

地下水主要イオン濃度の主成分分析結果と 地下水流動方向との関係

THE RELATION BETWEEN THE RESULTS OF PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS FOR
GROUNDWATER ION CONCENTRATIONS AND GROUNDWATER FLOW DIRECTION

坂本康¹・西田継²

Yasushi SAKAMOTO and Kei NISHIDA

¹正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 甲府市武田 4-3-11)

²博(工) 山梨大学講師 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 甲府市武田 4-3-11)

Wells of the four study areas in Yamanashi Prefecture were grouped on the basis of groundwater qualities. Grouping was based on the scores of principal components of the major ion concentrations. Spatial distribution of grouped wells was consistent with the topography and with the distributions of water temperature and 1,1,1-trichloroethene concentration. Similar quality wells grouped by cluster analysis using the principal component scores line up geometrically along the groundwater flow direction estimated with the computer model, USGS MODFLOW. These results supported the hypothesis that the wells of similar quality line up in the direction of the groundwater flow. This characteristic resulted from the human activity which supply the environmental tracers into the groundwater. The semivariogram of the scores of principal component was effective to some extent to find the anisotropy of water quality, if its calculation takes the azimuth into consideration..

Key Words: groundwater flow direction, major ion concentration, principal component, cluster analysis, semivariogram

1. はじめに

地下水汚染の汚染源推定には地下水の流動方向を知ることが必要である。地下水の流動方向は、水位と透水係数の空間分布が分かれば理論的には計算可能である。しかし、現在一般的になっている家庭用の井戸では、地下に打ち込んだ鉛直管から直接ポンプで汲みあげる構造がよく使われており、水位の測定は困難になってきている。また、透水係数を用いる計算では、水みちが存在する場合には対応できない。このようなことから、簡易に地下水流動方向を推定する方法として、水位を用いずに水質を用いる方法が考えられる。著者らは、水質を主成分分析し、その主成分のスコアを用いて流動方向を推定する方法について研究を続け、成果を上げている¹⁾。この方法では、既往の報告²⁾に基づき、「類似した水質を示す井戸は流動方向に沿って出現する」と仮定している。しかし、この仮定が適用できるのは、「どこを流れてきたか」ということが「どの程度の滞留時間で流れてきたか」ということより影響が大きい場合である。後者の影響が大きいときには、「類似した水質を示す井戸は等水位線に沿って出現する」という、全く相反する可能性もある。

このため、この方法の実用化には、著者らの仮定が適用可能な条件を明確にしておく必要がある。そこで、本研究では条件の異なる山梨県内4つの観測地域での分析結果から、類似した水質を示す井戸が出現する方向と地下水の流動方向との関係を検討した。この検討では、「類似した水質」として主要イオン濃度から算出した水質主成分のスコアを用いた。また、比較の対象として、モデル計算により求めた流動方向、他の水質情報(水温、低沸点有機塩素化合物濃度など)、上記スコアの空間分布特性を用いた。

2. 方法

(1) 観測地域

本研究で取り上げる観測地域は、図-1に示す山梨県内の4地域、A、B1、B2、Cである。各地域の地理条件、採水条件を表-1に示す。各地域の概要は以下である。
A 地域(図-2): 他の地域は甲府盆地内の河川沿いにあるのに対し、この地域は甲府盆地の北西にある八ヶ岳南麓に位置する。標高は他の地域より高く、勾配も急である。道路沿いに人家、工場がある以外はほとんど山地の

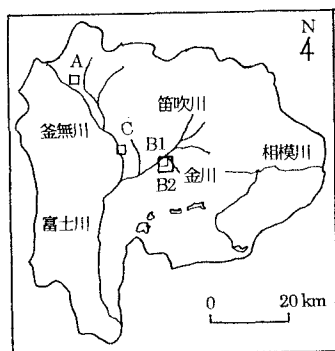


図-1 観測地域

表-1 観測地域の条件

観測地域	A	B1	B2	C
東西距離(km)	1.8	2.8	6.8	1.7
南北距離(km)	2.0	2.7	6.0	1.7
最高標高(m)	758	300	530	270
最低標高(m)	679	262	262	264
高低差(m)	79	38	268	6
平均勾配	1/25	1/43	1/27	1/238
採水日	12/22/98	01/07/98	11/17/98	01/06/97
採水点数	22	21	64	16
水位測定	可	不可	不可	不可
有機Cl測定	有	有	無	有
井戸深さ(m)	4.2-10	25-100	15-400	?
備考	池水 1	自噴 3	自噴 3	水道水 3 河川水 1

