

報 告

地下水汚染の機構解明に関する研究 (その2)

渡 辺 正 子 西 井 戸 敏 夫 森 田 一 夫
板 寺 一 洋
(非常勤研究員)

1 はじめに

1982年に環境庁がトリクロロエチレン等による全国の地下水汚染の現状を把握するため調査を始めてから10年たつが、地下水汚染は減少していないし、新たな化学物質による汚染も見つかっている。地下水汚染は、直接井戸に汚染物質が投棄された場合を除き、汚染物質で地層が汚染され、その影響が水質に現れてきたもので、汚染の機構を解明するためには地層中と地下水における汚染物質の挙動を明かにすることが大切であると考えられる。

そこで筆者らは平成2年度(1990年)、町田市と東久留米市において、夏期と冬期に調査を行い、地下水面の標高と水質組成から地下水域を区分し、トリクロロエチレン等の汚染地図を作成した。この調査により汚染はいずれも非常に狭い限られた地域(以下、町田地区及び東久留米地区と記する。)であり、また町田地区では主としてトリクロロエチレンによる汚染であり、東久留米地区ではテトラクロロエチレンによる汚染であることが確認された。平成3年の調査は両地区でそれぞれ汚染源と思われる事業所に直近する井戸1カ所と、その周辺の汚染井戸2カ所、計6カ所の井戸を監視井戸として選び、トリクロロエチレン等の分析を行った。この結果と平成2年度の調査結果とから、年間の汚染の変動と地中における汚染物質の動きの推定を行ったのでこれを報告する。

2 調査方法

(1) 調査方法

調査の期間は1991年6月から1992年4月までで、雨量の多くなる11月より毎月調査をし、他の期間は隔月である。調査地点を図1、図2に掲げる。

現地です井戸枠の高さ、井戸の深さ、地下水位を測定し、これらから地下水面の標高を求めた。その後、採水

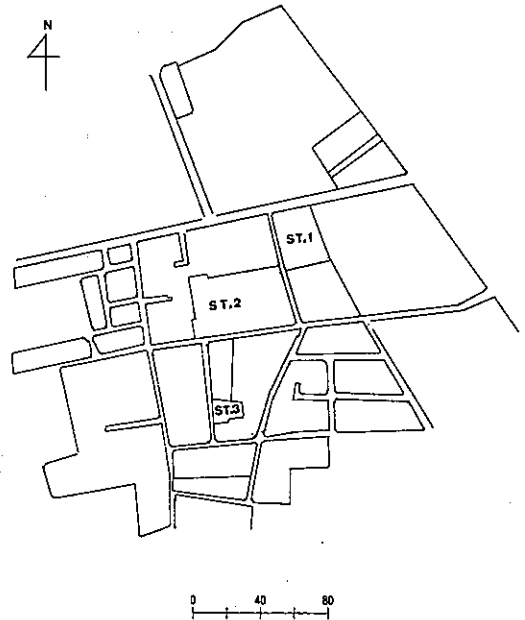


図1 町田地区の調査地点

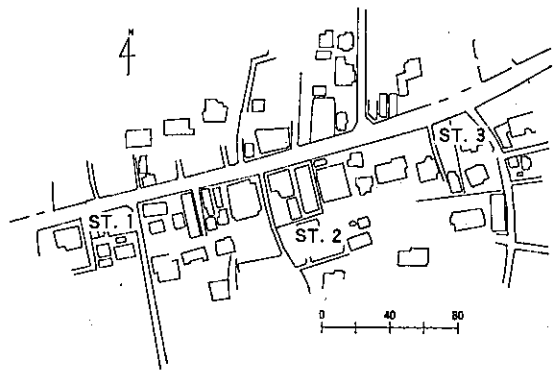


図2 東久留米地区の調査地点

表1 分析方法の一覧表

項 目	測 定 方 法
水 温	現地で温度計の目盛りが平衡になるまで流水し測定
PH	PHメーターで測定
有機塩素化合物	JIS K0125 (用水・排水の低分子量ハロゲン化炭化水素試験方法) によるガスクロマトグラフィー
Na, K, Mg, Ca	JIS-K0102 (工場排水試験方法) による原子吸光度法
Cl, NO ₃ SO ₄	液体クロマトグラフィー
HCO ₃	上水試験法による滴定法
電気伝導度	導電率計で測定
地点標高	国土地理院の地図から読みとった。
地下水位	水位計による測定
土壌中の有機塩素化合物	n-ヘキサンによる抽出法

