

# 汚染井戸の位置と濃度分布を用いた 地下水汚染物質移流方向の推定

## ESTIMATION OF CONVECTION DIRECTION OF GROUNDWATER POLLUTANT ON THE BASIS OF POLLUTED WELL LOCATION AND CONCENTRATION DISTRIBUTION

坂本 康<sup>1</sup>・西田 継<sup>2</sup>

Yasushi SAKAMOTO, Kei NISHIDA

<sup>1</sup>正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒400 甲府市武田 4-3-11)

<sup>2</sup>正会員 工博 山梨大学助手 工学部土木環境工学科 (〒400 甲府市武田 4-3-11)

Simple method for estimation of convection direction of volatile chlorinated hydrocarbon through groundwater was proposed and examined. This method is consisted of 1) identification of polluted aquifer by principal component analysis and cluster analysis of water quality and 2) estimation of convection direction by polluted well location and concentration distribution analysis.

This method was applied to actual and simulated polluted regions. Application to actual region resulted in discovery of polluted wells on the other side of river. Simulation results showed that this method was effective especially for convection-dominant pollution and that identification of wells originating from polluted aquifer was important for precision estimation.

**Key Words:** groundwater pollution, convection direction estimation, volatile chlorinated hydrocarbon, component analysis, cluster analysis

### 1. はじめに

低沸点有機塩素化合物による地下水汚染については、汚染源の特定に費用がかかり難しいとして、汚染の発見があっても十分な対策がとられてこなかった。しかし、簡単な方法で汚染源の大体の位置がわかれば、立ち入り検査等で汚染源の発見は可能と考えられる。本研究では、そのような簡単な方法として、一般水質により汚染水系を識別し、その水系の汚染井戸の位置と濃度分布を用いて汚染物質移流方向を推定する方法を提案する。さらに、この方法を実際の有機塩素化合物汚染域、およびシミュレーションで作成した井戸分布・濃度分布に適用した結果を示す。

### 2. 方法

#### (1) 基本的考え方

地下水水質のクラスター分析により井戸を水系に区分すると、同じ水系に属する井戸の分布位置は地

形などから推定される流れの方向に広がるという例が多い<sup>1,2,3)</sup>。一方、低沸点有機塩素化合物に関しては、汚染が面的にではなく線的に広がっている例が多く、汚染物質の移動としては流線に沿っての移動、つまり移流と流れ方向の機械的分散が大きいと考えられる。この2つの事実に基づき、本報で提案する方法では、低沸点有機塩素化合物に汚染された水系の井戸の位置分布の長軸の方向が汚染物質の移流の方向を示していると仮定した。本報では、以下、この移流の流線のうち汚染源を通る流線を汚染軸と呼ぶ。もし、この汚染軸が推定できれば、その軸に沿って土壌ガス調査などを行っていけば、汚染源は推定できると考えられる。

このような考え方に加え、以下の仮定により、汚染軸を推定した。

- ①汚染軸上の一般水質には類似性がある。
- ②汚染軸は直線で近似できる。
- ③対象範囲には汚染源は一つである。
- ④汚染軸は等方性の場を通っている。

仮定の①は、同じ流線上の地下水は同じ地層・地

質を流れてくるため、地質・地層などで決まる一般水質は類似していることによる。仮定の②は、有機塩素化合物汚染の広がり数百m程度が主であるため、この程度の距離では流線を直線で近似できる場合が多いと考えた。仮定の③、④は、個々の事例で異なるが、本研究では、本方法の有効性の予備的検討を目的にしているため、問題を簡単にするために採用した。

以上の仮定により以下の2段階の手順により汚染軸を推定した。

○第一段階：汚染軸に沿って流れる水を一般水質によって特定する。本研究では、一般水質を用いたクラスター分析を行うことで、水系を特定する<sup>1-5)</sup>。

