

# 選択取水効率向上のための一手法に関する研究

## Study on a Effective Method for the Selective Withdrawal from Two-Layered System

有田 正光\*

By Masamitsu ARITA

This paper proposes a effective method using eve for the selective withdrawal from two layered system. Experimental studies were conducted on its effectiveness. Flow field effected by the eve was studied using the flow visualization technique and classified into three types. The experiments also revealed the two mechanisms of effectiveness, namely due to, ① separation of withdrawal line, ② energy dissipation caused by the eve.

Finally, this paper proposed the equation for the field design which could give the most efficient position and the width of the eye for the selective withdrawal from the two-layered system.

**Key Words:** *Selective withdrawal, stratified flow, two-layered system*

## 1. まえがき

密度の鉛直分布が存在する水域より任意の密度層の水塊のみを選択取水する技術は環境水理学、農学などの多方面にわたる課題である。従って、取水効率の向上、つまり、水理条件が同一の水域から任意の密度層のみをより多く選択取水する技術は工学的に重要である。著者等<sup>1)</sup>は底を使用して取水効率を向上させる手法を提案している。一方、原理的に同様な手法によって取水効率を向上させることが瀧本・大西・古賀<sup>2)</sup>によっても報告されている。

本研究は底を使用して取水効率を向上させようとする概念の妥当性を実験的に詳細に検討しようとするものである。実験においては底による取水効率向上の物理的メカニズムを流れの可視化により明らかにする。また、実験結果に基づいて効果的な底の設置位置および長さに関する条件式を提案する。

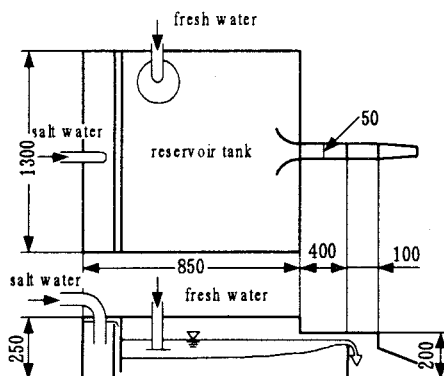


図-1 実験装置の概要(単位: mm)

## 2. 実験装置・要領および考える流れの場合

使用した実験装置は図-1に示す様な850mm×1300mm×250mmの貯水部となる平面水槽に幅50mm、高さ250mm、長さ400mmの導水路部を接続したものである。実験においては上層を

\* 正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町)

淡水，下層を塩水とする二成層場を水槽内に形成させた上で導水路下流端の堰天端より取水する。取水流量は貯水部の淡水および塩水の供給流量を制御して定めた。なお，実験中は流れの定常状態を維持する為に貯水部の密度界面の位置に導電率計のセンサーをセットしてその出力が一定になる様に上下層の補給流量を制御した。実験に先立って，水槽内の鉛直密度分布が計測され，理想的な二成層が形成されていることを確認した。

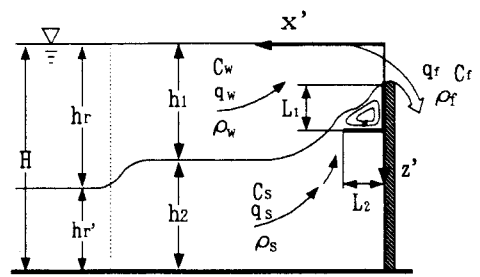


図-2 考える流れの場

図-2に考える流れの場を示す。同図に示す様に下流端の取水地点の堰天端より  $L_1$  低い位置に  $L_2$  の長さの底を設置する。図中で  $q$ =単位幅流量， $C$ =塩分濃度， $\rho$ =水の密度，である。また，添字， $w, s, f$  はそれぞれ，上層淡水層，下層塩水層，取水地点での値であることを示している。さらに  $h_r$  は貯水部上層水深， $h_r'$  は貯水部下層水深， $H$  は貯水部全水深，である。ここで，以下の検討の為に次式で定義される密度フルード数  $Fr$  を導入する。

$$Fr = \frac{qr}{(\varepsilon g h_r'^{3/2})} \quad (1)$$

ここに， $\varepsilon = \Delta \rho / \rho_s$ ， $\Delta \rho = \rho_s - \rho_w$ ， $g$ =重力の加速度である。

論文中で使用される  $q_{fc}$  は下層水を取水することなく上層水のみを取水しうる取水流量  $q_f$  の最大値，つまり限界取水流量である。なお， $q_{fc}$  に対応する  $Fr$  の値を  $Fr_c$  とする。

