

松本市周辺の水質と土地利用について

WATER CHEMISTRY AND LAND USE NEIGHBORING MATSUMOTO CITY

井伊博行¹・平田健正²・加々美久夫³
Hiroyuki II, Tatemasa HIRATA, and Hisao KAGAMI

¹正会員 博(理) 和歌山大学助教授, システム工学部 (〒640 和歌山市栄谷930)

²正会員 工博 和歌山大学教授, システム工学部 (同上)

³長野県道路公社 (〒390 松本市島内8370-3)

Concentrations of nitrate, chlorine, and sodium ions in shallow groundwater beneath houses and farm lands were higher than those beneath forest. Tunnel seepage originated from shallow groundwater in the plateau because the plateau was separated from the surrounding plateau by rivers and tunnel was constructed in the foot of the plateau. Concentration of nitrate ion in tunnel seepage water as deep groundwater was lower than those in the shallow groundwater beneath houses and farm lands. As concentration of nitrate ion in tunnel seepage was very low and nitrate in a reduction condition such as tunnel seepage was decomposed by denitrifying bacteria, nitrate concentration was affected by denitrification. Concentrations of chlorine and sodium ions of tunnel seepage beneath forest were lower than those beneath houses and farm lands. Therefore, concentrations of chlorine and sodium ion in deep groundwater were affected by land use.

Key words : land use, groundwater chemistry, tunnel, chlorine, nitrate

1. はじめに

農地や住宅地からの排水による表流水や地下水の汚染が顕在化しつつある。これらの表層水には、硝酸イオンや塩素イオンなどが多量に含まれ、下流域での水質悪化の原因となっている¹⁾。硝酸イオンは人の体内で亜硝酸窒素に還元され、メトヘモグロビン血症(チアノーゼで窒息症状)を引き起こす物質として水道水質基準10mg/lが定められている。近年、地下水の硝酸イオン濃度が増加し、飲料水としての使用に問題が生じている¹⁾。そのため、表層部での汚染が地下水にどのような影響を与えているのかを調べることは重要である。

地下水の浅層部の採水方法としては、井戸や湧水を用いた。さらに、深部の水を効率よく採水するために、ここでは、掘削中のトンネルを利用し、切羽で試水を採取した。湧水をトンネル内で直接採水することによって、ボーリング孔や井戸を用いた採水方法で発生する様々な区間の水の混合を防ぐことができる²⁾。

本研究では、沢水や池水などの表流水、井戸や湧水からの浅層地下水、深層地下水のトンネル湧水の

水質の比較を行い、硝酸イオンや塩素イオンなどの汚染物質と土地利用との関係を調べ、さらに、汚染された地下水が地下深部に浸透していく過程で、水質がどのように変化するのかを明らかにした。

2. 調査地域の概要

調査地域は、図-1に示す松本市北方の台地で、台地は主に新第三紀の凝灰角礫岩と砂岩礫岩層から構成されている。台地上部に段丘堆積物がある。採水及びトンネル掘削は1990年10月から開始され、全長約2kmのトンネルは1992年11月に完成し、松本城山トンネルと命名された。表流水とトンネル全区間からの湧水の採水は現在も行っている。地表面からのトンネルの深さは、トンネルの出入口を除くと約150mである。このトンネルでは、トリチウムを用いた自然トレーサ試験や臭素イオンを用いた人工トレーサ試験を行い、有効間隙率や分散係数を測定した^{3), 4)}。また、トンネル湧水と周辺の表層水(沢水、池水、井戸水、湧水)との関係も調べた⁵⁾。トンネルからの全湧水量は、工事中で300万m³に達し、現在(1996年の末)でも毎

