

多摩川流域の都市河川の地下水流出の
涵養源に関する同位体水文学的研究

1983年

松尾 禎 士
東京工業大学理学部教授

目 次

1. 序 論	1
2. 野川流域における地下水流出の涵養源についての従来の見解	1
3. 流域内全体を対象とした同位体水文学的研究	1
4. 野川元町用水湧水の涵養源の研究	7
5. 結 語	12
6. 謝 辞	12
参 考 文 献	14

1. 序 論

多摩川流域のような都市化の進行した地域では、河川の平常時の流水中に占める地下水の寄与を推定することは適正な環境保全を立案する上できわめて重要である。多摩川の支流の一つである野川では、国分寺崖線沿いに点在する湧水が、その自然の基底流量の大部分を占めると考えられるが、その湧水自体にも人間活動の影響が、主に水質の面から指摘されている。本研究では、野川流域を例にとりて、水文学的手法および安定同位体分析の手法の相互連携によって、従来の水質面からの検討と併せ、可能な限り定量的に当地域の地下水流出の涵養源を明らかにすることを試みた。

2. 野川流域における地下水流出の涵養源についての従来の知見

2.1. 溶存物質からみた人間活動の影響の評価

吉田・小倉¹⁾は、野川湧水中の硝酸塩について人間活動の直接および間接的影響を指摘している。彼らは、野川流域内における国分寺崖線沿いの湧水群の水質を調査し、硝酸態窒素濃度と塩化物イオン濃度との間に高い相関を見いだしている。また、国分寺市東元町「真姿の池」湧水点における1976～1978年の硝酸態窒素濃度と塩化物イオン濃度の変動についても高い相関を認めている^{1), 2)}。その濃度は天然のレベルに比較してかなり高い値であり、人間活動の影響を考えないわけにはいかない。実際、彼らによれば²⁾、降水量および湧水量と推定流出率とから、この湧水についての集水域が国分寺崖線上部に推定可能で、その範囲内には生活排水の吸い込み井戸利用地区が含まれている。さらに推定集水域内の吸い込み井戸利用地区内人口に生活排水中の窒素および塩素の原単位を乗じて生活排水起源のこれら元素の量を推定しているが、それは降水起源の量に比較して湧水中に占める割合が高いことが示されている。

2.2. 安定同位体による湧水の涵養源の推定

松尾ら^{3), 4)}は、湧水の起源を水の同位体分析により明らかにしようと試み、国分寺崖線下湧水群について以下のような議論を展開している。すなわちこれら湧水群の集水域内での降水の同位体組成は均一とみなせるから、もし生活排水の同位体組成が地域的に異なっているならば、降水と生活排水の混合と考えられている湧水にも地域による同位体組成の差が存在するはずである。彼らは、湧水の1年間にわたる月別試料から上流域湧水群と下流域湧水群との間に系統的な同位体組成の差を見だし、これを各市域への供給上水にみられる同位体組成の差（これは各水道事業者の原水比率の違いによって生ずると思われる）に帰している。

3. 流域内全体を対象とした同位体水文学的研究

3.1. 序 論

松尾ら^{3), 4)}の研究をひきついで、これに浅層地下水の観測を加えることで、湧水の涵養源を同位体手法によって特定可能であるか否かを検討した。また研究対象流域内での平常時の流水中に占める地下水の寄与を評価する目的で、水文観測・水質分析・同位体分析を実施した。

3.2. 調査方法

3.2.1. 観測点

図1に観測点を示す。観測・採水は昭和57年7月22日・翌23日におこなった。各採水試料は、水素同位体組成分析用には20ml ガラス製バイアルに、塩化物イオン濃度分析用には250ml ポリエチレン製試料びんに、トリチウムおよび懸濁物質分析用にはそれぞれ、3ℓおよび1ℓのポリエチレン製試料びんに蓄え、実験室に持ち帰り分析に供した。

