河川を考慮した地域地下水汚染の解析

古市 徹*・林田 貴範**・眞柄 泰基*

Numerical Analysis of Regional Groundwater Pollution Considering the Effect of River

Tohru FURUICHI*・Takanori HAYASHIDA**
and Yasumoto MAGARA*

Abstract

The purpose of this study is to analyze numerically the regional groundwater pollution by TCE (Trichloroethylene) and PCE (Tetrachloroethylene) in J city, Japan. Firstly, we examine the field data measured since 1986 and display the distribution of groundwater level and concentration of TCE and PCE by a computer. Based on these data, we can guess the interrelation between the water balance of groundwater and the diffusion of pollutant in this region.

Secondly, we conduct the sensitivity analysis and the inverse estimation considering the water balance and the hydraulic conductivity distribution.

Finally, we analyze the groundwater pollution and predict the amount of mass transfer into the river from groundwater in this region, using the LOD-CFEM (Locally One Dimensional-Collocation Finite Element Method).

1. はじめに

本研究では、J市X区のトリクロロエチレン（以下TCEと呼ぶ）、テトラクロロエチレン（以下PCEと呼ぶ）による汚染事例を対象に現地調査及び資料の収集整理を行い、地下水流れ場、汚染状況の現況

特性を把握し、それらを踏まえた上で流れ場、濃度場各々について数値モデルを構築し汚染機構の解明を試みた。モデル化においては、まず対象領域内で降雨、河川流出量、領域内揚水量などの地下水の主要水収支項目を考慮した流れ場のモデリングを行い、河川流出量、領域内揚水量、透水係数に関する感度解析、逆解析を行った。次に、LOD-CFEM (Locally One Dimensional-Collocation Finite Element Method) による濃度場の解析をして、汚染ブ

* 国立公衆衛生院、衛生工学部

** バシフィックコンサルタンツ(株)

リユームの拡散傾向を検討すると共に、領域内主要河川への汚染物質の流出量の予測評価を数値シミュレーションに基づいて試みた。

2. 解析対象領域について

図-1 に解析対象領域を示す。領域周辺は、周囲を I 連峰、E 山地等に囲まれた盆地で住宅地が密集している。領域内においては Z 川を含め、T 川、B 川、J 川等の 4 本の通過河川があり、また Z 川を境に、領域西側に主として洪積段丘、沖積段丘、氾濫平野等が、東側に緩扇状地が認められ、地形的に複雑な様相を呈している。また地質構成は、既往のボーリング記録により、領域全体にわたり砂礫層と粘土層から構成される互層状態となっている。地下水の流れについてはその流れが地形の傾斜に対応すると仮定するならば、北東から南西方向および北西から南東方向の 2 方向の流れが予測され、それらが領域下流部に流下すると推察される。

3. 現地調査

領域内にて1986年から表-1 に示すような地下水位、水質（TCE、PCE 等）調査を行った。実測地下

水位分布（図-2、図-3）より、全体的な傾向として浅層地下水が北東から南西および北西から南東に流れており、これらが中央部に集まり南下していると考えられる。また調査範囲内において約1.0m 程度の地下水位の経年的な変動が認められるが、当市の環境月報より 2 月上旬における日平均降水量小計が1988年で35mm、1989年で435mmであること、対象領域の地質が沖積砂礫層であることにより降雨による一時的な地下水位上昇現象と推察され、従って経年的な地下水位変動を当領域内では考慮しないこととした。

表-1 現地調査
Table 1 Field Investigation

No.	調査年月	調査点数	PCE	TCE	GW	備考
1	86.12	57	図-7	図-8	*	FP
2	87.11 -88.01	11	図-5	図-6	*	水質測定
3	88.02	18	*	*	図-2	
4	89.02	13	*	*	図-3	

（図形出力には NCAR-G を使用）

図-1 対象領域概要
Fig. 1 Investigation Region

図-2 実測地下水位分布
Fig. 2 Groundwater Level Contour Map for Analysis surveyed in Feb.1988

図-3 実測地下水位分布 (1989.02)

Fig. 3 Groundwater Level Contour Map surveyed in Feb. 1989

地下水の河川との関連でみると(表-2参照)、領域上流部でZ川、T川、B川の河床高が周辺地下水位より高く、下流部では逆に低いことが確認された(対象河川の改修計画縦断面図等)。これらの位置関係より領域上流部で河川からの地下水かん養が(Z川上流部約600m、T川約400m、B川約500m)、下流部では地下水の河川への流出が(Z川下流部約700m区間)発生しているものと推察される。また本市が行った地下水利用実態調査表より、領域内8地点で地下水揚水が確認された(日平均総揚水量=811m³/day、図-4参照)。

