟メソコスムおよび盤洲干潟における DIN・DIP 交換フラックスおよび脱窒速度の測定結果を図-7 に示す。DIN, DIP ともに干潟メソコスムの方が盤洲干潟より大きな吸収フラックス (直上水→干潟底泥) を示す傾向にある。干潟メソコスムにおけるフラックスは盤洲干潟のそれよりも変動幅が大きい。脱窒速度の変動幅は両干潟において大きく、顕著な違いがみられていない。

干潟メソコスムおよび盤洲干潟における単位面積当たりの濾水速度・直上水中の PON・POP 濃度・PON・POP 吸収フラックスをそれぞれ表-2, 表-3 に示す。干潟メソコスムにおける懸濁物食者量が盤洲干潟よりかなり少ないため、干潟メソコスムにおける単位面積当たりの濾水速度も盤洲干潟の約 5% と低い値を示している。両干潟における直上水中の PON 濃度には大きな違いがみ

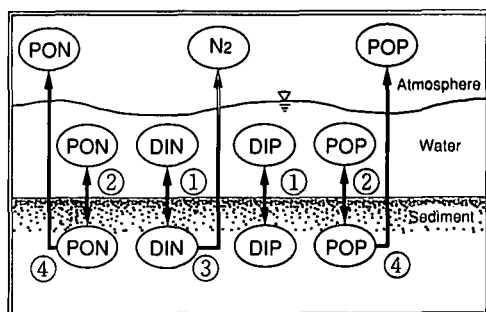


図-4 干潟による窒素・リンの除去プロセス、①-④は本文を参照。

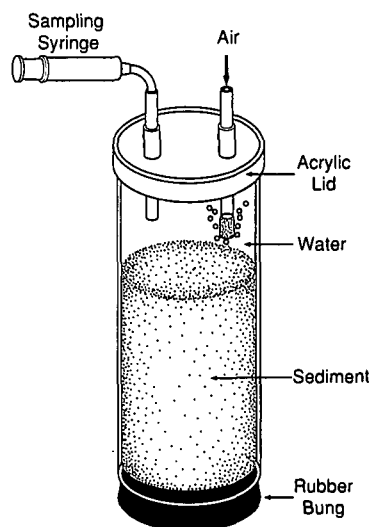


図-5 コアサンプルによる培養実験概念図

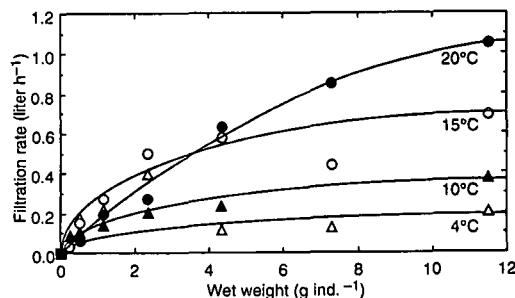


図-6 アサリ 1 個体当たりの湿重量と濾水速度との関係

れていないが、POP 濃度については、干潟メソコスムの方が盤洲干潟よりかなり低い値となっている。したがって、濾水速度と直上水中の PON・POP 濃度との積で求まる PON・POP 吸収フラックスについてみると、干潟メソコスムのそれは、PON において懸濁物食者量の少なさが影響し、平均値で盤洲干潟の約 5%、POP において懸

表-2 干潟メソコスムにおける単位面積当たりの濾水速度、直上水中の PON・POP 濃度、および PON・POP 取り込みフラックス

Date	Suspension-feeders (g wet m ⁻²)	Filtration rate (liter m ⁻² h ⁻¹)	PON (μM)	POP (μM)	PON flux (μmol N m ⁻² h ⁻¹)	POP flux (μmol P m ⁻² h ⁻¹)
20 Sep, 1995	12	2.9	5.1	0.2	14.1	0.7
25 Mar, 1996	14	3.3	2.4	0.5	6.4	1.2
10 Sep	27	6.0	24.2	0.2	130.3	1.2
12 Feb, 1997	4	0.8	3.3	0.1	2.5	0.1
17 Sep	2	0.4	6.3	0.1	2.3	0.0

