

# 연안어장의 환경변화가 수산자원량에 미치는 영향평가

李寅鐵·關根雅彦\*

日本通商産業省工業技術院 中國工業技術研究所, \*日本山口大學 理工學部

## Environmental Impact Analysis on Fish Stocks caused by Environmental Change in the Coastal Fishing Ground

IN-CHEOL LEE AND MASAHIKO SEKINE\*

Chugoku National Industrial Research Institute, 2-2-2 Hiro-Suehiro, Kure, Hiroshima 737-0197, Japan

\* Dept. of Civil Engineering, Yamaguchi University, 2557 Tokiwadai, Ube, Tamaguchi 755, Japan

**KEY WORDS:** Environmental impact analysis 환경영향평가, Fishing ground 어장, Shallow-sea ecological model 천해생태계모델, Fish stocks 수산자원량, Nutrient loads 영양염부하, Seto-inland sea 瀬戸内海

**ABSTRACT:** To predict the influence on fish stocks which were caused by environmental change in the fishing ground of shallow sea areas, we have developed the Shallow-Sea Ecological Model(SSEM) which that focuses on living organisms, especially fish and benthos. By applying the SSEM in the Seto-Inland Sea of Japan, we have simulated another aspect of influence on fish stocks that was caused by oxygen deficient water mass and nutrient loads. From the simulated result of the fish stocks, it was indicated that the stock of fish and benthos has shown a relative difference between the western sea and the eastern sea in the Seto-Inland Sea. According the to prediction, results of fish stocks that were caused by oxygen deficient water mass, it was estimated that the pelagicfish stock increases about 6 %, whereas the stocks of demersalfish and benthos decreases about 30% and 70 %, respectively. On the other hand, it seemed that there was an increased in the fish stocks of demersalfish and benthos in the eastern sea of Seto-Inland Sea by nutrient loads reduction.

### 1. 서 론

연안해역은 항만 및 수변공간시설의 개발이용도가 높은 반면, 육역으로부터 대량으로 유입되는 생활하수와 공장폐수 등의 오염부하가 축적되기 쉬워 부영양화를 비롯한 빈산소수괴 및 적조현상의 발생 등 부차적인 문제로 인하여 어장환경이 점점 악화되어 가고 있다. 이에 따라 최근 연안환경의 지속가능한 개발과 보전을 위해서는 수질관리 뿐만아니라 해역의 환경변화가 수산자원을 포함하는 어장생태계에 미치는 영향에 대하여 종합적으로 평가해야 할 필요성을 지적하고 있다(습田, 1987 ; Okaichi and Yanagi, 1997).

일반적으로 수산자원량의 평가 및 예측에 관한 연구에 있어서는 수산학분야를 중심으로 발전되어, 수산생태계의 복잡한 구조중에서 어업생산에 관한 기능을 추출하여 형상화한 수치생태계모델이 유효하게 이용되고 있다. 이와같은 수치생태계모델에 의한 수산자원량의 예측은 Laevastu and Larkins (1981)의 연구가 대표적인 예로서, 최근에는 기후 및 해양의 장기변화에 대한 해역의 생물생산성의 응답특성을 기술한 모델(Robinson and Ware ; 1994)이 제안되어, 和田 등(1994)에 의해 어획량 또는 어획크기의 규제완화 및 강화와 같은 어업관리대책에 적용되고 있다. 또한, 關根 등(1994)은 다수어종의 고차생물을 포함한 천해어장생태계모델을 제안하여 환경변동에 의한 수산자원

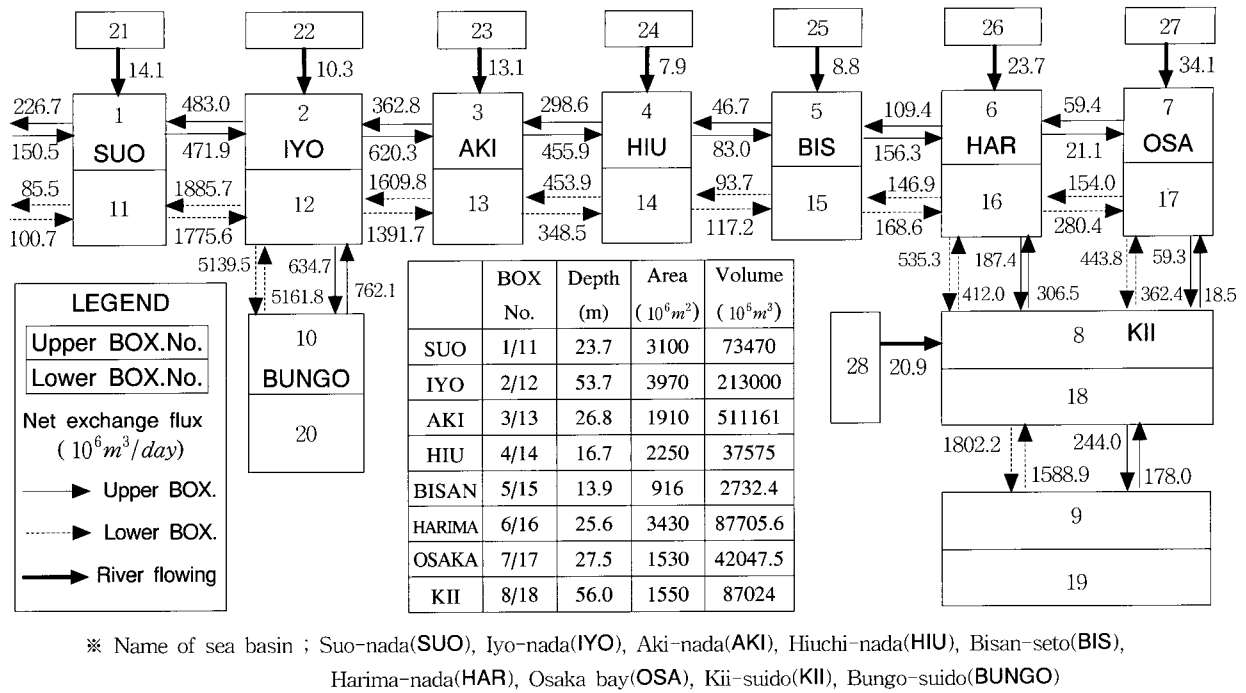
량의 변화를 평가하는데 적용하였다. 이와 같이 해역의 환경변화에 따른 어업생산구조를 표현하는 생태계모델은 수산자원의 환경관리를 위해서 필요한 예측수법이지만, 수산어종의 현존량을 실측할 수 없어 평가결과의 검증이 어렵다는 단점과 생태계 구성요소간의 상호관계가 복잡하다는 이유에서 수산생물자원의 정량적인 평가에 있어서는 아직 문제가 많이 남아있다.

