

地下密度流の数値解析

岩佐 義朗・綾 史郎・大西 亘

NUMERICAL SIMULATION OF SALT-WATER INTRUSION IN POROUS MEDIA

By Yoshiaki IWASA, Shirou AYA and Wataru OHNISHI

Synopsis

The present paper deals with the shape of salt-intrusions in various confined aquifers by numerical simulations. A set of basic partial differential equations which governs salt-intrusion phenomena is solved by the Galerkin finite element method. The numerical model is applied to salt-intrusion phenomena in non-isotropic aquifers, layered aquifers and aquifers in which a thin horizontal or vertical semi-pervious area is present. Iso-concentration contour maps and velocity vectors are simultaneously obtained, and the shape of saline water in an aquifer is discussed in view of the two-dimensional velocity patterns and the permeability in each aquifer model.

1. はじめに

海岸付近の滞水層においては、一般に陸側から海側へ淡水が流出するとともに、逆に、淡水流出層下部では、海側から陸側への海水の侵入がみられ、淡塩境界面の明確さは別として、淡塩密度流が形成されていることが多く、従来より、理論的^{1),2),3)}、数値解析的^{4),5),6)}な多くの研究が行われている。理論的な研究では、淡塩水が混合しないと仮定して扱う淡塩2層モデルにより解析的に行われるが、基本的な仮定として、1) 淡水層と塩水層の境界面は明瞭であり、塩分の分散は無視できる、2) 海岸線付近を除いては、鉛直流速は小さく、層内の圧力は静水圧分布をなし、鉛直面内では水平流速は一樣であるという仮定が用いられている。しかし、淡塩2層モデルは、塩水と淡水が混合する遷移領域が存在する場合や、滞水層の構造が複雑な場合には、その適用が困難であって、このような場合には、数値解析的な方法が有力となる。

数値解析的手法では、後述のような基礎方程式系を連立して解くため、前述のような仮定は不要であり、塩分濃度分布と同時に流速分布も得られるため、塩分濃度分布と流速分布との関係等も知ることができ、現象の理解にも好都合である。また、種々の境界条件を組み入れうることや、複雑な滞水層の構造等を考慮することも比較的容易であり、実際の現象への適用性も高いものとなる。しかし、数値解析では、差分法や有限要素法による離散化の際に生じる離散化誤差の問題は避けられず、特に滞水層内の流れにおけるように分散係数が小さいときは、解が振動したり歪んだりすること、また離散化の方法によっては、数値的な粘性が持ちこまれて、数値解がなまることが知られている。この問題の解決には、適切な離散化手法の選定とともに、適切なメッシュサイズ、積分時間間隔の選定が必要となるが、非一様な2次元の流れの場でこれらを適切に定めることは、計算の実際上極めて困難であって、現時点では、計算を円滑にすすめるため、分散係数を大きめに見積ることにより解析が進められることが多いようであり⁷⁾、従来の数値解析結果と室内実験結果とを比較すると、数値解は淡水と塩水間の塩分遷移領域を大きく与えすぎることが多い^{7),8),9)}。

このように、滞水層内における密度流を対象とした数値解析的手法はまだ十分に開発されたとは言えない

面を持っているが、前述したように滞水層の構造が複雑な場合等への適用性は極めて高いものであり、本研究では、いくつかの異なった構造を持つ被圧滞水層における塩水侵入問題を数値解析的に扱い、滞水層の構造と、流速分布、塩分侵入領域の関係について考察する。

2. 基礎方程式とその数値解法

2.1 基礎方程式系と境界条件

解析に用いられる基礎方程式系は、 x, z 軸方向の運動量保存則、質量保存則、塩分濃度の保存則としての移流分散方程式、および塩分濃度と密度の関係式（状態方程式）より構成されるが、つぎの諸仮定を設けるものとする。

- (1) 滞水層内の流れは層流であり、また速度が小さいので、2次以上の項は省略される。
- (2) 速度の時間的変化は極めて緩慢である。
- (3) 滞水層内の抵抗則として、Darcy 則が成立する。
- (4) Boussinesq 近似が適用される。
- (5) 流体は非圧縮性である。
- (6) 滞水層の圧縮性は微小なものとして無視される。
- (7) 滞水層構成材料への塩分の吸着、構成材料からの塩分の洗い出しはないものとする。
- (8) 塩分濃度と密度の関係は線形である。

