

大和町吉岡における地下水流動と有機塩素化合物による地下水汚染の検討

Multivariate Analysis of Groundwater Flow and Evaluation of Groundwater Contaminated
by Organic Chlorinated Compounds in Taiwa

清野 茂 小山 孝昭 牧 滋
佐藤 勤 大庭 和彦*¹

Shigeru SEINO, Takaaki KOYAMA, Shigeru MAKI
Tsutomu SATO, Kazuhiko OHBA*¹

大和町吉岡の地下水は砂礫層中を0.86~1.7m/日(年間約300~600m)で流動し、Ca-SO₄型地下水が東北東方向に分布することから東北東方向と推定され、クラスター分析により、東北東方向、東方向、善川沿いの3つの地下水流動群に分類された。S工場観測井戸ではTCE及び分解生成物濃度が高濃度高分解度で、TCA及び分解生成物濃度は低濃度高分解度であることから、地下水汚染経過時間が長いと推定された。VOC検出5カ所の周辺井戸中3カ所はS工場から東北東方向に位置していた。定期モニタリング調査地点ではPCE汚染とTCE・TCA汚染の2つの汚染源が存在しており、PCE汚染地点ではPCEが帯水層に到達し地下水に溶出しはじめ、TCE・TCA汚染地点ではTCEによる汚染経過時間は長く汚染源は消失傾向に、TCAによる汚染源は比較的近くに存在するものの消失状況にあると推定された。

キーワード：地下水流動；地下水汚染；有機塩素化合物；多変量解析

Keywords : Groundwater Flow ; Groundwater Contamination ; Organic Chlorinated Compounds ;
Multivariate Analysis

1 はじめに

テトラクロロエチレン(PCE)やトリクロロエチレン(TCE)などの有機塩素化合物(VOC)による土壌汚染・地下水汚染は全国各地で発生している¹⁾。そのため、汚染土壌や汚染地下水などの汚染処理対策を実施することが必要となっている。この処理対策を適切且つ効率的に実施するためには、汚染地域における地下水流動を明らかにし、汚染物質の位置や汚染範囲などを把握することが重要である。

2004年11月30日に大和町吉岡の通信機器製造工場(S工場)において、敷地内でVOCによる土壌・地下水汚染が確認された。汚染源はTCE及び1,1,1-トリクロロエタン(TCA)の使用箇所・保管場所・回収機設置箇所と推定され、地下水汚染は第一帯水層(深度4~19m)であることが判明した。S工場はVOCを使用していないが、同敷地内では1974年から2002年3月まで操業していたN工場が部品洗浄剤としてTCE及びTCAをそれぞれ1976年から1985年、1980年から1992年まで使用していた。

そこで、県と当センターは2004年12月1日から3日までの3日間にわたり工場内及び周辺井戸の地下水汚染調査を実施した。その結果、工場周辺井戸の地下水が

らはVOC環境基準を超えるものは検出されなかった。

本報告では、大和町吉岡地区の井戸水のVOC調査の際に、一般水質成分を測定し、井戸水の水質組成解析や多変量解析の結果に基づき地域内の地下水流動を推定し、同地区で1992年度から実施されている地下水定期モニタリング調査結果の解析を行って、2つのVOC汚染地下水を評価した。

2 方法

採水は2004年12月1日から3日の3日間実施した。調査井戸はS工場敷地境界の観測用浅井戸1カ所(地点番号1)、工場周辺の個人所有で飲用または生活用井戸21カ所(地点番号2~22、浅井戸15、深井戸6)の計22カ所である。(図1)工場観測井戸からの地下水は水中ポンプにより約2時間揚水後深度3.16mで採水し、周辺井戸の地下水は井戸ポンプ稼働後水温が一定になった後に蛇口から採水した。

分析項目は、VOCについては土壌汚染対策法に基づく第1種特定有害物質(ベンゼンを除く10成分)でヘッドスペースGC/MS法(JIS K 0125.5.2)による。一般水質については陽・陰イオンはイオンクロマトグラフ法、HCO₃⁻は0.01mol/L H₂SO₄ 滴定法、SiO₂はモリブデン青吸光光度法、Al³⁺はCTMAC吸光光度法に従った。

