

# 生態系モデルによる大村湾の3次元流動・水質解析

富 樫 宏 由\*・清 成 竜 太\*\*

## Application of an Ecosystem Model for 3-D Tidal Current and Water Quality Analysis in Omura Bay

by

Hiroyoshi TOGASHI\* and Ryuta KIYONARI\*\*

In this study, two numerical models are developed for tidal current and ecosystem analysis. The models are based on eutrophication phenomenon which is considered as the process of water pollution analysis. From the tidal model results, it is understood that there is a special current in Omura Bay. The ecosystem model based on tidal current predicts good agreement of COD concentration for the whole bay area with the measured data.

### 1. はじめに

近年、閉鎖性海域における代表的な水質汚濁問題として、富栄養化現象が懸念されており、海洋環境保全を考えると、早急に解決しなければならない課題の一つである。そのため、水質汚濁解析プロセスを構成する流体力学過程（流動場及び密度場）と、生物化学的過程（生態系）を結合して水質汚濁現象を再現する試みが進められ、富栄養化現象を数値シミュレーション解析によって再現することが可能になりつつある。また、わが国では、化学的酸素要求量（Chemical Oxygen Demand：以後 COD と称す）が環境基準として採用されているため、環境影響評価の際の重要な項目として、COD 濃度の解析は結果が分かり易くて良い。そこで、本研究では対象を閉鎖性の強い大村湾とし、湾全域における水質状況の把握を目的としている。上述した事柄から、大村湾の今後の海洋環境保全を考えると、湾内における流動特性と水質状況を把握することは、極めて重要と考えられる。

水質汚濁解析プロセスとしては、まず、流体力学過程によって大村湾固有の流動形態の現況を把握するために、湾内流れを代表する主要地点の潮流楕円について、数値解析結果と現地観測結果を比較検討して数値解の妥当性を検証し、湾内を支配している残差流を求

めた。次いで、先の流動解析結果に基づき、大村湾全域において生態系モデルを用いた富栄養化現象の解析を試みる。この生物化学的過程により算出する因子としては、主に COD であるが、溶存酸素 (DO) や富栄養化現象の誘発要因でもある、全窒素 (T-N) や全リン (T-P) についての解析や挙動についても検討する。

### 2. 流動解析モデルの概要

#### (1) 基礎方程式と計算対象領域

モデルは流動場及び密度場の2つのサブモデルにより構成されている。流動場に対する支配方程式としては、Navier-Stokes の方程式、連続の方程式であり、密度場に対しては熱・塩分収支を考慮した拡散方程式及び水温・塩分による海水密度の状態方程式である。

解析対象領域は、図-1に示すような大村湾全域とし、水平方向を900m×900mの格子間隔に、鉛直方向には5層（1層目：4m、2～4層目：5m、5層目：18.0m）に分割した。数値計算の時間ステップは10秒とし、水平及び鉛直方向の渦動粘性係数や渦動拡散係数は一定として与えた。

#### (2) 境界条件及び計算条件

流動解析は、成層期である夏場と混合期である冬場

平成12年4月21日受理

\* 社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

\*\* 日本工営 (株) (Nippon Koei Co.)

を対象に行った。計算に用いた初期条件，境界条件は以下に示す通りである。

- 1) 密度：初期条件として湾全域に与えた水温と塩分は，夏場及び冬場により大別される。夏場における水温は，上層から28.0, 28.0, 26.0, 25.0, 25.0℃，塩分は28.0, 28.0, 31.0, 31.0, 31.0‰として与えている。一方，冬場においては，混合期ということ を考慮し，水温14.0℃，塩分32.5‰を全層一定で与えている。また，外洋との境界条件として，夏場においては水温25.0℃，塩分33.0‰，一方，冬場においては水温11.0℃，塩分33.0‰を与えた。
- 2) 河川流量：川棚川，彼杵川，郡川，長与川など大村湾に流入する主要22河川を対象に，年間平均流量と夏場及び冬場における水温の平均値を，時間的に変化のないものとして与えている。また，河川の塩分濃度は0‰としている。
- 3) 潮汐：湾口部開境界にて，大村湾のM2分潮振幅である0.24mを与えた。

3. 生態系モデルの概念

(1) 基礎方程式及び物質循環

生物化学的過程においては，実海域での物理過程である流れによる物質の循環と，渦動拡散現象を考慮しなければならない。故に，物質の時間的変化及び空間分布は，物理過程と生物化学的過程を考慮した相互関係から成り立っている。本研究における生態系モデルは，図-2に示すような物質循環を考慮しており，中田<sup>1)</sup>に従い，植物プランクトン，動物プランクトン，懸濁態有機物 (POC)，溶存態有機物 (DOC)，全無機態窒素 (DIN)，リン酸塩 (DIP)，溶存酸素 (DO)，COD の8要素で構成されており，これらの変化は，生物化学的变化項を加えた次式に示す拡散方程式で表わされる。

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -u \frac{\partial B}{\partial x} - v \frac{\partial B}{\partial y} - w \frac{\partial B}{\partial z} + A_h \left( \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} + \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^* \quad (1)$$

