

(10) 桂川右岸地下水の水質分布変化に関する研究

Study on the change of groundwater quality distribution in the right side of Katsura river

齊藤卓弥* 米田稔* 森澤眞輔*

Takuya SAITOH, Minoru YONEDA, Shinsuke MORISAWA

ABSTRACT; Shallow groundwater on the right hand side of Katsura River in Kyoto was investigated 13 years ago. Approximately the same investigation was executed this time and the results were compared to the previous one. The results of comparison showed that the concentrations of chloride ion and anionic surfactant decreased and quality of shallow groundwater in this area was improved especially in terms of pollution caused by infiltration of municipal waste water. The reason of this phenomena seemed to have a direct relation to the rise of percentage of sewerage area. However, the area where the concentration of dissolved oxygen was low and that of Mn was high were not shrunk. This means that groundwater deterioration caused by the recharge of low DO water on the right side of Katsura river was not improved. The improvement of the quantity of shallow groundwater was also observed at a continuous monitoring point of Ministry of Land Infrastructure and Transport in this area. Sewerage infrastructure is thought to be effective not only for surface water but also for shallow subsurface water. The improvement of the quality of the recharge source of groundwater is also thought to be important for the improvement of groundwater quality.

Keywords; groundwater, stream water, water quality, sewerage, temporal change

1. はじめに

地下水は水温・水質が安定したきれいな水と一般的に考えられ、また比較的簡単に取水できるため、古くから生活用水として使われてきた。しかし、水資源の開発が進むにつれて、地下水に対する人間の影響が顕著に見られるようになってきた。その影響は地下水位の低下などの量的な影響のみでなく、水質悪化という質的な面においても現れてきている。地下水の質的悪化をもたらすものとしては工場・事業所からの汚染物の漏洩などがあるが、より広範囲の地下水の質的悪化の原因となっているのは、いわゆるノンポイントソースといわれる、不特定多数の汚染源である。これら汚染源は特定困難であることから、対策の立案を困難としているが、近年地下水は有効な水資源として見直されてきており、量・質ともに地下水の適正利用を目指していくためには、このような地下水の広域における水質悪化機構などを明らかにしていく必要がある。

地下水のノンポイントソースによる汚染機構を解析した研究としては Lerner らの研究¹⁾、Cogger の研究²⁾、米田らの研究^{3) 4)}などがある。このうち米田らは京都盆地の桂川右岸の浅層地下水について大規模な水質調査を行い、この地域が DO 濃度の高い比較的良好な水質の地域と、DO 濃度が低く水質が悪化した地域に二分されること、水質が悪化した原因として比較的水質が悪化した桂川からの浸透水の影響を受けていると考えられること、また地下水中のアンモニア性窒素などの起源としては、表層からの浸透水の影響も考えられること、などを明らかにしている。現在この研究が行われてから十数年が経過しており、地下水揚水量や河川水質など様々な要素が変化していると考えられる。よって本研究では、米田らの研究と同領域同時期において、地下水と河川水の水質調査を行い、各水質項目の平面分布の変化、および同一の井戸または近傍の井

*京都大学工学研究科(Graduate School of Engineering, Kyoto University)

戸での値の変化を統計的に解析することにより、水質変化の機構について考察し、浅層地下水質の維持・改善のための方策について検討する。

2. 水質調査

2. 1 調査内容

(1) 調査領域と採水地点

米田らの調査³⁾(以後、前回調査と記す。)と同様に、桂川と鴨川の合流点付近より下流の右岸から山麓までの範囲において、地下水の水質調査を行った。また、桂川と小畑川において、河川水の水質調査を行った。図1に前回調査と今回調査の採水地点を示す。○、×は地下水の採水地点、

▲、△は河川水の採水地点、●は3.で使用する文献データの採水地点を示す。地下水、河川水ともできるだけ前回調査と同じ地点で採水した。地下水については、今回は前回調査と比べて約3分の2ほどの採水地点数となっている。これは、この13年ほどの間に前回調査を行った井戸が使われなくなっていたり、今回の調査期間に井戸の所有者と連絡が取れず、採水できなかった地点があったためである。

前回および今回調査を行った京都盆地は北、東、西の三方を山に囲まれており、所々に扇状地が発達している。周辺山地は二畳系の砂岩、チャート、頁岩等からなり、北東の一部に花崗岩が認められる⁵⁾。平野部は盆地内を流れる主たる3つの河川である桂川、宇治川、木津川とその支川によって運ばれ堆積したものを主体として形成された氾濫平野であり、南西に向かって穏やかに傾斜している。地質時代区分では沖積層に相当する。盆地地下には大阪層群が広く分布している。その層厚は200mに達すると見られ、被圧地下水が賦存している。大阪層群を覆って上部洪積層が分布する。上部洪積層は、段丘堆積物、扇状地性堆積物などの砂礫層であり、主として不圧地下水が賦存している。沖積層は比較的薄く、盆地南部で10m程度であり、砂、泥からなる⁶⁾。

