- 課題名 5B-1105 葉のオゾン吸収量に基づいた樹木に対するオゾンの影響評価に関する研究
- 課題代表者名 伊豆田 猛 (東京農工大学大学院農学研究院教授)
- 研究実施期間 平成23~25年度
- 累計予算額 154,872千円(うち25年度47,653千円) 予算額は、間接経費を含む。
- 本研究のキー オゾン、越境大気汚染、落葉広葉樹、葉のオゾン吸収量、オゾンの樹木影響の現状評価 ワード

研究体制

- (1)樹木の葉のオゾン吸収量推定法の開発(東京農工大学)
- (2)樹木の葉のオゾン吸収量と光合成能力との関係の解明(((一財)電力中央研究所)
- (3)葉のオゾン吸収量に基づいた成木に対するオゾンの影響評価(北海道大学)
- (4)フラックスタワー測定による森林のCO,吸収量に対するオゾンの影響評価((独)森林総合研究所)

研究概要

1. はじめに(研究背景等)

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 (O₃)の濃度が増加している。その原因のひとつとして、アジア 大陸からの越境大気汚染が指摘されている。対流圏における オゾン濃度の上昇は樹木の光合成能力を低下させ、森林の 二酸化炭素(CO₂)などの温室効果ガス削減能力へ悪影響を 及ぼすことが危惧される(図1)。したがって、日本の森林を構成 する樹木に対するオゾンの影響を正確に評価する方法を早急 に確立する必要がある。しかしながら、現在の所、オゾン濃度の 上昇が日本の森林を構成している樹木のCO₂吸収・固定能力 や成長に与える影響を気孔を介した葉のオゾン吸収量に基づ いて正確に評価する方法は確立されていない。したがって、気 孔を介した葉のオゾン吸収量に基づいて日本の森林を構成して いる樹木のCO₂吸収・固定能力や成長に及ぼすオゾンの影響を 正確に評価する方法を確立し、日本の主要な樹種に対する オゾンの影響に関する現状評価を早急に行なう必要がある。



図1 樹木に対するオゾンの影響

2.研究開発目的

本研究の目的は、気孔を介した葉のオゾン吸収量に基づいて日本の森林を構成している樹木のCO₂吸収・ 固定能力や成長に及ぼすオゾンの影響を正確に評価する方法を確立し、日本の主要な森林樹種であるブナ、 ナラ類、カンバ類に対するオゾンの影響に関する現状評価を行なうことである。平成25年度においては、サブテー マ(1)の「樹木の葉のオゾン吸収量推定法の開発」では、コナラ、ミズナラ、シラカンバおよびブナの苗木を対象と したオゾン暴露実験を行い、ナラ類とカンバ類の苗木を対象としたオゾン暴露実験を継続して行い、葉のガス 交換速度、生理生化学的活性、気孔の構造や分布および形態的特性と環境要因やオゾン濃度・ドースとの 関係を解析し、葉のオゾン吸収量の推定式を構築することを目的とした。また、サブテーマ(2)の「樹木の葉の オゾン吸収量と光合成能力との関係の解明」では、平成24年度に引き続き、ブナ・ナラ類・カンバ類の苗木に 対する長期オゾン暴露実験を継続実施し、二成長期にわたる葉のオゾン吸収量と光合成能力との関係を解析 し、得られた関係をサブテーマ(3)およびサブテーマ(4)に提供し、成木レベルでの検証を行うことを目的とした。 サブテーマ(3)の「葉のオゾン吸収量に基づいた成木に対するオゾンの影響評価」においては、ブナ、ナラ類、 カンバ類の成木の光合成能力、成長と木部組織構造に対するオゾンの影響を解明し、光による樹木のオゾン 感受性に与える影響を解明し、最終的には刈り取りを行い、 より詳細な樹木の構造解析を行うことを目的とした。サブテーマ (4)の「フラックスタワー測定による森林のCO2吸収量に対する オゾンの影響評価」では、オゾン濃度測定を継続して行い、 オゾン濃度の季節変化、年次変化と森林のCO2吸収量との関係 から、森林群落レベルでのオゾン影響を評価することを目的と した。

3.研究開発の方法

(1)樹木の葉のオゾン吸収量推定法の開発

供試植物として、コナラ(Quercus serrata, 2年生苗)、ミズナラ (Quercus mongolica Fisch. ex Ledeb. var. crispula (Blume), 2年生苗)、シラカンバ(Betula platyphylla, 2年生苗)およびブナ (Fagus crenata, 3年生苗)を用いた(写真1)。供試土壌として、 育苗培土を用いた。供試土壌を詰めたワグネルポット(1/2000a, 容積12L)に、1ポット当たり1個体ずつ各樹種の苗木を移植した。 移植後、東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイ エンス教育研究センターのフィールドミュージアム多摩丘陵 (FM多摩丘陵,東京都八王子市)に設置したオゾン暴露チャン バー内で、コナラ、ミズナラ、シラカンバおよび ブナの苗木を 2012年6月5日~2013年10月15日の498日間にわたって育成した (写真2)。4樹種の育成期間を通して、3段階のガス処理を設定し た。ガス処理区として、活性炭フィルターによって浄化した空気を チャンバー内へ導入した浄化空気区(CF区)、チャンバー内の オゾン濃度を野外オゾン濃度の1.0倍に比例追随制御した1.0倍 オゾン区およびチャンバー内のオゾン濃度を野外オゾン濃度の 1.5倍に比例追随制御した1.5倍オゾン区の合計3処理区を設け た。ガス処理は、2012年6月5日~11月6日と2013年4月13日~ 10月15日の合計341日間にわたって行なった。携帯型蒸散測定 装置を用いて、4樹種の葉の水蒸気気孔コンダクタンス(気孔 開度の指標)を測定した。気孔コンダクタンスの測定時の環境 条件として、光合成有効放射束密度、気温、相対湿度、土壌 体積含水率およびオゾン濃度を気孔コンダクタンスと同時に測定 した。なお、気温と相対湿度を用いて気孔コンダクタンス測定時 の飽差を算出した。また、出葉日から気孔コンダクタンスの測定 時までの有効積算温度(日平均気温から5℃を差し引いた値の 積算値)を算出した。

サブテーマ(1)、(2)、(3)および(4)で得られた知見を総合的に 解析し、日本に分布するブナ、コナラ、ミズナラ およびシラカンバの 葉の積算純光合成量(積算CO₂吸収量)に対するオゾンの影響の 現状評価を行った。

(2) 樹木の葉のオゾン吸収量と光合成能力との関係の解明

供試植物として、ブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの苗木を用いた。電力中央研究所赤城試験センターに設置されているオープントップ チャンバー(写真3)を用いて、4段階の濃度のオゾン(浄化大気/外気オゾ ン濃度の1.0倍/1.5倍/2.0倍)の処理実験を2成長期間(2012年4~11月 および2013年3~11月)にわたって行った(ガス処理期間中の平均オゾン 濃度: 5/26/46/61ppb)。ガス処理期間中における4樹種の葉の光飽和 条件における純光合成速度を定期的に測定した。測定葉は上位枝に 着生した成熟葉とした。葉の純光合成速度とその経時変化(出葉日から の日数)から2012年および2013年における積算純光合成量(積算CO₂ 吸収量)を算出した。サブテーマ(1)で構築した推定法によって気孔を介し



写真1本研究の供試樹木(落葉広葉樹4種).



写真2 樹木苗へのオゾン暴露に用いた オゾン暴露チャンバー(東京農工 大学 FM 多摩丘陵).



写 真 3 樹木 苗 へ の オゾン 暴 露 に 用 い た オープントップチャンバー(電 カ 中 央 研究所赤城試験センター).



写真4 成木へのオゾン暴露に用い た開放型オゾン暴露シス テム(北海道大学).

た葉のオゾン吸収速度の1時間値を推定し、出葉日から純光合成速度の測定日までの葉の積算オゾン吸収量 を算出した。

(3)葉のオゾン吸収量に基づいた成木に対するオゾンの影響評価

樹高が約5m、胸高直径が約8cmのブナ、ミズナラおよびシラカンバの成木(若齢木)を対象に、開発した開放型 オゾン暴露システム(写真4)を用いてオゾン暴露実験を野外で行い、オゾンによる気孔コンダクタンスの低下が 気孔を介した葉のオゾン吸収量の推定値におよぼす影響を検討した。樹冠に達する足場を組み、生育期間を通 じて、葉のガス交換速度を測定した。同時に、測定対象葉付近の光環境を測定した。従来の気孔コンダクタンス のモデル式ではオゾンによる気孔コンダクタンスの低下(気孔閉鎖)は考慮されていないため、本研究で改良した モデル式に基づいて気孔を介した葉のオゾン吸収量を推定した。葉の動態のモニタリングを行い、群落生産 モデルによって樹木の炭素収支の推定を行った。また、オゾン付加によるシラカンバ葉の虫害を観察し、葉の 虫害に対する防御物質を定量した。

(4)フラックスタワー測定による森林のCO,吸収量に対するオゾンの影響評価

森林総合研究所のフラックスタワー観測サイトの中で、落葉広葉樹林を対象とする3試験地(北海道支所 札幌試験地、東北支所安比試験地、関西支所山城試験地,写真5)を対象として、森林上空のオゾン濃度の 連続測定を行った。周辺大気観測局のオゾンデータから、過去のフラックスタワーサイトのオゾン濃度の推定を 行うため、2012年4~10月(山城は2012年4~6月)に得られた大気・気温データを説明変数とした線形重回帰 モデルを作成した。次に、Penman-Monteith法が適用できない降雨時ならびに開葉・落葉期の森林レベルの 気孔コンダクタンスを推定するために、Ball-Woodrow-Berryの気孔反応式による補正を試みた。 Penman-Monteith法が適用可能な条件を林冠が閉鎖している6月から9月および24時間以内に1mm以上の 降雨がなかった時期と定め、Penman-Monteith法で求めた群落コンダクタンス(群落レベルの気孔コンダクタ ンス)とタワーフラックス測定による総光合成速度、CO2濃度、相対湿度との関係を調べ、Ball-Woodrow-Berry の気孔反応式における定数の推定を行った。これらの手法を用いて、過去のオゾン濃度および群落コンダクタン スを推定し、さらに空気力学的抵抗、境界層抵抗、表面抵抗を考慮に入れ、森林群落におけるオゾン吸収量を 算出した。フラックス測定による森林群落のCO2吸収速度と積算オゾン吸収量との関係を調べ、森林群落レベル のオゾン影響の評価を行った。

4. 結果及び考察

(1)樹木の葉のオゾン吸収量推定法の開発

光合成有効放射束密度、気温、飽差、有効積算温度、土壌体積含水率および大気オゾン濃度に基づいて、日本 の代表的な落葉広葉樹であるブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの葉の水蒸気気孔コンダクタンスの推定式を 構築し、気孔を介した葉のオゾン吸収量を算出することが可能になった。比較的高濃度のオゾンが観測された春季に おいては、ブナ、コナラおよびミズナラの葉は未成熟であったため、気孔開度が比較的低く、オゾン吸収量が低いこと が明らかになった。一方、シラカンバの葉は葉の成熟が比較的早く、春季においても葉のオゾン吸収量が他の3樹種 に比べて高いことが明らかになった。

ブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの葉の積算オゾン吸収量と積算純光合成量(積算CO2吸収量)の相対値 (オゾン区の積算純光合成量/対照区の積算光合成量)との関係に基づいて(図2)、日本に分布するこれら4樹種 の積算純光合成量に対するオゾンの影響の現状評価を行った。その結果、ブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの 葉の積算純光合成量のオゾンによる年平均低下率(最低低下率~最高低下率)は、それぞれ12%(1~32%)、10% (2~17%)、12%(1~32%)および16%(9~58%)であった(図3)。この結果は、現状のオゾンによって日本の森林のCO2 削減能力が低下していることを示している。



写真5 森林総合研究所のフラックスタワー観測サイト(北海道支所札幌試験地,東北支所安比試験地,関西支所 山城試験地).



図2 赤城(○:2012年, △:2013年)および八王子(□:2013年)におけるブナの第1展開葉、コナラの第1展開葉、 ミズナラの第1展開葉およびシラカンバの春葉の積算純光合成量(積算CO₂吸収量)の相対値と出葉日からの 単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量との関係.積算純光合成量の相対値とは、浄化空気区の積算純光合 成量に対する各オゾン処理区の積算純光合成量の相対値である.



図3 出葉日からの単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量に基づいて算出した2009~2011年におけるブナ、コナラ、 ミズナラおよびシラカンバの葉の積算純光合成量(積算CO₂吸収量)の年平均低下率(%).

2) 樹木の葉のオゾン吸収量と光合成能力との関係の解明

ブナの第 1 展開葉の純光合成速度は、出葉から 45 日以上経過するとオゾンの影響が発現し始め、オゾン レベルの上昇に伴って一次的に低下した。ブナの第 2 展開葉の純光合成速度は、出葉から 30 日経過した 7 月 からオゾンレベルの上昇に伴って一次的に低下した。コナラとミズナラの第 1 展開葉および第 2 展開葉の純光合 成速度は、出葉から 60 日経過するとオゾンレベルの上昇に伴って低下した。これらに対して、他の 3 樹種より 出葉時期が早かったシラカンバの春葉の純光合成速度は、出葉から 30 日以上経過するとオゾンの影響が発現 し始め、オゾンレベルの上昇に伴って一次的に低下した。シラカンバの夏葉の純光合成速度は、出葉から 15 日 以上経過するとオゾンレベルの上昇に伴って一次的に低下した。

純光合成速度の経時変化からオゾン処理期間中における積算純光合成量(積算CO₂吸収量)の浄化区に 対する相対値(Y, %)を算出し、気孔コンダクタンス推定モデルに基づいて算出した同期間中の単位葉面積あたり の積算オゾン吸収量(X, mmol m⁻²)との関係をウェイブル関数(Y = exp $[-(X/\omega)^{\lambda}]$ 、 ω 、 λ は定数)で近似し、 以下の式を得た: ブナ第1展開葉 Y=100×exp $[-(X/83.9)^{3.19}]$ 、ブナ第2・3展開葉 Y=100×exp $[-(X/57.4)^{2.61}]$ 、 コナラ 第1展開葉 Y=100×exp $[-(X/58.0)^{3.94}]$ 、コナラ第2・3・4展開葉 Y=100×exp $[-(X/55.1)^{3.83}]$ 、ミズナラ第1 展開葉 Y=100×exp $[-(X/57.0)^{5.75}]$ 、ミズナラ第2・3・4展開葉 Y=100×exp $[-(X/64.8)^{3.61}]$ 、シラカンバ春葉 Y=100×exp $[-(X/48.7)^{3.86}]$ 、シラカンバ夏葉 Y=100×exp $[-(X/82.8)^{1.81}]$ 。葉のオゾン吸収量に対する積算 純光合成量の低下を指標としたオゾン感受性には樹種間差異があり、同量のオゾンを吸収しても、オゾンによる 純光合成量の低下程度が樹種によって異なることが明らかになった。

(3)葉のオゾン吸収量に基づいた成木に対するオゾンの影響評価

ブナの成木においては、樹冠位置にかかわらず、オゾン付加区の気孔コンダクタンスは対照区のそれに比べ て低下した。一方、葉の黄化が始まる10月以降においては、両処理区間の気孔コンダクタンスの差が小さくなり、 オゾン暴露による気孔閉鎖機能の損傷が示唆された。気孔コンダクタンスの推定式にオゾンによる気孔コンダク タンスの低下を組み込むと、気孔を介した葉の積算オゾン吸収量の推定値は樹冠上部では13%、下部では 18%低下した。気孔閉鎖によって気孔を介した葉のオゾン吸収量が制限されることで、オゾンによる障害が軽減さ れると推察され、この傾向は 6~7月に明瞭であった。8月と10月において、LMA(葉面積あたりの葉乾重,葉の 厚さの指標)が高い葉ではオゾンによって純光合成速度や生化学的パラメーターが低下した。同時期において、 LMAの高い葉でオゾンによる暗呼吸速度の増加が認められた。10月においては、葉のLMAの大小にかかわらず、 オゾンによって純光合成速度における気孔制限が低下した。なお、いずれの測定月においても、光合成の 光化学系反応の効率に対してオゾンの有意な影響は認められなかった。以上の結果より、ブナの成木において、 ①樹冠上部の明るい環境に展開する陽葉のオゾン感受性は樹冠下部に展開する陰葉よりも高いこと、 ②純光合成速度の主な低下要因は、気孔閉鎖でなく、葉緑体における炭素同化能力の低下や呼吸の増加に よること、③光合成パラメーター間にもオゾン感受性の差があることが明らかになった。さらに、日中60ppbのオゾ ンによって、ブナの肥大成長の相対成長率が約20%低下したが、葉の虫害は抑制された。

(4)フラックスタワー測定による森林のCO,吸収量に対するオゾンの影響評価

各試験地のフラックスタワーにオゾン濃度計を設置して連続測定した森林上空のオゾン濃度と 近隣都市の大気観測局で測定されたオゾン濃度との比較を行った。その結果、気温や二酸化窒素濃度 を説明変数とし、森林のオゾン濃度を応答変数とした重回帰分析を行うことで、大気観測局のオゾン 濃度から各試験地の森林上空のオゾン濃度を推定するための推定式を得た。また、正味放射量と顕熱 フラックスから潜熱フラックスを推定し、蒸発散量の推定モデルであるPenman-Monteith法を用いて 群落コンダクタンスを算出した。さらに、群落コンダクタンスは総光合成速度、CO2濃度、相対湿度に よって決まるというBall-Woodrow-Berryの経験式に基づき、Penman-Monteith法では測定困難な降雨時 および樹冠の一部が落葉している時期の群落コンダクタンスをフラックス観測データから推定する 手法を開発した。これらの手法に基づき、山城試験地のコナラ・ソヨゴ林のオゾン吸収量とCO2吸収量 との関係を調べた結果、葉の成熟にともない光合成速度が上昇していく4~7月においては葉のオゾン 吸収量の増加による葉重量あたりの総光合成速度の低下は見られなかった。一方、総光合成速度が 低下していく8月以降は、葉のオゾン吸収量が増加することで総光合成速度がより低下する傾向が見ら れた。本研究の成果から、現時点で観測されているオゾン濃度においても、葉のオゾン吸収量の増加 によって森林群落レベルで葉の老化が促進され、森林のCO2吸収機能の低下が生じていることが示唆 された。

5. 本研究により得られた主な成果

(1)科学的意義

日本の代表的な落葉広葉樹であるブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの葉の水蒸気気孔コンダクタンスの 推定式を構築し、気孔を介した葉のオゾン吸収量を算出することが可能になった。その結果、比較的高濃度のオゾン が観測された春季においては、ブナ、コナラおよびミズナラの第1展開葉は未成熟であったため、気孔開度が比較的 低く、オゾン吸収量が低いことが明らかになった。一方、シラカンバの春葉および夏葉は葉の成熟が早く、春季におい ても葉のオゾン吸収量が比較的高いことが明らかになった。

日本の代表的な落葉広葉樹であるブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの気孔を介した葉のオゾン吸収量と 積算純光合成量(積算CO₂吸収量)との関係を解明した。また、葉のオゾン吸収量に対する積算純光合成量 の低下程度を指標としたオゾン感受性には樹種間差異があり、同量のオゾンを吸収してもオゾンによる積算 純光合成量の低下程度が樹種によって異なることが明らかになった。

開発した開放型オゾン暴露システムによって、未解明であった日本の冷温帯森林を構成する代表的樹種の 成木へのオゾンの影響に関する知見が得られた。オゾンによる生理的な影響のひとつである気孔閉鎖の程度は、 従来多用されてきた大気オゾン濃度ベースの指標であるAOT40よりも、気孔を介した葉の積算オゾン吸収量と 関係があることが示された。また、成木では、受光量の小さい葉に比べて、樹冠内の受光量の大きい葉において オゾンによる光合成能力の低下が著しいことが明らかになった。

落葉樹と常緑樹の混交林では、エネルギーと水のフラックス測定値を用いるPenman-Monteith法では落葉期 や降雨時の群落コンダクタンスの推定が困難であったが、CO₂フラックス測定値を用いてBall-Woodrow-Berryの 気孔コンダクタンス推定モデルで補正を行うことで、年間を通してのオゾン吸収量の推定が可能となった。本研究 課題で開発した手法によって推定した森林群落レベルでのオゾン吸収量とフラックス測定によるCO₂吸収速度と の関係から、森林群落レベルでもオゾン吸収量の増加によって葉の老化が促進され、CO₂吸収能力が低下して いる可能性が示された。

気孔を介した葉の積算オゾン吸収量に基づいて、日本に分布する落葉広葉樹4種の積算純光合成量(積算CO₂ 吸収量)に対するオゾンの影響評価を行った結果、ブナ、コナラおよびミズナラの1st flush葉とシラカンバの春葉の 積算純光合成量のオゾンによる年平均低下率はそれぞれ12%,10%,12%および16%と推定された。この結果は、現状 のオゾンによって日本の森林のCO₂削減能力が低下していることを示している。したがって、アジア大陸からの 越境大気汚染対策や日本国内のオゾンの前駆物質の排出源対策を行うことで、日本の森林の保護だけでなく、その 地球温暖化防止機能を向上させることができることを科学的に示した。

(2)環境政策への貢献

く行政が既に活用した成果>

環境省の越境大気汚染・酸性雨対策検討会の生態影響分科会の下にあるオゾン等の植物影響評価ワー キンググループ(座長:伊豆田 猛)において、本研究で得られた研究結果などを提示し、平成26年3月に公表さ れた環境省の越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング(平成20~24年度)最終報告書の内容(119~123ページ) の検討過程で多大な貢献をした。同ワーキンググループで実施しているオゾンによる植物影響のパイロットモニタ リングの地点選定過程で本研究で得られた研究成果を提示し、福岡県(英彦山)、新潟県(八海山)および 北海道(摩周湖外輪山)におけるオゾン濃度測定と植物被害評価が開始され、その結果が平成26年3月に 公表された環境省の越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング(平成20~24年度)最終報告書に掲載された (123~129ページ)。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究では、気孔を介した葉のオゾン吸収量に基づいた日本の落葉広葉樹のCO2吸収・固定能力に対する オゾンの影響の評価手法を確立したため、日本の現状レベルのオゾンによる落葉広葉樹の年間CO2吸収量の 低下程度が評価できるようになった。本研究の結果は、日本におけるオゾンの前駆物質の発生源対策とアジア におけるオゾンによる越境大気汚染の対策を行い、森林を保護することは、温暖化対策にもなることを示してい る。したがって、本研究によって、大気汚染対策と温暖化対策のコベネフィットアプローチに対して科学的知見を 提供することができた。

本研究では、日本におけるオゾンによる森林衰退の危険地域(ホットスポット)の選択が可能となったため、 越境大気汚染による生態系影響の発現予測やその対策に貢献できる。

本研究による森林のCO₂固定能へのオゾンの影響評価は、気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)の報告書などの国際的な科学的知見の集積に直接的 に貢献し、温暖化防止を目的として東アジア各国の連携の下で国際的大気汚染対策を推進するための科学 的根拠を提供できる。 本研究によって、現在、オゾンなどのガス状大気汚染物質の測定が検討されている東アジア酸性雨ネットワーク(EANET)におけるオゾン測定地点の設定やオゾンの植物影響評価地点の選定などへの科学的根拠を提供できる。

6.研究成果の主な発表状況

(1)主な誌上発表

<査読付き論文>

- M. YAMAGUCHI, M. WATANABE, H. MATSUMURA, Y. KOHNO and T. IZUTA: Asian J. Atmos. Environ, 5, 65-78 (2011) "Experimental Studies on the Effects of Ozone on Growth and Photosynthetic Activity of Japanese Forest Tree Species"
- M. WATANABE, M. YAMAGUCHI, H. MATSUMURA, Y. KOHNO, T. KOIKE and T. IZUTA: Asian J. Atmos. Environ., 5, 205-215 (2011) "A Case Study of Risk Assessment of Ozone Impact on Forest Tree Species in Japan"
- 3) 伊豆田 猛:大気環境学会誌,47,1,A12-A15 (2012).「葉のオゾン吸収量に基づいた植物に対するオゾン の影響評価」
- M. WATANABE, M. YAMAGUCHI, H. MATSUMURA, Y. KOHNO and T. IZUTA: Eur. J. Forest Res., 131, 475-484 (2012) "Risk Assessment of Ozone Impact on *Fagus crenata* in Japan: Consideration of Atmospheric Nitrogen Deposition"
- 5) F. AZUCHI, Y. KINOSE, T. MATSUMURA, T. TANOMATA, Y. UEHARA, A. KOBAYASHI, M. YAMAGUCHI and T. IZUTA: Environ. Pollut. 184: 481-487 (2014) "Modeling Stomatal Conductance and Ozone Uptake of *Fagus crenata* Grown under Different Nitrogen Loads"
- 6) T. KOIKE, M. WATANABE, Y. HOSHIKA, M. KITAO, H. MATSUMURA, R. FUNADA and T. IZUTA: Climate Change, Air Pollution and Global Challenges: Understanding and Solutions from Forest Research (R. Matyssek *et al.*, eds.), Elsevier. 2013 "Effects of Ozone on Forest Ecosystems in East and Southeast Asia"
- 7) Y. HOSHIKA, M. WATANABE, N. INADA and T. KOIKE: Ann. Bot. 112: 1149-1158 (2013) "Model-based analysis of avoidance of ozone stress by stomatal closure in Siebold's beech (*Fagus crenata*)"
- Y. HOSHIKA, M. WATANABE, N. INADA, Q. MAO and T. KOIKE: Environ. Pollut. 182: 242-247 (2013) "Photosynthetic response of early and late leaves of white birch (*Betula platyphylla* var. *japonica*) grown under free-air ozone exposure"
- 9) M. WATANABE, Y. HOSHIKA, N. INADA and T. KOIKE: Environ. Pollut. 184: 682-689 (2014) "Canopy carbon budget of Siebold's beech *Fagus crenata* sapling under free air ozone exposure"
- 10) M. WATANABE, Y. HOSHIKA and T. KOIKE: J. Plant Res. 127: 339-345 (2014) "Photosynthetic responses of Monarch birch seedlings to different timing of free air ozone fumigation"
- 11) M. KITAO, M. KOMATSU, Y. HOSHIKA, K. YAZAKI, K. YOSHIMURA, S. FUJII, T. MIYAMA and Y. KOMINAMI: Environ. Pollut., 184, 457-463 (2014) "Seasonal ozone uptake by a warm-temperate mixed deciduous and evergreen broadleaf forest in western Japan estimated by the Penman-Monteith approach combined with a photosynthesis-dependent stomatal model"
- 12) 小松雅史、吉村謙一、藤井佐織、矢崎健一、溝口康子、深山貴文、小南裕志、安田幸生、 山野井克己、北尾光俊:関東森林研究(印刷中)「森林における対流圏オゾン濃度の推定」
- (2)主な口頭発表(学会等)
- 1) 山口真弘、黄瀬佳之、安土文鹿、上原 唯、小林亜由美、鹿又友彰、松村秀幸、伊豆田 猛:第54回 大気環境学会(2013)「ブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの葉の気孔を介したオゾン吸収量の推定」
- 2) 松村秀幸、山口真弘、黄瀬佳之、米倉哲志、伊豆田 猛:第54回大気環境学会(2013)「落葉広葉樹4種 の葉の純光合成速度におよぼす1成長期間のオゾン暴露の影響とオゾン吸収量との関係」
- 3) 安土文鹿、上原 唯、黄瀬佳之、鹿又友彰、小林亜由美、山口真弘、伊豆田 猛:第54回大気環境学会 (2013)「葉のオゾン吸収量に基づくブナ、ミズナラおよびシラカンバの純光合成速度におけるオゾン感受性 の評価」
- 4) M. WATANABE, Y, HOSHIKA, N. INADA, Q. MAO and T. KOIKE: International Conference "Vegetation Response to Climate Change and Air Pollution, Unifying Evidence and Research across Northern and Southern Hemisphere Jointly organized by: IUFRO Research Group 7*01*00. Bahia, Brazil, September 1-6 2013. "Photosynthetic traits in leaves of Siebold's beech (*Fagus crenata*) saplings under free air O₃

exposure in relation to the within-canopy light gradient"

- 5) X. WANG, Q. MAO, L. QU, K. KAWAGUCHI, M. WATANABE, Y. HOSHIKA, A. KOYAMA, Y. TAMAI and T. KOIKE: International Conference "Vegetation Response to Climate Change and Air Pollution, Unifying Evidence and Research across Northern and Southern Hemisphere Jointly organized by: IUFRO Research Group 7*01*00. Bahia, Brazil, September 1-6 2013. "Ectomycorrhizal richness and growth of hybrid larch F₁ under elevated O₃ and CO₂"
- 6) Q. MAO, M.WATANABE, Y. HOSHIKA, K. KITA and T. KOIKE: International Conference "Vegetation Response to Climate Change and Air Pollution, Unifying Evidence and Research across Northern and Southern Hemisphere Jointly organized by: IUFRO Research Group 7*01*00. Bahia, Brazil, September 1-6 2013. "Photosynthetic responses of three kinds of larch seedlings raised under free air CO₂ enrichment (FACE)"
- 7) 小松雅史、吉村謙一、藤井佐織、矢崎健一、溝口康子、深山貴文、小南裕志、安田幸生、 山野井克己、北尾光俊:第3回関東森林学会大会(2013)「落葉広葉樹林における対流圏オゾン濃度の 推定」
- 8) 北尾光俊、小松雅史、矢崎健一、北岡哲、深山貴文、小南裕志:第 125 回日本森林学会テーマ別シンポ ジウム(2014)「フラックスタワー測定による森林の CO,吸収に対するオゾンの影響評価」
- 7. 研究者略歴

課題代表者:伊豆田 猛

東京農工大学大学院連合農学研究科修了、農学博士、現在、東京農工大学教授

研究分担者

1) 松村秀幸

東京農工大学農学研究科修了、博士(農学)、現在、一般財団法人電力中央研究所主任研究員 2)小池孝良

名古屋大学大学院農学研究科博士後期課程中退、農学博士、現在、北海道大学大学院教授 3)北尾光俊

東京大学大学院農学研究科修士課程修了、農学博士、現在、森林総合研究所樹木生理研究室長

5B-1105 葉のオゾン吸収量に基づいた樹木に対するオゾンの影響評価に関する研究

(1) 樹木の葉のオゾン吸収量推定法の開発

東京農工大学

大学院農学研究院	伊豆田 犭	孟
大学院農学研究院	船田 良	

山口真弘
山根健一

平成23~25年度累計予算額: 39,955千円(うち、平成25年度予算額: 12,294千円) 予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究では、光合成有効放射束密度、気温、飽差、有効積算温度、土壌体積含水率および大気オゾン 濃度に基づいて、日本の代表的な落葉広葉樹であるブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの葉の 水蒸気気孔コンダクタンスの推定式を構築し、気孔を介した葉のオゾン吸収量を算出することが可能に なった。比較的高濃度のオゾンが観測された春季においては、ブナ、コナラおよびミズナラの葉は未成 熟であったため、気孔開度が比較的低く、オゾン吸収量が低いことが明らかになった。一方、春季にお いてシラカンバの葉の成熟は比較的早いため、葉のオゾン吸収量が他の3樹種に比べて高いことが明ら かになった。

葉の積算オゾン吸収量に基づいて、日本に分布する落葉広葉樹4種の積算純光合成量(積算CO2吸収量) に対するオゾンの影響評価を行った結果、ブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの葉の積算純光合 成量のオゾンによる年平均低下率(最低低下率~最高低下率)はそれぞれ12%(1~32%)、10%(2~ 17%)、12%(1~32%)および16%(9~58%)であった。この結果は、現状のオゾンによって、日本 の森林のCO2削減能力が低下していることを示している。本研究の結果は、日本におけるオゾンの 前駆物質の発生源対策とアジアにおけるオゾンによる越境大気汚染の対策を行い、森林を保護す ることは、温暖化対策にもなることを示している。したがって、本研究によって、大気汚染対策 と温暖化対策のコベネフィットアプローチに対して科学的知見を提供することができた。

[キーワード]

オゾン、越境大気汚染、落葉広葉樹、気孔コンダクタンス、葉のオゾン吸収量

1. はじめに

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(O₃)の濃度が増加している。 この原因として、アジア大陸からの越境大気汚染が指摘されている。対流圏におけるオゾン濃度の 上昇は樹木の光合成能力を低下させ、森林による二酸化炭素(CO₂)などの温室効果ガス削減能力 の低下を引き起こすことが危惧される。したがって、日本の森林を構成している樹木に対する オゾンの影響を正確に評価する方法を早急に確立する必要がある。しかしながら、現在の所、オゾ ン濃度の上昇が日本の森林を構成している樹木のCO₂吸収・固定能力や成長に与える影響を気孔を 介した葉のオゾン吸収量に基づいて正確に評価する方法は確立されていない。したがって、気孔を 介した葉のオゾン吸収量に基づいて日本の森林を構成している樹木のCO₂吸収・固定能力や成長に 及ぼすオゾンの影響を正確に評価する方法を早急に確立し、日本の主要な樹種に対するオゾンの 影響に関する現状評価を行なう必要がある。

2. 研究開発目的

5B-1105「葉のオゾン吸収量に基づいた樹木のオゾン影響評価に関する研究」では、気孔を介し た葉のオゾン吸収量に基づいて日本の森林を構成している樹木のCO2吸収・固定能力や成長に及ぼ すオゾンの影響を正確に評価する方法を確立し、日本の主要な樹種であるブナ、ナラ類、カンバ 類に対するオゾンの影響に関する現状評価を行うことを目的とした。

サブテーマ(1)においては、日本の代表的な落葉広葉樹であるブナ、コナラ、ミズナラおよび シラカンバの苗木を対象としたオゾン暴露実験を行い、葉のオゾン吸収量の推定式を構築すること を目的とした。

サブテーマ(1)、(2)、(3)および(4)で得られた研究成果を総合的に考察し、現状の オゾンによる日本に分布する落葉広葉樹4種(ブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバ)の積算 純光合成量(葉のCO₂吸収能力)の年平均低下率を評価した。

3. 研究開発方法

(1)気孔を介した葉のオゾン吸収量の推定

1)供試植物および育成条件

供試植物として、ブナ (Fagus crenata, 3年生苗)、コナラ (Quercus serrata, 2年生苗)、ミズナラ (Quercus mongolica var. crispula, 2年生苗) およびシラカンバ (Betula platyphylla, 2年生苗) の合計4樹種を用いた

(写真(1)-1)。供試土壌として、育苗培土(タキイ 種苗)を用いた。2012年5月23日に供試土壌を詰めた ワグネルポット(1/2000a,容積12 L)に、1ポット あたり1個体ずつ各樹種の苗木を移植した。移植後、 東京農工大学農学部附属広域都市圏フィールドサイ エンス教育研究センターのフィールドミュージアム 多摩丘陵(FM多摩丘陵)の標高145 m地点に設置した オゾン暴露チャンバー内で、4樹種の苗木を2012年 6月5日~2013年10月15日の498日間にわたって育成し た。2012年5月26日~2012年6月2日に、4樹種の苗木の



写真(1)-1 供試樹木(落葉広葉樹4種).

