関東平野北西部における森林からの溪流水中の 硝酸態窒素濃度の地域分布特性

長谷川香織¹・小葉竹重機^{*2}

長谷川香織・小葉竹重機：関東平野北西部における森林からの溪流水中の硝酸態窒素濃度の地域分布特性 日林誌 88：534~540, 2006 関東平野北西部における森林からの溪流水の窒素流出の地域分布特性を把握するため、群馬県内に調査地を設定し、継続的な観測を行った。これによって、窒素流出の地域分布特性が、概ね利根川を境とするその東西部で異なることが示され、西部では東部で示されない高濃度の溪流水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ が観測された。この傾向は土壤抽出水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度でもみられた。また、降水量と溪流水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度との相関傾向では、利根川東部では西部よりも高い正の相関を示した。これらのことから、利根川以西において窒素飽和の状態が示されていることが考えられ、その要因として首都地域からこの地域に輸送される大気汚染物質の影響が考えられる。

キーワード： $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度、溪流水、大気汚染物質、窒素飽和

Hasegawa, K. and Kobatake, S.: Characteristics of Nitrate Concentration of Headwater Streams Located in the Northwest of Tokyo Metropolitan Area. J. Jpn. For. Soc. 88: 534~540, 2006 Nitrate nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$) concentrations of stream water have been observed in the headwater catchments within Gunma Prefecture located in northwest of Metropolitan area Japan. Large differences of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations were observed between the west side and the east side of Tone River which flows through Gunma Prefecture in north and south. There is positive correlation between rainfall events and increase of the $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations of stream water in the east side. On the contrary, no correlation is found out in the west-side where the $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration is high. These phenomena suggest that the nitrogen saturation occurred in the west side of Tone River. The nitrogen saturation is supposed to be occurred by dry and wet atmospheric depositions that are transported by the wind from the Metropolitan area.

Key words: air pollutant, $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration, stream water, the nitrogen saturation

I. はじめに

地球規模で環境に関わる問題が議論される中、水問題への関心が高まっている。水問題に対応する取組みの視点には、水の量だけでなく、水の質に関する課題も含まれており、ともに広域的な課題となっている。

このような中、欧米の森林において窒素の飽和現象が報告されており (Aber *et al.*, 1989)、近年日本においても、同様の現象が報告されている (Ohrui and Mitchell, 1997)。欧米諸国におけるこれまでの報告では、おもに施肥や大気汚染といった人為的な影響で、多量の窒素が森林域に供給され、森林生態系内の植生による需要を上回ることがその誘因と考えられている。これによって、流域からの窒素流出が起きやすくなり、溪流水中の窒素濃度が高くなる。このようなことが窒素飽和の一現象と考えられている (Aber *et al.*, 1989)。窒素の流域への負荷において、人為的な影響要因の一つである家畜糞尿、施肥、生活排水などについては、行政区や農地の集積する流域単位での水質の監視、施肥量の管理などによる取組みがされている。しかし、大気からの窒素の過剰供給は、限られた地域や流域にとどま

らず、より広い範囲に影響を及ぼすと考えられる。

群馬県を含む北関東地域でも窒素飽和現象の発現が示唆されている (伊藤ら, 2004; Ohrui and Mitchell, 1997; 戸田・生原, 2000)。北関東地域は、関東平野を取り囲む形で山地が発達しており、平野と山地の間で1日を周期とする風が吹くことが明らかにされている (荒川, 2004)。この風によって首都地域由来の窒素酸化物が輸送され (近藤, 2001)、それが森林域に沈着することが溪流水への窒素の流出に影響を及ぼしている可能性が指摘されている (Ohrui and Mitchell, 1997)。しかし、このような地域的な要因や、大気汚染物質との関連性が示されながら、溪流水中の無機態窒素濃度についての地域的な分布を継続的な調査によって明らかにすることは、ほとんど行われていない。

本研究では、関東平野北西部に位置する群馬県内に調査地を複数設定し、継続的に溪流水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の観測を行った。また、溪流水の流出源である流域内の土壤が溪流水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 動態に関わっていると考え、調査流域内土壤中の $\text{NO}_3\text{-N}$ の状況について観測を行った。これによって、群馬県における溪流水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の地域分布特性を明らかにする。

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: kobat@ce.gunma-u.ac.jp

¹ 群馬大学大学院工学研究科生産工学専攻 (376-8515 桐生市天神町1-5-1)

Department of Production Engineering, Graduate School of Technology, Gunma University, 1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu 376-8515, Japan.

