

二成層場からの二次元選択取水

Study on Selective Withdrawal from Two-Dimensional and Two-Layered Systems

東京電機大学理工学部 有 田 正 光 Masamitsu Arita
水沢農業高校 及 川 秀 明 Hideaki Oikawa

This paper presents theoretical and experimental study of selective withdrawal from two-dimensional and two-layered systems. To estimate critical withdrawal condition precisely, it is most important to determine the configuration of density interface. It is studied theoretically dividing into two regions. One of them is the region far from intake and possible to predict as density wedge such as saline wedge because of viscous effect. The other one is the region near the intake and possible to assume similarity of interface configuration because viscous effect is less important. The model to predict configuration of density interface is developed using concepts mentioned above and verified by experimental results.

Key Word : Selective Withdrawal, Stratified Flows, Reservoir

1. 緒論

選択取水の研究は完全流体を仮定した上での理論的な研究とそれに基づく考察が行なわれることが一般的であった。しかしながら取水口から離れた地点においては粘性の効果は重要となりこれを無視することはできないと考えられる。選択取水の問題において工学上最も重要な事は限界取水流量を定めることであるが、その為には限界取水条件における密度界面形状を定めることがその基礎となる。この観点に立って本研究は流体の粘性の効果を十分念頭において限界取水条件における密度界面形状の予測モデルについての検討を行なう事を主たる目的とする。また、流体の粘性の効果を考慮すれば従来の粘性を無視した理論と実験データとのずれの原因が良く説明できることを示す。さらに、実験結果より得られる知見について論ずる。

2. 考える流れの場合

最も簡単で基礎的なケースとして本研究においては図1に示すように上層は温水、下層は冷水で二成層化した鉛直二次元の貯水池の上層から下流端に設置されたダムの天端を通して上層の温水のみを限界取水条件で分離選択取水する場合について考察する。この場合の、取水地点における上層平均密度フルード数： F_1 は $F_1 \gg 1$ となる。粘性の効果を簡便に理論中に考慮するために、選択取水に伴う流れの領域をダムの近傍の取水の効果を直接受けて F_1 が大きく粘性の効果が比較的小さいのでこれを無視し得る「吸込流領域」と、取水口より離れた地点で粘性の効果に基づいて密度楔が形成される「密度楔領域」に分割できるものと考えて考察を進める。なお両領域の分割は便宜的に F_1 (上層密度フルード数) = 1 で行ない $F_1 \leq 1$ の領域を密度楔領域、 $F_1 > 1$ の領域を吸込流領域と考える事とする。この領域分割は「噴流の問題において $F_1 > 1$ では強い乱れを伴い粘性の効果は極めて小さいが、 $F_1 < 1$ では乱れが小さく粘性の効果が強くなる」との従来からの知見や

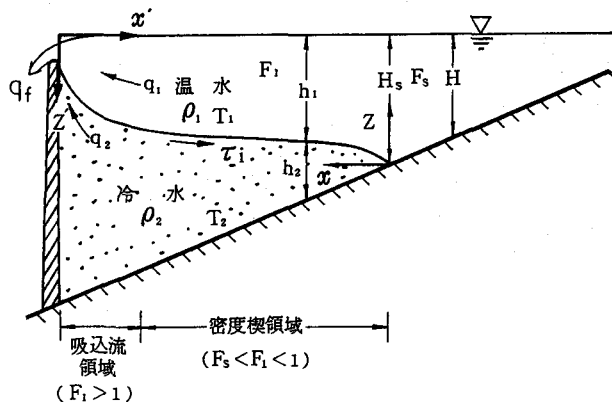


図1 流れの模式図と座標系

接受けて F_1 が大きく粘性の効果が比較的小さいのでこれを無視し得る「吸込流領域」と、取水口より離れた地点で粘性の効果に基づいて密度楔が形成される「密度楔領域」に分割できるものと考えて考察を進める。なお両領域の分割は便宜的に F_1 (上層密度フルード数) = 1 で行ない $F_1 \leq 1$ の領域を密度楔領域、 $F_1 > 1$ の領域を吸込流領域と考える事とする。この領域分割は「噴流の問題において $F_1 > 1$ では強い乱れを伴い粘性の効果は極めて小さいが、 $F_1 < 1$ では乱れが小さく粘性の効果が強くなる」との従来からの知見や

