

特性曲線法を用いた透水性の分布が物質輸送に及ぼす影響の数値実験的検討

中川, 啓
九州大学大学院農学研究院植物資源科学部門植物生産科学講座土壌学研究室

<https://doi.org/10.15017/21124>

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 57 (1), pp.67-74, 2002-10. 九州大学大学院農学研究院
バージョン：
権利関係：

特性曲線法を用いた透水性の分布が物質輸送に 及ぼす影響の数値実験的検討

中 川 啓*

九州大学大学院農学研究院植物資源科学部門植物生産科学講座土壌学研究室
(2002年5月14日受付, 2002年5月30日受理)

Numerical Study on the Effect of the Hydraulic Conductivity Distribution on Mass Transport using Method of Characteristics

Kei NAKAGAWA*

Laboratory of Soil Science, Division of Soil Science and Plant Production,
Department of Plant Resources, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

緒 言

先日環境省より土壤汚染の状況把握や土壤汚染による人の健康被害の防止に関する措置などを盛り込んだ土壤汚染対策法案が閣議決定され、国会に提出されることが発表され、現在審議中である。このような状況の中、汚染された土壤の修復や対策がますます重要になってくることは間違いないと考えられる。また、地下水・土壤汚染の対策を講じるうえで、数値計算による汚染物質の挙動を明らかにすることは必要な手段の一つである。

最近では、多くの研究者や技術者によって用いられてきたMODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988) を使いやすくするためのブリ、ポスト処理ソフトも容易に手にはいるようになってきている (Chiang and Kinzelbach, 2001)。このようなソフトを用いて対象とする現場固有の帯水層の水文地質学的特性を把握して、個別のモデルを設計しシミュレーションすることも大切であるが、透水性の組み合わせによる物質輸送の違い、観測井戸における濃度変化の違いについて基本的な性質を検討することは、汚染源の特定できる場合の汚染物質が拡がる範囲の推定や汚染対策の重要度の空間的な特定について有用な知見を

得られると考えられる。

本研究では、水平2次元の被圧帯水層地下水流動系において、観測井戸の支配する透水係数の分布による非反応性の物質輸送に及ぼす影響について数値実験的に検討する。

数値計算モデル

1. 基礎式と計算方法

被圧帯水層における水平2次元地下水流れに関しては次式のようになる。

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(Ak \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Ak \frac{\partial h}{\partial y} \right) + R(x, y, t) - W(x, y, t) \quad (1)$$

ここで、 S : 貯留係数、 h : 地下水頭、 $R(x, y, t)$: 単位時間・単位面積あたりの涵養量、 $W(x, y, t)$: 単位時間・単位面積あたりの揚水量、 k : 透水係数、 A : 帯水層厚である。なお貯留係数は比貯留係数 S_s と帯水層厚 A を用いて、 $S = S_s A$ で表される。

非反応性の物質輸送に関する基礎式は次式のようになる。

* Corresponding author (E-mail: nakagawa@agr.kyushu-u.ac.jp)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u' \frac{\partial C}{\partial x} - v' \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (2)$$

ここで、 C : 溶質濃度、 u' 、 v' : x および y 方向の実質流速で、ダルシー流速との間に、 $u' = u/\theta$ 、 $v' = v/\theta$ の関係にある。 θ は空隙率、またダルシー流速は次式で計算される。

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v = -k \frac{\partial h}{\partial y} \quad (3)$$

D_{xx} 、 D_{xy} 、 D_{yy} 、 D_{yx} : 次式に示す分散係数で、流速依存型の水理学的分散と分子拡散の和で表される。

$$D_{xx} = \frac{\alpha_L u'^2}{V} + \frac{\alpha_T v'^2}{V} + D_M$$

$$D_{yy} = \frac{\alpha_T u'^2}{V} + \frac{\alpha_L v'^2}{V} + D_M \quad (4)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = \frac{(\alpha_L - \alpha_T) u' v'}{V}$$

ここで、 $V = (u'^2 + v'^2)$ であり、 α_L : 縦方向分散長、 α_T : 横方向分散長、 D_M : 水の分子拡散係数である。
 計算方法は、地下水流れの (1) 式については、左辺については後退差分、右辺については中央差分により離散化を行い加速緩和法により計算を行う。物質輸送の (2) 式については、左辺に移流項を移項し、全微分で表して特性曲線法により計算を行う (神野, 2001)。

