

光化学オキシダントの植物影響に関するまとめ（案）

<目次>

1.	オゾン等の農作物への影響.....	2
1.1.	葉の可視障害	2
1.2.	成長や収量に及ぼす影響	2
1.3.	農作物影響を変化させる環境要因	5
2.	オゾン等の樹木への影響	7
2.1.	成長に及ぼす影響	7
2.2.	樹木影響を変化させる環境要因	8
3.	オゾンと森林衰退との関係.....	10
4.	パーオキシアセチルナイトレート（PAN）の植物影響.....	12
5.	全体のまとめ.....	13

第2回の本検討会（資料3）において示したとおり、光化学オキシダントの植物影響に関する定量評価に関しては、オゾンとオゾン以外の光化学オキシダント成分の植物影響に関する科学的知見を別々に検討・評価することが適切と判断されたことから、オゾン以外の光化学オキシダント成分としてその植物影響に関する科学的知見が報告されているパーオキシアセチルナイトレート（以下、「PAN」という。）についてとりまとめた。

「1.オゾン等の農作物への影響」、「2.オゾン等の樹木への影響」、「3.オゾンと森林衰退との関係」及び「4.パーオキシアセチルナイトレート（PAN）の植物影響」の各章では、可視障害、成長や収量に及ぼす影響等に関する文献の記載に基づく科学的知見の要約として整理し、「5.全体のまとめ」においてはオゾン及びPANの各植物影響に関する知見をとりまとめた。

なお、植物影響に関する報告において光化学オキシダント濃度として記載されているものについては、原則として O_x として示し、オゾン濃度として記載されているものについては O_3 として示した。

1. オゾン等の農作物への影響

1.1. 葉の可視障害

農作物が比較的高濃度の O_3 に曝露されると、葉に可視障害が発現することがある。国内で実施された 22 科 45 種の農作物及び園芸作物を対象とした空気浄化 (FAC: Filtered Air Chamber) 試験では、可視障害が発現した O_x の濃度最高値は作物種によって異なり (10 ppm 以下、10~15 ppm、15 ppm 以上の 3 段階に分類)、ハウレンソウやハツカダイコン等の感受性が高いことが報告されている。

また、広範囲な農作物や園芸作物を対象とした既存の O_3 曝露実験の結果を元に、作物の可視障害の発現と O_3 曝露との関連性について検討された報告では、 O_3 濃度 (C) の 2 乗と曝露時間 (t) の積であるドース ($C^2 \times t$) により O_3 感受性の高低を 4 段階 (0.10 ppm²・h 以下、0.11~0.30 ppm²・h、0.31~1.00 ppm²・h 及び 1.01 ppm²・h 以上) に分類された。その結果、作物種によって感受性が異なっており、前述の報告と同様に、ハウレンソウやハツカダイコン等の感受性が高いことが報告されている。

なお、可視障害の発現に対する O_3 感受性は作物種だけでなく品種間でも異なっていることが報告されている。

1.2. 成長や収量に及ぼす影響

O_3 等が農作物の成長や収量に及ぼす影響については様々な作物について報告がなされている。本検討会では、具体的にはイネ、ダイズ、オオムギ、ラッカセイ、バレイショ、トマト、キュウリ、コマツナ、ハウレンソウ、ハツカダイコン、メロン及び果樹に関する代表的な報告をとりまとめた。なお、第 6 回の本検討会 (資料 2-2) のとおり、複数の研究において成長や収量に及ぼす影響が比較可能であり、定量評価が可能と考えられた作物種としてはイネ、コマツナ、ハツカダイコンが整理されている。本資料においても当該種の報告を中心にとりまとめている。

O_3 等によるイネの収量減少に関する報告はいくつもある。

O_x によるイネ 4 品種の減収影響について検討した FAC 試験では、品種によって程度は異なるが、地上部重、穂数、総穎花数、登熟歩合、千粒重及びもみ重について低下が報告されている。

“日本晴”を用いた FAC 試験では浄化区と非浄化区で草丈には差がないが茎数・穂数は非浄化区で少なく、穂重の減少により非浄化区で収量 (玄米重) が減少したと報告されている。この時の非浄化区の O_x 濃度は 24 時間平均で 0.030 ppm であった。

“コシヒカリ”を対象とした自然光型 O_3 曝露チャンバーを用いた O_3 曝露試験では、栄養成長期から出穂初期 8 週間において 3 段階の O_3 濃度 (浄化、0.05、0.10 ppm) に曝露した結果、0.10 ppm 区で 5 週目、6 週目に個体乾重量が 50% 減少した。また、0.05 ppm 区、0.10 ppm 区において地下部/地上部比の低下が報告されている。

“コシヒカリ”及び“日本晴”を供試した 5 段階 (野外の 0.5 倍、1 倍、1.5 倍、2 倍、2.75 倍) の O_3 濃度のオープントップチャンバー (OTC) 試験では O_3 曝露量の増加に伴ってイネの収量が減少することが報告され、精玄米重の結果を基に O_3 曝露応答関係式が導出されている。

1 日本のイネ 9 品種を対象とした 3 段階の O₃ 濃度（浄化、野外、1.5 倍野外）による OTC 試験
2 においても収量に対する O₃ の影響が検討され、相対収量と AOT40 の O₃ 曝露応答関係式が報告
3 されている。

