

図-2 流れの重ね合わせとの類似性

$(\rho_s - \rho_f) / \rho_f$  とおくと、

$$(\Phi_f)_F = k \left\{ \frac{\rho_f Q h + \rho_s g y - \rho_f g y}{\rho_f g} \right\} = kh + k\epsilon y \dots \dots \dots (2)$$

となる。すなわち、海水飽和地盤中の海水を、これと同じ圧力分布をもつ淡水で置き換えると、この淡水は垂直下方に  $k\epsilon$  の割合で増加する 図-2 に示すようなポテンシャル分布をもつことになり、ポテンシャルの類似性に着目すれば、海水飽和地盤中の海水は、上方に向かって  $-k\epsilon$  のポテンシャル勾配をもつ淡水の垂直上方への平行等速流（以下、垂直上向流とよぶ）に置き換えることができる。この淡水の垂直上向流を井戸からの淡水の流出流れに重ね合わせて、この結果得られる2つの流れの境界面を、近似的に淡塩境界面とする解析手法が、ここで用いる流れの重ね合わせの基本的な考え方である。著者らは、この手法を用いて、円形暗きよから淡水を注入する場合の2次元のウォーターカーテンを算定し、その結果 Zhukovsky 関数を用いた厳密解と、非常に高い精度で一致することを確認している。

(2) 井戸底面からの注入の解析

図-1 に示すように、海水飽和地盤中に井戸底面から淡水を注入する場合を解析しよう。

いま、井戸の半径  $r_0$  が井戸の長さ  $d$  に比べて十分に小さい場合を考えることにする。まず、井戸底面から流出する流れとして、井戸の底面の中央に中心をもつ半径  $r_0$  の球から流出し、これが地表面に関して対称な位置に置かれた同じ径の球へ流入する流れを考える。この場合の2つの球の表面は等ポテンシャル面であるから、上記のような無限領域において、対称におかれた流出・流入の球状の等ポテンシャル面間の流れは、それぞれの等ポテンシャル面内に考えられる流出点 ( $r=0, y=a, a>0$ ) と流入点 ( $r=0, y=-a$ ) との間の流れと同じになる。したがってここでは、図-1 の淡塩境界面の内部の流れを上記の流出・流入点間のポテンシャル流に、垂

直上向流を重ね合わせるにより求めることにする。いま、淡水注入量を  $Q$ 、垂直上向流のポテンシャル勾配を  $mke$  とすると、速度ポテンシャル  $\Phi$  は次式で表わされる<sup>9)</sup>。

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi} \left( \frac{1}{\sqrt{(y-a)^2 + r^2}} - \frac{1}{\sqrt{(y+a)^2 + r^2}} \right) + mkey + C_1 \dots \dots \dots (3)$$

また、流れ関数  $\Psi$  は  $\Phi$  との関係式<sup>10)</sup>  $(1/r) \cdot (\partial\Psi/\partial r) = (\partial\Phi/\partial y)$  を用いて算出する。ここに式 (3) より、

$$\frac{\partial\Phi}{\partial y} = -\frac{Q}{4\pi} \cdot \left( \frac{y-a}{\sqrt{\{(y-a)^2 + r^2\}^3}} - \frac{y+a}{\sqrt{\{(y+a)^2 + r^2\}^3}} \right) + mke$$

したがって、

$$\Psi = \int r \left( \frac{\partial\Phi}{\partial y} \right) dr = \frac{Q}{4\pi} \left( \frac{y-a}{\sqrt{(y-a)^2 + r^2}} - \frac{y+a}{\sqrt{(y+a)^2 + r^2}} \right) + \frac{1}{2} mker^2 + C_2 \dots \dots \dots (4)$$

ここで、地表面でのポテンシャルを求めると、式 (2) より  $\Phi = kh$ 、式 (3) より  $\Phi = C_1$  であるから  $C_1 = kh$ 。また、 $r=0, y>a$  の流れを  $\Psi=0$  とおくと、式 (4) より  $C_2=0$  となる。

次に、このような流れにおいて、流出点のまわりに行ける等ポテンシャル面群は、流れの重ね合わせの結果、球形から変形されるが、流出点に近い等ポテンシャル面は、ほとんど球形と考えられるので、前述の井戸先端部に考えた全面から流出する半径  $r_0$  の球（中心位置  $r=0, y=a$ ）にほとんど一致する等ポテンシャル面が存在するといえる。したがって、いま、この球について考えると、その上端と下端の位置は等ポテンシャルであるので、式 (3) を

$$\Phi(r=0, y=d-r_0) = \Phi(r=0, y=d+r_0)$$

と置き、 $d \pm r_0$  と  $a$  の大小に注意して整理すると、

$$\frac{a}{(d+r_0)^2 - a^2} = \frac{d-r_0}{a^2 - (d-r_0)^2} - \frac{4\pi mke}{Q} r_0 \dots \dots \dots (5)$$

式 (5) より流出点の位置  $a$  が求められる。

次に、ここでは、井戸の先端に流出球を考えていることから、この境界条件として、式 (3) に  $r=0, y=d-r_0$  において  $\Phi = k(\Delta H + h)$  の条件を代入すると、淡水注入量  $Q$  は、

$$Q = \frac{2\pi k \{ \Delta H - m\epsilon(d-r_0) \}}{(d-r_0) / \{ a^2 - (d-r_0)^2 \}} \dots \dots \dots (6)$$

次に、淡塩境界面の方程式は、式 (4) に  $\Psi=0$  を代入して、

$$\frac{Q}{4\pi} \left( \frac{y-a}{\sqrt{(y-a)^2 + r^2}} - \frac{y+a}{\sqrt{(y+a)^2 + r^2}} \right)$$

$$+\frac{1}{2}mker^2=0 \dots\dots\dots(7)$$

これより地表面 ( $y=0$ ) での淡塩境界面の半径  $r_A$  は、

$$r_A = \sqrt{\frac{Q}{mke\pi} \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2+r_A^2}}} \dots\dots\dots(8)$$

