

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26292075

研究課題名(和文) 開放系オゾン付加施設で生育する冷温帯樹種の成長に及ぼす窒素沈着の影響解明と応用

研究課題名(英文) Effect of high nitrogen loading on growth of cool temperate trees raised under free-air O₃ exposure

研究代表者

小池 孝良 (Koike, Takayoshi)

北海道大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：10270919

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：越境大気汚染の地表付近オゾン(O₃)濃度が増加し樹木の成長が低下してきた。一方、窒素(N)沈着も増加しており樹木は両者の複合影響を受ける。開放系O₃付加施設にてN沈着との複合影響をF1を主な対象とした。土壌は褐色森林土と未成熟火山灰土とし、ゲイマツ雑種F1と競合種などを植栽し、PM_{2.5}の主要物質の硫酸アンモニウムによる処理をした。N沈着は土壌・植物体のN量を増加させ、N沈着は土壌pHを低下させストレスが生じる可能性を検証した。O₃は成長を明確に抑制したが、50kgN/hr・年のN付加によるpHの低下がなく、O₃とNの複合影響もなかった。Nは養分として作用し、個葉レベルの生理反応は促進された。

研究成果の概要(英文)：With rapid increase of ground-surface ozone (O₃) and nitrogen loading (N) in the northeastern part of Asia, some tree species showed declining symptoms, especially around volcano, such as somma of Lake Mashu. Trees are suffering from combination stresses of the two. We examined effects of elevated O₃ and N on hybrid larch and related species grown in brown forest soil (BF) and immature volcanic ash soil (VA) with use of a free-air O₃ fumigation system of our university. With recent analysis of transboundary particle matter, we should examine (NH₄)₂SO₄ as N source. O₃ alone clearly suppressed growth of the trees tested but we did not find any marked decrease of soil pH of around 5.0 with 50kgN/hr・yr. No combination effects were also found. Based on our experiments, we may conclude that N loading accelerates tree growth as acting as N resources to plants to some extent. But we should carefully check an increase of SO₄ ion affecting soil pH in future.

研究分野：森林生理生態学

キーワード：越境大気汚染 対流圏オゾン 窒素沈着 冷温帯樹種 光合成生産 成長 開放系施設 老化

1. 研究開始当初の背景

全国の大気汚染常時測定によると、窒素酸化物 (NOx) や揮発性有機化合物 (VOC) などオゾン (O₃) 前駆物質や硫酸酸化物の濃度が減少傾向にもかかわらず、地表付近の O₃ 濃度の上昇が見られている。その原因として越境大気汚染が指摘されており、北海道でも森林への影響が懸念されている。偏西風の風下に位置する我が国は、急速な経済発展を遂げる風上の国々からの越境大気汚染を当分受け続けることになる。春先の北海道や主に本州の日本海側では、地表付近の O₃ 濃度が増加し森林衰退への関与が指摘されている。

欧州ブナに大気 2 倍濃度の O₃ 付加を 8 年間行った結果、梢殺 (肥大成長が着葉部分で抑制) が生じ、成長量が 40 % も低下した。加えて、近年、越境汚染にも関連して増加傾向にある大気からの窒素沈着の影響も複合的に考える必要がある。北海道の脊梁山地に多い蛇紋岩地帯では、窒素沈着によるグイマツ雑種 F₁ 稚樹の著しい成長抑制が指摘された。しかし、カラマツでは窒素沈着が 50 kgN/hr・yr で O₃ 感受性が低下するが、ブナでは上昇する事が温室実験から解明された。これは、樹種によっては窒素に富む立地でオゾンによる成長低下を低減できる可能性を示すが、樹木生理的な裏付けがない。

本研究ではカラマツ属を中心とするが、この理由は、他の針葉樹では年輪幅が 2mm 付近をピークに広狭に関わらず容積密度が低下し強度に不安があるからである。

2. 研究の目的

3 成長期に渡る栽培実験から、グイマツ雑種 F₁ とその競合種のオゾンに対する生理的および形態的応答を、土壌の違いおよび窒素沈着の違いに関連させて明らかにする。さらに 3 年目には、育成個体の掘り取りを行い、成長応答の定量化と樹体としての養分利用特性を解明する。