○第二段階：上記の汚染水系に属する井戸の位置、濃度分布を検討して、汚染軸を推定する。

## (2) 一般水質によるクラスター分析

水質測定値を平均0、分散1に基準化し、相関係数行列を用いて主成分を求めた。累積寄与率0.97以上になる数個の主成分に対して、各井戸のスコアを求めた。このスコアの値により各点（井戸）をプロットし、近い点を見つけていくことでグループ分けした。各点間の距離には標準化ユークリッド平方距離を用い、グループ作成の手順はウォード法を用いた。得られたグループのうち、有機塩素化合物濃度がもっとも高い井戸を含むグループを、汚染井戸グループとした。このグループには数個の井戸が含まれるようにグループ分けした。

## (3) 汚染井戸分布位置・濃度分布による汚染軸推定

汚染井戸グループの空間的広がりの方向は、汚染井戸の分布を直線で置き換えることで、ある程度推定できる。このような直線として、汚染グループの各井戸からその直線までの距離の2乗の和が最小となる直線を想定した。ここで、直線までの距離は、

○直交  $x$ - $y$ 座標系での各井戸とその直線との間の  $x$ 方向の長さ  $a$  と  $y$ 方向の長さ  $b$  と

○各井戸位置からその直線に下ろした垂線の長さが考えられる。本研究ではこの両者を対象とした。しかし、汚染井戸の座標の情報だけでは、汚染物質濃度の具体的値が反映されない。そこで、これを情報として加味する方法として、以下の2法を試みた。

### a) 方法1：重み付き最小二乗法による方法

各座標軸の方向での距離の二乗に各井戸での汚染物質濃度  $C$  を重みとして乗じ、その和を最小とするような直線を求めた。すなわち、東西の  $x$ 座標、南北の  $y$ 座標を用いて直線を  $y = ax + b$  と表し、南北の  $y$ 座標での点と直線の間の距離を用いて、

$$\sum_{i=1}^n C_i (y_i - a_1 x_i - b_1)^2 \quad (1)$$

を最小とする  $a_1$ 、 $b_1$  を求めた。また、東西の  $x$ 座標

の距離を用いて、

$$\sum_{i=1}^n C_i (x_i - a_2 y_i - b_2)^2 \quad (2)$$

を最小とする  $a_2$ 、 $b_2$  を求めた。ここに、 $n$ ：汚染グループの井戸の数である。この考え方は、 $x$ - $y$ 座標系での分布位置に対する線形回帰だが、濃度  $C$  を重みとして乗じることで、直線が濃度の高い点に近づくようにしている。

### b) 方法2：主成分軸による方法

各井戸位置からその軸に下ろした垂線の長さの二乗和が最小となる軸を求めることは、 $x$ 、 $y$ 軸の2次元座標系で主成分の軸を求めることにほかならない。しかし、 $x$ 、 $y$ 軸の2次元座標系では汚染物質濃度分布の情報は含まれない。そこで、 $x$ 、 $y$ 軸に鉛直な  $z$ 軸として濃度軸を設定し、この3次元座標系で主成分軸を求めることとした。そして、この軸の  $xy$ 平面への射影を汚染軸と考えた。汚染軸の方向では濃度の広がりが大きく、この軸方向での濃度の分散が大きくなると考えられる。本方法は、分散が最大となるという主成分の軸の特徴を生かした方法といえる。

## 3. 実際の汚染域への適用

### (1) 事例-1

#### a) 汚染状況

汚染井戸が発見された地域の概要、観測井戸の位置を図-1に示す。この地域は山梨県内の笛吹川左岸の地域である。笛吹川は北東方向から南西方向に流れている。また、地表勾配は笛吹川に向かって南東方向から北西方向に向かって下がっており、この地域はこの方向に流れる笛吹川支流の扇状地上にある。扇端部にあたるこの地域の井戸は、ほとんど自噴井戸である。この地域は、桃の果樹園が主な土地利用になっている。この地域での測定の結果、1-1-1 トリクロエチンによる汚染が観測された。1993年12月での濃度の値 ( $\mu\text{g/l}$ ) を図中に示す。数値の記していない井戸では、検出限界以下であった。