淡塩境界面の下端  $C$  点の位置 ( $r=0, y=y_C, y_C > 0$ ) は、 $C$  点に対応する図-2の  $J$  点が滞り点 (Stagnation Point) であることを考慮すると、式 (3) について  $(\partial\phi/\partial y)_{r=0} = 0$  として、

$$y_C = \sqrt{\sqrt{\frac{Qa}{mke\pi}} y_C + a^2} \dots\dots\dots(9)$$

次に、 $m$  の値を決定する。 $C$  点のポテンシャルは、式 (3) に  $r=0, y=y_C$  を代入した値で与えられ、これが式 (2) の海水飽和地盤中のポテンシャル  $(\phi_r)_C = kh + ke y_C$  と等しくならなければならない。この等式を整理すると、

$$m = 1 - \frac{Q}{2\pi ke y_C} \cdot \frac{a}{y_C^2 - a^2} \dots\dots\dots(10)$$

したがって、式 (5), (6), (9) および (10) より、与えられた境界条件  $d, r_0, \Delta H$  について解くと  $a, m, Q$  および  $y_C$  が求まり、式 (7), (8) から淡塩境界面の水理諸量が算出される。

(3) 井戸の底面と壁面からの注入の解析

図-3 のように、淡水を井戸の底面からだけでなく、井戸先端部のある長さにはわたってストレーナーがあって、この壁面からも注入する場合について解析しよう。

まず、井戸から流出する流れとして、井戸壁の流出部に対応させて、同じ強さの流出点を、井戸の中心軸の位置に配列させた流出線源 (Line Source) と、これと地表面に関して対称な位置に置かれた同様の流入線源 (Line Sink) との間のポテンシャル流を考える。ここに流出・流入線源を微小区間に分割すると、地表面より  $a$  の距離の対称な位置にある強さ  $qda$  (ここに、 $q$ : 単位長さあたりの流出・流入量) の流出・流入線源要素間のポテン

シャル流は、

$$d\phi = qda \left( \frac{1}{\sqrt{(y-a)^2+r^2}} - \frac{1}{\sqrt{(y+a)^2+r^2}} \right)$$

で表わされるから<sup>11)</sup>、流出線源の上端と下端の位置をそれぞれ  $y=a_1$  と  $y=a_2$  ( $a_1, a_2 > 0$ ) とすると、流出・流入線源間のポテンシャルは、

$$\begin{aligned} \phi &= q \int_{a_1}^{a_2} \left( \frac{1}{\sqrt{(y-a)^2+r^2}} - \frac{1}{\sqrt{(y+a)^2+r^2}} \right) da \\ &= q \cdot \log \frac{y+a_1 + \sqrt{(y+a_1)^2+r^2}}{y+a_2 + \sqrt{(y+a_2)^2+r^2}} \\ &\quad \cdot \frac{y-a_1 + \sqrt{(y-a_1)^2+r^2}}{y-a_2 + \sqrt{(y-a_2)^2+r^2}} \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

したがって、図-3 の淡塩境界面の内部の流れは、式 (11) に垂直上向流を重ね合わせた次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \phi &= q \cdot \log \frac{y+a_1 + \sqrt{(y+a_1)^2+r^2}}{y+a_2 + \sqrt{(y+a_2)^2+r^2}} \\ &\quad \cdot \frac{y-a_1 + \sqrt{(y-a_1)^2+r^2}}{y-a_2 + \sqrt{(y-a_2)^2+r^2}} + mke y + kh \\ &\dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

また、式 (4) と同様に、流れ関数  $\Psi$  を求めると、 $r=0, y > a_2$  の流線を  $\Psi=0$  とすれば、

$$\begin{aligned} \Psi &= q \cdot \{ \sqrt{(y+a_1)^2+r^2} + \sqrt{(y-a_1)^2+r^2} \\ &\quad - \sqrt{(y+a_2)^2+r^2} - \sqrt{(y-a_2)^2+r^2} \} \\ &\quad + mker^2/2 \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

いま、井戸全体からの淡水注入量を  $Q$  とすれば、 $r=0, 0 < y < a_1$  の流線に対する  $\Psi$  はポテンシャル理論より<sup>12)</sup>  $\Psi = -Q/2\pi$  である。また、式 (13) において、 $0 < y < a_1$  の範囲で  $r=0$  とすれば、 $\Psi = -2(a_2-a_1)q$  となる。したがって、

$$q = \frac{Q}{4\pi(a_2-a_1)} \dots\dots\dots(14)$$

次に、ここで取り扱っている流れは流出線源からのもので、その等ポテンシャル面は線源を回転軸にした回転楕円体に近似したものとなる。これに対して、実際の場合は井戸の底面および先端部のある長さの壁面から流出するから、その等ポテンシャル面は円筒である。したがって境界条件がやや異なるが、いま、境界条件として、 $r=r_0, y=(a_1+a_2)/2$  において  $\phi = k(\Delta H + h)$  の条件を式 (12) に与える。このことは  $r=r_0, y=(a_1+a_2)/2$  を通る近似回転楕円面のポテンシャルを  $k(\Delta H + h)$  と与えたことになる。このようにすれば、

$$\begin{aligned} Q &= \frac{4\pi(a_2-a_1)}{\log \frac{(a_2-a_1)/2 + \sqrt{(a_2-a_1)^2/4+r_0^2}}{-(a_2-a_1)/2 + \sqrt{(a_2-a_1)^2/4+r_0^2}}} \\ &\quad \cdot \frac{\{k\Delta H - mke(a_1+a_2)/2\}}{\frac{(3a_1+a_2)/2 + \sqrt{(3a_1+a_2)^2/4+r_0^2}}{(a_1+3a_2)/2 + \sqrt{(a_1+3a_2)^2/4+r_0^2}}} \\ &\dots\dots\dots(15) \end{aligned}$$

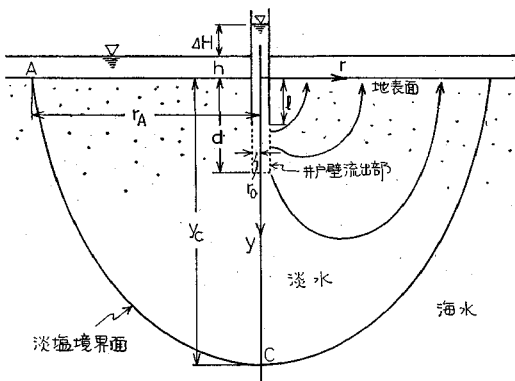


図-3 井戸の底面と壁面からの注入

次に、淡塩境界面の方程式は、式(13)に  $\Psi=0$  を代入して、

$$\frac{Q}{2\pi(a_2-a_1)} (\sqrt{(y+a_1)^2+r^2} + \sqrt{(y-a_1)^2+r^2} - \sqrt{(y+a_2)^2+r^2} - \sqrt{(y-a_2)^2+r^2}) + m k \epsilon r^2 = 0 \dots\dots\dots(16)$$

