

ゲートからの定常流出に伴う内部流の流況
Densimetric flow pattern accompanying outflow from a gate.

水産工学研究所 正員 〃乃 万 俊 文
東亜建設工業 K.K 加 戸 俊 広

1. はじめに

海面養殖は一定水域を生物生産の場として長期間使うものである。生物生産を有効に行うためには養殖施設の清掃、給餌、収穫などの管理作業が必要である。それらの作業は通常小舟で行うので、養殖は岸に近く波浪の直接当たらない静穏水域で行われることが多い。静穏水域は一般に外海水との海水交換率が小さいため多量の養殖生物を収容したり、給餌を続ければ海底には残餌や排泄物が蓄積し、その分解のため酸素が消費され、水質悪化につながる。特に閉鎖性の湾内漁場では夏季には太陽輻射、陸水流入のため成層が発達し、底層への溶存酸素の供給が不足し水質悪化が問題となる。このように養殖を行うには水質改善対策の検討が重要である。

閉鎖性湾内漁場の水質改良保全のためには潮汐を利用した交流口改善工法¹⁾や、機械エネルギーによる外海水導入が実施され、また導流堤方式が提案されている²⁾。現実の海湾に存在する密度成層を考慮して水質の改良保全をはかるには、潮汐による外海水の流出に伴う湾内水の混合機構が明らかにされねばならない。そのための基礎研究として、水槽実験において淡水域へゲート下端から塩水が定常流入する場合の流況および混入量には、ゲート開度が大きく影響することを実験結果から明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は図-1に示すように長さ14m、幅0.2m、深さ0.5mの両面ガラス張り水路で、塩水槽、高水槽(1×1×1m)および計量水槽から成り、塩水70cc/s/cmまで流すことができる。実験水路の上流方には整流板、模型湾口が設けられており、上流端から1.8mの所にスルースゲートが設けられている。

実験に先だちゲートを下ろして下流側に淡水、上流側に塩水をはば水位が釣り合うように注水し所定水深まで湛水させる(ゲートは塩板にゴムを張りつけたもので水路半ばまでの戸当り溝との接触もよく塩水または淡水の遮水は十分である)。この状態で上流側塩水を余水吐で放流しながら所要流量に設定し、余水吐を閉じると同時に、ゲートを人力で所定の高さに引揚げて実験開始とする。従って基本的には淡水(上層)静止、塩水(下層)流動の現象となるが、淡水は下流端の堰を越流して流出する。

流量は計量槽の三角堰を用いて測定するが、余水吐から計量槽に受けて測定することも補助的に行った。

淡水密度は採水して比重計で、塩水密度は標準塩水で検定を行った導電率計でその鉛直分布を求めた。ブルームの状況は予め塩水等をウランインで着色して目視で観測した。ゲート下流側流量はブルームの高さとその進行速度の積として求め、ブルームの速度はある距離を移動するのに要する時間から求めた。

実験の組み合わせは表-1の通りである。

混入率はブルームの密度から(1)式で計算する。

$$\xi = \frac{q_e}{q_0} = \frac{\rho - \rho_1}{\rho_0 - \rho_1} \dots\dots\dots (1)$$