#### b) クラスター分析結果

1993年10、11、12月、1994年1月に測定した、pH、電導度および陰イオン ( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ) 濃度、陽イオン ( $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ) 濃度の平均値、計9つの水質指標を用いて主成分を求め、そのスコアによってクラスター分析を行った。結果を図-1に示す。地点5、6、8、12、18、37を含むグループ（図中の△印）では、12、18以外では汚染は観測されなかった。汚染がもっともすすんでいるのは、地点2、3、13、15のグループ（図中の○印）で、その次が、地点1、14、16、19のグループ（図中の□印）であった。

#### c) 汚染軸推定結果

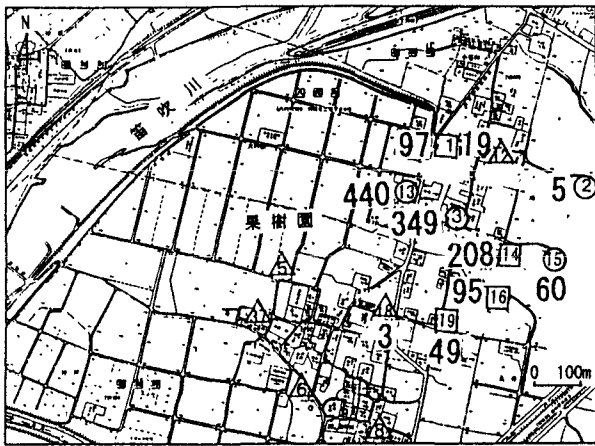


図-1 事例-1の汚染状況

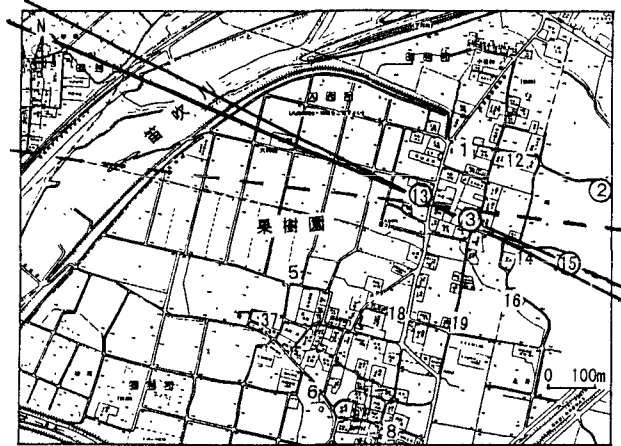


図-2 事例-1の推定汚染軸(1)

汚染がもっともすすんでいた、地点2, 3, 13, 15のグループについて、前述の方法で推定した汚染軸を図-2に示す。地点2, 3, 13, 15のグループと地点1, 14, 16, 19のグループを合わせて推定した結果を図-3に示す。実線は方法1による結果、破線は方法2による結果である。

1994年には、この地域に対し笹吹川の対岸にあたる地域の井戸を観測したが、その結果、対岸の河岸近くで、地点2, 3, 13, 15のグループと同程度に汚染された井戸が複数見つかった。その位置は、図-2の実線と破線の間に見られる人家の点する位置であった。また、対岸の井戸も含めたクラスター分析では、地点13の井戸は同じ左岸側にある地点6と同じグループにはならず、対岸の汚染井戸と同じグループに分類された。このように、推定汚染軸の延長線上に新たな汚染井戸を発見できたことから、この汚染軸の推定が妥当であったと考えられる。この例では、現河道の下をくぐる地下水流があると考えられる。また、図-2と図-3を比較すると汚染井戸の数を絞り込んだ図-2の推定汚染軸の方が対岸の汚染井戸に近いところを通る。このことより、第一段階の井戸のグループ分けで汚染井戸の数を絞ることが推定の正確さを増すといえる。

