

Numerical Simulation of Water Purification Process
in the Closed Water Area

小池 武
Takeshi Koike
エンジニアリング事業
本部 鋼構造研究所土
木建材・橋梁研究室長
(部長補)・工博



加古 登志夫
Toshio Kako
エンジニアリング事業
本部 環境エンジニア
リング部

要旨

本研究は、水質浄化対策あるいは水質保全計画の立案に必要な海域の流況予測および水質汚濁・浄化過程のシミュレーションを実行するために開発した解析システムの概要と解析事例を紹介するものである。本システムは、閉鎖性水域内の密度流予測に適したマルチレベル流動モデルを採用し、三次元数値解析モデルで表現される海域の流況および水質汚濁・浄化過程を潮汐、風向、河川流入条件の時間的変動に応じて逐次的に解析できるシステムである。とくに、本システムは浄化プラントを新設した場合の浄化能力向上の程度を評価できる解析機能を備えており、適用事例では東京湾に浄化モデルプラントを設置した場合の検討事例について論じている。

Synopsis:

A numerical simulation method is developed to analyse the surface wave flow and nutritious processes in the closed water areas which include a bay area, marina, channel and lagoon in order to make a plan for water purification and quality preservation. The applicability and efficiency of this system are shown in the numerical examples in the Tokyo Bay area. The present method adopts a multi-level ocean wave model to simulate a marine water flow, water pollution and nutritious processes which are erected by wind forces, tidal residual flows and water inlet flows from rivers. In the planning stage of new water treatment plants located around the bay area, this system can provide an analytical tool to estimate the efficiency of the water purification system.

1 まえがき

近年、マリーナやカナル（水路）、ラグーン（池）など、海水を利用した親水空間の形成を行う計画が増加しつつある。しかし、大都市沿岸の富栄養化の進んだ海水を水源として利用した場合など、植物プランクトンや藻類の異常発生による水質悪化が懸念される。

本報告は、水質汚濁が懸念される沿岸海域の水質環境保全技術について、当社の取り組みの一端を紹介するものである。

東京湾や大阪湾などわが国の代表的な内湾部には、人口が集中し活発な経済活動がくり広げられている。とくに1990年代初頭には、海浜地域の地域開発計画がウォーターフロント開発やマリリゾート開発の名を冠して多数立案され、海域の利用ということに一般の人々の関心が著しく高まることになった。しかし、それとともに海域の環境問題にも同時に厳しい関心が寄せられるようになった。

実際、大都市を後背地としてもつ内湾では、いずれも生活排水、工場排水の流入にともなう海水の富栄養化のため、赤潮の発生などによる漁業被害や海水浴の利用障害、悪臭の発生、海浜の汚染、底層の貧酸素化などの現象が顕著になりつつあり、生活環境への被害・影響が広範囲に生じている。

このような背景の下で、今後、内湾部に海浜地域開発計画を実施する場合には、内湾部の水質汚濁に対する浄化対策あるいは水質保全計画について詳細な技術的検討を行うことが必須の要件となりつつある。

海域の水質浄化に関する研究・技術開発は、大学、政府研究機関、民間研究所その他で行われており、その内容は海域の流況・水質調査、水理実験、流況予測シミュレーション、流況制御構造物の開発から浄化プラント開発・設計まで多岐にわたっている。この分野の問題に関心のある国内の団体が集まり、運輸省を中心に海域の水質浄化に関する研究会（シーブルー計画研究会）が組織され、1989年シーブルー計画の報告書¹⁾がまとめられた。そこでは、快適な海域環境の創造に向けてさまざまな浄化技術や海域開発手法について国内外の現状技術が紹介され、とくに、海浜開発にともなう流況変化や水質汚濁の予測手法として数値シミュレーション手法の有効性・適用性が例証されている。

本研究は、水質汚濁に対する浄化対策あるいは水質保全計画を立案するのに必要な海域の流況予測およびそれを基礎とした水質汚濁・浄化過程のシミュレーションを実行できる解析システムの構築を目的とするものである。

* 平成6年12月12日原稿受付

2 解析手法の概要

2.1 解析対象

本論文で取り扱う閉鎖性水域というのは、内湾あるいはエスチャリー(Estuary)と呼称されているものの総称であり、空間距離として1 km~100 kmの水域である。国内では東京湾、大阪湾、伊勢湾などがこれに該当する。これら閉鎖性水域での海水の運動(流動現象)は、「河川を通じて陸から流入する淡水の影響で海水が希釈される一方で、潮汐流や沿岸流によって外洋との間に適度な海水交換が続けられる」という特徴をもっている。