を行い、水温を測定し、試料は保冷箱に入れて持ち帰り実験室で分析を行った。同時に東久留米地区では汚染源と思われる ST. 1 に隣接する表層の土壌を採取し有機塩素化合物の土壌中の濃度を測定した。また汚染源から汚染井戸まで数カ所をボーリングバーで採掘し、ラダーバックに土壌中のガスと、同時にその場所で大気中のガスも採集し、持ち帰り実験室で有機塩素化合物の濃度を測定した。なお町田地区の ST. 1, ST. 2, ST. 3 は平成 2 年の調査井戸 No. 3, No. 2, No. 1 に相当し、東久留米地区の ST. 1, ST. 2, ST. 3 は平成 2 年の調査井戸 No. 11, No. 10, No. 1 に相当する。

(2) 分析方法

表 1 に掲げる方法による。

3 結果及び考察

結果を表 2, 3, 4, 5 に掲げる。

(1) 無機イオン

地下水に含まれる無機イオンは陽イオンは Na, K, Ca, Mg, 陰イオンでは SiO₂, SO₄, HCO₃, Cl が主要な成分であり、この組成は、地下水が長時間、地層と接することにより、イオン交換作用等を受け固有なもの

に変化する。この現象は、帯水層の岩石の種類、風化の程度、粒子の大きさ、接触時間などに依存する。同一の地下水系に属すると考えられる水は、その無機イオンの含有量の大小に関係なく、水質組成を示すヘキサダイアグラムの形は相似である。

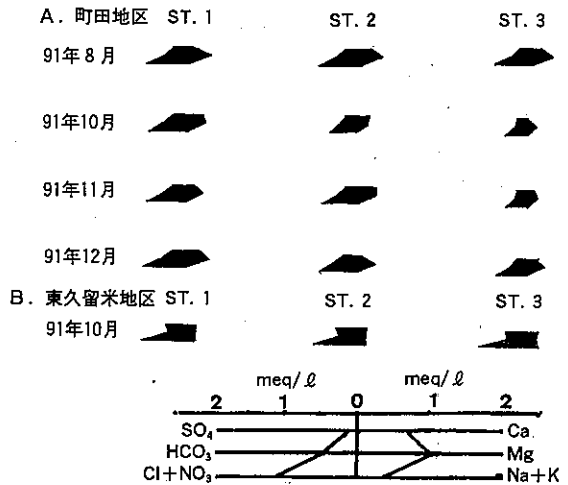


図3 町田、東久留米地区の地下水のヘキサダイアグラム

東久留米地区の地下水の代表的なヘキサダイアグラムを
図3に示したが、この地区のヘキサダイアグラムの形
と大きさには経時的な変化は認められない。これに對

し、同図に示したように町田地区の地下水のヘキサダイ
アグラムには1991年10月より変化が見られる。これは町
田地区の地下水位が15m前後であるのに対し、東久留米

