

我が国及び東アジアの大気環境と森林生態系影響に関する研究

○佐瀬裕之¹⁾

1) アジア大気汚染研究センター

【はじめに】

大気中に放出された物質の長距離輸送やその過程で生じる化学反応、森林樹冠への沈着、生態系内での循環・応答は普遍的な事象であるが、人為活動由来の大気汚染物質が森林生態系に過剰に沈着・流入することは、生態系の循環・応答プロセスを大きく攪乱させる可能性があり、時にそれは不可逆的になる。一時期、酸性雨問題としてクローズアップされ、森林衰退や淡水魚の死滅などが懸念されたのはその一例である。幸い我が国では、欧米のような大規模な影響は見出せず、いわゆる「酸性雨」のブームは去ったが、決して、大気汚染物質の沈着・流入プロセスが止まった訳ではなく、一部では回復を示唆する現象は見られるものの、気候・気象の変動との相互作用も含め、生態系の攪乱は現在でも続いている。

筆者は、大学院の在籍期間（少々長く修士課程・博士課程合わせて8年間）のほとんどを、国立環境研究所の土壤環境研究室（高松武次郎室長）で研究指導をいただき、酸性雨研究チーム（佐竹研一総合研究官）の方々にも色々ご助言いただいた（役職はいずれも当時）。また、学位取得後は、東アジア酸性雨モニタリングネットワーク（EANET）のネットワークセンターとして設立された酸性雨研究センター（現アジア大気汚染研究センター：新潟市）に研究スタッフとして採用され、「酸性雨」をキーワードとしつつ、複数の東アジア諸国において大気環境と森林生態系影響に関する研究に携わることができた。本講演では、これまでの研究で得られた知見を概観しつつ、今後の視点について論じることとしたい。

【大気汚染物質の森林樹冠への沈着プロセスに関する研究】

関東地方平野部の社寺林等では、高度経済成長による高濃度大気汚染が改善された後も、梢端部から枯れ下がるスギ（*Cryptomeria japonica*）の衰退現象が多く見られ、1980-1990年代にかけて、酸性雨によるものではないかとの議論が盛んにされていた。森林樹冠を構成する樹木葉面は、大気汚染物質に直接暴露される大気と生態系との重要な境界面であることから、そこに着目し葉面を防護しているエピクチクラワックス（クチクラ表層ワックス）、そこに付着した粒子状物質（PM）、そして葉面からのイオン溶出等の研究を行った。

関東・東北地方の全域や天然スギで知られる屋久島での標高別調査などから、スギ葉のエピクチクラワックスは、生育環境によって量的・化学的に変化が生じることが示された。一般的に、ストレス環境下ではワックス量の増加が見られたが、関東地方の平野部では加齢によるワックスの流亡や劣化が著しく、葉面からの水分損失を促進させていた（Sase et al. 1998a, 1998b）。また、葉面に付着したPM中の重金属濃度は、都市の大気汚染の状況をよく反映しており、PMによる気孔の機能障害も水分損失を促進していた（Takamatsu et al. 2001）。これらのワックスの劣化や沈着したPMに加え、関東地方における降水量の低下傾向や気温の上昇傾向が、さらに水分損失を促進し、スギ衰退の一因となっていたことが示唆された（Sase et al. 1998b; Takamatsu et al. 2001）。スギ衰退については、光化学オキシダントや窒素沈着も含む大気汚染物質、気候変動や土壌の踏圧による水分条件の悪化などもその要因として示唆されていたが、筆者らが提唱したメカニズムは、いずれの仮説とも矛盾するものではなく、これらに関連づけるものとも考えられた。

これらの初期の研究は、その後、文部科学省科学研究費補助金新学術研究領域「東アジアにおけるエアロゾルの植物・人間系へのインパクト」（島山史郎代表）における、元素状炭素（EC）の沈着プロセスの検討やその蓄積の評価方法の確立へと繋がっている（Sase et al. 2012）。さらに近年は、東京農工大学（伊豆田猛教授）の研究グループが中心となり、大気を浄化する生態系機能として、樹木によるPM捕捉能の研究へと発展させており、筆者も参画し、その制御因子としてワックスや葉面状態との関連性を議論しているところである（Takahashi et al. 2022）。都市森林（urban forest）の生態系機能は、世界的にも関心が高い分野であり、樹木葉面でのPMの捕捉・保持機構は、その大気浄化能を十分活かすためにも、重要なテーマである。

また、樹木葉面では、乾性沈着したガスやPMは降水で洗い流されるだけでなく、樹木との間でイオン交換反応も生じ、NO₃⁻やNH₄⁺の吸収は、葉面の濡れ性の増大により促進されることを明らかにした（Sase et al. 2008）。一方で、NH₃は植物葉面から放出することも知られている。その制御因子として葉内NH₄⁺濃度との関連性を議論しているが、東京農工大学（松田和秀教授）の研究グループによるタワー観測との協働から、それだけで制御される訳ではないことも分かってきた（Xu et al. 2022）。窒素（N）沈着・循環は、地球的課題の一つであり、大気と森林生態系のインターフェースである樹木葉面で生じるであろうNH₃（またはNH₄⁺）

