

物理外力を考慮した生態系モデルによる干潟生態系の評価

杉田 繁樹* ・ 中瀬 浩太** ・ 古川 恵太***
重松 孝昌**** ・ 青木 伸一*****

干潟生態系を保全・修復するためには、物理的外力環境と生息する生物の活動、水質・底質などを総合的に判断し、干潟生態系の機能や構造を評価する指標が必要である。本研究では、新たに生態系モデルを構築し、(独法)港湾空港技術研究所所有の干潟実験施設のデータを対象に再現計算を行い、計算結果を基に干潟生態系の評価指標を提案することを試みた。その結果、以下のことが明らかになった。1)物質循環機能を表す指標、生物種構成の指標を提案し、機能評価において有効であることが示された。2)モデル計算結果の生物群集をもとにして求められる生態系複雑度の変動傾向は、従来用いられる多様性指数や出現種数の変動に整合していた。

1. はじめに

干潟生態系は、河川上流等から運ばれてきた砂泥が河口部、沿岸部の潮干帯にできる 1000 分の 1 程度の非常に緩やかな地形の安定性と、そこに住む底生生物、浮遊生物、そして、それらの生物を餌とする鳥類、大型魚類等の生物群としての安定性の上に構成されている。

干潟は、1) 生物生産、2) 海水浄化、3) 生物生息、4) 親水などの機能を持つと言われている。そうした機能は干潟の生態系によって発揮される。したがって、この生態系を保全・修復する必要がある。そのためには、単に干潟の地形的な特徴を再現するだけでなく、生態系が適正な機能・能力を発揮できる場とする必要がある。

そのためには、潮汐や波・流れといった地形的な特徴により生じる物理的外力環境と、その場に生息する生物の活動、水質・底質などを総合的に判断する指標が必要であり、そうした干潟生態系の評価指標を干潟生態系モデルの計算結果より抽出して、構築することを本研究の目的とする。

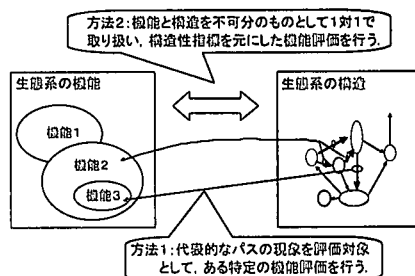
2. 干潟生態系の評価指標

干潟生態系の評価指標を作る目的を整理すると以下の 3 点となる。

- 1) 現況把握: 対象とする干潟の現在の状態を表す
- 2) 計画設計: 計画する干潟の特性を予測する
- 3) 維持管理: 干潟の状態の変化をモニタリングする

こうした目的のために、指標の表す意味の明快さ、指標を求めるための手順の簡便さに重点をおき、現象面からのアプローチを行うこととした。

それは、生態系の特性を考慮し、その中の特徴的な機能のみの評価を行う方法である。例えば、干潟における



図一 生態系の機能評価の2つの方向性

二枚貝が浮遊懸濁物をろ過する作用があるとする、その「ろ過機能」を機能性の指標とする。ただし、ろ過機能には、二枚貝の寄与だけでなく、物理的な沈降や、波による再懸濁も含め、干潟における「広義のろ過機能」とする必要がある。そのように計算できる現象としては、「酸素供給機能(光合成による生産+波によるばっ気から、底泥・水中での消費を引く)」「赤潮発生防止機能(植物プランクトン増殖速度から、沈降、移流、捕食圧などを引いたもの)」などが考えられる(図一の方法1: 個別機能評価法)。

こうした評価指標は、評価する対象の機能や特性を事前に十分に把握した上で構築するものであり、既知の機能の変化の予測や、モニタリング等の目的には利用しやすいが、未知の機能を評価することはできない。

一方、特定の機能のみを抽出して評価するのではなく、機能と構造を不可分のものとして1対1で取り扱い、構造的指標を元に機能評価を行う手法が提案されている(例えば、中村・田口, 2000; 図一の方法2: 構造的機能評価法)。こうした生態系の評価指標の特性を比較整理すると、表一のようになる。

