

生態系モデルを用いた環境修復技術の機能評価

— りんくう公園内海の事例 —

中谷直樹¹・大塚耕司²・奥野武俊³

¹工修 大阪府立大学助手 大学院工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-1)

²正会員 工博 大阪府立大学助教授 大学院工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-1)

E-mail: otsuka@marine.osakafu-u.ac.jp

³工博 大阪府立大学教授 大学院工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-1)

本研究では、生態系モデルを用いて沿岸域における環境修復技術の機能を評価する方法について検討することを目的とし、環境修復技術の一例として、透過性堤体で閉鎖された浅場を形成している大阪府泉佐野市のりんくう公園内海を研究対象とした。現地における水質、底質、生態系の調査結果を基に、浮遊生態系モデル、付着生態系モデル、底泥生態系モデル、堤体モデルの4つのサブモデルからなる生態系モデルを開発し、環境修復効果の指標として炭素および栄養塩の固定量について定量的な評価を行った。その結果、炭素および栄養塩固定効果は、海底有機堆積物の増加に伴って年々減少すること、海藻の生産量と密接に関係のある内海の水深に大きく依存することがわかった。

Key Words : enclosed sea, environmental restoration, ecosystem model, carbon and nutrient fixation, artificial lagoon

1. 緒言

大阪湾のような周辺部に大都市を持つ閉鎖性海域では、自然の水質浄化機能が都市部からの負荷に追いつけず、赤潮や貧酸素水塊の発生など慢性的な水質汚染に悩まされている。閉鎖性海域環境の修復に関しては、これまでも様々な技術が開発、提案されているが、中でも、干潟、藻場などの浅場の造成は、生態系が本来持っている物質循環機能を積極的に利用するという点で、生物資源管理も含めた効果が期待されている。このような技術の特徴や期待される効果については、現在調査や研究が進められているところであるが、未だ経験的、定性的なものが多く、物質循環を含めた機能解明は、三河湾一色干潟¹⁾など一部で試みられている程度である。

停滞性の強い閉鎖性海域における環境修復技術の一つとして、赤井²⁾は「海洋の空(うつろ)」と呼ばれる石積みの堤体で囲まれた浅場を提唱した。この技術の水質浄化機能に関しては、堤体での礫間接触酸化効果に着目した小田ら^{3),4),5)}の研究や、実海域実験施設を用いた辻ら⁶⁾の研究などが行われているが、生物の生産、捕食活動という複雑な機構が水質浄化の主要因の一つとなっているため、その機能については不明な点が多く残されている。また、水質浄化効率の向上、浄化機能の維持管理を行う上で、規模や形態などが水質浄化機能に及ぼす影響、浄

化能力の長期的な変化等を推定、予測する必要があり、内水域の物質循環も考慮した数値モデルの開発が望まれている。

著者ら^{7),8),9)}は、大阪府泉佐野市の府営りんくう公園シンボル緑地内にある内海(石積みの堤体で閉鎖された浅場となっている)を対象として、内水域生態系の物質循環に着目した実地調査と生態系モデルの開発を行い、生態系の特徴と水質浄化機能を明らかにすることを目的として研究を進めている。実地調査結果の詳細については別報¹⁰⁾にまとめているので、本論文では、実地調査の概要と、調査結果から水質浄化機能に重要な役割を果たしていることが明らかとなった大型海藻の調査について述べるに留め、調査結果に基づいて開発した閉鎖性の浅場に対応した生態系モデルについて詳述することとする。また、環境修復技術の機能評価の一例として、炭素および栄養塩固定効果の推定方法を提案し、堤体形状や内水域の水深が炭素および栄養塩固定効果に及ぼす影響について考察した結果を紹介する。

2. 実地調査

(1) 調査対象

本研究の対象であるりんくう公園は、図-1に示すよう

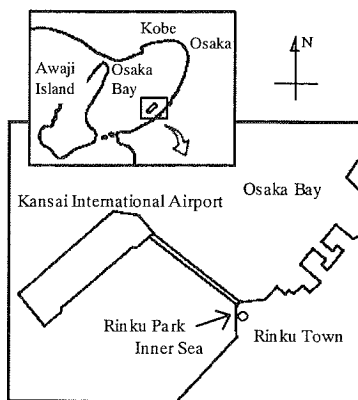


図-1 りんくう公園内海の場合

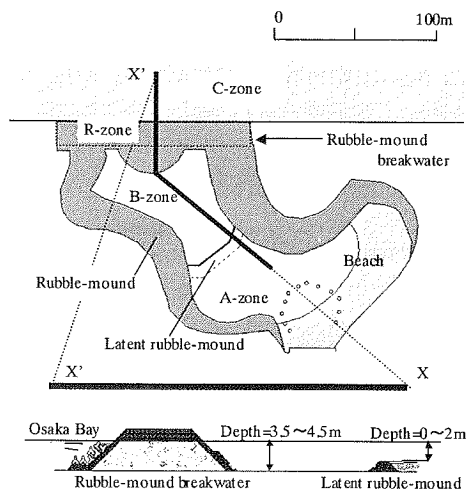


図-2 りんくう公園内海の平面および断面形状

に、大阪府泉佐野市の関西国際空港対岸に位置する。このりんくう公園シンボル緑地内には内海（うちうみ）と呼ばれる石積みの堤体によって閉鎖された浅い静穏水域がある。内海は、図-2に示すように、奥行き120m、幅50m程度の細長い形状をしており、表面を巨礫で覆われた石積み護岸と砂浜、および石積み防波堤によって囲まれている。中央部には砂止め用の潜堤があり、その奥側は比較的浅く、海底基質は砂質で、外海側は比較的深く、海底基質はシルト質となっている。このあたりの平均潮位差は約0.6m、大潮差は約1.0mであり、平均水位における内海の水線面積が約6,600m²、そのときの容積が約10,000m³であるので、平均的な水深は約1.5mとなり、非常に浅い水域であるといえる。後述するように、水質は内海内においてほぼ一様で、底質は潜堤の内外で差異が見られたことから、潜堤の内側（A-zone）、潜堤の外側（B-zone）、外海（C-zone）の3つにゾーニングした。

(2) 調査の概要

実地調査およびモニタリングは内海オープン直後の1996年10月から2002年3月まで行った。毎月の調査では、水質の現地計測および採水後の分析、潜水による大型海藻の植生被度分布調査、海底の堆積物厚さの調査、目視観察、写真撮影による生物相の調査等を行った。これらの結果は主として生態系モデルの検証用のデータとして用いた。また1997年5月より3ヶ月毎に行った総合調査では、主として生態系モデル開発のための基礎データとして用いることを目的として、毎月調査の項目に加えて、底質および海底堆積物のサンプリング調査、付着生物の採取調査、動植物プランクトンの採集、刺網等によるネクトンの捕獲、採泥によるバントスの採集などを行った。

(3) 大型海藻の調査結果

1997年1月頃から大型海藻が急増してきたので、1997年2月以降大型海藻の植生被度分布調査を毎月行うことにした。植生被度調査は、主として潜水による目視観察によって行い、補助的に船上からの箱めがねによる観察結果を考慮して決定した。図-3に一例として調査開始当初の被度調査結果を示す。図中の番号は被度階級を表したものであり、Penfound¹¹⁾が提案した被度階級を改良したものである。この例では、周辺護岸付近においては被度階級3以上が確認される。またB-zone中央部は被度階級2以下が続くものの、A-zone中央部は季節変動が大きく2月から4月にかけて高い被度階級の面積が広い。

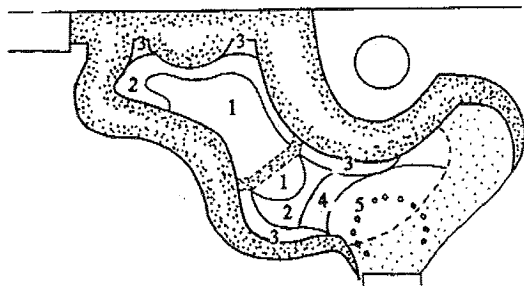
これらの毎月の被度分布図から被度階級ごとの分布面積を算出し、これに表-1に示す各被度階級の現存量を乗じて、内海全体の海藻全湿重量を推定した。なお各被度階級の現存量は数回の採取調査によって計測した平均値を用いている。図-4にA-zone、B-zoneそれぞれにおける海藻湿重量の季節変化を示す。これより、2000年まではA-zone、B-zoneともに春先に大量発生しているが、2000年5月以降は急激な増減は見られず、B-zoneでは年間を通してある程度の量を保っていることがわかる。

この増減の変化は、生育海藻種の変化によって引き起こされたものと考えられる。内海に最初に現れた海藻はアナアオサ、アオノリ属、シオゲサ属で、1997年2月～3月にかけて砂浜から潜堤に至るまでの砂地に一気に分布域を広げた。

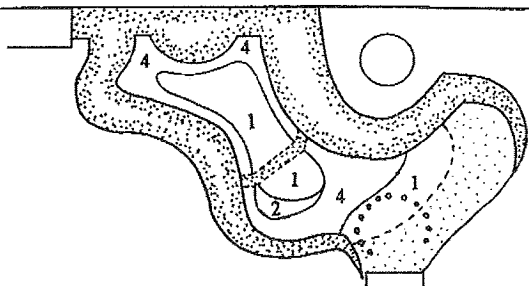
表-1 海藻の植生被度階級および各被度の採取結果

Coverage rank	Coverd ratio (%)	Biomass(g/m ²)	Ave ±SD	Number of Data
0	0	0.0		-
1	0~5	10.8±3.3		7
2	5~25	146.8±31.0		7
3	25~50	692.7±61.8		7
4	50~75	1058.6±119.3		14
5	75~100	2816.0±262.8		8