² 群馬大学建設工学科 (376-8515 桐生市天神町1-5-1)

Faculty of Engineering, Gunma University, 1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu 376-8515, Japan.

(2005年7月25日受付; 2006年7月24日受理)

II. 調査地と調査方法

調査地として群馬県内に 14 調査地を設定した。調査地はいずれもその上流に生活排水や施肥、畜産、工業廃水などによる人為的な直接影響がない森林流域である。調査地の位置を図-1 に、概況を表-1 に示す。調査地流域はスギ、

図-1. 調査地位置図

本研究における調査地の配置図。グレー枠は 2002 年から、白枠は 2001 年から、枠なしの川内は 2000 年から調査を開始した。枠なしの菅塩は 2000～2001 年に調査を行った。図中の濃淡は標高の概要を示し、図中に標高をメートル表示する。

ヒノキの人工林流域とコナラ、クヌギ、アカマツを主とする二次林流域からなる。唐沢、赤城のみ黒色土が流域内に分布しており、それ以外の調査地は褐色森林土からなる流域である（群馬県、1993～2005）。

1. 渓流水

2000 年 7 月～2001 年 12 月に川内、菅塩の 2 調査地、2001 年 6～12 月に唐沢、吉井①を加えた計 4 調査地で毎月 1 回同日に渓流水を採取し、現地で、あるいは実験室に持ち帰り、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ について水質分析を行った。2001 年 6 月以降は吉井①、吉井②、唐沢、菱、川内の計 5 調査地では隔週、それ以外の 8 調査地（菅塩を除く）は毎月 1 回、同日もしくはそれに近い条件下で渓流水を採取し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ について水質分析を行った。水質分析は HACH 社製迅速水質分析計（DR-820）および共立製水質迅速分析計（WAL-M）を用い、吸光光度法によって行った。両測定器の検査法は、HACH 社製迅速水質分析計ではそれぞれ $\text{NO}_3\text{-N}$ がカドミウム還元法、 $\text{NO}_2\text{-N}$ がジアゾ化法、 $\text{NH}_4\text{-N}$ がサリチル酸法、共立製水質迅速分析器ではそれぞれ $\text{NO}_3\text{-N}$ が亜硝酸還元法とグリース改良法、 $\text{NO}_2\text{-N}$ がグリース改良法、 $\text{NH}_4\text{-N}$ がインドフェノール法である。両測定器とも採取した渓流水は、濾過等を行わずに分析した。なお、両測定器間の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の誤差は最大で 0.2 mg L^{-1} であり、測定器による値の測定ごとの補正は行っていない。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度