(2) 調査期間および調査水質項目と測定方法

前回調査と今回調査の調査期間、調査地点数、調査水質項目とその測定法を表1に示す。今回の調査では水温、DO、ORPは採水時に、他の項目は試料を実験室に持ち帰り、採水した日の夜のうちに測定した。なお、今回の調査において、塩素イオン濃度の測定では、水中に溶解している塩素原子濃度を塩素イオン濃度と仮定し、ICPMSを用いて測定した。

(3) 採水方法

地下水は、個人宅や工場、農地で現在使用されている井戸から採水した。大部分は打ち込み井戸で、ほとんどのところで電動ポンプを用いて地下水を汲み上げていたが、一部は素掘りの井戸でつるべによる汲み上げ方式であった。採水の際には、地下水水質を安定させるために、まず数十リットルの水を流した後、採水容器(ポリプロピレン製100mL容器またはポリエチレン製1L容器)に採水し、密栓するという方法でできるだけ用いた。また、DOのように採水時にバブリングすることで大きく値が変化してしまうものもあるため、採水にあたっては極力、バブリングを抑えるよう細心の注意を払った。

河川水は、ロープを付けたバケツを用いて、橋の上や河岸から採水した。日変動、時間変動、また河川幅

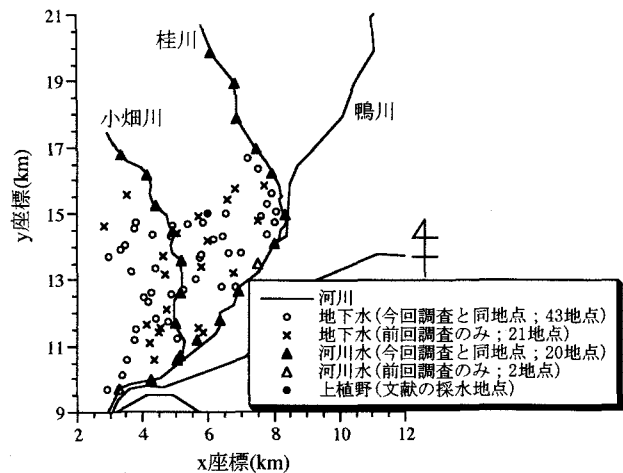


図1 前回調査と今回調査の採水地点

表1 前回調査（1991年）と今回調査（2004年）の調査内容

	前回調査	今回調査
調査期間	1991年12月9～18日	2004年12月9～14日
採水地点数	地下水64地点、河川水22地点	地下水43地点、河川水20地点
調査水質項目	水温（水温計による） pH（pHメーターによる） 電導度（電導度計(AOC-10)による） DO（DOメーター(UC-12)による） ORP（ORPメーターによる） COD, 陰イオン性界面活性剤濃度 （分光光度計(DR-2000)による） $\text{NH}_4^+\text{-N}$ （富栄養計(HC-1000)による） $\text{NO}_3^-\text{-N}$, SO_4^{2-} , Cl^- （イオンクロマトグラフィー検出器による） Na, K, Ca, Mg, Mn, Znの各濃度 （原子吸光分析器で測定）	水温（水温計による） pH（pHメーターによる） 電導度（電導度計(AOC-10)による） DO（DOメーター(UC-12)による） ORP（ORPメーターによる） COD, 陰イオン性界面活性剤濃度 （分光光度計(DR-2000)による） $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ （富栄養計(HC-1000)による） Cl, Na, K, Ca, Mg, Mn, Zn, Feの各濃度 （試料を0.45μmで濾過後ICP/MSで測定）

方向の採水場所の違いにより水質の違いが生じる可能性があるが、河川水質は参考データということで、1ヶ所からは1サンプルのみ採水した。

2. 2 調査結果

前回と今回の水質調査の結果を比較して顕著な変化が見られた項目について、各調査水質項目の分布の特徴や変化など、調査結果の概略を示す。なお、地下水質は浅層地下水か深層地下水かによって大きく変わると考えられるため採水深を考慮して解析すべきであるが、本研究では採水深の違いを考慮せず比較している。これはまず採水深は井戸の所有者への聞き取り調査によって調べたため、前回調査の 64 地点中 16 地点のみでしか採水深が明らかでないこと、既知となった採水深の値は 6.5m から 12.5m の間に分布していたこと、採水深未知の場合でも採水を行った井戸の多くは一般家庭や工場で洗浄用に使用されており、浅層地下水が豊富なこの地域において、わざわざ深井戸を掘るとは考えにくいことなどから、全てを浅層地下水と仮定して解析することとした。