3. 研究の方法

2016 年までおよそ 10 年維持してきた開放系大気 CO₂ 実験 (FACE) 施設の骨組みを利用して、開放系オゾン付加施設 (褐色森林土、火山灰土) (通称 O₃-FACE) を作製した。設定オゾン濃度は環境基準値である 60 ppb とする。さらに、大気からの窒素沈着を模した窒素処理区を設け、そこで、グイマツ雑種 F₁ とその競合種 (ニホンカラマツ、カンバ類、ミズナラ) を 3 成長期に渡って栽培する。また、急増している越境汚染を想定した硫酸アンモニウム (硫安: (NH₄)₂SO₄; PM2.5 によって供給される窒素沈着の本体とされる) による窒素沈着 (N) 処理を施した。根の成長は、イングロース法 (一定の体積を持つ土壌コアに侵入する細根量を破壊的にサンプリング) による根の観察を実施し、成長阻害を樹木栄養生理的に評価した。プラズマ発光分析を用いて光合成機能等との詳細な関係解析を行う。それ

らの成長応答に樹体生理と樹型解析から追える。特に土壌および N 処理に伴う養分状態に関しては、開放系チェンバーも利用し調査する。

4. 研究成果

窒素沈着 (N) は無機態窒素量を増加させるが硫安付加は土壌 pH を低下させ土壌からのストレスが生じる可能性を検証した。本調査の N 付加の範囲では、やや pH は低下したが 5.6 付近でこの水準であれば、土壌酸性化は見られなかった。

窒素沈着と O₃ の複合影響を日本の森林樹種を対象に行われてきた研究は、脱硫装置導入後なので硝酸アンモニウム (硝安: NH₄NO₃) 沈着を想定した。O₃ と硝安の複合影響では、材料の葉緑体の酵素再生機能と CO₂ 固定酵素濃度は低下した (図 1)。従来の硝安の土壌への付加は 100 kgN/ha・yr で pH は 5 を下回ったが、50 kgN/ha・yr では pH は 5 を下回らなかった。本研究の硫安 [(NH₄)₂SO₄] 付加では、光合成能を低下させる O₃ と窒素の複合影響は、予想と異なり両樹種で確認できなかった。

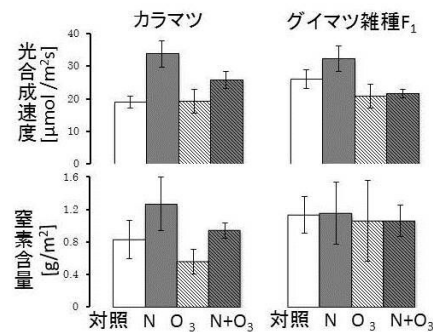


図 1. カラマツとグイマツ雑種の光合成 (A_{max}) と窒素含量 (N_{area}) に対する N と O₃ の影響 (統計値は表 1 を参照)

表 1. カラマツ属 2 種に対する N と O₃ の影響

P 値	カラマツ			グイマツ雑種 F ₁		
	N 区	O ₃ 区	複合区	N 区	O ₃ 区	複合区
A _{max}	*	n. s.	n. s.	n. s.	*	n. s.
N _{area}	**	*	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

この原因として、(NH₄)₂SO₄ 付加による顕著な土壌ストレスが生じず窒素栄養として作用し、個葉レベルの生理反応は促進された可能性がある。

得られた結果から、少なくともカラマツは、低標高の富栄養土壌に植え付ける、あるいは植え付けられた材料は、地表付近オゾン濃度と窒素沈着が増えても成長が期待できる、一方、グイマツ雑種 F₁ の光合成速度には O₃・N 沈着の複合影響は無視できないので、注意深く観察し、可能ならオゾンの影響が少ない貧栄養立地が好ましい。しかし、統計的な有意差は無いが、カラマツより N を集積するので

(表1) 光合成・蒸散が増加し、O₃の悪影響が生じ得る。この点は、落葉前の再転流も含め、さらなる解析が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計20件)

(1) Agathokleous, E., Vanderstock, A., Kita, K., and Koike, T. (2017) Stem and crown growth of Japanese larch and its hybrid F₁ grown in two soils and exposed to two free-air O₃ regimes. Environmental Science and Pollution Research. DOI 10.1007/s11356-017-8401-2.

(2) 菅井徹人・渡部敏裕・来田和人・斎藤秀之・渋谷正人・小池孝良 (2016) ニホンカラマツとグイマツ雑種 F₁ の光合成と成長に及ぼすオゾン暴露と硫酸アンモニウム付加の影響, 北方森林研究, 64:63-66.

(3) 蟹江紗耶子・佐藤冬樹・小池孝良(2016)開放系オゾン付加施設で育成した稚樹の光合成特性. 北方森林研究, 64: 71- 72.

(4) Agathokleous, E., Paoletti, E., Saitanis, C.J., Manning, W.J., Sugai, T. and Koike, T. (2016). Impacts of ethylene diurea (EDU) soil drench and foliar spray in *Salix sachalinensis* protection against O₃-induced injury. Science of the Total Environment 573: 1053-1062.