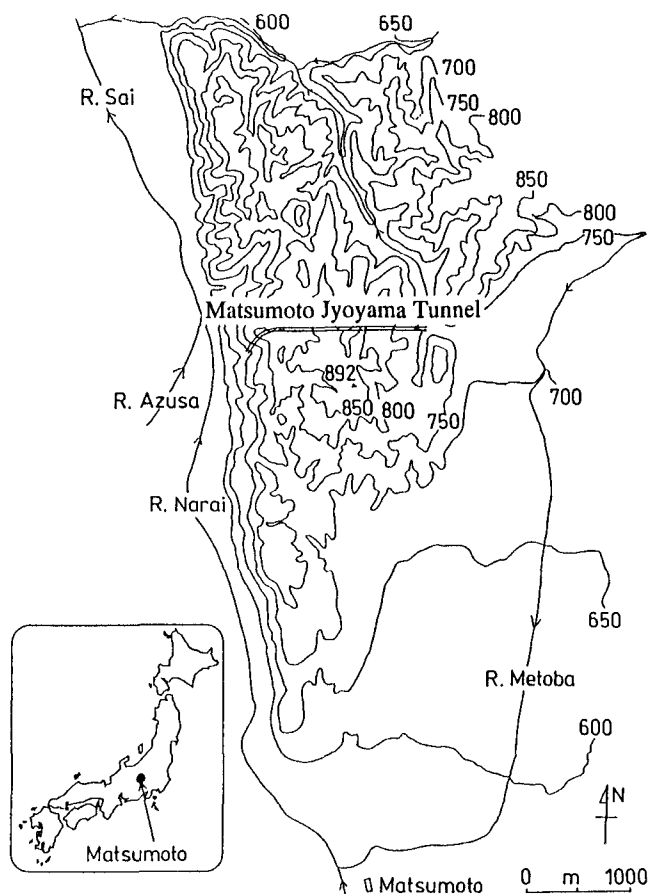


図-1 調査地域位置図

分0.5m³の湧水がある。地形的な特徴として、台地は周囲の山と河川で切られており、トンネル湧水の起源はすべて、この台地上の水である。

3. 調査方法

図-2には、図-1に示した対象地域を拡大し、土地利用状況と採水地点をプロットした。同図に示すように台地周辺の沢水、井戸水、池水、湧水とトンネルからの湧水を定期的に採水した。井戸はいずれも浅井戸で深さは10m以内である。試水のpH、酸化還元電位(Eh)は、原位置において測定した。試水の溶存成分の内イオンクロマトグラフィでNa⁺、NO₃⁻、Cl⁻を測定した。NO₃⁻の窒素安定同位体比 $\delta^{15}N$ 値の分析は、ケルダール法によりNO₃⁻をアンモニアに還元した後、硫酸でトラップして濃縮し、アルカリ条件でN₂ガスを発生させ、精製したN₂ガスを質量分析計で測定した⁶⁾。