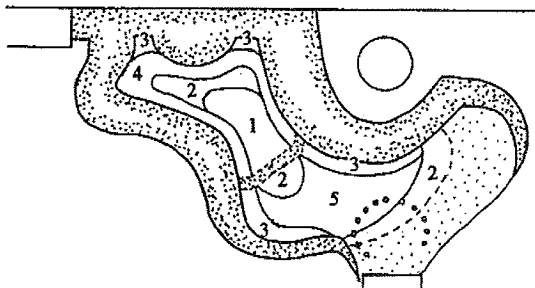
(1) February 5, 1997



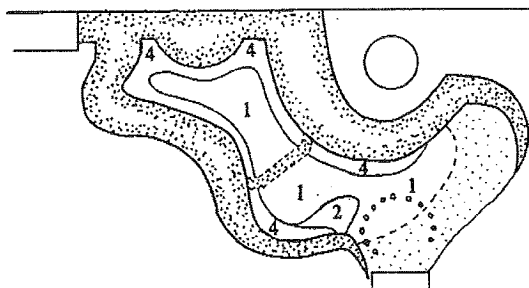
(5) June 4, 1997



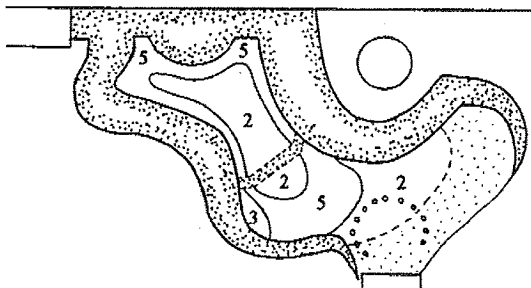
(2) March 5, 1997



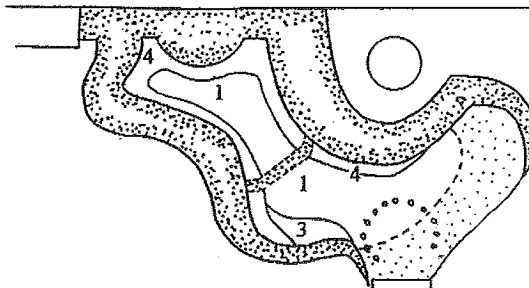
(6) July 2, 1997



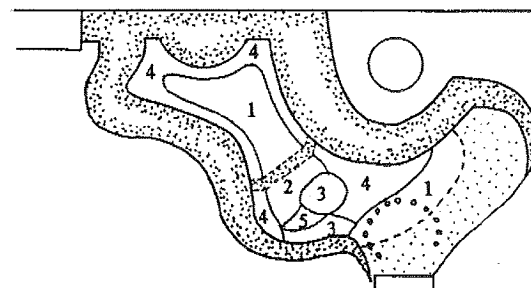
(3) April 2, 1997



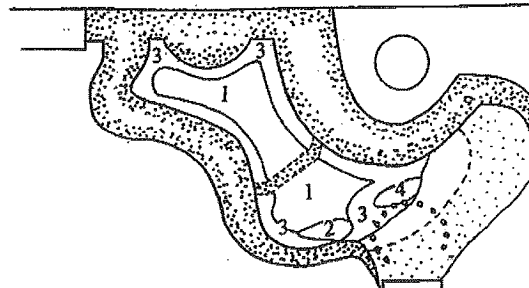
(7) July 30, 1997



(4) May 19, 1997



(8) September 1, 1997



Coverage rank	Coverd ratio (%)
0	0
1	0~5
2	5~25
3	25~50
4	50~75
5	75~100

図-3 大型海藻の植生被度分布調査結果例 (1997年2月~1997年9月)

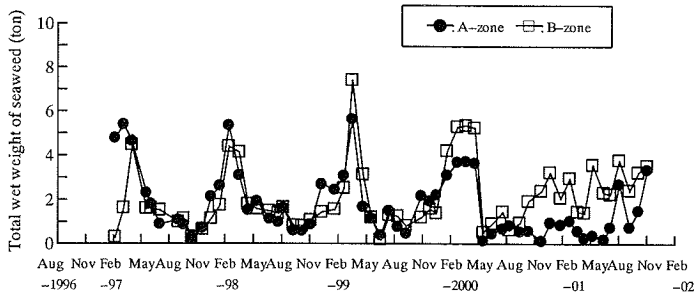


図-4 大型海藻の湿重量推定結果

一方防波堤近くでは、緑藻類が優占種であるものの、褐藻類のシオミドロや紅藻類のフダラク等が所々生息していた。1997年5月になると防波堤近くで褐藻類のワカメや紅藻類のトサカノリ、ベニスナゴ等が見られるようになった。さらに1997年10月からは防波堤の近くで、それまでに見られなかった種類の紅藻類（ムカデノリ、ツノマタ、カバノリ等）も見られるようになり、1998年以降は、毎年冬季に防波堤近くで褐藻類のタマハハキモクの生息が確認された。

このように、内海での出現種は年々増加しており、それに伴って多様性は増している。初年度は緑藻類のアオサがほぼ優占していたために現存量は大きな増減を繰り返したが、3年目からフダラクやツノマタなどの紅藻が、4年目以降ではワカメやタマハハキモクなどの褐藻がそれぞれ増えており、植生が変化したために、現存量の変動の様子が変わったものと考えられる。

3. 生態系モデル

(1) 生態系モデルの概要

本研究で扱う生態系モデルは、有機物や栄養塩類、大型海藻、付着動物などをコンパートメントとして扱い、その間における物質（炭素、窒素、リン、および酸素）のやり取りを微分方程式で置き換えた、いわゆる物質循環型モデルである。これらコンパートメント間のフラックスは、後述する海水交換による物質の移動 (F_P) に光合成や呼吸、分解などの化学/生物反応 (F_B) を加えた次式で表される。

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = F_{Pi} + F_{Bi} \quad (1)$$

ただし、 C_i は*i*番目のコンパートメントの状態変数（現存量など）を表す。

ここでは、りんくう公園内海のように比較的小規模な

閉鎖性の浅場を対象としており、物質の輸送に関しては潮汐による海水交換が卓越し、内水域で水質がほぼ均一となっているため、水域をいくつかのボックスの組み合わせで表し、ボックス間の海水交換のみで物質の移動を表現することとした。また、各ボックスの生物反応については、浮遊生態系モデル、付着生態系モデル、底泥生態系モデル、堤体モデル、の4つのサブモデルの自由な組み合わせで構成することとし、設計条件が変わった場合にも対応できるようにした。以下、各サブモデルの詳細について述べる。

(2) 浮遊生態系モデル

浮遊生態系モデル (PLE) は、図-5に示すように、内湾の低次生態系を扱った中田¹²⁾モデルを簡略化したモデルとなっており、植物プランクトン (PP)、動物プランクトン (ZP)、懸濁態有機物 (POM)、溶存態有機物 (DOM)、溶存無機態リン (DIP)、溶存無機態窒素 (DIN)、溶存酸素 (DO) の7つのコンパートメントからなる。これらのコンパートメント間の炭素、窒素、リン、および酸素のフラックスは表-2のように定義しており、各コンパート

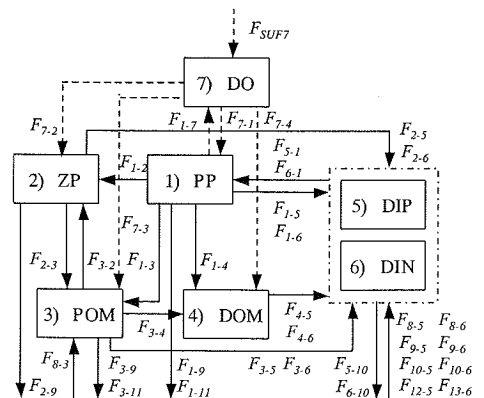


図-5 浮遊生態系モデル (PLE) の各コンパートメントおよびフラックス

表-2 浮遊生態系モデル (PLE) の各フラックスの定義

CNP fluxes			
$F_{1,2}$	Grazing	$F_{3,4}$	Translation
$F_{1,3}$	Natural death	$F_{3,5}, F_{3,6}$	Decomposition
$F_{1,4}$	Secretion	$F_{3,9}$	Grazing
$F_{1,5}, F_{1,6}$	Respiration	$F_{3,11}$	Sinking
$F_{1,9}$	Grazing	$F_{8,3}$	Evacuation, Natural death
$F_{1,11}$	Sinking	$F_{4,5}, F_{4,6}$	Decomposition
$F_{5,1}, F_{5,6}$	Photosynthesis	$F_{5,10}, F_{6,10}$	Photosynthesis
$F_{2,3}$	Evacuation, Natural death	$F_{8,5}, F_{8,6}$	Excretion
$F_{2,5}, F_{2,6}$	Excretion	$F_{9,5}, F_{9,6}$	Excretion
$F_{2,9}$	Grazing	$F_{10,5}, F_{10,6}$	Respiration
$F_{3,2}$	Grazing	$F_{12,5}, F_{13,6}$	Elution
Oxygen fluxes			
F_{SUF7}	Reaeration	$F_{7,2}$	Respiration
$F_{1,7}$	Photosynthesis	$F_{7,3}$	Decomposition
$F_{7,1}$	Respiration	$F_{7,4}$	Decomposition

メントの現存量の時間変化は、前述のように海水交換による物理過程に、光合成や呼吸、分解などの化学/生物過程を加えた関係式で表される。なお、それぞれのフラックスの反応式および各生物パラメータは中田¹²⁾モデルのものを用いている。詳細は付録の表-a1、表-a2に示した。

(3) 附着生態系モデル

内海における生態系の特徴のひとつとして、アオサなどの大型海藻とマガキやフジツボなどの附着動物、カニや魚などのネクトンの存在があげられる。附着生態系モデル (SSE) では、このような特徴を表現するため、図-6に示すように、海藻 (SW)、附着動物 (SA)、ネクトン (NK) の3つのコンパートメントで表す。ここでフラックスは表-3のように定義した。また、それぞれのフラックスの定式化および各生物パラメータは付録の表-a3、表-a4にまとめた。

海藻の成長フラックスの定式化に関しては、能登谷¹³⁾による不稔性アオサの栄養塩に対する光合成速度の特性を求めた実験、同じく不稔性アオサの光強度に対する光合成速度の特性を求めた実験、Yokohama¹⁴⁾によるアナアオサの水温に対する酸素放出速度に対する特性を求めた実験の結果から近似式を求め、栄養塩と光強度、水温の関数で表した。また、植物プランクトンの増加にともなって光強度が減衰する従来の式に加え、海藻自身の増加によっても光が遮蔽され、成長をおさえる形にした。海藻の呼吸フラックスの定式化は、上述のYokohama¹⁴⁾の実験のうち、暗条件での結果より、水温35℃まで水温に対して指数関数的に増加していたため、指数関数で表した。枯死についても同様に、水温に対し指数関数的に大きくなる形とした。

附着動物およびネクトンに関しては、干潟の生態系を扱ったBaretta and Ruardij¹⁵⁾のモデルで取り扱われている、マクロベントスおよび表在性ベントスのモデルを基本的に定式化を行った。附着動物の摂餌する対象は、植物プランクトン、動物プランクトン、POM、附着動物(共食い)、海藻、底泥有機物とし、ネクトンは海藻、附着動物、ネ

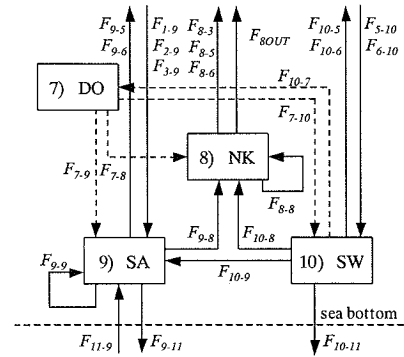


図-6 附着生態系モデル (SSE) の各コンパートメントおよびフラックス

表-3 附着生態系モデル (SSE) の各フラックスの定義

CNP fluxes			
F_{8OUT}	Grazing	$F_{9,11}$	Evacuation, Natural death
$F_{8,8}$	Grazing	$F_{10,9}$	Grazing
$F_{9,8}$	Grazing	$F_{11,9}$	Grazing
$F_{10,8}$	Grazing	$F_{10,11}$	Natural death
$F_{9,9}$	Grazing		
Oxygen fluxes			
$F_{10,7}$	Photosynthesis	$F_{7,9}$	Respiration
$F_{7,8}$	Respiration	$F_{7,10}$	Respiration

