水素・酸素および窒素安定同位体組成からみた甲府盆地東部地下水の 涵養源と硝酸イオン濃度分布特性

中村 高志*

長田 淑美*

風間 ふたば*

Identifying the Effects of Groundwater Recharge on Nitrate Concentration in the Eastern Kofu Basin Using ^2H , ^{18}O and ^{15}N

Takashi NAKAMURA*, Yoshimi OSADA*
and Futaba KAZAMA*

*Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, University of Yamanashi, 4-3-11 Takeda, Kofu, Yamanashi 400-8511, Japan

Abstract

A stable isotopic technique was used to identify the effects of groundwater recharge on nitrate concentration in the alluvial fans of the eastern Kofu basin. Precipitation, groundwater and river water samples were collected from the Fuefukigawa and Hikawa-Kanegawa alluvial fans. The samples were analyzed for nitrate concentration, water δD and $\delta^{18}\text{O}$ and nitrate $\delta^{15}\text{N}$. A wide range of nitrate concentrations was observed in the groundwater of both alluvial fans. The observed $\delta^{15}\text{N}$ values suggest that the major sources of nitrate are the fertilizers used in orchards. Similarly, the values of δD and $\delta^{18}\text{O}$ shows that precipitation and river water are the sources of groundwater recharge for both aquifers. Furthermore, a strong positive correlation was observed between nitrate concentration and $\delta^{18}\text{O}$ values. Nitrate concentration increases with an increase in $\delta^{18}\text{O}$ value, where lower $\delta^{18}\text{O}$ values correspond to river water and higher $\delta^{18}\text{O}$ values correspond to precipitation. It is suggested that precipitation acts as a carrier and river water acts as a diluent in nitrate loading from terrestrial catchments.

Key words : water-hydrogen isotope, water-oxygen isotope, nitrate-nitrogen isotope, alluvial fan, groundwater

1. はじめに

窒素施肥や畜産廃棄物等の人為的窒素負荷の増加による地下水の硝酸性窒素汚染が世界的に問題視されており^{1~4)}、日本も例外ではない。日本は国土の多くを山地が占めるため、扇状地や台地に農地が集約されやすい傾向にあり、このような農村地帯で硝酸性窒素汚染が問題となっている^{5,6)}。環境庁(現環境省)が1997年度に行った調査では⁷⁾、6.5%の井戸で硝酸性窒素が水質基準項目としての規制値($10\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$)を越えていることが確認されていたが、2005年度においても調査井の4.2%が基準値を超過しており⁸⁾、状況は大きく変化していない。

山梨県甲府盆地東部においても盆地内に形成された扇状地上に果樹園(葡萄・桃)が広く分布しており、硝酸性窒素濃度の高い地下水の存在が報告されている⁹⁻¹¹⁾。風間・米山(2000)¹¹⁾によって推定されたこの地域の窒素負荷発生量によれば、施肥による負荷発生量は全窒素負荷発生量の40%~60%を占めるとされている。

地表に窒素負荷発生源が存在する場合、それらは降水の地下浸透によって地下水中へ流入することが報告されている^{12,13)}。特に、砂礫土壌により形成される扇状地では降水浸透が卓越し、窒素汚染は深刻化しやすい傾向にあり、実際に扇状地上の畑地に散布された窒素が降水浸透に伴って地下水へ流入していることも報告されている^{14,15)}。し

かし一方で、扇状地上に天井川や水田が存在する場合、その地域における地下水は降水浸透だけでなく、扇状地上を流れる河川水や水田水からの涵養も受け、帯水層中で混合していることも報告されている^{16,17)}。従って、扇状地地下水の涵養源が複数存在する場合には、それらの混合を反映して硝酸イオン濃度が決定されると考えられるが、これまでこのような視点から調査を行った例はほとんどない。

甲府盆地東部には笛吹川扇状地、日川扇状地および金川扇状地が形成され、いずれの扇状地も天井川を有している。従って、この地域における地下水は、扇状地上の降水と天井川からの涵養を受けている可能性があるといえる。

扇状地地下水涵養源の特定や複数の涵養源の相対的寄与率の推定を行う上で、保存性の高いトレーサーである水の安定同位体の利用は極めて有用である。実際に、水谷・小田(1983)¹⁸⁾は富山県庄川扇状地において、越前・越中(2000)¹⁹⁾は神奈川県足柄平野において、また涌井・山中(2006)²⁰⁾は栃木県那須扇状地において、それぞれ同位体情報を基に同定された主たる地下水涵養源に注目して地域区分を行っている。また、硝酸性窒素安定同位体も、先行研究において様々な硝酸性窒素起源物質の同位体比値が報告され²¹⁾、それらの値は物質により異なっていることから、地下水中の硝酸性窒素起源解析を行う上で有用なトレーサーであることが示されている²²⁻²⁴⁾。

そこで本研究では、同位体トレーサーを用いて笛吹川扇

* 山梨大学大学院医学工学総合教育部 〒400-8511 甲府市武田4-3-11

Fig.1 Study area and sampling location.