(5) Shi, C., Eguchi, N., Meng, F., Watanabe, T., Satoh, F. and Koike, T. (2016) Retranslocation of foliar nutrients of deciduous tree seedlings in different soil condition under free-air O₃ fumigation, iForest - Biogeosciences and Forestry (doi: 10.3832/for1889-009) on line journal

(6) Agathokleous, E., Paoletti, E., Saitanis, C.J., Manning, W.J., and Koike, T. (2016). High doses of ethylene diurea (EDU) are not toxic to willow and act as nitrogen fertilizer. Science of the Total Environment 566-567: 841-850. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016. 05.122.

(7) Shi, C., Kitao, M., Agathokleous, E., Watanabe, M., Tobita, H., Yazaki, K., Kitaoka, S. and Koike, T. (2016) Foliar chemical composition of two oak species grown in a free-air enrichment system with elevated O₃ and CO₂. Journal of Agricultural Meteorology 72: 50-58.

(8) Wang, X.N., Agathokleous, E., Qu LY., Watanabe M and Koike, T. (2016) Effects of CO₂ and/or O₃ on the interaction between root of woody plants and ectomycorrhizae. Journal of Agriculture Meteorology 72: 95-105.

(9) Agathokleous, E., Saitanis, C.J., Wang X.N., Watanabe M. and Koike T. (2016) A review study on past 40 years of research on effects of tropospheric O₃ 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.

(10) 蟹江紗耶子・竹内裕一・崎川哲一・佐藤冬樹・小池孝良(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.

(11) 崎川哲一・中村誠宏・渡辺 誠・佐藤冬樹・小池孝良(2015)開放系オゾン付加施設で生育したシラカンバ若齢木の葉の食害. 北方森林研究, 63: 39- 40.

(12) Agathokleous, E., Saitanis, C.J., Satoh, F. and Koike, T. (2015) Wild plant species as subjects in O₃ research. Eurasian J. Forest Research 18: 1-36.

(13) Kam, D.-G., Shi, C., Watanabe, M., Kita, K., Satoh, F. and Koike, T. (2015) Growth of Japanese and hybrid larch seedlings grown under free-air O₃ fumigation—an initial assessment of the effects of adequate and excessive nitrogen. Journal of Agricultural Meteorology 71: 239-244

(14) Hoshika, Y., Watanabe, M., Inada, N. and Koike, T. (2015) The effect of ozone- induced stomatal closure on ozone uptake and its changes due to leaf age in sun and shade leaves of Siebold's beech. Journal of Agricultural Meteorology 71: 218-226.

(15) Watanabe, M., Hoshika, Y., Inada, N. and Koike, T. (2015) Difference in photosynthetic responses to free air ozone fumigation between upper and lower canopy leaves of Japanese oak (*Quercus mongolica* var. *crispula*) saplings. Journal of Agricultural Meteorology 71: 227-231.

(16) Hoshika, Y., Katata, G., Deushi, M., Watanabe, M., Koike, T. and Paoletti, E. (2015) Ozone-induced stomatal sluggishness changes carbon and water balance of temperate deciduous forests, Scientific Report 04/2015; 5:9871. DOI:10.1038/srep 09871

(17) Agathokleous, E., Saitanis, C.J., and Koike, T. (2015) Tropospheric O₃, the nightmare of wild plants –A review study. Journal of Agricultural Meteorology 71: 142- 152.

(18) Hoshika, Y., Watanabe, M., Kitao, M., Haberer, K.-H., Grams, T.E.E., Koike, T. and Matyssek, R. (2015) Ozone induces stomatal narrowing in European and Siebold's beeches: a comparison between two experiments of free-air ozone exposure. Environmental Pollution 196: 527-533, DOI: 10.1016/j.envpol.2014.07.034.

(19) Agathokleous, E., Paoletti, E., Manning J, W, Satoh, F. and Koike, T. (2015) Ethylenediurea (EDU) as a soil drench to reduce O₃ impact on willow (*Salix sachalinensis*) cuttings - A preliminary observation using a free-air O₃ fumigation system -. Boreal Forest Research 63: 41-42.

(20) Kam D.G., Agathokleous E, Watanabe, M., Takagi, K., Satoh, F., Kita, K. and Koike, T. (2015) Production efficiency of needles of two larches species raised under a free air Ozone fumigation system in combination with nitrogen application. Boreal Forest Research 63: 43-44.