式(16)より、地表面 ( $y=0$ ) での淡塩境界面の半径  $r_A$  を求めると、

$$r_A = \sqrt{\frac{Q(\sqrt{r_A^2+a_2^2}-\sqrt{r_A^2+a_1^2})}{m k \epsilon \pi (a_2-a_1)}} \dots\dots\dots(17)$$

また、淡塩境界面の下端 C の位置 ( $r=0, y=y_c$ ) は、 $(\partial\Phi/\partial y)_{r=0}=0$  より、

$$y_c = \sqrt{\frac{Q(a_2+a_1)}{2\pi m k \epsilon (y_c^2-a_1^2)}} \cdot y_c + a_2^2 \dots\dots\dots(18)$$

次に、 $m$  の値は {式(2) $_{y=y_c}$ } = {式(12) $_{r=0, y=y_c}$ } の等式より

$$m = 1 - \frac{Q}{4\pi k \epsilon y_c (a_2-a_1)} \cdot \log \frac{(y_c-a_1)(y_c+a_1)}{(y_c-a_2)(y_c+a_2)} \dots\dots\dots(19)$$

ここで、 $a_1$  と  $a_2$  の値として次の値をとることにする。 $a_1$  については、井戸壁流出部の上端の位置、すなわち  $a_1=l$  とし、 $a_2$  については井戸下端の位置、すなわち  $a_2=d$  とする。

この  $a_1, a_2$  の値と式(15)、(18) および (19) から、与えられた境界条件  $d, r_0, \Delta H$  について解けば、 $m, Q$  および  $y_c$  が求まり、式(16)、(17) から淡塩境界面の水理諸量が算出される。

### 3. 非定常の淡塩境界面の算定

井戸から注入した淡水が、海水飽和地盤中を浸透して、定常状態に達するまでの非定常過程を算定してみよう。解析は、2次元の円形暗きよによる非定常の淡塩境界面の近似的算定に用いた手法によった。すなわち、非定常淡塩境界面の各点の移動が、定常状態における同じ位置の淡水の浸透速度に等しい速度で行われるとする近似解法である。この手法は、Muskat や Bear and Jacob が、地盤中の淡水の流れに、井戸から淡水を注入した時の、両淡水の流れの境界面の平面的な移動の算定に用いた近似的手法である。ここで取り扱っている現象は、淡塩2層の境界を考えている点で異なるが、淡塩境界面の進行速度に影響する Mobility ratio<sup>13)</sup> は、淡水と海水との動粘性係数がほぼ等しいので、その効果を見捨てることができることから、ここでも同様に用いることができると考えた。

この算定法によれば、地盤の空隙率を  $\lambda$ 、流線に沿う微小区間の長さを  $dL$ 、移動時間を  $dt$  とすれば、

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{1}{\lambda} \frac{\Delta\Phi}{dL} \dots\dots\dots(20)$$

であり、定常状態の流線に沿って、淡塩境界面が点  $(r_i, y_i)$  から点  $(r_{i+1}, y_{i+1})$  に到達するのに要する時間  $t_i$  は、

$$t_i = \lambda \sum_{n=1}^i \frac{(r_{n+1}-r_n)^2 + (y_{n+1}-y_n)^2}{\Phi(r_n, y_n) - \Phi(r_{n+1}, y_{n+1})} \dots\dots\dots(21)$$

変数を無次元化して  $y/d=Y, r/d=R, \Phi/kd=\Phi$  とすれば、無次元時間  $T(=kt/d\lambda)$  は次式となる。

$$T = \sum_{n=1}^i \frac{(R_{n+1}-R_n)^2 + (Y_{n+1}-Y_n)^2}{\Phi_n - \Phi_{n+1}} \dots\dots\dots(22)$$

したがって、あらかじめ定常状態の流線を描いておき、各流線上の各位置での式(22)の算定結果を用いて、等時到達位置を選んで結んでいけば、その時刻の淡塩境界面が得られる。

なお、 $r=0$  の  $y$  軸に沿う淡塩境界面の到達時間は、井戸の底面から注入する場合には、式(3)より、

$$t = \frac{\lambda}{m k \epsilon} \int \left\{ \frac{aQy}{aQy - (y^2 - a^2)m k \epsilon \pi} - 1 \right\} dy \dots\dots\dots(23)$$

また、井戸の底面と壁面から注入する場合には式(12)より、

$$t = \frac{\lambda}{m k \epsilon} \int \left\{ \frac{(a_1+a_2)Qy}{(a_1+a_2)Qy - 2(y^2-a_1^2)(y^2-a_2^2)m k \epsilon \pi} - 1 \right\} dy \dots\dots\dots(24)$$

