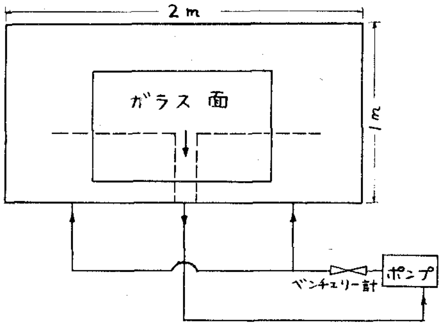
Ⅱ－109　　垂直円管による下層取水に関する研究

北海道大学工学部　正員　岸　力
北海道大学工学部　正員　○加藤　正進

1　概説

分離取水に関してはHarleman等のように上層下層では密度がそれぞれ一定であり境界面において密度が不連続に変化する場合，Yih等のように密度が水面から水底まで直線的に変化する場合について，いろいろな取水タイプに関する研究がある。　しかし実際の場合，垂直方向の密度変化の状態はこの両者の中間の状態にあり，このような場合についての研究はあまりないようである。　本研究では垂直な円管による下層取水について，中間層の存在が限界取水量におよぼす効果と，取水管の底面からの突出高さによる限界取水量の変化について調べてみた。

2　実験装置および実験方法



図－1

実験は図－1に示されるような，長さ2m巾1m高さ1m，の水槽を用いて行なわれた。　実験に用いた取水管の管径は3cmであり，真空ポンプにより取水された塩水はベンチュリー計により流量を測定された後水槽へ戻される。　塩分濃度は実験に先きだち水深方向に1cmの間隔で電気伝導度計により測定され密度に換算された。　上層あるいは中間層の混入限界はHarleman等の実験に習い次のように決定された。　混入が許容される限界の密度を有する面にキシロールと四塩化炭素の混合液に少量のアスファルトを混合して作られた油滴をのせ，この油滴が取水管に吸い込まれる時をもって限界とした。

取水管の突出高さは水槽内に置かれた平板を上下させることにより変化させた。　なお水深方向の温度差による密度の変化は特に考慮に入れなかった。

3　中間層が無視できる場合

中間層の厚さが上層下層に比して十分薄く安定度も高い場合には，中間層を無視し密度は境界面において不連続であると考えてもよいであろう。　このような場合には取水の限界条件として次の式が成立する。

$$Q_c = \frac{\pi}{4} D^2 V_c = 2.51 K \sqrt{\varepsilon g}\ y_0^{5/2} \qquad (1)$$

ここで

$$\frac{V_c}{\sqrt{\varepsilon g y_0}} = 3.20 K \left(y_0 / D \right)^2 \qquad \varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \qquad (2)$$

このような限界条件を確かめるため，次の実験を行なった。　実験においては中間層の厚さは下層水深の1～2割程度であり垂直安定度 $E = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dy}$ は $10^{-2} < E$ (1/cm) であった。　境界面の定義は上層と下層の平均密度を有する面をもってした。　実験結果をHarleman等の結果とあわせて図

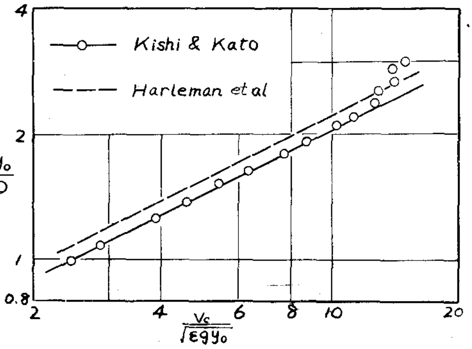
－2に示す。　図－2によると(2)式であらわされる限界条件はかなりよく成立し，次式となる。

$$\frac{V_c}{\sqrt{\varepsilon g y_0}} = 2.4\,(y_0/D)^2 \qquad (3)$$

(2)式と比較すればKの値はK＝0.79なる常数であらわすことができる。　(3)式を限界取水量に書き換えると，本実験およびHarleman等の実験に対して次の式を得る。

$$Q_c = 1.88\sqrt{\varepsilon g}\;y_0^{5/2} \qquad (4)$$

$$Q_c = 1.61\sqrt{\varepsilon g}\;y_0^{5/2} \quad (\text{Harleman等}) \qquad (5)$$



