

(31) 瀬戸内海漁場生態系モデルにおける溶存酸素の取り扱い

HANDLING OF DISSOLVED OXYGEN IN THE SETO INLAND SEA FISHERIES ECOLOGICAL MODEL

関根雅彦*、李寅鉄*、檜崎寿晃**、浮田正夫*、今井剛*、中西弘***

Masahiko SEKINE, In-cheol LEE, Toshiaki NARAZAKI, Masao UKITA, Tsuyoshi IMAI, Hiroshi NAKANISHI

ABSTRACT; The purpose of our study is to estimate the influence of development activities on shallow sea ecosystems, especially on fish. An eight boxes two layers ecological model was adopted to the Seto inland sea by using a Shallow Sea Ecological Modelling tool (SSEM). The components of the model were nutrient, detritus, phytoplankton, copepod, pelagic fish (plankton feeder and fish feeder), demersal fish (plankton feeder and fish feeder), and benthos (detritus feeder and benthos feeder). Oxygen deficit was selected as an human impact factor to the fishery environment. The water / sediment interaction model was employed to evaluate the box-average dissolved oxygen concentration. Because SSEM is a box based model, it was difficult to estimated the local oxygen deficit that occurs in rather small water volume. Probability density function of oxygen deficit occurrence was decided based on field survey data from a literature. Oxygen-deficient water volume to a certain box-average dissolved oxygen concentration was calculated using the probability density function. Although quantitative estimation of stock size by mathematical model are generally thought to be difficult, SSEM seemed to succeed in explaining the distribution of benthos catch in the Seto inland sea by taking the influence of anoxia into account.

KEYWORDS; Seto inland sea, ecological model, fish catch, oxygen-deficient water, assessment of coastal development

1 はじめに

著者らは水域の環境管理に応用することを目的とした生態系モデリングツール SSEM を開発してきた¹⁾。従来の水域生態系モデルが赤潮発生予測など植物プランクトンを主対象としたものが多いのに対し、SSEM は水産資源として人間生活に直接関係の深い魚を中心とした高次栄養段階生物に与える開発行為の影響を評価することを目的としている。SSEM はオブジェクト指向プログラミング言語 Smalltalk を用いて実現されており、複雑な生態系を柔軟にモデル化できる^{2,3)}。特に、生物の選好性に基づく環境条件の変化に対する逃避行動など、生物の生態の定量的モデル化が可能である点に大きな特徴がある。このため、多自然型河川改修工法の影響評価など、比較的狭い水域での魚の行動予測に適用を試みてきた^{4,5)}。

一方、生態系モデルで生物資源量を予測する努力は、ライバストモデル⁶⁾を代表として、水産学分野を中心として続けられてきた。環境変化に伴う生物資源量の変動を予測することは、持続可能な発展を可能にするために是非とも必要な研究である。この種の研究の現状は、筆者らによるものも含め文献⁷⁾にて論じられているが、残念ながら生物資源量の定量的な評価はいまだに困難であるとされている。生物資源量評価の困難性は、評価の妥当性の検証の難しさと生態系の構成要素相互関係の複雑さにある。

SSEM においても、アサリ資源量評価^{2,8)}などへの適用を試みてきたが、狭い水域における単純な生態系をモデル化したに過ぎなかった。種々の特徴を持つ SSEM ではあるが、生物の成長などの生理に関わる部分は伝統的な食物連鎖モデルと同じであり、生物資源量評価の困難性では従来のモデルと変わるところはない。

* 山口大学工学部社会建設工学科 〒755 宇部市常盤台 2557

Department of Civil Engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube, Yamaguchi, 755 Japan

** 福岡県

Fukuoka prefecture, Fukuoka, Japan

*** 大阪工業大学土木工学科 〒535 大阪市旭区大宮 5-16-1

Department of Civil Engineering, Osaka Institute of Technology, Ohimiya 16-1, Asahiku, Osaka, 535 Japan

本研究では、対象海域をより広範囲で複雑な生態系を持つ瀬戸内海とし、前述のような困難性を意識しつつ環境変化に伴う生物資源量変化の評価に取り組んだ。生物資源量に影響を与える環境因子は数多く存在するが、本報告では溶存酸素濃度と生物資源量変化を関連づけようとした試みについて述べる。

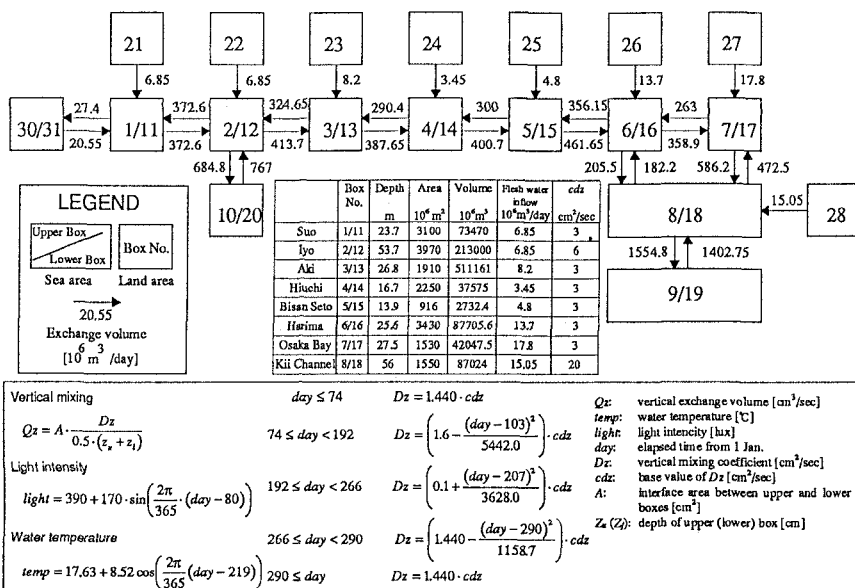


Fig. 1 The Seto inland sea eight boxes two layers model

2 瀬戸内海漁場生態系モデルの概要

SSEM は基本的にボックスモデルである。これは魚の行動や生物量の評価の精度が詳細なメッシュモデルなどに馴染まないとの判断からである。モデルの組み立て方として、現象を詳細にモデルに組み込む方法と、特徴を抽出して簡略化する方法があるが、生態系モデルでは現象の複雑さから必然的に後者の方法をとらざるを得ない。こうした場合、中途半端に詳細な機構をモデルに組み込むことはむしろ本質を見えにくくし、有害であると筆者は考えている。本研究では、単純なモデルで生物資源量変動のおおまかな動きをつかむことが可能かどうか注目した。

