

成層密度流体からの選択取水に関する実験

—層分離現象と中層取水—

日 野 幹 雄*・古 沢 恵**

要 旨 これまで一様密度勾配の成層流体中の point sink あるいは取水円筒のスリットへの流れの理論^{1),2),3)}を発表してきた。この理論によれば, modified densimetric Froude number $G=Q/\{2\pi\sqrt{g\beta}d^3\}$ がある第1の限界値以下になるとき層分離現象が生じ, 上層(あるいは)下層取水が可能になり, さらに G の値が小さくなり第2の限界値以下になれば, 中間層取水が可能であることが示された。本研究はこうした現象の水理条件を検証するために行なった模型実験の報告である。その結果, 理論的に予測された現象が実際に認められ, また分離取水の取水量・成層度に関する理論と実験がよく一致することが示された。

1. はじめに

海水や湖沼の水は, 一年の特定の期間を除いて密度が一樣ではなく, 成層をなしていることはよく知られている。こうした水域から取水する際, 特定の層の水のみを選択的に取水したいことがよくある。貯水池内の水を農業用水として利用する場合には, 稲の育成上から上層の温度の高い水を取水することが望ましいし, 火力あるいは原子力発電所の熱交換器の冷却には下層の冷水のみを取水して発電効率をあげる必要がある。また, 海底が泥土の場合にはあまり底の水は汚れているから, 最下層を除いて中間層から取水したい。こうした特定層からの取水を“分離取水”(selective withdrawal)と呼んでいる。

分離取水については, 二層密度流や一様勾配密度流の場合に対して, これまでいくつかの理論や実験が行なわれてきた。

一様密度勾配の成層流体からの分離取水の問題は, これまでほとんど2次元の場合(カーテン・ウォール式その他)を対象として行なわれてきた。しかし, 3次元軸対称問題(円筒式)も実際に多く用いられており, 利点も多いので, 本研究では軸対称の場合について種々解析を行なってきた。

前報告^{1),2),3)}の理論ではつぎの点を仮定していた。

- (i) 非圧縮流体
- (ii) 非粘性流体

(iii) 非拡散

(iv) 一様勾配成層

ここで(i)の仮定は水を対象とする限り問題はないし, (iv)の仮定も現象の特性解析の第一段階として妥当なところである。(iii)の仮定も安定な成層では, 混合が起こりにくい事実を考えれば, 流れの状態がある限界(成層安定度を示すパラメーター Richardson 数がある値以下)を越えなければ問題は無い。問題は仮定(ii)の非粘性流体という点である。事実, 理論計算では取水流量がある値より小さくなると, 吸込点の近くに大きな渦領域が発生する^{1),2)}。このような状態では, 流れの shear が大きく, もはや非粘性の仮定は成立しなくなる。

そこで, 前報告の理論では, つぎのように考えた。取水にともなう渦領域の強さがある値以上になると, (ii)の仮定が破られるので, 理論解はそのままでは成立しない。しかし, このような条件のもとでは成層流の安定化の性質のために層の分離, つまり成層流体の一部の層のみが取水口に吸込まれ, 他は澱み層となるであろう。このとき, 澱み層に virtual sink を考え, 仮想的にこの層の水を取水したとする。この2層の流れにはそれぞれ理論解が適用でき, 分離流線に沿ってベルヌーイの式を満たすよう virtual sink およびその位置を求め, 分離流線(dividing stream-line)を決定することができる(この分離流線の形を求めるための理論式と計算プログラムは完成しているが, 計算費用の点から実際の計算は省略した)。一方, Debler⁴⁾は2次元成層流の層分離を実験的に見出している。