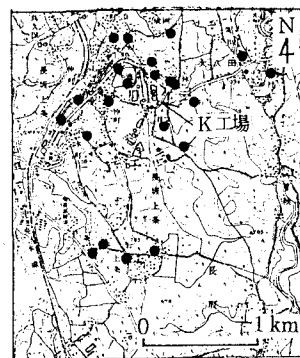


図-2 A 地域採水点

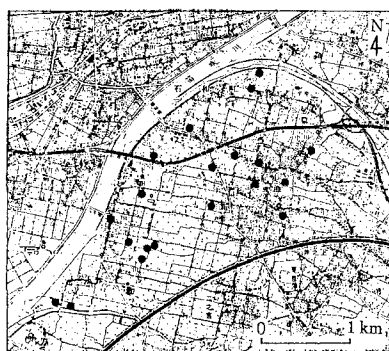


図-3 B1 地域採水点

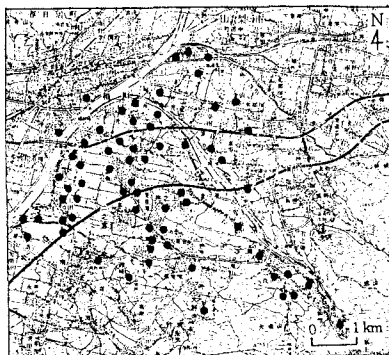


図-4 B2 地域採水点

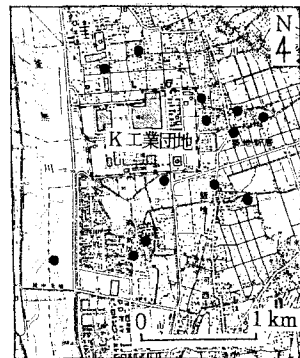


図-5 C 地域採水点

森林である。図-2 中の K 工場は、敷地内土壌で高濃度の低沸点有機塩素化合物が確認されたことを山梨県に報告している。周辺の井戸水についても山梨県により汚染が確認されている。ただし、地下水汚染がこの工場によるかどうかは確認されていない。他の地域とは異なり、この地域では地表から井戸水の水面までの深さを測ることができた。採水点には K 工場北西の池も含まれる。

B1 地域 (図-3)：甲府盆地内の笛吹川と金川との合流点付近の金川扇状地扇端部に位置する。果樹栽培地帯で多くの果樹園と民家が混在している。笛吹川近傍には自噴井戸もある。金川は、冬季にこの地域で表流水がほとんど見られない時期がある。

B2 地域 (図-4)：B1 地域を内包し、金川扇状地の全体と隣接する扇状地の一部を含む。面積は他の地域の 4 倍程度であり、標高差、地表勾配が大きい。調査地点数は他の地点の 2 倍以上である。

C 地域 (図-5)：甲府盆地内の釜無川 (富士川) 沿いの K 工業団地周辺に位置する。この地域でも低沸点有機塩素化合物による地下水汚染があり、山梨県による「汚染井戸周辺地区調査」で多くの井戸の汚染が観測されている。工業団地以外は人家と田畑に占められている。他の地域に比べ標高差は小さく、地表勾配も小さい。地表勾配は南東方向に下がる向きになっている。採水点には K 工業団地南西の釜無川も含まれる。

(2) 水質分析

各地域で、井戸水の主要陽イオン (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})・陰イオン (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) 濃度と、水温, pH,

