舞鶴湾における夏季成層期の流れと水質分布の数値解析

NUMERICAL ANALYSIS OF TIDAL CURRENT AND WATER QUALITY IN STRATIFIED FIELD ON SUMMER IN MAIZURU BAY

三輪 浩¹・池野英利²

Hiroshi MIWA and Hidetoshi IKENO

¹正会員 工博 舞鶴工業高等専門学校准教授 建設システム工学科 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234)

²工博 兵庫県立大学教授 環境人間学部環境人間学科 (〒670-0092 兵庫県姫路市新在家本町1丁目1-12)

In order to understand current conditions of water environment and investigate improvement methods for water quality in an estuary, it is important to clarify characteristics of flow field and circulation of nutrients. Maizuru Bay has complex shape that the northern part with bay mouth (North bay) is quite narrow, and the southern part is separated into West and East bays. Toshima is located at the separation zone. 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 this study, we investigate characteristics of tidal current and distributions of nutrients (COD, DO, nitrogen and phosphorus) in Maizuru Bay through the numerical analysis based on the baroclinic model and the ecosystem model. The flow field of tidal current and the distributions of temperature, salinity and nutrients are simulated in the case of the summer with density stratification.

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

1. 緒 言

沿岸水域における水質の悪化は、社会環境や自然環境にとって深刻な問題となっている。これは人口の密集や工業化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、海水の流れが遅く、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。このため、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。そのためには、まず、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ており、場の状況を把握するための貴重な資料となっている^{1), 2)}。しかし、複雑な地形を有する水域では、調査観測データによる現状把握だけでは不十分な場合が多く、また、将来予測も困難である。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を通して種々の検討が行われている¹⁾。

京都府の舞鶴湾は典型的な閉鎖性水域で、狭い湾口と二つに分かれた深い湾奥を有する。このため、海水交換が活発ではなく、水質の悪化が懸念されている。Daigo³⁾は舞鶴湾の水質特性を調査するとともに、ボックスモデルを用いて湾内外の全窒素と全リンの収支バランスについて検討した。その結果、陸上から流入する全窒素

の約3割、全リンの約2割が湾外に流出することを示した。また、いくつかの水質改善法について検討し、その効果を分析した。ただし、この検討手法では現状分析の域を出ず、水質の時間変動や将来予測は困難である。舞鶴湾全体の流れや水質の特性を明らかにするとともに、水質改善策の検討を含む水質変動の将来予測が可能な研究アプローチが必要であるが、これまでほとんど行われていない。そこで、本研究では、バロクリニックモデルと生態系モデルに基づく流れ場と水質分布に関する数値シミュレーションを行い、測定結果と比較するとともに舞鶴湾におけるこれらの特性を明らかにする。解析は夏の成層期に対して行うこととし、水質指標としてCOD、DO、窒素およびリンを対象とする。

2. 舞鶴湾の概要

舞鶴湾は京都府北部に位置し、湾北部、湾西部および湾東部からなる閉鎖性水域である。面積は23.4km²、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。朔望平均干満差は約50cm、波高は小さいため観測されていない。また、潮流は弱く、流速は海面付近で0.05~0.1m/s程度である。湾西部と湾東部の分岐部にある戸島によって流れが阻害され易く、外海との海水交換も十分ではない。人口や商業および工業地は西地区と東地区に集中しており、各種排水は河川や東・西地区の浄化センターを通して湾内に排出されている(図-1)。

図-1 舞鶴湾

3. 基礎式と物質循環モデル

(1) 流れ場の基礎式

流れの計算に用いる連続式，運動方程式および水位式を以下に示す．なお，座標軸は平均海面の東向きをx軸，南向きをy軸，鉛直上向きをz軸とする．

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f_v - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -f_u - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H}^{\zeta} v dz = 0 \quad (5)$$

ここに， u ， v ， w はそれぞれx，y，z軸方向の速度成分， f はコリオリパラメータ， ρ_0 は基準密度(=1,000kg/m³)， ρ は海水密度， p は圧力， A_h ， A_v はそれぞれ水平方向および鉛直方向の渦動粘性係数， g は重力加速度， H は基準面から海底面までの深さである．

さて，基準面から海面までの距離を ζ とし， $\rho = \rho_0 + \Delta\rho$ ($\Delta\rho$ は密度偏差)とおけば，式(4)より次式が得られる．

$$p = \rho_0 g \zeta + \rho_0 g \zeta - \int_{-\zeta}^{\zeta} \Delta\rho g dz \quad (6)$$