で表わされ、数値積分法によって求められる。

## 4. モデル実験による検討

### (1) 実験装置および実験条件

以上の解析を実験的に検討するために、砂モデルの実験を行った。実験装置は図-4に示すように、中心角が

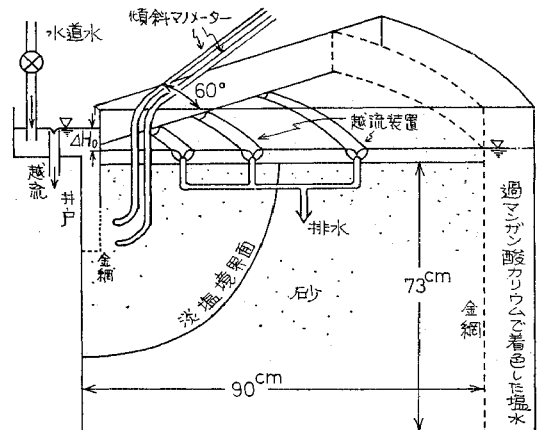


図-4 実験装置の概略図

60度で、両面が透明アクリル板の扇形水槽を用いた。実験は次の4種類について行った。まず、井戸底面からの注入については、解析解を検討する意味で、解析解と同じ条件として地盤中に球を設置して実験を行い、次いで、井戸を設置して、その底面から注入する実験を行った。また、井戸の底面と壁面からの注入については、同様に解析解を検討する意味で地盤中に楕円体を設置して行う実験と、井戸の底面および先端部付近の壁面から注入する実験を行った。なお、流出部は金網を用いた。海水には、比重を1.025に調整し、過マンガン酸カリウムで着色した食塩水を用い、淡水には水道水を用いた。また、実験砂は相馬砂 ( $d_{50}=0.74$  mm, 均等係数=1.19) を用い、水槽内への充填の際には、実験ごとに空隙率が変化しないように、同じ総重量の砂を同容積に充填し、さらに、砂層内に気泡が残らないように、また、水槽内で空隙率が均一になるように、十分に留意した。ここに、水槽内に入れた砂の総重量より求めた空隙率は43%であり、この状態の透水係数は表-1に示すように実験公式による値を平均すると、 $k=0.30$  cm/sec となり、この値をすべての実験に用いた。なお、この平均値は、別に行った定水頭浸透計の実験結果とよく一致することが確かめられている<sup>14)</sup>。次に、図-1のように地表面上には水深  $h$  の淡水があるととして解析しているが、実験では、淡水で地表面をおおうと地表面付近の地盤中の海水が拡散して急激に食塩濃度が薄くなるので、本実験では、始め地表は水深  $h$  の海水でおおった。  $h$  が小さいので、この解析の条件の相違に基づく誤差は無視できると考えられる。

表-1 実験公式による透水係数の算定<sup>14)</sup>

公式名	Slichter式	Terzaghi式	佐々木式	Kozényi Donat式	平均値
$d$ (mm)	$d = d_2 = 0.674$	$d_{10} = 0.62$	$d_{10} = 0.62$	$d_2 = 0.674$	
定数	$\lambda = 16.29$	$C_1 = 8$	$b = 100$	$C_2 = 2.3$	
$k$ (cm/sec)	0.286	0.395	0.297	0.249	0.30

次に、実験中の淡塩境界面の曲線形状は、各時間ごとに水槽両面に描いておき、実験後に読みとって、両面の平均値を実験結果とした。なお、実験は、実験開始後約2時間で淡塩境界面がほぼ変らなくなるので、3時間目を定常状態とした。淡水注入量は、定常状態において、地表面上の越流装置から排出される流量を測定した。次に、これまでは注入淡水の井戸からの流出部に与えられるポテンシャルは図-1の  $\Delta H$ 、すなわち図-4の  $\Delta H_0$  として説明してきた。しかし、流出部から砂層に出たとたん、ポテンシャルが非常に下がり、このポテンシャルと井戸内部のポテンシャルとは非常に大きな相違がある。したがって、ここでは図-4の  $\Delta H_0$  を用いず、流出部近傍の圧力をマンメーターで測定し、このポテン

シャル  $\phi$  とこの測定位置 ( $r, y$ ) を用いて、式(3),(5),(6),(9),(10)あるいは式(12),(14),(15),(18),(19) から  $\Delta H$  を求め、同時にそのほかの水利諸量を算定した。なお、流出部近傍の2点で圧力を測定した場合は、上記によって得られた2つの  $\Delta H$  の平均値を用いた。圧力測定は傾斜マンメーターにより測定した。

(2) 実験結果の考察

井戸底面から注入する場合の淡塩境界面の形状を図-5および図-6に示している。まず、図-5は、井戸の代わりに、球から淡水を注入した場合の定常状態の境界面形状を示すもので、球の半径は  $r_0=3.0$  cm, 設置深さは  $d=20.0$  cm であり、 $\Delta H$  の圧力測定は  $r=7.0$  cm,  $y=22.5$  cm の位置で行った。この実験は、井戸底面からの注入の解析が球形の等ポテンシャル面について行ったものであることから、解析解とほぼ同じ境界条件の実験といえる。両結果を比較すると、実験結果の淡塩境界

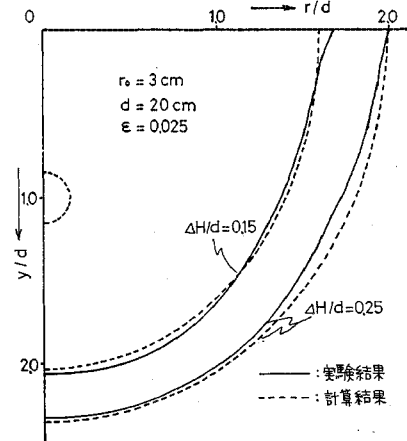


図-5 球からの実験結果との比較

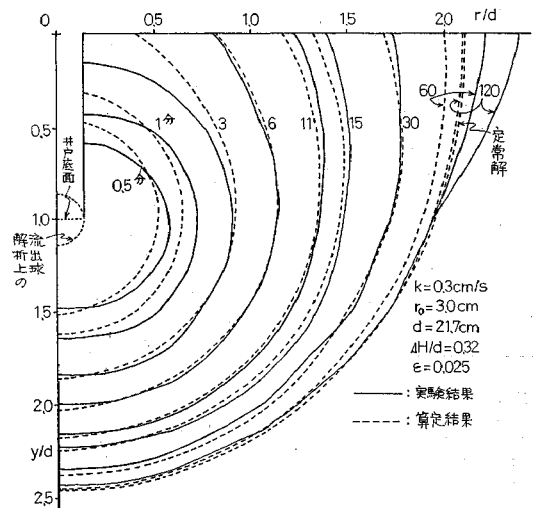


図-6 実験結果との比較 (その1)

面は地表面付近で拡がる傾向を示している。これは前述のように始め地表面を海水でおおっていても、地表面に流出する淡水により、淡塩境界面より内側の地表上は淡水化し、また、淡塩境界面付近の地表上の海水も薄められ、このため地表付近の淡塩境界部も拡散によって薄められて境界部が拡がったものと考えられる。これは以下に述べるすべての実験でも顕著に認められた。しかし、淡塩境界面のこの部分以外はほぼよい一致を示している。このことは、ここで用いた重ね合わせによる解析手法が、3次元の淡水注入工法にも実用的には十分用いることを示すものといえよう。

