

# 密度分布を考慮した舞鶴湾の 流れ場と水環境に関する数値解析

三輪 浩<sup>1</sup>・池野英利<sup>2</sup>

要旨：典型的な閉鎖性水域である舞鶴湾は、その複雑な形状のため外海との海水交換が十分でなく、水質の悪化が懸念されている。とくに、COD、窒素およびリンは環境基準を恒常的に達成することが必ずしも容易ではなくなっている。したがって、水質改善に関する効果的な対策を検討することは緊急かつ重要な課題であるといえる。このためには、水域における水質状態の把握が必要であり、併せて流れ場の特性と富栄養化物質の反応および循環過程を明らかにすることが重要である。そこで本研究では、三次元の数値解析を通して舞鶴湾における潮流と水質の特性について検討する。解析は成層状態が顕著であると考えられる夏期を対象とし、水温、塩分および富栄養化物質等の分布状況を解析するとともに、実測値と比較して解析結果の妥当性を検証する。

キーワード：水質、潮流、残差流、物質循環、窒素・リン、数値解析、舞鶴湾

## 1. はじめに

沿岸水域における水質の悪化は、我々の生活だけでなく自然環境にとっても深刻な問題となっている。これは人口の密集や化学工業の進展に伴って窒素やリン等の富栄養化物質が水域に流入することや水質の自然浄化機能が不十分であることに起因している。とくに、海水の流れが弱く、外海との交換が活発に行われないような閉鎖性水域では汚濁物質が貯留されやすく、自然浄化による水質の改善が期待できない場合が多い。したがって、何らかの人為的な方策を講ずることによって水質改善を図る必要がある。このためにはまず、水質に関連する水域の現状を分析し、その特性を明確にする必要がある。すなわち、閉鎖性水域における流れ場の特性と富栄養化物質の循環過程を明らかにすることが重要である。これまでも多くの閉鎖性水域において、流れや水質の調査が実施され、場の現状を示すデータが蓄積されている。しかしながら、三次元的に広大な領域を有する水域では、流れや富栄養化物質の分布特性や時間的な変化特性などの把握を行おうとしても、観測データのみでは不十分であり、また、適切な将来予測などは極めて困難である。このため、対象とする水域の流れや物質の挙動に関する数値シミュレーションによる解析が有効な手段となる。

京都府北部に位置する舞鶴湾は、典型的な閉鎖性水域であり、狭い湾口と二つに分かれた深い湾奥を有することから、海水交換が十分でなく、水質の悪化が問題となっている。Ikenoら<sup>1)</sup>は数値シミュレーションによって舞鶴湾の流れ場と水質の特性を検討した。しかし、彼らは海水密度を一定としたバロト

ロピックモデルを採用したため、密度成層が形成される場合の解析はできなかった。海水密度は主として水温と塩分によって規定されるため、成層状態を対象とするためにはこれらの時空間分布を計算する必要がある。そこで、本研究では海水密度の分布を考慮できるバロクリニックモデルを採用し、夏期における舞鶴湾の流れ場と物質循環の解析を行うとともに、実測結果と比較する。なお、潮流の計算は実潮位変動による流れを再現することとし、これによる流れと物質循環の特性を検討する。また、本研究では物質としてCOD、DO、窒素およびリンを対象とする。

## 2. 舞鶴湾の概要

舞鶴湾はFig.1に示すように、京都府北部の若狭湾西部に位置し、湾北部、湾西部および湾東部からなる典型的な閉鎖性水域である。流域面積は178km<sup>2</sup>、総面積は23.4km<sup>2</sup>（湾北部：4.2km<sup>2</sup>、湾西部：8.3km<sup>2</sup>、湾東部：10.9km<sup>2</sup>）、平均水深は湾北部が約27m、湾西部と湾東部はいずれも約10mである。平均潮位は+0.194m、最近5年間の朔望平均満潮面は+0.42m、朔望平均干潮面は-0.072mである。したがって、潮差は約50cmである。波高は小さいため観測されていないが、舞鶴湾特有の副振動が観測されている。これは、周期が86.1分の自由振動と、湾外のある種の振動が湾口に作用することによって湾内に生じさせた協同振動であり、この副振動による振幅は約48cmと報告されている<sup>2),3)</sup>。また、潮流流速は海面付近で5~20cm/secである。

舞鶴湾は狭い湾口と深い湾奥を有し、湾中央部にある戸島によって流れが阻害され易く、湾西部や湾東部と外海との海水交換は活発ではない。人口や商

1 舞鶴工業高等専門学校建設システム工学科 助教授  
2 兵庫県立大学環境人間学部環境人間学科 教授



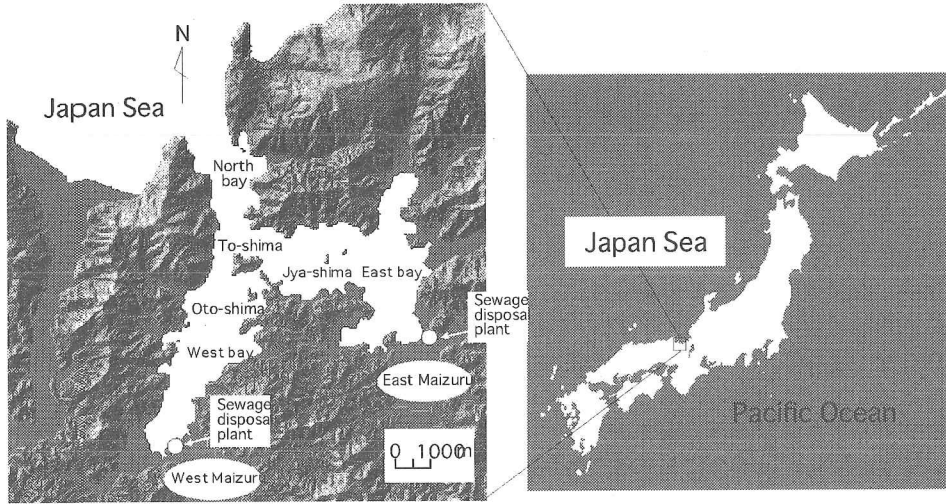


Fig.1 Location and map of Maizuru Bay

業および工業地は西地区および東地区に集中しており、各種排水はこれらの地区にある浄化センターを通じて湾内に排出されている。また、両湾奥部の水質の悪化傾向も報告されている<sup>4)</sup>。

### 3. 支配方程式と物質循環モデル

#### 3.1 流れ場の支配方程式

潮流などの長周期の流れは空間スケールがかなり大きく、この現象は比較的緩慢であると見なすことができる。したがって、鉛直方向の速度成分に関する項は重力加速度と圧力項に対して十分に小さく、鉛直方向の圧力は静水圧分布によって近似することができる。また、座標軸は基準面（後述する水面変動量 $\xi$ が零である水平面）の東向きを  $x$  軸、北向きを  $y$  軸、鉛直上向きを  $z$  軸とする。このとき、運動方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f v - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_{hx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + A_{hy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -f u - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_{hx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + A_{hy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

また、連続式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

である。ここに、 $u, v, w$  はそれぞれ  $x, y, z$  軸方

向の速度成分、 $f$  はコリオリ係数 ( $=2\omega \sin\varphi$ ,  $\omega$ : 地球の自転の角速度,  $\varphi$ : 緯度),  $p$  は圧力,  $\rho_0$  は基準密度 ( $=1,000\text{kg/m}^3$ ),  $\rho$  は海水密度,  $A_{hx}, A_{hy}$  はそれぞれ  $x, y$  方向の水平混合に関する渦動粘性係数,  $A_v$  は  $z$  方向の鉛直混合に関する渦動粘性係数,  $g$  は重力加速度である。

