

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 —

東京大学工学部土木工学科 ○ 安藤 義久
東京工業大学理学部化学科 大隅多加志
東京大学工学部土木工学科 高橋 裕
東京工業大学理学部化学科 松尾 禎士

1. はじめに

従来、河川は治水・利水面のみが重要視されていたが、近年では河川の機能として治水・利水機能だけでなく親水機能も重要であるという考えが定着しつつある。この河川の親水機能が発揮されるためには、水環境を維持する汚濁されていない流量の存在が前提条件となると考えられる。都市河川の多くは、生活排水や工場排水などで汚濁されており、都市河川の環境維持流量としての地下水流出の重要性がクローズ・アップされてきている。本研究では、多摩川の支川の野川を対象として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を明らかにする。これをふまえて、野川の水環境保全計画への提言を行なう。

2. 野川における地下水流出の流出形態

2-1 野川流域の概要

野川は、図1に流域の概要を示すが、武蔵野台地を東南に流下し多摩川に合流する一級河川で、その延長は約20km、流域面積は約70km²である。この流域は近年急激に都市化され、これが河川の汚濁を促進している。特に、1960年頃から、主に生活排水による水質汚濁が本格化している。図1をみると、流域全体にわたって段丘崖が存在することがわかる。この段丘崖の北側は武蔵野段丘面であり、南側は立川段丘面である。この段丘崖（国分寺崖線）沿いに湧水が点在している。

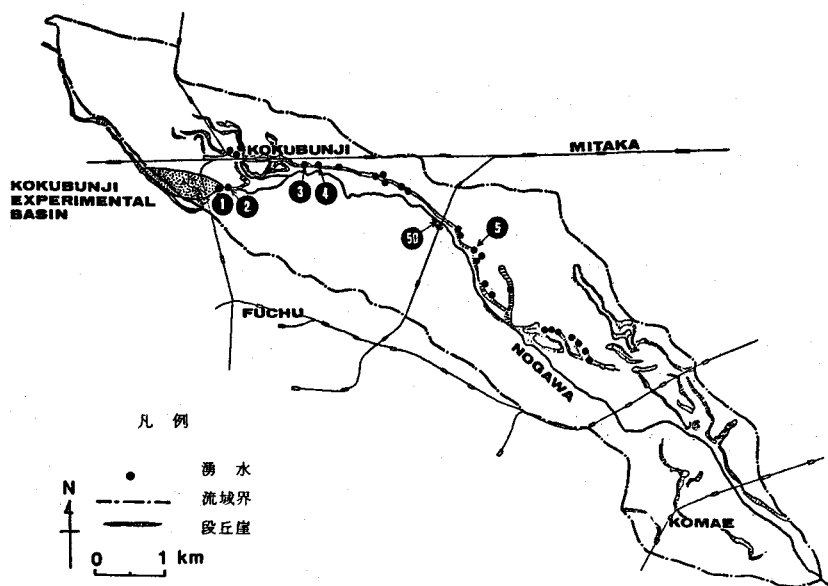


図1 野川流域の概要

2-2 平常時流出量中に占める地下水流出成分の分離

野川の平常時流出量は、主に生活排水などの汚水排水と地下水流出の2成分により構成されていると考えられる。ここでは、筆者らが観測した流量と水質のデータに基づき、野川の平常時流出量中に占める地下水流出成分の分離を試みる。

(1) 流量と水質の観測方法と結果

1982年7月22, 23日の無降雨日に中流部の二枚橋地点(図1中の㊟地点)において、流量と水質の3時間毎の24時間観測を行なった。その結果を図2に示す。流量(Q)は、プロベラ式流速計により平均流速を求め、断面積との積により測定した。水温と電気伝導度(EC)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。塩化物イオン濃度(Cl^-)は、採水したサンプルを実験室においてモル法により測定した。図2の結果には汚水排水の1日の時間変動が典型的に表われている。

(2) 解析の方法

河川水が汚水排水と地下水流出の2者より構成されているとし、保存性の水質項目を選べば、次式の混合方程式が成り立つ。

$$\begin{cases} Q_g + Q_s = Q_r & \dots\dots ① \\ C_g \cdot Q_g + C_s \cdot Q_s = C_r \cdot Q_r & \dots\dots ② \end{cases}$$

ただし、 Q_g : 地下水流出量, Q_s : 汚水の流量, Q_r : 全流量, C_g : 地下水流出の水質, C_s : 汚水排水の水質, C_r : 河川水の水質 である。