の沈着・吸収・放出プロセスとその制御因子は、さらに解明が必要である。

【大気汚染物質の森林生態系内での挙動・循環解析に関する研究】

森林生態系に流入した大気汚染物質が、土壌・植物系から河川に流出するまでの一連のプロセスについて、集水域を単位としたフィールド調査・解析を、EANET 参加国で実施した。タイ東北部 Sakaerat 試験地の熱帯季節林では、乾季・雨季の明瞭な季節性が、大気汚染物質の沈着プロセスを大きく支配するとともに、土壌化学性や物質挙動に大きく影響し、雨季の中期には河川への急激な SO_4^{2-} 流出や一時的な酸性化を生じさせていた。それに加えて近年の降水パターンの変化は、大気硫黄 (S) 沈着が低下傾向にあるにも関わらず、河川の酸性化を促進させていた (Sase et al. 2017)。一方で、マレーシア・ボルネオ島 Danum Valley 試験地の熱帯多雨林では、大気沈着よりも岩石風化による中和の影響が大きかった (Yamashita et al. 2014)。さらに、極東ロシアの北方樹林の Komarovka 川では、地域の大気汚染物質の排出量は減少傾向にあるものの、暖候期の降水量の増大により、沈着量の増加や河川酸性化が生じていた (Zhigacheva et al. 2022)。

酸性物質の大気沈着量が日本一多く、我が国で最初に土壌や河川の酸性化が指摘された伊自良湖集水域 (岐阜県山県市) では、極端気象との相互作用や酸性化からの回復プロセスを明らかにした (Nakahara et al. 2010; Sase et al. 2019)。日本海側の加治川集水域 (新潟県新発田市) では、越境大気汚染 (主に S 沈着量) の低減により、河川中の SO_4^{2-} 濃度の低下や pH 上昇など酸性化からの回復が見られたものの、生態系の応答は緩慢であり回復には時間がかかることが S 同位体比解析から示唆された (Sase et al. 2021)。一方で、加治川集水域では河川の NO_3^- 濃度の上昇は続いており、樹木成長等を考慮する必要はあるものの、十分に下がっていない N 沈着量 ($> 10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) が N 飽和を進行させている可能性を指摘した (Sase et al. 2022)。

気候帯の異なる東アジア地域での森林集水域のフィールド研究では、大気汚染物質の影響を評価する上での季節性の重要性や、特に大気環境の改善による回復過程において、気象の変動が重要な役割を果たす可能性があることが指摘された。大気汚染と気象変動の相互作用は、筆者も参画した 科学研究費補助金基盤研究 (A) (代表：大河内博教授) でも指摘された。特に、伊自良湖集水域のように過去に大気沈着量が多かった地域においては、大気汚染のレガシーと言える物質 (例えば S) が土壌に大量に蓄積していることから、今後の極端気象や気候変動による急激な流出の可能性について検討を開始したところである。

【モニタリングネットワークを用いた大気環境研究の推進】

EANET では、中期計画、技術マニュアル、モニタリング戦略文書 (Strategy Papers) 等に基づき、モニタリングや関連研究が行われ、国内では環境省「越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング計画」とも連携し、伊自良湖集水域での定期モニタリングの推進や、国内 EANET サイトで得られた降水・河川水への同位体比分析の適用が行われてきた。これらのモニタリングネットワークと研究の連携により、上述した、伊自良湖集水域や加治川集水域での科学的知見が得られ、我が国の越境大気汚染や森林集水域の N 飽和の状況把握にも貢献している。EANET や国内モニタリングのデータやサイトは、広く学術研究にも活用されるべきであり、筆者はそのハブとしての役割も果たしつつ、変動する大気環境への森林生態系の応答を解析していきたい。

【謝辞】本稿で紹介した研究には以下のご支援をいただいた：環境研究総合推進費 (C-2; C-052; C-082; B-0801)、アジア太平洋地球変動研究ネットワーク (APN: ARCP2013-13CMY-Sase, ARCP2012-18NMY-Sase)、科学研究費助成事業 (JP20120012; JP18K11616; JP19K12315; JP19H00955; JP22H02401)、そして EANET Non-Core Budget (Project Fund)。また、以下の方々に多大なご指導、ご支援をいただいた：高松武次郎先生、佐竹研一先生、犬伏和之先生、吉田富男先生、村野健太郎先生、畠山史郎先生、戸塚績先生、植田洋匡先生、秋元肇先生、坂本和彦先生、伊豆田猛先生、松田和秀先生、井川学先生、大河内博先生、中田誠先生、大泉毅先生、酸性雨研究センター/アジア大気汚染研究センター・共著者・共同研究者・新潟県・環境省・EANET 参加国の皆さま、そして、両親と家族。皆さまに感謝いたします。

【文献】 Nakahara et al. 2010. Biogeochemistry; Sase et al. 1998a, 1998b. Can. J. For. Res.; Sase et al. 2008. Environ. Pollut.; Sase et al. 2012. Asian J. Atmos. Environ.; Sase et al. 2017. Hydrological Processes; Sase et al. 2019. Biogeochemistry; Sase et al. 2021. Atmos. Environ.; Sase et al. 2022. Soil Science and Plant Nutrition; Takahashi et al. 2022. International Journal of Phytoremediation; Takamatsu et al. 2001. Can. J. For. Res.; Xu et al. 2022. Atmos. Environ.; Yamashita et al. 2016. J. Tropical Ecology; Zhigacheva et al. 2022. Limnology.