博多湾の低次生態系に関する数値モデル*

柳 哲雄[†]・鬼塚 剛[‡]

Numerical Model on the Lower Trophic Level Ecosystem in Hakata Bay

Tetsuo Yanagi^{**} and Goh Onizuka^{††}

Abstract

A numerical ecosystem model on the lower trophic level in Hakata Bay is developed. The primary production is $1,067 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and DIP of $1,607 \text{ kg}$ is assimilated per day to phytoplankton in the euphotic layer of Hakata Bay, which is about four times of DIP load to the bay. Regenerated DIP in the euphotic layer occupies 47% of DIP used for the primary production. The secondary production is $165 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and the transfer efficiency from the first to the secondary production is 15% in Hakata Bay.

1. はじめに

博多湾は九州北部に位置する浅い閉鎖的内湾である。この湾には九州最大の都市である福岡市をはじめ周辺の諸都市から多量の栄養塩が負荷されるために、富栄養化が進行して、毎年夏季には表層で赤潮、底層で貧酸素水塊が発生している。博多湾内の海域環境を保全するためには陸岸からの栄養塩負荷量を適切なレベルに抑える必要があるが、適切な栄養塩負荷量を決定するためには、まず湾内の栄養塩の動態を定量的に明らかにしておく必要がある。

本稿では博多湾の低次生態系に関する数値生態系モデルを作成し、溶存態無機リン (DIP)、溶存態有機リン (DOP)、懸濁態有機リン (POP) の観測値を再現するモデル計算値をもとに、博多湾の低次生態系をめぐる栄養塩の動態を定量的に明らかにすることを試みる。

2. 観測方法と結果

福岡市港湾局は平成5年度(1993年4月~1994年3月)の毎月1回、Fig. 1に星印で示す3点の表層(0m)、亜表層(-2.5m)、底層(海底上1m)で水温、塩分、溶存態無機リン(DIP)、溶存態

Fig. 1. Hakata Bay. Stars show the observation stations and arrows the river mouths and outlets of sewage plant. Numbers show the depth in meters.

有機リン(DOP)、懸濁態有機リン(POP)の濃度を観測するとともに、透明度を観測した(Yanagi, 1999)。同時に博多湾内に流入するすべての河川と排水処理場(Fig. 1中に矢印で示した)からの流量と濃度観測結果から毎月のDIP、DOP、POP負荷量を算定するとともに、年4回、観測点C-1とE-2で採取した底泥のコアーサンプルを用いた室内溶出実験結果からDIP、DOP溶出量を推定した。これに加えて、過去の福岡における降水中のDIP濃度の観測結果(斉藤ら, 1994)をもとにして、福岡地方気象台の毎月の降水量から降水によるDIP負荷量を推定した。

* 1999年2月15日受領, 1999年4月12日受理

[†] 九州大学応用力学研究所, 〒816-8580 春日市春日公園6-1

[‡] 九州大学大学院総合理工学研究科, 〒816-8580 春日市春日公園6-1

^{**} Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga-Park, Kasuga 816-8580, Japan

^{††} Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, 6-1 Kasuga-Park, Kasuga 816-8580, Japan

Fig. 2. Yearly averaged concentrations (mg l^{-1} in squares) of DIP, DOP and POP in the upper and lower layers in and out of Hakata Bay and their load (kg month^{-1}). P denotes phytoplankton, Z zooplankton and D detritus.

ここでは観測点 C-1 と E-2 の代表する博多湾中央から東部をひとつのボックス (体積 $424 \times 10^6 \text{ m}^3$, 表面積 62 km^2 , 水深 7.0 m) とみなし, さらに観測期間中の年間平均湾内透明度 2.1 m を 2.8 倍した値を有光層の厚さとみなして (橋本・多田, 1997), 厚さ 5.9 m の有光層と 1.1 m の無光層からなる上・下 2 層のボックスモデルを設定した. 博多湾は 4 月～9 月は海面下 3 m 付近に密度躍層を有して成層するが, 10 月～3 月は海底まで鉛直混合する (Yanagi, 1999).

博多湾内の年間平均した DIN/DIP はモル比で 160 となり, 湾内の光合成を律速している栄養塩は窒素ではなくリンなので (Yanagi, 1999), この生態系モデルではリンの挙動のみを扱う.