一般に閉鎖性水域では、潮汐や淡水の流入、海上風、海面を通じての熱交換あるいは外洋水の流入などさまざまな要因の相互作用によって、海水の運動が生じている。この流動現象を時間尺度によって分類すると、周期1時間前後のセイシュ(Seiche)から、半日~1日の潮汐流、1日~1週間の吹送流、そして1週間~1月以上の長周期におよぶ密度流といったさまざまな波が存在する。Fig. 1は、海洋流動現象の時間・空間スケールごとの特徴をまとめたものである。

上述の閉鎖性水域内の海水の運動や汚染物質の移動・拡散してゆく過程は、海水の密度変化が駆動力として作用することで生起する現象であり、密度流によって引き起こされる現象と言われている。したがって、閉鎖性水域内の海水の流況や汚染物質の輸送・拡散過程を予測するためには、密度流の流動過程を追跡できる解析システムが必要となる。

2.2 流況解析手法

本研究で採用した三次元数値解析モデルは、マルチレベル流動モデルと呼ばれる閉鎖性水域内の密度流予測に適した数値モデルである。

この数値モデルは、

- (1) 閉鎖性水域の流体運動を記述する運動方程式
- (2) 流量連続の式

- (3) 潮位の変化を記述する式
- (4) 塩素量の拡散方程式
- (5) 熱、水温の拡散方程式
- (6) 海水の密度と塩素量、水温との関係を記述する状態方程式から構成されている。

モデルを定式化するための座標系は、Fig. 2に示すように、平面水面上にx-y軸をとり、鉛直上向きにz軸をとる。モデルの基礎方程式を導出するための前提条件として、以下の項目を仮定する。

- (1) 海域の流れを駆動する要因は、潮汐、密度傾度、沿岸からの河川水の流入および海上を吹く風の応力である。
- (2) 流体は回転地球上の粘性非圧縮性流体として扱う。
- (3) 地球の回転効果を表すコリオリのパラメータは生産領域全体で一定とする。
- (4) 鉛直方向には静力学的平衡を仮定し、運動を無視する。すなわち、重力の加速度と圧力傾度が静的に釣り合っているとみなす。
- (5) 海面における熱フラックスは、吸収日射(短波放射)量、正味の長波放射量、海面での顕熱輸送量(乱流による熱伝達量)

