

# 農作物に対するオゾンの影響

## Effects of ozone on crops

山口真弘<sup>1\*</sup>, 黄瀬佳之<sup>2</sup>, 米倉哲志<sup>3</sup>, 伊豆田 猛<sup>4</sup>

光化学オキシダントの主成分であるオゾンは、植物に対して毒性が高いガス状大気汚染物質である。オゾンは葉の気孔を介して葉内に吸収され、植物に害作用を引き起こす。葉内へのオゾンの吸収は、大気圏におけるプロセスでは沈着・除去に相当するが、植物側からは影響発現の発端となるプロセスである。農作物に対するオゾンの影響として、葉の可視障害の発現、光合成能力の低下、成長や収量の低下などがある。これらはいずれも現状レベルのオゾン濃度によって引き起こされていることがこれまでの数多くの研究によって示されている。本稿では、そのような農作物に対するオゾンの影響とそのリスク評価を概説する。

### 1. はじめに

人間の生活環境において、植物は緑地や並木などを構成して快適な生活環境を維持するばかりではなく、人間社会の生活基盤である食糧生産の重要な担い手となっている[戸塚, 1989]。しかしながら、産業革命以降にもたらされた大気汚染によって様々な植物被害が生じていることは、これまでの数多くの研究によって明らかにされている[田崎, 1978; 小林, 1999; 野内, 2001]。数ある大気汚染物質の中でも光化学オキシダントは、その環境基準(1時間値で 60 ppb)がほとんど達成されておらず、未だ問題視されている大気汚染物質である。光化学オキシダントの主成分はオゾンであり、日本における平均オゾン濃度は近年、上昇傾向にある[Akimoto *et al.*, 2015]。このような現状の濃度レベルのオゾンが様々な農作物の収量の低下を引き起こすことが、世界中の研究者によって報告されている[e.g., Feng & Kobayashi, 2009; Ainsworth, 2017; Mills *et al.*, 2018]。そして後述するように、日本の様々な地域においてすでに、野外で栽培されている農作物の葉に、オゾンによる可視障害が発現している。そのため、日本の農作物に対するオゾンのリス

ク評価に関する研究や植物保護のための光化学オキシダントの環境基準の設定に向けた研究や議論が現在も活発になされている[米倉, 2016; 伊豆田, 2020; 環境省, 2022]。本稿では、農作物の成長、収量および光合成などの生理機能に対するオゾンの影響やそのリスク評価を日本における研究事例に基づいて概説する。

### 2. オゾンの作用メカニズム

大気中のオゾンは、葉の気孔を介して葉内に吸収され、光合成などの生理機能に害作用を及ぼす(図1)[野内, 2001]。気孔とは、葉の表皮に存在する小さ

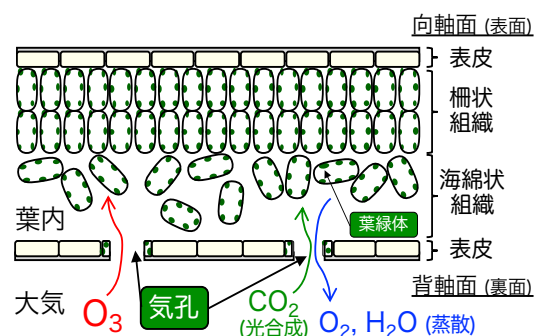


図 1 大気から気孔を介した葉内へのオゾン(O<sub>3</sub>)の吸収経路を示した葉の断面の模式図。

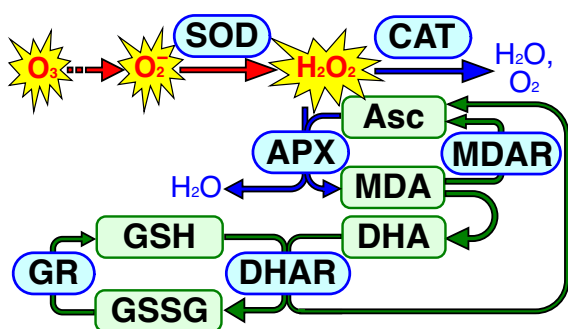


図 2 葉内の活性酸素消去系。緑枠で囲われた抗酸化物質や青枠で囲われた酵素の働きによって活性酸素種が消去される。SOD: スーパーオキシドジスムターゼ, CAT: カタラーゼ, APX: アスコルビン酸ペルオキシダーゼ, MDAR: モノデヒドロアスコルビン酸レダクターゼ, DHAR: デヒドロアスコルビン酸レダクターゼ, GR: グルタチオンレダクターゼ, Asc: 還元型アスコルビン酸, MDA: モノデヒドロアスコルビン酸, DHA: デヒドロアスコルビン酸, GSH: 還元型グルタチオン, GSSG: 酸化型グルタチオン。

