ネパール・カトマンズ盆地における浅層地下水の窒素汚染

中村 高志^{*1}・西田 継^{*1}・風間 ふたば^{*1}・
尾坂 兼一^{*2}・Saroj K. Chapagain^{*3,4}

**Nitrogen contamination of shallow groundwater
in Katmandu Valley, Nepal**

Takashi NAKAMURA^{*1}, Kei NISHIDA^{*1}, Futaba KAZAMA^{*1},
Kenichi OSAKA^{*1} and Saroj K. CHAPAGAIN^{*3,4}

Abstract

To identify the sources of nitrogen contamination of urban shallow groundwater in Kathmandu Valley in Nepal, groundwater, river and sewage water samples were collected and analyzed for oxygen and hydrogen isotopes in water, nitrogen and oxygen isotopes ratio in nitrate and major dissolved ions. Groundwater samples were collected from 15 dug wells and 19 driven wells; river water samples from 8 locations in the major rivers; and sewage water samples from two locations in the urban area. Results showed that nitrogen contamination in the shallow groundwater is composed mainly of nitrate and ammonium ions. The nitrate-nitrogen and ammonia-nitrogen are as high as 63.9 mg/L and 36.7 mg/L, respectively. The results of nitrate nitrogen isotope ratio suggest sewage as the source of nitrate contamination. The increase in hydrogen isotope ratio of shallow groundwater with chloride concentration indicates the occurrence of sewage water contamination to shallow groundwater. In addition to nitrate, nitrogen contamination is also revealed from the increasing trend of dissolved inorganic nitrogen (DIN) with hydrogen isotope ratio in the shallow groundwater. The level of concentration, however, is found as lower than expected concentration of DIN on the sewage-contaminated groundwater. A possibility of reducing nitrogen by denitrification under anoxic conditions in the shallow groundwater was also analyzed based on hydrogen isotope ratio and chloride concentration. The results showed that most of the groundwater has no rainwater dilutions, and therefore, denitrification may be occurring in the shallow groundwater of the Kathmandu Valley.

Key words: Kathmandu Valley, Shallow groundwater, Nitrogen contamination, Water quality, Stable isotopes

-
- * 1 山梨大学大学院医学工学総合研究部附属国際流域環境研究センター Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, International Research Center for River Basin Environment, University of Yamanashi
* 2 滋賀県立大学環境科学部環境生態学 School of Environmental Science, Dept. of Ecosystem Studies, University of Shiga Prefecture
* 3 Center of Research for Environment Energy and Water, Kathmandu (CREEW), Nepal
* 4 Environmental Engineering and Management, Asian Institute of Technology

1. はじめに

発展途上国の上水道の整備が遅れている地域や水道水を入手できない人々にとって、地下水は重要な水資源である。特に、人口が密集する都市域では水不足に加え深刻な地下水汚染が多数報告されている（例えばUmezawa et al., 2009）。途上国であるネパールの首都カトマンズにおいても同様で、この地域の水道水の水供給量に対する地下水の割合は20%程度であるが（GWRDB, 2009）、水資源や電力不足による計画的な断水が行われている期間や、水道設備が普及していない地域においては、個人やコミュニティが保有する開放井戸や掘抜き井戸の地下水、湧水を起源とする公共水場（stone spout）の水が主要な水供給源となっている（Pradhan et al., 2007; Khadka, 1993; Conan, 2004）。総じてカトマンズ盆地における水供給量の50%程度が地下水に依存していると報告されている（Jha et al., 1997; Khatiwada et al., 2002）。一方、地下水については深刻な窒素汚染が報告されている。硝酸性窒素濃度について、WHOの飲料水水質ガイドライン（11.3 mg/L）を超過している井戸は11%であり、アンモニア性窒素濃度がWHOの飲料水水質ガイドライン（1.2 mg/L）を超過している井戸は45%（Warner et al., 2008）であることが報告されている。大腸菌や大腸菌群による地下水汚染も複数報告され（Jha et al., 1997; Maharjan, 2005; Prasai et al., 2007; Warner et al., 2008; Pant, 2011; Shrestha et al., 2013a）。*Cryptosporidium* spp., *Giardia* spp., human adenovirus, norovirusなどの病原性微生物も検出されている（Haramoto et al., 2011）。

