

ノート

鹿児島湾の水質変動に関する調査研究（第Ⅶ報）

-シミュレーションによる現況再現-

吉 留 雅 仁 末 吉 恵 子 瀬 戸 加 奈 子
 山 田 正 人 下 蘭 清 香

要 旨

低次生態系モデルを用いた数値シミュレーションを鹿児島湾に対して適用し、鹿児島湾の水質の現況再現を試みた。表層のCODについては、実測値と比較して高い濃度を示したものの、鹿児島市沖における上昇傾向などの濃度分布や季節変動が比較的良く再現された。また、CODの濃度上昇にプランクトンが寄与していることも示唆された。一方で、層間の物質循環などの再現は十分ではなく、今後の検討課題である。

キーワード：鹿児島湾，シミュレーション，COD，プランクトン

1 はじめに

本調査研究では、これまでに過去のCOD¹⁾や内部生産COD²⁾の動態を調べることにより、近年のCODの上昇にプランクトンが影響していることを明らかにしてきた。また、多変量解析による分類³⁾などから、CODの上昇が湾内で均一に生じているのではなく、特に鹿児島市沖において顕著であることも明らかになってきている。より詳細に原因について調査するためには、外部負荷や、プランクトンの栄養塩となる窒素、リンの動態等を含め、湾内における物質の循環について明らかにする必要があるが、定点観測によるデータから湾全体を把握するのは困難である。

海域における物質循環を数値計算的に解明する試みは以前から行われているが、その中でも中田は、特にCOD濃度のモデル化を意図した低次生態系モデルを提案している⁴⁾。本報告では、低次生態系モデルを用いた数値シミュレーションを鹿児島湾に対して適用し、その現況についての再現を試みた。

2 調査方法

2. 1 シミュレーションソフト

数値シミュレーションには、財団法人鹿児島県環境技術協会が作成した「鹿児島県水質予測システムKINEMA」を使用した。

2. 2 潮流計算

潮流は、多層モデルで密度流を考慮した計算を行った。計算に使用した条件⁵⁾は表1のとおりである。

2. 3 低次生態系モデル

生態系モデルは、プランクトンや栄養塩などの物質を状態変数（コンパートメント）として、物質の拡散で表される流動モデルと、物質の循環を表す反応モデルの和として表現される。「鹿児島県水質予測システムKINEMA」では反応モデルとして、中田によって提案された低次生態系モデルをもとに、植物プランクトン（P：mgC/m³）、動物プランクトン（Z：mgC/m³）、懸濁態有機物（POC：mgC/m³）、溶存態有機物（DOC：mgC/m³）、無機態リン（DIP：mmol/m³）、無機態窒素（DIN：

表1 潮流計算条件

潮汐	M2潮
境界潮位	振幅 76.5cm 遅角 205.4度
海底摩擦係数	0.0026
内部摩擦係数	0.002
水平渦粘性係数	$5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$
水平拡散係数	$1 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$
鉛直拡散係数	$1 \times 10 \text{ cm}^2/\text{s}$
計算時間	200潮汐
格子分割	格子数： 横34, 縦85 格子幅： 1km
層分割	第1層 海面～5m 第2層 5m～10m 第3層 10m～30m 第4層 30m～60m 第5層 60m以深

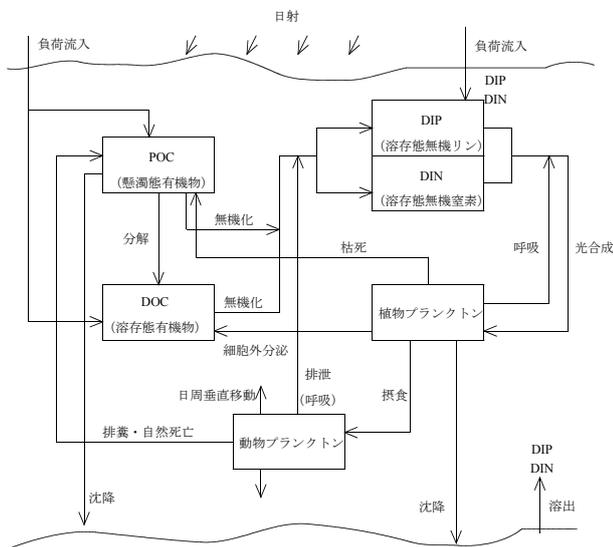


図1 低次生態系モデル概念図

mmol/m³) をコンパートメントとし、それぞれの濃度の時間変化を計算している。図1にモデルの概略図を示す。各コンパートメントの濃度変化は以下の式で定式化している。

