

湾口密度流

—— 内部落下流における湾内水の混入と層厚変化 ——

乃万俊文*・中村 充**・吉沢 裕***・谷藤康造****

1. 緒 言

湾内に比べて水深の小さい交流口で外海と接続している閉鎖性内湾漁場では、陸水の影響をうけて表層には比較的密度の小さい水があり、下層には塩分濃度の高い水が停滞して密度成層を形成し、水質環境はよくない。このような漁場水環境改善方法の一つとして海水交換の増大が考えられる。海水交換量とは外海水が潮汐により湾内に流入し、その一部が内湾固有水と置き代って流出時に湾内にとどまる量と定義される。

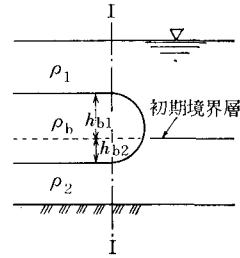
流入する外海水は湾内表層水より密度が大きく、流速は極端には大きくないので潜流タイプ、つまり湾口付近の密度境界面を考えると一つの非定常くさびとして流入する。くさびは潜入に伴って湾内水を混入し、その密度を変化させ境界層付近を潜入する。一方湾からの流出はポテンシャル流と考えられるので、湾内での流入水の厚さひいては混入量の推算が交換率を知る上で必要となる。

混入に関してはこれまで surface jet, wall jet および jet diffusion として運動量論的に取扱われてきた。湾口においてはくさびが形成されるので運動量論的取扱いは単純には行い難い。ここでは段差を有する2次元湾口を考えた場合、湾口上における内部限界水深発生部および流入水の内部跳水終了後の位置をそれぞれ検査面にとって運動量の式をたて内部段波先端の波速と流量との関係連続の条件として途中での混入量が層厚変化に比例することを得、湾内水に成層のない場合について実験を行いこれを検証した。

2. 水理学的考察

以下の理論的取扱いにおいて解を単純化するため次のような前提を置く。

- ① 各層において圧力は静水圧分布をする。
- ② 各層において流速は一様分布をなす。
- ③ 湾口における流入水の密度と各層の密度の比は桁落ちのない場合1とみなせる。
- ④ 外海水流入に伴う水位上昇はきわめて小さい。



図—1 plume のつり合い

内部跳水後の流入 plume において圧力分布から、plume の境界層上・下の厚さ h_{b1} , h_{b2} は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} h_b(\rho_b - \rho_1) &= h_{b2}(\rho_2 - \rho_1) \\ h_{b2} &= \frac{\rho_b - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} h_b, \quad h_{b1} = \frac{\rho_2 - \rho_b}{\rho_2 - \rho_1} h_b \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

ここに、 ρ_1 , ρ_2 および ρ_b はそれぞれ上層、下層および plume における密度である。

$$\left. \begin{aligned} \frac{h_{b2}}{h_{b1}} &= \frac{\rho_b - \rho_1}{\rho_2 - \rho_b} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

ここに、 $\varepsilon_1 = (\rho_b - \rho_1)/\rho_b$, $\varepsilon_2 = (\rho_2 - \rho_b)/\rho_b$

また

$$h_{b1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} h_b, \quad h_{b2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} h_b \dots\dots\dots (3)$$

段波先端の波速は I 断面の流量で補給されるから

$$\begin{aligned} \frac{q_0 + Q}{h_b} &= u_b = \alpha \sqrt{\varepsilon_1 g h_{b1}} = \alpha \sqrt{\varepsilon_2 g h_{b2}} \\ &= \alpha \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} g h_b} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\alpha = \frac{u_b}{\sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} g h_b}} = F_{ib} \dots\dots\dots (5)$$

$$Q = q_1 + q_2 \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 q_0 , q_1 および q_2 はそれぞれ湾口流入量、上層からの混入量および、下層からの混入量、 u_b は plume 内の流速、 α は plume における内部フルード数である。