〔学会発表〕(計 21 件)

(1) 菅井徹人・北尾光俊・来田和人・渡部敏裕・小池孝良 (2017) オゾン暴露に対するトドマツの生理成長応答～ニホンカラマツとの比較から。日本生態学会北海道地区大会 2016 年度、北大・環境科学院、北海道・札幌市、3月3日 2017年。

(2) Agathokleous, E., Koike, T., Kanie, S., Paoletti, E., Manning, W.J. and Saitanis, C.J. (2016). Interactive effect of Ethylenediurea, O₃ pollution and insect grazing on willow saplings cultivated in a free-air-O₃ system. IUFRO Regional Congress for Asia and Oceania 2016, Air pollution and climate change impacts on forest ecosystems. 24-27, October 2016, Beijing, People's Republic of China.

(3) Koike, T., Wang, X., Qu, L., Agathokleous, E., Kam, D.-G., and Tamai, Y. (2016). Increased nitrogen and O₃ changed ectomycorrhizae community structure in three larch species. IUFRO Regional Congress for Asia and Oceania 2016, Air pollution and climate change impacts on forest ecosystems. 24-27, October 2016, Beijing, People's Republic of China.

(4) Koike, T., Agathokleous, E., Shi, C., Vanderstock, A., Fujita, S., Sugai, T., Wang, X., and Watanabe, T. (2015). Sustainable forest production under changing environment with a free-air system and open top chambers. Joint Myanmar-Japan symposium. Patheon Patyn University, 5-6 December 2015, Ayeyarwady, Myanmar.

(5) Agathokleous, E., Kanie, S., Paoletti, E., Manning, W.J., Saitanis, C.J., Satoh, F., and Koike, T. (2015). Impact of elevated O₃ on growth, physiology and production of willow (*Salix sachalinensis* L.), an energy crop, and the role of Ethylene di-urea: a free-air-O₃ system. 3rd International Life-Science Symposium. 26 November 2015, Sapporo, Japan.

(6) 菅井徹人・渡部敏裕・来田和人・齋藤秀之・渋谷正人・小池孝良 (2016)ニホンカラマツとグイマツ雑種 F₁ 稚樹に対するオゾン暴露と硫酸アンモニウム付加の影響 - 光合成と成長に着目して - 第 127 回日本森林学会, 日本大学, 3月26日、2016年, 神奈川県, 藤沢市。

(7) Sugai, T., Watanabe, T., Kita, T. and Koike, T. (2016) Effects of ammonium sulfate and/ or ozone on growth and photosynthesis of Japanese larch and hybrid larch F₁. The 7th International Nitrogen Initiative Conference. Melbourne Cricket Ground, Dec 2016, Melbourne, Australia.

(8) 菅井徹人・渡部敏裕・来田和人・齋藤秀之・渋谷正人・小池孝良 (2016) 2年間に渡るニホンカラマツとグイマツ雑種 F₁ 苗木に対するオゾン暴露と硫酸アンモニウム付加の影響, 第 65 回北方森林学会, 札幌コンベンションセンター, 11月, 北海道, 札幌市。

(9) Sugai, T., Kam, D., Kita, K., and Koike, T. (2016) Effects of different ozone concentrations on Japanese larch and its hybrid larch with an open top chamber, International Conference on Agricultural Biodiversity and Sustainability 2016 -CABS 2016-, 22-24, August 2016, Hokkaido University, Japan.

(10) Agathokleous, E., Vanderstock, A., Sugai, T., Fujita, S., and Koike, T. (2016). Japanese larch and its hybrid grown in two soils in a free-air O₃ enrichment regime: Growth and photosynthetic pigments. IUFRO Regional Congress for Asia and Oceania 2016, Air pollution and climate change impacts on forest ecosystems. 24-27, October 2016, Beijing, People's Republic of China.

(11) Agathokleous, E., Sugai, T., Paoletti, E., Manning, W.J., Saitanis, C.J., Satoh, F., and Koike, T. (2016). Experimental comparison of two methods of ethylene di-urea application as to their efficacy to protect *Salix udensis* plants against O₃ stress. Committee on Air Pollution Effects Research on Mediterranean Ecosystems (CAPER med) – II Meeting entitled "(E) merging directions on air pollution and climate change research in the Mediterranean ecosystems". 28-30 June, 2016, Brescia, Italy.

(12) Koike, T., Wang XN, Qu, L.Y., Fujita, S., Sugai, T., Shi, C. and Watanabe T. (2016) Sustainable forest production with hybrid larch F₁ under changing environment: Prediction with a free-air system and OTC. Joint symposium between Nankai University and Hokkaido University, March 28-30, 2016, Tianjin, China.