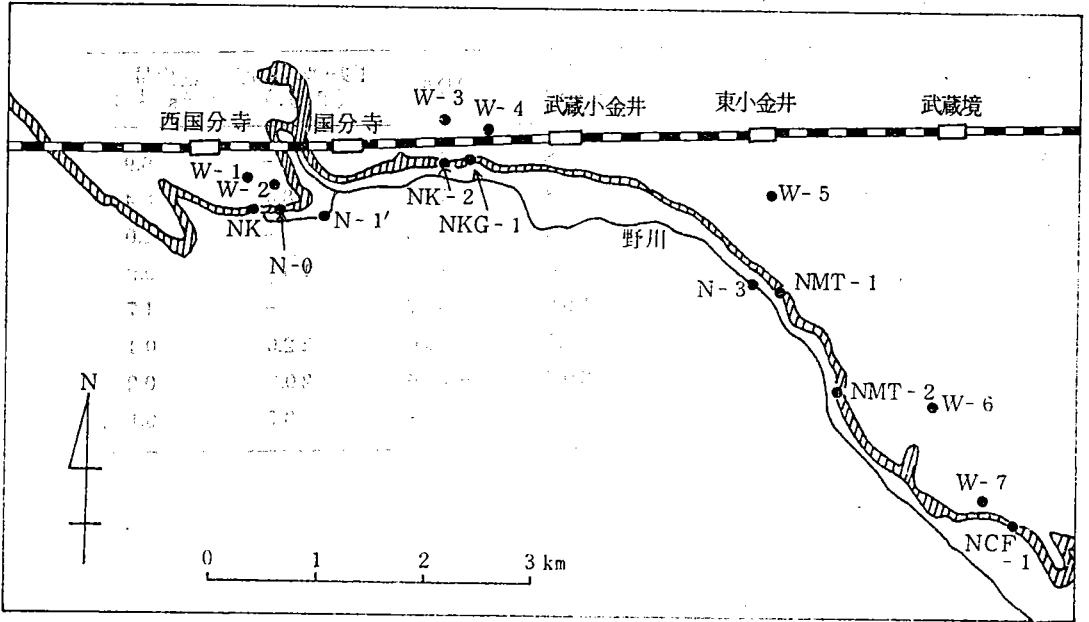


図1 野川調査域内の採水点
(斜線は急斜面または崖を示す。)

3.2.2 現場測定と分析方法

流量は、断面積と流速の積により測定し、一部の観測点では、直接法によった。

水温および電気伝導度は、堀場製作所製導電率チェッカU-7 COND型を用いて観測点において採水時に測定した。

水素同位体組成は、試水5mgを400℃に加熱した亜鉛により水素に還元し、この試料ガスにつき水素同位体比測定用質量分析計(日立製作所製RMD型)により測定した。本報告では測定値を以下のように定義される標準平均海水(SMOW)からの千分偏差 δD (単位は‰, パーミル)によって表現する。

$$\delta D = \left\{ \frac{(D/H)_{\text{試水}}}{(D/H)_{\text{SMOW}}} - 1 \right\} \times 10^3$$

塩化物イオン濃度測定はモール法，懸濁物質（SS）の測定法はJIS K0101-16.1に従った。

3.3 結果および考察

3.3.1 湧水

表1に今回の観測点についての各項目の測定値を示した。湧水についての前回³⁾（1979～1980年）の観測（表2）との比較により，以下の諸点が明らかになった。

表1 A 湧水試料の水質

試料	水温(℃)	電気伝導度 ($\mu\text{mho cm}^{-1}$)	塩化物イオン (ppm)	$\delta D\%$	トリチウム濃度 (T.U.)	湧出量 (ℓs^{-1})
NK	17.0	211	18.8	-53.9	—	6.9
N-O	16.0	188	15.8	-50.1	18.4	8.4
N-1'※)	21.5	222	18.4	-54.3	—	11.0
NK-2	16.5	198	16.4	-53.9	10.7	0.9
NKG-1	15.8	211	19.6	-50.7	—	1.7
NMT-1	—	—	16.7	-46.6	22.0	0.4
NMT-2	19.2	247	20.7	-46.6	20.9	0.2
NCF-1	20.5	134	—	—	3.7	0.1