4. 調査結果と考察

(1)土地利用

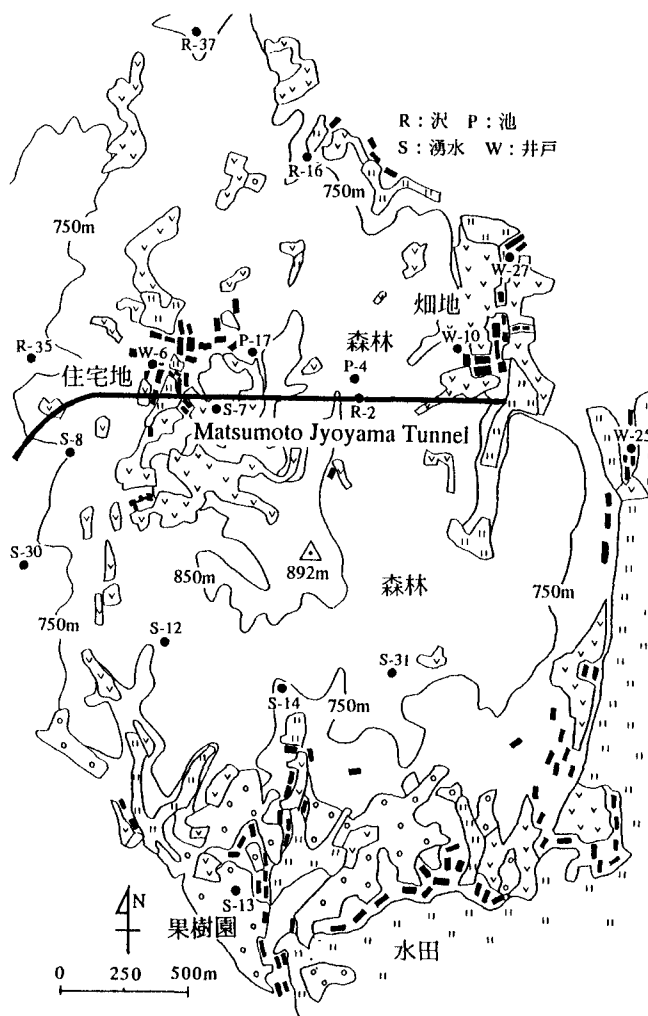


図-2 土地利用と採水地点

図-2に描いたように全体としては、台地の麓に広がる低地は水田、中腹部は森林で、台地上部には民家があり、水田や畑地が見られる。トンネル測線では、トンネルの東側入口付近の低地に水田が、麓に畑地が広がっている。そこからトンネル中央部にかけては、広葉樹や針葉樹からなる森林が見られる。中央部から西側にかけては、民家があり、水田、桑畑が見られる。トンネル西側入口付近は、森林である。台地の南側の麓では、リンゴなどの果樹栽培が行われ、低地では水田が見られる。

(2)塩素イオンと硝酸イオン濃度の関係

生活排水や農業活動の影響は、水の塩素イオンや硝酸イオン濃度を上昇させるため、試水の塩素イオンと硝酸イオン濃度を比較した。

図-3の地下水中の塩素イオンと硝酸イオン濃度の関係では、民家の井戸水は□、畑地・水田の湧水は○、森林地域の湧水は×、トンネル湧水が△印で示されている。また、これ以降の地下水の図でも同じ記号を用いた。total tunnel は掘削終了後のトンネル全区間の湧水で、tunnel(east)はトンネル東側