Fig. 1 に本研究で用いた瀬戸内海のボックス分割とその諸元を示す。陸域ボックス(Box 21~28)は淡水流入量を表現するために便宜的に与えたものである。底層の貧酸素化を表現するため海域については Box を上下2層とした。上層、下層の層厚は等しくとした。交換流量、淡水流入量は文献値⁹⁾を参考に、上層、下層に均等配分した。鉛直混合流量には、上下層の温度差の季節変化を考慮し、種々の文献値を参考に経験的に定めた季節変化を与えた。強制関数は Fig. 1 に示した水温、日射のほか、5年毎の原単位計算を内挿することにより Fig. 2 のように流入負荷量を上層 Box に与えた。上層、下層の層厚を等しくとるなど、水理モデルとしてはかなり荒いものではあるが、水質濃度がほぼ再現できることを確認してある¹⁰⁾。

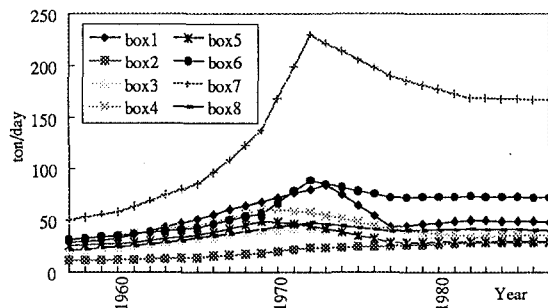


Fig. 2 Nitrogen loading from land area

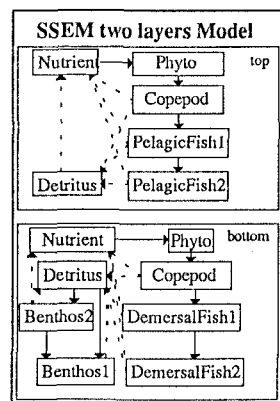


Fig. 3 Outline of SSEM two layers model

Table 1 Basic equations for SSEM two layers model

<p>Inanimate (Nutrient, Detritus)</p> $\frac{\Delta W_n}{\Delta t} = \sum U - \sum E_n$ $\frac{\Delta W_d}{\Delta t} = -Kd \cdot W_d + \sum F - \sum E_d$ <p>Wn: weight of nutrient [kg] Wd: weight of detritus [kg] En: absorbed nutrient [kg/day] Ed: absorbed detritus [kg/day]</p> <p>Livings (Phyto, Copepod, Benthos, Fish)</p> $\frac{\Delta W}{\Delta t} = E - F - U - R - D$ <p>$E = W \times G$ $F = E \times Kf$ $U = E \times Ke$ $R = W \times Kr \cdot e^{K_r \cdot TEMP}$ $D = W \times Kd \cdot e^{K_d \cdot TEMP}$</p>	<p>Phyto</p> $G = G_{max} \times \frac{(n - Kt) / W}{Ks + (n - Kt) / W}$ $G_{max} = Kg \cdot e^{K_g \cdot TEMP} \cdot LTLIM$ $LTLIM = \left(\frac{s}{500} \right)^{\left(\frac{1.0 - s}{2000} \right)}$ $s = light \cdot e^{-0.01 \cdot t}$ $k = 0.04 + (8.8 \cdot W) + (0.054 \cdot W \cdot 1000)^2$ <p>Copepod</p> $G = G_{max} \times (1 - \exp(Ks(Kt \cdot V - n) / W))$ $G_{max} = Kg \cdot e^{K_g \cdot TEMP}$ <p>Fish, Benthos (Pelagicfish1,2, Demersalfish1,2, Benthos1,2)</p> $G = G_{max} \times \frac{n - Kt}{Ks + (n - Kt)}$ $G_{max} = Kg \cdot e^{K_g \cdot TEMP}$ <p>Reproduction of fish $W_{egg} = 0.0125W$</p>	<p>W: weight of Living's in a box [kg] Δt: time step [day] E: food requirement [kg/day] F: faecal amount [kg/day] U: excretion amount [kg/day] R: respiration amount [kg/day] D: death amount [kg/day] G: grazing rate [day⁻¹] Gmax: maximum grazing rate [day⁻¹] n: food amount [kg] Kg: maximum growth rate at 0 °C [day⁻¹] Kf: faecal ratio [-] Kt: threshold of grazing [mg/l] Ks: half-saturation constant Ke: excretion ratio [-] Kr: respiration rate [day⁻¹] Kd: death rate [day⁻¹] Kgt, Krt, Kdt: temperature constant [°C⁻¹]</p>
<p>Movement among Boxes</p> $W_{m_{ij}} = \frac{Kc W Q_{ij}}{V \Delta t}$	<p>W_{m_{ij}}: weight of fish moving from box i to j [kg] V: volume of water in box i [10³m³]</p>	<p>Q_{ij}: volume of water flowing from box i to j. [10³m³/day] Kc: exchange coefficient [-]</p>

Table 2 Parameter values for SSEM two layers model

			Pelagicfish1			Pelagicfish2			juvenile: under one year old fish young: one year to three years old fish adult: over three years old fish	
	Phyto	Copepod	juvenile	young	adult	juvenile	young	adult		
Ks	1.8	0.2	0.024	0.007	0.009	0.013	0.003	0.29		
Kt	0.0	0.0	0.0	0.002	0.003	0.0	0.0004	0.0004		
Kg	0.5	0.2	0.03	0.013	0.006	0.0243	0.00308	0.0017		
kgt	0.0633	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693		
Kr	0.01	0.04	0.01	0.006	0.003	0.01	0.001	0.00019		
Krt	0.0524	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693		
Kd	0.003	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Kdt	0.0524	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693		
Kf	0.0	0.01	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2		
Ke	0.0	0.01	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1		
Kc	0.9	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Food	Nutrient	Phyto	Food	Copepod	Copepod	Copepod	Copepod	Pelagicfish1 (day<740)	Pelagicfish1 (day>365)	"Pelagicfish1 (day < 740)" means that the fish feed on Pelagicfish1 younger than 740 days.

