

1976～1986年にわたって観測した札幌市の
豊平川扇状地地下水の塩素イオン、硫酸イオン
及び硝酸態窒素について

Chloride, Sulfate and Nitrate in
the Groundwater of the Toyohira River Fan,
Sapporo, During the Period of 1976～1986

内野 栄治 伊藤八十男 都築 俊文
小谷 玲子 井上 勝弘

Eiji Uchino, Yasoo Itoh, Toshifumi Tsuzuki,
Reiko Kotani and Katsuhiko Inoue

目 的

札幌市は、その市街中心部が豊平川扇状地上に位置しているため、古くから、豊富な地下水に恵まれていた。しかしながら、1955年以降、市の人口が急激に増加し、それに伴う高層建築の建造など都市化が急速に進んだ。その結果、地下水の需要が一挙に増大し、市内の浅層地下水（水深5～10m）は、次々と枯渇するなどの現象がみられ、扇状地帯下水の主体をなす中・深層地下水（水深20～80m）の水位の低下や水質の悪化が懸念されている^{1～4)}。

我々は、1976年以降、札幌市の地下水を対象として、都市の近代化が、都市地下水の水質に与える影響を知るため、その水質についての調査を続けてきた。そこで今回は、地下水の人为的汚染の指標成分と考えられている塩素イオン、硫酸イオン及び硝酸態窒素の3成分に的を絞り、過去11年間（1976～1986）の水質調査で得られたこれらの成分の分析値について、詳細な解析を行った。本報告では、札幌市の中心部が位置する豊平川扇状地の地下水の解析結果について述べる。

調査方法

1. 豊平川扇状地の概況⁴⁾

豊平川扇状地は、図1に示すように、南から北へ流れる豊平川によって発達した扇状地である。その地形は真駒内地区の南端をかなめとして、ほぼ北に向いて80度の角度で開けている。一般に、その堆積物は主として砂礫から成り厚さ50m前後を有し、表層は厚さ2～3mのロームまた

は砂質粘土で覆われていることが知られている。

2. 試料の採取及び分析方法

我々は、豊平川扇状地に12ヵ所と比較のため他の地区に14ヵ所、計26ヵ所の採水点を設定した（図1）。表1に各採水井戸の深度及びストレーナー深度を示した。試料の採取は毎年四期別（2、5、8及び11月）に実施した。採水に