状地および日川扇状地、金川扇状地における地下水について、以下を目的とした検討を行った。

- 1) 水中水素・酸素安定同位体比を用いた地下水涵養源の把握、および相対的な寄与度の推定
- 2) 窒素安定同位体比を用いた地下水中の硝酸性窒素起源の把握
- 3) 複数の涵養源を有する地下水において、それぞれの涵養が地下水中の硝酸イオン濃度に及ぼす影響の把握

2. 方法

2.1 研究対象地域

本研究の対象地域である笛吹川扇状地、日川扇状地および金川扇状地は山梨県甲府盆地東部に位置している。これらの扇状地は、北東縁に位置する秩父山地を源流域とした笛吹川、日川および南東縁に位置する御坂山地を源流域とした金川による搬入土砂により形成されている (Fig.1)。

この地域にはこれら3河川の外、調査地域のほぼ中央に重川が流下している。重川はこの地域内で最も低い位置を流れ、右岸に笛吹川扇状地、左岸に日川扇状地が形成されている。金川扇状地は日川扇状地よりさらに高い位置に形成されているため、この地域は重川を谷底とした扇状地によるゆるやかな谷型地形を形成している。この地域の地形状況を詳述すると以下の様である。

笛吹川扇状地における扇頂部の標高は約450mで、扇端部は約300mであり、笛吹川から重川方向に向かって傾斜している。日川扇状地の扇頂部はおおよそ400mで扇端部地域はおおよそ310mであり、日川から重川方向に向かって傾斜している。また、金川扇状地の扇頂部の標高は約450mで、扇端部は280mである。金川左岸に形成されている扇状地は金川から笛吹川に向かって傾斜しているが、金川右岸については、金川から日川方向に傾斜しており、日川扇状地および金川右岸側に形成されている扇状地は、いずれも重川に向かって傾斜している複合扇状地を成している。この2つの扇状地における地下水は連続している可能性があることから、本研究ではこの地域を以下、日川・金川扇状地と称する。

地質構造については、国土交通省の行った富士川河床掘削検討業務報告²⁶⁾によれば、笛吹川扇状地における全域で、上から玉石層が約30m、次いで礫混じり粘土層が20m、それ以降は再び玉石層が40m以上発達している。また日川・金川扇状地における扇頂部から扇中部の地域では、上から砂礫層が35m、次いで礫混じり粘土層が20m、それ以降は再び砂礫層が20m以上発達している。扇端部では、扇頂部から扇中部の地域で発達している礫混じり粘土層が粘土のみの層となっている。以上の様にこの地域における表層からの浸透は上位層において比較的容易な地質構造となっており、深度20m~40mに形成されている礫混じり粘土層および粘土層が不透水層となり、上位層はこの地域における浅層地下水の良好な帯水層となる。以上のような地形ならびに地質構造より、この地域は河川涵養と降水浸透が卓越した地下水系を有する可能性が高い。

本地域の土地利用形態としては、果樹園が全域で卓越し、農地の8割以上が桃および葡萄の栽培を行っている¹⁾。また、施肥に関しては、農業協同組合による施肥量の指導が実施され、おおよそ $110\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ の窒素が散布されている。

気候は典型的な太平洋型であり、降水量は夏季に多く冬季に少ない。研究対象地域内に位置する旧勝沼町 (現甲州市) における気象データ²⁵⁾によれば1979年~2000年の21年間の年平均気温は 13.7°C 、年降水量は 1053mm である。また、最暖気 (8月) と最寒気 (1月) の月平均気温はそれぞれ 25.5°C および 2.1°C である。

