

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23380078

研究課題名(和文) 開放系施設を用いたO₃とCO₂付加が主要樹種の成長と気孔通道性に及ぼす影響解明研究課題名(英文) Combination effects of elevated O₃ and CO₂ on growth and hydraulic function of representative trees

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) 14,000,000円、(間接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：高オゾン(O₃)処理(60 ppb、日中7時間)ではグイマツ雑種F1稚樹の肥大成長量は葉量と細根の生産量の低下のため抑制された。高CO₂処理(日中600 ppm)では、全3種(雑種と両親)の成長が促進され、O₃との複合影響下では、グイマツ雑種F1では成長低下の顕著な緩和が見られた。しかし、高CO₂条件下での気孔開度の低下のみではO₃による成長抑制の原因を説明出来なかった。開放系O₃付加実験ではブナ若齢木の相対成長率が対照区に比べて約25%低下した。しかし、同じ樹齢のミズナラやシラカンバではこの傾向は明確ではなかった。

研究成果の概要(英文)：With use of open top chambers, the diameter growth of hybrid larch F1 (*Larix gmelinii* x *L. kaempferi*) was suppressed by high O₃ (60 ppb, 7 hours in day) which is mainly due to decrease of dry-mass needles and fine roots. At high CO₂ (600 ppm, day), the growth of F1 and its parents was increased and the O₃-induced depression was moderated. However, recovery of O₃-induced decrease of F1 was not simply explained by stomatal closures by high CO₂. Relative growth rate of young beech (*Fagus crenata*) trees was about 25% suppressed by 60 ppb with free-air O₃ fumigation, by contrast no decrease in the same age of oak (*Quercus mongolica* var. *crispula*) trees was found.

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：対流圏オゾン 高CO₂ 複合影響 落葉樹 気孔コンダクタンス 光合成 補償作用 肥大成長

1. 研究開始当初の背景

(1)東北アジアでの急速な経済発展に伴って排出される多量の一次大気汚染物質(窒素・硫黄酸化物、炭化水素類など)は、発生源近傍の大気汚染だけでなく、周辺国への広域越境汚染を引き起こしている。近年、日本では光化学オキシダントの主成分であるオゾンの濃度が再び増加している。酸性雨問題をきっかけに欧州では森林衰退の原因解明に関する研究が継続されているが、その結果、土壌酸性化と対流圏 O₃ (地表から 11 km 高: 以下 O₃) の複合影響が衰退の主因と推察された。

(2)2009 年 9 月の国連気候変動首脳会合において、「我が国の温室効果ガス排出量を 2020 年までに 1990 年比で 25%削減」の達成目標が掲げられ、森林による温室効果ガス CO₂ の削減の役割が期待されている。Sitch et al. (2007; Nature 448, 791-)は、従来の研究結果から O₃ によって最大約 30%の光合成生産機能の低下を指摘したが、増加し続ける大気 CO₂ 濃度との複合影響は、このモデルには反映されていない。欧州では越境大気汚染条約により、農作物、森林、自然植生に対する O₃ のクリティカルレベルの暫定値が設けられた。しかし、残念ながら、我が国では特に森林に関する情報が著しく不足している。大きく変化している大気環境が森林の健全性と活力に及ぼす影響の評価は急務である。

(3)O₃ の樹木への研究が北欧と中央ヨーロッパで行われた結果、例えば 40 ppb 程度の低濃度 O₃ であっても暴露期間が生態系にマイナス影響を及ぼすという指摘から、積算値を用いた評価方法の導入が暫定的に提唱され AOT40 (Accumulated Exposure Over Threshold of 40: 40 ppb を超える O₃ 濃度の 1 時間値の積算値)が導入された。このように樹木に影響が現れるクリティカルレベルは提唱されたが、O₃ 吸収量を基礎にしたパラメータではないため、樹木生産力の低下を十分に説明できる内容とは言えない。