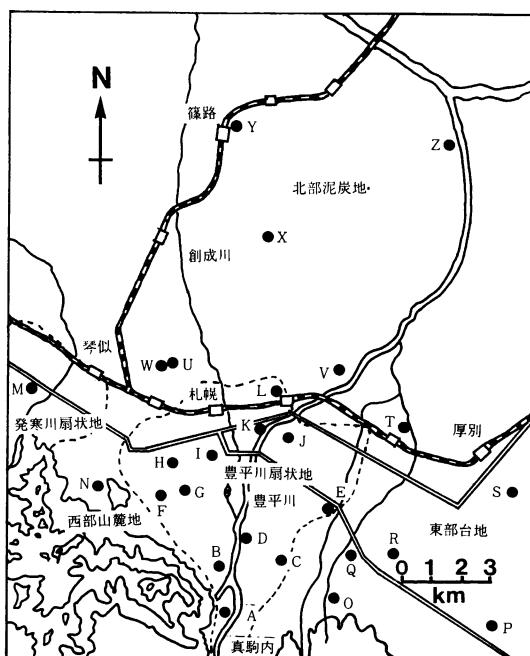


図1 札幌市の地形及び地下水の採水点

表1 札幌市の地下水水質調査における採水井一覧表

| 採水点 | 地形分類 | 深度(m) | ストレーナー深度(m) | 採水点 | 地形分類 | 深度(m) | ストレーナー深度(m) |
|-----|------|-------|---------------------|-----|------|-------|-------------------------|
| A | | 33 | 25~30 | O | | 100 | 35~45, 62~78, 89~95 |
| B | | 20 | | P | | 200 | 139.5~104, 143~149 |
| C | | 14 | 0~14 | Q | IV | 100 | 50~70, 76~87 |
| D | | 30 | 19~30 | R | | 150 | 85~90, 100~110, 120~130 |
| E | | 20 | 0~20 | S | | 180 | |
| F | I | 27 | | T | | 210 | |
| G | | 35 | 31~35 | U | | 80 | 30~45, 50~60 |
| H | | 80 | 20~30, 50~60 | V | | 60 | 15~46.5 |
| I | | 33 | 22~33 | W | | 150 | 98.5~104, 143~149 |
| J | | 36 | | X | | 100 | 80 |
| K | | 60 | 15~25, 32~42 | Y | V | 65.5 | 50~65.5 |
| L | | 70 | 31~41, 46~51, 56~66 | Z | | 140 | |
| M | II | 83 | | | | | |
| N | III | 65 | | | | | |

I : 豊平川扇状地 II : 発寒川扇状地 III : 西部山麓地 IV : 東部台地 V : 北部泥炭地 なお、採水点U及びVはIとVの境界に位置している。

表2 1976~1986年に観測した札幌市の地下水中の塩素イオン、硫酸イオン及び硝酸態窒素濃度

| 採水点 | 地形分類 | 調査期間 | 塩素イオン | 硫酸イオン | 硝酸態窒素 |
|-----|------|-----------------|----------------|---------------|----------------|
| A | | 1976. 8~1986. 5 | 31.0± 0.9(11)* | 42.4± 3.8(11) | 7.05±0.50(11) |
| B | | 1976. 8~1981. 2 | 24.2± 0.6(6) | 29.1± 7.3(6) | 2.45±0.65(6) |
| C | | 1976. 8~1986. 5 | 33.7± 5.1(11) | 56.3± 9.1(11) | 6.50±0.82(11) |
| D | | 1978. 5~1985.11 | 25.1± 2.2(9) | 37.0± 4.6(8) | 4.99±1.17(9) |
| E | | 1976. 8~1983.11 | 37.7± 4.2(8) | 49.6± 5.4(8) | 11.3 ±0.70(8) |
| F | I | 1981. 5~1986. 5 | 26.4± 0.7(6) | 30.7± 1.4(6) | 8.09±0.31(6) |
| G | | 1976. 8~1986. 5 | 28.0± 2.1(11) | 39.9± 6.7(11) | 7.66±1.02(11) |
| H | | 1977. 5~1986. 5 | 23.9± 1.2(10) | 24.3± 4.1(10) | 4.39±1.08(10) |
| I | | 1976. 8~1986. 5 | 28.2± 2.8(11) | 38.2± 5.0(11) | 5.71±1.10(11) |
| J | | 1976. 8~1983. 2 | 38.3± 3.8(8) | 45.6± 5.1(8) | 9.42±0.63(8) |
| K | | 1978. 5~1986. 5 | 21.0± 1.3(9) | 42.5± 4.2(9) | 0.80±0.25(9) |
| L | | 1978. 5~1984. 2 | 27.1± 1.2(7) | 49.2± 3.9(7) | 3.40±0.07(7) |
| M | II | 1976. 8~1986. 5 | 17.4± 4.3(11) | 10.0± 2.9(11) | 3.57±1.85(11) |
| N | III | 1977. 5~1981. 2 | 74.4±17.8(5) | 27.3± 3.7(5) | 0.01±0.02(5) |
| O | | 1976. 8~1983. 2 | 12.6± 0.9(8) | 10.0± 3.0(8) | 0.38±0.36(8) |
| P | | 1978. 5~1983. 2 | 10.9± 0.7(6) | 8.1± 1.9(6) | 0.13±0.14(6) |
| Q | IV | 1976. 8~1986. 5 | 12.9± 1.3(11) | 6.2± 2.0(11) | 1.26±0.58(11) |
| R | | 1976. 8~1986. 5 | 11.0± 1.1(11) | 16.0±16.3(11) | 0.05±0.07(11) |
| S | | 1976. 8~1986. 5 | 9.6± 1.9(11) | 11.3± 4.6(11) | 0.05±0.08(11) |
| T | | 1979. 5~1983. 8 | 10.3± 0.6(5) | 9.3± 1.9(5) | 0.00±0.00(5) |
| U | | 1977. 5~1983. 2 | 29.2± 1.1(7) | 30.2± 4.9(7) | 0.79±0.17(7) |
| V | | 1976. 8~1986. 5 | 29.0± 1.3(11) | 83.6±13.3(11) | 1.09±0.28(11) |
| W | | 1980. 5~1986. 5 | 15.9± 0.8(7) | 3.7± 1.3(7) | 0.00±0.00(7) |
| X | V | 1977. 5~1984. 8 | 11.0± 0.7(8) | 5.9± 4.0(8) | 0.00±0.01(8) |
| Y | | 1978. 5~1986. 5 | 9.3± 0.3(9) | 5.2± 3.0(9) | 0.00±0.00(9) |
| Z | | 1980. 5~1986. 5 | 9.5± 0.4(7) | 6.0± 0.8(7) | 0.00±0.00(7) |