			Demersalfish1			Demersalfish2			Benthos1			Benthos2			
	juvenile	young	adult	juvenile	young	adult	juvenile	young	adult	juvenile	young	adult	juvenile	young	adult
Ks	0.0014	0.0004	0.0003	0.0006	0.0002	0.01	0.006	0.002	0.01	0.01	0.009	0.0063	0.01	0.009	0.0063
Kt	0.0	0.0004	0.0005	0.0	0.0	0.0001	0.0	0.0	0.0001	0.0	0.0003	0.0004	0.0	0.0003	0.0004
Kg	0.03	0.013	0.006	0.0243	0.00308	0.0017	0.032	0.005	0.002	0.0576	0.0245	0.0038	0.032	0.005	0.002
Kgt	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693
Kr	0.01	0.006	0.003	0.01	0.001	0.00019	0.015	0.002	0.0005	0.02	0.01	0.0014	0.015	0.002	0.0005
Krt	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693
Kd	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Kdt	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693	0.0693
Kf	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Ke	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Kc	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Food	Copepod	Copepod	Copepod	Copepod	Demersal fish1 (day<730)	Demersal fish1 (day>365)	Food	Copepod	Benthos2 (day<730)	Benthos2 (day<365)	Copepod	Detritus	Detritus	Detritus	Detritus

モデルの構成要素は栄養塩(Nutrient)、植物プランクトン(Phyto)、動物プランクトン(Copepod)、デトリタス食ベントス(Benthos2)、ベントス食ベントス(Benthos1)、プランクトン食浮魚(PelagicFish1)、魚食浮魚(PelagicFish2)、プランクトン食底魚(DemersalFish1)、魚食底魚(DemersalFish2)である(Fig. 3)。基礎式および係数値を Table 1, Table 2 に示す。係数値は文献^{11,12)}などを参考に定めた。生物量はすべて窒素で表現している。SSEM の特徴は、複雑な生態系でも比較的容易にモデル化できるところにあるが、本節冒頭で述べた方針に従い、生態系はできるだけ簡略に表現した。また、植物プランクトン、動物プランクトンの摂食式には安定性の強い式型¹⁾を用い、栄養塩を高次栄養段階生物に汲み上げるポンプとしての役割を強調した。このため、本モデルでは突発的な赤潮などを再現することは困難である。さらに、栄養塩とプランクトンは水交換とともにパラメータ Kc に比例して灘間を移動するが、高次栄養段階生物については灘間の移動をさせていない。灘間の魚の移動としては紀伊水道からのイワシ(シラス)の入り込みが重要^{13,14)}であるが、その他の資源の多くは沿岸地先資源であり、モデルの単純性を保つために現段階ではあえて移動させなかった。

3 溶存酸素の取り扱い

ボックスモデルの問題点は、水質濃度など場所的な変動のある項目を広い水域で一定値として扱ってしまうことである。特に、溶存酸素濃度など3次元的な変化が大きく、かつ生物にとって致命的な影響力を持つ項目においてこの問題が顕著になる。本節では、あくまでボックスモデルの立場から局所的な貧酸素の影響を評価する方法を考察した。

3.1 溶存酸素濃度の生物影響の文献調査

貧酸素水塊の事例や形成機構、定義などは文献¹⁵⁾にまとめられている。これによれば、海底の正常なベントス分布が危うくなる溶存酸素 3.6mg/l 以下を貧酸素水塊、0.036mg/l 以下を無酸素水塊としている。ここでは、個々の生物種に対する溶存酸素濃度の影響についての具体的な情報を紹介する。なお、以下に挙げる文献では溶存酸素濃度を ml/l で表記しているものも多いが、本稿では 1.43 を乗じて mg/l に換算した。

まず、各種生物の溶存酸素要求量の目安として、チェサピーク湾では、貝、イソギンチャクなどの底生動物は常時 1 mg/l 以上、小魚では 12~48 hr にわたって 1~3 mg/l 以下にならないこと、魚、カニでは月平均 5 mg/l 以上、大きな魚では常時 5 mg/l 以上としている¹⁶⁾。水族館の飼育水溶存酸素が 4~5.7 mg/l とされている¹⁷⁾のも参考となる。

魚類の貧酸素に対する耐性については、4.3mg/l 以下で危険(養殖ハマチ¹⁸⁾)。0.7 mg/l に耐える(ゲンゴロウブナ)。5 mg/l で呼吸困難、3 mg/l で死亡(ニジマス)。4.4 mg/l で一部死亡、2.9 mg/l で大部分が死亡(アユ稚仔魚)。致死限界 2.9 mg/l(イカナゴ、カタクチイワシ)。飼育環境 3.69 mg/l 以上(クロマグロ)。致死限界 1.5 mg/l(クロダイ稚魚)。などの記述がある¹⁹⁾。

一方、ベントスについては、室内実験で 1.3 mg/l の間欠的な低下に耐えるが、天然海域では 5 mg/l 以下で生息密度が低下(シズクガイ²⁰⁾)。4.3mg/l までは直線的に減少し、それ以下ではほとんど出現しない(シズクガイ²¹⁾)。1.5 mg/l 以上では問題なく、0.3~0.6 mg/l で4日目以降死亡が見られる(アサリ²²⁾)。1.5 mg/l まで酸素消費は変化せず、0.36 mg/l で10日で全滅(アカガイ²²⁾) 2~2.4 mg/l でへい死(アカガイ¹⁹⁾)。2.9 mg/l で危険(クロアワビ¹⁹⁾)。2.9 mg/l で酸素消費に影響(コタマガイ²³⁾)。1.5 mg/l で40 hr、0.7 mg/l で24 hr でへい死(トリガイ²³⁾)。ゾエア期では 3.4 mg/l 以下、メガロバ期では 2.6 mg/l 以下、成体では 1.5 mg/l 以下で48時間生残率に重大な影響(ガザミ²⁴⁾)。2mg/l 以下の状態が2日間継続すると死滅(ヨツパネスピオ²⁵⁾)。などの記述がある。

また、筆者らのトラフグ稚魚を用いた忌避実験では、溶存酸素濃度 3.7 mg/l では忌避行動は見られなかったが、1.4 mg/l では明らかな忌避行動が観察された⁵⁾。さらに、連続的に貧酸素状態に置いた場合、0.8 mg/l では30分以内に死亡、3.7 mg/l でも1日以内に死亡した²⁶⁾。

