

トリクロロエチレンの自然河床区間から 地下水系への浸透特性について

Characteristics of infiltration of trichloroethylene from the
natural river bed to groundwater

江種 伸之*, 神野 健二**, 粕井 和朗***, 鷺見 栄一****
By Nobuyuki EGUSA, Kenji JINNO, Kazurou MOMII and Eiichi SUMI

In the present paper, the simulation results of infiltration of trichloroethylene from the natural river bed to groundwater region is shown. The method of characteristics(MOC) and iterated alternating direction implicit method(IADI) was applied to the computation of two-dimensional convection-dispersion equation and groundwater flow equation. It was found that the infiltration from the river bed when the groundwater level was high in the steady state becomes large while small when the level was low. In the transient period of the groundwater table from high to low or from low to high levels, spread of trichloroethylene showed an opposite tendency due to the unsteady velocity field which contributes to the convection of mass transport. Keywords :Trichloroethylene, Natural river bed, Infiltration, Groundwater variation, Unsaturated flow, Mass transport equation

1.はじめに

近年、有機塩素化合物による地下水汚染が社会問題として大きく取り上げられている。有機塩素化合物が地下水系へ浸透するプロセスは村岡により種々考えられている¹⁾。そのうちの一つに事業所からの排水が自然河床区間や側溝のつなぎ目から浸透し、地下水汚染を引き起こしているものがある。そしてその下流側に地下水利用者が近接している場合には飲料水に対する基準値を超える可能性が考えられる。このような場合には、河床下の地下水面の変動や河床のもつ不飽和浸透特性を考慮に入れた濃度分布の特性解析や水理学的な解析が必要であると考えられる。そこで、ここでは事業所からの排水が地下水系へ浸透する例として、F県A市の現地の状況や観測されたデータを参考に数値計算を行い、河床から浸透する有機塩素化合物による地下水汚染の水理学的な特性解析や汚染状況の検討を行った。

* 学生員 九州大学大学院工学研究科修士課程 水工土木学専攻

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科

(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

*** 正会員 農博 鳥取大学助教授 乾燥地研究センター

(〒690 鳥取市浜坂1390)

**** 通商産業省工業技術院資源環境技術総合研究所

(〒305 茨城県つくば市小野川16番3)

2. 基礎式と数値計算の方法

断面2次元不飽和-飽和帯水層における基礎式は水平方向にx軸、鉛直上向きにy軸をとると次式で示される。

地下水流れの基礎式

$$\{C_W(h) + \alpha S\} \frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1)$$

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

トリクロロエチレン輸送の基礎式

$$\frac{\partial (\theta C)}{\partial t} + \frac{u'}{R_d} \frac{\partial (\theta C)}{\partial x} + \frac{v'}{R_d} \frac{\partial (\theta C)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\theta D_{xx}}{R_d} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\theta D_{xy}}{R_d} \frac{\partial C}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\theta D_{yx}}{R_d} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\theta D_{yy}}{R_d} \frac{\partial C}{\partial y} \right\} \quad (3)$$

ここに、 $C_w(h)$:比水分容量、 S :比貯留係数であり、式 (1)の係数 α は不飽和領域では0、飽和領域では1の値をとる変数である。 h :圧力水頭、 $k(h)$:透水係数、 ρ_f :地下水の密度、 ρ :流体密度、(今回はトリクロロエチレンの濃度が薄いので、地下水中の密度効果を考えず、また河川水と地下水との密度差も考えないで $\rho=\rho_f$ とした)、 θ :体積含水率、 C :トリクロロエチレン濃度、 u, v, x, y 方向のダルシー流速、 u', v' :実流速、 R_d :トリクロロエチレンの土壌に含まれる有機炭素への吸着による遅れ係数、 $D_{xx}, D_{xy}, D_{yx}, D_{yy}$:分散係数であり個々の地層の分散定数に関する一様等方性を仮定すると次式の流速依存型で与えられる。

$$\theta D_{xx} = \alpha_L \cdot u^2/V + \alpha_T \cdot v^2/V + \theta D_M, \quad \theta D_{yy} = \alpha_T \cdot u^2/V + \alpha_L \cdot v^2/V + \theta D_M, \quad \theta D_{xy} = \theta D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) \cdot u \cdot v/V \quad (4)$$

