

生態系モデルを用いた東京湾夏季の水質シミュレーション

Numerical Simulation of Water Quality in Tokyo Bay in Summer using Biological model

田中昌宏*・稲垣 聡*

Masahiro Tanaka and Satoshi Inagaki

A biological model has been developed to simulate the water quality in a bay. The model is a hydrodynamical and ecological coupled model, and the ecological model includes the biological process in the bottom sediment. The vertical diffusivity is estimated by $k-\epsilon$ turbulence model to simulate the vertical transport process with high accuracy. The model was applied to Tokyo Bay in summer, which is a typical eutrophicated bay in Japan. The numerical results showed good agreement with the observed data. The model can simulate the formation of oxygen poor water in the bottom layer, which is the most serious environmental problem in Tokyo Bay

Keywords : biological model, numerical simulation, eutrophication,, oxygen poor water

1. はじめに

東京湾は我が国の富栄養化が進んだ典型的な内湾であり、環境基準を達成するため様々な努力が払われている。その一方で、埋め立てを中心とした開発プロジェクトも数多く計画されているが、今後のプロジェクト推進にあたっては、従来のようなその影響を最小限に食い止めるだけでは不十分であり、より積極的にプロジェクトの一環として豊かな環境を新たに創造することが要求されている。こうしたニーズに対応するために、数値モデルを用いた海域の生態環境のシミュレーションが有力なツールとして使用されはじめている。

Nakata and Kuramoto(1992)は、無機-有機栄養塩循環を基本としたモデルを構築し、東京湾の最も深刻な環境問題である底層の貧酸素水塊の形成をシミュレートし、その中で鉛直方向の拡散係数が重要なパラメータであることを指摘している。一方堀口・中田(1995)は、動物プランクトンを含む生態系モデルを構築し、東京湾夏季の水質シミュレーションを行っている。このシミュレーションでは、COD、総窒素、総リンに関しては実測値と良好な一致を見たが、プランクトン量や栄養塩の結果には問題があり、その原因について詳細な検討を行っている。

このように、東京湾の生態系シミュレーションに関しては、まだ多くの問題が残されており、様々な角度からの検討が必要である。そこで、本研究では東京湾の現状の水質環境を再現できるモデルの開発を目指し、夏季の平均的な水質のシミュレーションを行った。

2. 生態系モデル

モデルは、オランダ・デルフト水理研究所が開発し、共同で改良を加えている流れ解析モデル TRISULA と水質解析モデル DELWAQ を使用した。著者ら(1996)は、これらのモデルを用いて東京湾の残差流とそれが水質解析に及ぼす影響について検討しており、本論文では、水質モデルをさらに高度化し、植物プランクトンまでを含む生態系モデルを作成した。また、貧酸素水塊の再現にとって重要である鉛直拡散係数を高精度に求めるため、流れ解析に用いた $k-\epsilon$ モデルから求められた値を水質解析にも用いた。

2.1 モデルの構成

モデルの全体構成を図1に示す。大きく浮遊系と底泥系に分かれ、浮遊系は植物プランクトンを中心として、炭素、窒素、リン及び溶存酸素の循環がモデル化されている。底泥系は、有機態物質の浮遊系における移流拡散過程以外のすべて