ここに，B：生態系モデルの各構成要素の現存量であり，A<sub>h</sub>，A<sub>v</sub>：水平及び鉛直方向の渦動拡散係数は一定と仮定している。また，生物化学的变化項： $(\partial B / \partial t)^*$ に相応する各コンパートメントの物質循環を模式化すると以下ようになる。

- 1) 植物プランクトン： $dPHY/dt =$  (光合成による増殖) - (細胞外分泌) - (呼吸による消費) - (ZOOによる被食) - (枯死) - (沈降)
- 2) 動物プランクトン： $dZOO/dt =$  (摂食による増

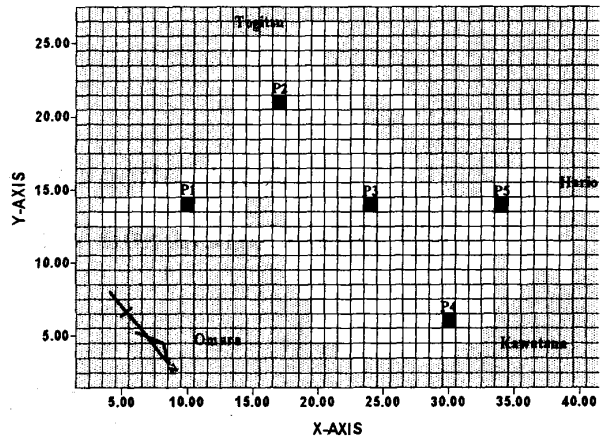


図-1 大村湾の解析領域

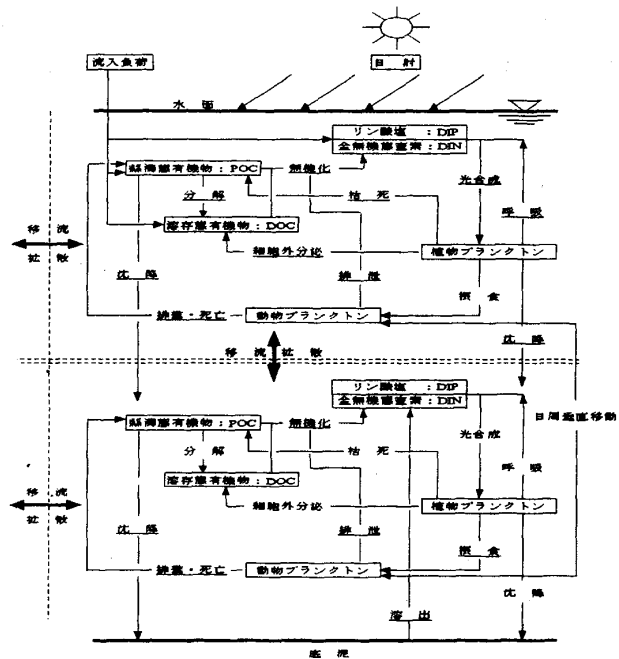


図-2 生態系モデルによる物質循環

加) - (排糞) - (排泄) - (自然死亡) ± (日周垂直移動)

- 3) 懸濁態有機物： $dPOC/dt =$  (PHYの枯死) + (ZOOの排糞・自然死亡) - (微生物による分解) - (分解余剰物生成) - (沈降)
- 4) 溶存態有機物： $dDOC/dt =$  (PHYの細胞外分泌) + (POCの分解余剰物生成) - (無機化)
- 5) リン酸塩： $dDIP/dt =$  - (PHYによる摂取・呼吸) + (ZOOの排泄) + (POCの無機化) + (DOCの無機化) + (海底からの溶出)
- 6) 全無機態窒素： $dDIN/dt =$  - (PHYによる摂取・呼吸) + (ZOOの排泄) + (POCの無機化) + (海底からの溶出)

- 7) 溶存酸素： $dDO/dt = (\text{光合成による供給}) - (\text{PHYの呼吸による消費}) - (\text{ZOOの呼吸による消費}) - (\text{POCの無機化に伴う消費}) - (\text{DOCの無機化に伴う消費}) - (\text{底泥による酸素消費}) - (\text{再曝気})$
- 8) 化学的酸素要求量： $dCOD/dt = (\text{PHYから求まるCODの時間変化}) + (\text{ZOOから求まるCODの時間変化}) + (\text{POCから求まるCODの時間変化}) + (\text{DOCから求まるCODの時間変化})$

解析対象領域における水平及び鉛直方向の格子間隔は、流動モデルと同様とし、数値計算の時間ステップは54秒とした。

#### (2) 境界条件及び計算条件

解析は成層期である夏場を対象として行い、生態系モデルに用いた初期条件及び境界条件は以下に示す通りである。

- 1) 水温・塩分：初期条件は、上述した流動モデルと同様に設定した。
- 2) 河川水質：大村湾に注ぎ込む主要22河川の流入負荷は、長崎県・社団法人底質浄化協会<sup>2)</sup>を基に平成3年度の数値を年平均値として、一定で与えた。
- 3) 生態系モデルの初期値：平成3年度～6年度における6月の平均値を、公共用水域水質測定結果に基づき設定した。
- 4) 生態系モデルのパラメータ：財団法人ナガサキ・テクノポリス財団<sup>3)</sup>に従い、表-1、2のように設定した。

