HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	都市生態系へのオゾン汚染の影響：実験的研究によるＪＳＴへのとり組み
Author(s)	小池, 孝良; 菅井, 徹人; 渡部, 敏裕; 市川, 一; 藤戸, 永志; 佐々木, 圭子; 曲, 来葉; 渡辺, 誠; 荒川, 圭太; 山﨑, 友紀; 佐藤, 冬樹
Citation	北方森林保全技術, 37, 11-17
Issue Date	2019-12
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/76338
Type	bulletin (article)
File Information	01-3.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Ｉ－３　都市生態系へのオゾン汚染の影響：実験的研究による ＪＳＴへのとり組み

小池 孝良[1]，菅井 徹人[2]，渡部 敏裕[1]，市川 一[3]，藤戸 永志[3]，佐々木 圭子[3]
曲 来葉[4]，渡辺 誠[5]，荒川 圭太[1]，山﨑 友紀[3]，佐藤 冬樹[3]

1 北海道大学大学院農学研究院　2 北海道大学大学院農学院(日本学術振興会特別研究員 DC1)
3 北海道大学北方生物圏フィールド科学センター　4 中国科学院生態･環境研究センター
5 東京農工大学大学院農学研究院

はじめに

多くの開発途上国が直面するのが大気汚染である。これを低減するために緑地を用いた適応的対策への指針を与えることが本研究の課題である。このために北方生物圏フィールド科学センター(FSC)札幌研究林実験苗畑の開放系オゾン付加施設を利用した研究を進めている。表記課題は、国立研究開発法人・科学技術振興機構(略称 JST)の国際共同研究イノベーション拠点研究の連携プロジェクトの分担研究である。この研究内容は以下に詳説するが、我々は、日本側のモデル実験の実証的アプローチを分担している。そこで、本稿では、いずれも大学間協定校との共同研究を基礎に、ドイツとの野外調査の概要と、中国側の提案者の曲 来葉氏(中国科学院・生態･環境研究センター：旧・北方森林保全学講座 OG)らの実験施設も紹介しながら、JST 研究「都市生態へのオゾン汚染の影響：モニタリング、評価そして緩和」(YY2019～2021)へのとり組みを紹介したい。

研究小史

日本では緑地による大気浄化能の評価は 1970-80 年代に精力的に行われた(戸塚 2012)。しかし、その時期の調査は計測技術の問題もあり「緑地周辺でどれくらいオゾン濃度が低下したのか」という単純な計測結果の報告がほとんどであった。一方、2013~2017 年に欧州(EU)において 40 か国が参加した Green Infrastructure：グリーンインフラ(例えば、緑化公園によるヒートアイランド現象の緩和など)プロジェクト(欧州科学技術研究協力機構：European Cooperation in Science & Technology：COST)の一環が実施され、都市緑地の生態系サービスに関する科学的・社会経済学的調査が行われた。この中でも都市緑地の大気汚染浄化能力の評価が行われたが、南欧以外の都市では、地表付近オゾン(O_3)による大気汚染問題はかなり改善されており、オゾン中心の研究は対象とはならなかった。

一方で、局所的には高濃度のオゾンが観測されているにもかかわらず、日本の大都市域でも COST の課題と同様な傾向にある(渡辺・小池 2013; Koike ら 2013)。今なおオゾンの汚染下にある米国のカルフォルニアやアパラチアでも、オゾン影響評価の研究は一段落したと見なされている(Karnosky ら 2009; Chappelca and Grulke 2015)。しかし、中国をはじめとして、東アジアの大都市ではオゾンの問題は依然として極めて深刻である。事実、全球レベルに注目したシミュレーションでは、東アジアの光合成総生産量は約 30%以上抑制されるとの指摘がある(Scith ら 2007)。北方生物圏フィールド科学センターのブナ林での結果では、大気の 2 倍程度のオゾン濃度を 2 年間付加しただけで相対成長率が約 25%、ミュンヘン工科大学で 8 年間、大気の 2 倍濃度 O_3 付加を行った欧州ブナの例では 44%抑制された(Pretzsch ら，2010; 小池ら 2018)。