*¹ 現 栗原保健福祉事務所

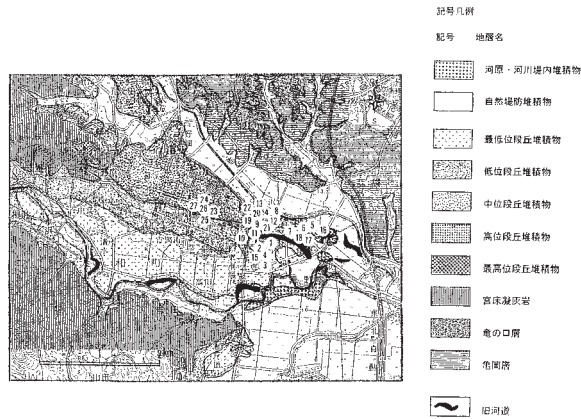


図1 大和町吉岡の地質図及び調査地点図 (北村ら³⁾一部改変)

定期モニタリング調査結果の解析資料は5井戸(浅井戸, 地点番号23~27)で, 1992年度から2004年度までの13年間である。なお, 地下水定期モニタリング調査地区はS工場から北西方向に約1 km離れた約100m範囲内にあり, VOC汚染の原因は不明である。

3 結果と考察

3.1 調査地域の概要

大和町吉岡は仙台市に隣接する農工並進の町で, 近年工業団地などによる企業誘致を積極的に実施されている地域である。北村らによれば²⁾³⁾, 地形は奥羽山脈西麓の丘陵地の辺縁部に位置し, 吉田川低地に分類され, 標高20~30mの低位段丘地域にある。この段丘は北西から南東方向に傾斜し, 本地域はその段丘崖の南東端部に当たり, 南側は北側よりも標高は高い。地質は基盤が頁岩からなる先新第三系の利府層で, この上にある宮床凝灰岩層・七北田層を覆う段丘堆積物からなり, ディサイト質や凝灰岩質の風化残留物, 崩壊性堆積物, 火砕流堆積物, 河成堆積物及び火山灰を含む砂礫層から構成されている。地質構造上は七北田層の沈降向斜部に位置している⁴⁾。水系は, 吉田川本流と善川があり, これら河川の複合扇状地域に当たり, 調査地域では河川流向が南東方から東北方へ変位している。現工場用地以前は水田であった⁵⁾。これらの水文地質構造からみると, 調査地域の地下水は透水性の高い砂礫層中の帯水層を流動し, 東北方方向に傾く向斜地形に沿って善川南岸へ地下水流動していると考えられる。

3.2 地下水の流動

一般に, 地下水流動はマクロ的に地形の影響を受け, ミクロ的に地下水面(動水勾配)に規制されると考えられる。地下水の流速は, 地下水面の傾き, 地層の透水係数と有効間隙率から算出することができる。地下水面の傾きは2万分の1地形図中の水準点や三角点の水平距離及び標高差地から3/1000~6/1000であり, 透水係数は地下水が砂礫層中に存在することから