表-1. 調査地概況

	植 生	土壌型	標高 (m)	流域面積 (m^2)	基 岩	斜面 方向	年平均降水 量 (mm)	年平均気 温 ($^{\circ}\text{C}$)
吉井①	スギ・ヒノキ・コナ ラ・クヌギ	褐色森林土壌・湿性褐色森林土壌・乾 性褐色森林土壌	350～700	270,000	第三系	NNE	1203	15.1
吉井②	スギ・ヒノキ・コナ ラ・クヌギ	褐色森林土壌・湿性褐色森林土壌・乾 性褐色森林土壌	350～700	350,000	第三系	NNW	1203	15.1
妙義	ヒノキ・コナラ・クヌ ギ・カエデ	褐色森林土壌	490～830	261,000	第三系	SEE	1319	12.3
地蔵	スギ・ヒノキ・コナ ラ・クヌギ	褐色森林土壌	600～810		第三系	SE	1379	14.0
社家	スギ・ヒノキ・コナ ラ・ミズナラ	褐色森林土壌	930～1200		第四紀火山およびそ の火砕物	SSE	2186	11.0
唐沢	スギ・ヒノキ・コナ ラ・ミズナラ	褐色森林土壌・黒ボク土	800～1130	213,000	第四紀火山およびそ の火砕物	SSW	2186	11.0
子持	スギ・ヒノキ・ホオノ キ・ミズナラ	褐色森林土壌	600～1200		第四紀火山およびそ の火砕物	SSE	1119	11.9
赤城	ヒノキ・アカマツ・ミ ズナラ	褐色森林土壌・黒ボク土	990～1480		第四紀火山およびそ の火砕物	SSW	1257	14.9
梨木	スギ・ヒノキ・コナ ラ・クヌギ	褐色森林土壌	570～1310		第四紀火山およびそ の火砕物	SSE	1502	12.7
川内	スギ・ヒノキ・アカマ ツ・コナラ・クヌギ	褐色森林土壌・湿性褐色森林土壌・乾 性褐色森林土壌	207～360	200,500	中生界	SSW	1302	14.5
菱	スギ・ヒノキ・コナ ラ・クヌギ	褐色森林土壌	210～650		中生界	SSW	1302	14.5
神戸①	スギ・ヒノキ・コナ ラ	褐色森林土壌・湿性褐色森林土壌・乾 性褐色森林土壌	800～1070		中生界	SEE	1502	12.7
神戸②	スギ・ヒノキ・コナ ラ	褐色森林土壌・湿性褐色森林土壌・乾 性褐色森林土壌	800～1070		中生界	SEE	1502	12.7
菅塩	ヒノキ・アカマツ・コ ナラ・クヌギ	褐色森林土壌	110～220	350,500	中生界	SW	1302	14.5

土壌型 (6)・年平均降水量、年平均気温は 2000～2004 年平均值（前橋地方気象台）。

は後述のように低く、両測定器間の誤差は認められなかった。

2. 土壌抽出水

土壌中の $\text{NO}_3\text{-N}$ は、陰イオンである硝酸イオンとして存在しているため、土壌に置換吸着されにくい。このため、土壌中の $\text{NO}_3\text{-N}$ のほぼ全量を水によって抽出することが可能である（土壌環境分析法編集委員会, 1997）。このような観点から、調査地流域内の土壌を採取し、その抽出水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を測定した。

調査は2002～2004年に夏期から冬期にかけて、地蔵以外の13調査地で行った。土壌採取にあたっては、調査流域内で、渓流水採取点の上流側の、河道から尾根までの斜面垂直高の中間的な高さの地点において、崩落等の影響がなく、樹木からの距離が50 cm以上の地点を選定した。各調査回の採取地点はできるだけ近接した点とした。採取はA層最上部を深度0 cmとし、これを基準に0～5 cm, 10～15 cm, 20～25 cm, 40～45 cm, 60～65 cm, 80～85 cmの深度で行った。A層厚は吉井①, 吉井②, 川内および菱が5～10 cm, それ以外が20～25 cmで、いずれも褐色森林土壌の断面形態を示す場所で行った。また、各回調査とも、全調査点での採取を4日以内で行い、全調査地の採取条件の統一に配慮した。調査を行った回数は各調査地によって異なるが、調査時期は毎年同月の同時期とした。土壌抽出水は、風乾試料と蒸留水を質量比1:5の比率でガラス容器内に混合し、振とう機によって1時間振とう後、No. 6の乾燥濾紙で濾過し、さらに0.45 μm のメンブランフィルターで吸引濾過した（山崎・六本木, 1992）。試料の分析は渓流水の分析と同じである。

※ $\text{NO}_2\text{-N}$ のグラフのみ濃度の軸が異なる。

図-2. 各調査地の渓流水中無機態窒素の濃度

2000～2001年に行った、渓流水中の硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素の濃度調査結果を示す。 $\text{NO}_2\text{-N}$ のグラフのみ濃度の軸が異なる。