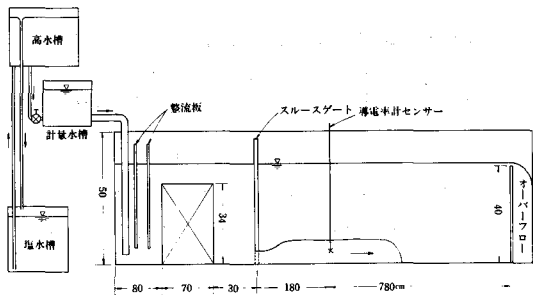


図-1 実験装置模式図

ここに、 ε ：混入率、 q_0 ：塩水流量、 q_e ：淡水混入量、 ρ_0 ：塩水密度、 ρ_1 ：淡水密度、 ρ ：ブルーム密度。

3. 実験結果およびその考察

1) 水理現象

流況はゲートの開度によって3つの型がある。

まず、開度が小さい場合流出塩水はゲートを離れて縮流を受けた後内部跳水を起こす。この途中跳水区間において界面には渦が発生し、上層淡水の混入がみられる（A-タイプ）

開度が大きくなると流出塩水は縮流を受けることなく内部跳水を起こす。この場合淡水混入は小さい（B-タイプ）

更に開度が大きくなるとゲート開口部上端から淡水が逆流して、塩水貯留部で混合しながら流出する。この場合混合塩水は跳水を起こすことなく、その層厚がほぼ一定で下流方へ流出する（C-タイプ）

ゲートの開度を内部限界水深を用いて D/h_0 と定義するとタイプ分けは次のようである。

$$D/h_0: A < 1.6 < B < 2.2 < C$$

$$F_D: A > 0.5 > B > 0.3 > C$$

ここに、 D ：開口高さ、 h_0 ：内部限界水深 $h_0 = (q_0^2 / \varepsilon g)^{1/3}$ 、 $\varepsilon = \rho_0 - \rho_1 / \rho_0$ 、 g ：重力の加速度。

更に開口部における内部フルード数 F_D と混入率の関係を示すと図-2のようになる。 F_D は次のように定義する。

$$F_D = \frac{q_0}{\sqrt{\varepsilon g D^3}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

従って F_D と開口度の関係は(3)式のようなのである。

$$F_D = \left(\frac{h_c}{D} \right)^{3/2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

つまり流況は開度によって異なることがわかる。またB、C-型の境界では混入ゼロとなることがうかがわれる。

2) 縮流係数

以下縮流を受けるA型の流況について検討を進める。

縮流部のブルーム高さを h_1 とするとゲート上流側での流入エネルギーは

$$(\rho_0 - \rho_1) g (H - h_1) + \rho_0 \frac{(q_0 / H)^2}{2}$$

縮流部では

$$\rho_0 \frac{u_1^2}{2} + \rho_1 g \Delta H$$

流入エネルギーが縮流部に伝わる割合を k とすると

$$k \left\{ (\rho_0 - \rho_1) g (H - h_1) + \rho_0 \frac{(q_0 / H)^2}{2} \right\} = \rho_0 \frac{u_1^2}{2} + \rho_1 g \Delta H \quad \dots (4)$$

ここに、 $u_1 = q_0 / h_1$ 、 H ：全水深、 ΔH ：塩水流入による水位変動、但し実験において ΔH は残念ながら測定していない。実験結果から次式の k を求めると図-3のように h_0 / D の関数となる。

$$k = \frac{u_1^2}{2 \varepsilon g (H - h_1) + (q_0 / H)^2}$$

表-1 実験の組み合わせ

流 量	q_0 (cc/s/cm)	6.5 ~ 16.3
開 口 高	D (cm)	0.8 ~ 8.5
密 度 差	ε	0.0021 ~ 0.0143
全 水 深	H (cm)	40 に固定