質量保存則から

$$\rho_b = \frac{\rho_0 q_0 + \rho_1 q_1 + \rho_2 q_2}{q_0 + Q} \dots\dots\dots (7)$$

いま $q_2/q_1 = \beta$ とおけば

* 正会員 農林省農業土木試験場水産土木部
 ** 正会員 農博 農林省農業土木試験場水産土木部研究室長
 *** 正会員 (株)漁港浅海開発コンサルタント
 **** 農林省農業土木試験場水産土木部

$$q_1 = \frac{1}{1+\beta} Q, \quad q_2 = \frac{\beta}{1+\beta} Q \dots\dots\dots (8)$$

式(8)を式(7)に代入して

$$\left. \begin{aligned} \rho_b &= \frac{\rho_0(1+\beta) + \xi(\rho_1 + \beta\rho_2)}{(1+\beta)(1+\xi)} \\ \xi &= Q/q_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

式(2)および式(9)から

$$E = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} = \frac{\rho_2 + \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} - \frac{\rho_0(1+\beta) + \xi(\rho_1 + \beta\rho_2)}{(\rho_2 - \rho_1)(1+\beta)(1+\xi)} - \frac{\rho_1 \rho_2 (1+\beta)(1+\xi)}{(\rho_2 - \rho_1) \{ \rho_0(1+\beta) + \xi(\rho_1 + \beta\rho_2) \}} \dots\dots\dots (10)$$

湾口における内部限界水深は

$$Fr_0 = u_0 / \sqrt{\varepsilon_{01} g h_c} = 1$$

を満足するようにとる, よって

$$q_0 = \sqrt{\varepsilon_{01} g h_c} \cdot h_c$$

ここに, $\varepsilon_{01} = (\rho_0 - \rho_1) / \rho_0$

これを式(4)に代入して

$$\left(\frac{h_b}{h_c} \right)^{3/2} = \alpha \left(\frac{E}{\varepsilon_{01}} \right)^{1/2}$$

よって

$$\eta = \frac{h_b}{h_c} = \frac{(1+\xi)^{2/3}}{\alpha^{2/3} (E/\varepsilon_{01})^{1/3}} \dots\dots\dots (11)$$

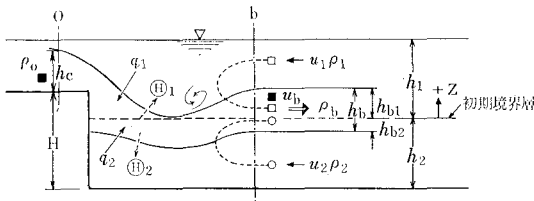


図-2 plume 模式図

次に0検査面を内部限界水深発生部に, b検査面を内部跳水後の位置にとってエネルギー収支を検討する。b断面において plume の密度は ρ_b であるが取扱いを簡単にするため運動エネルギーについては0断面, 上層および下層での密度のまま検討する。

0断面を流入するエネルギー E_T は

$$E_T = q_0 \left\{ \frac{\rho_0 u_0^2}{2} + (\rho_0 - \rho_1) g (H + h_c) \right\} \dots\dots\dots (12)$$

b断面を出入するエネルギー E_R は

$$E_R = q_0 \left\{ \frac{\rho_0 u_b^2}{2} + \frac{1}{h_b} \int_{-h_{b2}}^{h_{b1}} (\rho_0 - \rho_1) g (z + h_2) dz \right\} + q_1 \left\{ \frac{\rho_1 u_1^2}{2} + \frac{\rho_1 u_b^2}{2} + \frac{1}{h_b} \int_{-h_{b2}}^{h_{b1}} (\rho_b - \rho_1) g (h_{b1} - z) dz \right\}$$

$$+ q_2 \left\{ \frac{\rho_2 u_2^2}{2} + \frac{\rho_2 u_b^2}{2} + \frac{1}{h_b} \int_{-h_{b2}}^{h_{b1}} (\rho_2 - \rho_1) g (h_{b2} + z) dz \right\} \dots\dots\dots (13)$$

