

海岸地下水の塩水化について

——揚水量分布と淡塩水境界面移動との関係——

出井 紘・福尾 義昭

INTRUSION OF THE SEAWATER THROUGH UNCONFINED COASTAL AQUIFERS

——Some Relations between the Spatial Distribution of Pumping Intensity
and the Motion of Interface Separating Sea Water and Fresh Water
in Coastal Aquifers——

Synopsis

This paper describes the theoretical and experimental study on the relation between the distribution of pumping intensity and the sea water intrusion through an unconfined aquifer in a coastal region. Both cases of the fresh water pumping and the salt water pumping are analyzed by applying Darcy's law and the equation of continuity under the assumption of the hydrostatic pressure distribution and two dimensional model. Analytical results agree well with experimental results in the tendency of the interface between sea water and fresh water corresponding to the various pumping conditions.

1. はじめに

地下水の塩水化は、自然の条件下でも起っており、淡水の供給源を地下水に頼っている離島や、海岸地方の人々にとっては、昔から非常な関心事であった。そのため、この現象は古くから論じられ、Herzbergにより定式化されている。しかし、最近わが国でよく問題とされる塩水化の多くは、沿岸地方の急速な工業化にともなう用水獲得のための地下水揚水によって生じているものであり、この過剰揚水の結果が、その地方の灌漑用水や生活用水にも支障をきたしている。従って揚水量の総量や分布が、どのように塩水化の進行と関係しているかが、塩水化を防ぐ意味で、水資源利用上の重要な課題となっている。

海岸地下水の研究は、Ghyben, Herzberg に始まり、Nomitsu, Toyohara, Kamimoto が解析的方法を施し、Jacob Bear¹⁾ が非定常運動について論じたが、いずれの研究も解析の比較的簡単な被圧地下水について行われており、解析の複雑な不圧地下水については、余り研究は進まなかった。その後、Shima²⁾ が不圧地下水の塩水化を定常・非定常運動両方にわたり解析し、さらに Kawatani³⁾ は、鉛直浸透が塩水化におよぼす影響まで解析しているが、いずれも揚水については、ふれていない。

Fukuo^{4) 5)} は、海岸地下水の塩水化を、定常状態、二次元流の場合について、揚水量分布の一般的表現を用いて被圧および不圧地下水両方にわたって解析し、実験的検討も加えたが、淡水揚水の場合しか論じなかった。しかし、現地では塩水化の進行に伴って、塩水も揚水されている状況であり、揚水量分布が塩水化におよぼす影響を、より有用に論ずるためには、塩水を汲みあげる場合にまで考察を拡げる必要がある。この考察の拡張は Double pumping method から連想されるように、淡塩水両者の同時揚水による効果的な塩水化防止法の可能性につながるように思われる。

このような視点から、本研究は、不圧地下水の場合について、淡水の揚水量分布が、どのように塩水化に影響するかを、Fukuo の解析をもとに検討し、その不十分な点をさらに詳しく調べると共に、塩水の揚水量分

布が、塩水化にどのように影響するかを解析し、実験した。

2. 解 析

2.1 仮定とモデル

自由表面を持つ不圧地下水の定常状態の塩水化を取り扱うに当たって、次の仮定をおく。

- 〔1〕 滞水層は、自由表面を有し、流れは二次元的である。
- 〔2〕 滞水層を構成している medium は、均質、等方であり、一定の深さの不透水性の基底床の上にあるものとする。
- 〔3〕 滞水層には、淡水・塩水の二層が存在し、その境界面は明瞭であり、塩水の拡散は無視する。
- 〔4〕 淡水自由表面、淡塩水境界面の傾斜は緩やかで、Dupit の準一様流の仮定が成立し、鉛直方向の速度は無視でき、従って淡水圧・塩水圧は静水圧であり、鉛直面内の水平速度は一樣であるとする。

以上の仮定をもとに Fig. 1 に示すような二次元モデルを考える。実際の海岸では、海底にヘドロなどの不透水層があるが、揚水などの影響で地下水圧が低下し、透水状態になっているものとする。

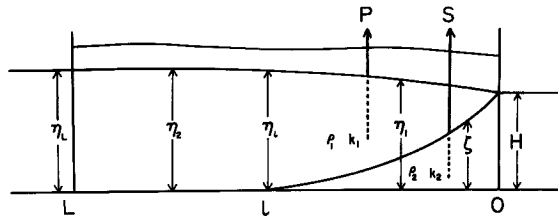


Fig. 1 Model in analysis

Fig. 1 で $z=0$ が不透水層から成る基底床を表し、ここでは基底床は水平となる。 $x=0$ が海岸線、淡水流出口となっており、 $x=L$ が淡水流入口の位置を示す。図で分るように、 $x=l$ が塩水化域の足の位置を示し（以後 l を塩水化域長と呼ぶ）、 $0 \leq x \leq l$ の部分が塩水化域である。 $H, \eta_1, \eta_2, \zeta, \eta_l$ は $z=0$ を基準にとり、 H は海水位、 η_1, ζ は塩水化域の淡水位、塩水位を表し、 η_2 は塩水化域より上流部分での淡水位を、 η_l は塩水化域の足の淡水位を表わす。 ρ_1, k_1, ρ_2, k_2 はそれぞれ、淡水・塩水の密度および透水係数である。 P, S はそれぞれ、淡水・塩水の単位巾、単位時間あたりの揚水量を示す。