さて、基準面から水面までの高さ（基準面からの水位）を  $\xi$  とし、 $\rho = \rho_0 - \Delta\rho$  ( $\Delta\rho$  は密度偏差) とおけば、式 (3) より圧力は次式で表される。

$$p = \rho_0 g z + \rho_0 g \xi - \int_{-z}^{\xi} \Delta\rho g dz \quad (5)$$

式 (5) の右辺第 1 項と第 2 項の和は基準密度  $\rho_0$  による圧力であり任意の水深で一定値をとる。また、右辺第 3 項は密度偏差による圧力の減少分を表す。前者はバロトロピックな流れを生起させ、後者はバロクリニックな流れを生起させる。なお、右辺第 1 項は静止状態 ( $\xi=0$ ) のときの基準密度による圧力で、同一の  $z$  に対して常に一定値をとり、式 (1) および式 (2) 中の  $\partial p/\partial x, \partial p/\partial y$  には影響を及ぼさない。そこで、以下の解析では圧力を改めて次式で表す<sup>5)</sup>。

$$p = \rho_0 g \xi - \int_{-z}^{\xi} \rho g dz \quad (6)$$

ただし、流れ場の解析において任意位置の圧力の大きさを算定する場合は、式 (5) に基づいて求める必要がある。

海水の密度は主として水温と塩分によって決まり、それらはそれぞれ次の拡散方程式で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = K_h \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_h \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_z \quad (7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = K_h \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + K_h \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + K_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (8)$$

ここに、 $T$ は水温(°C)、 $K_h$ は水平方向の拡散係数、 $K_v$ は鉛直方向の拡散係数、 $q_z$ は日射による水温生成項、 $S$ は塩分(‰)である。海水の密度は次式で求められる<sup>6)</sup>。

$$\rho - 1000 = 28.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 + (0.802 - 0.002T)(S - 35) \quad (9)$$

ここに、密度の単位は $\text{kg/m}^3$ である。

式(4)を鉛直方向に積分し、自由水面での運動学的条件を考慮することによって、水位に関する次式が得られる。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H}^{\xi} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H}^{\xi} v dz = 0 \quad (10)$$

ここに、 $H$ は基準海水面から海底面までの深さである。

### 3.2 物質循環の支配方程式

物質循環は生化学反応項を含んだ次式の移流拡散方程式によって表される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} + \frac{\partial(wc)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial c}{\partial z} \right) + R_c \quad (11)$$

ここに、 $c$ は物質濃度、 $D_h$ は水平方向の拡散係数、 $D_v$ は鉛直方向の拡散係数である。また、 $R_c$ は物質の生化学的反応方程式を表す。本研究では物質としてCOD、DO、有機窒素(O-N)、無機窒素(I-N)、有機リン(O-P)および無機リン(I-P)を対象とし、湾内におけるこれらの物質の循環を蔵本・中田<sup>7)</sup>のモデルを参考に、Fig.2のようにモデル化した。なお、生化学反応式はHorie<sup>8)</sup>のモデルを基に以下のように表す。

$$\frac{d(\text{COD})}{dt} = \beta \text{GOP} - B^C \text{COD} - \frac{S^C \text{COD}}{h} + \frac{R_{\text{COD}}}{h} + \frac{L_{\text{COD}}}{h \Delta x \Delta y} \quad (12)$$

$$\frac{d(\text{DO})}{dt} = \gamma \text{GOP} - B^O \text{COD} - \frac{DB}{h} + A(\text{SDO} - \text{DO}) \quad (13)$$

$$\frac{d(\text{ON})}{dt} = G_N \text{ON} - B^N \text{ON} - \frac{S^N \text{ON}}{h} + \frac{L_{\text{ON}}}{h \Delta x \Delta y} \quad (14)$$

$$\frac{d(\text{IN})}{dt} = -G_N \text{ON} + B^N \text{ON} + \frac{R_{\text{IN}}}{h} + \frac{L_{\text{IN}}}{h \Delta x \Delta y} \quad (15)$$

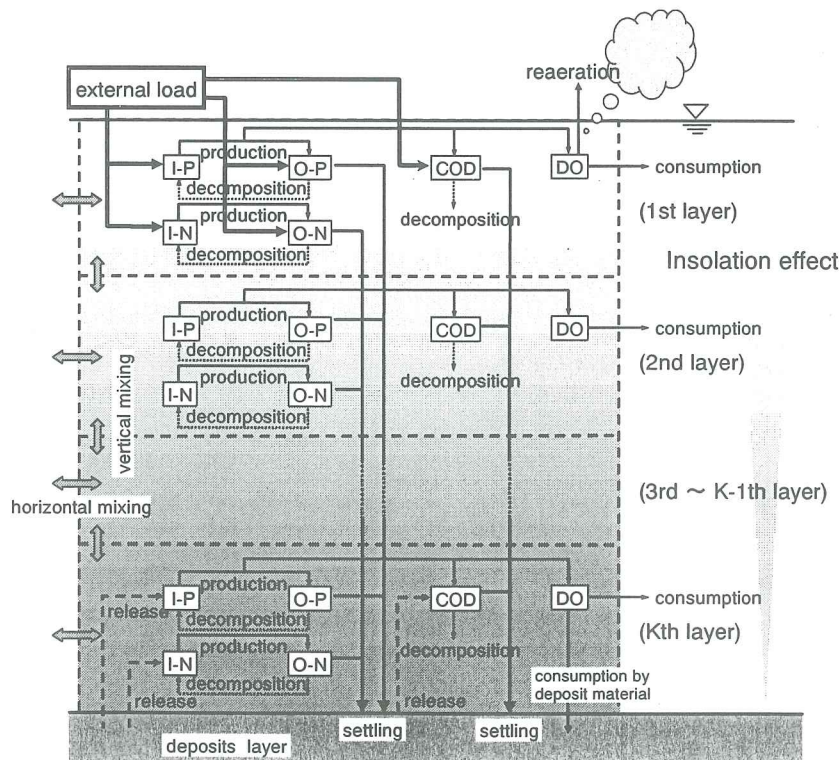


Fig.2 Nutrient cycle model



$$\frac{d(OP)}{dt} = G OP - B^P OP - \frac{S^P OP}{h} + \frac{L_{OP}}{h \Delta x \Delta y} \quad (16)$$

$$\frac{d(IP)}{dt} = -G OP + B^P OP + \frac{R_{IP}}{h} + \frac{L_{IP}}{h \Delta x \Delta y} \quad (17)$$

ここに、 $ON$ ,  $IN$ ,  $OP$ ,  $IP$  はそれぞれ O-N, I-N, O-P, I-P の濃度,  $G$ ,  $G_N$  はそれぞれ I-P と I-N による植物プランクトンの生産速度定数,  $B^O$  は分解による DO 消費速度,  $B^C$ ,  $B^N$ ,  $B^P$  はそれぞれ COD, O-N および O-P の分解速度定数,  $S^C$ ,  $S^N$ ,  $S^P$  はそれぞれ COD, O-N および O-P の沈降速度,  $R_{COD}$ ,  $R_{IN}$ ,  $R_{IP}$  はそれぞれ COD, I-N および I-P の底泥からの溶出,  $L_{COD}$ ,  $L_{ON}$ ,  $L_{IN}$ ,  $L_{OP}$ ,  $L_{IP}$  はそれぞれ COD, O-N, I-N, O-P および I-P の流入負荷,  $A$  は再ばつき係数,  $DB$  は底泥による消費,  $SDO$  は飽和酸素濃度,  $\beta$  は COD への換算係数,  $\gamma$  は DO への換算係数である. 植物プランクトンの生産速度定数  $G$  および  $G_N$  は次式によって計算される<sup>8)</sup>.

$$G = \mu_I \mu_T \frac{IP}{k_P + IP}, \quad G_N = \mu_I \mu_T \frac{IN}{k_N + IN} \quad (18)$$

