

化学成分から見た京都市街域の地下水

向井 浩*

1. はじめに

京都盆地は、大阪層群とその被覆層から成る堆積層を地盤とした細長い盆地で、市街地が多くを占める北部域は、東西約8 km、南北約20 kmの大きさを持つ[1]。礫・砂・粘土層の互層から成る堆積層はその内部に帯水層を含むため、京都盆地は地下水盆を形成して、豊富な地下水を貯えている。京都水盆の水質についての研究報告は、地下水利用の多い、盆地中心部以南の伏見区および木津川周辺部についてなされている[2-4]。一方、盆地北部域の鴨川を中心とした京都市市街部の地下水の流動や水質について調べた研究報告は、上水が地下水から琵琶湖疎水へと転換され、飲料用としての地下水利用が減少したこともあってか、1933年の沖野らの研究[5]以降、殆どなされていないようである。

京都盆地北部都市域の地下水の状況を把握することは、都市化による地下水の汚染実態や汚染経路を把握する上で、また、都市域の被覆土壌への涵養を考える上で重要性を増しているといえる。特に、京都市南部地域や大阪方面へと流下する地下水系への影響を鑑みると、水質に基づく地下水系の解析は有益であると思われる。現在、公共水道水への転換により、都市部の地下水試料を容易に得られる井戸は多くない。しかし、京都市内の神社仏閣においては名水、神水としての名残を残し、地下水を供しているところも多い。これらの井水を採取し、主に都

市部の地下水の水質分析を行い、成分組成の相関について調べた。また、都市化の地下水への影響についても考察した。

本研究では、京都盆地北部（東山丘陵地、伏見区、宇治市の地下水を含む）の25地点の井水と、京都北山地区の4地点の井水、計29地点の井水について、17項目の水質分析を行い、種々の検討を行ったので、その結果を報告する。

2. 実 験

試料採取は、1994年12月20日から25日の6日間で29試料全ての採取を行った。採水地点は、京都市28地点（左京区7、上京区5、中京区3、下京区2、西京区1、東山区4、山科区1、南区2、伏見区3）と宇治市1地点の計29地点である。29の採水地点を図1に示した。地下水との比較のため、伏見区内において京都市水道水

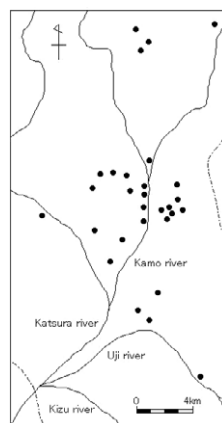


図1 京都盆地北部域の井水の採水地点

*京都教育大学理学科准教授

を採取し、同様の分析を行なった。

分析方法は、JIS K 0101 (1991) [6]に準拠し、文献7を参考にした。

温度（ガラス製棒状温度計）、pH（堀場製作所製コンパクト pH メータ B-112）および導電率（堀場製作所製コンパクト導電率計 B-173）の3項目は、採水時に現場で校正と測定を行った。

その他14項目の分析は、試料を2L ポリエチレン瓶に採水して実験室に持ち帰り分析を行った。

酸化還元電位は、ORP電極（東亜電波製 PTS-5011C）を用いて測定（東亜電波製 pH メータ HS-60S）した。全蒸発残留物は、試料水200mLを105°Cで蒸発乾固させ秤量した。CODは、過マンガン酸カリウムによる酸素消費量（酸性法）により測定した。Ca²⁺、Mg²⁺、鉄、マンガンはフレイム原子吸光法（日立製作所製308形デジタル2波長原子吸光光度計）で、

