HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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
Author(s)	増井, 昇; 菅井, 徹人; 渡邊, 陽子; 渡部, 敏裕; 塩尻, かおり; 佐々木, 圭子; 藤戸, 永司; 荒川, 圭太; 佐藤, 冬樹; 小池, 孝良
Citation	北方森林保全技術, 38, 1-8
Issue Date	2021-01
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/80369
Type	bulletin (article)
File Information	38_01-1.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Ⅰ－１　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－

増井 昇[1]，菅井 徹人[1]，渡邊 陽子[2]，渡部 敏裕[2]，塩尻 かおり[3]
佐々木 圭子[4]，藤戸 永司[4]，荒川 圭太[2]，佐藤 冬樹[4]，小池 孝良[2]

1 北海道大学農学院　2 北海道大学農学研究院　3 龍谷大学農学部
4 北海道大学北方生物圏フィールド科学センター

はじめに

ヤマナラシ（*Populus* sp.）類は木部の比重が 0.4 程度で用材生産の対象木としての期待はなかったが、王子製紙では 1cm 年$^{-1}$以上の非常に早い直径成長ができる個体の選抜に成功し、木質繊維資源としての期待を担った。最近ではバイオ燃料となるバイオマス素材として、少なくても北海道では早生樹種が再び注目を集めている（北海道新聞　2020）。ポプラやカラマツ類などの早生樹は、中国（南部を除く）では世界第一の植林面積を占め（Zhang ら 2000, Feng et al. 2019a）、北米ではパルプ資源（Karnosky et al. 2005）、欧州共同体（EU）では古くから木質・緑化資源として注目されてきた（LRTAP 2020）。しかし、実用的な利用法として緑化樹などの一定の役割はあるが、比重が小さくて建築用材などには不適なヤマナラシ類については、実用的な研究は、上記の王子製紙やモデル植物の研究以外、日本ではこの 30 年ほど林業的研究はなされてこなかった（岩崎ら，2012）。一方で、未利用資源としてのヤナギ（*Salix* sp.）類については、一部、木質バイオマス資源としての期待を担う研究が行われてきた（森林総研北海道　2011）。

近年の日本の大気汚染問題は、隣国の急速な経済活動による越境大気汚染が要因であり、生産環境は過去に経験しなかったほど急速に変化している。生産環境の劣化は進み、南欧や中国では対流圏オゾン（地表付近～11km 付近）の悪影響が謳われて久しい。日本では 1960～70 年代には大気環境の悪化から、主に亜硫酸ガスのために異常落葉が進んだが（田崎 1978）、脱硫装置の導入で大気汚染は緩和された。しかし、光化学スモッグの本体とされる対流圏オゾンの影響はいまだに大きく、詳細に調べられている（戸塚　2012，Izuta 2017）。特に光化学スモッグ（90%以上が対流圏オゾン；0～11km と考えられている）に対する影響は、欧米や中国で精力的に進められてきたが（Feng et al. 2019a,b）、日本固有樹種や改良種への影響評価は顕著ではない（Koike et al. 2013，Izuta 2017）。これらの大部分に対しては成長モデルに貢献できる無機環境（温度、光、水など）と成長量、刈り取り後の再生産能の調査がなされてきた。しかし、病虫害を中心とする生物環境に関する影響は、依然として不明なことが多い（増井・小池 2020）。

特に、対流圏オゾンの前駆物質であり、多くの植物が信号として利用している（塩尻 2020）生物由来の揮発性有機化合物（BVOC）を介した植物－昆虫間の化学的コミュニケーション（以降、コミュニケーション）関係の挙動の変化に注目し、Y 字菅試験によってハンノキハムシとシラカンバ葉を調査して、この関係におけるオゾンの BVOC への攪乱に役割を解明した（Masui et al. 2020）。二重結合を持つ BVOC は、オゾンとの反応によって大気中での寿命が短縮され、構造変化が誘因性や忌避性など BVOC が本来有する機能を変化させ得ると考えられている（Fuentus et al. 2013）。結果として、オゾン処理が BVOC に与える影響がシラカンバとハンノキハムシの関係に波及し（Sakikawa et al. 2016）、ハンノキハムシが餌であるシラカンバへたどり着けなかった可能性が指摘された（小池　2018）。