以上のように、微生物による汚染が多数報告されていることから下水等の生活排水による地下水の汚染が指摘されているが、窒素の汚染源や地下水への下水混入の実態については十分に把握されていない。そこで本研究では、水の水素および酸素の安定同位体比や硝酸イオンの窒素および酸素安定同位体比ならびに主要溶存化学成分を用いて

カトマンズ市街地における浅層地下水中の窒素の起源や下水混入の実態の把握を試みた。

2. 研究対象地域

カトマンズ盆地はネパールの中央部に位置し、およそ2300 mの山々に囲まれ、盆地底部の標高は約1300 mである。盆地の面積はおよそ665 km²で（Acers International, 2004）、カトマンズの都市域は盆地底部に分布している（Fig. 1）。盆地の中央から南部には細粒湖成堆積物、北側には粗粒扇状地堆積物が分布し（Kannel et al., 2008）、深度5~60 mに分布する浅層地下水は主に雨期の降水の浸透によって涵養されていると考えられている（Gurung et al., 2007）。年間降水量は約1400 mmで、その80%は6月から9月の雨季に降る（Acers International, 2004）。

Fig. 1 Sampling location and land-use settings of central Kathmandu Valley.

3. 研究方法

地下水、河川水、下水の採水は2010年の8月に行った。地下水の調査地点は、都市の全域で選定し、開放井戸15地点、掘抜き井戸19地点で採水した (Fig. 1)。これらの井戸の深度は3~20 mである。地下水は既設の手動ポンプで汲み上げ、地下水の温度が一定になるのを待ってから気泡が混入しないようにポリ瓶に採水した。河川水は、バグマティ川とその支流河川の8地点 (MR01~MR08, Fig. 1) でバケツによる採水を行い、下水試料は市街地の異なる2地点で下水道からバケツによる採水を行った。採取した水試料は氷冷下で現地の実験室に持ち帰り、口径0.22 μm のメンブレンフィルターでろ過した後、冷凍で保存し日本の実験室に移送した。

水試料を解凍した後、オンクロマトグラフ (DIONEX 社製, ICS-1100) を用いて無機溶存イオン (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) を測定した。溶存無機窒素濃度 (DIN) はイオンクロマトグラフィーで得られた硝酸性窒素、亜硝酸性窒素濃度、アンモニア性窒素濃度の総和により算出した。

水の水素および酸素安定同位体比は近赤外光を用いたキャビティーリングダウン分光光度法 (PICARRO, L1102-i) により測定した。測定精度 (1σ) は、 $\delta^{18}\text{O}$: $\pm 0.1\text{‰}$, δD : $\pm 1.0\text{‰}$ である。

硝酸イオンの窒素および酸素安定同位体比は脱窒菌法 (Sigman et al., 2001; Casciotti et al., 2002) により硝酸イオンを亜酸化窒素ガスに還元し、前処理装置 (SerCon 社製, Cryo-Prep) で亜酸化窒素ガスを濃縮した後、安定同位体質量分析計 (SerCon 社製 Hydra20-20) で測定した。測定精度 (1σ) は、 $\delta^{15}\text{N}$: $\pm 0.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$: $\pm 0.3\text{‰}$ である。

4. 結果と考察

1. 地下水の涵養状況の把握

Table 1に開放井戸と掘抜き井戸の地下水、河川水ならびに下水の水質と同位体比の統計値をま

Table 1 Statistical values (Mean, Median, Minimum and Maximum values) of analytical results for water samples from Kathmandu Valley.