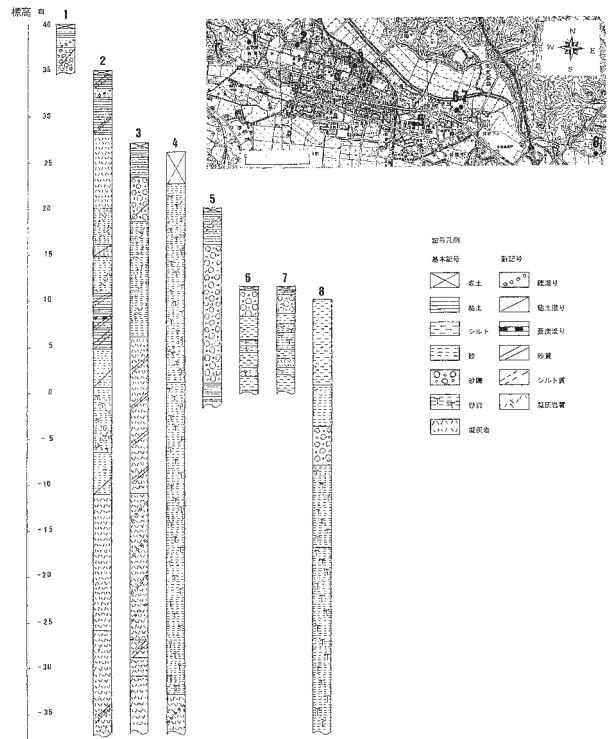


図2 大和町吉岡のボーリング柱状図

0.1cm/s, 有効間隙率を0.3と仮定し(図2), 地下水の流速 = (地層の透水係数 × 地下水面の傾き) / 有効間隙率の式により, 0.86~1.7m/日と求められ, 年間約300~600mと推定される。日本の平均的な地下水流速は約1 m/日と考えられており, 大和町吉岡地域の地下水流速は砂礫層内の地下水流速としてほぼ平均的な値である。なお, S工場の資料によれば⁶⁾, 地下水流速は透水係数を0.01と仮定し約0.25m/日(年間約90m)と推定している。この値は透水係数を0.01と仮定したものであった。今後は地下水流向流速計を用いた流速の測定により実流速を評価する必要があると考える。

3.3 水質組成による地下水流動の解析

大和町吉岡地区の地下水水質成分はHCO₃⁻, SiO₂濃度が高い(表1)。パターンダイアグラムによる水質組成は浅井戸(Na・Ca-HCO₃・Cl型)と深井戸(Na-HCO₃型)で異なり, S工場から東北東方向の浅井戸には溶存イオン量が同程度で同一パターンダイアグラムが位置している(図3)。このことから, 地下水の流動は東北東方向と考えられる。一方, 定期モニタリング調査地点では溶存イオン量が多いパターンダイアグラムを示している。キーダイアグラムによる地下水水質の領域ではアルカリ土類炭酸塩型, アルカリ土類非炭酸塩型, アルカリ炭酸塩型, 中間型の4つに分類された(図4)。後述するVOC検出の5井戸は型, 定期モニタリング調査井戸はすべて型であることから, S工場及び周辺地域と定期モニタリング調査地域では地下水系を異にすることが考えられる。主成分分析により, 大和町吉岡の地下水水質は第1主成

表 1 大和町吉岡及び県内・全国の地下水成分の平均値

地区		大和町吉岡			宮城県	全国
調査名		周辺調査			定期 モニタリング	地下水調査
種類		全	浅井戸	深井戸		
N		27	16	6	5	65
pH		6.9	6.5	7.7	6.4	6.82
EC	mS/m	34.8	38.3	32.6		
Na	mg/L	14.39	13.18	24.32	25.13	19.24
K	mg/L	4.07	3.89	2.93	6.56	2.62
Mg	mg/L	9.53	13.21	4.65	8.97	4.31
Ca	mg/L	27.11	36.7	17.19	26.98	26.19
NH ₄	mg/L	0.01	<0.01	0.03	<0.01	<0.01
Cl	mg/L	21.0	24.6	12.5	20.7	11.54
HCO ₃	mg/L	96.7	79.5	122.5	141.3	108.4
SO ₄	mg/L	37.2	56.3	23.90	9.27	8.49
NO ₃	mg/L	17.6	26.8	4.8	9.1	4.78
F	mg/L	0.10	0.07	0.24	0.02	0.09
PO ₄	mg/L	0.14	0.07	0.21	<0.01	0.10
SiO ₂	mg/L	45.5	42.6	64.0	33.1	36.68
出典		本研究			平成16年度	半谷 (1956)

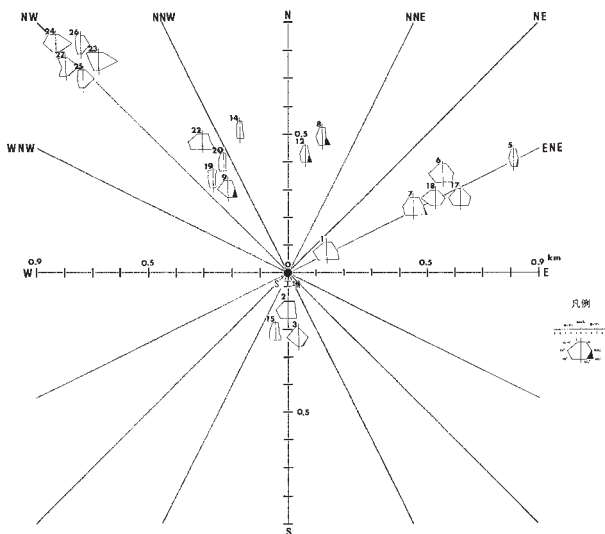


図 3 方位別パターンダイアグラム (浅井戸21)