その後の研究でも、ハルニレハムシの食害はオゾン処理区では非常に少なかった（Sugai et al. 2019）。このように同じ実験施設でのハムシ類 2 種での事例からは、上記のオゾン処理による植物－昆虫間の BVOC を介したコミュニケーション阻害は、ポプラ（ヤマナラシ）類を選択的に食害するドロノキハムシに対しても認められる可能性がある。以上の結果を踏まえると、オゾンを介した大気汚染環境において、生物ストレスを制御しうる一要因として（Fuentus et al. 2013）、植物-昆虫間コミュニケーションに注視することが重要である。

そこで、本研究では、1）オゾンによる植物―昆虫間の“コミュニケーション”阻害現象がヤマナラシ系 2 樹種とドロノキ類の狭食者のドロノキハムシでも見られるかどうか、を中心に、2）オゾンによる成長抑制がどの様な形で生じるか、成長に影響とそれに及ぼす病虫害の影響に注目した調査を行っている。本稿では、2020 年 9 月上旬までの中間報告を紹介したい。なお、研究は令和 3 年度までは継続予定である。

材料と方法

1．オゾン付加施設と土壌

北大北方生物圏フィールド科学センター札幌研究林・札幌試験地実験苗畑（以下、実験苗畑）の開放系オゾン暴露施設（直径 6.5m 高さ 5.5m；図 1）を利用した。土壌は 6 角形の西側片面へ、苫小牧研究林の地下 5m 付近の風化の進んだ火山灰土壌を客土し、地表から 20cm まで加えた。オゾン付加区（目標値 80ppb；関東近郊より 20ppb 程度高く設定； 全般スモッグ情報，2020）と対照区（25～35ppb）であった。この設定値は関東近郊であれば低濃度オゾン暴露と言える（Izuta 2017）。FACE フレーム内に 2m 間隔で設けた付加用チューブによってオゾン付加が可能である。なお、制御は PIV（Proportional-Integral-Differential Controller）方式を採用した。また、風速 3m 秒$^{-1}$ 以上、及び光センサーによって光補償点（80 μ mol・m^{-2}s^{-1}）以下になるとオゾン付加は停止する。基本システムの詳細は Watanabe et al. （2013）を参照していただきたい。

図 1. 開放系オゾン付加施設（O_3-3 サイト）（8 月 24 日 2020 年）

オゾン付加は以下に示すように、挿し穂の活着を確認した後、2020 年 5 月 12 日から実施し、着葉期間は可能な限り、少なくても 10 月中はオゾン付加を行う。

2．材料と試験地

2.1.ポプラ・クローン

対象としたのは、山地系ポプラとしてバイオマス資源とされたドロノキ（*Populous maximocziczii*）で、森林総研北海道支所構内に自生する約 25 年生の 1 個体から、枝を 3 月上旬に、長さ 15～18ｃｍで採取した。その後、同・低温室（-1～1 度）で保管し、試験地へ挿し木として 5 月上旬に植え付けた。

もう 1 樹種は、改良ポプラであった。実験苗畑に植栽された改良ポプラ F_1（ヨーロッパヤマナラシ *P. tremula* ×ギンドロ *P. alba* の雑種）から作成した挿し穂であった。2019 年 12 月中旬に、ドロノキと同じく長さ 15～18cm に切り分け、湿らせた古新聞に包み、森林総研で保管した（発泡スチロール製の保管箱に入れて 12 月中旬から翌年 2 月上旬まで冷暗所で保管した）。ここで、ヤマナラシ属（分類群としてはハコヤナギ属から移動）の葉を食べるのは、ドロノキハムシが主要な虫害ということが解っている（林試北海道支場保護部、1985）。なお、オゾン区と対照区の昆虫相について、ドロノキハムシモドキが同所的に見られると言うが（西口、1995）、センサスを行ってきた小池には、同定できなかった。