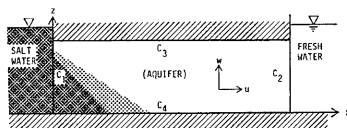


Fig. 1 Definition sketch

仮定(1)～(5)は、運動量保存則に、(5)～(6)は、質量保存則に、(7)は移流分散方程式に、また(8)は、状態方程式に関する仮定であるが、これらの仮定により基礎方程式系は、Fig. 1 を参照して、次の様に書くことができる。

・ x 軸方向の運動方程式

$$0 = \frac{1}{\rho_f g} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{K_x} u \quad \dots\dots\dots (1)$$

・ z 軸方向の運動方程式

$$0 = -\frac{\rho}{\rho_f} - \frac{1}{\rho_f g} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{1}{K_z} w \quad \dots\dots\dots (2)$$

・ 連続方程式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

・ 移流分散方程式

$$\frac{\partial \lambda C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u C) + \frac{\partial}{\partial z} (w C) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

・ 塩分濃度と密度の関係

$$\rho = \rho_f + (\rho_s - \rho_f) C \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 p ；圧力、 u ； x 軸方向の Darcy 流速、 w ； z 軸方向の Darcy 流速、 K_x ； x 軸方向の透水係数、 K_z ； z 軸方向の透水係数、 ρ ；密度、 ρ_f ；淡水密度（ $=1.0$ ）、 ρ_s ；塩水密度（ $=1.02$ ）、 C ；塩水濃度で基準化した塩分濃度（ $C_s=1.0$ 、 $C_f=0.0$ ）、 D_x ； x 軸方向の分散係数、 D_z ； z 軸方向の分散係数、 λ ；空隙率である。なお、(4) 式における分散項、および分散係数については、つぎのように考えて扱った。すなわち、浸透層内の分散現象は、分子拡散（ D_m ）と、浸透層の複雑な空隙系を流体素分が流下することに伴う対流分散（ D_c ）の和であるが、分子拡散は対流分散に比較して極めて小さく、分散係数は、対流分散の効果を表

しているものと考えてよく、一般には、テンソル表示¹⁰⁾される。また、従来からの等方性浸透層内の流れを対象とした理論的、実験的研究からは、浸透流速、および浸透層構成材料の代表粒径の関数であることが知られている^{11),12)}。

しかし、本研究で扱うような非等方な滯水層内の流れや、密度流を形成する流れの場における研究は少なく、また、前述したように、現時点では、数値計算を円滑にすすめるには、分散係数を大きめに見積らざるを得ないようであり、理論的、実験的研究成果を正確に数値解析に取り入れることは困難であり、本研究の主要な目的が流れ場と塩水侵入領域の形状との関係を明らかにすることであるから、簡単に分散項を(4)式のように表現するとともに、分散係数を

$$D_i = \alpha |u_i| + D_0 \quad (i=x, z) \quad \dots\dots\dots(6)$$

と表示する。なお、定数 α , D_0 の具体的な値については、計算ケースによって異なっており、後の解析例において述べる。

つぎに、境界条件であるが、本文で扱うような被圧滯水層の場合、Fig. 1 を参照して、境界はつぎの4つの領域に区分される。

- C_1 ; 塩水側境界,
- C_3, C_4 ; 上側, 下側の不透水層,
- C_2 ; 淡水側境界,

であり、流れに関する境界条件としては、

- C_1 上で、圧力が塩水静水圧分布 ($p(z) = \rho_s g(h_s - z)$),
- C_2 上で、圧力が淡水静水圧分布 ($p(z) = \rho_f g(h_f - z)$),
- C_3, C_4 上で、不浸透層であるから $w=0$ ($\partial p / \partial z = -\rho g$),

が適用されるものとし、また、濃度に関する境界条件は、

- C_1 上で、 $C = C_f (=0.0)$,
- C_2 上で、 $u \geq 0$ のとき $C = C_s = 1.0$,
 $u < 0$ のとき $\partial c / \partial x = 0$,
- C_3, C_4 上で、 $\partial c / \partial z = 0$,

が適用されるものとした。

2.2 Galerkin 法による離散式の誘導

塩分濃度、流速分布の時間的変化を追跡するためには、(1)―(5)式を連立して解かなければならないが、本研究では、まず、(1), (2)式を連続式(3)に代入し、 p に関する Poisson 方程式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial}{\partial x} \frac{p}{\rho_f g} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial}{\partial z} \frac{p}{\rho_f g} \right) = - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\rho}{\rho_f} \right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