2. 初期・境界条件

圧力水頭の初期値は、計算領域一様に 0 cm とした。非反応性物質の濃度の初期値は、図 1 に示す物質投入領域を 100% とし、それ以外の部分では 0% とした。圧力水頭の境界条件は、図 1 に示すように上辺と下辺

を不透水壁、右辺と左辺を一定水頭とする。非反応性物質の濃度の境界条件は、四辺の濃度勾配 = 零 ($\partial C/\partial x = 0$ (x -direction), $\partial C/\partial y = 0$ (y -direction)) とする。

本報で示す計算例は、まず地下水流れの (1) 式を解いて、上記の境界条件で圧力水頭の定常分布を得る。ただしこのとき定常状態を求めるため、非定常項を落として、すなわち $S=0$ として計算を行う。圧力分布から x 方向および y 方向のダルシー流速、 u 、 v を (3) 式より得る。次いでこれらの流速を空隙率を用いて実質流速 u' 、 v' に変換し、物質輸送の (2) 式に代入して、上記の境界条件のもとで非定常計算を行い濃度分布の時間変化を得る。

数値実験と結果

1. 計算例

まず図 1 に示した対象領域について、3つの井戸を想定する。それぞれの井戸が支配する小領域をティーン分割 (篠原, 1975) により決定する。井戸固有の

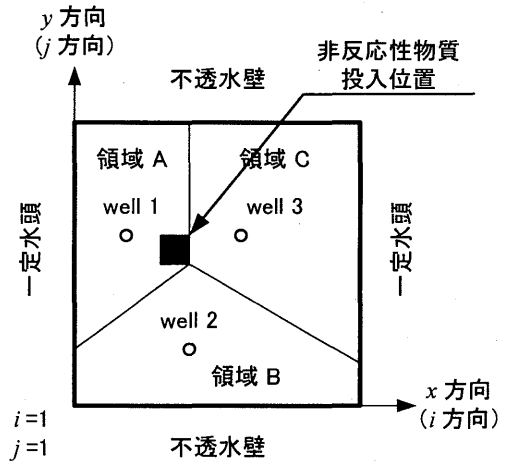


図 1 計算領域と境界条件

表 1 各領域の透水係数、分散長、固定水頭値および揚水の有無

計算例	k_A	k_B	k_C	α_L	α_T	H_u	H_d	揚水
	cm s ⁻¹							
CaseA(1)	0.05	0.01	0.005	5.0	0.5	500	490	×
CaseA(2)								○
CaseB	0.005	0.05	0.01					○
CaseC	0.01	0.005	0.05	○				

透水係数, 分散長などの水理パラメータはこの分割した小領域ごとに一定値を設定する. 透水係数と分散長は表1のように設定した計算例4つについて数値実験を行う(表中, k は透水係数, 添字 A, B, Cは小領域の記号, H は境界の固定水頭値で添字 u が上流側, d が下流側である). 空隙率は, 全ての計算例, 全領域共通で, 25%, 帯水層厚は400cmとした. 計算領域は, x 方向に500cm, y 方向に500cmで, それぞれ差分格子間隔は, x, y 方向に100分割し, 5cmとす

る. またここでは固定水頭条件は, 左側の上流側が500cm, 右側の下流側が490cmとし, 500cmの距離で10cmの水頭差を与えた. 物質輸送の計算に必要な x 方向, y 方向それぞれの分散長 α_L, α_T は, 全てのケースで全領域5.0cmと0.5cmとした. 3つの井戸において揚水を行う場合 (CaseA(2), CaseB, CaseC), 各井戸 $8.33\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ とした. 物質輸送の計算においては, 水の拡散係数に $1.0 \times 10^{-5}\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ を与え, 差分時間間隔は12sとした. 特性曲線法で配置する移動子