※)元町用水表流水

表1 B 浅井戸水試料の水質

試料	塩化物イオン (ppm)	$\delta D\%$	トリチウム濃度 (T.U.)
W-1	21.4	-53.5	5.8
W-2	18.8	-50.7	—
W-3	17.9	-53.0	18.3
W-4	17.1	-52.1	14.8
W-5	19.6	-52.2	17.7
W-6	20.0	-43.2	—
W-7	26.9	-51.4	14.7

表2 1979～80年の湧水観測結果(平均値)

試料	水温(℃)	塩化物イオン (ppm)	電気伝導度※ ($\mu\text{mho cm}^{-1}$)	δD ‰	湧出量 (ℓs^{-1})
N-0	16.2	15.8	223	-5.14	6.5
NK-2	16.2	18.7	259	-5.22	2.1
NKG-1	15.9	19.3	257	-5.16	5.5
NMT-1	15.9	12.6	192	-5.03	7.4
NMT-2	15.9	18.2	246	-5.02	-
NCF-1	15.5	19.1	277	-5.03	1.6

※) 25℃に補正

- 1) NCF-1については電気伝導度から判断して今回の試水についてはくみ上げ水の混和などの人為的な影響の疑いが認められるので、ここでの考察の対象から除外するのが適当である。
- 2) 前回、同位体組成の上から推定された上流群・下流群の区別は、今回の観測においても、より明瞭に判別できる。NK, N-0, N-1, NKG-1が $\delta D = -5.2\%$ 前後で、上流群を構成し、下流群NMT-1, NMT-2は、明確に異なった水素同位体組成 $\delta D = -4.7\%$ を持つ。水素の安定同位体組成のみならず、トリチウム分析の結果もこれを支持していると思われる。
- 3) 前回の結果と同様に、同位体組成以外の水質指標で、これら湧水の上流群・下流群の区別をおこなうことは困難である。

3.3.2 浅層地下水と湧水の関係

浅井戸(W-1～W-7)採水時に実施した水位観測によれば、標高から判断して、採取した浅層地下水は、湧水群を涵養している地下水層に相当する水位を持っていると推定される。上流群の湧水の集水域と思われる地域に存在する浅層地下水試料(W-1～W-4)は、これら湧水の水素同位体組成($\delta D = -5.2\%$ 前後)にほぼ等しい同位体組成を持っているが、この関係は下流群湧水(NMT-1, NMT-2)とこれらに近い位置にある浅井戸試料(W-5～W-7)については成り立っていない。

そこで浅層地下水の水質についてより詳しく、以下に検討を加える。まず距離の近い浅井戸水試料W-1とW-2、およびW-3とW-4の組み合わせ内での水質の差に注目する。後者の組み合わせではほぼ均一な水が地下水として存在していると結論されるのに対して、前者では、重水素濃度の低い水に塩化物イオン濃度が高いという関係が示されている。W-3, W-4については、これらの水が湧出している点を推定することはできないが、W-1, W-2についてはそれぞれの水が、NK, N-0を湧出点としていることが推定される。上述の重水素濃度・塩化物イオン濃度についての関係が、NK, N-0のものにも反映している事実は、この推定の強力な支持を与えている。

このことは、湧水の涵養源を特定する上での浅層地下水観測の重要性を物語っている。

前回の調査の際に示された水道水の同位体組成の市域による違いも認められるが(表3)、現在の分析精度では同位体組成のみから漏水あるいは生活排水として、水道水が湧水を涵養している割合を定量的に論ずることは不可能である。

表3 水道水の同位体組成

試料	採取日	$\delta D\%$	位置
TW-1	S57.7.23	-56.5	W-2 近傍(国分寺市)
TW-2	"	-57.4	W-3 近傍(小金井市)
TW-4	S57.7.28	-54.8	W-6 近傍(三鷹市)
ODTW	S57.7.22	-59.4	NKG-1 近傍(小金井市)
TW-K	S57.12.22	-55.7	W-2 近傍(国分寺市)