「著者等¹⁾の密度界面抵抗係数や連行係数の理論解析結果よりレイノルズ数が大きくても $F_1 < 1$ では粘性の効果が急激に強くなる」という研究結果に裏付けられているものである。

3. 実験水槽・要領と実験結果例

(3-1) 実験装置及び実験の概要

理論的検討結果の検証および現象の物理的なメカニズムの把握の為の基礎となるべき実験を企画した。実験水槽の概略を図2に示す。実験に使用した水槽は長さ：10m、幅：40cm、高さ：1mの鉛直二次元水槽であり、取水地点から4mの区間を10cmと30cmの幅に二分割し、10cmの部分を実験領域とした。実験は上層を温水、下層を冷水とする二成層場を水槽内に形成させ、水路下流端に設置されたダム模型の天端より上層温水を選択取水した。

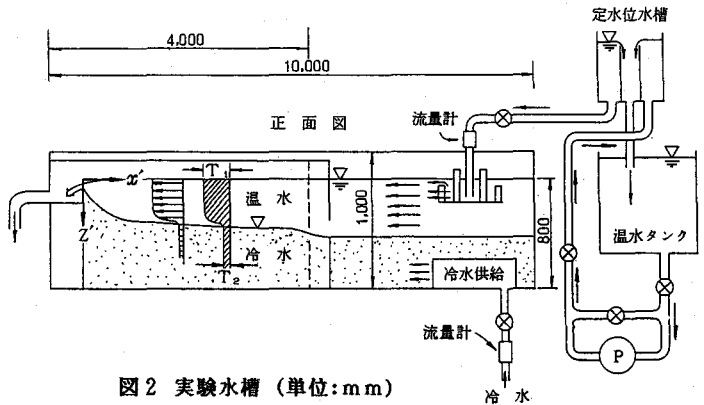


図2 実験水槽 (単位:mm)

実験においては、主として選択取水に伴う流れの縦断面内の流速分布と温度分布の同時測定を行なった。従って、長時間流れの定常状態を維持する必要があるため、限界取水流量以上の流量で取水する場合は下層水も取水されるのももちろんのこと、限界取水流量以下の流量で取水する場合においても上層への若干の連行流量を補うように下層水を補給した。

(3-2) 実験結果の代表例

実験条件を変化させて多くのデータが採集されたがそれらの中で限界取水流量以下の流量で取水する場合と、限界取水流量以上の流量で取水する場合の縦断面内の流速と温度分布の同時測定結果の代表例の一例ずつを示し、以下に説明を加える。

(a) 限界取水量以下の流量で取水する場合 (RUN1-1) 流速と温度の同時測定結果を図3に、流況の可視化写真を写真1に示す。図中に各測定断面における流速分布、温度分布、零流速面の位置、 $T_r = 0.5$ で定義される密度界面の位置、染料によって可視化された界面の位置を示してある。図3および写真1より得られる知見とその考察を以下に箇条書きにして示す。

① 零流速面の位置は、ほぼ $T_r = 0.6$ で定義される界面の位置と一致する。 ② 零流速面より上層の流れはそのほとんどがダムの天端より水槽外へ流出するが、ごく一部は下流端の壁面で反転し水槽内に循環流を発生せしめることとなる。この循環流は流速そのものは極めて遅いものであるにもかかわらず水温分布には大きな影響をあたえ、ダム近傍に温度がほぼ一定の新たな中間層の形成をもたらす。 ③ 写真1は限界取水流量以下の流量で取水する場合の澱み点付近の流況を示す可視化写真である。取水地点壁面に染料で可視化された半円が認められるが、この半円内に到った流線 (上方の2本の線) は直接水槽外へ流出するのに対して、外側に到った流線 (下方の2本の線) は下層方向に反転した後側方に移動し、スパイラル渦を形成しながら上昇し水槽外へ流出していることが認められる。このことからこの半円を「澱み線」と名付け

