

底層水の選択取水に関する研究

中村 充*・乃万俊文**・不破政一***

1. 緒 言

狭くされた交流口で外海と結ばれる内湾漁場において交流口敷高より内湾湾底が低い場合、一般に内湾漁場水は密度成層、水質成層を形成する。つまり上層には塩分濃度は比較的小さいが溶存酸素に富む水塊があり、下層には高塩分であるが貧酸素の水塊が存在する。この2つの水塊は秋季の全層対流期には混合するがその際下層の貧酸素水塊が上昇して生簀などで飼育されている水産生物に害を及ぼすことがある。この対策の一つとして底層水のみを排除して漁場水質の改善をはかることが考えられる。

ここでは、上層水の連行が行なわれているときの境界層の形状を一種の内部段波であると考えて、底層水を選択的に排除する際の限界水理条件を決定した。また、取水が上層水を連行する限界を越えて行なわれる場合の上層水連行率についても限界内部フルード数の比で表わすことができた。

2. 底層水取水に関する水理学的考察

境界層をはさんで密度 ρ_1 , ρ_2 の流体の成層を考える場合、境界層よりある距離 h_s だけ下方に設置した取水パイプから下層水を取水する場合、取水流速、 h_s および上下層の密度差 $\Delta\rho (= \rho_2 - \rho_1)$ のいかによっては、上層水を連行することが起こる。漁場内水質改善のためポンプなど動力を導入する場合は、上層水を連行することは事業効果の面より避けたいところである。

連行が生じた状態での境界層の形状を2次元的に考えると、吸込口から十分遠い地点で水底より h_2 の高さにある境界層が吸込口では $h_2 - h_{sc}$ に低下している。一種の内部段波であると考えて以下のように取り扱う。

(1) 2次元の場合

検査面 I, II について力のつり合いを考えると

$$F = \frac{h_2}{2} (2\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) g - \frac{h_2 - \zeta}{2} \{ 2\rho_1 (h_1 + \zeta) + \rho_2 (h_2 - \zeta) \} g - \frac{\zeta}{2} \{ \rho_1 h_1 + \rho_1 (h_1 + \zeta) \} g$$

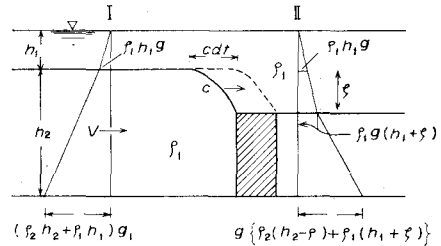


図-1 内部段波模式図 (2次元)

$$= \frac{\zeta g}{2} (\rho_2 - \rho_1) (2h_2 - \zeta) \dots\dots\dots (1)$$

運動量の増加は

$$Fdt = \rho_2 (h_2 - \zeta) Cdt V \dots\dots\dots (2)$$

また連続条件から

$$Vh_2 = C\zeta \dots\dots\dots (3)$$

式(3)より

$$C = \frac{Vh_2}{\zeta} \dots\dots\dots (4)$$

したがって式(2)に式(1)および式(4)を代入すると、

$$\frac{g\zeta}{2} (\rho_2 - \rho_1) (2h_2 - \zeta) = \rho_2 (h_2 - \zeta) \frac{V^2 h_2}{\zeta} \dots\dots\dots (5)$$

ゆえに

$$\left. \begin{aligned} V &= \zeta \sqrt{\frac{eg(2h_2 - \zeta)}{2h_2(h_2 - \zeta)}} \\ C &= h_2 \sqrt{\frac{eg(2h_2 - \zeta)}{2h_2(h_2 - \zeta)}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ただし

$$\varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}$$

限界吸込深を h_{sc} 、そのときの波速および流速を C_c , V_c とすれば、 $\zeta = h_{sc}$ において

$$\left. \begin{aligned} C_c &= h_2 \sqrt{\frac{eg(2h_2 - h_{sc})}{2h_2(h_2 - h_{sc})}} \\ V_c &= h_{sc} \sqrt{\frac{eg(2h_2 - h_{sc})}{2h_2(h_2 - h_{sc})}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

