

## 森林流域の渓流水における硝酸イオンの濃度変化

山本 晶子\*・眞板 秀二\*

### 目 次

1. はじめに .....	59
2. 調査地 .....	60
3. 調査方法 .....	61
4. 結果 .....	62
5. 考察 .....	66
6. 結論 .....	69
謝辞 .....	70
引用文献 .....	70

### 1 はじめに

窒素は森林生態系において重要な栄養物質である。主に大気中に含まれる  $N_2$  ガスを微生物が固定したり、量的には多くないが降水に含まれる  $NO_3^-$  や  $NH_4^+$  といった無機態の窒素が生態系に流入したり、落葉・落枝等による生物遺体が分解されて植物から土壌の間で循環する（塚本, 1992; 久馬, 1997）。しかし、酸性降下物による人為的な窒素酸化物の負荷によって、養分循環に影響が出ることが指摘されるようになってきた（Aber et al. 1989）。 $NH_4^+$  は土壌に吸着されやすいが、 $NO_3^-$  は土壌水に含まれ、地下水や渓流水から下流域へと流出する。その結果、土壌や流出水の酸性化への影響も懸念される。よって、流域への窒素流入量を把握し、渓流水中の  $NO_3^-$  濃度に着目することは、窒素降下物の森林生態系への影響を検討する上で重要である。

近年の日本の研究では、伊藤ら（2004）によって、関東・中部地方の都市域周辺の森林流域では高濃度の  $NO_3^-$  濃度が渓流水から検出されたと報告されている。この現象の主な原因は、大都市圏から排出される汚染大気の流れにより、森林流域への窒素の高負荷が生じ、窒素流出に影響が生じたと考えられている。また戸田ら（2000）は、本研究の対象流域である流域の下流部で、全国的にも高濃度の  $NO_3^-$ 、 $NH_4^+$  が検出されたことを報告している。山本（2004）の研究でも  $NO_3^-$  濃度が高いことが分かっている。 $NO_3^-$  は大気汚染物質による湿性沈着で問題となっている

\* 筑波大学大学院生命環境科学研究科 Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

代表的な物質であり、大気汚染の寄与が疑われる。

そこで本研究では、渓流水、林外雨、林内雨をサンプリングし、渓流水中の各種溶存成分、特に  $\text{NO}_3^-$  の流出形態の違いによる変動特性について調べ、イオンの起源を考察すること、また各イオンの流域内への流入量・流出量を把握し、各溶存成分の起源を調べ、特に  $\text{NO}_3^-$  がなぜ高濃度で検出されるのかを解明する。そして森林流域への酸性降下物の影響について検討することを目的としている。

## 2 調査地

本研究は、長野県と山梨県の県境にある、筑波大学農林技術センター川上演習林内の鞍骨岳の沢で行った。以後この沢を鞍骨沢、図1に示す流域を鞍骨流域と呼ぶ。川上演習林は千曲川水系三沢川の源流部にあり、関東山地の最西端（北緯35.55度、東経138.30度）に位置する。東方には奥秩父連山があり、西方には野辺山ヶ原を隔てて八ヶ岳の山塊がある。