4 “コシヒカリ”及び”キヌヒカリ”を対象に 3 段階の O₃ 曝露（浄化空気、60 ppb もしくは 100 ppb
5 の O₃ 曝露（10:00～17:00））の試験をグリーンハウス型 OTC で実施した結果、“コシヒカリ”、“
6 キヌヒカリ”いずれについても浄化に比べ O₃ 曝露群において収量減少が認められた。

7 “コシヒカリ”を対象とした別のグリーンハウス型 OTC で実施した 3 段階の O₃ 曝露（浄化空
8 気、野外の 1 倍または 1.5 倍）試験では、AOT40 と水蒸気気孔コンダクタンスなどにより算出
9 した O₃ 吸収量 POD₁₀ に基づいて収量に対する O₃ 曝露応答関係式を検討し相対収量との関係式
10 が導出されている。

11 “コシヒカリ”を対象に異なる 2 段階の窒素施肥条件下で 3 段階の O₃ 曝露（浄化空気、野外、
12 1.5 倍野外）の試験をグリーンハウス型 OTC で実施した結果、無施肥区では収穫時の葉、茎、根
13 及び個体乾重量に対する O₃ の影響は認められなかったが、施肥区において 1.5 倍の O₃ 濃度で低下
14 が認められており、O₃ と窒素施肥の有意な相互作用効果があった。一方、収量に対する O₃ の影
15 響は無施肥区では認められず、施肥区において O₃ の増加に伴う収量低下が認められた。

16 なお、日本とアジアのイネ 21 品種を対象とした O₃ 曝露試験をガラス温室型 OTC で実施した
17 場合には、外気の 2 倍の O₃ 濃度（24 時間平均値で 57 ppb）で有意な収量低下が生じた品種は”
18 きらら 397”を除き、すべてインディカ型品種であり、ほとんどのジャポニカ型品種は有意な収量
19 低下を示さなかった。

20

21 O_x による成長や収量に及ぼす影響について複数の研究において比較可能な植物種としてはコ
22 マツナ、ハツカダイコンが報告されている。

23

24 コマツナについては以下の収量減少に関する報告がある。

25 10 品種を対象とした人工光型 O₃ 曝露チャンバーにて曝露（播種後 8、10 及び 12 日目に 130
26 ppb を 4 時間（10:00～14:00））した結果、個体乾重量が低下した。品種間の感受性差は O₃ 曝露
27 による可視障害の程度、個体当たりの乾物成長速度、気孔密度では説明できなかったが、単位 O₃
28 吸収量当たりの純光合成阻害率の O₃ 感受性と一致することが報告されている。

29 “楽天”を対象とした 4 段階の O₃ 曝露試験（浄化、60、90、120 ppb）を人工気象室にて実施し
30 た結果、O₃ 濃度の上昇に伴って成長（個体乾重量）の低下が認められ、相対成長と AOT40 との
31 O₃ 曝露応答関係式が報告されている。

32 また、“楽天”を対象とした OTC 試験では野外区（昼間 O₃ 濃度：52 ppb（最大 O₃ 濃度：143
33 ppb））で 1 か月間の育成をした結果、個体乾重量は 42%の低下が認められている。

34

35 ハツカダイコンについては以下の収量減少に関する報告がある。

36 “コメット”を対象に自然光型ファイトトロンにて 3 種類の温度条件下で育成しながら 0.10
37 ppm の O₃ を 1 日 4 時間（10:00～14:00）、7 日間にわたり曝露した結果、25/18℃及び 30/23℃
38 （日中/夜間）の条件で個体当たりの乾物成長が 20%減少したと報告されている。

1 “コメット”を対象とした OTC 試験では野外（非浄化区）の個体当たりの葉面積及び乾重量が
2 浄化区に比べて有意に低下し、O₃ 濃度の増加に伴い成長割合が直線的に減少することが報告さ
3 れている。

4 “コメット”を対象とした別の OTC 試験では午前 9 時の平均気温が 20°C 以上の場合に O₃ によ
5 る乾重量の低下がみられている。

6 さらに、“コメット”を対象に通年で計 9 回の OTC 試験を実施した結果、地上部には O₃ の有
7 意な影響が認められなかった。また、5 月中旬、9 月及び 10 月に実施した実験では、O₃ による
8 地下部乾重量の有意な低下が認められたが、相対地下部乾重量と平均 O₃ 濃度との関係に有意な
9 相関は認められなかった。この原因は育成下の平均気温や相対湿度が O₃ 感受性に影響している
10 と考察されている。

11 ハツカダイコン 3 品種を対象とした OTC 試験では個体当たりの乾物成長に基づいた O₃ 感受
12 性に差異があり、特に“ユキコマチ”の感受性が高いことが報告されている。

13 “赤丸（コメット）”を対象に 4 段階の O₃ 曝露（浄化、60、90、120 ppb）試験を人工気象室に
14 て実施した結果、O₃ 濃度上昇に伴って個体乾重量が低下することが報告されている。