본 연구에서는 연안어장에서 수산생태계의 변화를 예측하기 위한 천해생태계모델(SSEM)을 개발하여, 일본 瀬戸内海를 대상으로 기초생산 및 수산생물자원량을 예측하고, 육역으로부터 유입되는 영양염류의 부하량감 및 빈산소수괴 발생 등의 환경변화가 수산자원량에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

### 2. 어장생태계의 해석

#### 2.1 대상해역

본 연구에서는 일본의 대표적인 내해, 瀬戸内海의 어장생태계를 대상으로 하였다. 瀬戸内海는 평균수심이 약 30 m, 어장면적이 약 1.9 km<sup>2</sup>의 일본최대의 내해어장으로서 연간 약 81만톤의 어업생산량으로 일본전체 어장생산량의 1/4을 점유하고 있다. 이 해역은 섬이 많고 지형이 복잡하여 일반적으로 8개의 천해어장으로 구분되고 있으며, 다양한 수산환경특성을 지니고 있어 치어의 생육장이나 연안소형 어선어업의 어장으로서 널



\* Name of sea basin ; Suo-nada(SUO), Iyo-nada(IYO), Aki-nada(AKI), Hiuchi-nada(HIU), Bisan-seto(BIS), Harima-nada(HAR), Osaka bay(OSA), Kii-suido(KII), Bungo-suido(BUNGO)

Fig. 1 The net exchange flux and box division of the eight basins two layer model in the Seto-Inland Sea, Japan

리 알려져 있다. Fig. 1은 瀬戸内海の 어장생태계에 대한 해역 구분과 그 체적을 나타낸 것으로, 수평으로 8개해역, 연직으로 상층 5 m와 하층을 5 m이하의 수심으로 한 2층 BOX구조로 구분하였다. 각 해역별의 어장생태계 현황은 해역의 조사자료를 바탕으로 영양염농도(총질소), 식물성 및 동물성플랑크톤의 현존량 등의 저차생산현황과 어종별의 어획량통계자료를 토대로 한 고차생산 현황으로 해석하였으며, 이를 천해생태계모델의 검증자료로 이용하였다. 한편, 어장생태계의 해석은 질소농도로서 나타내었다.

## 2.2 어장환경의 변화해석

### (1) 저차생산의 변화

瀬戸内海の 8개 해역별의 영양염류농도는 日本환경청(1988)에 의한 1984년~1987년(4년간)의 총질소(TN)농도의 평균치를 수심과 중첩시켜 농도 및 수심별로 분포면적을 측정된 가중평균치로서 현황농도로 산출하였다. 그리고, 식물성 및 동물성플랑크톤의 현존량과약은 1993년~1994년의 해역조사결과(多田,1996; 上,1996)를 질소농도로 환산하여 추정하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다. 瀬戸内海の 저차생산을 해역별로 살펴보면, 大阪灣(OSA)와 播磨灘(HAR)에서 높게, 외해와 인접한 紀伊水道(KII)와 周防灘(SUO)에서 낮게 나타났다.

### (2) 어종의 분류

瀬戸内海에서 어획되는 어종은 약 600종이상으로 이중 약 100종이 어업대상으로 되어 있다. 이들 전부를 각각 모델의 구성요소로 하기에는 각 어종의 생리·생태변수의 결정에 있어 많은 제약이 따르므로 대표적인 일부 어종만을 선별하여

Table 1 Standing stocks of nutrient and primary production in the Seto-Inland Sea

Box	TN	Phytoplankton	Zooplankton
SUO	0.20	0.029	0.0029
IYO	0.17	0.035	0.0024
AKI	0.21	0.040	0.0021
HIU	0.21	0.042	0.0032
BIS	0.30	0.039	0.0028
HAR	0.26	0.042	0.0038
OSA	0.59	0.044	0.0053
KII	0.25	0.023	0.0015
Average	0.27	0.037	0.0032
C/Chl-a		26.5	-
C/N		5.11	8.49

분류하였다. 어종분류에 있어서는 어획통계대상어종에 관한 생태계 자료총괄표(中四國農政局, 1992)와 어구·어법도감(金田禎之,1989) 등을 참고로 하여 어종의 생활형태와 식성을 근거로 분류하였다. 어종의 생활형태별로는 浮魚(Pelagicfish)와 底魚(Demersalfish), 식성별로 플랑크톤食性系와 魚食性系로 구분하여 총 4종류로 분류하였다. 그리고, 저서생물(Benthos)은 지선 어업자원이므로 생물종의 이동이 없는 것으로 간주하여 생활 형태별로는 분류하지 않고 食性別로 저서생물食性系(Benthos1)와 Detritus食性系(Benthos2)로 분류하였다. 그 결과는 Table 2와 같으며, 분류한 어종들을 어획량 산출 및 모델계산의 구성요소

로 이용하였다.

(3) 어획량의 산출

각 해역별의 어획량산출에 있어서는 Table 2의 어종분류표를 근거로 어종별어획통계자료((中四國農政局, 1992)를 이용하여 1962년~1991년까지의 30년간의 어획량을 질소중량으로 환산하여 산출하였다. 어획량의 질소중량환산은 어종별의 폐기물 및 가식단백질의 비율과 함량이 기재된 식품성분표(松本, 1982)에 따라 각 어종별의 질소함유율을 구한 후, 어종별의 어획량에 곱하여 환산하였다.

### 3. 천해생태계모델의 내용

#### 3.1 유동과 수질모델

천해생태계모델의 유동장계산에 있어서는 연직방향으로 정수압분포를 가정하여 Navier-Stocks의 운동방정식 및 연속방정식을 수심방향으로 평균한 2차원 2층의 유한차분모델에 의해 계산하였다. 조류계산의 결과로부터 유동의 재현성 및 유량수지를 검토한 후, Fig. 1과 같이 8개 해역 2층 BOX구조로 분할하여 조석잔차류와 하천으로부터의 담수유입량으로부터 단면교환유량을 구하였다(李 등, 1995). 또한, 해역별의 용존산소(DO)농도에 대해서는 수·저질예측모델(李 등, 1996)에 의한 계산결과를 이용하였다. 이상의 유동과 수질모델에서 구해진 단면교환유량과 용존산소농도를 어장생태계모델의 입력자료로 이용하였다.