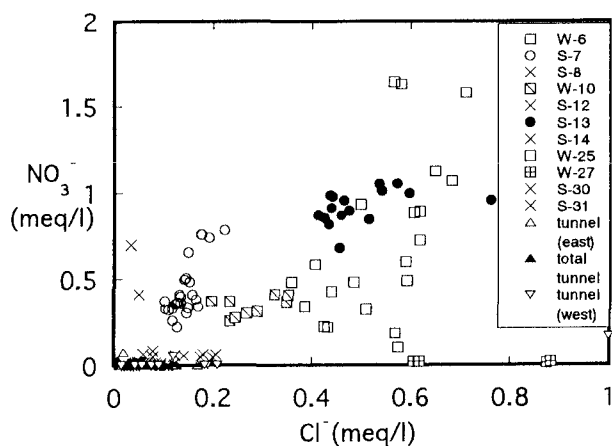


図-3 地下水の塩素イオンと硝酸イオン濃度

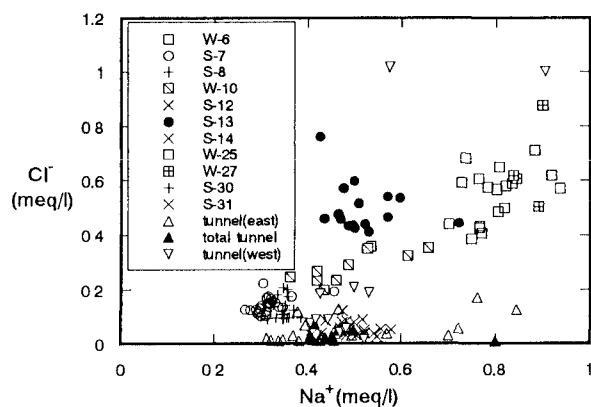


図-5 地下水の塩素イオンとナトリウムイオン濃度

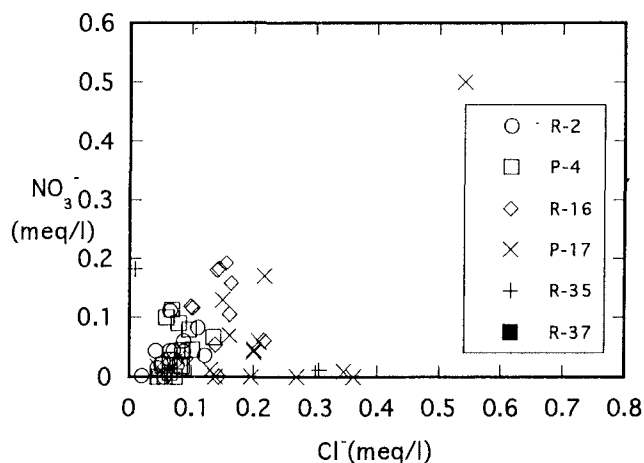


図-4 表流水の塩素イオンと硝酸イオン濃度

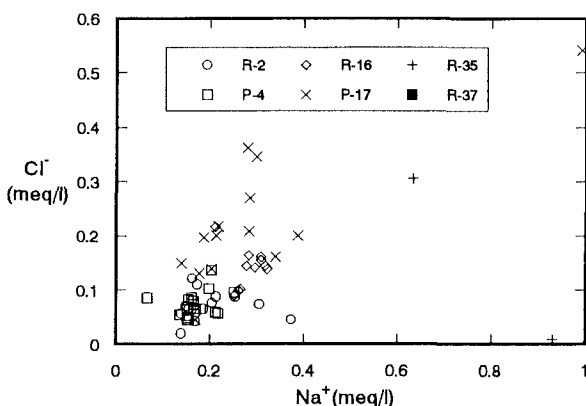


図-6 表流水の塩素イオンとナトリウムイオン濃度

の切羽湧水を，tunnel(west)はトンネル西側の湧水を表している。

森林の湧水では，塩素イオン濃度が0.2 meq/l以下，硝酸イオン濃度がほとんどの例で0.1 meq/l以下と民家の井戸水と畑地・水田にある湧水よりも低く，硝酸イオン濃度が特に低いことが特徴である。畑地・水田の湧水と民家の井戸水は，硝酸イオン濃度は最大で1.5 meq/l，塩素イオン濃度は最大で0.9 meq/lであり，硝酸イオン濃度が高いと塩素イオン濃度も高くなっている。つまり，硝酸イオンの汚染と同時に塩素イオンの汚染も起きている。畑地・水田の湧水は，民家の井戸水に比べて塩素に対して硝酸イオン濃度が高い傾向があるものの，民家の井戸水と畑地・水田の湧水では，大きな差が見られない。この理由としては，民家が水田や畑地のなかにあり，民家の井戸水が畑地・水田の地下水の影響を受けているものと考えられる。

トンネル湧水は，一部の水を除いて，塩素イオン，硝酸イオン濃度は低く，森林の湧水の濃度分布に似ている。特に，硝酸イオン濃度は検出限界以下(0.01 meq/l)であり，塩素イオン，硝酸イオ

ン濃度が異常に高いトンネル湧水は，トリチウム濃度も他のトンネル湧水が検出限界以下(0.3 T.U.以下)なのに対して，約9 T.U.と高く(図-10参照)，掘削の影響で地表水が直接トンネル内部に流れたと考えられる。このトンネルの採水位置の真上は台地上部の水田や民家がある。このように，地下深部のトンネル湧水は，汚染の少ない森林地域の湧水と組成に近いことが判る。