15
16 その他、ダイズ、オオムギ、ラッカセイ、バレイショ、トマト、キュウリ、ホウレンソウ、メ
17 ロン及び果樹について成長や収量に及ぼす影響が報告されている。

18
19 ダイズについては、夏蒔きダイズ 12 品種を用いた FAC 試験において O_x が収量に与える影響
20 が品種によって異なることが報告され、2 品種を対象とした 5 段階の O₃ 曝露によるフィールド
21 チャンバーを用いた実験では、O₃ 濃度上昇に伴う収量の低下が認められ、乾物生産量の低下が報
22 告されている。また、“エンレイ”を対象とした自然光型ファイトトロンについて昼間(9:00-17:00)
23 に O₃ を曝露（60 ppb）した結果、子実数（粒数）の低下に伴う収量低下が認められ、浄化区に
24 比べ 10%程度低下することが報告されている。

25
26 オオムギ、ラッカセイ、バレイショについては報告数が限られているが FAC 試験において O_x
27 の曝露による収量低下が報告されている。

28
29 トマトについては、“栄寿”を対象とした低濃度ガス長期間接触装置を用いた O₃ 曝露試験にお
30 いて、3 段階で 1 日 8 時間の曝露を 28 日間実施した結果、O₃ による個体乾重量の低下、特に葉
31 の乾重量の低下が認められた。“ポンデローザ”を対象としたグロースキャビネットを用いた O₃
32 曝露試験では草丈や茎数などに影響は認められなかったが、地上部重量は減少した。

33 キュウリについては、“ときわ光 3 号 P 型”を対象とした低濃度ガス長期間接触装置を用いた 3
34 段階の O₃ 曝露による試験において葉身と根の有意な成長抑制、収量低下が報告されている。”立
35 秋”を対象としたグロースキャビネットを用いた O₃ 曝露試験では、草丈、茎数では差が認められ
36 なかったが地上部重は O₃ 処理区で減少した。また、“霜知らず地這いキュウリ”を対象とした人
37 工光型 O₃ 曝露チャンバーを用いた 3 段階の O₃ 曝露試験では葉面積及び乾物成長の低下が報告
38 されている。

1 ハウレンソウについてはグロースキャビネットを用いた O₃ 曝露試験において乾燥重量の減少
2 が報告されている。

3 メロンについてはグロースキャビネットを用いた O₃ 曝露試験が実施され、草丈、茎数などで
4 は差が認められなかったが地上部重は O₃ 処理区で減少したと報告されている。

5 果樹についてはウンシュウミカン、モモ、ナシに対する O₃ が及ぼす影響が検討され、ウンシ
6 ュウミカンについては落果率に O₃ の影響は認められず、モモについては O₃ 濃度の増加に伴い落
7 果率が高くなったが落葉数や果実肥大率にはほとんど影響が認められなかった。ナシについては
8 花粉に O₃ を曝露した場合は発芽率の低下が報告され、受粉する際に O₃ を曝露した場合は結実率
9 の低下傾向が認められたが受精への影響は多くないこと等が報告されている。

10 11 1.3. 農作物影響を変化させる環境要因

12 日本の農作物を対象として、O₃ 以外の環境要因が O₃ の影響に及ぼす作用を報告した実験的研
13 究はいくつかあり、具体的には光強度、気温上昇、土壤乾燥ストレス、窒素施肥及び二酸化炭素
14 濃度の上昇が O₃ の影響に及ぼす作用について報告されている。

15 光強度に対する O₃ の影響の変化に関しては、例えば、異なる光条件で栽培したハツカダイコ
16 ンに対する O₃ の影響を評価した研究では、弱光条件で栽培した個体の成長や光合成に O₃ の影響
17 は認められなかったのに対して、強光条件で栽培した個体では O₃ によって成長や光合成が低下
18 したことが報告されている。最近の研究では、葉緑体内で光合成に伴って発生する ROS(Reactive
19 oxygen species (活性酸素種)) は光照射下で O₃ 障害が生じやすいことが示された。

20 温度の変化は化学反応速度を左右するため、光合成や呼吸などの代謝反応に強く影響を及ぼす。
21 したがって、気温の変化は葉内への O₃ 吸収量や葉内における O₃ の解毒能力の変化をもたらすと
22 考えられる。植物に対する O₃ の影響を変化させる要因として気温を取り上げた実験的研究は世
23 界的にも極めて限られている。例えば、ハツカダイコンを対象とした研究では O₃ による成長低
24 下が気温上昇によって著しくなることが報告されている。一方で、イネを対象とした研究では成
25 長や収量に対する影響は報告されていない。なお、O₃ による玄米の外観品質低下が気温上昇によ
26 って著しくなることが報告されているが、このような助長作用は品種によって異なり O₃ の影響
27 が気温上昇によって変化しない品種もある。

28 一般に乾燥条件下では植物は葉からの水分損失を防ぐために気孔を閉鎖する。そのため、大気
29 湿度の低下や降水量の減少などに伴う土壤乾燥によって葉内への O₃ 吸収量が低下すると考えら
30 れる。日本の植物を対象としてその成長や光合成に対する O₃ の影響に及ぼす土壤乾燥ストレス
31 の作用を評価した実験的研究はいくつかある。例えば、O₃ によるダイズの収量への影響について
32 は土壤乾燥ストレスによって緩和される報告があるが、別の研究では O₃ の影響は土壤乾燥スト
33 レスで変化しないとの報告もある。そのため、O₃ の影響に対する土壤乾燥ストレスの作用は土壤
34 乾燥ストレスの程度や栽培時の気象条件等によって異なる可能性が考えられる。