	Groundwater (Dug well) n=15				Groundwater (Tube well) n=19				River water n=8				Sewage water n=2			
	Mean	Median	Minimum	Maximum	Mean	Median	Minimum	Maximum	Mean	Median	Minimum	Maximum	Mean	Median	Minimum	Maximum
Depth of well (m)	7.9	6.4	3.0	19.8	8.6	6.9	4.6	21.3	—	—	—	—	—	—	—	—
DO (mg/L)	2.3	1.9	0.5	5.1	1.3	1.1	0.4	2.6	4.7	4.5	2.0	7.8	no data	no data	no data	no data
Cl (mg/L)	87.0	77.4	28.4	191.5	75.1	80.3	16.8	125.6	19.8	15.2	2.4	47.8	110.5	—	83.0	138.0
$\text{NO}_2\text{-N}$ (mg/L)	0.5	0.3	0.2	1.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.0	0.9	0.0	—	0.0	0.0
$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L)	15.5	9.7	0.2	63.9	6.2	2.6	0.0	19.0	0.3	0.3	0.1	0.6	0.0	—	0.0	0.0
$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/L)	6.4	1.8	0.2	36.7	7.2	5.2	1.0	26.0	4.2	2.4	0.2	10.2	110.5	—	46.0	175.0
DIN (mg/L)	19.0	12.5	2.7	101.7	9.7	5.4	0.0	26.0	4.7	3.4	0.5	10.3	110.5	—	46.0	175.0
δD in H_2O (‰)	-57.5	-57.1	-70.1	-50.4	-53.2	-54.2	-57.3	-46.8	-68.5	-67.1	-83.5	-62.1	-48.6	—	-49.7	-47.5
$\delta^{18}\text{O}$ in H_2O (‰)	-8.1	-8.1	-9.9	-7.2	-7.7	-7.7	-8.3	-7.0	-9.6	-9.5	-11.6	-8.8	-7.3	—	-7.3	-7.2
$\delta^{15}\text{N}$ in NO_3 (‰)	17.7	17.2	10.0	34.6	21.8	20.6	12.7	32.3	9.6	10.7	5.6	12.5	—	—	—	—
$\delta^{18}\text{O}$ in NO_3 (‰)	4.1	4.1	-0.3	9.8	7.9	7.5	1.0	14.0	2.6	2.7	-1.2	4.9	—	—	—	—

Fig. 2 δD and $\delta^{18}O$ diagram for the water samples collected from the Kathmandu urban area.

*The weighted mean isotope values of precipitation are from Gajurel et al. (2006) ($n=114$), these samples were collected at central Kathmandu Valley from 2001–2002.

とめた。Fig. 2には開放井戸と掘抜き井戸の地下水、河川水、下水の水素および酸素の安定同位体比値を示し、合わせて既往の研究（Gajurel et al., 2006）で報告されているカトマンズ市街地における降水の水素および酸素安定同位体比の年間の降雨量加重平均値（ δD : -53‰ , $\delta^{18}O$: -8.0‰ , $n=114$ ）を示した。地下水の水素および酸素安定同位体比値はそれぞれ、 -70‰ ～ -47‰ および -9.9‰ ～ -7.0‰ の範囲を示した（Table 1）。異なる2地点で採取した下水の水素および酸素安定同位体比値はそれぞれ -50‰ と -48‰ および -7.3‰ と -7.2‰ と比較的近い値を示した。河川水の水素および酸素安定同位体比値はそれぞれ、 -84‰ ～ -62‰ および -11.6‰ ～ -8.8‰ の範囲を示し、地下水や下水の同位比に比べ低い値であった。本研究で調査対象とした主要河川は盆地を取り囲む山地を主な集水域としている。これらの山の標高はおよそ2300 mで、市街地の標高（約1300 m）と1000 m程度の標高差がある。従って、河川水の水素および酸素安定同位体比値

が市街地の地下水や下水より低い値を示したのは水の水素および酸素安定同位比にみられる高度効果を反映したものと考えられる。また、最下流のRW01の河川水はRW02～RW05の河川水が合流して形成されているにもかかわらず、その水素および酸素安定同位体比はRW02～RW05より著しく低い値を示した（Fig. 2）。RW01の試料採取時には豪雨が発生し出水中の河川水を採取したため、この河川水試料については一時的に流出した降雨の同位体比値を反映している可能性が高い。よってRW01の試料については以後、参考値として取り扱う。