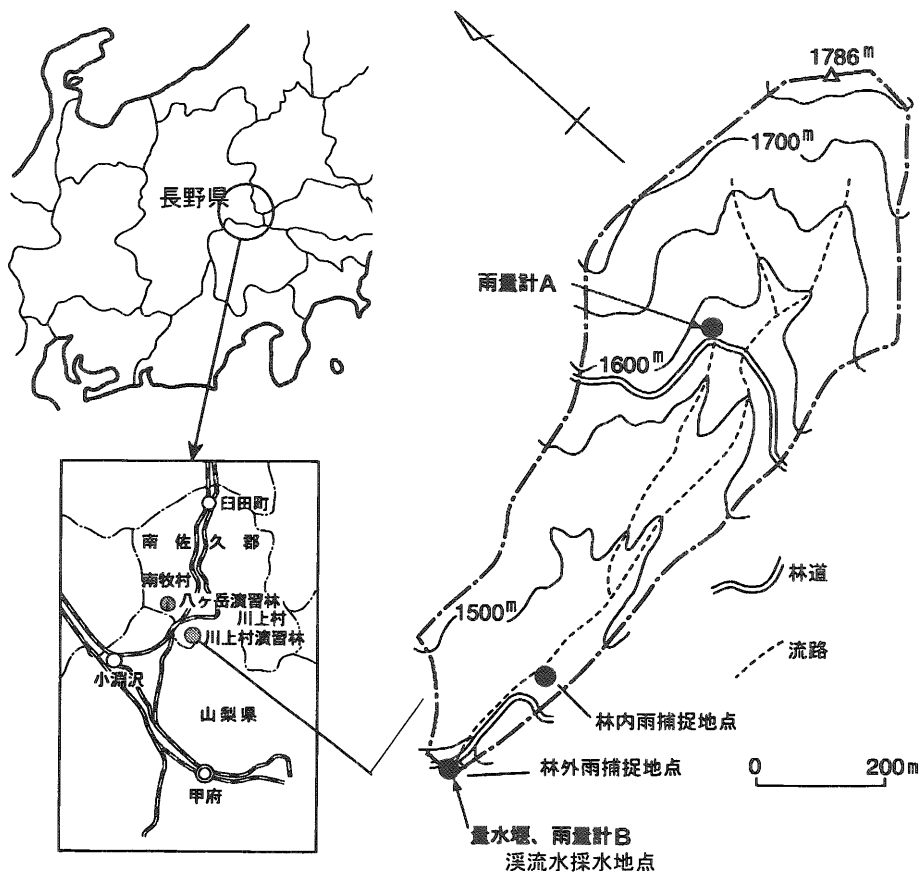


図1 鞍骨流域の概要

鞍骨流域の面積は37.8haで東西に細長く、標高は1450m～1786mである。1550m地点から平均勾配が約20度と急峻になり、土層は薄い。それより下流は平均勾配が約12度と比較的緩やかで土層が厚く堆積している。現流路はこの堆積土層を下刻しており、標高1480m地点から上流の河床や溪岸では基岩が一部露出している。崩壊は源頭部に見られるが規模は小さい（秋山ら、2002）。基盤岩は、飯盛山（1670m）、横尾山（1818m）などを構成する新第三紀飯盛山火山岩類である。年平均気温は6.2℃、年平均降水量は1470mmで、土壌は褐色森林土壌とクロボク土壌が主である。植生は流域中流部から下流部にかけてカラマツ人工林からなる針葉樹林で、上流部は天然林であるミズナラ、カンバ、カエデ類などからなる落葉広葉樹林で構成されている。

### 3 調査方法

#### 3-1 水文観測

流域出口に直角三角堰（ステンレス製刃型付）を設け（図1）、フロート式自記水位計を用いて、越流水深を1時間間隔で測定した。あわせて浮力式水位計で越流水深を1時間間隔でデータロガーに収録した。自記紙は1ヶ月巻、紙送り速度36mm/hで設定した。また流域出口および流域中流部に転倒マス式雨量計を設置して雨量観測も行なった。本研究では、フロート式自記水位計の観測データを元に流量を算定し、雨量は流域中流部の雨量計Aの観測データを使用した（図1）。但し冬期は雨量観測を行っていないため、データが欠測している。

#### 3-2 水質測定項目と採取場所

調査期間は渓流水の採水については2005年5月～10月、降雨の採水については2005年7月～2005年10月の間である。流域下流部（図1）で渓流水、林外雨、林内雨のサンプリングを行った。渓流水は流域の量水堰提上流部の流水から採取した。この採取地点での流域面積は37.8haである。平水時は月1回～3回の頻度で手動にて採水し、洪水時は手動と自動採水機（ISCO）で採水した。

さらに量水堰付近の解放空間で林外雨を、量水堰から約200m上流の森林内で林内雨を採取した（図1）。雨のサンプルを採取するために図2のように、直径21cm、集水面積約346cm<sup>2</sup>の漏斗を地上120cmの高さに設置し、チューブをつないで10リットルタンクに雨を溜めた。雨のサンプルは約1週間～2週間おきに取りに行き、タンク、チューブ、漏斗すべて取り替えて純水でよく洗って乾かした後、再び使用した。一部の洪水については数時間毎に採取を行い、雨の時間的な変化と水質の関係を調べた。

水質測定項目は、すべてのサンプルにおいてEC（電気伝導度）、pH、無機イオン（陽イオン： $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{NH}_4^{+}$ 、陰イオン： $\text{Cl}^{-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^{-}$ ）である。無機イオンは0.45μmのフィルタを通した後、イオンクロマトグラフィー（YOKOGAWA IC7000D）を用いて分析した。

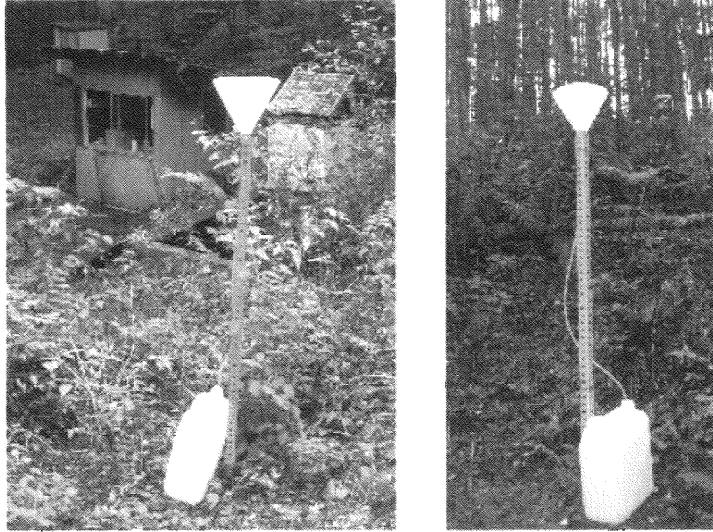


図2 林外雨（左）と林内雨（右）の採取装置

## 4 結果

### 4-1 降雨流出

2005年1月から10月までの1時間ごとの降雨と流量の変化の様子を、図3に表す。1月1日から4月5日までは流域中流部における雨量観測を行なっていないため、当該データが一部欠損している。鞍骨流域の年平均降水量は1470mmと全国平均に比べて降水量が少ない。気象庁の気象観測データによると、鞍骨流域が位置する長野県野辺山の2005年1月～10月の降水量は合計983mmで、平年の1300mm前後に比べて特に降水量が少ない年であった。2005年の年平均気温は7.2℃で、平年に比べ1℃ほど温かかった。

