

森林溪流水の硝酸濃度を決定する環境要因を広域スケールで解明 -機械学習により視覚化-

概要

牧野奏佳香 京都大学大学院農学研究科 博士課程学生、徳地直子 同フィールド科学教育研究センター 教授、駒井幸雄 大阪工業大学工学部 名誉教授、國松孝男 滋賀県立大学環境科学部 名誉教授の研究グループは、気候条件等に勾配のある近畿地方を対象に、森林溪流水の硝酸(NO_3^-)濃度を規定する環境要因を、機械学習を用いて初めて広域スケールで解明しました。

窒素(N)が生態系にとって過剰になると溪流から N が流れ出し、溪流水の NO_3^- 濃度が高くなる傾向があります。これを窒素飽和現象といいます。このことは水資源の劣化というだけでなく、土壌の酸性化や生物多様性の低下を引き起こす可能性があります。そのため溪流水 NO_3^- 濃度を規定する要因の解明が望まれます。

本研究では大気からの N 降水量だけでなく降水量や気温等の気候条件も重要であり、これらが一般的な規定要因であることが示されました。特に、雪の降り方の影響が示唆されました。つまり、生育期に森林に降下した N は生態系に取り込まれ、蓄積され、窒素飽和に至り、溪流に流出します。一方、多雪地域である日本海側では休眠期に降下した N の多くが積雪中に留まって生態系に取り込まれず、融雪期に一気に流出するため、窒素飽和に至りにくいと考えられました。これが、日本海側では近畿全体に比べて N 降水量は多いにもかかわらず溪流水 NO_3^- 濃度は低くなった原因と解明されました。

本成果は、2021 年 5 月 20 日に英国の国際学術誌「Hydrological Processes」にオンライン掲載されました。



図 近畿全体と日本海側(多雪地域)における森林溪流水の NO_3^- 濃度形成のメカニズムの違い

1. 背景

窒素(N)は森林の成長にとって重要な元素の一つです。しかし、森林生態系が必要とする量よりも多くの N が森林に存在すると、硝酸(NO_3^-)^{*1} が生成され土壌が酸性化し、生物多様性が低下し、木が枯れる場合まであります。同時に、土壌から NO_3^- が流出し始め、溪流水の NO_3^- 濃度が高くなります。こ

の現象を窒素飽和と言います。NO₃⁻濃度が高い河川水は河川中の生物相に影響を及ぼし、農業・工業・水産用水として適さないことから、渓流水の NO₃⁻濃度が高いことは憂慮すべき状態です。そのため、渓流水 NO₃⁻濃度を規定する要因の解明が望まれます。

これまで化石燃料の燃焼に伴い放出された N が大気から負荷されることが、渓流水 NO₃⁻濃度の上昇、窒素飽和の最大の要因の一つと考えられてきました。しかし、どの森林でも N 降下量に規定されている訳ではありません。国内の広域スケールでは、日本海側がその一例です。日本海側では主に冬季に、北西の季節風によってアジア大陸から N を含む大気汚染物質がもたらされ、N 降下量が国内でも多い水準となっています。それにもかかわらず、渓流水の NO₃⁻濃度は国内で低い水準にあります。

渓流水 NO₃⁻濃度に影響を及ぼす要因として、N 降下量の他に、気候条件や地形、植生、土壌、地質、土地地用履歴が候補として挙げられるため、本研究ではこれらの要因を、N 降下量や気候条件に勾配があり、日本海側を含む近畿地方を対象に、広域スケールで検討しました。その結果から、渓流水 NO₃⁻濃度の一般的な規定要因について知見を得るとともに、日本海側と近畿全体における規定要因の違いを明らかにしました。

2. 研究手法・成果

福井・京都・滋賀・大阪・奈良・三重・和歌山の 7 府県において 1691 本の森林渓流から平水時^{※2}に渓流水を採取し、NO₃⁻濃度を測定しました。次に、各採水地点の集水域^{※3}に対して N 降下量、気候条件(降水量・積雪深・気温等)、地形、植生、土壌、地質、森林率(30 年前と現在)とその変化を、ArcGIS(地図上でデータを編集するソフトウェア)を用いて求めました。最後に、機械学習の一つである Random Forest^{※4}を用いて渓流水 NO₃⁻濃度を規定する要因を、上記の環境要因から近畿全体と日本海側においてそれぞれ求めました。

近畿全体・日本海側のいずれでも、N 降下量だけでなく降水に関する要因の重要度が高かったことは興味深く、梅雨や台風といった雨の多い日本の特徴が NO₃⁻流出にも反映されていました。生育期^{※5}の降水量は渓流水 NO₃⁻濃度と負の相関を示したため、台風等の大雨が土壌表層の NO₃⁻を洗い流して土壌の N 蓄積量を減少させ、あるいは多量の水分が土壌下方に浸透して地下水を希釈し、その結果平水時の渓流水 NO₃⁻濃度を低下させたと考えられました。

