ますがた
真姿の池湧水群を中心とした浅層地下水の揮発性有機塩素化合物の濃度比*

宮崎礼子**・小倉紀雄***

**The Concentration ratio of the Volatile Organochlorine Compounds
in the Masugatanoike Springs and Shallow Groundwater**

Reiko Miyazaki**, Norio Ogura***

Abstract

Water qualities of spring waters (N0k, N0e, N0w, and N0m) at Kokubunji City, Tokyo which springs were very close were studied during January to December 1990. N0e and N0w are belong to Masugatanoike springs. These springs were very close and their water qualities such as anions or metals were similar.

In these spring waters we detected volatile organochlorine compounds (VOCC) such as trichloroethylene (TCE), tetrachloroethylene (PCE), and 1-1-1trichloroethane (MC). Although sampling stations were very close, VOCC concentrations of each spring waters showed different tendency. At N0k and N0e, TCE concentration was highest of three compounds. But at N0w and N0m, PCE concentration was highest of all.

Concentrations of TCE and MC had close relations at these springs. And these relations were different between N0k-N0e and N0w-N0m. At the result, it was suggested that there were the relations with TCE concentrations and MC concentrations and there were two groundwater flows.

キーワード：揮発性有機塩素化合物、浅層地下水、地下水流れ、濃度比、真姿の池湧水群
Volatile Organochlorine Compounds, Shallow Groundwater, Concentration ratio, Masugatanoike Springs

* 本研究は東京農工大学農学部卒業研究として行ったものである

** 大成建設(株)技術研究所 Technology Research Center, Taisei Corporation

*** 東京農工大学農学部 Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

1. はじめに

武蔵野台地の武蔵野面と立川面とを分ける国分寺崖線は東京都立川市付近から発し多摩川まで至っており、崖線沿いには昔から湧水が多く湧出している。そのうちの多くは、宅地造成、下水道の完備などによる地下水の減少により水量が減少したり、枯渇しているが、国分寺市、小金井市だけでも日立中央研究所構内、真姿の池湧水群、東京経済大学構内湧泉などに比較的水量の多い湧水が残っている。著者らの研究室では、国分寺崖線沿いの湧水のうち国分寺市の真姿の池湧水群を中心として湧水の水質測定を定期的に行ってきた。環境庁選定の名水百選に選ばれている真姿の池湧水群は多摩川の支流の野川の水源の1つで、付近に東屋や遊歩道などが整備されており、市民の憩いの場としても親しまれている。ここから検出される汚染物質は、以前は硝酸イオン、塩化物イオンを中心とする家庭排水由来または農業由来の汚染物質が主であったが、最近では半導体工業、クリーニング業などから排出される揮発性有機塩素化合物が認められるようになった(加藤、小倉、1991)。さらに、真姿の池湧水群において肉眼で認められる2つの大きな湧出口では揮発性有機塩素化合物による汚染状況が異なる傾向が認められた(平野、1991)。このことから、真姿の池湧水群には異なる地下水流が流れ込んでいる可能性が考えられた。そこで、本研究は東京都国分寺市の真姿の池湧水群を中心とした小集水域における揮発性有機塩素化合物濃度を測定し、地下水流れとの関係を考察することを目的として行った。

2. 調査地概要

武蔵野台地は東京の西部に広がっており、洪積世の後半に作られた日本で最大級の沖積台地である。この台地は北は荒川、南は多摩川、西は山地と丘陵に囲まれており、台地の等高線は関東山地東麓の青梅付近を扇頂として東に広がる扇形をしている。この扇形は荒川低地帯の沈降運動により北東方向への勾配が強く(貝塚、1957)、その傾向は200m以上深部の地層構造にも見られる。武蔵野台地にはいくつかの段丘面があり、高位から金

子台、所沢台などの末吉面、豊島台や荏原台などの武蔵野面、立川面、青柳面、拝島面及びそれ以下の断片的な段丘崖の順になっている。このうち武蔵野面では地表から順に関東ローム層、武蔵野礫層が堆積し、その下に帯水層である上総層群が広がっている。武蔵野面と立川面との境に位置する国分寺崖線は東京都立川市のJR立川駅付近から発し世田谷区の二子玉川付近まで続いている。本研究の調査地はこの崖線沿いの国分寺市に位置する4地点の湧水を中心に設定した。調査を行った地域では武蔵野面と立川面との標高差が約14mであった。