### 4-2 鞍骨沢の水質と季節変動

山本（2004）の鞍骨沢の渓流水質の平均と、広瀬ら（1988）による全国の渓流水質の平均を比較し、今回の研究で採水した2005年の平水時の平均とともに表1に示す。また、各溶存成分濃度の季節変動（山本，2004）を表2に示す。表2では、調査期間を2001年10月～2002年3月，2002年4月～2002年6月，2002年7月～2002年9月，2002年10月～2002年12月の4つに区分し，以下のように定義している。

- 2001年10月～2002年3月…冬季低水期1
- 2002年4月～2002年6月…春（豊水期）
- 2002年7月～2002年9月…夏（豊水期）
- 2002年10月～2002年12月…冬季低水期2

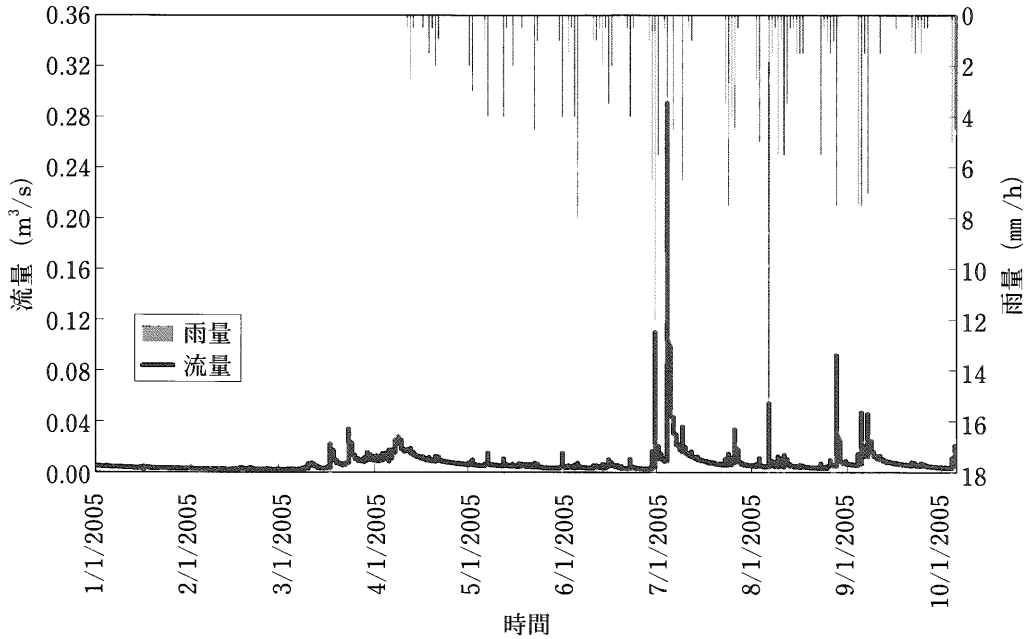


図3 2005年1月～10月のハイドロ・ハイトグラフ

表1 鞍骨流域と日本の渓流水質の平均値との比較

	pH	EC	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
		μS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
日本の渓流水質の平均	6.83	82.8	4.98	0.35	7.04	6.01	1.1	4.88	1.61
鞍骨流域2002年出口の平均	6.41	52.3	0.97	1.73	15.3	2.76	0.15	4.95	1.16
2005年5月～10月出口の平均	6.80	60.8	0.74	1.14	18.7	3.39	0.48	4.10	1.24

表2 2001年10月～2002年12月の各溶存成分濃度の季節変動

	冬季低水期1	春	夏	冬季低水期2
EC (μS/cm)	48.4	49.0	54.6	51.6
pH	6.54	6.53	6.03	6.25
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	1.00	0.84	0.87	1.04
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	1.75	1.65	2.03	1.04
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	13.2	13.3	18.1	14.8
Na <sup>+</sup> (mg/l)	2.79	3.22	3.06	2.70
K <sup>+</sup> (mg/l)	0.13	0.01	0.21	0.75
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	3.91	4.29	5.37	5.64
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	1.09	0.75	1.13	1.45

# 4-3 降雨の水質特性

2005年7月8日～2005年10月6日まで約3ヶ月間、流域内で林外雨と林内雨を採取した。サンプルは1週間～2週間おきに回収し、一部の雨は数時間ごとに採取した。合計16回の採取における、EC、pH、各溶存成分濃度を、表3、表4に示す。さらにサンプルごとの $\text{NO}_3^-$ イオン、 $\text{NH}_4^+$ イオンの濃度の違いを図4、図5に示す。