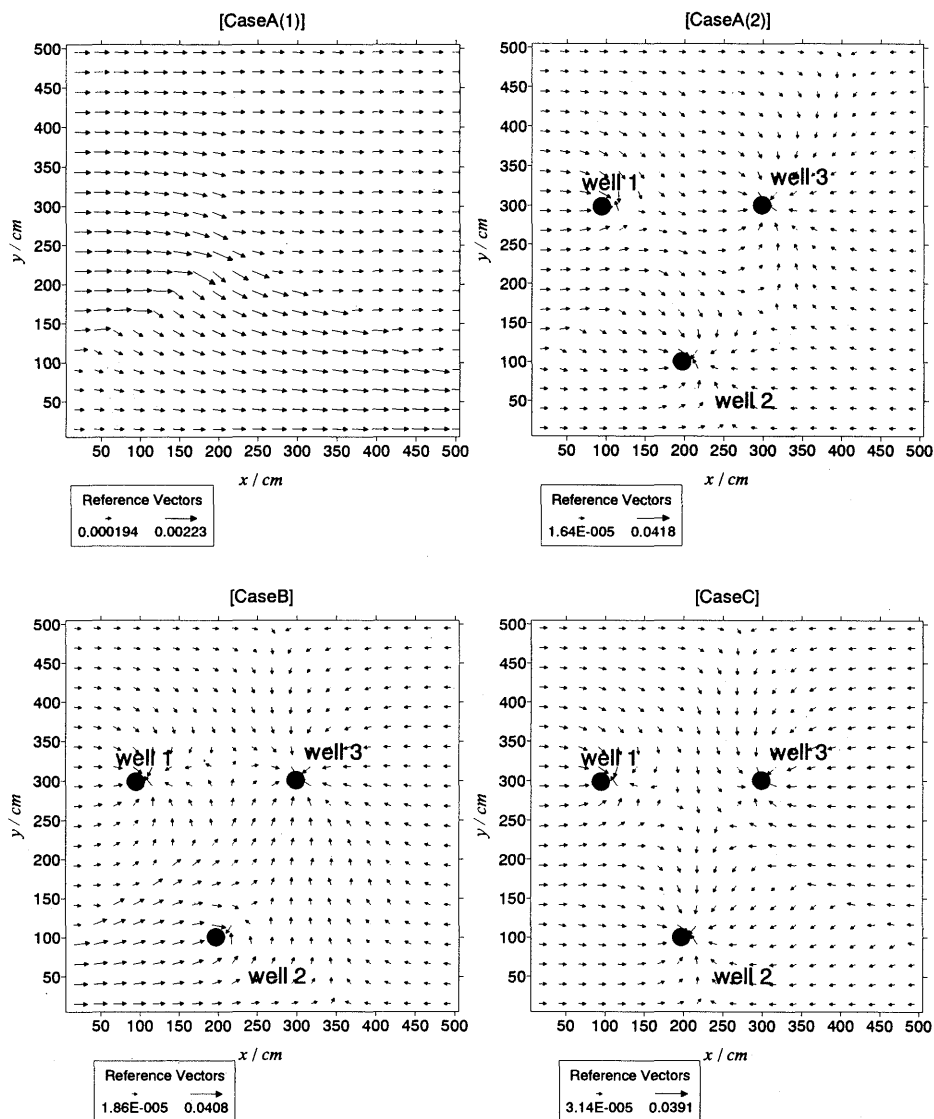


図2 各揚水計算例の流速ベクトル分布

は1格子点領域あたり9個を配置している。これは通常2次元の場合は4個配置すれば十分であるが、ここでは井戸における濃度変化を精度良く求めるために多めに配置した。

2. 結果と考察

図2に計算例それぞれの流速ベクトル分布を示す。CaseA(1)では、当然のことながら透水係数の大きい領域Aにおいて流速が大きくなっており、透水係数の小さい領域Cを迂回するように多くは領域Bに向かい流下している。CaseA(2)では、揚水の影響を受けて下流側に流出し、右側の境界で右向きだった流れが、左向きとなっている。領域Aでは流れが速く、井戸No.1による揚水は井戸の下流側に対してはあまり効かない。一方領域BとCでは下流側からも上流側と同程度揚水している。CaseBでは領域Bで透水係数が大きく、流速が大きくなるため井戸No.2の揚水はCaseA(2)やCaseCに比べ効かず、井戸No.2の下流側はむしろ井戸No.3の揚水の影響を受け上向きの流れを示している。CaseCの場合は、CaseA(2)では領域Aにおいて、CaseBでは領域Bにおいて流速が卓越しているのに対し、全体的に一樣な流速分布を示している。