図-4に示すように多くの表流水は硝酸イオン濃度が0.2 meq/l以下，塩素イオン濃度0.4 meq/l以下にあり，地下水に比べて濃度が低い。

(3) 塩素イオンとナトリウムイオン濃度の関係

生活排水には，食べ物に含まれる塩の影響で塩素イオンとナトリウムイオンが共に多く含まれるので，塩素イオンとナトリウムイオン濃度の関係を調べた。図-5に示すように台地南斜面の森林の湧水S-12，S-14，S-31を除くと地下水の塩素イオン濃度が高くなると，ナトリウムイオン濃度も高くなっている。森林の湧水S-12，S-14，S-31は，ナトリウム濃度に比べて塩素イオン濃度が，特に低い。森林の湧水は塩素イオン，ナトリ

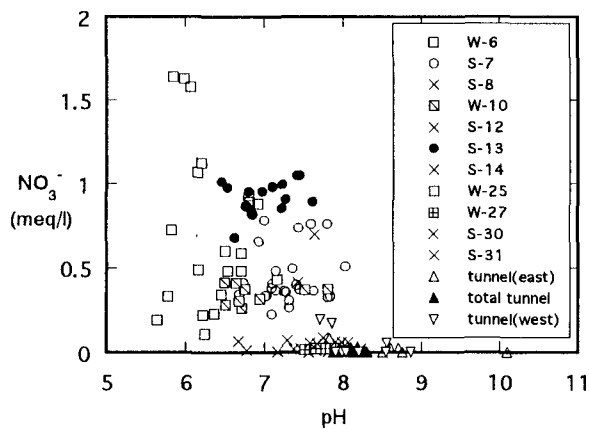


図-7 地下水のpHと硝酸イオン濃度

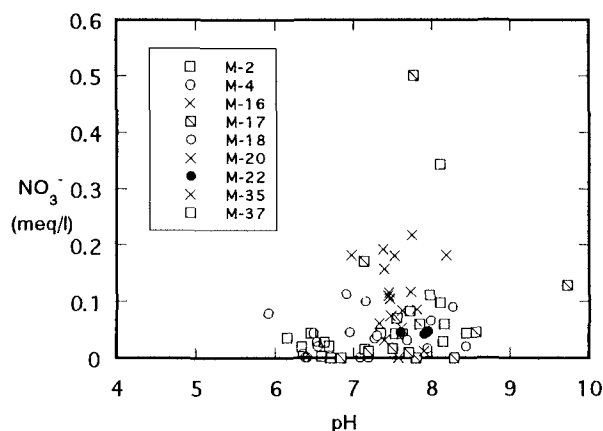


図-8 表流水のpHと硝酸イオン濃度

ウムイオン濃度共に低く、畑地・水田の湧水、民家の井戸水と高くなっている。トンネル湧水の塩素イオン濃度はナトリウムイオン濃度の増加に関係なく、全体的に低い。ナトリウムイオン濃度は0.4 meq/l付近に集中しており、表流水よりも高く、森林地下水と同じ濃度である。

図-6に示すように表流水の塩素イオン濃度が高くなるとナトリウムイオン濃度も高くなっている。しかしながら、ナトリウムイオンと塩素イオン濃度はいずれも地下水よりも濃度が低い。

以上のことから、トンネル湧水を除くと塩素イオン濃度が高くなると、硝酸イオンやナトリウムイオン濃度も共に高くなることが判る。しかしながら、トンネル湧水はナトリウムイオン濃度が他の水に比べて高いが、硝酸イオン、塩素イオン濃度は低い。

(4)pHと硝酸イオン濃度の関係

窒素汚染の発生する地域での地下水では、硝酸イオン濃度が高いほど水が酸性になる傾向がある。これは、(1)式で示されるような農地に適用される無機化学肥料の硝化過程によって硝酸イオンが生成すると同時に酸が発生するためである。