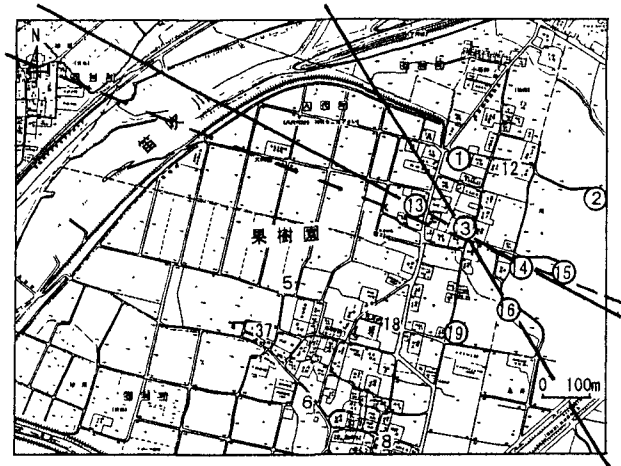


図-3 事例-1の推定汚染軸(2)

検出された。汚染源はこの地域の工業団地の中にあると考えられた。トリクロエチレンについては、県の立ち入り検査で汚染源事業所が特定できたという新聞報道があった。この地域の南側には水道の水源用井戸もあり、水源に汚染が広がるおそれもある。

#### b) クラスタ分析結果

1997年1月に測定した、水温、pH、電導度および陰イオン ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) 濃度、陽イオン ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) 濃度の平均値、計10の水質指標を用いて主成分を求め、そのスコアによってクラスター分析を行った。結果を図-4に示す。

井戸水は大きく、地点1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10のグループ (図中の○印) と地点8, 11, 12のグループ (図中の□印) に分けられた。後者は、釜無川の河川水13にも、類似していた。汚染は、主に前者のグループで起こっていた。

#### c) 汚染軸推定結果

1-1-1 トリクロエチレンについては、地点4, 5, 9, 10のデータにより汚染軸の推定を行った。結果を図-5に示す。また、トリクロエチレンについては地点1, 6, 10のデータにより汚染軸の推定を行った。結果を図-6に示す。

1-1-1 トリクロエチレンについては、方法1と方法2では

## (2) 事例-2

### a) 汚染状況

汚染井戸が発見された地域の概要、観測井戸の位置を図-4に示す。この地域は山梨県内の釜無川左岸の地域である。釜無川は北方向から南方向に流れている。この地域では、測定の結果、1-1-1 トリクロエチレンとトリクロエチレンによる汚染が数箇所で見出された。1997年1月でのこの2物質の濃度の値 ( $\mu\text{g/l}$ ) を図中に1-1-1 トリクロエチレン、トリクロエチレンの順に並べて示す。数値の記してない井戸では、検出限界以下であった。1-1-1 トリクロエチレンについては、地点4, 9, 10、トリクロエチレンについては地点6, 10での濃度が高かった。この他に、地点6ではトリクロエチレン  $1.8 \mu\text{g/l}$  も

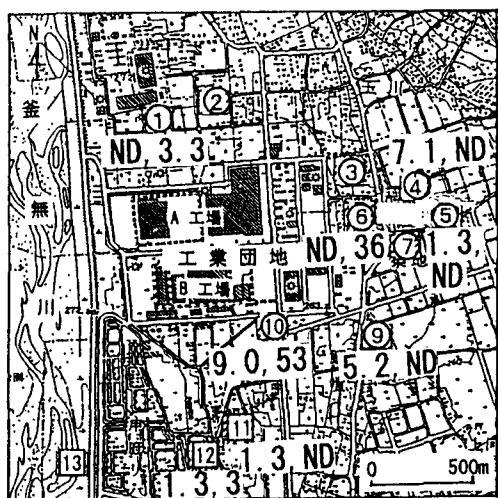


図-4 事例-2の汚染状況

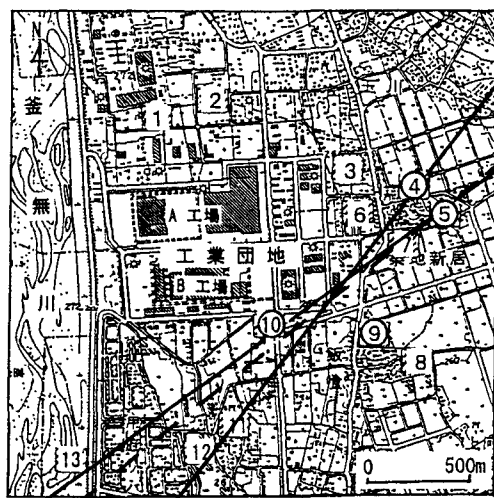


図-5 事例-2の推定汚染軸(1)