図-5、図-6はPCE、TCEの地下水中の濃度分布を示したものであるが、これより、領域中央部付近に高濃度地点Aが認められ、これらを中心に北東から南西の方向に広がる傾向が認められる(図-2、図-3から推測される流れと対応する)。

図-7、図-8はPCE、TCEのフィンガープリント(以下FPと呼ぶ)による測定値をもとに作成したもので、前述の高濃度地点Aの他に、複数の高濃度地点B、Cが認められた。地下水濃度とFPによる測定値との関係は必ずしも明確ではないが、FPによる測定値が、少なくとも土壌及び地下水中の汚染物質の存在を示しているものとするならば、

表-2 領域内通過河川

Table 2 Condition of River running through this Region

	川床高	周辺地下水位	備考
Z川上流部	42.7	> 33.8	河川かん養
	41.4	> 34.0	〃
	35.7	> 31.5	〃
T川	45.0	> 34.7	〃
B川	45.4	> 34.7	〃
Z川下流部	29.7	< 30.0	河川流出
	27.0	< 29.0	〃

(EL-m)

(EL-m)

図-4 揚水量調査地点及び地下水位観測地点

Fig. 4 Location of Groundwater Pumping and Wells of surveying

当領域内において汚染源が存在する可能性があると言える。これらをもとに現地踏査により汚染源の調査を行った結果、高濃度地点A、B付近では汚染源と考えられる、PCE、TCEを使用している事業所の存在が確認できた。また高濃度地点Aについては、その位置の経時的な移動も調査範囲内では認められず、濃度場計算においては地点A、Bを連続供給を行う汚染源として、解析を行った。

4. モデル化

4.1 地下水流れ場のモデル化

(1)モデル化の仮定

上記の実測結果をもとに、浅層地下水の流れ場に

图-5 实测 PCE 浓度分布
Fig. 5 Contour Map for PCE Concentration (surveyed)

图-7 PCE 浓度分布 (FP)
Fig. 7 Contour Map for PCE Concentration (surveyed, using FP)

图-6 实测 TCE 浓度分布
Fig. 6 Contour Map for TCE Concentration (surveyed)

图-8 TCE 浓度分布 (FP)
Fig. 8 Contour Map for TCE Concentration (surveyed, using FP)

対し有限要素法によるモデル化を行い、流れ場の再現を試みた。現況再現においては、実測濃度分布結果が比較的良好に整理されている1988年の調査結果（表-1中のNo.3の図-2）を対象としている。モデル化では以下の仮定を設けた。

- ①単一不圧帯水層から成り、定常的なダルシー流れで、平面二次元的に解析が可能である。
- ②領域内におけるZ川上流部、T川、B川からは地下水かん養が、Z川下流部で流出があり、かん養量と流出量のオーダーは等しい。
- ③領域内で地下水流れに影響を与えると考えられる、8地点での地下水揚水量を考慮し、それら揚水地点近傍における地下水の鉛直方向流動は無視できるとした。
- ④土地利用形態に基づいて降雨浸透、蒸発散を計算する。
- ⑤透水係数の実測値および地質資料を参考に、領域内における透水係数分布を2つのブロックに分ける。

(2)基礎指揮と計算条件

流れ場の基礎方程式を以下に示す。

① ダルシーの式

$$q = -K \cdot \text{grad } h$$

② 連続の式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

ここに、 h ：地下水頭 [L]、 K ：透水係数 [LT⁻¹] である。

これらの仮定を踏まえ、対象領域の設定を行った。設定にあたっては現状の汚染の拡がりの程度、並びに地下水流動傾向を考慮した。また、地下水の流下方向と予測される南西側ではJ川の一部を水位規定の境界条件として取り込むようにした。透水係数は既往の工事記録をもとにブロックごとに設定した。また河川かん養量は実測値がないので既往の検討手法より算出した（例えば土木工学ハンドブック第8編参照）。河川流出量についても実測値がないため、仮定②をもとに設定した。降雨、蒸発散量は領域内の市街化状況、排水整備状況、植生等を踏まえ設定した。揚水量については当市の地下水利用実態調査記録をもとに、浅層からの揚水量を整理した。ここで地下水流れ場解析コードとしては汎用プログラム UNISSF（地下水変動解析プログラム、CRC(株)）