3. 試料採取地及び調査、分析方法

3.1 調査、採水地点

(1) 湧水

平野(1991)により真姿の池湧水群において2つの大きな湧出口が確認されているため、本研究ではこの湧水群の2つの湧出口からそれぞれ別々に試料を採取することとし、東側の湧出口をN0e、西側の湧出口をN0wとした(図1)。さらに真姿の池湧水群の東西に位置する湧水2地点、N0kおよびN0mからも採取を行った(図1)。湧水試料の採取および調査は1991年1月から12月にかけて月1回又は2回行った。

(2) 浅層地下水

崖線上の武蔵野面における地下水水質および地下水流を明らかにするため、調査対象とした湧水に比較的近い地域において浅層地下水の採水を行った。調査は国分寺市の管理する浅井戸1地点、個人所有の浅井戸1地点、水位観測孔5地点及び共用井戸跡7地点の計14地点で行った(図1)。浅井戸、水位観測孔および共用井戸跡はいずれも深度が10~20mであることから、調査を行った湧水と同じ帯水層の地下水であるとみなした。

3.2 調査、試料採取および分析方法

(1) 湧出水量

真姿の池湧水群では各湧出口毎に湧出水量を測定することが困難であったため、N0eとN0wの

図1 調査地点 (Sampling station)

合量を測定した。測定には、容量既知の容器に流水を満ち、それに要した時間から湧出水量を算出する一定容量法を用いた。N0k、N0mについては湧出水量を測定することができなかった。

(2) 一般水質項目

採水地点において水温(T_w)、電気伝導度(EC)を電気水質計(東邦電探 EST-3型)またはポケット伝導度計(横河北辰電気 SC51)を用いて測定した。

その他の項目については全て調査地点で試料を採水し、研究室に持ち帰り分析を行った。

pHはpHメータ(電気化学計器 デジタルpH計 HG-3)、全炭酸($T-CO_2$)は赤外吸光度計(島津製作所 URA-106)にて測定した。溶存酸素(DO)はウインクラー法のアジ化ナトリウム変法に基づいて定量した。塩化物イオン(Cl^-)、硝酸イオン(NO_3^-)、硫酸イオン(SO_4^{2-})はイオンクロマトグラフ(横河電気 IC-200)を用いて定量し、カルシウムイオン(Ca^{2+})、マグネシウムイ

オン(Mg^{2+})は原子吸光光度計(島津製作所 フレーム分光光度計 AA-670)にて定量を行った。珪酸態珪素(SiO_2-Si)はモリブデン青法により定量を行った。

(3) 揮発性有機塩素化合物

揮発性有機塩素化合物は調査当時に水質汚濁防止法で暫定基準値(現在の環境基準値)の設定されていた1-1-1トリクロロエタン(MC)、トリクロロエチレン(TCE)、テトラクロロエチレン(PCE)の3種類について分析を行った。

試料は採水地点で250mlの共栓付ガラスビンに取り、気泡が入らないように栓をしてシーロンフィルムで密封し、実験室に持ち帰った。実験室において試料40mlからn-ヘキサン10mlに揮発性有機塩素化合物を抽出した。このn-ヘキサンをECD付ガスクロマトグラフ(横河電気 HP5890A)に注入し、3種類の化合物の定量分析を行った。回収率はMC94.0%、TCE96.6%、PCE99.2%であり、5回の分析の変動係数は

MC2.11%、TCE2.73%、PCE1.83%であった。

(4)降水量

降水量は真姿の池湧水群から南東約1Kmに位置する気象庁の気象観測所(府中市幸町3-5-8東京農工大学農学部構内)の1991年の値を用いた(気象庁、1991)。

4. 結果及び考察

4.1 湧水中の一般的な水質の概況

調査を行った湧水4地点の水質の年間最大値、最小値および年平均値を表1に示した。

4つの湧水はいずれも1年を通して水温が16℃弱、pH6前後、DOは平均7.85~8.35mgO₂/lと好氣的条件であり、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、SiO₂-Siなどにも大きな変化は認められず、湧水間での違いも認められなかった。