ここに u_1 , および u_2 はそれぞれ plume 流入により発生した上層および下層の流速で, それぞれ混入量 q_1, q_2 を供給する。流入エネルギーは E_R の外に熱エネルギーとしても消費される。これを θ とすると

$$E_T = E_R + \theta \dots\dots\dots (14)$$

θ は湾口形状 (角度) 落下高などによって決まるであろう。

式(14)から

$$q_0 \{ \rho_0 u_0^2 + 2(\rho_0 - \rho_1) g (H + h_c) \} = \rho_0 q_0 u_b^2 + \rho_1 q_1 u_1^2 + \rho_2 q_2 u_2^2 + u_b^2 (\rho_1 q_1 + \rho_2 q_2) + g q_0 (\rho_0 - \rho_1) (h_{b1} - h_{b2} + 2 h_2) + g q_1 h_b (\rho_b - \rho_1) + g q_2 h_b (\rho_2 - \rho_1) + \theta$$

ここで式(8)を代入し両辺を $q_0(\rho_0 - \rho_1) g h_c$ で割り, $Fr_0 = u_0 / \sqrt{\varepsilon_{01} g h_c} = 1$ とすると

$$2 \frac{H}{h_c} + 3 = \left(\frac{u_b}{u_0} \right)^2 \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_0} \frac{\xi}{1+\beta} + \frac{\rho_2}{\rho_0} \frac{\xi \beta}{1+\beta} \right) + \left(\frac{u_1}{u_0} \right)^2 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_0} \frac{\xi}{(1+\beta)} + \left(\frac{u_2}{u_0} \right)^2 \cdot \frac{\rho_2}{\rho_0} \frac{\xi \beta}{1+\beta} + \left(\frac{h_b}{h_c} + 2 \frac{h_2 - h_{b2}}{h_c} \right) + \frac{\xi}{1+\beta} \frac{h_b}{h_c} \frac{1}{\rho_0 - \rho_1} \{ (\rho_b - \rho_1) + \beta(\rho_2 - \rho_1) \} + \frac{\theta}{q_0(\rho_0 - \rho_1) g h_c} \dots\dots\dots (15)$$

u_1, u_2 及び u_b はそれぞれ式(16)のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \frac{q_1}{h_1 - h_{b1}} = \frac{Q}{(1+\beta)(h_1 - h_{b1})} \\ u_2 &= \frac{q_2}{h_2 - h_{b2}} = \frac{\beta Q}{(1+\beta)(h_2 - h_{b2})} \\ u_b &= \frac{q_0 + Q}{h_b} = \frac{q_0(1+\xi)}{h_b} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

式(1), (9), (16) および前提③から

$$2 \frac{H}{h_c} + 3 = \frac{(1+\xi)^3}{\eta^2} + \frac{\xi^3}{(1+\beta)^3} \times \frac{1}{\left\{ \frac{h_1}{h_c} - \frac{(1+\beta)(\rho_2 - \rho_0) + \xi(\rho_2 - \rho_1)}{(1+\beta)(1+\xi)(\rho_2 - \rho_1)} \right\}^2} + \frac{\beta^3 \cdot \xi^3}{(1+\beta)^3} \times \frac{1}{\left\{ \frac{h_2}{h_c} - \frac{(\rho_0 - \rho_1)(1+\beta) + \beta \xi(\rho_2 - \rho_1)}{(1+\beta)(1+\xi)(\rho_2 - \rho_1)} \right\}^2} + 2 \frac{h_2}{h_c} + \eta \left[1 - 2 \frac{(\rho_0 - \rho_1)(1+\beta) + \beta \xi(\rho_2 - \rho_1)}{(1+\beta)(1+\xi)(\rho_2 - \rho_1)} + \frac{\xi}{1+\beta} \left\{ \frac{\rho_0(1+\beta) + \xi(\rho_1 + \beta\rho_2)}{(1+\beta)(1+\xi)(\rho_0 - \rho_1)} - \frac{\rho_1}{\rho_0 - \rho_1} + \beta \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_0 - \rho_1} \right\} \right] + \frac{\theta}{q_0(\rho_0 - \rho_1) g h_c} \dots\dots\dots (17)$$

