

II-46 湾内における廃水拡散の予測について

電力中央研究所 正会員 和田 明
同 上 同 上 〇片野尚明
北海道電力株式会社 同 上 荒木 洋

1. 湾内における廃水の拡散現象

湾内に廃水を放出した場合の汚染の問題は、汚染物質の時間的および空間的分布と水質への影響の問題に関連して多くの関心をもたれている。対象水域にどの程度の汚染が表われるかを解析することは、現在排水されている汚水の処理対策および計画されている汚水の放流による汚染の予知する上に重要である。

一般に、幅のせまい湾内における拡散現象は、近似的に一次元現象として取り扱うことができる。従って、縦断方向の分散に大きな影響をもたらすものに潮流の振動現象があり、その潮汐効果を十分考慮することが必要である。湾内の断面積が変化する場合の汚染物質の保存を示す一次元表現式は、一次元の基礎式を断面積 A について積分することにより求められる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (A E_x \frac{\partial C}{\partial x}) + R_a - R_r \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 C 、 u 、 E_x は断面平均値を意味する。 C ：汚染物質の濃度、 u ：潮汐と廃水の両者を含む湾軸 (x) 方向の流速、 E_x ：乱流拡散係数、 R_a ：単位時間当りに放出される汚濁負荷量、 R_r ：単位時間当りに除去される汚濁量。

式 (1) の取り扱い方については二つの方法が考えられる。一つは、潮汐周期で時間平均をとり、移流項内の潮汐流を無視して廃水流のみを考える方法である。従って、拡散項の中に潮汐振動の効果を含ませなければならない。もう一つの方法は、潮流が時間的に変化する移流モデルによるものである。ここでは、移流項の流速は潮流と廃水に関連して時間的、場所的に変化する。分散項は鉛直および横方向の速度分布と乱流拡散の影響を表わすものとなる。

2. 温排水による水温分布の解析

湾を一次元的に取り扱える場合の温排水分布は、基礎式 (1) を用いて求めることができる。いま、温度 T のかわりに熱量 W を導入し、潮流流を正弦的であるとみなすと、それぞれ次式のようなになる。

$$T = W / c_p A \Delta x \quad \text{----- (2)} \quad u = u_0 + u_t \sin \sigma t \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 c 、 ρ ：それぞれ海水の比熱と密度、 A ：温排水が含まれる湾の表層断面積 ($= B H_w$)、 $u_0 = Q/A$ 、 Q ：冷却水排水量、 u_t ：潮流の最大流速、 σ ：潮汐の角周波数
式 (2)、(3) の関係を式 (1) に代入し、環境水温からの変化分として示せば次式が得られる。

$$\frac{\partial W}{\partial t} + (u_0 + u_t \sin \sigma t) \left\{ \frac{\partial W}{\partial x} - \frac{W}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \right\} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{A E_x}{A} \frac{\partial W}{\partial x} - \frac{E_x W}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \right\} + P - R W \quad \text{----- (4)}$$

ここに、 P ：単位時間当りの排熱量、 R ：大気への逸散を示す係数

以上の解析手法は非定常解に対するものであるが、定常解を求める時には、式 (1) を潮流の一周期

について時間平均を行えばよい。すなわち、

$$u_0 \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (A E_{xL} \frac{\partial T}{\partial x}) + R_a - R_r \quad \text{----- (5)}$$

ここに、 T 、 E_{xL} 、 R_a 、 R_r は一潮時の平均値であり、 E_{xL} は渦動拡散のほか潮汐による分散効果を考慮した拡散係数となる。式(5)において、式(4)と同様に熱量 W を導入し、数値解析に便利な差分式に書き改めて整理すれば次のようになる。

$$Q_{i+1} \cdot W_{i+1} + Q_i \cdot W_i + Q_{i-1} \cdot W_{i-1} = P \quad \text{----- (6)}$$

ここに、

$$\begin{cases} Q_{i+1} = \frac{u_0}{2\Delta x} - \frac{1}{\Delta x^2} \left(\frac{A_i (E_{i+1} + E_i)}{A_{i+1} + A_i} \right) \\ Q_i = -\frac{u_0}{2\Delta x} \left(\frac{A_{i+1} - A_{i-1}}{A_i} \right) + \frac{1}{\Delta x^2} \left(\frac{A_{i+1} (E_{i+1} + E_i)}{A_{i+1} + A_i} + \frac{A_{i-1} (E_i + E_{i-1})}{A_i + A_{i-1}} \right) + f_e \\ Q_{i-1} = -\frac{u_0}{2\Delta x} - \frac{1}{\Delta x^2} \left(\frac{A_i (E_i + E_{i-1})}{A_i + A_{i-1}} \right) \\ P = C_P Q \Delta T, \quad f_e = \frac{Q_1}{C_P H_w} \end{cases}$$