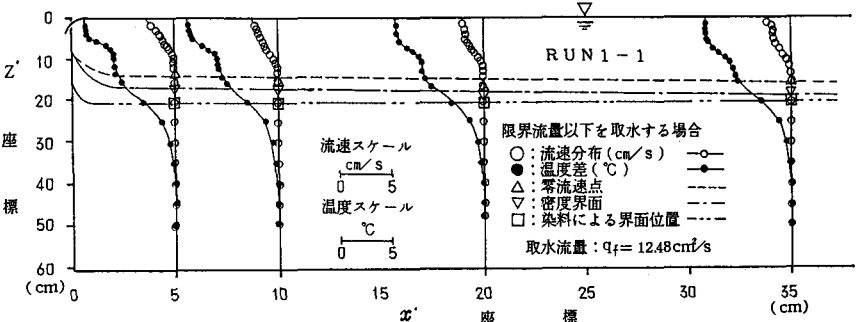
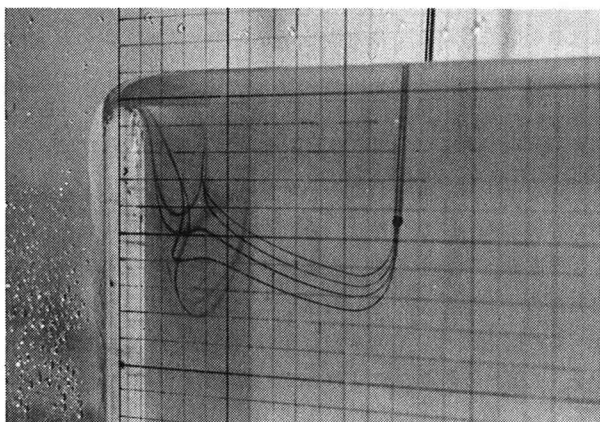


図3 限界取水流量以下の流量で取水する場合 (RUN1-1)

る事ができるが、その大きさは周期的に増減を繰り返し、下層水の流出現象は間欠的なものである事が認められた。類似の報告が吉田等²⁾によってもなされている。このような下層水の間欠的流出機構は水路幅が狭いことにその原因の一つが求められる。しかしながら水路幅が広い場合にも類似の複雑な流出機構が存在すると考えられる。なお写真1の最下段の流線より下層の流体中に循環渦が形成されていることが別の可視化写真で確認されている。



(b) 限界取水流量以上の流量で取水する場合 (RUN1-2) 図4に示す流速と温度の同時測定結果および流況の可視化写真、写真2より得られる知見と考察を以下に箇条書きにして示す。

写真1 限界取水流量以下の流量で取水する場合

①水温分布と流速分布は流れの全域において類似なものとなる。②取水前に水槽内に存在していた中間層は、下層の取水によって水槽外に流出する為に消失する。結果として、密度界面付近の流速分布は極めてシャープなものとなり、上層の温度分布、流速分布および下層の温度分布はほぼ一様分布となる。③上層と下層の中間に見られる混合層は極めて薄い。この事は上下層の混合は弱く、そこでの連行現象が弱いことを示している。また、

実験領域が短く混合層が十分に発達しない事も原因となる。

④写真2は限界取水流量以上の流量で取水する場合の流況を示す可視化写真である。水域から一様に取水されほぼポテンシャル流的な流動を示していることが認められる。

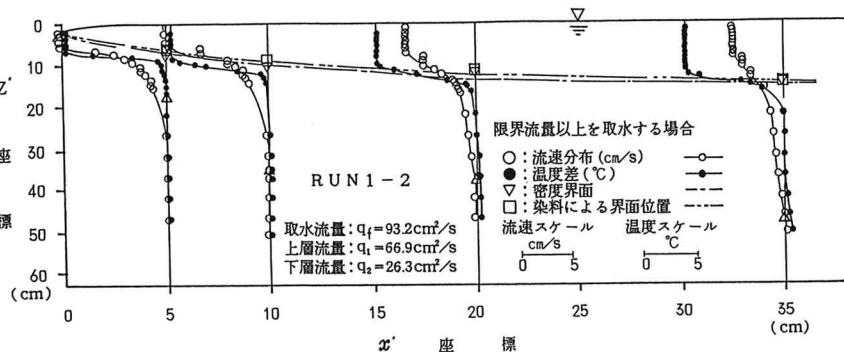


図4 限界取水流量以上の流量で取水する場合 (RUN1-2)