2.2 基本式

前節で述べた仮定とモデルを用いて次の式をたてる。仮定〔4〕より

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \rho_1 g \eta_1 & (0 \leq x \leq l) \\
 p_2 &= \rho_1 g (\eta_1 - \zeta) + \rho_2 g \zeta & (0 \leq x \leq l) \\
 p_3 &= \rho_1 g \eta_2 & (x \geq l) \\
 \left. \begin{aligned}
 p_1 &\cdots \text{淡水層の地下水圧} \\
 p_2 &\cdots \text{塩水層の地下水圧}
 \end{aligned} \right\} & (0 \leq x \leq l) \\
 p_3 &\cdots \text{淡水層の地下水圧} & (x \geq l)
 \end{aligned}$$

連続の式は、Darcy の法則が成立すると、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(\eta_1 - \zeta) \left(-k_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \right) \right] + q(x) = 0 \quad (0 \leq x \leq l) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\zeta \left\{ -k_2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \eta_1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \zeta \right) \right\} \right] + s(x) = 0 \quad (0 \leq x \leq l) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\eta_2 \left(-k_1 \frac{\partial \eta_2}{\partial x} \right) \right] + q(x) = 0 \quad (l \leq x \leq L) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$q(x)$, $s(x)$ は、それぞれ淡水・塩水の単位巾、単位長あたりの揚水量である。

次に境界条件は、

$$x=L, \eta_2=\eta_L \dots\dots\dots (4)$$

$$x=l, \eta_1=\eta_2=\eta_l, \frac{\partial \eta_1}{\partial x}=\frac{\partial \eta_2}{\partial x}, \zeta=0 \dots\dots\dots (5)$$

$$x=0, \eta_1=\zeta=H \dots\dots\dots (6)$$

(1), (2), (3)式を上境界条件のもとに積分すると次のようになる。

$$k_1(\eta_1-\zeta)\frac{\partial \eta_1}{\partial x}=\int_0^x q(\mu)d\mu+Q \dots\dots\dots (7)$$

$$\zeta\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\eta_1+\frac{\rho_2-\rho_1}{\rho_2}\zeta\right)=-\frac{1}{k_2}\int_x^l s(\mu)d\mu \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{1}{2}(\eta_L^2-\eta_2^2)=-\frac{1}{k_1}\left[\int_x^L(L-\mu)q(\mu)d\mu+(L-x)\left\{Q+\int_0^x q(\mu)d\mu\right\}\right] \quad (l\leq x\leq L) \dots\dots\dots (9)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\rho_1}{2}(\eta_1^2-\zeta^2)-\frac{\rho_1}{k_1}\int_0^x \{Q+(x-\mu)q(\mu)\}d\mu \\ &= \frac{\rho_2}{2}(H^2-\zeta^2)-\frac{\rho_2}{k_2}\left[x\int_x^l s(\mu)d\mu+\int_0^x \mu s(\mu)d\mu\right] \quad (0\leq x\leq l) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ただし、上式中の Q は $x=0$ における単位巾あたりの淡水流出量である。

以上の式を基本式として、以下の解析を進めて行く。

2.3 淡水揚水の場合

$x=a$ の位置で、揚水量 P で淡水揚水すると考え、この時塩水は揚水しないとすると、(8), (10)と境界条件より淡塩水境界面の形 ζ が求まり

$$\left(1-\frac{\zeta}{H}\right)^2=\int_0^x \{Q+(x-\mu)q(\mu)\}d\mu - \int_0^l \{Q+(l-\mu)q(\mu)\}d\mu \quad (0\leq x\leq l) \dots\dots\dots (11)$$

となる。

揚水量分布が

$$\left. \begin{aligned} q(x) &= p & a\leq x\leq a+da \\ q(x) &= 0 & \text{その他} \end{aligned} \right\} \text{であるとすると}$$

$x=a$ で P 揚水するということは、 $P=pda$ を一定に保って、 $da\rightarrow 0$ に相当すると考えられるので、(11)式の積分は次のようになる。

$a\leq l$ のとき、すなわち塩水化域で淡水揚水する場合。

$$0\leq x\leq a \text{ では、} \left(1-\frac{\zeta}{H}\right)^2=Qx - Ql+P(l-a) \dots\dots\dots (12)$$

$$a\leq x\leq l \text{ では、} \left(1-\frac{\zeta}{H}\right)^2=Qx+P(l-a) - Ql+P(l-a) \dots\dots\dots (13)$$

$a\geq l$ のとき、塩水化域よりも上流で揚水する場合。

$$\left(1-\frac{\zeta}{H}\right)^2=x/l \dots\dots\dots (14)$$

となる。

次に $x=0$ での淡水流出量 Q は

$$Q=\frac{k_1}{2L}\left\{\eta_L^2-\frac{\rho_2}{\rho_1}H^2-\frac{2P}{k_1}(L-a)\right\} \dots\dots\dots (15)$$

