

森林の健康度を判定する新しい指標を発見！

名古屋大学環境学研究科の中川 書子 准教授、角皆 潤 教授らの研究グループは、アジア大気汚染研究センターの佐瀬 裕之 部長らと、森林域から渓流水などを通じて流出する硝酸 (NO_3^-)^{注1}の中の酸素の同位体組成^{注2}を測定することで、降水などを通じて大気から森林に沈着した硝酸（「大気硝酸」と呼ばれる）の中で、森林に利用されずに直接森林域の外に流出する硝酸の比率（「直接流出率」と呼ばれる）を高精度に求めることに成功しました。さらに、こうして求めた「大気硝酸の直接流出率」が、森林の窒素飽和^{注3}のステージ（＝森林の健康度）を判定する新しい指標として活用できることを見出しました。

今後は、渓流水中の硝酸が高濃度化し、森林域から多量の窒素が流出するようになる窒素飽和現象について、これを他の窒素汚染と容易に区別できるようになります。また、窒素飽和緩和策^{注4}として提唱されている間伐などの「森林管理」が本当に有効なのかどうか、容易に検証できるようになります。将来的には、各森林域から流出する渓流水や地下水の水質保全に貢献することが期待されます。

この研究成果は、平成 30 年 11 月 22 日付で欧州地球科学連合（European Geosciences Union）の科学雑誌「Biogeosciences」に掲載されました。

この研究は、環境省越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング事業と、平成 29 年度から始まった文部科学省科学研究費助成事業基盤研究 A（代表：角皆 潤）、さらに平成 30 年度から始まった文部科学省科学研究費助成事業挑戦的萌芽研究（代表：中川 書子）の支援のもとで行われたものです。

【ポイント：森林の窒素飽和（健康度）について】

- ・多量の窒素が大気沈着等を通じて森林域に供給され続けると、森林の窒素吸収能力が低下し、森林域内で過剰になった窒素が硝酸（ NO_3^- ）として森林域外に流出するようになる。この現象は窒素飽和と呼ばれ、日本では、関東の一部の森林域などで顕著に見られる。栄養塩^{注5}である硝酸が湖沼や海洋域で高濃度化すると、富栄養化や生態系シフト等の深刻な環境問題を引き起こす。
- ・窒素飽和には、軽度から重度まで複数のステージがあり、欧米では、渓流水中の硝酸濃度の季節変化^{注6}の有無が指標として使われている。ところが、降水量の多い日本では、窒素飽和とは無関係に硝酸濃度の季節変化が見られないので、窒素飽和の指標として使えなかった。
- ・渓流水や地下水中の硝酸濃度は、流域の人間活動による直接的な汚染などによって高くなる可能性もあり、硝酸濃度以外に、窒素飽和の進行度を客観的に判定できる指標が必要とされていた。

【ポイント：硝酸の起源と酸素同位体組成について】

- ・硝酸（ NO_3^- ）には、地表から大気中に放出された一酸化窒素（NO）を起源として、これが大気中でオゾン等と化学反応することで形成され、降水等を通じて地表に沈着する硝酸（大気硝酸）と、有機体窒素（タンパク質やアミノ酸など）やアンモニアを起源として、これが水圏や土壌圏内で微生物などによって酸化されることで形成される硝酸（再生硝酸）の二種がある（図1）。
- ・大気硝酸は、再生硝酸と比べると、三種の安定同位体の中で ^{17}O を異常濃縮していることが近年の研究で明らかになっている。この異常濃縮の程度は、一般の化学反応の際は変化せず、再生硝酸と混合した時だけ、その混合比に応じて減少するという性質がある。このため、森林域から流出してくる硝酸の ^{17}O 異常濃縮度^{注7}を高精度で定量化することで、流出する硝酸に占める大気硝酸の比率や、大気硝酸の直接流出率（森林域に沈着した大気硝酸の中で、森林に利用されずに森林域の外に直接流出する硝酸の比率）を高精度で求めることができる。