4. 密度界面形状の予測モデル

本章においては選択取水に伴う流動の密度界面位置の予測モデルについて検討するが、理論的検討に当たっては工学的に重要である効率的な選択取水条件を与える限界取水条件つまり下層の冷水を取水する事無く上層の温水のみを最大流量取水し得る水理条件の場合を考える。従ってダム地点における密度界面はダムの天端と一致する場合を念頭におく事となる。以下に密度楔領域と吸込流領域に分割して考察する。

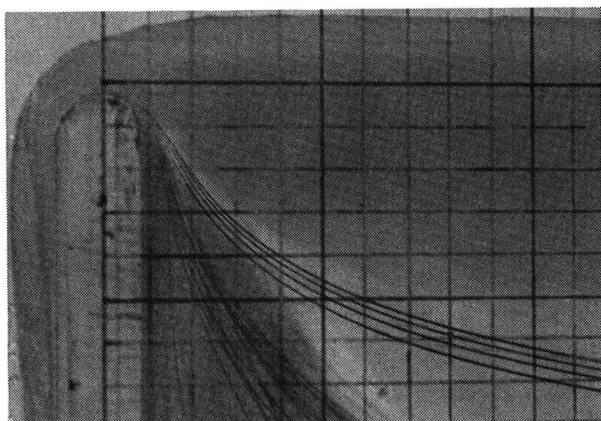


写真2 限界取水流量以上の流量で取水する場合

(4-1) 密度楔領域 ($F_1 \leq 1$) 密度楔領域においては、塩水楔の問題と同様に界面連行係数や界面抵抗係数の概念を使用して取り扱う事が可能である。この領域においては、二次元漸変流と見做し得るから x 方向の運動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u w}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta_s}{\partial x} - \frac{g}{\rho_s} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{\eta_s} \Delta \rho g z + \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (1)$$

上式を上下層それぞれについて断面内積分した上で整理すると密度界面形状の予測式を得る。なお、モデルの詳細については Arita-Jirka³⁾ の論文を参照されたい。彼等のモデルの特徴は下層を流動する循環量や混合層厚を予測できる事、および斜面勾配の影響を考慮できる事にある。しかしながら、今回の著者等の実験を含めて実験室での選択取水の実験域は密度楔領域の全長に比較して極めて短い（第5章参照）ものであり、また国内における貯水池は比較的短く、密度楔領域そのものが短いので一般的に下層水の循環が無視し得る。下層水の循環を無視すれば底面勾配の影響は無視し得るので³⁾ 密度界面形状を表わす式は次式となる。

$$\frac{d \eta_r}{d x_r} = \lambda_1 \frac{F_s^2}{(F_s^2 - \eta_r^3)(1 - \eta_r)} + \frac{2 \lambda_{w1}}{F_s^2 - \eta_r^3} \frac{\eta_r^4}{B_r} = G \quad (2)$$

また、上式を x_r で積分して、

$$x_r = \int_1^{\eta_r} G^{-1} d \eta_r \quad (3)$$

ここに、 $\eta_r = h_1/H_s$ 、 $x_r = x/H_s$ 、 F_s =密度楔始点における上層平均密度フルード数、 λ_1 =密度界面抵抗係数、 λ_{w1} =壁面抵抗係数であり詳細は Arita-Jirka³⁾ 参照、 B_r =無次元水路幅= B/H_s (B =水路幅)、 R_{s1} =上層レイノルズ数、である。なお、モデル計算における λ_1 は Arita-Jirka³⁾ によって提案されている理論式を使用事とする。彼等の理論式は「完全層流の条件では λ_1 は R_{s1} のみの関数となる」、「 R_{s1} 数が多い場合については流動層の F_1 の値が大きければ R_{s1} 数の関数とならないが、 F_1 の値が小さい場合は混合層厚が小さくなり粘性の効果が強くなって R_{s1} 数の関数となる」など、本来理論式の満足すべき条件を満足している点にその特徴がある。結局、式(2)を直接数値積分するか、特異点近傍での解の精度を上げる為に式(3)のように変形して数値積分することによって密度楔領域の界面形状が定まることとなる。