3.3.3 野川本川に占める地下水流出の寄与の推定

二枚橋(N-3)で実施した3時間ごとの観測結果を図2に示す。ここで水位は任意のスケールで表わしてあり、流量の実測値としては7月23日6時10分に $1,200 \text{ l s}^{-1}$ 、同日14時10分に 300 l s^{-1} であった。早朝に生活排水の寄与が減少するに伴い、汚濁負荷を示す水質指標(電気伝導度、塩化物イオン濃度、懸濁物質)の低下が認められる。

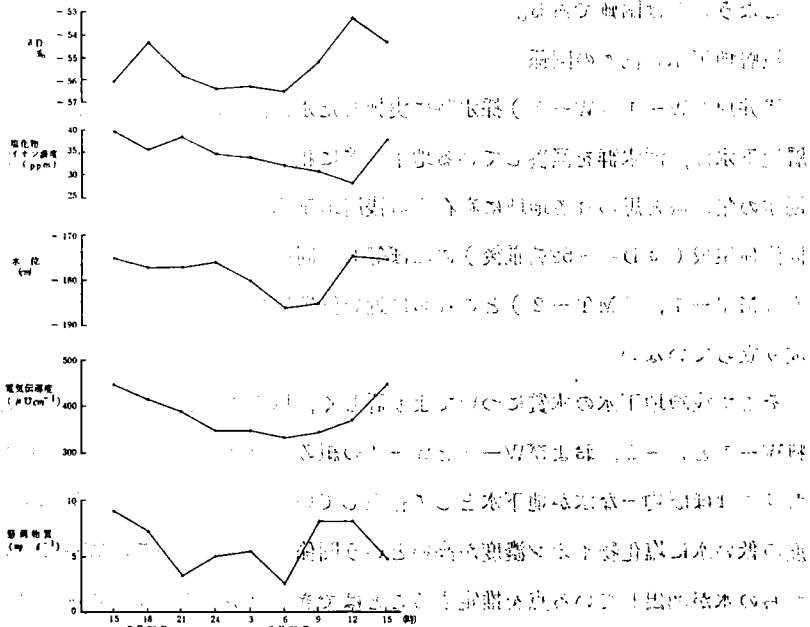


図2 野川二枚橋での水質・水位の2.4時間観測結果

河川水は、地下水流出と生活排水の2者よりなっているとし、保存性の指標(C)をえらべば、次式が成り立つ。

$$Q_R = Q_G + Q_S \quad (1)$$

$$C_R Q_R = C_G Q_G + C_S Q_S \quad (2)$$

ここで、 Q_R : 河川流量, Q_G : 地下水流出量, Q_S : 河川に直接あるいは管路などを経て排出されている生活排水量, であり, C_R , C_G , C_S はそれぞれの水質濃度である。

Q_G の量は時刻によらず一定で、また水質 C_G , C_S についても一定であるとの基本仮定を置く。早朝時(添字L)および午後の水質の悪化時(添字H)の生活排水量をそれぞれ Q_{SL} , Q_{SH} で表わすと、実測河川流量(Q_R)の式(1)から

$$Q_G + Q_{SL} = 120 \text{ } \ell\text{s}^{-1} \quad (1-1)$$

$$Q_G + Q_{SH} = 300 \text{ } \ell\text{s}^{-1} \quad (1-2)$$

が導ける。

いま表4に示すように C_{RL} , C_{RH} をとれば各水質指標のそれぞれについて、

$$C_G Q_G + C_S Q_{SL} = C_{RL} \times 120 \quad (2-1)$$

$$C_G Q_G + C_S Q_{SH} = C_{RH} \times 300 \quad (2-2)$$

である。ここで、地下水流出分の水質 C_G については、湧水(NK~NKG-1)の平均値をとった(同じく表4に示す)。

表4 野川二枚橋における地下水流出の算出

水質項目	C_{RL}	C_{RH}	C_G	算出された $Q_G/\ell\text{s}^{-1}$
電気伝導度 ($\mu\text{mho cm}^{-1}$)	330	450	210	75
塩化物イオン濃度 (ppm)	30	40	18	70
懸濁物質 (mg/ℓ)	2.5	8	0	94