#### 4. 解析結果及び考察

##### (1) 流動モデルによる解析結果の考察

ここでは、上述した流動モデルにより解析された大村湾の流動形態について検討する。解析データは、水面変動及び残差流、潮流楕円であり、図-1に示しているP1～P5の5地点を対象としている。ただし、解析データは成層期（夏場）を対象としたものである。

図-3は、P1における水面変動を示している。湾中央南東部である津水湾近郊に位置するP1のM2分潮振幅0.24mの潮位は良好に出ており、5周期目以降は定常状態となり安定している。

次に、図-4から図-7に、湾中央部であるP3と川棚港沖であるP4の表層及び底層における現地観測結果と数値解析結果の潮流楕円を示す。図に示す●印は、中村ら<sup>4)</sup>による現地観測結果であり、▼印は本研究による解析結果である。先ず、P3に着目すると、表層及び底層の計算結果は、観測値よりも若干流速が小さくなったが、流向は比較的良く再現できているも

表-1 生態系モデルのパラメータ

パラメータ	単位	設定値
最大可能成長速度	day <sup>-1</sup>	0.59 exp (0.0633 T)
呼吸速度	day <sup>-1</sup>	0.02 exp (0.0524 T)
リン酸塩摂取の半飽和値	μg-atm/l	0.02
無機態窒素摂取の半飽和値	μg-atm/l	1.0
沈降速度	m/day	0.15
枯死速度	day <sup>-1</sup>	0.02 exp (0.0639 T)
光合成の最適光強度	cal/cm <sup>2</sup> ·day	250
Chl-a 濃度に依らない光消散係数の成分	m <sup>-1</sup>	0.15
消散係数の Chl-a 依存性を示す比例定数	m <sup>-1</sup> (mgChl.m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	0.066
C/Chl-a 比	mg/mg	2.65
C/P 比	mg/mg	63.1
C/N 比	mg/mg	8.6
TOD/C 比	mg/mg	3.2
COD/C 比	mg/mg	1.4
最大捕食速度	day <sup>-1</sup>	0.18 exp (0.0693 T)
飼料制限パラメータ	(m <sup>3</sup> C/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	0.01
捕食の閾値	mgC/m <sup>3</sup>	0.0
消化効率	%	70.0
総成長効率	%	30.0
死亡速度	day <sup>-1</sup>	0.054 exp (0.0693 T)
C/P 比	mg/mg	45.8
C/N 比	mg/mg	5.41
TOD/C 比	mg/mg	3.51
COD/C 比	mg/mg	1.55

表-2 生態系モデルのパラメータ

パラメータ	単位	設定値
縣濁態有機物の無機化速度	day <sup>-1</sup>	0.01 exp (0.07 T)
縣濁態有機物の無機化に関する DO の半飽和値	mg/l	1.0
縣濁態有機物の無機化に関する分解余剰物生成の割合	%	25.0
縣濁態有機物の沈降速度	m/day	0.432
溶存態有機物の無機化速度	day <sup>-1</sup>	0.003 exp (0.0693 T)
溶存態有機物の無機化量に関する DO の半飽和値	mg/l	1.0
底泥		
・P 溶出速度	mg/m <sup>2</sup> ·day	1.7
・N 溶出速度	mg/m <sup>2</sup> ·day	26.8
・酸素消費速度	mgO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ·day	250.0 exp (0.0693 T)
縣濁態有機物中の		
・C/P 比	mg/mg	32.7
・C/N 比	mg/mg	6.9
・TOD/C	mg/mg	3.2
・COD/C	mg/mg	1.42
溶存態有機物中の		
・C/P 比	mg/mg	125.0
・C/N 比	mg/mg	10.0
・TOD/C	mg/mg	3.1
・COD/C	mg/mg	1.38
海表面最強日射量	cal/cm <sup>2</sup> ·day	930
日長	day	0.581
海表面再曝気係数	day <sup>-1</sup>	0.15

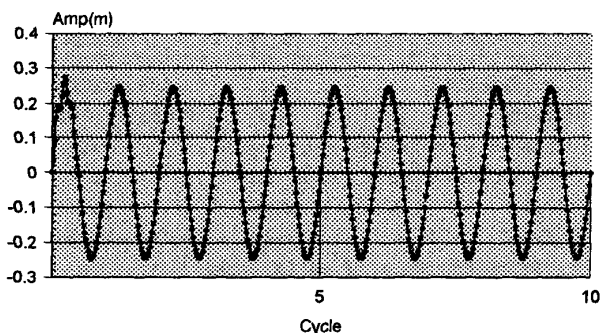


図-3 P1における水面変動

のと思われる。また、水平2成分（東西方向と南北方向）に分解して考察すると、表層においては、東西方向の流速が1.3cm/s程度であるのに対し、南北方向は4.2cm/s程度を示していることから、P3の表層近傍では南北方向の流れが卓越していることがわかる。一方の底層近傍における流速は、東西及び南北方向とも3.0cm/s程度の相似した流速成分が見られた。次に、P4に着目すると、P3と同様表層及び底層の計算結果は、観測値よりも若干弱い流速であったが、流向は良好に再現できているものと思われる。表層においては、東西及び南北方向とも2.0cm/s程度の相似した流速成分が見られた。しかし、底層においては、南北方向の流速が1.0cm/s程度であるのに対し、東西方向の流速は4.5cm/s程度を示していることから、P4の底層近傍では東西方向の流れが卓越していることがわかる。