観測により得られた博多湾ボックスの内・外, 上・下層の年間平均 DIP, DOP, POP 濃度, ボックス内上層へ負荷される DIP, DOP, POP 負荷量, 海底からの DIP, DOP 溶出量は Fig. 2 に示すようである. 湾外の POP 濃度は過去の植物プランクトンの chl.a 濃度観測値 (九州環境管理協会, 私信) をもとに, $C/\text{Chl.a}=30$ (Parsons *et al.*, 1984), レッドフィールド比 ($C/P=106$) を仮定して, 植物プランクトン濃度を推定し, 植物プランクトン濃度の $1/10$ を動物プランクトン濃度, POP 濃度から植物・動物プランクトン濃度を差し引いた値をデトリタス濃度として Fig. 2 に示すように設定した.

さらに博多湾内における底泥中の ^{210}Pb 濃度分布から推定し

Fig. 3. Components of ecosystem model.

た堆積速度 $0.090 \text{ g cm}^{-2} \text{ year}^{-1}$ (九州環境管理協会, 私信) に湾内表層底泥中の有機態リンの年間平均濃度 $585 \text{ mg kg}^{-1} \text{ dry}$ (九州環境管理協会, 私信) をかけることにより得られたデトリタスの海底への堆積フラックスをモデルの海底の境界条件として与えた.

3. 数値生態系モデル

Fig. 3 に示すようなコンポーネント (Kawamiya *et al.*, 1995) を湾内上・下層のボックス内に設定し, Fig. 2 に示した負荷量, 溶出量, 堆積量, 湾外濃度を境界条件として計算を行ない, 得られた湾内ボックスの上・下層の DIP・DOP・POP 濃度計算値が観測値を再現するよう試みた.

先述したように, 博多湾では 10 月～3 月は鉛直混合が卓越するが, 有光層と無光層では生化学反応が異なるために, 2 層構造で年平均の計算を行う.

3.1. モデルの定式化

湾内ボックス上・下層の DIP 濃度, 植物プランクトン濃度 (PHY), 動物プランクトン濃度 (ZOO), デトリタス濃度 (DET), DOP 濃度の時間変動は次式で表される.

$$\begin{aligned}
 V_u \frac{dDIP_{iu}}{dt} = & DIP_{LA} - V_u (A_1 DIP_{iu} - B_2 ZOO_{iu}) \\
 & - C_1 DET_{iu} - D_1 DOP_{iu} \\
 & - S_u \frac{K_h}{L} (DIP_{iu} - DIP_{ou}) \\
 & - A \frac{K_{vD}}{H} (DIP_{iu} - DIP_{il})
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$V_u \frac{dPHY_{iu}}{dt} = V_u (A_1 DIP_{iu} - B_1 ZOO_{iu})$$