### 3. 実験結果と考察

表-1は今回実施した実験条件の一覧を示すものである。実験は表中に示す様に  $h_r' \sim 7\text{cm}$ ， $C_s = 0.26 \sim 0.27\%$  程度とした。また，実験開始前（取水前）における貯水部水深  $H$  は取水地点堰端の高さと一致するが，そのときの  $H$  は  $H = 18.5\text{cm}$  の一定とした。なお，今回の実験においては  $h_r'$  をほぼ一定としたので式(1)より  $Fr$  の値が大きくなることは取水流量  $q_f$  の値が増加することを意味している。

図-3は底の効果を判定するための基準となるべき，底無の実験ケース Case S の取水曲線に関する実験結果を示すものである。同図の縦軸の  $C_f/C_s$  の値は無次元取水塩分濃度であり，取水流量  $Fr$  が小さく ( $q_f$  が小さく)，下層塩水が取水されない場合は  $C_f/C_s = 0$  となる。なお，同図の実験データと比較して底有の Case A～Case H の実験データが右にシフトすれば底によって取水効率が向上していることを示し，左にシフトすれば取水効率が低下していることを示す。

図-4は Case A～Case H の各種底を使用した実験結果を示している。図中の実線は底無 Case S の実験データのベストフィットラインを，破線は底有の各実験データのベストフィットラインを示している。また，( ) は  $(L_1, L_2)\text{cm}$  の値を示している。同図より全体として底による取水効率向上が認められること，およびその効果は  $L_1$  と  $L_2$ ，つまり底の長さや設置深によって大きく異なるものであることが明らかである。

表-1 実験条件一覧

| Case | $h_r'$<br>(cm) | $C_s$<br>(%) | $L_1$<br>(cm) | $L_2$<br>(cm) |
|------|----------------|--------------|---------------|---------------|
| S    | 7.04           | 0.265        | 0.0           | 0.0           |
|      | 7.03           | 0.265        | 0.0           | 0.0           |
|      | 7.03           | 0.270        | 0.0           | 0.0           |
|      | 7.04           | 0.270        | 0.0           | 0.0           |
|      | 7.02           | 0.270        | 0.0           | 0.0           |
|      | 7.01           | 0.270        | 0.0           | 0.0           |
| A    | 7.00           | 0.270        | 2.0           | 1.0           |
|      | 7.00           | 0.270        | 2.0           | 1.0           |
| B    | 7.02           | 0.270        | 1.0           | 2.0           |
|      | 6.96           | 0.270        | 1.0           | 2.0           |
| C    | 6.96           | 0.268        | 2.0           | 2.0           |
|      | 7.00           | 0.268        | 2.0           | 2.0           |
| D    | 7.00           | 0.270        | 3.0           | 2.0           |
|      | 7.00           | 0.270        | 3.0           | 2.0           |
| E    | 7.00           | 0.272        | 2.0           | 3.0           |
|      | 7.00           | 0.272        | 2.0           | 3.0           |
| F    | 7.00           | 0.272        | 3.0           | 4.0           |
|      | 7.00           | 0.272        | 3.0           | 4.0           |
| G    | 7.00           | 0.271        | 1.0           | 6.0           |
|      | 7.00           | 0.271        | 1.0           | 6.0           |
| H    | 7.00           | 0.270        | 2.0           | 6.0           |
|      | 7.00           | 0.270        | 2.0           | 6.0           |

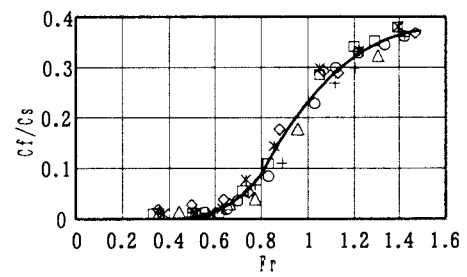


図-3 底無のケースの取水曲線(Case S)

