

## 研究成果報告書

- ・機関及び学部、学科等名：  
富山県立大学 大学院工学研究科 環境工学専攻、工学部 環境・社会基盤工学科
- ・所属ゼミ：川上ゼミ
- ・指導教員：川上智規
- ・代表学生：今井裕規
- ・参加学生：伊藤智紀、尾山広成、中村ひかり、高橋美優

### 【研究題目】 呉羽山における窒素飽和緩和の調査

#### 1. 課題解決策の要約

通常渓流水は窒素を含まない。これは、集水域に沈着する降雨や乾性降水物に含まれる窒素化合物が森林によって吸収されるためである。ところが、富山県の呉羽丘陵の渓流では、集水域に人為的汚染が無いにもかかわらず高濃度の硝酸イオンが流出しており、平均で7.9 mg/Lに達する。これは、集水域に沈着する窒素化合物の量より多くの硝酸イオンが集水域から流出しているということであり、森林の衰退を示唆している。この現象を窒素飽和と呼び、大気からの窒素沈着量が過多である場合に生じるとされる。近年、大気からの窒素沈着量が減少するとともに、呉羽山の渓流水も硝酸イオン濃度が低下しているとの報告もある。しかしながら、一年間を通じてのデータが無いため、本研究では窒素沈着量減少に伴う窒素飽和からの回復を調査した。方法は、現地の渓流水の流量データの取得と継続的なサンプリングによって、窒素の流出量や流出パターンを解析し、20年前のデータと比較した。また、降雨中の窒素濃度を測定し、窒素の流出量と比較した。土壌中の微生物による窒素の無機化速度と硝化速度を測定し20年前のデータと比較した。その結果、硝酸イオンの渓流水への流出パターンに変化が見られた。しかしながら、渓流水による窒素の流出量は降雨による沈着量を上回る状況に変化は無かった。また、無機化速度と硝化速度に大きな変化は無く、窒素飽和状態は継続していることがわかった。

#### 2. 調査研究の目的

窒素飽和現象は森林集水域から硝酸イオンが流出する現象であり、Aberらによって提唱された。森林生態系が必要とする以上に、大気からの窒素沈着量が大きい時に生じるとされる<sup>1)</sup>。窒素飽和により土壌が酸性化し、その最終段階においては森林が衰退することによってより多くの硝酸イオンが集水域土壌から流出するとされる<sup>2)</sup>。呉羽山の渓流水は世界でも最も高濃度の硝酸イオンが流出していることが知られている。また、森林の衰退も見られ、典型的な窒素飽和現象の様相を呈している<sup>3)</sup>。この現象は20年前から観測されているが、近年、大気からの窒素沈着量が減少するとともに、呉羽山の渓流水も硝酸イオン濃度が低下しているとの報告もある。本調査研究では、現在でも窒素飽和状態が継続しているのかどうか評価することが目的である。

#### 3. 調査研究の内容

呉羽丘陵の地図を図1に示す。図1中の①の百牧谷の渓流水は1999年より継続的にサンプリング

し分析している。従って20年間にわたる水質のデータが存在する。2019年7月より隔週で渓流水のサンプリングを実施した。流量は百牧谷に三角堰を設置し記録した。百牧谷以外でも、図1中の②～⑤において渓流水のサンプリングを行い、流量の大小に応じて硝酸イオン濃度がどのように変化するかについて調べた。百牧谷の集水域土壌において、2019年8月にA層より土壌を採取し、C/N比、窒素含有量、微生物による無機化速度と硝化速度を測定した。それらを2002年8月のデータと比較した。C/N比は土壌を風乾後CHNコーダで測定した。無機化速度と硝化速度は、土壌を、3°C、15°C、30°Cで4週間培養し、アンモニウムイオンと硝酸イオンを抽出し、培養前後の増減から求めた。

