

# 海底地形急変部を通過する準定常密度流の二つの流況

柴田 正和\*・大西 外明\*\*

## 1. はじめに

火力・原子力発電所の冷却水取水口の前面で海底地形が急変する場合、たとえば取水開口部前面の海底を掘削することによって段落ちが形成される様な場合、段落ち部に生ずる自由噴流境界、傾斜境界面に沿う流れの加速、内部跳水の発生が成層密度流の安定性ひいては選択取水の効率に影響を及ぼす。この問題に関連して著者らは先に、取水開口部に比較的近い所に段落ちがある場合について検討し、段落ちを設けずその分だけ開口高を小さくした方が選択取水効率が良くなることを指摘したり、この前報の結論は、段落ち部と取水開口部の位置が接近している条件下での実験を基にしたものであったために、開口部直上流部における内部境界面の傾斜の影響と、段落ちを設けることによりもたらされる影響との総和を観測した結果となり、段落ち部自身の影響を抽出するに至らなかった。そこで本論文では、段落ち等の海底地形急変部が取水開口部より十分上流にある場合を取り扱い、冷却水取水に伴う水理学的現象について考察を行う。

## 2. 海底地形急変部を通過する密度流の流況に関する考察

図-1 のような二層密度成層水域で、スルースゲート

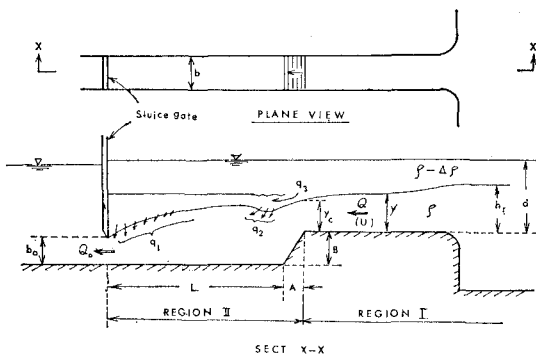


図-1 本論文で扱う密度流モデル

下端の取水開口部から下層水取水をする場合を考える。ただし取水路の途中、取水開口部より十分上流に段落ちを設けるものとする。沖合水域内での断面と段落ち部上流の任意断面との二つの断面についてエネルギー方程式をたてると、流れを非粘性とした沖合での流速を無視すると、

$$\frac{(\rho - \Delta\rho)(d - h_r)}{\rho} + h_r = \frac{(\rho - \Delta\rho)(d - y)}{\rho} + y + \frac{u^2}{2g} \quad (1)$$

段落ち部上流部を領域Ⅰと定義し、この領域での下層流の流量を  $Q$ 、取水路巾を  $b$  とすると、平均流速  $u$  は  $Q/by$  であり、これを上式に代入して

$$Q^2 = 2g \frac{\Delta\rho}{\rho} b^2 y^2 (h_r - y) \quad (2)$$

をうる。 $h_r$  を与えた場合の領域Ⅰにおける下層流の最大流量  $Q_0$  は、式(2)を  $y$  で微分して 0 とおくことによりえられるが、そのようにして求めた水路内の限界水深は  $y_0 = 2/3 h_r$  となり、 $Q_0$  は

$$Q_0 = b \sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} \left( \frac{2}{3} h_r \right)^3} \quad (3)$$

となる。限界水深  $y_0$  が生じる場合、それは段落ち頂部近傍においてであり、取水路の流れはこの支配断面を境にして、上流側の領域Ⅰと下流側の取水開口部に至る領域Ⅱに2分されることになる。この場合、領域Ⅱには前回の報告で示した様に、上下層の間には常に楔状の中間層が発生する。このような二領域に分割される状態は、取水開始直後もしくは取水流量  $Q_0 \geq Q_0$  の時に発生することは容易に予測されるが、一方、 $Q_0 < Q_0$  の場合には取水開口部のみが支配断面となる。さて、目を下層流内への上層水の混合機構に移すと、混入は常に中間層を介在することにより、すなわち、中間層と下層との境界面の不安定化に伴う中間層成分の下層への連行によって初めて起る<sup>2)</sup>。この中間層の連行は主として取水開口部直上流の急傾斜境界面の不安定化による  $q_1$  と段落ち直下流部の境界面擾乱による  $q_2$  によって生じ、 $Q_0$ 、 $Q$ 、 $q_1$ 、 $q_2$  間には次の関係が成り立つ。

$$Q_0 = Q + q_1 + q_2 \quad (4)$$

取水流量が小さくて  $Q \ll Q_0$  の場合は、 $q_1$  と  $q_2$  は共

\* 正会員 理修 東京理科大学 土木工学科研究員 (INA 新土木研究所より派遣)