分が地下水の総合指標，第2主成分がNO₃⁻の影響を強く反映し，第3主成分は段丘堆積物の地下水を示す指標と考えられ，第3主成分までで寄与率は70%であり，これらの指標で地下水水質の概略を説明できた(表2)。そこで，汚染が考えられる浅井戸の主成分のスコアを用いたクラスター分析を行った結果，3つの地下水流動群に分類された(図5)。群はS工場を含む東北東方向グループ，群は定期モニタリング調査地点を含む東方向グループ，群は善川に沿ったグループである。パターンダイアグラムやキーダイアグラムから考察すると，大和町吉岡地区における地下水流動は3つの流れが相互に存在すると推定される(図6)。

3.4 VOC 汚染地下水の評価

PCEやTCAは生物的・化学的作用によりPCEはTCE

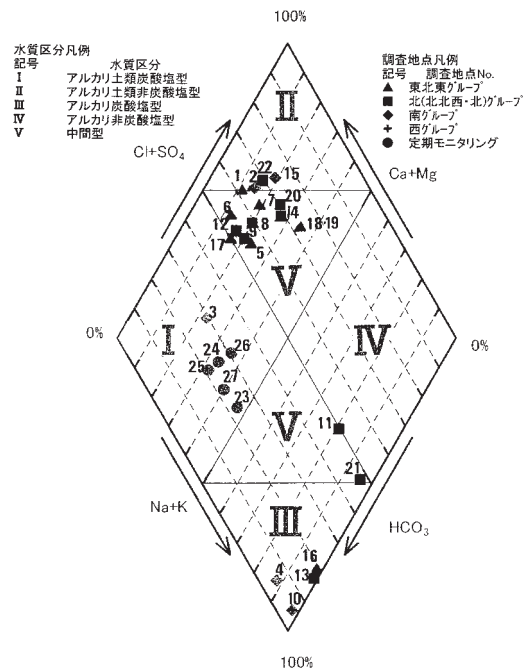


図 4 キーダイアグラム (全井戸 27)

とDCE類(cis-DCE, 1,1-DCEなど), TCAは1,1-DCEや1,1-ジクロロエタン(1,1-DCA)などを経て，二酸化炭素などに分解されることから，新たなPCEやTCAの供給がない場合にはPCE, TCE及びDCE類, TCA, 1,1-DCE及び1,1-DCAのモル濃度之和は分解反応の全期間を通して一定と考えられる⁷⁾⁸⁾。地下水の流動によるVOC濃度の減少が希釈によるか，分解によるかは，まず，濃度の減少が地下水流動による希釈(分散)の要因を汚染源からの距離との関係から検討した。次に，分解による要因をPCE分解度並びにTCE分解度から検討した。分解度は，PCEの場合はPCE, TCE及

表2 大和町吉岡の地下水成分の主成分分析結果

変数名	第1主成分	第2主成分	第3主成分
水温	-0.026	-0.361	-0.326
pH	0.423	-0.119	0.203
HCO ₃	0.041	-0.530	-0.251
Na	0.250	-0.242	-0.010
K	-0.043	-0.160	-0.575
Mg	-0.428	-0.137	0.217
Ca	-0.389	-0.237	-0.099
F	0.316	-0.139	0.201
Cl	-0.357	-0.163	0.248
NO ₃	-0.139	0.467	-0.078
SO ₄	-0.360	-0.226	0.344
SiO ₂	0.207	-0.316	0.419
固有値	4.315	2.377	1.718
寄与率(%)	35.96	19.81	14.32
累積寄与率(%)	35.96	55.77	70.09

びDCE類のモル濃度和に対するTCE及びDCE類のモル濃度和の割合(%), TCAの場合はTCA, 1,1-DCE及び1,1-DCAのモル濃度和に対する1,1-DCE及び1,1-DCAのモル濃度和の割合(%) から算出した。低分解度の井戸水は汚染源に近く, 高分解度の井戸水は汚染源から遠い。低分解度が経年的変化しない場合は汚染源が依然として存在し, 逆に高分解度がさらに上昇する場合は汚染源の消失または移動したと考えることができる。濃度との関係では低分解度で高濃度の場合は汚染経過時間が短く, 一方高分解度で低濃度の場合は汚染経過時間が長いと考えられる。