地下水の水素および酸素安定同位体比の中央値（ $\delta D=-55\text{‰}$, $\delta^{18}O=-8.0\text{‰}$ ）は、対象地域の降水の水素および酸素安定同位体比の年降雨量加重平均値（ $\delta D=-53\text{‰}$, $\delta^{18}O=-7.8\text{‰}$ ）に近い値を示した。一方、Fig. 2の水素・酸素安定同位体比値の分布をみると、殆どの地下水試料は河川水と下水の間に広く分布している。これらの結果から、対象地域の地下水は総じて降水の浸透により涵養されていると考えることもできるが、地下水の水素および酸素安定同位体比値が河川や下水の間に広く分布していることは、地下水に河川水や下水が含まれていることも示唆している。より詳細な地下水の起源に関する考察は以後、塩化物イオン濃度の分布を含めて議論する。

2. 水質と硝酸イオンの起源の推定

Table 1に開放井戸と掘抜き井戸の地下水、河川水、水質ならびに硝酸イオンの窒素および酸素の安定同位体比値の統計値（平均値、中央値、最大値、最小値）を示した。開放井戸および掘抜き井戸の地下水中の塩化物イオンの平均濃度はそれぞれ87.0 mg/Lおよび75.1 mg/Lであった。これに対して河川水は19.8 mg/Lと比較的低く、下水は110.5 mg/Lと極めて高い濃度を示した。開放井戸と掘抜き井戸の地下水中の塩化物イオンの濃度はそれぞれ28.4 mg/L～191.5 mg/Lおよび16.8 mg/L～125.6 mg/Lであり、河川水と下水が示す塩化物イオン濃度の間に広く分布していた。

地下水の亜硝酸性窒素は低く 1.1 mg/L 以下であった。一方、硝酸性窒素の平均濃度は開放井戸ならびに掘抜き井戸でそれぞれ 15.5 mg/L および 6.2 mg/L で、アンモニア性窒素の平均濃度は開放井戸ならびに掘抜き井戸でそれぞれ 6.4 mg/L および 7.2 mg/L で (Table 1)、地下水の窒素汚染の主な窒素形態は硝酸性窒素とアンモニア性窒素であった。最も高い硝酸性窒素濃度は 63.9 mg/L、アンモニア性窒素濃度は 36.7 mg/L で、いずれも開放井戸で検出された。開放井戸の地下水と掘抜き井戸の地下水の溶存無機窒素濃度 (DIN) の平均値ならびに中央値を比較すると、開放井戸が掘抜き井戸の地下水の 2 倍程度の濃度を示し (Table 1)、開放井戸が窒素汚染を受けやすい傾向があることがわかる。対象地域の掘抜き井戸はボーリング孔に鉄管を埋設し地表部分は手動ポンプを設置し、コンクリートで保護されている。一方、開放井戸は直径 1.5~2 m の手掘りの井戸でその内壁はレンガやコンクリート製のリングで補強されているものの、井戸の内壁には滲出水が確認されるなど地表付近の水が流入する可能性が高い。このような井戸の構造が水質に反映されていると考えられる。

河川水の溶存無機窒素濃度の平均値は 4.7 mg/L 程度で、地下水のそれに比べ低く、溶存無機窒素の殆どはアンモニア性窒素であった (Table 1)。一方、下水の 2 試料については硝酸性窒素、亜硝酸性窒素は検出されず主な溶存態窒素はアンモニア性窒素で、溶存無機窒素の濃度はそれぞれ 46.0 mg/L、175.0 mg/L であり試料毎の差は大きかった。