な穴のことであり、大気と葉の間で CO<sub>2</sub> などのガスの交換が行われる場である。葉内に吸収されたオゾンは細胞壁などの細胞外空間(アポプラスト)の水溶液に溶けるが、オゾンの分解によって O<sub>2</sub><sup>-</sup> や H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> のような活性酸素種(ROS: Reactive Oxygen Species)を生ずる[Heath, 1980]。一方、アポプラストにはアスコルビン酸(ビタミン C)などの抗酸化物質が存在し、細胞内にはさらに抗酸化物質の酸化(ROS 消去)反応やその再利用のための還元反応などを触媒する酵素も存在しており(活性酸素消去系)、それらの働きによって葉内に吸収されたオゾンや生じた ROS の一部は消去(解毒)される(図 2)。しかしながら、気孔を介したオゾンの吸収速度や ROS の生成速度がその消去能力を上回ると、光合成色素やタンパク質の分解、膜脂質の過酸化による分解といった酸化ストレスを引き起こし、後述するような害作用が発現する[野内, 2001]。

### 3. 葉の可視障害

農作物が比較的高濃度のオゾンに暴露されると、葉に可視障害が発現することがある(写真 1)[野内, 2001; 米倉, 2016]。その症状は農作物の種類によっ

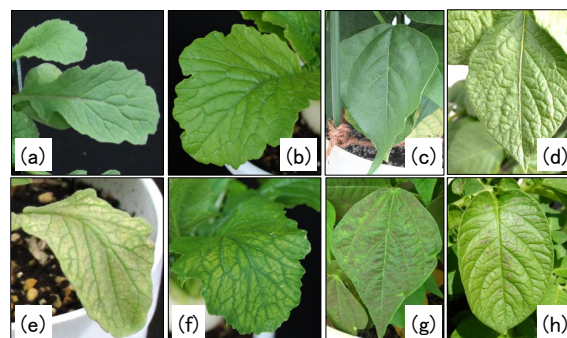


写真 1 ハツカダイコン(a, e), コカブ(b, f), インゲンマメ(c, g)およびジャガイモ(d, h)の葉の健全葉(a-d)とオゾンによる可視障害が発現した葉(e-h)。ハツカダイコンとコカブでは漂白斑(e, f), インゲンマメとジャガイモでは褐色斑点が生じる(g, h)。e, g, h: 長崎県長崎市(長崎大学)における野外濃度のオゾンで発現, f: 山梨県甲府市(山梨大学)における野外濃度の 2 倍の濃度のオゾンで発現。いずれも 2015 年以降に観察された。

て異なり、例えばハツカダイコンやコカブなどでは葉脈間に無数の漂白された微細な斑点や比較的大きな漂白斑を生ずる。これは、細胞が崩壊した部分に空気が充満したために生じると考えられている。一方、イネ科やマメ科などの農作物の葉では、オゾンによって褐色または赤褐色の斑点が生ずる。これは、壊死した細胞に色素が沈着して生じると考えられている。一般に、オゾンによる葉の可視障害は成熟葉や比較的古い葉に生じやすく、主に葉の向軸面(表面)に発現する。葉に可視障害が発現するオゾン暴露濃度は作物種によって異なり、ハツカダイコンやインゲンマメなどのオゾン感受性が高い(オゾンに弱い)農作物では、日最高オゾン濃度が 60~90 ppb に達すると葉に可視障害が発現する。このような可視障害の発現は、葉物野菜の商品価値を低下させるため、経済的損失が大きい。なお、可視障害の発現に対するオゾン感受性は作物種によって異なるだけでなく、品種間でも異なることが知られている。さらに、葉の可視障害の発現程度に基づいたオゾン感受性と後述する成長や収量の低下程度に基づいたオゾン感受性は異なることも知られている[Izuta *et al.*, 1999; 野内, 2001; Sawada & Kohno, 2009; 米倉, 2016]。

## 4. 光合成, 成長および収量に対する影響

### 4.1 光合成に対する影響

葉内に吸収されたオゾンは細胞内の葉緑体における光合成機能を阻害する[野内, 2001]。葉緑体では, 光合成色素に吸収された光エネルギーが化学エネルギーに変換され, それを利用して気孔から取り込まれた CO<sub>2</sub> が固定されて有機物(光合成産物)が作り出される。オゾンは, 光合成色素であるクロロフィルや CO<sub>2</sub> 固定反応を触媒する酵素である Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (Rubisco) の濃度を低下させ, 純光合成速度(光合成による CO<sub>2</sub> 吸収速度から呼吸による CO<sub>2</sub> 放出速度を差し引いた正味の CO<sub>2</sub> 吸収速度)を低下させる。

日本で栽培されている農作物の純光合成速度に対するオゾンの影響に関する研究は限られているが, イネ, ハツカダイコン, コマツナ, コムギなどでオゾンによる純光合成速度の低下が報告されている。イネ(品種:コシヒカリ)では, 活性炭フィルターによってオゾンを除去した浄化空気を暴露した場合と比較して, 60 ppb または 100 ppb のオゾンを暴露した場合は止葉(イネ科作物の茎の最上位に発生する葉)のクロロフィル濃度や Rubisco 濃度の低下が認められ, それらによって純光合成速度が低下したことが報告されている[Yamaguchi *et al.*, 2008, 2015]。この時, 気孔におけるガスの通りやすさの指標である気孔コンダクタンス(気孔抵抗の逆数,  $g_s$ )の低下も認められており, 気孔開度の低下もオゾンによる純光合成速度の低下の一因であると考えられている。