NO₃⁻はN0mにおいて11月に水道水基準(10mgN/l)を超える10.4mgN/lが測定されたが、年間の平均ではどの湧水も基準値以下であった。また、真姿の池湧水群では既存の研究と比較して、NO₃⁻、Cl⁻濃度の年平均は減少傾向にあった(平野、1992)。

4.2 湧水中の揮発性有機塩素化合物濃度

(1)湧水中の揮発性有機塩素化合物濃度の月変化

調査を行った4地点では、揮発性有機塩素化合物のうち調査対象としたMC、TCE、PCEの3種類全てが検出されたが、基準値のMC-0.1mg/l、TCE-0.03mg/l、PCE-0.01mg/lを越える湧水はなかった。しかし、表1中の一般水質項目の場合と異なり、濃度およびその月変化に湧水間で差が認められた(表1、図2-a~d)。

調査を行った湧水の東端に位置しているN0kでは3種類の化合物の中でTCE濃度が年間を通して最も高かった(図2-a)。年間の平均濃度は12.2μg/lで、他の3地点の平均値の3倍以上に相当した。TCE濃度は10月に急に減少し、11月に最低値を示した後再び増加を始めたが、MC、PCE濃度には大きな月変化は認められなかった。

真姿の池湧水群の東側の湧出口であるN0eで

は図2-bに見られるように9月まではN0kと同様にTCE濃度が最も高かった。TCE濃度は月間降水量が200mmを超えた8月から減少を始め、月間降水量が100mm以下になった11月から再び増加を始めた。PCE濃度は8月に入っても減少は認められなかったが、TCE濃度が大きく減少したために両化合物の濃度の逆転が見られ、調査を行っていた期間中はPCE濃度の方が高いままであった。MC濃度には大きな変化は認められなかった。

N0eから僅か1m程西にあるN0wではPCE濃度が最も高く、9月に入り減少を始め、11月から増加する傾向にあった。TCE濃度はN0k、N0eと比較して非常に低く、10月から11月半ばにかけて検出限界以下となった。MC濃度は年間を通して濃度が低く変化も小さかった(図2-c)。

調査地点の西端のN0mではN0wと同様、PCE濃度が最も高くなっていた。PCE濃度の月変化はN0wと類似しているが、N0wに比べて全体的に濃度が低かった。MC、TCEは年間を通して低濃度であった(図2-d)。

以上の結果から、4つの湧水はTCE濃度が高い湧水(N0k、N0e)とPCE濃度が高い湧水(N0w、N0m)の2つのグループに分類された。このことから、4つの湧水が非常に近接しているにもかかわらず、異なる地下水の流れにより涵養されている可能性が示唆された。

(2)揮発性有機塩素化合物濃度の湧水間での関連性

揮発性有機塩素化合物による汚染は単独の化合物による汚染よりも、複数の化合物による複合汚染が多く(国立環境研究所、1991)、MCはTCEの代替物質として使用されているため2種類の化合物の用途は類似している(Rivett *et al.*, 1990)。また、調査を行った真姿の池湧水群においては、加藤、小倉(1990)によりMC濃度とTCE濃度との相関が高いことが報告されている。そこで本研究の調査地域における3種類の化合物間の濃度関係を調べた結果、TCEとMCの間には正の相関が認められた。また1991年のデータのみでは情報が少ないため、著者等の研究室において1987、1988、1990年に行われた真姿の池湧水群の水質調

表1 湧水の水質
(Water quality of spring waters)