2.2 試料採取

2006年1月~2006年12月の1年間にわたって、現地調査を行った。地下水試料採取は、笛吹川扇状地24地点、日川・金川扇状地17地点 (Fig.1) において2006年3月、6月、10月、12月の4回行った。本研究で使用した井戸の掘削深度は5m~42mであるので、対象となる地下水は上位帯水層であり、不透水層以深の地下水は含まれない。また、地下水涵養源としての河川水および降水の採取を実地した。河川水については、笛吹川、重川、日川および金川の4河川を対象とした。いずれの河川も扇頂部を採水地点とし、調査期間中6回の採水を行った。降雨による一時的な増水为避免、水の流れが比較的速い部分の表層から採取した。

降水はFig.1に示した地点に設置した蒸発抑制型の降水サンプリングによって年間を通して各月の採取および降水量の測定を行った。

2.3 測定項目

採取した試料は氷冷条件下で実験室に持ち帰り、水中水素・酸素安定同位体比の測定と、 NO_3^- 濃度および硝酸性窒素安定同位体比の測定を行った。水素安定同位体比は白金触媒を用いた水-水素ガス平衡法、酸素安定同位体比は水-二酸化炭素ガス平衡法を用い、質量分析計 (ANCA20-20, Sercon) で測定した。 NO_3^- 濃度は採取した試料を $0.45\mu\text{m}$ のフィルターで濾過した後、イオンクロマトアナライザー (Metrohm Compact IC 761) で定量した。また、硝酸性窒素安定同位体比はSilva (2000)²⁷⁾によって確立された方法に従って前処理を行った後、元素分析計直結型質量分析計 (ANCA-GSL, Sercon) で測定した。

安定同位体比の表現には、水素・酸素安定同位体比は標準平均海水 (V-SMOW)、窒素安定同位体比は大気窒素からの千分率 (‰) である δ 表記をそれぞれ用いている。質量分析計の測定精度は水素・酸素および窒素でそれぞれ $\delta\text{D} = \pm 1\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O} = \pm 0.1\text{‰}$ 、 $\delta^{15}\text{N} = \pm 0.2\text{‰}$ である。

3. 結果および考察

3.1 地下水涵養源の把握

Fig.2に、各調査井の地下水ならびに地下水の涵養源と考えられる降水および河川水の $\delta^{18}\text{O}$ 値の年変化を示す(δD 値の変動はほぼ同様なので割愛する)。降水の δ 値は冬季に低く、夏季に高い傾向を示したが(Fig.2(a)), 7月は一時的に低くなっている様に不規則な変動を示した。河川水の δ 値の変動は降水のそれに比べて極めて小さく、降水の δ 値の変動は反映されていなかった(Fig.2(b))。各調査井における地下水の δ 値の変動も極めて小さく、河川水と同様に降水の δ 値の変動は反映されていなかった(Fig.2(c))。

Fig.2 Annual variations in isotopic compositions of (a) precipitation, (b) river water and (c) groundwater of all sampling stations.

Table.1 Summary of isotopic compositions of precipitation and river water (Annual average) with average altitude of watershed.

	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Av. altitude(m)
Precipitation	-67.2*	-9.5*	310**
Fuefukigawa River	-74.0	-10.7	1570
Omokawa River	-73.1	-10.4	1150
Hikawa River	-72.2	-10.4	1180
Kanegawa River	-71.5	-10.4	1110

* Weighted mean by volume

** Altitude of sampling location

一般に、降水浸透によって地下水が形成されている場合、地下水の δ 値の変動は滞留時間の増加とともに小さくなるとされている^{28,29)}。従って、河川水の δ 値の変動が小さいのは、集水域(山地)において、降水が一度地下へ涵養し年間の降水が十分に混合された後に河川へと湧出しているためと考えられる。また、降水浸透により形成される地下水が1年以上の滞留時間を有する場合、その δ 値は降水の降水量加重平均値とよく一致することが知られている¹⁶⁾。そこで本研究における降水の降水量加重平均値を求めたところ、 $\delta\text{D} = -67\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O} = -9.5\text{‰}$ となった。中村(2007)¹⁷⁾が2003年~2004年において行った、甲府盆地内における降水起源湧水(地形から判断)の調査によれば、それらの δ 値(年平均値)は $\delta\text{D} = -66\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O} = -9.7\text{‰}$ であり、本研究の降水はこれと極めて近い δ 値であった。従って、今回得られた降水の降水量加重平均値は本地域内の降水起源地下水の推奨値として妥当であると考えられる。また、地下水の δ 値の変動は極めて軽微であることから、年単位では準定状態を仮定することができる。そこで年平均値を用いて、これら同位体データによる地下水涵養源推定を行った。