純光合成速度におけるオゾン感受性においても品種間差が報告されており, コムギではシロガネコムギのオゾン感受性は農林 61 号に比べて高いことが報告されている(図 3)[Inada *et al.*, 2012]。このようなオゾン感受性の品種間差はハツカダイコンやコマツナにおいても報告されており, その原因として葉内におけるオゾンや ROS の消去能力の品種間差が指摘されている[Izuta *et al.*, 1994, 1999]。

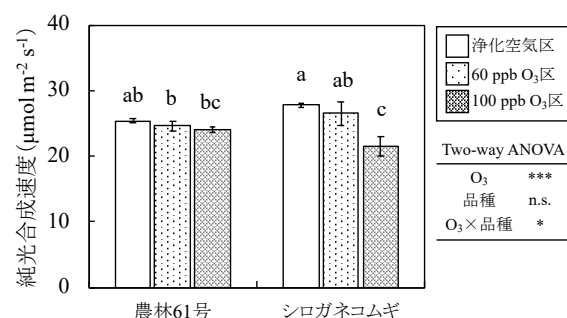


図 3 コムギ 2 品種(農林 61 号, シロガネコムギ)の止葉の純光合成速度に対するオゾンの影響。10-17 時に 60 ppb もしくは 100 ppb のオゾンを暴露した。浄化空気区で同時刻(10-17 時)の平均オゾン濃度は約 13 ppb。オゾン暴露開始後 31~41 日目の測定値。Two-way ANOVA: \*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.001$ , n.s. = not significant。異なるアルファベットのついた値間には有意な差がある (Tukey's HSD test,  $p < 0.05$ )。Inada *et al.*[2012]より許可を得て作図。

### 4.2 成長や収量に対する影響

植物は光合成産物の一部を呼吸によって消費するが, その残余分を使って新しく植物体を形成して成長する[野本・横井, 1981]。そのため, オゾンによる純光合成速度の低下は農作物の成長や収量の低下につながる。日本の研究事例では, オゾンによる成長や収量の低下はイネ, キュウリ, コマツナ, ハツカダイコンなどで報告されている[e.g., Kobayashi *et al.*, 1995; Izuta *et al.*, 1995; Yonekura *et al.*, 2005a]。イネ(品種:コシヒカリ)では, 浄化空気を暴露した場合と比較して, 野外濃度の 1.0 倍または 1.5 倍の濃度のオゾン暴露によって収量の低下が認められている(図 4)[Yamaguchi *et al.*, 2014]。海外の研究事例では, コムギ, ダイズ, ジャガイモ, イネ, トウモロコシなどの数多くの農作物でオゾンによる収量低下が報告されている[e.g., 小林, 1999; CLRTAP, 2010; Feng *et al.*, 2022; Gupta *et al.*, 2022]。

農作物の収量におけるオゾン感受性においても品種間差や品種間差が報告されており, 日本で栽培されている農作物で比較すると, ダイズ, ラッカセイ, ソバのオゾン感受性は比較的高いが, トウモロコシやオオムギのそれは低い[野内ら, 1988]。欧米の研究例では, 春コムギ, ダイズ, ワタのオゾン感受性は比較的高く, ジャガイモは中程度, イネやトウモロコシは比較

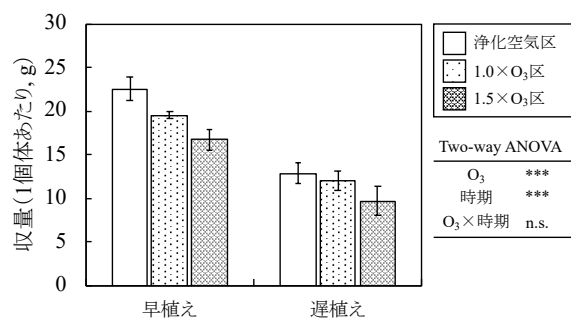


図 4 田植え時期の異なるイネ(品種:コシヒカリ)の収量(稔実モミの風乾重)に対するオゾンの影響。オゾン濃度を野外濃度の 1.0 倍(1.0×O<sub>3</sub>)もしくは 1.5 倍(1.5×O<sub>3</sub>)に比例追随制御してオゾンを暴露した。10-17 時における平均オゾン濃度は 9-10 ppb(浄化空気区), 27-29 ppb(1.0×O<sub>3</sub>)および 40-43 ppb(1.5×O<sub>3</sub>)。Two-way ANOVA: \*\*\*  $p < 0.001$ , n.s. = not significant。Yamaguchi *et al.*[2014]より許可を得て作図。