(4-2) 吸込流領域 ($F_1 > 1$) 吸込流領域においては漸変流の仮定が成立せず、また水表面位置の低下もあり精度の高い理論的な取り扱いが難しい。従って本報ではこの領域においては F_1 の値が大きいので粘性の効果は比較的小さく無視し得ると考える事とする。粘性の効果が無視し得るとすれば密度界面形状の相似性が成立すると考えることができる。ところで、限界取水条件近傍の取水条件においては写真1に示す様に流況が極めて複雑なものとなり理想的な限界取水条件を得ることが不可能であるとともに取水に伴う中間層の形成などによってモデルの仮定する流れの場との相違が大きくなる。この事から図5に吸込流領域の密度界面形状に関する実験結果を整理して示すが、同図において使用したデータはいずれの場合も下層水を小量流し、若干限界取水条件を超えて取水している場合である。工学的にもこの程度の下層流量は(図の表中の最下段のデータを除く)取水温度をそれほど上昇させるものではなく、ほぼ限界取水条件での取水と見做し得る

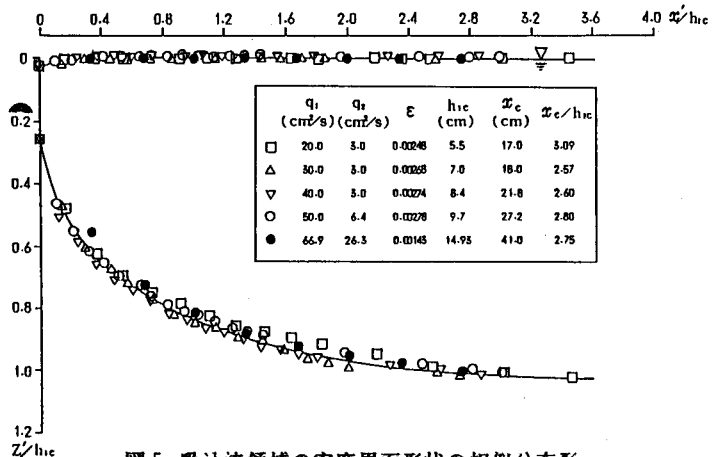


図5 吸込流領域の密度界面形状の相似分布形

ものである。図5において、ダム地点よりの距離： x' と上層厚： h_1 は $F_1=1$ となる断面における上層水深（限界上層水深）： h_{1c} で無次元化してある。同図より密度界面形状の相似性が認められる。また吸込流領域の長さ： l は図中に示すデータの平均値より、 $l = x'/h_{1c} \sim 2.8$ である。結局、本研究においては吸込流領域の密度界面形状の予測には、図5中の破線で示されるデータ群の Best-Fit Line を使用する事とする。

5. 密度界面形状の予測結果と実験結果の比較

選択取水に伴う流れの全領域の密度界面形状の予測は密度楔領域については式(2)もしくは式(3)の数値積分により、吸込流領域については図5に示した密度界面形状の相似性を使用して定める。図6はこのようにして求められた密度界面形状の予測結果と実験結果の

