

有機塩素化合物による地下水汚染の時間的・空間的拡がり

HYDRAULIC STUDY ON GROUNDWATER CONTAMINATION BY TOXIC ORGANIC CHEMICALS

中辻啓二*

By Keiji NAKATSUJI

Based on systematic field observations of trichloroethylene (TCE) concentration at 27 wells in Taishi Town, Hyogo Prefecture during the period from January 1984 to August 1985, convection and dispersion processes of the groundwater contamination by toxic organic chemicals are examined hydraulically. Variations in the TCE-concentration are shown to be classified into two characteristic patterns; monotonically decreasing one with time and cyclically changing one with the seasonal variation. Calculations of groundwater flows by using simple potential theories show that the observed variations in TCE-concentration might be dependent of the variations in the surface level of unconfined groundwater. Furthermore, the convection velocity of TCE-concentration is found to be small as to be 5×10 m/day in summer and 10^0 m/day in winter, which approximately agrees with field observation results.

Keywords: groundwater contamination, toxic organic chemicals, dispersion, field observations, well

1. まえがき

昭和57年に環境庁が全国の15都市で地下水の分析調査をした結果、有機塩素化合物等による地下水汚染が全国的に拡がっており、しかも、従来汚染されにくいと考えられていた水深30m以上の深井戸においても汚染が及んでいることがわかった。半導体をはじめとした先端技術産業の発達とともに、その有機溶剤による地下水汚染がアメリカ合衆国はじめ諸外国で指摘され始めたのは1970年代に入ってからのことである。今後、技術の進歩に伴い新たな化学物質による環境汚染の潜在的危険性はますます増大するものと考えられる。

有機塩素化合物の多くは比重が1.4~1.6と大きく、粘性は水より小さい。また、水への溶解度は小さく、原液と水とを混ぜ合わせると粉々に砕け完全に分離状態になる。しかし、難溶解性物質といっても、徐々に地下水中に溶解してゆくことは可能である。それは水質の暫定基準値をかなり上回った高濃度の汚染物質が井戸水中から観測されていることからわかる。最近、村岡・平田¹⁾が有機塩素化合物の地下水中における挙動特性を水理学的に検討しつつあるが、有機塩素化合物がどのような経

路で地下水に侵入するか、またどのような機構で地下水を移流・拡散するかは、現在のところ全くわかっていない。そのために、根本的な汚染源対策をとることができないのが実情である。

地下水汚染対策を実施するためには、汚染の実態を把握することが肝要であることはいうまでもない。これまで国や自治体が有機塩素化合物による地下水汚染調査を実施しているが、その多くは汚染の発見された井戸や有機塩素化合物を使用している事業所の周辺にある既存の井戸に対する水質調査である。地形・地質や水理・水文の調査は一般に並行して実施されておらず、汚染機構の解明に不可欠な地下水の運動や水収支に関連する情報が欠如しているのが実情である。そのため、地下水汚染を一般水質項目の統計解析から類型別に解釈するにとどまっておき、汚染の全体像を理解するまでに至っていない。

本文では、兵庫県太子町における地下水汚染の事例を対象に、トリクロロエチレンによる地下水汚染の実態一特に、その時間的・空間的拡がり一について水理学的に考察する。この調査も汚染井戸の発見を主目的に実施されたために、井戸内水位や地質等の調査がなされておらず、汚染経路や汚染機構の解明にとって直接的に有効な調査であったとはいえない。しかし、比較的長期にわ

* 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科
(〒565 吹田市山田丘2-1)

たつて定期的な水質調査が実施されていること、また観測井戸の数が27で広範囲に分布していることから、きわめて貴重なデータである。幸い、汚染範囲が鮮明であり、かつ汚染地域を縦断して水源井戸が存在している。簡単な井戸理論によって水源井戸の稼動状況の記録（たとえば、揚水量、井戸内水位等）から自由地下水面の縦断形状を推算することが可能であり、地下水汚染の経時変化を自由地下水面の推移との関連で考察する。