このような理論的考察のもとに分離取水の限界条件を求めた。すなわち, 流れと分離条件を支配するのは, 取水流量, 水深, 成層勾配で定義される成層パラメーター G であり,

$$G = \frac{Q}{2\pi\sqrt{g\beta}d^3} \dots\dots\dots (1)$$

ここに, Q : 取水流量

d : 水深

g : 重力加速度

$\beta: (\rho_0 - \rho_1)/\rho_0 d = \text{成層の強さ}$

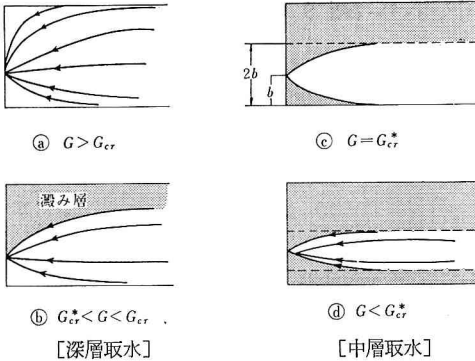
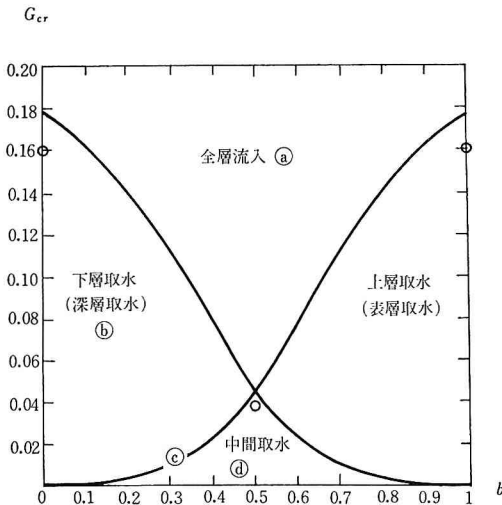
ρ_0 : 水底の密度

ρ_1 : 水面の密度

この G がある限界値 G_{cr} 以下のとき分離取水が可能

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部

** 東京工業大学 工学部

図-1 種々の取水状況とパラメーター G との関係図-2 成層取水パラメーターおよび取水口高さ
と取水状態の関係(日野・大西²⁾)
○印は本報告の実験値

能である。限界条件 G_{cr} は吹込口の相対水深にも関係する。

このような理論解析をすすめた結果、単に上層または下層のみからの分離取水のみでなく、中間取水も可能であることが理論的に明らかとなった。図-1, 2 は、このような流れの場の典型的な状態と、各取水状態の限界 G_{cr} と相対的取水口高さ b/d の関係を示している。

本実験は、以上のような理論解析の結果の妥当性を実証するために行なった、模型実験の結果についての報告である。

2. 実験方法

(1) 実験装置

半径 60 cm, 深さ 30 cm の四分の一円のプロラスチック製の水槽を用いた(図-3)。扇形の要の部分には直径 6 cm の筒形をつけ、この筒の水槽内側の部分は切り欠いてある。この筒 (A) の中にスリットを開けた筒 (B) を差し込み取水塔とした。point sink の実験は困難であ

図-3 (a) 実験水槽

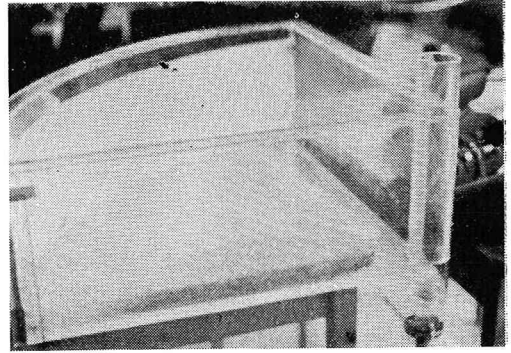
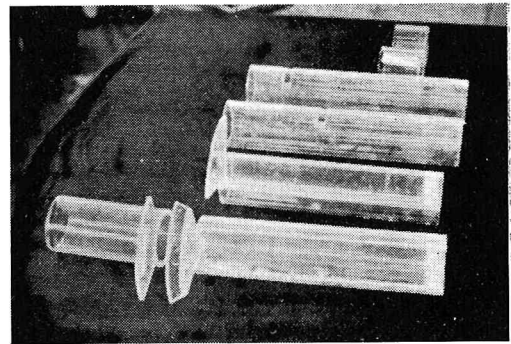