III. 観 測 結 果

1. 渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度

各調査地における渓流水中の $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度は $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と比較して低く、渓流水中に存在する無機態窒素のほとんどが $\text{NO}_3\text{-N}$ であった（図-2）。各調査地における渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の推移を図-3に示す。また、各調査地における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の最大値、最小値および算術平均値（以下平均値）を図-4に示す。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は川内の0.2 mg L^{-1} から吉井①の4.9 mg L^{-1} まで幅が広く、調査地による傾向の相違が認められる。平均値が2.0 mg L^{-1} 以上を示す吉井①, 吉井②, 子持は最大値がいずれも3.0 mg L^{-1} 以上を示しており、他の調査地との相違が顕著である。また妙義, 唐沢も最大値が2.4 mg L^{-1} , 2.6 mg L^{-1} と比較的大きく、平均値も1.5 mg L^{-1} 以上を示している。これらの5調査地以外はいずれも平均値1.0 mg L^{-1} 以下を示している。関東および中部地方の270地点で調査を行った報告（伊藤ら, 2004）では渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は0.0～1.9 mg L^{-1} （換算値）であり、全国大学演習林での調査における群馬県内6地点での報告（戸田ら, 2000）では0.4～2.2 mg L^{-1} （換算値）である。吉井①, 吉

図-3. 渓流水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の推移

これまでの渓流水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の推移をX軸時系列（調査日）、Y軸濃度（ mg L^{-1} ）で示す。

図-4. 渓流水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度範囲および濃度平均値

各調査地の濃度傾向を示すために濃度最高値と最小値をグレーの線で示し、濃度平均値をグレー菱形ポイントで示す。X軸調査地、Y軸濃度（ mg L^{-1} ）。

図-5. 渓流水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の経時的変化 2 例 (吉井①・社家)

年々変動 (特に 2004 年夏期) が示された調査地代表例として吉井①と、年々変動が示されない調査地代表例として社家を取りあげ、年による月ごとの推移傾向の相違を示す。X 軸月、Y 軸濃度 (mg L^{-1})。

井②, 子持, 妙義, 唐沢の 5 調査地以外の濃度はこれらとほぼ一致しているが, 5 調査地の濃度はこれらの報告よりも高濃度を示している。

また, 群馬県東部においてはすでに, 森林域での窒素収支, 大気からの窒素沈着と渓流水への窒素流出の関係が明らかにされている (Ohrui and Mitchell, 1997)。本調査における神戸①, 神戸②は, この報告による調査地の近傍に位置しており, 神戸①, 神戸②で得られた結果は, この報告による渓流水の無機態窒素の濃度の状況と概ね一致している。

1) 濃度の経時的変化

渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の経時的変化は, 2001~2003 年においては, 6~9 月を中心とした若干の濃度上昇が示されるものの, 顕著な季節変化は認められない (図-3)。しかし, 2004 年において特に吉井①, 吉井②, 子持の 5~10 月の濃度上昇が著しく, それ以前との傾向の相違が顕著である。上昇の傾向が最も強く示された吉井①と, 比較的低濃度を通年示す調査地の一つ社家の経時的変化を図-5 に示す。吉井①では 2004 年の 6~9 月の上昇が顕著であるが, 社家においては, 経時的変化はほとんど認められない。

2) 地域的な分布

渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は, 調査地によって傾向が異なるが, 概ね平均値 1.5 mg L^{-1} 以上と 1.0 mg L^{-1} 以下の 2 グループに分けられる (図-4)。図-6 は各調査地の位置に, それぞれの濃度平均値を円の大きさに示し, プロットしたものである。群馬県域のほぼ中央を南北に流れる利根川より西側 (以下利根川以西) では渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の平均値は, 地蔵, 社家で 1.0 mg L^{-1} 以下を示すが, それ以外の 5 調査地ではいずれも 1.5 mg L^{-1} 以上を示し, 利根川より東側 (以下利根川以东) と比較して渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高い傾向が認められる。

図-6. 渓流水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の地域分布 (平均値)

渓流水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度傾向を地図にプロットし, 地域分布を表示している。濃度傾向は, 「図-4」により, 濃度平均値を概ね 3 段階に分類し (2.0 以上・ 1.5 以上・ 2.0 未満・ 1.0 程度以下, ともに (mg L^{-1})), グレー円で示している。なお, グレー円の直径等は目安であり, 実数を示すものではない。