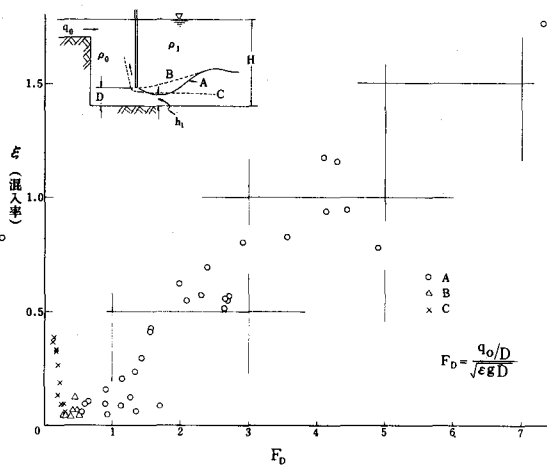


図-2 混入率と F_D の関係

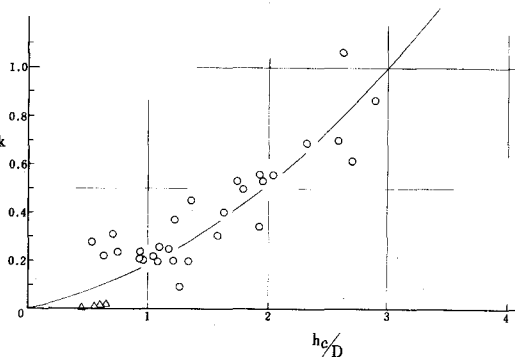


図-3 k と h_0 / D の関係

k は基本的には定数と考えられるが、 h_c/D が大きい即ち閉塞の度が強まると k が大きくなるのはゲート上流側に堰きあげが起ったのを無視したことによると考えられる。右辺第 2 項を無視して(4)式を整理すると

$$2kC_c^3 - \left\{ 2k \frac{H}{D} + k \frac{h_c}{D} \left(\frac{h_c}{H} \right)^2 \right\} C_c^2 + \left(\frac{h_c}{D} \right)^3 = 0 \quad \dots (5)$$

ここに、 C_c : 縮流係数 ($=h_1/D$)、 k を h_c/D の関数として(5)式を解くと縮流係数は図-4 の曲線のようにになる。

3) 共役水深

共役水深については中村ら³⁾が運動量則を適用して(6)式を示している。

$$\eta^3 - (1+\xi)(1+2F_{r1}^2 - 2\frac{\rho}{\rho_0} \frac{F_{r1}^2 \xi^2}{\eta_1 C^2 \eta}) \eta + 2\frac{\rho}{\rho_0} (1+\xi)^3 F_{r1}^2 = 0 \quad (6)$$

ここに、 $\eta = h_2/h_1$ 、 h_2 : 跳水後のブルームの高、 $F_{r1} = u_1/\sqrt{\varepsilon g h_1}$ 、 $\eta_1 C = H/h_1$ 、 u : 縮流部流速。

(6)式には上層水の連行されることによって発生した運動量の項(第2項カッコ内第3項)がある。その流速 u_0 は $u_0 \ll u_1$ でこの項を省略すると

$$\eta^3 - (1+\xi)(1+2F_{r1}^2) \eta + 2\frac{\rho}{\rho_0} (1+\xi)^3 F_{r1}^2 = 0$$

いま $\rho/\rho_0 = 1$ とおき、また $\xi = 0$ とおくと

$$\eta = \frac{1}{2} (-1 + \sqrt{1 + 8F_{r1}^2}) \quad \dots (7)$$

となり空気界面における跳水式と同型となる。実験結果を示すと図-5 のようによく一致しており、共役水深を求める場合は混入を考慮しなくともよいことがわかる。

4) 上層水の混入

A-型の流況の場合、上層淡水の混入は主に跳水区間で起こる。その混入量を中村らは、①運動量則に基づく(6)式、②共役水深位置を検査面とするエネルギー伝達率、および③エリソン・ターナーに倣う方法で計算できるとしている。(6)式での計算結果は実験結果を説明しない(後述の図-8において計算結果は立っている)。第2の方法は伝達率を次式で定義する。

$$R = \frac{\left\{ (\rho - \rho_1) g h_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} \right\} q_e}{\left\{ \left\{ (\rho_0 - \rho_1) g h_1 + \frac{\rho_0 u_1^2}{2} \right\} - \left\{ (\rho - \rho_1) g h_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} \right\} \right\}}$$

$$u_2 = (q_0 - q_e) / h_2$$

R は実験結果では 0.04 ~ 0.30 であるがこの伝達率と F_{r1} または h_c/D との関係が見出せない。そこでエリソン・ターナーに倣って混入率は両層の相対速度に比例すると考えると