ここに、 $V=(u^2+v^2)^{1/2}$ であり、 D_H :分子拡散係数 ($1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$)、 α_L, α_T :縦方向及び横方向分散定数である。なお、不飽和領域の揮発ガスの輸送効果については今回は考えていない。

数値計算の方法は、まず圧力水頭 h に関しては陰形式の差分法である IADI 法 (反復交互方向陰解法)²⁾ を用いている。また、ある時間ステップでの反復計算は、SOR 法 (加速緩和法)²⁾ により行い、反復計算は 1 ステップ前の圧力水頭との差の絶対値が予め設定した収束判定基準値 ε よりも小さくなるまで繰り返した。本計算での ε の値は 0.001cm としている。次にトリクロロエチレン濃度 C に関しては、粒子移動法 (特性曲線法)³⁾ を用いている。

3. 解析領域と計算条件

3-1 解析領域

図-1には本研究で対象とした水路周辺の縦断面図の概略を示している。この水路は大部分がコンクリートで被覆されているが、一部分だけ自然河床になっている区間があり、その区間からトリクロロ

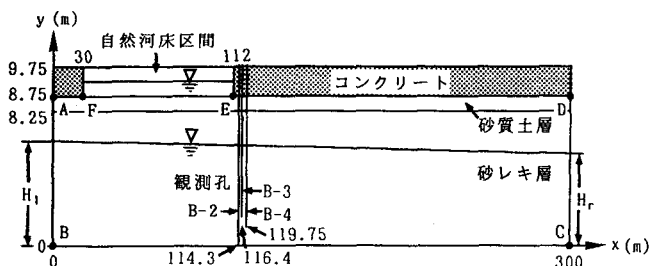


圖-1 解析領域縱斷面圖

エチレンの浸透が考えられる。帯水層は 2 層に分かれ、上層は層厚が 0.4 ~ 0.5 m と薄く、細砂を主体とした砂質土層で小さなレキも混入している。下層は直径 150 mm ~ 300 mm の玉石が多量に混入する砂レキ層である。地下水面の変動の実測値は観測孔 B-4 において $y=5.75\text{m} \sim 7.75\text{m}$ の間にある。そこで後の計算例ではこの変動範囲内で地下水面の上昇や低下が顕著に見られる $y=6.4\text{m} \sim 7.5\text{m}$ の間に観測孔 B-4 付近の地下水面がくるように境界条件 (H_L, H_R) を与えている。

3.2 不飽和特性

土壤の不飽和特性に関しては、Van Genuchten⁴⁾が提案した $h-\theta$ 曲線、 k_r-h 曲線、比水分容量： $C_w(h)=d\theta/dh$ を用いて、次式で与える。

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\{1 + (\alpha |h|)^n\}^m} \quad (5)$$

$$k_r = \frac{k}{k_{sat}} = \frac{[1 - (\alpha |h|)^{n-1} \{1 + (\alpha |h|)^n\}^{-m}]^2}{\{1 + (\alpha |h|)^n\}^{m/2}} \quad (6)$$

$$C_w(h) = \frac{\alpha \cdot m \cdot n (\theta_s - \theta_r) (\alpha |h|)^{mn}}{\{1 + (\alpha |h|)^n\}^{n+1}} \quad (7)$$

ここに、 θ : 体積含水率、 h : 圧力水頭、 θ_r : 残留含水率、 θ_s : 飽和含水率、 k_r : 相対透水係数、 k : 不飽和透水係数、 k_{sat} : 飽和透水係数、 α, m, n : 定数である。今回は、上層の砂質土層に関するデータが不明であることから、粒度試験より得られた粒度分布に基づいて、Mualemの土質カタログ⁵⁾と比較して類似した粒度分布の試料を選び、不飽和特性値を決定した。一方、下層の砂レキ層については現地トレーサー試験によって飽和透水係数は求めたが、その他の不飽和特性値についてはMualemの土質カタログが適用できないこともあり、通常の砂レキ層の持つ値を仮定した。それぞれの値は、砂質土層($k_{sat}=0.0144\text{cm/s}$, $\theta_s=0.428$, $\theta_r=0.157$, $\alpha=0.02$, $n=2.0$)、砂レキ層($k_{sat}=0.167\text{cm/s}$, $\theta_s=0.27$, $\theta_r=0.03$, $\alpha=0.02$, $n=3.0$)である。