Na⁺、K⁺は炎光光度法（同原子吸光光度計）で、いずれも検量線法により定量した。Ca²⁺とMg²⁺については、ケイ酸、アルミニウムによる化学的干渉を抑制するため酸化ランタンを添加して測定した。また、鉄、マンガンについては、全蒸発残留物を有害金属測定用濃硝酸2.5mLで溶解し10mLにすることで、20倍に濃縮した試料を測定した。HCO₃⁻は、メチルレッドを指示薬とした硫酸による酸塩基滴定によりpH 4.8アルカリ度を測定し、HCO₃⁻を算出した。遊離炭酸（CO₂）は、HCO₃⁻濃度とpHから平衡計算で求めた。Cl⁻はクロム酸バリウム法を、SO₄²⁻はチオシアン酸水銀（Ⅱ）法を用いて、吸光光度法（島津製作所製紫外可視分光光度計 UV-160A）により定量した。NO₃⁻の定量は、Aokiらのフローインジェクション化学発光法を用いた[8]。分析した17項目と測定方法を表1に示す。

表1 測定項目と測定方法

分類	測定項目	測定方法・器具
物理的項目	温度	ガラス製棒状温度計
	pH	電位差分析
	酸化還元電位	電位差分析
	導電率	導電率計
	全蒸発残留物	蒸発乾固
化学的項目	COD	過マンガン酸カリウム酸性法
	遊離炭酸	pHと[HCO ₃ ⁻]による平衡計算
陽イオン	カルシウムイオン	原子吸光光度法
	マグネシウムイオン	原子吸光光度法
	ナトリウムイオン	炎光法
	カリウムイオン	炎光法
陰イオン	硫酸イオン	クロム酸バリウム吸光光度法
	塩化物イオン	チオシアン酸水銀（Ⅱ）吸光光度法
	炭酸水素イオン	pH 4.8滴定法
	硝酸イオン	フローインジェクションー化学発光法
微量成分	鉄	原子吸光光度法
	マンガン	原子吸光光度法

3. 結果と考察

3-1. 測定項目間の相関

分析を行った8種類のイオン (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) の当量濃度の分析値の妥当性について検討した。イオンの当量濃度を用いて、正負の電荷均衡を調べたところ、僅かに正電荷(陽イオン)に対し負電荷(陰イオン)が不足気味な傾向が見られるが、概ね電荷の均衡がとれており、分析値の妥当性が確保されていると考えられる。ただし、1つの試料については、電荷の不均衡が大きく、測定値の不正確さが認められ、データの解析には注意が必要であった。この電荷不均衡の原因として、吸光光度法による $[\text{SO}_4^{2-}]$ の定量値の再現性があまり高くないことから、この成分の測定誤差による可能性が考えられる。また、全イオンの総濃度と、導電率、全蒸発残留物との相関からも、分析値の妥当性を検討したが、概ね妥当な相関関係が得られ、分析値の信頼性が確保されていると結論づけた。

2つの測定項目間の相関係数を全測定項目について調べ、相関係数の高いものについて考察した。

$\text{Na}^+ - \text{K}^+$ と $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ の相関係数はそれぞれ、0.86と0.76であった。 Na^+ , K^+ および Cl^- は互いに濃度の比に相関があると考えられる。このため、個々の試料について濃度比を求め幾何平均値を求めたところ、 $\text{Na}^+ : \text{K}^+ : \text{Cl}^- = 1 : 0.13 : 0.72$ の結果を得た。この値は、日本の各都道府県から集めた雨の年間平均成分濃度の比、 $1 : 0.14 : 0.64$ [9]に近い。地下水中のこれら3元素の起源は、雨水すなわち海塩粒子などのエアロゾルであり、海洋と陸水との間で循環しているものと推定される。

$\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ の相関係数は、0.88であった。当量比の幾何平均値として、 $\text{Ca}^{2+} : \text{HCO}_3^- = 1 :$

1.15が得られた。このことは、大気中の二酸化炭素の水への溶解、或いは好気的条件下での有機物の分解により生じた炭酸と、岩石成分との中和による風化過程の中で、 Ca^{2+} が供給されたことを示唆すると思われる。