$$\frac{q_e}{L} = E \left(\frac{u_1 + u_2}{2} + u_0 \right) \quad \dots (8)$$

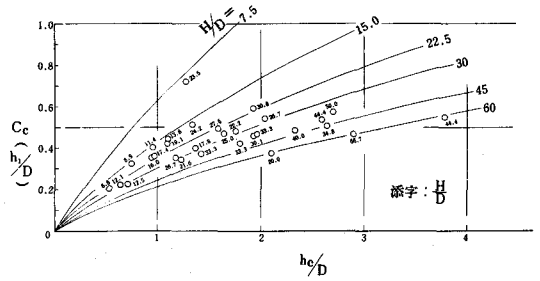


図-4 縮流係数

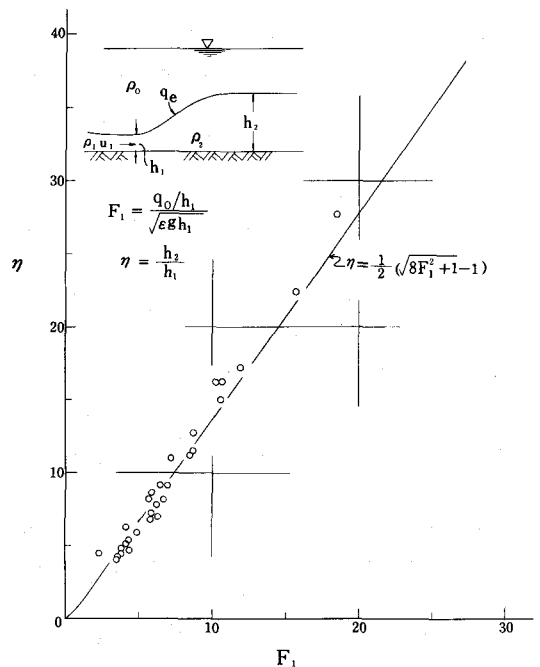


図-5 共役水深

ここに、 L ：跳水区間長、 E ：連行係数。
いま跳水区間長は共役深差に比例すると考え、その比例係数を K とおく

$$L = K(h_2 - h_1) \quad \dots\dots\dots (9)$$

(9)式を(8)式に代入して整理すると

$$\xi = \frac{KE(\eta - 1)(\eta_{1C} - \eta)(\eta + 1)}{2\eta(\eta_{1C} - \eta) - KE(\eta - 1)(\eta_{1C} + \eta)} \quad \dots\dots\dots (10)$$

つまり、混入率 ξ は K および E をパラメーターとする η の関数で、 K 、 E が分れば計算できる。まず、 K について実験結果を示すと図-6 に示すように横軸にとった h_c/D につれて $K = 1.36 \sim 7.20$ までに変化している。

次に実験結果による K 、 η 、 ξ を使用して(10)式から E を逆算すると図-7 に示すよう $E = 0.04 \sim 0.033$ の範囲にありオーダーとしてエリソン・ターナーによる値と同程度であるが彼らが示したリチャードソン数が小さくなれば E が大きくなる傾向は認められない。

さて、実験における混入率 ξ を示すと図-8 のように η が大きくなるにつれて ξ も大きくなる傾向を示す。今、 K は図-6 に示したように h_c/D に関係するがこれを極値を 8 とする指数関係と考え、 E を定数 ($E = 0.018$) として(10)式を解くと図-8 中の曲線のようになる。計算結果から η_{1C} が同じ場合 h_c/D が大きい程 ξ も大きくなり、また h_c/D が同じ場合は η_{1C} が大きくなると ξ が小さくなることを示している。実験結果はこれら曲線との適合度は低い。しかし、式の示す傾向はある程度（例えば $\eta < 10$ で対比できるものが見られる）満足している。

5) 跳水後の流れ

跳水後のブルームはほぼ一定高さを保って下流側に流去する。その速度もほぼ一定であるのでこれ以降はそう大きい混入はないとして混入量等の測定は行っていない。この状態における内部フルード数 F_2 は A、B、C の 3 型とも $0.33 \sim 0.58$ の範囲にあり開口度等との関係はみられない。つまり、この実験においては跳水後のブルーム（跳水を起こさない場合も）はその内部フルード数 $F_2 = 0.45$ 程度で安定し、流去することがわかる。

