

北海道大学工学部

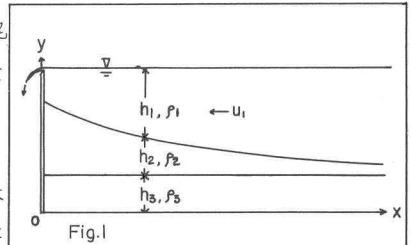
正 員

吉田 静男

明瞭な二層をなす流体場の上層表面から取水する場合、混合によって混合層(発生機構から、堆積層というべきかもしれない)が形成されるが、この機構の解明と形状予測の可能性について論じてみる。

回実験及び混合層発生機構

実験は Size $8\text{cm} \times 20\text{cm} \times 600\text{cm}$, $8\text{cm} \times 50\text{cm} \times 600\text{cm}$ の水槽を使って行なわれた。いずれの場合も Fig.1 に示すごとく、あらかじめたててある塩水(β)上に淡水(α)を一端から注ぎ、取水は他端に設置された堰を越流させる事によって行なった。又塩水比重も種々変えて実験を行ったが、いずれの場合でも Photo.1 に見えされる様な淡水層、塩水層と明瞭に区別できる混合層が発生する¹⁾。この混合層の発生と成長の機構は色素トレーサーを追跡する事によって次の様なものである事が分かった。まず上流で生成された混合液が取水口まで輸送されてくる。その中には充分希薄で取水の中に取込まれてしまう液体と比較的重く、取残される液体とがある。残留した液体は、やがて Fig.2 のごとく flow pattern を有する様になり、塩水層からの塩分拡散と出会い、次第にその密度を増して上流側へと成長して行く。又混合層内部の密度場は、塩水層との同化を目差して、限りなく変化し続け、明瞭な境界を破壊し続けるが、取水中に取込まれる塩分は非常に少なく、この欠損塩分を塩水層に補給したとしても初期の密度場は維持できない。しかしこの密度場の変化は遅く、ある時刻における混合層の形状を力学的に予測する場合、定常と見なし得るものである。こうした機構は取水流量が比較的小さい場合に見られるが、取水流量がある値を越すと Fig.3 に示す様な発達途上の K-H 波(Thorp²⁾の "rolls" の初期状態と思われる。循環は運行を伴ない、時間とともに成長する。成長が著しくなると淡水を混合層内に引き込む様になる。この機構は塩水堰への淡水混入³⁾にも見られる)を見る様になり、加えて速やかに伝播する(波速式³⁾で説明できる)内部波の発生も見られる様になる。この K-H 波は伝播速度が非常に小さいため通常の内部波はこの上を通過する事になり、教い上下振動を繰り返され、中には砕波に至るものも見られる。又砕波に至らない内部波は増幅され、取水口ではその Crest が堰を越え、取水塩分を著しく増大させる。勿論この時の塩分増大は内部波波数に一致した間歇的なものであり、この時間平均塩分濃度即取水口における



f_c : 抵抗係数 g : 重力加速度 h : 層厚
 u : 流速の x 成分 x : y: 座標 F : 内部フルード数 $= \sqrt{g h / \rho_2}$ Q : 流量 (cm^3/s) R : レイリー数 $= u h / \nu_2$ $\beta = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$ $\gamma = \rho_1 / \rho_2$
 $\delta = \rho_3 / \rho_2$ $\epsilon_{ij} = (\rho_i - \rho_j) / \rho_i$ z : 動粘性係数 ρ : 密度 $\psi = F^2 R$
 suffix 1, 2, 3: 上, 中, 下層 suffix 2 u, 2 b: 中層上, 下境界 $\bar{\rho}$: 2 層鉛直断面平均密度