①, ②式の連立方程式において、未知数が Q_g , Q_s , C_s の3つあり、このままでは解けない。そこで、①, ②式を2つの時間($t = a$ および $t = b$)について連立させる。

$$\begin{cases} Q_g(a) + Q_s(a) = Q_r(a) & \dots\dots ③ \\ C_g(a)Q_g(a) + C_s(a)Q_s(a) = C_r(a)Q_r(a) & \dots\dots ④ \\ Q_g(b) + Q_s(b) = Q_r(b) & \dots\dots ⑤ \\ C_g(b)Q_g(b) + C_s(b)Q_s(b) = C_r(b)Q_r(b) & \dots\dots ⑥ \end{cases}$$

さらに、次の3つの仮定を設けると、③~⑥式は③'~⑥'式に変形される。

$$1) \text{ 地下水流出量 } Q_g \text{ は時間によらず一定である: } Q_g(a) = Q_g(b) = Q_g \quad \dots\dots ⑦$$

$$2) \text{ 地下水流出の水質 } C_g \text{ も時間によらず一定である: } C_g(a) = C_g(b) = C_g \quad \dots\dots ⑧$$

$$3) \text{ 汚水排水の水質 } C_s \text{ が } t = a, b \text{ でも同じである: } C_s(a) = C_s(b) = C_s \quad \dots\dots ⑨$$

$$\begin{cases} Q_g + Q_s(a) = Q_r(a) & \dots\dots ③' \\ C_g Q_g + C_s Q_s(a) = C_r(a) Q_r(a) & \dots\dots ④' \\ Q_g + Q_s(b) = Q_r(b) & \dots\dots ⑤' \\ C_g Q_g + C_s Q_s(b) = C_r(b) Q_r(b) & \dots\dots ⑥' \end{cases}$$

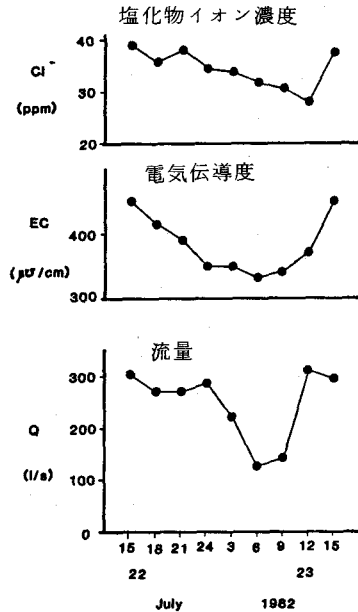


図2 野川の二枚橋地点における流量と水質の観測結果

③～⑥'式において、未知数は Q_g , $Q_s(a)$, $Q_s(b)$, C_s の4つであり、解ける。解いた結果を以下に示す。

$$C_s = \frac{Cr(b) \cdot Q_r(b) - Cr(a) \cdot Q_r(a)}{Q_r(b) - Q_r(a)} \dots\dots\dots ⑩$$

$$Q_s(b) = \frac{\{Cr(b) \cdot Q_r(b) - C_g \cdot Q_r(b)\} \{Q_r(b) - Q_r(a)\}}{Cr(b) \cdot Q_r(b) - Cr(a) \cdot Q_r(a) - C_g \cdot Q_r(b) + C_g \cdot Q_r(a)} \dots\dots\dots ⑪$$

$$Q_s(a) = \frac{\{Cr(a) - C_g\} \cdot Q_r(a) \cdot \{Q_r(a) - Q_r(b)\}}{Cr(b) \cdot Q_r(b) - Cr(a) \cdot Q_r(a) - C_g \cdot Q_r(b) + C_g \cdot Q_r(a)} \dots\dots\dots ⑫$$

$$Q_g = \frac{\{Cr(b) - Cr(a)\} \cdot Q_r(a) \cdot Q_r(b)}{Cr(b) \cdot Q_r(b) - Cr(a) \cdot Q_r(a) - C_g \cdot Q_r(b) + C_g \cdot Q_r(a)} \dots\dots\dots ⑬$$

(3) 解析結果と考察

3つの仮定の中で1)と2)はどの時間でも満足されていると考えられるが、仮定3)の制約条件より7月23日の3時と6時を解析対象とする。

表1には、水質項目として塩化物イオン濃度と電気伝導度を用いた場合の解析結果をそれぞれ表示するが、いずれの場合も地下水流出量 Q_g の値は約 30 l/s の値を示している。