#### 3.2 천해생태계 모델(SSEM)

##### (1) 모델의 개요와 구성

천해생태계모델(이후 SSEM으로 칭함)은 Sekine *et al.*(1991)에 의해 개발된 목적지향성 프로그래밍언어인 Smalltalk로 작성되는 Box-Type모델로서 복잡한 생태계를 원활하게 모델화하는데 편리하며, 생물의 선호성에 근거한 환경조건의 변화에 대한 기피행동 등 생물의 생태거동을 정량적으로 모델화할 수 있는 특징이 있다. 이상의 모델을 기본으로 하여 본 연구에서는 瀬戸内海를 유동 및 수질모델과 동일하게 8개 해역 2층 BOX(총 16 BOX)모델로 계산영역을 확장하였으며, 영양염류의 유입부하량 및 빈산소수괴의 조건, 회유어종의 조건 등을 설정하여 모델을 개량하였다.

Fig. 2는 어장생태계모델을 구성하는 요소간의 물질순환 및 상호작용관계를 모식화한 것이다. 모델의 구성요소로서는, 저차생산요소로 영양염류(TN), 식물성플랑크톤(Phyto), 동물성 플랑크톤(Cope) 및 Detritus의 4요소로 구성되며, 고차생산요소는 앞절에서 언급한 어종분류와 동일하게 플랑크톤食性浮魚(Pelagicfish1)와 魚食性浮魚(Pelagicfish2), 플랑크톤食性底魚(Demersalfish1)와 魚食性底魚(Demersalfish2), 저서생물食性的 저서생물(Benthos1), Detritus食性的 저서생물(Benthos2)의 6요소로 구성되어 있다. 영양염류는 하천으로부터의 유입부하량과 인접해역으로부터의 이류, 플랑크톤 및 어패류의 대사작용, Detritus의 분해에 의한 것으로 설정되어 있으며, Detritus는 플랑크톤 및 어패류의 배설물과 사망에 의한 잔해 등으로 설정하였다.

Table 2 Classification of species group for fish and benthos

Pelagic Fish	
Plankton feeder(Pelagic Fish 1)	Fish feeder(Pelagic Fish 2)
Sardine	Horse mackerels
Anchovy	Yellow tail
Anchovy larvae	Scomberomorus
Mackerels	Other fishes
Gizzard shad	
Other fishes	
Demersal Fish	
Plankton feeder(Demersal Fish 1)	Fish feeder(Demersal Fish 2)
Butter fish	Bastard halibut
Sand lance	Lizard fishes
Mulletts	Eel
Other fishes	Ribbon fish
	Sepia
	Other Squids
	Other fishes
Benthos	
Benthos feeder(Benthos 1)	Detritus feeder(Benthos 2)
Kuruma prawn	Ark shells
Other shrimps	Clam
Mantis shrimps	Short necked clam
Other crabs	Abalone
Blue crab	Turbo
	Other shell fishes

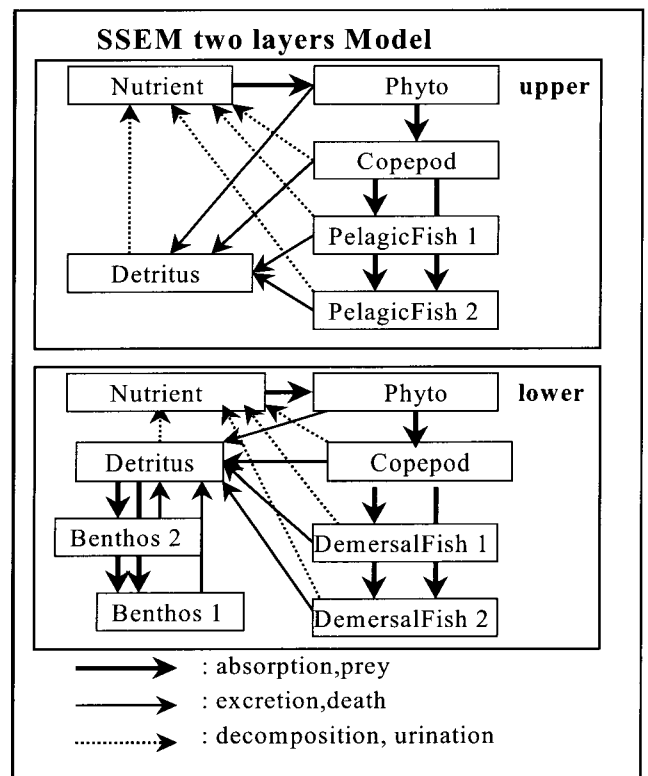


Fig. 2 Components and material flow in each box of SSEM model

Table 3 Mathematical equations of SSEM model

Components	Equations	Symbols
Inanimate (Nutrient, Detritus)	$\frac{\Delta W_n}{\Delta t} = \sum U - \sum E_n$ $\frac{\Delta W_d}{\Delta t} = -Kd \cdot W_d + \sum F - \sum E_d$	$W_n$ : weight of nutrient (kg) $W_d$ : weight of detritus (kg) $E_n$ : absorbed of nutrient (kg/day) $E_d$ : absorbed of detritus (kg/day)
Livings (Phyto, Copepod, Fish Benthos)	$\frac{\Delta W}{\Delta t} = E - F - U - R - D$ $E = W \times G$ $F = E \times Kf$ $U = E \times Ke$ $R = W \times Kr \cdot e^{krt \cdot TEMP}$ $D = W \times Kd \cdot e^{kdt \cdot TEMP}$	$W$ : weight of livings in a box (kg) $\Delta t$ : 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)
Phyto	$G = Gmax \times \frac{(n - Kt)/W}{Ks + (n - Kt)/W}$ $Gmax = Kg \cdot e^{hgt \cdot TEMP} \cdot LTLIM$ $LTLIM = \left(\frac{s}{500}\right)^{(1.0 - \frac{s}{2000})}$ $s = light \cdot e^{-0.01 \cdot z \cdot k}$ $k = 0.04 + (8.8 \cdot W) + (0.054 \cdot W \cdot 1000)^{2/3}$	$G$ : grazing rate (1/day) $Gmax$ : maximum grazing rate(1/day) $n$ : food amount (kg) $Kg$ : max. growth rate at 0°C(1/day) $Kf$ : faecal ratio (-) $Kt$ : threshold of grazing (mg/l) $Ks$ : half-saturation constant $Ke$ : excretion ratio (-) $Kr$ : respiration rate (1/day) $Kd$ : death rate (1/day) $Kgt, Krt, Kdt$ : $TEMP$ constant (1/°C) $TEMP$ : water temperature (°C)
Copepod	$G = Gmax \times (1 - \exp(Ks(Kt \cdot V - n)/W))$ $Gmax = Kg \cdot e^{hgt \cdot TEMP}$	$Kr$ : respiration rate (1/day) $Kdt$ : death rate (1/day) $Kgt, Krt, Kdt$ : $TEMP$ constant (1/°C)
Fish, Benthos(PelagicFish1 · 2, DemersalFish1 · 2, Benthos1 · 2)	$G = Gmax \times \frac{(n - Kt)/W}{Ks + (n - Kt)/W}$ $Gmax = Kg \cdot e^{hgt \cdot TEMP}$	$W m_{ij}$ : weight of fish moving from box $i$ to $j$ (kg) $Q_{ij}$ : water volume of flowing from box $i$ to $j$ ( $10^3 m^3/day$ )
Reproduction of Fish	$W_{egg} = 0.0125 \cdot W$	$Kc$ : exchange coefficient (-)
Movement among boxes	$W m_{ij} = Kc \cdot W \cdot Q_{ij} / V \cdot \Delta t$	$V$ : water volume in box $i$ ( $10^3 m^3$ )

