

舞鶴工業高等専門学校 正会員○三輪 浩
兵庫県立大学環境人間学部 池野英利

1. まえがき 舞鶴湾はその複雑な形状のため海水交換が必ずしも十分ではなく、水質の悪化が懸念される。効果的な水質改善策を検討するためには、流れ場の特性と水質の分布特性を把握する必要がある。本文では、湾内の流れとCOD, DO, 窒素およびリンの分布特性を、数値解析を通して検討している。

2. 舞鶴湾の概要 舞鶴湾は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。面積は23.4km²、平均水深は湾北部が約23m、湾西部と湾東部はいずれも約10m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やすい。このため、湾西部や湾東部と外海との海水交換は必ずしも活発ではない。人口や商業・工業地は西地区と東地区に集中しており、各種排水は主としてこれらの地区にある浄化センターで処理され、湾内に排出されている(図-1参照)。

3. 基礎方程式 流れの基礎式は、連続式、鉛直方向の静水圧近似とBoussinesq近似を仮定した運動方程式、水温・塩分の拡散方程式、密度の状態方程式および海面での熱収支式¹⁾で構成される。また、物質循環は各物質の拡散方程式と生化学反応式で構成される。本研究で用いた生化学反応式を表-1に示す。ここに、ONは有機態窒素、INは無機態窒素、OPは有機態リン、IPは無機態リンであり、 G , G_N は生産速度、 B^* は分解速度、 S^* は沈降速度、 R^* は底泥からの溶出、 L^* は流入負荷、 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、 β はCODへの換算係数、 γ はDOへの換算係数を表す。

4. 計算方法と条件 本研究では多層レベルモデル²⁾を採用した。メッシュの幅は Δx (東西方向)= Δy (南北方向)=125m, Δz (鉛直方向)=2mとし、計算領域をx方向に65分割、y方向に86分割およびz方向に20分割とした。流れ場の計算では、湾口部においてNaotide³⁾によって計算された実潮位を流れの計算間隔ごとに与えた。なお、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、拡散係数は $K_h=5.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ とした。また、鉛直方向の渦動粘性係数と拡散係数はRichardson数の関数として与えた。さらに、河川と浄化センターからの流入は当該メッシュの第1層目に与えた。一方、物質循環の計算では、流れ場の計算結果と河川および浄化センターからの流入濃度(COD, 全窒素, 全リン)を与えた。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。シミュレーションは、まず、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速、水温・塩分および物質濃度を算出した。ついで、8月1日から12日までの日平均の気象条件を与えながらこれらの値を算出した。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秒である。

5. 計算結果と考察 図-2は海面下3mにおける残差流ベクトルを示している。戸島の周辺に循環流の形成が確認でき、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に見られる弱い残差流と相まって海水の外海との交換を抑制していると考えられる。

図-3は図-1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実測結果⁴⁾を比較したものである。まず、水温をみると、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