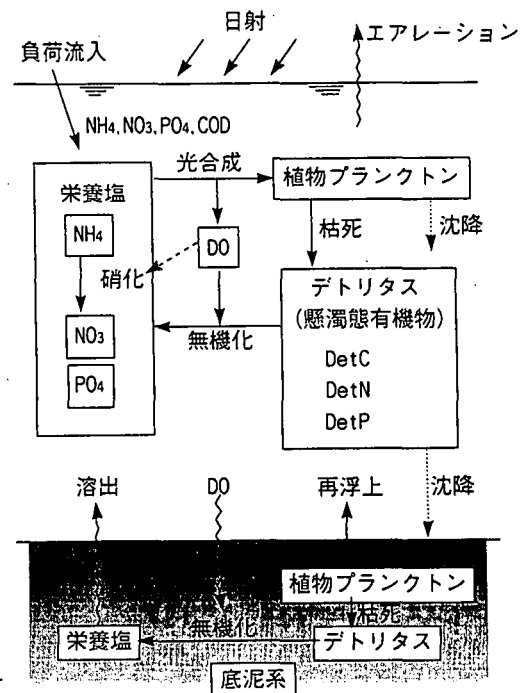


図1 生態系モデルの構成

* 正会員 鹿島技術研究所第1研究部第4研究室

〒182 東京都調布市飛田給 2-19-1

の過程がモデル化されている。ただし底泥内の溶存物質はモデル化されていないため、底泥内の有機物の反応は浮遊系の最底層の溶存物質との間で生じることになる。モデル変数をまとめると表1のようになる。

2.2 基礎方程式

モデルの基礎方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} - uC \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} - vC \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} - wC \right) = F(C) \quad (1)$$

ここに、C；各変数の濃度、t；時間、x、y；水平方向座標、z；鉛直方向座標、Dx、Dy、Dz；各方向の拡散係数、u、v、w；各方向の流速、F(C)；生化学反応項である。

化学反応の項を変数毎に示すと以下のようになる。

- F(Green) = (光合成による増殖) - (呼吸) - (死亡) - (沈降)
F(DetC,N,P) = (植物プランクトンの死亡) - (無機化) - (沈降)
F(NH₄-N) = (デトリタスの無機化) + (植物プランクトンの死亡)
 - (光合成による摂取) - (硝化) + (底泥からの溶出)
F(NO₃-N) = (デトリタスの無機化) + (植物プランクトンの死亡)
 - (光合成による摂取) + (硝化) - (脱窒) + (底泥からの溶出)
F(PO₄-P) = (デトリタスの無機化) + (植物プランクトンの死亡)
 - (光合成による摂取) + (底泥からの溶出)
F(GreenS) = (死亡)
F(DetCS,NS,PS) = (植物プランクトンの死亡) - (無機化)
各反応及び変数は表2及び表3にまとめた。

表1 モデル変数

	水質指標	変数名	単位
浮遊系	植物プランクトン	Green	gC/m ³
	デトリタス炭素	DetC	gC/m ³
	デトリタス窒素	DetN	gN/m ³
	デトリタスリン	DetP	gP/m ³
	アンモニア態窒素	NH ₄ -N	gN/m ³
	硝酸態窒素	NO ₃ -N	gN/m ³
	リン酸態リン	PO ₄ -P	gP/m ³
	溶存酸素	OXY	g/m ³
底泥系	植物プランクトン	GreenS	gC/m ³
	デトリタス炭素	DetCS	gC/m ³
	デトリタス窒素	DetNS	gN/m ³
	デトリタスリン	DetPS	gP/m ³

3. 計算条件

計算メッシュは図2に示すように、一辺 800m の正方形メッシュとし、鉛直方向にはσ座標系で、流動計算は10層、水質解析は5層とした。

流動解析は、夏季の平均的な流れ場(残差流)を求めるため、湾口で潮汐(M2分潮)を与え、主要河川から淡水の供給を与え、定常に達する(30日)まで計算した。計算の詳細は田中ら(1996)を参照されたい。

水質解析における初期条件、境界条件、流入負荷量及び各種パラメータの値は、堀口・中田(1995)にほぼ従って与えた。それぞれを表4から表7に示す。この条件の下に計算を60日間行った。

4. 結果及び考察

水質解析に使用した流れ場は田中ら(1996)の CASE3 である。この計算では、鉛直拡散係数の評価に k-e 乱流モデルを使用しており、水質解析にもそこで求めた拡散係数を使用している。

図3に湾中央部での表層の植物プランクトン及び栄養塩の計算開始からの時系列を示す。どれも60日めではまだ完全に定常に達していないが、変化の速度はかなり小さくなっており、計算結果は初期条件の影響はほぼなくなったと判断できる。堀口・中田(1995)は100日程度で定常に達することを確認しているが、ここでは計算時間の制約から60日目の結果について考察する。