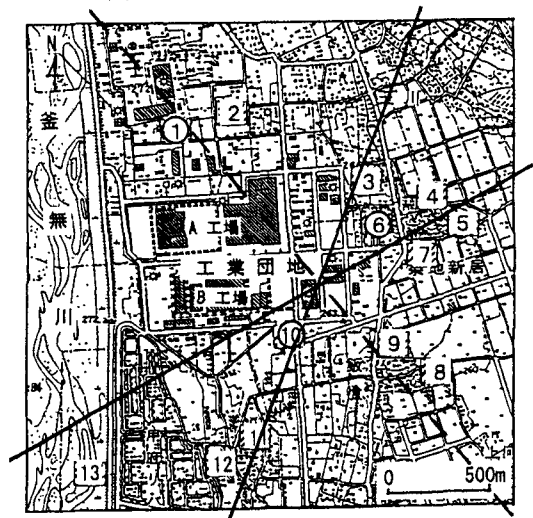
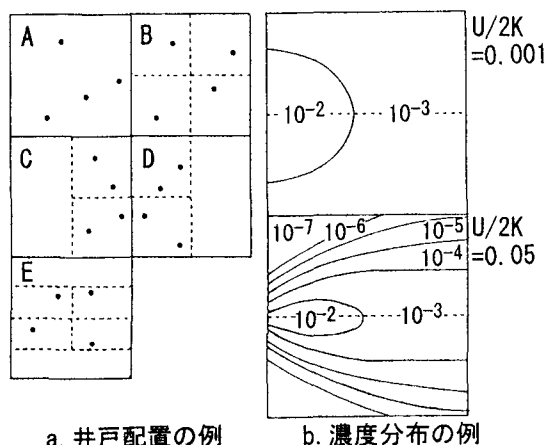


図-6 事例-2の推定汚染軸(2)



a. 井戸配置の例

b. 濃度分布の例

図-7 シミュレーション条件の例

ば同様な結果になった。異なる方法で類似した結果になったこと、推定汚染軸は工業団地の南東端を通っており軸近くに汚染源になりうる施設があることから、推定はほぼ妥当な結果と考えられる。しかし、工業団地内の観測井戸がなく、事例-1より観測井戸位置が偏っているため、それによる誤差が含まれているおそれはある。

トリクロロエチレンについては方法2の結果は方法1の結果とは異なった。これは、方法2では濃度のばらつきの影響が大きく出たためと考えられる。どちらの推定が正しいかは、現時点では不明である。

#### 4. シミュレーション汚染域への適用

##### (1) シミュレーション方法

2. で示した汚染軸推定方法の成否は、移流と拡散の大きさ、観測井戸の位置分布に依存すると考えられる。そこで、汚染井戸の位置、濃度分布を人為的に設定した場について、汚染軸推定シミュレーションを行い、井戸位置分布、移流／拡散比が推定の

正確さ、精度に与える影響を検討した。

##### a) 井戸分布

井戸の数は4個とし、1000m×1000mの範囲でその位置を乱数により決定した。ただし、対象領域にA. ランダムに4個あるとき、B. 1/4の範囲に1個ずつあるとき、C. 下流側の1/4の範囲に2個ずつあるとき、D. 上流側の1/4の範囲に2個ずつあるとき、E. 汚染軸沿いの1/8の範囲に1個ずつあるときの5種類を設定した。井戸分布の例を図-7aに示す。設定した汚染軸は図の中心を通る水平線である。また、汚染源の位置は図の左端（上流側）にあるときと中央にあるときの2通りで検討した。