以上の考察から、表層及び底層における流況特性は、それぞれの場所によって大きな相違はあるが、数値解と観測値は各地点毎ではほぼ相似していて数値解は概ね再現性の良いことが分かり、その妥当性が検証された。

また、図-8から図-11に、それぞれの流況特性が顕著に見られる第1層、第2層及び第3層、第4層における残差流の流速ベクトル図を示す。まず、湾口部に着目すると、各層において反時計回りの水平循環流の存在が確認できることから、湾口部における各層ごとの相違は殆ど見られないようである。次いで、湾中央部における流況特性について考察を行う。第1層、第2層である表層における流況特性としては、時津港沖近郊から川棚港沖へと向かう北向きの流れが湾中央部で大きな反時計回りの水平循環流を形成していることが確認できた。この流況は、第3層において、第1層及び第2層よりも弱い流れで形成されていることが認められるが、第4層においては確認できなかった。また、第1層及び第2層における津水湾や長崎空港付近の流況特性は、流出する傾向が見られたが、第4層

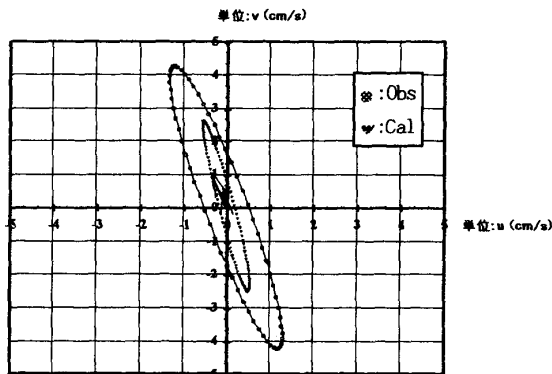


図-4 P3における表層の潮流楕円

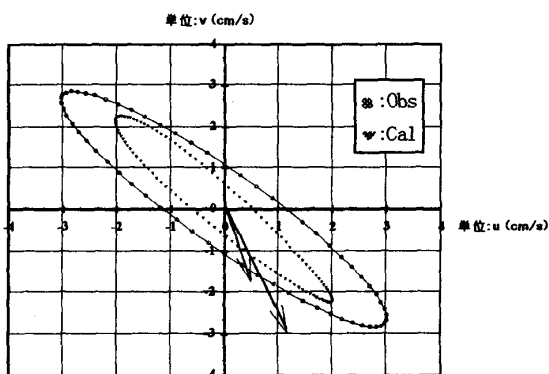


図-5 P3における底層の潮流楕円

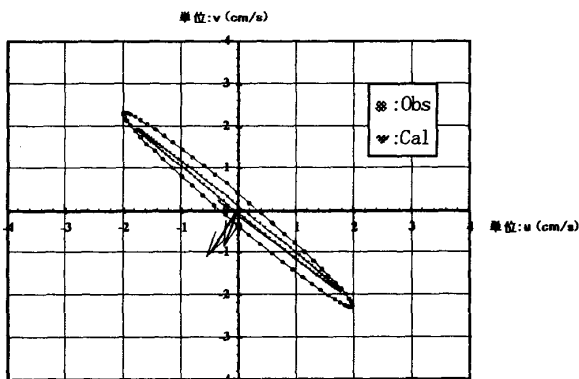


図-6 P4における表層の潮流楕円

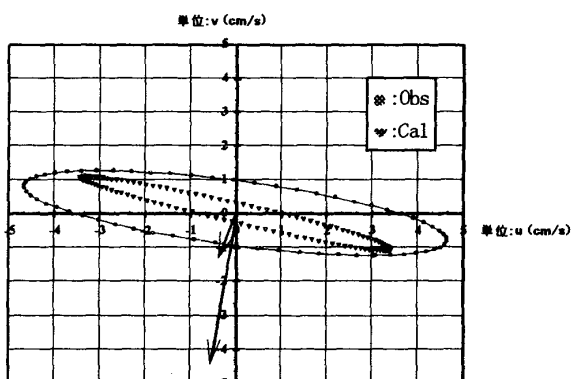


図-7 P4における底層の潮流楕円

においては流入する傾向にあった。従って、湾全域における流況特性として、底層から流入した水塊が沿岸湧昇し、表層から流出するという鉛直循環流の存在が確認できる。一方、図-10に示す第3層においては、水塊の流入や流出が余り顕著に見られないことから、流入及び流出する流れが複雑に入り混じる逆転層の流況であろうと推察される。