背景：中国と日本(東京と札幌)のとり組み

現在の中国・北京のようなメガシティは、世界で最も大気汚染が深刻な地域であり、その改善が急務であることは世界的にも認知されている(Pretzsch ら 2015; 2017)。大気環境が比較的良好とされる札幌ですら、都心と郊外のトドマツ人工林を中心とした林分の年輪解析からは、大気汚染の影響が刻まれていることが解明された(Moser-Reischl ら 2019)。一方で、日本におけるオゾン汚染についても、様々な対策が講じられているにもかかわらず、東京とその周辺都市のように、環境基準値の達成できていない都市が多い。

さらに、オゾン前駆物質の窒素酸化物や(生物由来:B)揮発性有機化合物(VOC)の発生源対策は様々な分野で進められているが、その背景としては、経済発展と BVOC の発生量の多い緑地構成種の植栽によることも考えられる。このため、近い将来において、オゾン濃度の抑制が劇的に達成できるとは考えにくい(Izuta 2017)。そこで大気汚染に対する適応策も同時に推進する必要があり、研究全体の目標として、適応策の一つである都市緑地によるオゾン濃度の低減(戸塚 2013)を目指す。本研究によって都市緑地の新たな役割が科学的根拠をもって提示できることを期待する。

上述の通り、中国の北京、天津、重慶のようなメガシティは、世界で最も大気汚染が深刻な地域であり、それを反映して中国では大気汚染の植物影響に関する実験的研究が世界で最も多く行われており、樹木の応答に関する国際研究も盛んである(Feng ら 2017 ; 2019)。しかし、日本で多数行ってきた樹木の生理プロセスのモデリング、シミュレーション研究、微気象学的手法を用いた大気汚染物質の影響に関する総合的影響研究は(Izuta 2017)、中国では現在進行中である。このような特徴を持つ日本と中国の大気汚染とそれに関する研究の強みを生かすことによって、双方にとって研究の進展と政治的な提言も期待できる。

2009 年から取り組んできた開放系オゾン付加施設を利用した成果(Koike et al. 2013)を基礎に、上記のように 2011 年からは地球環境研究推進費によって、日本の主にブナ林におけるオゾンの負の影響がフラックス研究を基礎に示され(Kitao ら 2015)、従来のオープントップチェンバー(OTC: Open Top Camber)を利用したオゾン耐性基準では見落とされていた養分回収に関連したデータの必要性を指摘した(Shi ら 2017)。これらの成果を基礎に、JST の予算による「戦略的国際共同研究プログラム・日本-中国[環境・エネルギー分野]・国際共同研究イノベーション拠点・連携プロジェク」への貢献が始まった。

準備状況

構成は、日本側は代表者の渡辺 誠が所属する東京農工大学環境資源科学科(含 OB:山梨大学)のメンバーを中心に構成され、一部、大気沈着モデルは茨城大学の大気化学研究者が担う。中国側は、代表の曲 来葉の所属する中国科学院・生態-環境研究センターの都市域生態研究部門が担当する。北京郊外の中国科学院の試験地に 1 列で設けられた OTC(図 1)を利用して環境微生物学分野の構築を意図している。OTC 研究は、オゾン研究の第一人者、Xiaoke Wang (王 效科)博士が中心に研究を実施する。関連して、オゾンによる経済的損失に関する推定も、メンバーによって実施された(Li ら 2019)。なお、研究の進展のために OTC に改良を加える予定があるという。以下に、日本側・

図 1. 中国・北京市郊外の OTC の概要

北大としての準備状況と研究へのきっかけとなった情報を示す。

北大北方生物圏フィールド科学センター(FSC)と農学研究院のとり組み

1）野外調査から見える郊外と都心域の無機生産環境の樹木の成長への影響

我々が本研究に取り組む前段として、ミュンヘン工科大学(TUM)の自動車会社 Audi の「環境科学研究費：環境変化に伴う樹木の動態応答解明(project 5101954): “Reaktionskinetik von Bäumen unter Klimaveränderungen”」への参加があった(2012 年)。試験地として、FSC 札幌研究林実験苗畑 2 ヶ所の約 40 年生トドマツの植栽木のサンプリングを認めた(都心データ)。また、郊外データとしては、札幌市の協力で白旗山の植林地(郊外：サンプリング場所は標高約 250m)と天然生林からサンプリングした。准郊外の試験地(標高約 140m)として、FSC 札幌研究林・簾舞試験地と森林総研羊ヶ丘実験林 3 ヶ所(準郊外データ)の約 50 年生の植栽木を対象に成長錘を利用してコアを採取した。