図3にCaseA(1)の濃度分布の時間変化を500分後、2500分後、5000分後について示している。汚染物質が、若干透水係数の分布の影響を受けつつも(2500分後は、領域Bの方へより大きく拡がりながら流下している)、下流側(右側)に流下しながら分散していく様子が分かる。図4にCaseA(2)の濃度分布の時間変化を20分後、40分後、60分後について示している。最初3つの井戸の揚水の影響を受けながら3方向に拡がっているが、下流側(右側)に流下すると井戸No.2と井戸No.3の揚水の影響を受け、縦長に伸びる形となっている。その後、それらの井戸に揚水されて濃度が低減していく。図5にCaseBの濃度分布の時間変化を20分後、40分後、60分後について示している。この場合は初期には主に井戸No.1の影響を受けており、下流へ行くに従い井戸No.3の影響が強くなる。しかしこの場合は、井戸No.2の方へは至らずに下流側(右側)へ流下している。図6にCaseCの濃度分布の時間変化を20分後、40分後、60分後について示している。この場合は計算時間を通じて3つの井戸の影響を受けて井戸方向へ拡がる分布を示している。CaseB、CaseCの場合両方とも最終的には下流側へ流出することなく、井戸に揚水され濃度が低減していくと

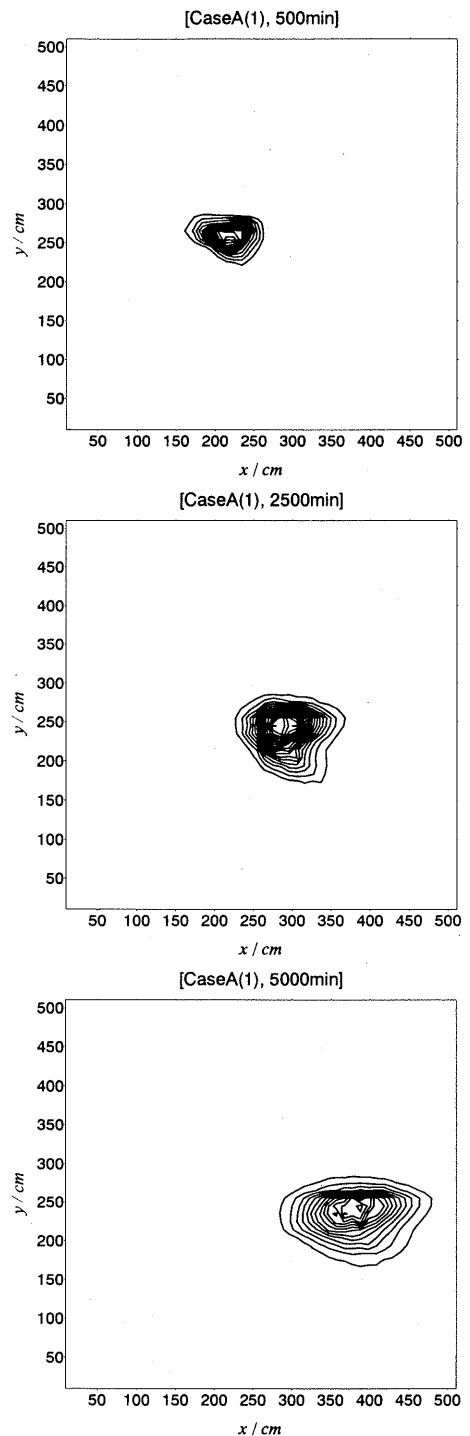


図3 CaseA(1)の濃度分布の時間変化
(500minのときは5%間隔、2500min
と5000minのときは2%間隔)