表2 町田地区地下水調査結果

	地点名	水温 (°C)	pH	電気伝導度 ($\mu S/cm$)	陰イオン								陽イオン		
					K	Na	Ca	Mg	Cl	NO3	SO4	HCO3	1.1.1トリクロロエチレン	トリクロロエチレン	テトラクロロエチレン
					(mg/l)								(μg/l)		
1990年7月	S.T. 1	19.4	6.0		0.8	6.4	15.0	17.6	22.7	46.5	7.0	30.3	65	21	<1
	S.T. 2	17.1	5.7		0.5	6.1	14.9	8.6	21.0	45.7	7.9	31.4	410	2100	<1
	S.T. 3	18.3	5.5		0.3	5.3	5.8	7.3	20.1	39.9	6.4	24.7	440	19	<1
1990年12月	S.T. 1			280	0.6	5.7	18.4	11.6	19.8	41.0	5.7	35.1	20	28	2
	S.T. 2	12.5		200	0.3	4.6	12.6	8.8	12.9	32.7	5.6	25.5	60	750	1
	S.T. 3	14.0		170	0.5	4.8	8.4	7.5	6.2	26.2	4.3	15.3	12		<1
1991年5月6日	S.T. 1	18.3	7.0	270	0.58	8.0	21.6	15.8	20.1	43.6	5.9	31.6	25	16	2
	S.T. 2	17.4	6.5	280	0.43	8.2	21.1	15.8	18.8	35.6	7.6	30.0	120	1900	2
	S.T. 3	17.4	6.5	230	0.37	7.5	18.2	14.0	18.2	43.2	6.2	24.0	250	11	1
1991年8月1日	S.T. 1	23.5	7.1	290	0.47	7.3	10.3	15.7	20.4	43.2	6.4	31.1	8	14	1
	S.T. 2	17.7	6.8	280	0.43	7.4	16.7	15.9	18.9	43.4	6.8	31.0	92	2300	2
	S.T. 3	16.8	6.8	250	0.33	6.3	13.5	14.1	18.7	38.6	5.8	25.9	240	16	<1
1991年10月2日	S.T. 1	18.0	6.7	247	0.68	7.6	18.6	12.7	17.7	38.4	7.3	33.1	11	52	1
	S.T. 2	16.7	6.6	171	0.45	5.7	15.6	9.0	11.2	29.4	6.9	23.3	62	1900	1
	S.T. 3	16.6	6.7	143	0.41	5.2	3.1	7.1	9.2	22.4	10.0	16.6	<1	<1	<1
1991年11月8日	S.T. 1	14.4	7.1	258	0.38	6.5	12.4	11.9	18.5	39.5	7.0	33.3	25	21	2
	S.T. 2	15.5	7.0	238	0.20	6.2	19.7	12.2	15.3	38.1	8.0	31.0	200	8700	1
	S.T. 3	15.4	7.0	137	0.05	4.8	10.0	7.3	8.9	21.8	7.9	15.6	<1	<1	1
1991年12月3日	S.T. 1	15.3	6.3	258	0.48	6.8	17.9	15.2	18.9	41.8	6.5	34.2	19	18	4
	S.T. 2	15.7	6.4	255	0.54	6.8	9.3	13.8	16.4	38.5	8.9	34.1	210	6500	2
	S.T. 3	14.9	6.3	177	0.23	5.8	12.1	11.5	14.6	28.5	6.6	21.7	58	5	<1
1991年12月18日	S.T. 1			254									180	4600	180
	S.T. 2	15.0	6.5												
	S.T. 3														
1992年1月8日	S.T. 1												100	920	4
	S.T. 2	14.3													
	S.T. 3														
1992年2月3日	S.T. 1	13.1	6.4	243	0.49	6.8	18.7	14.5	20.8	42.4	6.9	31.8	8	11	2
	S.T. 2	13.6	6.7	251	0.43	6.6	14.0	13.1	18.8	42.4	8.1	32.7	75	2100	3
	S.T. 3	14.5	6.6	222	0.28	6.2	8.9	10.9	19.0	37.8	6.9	23.9	120	7	<1
1992年4月7日	S.T. 1	15.1	6.5	255	0.43	6.2	12.9	11.3	21.2	41.4	6.9	32.3	6	13	<1
	S.T. 2	15.7	6.3	252	0.29	6.1	12.4	11.4	19.5	41.9	8.2	32.3	90	2400	2
	S.T. 3	15.8	6.5	222	0.17	5.7	17.8	11.5	19.5	39.9	7.6	25.6	120	8	<1