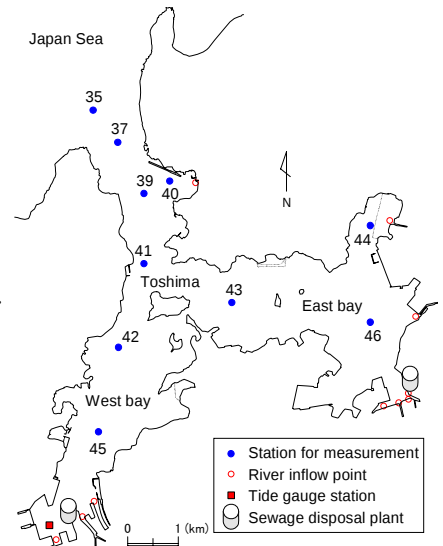


図-1 舞鶴湾と調査地点

表-1 生化学反応式

$\frac{d(\text{COD})}{dt} = \beta \cdot G \cdot \text{OP} - B^C \cdot \text{COD} - \frac{S^C \cdot \text{COD}}{h} + \frac{R_{\text{COD}}}{h} + \frac{L_{\text{COD}}}{h \cdot \Delta x \cdot \Delta y}$
$\frac{d(\text{DO})}{dt} = \gamma \cdot G \cdot \text{OP} - B^O \cdot \text{COD} - \frac{DB}{h} + A(SDO - \text{DO})$
$\frac{d(\text{ON})}{dt} = G_N \cdot \text{ON} - B^N \cdot \text{ON} - \frac{S^N \cdot \text{ON}}{h} + \frac{L_{\text{ON}}}{h \cdot \Delta x \cdot \Delta y}$
$\frac{d(\text{IN})}{dt} = -G_N \cdot \text{ON} + B^N \cdot \text{ON} + \frac{R_{\text{IN}}}{h} + \frac{L_{\text{IN}}}{h \cdot \Delta x \cdot \Delta y}$
$\frac{d(\text{OP})}{dt} = G \cdot \text{OP} - B^P \cdot \text{OP} - \frac{S^P \cdot \text{OP}}{h} + \frac{L_{\text{OP}}}{h \cdot \Delta x \cdot \Delta y}$
$\frac{d(\text{IP})}{dt} = -G \cdot \text{OP} + B^P \cdot \text{OP} + \frac{R_{\text{IP}}}{h} + \frac{L_{\text{IP}}}{h \cdot \Delta x \cdot \Delta y}$

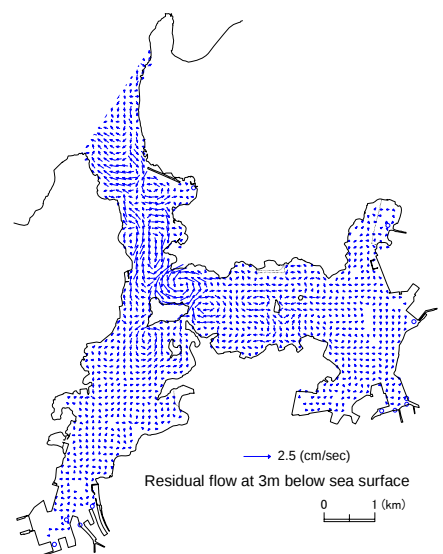


図-2 潮汐残差流(海面下3m)

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ほぼ適切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部の方が強いことがわかる。これは、河川や浄化センターからの淡水の流入の影響であると推察されるが、その他の影響については明らかになっていない。

図-4はCODの鉛直分布の計算結果と実測結果⁴⁾を比較したものである。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傾向を示している。図示はしていないが、計算によるCODの水平分布では、東浄化センターからの排水質に起因して湾東部の上層で相対的に高い値を示している。したがって、湾奥の高いCODは湾口に向かって水平方向に移流・拡散していると推察される。

図-5はDOの鉛直分布の計算結果と実測結果⁴⁾を比較したものである。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っ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、ここでは酸素の生成が消費よりも卓越したものと推察される。

図-6(a), (b)は、それぞれ計算によって得られた海面下3mにおける全窒素および全リンの濃度の水平分布を示したものである。東西の浄化センターからの排水質によって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。これらの濃度は湾奥から遠ざかるにつれて低下するが、湾東部では比較的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、顕著ではないと考えられる。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。上げ潮および下げ潮時でも湾西部と湾東部の潮流はかなり遅いことが計算結果から判明しており、窒素やリンは湾奥において緩やかに移流・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. あとがき 本文では、バロクリニックモデルによる数値計算を通して、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。今後、湾内への流入水質の影響をより詳細に検討するとともに、水温分布が異なる冬季の現象に対しても検討を行う予定である。

参考文献 1) 安芸：貯水池濁水現象，水工学シリーズ75-A-1，1975。
2) 岩佐ら：京大防災研年報，第26号，1983。 3) Matsumoto et al.: Jour. Oceanography, Vol.56, 2000.