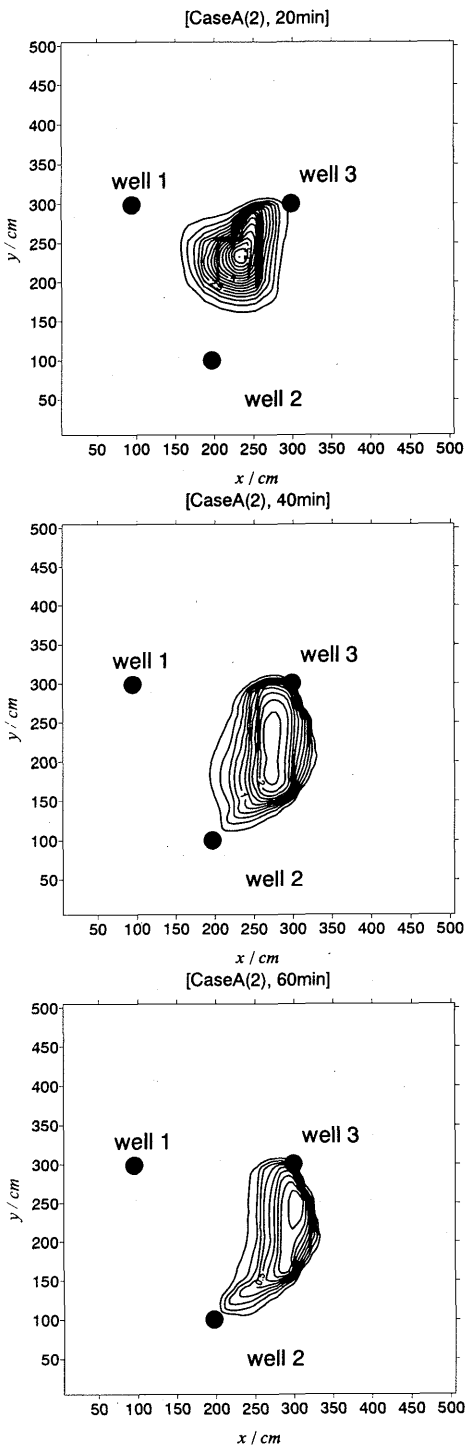


図4 CaseA(2)の濃度分布の時間変化
(20minのときは0.5%間隔, 40minのときは0.2%間隔, 60minのときは0.1%間隔)

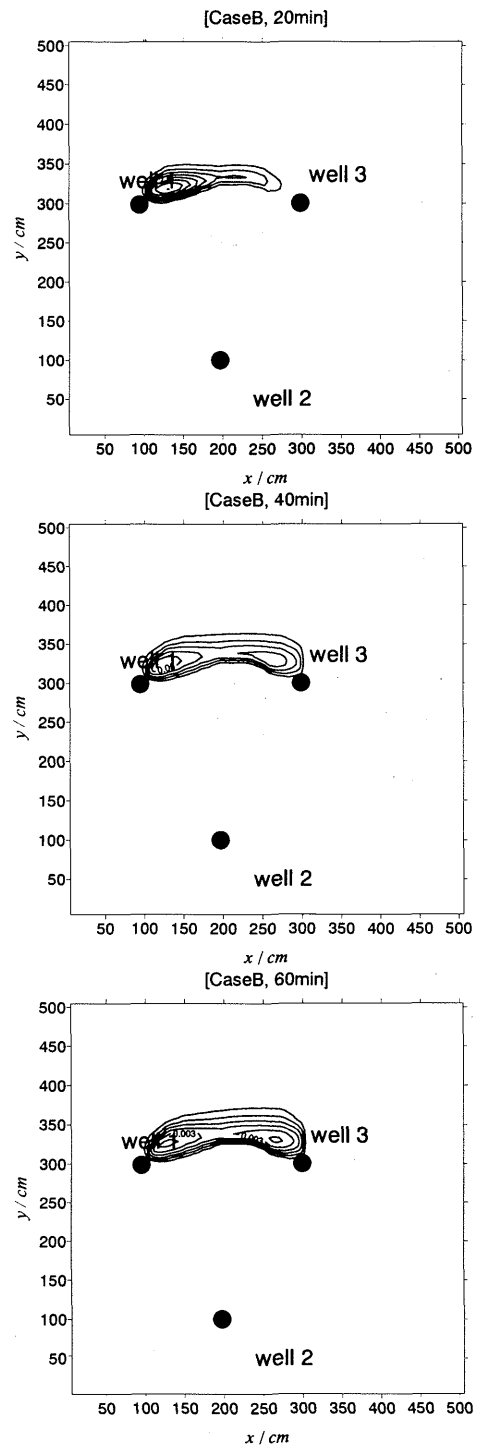


図5 CaseBの濃度分布の時間変化
(20minのときは0.5%間隔, 40minのときは0.01%間隔, 60minのときは 6.0×10^{-4} %間隔)