(4)最近、西南日本を中心に O₃ による樹木の衰退や森林の健全性の低下が指摘され、北海道では高標高のダケカンバに深刻なダイバック(枯れ下がり)現象が見られ、銘木ウダイカンバには水分ストレスと虫害に起因する衰退が問題視されている。一方、開放系暴露(FACE 型)システムによる成木を対象にした研究では、米国北部でアスペンとカンパ類の混交林での O₃+CO₂ 複合影響が調べられ、病害耐性が低下して成長が抑制されていた。欧州トウヒ・ブナ混交林で 60 ppbO₃ を 8 年間暴露した結果、ブナ成木では梢殺が生じ、幹の成長が 40 %低下したことが指摘された。しかし、全体としても O₃ と CO₂ が樹木に及ぼす野外での評価は著しく遅れている。

2. 研究の目的

(1)樹木に対する O₃+CO₂ の暴露試験は、これ

まで閉鎖系(人工気象など)で実施されてきた。このため葉の表面構造発達に重要な B.A 領域紫外線の効果が遮断され、研究成果を屋外へ出すことは難しかった。理想的な研究施設は米国のアスペン FACE であったが、アスペン・ポプラ・カンパ類のみと樹種が限定されている。そこで対象樹種を国産のカンパ類や主要造林樹種を用いることで、我が国の実情に合うデータを得る。

(2)野外に近い条件で O₃ を暴露できる開放系システムを構築し、開放系大気 CO₂ 増加実験(FACE)での CO₂ 付加の効果の著しいシラカンバや造林樹種グイマツ雑種 F₁ を中心に、O₃ 吸収ベースでの成長と CO₂ 付加による複合影響を調べる。この結果、従来の AOT40 より精度の高い環境基準を用いて衰退を引き起こす O₃ 濃度と CO₂ 増加による補償効果を明確にする。なお、O₃ も質量ベースでは CO₂ の 1000 倍の放射強制力(温室効果)を持つ温室効果ガスである

3. 研究の方法

(1)実験施設と植物材料: 初年度に開放系 O₃ 付加装置(O₃ 除去浄化空気、60 ppbO₃ 単独: (60 ppb、日中 7 時間; 東京近郊での平均最高値、600 ppmCO₂ 付加、O₃+CO₂ 付加を各 4 チェンバー)を作成する。実験材料の苗木(2010 年時点で 2 年生:カンパ類 3 種、グイマツ雑種 F₁)を植え込む。一方、完全な開放系の O₃ 付加装置は、ブナとミズナラ(2010 年時で 9 年生)は、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター・札幌研究林内に植えられた各 10 本の個体を用いる。例年 5 月には対流圏 O₃ 濃度がピークになるので、それまでに O₃ 付加を開始する。

(2)葉の生物季節観察を行い、葉の展開後、クロロフィル、窒素量、光合成速度などを追跡する。さらに、ライゾトロンによって根圏の観測を試みる。処理 2 年目から吸収量ベースの O₃ 影響を評価し、3 年間観測を継続する。この間、葉の形態・解剖特性を調べ O₃ 侵入経路、葉の表面構造の観察を行う。最終年には落葉の始まる前の 9 月頃に掘り取りを行い、O₃ 存在で低下するという樹冠の発達阻害(梢殺)と根の成長解析を行い評価する。また、摩周湖外輪山と天塩でも野外研究を継続し、衰退に関する誘因の解明を行う。なお、統計解析は 2 元配置の分散分析を行い、 $P < 0.05$ で有意差有りとした。

4. 研究成果

(1)明瞭な結果は植栽時に競合するカンパ類よりは、北海道の主要造林樹種であるカラマツ属に見られた。グイマツ雑種 F₁ 稚樹の成長は高オゾン処理で明瞭に抑制された($P < 0.05$)。しかし、花粉親のニホンカラマツと雌親のグイマツ(北海道の中標津産)の稚樹には明瞭な成長抑制は見られなかった。この原因は葉

量（枝も含みシュート量と換言できる）の抑制によると考えている。しかし、高二酸化炭素（CO₂）処理（日中 600 ppm：IPCC によって 2050 年頃を想定）では、全種の成長がやや促進され、O₃との複合影響下では、成長低下がやや緩和された(図-1)。しかし、期待していた高CO₂条件下での気孔開度の低下のみでは、O₃による成長抑制の原因を説明出来なかった。