的低いことが報告されている[e.g., 小林, 1999; CLRTAP, 2010]。オゾン感受性の品種間差はコマツナ, ハツカダイコン, イネで報告されており, イネでは海外の品種と比較すると日本の品種はオゾン感受性が低いことが報告されている[Izuta *et al.*, 1994, 1999; Yonekura *et al.*, 2005b]。このような収量におけるオゾン感受性の作物種間差や品種間差をもたらす要因として, 気孔を介した葉のオゾン吸収量の違いや, 葉内におけるオゾンや ROS の消去能力の違いが考えられている[e.g., Emberson *et al.*, 2018]。

植物器官ごとの成長に対するオゾンの影響に着目すると, 葉や茎などに比べて根における成長低下が著しいことはオゾン障害の特徴である[e.g., Nouchi *et al.*, 1991; 中島ら, 2018; Yamaguchi *et al.*, 2018]。この理由として, 光合成を行う器官である葉に光合成産物を優先的に分配することによって葉の成長を維持し, オゾンによる個体の成長低下を防いでいると考えられている[野内, 2001]。根の機能のひとつに個体の支持があり, イネでは強風などで倒れる倒伏の被害を防ぐ役割も持つ。そのため, オゾンによる根の成長の特異的な低下がイネの倒伏被害のリスクを高める可能性も指摘されている[Yamaguchi *et al.*, 2018]。また, 収量だけでなく, 玄米の品質もオゾンによって低下することが報告されており[Sawada *et al.*, 2016; 澤

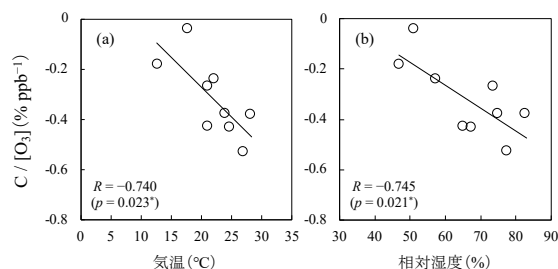


図 5 ハツカダイコンの単位オゾン濃度あたりの地下部乾重量のオゾンによる変化率(C/[O<sub>3</sub>], % ppb<sup>-1</sup>)と栽培期間中の平均気温(a)および平均相対湿度(b)との関係。地下部: 根と下胚軸(いわゆる大根の部分)。変化率(C, %) = ((非浄化空気区の乾重量/浄化空気区の乾重量)-1) × 100。縦軸の値が低い方が, 同じ濃度のオゾンを暴露してもオゾン害が顕著であることを示し, 気温や相対湿度と負の相関がある。中島ら[2018]より転載。

田ら, 2017], 収量だけでは評価できないオゾンによる経済的損失が引き起こされる可能性がある。

### 4.3 他の環境要因との複合影響

大気 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇やそれに伴う気温上昇など, 農作物の栽培環境は今後も変化することが予測されている[Arias *et al.*, 2021]。このような環境変化によって農作物のオゾン障害の程度が変化することが知られている[黄瀬ら, 2020]。日本の農作物を対象としたオゾンと他の環境要因との複合影響に関する研究は極めて限られているが, ハツカダイコンとコマツナではオゾンによる葉面積の減少を高濃度 CO<sub>2</sub> が緩和する相殺的な複合影響が報告されている[Yonekura *et al.*, 2005a]。海外の研究事例をメタ解析した論文においても, オゾンによるコムギの収量低下が高濃度 CO<sub>2</sub> によって緩和されることが報告されている[Feng *et al.*, 2008]。乾燥ストレスも同様にオゾン障害を緩和することがダイズなどで指摘されている[e.g., Kobayashi *et al.*, 1993], そのような相殺作用が認められなかった報告もある[米倉ら, 2000]。一方, オゾン障害が顕著になるという相乗的な作用をもたらす環境要因もある。例えば, 気温が高いとオゾンによるハツカダイコンの成長低下やイネの玄米の品質低下が顕著になることが報告されている(図 5)[伊豆田ら, 1988; Izuta *et al.*, 1993; 澤田ら, 2017; 中島ら, 2018]。また, 農作物に

おけるオゾンと光強度や窒素施肥との相乗作用が報告されている[Izuta *et al.*, 1991; Tatsumi *et al.*, 2019]。このような複合影響のメカニズムは明らかになっていないが、他の環境要因が気孔開度(オゾン吸収量)と葉内の活性酸素消去系の抗酸化物質濃度や酵素活性(オゾンの消去能力)のいずれか、もしくは両方を変化させることによって生じていると考えられている[米倉, 2016; 黄瀬ら, 2020]。

## 5. 収量に対するオゾンのリスク評価

### 5.1 暴露オゾン濃度に基づいた評価

農作物に対するオゾン暴露実験の結果から、オゾンによる収量低下とオゾン濃度などとの関係を表す収量のオゾン暴露応答関数が得られれば、観測値や化学輸送モデルなどによって推定されたオゾン濃度と組み合わせることで、オゾンによる減収率を推定(リスク評価)することができる[e.g., 米倉, 2016; Kobayashi, 2022; 木村ら, 2023]。