3.3 縦方向、横方向分散定数について

縦方向及び横方向分散定数については、砂レキ層では現地トレーサー試験の結果と解析解との比較により、 $\alpha_L=28.0\text{cm}$, $\alpha_T=1.6\text{cm}$ を与えた。砂質土層については現地トレーサー試験の結果がないので、砂レキ層の0.001倍の値を仮定した。今回のトレーサー試験はトレーサーとして食塩水を投入孔(B-2)に注入し、5.45m離れた観測孔(B-4)で測定した。観測結果と解析解との比較を図-2に示す。なお解析解²⁾には2次元連続注入の次式を用いた。

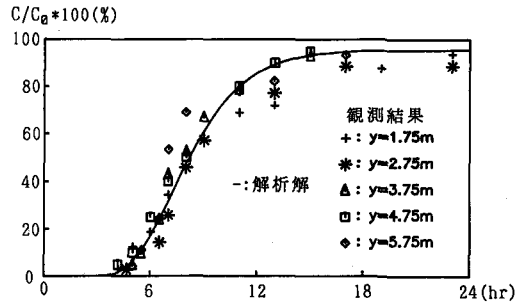


図-2 トレーサー試験結果と解析解の適用

$$C(X, Y, t) = \frac{C_0}{4(\pi \alpha_T r)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{X-r}{2\alpha_L}\right\} \text{erfc}\left\{\frac{r-ut}{2(\alpha_L ut)^{1/2}}\right\}, \quad r^2 = X^2 + \alpha_L / \alpha_T \cdot Y^2 \quad (8)$$

ここに、 C_0 : B-2での濃度、 X : 観測規模(5.45m)、 Y : B-2から横方向へのずれ(1.25m)、 u : 地下水流速、 t : 時間

3.4 遅れ係数¹⁾について

トリクロロエチレンの土壤に含まれる有機炭素への吸着による遅れ係数 R_d は、吸着がない場合は1.00となり、吸着がある場合は次式のように示される。

$$R_d = 1 + (1-n)/n \cdot \sigma_s \cdot K_{oc} \cdot (OC) \quad (9)$$

ここに、 n : 空隙率、 σ_s : 土壤の密度、 K_{oc} : 比例定数でオクタノール・水分分配係数 K_{ow} とは良い相関があり、次式で示される。

$$\log K_{oc} = \lambda \cdot \log K_{ow} - \beta \quad (\lambda=1.00, \beta=0.21) \quad (10)$$

(OC): 有機炭素の質量濃度でその深さ方向の減衰は、今回は現地の実測値から指数関数分布で与えた。

$$(OC) = (OC)_0 \cdot \exp\{-a \cdot (9.75-y)\} \quad (11)$$

ここに、 $(OC)_0$: $y=9.75\text{m}$ での有機炭素の質量濃度($3.63 \times 10^{-2}\text{g/g}$)、 a : 定数($6.37 \times 10^{-2}/\text{cm}$)。

3.5 水路中のトリクロロエチレンの減衰について

水路中のトリクロロエチレンの減衰は指数関数的であるとして次式で与えた。

$$C = C_0 \cdot \exp(-K/U \cdot x') \quad (12)$$

ここに、 C_0 : 自然河床が始まる点における濃度(排水口での濃度を100%とすると現地では14.0%となっている)、 U : 河川水の平均流速(58.0cm/s)、 K : 減衰係数($6.7 \times 10^{-4}/\text{sec}$)、 C : 自然河床が始まる点から x' m下流の地点での濃度である。その他の条件としては、水路の水深を10cm、 x 方向、 y 方向の差分格子間隔はそれぞれ100

cm, 25cmとした。

3.6 境界条件について

図-1に示している解析領域での圧力水頭 h およびトリクロロエチレン濃度 C の境界条件を次のように与えた。

- | | |
|---|--|
| AB境界——水圧に関して： $h=H_1-y$ 、 | 濃度に関して： $D_{xx}(\partial C/\partial x)=0$ 、 |
| BC境界——水圧に関して： $-k(\partial h/\partial y + \rho/\rho_f)=0$ 、 | 濃度に関して： $D_{yy}(\partial C/\partial y)=0$ 、 |
| CD境界——水圧に関して： $h=H_r-y$ (定常状態の場合)、 | $\partial h/\partial x=\text{const}$ (非定常状態の場合)、 |
| | 濃度に関して： $D_{xx}(\partial C/\partial x)=0$ 、 |
| DE境界——水圧に関して： $-k(\partial h/\partial y + \rho/\rho_f)=0$ 、 | 濃度に関して： $D_{yy}(\partial C/\partial y)=0$ 、 |
| EF境界——水圧に関して： $h=10.0$ 、 | 濃度に関して： $C=C_0 \cdot \exp(-K/Ux')$ 、 |
| FA境界——水圧に関して： $-k(\partial h/\partial y + \rho/\rho_f)=0$ 、 | 濃度に関して： $D_{yy}(\partial C/\partial y)=0$ |