このときの吸込量を q_c とすれば

$$q_c = C_c h_{sc} = V_c h_2$$

したがって次式を得る。

$$q_c = h_2 h_{sc} \sqrt{\frac{eg(2h_2 - h_{sc})}{2h_2(h_2 - h_{sc})}} \dots\dots\dots (8)$$

式(8)は吸込口が水底付近にあるような場合には、分

* 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 農林省農業土木試験場水産土木部研究員
 *** 東海大学学生

母がゼロになって発散し適応できない。以上における取扱いでは底面摩擦がゼロと考えたが実際には吸込口付近の底面摩擦が影響して流速の鉛直分布形が以上の取扱いと異なってくる。その流速の鉛直分布の平均化における効果を、自由水面段波¹⁾と同じように考えて修正すると式(7)および式(8)はそれぞれ次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} C_c &= h_2 \sqrt{\frac{\varepsilon g (2h_2 - h_{sc})}{2h_2 (h_2 - \eta h_{sc})}} \\ V_c &= h_{sc} \sqrt{\frac{\varepsilon g (2h_2 - h_{sc})}{2h_2 (h_2 - \eta h_{sc})}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)'$$

$$q_c = h_2 h_{sc} \sqrt{\frac{\varepsilon g (2h_2 - h_{sc})}{2h_2 (h_2 - \eta h_{sc})}} \dots\dots\dots (8)'$$

ただし、修正係数 η は

$$\eta = 0.82 + 0.6 \frac{h_2 - h_{sc}}{h_2} \quad \left(0 < \frac{h_2 - h_{sc}}{h_2} \leq 0.3 \right)$$

$$\eta = 1 \quad \left(0.3 < \frac{h_2 - h_{sc}}{h_2} \right)$$

これを $h_1 = h_2$ の場合について数値解で求めた Huber の結果²⁾ ($V_c = 1.66 \sqrt{\varepsilon g h_{sc}}$ としている), と比較すると $\eta = 0.82$ となる。

よって式(7)'から

$$\begin{aligned} V_c &= h_{sc} \sqrt{\frac{\varepsilon g h_{sc}}{2h_{sc}^2 (1 - 0.82)}} \\ &= 1.66 \sqrt{\varepsilon g h_{sc}} \end{aligned}$$

となつて一致する。

(2) 3次元の場合

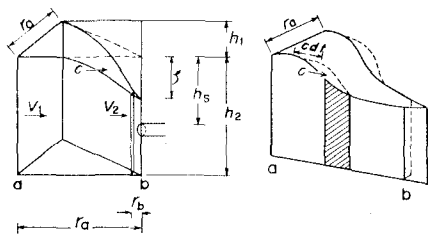


図-2 内部段波模式図(3次元)

吸込口から遠く境界層の低下がみられないa点と、吸込口にきわめて近いb点の2つの検査面をとって、単位角度についての作用合力 F を求める。

$$F = \frac{h_2 g}{2} (2\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) r_a - \int_0^{r_a} g \rho_1 (h_1 + z) r dr \dots\dots\dots (9)$$

実験観測において内部段波の前面の断面形状は、ほぼ円形とみなしうるから

$$z = r_a - \sqrt{r_a^2 - (r_a - r)^2} \dots\dots\dots (10)$$

式(10)を式(9)に代入して整理すると

$$\begin{aligned} F &= \frac{\rho_1 g r_a}{2} \left\{ h_2 \left(2h_1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} h_2 \right) \right. \\ &\quad \left. - r_a h_1 + r_a^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{5}{3} \right) \right\} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

また連続条件から

$$V_1 h_2 r_a dt = C dt \int_s r ds \dots\dots\dots (12)$$

ここに ds は

$$ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dr} \right)^2}$$

C について解くと次式を得る。

$$C = \frac{h_2}{r_a (\pi/2 - 1)} V_1 \dots\dots\dots (13)$$

よって時刻 t での運動量方程式は

$$F dt = \lim_{r_b \rightarrow 0} \int_0^{h_2 - \zeta} \rho_2 r_b c dt v_1 \frac{r_a}{r_b} dz \dots\dots\dots (14)$$

ここに v_1 は検査面 a における各水深での流速である。

$$F = \rho_2 \frac{\beta h_2 V_1^2}{(\pi/2 - 1)} (h_2 - \zeta) \dots\dots\dots (15)$$