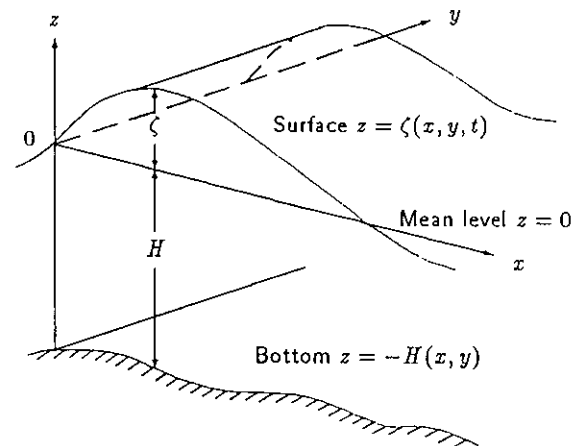


Fig. 2 Coordinates of the multi-levelled ocean wave model

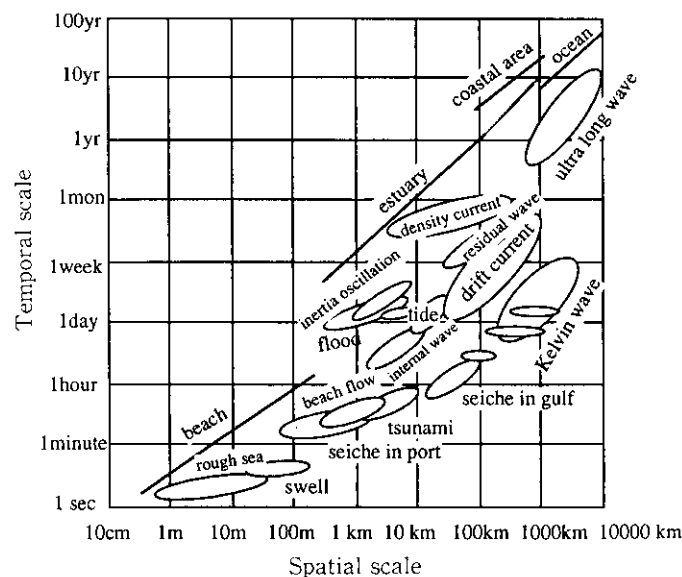


Fig. 1 Temporal and spatial scales of ocean waves

および潜熱輸送量（水の相変化にともなう熱の出入り）の収支として定式化する。

(6) 密度(ρ)と水温(T)および塩素量(CI)の関係式(状態方程式)として, Knudsen の式を用いる。

$$\rho = \rho(CI, T) \\ = \frac{\sigma_t}{1000} + 1 \dots \dots \dots (1)$$

ここで,

$$\sigma_t = \Sigma_t + (\sigma_0 + 0.1324) \{1 - A_t + B_t (\sigma_0 - 0.1324)\}$$

$$\sigma_0 = -0.069 + 1.4708 CI - 0.001570 d^2 + 0.0000398 d^3$$

$$\Sigma_t = -\frac{(T - 3.98)^2}{503.570} \times \frac{T + 283.0}{T + 67.26}$$

$$A_t = T (4.7869 - 0.098185 T + 0.0010843 T^2) \times 10^{-3}$$

$$B_t = T (18.030 - 0.8164 T + 0.01667 T^2) \times 10^{-6}$$

(7) 鉛直方向に層区分を行い, 各層内で平均化された諸状態量(速度, 温度, 塩素量など)を予測計算する。

以上の前提条件を用いると, マルチレベル流動モデルの7個の基礎式は, xy 方向の運動方程式, 連続の式, 自由表面(潮位)の式, 温度の拡散方程式, 塩素量の拡散方程式および Knudsen の状態方程式として定式化できる。

2.3 汚濁解析手法

閉鎖性水域における水質汚濁を予測するには, 海洋生態系内に存在する炭素(C), 窒素(N), リン(P)の物質循環過程を追跡する必要がある。Fig. 3 は, 生態系内の窒素とリン循環の模式図を表している。

水質汚濁は, 沿岸海洋生態系内の物質循環により, 生態系内が富栄養化することによって発生する。このような生態系内の汚濁過程を追跡する数値解析モデルは, 一般に富栄養化予測モデルと呼ばれている。

水質汚濁解析の数値モデルを構成するための低次生態系モデル²⁾を採用し, 沿岸海洋生態系の富栄養化を追跡する構成要素(コンパ

Table 1 Compartments of nutrition process model

Classification	Compartments	Symbol	Unit
Organics	Phytoplankton	P	mgC/m ³
	Zooplankton	Z	mgC/m ³
	Particle organic carbon (detritus)	POC	mgC/m ³
	Dissolved organic carbon	DOC	mgC/m ³
Inorganics	Dissolved inorganic phosphorus	DIP	μg-atm/l
	Dissolved inorganic nitrogen	DIN	μg-atm/l
Oxygen	Dissolved oxygen	DO	mg/l
Water quality	Chemical oxygen demand	COD	mg/l

ートメント)として Table 1 に示す変数を設定する。

任意地点 (x, y, z) におけるそれぞれの構成要素の現存量 B の時間変化を記述する関係式は(2)式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} = & [\text{潮汐流によって運ばれる効果を示す項(移流)}] \\ & + [\text{乱流拡散(混合)を示す項(拡散)}] \\ & + [\text{生物学的な諸過程を含む項(生物・化学的变化項)}] \\ = & -u \frac{\partial B}{\partial x} - v \frac{\partial B}{\partial y} - w \frac{\partial B}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial B}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial B}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial B}{\partial t} \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