Table 3 Basic equations of water / sediment interaction model

<p>Inorganic phosphorus</p> $dCP1/dt = D_z \cdot (CP2 - CP1) / Z^2 - PRO1 \cdot FP1 + KDFZ \cdot KD1 - FZ1 \cdot L/P / SA / Z$ $dCP2/dt = D_z \cdot (CP1 - CP2) / Z^2 - PRO2 \cdot FP2 + KDFZ \cdot KD2 - FZ2 \cdot \gamma \cdot AOA - D \cdot (CP3 - CP2) / (0.5 \cdot Z^2 \cdot \gamma \cdot KDB - FP3 \cdot Z3 / Z \cdot \gamma - KDFZ \cdot KDB - FP3 \cdot Z3 / Z)$ $dCP3/dt = D \cdot (CM - CP3) / (0.5 \cdot Z_m \cdot Z) + AOA \cdot D \cdot (CP2 - CP3) / Z^2 + KD3 \cdot FP3 + KDFZ \cdot KD3 - FZ3 \cdot Wm - CP3 / Z3 \cdot (KEP / \omega) \cdot (EPA3 - CP3 / e) \cdot (KR / \omega) \cdot (EPR3 - 1.3 \cdot \beta \cdot \omega \cdot MO) \cdot (CP3 / (CP3 + CP30))$ $dCP4/dt = D \cdot (CP3 - CP4) / (0.5 \cdot Z_m \cdot Z) + KD4 \cdot FP4 + KDFZ \cdot KD4 - FZ4 \cdot (Wm + (EPA4 - CP4 / e) \cdot Wm) - CP3 / Z4 - Wm \cdot CN4 / Z4$ <p>Phytoplankton phosphorus</p> $dFP1/dt = Rdx \cdot Dz \cdot (FP2 - FP1) / Z^2 + PRO1 \cdot FP1 - KD1 \cdot FP1 - FPI1 \cdot KFZ1 - FZ1 \cdot Ws + FPI1 / Z$ $dFP2/dt = Rdx \cdot Dz \cdot (FP1 - FP2) / Z^2 + PRO2 \cdot FP2 - KD2 \cdot FP2 - KFZ2 - FZ2 \cdot Ws + FP2 / Z + Ws \cdot FPI1 / Z$ $dFP3/dt = Ws \cdot FP2 / Z3 - Wm \cdot FP3 / Z3 - KD3 \cdot FP3 - KDB \cdot FP3$ $dFP4/dt = Wm \cdot FP3 / Z4 - KD4 \cdot FP4 - Wm \cdot FPI1 / Z4$ <p>Zooplankton phosphorus</p> $dFZ1/dt = KFZ1 - FZ1 \cdot KDFZ \cdot KD1 - FZ1 \cdot KG - FZ1 \cdot Ws3 - FZ1 / Z$ $dFZ2/dt = KFZ2 - FZ2 \cdot KDFZ \cdot KD2 - FZ2 \cdot KG - FZ2 \cdot Ws3 - FZ2 / Z + Ws \cdot FZ2 / Z$ $dFZ3/dt = KDFZ \cdot KD3 - FZ3 \cdot KDFZ \cdot KDB - FZ3 \cdot Ws3 - FZ3 / Z - FZ3 \cdot Wm - FZ3 / Z3$ $dFZ4/dt = KDFZ \cdot KD4 - FZ4 \cdot Wm - FZ3 / Z4 - Wm \cdot FZ4 / Z4$ <p>Sediment absorbed phosphorus</p> $dEPA3/dt = KRP \cdot (EPA3 - CP3 / e)$ $dEPR3/dt = KR \cdot (EPR3 - 1.3 \cdot \beta \cdot \omega \cdot MO) \cdot (CP3 / (CP3 + CP30))$ $dEPA4/dt = KRP \cdot (EPA4 - CP4 / e)$	<p>Dissolved oxygen</p> $dCO1/dt = D_z \cdot (CO2 - CO1) / Z^2 + Rop \cdot PRO1 \cdot FP1 - Rop \cdot KDI \cdot FP1 - Roc \cdot KDC \cdot (COD1 - 0.5) \cdot Roc - RKD \cdot KD1 \cdot PC1 - ROP \cdot KDFZ \cdot KD1 - FZ1 \cdot LDO / SA / Z \cdot KA \cdot (CO1 - CO_{sat}) / Z \cdot 4.57 \cdot KN1 \cdot CN1 \cdot 4.3 \cdot KN1 \cdot CN1$ $dCO2/dt = D_z \cdot (CO1 - CO2) / Z^2 + \gamma \cdot Rdm \cdot D \cdot (CO3 - CO2) / (0.5 \cdot Z^2 \cdot \gamma) + Rop \cdot PRO2 \cdot FP2 - Rop \cdot KDI \cdot FP2 - Roc \cdot KDC \cdot (COD2 - 0.5) \cdot Roc - RKD \cdot KD2 \cdot PC2 - Rop \cdot KDFZ \cdot KD2 - FZ2 \cdot \gamma \cdot Rop \cdot KDB \cdot FP3 \cdot Z3 / Z \cdot \gamma \cdot Rop \cdot KDFZ \cdot KDB \cdot FZ3 \cdot Z3 / Z \cdot 4.57 \cdot KCN2 \cdot CN2 + 4.3 \cdot KCN2 \cdot CN2$ $dCO3/dt = Rdm \cdot D \cdot (CO4 - CO3) / (0.5 \cdot Z_m \cdot Z) + Rdm \cdot D \cdot (CO3 - CO2) / (0.5 \cdot Z^2 \cdot \gamma) \cdot Rop \cdot KD3 \cdot FP3 - Roc \cdot KDC \cdot (COD3 - PC3) \cdot Rop \cdot KDFZ \cdot KD3 - FZ3 \cdot 4.57 \cdot KCN3 \cdot CN3 + 4.3 \cdot KCN3 \cdot CN3$ $dCO4/dt = Rdm \cdot D \cdot (CO3 - CO4) / (0.5 \cdot Z_m \cdot Z) \cdot Rop \cdot KD4 \cdot FP4 - Roc \cdot KDC \cdot (COD4 - PC4) \cdot Rop \cdot KDFZ \cdot KD4 - FZ4 \cdot 4.57 \cdot KCN4 \cdot CN4 + 4.3 \cdot KCN4 \cdot CN4$ $4MO/dt = KMD \cdot MO \cdot CO3 / (CO3 + CO30) + RX \cdot KMP \cdot M \cdot CO2 / (CO2 + CO20)$ $4M/dt = KMD \cdot MO \cdot CO3 / (CO3 + CO30) + RX \cdot KMP \cdot M \cdot CO2 / (CO2 + CO20)$ <p>NH₄-nitrogen</p> $dCN1/dt = D_z \cdot (CN2 - CN1) / Z^2 - PRO1 \cdot Rm1 \cdot FN1 + KD1 \cdot FN1 + Rnp \cdot KDFZ \cdot KD1 - FZ1 \cdot KCN1 \cdot CN1 + 0.5 \cdot LN / SA \cdot Z \cdot PRO2 \cdot Rm2 \cdot FN2 + KD2 \cdot FN2 + Rnp \cdot KDFZ \cdot KD2 - FZ2 \cdot \gamma \cdot KDB \cdot FN3 \cdot Z3 / Z \cdot \gamma \cdot Rnp \cdot KDFZ \cdot KDB \cdot FZ3 / Z \cdot KCN2 \cdot CN2$ $dCN3/dt = D \cdot (CN4 - CN3) / (0.5 \cdot Z_m \cdot Z) + D \cdot (CN2 - CN3) / (0.5 \cdot Z^2 \cdot \gamma) + KD3 \cdot FN3 + Rnp \cdot KDFZ \cdot KD3 - FZ3 \cdot KCN3 \cdot CN3 + (KEN / \omega) \cdot (EN3 - CN3 / e) \cdot Wm \cdot CN3 / Z3$ $dCN4/dt = D \cdot (CN3 - CN4) / (0.5 \cdot Z_m \cdot Z) + KD4 \cdot FN4 + Rnp \cdot KDFZ \cdot KD4 - FZ4 \cdot KCN4 \cdot CN4 + (KEN / \omega) \cdot (EN4 - CN4 / e)$	<p>NO₃-nitrogen</p> $dCNN1/dt = D_z \cdot (CNN2 - CNN1) / Z^2 - PRO1 \cdot Rm1 \cdot FN1 + KCN1 \cdot CN1 - KCN1 \cdot CNN1 + 0.5 \cdot LN / SA \cdot Z \cdot dCNN2/dt = D_z \cdot (CNN1 - CNN2) / Z^2 + \gamma \cdot D \cdot (CNN3 - CNN2) / (0.5 \cdot Z^2 \cdot \gamma) \cdot PRO2 \cdot Rm2 \cdot FN2 + KCN2 \cdot CN2 - KCN2 \cdot CNN2$ $dCNN3/dt = D \cdot (CNN4 - CNN3) / (0.5 \cdot Z_m \cdot Z) + D \cdot (CNN2 - CNN3) / (0.5 \cdot Z^2 \cdot \gamma) + KCN3 \cdot CN3 - KCN3 \cdot CNN3 - Wm \cdot CNN3$ $dCNN4/dt = D \cdot (CNN3 - CNN4) / (0.5 \cdot Z_m \cdot Z) + KCN4 \cdot CN4 - KCN4 \cdot CNN4$ <p>Sediment absorbed nitrogen</p> $dEN3/dt = KIN \cdot (EN3 - CN3 / e)$ $dEN4/dt = KIN \cdot (EN4 - CN4 / e)$ <p>Organic nitrogen</p> $dFN1/dt = Rnp \cdot FPI1 \quad (i=1 \sim 4)$ <p>COD</p> $dCOD1/dt = KDC \cdot (COD1 - 0.5) + D_z \cdot (COD2 - COD1) / Z^2 + LCO3 / SA / Z$ $dCOD2/dt = KDC \cdot (COD2 - 0.5) + D_z \cdot (COD1 - COD2) / Z^2$ $TCOD1 = COD1 + (FPI1 + 0.2 \cdot FZ1) \cdot (143/g) \cdot PC1$ $TCOD2 = COD2 + (FPI2 + 0.2 \cdot FZ2) \cdot (143/g) \cdot PC2$ <p>Detritus (COD)</p> $dPC1/dt = ROP1 \cdot FP1 \cdot Rpe \cdot (Rop/Roc) \cdot RKD \cdot KD1 \cdot PC1 - Wm2 \cdot PC1 / Z$ $dPC2/dt = ROP2 \cdot FP2 \cdot Rpe \cdot (Rop/Roc) \cdot RKD \cdot KD2 \cdot PC2 - Wm2 \cdot PC2 / Z$ $dPC3/dt = Ws2 \cdot PC2 / Z3 - RKD \cdot KD3 \cdot PC3 - Wm \cdot PC3 / Z3$ $dPC4/dt = RKD \cdot KD4 \cdot PC4 + Wm \cdot PC3 / Z4 - Wm \cdot PC4 / Z4$ $PRO1 = KPI \cdot (CP1 + \gamma \cdot FPI1) / (CP0 + CP1 + \gamma \cdot FPI1) \quad (a)$ $PRO2 = KPI \cdot (CN1 + \gamma \cdot FN1) / (CN0 + CN1 + \gamma \cdot FN1) \quad (b)$ <p>(see value adopted)</p> <p>LP, LDO, LN, LCO: Loads from outside (driving functions) SA: Surface area.</p>
--	---	--