硝酸イオンの窒素および酸素安定同位体比は環境水中の硝酸イオンの起源や生化学的反応 (硝化や脱窒) の把握に用いられている (例えば Li et al., 2007; Umezawa et al., 2009; Hosono et al., 2011)。硝酸イオンの窒素ならびに酸素の安定同位体比を用いて硝酸イオンの起源を推定する場合、地下水中での硝化や脱窒による同位体比の変動に留意する必要がある。例えば、脱窒反応では濃度の減少に伴う硝酸イオンの窒素および酸素の

同位体比が増加するため、必ずしも負荷源の窒素同位体比値を反映しない (例えば Umezawa et al., 2009; Hosono et al., 2011)。カトマンズ盆地においても地下水中の脱窒反応に伴う硝酸イオンの窒素および酸素安定同位体比の増加が確認されている (Nakamura et al., 2012)。脱窒反応により硝酸イオン濃度の減少に伴って硝酸イオンの窒素同位体比値が増加している場合、同位体比値が最も低い試料または硝酸イオン濃度が高い試料については窒素負荷起源の窒素同位体比値を反映している可能性が高い。本研究における地下水中の硝酸イオンの窒素安定同位体比は 10.0‰~34.6‰を示し、最低値は 10.0‰であった (Table 1)。また、本研究において最も高い硝酸性窒素濃度を示した地点の窒素安定同位体比値は 14.8‰であった。以上の窒素同位体比の結果を既往の研究で得られている環境中の窒素負荷起源の窒素同位体比と比較すると、堆肥や生活排水の窒素同位体比 ($\delta^{15}\text{N}=0\sim25\%$) (Kendall, 1998) と同等の値を示した。本研究の対象地域には農地は無いため堆肥を起源とする窒素の負荷は考えにくい。従って、地下水中の窒素の負荷起源は生活排水によるものと推定される。

3. 下水漏洩による地下水の汚染

開放井戸の地下水、掘抜き井戸の地下水、河川水、下水の水素同位体比値と塩化物イオン濃度の関係を Fig.3(a) に示す。合わせて既往の研究で得られている降水の水素安定同位体比 (Gajurel et al., 2006) ($n=114$) と塩化物イオン濃度 (Shrestha et al., 2013b) ($n=94$) の降水量加重平均値を参考値として示した。

開放井戸ならびに掘抜き井戸の地下水の多くは、水の水素同位体比値が下水の水素同位体比値に近い値を示す地下水ほど塩化物イオン濃度が増加する傾向がみられ (Fig. 3(a))、下水の混入による塩化物イオン濃度の増加が示唆された。ここで、地下水の涵養において河川水と下水の混合を想定し、河川水と下水のプロットの間に混合ラインを作成した。混合ラインの作成においては、河

Fig. 3 Relationship between δD in water and chloride concentration for water samples collected from Kathmandu urban area (a). And Relationship between δD in water and concentration of dissolved inorganic nitrogen (b).

*The weighted mean values for δD in water and chloride concentration are from Gajurel et al. (2006) for δD and Shrestha (2013) for chloride concentration.

川水の塩化物イオン濃度と下水の塩化物イオン濃度それぞれにある程度の差があったため、高濃度の混合ラインと低濃度の混合ラインを作成した (Fig. 3(a))。開放井戸ならびに掘抜き井戸の地下水は概ね河川水と下水の混合ラインの近くに分布していることから、これらの地下水が河川水と下水の混合により形成されていると考えられる。ただし、掘抜き井戸のSG12については混合ラインから大きく乖離し、低い塩化物イオン濃度を示している (Fig. 3(a))。この地下水については、降水の水素同位体比と塩化物イオン濃度に近い値を示しているため、降水の浸透による塩化物イオンの希釈が起こっていると推察される。またSG06, SG24, SG26の開放井戸については、塩化物イオン濃度が下水よりも高い値を示しているが (Fig. 3(a))、この結果については現時点で不明である。今後、下水より高濃度の塩化物イオンを有していると考えられる汲み取り式のし尿槽等の水の混入を検討する必要がある。