ここに、 $k_P$ ,  $k_N$  はそれぞれ I-P, I-N の半飽和定数である. また、 $\mu_I$ ,  $\mu_T$  はそれぞれ照度および水温の効果を表し、次式で表される<sup>9),10)</sup>.

$$\mu_I = \frac{I}{I_{OPT}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{OPT}}\right), \quad (19)$$

$$I = (1 - \beta_0)(1 - A_r) Q_{SO} \exp(-\kappa z)$$

$$\mu_T = k_{G\alpha 1} \exp(k_{G\beta 1} T) \quad (20)$$

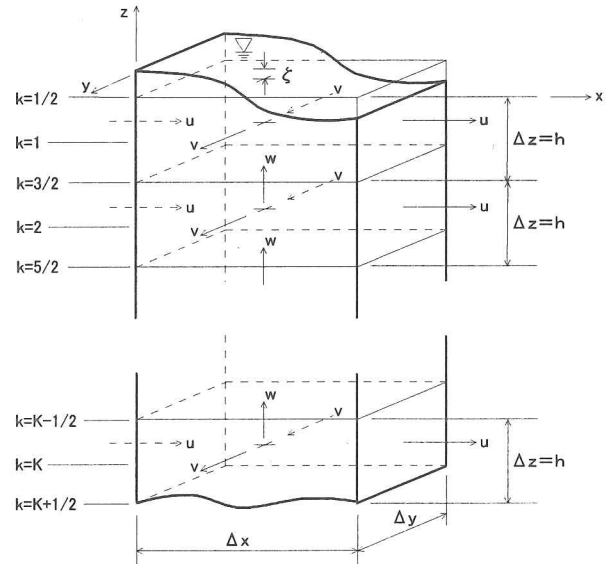
ここに、 $I$  は照度,  $I_{opt}$  は最適照度,  $\beta_0$  は海面での吸収率,  $A_r$  はアルベロ,  $Q_{SO}$  は全天日射量,  $\kappa$  は減衰係数,  $k_{G\alpha 1}$ ,  $k_{G\beta 1}$  は定数である. なお、これらのパラメータ値は **Table 1** に示されている.

#### 4. 計算方法と計算条件

先の基礎式を差分化するに当たり、本文では、**Fig.3**に示すように $z$ 方向を鉛直方向の固定幅の層に分割し、層間の交換を鉛直流速で評価する多層レベルモデル<sup>5)</sup>を採用した. また、 $x$ - $y$ 平面はスタガードメッシュを用い、基礎式は陽形式で差分化した<sup>11)</sup>. メッシュの幅は、 $\Delta x$ (東西方向)=125m,  $\Delta y$ (南北方向)=125m,  $\Delta z$ (鉛直方向)=2mとし、計算領域を東西方向に65分割、南北方向に86分割および鉛直方向に20分割とした.

式(1)、式(2)中のコリオリ係数に用いる緯度は、舞鶴湾のほぼ中央の $\varphi=35.5$ 度を与える. また、風による海面のせん断力は次式で求められる.

$$\begin{aligned} \tau_{sx} &= \gamma_a^2 \rho_a W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ \tau_{sy} &= \gamma_a^2 \rho_a W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{aligned} \quad (21)$$



**Fig.3** Coordinate system and arrangement of velocity components

**Table 1** Parameters and their values in nutrient cycle model

Reaction	Item	Value	Reaction	Item	Value
Production	$k_N$ (mg/l)	2.85	Decomposition	$B^N$ (1/day)	0.04
	$k_P$ (mg/l)	0.095		$B^P$ (1/day)	0.04
	$\beta_0$	0.5	Settling	$S^C$ (m/day)	0.072
	$A_r$	0.06		$S^N$ (m/day)	0.3
	$\kappa$ (1/m)	0.5		$S^P$ (m/day)	0.3
	Deposit	$k_{G\alpha 1}$ (1/day)	0.59	$R_{COD}$ (mg/m <sup>2</sup> /day)	44
		$k_{G\beta 1}$	0.0693	$DB$ (mg/m <sup>2</sup> /day)	390
		$\beta$	72	$R_{IN}$ (mg/m <sup>2</sup> /day)	7
$\gamma$		62	$R_{IP}$ (mg/m <sup>2</sup> /day)	1	
Decomposition		$B^C$ (1/day)	0.05	Aeration	$A$ (1/day)
	$B^O$ (mg/m <sup>2</sup> /day)	0.024	$SDO$ (mg/l)		7.23

ここに、 $\rho_a$ は空気の密度、 $W_x$ 、 $W_y$ はそれぞれ風速の  $x$  および  $y$  方向成分、 $\gamma_a^2 = 1.3 \times 10^{-3}$  とした。また、海底面のせん断力は次式で表される。

$$\begin{aligned}\tau_{bx} &= \gamma_b^2 \rho_0 u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \\ \tau_{by} &= \gamma_b^2 \rho_0 v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}\end{aligned}\quad (22)$$

ここに、 $u_b$ 、 $v_b$ は最下層のメッシュにおける  $x$  および  $y$  方向の流速成分である。また、 $\gamma_b^2 = 2.6 \times 10^{-3}$  とした。

輻射熱の取り扱いに関しては、安芸の方法<sup>12)</sup>によることとした。一方、海面での蒸発量は次式<sup>13)</sup>によって求められる。

$$E = \rho_a C_E U_{10} (q_s - q) \quad (23)$$

ここに、 $C_E$ は潜熱の輸送係数、 $U_{10}$ は海面上10mの風速である。また、 $q_s$ は海面水温に対する飽和比湿、 $q$ は気温に対する飽和比湿であり、それぞれ次式で表される。

$$\begin{aligned}q_s &= \frac{0.622(0.98 e_s / p_0)}{1 - 0.378(0.98 e_s / p_0)} \\ q &= \frac{0.622(0.98 e / p_0)}{1 - 0.378(0.98 e / p_0)}\end{aligned}\quad (24)$$

ここに、 $p_0$ は大気圧である。また、 $e_s$ は海面水温に対する飽和水蒸気圧、 $e$ は空気の水蒸気圧であり、それぞれ次式で表される。

$$e_s = 6.1078 \times 10^{7.5T_s / (273.7 + T_s)} \quad (25)$$

$$e = \Phi e_a \quad (26)$$

$$e_a = 6.1078 \times 10^{7.5T_a / (273.7 + T_a)} \quad (27)$$

ここに、 $T_s$ は海面の水温(°C)、 $T_a$ は気温(°C)、 $\Phi$ は相対湿度(100%で1)である。

流れ場の計算においては、Matsumotoら<sup>14)</sup>によるNaotideによって計算された湾口部の潮位を池野・三輪の方法<sup>15)</sup>によって流れの計算間隔ごと与えた。また、水平方向の渦動粘性係数はRichardsonの4/3乗則に従うものとし、次式で与えた。

$$A_{hx} = 0.01 \Delta x^{4/3}, \quad A_{hy} = 0.01 \Delta y^{4/3} \quad (28)$$

ここに、渦動粘性係数の単位は $\text{cm}^2/\text{sec}$ 、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ の単位は $\text{cm}$ である。さらに、水平方向の拡散係数は $K_H = 5.0 \times 10^{-3}$ とした。一方、鉛直方向の渦動粘性係数および拡散係数は次の成層化関数によって与える<sup>16)</sup>。