樹高、根元幹直径および葉数を測定した。ブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの樹高の平均値は、 それぞれ39.5±4.1, 62.5±8.7, 75.6±7.5および44.7±4.5 cmであった。ブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカ ンバの根元幹直径の平均値は、それぞれ7.2±0.9, 5.1±0.7, 8.4±1.0および4.0±0.6 mmであった。また、ブナ、 コナラ、ミズナラおよびシラカンバの個体あたりの葉数の平均値は、それぞれ94±33, 107±36, 57±22およ び19±6枚であった。これらの結果をもとに、樹高と根元幹直径から算出した幹体積の平均値と幹体積に 対する葉数の割合の平均値がすべてのガス処理区で等しくなるように、4樹種の個体を振り分けた。

オゾン暴露チャンバーは、9棟のビニールハウス(チャンバー,間口2.2 m×奥行き3.6 m×高さ2.0 m) と送風ボックスから構成されている(写真(1)-2)。送風ボックスは流量1.03 m³ s⁻¹で野外の空気を導入 する換気扇(EF-40DTB1,三菱電機株式会社)、換気扇ボックス、防塵フィルターおよび活性炭フィル ターから構成されている。オゾンを含む外気は、防塵フィルターを通過した後、活性炭フィルターで 浄化し、チャンバー内に導入した。チャンバー内を通過した空気は、チャンバーの入口の金網部から 野外に排出した。チャンバー内の気温と相対湿度は、温湿度記録計(TR-72U, T&D Corp.)を用いて5分 間隔で測定した。光合成有効放射束密度は、野外およびチャンバー内に設置した光量子センサー (LI-190SA, Li-Cor Inc., USA)を用いて1分間隔で測定した。2012年および2013年のチャンバービニール の光透過率は、それぞれ69.5および76.6%であった。また、土壌表面から深さ10 cmの土壌の体積含水率 (%)を土壌水分センサー(10HS Moisture sensor, Decagon Devices Inc., USA)を用いて 30分間隔で測定 した。各チャンバーに、ブナの苗木を16個体とコナラ、ミズナラおよびシラカンバの苗木を14個体ずつ 配置した。

表(1)-1に、ガス処理期間中(2012年6月5日~11月6日,2013年4月13日~10月15日)におけるチャン バー内の気温と相対湿度の測定結果を示した。2012年のガス処理期間における平均気温と平均相対湿度 は、それぞれ21.9°C および87.7%であった。また、2013年のガス処理期間における平均気温と平均相対 湿度は、それぞれ21.6°Cおよび84.5%であった。

表(1)-1	ガス処理期間中(2012年6月5日~11月6日および2013年4月13日~10月15日)におけるチャン
	バー内の気温と相対湿度の測定結果.

期間		気温 (°C)				相対湿度 (%)			
		日平均値	日最高值 ^a	日最低值 ^b	12時間平均値 ^c	日平均値	日最高值 ^a	日最低值b	12時間平均値 ^c
2012	6月5~30日	19.6 (0.1)	24.4 (0.1)	16.1 (0.1)	21.5 (0.3)	88.9 (0.8)	98.8 (0.2)	71.5 (1.5)	82.0 (0.5)
	7月1~31日	24.8 (0.2)	31.3 (0.4)	21.0 (0.0)	27.3 (0.5)	88.1 (0.7)	98.8 (0.2)	65.0 (1.2)	79.7 (0.3)
	8月1~31日	26.8 (0.0)	34.2 (0.0)	21.8 (0.0)	29.9 (0.3)	83.2 (2.0)	99.0 (0.1)	56.6 (3.1)	72.1 (1.9)
	9月1~30日	23.4 (0.0)	29.1 (0.1)	19.7 (0.1)	25.5 (0.2)	90.0 (1.0)	99.0 (0.0)	69.0 (1.8)	82.7 (1.1)
	10月1~31日	16.5 (0.1)	22.9 (0.5)	12.3 (0.2)	18.8 (0.1)	88.4 (1.2)	99.0 (0.0)	62.1 (2.1)	80.0 (1.2)
	11月1~6日	10.6 (0.3)	16.8 (1.0)	6.9 (0.3)	12.6 (0.3)	88.4 (1.2)	98.7 (0.4)	59.1 (2.4)	80.2 (1.1)
	6月5日~11月6日	21.9 (0.0)	28.0 (0.0)	17.8 (0.1)	24.2 (0.2)	87.7 (1.1)	98.9 (0.1)	64.4 (2.0)	79.2 (1.0)
2013	4月13~30日	13.6 (0.1)	22.1 (0.3)	6.4 (0.3)	17.5 (0.0)	68.4 (0.6)	96.5 (0.5)	35.4 (0.4)	52.6 (0.3)
	5月1~31日	18.2 (0.3)	26.5 (0.4)	12.5 (0.3)	21.7 (0.4)	76.5 (0.9)	97.9 (0.4)	44.2 (1.7)	62.5 (1.1)
	6月1~30日	21.0 (0.1)	26.5 (0.5)	17.4 (0.2)	23.1 (0.3)	88.1 (1.3)	98.8 (0.2)	67.0 (3.0)	80.4 (1.9)
	7月1~31日	25.3 (0.1)	31.2 (0.6)	21.7 (0.2)	27.5 (0.2)	88.4 (1.4)	98.7 (0.3)	67.6 (3.3)	81.3 (2.1)
	8月1~31日	26.8 (0.1)	33.9 (0.6)	22.3 (0.2)	29.6 (0.2)	86.4 (1.5)	99.0 (0.0)	61.5 (3.6)	77.1 (2.3)
	9月1~30日	22.1 (0.1)	28.0 (0.3)	17.7 (0.2)	24.3 (0.1)	89.6 (0.9)	99.0 (0.0)	67.4 (2.7)	81.7 (1.4)
	10月1~15日	20.7 (0.1)	27.2 (0.3)	17.1 (0.3)	22.7 (0.1)	90.3 (1.1)	98.9 (0.1)	68.7 (3.0)	84.2 (1.8)
	4月13日~10月15日	21.6 (0.1)	28.4 (0.3)	17.1 (0.2)	24.3 (0.1)	84.5 (1.1)	98.5 (0.2)	59.5 (2.5)	74.8 (1.6)

各値は3チャンバーの平均値であり、括弧内は標準偏差を示す.

^a, 日最高1時間値の平均値

^b, 日最低1時間値の平均値

°,12時間:6:00~18:00

2) ガス処理

4樹種の育成期間を通して、3段階のガス処理を設定し た。ガス処理区として、活性炭フィルターによって浄化 した空気をチャンバー内に導入した浄化空気区(CF区)、 チャンバー内のオゾン濃度を野外オゾン濃度の1.0倍に 比例追随制御した1.0倍O3区およびチャンバー内の オゾン濃度を野外オゾン濃度の1.5倍に比例追随制御 した1.5倍O3区の合計3処理区を設けた。ガス処理は、 2012年6月5日~11月6日と2013年4月13日~2013年10月 15日の合計341日間にわたって行なった。

PSA酸素濃縮器(SO-008S,山陽電子工業株式会社)に よって発生させた高濃度酸素をオゾン発生器(OZC-05A, ダイレック株式会社)に供給し、無声放電によってオゾ



写真(1)-2 樹木苗へのオゾン暴露に 用いたオゾン暴露チャン バー.

ンを発生させた。発生させたオゾンは、電磁弁によって流量を制御し、防塵フィルターおよび活性炭 フィルターを通した空気と混合した後、チャンバー内に供給した。チャンバー中央部における群落表層 で捕集した空気のオゾン濃度をオゾン濃度計(Model 1210,ダイレック株式会社)を用いて30分間隔で 測定した。測定したチャンバー内のオゾン濃度をその後の30分間のチャンバー内のオゾン濃度制御に フィードバックさせることで、チャンバー内のオゾン濃度を制御した。野外のオゾン濃度は、同オゾン 濃度計によって10分間隔で測定した。オゾン暴露期間中に、チャンバー内と野外のオゾン濃度をデータ ロガー(8421-50,日置電機株式会社)で記録した。ガス処理区毎に3棟の同型チャンバーを使用し、 チャンバーレプリケーションを設けた。チャンバーエフェクトおよびチャンバー内における苗木のポジ ションエフェクトを緩和するために、チャンバー間ローテーションを2週間毎に行い、チャンバー内の ポットの並び替えを3~4日毎に行った。

表(1)-2に、2012年と2013年のガス処理期間におけるチャンバー内の平均オゾン濃度(nl Γ^1 , ppb)、 大気オゾン濃度の1時間値の積算値(AOT0)および40 nl Γ^1 (ppb)を超える大気オゾン濃度の1時間値の 積算値(AOT40)を示した。2012年のガス処理期間におけるCF区、1.0倍O₃区および1.5倍O₃区の日平均 オゾン濃度は、それぞれ7.9,20.6および29.6 ppbであった。CF区、1.0倍O₃区および1.5倍O₃区における 日中(日射量:>50 W m⁻²)のAOT0は、それぞれ13.6,36.5および54.3 µl Γ^1 h (ppm h)であった。CF区、 1.0倍O₃区および1.5倍O₃区における日中のAOT40は、それぞれ0,4.5および15.7 µl Γ^1 h (ppm h)であっ た。2013年のガス処理期間におけるCF区、1.0倍O₃区および1.5倍O₃区の日平均オゾン濃度は、それぞれ 11.1,25.3および 36.6 nl Γ^1 (ppb)であった。CF区、1.0倍O₃区および1.5倍O₃区における日中のAOT0は、 それぞれ26.0,59.5および86.4 µl Γ^1 h (ppm h)であった。CF区、1.0倍O₃区および1.5倍O₃区における日中のAOT0は、 日中のAOT40は、それぞれ0,10.7および31.7 µl Γ^1 h (ppm h)であった。

3) 水蒸気気孔コンダクタンスの測定

携帯型蒸散測定装置(LI-1600, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)を用いて、コナラの1st flush葉、 ミズナラの1st flush葉、シラカンバの春葉、シラカンバの夏葉およびブナの1st flush葉の背軸面の 水蒸気気孔コンダクタンス (g_s , mol H₂O m⁻² s⁻¹)を測定した。 g_s 測定時の環境条件として、光合成 有効放射束密度、気温、相対湿度、土壤体積含水率およびオゾン濃度を g_s と同時に測定した。なお、 気温と相対湿度を用いて g_s 測定時の飽差を算出した。また、出葉日から g_s 測定時までの有効積算温度(EATL, °C・day)を算出した。有効積算温度とは、日平均気温(°C)から5°Cを差し引いた値の積算値である。

表(1)-2 ガス処理期間(2012年6月5日~11月6日および2013年4月13日~10月15日)におけるチャン バー内の平均オゾン濃度、オゾン濃度の1時間値の積算値(AOT0)および40 nl l⁻¹ (ppb)を超え たオゾン濃度の1時間値の積算値(AOT40).

ガス処 理 期間			濃度 (nl l ⁻¹)		AOT0 (μ l l ⁻¹ h)		AOT40 (μ l l ⁻¹ h)	
		処埋区	24時間平均値	12時間平均值 ^а	24時間値	Daylight b	24時間値	Daylight ^b
		CF	9.2 (0.4)	11.0 (0.6)	5.1 (0.2)	2.4 (0.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
	6月5~30日	$1.0 \times O_3$	20.7 (0.1)	26.0 (0.5)	11.4 (0.0)	5.9 (0.2)	0.8 (0.0)	0.7 (0.0)
2012		$1.5 \times \mathrm{O_3}$	29.1 (0.1)	36.8 (0.4)	16.1 (0.1)	8.5 (0.1)	3.3 (0.0)	2.4 (0.0)
	7月1~31日	CF	7.9 (0.4)	10.4 (0.5)	5.8 (0.3)	3.3 (0.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
		$1.0 \times {\rm O_3}$	22.7 (0.4)	30.1 (0.7)	16.9 (0.3)	9.4 (0.2)	2.2 (0.2)	1.8 (0.2)
		$1.5 \times {\rm O_3}$	32.6 (0.2)	44.8 (0.3)	24.3 (0.1)	14.3 (0.2)	6.6 (0.1)	5.4 (0.1)
	8月1~31日	CF	6.5 (1.0)	8.7 (1.3)	4.9 (0.8)	2.8 (0.4)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
		$1.0 \times {\rm O_3}$	19.9 (0.4)	25.9 (0.2)	14.8 (0.3)	8.2 (0.1)	1.2 (0.1)	1.0 (0.1)
		$1.5 \times O_3$	28.5 (0.3)	37.9 (0.4)	21.2 (0.2)	12.1 (0.2)	4.1 (0.1)	3.2 (0.1)
		CF	7.5 (1.4)	9.7 (1.9)	5.4 (1.0)	2.6 (0.5)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
	9月1~30日	$1.0 \times {\rm O_3}$	21.7 (0.2)	27.1 (0.2)	15.6 (0.1)	7.3 (0.1)	1.4 (0.0)	0.8 (0.0)
		$1.5 \times {\rm O}_3$	31.8 (0.3)	40.5 (0.5)	22.9 (0.2)	10.9 (0.2)	4.6 (0.1)	2.8 (0.1)
		CF	8.7 (0.5)	10.2 (0.7)	6.5 (0.4)	2.3 (0.2)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
	10月1~31日	$1.0 \times {\rm O_3}$	19.6 (0.2)	23.0 (0.2)	14.6 (0.2)	5.1 (0.1)	0.4 (0.1)	0.2 (0.0)
		$1.5 \times {\rm O_3}$	28.3 (0.3)	34.4 (0.7)	21.1 (0.2)	7.8 (0.3)	3.2 (0.1)	1.7 (0.1)
		CF	6.6 (0.2)	7.9 (0.3)	0.9 (0.0)	0.3 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
	11月1~6日	$1.0\times {\rm O}_3$	13.1 (0.3)	17.1 (0.4)	1.9 (0.0)	0.6 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
		$1.5 \times {\rm O}_3$	18.0 (0.3)	24.1 (0.4)	2.6 (0.0)	0.8 (0.0)	0.3 (0.0)	0.1 (0.0)
		CF	7.9 (0.5)	9.9 (0.6)	28.7 (1.8)	13.6 (0.9)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
	6月5日~11月6日	$1.0\times {\rm O}_3$	20.6 (0.2)	26.1 (0.0)	75.1 (0.8)	36.5 (0.2)	6.0 (0.2)	4.5 (0.1)
		$1.5 \times \mathrm{O_3}$	29.6 (0.2)	38.4 (0.4)	108.1 (0.8)	54.3 (0.9)	22.0 (0.3)	15.7 (0.3)
		CF	18.2 (0.6)	21.0 (0.6)	7.9 (0.3)	3.8 (0.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
	4月13~30日	$1.0 \times {\rm O_3}$	41.8 (0.8)	49.0 (1.3)	18.0 (0.4)	9.0 (0.3)	3.6 (0.3)	2.4 (0.2)
		$1.5 \times {\rm O_3}$	62.2 (0.6)	73.8 (1.3)	26.9 (0.3)	13.6 (0.3)	11.0 (0.2)	6.7 (0.2)
	5月1~31日	CF	14.9 (0.3)	17.4 (0.4)	11.1 (0.3)	5.6 (0.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
		$1.0 imes O_3$	35.5 (0.4)	42.3 (0.9)	26.4 (0.3)	13.7 (0.3)	4.5 (0.2)	3.0 (0.2)
		$1.5 \times {\rm O}_3$	52.5 (0.2)	63.2 (0.8)	39.1 (0.1)	20.6 (0.3)	14.5 (0.2)	9.0 (0.2)
	6月1~30日	CF	9.8 (0.4)	11.4 (0.3)	7.0 (0.3)	3.5 (0.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
		$1.0\times {\rm O}_3$	28.6 (0.4)	33.7 (0.8)	20.6 (0.3)	10.2 (0.2)	2.8 (0.1)	1.8 (0.1)
		$1.5 \times {\rm O_3}$	41.6 (0.2)	49.5 (0.1)	30.0 (0.1)	14.9 (0.0)	8.9 (0.1)	5.3 (0.1)
	7月1~31日	CF	9.8 (0.9)	12.0 (1.0)	7.3 (0.6)	4.0 (0.3)	0.0 (0.1)	0.0 (0.0)
		$1.0 \times {\rm O_3}$	18.3 (0.4)	21.8 (0.7)	13.6 (0.3)	7.4 (0.2)	1.3 (0.2)	0.8 (0.2)
2013		$1.5 \times \mathrm{O_3}$	24.3 (0.1)	28.7 (0.6)	18.1 (0.1)	9.6 (0.2)	3.8 (0.0)	2.4 (0.1)
2013	8月1~31日	CF	9.7 (0.3)	13.2 (0.2)	7.2 (0.2)	4.5 (0.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
		$1.0 \times {\rm O_3}$	20.5 (0.4)	28.1 (0.6)	15.3 (0.3)	9.5 (0.2)	2.0 (0.1)	1.6 (0.1)
		$1.5 \times {\rm O}_3$	28.4 (0.5)	38.9 (1.0)	21.2 (0.4)	13.0 (0.3)	5.6 (0.1)	4.3 (0.1)
	9月1~30日	CF	9.2 (0.3)	12.4 (0.3)	6.6 (0.2)	3.5 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
		$1.0 imes O_3$	19.9 (0.2)	26.7 (0.1)	14.3 (0.2)	7.6 (0.1)	1.1 (0.0)	0.9 (0.0)
		$1.5 imes O_3$	29.2 (0.1)	40.1 (0.5)	21.0 (0.1)	11.3 (0.2)	4.6 (0.1)	3.6 (0.2)
	10月1~15日	CF	6.7 (0.2)	8.3 (0.3)	2.4 (0.1)	1.1 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
		$1.0\times {\rm O}_3$	13.4 (0.3)	16.8 (0.4)	4.8 (0.1)	2.2 (0.1)	0.1 (0.0)	0.1 (0.0)
		$1.5 \times {\rm O}_3$	19.6 (0.2)	24.7 (0.2)	7.0 (0.1)	3.3 (0.0)	0.7 (0.0)	0.5 (0.0)
	4月13日~10月15日	CF	11.1 (0.4)	13.6 (0.4)	49.6 (1.8)	26.0 (0.7)	0.0 (0.1)	0.0 (0.0)
		$1.0 \times O_3$	25.3 (0.1)	31.2 (0.3)	113.1 (0.5)	59.5 (0.6)	15.4 (0.4)	10.7 (0.3)
		$1.5 \times O_3$	36.6 (0.1)	45.4 (0.5)	163.2 (0.4)	86.4 (1.1)	49.1 (0.5)	31.7 (0.6)

CF, 浄化空気区; 1.0×O₃, 1.0倍O₃区; 1.5×O₃, 1.5倍O₃区

各値は3チャンバー反復の平均値であり、括弧内は標準偏差を示す.

a,12時間:6:00~18:00

^b, Daylight: 日射量 > 50 W m⁻²

(2) 日本の落葉広葉樹の積算純光合成量に対するオゾンの影響の現状評価

1) 積算純光合成量に対するオゾンの影響評価

純光合成速度の測定日間で純光合成速度が直線的に変化すると仮定し、一成長期間にわたって 純光合成速度を積算したものを積算純光合成量(積算CO₂吸収量)とした。なお、出葉日における 純光合成速度は0 µmol m⁻² s⁻¹と仮定した。4樹種の積算純光合成量に対するオゾンの影響を評価するため に、日中(日射量: >50 W m⁻²)における出葉日からの単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU, mmol m⁻²)と浄化空気区(CF区)の積算純光合成量に対する各オゾン処理区における積算純光合成量の 相対値との関係を解析した。

2) 日本に分布する落葉広葉樹の積算オゾン吸収量の推定

オゾンのAOT0およびCOUの算出には、日本の大気環境常時監視測定局における光化学オキシダント 濃度の1時間値(独立行政法人国立環境研究所環境数値データベース)、気象官署・AMeDAS(Automated Meteorological Data Acquisition System)で測定されている気温、相対湿度、降水量、積雪、日照時間およ び風速の1時間値を利用した。光化学オキシダントの90%以上はオゾンであるため、本研究では光化 学オキシダント濃度をオゾン濃度として扱った。以降では、オゾン濃度と表記する。大気飽差(VPD, kPa)およびPPFDは推定した。水蒸気圧の日変化は小さく、夜間に相対湿度はほぼ100%となることから、 日中の水蒸気圧を日最低気温における飽和水蒸気圧と等しい値であると仮定し、VPDを算出した。また、 太陽高度等から得られる大気外の日射量に、日照時間および降水量や積雪などの天候に応じた大気に おける日射量の経験的な減衰係数を掛け合わせることで地表面の日射量を推定し¹⁾、それに日射量

(W m⁻²)をPPFD (µmol m⁻² s⁻¹)に変換する係数(1.9)を掛け合わせることでPPFDを推定した²⁾。 また、有効積算温度と出葉日との関係を用いて出葉日を推定した^{3),4)}。しかしながら、落葉日は文献値 等を基に推定できなかったため、本研究で供試した4樹種の中で最も落葉が早いシラカンバの落葉時期 の調査を行い、葉が落葉する10月31日までの期間の積算オゾン吸収量を算出した^{5),6),7)}。大気環境常時監 視測定局におけるオゾン濃度の実測値、最寄りの気象官署やAMeDASで得られた気象観測データおよび それらの推定値を基に、日中の単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU)を推定した。オゾン濃度 の1時間値は2009~2011年のデータが公開されているため、この3年間のCOUの平均値を算出した。なお、 シラカンバの夏葉の出葉日は推定できなかったため、シラカンバの夏葉は対象としなかった。

3) 地理情報システム

本研究では、日本におけるブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの植生分布、COUおよびオゾン による積算純光合成量の低下率を地理情報システム(GIS)ソフトのArcGIS 10.2 software (ESRI inc. USA) を用いて地図化した。各樹種の分布図の作成には、1992~1996年にかけて行われた第5回基礎調査の 植生3次メッシュデータ(環境省 生物多様性情報システム 植生調査データベース)を用いた。 3次メッシュデータは、経線と緯線で地域を網の目状に区画したものであり、網の目の大きさは経度差 45秒、緯度差30秒に区画され、約1 km四方に該当している。なお、本研究における樹木の分布域には、 天然林だけではなく、人工林も含めた。4樹種のCOUに基づいて、クリギング法を用いて4樹種が分布す る地域における葉のCOUの空間補間を行った。

4. 結果及び考察

(1)気孔を介した葉のオゾン吸収量の推定

1) 樹木の葉のオゾン吸収量推定法の開発

樹木の葉のオゾン吸収量は、気孔を介した葉のオゾン吸収速度(F_{st} , nmol O_3 m⁻² s⁻¹)を 一定期間にわたって積算することによって求めることができる。 F_{st} は、樹冠表層部における オゾン濃度($[O_3]_{air}$, nmol O_3 mol⁻¹)、気孔腔におけるオゾン濃度($[O_3]_{leaf}$, nmol O_3 mol⁻¹)、 オゾンの葉面境界層拡散抵抗(r_{b_ozone} , m² s mol⁻¹ O_3)およびオゾンの気孔拡散抵抗(r_{s_ozone} , m² s mol⁻¹ O_3)を用いて、式1によって算出される。

$$F_{st} = \frac{[O_3]_{air} - [O_3]_{leaf}}{r_{b_{ozone}} + r_{s_{ozone}}}$$
(1)

気孔腔におけるオゾン濃度は0 ppbと仮定できるため⁸⁾、F_{st}は式2によって算出される。

$$F_{st} = \frac{\left[O_3\right]_{air}}{r_{b_ozone} + r_{s_ozone}}$$
(2)

ここで、r_{b_ozone}は150(定数)、風速(*u*, m s⁻¹)および葉幅(*L*_d, m)から得られ、気体の状態 方程式を利用して単位の変換を行った(式3)。なお、1.3はオゾンと顕熱の拡散係数の比で ある。

$$\mathbf{r}_{\rm b_ozone} = 1.3 \times 150 \times \sqrt{\frac{L_{\rm d}}{u}} \times \frac{8.31 \times (273.15 + \rm temp)}{1.013 \times 10^5}$$
(3)

また、 \mathbf{r}_{s_ozone} はオゾンの気孔コンダクタンス (g_{s_ozone} , mol O₃ m⁻² s⁻¹) の逆数であり、 g_{s_ozone} は水蒸気気孔コンダクタンス (g_s , mol H₂O m⁻² s⁻¹) に水とオゾンの分子拡散係数の比である 0.663を掛け合わせることによって算出した (式4)。

$$\mathbf{r}_{s_{\text{ozone}}} = \frac{1}{g_{s_{\text{ozone}}}} = \frac{1}{g_{s} \times 0.663}$$
(4)

葉の g_s は、気温や光の強さなどの環境条件に応じて変化するため、生育期間中の g_s を常時 測定が可能な気象条件等から推定できるモデルを構築する必要がある。そこで、 g_s の実測値 と測定時における気象条件等との関係をBoundary line technique⁹⁾で解析し、Stomatal conductance multiple model¹⁰⁾を用いて各樹種の葉の g_s 推定モデルを構築した。

Boundary line techniqueとは、従属変数に対して複数の独立変数が影響を及ぼす場合、独立 変数と従属変数との単相関の散布図におけるデータ値集団の上側の境界線が独立変数の変化 に伴う従属変数の最大値の変化を示すことを前提とした手法である。このことを応用して、 g_s 実測値の g_s 最大値 (g_{max} , mol H_2O m⁻² s⁻¹) に対する相対値 (g_s/g_{max}) と各環境要因との 単相関の散布図における境界線の近似式を算出することで、各環境要因に対する g_s の応答 変数を得ることができる。なお、育成期間中に測定したコナラ1st flush葉、ミズナラ1st flush 葉、シラカンバ春葉、シラカンバ夏葉およびブナ1st flush葉の g_{max} は、それぞれ479,705,641,811 および644 mmol H₂O m⁻² s⁻¹であり、 g_s 実測値の最小値 (g_{min} , mol H₂O m⁻² s⁻¹) はそれぞれ17,19,7, 22および9 mmol H₂O m⁻² s⁻¹であった。

2) ブナの水蒸気気孔コンダクタンスと環境要因の関係

図(1)-1-Aに、ブナの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と g_s 測定時の光 合成有効放射束密度(PPFD, μ mol m⁻² s⁻¹)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ 値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{light} の境界線とした(式5)。

$$f_{\text{light}} = \frac{0.004 \times \text{PPFD} + 1 - [(0.004 \times \text{PPFD} + 1)^2 - 4 \times 0.004 \times \text{PPFD} \times 0.9]^{1/2}}{2 \times 0.9}$$
(5)

図(1)-1-Bに、ブナの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値 (g_s/g_{max}) と g_s 測定時の 飽差 (VPD, kPa) との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{VPD} の境界線とした(式6)。

$$f_{\rm VPD} = \min(1, -0.49 \times \rm VPD + 2.53)$$
 (6)

図(1)-1-Cに、ブナ1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と g_s 測定時の気温(temp, °C)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{temp} の境界線とした(式7)。

$$f_{\text{temp}} = \left(\frac{\text{temp} - T_{\text{min}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{min}}}\right) \times \left(\frac{T_{\text{max}} - \text{temp}}{T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}}\right)^{t} \quad t = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{min}}}$$
(7)

 $\sub{\circl}$, $T_{min} = 12 \ ^{\circ}C$ $T_{opt} = 29 \ ^{\circ}C$ $T_{max} = 45 \ ^{\circ}C$

 T_{min} , T_{opt} および T_{max} は、それぞれ気孔が反応する気温域における最低気温、 g_s が g_{max} となる気温、 気孔が反応する気温域における最高気温を示している。

図(1)-1-Dに、ブナの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値 (g_s/g_{max}) と出葉日から g_s 測定時までの有効積算温度 (EATL, °C・day) との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、 データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{phen} の境界線とした(式8)。

EATL < 850 °C · dayのとき、

$$f_{phen} = 0.0012 \times EATL$$

 $850 \leq EATL \leq 2250 °C · dayのとき、$
 $f_{phen} = 1$
EATL > 2250 °C · dayのとき、
 $f_{phen} = -0.00059 \times EATL + 2.3$
(8)

EATLは出葉からの有効積算温度であり、出葉日からの葉の成長過程の指標として用いた。

図(1)-1-Eに、ブナの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値 (g_s/g_{max}) と g_s 測定時の 育成土壌における体積含水率 (SWC, %) との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ 値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{SWC} の境界線とした (式9)。

$$f_{\rm SWC} = \left[1 + \left(\frac{\rm SWC}{\rm 15}\right)^{-0.6}\right]^{-1} \tag{9}$$

図(1)-1-Fに、ブナの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と大気オゾン 濃度(O_3 , ppb)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{O3conc} の境界線とした(式10)。

$$f_{\rm O3conc} = \left[1 + \left(\frac{\rm O_3}{110}\right)^3\right]^{-1}$$
(10)

3) コナラの水蒸気気孔コンダクタンスと環境要因の関係

図(1)-2-Aに、コナラの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値 (g_s/g_{max}) と g_s 測定時 の光合成有効放射束密度 (PPFD, μ mol m⁻² s⁻¹) との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、 データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{light} の境界線とした(式11)。

$$f_{\text{light}} = \frac{0.004 \times \text{PPFD} + 1 - [(0.004 \times \text{PPFD} + 1)^2 - 4 \times 0.004 \times \text{PPFD} \times 0.95]^{1/2}}{2 \times 0.95}$$
(11)

図(1)-2-Bに、コナラの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と g_s 測定時の 飽差(VPD, kPa)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{VPD} の境界線とした(式12)。

$$f_{\rm VPD} = \min(1, -0.88 \times \rm VPD + 3.3)$$
 (12)

図(1)-2-Cに、コナラの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値 (g_s/g_{max}) と g_s 測定時の 気温 (temp, °C) との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{temp} の境界線とした (式13)。

5B-1105-10

$$f_{\text{temp}} = \left(\frac{\text{temp} - T_{\text{min}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{min}}}\right) \times \left(\frac{T_{\text{max}} - \text{temp}}{T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}}\right)^{t} \quad t = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{min}}}$$
(13)

 $\mathbb{C} \subset \mathbb{C}, \ T_{min} = 14 \ ^{\circ}C \\ T_{opt} = 32 \ ^{\circ}C \\ T_{max} = 38 \ ^{\circ}C$

 T_{min} , T_{opt} および T_{max} は、それぞれ気孔が反応する気温域における最低気温、 g_s が g_{max} となる気温、気孔が反応する気温域における最高気温を示している。

図(1)-2-Dに、コナラの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と出葉日から g_s 測定時までの有効積算温度(EATL, °C・day)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{phen} の境界線とした(式14)。

EATL < 600 °C · dayのとき、 $f_{phen} = 0.0017 \times EATL$ 600 ≤ EATL ≤ 1400 °C · dayのとき、 $f_{phen} = 1$ EATL > 1400 °C · dayのとき、 $f_{phen} = -0.00042 \times EATL + 1.6$

(14)

EATLは出葉からの有効積算温度であり、出葉日からの葉の成長過程の指標として用いた。

図(1)-2-Eに、コナラの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と g_s 測定時の 育成土壌における体積含水率(SWC, %)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ 値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{SWC} の境界線とした(式15)。

$$f_{\rm SWC} = \left[1 + \left(\frac{\rm SWC}{\rm 12}\right)^{-0.3}\right]^{-1}$$
(15)