ここに

$$\beta = \int_0^{h_2 - \zeta} \left(\frac{v_1}{V_1} \right)^2 \frac{dz}{h_2 - \zeta}$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{(\pi/2 - 1) F}{\beta \rho_2 h_2 (h_2 - \zeta)}} \dots\dots\dots (16)$$

$$\begin{aligned} q &= 2\pi h_2 r_a \left[\frac{(\pi/2 - 1) \rho_1 g r_a}{2\beta \rho_2 h_2 (h_2 - \zeta)} \right. \\ &\quad \left. \times \left\{ h_2 \left(2h_1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} h_2 \right) - r_a h_1 + r_a^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{5}{3} \right) \right\} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

ここで r_a を次のように考える。

$$r_a = n \zeta \dots\dots\dots (18)$$

連行の始まるとき、 $\zeta = h_{sc}$ 、このときの流量を q_c および流速を v_c とすれば

$$\begin{aligned} q_c &= 2\pi n h_2 h_{sc} \left[\frac{(\pi/2 - 1) n h_{sc} \rho_1 g}{2\beta \rho_2 h_2 (h_2 - h_{sc})} \right. \\ &\quad \times \left\{ h_2 \left(2h_1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} h_2 \right) - n h_1 h_{sc} + n^2 h_{sc}^2 \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{\pi}{2} - \frac{5}{3} \right) \right\} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_c &= \frac{8n h_2 h_{sc}}{\phi^2} \left[\frac{(\pi/2 - 1) n h_{sc} \rho_1 g}{2\beta \rho_2 h_2 (h_2 - h_{sc})} \right. \\ &\quad \times \left\{ h_2 \left(2h_1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} h_2 \right) \right. \\ &\quad \left. \left. - n h_1 h_{sc} + n^2 h_{sc}^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{5}{3} \right) \right\} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{v_c}{\sqrt{\varepsilon g h_{sc}}} &= 8n \frac{h_2}{\phi} \frac{h_{sc}}{\phi} \left[\frac{(\pi/2 - 1) n (1/\varepsilon - 1)}{2\beta (1 - h_{sc}/h_2)} \right. \\ &\quad \left. \left\{ \left(2 \frac{h_1}{h_2} + \frac{1}{1 - \varepsilon} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - n \frac{h_1}{h_2} \frac{h_{sc}}{h_2} + n^2 \left(\frac{h_{sc}}{h_2} \right)^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{5}{3} \right) \right\} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

となる。

3. 上層水連行率

底層水排除の際、取水速度、密度差および境界面、取水管上端部間距離によって定義される内部フルード数が

大きくなるにつれて取水口付近の境界面は低下しついには上層水の連行が生じる。その連行の開始する時点での内部フルード数を限界内部フルード数 F_{rc} と定義する。内部フルード数がこの F_{rc} より大きくなるにつれて上層水の連行は増加する。

この連行率 m を次のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{q_1}{q} \\ &= \frac{\rho_2 - \rho}{\rho_2 - \rho_1} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (22)$$

ここに、 q_1 は全取水量中の上層水取水量、 q は全取水量、 ρ は排除された水の密度。

内部フルード数が大きくなるためには上下層の密度差が一定とした場合、取水流速 v が大となるか、境界層、取水口上端部間距離 h が小さくなるか、またはその両者が同時に起こることが考えられる。ここでは単純化するため前 2 者の条件について取り扱う。

(1) 取水流速 v のみが増加する場合

限界条件を越えた内部フルード数 F_{rs} は

$$F_{rs} = \frac{v_s}{\sqrt{\epsilon q h_{sc}}}$$

で与えられる。これと F_{rc} との比を τ とすると

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{F_{rs}}{F_{rc}} \\ &= \frac{v_s}{v_c} \dots\dots\dots (23)\end{aligned}$$

取水量については

$$\left. \begin{aligned} q &= s v_s \\ q_1 &= s \cdot \alpha_1 (v_s - v_c) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

式(23)および式(24)を式(22)に入れると連行率は

$$m = \alpha_1 \left(1 - \frac{1}{\tau} \right) \dots\dots\dots (25)$$

で表わされる。

(2) h_s のみが増加する場合

この場合 F_{rs} は

$$F_{rs} = \frac{v_c}{\sqrt{\epsilon g h_{ss}}} \\ \tau = \sqrt{\frac{h_{sc}}{h_{rc}}} \dots \dots \dots (26)$$

