



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	開放系オゾン付加施設で育成したドロノキと欧州ヤマナラシ雑種の光合成と揮発性有機炭素化合物の計測
Author(s)	増井, 昇; MASUI, Noboru; 中島, 大賢 他
Citation	北方森林保全技術, 42, 25-28
Issue Date	2024
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99065
Type	departmental bulletin paper
File Information	43_1-6.pdf



I-6 開放系オゾン付加施設で育成したドロノキと欧州ヤマナラシ 雑種の光合成と揮発性有機炭素化合物の計測

増井 昇^{1,2}, 中島 大賢³, 藤戸 永志⁴, 佐々木 圭子⁴, 渡部 敏裕³, 小池 孝良³

1 静岡県立大学, 2 北海道大学・農学院, 3 農学研究院, 4 北方生物圏フィールド科学センター

はじめに

国内の環境基準の遵守厳格化もあって（伊豆田，2020）、地表付近の対流圏オゾン（O₃）による緑地・樹体の明確な衰退は、話題にのぼることは減ってきたように思われる。一方で、O₃の前駆物質とされる二酸化窒素（NO₂）の放出量は、東アジアでは依然として欧米の4倍量（約40 tN/年）であり、偏西風の風下に位置する我が国への越境大気汚染の影響は否めない（上田，2023）。一方、ハコヤナギ（=ヤマナラシ；*Populus*）属樹木は、パルプ、繊維材料やエネルギー資源として世界中で期待されている（千葉・永田，1991；Stolarski，2025）。

最近、都市中心部ではシラカンバなどの街路樹にハンノキハムシによる虫害が目立つ一方、郊外の並木では、葉への食害は目立たない（小池・増井，2021）。これは、被食防衛の視点からは不思議な現象である。理由として、都市域では硫黄・窒素酸化物など排ガスの影響があり、

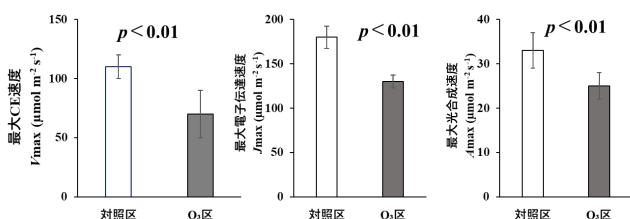


図-1. シラカンバ幼木樹冠でのオゾン付加（灰色バー）の光合成に及ぼす影響（蟹江ら，2015）

樹体の衰退により葉の防衛能力が低下しているためと考えられていた。実際、開放系 O₃ 付加施設（80 ppb）で生育したシラカンバ葉の純光合成速度は低かった（蟹江ら，2015）（図-1）。したがって、光合成産物由来の被食防衛物質量が少なく病虫害への耐性は低いと考えられる（松木，2023）。実際、札幌市内と市外に生育

する 40~50 年生のトドマツの胸高部位の年輪解析を行った結果、都心個体に比べると郊外の個体での成長が抑制されていたことが解った（Moser-Reischl et al., 2019）。一方、葉を採取してハンノキハムシ成虫の嗜好性を選択試験で調べたところ、ハンノキハムシは都市域環境で生育したのではなく郊外環境で展開した葉を選択した（Agathokleous et al., 2017）。この理由を O₃ の対流の視点から実験を進め、解析を進めた。注目したのは NO（一酸化窒素）タイトレーション効果である（吉門，2019）。

NO タイトレーション効果

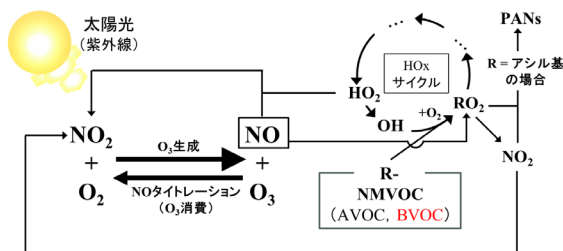


図-2. NO タイトレーション効果（増井原図）

NOタイトレーション(titration)効果とは、NOがO₃(オキシダント)と反応してNO₂(二酸化窒素)になる(NO+O₃→NO₂+O₂)ことで、O₃を消費する作用のことである。NO_x(窒素酸化物)の排出削減が進むと、このNOタイトレーション効果が低下し、結果として光化学オキシダントの減少抑制につながる（吉

門, 2019)。したがって、 O_3 濃度は都市域では中和され、郊外へ対流する際に紫外線によって O_3 が生成されるため濃度が高い。

図-2 に示す通り、光化学スモッグの本体とされる O_3 の前駆物質として、 NO_2 だけではなく揮発性有機化合物 (VOC) に注目が集まってきた。とりわけ樹木からの生物由来 (B) VOC は注視されており、イソプレンやモノテルペンなどの主要な BVOC を出さない緑化樹への転換も推奨されてきた (増井ら, 2022 ; Sicard et al., 2022)。本稿では、虫害と O_3 の有無に注目して、ハコヤナギ属 2 種の光合成と BVOC 放出の傾向を把握するための測定例を報告する。