すなわち, 各構成要素現存量の刻々の変化は, 生態系内の循環過程における炭素の生成量や消失量を算定し, 換算係数を乗じて各構成

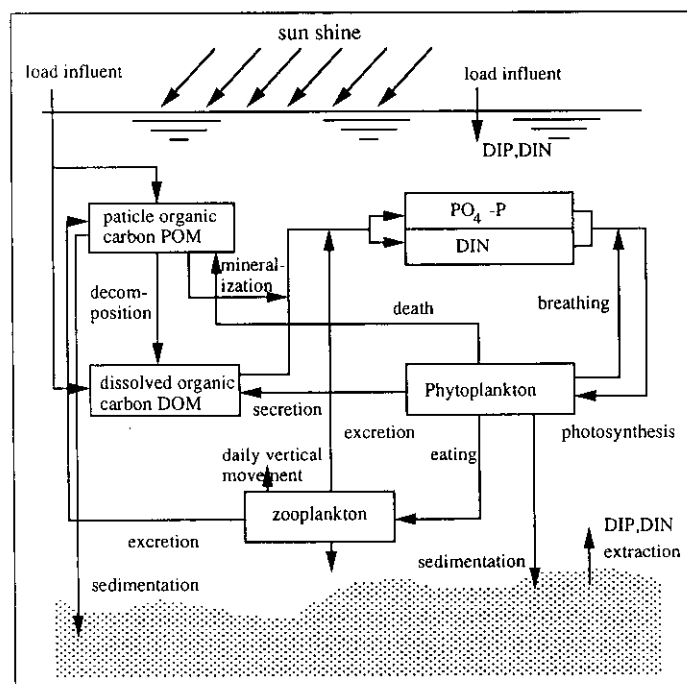


Fig. 3 Circulation process of nitrogen and phosphorus in the ecological system

要素の変化量を逐次予測することにより求めることができる。その際、各構成要素の速度成分 (u , v , w) は、流況解析の計算結果として得られる密度流に関する刻々の速度データを利用して算定することになる。また、生物・化学的变化項については、各構成要素ごとに具体的な物質循環の定式化を行った上で、同様の解析を行う必要がある。本研究におけるこれら物質循環の定式化は、その一つ一つが実験や観測事実から導かれた経験則にしたがったものであり、既往の生態学研究による知見を統合したものとなっている。

2.4 プラント組込型浄化解析手法

前節の汚濁解析手法を用いると、ある閉鎖性水域が与えられたとき、その生態系内の生産活動に起因する COD 濃度増加 (内部生産) 分の分散状況を把握することができる。一方、現状の水質汚濁状況を改善するためには、水質浄化プラントの設置とそれによる効果を定量的に評価できる浄化予測手法が必要となる。すなわち、取水地点、取水量、汚濁物質除去率 (浄化処理レベル)、放流地点、放流量などを設定条件として、浄化プラントを設置し浄化処理を行った場合の水質汚濁状況の変化過程を追跡できるシミュレーションシステムを構築する必要がある。

本研究では、上記の目的のため、前節の汚濁解析手法を基礎に、以下の機能を付加した浄化予測システム (プラント組込型浄化解析手法) を開発した。

(1) 浄化プラントの機能設定 (モデル化)

- (a) 浄化プラント数、取水口数、放流口数を設定できること。
- (b) 取水口、放流口の水量を設定できること。
- (c) 各取水口の水がどの浄化プラントで処理されるか指定できること。
- (d) 各浄化プラントの処理水がどの放流口から放流されるか指定できること。
- (e) 各浄化プラントごとに水処理レベルを設定できること。

(2) 水処理能力の機能設定 (モデル化)

- (a) 処理対象水の各成分 (植物プランクトン、POC、COD など) の除去率を設定できること。
- (b) 処理限界値を設定できること。
- (c) 各成分の濃度に対応する処理効率 (除去率) を関数として設定できること。

(3) その他

- (a) 取水量や河川流量、窒素やリンの負荷量の時間変化を入力できること。
- (b) 処理時間を設定できること。
- (c) 取水、放流による流況の変化を考慮できること。

3 適用事例

3.1 水質浄化シミュレーションの作業フロー

最適な水質浄化システムを構築するためには、閉鎖性水域を囲む地域特性や、求められる水質条件などを把握した上で、現地調査、浄化予測シミュレーション、そしてモデルプラントでの実証実験などを基礎に、最適な水質浄化計画を立案することになる。その全体的な作業フローを Fig. 4 に示す。

本論文で紹介している水質浄化シミュレーションシステムは、図中の浄化水域の特徴を把握するための中核的技術であり、浄化計画の定量的な評価を行う上で主要な役割を發揮するものである。一方、浄化すべき目標水質は水の利用形態に応じて異なるが、基本的