近畿全体ではその他に、生育期の N 降下量、温量指数^{※6}、地形湿潤指数^{※7}等が渓流水 NO₃⁻濃度を規定する重要な要因でした。これらが渓流水 NO₃⁻濃度と正の相関を示したことから、生育期に森林に降下した多量の N が生物による N 保持を通して生態系に取り込まれ、土壌中で無機化されて NO₃⁻が多く生成され、その結果平水時の渓流水 NO₃⁻濃度が上昇したと考えられました。一方、日本海側では積雪深も重要な要因で、渓流水 NO₃⁻濃度と負の相関を示したことから、休眠期^{※5}に多量に降下した N の多くが積雪中に留まって生態系に取り込まれず、融雪期に一気に流出したために、平水時の渓流水 NO₃⁻濃度が低下したと考えられました。つまり、日本海側では積雪が多いという特徴が、近畿全体に比べて N 降下量が多いにもかかわらず渓流水 NO₃⁻濃度は低かった原因であることが明らかになりました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究により、N 降下量だけでなく気候条件も渓流水 NO₃⁻濃度の一般的な規定要因であることが示唆されました。さらに、森林生態系内の N 蓄積・循環が渓流水 NO₃⁻濃度と関係が深いことも、Random Forest を用いて初めて統計的に確認されました。以上のことから、Random Forest が物質循環研究に有

用であると判明したので、今後は降水量が比較的少ない瀬戸内海や温暖な南九州等も対象に、本研究の手法を活用して渓流水 NO_3^- 濃度の規定要因の解明を進めていきたいと考えています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、公共財団法人 河川財団(助成番号 22-1211-03023、23-1211-025)、日本学術振興会 科研費(助成番号 15H04515)、国立研究開発法人 科学技術振興機構 戦略的国際共同研究プログラム SICORP(助成番号 JPMJSC19C3)の助成を受けて行われました。

<用語解説>

※1： NO_3^-

窒素は有機態や無機態(アンモニウム態(NH_4^+)、硝酸態(NO_3^-))として土壤中に存在しますが、土壌はマイナスに帯電しているため、土壌から流出する窒素の多くは NO_3^- が占めます。

※2：平水時

降雨出水時、融雪時、渇水時以外の流量が落ちついている間のことを平水時と言います。降雨出水、融雪、渇水によって渓流水水質は著しく変化するため、水質の空間分布を調べる場合等、流量の変化の影響を避けたい場合には平水時に採水を行うことがあります。

※3：集水域

溪流のある地点に対して、森林に降ってきた雨がその地点に流下してくる範囲のことで、山の尾根が集水域の境界になります。

※4：Random Forest

機会学習の一つで、精度が高く安定した結果が得られるという特徴があるため、近年様々な生態学研究に用いられ始めている手法です。説明変数(本研究の場合では環境要因)から目的変数(本研究の場合では渓流水 NO_3^- 濃度)を予測するとともに、目的変数を予測する際に重要な説明変数が求められます。

※5：生育期、休眠期

月平均気温が 5°C 以上の月を生育期、 5°C 未満の月を休眠期と定義しました。

※6：温量指数

温量指数は生育期の月平均気温の合計で求められ、NDVI(植生の分布状況や活性度を示す指標)と相関があります。

※7：地形湿潤指数

地形湿潤指数 $= \log_e(\text{集水域面積} / \tan(\text{集水域傾斜(ラジアン)}))$ で求められ、集水域の土壌水分の分布をよく再現すると言われています。

<研究者のコメント：牧野 奏佳香>

本研究はまず、共同研究者の先生方が膨大な渓流水の水質データを集められるところから始まりしました。私はこのデータを、試行錯誤を重ねつつ ArcGIS や Random Forest を用いて解析しました。例えば ArcGIS での作業は数ヶ月の時間を要しますが、研究室メンバーにも助けられつつ一部の作業を自動化しました。広域スケールで渓流水 NO_3^- 濃度の決定要因を解明するという、初の試みに貢献できたことはこの上ない喜びあり、Random Forest が物質循環研究にも有用であると身をもって実感しま

した。

<論文タイトルと著者>

タイトル： Environmental factors regulating stream nitrate concentrations at
baseflow condition in a large region encompassing a climatic gradient
(気候条件に勾配のある広域において平水時の渓流水硝酸濃度を規定する環
境要因)

著 者： 牧野奏佳香、徳地直子、駒井幸雄、國松孝男

掲 載 誌： Hydrological Processes

D O I： 10.1002/hyp.14200