

## 2-1 植物影響評価のための オゾン吸収モデリング

イタリア国立研究機関 環境保護研究所 星加 康智  
東京大学大学院農学生命科学研究科 大政 謙次

### はじめに

産業革命以後、日本を含めた各国の経済発展は、石炭や石油といった化石燃料の大量消費により支えられてきた。化石燃料の燃焼は、硫黄酸化物や窒素酸化物のような汚染物質の大気中への放出につながる。とくに、人間活動によって放出される窒素酸化物や炭化水素は、対流圏(地表付近から高度10km付近まで)において、太陽からの紫外線を受けて、光化学反応により、オゾンが生成される。対流圏のオゾンは、光化学スモッグの主因として知られ、植物への被害や健康の悪化をもたらす。一般的に、成層圏(高度11~50km)では、オゾンはオゾン層を構成し、生物にとって有害な太陽からの紫外線を吸収することで知られるが、これが地表付近において生成されると、その強力な酸化力により生物に悪影響を及ぼす大気汚染物質となるのである<sup>1)</sup>。従来は、オゾンを含めた大気汚染の問題は、大都市における地域的な問題であった。しかし、最近では、国境や大陸を越えて大気汚染物質が運ばれる越境大気汚染とよばれる現象が見られるようになり、欧米だけでなく、アジア地域を含めた北半球全体における問題となっている。現在、アジア地域では、オゾン濃度の月平均値は50~70ppb(part per billion, 10億分の1)にも及び、ヨーロッパのそれと同等か、それ以上である。したがって、アジア地域では、オゾン濃度の上昇による植物への影響の評価が必要とされている<sup>2,4)</sup>。

植物にとって、オゾンは非生物学的ストレスである酸化ストレスと捉えられる<sup>5)</sup>。オゾンは植物に吸収されると同時に活性酸素種を生成し、光合成などの生理機能

の低下を引き起こす。よって、オゾンによって引き起こされる障害をオゾン吸収量と関連づけて整理することは、大気環境変化への植物の応答を調べる上で有効な手段となる。

本稿では、まず、植物体内へオゾンがどのように取り込まれるかについて概説し、東アジア地域において落葉広葉樹林を対象としてオゾン吸収量を推定した例を紹介する。続いて、現在取り組んでいるオゾン吸収モデリングの改良に向けた研究についても紹介する。

### オゾン吸収量の推定

オゾンは、いかにして植物に吸収されるのか?

植物の葉(おもに葉の裏側)にはたくさんの「気孔」とよばれる穴がある。植物は、この気孔を開閉しながら、二酸化炭素を取り入れている(図1)。晴れた日には気孔を大きく開き、光合成に必要な二酸化炭素をたくさん取り込む。また、気孔を開くことで、葉内からの水の蒸発(蒸散)が行われる。蒸散により、強い日射が当たっても、葉の温度が上昇しにくくなるのである。オゾンの取り込みは、この気孔を介して行われる。そのため、たとえオゾン濃度が高くても、気孔が閉じていればオゾンの吸収が少なく、被害は小さいと考えられる。一方で、気孔が開いているときには、オゾンを取り込み、植物にさまざまな被害を生じさせる。

葉のオゾン吸収量を測定するためには、高価な測定機器が必要であり、さまざまな場所で一度に測定することは難しい。そこで、従来、気孔の開き具合に基づいて、オゾン吸収量を計算して求める方法がとられてきた<sup>6,7)</sup>。



葉の気孔(多くは葉の裏面(背軸面)に存在)