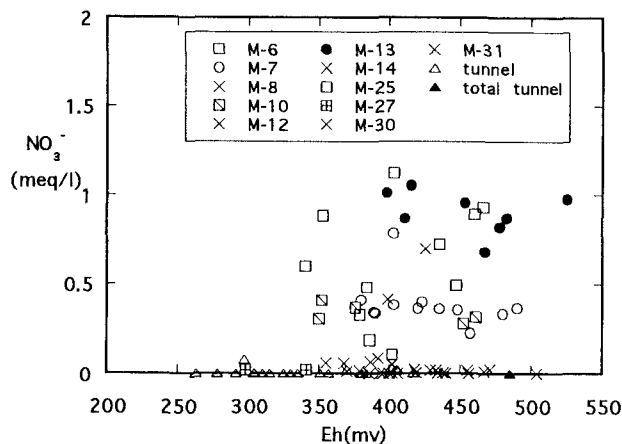
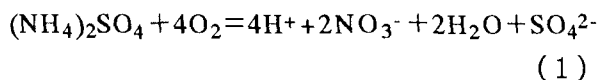


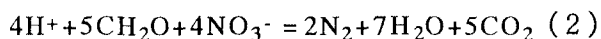
図-9 地下水のEhと硝酸イオン濃度



そこで、pHと硝酸イオン濃度の関係を調べた。図-7に示すように森林の湧水は、硝酸イオン濃度が低く、pHが8前後と他の地下水よりも高い。畑地・水田の湧水や民家の井戸水は、pHは8より小さく、硝酸イオン濃度は高い。トンネル湧水のpHは8以上であり、一部の湧水を除くと硝酸イオンは検出されず、地下水のpHが高いほど硝酸イオン濃度が少なくなっていることが判る。しかしながら、図-8に示すように表流水のpHと硝酸イオン濃度の関係では、pHが6から8.5まで分布し、pHが大きい値でも硝酸イオン濃度は高く、地下水やトンネル湧水で見られるpHが大きくなるほど硝酸イオン濃度が小さくなる傾向は認められない。

地下水では、浅層地下水の井戸水や湧水から深層地下水のトンネル湧水へと、pHが高くなり、硝酸イオン濃度が小さくなった。これは、(1)式の硝化過程では説明できない。トンネル湧水の起源の一部は浅層地下水であり、その地下水には多量の硝酸イオンが含まれている。しかしながら、トンネル湧水は一部の水を除き、硝酸イオン濃度は検出限界以下である。このことから、硝酸イオンが地下で消滅することでpHが変化したとも考えられる。

還元環境では、硝酸イオンは脱窒菌によって窒素ガスに分解されることが知られている⁸⁾。



脱窒では、硝酸イオンと水素イオンが消失し、窒素ガスが生成される。そのため、水のpHは増加してアルカリ性側になる。脱窒が起こる環境は大気遮断され、酸素の少ない河川や池の低層部や土中である。生成された窒素ガスは大気に放出される。次

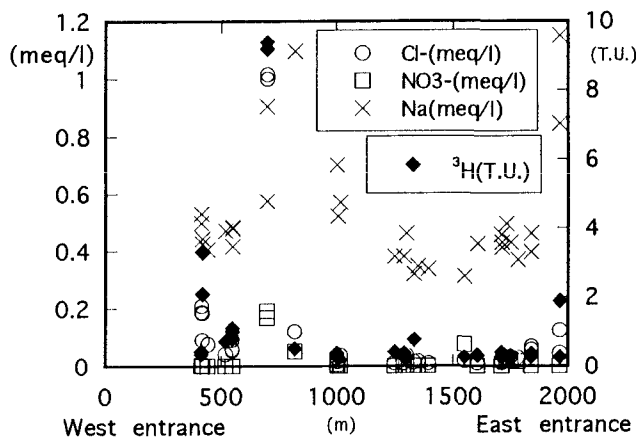


図-10 トンネル湧水の測線上の水質変化

に、還元環境で脱窒が生じたかどうかを酸化還元電位を測定し、確認した。

(5) 硝酸イオン濃度と酸化還元電位の関係

図-9に硝酸イオン濃度と酸化還元電位の関係を示す。酸化還元電位(Eh)が350mV以下になると、硝酸イオンが検出されなくなっていることが判る。脱窒はpHが7で25℃の条件では、酸化還元電位(Eh)が250mV⁹⁾から700mV¹⁰⁾で起こるといわれ、脱窒の起こる条件、脱窒速度などが正確にはよく判っていないものの、より還元的な環境で硝酸イオンが検出されなくなっていることが判る。この結果、地下水中の硝酸イオンは脱窒によって分解されていることが推定される。