本研究では、個別機能評価法を対象に、新たな評価指標を定義、検討することを目的とした。

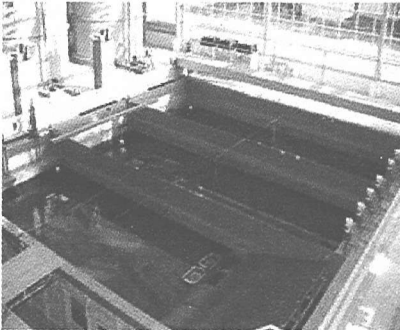
3. 対象とした干潟生態系

本研究では、(独法)港湾空港技術研究所所有の干潟実

* 正会員 修(工) 五洋建設(株)技術研究所
** 正会員 五洋建設(株)環境事業部 課長
*** 正会員 工 修 国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部海洋環境研究室 室長
**** 正会員 博(工) 大阪市立大学講師 大学院工学研究科
***** 正会員 工 博 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系

表—1 機能評価のための方法論

	個別機能評価法 (図—1：方法1)	構造的機能評価法 (図—1：方法2)
機能評価の前提	「物質循環系」「生物構成種」等、生態系の機能の一部を特化して評価する。	生態系は、生物群集の動的構造をもとに機能を発揮している。
評価される機能の範囲	仮定した機能の評価のみ。	未知の機能も暗に含めての評価。
汎用性	個別の生態系毎に異なる指標を考慮することが基本なので汎用性は低い。	もとなる構造指標の適用性が汎用的であれば、機能評価も汎用的に適用できる。
具体性	現象を限定するので具体性は高い。	構造指標がもつ具体性によるが、抽象的な評価である。
客観性	現象抽出とそのモデル化に恣意性が入る部分があり、客観的かどうかを慎重に判断する必要がある。	モデルの構成が客観的であれば、評価システムとしての高い客観性が確保される。

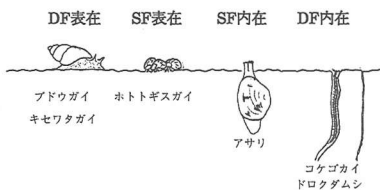


図—2 干潟実験水槽 (手前から水槽1, 2, 3)

表—2 底生生物の分類

食性分類	在位	代表種	環境耐性	
			波に	濁りに
DF	表在	巻き貝 (ブドウガイ)	弱い	弱い
	内在	コゲゴカイ・ドロクダムシ・ヨコエビ類	影響なし	影響なし
SF	表在	ホトギスガイ	弱い	強い
	内在	アサリ	影響なし	強い
生産者	表在	珪藻類	強い	弱い

注) DF：堆積物食者, SF：懸濁物食者



図—3 分類ごとの底生生物の代表種

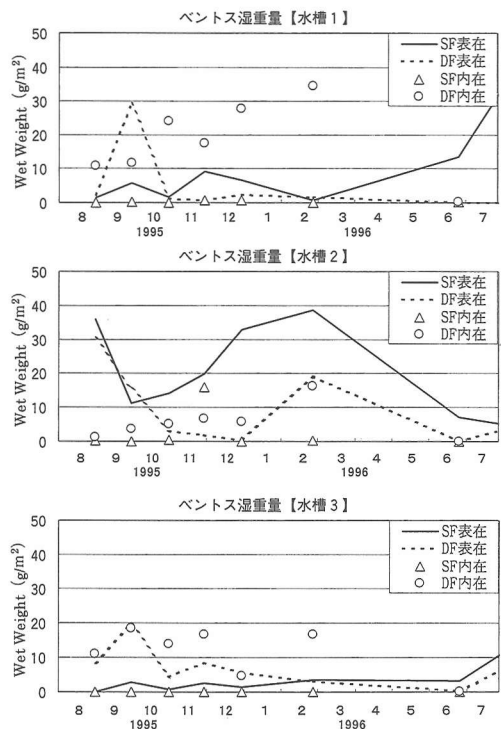
験施設において観察された干潟生態系 (桑江ら, 1997) をもとに、その生物群集の変化に着目し、解析を行った。