クトン(共食い)を食べる設定とした。また、餌と自分自身のCNP比が異なるときは、糞のCNP比を調節することで、自身のCNP比を保持するようにした。なお、表-a3中の $Area_1$ は海藻および附着動物が分布する面積を表しており、 $Area_2$ は次節で扱う泥の存在する面積を表している。

(4) 底泥生態系モデル

底泥生態系モデル (SDE) のコンパートメントとフラックスを図-7と表-4に示す。また、それぞれのフラックスの定式化および各生物パラメータを付録の表-a5、表-a6に示す。底泥は酸化分解が行われる表層と、嫌気分解が行われる底層の2層に分けた。表層は底泥有機物 (SOM1) と溶存無機態窒素 (SDIN1) と溶存無機態リン (SDIP1) の3つのコンパートメントから成る。表層の厚さ h_1 は一定で、0.01 mとした。底層は底泥有機物 (SOM2) と溶存無機態窒素 (SDIN2) と溶存無機態リン (SDIP2) から成る。SOM2は、単位体積当りの炭素量が 3000 gC/m^3 で一定とし、底層の厚さ h_2 が物質質量によって変化する。

底泥の酸化分解に関しては、実地実験から得られた酸素消費速度から、計測時の単位面積あたりの炭素量で割り、SOM1に対する酸化分解速度を求めた。調査における炭素量の平均は $2.9 \times 10^6 \text{ mgC/m}^3$ であり、酸化分解が行われていると思われる0.01 mを掛けて単位面積あたりの炭素量を求めた。その他のフラックスは、今村ら¹⁶⁾

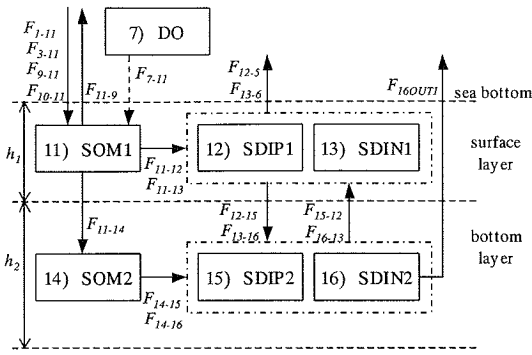


図-7 底泥生態系モデル (SDE) の各コンパートメントおよびフラックス

表-4 底泥生態系モデル (SDE) の各フラックスの定義

CNP fluxes			
F_{11-12}, F_{11-13}	Aerobic Decomposition	F_{14-15}, F_{14-16}	Anaerobic Decomposition
F_{11-14}	Deposit	F_{15-12}, F_{16-13}	Elution
F_{12-13}, F_{13-16}	Absorption	F_{16OUT1}	Denitrification
Oxygen fluxes			
F_{7-11}	Decomposition		

による水と底泥間のモデルを参考に定式化を行った。ここでは、底泥下層の無機栄養塩はそれより下に堆積しない、SDIN1からは脱窒は行われない、酸化層と還元層の付近でSDIN2から N_2 として出ていく、溶出は鉛直上向きにのみ行われる、と仮定し、実海域の底泥で行われている分解過程をできるだけ正確にモデル化するように試みた。

(5) 堤体モデル

堤体のフィルター効果を表現するために、浄水場などを対象として研究されてきた「ろ過」の理論を用い、堤体の礫による物理的な懸濁物の除去過程を、礫の粒径や堤体の長さといった物理パラメタで定式化した。また、前節で述べた底泥の分解、溶出のモデルと組み合わせて堤体モデル (RF) とし、石積み透過堤で行われる反応をサブモデルとしてまとめた。以下ろ過モデルについて述べる。

水が堤体を通過するとき水中の懸濁物 (PP, ZP, POM) が除去される過程が、一次反応の形で表されるとすると、それぞれの体積を V_{PP} , V_{ZP} , V_{POM} とすれば、

$$\frac{d(V_{PP} + V_{ZP} + V_{POM})}{dx} = \lambda(V_{PP} + V_{ZP} + V_{POM}) \quad (2)$$

で表される。これは、清澄化方程式とよばれるもので、 λ はろ過係数である。これを解くと以下のように、長さ

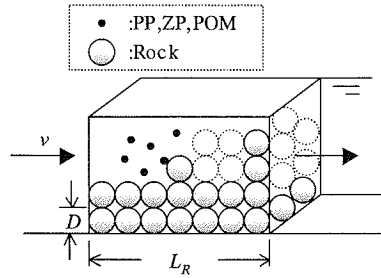


図-8 堤体モデル (RF) の概念

表-5 堤体モデル (RF) の各物理パラメタの値

Item	Symbol	Value
Deposit capacity	σ_s	0.5
Rock shape function	ϕ	0.8
Rock diameter	D	0.1m
Filtering efficiency	γ	0.00047

L_R の堤体を通過するとき除去される懸濁物の体積が求められる。

$$\frac{(V_{PP} + V_{ZP} + V_{POM})}{(V_{PP} + V_{ZP} + V_{POM})_0} = \exp(-\lambda L_R) \quad (3)$$

ただし、 $(V_{PP} + V_{ZP} + V_{POM})_0$ は透過前の懸濁物の体積を表す。

ろ過係数 λ は、阻止率とも呼ばれ、比堆積量 (堤体の体積に対する堆積物の体積の比) σ の関数である。 λ の表現は多くの研究者達によってさまざまな式が提案されているが、ここでは、空隙が減少することにより λ が小さくなることを表現した以下の式を使う。

$$\lambda = \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_s}\right) \lambda_0 \quad (4)$$

ここで、 σ_s は飽和状態での比堆積量であり、初期ろ過係数 λ_0 は藤田¹⁷⁾の値を参考に、以下のように与えた。

$$\lambda_0 = \frac{\gamma}{\phi D^{1.4} v^{0.5}} \quad (5)$$

ここで、 ϕ は礫の形状係数、 D は礫の粒径、 v は水が堤体を通過する速度である (図-8参照)。表-5に堤体モデルで使われるパラメタとその値を示す。除去効率係数 γ の値は小田ら^{4, 5)}の実験結果を参考に与えた。その他のパラメタは内海の堤体をもとに決定した。

ただし、生態系モデルでは各コンパートメントを炭素、窒素、リンの物質量で表しているため、除去される懸濁物の体積を物質量に換算する必要がある。ここでは、動物植物プランクトンとPOMの体積を文献^{(18), (19)}を参考にし、次式で表し、炭素量への変換を行った。

$$V_{PP} = \frac{C_{PP} Vol_R \varepsilon_0}{6.5 \times 10^7} \quad (6)$$

$$V_{ZP} = \frac{C_{ZP} Vol_R \varepsilon_0}{7.8 \times 10^9} \quad (7)$$

$$V_{POM} = \frac{C_{POM} Vol_R \varepsilon_0}{3.4 \times 10^7} \quad (8)$$

水中から除去された懸濁物は、礫に堆積した後に分解が行われる。本モデルでは、堆積する懸濁物を底泥有機物(SOM1)とみなし、堤体内における堆積から分解過程を、底泥モデルで表現する。堤体では、礫の全表面において分解が行われると考え、次式で礫の総表面積を求め、分解する有機物の面積とした。

$$Area_2 = \frac{4\pi(\phi D/2)^2}{3} Vol_R (1 - \varepsilon_0) = \frac{6Vol - R(1 - \varepsilon_0)}{\phi D} \quad (9)$$

ここで、 Vol_R は堤体ボックスの体積、 ε_0 は空隙率である。

(6) ボックス配置および流動モデル

りんくう公園内海に上述の生態系モデルを適用するため、B-zone、C-zone、R-zoneの表層と底層、A-zone表層の合計7つのボックスを配置した(図-9)。A-zoneは、浮遊生態系モデル(PLE)、付着生態系モデル(SSE)、および底泥生態系モデル(SDE)の3つのサブモデルの組み合わせであり、C-zoneは浮遊生態系モデルのみ、R-zoneは浮遊生態系モデル(PEL)、底泥生態系モデル(SDE)、堤体モデル(RF)の3つから成る。ただしR-zoneの分解過程における面積は堤体の礫の全表面積とした。

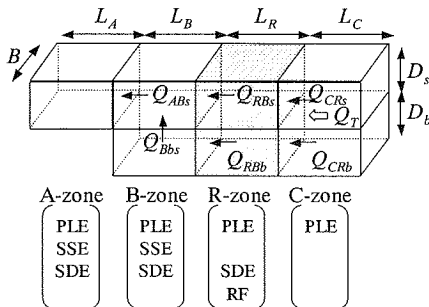


図-9 生態系モデルのボックス配置および海水交換の定義

このとき、内海全体の1潮汐間の海水交換量 Q_T は以下のように表される。

$$Q_T = \frac{d}{dt} [(L_A + L_B + L_R \varepsilon_0) BH \sin \omega_T t] \\ = (L_A + L_B + L_R \varepsilon_0) BH \omega_T \cos \omega_T t \quad (10)$$

ここで、 $\omega_T = (2\pi/720)$ rad/min は潮汐の振動数、 L_A , L_B , L_R はそれぞれ A-zone, B-zone, R-zone の長さ、 B は幅である。潮位変化による振幅 H は、大潮時の平均水位差 h_m 、小潮時の平均水位差 h_n を用いて次のように表した。

$$H = \frac{1}{2} \left\{ \frac{h_m + h_n}{2} + \frac{h_m - h_n}{2} \cos(\omega_L t) \right\} \quad (11)$$

ここで、 $\omega_L = (2\pi/21600)$ rad/min は月齢の振動数である。

R-zone では流入と流出の速度が同じであるとすると、表層と底層の単位時間あたりの流量は次のように表され、

$$Q_{CRs} = \frac{D_s}{D_s + D_b} Q_T, \quad Q_{CRb} = \frac{D_b}{D_s + D_b} Q_T \quad (12)$$

さらに流れが連続であるとすると、それぞれの境界面での単位時間あたりの流量は次式で表される。

$$Q_{RBb} = Q_{Bbs} = Q_{CRb} \quad (13)$$

$$Q_{RBs} = Q_{CRs} = L_R BH \omega_T \cos(\omega_T t) \quad (14)$$

$$Q_{BAs} = L_A BH \omega_T \cos(\omega_T t) \quad (15)$$

4. 数値計算

(1) 計算結果の検証

本生態系モデルの精度を検証するため、内海の水質環境に最も影響を与えていると思われる大型海藻の現存量について、数値計算結果と調査結果との比較を行った。ここで、数値計算の時間間隔は12分とした。また、外部境界条件、初期条件はそれぞれ表-6、表-7のように与えた。ここで外部境界条件としては、日射量については北緯35°における完全晴天時の全日射量のデータを参考に正弦関数で与え、日長に関しては中田⁽¹¹⁾の値をそのまま用いている。また水質の境界条件としては、水温は現地調査の結果を、DOおよび栄養塩類については過去20年間の大阪湾全体の平均値をそれぞれ参考にして正弦関数で季節変化を与えているが、その他の有機物に関しては初期値の状態が年間続くものとした。なお初期条件は、