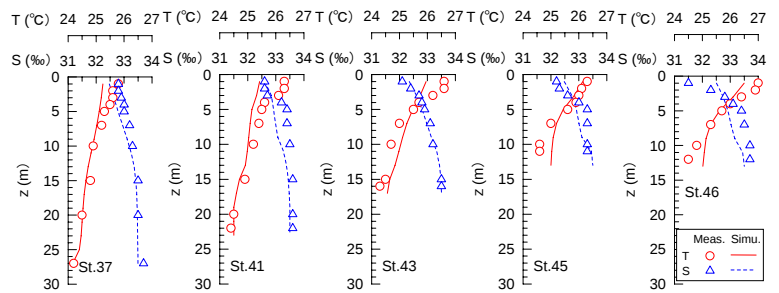


図-3 水温および塩分濃度分布の計算結果と実測値の比較

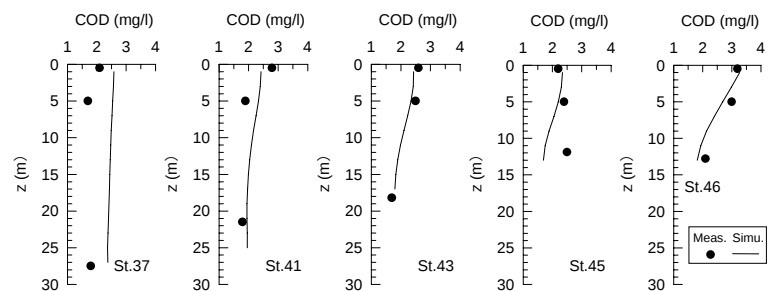


図-4 CODの計算結果と実測値の比較

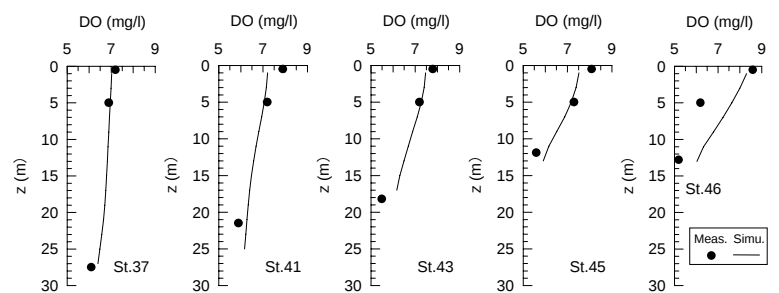


図-5 DOの計算結果と実測値の比較

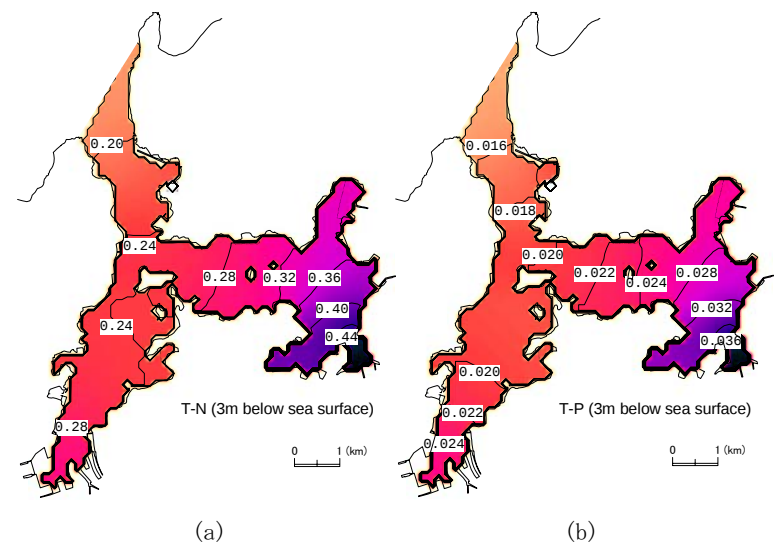


図-6 全窒素，全リンの計算結果(海面下3m)