から求められ、塩水化域長 l は

$$a \leq l \text{ なら, } l = l_1 = \left\{ \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) H^2 + \frac{2Pa}{k_1} \right\} L \searrow \eta L^2 - \frac{\rho_2}{\rho_1} H^2 + \frac{2Pa}{k_1} \dots\dots\dots (16)$$

$$a \geq l \text{ なら, } l = l_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) H^2 L \searrow \eta L^2 - \frac{\rho_2}{\rho_1} H^2 - \frac{2P}{k_1} (L - a) \dots\dots\dots (17)$$

となる。(16), (17), 式を見ると、揚水量 P が一定だと(16)式では a の増加と共に l も増加し、(17)式では a の増加と共に l は減少することが分る。このことから P が一定の時には、塩水化域長 l が最大となる揚水位置 $a = a_m$ の存在が予想され、この a_m を求めると、 a_m の値は $l_1 = l_2$ を満す a であり、

$$a_m = \frac{k_1}{4P} \left\{ \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} H^2 + \frac{2P}{k_1} L - \eta L^2 \right) + \sqrt{\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} H^2 + \frac{2P}{k_1} L - \eta L^2 \right)^2 + \frac{8P}{k_1} \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} L H^2} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

となる。 $a = a_m$ で揚水すると、 $l = a_m$ となり揚水位置まで塩水化域が伸び、最大となる。

以上を無次元化してまとめると、次のようになる。

$a^* \leq a_m^*$ で揚水する場合

$$l^* = l_1^* = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right) + 2P^* a^* \searrow \eta L^{*2} - \frac{1}{\gamma} + 2P^* a^* \dots\dots\dots (19)$$

淡塩水境界面の形は、

$$0 \leq x^* \leq a^* \text{ では, } (1 - \zeta^*)^2 = Q^* x^* \searrow Q^* l^* + P^* (l^* - a^*) \dots\dots\dots (20)$$

$$a^* \leq x^* \leq l^* \text{ では, } (1 - \zeta^*)^2 = Q^* x^* + P^* (x^* - a^*) \searrow Q^* l^* + P^* (l^* - a^*) \dots\dots\dots (21)$$

$a^* \geq a_m^*$ で揚水する場合

$$l^* = l_2^* = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right) \searrow \eta L^{*2} - \frac{1}{\gamma} - 2P^* (1 - a^*) \dots\dots\dots (22)$$

淡塩水境界面の形は、

$$(1 - \zeta^*)^2 = x^* / l^* \dots\dots\dots (23)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \zeta^* &= \zeta / H, \quad \eta_1^* = \eta_1 / H, \quad \eta_L^* = \eta_L / H, \quad l^* = l / L, \quad x^* = x / L \\ a^* &= a / L, \quad a_m^* = a_m / L, \quad Q^* = LQ / k_1 H^2, \quad P^* = LP / k_1 H^2, \quad \gamma = \rho_1 / \rho_2 \\ a_m^* &= \frac{1}{4P^*} \left\{ \left(\frac{1}{\gamma} + 2P^* - \eta L^{*2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\gamma} + 2P^* - \eta L^{*2} \right)^2 + \frac{8P^*}{\gamma} \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right)} \right\} \\ Q^* &= \frac{1}{2} \left\{ \eta L^{*2} - \frac{1}{\gamma} - 2P^* (1 - a^*) \right\} \end{aligned}$$

Fig. 2 は揚水量 P が一定のときの揚水位置 a と塩水化域長 l の関係を無次元量で表わしたものである。これを見ると $a^* = a_m^*$ で揚水するとき、 $l^* = a_m^*$ の所まで塩水が浸入してくることが分る。また、 $x^* = 0$, $x^* = 1$ の所では無揚水の場合と同じになる。

2.4 塩水揚水の場合

$x = a$ の位置で揚水量 S で塩水揚水し、その時淡水は揚水しないと仮定すれば、(7), (10)式は、

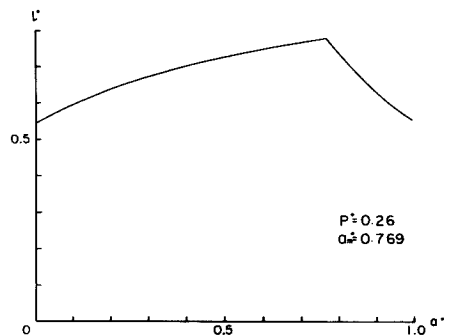


Fig. 2 Relations between pumping location and salt wedge length

$$\left\{ \begin{aligned} k_1(\eta_1 - \zeta) \frac{\partial \eta_1}{\partial x} &= Q \dots\dots\dots (24) \\ \frac{\rho_1}{2}(\eta_1^2 - \zeta^2) - \frac{\rho_1}{k_1} Q x &= \frac{\rho_2}{2}(H^2 - \zeta^2) - \frac{\rho_2}{k_2} \int_0^x \{S - (x - \mu) s(\mu)\} d\mu \dots\dots\dots (25) \end{aligned} \right.$$