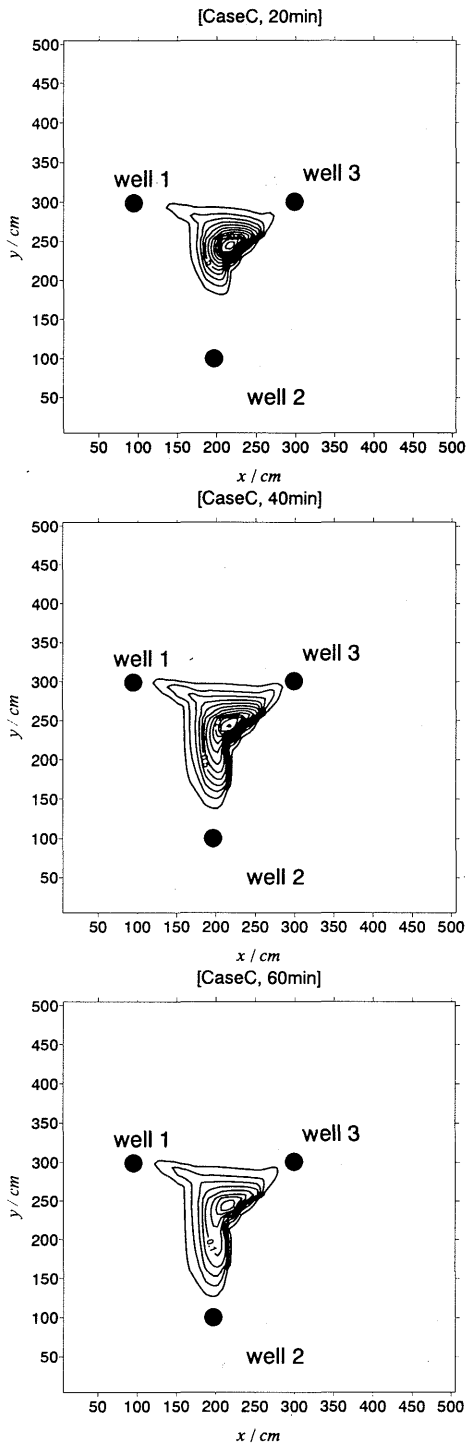


図6 CaseCの濃度分布の時間変化
(20minのときは1%間隔, 40minのときは0.1%間隔, 60minのときは0.02%間隔)

考えられる。

図7に計算例それぞれの観測井戸における濃度変化を示す。CaseA(2)に対するものは軸を変えて示している。井戸No.1は、汚染物質投入点の上流側に位置するが、どの計算例においても初期に濃度を上昇させるものの低下する時間も早い。CaseBやCaseCにおいてはCaseA(2)よりも高いピーク濃度となっていてこれらの計算例では、流れや物質輸送に他の井戸よりも大きな影響を与えている。井戸No.2においては、CaseBの場合は汚染物質を吸い上げていない、またCaseA(2)はピーク濃度がCaseCより高いが他の井戸におけるピーク濃度よりも低く、この井戸へは余り高い濃度は入って来ない。井戸No.3においては、CaseA(2)、CaseC、CaseBの順にピーク濃度が高い。CaseA(2)の濃度の立ち上がりは他の計算例よりも遅くなっているが、時間をかけて吸い上げている。

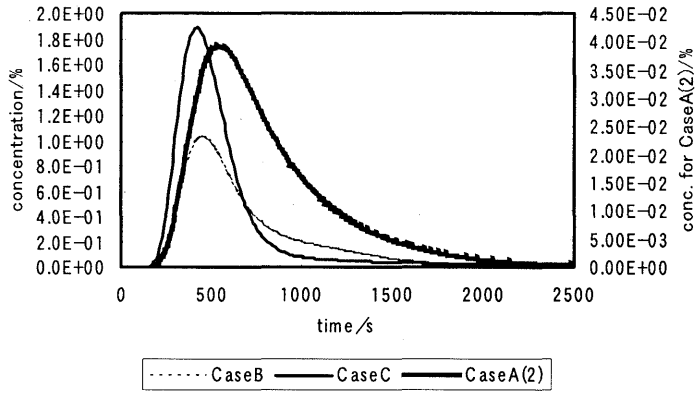
以上に示したように、定常揚水時での汚染物質の拡がり形状は、透水係数の分布の影響を大きく受けることが分かった。また透水係数の分布は、井戸の揚水量が同じであることや流れの上流側や下流側であることと相まって流速ベクトル分布に影響を与える。このようなことは、水質汚染が発見された井戸が、どの地域の地下水を主に汲み上げているのかという検討を十分行った上で汚染対策を講じる必要性が示唆される。たとえば本報で示した計算例では、CaseBの井戸No.2で汲み上げられている地下水は、ほとんど領域Bの井戸よりも上流側の部分からのものであるから、この部分の汚染源を疑い、重点的に調べなければならないと考えられる。