Table 4 The value of preset parameters used in the SSEM model

Components	Parameters												
	$Ks$	$Kt$	$Kg$	$Kgt$	$Kr$	$Krt$	$Kd$	$Kdt$	$Kf$	$Ke$	$Kc$	Food	
Phyto	1.8	0.0	0.5	0.0633	0.01	0.0524	0.003	0.0524	0.0	0.0	0.9	Nutrient	
Copepod	0.2	0.0	0.2	0.0693	0.04	0.0693	0.01	0.0693	0.01	0.01	0.7	Phyto	
PelagicFish1	juvenile	0.024	0.0	0.03	0.0693	0.01	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	Copepod
	young	0.007	0.002	0.013	0.0693	0.006	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	Copepod
	adult	0.009	0.003	0.006	0.0693	0.003	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	Copepod
	juvenile	0.013	0.0	0.0243	0.0693	0.01	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	Copepod
PelagicFish2	young	0.003	0.0004	0.0031	0.0693	0.001	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	PelagicFish1 (day <740)
	adult	0.29	0.0004	0.0017	0.0693	0.0002	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	PelagicFish1 (day > 365)
DemersalFish1	juvenile	0.0014	0.0	0.03	0.0693	0.01	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	Copepod
	young	0.0004	0.0004	0.013	0.0693	0.006	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	Copepod
	adult	0.0003	0.0005	0.006	0.0693	0.003	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	Copepod
	juvenile	0.0006	0.0	0.0243	0.0693	0.01	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	Copepod
DemersalFish2	young	0.0002	0.0	0.0031	0.0693	0.001	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	Copepod
	adult	0.01	0.0001	0.0017	0.0693	0.0002	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	DemersalFish1 (day <730)
	juvenile	0.006	0.0	0.032	0.0693	0.015	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	DemersalFish1 (day > 365)
	young	0.0002	0.0001	0.005	0.0693	0.002	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	Copepod
Benthos1	adult	0.064	0.00015	0.002	0.0693	0.0005	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	Detritus
	juvenile	0.01	0.0	0.0576	0.0693	0.02	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	Benthos2 (day <730), Detritus <730), Detritus <365), Detritus <365)
Benthos2	juvenile	0.009	0.0003	0.0245	0.0693	0.01	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	Copepod
	adult	0.0063	0.0004	0.0038	0.0693	0.0014	0.0693	0.0	0.0693	0.2	0.1	0.0	Detritus

Note) 1) juvenile : under one year old fish, young : one year to three year old fish, adult : over three years old fish

2) PelagicFish 1 (day <740) means that the fish feed on PelagicFish 1 younger than 740 days.

3) Reproduction time of the fish : the 120 days from calculation start (only, the fish of older than 550 days).

구성요소간의 물질순환은 전부 질소농도로 표현하여 물질수지를 계산하는 구조로 설계하였다.

(2) 생물생태의 정식화

생물의 성장에 관련한 생활사에 대해서는 日本水産資源保護協會(1981, 1985, 1986)의 자료를 참고로 하여 모델계산의 변수로 설정하였다. 어패류의 수명은 각 어종에 따라 다르지만, 모델을 구성하는 어종이 복수어종을 대표하는 형태로 되어있어 전 어종의 수명을 6세로 설정하였으며, 6세를 초과하는 어패류는 전부 사망하는 것으로 가정하였다. 어류는 생활사로부터란, 치어, 미성어, 성어의 4단계로 구분하여, 생후 365일까지를 치어, 3세미만은 미성어, 3세이상을 성어로 설정하였으며 각 성장단계별로 성장·호흡속도, 반포화정수, 식성 등을 변화시켰다. 또한, 란의 부하일수는 어종에 따라 다르며 온도에 영향을 받으나 모델에서는 1일로 가정하였으며, 어종의 산란에 대하여는 생후 550일이상의 어종이 산란연령에 달하는 것으로 산란시기는 봄철의 년 1회로 제한하였다. 이와 관련한 생물별의 성장속도 및 비성장속도에 대해서는 각각 久保(1969)와 松原등(1965)의 연구결과를 참고로 추정하였으며, 생물의 섭식, 호흡, 배설, 분해 등은 각각의 구성요소별로 정식화하였다. 이들 생물생태를 정식화한 SSEM모델의 기초식을 Table 3에 나타내었으며, 기초식에서의 각 변수 및 상수들은 Table 4와 같다.

한편, 일사량, 수온 및 연직혼합유량 등의 외력 및 구동함수는 Table 5와 같이 강제함수로 주었으나, 해역별의 총질소(TN)의 유입부하량(Fig. 3)에 대하여는 1957년~1987년(30년간)의 유입부하량(李 등;1995)을 입력조건으로 설정하였다. 모델의 계산은 Runge-Kutta법에 의해 1962년~1987년(25년간)의 기간을 대상으로 실시하였다.