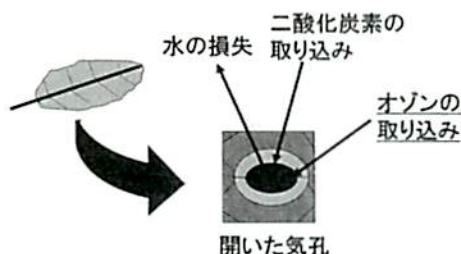


図1 気孔を介したオゾン吸収の概念図

オゾン吸収量は、フィックの法則<sup>9)</sup>により、(大気と葉内とのオゾン濃度の差) × (気孔コンダクタンス)の簡便式で概算することができる。葉内のオゾン濃度は、オゾンが純粋な水にはあまり溶解しないため、オゾンの細胞間隙における抗酸化物質による還元や細胞内での生理的な代謝の速度によって決まる。葉内に吸収されたオゾンは、葉内の組織で、すみやかに分解・代謝されるため、葉内のオゾン濃度(この場合、気孔底界面のオゾン濃度)は、0ppbと仮定できる。すなわち、大気と葉内とのオゾン濃度の差は、大気中のオゾン濃度で置き換えることが可能となる。一方、気孔コンダクタンスとは、気孔の開き具合の指標である。屋外において、気孔コンダクタンスは、光の強さ、温度、湿度、土壌の湿り具合など、環境のさまざまな要因に左右される。たとえば、明るい日中には光合成のために気孔を開き、暗い夜間には気孔は閉じる。また、夏の午後に湿度が下がると、気孔を閉じ、水分の損失を防ごうとするのである。こうした知見をまとめ、周囲の環境に対する気孔の開閉の反応をあらゆる経験的な計算式が作られている。このように、大気中のオゾン濃度の測定とともに、気孔の開き具合の指標である気孔コンダクタンスを計算式により見積もることで、オゾン吸収量を推定することができるのである。

ヨーロッパでは、この計算式を用いてオゾン吸収量を推定し、ヨーロッパにおける作物の収量や樹木の乾物成長量とオゾン吸収量の関係を示し、オゾンの植物への危険レベルを予測している。英国気象局ハドレーセンターのSitch博士らは、この結果に基づいて全球レベルにおけるオゾンの光合成生産への影響を予測した<sup>9)</sup>。この報告によれば、21世紀末において、20世紀初頭と比べると、地域によっては、オゾンによって最大30%

の光合成生産の低下が生じると予測している。しかし、ヨーロッパの結果を、アジアなどの環境が大きく異なる地域にそのまま適用することには疑問が生じる。これは、オゾンの吸収にかかわる気孔の開閉の反応に関して、対象地域の気象・土壌条件や水分条件によって異なると考えられるとともに、吸収されたオゾンの解毒能力が植物の種によっても変化することが知られており、研究対象地域での実験が必要不可欠となっているからである。

そこで、アジア地域においても、気孔を介したオゾン吸収量に基づいて、広域におけるオゾンの植物への影響を評価することを目的とする研究が開始された<sup>2,3)</sup>。筆者らは、この試みにおける1つのステップとして、東アジア地域(30°N 100°E ~ 45°N 150°E)を対象にして、当該地域で報告されているブナ、ナラおよびカバノキの気孔コンダクタンスの計算式を基に、落葉広葉樹林における葉のオゾン吸収量の推定を行った<sup>10)</sup>。そして、従来用いられてきた簡便な指標であるAOT40値(Accumulative Ozone exposure over a Threshold of 40 ppb、日中40ppb以上のオゾン濃度の積算値)の空間分布と比較した。図2は2000年におけるオゾン濃度データを基に推定したAOT40値の分布とオゾン吸収量の推定値の分布を比較したものである。両者を比較してみ

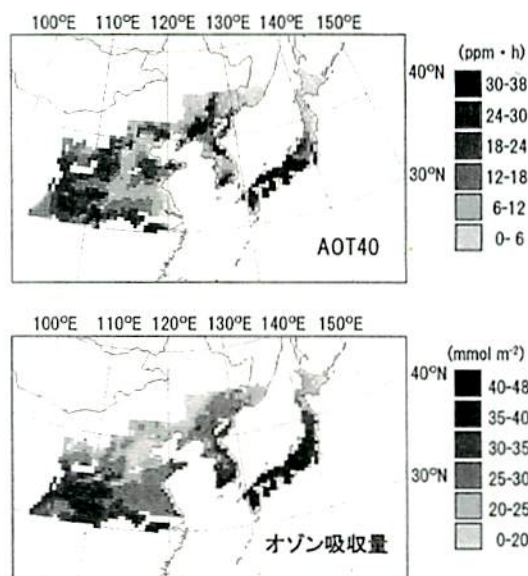


図2 AOT40値の分布と、落葉広葉樹林における積算オゾン吸収量の推定値の分布との比較(文献10改変)

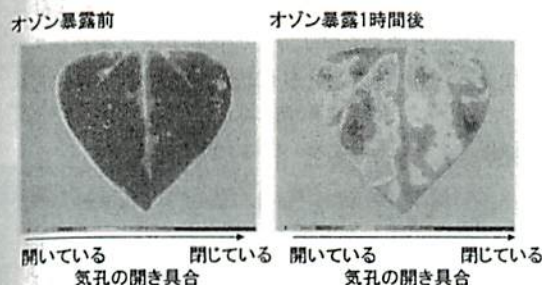


図3 オゾンによる気孔反応への影響の視覚的評価  
(文献5 改変)