ただし $S \equiv \int_0^x s(\mu) d\mu$

となる。揚水量分布を用いて(24)、(25)式を積分すると、揚水量により積分の形は異なる。結果を無次元量で表わすと次のようになる。

(1) $0 \leq x^* \leq a^*$ では、

(a) $S^* < (1 - \sqrt{1 - \gamma})^2 Q^*$ のとき、

$$\eta_1^{*2} = 4Q^{*2}(1 + \gamma c) \left(\frac{2Q^* + cR^* + \sqrt{D}}{2Q^* + cR^* - \sqrt{D}} \right)^{\frac{cR^*}{\sqrt{D}}} \frac{(2Q^*\xi^* + cR^* - \sqrt{D}) \left(\frac{cR^*}{\sqrt{D}} - 1 \right)}{(2Q^*\xi^* + cR^* + \sqrt{D}) \left(\frac{cR^*}{\sqrt{D}} + 1 \right)} \dots\dots\dots (26)$$

(b) $S^* = (1 - \sqrt{1 - \gamma})^2 Q^*$ のとき、

$$\eta_1^* = \left(\frac{2Q^* + cR^*}{2Q^*\xi^* + cR^*} \right) \exp \left\{ -cR^* \left(\frac{1}{2Q^*\xi^* + cR^*} - \frac{1}{2Q^* + cR^*} \right) \right\} \dots\dots\dots (27)$$

(c) $(1 - \sqrt{1 - \gamma})^2 Q^* < S^* \leq S_c^*$ のとき、

$$\eta_1^{*2} = \exp \left\{ \frac{2cR^*}{\sqrt{D}} \left[\tan^{-1} \left(\frac{2Q^*\xi^* + cR^*}{\sqrt{|D|}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{2Q^* + cR^*}{\sqrt{|D|}} \right) \right] - \log \left[\frac{Q^*\xi^{*2} + cR^*\xi^* - (cR^* - \gamma c Q^*)}{Q^*(1 + \gamma c)} \right] \right\} \dots\dots\dots (28)$$

(2) $a^* \leq x^* \leq l^*$ では、

$$\eta_1^* = \eta_{1a}^* \left\{ \frac{(1 - \gamma)\xi_a^* + \gamma}{(1 - \gamma)\xi^* + \gamma} \right\} \dots\dots\dots (29)$$

ただし、 $S^* \equiv LS/k_2 H^2$, $Q^* = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\gamma \eta_{1a}^{*2} - 1}{2} + S^* a^* \right) \dots\dots\dots (30)$

$$c = 1/1 - \gamma, R^* \equiv \gamma Q^* - S^*, D \equiv (cR^*)^2 + 4Q^*(cR^* - \gamma c Q^*), \xi^* \equiv \zeta^*/\eta_1^*$$

$\eta_{1a}^* \dots\dots x^* = a^*$ での η_1^* の値 } 領域(1)の積分の実行により求められる。
 $\xi_a^* \dots\dots x^* = a^*$ での ξ^* の値 }

実際に ζ^* の形を求めるには、 ξ^* に数値を入れ η_1^* を求め、次に $\zeta^* = \xi^* \eta_1^*$ より ζ^* を求める。領域(1)、すなわち揚水位置より下流側では、

$$x^* = \zeta^{*2} + \gamma c \eta_1^{*2} - c \text{ --- } 2cR^* \dots\dots\dots (31)$$

より、また、領域(2)、すなわち揚水位置より上流側では、

$$x^* = \zeta^{*2} + \gamma c \eta_1^{*2} - c(1 - 2S^* a^*) \text{ --- } 2\gamma c Q^* \dots\dots\dots (32)$$

より x^* , ζ^* の関係が数値的に計算される。

2.5 淡水・塩水両者揚水の場合

積分は、塩水揚水の場合と同様に行われ、解の形も塩水揚水の場合と等しくなるが、 Q^* の値として次の(33)式を用いなければならない。

$$Q^* = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\gamma \eta_{1a}^{*2} - 1}{2} + S^* a^* \right) - P^*(1 - a^*) \dots\dots\dots (33)$$

次に x^* , ζ^* の関係を求めるとき、(1)の領域では(31)式がそのまま利用されるが、(2)の領域では次の(34)式

を利用しなければならない。

$$x^* = \zeta^{*2} + \gamma c \eta_1^{*2} - c N^* / 2\gamma c M^* \dots\dots\dots (34)$$

