

# 対流圏のオゾンが 森林に与える影響について

わた なべ まこと  
渡辺 誠

東京農工大学 農学部 環境資源科学科 教授

## はじめに

光化学オキシダントの主成分であるオゾンはヒトの健康影響のみならず、植物に対しても毒性が高いガス状大気汚染物質である。また、現在進められている光化学オキシダントの環境基準の見直し作業においては、ヒトの生活環境に及ぼす影響として植物に対する影響も検討されている。ここで、ヒトの生活環境に影響を及ぼす植物とはどのようなものであろうか。すぐに思いつくのはやはりイネをはじめとした農作物であろう。また、記録的な猛暑が続く近年は、街路樹の存在も我々の生活環境に影響を及ぼす植物として理解しやすい。では、人里離れた森林はヒトの生活環境に影響を及ぼす植物だろうか。

内閣府が2023年10月に実施した「森林と生活に関する世論調査」の設問「森林に期待する働き」の回答の上位3位は「二酸化炭素を吸収することにより、地球温暖化防止に貢献する働き（1位）」、「山崩れや洪水などの災害を防止する働き（2位）」、「水資源を蓄える働き（3位）」であった。これらのいずれも国民生活の安全や安心につながる機能であり、国民の期待も高いことから、やはり森林の植物も人の生活環境に

影響を及ぼす重要な要素であるといえるだろう。国民が期待するこれらの機能は、当然ながら健全な森林において発揮されるものであり、オゾンが森林、特にその主要構成種である樹木に与える影響は、まさに我々の生活環境に関わる問題であると捉えることができる。本稿では著者が共同研究者らと取り組んできた研究を中心に樹木に対するオゾンの影響について概説するとともに、日本の森林のCO<sub>2</sub>吸収に対するオゾン影響評価における課題や今後の取組みについて述べる。

## 樹木に対するオゾンの影響

現在及び近い将来における森林が、オゾンによってどのような影響を受けるのかを明らかにすることを目的として、オゾンに対する樹木の応答に関する実験が数多く行われてきた。実験では多くの場合、**図1**に示すようなオゾン暴露実験と呼ばれる対照実験が行われる。

多くの実験結果がオゾン暴露に伴う樹木の成長低下を報告している。ただし、同じオゾン濃度の環境でも、ある樹種はオゾンによって成長低下するが、別の樹種はオゾンの影響が認められないなど、オゾン感受

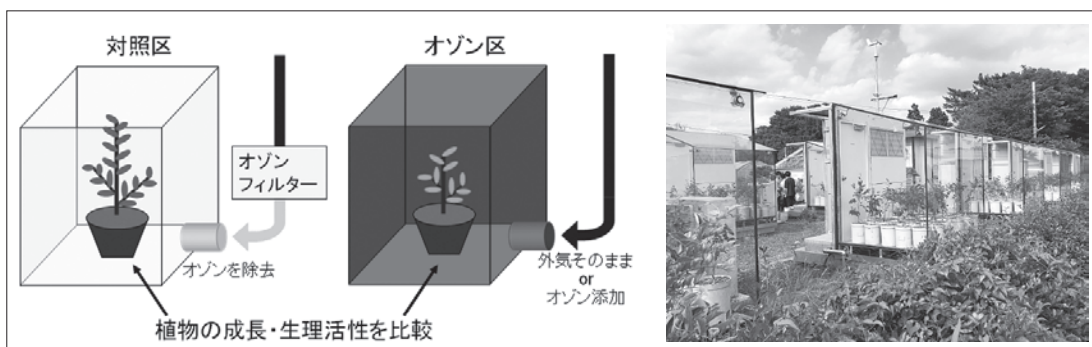


図1 オゾンの影響を評価するための対照実験の概要（左）と実際の実験設備（東京農工大学自然光型ファイトトロン）

オゾン濃度を低下させた環境で育成した植物（対照区）と外気のままあるいはオゾン濃度を高めた環境で育成した植物の成長や光合成などの生理活性を比較し、その差をオゾンの影響と見なす。