(6) 窒素の同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$)

窒素の同位体比 $\delta^{15}\text{N}$ 値は

$$\delta^{15}\text{N} = [(R_{\text{sample}} / R_{\text{air}}) - 1] \times 10^3 \quad (3)$$

で定義され、Rは窒素を構成する原子量15と14の比である。

$$R = {}^{15}\text{N} / {}^{14}\text{N} \quad (4)$$

また、 R_{sample} は対象試水、 R_{air} は空気中の窒素成分の比であるため、空気中の窒素を固定して製造される無機化学肥料(硫酸など)の窒素安定同位体比は $\delta^{15}\text{N}$ 値は理論上、0%となる。住宅地の井戸水の硝酸イオンの窒素同位体比は、7.2から7.8%、畑地・水田の湧水が5.1から5.4%で、沢水で4.9%であった。森林では降水や空気中の窒素を固定するために0%付近にある。化学肥料は空気中の窒素を固定するため低いが、施肥された土壌では、アンモニア揮散によって同位体比は少し高くなってい

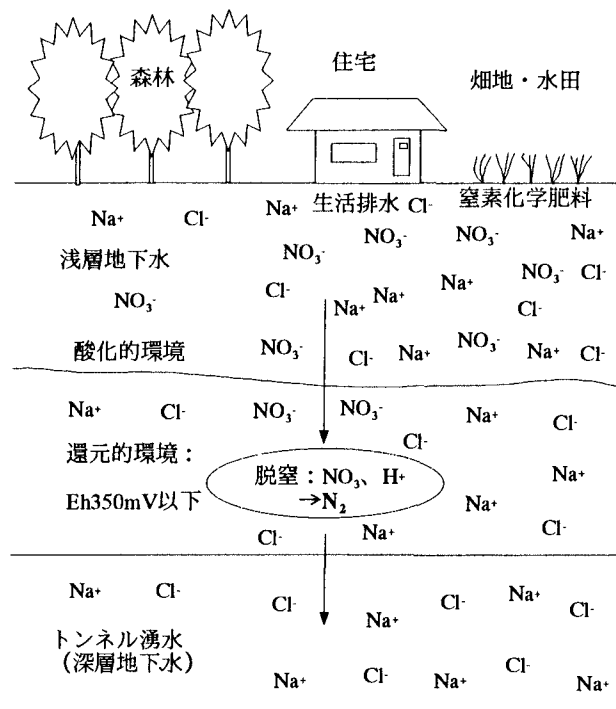


図-11 地下水の水質変化

る。生物・化学反応では軽い同位体 ^{14}N が選択的に代謝されるため、動物の排泄物の同位体比は非常に高いので、有機肥料や生活排水の同位体比も高くなっている¹⁾。それ故、住宅地の同位体比が高いのは生活排水の影響と考えられる。また、沢水よりも畑地・水田の湧水の同位体比が高いのは、肥料の影響と考えられる。

(7) トンネル湧水の水質変化

トンネル測線上の土地利用に違いがあるので、トンネル湧水の測線上の水質を、図-10に示した。トンネル東側は入り口付近に住宅や畑地・水田が分布するものの、測線上は主に森林である。一方、トンネル中央から西側に集落があり、畑地・水田や住宅が見られる。トンネル東側は、入り口付近を除くとナトリウムイオン、塩素イオン濃度が西側よりも低い。硝酸イオン濃度は、一部、トリチウム濃度から判断して掘削による影響と考えられる地表水の混入^{4), 5)}を除くと、ほとんど検出限界以下にあった。