工場観測井戸の地下水のVOCはTCEが0.12mg/L(環境基準0.03mg/L), その分解生成物1,1-ジクロロエチレン(1,1-DCE)は0.070mg/L(環境基準0.02mg/L)であり, その他に1,1,1-トリクロロエタン(TCA)が0.027mg/L(環境基準1mg/L), シス-1,2-ジクロロエチレン(cis-DCE)が0.023mg/L(環境基準0.04mg/L)検出された(図7)。周辺井戸はすべて環境基準以下であったが, 5カ所の井戸ではVOCが報告下限値の約1/10の濃度で検出され, そのうち3カ所は工場から東北東方向, 残りは南と北方向の位置にあたる。距離とPCE, TCE及びDCE類のモル濃度和との関係, 距離とTCA, 1,1-DCE及び1,1-DCAのモル濃度和との関係は指数関数的に減少していた(図8)。工場観測井戸ではTCE及び分解生成物濃度が環境基準値の3.5~4倍の高濃度で高分解度であり, TCA及び分解生成物濃度は報告下限値の約1/10と低濃度で高分解度であることから, 汚染経過時間が長いと推定される。このことはN工場のTCE, TCA使用期間がそれぞれ1985年, 1992年で終了していることから整合性はあると考えられる

地下水定期モニタリング調査5地点は工場から北西に約1km離れた中位段丘地域に位置し約100m範囲に

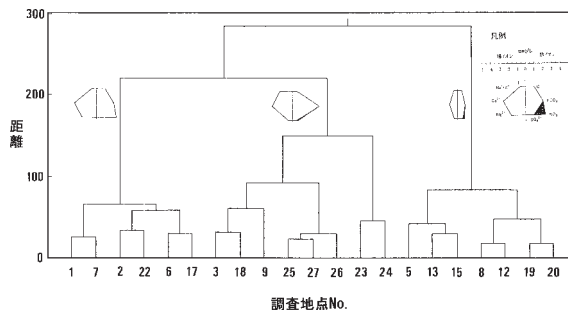


図5 デンドログラム(浅井戸21)

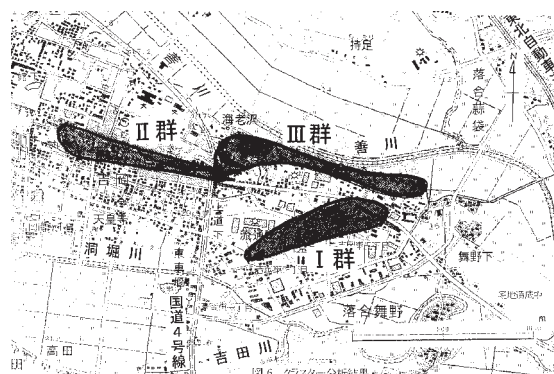


図6 クラスタ分析結果

集中している。この地区のVOV汚染は主としてPCE汚染とTCE・TCA汚染の2つの異なる汚染源が存在すると思われる。(図9)PCE汚染地点(地点番号23, 24)では経年的に濃度が上昇し, 一方分解度は減少していることから, PCEが帯水層に到達して地下水に溶け出しはじめたと考えられる。TCE・TCA汚染地点(地点番号26, 27)ではTCE濃度は減少し分解度は高い状況で継続していることから, TCEによる汚染経過時間は長く汚染源は消失傾向にあると考えられ, TCA濃度は減少し分解度が漸増していることから汚染源は比較的近くに存在するものの生物分解などによる消失状況にあると推定される。

4 まとめ

- 大和町吉岡における地下水流動と有機塩素化合物による地下水汚染の検討を行った結果, 次の結論を得た。
- (1) 水文地質構造から, 地下水は砂礫層中の帯水層を東北方向に0.86~1.7m/日(年間約300~600m)の流速で善川南岸へ流動していると考えられる。
 - (2) 地下水の流向は, 水質組成Ca-SO₄型の地下水が東北東方向に分布していることから, 東北東方向と推定された。
 - (3) 地下水の水質は, 主成分分析から土壌及び段丘堆積物から溶出成分の由来, 農業活動の影響の地下水で説明ができた。
 - (4) 浅井戸水のクラスタ分析により, S工場を含む東北東方向グループ, 定期モニタリング調査地点を含む東方向グループ, 善川に沿ったグループの3つ