$$\frac{A_v}{A_{v0}} = (1 + 5.2 R_i)^{-1} \quad (29)$$

$$\frac{K_v}{A_{v0}} = \left(1 + \frac{10}{3} R_i\right)^{-3/2} \quad (30)$$

ここに、 $A_{v0}$ は中立(密度偏差がない)状態での鉛直渦動粘性係数、 $R_i$ はRichardson数であり、次式で定義される。

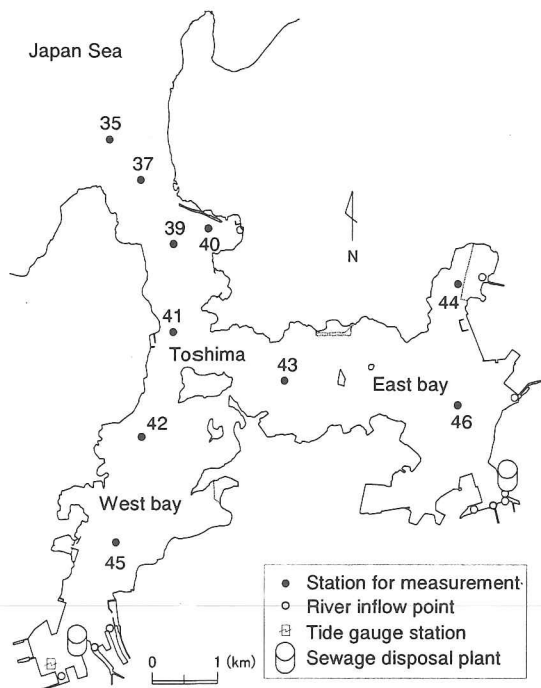
$$R_i = \frac{-g(\partial\rho/\partial z)}{\rho_0(\partial U/\partial z)^2} \quad (31)$$

ここに、 $U$ は流速ベクトルである。なお、本研究では $A_{v0} = 0.01 \text{cm}^2/\text{sec}$ とした。

舞鶴湾にはTable 2に示されているように10本の河川(2河川は湾口付近で合流)と2つの浄化セン

Table 2 Inflow conditions from rivers and disposal plants<sup>17),18),19)</sup>

Region	River Disposal plant	Inflow rate ( $\text{m}^3/\text{sec}$ )	External load (mg/ℓ)		
			COD	T-N	T-P
North bay	Onyu	0.4	2.458	0.978	0.230
East bay	Kawabe	0.9	0.420	0.566	0.026
	Aseku	0.8	1.427	0.504	0.060
	Siraku	1.4	1.341	0.471	0.056
	Sobotani				
	Yohoro	1.2	2.374	0.814	0.109
	Tera	0.5	1.711	3.020	0.429
West bay	Isazu	3.7	0.673	0.273	0.025
	Takano	1.0	2.676	0.914	0.119
	Fukui	0.3	2.430	0.791	0.101
East bay	Maizuru East	0.146	17.1	40.0	2.46
West bay	Maizuru West	0.0324	11.2	9.8	0.26



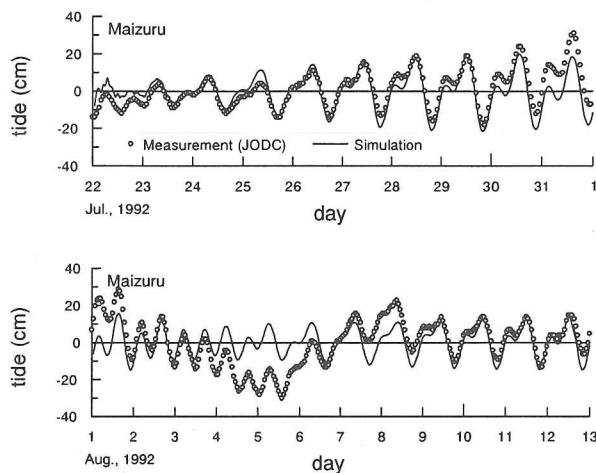
**Fig.4 Measurement sites of tidal level, temperature, salinity and nutrients concentrations**

ターからの流入があり、これらからの流入量を当該メッシュの第1層目に与えた。

流れ場の計算では、2ステップ前と1ステップ前の水位と流速値 $u$ ,  $v$ ,  $w$ から内部変数としての水位を計算し<sup>20)</sup>、当該ステップの水位はこれら3つの平均として求めている。この水位と1ステップ前の流速値から当該ステップにおける流速を計算、流速に関する閉境界でのnon-slip条件を適用した後、次のステップの計算に移った。

一方、物質循環の計算は、流れ場の計算結果と河川および浄化センターからの物質濃度(COD, T-N, T-P)を与えて行った。湾内に流入する物質濃度もTable 2に示されている。また、水平方向および鉛直方向の拡散係数はそれぞれ $D_h=1.0 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{sec}$ ,  $D_v=0$ とした。

流れ場の解析では閉境界でnon-slip条件を適用するとともに、流速の初期条件は全ての計算点で零を与えた。境界における水温、塩分および物質濃度は隣の計算点と同じ値とした。また、これらの初期条件は湾口部における実測の鉛直分布を基に与えた。そして、1992年7月の平均気象条件の下で10日間の計算を行って流れ場と物質濃度分布を計算した。ついで、1992年8月1日から8月12日までの日平均の気象条件を与えながら、流れ場と物質濃度分布の計算を実行した。なお、計算時間間隔は、流れに対しては1秒、物質循環に対しては180秒とした。



**Fig.5 Comparison of simulation results with measurement values for variation in tidal level (July 22 to August 12, 1992)**

### 5. 計算結果と考察

数値計算結果に関しては実測結果<sup>21)</sup>との比較・検討を行うが、これに先だて、潮位、水温、塩分および物質濃度の測定位置をFig.4に示す。図中には河川および浄化センターからの流入点も併記されている。なお、潮流については実測値が得られなかったため、計算結果のみでその特性を考察する。

#### 5.1 流れ場

Fig.5は検潮所がある西湾奥における1992年7月22日から8月12日までの潮位時系列に関して、計算結果と実測結果を比較したものである。計算結果は潮位の時間変動をおおむね適切に再現できている。しかし、7月31~8月1日および8月4日~8日の算定精度は低い。ただし、この期間でも満潮と干潮のタイミングはほぼ実測結果と同様であるため、流れ場の傾向は再現できるものと考えられる。なお、算定精度の低下原因は現時点では不明である。今後、気象条件等との関連も考慮して検討する必要がある。

Fig.6は1992年8月11日の干潮時および満潮時の海面下3mにおける水平方向の流速ベクトルを示したものである。いずれにおいても湾北部では大きな流速を示しているが、湾西部および湾東部では流速はかなり小さくなっていることがわかる。なお、鉛直方向の流速は水平方向の流速に比べて1~2オーダー小さいことを確認している。海面下3mおよび13mにおける残差流ベクトルをFig.7に示す。戸島の周辺で循環流の形成が確認できる。とくに、戸島の北と南に形成される反時計回りの循環流は、湾西部および湾東部の小さな残差流と相まって物質の外洋との交換を抑制していると考えられる。