干潟実験施設では、3つの独立した水槽において、東京湾の砂質干潟である盤州干潟の底質を採取・乾燥させ、1994年12月から久里浜湾の自然海水を導入することで干潟生態系のメソコスム実験を行っている (図—2)。

特徴的であることは、3つの水槽毎に外力の変化を与えていることである。どの水槽も、12時間の干満を繰り返

返し、満潮時をはさんだ冠水時には、水槽1では造波装置により波が起こされ、水槽2, 3ではインペラーにより流れが起こされる。また、水槽1, 2では水槽の水を週3回湾内水と交換し、水槽3では週1回湾内水と交換する。このような条件設定により、水槽1：波あたりの強い前浜干潟、水槽2：波が遮蔽された河口干潟、水槽3：海水交換の悪い干潟をシミュレートしている。

これらの干潟に出現してきた生物の出現特性について、表—2および図—3のような分類を行い整理した。すなわち、底生生物を摂餌形態により分類したものである。ただし、この分類は、本作業のために行った暫定的な分類である。その結果、図—4のように各水槽毎に特徴的な



図—4 分類ごとの底生生物湿重量の経時変化

分布が見られた。図-4は、各水槽毎の分類ごとの底生生物湿重量の経時変化を示す。特徴的なこととして、懸濁物食者(SF)が少なく堆積物食者(DF)の多い干潟となっており、波あたりなどの変化があったものの、全体的に特に生物量の少ない、かく乱の少ない干潟生態系が出現しているように見える。ただし、水槽2では、懸濁物食者が堆積物食者を上回っている。これは、95年9月の時点ですでにSFの現存量が多いことから、実験施設稼働初期の生物量の増大の影響を受けているように思われる。

4. 干潟生態系モデル

4.1 数値モデルの概要

上記の実験干潟の生態系の機能や構造を調べるために、新たに干潟生態系モデルを構築した。構築した干潟生態系モデルの概念図を図-5に示す。本モデルは浮遊系の生態系及び底生の生態系について、生産や分解といった物質循環と捕食と枯死といった生物の消長を再現することを目標として構築された。

モデル内の独立変数を表-3に示す11変数とし、図-

5に示すフローをもとに簡易な干潟生態系モデルを構築した。ここで、波と流れの物理外力を、底質の巻き上げおよび海水交換率の変化としてモデル化している。

波浪による巻き上がりは、波による底面せん断力を評価し、底泥デトリタス、付着珪藻の減少、水中デトリタスの増加として直接的にモデル化されている。巻き上げが増加すると、底泥でのデトリタスによる分解量の減少、水中でのデトリタスによる分解量の増加、溶存酸素の消費量の増加などに影響が伝播していく。また、流れによる海水交換が盛んになると、境界条件として与えられる環境条件に強く支配される場となる。

4.2 計算条件

計算対象期間は、干潟実験施設の生態系が初期の段階であると考えられた1995年9月から1996年8月までの1ヵ年とした。その他の外的要因である日射、気温、水温、久里浜湾海水の水質などではできる限り観測値を用いて与えた(日比野ら, 1999)が、一部水中デトリタス、水中硝酸態窒素、水中リン酸態リンについては、一定値を仮定して与えた。