Table 4 Parameter values of water / sediment interaction model

KDi	0.32 ~ 0.66 [1/day]	KR	10 ⁵ [1/sec]	CO _{sat}	7.00 ~ 10.17 [mg/l]	Ron	15.1
KDj	0.001 ~ 0.11 [1/day]	KMP	0.1 [1/day]	a	0.25 [g/ml]	Roc	3.0
KPi	0.44 ~ 5.48 [1/day]	KMD	0.1 [1/day]	ω	1.6	Rpc	0.01
	(i=1,2; j=3,4)	KA	191 ~ 517 [cm ² /day]	β	0.1	RKD	0.08
KDB	0.02 [1/day]	Dz	0.15 ~ 2.16 [cm ² /sec]	γ	0.78 [ml/g]	RX	0.3 ~ 1.7
KN	0.005 [1/day]	D	0.4 ~ 0.6 × 10 ⁵ [cm ² /sec]	η	0.01	Z3 (up)	1.0 [cm]
KDC	0.02 [1/day]	Ws	20.0 [cm/day]	Rdm	3.0	Z4 (low)	4.0 [cm]
KEP	10 ⁴ [1/sec]	Wm	0.002 [cm/day]	Rop	109.5		

以上より、種によって貧酸素に対する耐性は様々であることが理解されるが、ごくおおづかみに言ってベントスは1 mg/l程度、魚類は2~3 mg/lが致死限界であろう。

3.2 溶存酸素濃度の計算方法

溶存酸素濃度は、水域に存在するプランクトンなどの生物により大きく変化する。このため、本来 SSEM 中で動的に計算されるべきものである。しかしながら、Smalltalk で実装された SSEM は大規模モデルでは計算実行速度が遅いこともあり、こ

こでは、筆者らが提案したもう一つの生態系モデルである水・底質モデルを用いて SSEM とは別に算定した。

水・底質モデルの概要を Fig. 4 に、基礎式とパラメータ値を Table 3, Table 4 に示す。水・底質モデルでは魚は考慮されていないが、底泥表面の酸化層の消長とそれに伴うリンの溶出も含めた酸素の授受がモデル化されている。水・底質モデルの詳細については文献²⁷⁾を参照されたい。

ボックス分割や交換水量、陸域からの負荷量などの強制関数は水・底質モデルと SSEM と共有した。Fig. 5 に SSEM と水・底質モデルによる植物プランクトンの周年変動の計算結果の一例を示す。これより明らかにように、SSEM では春・秋の植物プランクトンのブルームが十分再現されていない。これは底泥の取り扱い

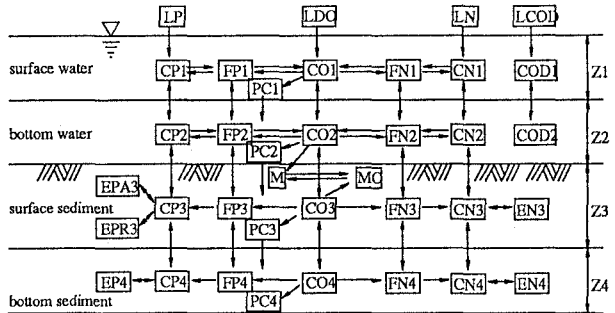


Fig. 4 Water / sediment interaction model

の違いなどからくるものである。今後、秋期の台風などによる陸域からの負荷の増大などを強制関数として与えていくことにより、SSEMでもより精度の高い周年変化の再現が可能となる可能性もある。しかしながら本研究では、先にも述べたようにプランクトンを栄養塩ポンプとしての取り扱いに限定しており、周年変化が十分再現できないことはいたしかたないと考えている。