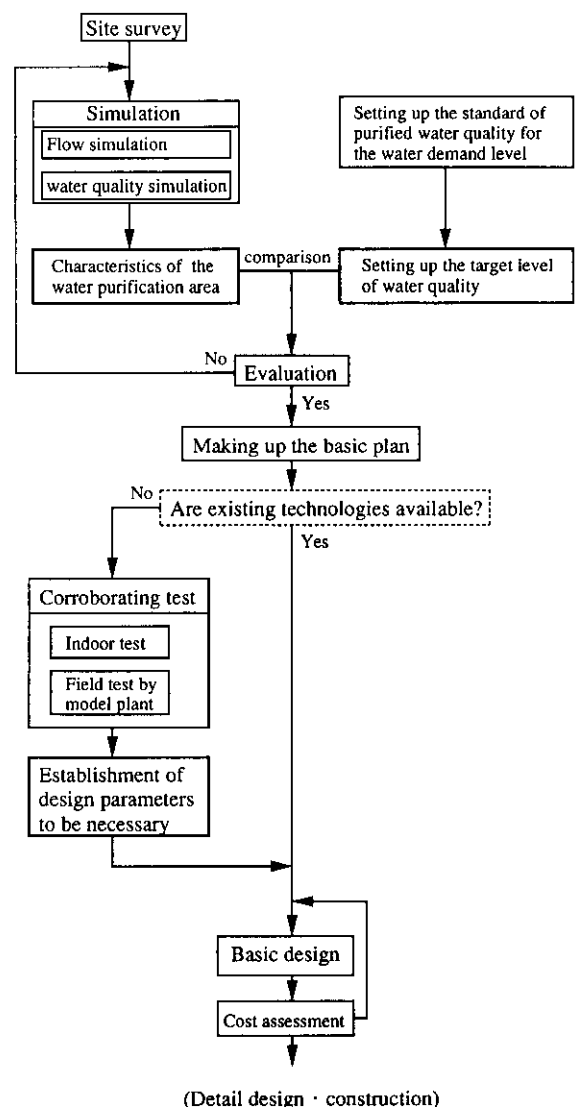


Fig. 4 Flow chart of water purification planning

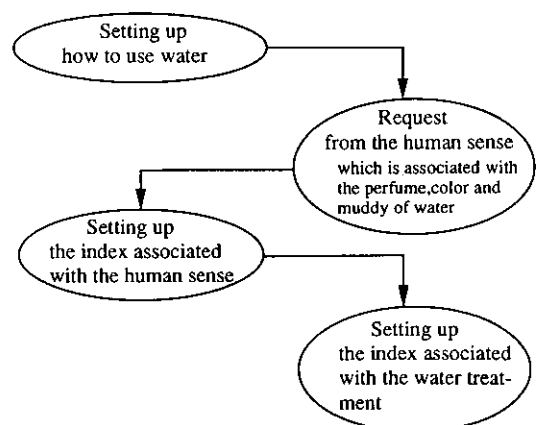


Fig. 5 Procedure to set up the water purification levels

には以下の手順 (Fig. 5) で水処理的指標を設定することになる。

以下には一例として、東京湾の流況および水質浄化に関するシミュレーション結果を示す。

3.2 東京湾の流況シミュレーション

計算対象領域は、東京湾の城ヶ島と岩井袋両地から湾奥までとする。潮汐条件は日本沿岸潮汐調和定数表³⁾を参考に Table 2 とし、河川流量は Table 3 の河川データを利用した。解析条件については、解析メッシュ寸法として Table 4 の値を用い、風による吹送流は考慮せず、淡水流入による移流と潮汐による流況を解析対象とした。

流況シミュレーション結果として、Fig. 6 および 7 のように湾内潮位と流速分布が得られた。Fig. 6 は満潮時の潮位図である。上げ潮時に湾口から湾奥に向かって、潮位は次第に高くなり、逆に下げ潮時に湾奥で最低であることがわかる。観測値と計算結果は、Table 5 に示すようによい対応を示している。

Fig. 7 は、上げ潮時の流速ベクトルである。上げ潮時に湾奥へ流入し、下げ潮時に湾口へ流出する。流速ベクトルは湾口部が大きく湾奥部で小さい。また、下層より上層が大きく第一海堡、第二海堡、第三海堡付近で流速が最も早い (0.46~0.77 m/s) と算定されるが、これは潮流観測結果 (0.4~1.1 m/s) とよく一致している。

Table 2 Boundary condition of tidal wave level

Location	Latitude	Longitude	Amplitude (cm)	Phase (degree)
Jouga-shima	35° 8' N	139° 37' E	38.0	146.0
Iwai-fukuro	35° 6' N	139° 50' E	35.0	148.5

Table 3 Rivers surrounding Tokyo Bay area

Name of river	Flow (m ³ /day)
Edo River	6.022×10^6
Sumida River	4.087×10^6
Arakawa River	2.954×10^6
Naka River	1.986×10^6
Tama River	1.782×10^6
Shinagawa area	1.841×10^6
Oomori area	1.010×10^6