を得、(1), (2), (4), (5), (7)式を連立して解いた。離散化にあたっては、空間的には Galerkin 法により、時間的には差分法を用いて行った。

Galerkin 法とは、微分方程式 $L(u)=0$ を領域 D について考えるとき、境界条件を満足する解 u を試験関数 N を用いて、

$$u = N_i u_i$$

と近似し(上式右辺の表現は、総和規約に従うものとし、 $i=1, 2, \dots, n$ の和をとるものとする。 n は節点数である)、 u を元の微分方程式に代入したときの残差 $L(N_i u_i)$ と試験関数 N_i とを掛け合わせたものを解析領域で積分し、ゼロとするものであり、重み付き残差法の1つである。すなわち、

$$\iint_D L(N_i u_j) N_i dA = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots\dots\dots(8)$$

である。解析領域をいくつかの小領域に分割し、 N_i として、節点 i で単位値、節点 i に関係しない要素では、零となるような関数形（局所化関数）を選べば、(8)式の積分は、各個別要素に対して(8)式を適用した結果を重ね合わせることによって計算することができる。Galerkin 法では、要素の大きさを自由に定め得ること、境界条件の処理が容易であること等の特色がある。

具体的手順を述べると、まず、解析領域を三角形要素に分割し、形状関数には、線形関数を用いるものとする、1 個の三角形有限要素において、

$$\left. \begin{aligned} p &= \phi_i p_i, \quad u = \phi_i u_i, \quad w = \phi_i w_i \\ \rho &= \phi_i \rho_i, \quad C = \phi_i C_i \\ \phi_i &= (a_i x + b_i y + c_i) / 2A \\ a_i &= x_k - x_j, \quad b_i = y_j - y_k, \quad c_i = x_j y_k - x_k y_j \\ A &: \text{三角形の面積} \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

と表現される。要素内で透水係数を一定とし、(7)式を Galerkin 表示すると

$$\int_A \left(K_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + K_z g \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) \phi_i dA = 0 \quad (i=1, 2, 3) \dots\dots\dots (10)$$

である。 ϕ_i は線形関数であり、(10)式は 2 階微分の項を含むので、Green-Gauss の公式を用いて弱形式化した後、(9)式の第 1 式を代入して積分すると、 p に関して、

$$\bar{Q} \bar{p} = \bar{q} \dots\dots\dots (11)$$

なる 3 元のベクトル・マトリクス表示を得る。ここに、

$$\bar{Q}_{ij} = \int_A \left(K_x \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial \phi_j}{\partial x} + K_z \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \frac{\partial \phi_j}{\partial z} \right) dA \dots\dots\dots (12)$$

$$\bar{q}_i = \int_C \left(n_x K_x \frac{\partial p}{\partial x} + n_z K_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) \phi_i ds - \int_A K_z \rho_j \frac{\partial \phi_j}{\partial z} \phi_i dA \dots\dots\dots (13)$$

である。(1)、(2)式に対しても同様に行うと、

$$\bar{R} \bar{u} = \bar{r} \dots\dots\dots (14)$$

$$\bar{R} \bar{w} = \bar{s} \dots\dots\dots (15)$$

を得る。ここに、

$$\bar{R}_{ij} = \int_A \phi_i \phi_j dA \dots\dots\dots (16)$$

$$\bar{r}_i = - \frac{K_x}{\rho_f g} \int_A \frac{\partial \phi_j}{\partial x} \rho_j \phi_i dA \dots\dots\dots (17)$$

$$\bar{s}_i = - \frac{K_z}{\rho_f g} \int_A \left(\frac{\partial \phi_j}{\partial z} \rho_j + g \phi_j \rho_j \right) \phi_i dA \dots\dots\dots (18)$$

である。(4)式については、(7)式と同様に弱形式化して演算を行うと、

$$\bar{R} \frac{d}{dt} \bar{C} + \bar{T} \bar{C} = \bar{f} \dots\dots\dots (19)$$