以上4式で未知量は Q_G , Q_{SL} , Q_{SH} , C_S であり、各保存性水質指標から独立に地下水流出量 Q_G が求まることになる。結果を表4に掲げる。

どの水質指標から算出した Q_G でも、 $80 \text{ } \ell\text{s}^{-1}$ 程度、すなわち早朝の流量低下時では、その $2/3$ が、自然の地下水流出分であるという結論が得られた。7月22日に表流水として観測された湧水量の和は $18 \text{ } \ell\text{s}^{-1}$ であり、測定できなかった日立中央研究所構内などの湧水の存在、および地表にあらわれない地下水流出を考えると、妥当な値といえよう。

以上の水質指標と比べて、より直接的に水自身のトレーサーとして役立ち得ると期待される水素同位体組成については、汚濁時にむしろ湧水の同位体組成に近づくという観測結果が得られている（表1を参照）。このことは上述の地下水流出（＝湧水と同じ水質）・生活排水2成分混合モデルでは説明できない。今回の観測では前日まで降水が続いていたという事実があり、排水管路内の汚濁を担う水自体に降水（その時々で、同位体組成に大きな変動があることが知られている。）の成分が多かったなどの影響が、2成分モデル不成立の原因として指摘できるかもしれない。

また、前回調査の際に試みた水収支計算においても、収支計算が同位体指標の場合について、不成立の場合が多かったことを考えあわせると、安定同位体分析の潜在的な有用性をいかにするためには、①分析精度を高める；②測定を自動化をすすめて多試料を分析できるようにして、調査地における未知の同位体組成変動要因を究明する、などが、今後の課題といえよう。

※）懸濁物質を保存性とするのは、流速の変化による巻き上げ、沈降のバランスの変動を考えると必ずしも正当化されないが、この場合、電気伝導度や塩化物イオン濃度による推定と調和的な結果が得られたのは注目に値する。また、より深い考察として文献⁶⁾を参照されたい。

4. 野川元町用水湧水の涵養源の研究

4.1 目的

野川最上流部元町用水の主な水源は、国分寺万葉植物園内湧水（NK）および真姿の池湧水（N-0）である。これら湧水の涵養源を水文学的手法により特定し、また溶存物質の起源を究明する目的で、国分寺崖線上での地下水位観測、吸い込み井戸調査、地下水等の塩化物イオン分析を実施した。

4.2 調査方法

4.2.1 水位観測

現地予備調査により、対象湧水を涵養する地下水流域界を決定するに十分なだけの浅井戸を選定、これらの井戸につきその上端の水準測量をおこなった（測機舎製自動レベルC3型を使用）。ついで昭和57年12月22日、地下水面図作製のため、携帯水位計（測機舎製NP型）を利用して、地下水位の同時観測を実施した。

4.2.2 水質調査

地下水位測定を実施した大部分の井戸からこの時同時に地下水を採取した。また湧水（NKおよびN-0）も採取、分析に供した。試水は250mlのポリエチレン製試料びんに蓄えた。別に、水質の変動を評価するために、4個所の浅井戸および湧水（NK）から、昭和57年12月10日から昭和58年1月28日に定期採水を実施した。また昭和57年12月31日には、調査域内の吸い込み井戸試料7点を採取した。これら試水の塩化物イオン定量は、モール法によった。