図-3 (b) 実験に用いた種々の型の取水塔



るので第2報²⁾で述べた円柱型の取水部の場合に相当する実験を考えたわけである。

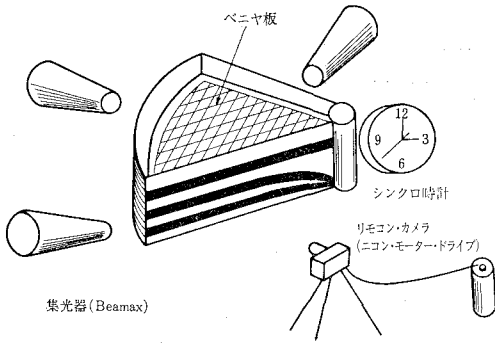
壁面の影響をなくするよう扇形の開き角をどうとるかで種々検討したが、上述のように $1/4$ 円 ($=90^\circ$) にとることにした。実際に実験を行なった場合にも、流れが軸対称で壁面(境界層)の影響はないことが認められた。

(2) 成層の作り方

密度成層は一度形成されると層の混合はなかなか起こらずに安定であるが、混合を生じさせずに好みの成層状態を作することは意外にむずかしい。いろいろ面白い方法もあるが、この実験ではわれわれの研究室で考案したつぎのような方法を用いた。

まず、10 個のポリバケツに等密度差の塩水を必要量用意する。塩水は1つおきに過マンガン酸カリで赤く着色しておく。このうち一番密度の大きいものを扇形水槽に注ぐ。つぎに、水槽面よりやや小さく切ったベニヤ板を水面に浮かせ、つぎつぎに密度の小さい塩水を板の上に注ぐ。塩水はベニヤ板の周辺からゆるい速度で水面に流れる。この場合、層どうしの混合が起こらないようにきわめてゆっくりと注ぐ必要がある。こうして層厚 1.0~1.5 cm の互層からなる深さ 10~15 cm の成層流体を作ることができる。しばらくそのまま放置すれば、分子拡散で層と層の間の塩分の不連続はなくなり、一様密度勾配の成層流体とみなせる。塩分の拡散にくらべ、色素分の拡散は遅く互層の着色状態はほぼそのままであ

図—4 実験写真撮影法



る。

この成層を作る作業は、平均 3~4 時間とかなり長い時間を要し、このため 1 日 1~2 回の実験しかできず、実験終了までに予定以上の日数が必要であった。

(3) 写真撮影

実験流体が塩分濃度差のある成層流体であること、流速が遅いこと（扇形の中心部を離れると）、分離現象が発生することのために、ピトー管など普通の測定器が使えず、流れの写真を撮影し、これを解析する方法を主とした。

流体は赤と無色の互層をなしており、カメラはこれを真横からみえるように位置にすえた。この互層による成層状態をはっきり見えるように、集光器 (Beamax) 3 個により図—4 のように水層の背後から照明した。光が直接カメラレンズに入らないこと、赤色層の色が照明により無色層に散らないよう注意が必要である。また、水槽のカメラに対する面よりの反射光でまわりの物が写らないように偏光フィルターを使った。写真はモーター・ドライブを付けたニコン F で撮った。フィルムは黒白としてコダック・トライ X (ASA 300)、カラーとしてさくらネガカラー (ASA 100) を用いた。この場合は、ネガカラーの方が良かったが、むしろ現像技術の問題といえよう。