材料と方法

植物：ハコヤナギ属の 2 種を対象とした。ドロノキ (*Populus maximowiczii*) は森林総合研究所北海道支所の羊ヶ丘実験林の孤立木 (樹高約 16 m、胸高直径 25.3 cm) から挿し穂 (20~25



図-3. 欧州ヤマナラシの挿し穂の採取場所 (google から作成)、六角形：オゾン付加場所

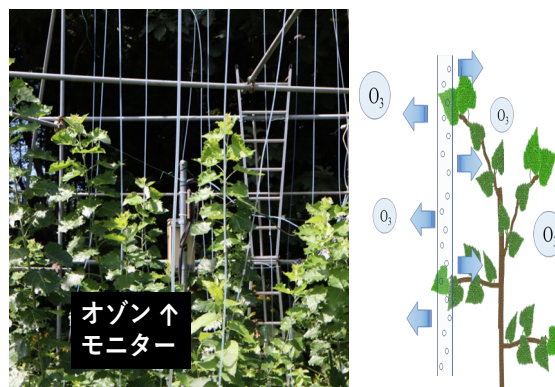


図-4. オゾン付加の様子 (左) と模式図 (右) (増井原図)

cm、太さ 1.0~2.2 cm) を作成した。欧州ヤマナラシ雑種 (*Populus tremula* x *P. alba*: 欧州ヤマナラシ x ギンドロ) の挿し穂は、ドロノキと同様のサイズの材料を札幌実験林の萌芽個体 (図-3) から得た (増井ら, 2021)。

処理：開放系 O_3 付加施設は、学術振興会「新学術領域」(2009~2013) の推進会議で、光合成生産の O_3 による抑制に関する実測値を示すことが要請され、設置したものである。 O_3 付加は、図-4 に示すように、不安定な O_3 の寿命を考慮して 50 cm 間隔で穴の空けたテフロンチューブから O_3 を付加し、リング中央のモニター装置での値をフィードバックして、各リング内の O_3 濃度の制御を行った。

サンプリング：開放系 O_3 付加施設で育成され、2019 年から地上部が毎年収穫されてきた萌芽個体を対象に、成熟したシュート (枝+葉) を選定した。2024 年の開葉直後に、シュート全体にキャベツなどの虫害防止用の筒状ネット (メッシュ 2 mm、35 cm x 70 cm) を作成してドロノキハムシの食害を防止し、誘導防御による影響を排除した (松木, 2023)。 O_3 付加区と対照区内からそれぞれ 60~80 cm シュートを採取し、直ちに水を満たしたバケツの中で切り口を水



図-5. 光合成・蒸散、BVOC の測定の様子

切りして (Koike, 1986)、温室へ移動し実験に供した。

測定：携帯型光合成蒸散測定装置 (LI-6400) の測定部分 (チャンバー) にバイパスをつけた装置を用いて、光合成・蒸散の測定だけでなく葉から放出される BVOC をサンプル管に捕集した (図-5 右)。

LI-6400 へ供給される空気は、上流に活性炭 (VOC 除去) および乾燥剤 (過湿防止) を充填した筒を設置しポンプで通気させた (図-5 左)。

【注】イソプレンは炭素数 5 個の基本単位 (炭素 5 ; C₅H₈) であり、モノテルペン (MT) はそのイソプレン単位が 2 個結合した炭素数 10 個の化合物の総称。イソプレン単位の数によってテルペンの種類が分類され、モノテルペン類にはオンメン (C₁₀H₁₆)、リナロール (C₁₀H₁₈O)、カンファー (C₁₀H₁₆O) などがある。セスキテルペン (SQT) はイソプレン単位 3 個が結合してできた炭素数 15 個の化合物のグループをいう。オゾン生成の前駆物質としてのセスキテルペンは反応性が高く局地的な寄与が大きい一方、イソプレンは排出量が最大であるため広域的な影響が大きい。

光合成・蒸散と BVOC 測定例

光合成と気孔コンダクタンス (gs) を見ると、ドロノキでは、O₃ 存在下であっても気孔を少し閉じ (gs が低下)、O₃ 吸収を抑え、効率的に光合成活動を維持していることがうかがえた。測定時期が 8 月であったが、葉齢が約 40 日で気孔開閉能は十分に機能していたと考えられる (伊豆田, 2020)。欧州ヤマナラシ雑種 F₁ では、O₃ 存在下でも気孔をほとんど閉じず (gs は変化なし)、葉内の光合成系が損傷を受け、光合成速度やイソプレン放出速度が低下した。

シラカンバでは、BVOC 放出の 7 割以上がモノテルペン (MT) であった (図-6)。これら放出化合物のうち、組成比としても大きな β-ocimene や linalool は、放出後に大気中で O₃ との

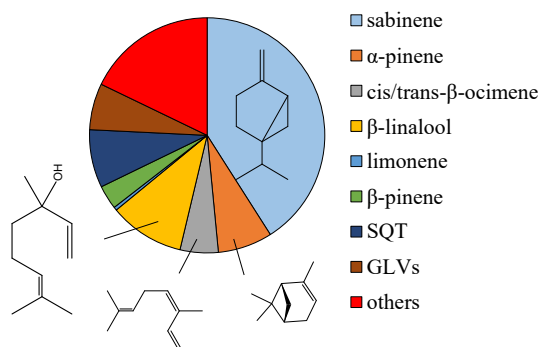


図-6. 6 月におけるシラカンバの BVOC の放出の例 (Masui et al. (2020) から作成)