植物に対するオゾンの影響は、暴露期間が長く、濃度が高いとより顕著である。そのため、オゾン暴露応答関数の説明変数には、栽培期間もしくは農作物の収量を左右する重要な期間におけるオゾン濃度の積算値(積算暴露量)がオゾン暴露指標として用いられることが多い。この指標の算出時には高濃度のオゾンの重み付けや閾値を超えた濃度のオゾンのみを積算対象とするなどの工夫もなされている。ヨーロッパで提案されたオゾンの積算暴露量として、AOT40 (Accumulated exposure over a threshold of 40 ppb)がある[CLRTAP, 2010]。これは、日照時(日射量が  $50 \text{ W m}^{-2}$  以上)もしくは日中に、閾値である 40 ppb を超過したオゾン濃度(1 時間値)の閾値超過分を指定された期間にわたって積算した値である。このようなオゾンの積算暴露量を使った収量のオゾン暴露応答関数は、世界的には数多く報告されているが、日本での研究例は限られている(図 6a) [Izuta *et al.*, 1993; Yonekura *et al.*, 2005a, b; Sawada & Kohno, 2009; Yamaguchi *et al.*, 2014]。

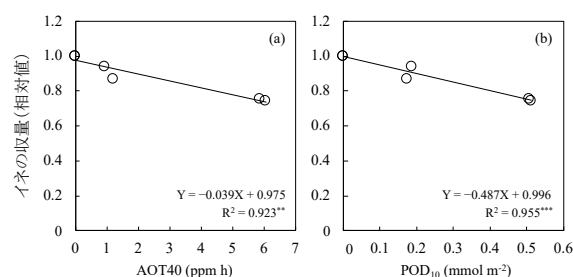


図 6 イネの収量(相対値)とオゾンの AOT40(a)または POD<sub>10</sub>(b)との関係。図 3 に示したデータに基づく(Yamaguchi *et al.*[2014]より許可を得て転載)。相対値: 浄化空気区の収量を 1 とした時の各処理区の収量。  
\*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$  (Pearson's correlation test)。

### 5.2 気孔を介した葉のオゾン吸収量に基づいた評価

2章で述べた通り、大気中のオゾンは気孔を介して葉内に吸収されて害作用を発現する。気孔は光の強さや湿度などの環境条件に応じて開閉している。したがって、大気中のオゾン濃度が同じであっても、植物を取り巻く大気湿度や光強度などの環境条件に応じて気孔開度が異なり、気孔を介して葉内に吸収されるオゾンの量に変化するため、オゾン障害の程度も変化する。そのため、ヨーロッパでは暴露オゾン濃度に基づいた指標である AOT40 を説明変数としたオゾン暴露応答関数は、オゾンによる減収率の算出などを広域にわたって行う定量的な評価では使用せず、リスクの高い地域の抽出にとどめることが推奨されている。したがって、農作物の収量に対するオゾンの影響の定量的な評価は、気孔を介して葉内に吸収されたオゾンの積算量(POD: Phytotoxic Ozone Dose)に基づいて行う必要がある[CLRTAP, 2010]。

POD は気孔を介した葉のオゾン吸収速度 ( $F_{st}$ ,  $\text{nmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )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。葉内のオゾン濃度は 0 ppb と仮定できるため[大政ら, 1979; Laisk *et al.*, 1989],  $F_{st}$  は大気オゾン濃度とオゾンの葉面境界層抵抗および気孔コンダクタンス ( $g_s$ ) から求めることができる。ここで、光の強さや大気湿度などの環境条件に応じて変化する  $g_s$  の推定が必要になる。そのため、 $g_s$  推定モデルの報告例が世界的に増えつつあるが、日本ではイネを対象としたモデルのみが報告されている[e.g.,

Yamaguchi et al., 2014]。g<sub>s</sub> 推定モデルの詳細については、山口[2021]を参照されたい。

$F_{st}$  の積算期間は収量を左右する重要な期間を対象とし、穀類や果菜類では可食部が実り成熟する期間に設定されることが多い。また、積算時にはオゾン吸収速度に閾値 ( $Y \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) を設けることが多く、 $POD_Y$  のように設定した閾値を下付きで示す。図 6b に示した例では、その閾値は  $10 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  である ( $POD_{10}$ )。この閾値の設定根拠は、葉に吸収されたオゾンの一定量は活性酸素消去系などの働きによって無毒化されるという考えに基づく。オゾン吸収速度の閾値  $Y$  は、その値を一定間隔で高くしていき、その都度算出した  $POD_Y$  を使って求めた収量のオゾン暴露応答関数の直線回帰式へのあてはまりの良さから判断されており、作物種 (研究事例) によって異なっている。しかしながら、活性酸素消去系の抗酸化物質の濃度や酵素活性は常に一定ではなく、環境要因によって変化するため、一定の閾値を設けることは生物学的に正しいとは言えない。そのため、そのような消去能力の変動まで考慮できていない現段階においては、オゾン吸収量に基づくよりも、経験的であっても暴露オゾン濃度に基づいて評価した方が良いという考えもある[Musselman et al., 2006]。そのため、より正確なリスク評価のためには葉内におけるオゾンの消去能力の定量的な評価が必要である。例えば、葉内での化学反応を伴ったガス拡散移動に基づくモデルによって、アポプラストに存在するアスコルビン酸によるオゾンの解毒量の評価がなされているが、このような研究は限られている[e.g., 野内ら, 2019]。