5. 結論

地下水及び表流水の水質と土地利用の関係を調べた。調査地域は、松本市北方の台地で、トンネルは、台地の中腹にあり、台地は他の台地と麓を河川で区切られている。トンネル湧水の位置は、台地上や中腹部の湧水や井戸などの浅層地下水よりも低い位置にある。そのため、トンネル湧水は浅層地下水を起源とする深層地下水である。

図-11は調査地域の水質変化を示したものである。表層部の土地利用は森林、住宅、畑地・水田の3つに分けることができる。森林の浅層地下水は硝酸イオン、塩素イオン、ナトリウムイオン濃度が低く、住宅、畑地・水田の浅層地下水は、硝酸イオン、塩素イオン、ナトリウムイオン濃度が高い。また、トンネル湧水の硝酸イオンは検出されず、森林直下のトンネル湧水のナトリウムイオン、塩素イオン濃度は、住宅、畑地・水田の直下のトンネル湧水よりも低い。

硝酸イオンは肥料に、塩素イオン、ナトリウムイオンは生活排水に多く含まれている。そのため、住宅、畑地・水田の浅層地下水の塩素イオン、硝酸イオン、ナトリウムイオン濃度が高いのは、肥料や生活排水が浅層地下水に影響を与えているものと考えられる。

地下水の酸化還元電位が350mV以下になると、地下水の硝酸イオン濃度は検出限界以下(0.01meq/l)になることと、硝酸イオン濃度が低くなるとpHが増加することから、脱窒による硝酸イオンの分解が起こったと考えられる。そのため、図-11に示すように表流水が地下に浸透する過程で脱窒が起こり、還元的な条件にあるトンネル湧水の硝酸イオン濃度は、浅層地下水よりも低く、ほとんどが検出限界以下になったと考えられる。

このように台地内部で硝酸イオンが分解したことで、土地利用の違いが浅層地下水だけでなく深層地下水まで影響を与えていたことが判った。

参考文献

1) 平田健正編：土壌・地下水汚染と対策，社団法人日本環境測定分析協会，pp304，1996。

2) Ii, H., Horie, Y., Ishii, T., and Shimada, J. : Development of an apparatus to measure groundwater qualities in-situ and to sample groundwater using boreholes. J. Environmental Geology. 32, 1 : 17-22, 1997.

3) Ii, H. : Effective porosity and longitudinal dispersivity of sedimentary rocks determined By laboratory and field tracer tests. J. Environmental Geology. 25, 2 : 71-85, 1995.

4) Ii, H., Ohtsuka, Y., Mori, N., Inagaki, T. and Misawa, S. : Effective porosity and specific yield of a sedimentary rock determined by a field tracing test using Tritium as a tracer. J. Environmental Geology. 27, 3 : 170-177, 1996.

5) Ii, H. and Kagami, H. : Groundwater level and chemistry changes resulting from tunnel construction near Matsumoto city Japan. J. Environmental Geology. 31, 1/2 : 76-84, 1997.

6) Wada, E., Imaizumi, R., and Takai, Y., : Natural abundance of ^{15}N in soil organic matter with special reference to paddy soils in Japan : biogeochemical implications on the nitrogen cycle. Geochemical J. 18 : 109-123, 1984.

7) 井伊博行，平田健正，松尾宏，田瀬則雄，西川雅高：茶畑施肥に由来する硝酸性窒素と周辺表流水に及ぼす影響，水工学論文集，41，575-580，1997。

8) 社団法人日本水質汚濁研究協会：陸水の酸性化による影響及び機構解明調査－文献調査－，昭和58年度環境庁委託業務結果報告書，1984。

9) Freeze, R. A. and Cherry, J. A. : *Groundwater*. New Jersey : Prentice-Hall Inc. pp604. 1979.

10) Schindler, D. W., Turner, M. A., and Hesslein, R.H. : Acidification and alkalization of lakes by experimental addition of nitrogen compounds. Biochemistry. 1 : 117-133, 1994.

(1997.9.30受付)