ただし、 $M^* = P^* + Q^*$, $N^* = 1 - 2\gamma P^* a^* - 2S^* a^*$

2.6 数 値 例

前節での解析をもとに、それぞれの場合について、数値を入れて計算し、淡塩水境界面の形を求め、その結果をグラフに表す。

(1) 淡水揚水の場合

実験と比較するため、数値として、 $\eta_L^* = 1.267$, $\gamma = 0.840$ を使用した。

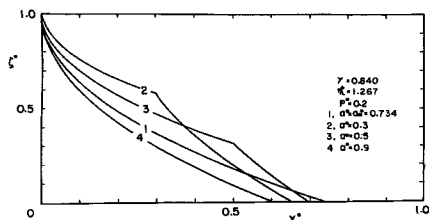


Fig. 3 Theoretical figure of interface by pumping fresh water

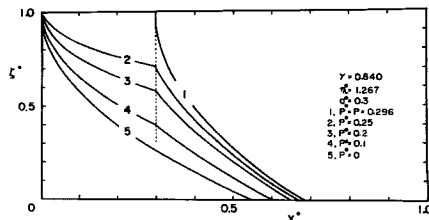


Fig. 4 Theoretical figure of interface by pumping fresh water

Fig. 3 は淡水揚水量 $P^* = 0.2$ (一定) にして、揚水位置 a^* の変化によって、淡塩水境界面がどのように移動するかを表わしたものである。 $P^* = 0.2$ のとき、 $a_m^* = 0.734$ となり、このとき先に述べたように、塩水化域長 l^* が最大となることがよく分る。また、この図より揚水位置が a_m^* から遠くなるほど、塩水化域長は短くなることが分る。しかしながら、Fig. 3 の曲線 2, 3 を見れば分るように、下流で揚水するほど $0 \leq x^* \leq a^*$ での境界面は上昇することになり、塩害を防ぐには、一概に a_m^* から遠く離れた位置で揚水すればいいとは言えない。

Fig. 4 は、揚水位置 $a^* = 0.3$ (一定) にして、揚水量 P^* を変えたとき、境界面がどのように移動するかを示したものである。この図を見ると揚水量が増すほど、塩水化域長 l^* は伸び、境界面が上昇するという当然の結果が表われているが、揚水量の増加の割には、塩水化域長は伸びないことが分る。

Fig. 3, Fig. 4 から、塩害防止には、塩水化域長の増加と共に境界面上昇をも考慮に入れなければならないことが分る。

(2) 塩水揚水の場合

Fig. 5 は、揚水量 $S^* = 0.15$ を一定にして、揚水位置 a^* を変化させたとき、淡塩水境界面がどのように移動するかを表わしたものである。上流側で揚水するほど塩水化域長 l^* は短くなり、境界面も下る。特に

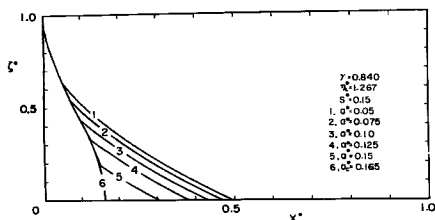


Fig. 5 Theoretical figure of interface by pumping salt water

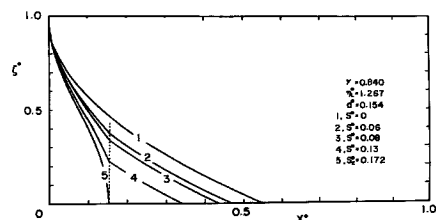


Fig. 6 Theoretical figure of interface by pumping salt water

$x^* > a^*$ での効果が著しい。曲線 6 は、 $a^* = a_c^* = 0.165$ で揚水したときで、揚水位置まで塩水化域の足が引くことが分る。この位置より上流で揚水した場合、解析の結果では、塩水化域の外で塩水を揚水するという矛盾が生じる。

Fig. 6 は、揚水位置 $a^* = 0.154$ を一定にして揚水量の変化によって、淡塩水境界面がどのように移動するかを示したものである。図から分るように、塩水揚水量が増すほど境界面は下り、塩水化域長 l^* は短くなること分る。

Fig. 5, Fig. 6 から一般に塩水揚水は、塩害防止に対して効果的であることが分る。

(3) 淡水・塩水両者揚水の場合

Fig. 7, Fig. 8 は、揚水位置 $a^* = 0.154$ を一定にして、淡水塩水揚水量を変化させたとき、淡塩水境界面がどのように移動するかを示している。

Fig. 7 は、淡水揚水量 $P^* = 0.13$ (一定) にして、塩水揚水量を増加した場合の境界面の移動を示している。塩水揚水量の増加と共に、境界面は下がり、塩水化域長も短くなること分る。

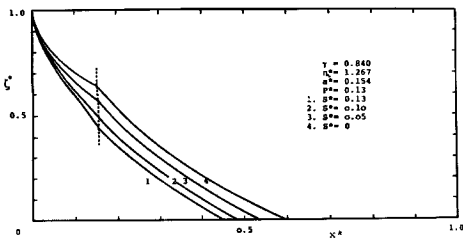


Fig. 7 Theoretical figure of interface by pumping fresh water and salt water

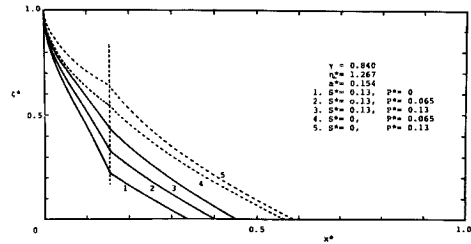


Fig. 8 Theoretical figure of interface by pumping fresh and salt water

Fig. 8 は、塩水揚水量 $S^* = 0.13$ (一定) にして、淡水揚水量を増加した場合の境界面の移動を示している。比較のため $S^* = 0$ の場合の境界面を点線で示している。図を見ると、淡水揚水量の増加と共に境界面は上昇するが、 $S^* = 0$ の場合と比較すると、はるかに境界面は下がっていることが分る。