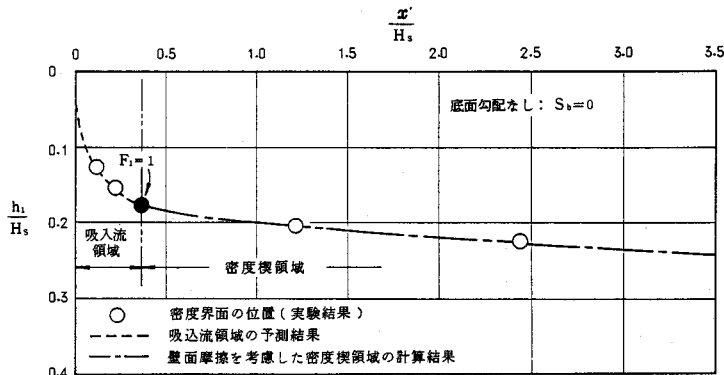


図6 実験結果と予測モデルの比較

一例との比較を示すものである。図中の●もしくは○で示される実験データは下層水温よりの温度上昇の半値で定義される密度界面の位置を表わしている。理論とデータの一致の度合いは良好である。ところで、密度楔領域の特徴はその長さが極めて長いということにある。ちなみに図6に示す実験条件における密度楔領域の全長、つまり密度楔の始点が一樣水深水路の底面と一致するようなケースについて理論計算を行なうと密度楔領域の全長は338mとなる。従って長さが長い貯水池の場合は同領域の存在を念頭におくことは極めて重要である事はもちろんの事、長さが比較的短い貯水池においても密度楔領域の終点付近においては密度フルード数が1の近傍の値となり、そこでは密度界面の変化率が大きくなるのでやはり密度楔領域を無視することはできない。一方、平野等⁴⁾も放出口遠方においては塩水楔の解析と同様な計算ができるとして密度界面形状の予測を行なっている。この領域における著者等と彼等の研究の主たる相違は、本研究においては著者の一人が塩水楔の計算の為に開発したモデルを使用した点および著者の一人自身の提案する密度界面抵抗係数の理論式を使用した点にある。また、平野等は吸込流領域の密度界面形状の予測は行なっていないが、本報では相似性の仮説を導入して予測することとした。

6. 密度楔領域を念頭におく事の重要性についての考察

本章においては密度楔領域を念頭におく事が極めて重要であることを示すために下層取水の場合を取り上げて説明を加える。図7は下層取水の場合のHarleman等⁵⁾の限界取水条件に関する実験データと粘性を無視した理論、つまりエネルギー損失を無視して貯水部と取水地点に渡る密度界面に沿って立てられたベルヌイの式より得られる $h_r/a = 1 + (1/2) F_r^2$ (ここに、 F_r =取水地点の密度フルード数) との比較を示しているものである。従来は理論と実験データとの相違は密度界面が曲率を持つことによる静水圧分布からのずれを考慮したり、取水層内の流速分布が厳密に矩形分布とならないと考えてベルヌイの式の流速水頭の項に補正係数を導入するなどして検討されてきた⁵⁾。しかしながらいずれの説明も合理的で本質的なものとは言いがたい。また、粘性の効果についてもデータと理論との相違の原因であるとの指摘はあっても、粘性が取水に伴う流動にどのような効果を及ぼすかという点についてはほとんど説明されてこなかった。ここでは粘性の効果は密度楔発生の原因となり、これを念頭におく事によってデータと粘性を無視した理論とのずれの定性的挙動が説明できる事を示す事としてその内容を以下に箇条書きにして示す。

①□のデータ群が●のデータ群より h_r/a の値が高くなっているのは、これは□のケースは導水路長が長いので、形成される密度楔の長さが長くなる為である。 ②導水路長が極めて短いケースである●のデータ

群の理論式とのずれの理由は F_f の範囲で分類して次の通りである。(a) $0 < F_f < 1$ の範囲: F_f の値が大きくなるに従って徐々に理論曲線と実験値との相違が大きくなる。これは F_f が大きくなると導水路内に形成される密度楔領域が密度界面の変化率の大きい $F_f = 1$ 近傍の領域を大きく含むようになって行く為である。従って両者の相違は $F_f \sim 1$ で最大となる。(b) $F_f > 1$ の範囲: F_f の値が1より大きくなって行くと $F_f = 1$ となる密度楔領域の始点が上流側に(貯水池側)に移動し、導流部内の密度楔領域が短くなっていくので理論値との誤差は小さくなって行く。(c) $F_f > 1$ の範囲: F_f の値が1よりさらに大きくなると密度楔領域はますます小さくなっていく。