\*\* 正会員 工博 東京理科大学教授 土木工学科

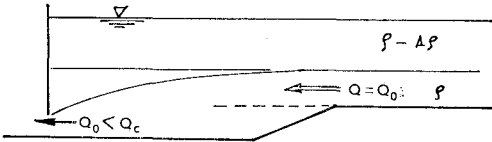
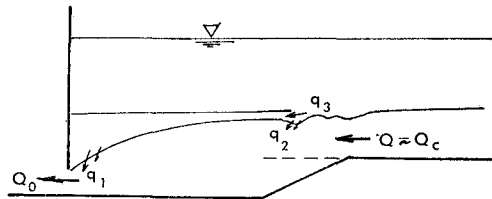
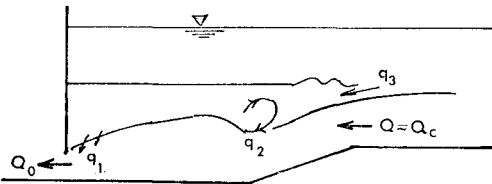


図-2 水平流れ ( $Q < Q_c$ )



(a) horizontal flow



(b) submerged flow

図-3  $Q \approx Q_c$  時の2つの下層流況

に小さく、したがって  $Q=Q_0$  となり、下層流の挙動は唯一の支配断面である取水開口部の水理条件により支配される。この場合、段落ち部を通過する下層流は、均等質流体内の噴流となり、図-2のような水平な軌道を書くと考えられる。この状態では中間層と下層との境界面のこう配は緩やかであり、境界面は安定を保ち  $q_1=q_2=0$  である。つぎに、 $Q \approx Q_c$  の状態では、段落ち部付近の境界面の変動が大きくなり、それに伴ない上層から中間層への混入  $q_3$  (図-3 参照) が生じる。もしこの  $q_3$  が  $q_1$  と  $q_2$  の和に等しいならば、定常もしくは準定常な密度流パターンが生じるのであるが、一般には  $q_3 \neq q_1 + q_2$  である。 $q_3 > (q_1 + q_2)$  の場合は中間層水位が増加し、下層の水平流れは図-3 (b) のような潜り込み流れとなる。この状態では  $(q_1 + q_2)$  が増加し、したがって  $Q < Q_0$  となり、再び図-3 (a) の水平流れに戻る。このようにして、領域 I が限界流に近い状態では、水平流れと潜り込み流れの2つの流況が交互に発生するものと考えられ

る。なお、 $Q_0 \gg Q_c$  の状態では  $q_3 \approx Q_0 - Q_c$  となる。

### 3. 実験結果とその考察

以上の予測の検証の目的で水理模型実験を行なった。実験は東京理科大学水理実験室の鉛直二次元水槽を用いた。その諸元は参考文献<sup>1)</sup>に与えられている。水路中央に設置されたスルースゲートの上流側に塩分濃度差による密度成層を作った。ゲートより  $L$  だけ上流側に  $1/3$  勾配又は直角の二種類の段落ちを設け、付近の密度流の流況とそれが選択取水に及ぼす影響を考察した。(図-1)

前報の実験ではゲートと段落ちとの間の距離を水深の数倍程度にとった。その結果は、段落ちを設けずその分だけ開口高の小さい条件の方が選択取水効率が良い。即ち掘削の効果は無いというものであった。今回の実験では、段落ちを水深に比べて十分にゲートより上流に離れた。これにより、ゲートにより塞ぎ止められた中間層と下層との間の内部境界面の傾斜の影響<sup>2)</sup>を分離することを意図した。実験を始めるに当たっては、段落ち勾配  $B/A$  を十分小さく、又  $L$  を十分大きくとれば選択取水効率は段落ちを設けない場合よりも良くなることが予想された。

実験条件は表-1に掲げられている。Run 1~4 は内部フルード数 ( $Fi$ ) が  $0.84 \sim 0.98$  であり、限界状態に近い場合に相当し、一方、Run 5, 6 では  $Q_0 > Q_c$  である。2節で予想したとおり、Run 1~3 において密度流は図-3 (a) と 3 (b) に模式的に示した二つの典型的な流況を各々 10 分のオーダーの時間だけ継続し、これらの間を遷移し続ける・同様の現象は著者らの先の実験でも観測された<sup>3)</sup> (図-4)。遷移に要する時間も長い場合には 10 分以上に達するが「遷移」という状態が今の所必ずしも明確に定義できていないのでこれを分離して示

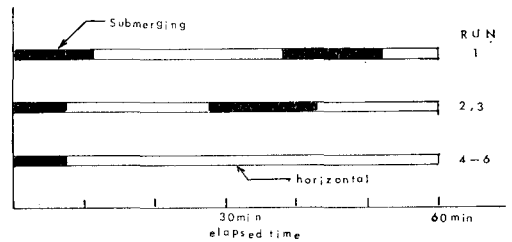


図-4 二つの流況の継続時間

表-1 実験条件 (cgs 単位)

| Run | A  | $h_2$ | Q     | $Q_{max}$ | u   | $Fi$ |                  |
|-----|----|-------|-------|-----------|-----|------|------------------|
| 1   | 15 | 3.5   | 650   | 420       | 6.2 | 0.84 | $h_1 = 10$       |
| 2   | 0  |       | 650   |           | 6.2 | 0.84 | $\rho_1 = 1.000$ |
| 3   | 15 |       | 760   |           | 7.2 | 0.98 | $\rho_2 = 1.016$ |
| 4   | 15 |       | 1,880 |           | 8.9 | 0.86 | $b_0 = 6$        |
| 5   | 0  | 7.0   | 380   | 1,100     | 3.6 | 0.49 | $L = 265$        |
| 6   | 15 |       | 1,080 |           | 5.2 | 0.50 | $B = 5$          |