を用いた（節点数=311、要素数=275、四角形要素使用、メッシュ間隔=100m）。

4.2.濃度場のモデル化

(1)基礎式と計算条件

濃度場の計算は、次の平面二次元の移流拡散方程式(1)を有限要素法で定式化することにより行った。

$$\begin{aligned} & (\theta + \rho Kd) \frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\theta D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + \right. \\ & \left. \theta D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + v_x \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\theta D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} \right. \\ & \left. + \theta D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + v_y \frac{\partial c}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 c ：溶質物質の濃度 [ML⁻³]、 Kd ：分配係数（吸着率）[M⁻¹L³]、 θ ：体積含水率、 ρ ：単位体積あたりの土壌重量 [ML⁻³]、 v_x 、 v_y ：ダルシー流速 [LT⁻¹]、 D_{xx} 、 D_{xy} 、 D_{yx} 、 D_{yy} ：分散係数 [L²T⁻¹] である。

ここで定式化はLOD-CFEM（Locally One Dimensional-Collocation Finite Element Method：井上ら、1984）を用いた。本手法は空間多次元の変常偏微分方程式を精度よく効率的に数値計算するのに優れている。具体的には、まず二次元移流拡散方程式をLOD法により以下のように一次元に分割する。

$$\begin{aligned} \text{x 方向：} & (\theta + \rho Kd) \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) * - v_x \frac{\partial c}{\partial x} \\ \text{y 方向：} & (\theta + \rho Kd) \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\theta D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\theta D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) * - v_y \frac{\partial c}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに式中に*印の項 $\frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} \right)$ 、 $\frac{\partial}{\partial y} \left(\theta D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} \right)$ は外力項として扱う。

次に分割後、それらをCFEMで離散化する手法で

ある。ここで、濃度場における移流（地下水流れ）項は、前節の地下水流れ場の計算結果をもとに、節点毎の成分を算出し直し、計算された。

(2)数値モデルの設定

数値モデルとしては、濃度、地下水実測コンターより表-3に示す計算ケースを設定し、汚染ブリュームの拡散傾向を検討すると共に、領域内主要河川Z川への汚染物質流出量の定量評価を試みた。ここで、汚染源は現地調査結果を踏まえて複数連続源と仮定した。また汚染物質の流出箇所としては、領域内揚水箇所（484.5m³/day：逆推定後における浅層からの地下水揚水総量）、Z川河川流出区間（700m, 7280m³/day）が考えられるが、ここでは水収支項目のオーダー比較からZ川下流部流出区間を流出対象とし、内部境界条件処理を行った。また表-3中備考欄の記号Pe, F, Gは各々ペクレ数、クラーン数、拡散数と呼ばれ、次式により定義される（平岡ら、1982年）。

$$\begin{aligned} Pe &= U \cdot \Delta L / D \\ F &= U \cdot \Delta t / \Delta L \\ G &= D \cdot \Delta t / \Delta L^2 \end{aligned} \quad (4)$$

ここにU：代表流速、ΔL：代表長さ（メッシュ間隔=100m）、Δt：計算時間間隔、D：拡散係数である。ここでPe数等の無次元数は、対象領域内で平均的に決めている。予測計算においては、数値モデルの安定性を保持するため、以下の安定条件下でΔL、Δtの設定を行った。

表-3 濃度場計算ケース

Table 3 Cinditions for the Numerical Simulation of Concentration

case	汚染源数	分散能 時間ビッチ	備 考
1	1 (A)	$\alpha_L=100m$ $\Delta t=60日$	Pe=1.0, F=0.06 G=0.06 D=10m ² /日
2	1 (B)	$\alpha_T=20m$	
3	2 (A,B)		
4	1 (A)	$\alpha_L=50m$ $\Delta t=60日$	Pe=2.0, F=0.06 G=0.03 D=5m ² /日
5	1 (B)	$\alpha_T=10m$	
6	2 (A,B)		

$$Pe = U \cdot \Delta L / D, F = U \cdot \Delta t / \Delta L, G = D \cdot \Delta t / \Delta L^2$$

で、ここにΔL=100m, Δt=60日, U=0.1m/日である。

$$D_{xx} = (\alpha_L \cdot U_{xx}^2 + \alpha_T \cdot U_{yy}^2) / U + Dd$$

$$D_{yy} = (\alpha_L \cdot U_{yy}^2 + \alpha_T \cdot U_{xx}^2) / U + Dd$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) \cdot U_{xx} \cdot U_{yy} / U$$

$$\begin{aligned} 0 &< Pe < 10.0 \\ 0 &< F < 1.0 \\ 0.01 &< G < 1.0 \end{aligned} \quad (5)$$