図4は1994年の公共用水域データによる7月のクロロフィルa及び表層、底層の溶存酸素の値を示している。図5に計算結果の内、表層の植物プランクトン、栄養塩、溶存酸素及び底層の溶存酸素量を示す。堀口・中田によると東京湾にお

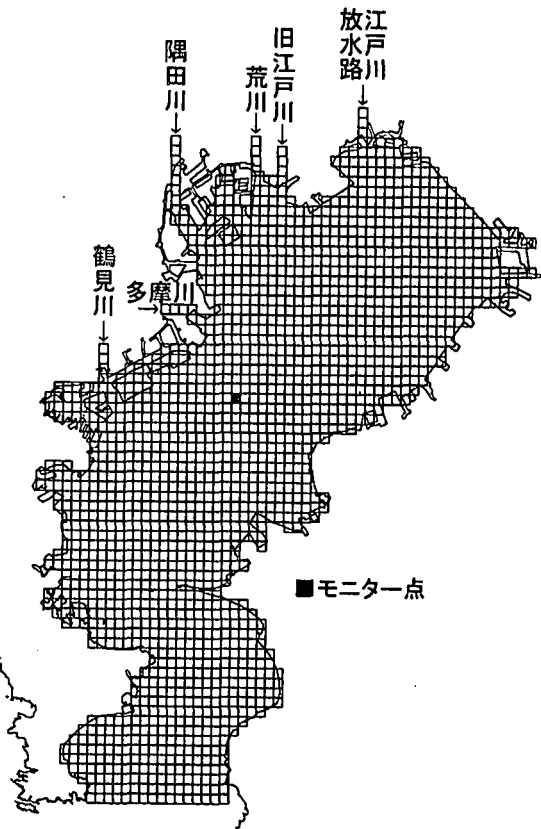


図2 計算メッシュ

けるクロロフィル／炭素比は、約 50 と報告されている。この比を適用すると、実測のプランクトン量は 1 gC/m^3 以上であり、計算結果と対応している。実測値は、湾西南岸の川崎から横須賀沖にかけて高い値を示しており、計算結果と異なっている。これは、計算では流入負荷の設定を湾奥の主要河川のみにしか行っていないことが影響しているものと考えられる。実測の溶存酸素は、表層ではクロロフィル a の高い領域で非常に高く過飽和の状況になっている。計算結果もプランクトンの高濃度な領域で高くなっており、光合成に伴う酸素の生成に対応しているものと考えられる。一方、底層の溶存酸素は、実測値、計算値共に湾奥で 2 g/m^3 以下となっており、広い範囲で貧酸素水塊が形成されている。この貧酸素水塊の形成は東京湾の最も深刻な環境問題であり、本モデルはその特性をよく再現していることがわかる。

表 2 生態系モデルの各反応式

(1) 浮遊系の植物プランクトンの増殖、呼吸及び死亡

$$\begin{aligned} dPP &= (RcGro - RcMrt) \times Green \\ dMrt &= Mori0 \times TFMrt \times Green \\ RcGro &= LimDL \times LimNut \times LimRad \times TFGro \times PPM_{\max} \\ RcMrt &= RcGro \times Gresp + Mresp \times TFMrt \times (1 - Gresp) \end{aligned}$$

(2) 温度関数

$$\begin{aligned} TFGro &= TCGro^{Temp-20} \\ TFMrt &= TCD_{\text{Dec}}^{Temp-20} \end{aligned}$$

(3) 日長の制限関数

$$LimDL = \min(DayL, OptDL) / OptDL$$

(4) 栄養塩の制限関数

$$\begin{aligned} LimNUT &= \min(LimN, LimP) \\ LimN &= DIN / (DIN + KmDIN) \\ LimP &= PO_4 / (PO_4 + KmP) \\ DIN &= NH_4 + NO_3 / PrfNH_4 \end{aligned}$$