表-6 数値計算で用いた境界条件

Forcing	Notation	Units	Value
Phytoplankton	PP	mgC/m ³	485
Zooplankton	ZP	mgC/m ³	35
Particulate Organic Matter	POM	mgC/m ³	354
Dissolved Organic Matter	DOM	mgC/m ³	1200
Dissolved inorganic phosphorus	DIP	μ molP/l	$DIP=0.5+0.5 \cdot \cos((2\pi/365)(day-60))$
Dissolved inorganic nitrogen	DIN	μ molN/l	$DIN=17.0+10.0 \cdot \cos((2\pi/365)(day-90))$
Dissolved Oxygen	DO	mg/l	$DO=6.5+1.5 \cdot \sin((2\pi/365)(day-90))$
Temperature	T	°C	$T=17.5+10.0 \cdot \sin((2\pi/365)(day-190))$
Incident Max. Insolation	I_{max}	ly/day	$I_{max}=285.0+115.0 \cdot \sin((2\pi/365)(day-120))$
Day length	DL	day	$DL=0.508+0.098 \cdot \sin((2\pi/365)(day-233))$

表-7 数値計算で用いた初期条件

Forcing	Notation	Units	Value							
			A-zone	B-zone		R-zone		C-zone		
				surface layer	bottom layer	surface layer	bottom layer	surface layer	bottom layer	
Phytoplankton	PP	mgC/m ³	200						485	
Zooplankton	ZP	mgC/m ³	35.0							
Particulate Organic Matter	POM	mgC/m ³	100	200		100		354		
Dissolved Organic Matter	DOM	mgC/m ³	1200							
Dissolved inorganic phosphorus	DIP	μ molP/l	0.79							
Dissolved inorganic nitrogen	DIN	μ molN/l	25.843							
Dissolved Oxygen	DO	mg/l	5.0							
Nekton	NK	mgC/m ³	100							
Sessile animals	SA	mgC/m ²	1000							
Seaweed	SW	mgC/m ²	2000							
Sedimentary organic matter 1	SOM1	mgC/m ³	8.0E+03		1.5E+03					
Sedimentary organic matter 2	SOM2	mgC/m ³	3.0E+03							
Depth of sedimentary organic matter 2	h_2	m	0.0001							
Sedimentary dissolved inorganic phosphorus	SDIP	μ molP/l	0.79							
Sedimentary dissolved inorganic nitrogen	SDIN	μ molN/l	25.843							

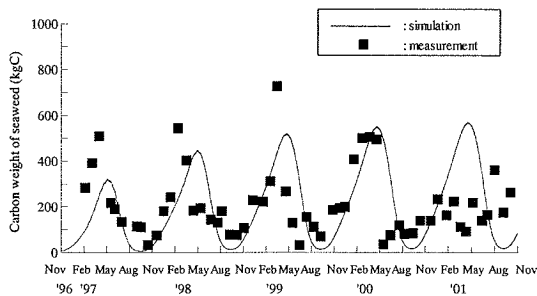


図-10 大型海藻の数値計算結果と調査結果の比較

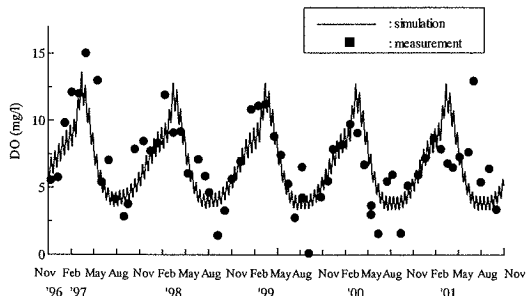


図-12 DOの数値計算結果と調査結果の比較

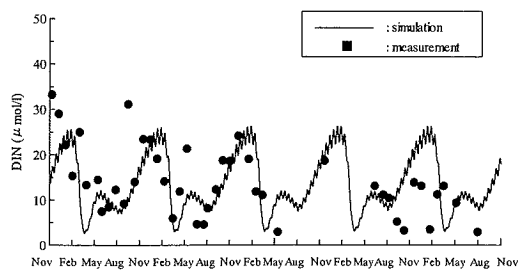


図-11 DINの数値計算結果と調査結果の比較

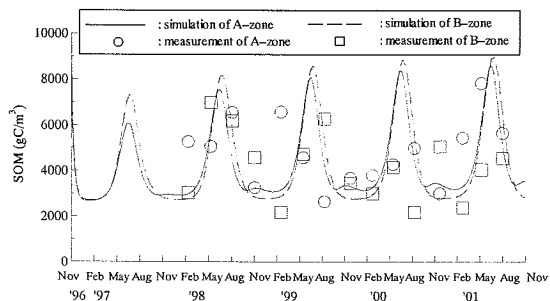


図-13 SOMの数値計算結果と調査結果の比較

1996年10月における実地調査結果を参考にした。

図-10に大型海藻の数値計算結果と調査結果の比較を示す。図の実線は内海の全海藻炭素量の計算結果、■印は調査から得られた推定値である。これを見ると、海藻の季節的な増減を概ね表現できており、量的にも一致していると思われる。また、図-11~13に示すように、栄養塩類、DO、海底堆積物の炭素量などの比較も行っており、調査結果とよい一致を示すことを確認している。

(2) 炭素および栄養塩固定量

本生態系モデルでは、光合成、呼吸、脱窒によるガスのやり取り以外には、炭素、窒素、リンの全ての物質が系内で保存されるように物質循環をモデル化している(CNP保存系モデル²⁰)。このモデルを用いると、内海内の浮遊系を除く全物質量の一定期間の増加量から海水経由の内海の炭素および栄養塩(窒素、リン)の固定量が計算できる。またこの固定量から海水経由の炭素の流

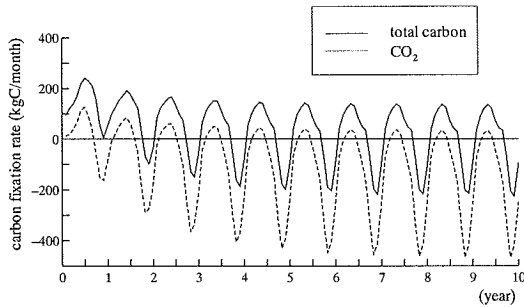


図-14 りんくう公園内海の1月毎の炭素固定量

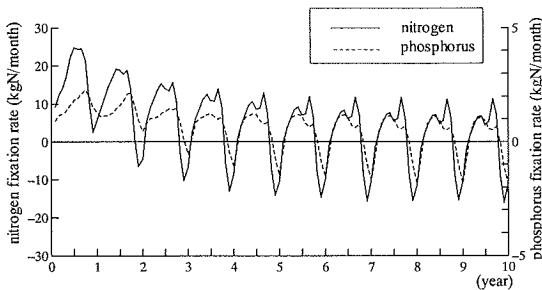


図-15 りんくう公園内海の1月毎の栄養塩固定量

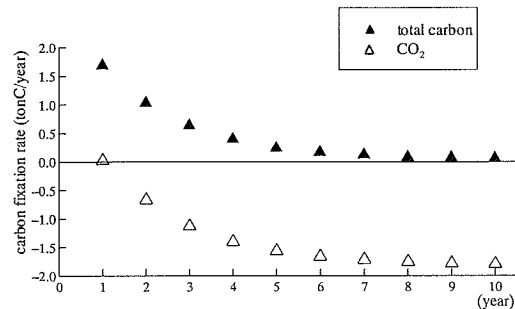


図-16 りんくう公園内海の1年毎の炭素固定量

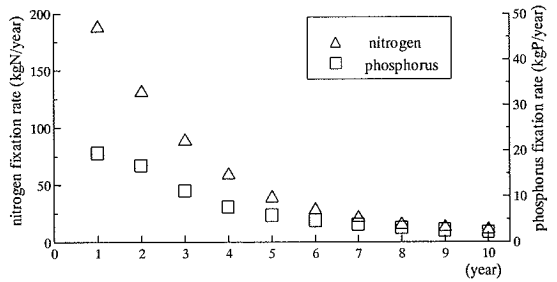


図-17 りんくう公園内海の1年毎の栄養塩固定量

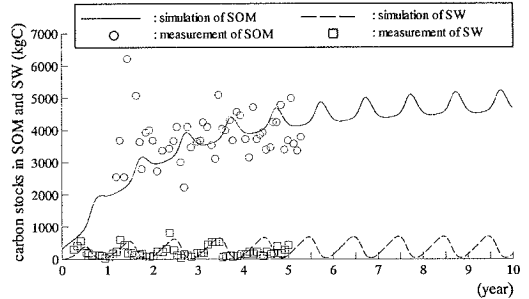


図-18 りんくう公園内海の底泥有機物および海藻の炭素量

入量を差し引くことによってCO₂固定量を計算することができる。

計算された1ヵ月毎の炭素と栄養塩の固定量を図-14、図-15にそれぞれ示す。炭素および栄養塩固定量は年に1回大きなピークを持っているが、この時期が図-10に示した海藻の現存量が増加する時期と一致していることから、内海の炭素および栄養塩の固定量は海藻による光合成に強く依存していることがわかる。

図-16、図-17は1年毎の炭素および栄養塩の固定量を示している。炭素および栄養塩の固定量は初めの2~3年で急激に減少し、その後0に漸近している。特にCO₂の固定量は2年目以降負の値となっており、大気中にCO₂を出す系となっていることを表している。内海の底泥有機物(SOM)と海藻(SW)の炭素量の季節変化を表した図-18を見ると、底泥有機物の堆積がある一定量以上で飽和状態となることがわかる。海藻の生産活動は常に行われていることから、光合成による炭素および栄養塩の取り込みのフラックスと呼吸や分解によって排出するフラックスが同じ量に達したと考えられ、内海の水質浄化能力を保つためには溜まった有機物を系外に取上げるなど何らかの管理が必要であることを示唆している。

(3) 堤体体積および水深の影響

水質浄化効果に対する堤体体積の影響と内水域の水深の影響を見るために、以下のように設計条件を変化させてケーススタディを行った。基本となるCase 1は内海の

現状を模した形で、前節でその結果を示している。Case 2 は堤体の長さは変化させず、全ての幅を 1.5 倍にした上で全体の体積を同じにするため、内海の長さを小さくした。これにより、堤体体積と内水域体積の比が Case 1 の 0.17 から 0.27 へ増加し、堤体の影響がより強い形状となっている。Case 3 は長さおよび堤体体積と内水域体積の比は Case 1 と同じで、幅を 1/2 にし、水深を 2 倍にした。設計条件は表-8 に示す通りで、体積の変化による影響を小さくするために、なるべく総体積は変化しないようにした。