$$\begin{aligned}
 & -A_2A_1PHY_{iu} - A_3PHY_{iu}^2) - Aw_pPHY_{iu} \\
 & -S_u\frac{K_h}{L}(PHY_{iu} - PHY_{ou}) \\
 & -A\frac{K_{vp}}{H}(PHY_{iu} - PHY_{il}) \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_u\frac{dZOO_{iu}}{dt} = & V_u(B_1ZOO_{iu} - B_2ZOO_{iu} - B_3ZOO_{iu} \\
 & -B_4ZOO_{iu}^2) - S_u\frac{K_h}{L}(ZOO_{iu} - ZOO_{ou}) \\
 & -A\frac{K_{vp}}{H}(ZOO_{iu} - ZOO_{il}) \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_u\frac{dDET_{iu}}{dt} = & DET_{LA} + V_u(A_3PHY_{iu}^2 + B_3ZOO_{iu} \\
 & +B_4ZOO_{iu}^2 - C_1DET_{iu} - C_2DET_{iu}) \\
 & -Aw_dDET_{iu} - S_u\frac{K_h}{L}(DET_{iu} - DET_{ou}) \\
 & -A\frac{K_{vp}}{H}(DET_{iu} - DET_{il}) \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_u\frac{dDOP_{iu}}{dt} = & DOP_{LA} + V_u(A_2A_1PHY_{iu} + C_2DET_{iu} \\
 & -D_1DOP_{iu}) - S_u\frac{K_h}{L}(DOP_{iu} - DOP_{ou}) \\
 & -A\frac{K_{vD}}{H}(DOP_{iu} - DOP_{il}) \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_l\frac{dDIP_{il}}{dt} = & DIP_{RE} + V_l(B_2ZOO_{il} + C_1DET_{il} \\
 & -D_1DOP_{il}) - S_l\frac{K_h}{L}(DIP_{il} - DIP_{ol}) \\
 & +A\frac{K_{vD}}{H}(DIP_{iu} - DIP_{il}) \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_l\frac{dPHY_{il}}{dt} = & V_l(B_1ZOO_{il} - A_3PHY_{il}^2) \\
 & +Aw_pPHY_{iu} - S_l\frac{K_h}{L}(PHY_{il} - PHY_{ol}) \\
 & +A\frac{K_{vp}}{H}(PHY_{iu} - PHY_{il}) \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_l\frac{dZOO_{il}}{dt} = & V_l(B_1ZOO_{il} - B_2ZOO_{il} - B_3ZOO_{il} \\
 & -B_4ZOO_{il}^2) - S_l\frac{K_h}{L}(ZOO_{il} - ZOO_{ol}) \\
 & +A\frac{K_{vp}}{H}(ZOO_{iu} - ZOO_{il}) \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_l\frac{dDET_{il}}{dt} = & V_l(A_2PHY_{il}^2 + B_3ZOO_{il} + B_4ZOO_{il}^2 \\
 & -C_1DET_{il} - C_2DET_{il}) + A(w_dDET_{iu} \\
 & -DET_{SINK}) - S_l\frac{K_h}{L}(DET_{il} - DET_{ol}) \\
 & +A\frac{K_{vp}}{H}(DET_{iu} - DET_{il}) \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_l\frac{dDOP_{il}}{dt} = & DOP_{RE} + V_l(A_3PHY_{il} + C_2DET_{il} \\
 & -D_1DOP_{il}) - S_l\frac{K_h}{L}(DOP_{il} - DOP_{ol}) \\
 & +A\frac{K_{vD}}{H}(DOP_{iu} - DOP_{il}) \quad (10)
 \end{aligned}$$

ここで、 V はボックスの体積、 S は湾内・外の境界断面積、 A は湾内ボックス上・下層の境界面積、添え字の u は上層、 l は下層、 i は湾内、 o は湾外、 LA は河川及び降水からの負荷、 RE は溶出、 $SINK$ は海底への堆積フラックスを表す。 K_h 、 K_v は水平・鉛直渦拡散係数、 L は湾内・外のデータ取得点間の距離、 H は湾内上・下層のデータ取得点間の距離を表す。

以下に述べる生化学過程の定式化およびパラメータの設定は基本的には Kawamiya *et al.* (1995) によった。しかし、いくつかのパラメータは Kawamiya *et al.* (1995) のものから変えないと計算値を観測値に合わせることが出来なかった。詳細については後述する。

まず植物プランクトンの光合成速度 A_1 は次式で表す。

$$A_1 = V_{max} \left(\frac{DIP}{DIP + K_p} \right) \times \exp(kT) \times \frac{I}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \quad (11)$$

植物プランクトンからの DOP の浸出は光合成量に比例するとして、その係数を A_2 として与えた。植物プランクトンの枯死速度 A_3 は水温に依存するとして、次式で与える。

$$A_3 = M_{po} \exp(k_{MPT}) \quad (12)$$

動物プランクトンの摂食速度 B_1 は次式で与える。

$$B_1 = G_{max} \{1 - \exp(\lambda(PHY^* - PHY))\} \quad (13)$$

ここで G_{max} は最大摂食速度、 λ は Ivlev の定数、 PHY^* はこれ以上植物プランクトン濃度が下がれば、摂食が 0 となるしきい値を示す。

動物プランクトンの尿生産速度 B_2 、糞生産速度 B_3 、死亡速度 B_4 はそれぞれ次式で表す。

$$B_2 = \alpha B_1 \quad (14)$$

$$B_3 = \beta B_1 \quad (15)$$

$$B_4 = M_{zo} \exp(k_{MZ}T) \quad (16)$$

デトリタスの DIP への分解速度 C_1 , DOP への分解速度 C_2 はそれぞれ次式で表す.

$$C_1 = V_{PI} \exp(k_{VPI}T) \quad (17)$$

$$C_2 = V_{PO} \exp(k_{VPO}T) \quad (18)$$

DOP の DIP への分解速度 D_1 は次式で表す.

$$D_1 = V_{DI} \exp(k_{VDI}T) \quad (19)$$

初期条件は湾内のすべてのコンポーネントの濃度が湾外のそれらと等しいとおいた. 観測結果から有光層の水温は 17.2°C , 無光層の水温は 16.7°C とした.