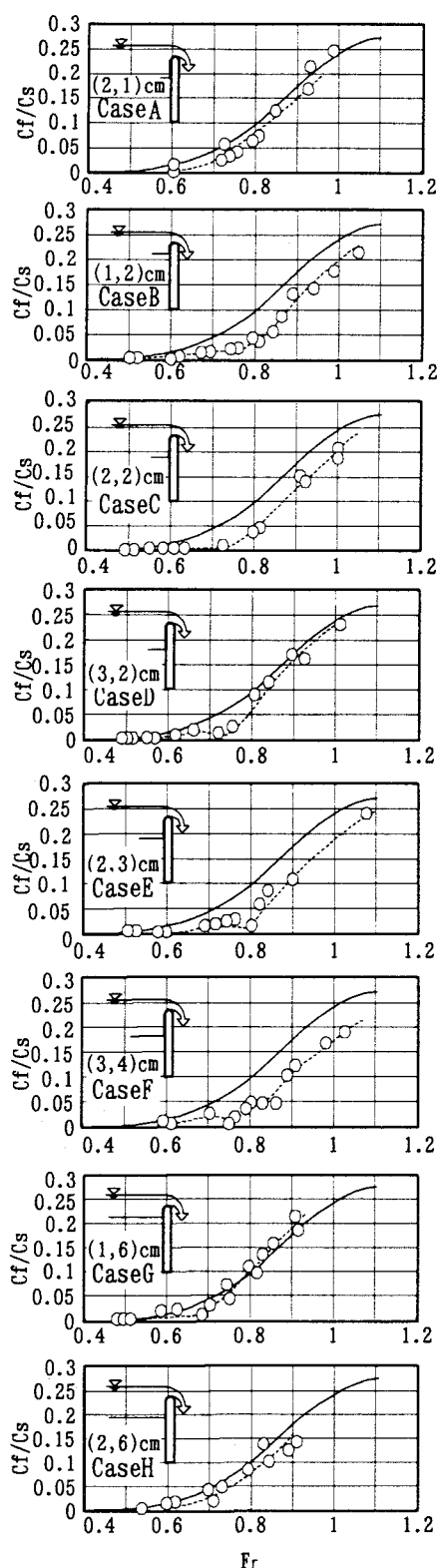


図-4 各種底の取水効率向上効果

ところで、本研究で論ずる取水効率向上効果は限界取水条件を超える流量で取水する場合（上層水とともに下層水が取水される場合）に、下層流れと底が干渉する結果として生ずるものであることに留意する必要がある。底による取水効率向上のメカニズムとしては、密度界面の底による上下層への分離効果(図-5A 参照)と、底と取水壁面との間の空間に発生する渦によるエネルギー損失に基づくものが考えられる(図-5B 参照)。以下にそれぞれのメカニズムについて若干考察する。

上層を限界取水流量より若干大きな流量で選択取水すると粘性の効果により下層の一部が取水壁面に向かう流れとなる。この下層流れは取水壁面に衝突して激み圧による圧力上昇を生じせしめて取水効率を低下させる。従って、底によって密度界面の上下層の流れを分離すればこれによる取水効率低下を防止することができる。ただし、限界取水流量を大きく超えて取水する場合( $q_f \gg q_{fe}$ )には下層水の全体が取水されるので、このメカニズムに基づく取水効率向上効果は生じない。それゆえ、同効果による取水効率向上は取水流量が限界取水流量より若干大きな場合のみ効果的なものとなる(図-5A 参照)。

一方、取水流量が限界取水流量よりも十分に大きくなると底および取水壁面との間の空間に下層流れによって渦が形成されることとなる(図-5B 参照)。この渦は下層流にエネルギーの損失を生じさせるので下層流に対して抵抗として働く。その結果、取水流量を増加させると底無の場合に比較して上層からの取水量増加割合が下層からの取水量の増加割合より大きくなり、結果として取水効率が向上する。従って、この原因による取水効率向上効果は底と取水壁面の作る空間の形状が最も大きなエネルギー損失を生じせしめる渦を発生させるような関係にあるときに強くなる。

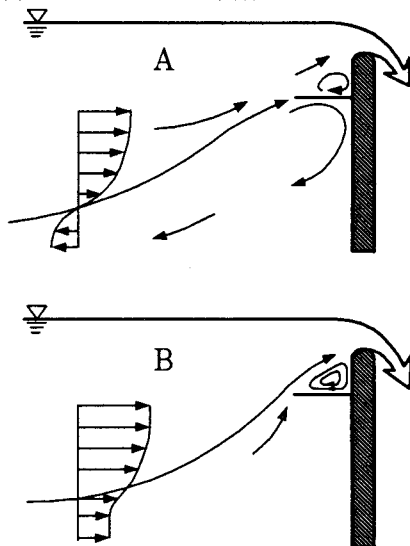


図-5 底の効果の概念図

流れの可視化結果および既述の二種の取水効率向上のメカニズムを念頭において実験によって観察された流況を図-6に示す様に三種のタイプに分類した。以下にそれぞれのタイプの流況の特徴の概要を示すとともに図-4に示す実験結果についての考察を行う。