(5) 光の制限関数

$$\begin{aligned} RAD_{\text{sat}} &= TFGro \times RAD_{\text{sat}} \\ RAD_{\text{bot}} &= RAD \times \exp[-ExtVL \times Depth] \\ \text{if } \frac{RAD}{RAD_{\text{sat}}} > 1.0 \wedge \frac{RAD_{\text{bot}}}{RAD_{\text{sat}}} > 1.0 \text{ then} \\ LimRAD &= 1.0 \\ \text{if } \frac{RAD}{RAD_{\text{sat}}} > 1.0 \wedge \frac{RAD_{\text{bot}}}{RAD_{\text{sat}}} < 1.0 \text{ then} \\ LimRAD &= \frac{1 + \ln\left(\frac{RAD}{RAD_{\text{sat}}}\right) - \left(\frac{RAD}{RAD_{\text{sat}}}\right) \times \exp[-ExtVL \times Depth]}{ExtVL \times Depth} \\ \text{if } \frac{RAD}{RAD_{\text{sat}}} < 1.0 \text{ then} \\ LimRAD &= \frac{RAD}{RAD_{\text{sat}}} \times \frac{(1 - \exp[-ExtVL \times Depth])}{ExtVL \times Depth} \end{aligned}$$

(6) 光合成による栄養塩の摂取

$$\begin{aligned} dNH_4Upt &= dPP \times NCRat \times FracUptNH_4 \\ dNO_3Upt &= dPP \times NCRat \times (1 - FracUptNH_4) \\ dPO_4Upt &= dPP \times PCRat \\ \text{If } (NH_4 < NH_4Krit): \\ FracUptNH_4 &= \frac{NH_4}{NH_4 + NO_3} \\ \text{else} \\ \text{If } (NH_4 - NH_4Krit) > ReqDIN: \\ FracUptNH_4 &= 1.0 \\ \text{If } (NH_4 - NH_4Krit < ReqDIN): \\ FracUptNH_4 &= \frac{(NH_4 - NH_4Krit) + \left(\frac{NH_4Krit}{NO_3 + NH_4Krit}\right) \times (ReqDIN - NH_4 + NH_4Krit)}{ReqDIN} \end{aligned}$$

(7) 植物プランクトンの死亡による栄養塩の放出

$$\begin{aligned} dNH_4Aut &= dMrt \times NCRat \times FrAut \\ dPO_4Aut &= dMrt \times PCRat \times FrAut \\ dMortDetC &= dMrt \times FrDet / (1 - FrAut) \\ dMortDetN &= dMrt \times NCRat \times FrDet \\ dMortDetP &= dMrt \times PCRat \times FrDet \end{aligned}$$

(8) 硝化

アンモニアの硝化に対して

If Temp < CTN_{it} then

$$dNitif = ZNit$$

else

$$dNitif = Znitrif + (RcNit \times NH_4 \times TempC \times O_2FuncNit)$$

$$TempC = TcNit^{Temp-20}$$

溶存酸素に対して

if OXY ≥ OOXN_{it} then

$$O_2FuncNit = 1$$

if OXY ≤ OOXN_{it} then

$$O_2FuncNit = CFLNit$$

else

$$O_2FuncNit = (1 - CFLNit) \times \left(\frac{OXY - COXN_{it}}{OOXN_{it} - COXN_{it}} \right)^{10^{Temp-20}} + CFLNit$$

(9) 脱窒

If Temp < CT_{Den} then

$$dDenWat = ZDenWat$$

else

$$dDenWat = ZdenWat + (RcDenWat \times NO_3 \times TempC \times O_2FUNC)$$

温度関数

$$TempC = TcDenWat^{Temp-20}$$

酸素関数

if OXY < OOXDEN then

$$O_2FUNC = 1$$

else

$$O_2FUNC = \frac{COXDEN - OXY}{COXDEN - OOXDEN + Curvt(OXY - OOXDEN)}$$

(10) 分解

If Temp < CT_{Min}

$$dMinX = ZMinX$$

else

$$dMinX = ZMinX + (RCX \times TCX^{Temp-20} \times X)$$

(11) 消散係数

$$ExtVL = ExtVL_{\text{Bak}} + ExtVL_{\text{LOSS}} + ExtVL_{\text{Alg}}$$

$$ExtVL_{\text{LOSS}} = ExtVL_{\text{DetC}} \times DetC, \quad ExtVL_{\text{Alg}} = ExtVL_{\text{Green}} \times Green$$