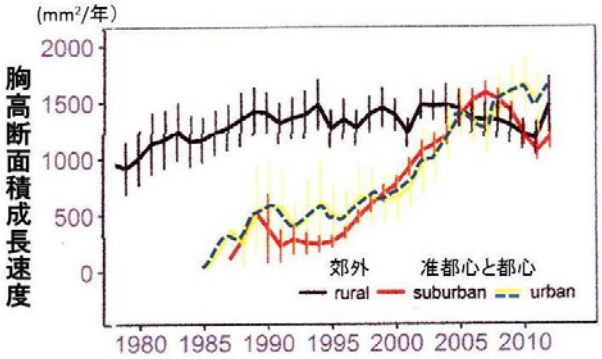

図 2. 郊外と都心・准都心の胸高断面積成長

図 2 には、1983 年~2010 年のサンプル木・合計 109 本から、成長の時系列を調べた結果を示す(Moser-Reischl ら、2019)。郊外のサンプルには天然生の個体が含まれるため、単純な比較は難しい。しかし、2003 年頃からの都心と准都心の個体成長と郊外の個体の成長を見ると、郊外の約 100 年生の個体の成長が近年抑制気味であり、都心・准都心の約 40 年生個体の成長が促進される傾向にあった。この解釈としては、一般的には夏期のヒートアイランド化の顕在化が想定されるが、トドマツは北海道を分布南限とする樹種であり、標高による気温の補整が地形(特に湿度の滞留濃霧など)の問題もあって難しい事も反映し、気温との負の相関を見るとヒートアイランドによる温度上昇との関係を指摘することは難しい(図 4 : Temperature)。詳細は後述する。

一方、札幌市衛生研究所の公開データの中から成長に影響する因子として主に、SO_2、NO_x、オゾン(O_3)に注目した(図 3)。この 30 年間、SO_2 と O_3 の前駆体である窒素化合物 NO_2 (NO_x)濃度は一貫して低下傾向にあったが、光化学スモッグの本体である酸素酸化物(Ox：主に O_3)の濃度は増加傾向にあった。これは、越境大気汚染の影響を示唆する内容であった。さらに成

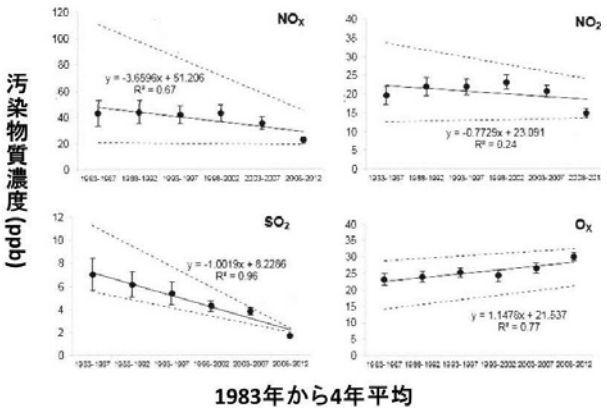

図 3. 1983 年からの大気汚染物質の動態
NO_x は主にディーゼル車からの排ガスを意味する

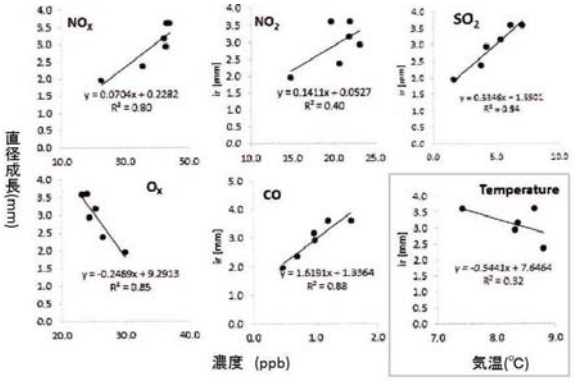

図 4. サンプル個体の直径成長と環境要因との関係

長パラメータから推察すると、SO_2のみ、その影響の説明が難しい(図 4)。日本列島の一部では、硫黄(S)分の欠乏症状を考慮する必要があるが、札幌周辺での S 分不足は報告されていない(谷川ら 2004)。