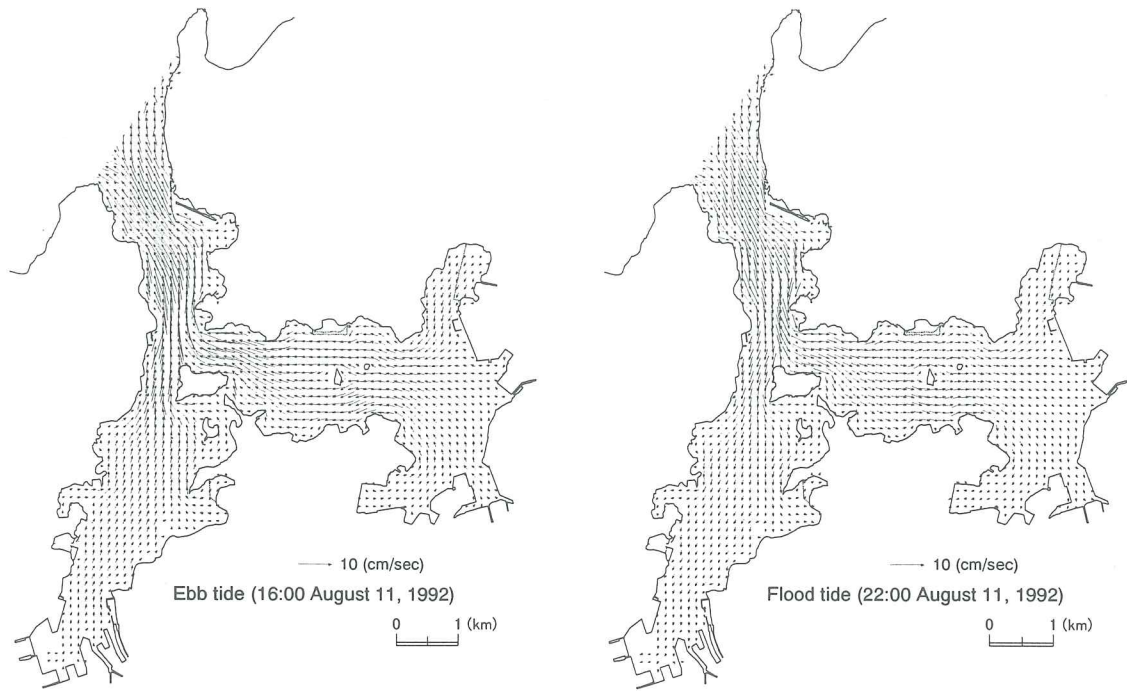


Fig.6 Ebb and flood tidal currents at 3 m below sea surface (August 11, 1992)

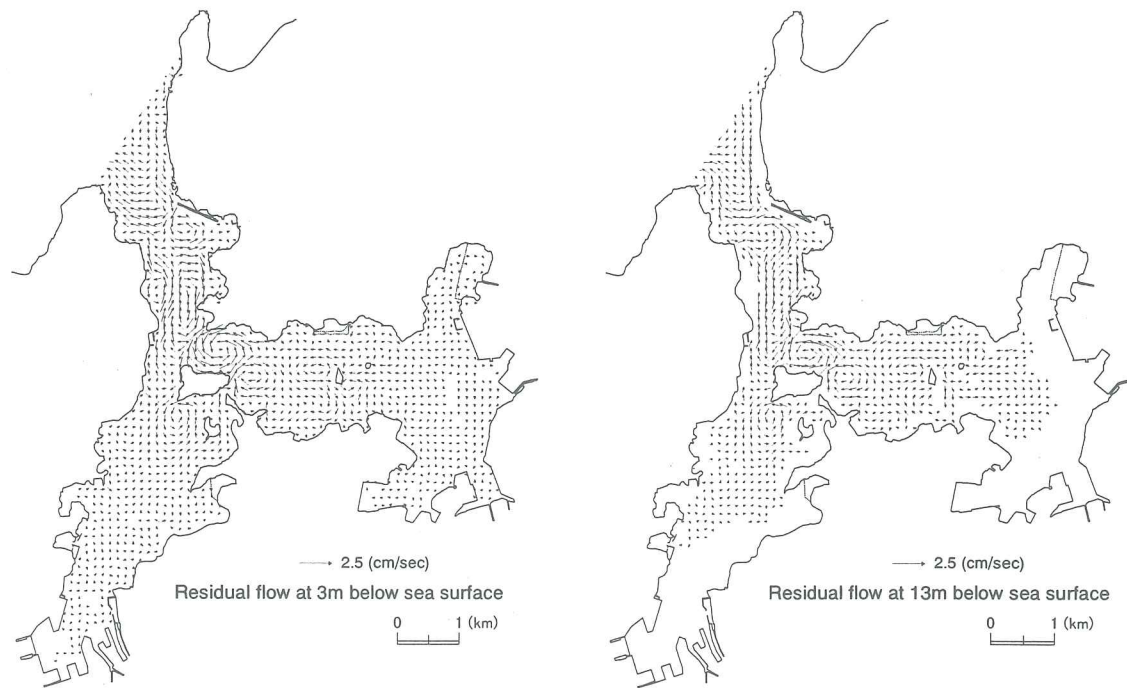


Fig.7 Horizontal residual flows at 3 m and 13 m below sea surface (August 11, 1992)

Fig.8はFig.4に示した各測定点における水温と塩分の鉛直分布の計算結果と測定結果を比較したものである。黒丸印と実線はそれぞれ水温の実測値と計算値を示し、白丸印と破線はそれぞれ塩分の実測値と計算値を示す。水温の測定値は下層から上層に向かって徐々に増加しており、水温成層が形成されて

いる状態にあるといえる。しかし、水温躍層の形成は認められない。さらに、表層付近の水温は湾口から湾奥に向かうほど高く、水温勾配 $dT/dz$ も大きくなっている。これは、湾奥では水深が浅く、外海との海水交換が活発に行われていないためであると考えられる。計算結果はこのような実測値の傾向を良

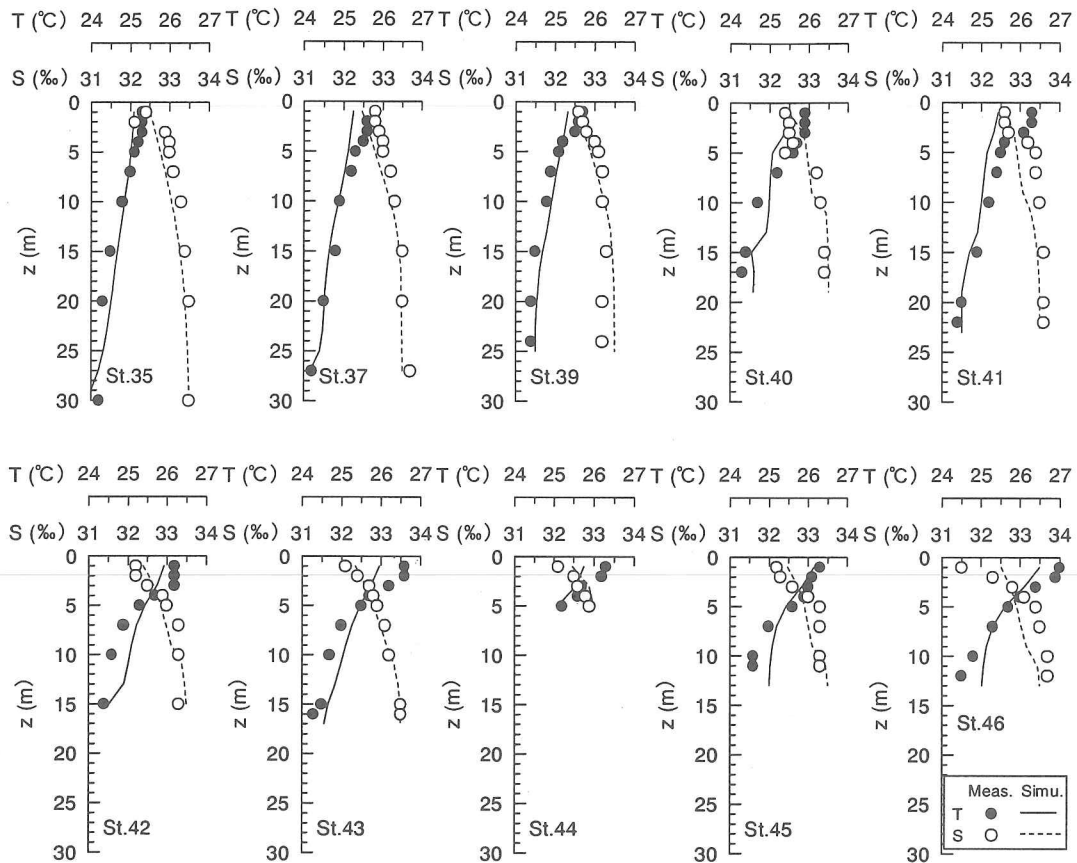


Fig.8 Comparison of simulation results with measurement values for vertical distributions of temperature and salinity (August 12, 1992)

