Journal of the Korean Society
for Marine Environmental Engineering
Vol.4, No. 2, pp. 3~14, May 2001

水-底質생태계모델에 의한 博多灣의 물질순환예측

이인철[1], 류청로[2]

A Numerical Prediction of Nutrient circulation in Hakata Bay by Sediment-Water Ecological Model(SWEM)

by
In-Cheol Lee[1] and Cheong-Ro Ryu[2]

요 약

저질로부터 용출되는 영양염부하가 내만의 수질오염에 미치는 영향을 예측하기 위하여 수층과 저질간의 물질순환과정을 고려한 수-저질생태계모델(SWEM)을 개발하였다. SWEM모델은 유동을 예측하는 수리역학모델과 수층의 생태계순환 및 저질로부터의 영양염용출과정을 고려하여 수-저질간의 물질순환과정을 예측하는 생태계모델의 2개의 서브모델로 구성되어 있으며, 수치모형실험은 실시간에 의한 유동과 수질예측 계산을 실시하였다. 본 모델을 일본 博多灣에 적용하여 대상해역의 부영양화과정 및 영양염의 물질순환과정을 수치예측하고, 저질로부터 용출되는 영양염이 만내의 수질변화에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 모델에 의한 博多灣의 유동계산결과는 조류, 수온·염분의 관측치와 잘 일치하였으며, 물질순환예측의 계산치는 만내 수질관측치를 양호하게 재현하였다. 또한, 博多灣의 영양염 플럭스의 예측결과로부터 저질로 부터 용출하는 영양염 플럭스는 수질변화에 크게 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다.

Abstract

In order to predict nutrient circulation in Hakata bay, we have developed an ecosystem model named the Sediment-Water Ecological Model (SWEM). The model, consisting of two sub-models with hydrodynamic and biological models, simulates the circulation process of nutrient between water column and sediment, such as nutrient regeneration from sediments as well as ecological structures on the growth of phytoplankton and zooplankton. This model was applied to prevent eutrophication in Hakata bay, located in western Japan. The calculated results of the tidal currents by the hydrodynamic model showed good agreement with the observed currents. Moreover, SWEM simulated reasonably well the seasonal variations of water quality, and reproduced spatial heterogeneity of water quality in the bay, observed in the field. According to the simulation of phosphorus circulation at the head of the bay, it was predicted that the

(1) 정회원, 부경대학교 해양공학과, ilee@pknu.ac.kr
(2) 정회원, 부경대학교 환경·해양대학 해양공학과

regeneration process of phosphorus across the sediment-water interface had a strong influence on the water quality of the bay.

Keywords : Sediment-Water Ecological Model (SWEM), Eutrophication, Phosphorus circulation, Hakata Bay

1. 서 론

연안해역 및 내만의 수질관리를 위해서 일본에서는 COD 총량규제를 비롯한 여러 가지 대책이 시행되어져 오고 있으나 내만에서의 COD 농도의 환경기준은 아직도 달성되지 못하고 있는 실정이다. 이것은 식물플랑크톤의 증식과정에서 생성되는 COD 농도(내부생산 COD)가 내만의 수질 COD 농도증가에 크게 기여하고 있어 총량규제의 효과에는 한계가 있기 때문이다(日本水環境學會 [1999]). 그러므로 식물플랑크톤의 증식을 억제하여 내부생산 COD의 기여를 작게하는 것이 환경기준의 달성을 위해 유효한 방법으로 예상되어 해역의 수질관리대책을 설정함에 있어서는 내부생산의 증식인자인 영양염류(질소와 인)를 제어하는 것이 효과적이다. 이를 위해서는 육역으로부터 유입되는 영양염부하 뿐만아니라 저질로부터 용출되는 영양염부하량을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

일반적인 수질예측모델은 저질로부터 용출되는 영양염부하에 대하여 저질내의 영양염거동을 생략하고 수온이나 용존산소농도에 의해 변화하는 강제함수로 평가하고 있다(Nakata and Kuramoto[1992] ; Kishi et al.[1994] ; 김 등[1995]). 그러나, 저질로부터의 영양염용출량이 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 수층에서 저질에 공급

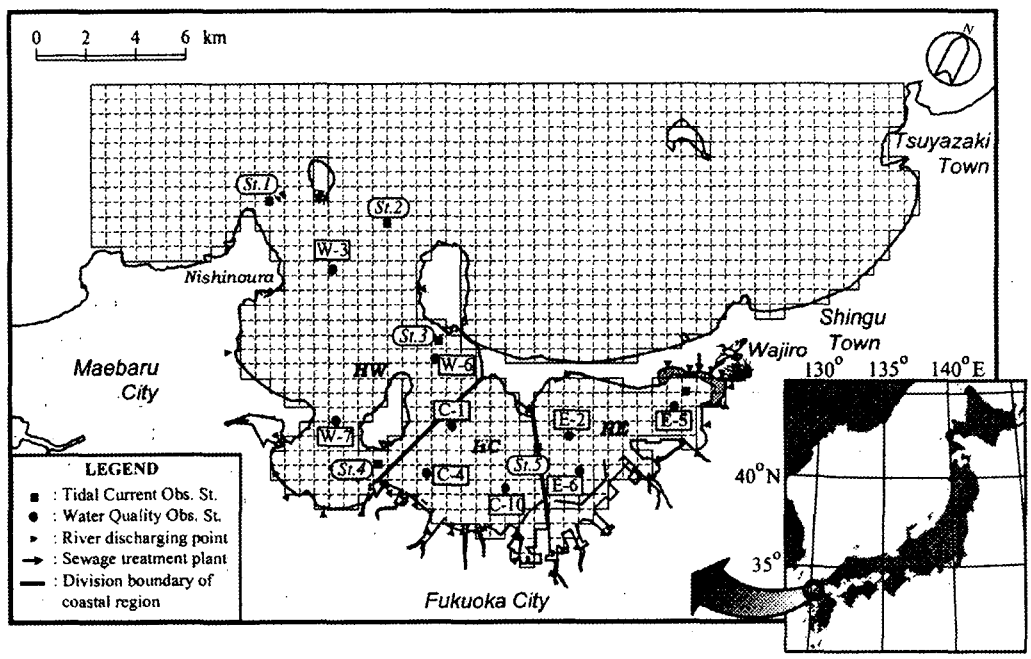

Fig. 1 The calculation grid system and field observation stations in Hakata Bay. The shaded zone shows Wajiro tidal flat area.

되는 유기물량과 저질중에서의 유기물의 분해속도등에 지배되는 과정을 무시할수 없다(Fisher et al.[1982] ; Smith and Molen[1993] ; 松梨 등[1998] ; 李 등[1998]).

본 연구에서는 수층과 저질간의 물질순환과정을 고려하여 내만의 수질을 예측하는 수-저질생태계모델을 개발하여 博多灣(Hakata灣)의 부영양화 및 영양염의 물질순환과정과 저질로부터 용출되는 영양염이 만내의 수질에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

2. 재료와 방법

2.1 대상해역의 개요

일본의 九州연안에 위치한 博多灣은 東西 약 20 *km*, 南北 약 10 *km*, 총면적이 약 134 km^2의 길고 협소한 반폐쇄성 내만이다(Fig. 1). 만의 수심은 동부해역(HE)이 5 *m* 이하, 중부해역(HC)이 5~10 *m*, 서부해역(HW)이 10~20 *m* 정도로 만의 체적은 $1.4\times10^9 m^3$정도이다. 특히, 동부해역의 연안에 둘러싸인 면적 약 80 ha정도의 和白(Wajiro)간석지(Fig. 1의 사선부)와 주변의 천해역은 저서생물과 치자어의 생육장 및 철새들의 월동지로서 널리 알려져 있다. 그러나, 이 해역은 육역과 인접하여 많은 오염물질이 유입·축적되기 쉬움에 따라 해역의 부영양화가 진행되고 있으며 적조현상 및 빈산소수괴가 매년 발생하고 있을 뿐만아니라 최근에는 겨울철의 수질오염 현상이 대두되고 있어 연간을 통한 적정한 수질관리 대책이 요구되고 있다.