3-2. 地下水の分類

水質の違いから、地下水試料をいくつかに分類することを試みた。

まず、イオンの総濃度と導電率に着目した。イオンの総濃度 ($\Sigma [\text{Ion}]$) と導電率 (EC) の相関グラフを図2に示す。北山および東山丘陵地の山間部の井水8試料は、イオンの総濃度と導電率の値が低い。これらの井水は、降水が山地や丘陵地の斜面の比較的浅い地層を浸透、流下した後、比較的短い滞留時間で地表面に汲み出された、涵養地点が近く採水深度が浅い地下水であると推測できる。これらの8井水は、浅層の地下水であるため、採水時の冬期の低い気温の影響を受けやすいと考えられる。図3に水温の頻度分布を示す。8井水はいずれも15°C以下で、うち5井水は10°C以下であった。

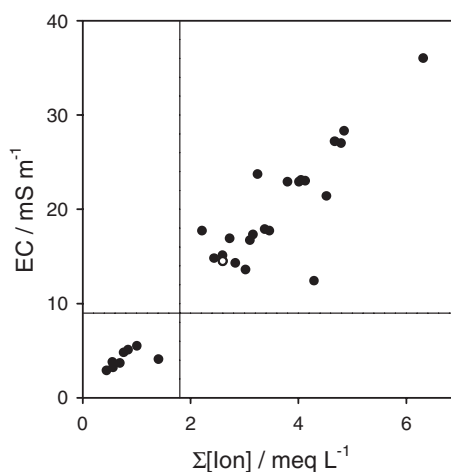


図2 イオンの総濃度と導電率の相関
○：京都市水道水

地温の年変化が消失する恒温層が深度 8–15 m に存在し、その地温はその地点の年平均気温よりも 1–2 °C 高い [10]。京都市の年平均気温は 15 °C で、図 3 の水温の頻度分布においても、16–17 °C にピークを持つ分布が見てとれる。井戸の状況により、採水時の水温は地中での水温と必ずしも一致しない。しかし、16–17 °C にピークを持つ分布は、概ね恒温層以深の地下水の水温分布を示していると思われる。

塩化物イオン濃度の頻度分布を図 4 に示す。塩化物イオン濃度が 0.4 meq L⁻¹ 以上の井水は、15 試料であった。これら 15 井水は、硝酸イオン濃度も高い傾向があった。これらは、いずれも京都市中心部および伏見区の市街地に位置する

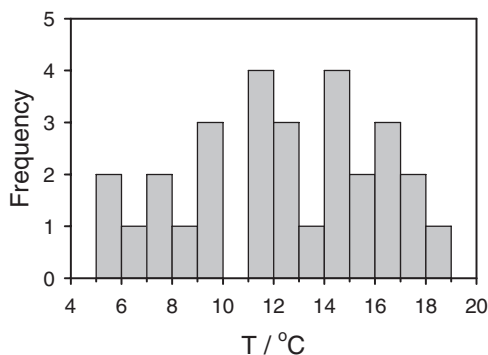


図 3 井水の水温の頻度分布

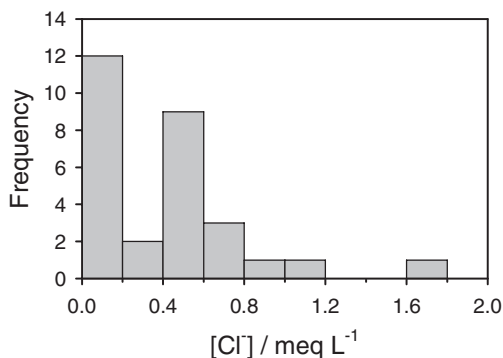


図 4 井水の塩化物イオン濃度の頻度分布

比較的浅い層の井水（井戸深度は 100 m 足らず）である。地下水中の Cl⁻ の増加の一つの原因として、地表水の混入が考えられる。鴨川および疎水の流域に位置するこれら 15 井水は、こうした地表水からの涵養を受けていることが示唆される。