Fig. 7, Fig. 8 から Double pumping method は、かなり有効であることが分る。

3. 実 験

以上で解析した結果を検証するため、次のような実験を行った。Fig. 9 で示すような塩ビ製の水槽を作り、両端にある淡水 head-tank・塩水 head-tank には、over-flow 用パイプを付けて種々の head が保てるようにした。中央部の槽に、ふるいで粒径を 0.5~1.0mm に揃えた寒水砂を、水締めしながら詰めて滞水層を作った。

揚水用にストレーナを切った塩ビ製 U 字型サイフォンを作り、揚水した淡水・塩水をビニールパイプに導き、ピンチコックを付けて流量を調節できるようにした。このようなサイフォンを 10cm おきに滞水層に埋め、淡水・塩水を揚水できるようにした。

淡水として水道水(密度 $\rho_1 = 1.00$)を使用し、気泡が入って透水係数が低下しないように、できるだけゆっくり供給した。

塩水として、飽和食塩水に過マンガン酸カリ ($KMnO_4$) を加えて着色したもの(密度 $\rho_2 = 1.19$)を使用した。飽和食塩水を使用したのは、一定密度にするのが容易であり、保存できることと淡塩水の密度差が大きいほど、塩水化域が延びて観察しやすい理由からである。実際の実験は次の操作によった。

(1) 無揚水での Q_0 の測定

無揚水の状態で塩水化域が定常状態になったときの Q を Q_0 とし、塩水 head-tank から over-flow して

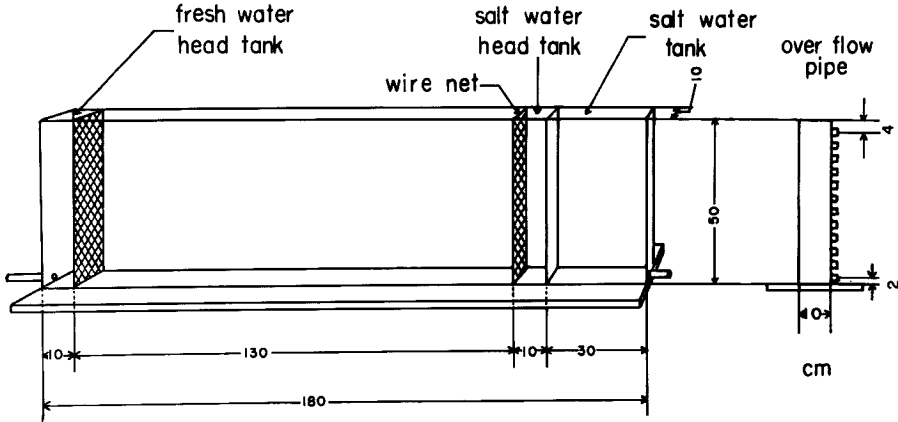


Fig. 9 Experimental apparatus

る流量によって測定した。測定に際しては着色した塩水が、できるだけ入らないように注意し、さらに overflow した水の密度を測り、純粋の淡水量を計算した。

(2) 透水係数 k_1 , k_2 の測定

実験装置の滞水層自体を使って次のように求めた。(1)で測定した Q_0 を使用し、(15)式より k_1 を算出した。 k_2 の測定にも Q_0 を使い、(15)式より k_1 を求め、次に $x=a$ で S だけ塩水揚水するときの淡水流出量 Q を測ると、 $Q^* = LQ/k_1 H^2$ より Q^* が定まり、(30)式より S^* が計算され、 S は測定される量であるから、 $k_2 = LS/H^2 S^*$ より k_2 を定めた。

(3) 揚水時の Q , l , ζ の測定

上で述べたように、無揚水、定常状態の塩水化域を作った後、揚水実験を行い、(1)と同じ方法で定常状態になったときの Q , l を測定した。それと同時に 35mm カラーフィルムで写真記録して ζ を読み取った。

4. 理論と実験の比較

実験は $\eta_L = 38(\text{cm})$, $H = 30(\text{cm})$, $\rho_1 = 1.00$, $\rho_2 = 1.19$ で行い、前節の(1)(2)の操作により Q_0 , k_1 , k_2 を測定した。理論値は、この k_1 , k_2 を使用して Q , l , ζ を計算した。この結果を以下に示す。

(1) 淡水揚水の場合

Table 1 を見ると、理論値と実験値が比較的良好に合っていることが分る。特に塩水化域長 l はよく一致した。淡水流出量 Q の実験値が理論値を下回るのは、定常状態になるまで 2~3 時間かかり、その間に滞水層に気泡が溜り、透水係数 k_1 が低下した結果と思われる。