また取水量については

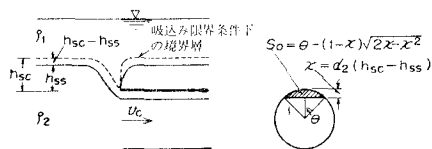
$$\left. \begin{aligned} q &= s \cdot v_c \\ q_1 &= s \cdot v_c \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (27)$$

円形パイプによる水平取水について、上層水の通過断面を図-3のように弦の面積であると考え、半径1の単位円では

$$S_0 = \theta - (1-x)\sqrt{2x-x^2}$$

また全断面積 $s_0 = \pi$ であるので式(26)及び式(27)より

$$m = \frac{1}{\pi} \{ \cos^{-1}(1-x) - (1-x)\sqrt{2x-x^2} \} \dots (28)$$



圖一-3 上層水取水断面說明

式(28)を半径 $\phi/2$ のパイプについて書き直すと

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{\phi/2} \alpha_2 (h_{sc} - h_{ss}) \\ &= 2\alpha_2 \frac{h_{sc}}{\phi} \left(1 - \frac{h_{ss}}{h_{sc}}\right) \end{aligned}$$

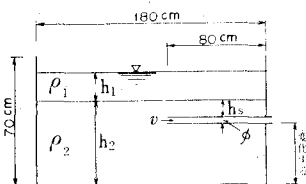
よって

$$m = \frac{1}{\pi} \{ \cos^{-1}(1 - 2\alpha_2 H_0 y) - 2(1 - 2\alpha_2 H_0 y) \sqrt{\alpha_2 H_0 y (1 - \alpha_2 H_0 y)} \} \dots (29)$$

ここに, $H_0 = h_{sc}/\phi$, $y = (1 - 1/\tau^2)$ 。

4. 水理模型実験およびその結果

実験は長さ 180 cm×幅 40 cm×深さ 70 cm の水槽で行なった。実験においては、淡水および食塩水を用いて所



ϕ	6, 13 (mm)	取水パイプ口径
ρ_1	~ 1.00	上層水の密度
ρ_2	1.005, 1.01, 1.03	下層水の密度
$\Delta \rho$	0.005, 0.010, 0.030	上下層の密度差
h_1	5, 10 (cm)	上層水の厚さ
h_2	20, 50 (cm)	下層水の厚さ
h_s	2, 5 (cm)	境界層から取水パイプ上端までの距離
v	0~1500 (cm/sec)	取水流速 (適宜変化させる)

図一4 実験模式および組合せ

定の成層を作った。所定口径のパイプを、下層塩水槽に設置して取水した。上層淡水の連行の状況は、電導度計による塩分濃度の測定およびウラニン色素による目視観測によって調べた。

実験結果から連行を開始する限界流速 v_c の決定は次のように行なった。境界層からパイプ上端までの距離を用いた内部フルード数 $F_r = v/\sqrt{g\theta h_s}$ が増加するにつれて連行率 m は増加する。増加の状況は F_r が限界値を越えると m が急激に増加する。この限界 F_r を $m = 1\%$ に対応させ、このときの F_r を読んで v_c を算出する。

(1) n について

3次元取水における境界層の形状を代表する実験係数 n は一定でなく、主に ε および h_2/ϕ に関係する。その関係を示したのが図-5 で n は ε が大きいほど大きくな

り, また h_2/ϕ が大きくなるほど小さくなる傾向がある。図中の曲線群は, 実験結果を統計的に処理して得たものでこれらの関係を示している。

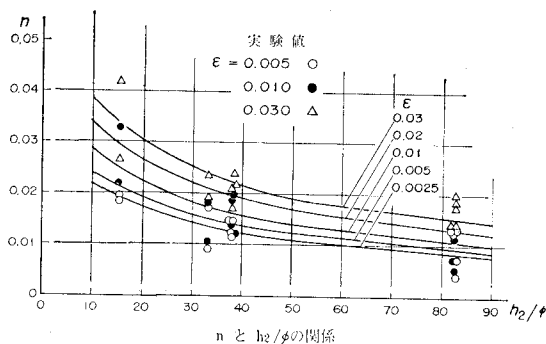


図-5 n と h_2/ϕ の関係

以上より n が得られれば, 式(21)によって示される3次元選択取水の限界水理量が計算できる。

(2) α_2 について

ポンプによって定量取水する場合, 内部フルード数が限界値を越えて大きくなるのは取水によって境界層・取水口天端間距離 h_{ss} が小さくなることによる。この場合 h_{ss} の限界値との差 ($h_{sc} - h_{ss}$) が上層水通水断面に関係する程度を示す係数 α_2 は, 実験結果を m と τ との関係を示す式(29)に入れて計算できる。図-6 はその一例を