**Type I** : 図-6に示す様に底の長さが短く、かつ、その設置位置が深い場合に出現する。本タイプは底の長さが短いので密度界面分離の効果は小さい。また、底によって発生する渦もそのスケールが小さいのでエネルギー損失による効果も小さい。今回の実験では Case A, Case D が相当する(図-4参照)。特に Case A は底長が短く、典型的な Type I のケースであり、取水効率向上効果はほとんど観察されていない。

**Type II** : 図-6に示す様に底の長さおよび設置位置が Type I と以下に説明する Type III の中間的なタイプである。本タイプは底によって強い渦が形成されるので エネルギー損失に基づく取水効率向上効果が大きいことが特徴である。今回の実験では Case B, Case C, Case E, Case F が相当する。なお、それぞれのケースの取水効率向上効果が若干異なることが認められる。これは既述のように下層流に効果的なエネルギー損失を生じせしめる為の底と取水壁面とで構成される適当な形状比の空間が存在することを示している。同タイプでは密度界面分離効果による効果はエネルギー損失に基づくものに比較して無視しうる。写真-1に Type II の流況の可視化写真を示す。同写真に底によって形成されるスケールの大きな強い渦が可視化されている。

**Type III** : 図-6に示す様に底の長さが長く、かつ、その設置位置が底の長さと比較して浅い場合に出現するタイプである。本タイプでは密度界面分離による取水効率向上が認められる。一方、底と取水壁面との間の空間に形成される渦は小さなものとなるのでエネルギー損失に基づく取水効率向上効果は小さい。今回の実験では Case G, Case H が相当する。特に Case G にその特徴がよく現れている。

図-7は本論文において導入した三種のタイプの中で最も顕著な効果が認められた Type II に属する Case F の取水曲線を拡大して示すものである。Type II の特徴の一つとして図中に示すように取水曲線が  $Fr$  に対して凸状の形状を示すことがあげられる。この現象を図中の A ~ E の各点に対応する流況の模式図を図-8に示し、以下に箇条書きにして論ずる。なお、既述のように今回の実験においては  $Fr$  の増加は取水流量  $q_f$  の増加を意味している。

① 取水流量が限界取水流量より十分に小さい場合は図-8Iに示す様に上層流中に底によって渦が形成されるものの取水効率向上効果は期待できない。

② 取水流量が限界取水流量より若干大きい場合(点A)は、図-8A 示す様に密度界面分離によって取水効率が若干向上し、 $q_{fc}$  (もしくは  $Fr_c$ ) の値が底無しの場合

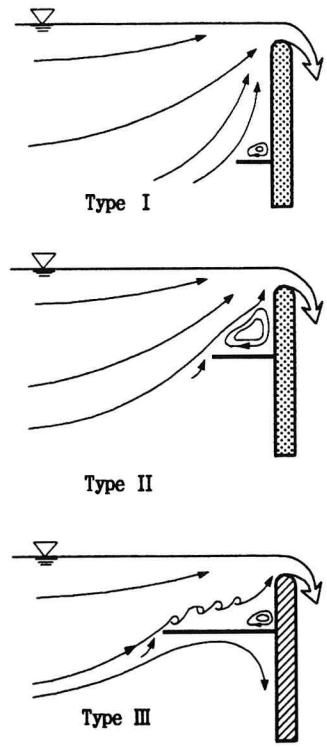


図-6 各種タイプ分類と流況

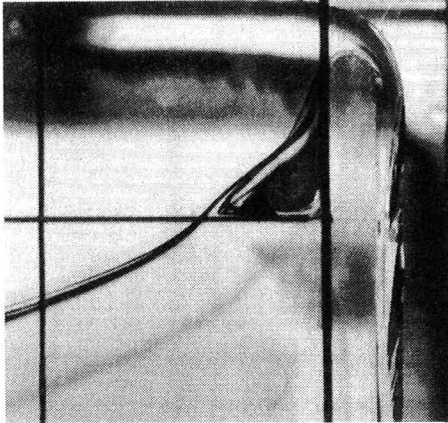


写真-1 Type II の流況の可視化

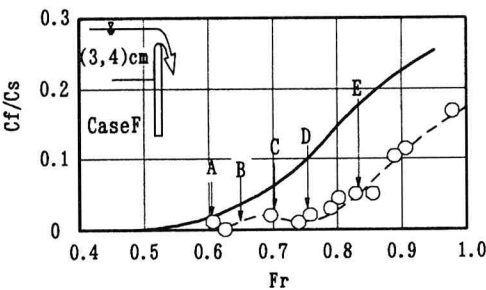


図-7 限界取水条件近傍の取水曲線(Case F)