表3 生態系モデルの変数一覧

dPP ネットの増殖率	RADsat プランクトンの飽和放射量	Temp 水温
dMrt 死亡率	ExtVL 可視光の消散係数	O2FuncNit 硝化に関する酸素関数
RcGro 増殖率	Depth 計算セグメントの厚さ	COXNit 臨界酸素濃度
RcMrt 呼吸速度	dNH4Upt アンモニア摂取フラックス	OOXNit 最適酸素濃度
LimDL 日長の制限関数	dNO3Upt 硝酸摂取フラックス	CFLNit 酸素関数
LimNut 栄養塩の制限関数	dPO4Upt リン酸摂取フラックス	CurvNit 関数曲線パラメータ
LimRad 光の制限関数	NCRat 植物プランクトンの窒素・炭素比	dDenWat 脱窒フラックス
TFGro 増殖の温度関数	PCRat 植物プランクトンのリン・炭素比	ZDenWat 0次の脱窒速度
PPMax 最大増殖率	FracUptNH4 アンモニアの消費比率	RcDenWat 1次の脱窒速度
Gresp 増殖に伴う呼吸ファクター	NH4Krit アンモニアの臨界濃度	COXDEN 臨界酸素濃度
Mresp 呼吸速度	dNH4Aut アンモニアの自己分解フラックス	OODEN 最適酸素濃度
TFMrt 死亡の温度関数	dPO4Aut リン酸の自己分解フラックス	Curvat 酸素関数曲線パラメータ
Mort0 死亡率定数	dMortDetC DetCの死亡フラックス	X DetC、DetN、DetP
TCGro 増殖に関する温度係数	dMortDetN DetNの死亡フラックス	dMinX 分解物の総量
TCDec 死亡に関する温度係数	dMortDetP DetPの死亡フラックス	ZminX 0次の分解速度
DayL 日長	FrAut 死亡に伴う自己分解の割合	RCX 1次の分解速度
OptDL 最適日長	FrDet 死亡に伴うデトリタス生成割合	TCX 分解速度係数
KmDIN 窒素に対する半飽和定数	dNitif アンモニアの硝化フラックス	CTMin 臨界温度
KmP リンに対する半飽和定数	Znit 0次の硝化フラックス	ExtVLBak バックグラウンドの消散係数
PrfNH4 アンモニアを好む率	RcNit 20℃における反応速度定数	
RAD 計算セグメント上端にの放射量	TcNit 温度係数	

表4 初期条件

変数	値
Green	0.5(gC/m ²)
Det C	0.8(gC/m ³)
Det N	0.128 (gN/m ³)
Det P	0.016 (gP/m ³)
NH ₄	0.070 (gN/m ³)
NO ₃	0.070 (gN/m ³)
PO ₄	0.124 (gP/m ³)
OXY	8.0 (g/m ³)

表5 境界条件

変数	値
Green	0.5(gC/m ²)
Det C	0.6(gC/m ³)
Det N	0.096 (gN/m ³)
Det P	0.012 (gP/m ³)
NH ₄	0.025 (gN/m ³)
NO ₃	0.025 (gN/m ³)
PO ₄	0.020 (gP/m ³)
OXY	8.0 (g/m ³)

表6 流入負荷量

	流量	Green	Det C	Det N	Det P	NH ₄ -N	NO ₃ -N	PO ₄ -P	OXY
単位	m ³ /s	t/day							
荒川	218.25	0	15.3	0	0	38.8	38.8	3.90	20.0
隅田川	14.34	0	1.8	0	0	0.6	0.6	0.53	45.4
多摩川	61.45	0	10.5	0	0	29.5	29.5	4.63	37.8
鶴見川	16.98	0	5.2	0	0	10.9	10.9	3.02	0.002
旧江戸川	198.35	0	10.6	0	0	16.2	16.2	3.90	47.2
江戸川放水路	2.62	0	11.4	0	0	18.4	18.4	3.68	56.0