2. 土壌抽出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度

1) 深度方向の濃度変化

土壌抽出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の傾向は大きく三つのタイプに分けられる。一つめは深度による変化がほとんどなく 1.0 mg L^{-1} 以下の低濃度を示すもので (Type 1, 図-7), 利根川以东に位置する梨木, 赤城, 神戸①, 神戸②, 川内, 菱が該当する。これらの調査地では渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の平均値も, 1.0 mg L^{-1} 以下で他の調査地と比較して低い。二つめは地表に近いほど高濃度を示すもので (Type 2, 図-7), 吉井①, 吉井②, 妙義, 社家, 唐沢が該当する (同 Type 2)。とくに, 唐沢は深度方向の濃度低下が比較的緩やかで, 40 cm 以深の濃度は 2.0 mg L^{-1} 程度で推移している。これらの調査地では渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の平均値も, 社家の 1.0 mg L^{-1} 以下を除いて 1.5 mg L^{-1} 以上を示し他の調査地と比較して高い。三つめは 40 cm 以深において濃度の上昇を示すもの (Type 3, 図-7) で子持が該当し, 地表から $10\sim15 \text{ cm}$ 深で濃度が低下するものの, $40\sim60 \text{ cm}$ 以深で上昇を示す。地上から 60 cm 以深で 2.0 mg L^{-1} 程度を示すのは唐沢, 子持のみである。子持では渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の平均値も, 2.0 mg L^{-1} 以上で他の調査地と比較して高い。深度方向の濃度変化について, 東京都内における渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高い流域と低い流域の調査において, 渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高い流域では 60 cm 以深でも硝酸イオン濃度が高いことが報告されている (楊, 1996)。唐沢, 子持における 60 cm 以深の土壌抽出水ならびに渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度はともに高く, この報告と同様の傾向を示す。

2) 地域的な分布

各回の調査において深度ごとに得た土壌抽出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の平均値を地点ごとに図-8 に示す。土壌抽出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の平均値は利根川以西で唐沢の 2.3 mg L^{-1} から吉井②の 0.9 mg L^{-1} の範囲, 利根川以东で赤城の 1.2

図-7. 土壌抽出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度-土壌深度分布 (Type 1~3)

土壌抽出水中の濃度調査で示された傾向について特徴的な調査地のものを Type 1~3 で示す。Type 1 は梨木, Type 2 は吉井①と唐沢, Type 3 は子持で示される傾向である。図の上下方向は地表からの深度 (cm), 左右方向は濃度 (mg L^{-1})。

mg L^{-1} から神戸①の 0.2 mg L^{-1} の範囲である。土壌中の硝酸イオンの存在量は、土壌の性質によって異なることが考えられるため、一概に比較することはできないが、渓流水中と同様に利根川以西で高く、以東で低い傾向が認められる。

IV. 結果の考察

1. 降水量との関係

人為による直接的な負荷が排除された森林環境下では、窒素集積量の 90% は土壌に存在しており、そのほとんどが土壌表層部に存在している (堤, 1997)。土壌表層部には多くの $\text{NO}_3\text{-N}$ が硝酸イオンとして存在しているため (村岡・平田, 1988)、土壌に吸着されにくく、水によって溶脱されやすい。流域内の斜面位置や地質によって異なるものの、一般的には日本の森林域における土壌表層部は浸透能力が高く、いわゆる地表面流はほとんど発生しないと考えられている (塚本, 1988)。また、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が多く存在する土壌の分布は流域内で必ずしも均等でないが、森林での降水時には $\text{NO}_3\text{-N}$ が比較的多く存在する土壌浅部の層内に飽和側方流 (中間流) が発生し、これによって渓流水に $\text{NO}_3\text{-N}$ が流出しやすくなることが考えられる。降水による流量の変化と渓流水中溶存物質の濃度変化についての報告では、渓流水中の溶存物質には降水後の流量逓減期に降水前の濃度に回復するものと、降水前の濃度を上回るものがあり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は後者に属すると示されている (平田・村岡, 1988)。そして、このような濃度変化のパターンの違いは流量逓減期の中間流出成分、すなわち土壌からの流出に由来しており、土壌浅部に $\text{NO}_3\text{-N}$ が多く存在し