表3 東久留米地区調査結果

	地点名	水温 (°C)	pH	電気伝導度 ($\mu S/cm$)	陰イオン								陽イオン		
					K	Na	Ca	Mg	Cl	NO3	SO4	HCO3	1.1.1トリクロロエチレン	トリクロロエチレン	テトラクロロエチレン
					(mg/l)								(μg/l)		
1990年8月	S.T. 1	17.1	6.4		2.5	12.9	12.0	9.5	22.7	50.1	20.7	19.3	66	11	45
	S.T. 2	16.8	6.7		3.9	13.4	6.9	9.5	22.4	50.3	21.0	19.2	96	11	340
	S.T. 3	17.1	6.5		3.8	14.1	5.4	9.6	23.3	49.7	21.7	19.8	63	11	240
1991年1月	S.T. 1	16.7	5.9	280	2.4	10.9	12.0	8.5	20.6	42.2	20.8	21.3	25	8	25
	S.T. 2	15.4	6.0	280	3.8	11.7	10.1	8.1	20.2	44.4	20.7	21.2	20	6	250
	S.T. 3	16.1	6.0	290	5.5	12.2	12.0	8.8	21.9	48.2	20.6	24.4	23	7	180
1991年5月12日	S.T. 1	18.2	5.9	280	2.82	14.9	16.0	12.1	21.1	45.0	20.2	19.5	40	9.6	23
	S.T. 2	16.9	6.1	280	3.99	15.1	15.5	11.7	21.1	45.6	21.1	19.4	36	8	250
	S.T. 3	17.0	6.0	290	5.69	15.1	9.0	11.8	22.8	49.3	20.3	19.5	35	8	150
1991年8月7日	S.T. 1	17.0	5.8	270	2.49	14.5	15.4	11.7	20.5	44.0	20.7	19.4	38	9	18
	S.T. 2	17.0	5.8	270	3.58	14.0	15.0	11.5	20.3	45.5	19.8	19.5	33	9	220
	S.T. 3	17.3	5.8	270	4.41	15.0	14.3	11.8	20.9	43.0	21.1	19.5	43	9	130
1991年10月9日	S.T. 1	17.7	5.8	267	3.13	14.6	14.4	8.5	18.9	49.5	20.7	19.3	39	7.7	1900
	S.T. 2	17.7	6.0	261	4.21	15.7	16.5	9.3	18.2	48.0	20.7	19.7	20	7	320
	S.T. 3	17.2	5.9	297	5.81	17.6	17.2	9.9	16.8	52.8	18.0	17.9	18	4	95
1991年11月12日	S.T. 1	16.9	6.0	277	2.62	13.8	10.5	10.5	19.8	51.4	21.2	20.5	25	10	18
	S.T. 2	16.7	5.9	281	3.76	14.3	6.8	10.1	20.2	52.2	19.8	20.4	22	10	320
	S.T. 3	17.1	6.0	304	6.50	15.4	12.3	10.2	23.6	61.5	19.5	19.0	21	8	130
1991年12月5日	S.T. 1	13.3	5.7	99	0.77	3.6	10.6	1.4	6.0	2.6	8.9	19.7	<1	1.7	2.5
	S.T. 2	16.2	5.7	268	3.90	15.1	13.9	12.1	20.3	49.3	21.0	20.9	18	7	170
	S.T. 3	17.0	5.8	290	13.4	15.0	5.8	10.4	21.1	53.4	19.8	20.4	20	6	88
1992年2月5日	S.T. 1	16.3	6.1	262	2.82	13.5	9.0	9.5	19.5	41.5	22.0	20.4	20	10	13
	S.T. 2	15.1	6.7	267	4.13	13.2	12.7	9.9	20.7	43.7	22.4	20.4	25	13	77
	S.T. 3	16.4	6.1	270	6.27	14.4	8.9	9.6	20.3	42.7	22.3	20.5	21	10	79
1992年4月8日	S.T. 1	16.8	5.9	259	2.85	13.2	13.2	9.2	19.9	42.8	24.2	20.5	21	7	12
	S.T. 2	16.5	5.9	250	3.30	12.2	13.9	8.8	19.9	42.1	24.6	19.8	12	5	120
	S.T. 3	16.8	5.9	260	5.08	13.0	13.6	8.9	19.7	41.7	23.5	20.1	15	5	70