$$\frac{dP}{dt} = \text{光合成による増殖} - \text{細胞外分泌} - \text{呼吸} - \text{動物プランクトンによる摂食} - \text{ベントスによる摂食} - \text{枯死} - \text{沈降} \dots \text{式-1}$$

$$\frac{dZ}{dt} = \text{摂食} - \text{排糞} - \text{排泄} - \text{自然死亡} \pm \text{日周垂直移動} \dots \text{式-2}$$

$$\frac{dPOC}{dt} = \text{植物プランクトン枯死} + \text{動物プランクトン排糞} + \text{動物プランクトン自然死亡} - \text{細菌による分解} - \text{分解過剰物生成} - \text{沈降} + \text{系外からの流入} \dots \text{式-3}$$

$$\frac{dDOC}{dt} = \text{植物プランクトンの細胞外分泌} + \text{POC分解過剰物生成} - \text{無機化} + \text{系外からの流入} \dots \text{式-4}$$

$$\frac{dDIP}{dt} = - \text{植物プランクトンによる摂取} + \text{植物プランクトンの呼吸} + \text{動物プランクトンの排泄} + \text{懸濁態有機物の無機化} + \text{溶存態有機物の無機化} + \text{溶出} + \text{系外からの流入} \dots \text{式-5}$$

$$\frac{dDIN}{dt} = - \text{植物プランクトンによる摂取} + \text{植物プランクトンの呼吸} + \text{動物プランクトンの排泄} + \text{懸濁態有機物の無機化} + \text{溶存態有機物の無機化} + \text{溶出} + \text{系外からの流入} \dots \text{式-6}$$

以上の式から算出される結果をもとに、COD (mg/L) を、

$$\frac{dCOD}{dt} = \text{植物プランクトンの寄与} + \text{動物プランクトンの寄与} + \text{懸濁態有機物の寄与} + \text{溶存態有機物の寄与} \dots \text{式-7}$$

と表す。なお、計算に使用した各生態パラメータ^{4, 5)}は表2のとおりである。以上の反応式を、拡散方程式と合わせて計算することにより、湾内におけるコンパートメントの濃度分布を算出することができる。