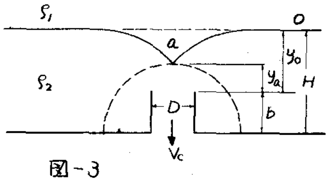
図－2

本実験およびHarleman等の実験結果によると，中間層が薄い場合には，限界取水量は(1)式の条件にあてはまり取水管の管径には無関係に，下層の水深および上層下層の密度によって決定されることになる。　又，Harleman等は取水管のみ口の形状を変えて実験を行なっているが，のみ口の形状による限界取水量の変化は明らかでないようである。

4　取水管の底面からの突出による効果

垂直取水管により取水する場合，土砂の流入防止などのため取水口を底面からある高さの位置に置かなければならない。　下層内に円管を突出させた取水方式についてはHarleman等が実験を行っており，取水管の突出により(2)式の係数が変化することを報告している。　この取水管の突出による効果について次のような考察を行った。　図－3に示すようなモデルを考え，取水口の十分遠方0点と取水口の上方a点でベルヌイの式を立てると次式が得られる。

$$\frac{V_a^2}{2g} = \varepsilon\,(y_0 - y_a) \qquad (6)$$



図－3

今図－3に示すようなドームを考えドームの表面を通過する流体の平均流速Vを $V = Q/(2\pi y_a^2 + 2\pi y_a b)$ とし，これがa点での流速 V_a のK倍であるとすれば次式が得られる。

$$Q^2 = 8\pi^2 K^2 \varepsilon g\, y_a^2 (y_a + b)^2 (y_0 - y_a) \qquad (7)$$

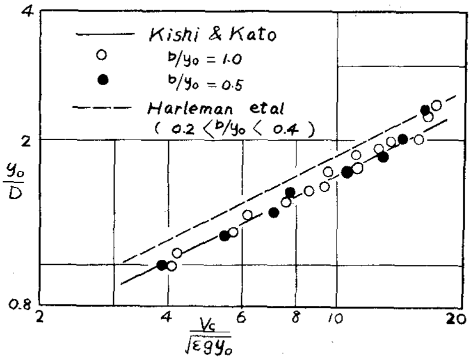
(7)式を y_a で微分し $dQ/dy = 0$ と置けば(8)式となる。

$$y_{ac} = \frac{1}{10}\left\{(4y_0 - 3b) + \sqrt{(4y_0 - 3b)^2 + 40 b y_0}\right\} \qquad (8)$$

(8)式(7)式より限界取水量 Q_c は次式で表わされる。

$$Q_c = 8.89K\sqrt{\varepsilon g}\;\alpha(\alpha+\beta)(1-\alpha-\beta)^{1/2} H^{5/2} \qquad (9)$$

ここで $\alpha = y_{ac}/H$　$\beta = b/H$



図－4

(9)式において $\beta = 0$ すなわち突出がない場合は(1)式と一致し，突出がない場合の限界取水量 Q_{co} と突出がある場合の限界取水量 Q_{cb} との関係は次式となる。

$$\frac{Q_{cb}}{Q_{co}} = 3.5\,\alpha(\alpha+\beta)(1-\alpha-\beta)^{1/2} \qquad (10)$$

図-4に $b/y_0=0.5$ 及び1.0について行なわれた実験結果を示す。実験結果によると両者の区別は明らかではなく次の実験式であらわされる。

$$\frac{V_c}{\sqrt{\varepsilon g y_0}} = 3.8\left(\frac{y_0}{D}\right)^2 \qquad b/y_0=0.5,\ 1.0 \qquad (11)$$

or

$$Q_{cb} = 2.98\sqrt{\varepsilon g}\,(1-b/H)^{5/2}H^{5/2} \qquad b/H=0.33,\ 0.5 \qquad (12)$$