表-3 盤洲干潟における単位面積当たりの濾水速度、直上水中の PON・POP 濃度、および PON・POP 取り込みフラックス

Date	Suspension-feeders (g wet m ⁻²)	Filtration rate (liter m ⁻² h ⁻¹)	PON (μM)	POP (μM)	PON flux (μmol N m ⁻² h ⁻¹)	POP flux (μmol P m ⁻² h ⁻¹)
11 May, 1996	62	5.0	8.4	0.8	118.5	10.8
13 Feb, 1997	1	0.7	8.3	0.8	6.1	0.6
19 Sep	504	113.1	7.6	0.6	855.5	72.0
12 Nov	542	120.8	12.3	1.3	1480.9	157.0
26 Feb, 1998	62	13.7	22.4	1.7	307.8	22.7

濁物食者量の少なさと直上水中の POP 濃度の低さの両方が影響し、盤洲干潟の約 1% と非常に小さい値を示している。

以上をまとめ、表-4 に盤洲干潟および干潟メソコスムにおける窒素・リンの除去量の比較結果を示す。干潟メソコスムにおける DIN・DIP 除去量は、DIN, DIP ともに盤洲干潟のそれより約 4.5 倍大きな値を示している。しかし、干潟メソコスムにおける PON・POP 除去量は、PON, POP ともに盤洲干潟のそれよりはるかに小さな値であるため、干潟メソコスムにおける単位面積・単位時間当たりの全窒素除去量は盤洲干潟の 44%, 全リン除去量は 30% にとどまっている。

3.4 考 察

干潟メソコスムにおける DIN・DIP 除去量が盤洲干潟のそれより大きく、反対に干潟メソコスムにおける PON・POP 除去量が盤洲干潟のそれより小さいという本研究の結果は、両者の生物相をよく反映したものといえる。干潟の DIN・DIP 除去に対する底生微細藻類の寄与は大きいといわれている (例えば Sundbäck ら, 1992)。底生微細藻類の現存量が多い干潟メソコスムでは (桑江ら, 2000), より多くの DIN・DIP が彼らによって取り込まれていたと考えられる。一方、遷移が進んで成熟している盤洲干潟においては、懸濁物食者が多いため (桑江ら, 2000), より多くの PON・POP が彼らによって取り込まれていたわけである。

脱窒速度に寄与する要因として、硝化速度・底泥中の酸素や有機物濃度・直上水や間隙水中の NO₃⁻ 濃度などが知られている (例えば Seizinger, 1988)。したがって、機能を評価するためにはこれらの要因と脱窒速度との関

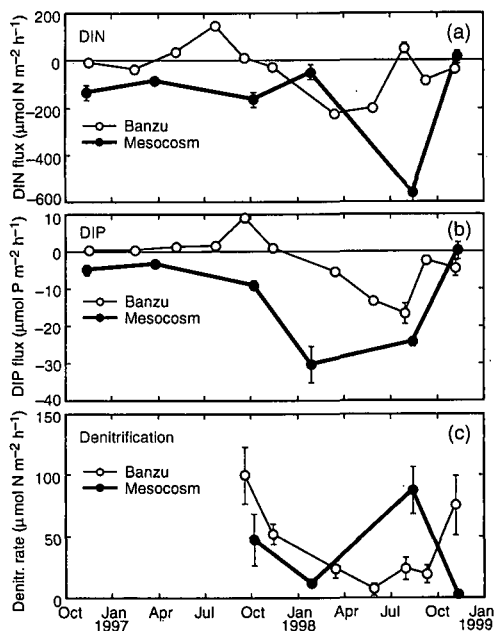


図-7 干潟メソコスム (●) および盤洲干潟 (○) における DIN (a) および DIP (b) の交換フラックスと、脱窒速度 (c) の経時変化。負の値は直上水中の NP 濃度の減少 (底泥による除去) を示す。

係を検討する必要がある。

4. あとがき

本研究において、メソコスムに形成された人工干潟および自然干潟で得られた生物量に関するデータを用いて両者を比較し、人工干潟の水質機能について評価した。以

表-4 干潟メソコスムおよび盤洲干潟における窒素・リンの除去量の比較 (平均値±標準誤差)。単位はすべて $\mu\text{mol N or P m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。