Table.1に、地下水の涵養源と考えられる降水と河川水の年平均 δ 値(降水については降水量加重平均値)ならびに、交点法³⁰⁾によって求めた試料採取地点における集水域の平均高度を示した(降水については試料採取地点の高度)。全ての河川水の δ 値は降水の降水量加重平均値に比べ低い値を示している。一般に、降水の δ 値は標高が高くなるにつれ低下することが知られており(高度効果)³¹⁾、水谷(1997)³²⁾の国内事例研究によれば、扇状地河川水の δ 値はその集水域の平均高度に反比例することが報告されている。本研究においても河川水と降水の δ 値の差はそれらの平均涵養高度の違いを反映したものと考えられる。

Fig.3に地下水と、その涵養源候補である河川水ならびに降水の年平均 δ 値(降水については降水量加重平均値)を示した。ここで、笛吹川扇状地地下水の涵養源推定のために用いる河川水の δ 値は扇状地に対して天井川である笛吹川の値を、日川・金川扇状地地下水の検討には扇状地に対して天井川である金川および日川の δ 値を示した。笛吹川扇状地の δ 値についてみると(Fig.3(a))、地下水試料の殆どは笛吹川河川水と降水を結ぶ線に沿って分布し、これらの地下水が笛吹川河川水と降水を涵養源としていることが分かる。またこれらの地下水の $\delta^{18}\text{O}$ 値は、Fig.4に示すように、笛吹川から離れ重川に近づくに従って増加し、降水の寄与度が増していることを示している。一方、Fig.3(b)に示した日川・金川扇状地における地下水の δ 値も同様に日川および金川河川水と降水を結ぶ線に沿って分布した。これらの地下水は、金川および日川近傍ではそれぞれの河川と同じ $\delta^{18}\text{O}$ 値を示し、河川より離れた地域においては比較的高い値を示すことから(Fig.4)、河川近傍においては河川寄与が大きく、河川から離れるに従って降水寄与が増していることが分かる。

以上より、天井川である笛吹川、日川および金川近傍では河川水の地下水涵養が著しく、この地域の最も低い位置を流れる重川の近傍地下水では、降水の寄与が大きいたことが明らかとなった。

Fig.3 Isotope compositions of precipitation (●), river water (▲) and groundwater (○).
(a) Fufukigawa alluvial fan (Fuefuki River as an end-member).
(b) Hikawa-Kanegawa alluvial fan (Hikawa and Kanegawa River as end-members).

Fig.4 Spatial distribution of the $\delta^{18}\text{O}$ values for groundwater (●) and river waters (▲) (Annual average).

3.2 硝酸性窒素起源の把握

地下水中の硝酸性窒素起源の主要な物質としては、窒素肥料、生活排水の流出、家畜し尿などが報告されている⁷⁾。本研究対象地域における地下水の涵養パターン(扇状地上水の起源となり得るのは、河川水中の窒素と扇状地上水の降水と河川水からの涵養)を考慮すると、地下水中の窒

Fig.5 Nitrate- $\delta^{15}\text{N}$ values of the groundwater in the Fufukigawa and Hikawa-Kanegawa alluvial fans as compared with the available indexes from the MOE, Japan, 2002 and Kendall, 1998.

素である。

Fig.5に2006年6月に採取した地下水試料の NO_3^- - $\delta^{15}\text{N}$ 値と、報告されている硝酸性窒素起源物質の $\delta^{15}\text{N}$ 値を示した。硝酸性窒素起源物質の $\delta^{15}\text{N}$ 値については研究者間で若干の差があるものの、比較的集計数が多い環境省水環境部地下水・地盤環境室⁷⁾およびKendall and McDonnell²¹⁾の報告によれば、降水は $-10\text{‰} \sim +2\text{‰}$ 、有機物施用土壌は $+3\text{‰} \sim +10\text{‰}$ 、畑地土壌は $+2\text{‰} \sim +8\text{‰}$ 、化学肥料は $-7\text{‰} \sim +7\text{‰}$ 、汚水および家畜し尿は $+10\text{‰}$ 以上と報告されている。本研究における地下水中の NO_3^- - $\delta^{15}\text{N}$ 値は、一部の試料(Fig.6: 試料No.1, 8, 46, 47)で特異的に高い値($>+10\text{‰}$)を示したものの、殆どの試料については NO_3^- - $\delta^{15}\text{N} = +5.5\text{‰} \sim +8.3\text{‰}$ の範囲の値を示した。この値は、先行研究によって報告されている畑地土壌、化学肥料および有機物施用土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値とよく一致しており、笛吹川扇状地および日川・金川扇状地地下水における硝酸性窒素起源が、肥料であることを示唆している。なお、特異的に高い $\delta^{15}\text{N}$ 値を示した4試料については、下水等の混入を示唆する $\delta^{15}\text{N}$ 値を示したが、本調査地域における主要な汚染源とは考えられないため、今回はこれらの硝酸性窒素起源推定のための詳細な検討は行っていない。