2-3 地下水流出の流出形態

野川本川の地下水流出の流出形態としては、以下の2つが考えられる。

- 1) 湧水からの流出
- 2) 河道への地下水の浸出

この2つの流出形態の寄与率を明らかにするため、1982年7月22日に流量観測点(二枚橋)上流の湧水の水質と湧出量の同時観測を行った。湧水の位置は図1中に示されている。表2には、湧水の水質・湧出量の同時観測結果を示す。4ヶ所の湧出の湧出量の合計は 18 l/s である。窓ヶ窪の日立中央研究所内は湧水の湧出量は測定できなかったが、従来の測定結果^{1),2)}によると国分寺万葉園と真姿の池の湧出量合計の約3分の2程度であるから約 10 l/s と推定される。従って、湧水の湧出量の合計は約 28 l/s と推定される。

以上のことから、野川本川の地下水流出の大部分は湧水からの流出であると考えられる。これは、図3に示すような野川流域の地質断面模式図からみても妥当である。即ち、流域の地下水の主要な帯水層は武蔵野礫層であり、湧水はこの帯水層からの流出であり、野川の河道と武蔵野礫層とは連続しておらず、帯水層中の地下水が河道へ浸出することはないと思われる。

表1 解析結果

変数名	変数	水質項目	
		塩化物イオン濃度	電気伝導物
地下水流出量	Q_g	31 l/s	26 l/s
汚水の水質	C_s	37 ppm	367 $\mu\text{V/cm}$
3時の汚水流量	$Q_s(a)$	191 l/s	196 l/s
6時の汚水流量	$Q_s(b)$	94 l/s	99 l/s

表2 湧水の水質・湧出量の同時観測結果

No	湧水名	水温 T ($^{\circ}\text{C}$)	塩化物イオン濃度 Cl^- (ppm)	電気伝導度 EC ($\mu\text{V/cm}$)	湧出量 Q (l/s)
1	国分寺万葉園	17.0	18.8	211	6.9
2	真姿の池	16.0	15.8	188	8.5
3	東京経済大学	16.5	16.4	198	0.9
4	貫井神社	15.8	19.6	211	1.7
合 計					18.0

小金井市付近の南北地質断面図

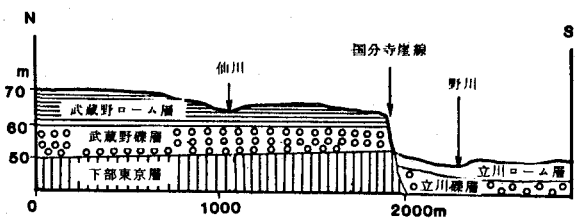


図3 野川流域の地質断面模式図
(出典：小金井市誌 p34)

3. 主要湧水における地下水流の涵養源

武蔵野台地の湧水の涵養源については、吉田・小倉³⁾ および吉田⁴⁾ の研究、水谷・虫明⁵⁾ の研究、および松尾ら⁶⁾ の研究がすでにあり、湧水の涵養源として降水だけでなく生活排水の吸込み井戸による涵養があることの指摘がなされており、それぞれの成分の寄与率についての検討もされている。ここでは、野川上流の主要な湧水の一つである国分寺万葉園内の湧水を対象として、その地下水流の涵養源について地下水位観測、吸込み井戸調査、および地下水等の塩化物イオン分析により検討を加える。

3-1 調査方法

(1) 地下水位の観測

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約60の浅井戸を選定し、これらの井戸につきその上端の標高を知るために、測機舎製自動レベルC3型を用いて水準測量を行なった。ついで、地下水面図作成のため測機舎製NP型携帯水位計を利用して、1982年12月22日に地下水位の同時観測を実施した。

(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、国分寺万葉園内の湧水と真姿の池の湧水のサンプルも採取し、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ヶ所の浅井戸および国分寺万葉園内の湧水から、1982年10月10日から1983年1月28日までの期間に定期的に採水を実施した。また、1982年12月31日には、調査域内の吸込み井戸試料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。

3-2 調査結果と考察

(1) 地下水面図と国分寺万葉園内の湧水の地下水流域界

調査対象浅井戸の位置および1982年12月22日の地下水位の同時観測結果から得た地下水面図を図4に示す。地下水位の等高線に直交する地下水流線を考慮することにより国分寺万葉園内の湧水については、図4に示すように地下水流域界を推定することができた。しかし、隣接する真姿の池の湧水については、湧水の北側に大きな敷地をもつ中央鉄道学園内に浅井戸が存在しないため、地下水流域界を推定できなかった。