(1) 水温

図 2 に前回調査と今回調査の水温分布を示す。前回と比べて分布に大きな変化は見られないが、全体として地下水の水温が高くなっている傾向が見られる。今回の調査は前回の調査と同じ井戸かその近傍の井戸からデータを採取しているので、今回調査の 43 地点について、前回調査と同一の井戸または近傍の井戸での増減関係の全体的な傾向を見るため、ノンパラメトリック検定の一つである符号検定により大小関係の有意差を見た。ここでノンパラメトリック検定である符号検定を用いたのは、データに正規性や等分散性の仮定を置くことが困難であったためと、大きく値が増減した少数の地点の変化にあまり影響されず、全体としての増減関係を比較するためである。以下、本研究では各水質項目について、全て同じ方法で符号検定を適用し、有意差を確認している。水温の変化について符号検定を行うと、有意確率 1.0% となり有意水準 5% で今回の値の方が高くなっている。これは、日最高気温 30℃ 以上の日数が、1991 年は 12 日間なのに対し 2004 年は 94 日間もあったことや、日最低気温 25℃ 以上の日数が、1991 年は 0 日間なのに対し 2004 年は 26 日間

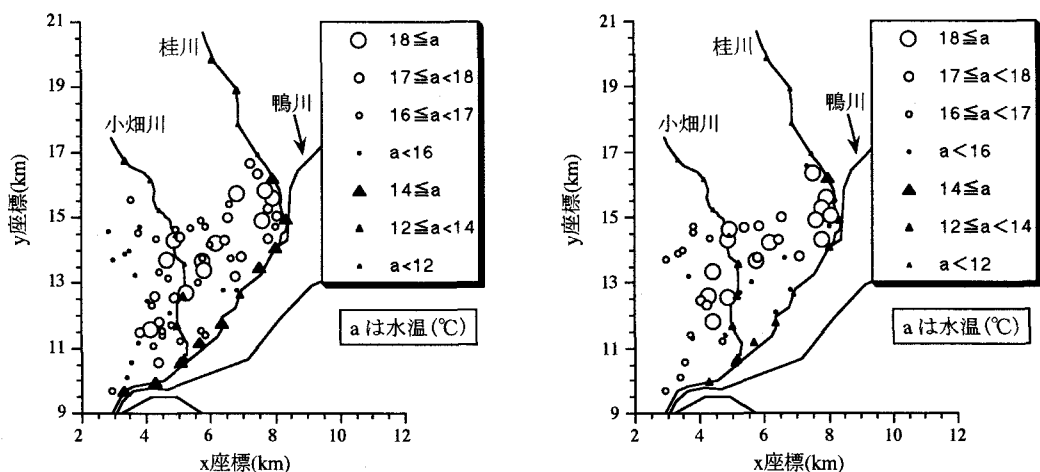


図2 前回調査と今回調査の水温分布（左が前回、右が今回）

もあったことなどを考えると、前回に比べて今回は地下水の水温が夏の間に上昇し、冬に水温があまり下がらなかったことが原因と推定される。しかし後で述べるように、国土交通省が継続観測を続けている領域内の井戸でも、この10年間ほど水温の上昇傾向が見られることから、単に2004年が1991年に比べて平均気温が高かったことだけが原因ではない可能性もある。

(2) 電導度

図3に前回調査と今回調査の電導度分布を示す。前回に比べ、今回の調査結果では全体的に値が小さくなっている。符号検定の結果では、有意確率0.0%となり有意水準5%で今回の方が値が小さい。その中でも特に、小畑川流域で値が小さくなっている地点が多い。これは、2.3で示すように小畑川流域で下水道の整備が進み、生活排水が直接小畑川に流入しなくなり小畑川の水質が良くなったことや、また、排水路などから生活排水が直接地下に浸透する量が少なくなったことが主な理由として考えられる。