また、今回は季節変動を再現するために、各層の水温は湾中央の環境基準点の一つである基準点13における測定結果をもとに設定した。計算時間は100潮汐とした。

河川等からの流入負荷については第4期鹿児島湾ブルー計画資料編のデータを用いた⁶⁾。

表2 生態パラメータ

	生物過程	単位	設定値
植物プランクトン	最大増殖速度	/day	0.59exp(0.063T)
	呼吸速度	/day	0.03exp(0.0524T)
	最適光量	ly/day	200
	消散係数	/m	0.1
		/m/(mgChla/m ³)	0.0179
	界面最強日射量	ly/day	850
	日長	—	0.59
	枯死速度	/day	0.01exp(0.0693T)
	沈降速度	m/day	0.15
	半飽和定数 (窒素)	mmolN/m ³	1.50
	半飽和定数 (リン)	mmolP/m ³	0.01
	細胞外分泌	—	0.135
	[Chla:Cp]	—	2.90E-02
	[P:Cp];P/C元素比率	—	2.00E-04
	[N:Cp];N/C元素比率	—	4.50E-03
	[TOD:Cp];TODと炭素の組成比	—	3.47E-03
[COD:Cp];CODと炭素の組成比	—	1.54E-03	
動物プランクトン	最大摂食速度	/day	0.19exp(0.0693T)
	自然死亡速度	/day	0.05exp(0.0693T)
	餌の閾値濃度	mgC/m ³	0
	Ivlev定数	/(mgC/m ³)	6.30E-03
	同化効率	—	0.7
	総成長効率	—	0.3
	最大下降速度	m/day	0
	最大上昇速度	m/day	0
	[P:Cz];P/C元素比率	—	3.23E-04
	[N:Cz];N/C元素比率	—	1.10E-02
[TOD:Cz];TODと炭素の組成比	—	3.31E-03	
[COD:Cz];P/C元素比率	—	1.46E-03	
懸濁有機物	分解速度	/day	1.24 × 10 ⁻² exp(0.07T)
	沈降速度	m/day	0.432
	分解余剰物生成	—	0.250
	[P:C _{Poc}];P/C元素比率	—	6.78E-04
	[N:C _{Poc}];N/C元素比率	—	5.36E-03
	[TOD:C _{Poc}];TODと炭素の組成比	—	3.01E-03
	[COD:C _{Poc}];CODと炭素の組成比	—	1.33E-03
細菌分解時の酸素濃度半飽和値	mg/L	0.5	
溶解有機物	無機化速度	/day at 0deg.	4.34 × 10 ⁻³ exp(0.0693T)
	[P:C _{Doc}];P/C元素比率	—	2.61E-04
	[N:C _{Doc}];N/C元素比率	—	2.36E-03
	[TOD:C _{Doc}];TODと炭素の組成比	—	2.82E-03
	[COD:C _{Doc}];CODと炭素の組成比	—	1.25E-03
	DOC無機化時の酸素濃度半飽和値	mg/L	0.5
最曝気係数	—	0.15	

表3 各層における水温の設定値

	(単位: °C)			
	春季	夏季	秋季	冬季
第1層	17.0	28.2	20.4	16.6
第2層	17.0	26.7	20.4	16.6
第3層	16.7	24.6	20.4	16.6
第4層	16.1	22.3	20.3	16.3
第5層	15.6	16.3	17.5	16.2

3 結果と考察

3.1 潮流計算

表層における潮流の計算結果の一つと、潮流楕円図を図2に示す。潮流楕円図は図2中のPt1~Pt4の4地点にお

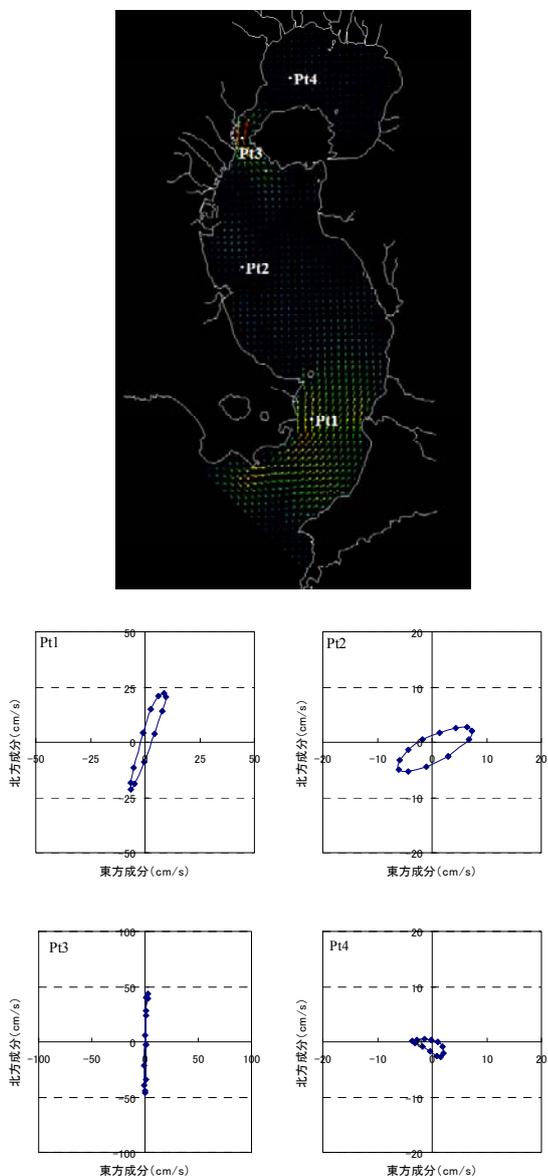


図2 潮流計算結果及び潮流楕円図

ける計算結果である。各地点における潮流楕円図の結果は、「第4期鹿児島湾ブルー計画資料編」で示されているデータ⁷⁾と概ね一致しており、湾内の流況をある程度再現できていると考えられる。