(4) 取水条件の測定

この実験は、いわば一発勝負であって、長時間の準備のあと、取水実験（扇形水槽の要部の円筒から水槽中の水をとる）を行なうと、はじめてから 1 分ぐらいですべてのデータを記録する必要がある。というのは、水槽内の水量は補給されないから、取水とともに成層の水深が変化してゆくからである。水槽の横に壁掛け用の時計（シンクロ・モーター駆動）を並べておき、水深の減少とこれに要する時間とから取水流量を決定した。

(5) 流速分布

水槽内の流速はつぎの方法により測定した。

a) 色素の移動

実験開始の直前、水槽のカメラに対する面の近くに過マンガン酸カリの粒（とくに粗いものを買う）を落とし

て、色の糸を画いておく。この色線の移動から流速分布を求める。

b) 水素気泡法

水中に流れに直角に張られた細い白金線を陰極とし、ほかに陽極を置く。白金線にパルスを通じると細かい水素気泡（浮上速度が無視しう程度）が白金線に発生し、これが流れて運ばれる。電流を断続的に流すことにより、白い水素気泡の線模様ができ、流速分布を求めることができる。ただ、この方法は、水の電気伝導度が白金線に沿って一様でなければならない。というのは、塩分濃度が高く、電気伝導度が良いところほど水素気泡が発生し、大きくなって浮上が著しくなるからである。それゆえ、局所的な流れの場合、一様密度の流れにのみ用いる。

(6) 相似律

密度流の流れを支配する主要因子は成層度 $\beta = (\rho_0 - \rho_1)/\rho_0 d$ と重力加速度 g である。これにくらべて、粘性の影響は 2 次的である。したがって、運動方程式における慣性項と密度勾配下の重力項の比—modified Froude number が実形と模型とで等しければよい。この比はすでに報告した理論式で導入されたパラメーター G [式 (1)] である。いま、実形を subscript p をつけ、模型を subscript m をつけて区別すれば、

$$G_p = G_m$$

すなわち、

$$Q_p / \sqrt{\beta_p} d_p^3 = Q_m / \sqrt{\beta_m} d_m^3$$

あるいは、

$$\frac{Q_p}{Q_m} \cdot \sqrt{\frac{\beta_m}{\beta_p}} = \left(\frac{d_p}{d_m} \right)^3 \dots\dots\dots (2)$$

が相似条件である。

本実験の結果を実際の取水構造物に適用するには、式によればよく、必ずしも成層度 β が実際と模型実験とで等しい値である必要はない。

3. 実験結果

(1) 分離水深と分離流量 (G の限界値)

われわれは理論的にパラメーター G の値がある限界値以下になると分離取水が可能であることを予測したが、図—5 は正にこの予測の正しかったことを実証するものである。さらに 図—6, 7 は中間取水の可能性の予測を証明している。

分離層を決定するには、取水ははじめの互層の状態と十分に分離取水がすすんで水深の低下が大きくなった状態をくらべ、層厚に変化のなかった層を“澱み層”と判定した。たとえば、図—8 では上から 3 層目の着色層までが“澱み層”である。

こうした一連の写真から、分離水深（または分離層の厚さ） d' 、水槽水深の減少 $\Delta d/\Delta t$ などから、分離水深（または分離層の厚さ、取水口が水底の場合—Type

I- に対してはその2倍) d_s と $Q/\sqrt{g\beta}$ との関係
求めると表-1の一欄表のようにになる。これをプロット
すれば 図-9 のようになり、 $d_s^3 \propto Q/\sqrt{g\beta}$ の関係が実
験で確かめられた。これからつぎの定数が与えられる。
パラメーター G の限界値 $G_{cr}^{(1)}$ (第1 限界値: 図-1 の
⑤ の状態が生じる限界値)および $G_{cr}^{(2)}$ (第2 限界値:
中層取水が可能となる限界値)を計算すれば、