Table 4 Numerical modeling data

Item	Value
Mesh of horizontal components	72 (length) by 46 (width)
Mesh of vertical components	1st layer : surface to -2 m 2nd layer : -2 m to -8 m 3rd layer : -8 m to sea bed
Mesh width	1 km
Time step	$\Delta T = 10 \text{ sec}$

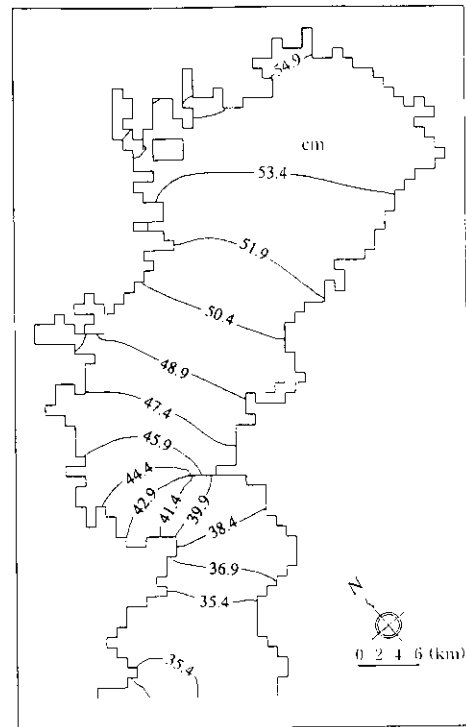


Fig. 6 Spatial profile of surface displacements

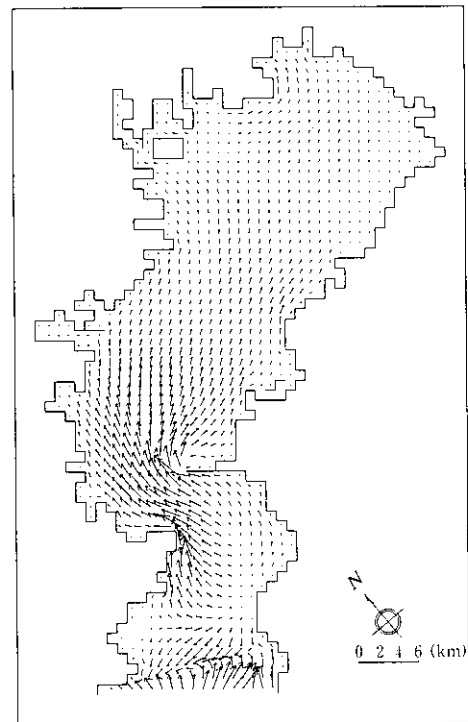


Fig. 7 Spatial distributions of flow velocities

Table 5 Comparison of flow velocity between the observed data and numerical results (cm)

Division	Daiichi-kaiho	Chiba touhyou	Tsukiji	Shinkou	Yokosuka
Calculated	45.7	52.2	52.2	48.0	43.7
Observed	45.0	50.9	50.1	46.7	41.2

3.3 東京湾水質浄化シミュレーション

東京湾の周辺に浄化プラントを設置した場合を想定して、東京湾に対する水質浄化効果を検討した。

Fig. 8 は、浄化プラントを設置しない現状での東京湾に対する汚濁解析結果の COD 濃度分布を示している。同図は、計算開始想定日より 5 日目の状況であり、湾口部で COD 濃度が 2 mg/l、湾奥部で 8 mg/l となり湾口部から湾奥部に行くほど汚染度合いが高く

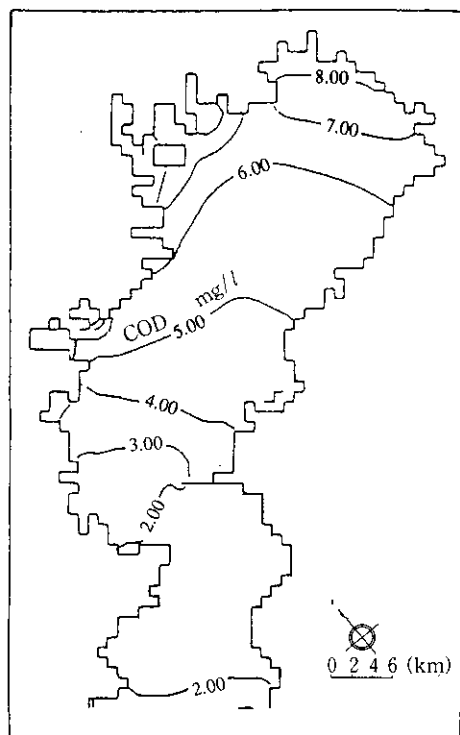


Fig. 8 Spatial profile of over-nourishment

なっている。これは、湾奥部ほど海水交換率が悪く、富栄養化が発生していることをうかがわせるものである。

水質浄化を進めるには、湾口部の比較的清浄な海水を湾奥部へ輸送し、反対に湾奥部の汚染度合いの高い海水を水質浄化して後、湾口部へ排水する形で湾奥部の海水交換率を高める戦略が必要となる。