次に、図-6 は、井戸の底面から注入する場合の結果を示す。井戸の模型の大きさは  $r_0=3.0\text{ cm}$ 、 $d=21.7\text{ cm}$  であり、 $4H$  の圧力測定は  $r=6.8\text{ cm}$  における  $y=15.6\text{ cm}$  と  $23.0\text{ cm}$  の2か所である。解析は図に示しているように、井戸半径と同じ半径の点線の球から淡水を注入した場合の結果を示している。まず、定常状態の淡塩境界面形状を比較すると、ほぼ井戸底面の深さから下方の浸透領域では、計算結果と実験結果はよく一致している。地表面付近では、実験結果の方が大きくなっているが、これは前述の地表面付近の拡散によるものと考えられ、これを除けばほぼよい一致を示しているとみてよい。次に、非定常状態の淡塩境界面を比較すると、初期に境界面形状の相違が大きい。これは解析では球のため、上方向の淡水の流出が井戸底面の場合に比べて大きいから、算定結果は実験結果に比べて井戸の周壁に沿う鉛直上方向の拡がりが大きくなったものと考えられる。しかし、この初期の相違も次第に減少して、最終的にはほぼ一致しているようである。したがって実用上から初期のある程度の誤差を許すならば、この方法によって非定常の淡塩境界面の移動状況をほぼ算出できるものと考ええる。

以上のように、淡塩境界面については、ほぼよい結果をうるようであるが、解析結果をさらにくわしく検討するために、押し下げ深さ  $y_c$  と淡水注入量  $Q$  について実験を行った。この結果を表-2 に示す。計算値は式(6)および式(9)の結果であり、実験は解析とほぼ同じ境界条件の球からの注入の場合と、井戸の底面からの注入の場合のそれぞれについて行っている。模型の大きさ

表-2 井戸底面からの淡水注入  
( $r_0=3.0\text{ cm}$ 、 $d=25.5\text{ cm}$ 、 $k=0.30\text{ cm/s}$ )

No.	$4H/d$	$y_c$ (cm)		$Q$ (cc/sec/60度)			
		計算値	実験値 (球)	実験値 (井戸)	計算値	実験値 (球)	実験値 (井戸)
1	0.132	46.7	44.9	46.8	5.78	6.37	5.79
2	0.162	49.4	46.7	48.7	7.34	7.35	6.76
3	0.203	52.5	50.1	51.7	9.45	10.06	9.65
4	0.240	55.0	52.8	54.8	11.36	12.14	12.38

はいずれも  $r_0=3.0\text{ cm}$ 、 $d=25.5\text{ cm}$  であり、 $4H$  の圧力測定は  $r=4.6\text{ cm}$  における  $y=16.5\text{ cm}$  と  $y=21.5\text{ cm}$  の2か所である。まず、 $y_c$  について比較すると、計算値は球による実験値および井戸による実験値より大きくなっており、また、井戸による実験値は球による実験値よりやや大きくなっている。これは井戸底面から注入する実験は、淡水の注入が鉛直下方向に行われることから、球から注入する実験よりも押し下げ深さがやや大きくなる傾向にあると推定される。しかし、 $y_c$  の計算値は球による実験値および井戸による実験値に比べて、実用上から考えて、ほぼ十分な精度をもっているといえよう。次に、淡水注入量  $Q$  は中心角 60 度当りの注流量を示している。 $Q$  の計算値は球による実験値よりやや小さくなっており、また、球による実験値は井戸による実験値よりやや大きくなっている。しかし、 $Q$  の計算値は球および井戸による実験値とほぼ一致しているといえよう。以上の図-5、6 および表-2 の実験結果から、井戸底面からの注入を球からの注入として、淡水上向流と重ね合わせる本解析による結果は、実用的にはほぼ満足できる値を与えると考えられる。

次に井戸の底面と壁面から注入する場合の淡塩境界面の形状を図-7 に示している。図-7 の井戸の模型の大きさは  $r_0=1.2\text{ cm}$ 、 $d=25.4\text{ cm}$ 、壁面の流出部の長さは  $10.0\text{ cm}$  であり、 $4H$  の圧力測定は  $r=3.1\text{ cm}$  における  $y=17.8\text{ cm}$  と  $y=23.0\text{ cm}$  の2か所である。まず、定常状態の境界面形状を比較すると、実験結果は押し下げ深さについてはほぼ一致するが、水平方向にやや拡がった形をしている。この傾向は井戸の代わりに解析とほぼ同じ境界条件について行った楕円体による実験においても同様であった。これは地表面付近での前述の拡散の影響もあるが、解析モデルの設定が十分でないことも

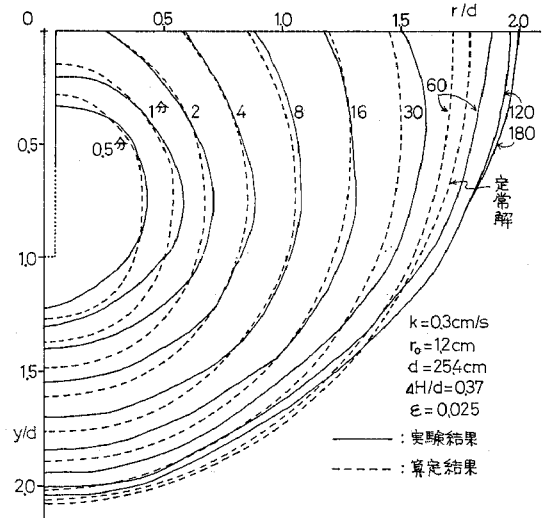


図-7 実験結果との比較 (その2)

原因していると考えられる。次に、非定常状態の淡塩境界面を比較すると、算定結果は実験結果より鉛直軸方向で大きめの値を示し、初期に生じた相違が時間が経過しても持続されているようである。また、ほぼ井戸底面の深さから上部の浸透領域では、およそ16分経過時までは、やや小さめの値を示しながらもほぼ一致しているが、30分経過時以後は、実験結果との相違が時間の経過につれて大きくなっている。