- 第1 取水限界値 $G_{cr}^{(1)}=0.16$
- 第2 取水限界値 $G_{cr}^{(2)}=0.04$

この値、とくに第2 取水限界 $G_{cr}^{(2)}$ は前報告³⁾ の理
論値とよく一致している。

図-5 深層取水の状態 (run A)

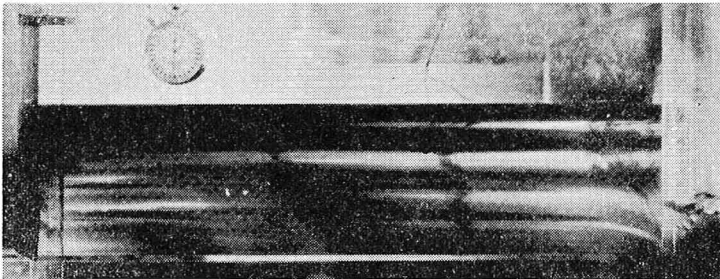


図-6 中層取水のはじまる限界状態 (run E)

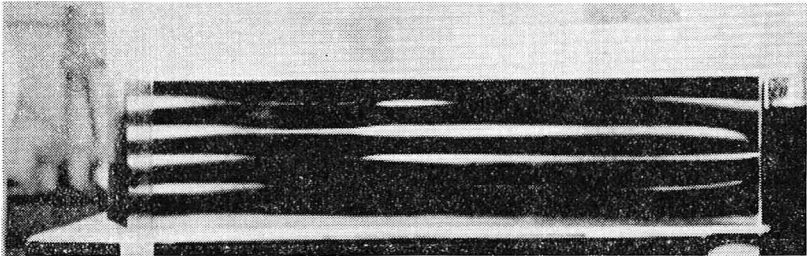


図-7 中層取水の状態 (run D)

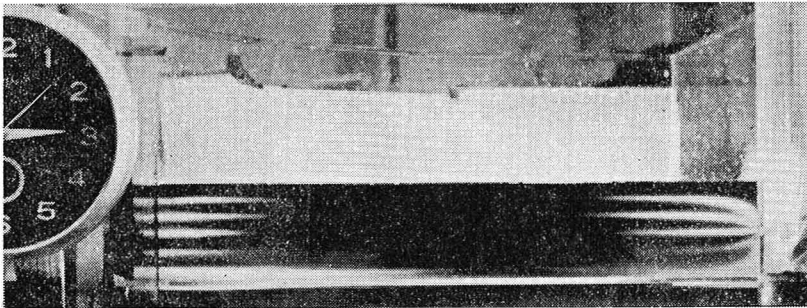
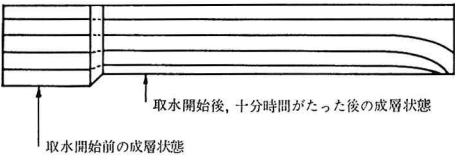


表-1 実験結果の一欄表: runs A.H. は吸込口が底面にある下層取水
(d_s は流動層厚の2倍として整理)、他の run は中間展取水

run	d_s (cm)	Δd (cm)	Δt (sec)	Q (cm ³)	d (cm)	$\frac{d\rho}{\text{gr/cm}^3}$	β	$\frac{Q}{\sqrt{g\beta}}$ (cm ³)
A	11.6 (5.8)	0.5	6	9.330	13.2	0.03	2.27	312.8
C	4.9	0.5	32	0.437	12.0	0.04	3.33	24.2
D	6.6	0.8	13	2.472	8.5	0.03	3.53	93.8
E	10.0	1.43	19	2.107	13.2	0.03	2.27	141.3
F	4.1	0.46	25	0.515	12.8	0.04	3.12	29.4
G	7.6	0.9	13	1.938	13.0	0.03	2.31	128.8
H	10.0 (5.0)	1.0	13	2.153	12.5	0.02	2.40	283.5