したがって, 上層からの連行量に対する下層からの連

行量の比, β , 内部跳水後のフルード数 F_{ib} , および θ を知れば混入量, 層厚変化は式 (11) および式 (17) から求まる。

湾内水に成層のない場合は式 (11) および式 (17) において $\beta=0$, $\rho_2=\infty$ および $h_2=0$ において

$$\eta = \frac{1}{F_{ib}^{2/3}}(1+\xi) \dots\dots\dots (11')$$

$$2 \frac{H}{h_e} + 3 = \frac{(1+\xi)^3}{\eta^2} + \frac{\xi^3}{\left(\frac{h_1}{h_e} - \eta\right)^2} + \eta \left\{ 1 + \frac{\xi}{(1+\xi)} \right\} + \frac{\theta}{q_0(\rho_0 - \rho_1)gh_e} \dots\dots\dots (17')$$

式 (11') を式 (17') に代入すると

$$\left. \begin{aligned} 2 \frac{H}{h_e} + 3 &= (2A^3 + 2)\eta \\ &+ \frac{A\eta \{ (2\eta_{1e}A^2 - 3A)\eta + (3 - \eta_{1e}^2 A^2) \} - 1}{(\eta_{1e} - \eta)^2} - 1 \\ &- \frac{1}{A} + \frac{\theta}{q_0(\rho_0 - \rho_1)gh_e} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

$$A = F_{ib}^{2/3}, \quad \eta_{1e} = h_1/h_e$$

3. 実験の方法

実験は長さ 10m, 高さ 1m, 幅 0.5m の両面ガラス張り水槽に長さ 2.1m, 高さ 0.68m の湾口模型を設置して行った。実験ケースは表のように与えた。

表-1 実験ケース

	層 な し	成 層
淡水厚 h_1 (cm)	83.0	16.0~61.0
塩水厚 h_2 (cm)	—(0)	22.0~67.0
湾口水深 h_0 (cm)	15.0	15.0
落下高 H' (cm)	68.0	1.0~46.0
流量 q_0 (cc/sec/cm)	22.4~48.0	28.9~43.5
ρ_1	≈ 1.0 (<1.0)	≈ 1.0 (<1.0)
ρ_0	1.0041~1.0127	1.0028~1.0125
$\Delta\rho$	0.0061~0.0146	0.0049~0.0140
限界水深 h_e (cm)	3.42~6.95	4.06~6.52

$$h_e = \sqrt[3]{\frac{8}{\epsilon g} q_0^2}$$

ここで落下高とは湾口数から境界層または底面 (層なしの時) の距離をいう。また全水深は実験を通じて 83 cm とした。

流量は定水頭水槽に接続した三角堰で測定し, 塩水密度は電気伝導度計により塩分量を測定し計算した。混合に伴う流量・流速は塩水を染料により着色し, その plume の進行状態から間接的に求めた。

実験は所定の条件に設置した後バルブを開いて塩水を流入させる (この時塩水は少量のウランで着色されて

いる)。その先端は内部段波として進行する。しばらくおいて (50~60 秒後) 塩水をローダミンで着色し, その形状・進行状態を記録して層厚, 流量・流速を間接的に求める。

4. 実験の結果

流入塩水は湾口上で内部低下背水形状となり落下する。落下塩水は落下途中および境界面または底面との衝突により湾内水を混入し, その層厚を増大させる。

成層なしの場合は落下底面上で内部跳水を形成し層厚は急激に大きくなった後, ほぼ同じ厚さで水平移動を行う。

成層の場合 plume は境界面下ある距離まで落下した後斜めに上昇し境界面をほぼ一定厚さで水平に移動する。この場合落下した凹部には大きな着色渦領域が発生し, plume 形状のみから流量・流速を求めることは非常に困難である。