また拡散係数テンソルは次式より与えられるものとする（Bear、1972）。

$$D_{xx} = (\alpha_L \cdot U_{xx}^2 + \alpha_T \cdot U_{yy}^2) / U + Dd$$

$$D_{yy} = (\alpha_L \cdot U_{yy}^2 + \alpha_T \cdot U_{xx}^2) / U + Dd \quad (6)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) \cdot U_{xx} \cdot U_{yy} / U$$

ここにU_{xx}, U_{yy}：間隙流速Uの各々x, y成分、α_L：流れの方向の分散能、α_T：流れに法線方向の分散能、Dd：間隙水中の溶質の分子拡散係数である。

また内部境界条件のモデル化は、仮想問題（矩形領域の二次元一様流れにおける移流拡散問題）を用いて検証を行った。詳細は省くが、物質流出のモデル化を行った場合とそうでない場合の濃度場出力結果での解の安定性等をチェックし、モデル化の妥当性評価を試みた。

5. 解析結果

5.1.地下水流れ場の解析結果

図-9は逆推定を行う前の状態で地下水流れ場を

図-9 地下水位計算出力

Fig. 9 Contour Map for Groundwater Level (computed)

再現したものであるが、同図より実測地下水位分布との間に局所的な差異があるものの、領域北東、北西から南東に向かう地下水流れが再現されており全体的には良好な一致が認められる。

次に、透水係数 ($K1=6.3\text{m/day}$, $K2=2.4\text{m/day}$)、河川流出量 R ($R1=800.0\text{m}^3/\text{day}$, $R2=100.0\text{m}^3/\text{day}$)、領域内揚水量 P に関して感度解析を踏まえたうえで、その結果をもとに逆解析を行うことにした。ここで領域内揚水量 P については地下水利用実態調査表において揚水深度、揚水規模が比較的大である図-4のNo.5、No.6の2揚水地点 ($P5=300$, $P6=132\text{m}^3/\text{day}$) を対象としている。まず感度解析として、 K 、 R 、 P の各一次設定値に対し、各々のパラメーターの値を個別に変化させた場合における各々の流れ場を計算し、領域内に存在する8観測地点(図-4参照)の地下水位観測値と計算値との残差平方和 RSQ を算出した。この RSQ の変化、並びに流れ場の出力結果を比較することにより、河川流出量 R が、揚水量 P および透水係数 K よりコンター形状の変化に与える影響が大きいこと

が認められた。

これらのことを踏まえて K 、 R 、 P の逆推定を行った。推定は非線形最小二乗法に基づいている。また推定の良否判定に用いる評価基準は、領域内に存在する8観測地点の地下水位観測値を採用した。推定手順としてまず K 、 R 、 P の各々に対し、単独に逆推定を試み、次に各変数を組み合わせたものに対し、各々逆推定を試みた。図-10は、逆推定に伴う RSQ の変化を整理したものである。単独推定の場合、 R に関して比較的大きい RSQ の低減があることがわかる。また全体的に見て、逆推定のパラメーター数を増やすにつれ、 RSQ が低減していくことが認められる。図-11は、逆推定に伴う流れ場の収支残余 RWB の変化を整理したものである。残差平方和 RSQ のように、推定パラメーター数の増大につれ、 RWB が全体的に低減するような傾向は認められない。これは、当検討で用いた逆推定が、地下水位の制約条件のみに関して設定されていることによると考えられる。したがって収支を重視した地下水流れ場の逆推定を行う場合、地下水位だけでな

図-10 逆推定に伴う残差平方和 RSQ

Fig.10 Relation between the RSQ and the Number of unknown Parameters

図-11 逆推定に伴う領域内水収支

Fig.11 Relation between the RWB and the Number of unknown Parameters

く、地下水位と水収支を同時に満足する制約条件を設定することが必要であることがわかる。

当検討においては、流れ場の水収支が検討範囲内で最も改良された (R, P) の逆推定結果をもとに、濃度場の計算に移行した。図-12は、逆推定に伴う計算地下水位の変化を示したものである。

全ケースともに逆推定を行うにつれ、その残差平方和 $\sum(H_o - H_c)^2$ は次第に減少してゆき、今回の結果ではその値が $8.7E+01$ から $4.9E+01m^2$ と減少する。ここで、 H_o : 地下水位観測値、 H_c : 地下水位計算値である。浅層の平均帯水層厚が約30mであることを考慮すれば、 $4.9E+01m^2$ の評価誤差は評価地点当り約1mで、これは評価基準の水位の約3% ($(\sum(H_o - H_c)^2)^{0.5}/H_o$) に相当し、解析範囲内では良好な結果と言える。