##### b) 濃度分布

汚染の濃度分布については、一般的な移流・分散方程式の連続点源の解析解<sup>6)</sup>を濃度について無次元化した次式を用いた。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{2^{1/2}}{r} \exp \left\{ -\frac{U}{2K} (r - x - 2^{1/2} + 1) \right\} \quad (3)$$

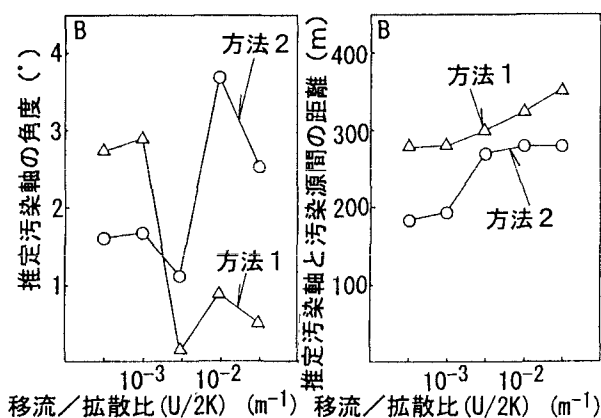


図-8 移流／拡散比と汚染軸推定の正確さ  
(観測井戸：下流域のみ)

ここに、 $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 、 $C$ : 座標  $(x, y)$  での濃度、 $C_0$ :  $x=1, y=1$  での濃度、 $U$ :  $x$  方向の移流速度、 $K$ :  $x, y$  方向への分散・拡散係数である。この式中のパラメータ  $U/2K$  は、0.0005, 0.001, 0.005, 0.01, 0.05 の 5 通り設定した。濃度分布の例を図-7b に示す。

### c) 結果の評価方法

設定した汚染軸が水平軸で汚染源を通ることから、水平軸と推定汚染軸のなす角度の平均値と推定汚染軸から汚染源までの距離の平均値を推定の正確さの指標とした。角度、距離の平均値は、4 個の井戸からなる 1000 組の井戸グループでの平均値とした。また、精度については、1000 個の推定汚染軸の角度が  $0^\circ \pm 40^\circ$  の範囲になった割合を指標にした。

### (2) 観測井戸が汚染源の下流のみにあるときの結果

汚染源が左端中央にあるとき、つまり観測井戸が汚染源の下流のみにあるときについて、B の配置で  $U/2K$  が異なるときの汚染軸推定の正確さを図-8 に示す。角度の値については  $U/2K$  が 0.005 以上のときに方法 1 が方法 2 に勝るが、他の  $U/2K$  値、および距離の指標では方法 2 による推定の方が正確であった。

図-7a に示した各井戸配置について推定の正確さを図-9 に示す。推定が不正確なのは C, D の配置のときであった。また、汚染源との距離が小さいのは E の配置であった。このことから、観測井戸が下流のみにあるときには、観測井戸が汚染軸に沿って偏らずにあることが必要といえる。また、いずれの配置でも方法 1 では移流が大きいとき、方法 2 では移流が小さいときに推定が正確になった。

各条件で推定汚染軸の角度が  $0^\circ \pm 40^\circ$  の範囲に収まる割合を図-10 に示す。  $0^\circ \pm 40^\circ$  に収まる割合では  $U/2K$  が大きくなるほど方法 2 と方法 1 の差が小さくなった。しかし、方法 1 では最もよいときでも半分程度しか  $0^\circ \pm 40^\circ$  の範囲にならず、精度の劣る推定法といえる。また、これらの図より、移流の影響が小さく井戸の配置に偏りがないうちに、方法 2

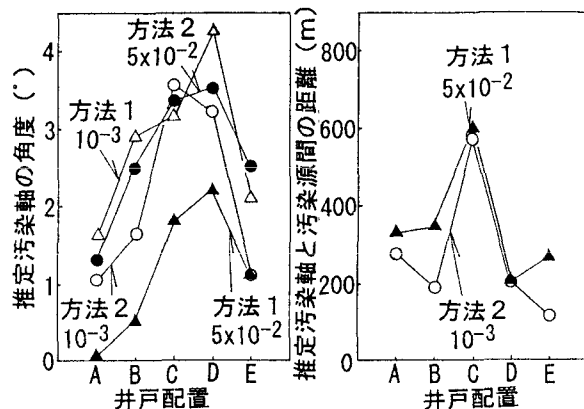


図-9 井戸配置と汚染軸推定の正確さ  
(観測井戸：下流域のみ)