ただし、 ΔT は排水温度 T_0 と環境水温 T_3 との差、 Q_1 は水温および風速の関数で示せる大気への逸散係数を示す。 H_w は表層の厚さである。境界条件は湾奥で $\partial T / \partial x = 0$ より、 $W_1 = (A_1 / A_2) \cdot W_2$ 、湾口で $\partial^2 T / \partial x^2 = 0$ より、 $W_{i+1} = 2(A_{i+1} / A_i) \cdot W_i - (A_{i+1} / A_{i-1}) \cdot W_{i-1}$ ととり、排水熱量は排水口のある位置に入ればよい。拡散係数 E_{xL} については、湾奥で渦動拡散係数 E_x 、湾口で $E_x + E_t$ を仮定する。 E_t は、潮汐流が大きなスケールの渦として拡散に寄与するものと考えたときの拡散係数を意味し、次の式によって表わせるものとする。

$$E_t = \alpha U_m l \quad \text{----- (7)}$$

ここに、 α は潮汐の半周期ごとの海水混合の割合で明石海峡での塩素量の実測結果から、 $\alpha = 0.1$ が得られている。 U_m は潮汐の半周期の平均流速(cm/sec)、 l は半周期における水粒子の流程(cm)である。このようにして、境界条件、湾の平面形状、拡散係数等を与えて式(6)を連立して解けば各点の熱量 W が求まり、さらに式(2)によって温度に変換すれば、対象水域の水温分布が得られる。

3. 数値解析例

近似的に一次元とみなせる湾内に温排水を放出した場合の水温の拡散範囲を数値モデルと現地観測結果との比較検討を行う。湾モデルとして、ほぼ平面積 10^6 m^2 を有するA、B二つの地点を考察の対象とする。

A湾は長さ1.7 km、平均幅約500 mの比較的小さな入江で、図-1に示すように断面幅は湾奥から湾口に向ってほぼ単調に拡大している。海象は年間を通じて静おんであり、潮差は比較的小さく、最大変化は50 cm位である。排水口は湾奥から240 mの位置にある。B湾は長さ3.5 km、平均幅約250 mの細長い小規模の泊地で、図-2示すように断面幅の変化は、中間でくびれて港口寄りで急激に拡大する地形である。排水口は湾奥から約1.2 kmの位置にある。潮位差は比較的大きく、潮流による分散効果が期待できる湾である。

実測との比較検討のための計算は表に示す条件の下で行なった。これらの計算結果は実測値と共に、

A湾, B湾それぞれに対して図-3 および図-4 に示してある。ここに、温度比 T^* は次の定義による。

$$T^* = (T - T_s) / (T_0 - T_s) \text{ ----- (8)}$$

ここに、 T : 任意の点の水温, T_0 : 排水温, T_s : 環境水温

図中の非定常一次元の解は湾内の水温が定常状態に達した後の、一潮時の平均値を示している。また、平面二次元の数値解は次のようにして求めている。

湾内の速度分布については、平面二次元の運動と連続方程式を一潮時について平均した次式にもとづいている。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (A_{xL} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}) + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[(A_{xL} + A_y) \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} \right] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (A_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}) = 0 \text{ ----- (9)}$$

ここに、 P : 流線函數で、 $u = -\partial P / \partial y$, $v = \partial P / \partial x$ により定義されている。 A_{xL} : 潮汐による分散効果を含んだ渦動粘性係数, A_y : 湾軸に直角な方向の渦動粘性係数

数値計算条件 $H_{ur} = 3m$

	パラメータ	A 湾	B 湾
実測	Q (m^3/sec)	20	24
	ΔT ($^{\circ}C$)	6.3	7.0
	水温測定面	0~3mの平均	海表面で一潮時の平均
定常一次元	Δx (m)	150	150
	Q (m^3/sec)	25.2	37
	ΔT ($^{\circ}C$)	5.0	4.5
	K (m^2/sec)	0.1 ~ 1.0	1 ~ 60
	Q_1 ($cal/m^2 \cdot sec \cdot ^{\circ}C$)	46.1	20
非定常一次元	Δx (m)	150	200
	Q (m^3/sec)	25.2	37
	ΔT ($^{\circ}C$)	5.0	4.5
	K (m^2/sec)	1.0	1.0
	u_{tL} (m/sec)	0.1	0.2
平面二次元	$\Delta x = \Delta y$ (m)	20	20
	Q (m^3/sec)	2.0	2.4
	ΔT ($^{\circ}C$)	6.3	7.0
	K (m^2/sec)	1.0	1.0
	Q_1 ($cal/m^2 \cdot sec \cdot ^{\circ}C$)	17.6	17.6