EC を測定した。その他に、A 地域では池の水、C 地域では河川水、水道水 (この地域内に水源井戸がある) も測定した。また、B2 地域以外では低沸点有機塩素化合物濃度も測定した。ただし、A 地域では工場周辺の 12 地点でのみ低沸点有機塩素化合物濃度を測定した。また、本論文では、測定した低沸点有機塩素化合物のうちで濃度が比較的高く、最も多くの地点で観測された 1,1,1-トリクロロエタンの濃度のみを示す。

(3) 井戸のグループ分け

前報¹⁾では、なるべく多くの水質情報を使って井戸を分類するという意図で、主陽イオン濃度だけでなく水温, pH, EC も用いて水質主成分を抽出した。今回は、主要陽イオン・陰イオンのみを用いることとした。その主成分のスコアを用いて、クラスター分析により井戸をグループ分けした。クラスター分析は標準化ユークリッド距離を使うウォード法である。また、今回は井戸全部をいくつかのグループに分けるということは目的にせず、非類似度の小さい 2-4 個程度の井戸のグループを抽出することを目的とした。これは、ある程度以上の非類似度を用いてグループ分けすると、信頼性が劣る可能性があるためである。

(4) 地下水流動方向のモデル計算

地下水位の測定できた A 地域については、コンピュータモデルにより地下水流動方向を推定し、類似した水質を示す井戸が出現する方向と比較した。用いたモデルは USGS の差分モデル MODFLOW である。入出力イン

表-2 水質概要

観測地域	A	B1	B2	C
試料数	22	21	64	16
平均濃度 (mg/l)	Na	15.1	14.1	12.3
	K	5.6	1.5	1.6
	Ca	17.5	34.9	27.7
	Mg	7.2	11.5	7.6
	Cl	24.4	12.9	13.2
	NO ₃ -N	8.0	9.5	8.2
相関係数 0.70以上 の項目	SO ₄	12.2	43.8	36.4
	Na	K, Cl	なし	Mg以外
	K	Na, Cl	なし	Mg以外
	Ca	なし	SO ₄	Mg以外
	Mg	なし	なし	なし
	Cl	Na, K	なし	Mg以外
	NO ₃ -N	なし	なし	Mg以外
	SO ₄	なし	Ca	Mg以外

表-3 水質主成分

観測 地域			A	B1	B2	C
第一主成分	固有値 (-)		3.5	3.2	2.8	5.3
	寄与率 (%)		50	45	40	76
	固 有	Na	0.47	0.17	0.04	0.40
		K	0.44	0.09	-0.17	0.40
		Ca	0.15	0.48	-0.48	0.41
		Mg	0.25	0.32	-0.48	0.12
	ベクトル	Cl	0.50	0.46	-0.35	0.42
		NO3-N	0.40	0.43	-0.40	0.37
		SO4	0.28	0.49	-0.48	0.43
	観測 地域			A	B1	B2
第二主成分	固有値 (-)		1.5	1.9	1.3	1.0
	寄与率 (%)		22	27	19	14
	固 有	Na	-0.13	0.60	0.64	-0.06
		K	-0.35	0.55	0.64	-0.27
		Ca	0.48	-0.21	-0.26	0.04
		Mg	0.57	-0.37	-0.18	0.96
	ベクトル	Cl	-0.01	0.03	0.16	0.04
		NO3-N	0.33	0.34	0.21	-0.08
		SO4	-0.44	-0.19	-0.03	0.03