Fig. 2는 博多灣에 유입하는 담수 및 오염부하량의 일변화를 나타낸다. 육역으로부터의 담수유입과 오염부하량의 유입점은 총 36지점으로서(Fig. 1), 연평균의 담수유입량은 약 $2.0\times10^6 m^3/day$ 정도로 9월에 가장 많았으며, 이시기에 만내에 유입되는 오염부하량도 가장 많았다. 博多灣의 연평균 부하량은 COD가 약 17.4 ton/day, 총질소(T-N)가 약 14.7 ton/day, 총인(T-P)이 약 1.2 ton/day로서, 형태별 부하량은 암모니아태질소(NH_4-N)와 인산태인(DIP)이 차지하는 비율이 각각 61 %와 65 %를 차지하였다. 특히, 博多灣의 중부해역에서부터 만내측의 연안에 걸쳐 위치하는 5지점의 하수처리장(Fig. 1의 →표시)으로부터 유입되는 오염부하량은 만내의 총부하량중 COD가 약 1/2, TP가 약 2/3정도를 차지하여 주요한 오염부하원이 되고 있으며, 이에 따라 만내로 유입되는 전체 오염부하량의 70%가 동부해역(HE)에 집중되어 있다.

2.2 水-底質생태계모델의 내용

水-底質생태계모델(Sediment-Water Ecological Model ; 이하 SWEM이라 칭함)은 유동예측모델과 수-저질간의 물질순환을 예측하는 생태계예측모델로 구성된다. 博多灣의 수치계산격자와 담수유입점, 조류관측점 및 수질관측점을 Fig. 1에 나타내었다. 계산격자간격은 수평방향으로는 600 m ×600 m로 하고, 연직방향으로는 수면으로부터 6 m사이는 2 m씩 3층, 6~14 m사이는 4 m씩 2층, 수심 14 m이하를 1층으로 총 6층으로 분할하였다. 본 모델에 의한 博多灣의 유동 및 수질예측은 1989년 4월1일부터 1990년3월31일까지 매일간격의 실시간에 의한 수치모형실험을 실시하였다. 모델의 검증은 博多灣의 조류의 15일간 연속관측결과(1990년 3월 14일 ~ 3월 29일 ; 福岡市港灣局[1990])와 월별의 수질관측결과(福岡市環境局[1990])를 이용하였다.

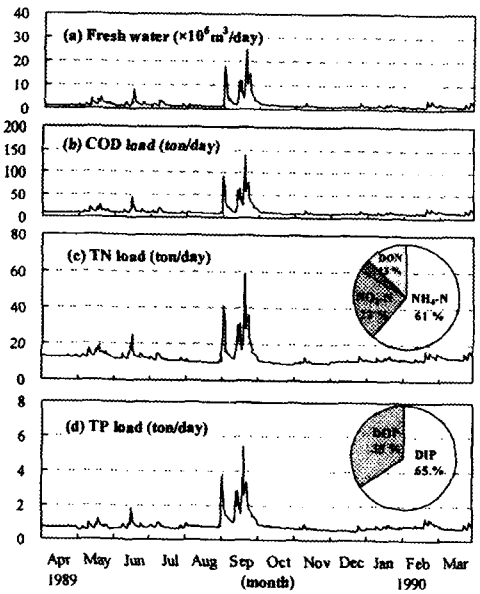

Fig. 2 Daily changes in inflow of freshwater and pollutant loads into Hakata Bay.

(1) 유동예측모델

유동예측모델은 연직방향으로 Boussinesq근사를 가정하여 층별로 연직적분한 Navier-Stokes방정식과 연속식, 열수지식, 염소이온의 물질수지식 및 해수의 밀도와 수온·염분을 관련시킨 상태방정식을 기초식으로한 연직다층의 레벨모델을 이용하였다(李 등[2000]).

밀도장의 계산은 단파방사, 장파방사, 잠열, 현열수송등에 의한 해면을 통한 열수지를 고려하여 기온, 일사량, 바람장등의 시계열자료를 입력치로 주어 계산하였다. 유동장의 경계조건으로서는, 육역과 해역과의 연직경계면에서는 Non-slip조건을 적용하고 해저마찰력과 자유수면에서의 바람응력, 수면에서의 열교환을 고려하였다. 유동계산의 좌표계, 연직수심구분 및 격자망의 물리적 변수는 Fig. 3과 같으며, 모델의 계산조건은 Table 1과 같다. 한편, 개경계에서의 조위는 식(1)과 같이 강제진동으로 주어졌다.

$$\zeta(t)=\sum_i f_i H_i \cos\{(V_0+u)l_i+\omega_i t-k_i\} \quad (1)$$

여기서, 첨자 i는 조석분조의 종류를 나타내고, $\zeta(t)$는 경계격자의 조위, f 와 $(V_0+u)l$ 은 천문상수, H는 조위진폭, k는 위상지각, ω는 분조의 각속도, t는 시간이다. 조석분조는 주요 4대분조인 M_2, S_2, O_1 및 K_1분조등 관측치(日本海上保安廳[1992])중의 10分潮를 고려하였다. 또한, 개경계에서의 수온·염분의 경계조건은 Fig. 1의 St. 1에서의 월별관측치(福岡市環境局[1990])를 참고로 하여 정현함수로 주었다. 그리고, 기상자료는 기온, 일사량, 습도, 雲量은 기상월보에 의한 일별치(日本氣象協會[1990])로 하고 풍향·풍속은 매시간별 관측치로 설정하였으며, 담수유입량(Fig. 2(a))도 외부입력조건으로 하였다.

(2) 생태계예측모델

생태계예측모델은 수층과 저질간의 영양염 순환과정을 고려한 모델로서(Lee et al[1999]), 앞절의 유동예측모델과 연결되어 유동계산에서 얻어진 시간간격별의 유속 및 물리적 변수를 가지고 생태계구성요소의 농도분포를 예측하는 구조로 되어있다. 모델내의 각 생태계요소는 水相系와 底質系가 개별의 변수로서 정의되어 있으며, 系內의 물질순환을 계면물질의 이동기구로 연결함으로써 수층과 저질사이의 물질순환과정을 계산하는 것으로 설정되어 있다. 수층의 계산범위 및 수평·연직방향의 층구분은 유동예측모델과 동일하며, 저질층은 연직으로 표층 1cm, 저층 4cm의 2층구조로 분할하였다.

Table 1 Parameters used in the hydrodynamic model of SWEM

Parameter	Symbol	Value	Unit
Time step	$\triangle t$	20	sec
Coriolis parameter	F	8.1×10	1/sec
Gravitational acceleration	G	9.8	$m/\sec^2$
Horizontal eddy viscosity	A_x, A_y	100	$m^2/\sec$
Sea surface friction coefficient	$\gamma_a{}^2$	0.001	-
Internal friction coefficient	$\gamma_i{}^2$	0.005	-
Bottom friction coefficient	$\gamma_b{}^2$	$\gamma_b{}^2 = g/c^2$; c is Chezy's coef.	