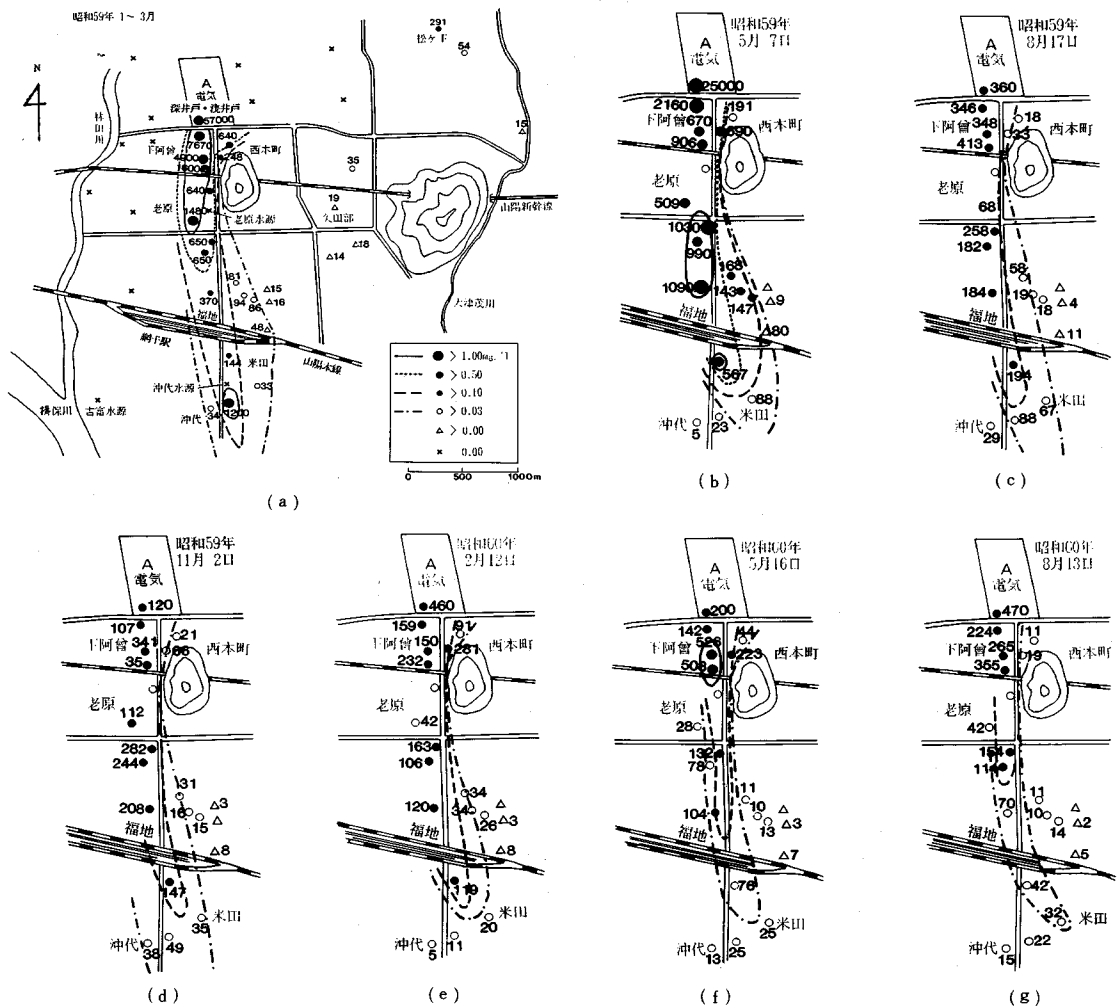
2. 兵庫県太子町における地下水汚染の概要

兵庫県太子町での地下水汚染の発端は、昭和58年12月の水源用地下水調査より、WHOが定めた飲料水の当時の水質暫定基準値（案）0.03 mg/lを超えたトリクロロエチレン（TCE）が水源井戸3か所のうち2か所から検出されたことである。汚染された上水道源はただちに揚水を中止し、上水の供給は停止された（TCEは動

物実験により発癌性物質であることが確認されている）。これに引き続いて実施された一般家庭用井戸の水質調査においても、287の井戸のうち128の井戸水が暫定水質基準値を超えていることがわかった（昭和59年1~3月）。トリクロロエチレンの使用状況調査と地下水調査の結果、汚染源は同町内のA電気（株）工場と想定された。工場付近の土壌調査を行った結果、1 mg/kg以上の汚染が南北に7~8 m、東西9 m、深さ7 mにわたって広がっていた。

汚染された上水道源には恒久対策として、空気曝気装置が設置された。また、汚染源と想定されるA電気（株）では汚染土壌の除去、溶剤の転換、曝気装置の設置等が汚染防止対策として実施された。

地下水汚染の発見後、太子町当局によって汚染地区内の20の井戸ならびに隣接地域の7つの井戸で水質追跡調査が継続して実施されている。



図一 トリクロロエチレン濃度の拡がり分布 ((a))と拡がり分布の経時変化 ((b)~(g)) [単位：ppb]