各ケースにおける炭素および栄養塩の取り込み量の経年変化を図-19~図-21 に示す。これを見ると、炭素、窒素、リンいずれの場合も Case 1 と Case 2 の固定量はほぼ同じとなっている。堤体体積と内水域体積の比の違いが固定量にあまり影響しないことの原因として、堤体体積が増加しても、一旦は懸濁物のトラップ量が増加するものの、礫間接触酸化による分解量も増加するため、結果的に固定量はあまり変化しないことが考えられる。一方、Case 3 では炭素、窒素、リンともに Case 1, Case 2 よりも初期の固定量が小さくなっており、水深を深くした影響が現れている。一次生産者であり、生態系の中でも物質量の比較的多い大型海藻の成長が水深を深くしたことによる光強度の減少で制限された結果、栄養塩の取り込みが低く抑えられたためと考えられる。これらのことから、炭素および栄養塩固定量という指標で見れば、大型海藻による生産活動を向上させるような設計条件を整えることが重要であるといえる。

表-8 各ケースにおけるボックスの大きさおよび体積

	Case 1	Case 2	Case 3
L_A (m)	60	40	60
L_B (m)	60	35	60
L_R (m)	15	15	15
L_C (m)	100	65	100
B (m)	60	90	30
D_s (m)	1.75	1.75	3.5
D_b (m)	1.75	1.75	3.5
Total volume (m ³)	43050	42525	43050

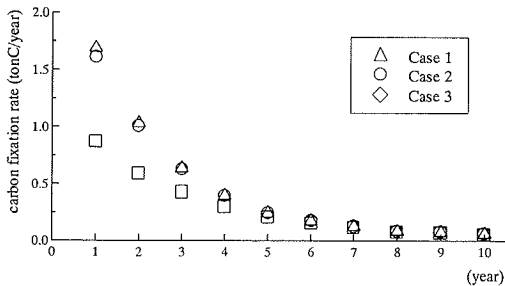


図-19 各ケースにおける1年毎の炭素固定量

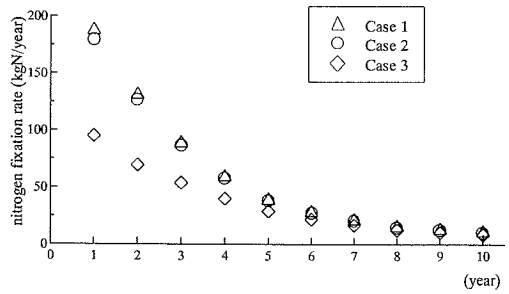


図-20 各ケースにおける1年毎の窒素固定量



図-21 各ケースにおける1年毎のリン固定量

5. 結言

本研究では、生態系モデルを用いて沿岸域における環境修復技術の機能を評価する方法について検討することを目的とし、透過性堤体で閉鎖された浅場を形成している大阪府泉佐野市のりんくう公園内海を対象として、実地調査および生態系モデルの構築を行った。

実地調査では、大型海藻の植生被度分布および各被度の平均現存量から内海全体の湿重量を推定し、季節変化および経年変化の特徴について整理した。

一方、現地における水質、底質、生態系の調査結果を基に、浮遊生態系モデル、付着生態系モデル、底泥生態系モデル、堤体モデルの4つのサブモデルからなる生態系モデルを開発し、モデルによって大型海藻の平均的な現存量と季節変化を概ね再現できることを確認した。

このモデルを用いて1月毎の炭素および栄養塩固定量を計算した結果、固定量が増加する時期が大型海藻の繁茂期と一致することがわかった。このことは、内海の炭素および栄養塩の固定が海藻の1次生産に強く依存していることを示している。

また1年毎の炭素および栄養塩固定量を計算し、経年変化を調べた結果、固定効果が海底有機堆積物の増加に伴って年々減少することがわかった。これは海藻や植物プランクトンの光合成による炭素および栄養塩の取り込みのフラックスに対し、呼吸や分解によって排出するフラックスが同レベルに達したためと考えられる。

さらに、内水域の形状を変化させたときの比較を行った結果、堤体体積と内水域体積の比の変化は炭素および栄養塩の固定量にはあまり影響せず、水深を深くすると、大型海藻の成長が制限され、固定量が減少することがわかった。このことから、炭素および栄養塩固定量という指標で見れば、大型海藻による生産活動を向上させるような設計条件を整えることが重要であるといえる。

以上の検討結果から、生態系モデルを用いて炭素および栄養塩の固定量を推定するという方法が、環境修復技術の機能を評価し、水質浄化効果の向上や浄化機能の維持管理に対する重要な情報を得るための手法として有効であることを示すことができたと考える。今後、本手法を他の環境技術にも応用し、環境技術の最適選定や最適組み合わせの検討などにも利用できるように研究を進めていきたい。

謝辞： 実地調査を行うにあたり、大阪府臨海公園事務所ならびに（財）大阪府公園協会の方々には多大なるご協力を賜りました。また、総合科学（株）中西敬氏、吉村直孝氏、（株）日本港湾コンサルタント沢田守氏には研究全般に関して専門的な立場からご助言いただきました。さらに、本研究に修士および卒業研究として参加して下さいました、元大阪府立大学大学院生宮地誠之氏（現国土交通省四国運輸局）、塩谷淳氏（現（株）石垣）、元大阪府立大学学部生藤原峰生氏（現大阪府立南港南中学校）には深く感謝いたします。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金の助成を得て行われたことを付記し、関係各位に謝意を表します。

付録 生態系モデルのフラックス計算式および生物パラメタ

表-a1 浮遊生態系モデル (PLE) のフラックスの計算式

Flux	Definition	Function	Parameter
[Phytoplankton]			
$F_{15,6,1}$	Photosynthesis	$F_{15,6,1} = V_1(T) \cdot \mu_1(DIP, DIN) \cdot \mu_2(I_0, H, t) \cdot PP(I) \cdot Vol(I)$	
$F_{5,1}$		$F_{5,1} = F_{15,6,1} \cdot [P:C]_{PP}$	
$F_{6,1}$		$F_{6,1} = F_{15,6,1} \cdot [N:C]_{PP}$	
	Maximum growth rate	$V_1 = ssp \cdot \exp(\beta_{ssp} \cdot T)$	ssp, β_{ssp}
	Growth restriction by nutrient	$\mu_1 = \min\left\{\frac{DIP(I)}{K_{dip} + DIP(I)}, \frac{DIN(I)}{K_{din} + DIN(I)}\right\}$	K_{dip}, K_{din}
	Growth restriction by light intensity	$\mu_2 = \frac{1}{H} \int_0^H \frac{I_0}{I_{opt}} \cdot \exp(-kz) \cdot \exp\left[1 - \frac{I_0}{I_{opt}} \cdot \exp(-kz)\right] dz$	I_{opt}
	Light intensity on the sea level	$I_0 = I_{max}(t) \cdot \sin^2((\tau/DL(t)) \cdot t)$	
	Extinction coefficient	$k = k_0 + 0.0088 \cdot [Chla:C] \cdot PP(I) + 0.054 \cdot \{[Chla:C] \cdot PP(I)\}^{2/3}$	$[Chla:C], k_0$
$F_{1,4}$	Secretion	$F_{1,4} = \mu_3(PP) \cdot F_{15,6,1}$	
	Secretion rate	$\mu_3 = betp \cdot \exp(\beta_{betp} \cdot [Chla:C] \cdot PP(I))$	$betp, \beta_{betp}$
$F_{1,15,6}$	Respiration	$F_{1,15,6} = V_2(T) \cdot PP(I) \cdot Vol(I)$	
$F_{1,5}$		$F_{1,5} = F_{1,15,6} \cdot [P:C]_{PP}$	
$F_{1,6}$		$F_{1,6} = F_{1,15,6} \cdot [N:C]_{PP}$	
	Respiration rate	$V_2 = prep \cdot \exp(\beta_{prep} \cdot T)$	$prep, \beta_{prep}$
$F_{1,3}$	Natural death	$F_{1,3} = V_3(T) \cdot PP(I)$	
		$V_3 = pmot \cdot \exp(\beta_{pmot} \cdot T)$	$pmot, \beta_{pmot}$
$F_{1,11}$	Sinking	$F_{1,11} = w_{pp} \cdot PP(I) \cdot Area_2$	w_{pp}
[Zooplankton]			
$F_{1,2}$	Grazing Phytoplankton	$F_{1,2} = \frac{PP(I)}{PP(I) + POM(I)} \cdot V_4(T, PP, POM) \cdot ZP(I) \cdot Vol(I)$	
$F_{3,2}$	Grazing POM	$F_{3,2} = \frac{POM(I)}{PP(I) + POM(I)} \cdot V_4(T, PP, POM) \cdot ZP(I) \cdot Vol(I)$	
	Grazing rate	$V_4 = rmax \cdot \exp(\beta_{rmax} \cdot T) \cdot \mu_4(PP, POM)$	$rmax, \beta_{rmax}$
	Grazing restriction by feed	$\mu_4 = 1 - \exp[\lambda \cdot \{pbz - (PP(I) + POM(I))\}]$	λ, pbz
$F_{2,3}^1$	Evacuation	$F_{2,3}^1 = (1 - mu) \cdot V_4(T, PP, POM) \cdot ZP(I) \cdot Vol(I)$	mu
$F_{2,3}^2$	Natural death	$F_{2,3}^2 = V_5(T) \cdot ZP(I) \cdot Vol(I)$	
	Mortality	$V_5 = zmot \cdot \exp(\beta_{zmot} \cdot T)$	$zmot, \beta_{zmot}$
$F_{2,15,6}$	Excretion	$F_{2,15,6} = V_6(T, PP, POM) \cdot ZP(I) \cdot Vol(I)$	
	Excretion rate	$V_6 = zrep \cdot \exp(\beta_{zrep} \cdot T) + nu \cdot V_4(T, PP, POM)$	$zrep, \beta_{zrep}, nu$
$F_{2,5}$		$F_{2,5} = F_{2,15,6} \cdot [P:C]_{ZP-out}$	
$F_{2,6}$		$F_{2,6} = F_{2,15,6} \cdot [N:C]_{ZP-out}$	
	P/C Ratio of evacuation and excretion	$[P:C]_{ZP-out} = [P:C]_{ZP} + \{([P:C]_{PP} - [P:C]_{ZP}) \cdot F_{1,2} + ([P:C]_{POM} - [P:C]_{ZP}) \cdot F_{3,2}\} / (F_{2,3}^1 + F_{2,3}^2)$	
	N/C Ratio of evacuation and excretion	$[N:C]_{ZP-out} = [N:C]_{ZP} + \{([N:C]_{PP} - [N:C]_{ZP}) \cdot F_{1,2} + ([N:C]_{POM} - [N:C]_{ZP}) \cdot F_{3,2}\} / (F_{2,3}^1 + F_{2,3}^2)$	
[Particulate Organic Matter]			
$F_{3,15,6}$	Decomposition	$F_{3,15,6} = (1 - K_{POM}) \cdot V_7(T, DO) \cdot POM(I) \cdot Vol(I)$	K_{POM}
$F_{3,5}$		$F_{3,5} = F_{3,15,6} \cdot [P:C]_{POM}(I)$	
$F_{3,6}$		$F_{3,6} = F_{3,15,6} \cdot [N:C]_{POM}(I)$	
	Decomposition rate	$V_7 = V_{POM} \cdot \exp(\beta_{POM} \cdot T) \cdot \frac{DO(I)}{DO_{POM} + DO(I)}$	V_{POM}, β_{POM}
$F_{3,4}$	Translation	$F_{3,4} = K_{POM} \cdot F_{3,15,6}$	
$F_{3,11}$	Sinking	$F_{3,11} = w_{POM} \cdot POM(I) \cdot Area_2$	w_{POM}
	P/C Ratio	$[P:C]_{POM}(I) = POM_P(I) / POM_C(I)$	
	N/C Ratio	$[N:C]_{POM}(I) = POM_N(I) / POM_C(I)$	
[Dissolved Organic Matter]			
$F_{4,15,6}$	Decomposition	$F_{4,15,6} = V_8(T, DO) \cdot DOM(I) \cdot Vol(I)$	
$F_{4,5}$		$F_{4,5} = F_{4,15,6} \cdot [P:C]_{DOM}(I)$	
$F_{4,6}$		$F_{4,6} = F_{4,15,6} \cdot [N:C]_{DOM}(I)$	
	Decomposition rate	$V_8 = V_{DOM} \cdot \exp(\beta_{DOM} \cdot T) \cdot \frac{DO(I)}{DO_{DOM} + DO(I)}$	V_{DOM}, β_{DOM}
	P/C Ratio	$[P:C]_{DOM}(I) = DOM_P(I) / DOM_C(I)$	
	N/C Ratio	$[N:C]_{DOM}(I) = DOM_N(I) / DOM_C(I)$	
[Dissolved Oxygen]			
$F_{3,UP}$	Reaeration	$F_{3,UP} = K_a \cdot \{DO_s - DO(I)\} \cdot Vol(I) / H$	K_a
	Saturation point of DO	$DO_s = \frac{32 \cdot O_2}{22.4 \cdot (T + 273)}$	
	Saturation point of O ₂	$O_2 = K_{O_2} \cdot (10.291 - 0.2809 \cdot T + 0.006009 \cdot T^2 + 0.000063 \cdot T^3)$	K_{O_2}