図(1)-2-Fに、コナラの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と大気オゾン濃度(O_3 , ppb)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{O3conc} の境界線とした(式16)。

$$f_{\rm O3conc} = \left[1 + \left(\frac{O_3}{135}\right)^{1.3}\right]^{-1}$$
(16)

4) ミズナラの水蒸気気孔コンダクタンスと環境要因の関係

図(1)-3-Aに、ミズナラの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と g_s 測定時の光合成有効放射束密度(PPFD, μ mol m⁻² s⁻¹)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、

データ値集団の境界に位置する g_{s}/g_{max} の近似式を f_{light} の境界線とした(式17)。

$$f_{\text{light}} = \frac{0.003 \times \text{PPFD} + 1 - [(0.003 \times \text{PPFD} + 1)^2 - 4 \times 0.003 \times \text{PPFD} \times 0.9]^{1/2}}{2 \times 0.9}$$
(17)

図(1)-3-Bに、ミズナラの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_{s}/g_{max})と g_s 測定時の飽差(VPD, kPa)との関係を示した。この g_{s}/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_{s}/g_{max} の近似式を f_{VPD} の境界線とした(式18)。

$$f_{\rm VPD} = \min(1, -0.81 \times \rm VPD + 3.3)$$
 (18)

図(1)-3-Cに、ミズナラの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と g_s 測定時の気温(temp, °C)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{temp} の境界線とした(式19)。

$$f_{\text{temp}} = \left(\frac{\text{temp} - T_{\text{min}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{min}}}\right) \times \left(\frac{T_{\text{max}} - \text{temp}}{T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}}\right)^{\text{t}} \quad \text{t} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{min}}}$$
(19)

 $\begin{array}{l} \sub{\sc c} \sub{\sc c}, \ \ T_{min} = 15 \ ^\circ C \\ T_{opt} = 32 \ ^\circ C \\ T_{max} = 40 \ ^\circ C \end{array}$

T_{min}, T_{opt}およびT_{max}は、それぞれ気孔が反応する気温域における最低気温、g_sがg_{max}となる気温、 気孔が反応する気温域における最高気温を示している。

図(1)-3-Dに、ミズナラの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と出葉日から g_s 測定時までの有効積算温度(EATL, °C・day)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{phen} の境界線とした(式20)。



EATLは出葉からの有効積算温度であり、出葉日からの葉の成長過程の指標として用いた。

図(1)-3-Eに、ミズナラの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_{s}/g_{max})と g_s 測定時の育成土壌における体積含水率(SWC, %)との関係を示した。この g_{s}/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_{s}/g_{max} の近似式を f_{swc} の境界線とした(式21)。

$$f_{\rm SWC} = \left[1 + \left(\frac{\rm SWC}{13}\right)^{-0.4}\right]^{-1} \tag{21}$$

図(1)-3-Fに、ミズナラの1st flush葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値 (g_s/g_{max}) と大気 オゾン濃度 (O_3 , ppb) との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置 する g_s/g_{max} の近似式を f_{O3conc} の境界線とした (式22)。

$$f_{\rm O3conc} = \left[1 + \left(\frac{\rm O_3}{210}\right)^{1.1}\right]^{-1}$$
(22)

5)シラカンバの春葉の水蒸気気孔コンダクタンスと環境要因の関係

図(1)-4-Aに、シラカンバの春葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と g_s 測定時の 光合成有効放射束密度(PPFD, μ mol m⁻² s⁻¹)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、デー タ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{light} の境界線とした(式23)。

$$f_{\text{light}} = \frac{0.005 \times \text{PPFD} + 1 - [(0.005 \times \text{PPFD} + 1)^2 - 4 \times 0.005 \times \text{PPFD} \times 0.9]^{1/2}}{2 \times 0.9}$$
(23)

図(1)-4-Bに、シラカンバの春葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と g_s 測定時の 飽差(VPD, kPa)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{VPD} の境界線とした(式24)。

$$f_{\rm VPD} = \min(1, -1.1 \times \text{VPD} + 3.86)$$
 (24)

図(1)-4-Cに、シラカンバの春葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値 (g_s/g_{max}) と g_s 測定時の 気温 (temp, °C) との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{temp} の境界線とした (式25)。

$$f_{\text{temp}} = \left(\frac{\text{temp} - T_{\text{min}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{min}}}\right) \times \left(\frac{T_{\text{max}} - \text{temp}}{T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}}\right)^{t} \quad t = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{min}}}$$
(25)

ここで、 $T_{min} = 15$ °C $T_{opt} = 25$ °C $T_{max} = 42$ °C

 T_{min} , T_{opt} および T_{max} は、それぞれ気孔が反応する気温域における最低気温、 g_s が g_{max} となる気温、気孔が反応する気温域における最高気温を示している。

図(1)-4-Dに、シラカンバの春葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と出葉日から g_s 測定時までの有効積算温度(EATL, °C・day)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、 データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{phen} の境界線とした(式26)。

EATL < 150 °C・dayのとき、 $f_{phen} = 0.004 \times EATL + 0.4$ 150 $\leq EATL \leq 450$ °C・dayのとき、 $f_{phen} = 1$ EATL > 450 °C・dayのとき、 $f_{phen} = -0.00038 \times EATL + 1.2$

(26)

EATLは出葉からの有効積算温度であり、出葉日からの葉の成長過程の指標として用いた。

図(1)-4-Eに、シラカンバの春葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と g_s 測定時の 育成土壌における体積含水率(SWC, %)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ 値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{SWC} の境界線とした(式27)

$$f_{\rm SWC} = \left[1 + \left(\frac{\rm SWC}{\rm 14}\right)^{-0.4}\right]^{-1} \tag{27}$$

図(1)-4-Fに、シラカンバの春葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と大気オゾン 濃度(O_3 , ppb)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{O3conc} の境界線とした(式28)。

$$f_{\rm O3conc} = \left[1 + \left(\frac{\rm O_3}{90}\right)^6\right]^{-1} \tag{28}$$

6)シラカンバの夏葉の水蒸気気孔コンダクタンスと環境要因の関係

図(1)-5-Aに、シラカンバの夏葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と g_s 測定時の 光合成有効放射束密度(PPFD, μ mol m⁻² s⁻¹)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、デー タ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{light} の境界線とした(式29)。

$$f_{\text{light}} = \frac{0.005 \times \text{PPFD} + 1 - [(0.005 \times \text{PPFD} + 1)^2 - 4 \times 0.005 \times \text{PPFD} \times 0.7]^{1/2}}{2 \times 0.7}$$
(29)

図(1)-5-Bに、シラカンバの夏葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と g_s 測定時の 飽差(VPD, kPa)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{VPD} の境界線とした(式30)。

$$f_{\rm VPD} = \min(1, -0.4 \times \rm VPD + 1.77) \tag{30}$$

図(1)-5-Cに、シラカンバの夏葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と g_s 測定時の気温(temp, °C)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{temp} の境界線とした(式31)。

$$f_{\text{temp}} = \left(\frac{\text{temp} - T_{\text{min}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{min}}}\right) \times \left(\frac{T_{\text{max}} - \text{temp}}{T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}}\right)^{\text{t}} \quad t = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{opt}}}{T_{\text{opt}} - T_{\text{min}}}$$
(31)

ここで、 $T_{min} = 13$ °C $T_{opt} = 28$ °C $T_{max} = 41$ °C

T_{min}, T_{opt}およびT_{max}は、それぞれ気孔が反応する気温域における最低気温、g_sがg_{max}となる気温、 気孔が反応する気温域における最高気温を示している。

図(1)-5-Dに、シラカンバの夏葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と出葉日から g_s 測定時までの有効積算温度(EATL, °C・day)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、 データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{phen} の境界線とした(式32)。

EATL < 150 °C · dayのとき、

$$f_{phen} = 0.0067 \times EATL$$

150 $\leq EATL \leq 400$ °C · dayのとき、
 $f_{phen} = 1$
EATL > 400 °C · dayのとき、
 $f_{phen} = -0.00043 \times EATL + 1.2$
(32)

EATLは出葉からの有効積算温度であり、出葉日からの葉の成長過程の指標として用いた。

図(1)-5-Eに、シラカンバの夏葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と g_s 測定時の 育成土壌における体積含水率(SWC, %)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ 値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{SWC} の境界線とした(式33)。

$$f_{\rm SWC} = \left[1 + \left(\frac{\rm SWC}{13}\right)^{-0.6}\right]^{-1}$$
(33)

図(1)-5-Fに、シラカンバの夏葉における g_s 実測値の g_{max} に対する相対値(g_s/g_{max})と大気オゾン 濃度(O_3 , ppb)との関係を示した。この g_s/g_{max} の分布をもとに、データ値集団の境界に位置する g_s/g_{max} の近似式を f_{O3conc} の境界線とした(式34)。

$$f_{\rm O3conc} = \left[1 + \left(\frac{\rm O_3}{100}\right)^7\right]^{-1}$$
(34)

7) 水蒸気気孔コンダクタンスとオゾン吸収量の推定式の構築

Stomatal conductance multiple modelは、気象条件等の環境要因が g_s に相加的に作用することを前提としたモデルである。このモデルを用い、各環境要因に対する g_s の応答変数を g_{max} に掛け合わせることで g_s の推定値(g_{sto})を算出する推定モデル^{10),11),12)}を構築した(式35)。

$$g_{\text{sto}} = g_{\text{max}} \times f_{\text{phen}} \times f_{\text{light}} \times \max\left\{ f_{\text{min}}, \left(f_{\text{temp}} \times f_{\text{VPD}} \times f_{\text{SWC}} \times f_{\text{O3conc}} \right) \right\}$$
(35)

なお、 f_{\min} は g_{\min} と g_{\max} の比 (g_{\min}/g_{\max}) である。

図(1)-6に、本研究で開発した各樹種の葉のg_s推定モデルから算出したg_sの推定値とg_sの実測値との関係を示した。ブナの1st flush葉、コナラの1st flush葉、ミズナラの1st flush葉、シラカンバの 春葉および夏葉におけるg_sの実測値と推定値との間に有意な正の相関関係が認められ、その回帰 直線の傾きはそれぞれ1.02, 0.83, 0.87, 0.82および0.80であり、切片はそれぞれ53, 89, 112, 166およ び194であった。これらの結果から、各樹種の葉のg_sを気象条件等の常時測定値から推定すること が可能になった。また、g_sの推定値を式4に代入し、式2と式3および風速とオゾン濃度の常時測定 値を用いてF_{st}を推定することで、ブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの葉のオゾン吸収量 を推定することが可能になった。



 図(1)-1 ブナの1st flush葉の水蒸気気孔コンダクタンス(g_s)の実測値の最大水蒸気気孔コンダク タンス(g_{max})に対する相対値(g_s/g_{max})と光合成有効放射束密度(A)、飽差(B)、気温(C)、
 出葉からの有効積算温度(D)、土壌体積含水率(E)、大気オゾン濃度(F)との関係.



図(1)-2 コナラの1st flush葉の水蒸気気孔コンダクタンス(g_s)の実測値の最大水蒸気気孔コンダクタンス(g_{max})に対する相対値(g_s/g_{max})と光合成有効放射束密度(A)、飽差(B)、気温(C)、出葉からの有効積算温度(D)、土壤体積含水率(E)、大気オゾン濃度(F)との関係.



図(1)-3 ミズナラの1st flush葉の水蒸気気孔コンダクタンス(g_s)の実測値の最大水蒸気気孔コン ダクタンス(g_{max})に対する相対値(g_s/g_{max})と光合成有効放射束密度(A)、飽差(B)、 気温(C)、出葉からの有効積算温度(D)、土壌体積含水率(E)、大気オゾン濃度(F)との 関係.



図(1)-4 シラカンバ春葉の水蒸気気孔コンダクタンス(g_s)の実測値の最大水蒸気気孔コンダク タンス(g_{max})に対する相対値(g_s/g_{max})と光合成有効放射束密度(A)、飽差(B)、気温(C)、 出葉からの有効積算温度(D)、土壌体積含水率(E)、大気オゾン濃度(F)との関係.



図(1)-5 シラカンバの夏葉の水蒸気気孔コンダクタンス(g_s)の実測値の最大水蒸気気孔コンダ クタンス(g_{max})に対する相対値(g_s/g_{max})と光合成有効放射束密度(A)、飽差(B)、気温 (C)、出葉からの有効積算温度(D)、土壤体積含水率(E)、大気オゾン濃度(F)との関係.



8) 環境要因による葉の水蒸気気孔コンダクタンスの律速程度

図(1)-7に、2013年における1.5倍O₃区で育成したブナ、コナラおよびミズナラの1st flush葉とシラカン バの春葉および夏葉の出葉日からの単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU, mmol m⁻²)とオゾン 濃度の日平均値の経時変化を示した。ブナの1st flush葉のCOUは8月に最も高く、コナラの1st flush葉およ びミズナラの1st flush葉のそれは6月に最も高かった。また、シラカンバの春葉および夏葉のCOUは5月 に最も高かった。2013年におけるブナの1st flush葉、コナラの1st flush葉、ミズナラの1st flush葉、シラカ ンバの春葉および夏葉のCOUは、それぞれ38.5, 25.4, 35.0, 37.2および35.1 mmol m⁻²であった。

1.5倍O₃区で育成したブナの1st flush葉、コナラの1st flush葉、ミズナラの1st flush葉、シラカンバの 春葉および夏葉の日中の大気オゾン濃度の1時間値の積算値(Daylight AOT0, ppm h)は、5月に最も高か った。同様に、1.5倍O₃区で育成したシラカンバの春葉および夏葉のCOUは、5月に最も多かった。これ に対して、1.5倍O₃区で育成したブナの1st flush葉のCOUは8月に最も高く、コナラとミズナラの1st flush 葉のCOUは6月に最も高かった。このように、ブナ、コナラおよびミズナラの1st flush葉において、オゾ ンのDaylight AOT0とCOUが最も高くなる月は異なっていた。地中海地域の夏季においても、このような 相違が生じることが報告されている¹³⁾。地中海地域の夏季においては、強い日射、高い気温および大気 の乾燥によって光化学反応が促進され、オゾン濃度が高くなる¹⁴⁾。しかしながら、夏季における大気の 乾燥は気孔を閉鎖させるため、気孔を介した葉のオゾン吸収量は比較的少なかった¹³⁾。このようなオゾ ンのAOT0とCOUが最も高くなる時期の相違は、樹木に対するオゾンの影響を評価する際に、AOT0では なく、COUを用いるべきであることを示している。水蒸気気孔コンダクタンスの最大値(g_{max})は、 シラカンバの夏葉>ミズナラの1st flush葉>ブナの1st flush葉>シラカンバの春葉>コナラの1st flush葉 の順に高かった。一方、2013年の1.5倍オゾン区の出葉日からの単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量

(COU, mmol m⁻²) は、ブナの1st flush葉>シラカンバの春葉>シラカンバの夏葉>ミズナラの1st flush 葉>コナラの1st flush葉の順に高かった(図(1)-7)。これらの結果は、 g_{max} の高い葉が必ずしもCOUが 高い訳ではなく、環境要因に対する g_s の応答がCOUの決定要因として重要であることを示している。



図(1)-7 2013年における1.5倍O₃区で育成したブナ、コナラおよびミズナラの1st flush葉と シラカンバの春葉および夏葉の出葉日からの単位葉面積あたりの積算オゾン吸収 量(COU, mmol m⁻²)と大気オゾン濃度の日平均値の経時変化.

図(1)-8に、1.5倍O₃区で育成したブナの1st flush葉、コナラの1st flush葉、ミズナラの1st flush葉、シラ カンバの春葉および夏葉の2013年の春季(4~5月)、夏季(6~8月)および秋季(9~10月)における Limiting degree を示した。Limiting degree ($D_{factor}: D_{phen}, D_{light}, D_{temp}, D_{VPD}, D_{SWC}, D_{O3conc}$) とは各環境要因に よる水蒸気気孔コンダクタンス (g_s , mmol H₂O m⁻² s⁻¹)の律速程度であり、各環境要因に対する g_s の応答 変数 ($f_{factor}: f_{phen}, f_{light}, f_{temp}, f_{VPD}, f_{SWC}, f_{O3conc}$)を用いて以下のように定義した(式36)。

$$D_{factor} = 1 - f_{factor} \tag{36}$$

春季においては、ブナ、コナラおよびミズナラの1st flush葉では D_{phen} が最も高く、それぞれ0.72, 0.63 および0.71であった。シラカンバ春葉および夏葉の D_{phen} はそれぞれ0.09および0.19であり、ブナ、コナラ およびミズナラの1st flush葉のそれと比較して低かった。また、シラカンバの春葉および夏葉では D_{temp} が最も高く、それぞれ0.32および0.26であった。夏季においては、ブナおよびミズナラの1st flush葉では D_{light} が最も高く、それぞれ0.19および0.25であった。コナラの1st flush葉では D_{temp} が最も高く、0.019で あった。シラカンバの春葉および夏葉では D_{phen} が最も高く、それぞれ0.40および0.40であった。秋季に おいては、ブナの1st flush葉、コナラの1st flush葉、ミズナラの1st flush葉、シラカンバの春葉および夏葉 において D_{phen} が最も高く、それぞれ0.27, 0.53, 0.52, 0.90および0.95であった。

日本のオゾン濃度は、春季(3~5月)に比較的高い^{15),16)}。したがって、樹木に対するオゾンの 影響評価において、春季における葉のオゾン吸収量は重要である。1.5倍O3区で育成したブナ、コナラ およびミズナラの1st flush葉における春季のCOU (5.6, 4.1および5.2 mmol m⁻²) が一成長期間のCOU (38.5, 25.4および35.0 mmol m⁻²) に占める割合は比較的低く、それぞれ14.5, 16.0および15.0%であった。一方、 1.5倍O3区で育成したシラカンバの春葉およびシラカンバの夏葉における春季のCOU(19.3および 14.7 mmol m⁻²)が一成長期間のCOU(37.2および35.1 mmol m⁻²)に占める割合は高く、それぞれ51.8%お よび42.0%であった。このような春季におけるCOUの樹種間差異の原因を明らかにするために、1.5倍O3 区で育成したブナ、コナラおよびミズナラの1st flush葉とシラカンバの春葉および夏葉の春季における Limiting degree (*D*_{factor}: *D*_{phen}, *D*_{light}, *D*_{temp}, *D*_{VPD}, *D*_{SWC}, *D*_{O3conc}) を計算した。その結果、ブナ、コナラおよ びミズナラの1st flush葉では D_{phen} が最も高く、それぞれ0.72, 0.63および0.71であった(図(1)-8)。一方、 シラカンバの春葉および夏葉のDphenは、ブナ、コナラおよびミズナラの1st flush葉のそれと比較して著し く低く、それぞれ0.09および0.19であった。その他のLimiting degree (D_{light}, D_{temp}, D_{VPD}, D_{SWC}, D_{O3conc}) に 樹種による著しい違いは認められなかった。f_{phen}のパラメータの一つであるphen_bは、葉の完全展開や 成熟に伴って気孔が最も開くようになる時 (fphen=1)の有効積算温度 (EATL, °C day) を示している。 ブナの1st flush葉、コナラの1st flush葉、ミズナラの1st flush葉、シラカンバの春葉および夏葉のphen_b は、それぞれ850,600,800,150および150 °C・dayであった。この結果は、シラカンバの春葉および夏葉 は、ブナ、コナラおよびミズナラの1st flush葉に比べて、出葉後に短期間でgsが高くなることを示してい る。以上のことから、ブナ、コナラおよびミズナラの1st flush葉は成熟が比較的遅いため、春季において 大気オゾン濃度は比較的高かったが、気孔を介した葉のオゾン吸収量は低いことが明らかになった。 これに対して、シラカンバの春葉および夏葉は成熟が早く、出葉後に短期間でgsが高くなるため、春季 のオゾン吸収量が高いことが明らかになった。



図(1)-8 1.5倍O₃区で育成したブナの1st flush葉(緑)、コナラの1st flush葉(黄)、 ミズナラの1st flush葉(青)、シラカンバの春葉(黒)および夏葉(赤)の 2013年の春季(4~5月)、夏季(6~8月)および秋季(9~10月)における Limiting degree. Limiting degree (D_{factor} : D_{phen} , D_{light} , D_{temp} , D_{VPD} , D_{SWC} , D_{O3conc})とは各環境要因による水蒸気気孔コンダクタンス (g_s)の律速 程度であり、各環境要因に対する g_s の応答変数 (f_{factor} : f_{phen} , f_{light} , f_{temp} , f_{VPD} , f_{SWC} , f_{O3conc})を用いて定義した。 $D_{factor} = 1 - f_{factor}$.

(2) 日本の落葉広葉樹の積算純光合成量に対するオゾンの影響の現状評価

1) 積算純光合成量に対するオゾンの影響

図(1)-9に、サブテーマ(1)とサブテーマ(2)のオゾン暴露実験から得られたブナの1st flush葉、 コナラの1st flush葉、ミズナラの1st flush葉およびシラカンバの春葉の積算純光合成量の相対値(%)と 出葉日からの単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU, mmol m⁻²)との関係を示した。積算 純光合成量の相対値とは、浄化空気区(CF区)の積算純光合成量に対する各オゾン処理区の積算純光合 成量の相対値である。ブナの1st flush葉の積算純光合成量の相対値(Y,%)と単位葉面積あたりの積算 オゾン吸収量(X, mmom m⁻²)との回帰曲線(ウェイブル関数, Y=exp[-(X/ ω)^λ]、 ω 、 λ は定数)は、 Y=100×exp[-(X/83.2)^{3.08}]であった。コナラの1st flush葉の積算純光合成量の相対値(Y,%)と 単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(X, mmom m⁻²)との回帰曲線は、Y=100×exp[-(X/69.0)^{2.59}]であ った。ミズナラの1st flush葉の積算純光合成量の相対値(Y,%)と単位葉面積あたりの積算オゾン吸収 量(X, mmom m⁻²)との回帰曲線は、Y=100×exp[-(X/66.5)^{3.51}]であった。シラカンバの春葉の積算 純光合成量の相対値(Y,%)と単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(X, mmom m⁻²)との回帰曲線は、 Y=100×exp[-(X/48.3)^{4.41}]であった。いずれの樹種においても、COUの増加に伴って積算純光合成量の 相対値は低下した。オゾンによる積算純光合成量の相対値の低下程度には樹種間差異があり、シラカン バ>コナラ>ミズナラ>シラカンバの順に高かった。この結果は、気孔から葉内に同量のオゾンを吸収 しても、オゾンによる積算純光合成量の低下程度が樹種によって異なることを示している。



図(1)-9 赤城(○: 2012年, △: 2013年)および八王子(□: 2013年)におけるブナの1st flush葉、 コナラの1st flush葉、ミズナラの1st flush葉およびシラカンバの春葉の積算純光合成量の相対 値(%)と出葉日からの単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU, mmol m⁻²)との関係. 積算純光合成量の相対値とは、浄化空気区(CF区)の積算純光合成量に対する各オゾン処理区 の積算純光合成量の相対値である。 ブナ:Y=100×exp[-(X/83.2)^{3.08}] コナラ:Y=100×exp[-(X/69.0)^{2.59}] ミズナラ:Y=100×exp[-(X/66.5)^{3.51}]

シラカンバ: Y=100×exp[-(X/48.3)^{4.41}]

2)現状のオゾンによる日本に分布する落葉広葉樹の積算純光合成量低下率の評価

図(1)-10に、2009~2011年における日本のブナ分布域の日中(日射量:>50 W m⁻²)の大気オゾン濃度 の1時間値の積算値(Daylight AOT0)の年平均値と1st flush葉の単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量 (COU)の年平均値を示した。ブナ分布域におけるオゾンのDaylight AOT0および1st flush葉のCOUの 全国平均値は、それぞれ 80.0 ppm hおよび43.0 mmol m⁻²であった。

図 (1)-11に、2009~2011年における日本のコナラ分布域のオゾンのDaylight AOT0の年平均値と 1st flush葉のCOUの年平均値を示した。コナラ分布域におけるオゾンのDaylight AOT0および1st flush葉の COUの全国平均値は、それぞれ82.3 ppm hおよび27.9 mmol m⁻²であった。

図(1)-12に、2009~2011年における日本のミズナラ分布域のオゾンのDaylight AOT0の年平均値と 1st flush葉のCOUの年平均値を示した。ミズナラ分布域におけるオゾンのDaylight AOT0および1st flush 葉のCOUの全国平均値は、それぞれ76.0 ppm hおよび35.6 mmol m⁻²であった。

図(1)-13に、2009~2011年における日本のシラカンバ分布域のオゾンのDaylight AOT0の年平均値と 春葉のCOUの年平均値を示した。シラカンバ分布域におけるオゾンのDaylight AOT0および春葉のCOU の全国平均値は、それぞれ58.6 ppm hおよび31.7 mmol m⁻²であった。



図(1)-10 2009~2011年における日本のブナ分布域のオゾンのDaylight AOT0の年平均値と 1st flush葉の単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU)の年平均値.



図(1)-11 2009~2011年における日本のコナラ分布域のオゾンのDaylight AOT0の年平均値と 1st flush葉の単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU)の年平均値.


図(1)-12 2009~2011年における日本のミズナラ分布域のオゾンのDaylight AOT0の年平均値と 1st flush葉の単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU)の年平均値.



図(1)-13 2009~2011年における日本のシラカンバ分布域のオゾンのDaylight AOT0の年平均値 と春葉の単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU)の年平均値.

日本に分布するブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの2009~2011年におけるオゾンによる積算 純光合成量の低下率(%)を積算純光合成量の相対値(%)と出葉日からの単位葉面積あたりの積算 オゾン吸収量(COU, mmol m⁻²)との関係(図(1)-9)から推定した。

図(1)-14に、積算オゾン吸収量(COU)に基づいて算出したブナの1st flush葉の積算純光合成量の 低下率を示した。積算純光合成量の低下率は1~32%であり、その全国平均値は12%であった。

図(1)-15に、積算オゾン吸収量(COU)に基づいて算出したコナラの1st flush葉の積算純光合成量の 低下率(%)を示した。積算純光合成量の低下率は2~17%であり、その全国平均値は10%であった。

図(1)-16に、積算オゾン吸収量(COU)に基づいて算出したミズナラの1st flush葉の積算純光合成量の低下率(%)を示した。積算純光合成量の低下率は1~32%であり、その全国平均値は12%であった。

図(1)-17に、積算オゾン吸収量(COU)に基づいて算出したシラカンバの春葉の積算純光合成量の 低下率(%)を示した。積算純光合成量の低下率は9~58%であり、その全国平均値は16%であった。



図(1)-14 出葉日からの単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU, mmol m⁻²)に基づいて算出 した2009~2011年におけるブナの1st flush葉の積算純光合成量の年平均低下率(%).



図(1)-15 出葉日からの単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU, mmol m⁻²)に基づいて算出 した2009~2011年におけるコナラの1st flush葉の積算純光合成量の年平均低下率(%).



図(1)-16 出葉日からの単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU, mmol m⁻²)に基づいて算出 した2009~2011年におけるミズナラの1st flush葉の積算純光合成量の年平均低下率(%).



図(1)-17 出葉日からの単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU, mmol m⁻²)に基づいて算出 した2009~2011年におけるシラカンバの春葉の積算純光合成量の年平均低下率(%).

3) 日本における森林衰退に対するオゾンの関与

本研究の結果を基に、日本における森林衰退に対するオゾンの関与を検討する。日本において、 コナラやミズナラの森林衰退が観察されているが、主な原因としてはナラ枯れが指摘されて おり^{17),18)}、それらの森林衰退に対するオゾンの関与の判断は困難である。一方、ブナ林の衰退の主な 原因として、オゾンが指摘されている^{19),20),21),22),23)}。例えば、丹沢山地においては、現状濃度レベルの オゾンによるブナ苗の葉のクロロフィル含量(SPAD値)の低下、落葉の早期化および個体乾物成長の 低下などが認められている²¹⁾。

図(1)-18に、日本における森林衰退や葉の異常が観察されているブナの分布地域^{20),22),23)}と2009~2011 年におけるブナの単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU)に基づいて算出した積算純光合成量 の低下率を示した。なお、葉の異常の判断指標は、その大きさ、色、形、空間的密度および枯葉数で ある²³⁾。丹沢山地(神奈川県)、英彦山(福岡県)、脊振山(福岡県)、函南原生林(静岡県)、 富士山(静岡県)および立山(富山県)におけるオゾンによる積算純光合成量の低下率は15~20%で あり、その全国平均値(12%)に比べて高かった。さらに、臥竜山(広島県)におけるオゾンによる 積算純光合成量の低下率は20~25%であり、その全国平均値に比べて極めて高かった。したがって、 日本に分布するブナ林の衰退や葉の異常にオゾンが関与している可能性が十分にある。



図(1)-18 日本における森林衰退や葉の異常が観察されているブナの分布地域と2009~2011年に おけるブナの単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(COU)に基づいて算出した積算 純光合成量の年平均低下率(%).