	N0k		N0e		N0w		N0m	
Tw (°C)	16.0-16.4	(16.2)	15.6-16.3	(15.9)	15.3-16.5	(15.7)	15.1-15.9	(15.7)
EC (μ S/cm)	150-198	(170)	149-210	(175)	127-206	(177)	160-208	(184)
pH	6.0-6.3	(6.1)	5.9-6.2	(6.0)	6.1-6.2	(6.1)	6.0-6.2	(6.1)
DO (mgO ₂ /l)	7.08-9.56	(7.85)	7.35-9.17	(8.11)	7.82-8.94	(8.35)	7.53-8.92	(8.10)
T-CO ₂ (mgC/l)	19.2-26.6	(23.4)	16.4-25.4	(22.5)	16.6-26.6	(21.0)	19.8-28.3	(23.2)
Cl ⁻ (mg/l)	10.2-18.7	(13.8)	8.8-15.4	(13.1)	11.9-14.2	(13.2)	12.1-15.2	(13.8)
NO ₃ ⁻ (mg/l)	21.0-32.1	(24.0)	16.5-33.1	(26.9)	29.8-40.7	(34.4)	26.4-46.1	(35.4)
NO ₃ -N (mgN/l)	4.75-5.83	(5.43)	5.47-7.48	(6.08)	6.73-8.31	(7.76)	5.97-10.4	(8.00)
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	6.26-9.03	(7.53)	4.29-10.7	(8.94)	4.91-8.61	(7.39)	4.38-8.68	(7.32)
Ca ²⁺ (mg/l)	11.7-14.6	(13.2)	11.7-14.7	(12.9)	11.6-14.4	(13.1)	12.4-14.7	(12.9)
Mg ²⁺ (mg/l)	6.59-9.62	(8.36)	6.24-9.55	(7.88)	6.09-9.75	(7.99)	6.48-9.85	(8.22)
SiO ₂ -Si (mg/l)	10.5-12.6	(11.5)	10.1-12.3	(11.3)	10.2-14.4	(12.3)	11.7-13.7	(12.3)
MC (μ g/l)	0.88-2.33	(1.60)	0.23-0.87	(0.64)	0.20-0.42	(0.33)	0.12-0.66	(0.27)
TCE (μ g/l)	6.84-16.07	(12.21)	0.48-6.46	(3.09)	N.D.-0.48	(0.31)	0.19-1.05	(0.65)
PCE (μ g/l)	0.79-1.22	(0.96)	1.32-1.89	(1.56)	3.29-6.53	(5.51)	1.79-4.15	(3.38)

() 内 年平均値

図2 湧水の揮発性有機塩素化合物の月変化
(Monthly change of Volatile Organochlorine Compounds in spring waters)

- (a) N0k
(b) N0e
(c) N0w
(d) N0m

査の結果も加えて TCE と MC の関係を表わすグラフを作成した(但し、1987、1988 年は N0w のみ)。その結果は図 3 に示す関係となり、図のように 4 つの湧水を東側(N0k、N0e)と西側(N0w、N0m)の 2 グループに分けることが出来た。それぞれの相関係数は N0k と N0e が 0.91 ($n = 58$)、N0w と N0m が 0.79 ($n = 156$)と比較的高い相関が得られた。

以上の結果から、先に述べたように 4 地点の湧水のうち東側の N0k、N0e と西側の N0w、N0m とでは湧水の汚染状況が異なっており、真姿の池湧水群付近には地下水の分水界があると推定された。

(1)で述べたように N0e に比べ N0k の TCE 濃度が大きく、また両地点の TCE 濃度の月変化の様

図3 湧水中のTCEとMCの関係
 (Relation of TCE and MC at spring waters)
 注) 1987、1988データ 加藤、小倉(1990)
 1990データ 平野(1991)

子が類似していることから N0k 方向から N0e 方向へ向かう地下水の流れがあり、その流れにより TCE が運ばれているのではないかと推定された(図 2-a, b)。さらに N0k よりも N0e の方が濃度が低いのは TCE による汚染の少ない地下水が N0e へ供給されることにより揮発性有機塩素化合物が希釈されている可能性を示唆していると考えられた。

N0e においては降水量の増加と共に TCE と PCE 濃度の逆転が認められた(図 2-b)。これは N0w と N0e では通常は地下水の流れが異なっているが、台風時には多量の降水により N0w へ供給される地下水の水位が上昇し、N0e 側へ流れ込んだためと推定された。