3.2 CODの濃度分布

図3に計算によって得られた表層のCODの濃度分布を示す。実測値では、冬季のCODは約1mg/L、夏季でも概ね3.5mg/L以下であるのに対し、計算値では、冬季で2mg/L以上、夏季には海域によっては6mg/L以上と、実測値と比較してかなり高め濃度となった。

表4に冬季の各海域におけるCODの平均値と、實成らが示した1996-2006年のCOD_{mn}の平均値をそれぞれ示す。計算値は、図3中に四角で囲った領域の平均値である。

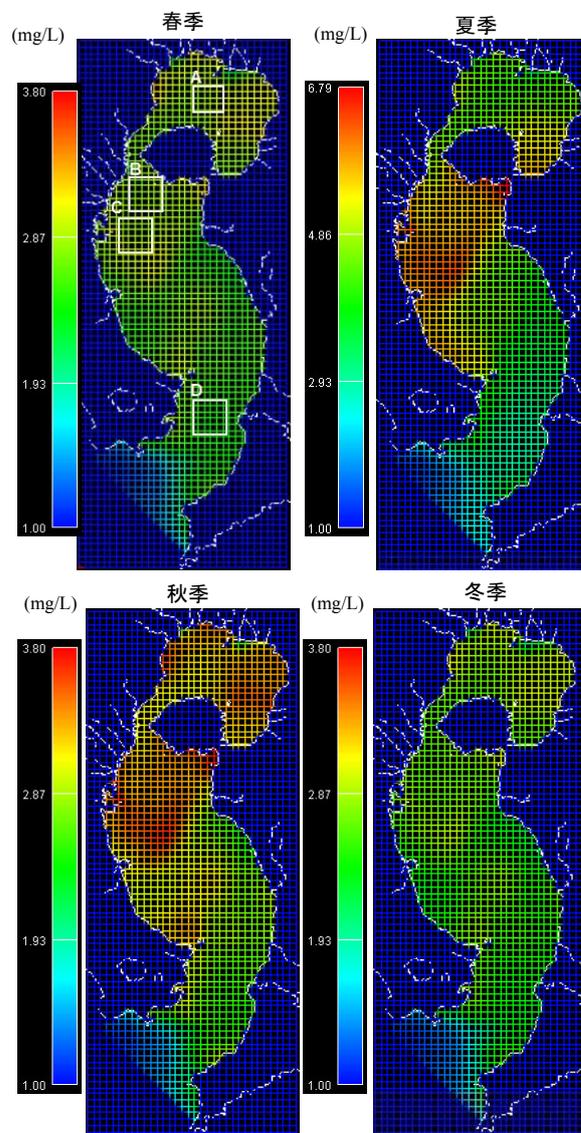


図3 CODの濃度分布

表4 実測CODminと計算値の冬季COD

(単位: mg/L)

実測値 (1996-2006)	海域	湾奥	鹿児島市沖 (北部)	鹿児島市沖 (南部)	湾央・ 指宿沖
	CODmin	1.22	1.11	1.14	1.08
計算値	海域	A	B	C	D
	冬季COD	2.81	2.66	2.69	2.11

計算値は、湾奥（A）、鹿児島市沖（B、C）、湾央・指宿沖（D）の順に高くなり、冬季における濃度分布は、実測値と類似した傾向を示した。

一方、夏季の濃度分布は冬季とは異なり、鹿児島市沖で濃度が高くなる傾向が顕著であった。この濃度分布の傾向は、これまでに報告されているΔCODの湾内での分布や、近年の鹿児島市沖におけるCOD上昇の傾向とも一致した。