水・底質モデルにより計算した溶存酸素濃度の一例をFig. 6に示す。表層では溶存酸素濃度が魚に影響することはほとんどないと考えられるが、大阪湾底層では陸域からの栄養塩負荷量の変動に応じて貧酸素状態が発生することがわかる。

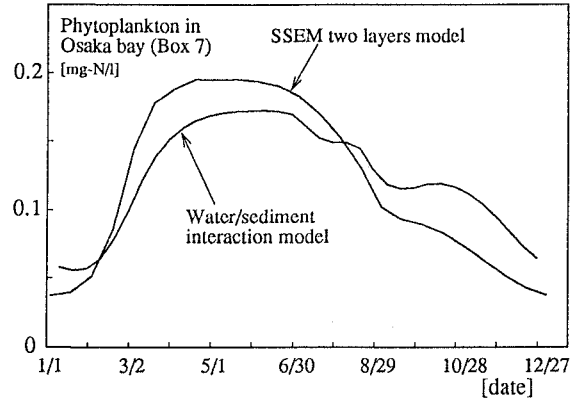


Fig. 5 Example of calculated phytoplankton stock by water/sediment interaction model and SSEM two layers model

3.3 局所的な貧酸素水塊量の推定

前項で得られた溶存酸素濃度は、あくまでも灘平均濃度である。しかし実際には、より酸素濃度が低い局所的な貧酸素水塊が問題を引き起こすと考えられる。

文献²⁸⁾には、周防灘および大阪湾の水域を流入負荷量に応じて分類し、同一流入負荷量区分水域毎に溶存酸素濃度分布を複数の測点で実測した図が示されている。これより、同一流入負荷量区分に属する海域における溶存酸素濃度の確率密度分布図を作成し、確率密度関数として正規分布を仮定して溶存酸素濃度の標準偏差を求めた。一例として周防灘水質類型B海域と大阪湾水質類型C海域における溶存酸素の確率密度分布をFig. 7に示す。周防灘7水域についてこの標準偏差を求め、各水域の平均

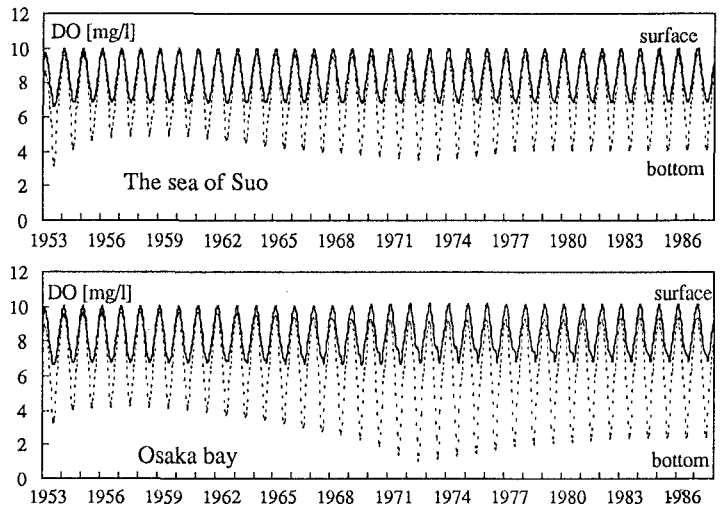


Fig. 6 Calculated DO concentration of the sea of Suo and Osaka bay

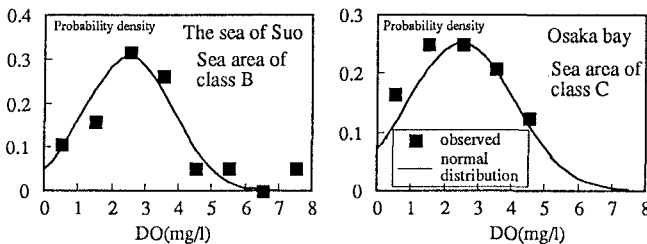


Fig. 7 Probability density of observed DO concentration

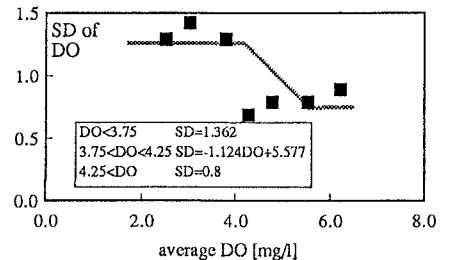


Fig. 8 Standard deviation (SD) of DO

溶存酸素濃度に対する標準偏差を整理したものがFig. 8である。平均溶存酸素濃度が低いほど標準偏差は大きくなる傾向がある。大阪湾のデータにおいても同様の傾向が認められた。平均溶存酸素濃度と溶存酸素濃度の標準偏差の関係を乱暴ではあるが簡単な式にしたものをFig. 8に併記してある。これより、任意の平均溶存酸素濃度に対応する溶存酸素濃度の確率密度分布を推定し、Fig. 9に示す致死限界溶存酸素濃度 DO_c を下回る貧酸素水塊のボックス全体に占める割合 r_{od} を推定できる。SSEMの計算では、貧酸素水塊内のベントス、魚の死亡速度係数は1であると仮定し、ボックス全体の各生物の貧酸素を原因とする死亡速度 D_{od} は、ボックス全体に占める貧酸素水塊の割合から別に定める逃避率 K_x を控除して、 $D_{od} = W \times r_{od} (1 - K_x) \cdot 1.0$ とした。