4. 数値計算結果とその考察

4.1 定常地下水流での浸透

まず、地下水面が時間的に変化しない定常状態で、どのようにトリクロロエチレンが輸送されて行くかを見るために境界条件に水位差をつけて、高い場合(下部境界上から測った $H_1=7.6\text{m}$, $H_r=5.95\text{m}$)と低い場合($H_1=7.1\text{m}$, $H_r=5.45\text{m}$)について数値計算を行った。図-3、図-4に浸透開始からある時間経過した後の等濃度線と流速ベクトルを示している。流速ベクトル図から地下水面が高い場合には、河床下の砂質土層中での水分量が大きく不飽和透水係数が大きいことから河床からの浸透流量が多く、地下水流に下向きの影響が見られる。一方、地下水面が低い場合には、地下水流に影響を与えるほど河床からの浸透流量は多くない。このように地下水面の高低によって河床からの浸透流量が変化することで、河床から浸透したトリクロロエチレンの地下水系での拡がりにも違いが生じている。すなわち地下水面が高い場合には、下流域に高い濃度で飽和帯深部にまで拡がり、一方地下水面が低い場合には、比較的

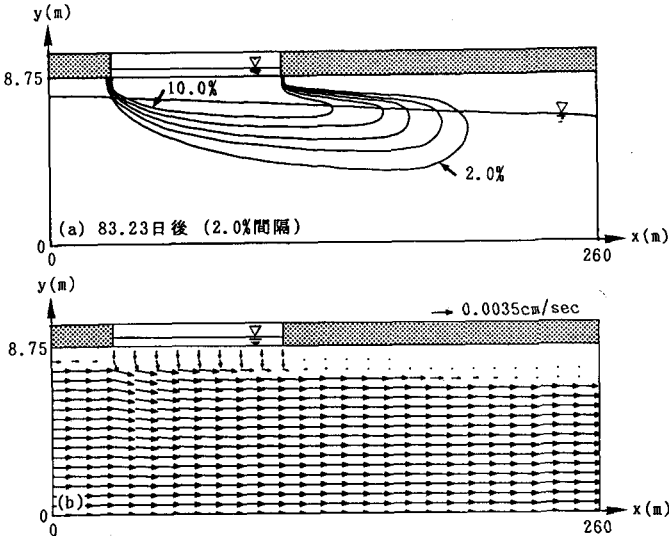


図-3 地下水面が定常で高い場合の等濃度線と流速ベクトル

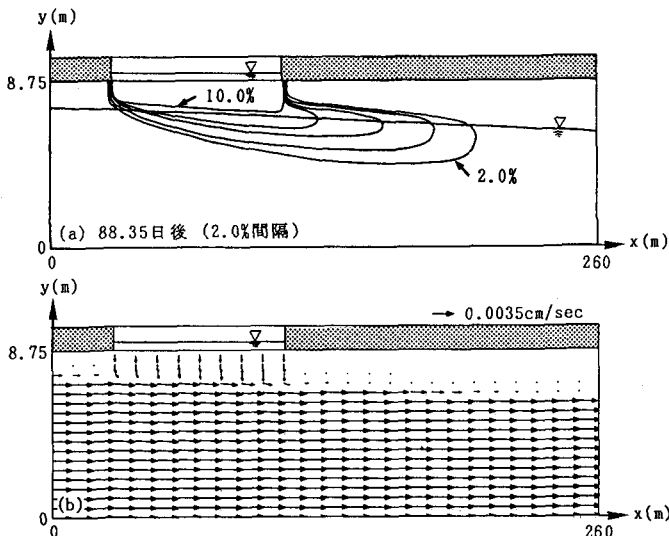


図-4 地下水面が定常で低い場合の等濃度線と流速ベクトル

低い濃度で地下水面近傍にだけ拡がる。

4・2 地下水面が変動する状態での浸透

次に、地下水面が時間的に変化する地下水系でのトリクロロエチレンの輸送を検討する。ここでは、地下水面の上昇と低下の2パターンを考えた。今回は、地下水面が一定($H_1=7.6\text{m}$, $H_r=5.95\text{m}$)のままで、ある程度トリクロロエチレンを地下水系へ浸透させた状態から、上流端の境界条件を50.0cmだけ下げ、その後は一定の水位を保つ場合と、逆に地下水面を一定($H_1=7.1\text{m}$, $H_r=5.45\text{m}$)のまま、ある程度トリクロロエチレンを地下水系へ浸透させた状態から、上流端の境界条件を50.0cmだけ上げ、その後は一定の水位を保つ場合について数値計算を行った。