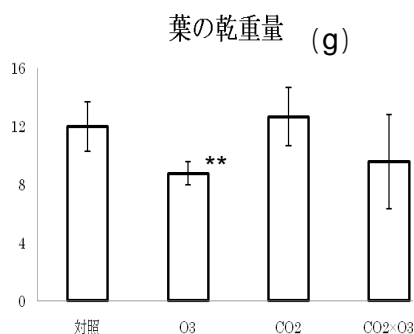


図 - 1 グイマツ雑種 F₁ の針葉乾重に及ぼす O₃ と CO₂ の単独・複合影響

特にブナでも確認されたが、生育後期になると気孔閉鎖機能が低下するため、機能面だけではなく、それを担う葉の動態を注視する必要性が確認出来た。

また、高 O₃ 条件では、本実験の範囲ではあるが、細根の生産量が抑制されることが解明された。植え付け初期には植栽地でカラマツ属造林樹種と競合するカンバ類では、落葉前の葉からの主に窒素回収機能が著しく低下し、この結果として、次年度での成長が阻害される可能性が得られた。

(2)今後の研究成果を待たねば成らないが、ブナで見られる梢殺（樹冠内部での肥大成長が抑制）現象が生じる原因解明へとつながると予想し、継続研究をおこなう。なお、茨城産（太平洋タイプ）のブナ稚樹を使った実験では、O₃+CO₂ 処理でのバイオマス増加が著しかった。この原因は、ブナは固定成長型であり、シュート成長は年に1度だけのはずであるが、気孔コンダクタンスの低下によって O₃ 吸収が抑制され、さらに高 CO₂ (= 700ppm) によって光合成生産量が増加したことが2度伸びを生じた結果、現存量も著しく増加した。この理由は、最近、欧州ブナの野外での実験によって、サイトカイニン系ホルモンの分泌が高オゾン環境で促進される結果ではないかと、予測されている。

(3)今後は、異なる O₃ 濃度による北海道の主要造林樹種として注目されるグイマツ雑種 F₁ に与える影響を確定したい。また、ニホンカラマツでは窒素沈着が増えると O₃ への感受性が低下するが、グイマツ雑種 F₁ ではどのような傾向が得られるかも合わせて解明せ

ねばならない。開放系オゾン付加実験からは、ブナの相対成長率が対照区に比べて約 25% 低下していた。この傾向はドイツ南部のヨーロッパブナでの成長低下と同じ傾向であり、その原因を検討中である。

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7件)

Watanabe, M., Hoshika, Y. and Koike, T. (2014) Photosynthetic responses of Monarch birch seedlings to different timing of free air ozone fumigation. *Journal of Plant Research*, 127: 339–345, DOI 10.1007/s10265-013-0622-y (査読有)

Watanabe, M., Hoshika, Y., Inada, N., Wang XN, Mao, QZ. and 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. doi: 10.1016/j.envpol.2012.11.006. (査読有)

Hoshika, Y., Tatsuta, S., Watanabe, M., Wang XN, Watanabe, Y., Saito, H. and Koike, T. (2013) Effect of ambient ozone at the somma of Lake Mashu on growth and leaf gas exchange in *Betula ermanii* and *B. platyphylla* var. *japonica*. *Environmental and Experimental Botany* 90: 12–1. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2012. 11.003. (査読有)

Hoshika, Y., Watanabe, M., Inada, N., Mao, QZ. and Koike, T. (2013) Model analysis of avoidance of ozone stress via stomatal closure for Siebold's beech (*Fagus crenata*). *Annals of Botany* 112: 1149-1158. Doi: 10.1093/aob/mct166. (査読有)

Koike, T., Mao, QZ., Inada, N., Kawaguchi, K., Hoshika, Y., Kita, K. and Watanabe, M. (2012) Growth and photosynthetic responses of cuttings of a hybrid larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* x *L. kaempferi*) to elevated ozone and/or carbon dioxide. *Asian Journal of Atmospheric Environment* 6: 104-110. doi: http://dx.doi.org/10.5572/ajae.2012.6. 2.104 (査読有)

Hoshika, Y., Watanabe, M., Inada, N., and Koike, T. (2012) Growth and leaf gas exchange in three birch species exposed to elevated ozone and CO₂ in summer. *Water, Air, and Soil Pollution*, 223: 5017-5025, DOI: 10.1007/s11270-012- 1253-y. (査読有)