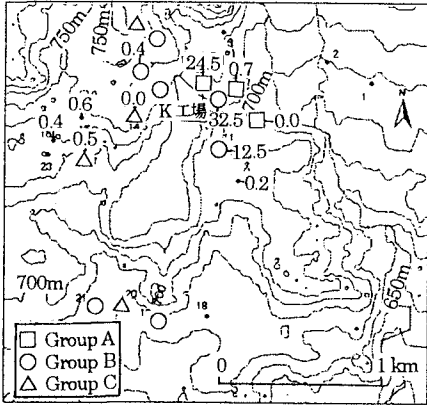


図-6 A地域の水質グループと1,1,1-トリクロロエタン濃度

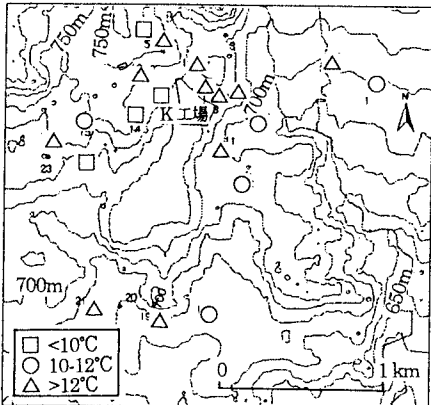


図-7 A地域の水温グループ

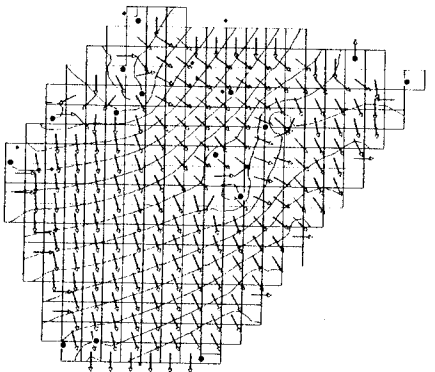


図-8 水位・流向の計算結果

ターターフェースとしては GMS(Department of Defense Groundwater Modeling System)を用いた。条件として 15 地点の井戸水位を与え、地域全体の定常状態の水頭分布を計算した。ただし、地質分布、透水係数分布に関する情報はなかったため、地表から不透水層までの距離、透水係数は地域全体で同一の値を用いた。したがって、水位分布、流動方向には意味があるが、流動速度等の正確さの保証はない。

3. 水質測定結果の概要

表-2に水質測定結果の概要を示す。NO₃⁻イオン濃度については水道水の基準 (NO₂⁻-N+NO₃⁻-N で 10mg/l 以下) との比較が容易なように NO₃⁻-N 濃度で示してある。なお、文献³⁾によると甲府盆地と周辺 89 地点の地下水の平均値として、Na⁺ 11.5mg/l、K⁺ 1.4mg/l、Ca²⁺ 19.8mg/l、Mg²⁺ 5.3mg/l、Cl⁻ 8.1mg/l、NO₃⁻-N 1.1mg/l、SO₄²⁻ 16.1mg/l が報告されている。

A 地域は、甲府盆地と周辺の地下水の平均に比べ、Na、K、Cl、NO₃⁻-N が特に多い。また、K、NO₃⁻-N の変動係数、Na、K、Cl 間の相関係数も大きい。変動係数は空間的分布の多様性の指標と考えられ、多様性の大きな

因子として人間活動が考えられる。これらのことから、この地域の Na、K、Cl、NO₃⁻-N には人間活動の寄与が多いと推定される。

B1 地域と B2 地域の平均濃度を比較すると、下流側にあり人間活動の影響がより大きいと考えられる B1 地域では B2 地域に比べ Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻濃度が大きい傾向がある。これらは、甲府盆地と周辺の地下水の平均値に比べても大きい。また、B2 地域ではイオン濃度間の相関係数はそれほど大きくないが B1 地域では Ca²⁺と SO₄²⁻との相関係数が比較的大きい。この地域では、これらの濃度が人間活動の影響の指標と考えられる。

C 地域では、Mg 以外のすべての項目間で相関係数が高い。変動係数が高いのは Na、Cl、NO₃⁻-N である。

4. A 地域での結果の検討

A 地域でのグループ分け結果を図-6 に示す。図のように、類似した水質を示す井戸が出現する方向は地表勾配の方向と一致している。図-6 には、1,1,1-トリクロロエタンの濃度も示す。1,1,1-トリクロロエタン濃度が高い井戸は Group A、B に集中している。図-7 には水温によ