3.3 硝酸イオン濃度分布

Table.2に、笛吹川扇状地および日川・金川扇状地地下水ならびに河川水の地点別年平均 NO_3^- 濃度、降水中の NO_3^- 濃度(降水量加重平均値)を示した。 NO_3^- 濃度は河川水で $3.3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1} \sim 6.9 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、降水で $1.9 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。地下水中の NO_3^- 濃度は $8.9 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1} \sim 47.8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ の範囲で検出され、地下水涵養源である河川水や降水と比較して高い濃度であった。これは、3.2節で述べた地下水中の硝酸性窒素起源より、地表に散布された肥料中の窒素が降水の地下浸透により地下水へ流入したためと考えることができる。しかしながら、2.1節で述べたように、土地利用はほぼ均一で、地表での窒素負荷量が一律であると考えられるにもかかわらず、 NO_3^- 濃度は $8.9 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1} \sim 47.8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ の広い範囲で検出された。さらに、これらの濃度分布特性は笛吹川扇状地地下水において、笛吹川近傍で低く、扇状地中央部から重川右岸近傍の地域で比較的高い濃度を示した。また、日川・金川扇状地地下水も、日川および金川近傍では低く、扇状地中央部や重川左岸近傍の地域で高い濃度を示した(Fig.6)。

Table.2 Summary of $\delta^{18}\text{O}$ values and nitrate concentration of precipitation, river and groundwater samples (Annual average).

	$\text{NO}_3^- (\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})$
Precipitation*	1.9
Fuefukigawa River	3.3
Omokawa River	6.9
Hikawa River	2.8
Kanegawa River	3.8
Groundwater (Fuefukigawa alluvial fan)**	8.9 ~ 47.8
Groundwater (Hikawa-Kanegawa alluvial fan)**	8.9 ~ 39.2

* Weighted mean by volume

** The range of the all groundwater samples

Fig.6 Spatial distribution of nitrate concentration (Annual average).

3.4 硝酸イオン濃度形成に及ぼす地下水涵養の影響

Fig.7 (a) (b)に降水、河川水、および地下水の年平均 $\delta^{18}\text{O}$ 値と NO_3^- 濃度との関係を示した。3.2節で NO_3^- - $\delta^{15}\text{N}$ 値が+10‰以上を示した4地点(試料No.1, 8, 46, 47)の地下水試料は特異な値を示したものの(**Fig.7: ◇**)、これらを除く扇状地地下水試料においては、いずれの扇状地においても $\delta^{18}\text{O}$ 値と NO_3^- 濃度(年平均値)との間に強い正の相関が認められた。さらに、その分布傾向は各扇状地地下水の涵養源のひとつである河川水を基点とし、 $\delta^{18}\text{O}$ 値が増加する(降水の値に近くなる)につれ NO_3^- 濃度が上昇する傾向を示している。これをこの地域における硝酸性窒素の起源解析結果と併せて考えると、降水浸透により地下水中へ流入した NO_3^- 濃度が、河川涵養によって希釈を受けていることを示唆している。さらに、**Fig.7**に示されている相関係数は、笛吹川扇状地地下水で $R^2=0.78$ 、日川・金川扇状地地下水で $R^2=0.93$ と、極めて高いことから、地下水中の NO_3^-

Fig.7 Relationship between the $\delta^{18}\text{O}$ values and nitrate concentration of the groundwater (○ and ◇) as compared with the river water (▲) and precipitation (●) values (Annual average).

(a) Fuefukigawa alluvial fan (Fuefuki River as an end-member).

(b) Hikawa-Kanegawa alluvial fan (Hikawa and Kanegawa River as end-members).