表3 林外雨の各溶存成分濃度

サンプ <sup>ル</sup> No	採水時期	EC	pH	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	
		μS/cm		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
1	2005/ 7 /26	7:21	17.9	4.50	0.14	0.88	2.87	0.11	0.24	0.36	0.10	0.24
2	2005/ 7 /26	10:00	7.30	6.25	0.52	0.42	0.96	0.36	0.21	0.27	0.07	0.10
3	2005/ 7 /26	13:00	4.10	5.98	0.12	0.76	0.72	0.22	0.00	0.25	0.07	0.00
4	2005/ 7 /26	18:00	3.58	6.25	0.05	0.60	0.76	0.11	0.00	0.28	0.07	0.05
5	2005/ 7 /27	0:00	3.50	6.24	0.37	0.33	0.36	0.40	0.27	0.30	0.02	0.00
6	2005/ 8 / 3	13:30	5.90	6.64	0.47	1.24	1.72	0.21	0.89	0.25	0.08	0.27
7	2005/ 8 /12	15:00	22.9	4.50	0.57	1.56	2.30	0.36	0.39	0.54	0.08	0.60
8	2005/ 8 /24	14:36	11.5	6.66	0.30	1.22	1.72	1.03	0.04	0.25	0.04	0.07
9	2005/ 8 /25	13:01	13.6	6.22	1.56	0.77	3.11	1.15	0.48	0.59	0.11	0.61
10	2005/ 8 /25	18:43	10.2	6.90	0.65	0.64	0.94	0.47	0.12	0.41	0.05	0.00
11	2005/ 9 / 7	8:20	5.40	5.83	0.69	0.12	0.36	1.17	0.08	0.10	0.00	0.00
12	2005/ 9 / 7	13:59	5.10	5.96	0.30	0.15	0.22	0.44	0.13	0.14	0.00	0.00
13	2005/ 9 /26	14:20	19.3	6.22	0.46	2.37	3.23	0.15	0.00	0.21	0.01	1.98
14	2005/10/ 5	13:00	5.22	6.30	0.12	0.20	0.68	0.20	0.20	0.26	0.02	0.00
15	2005/10/ 5	18:00	4.00	5.98	0.10	0.44	0.31	0.27	0.27	0.11	0.00	0.00
16	2005/10/ 6	6:00	8.08	5.66	0.17	1.73	0.60	0.47	0.00	0.31	0.02	0.00

表4 林内雨の各溶存成分濃度

サンプルNo.	採水時期		EC	pH	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
			μS/cm		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
1	2005/7/26	7:00	18.2	5.75	0.80	0.93	3.14	0.21	3.08	0.63	0.19	0.41
2	2005/7/26	10:00	7.00	5.74	0.25	0.49	0.93	0.17	0.69	0.23	0.05	0.01
3	2005/7/26	13:00	4.10	5.98	0.12	0.64	0.73	0.24	0.48	0.22	0.05	0.04
4	2005/7/26	18:00	5.80	5.57	0.08	0.46	0.83	0.14	0.39	0.27	0.05	0.01
5	2005/7/27	0:00	5.00	6.14	0.17	0.10	0.98	0.17	0.09	0.56	0.22	0.09
6	2005/8/3	13:30	35.8	6.14	1.59	1.42	2.22	0.25	7.25	0.70	0.38	0.50
7	2005/8/12	15:00	15.2	5.34	0.81	1.22	2.14	0.25	0.53	0.43	0.12	0.23
8	2005/8/24	14:36	26.3	6.24	1.17	0.74	2.17	0.54	6.71	0.71	0.23	0.00
9	2005/8/25	13:01	36.1	6.20	1.94	0.58	4.72	0.58	4.78	0.75	0.27	1.52
10	2005/8/25	18:43	22.2	6.26	0.85	0.38	2.35	0.66	3.83	0.41	0.10	0.64
11	2005/9/7	8:20	7.90	5.84	0.65	0.00	0.39	0.45	1.25	0.16	0.03	0.00
12	2005/9/7	13:59	9.10	6.21	0.96	0.05	0.33	0.45	1.18	0.21	0.00	0.00
13	2005/9/26	14:20	49.7	6.61	2.55	1.20	3.31	0.37	12.80	1.12	0.48	0.22
14	2005/10/5	13:00	23.6	6.10	1.44	0.19	0.94	0.28	0.28	0.52	0.17	0.00
15	2005/10/5	18:00	9.74	6.40	0.43	0.26	0.51	0.33	1.15	0.19	0.02	0.00
16	2005/10/6	6:00	11.0	6.05	0.65	0.67	0.29	0.26	2.24	0.14	0.01	0.00