35 化石燃料や化学合成肥料の消費によって大気に放出される反応性窒素 (Nr) は、直接的または
36 雨などに溶け込んでから間接的に森林や農地に沈着する。窒素は植物の多量必須元素であること
37 から、その土壤への沈着量の増加は光合成活性の上昇や気孔開度の上昇を引き起こすほか、葉内
38 の活性酸素消去系の活性を上昇させる可能性も考えられている。一方、土壤への過剰な窒素沈着
39 は植物の栄養バランスの悪化や土壤酸性化を引き起こして間接的に影響を及ぼすことから、光合

1 成や活性酸素消去系の活性を変化させると考えられる。土壌への窒素負荷や施肥が O₃ の影響に
2 及ぼす作用に関する実験的研究が報告されている。例えば、イネを用いた実験的研究では窒素施
3 肥を行わなかった栽培条件では O₃ によるイネの成長や収量の低下が認められなかったが、窒素
4 施肥を行った栽培条件では O₃ による低下が認められており、O₃ の影響の施肥による助長作用が
5 報告されている。このように施肥によって O₃ の影響が顕著になる可能性はあるが、研究例が限
6 られている。

7 植物は葉の気孔を介して CO₂ を葉内に吸収するが、光合成への CO₂ 供給が十分になると、水
8 分損失を防ぐために気孔を閉じることが知られている。一方で、異なる大気 CO₂ 濃度環境で育成
9 した日本の作物の成長や光合成に対する O₃ の影響を評価した実験的研究は限定的である。ハツ
10 カダイコンとコマツナを用いた実験的研究では、両作物種の成長に対する O₃ の影響の程度は高
11 濃度 CO₂ によって変化しなかったと報告されている。ただし、O₃ による葉面積の低下は高濃度
12 CO₂ によって緩和されることが両作物種で報告されている。一方、海外研究では O₃ によるコム
13 ギの収量低下は高濃度 CO₂ によって緩和されることが報告されている。そのため、高濃度 CO₂
14 によって O₃ の影響は緩和・相殺されるが、その作用は植物種や気象条件によって異なると考え
15 られる。

16

1 2. オゾン等の樹木への影響

2 2.1. 成長に及ぼす影響

3 樹木の成長は、環境との炭素交換（光合成、呼吸、枯死など）によって決まり、乾物成長で表
4 される。O₃は樹木の乾物成長を低下させることが知られており、日本の森林樹木におけるその影
5 響に関して温室、人工気象室またはOTCなどを用いたO₃を曝露する研究が多く行われている。

6 スギ、ヒノキ、ケヤキの苗を4段階の処理区（大気O₃濃度の0.4、1.0、2.0及び3.0倍）で24
7 週間にわたって育成した結果、個体乾重量が低下したと報告されている。O₃による樹木成長低下
8 はこれらの種を含む落葉広葉樹、落葉針葉樹、常緑広葉樹、常緑針葉樹などの多くの植物機能型
9 で報告されている。

10 また、日本の森林樹木の成長におけるO₃感受性には樹種間差があることが明らかになってお
11 り、現状濃度のO₃で有意に成長が低下する「高感受性種」、現状濃度の1.5倍または2.0倍の濃
12 度のO₃を曝露したときに有意に成長が低下する「中感受性種」と成長が低下しない「低感受性
13 種」の3つに分類されている。一般的には落葉樹は常緑樹よりもO₃に対する感受性が高く、こ
14 の傾向は欧州や中国など、世界中で確認されているが、日本の温帯林の代表的な常緑樹であるス
15 ダジイのO₃感受性がブナに匹敵するなどの例外も存在する。

16

17 2000年代以降、日本の樹木の成長や光合成などに対するO₃影響のリスク評価が実施されてお
18 り、多くの実験的研究に基づいてO₃の曝露量または吸収量と成長や光合成との関係式が得られ
19 ている。この関係式である回帰直線の傾きは、O₃曝露量あるいは吸収量あたりの成長や光合成低
20 下率を示しO₃感受性の指標となる。

21 O₃曝露量に基づくリスク評価の事例としては、16樹種の苗木のAOT40と個体乾重量を解析
22 した結果が報告されており、樹種によってO₃感受性差がありドロノキ、トウカエデ、ストロー
23 ブマツ、ブナなどのO₃感受性が比較的高い樹種であることが報告されている。また、苗木にお
24 ける4~9月のAOT40と個体乾物増加量との関係を解析した研究では、ブナ、カラマツ、スダ
25 ジイの回帰直線の傾きの絶対値がコナラ、アカマツ、スギと比較して高く、O₃感受性が高いこと
26 が報告されている。前者の調査結果ではアカマツはO₃感受性が比較的高い樹種に分類されてお
27 り、後者の調査結果とやや整合しない点はあるが、気象条件や栄養条件などによるO₃感受性へ
28 の影響と考えられる。実験から得られたAOT40と樹木の個体乾物成長との関係に基づく、現
29 状のO₃濃度でブナについて年間の成長が5%以上低下している日本の森林地域が存在すること
30 が示唆されている。一方で、この成長低下率はOTCを用いてO₃影響の現地調査を行った研究
31 結果とは一致しておらず、樹木に対するO₃の影響は生育環境などの影響を強く受けることが示
32 唆されている。