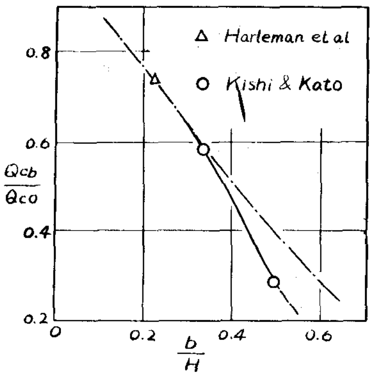


図-5

図-5に(10)式と実験結果とを比較して示す。ただしHarleman等の実験値に関しては実験範囲の平均の b/H の値を用いた。b/H が小さい範囲では(10)式で示される値と実験値とはよく一致しているが b/H が大きくなると(10)式を導びく仮定からはずれるため理論値は大きな値を示している。

5 中間層が無視できない場合

今までは境界面で密度が不連続であると考えて来たが、ここでは中間層がかなり厚く中間層内では密度が連続的に変化している場合を考える。今図-6に示すようなモデルを考え厳密に ρ_2 なる密度を有する下層だけを取水するものとする。図-6に示すように中間層を ρ_3, ρ_4 の密度を有する層に近似すると ρ_3, ρ_4 の値としては、$\rho_3=\rho_2+3\rho_1/4$, $\rho_4=\rho_1+3\rho_2/4$, と考えてよいであろう。前と同様にa点, 0点でベルヌイの式を立てると次式が得られる。

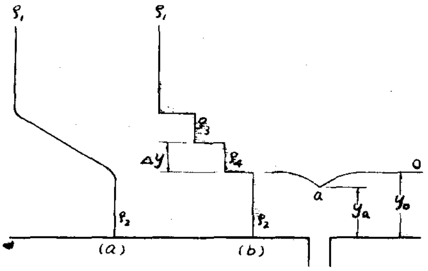


図-6

$$Q_c = \frac{\pi}{4}D^2V_c = 2.51K\sqrt{\varepsilon' g}\,y_0^{5/2} \qquad (13)$$

$$\frac{V_c}{\sqrt{\varepsilon' g y_0}} = 3.20K\,(y_0/D)^2 \qquad (14)$$

ここで

$$\varepsilon' = \frac{\rho_2-\rho_4}{\rho_2}$$

すなわち ε のかわりに ε' を用いることにより近似的に前と同様に考えることができるわけである。

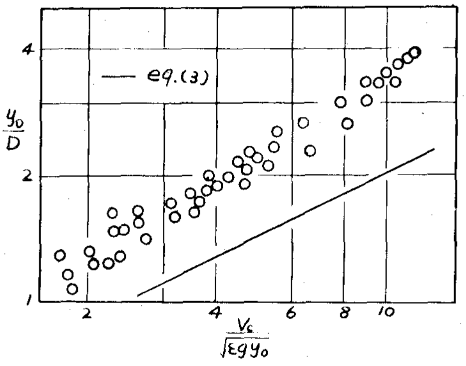


図-7

このような近似理論を調べるため中間層がかなり厚く無視できない場合に厳密に下層だけを取水する実験を行なった。実験における密度安定度は $3\times10^{-3}<E(1/m)<6\times10^{-3}$ であり、中間層の厚さは下層水深の5割程度であった。この場合どの面をもって下層と中間層とを分離するかが問題であるが、本実験では下層との密度差が上層と下層の密度差の80%および20%である面を結ぶこの直線の延長線と下層の密度一定の線の延長線との交点を下層の上端と考えた。実験結果を ε で整理し図-7に示す。図-8には(14)式に従い ε' で整理しなおしたものを示す。図-8によれば、