数値は各年平均値の平均と標準偏差をもってmg/lで示す。*括弧内の数値は測定した継続年数を示す。

I : 豊平川扇状地 II : 発寒川扇状地 III : 西部山麓地 IV : 東部台地 V : 北部泥炭地

当たっては、水温が一定になるまで十分に掲水した後、ポリエチレン瓶に採水し、速やかに実験室に持ち帰り分析に供した。Cl⁻は Mohr 法、SO₄²⁻は重量法、NO₃-N はブルシン吸光度法により定量した。

3. 数値解析

異常値は季節毎及び年毎に Grubbs 法⁵⁾により棄却検定を行なった。トレンドの有無は Kendall の順位相関⁶⁾を用いて行なった。

結果及び考察

1. 豊平川扇状地地下水の Cl⁻、SO₄²⁻及び NO₃-N の起源

表 2 に全試料中に含まれる Cl⁻、SO₄²⁻及び NO₃-N 濃度を調査期間中の年平均値の平均と標準偏差として示した。その結果、豊平川扇状地地下水中の Cl⁻、SO₄²⁻及び NO₃-N 濃度は、それぞれ概ね、29、40及び 6 mg/l であり、札幌市他の地下水群の濃度と比較し、いずれも高い値を示した。また、我が国の通常の地下水のそれらの値⁷⁾と比較しても同様の傾向が認められた。

一般にこれら的原因としては、何等かの人为的汚染が考えられる。しかし、豊平川扇状地地下水の場合、Cl⁻及び SO₄²⁻濃度が高い値を示したのは他の要因があるためと考えられた。即ち、豊平川扇状地地下水を涵養している豊平川の上流には、食塩を主成分とした定山渓温泉、そして、硫化鉱の採掘を行なっている豊羽鉱山があり、常時、多量の食塩或いは硫酸を含む温泉水や鉱床水が豊平川へ流入している。その結果、豊平川の河川水の Cl⁻濃度は 15.1 mg/l⁷⁾、SO₄²⁻濃度は 21.4 mg/l⁷⁾と、平均的な我が国の河川水の値⁷⁾ 5.8 mg/l、10.6 mg/l と比べて何れも高い値を示している。従って、本扇状地地下水中の Cl⁻及び SO₄²⁻の約半量は、扇状地地下水を涵養している豊平川河川水に由来していたことになる。

一方、豊平川河川中の NH₄⁺-N、NO₂-N 及び NO₃-N 濃度は極めて低い結果が得られているので、河川水から本地下水群への NO₃-N の寄与は無視し得るであろう。