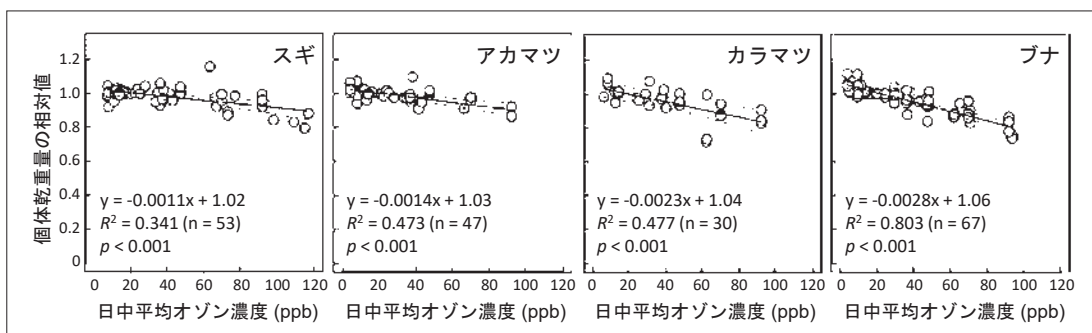


図2 スギ、アカマツ、カラマツ及びブナにおける日中（6：00～18：00）平均オゾン濃度に対する個体乾重量の応答

令和7年8月5日 大気汚染物質小委員会（第2回）資料2-1「中央環境審議会大気・騒音振動部会大気汚染物質小委員会報告（案）」<sup>1)</sup>より作成

性（オゾンによる悪影響の受けやすさ）には著しい樹種間差異がある。樹木のオゾン感受性を定量的に評価する際は、実験期間中の平均オゾン濃度、AOT40（Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppb, 40 ppbを超えたオゾンを一時間ごとに積算した値）や葉の気孔を介したオゾン吸収量などのオゾンに関わる指標と、個体乾重量などの成長に関わる指標の関係を解析する。図2は光化学オキシダントの環境基準の見直し作業で行われた解析結果の一例である。回帰直線の傾きはオゾン影響の受けやすさを示しており、この値の絶対値が大きいほどオゾン感受性が高い樹種であることを示している。常緑針葉樹のスギやアカマツに比べて落葉針葉樹のカラマツと落葉広

葉樹のブナのオゾン感受性が高いことが示されており、日本の主要な森林構成種の間でも大きなオゾン感受性の違いがある。なお、ヨーロッパや中国の研究も踏まえても常緑樹はオゾンに対する感受性が低い傾向がある。しかしながら、日本の代表的な常緑広葉樹の一つであるスタジイのオゾン感受性はブナと同程度であり、機能型（常緑樹／落葉樹、針葉樹／広葉樹といった分類）だけではオゾン感受性の樹種間差異は決定されない。

### オゾンによる成長低下の要因

オゾンはどのようにして樹木の成長低下を引き起こすのだろうか。その前段として

植物の成長の基本的な仕組みについて整理する。植物の葉では光合成によって大気中のCO<sub>2</sub>が炭水化物に変換され、その炭水化物が各植物器官に配分される。各植物器官においては、配分された炭水化物を利用して細胞の分裂や肥大・伸長が起こることで、植物は成長する。また、炭水化物は細胞の維持にも利用される。したがって、植物の成長速度はその原料となる炭水化物を生成する葉の光合成の速度に大きく依存する。植物の葉には気孔と呼ばれる大気と葉内をつなぐ開閉可能な穴があり、この穴を通じて葉は光合成に必要なCO<sub>2</sub>を葉内に取り込む。一方で、オゾンもこの気孔を通じて葉内に侵入し、その高い酸化力によって葉内の細胞に酸化ストレスを与える。そのため、植物器官のなかで最初にオゾンの影響を受けるのは葉である。このようなプロセスを踏まえ、これまでに葉における光合成に対するオゾンの影響が調査されてきた。図3は、野外の2倍の濃度のオゾン暴露したブナ苗の葉における光合成特性を示している<sup>2)</sup>。ブナの葉における純光合成速度（見かけの光合成速度）は、オゾン暴露によって低下した。この時、対照区とオゾン区におけるブナの葉の気孔におけるガスの通りやすさ（気孔コンダクタンス）に差は認められなかった。一方、葉緑体における光合成酵素であるRubiscoの活性はオ

ゾンによって低下した。この結果は、オゾンによる純光合成速度の低下は、気孔が閉じてCO<sub>2</sub>が葉内に入りにくくなったからではなく、葉緑体自身の生化学的な炭水化物生成能力の低下が原因であることを示している。このようなオゾンによる生化学的プロセスの能力の低下は、比較的多数の実験的研究で認められている。一方、オゾンによる気孔閉鎖が光合成速度の低下要因となった研究例もいくつか報告されている。このような影響メカニズムの違いは、樹種や樹齢、オゾンへの暴露期間の違いなどに起因すると考えられる。