### 5.3 オゾンの影響を考慮した作物モデルによる評価

ある農作物にオゾン暴露したときに、その平均濃度が同じであっても実験によってオゾンによる収量低下率は変動する。その変動を説明することは、より正確なリスク評価につながるため、AOT40 や  $POD_Y$  といったオゾン暴露指標を説明変数としたオゾン暴露応答関数の検討がなされてきた[e.g., 米倉, 2016;

Kobayashi, 2022]。一方、その変動は栽培期間中のオゾン濃度の変動だけでなく、農作物の成長速度の時期などによる違いによっても生じることが数理的解析によって示されている[Kobayashi, 1997]。そこで、農作物の成長をシミュレートできる作物モデルを利用した評価法が提案されている。作物モデルとは、光や気温などの環境条件を入力値として、光合成、呼吸、光合成産物の各器官への分配などの様々な生理プロセスに基づいて収量を推定できるモデルである[e.g., Masutomi et al., 2016]。この各生理プロセスにオゾンの影響を組み込むことで、成長速度を加味しながらオゾンの影響を考慮できるため、オゾンによる収量低下をより良く説明できることが期待されている。この評価法を確立するためには、光合成反応や光合成産物の分配といった農作物の成長における各プロセスに対するオゾンの影響を定量的に解明することが不可欠であり、今後の重要な課題である[小林, 1999; Emberson et al., 2018; Kobayashi, 2022]。

## 6. まとめと今後の課題

作物種や品種、栽培条件等によって程度は異なるが、現在観測されているオゾンの濃度は農作物の成長や収量の低下を引き起こすレベルである。このようなオゾンの影響は、都市部やその近郊において数多く報告されているが、近年では国境を越えた広域大気汚染の影響下にある地域においても報告されている[山口, 2021]。そして、農作物に対するオゾンの影響は日本に限られた話ではなく、欧米や中国、インドなどにおいても同様に報告されており、世界的に問題視されている[e.g., Mills et al., 2018]。欧米では、このようなオゾンの影響から植物を保護することを目的として環境基準等が設置されているが、日本では設置されていない[環境省, 2022]。そのため、農作物に対するオゾンの影響の定量的な評価とそれに基づいた植物保護のための光化学オキシダントの環境基準の設定に向けて、5章で述べたような農作物に対するオゾンのリスク評価を進めていく必要がある[戸塚,

1989; 伊豆田・松村, 1997; 米倉, 2016]。特に作物モデルを利用した評価法は陸面過程モデルとの親和性が高く、その応用性も考慮すると、今後重要なリスク評価法になると考えられる。しかしながら、作物モデルを利用したオゾンの影響評価においても、光合成能力などのオゾン暴露応答関数が必要になる。その説明変数としては、今後予測されている気温上昇や降水量の変化等を考慮すると、気孔を介した葉の積算オゾン吸収量(POD<sub>Y</sub>)が適切であると考えられる。しかしながら、POD<sub>Y</sub> は計算値であり、実測値との比較もなされていないのが現状であることから、現場観測との共同研究などによって検証していく必要がある。同時に、5.2 節で述べたような葉内の解毒能力の定量的評価を進める必要もある。さらに、リスク評価によって抽出された高リスク地域において、農作物に対するオゾンの影響を検証するような現場での植物影響モニタリングも進めていく必要がある。

## 参考文献

- Ainsworth, E. A. (2017), Understanding and improving global crop response to ozone pollution. *Plant J.*, 90, 886–897.
- Akimoto, H. et al. (2015), Analysis of monitoring data of ground-level ozone in Japan for long-term trend during 1990–2010: Causes of temporal and spatial variation. *Atmos. Environ.*, 102, 302–310.
- Arias, P. A. et al. (2021), Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V. et al., eds.]. Cambridge University Press, pp. 33–144.
- CLRTAP (Convention on Long-range Trans-boundary Air Pollution) (2010), Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. Chapter 3: Mapping Critical Levels for Vegetation.
- Emberson, L. D. et al. (2018), Ozone effects on crops and consideration in crop models. *Euro. J. Agron.* 100, 19–34.
- Feng, Z., Kobayashi, K. & Ainsworth, E. (2008), Impact of elevated ozone concentration on growth, physiology, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.): a meta-analysis. *Glob. Change Biol.*, 14, 2696–2708.
- Feng, Z. & Kobayashi, K. (2009), Assessing the impacts of current and future concentrations of surface ozone on crop yield with meta-analysis. *Atmos. Environ.* 43, 1510–1519.
- Feng, Z. et al. (2022), Ozone pollution threatens the production of major staple crops in East Asia. *Nature Food*, 3, 47–56.
- Gupta, A., Yadav, D. S., Agrawal, S. B. & Agrawal, M. (2022), Sensitivity of agricultural crops to tropospheric ozone: a review of Indian researches. *Environ. Monit. Assess.*, 194, 894.
- Heath, R. L. (1980), Initial events in injury to plants by air pollutants. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 31, 395–431.
- Inada, H. et al. (2012), Relationship between cultivar difference in the sensitivity of net photosynthesis to ozone and reactive oxygen species scavenging system in Japanese winter wheat (*Triticum aestivum*). *Physiol. Plant.*, 146, 217–227.
- 伊豆田 猛 (2020), 大気環境と植物. 朝倉書店.
- 伊豆田 猛, 船田 周, 大橋 毅, 三宅 博, 戸塚 績 (1988), 異なる温度条件下におけるハツカダイコンの生長に対するオゾンの影響. *大気汚染学会誌*, 23, 209–217.
- Izuta, T., Funada, S., Ohashi, T., Miyake, H. & Totsuka, T. (1991), Effects of low concentrations of ozone on the growth of radish plants under different light intensities. *Environ. Sci.*, 1, 21–33.
- Izuta, T., Miyake, H. & Totsuka, T. (1993), Evaluation of air-polluted environment based on the growth of radish plants cultivated in small-sized open-top chambers. *Environ. Sci.*, 2, 25–37.
- Izuta, T., Ohtsu, G., Miyake, H. & Totsuka, T. (1994), Effects of ozone on dry weight growth, net photosynthetic rate and leaf diffusive conductance in three cultivars of radish plants. *J. Jpn. Soc. Air Pollut.*, 29, 1–8.
- Izuta, T., Takahashi, S., Aoki, M. & Totsuka, T. (1995), Effects