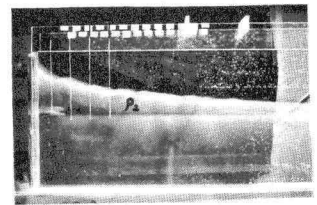


Photo.1 混合層(β) - 界面に K-H 波が見える。

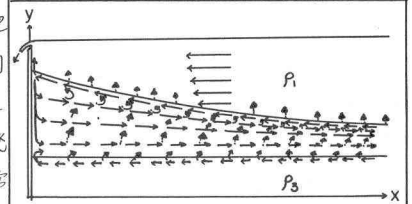


Fig.2 混合層内流れ図

砕波に至るものも見られる。又砕波に至らない内部波は増幅され、取水口ではその Crest が堰を越え、取水塩分を著しく増大させる。勿論この時の塩分増大は内部波波数に一致した間歇的なものであり、この時間平均塩分濃度即取水口における

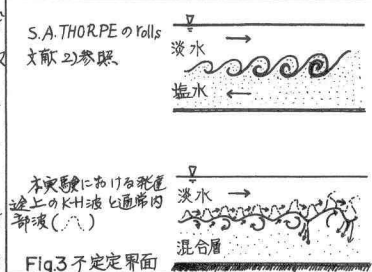


Fig.3 不定界面

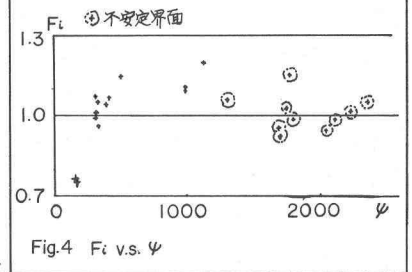


Fig.4 F_i v.s. ψ

淡水層の塩分濃度とはならない。

回 取水口における制禦条件及び混合層密度構造

上述のごとき混合層の準定常性に対して、取水口ではFig. 4に示すごとくすべての実験を通じてほぼ $F_i = 1$ という恒常性も有している。この制禦条件は塩水楔の河口条件でもあり、混合層と塩水楔の類似性の一つとして挙げる事ができるが、他方非常に異なる特性も見出せる。その特性はFig. 5, 6の等密度線図に見られる正方向への $\bar{\rho}_2$ (混合層鉛直断面の平均密度) 増大の傾向である。(塩水楔では通常減少する。) その他の特性として $\partial \bar{\rho}_2 / \partial x \approx \text{const}$ もいえるようである。

回 運動方程式及び抵抗係数

混合層形状は剪断応力を無視した場合説明できない¹²⁾ ことがすでに分かっているので、ここでは剪断応力を考慮してみる。得られた実験結果から、Fig. 1に示す様な三層モデルを考えればよいことが分かるが、現状をかんがみて混合層及び塩水層の流速を無視し鉛直方向速度成分も無視する。又水路は傾斜していないものとして運動方程式を立て整理すれば次式が得られる。

$$\begin{vmatrix} (1 - u^2/gh_1) & 1 & 1 \\ \delta & (1 - \beta/6) & 1 \\ \delta & 1 & \delta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \partial h_1 / \partial x \\ \partial h_2 / \partial x \\ \partial h_3 / \partial x \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -f_1 |u_1| u_1 / 2gh_1 \\ -f_2 |u_2| u_2 / 2gh_2 + (h_2/12) \partial^2 \bar{\rho}_2 / \partial x^2 - (6 - \beta) h_2 / 12 \bar{\rho}_2 \partial \bar{\rho}_2 / \partial x \\ -(h_2 / \bar{\rho}_2) \partial \bar{\rho}_2 / \partial x \end{vmatrix} \quad \text{----- (1)}$$

筆者の実験は $0.00267 < E_{12} < 0.0579$, $0.000400 < E_{12} < 0.000710$ と可成広範であるがこの領域では $\beta \approx 1$, $h_2 (\partial \bar{\rho}_2 / \partial x) \ll \partial \bar{\rho}_2 / \partial x$ であって実用上 $\beta = 0$ とお