より若干大きくなる。

③限界取水流量を超えて取水流量を大きくすると(点 B, 点 C), 渦によるエネルギー逸散に基づく取水効率向上効果が強くなりはじめるとともに密度界面分離による取水効率向上効果は小さくなる(図-8B, C参照)。

④点Cよりさらに取水流量を増加させると底に基づくエネルギー損失が大きくなり, 下層からの取水量も増加するもののその増加割合は上層からのそれに比較して小さくなる。結果として, 取水効率が向上しC点より  $C_t/C_s$  の値が小さいD点に至る(図-8D参照)。このメカニズムによって取水曲線は図-7に示す様に凸形の形状を持つこととなる。

⑤底によって形成される渦によるエネルギー損失は下層流量が増加すると大きくなるが, 十分に渦が成長すると, その大きな下層流量増加に対する増加率は小さくなると考えることが合理的である。従って, D点より取水流量を増加させると下層流量増加による希釈効果が強くなり,  $C_t/C_s$  の値はD点より大きなE点に至る(図-8E参照)。

ところで, 図-7において  $C_t/C_s=0.01$  となる  $F_r$  の値は底無の場合には  $F_r=0.62$  程度となるのに対して底有の場合は  $F_r=0.74$  程度となっている。従って, このケースでは  $C_t/C_s=0.01$  の場合は取水流量に関して20%程度効率が向上していることとなる。

#### 4. 効果的な底の為の条件式

前章までに底を取水壁面に設置することによって取水効率が向上すること, また, Type II の流況を与える様な底の設置位置および長さが最も効果的なものであることを示した。本章では現地での適用の為の条件式を求める為の検討を行う。

著者<sup>3)</sup>は選択取水に伴う流れの密度界面形状は取水口近傍の粘性の効果が無視できる領域と取水口より離れた地点の粘性の効果が重要となる領域に分割して議論することを提案している。著者の研究によれば粘性の効果が無視できるのは取水口近傍の上層流動層内の密度フルード数  $Fi=q_1/(\varepsilon gh)^{1/2}$  が  $Fi \geq 1$  の領域であり, そこでは密度界面形状の相似性が期待できるとしている。

図-9は二層からの上層取水をほぼ限界取水条件で実施する場合の密度界面形状に関する著者<sup>3)</sup>の実験データおよび本研究において実施した実験データを  $Fi=1$  となる地点の上層水深  $h_{1c}$  で無次元化してプロットしたものである。同図より取水地点近傍の密度界面形状は相似なものとなっていることが分かる。図中で黒塗りの記号は水表面の位置の実験データである。なお, 本論文の実験における  $h_{1c}$  の値は各実験ケースでほぼ一定であり,  $h_{1c} \sim 7.10\text{cm}$  である(一方, 著者<sup>3)</sup>の実験データにおける  $h_{1c}, q_{fc}$  などの諸量は種々変化している)。

図中に密度界面位置の実験データの平均曲線を実線で示している。また, 今回の実験で使用した Type A ~ H の底の設置位置と長さを  $h_{1c}=7.10\text{cm}$  で無次元化して示している。同図より Type I(Case A, Case D)は底の先端位置が密度界面付近かそれより低い場合に出現するものであり(低い場合の実験例はない), Type III(Case G, Case H)は底の先端が密度界面を通して上層中に長く突き出している場合に出現することが明らかである。一方, 取水効率向上効果が期待しうる Type II(Case B, Case C, Case E, Case F) の場合は底の先端が密度界面を通して適度に上層中に突き出している場合に出現することが分かる。結局, 本論文では効果的な取水効率向上効果を得る為の条件, つまり, Type II の流況を得る為の底の長さおよび設置位置に関する条件式として次の実験式を提案する。