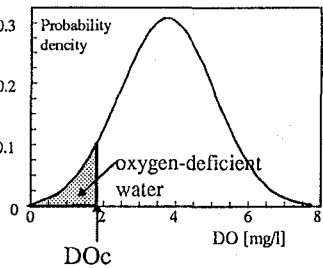


Fig. 9 Estimation of oxygen-deficient water volume

4 SSEMによる生物資源量計算

すでに述べたように、水中の生物資源量を実測する手法が確立されていないため、生物資源量モデルの計

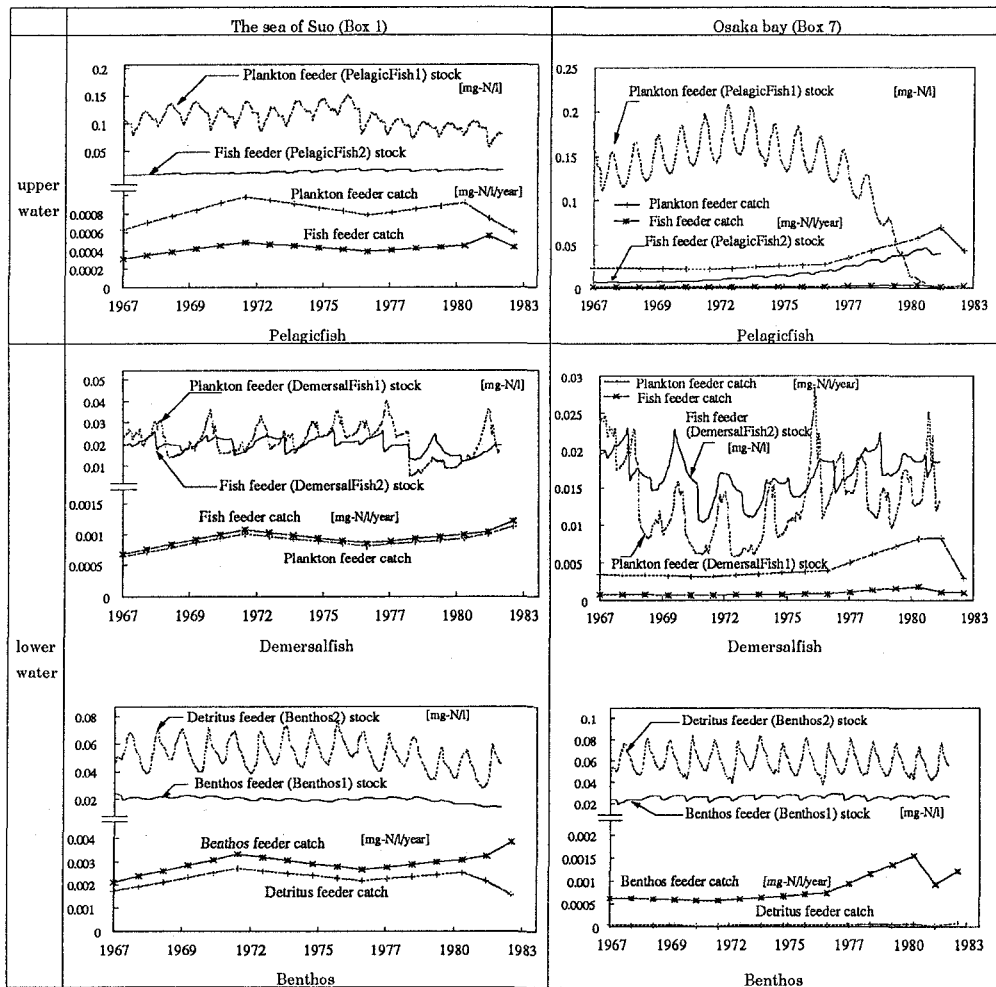


Fig. 10 Calculated living stocks and observed catches without oxygen deficit

算結果を検証することは難しい。漁獲対象種については、その種の資源量はおよそ漁獲量の2倍～3倍、場合によっては10倍程度であるといっても受け入れられる程度の精度であり、漁獲対象でない種の現存量はほとんど不明である。本計算では、まず漁獲圧*と貧酸素の影響がない状態で生物資源量が維持されることを確認した上で、モデルに漁獲圧あるいは貧酸素化の影響を組み込み、その状態でモデル中の生物資源量を維持できるかどうかを計算成功の目安とした。

4.1 漁獲圧のみを考慮した計算結果

計算結果の一部をFig. 10に示す。強制関数はFig. 1, Fig. 2に示した日射、水温、水平鉛直交換流量、栄養塩負荷量、および各県の農林水産統計年報から集計した漁獲量である。なお、生物量などの初期値は、漁獲量を参考にし、漁獲圧を与えない状態で1967年の強制関数を用いて10年間繰り返して計算した後の値を用いた。Fig. 10中には漁獲量を併記しているが、生物資源量は漁獲量が控除されたものである。

図に示した周防灘をはじめ、ほとんどの海域では漁獲圧が加わっても資源量を維持できているが、大阪湾だけは表層のプランクトン食魚資源が漁獲圧の増加に伴って急速に減少した。前述のように実際には大阪湾のプランクトン食魚資源の多くは紀伊水道からのイワシの入り込みによりまかなわれていると考えられるため、これを考慮していないことがプランクトン食魚資源量を維持できない理由とも考えられる。ただし、大阪湾に侵入したイワシは湾内のプランクトンを摂食するため、湾全体の資源量の制約を受ける。単純にイワシの入り込み量を計算された資源量に上乘せできるわけではない。この原因の追究には摂食や呼吸などの生物の成長に関わる素過程に対する漁獲圧の感度解析が必要となるが、魚は計算機中で年齢別のオブジェクトとして存在し、自律的に成長/死亡しているため、素過程の物質移動を集計することが現時点では難しい。より詳細な解析は今後の課題とし、ここでは、大阪湾ではもとも漁獲量と生物資源量のバランスがぎりぎりの線で保たれている可能性もあることを指摘するにとどめたい。