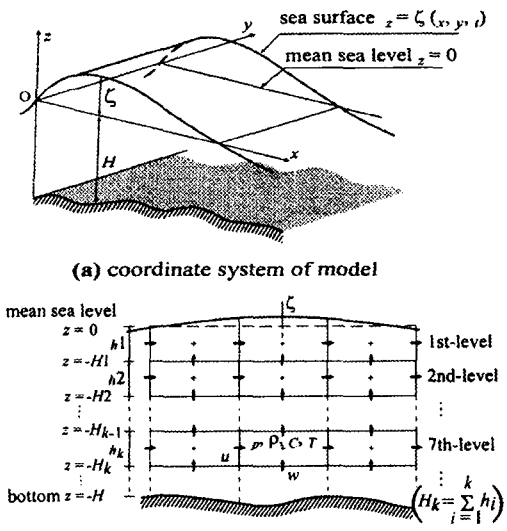

Fig. 3 The coordinate system (a) and vertical grid sssystem and calculation terms (b) in the numerical model.

생태계모델을 구성하는 생태계요소의 각 현존량(B)의 시간변화는 해수유동에 의한 물리적수송·확산, 系外로부터의 물질유입 및 系內의 각종 생물·화학적 반응과정에 의한 물질보존법칙에 의해 기술된다. 이를 유동예측모델과 같이 연직방향으로 적분하면 다음식으로 표현된다.

$$(\frac{\partial B_k, h_k}{\partial t}) = -\frac{\partial}{\partial x}(M_{xk}, B_k) - \frac{\partial}{\partial y}(M_{yk}, B_k) \quad (2)$$

$$+\frac{\partial}{\partial x}[K_{xk}h_k, (\frac{\partial B_k}{\partial x})] + \frac{\partial}{\partial y}[K_{yk}h_k, (\frac{\partial B_k}{\partial y})]$$

$$+K_z(B_{k-1}-B_k) - K_z(B_k-B_{k-1}) - w_{k-1/2}B^*$$

$$+w_{k+1/2}B^* + (\frac{\partial B}{\partial t})^* \cdot h_k + L_c \cdot h_k$$

여기서, t 는 시간(sec), B_k , B_{k-1} 및 B_{k+1}은 각각 제 k층, 제 $k-1$층, 제 $k+1$층의 생태계요소의 현존량(kg/m^3), h_k 는 제 k층의 수심(m ; 단, 표층은 $h_k = h_1 + \zeta$), M_{xk}와 M_{yk} 는 제 k층의 x, y방향의 선유량($m^2/\sec$), K_{xk} 와 K_{yk} 는 제 k 층의 열에 관한 x, y방향의 와동확산계수($m^2/\sec$), K_z는 열에 관한 z 방향의 혼합계수($m/\sec$), $w_{k-1/2}$과 $w_{k+1/2}$은 각각 제 k층과 제 $k-1$층, 제 $k+1$층의 경계면에서의 z 방향의 유속($m/\sec$), $(\partial B/\partial t)^*$는 생태계내의 각종 생물화학적과정에 의한 현존량(B)의 생성 및 소멸항, L_c는 외부로부터 유입되는 오염부하량을 나타낸다. 이들 생태계내의 구성요소와 물질상호간의 순환작용을 구조적으로 나타내면 Fig. 4와 같다.

모델내의 생태계구성요소는 水相系와 底質系에서 각각 11개항목으로 구성되어 있다. 水相系에서는 생물요소로서 종식특성이 서로다른 두종류의 식물플랑크톤(Phyto1과 Phyto2)과 동물플랑크톤(Zoo-Pl.) 및 Detritus의 4항목이고, 형태별영양염 5항목, 산소수지요소인 COD 및 DO의 2항목이다. 그리고, 底質系는 水相系로부터 공급(침강)되는 총유기태인(TOP)과 총유기태질소(TON), 간극수중의 영양염(DIP, NH_4-N, NO_3-N), 화학적 반응형 흡착태인(ER), 흡탈착태인(EP), 흡탈착태질소(EN), DO, 산화층(산화철 ; OM), 환원층(환원철 ; AM)으로 구성된다. 이들 각 생태계요소는 식물플랑크톤의 기초생산과정과 수층과 저질간의 물질의 생물·화학적인 상호순환작용으로 수식화되어 있으며, 크게 생물순환, 영양염순환(질소, 인), 용존산소순환으로 구분된다. 이들 물질순환을 구동시키는 것은 식물플랑크톤에 의한

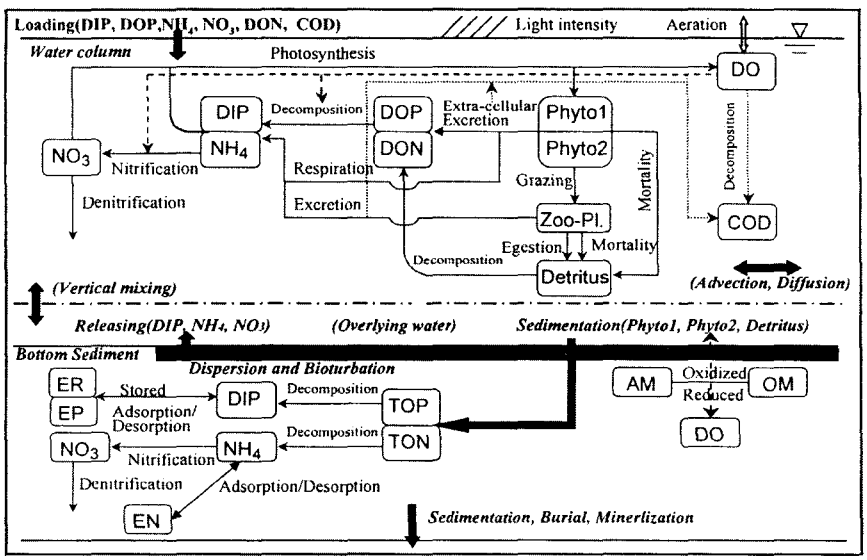

Fig. 4 Schematic views of material circulation flow in the SWEM model.

Table 2 Mathematical formulation of the bio-chemical processes used for the ecological model. Suffix i beside the variables denotes layer positions : 1 for surface layer of water, 2 for bottom layer of water, 3 for upper layer of sediment, 4 for lower layer of sediment, respectively

Phyto1 (PA)

$dPA_1/dt = G_{P1}PA_1 - E_{P1}PA_1 - D_{P1}PA_1 - R_{e1}PA_1 - G_{Z1}ZP_1 - W_PPA_1$

$dPA_2/dt = G_{P1}PA_2 - E_{P1}PA_2 - D_{P1}PA_2 - R_{e1}PA_2 - G_{Z1}ZP_2 - W_P(PA_2 - PA_1)$

Phyto2 (PB)

$dPB_1/dt = G_{P2}PB_1 - E_{P2}PB_1 - D_{P2}PB_1 - R_{e2}PB_1 - G_{Z2}ZP_1 - W_PPB_1$

$dPB_2/dt = G_{P2}PB_2 - E_{P2}PB_2 - D_{P2}PB_2 - R_{e2}PB_2 - G_{Z2}ZP_2 - W_P(PB_2 - PB_1)$

Zoo-plankton (ZP)

$dZP_1/dt = F_{PW}N_{YU}G_{Z1}ZP_1 + F_{PW}N_{YU}G_{Z2}ZP_1 - D_ZZP_1$

$dZP_2/dt = F_{PW}N_{YU}G_{Z1}ZP_2 + F_{PW}N_{YU}G_{Z2}ZP_2 - D_ZZP_2$

Detritus (Det)

$dDet_1/dt = F_{PW}D_{P1}PA_1 + F_{PW}D_{P2}PB_1 + D_ZZP_1 + 0.35F_{PW}G_{Z1}ZP_1 + 0.35F_{PW}G_{Z2}ZP_2 - K_DDet_1 - W_DDet_1$