ると、オゾン吸収量が相対的に高い値を示した地域は、AOT40値も高い値(>20ppm・h)を示した。一方、たとえば、中国東部(35°N 115°~117°E)では、AOT40値が高いが、オゾン吸収量がほかの地域と比べ、顕著に低く推定された。これは、中国東部が、2000年の夏季に旱魃を受けたため、気孔が閉鎖していたからであると考えられる。これらの結果は、オゾン吸収量の高い値を示した地域は、AOT40値も高い値を示すことが多かったが、その逆は必ずしも成り立たなかったことを示している。このように、東アジア地域のオゾン吸収量の推定値には、オゾン濃度だけではなく、地域的な気候と、それに伴う気孔コンダクタンスの環境要素への応答も影響を与えることがわかる。気孔を介して吸収されたオゾンの量に基づくことにより、AOT40値よりも、より現実的にも高精度なオゾンのリスク評価につながると考えられている。

## オゾン吸収量推定モデルの改良に向けて —オゾンによる気孔反応への影響の考慮—

前節で述べたように、計算式を用いることでオゾン吸収量の見積もりが可能となった。しかし、従来のオゾン吸収量の計算式には問題点が指摘されている。それは、オゾンは、それ自体、気孔の開き具合に影響を及ぼすが、その影響が計算式に考慮されていないことである。

オゾンによって引き起こされる気孔の開き具合への影響に関して、大抵は、葉の温度画像を用いて、葉面における熱収支とオゾン吸収モデルを計算し、視覚的に評価している<sup>5)</sup>。葉の温度画像は、気温や湿度、日射、風速などの熱環境が一定(均一)の条件下であれば、

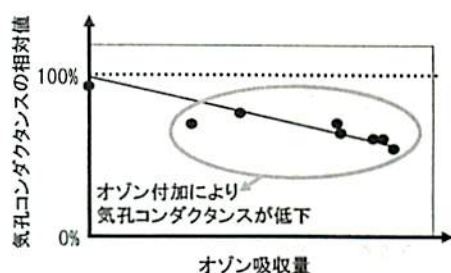


図4 オゾン吸収量の積算値と気孔コンダクタンスの関係  
(対象植物: ブナ) (文献12 改変)

蒸散速度の指標として利用できる。気孔が開いていれば、蒸散が多くなり、気化熱により葉温が下がる。一方で、気孔が閉じている場合、蒸散が抑えられるため、葉温が上昇する。したがって、葉温の高いところが、気孔が閉鎖している場所と推定できる。実験結果から、大抵<sup>5)</sup>は、オゾンに対する気孔反応が葉脈周辺とそれ以外で大きく異なることを報告した(図3: 気孔開度の不均一性とよばれる)。このように、葉の各部位によりオゾンに対する気孔反応が異なるが、全体的に見てみると、オゾンは気孔の閉鎖を促すことが明らかとなった<sup>11)</sup>。

そこで筆者らは、従来の計算式に、オゾンによる気孔コンダクタンスの低下を反映させることとした<sup>12)</sup>。本稿では、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター札幌研究林実験苗畑内に設置したFree-Air オゾン付加施設<sup>13)</sup>で行った研究を紹介する。

この施設は、日本の森林構成種を対象として、屋外において実験的にオゾンを付加し、植物の応答を観察できる大規模な実験施設である。この施設を用いて、まず、日当たりのよいブナ葉を対象に、気孔の開き具合の指標である気孔コンダクタンスの測定を実施した。測定結果から、オゾン付加により気孔コンダクタンスが低い値を示したことが明らかとなった(図4)。筆者らは、この測定結果を基に、オゾン吸収量の計算式の改良を試みることにした。具体的には、従来の計算式に、実験で得られたオゾンによる気孔の閉鎖の割合を反映させたのである。この改良した計算式を用いて、ブナ葉を対象として2011年の実験期間におけるオゾン吸収量の見積もりを行った結果が図5である。オゾン吸収量の推定の際に、改良前の計算式と、オゾンによる気孔の閉鎖を考慮に入れた計算式とを比較したところ、オ