を得る。ここに、

$$\begin{aligned} \bar{T}_{ij} &= \int_A \left(\phi_k u_k \frac{\partial \phi_j}{\partial x} + \phi_k w_k \frac{\partial \phi_j}{\partial z} \right) \phi_i dA - \int_A \left(D_{xk} \frac{\partial \phi_k}{\partial x} \frac{\partial \phi_j}{\partial x} + D_{zk} \frac{\partial \phi_k}{\partial z} \frac{\partial \phi_j}{\partial z} \right) \phi_i dA \\ &\quad + \int_A \left(D_{xk} \phi_k \frac{\partial \phi_j}{\partial x} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} + D_{zk} \phi_k \frac{\partial \phi_j}{\partial z} \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \right) dA \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

$$\bar{f}_i = \int_C \left(n_x D_x \frac{\partial C}{\partial x} + n_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \phi_i ds \dots\dots\dots (21)$$

である。(11)、(14)、(15)、(19)式を解析領域全体で重ね合わせると節点未知量に関する連立 1 次方程式

$$Qp = q \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$Ru = r \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$Rw = s \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$R \frac{dC}{dt} + TC = f \quad \dots\dots\dots (25)$$

を得る。(25)式については、時間微分項を含むが、これを陰形式で差分化すると

$$\frac{1}{\Delta t} R(C^{n+1} - C^n) + \theta TC^{n+1} + (1-\theta)TC^n = \theta f^{n+1} + (1-\theta)f^n \quad \dots\dots\dots (26)$$

となる。ここに、 θ は重みであり、後の解析では、 $\theta=1/2$ にとっている。

つぎに、計算の手順について示すと、まず、 ρ を前ステップの値 ρ^n で近似して、(22)式より p^{n+1} を求める。つぎに、 p^{n+1} 、 ρ^n を用いて、(23)、(24) 式より u^{n+1} 、 w^{n+1} を求める。得られた u^{n+1} 、 w^{n+1} 、 C^n を用いて (26) 式より C^{n+1} を求める。さらに、(5) 式を用いて、 C^{n+1} より密度 ρ^{n+1} を求めて 1 時間ステップの計算を終え、所要の時刻に至るまで、これを繰り返す (上添字 n は、 $t=n\Delta t$ における値を示す)。この計算手順に示されるように ρ と u 、 w を求めている時間が Δt だけ異なっているが、 Δt は十分小さいので、この影響は無視できるものである。

2.3 離散化誤差の検討

前節で示した (4) 式の離散化に伴う数値解の精度について、数値計算によって検討する。計算例は簡単のため 1 次元問題とし流速、分散係数を定数として、

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (27)$$

を用いるものとし、

$$\left. \begin{array}{l} \text{初期条件 } C(x, 0) = 0 \\ \text{境界条件 } C(0, t) = C_0 = \text{Const.} \\ x \rightarrow \infty \text{ で } \partial C / \partial x \rightarrow 0 \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (28)$$

の場合について行った。(27)式の(28)式の条件下における解は、

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x-ut}{2\sqrt{Dt}} \right) + \frac{1}{2} \exp(ux/D) \operatorname{erfc} \left(\frac{x+ut}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad \dots\dots\dots (29)$$

である。数値計算は、後述の Fig. 3 に示される長方形領域を対象として、全節点に u 、 D_x を定数、 $w=0$ 、 $D_x=0$ として与え、 $t \geq 0$ で上流端全節点に $C=C_0$ を与えることにより行った。得られた結果を $C \sim x$ 曲線として、解析解(29)式とともに示したものが Fig. 2 である。(26)式による離散化は、この場合、差分法で言う Stone & Brian 法と同一であり、打ち切り誤差解析法を適用すると無条件安定であり、数値粘性も含まれないが、3 階微分以上の項を考慮すると、離散化誤差が生じていることが示される¹³⁾。Fig. 2 には、分散係数をいくつか変えることにより、離散化間隔 Δx を代表として用いた Peclet 数 ($=u\Delta x/D$) をいくつか変えて計算した結果を示しているが、Pe 数が大きくなると濃度フロント後部で解が振動していることがわかり、 $Pe=10 \sim 25$ 程度までは比較的良好な数値解を与えている。なお、 Δt をかえることによる計算結果の変化は、ほとんどみられなかった。