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

サブテーマ(1)では、光合成有効放射束密度、気温、飽差、有効積算温度、土壌体積含水率および 大気オゾン濃度に基づいて、日本の代表的な落葉広葉樹であるブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカン バの葉の水蒸気気孔コンダクタンスの推定式を構築し、気孔を介した葉のオゾン吸収量を算出すること が可能になった。その結果、比較的高濃度のオゾンが観測された春季においては、ブナ、コナラおよび ミズナラの1st flush葉は未成熟であったため、気孔開度が比較的低く、オゾン吸収量が低いことが明らか になった。一方、シラカンバの春葉および夏葉は葉の成熟が早く、春季においても葉のオゾン吸収量が 比較的高いことが明らかになった。

葉の積算オゾン吸収量に基づいて、日本に分布する落葉広葉樹4種の積算純光合成量に対するオゾンの影響評価を行った結果、ブナ、コナラおよびミズナラの1st flush葉とシラカンバの春葉の積算純光合成量のオゾンによる年平均低下率はそれぞれ12%,10%,12%および16%と推定された。したがって、アジア大陸からの越境大気汚染対策や日本国内のオゾンの前駆物質の排出源対策を行うことで、日本の森林の保護だけでなく、その地球温暖化防止機能を向上させることができることを科学的に示した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

環境省の越境大気汚染・酸性雨対策検討会の生態影響分科会の下にあるオゾン等の植物影響 評価ワーキンググループ(座長:伊豆田 猛)において、本研究で得られた研究成果などを提示し、 平成26年3月に公表された環境省の越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング(平成20~24年度) 最終報告書の内容(119~123ページ)の検討過程で多大な貢献をした。同ワーキンググループ で実施しているオゾンによる植物影響のパイロットモニタリングの地点選定過程で本研究で得ら れた研究成果を提示し、福岡県(英彦山)、新潟県(八海山)および北海道(摩周湖外輪山)に おけるオゾン濃度の測定と植物被害の評価が開始され、その結果が平成26年3月に公表された環境 省の越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング(平成20~24年度)最終報告書に掲載された(123~ 129ページ)。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究では、気孔を介した葉のオゾン吸収量に基づいた日本の落葉広葉樹のCO2吸収・固定能力 に対するオゾンの影響の評価手法を確立したため、日本の現状レベルのオゾンによる落葉広葉樹 の年間CO2吸収量の低下程度が評価できるようになった。したがって、大気汚染対策と温暖化対策 のコベネフィットアプローチに対して科学的知見を提供できる。

本研究によって、日本におけるオゾンによる森林衰退の危険地域(ホットスポット)の選択が 可能になったため、越境大気汚染による生態系影響の発現予測やその対策に貢献できる。

本研究による森林のCO₂固定能へのオゾンの影響評価は、気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)の報告書などの国際的な科学的知見の集積に 直接的に貢献し、温暖化防止を目的として東アジア各国の連携の下で国際的大気汚染対策を 推進するための科学的根拠を提供できる。

本研究は、現在、オゾンなどのガス状大気汚染物質の測定が検討されている東アジア酸性雨 ネットワーク(EANET)におけるオゾン測定地点の設定やオゾンの植物影響評価地点の選定など に対して科学的根拠が提供できるため、多大な貢献が期待できる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1)誌上発表

<論文(査読あり)>

- M. YAMAGUCHI, M. WATANABE, H. MATSUMURA, Y. KOHNO and T. IZUTA: Asian J. Atmos. Environ., 5, 65-78 (2011) "Experimental Studies on the Effects of Ozone on Growth and Photosynthetic Activity of Japanese Forest Tree Species"
- 2) M. WATANABE, M. YAMAGUCHI, H. MATSUMURA, Y. KOHNO, T. KOIKE and T. IZUTA: Asian J. Atmos. Environ., 5, 205-215 (2011) "A Case Study of Risk Assessment of Ozone Impact on Forest Tree Species in Japan"
- 3) 伊豆田 猛:大気環境学会誌, 47, 1, A12-A15 (2012)「葉のオゾン吸収量に基づいた植物に対 するオゾンの影響評価」
- 4) M. WATANABE, M. YAMAGUCHI, H. MATSUMURA, Y. KOHNO and T. IZUTA: Eur. J. Forest Res., 131, 475-484 (2012) "Risk Assessment of Ozone Impact on Fagus crenata in Japan: Consideration of Atmospheric Nitrogen Deposition"
- 5) F. AZUCHI, Y. KINOSE, T. MATSUMURA, T. TANOMATA, Y. UEHARA, A. KOBAYASHI, M. YAMAGUCHI and T. IZUTA: Environ. Pollut. 184: 481-487 (2014) "Modeling Stomatal Conductance and Ozone Uptake of *Fagus crenata* Grown under Different Nitrogen Loads"
- 6) T. KOIKE, M. WATANABE, Y. HOSHIKA, M. KITAO, H. MATSUMURA, R. FUNADA and T. IZUTA: Climate Change, Air Pollution and Global Challenges: Understanding and Solutions from Forest Research (R. Matyssek *et al.*, eds.), Elsevier. (2013) "Effects of Ozone on Forest Ecosystems in East and Southeast Asia"

<その他誌上発表(査読なし)>

- 公害防止の技術と法規 編集委員会 編:新・公害防止の技術と法規 2012 大気編 I、 (社)産業環境管理協会、168-179 (2012)「植物に対する大気汚染物質の影響(執筆担当: 伊豆田 猛)」
- 2) 伊豆田 猛、船田 良:北方林業, 65, 23-24 (2013)「我が国における対流圏オゾンの植物影響 評価に関する試み」
- 3)公害防止の技術と法規 編集委員会 編:新・公害防止の技術と法規 2013 大気編 I、 (社)産業環境管理協会、175-186 (2013)「植物に対する大気汚染物質の影響(執筆担当: 伊豆田 猛)」
- 4) 公害防止の技術と法規 編集委員会 編:新・公害防止の技術と法規 2014 大気編 I、
 (社)産業環境管理協会、116-128 (2014)「植物に対する大気汚染物質の影響(執筆担当:
 伊豆田 猛)」
- (2) 口頭発表(学会等)
- 1) 伊豆田 猛: 大気環境学会関東支部講演会(2011)「葉のオゾン吸収量に基づいた植物に対す るオゾンの影響評価」

- 2) 伊豆田 猛:第28回エアロゾル科学・技術研究討論会(日本エアロゾル学会) 特別講演(2011) 「植物に対する越境大気汚染物質の影響」
- 3) 安土文鹿、母袋 朗、松村友絵、伊藤伸一郎、伊豆田 猛:第52回大気環境学会(2011) 「ブナ苗の成長、光合成および炭素固定量に対するオゾンの影響」
- 4) 渡辺 誠、山口真弘、松村秀幸、河野吉久、小池孝良、伊豆田 猛:第123回日本森林学会 (2012)「日本の森林樹種に対するオゾンのリスク評価、窒素沈着の考慮」
- 5) 山口真弘、渡辺 誠、松村秀幸、伊豆田 猛:第123回日本森林学会(2012)「ブナ苗の光合成 活性と窒素代謝に対するオゾンと土壌への窒素負荷の複合影響」
- 6) 伊豆田 猛: 大気環境学会 植物分科会 全国講演会 (2012)「大気汚染と植物」
- 7)渡辺 誠、山口真弘、松村秀幸、河野吉久、伊豆田 猛:大気環境学会 植物分科会 全国講演会(2012)「窒素沈着量を考慮したブナに対するオゾンのリスク評価」
- 8) 黄瀬佳之、安土文鹿、松村友絵、上原 唯、鹿又友彰、小林亜由美、山口真弘、伊豆田 猛: 第53回大気環境学会年会(2012)「ブナの葉のオゾン吸収量推定モデルの構築」
- 9) 安土文鹿、松村友絵、上原 唯、鹿又友彰、黄瀬佳之、小林亜由美、山口真弘、伊豆田 猛: 第53回大気環境学会年会(2012)「葉のオゾン吸収量に基づくブナ苗に対するオゾンと土壌 への窒素負荷の複合影響の評価」
- 10) T. IZUTA : Workshop on Atmospheric Deposition in East Asia 2012, Bangkok, Thailand, (2012) "Effects of ozone on plants"
- 11)山口真弘、渡辺 誠、松村秀幸、河野吉久、伊豆田 猛:第123回日本森林学会大会テーマ別 シンポジウム(2012)「葉のオゾン吸収量に基づくブナ苗に対するオゾンと土壌窒素負荷の 複合影響の評価」
- 12) 松村秀幸、伊豆田 猛:第53回大気環境学会年会(2012)「同化箱を用いて測定した数種落葉 広葉樹の葉のオゾン吸収と純光合成との関係」
- 13)山口真弘、安土文鹿、松村友絵、上原 唯、鹿又友彰、黄瀬佳之、小林亜由美、松村秀幸、 伊豆田 猛:第124回日本森林学会大会テーマ別シンポジウム(2013)「葉のオゾン吸収量に 基づくブナ苗に対するオゾンと土壌窒素負荷の複合影響の評価」
- 14)山口真弘、黄瀬佳之、安土文鹿、上原 唯、小林亜由美、鹿又友彰、松村秀幸、伊豆田 猛: 第54回大気環境学会(2013)「ブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの葉の気孔を介し たオゾン吸収量の推定」
- 15) 松村秀幸、山口真弘、黄瀬佳之、米倉哲志、伊豆田 猛:第54回大気環境学会(2013) 「落葉広葉樹4種の葉の純光合成速度におよぼす1成長期間のオゾン暴露の影響とオゾン 吸収量との関係」
- 16) 安土文鹿、上原 唯、黄瀬佳之、鹿又友彰、小林亜由美、山口真弘、伊豆田 猛:第54回 大気環境学会(2013)「葉のオゾン吸収量に基づくブナ、ミズナラおよびシラカンバの 純光合成速度におけるオゾン感受性の評価」
- 17) M. YAMAGUCHI and T. IZUTA : International Symposium on Agricultural Meteorology 2014, Sapporo, Japan, (2014) "Effects of air pollutants on photosynthetic activity of Asian forest tree species"

18)山口真弘、安土文鹿、黄瀬佳之、小林亜由美、鹿又友彰、上原 唯、松村秀幸、伊豆田 猛: 第125回日本森林学会大会テーマ別シンポジウム (2014)「葉のオゾン吸収量に基づくブナ、 コナラ、ミズナラおよびシラカンバの葉の純光合成速度に対するオゾンの影響評価」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナー等の開催(主催のもの) 特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

1) 東京新聞(2013年7月28日、サンデー版、「光化学スモッグ」)

(6) その他

「国民との科学・技術対話」(平成22年6月19日)を推進するために、平成23~25年度に合計 17回の講演等を行い、本研究プロジェクトで得られた成果を一般市民や学生などに紹介した。

- 1) 伊豆田 猛:府中市エコサマースクール (2011) 「府中市の大気はだいじょうぶ?」
- 2) 伊豆田 猛:オゾン等による植物影響シンポジウム(北海道弟子屈町)(2011)「植物に対する 越境大気汚染物質の影響」
- 3) 伊豆田 猛:東京大学森林科学セミナー(2012)「樹木に対する越境大気汚染物質の影響」
- 4) Izuta, T. : JICA Capacity Development (2012) "Effects of transboundary air pollutants on plants"
- 5) 伊豆田 猛:津軽半島環境サミット(2012)「植物に対する越境大気汚染物質の影響」
- 6) 伊豆田 猛:北海道大学講演会(2012)「対流圏オゾンが農林作物の成長に及ぼす影響の研究の 動向」
- 7)伊豆田 猛:北海道立総合研究機構 環境科学研究センター 対流圏オゾン等による植物影響 講演会(2012)「越境大気汚染の影響,北海道の農作物と樹木への影響は?」
- 8) 伊豆田 猛:北海道立総合研究機構 環境科学研究センター 対流圏オゾン等による植物影響 検討会(2012)「オゾンの植物影響評価には何が必要か、暴露試験の変遷と装置の特徴」
- 9) 伊豆田 猛: 横浜市立フロンティアサイエンス高等学校(2013)「大気汚染と植物」
- 10) 伊豆田 猛:府中市講演会(2013)「大気汚染と植物」
- 11) 伊豆田 猛:東京都立科学技術高等学校(2013)「大気汚染と植物」
- 12) 伊豆田 猛:慶熙大学校講演会(2013) "Effects of ozone on plants"
- 13) 伊豆田 猛:東京都立武蔵野北高等学校(2013)「大気汚染と植物」
- 14) 伊豆田 猛:神奈川県農業技術センター講演会 (2013)「ブナに対するオゾンの影響」
- 15) 伊豆田 猛:北海道大学講演会(2013)「越境大気汚染と植物」
- 16) 伊豆田 猛:東京農工大学科学技術展(2013)「樹木に対するオゾンの影響に関する研究」
- 17) 伊豆田 猛:京都大学生存圏研究所国際シンポジウム (2013) "Effects of transboundary air pollutants on plants"

8. 引用文献

- Y. MASAKI, T. KUWAGATA and Y. ISHIGOOKA: Theor. Appl. Climatol., 100, 283-297 (2010) "Precise Estimation of Hourly Global Solar Radiation for Micrometeorological Analysis by Using Data Classification and Hourly Sunshine"
- 2) 黒澤良太、曽我和弘:日本建築学会九州支部研究報告,47,173-176 (2008) 「光合成有効放射 量の推定法に関する基礎的研究」
- 3) 藤本征司:保全生態学研究,13,75-87 (2008)「気温変動が暖温帯域の樹木の葉フェノロジーに与える 影響の予測」
- 4) 飛田博順、北尾光俊、丸山 温:日本森林学会北海道支部論文集,59,49-52 (2011)「落葉広葉樹3種の開芽・開葉時期と落葉時の窒素引き戻しの年変動」
- 5) 菊沢喜八郎: 北海道林業試験場報告, 19, 93-104 (1981) 「シラカンバの葉の数の季節的変化, 実験的 研究」
- 6) 加藤正吾、山本美香、小見山 章:森林立地学会誌,41,39-44 (1999)「落葉広葉樹林の上層と下層での葉フェノロジー,1997年の荘川村六厩における解析」
- 7) 川村健介、橋本 靖、酒井 徹、秋山 侃:日本林學會誌,83,231-237 (2001)「冷温帯落葉広葉樹林の 林冠構成種のリーフフェノロジーが林床の光環境に及ぼす影響」
- A LAISK, O. KULL and H. MOLDAU: Plant Physiol., 90, 1163-1167 (1989) "Ozone Concentration in Leaf Intercellular Air Spaces is Close to Zero"
- 9) R.A. WEBB: J. Hortic. Sci., 47, 309-319 (1972) "Use of the Boundary Line in the Analysis of Biological Data"
- P.G. JARVIS: Phil. Trans. Royal Soc. London B, 273, 593-610 (1976) "The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field"
- 11) L.D. EMBERSON, M.R. ASHMORE, H.M. CAMBRIDGE, D. SIMPSON and J.P. TUOVINEN: Environ. Pollut., 109, 403-413 (2000) "Modelling Stomatal Ozone Flux across Europe"
- 12) G. GEROSA, R. MARZUOLI, M. ROSSINI, C. PANIGADA, M. MERONI and R. COLOMB: Environ. Pollut., 157, 1727-1736 (2009) "A Flux-based Assessment of the Effects of Ozone on Foliar Injury, Photosynthesis, and Yield of Bean (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Borlotto Nano Lingua di Fuoco) in Open-Top Chambers"
- G. GEROSA, M. VITALE, A. FINCO, F. MANES, A.B. DENTI and S. CIESLIK: Atmos. Environ., 39, 3255-3266 (2005) "Ozone Uptake by an Evergreen Mediterranean Forest (*Quercus ilex*) in Italy. Part I: Micrometeorological Flux Measurements and Flux Partitioning"
- M.M. MILLÁN, R. SALVADOR, E. MANTILLA and G. KALLOS: J. Geophys. Res., 102, 8811-8823 (1997)
 "Photooxidant Dynamics in the Mediterranean Basin in Summer: Results from European Research Projects"
- 15) H. TANIMOTO: Atmos. Environ., 43, 1258-1363 (2009) "Increase in Springtime Tropospheric Ozone at a Mountainous Site in Japan for the Period 1998-2006"
- 16) T. NAGASHIMA, T. OHARA and H. AKIMOTO: Atmos. Chem. Physics, 10, 11305-11322 (2010)"The Relative Importance of Various Source Regions on East Asian Surface Ozone"
- 17) 斉藤正一:森林科学, 35, 41-47 (2002) 「ナラ枯れ被害の防除法」
- 18) 斉藤正一、柴田銃江:日本林學會誌,94,223-228 (2012) 「山形県におけるナラ枯れ被害林分での森林 構造と枯死木の動態」

- 19) 丸田恵美子、志摩 克、堀江勝年、青木正敏、土器屋由紀子、伊豆田 猛、戸塚 績、横井洋太、 坂田 剛:環境科学会誌, 12, 241-250 (1999)「丹沢・檜洞丸におけるブナ林の枯損と酸性降下物」
- 20) 河野吉久、須藤 仁、石井 孝、相原敬次、内山佳美:丹沢大山総合調査学術報告書(丹沢大山総合 調査団 編), 383-395 (2007)「II. 丹沢山地周辺のオゾン濃度の実態とブナに対する影響」
- 21) 武田麻由子、相原敬次:大気環境学会誌, 42, 107-117 (2007)「丹沢山地の大気中オゾンがブナ(Fagus crenata) 苗に及ぼす影響」
- 22) A. KUME, S. NUMATA, K. WATANABE, H. HONOKI, H. NAKAJIMA and M. ISHIDA: Ecol. Res., 24, 821-830 (2009) "Influence of Air Pollution on the Mountain Forests along the Tateyama–Kurobe Alpine Route"
- 23) 武田麻由子、小松宏昭: 神奈川県環境科学センター研究報告, 9, 45-51 (2012) 「ブナ林衰退地域に おける総合植生モニタリング手法の開発」

(2) 樹木の葉のオゾン吸収量と光合成能力との関係の解明

(一財) 電力中央研究所 環境科学研究所 生物環境領域 松村秀幸

平成23~25年度累計予算額:43,940千円(うち、平成25年度予算額:13,520千円) 予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

わが国の代表的な落葉広葉樹4樹種(ブナ、コナラ、ミズナラ、シラカンバ)の苗木に2成長 期間にわたって4段階の濃度のオゾン(浄化大気/外気濃度の1.0倍/1.5倍/2.0倍)を処理し (処理期間中の平均濃度:5/26/46/61 ppb)、純光合成速度を測定した。ブナでは、第1展開葉 の純光合成速度が出葉から45日以上経過するとオゾンの影響が発現し、オゾンレベルの上昇に伴 って一次的に低下した。ブナの第2展開葉の純光合成速度は出葉から30日経過するとオゾンレベル の上昇に伴って一次的に低下した。コナラとミズナラの第1展開葉および第2展開葉の純光合成 速度は、出葉から60日経過するとオゾンレベル上昇に伴って低下した。他の3樹種より出葉時期が 早かったシラカンバの春葉と夏葉の純光合成速度は、それぞれ出葉から30日以上および15日以上 経過するとオゾンの影響が発現し、オゾンレベルの上昇に伴って一次的に低下した。

純光合成速度の経時変化からオゾン処理期間中における積算純光合成量(積算CO₂吸収量)の 浄化区に対する相対値(Y,%)を算出し、気孔コンダクタンス推定モデルに基づいて算出した 同期間中の単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量(X,mmol m⁻²)との関係をウェイブル関数 (Y=exp[-(X/ ω)^{λ}]、 ω , λ は定数)で近似し、以下の式を得た:ブナ第1展開葉 Y=100×exp[-(X/83.9)^{3.19}]、ブナ第2・3展開葉Y=100×exp[-(X/57.4)^{2.61}]、コナラ第1展開葉 Y=100×exp[-(X/58.0)^{3.94}]、コナラ第2・3・4展開葉Y=100×exp[-(X/55.1)^{3.83}]、ミズナラ第1展開葉 Y=100×exp[-(X/57.0)^{5.75}]、ミズナラ第2・3・4展開葉Y=100×exp[-(X/64.8)^{3.61}]、シラカンバ春葉 Y=100×exp[-(X/48.7)^{3.86}]、シラカンバ夏葉Y=100×exp[-(X/82.8)^{1.81}]。以上のことから、葉の オゾン吸収量に対する積算純光合成量低下を指標にしたオゾン感受性に樹種間差異があり、同量 のオゾンを吸収しても、オゾンによる純光合成量の低下程度が樹種によって異なることが明らか となった。

[キーワード]

落葉広葉樹、苗木、葉の純光合成、オゾン吸収

1. はじめに

近年、わが国では光化学オキシダントの主成分であるオゾン(O₃)の濃度が上昇傾向にある。 対流圏におけるオゾンの濃度が上昇すると、樹木の光合成能力が低下し、森林の二酸化炭素(CO₂) 吸収に影響を及ぼす可能性がある。

著者らは、これまでに苗木を用いた実験的研究により、わが国の代表的な樹種におけるオゾン 感受性の種間差異と濃度ベースのオゾン暴露量(濃度×時間)と樹木の成長反応との関係を 明らかにし、オゾンのリスク評価に必要なクリティカルレベルの暫定値を提案した¹⁾。一方、 欧州では、濃度ベースの暴露影響評価だけでなく、気孔を介した葉のオゾン吸収量に基づいた 影響評価が進められているが、わが国を含む東アジア地域ではまったく行なわれていない。

葉のオゾン吸収量に基づいて樹木におよぼすオゾンの影響を評価するためには、葉内へのオゾ ン吸収の定量とともに、光合成や成長などへの影響を調べる必要がある。欧米に生育する樹木を 対象にしたオゾン吸収に関する研究は広葉樹^{2),3),4),5)}や針葉樹^{6),7)}などで報告されている。一方、 わが国に生育する樹木を対象にした葉のオゾン吸収に関する研究は、ケヤキなどの街路樹⁸⁾や スギ⁹⁾で報告されているが、わが国の森林を構成する複数の樹種の光合成や成長におよぼす複数 年にわたるオゾンの影響を葉のオゾン吸収量に基づいて評価した研究はない。

2. 研究開発目的

サブテーマ(2)においては、ブナ、ナラ類、カンバ類の苗木を対象としたオープントップ チャンバー(OTC)を用いたオゾン暴露実験を行い、葉のガス交換速度を定期的に調査し、 サブテーマ(1)から提供される気孔を介した葉のO3吸収量と光合成能力との関係を解明すること を目的とした。

3. 研究開発方法

(1)供試植物

供試植物として、コナラ(茨城県産2年生苗)、ミズナラ(福島県産2年生苗)、シラカンバ (長野県産2年生苗)およびブナ(福島県産3年生苗)を用いた。各樹種の個体を市販の培土 (タキイ種苗,プロ向け培土50リットルシリーズ・育苗培土)を詰めた1/2000 aのワグネルポッ ト(土壌容量12 L)に、ポットあたり1個体ずつ植え付けた。2012年4月25日に、各樹種の個体を 8個体ずつ12棟の各OTC内にそれぞれ配置した。2012年8月下旬、2013年4月下旬および2013年7月 下旬には、各チャンバー内のポット・ローテーションを行うとともに、チャンバー間のローテー ションを行った。2013年4月12日および同年7月5日に、全樹種の各ポットに対し、N, P₂O₅, K₂O の各成分が1ポットあたり80 kg ha⁻¹となるように化成肥料を土壌に与えた。苗木への灌水は地下 水(平均pH7.7)をポット土壌表面に与えることによって行った。

(2) ガス処理

電力中央研究所赤城試験センター(群馬県前橋 市苗ヶ島町)構内の標高540 m地点に設置した オープントップチャンバー(OTC,間口3.6 m× 奥行3.6 m×高さ2.4 m)を用いて、樹木苗への ガス処理を行った(写真(2)-1)。大気中の汚染 物質を除去するため、各OTCのファンボックス内 に活性炭フィルター(日本ピュアテック,繊維状 活性炭ケミカルフィルター:クリーンソーブII CM-FL-H型)を収納した。OTCの構造等の詳細は 既報¹⁰に記した。

本研究では、活性炭フィルターによる浄化大気



写真(2)-1 樹木苗へのオゾン暴露に用い たオープントップチャン バー(OTC).

区(以下、浄化区と記す)および3段階のオゾン添加区(外気濃度の1.0倍、1.5倍あるいは2.0倍、 外気濃度追随比例制御)、以上4処理区を設定した。また、1処理区あたりに3つのチャンバー反復 を設定した。2012年におけるOTC内へのオゾンの添加は4月26日から11月22日まで、2013年におけ るオゾンの添加は、シラカンバの春葉の出葉が始まった3月29日から開始し、同年11月14日まで 荒天時および装置点検時以外の毎日、1日24時間行った。ガス処理期間中におけるOTC内および 屋外の平均気温は、2012年はそれぞれ19.4℃および18.3℃、2013年はそれぞれ19.1℃および17.9℃ であった。OTC内と屋外における光合成有効光量子束密度は、2012年はそれぞれ16.9 mol m⁻² day⁻¹ および22.1 mol m⁻² day⁻¹、2013年はそれぞれ16.8 mol m⁻² day⁻¹および21.5 mol m⁻² day⁻¹であった。

(3) 葉のガス交換速度の測定

2012年5月から11月および2013年4月から10月(シラカンバは9月)まで毎月、各OTCの各樹種か ら2~4個体ずつ無作為に選び、葉のガス交換速度を測定した。測定は、光合成蒸散測定装置 (LI-6400P, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)を用いて、葉身中央部をLED冷光光源(6400-02B, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)を装着した3 cm×2 cmのリーフチャンバーに挟んで行った。測定対象の葉 は以下に記した枝に着生し展開が終了した葉を対象として行った。ブナは頂部から1~3位目の枝 に着生した第1展開(1st flush) 葉から第3展開(3rd flush)葉、コナラおよびミズナラは頂部から 1~3位目の枝に着生した第1展開(1st flush) 葉から第4展開(4th flush) 葉、シラカンバは1~2位 目の側枝に着生した春葉(第1-2葉)、夏葉(第4-5葉、第9-10葉、第14-15葉、第19-20葉)を 測定対象とした。ガス交換速度の測定は、ポットをチャンバーから蛍光灯を備えた屋内に移動さ せて行った。ガス交換測定時におけるリーフチャンバー内の気温は、2012年の測定では5月は 22.6±0.1℃、6月は25.0±0.1℃、7月から8月は26.0±0.1℃、9月は24.4±0.4℃、10月は 20.9±0.3℃、11月は17.5±0.5℃に、2013年の測定では4月は19.1±0.3℃、5月は22.1±0.1℃、 6月は25.0±0.1℃、7月は28.0±0.1℃、8月は28.9±0.1℃、9月は26.0±0.1℃、10月は21.0±0.1℃ に制御した。リーフチャンバーに導入した空気のC0,濃度は390±1 μmol CO₂ mol⁻¹、チャンバー内 の光合成有効光量子束密度は1500±1 μmol m⁻² s⁻¹に制御した。葉をリーフチャンバーに挟み込んで から、CO2濃度や葉温が安定した10~30分後に測定を行った。また、対象葉の純光合成速度と その経時変化(出葉日からの日数)から2012年および2013年における積算純光合成量を算出した。 なお、2012年および2013年における各樹種の平均出葉日は、以下の通りである:2012年: ブナ第1展開葉5月5日・第2展開葉6月18日・第3展開葉8月5日、コナラ第1展開葉5月16日・ 第2展開葉6月15日・第3展開葉7月15日・第4展開葉9月3日、ミズナラ第1展開葉5月10日・ 第2展開葉6月20日・第3展開葉7月22日・第4展開葉8月28日、シラカンバ春葉(第1-2葉) 4月20日・夏葉(第4-5葉)5月10日・夏葉(第9-10葉)6月8日・夏葉(第19-20葉)7月12日、 2013年: ブナ第1展開葉4月14日・第2展開葉5月31日・第3展開葉7月15日、コナラ第1展開葉 4月22日・第2展開葉5月17日・第3展開葉6月25日・第4展開葉7月26日、ミズナラ第1展開葉 4月18日・第2展開葉5月30日・第3展開葉7月2日、シラカンバ春葉(第1-2葉)4月4日・ 夏葉(第4-5葉)5月2日・夏葉(第9-10葉)5月25日・夏葉(第14-15葉)6月29日・夏葉 (第19-20葉)7月27日。

葉の積算オゾン吸収量は、サブテーマ(1) で構築した推定法により各樹種の葉のオゾン 吸収速度の1時間値を推定し、対象葉の出葉日から純光合成速度の測定日まで積算することに

よって求めた。樹冠表層部におけるオゾン濃度([O₃]_{air})には、ガス処理区毎に算出した オゾン濃度の1時間値の3チャンバー反復の平均値を用いた。オゾンの葉面境界層拡散抵抗 (rb ozone)の算出に必要な風速(u)には、チャンバー内の床面から1.5 mの高さで測定した 16地点の平均風速を用い(0.17 m s⁻¹)、葉幅(L_d)には、葉1枚あたりの平均葉面積から樹種 毎に求めた葉幅を用いた(ブナ: 1.4 cm, コナラ: 1.5 cm, ミズナラ: 2.3 cm, シラカンバ春葉: 1.2 cm, シラカンバ夏葉: 3.2 cm)。オゾンの気孔拡散抵抗(r_{sozone})の算出に必要な水蒸気気 孔コンダクタンス(g_s)は、サブテーマ(1)で構築したg_s推定モデルを用いて推定した。 その推定に必要な環境要因には、チャンバー内で常時測定した光合成有効放射束密度、気温 および相対湿度の1時間値の12チャンバーの平均値を用いた。オゾン濃度は、ガス処理区毎に 算出したオゾン濃度の1時間値の3チャンバー反復の平均値を用いた。土壤体積含水率(SWC) は、土壤水分センサー(10HS Moisture sensor, Decagon Devices, Inc., USA)を用いて20分間隔 で測定したSWCの1時間値を用いた。飽差は気温から算出される飽和水蒸気圧と相対湿度から 算出し、出葉日からの有効積算温度は各樹種の光合成測定対象葉の出葉日と測定日、チャン バー内の気温から求めた。ここで、g_sの推定に必要な各環境要因に対するg_sの応答関数は、 実験場所や育成環境によって異なる可能性が考えられる。そこで、赤城試験センターのOTC 内で、携帯型蒸散測定装置(LI-1600, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)を用いて各樹種の葉のgs を測定し、測定時の光合成有効放射束密度、気温、相対湿度およびSWCを記録した。そして、 サブテーマ(1) で確立した手法に従って、ブナの第1展開葉と第2・第3展開葉、コナラおよび ミズナラの第1展開葉と第2~第4展開葉、シラカンバの春葉と夏葉のg、の各環境要因に対する 応答関数を導出し、g_sの推定に利用した。さらに、個葉の積算オゾン吸収量に、各樹種の直近 の個体葉面積(平均着葉数×平均個葉面積)を乗じて、ガス交換測定期間における個体あたりの 積算オゾン吸収量も算出した。個体あたりの積算オゾン吸収量は各年の最大個体葉面積で除した ものを解析に用いた。

(4) 成長パラメーターの測定

ガス処理開始時から定期的に、各樹種の落葉を個体毎に回収し、落葉数をカウントした。 2012年は各樹種の葉がすべて落葉した12月、2013年は出葉から11月までの積算落葉数を算出 した。各樹種の着葉数も定期的に調査した。

ガス処理開始から二成長期が経過した2013年10月から11月に、各OTC内の各樹種4個体を 樹種毎に順次採取した。各個体はほぼすべての葉が落葉していたが、着いたまま葉が枯れて いた個体もあったため、最初に着葉を採取した後、地上部と根を分別した。根は慎重に水洗 した。採取した各器官は80℃で5日間以上熱風乾燥させ、乾重量を測定した。なお、採取した 着葉は落葉として分別した。

(5)統計解析

測定した各項目について、OTCの処理区反復をブロック因子(変動因子)とし、オゾンを処理 因子(固定因子)とした分散分析を行った。チャンバー反復×処理(自由度6)を誤差として、 オゾン因子(自由度3)のF値を算出し、5%レベルで有意性を判定した。同時に、オゾン因子の 平均平方は、オゾン濃度レベル(4段階, 5/26/46/61 ppb:浄化区/1.0倍O₃区/1.5倍O₃区/2.0倍O₃ 区)における直交多項式の対比(orthogonal polynomial contrasts)によって一次から三次までの 傾向成分に分解し、各傾向成分の有意性を判定した。

4. 結果及び考察

(1)O₃処理状況

表(2)-1 に、2012 年および 2013 年のガス処理実験期間中における 各 オゾン処理 区 および外気の オゾン濃度とドースを示した。2012 年および 2013 年における外気の オゾン濃度の 24 時間平均値はそれ ぞれ 35 ppb および 33 ppb であった のに対し、浄化区におけるオゾン 濃度の平均値は 4~5 ppb であり、 オゾンは活性炭フィルターによっ て 85%が除去された。1.0 倍 O_3 区、 1.5 倍 O_3 区および 2.0 倍 O_3 区にお ける 24 時間平均オゾン濃度の外気 に対する比率はそれぞれ 70~80%、 130~140%および 170~190% で

表(2)-1 ガス処理期間中における各処理区および外気の オゾン濃度とオゾンドース.

	濃度 (ppb)					ドース (ppm・hr)		
	24時間値	15時間値	12時間値	日最高1	時間値	SUM0	AOT40	
	平均值	平均值	平均值	平均值	最高值		日照時	
2012年4月26日~11月22日(211日間)								
浄化区	4	5	5	7	22	22	0	
1.0倍O₃区	25	28	28	41	112	128	6	
1.5倍0₃区	44	47	47	71	165	222	34	
2.0倍O₃区	59	64	64	93	216	299	70	
外 気	35	38	38	52	109	176	14	
2013年3月29日~11月14日(228日間)								
浄化区	5	5	5	9	26	27	0	
1.0倍O₃区	27	30	31	43	90	147	7	
1.5倍O₃区	47	50	50	69	143	258	35	
2.0倍O₃区	62	66	65	93	190	340	70	
外 気	33	36	36	49	99	180	12	
LENTER A	.00. 00.00		C 00 10 C	0				

15時間:5:00~20:00, 12時間:6:00~18:00

AOT40:40 ppbを超過した1時間値の40 ppb超過分の合計

日照時:日射量の1時間平均値が>50W/m²の時

処理区(浄化区, 1.0倍O3区, 1.5倍O3区および2.0倍O3区)の各値は3チャンバーの平均値

あった。オゾン濃度の 1 時間値の最高値(日最高 1 時間値の最高値)は、外気で 109 ppb、 1.0 倍 O₃ 区、1.5 倍 O₃ 区および 2.0 倍 O₃ 区ではそれぞれ 112 ppb、165 ppb および 216 ppb で あった。

(2) 落葉数および着葉数の経時変化

図(2)-1 に、2012~2013 年のガス処理期間中における 4 樹種の個体あたりの積算落葉数および 着葉数の経時変化を示した。ブナとコナラでは積算落葉数および着葉数におよぼすオゾンの影響 は 認められなかった。ミズナラでは 2013 年の 8 月までの積算落葉数がオゾンレベルの上昇に 伴って一次的に増加したが、着葉数におよぼすオゾンの影響は認められなかった。シラカンバ では、2012 年のオゾン処理開始から 1 ヶ月経過した 5 月下旬から 2.0 倍 O₃ 区において落葉が始ま った。5 月、6 月および 7 月までの積算落葉数がオゾンレベルの上昇に伴って一次的に増加した。 2013 年においては、7 月、8 月および 9 月までの積算落葉数がオゾンレベル上昇に伴い一次的に 増加した。しかしながら、着葉数におよぼすオゾンの有意な影響は認められなかった。



図(2)-1 ガス処理期間中におけるブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの積算落葉数および着葉数.処理開始日:2012年4月26日.シンボル:△浄化区,○1.0倍O3
 区,◇1.5倍O3区,□2.0倍O3区.3チャンバー反復の平均値(±標準偏差).
 †:O3濃度レベルに伴う一次傾向が有意(p<0.05).

(3) 葉の純光合成速度の経時変化

図(2)-2 に、2012 年に測定した 4 樹種の葉の純光合成速度を示した。シラカンバでは、初出葉 (春葉)の純光合成速度が出葉から約 30 日経過した 5 月下旬からオゾンレベルの上昇に伴って 一次的に低下した。夏葉(第 4-5 葉)の純光合成速度も、出葉から約 30 日経過した 6 月から オゾンレベルの上昇に伴って一次的に低下した。第 9-10 葉以降の夏葉の純光合成速度は、出葉か ら 60 日以上経過すると、オゾンレベル上昇に伴って低下した。ブナの第 1 展開葉では、出葉から 45 日経過した 6 月からオゾンレベルの上昇に伴って純光合成速度が一次的に低下し、第 2 展開葉 の純光合成速度は、出葉から約 30 日経過した 7 月からオゾンレベルの上昇に伴って純光合成速度 が一次的に低下した。コナラとミズナラいずれの第 1 展開葉および第 2 展開葉でも、純光合成 速度は出葉から約 80 日経過すると、オゾンレベル上昇に伴って低下した。

図(2)-3 に、2013 年に測定した 4 樹種の葉の純光合成速度を示した。4 樹種いずれの初出葉 (第1展開葉/春葉)の純光合成速度も、出葉から約 60 日経過した 6 月からオゾンレベルの上昇 に伴って一次的に低下した。ブナ、コナラおよびミズナラの第2 展開葉では、出葉から約 30 日 経過した 6 月下旬からオゾンレベル上昇に伴って純光合成速度が一次的に低下した。さらに、 ブナとコナラの第3 展開葉の純光合成速度は、出葉から 60 日経過すると、オゾンレベルの上昇に 伴って低下した。一方、シラカンバの夏葉(第4-5葉)では、出葉から 15 日経過した 5 月中旬 からオゾンレベルの上昇に伴って純光合成速度が一次的に低下する傾向が認められた。第9-10 葉 以降の夏葉の純光合成速度は、出葉から約 40 日経過すると、オゾンレベルの上昇に伴って低下 した。



 図(2)-2 2012年におけるブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの純光合成速度に対する オゾンの影響.ガス処理開始日: 2012年4月26日.シンボル:△浄化区, ○1.0倍O3区,◇1.5倍O3区,□2.0倍O3区.3チャンバー反復の平均値(±標準 偏差).†:O3濃度レベルに伴う一次傾向が有意(p<0.05).