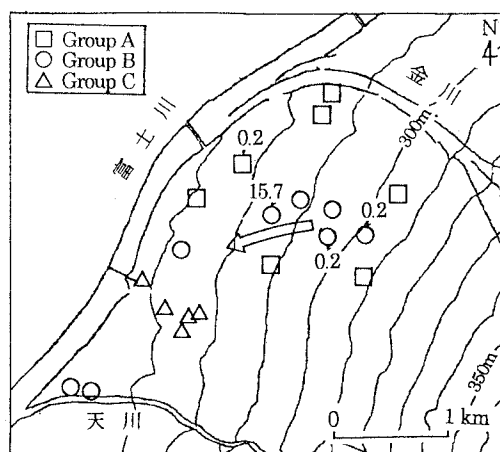


図-9 B1 地域の水質グループと
1,1,1-トリクロロエタン濃度

るグループ分け結果を示す。水温 12°C 以下の井戸は、EC が $200\mu\text{s/cm}$ 以上で水温 12°C を越える井戸より溶存成分が多かった。したがって、水温の低い水が流下の間に水温が高くなったとは考えられず、水温の異なる水は異なる流れの水と考えられる。また、水温が 10°C 未満の井戸は Group C にほぼ対応している。以上のことから、類似した水質を示す井戸が出現する方向が流動の方向に対応しているという仮定は妥当と考えられる。表-3 にはグループ分けの基本となった主成分の固有値、寄与率、固有ベクトルを示す。表-3 を見ると、他の地域に比べ平均濃度の高い Na, K, Cl, $\text{NO}_3\text{-N}$ の第一主成分への寄与が大きい。Group C は水温が低いことから地表の人間活動の影響が大きいと考えられるが、このグループの第一主成分のスコアが最も大きい。したがって、人間活動の場所的ながいが流線毎に異なるトレーサーを加えたような状態を生じ、類似した水質を示す井戸が流動方向に出現したと考えられる。

グループ井戸の配置と比較するために、MODFLOW により推定した等水位線と流向を図-8 に示す。計算条件としては図-8 中に大き目の印をした 15 ケ所の水位を用いた。図-6 と比較すると、Group B の最下流の井戸を除くと、類似した水質を示す井戸が出現する方向はどのグループもほぼ流線の方向と一致するといえる。Group B は他に比べ第一主成分のスコアが小さく、Na, K, Cl, $\text{NO}_3\text{-N}$ をもたらすような人間活動の影響が比較的小さいグループである。そのため、より深い水に依存する最下流の井戸もこのグループになったと考えられる。このことから、地域内に井戸密度の疎な部分がありかつ標高差が大きいときには、水質による流動方向の推定が困難といえる。

5. B1 地域での結果の検討

B1 地域でのグループ分け結果を図-9 に示す。図には 1,1,1-トリクロロエタン濃度が $0.2\mu\text{g/l}$ 以上の点につい

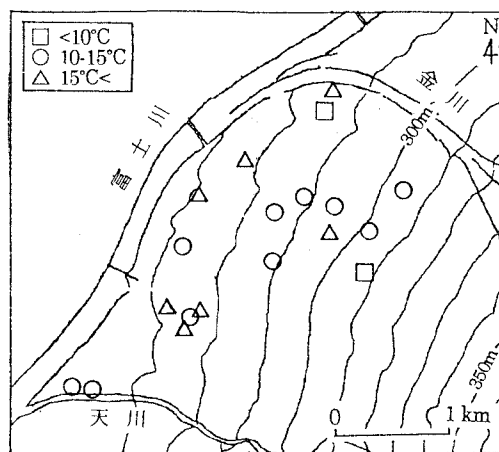


図-10 B1 地域の水温グループ

てはその濃度を示してある。図のように、 $0.2\mu\text{g/l}$ 以上の点は 1 ケ所を除きすべて Group B に属する。図-10 には水温によるグループ分け結果を示す。Group B は水温 $10\text{-}15^{\circ}\text{C}$ のグループとほぼ一致している。また、EC が $350\mu\text{s/cm}$ 以上の 5 地点はすべて Group B に属した。このようなことから、B1 地域でも類似した水質を示す井戸が出現する方向が流動の方向に対応しているという仮定は妥当と考えられる。図-9 には、Group B の流動方向と想定される方向を矢印で示した。この地域でも第一主成分への寄与が大きいのは、濃度が高く、変動係数が大きい Ca^{2+} , SO_4^{2-} であった。つまり、B1 地域でも人間活動がトレーサーを负荷したような状態を生じたといえる。