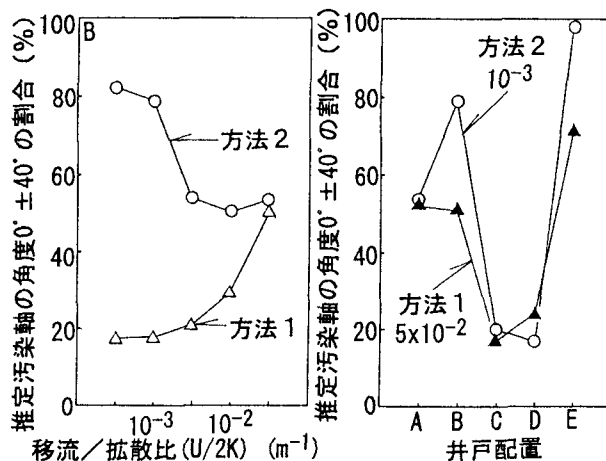


図-10 汚染軸推定の精度 (観測井戸：下流域のみ)

で高い推定精度が期待できるといえる。

### (3) 観測井戸が汚染源の上・下流にあるときの結果

図-7a に示した各井戸配置で汚染源が図の中央にあるとき、つまり汚染源の上流と下流の両方に観測井戸があるときについて、推定の正確さを図-11 に示す。観測井戸が下流のみにあるときに比べ、推定汚染軸と汚染源の距離は最小で 1/4 程度と小さくなった。移流の大小と正確さの間の関係は、井戸配置毎に異なっていた。また、移流が大きいときには方法 1 では推定そのものが不可能な場合があった。これは、濃度の極端に低い井戸が 3 個以上残り 1 個では推定できなくなった場合であった。

図-12 には、推定の精度を示す。方法 2 では移流が小さいときには下流のみにあるときよりも精度が悪いが、移流が大きいときには逆に精度がよい。また、方法 2 では E の配置のとき特に精度が高くなり、どの移流／拡散比でも、すべてのありうる井戸位置分布のうちの 70% 以上で推定汚染軸の角度は  $0^\circ \pm 40^\circ$  の範囲に収まっていた。

以上のシミュレーションの結果から、方法 2 が方法 1 より総体的に優っていること、方法 2 で精度の

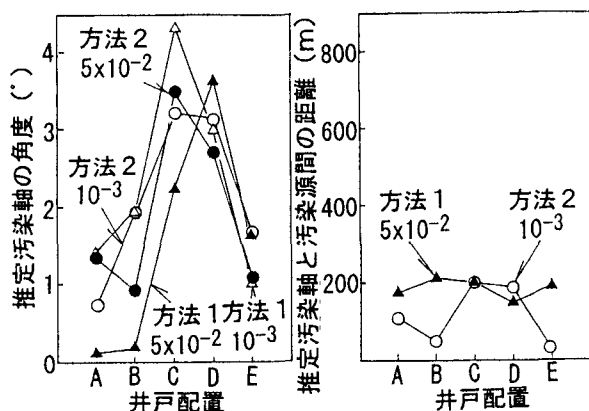


図-11 井戸配置と汚染軸推定の正確さ  
(観測井戸:上・下流域)