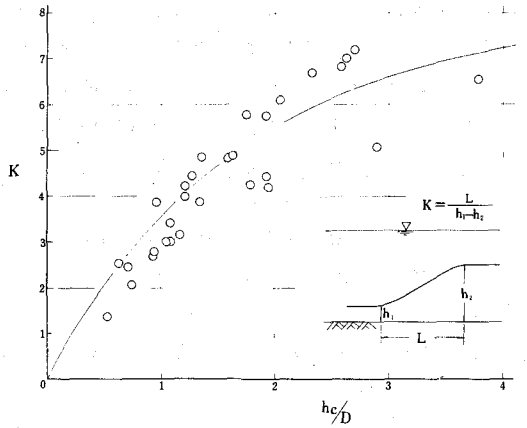


図-6 跳水長と h_c/D

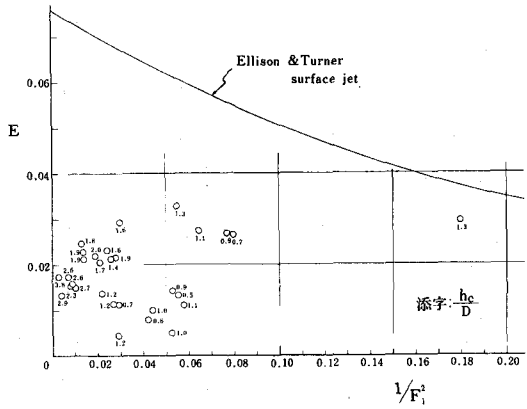


図-7 連行係数 E

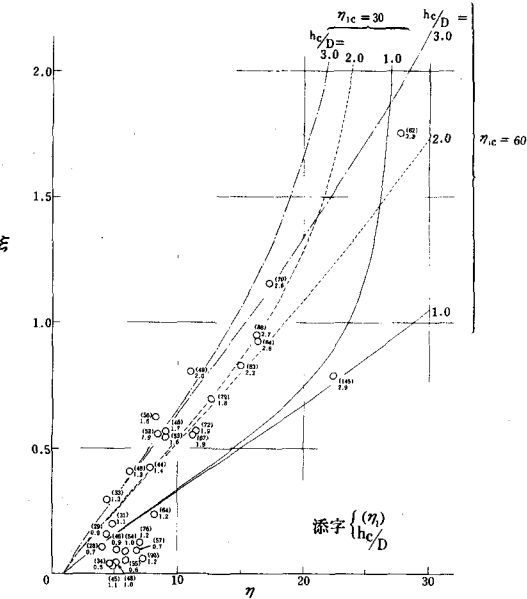


図-8 混入率と共役水深の関係

4. 結 論

水槽実験により淡水域へゲート下端から塩水が定常流入する場合の流況を観察して次のことがわかった。

① 流況はゲートの開口度によって3態あり、その区分は内部限界水深を指標とする開口度によって行なえる。

ゲートを出てから縮流を受けて後内部跳水を起こす流況について検討を進め

② 縮流係数は開口度に関係するとしてその推算式を示した。

③ 内部跳水における共役水深については自由水面の場合の共役水深の式と同型の式で推算できる。

④ 内部跳水の跳水長は開口度に関係する。

⑤ 内部跳水時におこる上層淡水の混入量についてはエリソン・ターナーに倣って解析し連行係数Eを求め、混入量の推算式を示し実験結果との比較を行った。

⑥ 内部跳水後（跳水の起こらない場合も）の内部フルード数は0.45周辺にある。

参 考 文 献

- 1) 中村充・萩野静也：海水交換に関する研究，農土試報告15，1977
- 2) 中村充・萩野静也・乃万俊文：潮流制御による水質改善工と瀬戸内海水質改善への適用，農土試報告14，1976
- 3) 中村充・乃万俊文・龍富士夫：密度成層流の内部跳水，第25回海工論集，1978