33 欧州では環境条件や個体発生学的要因によるO₃影響の差異も説明可能な気孔を介した葉のO₃
34 吸収量を推定し、それと成長との関係が解析されてきた。現在は日本でも気孔を介したO₃吸収
35 量に基づくO₃のリスク評価手法の開発が取り組まれており、日本の森林樹木のO₃吸収速度の推
36 定を目的とした研究が行われてきた。O₃吸収速度の推定に必要な最大気孔コンダクタンスや環
37 境応答関数は種特異的であり、4月から5月の春季のブナ苗、コナラ苗、ミズナラ苗のO₃吸収
38 量は少ない一方で、O₃濃度は比較的高いことが報告されている。一方、シラカンバ苗は主に葉の
39 成熟が早いことに加え、気孔開口の最適温度が低く、春季のO₃吸収量が比較的多いことが報告

1 されている。また、モデリング研究では O_3 が気孔コンダクタンスに影響を与えることが発見さ
2 れており、ブナの 10 年生幼木の葉の最大気孔コンダクタンスが低下することが報告されている。
3 近年は光合成速度と気孔コンダクタンスの間に成り立つ経験モデルを適用し、葉の O_3 吸収量の
4 推定を行った研究事例もある。

5 ブナ、コナラ、ミズナラ、シラカンバの苗木に O_3 を曝露し、1 成長期間の葉の O_3 吸収量に対
6 する純光合成量の応答を調べた結果、その応答は種特異的であり、樹種によって O_3 感受性が異
7 なることが明らかになった。また、純光合成量の低下率は地域によって著しく異なることが報告
8 されている。

9

10 2.2. 樹木影響を変化させる環境要因

11 日本の樹木を対象として、 O_3 以外の環境要因が O_3 の影響に及ぼす作用を報告した実験的研究
12 がいくつかあり、具体的には、土壤乾燥ストレス、大気から土壤への窒素沈着または施肥、二酸
13 化炭素濃度の上昇、酸性雨、酸性霧及び二酸化硫黄が O_3 の影響に及ぼす作用について報告され
14 ている。 O_3 による影響の程度は気孔を介した O_3 吸収量と吸収された O_3 の葉内における解毒量
15 のバランスによって決まると考えられており、気孔開度や葉内の活性酸素消去系の活性を変化さ
16 せる環境要因が変動すれば、大気中の O_3 濃度が同じであっても、 O_3 の影響の程度が変化するこ
17 とが示されている。なお、各環境要因の概要については「1.3.農作物影響を変化させる環境要因」
18 に整理したとおりである。

19

20 日本の樹木を対象としてその成長や光合成に対する O_3 の影響に及ぼす土壤乾燥ストレスの作
21 用を評価した実験的研究はいくつかある。ブナを対象とした研究では O_3 によるブナの肥大成長
22 の低下程度や翌年の成長に及ぼす悪影響の程度は、土壤乾燥ストレスによって変化しないことが
23 報告されている。一方で別の研究では O_3 によるブナの純光合成速度の低下程度は土壤乾燥スト
24 レスによって緩和されると報告されている。そのため、 O_3 の影響に対する土壤乾燥ストレスの作
25 用はその程度や気象条件等によって異なる可能性が考えられる。

26 土壤への窒素負荷や施肥が O_3 の影響に及ぼす作用についていくつかの実験的研究が報告され
27 ている。例えば、ブナにおいては成長や純光合成速度の O_3 による低下が土壤への窒素負荷によ
28 って著しくなるのに対し、カラマツにおいては O_3 による成長低下が窒素負荷によって緩和され
29 ることが報告されている。また、コナラ、スダジイ、アカマツ及びスギにおいては O_3 による成
30 長低下の程度が土壤への窒素負荷によって変化しないことが報告されている。一方で、ブナを対
31 象とした別の研究では土壤への窒素負荷によって O_3 による純光合成速度の低下は著しくなるが
32 成長の低下程度は変化しないことや施肥によって O_3 による成長低下が緩和されるという報告が
33 あり、同じ樹種であっても気象条件や窒素以外の栄養状態などによってその作用は異なる可能性
34 が考えられる。

35 異なる大気 CO_2 濃度環境で育成した日本の樹木の成長や光合成に対する O_3 の影響を評価した
36 実験的研究はいくつかある。これらの研究では、 O_3 の影響に対する高濃度 CO_2 の緩和・相殺作
37 用には樹種間差異があると考えられ、また、同じ樹種であっても、その作用は気象条件によって
38 異なる可能性が考えられる。なお、高濃度 CO_2 環境で育成したコナラ、ミズナラ及びブナの成長
39 が O_3 によって促進された報告もあり、これは O_3 による影響への補償的応答として生じた葉への