4.3 個別機能評価法の検討

a) ベントス湿重量の計算結果

図-6は、干潟生態系モデルによるベントス湿重量の計算結果と実測値の比較を示す。水槽1, 3については、DF, SFの増減に関して、比較的现状に近い結果が得られ

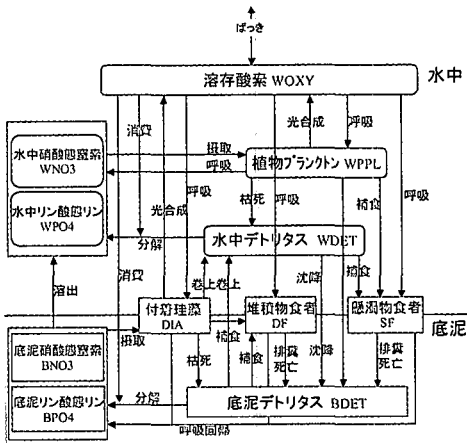


図-5 干潟生態系モデル概念図

表-3 干潟生態系モデルの独立変数

記号	変数	単位
C_{WPPL}	植物プランクトン	(g/m ³)
C_{WDET}	水中デトリタス	(g/m ³)
C_{WOXY}	溶存酸素 (DO)	(g/m ³)
C_{WNO3}	水中硝酸態窒素	(g/m ³)
C_{WPO4}	水中リン酸態リン	(g/m ³)
C_{DIA}	付着珪藻	(g/m ²)
C_{DF}	堆積物食者	(g/m ²)
C_{SF}	懸濁物食者	(g/m ²)
C_{BDET}	底泥デトリタス	(g/m ²)
C_{BNO3}	底泥硝酸態窒素	(g/m ²)
C_{BPO4}	底泥リン酸態リン	(g/m ²)

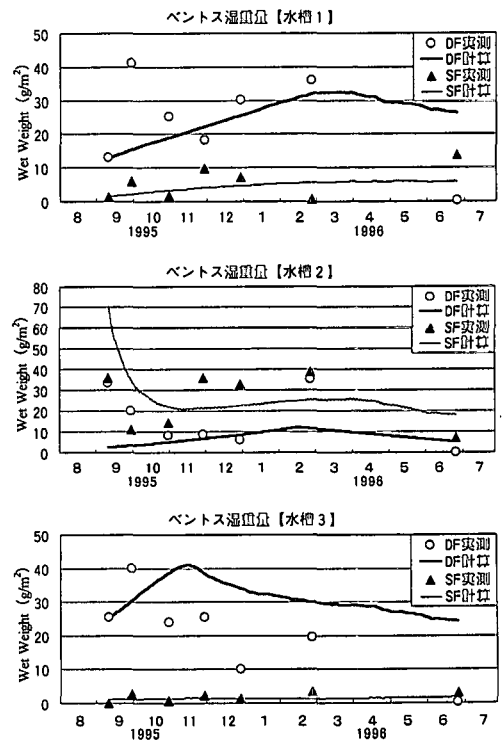


図-6 ベントス湿重量の計算結果と実測値の比較

ている。水槽2ではやや整合性が悪いが、増減傾向については概ね整合している。この結果から、構築したモデルの妥当性が検証された。本研究ではこの結果をもとに、干潟の機能を表す各種指標の可能性を検討した。

b) 物質循環系の指標

干潟の機能の1つとして物質循環を取り上げ、物質循環の中で物質の堆積速度を表す項目として、デトリタス(DET)の消費量に対する生成量の比を物質循環指標として定義し、本指標を用いて干潟の性質を検討した。この指標が1以上であれば有機物ストック型の干潟であることを、1未満であれば有機物分解型の干潟であることを意味する。図-7は、ここで定義した物質循環指標の上記の水槽ごとの経時変化を示したものである。いずれの水槽においても物質循環指標は1未満となっており、デトリタスが蓄積されるような状況にはなっておらず、有機物分解型の干潟であることがわかる。