図-8. 土壌抽出水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度平均値

土壌抽出水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の概況をみるため、各回調査で深度ごとに得た土壌抽出水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度値の平均を示す。X 軸調査地, Y 軸濃度 (mg L^{-1})。

ていることとの関連が指摘されている。このようなことを踏まえ、利根川以西と以東について、渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と、調査日以前 5 日間の降水量の積算値との関係について検討した。なお、利根川以西と以東における相違を示すことを目的とし、個々の調査地によるものではなく、利根川以西と以東の 2 地域という観点で検討した。降水量データは AMeDAS によるものから各調査地近傍のものを抽出した。なお、ヒノキ林地における林内雨は、林外雨 1 mm 以上に達したときに発生することが報告されている (小林ら, 2000)。また、1 mm 未満のデータは県内の 1 気象観測点のみで観測されているにすぎない。そのため、1 mm 以上のみを扱い、2002 年 6 月~2005 年 5 月における調査日以前 5 日間の 1 mm 以上降水量と渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の相関について検討を行った。その結果を図-9 に示す。利根川以西では、調査日以前 5 日間の積算降水量 1 mm 以上と渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度との相関は認められないが、利根川以東では正の相関が認められる (相関係数 0.20 $p = 0.03$ 5% 有意)。このことから利根川以東では、降水時の渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の上昇に土壌浅部から流出する硝酸イオンが影響していることが考えられる。しかし、利根川以西ではその影響は認められず、土壌のより深部から流出する硝酸イオンが渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に影響していることが考えられる。

2. 窒素飽和について

$\text{NO}_3\text{-N}$ が生物的な要求を上回って森林生態系に存在している場合、土壌中の $\text{NO}_3\text{-N}$ は、養分や水分を吸収する樹木細根がほとんど存在しない土壌深部へと移動し、地下水を経て渓流水へ流出する。利根川以西の吉井①、吉井②、妙義、唐沢、子持の 5 調査地は、渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の平均値が 1.5 mg L^{-1} 以上と、利根川以東と比較して高い。さらに、唐沢、子持の 2 調査地は、土壌深部における土壌抽出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が他の調査地と比較して高い。本調査では、直接土壌から得た土壌水ではなく土壌からの抽出水を対象としているため、渓流水との濃度値の比較は行えないが、渓流水、土壌抽出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の関連が考えられる。また、渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と降水量との相関関係は利根川以東では認められたが、以西では認められなかった。

図-9. 調査日以前5日間積算降水量と渓流水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ の散布図(利根川以西・利根川以东)

利根川以西と利根川以东における降水量と渓流水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の相関関係を散布図に示す。利根川以西および以东の相違について示すことを目的とし、個々の調査地によるものではなく、利根川以西と以东の2地域という観点で示す。

一方、本研究においては利根川以西と比較して低濃度を示す利根川以东では、渓流水の無機態窒素年間流出量が林外雨による年間収入量を上回ること等から窒素飽和の可能性が指摘されている(Ohrui and Mitchell, 1997)。本調査における神戸①、神戸②はこの報告による調査地の近傍に位置し、これらの渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の結果はこの報告と概ね一致している。この点について、利根川以西においては、利根川以东よりもさらに窒素飽和が進んでいる可能性が考えられる。しかしながら、窒素飽和現象の発現について明らかにするためには、降水による無機態窒素の収入量や流出のパターン、森林生態系における窒素の無機化や硝化のプロセス等についてさらに検討を行う必要がある。

3. 群馬県内における窒素濃度分布の原因の検討

渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の分布は、利根川以西と以东で異なることが示され、土壌抽出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の分布でも同様の傾向が示された。渓流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度について