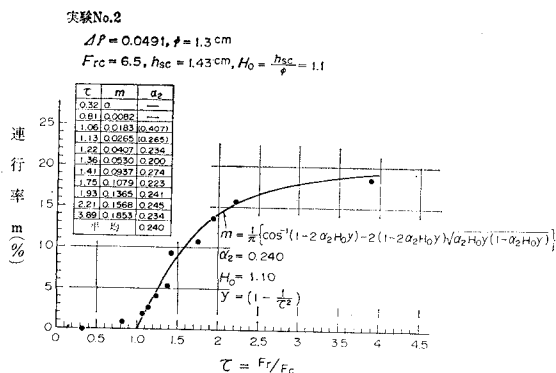


図-6 α_2 の計算および数式へのあてはめの一例

示すものであるが, このように求めた α_2 は $\tau=1.0$ 付近ではばらつくが τ がある程度大きくなるとかなりの範囲にわたって一定値に近づく。図中の曲線はこのように求めた α_2 の平均値を式(29)に入れた計算式であるが実験値のパラッキが小さいことがわかるであろう。このことは上層水連行において取水パイプ内の上層水断面は弦の面積で示されることを示している。

また, この α_2 に及ぼす要因として $H_0 (=h_{sc}/\phi)$ と Fr_c とが考えられるが, この関係を示すのが 図-7 であ

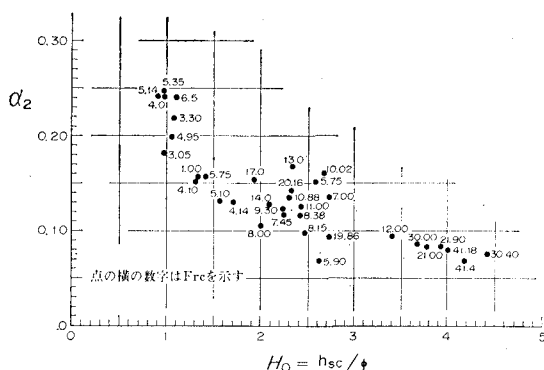


図-7 α_2 と h_{sc}/ϕ の関係

る。図によると H_0 が大きいほど α_2 は小さくなる。つまり連行開始時の h_{ss} の値の如何によって ($h_{sc} - h_{ss}$) の連行量に及ぼす影響は異なり, h_{sc} が小さいほどその影響が大きいことを表わしている。なお, 限界フルード数とは直接的な関係は認められない。

5. 結 言

以上, 密度境界面の形状は連行時には一種の内部段波であると考えて底層水の選択取水について検討して次のような結果を得た。

- 1) 2次元底層取水の場合, 上層水連行を開始する限界取水量は式(8)'で表わされる。
- 2) 3次元底層取水では, 内部段波の形状および吸込口付近での流速分布が境界条件に影響するが, ここでは前者を実験における境界面の形状観測より円として, また後者は一様であると仮定して式(21)を得た。なお実験係数 n は 図-5 に示すようである。
- 3) パイプによる定量取水の場合の上層水連行率 m と $\tau = Fr_s/Fr_c$ の関係は式(29)で与えられる。またこの場合の係数 α_2 は 図-7 に示すようである。

この解析結果は閉鎖性内湾において起こっている, 底層悪水の効率的排除に用いられる。漁場環境の改善工法の一つとして重要な課題であり, 福井県日向湖, 京都府久美浜その他の湾においてその実用化の検討が行なわれている。

参 考 文 献

- 1) 福井・中村・白石・佐々木: 堤防の津波対策に関する水理学的研究, 農業土木試験場報告第8号, 1963, 2.
- 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.