 図(2)-3 2013年におけるブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの純光合成速度に対する オゾンの影響.ガス処理開始日: 2012年4月26日.シンボル:△浄化区, ○1.0倍O3区,◇1.5倍O3区,□2.0倍O3区.3チャンバー反復の平均値(±標準 偏差).†:O3濃度レベルに伴う一次傾向が有意(p<0.05).

(4) 積算オゾン吸収量と積算純光合成量との関係

図(2)-4に、葉のガス交換速度の測定期間における積算O₃吸収量とオゾンドース(SUMO)との 関係を示した。図には、2012年と2013年の各データを合わせてプロットした。積算オゾン吸収量 とオゾンドースとの比例関係は一次的ではなかったが、4樹種間の積算O₃吸収量の多少は出葉時期 が異なると 変化し、初出葉(第1展開葉/春葉)ではブナ>ミズナラ>コナラ>シラカンバで あったが、出葉時期が遅い第2以降の展開葉や夏葉ではシラカンバ>ミズナラ=コナラ>ブナで あった。



|図(2)-4 ブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの葉の単位葉面積あたりの積算 オゾン吸収量とオゾンドース(SUM0)との関係(非直角双曲線に回帰).

図(2)-5に、4樹種の積算オゾン吸収量と積算純光合成量の浄化区に対する相対値との関係を ウェイブル関数(Y=exp[-(X/ ω)^{λ}]、 ω 、 λ は定数)で回帰して示した。初出葉(第1展開葉/春葉) では、積算O₃吸収量が20 mmol m⁻²を越えると、いずれの樹種の積算純光合成量も低下し始めた。 最も高かったO₃処理区(2.0倍O₃区)では、シラカンバの春葉は4樹種中で積算オゾン吸収量が最 も低かったが(35 mmol m⁻²)、積算純光合成量は25%低下した。2.0倍O₃区のブナの第1展開葉は 積算オゾン吸収量が最も高かったが(55 mmol m⁻²)、積算純光合成量の低下程度は22%で、4樹種 中で最も小さかった。コナラとミズナラでは、第1展開葉と第2以降の展開葉の間で積算オゾン 吸収量に対する積算純光合成量の反応はほぼ同様であった。しかしながら、ブナの第2・第3展開 葉およびシラカンバの夏葉の積算オゾン吸収量に対する積算純光合成量の反応はそれぞれの樹種 の初出葉とは異なり、初出葉の場合より低い20 mmol m⁻²の積算オゾン吸収量で10%以上の積算 純光合成量の低下を示した。コナラとミズナラでは、初出葉(第1展開葉)と第2以降の展開葉の 間で積算オゾン吸収量に対する積算純光合成量の反応は同様であった。以上のことから、シラカ ンバの春葉は他の3樹種より積算純光合成量の低下程度を指標としたオゾン感受性は高く、ブナと シラカンバでは出葉時期が異なると気孔を介した葉のオゾン吸収量に対する純光合成の低下程度 が異なることが明らかになった。



```
図(2)-5 積算純光合成量と単位葉面積あたりの積算オゾン吸収量との関係.
縦軸:浄化区に対する積算純光合成量の相対値
```

曲線:ウェイブル関数による回帰曲線

ブナ	第1展開葉	$Y=100 \times \exp[-(X/83.9)^{3.19}], R^2 = 0.920$
ブナ	第2・3展開葉	$Y=100 \times \exp[-(X/57.4)^{2.61}], R^2 = 0.548$
コナラ	第1展開葉	$Y=100 \times \exp[-(X/58.0)^{3.94}], R^2 = 0.965$
コナラ	第2・3・4展開葉	$Y=100 \times \exp[-(X/55.1)^{3.83}], R^2 = 0.799$
ミズナラ	第1展開葉	$Y=100 \times \exp[-(X/57.0)^{5.75}], R^2 = 0.908$
ミズナラ	第2・3・4展開葉	$Y=100 \times \exp[-(X/64.8)^{3.61}], R^2 = 0.719$
シラカンバ	春葉	$Y=100 \times \exp[-(X/48.7)^{3.86}], R^2 = 0.534$
シラカンバ	夏葉	$Y=100 \times \exp[-(X/82.8)^{1.81}], R^2 = 0.835$

(5) 個体乾重量におよぼすオゾンの影響

図(2)-6に、2013年10~11月に採取したブナ、コナラ、ミズナラおよびコナラの個体乾重量を 示した。オゾンレベルの上昇に伴って、4樹種の個体乾重量は一次的に低下した(*p*<0.05)。

図(2)-7に、オゾン処理区における各樹種の個体乾重増加量の浄化区におけるそれに対する 相対値(オゾン処理区の個体乾重増加量/浄化区の個体乾重増加量×100,%)と個体あたりの積算 オゾン吸収量との関係を示した。なお、樹種の各処理区の個体乾重量の平均値から、ガス処理 期間中における個体乾重増加量を算出した。ブナ、コナラおよびミズナラでは、個体あたりの 積算オゾン吸収量が35 mmol m⁻² year⁻¹を越えると個体乾重増加量が浄化区に比べて10%低下した。 また、2.0倍O₃区では、ブナ、コナラおよびミズナラの個体あたりの積算オゾン吸収量は40 mmol m⁻² year⁻¹程度で、ブナおよびミズナラの浄化区に対する個体乾重量増加量の低下率は15%、コナラで は10%と最も小さかった。2.0倍O₃区のシラカンバは他の3樹種に比べて個体あたりのオゾン吸収 量は最も高かったが(58 mmol m⁻² year⁻¹)、浄化区に対する個体乾重量増加量の低下率は18%であ った。したがって、積算純光合成量の低下程度を指標とした場合とは異なり、シラカンバは他の 3樹種より個体乾物成長の低下程度を指標としたオゾン感受性は低いことが明らかになった。



図(2)-6 ブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの個体乾重量に対するオゾンの影響.
 採取日:ブナ 2013 年 11 月 1 日、コナラ 2013 年 11 月 15 日、ミズナラ 2013 年 11 月 8 日、シラカンバ 2013 年 10 月 1 日.3 チャンバー反復の平均値(±標準偏差).



図(2)-7 個体乾重増加量と個体あたりの積算オゾン吸収量との関係. 縦軸:浄化区に対する個体乾重増加量の相対値 曲線:ウェイブル関数による回帰曲線 ブナ Y=100・exp[-(X/96.6)^{2.23}], R² = 0.998 コナラ Y=100・exp[-(X/67.7)^{4.21}], R² = 0.958 ミズナラ Y=100・exp[-(X/68.3)^{3.76}], R² = 0.997 シラカンバ Y=100・exp[-(X/73.5)^{6.78}], R² = 0.992

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

日本の代表的な落葉広葉樹であるブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの4樹種について、 苗木の個葉レベルにおける気孔を介した葉のオゾン吸収量と積算純光合成量(積算CO2吸収量)と の関係を解明し、苗木から成木レベルへのオゾン影響の外挿が可能となった。また、葉の積算 オゾン吸収量に対する積算純光合成量の低下程度を指標としたオゾン感受性には樹種間差異が あり、同量のオゾンを吸収してもオゾンによる積算純光合成量の低下程度が樹種によって異なる ことが明らかになった。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

環境省の越境大気汚染・酸性雨対策検討会の生態影響分科会の下にあるオゾン等の植物影響 評価ワーキンググループ(座長:伊豆田 猛)において、本研究で得られた研究成果などを提示し、 平成26年3月に公表された環境省の越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング(平成20~24年度) 最終報告書の内容(119~123ページ)の検討過程で多大な貢献をした。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究では、日本の代表的な落葉広葉樹の純光合成速度におよぼすオゾンの影響と気孔を介し た葉のオゾン吸収量との定量的関係を解明し、日本の現状レベルのオゾンによる落葉広葉樹の 年間CO2吸収量の低下程度を苗木レベルから評価できることを明らかにした。また、成木レベル へのオゾン影響の外挿が可能になったことは、大気汚染対策のみならず、温暖化対策とのコベネ フィットアプローチに対して重要な科学的知見を提供する。

これまでに我々が提案した樹木を対象とした濃度ベース(ドース:濃度×時間)のオゾンの クリティカルレベル(影響発現閾値)と共に、吸収量ベースのオゾン影響に関する樹種間の差異 が明らかになったことは、日本におけるオゾンによる森林衰退リスク評価のみならず、東アジア 酸性雨ネットワーク(EANET)におけるガス状大気汚染物質の評価対象樹種の選定に科学的根拠 を提供できる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- M. YAMAGUCHI, M. WATANABE, H. MATSUMURA, Y. KOHNO and T. IZUTA: Asian J. Atmos. Environ., 5, 2, 65-78 (2011) "Experimental Studies on the Effects of Ozone on Growth and Photosynthetic Activity of Japanese Forest Tree Species"
- M. WATANABE, M. YAMAGUCHI, H. MATSUMURA, Y. KOHNO, T. KOIKE and T. IZUTA: Asian J. Atmos. Environ., 5, 4, 205-215 (2011) "A Case Study of Risk Assessment of Ozone Impact on Forest Tree Species in Japan"
- 3) M. WATANABE, M. YAMAGUCHI, H. MATSUMURA, Y. KOHNO and T. IZUTA: Eur. J. Forest Res., 131, 475-484 (2012) "Risk Assessment of Ozone Impact on *Fagus crenata* in Japan: Consideration of Atmospheric Nitrogen Deposition"
- 4) T. KOIKE, M. WATANABE, Y. HOSHIKA, M. KITAO, H. MATSUMURA, R. FUNADA and T. IZUTA: Climate Change, Air Pollution and Global Challenges: Understanding and Solutions from Forest Research (R. Matyssek et al., eds.), Elsevier. (2013) "Effects of Ozone on Forest Ecosystems in East and Southeast Asia"

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1)渡辺 誠、山口真弘、松村秀幸、河野吉久、小池孝良、伊豆田 猛:第123回日本森林学会(2012) 「日本の森林樹種に対するオゾンのリスク評価,窒素沈着の考慮」
- 2)山口真弘、渡辺 誠、松村秀幸、伊豆田 猛:第123回日本森林学会(2012)「ブナ苗の光合成 活性と窒素代謝に対するオゾンと土壌への窒素負荷の複合影響」
- 3) 松村秀幸、伊豆田 猛:第53回大気環境学会(2012)「同化箱を用いて測定した数種落葉広葉 樹の葉のオゾン吸収と純光合成との関係」
- 4)山口真弘、安土文鹿、松村友絵、上原 唯、鹿又友彰、黄瀬佳之、小林亜由美、松村秀幸、 伊豆田 猛:第124回日本森林学会(2013)「葉のオゾン吸収量に基づくブナ苗に対するオゾン と土壌窒素負荷の複合影響の評価」
- 5) 松村秀幸、山口真弘、黄瀬佳之、米倉哲志、伊豆田 猛:第54回大気環境学会(2013)「落葉 広葉樹4種の葉の純光合成速度におよぼす1成長期間のオゾン暴露の影響とオゾン吸収量との 関係」
- 6)山口真弘、黄瀬佳之、安土文鹿、上原 唯、小林亜由美、鹿又友彰、松村秀幸、伊豆田 猛: 第54回大気環境学会(2013)「ブナ、コナラ、ミズナラおよびシラカンバの葉の気孔を介した オゾン吸収量の推定」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

- (4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの) 特に記載すべき事項はない。
- (5) マスコミ等への公表・報道等 特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

- 8. 引用文献
- 1)電力中央研究所,東京農工大学:東アジアにおける酸性・酸化性物質の植生影響評価とクリティカルレベル構築に関する研究,平成15年度~平成17年度,環境省地球環境研究総合推進費終了研究成果報告書,環境省地球環境局研究調査室,p.137 (2007)
- 2) S. FARES, J.-H. PARK, E. ORMENO, D.R. GENTNER, M. MCKAY, F. LORETO, J. KARLIK and A.H. GOLDSTEIN: Atmos. Environ., 44, 3404-3412 (2010) "Ozone Uptake by Citrus Trees Exposed to a Range of Ozone Concentrations"
- N. GRULKE, E. PAOLETTI and R.L. HEATH: Environ. Pollut., 146, 640-647 (2007) "Comparison of Calculated and Measured Foliar O₃ Flux in Crop and Forest Species"

- 4) G.E. TAYLOR JR. and P.J. HANSON: Agric. Ecosyst. Environ., 42, 255-273 (1992) "Forest Trees and Tropospheric Ozone: Role of Canopy Deposition and Leaf Uptake in Developing Exposure-Response Relationships"
- 5) D. WANG, T.M. HINCKLEY, A.B. CUMMING and J. BRAATNE: Environ. Pollut., 89, 247-254 (1995) "A Comparison of Measured and Modeled Ozone Uptake into Plant Leaves"
- 6) A. POLLE, G. WIESER and W.M. HAVRANEK: Plant Cell Environ., 18, 681-688 (1995)
 "Quantification of Ozone Influx and Apoplastic Ascorbate Content in Needles of Norway spruce Trees (*Picea abies* L., Karst) at High Altitude"
- 7) G. WIESER and W.M. HAVRANEK: Proc. Royal Soc. Edin., 102B, 119-125 (1994) "Exposure of Mature Norway Spruce to Ozone in Twig-Chambers: Effects on Gas Exchange"
- Y. FUJINUMA, A. FURUKAWA, T. TOTSUKA and T. TAZAKI: Environ. Control Biol., 25, 31-39 (1987) "Uptake of O₃ by Various Street Trees"
- 9) 平野高司, 内田晶夫, 清田 信, 榎 幹雄, 相賀一郎: 大気環境学会誌, 30, 327-336 (1995) 「スギの光合成速度と葉面拡散コンダクタンスに与えるO₃、NO₂、SO₂の単独および複合影響」
- 10) 松村秀幸,河野吉久:電力中央研究所研究報告U01028 (2001) 「ウメ、ヤマザクラ、コナラ、 スダジイおよびヒノキの生育におよぼす二酸化硫黄とオゾンの単独および複合影響」

(3) 葉のオゾン吸収量に基づいた成木に対するオゾンの影響評価

北海道大学・大学院農学研究院

環境資源科学部門 森林資源科学分野 小池孝良

〈研究協力者〉

北海道大学大学院農学研究院

環境資源科学部門森林資源科学分野 星加康智(非常勤特別研究員)(平成21年7月~23年3月) 環境資源科学部門森林資源科学分野 毛 巧芝(非常勤特別研究員)(平成23年4月~24年2月)

平成 23~25 年度累計予算額:27,037 千円(うち、平成 25 年度予算額:8,319 千円) 予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

サブテーマ(3)では、日本の温帯林構成種であるブナ、ミズナラ、シラカンバの成木(若齢木) を対象に開放型オゾン暴露システムを用いてオゾン暴露実験を行い、気孔を介した成木葉の オゾン吸収量推定のための気孔コンダクタンスモデルのパラメーターを導出した。同時に、 オゾンによる気孔コンダクタンスの低下がオゾン吸収量推定値におよぼす影響を検討した。 Embersonモデルを改良してオゾン吸収量の推定を行った。ブナでは、オゾン付加区における気孔 コンダクタンスは対照区におけるそれに比べて低かった。オゾン暴露実験開始前には処理区間に 気孔コンダクタンスの差がなかったことから、オゾンによってブナの葉の気孔閉鎖が生じたと 考えられる。対照区における日最大気孔コンダクタンスとオゾン付加区における日最大気孔コン ダクタンスの比(f₀₃)をもとに、オゾンによる気孔コンダクタンスの低下を検討した。この低下 程度は、オゾンの濃度ベースの指標であるAOT40よりも、積算オゾン吸収量との関係が明瞭であ った。モデルによって樹冠上部葉のオゾン吸収量を推定した結果、オゾンによる気孔コンダクタ ンスの低下を示すパラメーター(fo3)の有無によって葉の積算オゾン吸収量の推定値に約20%の 違いが生じた。一方、オゾン付加と葉群動態を考慮した群落生産モデルによる推定結果に基づく と、ブナの1成長期間の葉群炭素吸収量(光合成量-呼吸量)はオゾンによって12.4%低下した。 夏季のオゾンによる炭素吸収量の低下は葉の呼吸量の増加が主要因であったが、秋季では光合成 量の低下と呼吸量の増加の寄与率は同程度であった。また、樹冠部の肥大成長がオゾン付加に よって抑制された。さらに、オゾン付加によってシラカンバの葉の虫害が減り、その原因として オゾンによる葉の防御物質の増加が考えられた。しかしながら、葉の動態に及ぼすオゾン付加の 影響は、ブナおよびミズナラでは明瞭ではなかった。

[キーワード]

開放型オゾン暴露システム、気孔コンダクタンス、オゾン吸収量ベース、成木、温帯林樹種

1. はじめに

増加し続ける対流圏オゾン濃度の上昇に対する森林樹木の応答は、従来、大気オゾン濃度との 関係から調べられてきた。また、従来の多くの研究は、稚樹を対象にした制御環境の実験から 進められ、樹種による違いもわかってきた。しかし、現実の森林は数多くの樹種を含み、大気 オゾン濃度から森林のオゾン吸収量を推定するには、現状では多くの仮定を含むことになる。 例えば、稚樹では樹冠を構成する葉の光環境などに対する応答は考慮しなくてもよかった。 しかし、樹冠の構造と機能が複雑に分化した成木の応答は稚樹とは異なることが多い。そこで、 従来の成果を踏まえて、稚樹から成木、そして森林の応答へとスケールアップを行う必要がある。 このような状況から、大気オゾン濃度の急激な上昇の影響が指摘される冷温帯林を構成するブナ、 ミズナラ、シラカンバなどを対象として、野外でオゾンを付加し、生理的応答と葉の動態を追跡 し、成木の葉のオゾン吸収量に基づいてオゾンへの応答を解明する必要がある。しかしながら、 日本には野外で精度高く成木にオゾンを付加する施設がないため、施設の構築を行い、成木の オゾンへの応答を調査する必要がある。

2. 研究開発目的

サブテーマ(3)においては、開放型オゾン暴露システムを設計・作製し、ブナ、ナラ類、カンバ 類の成木の光合成能力(CO₂吸収)、成長および木部組織構造に対するオゾンの影響を解明するこ とを目的とした。また、樹冠内の葉群の分布からオゾン暴露による樹冠構造への影響を解析する ことを目的とした。

3. 研究開発方法

(1)対象樹種と試験地

対象樹種は、実験開始時点で3年生のシラカンバ(Betula platyphylla var. japonica)、11年生の ブナ(Fagus crenata)とミズナラ(Quercus mongolica var. crispula)であった。産地は、シラカン バとミズナラは長沼町産、ブナは黒松内町産であった。これらを北海道大学札幌研究林実験苗畑 (43°04'N, 141°20'E, 15 m a.s.l.)に移植し、シラカンバは植栽後1年以上、ブナとミズナラは10年

を経た個体を対象にした。褐色森林土の上に、 開放系オゾン暴露システムを設置した(写真(3)-1, 図(3)-1)。同システムの設計・作製やオゾン暴露 手法の検討の際に、ドイツのミュンヘン工科大学 の先行研究を参考にした¹⁾。活性炭でオゾンを 除去した高圧空気とオゾン生成装置で発生した オゾンを混合した後、オゾンに耐性のある特殊な チューブを通して、樹木の樹冠部にオゾンを暴露 した。なお、余分なオゾンは活性炭などで除去し た。試験地、対象樹種のサイズ、周辺環境への配 慮から、縦5.0 m× 横7.5 m (2.5 m×3)× 高さ5.5 m (+2.5 m)とした。比較のため、同サイズのプロッ トを対照区(外気オゾン濃度の実験区, 2012~2013



写真(3)-1 成木へのオゾン暴露に用いた 開放型オゾン暴露システム.

年度の実験期間中の日中平均オゾン濃度: 27.7 ppb)として、同実験苗畑に設置した。対照 区では、オゾンの放出が無い点以外は、樹齢、 樹種構成、処理開始時点におけるサイズなどは、 オゾン付加区とすべてほぼ同一であった。

ガス処理は、2011年8月6日~11月10日、2012年 5月17日~11月11日、2013年5月10日~11月9日に 実施し、樹冠高(2.5 m)における日中平均オゾン 濃度が目標値の60 nl l⁻¹(ppb)となるように、 日の出から日の入りまでの約10時間にわたって オゾン付加を行った。



図(3)-1 開放型オゾン暴露システムの概念図.

オゾン濃度の連続モニターは、施設の3ヶ所にサンプリング部を設け、オゾンモニター(Mod. 202, 2B Technologies, Boulder CO, USA) で記録した。さらに、オゾン濃度の水平方向または垂直方向の 分布を調べるために、Ogawa式パッシブサンプラーによって適宜調査した²⁾。

(2) 成長および樹冠構造に関する測定

樹木の成長や樹冠構造に関する測定として、葉数、樹高および高さごと(30 cmごと)の幹の 太さをシラカンバ、ブナおよびミズナラ(オゾン付加区と対照区でそれぞれ7~10個体)を対象と して個体別に測定した。なお、本数が異なるのは調査期間中に1.5 mに達する積雪によって枝が 抜けたり折れたりした個体を除いた結果である。これらの測定は、各樹種の肥大成長が一段落し た9月下旬に行った。

(3) 樹冠内の葉における光環境の測定

光環境の違いと葉の光合成能力に及ぼすオゾンの影響との関係を評価するため、樹冠内の個葉 の受光量を測定した。詳細な研究対象とした樹種は、これまでの研究から十分な樹冠の発達が見 られたブナおよびミズナラとした。シラカンバは樹冠表層にしか葉が着かず、陰葉化しないので、 測定対象としなかった。個葉の受光量は日射計フィルム測定器(オプトリーフ,大成化工,東京) を葉面に設置し(2012年8月1日)、2週間後(8月14日)に回収した。受光量の測定後、リーフ パンチでリーフディスクを採取し、70℃で4日以上乾燥し、葉の形態的なパラメーターである葉面 積あたりの乾重(LMA: Leaf mass per area, g m⁻²)を測定した。

(4) 葉の光合成能力に関する測定

2012年6月、8月および10月に、樹冠上部、中部および下部から葉を選び、携帯型光合成蒸散測 定装置(LI-6400, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)を用いて葉のガス交換速度を測定した。測定中の 葉温、光合成有効放射束密度および飽差は、それぞれ24-28℃、1500 µmol m⁻² s⁻¹、1.2-1.6 kPaとし、 飽和CO₂条件(1500 ppm)における純光合成速度(A_{max})を測定した。光一光合成関係から初期 勾配(ϕ_{680} : LED光源680 nmの値)を測定した。光飽和条件で葉内CO₂濃度-光合成曲線(A/Ci) を作成し、外気CO₂濃度が380 ppm(µmol mol⁻¹)条件における純光合成速度(A_{sat})、光合成の 気孔制限(L_s)、最大カルボキシル化速度(V_{cmax})および最大電子伝達速度(J_{max})を算出した。 この場合、対象とした樹種はすべて異圧葉(維管束鞘延長部が葉肉を小部屋に区切れた形態を有 する)のため、気孔反応が一様に行われることを前提として測定を行った³⁾。

外気CO₂濃度が380 ppm (µmol mol⁻¹)条件で光-光合成曲線を作成した後に暗呼吸速度(*R_d*)を求めた。葉のガス交換速度の測定後、葉を採取して葉面積と葉乾重量を測定し、LMA(単位葉面積 あたりの葉乾重量)を算出した。ガス交換速度の測定とは別に、葉面における光強度とLMAとの 関係を調べたところ、両者の間に有意な正の相関が認められたので、LMAを光環境の指標と した⁴⁾。

(5) オゾン吸収速度の推定方法

従来、オゾンによる植物被害の評価には、 オゾン濃度の平均値やその最高値、ドース (濃度×暴露時間)などを用い、被害の程度と の関係を解析することが行われてきた。しかし、 オゾン濃度を基礎にしたオゾン影響の程度は 年ごとや場所ごとに変化してしまい、オゾンに よる被害の評価に問題が生じた^{5),6)}。これは、 実際にはオゾンは気孔を介して葉内に入って 被害を与えるため、たとえ大気オゾン濃度が高 くても、気孔が閉じていればオゾンによる被害 は小さいと考えられるためである。したがって、 オゾンの暴露量ではなく、気孔を介して葉内に 吸収されたオゾンの量に基づくと、より現実的 で高精度なオゾン影響の評価につながる⁷⁾。



図(3)-2 大気から葉内へのオゾンの吸収に 関する模式図.

オゾン吸収量の推定には、葉内組織と大気との間のガス濃度差と拡散抵抗によって記述される モデルが用いられてきた。この拡散抵抗モデルは、大気と葉との間の水蒸気および二酸化炭素に 関するガス交換の解析に広く用いられており^{8),9)}、大気汚染ガスの場合も同様に扱うことができる ことが知られている^{10,11),12),13)}。

図(3)-2に、気孔を介した葉内へのオゾンの吸収に関する模式図を示す。葉内に吸収された オゾンは、葉内の組織ですみやかに反応すると報告されており¹⁴⁾、気孔底界面のオゾン濃度は **0** ppmと仮定できる^{15),16)}。したがって、水蒸気とオゾンの分子拡散係数の比を用いることで、 水蒸気気孔コンダクタンスから拡散抵抗モデルによって気孔を介した葉のオゾン吸収量の推定が 可能となった。気孔を介した葉のオゾン吸収速度(F_{st} , nmol m⁻² s⁻¹)は、式(1)で示される。

$$F_{st} = \frac{[O_3]_{air} - [O_3]_{leaf}}{\{R_b + 1.65/(g_s \times 1000)\}}$$
(1)

ここで、 $[O_3]_{air}$ は大気オゾン濃度 (nmol mol⁻¹)、 $[O_3]_{leaf}$ は気孔底界面のオゾン濃度 (nmol mol⁻¹) を表す。 g_s は水蒸気気孔コンダクタンス (mmol m⁻² s⁻¹) であり、1000は単位の換算のための係数 であり、1.65は水蒸気とオゾンの分子拡散係数の比を示す。 R_b は、オゾンに対する葉面境界層 抵抗 (m² s mol⁻¹) である。 気孔を介した葉のオゾン吸収量の推定は、気孔底界面のオゾン濃度を0 nmol mol⁻¹と仮定し、 水蒸気に関する気孔コンダクタンス (g_s)をもとに推定するWater vapor surrogate methodを用いた¹⁷⁾。 水蒸気気孔コンダクタンスの測定は、携帯型蒸散測定装置(LI-1600, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA) を用いて2012年5~10月に行った。欧州では、オゾン吸収量の推定の際、気孔コンダクタンスの 推定に関して、Embersonらによって提案された以下のモデル式が用いられている¹⁸⁾。

$$\mathbf{g}_{s} = \mathbf{g}_{max} \cdot \mathbf{f}_{phen} \cdot \mathbf{f}_{light} \cdot \max\left\{ \mathbf{f}_{min}, \left(\mathbf{f}_{temp} \cdot \mathbf{f}_{VPD} \cdot \mathbf{f}_{SMD} \right) \right\}$$
(2)

ここで、g_{max}は最大気孔コンダクタンス (mmol m⁻² s⁻¹)を示し、その他の関数は0から1までの スケールをとる。f_{min}は、最小気孔コンダクタンス (g_{min})とg_{max}の比 (g_{min}/g_{max})である。f_{phen}は 気孔コンダクタンスの葉齢における変化を示し、f_{light}は光合成有効放射波長域の光量子束密度

(PPF: Photosynthetic Photon Flux)に対する気孔コンダクタンスの応答を示す。f_{temp}、f_{VPD}、f_{SMD}は、 それぞれ温度、飽差、土壌水分に対する気孔コンダクタンスの応答を示す。

Embersonらの提案した式では、オゾンによる気孔コンダクタンスの低下は考慮されていないため¹⁸⁾、式(2)を以下のように改良した。

$$\mathbf{g}_{s} = \mathbf{g}_{\max} \cdot \mathbf{f}_{phen} \cdot \mathbf{f}_{O3} \cdot \mathbf{f}_{light} \cdot \max\left\{ \mathbf{f}_{\min}, \left(\mathbf{f}_{temp} \cdot \mathbf{f}_{VPD} \cdot \mathbf{f}_{SMD}\right) \right\}$$
(3)

ここで、f₀₃は対照区における日最大気孔コンダクタンスとオゾン付加区における日最大気孔コン ダクタンスの比であり、オゾンによる気孔コンダクタンスの低下を示すパラメーターである。 この式(3)に基づいて測定結果をまとめ、気孔コンダクタンスモデルの各パラメーターを導出し、 気孔を介した葉のオゾン吸収量の推定を行った。

(6) シラカンバに見られた生物ストレスの評価

2013年5~11月に3区画に植栽されたシラカンバ各2~3個体(合計8個体)の頂生側枝1本に対して、 シュートあたりの着葉数と出葉数を1~3週に1回の頻度で調査を行った。出葉の定義は、「葉身と 葉柄がシュート軸から離れ、1枚の葉として認識できる時点」とした。また、落葉は、「葉が脱落、 葉のほぼ全体が欠損もしくは変色した時点」とした。着葉数の調査から、シュートあたりの生育 期間に出葉した葉の総和(総出葉数)を求めた。

被食防衛能は、虫害の観察と被食防衛物質の定量を行って評価した。すなわち、虫害の影響の 有無は、目視による定期的観察・確認と写真撮影から判断した。また、本研究における虫害の 影響は、「植食性昆虫による食害により落葉、葉のほぼ全体が欠損するなど、葉数に影響を与え るもの」と定義した。

被食防衛物質の定量においては、着葉数の測定に用いた枝と近い条件のシュートの春葉および 夏葉(6月と7月の第1週に出現したものをマークした)を対象にした。先行研究から、春葉の 純光合成速度が低下し始め、夏葉の開葉が一段落する8月にサンプル葉を採取し、定法に従い、 縮合タンニン含量と総フェノール含量をそれぞれ塩酸ブタノール法およびFolin-Ciocalten法で測定 した¹⁹⁾。データ解析においては、各測定日における総出葉数と着葉数に対してオゾン処理を固定 効果として一元配置分散分析を行い、有意水準は10%以下とした。被食防衛物質の各測定項目に 対しては、春葉・夏葉(6月開葉)と夏葉(7月開葉)についてオゾン処理を固定効果として一元配置 分散分析を行い、有意水準は10%とした。各解析には、統計ソフト(SPSS12.0)を用いた。

4. 結果及び考察

(1) 葉のオゾン吸収量に基づいた成木に対するオゾンの影響評価

1) オゾン処理環境

試験地の大気オゾン濃度は平均27.7 ppb (nmol mol⁻¹) であった。樹木の生育期間に付加した オゾン濃度の制御は順調であった(図(3)-3)。水平面では、対象樹種の樹冠の着葉が疎になる 樹冠下部ではオゾン濃度がやや低くかった(図(3)-4)。右上の部位ではややオゾン濃度が高く 検出されたが、これは初年度にシナノキとホオノキの萌芽が発生して林床部分がやや混み合った 状態になったため、オゾンの拡散が妨げられた結果と考えられる。この調査後、萌芽枝を除去し たところ、このようなスポット的な高濃度オゾンは解消された。樹冠中部では、ミズナラとブナ の下枝が枯れ上がらず、オゾンの拡散がやや妨げられた。







図(3)-4 オゾン付加区におけるオゾン濃度の高さ別水平分布 (2011年8月の測定例).



図(3)-5 オゾン付加区におけるオゾン濃度の頻度 (2011年8月の測定から作成).