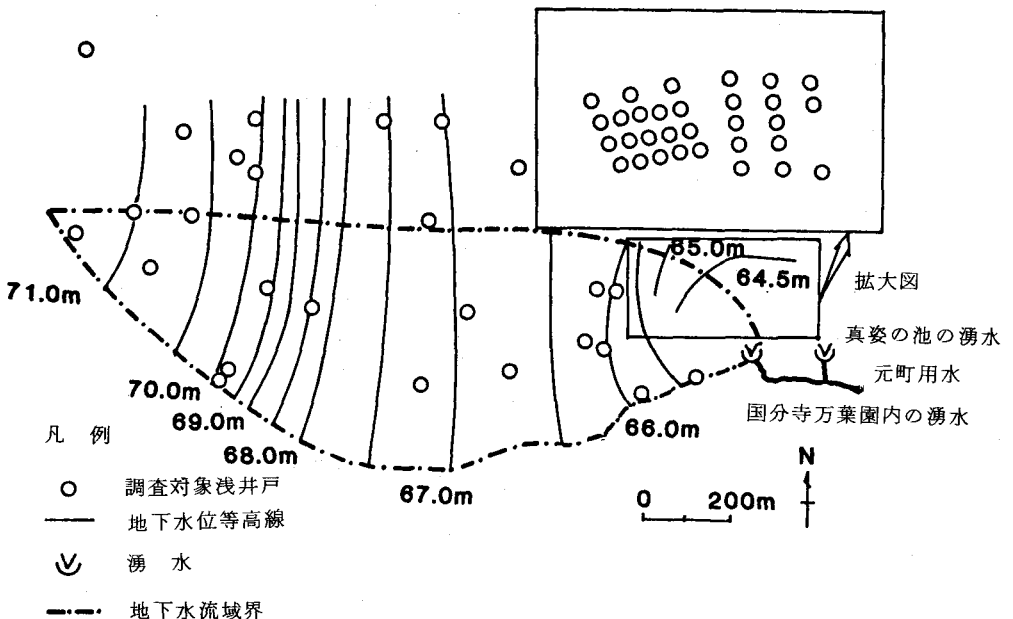


図4 調査対象とした浅井戸の分布と地下水面図と国分寺万葉園内の湧水の地下水流域界

(2) 地下水層内の塩化物イオン濃度分布と吸込み井戸の分布との対応関係

1982年12月22日採取の浅井戸水試料についての塩化物イオンの等濃度線を描いたのが図5である。この等濃度線の分布形状を図5中に示す吸込み井戸利用地区の地下水流域内での分布と照らしあわせてみると、吸込み井戸が地下水への塩化物イオン供給に大きな役割を果たしている様子がよくわかる。実際、表3に示すように吸込み井戸の生活排水の水試料は高い塩化物イオン濃度をもっている。

(3) 地下水の涵養に占める生活排水の寄与率の推定

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水量中に占める生活排水の寄与率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考えられるが、ここではこれを無視して生活排水と降水のみを考える。この場合、次の混合方程式が成り立つ。

$$\begin{cases} Q_w + Q_p = Q_g & \cdots \cdots (14) \\ C_w \cdot Q_w + C_p \cdot Q_p = C_g \cdot Q_g & \cdots \cdots (15) \end{cases}$$

ここで、 Q_g ：総湧出量、 C_g ：湧水の塩化物イオン濃度、 Q_w ：吸込み井戸からの生活排水に由来する流量、 C_w ：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。国分寺万葉園内の湧水についての1982年12月22日の塩化物イオン濃度の観測結果 $C_g = 18.3 \text{ ppm}$ 、表3に示した吸込み井戸の結果の平均値 $C_w = 37.1 \text{ ppm}$ 、水谷・虫明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、 $Q_w/Q_g = 0.47$ と算定される。地下水の約半分の量が生活排水によって涵養されており、残りの約半分が降水によって涵養されているという結果である。