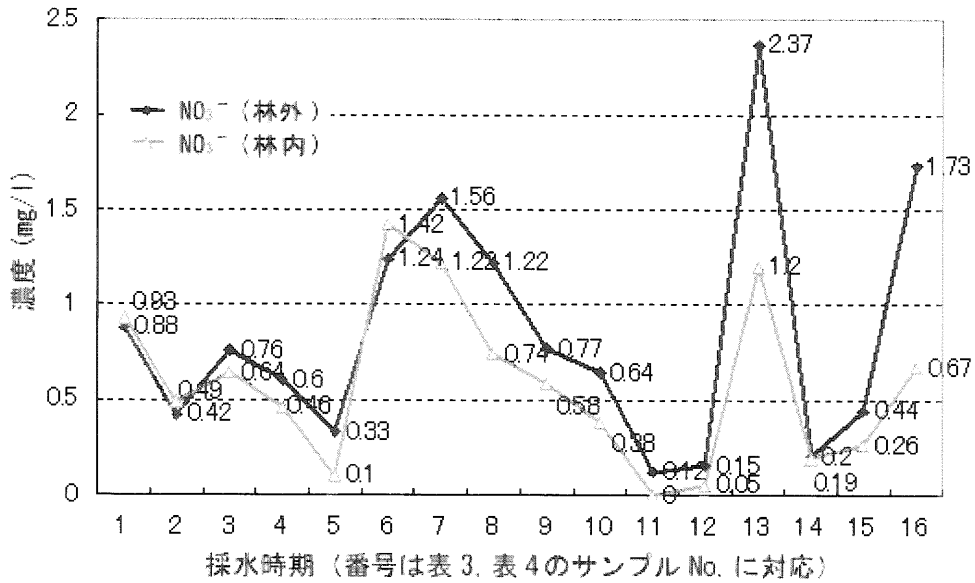


図 4 林内雨と林外雨の硝酸態窒素の濃度

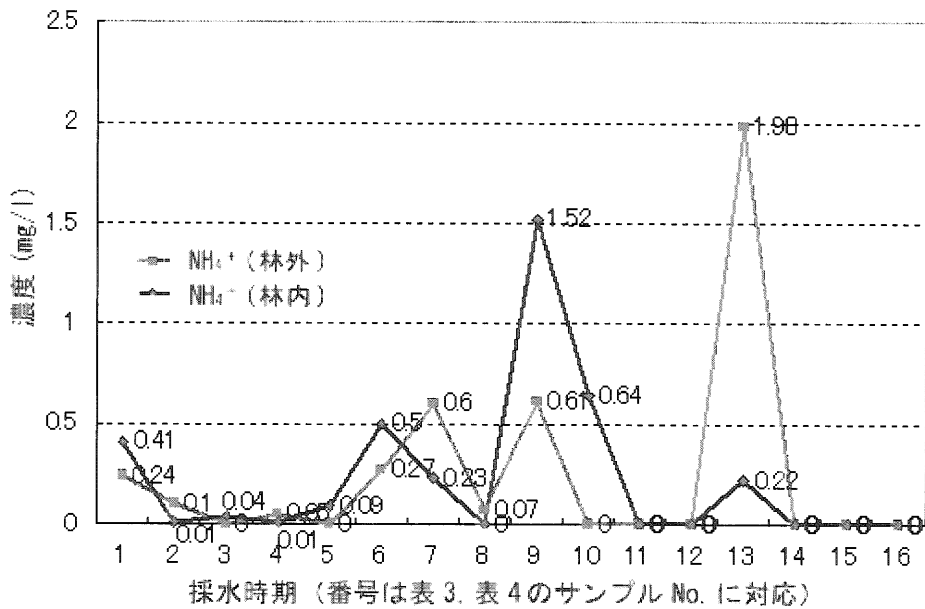


図 5 林内雨と林外雨のアンモニア態窒素の濃度

## 5. 考察

### 5-1 鞍骨沢の水質特性

鞍骨沢における水質は、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ イオン濃度が高いこと、海塩由来の $\text{Cl}^-$ は濃度が低いことなどが特徴として報告されている(山本, 2004)。今回の調査においては平水時における $\text{NO}_3^-$ 濃度は $0.77 \sim 1.44 \text{ mg/l}$ を示し、平均 $1.12 \text{ mg/l}$ という結果が見られた。また $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度は $10.57 \sim 21.19 \text{ mg/l}$ の範囲を示し、平均 $18.7 \text{ mg/l}$ であった。2002年の平均に比べ、 $\text{NO}_3^-$ 濃度はやや低く、 $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度はやや高いという傾向が見られた。また2002年の平均に比べ、 $\text{Cl}^-$ 濃度が低く、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 濃度が高いという傾向が見られた。

これらの違いは、2005年は年間降水量が $1031 \text{ mm}$ で、平年の $1470 \text{ mm}$ に比べ、 $400 \text{ mm}$ 程度、降水が少ない年であったという、年による違い、そして今回の調査では通年で調査を行ったのではなく、5～10月という短い調査期間だったことで生じた季節による違いがあると考えられる。 $\text{NO}_3^-$ は一般的に表層土壤中に多く溶存していると考えられ、洪水時に流量が増加すると多く流出する傾向がある(平田・村岡, 1988; 勝山, 2004; 志知, 2005など)。鞍骨流域では、2002年に20年に一度の規模の洪水があり、その後に $\text{NO}_3^-$ 濃度が非常に高い時期が続いたが、これは上述の理由によると考えられる。一方、2005年は $\text{NO}_3^-$ 濃度が低かったが、これは雨が少ないために流出する量も減少した可能性が考えられ、降雨量と雨の降り方が年による水質を変化させたと考えられる。このような気候の違いにより、2005年の $\text{NO}_3^-$ 濃度は低い値であったと推測される。

$\text{SO}_4^{2-}$ 濃度は鞍骨流域において夏に高い濃度を示す傾向がある(山本, 2004)。火成岩には硫化物や硫酸塩が溶け込んでいることから(藤本・柴田, 1966)、夏季に多量の降雨によって地下水に溶存する $\text{SO}_4^{2-}$ が押し出されて多く流出するため、濃度が上昇すると考えられる。2002年の夏の値は、2005年5～10月の平均濃度とほぼ変わらない値であり、 $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度については2002年と特に大きな違いのある変動はしていない。 $\text{Cl}^-$ は海塩由来の成分だと考えられ、日本海側から偏西風が吹く冬のほうが夏よりも濃度が高くなる。2002年の夏の値(表2)に比べて2005年の $\text{Cl}^-$ は若干低い値を示したが、これには2005年に雨が少なかったことによって樹木に乾性沈着した海塩成分が洗い流される機会が少なかったという可能性が考えられる。2005年の $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 濃度が高かったことについては、今回の調査だけでは原因はわからなかったが、年変動による違いや、分析による誤差なども考えられる。また $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ については、2001年10月～2002年12月の平均値とほぼ同じような値であった。