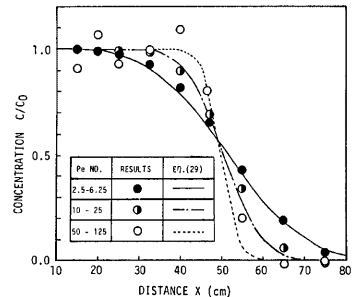


Fig. 2 Numerical results and analytical ones

3. 種々の滞水層における塩水くさびの数値解析

本章では、いくつかの滞水層を対象として、数値解析を行った結果を示すが、まず、数値実験の基本的条件をまとめて示すと、次のようである。

3.1 実験条件と計算例

数値解析は、室内実験程度の規模を想定し、Fig. 3に示される諸元の被圧滞水層とし、解析領域を154節点、260要素の三角形小領域に分割して計算を行った。三角形の大きさは $\Delta z=3.0$ cmとし、 $\Delta x=5.0\sim 12.5$ cmと塩水側境界と淡水側境界では領域の大きさを変えている。これは、主として塩水側境界付近で塩分濃度の変化が著しいと考えられるためである。 Δt については、制限はないが、前述のように ρ と ρ' とを求める時間に Δt だけの差があるから、あまり大きくとらず $\Delta t=100$ secとした。また $\rho_s=1.02$ g/cm³、 $\rho_f=1.0$ g/cm³、 $h_s=31.0$ cm、 $h_f=30.0$ cm、 $\lambda=0.5$ の値がすべての計算例において用いられている。透水係数の値は、数値実験のパラメータとして、種々与えられているが、特に言及しないかぎり $K_x=K_z=0.25$ cm/secの値が標準値として用いられた。分散係数については、2.1で述べたような問題があるが、本論文では、滑らかな数値解が得られうる限りできるだけ小さな値を与えることを目標とし、2.3の検討結果を参考にして、予備的な数値計算を行った結果、 $\alpha=0.2$ (cm)、 $D_0=0.00025$ cm²/sの値を標準として用いた。

これらの値を用いて、淡水で満たされている一様被圧滞水層に、 $t=0$ で、塩水側境界に設けられたゲートを急開することにより、塩水が侵入してくる過程を数値解析した結果を示したものがFig. 4 (a), (b), (c)である。これらの図よりわかるように、塩水側境界の圧力の不平衡により、塩水側境界下部より塩水が流入し、上部よりは、淡水が流出する。時間の経過とともに、塩水の侵入高さが高くなるとともに、底部ほど早い速度で塩水領域が拡大していく。これらの傾向は、類似的室内実験で報告されているもの¹⁴⁾と同一である。さらに時間がすすむと平衡状態に達して、塩水領域はもはや拡大することはない(Fig. 4 (c))。このときの流況をみると、淡水側境界よりほぼ一様に流入した淡水は、塩水領域に出合って流向を転じ、斜め上方に向かって流れている。一方、塩水領域では、初期に見られた強い循環流は、もはや見られず、淡水流による塩水の連行を補償するような塩水側境界からの小さな塩水流入と弱い循環流の存在がみられる。塩分濃度の遷移領域幅は、侵入初期と平衡状態に達した後とは、差程違いはなく、比較的狭い領域にとどまっている。なお、この計算においては、 $t=80,000$ 秒まで行ったが、塩水領域、流速分布の変化はほとんどなく、以後の解析では、 $t=60,000$ 秒における値を平衡状態におけるものと考えて検討している。また、局所的なPe数の値は、10~30程度の値である。

3.2 結果とその考察

(1) 異方性浸透層の場合 Fig. 5は $K_x=0.005, 0.05, 0.25$ (cm/s)と鉛直方向の透水係数をかえて計算した結果を示したものであり、ほぼ定常状態とみられる時の塩水侵入領域を示している。この図より、 K_x が大きくなるにつれて、塩水側境界における塩水の侵入高さが高くなるとともに、塩水侵入長も長くなって