次に、押し下げ深さ  $y_c$  と淡水注入量  $Q$  についての実験結果を表-3に示す。計算値は式(15)および式(18)の結果であり、実験は解析とほぼ同じ境界条件について行う楕円体からの注入の実験と、井戸の底面および壁面からの注入の実験を行っている。模型の半径、設置深さおよび  $\Delta H$  の圧力測定位置は表-2の実験と同じである。また、流出部の長さは、楕円体の場合は長軸の長さを10cmとし、井戸の場合は壁面での長さを10cmとした。まず、 $y_c$  について比較すると、計算値は、楕円体による実験値より大きい場合と小さい場合が現われている。両者はほぼ一致しているといえよう。また、井戸による実験値と比較すると、No. 1の値との相違が大きい、これを除けばほぼ一致しているようである。次に、 $Q$  の計算値を楕円体による実験値と比較すると、No. 1の場合はよく一致しているが、それ以外は計算値

の方が小さくなっている。また、井戸による実験値は楕円体による実験値より大きく、計算値との差がさらに大きくなっている。ちなみに井戸による実験値は計算値より、平均すると26%程度大きくなっている。以上の図-7および表-3の実験結果から、井戸の底面と壁面から注入する場合の解析結果は、淡水の押し下げ深さについてはほぼよい結果を与えるが、淡塩境界面の水平方向の拡がりおよび淡水注入量は実際より小さめの値を与えることがいえる。したがって上述の流出線源による重ね合わせの手法を用いた解析モデルは、現象を的確に表現していないと考えられるが、淡水の押し下げ深さに重点をおくと、実用上ある程度の算定が可能と考えられる。なお、図-8に  $y/d=0.606\sim 1.0$  の間に置かれた流出線源による、定常状態の本解析結果の等ポテンシャル面と流線を示している。この図のポテンシャル  $\Phi/(k\Delta H)=1.0$  の等ポテンシャル面(ほぼ楕円体を示す)は、井戸による実験でとった井戸壁(実際の等ポテンシャル面)に相当するもので、比較のため併記している。

5.  $r_0, d, \Delta H$  などが淡水注入量、淡塩境界面に与える影響

ここでは、前述してきた計算式による淡水注入量および淡塩境界面形状の算定結果を検討してみよう。まず、定常状態についてみると、井戸底面から注入する場合の算定結果を図-9, 10に示している。これより、 $y_c/d$  は常に  $r_A/d$  より大きく、両者の差は  $\Delta H/d$  が小さいほど大きいこと、および  $\Delta H/d$  の増加による  $y_c/d, r_A/d$  の増加率は、 $\Delta H/d$  が小さい時に大きく、 $\Delta H/d$  が大きくなるに従い、次第に小さくなる傾向にあることなどがわかる。また、円形暗きよから2次元的に淡水を注入する場合(前報<sup>9)</sup>参照)に比べて、 $\Delta H/d$  の変化に対する  $y_c/d, r_A/d$  の変化は全体的に小さいようである。次

表-3 井戸底面および壁面からの淡水注入 ( $r_0=3.0\text{ cm}, d=25.5\text{ cm}, l=15.5\text{ cm}, k=0.30\text{ cm/s}$ )

No.	$\Delta H/d$	$y_c$ (cm)			$Q$ (cc/sec/60度)		
		計算値	実験値(楕円)	実験値(井戸)	計算値	実験値(楕円)	実験値(井戸)
1	0.119	44.8	42.5	40.9	7.19	7.18	8.53
2	0.161	48.7	49.2	48.7	10.26	13.42	14.37
3	0.225	53.6	53.4	53.3	14.71	17.48	19.00
4	0.295	58.2	56.1	56.2	19.75	21.13	23.38

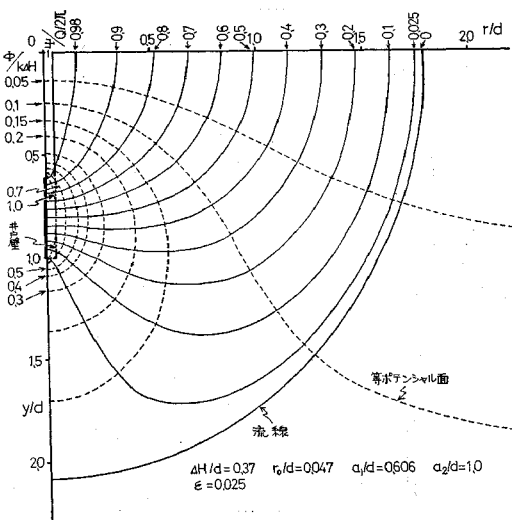


図-8 井戸底面と壁面からの注入の流線網図

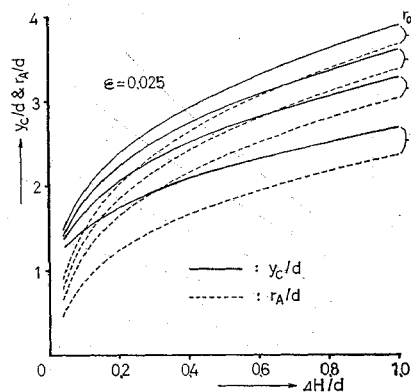
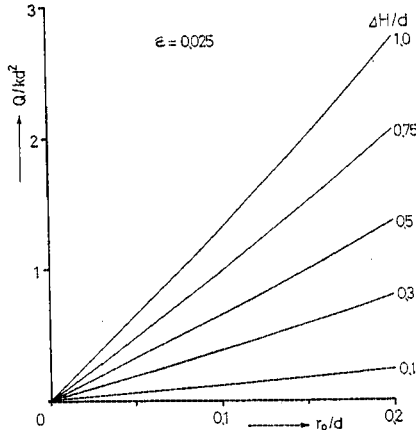


図-9 淡塩境界面の大きさ(その1) (井戸の底面からの注入)