6. B2 地域での結果の検討

B2 地域は、採水日は異なるが B1 地域を含んでいる。このためか、主成分としては B1 と似たものとなった。この地域は地点数が多いため、主成分のスコアで単純にグループ分けしようとする、複雑に入り組んだグループ井戸の分布になった。そこで、2つの井戸の組だけで考えることとした。水質がある程度以上似た2つの井戸を抽出して行くと 24 組のグループができた。そのうち、12 組は 2つの井戸とも金川と天川に囲まれた範囲にあった。これらの組を直線でつないだものを図-11 に示す。他の 12 組は 2つの井戸が金川の左岸と右岸、天川の左岸と右岸、笛吹川の左岸と右岸に分かれていた。図-11 によると、2つの川に囲まれた範囲に限ると、直線は地表勾配の方向になっているもの（図-11 の実線）が多く流れの方向を表わしていると考えても矛盾はない。ただし、金川に近接した井戸の水と天川に近接した井戸が同じグループになる（図-11 の破線）など、川に近接した点ではこのことは当てはまらない。

次に、第一主成分のスコアの分布と流動方向との関係を検討した。第一主成分のスコアの空間分布を図-12 に、第一主成分スコアの出現頻度のヒストグラムを図-13 に

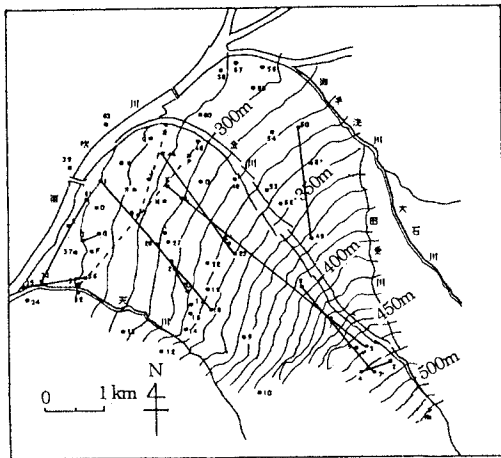


図-11 類似した水質の井戸の組

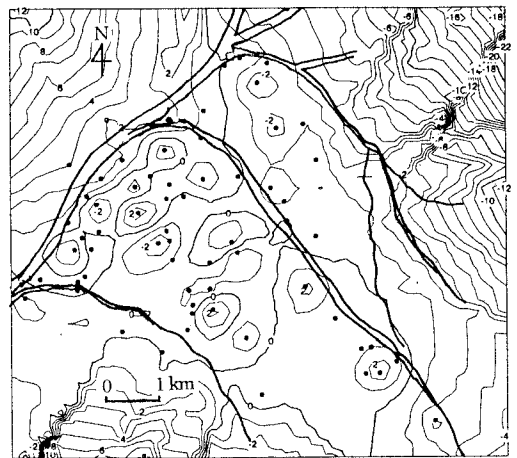


図-12 第一主成分の等値線図

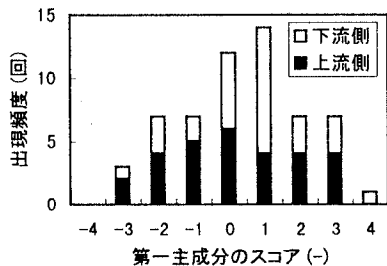


図-13 第一主成分の出現頻度

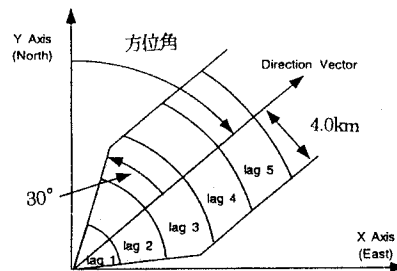


図-14 semivariogram 計算範囲

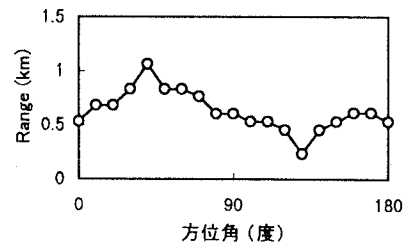


図-15 方位角と Range

示す。図-12は Kriging 法により内挿した等値線図である。図-13のように、金川の上流側ではどの値も似た頻度で出現するが下流側では-1 から 1 までの値で頻度が大きい。図-12によると、これは扇端部にある笛吹川に平行な方向に広がる負の値の影響と考えられる。上流側では同じ金川水系で一様分布の水質であったものが、下流側では笛吹川水系の影響で特定の範囲の値が増えたと解釈できる。このことから、この地域では、前述のようなグループ分けを行わなくともスコアの分布そのものから流動方向が推定できる可能性が考えられた。そこで、semivariogram により主成分の値の異方性を検討することとした。この方法は、semivariogram を計算するとき、すべての観測点での値を使うのではなく、特定の方向（方位角）にある観測点での値だけを使って計算する方法である。semivariogram の計算は、地質統計計算ソフト GSLIB⁹⁾ によった。