春季は冬季と類似した濃度分布を示した。秋季も比較的類似した分布を示したが、鹿児島市沖の濃度が湾奥の濃度と比較して相対的に高くなる傾向があり、夏季の影響が見られた。同一地点での濃度は夏季、秋季、春季、冬季の順で高くなり、季節変動が再現された。

以上の結果から、表層のCODについては、実測値と比較し濃度が高く算出されたものの、濃度分布や季節変化などの動態については比較的よく再現されたと考えられる。その一方で、表層以外では60m以深での濃度が0.1mg/L以下になってしまうなど、表層における濃度の高さに対してあまりにも低い値となった。この結果から、面方向の物質移動が比較的よく再現されているのに対して、層間の物質移動の再現が不十分であると推測される。今後、潮流計算におけるパラメータを精査することで改善される可能性がある。

3. 3 プランクトンの分布

夏季と冬季の植物プランクトンおよび動物プランクトンの分布を図4に示す。冬季の植物プランクトンは、湾央、鹿児島市沖で比較的濃度が低いのにに対し、夏季になると、全体的に濃度が高くなり、特に鹿児島市沖においてその傾向が顕著であった。

動物プランクトンは、冬季には湾全体でほぼ均一な濃度であったが、夏季になると、鹿児島市沖と湾奥の一部で濃度が高くなった。

夏季にプランクトン、特に動物プランクトンの濃度が高くなった水域は、夏季にCODが高くなった水域とおおむね一致していた。このことから、夏季に鹿児島市沖でCODが高くなった主な要因はプランクトンの発生と考えられる。これは、これまで本調査研究で明らかにし

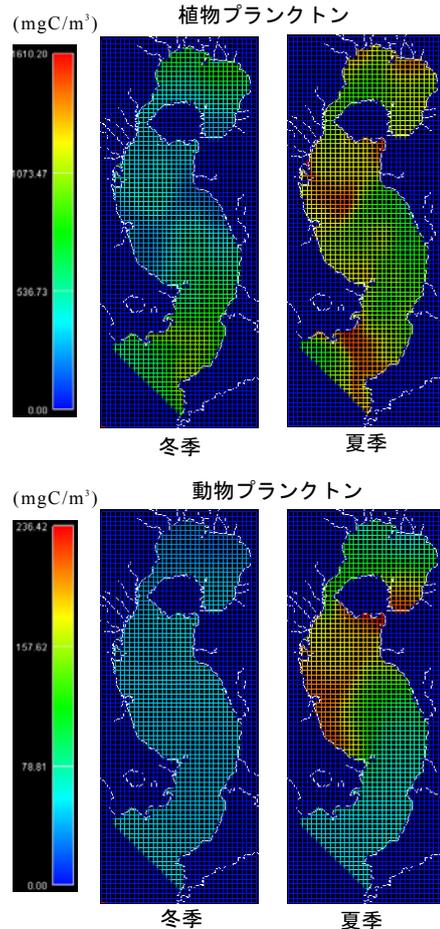


図4 植物及び動物プランクトンの濃度分布

てきた結果とも一致する。今回の計算では、何故夏季に鹿児島市沖でプランクトンが発生しやすくなるのかまでは明らかにできなかったが、生態系のパラメータや外部負荷のパラメータを変えて計算することで、プランクトンの発生に寄与するパラメータを絞り込むことができるようになると期待される。

3. 4 DIN, DIPの濃度分布

図5に夏季と冬季のDINおよびDIPの分布を示す。DINについては、天降川の河口周辺など流入負荷が大きい水域では濃度が高くなる傾向があったが、湾全体ではほぼ均一であった。また、CODやプランクトンとは異なり、明確な季節変動は無かった。なお、湾口と外洋の境界で濃度が高い水域が生じたのは、外洋のDINの濃度を常に一定として境界条件を与え計算したためと考えられる。

DIPは、全ての季節を通じて類似した濃度分布を示した。同一地点で比較した場合、夏季を除きほぼ一定の濃度であったが、夏季には濃度が高くなる傾向が湾全体でみられた。実測値ではリンは冬季に濃度が高くなる季節変動を示すことと矛盾するが、これは、夏季においてプ