そこで実験苗畑内での食草のポプラ類、ドロノキの配置を示す（図 2）。O_3-区のみ、近隣には、ポプラ系の集団生育は少なく、ポプラ稚樹のみ点在している。

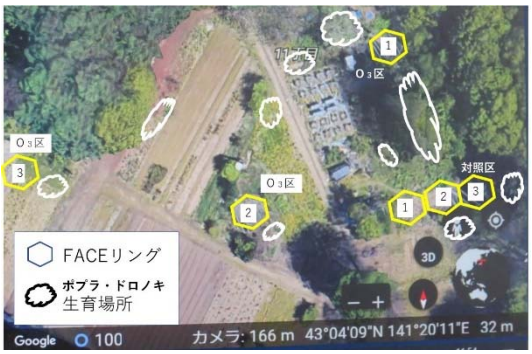

図 2. 実験苗畑の開放系オゾン処理区と対照区の位置図とポプラなどの生育場所（google earth から作成）

2.2. 挿し穂の作成

2019 年の活着率（挿し穂を挿しつけて、シュート[枝と葉]を形成した割合）は、ドロノキでは 80%を越えたが、ポプラ F_1 では 40%以下であったため、2020 年度はポプラ F_1 の挿し穂を温室で作成し、シュートの伸びた個体を植え付けた。21cm 直径のビニルポットに鹿沼土を満たし、発根促進効果を持つというメネデール（メネデール社、大阪）の 100 倍液に、斜め切りした切り口を 1 晩浸してから鹿沼土（中径）で満たし、水分を十分に与えた状態で挿しつけた。実験苗畑の温室（日中 20℃付近；夜間 15℃以上）にて 2 月中旬から栽培し、ポット表面が乾くとメネデール 200 倍液を与えた。シュートの発達を確認後、土壌表面が乾くとポット上部からジョウロによって水道水を与えた（図 3 左）。

図 3. ポプラ F_1 の挿し穂の調整
ポットでシュートの形成されたポプラ F_1 挿し穂（温室内で発芽後 35 日目：左）、カルス（真ん中の左）、発根した挿し穂の植え付けの状況（右）

2.3.植え付け

ドロノキ挿し穂は、4 月下旬に案内棒（直径 2cm の“イボ竹”支柱）で穴を空けて、そこへ植え付けた。一方、ポプラ F_1 はシュート長がドロノキの成長状態と合う 5 月上旬に、図 3 右に示したようにシュートが伸びている個体をポットの鹿沼土と一緒に植え穴（約 25cm 直径の穴）を空けて、そこへ植え付けた。なお、格子状にイボタケを組み合わせ、それを目安として 50cm 間隔で同一種が隣に来ないようにして挿しつけた（図 4）。2.5 に示す測定予定対象個体以外にも挿し穂を植え付け、密度がそろうように心がけた。

図 4. O_3-FACE への植え付け状況
（開葉の目立つのはドロノキ）

2.4.管理（除草など）

5～8 月は週に 2 度程度、除草を行った。6 月末まではヒメジョン、アレチノギク、セイヨウタンポポ、ギシギシ、根が取りきれなかったのはツクシ、6 月からはツユクサ、7 月からはエノコログサ、カモガヤ、ホソムギ、スベリヒユが優占していた。8 月末からは、再びスギナとアレチノギク、エノコログサ、スベリヒユが繁茂し始めた。イネ科は根から抜くことが出来るが、ギシギシ、スギナは難しく、鍬で地上部を除く程度のため、繁茂が続いた。

8 月中旬から下旬までに、オゾン付加区では急速な伸長が始まったドロノキのシュートが、雨のあと倒れ始めたため、光環境の悪化を防ぐために、イボタケや枯れたヤチダモ主軸を根元に差し込んで“添え木”として倒伏を防いだ（ドロノキでは土壌にかかわらず 3～4 個体：密度調整用の対象は各 6 個体）。9 月初めには、対照区でも同じようなドロノキの倒伏があったため、支柱を添えた（同様に 2～3 個体）。