連日のモニタリングの結果から、目標値に向かってオゾン付加処理は精度よく行われたと考え られる。事実、オゾン濃度の頻度分布からは、目標値±10%の範囲での制御は約65%行われており、 20%範囲では約80%行われていた(図(3)-5)。

2) ブナ葉における気孔コンダクタンスの季節変化の測定

気孔を介した葉のオゾン吸収量を評価するため、日当たりの良いブナ葉を対象に、水蒸気気孔 コンダクタンスの測定を実施した。オゾン付加区における日最大気孔コンダクタンスは、対照区 のそれと比較して低かった。一般に、オゾンは気孔コンダクタンスの低下を促すとされる²⁰⁾。 これは、オゾンによって引き起こされる純光合成速度の低下に伴う気孔コンダクタンスの低下に よるとされる¹⁴⁾。また、オゾンの吸収を防ぐために気孔を閉じ気味にするとも考えられる¹⁾。オゾ ン暴露実験開始前には処理区間にブナの気孔コンダクタンスの差は見られなかったことから、 オゾン付加区における日最大気孔コンダクタンスの低下はオゾンによって気孔閉鎖が生じたため であると推察できる。また、オゾンによる気孔コンダクタンスの低下を示すパラメーターであるfo3 は、オゾン濃度ベースの指標であるAOT40よりも、気孔を介した葉のオゾン吸収量と関係がある ことが明らかになった(図(3)-6)。

図(3)-7に、オゾン付加によるブナの気孔コンダクタンスの低下(f_{03})を考慮に入れた改良モデルおよび既存のEmbersonモデルの推定値とオゾン付加区における気孔コンダクタンス測定値との比較を行った結果を示す。既存モデルは、オゾン付加区の気孔コンダクタンスを過大に推定した。 一方、 f_{03} を考慮した改良モデルの推定値は、改良前と比べると決定係数に違いは認められなかったが、誤差が小さくなった(既存モデル: RMSE (Root Mean Square Error, 平均二乗誤差)=112.2 mmol m⁻² s⁻¹; 改良モデル: RMSE=84.9 mmol m⁻² s⁻¹)。



図(3)-6 オゾン付加区における最大気孔コンダクタンスと対照区におけるブナの最大気孔コンダ クタンスの比(f₀₃)と積算オゾン吸収量(A)または AOT40(B)との関係(2012 年 6~8 月). 用いた関数は、本文に記載した式(3)である。

$$\mathbf{g}_{s} = \mathbf{g}_{max} \cdot \mathbf{f}_{phen} \cdot \mathbf{f}_{O3} \cdot \mathbf{f}_{light} \cdot max \left\{ \mathbf{f}_{min}, \left(\mathbf{f}_{temp} \cdot \mathbf{f}_{VPD} \cdot \mathbf{f}_{SMD}\right) \right\}$$

ここで、g_{max}は最大気孔コンダクタンス(mmol m⁻² s⁻¹)を示し、

その他の関数は0から1までのスケールをとる。

 f_{min} は最小気孔コンダクタンス (g_{min})と g_{max} の比 (g_{min}/g_{max})である。

f_{phen}は気孔コンダクタンスの葉齢における変化を示す。

f_{light}は光合成有効放射束密度に対する気孔コンダクタンスの応答を示す。

f_{temp}、f_{VPD}、f_{SMD}は温度、飽差、土壌水分に対する気孔コンダクタンスの応答を示す。



図(3)-7 オゾンの気孔コンダクタンスにおよぼす影響(f_{o3})の考慮の有無によるブナの葉 のオゾン吸収量推定値の違い(オゾン付加区, 2011年).
既存モデルと改良モデルの両者を用いて、2011年の実験期間におけるブナの葉のオゾン吸収量 の推定を試みた(図(3)-8)。両者の結果を比較すると、オゾン吸収量推定の際にfo3を考慮に入れ た場合は積算オゾン吸収量の推定値が約20%低下した。このモデル間の比較によって確認された 積算オゾン吸収量の差は、fo3によるオゾンの取り込み量の制限と解釈できる。気孔閉鎖によって オゾンの取り込み量が制限されることで、オゾン暴露条件下におけるオゾンのダメージは軽減 されると推察される。一方、より長期のオゾン暴露下では気孔開閉機能の低下を促し、気孔コン ダクタンスを増加させるとの報告もあり^{21),22)}、オゾンの取り込み量が増加する可能性もある。 したがって、モデルのさらなる改良に向け、全成長期間を通した測定からfo3のパラメーターに関 する季節変化を今後検討していく必要がある。

本研究の結果から、モデルにオゾンによる気孔コンダクタンスの低下を考慮することによって、 モデルの推定誤差が小さくなることが明らかになった。継続した測定によってオゾンの取り込み 量を正確に評価することは、日本の森林を構成している樹木に対するオゾンの影響評価における 精度の高度化につながると考えられる。



図(3)-8 オゾン付加区におけるブナの気孔コンダクタンス(g_s)の測定値とモデル推定値の 比較(A: Emberson らの既存モデル; B: 改良モデル, 2011年の測定値).

3) 光合成機能に対するオゾンの影響

ブナの樹冠上部の光合成機能は、オゾンによって有意に低下した(図(3)-9)。これに対して、 ブナ樹冠下部でオゾンによる光合成機能への影響は確認できなかった。この理由として、樹冠下 部では気孔コンダクタンスが低いためにオゾン吸収量が少なかったことや受光量の違いによって オゾンの影響が異なることが考えられる。ミズナラでは、オゾンによる光合成機能の低下は確認 できなかった。オープントップチャンバーを用いたポット苗実験から、ブナのオゾン感受性は ミズナラに比べて高いことが指摘されている^{23),24)}。したがって、オゾン感受性の樹種間差に関し ては、成木と苗木で同様であると考えられる。



図(3)-9 ブナの樹冠位置によるオゾンの純光合成速度への影響の違い(6 個体の平均値, エラーバーは標準偏差を示す).純光合成速度は、2011年8月に測定した。

4) 光強度の変化に対するブナ葉における気孔応答へのオゾンの影響

光強度を変化させた際に、ブナの気孔閉鎖に要する時間はオゾンによって増加したが、開孔に 要する時間に対するオゾンの影響は確認できなかった(図(3)-10)。一般に、オゾンは葉の老化 を促進すると言われてきた。本研究で確認されたオゾン付加による定常状態の葉のガス交換速度 および気孔応答への影響は葉の老化現象と似ていた。しかし、葉の老化によって気孔の開孔と 閉鎖の反応が共に影響を受けるのに対して、オゾンでは気孔の開孔時間よりも閉鎖時間に影響を 及ぼした(図(3)-10)。光強度を強光から弱光に変化させた際に、オゾンによって気孔閉鎖が 著しく鈍化することが明らかになった。気孔閉鎖の鈍化は、結果的にオゾン吸収量を増加させる と共に、蒸散量の増加が促され、水ストレスを受けやすくなると予想される。



図(3)-10 光強度を変化させた時のブナの気孔コンダクタンスの変化に対する オゾンの影響の例(2011年9月に測定).

5) 光環境の違いと葉の光合成能力に及ぼすオゾンの影響との関係

図(3)-11に、ブナとミズナラの葉の平均受光量とLMA(単位葉面積あたりの葉乾重量)との 関係を示す。それぞれの葉が生育する光環境と葉の形態との間には、受光量が大きい葉ほどLMA が大きくなる関係が見られた。一方、光環境とLMAとの関係には、オゾン付加による違いは認め られなかった。この結果から、LMAをそれぞれの葉が生育する光環境の指標として用いることで、 樹冠内における各葉の光環境を考慮してオゾンの影響を評価することが可能であると考えられた。

2012年8月と10月において、ブナのLMAが比較的高い葉でオゾンによる光飽和での純光合成速度 (A_{sat})の低下が認められた(図(3)-12)。同様の傾向は、ブナの最大カルボキシレーション速度 (V_{cmax})および最大電子伝達速度(J_{max})にも認められた(図(3)-13)。同時期において、ブナの LMAが比較的高い葉では、オゾンによる暗呼吸速度(R_d)の増加が認められた(図(3)-12)。 気孔制限(L_s)に対するオゾンの影響は8月においては認められなかったが、10月においてはLMA の大小に関係なくオゾンによって L_s は低下した(データは示さず)。いずれの測定月においても ϕ_{680} に対してオゾンの有意な影響は認められなかった(図(3)-12)。

以上の結果より、ブナにおいて、①樹冠上部の明るい環境に展開する陽葉のオゾン感受性は 樹冠下部に展開する陰葉よりも高いこと、②純光合成速度の主な低下要因は気孔閉鎖でなく、 葉緑体における炭素同化能力の低下や呼吸の増加によること、③光合成パラメーター間にもオゾ ン感受性に違いがあることが明らかになった。これまでの研究と異なり、樹冠上部の葉でオゾン 感受性が高いことが示された。



図(3)-11 2012 年 8 月のブナおよびミズナラの葉の 1 日あたりの平均受光量と LMA (単位葉面積あたりの葉乾重量)との関係. 白丸が外気区、黒丸がオゾン付加区 を示す。共分散分析: n.s., 有意差なし.



図(3)-12 ブナの LMA と光飽和での純光合成速度(A_{sat})、光-光合成曲線の初期勾配(φ₆₈₀: 光量子収率)、光合成測定後の暗呼吸速度(R_d)との関係(2012 年 6、8 および 10 月).



図 (3)-13 ブナとミズナラの葉の最大カルボキシレーション速度 (V_{cmax})、最大電子伝達速度 (J_{max})および葉内 CO₂濃度に対するオゾン付加の影響.

図(3)-14に、2012年8月におけるブナとミズナラの光・CO₂飽和条件における純光合成速度(A_{max}) とLMAとの関係を示す。ブナにおいては、LMAが比較的大きい葉でA_{max}の低下が認められた。 一方、LMAが比較的小さい葉では、A_{max}の低下が確認できなかった。これは、ブナの受光量の 大きい葉において、オゾンによる光合成能力の低下が大きいことを意味する。その原因として、 受光量の大きい葉では、気孔コンダクタンスが大きいため、オゾン吸収量が多かったことが考え られる。また、オゾンの取り込みと共に生成し、植物に障害を与える活性酸素種の発生が光依存 的であることも要因のひとつとして考えられる²⁵⁾。ミズナラでは受光量が大きい葉において、わ ずかにA_{max}の低下が見られたが、A_{max}にオゾン付加による有意な違いは確認できなかった。ブナと ミズナラの間に気孔コンダクタンスの大きな違いが認められなかったことから、この樹種間の 差に葉内の解毒能力の違いが関与していることが考えられる。既往のオープントップチャンバー を用いたポット苗実験から、ブナの光合成におけるオゾン感受性はミズナラに比べて高いことが 示唆されている²⁴⁾。したがって、光合成におけるオゾン感受性の樹種間差に関しては、成木と 苗木で同様であると推察できる。

2012年6月、8月および10月に樹冠内の様々な位置の葉で光-光合成曲線を測定し、LMAを指標 としたモデリングを行った(図(3)-15)。得られたモデルを葉群光合成モデルに組み込み、1成長 期間の炭素収支を推定した。その結果、1成長期間のブナの葉群炭素吸収量(光合成量-呼吸量) はオゾンによって12.4%低下すると推定された。夏季のオゾンによる炭素吸収量の低下は、呼吸量

(光合成速度計測後の暗呼吸速度)の増加が主な要因であったのに対して、秋季では光合成量の 低下と呼吸量の増加の寄与率は同程度であった。このことから、ブナ若齢木の葉群炭素吸収量の オゾンによる低下に対する光合成低下と呼吸増加の寄与率は、季節によって異なることが明らか になった。特記しておきたいことは、オゾン付加区では樹冠上部の暗呼吸速度が高かったことで ある。



図(3)-14 ブナおよびミズナラにおける LMA と光・CO₂ 飽和条件における光合成速度(A_{max}) との関係(2012 年 8 月). 白丸が外気区、黒丸がオゾン付加区を示す。共分散分析: n.s., 有意差なし.



図(3)-15 夏季と秋季におけるブナの土地面積あたりの炭素の光合成による吸収量と呼吸に よる消費量の垂直分布(2012年).

6) 成長および葉数に関する測定結果

表(3)-1に、シラカンバ、ブナおよびミズナラの2011年9月から2012年9月までの樹高成長量およ び胸高直径成長量を示す。シラカンバでは、オゾン付加によって樹高成長量が増加した。一方、 ブナおよびミズナラでは、ガス処理区間で樹高成長量に違いは認められなかった。カバノキでは、 春に一斉に開葉するブナなどとは異なり、連続的な葉の生産が秋まで見られ、オゾンによる ダメージの補償作用として葉の生産の促進が報告されている²⁶⁾。したがって、シラカンバでは、 補償作用による葉の生産のためにシュートの伸長が生じ、樹高成長量が増加したと考えられる。 また、胸高直径成長量は、いずれの樹種においても、対照区と比較してオゾン付加区で低い値を 示したが、処理区間に有意な差は認められなかった。

表(3)-2に、2012年9月におけるシラカンバ、ブナおよびミズナラの着葉数を示す。いずれの 樹種の着葉数も処理区間に有意な差は認められなかった。

樹種および測定項目	対照区	オゾン付加区	T-test
シラカンバ 樹高成長(cm) 胸高直径成長(mm)	90 (17) 8.7 (2.6)	107 (10) 7.4 (1.4)	* n.s.
ブナ 樹高成長(cm) 胸高直径成長(mm)	45 (18) 8.4 (1.5)	50 (11) 6.3 (3.0)	n.s. n.s.
ミズナラ 樹高成長(cm) 胸高直径成長(mm)	72 (24) 9.1 (3.5)	76 (27) 8.1 (7.0)	n.s. n.s.

表(3)-1 オゾン付加がシラカンバ、ブナおよびミズナラの樹高および胸高直径成長に 及ぼす影響(2011年9月~2012年9月).

データはそれぞれ7~10個体の平均値(±標準偏差)を示す.

**p<*0.05, n.s. 有意差なし.

表(3)-2 オゾン付加がシラカンバ、ブナおよびミズナラの葉数に及ぼす影響(2012 年	-9月))
--	------	---

樹種	対照区	オゾン付加区	T-test	
シラカンバ	362 (159)	392 (137)	n.s.	
ブナ	2257 (775)	2367 (340)	n.s.	
ミズナラ	2410 (643)	2618 (1209)	n.s.	

データはそれぞれ7~10個体の平均値(±標準偏差)を示す.

n.s. 有意差なし.

7) オゾン付加によるブナの肥大成長

着葉部位(樹冠)直下の幹の太さは、そこから上部の着葉量に直結している。このため、オゾ ン吸収量を群落へ拡張するためにも、部位別(樹高別)の肥大成長に対するオゾンの影響に注目 する必要がある。ブナおよびミズナラの樹高成長にオゾンによる有意な影響は認められなかった が、ブナの樹冠部(着葉部位)の幹直径(肥大成長)が若干低下する傾向があった(図(3)-16)。 ドイツ南部のKrantzberg試験地の開放系施設で8年間にわたって大気濃度の2倍のオゾン(平均 57 ppb)を付加したところ、ヨーロッパブナの胸高部位の肥大成長にオゾンの有意な影響は認めら れなかったが、樹冠内部の肥大成長はオゾンによって著しく低下した²⁷⁾。これらのことから、 樹木の肥大成長に対するオゾンの影響は部位によって異なることが考えられる。



図(3)-16 ブナの樹高別の幹直径(青:対照区,赤:オゾン付加区, n=10).

(2) 葉の動態と昆虫による食害

1) 出葉数と着葉数

シラカンバの春葉の出葉数には対照区とオゾン付加区の間に差はなく、2013年5月10日の測定時 点でシュートあたり2~3枚の春葉が開葉していた。春葉の展開完了後、夏葉が出葉し始め、 シュートあたりの積算葉数は7月上旬までは対照区でやや多い傾向であったが、実験終了時には 対照区で10.1枚、オゾン付加区で10.1枚となり、オゾン処理による差は見られなかった (図(3)-17)。着葉数の季節変化に注目すると、春葉の展開完了後、夏葉が出葉し始め、シュート あたりの着葉数は7月上旬までは対照区でやや多い傾向であった。しかし、7月中旬から8月にかけ て対照区でシュートあたりの着葉数が9.6枚から5.4枚になり、オゾン付加区の半分程度にまで 減少した(図(3)-18)。9月上旬には対照区とオゾン付加区ともに夏葉の展開が完了した。夏葉の 展開が完了した時点の対照区とオゾン付加区のシュートあたりの着葉数はそれぞれ5.5枚および 9.9枚であった。その時点で対照区では春葉のほとんどが落葉していたが、オゾン区では全体で 1枚しか落葉していなかった。10月には対照区とオゾン付加区で落葉が見られたが、オゾン付加区 の方が10日程度早く落葉が始まった。

シラカンバの春葉の出葉数と出葉時期にオゾン処理による差が見られなかった。このことから、 春葉の生産数には前年のオゾン処理の影響がないことが考えられた。また、シラカンバの総出葉 数に対照区とオゾン付加区でまったく差がなかったことから、夏葉の出葉数にもオゾン処理の 影響がないと考えられた。これらから、オゾンはシラカンバの葉の生産(葉原基の形成)に影響 していないと考えられる。これは、ポプラのクローン苗(Populus tremula)を用いて行った実験と 同じ現象であり²⁸⁾、少なくともシラカンバとオゾン感受性が高いとされるポプラでは、葉原基 形成にオゾンは影響しないことが明らかになった。



図(3)-17 シラカンバのシュートあたりの積算葉数(n=8, 2013年の測定値). エラーバー は、標準誤差を表す。



図(3)-18 シラカンバのシュートあたりの着葉数(n=8, 2013 年の測定値). エラーバーは、 標準誤差を表す。

2) 虫害

2013年7月中旬から8月にかけて、対照区におけるシラカンバの着葉数が大きく減少した (図(3)-18)。害虫の発生時期や様子を観察した結果、ハンノキハムシ幼虫による食害であった。 5月中旬から6月の観察時点で約同数の成虫が対照区とオゾン付加区で確認された。さらに、開放 型オゾン暴露システム直近に生育するケヤマハンノキには、ハンノキハムシ幼虫による相当な 食害が見られた。これらのことから、オゾンがハンノキハムシに直接影響し、ハンノキハムシ 成虫がオゾン付加区を避けたとは考えられない。

シラカンバにおける目視と写真撮影による観察ではあるが、2013年6月に対照区とオゾン付加区 で同数程度のハンノキハムシの成虫が確認された。さらに、7月から8月にかけて、対照区で多く のハンノキハムシ幼虫が見られた。写真では、7月下旬の時点で対照区における虫害の跡がオゾン 付加区に比べて多く確認された。一方、オゾン付加区ではハンノキハムシ幼虫そのものがあまり 見られなかった。

被食防衛物質として、葉の総フェノール量と縮合タンニン量を調べた。シラカンバの春葉、 夏葉(6月開葉)、夏葉(7月開葉)に含まれた総フェノール量は、対照区でそれぞれ46.0 mg g⁻¹、 45.6 mg g⁻¹、53.5 mg g⁻¹、オゾン付加区では52.8 mg g⁻¹、43.9 mg g⁻¹、45.4 mg g⁻¹であった。統計 処理の結果、オゾン処理による有意な影響は検出されなかった。シラカンバの春葉、夏葉 (6月開葉)、夏葉(7月開葉)に含まれた縮合タンニン量は、対照区でそれぞれ10.7 mg g⁻¹、 10.2 mg g⁻¹、16.4 mg g⁻¹、オゾン区では14.7 mg g⁻¹、9.9 mg g⁻¹、12.3 mg g⁻¹であった。対照区の材料 と比較して、春葉ではオゾン付加区で有意に増加した(*p*=0.08)。しかし、夏葉ではオゾン処理に よる有意な影響は検出されなかった。これらの結果から、オゾン区でハンノキハムシ幼虫の食害 による着葉数の減少が起きなかった原因として、欧州シラカンバで確認されたように²⁹⁾、気孔を 介して葉内に取り込まれたオゾンによって各種酵素活性が増加して、ハンノキハムシへの抵抗性 が増加し、成虫がオゾン付加区の葉への産卵を避けた結果、対照区に比べてオゾン付加区では 幼虫の数が相対的に減少したことが考えられる。先行研究では、オゾン暴露を受けたヤナギ類の 葉へのハムシ類の産卵数が減少したという報告もある³⁰⁾。また、シラカンバの春葉の葉緑体の 糖脂質などが酸化を受けて酸化脂質が生成され、これが忌避物質として働き、ハンノキハムシの 成虫がオゾン付加区のシラカンバへの産卵を避けた可能性も推察される。

本研究の結果、オゾンによるシラカンバの葉の生産数への影響は確認されず、オゾン付加区に おいて春葉への障害があって夏葉の生産数が減少し、結果として葉数が減少すると考えていた。 しかし、ハンノキハムシ幼虫の虫害がなく、生産された葉数には対照区との差がなかった。 2013年の観察結果からは、従来の制御環境の実験からは解らなかったハンノキハムシによる食害 の影響が明らかになった。オゾンによってシラカンバの少なくとも春葉の虫害抵抗性が変化し、 ハンノキハムシの産卵行動を介してオゾンがシラカンバの葉数の動態に影響を与える可能性が示 唆された。

サブテーマ(3)では、開放系オゾン暴露システムを開発し、成木(若齢木)にオゾンを付加 した結果、オゾン感受性に樹種間差が見られた。気孔を介した葉のオゾン吸収量の増加によって、 生育後期の葉の老化、特に気孔閉鎖能が低下し、森林のCO2吸収機能が阻害される可能性が示され た。また、将来予測されているオゾン濃度の上昇だけではなく、現状のオゾン濃度においても 成木に悪影響が生じていることが示された。従来の研究では、虫害による葉量の低下などはほと んど考慮されてこなかった^{32,33)}。開放系オゾン研究によって、越境大気汚染が深刻化する中で³⁴⁾、 より現実に迫ることができるようになると期待される。

5. 本研究により得られた主な成果

(1)科学的意義

本サブテーマにおいて設計・作製した開放型オゾン暴露システムによって、これまでにまったく 未解明であった日本の落葉広葉樹の成木に対するオゾンの影響に関する基礎的知見を提供できた。 オゾンによる生理的な影響のひとつである気孔閉鎖の程度が、従来多用されてきたオゾンの濃度 ベースの指標であるAOT40よりも積算オゾン吸収量と関係があることが示された。このオゾンに よる気孔応答の鈍化(ダルリーフ化)により、水ストレスの影響を受けやすくなる可能性もある。 これは温暖化が顕在化してきた現状を考えると、対策をたてる必要性を指摘できる。森林樹木で は、樹冠内の光環境の違いに伴って葉の光合成能力が異なる。そこで、樹冠内の葉の光環境を 調べ、光環境の違いと葉の光合成能力に及ぼすオゾンの影響との関係を評価した。その結果、 樹冠内の受光量の大きい葉において、受光量の小さい葉よりもオゾンによる光合成能力の低下 程度が著しいことが明らかになった。本研究で得られた成果は、成木の樹冠内における各葉の 光合成能力へオゾンの影響を反映させるために必要な基礎的知見の提供を可能にした。また、 オゾン付加によってシラカンバでは虫害が回避できる可能性が示唆された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

北海道総合研究機構の環境科学センターは、北海道各地での環境モニタリングに加え、対流圏 オゾンが植物に与える影響を本研究で開発した開放系施設を利用して解明することを目指してい るため、本サブテーマにおける研究の見学会が催された。また、本サブテーマで得られた知見に 基づき、北海道東部の弟子屈町に摩周湖外輪山のダケカンバ林衰退に関する問題提起を行い、 環境保全対策の推進に貢献した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本サブテーマは、現実に生じうるオゾン濃度の水準で、日本の代表的な冷温帯植生であるブナ 若齢木のCO2吸収能力が影響を受ける可能性を示した。本サブテーマで得られた成果は、気孔を介 した葉のオゾン吸収量に基づいたオゾンの樹木影響の評価法の有効性を示したため、日本におけ るオゾンによる森林衰退の危険地域(ホットスポット)の選択などに貢献でき、越境大気汚染に よる生態系影響の発現予測やその対策に貢献できる。本サブテーマで得られた成果は、オゾンの 前駆物質の排出量削減などの地球環境政策への科学的根拠として貢献できる。

6. 国際共同研究等の状況

中国・南開大学生命科学院の資源環境植物学教室は、独自の予算でオゾン濃度の解析と都市 近郊植物群の成長を追跡しているが、2014年1月にパッシブサンプラーの設置方法などの本サブ テーマで用いた研究手法を指導した。

7. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- M. WATANABE, M. YAMAGUCHI, H. MATSUMURA, Y. KOHNO, T. KOIKE and T. IZUTA: Asian J. Atmos. Environ. 5, 205-215 (2011) "A Case Study of Risk Assessment of Ozone Impact on Forest Tree Species in Japan"
- 小池孝良、毛 巧芝、渡辺 誠、稲田直輝、川口光倫、星加康智:北海道の農業気象, 63, 17-23
 (2011)「北海道の森林を対象にしたオゾン影響解明の展望」
- K. KAWAGUCHI, Y, HOSHIKA, M. WATANABE and T. KOIKE: Asian J. Atmos. Environ. 6: 192-205 (2012) "Ecophysiological Responses of Northern Birch Forests to the Changing Atmospheric CO₂ and O₃ Concentration"
- 4) T. KOIKE, T., Q. MAO, N. INADA, K. KAWAGUCHI, Y. HOSHIKA, K. KITA and M. WANATABE: Asian J. Atmos. Environ. 6, 104-110 (2012) "Growth and Photosynthetic responses of Hybrid Larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) Cuttings to Elevated Ozone and/or Carbon Dioxide"
- 5) Y. HOSHIKA, M. WATANABE, N. INADA and T. KOIKE: Environ. Pollut. 166: 152-156 (2012) "Ozone-Induced Stomatal Sluggishness Develops Progressively in Siebold's Beech (*Fagus crenata*)"
- Y. HOSHIKA, M. WATANABE, N. INADA and T. KOIKE: Water Air Soil Pollut. 223: 3893-3901 (2012) "Modeling of Stomatal Conductance for Estimating Ozone Uptake of *Fagus crenata* under Experimentally Enhanced Free-Air Ozone Exposure"
- Y. HOSHIKA, M. WATANABE, N. INADA and T. KOIKE: Water Air Soil Pollut. 223: 5017-5025 (2012) "Growth and Leaf Gas Exchange in Three Birch Species Exposed to Elevated Ozone and CO₂ in Summer"
- 8) T. KOIKE, M. WATANABE, Y. HOSHIKA, M. KITAO, H. MATSUMURA, R. FUNADA and T. IZUTA: Climate Change, Air Pollution and Global Challenges: Understanding and Solutions from Forest Research (R. Matyssek *et al.*, eds.), Elsevier. 371-390 (2013) "Effects of Ozone on Forest Ecosystems in East and Southeast Asia"
- 9) M. WATANABE, Y. HOSHIKA, N. INADA, X. WANG, Q. MAO and T. KOIKE: Environ. Pollut. 174, 50-56 (2013), "Photosynthetic Traits of Siebold's Beech and Oak Saplings Grown under Free Air Ozone Exposure"
- 10) Y. HOSHIKA, M. WATANABE, N. INADA and T. KOIKE: Ann. Bot., 112, 1149-1158 (2013)
 "Model-Based Analysis of Avoidance of Ozone Stress by Stomatal Closure in Siebold's Beech (Fagus crenata)"
- 11) 星加康智:北方林業, 64, 50-51 (2012)「オゾン吸収量によるブナへのオゾン影響評価の こころみ」
- 12) 星加康智、毛 巧芝、稲田直輝、王 暁娜、川口光倫、渡辺 誠,小池孝良:北海道の農業 気象,64,13-22 (2012)「日本の冷温帯落葉樹を対象としたオゾンの影響評価に関する新た な取り組み」

- 13) 王 暁娜、龍田慎平、渡辺 誠、星加康智、小池孝良:北方林業,64,170-172 (2012) 「ダケ カンバ衰退木と根の活動 - 外生菌根菌の役割 - 」
- 14) Y. HOSHIKA, M. WATANABE, N. INADA, Q. MAO and T. KOIKE: Environ. Pollut. 182:
 242-247 (2013) "Photosynthetic Response of Early and Late Leaves of White Birch (*Betula platyphylla var. japonica*) Grown under Free-Air Ozone Exposure"
- 15) 渡辺 誠、星加康智、小池孝良:北方林業,65,76-79(2013)「開放系付加施設を利用した 異なる時期のオゾン付加に対するウダイカンバの光合成応答」
- 16) 川口光倫、星加康智、渡辺 誠、小池孝良:北方林業,65,73-75 (2013)「カンバ類への オゾンの影響 -メカニズム解明とフィールド観察をつなげる-」
- 17) 王 暁娜、毛 巧芝、甘 烔圭、渡辺 誠、星加康智、小池孝良:北海道の農業気象,65,49-57 (2013)「カラマツ属樹木に対する対流圏オゾンの影響評価の現状と課題」
- 18) M. WATANABE, Y. HOSHIKA, N. INADA and T. KOIKE: Environ. Pollut. 184: 682-689 (2014) "Canopy Carbon Budget of Siebold's Beech Fagus crenata Sapling under Free Air Ozone Exposure"
- 19) M. WATANABE, Y. HOSHIKA and T. KOIKE: J. Plant Res., 127, 339-345 (2014) "Photosynthetic Responses of Monarch Birch Seedlings to Different Timing of Free Air Ozone Fumigation"

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 星加康智、渡辺 誠、稲田直輝、毛 巧芝、小池孝良:日本農業気象学会北海道支部 2012 年大 会(2012)「開放系オゾン暴露実験を用いたブナ葉の気孔コンダクタンスモデリング-オゾン影響の考慮について-」
- 2) 星加康智、渡辺 誠、稲田直輝、毛 巧芝、小池孝良:第19回大気環境学会北海道東北支部会 (2012)「開放系オゾン暴露実験を用いたブナ葉のオゾン吸収量推定のための気孔コンダクタ ンスモデリング」
- 3) 渡辺 誠、星加康智、小池孝良:第19回大気環境学会北海道東北支部会(2012)「異なる時期 のオゾン付加に対するウダイカンバ苗の光合成応答」
- 4) 星加康智、渡辺 誠、稲田直輝、毛 巧芝、小池孝良:第53回大気環境学会年会「開放系オゾン暴露実験による冷温帯落葉広葉樹を対象としたオゾン吸収量の推定」
- 5) 星加康智、稲田直輝、渡辺 誠、小池孝良:第123回日本森林学会大会(2012)「開放系オゾン 暴露実験によるブナを対象とした光合成速度と気孔応答へのオゾンの影響」
- 6) 小池孝良、毛 巧芝、稲田直輝、川口光倫、来田和人、渡辺 誠:第123回日本森林学会大会(2012) 「グイマツ雑種 F₁の成長と光合成に及ぼすオゾンと高 CO₂の影響」
- 7) WATANABE, Y, HOSHIKA, N. INADA, Q. MAO and T. KOIKE : International Conference "Vegetation Response to Climate Change and Air Pollution – Unifying Evidence and Research across Northern and Southern Hemisphere Jointly organized by: IUFRO Research Group 7*01*00. Bahia, Brazil, September 1-6, (2013) "Photosynthetic Traits in Leaves of Siebold's Beech (*Fagus crenata*) Saplings under Free Air O₃ Exposure in Relation to the Within-Canopy Light Gradient."