このように落下のある密度流において混入は落下途中または衝突によっておこり, その後は連行もほとんどおこらない。混入の終了した際の層厚 h_b を知れば途中での総混入量もわかることになる。

くさび先端通過後の内部跳水完了点 (b 点) での流況は定常状態と見なせる。厳密には塩水流入に伴って水槽後端部から淡水が越流し定常とはいえないが, 段波先端が反射して返ってくるまでの短かい時間では定常とみなした。

内部落下に伴う層厚変化は例えば層なしの場合式 (18) によって与えられるが, そのためには plume の内部フルード数およびエネルギー損失がわかっていなければならない。実験においてこれらを測定することはできなかった。流入条件として湾口における無次元流入エネルギー $(2H/h_e + 3)$ と η との関係を示すと 図-3 のようになる (図には成層のある場合の内部落下について

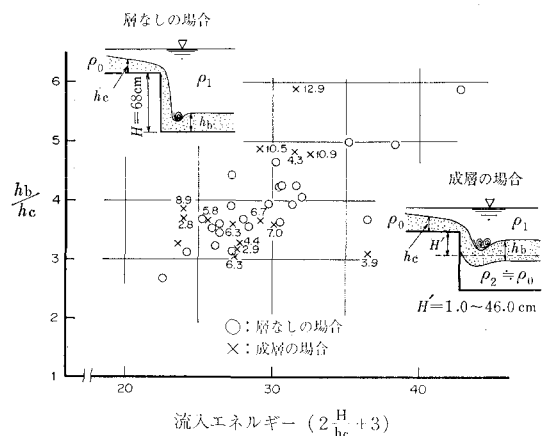
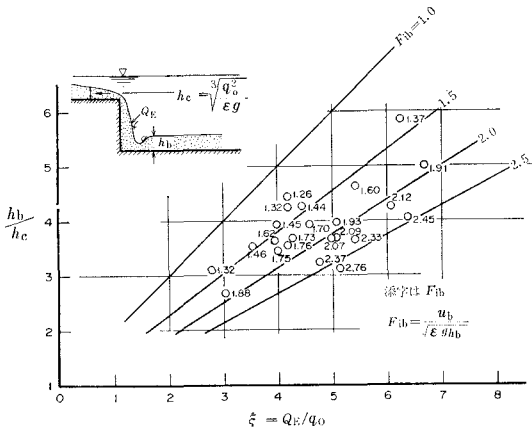


図-3 流入エネルギーと層厚変化



図—4 厚層変化と混入量

も×印で示したが、この場合は着色 plume での h_b の読みとりが困難で精度がよくなかったこともばらつきの原因の1つと思われる)。成層なしの場合について式(18)の F_{ib} および θ をこの実験値を用いて求めると

$$F_{ib}=1.75, \quad \theta=5.5 q_0(\rho_0-\rho_1)gh_c$$

が得られる。

F_{ib} つまり段波波速と流速比に関しては、筆者ら¹⁾、および Huber²⁾ の求めた値 1.66 にきわめて近いものである。

また、層厚変化と混入率について、成層なしの場合着色 plume から目測したものを参考までに示すと図—4 のようになる。

5. 結 論

流入に伴う湾口密度流のうち内部落下によって生ずる他層水混入と流入 plume の層厚変化について検討した。検討において本来非定常であるべき流入 plume を短い時間については定常と考え式(11)および式(17)を得た。成層のない場合については水理実験により跳水後の内部フルード数および流入落下混入に伴うエネルギー損失の概略の値を得た。

今後は跳水後の内部フルード数、成層のある場合の混入量比 β 、また湾口形状(角度)とエネルギー損失の関係の究明など今後に残された問題点の方が多いといえる。

参 考 文 献

- 1) 中村・乃万・不破：底層水の選択取水に関する研究，第20回海岸工学講演会論文集，1973.
- 2) Huber, D.G.: Irrotational motion of two fluid strata towards a line sink, Proc. A.S.C.E., Vol. 86, No. EM 4, 1960.