表4 町田地区の地下水の水面標高等

	地点名	水面標高 (m)	地下水位 (m)	湛水深 (m)
1990年7月	ST. 1			
	ST. 2	66.13	16.77	1.61
	ST. 3	66.11	16.69	2.08
1990年12月	ST. 1			
	ST. 2	68.60	14.3	4.5
	ST. 3	68.90	13.9	4.8
1990年6月 6日	ST. 1			
	ST. 2	66.02	16.88	1.61
	ST. 3			
1990年8月 1日	ST. 1			
	ST. 2	66.16	16.74	1.66
	ST. 3	66.22	16.58	1.86
1990年10月 2日	ST. 1			
	ST. 2	70.29	12.61	5.52
	ST. 3	70.26	12.54	5.88
1990年11月 8日	ST. 1			
	ST. 2	69.40	13.50	4.63
	ST. 3	69.38	13.42	5.00
1990年12月 3日	ST. 1			
	ST. 2	67.63	15.27	3.08
	ST. 3	67.65	15.15	3.27
1990年12月 18日	ST. 1			
	ST. 2	67.05	15.85	2.50
	ST. 3			
1990年1月 8日	ST. 1			
	ST. 2	66.63	16.27	2.08
	ST. 3			
1990年2月 3日	ST. 1			
	ST. 2	66.18	16.27	1.63
	ST. 3	66.24	16.56	1.86
1990年4月 7日	ST. 1			
	ST. 2	66.02	16.88	1.50
	ST. 3	66.03	16.77	1.72

地区では5m前後と浅く、また湛水深の変化も少なく、更にこの両区付近の土質を比較すると、町田地区は全体的に粘土質の混ざった砂礫層であるのに対し、東久留米地区は礫層で浸透性がよく、地下水を保持しにくいと推定される。奥多摩地区の降水の無機イオンの含有量は、町田地区のST.3の90年12月、91年10、11月の無機イオンの含有量に類似している。これらの測定日は前月の降水量が200mmを超えており、雨水による希釈が顕著に現れた例である。

(2) 降水量、湛水深と有機塩素化合物の濃度

東京地方の30年間の平均降水量は1500mmであるが、1991年は約2000mmの年間降水量があり、とくに10月には533mmの降水があった(表6)。降水量の増加は地下水位の上昇となって現れ、両地区とも10月に最も上昇している。地下水位の上昇は湛水深の増加と同一であり、降水量と湛水深は両地区で正の相関が得られた(表4、5)。

有機塩素化合物と降水量の関係を考慮してみると、町田地区のST.1の地下水中のトリクロロエチレン濃度は、11月に8700 $\mu\text{g}/\ell$ 、12月に6500 $\mu\text{g}/\ell$ 検出されており降水量と関係があるように思われる(図4)。更に、9月の降水量は446mm、10月のトリクロロエチレン濃度1900 $\mu\text{g}/\ell$ 、10月は533mm、11月は8700 $\mu\text{g}/\ell$ 、11月の降水量は114mm、12月のトリクロロエチレン濃度は6500 $\mu\text{g}/\ell$ であり、降水量が多い翌月に濃度が上昇している。降水量と濃度の相関を検討するため、前2ヶ月降水量の和と地下水中のトリクロロエチレン濃度を調べると相関係数は0.63で高い。関東ローム台地の特性として、見た目よりも水の透水性がよい。降雨後、立川ローム層上部内の地下水は2m/d程度の流速であり、地表から立川ローム層下部までの雨水の浸透速度は1~4m/dある。町田地区の井戸は約18m、東久留米地区では約7mの深さがあり、汚染源と監視井戸の距離は30~150m離れているので、降雨が、有機塩素化合物に与える影響を考察する時は、前月、前前月の雨量を考慮する必要がある。町田地区のST.1、ST.3ではトリクロロエチレン濃度が低く、相関は明白でない。東久留米地区では、調査開始前の1990年4月に汚染源付近の土壌を除去したため、降水量とテトラクロロエチレン濃度の関係は明瞭でない。

