

京都大学 学生員 片山 秀樹
 京都大学 正員 古市 徹
 京都大学 正員 井上 頼輝

1. はじめに 従来の地下水環境中での有害物質移動シミュレーションは、飽和層(帯水層)および不飽和層(通気層)それぞれ独立に行った研究が主であった。しかしながら、現実の廃棄物処分場では、有害廃棄物は不飽和層に埋立てられ、飽和層を移行して生活圏に至ること、および飽和層と不飽和層では汚染物質の拡散傾向が異なると考えられるので、実地層の構造を取り入れて、両層を同時に統一的に取り扱う必要があることは明確である。このような研究は流れ場だけの解析についてはいくつか見られるが、物質移動をも同時に考慮したものはほとんどなく、著者らの知る限りではJ.F. Pickness⁽²⁾の研究ぐらいである。本研究では飽和-不飽和モデルにより地下水を統一的に取り扱い、流速分布と濃度分布を連立して求める。流速分布計算では非線型方程式を解くので、特に境界条件の取り扱いが困難であるが、本法においてはその修正方法を明確にした上で、全体的なアルゴリズムを明らかにした。さらに基礎式の各パラメータが、流速分布、濃度分布へ与える影響について感度解析的に検証し、現象面での本方法の有効性について考察した。

2. 定式化とアルゴリズム 本方法の特徴は、飽和-不飽和層を相対透水係数 K_r によって区別し、圧力水頭 h の関数として、連続的に記述することにある。流れ場の基礎式は、連続の式(1)式とダルシー則(2)式から得られる(4)式である。濃度場の基礎式は、移流拡散方程式(5)式で表わされる。(4)式、(5)式を有限要素法によって定式化すると、(9)式、(10)式となる。(9)式の $\{F\}$ は h の関数であるから、(9)式は非線型方程式となる。よって反復法により h のより良い値を求める必要がある。そのアルゴリズムをFig-1に示す。その際、境界条件修正の方法については、表-1に示している。 Q は境界における圧力勾配の正負を示す。この修正方法のポイントは、境界上の節点が自由水面になるかどうかを物理的な見地から、システムティックに判断し、反復計算ごとに自由水面BD上の節点では、 $h=0$ とすることである。Fig-2は濃度分布を求めるためのアルゴリズムである。(1) $\partial(P\theta)/\partial t = -\nabla(P\bar{q})$

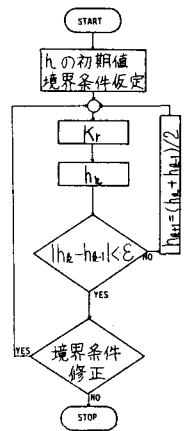


Fig-1 Algorithm

なお、 $\partial h/\partial t$, $\partial \theta/\partial t$ の項については、クランクニコール(2) $\bar{q} = -K \nabla(h+Z)$ (3) $K = K_r K_s$

ソンの差分式(11)式を採用した。(4) $L(h) = (c + \theta/\rho_s) \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot (\eta h + \nabla Z)$

3. 計算結果と考察 本研究における解析対象 (5) $L(c) = (\theta + PK_d) \frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} (\theta D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + \theta D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z})$
 は、Fig-3のように設定している。場は等方性を仮定し、GEに関して対称としている。DE以下は、

$$+ \theta_x \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} (\theta D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + \theta D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z}) + \theta_z \frac{\partial c}{\partial z} + \lambda (\theta + PK_d) = 0$$

不透水層で、BDの左方は広い排水溝を考え、その(6) $D_{xx} = \alpha_L V_x^2 / V + \alpha_T V_z^2 / V + D_d$

水位は変化しないとする。ABについては、フラッシュ(7) $D_{zz} = \alpha_T V_z^2 / V + \alpha_L V_x^2 / V + D_d$

クスはなく、BDは自由水面と考える。AGから、(8) $D_{zx} = D_{xz} = (\alpha_L - \alpha_T) V_x V_z / V$

雨が定常で、 $V(\text{cm}/\text{hr})$ で降っているものとし、汚染(9) $[A]\{f\} + [B]\{\frac{\partial c}{\partial t}\} + [F] = 0$

物質は、定常的に基準化した濃度、 $C=7.0$ で流れ(10) $[E]\{f\} + [G]\{\frac{\partial c}{\partial t}\} + [H] = 0$

あとしている。 K_r-h , S_w-h の関係は、(12)式で (11) $\{\frac{\partial h}{\partial t}\}_e = -\{\frac{\partial h}{\partial t}\}_{t=at} + \{h\}_e - \{h\}_{t=at} \cdot \Delta t$

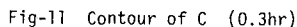
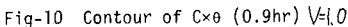
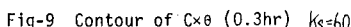
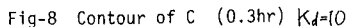
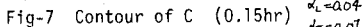
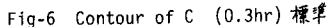
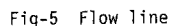
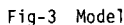
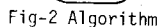
表わされる。感度解析のための濃度分布計算の各パ (12) $K_r = \frac{3.6 \times 10^5}{3.6 \times 10^5 + |h+10|^{1.5}}$ $S_w = \frac{4.0 \times 10^4}{4.0 \times 10^4 + |h+10|^{2.5}}$

ラメータの標準値を、 $K_s = 40.0 (\text{cm}/\text{hr})$, $K_d = 0$ $\left\{ \begin{array}{ll} K_r = 1.0 & (h \geq -10.0) \\ S_w = 1.0 & (h \geq -10.0) \end{array} \right.$

(cm^3/g) $\alpha_L = 0.04 (\text{cm})$ $\alpha_T = 0.01 (\text{cm})$ $\lambda = 0 (\text{hr}^{-1})$

ρ	水の密度 g/cm^3
θ	体積含水率
ϕ	空率率
S_w	飽和度
$\bar{q}$	比流速 cm/hr
K	透水係数 cm/hr
K_r	相対透水係数 $0 < K_r < 1$
K_s	飽和透水係数 cm/hr
	の要素 cm/hr
h	圧力水頭 cm
Z	位置水頭 cm
S_s	比貯留係数 cm^{-1}
c	比水分容量 cm^{-1}
C	溶質物質の濃度 g/cm^3
λ	1次反応定数 hr^{-1}
ρ'	土の密度 g/cm^3
K_d	分配係数 cm^3/g
D_{ij}	分散係数 cm^2/hr の成分 cm^2/hr
D_d	間隙水の中を容れられ分散係数 cm^2/hr
d_L	流れ方向の拡散能 cm^2/hr
d_T	流れと垂直方向の拡散能 cm^2/hr
v	間隙流速 cm/hr
[A], [B], [E], [G]	n 次元正方行列
$[A], [B], [E], [G]$	$n \times n$ 次元正方行列

4. おわりに 今後の課題として、本方法の解析をさらに発展させて、より現実的な降雨パターンを考慮し、層化した地層にも適用できるようにして、シミュレーションが、精確に行なえることを検証してみる必要がある。



〔参考文献〕