(3) 湧水と武蔵野面上の浅層地下水の揮発性有機塩素化合物の関連性

湧水中の揮発性有機塩素化合物濃度および地下水の流れが真姿の池湧水群を中心として東西で異なることが推定された。そこで 4 つの湧水周辺の武蔵野面での揮発性有機塩素化合物による汚染状況を知るため、武蔵野面の浅層地下水の揮発性有機塩素化合物の調査を行った。調査対象には普段揚水している井戸が最適であるが、本調査地域では住宅地が少ないこと、地下水位の低下や水質汚染などにより常時使用している井戸が減少しているため調査には主として井戸跡や水位観測孔を用いた(図 1)。

水質調査の結果を表 2 に示したが、武蔵野面上の井戸では TCE 濃度は平均して非常に低く、14 地点中 2 地点においてのみ TCE 濃度が優先していた。PCE については N0w と同程度の濃度を示した井戸が認められた。地図上で調査地点の位置関係を見ると真姿の池湧水群を中心として TCE 濃度が高い地点と PCE 濃度が高い地点とに分けることができた(図 4)。このことから、武蔵野面において真姿の池湧水群より西方向から PCE、東方向から TCE の混入があったと推定されるが、これ等の汚染源を特定するには至らなかった。

5. まとめ

真姿の池湧水群を中心とした小集水域において

表 2 武蔵野台地の浅層地下水中の揮発性有機塩素化合物濃度
(Concentrations of Volatile Organochlorine Compounds in the shallow ground water at Musashino Upland)

	MC	TCE	PCE
1	0.38	8.33	0.34
2	0.40	N.D.	0.61
3	0.28	0.25	3.96
4	0.10	N.D.	0.78
5	0.40	N.D.	0.35
6	0.40	0.51	6.29
7	0.15	N.D.	2.62
8	0.23	0.08	3.50
9	0.40	N.D.	0.24
10	0.25	0.30	4.10
11	0.30	0.11	3.14
12	0.50	N.D.	0.25
13	0.33	N.D.	0.26
14	0.41	0.14	2.69

単位 $\mu\text{g}/\text{l}$
(N.D.-検出限界以下)

は MC 濃度と TCE 濃度との間に正の相関が認められ、このことから 2 つの物質による汚染には関係があることがわかった。

湧水の揮発性有機塩素化合物濃度の関係から、真姿の池湧水群では湧出口ごとに水質が異なっており、真姿の池湧水群は異なる地下水流れで涵養されていることが推定された。

いくつかの揮発性有機塩素化合物について各々の濃度を測定し、相互の関連性を検討することは比較的狭い範囲での地下水の流れを推定するのに有効であると思われる。

謝辞

本研究を行うにあたり、御協力いただきました東京農工大学農学部環境保護学科土壌水界環境学講座の皆様には感謝いたします。また、通産省工学技術院の上田真吾氏、東京都の加藤寛久氏、平野晃章氏には本研究を行うにあたり貴重なデータお

図4 湧水および浅層地下水中の揮発性有機塩素化合物の分布
(Distribution of Volatile Organochlorine Compounds in springs and shallow groundwaters)

よび御意見をいただきましたことを感謝いたします。最後に本論文の構成にあたり、助言をいただきました大成建設株式会社の藤原靖氏にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 貝塚爽平(1979): 東京都地学のガイド 東京都地学のガイド編集委員会編
- 加藤寛久、小倉紀雄(1990): 東京北多摩地区の湧水、および深井戸水中の揮発性有機塩素系化合物 水質汚濁研究 13-7、449～455
- 気象庁(1991): 東京管区気象月報 1月～12月
- 国立環境研究所(1991): 土壌および地下水圏における有害化学物質の挙動に関する研究 国立環境研究所特別研究報告 5p
- 平野晃章(1991): 武蔵野台地浅層地下水の動態と水質特性 東京農工大学1990年度卒業論文
- 平野晃章、小倉紀雄(1992): 水質変動からみた湧泉の湧出機構推定の試み 水利科学 36-2、63～79
- Rivett.M.O., Lerner.D.N., Lloyd.J.W. and Clark. L (1990): Organic contamination of the Birmingham aquifer, Journal of Hydrology, 113, 307-323
- (受付: 1994年6月30日、受理: 1994年10月20日)