表-a2 浮遊生態系モデル (PLE) の生物パラメタ

Definition	Symbol	Value	units	Definition	Symbol	Value	units
[Phytoplankton]				Natural mortality at 0°C	$zmot$	7.50×10^{-3}	day^{-1}
Potential growth rate at 0°C	spp	0.59	day^{-1}	Temperature coefficient	β_{zmot}	0.0693	$^{\circ}C^{-1}$
Temperature coefficient	β_{spp}	0.0633	$^{\circ}C^{-1}$	Respiration rate at 0°C	$zrep$	0.0214	day^{-1}
Half saturation constant for DIP	k_{pp}	0.2	$\mu mol/l$	Temperature coefficient	β_{zrep}	0.0637	$^{\circ}C^{-1}$
Half saturation constant for DIN	k_{np}	1.5	$\mu mol/l$	Assimilation efficiency	nu	0.3	
Optimum light intensity for Photosynthesis	I_{opt}	150	ly/day	C/P Ratio	$[C:P]_{zp}$	50.0	
Extinction coefficient	k_d	0.02152	m^{-1}	C/N Ratio	$[C:N]_{zp}$	6.0	
C/Chl-a Ratio	$[Chl:a]:C$	48.5		TOD/C Ratio	$[TOD:C]_{zp}$	3.31×10^{-3}	
Extracellular release rate	$betp$	0.135		[Particulate Organic Matter]			
Temperature coefficient	β_{betp}	0.00201	$^{\circ}C^{-1}$	Decomposition rate at 0°C	V_{POM}	0.01	day^{-1}
Respiration rate at 0°C	$prep$	0.03	day^{-1}	Temperature coefficient	$\beta_{V_{POM}}$	0.0693	$^{\circ}C^{-1}$
Temperature coefficient	β_{prep}	0.00501	$^{\circ}C^{-1}$	Dependency factor on DO of decomposition	DO_{POM}	0.5	mg/l
Mortality at 0°C	$pmot$	5.0×10^{-3}	day^{-1}	A fraction transferred to DOC	K_{POM}	0.2	
Temperature coefficient	β_{pmot}	0.0693	$^{\circ}C^{-1}$	Sinking rate	W_{POM}	0.5	$miday$
Sinking rate	w_{pp}	0.1728	m/day	TOD/C Ratio	$[TOD:C]_{POM}$	3.01×10^{-3}	
C/P Ratio	$[C:P]_{pp}$	161.3		[Dissolved Organic Matter]			
C/N Ratio	$[C:N]_{pp}$	15.9		Decomposition rate at 0°C	V_{DOM}	0.002	day^{-1}
TOD/C Ratio	$[TOD:C]_{pp}$	3.60×10^{-3}		Temperature coefficient	$\beta_{V_{DOM}}$	0.0693	$^{\circ}C^{-1}$
[Zooplankton]				Dependency factor on DO of decomposition	DO_{DOM}	0.5	mg/l
Maximum grazing rate at 0°C	r_{max}	0.18	day^{-1}	TOD/C Ratio	$[TOD:C]_{DOM}$	2.82×10^{-3}	
Temperature coefficient	$\beta_{r_{max}}$	0.0588	$^{\circ}C^{-1}$	[Dissolved Oxygen]			
Ivlev constant	λ	0.01	$(mgC/m^3)^{-1}$	Reaeration coefficient	K_a	0.01625	
Threshold food concentration for grazing	pbz	0.0	(mgC/m^3)	Adjustment coefficient for DO	K_{DO}	0.8	
Digestion efficiency	mu	0.7					

表-a3 付着生態系モデル (SSE) のフラックスの計算式

Flux	Definition	Function	Parameter
	[Sessile Animals]		
$F_{1,9}$	Grazing	$F_{1,9} = V_9(T, fd) \cdot \left\{ \frac{U_1 \cdot PP(I) \cdot Vol(I) / Area_1}{fd(PP, ZP, POM, SA, SW, (SOM1 + SOM2))} \right\}^{x_{fd}} \cdot SA(I) \cdot Area_1$	U_1, x_{fd}
$F_{2,9}$	Grazing	$F_{2,9} = V_9(T, fd) \cdot \left\{ \frac{U_2 \cdot ZP(I) \cdot Vol(I) / Area_1}{fd(PP, ZP, POM, SA, SW, (SOM1 + SOM2))} \right\}^{x_{fd}} \cdot SA(I) \cdot Area_1$	U_2
$F_{3,9}$	Grazing	$F_{3,9} = V_9(T, fd) \cdot \left\{ \frac{U_3 \cdot POM(I) \cdot Vol(I) / Area_1}{fd(PP, ZP, POM, SA, SW, (SOM1 + SOM2))} \right\}^{x_{fd}} \cdot SA(I) \cdot Area_1$	U_3
$F_{9,9}$	Grazing	$F_{9,9} = V_9(T, fd) \cdot \left\{ \frac{U_9 \cdot SA(I)}{fd(PP, ZP, POM, SA, SW, (SOM1 + SOM2))} \right\}^{x_{fd}} \cdot SA(I) \cdot Area_1$	U_9
$F_{10,9}$	Grazing	$F_{10,9} = V_9(T, fd) \cdot \left\{ \frac{U_{10} \cdot SW(I)}{fd(PP, ZP, POM, SA, SW, (SOM1 + SOM2))} \right\}^{x_{fd}} \cdot SA(I) \cdot Area_1$	U_{10}
$F_{11,9}$	Grazing	$F_{11,9} = V_9(T, fd) \cdot \left\{ \frac{U_{11} \cdot (SOM1(I) + SOM2(I) \cdot Area_2 / h_2(I)) / Area_1}{fd(PP, ZP, POM, SA, SW, (SOM1 + SOM2))} \right\}^{x_{fd}} \cdot SA(I) \cdot Area_1$	U_{11}
	Target feed	$fd = \left[\frac{U_1 \cdot PP(I) \cdot Vol(I) / Area_1}{x_{fd}} + \frac{U_2 \cdot ZP(I) \cdot Vol(I) / Area_1}{x_{fd}} + \frac{U_3 \cdot POM(I) \cdot Vol(I) / Area_1}{x_{fd}} + \frac{U_9 \cdot SA(I)}{x_{fd}} + \frac{U_{10} \cdot SW(I)}{x_{fd}} + \frac{U_{11} \cdot (SOM1(I) + SOM2(I) \cdot Area_2 / h_2(I)) / Area_1}{x_{fd}} \right]^{1/x_{fd}}$	
	Grazing rate	$V_9 = r_{upmax} \cdot \exp\{\beta_{r_{upmax}} \cdot (T-12)\} \cdot \frac{fd}{K_{fd} + fd} \cdot \frac{DO(I)}{DO(I) + K_{S40}}$	$r_{upmax}, \beta_{r_{upmax}}, K_{fd}, K_{S40}$
$F_{9,(5,6)}$	Excretion	$F_{9,(5,6)} = (FFOUT(V_9, SA) + FSOUT(T, SA))$	
$F_{9,5}$		$F_{9,5} = F_{9,(5,6)} \cdot [P:C]_{S4-out}$	
$F_{9,6}$		$F_{9,6} = F_{9,(5,6)} \cdot [N:C]_{S4-out}$	
	Active excretion	$FFOUT = REFRAC \cdot YUPLOS \cdot V_9(T, fd) \cdot SA(I) \cdot Area_1$	$REFRAC, YUPLOS$
	Stationary excretion	$FSOUT = REFRAC \cdot YBILOS \cdot \frac{3.0 \cdot \exp\{\beta_{r_{np}} \cdot (T-12)\}}{\exp\{\beta_{r_{np}} \cdot (T-12)\} + 2.0} \cdot SA(I) \cdot Area_1$	$YBILOS$
$F_{9,11}$	Evacuation and Natural death	$F_{9,11} = FFOUT2(V_9, SA) + FSOUT2(T, SA) + Fdeath(T, SA)$	
	Active evacuation	$FFOUT2 = (1 - REFRAC) \cdot YUPLOS \cdot V_9(T, fd) \cdot SA(I) \cdot Area_1$	
	Stationary evacuation	$FSOUT2 = (1 - REFRAC) \cdot YBILOS \cdot \frac{3.0 \cdot \exp\{\beta_{r_{np}} \cdot (T-12)\}}{\exp\{\beta_{r_{np}} \cdot (T-12)\} + 2.0} \cdot SA(I) \cdot Area_1$	
	Natural death	$Fdeath = r_{dtmax} \cdot \exp\{\beta_{r_{dtmax}} \cdot (T-12)\} \cdot SA(I) \cdot Area_1$	$r_{dtmax}, \beta_{r_{dtmax}}$
	P/C Ratio of excretion	$[P:C]_{S4-out} = [P:C]_{S4} + \{([P:C]_{PP} - [P:C]_{S4}) \cdot F_{1,9} + ([P:C]_{ZP} - [P:C]_{S4}) \cdot F_{2,9} + ([P:C]_{POM}(I) - [P:C]_{S4}) \cdot F_{3,9} + ([P:C]_{SW} - [P:C]_{S4}) \cdot F_{10,9} + ([P:C]_{SOM1}(I) - [P:C]_{S4}) \cdot F_{11,9}\} / (F_{9,(5,6)} + FFOUT2 + FSOUT2)$	
	N/C Ratio of excretion	$[N:C]_{S4-out} = [N:C]_{S4} + \{([N:C]_{PP} - [N:C]_{S4}) \cdot F_{1,9} + ([N:C]_{ZP} - [N:C]_{S4}) \cdot F_{2,9} + ([N:C]_{POM}(I) - [N:C]_{S4}) \cdot F_{3,9} + ([N:C]_{SW} - [N:C]_{S4}) \cdot F_{10,9} + ([N:C]_{SOM1}(I) - [N:C]_{S4}) \cdot F_{11,9}\} / (F_{9,(5,6)} + FFOUT2 + FSOUT2)$	
	[Seaweed]		
$F_{(5,6),10}$	Photosynthesis	$F_{(5,6),10} = K_{SWmax} \cdot V_{10}(T) \cdot (1 - V_{10}(T)) \cdot \mu_s(DIP, DIN) \cdot \mu_o(I, H, I) \cdot SW(I) \cdot Area_1$	K_{SWmax}
$F_{5,10}$		$F_{5,10} = F_{(5,6),10} \cdot [P:C]_{SW}$	
$F_{6,10}$		$F_{6,10} = F_{(5,6),10} \cdot [N:C]_{SW}$	
	Maximum growth rate	$V_{10} = \left(\frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \right)^{c_{10}}$	$T_{min}, T_{max}, c_{10}, SW$