3. 地下水汚染の拡がり—継続調査の結果

(1) 汚染の拡がりの経時変化

図-1は地下水汚染発見時の調査結果(昭和59年1~3月)および以後3か月ごとの汚染の拡がりの経時変化を示したものである。トリクロロエチレンにより汚染された井戸はA電気(株)工場南側より南方へ約3km強の範囲に及ぶ。0.03 mg/lの等濃度線が300~700mの幅で帯状に拡がっている。下阿曾, 老原水源, 福地, 沖代水源と南に下るに従って, 濃度が低下しているのがよくわかる。汚染地域内に老原と沖代の両水源を含んでいる。吉富水源近くの林田川沿いの井戸ではトリクロロエチレンが全く検出されないことを考え合わせれば, 地下水は南南東に向かう流れであることが推察できる。

図中に1.0, 0.5, 0.1, 0.03 mg/lの等濃度線を描いて, 汚染の拡がりをわかりやすく表示した。その特徴を列記すると, 以下のようである。

a) 昭和59年5月には, 汚染地域の北側で濃度が減少し, 南側で増大している。1.0および0.5 mg/lの等濃度線は南へ進んでいる。1.0 mg/l等濃度線の中心および0.5 mg/l等濃度線の南端の移動距離は3か月で約1200mである。単純に計算すると, 汚染塊の移動速度は約13 m/dayとなる。

b) 昭和59年8月には, 濃度がすべての領域で低下しており, 1.0および0.5 mg/l等濃度線は消滅している。この原因として, A電気(株)工場の汚染防止対策の効果が現われていると考えることができる。A電気(株)工場南側近傍での井戸水濃度は1~3月時の値の1/10以下になっていることから, 発生源対策の直接的な効果が顕著に現われている。また, 0.1および0.03 mg/l等濃度線は南南東に伸張している。このことから, 0.5 mg/l以上の汚染された水塊がこの3か月の間に南側へ移流したとも推察される。そのためには, 移流速度は前述の値より一桁大きい値になる必要がある。

c) 昭和59年11月になると, 汚染地域の南南東への拡がりが大きくなる。A電気(株)工場前から南下する道路の西側と東側とで濃度の値が大きく異なる。この原因として道路の地表面下約5mに下水幹線の暗渠が埋設されている影響が考えられる。仮にそうであるならば, 地下水中の汚染物質は地表面より5m以浅の範囲で移流していることになる。

d) 昭和60年2月には, 濃度の値は全体に低下する傾向にある。0.03 mg/l等濃度線の範囲は収縮している。この傾向は5月, 8月においてもみられ, 0.1 mg/l等濃度線は時間の経過とともに北側へ移る。注目すべき変化は, 西本町の2つの井戸水の濃度が逆に増大することである。この変化は, 5月には下阿曾地区の2か所の井

戸水の水質濃度に0.526, 0.503 mg/lとなって現われる。A電気(株)工場内の浅井戸の濃度は0.2 mg/lであることから, 濃度の増加の原因は他に求めなければならない。しかしながら, 8月になると, 西本町と下阿曾地区の4か所の井戸の濃度は低下し, 浅井戸の濃度は逆に増加している。

(2) トリクロロエチレン濃度の経時変化

図-2は汚染源と考えられるA電気(株)工場内にある2つの井戸(浅井戸と深井戸)のトリクロロエチレン濃度の経時変化を示す。浅井戸の濃度の変化をみると, 2月13日までのトリクロロエチレンからトリクロロエタンへの原料転換対策によって, 濃度は少しずつ低下しはじめる。さらに, 5月7日の汚染土壌の除去により, 濃度は短時間のうちに急激に低下している。取り除かれた1.0 mg/l以上の汚染土壌は前述したように南北7~8m, 東西9m, 深さ7mの範囲に及んでいた。一方, 深井戸の濃度は汚染防止対策にもかかわらず時間の経過とともに一様に増加しており, 昭和59年の1年間で3 mg/lから8 mg/lになっている。深井戸内水面は地表面下40~60mの範囲にある。これに対して, 浅井戸内の水面は地表面下3.5~7.5mの範囲で変動する。したがって, 浅井戸と深井戸とは, 揚水する地下水が異なる。つまり, 7m以深の地中に残存する不溶性で, かつ比重が水より大きいトリクロロエチレンを, 深井戸からの揚水によって漸次汲み上げていることになる。

図-3(a), (b)は図-1の汚染地域を縦断する定点観測井戸ならびにA電気(株)工場周辺の井戸水の水質濃度の経時変化を示す。同図から, 濃度の経時変化は特徴的な2つのパターンに大別できることがわかる。1つは, 時間の経過とともに, 濃度が低下してゆくパターンである。もう1つは, 濃度が季節変化に応じて変動するパターンである。