計算に用いたパラメータの値をまとめて Table 1 に示す. () のついたパラメータは Kawamiya *et al.* (1995) と値を変更したものを示し, () 内の値が Kawamiya *et al.* (1995) のものを示す. 主な変更点は, 1) デトリタスの沈降速度を小さくした, 2) デトリタスの DOP への分解速度を小さくした, ことである. 1) は博多湾のデトリタスの主成分が後述する Fig. 5 で示すように, 外洋のような動物プランクトンの糞ではなく, 植物プランクトンの枯死したものが多いためであると考えられる. 2) の理由はよくわからない. 今後, 外洋と沿岸海域のバクテリアの活性に関する比較研究を行って検討する必要がある. 水平拡散係数は Yanagi (1999) のボックスモデル解析から得られた値をもとに決めたもので, 鉛直拡散係数は計算値が観測値に合うように調整した結果得られたものである. DIP, DOP の鉛直拡散係数より POP の鉛直拡散係数を小さくしないと, 両者の良い一致は得られなかった. これは博多湾で鉛直流速変動と関連した溶存物質 (DIP, DOP) の濃度変動が懸濁物質 (POP) の濃度変動より大きいことを示唆している.

時間ステップ 1/5 日で計算を開始した後, 約 3 ヶ月で定常状態が得られたので以下はその定常値をもとに議論する.

3.2. 計算結果

計算の結果得られた湾内上・下層の各コンポーネントの定常濃度を Fig. 4 に示す. Fig. 2 に示した観測値と比較すると, 上層の DOP 濃度がわずかに低いことを除けば, 計算値は観測値をよく再現している.

euphotic layer		mg/l
	0.008	
	0.010	
	0.019	P:0.0079 Z:0.0013 D:0.0103
aphotic layer		
	0.010	
	0.010	
	0.015	P:0.0037 Z:0.0010 D:0.0101

Fig. 4. Calculated concentrations of DIP, DOP and POP in the upper and lower layers in Hakata Bay. P denotes phytoplankton, Z zooplankton and D detritus.

各コンポーネント間のリンのフラックスを Fig. 5 に示す. 降雨も含め陸岸より流入する DIP の約 4 倍の DIP が基礎生産に用いられていて, 湾内の有光層内で活発な生化学過程が起きていることがわかる. 有光層内の DIP 存在量 $2,690 \text{ kg}$ を光合成に用いられる DIP フラックス $1,607 \text{ kg day}^{-1}$ で割って得られる 1.7 日は有光層内の DIP の平均寿命を表しているが, この平均寿命は同じく DIP 存在量を DIP 流入量で割って得られる有光層内の DIP の平均滞留時間 6.1 日より短く, 有光層内でのリンの活発な生化学的動態が理解出来る.

無光層である下層のリンの循環フラックスは有光層である上層のそれと比較するとはるかに小さい.

有光層内のリン循環の主な経路は DIP → 植物プランクトン → デトリタス → DIP で, 植物プランクトン → DOP のフラックスは植物プランクトン → デトリタスの 27% に過ぎない. しかし, DOP → DIP のフラックスはデトリタス → DIP のフラックスの 92% に達する.

4. 考 察

計算の結果得られた博多湾の年間平均基礎生産量は $26 \text{ mgP m}^{-2} \text{ day}^{-1} = 1067 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ である. この値は瀬戸内海の $781 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (Tada, 1997) よりやや大きく, 東シナ海黒潮域の $220\text{--}350 \text{ mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, 東シナ海陸棚域の 570 mgC

Table 1. Parameters used in this numerical model. Numbers in parenthesis are values used by Kawamiya *et al.* (1995).

