

沿岸域地下水の流動時間について

九州産業大学大学院工学研究科 学生会員 中村陽介  
 九州産業大学大学院工学研究科 正会員 細川土佐男  
 九州産業大学大学院工学研究科 正会員 岩満公正  
 九州大学大学院工学研究院 正会員 神野健二

1.はじめに

沿岸域の帯水層では、陸側から海側に向かって淡水が流出し、その下に海側から陸側に向かって塩水が侵入している。著者らはこれまで、塩水が海側から淡水の流出速度に比べて非常に遅い流速で塩水域を陸側に向かって侵入した後、淡水と塩水の混合域で流れの方向を変え、混合域内を海側に向かって流出していることを発表してきた<sup>1)</sup>。近年、高レベル放射性廃棄物の処分場を塩水域に建設することが検討されている。そこで本研究では、建設計画にあたって基礎的な水理資料となる沿岸域の地下水の流動時間の計算を、これまで行ってきた淡塩二相流の混合解析の方法を用いて行い、その結果について検討を行ったものである。

2.解析領域および基礎式

解析の対象とする不圧地下水の領域を図-1に示している。

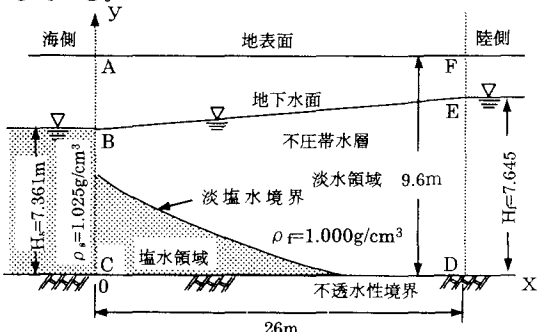


図-1 境界領域

2.1 淡塩二相流の基礎式<sup>(1)</sup>

(1) 連続の式

$$(C_w + \alpha_0 S_s) \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1)$$

ここに、 $C_w$  : 比水分容量、 $S_s$  : 比貯留係数、 $h$  : 圧力水頭、 $t$  : 時間、 $u, v$  :  $x, y$  方向の Darcy 流速、 $\alpha_0 = 0$  : 不飽和領域、 $\alpha_0 = 1$  : 飽和領域である。

(2) 運動方程式

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2) \quad , \quad v = -k \left( \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\rho}{\rho_f} \right) \quad (3)$$

ここに、 $\rho$  : 流体密度、 $\rho_f$  : 淡水密度である。

式(2.3)の右辺  $\rho/\rho_f$  は、飽和-不飽和領域における密度効果を表している。 $k$  は透水係数である。

(3) 2次元移流分散方程式

塩分濃度に関する基礎式は、次式に示す2次元移

流分散方程式である。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\theta C)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\theta u' C) + \frac{\partial}{\partial y}(\theta v' C) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta D_x \frac{\partial C}{\partial x} + \theta D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left( \theta D_x \frac{\partial C}{\partial y} + \theta D_y \frac{\partial C}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\theta$  : 体積含水率、 $C$  : 塩分濃度、 $u', v'$  は  $x$  方向および  $y$  方向の実流速で、式(2), (3)の Darcy 流速  $u, v$  との間には、 $u' = u/\theta$ ,  $v' = v/\theta$  の関係がある。

$D_x, D_y, D_{xy}, D_{yx}$  は分散係数である。

2.2 流線の算定式

2次元の浸透流においては、

$$\Phi = kH \quad (5) \quad , \quad H = h + y \quad (6)$$

で与えられる速度ポテンシャル  $\Phi$  と速度に共役な流れ関数  $\Psi$  を導入することにより、

$$u = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad (7) \quad , \quad v = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (8)$$

が成り立つ。したがって流線は、 $x = \text{一定}$  または、 $y = \text{一定}$  にそって

$$\Psi = \Psi_L + \int_{y_L}^y \frac{\partial \Phi}{\partial x} dy \quad (9) \quad , \quad \Psi = \Psi_L - \int_{x_L}^x \frac{\partial \Phi}{\partial y} dx \quad (10)$$

によって  $\Psi$  を求め、 $\Psi$  の等値線を描けばよい。

3.数値計算の方法

本研究では、地下水流れの式(1)~(3)の数値計算を陰形式の差分法を用いて行い、定常状態の圧力水頭  $h$  と流速  $u, v$  を求め、これらの流速をもとに2次元移流分散方程式(4)の数値計算を特性曲線法により行い塩分濃度を求めた。

流線は、ある瞬間におけるその点の水分子の速度方向を示すだけで、水分子の動いた経過を示すものではないが、流れの状態が時間的に変化しない定常では、流線と水分子が通った軌跡を示す流跡線とは一致する。そこでまず、淡塩二相流の混合計算により得られた塩水域の格子点上の圧力水頭を用いて式(9), (10)から流線を描き、次いで流線上の流速を格子点上の流速から内挿し、塩水域では帯水層の左端を出発した塩水が混合域に達するまでの流線上の流動時間、淡水域では、帯水層の右端を出発した淡水が混合域の手前で向きを変えて帯水層の左端に達するまでの流線上の流動時間を求めた。また、混合域の水が帯水層の下端から等濃度線上を通過して帯水層の左端に達するまでの流動時間を求めた。

なお、不飽和地盤の圧力水頭の解析に必要な水理特性には、Van Genuchten の式( $\theta_r=0.075$ 、 $\theta_s=0.342$ 、 $\alpha=0.0491$ 、 $m=0.860$ 、 $n=7.138$ )を適用し、縦、横方向の分散係数は $\alpha_L=3.6\text{cm}$ 、 $\alpha_T=0.36\text{cm}$ としている。差分格子間隔はx方向に13cm、y方向に7.5cm、緩和係数は $\omega=1.6$ 、飽和透水係数 $k=0.02\text{cm/s}$ としている。