### 森林のCO<sub>2</sub>吸収に対するオゾンの影響

これまで述べてきたように、実験的研究からオゾンは樹木の成長や光合成に悪影響を与えている可能性が高いことが示唆されている。それでは日本で観測されている濃度のオゾンは森林のCO<sub>2</sub>吸収をどれだけ低下させているのだろうか。これまでに実験的研究で得られたAOT40と樹木の成長の関係に基づき、樹木に対するオゾンリスクの広域評価も行われている。それらによると、AOT40が高い地域とオゾンリスクが高い地域は必ずしも一致しないことが指摘されている<sup>3)</sup>。その原因として、オゾン

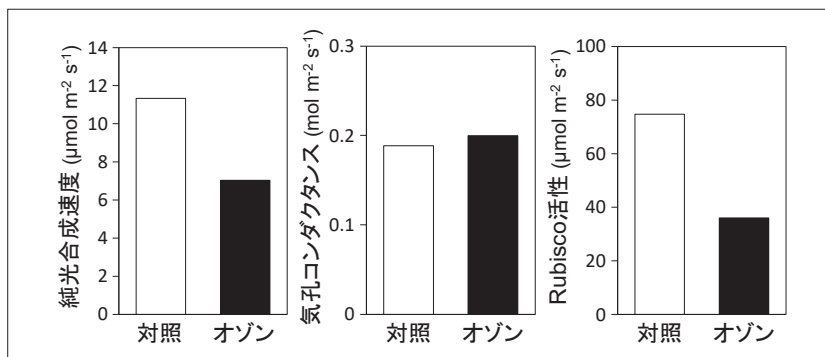


図3 ブナの葉における光合成特性に対するオゾンの影響

Watanabe et al. (2022)<sup>2)</sup> より作成

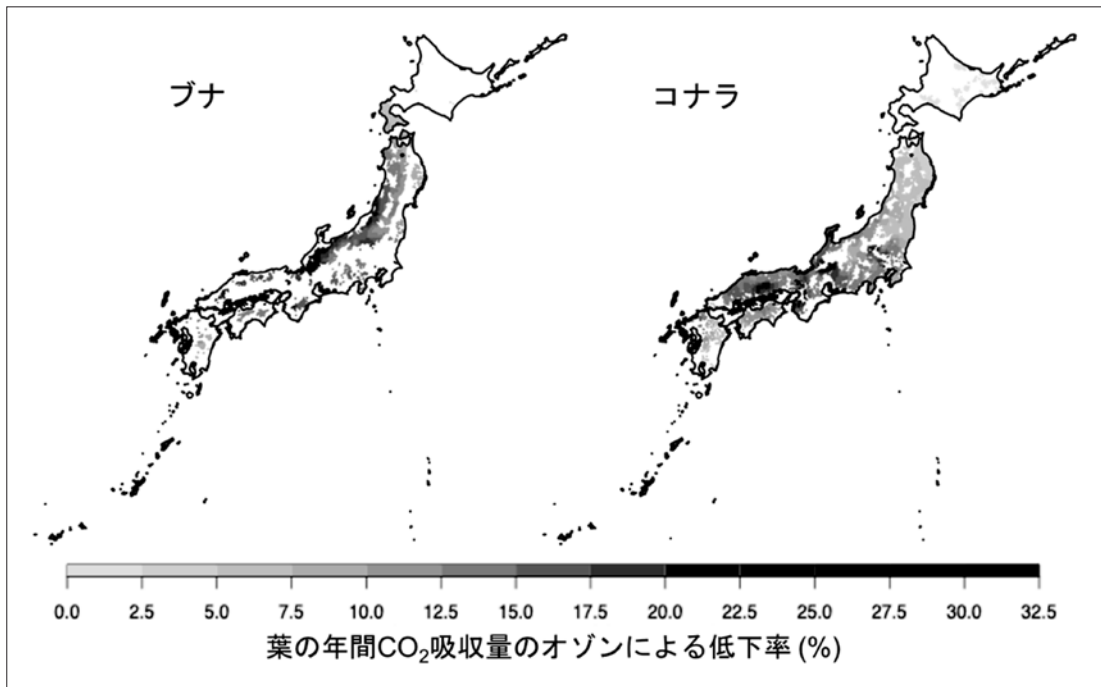


図4 ブナとコナラにおける葉の年間CO<sub>2</sub>吸収量のオゾンによる低下率 (%)  
 低下率推計の対象年は2011~2015年として、その年平均低下率を示した