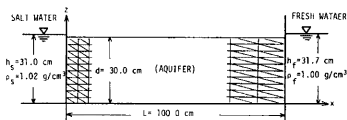


Fig. 3 Aquifer model used in simulation analysis

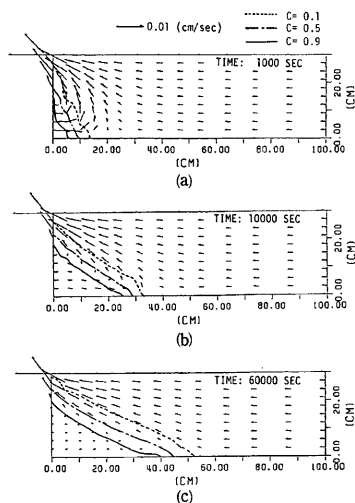


Fig. 4 Salt-intrusion process in confined aquifer

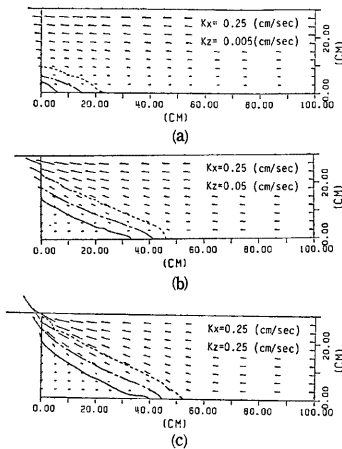
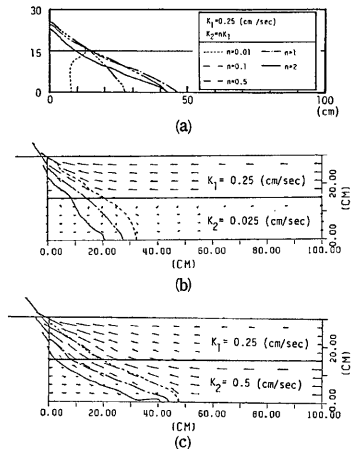

 Fig. 5 Concentration and flow patterns in various K_z


Fig. 6 Concentration and flow patterns in two-layered aquifer

いくことがわかる。同図には、同時に得られた流速パターンも示されているが、 K_x が大きいときは、下層淡水の上層への流入は容易であり、淡水が塩水に出会って、容易に流向を変え得るが、 K_x が小さいときは、淡水の鉛直方向への移動が抑制されて、塩水の侵入高さが、高くないものと考えられ、準一様流モデルでは考慮にくい、鉛直方向の滞水層の特性が塩水侵入領域の形状に大きな影響を与える可能性のあることがわかる。

(2) 成層滞水層の場合 (a) 2 成層の場合 Fig. 3 における滞水層が、透水係数の異なる 2 つの水平滞水層 (上層の透水係数 K_1 、下層の透水係数 K_2) より構成されている場合について扱った。ただし、各々の滞水層では $K_x = K_z$ であるとし、その他の条件も前述のものと同じである。

Fig. 6 (a) は、 $K_1 = 0.25$ (cm/s) と固定し、 K_2 を種々に変えた場合におけるほぼ定常状態の 50 等濃度線 $C_{0.5}$ を示したものである。 $K_1 > K_2$ の場合、上層における塩水侵入領域は下層の透水性の影響をほとんど受けずほぼ一定であるのに対し、下層の塩水侵入領域は、 K_2 が小さくなるほど侵入領域が小さくなる。 K_2 が極端に小さいときは、上層の塩水くさびの下に淡水が入りこむこともある。一方、 $K_1 < K_2$ の場合は、下層の塩水侵入長には大きな変化はないが、上層の塩水領域が後退し、異った傾向を示す。これは、Fig. 6 (b), (c) に示される流速パターンからわかるように、 $K_1 > K_2$ の場合、下層の淡水流量は上層に比べて小さく、下層の淡水が侵入塩水に出会って流向を転じ、上層淡水流れへ流入しても上層淡水流れは大きく変化しないのに対し、 $K_1 < K_2$ の場合は、下層の淡水流量が大きく、下層淡水が上層淡水流れに流入した結果、上層淡水流量が大きくなり、上層における塩水流入を抑制することによるものと考えられる。

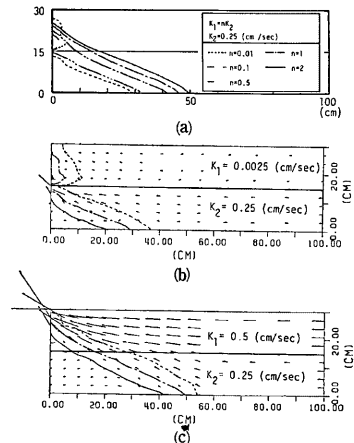


Fig. 7 Concentration and flow patterns in two-layered aquifer

つぎに、 K_2 を固定して、 K_1 を種々にかえて計算した結果を同様に示したものが、Fig. 7 (a), (b), (c) である。この場合、 K_1, K_2 の大小関係に関係なく、 K_1 が大きくなるにつれて、上層、下層における塩水侵入領域が拡大しており、下層の塩水侵入領域が上層の透水性の影響を強く受けていることがわかる。このときの流況は、Fig. 7 (b) に示されるように、上層の透水係数が小さい時は、下層淡水流の上層への流入が抑制され、下層からも塩水側への流出がみられる。一方、 K_1 が大きくなると、下層から上層への淡水流入はより容易となり、下層の塩水侵入領域も大きくなり、大きな1つの循環流を形成する。