V_u	volume of upper layer	$365.8 \times 10^6 \text{ m}^3$
V_l	volume of lower layer	$68.2 \times 10^6 \text{ m}^3$
S_u	surface area of upper boundary between the inner and outer bay	$35,400 \text{ m}^2$
S_l	surface area of lower boundary between the inner and outer bay	$6,600 \text{ m}^2$
A	surface area between the upper and lower layer	62 km^2
K_h	horizontal eddy diffusivity	$1.4 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
K_{vD}	vertical eddy diffusivity for DIP and DOP	$20 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
K_{vP}	vertical eddy diffusivity for POP	$1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
L	length between the outer and inner bay	10 km
H	length between the upper and lower layer	3.5 m
Δt	time step of the calculation	0.2 day
w_p	sinking speed of phytoplankton	4.6 cm day^{-1}
w_d	sinking speed of detritus	28.5 cm day^{-1} (10 m day^{-1})
V_{max}	maximum specific phosphate uptake rate by phytoplankton	1.05 day^{-1} (1.0 day^{-1})
A_2	ratio of extracellular excretion of DOP by photosynthesis	0.14 (0.135)
K_p	half saturation constant for DIP	$0.03 \mu \text{ g-atP l}^{-1}$
k	temperature dependency of photosynthesis	$0.063 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
I	light intensity	$2.9 \times 10^5 \text{ cal m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
I_{opt}	optimum light intensity for photosynthesis	$5.0 \times 10^5 \text{ cal m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
M_{po}	mortality of phytoplankton at 0°C	$13.0 \text{ day}^{-1} \text{ m}^3 \text{ g}^{-1}$
k_{MP}	temperature dependency of mortality of phytoplankton	$0.069 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
G_{max}	maximum grazing rate of zooplankton	0.35 day^{-1} (0.30 day^{-1})
λ	Ivlev' constant	$100 \text{ l (mgP l}^{-1})^{-1}$
PHY^*	threshold of phytoplankton density for grazing	$6.02 \times 10^{-4} \text{ mgP l}^{-1}$
α	constant for urine generation	0.4
β	constant for fecal pellet generation	0.3
M_{zo}	mortality of zooplankton at 0°C	$15.6 \text{ day}^{-1} \text{ m}^3 \text{ g}^{-1}$
k_{MZ}	temperature dependency of mortality of zooplankton	$0.069 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
V_{PI}	decomposition speed of detritus to DIP at 0°C	0.031 day^{-1} (0.030 day^{-1})
V_{PO}	decomposition speed of detritus to DOP at 0°C	0.0017 day^{-1} (0.030 day^{-1})
V_{DI}	decomposition speed of DOP to DIP at 0°C	0.029 day^{-1} (0.030 day^{-1})
k_{VPI}	temperature dependency of decomposition of detritus to DIP	$0.069 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
k_{VPO}	temperature dependency of decomposition of detritus to DOP	$0.069 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
k_{VDI}	temperature dependency of decomposition of DOP to DIP	$0.069 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

$\text{m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (Hama *et al.*, 1997) よりかなり大きな値となっている。

上層の基礎生産に使われる栄養塩のうち、陸・雨または下層起源の DIP は 53% で、残りの 47% は有光層内のデトリタスや DOP からの再生栄養塩として供給されている。一般に外洋に

おいては新生産と呼ばれる下層から供給される栄養塩が有光層内の基礎生産に占める割合は 10–20% 程度と言われているが (Epply, 1989), 富栄養化した閉鎖的沿岸海域である博多湾では新生産の割合が上述したように 53% で、外洋と比較するとかなり大きな割合になっている。

Fig. 5. Phosphorus flux (kg day^{-1}) in euphotic (upper) and aphotic (lower) layers in Hakata Bay.

Fig. 5 によれば博多湾の年間平均 2 次生産量は $4.0\text{mgP m}^{-2} \text{ day}^{-1} = 165\text{mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ である。この値は瀬戸内海の $222\text{mgC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (Uye and Hashimoto, 1997) より小さい。したがって、博多湾における基礎生産から 2 次生産への転送効率は 15% となり、瀬戸内海の 28% (Uye and Hashimoto, 1997) より小さくなる。

しかし、以上の述べた値の精度は明確ではない。本来ならパラメータの感度実験を行い、この計算で得られた数字の誤差範囲の議論を定量的に行うべきであるが、パラメータの値を変えると、再現性そのものが変化するので、数値生態系モデルで得られた値の誤差範囲に関する定量的な議論は容易ではない。この問題に関しては改めて稿をおこして検討したいと考えている。