	Growth restriction by nutrient	$\mu_5 = \min \left\{ \frac{xS \cdot DIP(I)}{K_{dipSW} + xS \cdot DIP(I)}, \frac{xS \cdot DIN(I)}{K_{dinSW} + xS \cdot DIN(I)} \right\}$	K_{dipSW}, K_{dinSW}, xS
	Growth restriction by light intensity	$\mu_6 = \frac{1}{H} \int_0^H (1 - \exp(-\alpha I_0 (-k \cdot z - k_{sw} \cdot SW(I)))) dz$	α, k_m
$F_{10-(5,6)}$	Respiration	$F_{10-(5,6)} = V_{11}(T) \cdot SW(I) \cdot Area_1$	$F_{10-3} = F_{10-(5,6)} [C:P]_{SW}$
	Respiration rate	$V_{11}(T) = r_{rsw} \cdot \exp(\beta_{rsw} \cdot T)$	r_{rsw}, β_{rsw}
F_{10-5}		$F_{10-5} = F_{10-(5,6)} [P:C]_{SW}$	
F_{10-6}		$F_{10-6} = F_{10-(5,6)} [N:C]_{SW}$	
F_{10-11}	Natural death	$F_{10-11} = V_{12}(T) \cdot SW(I) \cdot Area_1$	
	Mortality	$V_{12} = U_{SWmax} \cdot \exp(m_{sw} \cdot T)$	U_{SWmax}, m_{sw}
[Nekton]			
F_{9-8}	Grazing	$F_{9-8} = V_{13}(T, fd_{NK}) \cdot \left\{ \frac{U_{9-8} \cdot SA(I) \cdot Area_1 / Vol(I)}{fd_{NK}(SA, SW, NK)} \right\}^{X_{9-8}} \cdot NK(I) \cdot Vol(I)$	$U_{9-8}, X_{9-8}, fd_{NK}$
F_{10-8}	Grazing	$F_{10-8} = V_{13}(T, fd_{NK}) \cdot \left\{ \frac{U_{10-8} \cdot SW(I) \cdot Area_1 / Vol(I)}{fd_{NK}(SA, SW, NK)} \right\}^{X_{10-8}} \cdot NK(I) \cdot Vol(I)$	U_{10-8}
F_{8-8}	Grazing	$F_{8-8} = V_{13}(T, fd_{NK}) \cdot \left\{ \frac{U_{8-8} \cdot NK(I)}{fd_{NK}(SA, SW, NK)} \right\}^{X_{8-8}} \cdot NK(I) \cdot Vol(I)$	U_{8-8}
	Target feed	$fd_{NK} = \left[\frac{U_{9-8} \cdot SA(I) \cdot Area_1}{Vol(I)} \right]^{X_{9-8}} + \left[\frac{U_{10-8} \cdot SW(I) \cdot Area_1}{Vol(I)} \right]^{X_{10-8}} + \left[\frac{U_{8-8} \cdot NK(I)}{Vol(I)} \right]^{X_{8-8}}$	
	Grazing rate	$V_{13} = r_{upmaxNK} \cdot \exp(\beta_{upmaxNK} \cdot (T - 12)) \cdot \frac{fd_{NK}}{K_{fdNK} + fd_{NK}} \cdot \frac{DO(I)}{DO(I) + K_{NKO}}$	$r_{upmaxNK}, \beta_{upmaxNK}, K_{fdNK}, K_{NKO}$
$F_{8-(5,6)}$	Excretion	$F_{8-(5,6)} = (FFOUT_{NK}(V_{13}, NK) + FSOUT_{NK}(T, NK))$	
F_{8-5}		$F_{8-5} = F_{8-(5,6)} [P:C]_{NK-out}$	
F_{8-6}		$F_{8-6} = F_{8-(5,6)} [N:C]_{NK-out}$	
	Active excretion	$FFOUT_{NK} = REFRAC_{NK} \cdot YUPLOS_{NK} \cdot V_{13}(T, fd_{NK}) \cdot NK(I) \cdot Vol(I)$	$REFRAC_{NK}, YUPLOS_{NK}$
	Stationary excretion	$FSOUT_{NK} = REFRAC_{NK} \cdot YBILOS_{NK} \cdot \frac{3.0 \cdot \exp(\beta_{rep} \cdot (T - 12))}{\exp(\beta_{rep} \cdot (T - 12)) + 2.0} \cdot NK(I) \cdot Vol(I)$	$YBILOS_{NK}$
F_{8-3}	Evacuation and Natural death	$F_{8-3} = FFOUT_{2,NK}(V_{13}, NK) + FSOUT_{2,NK}(T, NK) + Fdeath(T, NK)$	
	Active evacuation	$FFOUT_{2,NK} = (1 - REFRAC_{NK}) \cdot YUPLOS_{NK} \cdot V_{13}(T, fd_{NK}) \cdot NK(I) \cdot Vol(I)$	
	Stationary evacuation	$FSOUT_{2,NK} = (1 - REFRAC_{NK}) \cdot YBILOS_{NK} \cdot \frac{3.0 \cdot \exp(\beta_{rep} \cdot (T - 12))}{\exp(\beta_{rep} \cdot (T - 12)) + 2.0} \cdot NK(I) \cdot Vol(I)$	
	Natural death	$Fdeath = r_{dmaxNK} \cdot \exp(\beta_{dmaxNK} \cdot (T - 12)) \cdot NK(I) \cdot Vol(I)$	$r_{dmaxNK}, \beta_{dmaxNK}$
F_{8-11}	Natural death	$F_{8-11} = r_{dmaxNK} \cdot NK(I) \cdot Vol(I)$	r_{dmaxNK}
	P/C Ratio of excretion	$[P:C]_{NK-out} = [P:C]_{NK_0} + \{([P:C]_{24} - [P:C]_{NK_0}) \cdot F_{9-8} + ([P:C]_{SW} - [P:C]_{NK_0}) \cdot F_{10-8}\}$	
	N/C Ratio of excretion	$[N:C]_{NK-out} = [N:C]_{NK_0} + \{([N:C]_{24} - [N:C]_{NK_0}) \cdot F_{9-8} + ([N:C]_{SW} - [N:C]_{NK_0}) \cdot F_{10-8}\}$	

表-a4 付着生態系モデル (SSE) の生物パラメータ

Definition	Symbol	Value	units	Definition	Symbol	Value	units
[Sessile Animals]							
Utilizing rate for Phytoplankton	U_1	0.05		Half saturation constant for DIN	K_{dinSW}	16.78	$\mu mol/l$
Utilizing rate for Zooplankton	U_2	0.05		Utilizing rate for nutrient	xS	0.95	
Utilizing rate for POM	U_3	0.05		Respiration rate at 0°C	r_{rsw}	0.00089	day^{-1}
Utilizing rate for Sessile animals	U_9	0.01		Temperature coefficient	β_{rsw}	0.1243	$^{\circ}C^{-1}$
Utilizing rate for Seaweed	U_{10}	0.0008		Maximum mortality	U_{SWmax}	0.0003	day^{-1}
Utilizing rate for Sedimentary Organic Matter	U_{11}	0.0001		Adjustment coefficient for natural death	m_{sw}	0.2	$^{\circ}C^{-1}$
Adjustment coefficient for feed	X_{fd}	1.5		C/P Ratio	$[C:P]_{SW}$	243.77	
Maximum grazing rate at 12°C	r_{upmax}	0.25	day^{-1}	C/N Ratio	$[C:N]_{SW}$	10.378	
Temperature coefficient	$\beta_{r_{upmax}}$	0.0882	$^{\circ}C^{-1}$	TOD/C Ratio	$[TOD:C]_{SW}$	3.077	
Half saturation constant for feed	K_{fd}	40	$mg C/m^3$	[Nekton]			
Half saturation constant for DO	K_{SAO}	1.0	$mg C/l$	Utilizing rate for Sessile animals	U_{9-8}	0.5	
Assimilation efficiency	$REFRAC$	0.5		Utilizing rate for Seaweed	U_{10-8}	0.5	
Assimilation loss rate at 12°C	$YUPLOS$	0.7		Utilizing rate for Nekton	U_{8-8}	0.5	
Loss rate for basal metabolism at 12°C	$YBILOS$	0.01	day^{-1}	Adjustment coefficient for feed	$X_{fd_{NK}}$	1.2	
Natural Mortality at 12°C	r_{dmax}	0.0005	day^{-1}	Maximum grazing rate at 12°C	$r_{upmaxNK}$	0.15	day^{-1}
Temperature coefficient	$\beta_{r_{dmax}}$	0.0822	$^{\circ}C^{-1}$	Temperature coefficient	$\beta_{upmaxNK}$	0.0588	$^{\circ}C^{-1}$
C/P Ratio	$[C:P]_{SA}$	56.6		Half saturation constant for feed	$K_{fd_{NK}}$	40.0	$mg C/m^3$
C/N Ratio	$[C:N]_{SA}$	7.5		Half saturation constant for DO	K_{NKO}	2.0	mg/l
TOD/C Ratio	$[TOD:C]_{SA}$	3.036		Assimilation efficiency	$REFRAC_{NK}$	0.5	
[Seaweed]				Assimilation loss rate at 12°C	$YUPLOS_{NK}$	0.7	
Maximum growth rate	K_{SWmax}	3.996		Loss rate for basal metabolism at 12°C	$YBILOS_{NK}$	0.01	day^{-1}
Temperature of minimum growth	T_{min}	0.0	$^{\circ}C$	Natural Mortality at 12°C	r_{dmaxNK}	0.0005	day^{-1}
Temperature of maximum growth	T_{max}	40.0	$^{\circ}C$	Temperature coefficient	β_{dmaxNK}	0.1	$^{\circ}C^{-1}$
Temperature coefficient	ω_{SW}	1.63		C/P Ratio	$[C:P]_{NK}$	33.6	
Half saturation constant for DIP	K_{dipSW}	0.103	$\mu mol/l$	C/N Ratio	$[C:N]_{NK}$	3.83	
				TOD/C Ratio	$[TOD:C]_{NK}$	3.86	