- 8) X. WANG, Q. MAO, L. QU, Y. TAMAI, A. KOYAMA, M. WATANABE and T. KOIKE: The 124 Annual Meeting Japanese Society of Forest. Mar. 26-29th, Morioka, Japan. (2012) "Ectomycorrhizal Richness and Growth of Hybrid Larch F₁ under Elevated O₃ and CO₂"
- 9) M. WATANABE, Y.HOSHIKA, N. INADA, X. WANG, Q. MAO and T. KOIKE: International Symposium on Aerosols in East Asia and Their Impacts on Plants and Human Health, Koganei, Tokyo 29 November-1 December 10, (2012) "Photosynthetic Responses of Sieboid's Beech and Oak Saplings Grown in Northern Japan to Free Air Ozone Exposure"
- 10) M. WATANABE, Y. HOSHIKA, N. INADA, X. WANG, Q. MAO and T. KOIKE: International conference 'Biological Reactions of Forests to Climate Change and Air Pollution', 18-27 March (2012) Kaunas, Lithuania "Photosynthetic Traits of *Fagus crenata* and *Quercus crispula* Sapling Grown under Free Air Ozone Exposure"
- 11) 渡辺 誠、星加康智、稲田直輝、小池孝良:第54回大気環境学会年会(2013)「オゾンに対す るブナの光合成応答~樹冠内光勾配との関係~」
- 12) 稲田直輝、星加康智、渡辺 誠、毛 巧芝、小池孝良:第 124 回日本森林学会大会(2013) 「ブナとミズナラを対象としたオゾンの光合成への影響[~]光環境とオゾン影響の関係[~]」
- 13) 渡辺 誠、星加康智、小池孝良:第 124 回日本森林学会大会(2013)年 3 月 「異なる時期の オゾン付加がウダイカンバ苗の光合成に与える影響」
- 14) 崎川哲一、及川聞多、渡辺 誠、毛 巧芝、小池孝良:第 62 回北方森林学会(2013)「開放系 オゾン付加実験を用いたシラカンバ幼木の葉の動態」
- 15) D. KAM, M. WATANABE, C. SHI, Q. MAO, X. WANG, K. KITA and T. KOIKE: International Symposium on Agriculture Meteorology 2014, Sapporo, March 17-20, (2014) "Effects of O₃ on the Growth of Japanese Larch (*Larix kaempferi*) and Hybrid Larch F₁ (*Larix gmelinii var. japonica × L. kaempferi*) Grown under Different Nitrogen Concentration"
- 16) D. KAM, M. WATANABE, Q. MAO, X. WANG, K. KITA and T. KOIKE: Sustainability Science week Hokkaido University Dec 9, 2013, Sapporo, (2013) "Effects of O₃ on the Growth of Japanese larch (*Larix kaempferi*) and Hybrid larch F1 (*Larix gmelinii* var. *japonica* x L. *kaempferi*) Grown under 2 Nitrogen Levels"
- 17) D. KAM, M.WATANABE, Q. MAO, X.WANG, K. KITA and T.KOIKE: Joint Symposium on Environmental Science, November, 26-28 (2013) Helsinki, Finland "Effects of O₃ on the Growth of Japanese Larch (*Larix kaempferi*) and Hybrid Larch F1 (*Larix gmelinii* var. *japonica* x *L. kaempferi*) Grown under Different Nitrogen Voncentration"
- 18) X. WANG, Q. MAO, L. QU, K. KAWAGUCHI, M. WATANABE, Y. HOSHIKA, A. KOYAMA, Y. TAMAI and T. KOIKE : International Conference "Vegetation Response to Climate Change and Air Pollution Unifying Evidence and Research across Northern and Southern Hemisphere Jointly organized by: IUFRO Research Group 7*01*00. Bahia, Brazil, September 1-6, (2013) "Ectomycorrhizal Richness and Growth of Hybrid Larch F₁ under Elevated O₃ and CO₂"

- 19) M.WATANABE, Y. HOSHIKA, K. KITA and T. KOIKE : International Conference "Vegetation Response to Climate Change and Air Pollution – Unifying Evidence and Research across Northern and Southern Hemisphere Jointly organized by: IUFRO Research Group 7*01*00. Bahia, Brazil, September 1-6 (2013) "Photosynthetic Responses of Three Kinds of Larch Seedlings Raised under Free Air CO₂ Enrichment (FACE)"
- 20) Y. HOSHIKA, M. WATANABE, N. INADA, Q. MAO and T. KOIKE: International Conference "Vegetation Response to Climate Change and Air Pollution – Unifying Evidence and Research across Northern and Southern Hemisphere Jointly organized by: IUFRO Research Group 7*01*00. Bahia, Brazil, September 1-6, (2013) "Estimation of Stomatal Ozone Uptake of Sun and Shade Leaves for Siebold's Beech (*Fagus crenata*)"
- 21) M. WATANABE, Y.HOSHIKA, N. INADA, Q. MAO and T.KOIKE: International Conference, Vegetation Response to Climate Change and Air Pollution – Unifying Evidence and Research across Northern and Southern Hemisphere Jointly organized by: IUFRO Research Group 7*01*00. Bahia, Brazil, September 1-6, (2013) "Photosynthetic Traits in Leaves of Siebold's Beech (Fagus crenata) Saplings under Free Air O₃ Exposure in Relation to the Within-Canopy Light Gradient"
- 22) M. WATANABE, Y. HOSHIKA, X. WANG, Q. MAO, N. INADA, T. SAKIKAWA and T. KOIKE: International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM), Sapporo, Japan, Mar 17-21 (2014) "Free Air Ozone Fumigation Study on Deciduous Broad-Leaved Tree Species in Northern Japan"
- 23) 渡辺 誠、星加康智、稲田直輝、小池孝良:第125回日本森林学会(2014)「ブナ幼木の葉群光 合成に与える開放系オゾン暴露の影響」
- 24) C. SHI, X. WANG, Q. MAO, D. KAM, M. WATANABE and T. KOIKE : Proceeding of Symposium of forest declining in the somma of Lake Mashu 37-42, Dec. 16th (2013), "Effects of Ground Surface Ozone on the Growth of Deciduous Trees"
- 25) C. SHI, M. KITAO, M. WATANABE, H. TOBITA, K. YAZAKI, S. KITAOKA and T. KOIKE: Japan Forest Scociety Annual Meeting 125, "O₃ and Plant session," Omiya March 29th, (2014) "Combination Effect of Elevated O₃ and CO₂ on Foliar Chemistry of *Quercus serrata* and *Q. mongolica* var. *crispula* Seedlings, A Trial with a Free-Air Fumigation System"
- 26) C. SHI, M. KITAO, M. WATANABE, K. YAZAKI, H. TOBITA, S. KITAOKA and T. KOIKE: International Symposium on Agriculture Meteolorogy, Sapporo, Japan, March 19th (2014) "Chemical Composition of *Quercus serrata* and *Q. mongolica* var. *crispula* Seedlings Grown under Elevated O₃ and CO₂ with a Free-Air Fumigation System"

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナー等の開催(主催のもの) 特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

2012年5月28日、NHK札幌、特集「樹木が語る環境の異変」において施設の紹介を行った。

(6) その他

本研究プロジェクトで得られた成果を一般市民を対象とした講演会(弟子屈町と協賛:対流圏 オゾンの現状と森林景観維持への課題,摩周湖外輪山のダケカンバ林衰退の謎にせまる, 2013年12月17日)で紹介した。また、SSH協定の北海道立岩見沢農業高等学校のSSH選抜生40名 を対象に、本プロジェクトの成果の紹介を行った(2013年9月13日)。

8.引用文献

- R. MATYSSEK, H. SCHNYDER, W. OBWALD, D. ERNST, J.C. MUNCH and H. PRETZSCH: Growth and Defence in Plants. Resource Allocation at Multiple Scales. Series: Ecological Studies, Vol. 220. Springer Verlag, Heiderberg (2012)
- 2) http://ogawajapan.com/manuaru12.pdf
- 3) I. TERASHIMA: Photosynthesis Research, 31, 195-212 (1992) "Anatomy of Non-Uniform Leaf Photosynthesis"
- 4) M. WATANABE, Y. HOSHIKA, N. INADA and T. KOIKE: Environ. Pollut. 184: 682-689 (2014) "Canopy Carbon Budget of Siebold's Beech *Fagus crenata* Sapling under Free Air Ozone Exposure"
- 5) 小林和彦: 大気環境学会誌, 34, 162-175 (1999)「対流圏オゾンが農作物生産に及ぼす影響の 評価」
- R. MATYSSEK and J.L. INNES: Water, Air Soil Pollut., 116, 199-226 (1999) "Ozone A Risk Factor for Trees and Forests in Europe?"
- 7) 渡辺 誠、山口真弘:日本生態学会誌,61,89-96.(2011)「日本の森林樹種6種に対する窒素 沈着を考慮したオゾンのリスク評価」
- 8) J.L. MONTEITH: Principles of environmental physics. Arnold, London, pp. 260 (1973)
- 9) H.G. JONES: Plants and Microclimate, 2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge (1992)
 "A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology" pp. 428 "Model-Based Analysis of Avoidance of Ozone Stress by Stomatal Closure in Siebold's Beech (*Fagus crenata*)"
- 10) J.H. BENNETT, A.C. HILL and D.M. GATE: J. Air Pollut. Contr. Assoc., 23, 957-962. (1973) "A Model for Gaseous Pollutant Sorption by Leaves"
- M.H. UNSWORTH, P.V. BISCOE and V. BLACK: Effects of air pollutants on plants (ed. Mansfield, T.A.), Cambridge University Press, 5-16, (1976) Cambridge University Press, "Analysis of Gas Exchange between Plants and Polluted Atmospheres"
- 12) 大政謙次: 国立公害研究所研究報告, 10, 367-385 (1979)「植物群落の汚染ガス収着機能 一現象の解析とそのモデル化一」
- 13) S. CIESLIK, K. OMASA, and E. PAOLETT: Plant Biology, 11, 24-34, (2009) "Why and How Terrestrial Plants Exchange Gases with Air"
- 14) E. POLETTI and N. GRULKE: Environ. Pollut., 137, 483-493 (2005) "Does Living in Elevated CO₂ Ameliorate Tree Response to Ozone? A Review on Stomatal Response"

- 15) 大政謙次、安保文彰、名取俊樹、戸塚績:農業気象,35,77-83(1979)「植物による大気汚染物質の収着に関する研究(II) NO₂,O₃あるいはNO₂+O₃曝露下における収着について」
- 16) A. LAISK, O. KULL and H. MOLDAU 1989: Plant Physiol., 90, 1163-1167. "Ozone Concentration in Leaf Intercellular Air Spaces is Close to Zero"
- 17) Y. HOSHIKA, M. WANATABE, N. INADA and T. KOIKE: Ann. Bot., 112, 1149-1158 (2013)
 "Model-Based Analysis of Avoidance of Ozone Stress by Stomatal Closure in Siebold's Beech (Fagus crenata)"
- 18) L. EMBERSON, M.R. ASHMORE, H.M. CAMBRIDGE, D. SIMPSON and J.P. TUOVINEN: Environ. Pollut., 109, 403-414, (2000) "Modelling Stomatal Ozone Flux across Europe"
- 19) R. JULKUNEN-TITTO: J. Agric. Food Chem., 33, 213-217 (1985) "Phenolic Constituents in the Leaves of Northern Willows: Methods for the Analysis of Certain Phenolics"
- 20) V.E. WITTIG, E.A. AINSWORTH and S.P. LONG: Plant Cell Environ., 30, 1150-1162 (2007) "To What Extent Do Current and Projected Increases in Surface Ozone Affect Photosynthesis and Stomatal Conductance of Trees? A Meta-Analytic Review of the Last 3 Decades of Experiments"
- 21) Y. HOSHIKA, M. WANATABE, N. INADA and T. KOIKE, T.: Environ. Pollut., 166, 152-156 (2012)
 "Ozone-Induced Stomatal Sluggishness Develops Progressively in Siebold's Beech (*Fagus crenata*)"
- 22) Y. HOSHIKA, M. WANATABE, N. INADA, and T. KOIKE, T.: Water Air Soil Pollut., 223, 3893-3901, (2012b) "Modeling of Stomatal Conductance for Estimating Ozone Uptake of *Fagus* crenata under Experimentally Enhanced Free-Air Ozone Exposure"
- 23) Y. KOHNO, H. MATSUMURA, T. ISHII and T. IZUTA: Plant Responses to Air Pollution and Global Change (K. OMASA, I. NOUCHI and L.J. DE KOK Eds), Springer-Verlag, Tokyo, 243-250 (2005)
 "Establishing Critical Levels of Air Pollutants for Protecting East Asian Vegetation, A Challenge"
- 24) M. YAMAGUCHI, M. WATANABE, H. MATSUKMURA, Y. KOHNO and T. IZUTA: Asian Journal of Atmospheric Environment, 5, 65-78 (2011) "Experimental Studies on the Effects of Ozone on Growth and Photosynthetic Activity of Japanese Forest Species"
- 25) P.E. KARLSSON, H. PLEIJEL, M. BELHAJ, H. DANIELSSON, B. DAHLIN, M. ANDERSSON, M. HANSSON, J. MUNTHE and P. GRENNFELT: Ambio, 34, 32-40 (2005) "Economic Assessment of the Negative Impacts of Ozone on Crop Yields and Forest Production"
- 26) 佐治 光: 大気汚染ガス傷害・耐性の分子機構 蛋白質 核酸 酵素 44: 2253-2259 (1999)
 「植物の環境対応と耐性メカニズム 3.活性酸素、強光、弱光に対する応答」
- 27) H. PRETZSCH, J. DIELER, R. MATYSSEK, and P. WIPFLERE: Environ. Pollut., 158, 061-1070 (2010). "Tree and Stand Growth of Mature Norway Spruce and European Beech under Long-Term Ozone Fumigation"
- 28) R. MATYSSEK, TH. KELLER AND T. KOIKE: Environ. Pollut., 79: 1-7 (1993) "Branch Growth and Leaf Gas Exchange of *Populus tremula* Exposed to Low Ozone Concentration throughout Two Growing Seasons"
- 29) E. OKSANEN, J. RIIKONEN, S. KAAKINEN, T. HOLOPAINEN and E.VAPAAVUORI: Global Change Biology 11, 732-748 (2005) "Structural Characteristics and Chemical Composition of Birch (*Betula pendula*) Leaves are Modified by Increasing CO₂ and Ozone"

- 30) G. CLIVE and S. JAMES: Oecologia 76, 51-56 (1988) "Plant Stress and Insect Behavior: Cottonwood, Ozone and the Feeding and Oviposition Preference of a Beetle"
- 31) 伊豆田 猛: 植物と環境ストレス. コロナ社, 東京 (2006)
- 32) 野内 勇:大気環境変化と植物の反応. 養賢堂、東京、pp. 391 (2001)
- 33) 大原利眞:日本生態学会誌,61,77-81 (2011)「なぜ、日本の山岳や島嶼でオゾン濃度が 上昇しているのか?」
- 34) K. YAMAJI, T. OHARA, I. UNO, H. TANIMOTO, J. KUROKAWA and H. AKIMOTO: Atmos. Environ., 40, 1856-1868 (2006) "Analysis of the Seasonal Variation of Ozone in the Boundary Layer in East Asia using the Community Multi-Scale Air Quality Model: What Controls Surface Ozone Levels over Japan?"

(4) フラックスタワー測定による森林のCO2吸収量に対するオゾンの影響評価

(独)森林総合研究所

植物生態研究領域	樹木生理研究室	北尾光俊
北海道支所	寒地環境保全研究グループ	山野井克己
東北支所	森林環境研究グループ	安田幸生
関西支所	森林環境研究グループ	深山貴文

〈研究協力者〉

(独)森林総合研究所

植物生態研究領域	小松雅	隹史	(非常勤特別研究員)	(平成23年9月~25年8月)
植物生態研究領域	相川真	ī—	(非常勤特別研究員)	(平成25年10月)
植物生態研究領域	北岡	哲	(非常勤特別研究員)	(平成25年12月~平成26年1月)

平成23~25年度累計予算額:43,940千円(うち、平成25年度予算額:13,520千円) 予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

対流圏オゾン濃度の上昇に対して、森林群落レベルでのオゾン影響評価をするためには、森林 群落のオゾン吸収量に基づいた影響評価が不可欠である。そこで、森林総合研究所のフラックス タワー観測サイトの中で、落葉広葉樹林を対象とする3試験地(札幌試験地、安比試験地、山城 試験地)を対象として、フラックスデータとオゾンデータから森林群落のオゾン吸収量を推定し、 オゾン吸収が森林群落レベルのCO2吸収能力に及ぼす影響を評価した。各試験地のフラックス タワーにオゾン濃度計を設置して連続測定した森林上空のオゾン濃度と近隣都市の大気観測局で 測定されたオゾン濃度との比較を行った。その結果、気温や二酸化窒素濃度を説明変数として用 い、森林のオゾン濃度を応答変数とした重回帰分析を行うことで、大気観測局のオゾン濃度から 各試験地の森林上空のオゾン濃度を推定するための推定式を得た。正味放射量と顕熱フラックス から潜熱フラックスを推定し、蒸発散量の推定モデルであるPenman-Monteith法を用いて群落レベ ルの気孔コンダクタンス(群落コンダクタンス)を算出した。さらに、群落コンダクタンスは 総光合成速度、CO2濃度、相対湿度によって決まるというBall-Woodrow-Berryの経験式に基づき、 Penman-Monteith法では測定困難な降雨時および樹冠の一部が落葉している時期の群落コンダクタ ンスをフラックス観測データから推定する手法を開発した。これらの手法に基づき、山城試験地 のコナラ・ソヨゴ林のオゾン吸収量とCO2吸収量との関係を調べた結果、葉の成熟にともない 総光合成速度が上昇していく4月から7月の期間は、オゾン吸収量の増加による葉重量あたりの 総光合成速度の低下は見られなかった。一方、総光合成速度が低下していく8月以降はオゾン吸収 量が増加することで総光合成速度がより低下する傾向が見られた。本研究の成果から、現時点で 観測されているオゾン濃度においても、オゾン吸収量の増加によって森林群落レベルで葉の老化 が促進され、森林のCO2吸収機能の低下が生じていることが示唆された。

[キーワード]

CO2吸収、オゾン吸収、群落コンダクタンス、フラックスタワー、落葉広葉樹林

1. はじめに

現在、地球規模での対流圏オゾン濃度の上昇が報告されている。とりわけ我が国が位置する 東アジア地域では、産業の発展にともなうオゾン濃度の急激な上昇が生じており、我が国におい ても越境大気汚染に起因すると考えられるオゾン濃度の上昇が問題となっている¹⁾。オゾンは温室 効果ガスの一種として知られるが、オゾン濃度が上昇することにより、光合成の低下、老化促進、 呼吸量の増加などの植物への悪影響が生じることが知られている²⁾。その結果、森林のCO₂吸収機 能が損なわれるため、オゾンによる温室効果は温室効果ガス単体としての予測の2倍に達すること が試算されている³⁾。しかしながら、オゾンに対する樹木の反応、特に光合成の阻害に起因する森 林レベルのCO₂吸収量の低下に関する知見は限られており、より正確なオゾン影響評価を達成する ためには森林群落を対象とした研究の蓄積が必要である⁴⁾。特に、オゾン汚染のホットスポットと して今後の急激なオゾン濃度の上昇が危惧されている東アジア⁵⁾の森林を対象としたオゾン影響 評価は喫緊の課題である。

これまでに行なわれてきた苗木を用いた実験的研究の結果に基づくと、樹木の光合成機能や 成長などにおけるオゾン感受性には樹種間差異が存在する。また、このオゾン感受性の樹種間差 異を説明する要因として、気孔を介した葉のオゾン吸収量は極めて重要である。したがって、 森林のCO2吸収源としての機能に対するオゾンの影響を正確に評価するために、森林群落レベルで のオゾン吸収量の推定方法を確立し、森林におけるオゾン吸収が光合成によるCO2吸収へ与える 影響を明らかにする必要がある。

2. 研究開発目的

サブテーマ(4)においては、森林総合研究所のフラックスタワーを利用して、北方系落葉広葉 樹林、冷温帯性落葉広葉樹林、暖温帯性落葉広葉樹二次林などの構成樹種が異なる森林において 大気オゾン濃度を測定し、フラックス測定による観測データと合わせて、森林群落レベルのオゾ ン吸収量の推定手法を開発することを目的とした。さらに、開発した手法により推定したオゾン 吸収量とCO₂フラックス測定による森林のCO₂吸収量との関係を調べ、オゾンが森林のCO₂吸収 機能に及ぼす影響を評価することを目的とした。

3. 研究開発方法

(1) 試験地概要

森林総合研究所では、研究グループを組織し(森林総合研究所フラックス観測ネットワーク; FFPRI FluxNet)、日本国内5カ所の試験地で、微気象学的手法による二酸化炭素フラックス測定を 中心とした観測研究を行っている。本研究では、フラックスタワーサイトの中で、落葉広葉樹林 を対象とする3試験地を対象としてオゾン影響評価を行った。各試験地の概要は以下の通りである。

札幌試験地:札幌試験地は札幌市街地に隣接する丘陵地に山火事後に成立した2次性の北方系 落葉広葉樹林である。優先樹種のシラカンバは樹齢100年を越え衰退傾向にあり、ミズナラなどの 後継樹種に遷移する段階にある。気候は冷温帯に属し、夏には比較的高温で乾燥した期間がある 一方、冬期は気温-15℃以下、積雪1 mに達する寒冷多雪地帯である。2004年9月の台風による 風害で、観測タワー周辺の森林に多数の倒木が発生したが、風倒跡は森林生態系の推移を研究す るため自然状態で放置されている。

安比森林気象試験地:岩手県八幡平市の西森山北麓に広がる台地状の緩傾斜地に位置する。 ブナを主とする冷温帯性落葉広葉樹の二次林で、林床植生は少なく、常緑性の樹木は殆ど混交し ていない。冬期の積雪深は約2mに達する豪雪地で、例年11月から5月の間には積雪がある。

山城試験地:山城試験地は京都府南部の風化花崗岩地帯、木津川源流域の広葉樹林に位置する 試験地である。かつて、この一帯は都市近郊林としての利用によって裸地化していたが、約100年 前に開始された緑化工事によって植生が回復した。1980年代に松枯れの影響を受けた後、現在は 落葉広葉樹であるコナラを優占樹種とし、常緑広葉樹のソヨゴが散見される落葉広葉樹二次林が 成立している。

表(4)-1 試験地の概要.

試験地	位置	標高	観測対象	主要構成種	群落高さ	樹齢
			生態系			
札幌試験地	北緯43.0度	182 m	北方系	シラカンバ、ミズナ	約20 m	シラカンバで
	東経140.9度		落葉広葉樹林	ラ、ハリギリなど		約100年
安比試験地	北緯40.0度	825 m	冷温帯性	ブナ	19~20 m	70~80年
	東経141.4度		落葉広葉樹林		2009年	
山城試験地	北緯34.8度	$180 \sim$	暖温帯性	コナラ、ソヨゴなど	$6\sim\!20~m$	最高樹齢
	東経135.9度	255 m	広葉樹林		平均樹高	アカマツ
					約12 m	119年

(2)森林上空及び樹冠内のオゾン濃度測定

1)森林上空のオゾン濃度の連続測定

森林のCO₂フラックス観測位置と同じく、各試験地のタワーの頂部(高さ約30m)にオゾン濃度 測定用の取り組み口を設置した。テフロンチューブを通じて大気約2 L min⁻¹を引き込み、タワー 下部に設置した紫外線吸光式オゾン濃度計(Type-205, 2B technologies社)を用いてオゾン濃度を 2秒間隔で計測した。

2)森林樹冠内のオゾン濃度勾配

森林樹冠内のオゾン濃度勾配を測定するために、各タワーの基部から樹冠頂部までの約2m間隔 の位置とオゾン濃度の常時観測を行っているタワー頂部に、オゾン捕集液含浸ろ紙(OG-SN-16, 小川商会,神戸市)を入れたパッシブサンプラー(OG-SN-S,小川商会)を雨除けシェルター (OG-SN-SH,小川商会)を用いて設置した。パッシブサンプラーは1ヶ月に一度回収して、イオン

クロマトグラフ法により高さ別オゾン濃度の分析を行った。

3) グラニエセンサー法による樹液流速度測定

樹木の葉は気孔を開いているときにオゾンを吸収するが、同時に蒸散によって樹木樹幹に樹液 流を生じる。森林樹木の気孔反応推定のために、樹木の樹液流速度を測定するためのグラニエ センサーを設置した。グラニエセンサーは直径2 mm、長さ2 cmのヒーター線と熱電対からなる ヒーターセンサーと熱電対からなるリファレンスセンサーを樹幹上下二カ所に差し込み、樹液流 速度を測定するものである。計測されたセンサー間の温度差は、データロガー(CR1000, Cambell Scientific, Logan, USA)とマルチプレクサー(AM16/32, Cambell Scientific, USA)によって記録 した。

(3)森林群落レベルのオゾン吸収量推定モデルの開発

1) フラックスタワーサイトでのオゾン濃度推定手法の開発

森林群落でのオゾン吸収量を算出するためには、森林上空のオゾン濃度と森林群落コンダクタ ンスが必要となる。森林総合研究所では2000年より全国5カ所のタワーサイトにおいてフラックス 観測を行い、森林群落のCO2吸収データを蓄積している。一方で、各都道府県の都市部に設置され た大気汚染常時監視測定局ではオゾンを含む大気汚染物質の常時観測が行われており、各自治体 による過去のオゾン観測データが提供されている。測定局データから森林上空のオゾン濃度の 推定が可能となれば2000年より蓄積されているCO2吸収データに対してオゾン影響を評価するこ とが可能となる。そこで、フラックスタワーサイトの森林上空で連続測定したオゾン濃度と近隣 都市の測定局とのオゾン濃度の比較を行い、森林と都市部のオゾン濃度の差異を生じる要因を 解析するとともに、過去の森林のオゾン濃度の推定法の開発を試みた。

オゾン濃度の観測は、森林総合研究所の札幌森林気象試験地、安比森林気象試験地、山城水文 試験地の3カ所のタワーサイトで行った(図(4)-1)。タワー頂部で測定した2秒間隔のオゾン濃度 から1時間平均値を算出した。得られたオゾン濃度値と比較を行うため、周辺都市部に設置された 大気観測局;センター(札幌市,札幌試験地より北北西に8.7 km)、津志田(盛岡市,安比試験地 より南南東に43 km)、京田辺(京田辺市,山城試験地より西北西に7.7 km)の3カ所の大気観測局

よりオゾン濃度と二酸化窒素濃度の1時間値を得た (図(4)-1)。測定局の気温として、同じ市内の気象 台やアメダスで観測された気温の1時間値を用いた。

タワーのオゾン濃度の推定を行うため、2012年4月 から10月の間(山城のみ2012年4~6月)に得られた 大気・気温データを説明変数とした線形重回帰モデ ルを作成した。説明変数の組み合わせごとにAIC (赤池情報量基準)を計算し、最もAICが低くなるモ デルを採用した。説明変数の係数は、mcmc(マルコ フ連鎖モンテカルロ)法によって推定した。mcmc法 の計算にはWinBUGSを用い、説明変数の係数は 無情報事前分布からサンプリングした。chain数は 3とし、最初の10000回分の計算は廃棄(burn in)し、 次の10000回分の計算のうち、3回毎の推定結果を サンプリングすることで10000個の係数の組み合わ せを得た。2000年以降に得られた大気・気温データ 1時間値と上記mcmc法により求められた係数を用い て、フラックスタワーサイトの過去におけるオゾン



図(4)-1 オゾン観測を行ったタワー (▲,実線)と比較を行った 大気観測局(●,破線)の 位置.

濃度1時間値を推定した。

2) 森林群落コンダクタンス推定手法の開発

タワー測定に基づき植物群落レベルの気孔コンダクタンスを推定する手法として、熱収支法と 空気力学的方法を組み合わせたPenman-Monteith法が広く使われている⁶⁾。以下の式を R_s について解 くことで、群落レベルの気孔コンダクタンス G_s (=1/ R_s)を求めることができる。

$$\lambda E = \frac{(Rn-G)}{\frac{\partial e_s(T)}{\partial T} + \frac{\rho C_p[es(T)-e]}{R_a+R_b}}{\frac{\partial e_s(T)}{\partial T} + \gamma (1 + \frac{R_s}{R_a+R_b})}$$

パラメーターの説明: λE 潜熱フラックス; R_n 正味放射;G 地中熱流; c_p 空気の定圧比熱; ρ 空気密度; T 気温;e 気温Tでの水蒸気圧; e_s (T) 気温Tでの飽和水蒸気圧; γ 乾湿計定数; R_a 空気力学的抵抗; R_b 境界層抵抗; R_s 気孔抵抗[逆数($1/R_s$)が群落レベルの気孔コンダクタンス(群落コンダクタンス, G_s) となる]

しかしながら、Penman-Monteith法による気孔コンダクタンスの推定が成立するためには、林冠 が閉鎖していること、また、葉が濡れていないことが必要となる。すなわち、森林群落からの 水蒸気の放出がすべて気孔を介して行われており、地表面および濡れた葉からの蒸発散がない条 件が必須となる。そのため、降雨により葉が濡れている時、また、開葉期・落葉期のように林冠 が閉鎖していない条件では、葉の表面や地表面からの蒸発散が存在するため、Penman-Monteith法 では気孔コンダクタンスを正確に推定できず、積算オゾン吸収量を推定できないという問題が あった。

山城試験地を例に取ると、京都府南部の風化花崗岩地帯、木津川源流域の広葉樹林に位置する この試験地には、落葉広葉樹であるコナラを優占樹種とし、常緑広葉樹であるソヨゴが混在する 二次林が成立している。秋から翌春にかけてのコナラが葉を着けていない時期は、常緑樹である ソヨゴの樹冠がパッチ上に分布しているが、林冠が閉鎖されていないため、Penman-Monteith法の 適応が困難である。また、年間を通して1 mm以上の降雨がある日がおよそ100日あり、夏季の林冠 閉鎖時においても葉が濡れるためにコンダクタンスの推定が難しいケースが多く見られる。

森林群落レベルの気孔コンダクタンス(群落コンダクタンス)の推定は森林のオゾン吸収量を 算出するために必須であり、年間を通したオゾン吸収量を推定するためには、コナラ落葉時およ び降雨時の気孔コンダクタンスを推定する新たな手法が必要となる。そこで、Penman-Monteith法 にBall-Woodrow-Berryの気孔コンダクタンス推定モデル⁷⁾を組み合わせることで、Penman-Monteith 法の使用が困難な条件も含めた通年での気孔コンダクタンスの推定を試みた。Ball-Woodrow-Berry モデルは、気孔反応が主として光合成に依存すると仮定したモデルであり、以下の関係式で表さ れる。 $G_{\rm s} = a * \text{GPP} * rh/C_{\rm s} + G_{\rm min}$

パラメーターの説明: G_s 群落コンダクタンス; G_{min} 群落コンダクタンスの最小値;a 経験式の定数; GPP 総一次生産;rh 相対湿度; C_s CO2濃度.

近年の研究により森林群落での気孔反応は湿度に対して指数関数的に反応することが示唆されており、湿度への反応を考慮したBall-Woodrow-Berryの気孔反応式は以下のように改変される^{8),9)}。

 $G_{\rm s} = a * b^{rh} \text{ GPP}/C_{\rm s} + G_{\rm min}$

パラメーターの説明: G_s 群落コンダクタンス; G_{min} 群落コンダクタンスの最小値;a, b 経験式の定数; GPP 総一次生産;rh 相対湿度; $C_s CO_2$ 濃度.

Penman-Monteith法が適用可能な条件を、林冠が閉鎖している6~9月、24時間以内に1 mm以上の 降雨がなかった時期と定め、Penman-Monteithで求めたGsとタワーフラックス測定による総一次 生産量(GPP)および環境条件である相対湿度(rh)とCO2濃度(Cs)との関係を調べ、式中のGmin および定数a,bの値の推定を行った。すなわち、式中のGminおよび定数a,bの値が定まれば、タワー フラックス測定による総一次生産量(GPP)および環境条件である相対湿度(rh)とCO2濃度(Cs) から、Penman-Monteith法が適応できない降雨時ならびに開葉・落葉期の森林レベルの気孔コンダ クタンスの推定が可能となると考えた。

(4) フラックスタワー測定による森林のCO2吸収量に対するオゾンの影響評価

Penman-Monteith法とBall-Woodrow-Berryモデルを組み合わせることにより、通年での森林群落の 気孔コンダクタンスを求め、さらに、空気力学的抵抗、境界層抵抗、表面抵抗を考慮に入れ、 森林群落でのオゾン吸収速度(F_{ST})を算出した^{10),11),12)}。

 $F_{\rm ST} = C_{\rm m} * R_{\rm c} / \left[\left(R_{\rm a} + R_{\rm b} + R_{\rm c} \right) R_{\rm ST} \right]$

パラメーターの説明: C_m オゾン濃度; R_c 表面抵抗; R_a 空気力学的抵抗; R_b 境界層抵抗; R_{ST} 気孔抵抗 (=1 $\angle G_s$).

さらに、日中(光強度: PFD>0)のオゾン吸収速度を積算することで積算オゾン吸収量(D)を 算出した。

 $D = \Sigma F_{ST} \Delta t,$

積算オゾン吸収量と森林群落のCO₂吸収速度を示す総一次生産(GPP)との関係から森林群落 レベルでのオゾン影響評価を試みた。光-GPP曲線を用いて、光強度が十分に強く、光合成が飽和 していると考えられる1500 μmol m⁻² s⁻¹のGPPの値を森林のCO₂吸収機能の指標とした(図(4)-2)。



 図(4)-2 森林群落の総一次生産(GPP)と光合成 有効放射束密度(PPFD)との関係.
 光合成有効放射束密度が1500 µmol m⁻² s⁻¹
 の時のGPPの値を近似曲線より求め、森林
 のCO₂吸収機能の指標とした。

4. 結果及び考察

(1) 森林上空及び樹冠内のオゾン濃度測定結果

2011年9~10月より、札幌(北海道)、安比(岩手)、山城(京都)の3地点のフラックス タワーにおいて森林上空のオゾン濃度の連続測定を行った。図(4)-3に、10月の各試験地の森林上 空でのオゾン濃度測定値を示す。周辺の大気観測局のオゾンデータとの比較を行った結果、昼間 のオゾン濃度の傾向が近似していた測定局はそれぞれ、千歳市(札幌タワーより約30km)、秋田 市(安比タワーより約75km)、京田辺市(山城タワーより約8km)のものであった。全体として 昼間のオゾン濃度の最高値は測定局と同程度の値を示すが、森林上空では夜間のオゾン濃度が 下がらない傾向が見られた。



図(4)-3 2011年10月の各試験地における森林上空のオゾン濃度と周辺大気観測局の測定値比較. 実線がタワーでの測定値、破線が大気観測局の測定値を示す。図中の白色部分は昼間 (6:00-18:00)、灰色部分は夜間(18:00-6:00)を示す。なお、大気観測局のデータは速報値を 用いた。

図(4)-4に、シラカンバ、ミズナラ、コナラの樹液流測定の結果を示す。樹液流速度は正午付近 が最も高い値を示し、夜間にはほぼ0に近い低い値を示した。このことは、夜間は気孔を閉じてお り蒸散が抑制されていることを示唆している。なお、札幌試験地で10月後半にシラカンバ、ミズ ナラの樹液流速度が低下したのは落葉による影響と考えられる。樹液流速の結果より、オゾン吸 収量の推定には気孔が開いている昼間のオゾン濃度が重要であることが示唆された。森林上空で は夜間に高いオゾン濃度が維持されるが、オゾン吸収量の算出に必要とされる昼間のオゾン濃度 値であれば、同等の値を示す近隣の測定局のデータで代用できる可能性が示された(図(4)-3)。 フラックスタワーによる観測データは2000年から記録されているので、測定局のオゾンデータを 利用することができれば、過去10年以上に遡りCO₂フラックスへのオゾンの影響評価を行うことが できるという点で重要な知見であると考える。



図(4)-4 2011年9~10月の樹液流速度. 図中の白色部分は昼間(6:00-18:00)、灰色部分は夜間(18:00-6:00)を示す。

図(4)-5に、森林樹冠内でのオゾン濃度の変化を示す。樹冠内でのオゾン濃度は、葉の表面での オゾンの分解と葉へのオゾン吸収により下層に行くほど低下していくと考えられる。本研究に よって、オゾン濃度の変化には葉群の分布が密接に作用していることが示唆された。たとえば、 安比試験地では下層植生が少ないため8 m以下の測定点でのオゾン濃度低下が緩やかになったの に対し、下層にササが繁茂する札幌試験地では2 mの測定点での顕著なオゾン濃度の低下が見られ た(図(4)-6)。一方、平均樹高が約12 mと低い山城試験地では、上層下層の区別なく小径木が 密生している状態であり、樹冠が始まる12 m付近から直線的にオゾン濃度の低下が見られる結果 となった。これらの結果は、オゾン吸収量に基づく樹木成木のオゾン影響を評価する際には、 葉群の分布とそれにともなうオゾン濃度の変化を考慮に入れてオゾン吸収量を算出する必要が あることを示唆している。



図(4)-5 森林樹冠内でのオゾン濃度の垂直変化.オゾン濃度は9~10月のオゾン濃度の平均値を 示す。矢印はそれぞれの樹種の樹冠を示す。



札幌試験地:上層にシラカンバ、ミズナラ、 下層にササが生育



安比試験地:ブナが優占、 下層植生は少ない

山城試験地:小径木が密生、下層植

山城試験地:小径木が密生、ト層植 生は少ない

図(4)-6 各試験地の下層植生.