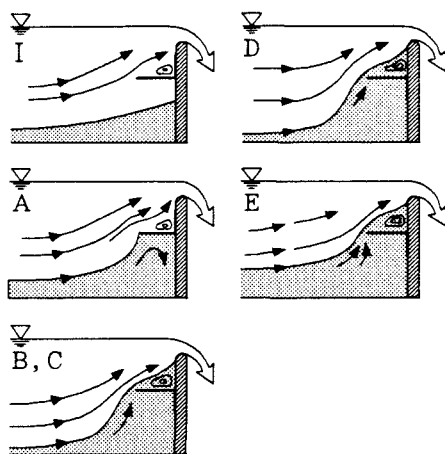


図-8 取水流量増加に伴う流況の変化の模式図

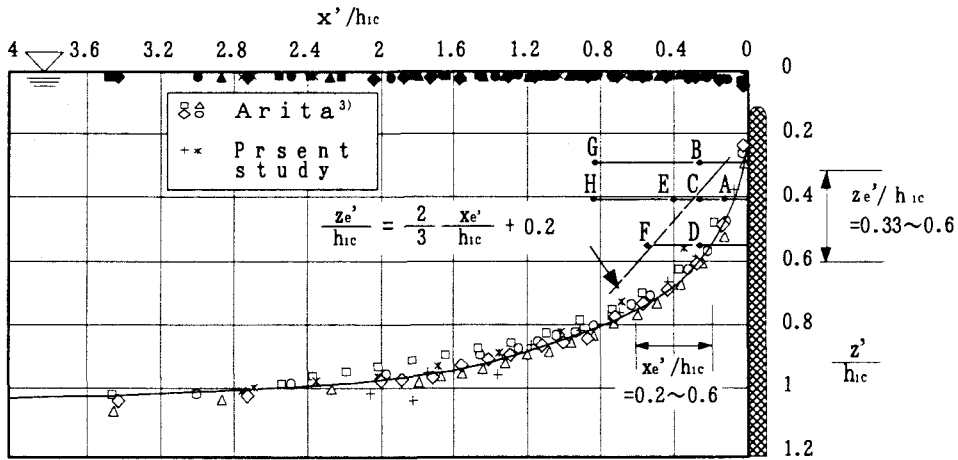


図-9 無次元化された密度界面と底の設置位置

$$\frac{z_e'}{h_{1c}} = \frac{2}{3} \frac{x_e'}{h_{1c}} + 0.2, \quad \text{ただし, } 0.2 \leq \frac{x_e'}{h_{1c}} \leq 0.6, \quad 0.33 \leq \frac{z_e'}{h_{1c}} \leq 0.6 \quad (2)$$

ここに、 $x_e'$ 、 $z_e'$ は $(x', z')$ 座標上の底の先端位置を示す。

## 5. まとめ

本研究は二成層化した水域より上層を選択取水する場合に取水壁面に底を設置して取水効率を向上させようとする著者等の提案する手法の効果を実験的に検証したものである。実験的検討により底の設置位置および長さを適当に選択すれば提案された手法は取水効率向上に効果的なものであることを明らかにした。また、底による取水効率向上効果は、①密度界面分離に基づくもの、②底によって形成される渦によるエネルギー損失に基づくもの、の二種類のメカニズムによってもたらされることが明らかにした。この二種のメカニズムのうちで密度界面分離による取水効率向上効果は限界取水流量を若干超える程度で取水する場合に出現し、また、取水流量が十分大きい場合はエネルギー損失に基づく取水効率向上効果が強くなることが明らかにされた。さらに、底による流況を三種のタイプに分類し、その中で最も効果が期待しうるタイプを与える為の底の設置位置および長さを与える条件式を提案した。

なお、本研究は上層取水のケースについて論じたが下層取水のケースにも応用可能なものであることを付記する。

謝辞：本研究において実施した実験は平成5年度および平成6年度に東京電機大学・環境水理研究室において卒研生の協力を得て実施したものである。また、本研究に使用した研究費の一部は川崎重工(株)より御援助いただいたものであることを記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 有田正光・廣沢祐喃：二次元選択取水の取水効率向上に関する研究，第45回年講概要集，pp.476-477，1990。
- 2) 滝本英男・大西外明・古賀克志：円筒取水口による汚濁下層水混入制御に関する研究，第49回年講概要集，pp.454-455，1994。
- 3) Arita, M.: Selective withdrawal from two-dimensional and two-layered systems, Proc. of Int. Sympo. on Env. Hy., IAHR, pp.553~558, 1991。