濃度を決定する上で、降水と河川水の混合が極めて重要な要因となっていることは明らかである。ここで、 $\delta^{18}\text{O}$ 値と NO_3^- 濃度の間に得られた回帰直線(**Fig.7**)に降水の $\delta^{18}\text{O}$ 値(-9.5‰)を代入し、地表窒素が降水の地下浸透のみによって地下水へ流入してくると仮定した際の NO_3^- 濃度を推定すると、笛吹川扇状地地下水で $54 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 、日川・金川扇状地地下水で $55 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ となった。これは、WHOの定める国際水質基準値($50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)より若干高い値である。しかしながら、今回の調査では基準値を超える井戸は観測されていない。これは前述した様に、河川涵養による NO_3^- 濃度の希釈を反映した結果であり、これらの地域の地下水において、河川涵養が NO_3^- 濃度を基準値以下に保つために極めて重要な要因であることを示している。

4. まとめ

山梨県甲府盆地東部笛吹川扇状地および日川・金川扇状地地下水を対象とした一般水質および安定同位体分析の結果、本地域における浅層地下水の水循環および NO_3^- 濃度分布について以下のことが明らかとなった。

1) 水中水素・酸素安定同位体比測定の結果から、この地域における扇状地地下水の涵養源は、天井川である笛吹川、日川、金川の河川水と、扇状地上の降水であった。さらにそれらの寄与は、河川近傍では河川水寄与が卓越し、河川から離れるに従って降水の寄与が増加している。

2) 地下水中の硝酸性窒素安定同位体比測定の結果から、それらの窒素起源は果樹園で施用されている窒素肥料であることが示唆された。

3) 水中酸素安定同位体比値および NO_3^- 濃度の関係から、この地域における扇状地地下水中の NO_3^- 濃度は、降水浸透による地表窒素の流入と、河川水の涵養による希釈によって決定されていることが示唆された。

以上のように本研究では、当該地域の扇状地地下水の NO_3^- 濃度形成において、帯水層中の水の挙動について十分に理解することの重要性を示した。

地下水中の汚染物質の濃度分布ばかりでなく、その地域の地下水形成に関する情報を併せることで、実態の理解を深めることが可能であり、そのための安定同位体比の測定は今後極めて有用な測定項目になると思われる。

謝 辞

現地調査および水質分析の際に、山梨大学工学部土木環境工学科の平賀由紀氏、及び山梨大学工学部循環システム工学科・風間研究室の学生諸氏に協力していただいた。また、調査地域における住民の方々には地下水採取において多大なる協力をいただいた。また本研究は、山梨大学・21世紀COEプログラム「アジアモンスーン流域総合水管理教育」からの支援を受けた。ここに記して謝意を表します。

(原稿受付 2007年8月31日)

(原稿受理 2007年12月5日)