三鷹市の井戸の6カ年にわたる調査で、古賀らは、不圧地下水の汚染濃度と降水量、地下水位との間に正の相

表5 東久留米地区の地下水の水面標高等

	地点名	水面標高 (m)	地下水位 (m)	湛水深 (m)	土 壌 中 の テトラクロ ロエチレン μg/g
1990年8月	ST. 1				
	ST. 2	50.31	5.34	2.02	
	ST. 3	49.90	5.60	1.40	
1991年1月	ST. 1				
	ST. 2	50.45	5.20	2.20	
	ST. 3	49.90	5.60	1.40	
1991年6月 12日	ST. 1				1.11
	ST. 2	50.51	5.14	2.20	
	ST. 3	50.10	5.40	1.58	
1991年8月 7日	ST. 1				1.94
	ST. 2	50.45	5.20	2.20	
	ST. 3	50.19	5.31	1.70	
1991年10月 9日	ST. 1				7.82
	ST. 2	51.61	4.04	3.31	
	ST. 3	51.26	4.24	2.80	
1991年11月 12日	ST. 1				
	ST. 2	51.06	4.59	2.76	
	ST. 3	50.56	4.94	2.04	
1991年12月 5日	ST. 1				0.90
	ST. 2	50.90	4.75	2.61	
	ST. 3	50.43	5.07	1.91	
1991年2月 5日	ST. 1				1.10
	ST. 2	50.71	4.94	2.42	
	ST. 3	50.24	5.26	1.77	
1991年4月 8日	ST. 1				1.20
	ST. 2	50.60	5.05	2.32	
	ST. 3	50.23	5.27	1.76	

表6 年間の降水量

	1989年	1990年	1991年	1992年	30年間の 平均
1月	95	32	55	50.0	54
2月	107	116	69	36.0	63
3月	118	97	164	205.0	102
4月	187	137	113	168.0	128
5月	210	120	61	134.0	148
6月	205	68	142		181
7月	154	51	72		125
8月	360	181	238		137
9月	204	287	446		193
10月	197	148	533		181
11月	71	234	114		93
12月	29	38	36		56
合計	1937	1509	2043		1461

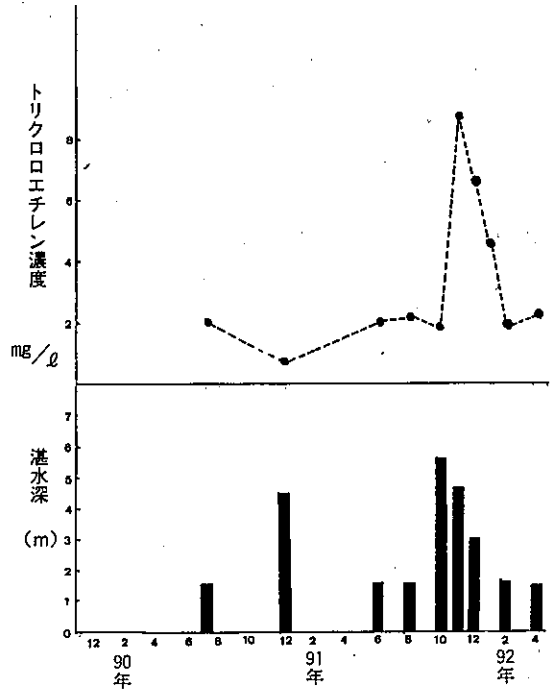


図4 町田地区 ST. 2 の湛水深と
トリクロロエチレン濃度

関関係があり、季節変動を明かにしている。

91年10月、東久留米地区 ST. 1の地下水でテトラクロロエチレンが1900μg/l 検出されたことは、地下水の汚染物質濃度上昇ではなく、漏出が原因と推定される。汚染源から汚染井戸への経路を推定するため調査時に ST. 1, ST. 2, ST. 3で採水と同時に土壌中のガスも採取した。ボーリングローバーで土壌に深さ1.5mの穴を明け、ミニポンプで吸引し、ラドバックに土壌中のガスと、同時にその場所で大気中のガスも採集し、持ち帰り実験室で有機塩素化合物の濃度を測定した。ST. 1, ST. 2, ST. 3の土壌ガスと大気からもテトラクロロエチレンが検出され、また約1km離れた市民ホールの大気からも検出されており、事業所の機械からの漏出があり、付近が汚染されたものと思われる。翌月には通常の測定値に戻っており、このことを裏づけている。