本論文で用いた各方位角での点の範囲を図-14に示す。また、方位角と Range の関係を図-15、semivariogram と距離の関係を図-16 に示す。ここで Range と呼んでいるものは、図-16で semivariogram が一定値になるまでの距離である。なお、図-16には、A：すべての観測点での値を使って計算した semivariogram と B：方位角を 40°、130° として計算した semivariogram を示してある。Range は、観測値の semivariogram と距離の関係（図-16）に、目視により球関数を当てはめ、そのパラメータとして求めた。図-15によると、Range は方位角 40° 程度で大きく 130° 程度で小さい。図-16によると、すべての方向の観測点を使ったとき、方位角 130° の観測点を使ったときには、

0.2-0.4km 程度は離れると semivariogram は距離によらなくなる。一方、方位角 40° の観測点を使ったときには 1.0km 程度までは、距離が大きくなるにつれ semivariogram も大きくなる。このような水質の異方性は流れの方向に対応しているとも考えられ、これによっても流動方向を推定できる可能性がある。笛吹川の方位角は北から時計回りに 36°、金川は 143° である。したがって、40° 程度の方向にある点の間の関係が強いということは、笛吹川に沿った地下水の流動の影響を示しているのかもしれない。

7. C 地域での結果の検討

C 地域の特徴は、他の地域より標高さが少なく勾配が緩やかなことである。地表勾配は南東に下がっている。Mg 以外の水質に相関があるため、主成分は Mg 以外のすべてに同程度影響されるものとなった。濃度はいずれも他の地域に比べて高い方で、さまざまな人間活動の影響が考えられる。図-17 にグループ分け結果と検出された 1,1,1-トリクロロエタン濃度を示す。Group A, B では EC は 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下であったが、Group C ではそれぞれ 319, 420 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と極端に高くなっていた。また、第一主成分のスコアも大きくなった。Group A と Group B では Group A の方が幾分第一主成分のスコアが大きい差は少ない。Group B は河川水も含むグループとなった。1,1,1-トリクロロエタンの最高濃度は Group A の井戸で見られたが、Group B, Group C にも

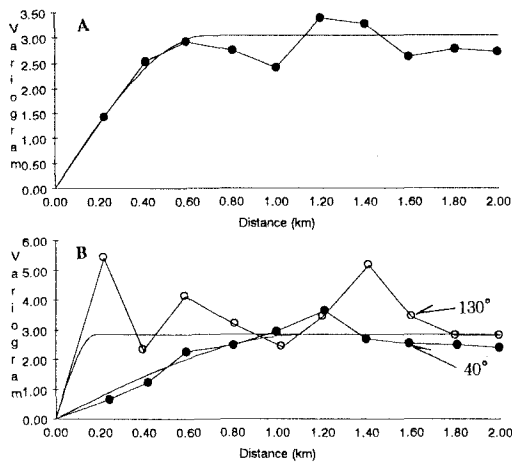


図-16 距離と semivariogram
(A:全点, B:特定方位角)