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

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

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

ここに， T は水温(°C)， K_h ， K_v はそれぞれ水平方向および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(psu)である．なお，海水密度(kg/m³)は近似的に

図-2 物質循環モデル

次式で求められる⁴⁾．

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

(2) 物質循環の基礎式

物質濃度の変化は生化学反応項を含んだ次の移流拡散方程式によって表される．

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial (uc)}{\partial x} + \frac{\partial (vc)}{\partial y} + \frac{\partial (wc)}{\partial z} = D_h \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + D_v \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + R_c \quad (10)$$

ここに， c は物質濃度， D_h ， D_v はそれぞれ水平方向および鉛直方向の拡散係数である．また， R_c は物質の生化学反応式を表す．本研究では水質指標としてCOD，DO，有機態窒素(O-N)，無機態窒素(I-N)，有機態リン(O-P)および無機態リン(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⁵⁾のモデルを基本として，図-2のようにモデル化した．なお，生化学反応式はHorie⁶⁾のモデルをもとに以下のように表す．

$$\frac{d(\text{COD})}{dt} = \beta G \text{OP} - B^C \text{COD} - \frac{S^C \text{COD}}{h} + \frac{R_{\text{COD}}}{h} + \frac{L_{\text{COD}}}{h \Delta x \Delta y} \quad (11)$$

$$\frac{d(\text{DO})}{dt} = \gamma G \text{OP} - B^O \text{COD} - \frac{DB}{h} + A(\text{SDO} - \text{DO}) \quad (12)$$

$$\frac{d(\text{ON})}{dt} = G_N \text{ON} - B^N \text{ON} - \frac{S^N \text{ON}}{h} + \frac{L_{\text{ON}}}{h \Delta x \Delta y} \quad (13)$$

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

$$\frac{d(\text{OP})}{dt} = G \text{OP} - B^P \text{OP} - \frac{S^P \text{OP}}{h} + \frac{L_{\text{OP}}}{h \Delta x \Delta y} \quad (15)$$

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

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，

表-1 水質モデルパラメータ

反応	パラメータ	値	反応	パラメータ	値
生産	k_N (mg/l)	2.85	分解	B^N (1/day)	0.04
	k_P (mg/l)	0.095		B^P (1/day)	0.04
	β_0	0.5	沈降	S^C (m/day)	0.072
	A_r	0.06		S^N (m/day)	0.3
	κ (1/m)	0.5		S^P (m/day)	0.3
	I_{opt} (kcal/m ² /day)	2000	溶出	R_{COD} (mg/m ² /day)	44
	k_{Gal} (1/day)	0.59		R_{IN} (mg/m ² /day)	7
	k_{GBI}	0.0693		R_{IP} (mg/m ² /day)	4
	β	72	底泥消費	DB (mg/m ² /day)	390
	γ	62		A (1/day)	0.1
分解	B^C (1/day)	0.05	曝気	SDO (mg/l)	7.23
	B^O (mg/m ² /day)	0.024			

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 は再曝気係数, DB は底泥による消費, SDO は飽和酸素濃度, β はCODへの換算係数, γ はDOへの換算係数である. G および G_N は次式によって計算される.

$$G = \mu_I \mu_T \frac{IP}{k_P + IP}, \quad G_N = \mu_I \mu_T \frac{IN}{k_N + IN} \quad (17)$$

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, μ_I , μ_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^{7),8)}.

$$\mu_I = \frac{I}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right), \quad I = (1 - \beta_0)(1 - A_r)Q_{SO} \exp(-\kappa z) \quad (18)$$

$$\mu_T = k_{Gal} \exp(k_{GBI} T) \quad (19)$$

ここに, I は水中日射量, I_{opt} は最適日射量, β_0 は海面での吸収率, A_r はアルベド, Q_{SO} は全天日射量, κ は減衰係数, k_{Gal} , k_{GBI} は定数である. なお, これらのパラメータ値は表-1に示されている.

4. 計算方法と計算条件

本研究では, z 方向を一様な層厚に分割し, 層間の交換を鉛直流速で評価する多層レベルモデルを採用した. また, x - y 平面はスタッガードメッシュとし, 基礎式は陽形式で差分化した. メッシュサイズは, Δx (東西方向)= Δy (南北方向)=125m, Δz (鉛直方向)=2mとし, 東西方向65分割, 南北方向86分割および鉛直方向20分割とした.