(3) 汚染物質の減少

東久留米地区では筆者らが調査を始めた1990年4月に、汚染源付近の土壌を表面より約50cm除去した。表5に除去後の当地区の汚染源付近の表層土壌中のテトラク

ロロエチレン濃度を掲げた。濃度にバラツキが認められるが $1\mu\text{g}/\text{g}\cdot\text{dry}$ 以上の時もあり、完全除去は困難であると思われる。ST.2の井戸も、ST.3の井戸もテトラクロロエチレンにより高濃度汚染され、季節変動が激しかった。しかし、1991年10月にST.2の井戸から $320\mu\text{g}/\text{l}$ 検出されているが、ST.3では $96\mu\text{g}/\text{l}$ であり、前年、前前年に比べ減少しており、水質に対する影響は、汚染源から離れていく程、薄らいでいる。このことは調査開始前に汚染土壌が除去されたためと思われる。

兵庫県でトリクロロエチレンの地下水汚染^{6,7)}があり、1983年に $407\mu\text{g}/\text{l}$ が検出された。1984年5月汚染源である工場の土壌を除去し、その後の水質検査で、徐々に減少し、 $31\mu\text{g}/\text{l}$ となり除去効果はあったという。この例では、 $1\text{mg}/\text{kg}$ 以上の土壌を除去し風乾後、工場敷地内に穴を掘り、防水シートで密閉した穴に埋め戻している。