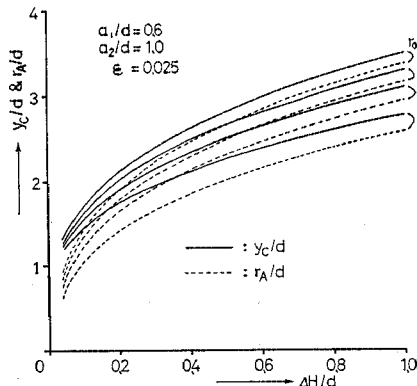
に、 $[Q/kd^2]$  については、 $r_0/d$  の変化につれて直線的に変化し、 $\Delta H/d$  が大きいほど  $r_0/d$  による変化が大きい。

次に、井戸の底面および壁面から淡水を注入する場合の算定結果を図一11、12 に示している。なお、 $Q$  および  $r_A$  については、前述のように誤差を含むものと考え

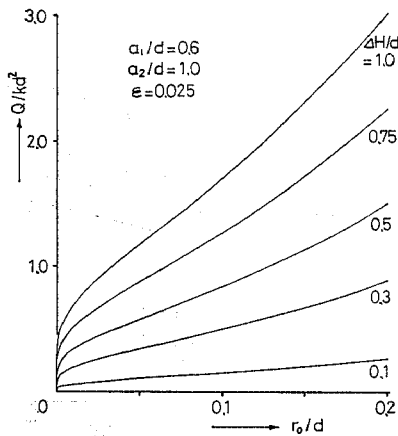
られるが、その傾向をみるうえで記載している。図一11、12 を図一9、10 と比較すると、ほぼ同じような結果となっているが、次の点で傾向が異なっているようである。すなわち、 $r_0/d$  による  $y_c/d$ 、 $r_A/d$  の変化がかなり小さい。また、 $y_c/d$  と  $r_A/d$  の差が小さく、この差も  $\Delta H/d$  によってあまり変化しない。次に、 $(y_c/d)/(Q/kd^2)$  および  $(r_A/d)/(Q/kd^2)$  を注入効率として、



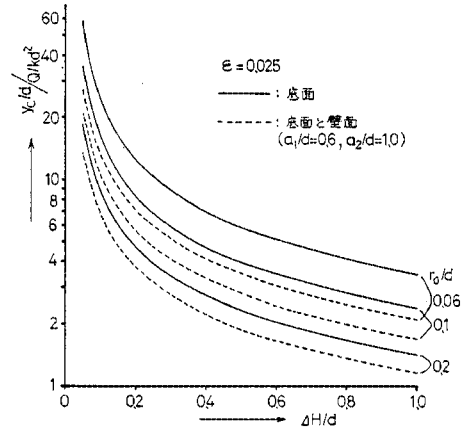
図一10 淡水注入量 (その 1) (井戸の底面からの注入)



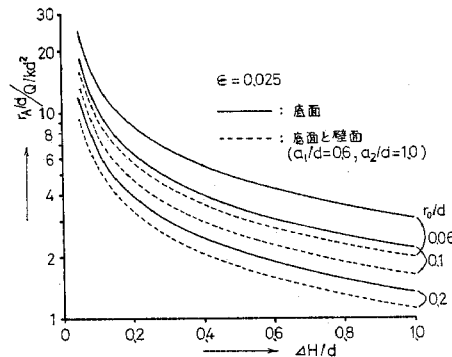
図一11 淡塩境界面の大きさ (その 2) (井戸の底面と壁面からの注入)



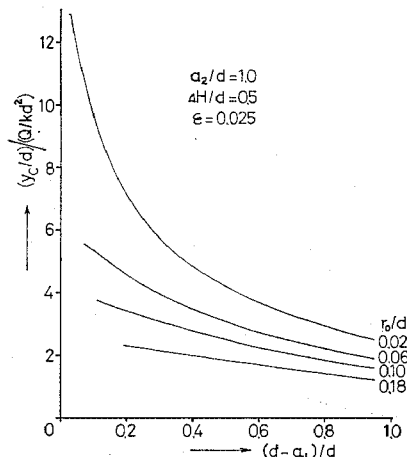
図一12 淡水注入量 (その 2) (井戸の底面と壁面からの注入)



図一13 注入効率 (その 1)



図一14 注入効率 (その 2)



図一15 注入効率 (その 3)



これについて比較すると、図-13, 14に示すように、いずれも井戸の底面から注入する場合の方が大きくなっている。また、井戸半径  $r_0$  が小さい方が大きくなっている。したがって、より少ない淡水注入量で、より深く、また、幅広く淡塩境界面を形成させるには、井戸の底面だけから注入する場合の方が、また、 $r_0$  が小さい方が有利であるといえる。次に、図-15, 16は井戸の壁面の注入部の長さ  $(d-a_1)$  を変えた場合の注入効率  $(y_c/d)/(Q/kd^2)$ ,  $(r_A/d)/(Q/kd^2)$  を示している。これによると、 $Q$  を一定にしたとき、注入部の長さを小にし、ま

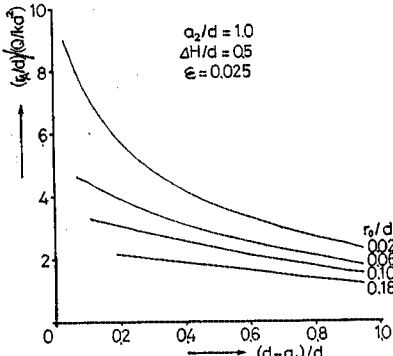


図-16 注入効率 (その 4)

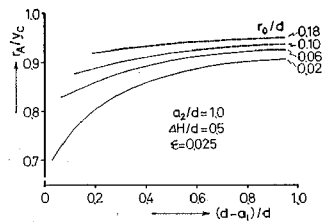


図-17 淡塩境界面の大きさの縦横の比

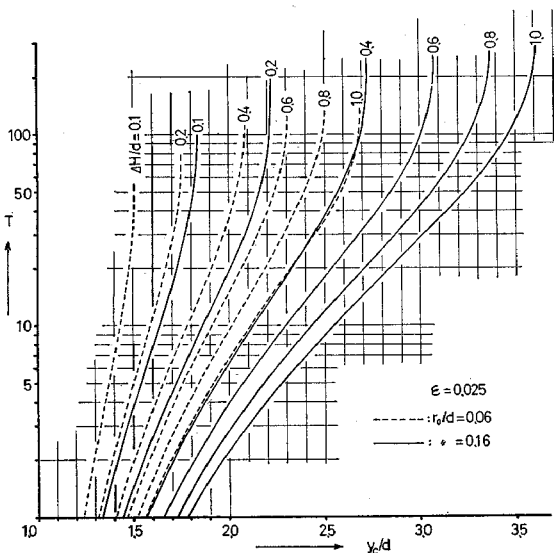


図-18 淡塩境界面の押し下げ時間 (その 1)  
(井戸の底面からの注入)