式(2), 式(3)中のコリオリパラメータに用いる緯度は, 舞鶴湾のほぼ中央の $\phi=35.5$ 度を与えた. また, 風による海面のせん断力は次式で算定した.

$$\tau_{sx} = \gamma_a^2 \rho_a W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \quad \tau_{sy} = \gamma_a^2 \rho_a W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (20)$$

ここに, ρ_a は空気の密度, W_x , W_y はそれぞれ風速の x および y 方向成分である. なお, $\gamma_a^2 = 1.3 \times 10^{-3}$ とした. さらに, 海底面のせん断応力は次式で求めた.

$$\tau_{bx} = \gamma_b^2 \rho_b u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}, \quad \tau_{by} = \gamma_b^2 \rho_b v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (21)$$

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.

表-2 河川および浄化センターからの流入条件^{14), 15), 16)}

水域	河川名	流入量 (m ³ /sec)	流入負荷 (mg/ℓ)		
			COD	T-N	T-P
湾北部	大丹生川	0.4	2.458	0.978	0.230
湾西部	伊佐津川	3.7	0.673	0.273	0.025
	高野川	1.0	2.676	0.914	0.119
	福井川	0.3	2.430	0.791	0.101
湾東部	河辺川	0.9	0.420	0.566	0.026
	朝来川	0.8	1.427	0.504	0.060
	志楽川・祖母谷川	1.4	1.341	0.471	0.056
	与保呂川	1.2	2.374	0.814	0.109
	寺川	0.5	1.711	3.020	0.429
湾西部	西浄化センター	0.0324	11.2	9.8	0.26
湾東部	東浄化センター	0.146	17.1	40.0	2.46

輻射熱の取り扱いには安芸の方法⁹⁾によることとした. また, 海面からの蒸発量は次式¹⁰⁾によって算定した.

$$E = \rho_a C_E U_{10} (q_s - q) \quad (22)$$

ここに, C_E は潜熱の輸送係数, U_{10} は海面上10mの風速, 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る.

流れ場の計算で用いる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.

$$A_h = 0.01 \Delta^{4/3} \quad (23)$$

ここに, A_h の単位はcm²/sec, Δ は水平方向のメッシュサイズ(単位cm)である. また, 水平方向の拡散係数は $K_h = 5 \times 10^3$ cm²/secとした. さらに, 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た¹¹⁾.

$$A_v/A_{v0} = (1 + 5.2 R_i)^{-1}, \quad K_v/A_{v0} = (1 + 10/3 \cdot R_i)^{-3/2} \quad (24)$$

ここに, A_{v0} は均質流体(中立安定場)の鉛直方向渦動粘性係数, R_i はRichardson数で, $A_{v0} = 1 \times 10^{-2}$ cm²/sとした. 一方, 物質濃度の計算で用いる水平方向の拡散係数は $D_h = 1 \times 10^5$ cm²/sとし, 鉛直方向の拡散係数は先と同様に, 次の成層化関数で与えた.

$$D_v/A_{v0} = (1 + 10/3 \cdot R_i)^{-3/2} \quad (25)$$

流れ場の計算では, 初期条件として流速ゼロと湾口部の水温, 塩分の実測鉛直分布を全ての計算点に与えた. また, 舞鶴湾には表-2に示す10本の河川と2つの浄化センターが接続しており, これらからの流入流量を当該メッシュの第1層目に与えた. さらに, 開境界を湾口(図-1: 金ヶ岬と博奕岬を結ぶ線上)に設定し, 当該メッシュ点の潮位値を, Naotide¹²⁾を用いた三輪・池野¹³⁾の方法によって各計算ステップで与えた. 流速に関して, 閉境界ではノンスリップ条件を, 開境界では連続条件(勾配ゼロ)を適用した. 一方, 物質循環の計算は, 初期条件として湾口部の物質濃度の実測鉛直分布を全ての計算点に与え, 流れ場の計算結果を用いて行った. また, 計算では表-2に示した流入負荷を流量と同じ計算点に与えた. なお, 閉境界, 開境界とも水温, 塩分および物質濃度は連続条件を適用した. シミュレーションは, 1992年7月1日から8月12日までを対象とし, 日平均の気象条件を与えて実行した. 計算時間間隔 Δt は, 流れに対しては1秒, 物質循環に対しては180秒とした.