前者は老原水源より南の観測井戸でみられる変動パターンである。濃度は時間とともに緩やかに遞減する。

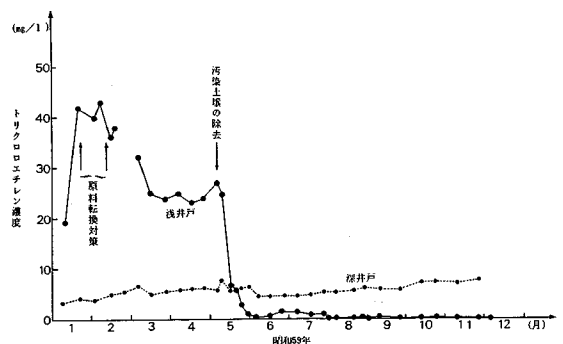
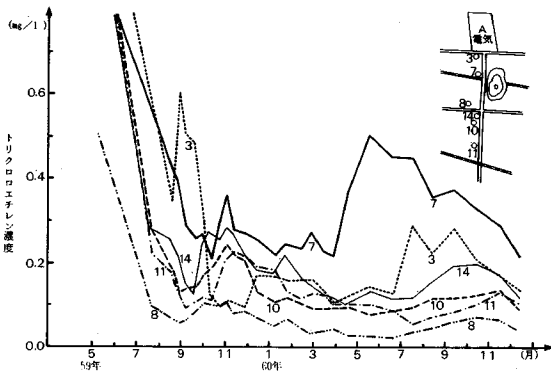
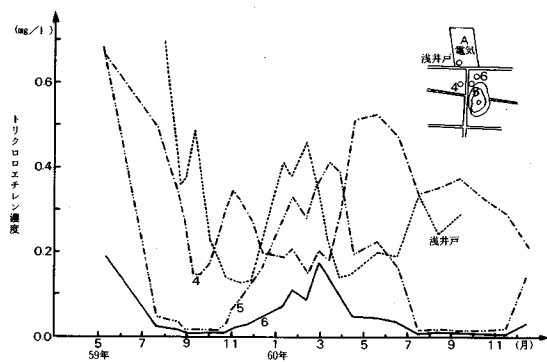


図-2 A電気(株)工場内浅井戸と深井戸のトリクロロエチレン濃度の経時変化



図一3(a) 地下水の流下方向の継続調査井戸のトリクロロエチレン濃度の経時変化



図一3(b) 浅井戸周辺の継続調査井戸のトリクロロエチレン濃度の経時変化

と同時に、いずれの時刻においても、A電気(株)工場からの距離が大きいほど、その観測井戸における濃度の値は小さい。昭和59年10月に観測される小さなピークの出現時間に着目すれば、定点8では10月1日、定点14では10月11日、定点10では11月2日、定点11では11月12日と、南側へ移動するに伴い、時間の遅れが認められる。1か月に3回の観測であるので移流速度を正確に算出できないが、汚染塊の移流速度はおおよそ11 m/dayのオーダーである。

一方、後者の季節変動パターンは工場周辺の観測井戸のトリクロロエチレン濃度の経時変化に認められる。特に、その濃度の値が定点5, 6では夏期(8~10月)には0.02 mg/l以下、3月にはおのおの最大値0.41, 0.18 mg/lとなる特異な変動パターンを呈している。工場内の浅井戸および定点3, 4, 7においても同じ規模の大きな変動が観察される。浅井戸と定点3とは距離にして145 m程度しか離れていないために、濃度値も変動パターンもほとんど同じである。しかし、昭和59年12月から3か月間の変動が異なった傾向を示している。湧水時の揚水の影響が浅井戸における濃度に現われたのか

どうか、興味ある観測事実である。定点3の濃度-時間曲線に現われる2つのピークは約2か月遅れで定点7の曲線にも認められる。両点間の距離が330 mであることから、昭和59年11月の汚染物質の移流速度は平均して6.5 m/dayと推算できる。

4. 太子町周辺の地質特性

(1) 地質の概要

太子町より北では急勾配の丘陵が連なり、中小河川がその間を枝状に深く入り込む谷を形成している。これらの中小河川は下流では土石流および河川の運搬・堆積作用によって生じた扇状地形を形成している。

対象地域の模式柱状図によれば、白亜紀の流紋岩質の溶結凝灰岩が基盤を成し、この上に洪積層、最上位に沖積層が分布している。洪積層も沖積層もいずれも林田川や揖保川により上流から運搬されてきた砂および砂礫、玉石等の土質である。

土質のボーリング調査はA電気(株)工場北約1 kmのバイパス道路、新幹線、東海道本線の建設等に関連して実施されている。そのなかでも、井戸深度の最も大きいのがA電気(株)工場内の深井戸である。その地点の柱状図をみると、地表面から2 mまでが表土、12 mまでは砂利混じり栗石、30 mまでは栗石混じり砂利、52 mまでは砂利、77 mまでは小砂利混じり砂利(赤土を含む)、99 mまでは小砂利混じり荒砂、そして井戸深度101 mまでは砂利混じり青土である。いずれにしても、太子町周辺は透水性のよい地質であるといえる。