Table 5 External force and driving functions in the SSEM model

Items	Functions
Light intensity	$light = 390 + 170 \cdot \sin\left\{\frac{2\pi}{365} \cdot (day - 80)\right\}$
Water temperature	$T_1 = 17.63 + 8.52 \cdot \cos\left\{\frac{2\pi}{365} \cdot (day - 219)\right\}$ $T_2 = 16.46 + 7.73 \cdot \cos\left\{\frac{2\pi}{365} \cdot (day - 222)\right\}$
Vertical mixing	$Q_z = A \cdot \frac{D_z}{0.5 \cdot (Z_U + Z_L)}$
Vertical mixing coefficient	if, $day \leq 74$ $D_z = 1.440 \cdot cdz$ $74 \leq day < 192$ $D_z = \left\{1.6 - \left(\frac{(day - 103)^2}{5442.0}\right)\right\} \cdot cdz$ $192 \leq day < 266$ $D_z = \left\{0.1 + \left(\frac{(day - 207)^2}{3628.0}\right)\right\} \cdot cdz$ $266 \leq day < 290$ $D_z = \left\{1.44 - \left(\frac{(day - 290)^2}{1158.7}\right)\right\} \cdot cdz$ $290 \leq day$ $D_z = 1.440 \cdot cdz$

$Q_z$  vertical exchange volume ( $cm^3/sec$ ),  $T_1$ ( $T_2$ ) water temperature of upper(lower) water ( $^{\circ}C$ ),  $light$  light intensity (lux),  $day$  elapsed time from 1 Jan.,  $D_z$  vertical mixing coefficient ( $cm^2/sec$ ),  $cdz$  base value of  $D_z$  ( $cm^2/sec$ ),  $A$  interface area between upper and lower boxes ( $cm^2$ ),  $Z_U$ ( $Z_L$ ) depth of upper(lower) box ( $cm$ ).

(3) 계산조건

1) 빈산소수괴

수산생물의 대량폐사를 일으키는 국소적인 빈산소수괴를 설정함에 있어서는 周防灘과 大阪灣의 영양염부하와 저층의 DO 농도와의 상관도(日本水産資源保護協會 ; 1990)를 근거로 각 해역의 저층 DO농도의 확률밀도분포도를 작성하여 Fig. 4와 같은 치사한계 DO농도(DOc)이하로 되는 빈산소수괴의 용적을 산정하였다. 모델의 계산에서는 빈산소수괴내의 저서생물 및 어류의 사망속도계수는 1로 가정하여 해역전체의 각 생물의 빈산소수괴로 인한 사망률( $R$ )을 식(1)과 같이 설정하였으며, 사망속도( $Kd$ )는 식(2)와 같이 산출하였다. 또한, 어류는 90%가 빈산소수괴로부터 도피하는 것으로 가정한 반면, 저서생물은 생활사의 특성상 도피하지 않는 것으로 설정하였다.

$$R = W \times \gamma od (1 - Kx) \tag{1}$$

$$Kd = \{1 - (1 - R)^{1/10}\} / \Delta t \tag{2}$$

여기서,  $R$ 은 BOX전체의 각 생물의 빈산소수괴로 인한 사망률,  $W$ 는 생물량,  $\gamma od$  는 DOc이하로 되는 빈산소수괴의 용적을,  $Kx$ 는 빈산소수괴로 부터의 도피율,  $Kd$ 는 빈산소로 인한 사망속도를 나타내며,  $\Delta t$ 는 1일로 하였다.

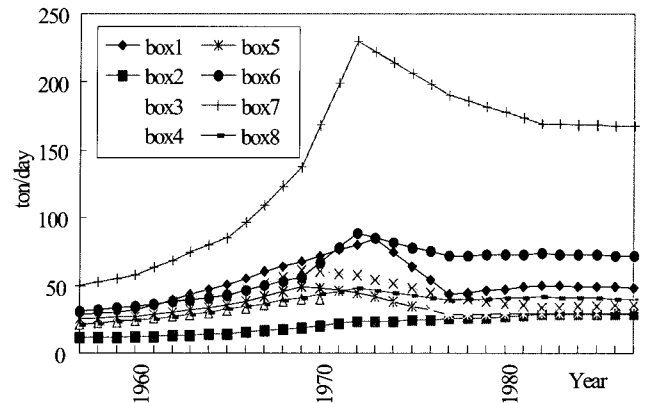


Fig. 3 Year-to-year variation in total nitrogen(TN) load

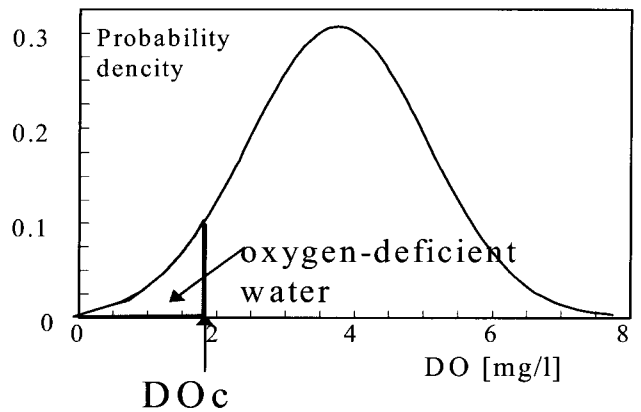


Fig. 4 Estimation results of oxygen deficient water volume by probability density function with observed DO concentration in the Seto-inland Sea

2) 회유어종의 설정

瀬戸内海中 大阪灣에서 어획되는 정어리 및 멸치 등은 늦은 봄에 紀伊水道(KII)를 통하여 다량 유입하여 大阪灣 및 播磨灘(HAR)에서 체류한 후, 겨울철에 재차 紀伊水道(KII)를 통하여 외해로 나가는 회유성을 지니고 있다. 이와같은 연안지선자원이 아닌 회유어종에 대해서는 어획강도 및 섭식강도를 주어 정어리의 어획량이 많은 6월~11월사이의 6개월간 大阪灣의 월 어획량에 2배의 정어리가 회유해 오는 것으로 가정하여 浮魚1의 생물량에 가산하였다.

3) 어획량의 계절변동

어종별어획통계치에 의한 어종별의 어획량을 살펴보면 浮魚1이 5~11월, 底魚1은 2~6월에 많이 어획되는 것으로 나타났다. 이를 근거로 각 계산항목별로 연간총어획량에 대한 월별 어획량의 비율을 구하여 어획량의 계절변화를 고려하였다. 그러나, 浮魚2와 底魚2는 어획량이 비교적 적고 다양한 어종이 포함되어 있음을 고려해 연간어획량의 1/12이 매월 어획되는 것으로 설정하였다. 한편, 계산중의 어획시기는 매월초 3세 이상의 어종부터 어획되는 것으로 설정하였다.