Table 1. Comparison between theoretical and experimental results by pumping fresh water

Run	a (cm)	p (cc/sec·cm)	Q(cc/sec·cm)		l(cm)		ζ
			Theoretical	Experimental	Theoretical	Experimental	
1	—	0	—	0.287	70.9	70.5	Fig. 11-3
2	100	0.36	0.204	0.190	100.0	103.5	Fig. 10-2
3	120	0.36	0.259	0.233	78.5	78.8	Fig. 10-3
4	50	0.36	0.065	0.043	90.2	91.5	Fig. 10-1
5	50	0.23	0.145	0.143	84.8	83.4	Fig. 11-2

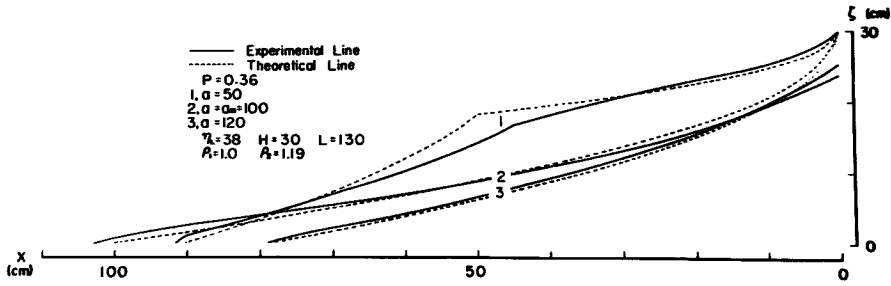


Fig. 10 Comparison between theoretical and experimental results by pumping fresh water

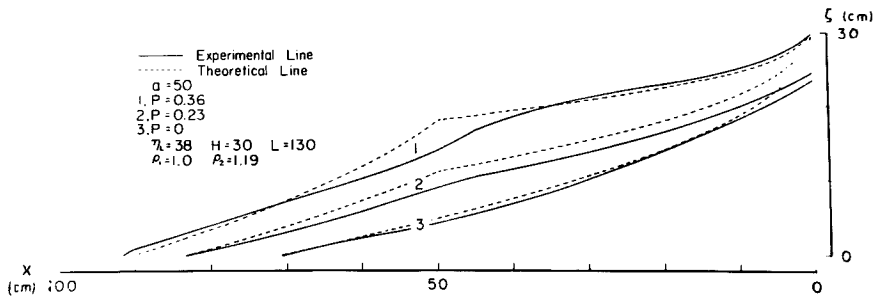


Fig. 11 Comparison between theoretical and experimental results by pumping fresh water

Fig. 10 は揚水量を $P=0.36(\text{cc}/\text{sec}\cdot\text{cm})$ に保って、揚水位置 a を変えた時の実験曲線と理論曲線を表わしたもので、2.6節で指摘した通り、 $a=a_m=100(\text{cm})$ のとき l は最大で $l=a_m$ となることが、実験でも確かめられた。また揚水位置が下流に行くほど、境界面は上昇することも確かめられた。

Fig. 11 は揚水位置 $a=50(\text{cm})$ を固定して、揚水量を変えた時を表わしている。揚水量が多くなるほど、塩水化域長 l は伸び、境界面も上昇することが分る。

Fig. 10, Fig. 11 から、淡塩水境界面の形は、理論と実験とが $x=0$ 付近を除いてかなりよく一致していることが分る。

(2) 塩水揚水の場合

Table 2 を見ると、淡水流出量 Q については、余りよい一致は見られなかったが、塩水化域長 l 、境界面の形については、比較的よい一致が見られた。 Q の値に違いが出たのは、淡水・塩水の透水係数が不安定で実験途中変化したものと思われる。

Table 2. Comparison between theoretical and experimental results by pumping salt water

Run	a (cm)	S (cc/sec·cm)	Q(cc/sec·cm)		l(cm)		ζ
			Theoretical	Experimental	Theoretical	Experimental	
1	20	0.040	0.313	0.296	60.3	60.0	Fig. 12
2	20	0.053	0.318	0.287	56.3	56.0	Fig. 13
3	20	0.087	0.331	0.280	44.3	45.0	Fig. 14

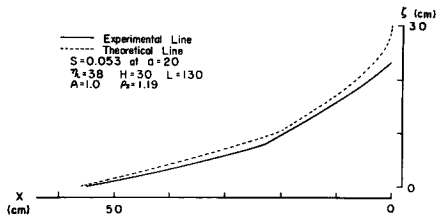


Fig. 12 Comparison between theoretical and experimental results by pumping salt water

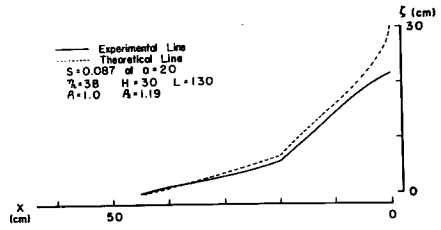


Fig. 13 Comparison between theoretical and experimental results by pumping salt water