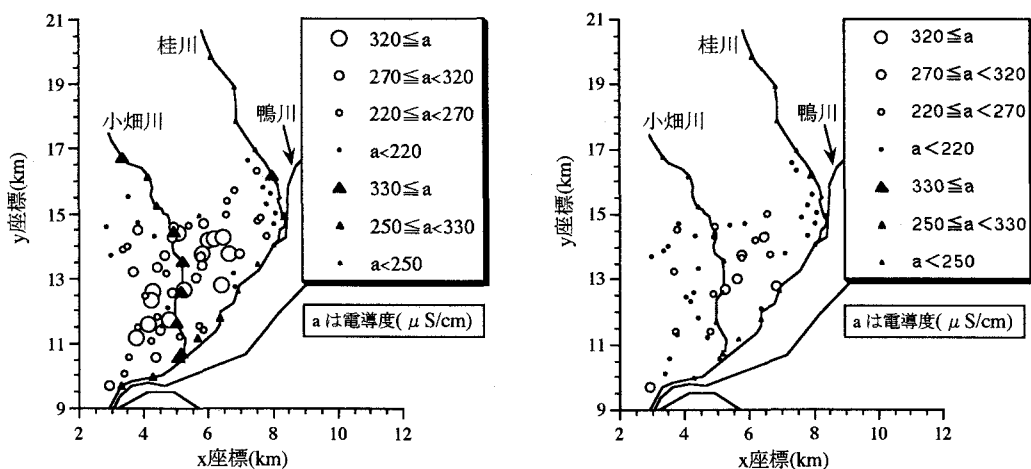


図3 前回調査と今回調査の電導度分布（左が前回、右が今回）

(3) 陰イオン性界面活性剤濃度

図4に前回調査と今回調査の陰イオン性界面活性剤濃度分布を示す。前回の分布では、小畑川とその流域、桂川と鴨川の合流点付近などで高い濃度を示していた。陰イオン性界面活性剤は洗剤等に含まれており、生活系排水による汚染の指標となるが、当時小畑川流域では下水道の整備が進んでいなかったこと、桂川と鴨川の合流点付近では、下水処理水などを含んだ桂川からの浸透水の水質の影響などが、高い濃度を示していた原因として考えられる。また、これらの地域は他の地域に比べて人口が密集していることも原因の一つであると考えられる。

前回から今回への変化では、まず、小畑川とその流域の浅層地下水で濃度がかかなり下がっていることが見られる。全体的にも符号検定の結果では、有意確率 4.5%となり有意水準 5%で今回の方が値が小さい。この原因としては電導度同様、この地域での下水道普及率の向上が大きく影響していると考えられる。また、桂川の濃度にも若干の減少が見られることから、陰イオン性界面活性剤に関しては桂川からの浸透水の水質が若干改善されている可能性もある。

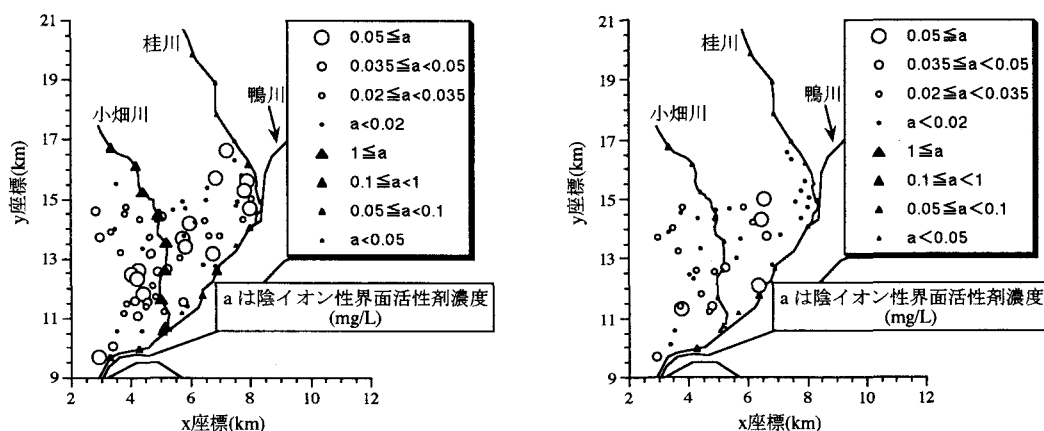


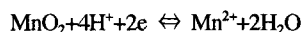
図4 前回調査と今回調査の陰イオン性界面活性剤濃度分布 (左が前回、右が今回)

(4) DOおよびMn濃度

図5および図6に、それぞれ前回調査と今回調査のDO分布とMn濃度分布を示す。

まずはDOについて、前回調査の分布の特徴としては、小畑川右岸では、山から涵養される酸素を多く含んだ地下水の影響で高い値を示し、桂川右岸では、河川水が地下に浸透する際、桂川河床においてDOが消費されるため、低い値を示す傾向が見られた。米田ら⁴⁾は調査が行われた時期は降雨が少ないことから地表面からの雨水の浸透を無視した数値シミュレーションにより、これが小畑川中流部付近での大きな水位の落ち込みに起因する水質分布であることを明らかにしている。今回調査でもこの傾向に変化は見られない。符号検定の結果でも有意確率54.2%となり、有意差は見られない。

また、Mn濃度については、前回調査、今回調査ともに、桂川右岸で高い濃度を示し、小畑川右岸で低い濃度を示すという分布になっている。土壌中のマンガンは大部分が+2(II)および+4(IV)の酸化数を示し、IIのときは主として交換性および水溶性の Mn^{2+} 、IVのときは主として不溶性の酸化マンガン(MnO_2)およびその水和物として存在する。酸化マンガン(IV)は土壌溶液中の Mn^{2+} と次式のような平衡関係にある⁷⁾。