この地区的地下水中的 NO₃-N 濃度と Cl⁻濃度との間に、図 2 に示すように、極めて高い相関 ($r=0.842$) が認められた。このことから、本地下水中の Cl⁻の供給源としては、NO₃-N と同様、河川水以外に地表から鉛直的に浸透する部分があることが明らかとなり、両成分の人類活動起源は人間生活で生じた各種排水（下水）と密接に関連しているものと推定した。なお、NO₃-N と SO₄²⁻の間には有意な相関は認められず ($r=0.301$)、両成分の供給源は異なることが示唆された。

2. 豊平川扇状地地下水中的 Cl⁻、SO₄²⁻及び NO₃-N 濃度の経年変化

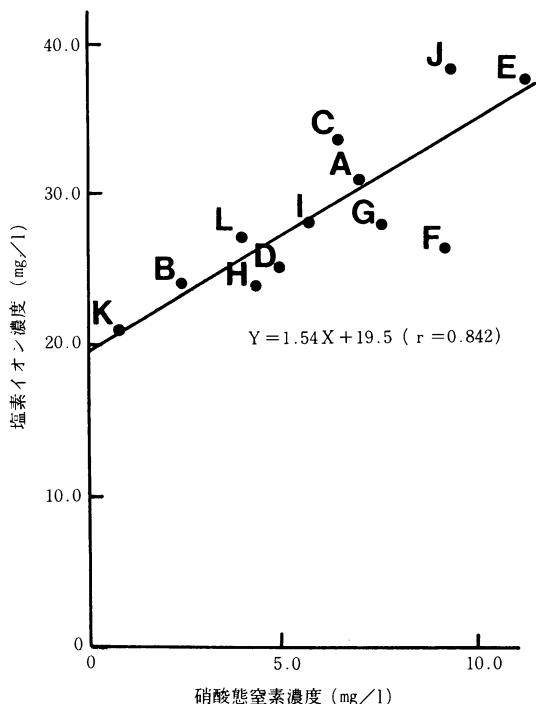


図 2 豊平川扇状地地下水群における硝酸態窒素濃度と塩素イオン濃度との関係

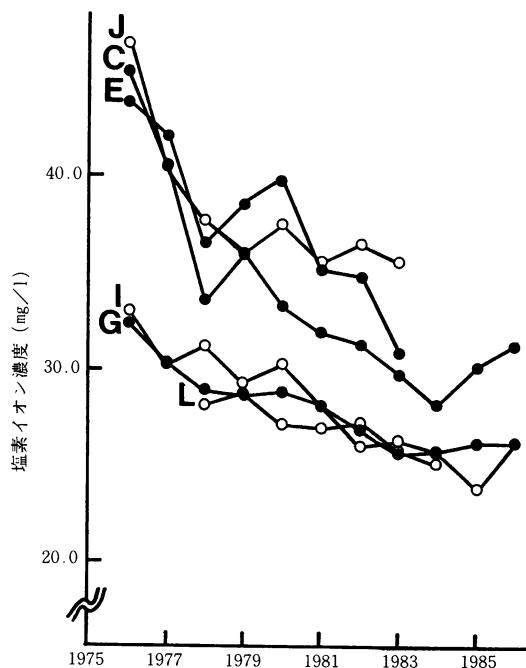


図 3 豊平川扇状地地下水群における塩素イオン濃度の経年変化

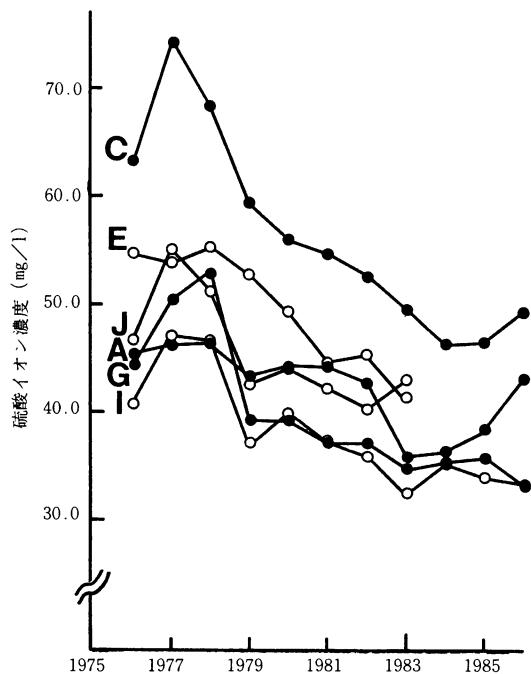


図4 豊平川扇状地地下水群における硫酸イオン濃度の経年変化

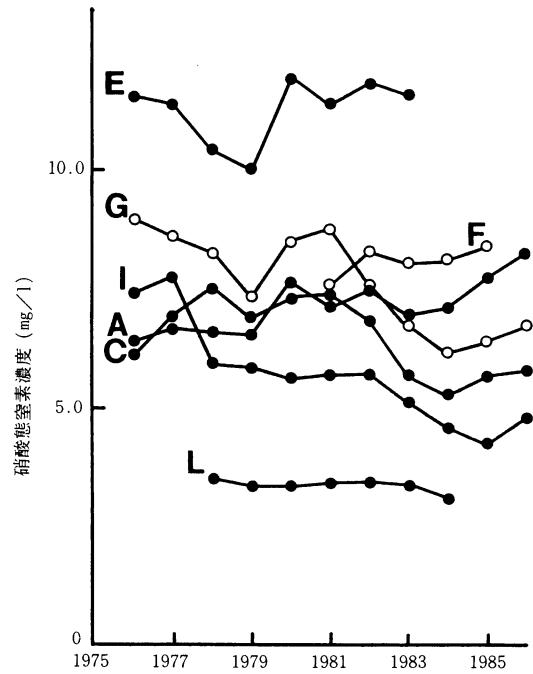


図5 豊平川扇状地地下水群における硝酸態窒素濃度の経年変化

表3 豊平川扇状地地下水における塩素イオン、硫酸イオン及び硝酸態窒素濃度の経年変動（トレンド分析）

| 採水点 | 調査期間 | 塩素イオン | | | 硫酸イオン | | | 硝酸態窒素 | | |
|-----|-----------------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|
| | | P | S | IT | P | S | IT | P | S | IT |
| A | 1976. 8~1986. 5 | 37 | 19 | 1.48 | 12 | -31 | -2.41 | 45 | 35 | 2.72 |