4. 수산자원량의 영향평가

4.1 수산생물량의 계산

(1) 저차생산의 현존량

Fig. 5는 저차생산의 현존량 계산치와 Table 1의 실측치를 비교검증한 결과이다. 영양염류(TN)의 계산치는 播磨灘를 제외하고는 전해역에 걸쳐 실측치와 거의 일치하였으며, 식물성 및 동물성플랑크톤의 계산치는 瀬戸内海の 서부해역에서는 실측

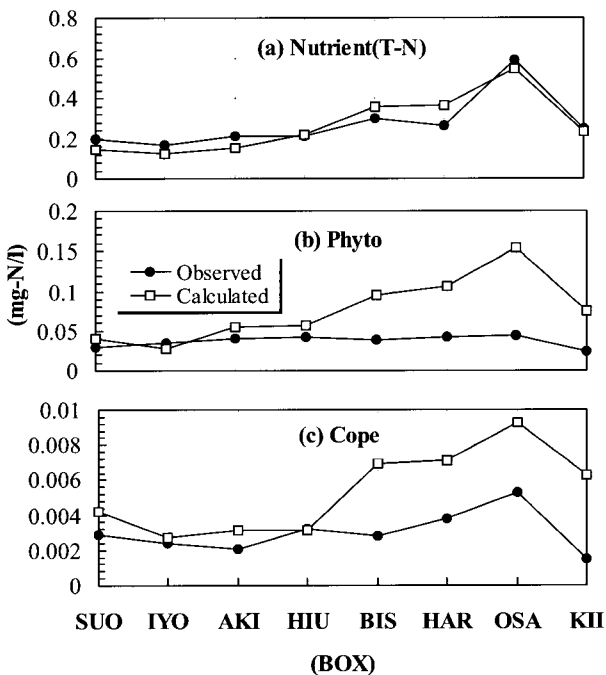


Fig. 5 Calculation results of primary production by SSEM

치와 잘 일치하였으나 備讃瀬戸(BIS)에서 紀伊水道(KII)에 이르는 동부해역으로 갈수록 계산치가 높게 나타났다. 이것은 Table 1의 탄소/질소비(C/N比)의 실측치 부족과 년 4회의 실측 평균치에 기인된 것으로 예상되나, 해역별의 투명도분포와의 상관관계로 유추하여 보면, 저차생산의 현존량은 타당한 농도 범위에 있는 것으로 추정되었다.

(2) 고차생산의 생물량

모델에 의한 생물량의 계산결과를 검증하기 위해 식(3)과 같은 생물의 연간 순생산량의 계산치와 어획량을 비교하여 나타내었다.

$$P_n = P_g - B - D - G \quad (3)$$

여기서,  $P_n$ 은 생물의 연간 순생산량,  $P_g$ 는 연간 총생산량,  $B$ 는 연간 총호흡량,  $D$ 는 연간 총사망량,  $G$ 는 연간 총피식량이다.

Fig. 6은 瀬戸内海の 해역별, 어종별의 20년간의 평균어획량과 모델에서 계산한 20년간의 평균 순생산량을 나타낸 것이다. 해역별의 어획량을 비교해 보면, 어류는 備讃瀬戸에서 紀伊水道까지의 동부해역에서 많고, 저서생물은 周防灘과 安藝灘(AKI)의 서부해역에서 많은 경향을 나타내고 있어 어류와 저서생물의 서식장에 있어서 뚜렷한 차이를 알 수 있다. 그리고, 해역의 환경용량에 비하여 유입부하량이 많은 備讃瀬戸, 播磨灘, 大阪灣에서는 浮魚의 어획량이 현저하게 많은 경향을 나타내었다. 한편, 생물의 순생산량의 계산결과를 보면, 어획량의 해역별 분포와 거의 일치하였으며 大阪灣에서는 底魚2와 저서생물류의 순생산량이 빈산소의 영향으로 낮게 나타나는 등 해역의 현황을 잘 재현하였다. 이러한 결과는 해역별의 저차생산에서 고차생산으로의 이용 및 어획량의 분포특성 등이 모델의 계산에서 양호하게 재현되고 있음을 나타내고 있다.

4.2 환경변화에 의한 수산자원량의 예측

(1) 빈산소수괴의 영향

수산자원량의 계산결과를 이용하여 빈산소수괴의 발생이 수산생물의 자원량에 미치는 영향을 검토하였다. 빈산소수괴의 영향도는( $\beta$ )는 식(4)와 같다.

$$\beta = (\theta_i - \theta_j) / \theta_i \quad (4)$$

여기서,  $\theta_i$ 는  $i$ 해역의 빈산소수괴를 고려하지 않고 계산된 평균현존량,  $\theta_j$ 는 빈산소수괴를 고려하여 계산된 평균현존량을 나타낸다.

Fig. 7은 식(4)로부터 구한 빈산소수괴에 의한 생물자원량의 증감경향을 1965년~1985년(20년간)의 평균치로서 나타낸 것이다. 빈산소 수괴의 발생으로 인한 생물자원량에 미치는 영향도( $\beta$ )를 살펴보면, 저층에 서식하는 底魚와 저서생물의 자원량은 각각 30%와 70%정도로 감소하였으나, 浮魚의 자원량은 포식자인 魚食性底魚(Demersalfish2)의 감소로 인하여 약 6%증가하는 것으로 나타났다. 또한, 해역별로 살펴보면 浮魚의 자원량은 安藝灘(AKI)에서 최대 20%까지 증가하였으며 底魚와 저서생물은 동부해역에서 빈산소수괴에 의한 자원량의 감소경향이 크게 나타나서, 자원량의 회복을 위해서는 빈산소수괴의 억제대책이 필요함을 시사하고 있다.