2.5.観察と測定

活着後、シュートが 10cm 程度になった 5 月末から約 1 ヶ月間隔で、樹高、地際直径（ノギス）、着葉数、落葉数、側枝本数を測定した。さらに、病虫害は除草時を中心に、2 週に 1 度の観察を行った。病害（確認できたのは、さび病、すす病）の感染について、葉に黄色の斑点や葉の黒変色が確認された個葉枚数を数えて記録した。病害の観察、虫害と昆虫の種類を、昆虫の活動の盛んな 13 時～15 時ころに行った。ただし、天敵とされる鳥類の観察は出来ていない。また、虫害後の新しいシュートの発達も記録した。

対象木は各土壌に 4～5 個体であり、個体としては 8 月まではシュート状の個体として見られた（図 5）。その後、対照区では分枝する個体が見られ、特に食害後に新しいシュートの顕著になった。虫害は、このシュートの食害程度（スコアとして評価）を、激害（葉柄・葉身を食べられる；スコア 5）、中程度（葉身が食害を受けるが、全面積の約 50%は残る；スコア 3）、軽微（食害は見られるが葉身の約 70%以上が残る；スコア 1）を記録した。これらのそれぞれ中間を設け、最終的被害段階は 1～5 とした。また、シュートに着生の個葉の枚数も合わせて数えた。

図 5. ドロノキの生育の様子

8 月中旬には、クロロフィル蛍光反応（Junior-PAM, WALZ 社、ドイツ）を測定した。測定した葉の C/N 比も測定する（CHN 分析器、Perkin-Elmah, 横浜）。葉の物理的強度はプシュプルゲージ（ダルテック製、札幌）で確認した。さらに、8 月上旬と 9 月上旬に、さび病進展の評価指標として相対的クロロフィル量を SPAD-502、SPAD-502Plus（両機種とも Minolta，東京）によって評価した。

結果と考察

1. 挿し木の活着率

2019 年度の活着率は、ドロノキで 78%、ヤマナラシ系のポプラ F_1 では 32%であった。ポプラ F_1 の活着率の低さは、ヤマナラシ系の特徴かも知れないが、シュートが発達した状態での挿し木を用いた。この結果、温室内で挿し穂がシュートを形成したのは 74%まで高まったが、発根が確認されたのは 65%であった。残りは、シュートは形成されたが地下部にカルスはできても根の発達に至らなかった（図 3）。実験苗畑の試験地内へ移植したのは発根を確認した個体であったが、それらのうち 15%が枯死し、成長が継続しなかった。このため、根萌芽から育成していた“荒川・山岸試験地”個体を、もとの個体が枯死した場所へ移植し密度維持のための補植とした。枯死の原因は、根系が未発達なために生じた脱水し、枯死であった。この結果から、太い挿し穂の場合、根部にカルスが形成されても根の発達に結び付かない事例かと思われる。

図 6. ポプラ F_1 における食害後の分枝（四角内：対照区）

2. 成長と虫害と病害

単純に、挿し穂からシュート成長を追跡する予定でいたが、7 月上旬から虫害が広がって、その後、いわば補償作用的に側枝が発達してきた。この傾向は、ドロノキよりは、ポプラ F_1 で顕著であった（図 6）。このため、側枝形成後、直径成長にもわずかに増加傾向があった。従って、本研究では、虫害の推移と虫害程度を観察した。なお、8 月中旬から、オゾン区ではシュートが自立できない個体が増え、イボタケなどで倒伏を抑えた。この傾向は雨天後のドロノキ

で顕著であった。しかし、この支柱を設けたせいか、主軸の伸長が顕著になってしまった。従って、測定対象の個体に支持棒を設置した個体の成長は、別に考察する必要がある（Osawa 1993）。

5 月 20 日頃、シュート長が 20～40cm に達した時期には、葉はドロノキで 5～7 枚、ポプラ F_1 では 7～12 枚を展開した。この時点で、両樹種において、対照区でのドロノキハムシ成虫の食害、交尾（図 7）、産卵がみられた。開葉後約 10～20 日の若葉がドロノキハムシの顕著な食害に遭ったのはドロノキであり、葉柄までシャク類が食べたのはポプラ雑種 F_1 のみであった。