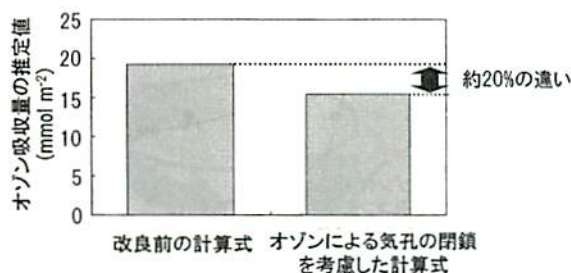


図5 オゾンによる気孔の閉鎖を計算式に考慮した際に生じるオゾン吸収量の推定値の違い(対象植物:ブナ)

オゾン吸収量の推定値に約20%の違いが生じることが明らかとなった。確認されたオゾン吸収量の差は、気孔の閉鎖によるオゾンの取り込み量の制限と解釈できる。気孔の閉鎖によりオゾンの取り込み量が制限されることで、オゾンのダメージが軽減されていると考えられる。野外調査においても、オゾン濃度の高い地域で、気孔コンダクタンスが低い傾向が確認されており<sup>14)</sup>、今後、さらなる野外調査を含めた検討が必要であろう。

## 結論および今後の課題

オゾンの植物への影響は、オゾンの吸収がきっかけとなり生じる。オゾンによって引き起こされる葉の光合成速度の低下から成長の低下に至るまでのそれぞれの現象をオゾン吸収量と関連付けて整理することは有効な手段である。筆者らの取り組みは、光合成や蒸散に関連した葉面でのガス拡散現象に基づいたオゾンの取り込み量の評価によって、大気汚染物質であるオゾンの植物への影響評価における手法の発展に貢献するものである。

また、筆者らは、気孔の開閉の反応に関する計算式に、オゾンによって引き起こされる気孔の閉鎖を考慮することに成功した。ただし、オゾンによる気孔の閉鎖の度合いは、樹種ごとに異なることが知られている。よって、オゾンによる気孔の閉鎖のプロセスを考慮した計算式の作成および検証が今後必要となろう。また、長期のオゾンは、気孔の閉鎖を引き起こすとともに、光強度や湿度などの環境要素の変化に対する気孔の開閉の反応を鈍くすることも知られている<sup>15)</sup>。気孔の開閉を表す計算式は、気候変動の予測を行う上でも重要な役割を担っている。したがって、変動環境下における

気孔の開閉を明らかにし、得られた新たな知見を計算式に反映させることによって、気孔コンダクタンスの再現度を充実させることが大切である。

## 謝辞

本稿で紹介した研究を行うに当たり、北海道大学大学院農学研究院・小池孝良教授、東京農工大学大学院農学研究院・伊豆田猛教授から御指導を賜った。また、北海道大学大学院農学研究院(現・東京農工大学大学院農学研究院)・渡辺誠博士、東京農工大学大学院農学研究院(現・長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科)・山口真弘博士、日本原子力研究開発機構・堅田元喜博士には活発な議論と貴重なご意見を賜った。本報告は、環境省地球環境研究推進費(B-1105)、科学研究費補助金基盤研究(B-23380078)および若手研究(B-24710027、B-24780239)の一部支援を得た。ここに記して感謝する。

## 【参考文献】

- 1) Omasa K, et al.: Air Pollution and Plant Biotechnology, Springer-Verlag, Tokyo, pp.455, 2002.
- 2) 伊豆田猛: 大気環境学会誌, 47: A12, 2012.
- 3) 小林和彦: 資源環境対策, 43(7): 49-53, 2007.
- 4) Omasa K, et al.: Plant Responses to Air Pollution and Global Change, Springer-Verlag, Tokyo, pp.300, 2005.
- 5) Omasa K, et al.: Environ. Control Biol., 19: 85-92, 1981.
- 6) Cieslik S, et al.: Plant Biol., 11: 24-34, 2009.
- 7) 大政謙次ほか: 農業気象, 35: 77-83, 1979.
- 8) Fick A: Ann. Der. Physik, 94: 59-86, 1855.
- 9) Sitch S, et al.: Nature, 448: 791-795, 2007.
- 10) Hoshika Y, et al.: Ann. For. Sci., 68: 607-616, 2011.
- 11) 大政謙次: 農業気象, 45: 251-257, 1990.
- 12) Hoshika Y, et al.: Wat. Air Soil Pollut., 223: 3893-3901, 2012c.
- 13) 小池孝良ほか: 北海道の農業気象, 63: 17-23, 2011.
- 14) Hoshika Y, et al.: Atmos. Environ., 55: 271-278, 2012a.
- 15) Hoshika Y, et al.: Environ. Pollut., 166: 152-156, 2012b.