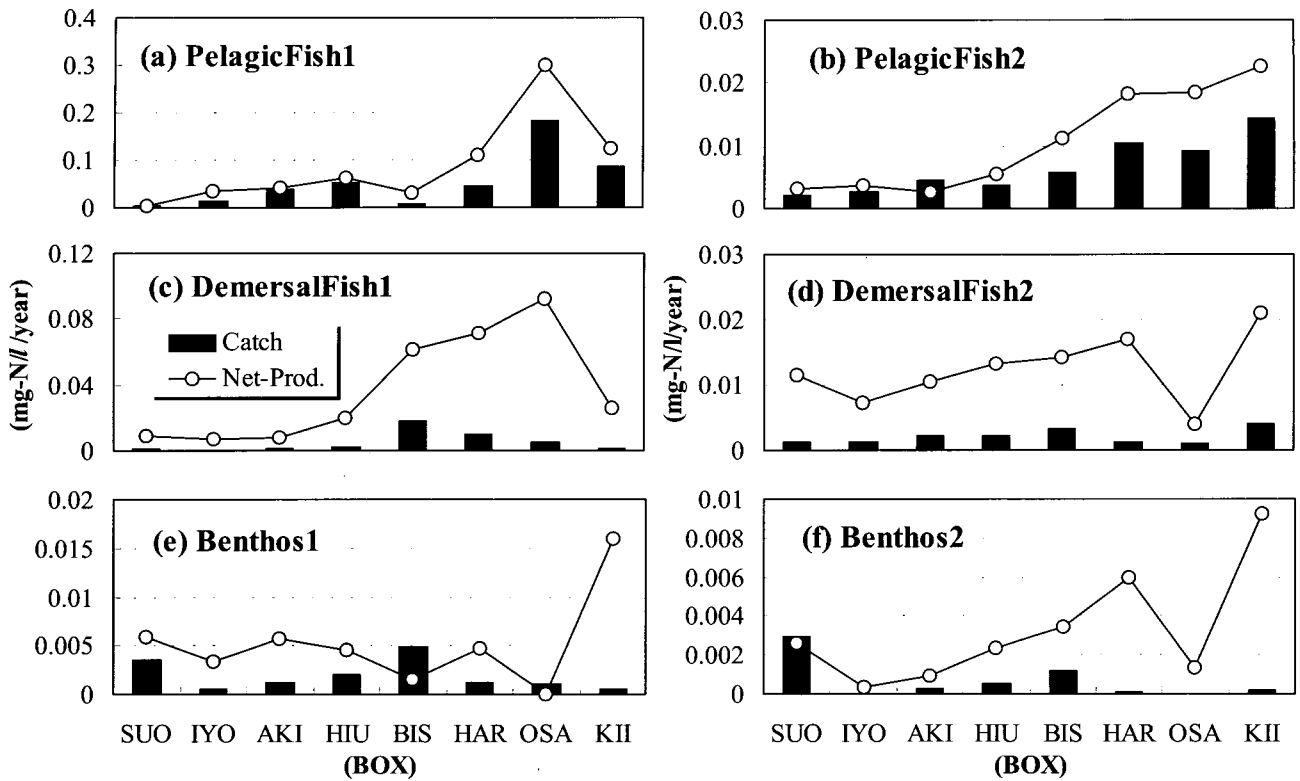


Fig. 6 Comparison results of fish catches and calculated net production of fish stocks in the Seto-Inland Sea by SSEM

(2) 영양염부하삭감에 의한 영향

육역으로부터 유입되는 영양염부하는 기초생산력의 증가는 물론 나아가 고차생산자인 수산생물의 자원량증가에 중요한 공급원이 되고 있으나, 어느 범위를 넘는 부영양화는 앞절에서 언급한 빈산소수괴의 발생으로 고급어종의 자원량감소를 초래한다고 볼 수 있다. 따라서, 수산자원량의 장래예측에 있어서는 당면의 환경변동요인인 유입영양염의 삭감에 따른 수산자원량의 영향을 평가하는 것이 중요하다. 본 절에서는 빈산소수괴의 발생조건하에서 1987년의 유입영양염 부하량을 기준으로 하여 부하량삭감이 수산자원량에 미치는 영향을 평가하였다.

Table 6은 1987년의 총질소 부하량을 현상태의 부하조건으로 하여, 永井(1996)이 제시한 瀬戸内海의 지속적인 어업을 위한 영양염의 목표수질농도를 토대로 추산한 해역별의 부하량삭감을 나타낸 것이다. Table 6의 Case 1은 부하량삭감의 상한도를 30%로 한 경우, Case 2는 각 해역별로 목표수질농도를 달성하기 위한 최대삭감을 적용한 경우이다.

Fig. 8은 Table 6의 각 Case의 부하량삭감을 적용해서 10년간 계산하여 얻어진 수산자원량의 변동을 나타낸 것이다. 周防灘에서 安藝灘이르는 서부해역에서는 현상태와 부하량삭감후와의 비교에서 생물량의 변화가 거의 나타나지 않았으나, 備讃瀬戸에서 紀伊水道까지의 동부해역에서는 부하량의 삭감에 따라 浮魚의 자원량이 약 0.1~0.15 mg-N/l로 감소하였으나, 底魚 및 저서생물의 자원량은 각각 약 0.1mg-N/l와 0.04~0.08 mg-N/l정

Table 6 The reduction rates of total nitrogen load at each region in the Seto-Inland Sea

Case	SUO	IYO	AKI	HIU	BIS	HAR	OSA	KII
Case 1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
Case 2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.8	0.3	0.55	0.1

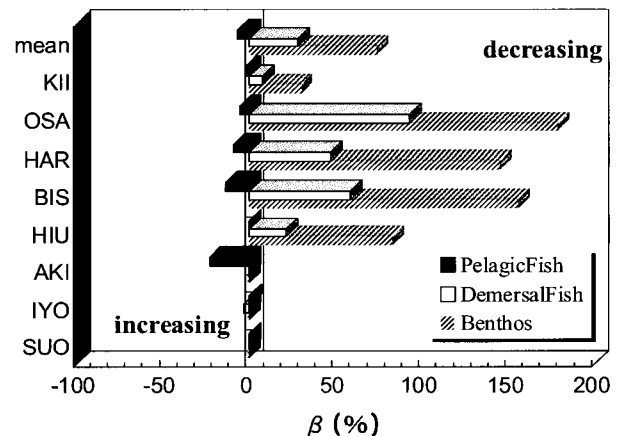


Fig. 7 The change of fish stocks caused by oxygen deficient water mass

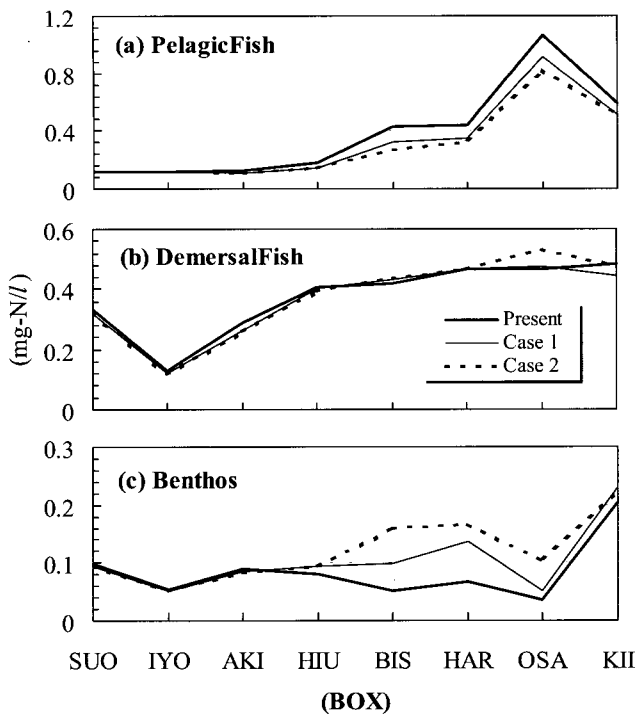


Fig. 8 The change of fishery stocks caused by nutrient load reduction in the Seto-Inland Sea