(2) 地下水の流動特性

対象地域の地下水の供給源は林田川の表流水の伏流地下水であり、供給全量が林田川である。林田川の旧河川の水脈はA電気(株)工場の両側、老原地区の東側を南下するといわれている。日本国有鉄道の新幹線と東海道本線網干駅のボーリング調査結果に基づけば、南北方向の地表面の勾配は0.0034である。また、沖積層底面の勾配は0.0115である。このことから、地下水の流向は是認できる。さらに、網干駅近辺の地質調査によれば、砂礫層の組成は礫分の混入率が50~80%と過半数を占め、砂分は30~40%であること、また地下水による崩壊現象が観察されることを報告していることから、対象地域は地下水の帯水性に富む地質であると予想できる。

地下水の流動層厚を推定することはなかなか難しい。昭和57年12月にA電気(株)工場内の深井戸で実施された電気探査の結果を図一4に示す。比抵抗は、単位体積の物質が有する抵抗である。その値は地層の構成物質、間隙率、粘土分、地下水水質、含水量などに応じて変化する。関連要因が多数であるため、測定された比抵抗値から特定の地質を確定できるわけではない。一般に未固

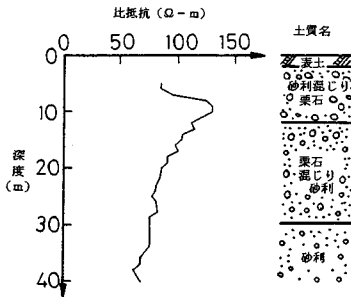


図-4 A電気(株)工場内深井戸の電気探査結果(昭和57年12月)

粘堆積層の比抵抗が大きいことは、溶存物質に乏しい流動しやすい地下水が包蔵される可能性を示す。この観点から同図をみれば、地下水の流動層は地表面から25mの範囲にあると判断できる。比抵抗値の変化は同図の右欄に示す土質の柱状図とあまり対応していないことは注意を要する。

5. 井戸理論による地下水面の推算

概要で述べたように一連の水質調査は汚染井戸の発見あるいは汚染実態の把握を目的として実施された。したがって、地下水の流動を推定するために必要な水位や地質の情報が全くない。幸いにも、A電気(株)工場内浅井戸、老原水源井戸および沖代水源井戸の稼動状況の記録があるので、簡単な井戸理論を用いて地下水の流れを概算してみよう。

(1) 透水係数 k

透水係数は地下水の流動を規定する最も基本的な水理量であり、土砂の空隙率、水の密度や粘性等によってその値が異なる。ここでは、「老原水源ボーリング調査業務報告書、太子町(昭和58年3月)」と「A電気(株)太子工場・段階揚水試験(昭和57年12月)」の揚水試験表に基づいて透水係数を算出する。

a) 老原水源の浅井戸ボーリング調査の例

井底が不透水層に達しない場合で、地下水が井底だけから流入する場合の流量は次式で求まる。

$$Q = 4 \cdot r_0 \cdot \Delta h \cdot k \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 Q :揚水量 (m^3/s)、 $\Delta h = H - h_0$:水位低下量 (m)、 H :不透水層面から自由地下水位までの高さ (m)、 h_0 :不透水層面から井戸内水面までの高さ (m)、 r_0 :井戸半径 (m) である。

5回に分けた段階揚水試験の値を式(1)に代入することにより、透水係数 k が求まる。表-1にその結果を示す。ただし、ボーリング井戸の半径と深度はそれぞれ0.05 mと15 mである。

透水係数は $h_* = 6.26 m$ を境に一桁異なる値を示す。

表-1 透水係数の推算(老原水源の浅井戸)

回	$Q(cm^3/s)$	$h_0(m)$	$\Delta h(m)$	$k(cm/s)$
1	158.5	5.875	0.075	1.02
2	294.4	5.945	0.145	0.98
3	381.9	6.053	0.253	0.73
4	483.6	6.260	0.460	0.51
5	1 642.2	15.000	9.200	0.086

注) h_0 は地表面から井戸内水面までの距離を示す。

上層では $k=0.9 cm/s$ であるのに対し、6.26 m以深では $k=0.086 cm/s$ である。老原から1.5 kmほど南に位置する沖代水源池近くで実施されたボーリング調査(「揖保川流域下水道土質調査報告書、兵庫県姫路工事事務所(昭和59年)」)によれば、粒度組成をもとにした経験式から透水係数を求めた場合、 k の値は $10^{-1} \sim 10^{-2} cm/s$ の間にあり、平均的には $k=0.26 cm/s$ と報告している。