Site	DIN flux	DIP flux	PON flux	POP flux	Denitrification	Total N remov.	Total P remov.
Mesocosm	157.3±85.4	11.7±5.2	23.0± 9.9	0.7± 0.2	37.4±19.3	217.7	12.4
Banzu	34.0±32.4	2.7±2.2	416.6±169.0	38.7±17.2	42.9±12.8	493.5	41.4

下に得られた結果の要点を示す。

(1) メソコスムの特性を整理し、データ解釈上の留意点を示した。大きな物理攪乱を経験しないメソコスムでは、自然干潟と比較し底泥が安定的であり、シルト・粘土分の増加や底面限界せん断力の低下に伴う底泥一直上水間の物質移動の低下の可能性がある。

(2) メソコスムの生態系では、生物群集構造をよく反映した物質循環が成立している。すなわち、メソコスムでは底生微細藻類の現存量が多いため DIN・DIP 除去量が大きく、反対に懸濁物食者の現存量が少ないため PON・POP 除去量が小さい。

参 考 文 献

青山裕晃・鈴木輝明 (1996): 干潟の水質浄化能力の定量的評価, 愛知県水産試験場研究報告, 3 巻, pp. 17-28.
桑江朝比呂・細川恭史・小笹博昭 (2000): メソコスム実験による人工干潟の生物生態機能の評価, 海岸工学論文集, 47 巻, pp. 1101-1105.
児玉真史・松永信博・水田健太郎 (2000): 夏季の和白干潟における栄養塩収支に関する現地観測, 水工学論文集, 44 巻, pp. 1095-1100.
西條八束・坂本 充, 1993. メソコスム湖沼生態系の解析, 名古屋大学出版会, 346 p.
細川恭史・桑江朝比呂・三好英一・室善一朗・木部英治 (1996a): 干潟実験施設を用いた物質収支観測, 港湾技研資料, No. 832, pp. 1-21.
細川恭史・木部英治・三好英一・桑江朝比呂・古川恵太 (1996b):

盤洲干潟 (小瀬川河口付近) におけるアサリによる濾水能力分布調査, 港湾技研資料, No. 844, pp. 1-21.
松梨史郎 (1996): 東京港の夏季における窒素・リンの水-底泥間のフラックス, 海岸工学論文集, 43 巻, pp. 1116-1119.
李 正奎・西嶋 渉・向井徹雄・滝本和人・沼木 徹・平岡喜代典・岡田光正 (1998a): 自然および人工干潟における構造と有機物分解能の比較—広島湾におけるケーススタディー, 水環境学会誌, 20 巻, pp. 175-184.
李 正奎・西嶋 渉・向井徹雄・滝本和人・沼木 徹・平岡喜代典・岡田光正 (1998b): 自然および人工干潟の有機物浄化能の定量化と広島湾の浄化に果たす役割, 水環境学会誌, 21 巻, pp. 149-156.
Kohata, K., T. Hiwatari and H. Tanaka (1999): Water purification by bivalves in shallow areas of Tokyo Bay, Proceedings of MEDCOAST 99-EMECS 99, pp. 301-312.
Kuwaie, T., Y. Hosokawa and N. Eguchi (1998): Dissolved inorganic nitrogen cycling in Banzu intertidal sand-flat, Japan, Mangroves and Salt Marshes, Vol. 2, pp. 167-175.
Montani, S., P. Magni, M. Shimamoto, N. Abe and K. Okutani (1998): The effect of a tidal cycle on the dynamics of nutrients in a tidal estuary in the Seto Inland Sea, Japan, Journal of Oceanography, Vol. 54, pp. 65-76.
Seitzinger, S. P. (1988): Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems: ecological and geochemical significance, Limnology and Oceanography, Vol. 33, pp. 702-724.
Sundbäck, K., V. Enoksson, W. Granneli, K. Petersson (1991): Influence of sublittoral microphytobenthos on the oxygen and nutrient flux between sediment and water: a laboratory continuous-flow study, Marine Ecology Progress Series, Vol. 74, pp. 263-279.