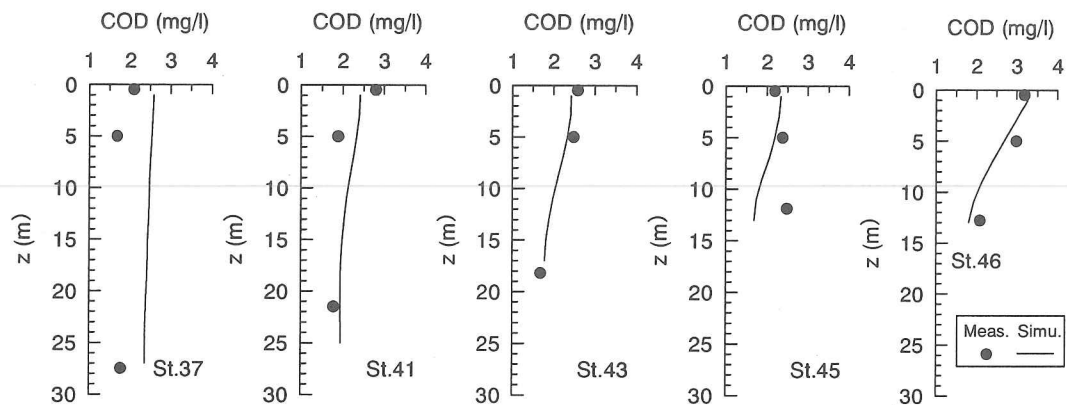


Fig.9 Comparison of simulation results with measurement values for vertical distributions of COD (August 11, 1992)

好に表しているといえる。一方、塩分濃度は水温とは逆に下層から上層に向かって徐々に減少しており、この傾向は湾口部に比べて湾奥の方が強いことがわかる。この原因は必ずしも明らかではないが、河川からの淡水の流入が関係している可能性も考えられる。なお、計算結果は実測値の傾向をおおむね再現しているといえる。

これらの結果から、密度の分布もほぼ適切に計算されていると考えられる。また、水温、塩分および密度の分布は物質循環の計算にも反映されている。

## 5.2 物質濃度分布

Fig.9はCODの鉛直分布の計算結果と測定結果を比較したものである。なお、各測定点の位置はFig.4



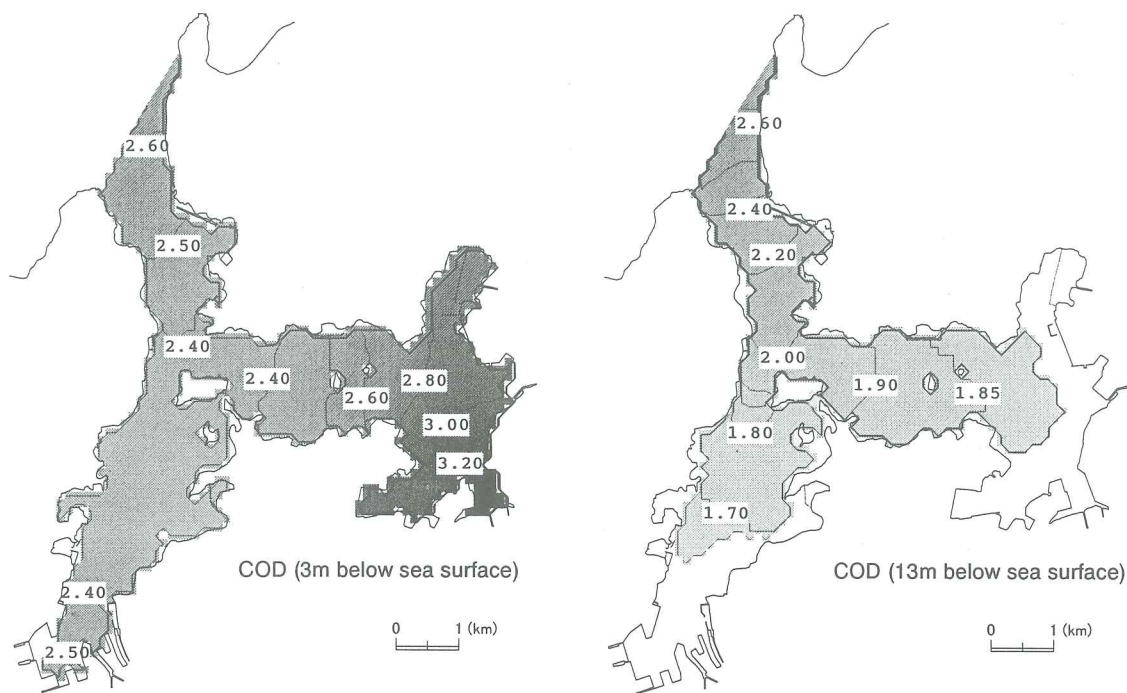


Fig.10 Simulation results of horizontal COD distribution (August 11, 1992)

に示されている。両結果とも上層のCOD濃度は湾奥から湾口に向かって徐々に減少することを示している。海面下3mおよび13mにおける水平方向のCOD分布の計算結果をFig.10に示す。海面下3mにおける濃度は湾東部でかなり高い値を示していることがわかる。これは、Table 2に示したように、主として湾奥にある東浄化センターからの排水が高いCOD値を示していることに起因していると考えられる。西浄化センターからも比較的高濃度の排水があるが、湾への流入量が少ないため、湾西部のCOD濃度は必ずしも高くない。一方、海面下13mにおける濃度は3mよりもかなり低い。したがって、浄化センターからの高濃度なCOD値を示す流入水は主として湾口に

向かって水平方向に移流・拡散していると考えられる。このことは、先述したFig.9の結果からも裏付けられる。

Fig.11はDOの鉛直分布の計算結果と測定結果を比較したものである。なお、各測定点の位置はCODと同じである。同図より、上層のDO濃度は湾口から湾奥に向かって徐々に増加することがわかる。これはDO生成の促進に起因している。すなわち、湾口から湾奥に向かうにつれて水深は浅くなるため、海面水温は上昇しやすく、酸素の生成も活発になるためであると考えられる。もっとも、DO濃度はCOD濃度の増加に伴って低下するが、ここで扱った場においてはDOの生成が消費よりも卓越したものと推察

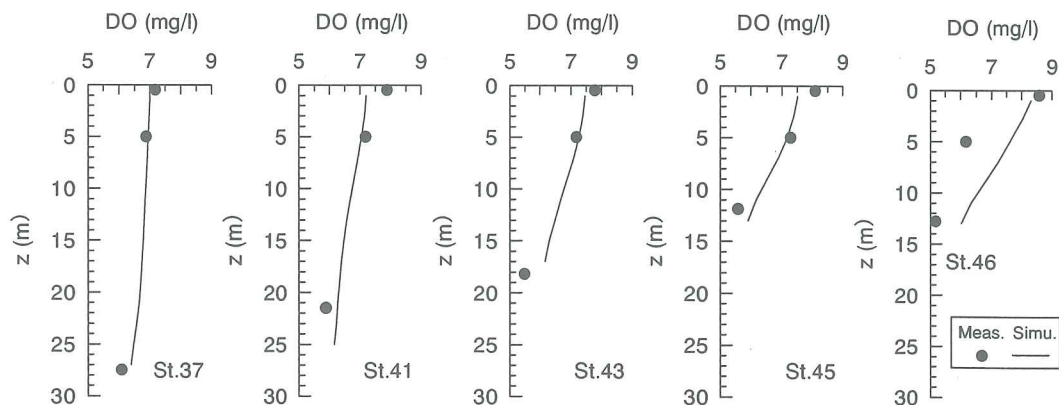


Fig.11 Comparison of simulation results with measurement values for vertical distributions of DO (August 11, 1992)