#### 4. 結果及び考察

図-2には、鉛直塩分濃度布の実測値を×で数値解を実線で示している。この図より数値解は実測値をよく再現しているといえる。

図-3には数値解による10%から90%までの20%間隔の等濃度線を実線で示し、これに数値解の流速に基づいた流況を描

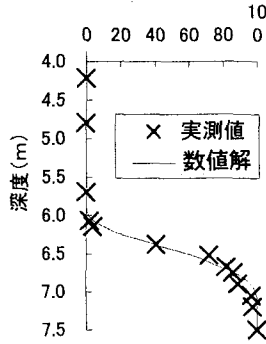


図-2 鉛直濃度分布

いている。楔状に侵入した塩水域の上端には、濃度0%から100%までの混合域が形成されている。

塩水は、海側から陸側に向かって、ほぼ水平な流れを示し、淡水は陸側から海側にほぼ水平に流出した後、流れの向きを変え混合域にそって海側に流出している。混合域では、海側から侵入した塩水と、海側に向かって流出する淡水とが混じりあって海側に流出している。

図-4に、塩水領域と淡水領域における流線上の流動時間、混合域における10%、90%等濃度線上の流動時間を示している。流速は淡水域に比べて塩水領域が非常に小さいため、塩水域の流動時間淡水域のそれよりもほぼ27倍大きくなっている。

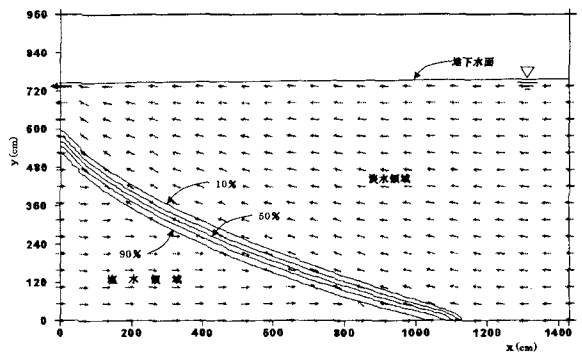


図-3 濃度分布と流況

例えば、淡水は不透水壁の直上を水平に海側に向かって流出し混合域の手前まで流動するのに116日、さらに混合域に沿って海側に流出するのに66日、計182日かかっている。塩水は不透水境界上( $y=0\text{cm}$ )を、混合域の手前まで侵入するのにほぼ2041日かかっている。混合域では90%の等濃度線上を海側に向かって流出するのにほぼ1634日かかっている。もし海側から不透水壁を侵入し、その後90%の等濃度線上を海側に向かって流出するとしたならば、3675日かかることになる。

#### 7. 結論

本研究では、定常状態の淡塩二相流の混合解析の結果をもとに流線上の流動時間を求めた。その結果、淡水領域に比べて塩水領域の方が極端に流動に時間がかかることがわかった。今後、沿岸域における透水性が低い深層地盤の流動時間について検討を行う予定である。

【参考文献】

(1)細川土佐男、神野健二、粕井和郎：現地ボーリング孔内の塩分濃度実測値に基づく横方向分散定数の推定と数値シミュレーション、水工学論文集第36巻、pp.423-428、1992年2月。

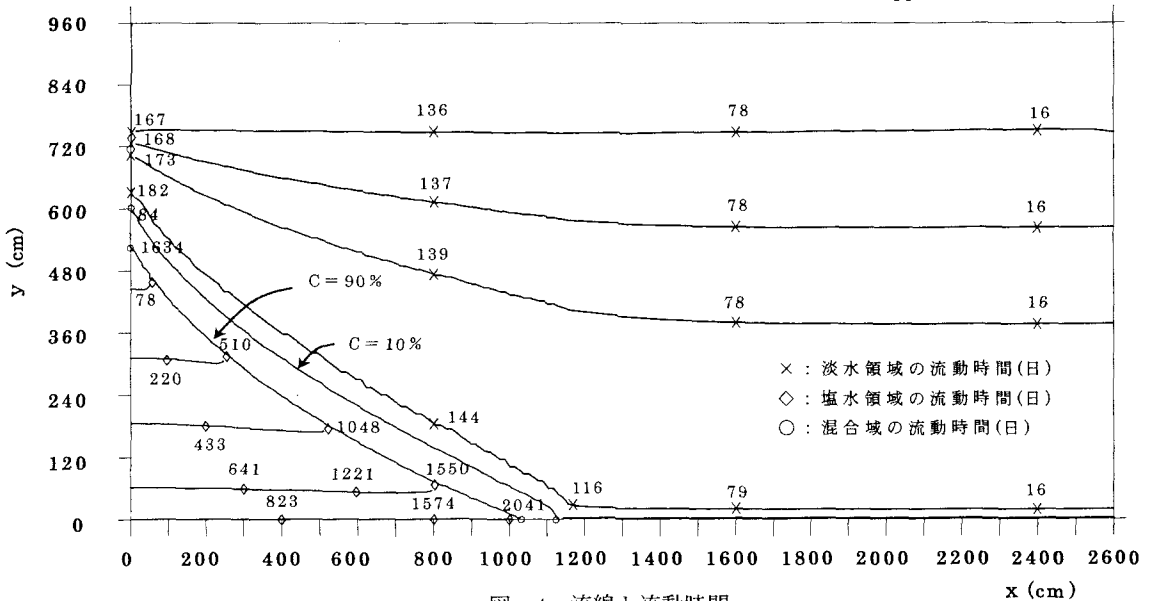


図-4 流線と流動時間