1 乾物分配の増加と高濃度 CO₂ による葉の光合成促進の相乗的な作用によって引き起こされた可
2 能性が指摘されている。

3 その他、酸性雨、酸性霧もしくは二酸化硫黄が樹木に及ぼす影響を評価するための実験的研究
4 において、それらを樹木に対する O₃ の影響を変化させる要因として取り上げた実験的研究も報
5 告されている。これらの研究報告では一部の樹種については O₃ による根に対する地上部の乾重
6 量比の増加や個体乾重量の低下が顕著になることが報告されているが、そのような助長作用が認
7 められない樹種も多く、樹種間差異があるとされている。

8

1 3. オゾンと森林衰退との関係

2 一般に森林衰退とは「何らかの原因によって森林を構成している樹木の衰退が進行している過
3 程と、その結果として多数の樹木が枯死し、森林としての構造や機能が保持できない状態」と定
4 義できる。現在までに様々な森林衰退が日本各地において観察されてきた。

5 丹沢山地におけるブナの枯死は 1970～1980 年頃にまとまって発生しており、2000 年代以降
6 も衰退が続いている。特に蛭ヶ岳から丹沢山・竜ヶ馬場にかけての主稜線と檜洞丸の南～西向き
7 斜面を中心にブナ林の衰退が進行している。このような衰退状態やその原因などを調査したとこ
8 ろ南斜面におけるブナの衰退木は北斜面の健全木に比べて葉の光合成速度、水利用効率、クロロ
9 フィル含量などが低いことが明らかになった。一方で、夜間の蒸散速度や気孔コンダクタンスは
10 健全木に比べて衰退木において高く、これに南斜面の大気の方が乾燥していることを合わせると
11 衰退木は健全木に比べて水分ストレスを受けやすいと考えられた。また、両斜面の土壌分析から
12 土壌が酸性化しているとは言えず両斜面とも二酸化硫黄や二酸化窒素の濃度は低かったが、南斜
13 面では O₃ 濃度が高かったため、O₃ がブナに対して悪影響を及ぼしている可能性が指摘された。
14 また、犬越路において実施された OTC 実験、丹沢山地の大気に関する物質移流のモデルシミュ
15 レーション及び丹沢山地を含む周辺地域の O₃ 吸収量の数値モデルによる推定結果から、丹沢山
16 地におけるブナ林の衰退に O₃ が関与している可能性が指摘されている。この他にも、気温上昇、
17 土壌の乾燥ストレス、ブナハバチやシカによる食害などもブナ林の減少に影響を与えていること
18 が指摘されており、ブナ林の減少に与える要因は複雑であると考えられている。

19 立山黒部アルペンルートでは、主に大型バスによって観光客の輸送がなされており道路沿いの
20 ブナ林で樹木の枯死が目立つことから排気ガスの悪影響が指摘されている。また、日本海に面し
21 ているため大陸からの O₃ や SO₄²⁻などの広域大気汚染の影響も懸念された。そこで、ブナ・スギ
22 混交林におけるバス通行量、大気汚染物質 (NO₂ と O₃) 及び森林動態の関係について調査を行
23 った結果、O₃濃度は道路からの距離にかかわらず高い値を示し、平均濃度が 60 ppb を超えるこ
24 ともあった。O₃曝露実験の結果からブナは O₃感受性が高く、スギは O₃感受性が低いことが知
25 られており、現地の O₃濃度は感受性の高いブナの衰退を引き起こすほどに上昇しており、ブナ
26 の衰退で生じたギャップにおいて O₃感受性の低いスギの成長が促進されたと考えられた。また、
27 2006 年以降は、中国の大気汚染対策による大気汚染物質の排出削減とラニーニャ的な気候条件
28 の影響によって O₃感受性の高いブナと感受性の低いスギの種間関係が変化し、ブナの競争力が
29 高まる要因となっていた可能性が考えられた。

30 関東平野における 1980 年代以降のスギの衰退を説明する仮説の 1 つとして O₃の影響が考え
31 られた。スギは日本の主要な樹種と比較して水ストレスに弱く乾燥化が主要因であると推論され
32 たが、一方で O₃曝露実験では O₃による気孔調整機能の低下が認められることから、調査は行わ
33 れていないものの乾燥に伴う水分ストレスへの耐性を低下させている可能性も考えられている。
34 スギ林の衰退メカニズムは明らかになっていないが、都市化や気候変動そして大気汚染といった
35 要因が複合的に関与して樹木の健全性の低下や枯死につながったと考えられた。

36 屋久島では 1990 年にヤクタネゴヨウの衰退が報告されており、それを説明する仮説の 1 つと
37 して中国からの越境大気汚染として運ばれてくる高濃度の O₃ と SO₄²⁻の沈着が挙げられた。ヤク
38 タネゴヨウの O₃感受性は明らかになっておらず、どの程度の影響を引き起こしているかは不明
39 であるが、現地においては北西からの風が卓越した際に大気 O₃濃度が顕著に高くなり、100 ppb