Kinose et al. (2020)<sup>4)</sup>より作成

感受性の樹種間差異や生育環境の違いなどが考えられている。

近年は、葉の気孔を介したオゾン吸収量と光合成によるCO<sub>2</sub>吸収の関係に基づいた広域リスク評価も行われている。この方法は平均オゾン濃度やAOT40などを指標にした評価と比べて、植物へのオゾン影響プロセスを踏まえた高度な評価法といえる。一例として、ブナとコナラの葉のCO<sub>2</sub>吸収量に対するオゾンの影響に関する広域評価を図4に示す<sup>4)</sup>。オゾンによるCO<sub>2</sub>吸収量の低下率は地域によって著しく異なり、ブナの場合は5%以下の低下率の地域もあれば、30%以上低下する地域もあった。また、樹種によってもオゾン影響の程度は異なり、CO<sub>2</sub>吸収量の低下率の全国平均はブナで14%だったのに対して、コナラでは10.6%であった。

注意すべきこととして、ここで紹介したリスク評価は、いずれも苗木を対象とした

オゾン暴露実験で得られた結果を日本全国の森林に直接スケールアップしたものであり、大きな不確実性が含まれている点である。また、図4は、葉面積あたりの光合成に対するオゾンの影響を評価したものであり、森林としての影響評価ではない。したがって、日本の森林のCO<sub>2</sub>吸収に対するオゾンの影響は十分に理解できていないのが現状といえる。

### 森林のCO<sub>2</sub>吸収に対する オゾンの影響評価に関する課題と それに向けた取組み

森林のCO<sub>2</sub>吸収に対するオゾンの影響を考える際に、樹高20mを超えるような巨大な樹木において葉の気孔からのオゾン吸収量をどのように評価するのかという問題がある。特に林冠は上部が明るく下部が暗いという光強度の鉛直勾配があり、樹木の葉

はそれぞれの光環境に適した形質を持つ。しかしながら、従来のオゾン吸収速度の推定では林冠内における光強度や葉のガス交換特性の鉛直分布などのプロセスがほとんど考慮されておらず、推定における不確実性が高い。著者らの研究グループはその問題に対処するために、実際にクライミングロープを用いて樹木に登攀し（写真1）、葉の形質を測定するとともに、その結果に基づく樹木のオゾン吸収量の評価に取り組んでいる。それと並行して、樹液流に基づく樹木個体のオゾン吸収量の推定にも取り組んでいる。樹液流とは幹の道管を通る水の流れであり、その樹木個体のすべての葉からの蒸散と等しいとみなすことができる。この蒸散速度から気孔におけるガスの通りやすさ（林冠コンダクタンス）ひいては樹木個体や森林のオゾン吸収速度を評価することができる。さらには森林に設置された観測タワーを用いた微気象学的大気から森林へのオゾンの移動（オゾンフラックス）についての観測を行っている研究者とのコラボレーションにより、より多角的な視点で森林のオゾン吸収量の評価に取り組んでいる。

このような取組みを基盤として、2025年度より環境再生保全機構による環境研究総合推進費の研究課題として、野外観測、実験的研究及びモデル研究の各分野の研究者が密接に協力し合い、日本全体の森林の光合成によるCO<sub>2</sub>吸収に対するオゾンの影響を定量的に評価することを目的とした3年間のプロジェクトが始まった（図5）。このプロジェクトでは、①森林のオゾン吸収推定モデル構築に必要となる樹木パラメーターならびにモデルによる計算結果の検証に必要なグラウンドトゥールズデータの取得、②精緻な植物生理実験に基づいた気象要素に対する気孔コンダクタンス応答のモデル化と過去研究の再解析によるオゾン吸収量と光合成能力の低下率の堅牢な定量的



写真1 樹上作業の様子

関係の構築を行う。そして③新たに「蒸散・光合成・オゾン沈着結合モデル」を開発し、①の樹木パラメーターや②のオゾン吸収量と光合成能力の低下率の関係を組み入れた「気象・化学・陸面統合モデル」を構築する。従来の森林のCO<sub>2</sub>吸収に対するオゾンの影響を評価するために必要となる主要なプロセスを適切に組み入れたフレームワークが完成することにより、オゾン濃度の低減が森林のCO<sub>2</sub>吸収にどれだけ貢献するのかについて定量的に示すことが可能になり、わが国のオキシダント濃度低減対策の有効性を検討するうえで極めて重要な科学的知見を提供することが期待される。