- of ozone and ultraviolet-B radiation, alone and in combination, on growth of cucumber plants. *J. Jpn. Soc. Air Pollut.*, 30, 126–136.
- 伊豆田 猛, 松村秀幸 (1997), 植物保護のための対流圏オゾンのクリティカルレベル. *大気環境学会誌*, 32, A73–A81. [https://doi.org/10.11298/taiki1995.32.6\\_A73](https://doi.org/10.11298/taiki1995.32.6_A73)
- Izuta, T., Takahashi, K., Matsumura, H. & Totsuka, T. (1999), Cultivar difference of *Brassica campestris* L. in the sensitivity to O<sub>3</sub> based on the dry weight growth. *J. Jpn. Soc. Atmos. Environ.*, 34, 137–146.
- 環境省 (2022), 光化学オキシダント植物影響評価検討会配布資料. <https://www.env.go.jp/press/110656.html> (2023年6月20日アクセス)
- 木村知里ら (2023), 大気オゾンの環境影響評価に向けたバイアス補正手法の検討. *大気環境学会誌*, 58, 74–85.
- 黄瀬佳之, 渡辺 誠, 山口真弘, 伊豆田 猛 (2020), 植物に対するオゾンと環境要因の複合影響. *大気環境と植物*, 朝倉書店, pp. 18–26.
- Kobayashi, K. (1997), Variation in the relationship between ozone exposure and crop yield as derived from simple models of crop growth and ozone impact. *Environ. Pollut.*, 31, 703–714.
- 小林和彦 (1999), 対流圏オゾンが農作物生産に及ぼす影響の評価. *大気環境学会誌*, 34, 162–175. [https://doi.org/10.11298/taiki1995.34.3\\_162](https://doi.org/10.11298/taiki1995.34.3_162)
- Kobayashi, K., Miller, J. E., Flagler, R. B. & Heck, W.W. (1990), Modeling the effects of ozone on soybean growth and yield. *Environ. Pollut.*, 65, 33–64.
- Kobayashi, K., Miller, J. E., Flagler, R. B. & Heck, W. W. (1993), Model analysis of interactive effects of ozone and water stress on the yield of soybean. *Environ. Pollut.*, 82, 39–45.
- Kobayashi, K., Okada, M. & Nouchi, I. (1995), Effects of ozone on dry matter partitioning and yield of Japanese cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). *Agric. Ecosyst. Environ.*, 53, 109–122.
- Kobayashi, K. (2022), Effects of ozone on agricultural crops. In *Handbook of Air Quality and Climate Change* (Akimoto, H. & Tanimoto, H. eds.). [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2527-8\\_25-1](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2527-8_25-1)
- Laisk, A., Kull, O. & Moldau, H. (1989), Ozone concentration in leaf intercellular air spaces is close to zero. *Plant Physiol.*, 90, 1163–1167.
- Masutomi, Y., Ono, K., Mano, M., Maruyama, A. & Miyata, A. (2016), A land surface model combined with a crop growth model for paddy rice (MATCRO-Rice v. 1) – Part 1: Model description. *Geosci. Model Dev.*, 9, 4133–4154.
- Mills, G. et al. (2018), Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day tropospheric ozone distribution and trends relevant to vegetation. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6, 47.
- Musselman, R. C., Lefohn, A. S., Massman, W. J. & Heath, R. L. (2006), A critical review and analysis of the use of exposure- and flux-based ozone indices for predicting vegetation effects. *Atmos. Environ.*, 40, 1869–1888.
- 中島健太郎, 西 祐理子, 川田彩香, 山口真弘 (2018), オープントップチャンバー法を用いたハツカダイコンの生長に対するオゾンの影響を指標とした長崎の大気環境評価. *大気環境学会誌*, 53, 186–193.
- 野本宣夫, 横井洋太 (1981), 植物の物質生産. 東海大学出版会.
- 野内 勇 (2001), 大気環境変化と植物の反応. 養賢堂.
- 野内 勇, 高崎 強, 戸塚 績 (1988), 光化学オキシダントに対する農作物および園芸作物の相対的感受性比較. *大気汚染学会誌*, 23, 355–370. <https://doi.org/10.11298/taiki1978.23.355>
- Nouchi, I., Ito, O., Harazono, Y. & Kobayashi, K. (1991), Effects of chronic ozone exposure on growth, root respiration and nutrient uptake of rice plants. *Environ. Pollut.*, 74, 149–164.
- 野内 勇, 青木一幸, 小林和彦 (2019), 葉アポプラスト(細胞壁)に存在する抗酸化性アスコルビン酸はオゾンをごくまで解毒できるのか? (I) 化学反応を伴ったガス拡散移動に基づいたシミュレーションモデル. *大気環境学会誌*, 54, 113–127. <https://doi.org/10.11298/taiki.54.113>