よって、酸素濃度が減少し、還元状態になると平衡が右に移動し、土壌溶液中の Mn^{2+} 濃度が増加する。こ

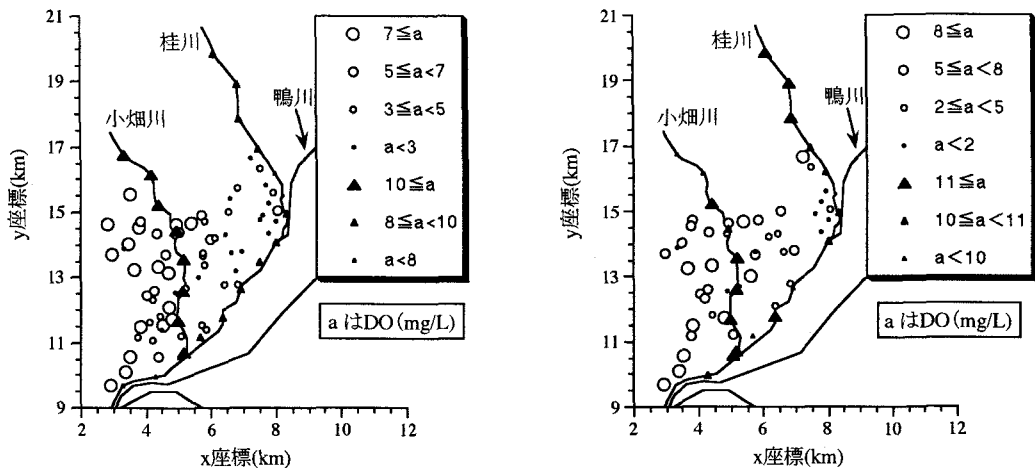


図5 前回調査と今回調査の DO 分布 (左が前回、右が今回)

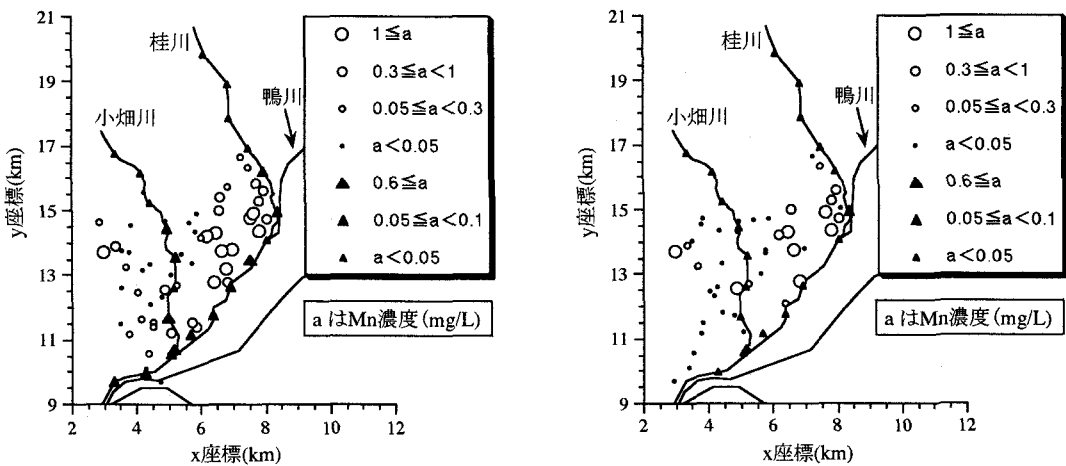


図6 前回調査と今回調査の Mn 濃度分布 (左が前回、右が今回)

のため DO 濃度が低い領域で高濃度となっていると考えられる。つまり、主たるメカニズムとして桂川と小畑川の間領域では桂川からの涵養水中の DO が河床において消費されてしまい、結果として DO 濃度の低い水が桂川から涵養されることとなり、地下水が還元状態となって Mn 濃度が高く飲用に不適な地下水となってしまうと考えられる。この傾向は前回調査から変わらず、水質改善の傾向は見られない。符号検定の結果でも有意確率 22.2% となり、有意差は見られない。

また、今回のデータについて、Spearman の相関係数を求めてみると DO と比較的是っきりした相関が認められたものとしては Mn (相関係数 $r=-0.65$) の他に、ORP ($r=0.61$)、 NO_3^- -N ($r=0.42$)、 NH_4^+ -N ($r=-0.45$)、Fe ($r=-0.48$) がある。これらの結果は ORP や NO_3^- -N は DO が高くなると値が高くなる傾向が、また、Mn、 NH_4^+ -N、Fe などは DO が高くなると値が低くなる傾向があることを示しており、 NH_4^+ -N の酸化メカニズムや三価の鉄が沈殿しやすく二価の鉄が溶解しやすいことを考えると、妥当な結果と考えられる。