開放井戸と掘抜き井戸の地下水、河川水、下水の水素同位体比值と溶存無機窒素濃度の関係を図3(b)に示す。また、河川水と下水の混合を想定し、河川水と下水のプロットの間に混合ラインを

作成した。混合ライン作成においては、2つの下水試料の溶存無機窒素濃度に差があったため、高濃度の混合ラインと低濃度の混合ラインを作成した (Fig. 3(b))。

開放井戸と掘抜き井戸の地下水については、水素同位体比值の増加に伴い溶存無機窒素濃度が増加する傾向がみられた。これは下水の混入による溶存無機窒素濃度の増加と考えることができるが、殆どの地下水の溶存無機窒素濃度については河川水と下水の混合から想定される溶存無機窒素濃度 (混合ライン) より低い傾向を示している。この結果から、溶存無機窒素濃度の希釈または窒素の除去が起こっている可能性が考えられる。Fig. 3(a)によると、降水による塩化物イオン濃度の希釈が考えられたのは一部の限られた地下水であり、広域的な溶存無機窒素濃度の低下の原因が降水浸透による希釈とは考えにくい。一方、開放井戸と掘抜き井戸の地下水の溶存窒素濃度はそれぞれ0.5 mg/L~5.1 mg/L (平均: 2.3 mg/L) および0.4 mg/L~2.6 mg/L (平均: 1.3 mg/L) (Table 1) と低く、還元的な環境であることを示している。加えて同地域においては硝酸イオンの窒素および酸素安定同位体比から地下水中での脱窒

反応による窒素の除去が確認されている (Nakamura et al., 2012)。したがって、溶存無機窒素濃度が河川水と下水の混合ラインより低くなる傾向は、還元的な環境で生じる脱窒反応により地下水中から窒素が除去されたためと考えられる。

5. おわりに

本研究では、ネパールのカトマンズ市街地における浅層地下水中の窒素の起源や下水混入の実態を把握するため、地下水、河川水、下水の採取を行い水の酸素および酸素同位体比、硝酸イオンの窒素および酸素同位体比ならびに溶存化学成分の測定を行った。その結果以下の知見が得られた。

水の酸素および酸素同位体比の分布から、対象地域の地下水は概して降水の浸透により涵養されていると考えられるが、一部の地下水では河川からの伏流水や下水の混入も考えられた。地下水の窒素汚染の主な形態は硝酸性窒素とアンモニア性窒素であり、最も高い硝酸性窒素濃度は 63.9 mg/L、アンモニア性窒素濃度は 36.7 mg/L で、いずれも開放井戸で検出された。開放井戸の地下水と掘抜き井戸の地下水の溶存無機窒素濃度は、開放井戸の地下水が掘抜き井戸の地下水の2倍程度の濃度を示し、これは地表付近の水が混入しやすい開放井戸の構造に起因するものと考えられた。硝酸性窒素同位体比の測定により、地下水中の硝酸性窒素の起源は下水であると推定された。地下水の酸素安定同位体比と塩化物イオン濃度の関係から、地下水への下水の混入が確認された。地下水中の溶存無機窒素については、下水混入に伴う溶存無機窒素濃度の増加が示唆されたが、河川水と下水の混合割合から想定される濃度より低い傾向が得られた。この原因については、一部の限られた地下水については降雨浸透により塩化物イオンが希釈されていると考えられたが、その他の地域においては降水による希釈効果は小さいと考えられた。一方、対象地域の地下水の溶存酸素濃度が低いことや既往の研究により硝酸イオンの窒素および酸素安定同位体比を用いた脱窒

反応の存在が確認されていることから、対象地域の地下水における溶存無機窒素濃度の低下は、還元的な環境で生じる脱窒反応により地下水から窒素が除去されたためと考えられた。

謝 辞

本研究は、文部科学省グローバルCOEプログラム（アジア域での流域総合水管理研究教育の展開）ならびに独立行政法人科学技術振興機構（JST）・独立行政法人国際協力機構（JICA）共同実施の地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）（微生物学と水文水質学を融合させたネパールカトマンズの水安全性を確保する技術の開発）の補助により実施した。ここに記して謝意を表します。