表3 吸込み井戸の試料(1982年12月31日採取)の塩化物イオン濃度

試料番号	塩化物イオン濃度 (ppm)
1	74.7
2	19.8
3	25.9
4	22.9
5	40.3
6	36.6
7	39.3
平均値	37.1

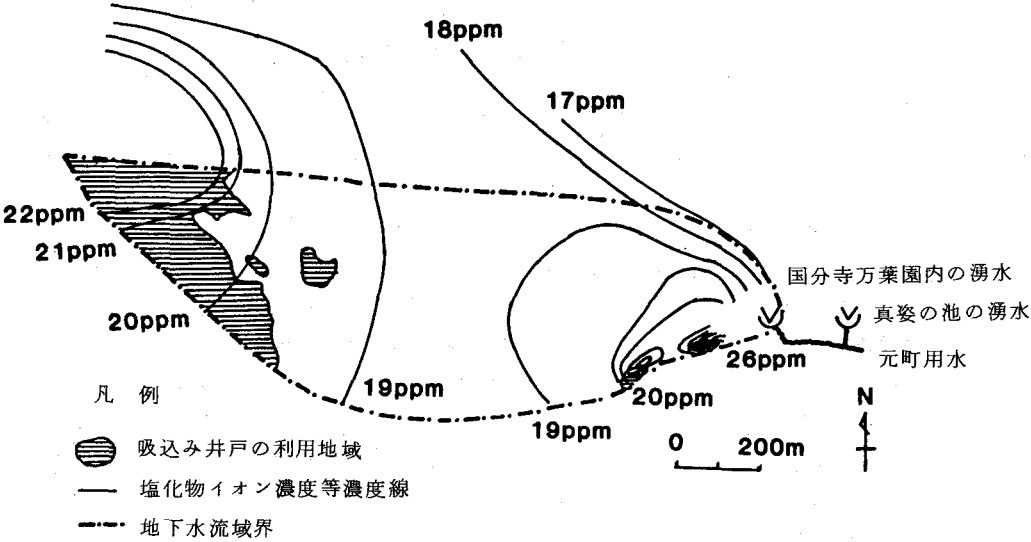


図5 地下水層内の塩化物イオン濃度分布と吸込み井戸の分布

4. むすび

本研究で得られた主な成果とそれをふまえた水環境保全計画への提言に分けて記述する。

4-1 主要な成果

- (1) 野川本川の平常時流量中に占める地下水流出成分の分離を流量と水質の24時間測定データに基づく水質による混合方程式を用いて行ない、地下水流出成分が約30ℓ/sであることを明らかにした。この地下水流出量は、早期の流量低下時の河川流量の約25%に相当し、午後の流量増大時の河川流量の約10%に相当する。
- (2) 野川本川の地下水流出量と流量観測点上流の湧水の総湧水量の比較により、野川本川の地下水流出の大部分が湧水からの流出という形態をとっており、河道への地下水の浸出量は微量であると推定された。また、この推定は流域の水文地質構造と符合するといえる。
- (3) 主要湧水の涵養源に関して、塩化物イオン濃度による混合方程式により、降水による地下水涵養が約50%であり、生活排水による地下水涵養が約50%であることを明らかにした。

4-2 野川の水環境保全計画への提言

- (1) 主要な結果の(1)により、現在の野川の平常時流量の大部分が汚水排水によって構成されており、地下水流出の寄与率が小さいことが明らかにされた。従って、今後の流域内の下水道の普及に伴い、野川の平常時流量の激減が予想されるので、その対応策をたてることが望まれる。
- (2) 主要な成果の(2)によると、現在の野川の地下水流出量の大部分が湧水からの流出形態をとっており、環境維持流量としての地下水流出の保全のためには、湧水の保全が最も重要であることが指摘される。
- (3) 主要な成果の(3)によると、湧水の地下水流出の涵養源として生活排水の吸込み井戸による涵養がかなりの量であるので、湧水の流出量の保全のためには、今後、下水道の普及に伴い生活排水の吸込み井戸による地下水への涵養が減少すると考えられるので、その補完措置として雨水の地下水への涵養を促進させる浸透型雨水貯留の実施が望まれる。具体的には、吸込み井戸の浸透井化が有効な手段であると思われる。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、財団法人とうきゅう環境浄化財団の研究助成を受けたことを記して感謝の意を表します。武蔵野台地の地質と地下水に関して御教示賜りました自治省消防研究所の細野義純博士に深謝の意を表します。本研究の現地調査に協力していただいた東京大学ならびに東京工業大学の院生・学生諸氏に感謝いたします。また、調査の目的を理解され、協力を惜しまれなかった調査域内の浅井戸所有者の方々にも御礼申し上げます。なお、本研究は、田口隆男氏（当時東京大学工学部土木工学科学生、現在建設技術研究所勤務）の積極的な取り組みに負うところが大きいことを特に記して謝意を表する次第であります。

参考文献

- 1) 細野義純：武蔵野台地における地表水および地下水の測水資料，消防研究所技術資料 第1号，自治省消防庁消防研究所，1968.
- 2) 三多摩問題調査研究会：野川流域の自然，三多摩問題調査研究会，1976.
- 3) 吉田和広・小倉紀雄：野川湧水中の硝酸塩濃度とその起源，地球化学 12, pp. 41～51, 1978.
- 4) 吉田和広：野川湧水中の硝酸塩の起源に関する研究，東京農工大修士論文，1979.
- 5) 水谷淳・虫明功臣：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，pp. 153～160, 1981.
- 6) 松尾禎士：野川に関する水収支および水溶存物質の涵養源の研究，財団法人とうきゅう環境浄化財団研究助成，№38，1981.