市街地に位置する井水でも、塩化物イオン、硝酸イオンの濃度が高くない井水が 2 点あった。これらの井戸の深度は比較的深い（約 100 m 以上）、地表水の涵養の影響が少ないためと考えられる。

その他の 4 井水はいずれも、京都北山と京都盆地辺縁部の京都市郊外に属し、都市化の影響の少ない地域の井水であった。これらの井水の主要成分は、陽イオンでは Ca²⁺、陰イオンでは HCO₃⁻ であり、Ca-HCO₃ 型の汚染のない典型的な浅層地下水の型をしており、採水地点の環境が良好で水質的に非常に優良なものであることを示している。

以上の考察から京都地域の 29 井水を 4 つの型に分類できる。すなわち、溶存物質量の少ない山地丘陵地型（8 井水）、塩化物イオン、硝酸イオンの多い都市部地表水涵養型（15 井水）、地表水の影響を受けていない都市部深井戸型（2 井水）および Ca²⁺ と HCO₃⁻ を主成分とする人為的汚染のない郊外型（4 井水）である。

3-3. 地下水の類似性

主要成分である 7 種類のイオン（Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻）の当量濃度を用い、濃度相関マトリックス法とパターン認識法の 2 つの方法で、水質の類似性を調べた。これらの解析により、地下水の水源の同一性や地下水流動についての情報が得られると期待できる。

濃度相関マトリックス法は、2 種類の試料水

について各成分の濃度比を相互に比較して、行列表現を行い、行列の成分の値から、2種類の水間の類似性を判定する方法である。パターン認識法は、一つの井水を7つの主要イオンの濃度を成分として持つ7次元ベクトルと見なし、2種類の水間の類似性を2つのベクトルが成す角度で表現するものである。角度が小さいほど水質の類似性は高い。

鴨川沿いに並ぶ、6井水は強い類似性を持ち、北から南に鴨川の流れに沿って地下水が流動していると思われる。一方その西部の3井水も類似性が高く、地下水が南西方向へ流下していることを示唆すると思われる。

4. おわりに

京都市街域の地下水を化学成分に基づいて調べたところ、概略、次の事柄が結果として得られた。

京都市の市街域の地下水では、地表水の混入が大きく、塩化物イオンが多く、同時に硝酸イオンも多い傾向が見られた。しかし、郊外部および深井戸では、汚染の少ないCa-HCO₃型の良好な水質が見られた。

化学成分の解析により、鴨川沿いに北から南方向へ地下水が流動していること、鴨川の西側

にも北東から南西の方向に地下水の流れがあることが推定された。

参考文献

- [1] 山口省三, 地下水と井戸とポンプ, **22**, 8-22 (1980) .
- [2] 松原厚, 醸造学雑誌, **6**, 568-588 (1929); 同, **6**, 665-671 (1929).
- [3] 堀池昭, 京都酒造工業研究会会報, **11**, 38-45 (1983); 同, **21**, 27-37 (1993).
- [4] 谷口敬一郎, 物理探査, **45**, 54-62 (1992).
- [5] 沖野茂, 和泉正顕, 福原真介, 水道, **8**, 417-430 (1933).
- [6] 日本工業標準調査会, 工業用水試験方法 JIS K 0101, 日本規格協会, 東京, 1991.
- [7] 日本分析化学会北海道支部編, 水の分析—第4版—, 化学同人, 京都, 1994, pp. 131-235.
- [8] T. Aoki, S. Fukuda, Y. Hosoi, H. Mukai, *Anal. Chim. Acta*, **349**, 11-16 (1997).
- [9] 西村雅吉, 環境化学, 裳華房, 東京, 1991, p. 25.
- [10] 山本莊毅編, 陸水, 共立出版, 東京, 1968, p. 25.