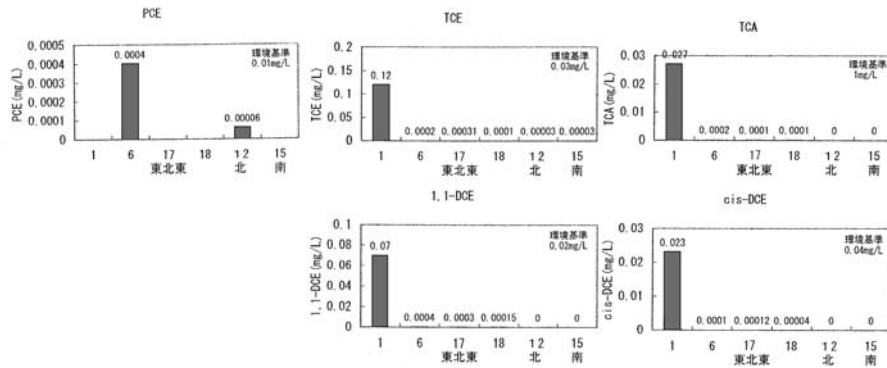


図7 方位別 VOC 濃度分布

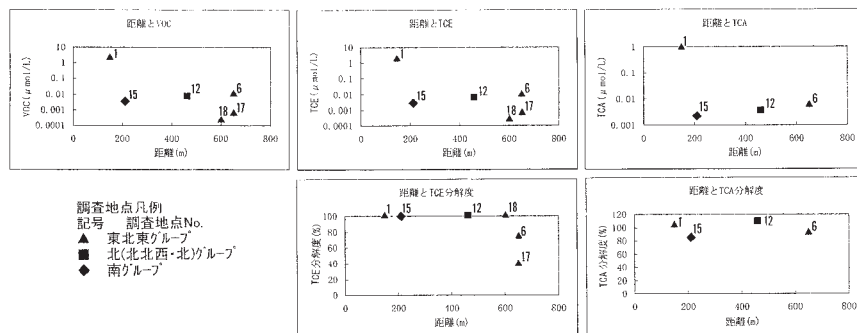


図8 汚染源からの距離とVOC,TCE,TCA濃度($\mu\text{mol/L}$)とTCE,TCA分解度(%)の関係

の地下水流動群に分類され、これらの地下水の流れが相互に存在すると推定される。

- (5) S工場観測井戸ではTCE及び分解生成物濃度が環境基準値の3.5～4倍の高濃度で高分解度であり、TCA及び分解生成物濃度は低濃度で高分解度であることから、地下水汚染されてからの経過時間が長いと推定された。
- (6) VOC検出5カ所の周辺井戸うち3カ所は、S工場から東北東方向に地下水流動する位置にあたり、距離とPCE、TCE及びDCE類、TCA、1,1-DCE及び1,1-DCAのモル濃度との間には指数関数的に減少する関係がみられた。
- (7) 地下水定期モニタリング調査地点ではPCE汚染とTCE・TCA汚染の2つの異なる汚染源が存在しており、PCE汚染地点ではPCEが帯水層に到達して地下水に溶け出しはじめ、TCE・TCA汚染地点ではTCEによる汚染経過時間は長く汚染源は消失傾向にあり、TCAによる汚染源は比較的近くに存在するものの生物分解などによる消失状況にあると推定された。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、調査に協力していただいた大和町職員各位並びに仙台保健福祉事務所黒川支所職員各位、元地質調査所技官阿部智彦氏に有益な助言・指導をいただいた。以上の方々へ心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 環境庁水質保全局水質管理課・土壤農薬課：土壤地下水汚染と対策、日本環境測定分析協会、(1966)
- 2) 北村 信、中川久夫：土地分類基本調査。「吉岡」(5万分の1)宮城県土地対策課、14、(1979)
- 3) 北村 信、大沢 穠、中川久夫：地域地質研究報告5万分の1図幅 秋田(6)第8号 吉岡地域の地質、地質調査所、(1983)
- 4) 藤田博志：東北大学理学部地質古生物学教室研究邦文報告、73、111(1972)
- 5) 国土地理院：1:50,000地形図「吉岡」(昭和41年編集)(1968)
- 6) 地下水汚染の現状と対策について、(2004)
- 7) 二宮勝幸、大場栄次、酒井 学、若林信夫、悪七由美子：水環境学会誌、17、383(1994)
- 8) 宮川みどり、小寺康次、塩谷稔哉、木津良一、早川和一：水環境学会誌、26(7)、437(2003)