4.3 結果と考察

4.3.1 浅井戸の存在と地下水面図

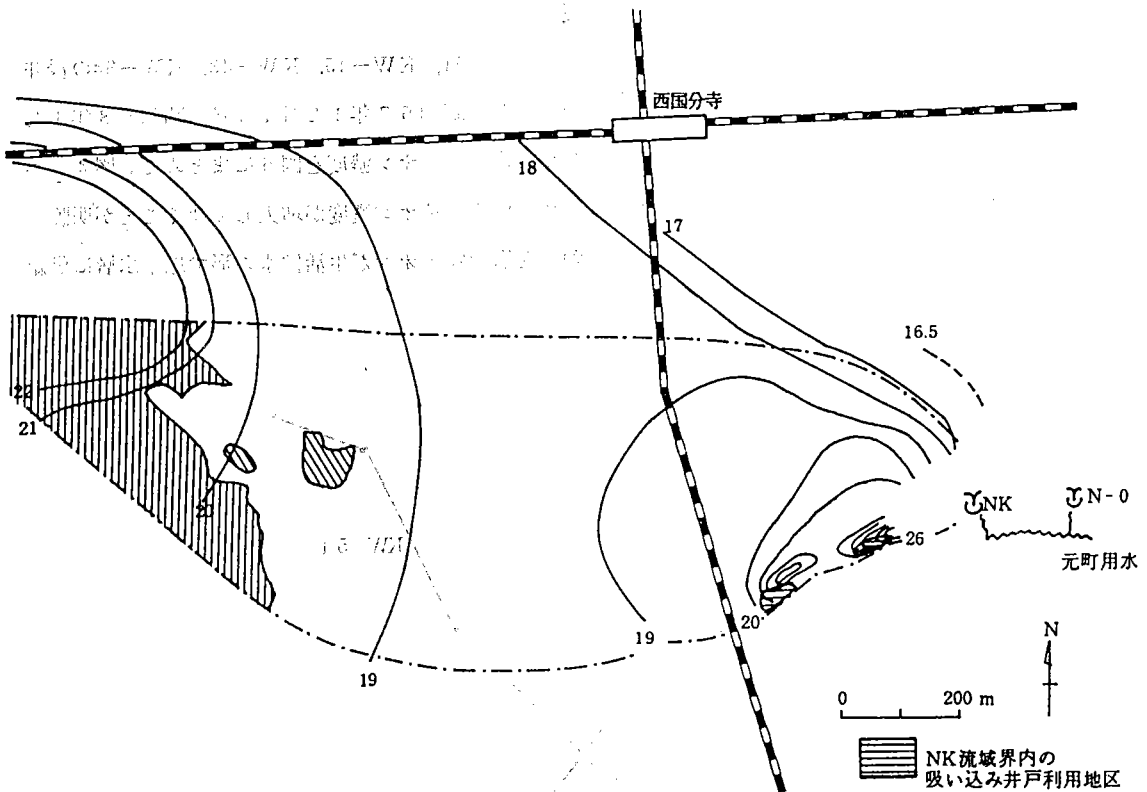


図4 地下水層内の塩化物イオン濃度分布（濃度の単位は ppm）

また、NK、N-0の湧出点付近には、図3に示したように多くの浅井戸が存在し、地下水層内の塩化物イオン分布の詳細を知ることができるのであるが、地下水流線を考慮すると、NK、N-0の塩化物イオン濃度の差（表7）が、地下水層内での分布によって説明できることがわかる。すなわち、NKとN-0とは、湧出点が150mほどしか離れていないにもかかわらず、明確に異なる地下水流域を持っているため、その流域での塩化物イオンの地下水への供給の程度の差に応じた水質の差を生じていると考えられる。

表7 昭和57年12月22日における元町用水湧水の水質結果

試料	塩化物イオン濃度 (ppm)	δD ‰
NK	18.4	-5.3.1
N-0	15.6	-5.2.1

4.3.3. 地下水層中の塩化物イオン濃度の時系列変動

湧水NKの地下水流域界中に上流部から順に、KW-51、KW-45、KW-43、KW-34の浅井戸を選び、降雨が地下水位に影響を与えていない期間（昭和57年12月10日～昭和58年1月28日）におけるこれら浅井戸および湧水NKでの塩化物イオン濃度を図5にまとめた。図4に示した吸い込み井戸利用地区内の井戸KW-51で、塩化物イオン濃度が増大してゆくことが明瞭にみてとれる。この事実は、実際に吸い込み井戸から塩化物イオンが生活排水の形で地下水層に供給されていることの良い証左といえよう。