参 考 文 献

- Hudak, P. F. (2000) Regional trends in nitrate content of Texas groundwater, *Journal of Hydrology*, **228**, 37–47.
- Zhang, W.L., Tian, Z.X., Zhang, N. and Li, X.Q. (1996) Nitrate pollution of groundwater in northern China, *Agriculture Ecosystems & Environment*, **59**, 223–231.
- Agrawal, G. D., Lunkad, S. K. and Malkhed, T. (1999) Diffuse agricultural nitrate pollution of groundwaters in India, *Water Science and Technology*, **39**, 67–75.
- Mohsen, J. (2005) Nitrates leaching from agricultural land in Hamadan, western Iran, *Agriculture Ecosystems & Environment*, **110**, 210–218.
- 鶴巻道二 (1992) 浅層地下水の硝酸性窒素, 地下水学会誌, **34**, 153–162.
- 堀越莊一, 飯島明宏, 富岡淳, 関順司, 加藤政彦, 小澤邦壽 (2007) 群馬県における地下水硝酸性窒素濃度低下に関する研究, 水環境学会誌, **30**, 283–286.
- 環境省 (1997) 硝酸性窒素汚染による地下水汚染対策の手引き, pp.3–45.
- 環境省ホームページ <http://www.env.go.jp>
- 吉沢一家, 清水源治, 高橋照美, 茅野陽子, 堤充紀 (1989) 甲府盆地および周辺部の地下水の水質について, 山梨県衛生公害研究所年報, **33**, 59–62.
- 坂本康, 中村文雄, 風間ふたば (1997) 地下水を水源とする水道水の硝酸性窒素濃度の地理的分布と時間的変動, 水道協会雑誌, **62**, 17–28.
- 風間ふたば, 米山実 (2002) 山梨県における窒素負荷発生量と地下水汚染状況, 環境科学会誌, **15**, 293–298.
- 田口雄作 (1995) 窒素による地下水汚染と水文学の課題, ハイドロロジー (日本水文学会), **25**, 51–56.
- 大橋真人, 田瀬則雄, 檜山哲哉, 鈴木祐一 (1994) 那須野原における地下水中の硝酸イオン濃度の空間変動について, ハイドロロジー (日本水文学会), **24**, 221–232.
- 田中芳則, 中山千栄子, 廣瀬寛幸 (2006) 一湧水における水質の経日変化と地域環境要因, 地下水学会誌, **48**, 101–111.
- 村松容一, 福田桃子 (2006) 千葉県下層群に賦存する地下水の地球化学特性, 地下水学会誌, **48**, 87–99.
- 水谷義彦, 佐竹洋, 山邊綾子, 宮地ひろみ, 間瀬暢彦, 山村嘉代子 (2001) 扇状地浅層地下水の水素および酸素同位体比, 地下水学会誌, **43**, 3–11.
- Nakamura, T., Satake, H. and Kazama, F. (2007) Effects of groundwater recharge on nitrate–nitrogen loadings, *Journal of Water and Environment Technology E-Journal*, (in press)
- 水谷義彦, 小田松尚 (1983) 安定同位体組成による富山県庄川扇状地地下水のかん養源および流動状況, 地球化学会誌, **17**, 1–9.
- 藁崎志穂, 嶋田純, 宮岡邦任, 宮下雄次, 吉田誠 (2000) 安定同位体をもちいた足柄平野における地下水流同系の区分, 水文学会誌, **30**, 3–13.
- 涌井久司, 山中勤 (2006) 安定同位体組成からみた那須扇状地扇央部における地下水涵養とその地域性, 地下水学会誌, **48**, 263–277.
- Kendall, C. and McDonnell, J.J. (1998). Tracing nitrogen sources and cycling in catchments, In: Kendall, C. and McDonnell, J.J. (Eds.), *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, pp. 519–532.
- Feast, N. A., Hiscock, K. M., Dennis, P. F. and Andrews, J. N. (1998) Nitrogen isotope hydrochemistry and denitrification within the Chalk aquifer system of north Norfolk, UK, *Journal of Hydrology*, **211**, 233–252.
- Ogawa, Y., Nisikawa, M., Nakasugi, O., Ii, O. and Hirata, T. (2001) Determination of the abundance of $\delta^{15}\text{N}$ in nitrate ion in contaminated groundwater samples using an elemental analyzer coupled to a mass spectrometer, *Analyst*, **126**, 1051–1054.
- Woo, J.C., Gwang, H.H., Sang, M.L., Goon, T.L., Kwang, S.Y., Soo, M.C., Hee, M.R. (2007) Impact of land-use types on nitrate concentration and $\delta^{15}\text{N}$ in unconfined groundwater in rural areas of Korea, *Agriculture ecosystems and environment*, **120**, 259–268.
- 気象庁ホームページ <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 国土交通省 関東地方整備局 甲府工事事務所 (2000) 富士川河床掘削検討業務報告書, **3**, 8–10.
- Silva S R., Kendall M., Wilkison D. H., Ziegler A. C., Chang C.C.Y. and Avanzino R. J. (2000) A new method for collection of nitrate from fresh water and the analysis of nitrogen and oxygen isotope ratios, *Journal of Hydrology*, **228**, 22–36.
- Maloszewski, P. and Zuber, A. (1982) Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers, 1. Models and their applicability, *Journal of Hydrology*, **57**, 207–231.
- Maloszewski, P., Rauert, W., Stichler, W. and Herrmann, A. (1983) Application of flow models in an alpine catchment area using tritium and deuterium data, *Journal of Hydrology*, **66**, 319–330.
- 野満隆治, 瀬野錦蔵 (1974) 新河川学, p.7, 他人書館, 東京.
- Clark, I.D. and P. Fritz. (1997) *Environmental isotopes in hydrogeology*, p.328, Lewis Publishers, New York.
- 水谷義彦, 佐竹洋 (1997) 地下水かん養源の指標としての河川水の水素および酸素同位体組成, 地下水学会誌, **39**, 287–297.