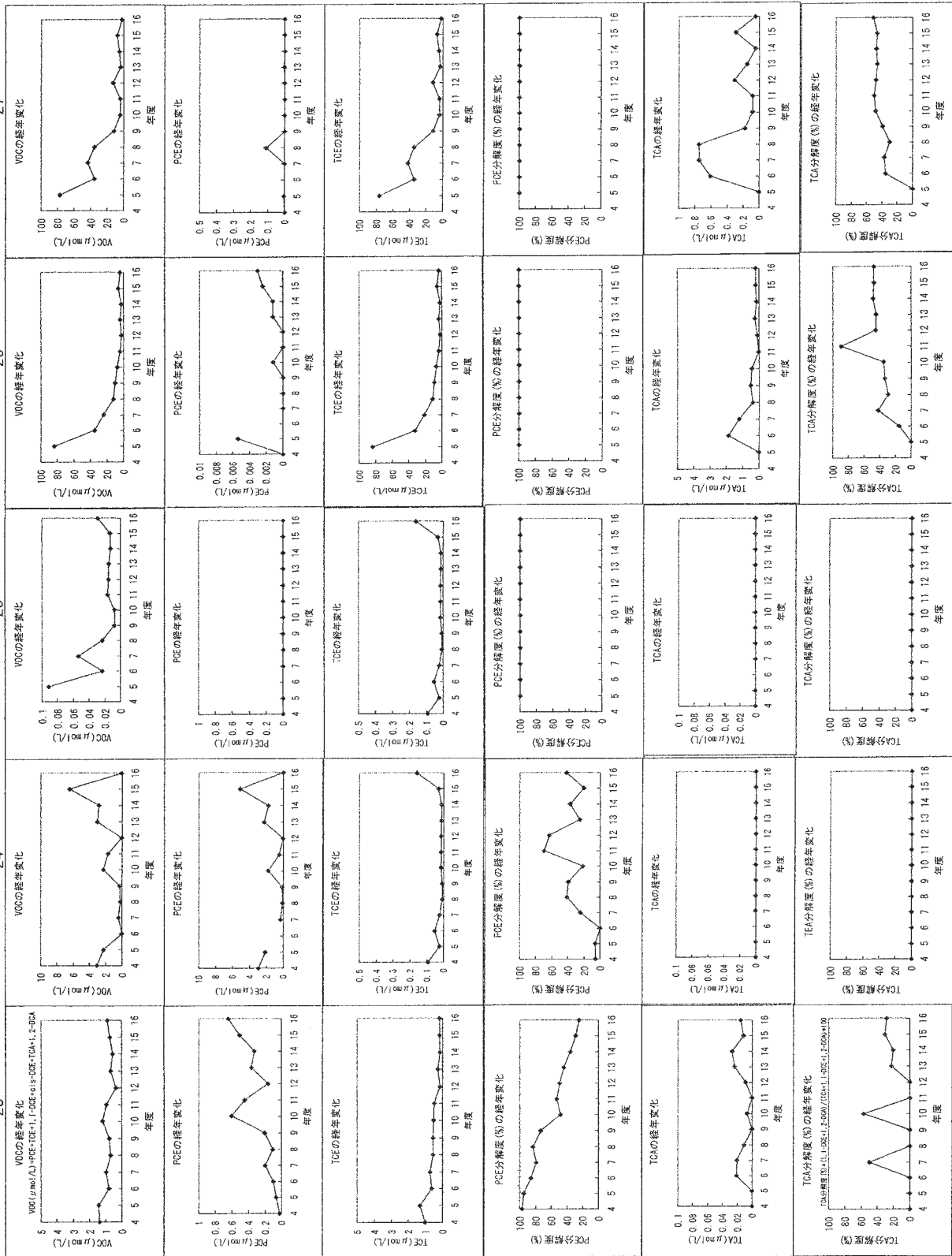


図9 定期モニタリング調査地点におけるVOC、PCE、TCE、TCA濃度とPCE、TCA分解率(%)の経年変化(平成4年度～16年度)