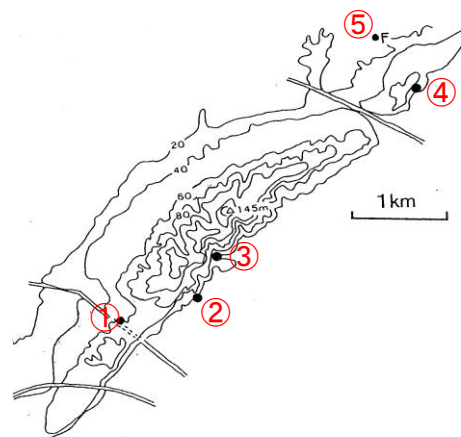


図1 呉羽丘陵でのサンプリング地点

#### 4. 調査研究の成果

1999年と2019年の百牧谷における流量と硝酸イオン濃度との関係を図2と図3に示す。1999年には流量の対数に対して硝酸イオン濃度が直線的に変化したが、2019年では流量に対して直線的に硝酸イオン濃度が変化した。この結果、百牧谷の年間平均流量である1.4 L/secと比較すると1999年の硝酸イオン濃度は7.2 mg/Lであるのに対して、2019年では4.2 mg/Lと1999年の58%とかなり低い。一方、2009年における流量と、図2と図3から得られた流量と硝酸イオン濃度との関係を用いて1999年と2019年の流出パターンによる硝酸イオン濃度を推算した結果を図4に示す。推算した硝酸イオン濃度から流量加重平均を求めると1999年では7.9 mg/L、2019年では6.5 mg/Lと1999年の82%

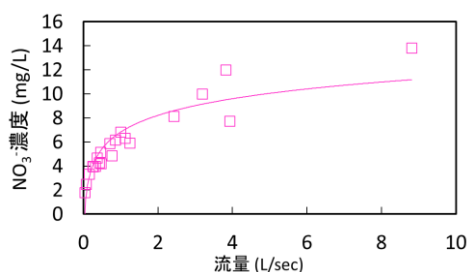


図2 流量に対するNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度の変化 (1999年)

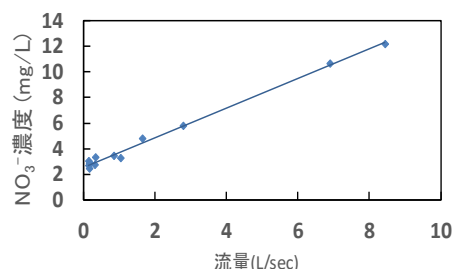


図3 流量に対するNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度の変化 (2019年)

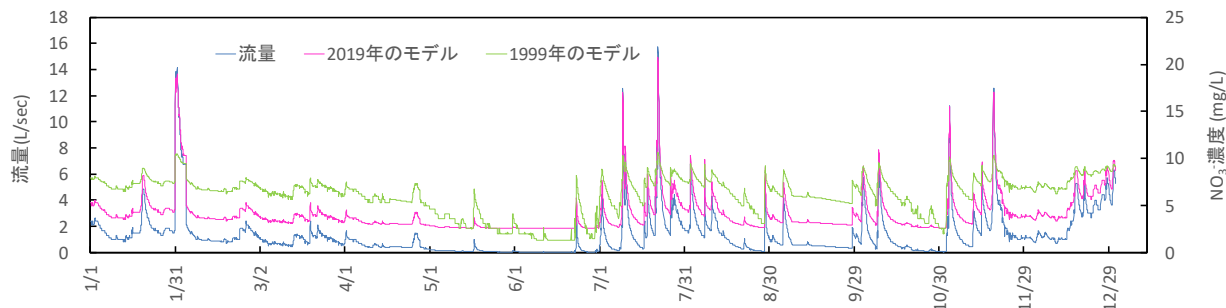


図4 2009年の流量変化とNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度推算値

となり、差が縮小した。1999年の流出パターンでは流量が大きくなると頭打ちになるのに対し、2019年では直線的に濃度が上昇するため、流量と濃度が共に上昇し、流出量として非常に大きくなる。こ

のことが、流量加重平均で表した時に差が縮小する原因である。すなわち、流出パターンが変化することにより、流量がそれほど大きくない時には2019年の硝酸イオン濃度が小さいが、流量加重平均すなわち流出量で表現するとやはり高濃度の硝酸イオンが流出していることが判明した。集水域からの硝酸イオンの流出量は1999年と2019年で、それぞれ2230 mol/ha/年ならびに1850 mol/ha/年の流出量に相当する。百牧谷集水域では林内雨の窒素沈着量はおおよそ1600 mol/ha/年であるため、2019年の流出パターンを用いても、窒素の沈着量より硝酸イオンの流出が多く、窒素飽和状態が継続していると考えられる。

図1の①～⑤の地点における、流量が大(6.9 L/s)中(1.65 L/s)小(0.12 L/s)の時の硝酸イオン濃度を、2005年～2006年の観測値と2019年の観測値を比較して表1に示す。流量は百牧谷における流量である。2019年の採水時の流量に合わせるために、2005年～2006年のデータでは、流量と硝酸イオン濃度を二次式で近似し、硝酸イオン濃度を推定した。全体的に2019年では2005年～2006年よりもNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の流出濃度が低下している。ここでも2005年～2006年よりも2019年では流量とNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度が比例関係に近づいており、流出パターンの変化が見られた。