ここで、SO_x は大部分が低質な燃料の利用に起因する(Moser-Reischl ら、2019)。一方、札幌市では、「札幌の街を車粉から守るためスパイクタイヤの使用を規制する条例」が 1987 年から施行されている。スタッドレスタイヤに置き換わったことによって、大気からの酸性沈着が、従来はスパイクタイヤによる粉塵と結合していたが、スタッドレスタイヤになってからは、SO_x など酸性沈着が土壌へ直接供給された可能性を考えている。事実、札幌市郊外の羊ヶ丘実験林での一雨毎の降水の pH のモニタンリングからは(真田ら 1994)、スパイクタイヤ使用停止時期から、pH はやや低下傾向が認められた(図 5)。トドマツはやや低い pH (pH=4.8~5.7 付近)での成長がよい(坂上 1985)。また、規制後に塩化カルシウム($CaCl_2$)や塩化カリウム(KCl)を主体にした凍結防止剤の利用が増えたので、それらの影響は考察する必要がある。

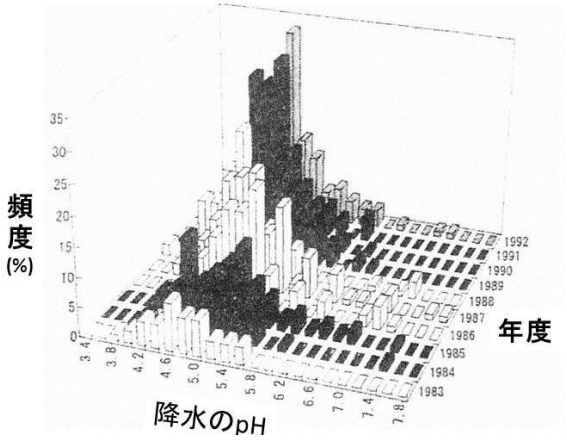

図 5. 札幌市羊ヶ丘の降水の pH の季節･年次変化
1988 年からスタッドレス(真田ら 1994 から作成)

特記すべき点は、OTC を利用した日本産 18 樹種の稚樹に関するオゾンに対する耐性からは、トドマツは中庸と位置づけられた(Yamaguchi ら 2011)。しかし、実験的研究からは、トドマツはカラマツよりは耐性はあるが、70ppb 程度の日中オゾン付加に対して成長抑制が認められた(Sugai ら 2019)。これらの先行研究を踏まえて、トドマツの成長を考察する。

図 3 に示すように地場・地元で生産されると考えられるオゾン濃度が近年低下しているに係わらず、オゾンに代表される酸素酸化物濃度の上昇に伴って(戸塚 2013)、明瞭にトドマツの直径成長は低下していた(図 4 Ox)。窒素酸化物(NO_x、NO_2)の増加は、土壌を介して成長を促してきたと考えられる。なお、相澤ら(2012)らの長期肥培試験地での報告でも認められているが、トドマツはやや酸性(pH=4.8~5.2)で窒素があれば良好な成長を遂げていた。一方、大気中の二酸化硫黄(SO_2)濃度との正の相関の解釈は今後の課題である。

このように、都市域であっても土壌条件に顕著な差がなくても局所的に成長差が出ていることから、実験的にも O_3 や土壌の影響を考慮した操作実験が必要になってきた。

２）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・開放系オゾン付加実験施設

骨格は 2003 年に RR2002(人・自然・共生プロジェクト)によって設置した開放系 CO_2 増加(FACE)システムの骨格を利用して、開放系オゾン付加施設を作成し、これまで代表的広葉樹(シラカンバ、ミズナラ、ブナ)に調査を行ってきた(小池ら 2015;Shi ら 2017)。2019 年度からドロノキ(*Populus suaveolens*＝*P.maximowiczii*)と雑種ヤマナラシ(ハイブリッドアスペン(*Populus tremula* x *P. alba*)のさし木(＝クローン植物)を用いて成長を調査する予定である(図 6)。ドロノキは欧州でよく利用されるバイオマス生産用ポプラの花粉親である。一方、雑種ヤマナラシの花粉親はヨーロッパヤマナラシ(*Populus tremula*)であるが、O_3 感受性は高い(Matyssek ら 1993)。日