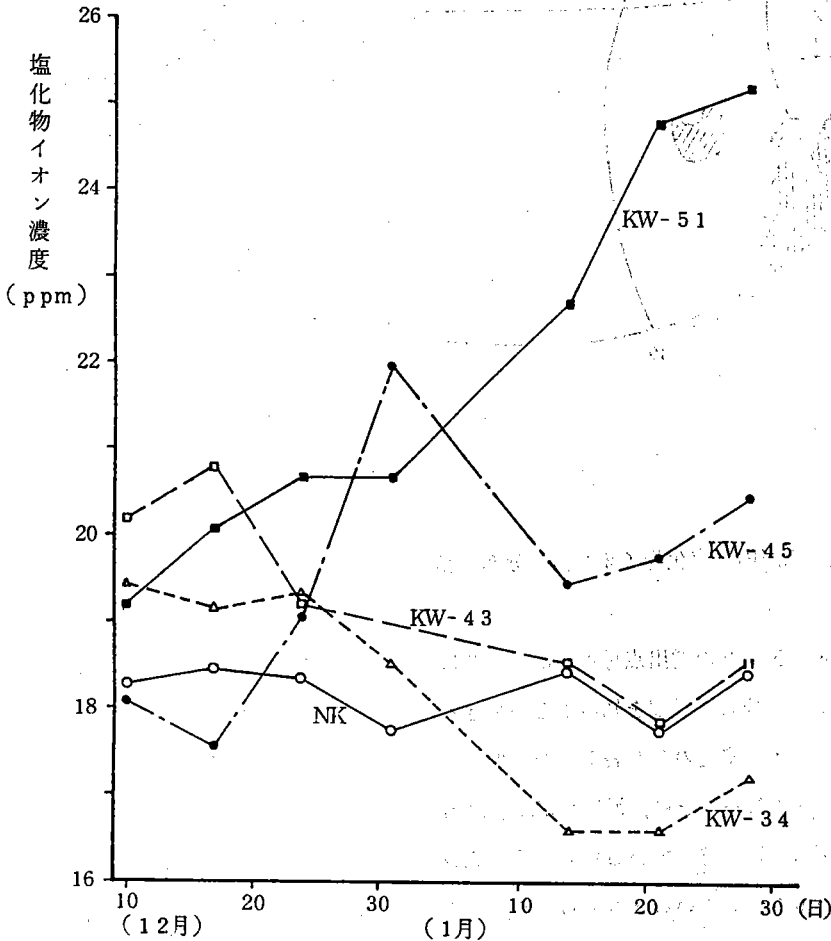


図5 塩化物イオン濃度の時系列変動

4.3.4 地下水の涵養に占める生活排水の寄与の推定

いま、塩化物イオン濃度のデータを用いてある時点での湧水の湧出量中に占める生活排水の寄与を定量的に検討してみる。湧水の涵養源としては水道からの漏水などもありうるが、ここではこれを無視して生活排水と降水のみを考える。3.3.3節での議論と同様に混合の方程式

$$Q_G = Q_S + Q_P \quad (1')$$

$$C_G Q_G = C_S Q_S + C_P Q_P \quad (2')$$

が成り立つ。

ここで、 Q_G ：総湧出量、 C_G ：湧水の塩化物イオン濃度、 Q_S ：生活排水に由来する流量、 C_S ：生活排水中の塩化物イオン濃度、 Q_P ：降水に由来する流量、 C_P ：降水中の塩化物イオン濃度、である。

湧水NKについての昭和57年12月22日の観測結果 $C_G = 18.4 \text{ ppm}$ 、表6に示した吸い込み井戸の結果の平均値 $C_S = 37.1 \text{ ppm}$ 、水谷ら⁵⁾が同様の試みの中で用いた降水の塩化物イオン濃度の値 $C_P = 1.7 \text{ ppm}$ を使えば、 $Q_S/Q_G = 0.47$ と算出される。地下水の約半分の量が生活排水によって涵養されているとの結果である。この推定では C_S にどのような値を用いるかで、 Q_S/Q_G の結果が大きく変わってくるので、選ぶ C_S の値の妥当性の検討、ならびに他の方法による推定値との整合性を確かめるなどが今後の課題であろう。