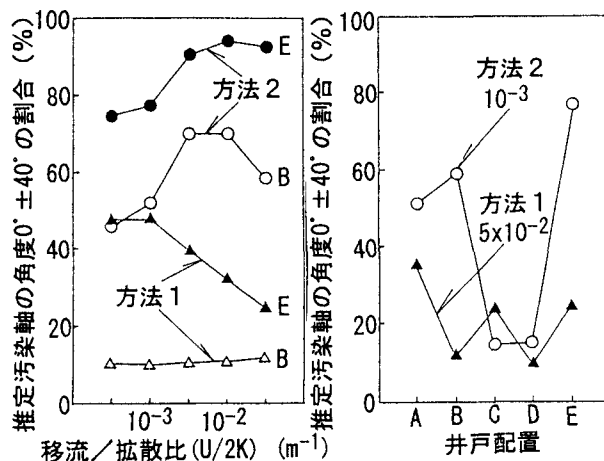


図-12 汚染軸推定の精度(観測井戸:上・下流域)

高い推定ができるのは観測井戸が汚染源の上・下流にともにあるときで移流の影響が分散・拡散の影響に比べて大きいときであること、汚染水系を特定して汚染軸に近い井戸だけについてこの方法を適用できれば推定精度が高くなることが分かった。

## 5. まとめ

本研究の内容をまとめると以下になる。

1. 一般水質を用いたクラスター分析で地下水を水系にわけると同じ水系の井戸の位置分布は移流方向に長くなること、低沸点有機塩素化合物汚染では移流方向への汚染が大きいことの2点を基礎に、汚染水系の井戸の位置と濃度の分布を使って移流方向(汚染軸と略記)を推定する方法を提案した。
2. 水系区分後、移流方向を推定する方法については、方法1として濃度を重みとした最小自乗法で位置分布に直線をあてはめて推定汚染軸とする方法、方法2として位置分布、濃度分布の分散が最大となる主成分軸を推定汚染軸とする方法の2つを検討対象とした。
3. 上記方法の実際の汚染地域への適用では、汚染軸の延長上に新たな汚染井戸を発見するなどの成果が得られた。また、第一段階で対象井戸の数を絞ることで、推定がより正確になった。
4. 上記方法の精度を確かめるために、汚染井戸の位置、濃度分布を人為的に設定した場合について、上記方法による汚染軸推定シミュレーションを行い、井戸位置分布、移流／拡散比が推定の正確さと精度に与える影響を検討した。
5. シミュレーション結果によると、観測井戸が汚染源の下流のみにあるときには、移流の影響が小さく、かつ井戸が均等にある場合にのみ、方法2で精度のよい推定ができた。
6. シミュレーション結果によると、観測井戸が汚染源の上流、下流の両方にあるときには、特に方法

2で下流のみにあるときよりも良好な推定が得られた。また、移流の影響が大きいほど推定の精度がよくなった。さらに、汚染軸に近い観測井戸があるほど精度はよくなり、このことから水系区分により対象井戸を絞ることが有効と考えられた。

謝辞：本研究では、井戸水の採水・水質測定において、山梨大学工学部土木環境工学科平成5年度卒業生、中川淳氏(現、日本技術開発(株))、平成8年度卒業生、宮下晶弘氏(現、茅野市)の多大なる協力を得た。ここに記して謝意を表したい。

## 参考文献

- 1) Ashley, R.P. and Lloyd, J.W.: An example the use of factor analysis and cluster analysis in groundwater chemistry interpretation, *Journal of Hydrology*, 39, pp.355-364, 1978.
- 2) Rauret, G. and Rubino, R.: Cluster Analysis as a Tool in the Study of Groundwater Quality, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 32, pp.255-268, 1988.
- 3) Rosenthal, E.A., Issar, A.S. and Batelaan, O.: Definition of groundwater flow patterns by environmental tracers in the multiple aquifer system of southern Arava Valley, Israel, *Journal of Hydrology*, 117, pp.339-368, 1990.
- 4) 乙間末広・中杉修身: 観測井水質の多変量解析による地下水汚染の状況把握, *水質汚濁研究*, 12(2), pp.105-111, 1989.
- 5) 瀧和夫: 市街化地域における地下水の汚染調査と解析, 「地下水汚染・土壌汚染の現況と浄化対策」, pp.166-181, 工業技術会, 1993.
- 6) 土木学会水理委員会編: 水理公式集一昭和60年版一, p.43, 1985.

(1997.9.30受付)