1 を超えるような高濃度も観測されている。そのため、O₃がヤクタネゴヨウの生育に悪影響を引き
2 起こしている可能性も指摘されている。

3 摩周湖外輪山ではダケカンバの衰退が観測されている。現地の土壌・植生調査から土壌の窒素
4 や可給態リン酸含有量は一般的な火山灰地と比べて半分以下であり極めて貧栄養であることが
5 報告されている。さらに、衰退木の多い場所では有効土壌深が健全木の多い場所の半分程度であ
6 り、土壌の養分及び水分保持能力がダケカンバの衰退に関与している可能性が指摘されている。
7 一方、大気汚染物質に関する調査では、現地における春のO₃濃度は月平均で50~60 ppbと比
8 較的高濃度であった。また、ダケカンバとシラカンバの苗木を用いたOTC実験の結果、O₃が葉
9 の光合成能力を低下させ、根へのバイオマス配分を低下させている可能性が示唆されている。摩
10 周湖外輪山のダケカンバ衰退は特に水分に関して脆弱な土壌環境であることが主要因であるも
11 のの、O₃等の人為起源の大気汚染もダケカンバの生育に影響を及ぼしてきた可能性がある。

12 奥日光の亜高山帯では1980年代からダケカンバ、シラビソ、オオシラビソ、コメツガなどの
13 衰退が観察されている。この衰退は自然な樹木枯死であるとの指摘もあるが、首都圏からの移流
14 に由来する100 ppbを超える高濃度のO₃やO₃に起因するヒドロキシラジカル及び有機過酸
15 化物の影響の可能性も指摘されている。首都圏からの大気汚染物質の流入と沈着による土壌酸性
16 化が森林衰退に寄与している可能性が指摘されたが、現地調査ではその証拠は認められなかった。
17 一方で、奥日光のコメツガの針葉と土壌はMg含量及びMg/Caモル比が低く、これが樹木の生
18 理的ストレスの感受性を高めている可能性が指摘されている。また、夏季の乾燥が衰退地に生育
19 するダケカンバの成長低下に関与している可能性が指摘されている。

20 宝満山ではモミの衰退が観測されている。1992年の調査によると、衰退しているモミの個体
21 数は全体の28%であり、特に山頂付近で著しかったが調査地点によって枯損の程度に差が見ら
22 れたことが報告されている。大径木のモミでは衰退が特に著しい傾向があった。林内の雨や霧の
23 pH、土壌の酸性度を調査した結果、両者ともある程度低いpHであったが調査地点間の違いはな
24 く地点間の衰退程度の差異を説明することはできなかった。一方、宝満山では100 ppbを超える
25 高濃度のO₃は観測されなかったものの、三郡山の山頂では1987年5月から9月の期間で1時
26 間値が60 ppbを超える合計時間数が661時間あり、O₃がモミに対してストレスを与えた可能性
27 は否定できなかった。

28 奥秩父山地においてシラビソの枯死が観察され、現地で立ち枯れの実態、降水の性状、土壌の
29 pH、気象条件及びO₃濃度の調査が行われた。シラビソの立ち枯れは保水力が乏しい尾根直下地
30 域で断続的に発生していたが、降水の汚染や土壌酸性化は確認されず、O₃濃度は平地部に比べて
31 平均値としては高いが、日中のピーク濃度は平地部より低かった。これらの結果から、長期的な
32 O₃の影響に関しては今後の検討課題であるが、都市部からの移流がシラビソの立ち枯れを引き
33 起こしている可能性は低いと考えられ、立ち枯れは天然更新の一形態とされる縞枯れ現象である
34 と結論づけられた。

35

1 4. パーオキシアセチルナイトレート (PAN) の植物影響

2 日本国内ではペチュニアを対象とした葉の可視障害に関する研究が実施されている。

3 25,000 ルクス of 光下で人工気象室内のペチュニア (品種: ホワイトエンサイン) に PAN を曝
4 露した調査では、葉の可視障害発現閾値は、1 時間曝露で 0.032 ppm、3 時間で 0.014 ppm、8 時
5 間で 0.007 ppm と報告されている。東京都立川市での PAN 濃度とホワイトエンサインの葉の可
6 視障害発現の研究では、大気中の PAN 濃度が 3 ppb 前後が葉の可視障害発生限界濃度であると
7 推測されている。東京都有楽町での野外調査では PAN の日最高濃度や一日の曝露量の増加に伴
8 い可視障害の発生率が高まること、一方で、一日の曝露量と障害の程度に有意な相関がみられな
9 いことが報告されている。また、可視障害が発現する可能性のある PAN 濃度は日最高濃度で 4
10 ppb、一日の曝露量 (8:00~18:00 の積算値) で 20 ppb・h 程度と報告されている。

11 ペチュニア (品種: ホワイトチャンピオン)、インゲンマメ (品種: ホンキントキ) 及びハツカ
12 ダイコン (品種: コメット) に自然光型ファイトトンネル内で PAN を曝露した研究ではペチュニ
13 アやインゲンマメでは 30 ppb 以上で葉に可視障害が発現したが、ハツカダイコンではいずれの
14 PAN 曝露によっても葉に可視障害が発現しなかったことが報告されている。