$dDet_2/dt = F_{PW}D_{P1}PA_2 + F_{PW}D_{P2}PB_2 + D_ZZP_2 + 0.35F_{PW}G_{Z1}ZP_2 + 0.35F_{PW}G_{Z2}ZP_2 - K_DDet_2 - W_D(Det_2 - Det_1)$

DOP

$dDOP_1/dt = F_{PP}E_{P1}PA_1 + F_{PP}E_{P2}PB_1 + 0.35F_{PP}G_{Z1}ZP_1 + 0.35F_{PP}G_{Z2}ZP_1 - K_{OP}DOP_1 + F_{ZP}K_DDet_1 + L_{DOP}$

$dDOP_2/dt = F_{PP}E_{P1}PA_2 + F_{PP}E_{P2}PB_2 + 0.35F_{PP}G_{Z1}ZP_2 + 0.35F_{PP}G_{Z2}ZP_2 - K_{OP}DOP_2 + F_{ZP}K_DDet_2$

DIP

$dDIP_1/dt = -F_{PP}G_{P1}PA_1 - F_{PP}G_{P2}PB_1 + F_{PP}R_{e1}PA_1 + F_{PP}R_{e2}PB_1 + K_{OP}DOP_1 + L_{DIP}$

$dDIP_2/dt = -F_{PP}G_{P1}PA_2 - F_{PP}G_{P2}PB_2 + F_{PP}R_{e1}PA_2 + F_{PP}R_{e2}PB_2 + K_{OP}DOP_2 + K_{DB}\gamma TOP_1h_3/h_2 + \gamma A_{OA}D_M(DIP_3 - DIP_2)/(0.5h_3h_2)$

$dDIP_3/dt = D_M(DIP_4 - DIP_3)/(0.5h_3H_Z) + (K_{EP}/\omega)(EA_3 - DIP_3/\alpha) - A_{OA}D_M(DIP_3 - DIP_2)/(0.5h_3h_3) + K_{top3}TOP_3 + (K_R/\omega)(ER_3 - 1.3\beta\omega O_M)(DIP_3/(DIP_3 + DIP_{30}))$

$dDIP_4/dt = D_M(DIP_3 - DIP_4)/(0.5h_4H_Z) + K_{top4}TOP_4 + (K_{EP}/\omega)(EP_4 - DIP_4/\alpha)$

DON

$dDON_1/dt = F_{PN}E_{P1}PA_1 + F_{PN}E_{P2}PB_1 + 0.35F_{PN}G_{Z1}ZP_1 + 0.35F_{PN}G_{Z2}ZP_1 - K_{ON}DON_1 + F_{ZN}K_DDet_1 + L_{DON}$

$dDON_2/dt = F_{PN}E_{P1}PA_2 + F_{PN}E_{P2}PB_2 + 0.35F_{PN}G_{Z1}ZP_2 + 0.35F_{PN}G_{Z2}ZP_2 - K_{ON}DON_2 + F_{ZN}K_DDet_2$

NH_4-N (NH)

$dNH_1/dt = -F_{PN}G_{P1}PA_1F_{Z1}/(F_{Z1}+F_{Z2}) - F_{PN}G_{P2}PB_1F_{Y1}/(F_{Y1}+F_{Y2}) + F_{PN}R_{e1}PA_1 + F_{PN}R_{e2}PB_1 + K_{ON}DON_1 - K_{CN}NH_1 + L_{NH4}$

$dNH_2/dt = -F_{PN}G_{P1}PA_2F_{Z1}/(F_{Z1}+F_{Z2}) - F_{PN}G_{P2}PB_2F_{Y1}/(F_{Y1}+F_{Y2}) + F_{PN}R_{e1}PA_2 + F_{PN}R_{e2}PB_2 + K_{ON}DON_2 - K_{CN}NH_2$

$dNH_3/dt = D_M(NH_4 - NH_3)/(0.5h_3H_Z) - D_M(NH_3 - NH_2)/(0.5h_3h_3) + K_{ton3}TON_3 + (K_{EN}/\omega)(EN_3 - NH_3/\alpha) - K_{CN}NH_3$

$dNH_4/dt = D_M(NH_3 - NH_4)/(0.5h_4H_Z) + K_{ton4}TON_4 - K_{CN}NH_4 + (K_{EN}/\omega)(EN_4 - NH_4/\alpha)$

NO_3-N (NO)

$dNO_1/dt = -F_{PN}G_{P1}PA_1F_{Z2}/(F_{Z1}+F_{Z2}) - F_{PN}G_{P2}PB_1F_{Y2}/(F_{Y1}+F_{Y2}) + K_{CN}NH_1 - K_NNO_1 + L_{NO3}$

$dNO_2/dt = -F_{PN}G_{P1}PA_2F_{Z2}/(F_{Z1}+F_{Z2}) - F_{PN}G_{P2}PB_2F_{Y2}/(F_{Y1}+F_{Y2}) + K_{CN}NH_2 - K_NNO_2 + \gamma D_M(NO_3 - NO_2)/(0.5h_3h_2)$

$dNO_3/dt = D_M(NO_4 - NO_3)/(0.5h_3H_Z) - D_M(NO_3 - NO_2)/(0.5h_3h_3) + K_{CN}NH_3 - K_NNO_3$

$dNO_4/dt = D_M(NO_3 - NO_4)/(0.5h_4H_Z) + K_{CN}NH_4 - K_NNO_4$

COD

$dCOD_1/dt = F_{PC}E_{P1}PA_1 + F_{PC}E_{P2}PB_1 + 0.35F_{PC}G_{Z1}ZP_1 + 0.35F_{PC}G_{Z2}ZP_1 + F_{DC}K_DDet_1 - K_CCOD_1 + L_{COD}$

$dCOD_2/dt = F_{PC}E_{P1}PA_2 + F_{PC}E_{P2}PB_2 + 0.35F_{PC}G_{Z1}ZP_2 + 0.35F_{PC}G_{Z2}ZP_2 + F_{DC}K_DDet_2 - K_CCOD_2$

$TCOD_1 = 0.59(F_{PW}(PA_1 + PB_1) + ZP_1 + Det_1) + COD_1$

$TCOD_2 = 0.59(F_{PW}(PA_2 + PB_2) + ZP_2 + Det_2) + COD_2$

DO

$dDO_1/dt = F_{PO}G_{P1}PA_1 + F_{PO}G_{P2}PB_1 - K_OCOD_1 - F_{PO}R_{e1}PA_1 - F_{PO}R_{e2}PB_1 - 4.57K_{CN}NH_1 + 3.43K_NNO_1 + B_{akki}(H_{owa} - DO_1)$

$dDO_2/dt = F_{PO}G_{P1}PA_2 + F_{PO}G_{P2}PB_2 - K_OCOD_2 - F_{PO}R_{e1}PA_2 - F_{PO}R_{e2}PB_2 - 4.57K_{CN}NH_2 + 3.43K_NNO_2 + \gamma R_{dm}D_M(r_{co3}DO_3 - DO_2)/(0.5h_3h_2) - R_{op}K_{DB}\gamma TOP_3h_3/h_2$

$dDO_3/dt = R_{dm}D_M(r_{co4}DO_4 - r_{co3}DO_3)/(0.5h_3H_Z) - R_{dm}D_M(r_{co3}DO_3 - DO_2)/(0.5h_3h_3) - R_{op}K_{top3}TOP_3 - 4.57K_{CN}NH_3 + 3.43K_NNO_3$

$dDO_4/dt = R_{dm}D_M(r_{co3}DO_3 - r_{co4}DO_4)/(0.5h_4H_Z) - R_{op}K_{top4}TOP_4 - 4.57K_{CN}NH_4 + 3.43K_NNO_4$