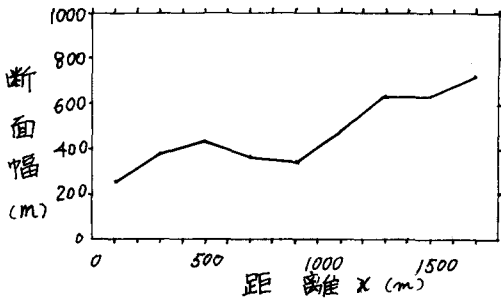


図-1 A湾の断面幅変化

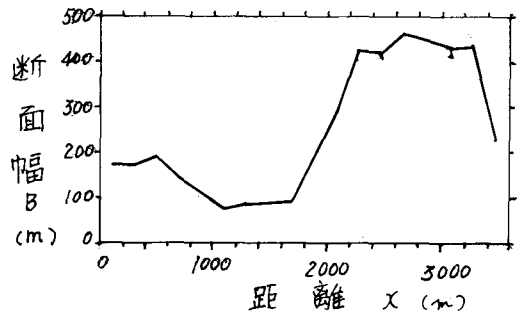


図-2 B湾の断面幅変化

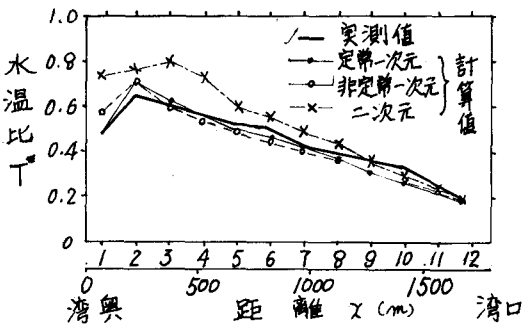


図-3 A湾の一次元水温分布

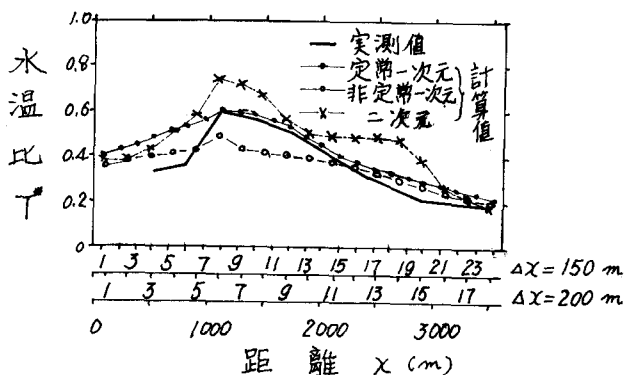


図-4 B湾の一次元水温分布

また水温分布も、一潮時について平均した次式から求めることができる。

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (K_{xL} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial T}{\partial y}) - \frac{Q_1 T}{CP H \omega} \quad \text{----- (10)}$$

ここに、 K_{xL} ：湾軸方向の拡散係数、 K_y ：湾軸と直角方向の拡散係数

○実測値と計算値との比較

(i) A湾：図-3にみられるように、一次元解析（定常、非定常）手法による表に示す条件の下での結果は、実測値にほぼ一致した結果を与えている。一次元解析手法の差分形の数値モデルにおいて、拡散係数の効果を知るために、表の条件（0.1～1.0）より10倍大きい拡散係数を与えたところ、湾奥を除いて湾内各点の水温は温度比として、図-3中の値より10%低下する結果が得られた。このことは拡散係数の増大に伴って、湾奥への蓄熱および湾外への逸散が助長されることを示す。二次元数値解析の結果によれば、排水地点付近の水温分布は実測値より高めに出的ている。これは排水口近傍での下層水加入現象を考慮していないことに起因しているものと思われる。一方、一次元計算においては、実測の排水口点の水温に近付くよう下層水加入現象を考慮した。その操作は実測時の排水熱量に等しくなるように、排水温度および排水量を変更することである（計算条件表参照）。

(ii) B湾：図-4に示すように定常一次元に対する解は、奥部を除いて実測結果にほぼ一致する。また、非定常一次元の解は排水口付近は低めに出的ているが、湾口寄りで実測値と一致している。一方、二次元解析結果は、排水口付近と断面が急激に変化する湾口寄りの付近で実測値を上回った値を示している。このように数値モデルの解析手法によって、異なった結果が生じたのは、拡散係数、または潮流の設定法に問題がありそうである。定常一次元において、拡散係数を1.0～60 m^2/sec のように設定して実測値にほぼ一致することは、単なる潮流の分散効果による拡散場というより、断面変化による分散効果がかなり重要な因子を占めていることが推定できる。

以上、A湾では比較の実測値との一致をみたが、B湾では解析手法によってかなりの相違が生じた。この原因としては、任意の断面の平均水温を算出する時には、断面平均操作より付随して生ずる分散過程を考慮していないと思われる。すなわち、A湾は比較的スムーズに断面が変化し、それに対してB湾は急激に変化している点に問題があると思われる。具体的な修正例として、非定常に対する計算に対して、湾軸方向にわたって拡散係数の値を一定と仮定することは、上記の考察から合理的でないように思われる。また、表層の厚さおよび気象要素の効果についても比較計算を試みた結果、気象要素が水温の値にかなりの影響をもたらすことが明かとなった。

将来の現地研究においては、潮流の特性について十分な注意を払うべきであろう。というのは、潮流の上げ、下げに伴う流速および継続時間等の不規則な変化、すなわち非線型効果が廃水濃度分布を決定するのに重要な因子となるからである。

数値計算の詳細および種々のパラメータによる比較計算の結果については、講演の際に報告する。