昭和59年4月から60年11月までの老原水源の井戸内水面は最大値でも地表面から4.4 mであることから、 k の値として1~3回の平均値 $0.9 cm/s$ が適当である。

b) A電気(株)の深井戸ボーリング調査の例

井底が不透水層に達し、地下水が側壁から流入する場合の水位低下量 Δh と揚水量 Q の関係は、次式の Theis²⁾ の非平衡式により求まる。

$$\Delta h = \frac{Q}{4 \pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4 \pi T} W(u) \dots \dots \dots (2)$$

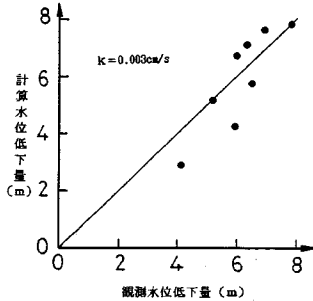
$$u = \frac{r^2 \lambda_e}{4 T t}$$

$$W(u) = -0.5772 - \log_e u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \dots$$

ここに、 r :井戸からの距離 (m)、 λ_e :有効間隙率、 $T = kH$:透水量係数 (m^2/s)、 t :揚水時間 (s) である。

ボーリング調査で砂利混じり青土が100 m深度で検出されたことから、不透水層までの深度を100 mとする。また、粒度組成が礫質土であることから、有効間隙率として $\lambda_e = 0.15$ を採用する。昭和57年12月に12段階に分けた揚水試験が行われ、15分ごとに揚水量を $0.0044 m^3/s$ から $0.0146 m^3/s$ の範囲で揚水された。揚水開始後2時間で定常状態に達し、そのときの揚水量は $0.0146 m^3/s$ 、井戸内水面は地表面から62 mであった。

自由水面の低下量を考慮しながら、任意の透水係数 k に対する $Q-\Delta h$ の関係を計算して、最適な k の値を推定する問題を解く。図-5は水位低下量の計算値と観測値を比較した一例を示したものである。同図よりA電気(株)工場周辺の透水係数として $k=0.003 cm/s$ が求まる。なお、水位復元試験では開始5分後には40 m上昇して、井戸内の水面が地表面から22 mになる結果を得ている。その後、漸次回復して、30分後に水面は10



図—5 透水係数の推定 (A電気(株)内深井戸)

m になっている。また、揚水を停止すると、深井戸内水面は浅井戸内水面にすぐに回復するという報告もある。揚水試験が12月の渇水期であることを考慮すれば、実際の透水係数はもう少し大きな値であろう。

また、ストレーナーは円周方向に14等分された開口部をもつ20段から構成されている。したがって、あらゆる深度からの地下水が渇水中に深井戸内に流入し、揚水されることになる。仮に、A電気(株)工場407号建屋南側で発見された土壌汚染が広範囲に拡がっておれば、深井戸からの揚水中に高濃度のトリクロロエチレンが検出されることになる。図—2にみられた浅井戸と深井戸の水質の経時変化の違いは予想以上の汚染土壌の拡がりを示唆するものと理解できる。

(2) 自由地下水面の時間変化

揚水量 Q と水位低下量 Δh が分れば、式(1)を逆算することにより、揚水時の不透水層面から自由地下水位までの高さ H を求めることができる。A電気(株)工場内浅井戸、老原水源井戸および沖代水源井戸の揚水量-水位の時間変化から自由地下水位を推算し、地盤高の補正から自由地下水面を求める。浅井戸の地盤高を基準にすれば、老原水源までは840mの距離で3.0mの高低差、沖代水源までは2550mで7.2mの高低差である。すなわち、地表面は南に向かって、平均して0.003の勾配で低下している。わずかのボーリング調査の結果から、太子町全域における不透水層面を決定することは難しい。A電気(株)工場内の深井戸の電気探査の結果において、深度25mが大地比抵抗値の急変点となっていることから、地表面から不透水層までの厚さを25mと仮定する。透水係数 k は老原水源と沖代水源の両井戸に対しては老原水源の浅井戸の揚水試験で得た $k=0.9$ cm/s の値を、また深井戸に対しては $k=0.0086$ cm/s の値を用いる。後者については、水位復元試験結果を考慮して、 $k=0.003$ cm/s より少し大きめの値を採用する。なお、沖代水源井戸に対して推定値 $k=0.26$ cm/s を用いた計算、あるいは深井戸に対して老原水源6.26m以深の実測値 $k=0.086$ cm/s を用いた計算では、

表—2 自由地下水面の勾配ならびに地下水の移流速度の推算

年・月	勾配 ($\times 10^{-4}$)	地下水の速度(m/day)		
		$k=0.0086$	$k=0.003$	
59 04	1.04	5.1	1.8	
	05	5.18	9.0	
	06	17.56	30.3	
	07	32.89	56.8	
	08	41.23	71.3	
	09	39.75	68.7	
	10	30.04	51.9	
	11	11.07	19.1	
	12	-1.20	-3.1	
	60 01	1.76	8.8	3.1
		-1.07	-5.3	-1.8
		03	2.29	4.0
05		5.79	10.1	
08		29.92	51.7	
11		5.33	9.2	