## (2) 生態系モデルによる解析結果の考察

生態系モデルでは、(1)で示した図-3を考慮し、定常状態での流動解析結果を用いて解析を行った。解析対象時期は既存資料の関係から夏場のみとし、平成3年度～6年度における6月の平均値を初期値として与え、30日間後である7月の解析を行うことにした。

生態系モデルにより解析された結果を、図-12から図-15に示し、考察を加えていく。ここでの図は、湾口部から湾奥部までのCOD、DO、T-N、T-Pの各濃度の空間分布を取っている。

図-12より、湾口部から湾奥部に向かうにつれてCOD濃度が全体的に大きくなっていることが確認できた。特に、表層ではその挙動が顕著に見られるが、底層においては濃度勾配が緩やかであり、殆ど変化は見られなかった。COD濃度も津水湾近傍で最大2.9mg/lと、やや高めの値であった。

図-13は溶存酸素の濃度分布を示しているが、底層における濃度が観測値では最小でも1.8～3.2mg/lであるのに対し、計算値では約4.6mg/lというかなり相違する結果になった。

図-14及び図-15に示すT-N及びT-Pによる濃度の空間分布の特徴としては、表層よりも底層において高い濃度を示している。このことより、全無機態窒素及び全リンを主体とした栄養塩濃度は、底層においてその挙動が顕著になる傾向が見られた。

次に、生態系モデルにより解析する領域の詳細を図-16に、解析結果を図-17から図-20に示して考察する。ここでの解析結果は、各領域におけるCOD、DO、T-N、T-Pの各濃度を示している。

図-17は、各エリアにおけるCOD濃度の計算結果と観測値の比較を示している。エリアAからEまでの湾全域において差は余り見られず、良好に再現できているものと思われる。表層に着目すると、エリアAからDは計算結果の方が観測値よりも0.05～0.40mg/l程度大きい値を取っているが、エリアEに関しては計算結果が観測値よりも小さい値を取っていた。このことから、本モデルによる喜々津川沖などの地形が複