図 6. サシ穂植え付け中
左:藤戸、右:市川各氏

本に自生するヤマナラシ(*Populus tremula* var. *sieboldii*)はその変種である。母親はギンドロ(*P. alba*)である。ここで、サシ穂個体間の植栽距離は 55cm であった。なお、ドロノキの活着率は約 80%であったが、雑種ヤマナラシは、30%程度で、次年度、雑種ヤマナラシの補植をする必要がある。調査は、葉のクロロフィル量、成長量と葉量の変化を追跡する予定である。

展望

本研究の終了時には、北京と東京という二つのメガシティ、さらに急速に肥大化している札幌市などにおける都市緑地の大気オゾン浄化が定量的に評価できる。さらに、オゾン吸収効率の改善が必要とされる地域とその改善策(植栽樹種の変更、管理方法の改善など)の提案を期待している。本研究の成果は、今後の都市環境の改善に向けた都市計画に対して、緑地を構成する樹種とそれらの配置の重要性を提示することも期待できる(小池ら 2015; 増井ら 2019)とともに、適切な配置を進めるうえでの重要な科学的根拠となる。

将来的には、実際に北京をはじめとした中国の大都市において、大気オゾンの浄化を目的とした都市緑地の拡充が科学的根拠に基づいて行われ、その結果として、大気汚染の改善が実現されると思われる。日本においても、都市緑地の拡充やオゾン浄化能の最適化によって、大気オゾン濃度の環境基準の達成率が向上すると考えられる。これらの結果、副次的にヒートアイランド現象の低減や緑地を利用した市民の様々な活動の充実につながることを期待している。

謝辞：土壌・降水酸性化に関する情報を提供下さった、松浦陽次郎博士(森林総合研究所)と真田勝氏(元森林総合研究所・北海道支所)に深く感謝する。

引用文献

相澤州平・伊藤江利子・橋本 徹・阪田匡司・酒井寿夫・田中永晴・高橋正通・松浦陽次郎・真田勝 (2012) トドマツ，エゾマツ，アカエゾマツおよびウダイカンバ人工林の 37 年間の成長経過と施肥の影響．北方森林研究 60: 93-99.

Agathokleous E, Saitanis CJ, Wang XN, Watanabe M, Koike T (2016) A review study on past 40 years of research on effects of tropospheric O_3 on belowground structure, functioning and processes of trees: a linkage with potential ecological implications. Water, Air, & Soil Pollution 227:33-DOI: 10.1007/s11270-015-2715-9.

Chappelka AH, Grulke N (2015) Disruption of the 'disease triangle' by chemical and physical environmental change. Plant Biology 18: 5–12. doi:10.1111/plb.12353

千葉 恵・口田圭吾・玉川勝美・加藤丈夫 (1993) 降下ばいじん槽貯留水の pH の経年変化ーpH と水溶性カルシウム'濃度の推移についてー、環境化学 3: 783-788

Feng ZZ, Bueker P, Pleijel H, Emberson L, Per Karlsson E, Uddling J (2017) A unifying explanation for variation in ozone sensitivity among woody plants. Global Change Biology 24 : pp. 1-7. ISSN 1354-1013, DOI: 10.1111/gcb.13824.

Fenga ZZ, De Marcob A, Anavb A, Gualtierid M, Sicard P, Tian H, Fornasier F, Taoi F, Guoj A, Paoletti E (2019) Economic losses due to ozone impacts on human health, forest productivity and crop yield across China. Environmental International 131, 104966, https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104966

Karnosky DF, Percy KE, Chappelka AH, Simpson C, Pikkarainen J (2003) Air Pollution, Global Change and Forests in the New Millennium. Elsevier, Amsterdam.