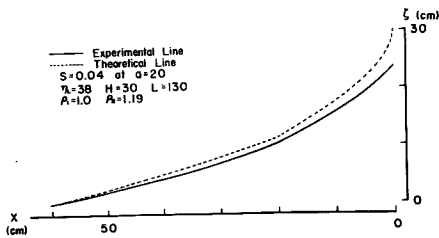


Fig. 14 Comparison between theoretical and experimental results by pumping salt water

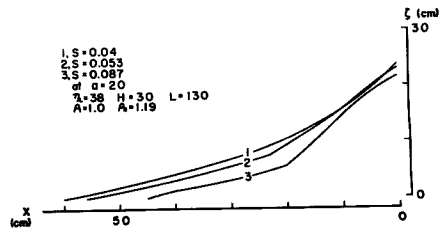


Fig. 15 Experimental figure of interface by pumping salt water

揚水量の変化に応じて、境界面の形が変わることは、解析で明らかにされたが、実験結果にもその違いが表われている。

Fig. 15 は、実験結果だけをまとめたもので、揚水位置を $a=20(\text{cm})$ の所に固定し、揚水量を変えた時の境界面の形を表わしている。図から揚水量が増すほど塩水化域は短くなり、淡塩水境界面も下ることが分る。

5. 考 察

以上述べたように、海岸地方における地下水の塩水化の問題の一つとして、定常状態での揚水量分布と淡塩水境界面移動の関係を解析し、検証実験を行った。

理論と実験が比較的良好に一致したことから、静水圧仮定は妥当であり、揚水量分布の変動に伴う塩水化域の消長は、次のように結論されるであろう。

- (1) 淡水揚水の場合、揚水量が増すほど、塩水化域の足は延び、淡塩水境界面は上昇する。
- (2) 同じ揚水量で淡水揚水する場合、揚水位置が $a=a_m$ のとき、塩水化域長 l は最大で $l=a_m$ となる。揚水位置が a_m から遠くなるほど塩水化域は短くなる。
- (3) 同じ揚水量で淡水揚水する場合、海に近い下流側で揚水するほど、淡塩水境界面は上昇する。
- (4) 塩水揚水する場合、揚水量が増加するほど、塩水化域は短くなり、淡塩水境界面も下がる。
- (5) 同じ量で塩水揚水する場合、上流側で揚水する方が、塩水化域は短くなり、淡塩水境界面も下がる。ただし揚水位置より下流側については、境界面の形は余り変化しない。
- (6) 塩水揚水する場合、揚水量、揚水位置それぞれに臨界値があり、臨界量より多く揚水しても、臨界位置より上流で揚水しても、共に塩水化域外で塩水揚水するという矛盾がおこる。

4 節で指摘したように、 $x=0$ 附近すなわち海に近い所では、淡塩水境界面の形は理論と実験が合わない。

これは仮定〔4〕の静水圧仮定を用いて、 $x=0$ で $\eta_1=\zeta=H$ という条件を採用し、淡水流出量 Q が通過断面 $\eta_1-H=0$ で無限大の水平速度で流出するという不合理な取り扱いをした結果である。この点の理論的解決は、今後の課題である。

仮定〔3〕で淡塩水境界面での塩分拡散を無視した。実際この実験では淡塩水境界面は、目で見た限り明瞭であり、拡散は無視できるものと思われる。しかしながら、長期間にわたる潮汐振動の影響を考えたとき、はたして無視できるかどうかは疑問である。

今回の解析では、淡水・塩水とも一ヶ所でサイフォン揚水する場合だけを考えたが、二ヶ所以上で揚水する場合への拡張は容易であり、基本式は変わらず、ただ結果が級数の和で表わされるだけである。ただし、数ヶ所で揚水する場合には、各揚水区間での境界面の形がどうなるかの区分が面倒になる。

この解析は、自由表面を持つ不圧地下水について行ったものであるが、被圧地下水の場合も、解析の大筋は変わらず、滞水層の厚さが一定であるから、不圧地下水よりも解析は簡単であろう。

今回の研究が、海岸地方の淡水資源の確保、さらに最近問題になっているヘドロなどによる海洋からの地下水汚染に少しでも役立てばと思う。

最後に、本研究を進めるにあたり、終始、有益で親切な御指導、御助言を賜った京都大学防災研究所、奥田節夫教授に心からの謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Bear, J. : Moving Interface in Coastal Aquifers, Jour. of the Hydraulics Division, Proc. of Amer. Soc. of Civil Engrs., Vol, 90, p. 193—216, July 1964.
- 2) 嶋 祐之, 地下密度流, 水工学に関する夏期研修会講義集, A ダム河川コース, 66—10, 1971.
- 3) 川谷 健, 鉛直浸透による塩水くさびの変形について, 第10回災害科学総合シンポジウム講演論文集, p. 251—254, 1973.
- 4) 福尾義昭, 被圧地下水の塩水化について, 日本地下水学会会誌, 14巻, 第2号, p. 33—44, 1972.
- 5) 福尾義昭, 北岡豪一, 内湾における海水と地下水の交流について, 沿岸海洋研究ノート, 12巻, 第1号, p. 23—36, 1974.