- 大政謙次, 安保文彰, 名取俊樹, 戸塚 績 (1979), 植物による大気汚染物質の収着に関する研究 (II) NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> あるいは NO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub> 暴露下における収着について. *農業気象*, 35, 77–83.
- Sawada, H. & Kohno, Y. (2009), Differential ozone sensitivity of rice cultivars as indicated by visible injury and grain yield. *Plant Biol.*, 11, 70–75.
- Sawada, H. *et al.* (2016), Elevated ozone deteriorates grain quality of *japonica* rice cv. Koshihikari, even if it does not cause yield reduction. *Rice*, 9, 7.
- 澤田寛子, 河野吉久, 玉置雅紀 (2017), 米 17 品種の外観品質に及ぼすオゾンと気温上昇との複合影響. *大気環境学会誌*, 52, 59–67.
- Tatsumi, K., Abiko, T., Kinose, Y., Inagaki, S. & Izuta, T. (2019), Effects of ozone on the growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.) under different nitrogen fertilization regimes. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 26, 32103–32113.
- 田崎忠良 (1978), *環境植物学*. 朝倉書店.
- 戸塚 績 (1989), 緑の環境基準を目指して. *大気汚染学会誌*, 24, 82–86. <https://doi.org/10.11298/taiki1978.24.392>
- Yamaguchi, M. *et al.* (2008), Effects of ozone on the growth, yield and leaf gas exchange rates of two Japanese cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). *J. Agric. Meteorol.*, 64, 131–141.
- Yamaguchi, M. *et al.* (2014), Evaluation of the effects of ozone on yield of Japanese rice (*Oryza sativa* L.) based on stomatal ozone uptake. *Environ. Pollut.*, 184, 472–480.
- Yamaguchi, M. *et al.* (2015), Evaluation of O<sub>3</sub> effect on net photosynthetic rate in flag leaves of rice (*Oryza sativa* L.) by stomatal O<sub>3</sub> flux and radical scavenging enzyme activities. *J. Agric. Meteorol.*, 71, 211–217.
- Yamaguchi, M., Nishi, Y., Kawada, S. & Nakashima, K. (2018), Tropospheric ozone reduces resistance of Japonica rice (*Oryza sativa* L., cv. Koshihikari) to lodging. *J. Agric. Meteorol.*, 74, 97–101.
- 山口真弘 (2021), 植物に対する微小粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>) とオゾンの影響に関する実験的研究. *大気環境学会誌*, 56, 25–33. <https://doi.org/10.11298/taiki.56.25>
- 米倉哲志 (2016), 大気環境と植物 第 3 講 農作物に対する光化学オキシダント (オゾン) の影響. *大気環境学会誌*, 51, A57–A66. <https://doi.org/10.11298/taiki.51.A57>
- 米倉哲志, 大嶋香緒里, 服部 誠, 伊豆田 猛 (2000), ダイズの成長, 収量, 子実成分および発芽率に対するオゾンと土壌水分ストレスの単独および複合影響. *大気環境学会誌*, 35, 36–50.
- Yonekura, T. *et al.* (2005a), Impacts of O<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub> enrichment on growth of komatsuna (*Brassica campestris*) and radish (*Raphanus sativus*). *Phyton*, 45, 229–235.
- Yonekura, T., Shimada, T., Miwa, M., Arzate, A. & Ogawa, K. (2005b), Impacts of tropospheric ozone on growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.). *J. Agric. Meteorol.*, 60, 1045–1048.

原稿受領日:2023 年 5 月 17 日

掲載受理日:2023 年 6 月 23 日

著者所属:

1. 長崎大学 環境科学部
2. 山梨大学大学院総合研究部
3. 埼玉県環境科学国際センター
4. 東京農工大学大学院農学研究院

\* 責任著者:

Masahiro Yamaguchi <masah-ya@nagasaki-u.ac.jp>