まず、水質浄化処理をせず、海水交換だけを行った場合について、水質浄化度合いを予測する。Fig. 9 (a) は、取水口を湾奥部に設置し、排水口を湾口部に設置 (4箇所) した場合を示している。一方、Fig. 9 (b) は、その反対に取水口を湾口部に、排水口を湾奥部に設置した場合である。両図より、排水口を湾奥部に設置した場合には水質浄化効果が比較的劣っており、逆に汚濁した海水を湾奥部で取水し湾口部より湾外に排出するほうが効果的であることを示している。

つぎに、取水した海水を水処理し COD を指定量だけ除去した場合の水質浄化結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 (a) は COD 濃度 50% 除去の場合であり、(b) は COD 濃度 90% 除去の場合である。両図中の斜線部は、5 日経過後の COD 濃度 6 mg/l 以上の部分を示している。また、Fig. 10 (c) は、(b) に対してさらに 5 日経過した 10 日目の結果であり、海域の清浄度が向上していることを表している。

4 適用範囲

本研究で開発したシステムは、東京湾などの広領域閉鎖性水域への適用以外に、次の分野への適用が考えられる。

- (1) 工場排水の海底放流の影響評価
- (2) 下水処理水の放流時の影響評価
- (3) 埋立地造成、海洋構造物・人工島建設、沿岸域浚渫時の影響評価
- (4) マリーナ、ラグーンなどの水利・水質状況評価
- (5) 底層の浚渫や水生植物による水質改善予測

将来的には、水質指標を用いた環境評価のみならず、生物学的指標

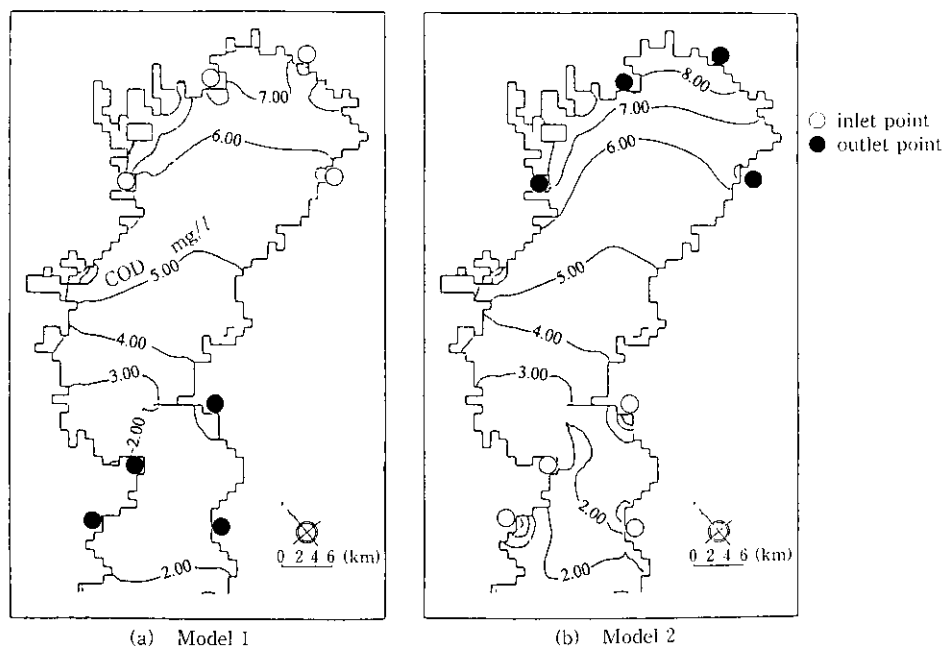


Fig. 9 Inlet and outlet locations for the water treatment plants (a volume of the daily water treatment per single plant is $1 \times 10^7 \text{ m}^3$)