図-8



(2) 分離流線

流れの状態を支配するのは
成層パラメーター G であり、
 G の値が同じならば無次元表
示された流線図は一つに定ま
る。上層あるいは下層取水の
状態では、分離水深 d_s を式
(1) の d の代りに用いれ
ば、パラメーター G は $b/d=$
0 に対応する 図-1 の G_{cr} の
値となる (第1 報参照)。

したがって、point sink の
場合には、ちょうど分離取水
の限界状態 (図-10 (a)) で
あれ、実際に分離取水の状態
(図-10 (b)) にあるにせよ、
分離水深 d_s を長さの単位に
とって表わした流線の形
 $f(x/d_s, z/d_s)$ は同じものと
なるはずである。

われわれは、第1 報で分離
流線の計算法については述べ
たが、実際の計算は計算費用
の点から省略した。今後、計
算の目的がつきしだい、理論
計算を行なうとして、ここ
では実験から分離流線を求め
てみる。ただし、模型では point
sink ではなく、cylindrical
tower による取水なので分離
水深が異なれば、取水塔の相
対径も異なることになるの
で、厳密に一本の無次元曲線
となるわけではない。

図-11 は、typical な分離
取水状態の流線の写真であ
り、図-12 はこうした写真
から求めた数本の分離流線の
図である (図-14 の Run F

図-9 d_s と $Q/\sqrt{g\beta}$ の関係

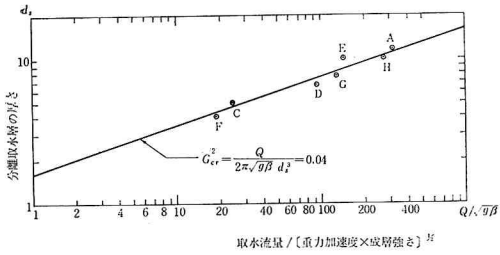
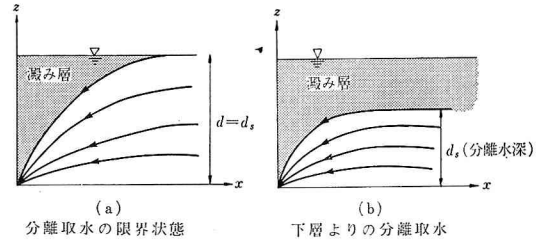


図-10



の下半分の線が他のものよりシャープで、また、上半分との対称性がないのは、この線が分離流線に対応する層でなかったためであろう。

図-13 の水底に取水口がある場合の分離流線の形と図-14 の中層取水の状態の分離流線の中心線に関する上または下半分の形が全く一致していることに注意しなければならない。これは、第1分離限界 $G_{cr}^{(1)}$ と第2

分離限界 $G_{cr}^{(2)}$ との関係

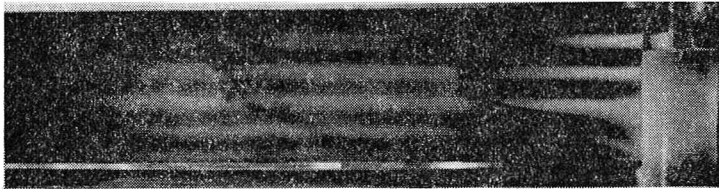
$$G_{cr}^{(2)} = G_{cr}^{(1)}/4 \dots \dots \dots (3)$$

および、第2分離曲線

$$G_{cr}^* = \begin{cases} G_{cr}^{(2)} \times 8b^3 & (0 < b < 1/2) \\ G_{cr}^{(2)} \times 8(1-b)^3 & (1/2 < b < 1) \end{cases} \dots \dots \dots (4)$$

を導くときの考え方の正しかった証明である。

図-11 分離流線 (run B) : 過マンガン酸カリの色素線による



(3) 取水口付近の流速分布

水素気泡式の微流速計を用いて、流体が等密度（水）の場合の取水口近くの流速分布を測定した。これは、成層流体で実験するよりも一様密度のときの方が、取水口形状の水理学的特性をよく表わすと考えたからである。また、