上流端の境界条件を変化させる割合は、ほぼ15日で50cm変化するように与えた。

(a) 地下水面が低下する場合

図-5には、地下水面が低下していく過程のトリクロロエチレン濃度の時間変化とある時間での流速ベクトルを示している。この場合には、上流側の地下水面が低下していくにつれて地下水の流れも上流側から変化し、下向きの成分が卓越してきてトリクロロエチレンは地下水面が低下していくにもかかわらず地下水面深くまで輸送され、下流域には高濃度で飽和帯深くまで拡がっているの

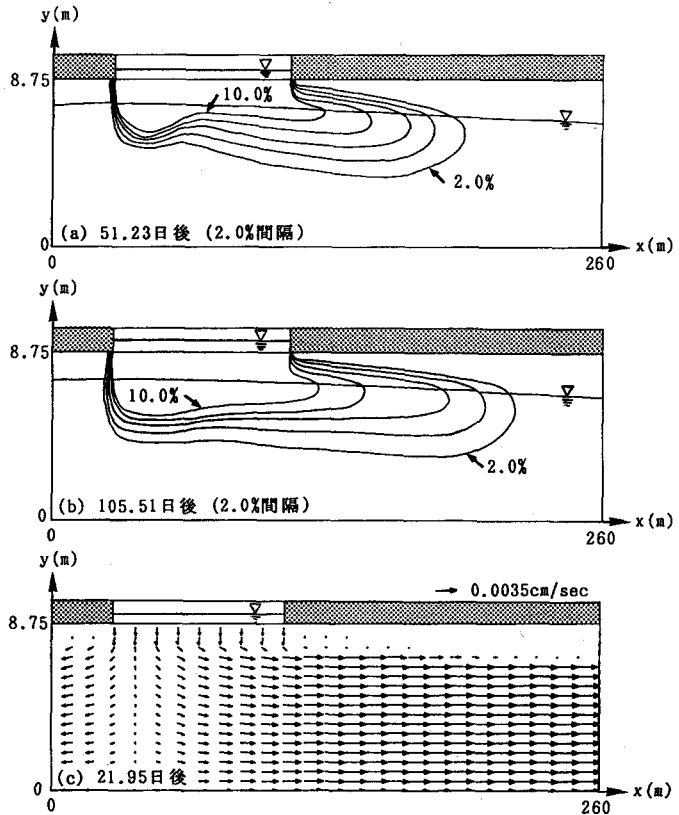


図-5 地下水面低下時の等濃度線と流速ベクトル

(b) 地下水面が上昇する場合

図-6には、地下水面が上昇していく過程のトリクロロエチレン濃度の時間変化とある時間での流速ベクトルを示している。この場合には上流側の地下水面が上昇していくにつれて、地下水流れに上向き成分が卓越するようになり、トリクロロエチレンの飽和帯への浸透が妨げられてくる。そのため上流側から飽和帯中のトリクロロエチレン濃度は薄くなり、下流域には比較的低い濃度で地下水

面近傍にしか拡がっていかないことがわかる。

図-7には、地下水面が変化している場合の B-4孔での各時間毎の鉛直濃度分布を示している。この図からトリクロロエチレンの濃度変化は最高濃度のところでは約5%から11%の間にある。この変化の割合は、現地での実測結果(約2%から10%)と大きく違ってはいないことから、現地においてもほぼこのような現象が起きている可能性がある。

5. むすび

本研究では、水に溶解したトリクロロエチレンが自然河床区間から地下水系へ浸透する過程を、主に地下水位が変動する場合について数値計算を行い検討した。本研究で得られた結果は以下の通りである。