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. *In*: Matyssek R, Clarke N, Cudlin P, Mikkelsen TN, Tuovinen J-P, Wieser G, Paoletti E, (eds), Climate Change, Air Pollution and Global Challenges: Understanding and Solutions from Forest Research, A COST action, Elsevier, 371-390.

小池孝良・渡辺誠・星加康智・玉井裕・高木健太郎・市川一・門松昌彦・佐藤冬樹（2015）対流圏オゾンの森林への影響評価に関する研究概要 ： 札幌実験苗畑の例、北方森林保全技術、32：32-34

Li P, De Marco A, Feng ZZ, Anav A, Zhou D, Paoletti E (2018) Nationwide ground-level ozone measurements in China suggest serious risks to forests. Environmental Pollution 237: 803e813.

増井 昇・小池孝良・高木健太郎・佐藤冬樹（2019）開放系 O_3 付加施設におけるシラカンバの虫害要因の探求－揮発性成分と昆虫の行動選択の関係性－. 北方森林保全技術, 36: 15-19.

Matsuura Y, Sanada M, Takahashi M, Sakai Y, Tanaka N (2001) Long term monitoring study on rain, throughfall and stem flow in evergreen coniferous forest, northern Japan. Water, Air and Soil Pollution 130: 1661-1666.

Matyssek, R., Keller, Th. and Koike, T. (1993) Branch growth and leaf gas exchange of *Populus tremula* exposed to low ozone concentration through out two growing seasons. Environmental Pollution, 79:1-7.

Moser-Reischl A, Rötzer T, Biber P, Ulbricht M, Uhl E, Qu LY, Koike K, Pretzsch H (2019) Growth of *Abies sachalinensis* along an urban gradient affected by environmental pollution in Sapporo, Japan, Forests, 10(8), 707; https://doi.org/10.3390/f10080707. Open access.

Pretzsch H, Dieler J, Matyssek R, Wipfler P (2010) Tree and stand growth of mature Norway spruce and European beech under long-term ozone fumigation. Environmental Pollution 158: 1061–1070.

Pretzsch H, Biber P, Uhl E, Dahlhausen J, Rötzer T, Caldentey J, Koike T, van Cond T, Chavannee A, Seifertf T, du Toitf B, Farndeng C, Pauleit S (2015) Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. Urban Forestry & Urban Greening 14: 466–479.

Pretzsch H, Biber P, Uhl E, Dahlhausenm Schütze JG, Perkins D, Rötzer T, Caldentey J, Koike T, van Con T, Chavanne A, du Toit B, Foster K, Barry Lefer B (2017) Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. Scientific Report www.nature.com/scientificreports. And https://doi.org/10.1038/s41598-017-14831-w.

坂上幸雄(1985) 北海道の主要樹種の成長特性、天然林を考える、北方林業会

真田 勝・大友怜子・真田悦子（1994）札幌市羊ヶ丘における過去 10 年間の降水のｐＨについて. 日本林学会北海道支部講演集、42: 261-263.

Shi C, Watanabe T, Koike T. (2017) Leaf stoichiometry of deciduous tree species in different soils exposed to free-air O_3 enrichment over two growing seasons. Environmental and Experimental Botany 138: 148–163

Sitch S, Cox PM, Collins WJ, Huntingford C (2007) Indirect radiative forcing of climate change through　ozone effects on the land-carbon sink. Nature doi:10.1038/nature 06059

谷川東子・高橋正通・今矢明宏（2004）森林生態系における硫黄の循環と土壌の硫黄集積機構の意義－土壌の硫黄蓄積とその理化学性との関係－.　地球環境 9: 19-28

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

渡辺 誠・小池孝良（2013）欧州科学技術協力機構 COST 会議 ： 大気環境と森林管理会議, 北方林業、65: 144-147.

Yamaguchi M, Watanabe M, Matsumura H, Kohno Y, Izuta T (2011) Experimental Studies on the Effects of Ozone on Growth and Photosynthetic Activity of Japanese Forest Tree Species. Asian Journal of Atmospheric Environment 5-2: 65-78, doi: 10.5572/ajae.2011.5.2.065