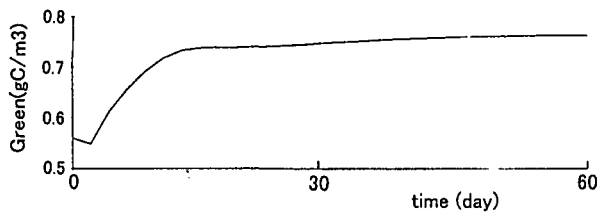
5. おわりに

本研究では、東京湾を対象に浮遊系と底泥系を結合した生態系モデルを開発し、夏季の水質の再現計算を行った。その結果、概ね実測データと一致した結果が得られ、東京湾の最も深刻な問題である底層の貧酸素水塊の形成がシミュレートできた。

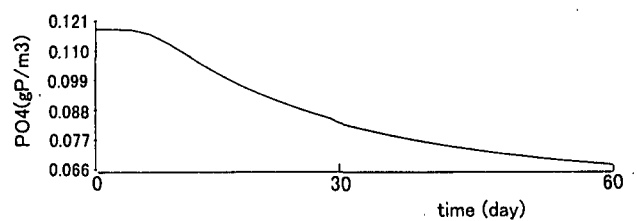
今後はより詳細な検討を継続すると共に、各種プロジェクトに際しての環境影響評価を行っていきたいと考えている。

表7 モデルパラメータの値

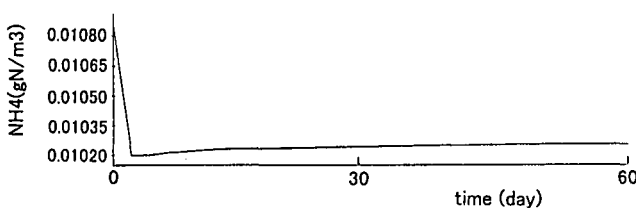
変数	値	単位	変数	値	単位	変数	値	単位
PPMAX	1.8	(/d)	KmP	0.003	(gP/m ³)	Cunvat	1.0	
Mresp	0.045	(/d)	RAD _{sat}	96.5	(W/m ²)	ZMinDetC	0.0	(g/m ³ /d)
Gresp	0.15		TFGro	1.0		ZMinDet N	0.0	(g/m ³ /d)
Mort0	0.35	(/d)	Znit	0.0	(gN/m ³ /d)	ZMinDetP	0.0	(g/m ³ /d)
TFMrt	1.0		RcNit	0.15	(/d)	RCDetC	0.12	(/d)
MrtSed	3.0	(/d)	TcNit	1.07		RCDetN	0.08	(/d)
NCRat	0.16	(gN/gC)	OOXNit	5.0	(g/m ³)	RCDetP	0.08	(/d)
PCRat	0.02	(gP/gC)	COXNit	1.0	(g/m ³)	TCDetC	1.047	
NH ₄ Krit	0.01	(gN/m ³)	CTNit	3.0	(°C)	TCDetN	1.047	
FrAut	0.3		CFLNit	0.0		TCDetP	1.047	
FrDet	0.7		CunvNit	0.0		CTMin	3.0	
TCGro	1.04		ZDenWat	0.0	(gN/m ³ /d)	ExtVLBak	0.127	(/m)
TCDeC	1.07		RcDenWat	0.0	(/d)	ExtVLGreen	0.15	(m ² /gC)
OptDL	0.58	(d)	TcDenWat	1.07		ExtVLDetC	0.06	(m ² /gC)
DayL	0.58	(d)	OOXDEN	1.0	(g/m ³)	VOSedGreen	0.1	(m/day)
PrfNH ₄	1.0		COXDEN	3.0	(g/m ³)	VOSedDet	0.423	(m/day)
KmDIN	0.042	(gN/m ³)	CTDen	2.0	(°C)	Dx、Dy	40	(m ² /s)