自由地下水位が地表面高さを上回る結果となった。

上述の方法により推算した自由地下水面の勾配、ならびに地下水の速度の時間変化を表—2に示す。地下水の実質的な速度はダルシーの法則から有効空隙率 λ_e を考慮して次式のように求まる。

$$V = -\frac{1}{\lambda_e} k \cdot \frac{\Delta h}{\Delta s} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $-\Delta h/\Delta s$ は正確には動水勾配であり、本計算では自由地下水面の勾配となる。透水係数として $k=0.0086$ cm/s と 0.003 cm/s を選んで地下水の速度を推算した結果を同表中に示す。

同表より、自由地下水面の水面勾配は夏期には 10^{-3} のオーダーであることがわかる。これに対して、冬期の渇水期には水面勾配は 10^{-4} のオーダーとなり、その符号は月によって変化する。これは地下水の速度に直接的に反映される。つまり、夏期の地下水は流動的であるのに対し、冬期の地下水は停滞気味である。

等濃度線の経時変化から得られたトリクロロエチレンの移流速度は昭和59年5月で約15 m/dayである。また、濃度の経時変化から得られる移流速度は昭和59年10月で約11 m/day、11月で約6.5 m/dayである。表—2の地下水の速度と比較すれば、太子町周辺でトリクロロエチレンを移流させる地層の透水係数として $k=0.003$ cm/s が妥当であることがわかる。

(3) 自由地下水面とトリクロロエチレン濃度との関連性

継続調査の観測井戸の自由地下水位はA電気(株)工場内浅井戸と老原水源井戸の揚水による水位低下量を重ね合わせるにより求めることができる。式(1)では任意点での自由地下水位を求めることができないので、ここでは井壁および井底から地下水が流入する浅井戸に対する Forchheimer³⁾ の近似式を用いる。

$$Q = k \left[\frac{1.36(h^2 - h_0^2)}{\log_{10} r - \log_{10} r_0} + 4 r_0(h - h_0) \right] \dots\dots\dots (4)$$

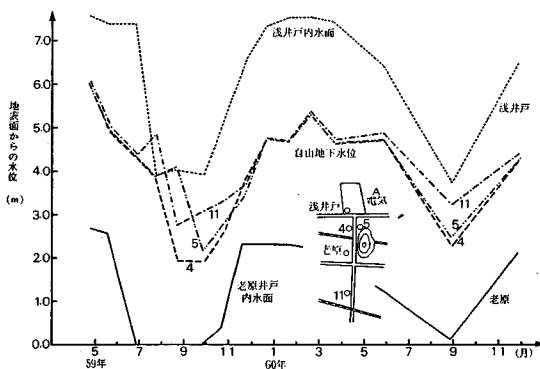
ここに、 h は井戸から r の距離での自由地下水位の高さである。計算にあたっては水面勾配の推算のときと全

同じ諸量を用いた。

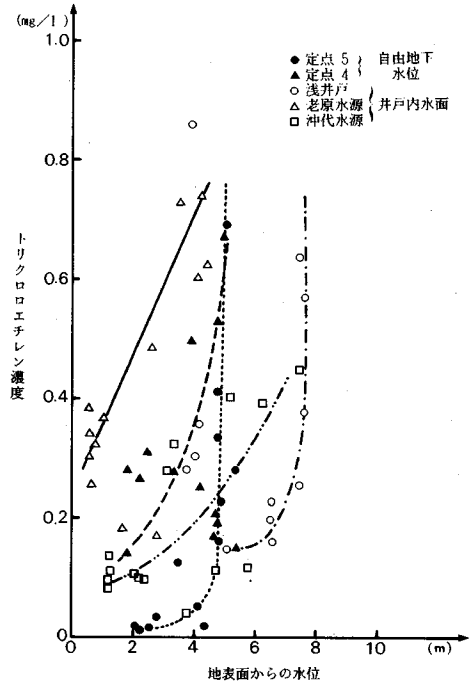
図—6は推算した定点4, 5, 11の自由地下水位の経時変化を示す。ただし、縦軸は浅井戸の地表面から各井戸の自由地下水位までの距離を示す。また、同図には観測された浅井戸ならびに老原水源井戸の水面も各井戸の地表面からの距離で示している。両井戸の水面は揚水の影響を直接受けるため、推算した自由地下水位の絶対値とは若干異なる。夏の降水期になると自由地下水位が上がり、定点4では浅井戸の地表面から約2m、定点11では約3m下に位置する。この水面勾配が影響して、地下水の流動が活発になる。図—1の説明で昭和59年8月の汚染物質の移流速度が5月のそれより一桁大きくなることを指摘したが、無理な推測でないことが理解できる。冬の渇水期になると自由地下水位が下がり、定点4, 5, 11とも地下水位は浅井戸の地表面から約5m下方になる。水面勾配はほとんどなく、地下水の流れはなくなる。