(b) 多成層滞水層の場合 Fig. 8 にドットで示されるように滞水層中に難透水層が水平方向に存在している場合について解析した。難透水層の透水係数は $K_x = K_z = 0.0025$ cm/s である。難透水層が長い場合 (Fig. 8 (c))、上層と下層とであたかも2つの塩水くさびが形成されたような形になり、くさび長も短いものとなるが、難透水層が短い場合は、分散幅も広く異なる傾向となる。(Fig. 8 (a)) これは、同時に示した流速ベクトル図からもわかるように、難透水層が長い場合、下層の淡水流れが、難透水層を通じて上層へ転じることが難しく、塩水の侵入を抑えるように下層を流れるのに対し、難透水層が短い場合、底層付近を流れる淡水は早くから流向を転じるためである。一方、短い難透水層が滞水層上部にあるときは、底層付近の淡水は、同様に流向を転じるが、難透水層にはばまれて、再び流向を水平方向に転じる結果、難透水層下部で、塩水側への流出が生じ、二つの塩水くさびが生じているような形状となる (Fig. 8 (d))。これらの解析例より、塩水領域の形状は難透水層の高さ、長さにより種々に変化することがわかる。

(3) 止水壁のある場合 Fig. 9 にドットで示したように滞水層中に鉛直方向に難透水層 (これを以下止水壁と呼ぶ) が存在する場合について行った。難透水層の透水係数は $K_x = K_z = 0.0025$ cm/s である。こ

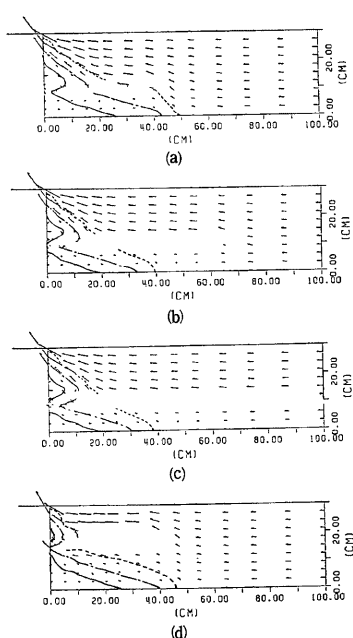


Fig. 8 Concentration and flow patterns in aquifer with horizontal semi-pervious layer

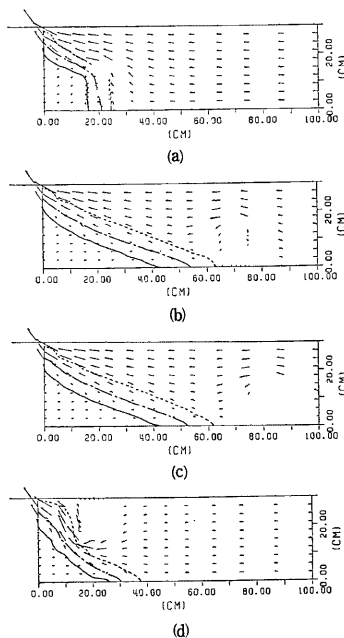


Fig. 9 Concentration and flow patterns in aquifer with vertical semi-pervious wall

の場合、塩水領域は止水壁の位置に大きく依存し、止水壁が塩水側境界付近に存在するときは、塩水の侵入を阻止するように働く (Fig. 9 (a)) が、逆に遠くにあるときは、塩水の侵入を促進し、塩水領域が拡大することとなる (Fig. 9 (b))。これは、同時に示した流速分布よりわかるように、止水壁が塩水側境界に近いときは、塩水の侵入を抑制するように働くのに対し、逆に遠い方にあるときは、底層における淡水流れを抑制するように働くので、塩水の進入を促進させる結果となる。しかし、この効果には限度があり、止水壁が塩水側境界から離れすぎると淡水が止水壁の後部に再び流れ込み、塩水の侵入を抑制するように働き、くさびは後退する (Fig. 9 (c))。