図-10. 渓流水および土壌抽出水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の地域分布と風向

渓流水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度傾向と土壌抽出水中濃度傾向を地図にプロットし、地域分布を示す。そして、これに気象情報(AMeDASデータ)等から得た夏期における典型的な地上風向と、栗田ら(栗田・植田, 1986)によって示された、 NO_x 高濃度域を表示する。渓流水中濃度傾向については「図-6」の表示の再掲だが、円での表示をグレー棒表示に変更している。土壌抽出水も「図-6」と同様に、「図-8」による濃度平均値を概ね3段階に分類し(1.5以上・1.0以上1.5未満・0.8以下、ともに mg L^{-1})、白棒で示している。なお、各棒の高さ等は目安であり、実数を示すものではない。

は、流域内の植生の種や林齢の影響(戸田・生原, 2000; 江角・古井戸, 1981)、地質の影響(國松・駒井, 2004)、首都地域からの大気移動等気象環境との関連(青井ら, 2002)などが指摘されている。利根川以西、以东の調査地において植生や地質等に顕著な違いは認められず、気象環境の影響について検討を行った。群馬県西部における河川水中の窒素の濃度特性について、首都地域からの大気移動との関連が、すでに青井ら(青井ら, 2002)によって指摘されている。

図-10に本調査による渓流水および土壌抽出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の平均値の地域分布と、AMeDASによる夏期の典型的な地上風の風向(土器屋, 2001)、および栗田ら(栗田・植田, 1986)による NO_x の高濃度域を示す。栗田らによる報告では、午前中に首都地域で発生した NO_x 高濃度域が午後から内陸へ移動する(図-10に示す NO_x 高濃度域)ことが示されている。また、このような高濃度の NO_x の大気汚染物質を含む大気の移動は地上風と関連していることが示されている。とくに夏期には、長野県松本盆地に内陸部特有の熱的低気圧が発生し、この影響で首都地域からの大気が高崎市から群馬県西部を経て長野県に至る現象が起きやすいことが示されている。このような気象特性が関わることによって、群馬県地域を含む関東平野北西部は、とくに夏期に大気汚染物質を含む首都地域からの大気移動の影響を受けやすく、さらに大気移動の経路と関連して、利根川以东よりも、以西で、よりその影響が及びやすいことが考えられる。

V. 結 論

関東平野北西部における溪流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は全国的な値と比較して高く、これまでの報告による濃度の範囲を超える傾向を示す調査地の存在が認められた。とくに高濃度を示す調査地は利根川以西に位置し、土壌抽出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度もこれと同様の地域分布特性を示した。一方、利根川以東では利根川以西と比較して溪流水および土壌抽出水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度がともに低いことが示された。また、溪流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と降水量の相関関係は、利根川以東では認められたが、利根川以西では認められず、利根川以西では土壌の深部から流出する硝酸イオンが溪流水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に影響していることが考えられた。

このようなことから、利根川以西では、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が生物的な要求を上回って森林生態系に存在している可能性が考えられる。こうした現象の理由として、植生や地質の影響が考えられるが、とくに夏期における首都地域からの大気汚染物質の移動の影響がその一要因として考えられる。

しかしながら、地域分布特性をさらに明らかにするためには、大気汚染物質以外の要因について検討を進めるとともに、大気による NO_x 高濃度域の移動、森林域への窒素沈着、森林生態系への窒素の取込みと流出に至るプロセスについて、さらに詳細に検討を行う必要がある。

本研究を進めるにあたり、その調査に多大なるご協力をいただいた群馬大学工学部松本健作助手、特定非営利活動法人 NPO ぐんま飯島弘幸主任研究員に深く感謝申し上げます。また、ともに研究に励み情報の蓄積に努力していただいた長谷部知広氏、加部 誠氏、朝倉裕介氏、武藤吉春氏、太田 烈氏に深く感謝申し上げます。本研究の一部は文部科学省科学研究費（基盤 C）および財団法人河川環境管理財団ならびに財団法人住友財団の研究助成を受けました。ここに記して感謝を申し上げます。