### 5-2 降雨の水質特性

鞍骨流域において2005年7月から10月の降雨の溶存成分濃度を加重平均し、各成分の平均濃度を算出した(表5)。降水中の $\text{NO}_3^-$ の濃度について、徳地ら(1991)は京都の森林流域で $0.25 \text{ mg/l}$ だったと報告している。また藤田ら(2000)は、降水モニタリングを行い、暖候期(4月～9月)における全国の $\text{NO}_3^-$ の降水の平均濃度を $0.69 \text{ mg/l}$ と報告している。鞍骨流域における林外雨の $\text{NO}_3^-$ 濃度は、京都の森林流域に比べて約3倍程度高い濃度である。一方、全国平均の



濃度と比べると、ほぼ同程度の値を示す。以上から、鞍骨流域における湿性沈着量は特に大きくはないということが示唆された。

表5 鞍骨流域における降雨の溶存成分濃度の平均値

	EC	pH	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
	μ S/cm		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
林 外 雨 の 平 均	10.7	5.64	0.43	0.73	1.37	0.58	0.18	0.25	0.04	0.26
林 内 雨 の 平 均	16.5	5.89	0.91	0.53	1.50	0.34	2.56	0.42	0.13	0.14

林外雨と林内雨を比較すると、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>は林内雨よりも林外雨で濃度が高く、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>は林内雨で濃度が高かった。植物にとってはNO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>は養分であるため、雨として流域内に降った際、すぐに吸着されることが原因と考えられる。このようにNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の濃度が林内雨で低くなる傾向は、他の流域でも見られている（酒井ら、2004）。また図4、図5を見ると、時期ごとに濃度の変動が非常に大きいことがわかる。中には2 mg/l 前後の値を取ることもあり、季節や気候条件などの要因によって大きく左右されることが考えられる。またこれらのイオン濃度の変動が大きいことについては、丸山ら（1964）、藤田ら（2000）でも報告されている。

Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>は海塩由来の成分でもあるため、乾性沈着した成分が林内雨に溶け込んで濃度が上昇すると考えられる。また、K<sup>+</sup>は林外雨に比べて林内雨の濃度が顕著に高い。これは、K<sup>+</sup>は溶脱されやすい物質であり（丸山ら、1964）、樹木の葉に多く存在しているため、雨が葉に触れることで成分が雨水中に溶け込むためと考えられる。この傾向は徳地ら（1991）、酒井ら（2004）などでも見られている。これよりK<sup>+</sup>は主に降雨時に流域内の森林からの溶脱によって供給されることが考えられる。

酸性雨はpH5.6以下の雨と定義されている。日本の降雨は一般的にpH4.8程度だと言われているが（吉永 私信）、鞍骨流域のpHは4.5～6.9を示した。これは日本の一般的な雨に比べてやや高い値で、酸性雨と通常の雨との境くらいの数値を示している。しかし、pHはH<sup>+</sup>の濃度を表す指標であって、直接的に大気汚染などによる「汚れ」を示すものではない。

原（1995）はpH5.6以下を酸性雨としてはいけない理由として、1）乾性沈着を無視することになる、2）沈着量の概念が欠落する、3）土壌中では微生物の作用によりNH<sub>4</sub><sup>+</sup>からH<sup>+</sup>が放出される、4）汚染されていない雨でもpH5.6以下のものはある、などといった理由を挙げて説明している。日本では中国からの黄砂の影響により、多量のエアロゾルが供給されている（井上ら、1998）。これらはCaCO<sub>3</sub>やMgCO<sub>3</sub>などの組成を持ち、酸性降下物を中和する機能を持つため、降雨の酸度が中和されている可能性がある。このような問題を考慮し、大気汚染による酸性降下物の影響をより化学的に表現できる指標として、原（1995）は以下のような指標を提案している。

— 原 (1995) —

$$pAi = -\log ([nss - SO_4^{2-}] + [NO_3^-])$$

鞍骨流域における  $pAi$  を、表 5-2 の林外雨の平均値を使って求めた。 $nss - SO_4^{2-}$  は海塩由来と考えられる  $Cl^-$  を用いて算出した。その結果、鞍骨流域では  $pAi = 4.4$  であった。原 (1995) は全国 23ヶ所の平均  $pAi$  は 3.9~4.4 であったと報告しており、鞍骨流域は大気汚染による酸性降水の影響が強いとは言えない結果であった。

以上より、鞍骨流域において都市部による大気からの酸性降水物の湿性沈着量は多いとは言えず、量的には全国の平均的なものであると考えられた。よって、渓流水中の  $NO_3^-$  濃度が高い原因は、大気由来による湿性沈着とは考えられず、その他の要因であると考えられる。今後は他の供給源を調査するため、引き続き林外雨・林内雨の採取・分析を行い、乾性沈着についても注目していく必要がある。