【研究成果の意義と背景】

通常の森林であれば、森林域から流出する渓流水中の硝酸（ NO_3^- ）の濃度はきわめて低い。ところが、大量の窒素が降水などを通じて森林域に供給され続けると、森林の窒素吸収能力が低下して消費しきれなくなり、渓流水中の硝酸が高濃度化して森林域外に流出するようになる。この状態を「窒素飽和」と呼ぶ。森林は過度の「窒素飽和」に陥ると、衰退する。さらに栄養塩^{注5}である硝酸が高濃度化すると、下流の湖沼や海洋の生態系に悪影響を及ぼすようになる。有効な「窒素飽和」対策を早期に講じるため、森林の健康度、すなわち「窒素飽和」の進行度（ステージ）を広域的に診断できる指標が必要とされていた。

そこで本研究グループでは、各森林における大気硝酸の「直接流出率」に着目した。直接流出率とは、降水などを通じて大気から森林に供給された硝酸の中で、森林域内で一度も吸収されることなく、渓流水等を通じて直接森林域外に流出する大気硝酸の比

率のことである(図1の中でA₁に対するA₂の相対比に相当する)。この直接流出率は、森林域から流出してくる硝酸の¹⁷O異常濃縮度^{註7}を測定することで容易に求めることができる。通常の森林であれば、栄養塩である硝酸の吸収(図1の各図中に「窒素吸収」として示した各2本の矢印)が活発なので、直接流出率(A₂/A₁比)は小さくなる(図1左の「一般の森林」の状態)。しかし、窒素飽和状態の森林(=不健康な森林)では、この「窒素吸収」が不活発になるので、直接流出率は上昇するはずである(図1右の「窒素飽和林」の状態)。森林を小学校に例えるなら、直接流出率は特定の給食メニュー(パンや牛乳)の残食率に相当し、森林の健康度は生徒の健康度に相当する。つまり、残食率の変化から、各学校におけるインフルエンザの流行が推定できる。森林の場合、図1中のR₁の大きさを把握するのは難しいので、すべての給食メニューについて残食率を把握するのは難しい。しかし、大気硝酸という特定メニューに限ると、¹⁷O異常濃縮度が指標に使えるので、容易に把握できる。

このアイデアを検証するため、窒素飽和状態と考えられている新潟県や岐阜県内にある計三ヶ所の森林域で、渓流水を通じて流出してくる硝酸の¹⁷O異常濃縮度を月に1度程度の頻度で2年以上に渡って数値化し、これを元に大気硝酸の直接流出率を見積もった。すると、渓流水における硝酸濃度の高い森林ほど、大きな直接流出率を示すことがわかった。さらに、海外の複数の森林域において測定・報告されていた硝酸の¹⁷O異常濃縮度データから見積もった各森林の直接流出率と硝酸濃度の間にも、本研究で見られたのと全く同じ関係が確認できた。つまり、大気硝酸の直接流出率は、窒素飽和の指標として有用であることが証明された。

今後は、直接流出率を測定することで、窒素飽和とその他の窒素汚染が、容易に区別できるようになる。また、窒素飽和緩和策^{註4}として提唱されている間伐などの「森林管理」が本当に有効なのかどうか、直接流出率を測定することで容易に検証できるようになる。将来的には、この大気硝酸の「直接流出率」が、各森林域の「健康度」判定や、各森林域から流出する渓流水や地下水の水質保全に貢献することが期待される。