さなかった。

一方, Run 4~6 では 図-4 に示されているように, 最初に潜り込み流れが出現したあと水平流れに遷移するとそのまま水平流れを続け, 再び潜り込み流れへの遷移を起さない。このうち Run 4 では, 結局潜り込み流れにはならなかったものの, 途中遷移すると思わせるような徴候を一回見せたことを特記しておかねばならない。

図-4 に示された各状態の継続時間は, 実験条件を同一にとったと考えて実験しても数十パーセントほど異なる値を示すことがある。つまり外的条件に非常に敏感で, その意味でこの値自体は定性的性質を示すに留めるものであることを断っておかねばならない。

中間層 (Transition Layer) では, 写真-1 にも示されているように不規則な循環流が生じており, 図-5 に示した A 点付近で生ずる下層流の内部跳水により, かなり速い割合で中間層成分が下層へ連行されてゆく様子が見られる。この潜り込み流れが 10 分のオーダーで安定して継続するということは, A 点でのこのかなり速い割合での中間層成分の流失を補償する, 上層成分の中間層への連行が B 点付近で生じていることになる。このことは, B 点付近の内部境界面が, 水平流れの流況では静穏を保っており, 潜り込み流れの流況では内部波を立たせていることもとも符合する。更にこの内部波は, 水平流れから潜り込み流れへの遷移の前兆段階から発達を見せて

おり, この内部波の不安定化により上層成分が下層部へ連行され 図-5 の中間層を形成することが理解される。しかし, 約 10 分という可成長い間 A 点からの流失と B 点からの供給の平衡がとれて, 安定な潜り込み流れが続いたあとに, 何が原因となってこの平衡が崩れ, 中間層が消失するのかは未だ明らかになっていない。

水平流れの流況においては (図-2, 図-3 (a)), 図-5 におけるような中間層は形成されていない。又上層と下層の間の境界面は段落ち付近でも静穏を保っている。これらの現象は 2 節での予測と一応の対応を示しているもののそれが潜り込み流れへの遷移を見るとき, 何が引き金となって内部波が立つのか未だ分っていない。ただ, 水平流れから潜り込み流れへの遷移が起る Run 1~3 と起らない Run 4~6 の実験条件の差異がそれに対するヒントを与えてくれる。有限振幅の内部波が立つということは微小擾乱が不安定化したことを意味する。Run 4 は先にも述べたようにやや特殊な振舞を見せたのでこれを例外とすると Run 5~6 は Run 1~3 に比べて相対流速が小さいために, 内部境界面の安定性の条件が破られなかったのであり, 一方 Run 1~3 の相対流速がより大きい状態では微小擾乱は不安定化し得る状態にあり, それが何らかの引き金により内部波が増幅され, それが砕波することにより上層の連行を引き起すものと考えられる。

#### 4. む す び

海底地形急変部付近における密度流は, フルード数の如何によって, 水平流れと潜り流れという二つの異なった流況を呈することを論じた。この現象は自由水面を有する均等質流体の射流と常流に関連した問題に対応するものであろうが, 内部境界面においては関連するパラメータが多くなり, 取り扱いが複雑となるが, それだけに興味も多い。現在, 密度流安定理論の立場からの検討を進めているので, その結果については後日報告する。

#### 参 考 文 献

- 1) 大西外明・宮崎洋三・柴田正和: 冷却水選択取水に及ぼす海底地形の影響, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 490~493, 1978.
- 2) 柴田正和・大西外明: 密度流の境界面の安定性—傾斜境界面に沿う加速流について—, 第 22 回水理講演会論文集, pp. 87~94, 1978.
- 3) 柴田正和・大西外明: 海底地形急変部に基づく内部境界面・擾乱機構, 第 23 回水理講演会論文集, pp. 355~362, 1979.
- 4) Chandrasekhar, S.: Hydrodynamics and Hydro-magnetic Stability, Oxford, Clarendon Press, 1961.

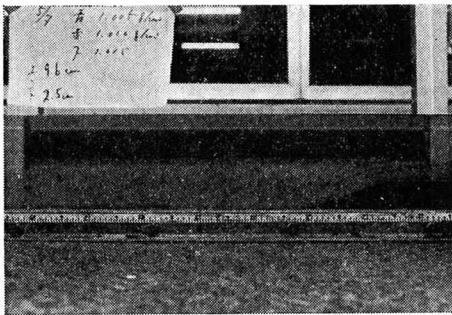


写真-1 潜り込み流れ

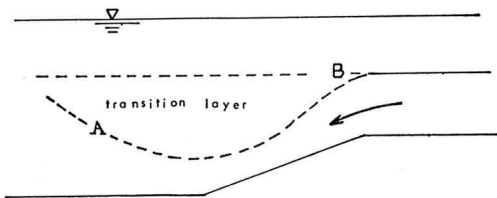


図-5 潜り込み流れ