(13) Hoshika, Y., Katata, G., Watanabe, M., Deushi, M., Koike, T. and Paoletti, E. (2016) Global ozone impacts on forest carbon and water use. IUFRO Regional Congress for Asia and Oceania 2016, Forest for Sustainable Development: The Role of Research, 26 October 2016, Beijing, China.

(14) 渡辺 誠・廣島ひろか・黄瀬佳之・岡部成晃・伊豆田 猛 (2016) ブナ苗の成長における窒素利用効率に対するオゾンの影響. 第 127 回日本森林学会大会, 2016年3月28日, 神奈川県, 藤沢.

(15) 渡辺 誠・廣島ひろか・黄瀬佳之・岡部成晃・伊豆田 猛 (2016) 異なる土壌養分条件におけるブナ苗の成長における窒素利用効率

に対するオゾンの影響. 第57回大気環境学会
年会, 2016年9月8日, 北海道, 札幌.

(16) Hoshika, Y., Watanabe, M., Katata, G.,
De Marco, A., Deushi, M., Carriero, G.,
Koike, T. and Paoletti, E. (2015) Toward
modeling of stomatal conductance under
elevated ozone in forest trees. 10th congress
of Italian Society of Silviculture and Forest
Ecology, 16 September 2015, Firenze, Italy.

(17) Watanabe, M., Hoshika, Y., Inada, N.
and Koike, T. (2015) Difference in
photosynthetic responses to ozone between
canopy positions in Japanese oak. IUFRO
2015: Global Challenges of Air Pollution
and Climate Change to Forests, 2 June
2015, Nice, France.

(18) Sugai, T., Watanabe, T., Kita, T. and
Koike, T. (2015) Effects of Ozone and/or
ammonium sulfate on photosynthesis of
Japanese larch and its hybrid larch, The
1st Asia Pollution Workshop, The Univ of
Tokyo, Oct 31st-Nov 2nd, 2015.

Bunkyo-ku, Tokyo,

(19) 渡辺 誠・星加康智・稲田直輝・小池孝
良 (2015) 着葉位置の異なるミズナラ葉の光
合成に対するオゾンの影響. 第56回大気環境
学会年会, 2015年9月15日, 東京都新宿区.

(20) 菅井徹人・渡部敏裕・来田和人・斎藤秀
之・渋谷正人・小池孝良 (2015) ニホンカラマ
ツとグイマツ雑種 F₁ の光合成と成長に及ぼ
すオゾン暴露と硫酸アンモニウム付加の影
響, 第64回北方森林学会, 札幌コンベンシ
ョンセンター, 11月, 北海道, 札幌.

(21) Sugai, T., Kam, D.-G., Satoh, F. and
Koike, T. (2015) Effects of elevated O₃ on
the growth of Japanese larch and its hybrid
larch F₁ with/ without ammonium sulfate
application. 2nd joint seminar between
Nankai Univ. and Hokkaido Univ., Sapporo
Jan. 2015. Abstract book p.14

〔図書〕(計4件)

(1) Yamaguchi, T., Watanabe, M., Noguchi, I. and
Koike, T. (2017) Tree decline at the somma of
Lake Mashu in northern Japan. Air pollution
impacts on plant in East Asia (Izuta, T. ed.),
Springer Japan, Tokyo, 135-150.

(2) Watanabe, M., Hoshika, Y., Koike, T. and Izuta,
T. (2017) Combined effects of ozone and other
environmental factors on Japanese trees. Air
pollution impacts on plant in East Asia (Izuta, T.
ed.), Springer Japan, Tokyo, 101-110.

(3) Watanabe, M., Hoshika, Y., Koike, T. and Izuta,
T. (2017) Effects of ozone on Japanese trees. Air
pollution impacts on plant in East Asia (Izuta, T.
ed.), Springer Japan, Tokyo, 73-100.

(4) 丹下 健・小池孝良 編著(2016) 造林学 4
訂版、朝倉書店、東京

〔産業財産権〕

なし

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小池 孝良 (KOIKE, Takayoshi)

北海道大学・大学院農学研究院・教授

研究者番号: 10270919

(2) 研究分担者

佐藤 冬樹 (SATOH, Fuyuki)

北海道大学・北方生物圏フィールド科学セン
ター・教授

研究者番号: 20192734

高木健太郎 (TAKAGI, Kentaro)

北海道大学・北方生物圏フィールド科学セン
ター・准教授

研究者番号: 20322844

渡部 敏裕 (Watanabe, Toshihiro)

北海道大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号: 60360939

渡辺 誠 (Watanabe, Makoto)

東京農工大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号: 50612256

(3) 連携研究者

来田 和人 (KITA, Kazuhiro)

北海道総合研究機構・林業試験場・主査

研究者番号: 90414250