表1 流量に対する硝酸イオン濃度の変化

単位 (mg/L)

流量 (L/s)	①呉羽山百牧谷		②金屋		③富大西		④民族民芸村		⑤図書館	
	2005~ 2006年	2019年	2005~ 2006年	2019年	2005~ 2006年	2019年	2005~ 2006年	2019年	2005~ 2006年	2019年
0.12	4.40	2.63	5.05	3.50	5.05	2.80	4.08	2.80	1.17	2.13
1.65	5.60	4.76	5.77	5.96	6.11	5.15	3.59	1.90	2.06	4.33
6.90	16.2	10.7	15.1	15.0	14.6	13.3	14.7	4.73	12.7	6.81

集水域土壌のN含有量とC/N比の変化を表2に示す。N含有量には大きな変化が見られなかったが、C/Nは2002年には18であったものが、2019年には12へと低下していた。C/N<25で窒素飽和とされていることから、この値を大きく下回り、窒素飽和状態が継続していることを示している。

表3に2002年と2019年における無機化速度と硝化速度を示す。無機化速度は2002年に比較すると2019年では上昇がみられ、硝化速度には大きな変化はなかった。このことから、百牧谷土壌では依然高い硝化活性を維持しているものと考えられる。

表2 百牧谷集水域土壌のC/N

	2002年	2019年
窒素含有量 (g/100g 乾土)	0.55	0.58
C/N	18	12

表3 百牧谷集水域土壌の無機化速度と硝化速度 (2002年と2019年の比較)

2002年	Nitrification	Mineralization	2019年	Nitrification	Mineralization
	μeq/100g 乾土	μeq/100g 乾土		μeq/100g 乾土	μeq/100g 乾土
30℃	468	449	30℃	442	855
15℃	152	134	15℃	218	223
3℃	89	80	3℃	58	122

## 5. 調査研究に基づく提言

窒素飽和は 20 年間継続していることが明らかとなった。この 20 年の間、他の地域の窒素沈着量と比較しても特に呉羽丘陵が大きいということは無い。従って、過去の窒素沈着により蓄積された窒素が引金となって窒素飽和を起こしているものと考えられる。従って、窒素飽和によって、一度森林衰退が生じると、森林が保持していた窒素が硝酸に変換され、土壌を酸性化し、さらに森林衰退を助長するという悪循環に陥り回復は困難である。通常、硝化菌は自己が生成する硝酸イオンによって生育環境が酸性化すると pH が 5 程度でその活動を停止するとされるが<sup>4)</sup>、呉羽丘陵の渓流水は pH が 4 台の前半にまで低下することが観測されている。

## 6. 課題解決策の自己評価

これらの研究成果は、以下の学会等で発表ならびに発表予定である。

日本水環境学会中部支部研究発表会（静岡市、2019 年 11 月）、課題名：富山県の呉羽丘陵における窒素飽和現象 20 年間の観測より

富山環境フェア（2019 年）課題名：呉羽丘陵における窒素飽和緩和の調査

日本水環境学会年会（岩手大学、2020 年 3 月予定）、課題名：富山県呉羽丘陵溪流における硝酸イオンの流出

International Forum on Ecotechnology(台湾、嘉義大学、2020 年 2 月予定) 課題名:Nitrate Leakage into a Stream on Kureha Hill in Toyama Prefecture, Japan

窒素飽和を緩和するための解決策を見出すことはできなかったが、未然に防ぐことの重要性を広く伝えることはできたのではないかと評価する。

## 参考文献

- 1) Aber, J. D., K. J. Nadelhoffer, P. Steudler, and J. M. Melillo Nitrogen Saturation in Northern Forest Ecosystems, *BioScience*, Vol. 39, No. 6, 378-386, 1989
- 2) Stoddard, J. L. Long-Term Changes in Watershed Retention of Nitrogen Environmental Chemistry of Lake and Reservoirs *Adv. Chem. Ser. Vol. 237*, 223-284, 1994
- 3) T. Kawakami, H. Honoki and H. Yasuda, Acidification of a Small Stream on Kureha Hill Caused by Nitrate Leached from a Forested Watershed, *Water, Air, and Soil Pollution*, 130, 1097-1102, 2001
- 4) 高橋令二、佐藤一郎、徳山龍明, アンモニア酸化菌研究の動向 *化学と生物* Vol. 44, No. 7, 439-446, 2006