図-12

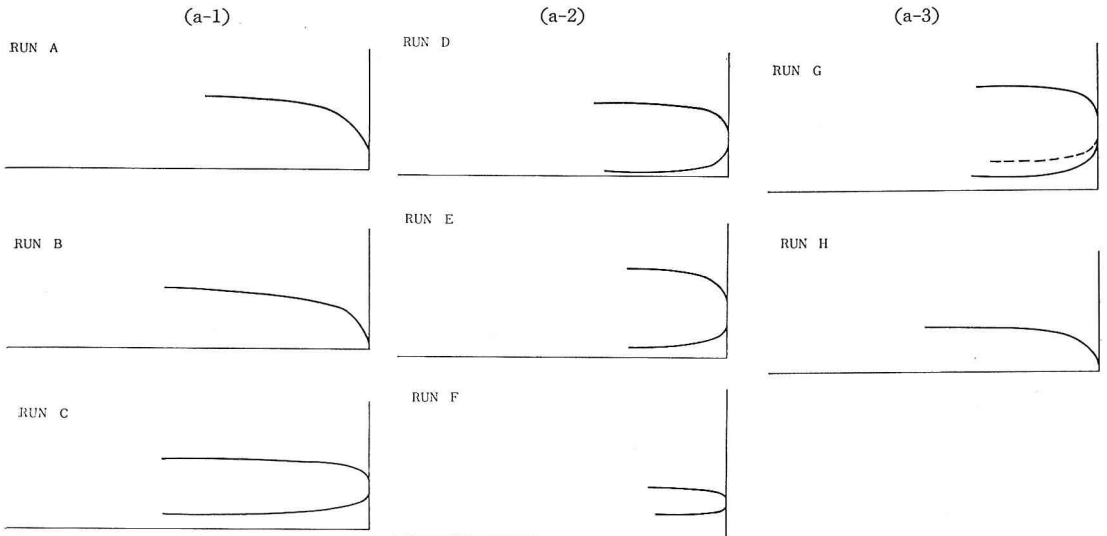


図-13 分離流線 (深層取水)

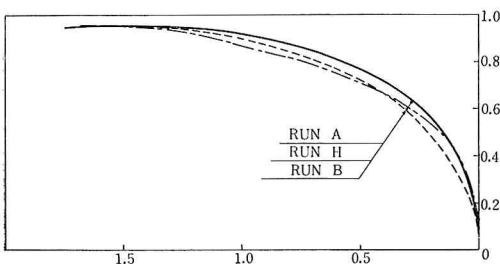
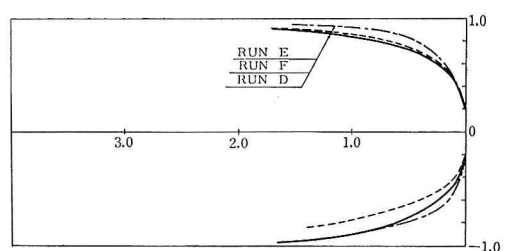


図-14 分離流線 (中層取水)



塩水密度層では塩分濃度の高い層で大きな気泡が発生し、気泡上昇の影響を強く受けるという実験技術上の問題もある。しかし、これは塩水成層のかわりに砂糖水の成層を用いれば、解決される点である。

水素気泡式で流速流向を一層よく測定するためには、水素気泡を発生する白金線にある間隔でペイントを塗り気泡を発生しない部分をつくる方法がある。しかし、ペイント部の両端で大きな気泡が発生するため、流速の小さい場合には使えない。本実験にも、この方法で行なってみたが、大きな気泡の上昇の影響が大きく測定には使えなかった。

図-15 (a)~(c) は、実験結果である。水素気泡の発生間隔は $3 \times 160 \text{ ms} = 480 \text{ ms} = 0.48 \text{ sec}$ である。これらの写真から、取水口の下あるいは上の板を除くと、接近流速の方向をかなり大きく変えることができることがいえる。