$dO_M/dt = -K_{MD}O_MDO_3/(DO_3 + DO_{30}) + R_XK_{MP}A_MDO_2/(DO_2 + DO_w)$

$dA_M/dt = K_{MD}O_MDO_3/(DO_3 + DO_{30}) - R_XK_{MP}A_MDO_2/(DO_2 + DO_w)$

TOP

$dTOP_3/dt = F_{PP}W_PPA_2/(\gamma h_3) + F_{PP}W_PPB_2/(\gamma h_3) + F_{ZP}W_{1D}Det_2/(\gamma h_3) - K_{top3}TOP_3 - W_MTOP_3/h_3$

$dTOP_4/dt = -K_{top4}TOP_4 + W_MTOP_3/h_4 - W_MTOP_4/h_4 - K_HTOP_4$

TON

$dTON_3/dt = R_{NP}TOP_3$

$dTON_4/dt = R_{NP}TOP_4$

Sediment adsorbed phosphorus

$dEA_3/dt = -K_{EP}(EA_3 - DIP_3/\alpha)$

$dER_3/dt = -K_R(ER_3 - 1.3\beta\omega O_M)(DIP_3/(DIP_3 + DIP_{30}))$

$dEP_4/dt = -K_{EP}(EP_4 - DIP_4/\alpha) - K_FEP_4$

Sediment adsorbed nitrogen

$dEN_3/dt = -K_{EN}(EN_3 - NH_3/\alpha)$

$dEN_4/dt = -K_{EN}(EN_4 - NH_4/\alpha)$

L_{DON}, L_{DOP}, L_{DIP}, L_{NH4}, L_{NO3}, L_{COD}: Input loadings from outside

h_i: layer thickness, suffix i means surface layer of water (1), lower layer of water (2), upper layer of sediment (3), lower layer of sediment (4). H_Z: Total thickness of sediment layer ($=h_3+h_4$)

Table 3 Definition of symbols and the values of preset parameters

Symbols	Definitions	Setting parameters	Symbols	Definitions	Value	Unit
G_{P1}	Growth rate of Phyto1	$G_{max1}\cdot F_{T1}\cdot F_{IA}\cdot(F_{Y1}+F_{Y2})\cdot F_P$	E_P	Excretion rate of Phyto-pl.	0.05	–
G_{P2}	Growth rate of Phyto2	$G_{max2}\cdot F_{T2}\cdot F_{IB}\cdot(F_{Z1}+F_{Z2})\cdot F_P$	D_P	Mortality rate of Phyto-pl	0.01	1/day
G_{max1}	Maximum growth rate of Phyto 1	$0.23\cdot\exp(0.0993\cdot T)$	R_e	Respiration rate of Phyto-pl	0.01	1/day · C
G_{max2}	Maximum growth rate of Phyto 2	$1.8\cdot(T/10\cdot\exp(1.0-T/10))^{2.5}$	w_P	Settling rate of Phyto-pl.	0.2	m/day
F_{T1}	Dependence term on temperature(T)	$T/25\cdot\exp(1-T/25)$	w_D	Settling rate of Detritus	0.3	m/day
F_{T2}	Dependence term on temperature(T)	$(T/10\cdot\exp(1-T/10))^3$	μ_Z	Filtration rate of Zoo-pl	0.35	l /mg/day
F_{IA}	Dependence term on light intensity(I)	$I/(K_{IA}+I)$, (K_{IA}=15klux)	K_{ZP}	Saturation effects of Zoo-pl	0.06	mg/l
F_{IB}	Dependence term on light intensity(I)	$I/K_{IB}\cdot\exp(1-I/K_{IB})$, ($K_{IB}$=15klux)	N_{YU}	Growth efficiency of Zoo-pl	0.3	–
F_{Y1},F_{Z1}	Half saturation term of NH_4	NH4/(K_{nh4}+NH4), (K_{nh4}=0.03 mg·l^{-1})	D_{PZ}	Mortality rate of Zoo-pl.	0.04	1/day
			K_{ZP}	Saturation effects of Zoo-pl	0.06	mg/l
F_{Y2},F_{Z2}	Half saturation term of NO_3	(NO3/(K_{no3}+NO3))·R_{no3}, (K_{no3}=0.03 mg·l^{-1})	K_{DE}	Decomposition of Detritus	0.03	1/day
			K_{ON0}	Decomposition of DON	0.04	1/day
F_P	Half saturation term of DIP	DIP/(K_P+DIP), (K_P=0.003 mg·l^{-1})	K_{CN0}	Nitrification coefficient	0.06	1/day
			K_{N0}	Denitrification coefficient	0.2	1/day
R_{no3}	Ratio of nitrate uptake	exp (-14.0·1.462·NH4)	B_{akki}	Reaeration rate coefficient	1.0	m/day
E_{P1},E_{P2}	Excretion of Phyto1 and Phyto2	$G_{P1}\cdot E_P$, $G_{P2}\cdot E_P$	F_{PW}	Dryweight/Chl-a ratio	110.0	–
D_{P1},D_{P2}	Mortality of Phyto1 and Phyto2	$D_P\cdot\exp(0.0693\cdot T)$	F_{PC}	COD/Chl-a ratio of Phyto-pl.	$0.59F_{PW}$	
R_{e1},R_{e2}	Respiration of Phyto1 and Phyto2	$R_e\cdot T$	F_{PN}	N/Chl-a ratio of Phyto-pl	6.022	–
W_P	Settling of Phyto-pl.	w_P/h	F_{ZN}	N/Dryweight ratio of Detritus	0.0547	–
G_{Z1}	Grazing rate of Zoo-pl with Phyto1.	$G_Z\cdot PA/(PA+PB)$	F_{PP}	P/Chl-a ratio of Phyto-pl	0.833	–
G_{Z2}	Grazing rate of Zoo-pl with Phyto2	$G_Z\cdot PB/(PA+PB)$	F_{ZP}	P/Dryweight ratio of Detritus	0.00757	–
G_Z	Grazing speed of Zoo-pl	$G_{ZC}\cdot K_{ZP}\cdot(PA+PB)/(K_{ZP}+(PA+PB))$	F_{ZC}	COD/Dryweight ratio of Zoo-pl.	0.59	–
			F_{DC}	COD/Dryweight ratio of Detritus	0.59	–
G_{ZC}	Grazing term of Zoo-pl.	$\mu_Z\cdot(T/25\cdot\exp(1.0-T/25))^{1.0}$	F_{PO}	DO/Chl-a ratio of Phyto-pl	$2.26F_{PC}$	–
D_Z	Mortality of Zoo-pl.	$D_{PZ}\cdot\exp(0.0693\cdot T)$	h	Layer thickness		m
K_D	Decomposition of Detritus	$K_{DE}\cdot\exp(0.0693\cdot T)$	α	Adsorption equilibrium constant	0.25	g/ml
W_D	Settling of Detritus	w_D/h	γ	Porosity of sediment	0.78	–
KON	Decomposition of DON	$K_{ON0}\cdot\exp(0.0693\cdot T)$	ω	Volume/Weight ratio of pore water/dry mud	1.3636	ml/g
KOP	Decomposition of DOP	K_{ON}				
K_C	Decomposition of COD	K_{ON}	β	Activity of oxidized layer for Stored-Phosphorus	0.3	–
K_O	Decomposition of DO	$K_{ON}\cdot2.26$				
K_N	Denitrification rate of NO_3	$K_{N0}\cdot(1.03^{T-18})\cdot((2-DO)/(DO+2))$	R_{dm}	Revising factor of D_M for "DO" to that for "DIP"	3.0	
KON	Nitrification rate of NH_4	$K_{CN0}\cdot(1.03^{T-18})\cdot(DO/(DO+1.0))$	DIP_{30}	Michaelis constant of DIP_3	1.0	mg/l
			DO_{30}	Michaelis constant of DO_3	1.0	mg/l
R_X	Revising factor of K_{MP}	$1.0+C_{RX}\cdot\cos((2\pi/365)\cdot(day-290))$	DO_W	Michaelis constant of DO_2	1.0	mg/l
			K_{EP}, K_{EN}	Adsorption or desorption rate coefficient	0.0001	l/sec
K_{DB}	Decomposition rate by benthos	if $DO_2>0$ then $0.02\cdot(DO_2/(DO_2+0.1))\cdot\exp(0.15(T-15))$	K_R	Precipitation/dissolving rate coeff	$0.1\,K_{EP}$	1/sec
			K_{MP}	Production rate of "OM"	0.03	1/day
		else $K_{DB}=0$	K_{MD}	Diminishing rate of "OM"	0.03	1/day
K_{top3}	Decomposition of TOP_3	$0.05\cdot\exp(0.0693\cdot T)$	C_{RX}	Revising coeff. of R_X	0.3	–
K_{top4}	Decomposition of TOP_4	$0.1\cdot K_{top3}$	K_F	Production rate of EP_4	0.005	1/day
K_{ton3}	Decomposition of TON_3	K_{top3}	K_H	Production rate of TOP_4	0.005	1/day
K_{ton4}	Decomposition of TON_4	K_{top4}	W_M	Sedimentation rate	0.0001	m/day
A_{OA}	Revising factor of DIP releasing	if OM > AM then $1.0/(1.0+2.0\cdot\exp(2.0\cdot(OM-AM)/(OM+AM)))$	R_{NP}	Conversion factor N/P	7.24	–
			R_{OP}	Conversion factor DO/P	143	–
			R_{ON}	Conversion factor DO/N	19.7	–
		if OM=AM, A_{OA}=1/3	D_M	Diffusion coeff. in sediment layer		
		if OM < AM, A_{OA}=1.0		Diffusion coefficient of DIP	0.000042	m^2/day
r_{co3}, r_{co4}	Revising factor of diffusion coeff. of DO in bottom sediment	if $DO_3<0$, r_{co3}=0.5; $DO_3>0$, r_{co3}=1.0		Diffusion coefficient of NH_4-N	0.000090	m^2/day
				Diffusion coefficient of NO_3-N	0.000093	m^2/day
		if $DO_4<0$, r_{co4}=0.5; $DO_4>0$, r_{co4}=1.0		Diffusion coefficient of DO	0.000050	m^2/day