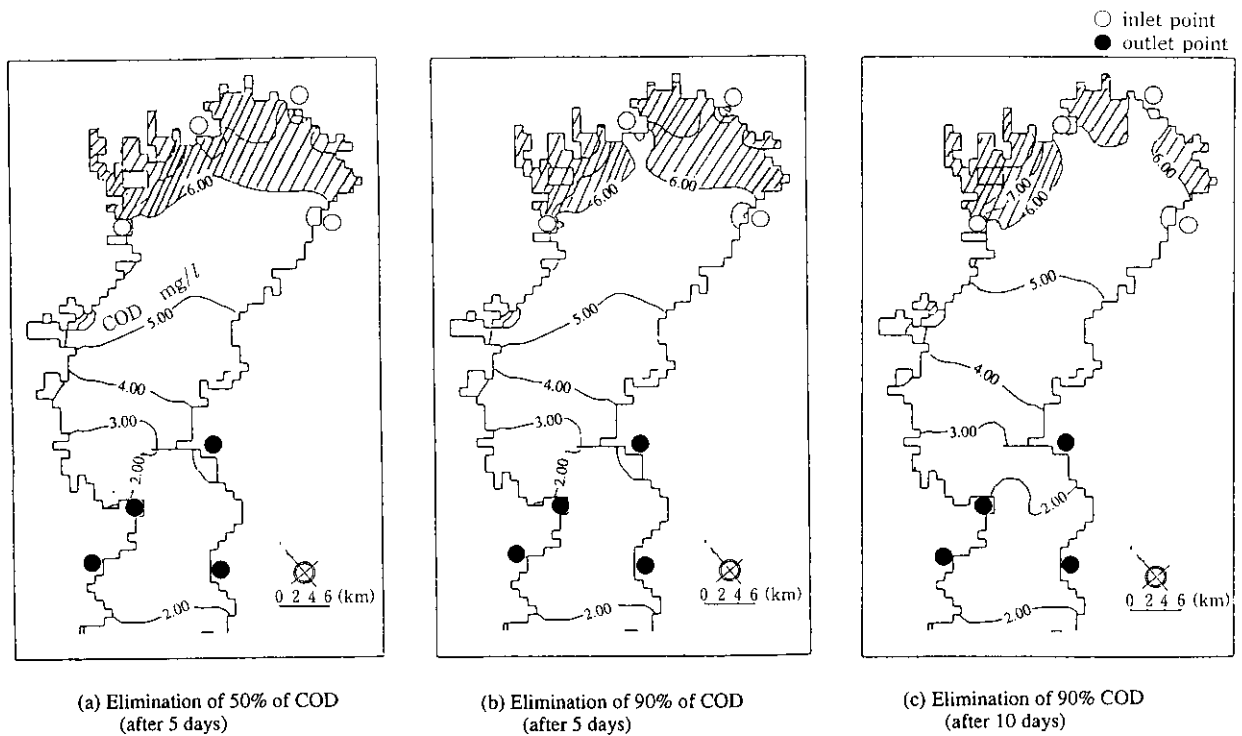


Fig. 10 Spatial profile of water purification

(プランクトン、底生生物、底魚、浮魚など)を用いた環境評価手法や底質条件の定式化などを考慮することによって、海洋資源や漁況の変動予測、生物生産量の管理、環境収容力などを含めた包括的な環境アセスメントが行えるものと考えられる。

5 結 論

本研究では、閉鎖性水域の流況解析システムおよび汚濁・浄化解析システムの構築を行った。開発したシステムは東京湾、大阪湾、伊勢湾などわが国の代表的な広域閉鎖性水域およびそれらの湾内で開発を予定する港湾やマリーナなど狭域閉鎖性水域の流況・汚濁・

浄化過程を解析できる機能を有するものである。以下に得られた成果を列挙する。

- (1) 開発した流況解析システムは、東京湾の潮位および流速分布に関して観測値と計算値でよい対応を示し、同システムの有効性が確認できた。
- (2) 水質汚濁予測と浄化プラントの機能が検討できるプラント組込型水質浄化予測システムを開発した。東京湾を対象としてモデルプラントを仮定し、浄化方式とその浄化効果について数値的検討を行った結果、浄化プラント最適配置のための取水口・排水口の設置方針について定性的な情報を得ることができた。

参 考 文 献

- 1) シーブルー・テクノロジー：シーブルー計画，(1989)
- 2) 柳 哲雄：「沿岸海洋学」，(1989)，[恒星社厚生閣]
- 3) 海上保安庁水路部：「日本沿岸潮汐調査定数表」，(1992)，133-137，[(財)日本水路協会]