| B | 1976. 8~1981. 2 | 7 | -1 | -0.19 | 4 | -7 | -1.32 | 8 | 1 | 0.19 |
| C | 1976. 8~1986. 5 | 6 | -43 | -3.35 | 5 | -45 | -3.50 | 16 | -23 | -1.79 |
| D | 1978. 5~1985.11 | 17 | 6 | 0.74 | 9 | -10 | -1.24 | 22 | 8 | 0.83 |
| E | 1976. 8~1983.11 | 3 | -22 | -2.72 | 3 | -22 | -2.72 | 15 | -12 | -1.49 |
| F | 1981. 5~1986. 5 | 5 | -5 | -0.94 | 7 | -1 | -0.19 | 9 | 3 | 0.56 |
| G | 1976. 8~1986. 5 | 6 | -43 | -3.35 | 6 | -43 | -3.35 | 9 | -37 | -2.88 |
| H | 1977. 5~1986. 5 | 28 | 11 | 0.98 | 34 | 23 | 2.06 | 31 | 17 | 1.52 |
| I | 1976. 8~1986. 5 | 7 | -41 | -3.19 | 6 | -43 | -3.35 | 6 | -43 | -3.35 |
| J | 1976. 8~1983. 2 | 3 | -22 | -2.72 | 6 | -16 | -1.98 | 19 | 10 | 1.24 |
| K | 1978. 5~1986. 5 | 14 | -8 | -0.83 | 16 | -4 | -0.42 | 19 | 2 | 0.21 |
| L | 1978. 5~1984. 2 | 3 | -9 | -1.70 | 9 | -3 | -0.45 | 8 | -5 | -0.75 |