図-3 潮位、水温、塩分および物質濃度の測定地点

図-5 水平残差流ベクトル（海面下3m）

図-4 潮位変動の計算値と測定値¹⁾の比較

図-6 水温と塩分の鉛直分布の計算値と測定値¹⁾の比較

5. 計算結果の検証と流れ・物質循環に関する考察

潮位、水温、塩分および物質濃度分布に関する測定結果との比較・検討において、潮位については日本海洋データセンター¹⁾、水温、塩分および物質濃度については関西電力¹⁷⁾によるデータを用いた。ただし、水温と塩分は1992年8月12日午前9時～10時28分に測定され、物質濃度は1992年8月11日（時間帯不明）に測定されているので、比較対象の計算結果は両日とも午前10時のものを用いた。図-3は測定位置を示したもので、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、潮流については測定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。

(1) 潮位変動と流れ場

図-4は湾西部奥の検潮所における1992年7月13日から8月12日までの潮位時系列と計算結果を比較したものである。計算結果は潮位の時間変動の傾向をおおむね表しているといえる。両者が異なっている期間はあるが、干満の時刻や潮差はほぼ同様である時間帯は多く、全体と

しての流れ場の傾向は再現できるものと考え、算定精度が低い原因は現時点では不明であり、今後、気象条件や計算地形等との関連も考慮して検討する必要がある。

図-5は1992年8月12日における海面下3mの残差流ベクトルを示したものである。戸島周辺や湾北部において循環流の形成が見られる。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、海面下13mでもその存在が確認されており、湾西部および湾東部の弱い残差流と相まって、外海との海水交換を抑制している。なお、干潮時および満潮時の水平方向の流速ベクトルは湾北部では相対的に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いことが分かっており、さらに、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も確認している。

図-6は図-3に示した各測定点における水温と塩分の鉛直分布の測定結果と計算結果を比較したものである。また、図中のSt.番号は図-3の測点番号に対応している。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ことがわかる。また、海面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、また、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。一方、塩分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

図-7 CODの鉛直分布の計算値と測定値¹⁷⁾の比較

図-8 DOの鉛直分布の計算値と測定値¹⁷⁾の比較

表-3 計算値と測定値¹⁷⁾の比較

水 域	測点 番号	全窒素 ($\times 10^{-1}$ mg/l)			
		上 層		下 層	
		測定	計算	測定	計算
湾北部	37	1.9	1.9	3.2	1.7
	41	2.9	2.0	3.0	2.1
湾西部	45	3.1	2.1	2.4	2.6
湾東部	43	2.7	2.2	1.8	2.5
	46	3.6	3.4	2.5	2.9

水 域	測点 番号	全リン ($\times 10^{-2}$ mg/l)			
		上 層		下 層	
		測定	計算	測定	計算
湾北部	37	1.4	1.5	1.8	1.5
	41	1.9	1.8	2.0	2.1
湾西部	45	2.5	1.8	2.6	2.8
湾東部	43	2.2	1.9	1.8	2.5
	46	3.0	2.9	3.8	3.0

図-9 全窒素および全リン濃度の水平分布（海面下3m）

湾口部に比べて湾奥の方が強いことがわかる。この原因は明らかになっていないが、湾への淡水の流入が関係している可能性がある。水温の計算結果は、海面付近の水温が湾口から湾奥にかけて高く、水温勾配が増加する傾向は再現されている。しかし、より厳密には海面近傍では算定精度が低下しており、今後の検討課題である。また、塩分については湾東部(St.46)を除いて測定値の傾向を再現している。なお、湾東部については淡水流入に影響についてさらなる検討が必要である。

(2) 物質濃度分布

図-7はCODの鉛直分布の測定結果と計算結果を比較したものである。両結果とも上層(0-5m程度)のCOD濃度は湾奥から湾口に向かって次第に減少する傾向にある。また、湾東部(St.46)の上層の濃度はかなり高い値を示している。これは、表-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濃度を示していることに起因している。なお、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、下層(13m程度)における濃度は上層よりもかなり低い。以上のことから、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。

図-8はDOの鉛直分布の測定結果と計算結果を比較したものである。同図より、上層のDO濃度は湾北部より

も湾西部や湾東部の方が高い値を示していることがわかる。これは湾口から湾奥に向かうにつれて水深は浅くなり、流れも遅いため、水温が上昇しやすく、また、後述するように窒素やリンの濃度も湾奥の方が比較的高く、これらによって生物活動が活発になるためであると考えられる。ただし、最適水温、最適栄養塩濃度の影響も受けるので、より厳密な検討のためには植物プランクトンを特定し、これらのパラメータ値を明らかにする必要がある。なお、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される。一方、海底面付近のDO濃度は湾奥に向かって徐々に低下しており、その結果、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。なお、DO濃度の低下は底泥での消費が活発であり、これが湾奥でより顕著であることを示している。