ける。この近似だけでは $\bar{\rho}_2$ が x の関数であるため線型化できず解はバクスターを含む初期値問題として数値計算する以外がまらない。ここで f_i の一義的決定が必要となるが周知のごとく実験値に合う f_i をさがす以外今のところ方法がない。(1)式より f_i と $\partial h_i / \partial x$ の関係を調べると次式のごとくなる。

$$f_i = -2g / |u_i| \{ h_1 h_2 / (h_1 + h_2) \} \{ \partial h_i / \partial x (E_{12} - u_i^2 / gh_i) - (h_i / 12 \bar{\rho}_2) \partial \bar{\rho}_2 / \partial x \} \quad \text{--- (2) (ただし } \beta = 0 \text{)}$$

この(2)式にもとづき f_i 対 ψ の関係を調べるとFig. 7のごとくになった。これによると筆者の実験にもとづき f_i は ψ と強い相関をもち $f_i = 0.25 \psi^{-0.5}$ と表わすことが出来る。この f_i を使用すれば(1)式はバクスターを含まない単なる初期値問題として取扱うことが出来る。さて筆者の f_i を従来の結果と比較してみると金予氏の実験式とはほとんど変わらず、推貝・玉井及び中村・阿部各氏の測定式⁴⁾ に $\psi = 1$ 近傍まで直線的に延長した分布になっている。こうした結果から混合層の形状予測は、一応、可能であるといえ、これまで主張されてきた f_i 対 ψ の関係の信頼度から混合層の形状維持には剪断力が大きな役割を果しているといつてよいであろう。ただ安定界面と不安定界面を同時に持つ混合層の形状予測をする場合Fig. 7からも分かる様に $f_i = 0.2 \psi^{-0.5}$ を使用しても予測不可能であり、今後さらに検討するべき問題である。終りにあたり有益な御助言をいただいた北工学部教授柏村正和先生に深く感謝の意を表します。

1) 吉田・北・福田: 土木学会北海道支部論文報告集 昭49-1.

2) S.A. THORPE: J. Fluid Mech. (1973) Vol. 61, Part 4.

3) 吉田: 津28回年講, 昭48-10

4) 水理公式集 (昭和46年度改訂版) P. 584.

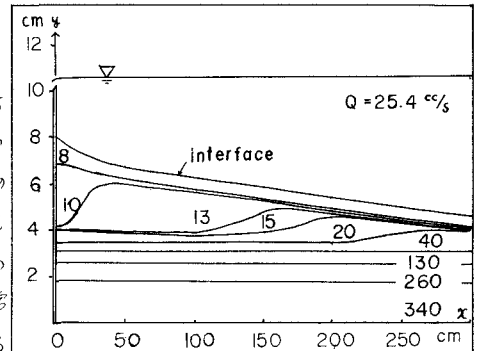


Fig. 5 Density distribution

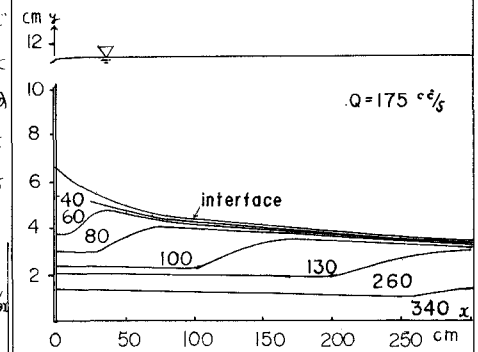


Fig. 6 Density distribution

Fig. 5, 6において等密度線の数 n とすると比重 ρ は次式で与えられる $\rho = 0.9977 + (n + 15) / 10000$

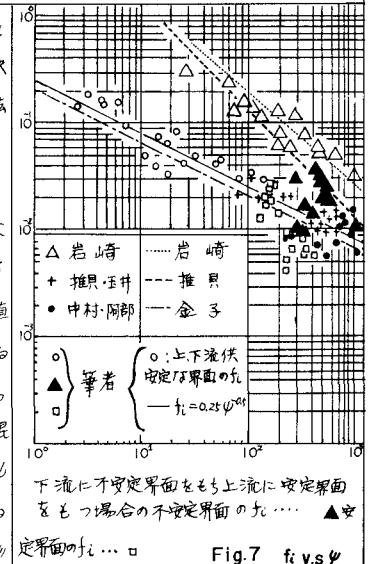


Fig. 7 f_i vs ψ