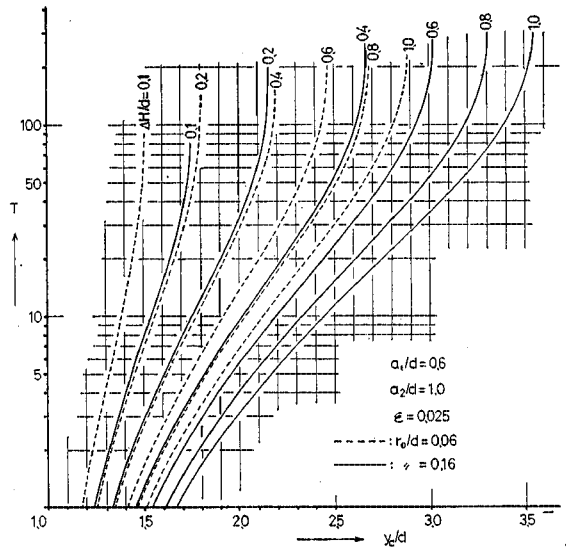


図-19 淡塩境界面の押し下げ時間 (その 2)  
(井戸の底面と壁面からの注入)

た、井戸半径  $r_0$  を小にすると  $y_c$ ,  $r_A$  は大きくなること が推察される。また、図-17は  $r_A/y_c$  を示したもので、注入部の長さを小にし、また、 $r_0$  を小にすると  $r_A/y_c$  は小さくなるが、その変化は少ないようである。次に、前述のように、やや誤差を含んでいるようであるが、非定常状態の押し下げ深さ  $y_c'$  についての算定結果を図-18, 19に示す。これよりある深さに海水を押し下げる時間を概略推定することができよう。

## 6. む す び

海水飽和地盤中に井戸によって、淡水を注入する場合の3次元ウォーターカーテンの厳密な解析は困難と考えられたので、ここでは井戸からの注入淡水の流れと、海水飽和地盤中の海水を上方に流れる淡水の流れに置き換えて、これら2つの流れの重ね合わせとして解く手法を用いて解析し、この算定結果と実験結果とを比較してこの手法の検討を行った。その結果、若干の誤差を許すとすれば、本手法でこのような現象の算定が可能なることを確かめ得た。ついで、非定常状態の淡塩境界面についても、定常状態の淡水粒子の移動速度を用いて近似的に算定できることも確かめ得たものとする。次に、この方法で算定した結果から、より少ない淡水注入量で、より深く淡塩境界面を形成させるには、井戸の底面から注入する方法が底面と壁面から注入する方法より有利であることなどが明らかになった。また、ある深さまで海水を押し下げる時間についての関係図表を求めることができた。

なお、本報は1本の注入井戸について検討したもので

あるが、井戸を一列に並べて不透水層上にウォーターカーテンを形成させる場合についても、本解析結果による淡塩境界面を重ね合わせることにより、概略の適用はできるものと考えられる。

また、本報で取り上げた淡水注入工法は、最近特に注目されてきた廃棄物あるいは廃水による地下水汚染の問題についても、浸透侵入する汚水が海水と類似の地下密度流的な現象を示すことから、地下水汚染の防止工法としても活用できるものと考えている。

本報では、地盤の異方性の影響、下部の不透水性地盤の影響、井戸を一列に並べた場合の淡塩境界面の重なりによる影響あるいは海水の自然流動の影響など基礎的な事項を考慮していない。今後これらの問題の解明に努力していきたいと考えている。

終わりに、本研究は昭和49年度および50年度文部省科学研究費の援助のもとに行われた。ここに記して関係各位に謝意を表します。また、本計算は九州大学大型計算機ならびに九州産業大学計算機によるものである。

#### 参 考 文 献

- 1) 嶋 祐之: 地下水(密度流的諸問題), 土木学会・水工学に関する夏期研修会講義集, pp. A-81, 1974年7月.
- 2) Ackermann & Sridurongkatum: Salt-Water Interface Near A Fresh-Water Canal, Proc. of ASCE., Vol. 90, No. HY 6, pp. 97, Nov., 1964.
- 3) 上田・崎山: 海水飽和地盤における淡水注入溝の浸透, 土木学会論文集, No. 135, Nov., 1966.
- 4) 崎山正常: 淡塩二層地下水流における塩水排除に関する水理学的研究, 九州大学学位論文, 昭和46年3月.
- 5) Sugio & Ueda: Analysis of fresh-salt water interface in aquifer during salt water draining, Proc. of Inter. Symp. on Development of Groundwater Resources, Vol. 2, IV 1-8, Madras, India, 1974.
- 6) D.K. Todd: Salt-water intrusion and its control, Jour. of AWWA, pp. 180, March, 1974.
- 7) 上田・杉尾: 淡水注入による地盤中の淡塩境界面解析の一手法, 第17回水理講演会講演集, pp. 50, Feb., 1973.
- 8) 上田・杉尾: 暗きよからの淡水注入による淡塩境界面の解析, 土木学会論文報告集, No. 225, pp. 43, May, 1974.
- 9) J. Bear & M. Jacob: On the movement of water bodies injected into aquifers, Jour. of Hydrology, Vol. 3, pp. 49, 1965.
- 10) 友近 晋: 流体力学, pp. 181, 文献社, 昭和47年.
- 11) Muskat: The flow of homogeneous fluids through porous media, pp. 266, McGraw-Hill Book Company, 1946.
- 12) 藤本武助: 改著流体力学, pp. 52, 養賢堂, 昭和46年11月.
- 13) J. Bear: Two-liquid flow in porous media, Advance in Hydroscience, Vol. 6, pp. 179, Academic press, 1970.
- 14) 杉尾 哲: 各種の決定法による透水係数の検討, 用水と廃水, Vol. 13, No. 12, pp. 16, 1971.

(1976.8.12・受付)