P, S及びIT値はKendallの順位相関に基づき各々次の式によって表せる。 $P = \frac{N-1}{2} n_i$, $S = 2 \{ P - N(N-1)/4 \}$,
 $IT = S\sqrt{N(N-1)(2N+5)/18}$ なお、Nとn_iはそれぞれ試料数とX_i以後にX_i以上の値が生じた回数を示している。

本地下水群の中、幾つかの採水点を選び、それぞれの Cl^- 、 SO_4^{2-} 及び NO_3^- -N 濃度の経年変化を図3、図4及び図5に示した。図3、図4から明らかなように、 Cl^- 及び SO_4^{2-} 濃度は過去11年間、経年的に低下していた。しかし、 NO_3^- -N 濃度について、大きな変動は認められなかった。また、このような傾向を明確にするため、各々の成分の年平均値を求め、Kendall の順位相関を用いてトレンド分析を行なった。この分析で得られたIT値は、 $IT > 1$ であれば増加傾向、 $IT < -1$ であれば減少傾向を示すとされている。表3に示すように、本扇状地の12採水点の地下水について Cl^- は6地点で $IT < -1$ 、1地点で $IT > 1$ 、 SO_4^{2-} は8地点で $IT < -1$ 、1地点で $IT > 1$ 、そして NO_3^- -N は4地点で $IT < -1$ 、3地点で $IT > 1$ の値を示した。即ち、トレンド分析によつても本地下水群の Cl^- 及び SO_4^{2-} 濃度は、減少傾向にあることが明らかとなった。そして NO_3^- -N 濃度は、明確な変動傾向を示さなかつた。

一般に、急速な都市化に伴つて地下水の需要も急増し、その結果地下水位の低下や水質の悪化を招く場合のあることが知られている。

札幌市においても、1950～60年代、市街地にある水深5m前後の浅層井戸水の枯渇が相次ぎ、池などにみられた湧水の多くは、その湧出が停止した。市の人口は、その後も増加が続き、我々が調査を始めた1976年から1986年迄の11年間に約30万人の増加が認められている（図6）。

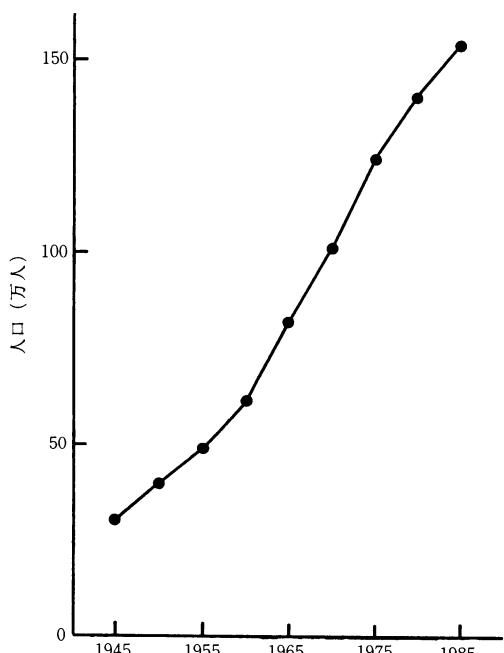


図6 札幌市の人口の推移（札幌市企画部統計課の資料より作成）

今回、この期間における豊平川扇状地地下水中の Cl^- 、 SO_4^{2-} 及び NO_3^- -N 濃度の変化を調べたが、これらの成分濃度、特に Cl^- や SO_4^{2-} 濃度は人口増加に比例せず、逆に減少傾向が認められた。先に述べたように、この地下水群中の Cl^- 、 SO_4^{2-} の主たる供給源は豊平川の河川水である。この河川中の Cl^- や SO_4^{2-} 濃度（図7、8）は調査期間中殆ど変化がないこと、又、それぞれの採水点におけるその地下水位

