

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 従来の地水圈環境中の有害物質移動シミュレーションは、飽和層(帶水層)および不飽和層(通気層)それぞれ独立に行なわれ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圈に至ること、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のはほとんどなく、著者らの知る限りでは J.F. Pickness⁽¹⁾らの研究⁽²⁾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形方程式を解くので、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、連續的に記述することにある。流れ場の基礎式は、連續の式(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_j は h の関数であるから、(9)式は非線形方程式となる。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、システムディクに判断し、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-1

2 は濃度分布を求めるためのアルゴリズムである。(11) $\partial(P\bar{Q})/\partial t = -\nabla(P\bar{Q})$

なお、 $\partial h/\partial t$ の項については、クランクニコル(2) $\bar{Q} = -K\nabla(h+z)$ (3) $K = K_r k_{ij}^s$ ソフト型の差分式(11)式を採用した。

$$(4) L(h) = (c + \frac{\partial}{\partial t} S_s) \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot k(h + \nabla z)$$

3.計算結果と考察 本研究における解析対象(5) $L(C) = (\theta + P' K_d) \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{2}{\partial x} (\theta D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + \theta D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z})$ は、Fig-3 のように設定している。場は等方性を仮定し、G-Eに関して対称としている。DE 以下は、 $+ \theta_z \frac{\partial C}{\partial z} + \lambda (\theta + P' K_d) = 0$

不透水層で、BD の左方は広い排水溝を考え、その(6) $D_{xx} = d_L V_x^2/V + d_T V_z^2/V + D_d$ 水位は変化しないとする。AB については、フランクニコル(7) $D_{zz} = d_T V_z^2/V + d_L V_z^2/V + D_d$ クスではなく、BD は自由水面と考える。AG から、(8) $D_{xz} = D_{zx} = (d_L - d_T) V_x V_z / V$ 雨水が定常で、 $V(\text{cm/hr})$ で降っているものとし、汚染(9) $[A][A] \{F\} + [B] \{\frac{\partial h}{\partial t}\} + [F] = 0$ 物質は、定常的に基準化した濃度 $C=1.0$ で“流れ込”(10) $[E] \{C\} + [G] \{\frac{\partial C}{\partial t}\} + [H] = 0$ おとしている。 $K_r - h$ 、 $S_w - h$ の関係は、(12)式で、(11) $\{\frac{\partial h}{\partial t}\}_t = -\{\frac{\partial h}{\partial t}\}_{t-t} + ([h]_t - [h]_{t-t})/2\Delta t$ 表わされる。感度解析のための濃度分布計算の各パラメータの標準値を、 $K_s = 40.0 (\text{cm}/\text{hr})$ 、 $K_d = 0$ (cm^3/g) 、 $d_L = 0.04 (\text{cm})$ 、 $d_T = 0.01 (\text{cm})$ 、 $\lambda = 0 (\text{hr}^{-1})$ とし、 $K_r = 1.0$ ($h \geq -1.0$)、 $S_w = 1.0$ ($h \geq -1.0$) とし、 $V = 100 (\text{cm}^3/\text{hr})$ とし、 $[A][B][E][G]$ n 次元正方行列、 $[h]_t$ ($t \geq 1$) $[F]$ n 次元ベクトル

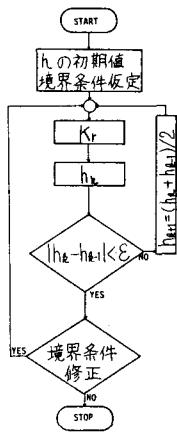


Fig-1 Algorithm

P	水の密度 g/cm^3
θ	体積含水率
ϕ	空隙率
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_{ij}^s	飽和透水係数 cm/hr
λ	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^{-3}
C	溶質物質の濃度 g/cm^3
α	1次反応定数 hr^{-1}
P'	土の密度 g/cm^3
K_d	分配係数 cm^3/g
D_{ij}	拡散係数 cm^2/hr
D_d	間隙水中の拡散係数 cm^2/hr
d_L	流れ方向の拡散能 cm
d_T	流れと直角方向の拡散能 cm
V	間隙流速 cm/hr
$[A][B][E][G]$	n 次元正方行列
$[h]_t$ ($t \geq 1$)	n 次元ベクトル