광합성이며, 질소·인의 섭취와 분해·회귀과정에 의해 동적으로 상호순환하고 있다.

모델의 주요한 특징을 요약하면 다음과 같다. i) 博多灣에서 여름철(9월)과 겨울철(1월)에 출현하는 Chl-a농도의 최대값을 재현하기 위하여 비증식속도의 수온의존성과 일사량의존성이 서로 다른 두종류의 식물플랑크톤, 즉 여름철에 증식하기 쉬운 Phyto1과 겨울철에 증식하기 쉬운 Phyto2를 정의하여 기초생산의 종조성분포를 고려하였다. ii) 식물플랑크톤 증식의 영양염농도의 존성은 DIP, NH_4-N 및 NO_3-N의 각각에 대한 Michaelis-Menten식으로 표현하고 있으나, 이중 질소에 대하여는 NO_3-N보다도 NH_4-N가 플랑크톤체로의 섭취효율이 높은 점을 고려하여, NH_4-N농도가 증가할수록 NO_3-N의 섭취효율을 제한하는 보정계수를 NO_3-N의 Michaelis-Menten식에 곱하는 형태로 설정하였다. iii) 저질에 침강한 현탁태유기물은 TOP와 TON으로 환산되어 저질에 공급되며 이중 일부는 부식화하여 재이용 불가능한 성분으로 이행하고, 나머지는 무기화되어 DIP와 NH_4-N로서 간극수중으로 이동한다. iv) 저질의 간극수중의 DIP는 일부는 저니입자와의 가역적인 흡착반응에 의해 흡착태인으로 되며, 나머지는 분자확산과 생물교란(Bioturbation)에 의해 水相系로 용출된다. 간극수중의 NH_4-N는 일부가 흡착태N나 水相系로 용출되는 과정은 DIP와 동일하지만, 더욱이 일부는 질산화반응에 의해 NO_3-N로 이행된다. 생성된 NO_3-N은 일부는 탈질소반응에 의해 계외로 이행하며, 나머지는 분자확산과 생물교란에 의해 水相系로 용출된다. v) 흡착태인(EP)과 질소(EN)는 저니입자와의 일반적인 흡착평형에 대응하는 것으로서 저질상층과 하층의 양방향에서 정의하고 있으나, 특히 흡착태인에 대하여는 산화상태에서 저질중에 존재하는 Fe^{3+}의 DIP포획을 표현하기 위하여 저질상층에서만 산화층의 생성·소멸에 수반하여 가용화, 불용화하는 철태인에 대응되는 화학적반응형 흡착태인(ER)을 정의하였다. 또한, 저질하층의 EP의 일부는 광물화에 의해 재이용 불가능한 성분으로 이행하는 것으로 설정하였다.

이상과 같은 水相系와 底質系사이의 영양염의 상호순환과정을 각 생태계요소의 항목별로 정식화하면 Table 2와 같으며, 수식에서의 식물플랑크톤의 생산속도, 분해속도, 침강속도등 모델내의 변수들은 문헌치(李 등[1998]; Nixon and Kremer[1978] ; Jorgensen et al.[1991])와 福岡市港灣局[1997]의 해역조사결과를 참고로하였으며, 본 모델에 이용된 변수와 설정값은 Table 3과 같다. 한편, 육역의 유입오염부하량(L_c)은 Fig. 2의 COD, 질소와 인의 형태별 오염부하량을 계산의 입력자료로 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동예측결과

Fig. 5는 博多灣의 유동예측결과중 St. 3과 St. 5에서의 M_2분조와 S_2분조의 관측치와 계산치로 작성한 조류타원을 비교한 것이다. 두 관측점에서 조류의 관측치(점선)와 계산치(실선)의 유속진폭은 잘 일치하였으나, 유향은 약간의 차이를 보였다. Fig 6은 博多灣전역의 상층에서의 유동의 수평적분포를 나타낸 것으로서 조류관측지점(Fig.1의 6지점)에서 1990년 3월 27일 오후 7시에 관측된 유속과 동일 시간에 예측된(실시간 예측) 계산유속을 비교한 것이다. 유속의 관측치와 계산치를 비교하면, 전관측점에서 유향과 유속은

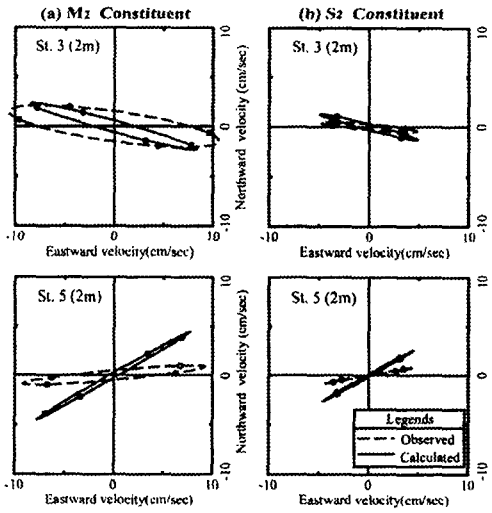

Fig. 5 Comparison between calculated tidal ellipses(solid line) on M_2 and S_2 tidal constituents and observed ones (broken line) at the upper layer in St. 3 and St. 5.