要 約

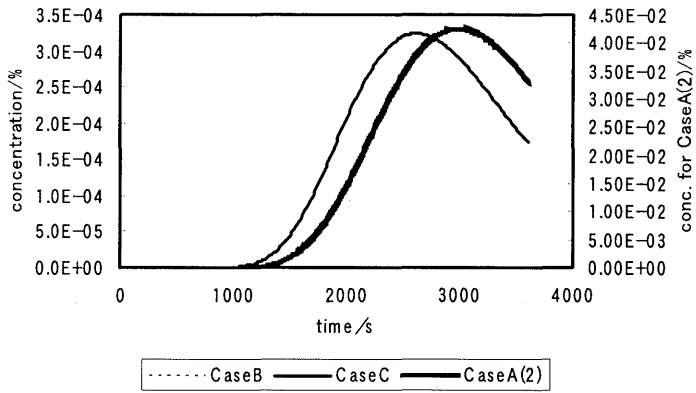
汚染源の特定できる場合の汚染物質が拡がる範囲の推定や汚染対策の重要度の空間的な特定について有用な知見を得るため、透水性の組み合わせによる物質輸送の違い、観測井戸における濃度変化の違いについて基本的な性質を調べることを目的として、被圧帯水層定常揚水時を想定した水平2次元地下水流れと物質輸送モデルを用いて数値実験的に検討した。

その結果、汚染物質の拡がり方、流速ベクトル分布、および井戸における濃度の時間変化は対象としている領域の透水係数分布の影響を受けることが分かった。このことは、実際に現場の汚染物質の移動を考える場合、透水係数の空間分布を注意深く調べなければならないことを意味する。また、水質汚染などが発見され

(a) well 1



(b) well 2



(c) well 3

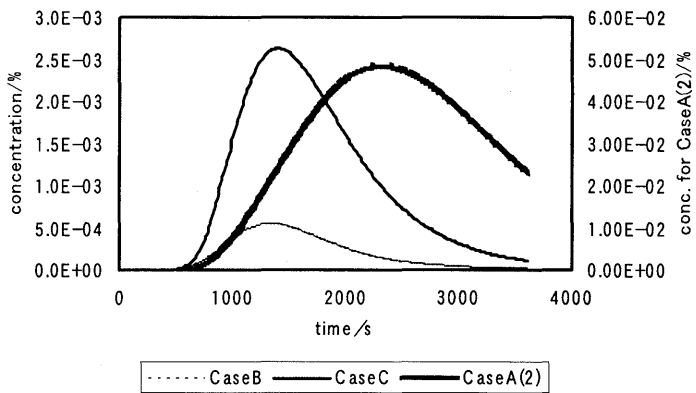


図7 各揚水計算例の井戸における濃度変化

た井戸では、その井戸が揚水している水は、主にどの地域のものであるかについて検討して対策を講じるべきであるが、数値計算によって検討する場合は、詳細な透水係数分布が得られていることが望ましい。

文 献

Chiang, W.-H. and W. Kinzelbach 2001 *3D-Groundwater Modeling PMWIN*, Springer Verlag, Heidelberg (Germany)

McDonald, M. G. and A. W. Harbaugh 1988 *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, Chapter A1, US Government Printing Office, Washington (USA)

神野健二編 2001 地下水中の物質輸送数値解析, 九州大学出版会, 福岡

篠原謹爾 1975 河川工学, 共立出版, 東京

Summary

In recent years numerical simulation of groundwater (soil water) has become a major part of many projects dealing with groundwater exploitation, protection and remediation of soils and groundwater. When the groundwater or soils are contaminated, a lot of physical-chemical properties of aquifer affect flow and transport of contaminant. Particularly, hydraulic conductivity changes groundwater flow. Therefore, examination of difference caused by distribution of hydraulic conductivities is extremely significant.

In this paper, four case studies were executed and discussed about contaminant transport and concentration change in the wells under contaminant water pumping or no water pumping, steady state condition. As a result of this study, it was confirmed that dispersion of contaminant, flow velocity vector distribution and concentration change in the wells were affected by the hydraulic conductivity distribution, obviously. This fact means that the spatial distribution of hydraulic conductivity should be carefully examined, when we try to take countermeasure of groundwater or soils pollution, even if the numerical model has limitation and uncertainty. And, in the well of which the water pollution was detected, the origin of pumping water should be specified using numerical model.