4. 結 論

この研究の第 1, 2 報で理論的に予測された密度流の分離取水（および任意の中間層からの取水）が、実際に可能であることが模型実験により認められた。

分離取水の条件を支配するパラメーターは、 $G=Q/[2\pi\sqrt{g\beta d^3}]$ であり、分離取水の限界値は実験結果から $G_{cr}^{(1)}=0.16$
 $G_{cr}^{(2)}=0.04$

と求められた。この値は、理論的に求められた値（図-2）とよく一致している。

分離流線の形は、図-13, 14 のように相似であり、取水口から分離層厚（ Q, β, b より決まる）の 1.5 倍の所で、ほぼ 95% の厚さに達している。

取水口の形状を適当にすることにより、とくに平板キャップとその下の円板の径を違えることにより、取水口付近の流れの方向・流速を変えることができる。

参 考 文 献

- 1) 大西外明・日野幹雄：深層取水の流れへの考察（1），第 14 回海岸工学講演会講演集（1967）。
- 2) 大西外明・日野幹雄：深層取水の流れへの考察（2），第 15 回海岸工学講演会講演集（1968）。
- 3) 日野幹雄・大西外明：密度成層流におよぼす point sink の高さの効果，土木学会論文報告集，第 163 号（1969）。
- 4) W.R. Deblor：Stratified flow into a line sink, Proc. ASCE, J. Eng. Mech. Div. (1959)。

図-15 (a) スリットをあけたシリンダー
(スリット幅 1 cm)

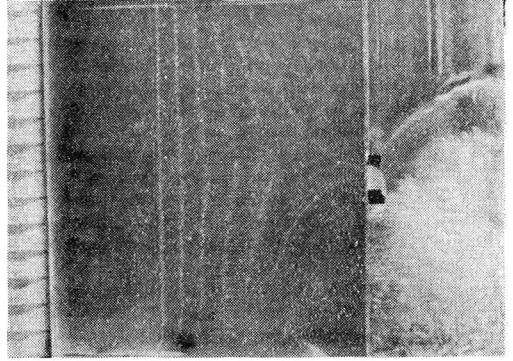


図-15 (b) 平板キャップ型（間隔 2 cm）

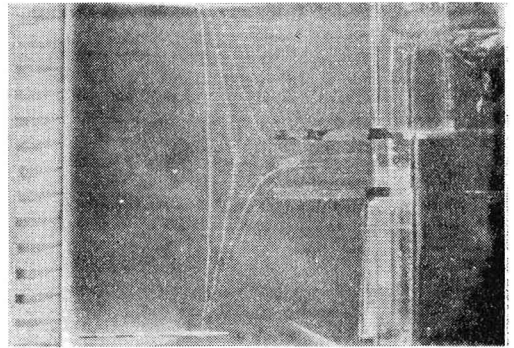
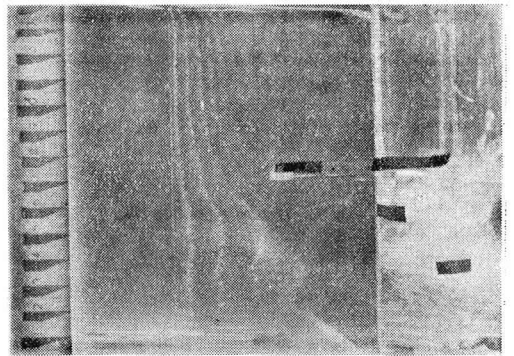


図-15 (c) 平板キャップ型



（後記）円筒に吸込みスリットのある場合の解は文献 2) に記したが、さらに高次解は次の文献に載せてある。

- 6) 日野幹雄・大西外明：吸込みスリットをもつ円柱取水塔への成層流の解析，東工大・土木工学科研究報告 No. 7 (1969)