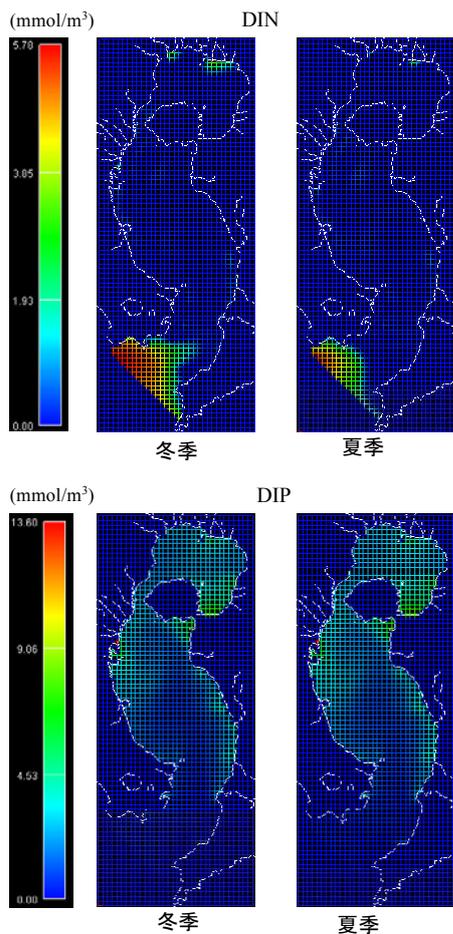


図5 DIN及びDIPの濃度分布

ランクトン濃度が著しく高いため、式-5において、濃度上昇に関わる項の寄与が大きくなりすぎたためではないかと推測される。

4 まとめ

低次生態系モデルを適用した数値計算を鹿児島湾に対して行い、現況の再現を試みた。その結果、表層のCODの濃度分布については、鹿児島市沖におけるCODの上昇傾向などが比較的良好に再現された。また、COD上昇の原因としてのプランクトン濃度の上昇など、これまでに実測値から得られていた知見を裏付ける結果も得られた。

その一方で、実測値と比較したCODの濃度や、DIN、DIPの動態、層間の循環など、現況の再現としては不十分な点も多かった。

今後、各パラメータを見直し再現性を向上させることで、水質変動の要因を解明につながる知見が得られると考えられる。

参考文献

- 1) 荒川浩亮, 末吉恵子, 他; 鹿児島湾の水質変動に関する調査研究 (第I報), 本誌, 7, 49~56 (2006)
- 2) 實成隆志, 末吉恵子, 他; 鹿児島湾の水質変動に関する調査研究 (第II報), 本誌, 8, 58~62 (2007)
- 3) 末吉恵子, 實成隆志, 他; 鹿児島湾の水質変動に関する調査研究 (第III報), 本誌, 8, 63~69 (2007)
- 4) 中田喜三郎, J. Adv. Mar. Tech. Conf., 8, 99~138 (1993)
- 5) 第4期鹿児島湾ブルー計画 資料編, 180~182 (2005)
- 6) 第4期鹿児島湾ブルー計画 資料編, 177 (2005)
- 7) 第4期鹿児島湾ブルー計画 資料編, 184~191 (2005)

Studies on the Water Quality Variations of Kagoshima Bay (VII)

— Reproduction of the present condition with numerical calculation —

Masahito YOSHIDOME, Keiko SUEYOSHI, Kanako SETO

Masato YAMADA, Seika SHIMOZONO

(Kagoshima Prefectural Institute for Environmental Research and Public Health)
18, Jonan-cho, Kagoshima-shi, 892-0835, JAPAN

Abstract

In this study, an ecosystem model was applied to reproduction of the present condition of Kagoshima bay. COD concentration increase around Kagoshima city was observed as a result of plankton development. This result support previous studies which were based on actual measurements. On the other hand, reproduction of material cycle between layers was not well. We need to inquire the condition of numerical calculation for solution of water quality variation of Kagoshima bay.

Key Words : Kagoshima Bay, simulation, COD, plankton