2. 3 下水道普及率の推移

2.2 (2),(3)において、小畑川流域の地下水質が良くなった原因として、下水道の整備が進んだことを挙げた。

この地域は、京都府が流域下水道の整備を進めている桂川右岸流域の中にあり、その地域の普及率の推移を図7に示す⁸⁾。

前回の調査が行われた1991年における普及率は75%であったが、今回調査を行った2004年の前年には98%にまで増加している。このことから、地下水質が良くなっている原因の一つとして下水道の整備が考えられる。

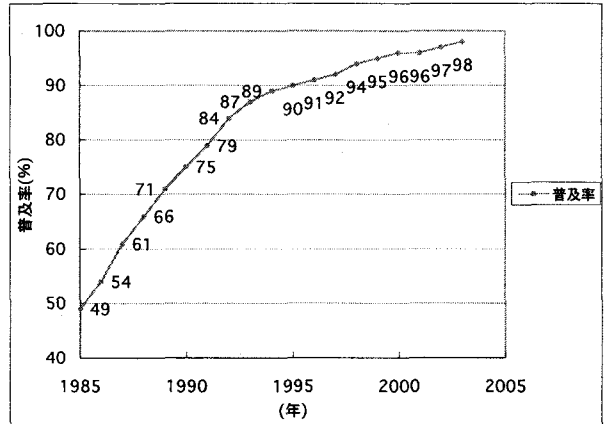


図7 桂川右岸流域における下水道普及率の推移

3. 継続モニタリング井戸データによる検討

地下水は、採水日や季節などによって水質が大きく変化する。そこで、今回の水質調査で水質が良くなったと推定された地域が、今回偶然水質が良かったのではなく、前回の水質調査のときから経年的に水質が良くなっていることを示すために、国土交通省（旧建設省）がモニタリングを行い、文献データとして公表されている地下水位年表⁹⁾、地下水水質年表¹⁰⁾のデータと、今回の水質調査結果とを比較・考察した。なお、文献の採水地点の中で、今回の調査領域内である小畑川流域にあり、比較的採水深度の浅かった上植野(図1)の地点のデータを採用した。

3. 1 地下水位

文献から得られた地下水位データを、図8に示す。

1989年から2002年まで、季節変動以外に大きな変動は見られないが、少しずつ水位は上昇しているといえる。米田らの研究⁴⁾によると、この地点から南に約5km程のところに地下水位の大きな落ち込みが見られ、そこに向かってこの地点からも地下水が流れ込んでいると推定されていた。図を見ると、当時から現在に至るまで、少しずつ地下水位は上昇してきており、先述の地下水位の大きな落ち込みの影響は徐々に小さくなっている可能性がある。

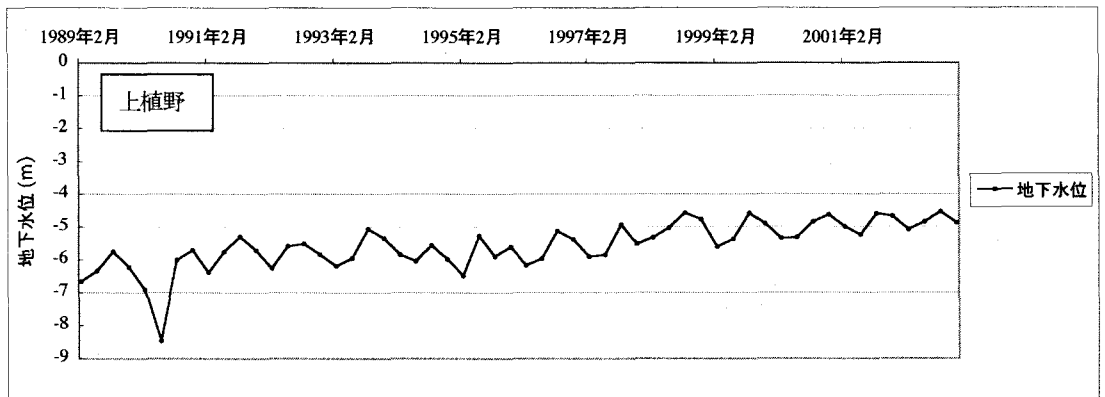


図8 地下水位（上植野）

3. 2 地下水質

文献から得られた地下水質データを、図9～図12に示す。

図9において、pHにはほとんど増減は見られないが、水温には若干の上昇傾向が見られる。この傾向は3.1の水位変化とも関係している可能性があるが、降雨による地下水涵養パターンの変化などを解析しないとはっきりした原因はわからない。