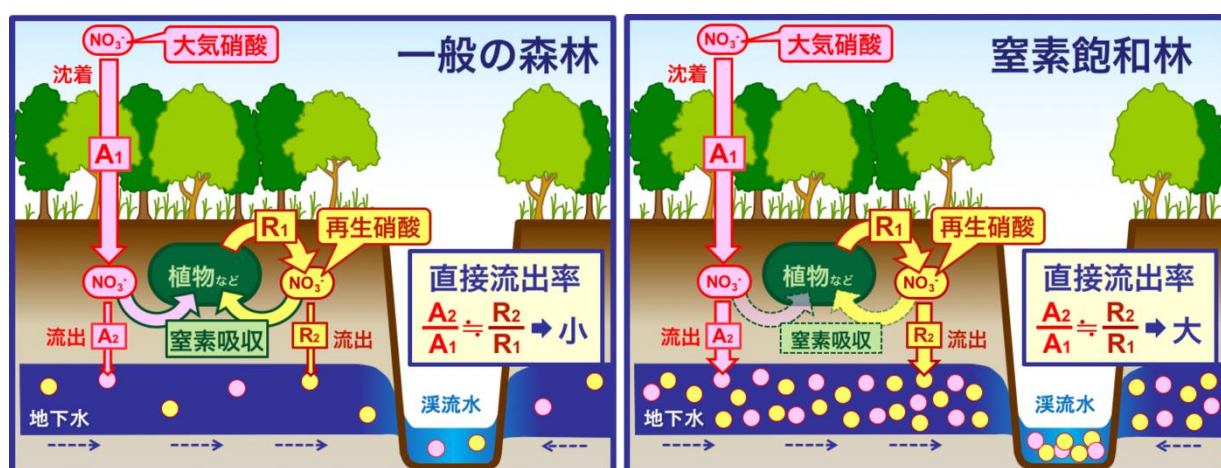


図1 一般の森林域(左)と窒素飽和林(右)における大気硝酸の直接流出率(図中のA₁に対するA₂の相対比)の比較。窒素飽和により森林の「窒素吸収」能力が低下することで、直接流出率が上昇する。つまり、大気硝酸の直接流出率は、窒素飽和の指標として活用できることが明らかになった。

【用語説明】

- 1) 硝酸 (NO_3^-) : 生物の必須元素である窒素 (N) の地表環境下における主要存在形。代表的な栄養塩であり、その供給速度は、地上や水域を問わず、基礎生産量や生態系構造を左右する。水域で高濃度化すると、富栄養化や生態系シフト等の深刻な環境問題を引き起こす。また、高濃度化した水は、飲用に利用できなくなる。なお NO_3^- は、正しくは「硝酸イオン」と呼ぶべきだが、自然界には HNO_3 や NaNO_3 といった形で存在するものも多くあり、これらを総称として「硝酸」と呼び、化学式は主要形である NO_3^- を使う習慣があり、これに倣った。
- 2) 酸素の同位体組成 : 自然界に存在する酸素原子の大部分 (約 99.8%) は陽子 8 個と中性子 8 個の原子核から構成される質量数 16 の酸素原子 (^{16}O と表記) であるが、陽子 8 個と中性子 9 個の原子核から構成される質量数 17 の酸素原子 (^{17}O と表記) が 0.04% 程度、陽子 8 個と中性子 10 個の原子核から構成される質量数 18 の酸素原子 (^{18}O と表記) が 0.2% 程度混在する。これらはいずれも安定な原子核で放射壊変はしないが、その相対存在比は、自然界における諸過程 (酸素原子を含む物質の化学反応や相変化など) に際して、微小に変化するため、指標として活用される。
- 3) 窒素飽和 : 通常の森林 (=健康的な森林) では、栄養塩^{注5}である窒素は、すみやかに植物や微生物に吸収されてしまうため、森林域から流出する渓流水や地下水中の硝酸 (NO_3^-) の濃度はきわめて低い。しかし、多量の窒素が大気沈着等を通じて森林域に供給され続けると、やがて森林の窒素吸収能力が低下し、過剰になった窒素が硝酸として森林域外に流出するようになる。この現象は窒素飽和と呼ばれ、日本では関東の一部の森林域などで顕著に見られる。窒素飽和に陥った森林を人間に例えるなら、偏食を繰り返すうちに不健康になり、食欲が湧かなくなってしまう人に相当する。窒素飽和は、その進行度に応じて軽度 (ステージ 1) から重度 (ステージ 3) に分類され、欧米では森林域から流出する渓流水中の硝酸濃度の大小と、硝酸濃度の季節変化の有無などを指標に用いて判定されている。
- 4) 窒素飽和緩和策 : 窒素飽和の緩和策として、間伐 (=抜き伐り) などのいわゆる「森林管理」が有効であるとの説が提唱され、国内で検討が進められている。間伐を実施すると、樹木の総数は減少するものの、残った森林の生育は良くなる (=健康になる)。加えて林内に適度に光が射し込むことで、下層植生 (下草など) が繁茂するようになるので、失われた森林の窒素吸収能力が回復するという説である。
- 5) 栄養塩 : 一次生産者 (植物や植物プランクトン) の光合成を律速 (=制限) する微量栄養物質の総称。代表的な栄養塩に、窒素 (硝酸やアンモニア) とリンがある。栄養塩が供給されると光合成が活発化するため、水域への過剰供給は富栄養化や赤潮、貧酸素化などの環境問題を引き起こす。また、栄養塩類の相対的な供給比の変化 (=窒素とリンの供給比の変化) は一次生産者を変化させ、それを捕食する動物類を含めた生態系全体に変化をもたらす危険性もある。
- 6) 硝酸濃度の季節変化 : 通常の森林 (=窒素飽和に陥っていない森林) では、夏季になると硝酸の吸収が活発化する。このため欧米では、窒素飽和に陥っていない森林から流出する渓流水中の硝酸濃度に、夏季に下降、冬季に上昇という季節変化が見られる。ところが、窒素飽和に陥った森林だと、夏季になっても硝酸の吸収が活発化せず、