汚染が見られる。図-18 に水温によるグループ分け結果を示す。井戸水で水温が 10°C 以下の点は Group A に 2 つ、Group B に 1 つ、Group C に 1 つあり、水質グループと水温グループには関係がなかった。以上のように、この地域では水質によるグループ分け結果と流動方向との関係ははっきりしなかった。この地域の井戸が EC の高い 2 つを除き全体に水質的に似通っており、流線毎の差がなかったことが原因と考えられる。この地域は、地表勾配が他地域に比べ小さい。このことから、水頭勾配も小さく移流も小さく、水質が均一化されているのではないかと推定される。

8. まとめ

水質による井戸のグループ分けが地下水流動方向の推定にどの程度有効かを考えるために、山梨県内 4 地域でのグループ分け結果を検討した。得られた主な知見は以下である。

- (1) 水位測定が可能な地域で、類似した水質を示す井戸が出現する方向とモデル計算で得た流向を比較した。その結果、類似した水質を示す井戸が出現する方向が流向と一致することが確認できた。
- (2) いずれの地域でも水質によるグループと水温によるグループがかなり対応し、かつ低沸点有機塩素化合物の濃度分布もグループ分けに対応していることから、類似した水質を示す井戸が出現する方向が流向に対応していることが確認できた。
- (3) 水質主成分で影響の大きい水質項目は、いずれの地域でも、濃度、変動係数が大きい項目であった。これらの特徴は自然の地質などの影響とは考えにくい。このことから、農業などの人間活動が地下水にトレーサーを負荷

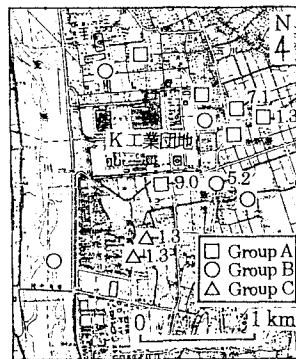


図-17 C 地域の水質グループと
1,1,1-トリクロロエチレン濃度

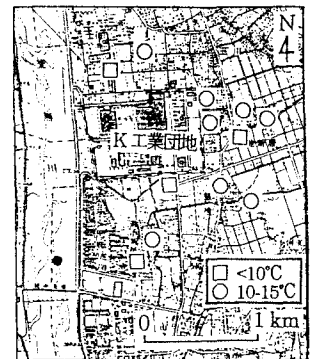


図-18 C 地域の水質グループ

している状況になっていると考えられる。

- (4) 水質による流動方向推定が困難なのは、地域内に井戸密度の疎な部分がありかつ標高差が大きいとき、試料に河川の対岸の地点のものを含むとき、多くの水質項目間で相関が強くかつ勾配が緩やかなときであった。
- (5) 試料数の多い地域で水質主成分スコアの統計的検討を行った。その結果、扇状地上流部では扇端の河川近傍にくらべ様分布に近い傾向、扇端の河川近傍では主河川沿いにスコアの分布が異なる傾向がみられた。また、主成分スコアの空間分布の semivariogram について異方向性が確認でき、主成分スコアの空間分布が流動方向の推定に役立つ可能性があることが分かった。

謝辞：本研究では、試料水の分析において、山梨大学工学部土木環境工学科平成 8 年度卒業生、宮下昌弘氏、平成 9 年度卒業生、雨宮信氏、平成 10 年度卒業生、葉袋文氏、山梨大学大学院土木環境工学専攻平成 10 年度修了生、北浦善樹氏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) 坂本康・西田継：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，水工学論文集，42，pp.391-396，1998。
- 2) 例えば，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, J. Hydrology, 117, pp.339-368, 1990。
- 3) 吉澤一家・清水源治・高橋・照美・茅野陽子・堤充紀：甲府盆地及び周辺部の地下水水質について，山梨衛公研年報，33，pp.59-62，1989。
- 4) Deutsch, C.V. and Journel, A.G: GALIB Geostatistical Software Library and User's Guide, second edition, Oxford University Press, 1998。

(1999.9.30 受付)