文 献

- Acres International (2004): Optimizing water use in Kathmandu Valley (ADB-TA) project. Final Report submitted to Government of Nepal, Ministry of Physical Planning and Works, Acres International in association with Arcadis Euroconsult Land and Water Product Management Group, East Consult (P) Ltd. & Water Asia (P) Ltd.
- Casciotti, K. L., Sigman, D. M., Hastings, M. G., Böhlke, J. K. and Hilkert, A. (2002): measurement of the oxygen isotopic composition of nitrate in seawater and freshwater using the denitrifier method. *Analytical chemistry*, **74**, 4905–4912.
- Conan, H. (2004): Small piped water networks: helping local entrepreneurs to invest. Water for All Publication Series, vol 13, Asian Development Bank, Manila, Philippines.
- Gajurel, P. A., France-Lanord, C., Huyghe, P., Guilmette, C. and Gurung, D. (2006): C and O isotope compositions of modern fresh-water

- mollusc shells and river waters from the Himalaya and Ganga plain. *Chemical Geology*, **233**, 156–183.
- Gurung, J., Ishiga, H., Khadka, M. and Shrestha, N. (2007): The geochemical study of fluvio-lacustrine aquifers in the Kathmandu Basin (Nepal) and the implications for the mobilization of arsenic. *Environmental Geology*, **52**(3), 503–517.
- GWRDB (2009): Study on the status of groundwater extraction in the Kathmandu Valley and its potential impacts. Final Report, submitted to Groundwater Resources Development Board (GWRDB), Nepal.
- Haramoto, E., Yamada, K. and Nishida, K. (2011): Prevalence of protozoa, viruses, coliphages and indicator bacteria in groundwater and river water in the Kathmandu Valley, Nepal. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, **105**(12), 711–716.
- Hosono, T., Wang, C., Umezawa, Y., Nakano, T., Onodera, S., Nagata, T., Yoshimizu, C., Tayasu, I. and Taniguchi, M. (2011): Multiple isotope (H, O, N, S and Sr) approach elucidates complex pollution causes in the shallow groundwaters of the Taipei urban area. *Journal of Hydrology*, **397**, 23–36.
- Jha M. G., Khadka M. S., Shrestha M. P., Regmi S., Bauld J., Jacobson G. (1997): The assessment of groundwater pollution in the Kathmandu Valley, Nepal: report on Joint Nepal-Australia Project 1995–96, Australian Geological Survey Organisation, Canberra, 1–64.
- Kannel, P. R., Lee, S. and Lee, Y. (2008): Assessment of Spatial and Temporal Pattern of surface and ground water qualities and factors influencing management strategy of groundwater system in an urban river corridor of Nepal. *Journal of Environmental Management*, **86**, 595–604.
- Kendall, C. (1998): Tracing nitrogen source and cycling in catchments. In: Kendall C, McDonne JJ, editors. Isotope tracers in catchment hydrology. The Netherlands: Elsevier Science B. V., 519–76.
- Khadka, M. S. (1993): The groundwater quality situation in alluvial aquifers of the Kathmandu Valley, Nepal. *AGSO journal of Australian geology & geophysics*, **14**, 207–211.
- Khatriwada, N. R., Takizawa, S., Tran, T. V. N., Inoue, M. (2002): Groundwater contamination assessment for sustainable water supply in Kathmandu Valley, Nepal. *Water Science and Technology*, **46**(9), 147–154.
- Li, X., Masuda, H., Koba, K. and Zeng, H. (2007): Nitrogen isotope study on nitrate-contaminated groundwater in the Sichuan Basin, China. *Water, Air, & Soil Pollut*, **178**, 145–156.
- Maharjan, M. (2005): Groundwater Quality Surveillance in Kathmandu and Lalitpur Municipality Areas—A Joint Study. Report, JICA and ENPHO, Kathmandu, Nepal.
- Nakamura, T., K. Osaka, K. Nishida, S. K. Chapagain, Y. Hiraga. and F. Kazama. (2012): Nitrate-organic carbon relationship in groundwater denitrification of Kathmandu Valley, Nepal, *Proceeding of the 10th International Symposium on Southeast Asian Water Environment*, 267–274.
- Pant, B. R. (2011): Ground water quality in the Kathmandu valley of Nepal. *Environmental Monitoring and Assessment*, **178**, 477–485.
- Pradhan, B. B., Shrestha, B. R., Punjali, K. R. and Lama, C. N. (2007): Kathmandu Valley Environmental Outlook. Report, International Center for Integrated Mountain Development.