一方、止水壁が滞水層上部に存在するとき (Fig. 9 (d)) は、上層淡水が止水壁にあたって、止水壁下部にまわりこみ、止水壁後部で再び上昇していく流況がみられ、この結果、止水壁下部での淡水流速が大きくなり塩水の侵入を抑制するが、止水壁後部における塩水領域が拡大する。

4. 結 語

本研究は滞水層内における密度流現象のうち、海岸付近の滞水層にみられる塩分侵入問題を対象として、淡水と塩水とは混合するものであるとの考え方に立て、これを取り扱っていく研究のはじめである。本報は、被圧滞水層を対象として数値解析的手法によって行い、滞水層の構造および流速分布形状と塩分侵入領域の形態について考察したものである。まず最初に、基礎方程式系を Galerkin 法によって離散化し、数値解析する手順を示した。次に、これをいくつかの模型的な滞水層に適用し、数値実験を行うことにより、滞水層の特性と塩分侵入領域の形状との関係について考察した。数値実験結果より、塩分侵入領域の形状は、従来考慮されることの少なかった鉛直方向の透水係数値の違いや、水平方向の難透水層の存在により変化することが示され、これは、同時に得られた流速ベクトル図より、塩水側境界より流出する淡水流れの鉛直方向への移動しやすさがそれらの影響を受け、その結果として塩分侵入領域の形状が変化するものと推察された。しかしながら、残された課題も多く、まず、このような密度流場における混合を決定づける分散係数の評価とこれを正しく反映する数値解析手法の開発をあげることができよう。さらには、自由地下水の場合や、塩、淡水位などの境界条件が非定常な場合についても扱い、より実際の解析法の開発をすすめていく必要がある。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費の補助を受けて行われたものであり、記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Bear, J.: *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, 1979, pp. 379-435.
- 2) 嶋 祐之：地下水（密度流の諸問題），水工学に関する夏期研修会講義集71-A-8，土木学会水理委員会，1971.
- 3) 佐藤邦明・渡辺邦夫：成層滞水層における地下塩水楔の挙動，第19回水理講演会論文集，1975，pp. 127-132.
- 4) Segol, G., G.F. Pinder and W. G. Gray: A Galerkin-Finite Element Technique for Calculating the Transient Position of the Saltwater Front, *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 2, 1975, pp. 343-347.
- 5) Pinder, G. F. and H. H. Cooper, Jr.: A Numerical Technique for Calculating the Transient Position of the Saltwater Front, *Water Resources Research*, Vol. 6, No. 3, 1970, pp. 875-882.
- 6) 川谷 健：滞水層内の塩水くさびと地層構造の関係について，土木学会第35回年次学術講演概要集，1980，pp. 556-557.
- 7) 川谷 健・岩倉 隆：滞水層内の塩水くさびに関する室内実験と数値解析，土木学会第37回年次学術講演会講演概要集，1982，pp. 417-418.

- 8) 岩崎敏夫・江塚利幸：移流分散現象と考えた海岸地下水における塩水侵入過程の解析，第28回海岸工学講演会論文集，1981，pp. 510-514.
- 9) 河野伊一郎・西垣 誠・田中慎一：非定常浸透流における塩分拡散の有限要素解析，第17回土質工学研究発表会，1982，pp. 2369-2372.
- 10) Bear, J.: *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, 1979, pp. 225-299.
- 11) Rumer, R. R., Jr.: Longitudinal Dispersion in Steady and Unsteady Flow, J. Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. 88, HY 4, 1962, pp. 147-171.
- 12) Harleman, D. R. F. and R. R. Rumer, Jr.: Longitudinal and Lateral Dispersion in an Isotropic Medium, J. Fluid Mechanics, Vol. 16, 1963, pp. 385-394.
- 13) 小門 武：河川における移流分散現象に関する研究，京都大学修士論文，1980.
- 14) 尾島 勝・鎌田義人・板東敏夫：不圧滞水層への塩分侵入に対する揚水および護岸矢板の効果に関する実験的研究，第27回海岸工学講演会論文集，1980，pp. 537-541.