同位体水文学的手法は、上述の推定の妥当性を検討できる可能性を持っている。表7に予備的に示した水素同位体組成分析の結果からは、次の点が指摘できる。

- 1) 生活排水の同位体組成が、この地区の上水道の同位体組成(昭和57年12月22日に国分寺市で $D = -55.7\%$ 、表3)に等しいとすれば、生活排水の寄与の大きい湧水NKは塩化物イオン濃度が高いのみならず同位体組成の上でも生活排水の値に近いという傾向を示している。
- 2) 同位体組成について(2')式を適用して Q_S/Q_G を推定することは、現在の δD の測定精度 $\pm 1.5\%$ と、地下水層内で期待できる同位体組成の分布の幅とを考慮すると、困難な点が多い。予備的には、塩化物イオン濃度と同位体組成とで地下水試料に相関が認められるかどうかを調べることでこの手法の潜在的有用性を評価できるであろう。今後、安定同位体組成測定精度向上が望まれる。

5. 結 語

本研究では、水文観測ならびに安定同位体組成分析を含む水質調査により、野川の地下水流出の実態を明らかにすることができた。以下に主な成果をまとめる。

- 1) 野川本川での24時間観測により、地下水流出(=湧水と同じ水質)と生活排水の2成分の混合で、河川水の水質が説明できることが明らかになり、自然の基底流量を分離することができた。
- 2) 浅層地下水への生活排水の混入という過程で、地下水流出自身への人間活動の影響が指摘されているが、その実態を、地下水流域界の推定、流域の吸い込み井戸分布によって支配されている地下水層内塩化イオン濃度分布などによって、実証的に明らかにすることができた。

6. 謝 辞

本研究をすすめるにあたり、とくに現地調査で手助けをしていただいた東京大学ならびに東京工業大

学の院生、学生諸氏に感謝する。また調査の目的を理解され、協力を惜しまれなかつた調査域内の浅井戸所有者の方々にも御礼申し上げる。

本研究は、田口隆男氏（当時、東京大学工学部土木学科学学生）の積極的な取り組みが無くては、成果を挙げる事が出来なかつたであろう。特に記して謝意を表する。

また、トリチウム濃度測定は、学習院大学にお願いした。

（以下は非常に薄い文字で印刷された、ほとんど読み取れない文章が続く。内容は不明瞭である。）

（以下は非常に薄い文字で印刷された、ほとんど読み取れない文章が続く。内容は不明瞭である。）

（以下は非常に薄い文字で印刷された、ほとんど読み取れない文章が続く。内容は不明瞭である。）

参 考 文 献

- 1) 吉田和広・小倉紀雄(1978):野川湧水中の硝酸塩濃度とその起源,地球化学12,44-51。
- 2) 吉田和広(1979):野川湧水中の硝酸塩の起源に関する研究,東京農工大学修士論文。
- 3) 松尾禎士(1981):野川に関する水収支および水,溶存物質の涵養源の研究。(財)とうきゅう環境浄化財団研究助成 №38。
- 4) T.M.Pradhananga, T.Ohsumi, H.Wushiki, U.Takeuchi, and S.Matsuo:Hydrological Study on the Nogawa Basin by Isotopic and Chemical Analysis, in preparation.
- 5) 水谷 淳・虫明功臣(1981):武蔵野台地における水循環機構に関する研究,土木学会 第25回水理講演会論文集。
- 6) 安藤義久・大隅多加志・高橋 裕・松尾禎士(1983):都市河川の環境維持流量としての地下水流出の形態と涵養源に関する研究—野川における事例的研究—,土木学会,第11回環境問題シンポジウム講演論文集。