図-9は、海面下3mにおける全窒素および全リンの濃度の水平分布の計算結果を示したものである。東西の浄化センターから窒素やリンを高濃度を含む水が排出されるとともに、河川からも湾内濃度を超える窒素やリンの流入があるため、湾北部に比べて湾奥において高い値を示しており、この傾向はとくに湾東部で顕著であることがわかる。これらの濃度は湾奥から湾口に向かう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。図-3に示された各測定地点における測定値と計算値の比較を表-3に示す。表中、上層は測定値については海

図-10 底泥による内部負荷の削減効果 (St. 46)

面下0.5m, 計算値については海面下1mの位置であり, 下層は両者とも海底面上1mの位置である。測定値を見ると, 湾北部の下層の窒素を除いて, 窒素, リンとも湾北部に比べて湾西部や湾東部の方が相対的に高濃度の傾向にある。計算値はこのような傾向を示してはいるものの, 窒素については湾北部下層で大きな誤差が見られる。一方, リンについての相対誤差は窒素よりも小さいが, 主に上層において測定値に比べて若干低い値を示している。計算精度については, 実測データの蓄積とモデル解析を並行して進めながらその向上を計る必要がある。

窒素やリンの高濃度域の形成は, これらを高濃度を含む流入水だけでなく, 上げ潮および下げ潮の時でも湾西部と湾東部の潮流はかなり弱いために, 海水交換が効果的に行われないことにも起因している。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に対して重点的に実施することが効果的であるといえる。

最後に, 本研究では底質の議論は行っていないが, 底泥からの物質の溶出も湾内の濃度に影響を及ぼしていることが予想される。そこで, 底泥からの内部負荷量の削減が水質に及ぼす影響について若干の検討を行う。図-10は覆砂や浚渫を想定して, 表-1の溶出および底泥による消費に係るパラメータ値を1/10と1/100にした場合の, 1992年8月11日の湾東部(St.46)におけるCOD, DO, 窒素およびリンの変化を示したものである。内部負荷の削減効果は上層まで及び, しかも, DOは顕著に増加することがわかる。また, 底泥付近のリン減少率も高い。他の地点でも同様の傾向を示したが, 水深が浅い湾奥の方が高い効果が得られた。今後は, 底質による内部負荷プロセスを検討し, その影響を明らかにする必要がある。

6. 結 言

本研究では, バロクリニックモデルと生態系モデルに基づく数値シミュレーションを通して, 舞鶴湾における夏季成層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) 戸島の北と南において, 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。これらのため, 外海との海水交換は活発に行われない。

(2) 水温および塩分の計算結果は鉛直方向の変化傾向を再現することができた。密度は水温と塩分によって近似的に求めることができるので, 密度の鉛直方向の変化傾向も再現できているといえ, 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って徐々に増加する。前者は浄化センターからの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) 窒素およびリンの上層濃度の実測値は湾北部に比べて湾西部や湾東部奥の方が高く, とくに湾東部奥で顕著である。このような傾向は計算結果によっても示されたが, 相対誤差はとくに窒素で大きく, 算定精度については今後の課題として残された。

参考文献

- 1) 日本海洋データセンター(JODC), <http://www.jodc.go.jp/>
- 2) 公共用水域の水質測定結果, 環境省総合データベース, <http://www.env.go.jp/doc/>
- 3) 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.
- 4) 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, 1994.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 近藤純正: 水環境の気象学 一 地表面の水収支・熱収支一, 朝倉書店, 第2章, 2000.
- 11) 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.
- 12) Naotide, Nao.99b tidal prediction system http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index_En.htm
- 13) 三輪 浩, 池野英利: 閉鎖性海域の潮流解析における開境界条件としての潮位変動の設定法と播磨灘への適用, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.10, pp. 873-879, 2007.
- 14) 舞鶴港港湾計画資料(その2), 1996.
- 15) 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.
- 16) 舞鶴工業高等専門学校調査資料, 1994(未公開).
- 17) 関西電力: 舞鶴発電所 修正環境影響調査書, 1995.

(2007.9.30 受付)