도로 증가하는 것으로 나타났다. 이를 생물중량으로 환산하면, 동부해역의 생물자원량은 浮魚가 부하삭감에 의해 현상태보다 약 1,000톤정도 감소하며, 저서생물이 약 2,500톤이상 증가하는 것으로 추정된다. 이상의 결과로부터 영양염의 부하삭감에 따른 수산자원량의 변화를 고찰하여 보면, 해역의 상층에서는 부하량의 삭감에 의해 저차생산량이 줄어들게 됨으로써 浮魚의 자원량은 감소하게 되지만, 해역의 저층에서는 부하량의 삭감에 의해 빈산소수괴의 발생이 억제됨에 따라 底魚 및 저서생물의 자원량은 증가 할 수 있음을 시사하고 있다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 연안어장에서 수산생태계의 변화를 예측하기 위한 천해생태계모델(SSEM)을 개발하여, 일본 瀬戸内海를 대상으로 기초생산 및 수산생물자원량을 예측하고, 육역으로부터 유입되는 영양염류의 부하량삭감 및 빈산소수괴 발생 등의 환경변화가 수산자원량에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 천해생태계모델에 빈산소수괴의 발생조건을 고려하여 수산자원량을 예측한 결과로 부터 瀬戸内海에서는 동부해역에서는 플랑크톤食性系の 浮魚자원이 풍부하며, 서부해역에서는 저서생물의 자원량이 풍부한 것으로 예측되어, 해역에 따라서 수산생물의 자원분포가 서로 다른 것으로 예측되었다.
- (2) 빈산소수괴의 발생에 따라 浮魚의 자원량은 약 6%정도 증가하였으나, 底魚와 저서생물의 자원량은 각각 30%와 70%정도 감소하는 것으로 나타났다.

(3) 영양염 부하량의 삭감에 의해 瀬戸内海의 동부해역에서는 底魚 및 저서생물의 자원량이 증가되는 것으로 평가되었다.

금후의 연구과제로서는 어종별의 생태에 관한 상세한 정보 수집과 계산에 이용되는 변수들의 감도해석과 환경변화에 의한 생물의 생식장변화난 도피행동등을 정식화하여 생태계모델의 신뢰성과 적용성에 대한 연구가 계속되어야 할 것으로 예상된다.

## 참고 문헌

- Jorgensen, S. E., Nielsen, S. N. and Jorgensen, L. A. (1991). "Hand-book of ecological parameters and ecotoxicology, Elsevier, p. 1263.
- Laevastu, T. and Larkins, H. A. (1981). "Marine fisheries ecosystem,- Its quantitative evaluation and management, Fishing News Books Ltd, Farnham, Surrey, England, p. 162.
- Robinson, C. L. K. and Ware, D. M. (1994). "Modelling pelagicfish and plankton trophodynamics of south-eastern Vancouver Island, British Columbia., Can. Jour. Fish. Aquat. Sci., Vol.51, pp 1731~1751.
- Sekine, M., Nakanishi, H., Ukita, M. and Murakami, S. (1991). "A Shallow-sea ecological model using an object-oriented programming language, Ecological Modelling, Vol.57, pp 221~236.
- Okaichi, T. and Yanagi, T. (1997). "Sustainable development in the Seto-Inland Sea, Japan-From the viewpoint of fisheries", TerraScientific Publishing Company, Tokyo, p. 329.
- 合田 建(1987). "今後の環境・衛生工学研究の課題と展望", 日本土木學會論文集, No.381/II-7, pp 21~31.
- 和田時夫, 八吹圭三(1994). "親潮陸棚水域の魚類營養動態モデル, 月刊海洋, Vol. 286, pp 251~255.
- 關根雅彦, 中西 弘, 浮田正夫(1994). "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, 日本土木學會論文集, Vol.491/II-27, pp 99~108.
- 環境廳(1988). "瀬戸内海の環境-瀬戸内海環境情報基本図-", pp 2~32.
- 多田邦尙(1996). "瀬戸内海の生物資源と環境-その將來のために-", 岡市友利編, 恒星社厚生閣, 第2章, pp 52~55.
- 上 眞一(1996). "瀬戸内海の生物資源と環境-その將來のために-", 岡市友利編, 恒星社厚生閣, 第2章, pp 57~62.
- 中四國農政局(1992). "瀬戸内海漁業灘別漁獲統計表(1982~1991年), 中四國農政局統計協會發行, pp 87~210.
- 金田楨之(1989). "日本漁具漁法圖說(増補改訂版), 成山堂, p.631.
- 李寅鐵, 浮田正夫, 關根雅彦, 中西 弘(1995). "瀬戸内海への營養鹽類の流入負荷解析と物質收支に關する研究", 日本海岸工學論文集, 第42卷, pp 1106~1110.
- 松本文子(1982). "調理のための食品成分表", 科學技術廳資源調査會編, pp 30~33.
- 李寅鐵, 浮田正夫, 關根雅彦, 藤田健一(1995). "瀬戸内海における流量收支と水質應答特性に關する研究", 日本環境工學論文



- 集, 第32卷, pp 293~300.
- 李寅鐵, 浮田正夫, 關根雅彦, 中西 弘(1996). “水・底質モデルによる瀬戸内海の水質管理に関する研究”, 日本土木學會論文集, Vol.545/II-36, pp 101~112.
- 日本水産資源保護協會(1981). “水生生物生態資料”, p. 202.
- 日本水産資源保護協會(1985; 1986). “水産生物の生活史と生態”, p. 232
- 久保伊津男, 吉原友吉(1969). “水産資源學(改訂版)”, 共立出版社編, pp 151~197.
- 松原喜代松, 落合 明, 岩井 保(1965). “魚類學(下)”, 水産學全集 19, 恒星社厚生閣編, pp 390~445.
- 日本水産資源保護協會(1990). “瀬戸内海漁場適正栄養レベル検討事業報告書(大阪灣, 周防灘)”, p. 267.
- 瀬戸内海環境保全協會(1993~1995). “瀬戸内海の環境保全—資料集—”, 環境廳水質保全局監修., pp 21~50.
- 永井達樹(1996). “望ましい漁業, 瀬戸内海の生物資源と環境—その將來のために—”, 岡市友利編, 恒星社厚生閣, 第3章, pp 83~105.
- 
- 2000년 7월 10일 원고접수  
2001년 2월 16일 수정본 채택