図 7. ドロノキ葉上でのドロノキハムシの交尾（6 月 10 日　2020）

シュート伸長の直後から食害が見られたのはドロノキであった。また、ポプラ F_1 でも、その後、若い葉の食害が見られた。成虫は葉柄と主軸を残して食べる葉食者（Chewer）であった。産卵後、約 2 週間で幼虫が孵化し、5 月末から見られた幼虫の食害は 6 月中旬まで続いた。8 月下旬からの食害は、生育期前半と異なり、新しく伸長した主軸も食害に遭い、その後、食害部の直下から 2, 3 の新しいシュートが伸びたのはドロノキであった。ポプラ F_1 では、側枝の発達より主軸の継続的伸長が見られた。なお、幼虫は葉脈を避け葉肉部のみを摂食する葉肉食者（Skeletonizer）であった。蛹は葉裏（背軸面）に見られた（図 7-1）。

図 7-1. ドロノキハムシの蛹（9 月 12 日）

越冬してきた成虫は葉を食べ始めたが、その 2～3 週間後には幼虫が見られ、成虫と幼虫の“共存”する状況が 8 月一杯続いた。これらの傾向は、既に報告されているドロノキハムシの生活史とほぼ一致した（図 8）。ただし、蛹は 9 月上旬の時点でもドロノキの背軸面（葉裏）を中心に見られた（図 7-1）。

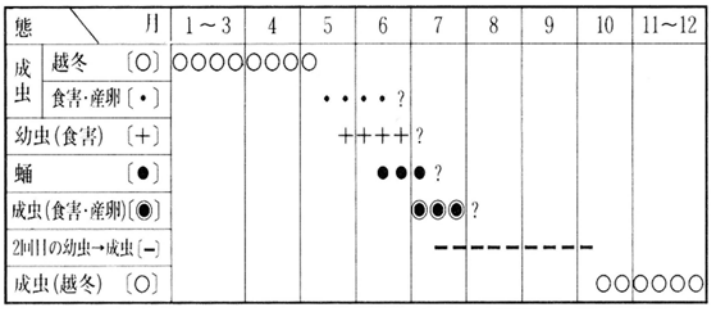

図 8 ドロノキハムシの生活史（林試北海道支場保護部、1985 から許可を得て転写）

一方、オゾン付加区（以下、オゾン区）の 3 ヶ所で、センサス時間帯の 11～15 時では、合計 2～3 匹確認できた程度であった。対照区、オゾン区ともに、近隣にドロノキとポプラ F_1 が生育しているので、図 3 に示すように、ドロノキハムシ類の“供給源”は備わっている、と考えている。

なお、ヤナギルリハムシも対照区でのみ 8 月上旬に確認したが、被害葉はわずかであった。一方、ナミスジナミフユシャクが 5 月末に 1 頭、7 月中旬に 2 頭、対照区、オゾン区のポプラで確認された。同様にサクツクリハバチの食害（図 9）も、7 月中旬から 8 月初めにかけて、

対照区、オゾン区で、それぞれ被食害木 2 個体が確認された。暫定的な結論であるが、ここで観察されたシャクトリムシ類やハバチ類は、オゾンの影響を受けていないように見えた。一方、ハムシ類は、ハンノキハムシ（Sakiwawa et al. 2016; Masui et al. 2020）やハルニレハムシ（Sugai et al. 2020）のように、ハムシ類が探索に利用している（誘因性である）BVOC が O_3 の影響を受けているのかも知れない。

対照区 3 ヶ所とも、成長の旺盛な（主軸伸長速度の高い個体、対照区では側枝発達の旺盛な個体）では、アブラムシが確認された。アリが活発に活動していたドロノキ個体の下位葉では、すす病が確認された（図 11）。同じようにアリとアブラムシが活動していた個体はオゾン区でも見られたが、すす病の確認はできなかった。なお、種の同定は不確かであるが、アブラムシ（図 10 左下，図 11）、セスジコナカイガラ幼生（図 10 の中央上）と同定できなかった微小動物を確認した。