なお、水槽1と3の方が水槽2よりデトリタスの分解効率が良いようである。これは水槽2では懸濁物食者(SF)の割合が多いことによるものと考えられる。

このように、干潟生態系モデルの計算結果より、各項目の生成量/消費量を考慮することにより干潟の性質や

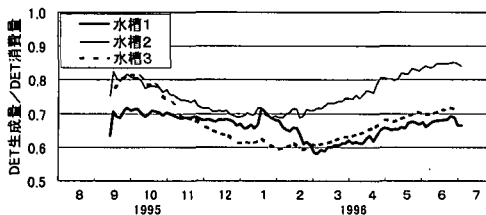


図-7 物質循環指標の経時変化

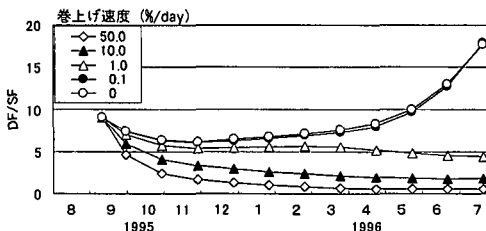


図-8 波浪外力によるDF/SFの経時変化

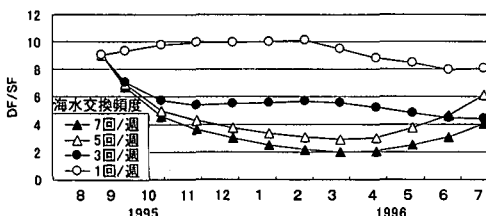


図-9 海水交換頻度によるDF/SFの経時変化

物質循環の特性を概略的に抽出することが可能である。

また、可能性としては、付着珪藻の同化速度、低DOの年間発生日数、浮遊・底生系を足した1次生産量などを指標として用いることで、海水浄化機能や水質改善・汚濁能力などを示す指標が作成できると考えられる。

c) 生物種構成の指標

干潟生態系の生物の種構成を表す指標として、堆積物食者(DF)と懸濁物食者(SF)の現存量(湿重量)の比を取った生物種構成の指標を提案、検討した。これは、直接的に干潟の生物相をあらわすとともに、物理外力等による生物の棲み分けを反映した指標でもあったと考えられる。ここでは、モデルを用いて、この指標の感度解析を行うこととした。図-8は、上記の水槽1を対象として、波浪外力(波による巻上げ速度)を変化させた場合のDF/SFの経時変化を示す。同様に、図-9は、海水交換頻度を変化させた場合のDF/SFの経時変化を示す。図-8より、波浪外力が大きいほど堆積物食者(DF)の割合が低くなることが窺われる。図-9では、海水交換が多く行われるほど懸濁物食者(SF)の割合が高くなることが示されている。これは、海水流動や波浪の影響の大きな干潟ほどデトリタスが巻きあがり、これらが懸濁物食者の摂食を有利にすることを示している。逆に海水が停滞しやすい干潟では堆積物食者が多くなることが示しており、これは実際の水槽の状況と整合している。

以上の検討結果は、干潟生態系モデルの中で、外力を変化させた場合にモデルの中で生物相に変化を及ぼしうることを示している。

4.4 構造的機能評価法の検討

次に、干潟生態系の構造的機能評価法(図-1: 方法2)について、モデル計算結果より検討を行った。

a) 多様性指標

まず、計算期間中の各水槽の出現種類数の変化を図-10に示す。また、生物群集の多様度の算出方法として汎用的に用いられる、Shannon-Weaverの多様度指数(H') (木元・武田, 1989)の実測データに基づく計算結果を図-11に示す。Shannon-Weaverの多様度指数(H')は、種類別出現個体数を元に生物群集の多様度を算出する方法であり、(1)式で示される。

$$H' = -\sum (n_i/N) \log_s(n_i/N) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 H' : 多様度指数、 n_i : 種別個体数、 N : 総個体数、 S : 総種類数を表す。 H' の値が大きいほど、多様性の高い環境であると言える。

図-10から、水槽1では、出現種類数が一度上昇した後に下降し、その後は横這い傾向が見られる。水槽2では8~10種程度の横這いから減少、水槽3では4~6種程度で横這い傾向を示すことがわかる。また、図-11から H' も時間とともに概ね低下傾向を示している。種類

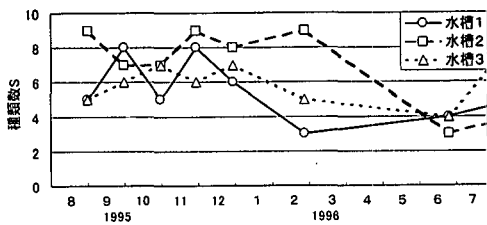
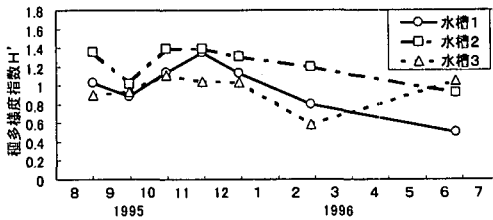
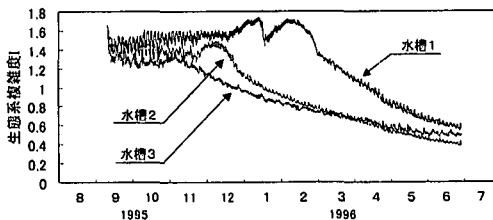