- ment, Kathmandu, Nepal.
- Prasai, T., Lekhak, B., Joshi, D. R. and Baral, M. P. (2007): Microbiological Analysis of Drinking Water of Kathmandu Valley. *Scientific World*, **5** (5), 112–114.
- Shrestha, S., Nakamura, T., Malla, R. and Nishida, K. (2013a): Seasonal variation in the microbial quality of shallow groundwater in the Kathmandu Valley, Nepal. *Water Science and Technology*, **14** (3), 390–397.
- Shrestha, S., Pandey, V. P., Yoneyama, Y., Shrestha, S. and Kazama, F. (2013b): An evaluation of rainwater quality in Kathmandu Valley, Nepal. *Sustainable Environment Research*, **23** (5), 341–350.
- Sigman, D. M., Casciotti, K. L., Andreani, M., Barford, C., Galanter, M. and Böhlke, J. K. (2001): A bacterial method for the nitrogen isotopic analysis of nitrate in seawater and freshwater. *Analytical Chemistry*, **73**, 4145–4153.
- Umezawa, Y., Hosono, T., Onoderac, S., Siringand, F., Buapenge, S., Delinmf, R., Yoshimizug, C., Tayasuh, I., Nagata, T. and Tani-guchi, M. (2009): Tracing the sources of nitrate and ammonium contaminations in groundwater at developing Asian megacities, using GIS data and nitrate $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$. *Science of the Total Environment*, **407**, 3219–3231.
- Warner, N. R., Levy, J., Harpp, K. and Farrugia, F. (2008): Drinking water quality in Nepal's Kathmandu Valley: a survey and assessment of selected controlling site characteristics. *Hydrogeology Journal*, **16** (2), 321–334.

(原稿受付：2014年 3 月 17 日)

(原稿受理：2014年 10 月 7 日)

この論文に対する「討論」を2015年5月31日まで受け付けます。

ネパール・カトマンズ盆地における浅層地下水の窒素汚染

中村 高志・西田 継・風間 ふたば・
尾坂 兼一・Saroj K. Chapagain

要 旨

ネパール・カトマンズ都市域の浅層地下水中の窒素汚染の起源を推定するために、地下水、河川水ならびに下水の水の水素および酸素安定同位体比、硝酸イオンの窒素および酸素安定同位体比ならびに主要溶存化学成分の測定を行った。地下水試料は15地点の開放井戸と19地点の掘抜き井戸から採水し、河川水資料は対象地域の主要な河川の内、8地点を選定し採水を行った。加えて、カトマンズの市街地における下水の内2地点を選定し採水した。浅層地下水中の窒素汚染は硝酸イオンとアンモニウムイオンが主要な窒素形態であり、最も高い硝酸性窒素とアンモニア性窒素の濃度はそれぞれ63.9 mg/Lならびに36.7 mg/Lであった。硝酸性窒素の安定同位体比から、これらの窒素汚染は下水を起源としていることが推定された。しかしながら、地下水中の溶存無機窒素濃度は下水の窒素濃度に比べ低い結果が得られた。この溶存無機窒素濃度の低下は降水による希釈や脱窒反応による地下水中の窒素の除去によるものと考えられた。

キーワード：カトマンズ、浅層地下水、窒素汚染、水質、安定同位体