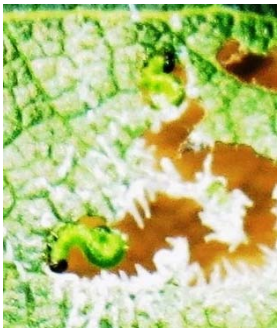

図 9. サクツクリハバチの食害

図 10. ドロノキ葉のアブラムシなど

さび病罹病個体は対照区のドロノキで 7 月下旬から見られ、8 月中旬にさび病被害が顕著になった。下位葉からスポット状に黄色の病害斑点が確認され（図 11）、8 月下旬から罹病葉の落葉が始まった。しかし、オゾン区では罹病が確認されたのは、8 月下旬からで、しかも、9 月上

図 11. ドロノキハムシの幼虫、すす病、さび病罹病葉

旬までは落葉は確認されていない。これらのオゾン区で見られたさび病（すす病も）への罹病が少ない現象は、マイルドなストレス（この場合、オゾンの長期付加）に曝されると、植物体でのストレス耐性が上がっているため（Izuta 2017）、他のストレスに対しても防御レベルが高まるというホルメシス現象が関与しているのかも知れない（図 12）。このあたりは、抗酸化物質等の定量から将来、調査を進める必要がある。

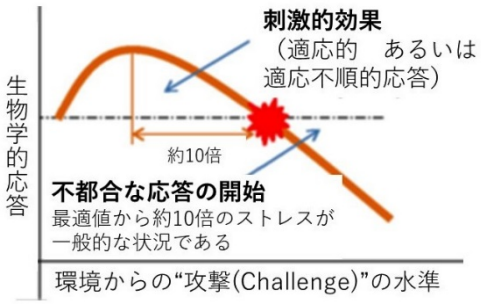

図 12. ホルメシスの概念図
(Agathokleous and Calabresec 2019)から改作

3. 展望

早生樹であるヤマナラシ類の再生可能性資源としての利用を念頭に、刈り取り後、次年度にも、同様の観察を行い、オゾンの長期間暴露の影響を、バイオマス生産の視点から解明したい。さらに、ドロノキなどでは、主な食害抵抗物質はサリチル酸であることから（西口　1995, Philippe & Bohlmann 2007）、葉の物理的強度だけではなく化学的な定量解析を行う必要がある。また、ドロノキハムシの体色が鮮やかな赤橙色であることは、このハムシがサリチル酸を解毒できるだけではなく、体に蓄えて、トリなど天敵への、自らの防御としているという（西口　1995）。この辺も興味深い。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人・科学技術振興機構（JST）の戦略的国際共同研究プログラム（SICORP）：日本－中国・国際共同研究イノベーション拠点連携プロジェクト課題「都市生態へのオゾン汚染の影響：モニタリング・影響評価・適応策」（Y2019～Y2021）代表：渡辺　誠・東京農工大学大学院農学研究院）の分担課題「植物 - 土壌系に対するオゾンの影響」（分担代表：渡部敏裕、課題番号 JPMJSC18HB）の支援を基本的予算とした。実験にご支援いただいた北尾光俊氏（森林総研）、市川一、田中郁也、原悠子、林忠一各氏に感謝する。ドロノキハムシの生活史の転写を認めてくださった吉田成章氏（元林試北海道）と北方林業会事務に感謝する。

引用文献

Agathokleous E, Calabresec EJ (2019) Hormesis can enhance agricultural sustainability in a changing world. Global Food Security 20: 150–155.

Feng ZZ, De Marco A, Anavb A, Gualtierid A, Sicarde P, Hanqin Tian AQ, Francesca Fornasierh F, Fulu FL, Guoj AH, Paoletti E (2019a) Economic losses due to ozone impacts on human health, forest productivity and crop yield across China. Environment International 131, 104966, open access: https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104966

Feng ZZ, Shang B, Gao F, Calatayud V (2019b) Current ambient and elevated ozone effects on poplar: A global meta-analysis and response relationships. Science of the Total Environment 654: 832–840.