引用文献

- Aber, J.D., Nadelhoffer, K.J., Steudler, P., and Mellilo, J.M. (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *Bioscience* 39: 378-386.
- 青井 透・森 邦広・池田正芳・阿部 聡 (2002) 利根川支流鐺川水系の高い窒素濃度と降雨中窒素との関係. 第 53 回全国水道研究発表会論文集: 580-581.
- 荒川正一 (2004) 局地風のいろいろ. 156 pp, 成山堂書店, 東京.
- 土壤環境分析法編集委員会編 (1997) 土壤環境分析法. 427 pp, 博友社, 東京.
- 江角比呂郎・古井戸良雄 (1981) 栄養塩及び有機物の動態に関する研究—多摩川上流域の硝酸態窒素. 文部省「環境科学」研究報告集 B74-R12-4: 227-234.
- 群馬県 (1993-2005) 土地分類基本調査. 群馬県農政部土地改良課, 群馬.
- 土器屋由紀子・岩坂泰信・長田和雄・直江寛明編著 (2001) 山の大气環境化学. 185 pp, 養賢堂, 東京.
- 平田建正・村岡浩爾 (1988) 溪流水質から見た森林の浄化機能に関する研究 (第 3 報) 溶存物質の流出機構. 国立公害研究所研究報告 R-116-'88: 53-74.
- 伊藤優子・三浦 寛・加藤正樹・吉永秀一郎 (2004) 関東・中部地方の森林流域における溪流水中の NO_3^- 濃度の分布. 日林誌 86: 275-278.
- 小林政広・小野寺真一・加藤正樹 (2000) 樹木の存在が林地土壌中の水分動態に与える影響. 日林誌 80: 287-294.
- 近藤裕昭 (2001) 大気環境の数値シミュレーション. 日本数値流体力学会誌 9(5): 133-139.
- 國松孝男・駒井幸雄 (2004) 農林地の水質化学研究の新展開. 環境技術 33: 364-370.
- 栗田秀實・植田洋匡 (1986) 沿岸地域から内陸の山岳地域への大気汚染物質の輸送および変質過程. 大気汚染学会誌 21: 428-439.
- 村岡浩爾・平田健正 (1988) 溪流水質から見た森林の浄化機能に関する研究 (第 4 報) 水収支と物質収支. 国立公害研究所研究報告 R-116-'88: 75-97.
- Ohrui, K. and Mitchell, M.J. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forested watersheds. *Ecol. Appl.* 7: 391-401.
- 戸田浩人・生原喜久雄 (2000) スギ・ヒノキ人工林小流域における植栽後 20 年間の溪流水質. 広域都市圏における土壌, 水および大気環境変動のモニタリングシステムの構築研究成果報告書. 東京農工大学, 東京. 143-152.
- 戸田浩人・笹賀一郎・佐藤冬樹・柴田英昭・野村 睦・市川 一・藤戸永志・鷹西俊和・清和研二・塚原初男・飯田俊彰・谷口憲男・中田 誠・桑原 繁・内田武次・春田泰次・井上 淳・八木久義・塚越剛史・蔵治光一郎・二田美穂・小野 裕・鈴木道代・今泉保二・山口法雄・竹中千里・万木 豊・川那辺三郎・安藤 信・中西麻美・西村和雄・山崎理正・長山泰秀・土肥奈都子・片桐成夫・小藤隆一・新村義昭・井上章二・江崎次夫・河野修一・藤久正文・岩松 功・今安清光・中村誠司・塚本次郎・野上寛五郎・榎木 勉 (2000) 全国大学演習林における溪流水質 (短報). 日林誌 82: 308-312.
- 塚本良則 (1998) 森林水文学. 319 pp, 文永堂出版, 東京.
- 堤 利夫 (1997) 森林の物質循環. 124pp, 東京大学出版会, 東京.
- 楊 宗興 (1996) 陸水学の視野を広げる: 陸域研究との相互作用. 広域都市圏における土壌, 水および大気環境変動のモニタリングシステムの構築研究成果報告書. 東京農工大学, 東京. 71-72.
- 山崎晴民・六本木和夫 (1992) 土壌中硝酸態窒素の簡易測定法. 埼玉園試報告 19: 31-36.