表-a5 底泥生態系モデル (SDE) のフラックスの計算式

Flux	Definition	Function	Parameter
[Sdimentary Organic Matter]			
F_{7-11}	Aerobic Decomposition	$F_{7-11} = V_{14}(DO, T) \cdot SOM1(I)$	$K_{decom1}, \beta_{decom1}$
	Aerobic Decomposition rate	$V_{14} = K_{decom1} \cdot DO(I) \cdot \exp(\beta_{decom1} \cdot T)$	
F_{11-12}		$F_{11-12} = \frac{F_{7-11}}{[TOD:C]_{SOM} \cdot 1000} \cdot [P:C]_{SOM}(I)$	
F_{11-13}		$F_{11-13} = \frac{F_{7-11}}{[TOD:C]_{SOM} \cdot 1000} \cdot [N:C]_{SOM}(I)$	
F_{11-14}	Deposit	$F_{11-14} = W_{sed} \cdot SOM1(I) / h_1$	W_{sed}
$F_{14-15,16}$	Anaerobic Decomposition	$F_{14-15,16} = V_{15}(T) \cdot SOM2(I) \cdot Area_2 \cdot h_2(I)$	$K_{decom2}, \theta_{decom2}$
	Anaerobic Decomposition rate	$V_{15} = K_{decom2} \cdot (\theta_{decom2})^{T-20}$	
F_{14-15}		$F_{14-15} = F_{14-15,16} \cdot [P:C]_{SOM2}(I)$	
F_{14-16}		$F_{14-16} = F_{14-15,16} \cdot [N:C]_{SOM2}(I)$	
	Depth of bottom layer	$h_2(I) = \frac{SOM2(I)}{SOM2_0 \cdot Area_2}$	
	P/C Ratio	$[P:C]_{SOM2}(I) = \frac{SOM2_P(I)}{SOM2_C(I)}$	
	N/C Ratio	$[N:C]_{SOM2}(I) = \frac{SOM2_N(I)}{SOM2_C(I)}$	
[Sdimentary Dissolved Inorganic Nutrients]			
F_{12-5}	Elution of SDIP1	$F_{12-5} = \frac{K_{pk}}{\{h_1 \cdot (h_1/2)\}} \cdot \{SDIP1(I) - DIP(I)\} \cdot Area_2 \cdot h_1 \cdot \phi_1$	K_{pk}
F_{12-13}	Absorption	$F_{12-13} = V_{16}(DO) \cdot SDIP1(I) \cdot Area_2 \cdot h_1 \cdot \phi_1$	$K_{absorp_sdip}, K_{sdido}$
	Absorption rate	$V_{16} = K_{absorp_sdip} \cdot \frac{DO(I)}{K_{sdido} + DO(I)}$	
F_{12-12}	Elution of SDIP2	$F_{12-12} = \frac{K_{pk}}{\{(h_1 + h_2) \cdot (h_2/2)\}} \cdot \{SDIP2(I) - SDIP1(I)\} \cdot Area_2 \cdot h_2 \cdot (\phi_1 + \phi_2) / 2$	
F_{13-6}	Elution of SDIN1	$F_{13-6} = \frac{K_{nk}}{\{h_1 \cdot (h_1/2)\}} \cdot \{SDIN1(I) - DIN(I)\} \cdot Area_2 \cdot h_1 \cdot \phi_1$	K_{nk}
F_{13-16}		$F_{13-16} = K_{absorp_sdin} \cdot SDIN1(I) \cdot Area_2 \cdot h_1 \cdot \phi_1$	K_{absorp_sdin}
F_{16-13}		$F_{16-13} = \frac{K_{nk}}{\{(h_1 + h_2) \cdot (h_2/2)\}} \cdot \{SDIN2(I) - SDIN1(I)\} \cdot Area_2 \cdot h_2 \cdot (\phi_1 + \phi_2) / 2$	
F_{16OUT1}	Denitrification	$F_{16OUT1} = V_{17}(DO, T) \cdot SDIN1(I) \cdot Area_2 \cdot h_{2nit} \cdot \phi_1$	h_{2nit}
	Denitrification rate	$V_{17} = K_{denit} \cdot \frac{DO(I)}{K_{sdido} + DO(I)} \cdot (\theta_{denit})^{T-20}$	$K_{denit}, K_{sdido}, \theta_{denit}$

表-a6 底泥生態系モデル (SDE) の生物パラメタ

Definition	Symbol	Value	units	Definition	Symbol	Value	units
[Sdimentary Organic Matter]				[Sdimentary DIP and DIN]			
Aerobic Decomposition rate	K_{decom1}	9.86×10^{-4}	day^{-1}	Elution rate	K_{pk}	1.0×10^{-5}	m^2/day
Temperature coefficient	β_{decom1}	0.1105	$^{\circ}C^{-1}$	Absorption rate	K_{absorp_sdip}	0.05	day^{-1}
Deposit rate	W_{sed}	0.001	m/day	DO coefficient for absorption	K_{sdido}	2.0	mg/l
Anaerobic Decomposition rate	K_{decom2}	0.0024	day^{-1}	Elution rate	K_{nk}	8.5×10^{-5}	m^2/day
Temperature coefficient	θ_{decom2}	1.07		Absorption rate	K_{absorp_sdin}	0.44	day^{-1}
TOD/C Ratio	$[TOD:C]_{SOM1}$	3.20		Depth of Denitrification arca	h_{2nit}	0.01	m
				Denitrification rate	K_{denit}	0.05	day^{-1}
				DO coefficient for absorption	K_{sdido}	2.0	mg/l
				Temperature coefficient for denitrification	θ_{denit}	1.07	

参考文献

- 鈴木輝明, 青山裕見, 畑恭子: 干潟生態系モデルによる窒素循環の定量化—三河湾一色干潟における事例—, 日本海洋理工学会論文集, Vol.3, pp.63-80, 1997.
- 赤井一昭: 水域の浄化システム, 第 11 回建設技術発表会論文集, pp.76-79, 1984.
- 小田一紀, 岡本良治, 大屋博史, 倉田克彦: 海水浄化への生物膜法の応用に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp.838-842, 1990.
- 小田一紀, 大屋博史, 斎藤美香, 倉田克彦: 生物膜の海水浄化効果に関する水槽実験—冬季海水を対象として—, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp.871-875, 1991.
- 小田一紀, 貫上佳則, 重松孝昌, 網潔之, 倉田克彦: 磯間

- 生物膜の海水浄化効果と現地へのその応用に関する研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.991-995, 1992.
- 辻博和, 石垣衛, 小林真, 喜田大三, 宮岡修二, 藤井慎吾: 石積み浄化堤による海水浄化工法の開発—実海域の浄化堤実証施設における水質浄化特性—, ヘドロ, No.61, pp.47-52, 1994.
- 大塚耕司, 中谷直樹, 宮地誠之, 中西敬, 吉村直孝, 沢田守: りんく公園人工環礁の水質浄化機能に関する研究 (第 1 報) —りんく公園人工環礁における実地調査—, 関西造船協会誌, 第 229 号, pp.211-219, 1998.
- 大塚耕司, 中谷直樹, 宮地誠之, 中西敬, 吉村直孝, 沢田守: りんく公園人工環礁の水質浄化機能に関する研究 (第 2 報) —りんく公園人工環礁における生態系モデル

- の構築一, 関西造船協会誌, 第 229 号, pp.221-234, 1998.
- 9) 大塚耕司, 中谷直樹, 宮地誠之, 藤原峰生, 中西敬, 吉村直孝, 沢田守: りんく公園人工環礁の水質浄化機能に関する研究 (第 3 報) - 内海モデルを用いた数値シミュレーション一, 関西造船協会誌, 第 231 号, pp.135-144, 1999.
- 10) 大塚耕司, 中谷直樹, 沢田守, 中西敬, 吉村直孝: りんく公園内海の水質浄化機能, 大阪府立大学報告書, 2002.
- 11) Penfound, W.T. and Howard, J.A. : *A Phytosociological Analysis of an Evergreen Oak Forest in the Vicinity of New Orleans, La.*, Amer. Midl. Nat., Vol.23, pp.165-174, 1948.
- 12) 中田喜三郎: 生態系モデルー定式化と未知のパラメータの推定法一, J. Adv. Mar. Tech. Conf., Vol. 8, pp.99-138, 1993.
- 13) 能登谷正浩: アオサの利用と環境修復, 成山堂書店, 1999.
- 14) Yokohama, Y. : Photosynthesis-Temperature Relationships in Several Benthic Marine Algae, *Proc.7th Intern. Seaweed Symp.*, pp.286-291, 1971.
- 15) Baretta, J.W. and Raurdij, P. : *Tidal Flat Estuaries, Analysis of a Coastal Marine Ecosystem*, Springer-Verlag, 1989.
- 16) 今村正裕, 松梨史郎: 湾奥部における水一底泥間の窒素・リンのフラックス, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp.1081-1085, 1997.
- 17) 藤田賢二: 急速ろ過工程の数学的表現 (I) - ろ過方程式一, 水道協会雑誌, 第 510 号, pp.12-29, 1977.
- 18) 高橋正征, 古谷研, 石丸隆監訳: 生物海洋学 1 プラクトンの分布/化学組成, 東海大学出版会, 1996.
- 19) 半田暢彦: 対話「セジメント・トラップ」, 月刊海洋, Vol.11, No.12, pp.956-964, 1979.
- 20) Nakatani, N. and Otsuka, K. : CNP-Conservative Ecosystem Model for Enclosed Coastal Seas (unpublished) .

(2003. 1. 6 受付)

EVALUATION OF ENVIRONMENTAL RESTORATION TECHNOLOGY USING ECOSYSTEM MODEL: A CASE OF INNER SEA AT RINKU PARK

Naoki NAKATANI, Koji OTSUKA and Taketoshi OKUNO

The purpose of this paper is to propose an evaluation method for coastal environmental restoration technologies using an ecosystem modeling technique. An ecosystem model of artificial lagoon, which is one of the environmental restoration technologies, has been developed based on field surveys at Rinku Park in Osaka Bay. Carbon and nutrient fixation effects of the artificial lagoon have been estimated as an index of the restoration efficiencies. The results of estimations have shown that the total fixation effects decreases year by year because of the accumulation of the sedimentary organic matter, and the fixation efficiency increases with decreasing the depth of the artificial lagoon.