図-10 水槽別出現種数

図-11 実測データに基づく種多様度指数 H' の算出結果図-12 生態系複雑度 I の計算結果

数の増加が見られず多様度指数が低下していることから、計算期間中においては、生物相が単純化（貧相化）していることがわかる。

b) 構造的機能指標

次に、中村・田口（2000）により提案された生態系複雑度 I について、本計算結果を用いて算定すると、図-12 のようになる。生態系複雑度 I は、生物の種類の多さと群集構造の複雑度の積で定義される生物群集の種多様度の類推として、生態系構成要素の現存量と物質循環のパスの多様性に着目し、物質循環系としての生態系の複雑度として定義された指標である。

いずれも、複雑度が減少していく傾向にあり、それは、モデル計算により生じる系内の底生藻類の枯渇等による物質循環パスの単純化が原因のひとつと考えられる。ただし、波あたりかのある水槽1において、複雑度の減少がもっとも緩やかで、長く生態系の複雑度が維持されると推察される。その複雑度は、上記に示された指標で表される機能の多様性に対応しているように窺われ、まさに全体評価としての複雑度指標と、個別評価の干潟生態系の評価指標の特性が反映されている結果といえる。

以上のように、生物の種という概念を含まない物質循

環パスによる生態系複雑度 I と出現種による生物群集の多様度 H' には関連があることが示唆されている。やはり出現種が多く、生物群集の多様性が高い方が物質循環の多様性も高いのではないかと考えられる。

5. おわりに

本研究では、簡易な干潟生態系モデルを構築し、干潟の機能や構造を評価する指標・手法について提案、検討した。本検討で用いたパラメータは最小限のものであり、かつ種という概念を排除して同様の生活型を持つ生物群集を単位として物質循環の多様性・物質の蓄積等の検討を行った。この結果以下の項目が明らかになった。

- 1) 物理条件の違いにより生じる生物群集の増減の変化を、定性的に再現できる生態系モデルを構築した。
- 2) 物質循環系の機能を表す指標として、デトリタスの消費量に対する生成量の比を用いることが有効であることが示された。
- 3) 生物群集構成を表す指標として、堆積物食者と懸濁物食者の現存量の比が有効であることが示された。
- 4) 生態系モデルより生物群集をもとにして求められる生態系複雑度 I の変動傾向は、従来より見られる多様度指数 H' や出現種数の変動に整合していた。

以上より、本手法は、干潟を計画・設計する際に、限られた情報により、事前に干潟の性質や将来の状況を予測する手法として用いることが明らかになった。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、(独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部 中村由行室長、桑江朝比呂主任研究官に多大なるご協力を賜った。ここに記して、感謝の意を表します。

また、本研究は、「(社)土木学会海岸工学委員会 沿岸生態系評価研究会」の活動の一環として行われました。ここに記して、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 木元新作・武田博治 (1989): 群集生態学入門, 共立出版 (株), pp. 123-137.
- 桑江朝比呂・細川恭史・古川恵太・三好英一・木部英治・江口菜穂子 (1997): 干潟実験施設における底生生物群集の動態, 港研報告, 36 巻, 3 号, pp. 3-35.
- 中村義治・田口浩一 (2000): 新しい評価指標の提案と適用例, 土木学会海岸工学委員会第III期地球環境問題研究小委員会調査研究報告, 土木学会編, pp. 1-4-1-1-4-30.
- 日比野忠史・豊田政史・西守男雄・細川恭史・鶴谷広一 (1999): 久里浜湾の流れ特性と生態系に関する研究, 港研報告, 38 巻, 2 号, pp. 29-62.
- 細川恭史・桑江朝比呂・三好英一・室管一朗・木部英治 (1996): 干潟実験施設を用いた物質収支観測, 港研資料, No. 832, 22 p.