Fuentes JD, Roulston TH, Zenker J (2013) Ozone impedes the ability of a herbivore to find its host. Environmental Research Letter, 2013, 8, 014048.（open access; doi:10.1088/1748-93）

北海道新聞（2020）バイオ発電用森林確保へ（政府方針、早生樹を育成）、2020 年 8 月 22 日、

岩崎 誠，坂 志朗，藤間 剛，林 隆久，松村順司，村田功二 （2012）早生樹-産業植林とその利用-、pp.259、海青社、大津.

Izuta T (2017) Air Pollution Impacts on Plants in East Asia, Springer Verlag Tokyo,

Karnosky DF, Pregitzer KS, Zak DR, Kubiske ME, Hendrey GR, Weinstein D, Nosal M, Percy KE (2005) Scaling ozone responses of forest trees to the ecosystem level in a changing climate. Plant & Cell Environment 28: 965–981.

Koike T, Watanabe M, Hoshika Y, Kitao M, Matsumura H, Funada R, Izuta T (2013) Effects of ozone on forest ecosystems in East and Southeast Asia. Developments in Environmental Science. 13: 371-390.

小池孝良（2018）街路樹シラカンバの虫喰いは，なぜ都心で目立つのか？ 樹木医学研究 23：174 – 175.

LRTAP (2020) International cooperative programme on effects of air pollution on natural vegetation and crops (ICP Vegetation). (https://icpvegetation.ceh.ac.uk/33rd-icp-vegetation-task-force-meeting)

増井昇，望月智貴，谷晃，松浦英幸，小池孝良（2019）変動環境下での樹林地構成樹種の虫害の現状と課題，北海道の農業気象　71: 6 – 13.

増井昇，小池孝良（2020）大気汚染が植物-昆虫間のコミュニケーションを阻害する―植物由来揮発性物質の役割―、樹木医学研究 24(4), 印刷中.

Masui N, Mochizuki T, Tani A, Matsuura H, Agathokleous E, Watanabe T, Koike T (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, (58) https://www.mdpi.com/1999-4907.

西口親雄（1995）森林保護から生態系保護へ、pp.265、新思索社、東京.

Philippe RN and Bohlmann J (2007) Poplar defense against insect herbivores, Canadian Journal of Botany 85: 1111-1126.

Osawa A (1993) Effects of mechanical stresses and photosynthetic production on stem form development of *Populus maximowiczii*. Annals of Botany 71: 489–494.

林試北海道支場保護部（1985）北海道樹木病害虫獣図鑑、pp.223、北方林業会、札幌.

森林総研北海道支所　(2011) ヤナギ畑からの利用－木質バイオマス資源作物の可能性―、pp. 16、https://www.ffpri.affrc.go.jp/hkd/research/documents/h23biomass.pdf

Sakikawa T, Nakamura M, Watanabe M, Oikawa M, Satoh F, Koike T (2106) Leaf phenology and insect grazing of Japanese white birch saplings grown under free-air ozone exposure. Journal of Agricultural Meteorology 72: 80-84.

塩尻かおり（2020）匂いを介した植物コミュニケーション、木本植物の生理生態、共立出版、p.69-70.

Sugai T, Okamoto S, Agathokleous E, Masui N, Satoh F, Koike T (2019) Leaf defense capacity of Japanese elm (*Ulmus davidiana* var. *japonica*) seedlings subjected to a nitrogen loading and insect herbivore dynamics in a free air ozone-enriched environment. Environmental Science and Pollution Research DOI 10.1007/s11356-019-06918-w.

田崎忠良　(1978) 環境植物学、朝倉書店、pp.270.

戸塚 績（2013）大気・水・土壌の環境浄化みどりによる環境改善、朝倉書店、pp160.

Watanabe M, Hoshika Y, Inada N, Wang XN, Mao QZ, Koike T (2013) Photosynthetic traits of Siebold's beech and oak saplings grown under free air ozone exposure in northern Japan. Environmental Pollution 174: 50-56

全般スモッグ気象情報（2020）【第 3 号】光化学オキシダント、https://typhoon.yahoo.co.jp/weather/jp/emergency/detail/00000009889016.html

Zhang P, Shao GF, Zhao G, Le Master DC, Parker GR, Dunning Jr JB, Li QL (2000) China's Forest Policy for the 21st Century. Science 288: 2135-2136