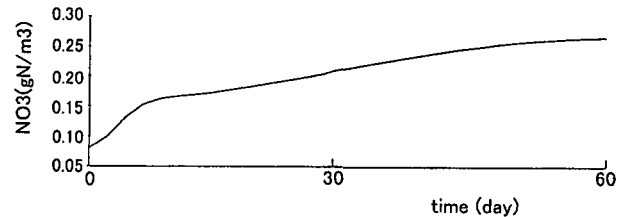
(a) 植物プランクトン



(b) リン酸態リン



(c) アンモニア態窒素



(d) 硝酸態窒素

図3 モニター点での水質指標の時系列

参考文献

- 田中昌宏・G.S.Stelling・A.Markus(1996)：東京湾の残差流のシミュレーションとそれが水質解析に及ぼす影響について、海岸工学論文集、第43巻、pp.1121-1125。
- 堀口文男・中田喜三郎(1995)：東京湾の水質のモデル解析、J. Adv. Mar. Sci. and Tech. Soc., Vol.1, pp.71-93。
- 一都三県公害防止協議会(1996)：東京湾水質汚濁調査報告書、平成6年度、p.34。
- Nakata,K and T.Kuramoto(1992):A model of the formation of oxygen depleted waters in Tokyo Bay, Proc. Adv. Mar. Tech. Conf., Vol.5, pp.107-132。