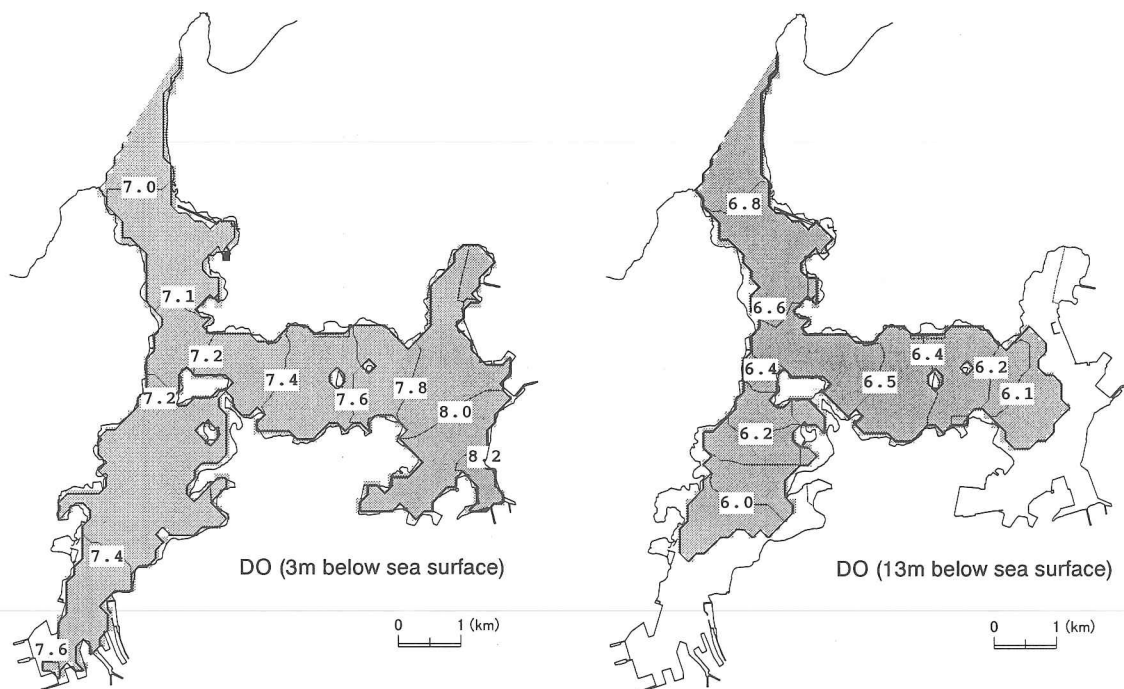


Fig.12 Simulation results of horizontal DO distribution (August 11, 1992)

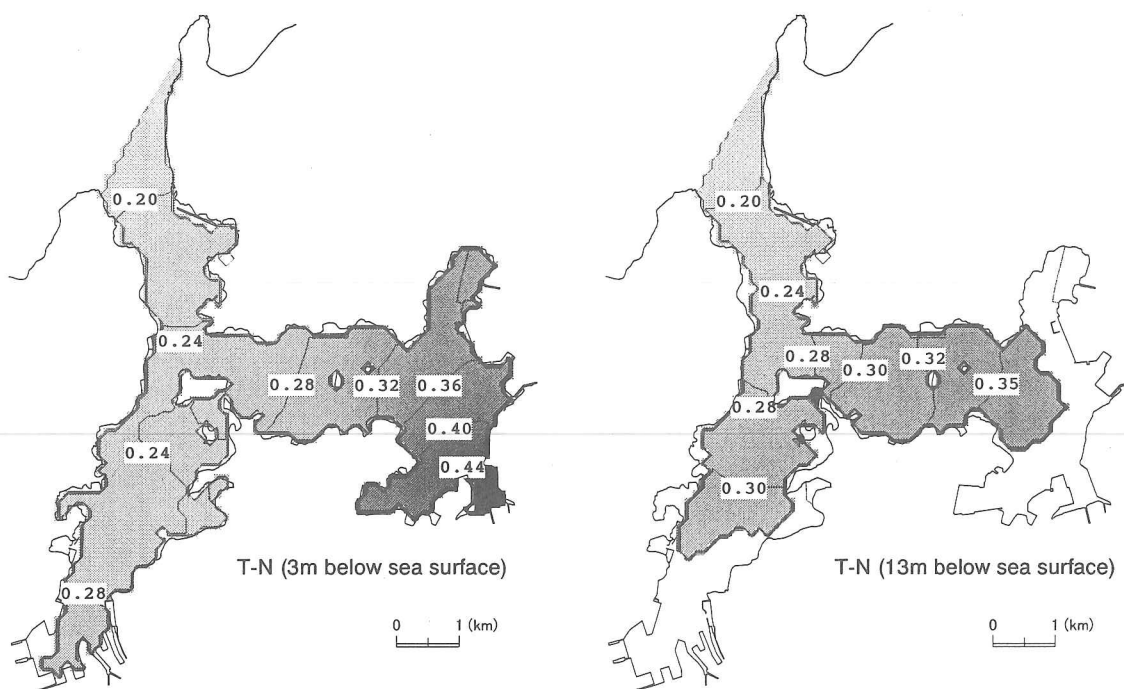


Fig.13 Simulation results of horizontal T-N distribution (August 11, 1992)

される。CODと同様に、海面下3mおよび13mにおける水平方向のDO分布の計算結果をFig.12に示す。海面下3mにおける濃度は湾西部の奥と湾東部で相対的に高い値を示していることがわかる。一方、海面下13mにおける濃度は湾北部が相対的に高い濃度を示している。このことは、DO濃度の鉛直分布は湾北部では一様に近く、湾奥で比較的大きな勾配を示す

ことを示唆している。Fig.11の結果はこれを裏付けるものであり、計算結果の再現性は良好であるといえる。

Fig.13 と Fig.14 は、それぞれ全窒素および全リンの濃度の水平分布を示したものである。これらの海面下 3m における濃度は、東西の浄化センターから窒素やリンを比較的高濃度に含む水が排水されるた

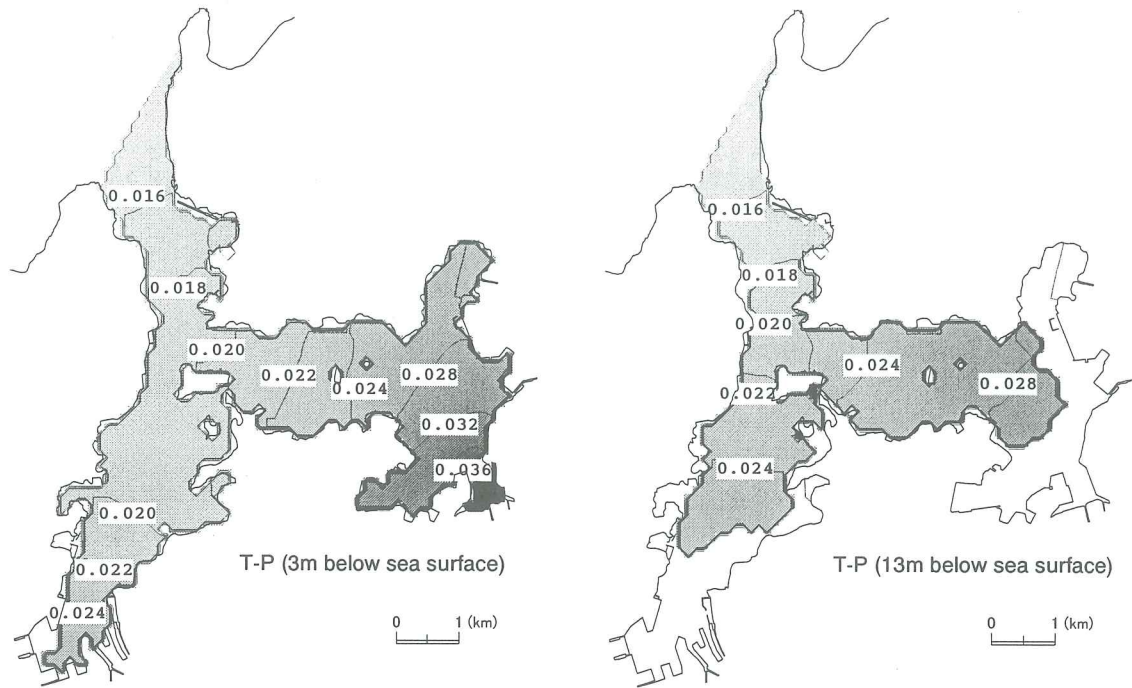


Fig.14 Simulation results of horizontal T-P distribution (August 11, 1992)