#### 参考文献

- 1) 環境省 中央環境審議会大気・騒音振動部会大気汚染物質小委員（2025）令和7年8月5日 大気汚染物質小委員会（第2回）資料2-1「中央環境審議会大気・騒音振動部会大気汚染物質小委員会報告（案）」
- 2) Watanabe, M., Li, J., Matsumoto, M., Aoki, T., Ariura, R., Fuse, T., Zhang, Y., Kinose, Y., Yamaguchi, M. and Izuta, T. (2022) Growth and

# 詳細な植物プロセスを組み入れた統合モデルによる 森林のCO<sub>2</sub>吸収に対するオゾン影響の広域評価

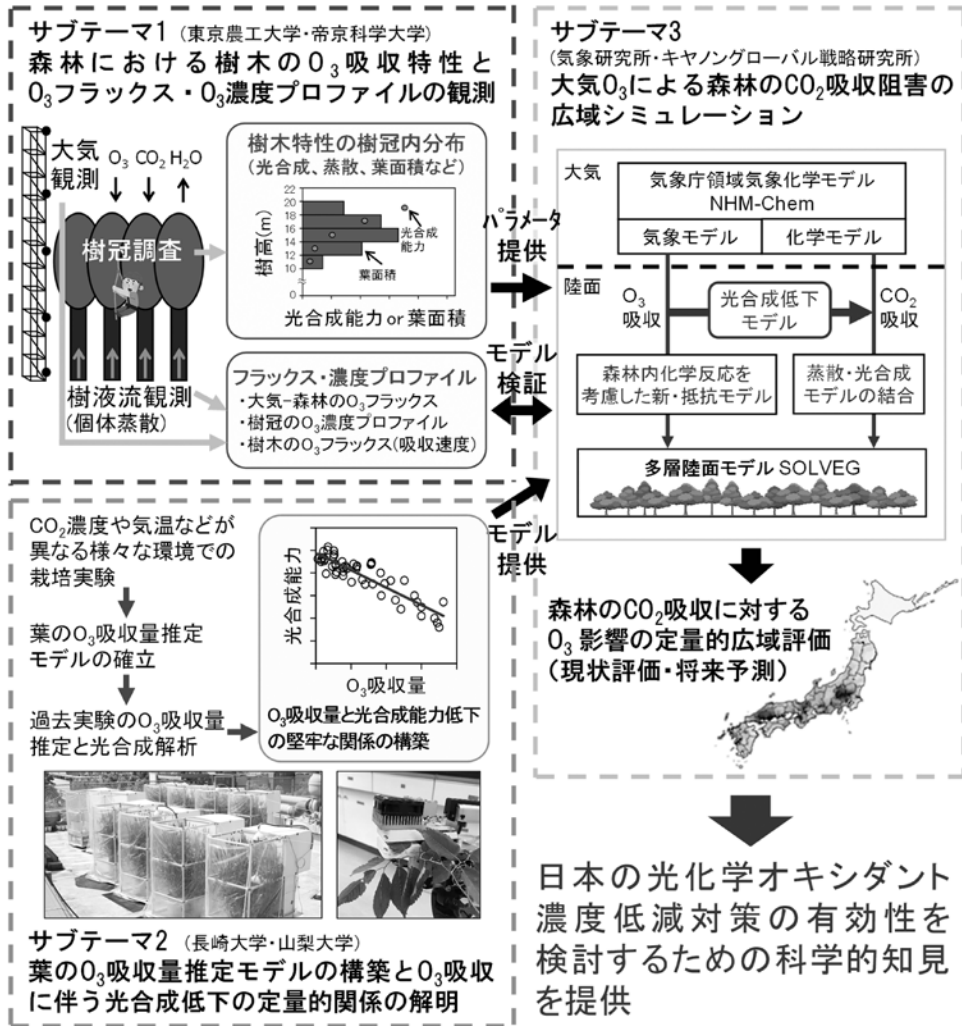


図5 プロジェクトの概要

photosynthetic responses to ozone of Siebold's beech seedlings grown under elevated CO<sub>2</sub> and soil nitrogen supply. Environmental Pollution 304: 119233.

- 3) Watanabe, M., Yamaguchi, M., Matsumura, H., Kohno, Y., Koike, T. and Izuta, T. (2011) A case study of risk assessment of ozone impact on forest tree species in Japan. Asian Journal of Atmospheric Environment 5: 205-215.

- 4) Kinose, Y., Yamaguchi, M., Matsumura, H. and Izuta T. (2020) Impact assessment of ozone absorbed through stomata on photosynthetic carbon dioxide uptake by Japanese deciduous forest trees: Implications for ozone mitigation policies. Forests 11: 137.