4.2 漁獲圧と貧酸素化を考慮した計算結果

貧酸素の影響を組み込んだ場合、表層の生物資源量は大きな影響を受けないが、DOc = 2 mg/lとし、魚の逃避を考慮しない状態では大阪湾の底層生物資

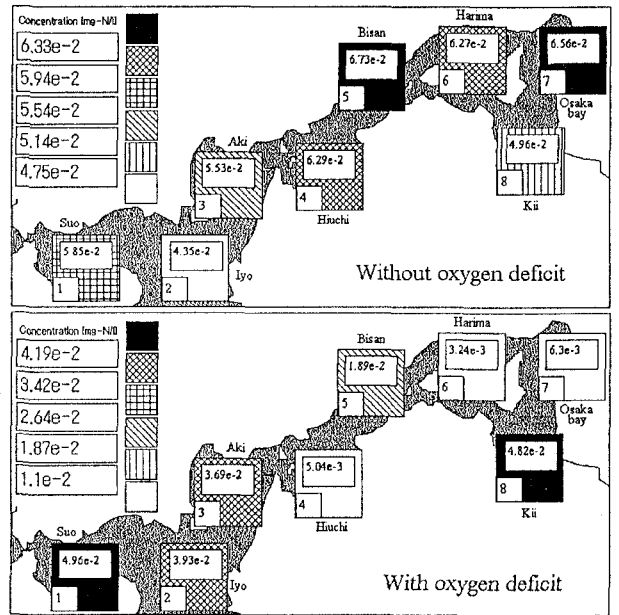


Fig. 11 Benthos stock with/without oxygen deficit

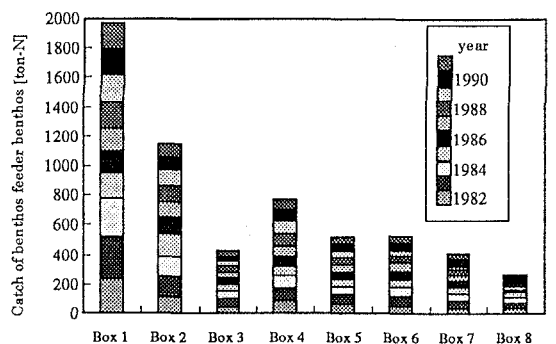


Fig. 12 Benthos catch in ten years

* 漁獲圧：生物資源が外部から受ける影響のうち、漁獲によるもの

源がほぼ全滅した。魚類は貧酸素水塊からの逃避能力を持つと考えられるが、この機構は定量的には明らかにされていない。ここでは一つのシナリオ分析として、 $DO_c = 1 \text{ mg/l}$ とし、魚の90%、ベントスの0%が貧酸素水塊から逃避できるとした場合のベントスの分布をFig. 11示している。ベントスの離別漁獲量の実績をFig. 12に示すが、漁獲量は西部海域に多く東部海域に少ないことがわかる。Fig. 11では、貧酸素を考慮しない場合(without oxygen deficit)には流入負荷量の大きさに応じて大阪湾でベントスの生物資源量が大きくなっているが、貧酸素を考慮(with oxygen deficit)することによって大阪湾の生物資源量が減少し、漁獲量分布に近づいていることがわかる。生物資源量と漁獲量は別物であり、本計算により貧酸素がベントス漁獲量の分布を決定していると証明できるわけではないが、少なくとも貧酸素を考慮することにより事実と矛盾しない結果が得られたと考える。

5 おわりに

SSEM を用いて瀬戸内海漁場生態系モデルを構成した。貧酸素を考慮することにより、ボックス間の移動がほとんどないと考えられるベントスについて、東部海域と西部海域の漁獲量の傾向をある程度説明することができた。まだまだ不完全ではあるが、環境変化の影響を組み込んだ生物資源量評価への一歩となったと考える。今後は、大阪湾へのイワシの入り込みなどの魚の移動の表現、貧酸素化などの環境変化が生じた場合の魚の忌避行動の組み込み、沿岸域や停滞水域の別ボックス化などを行い、沿岸開発に伴う干潟や藻場の喪失などの人間活動の影響評価を試みたい。

最後になりましたが、本研究は、明治生命財団特別研究助成「瀬戸内海における有用水産資源の持続的生産と環境保全に関する学際的研究」(代表 岡市友利)の補助を受けました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) M. Sekine, H. Nakanishi, M. Ukita, S. Murakami: A shallow-sea ecological model using an object-oriented programming language, *Ecological Modelling*, 57, 221-236, 1991
- 2) M. Sekine, H. Nakanishi, M. Ukita, E. Kanehiro: A shallow sea ecological model to assess the impact of coastal development. *Extended Abstracts of The 4th ICCCB*, 189, 1991
- 3) 関根雅彦、中西弘、浮田正夫: 水域生態系モデリングツール SSEM を用いた水門工事に伴う魚のへい死事故の解析, *土木学会論文集*, 491/II-27, 99-108, 1994
- 4) 関根雅彦、浮田正夫、中西弘、内田唯史: 河川環境管理を目的とした生態系モデルにおける生物の環境選好性の定式化. *土木学会論文集*, 503/II-29, 177-186, 1994
- 5) 関根雅彦、檜崎寿晃、浮田正夫、中西弘: 水環境管理への応用を目的とした魚の行動の実験的解析. *環境工学研究論文集*, 31, 225-232, 1994
- 6) T. Laevastu, H. A. Larkins: *Marine Fisheries Ecosystem, Its quantitative evaluation and management*. Fishing News Books Ltd., pp.162, 1981
- 7) 漁業生態系モデルー水産資源評価における諸問題一. *月刊海洋*, 海洋出版株式会社, 4, pp.253, 1995.
- 8) 関根雅彦、浮田正夫、中西弘、檜崎寿晃: 消波工設置工事が阿知須干潟の生物環境、特にアサリに及ぼす影響. *環境工学研究論文集*, 30, 351-359, 1993
- 9) 小坂淳夫編: 瀬戸内海の環境. 恒星社厚生閣, pp.342, 1985
- 10) 山原康嗣: 富栄養海域における水質管理に関する研究. 山口大学大学院工学研究科修士論文, 1991
- 11) S. E. Jorgensen, S. N. Nielsen, L. A. Jorgensen (ed.): *Handbook of ecological parameters and ecotoxicology*. Elsevier, pp.1263, 1991
- 12) J. N. Kremer, S. W. Nixon (中田喜三郎監訳): 沿岸生態系の解析. 生物研究社, pp.227, 1987

- 13) 日本水産資源保護協会: 水産生物の生活史と生態 (続), pp.224, 1986
- 14) 高尾亀次: 瀬戸内海におけるカタクチイワシの回遊・産卵. 水産 技術と経営, 36(3), 9-16, 1990
- 15) 日本海洋学会沿岸海洋研究部会: シンポジウム: 貧酸素水塊, 沿岸海洋研究ノート, 26(2), 1989
- 16) C. A. Stenger, F. P. Cresswell: Vision of a Balanced Ecosystem for Chesapeake Bay, Abstracts of EMECS '93, 181, (ポスタープレゼンテーションにて), 1993
- 17) 空気調和衛生工学便覧 III 給排水設備編, 空気調和・衛生工学会, 1987
- 18) 柳 哲雄: シンポジウム「貧酸素水塊」のまとめ, 沿岸海洋研究ノート, 26(2), 141-145, 1989
- 19) 日本水産資源保護協会: 水生生物生態資料, 1981
- 20) 玉井 恭一: シズクガイの貧酸素耐性. Nippon Suisan Gakkaishi, 59(4), 615-620, 1993
- 21) 今林 博道: 富栄養海域における底生動物群衆と貧酸素水塊の相互作用, 沿岸海洋研究ノート, 26(2), 119-128, 1989
- 22) 日本水産資源保護協会: 水産生物の生活史と生態, pp.251, 1985
- 23) 日本水産資源保護協会: 続水生生物生態資料, 1983
- 24) O. Matsuda, Ju-Chan Kang: Effects of low oxygen and hydrogen sulfide on crab population. Abstracts of EMECS '93, 183, 1993
- 25) 細川 恭史, 堀江 毅: 海域の貧酸素化による無生物底泥の発生の条件について, 環境システム研究, 16, 168-172, 1988
- 26) 岩本典丈: 漁獲量変動予測モデルの周防灘への適用のための基礎的研究. 平成 5 年度山口大学卒業論文, 1993
- 27) 浮田正夫, 中西弘, 河合泰治, 松村和紀: 富栄養水域における底質評価に関する研究. 土木学会論文集, 357/II-3, 235-242, 1985
- 28) 日本水産資源保護協会: 瀬戸内海漁場適正栄養レベル検討事業報告書 大阪湾・周防灘, 1990