反応性が高い成分である。よって、MT を中心とした BVOCs の誘引組成が高濃度 O₃ 区では大きく変化することが示唆された (Masui et al., 2020)。

本研究での対象樹種のコヤマナギ属では、BVOC 放出の 90%以上はイソプレンであった。イソプレンはコヤマナギ属のポプラ (Grey poplar: *Populus x canescens*; Aiton (Sm) syn. *Populus tremula* L. x *P. alba* L.) では、ドロノキハムシ (*Chrysomela populi*) の誘引に寄与しないという報告がある (Müller et al., 2015)。しかし、イソプレン以外にも、量的に

は極めて少ないが、MT や SQT も放出されていた。これらは、β-ocimene (MT : 16 分) や β-caryophyllene (SQT: 1 分) など (なお、括弧中は O₃-80 ppb 下の大気寿命)、シラカンバのように O₃ と反応性の高い成分で構成されていた。

謝辞

実験苗畑に設けられた開放系オゾン付加施設の利用は、この研究をもって終了し、2025 年 5 ~6 月に、解体に着手した。数々のご支援をいただいた北方生物圏フィールド科学センターの皆様、設計・施工して下さった上田龍四郎氏 (ダルトン KK) と環境省地球環境研究推進費と科学研究費補助金の支援に感謝する。

引用文献

Agathokleous, E., Sakikawa, T., Abu ElEla S., et al. (2017) Ozone alters the feeding behavior of the leaf beetle *Agelastica coerulea* (Coleoptera: Chrysomelidae) into leaves of Japanese white birch (*Betula platyphylla* var. *japonica*). *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 24: 17577–17583. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9369-7>

千葉茂・永田義明 (1991) ポプラ優良系統の単一栽培による生産力増進効果の解明; ヤナギ類

- 優良系統の選抜と多収穫栽培法の開発. 王子製紙林木育種研究所, 1-38.
- 伊豆田猛 (2020) 大気環境と植物. 朝倉書店.
- 蟹江紗耶子・竹内裕一・崎川哲一ほか (2015) 開放系オゾン付加施設で育成したシラカンバの光合成特性. 北方森林研究, 63: 37-38. https://doi.org/10.24494/jfsh.63.0_37
- Koike, T. (1986) A method for measuring photosynthesis with detached parts of deciduous broadleaved trees in Hokkaido. *Jour Jpn Forestry Soc.*, 68: 425-428.
- 小池孝良・増井昇 (2021) 樹林地の健全性の維持 - 無機環境の変化の視点から虫害発生を化学する-. ツリー・ドクター, 28: 37-42.
- Masui, N., Mochizuki, T., Tani, A., et al. (2020) Does ozone alter the attractiveness of Japanese white birch leaves to a leaf beetle (*Agelastica coerulea*) via changes in biogenic volatile organic compounds (BVOCs): An examination with the Y-tube test. *Forests*, 11; <https://doi.org/10.3390/f11010058>
- 増井昇・菅井徹人・渡邊陽子ほか (2021) 高オゾン環境下でのヤマナラシ属 2 種の成長と病虫害の観察: 中間報告. 北方森林保全技術, 38: 1-8.
- 増井昇・塩尻かおり・谷晃・松浦英幸ほか (2022) 植物由来香気成分が繋ぐ植物-昆虫関係と対流圏オゾンの影響. 北海道の農業気象, 74: 30-35.
- 松木佐和子 (2023) 被食防衛の原理. 小池孝良ほか (編), 木本植物の被食防衛—変動環境下でゆらぐ植食者との関係. 共立出版, pp.11-17.
- Moser-Reischl, A., Rötzer, T., Biber, P., et al. (2019) Growth of *Abies sachalinensis* along an urban gradient affected by environmental pollution in Sapporo, Japan. *Forests*, 10: 707. <https://doi.org/10.3390/f10080707>
- Müller, A., Kaling, M., Faubert, P., et al. (2015) Isoprene emission by poplar is not important for the feeding behaviour of poplar leaf beetles. *BMC Plant Biology*, 15: 165. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0542-1>
- Sicard, P., Agathokleous, E., De Marco A., et al. (2022). Ozone-reducing urban plants: Choose carefully. *Science*, 377(6606): 585. <https://doi.org/10.1126/science.add9734>
- Stolarski, M. J. (2025) Production of poplar and willow for industrial and energy purposes over an eight-year harvest cycle. *Industrial Crops & Products*, 232: 121292. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121292>
- 上田実希 (2023) 窒素沈着. 小池孝良ほか (編), 木本植物の被食防衛—変動環境下でゆらぐ植食者との関係. 共立出版, pp.145-150.
- 吉門洋 (2019) 都市圏周辺のオゾン濃度変化と NO タイトレーション (首都圏を中心に). 大気環境学会, 54: 185-193. <https://doi.org/10.11298/taiki.54.185>