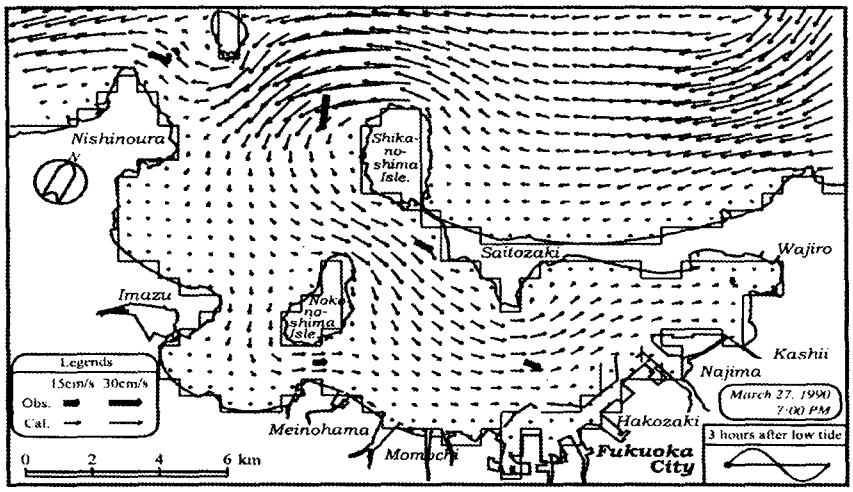

Fig. 6 Calculated horizontal current velocity field at the upper layer of Hakata Bay.

유사하게 일치하였으며, 만구부에서 만내측(HE해역)으로 흘러들어가는 양상으로서 최대유속은 약 50 cm/sec정도로 만구부주위에서 크고 만내측의 유속은 약 10 cm/sec이하로 느린 흐름을 나타내었다. 한편, 담수유입의 영향을 크게 받는 만내측(St.E-5)에서의 수온 및 염분의 계산치는 겨울철의 일부시기를 제외하고 연간에 걸쳐 관측된 수온·염분의 계절변화를 잘 재현하였으며, 특히 담수유입량이 많은 9월의 염분관측치는 계산치와 거의 일치하였다(Fig. 7).

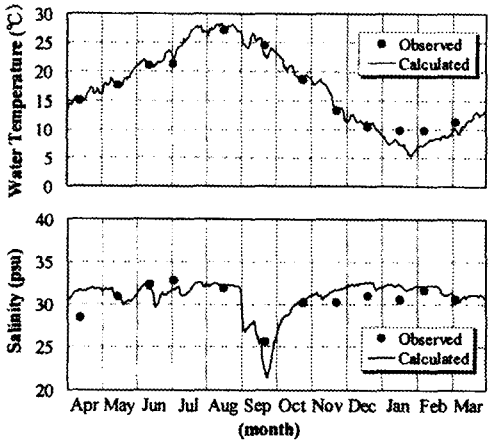

Fig. 7 Calculated seasonal variation of water (a) temperature and (b) salinity at the upper layer in St. F-5.

3.2 물질순환의 예측결과

(1) 수질의 계절변화

博多灣의 만내측(St.E-5)의 상층수질의 계산결과 중 인산태인(DIP), 클로로필-a (Chl-a) 및 화학적 산소요구량(COD)의 계산치와 관측치의 계절변화를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 계산결과에서 DIP농도는 5, 6월경에 증가하여 식물플랑크톤의 생산에 활발하게 이용되는 여름과 가을철에 걸쳐

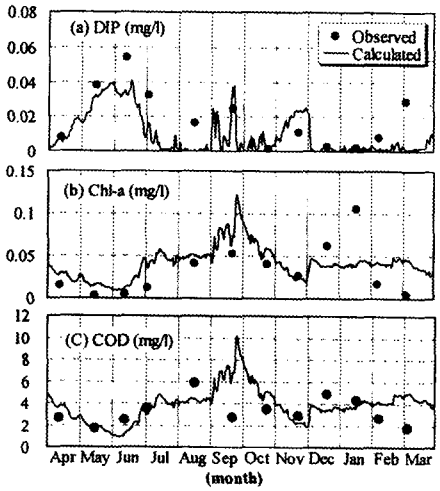

Fig. 8 Calculated seasonal variations of (a) DIP, (b) Chl-a, and (c) COD at the upper layer in St. F-5.

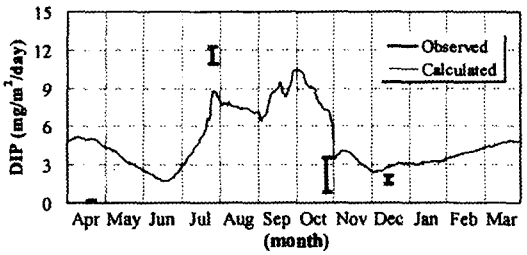

Fig. 9 Calculated seasonal variation in release rate of DIP at St. E-5 in Hakata Bay.

서 감소하였으며, 이에 따라서 같은 시기에 Chl-a농도는 반대로 높게 증가하는 경향으로 9월 말에는 약 0.1 mg/l 이상의 높은 농도를 나타내었다. 그리고, COD농도의 계절변화는 Chl-a농도의 변화와 유사한 경향으로 나타나 대상해역에서의 유기오염이 식물플랑크톤에 의한 내부생산에 크게 영향을 받고 있는 것으로 추정되었다. 이들 수질항목의 계산치는 연간을 통해서 대체적으로 수질관측치의 계절변화와 거의 유사한 재현성을 나타내었으나 겨울철의 일부시기에 보이는 Chl-a와 COD의 높은 농도값의 재현성은 불충분하였다. 이에 대한 원인을 고찰하여 보면 첫째는 식물플랑크톤의 종조성의 계절변화를 고려함에 따라 두종류의 증식특성을 기술하는 기초식과 변수의 설정값에 의한 원인과, 둘째는 겨울철의 북서계절풍에 의한 취송류의 영향으로 식물플랑크톤이 상층부에 장시간 체류하는 현상에 의한 원인 등 모델내에서 충분히 표현하지 못한 현상에 기인한 것으로 예상되며 이에 대한 계속적인 검토가 필요한 것으로 판단된다.

(2) DIP 용출속도의 계절변화

만내(St. E-5)에서의 DIP 용출속도의 계절변화를 예측한 결과를 현장관측치와 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. DIP 용출속도의 계산치는 6월에 가장 낮고 7월~10월에 걸쳐 높게 나타났으며 10월~12월까지 감소한 후 1월부터 재차 증가하는 변화를 보여 년4회에 걸친 현장관측치의 계절변화와 거의 일치하였으나, 수온의 계절변화(Fig. 7)와는 잘 대응되지 않았다. 이것은 저질로부터 용출되는 영양염이 여름철에는 수층에서 침강하는 유기물이 저질내에서 빠르게 분해됨에따라 짧은 시간에 수층으로 회귀하는 것에 비하여, 겨울철에는 저질에 침강하는 유기물은 여름철과 거의