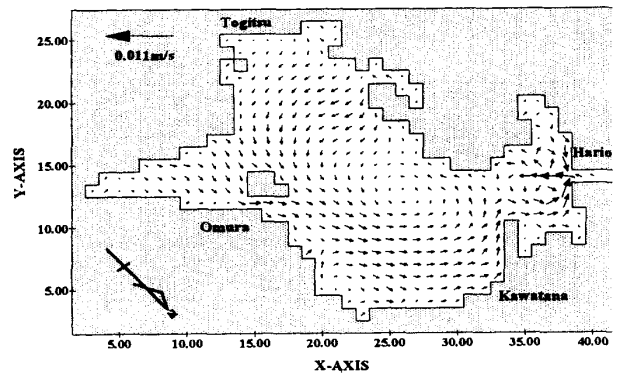


図-8 第1層における残差流

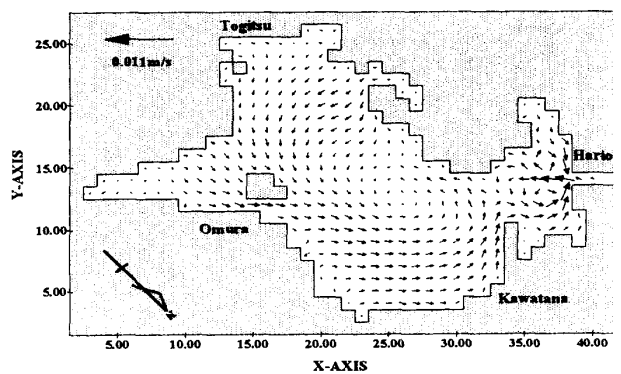


図-9 第2層における残差流

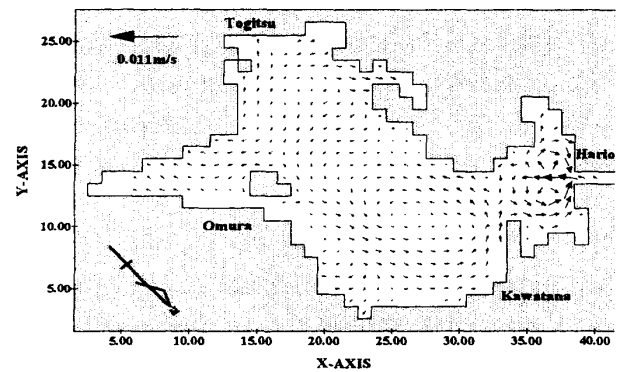


図-10 第3層における残差流

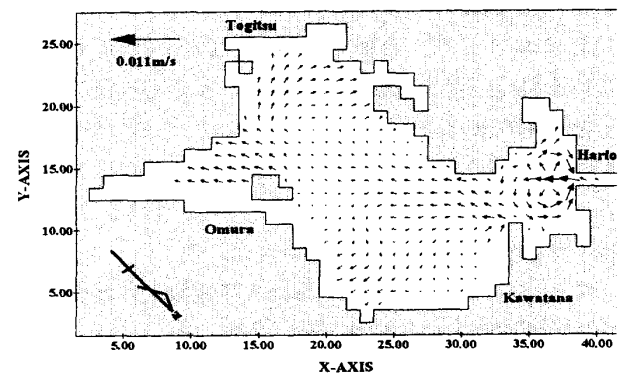


図-11 第4層における残差流

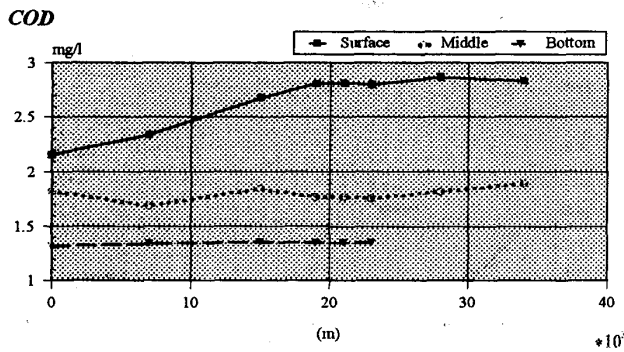


図-12 湾口からの COD 濃度分布

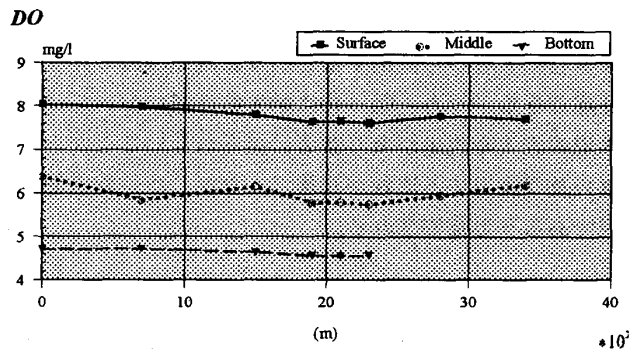


図-13 湾口からの DO 濃度分布

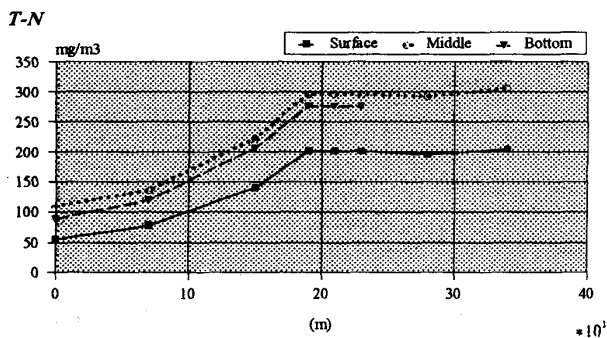


図-14 湾口からの T-N 濃度分布

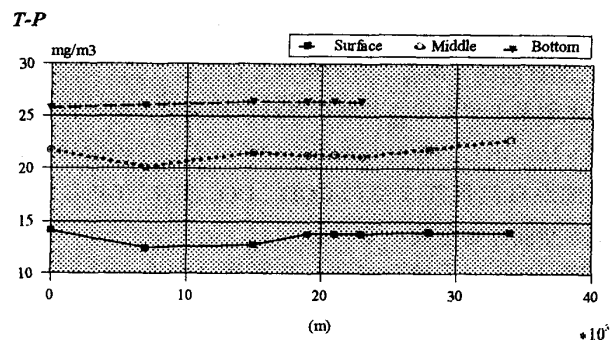


図-15 湾口からの T-P 濃度分布

雑で入り組んだ場所における表層の COD 濃度再現計算は、余り精度が良くないと考えられる。次に、底層に着目すると、エリア B の湾中央部やエリア C の形上湾近郊から時津港にかけての計算結果は、殆ど差異がなく、良好な値を示していると思われる。エリア D の堂崎沖に関しては、観測値よりも 0.50mg/l 程度低い値を示しているが、全体的な計算結果から考慮すると、特別な値ではないものと思われる。このエリア D に関しても言えることは、堂崎沖もエリア E と同様、地形的に複雑であり、再現計算は難しいものと考えられる。しかし、表層及び底層における本研究の計算結果は、少しの誤差はあるが、比較的観測値に近い値を取っていることが確認されている。また、これらの計算結果及び観測値から読み取れることは、エリア B 及び E においては、表層の COD 濃度が 3.0mg/l を超えているため、水質の悪化が懸念されている場所であると推測される。大村湾全域で考えると、平均的な値が表層で 3.0mg/l 前後、底層で 2.0mg/l 程度であることから、表層と底層では 1.0mg/l 程度の差があり、表層のほうが水質の悪化が顕著に見られる。

図-18には、各エリアにおける溶存酸素濃度の計算結果と観測値との比較を示す。表層においては、エリア A から E まで湾全域においてかなり良好な値が再現できていることが確認でき、湾平均値は 8.0mg/l 程