そして、同図のケースでは $F_f \sim 1.6$ の条件で粘性を無視した理論と良く一致していることが認められるが、これは導水路入口において $F_f = 1$ となる事を意味していると考えられる。さらに、 $F_f > 1.6$ では密度楔領域が導水路内部に現われないのみならず、吸込流領域もその全域が導流部には出現し得ず、一部は貯水池に現われる。つまり、導流部始点で $F_f > 1$ となる。(d) 結局、導水路長が比較的長く、密度楔が水路内に形成されれば、理論的限界取水条件式: $h_r/a = 1 + (1/2) F_f^2$ は選択取水能力を過大評価する事となり、また逆に導水路長が極めて短く密度楔が水路内に形成されないばかりか、吸込流領域の全長さも水路内に存在できない場合は選択取水能力を過小評価する事となる。

以上の議論のように従来の粘性を無視した理論と実験データとのずれの定性的傾向は密度楔領域と吸込流領域の長さおよび導水路長を念頭におくことによって良く説明できる。

7. 総括

選択取水に伴う流れを密度楔領域と吸込流領域に二分割して考えた。そして、密度楔領域の密度界面形状は著者等が塩水楔の問題において使用した密度界面形状予測モデルおよび密度界面抵抗係数を使用して高い精度で予測できる事を示した。また、吸込流領域においては粘性の影響が無視し得る為に密度界面の界面形状の相似性が成立し、これに基づいてその長さおよび形状の予測が可能であることを示した。さらに第6章において密度楔領域と吸込流領域の関連を念頭におけば実験データと従来よく使用されてきた粘性を無視した理論との不一致の原因が良く説明される事を示した。

参考文献

- (1) Arita, M. and G.H. Jirka: Two-Layer Model of Saline Wedge. I, Jour. of Hydraulic Div., Proc. ASCE, Vol. 113, No. 10, Oct., 1987.
- (2) 吉田静男, 塚田昌司: 淡塩二成層からの表面取水における混合効果, 第24回水理講演会論文集, PP. 423-428, 1980.
- (3) Arita, M. and G.H. Jirka: Two-Layer Model of Saline Wedge: Part 2: Prediction of Mean Properties: Journal of Hydraulic Division, ASCE, pp. 1249 ~ 1263, Oct., 1987.
- (4) 平野宗夫, 金子 新, 式 正治: 貯水池における密度躍層と濁質の挙動について, 第21回水理講演会論文集, pp. 57-62, 1977.
- (5) Harleman, D.R.F., R.S. Gooch and A.T. Ippen: Submerged Slice Control of Stratified Flow, Jour. of Hydraulic Div., Proc. ASCE, Vol. 84, HY2, 1958.

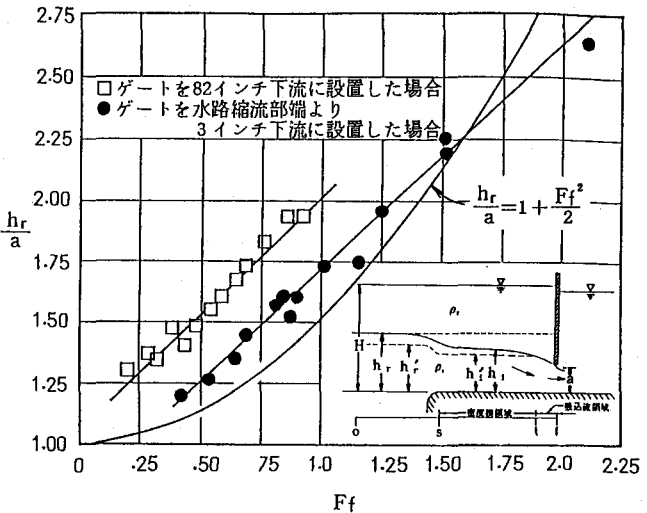


図7 粘性の効果を無視した理論と実験データ⁵⁾の比較