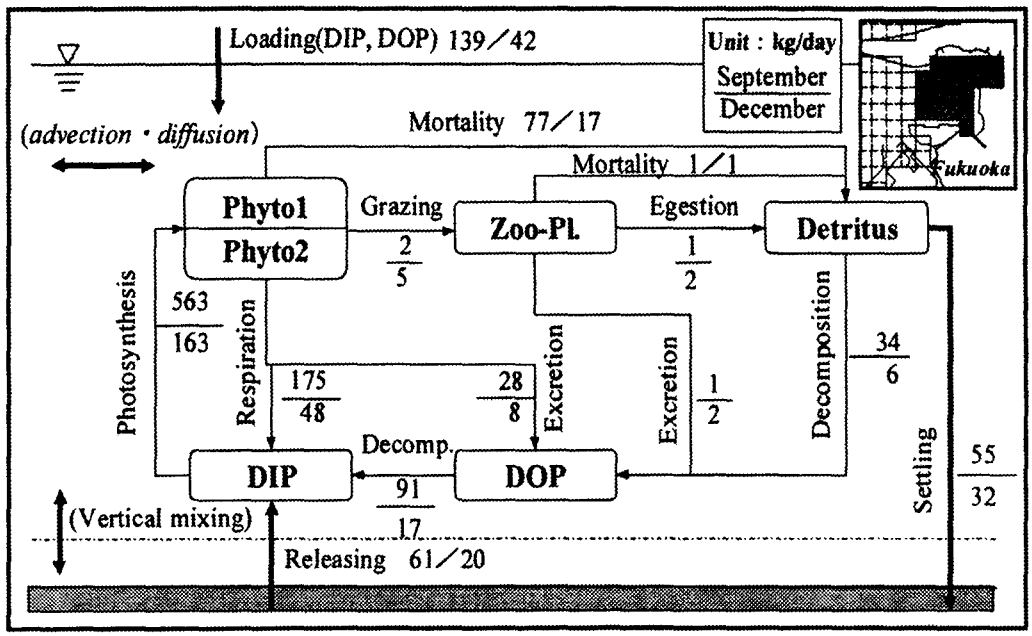

Fig. 10 Predictied results for phosphorus circulation around the head of Hakata Bay.

같지만 수온이 낮아짐에 따라 저질내에서의 유기물분해가 늦어져 시간이 경과하여 서서히 수층으로 회귀하고 있음을 나타낸다. 이와같이 겨울철의 만내 수질변화에 있어서 수층에서 공급되는 유기물이 저질로부터 회귀되는 과정은 무시될 수 없는 과정으로서 연간에 걸친 장기적인 내만의 수질변화를 예측하기 위해서는 수-저질간의 영양염순환과정을 고려하여야 할것으로 생각된다.

(3) 인의 물질순환예측

수질오염이 두드러진 부영양화한 해역인 만내측(Fig. 10의 사선부)에서의 물질순환과정을 파악하기 위하여 앞서의 수질 및 저질의 계산결과를 이용하여 DIP의 생물·화학적순환과정의 계절변화를 살펴보았다.

Fig. 10은 식물플랑크톤의 증식이 최대가 되는 9월과 겨울철에 Chl-a농도가 증가하는 12월에 있어서 인의 순환과정을 비교하여 나타낸 것이다. 인의 주요 순환경로는 식물플랑크톤의 광합성, 유기물의 침강, 저질로 부터의 용출등의 순으로 나타났다. 또한, 수온이 낮아지는 12월의 인플럭스는 각 순환과정에서 9월의 1/3～1/5정도로 낮게 나타났으나, 식물플랑크톤으로부터 DIP로 회귀되는 플럭스에 대한 광합성플럭스의 비율은 12월이 조금높게 나타났다. 따라서, DIP회귀속도에 대한 광합성속도의 상대적인 증가가 겨울철의 博多灣에 있어서 Chl-a농도의 상승을 야기하는 원인이 되고 있는 것으로 추정할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수층과 저질간의 물질순환과정을 고려하여 내만의 수질을 예측하는 수-저질생태계모델을 개발하여 博多灣(Hakata灣)의 부영양화 및 영양염의 물질순환과정과 저질로부터 용출되는 영양염이 만내의 수질에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 博多灣의 유동예측결과는 조류, 수온 및 염분의 현장관측결과와 유사하였으며, 생태계예측모델에 의한 수질 및 저질로부터의 영양염 용출속도의 예측결과는 관측치의 계절변화를 잘 재현하였다.

2) 수질예측결과 博多灣의 동부해역(HE해역)의 유기오염은 식물플랑크톤에 의한 내부생산에 크게 영향을 받고 있는 것으로 추정되었다.

3) 저질로부터 용출되는 인용출속도의 계절변화를 예측한 결과로부터 영양염의 용출플럭스는 수온이나 DO농도의 변화뿐만아니라 수층에서 공급되는 유기물의 회귀에 의한 영향이 무시될수 없는 것으로 나타났다.

4) 博多灣에서의 인의 주요순환과정은 식물플랑크톤의 광합성, 유기물의 침강 및 저질로부터의 용출등의 순으로 나타났고 저질에서의 영양염의 용출플럭스가 수질변화에 크게 영향을 미치고 있음을 알았다.

이상의 결과로부터 내만 및 연안역의 수질관리를 위해서는 현장에서의 수질뿐만아니라 저질의 계절변동 특성에 대한 조사분석이 실시되어야 하며, 장기적인 수질변화를 예측하기 위해서는 수-저질간의 영양염순환과정은 무시할 수 없는 과정으로서 이에 대한 적절한 모델화가 필요한 것으로 예상된다.

참고문헌

[1] 김종구, 유선재, 박청길, 1995, "진해만 해역의 하계부영양화모델링(Ⅱ)", 한국환경공학회지, Vol. 17, No.3, 215～223.

[2] 李 寅鐵, 張 善德, 金 鐘上, 浮田正夫, 1998, "富營養化된 瀨戶內海의 水質管理를 위한 수·저질예측모델의 적용", 한국해양환경공학회지, 제1권 2호, 96～108.

[3] Fisher, T.R., Carlson, P.R. and Barber, R.T., 1982, "Sediment nutrient regeneration in three North Carolina estuaries", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.14, 101～116.

[4] Jorgensen, S.E., Nielsen, S.N. and Jorgensen, L.A., 1991, *"Hand-book of ecological parameters and ecotoxicology"*, Elsevier, 1263p.

[5] Kishi, M., M. Uchiyama and Y. Iwata, 1994, "Numerical simulation model for quantitate management of aquaculture", *Ecological Modelling*, Vol. 72, 21～40.

[6] Lee, I-C., K. Fujita, K. Tanaka, A. Hoshika and T. Kusuda, 1999, "Numerical prediction of nutrient circulation between water and sediment in Hakata Bay, JAPAN", Proc. of 7th IAWQ Asia-Pacific Regional Conf.(Asian Waterqual'99), Vol.2, 1551～1554.

[7] Nakata, K. and Kuramoto, T., 1992, "A model of the formation of oxygen depleted waters in Tokyo Bay" , Proc. of Advenced Marine Technology Conf. , 5, 107 ~132.
[8] Nixon, S.W. and Kremer, J.N., 1978, *"A coastal marine ecosystem, Simulation and analysis"*, Ecological series, 24, Springer-Verlag, Berlin, Heiderberg, New York, 25~217.
[9] Smith, J.G.C. and van der Molen, D.T., 1993, "Application of SWITCH, a model for sediment-water exchange of nutrients, to Lake Veluwe in the Netherland", *Hydrobiologia*, Vol.253, 281~300.
[10] 福岡市環境局, 1990, "福岡市水質測定結果報告書", 16~148.
[11] 福岡市港灣局, 1990, "博多灣潮流調査結果報告書", 12~127.
[12] 福岡市港灣局, 1997, "博多灣海域環境調査報告書", 28~182.
[13] 李 寅鐵, 星加 章, 2000, "リアルタイムシミュレーションによる廣島灣の流況および水溫・鹽分の豫測", 日本中國工業技術研究所報告, 第54卷, 21~31.
[14] 松梨史郎, 今村正裕, 1998, "灣奥水域における水-底質豫測と負荷削減に伴う水質および榮養鹽溶出フラックスの應答", 日本土木學會論文集, No. 608/VII-9, 31~47.
[15] 日本海上保安廳, 1992, "日本沿岸潮汐調和定數表", 85~87.
[16] 日本氣象協會, 1990, "氣象月報(福岡市)", 1989年4月~1990年3月.
[17] (社)日本水環境學會編, 1999, "日本の水環境行政", 51~55. (出)ぎょうせい.