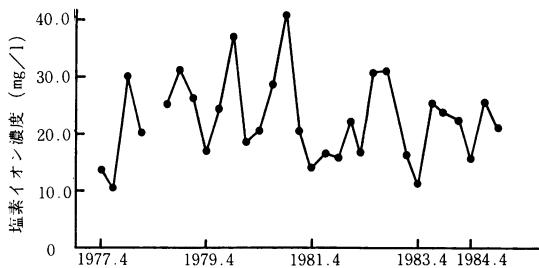


図7 豊平川22条大橋における塩素イオン濃度の経年変化（札幌市水道局拡張部の資料より作成）

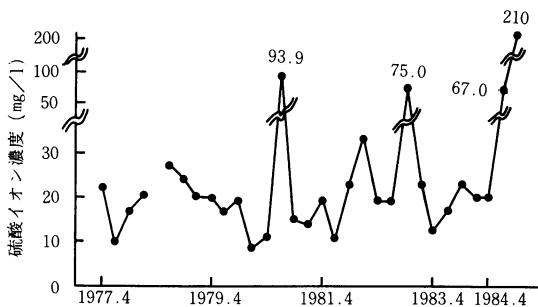


図8 豊平川22条大橋における硫酸イオン濃度の経年変化（札幌市水道局拡張部の資料より作成）

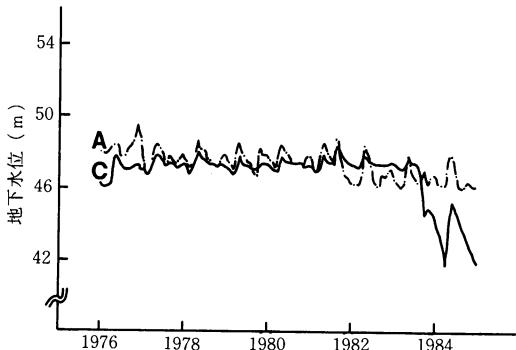


図9 豊平川扇状地（扇頂）における地下水位の経年変化（道開発局石狩川開発建設部の資料より引用）

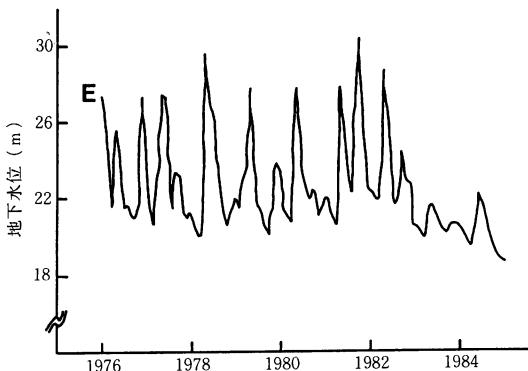


図10 豊平川扇状地（扇央）における地下水位の経年変化（道開発局石狩川開発建設部の資料より引用）



図11 豊平川扇状地（扇端）における地下水位の経年変化（道開発局石狩川開発建設部の資料より引用）

（図9、10、11）はほぼ一定に保たれていたことから、この11年間で減少した地下水中のCl⁻やSO₄²⁻は主として、地表から鉛直的に供給される人為的汚染の減少によるものと考えられた。

これらの人為的汚染の内訳は、屎尿、生活排水、都市廃棄物或いは大気からの降下物などが考えられる。地上にあるこれらの汚染源は、恐らく都市化に伴って量的には増大したことが推定される。しかし、実際にはこれらの成分の地下水への負荷は明らかに減少傾向を示した。その理由は下水道施設の充実と地上表面の舗装などによって地上からの鉛直汚染が減少したためであろう。