実験値は(3)式に大体一致する。 すなわち，その計算の際に下層の密度と下層に近い層の平均密度を用いることにより(3)式で示される限界条件を用いてもよいことになる。 しかしフルード数が大きくなると実験値は(3)式からはずれ，実験値全体からみれば $V_c/\sqrt{\varepsilon g y_0} \propto (y_0/D)^{3/2}$ の関係があるようにも思われる。 この関係が成立すると，限界取水量は取水管の管径にも影響されることになり，この点に関しては今後調べなければならないであろう。

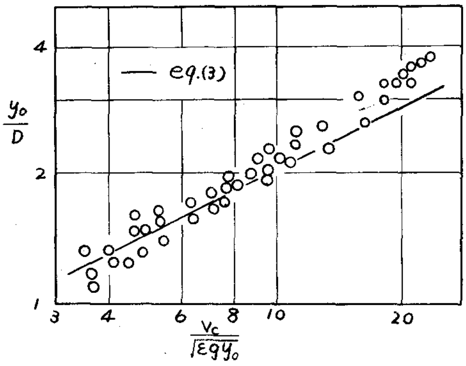


図-8

次に下層だけを取水するのではなく，中間層の中間まで取水するような場合を考える。

図-6に示すモデルを用いると，前にも述べたように，下層だけを厳密に取水する場合には，限界取水量は次式で表すことができた。

$$Q_c=\alpha\sqrt{\frac{\rho_2-\rho_4}{\rho_2}g}\;y_0^{5/2}\qquad \alpha\fallingdotseq1.88 \qquad (15)$$

次に $y_0+\Delta y$ の面まで取水するものとすれば，ρ_4 の密度を有する層はすでに下層に混合してしまい底面から $y_0+\Delta y$ までの間では近似的に ρ_2 の密度を有していると考えてもよいであろう。 このように考えると限界取水量は次式で表わされる。

$$Q_{cm}=\alpha\sqrt{\frac{\rho_2-\rho_3}{\rho_2}g}\,(y_0+\Delta y)^{5/2} \qquad (16)$$

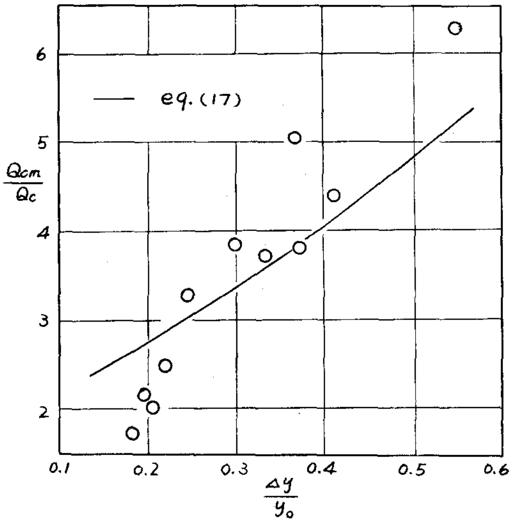


図-9

ρ_3，ρ_4 の値は前にも述べたように $\rho_3=\frac{\rho_2+3\rho_1}{4}$，$\rho_4=3\rho_2+\rho_1/4$ と考えることができるから(15)式(16)式の比は次式であらわされる。

$$\frac{Q_{cm}}{Q_c}=\sqrt{3}\,(1+\Delta y/y_0)^{5/2} \qquad (17)$$

(17)式を確かめるため，中間層の中間の面まで取水する実験を行った。 垂直安定度は下層だけを厳密に取水する場合とほぼ同じであった。 図-4に，下層だけを厳密に取水する場合と，中間層の中間まで取水する場合の限界取水量の実験値の比を示す。 この結果によると明らかに下層の水深が Δy だけ増加した以上に限界取水量は増大しており (17)式で示される近似理論が示すように $\sqrt{3}$ 倍あるいはそれ以上になっている。 この限界取水量の増加は 中間層の存在によるものであろう。 以上のように，中間層を無視する場合 無視できない場合について考察してきたのであるが，どの程度の厚さあるいは垂直安定度で中間層を無視することができるか又は考えなければならないかは，今の所明らかではない。 この点に関しては，今後調べるつもりである。