図10において、電導度、塩素イオン濃度は同じようなグラフの形を示しながら、1989年と比べて3分の2ほどの値に減少している。図11において、COD、DOともに季節変動が大きいものの、CODは徐々に減少してきているが、DOはほとんど変化が見られない。図12においては、K濃度以外は値が減少傾向を示しており、2002年の値は1989年の値のNaが72%、Caが73%、Mgが60%となり、ほぼ同じ比率で減少している。電導度、CODは総合的な汚染の指標に、Na濃度と塩素イオン濃度は生活系排水による汚染の指標になることから、図9～12を見る限り、地下水質は良くなっていると推定される。前回と今回の調査結果の比較では、電導度は符号検定の結果でも有意水準5%で減少しており、これらについては文献のデータと一致している。よって、上植野における地下水質の経年変化からも、この地域における浅層地下水質の改善傾向が見てとれる。

4. 結論

前回調査と今回調査を比較した結果、電導度、陰イオン性界面活性剤濃度などの主として生活排水に関係する項目に関しては、2.2で示したように、小畑川流域の地下水質、小畑川の河川水質は良くなっており、

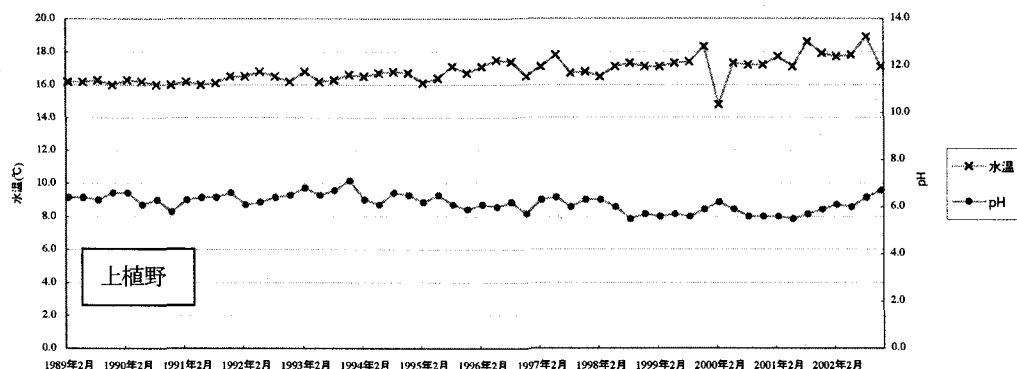


図9 地下水質（上植野）①

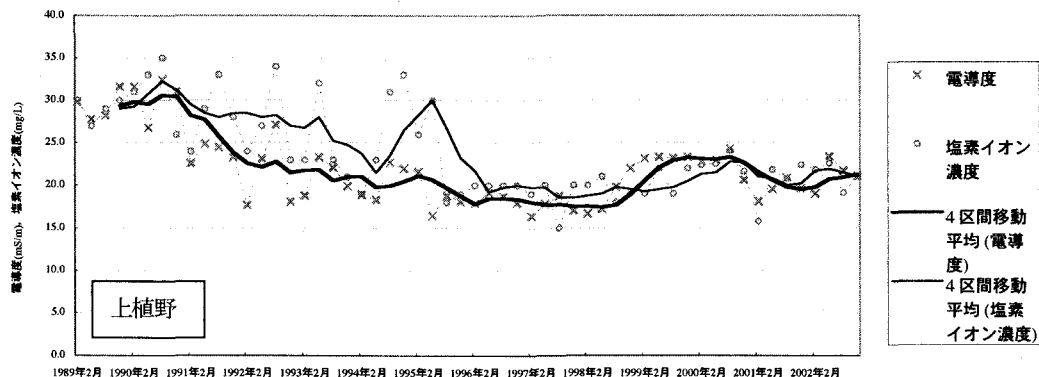


図10 地下水質（上植野）②

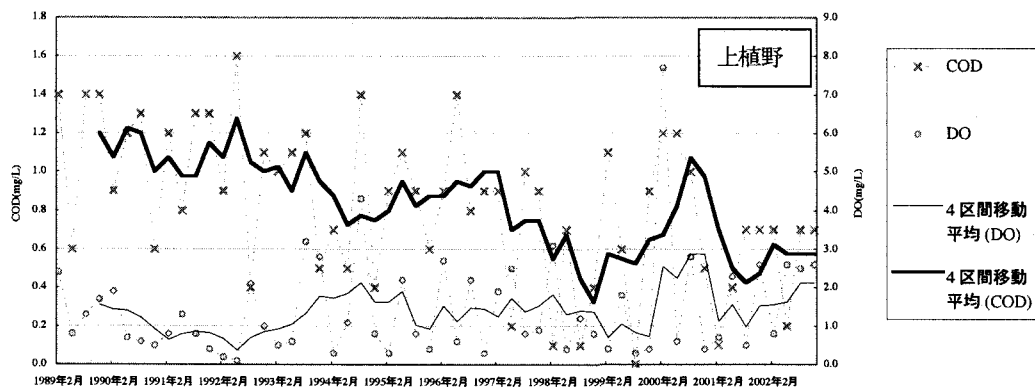


図 11 地下水質（上植野）③

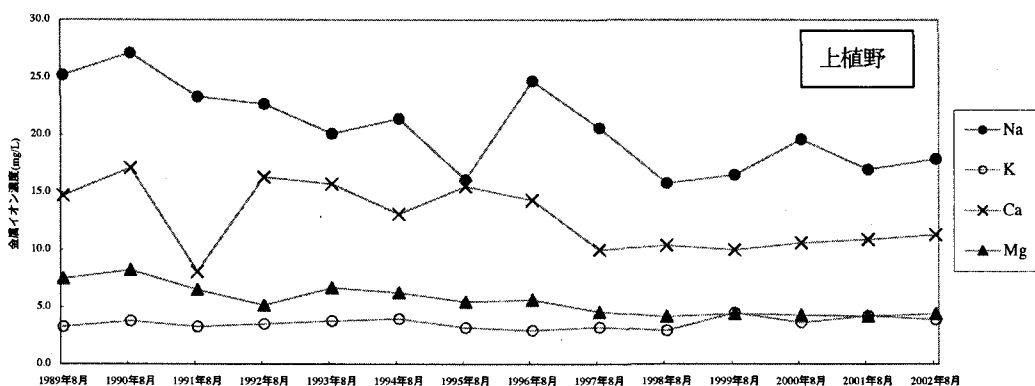


図 12 地下水質（上植野）④

水質分布は大きく変化している。その主な要因としては、下水道普及率の上昇が考えられ、下水道の整備は表流水質の改善のみでなく、浅層地下水質の改善にも有効である可能性が示唆された。しかし、DO や Mn 濃度に関しては、前回調査と比べて水質分布は大きく変化しておらず、小畑川右岸は、山から涵養される酸素を多く含んだ地下水の影響を受けて、DO 濃度の高い比較的良好な水質の地域であり、桂川右岸は、比較的水質が悪化した桂川からの浸透水の影響を受けて、DO 濃度が低く水質が悪化した地域であるという傾向は変わっていない。

また、国土交通省の継続観測井戸におけるデータを解析した結果、総合的な汚染の指標となる電導度、COD や、生活系排水による汚染の指標となる Na 濃度、塩素イオン濃度は経年的に値が小さくなっていることがわかった。このことより、今回の調査で水質が良くなったと推定された小畑川流域に関しては、今回の水質調査のときだけでなく、経年的に水質が良くなってきていることが示された。