NO₃⁻-Nは地上からの鉛直汚染が主体であるが、Cl⁻やSO₄²⁻とその挙動が必ずしも同じでないようである。その理由は現在の所明らかでない。

近年、都市への人口集中、消費需要の増大、産業構造の高度化などに伴って、地下水水質の汚染も複雑化の傾向を

呈しつつある。

地下水は人間にとて極めて貴重な水資源である。その水質保全の為には、現状を十分に認識したうえで長期的、かつ総合的な行政施策を立案、推進する必要があろう。

稿を終えるに当たり、資料を提供して頂いた北海道開発局石狩川開発建設部、札幌市、札幌市企画部統計課、札幌市水道局及び札幌市下水道局の関係各位に厚く感謝の意を表します。

要 約

1976年から1986年にわたって実施した札幌市の地下水水質調査の結果のうち、豊平川扇状地地下水群のSO₄²⁻、Cl⁻及びNO₃⁻-Nについて解析し、以下の点を明らかにした。

1) 札幌市の各地下水群中のSO₄²⁻、Cl⁻及びNO₃⁻-N濃度を比較した結果、市の中心部に位置する豊平川扇状地地下水群中の3成分は何れも他の地下水群濃度に比べて総体的に高い値を示した。

2) 豊平川扇状地地下水群中のCl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻-Nの主たる起源として、Cl⁻は豊平川河川水、人間生活排水、SO₄²⁻は豊平川河川水、NO₃⁻-Nは人間生活排水が推定された。

3) 豊平川扇状地地下水群中のSO₄²⁻、Cl⁻、NO₃⁻-N濃度について、過去11年間の経年変化の有無を調べた結果、SO₄²⁻、Cl⁻では有意な減少傾向が観察されたが、NO₃⁻-Nでは一定の傾向は認められなかった。

以上の結果、人口密度の集中した豊平川扇状地地下水群は他の地下水群に比べ、人間生活に由来する人為的な水質汚染を被っていることは明らかである。しかしながら、札幌市の場合、現時点における都市化は必ずしも地下水の水質悪化に結びついていない。これらは、下水道、屎尿処理等を含めた環境衛生施設の整備等が、都市化に伴って充実すれば地下水の汚染を防ぐことが出来ることを示唆している。

文 献

- 1) 札樽経済協議会：豊平川扇状地地下水調査報告書（1963）
- 2) 札幌市水道局拡張部：豊平川扇状地地下水調査報告書（1965）
- 3) 尾崎次雄他：地質調査所月報、16、1（1965）
- 4) 山口久之助他：北海道水理地質図幅説明書第8号、札幌、別冊、札幌周辺の地下水と地盤、北海道地下資源調査所（1965）
- 5) Snedecor, G. W., Cochran, W. G., : Statistical Methods, Iowa State University Press, Ames, Iowa, 280 (1980)

- 6) 河口至商：多変量解析入門II，森山出版株式会社，東京，108 (1978)
- 7) 小林 純：農学研究，48，63 (1960)
- 8) 建設省河川局編：地下水質年表，第1回昭和60年 (1987)

英 文 要 約

The variation level of chloride, sulfate and nitrate nitrogen in the groundwaters collected at 26 sites in Sapporo during the period of 1976~1986 was investigated.

The results were as follows;

- 1) The concentrations of Cl^- , SO_4^{2-} and NO_3^- -N in the groundwaters of the Toyohira River Fan were generally higher than those of other areas in Sapporo.
- 2) The major source of Cl^- and SO_4^{2-} in the groundwater of the Toyohira River Fan was due to the Toyohira River. On the other hand, most of NO_3^- -N was infiltrated from the surface of the Toyohira River Fan.
- 3) Except NO_3^- -N, the concentrations of Cl^- and SO_4^{2-} had gradually decreased during the period of 1976~1986.

It may be concluded that urbanization is not a direct cause of deterioration in water quality, and that in urban area it can be maintained by the improvement of several hygienic facilities.

Key Words: chloride, sulfate, nitrate nitrogen, groundwater quality, urbanization