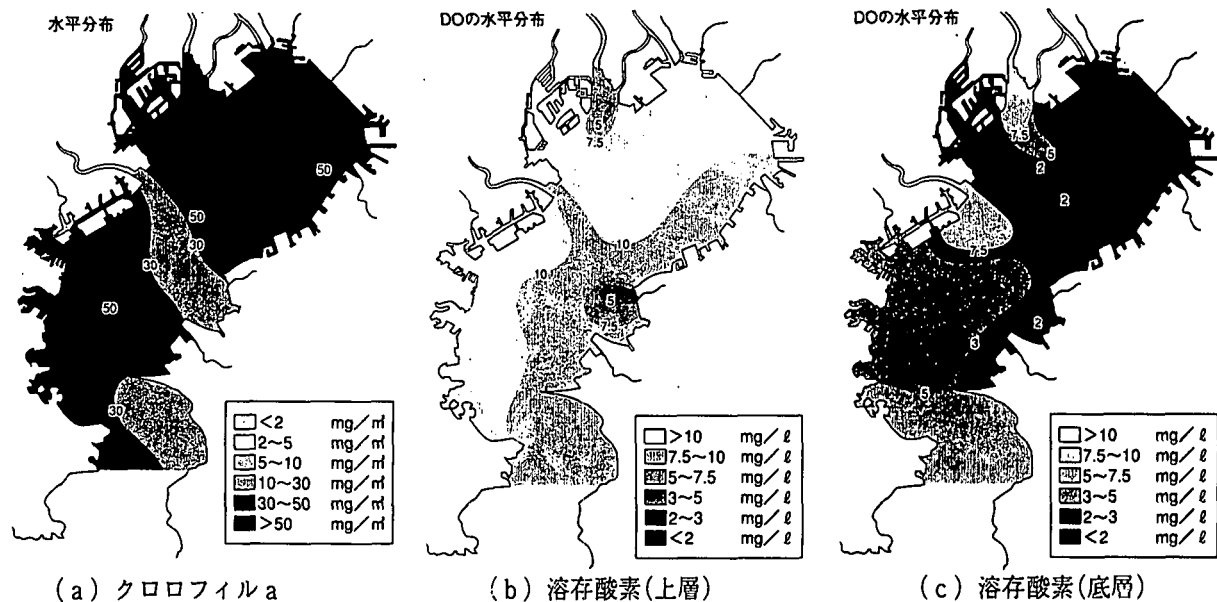


図4 公共水域データによる1994年7月の水質分布

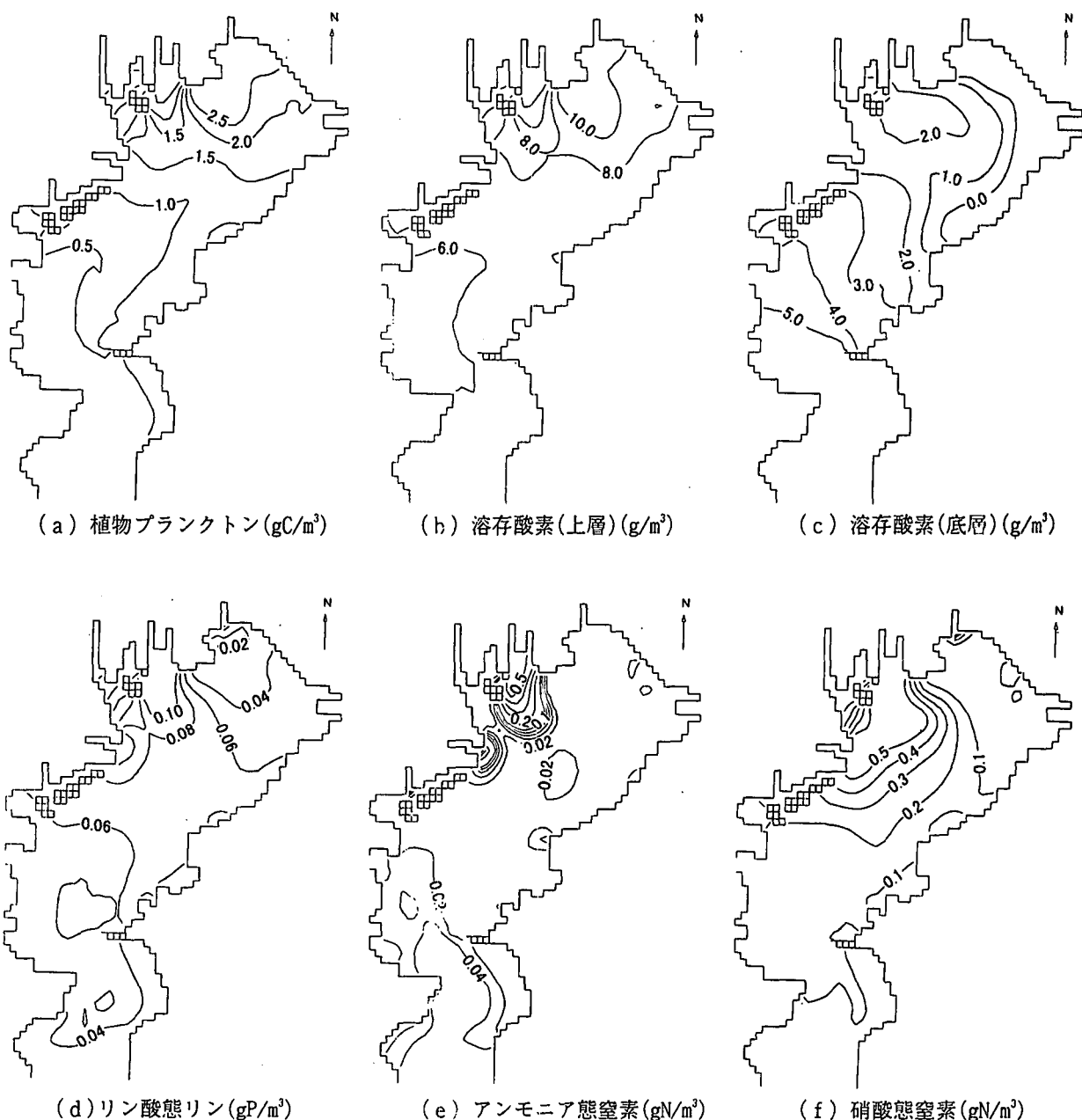


図5 計算結果(60日目の上層の濃度分布)