### 5-3 各溶存成分の流入量と流出量の比較

窒素の多量の供給が生態系に及ぼす影響について、大類 (1997) は 1) 樹木の栄養のアンバランスによる森林衰退、2) 植生の変化、3) 土壌や湖沼・河川の酸性化、4) 地下水・湖沼・河川及び海域の窒素汚染、5) 温室効果ガスの生産量の増加、が懸念されることを報告している。窒素が供給されて森林生態系へ固定されることは直接的な酸化には結びつかないが、多量に固定されることで無機化・硝化される窒素が増加し、結果として土壌や水の酸化に繋がる (Stoddard, 1994)。また、窒素が増加することで土壌中の C/N 比が変化し、土壌の腐植の発達を制限してしまう可能性も指摘されている (Aber et al., 1989)。このような事態を引き起こす可能性を生態系が示しつつある状態を窒素飽和と呼ぶ。窒素飽和の定義は様々だが、長期にわたって流域内からの窒素の流出量が流入量を超える (Agren and Bosatta, 1988) という定義や、1年を通して窒素の流出が生じる (Aber et al., 1989) という定義などがある。では、具体的に鞍骨流域における窒素の流入量・流出量はどの程度なのか。この論文では、Agren and Bosatta (1988) の定義を用いて窒素飽和について検討する。まず、表 5 の林外雨の溶存成分濃度を元に、流域内への流入量を求めた。

次に 2005 年のデータと、2001 年 10 月~2002 年 12 月のデータを利用し、流量と各溶存成分の負荷量の関係について統計回帰を行い、回帰式を作成した。その式を用いて、降雨サンプルを採取した 2005 年 7 月 8 日から 10 月 6 日までの約 3 ヶ月間の負荷量を推定した。ただし  $NH_4^+$  については、渓流水中から検出される濃度が非常に低く、データもほとんどなかったため、今回は負荷量を計算することができなかった。だが、一般的に  $NH_4^+$  は非常に微量の検出しかされないため、負荷量も小さな値であると予測される。

以上のような手法を用いて 7 月から 10 月の流域内への流入量と流域からの流出量を比較し、鞍骨流域の養分循環について考察した (表 6)。

表6 2005年7月～10月における各溶存成分の流入量と流出量

	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{NH}_4^+$
	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha
流入量	1.41	2.39	4.50	1.92	0.59	0.82	0.13	0.85
流出量	1.42	2.16	22.4	4.60	0.59	6.67	1.70	—

表6より、2005年7月～10月の各溶存成分は、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{K}^+$ は流入量と流出量がほぼ等しく、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ は流入量よりはるかに流出量が多いことがわかった。 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ は海塩由来の成分も含まれているものの、多くは流域内の地質由来の成分であり、その寄与の大きさが顕著にわかる結果となった。また、 $\text{SO}_4^{2-}$ は大気汚染物質である $\text{SO}_2$ の影響ではなく、主に火山地質によって高濃度で検出されるということが確認された。 $\text{Cl}^-$ はほぼ海塩由来の成分であると考えられ、量的には供給された分が流出するという傾向が見られた。 $\text{K}^+$ は植物にとって養分であり、林内雨に多く含まれていた成分であるが、生態系の系外から入ってきた分とほぼ等しい量を流亡している傾向が見られた。また、森林は一般的に貧栄養であり、 $\text{NO}_3^-$ は流入量より流出量が少ないと考えられていた。例えば岩坪・堤(1968)は、京都の森林流域における養分循環を評価し、1965年～1967年の平均で $\text{NO}_3\text{-N}$ の総流入量は $2.7\text{kg/ha}\cdot\text{yr}$ 、総流出量は $0.3\text{kg/ha}\cdot\text{yr}$ であったと報告している。しかし、今回の鞍骨流域における調査では、供給された量とほぼ等しい量が流出していた。通常の森林流域では、量的には少ないものの、降水による $\text{NO}_3^-$ の供給は栄養源として重要だと考えられている(岩坪・堤, 1968)。しかし鞍骨流域では流入量とほぼ等しい量が流出していることから、降雨からの栄養の供給がそれほど重要ではないと考えられる。よって栄養が制限されていない、すなわち貧栄養ではない状態であると考えられ、鞍骨流域が現在窒素飽和に近づいていることが示唆された。この原因は流域内に窒素が溜まっているからだと考えられ、これ以上 $\text{NO}_3^-$ の流入量が増加すると窒素飽和状態になる可能性がある。

## 6. 結論

鞍骨流域において、2005年5月～10月まで平水時の水質特性を調べた。その結果、鞍骨流域は全国的にも $\text{NO}_3^-$ と $\text{SO}_4^{2-}$ が高い濃度で検出されることが確認された。

$\text{NO}_3^-$ が渓流水中から高濃度で検出される要因の一つに、大気汚染による $\text{NO}_x$ の湿性沈着が挙げられているが、鞍骨流域ではこの影響は大きいとは言えず、その他の要因であると考えられた。 $\text{NH}_4^+$ は森林流域で微生物により硝化されて $\text{NO}_3^-$ となることから、鞍骨流域で $\text{NO}_3^-$ 濃度が高い要因の一つとして、 $\text{NH}_4^+$ の影響が考えられる。今後は流入してくる $\text{NH}_4^+$ にも着目する必要がある。また湿性沈着以外の流域内への流入源として、乾性沈着が考えられる。鞍骨流域の周辺には牧場が点在しており、周辺地域にある牧場の $\text{NH}_4^+$ 放出による影響も考えられる。今後はより広い周辺地域での水のサンプリングや土壤中に吸着されている $\text{NH}_4^+$ 量の測定、牧場における $\text{NH}_4^+$ の発生量の観測などを行い、この点についても追求する必要がある。