5.2.濃度場の解析結果

図-13～図-15は case 3 におけるそれぞれ3年

図-12 逆推定に伴うコンター形状変化

Fig.12 Comparison of Groundwater Level with Inverse Estimation and Others

後、9年後、15年後の濃度コンターを出力したものである。地下水流れ場のベクトル方向に沿って汚染プルームが移動し、ある期間を経過後、Z川への流出部付近で流出に伴う濃度コンターの低下が認め

図-13 case 3 (3年後)

Fig.13 Results of Simulation Case 3 (T=3 year)

図-15 case 3 (15年後)

Fig.15 Results of Simulation Case 3 (T=15 year)

図-14 case 3 (9年後)

Fig.14 Results of Simulation Case 3 (T=9 year)

図-16 case 6 (15年後)

Fig.16 Results of Simulation Case 6 (T=15 year)

られる。この傾向は全ケースにおいて確認された。
また図-16は case 6 における15年後の計算結果を
出力したものである。同ケースにおいても拡散のス
ピードは早い、同様な汚染パターンが認められる。

図-17は各ケースごとの領域内主要河川Z川への
汚染物質流出率RRを整理したもので、RRは次式
より算出した。

図-17 河川流出率

Fig.17 The Time Variation of Rate of mass releasing into the River from Groundwater

$$RR(\%) = 100 \cdot Ha_{out} / Ha_{in} \quad (7)$$

ここに Ha_{out} : 累積河川流出総量で、地下水の河川流出区間における汚染物質流出総量、 Ha_{in} : 累積汚染物質投入量で、領域内への汚染源からの汚染物質投入量である。ここで計算期間は15年としている。図-17より、ある期間を経過後、経時的に、また分散能（拡散係数）が増加するにつれRRが増加することが認められる。case 3、6でみれば、15年経過時においてはRRが各々3.4、2.8%となり、漏出後、同時点において汚染物質の大部分は領域内帯水層中に残存すると言える。

6. おわりに

本研究では、J市X区の汚染事例に対し現地調査し、それらの結果をもとに地下水流れ場、濃度場について数理モデルを構築し、河川を考慮した汚染機構の解明、影響予測について検討した。本研究より得られた知見を以下に述べる。

- (1)対象領域における現地調査結果を踏まえて、地下水流れ場を把握するための地下水位コンターを作成した。その時、領域内における降雨、揚水、河川流出などの各水収支項目を整理することにより、流動特性の概略が把握できた。濃度場については、測定値からTCE, PCEの濃度コンターを作成し、使用実態等の現地調査結果と併せた汚染源位置の絞り込みが行えた。

- (2)現地調査結果、既往の検討資料をもとに地下水流れ場の数理モデルを構築し流れ場を再現すると同時に、透水係数、河川流出量、領域内揚水量に対し感度解析、逆解析を行った。感度解析結果としては検討範囲内で河川流出量が領域内揚水量及び透水係数より流れ場のコンター形状の変化に与える影響が大きいことが認められた。また逆解析により、領域全体における水収支のバランスが改良され、モデルの信頼性を合理的に向上させることが出来た。

さらに、水収支を向上させるためには、地下水位と同時に水収支に関する制約条件を、逆推定に設定する必要性が示された。

- (3)LOD-CFEMにより濃度場の数理モデルを構築し、現況汚染状況の再現を試み、同手法の有効性を確認することが出来た。また同モデルにより、地下水から領域内主要河川Z川への汚染物質の流出について予測を試みた結果、15年経過時点においては、汚染物質の大部分は領域帯水層中に残存することが予測された。

最後に、当汚染事例に関し御討議頂いた大阪大学 村岡浩爾博士、国立公害研究所中杉修身博士、筑波大学田瀬則雄博士、並びにUNISSF利用で御援助頂いたCRC(株)田中豊氏、今井紀和氏に対し深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 金子良 (1973) : 農業水文学、共立出版
- 土木学会編 (1979) : 土木工学ハンドブック、技報堂
- 平岡正勝、古市徹、田中宏明 (1982) : 移流拡散方程式の数値解の安定性解析、土木学会論文報告集、No.319, pp77~85
- 井上頼輝、古市徹、片山秀樹 (1984) : LOD-CFEMを適用した飽和-不飽和地下水層における物質移動シミュレーション、京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム講演論文集、6, pp248~255
- CRC(株) : UNISSF-1, UNISSF-2の利用者マニュアル
- Bear, J. (1972) Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier.

(受付:1989年9月2日、受理:1990年4月2日)