浅層地下水質を維持・改善していくためには、下水道の整備などによって、表層からの汚水の浸透を減少させるとともに、涵養源の水質を向上させることが必要と考えられる。

謝辞

本研究で使用した地下水位年表および地下水水質年表のデータは国土交通省淀川河川整備局から提供を受けた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Lerner, D.N. and Barrett, M.H.: Urban groundwater issues in the United Kingdom. *Hydrogeology Journal*, 4(1), pp.80-89, 1996
- 2) Cogger, C.: On-Site Septic Systems: The risk of groundwater contamination. *Journal of Environmental Health*, 51, pp.12-16, 1988
- 3) 米田稔、井上頼輝、武内晴彦、滝根直哉、福原真一；ある盆地における広域地下水質悪化状況の調査例、地下水汚染とその防止対策に関する研究集会第2回講演集, pp.150-167 (1992)
- 4) Yoneda, M., Morisawa, S., Takine, N., Fukuhara, S., Takeuchi, H., Hirano, T., Takahashi, H., Inoue; Groundwater Deterioration Caused by Induced Recharge: Field Survey and Verification of the Deterioration Mechanism by Stochastic Numerical Simulation, *Water, Air, and Soil Pollution*, 127, pp.125-156, 2001
- 5) 上治寅次郎「京都近傍地質誌」、p24,p67, 1961
- 6) 農業用地下水研究グループ「日本の地下水」編集委員会；「日本の地下水」、地球社、1986.
- 7) 久馬一剛ら編集「土壌の辞典」朝倉書店, p.460, 1993
- 8) 京都府；URL(<http://www.pref.kyoto.jp/gesuido/page3.html>), 2005
- 9) 国土交通省（旧建設省）河川局編；地下水位年表, （社）全国鑿井協会, 1989～2002
- 10) 国土交通省（旧建設省）河川局編；地下水水質年表, （社）地下水技術協会, 1989～2002