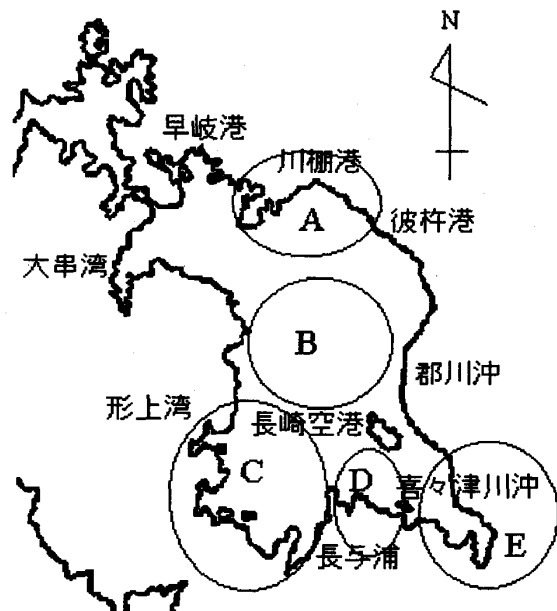


図-16 湾内における各エリアの詳細

度と高い値を示している。一方、底層に着目すると、エリア B, C, D とも観測値とは大きく異なる値を取っている。特にエリア C に関しては、2倍以上の差が生じており、貧酸素水塊形成の可能性が観測値から窺われる。大村湾において貧酸素水塊が形成される範囲は、エリア B の湾中央部からエリア C の形上湾に

かけてであり、溶存酸素濃度は2.0~4.0mg/l程度である。本モデルによるエリアB, C, Dにおける溶存酸素濃度は、平均値で4.57mg/l程度であり、貧酸素化状態の再現は見られなかった。以上の考察から本モデルによる再現計算は、表層においては良好であるものの、底層においては貧酸素水塊が形成される程度の値が算出されないことがわかった。ゆえに、底層における溶存酸素濃度の計算は、色々な諸条件を再度考慮し直す必要がある。

図-19には、各エリアにおける全窒素濃度の計算結果と観測値の比較を示す。表層に着目すると、エリアA及びDにおいて0.05mg/l程度計算結果が大きい値を取ってはいるものの、エリアB, C, Eに関しては良好な値であると思われる。また、エリアEの全窒素濃度の値は、他のエリアと比較すると2倍位大きい値を示している。エリアEにおいては流入してくる河川が多いため流入負荷が蓄積され易く、その負荷が地形的な要因から拡散し難いことが原因であると考えられる。一方、底層に着目してみると、エリアCのみにおいて観測値が大幅に計算結果より高い値を示している。このエリアCの形上湾及び時津港付近については、図-20からも全リン濃度が高い値を示していることなどから、窒素及びリンの流入負荷が大きいのか、もしくは地形的要因から蓄積されやすいのではないかと推測される。このエリアCについては、流況から考えても極めて流れが弱く、循環もしていないことなどを考慮すると、後者の方の影響が強いのではないと思われる。以上の考察より、全窒素濃度に関する表層及び底層における再現計算は、概ね計算値としては良好であると思われるが、エリアCの底層における再現計算は、本モデルでは難しいようである。

図-20には、各エリアにおける全リン濃度の計算結果と観測値との比較を示す。表層に着目すると、エリアA, D, Eに関しては、観測値と殆ど同じ値を取っており、良好に再現しているものと考えられる。しかし、エリアB及びCにおいては、最大で0.005mg/l程度の差が見られることから、湾中央部から湾中央南部にかけての再現計算は難しいものと考えられる。また、エリアA~Eを比較すると、エリアEにおける全リン濃度のみがエリアA~Dの2倍以上の値を示している。このエリアEにおいては、流入河川による流入負荷や地形的要因などから汚濁物質が蓄積されやすいため、全リン濃度の値が大きくなっているものと推察される。一方の底層における比較は、エリアB及びDに関しては、概ね良好に再現できていると思われる。しかし、エリアCの湾中央南部では観測値が0.005mg/l程度大