降雨量 $V = 4.0$ (cm/hr) とし、各パラメータを変化させたときの影響を調べた。標準値の場合の、圧力分布・流速分布の定常計算の結果を、Fig-4, Fig-5 に示す。標準値の場合の 0.3 時間後の濃度コンターを Fig-6 に示す。この図から、物質移動は、飽和領域では水平方向に進み、不飽和領域では、鉛直方向に浸透し、自由水面付近で傾向が異なることがわかる。各パラメータの感度について調べると、分配係数 K_d 、拡散能 α_L 、 Δt は、濃度分布 C に大きく影響を与える (Fig-7, Fig-8)。透水係数 K 、降雨量 V は、土壤単位体積あたりの汚染物質量 $C \times \theta$ の分布に大きく影響を与える (Fig-9, Fig-10)。すなわち、拡散能が大きいほど、あるいは分配係数が小さくなるほど、濃度拡散が速くすすむことがわかる。また、透水係数や降雨量は、実質的な汚染物質の移動に関係し、 $C \times \theta$ の分布において、その値の部分的な逆転がみられる。特に拡散能については、(6)～(8)式から、拡散係数と密接な関係があるが、Fig-11 は拡散係数の非対角項がない場合の濃度分布の結果である。非対角項を考慮した方 (標準値、Fig-6) が、やや速く拡散することがわかる。濃度分布計算において、流れ場が定常の場合と非定常の場合を比較したところ、濃度分布の傾向はほとんど変わらなかった。以上のような計算結果から、設定した解析モデルに対して、流速分布、濃度分布とも現象面を考慮して、物理的に妥当と考えられる数値計算結果が得られたものと考えられる。したがって現実的な飽和-不飽和層を同時に扱う本方法は、地中処分場の汚染解析の問題に対して有効に利用できると考えられる。

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。

表1 境界条件修正の方法

1	しをNから1まで変化させ h(i,j) 30となる最初のiを求め そのiをKとする。
2	Lを1からKまでについて h(i,j)=0 とする。
3	しを1からKまでについてQ(i,j) 30となる最初のiを求め、その時 のjをKKなければKK=Kとする jを1からKK-1まではについてh(i,j)=0 jをKKからKまでについてh(i,j)=10.0 jをK+1からNまで h(i,j):未指定 N:境界の節点数, Q(i,j):h(i,j)-h(i,N)
4	

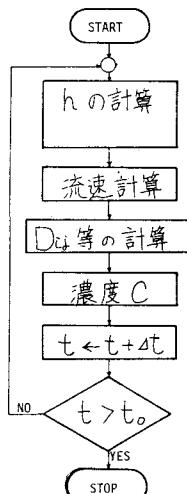


Fig-2 Algorithm

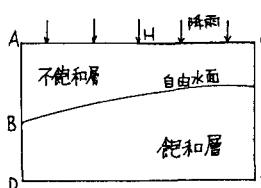


Fig-3 Model

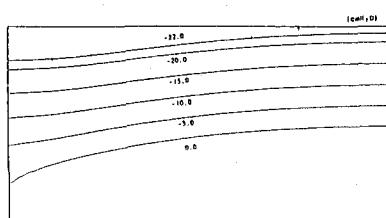


Fig-4 Contour of h

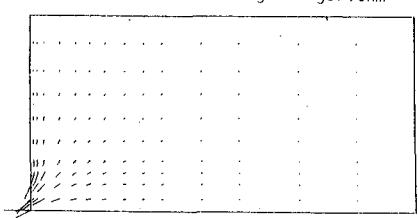


Fig-5 Flow line

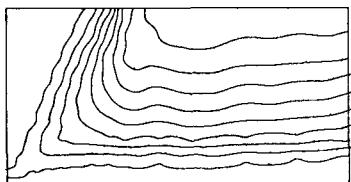


Fig-6 Contour of C (0.3hr) 標準

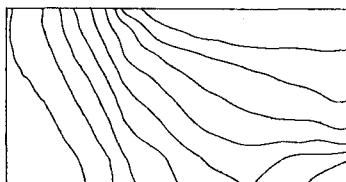


Fig-7 Contour of C (0.15hr) $\alpha_L=0.04$ $\Delta t=0.01$

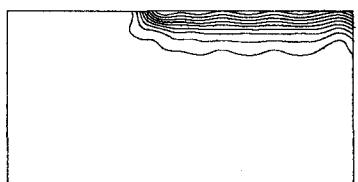


Fig-8 Contour of C (0.3hr) $K_d=0$

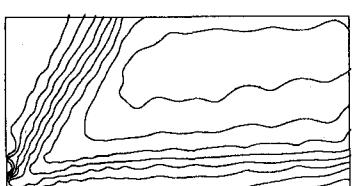


Fig-9 Contour of $C \times \theta$ (0.3hr) $K_s=60$

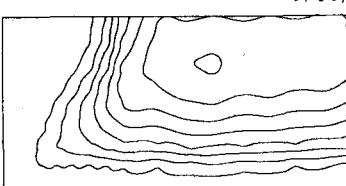


Fig-10 Contour of $C \times \theta$ (0.9hr) $V=1.0$

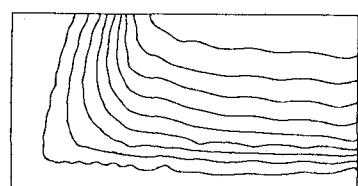


Fig-11 Contour of C (0.3hr) $K_d=0.04$

[参考文献] 1.A.B.Guteghian: A Two Dimensional Finite Element Solution Scheme for The Saturated-Unsaturated Flow through Ditch-Drained Soils (1981) 2.J.F.Pickness et al.; Finite Element Analysis of the Transport of Water and Solutes in Tile-Drained Soils. J. of Hydraul. vol.50 (1979) 243-263