(2) フラックスタワーサイトでのオゾン濃度推定

図(4)-7に、2012年4~10月に観測されたタワーサイトと大気観測局のオゾン濃度値の日変化に ついて月ごとの平均値を示す。



図(4)-7 2012年4月から10月までのタワー (実線)と周辺大気観測局(破線)の オゾン濃度の日変化(上段:札幌, 中段:安比,下段:山城). 月ごとの平均値を示した。 札幌では、観測局のオゾン濃度がタワーの濃度より常に10 ppb程高いものの日変化のパターンは 類似していた。一方、安比や山城では昼間のオゾン濃度は同程度だったが、夜間から朝にかけて 大気観測局のオゾン濃度が低下することで濃度差を生じていた。タワーと観測局のオゾン濃度 1時間値を比較したところ、各サイトで昼間(8:00-18:00)のオゾン濃度値は正の相関を示すのに 対し、安比や山城では夜間(18:00-8:00)の相関関係は低かった(図(4)-8)。



図(4)-8 タワーと観測局のオゾン濃度1時間値の比較. 灰色:昼(8:00-18:00),黒:夜間~朝(18:00-8:00)

図(4)-9に、タワーと観測局の気温差と夜間のオゾン濃度差は正の相関を示す。夜間の一酸化 窒素濃度が比較的高い都市部では、オゾンの分解が生じるが、窒素酸化物濃度が低い森林では 夜間のオゾンの分解は起こりにくい。さらに、夜間、放射冷却により大気が安定すると上層との 空気の撹拌が起こりにくくなる¹³⁾。このため、タワーと観測局の気温差が大きい時は大気の安定 性が増大していると考えられ、夜間のオゾン濃度差を生じる結果となったと考えられる。夜間の オゾン濃度差は標高差が大きい2地点間ほど大きいため¹⁴⁾、タワーと観測局の標高差が小さい札幌 では濃度差を生じなかったと考えられる。



図(4)-9 タワーと観測局のオゾン濃度差と大気・気象データの比較.
 a:オゾン濃度差と気温差の比較(山城),b:オゾン濃度差と観測局のN02濃度の比較(札幌,凡例は図(4)-8と同じ)

また、札幌では、観測局の二酸化窒素濃度とオゾン濃度差にも正の相関が認められた(図(4)-9)。 オゾンは、主に紫外線下で酸素と二酸化窒素が可逆的に反応することで生じる。その一方で、 過剰に発生する一酸化窒素はオゾンを分解し、オゾン濃度を低下させることが知られている。 そのため、バックグラウンドの濃度値として、二酸化窒素とオゾン濃度の和をポテンシャルオゾ ン(PO)として評価する場合もある¹⁵⁾。森林では窒素酸化物が少ないためオゾンの分解が起こら ず、結果として観測局の窒素酸化物濃度とタワーと観測局のオゾン濃度差の間に相関を示したと 考えられる。

タワーのオゾン濃度を応答変数とした重回帰モデルについて、AICに基づくモデル選択を行った 結果、札幌と安比ではフルモデル(Ox_{city} + NO_{2-city} + Ta_{tower} + Ta_{city})がAIC最小となったのに対し、 山城では気温について差のみを考慮したモデル(Ox_{city} + NO_{2-city} + ΔTa)でAIC最小となった。

AICが最小になったモデルについて, mcmc法によるパラメーター推定を行ったところ、Rhat値 はすべて1.001以下となった。また、推定平均値は最小二乗法で求められた重回帰モデルのパラ メーターとほぼ同じであったので、収束していたと判断し、各フラックスサイトにおける森林 上空のオゾン濃度推定モデルを構築した。

各サイトにおいて、昼間のオゾンの年(4-10月)平均濃度、AOT40共に観測局での実測値より タワーでの推定値の方が高い値を示した(図(4)-10)。これは、明け方のオゾン濃度差や都市部で の窒素酸化物によるオゾンの分解が考慮されたためと考えられた。また、AOT40は対流圏オゾン 濃度のオゾン影響評価の指標となり、暴露実験によりAOT40が16 ppm h以上で感受性のブナやアカ マツに対し10%の成長低下を生じさせることが示されている¹⁶⁾。安比試験地はブナ林であり、 推定AOT40の中央値が16 ppm hを超えている年があることから、感受性樹種であるブナの成長に 影響を与え得るオゾンレベルになっていることが示唆された。



図(4)-10

2000 年 以 降 の 各 タ ワー サイトのオゾン濃度値の 推定結果.各年4月から10月 までの昼間(6時~18時)の値 について、平均値(上段)と AOT40を示した。推定値の 中央値は実線で、観測局の 実測値を破線で示した。 さらに推定値の90%または 50%の信用区間について 濃淡の異なる範囲で示した。

(3)森林群落コンダクタンス推定手法の開発

森林群落のオゾン吸収量推定のために、落葉広葉樹のコナラと常緑広葉樹のソヨゴが優占する 山城試験地を対象として、森林群落コンダクタンスを推定する手法の検討を行った。図(4)-11に、 Penman-Monteith法を用いて推定した森林群落レベルの気孔コンダクタンス(G_s)とGPP*rh/C_sとの 関係を示す。ここで、GPP(Gross Primary Production)はフラックス測定によって得られた総一次 生産量、rhはタワーで測定した相対湿度、C_sはCO₂濃度である。直線回帰の傾きが、 Ball-Woodrow-Berryモデルの経験的定数a、切片が最小のコンダクタンスG_{min}に相当する。なお、 24時間以内に降雨があった場合には、Penman-Monteith法では気孔コンダクタンスの推定ができな いため、データから除外した。コナラの開葉は4月上旬から始まり、葉が完全展開し林冠が閉鎖す るまでにおよそ1ヶ月かかった。一方、落葉は11月初旬から認められた。林冠が閉鎖していない 3月、4月、11月および12月は、林冠閉鎖期に比べ回帰直線の傾きが高い傾向が見られた。林冠が

閉鎖していない時期には、地表面からの 蒸発が潜熱フラックスとして検知され るため、気孔コンダクタンスを過大評価 していると考えられる¹⁷⁾。一方、林冠が 閉鎖している時期の6~9月においては、 G_{\min} およびaの値にはほとんど変化は 見られなかった。そこで、この時期の 関係式が光合成(GPP)に基づき気孔 反応を推定する Ball-Woodrow-Berry モデルを代表するものと考え、以下の 推定式を得た。

$G_{\rm s} = 0.44 * \text{GPP} * rh/C_{\rm s} + 0.0025$

さらに、湿度に対する気孔反応が指数 関数的であるとする近年の研究により、 次の推定式を得た。

 $G_{\rm sB2} = 0.038 * 20.5^{rh} \text{ GPP}/C_{\rm s} + 0.0029$

上述の推定式を用いて、林冠が閉鎖 していない時期および降雨により 葉が濡れていると考えられる場合も 含めて気孔コンダクタンスの再計算を 行った(図(4)-12)。



図(4)-11 群落レベルの気孔コンダクタンス (Stomatal conductance)とGPP**rh*/*C*_sの 関係の季節変化.

再計算した気孔コンダクタンスの最大値 は0.03 m s⁻¹付近であり、報告されている森林 群落レベルの最大気孔コンダクタンスの 範囲に収まる¹⁸⁾。コナラの開葉が始まる4月 上旬より気孔コンダクタンスが上昇するが、 コンダクタンスの上昇は葉が完全展開した 5月上旬を過ぎても続き、6月に入りほぼ最大 値を示した。このことは、完全展開した後、 葉が機能的に成熟するまでにさらに一月ほ ど要したことを示唆している。

次に、Ball-Woodrow-Berryモデルによって 再計算した気孔コンダクタンスと森林上空



図(4)-12 Ball-Woodrow-Berryモデルによって
 推定した群落レベルの気孔コンダク
 タンスの季節変化.

のオゾン濃度から、森林群落レベルでのオゾン吸収量を算出した。オゾン吸収量の算出には、 オゾンに対する空気力学的抵抗、境界層抵抗、気孔抵抗、葉の外部抵抗を考慮した^{10),11),12)}。

図(4)-13に、植物へのオゾン影響の指標であるAOT40(40 ppbを超えるオゾン濃度の1時間値の 積算値)とオゾン吸収量の季節変化を示す。植物へのオゾン影響の指標として広く使われている AOT40は4月にピークを示したが、森林群落によるオゾン吸収量のピークは7月であった。コナラ が開葉した直後の4月には高いオゾン濃度が観測されたが、気孔コンダクタンスが低いために実際 の吸収量は抑えられたと考えられる。一方、光合成によるCO2吸収が活発になる7月は気孔コンダ クタンスも同様に高くなり、比較的高いオゾン濃度と相まって、高い吸収量を示す結果となった と考えられる。森林群落でのオゾン吸収量は、単に大気オゾン濃度で決まるのではなく、葉の 成熟といった生物的プロセスが大きく関与していることが示唆された。



図(4)-13 月別のAOT40(上)および 森林群落レベルのオゾン 吸収量(下). タワーフラックスサイトでは、CO₂吸収量のフラックス測定値が利用できることから、 Ball-Woodrow-Berryの気孔コンダクタンス推定モデルを組み合わせることにより、従来の Penman-Monteith法では困難であった林冠非閉鎖期および降雨時のコンダクタンスの推定が可能と なった。森林群落のCO₂吸収量が多い時は気孔コンダクタンスも高くなり、結果としてオゾンの 吸収量が増加するが、オゾン吸収量とCO₂吸収量の関係の年次変化を解析することで、森林のCO₂ 吸収量に対するオゾンの影響評価が可能である。

(4) フラックスタワー測定による森林のCO2吸収量に対するオゾンの影響評価

2004年頃から2009年頃にかけて急激にオゾン濃度の上昇が見られた京都府南部に位置する山城 試験地を例に取り(図(4)-10)、オゾン吸収量と光合成によるCO₂吸収速度との関係から、森林 群落レベルでのオゾン影響評価を行った。対象とした年は、2004年、2005年、2009年である。 昼間(6:00-18:00)のオゾン濃度平均値の季節変化から、すべての年において、4月ないし5月に オゾン濃度が最も高く、春から冬にかけて濃度が低下していく傾向が見られた(図(4)-14)。 なお、2009年のオゾン濃度は他の年に比べて年間を通して高い値を示した。



図(4)-14 日中オゾン濃度(6:00-18:00) の月別平均値.



図(4)-15 群落コンダクタンスの季節変化. 群落コンダクタンスは土地面積あたりの値で示されている。

それぞれの年の林冠閉鎖時期(6~9月)を対象として求めた森林群落レベルの Ball-Woodrow-Berryの関係式から通年の群落コンダクタンスの推定を行った。月別の平均群落 コンダクタンスは4月から上昇を始め、7月ないし8月に最大値を取り、12月に向けて低下していく 傾向が見られた(図(4)-15)。4月以降のコンダクタンスの上昇は、落葉広葉樹であるコナラの 開葉を反映しているものと考えられる。

山城タワーサイトにおける年降水量は2004年;1684 mm、2005年;960 mm、2009年;1149 mm となっていた(図(4)-16)。2009年の群落コンダクタンスに関して、特に高い群落コンダクタン スを示した2005年と比較すると、6月、7月、10月と降水量は2009年の方が高いにもかかわらず、 群落コンダクタンスは低くなっており、降水量から2009年の群落コンダクタンスの低下を説明 することはできなかった。2009年はオゾン濃度が通年高かったことを考えると、サブテーマ(1) で明らかにされたオゾン暴露による気孔閉鎖が森林群落レベルでも生じている可能性が示唆 された^{19),20)}。



図(4)-16 山城試験地フラックスタワー サイトでの月別降水量.

□ 2004 □ 2005 ■ 2009 森林群落によるオゾン吸収量は、主として群落コンダクタンスとオゾン濃度によって決まる¹¹⁾。 2009年は顕著に高いオゾン濃度を示したが(図(4)-15)、群落コンダクタンスが比較的低く抑え られていたため(図(4)-16)、オゾン濃度が比較的高く群落コンダクタンスが高かった2005年 5~7月のオゾン吸収量と同等の吸収量を示したと考えられる(図(4)-17)。このように、オゾン 吸収量には、植物の気孔反応が大きくかかわっているため、大気オゾン濃度だけでなく、森林 群落コンダクタンスの推定が重要である。



図(4)-17 山城試験地コナラ・ソヨゴ林の森林群落レベルでのオゾン吸収量. オゾン吸収量は土地面積あたりの値として示されている。

フラックスタワー測定から得られる総一次生産(GPP)は、土地面積あたりのCO₂の吸収速度を 表している。一方、図(4)-17に示したオゾン吸収量も土地面積あたりで表されている。山城試験 地の広葉樹2次林はその成立が1980年代と若く、1994年から2009年まで5年間隔で行った毎木調査 により、地上部現存量が継続的に増加していることが示されている。そこで、年次間の森林サイ ズの違いを考慮し、より生理学的視点からオゾン影響を評価するために、GPPおよびオゾン吸収量 をアロメトリー式を用いて算出した土地面積あたりの葉重量で除し、葉重量あたりのCO₂吸収速度 と葉重量あたりのオゾン吸収量に変換した。

図(4)-18に、葉重量あたりの積算オゾン吸収量と葉重量あたりの最大CO2吸収速度との関係を示 す。各月ごとに積算オゾン吸収量の違いがCO2吸収速度に与える影響を調べたところ、春から夏に かけては(4~8月)、オゾンによる影響は見られず、むしろオゾン吸収量が多いほどCO2吸収速度 が高くなる場合もあった。一方、9~11月の成長後期においては、オゾン吸収量が多いほどCO2 吸収速度が低下する傾向が見られた。このことから、サブテーマ(2)および(3)のオゾン暴露 試験によって報告されているオゾンによる老化促進が、オゾン濃度の上昇によってコナラ・ ソヨゴの森林群落においても生じていると考えられる。



図(4)-18 山城試験地コナラ・ソヨゴ林の森林群落レベルでの積算オゾン吸収量と光飽和 での最大CO2吸収速度との関係.オゾン吸収量、CO2吸収速度は葉重量あたり の値として示されている。オゾン濃度の積算は落葉広葉樹であるコナラが開葉 を開始する時期である4月1日を基点としている。

札幌試験地および安比試験地においても同様にPenman-Monteith法とBall-Woodrow-Berryの気孔 反応式を組み合わせてオゾン吸収量の推定を行い、フラックス測定によるCO2吸収速度との関係を 調べた。札幌、山城試験地の落葉広葉樹の開葉時期は、年によって数日しか違いがなかったが、 安比試験地のブナ林では4月30日~5月16日と大きく変動した。そこで、安比試験地に関しては 月別の平均値を取るのではなく、開葉日から4週間ごとに期間を区切り平均値を計算した。なお、 落葉の関係で、最後の期間は21~23週となっている。札幌試験地のシラカンバ・ミズナラ林と 安比試験地のブナ林は林齢が古く、樹冠が閉鎖しているため、安定した樹冠サイズを持つと仮定 し、土地面積あたりの積算オゾン吸収量での評価を行った。また、CO2吸収速度の評価は各期間で 求めたGPPの最大値を1とした相対値で行った。

オゾン吸収量の増加による老化促進について、安比試験地のブナ林においても山城試験地の コナラ・ソヨゴ林と同様の傾向が見られた(図(4)-19)。札幌試験地のミズナラ・シラカンバ林 で、程度は小さいが、9月に老化促進の傾向が見られた(図(4)-20)。札幌試験地のオゾン濃度が 他の2試験地と比較して低いことから(図(4)-10)、オゾンによる影響が小さかったと考えられる。

サブテーマ(4)では、フラックスタワー測定データを用いて推定した森林群落レベルでのオゾ ン吸収量とCO2吸収速度との関係から、森林群落レベルでもオゾン吸収量の増加によって生育後期 の葉の老化が促進され、森林のCO2吸収機能が阻害される可能性を示した。また、将来予測されて いるオゾン濃度の上昇に限らず、現状のオゾン濃度においても森林群落レベルでオゾン影響が 生じていることが示された。


 図(4)-19 安比試験地ブナ林の森林群落レベルでの積算オゾン吸収量と光飽和での GPP(相対値)との関係. 2001年から2006年の6年間のフラックスデータ より、開葉開始から4週間ごとに光飽和(1500 µmol m⁻² s⁻¹)でのGPPを求め、 各年ごとに最大となる値を1として相対値を求めた。



 図(4)-20 札幌試験地シラカンバ・ミズナラ林の森林群落レベルでの積算オゾン吸収 量と光飽和でのGPP(相対値)との関係. 2001年から2003年の3年間のフラ ックスデータより、各月ごとに光飽和(1500 µmol m⁻² s⁻¹)でのGPPを求め、 最大となる値を1として相対値を求めた。

5. 本研究により得られた成果

(1)科学的意義

落葉樹と常緑樹の混交林では、エネルギーと水のフラックス測定値を用いるPenman-Monteith法 では落葉期や降雨時の群落コンダクタンスの推定が困難であったが、CO₂フラックス測定値を用い てBall-Woodrow-Berryの気孔コンダクタンス推定モデルで補正を行うことで、年間を通してのオゾ ン吸収量の推定が可能となった。本研究課題で開発した手法により推定した森林群落レベルでの オゾン吸収量とフラックス測定によるCO₂吸収速度との関係から、森林群落レベルでもオゾン吸収 量の増加により葉の老化が促進され、CO₂吸収能力が低下する可能性が示唆された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

環境省の越境大気汚染・酸性雨対策検討会の生態影響分科会の下にあるオゾン等の植物影響 評価ワーキンググループ(座長:伊豆田 猛)において、本研究で得られた研究結果などを提示し、 平成26年3月に公表される越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング(平成20~24年度)最終報告書 の内容の検討過程で多大な貢献をした。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究では、フラックスタワー測定データを用いた森林群落レベルでのオゾン吸収量の推定法 を開発し、気孔を介した森林のオゾン吸収量に基づいた日本の落葉広葉樹のCO₂吸収能力に対す るオゾン影響評価手法を確立することで、日本の現状レベルのオゾンによる落葉広葉樹林のCO₂ 吸収機能の評価を可能とした。したがって、大気汚染対策と温暖化対策のコベネフィットアプロ ーチに対して科学的知見を提供することが可能になった。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1)誌上発表

<論文(査読あり)>

- 北尾光俊: 生態学会誌, 61, 83-87 (2011)「樹冠内の光環境を考慮して評価したヨーロッパ ブナ成木の光合成へのオゾン影響」
- 2) M. KITAO, S. KITAOKA, M. KOMATSU, H. UTSUGI, H. TOBITA, T. KOIKE and Y. MARUYAMA: Physiol. Plant., 146, 192-204 (2012) "Leaves of Japanese Oak (*Quercus mongolica* var. *crispula*) Mitigate Photoinhibition by Adjusting Electron Transport Capacities and Thermal Energy Dissipation along the Intra-Canopy Light Gradient"
- 3) M. KITAO, B. WINKLER, M. LÖW, A.J. NUNN, D. KUPTZ, K.-H. HÄBERLE, I.M. REITER and R. MATYSSEK: Environ. Pollut., 166, 108-115 (2012) "How Closely Does Stem Growth of Adult Beech (*Fagus sylvatica*) Relate to Net Carbon Gain under Experimentally Enhanced Ozone Stress?"

- 4) T. MIYAMA, M. OKUMURA, Y. KOMINAMI, K. YOSHIMURA, M. ATAKA and A. TANI: J For Res., 18, 4-12 (2013) "Nocturnal Isoprene Emission from Mature Trees and Diurnal Acceleration of Isoprene Oxidation Rates near *Quercus serrata* Thunb. Leaves"
- 5) M. KITAO, M. KOMATSU, Y. HOSHIKA, K. YAZAKI, K. YOSHIMURA, S. FUJII, T. MIYAMA and Y. KOMINAMI: Environ. Pollut., 184, 457-463 (2014) "Seasonal Ozone Uptake by a Warm-Temperate Mixed Deciduous and Evergreen Broadleaf Forest in Western Japan Estimated by the Penman-Monteith Approach Combined with a Photosynthesis-Dependent Stomatal Model"
- 小松雅史、吉村謙一、藤井佐織、矢崎健一、溝口康子、深山貴文、小南裕志、安田幸生、 山野井克己、北尾光俊:関東森林研究(2014,印刷中)「森林における対流圏オゾン濃度の 推定」

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 北尾光俊:林業技術,842,34-35 (2012)「報告第 123 回 日本森林学会大会から:大気 環境変化にともなう森林の生産性と分布の予測-対流圏オゾンの影響を中心に-」
- (2) 口頭発表(学会等)
- T. MIYAMA, K. YOSHIMURA, Y. KOMINAMI, M. ATAKA and M. OKUMURA : International Symposium in Agricultural Meteorology, Osaka (2012) "Characteristics of Nocturnal Isoprene Emission from Warm-Temperate *Quercus serrata* Forest"
- 2) 小松雅史、吉村謙一、矢崎健一、溝口康子、深山貴文、安田幸生、山野井克己、北尾光俊: 第 123 回日本森林学会テーマ別シンポジウム (2012)「落葉広葉樹林を対象とした林分 レベルでのオゾン吸収量の推定」
- 3) 深山貴文、奥村智憲、吉村謙一、小南裕志:第123回日本森林学会テーマ別シンポジウム (2012)「都市近郊の落葉広葉樹二次林における微量ガスの交換特性について」
- 4) 小松雅史、吉村謙一、藤井佐織、矢崎健一、溝口康子、深山貴文、小南裕志、安田幸生、 山野井克己、北尾光俊:第124回日本森林学会テーマ別シンポジウム(2013)「落葉広葉 樹林の炭素吸収量に及ぼす対流圏オゾンの影響」
- 5) 深山貴文、奥村智憲、小南裕志、吉村謙一、安宅未央子、檀浦正子:第 124 回日本森林 学会テーマ別シンポジウム(2013)「落葉広葉樹二次林周辺における植生起源揮発性有機 化合物の拡散過程について」
- 6) 小松雅史、吉村謙一、藤井佐織、矢崎健一、溝口康子、深山貴文、小南裕志、安田幸生、 山野井克己、北尾光俊:第3回関東森林学会大会(2013)「落葉広葉樹林における対流圏 オゾン濃度の推定」
- 7) M. KOMATSU, K. YOSHIMURA, S. FUJII, K. YAZAKI, Y. MIZOGUCHI, T. MIYAMA, Y. KOMINAMI, Y. YASUDA, K. YAMANOI, M. KITAO: International Symposium in Agricultural Meteorology, Sapporo (2014) "Ozone Flux Studies on Broad Leaved Forests in Japan"
- 8) 北尾光俊、小松雅史、矢崎健一、北岡 哲、深山貴文、小南裕志:第125回日本森林学会 テーマ別シンポジウム(2014)「フラックスタワー測定による森林の CO₂吸収に対する オゾンの 影響評価」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナー等の開催(主催のもの)

- 1) 大気環境変化にともなう森林の生産性と分布の予測,対流圏オゾンの影響を中心に (2012年3月28日、日本森林学会テーマ別シンポジウム、宇都宮大学、観客30名)
- 2) 大気環境変化にともなう森林の生産性と分布の予測,対流圏オゾンの影響を中心に (2013年3月26日、第124回日本森林学会テーマ別シンポジウム、岩手大学、観客30名)
- 3) 大気環境変化にともなう森林の生産性と分布の予測,対流圏オゾンの影響を中心に (2014 年 3 月 29 日、第 125 回日本森林学会大会テーマ別シンポジウム、大宮ソニック シティ、観客 45 名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

本研究プロジェクトや得られた成果を一般市民を対象とした講演会(森林講座「大気汚染 物質オゾンによる樹木の成長低下」(2011年11月11日、多摩森林科学園)で紹介した。また、 茨城県立大子清流高等学校森林科学科35名(2013年3月11日、森林総合研究所)および宇都宮 大学農学部森林科学科33名(2013年6月4日、森林総合研究所)を対象に、本プロジェクトの 成果の紹介を行った。

8. 引用文献

- 1) 大原利眞:日本生態学会誌, 61, 77-81 (2011)「なぜ、日本の山岳や島嶼でオゾン濃度が 上昇しているのか?」
- R. MATYSSEK and H. SANDERMANN, Jr: Prog. Bot., 64, 349-404 (2003) "Impact of Ozone on Trees, An Ecophysiological Perspective"
- S. SITCH, P.M. COX, W.J. COLLINS and C. HUNTINGFORD: Nature, 448, 791-794 (2007)
 "Indirect Radiative Forcing of Climate Change through Ozone Effects on the Land-Carbon Sink"
- 4) R. MATYSSEK, G. WIESER, R. CEULEMANS, H. RENNENBERG, H. PRETZSCH, K. HABERER, M. LÖW, A.J. NUNN, H. WERNER, P. WIPFLER, W. OßWALD, P. NIKOLOVA, D.E. HANKE, H. KRAIGHER, M. TAUSZ, G. BAHNWEG, M. KITAO, J. DIELER, H. SANDERMANN, K. HERBINGER, T. GREBENC, M. BLUMENRÖTHER, G. DECKMYN, T.E.E. GRAMS, C. HEERDT, M. LEUCHNER, P. FABIAN and K.-H. HÄBERLE: Environ. Pollut., 158, 2527-2532 (2010) "Enhanced Ozone Strongly Reduces Carbon Sink Strength of Adult Beech (*Fagus sylvatica*) Resume from the Free- Air Fumigation Study at Kranzberg Forest"
- 5) M.R. ASHMORE: Plant Cell Environ., 28, 949-964 (2005) "Assessing the Future Global Impacts of Ozone on Vegetation"

- 6) J.L. MONTEITH: Q. J. ROY. Meteor. Soc., 107, 1-27 (1981) "Evaporation and Surface Temperature"
- 7) J.T. BALL, I.E. WOODROW and J.A. BERRY: Progress in Photosynthesis Research, J. Biggens (Ed.), Martinus-Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 221-224 (1987) "A Model Predicting Stomatal Conductance and Its Contribution to the Control of Photosynthesis under Different Environmental Conditions"
- 8) S. FARES, G. MATTEUCCI, G. SCARASCIA MUGNOZZA, A. MORANI, C. CALFAPIETRA, E. SALVATORI, L. FUSARO, F. MANES and F. LORETO: Atmos. Environ., 67, 242-251 (2013) "Testing of Models of Stomatal Ozone Fluxes with Field Measurements in a Mixed Mediterranean Forest"
- 9) S. WANG, Y. YANG and A.P. TRISHCHENKO: Ecol. Model., 220, 2115-2118 (2009) "Assessment of Canopy Stomatal Conductance Models using Flux Measurements"
- J.W. ERISMAN, A. VAN PUL and P. WYERS: Atmos. Environ., 28, 2595-2607 (1994)
 "Parameterization of Surface Resistance for the Quantification of Atmospheric Deposition of Acidifying Pollutants and Ozone"
- G. GEROSA, S. CIESLIK and A. BALLARIN-DENTI: Atmos. Environ. 37, 777-788 (2003)
 "Micrometeorological Determination of Time-Integrated Stomatal Ozone Fluxes over Wheat: A Case Study in Northern Italy"
- 12) D. SIMPSON, A. BENEDICTOW, H. BERGE, R. BERGSTRÖM, L.D. EMBERSON, H. FAGERLI, C.R. FLECHARD, G.D. HAYMAN, M. GAUSS, J.E. JONSON, M.E. JENKIN, A. NYÍRI, C. RICHTER, V.S. SEMEENA, S. TSYRO, J.-P. TUOVINEN, Á. VALDEBENITO and P. WIND: Atmos. Chem. Phys., 12, 7825-7865 (2012) "The EMEP MSC-W Chemical Transport Model -Technical Description"
- J. ZHANG and R. TNIVIKRAMA: J. Appl. Meteorol., 38, 1674-1691 (1999) "The Role of Vertical Mixing in the Temporal Evolution of Ground Level Ozone Concentrations"
- 14) V.P. ANEJA, S.P. ARYA, Y. LI, G.C. MURRAY and T.L. MANUSZAK: J. Air Waste Manage. Assoc.,
 50, 54-64 (2000) "Climatology of Diurnal Trends and Vertical Distribution of Ozone in the Atmospheric Boundary Layer in Urban North Carolina"
- 15) 板野泰之: 生活衛生, 50, 115-122 (2006)「都市大気における光化学オキシダント問題の 新展開」
- 16) H15-17 年度環境省地球環境研究総合推進費終了研究成果報告書(2006)「C-7 東アジアにおける酸性・酸化性物質の植生影響評価とクリティカルベル構築に関する研究(河野吉久)」
- 17) K. DAIKOKU, S. HATTORI, A. DEGUCHI, Y. AOKI, M. MIYASHITA, K. MATSUMOTO, J. AKIYAMA, S. IIDA, T. TOBA, Y. FUJITA and T. OHTA: Hydrol. Proc. 22, 4083-4096 (2008) "Influence of Evapotranspiration from the Forest Floor on Evapotranspiration from the Dry Canopy"
- 18) F.M. KELLIHER, R. LEUNING, M.R. RAUPACH and E.-D. SCHULZE: Agric. For. Meteorol., 73, 1-16 (1995) "Maximum Conductances for Evaporation from Global Vegetation Types"

- 19) M. KITAO, M. LÖW, C. HEERDT, T.E.E. GRAMS, K.-H. HÄBERLE and R. MATYSSEK: Environ. Pollut., 157, 537-544 (2009) "Effects of Chronic Elevated Ozone Exposure on Gas Exchange Responses of Adult Beech Trees (*Fagus sylvatica*) as Related to the Within-Canopy Light Gradient"
- 20) F. AZUCHI, Y. KINOSE, T. MATSUMURA, T. KANOMATA, Y. UEHARA, A. KOBAYASHI,
 M. YAMAGUCHI and T. IZUTA: Environ. Pollut., 184, 481-487 (2014) "Modeling Stomatal Conductance and Ozone Uptake of *Fagus crenata* Grown under Different Nitrogen Loads"

Evaluation of Effects of Ozone on Japanese Forest Trees Based on Leaf Ozone Uptake

Principal Invest	igator: Takeshi IZUTA
Institution:	Tokyo University of Agriculture and Technology
	Fuchu, Tokyo 183-8509, JAPAN
	Tel: +81-42-367-5728 / Fax: +81-42-367-5728
	E-mail: izuta@cc.tuat.ac.jp
Cooperated by:	Central Research Institute of Electric Power Industry,
	Hokkaido University, Forestry and Forest Products Research Institute

[Abstract]

Key Words: Ozone, Transboundary air pollution, Decidurous broad-leaved tree species, Stomatal ozone uptake, Present evaluation of ozone effects on trees

The effects of O_3 on leaf CO_2 uptake capacity of four Japanese deciduous broad-leaved tree species (*Fagus crenata*, *Quercus serrata*, *Quercus mongolica* var. *crispula* and *Betula platyphylla*) were evaluated based on the stomatal O_3 uptake. Stomatal conductance models were constructed to estimate stomatal O_3 uptake of the 4 tree speices. The relationships between leaf CO_2 uptake capacity and integrated stomatal O_3 uptake were obtained from experimental studies using the seedling and adult trees. In Japanese warm-temperate broadleaf forests, CO_2 uptake capacity reduced with increasing integrated stomatal O_3 uptake specifically during the late growth season, suggesting an acceleration of leaf senescence. Average annual O_3 -induced reductions in the leaf CO_2 uptake capacity per unit leaf area of *Fagus crenata*, *Quercus serrata*, *Quercus mongolica* var. *crispula* and *Betula platyphylla* distributed in Japan were estimated to be 12%, 10%, 12% and 16%, respectively.