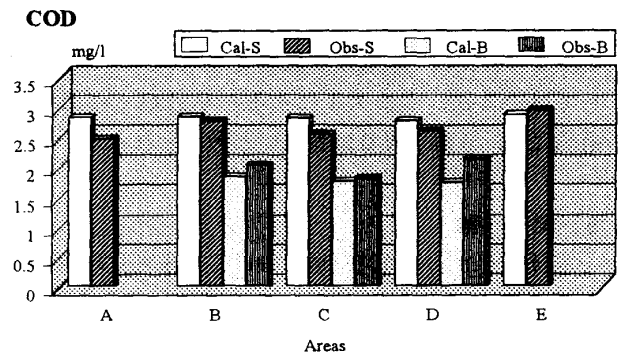


図-17 各エリアにおけるCOD濃度の比較

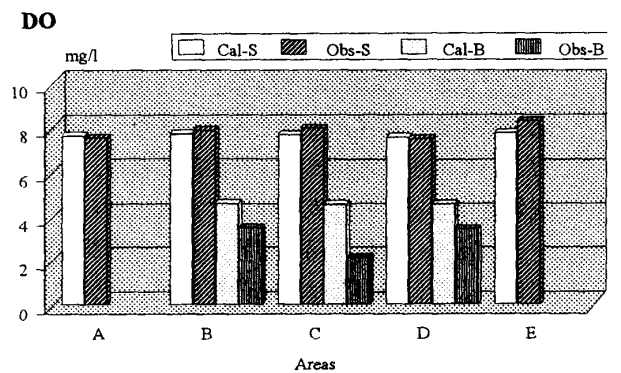


図-18 各エリアにおけるDO濃度の比較

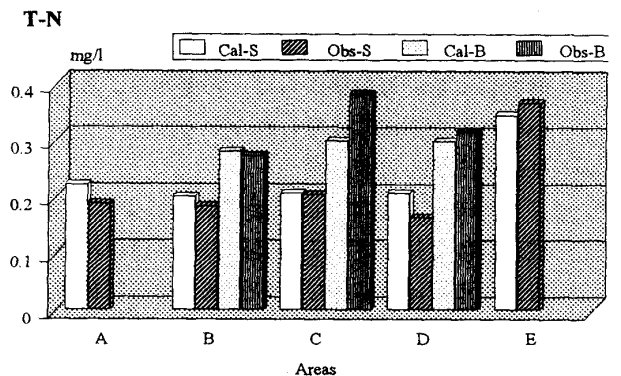


図-19 各エリアにおけるT-N濃度の比較

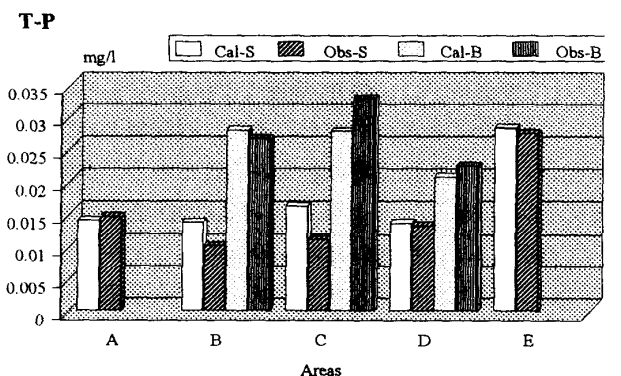


図-20 各エリアにおけるT-P濃度の比較

きい値を示しており、本モデルからは妥当な計算結果が算定出来なかった。以上の考察から、湾全域における全リン濃度は、表層及び底層とも概ね良好な値を示しているが、本モデルによるエリアCでの湾中央南部における再現計算は難しいと考えられる。

## 5. 結 論

本研究では、大村湾全域における富栄養化現象に伴う水質状況の把握を目的とした数値シミュレーション解析を行った。流動モデル及び水質モデルのそれぞれにより、得られた成果をまとめると以下ようになる。

### (1) 流動解析について

a) 大村湾全域における残差流の流況ベクトル図より、表層から底層までの各層において、湾口部の中心に位置する浅曽根を中心とした反時計回りの水平循環流の存在が確認できた。また、湾中央部においても水平循環流の存在が認められ、この流況特性は底層よりも表層の方に顕著に見られた。一方、宮浦・大崎半島を境界とした南東部の湾央では、表層においては流出の傾向が、底層においては流入の傾向がそれぞれ見られたことから、鉛直循環流による流況特性の存在が見出された。

b) 大村湾を支配している残差流は、成層期(夏場)及び混合期(冬場)において密度差によって生じる密度流の影響に依存している部分が極めて大きいことが、従来の研究より指摘されているが、本研究による計算結果からは、密度差による残差流への影響が明確には見られなかった。

### (2) 生態系モデルについて

a) 水質モデルでは、富栄養化現象によりCOD濃度が高いと推測される湾奥部の喜々津川沖や湾中央部から時津港にかけての海域を中心に再現計算を行った。その結果、湾奥部の喜々津川沖においては、COD濃度が表層で3.0mg/l程度であり、湾中央部から時津港沖までの海域においても表層で2.8~3.0mg/l程度の値を示していることから、大村湾の湾中央部から喜々津川沖や時津港沖にかけての海域では、COD濃度が3.0mg/l程度の高い値であることがわかった。また、観測値との比較からもかなり良く類似していることから、本研究による数値シミュレーションはCOD濃度の算出に関しては、精度の良いものであることがわかった。

b) 本研究では、大村湾全域における全窒素及び全リンに関しても計算を行った。計算結果から、全窒素及び全リンの濃度が表層よりも底層の方で濃度が高い傾向にあることから、湾全域における底

層近傍では、全窒素及び全リン濃度の挙動が顕著であることがわかった。また、湾中央部における底層近傍でのそれぞれの濃度は、全窒素が0.28mg/l程度であり、全リンが0.026mg/l程度の値を示していることから、本研究による計算結果は、観測値よりも若干小さい値を算出することがわかった。

## 参 考 文 献

- 1) 中田喜三郎(1993)：生態系モデル—定式化と未知のパラメータの推定法—。
- 2) 長崎県・社団法人底質浄化協会(1997)：平成8年度大村湾底質改善調査業務報告書。
- 3) 財団法人ナガサキ・テクノポリス財団、海洋技術振興室(1996)：海の環境予測手法開発事業報告書。
- 4) 中村武弘・富樫宏由・飯塚昭二・三厨晋也・石原 洋(1991)：大村湾の潮流に関する研究(2)—現地観測—, 長崎大学工学部研究報告, 第21巻, 第37号, pp.167~177。