Fig. 5 からわかるように、陸と雨からの DIP 負荷量の約 4 倍の DIP が湾内の基礎生産に用いられているということは、陸からの DIP 負荷量を削減しても直ちに博多湾内の植物プランクトン濃度は低下しないことを示唆している。もちろん富栄養化を防止するためにはリン・窒素など栄養塩負荷量を削減することが必要だが、今後博多湾沿岸住民・行政・周辺工場による議論によって博多湾の望ましい水質 (栄養塩濃度、植物プランクトン濃度など) を決め、それを達成するために必要な栄養塩負荷の削減量を、このような数値生態系モデルを用いて定量的に明らかにする必要があるだろう。

5. おわりに

以上、博多湾の低次生態系モデルを作成し、湾内の低次生態系をめぐるリンの動態を明らかにした。今回は年間平均値のみをモデル計算により再現したが、実際には湾内で DIP, DOP, POP 濃度は大きな季節変動を示している (Yanagi, 1999)。今後、今回と同じ生態系モデルを用いて、各濃度の季節変動を再現し、博多湾の低次生態系をめぐる物質循環の季節変動を明らかにしたいと考えている。

Kawamiya *et al.* (1995) のモデルはもともと、北太平洋の Sta. Papa の低次生態系構造を研究するために開発されたものであるが、彼らは同じモデルを用いて亜熱帯のバーミューダ海域 (Kawamiya *et al.*, 1997)、三陸の大槌湾 (Kawamiya *et al.*, 1996) の低次生態系構造の研究も行って、このモデルが汎用化出来ることを示した。今回の博多湾の計算結果は同じモデルが富栄養化した沿岸海域にも基本的には適用可能であることを示している。今後同じ生態系モデルを用いて東京湾・伊勢湾など日本各地の富栄養化した沿岸海域の計算も行って、富栄養化の度合いに伴う低次生態系の特性の変化なども研究していきたいと考えている。

本研究を進めるにあたり、貴重な観測データを提供していただいた福岡市港湾局、九州環境管理協会、有意義な議論をして頂いた名古屋大学大気水圏科学研究所の才野敏郎教授、貴重なコメントを頂いた査読者に深甚なる謝意を表する次第である。

References

- Empy, R.W. (1989): New production: History, methods and problems, 85-97. *In: Productivity of the Ocean, Present and Past*, ed. by W.H. Berger, V.S. Smetacek and G. Wefer, John Wiley & Sons.
- Hama, T., H. Shin and N. Handa (1997): Spatial variability in the primary productivity in the East China Sea and its adjacent waters. *J. Oceanogr.*, **53**, 41-51.
- Kawamiya, M., M. Kishi, Y. Yamanaka and N. Sugihara (1995): An ecological-physical coupled model applied to station Papa. *J. Oceanogr.*, **51**, 635-664.
- Kawamiya, M., M. Kishi, M.D.K. Ahmed and T. Sugimoto (1996): Causes and consequences of spring phytoplankton blooms in Otsuchi Bay, Japan. *Cont. Shelf Res.*, **16**, 1683-1698.
- Kawamiya, M., M. Kishi, Y. Yamanaka and N. Sugihara (1997): Obtaining reasonable results in different oceanic regimes with the same ecological-physical coupled model. *J. Oceanogr.*, **53**, 397-402.
- 橋本俊也・多田邦尚 (1997): 広島湾における海水の光学特性。海の研究, **6**, 151-155.

- Parsons, T.R., M. Takahashi and B. Hargrave (1984): Biological Oceanographic Processes, 3rd Edition. Butterworth-Heinemamm.
- 斉藤信弘・大石興弘・穴井功一・森 淳子・今村 修・森崎澄江・宝来俊一・金城義勝・広中博見・大和康博・広野岩男 (1994): 平成3年度九州・沖縄地方酸性雨共同調査結果. 全国公害研誌, 19(3), 147-156.
- Tada, K. (1997): Phytoplankton biomass and production, and bacterial density, 27-33. *In*: Sustainable Development in the Seto Inland Sea ed. by T. Okaichi and T. Yanagi, Terra Scientific Pub., Tokyo.
- Uye, S. and H. Hashimoto (1997): Trophic structure and transfer efficiency in the pelagic ecosystem, 41-46. *In*: Sustainable Development in the Seto Inland Sea, ed. by T. Okaichi and T. Yanagi, Terra Scientific Pub., Tokyo.
- Yanagi, T. (1999): Seasonal variations in nutrients budgets of Hakata Bay, Japan. J. Oceanogr. 55, 439-448.