め、湾奥において湾北部に比べて高い値を示している。この傾向はとくに湾東部で顕著である。これらの濃度は浄化センターから離れるにつれて低下するが、湾東部では高濃度な状態が維持されている。なお、河川からの流入の影響については、湾東部に流入する寺川を除いてこれらの濃度は低いため、顕著でないと推察される。

窒素やリンの高濃度域の形成は、これらを高濃度に含む流入水だけでなく、海水交換が効果的に行われないことにも起因している。すなわち、Fig.6に示したように、上げ潮および下げ潮の時でも湾西部および湾東部の潮流はかなり弱いことが影響している。これらの結果は、窒素やリンは湾奥において非常に緩やかに移流・拡散しているため、これらの削減対策はこのような場所を重点的に行う必要があることを示唆している。

## 6. 結語

本研究では、水温と塩分による密度変化を考慮したバロクニックモデルによる数値シミュレーションを通して、舞鶴湾における夏期の流れ場と物質分布の特性に関する検討を行った。本研究で得られた結果を以下に要約する。

(1) 戸島の北と南で反時計回りに循環する残差流が形成される。また、潮流は戸島によって阻害されるため、湾西部や湾東部ではかなり弱い。このため、外海との海水交換は必ずしも活発に行われない。

(2) 水温および塩分の計算結果は実測値の傾向を適

切に表すことができた。したがって、密度分布も適切に算定されているといえ、成層状態の計算が可能であることが示された。

(3) COD, DOとも上層の濃度は湾北部から湾奥に向かうにつれて徐々に増加する。前者は流入水質の影響であり、後者は水温上昇によるDO生成の促進によるものであると考えられる。

(4) 湾西部と湾東部における上層の窒素およびリンの濃度はかなり高い。これらの濃度は湾北部に向かって徐々に低下して行くが、とくに湾東部の奥では流れが弱いいため、高濃度の状態が維持される傾向にある。

## 参考文献：

- 1) Ikeno, H., Miwa, H. and Daido, A.: Numerical Analysis of Tidal Current and Water Quality in Maizuru Bay, *Proceedings of 4th International Conference on Hydro-Science and -Engineering*, Vol. IV/CD-ROM, 2000.
- 2) 二谷頴男：舞鶴湾の副振動について（I），水路要報，第53号，pp.11-15，1957.
- 3) 二谷頴男：舞鶴湾の副振動について（II），水路要報，第54号，pp.4-8，1958.
- 4) Daido, A., Miwa, H. and Ikeno, H.: Transmission of Nitrogen and Phosphorus in the Maizuru Bay and Proposal of Improvement Method for Water Quality, *Environmental Hydraulics*, A.A.Balkema Publishers, pp. 555-560, 1999.
- 5) 岩佐義明，井上一也，劉樹坤，阿部 徹：琵琶湖湖流の三次元的な解析，京都大学防災研究所年報，



- 第26号B-2, pp. 531-542, 1983.
- 6) 中辻啓二：大阪湾における残差流系と物質輸送，水工学シリーズ，土木学会，第30号，A9-1-A9-28，1994.
  - 7) 蔵本武明，中田喜三郎：物質循環モデル，漁場環境容量，第6章，恒星社厚生閣，1992.
  - 8) Horie, T.: Modeling for the Prediction of the Effect of Sea Bed Sediment Treatment on the Improvement of Ecological Conditions and Seawater Quality, Report of Port and Harbor Research Institute, Vol. 26, No. 5, pp. 175-214, 1987.
  - 9) DiToro, D., O'Conner, D.J. and Thomann, R.V.: A Dynamic Model of the Phytoplankton Population in the Sacramento-Sanjoaquin Delta, *Advances in Chemistry Series*, American Chemical Society, Vol.131, pp.131-180, 1971.
  - 10) 古川恵太，細川恭史：浅場の窒素収支を考慮した3次元物質循環モデルの構築と計算事例，港湾技術研究所報告，第33巻，第3号，pp. 27-56，1994.
  - 11) Press, W.H., Flannery, P.F., Teukolsky, S.A. and Vetterling, W.T.: Numerical Recipes in C, Cambridge University Press, 1988.
  - 12) 安芸周一：貯水池濁水現象，水工学シリーズ，土木学会，第11号，pp. A-1-A-26，1975.
  - 13) 近藤純正：水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 -，朝倉書店，第2章，2000.
  - 14) Matsumoto K., Takanezawa, T. and Ooe M.: Ocean tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model; A global model and a regional model around Japan, *Journal of Oceanography*, Vol.56, pp. 567-581, 2000.
  - 15) 池野英利，三輪 浩：閉鎖性水域の潮流解析における開境界条件の設定法，兵庫県立大学環境人間学部研究報告，第7号，pp. 99-106，2005.
  - 16) 中辻啓二，許 再寧，室田 明：三次元表層密度流の数値実験，土木学会論文集，No. 434/II-16，pp. 19-28，1991.
  - 17) 舞鶴港港湾計画資料（その2），1996.
  - 18) 舞鶴市役所：東西浄化センターの処理水質について，舞鶴湾水質改善検討資料，1997.
  - 19) 片野 孝，松本和典：舞鶴湾流域の河川特徴と汚濁負荷構造について，平成5年度舞鶴工業高等専門学校卒業論文，1994.
  - 20) Mellor, G.L.: Users Guide for a Three Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model, *Prog. in Atmos. and Ocean. Sci.*, Princeton University, 1998.
  - 21) 日本海洋データセンター(JODC)  
<http://www.jodc.go.jp/>

(2006.11.10受付)

### THREE DIMENSIONAL ANALYSIS OF FLOW FIELD AND WATER ENVIRONMENT IN MAIZURU BAY WITH CONSIDERATION OF DENSITY DISTRIBUTION

Hiroshi MIWA and Hidetoshi IKENO

**ABSTRACT:** In order to understand current condition of water environment and investigate improvement methods for water quality in inner bays, it is important to clarify characteristics of the flow field and the circulation process of nutrients. Maizuru Bay has complex shape that the Northern part with bay-mouth is quite narrow, and the Southern part is separated into West and East bays. Due to this complex structure, the tidal exchange with the Japan Sea is not always enough, and a deterioration of the water quality in the Bay has been concerned. In particular, COD, T-N (total nitrogen) and T-P (total phosphorus) have not shown continuous achievement of the environmental standards according to the development of industries and high-consumption human lifestyles. In this study, we investigated characteristics of tidal current and distributions of nutrients in Maizuru Bay by the multi-level baroclinic model, which can consider the water density distribution caused by spatio-temporal changes of temperature and salinity. The flow field of tidal current and the distributions of temperature, salinity and nutrients were simulated in case of the summer with temperature stratification.

**Key Words :** water quality, tidal current, residual flow, nutrient circulation, nitrogen and phosphorus, numerical simulation, Maizuru Bay