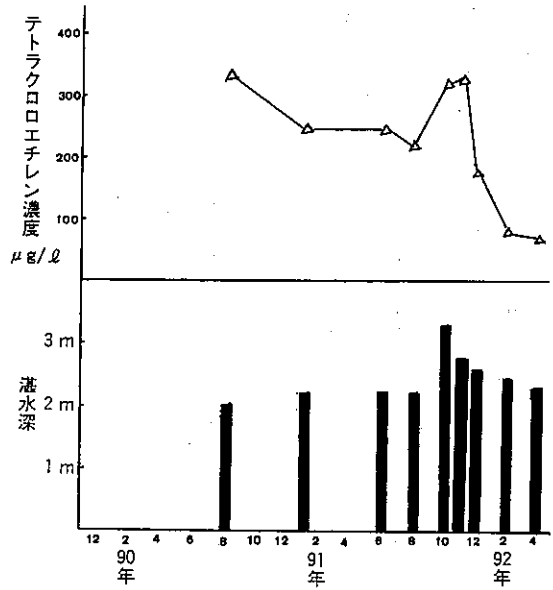


図5 東久留米地区 ST. 2 の湛水深とテトラクロロエチレン濃度

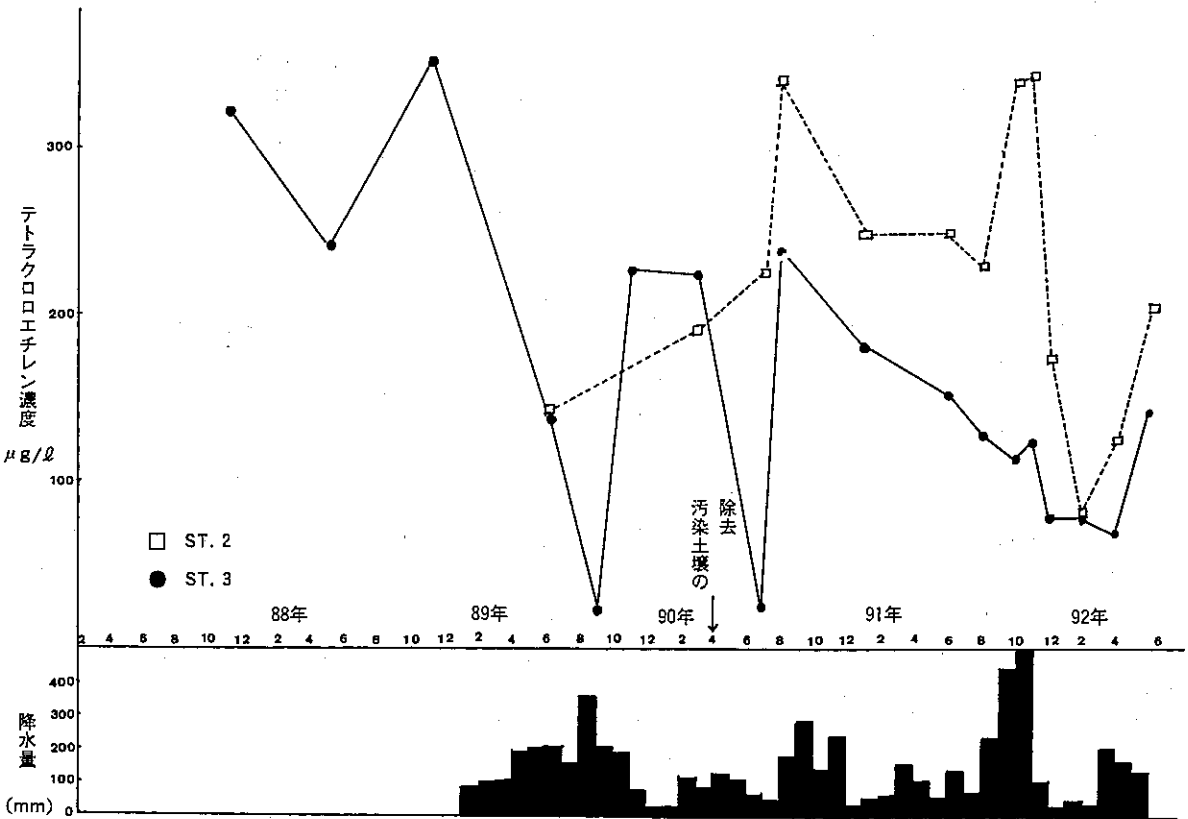


図6 東久留米地区の地下水中のテトラクロロエチレン濃度の経時変化

4 まとめ

地下水汚染の機構を解明し、汚染物質の地層と地下水における挙動を明らかにするため、降水量、地下水位、汚染物質濃度との関係を検討し、以下のことが明らかになった。

町田地区では降水量、地下水位、汚染物質濃度は相関関係がある。このことは、地下水面が上昇すると、汚染物質が停滞する難透水性のシルト質の部分に接し、新たな挙動が生じ、洗い出しを行い、地下水の汚染物質濃度の増加が生じたものと考えられる。既存の地質断面によると、町田地区は12~13m、東久留米市は4~5mにシルト質の存在が示されている。

東久留米地区で汚染物質の除去後の影響を比較するとST.2より汚染源から離れたST.3で効果がみられた。このことは汚染物質の水平方向への移動は小さく、降雨による希釈の影響により、テトラクロロエチレン濃度が減少したことを示す。

地下水域の分類を行うため、ヘキサダイアグラムの形、大きさについて検討したが、2年間の調査では、各測定地点で形の変化は小さく、分類に利用できることが明らかになった。

汚染物質の停滞域を確認し、難透水性のシルト質の土

壌がどの程度汚染物質を保持するか確認することが、汚染の将来を予測をする上で、重要と思われるので今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 渡辺正子ら：地下水汚染の機構解明に関する研究（その1）、東京都環境科学研究所年報1991-2, P.191.
- 2) 昭和61年度環境庁委託調査報告書：地下水保全対策調査—地下水質調査マニュアル検討調査—, 昭和62年3月.
- 3) 地下水汚染とその防止対策に関する研究集会, 第一回講演集, p.81, 土壌ガス法による地下水及び土壌汚染調査手法.
- 4) 地下水汚染とその防止対策に関する研究集会, 第一回講演集, p.70, 深井戸における不圧地下水の影響と汚染拡散防止対策.
- 5) 東京都環境科学研究所年報1991-2, 化学物質による環境汚染に関する研究（第3報）, p.289.
- 6) 地下水問題研究会編：地下水汚染論（その基礎と応用）, 共立出版株式会社, p.286.
- 7) 兵庫県：水質調査測定報告書, 1990年版, p.742.