鞍骨流域における  $\text{NO}_3^-$  の流入量と流出量は2005年7月上旬～10月上旬までについてはほぼ同程度の値であった。一般的に森林流域は栄養が制限された貧栄養状態にあり、窒素は流入量が流出量を上回る傾向が見られるので（岩坪・堤 1968, Aber et al 1989），流入量と流出量がほぼ等しいということは、鞍骨流域が貧栄養の状態ではないことを示している。したがって、鞍骨流域では、既に流域内に窒素が蓄積されつつある可能性が考えられ、窒素飽和に近づきつつあると考えることができる。結局、鞍骨流域において溪流水からの  $\text{NO}_3^-$  濃度が高い原因は、流域が窒素飽和に近づきつつあるため栄養が制限されず、流入してきた  $\text{NO}_3^-$  とほぼ同じ量の  $\text{NO}_3^-$  を流出しているためだと考えられる。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、鞍骨流域における過去の水質分析データを提供してくださった、元筑波大学助教授の内田煌二先生に深く御礼を申し上げます。

長野県の調査において、サンプルの採取方法や実地調査の心得を多く教えてくださり、分析方法についてもご指導いただいた森林総合研究所の吉永秀一郎様、釣田竜也様にも厚く御礼を申し上げます。

また黒田先生を始め、筑波大学農林技術センターハケ岳事務所の職員の方々にも支えていただきました。ありがとうございました。

## 引用文献

- Aber, J.D., K.J. Nadelhoffer, P. Steudler and J.M. Melillo (1989) : Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience*, **39**, 378-386
- Agren, G.I. and E. Bosatta (1988) : Nitrogen Saturation of Terrestrial Ecosystems. *Environmental Pollution* **54**, 185-197
- 秋山智弘・眞板秀二・天田高白（2001）：山地溪流河床におけるstep-pool構造の解析. 筑大演報 **17**, 53-76
- 藤本治善・柴田秀賢（1966）：地質学ハンドブック. 610pp, 朝倉書店, 東京
- 藤田慎一（1996）：日本列島における硫黄化合物の収支. 環境科学会誌 **9** (2), 185-199
- 藤田慎一・高橋 章・速水 洋（2000）：日本列島における硝酸イオンとアンモニウムイオンの湿性沈着量. 環境科学会誌 **13** (4), 491-501
- 原宏（1995）：酸性雨とは？；定義とその生成機構. 天気 **42** (5), 265-271
- 平田建正・村岡浩爾（1988）：森林域における物質循環特性の溪流水質に及ぼす影響. 土木学会論文集 **399**, 131-140
- 広瀬 顕・岩坪五郎・堤 利夫（1988）：森林流出水の水質についての広域的考察. 京大演報 **60**, 162-173

- 井上克弘・濱浦尚生・平舘俊太郎・葛西 攻（1998）：東北日本の雨水中の硫酸イオンとカルシウムイオン濃度の季節変動，起源および広域風成塵降下量との関係．日本土壤肥料学会誌 **69**, 445-456
- 伊藤優子・三浦 覚・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渓流水中の $\text{NO}_3^-$ 濃度の分布．日林誌**86**, 275-278
- 岩坪五郎・堤利夫（1968）：森林内外の降水中の養分量について（Ⅲ）流亡水中の養分量について．京大演報**39**, 140-156
- 勝山正則・大手信人・小杉賢一朗（2004）：風化花崗岩山地源流域の渓流水 $\text{NO}_3^-$ 濃度形成に対する水文過程のコントロール．日林誌**86**, 27-36
- 久馬一剛（1997）：最新土壌学．216pp, 朝倉書店, 東京
- 丸山明雄・岩坪五郎・堤 利夫（1965）：森林内外の降水中の養分量について（第1報）．京大演報**36**, 25-39
- 大類清和（1997）：森林生態系での"Nitrogen Saturation"—日本での現状．森林立地 **1**, 1-9
- 酒井寿夫・仙石鐵也・原 光好・森澤 猛・埴田 宏・岩本宏二郎・荒井國幸・小澤孝弘（2004）：酸性雨等の森林生態系への影響モニタリング—木曾御岳山の亜高山帯針葉樹林における降水の調査—．森林総研研究報告Vol. 3, No. 3, 297-317
- 志知幸治・橋本 徹・三浦 覚・相澤州平・池田重人（2005）：東北地方内陸部の森林流域における年間及び融雪期の渓流水質．日林誌**87**, 340-350
- Stoddard.J.L.(1994) : Long-term changes in watershed retention of nitrogen: its causes and aquatic consequences, in Environmental chemistry of lakes and reservoirs. 223-284. Advances in Chemistry Series No.237, Am.Chem.Soc.Washington
- 戸田浩人ほか46名（2000）：全国大学演習林における渓流水質．日林誌. **82**, 308-312
- 徳地直子・辻 明子・岩坪五郎（1991）：山地小流域における降水と流出水の水質．京大演報 **63**, 60-67
- 塚本良則（1992）：森林水文学．319pp, 文永堂, 東京
- 山本晶子（2004）：山地森林小流域における降雨流出と水質変動に関する研究．43pp, 平成16年度筑波大学生物資学類卒業論文

（2007年1月15日 受理）