季節変化が見られなくなる。そこで硝酸濃度の季節変化の有無が、欧米を中心に窒素飽和の指標として広く利用されている。ところが降水量の多い日本では、地下水が硝酸濃度の季節変化を緩和してしまうため、窒素飽和に陥っていない森林でも、渓流水中の硝酸濃度に明瞭な季節変化が見られないことが多い。このため、渓流水中の硝酸濃度における季節変化の有無は、日本では窒素飽和の指標にならなかった。

7) ^{17}O 異常濃縮：自然界で酸素の同位体の相対存在比が変化する際に、 ^{16}O に対する ^{17}O の濃縮度と、 ^{16}O に対する ^{18}O の濃縮度は、一般に比例関係を示す。ところが、大気中で進行するごく一部の化学反応では、この比例関係から大きく逸脱して、 ^{17}O が過剰に濃縮される。この現象は「 ^{17}O 異常濃縮」と呼ばれ、この反応の代表例がオゾン (O_3) の生成反応である。降水を通じて地表に供給される硝酸（大気硝酸）は、大気中で一酸化窒素 (NO) がオゾンと反応することで生成したものであり、オゾン同様 ^{17}O を異常濃縮している。したがって、硝酸の ^{17}O 異常濃縮度を測定すると、大きな異常濃縮度を示す大気硝酸と、異常濃縮の無い再生硝酸を明瞭に区別できる。また両者の混合している場合は、その混合比を定量化できる。

【論文名】

掲載雑誌：Biogeosciences（欧州地球科学連合の科学雑誌）

論文名：Export flux of unprocessed atmospheric nitrate from temperate forested catchments: A possible new index for nitrogen saturation（森林集水域における大気から沈着した硝酸の直接流出率：窒素飽和指標との利用の可能性）

著者：Fumiko Nakagawa¹, Urumu Tsunogai¹, Yusuke Obata¹, Kenta Ando¹, Naoyuki Yamashita^{2a}, Tatsuyoshi Saito^{2b}, Shigeki Uchiyama^{2c}, Masayuki Morohashi², and Hiroyuki Sase²（中川 書子¹, 角皆 潤¹, 小幡 祐介¹, 安藤 健太¹, 山下 尚之^{2a}, 齋藤 辰善^{2b}, 内山重輝^{2c}, 諸橋将雪², 佐瀬裕之²）

※1. 名古屋大学, ※2. アジア大気汚染研究センター, a.現在：森林総合研究所, b. 現在：新潟県保健環境科学研究所, c.現在：農林水産省

公表日：11月22日19時（日本時間）

DOI：[10.5194/bg-15-7025-2018](https://doi.org/10.5194/bg-15-7025-2018).