Kawaguchi, K., Watanabe, M., Hoshika, Y. and Koike, T. (2012) Ecophysiological responses of Northern Birch Forests to changing atmospheric environment, *Asian Journal of Atmospheric Environment* 6:196-205. doi: http://dx.doi.org/10.5572/

〔学会発表〕(計 8 件)

Wang, XN., Mao, QZ., Qu, LY., Kawaguchi, K., Watanabe, M., Hoshika, Y., Koyama, A. Tamai, Y. and Koike, T. (2013) Ectomycorrhizal richness and growth of hybrid larch F1 under elevated O₃ and CO₂. International Conference “Vegetation Response to Climate Change and Air Pollution - Unifying research and evidence across northern and southern hemispheres” 1-6 September 2013, Ilhéus, Bahia, Brazil.

Novriyanti, E., Watanabe, M., Hashidoko, Y. and Koike, T. (2012) Comparison of physiological responses of eucalypt species to elevated atmospheric [CO₂] and [O₃]. Japan-Australia Symposium on Plant Sciences for Agriculture, 19-20 January 2012, Sapporo, Japan.

Koike, T., Watanabe, M., Wang, X., Tatsuta, S., Sakuma, A., Yamaguchi, T., Noguchi, I., Saito, H. and Hoshika, Y. (2012) Declining symptom of mountain birch (*Betula ermanii*) in northern Japan. International conference ‘Biological Reactions of Forests to Climate Change and Air Pollution’, 18-27 May 2012, Kaunas, Lithuania.

稲田直輝・渡辺 誠・小池孝良 (2011) 高 O₃ および高 CO₂ がカンバ類 3 種稚樹の成長と光合成に与える影響. 第 52 回大気環境学会年会, 2011 年 9 月 14-16 日, 長崎県長崎市.

Novriyanti, E., Watanabe, M., Hoshika, Y., Hashidoko, Y. and Koike, T. (2012) Insensible response of eucalypts species to elevated [O₃] as compare with elevated [CO₂] may not reflect the actual defense cascade. 第 123 回日本森林学会大会, 2012 年 3 月 26-29 日, 栃木県宇都宮市.

川口光倫・渡辺 誠・稲田直輝・上田龍四郎・佐藤冬樹・小池孝良 (2012) 落葉樹種に対する高濃度の二酸化炭素とオゾンによる単独および複合作用. 第 123 回日本森林学会大会, 2012 年 3 月 26-29 日, 栃木県宇都宮市.

Watanabe, M., Mao, Q., Novriyanti, E., Ito, H., Takagi, K., Sasa, K. and Koike, T. (2011) Photosynthetic responses of 3 birch species to elevated CO₂ concentration with FACE system in northern Japan. XXIV SPPS (Scandinavian Plant Physiology Society) Congress, 21-25 August 2011, Stavanger, Norway.

Koike, T., Inada, N., Tonooka, M., Takeuchi, Y., Mao, Q., Kita, K., Kawaguchi, K. and Watanabe, M. (2011) Growth and photosynthetic responses of hybrid larch F₁ cuttings to elevated O₃ and/or CO₂. The 8th International Conference on Acid

〔図書〕(計 3 件)

Koike, T., *et al.* (2013) Matyssek, R., *et al.* eds., Climate Change, Air Pollution and Global Challenges: Understanding and Solutions from Forest Research, A COST action, Elsevier. 371-390.

北方森林学会編 (2012) 北海道の森林、北海道新聞社出版局.

Koike, T. (2012) Silviculture and Forest Ecology in changing environment. In: Hashidoko, Y. *et al.* eds., Agricultural Science for Human Sustainability, Kaiseisha. pp.121 -122.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.agr.hokudai.ac.jp/fres/silv/index.php?%BF%B9%CE%D3%C0%B8%CD%FD%C0%B8%C2%D6>

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

佐野 雄三 (SANO Yuzo)
北海道大学・大学院農学研究院・教授
研究者番号: 90226043

佐藤 冬樹 (SATO, 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

笹 賀一郎 (SASA, Kaichiro)

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: 70125318

(3) 連携研究者

船田 良 (FUNADA, Ryo)
東京農工大学・大学院農学研究院・教授
研究者番号: 20192734

千葉 幸弘 (CHIBA, Yukihiro)

森林総合研究所・拠点長
研究者番号: 90353771