(1)地下水面が高い定常な流れの場合でのトリクロロエチレンの地下水系への拡がりは飽和帯深部まで高濃度で及ぶ、(2)一方、地下水面が低い状態から上昇する過程での拡がりは、上向きに卓越した流速成分によって飽和帯への浸透が妨げられる傾向にあり、低い濃度で地下水面近傍に限られる。また、下方からのまだ汚染されていない地下水の供給による希釈も濃度低下に寄与する。(3)地下水面が低い定常な流れでのトリクロロエチレンの地下水系への拡がりは比較的低い濃度で地下水面近傍に限られる。(4)地下水面が高い状態から低下する過程での拡がりは、地下水面の低下に伴う下向きに卓越した流速成分によって飽和帯の深部まで高濃度で及ぶ。(5)このように地下水面が変動することによって、トリクロロエチレンは地下水面が一定の定常な流れの場合とは全く異なった挙動をすることがわかった。

以上のことから、自然河床区間から地下水系へのトリクロロエチレンなどの汚染物質の浸透現象を把握するには地下水面の変動を考慮する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、日本生命財団研究助成「地下水取水にともなう河川汚濁物質の地下水系への輸送過程に関する基礎的研究（研究代表者神野健二）の補助のもとに行われた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)村岡清爾：最近の地下水汚染について、土木学会論文集、第405号/II-1、pp.24-41、1989
- 2)キンツェルパッハW. [上田年比古 監訳]：『パソコンによる地下水解析』、森北出版、pp.39-51、1990
- 3)神野健二・上田年比古：粒子移動法による移流分散方程式の数値解法の検討、土木学会論文報告集、第271号、pp.45-53、1978
- 4)van Genuchten: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society, 44, pp.893-895,1980
- 5)Yechezkel Mualem: A Catalogue of Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, 1976

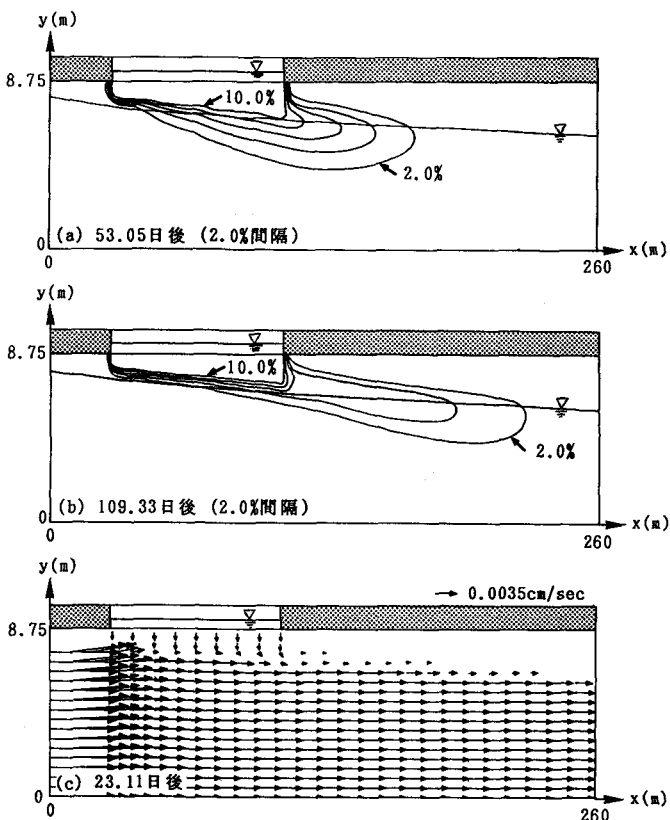


図-6 地下水面上昇時の等濃度線と流速ベクトル

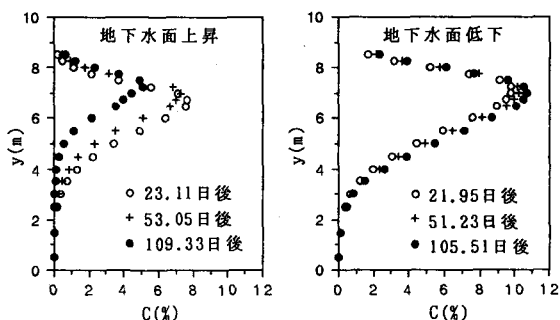


図-7 観測孔 B-4における地下水面変動時のトリクロロエチレンの鉛直濃度分布