トリクロロエチレン濃度の経時変化で特異な季節変動パターンを呈する定点5の濃度の経時変化と地下水位-時間曲線を対比させてみると、その傾向が見事に一致していることがわかる。浅井戸のトリクロロエチレン濃度と井戸内水面との関係においても同じ傾向が認められる。そこで観測井戸で検出されたトリクロロエチレン濃度と自由地下水位および井戸内水面との相関を調べたのが図—7である。

たとえば、定点5の観測井戸では自由地下水位が地表面から4.5mを越えて下がると、濃度は急激に増加する。また、浅井戸では井戸内水面が7mを越えて下がると、濃度は急増する。すなわち、7m以深に残存する汚染土壌に潜むトリクロロエチレンが季節変動に伴う自由地下水位の低下によって、高濃度で検出されることになる。夏期にも揚水によって検出されているが、浅層からの大量の地下水により希釈され、検出される濃度の値としては小さくなっていると考えられる。濃度の経時



図—6 地下水位の時間変化



図—7 トリクロロエチレン濃度と地下水位との関連性

変化における季節変動パターンがA電気(株)工場周辺地域に限定されているのは、トリクロロエチレンが地中深く分散して滞留しているためである。定点5の観測井戸は浅井戸から約260mも離れていることから判断して、汚染土壌の範囲は予想以上に広範囲に及んでいるものと想像できる。

6. まとめ

トリクロロエチレンは水に溶けにくく、かつ比重は1.47と水より大きい。したがって、いったん地下水中に混入した場合、トリクロロエチレンは帯水層の下部へ移動し、帯水層中の凹部に滞留すると考えられる。凹部が流動層中であれば、トリクロロエチレンは地下水の流れの方向に移流分散されるし、またさらに下にある帯水層へと拡散されることもある。本文で報告した兵庫県太子町の地下水汚染はこの例である。

汚染経路は不明であるが、いったん侵入したトリクロロエチレンは地中深く、広範囲に、地下水や土壌中に滞留している。図—2に示したように、約1000m³の汚染土壌の掘削・除去によってA電気(株)工場内の浅井戸のトリクロロエチレン濃度が短時間のうちに急激に低下しているのに対して、深井戸の物質濃度が時間の経過とともに一様に増加しているのは、この事実を端的に示している。また、自由地下水位の季節変動との関連で述べたように、観測井戸の物質濃度が夏場の降水期に低くな

り、冬場の自由地下水位の低下とともに高くなることも、この事実が反映している。つまり、夏場の自由地下水位の上昇は深層から揚水される汚染物質を希釈し、活発に移流拡散する働きをなすものと考えられる。ちなみに、表—2によれば、地下水の移流速度は夏場は $5 \times 10 \text{ m/day}$ 、冬場は約 10^0 m/day である。この値は等濃度線の経時変化から推定される移流速度とほぼ一致する。

このように、汚染物質の移流速度が表層水と比較してはるかに遅い地下水では、汚染物質の侵入を防ぐだけでは汚染された地下水の浄化はあまり期待できない。揚水による汚染地下水の汲み上げとか、汚染土壌の除去とか、人為的な手段を講じない限りは、地下水汚染の回復までにはきわめて長い時間が必要になると考えられる。

謝 辞：本研究を進めるに際し、大阪大学工学部教授 室田 明先生と環境庁国立公害研究所水質土壌環境部長 村岡浩爾先生より貴重な助言を頂いた。記して、

深基の謝意を表す。また、本文で使用した調査結果は兵庫県保健環境部から提供を受けた。兵庫県、太子町をはじめ、関係各位ならびに兵庫県課長補佐 小林悦夫氏に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 村岡浩爾・平田健正：昭和59・60年度文部省環境特別研究「合成有機化合物による地下水汚染機構の解明に関する基礎的研究」(研究代表者：村岡浩爾) 研究報告集, B 293-R 12-14, pp.57~70, 1986.
- 2) Theis, C.V. : The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground-Water Storage, Reports and Papers, Hydrology, Trans. Amer. Geophys. Union, pp.519~524, 1935.
- 3) Forchheimer, P. : Free-surface Flow Toward Partially Penetrating Wells, by Boreli, M. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol.36(4), 1955.

(1987.4.8・受付)