15 気孔を介した葉の PAN 吸収速度と葉の可視障害の程度に基づく PAN 感受性を調べるために、
16 草本 9 種に対して人工光型グロースキャビネット内に設置した透明アクリル製チャンバー内で
17 50 または 100 ppb の PAN を 5 時間曝露する実験を行った。明条件では PAN の吸収速度はほぼ
18 一定レベルに保たれたが、暗条件では急激に低下し、30~45 分でほぼゼロになった。これは、
19 PAN が主に開いた気孔を通じて葉内に吸収されることを示唆する。葉の PAN 吸収速度はヒマワ
20 リが最も高く、トウモロコシが最も低かった。可視障害に基づく PAN 感受性はペチュニアが最
21 も高く、トウモロコシとラッカセイが最も低かった。一方で、PAN の吸収速度と可視障害の程度
22 の間には相関が見られず、種の PAN 感受性の違いは、PAN の吸収速度ではなく、葉内の代謝プ
23 ロセスの感受性によるものであると考えられた。

24 PAN の農作物や樹木への影響に関する知見は極めて限られている。トマトの 4 品種に PAN (0
25 ppb、50 ppb または 100 ppb) と O₃ (0 ppb、102 ppb または 204 ppb) を組み合わせて曝露し成
26 長への影響を調査した結果、102 ppb 及び 204 ppb の O₃ で葉の可視障害が発現したと報告され
27 たが、PAN は単独または O₃ と組み合わせでも葉に可視障害が発現しなかった。O₃ 曝露は 4 品
28 種すべての成長を低下させ、PAN 曝露も成長を低下させたが、統計的には有意ではなかった。
29 O₃ と PAN のトマトの成長に対する複合影響は相殺的影響であったが、地上部乾重量と根乾重量
30 の比率に対する複合影響は相乗的影響であった。O₃ と PAN の複合曝露は葉の成長と比較して根
31 の成長をより著しく抑制したことに起因している。

32 ペチュニア (品種: ホワイトチャンピオン)、インゲンマメ (品種: ホンキントキ)、ハツカダ
33 イコン (品種: コメット) に PAN を曝露した結果、ペチュニアとインゲンマメの乾物成長は低
34 下したが、ハツカダイコンは有意な影響を受けなかった。ペチュニアとインゲンマメの個体乾重
35 量の低下と純同化率の低下率との間には正の相関が認められており、葉における同化産物の生産
36 効率の低下が原因であることが示唆された。

37 植物の生理生化学的機能に対する PAN の影響やそのメカニズムは未解明である。PAN と O₃
38 はどちらも O_x の一種であるが、両者の光合成などの生理生化学的機能に対する影響は異なる。

39

1 5. 全体のまとめ

2 O₃ の曝露による国内における農作物の葉の可視障害に関する検討結果によると、比較的高濃
3 度の O₃ 曝露によって葉に可視障害が発現し、可視障害の発現に対する O₃ 感受性は作物種だけで
4 なく品種間でも異なっていることが報告されている。なお、葉の可視障害に関する研究は多数報
5 告されているが、共通した定量評価手法がないため現時点では定量評価は困難と考えられた。

6 O₃ の曝露による国内における農作物の成長や収量などの影響に関する検討結果によると、O₃
7 は多岐にわたる農作物の成長や収量などに対して悪影響を及ぼすことは明らかである。さらに、
8 O₃ に対する感受性は作物種の間で異なっているだけでなく、同一種でも品種による差異が認め
9 られている。また、イネなどの比較的長期的に O₃ 曝露される作物においては、生育段階によっ
10 て O₃ 感受性が変化することが十分に予想されている。

11 O₃ の曝露による樹木の乾物成長に関する知見によると、O₃ の曝露実験からは、現状濃度の O₃
12 によって、いくつかの樹種の成長が低下することが報告されている。さらに、O₃ 曝露実験から得
13 られる AOT40 と樹木の個体乾物成長との関係に基づいて、現状濃度の O₃ でブナの年間の成長
14 が 5%以上低下している日本の森林地域が存在することが示唆される知見が認められた。樹木は
15 多年生植物であり複数年にわたる累積的な O₃ の影響が懸念される。一方、O₃ 感受性には樹種間
16 差があることや、気象条件や栄養条件などの生育環境によって感受性が変化することも報告され
17 ており、O₃ による成長低下予測の結果は慎重に解釈する必要がある。

18 O₃ の作物や樹木への影響を変化させる環境要因としては、気温上昇、土壤乾燥ストレス、土壤
19 窒素負荷や施肥、CO₂ 濃度上昇、酸性雨等があり、これらの環境要因が O₃ の植物影響に及ぼす
20 作用に関する実験的研究が報告されている。その結果、O₃ の植物影響は気温上昇、酸性雨及び酸
21 性霧によって顕著になるという報告があったのに対し、土壤乾燥ストレスや大気 CO₂ 濃度の上
22 昇によって緩和・相殺されるという作用が報告されている。また、土壤への窒素負荷や施肥、ま
23 たは SO₂ の作用としては O₃ の影響が緩和される植物種がある一方で助長される植物種もあるこ
24 とが報告されている。このように、O₃ の影響の程度は他の環境要因によっても変化し、その変化
25 は環境要因の種類によっても異なる。また、同一の環境要因の変動であっても、その程度や樹種
26 によって O₃ の影響に及ぼす作用は異なっている。

27 O₃ に関連した調査が行われた森林衰退の事例調査地の多くでは、比較的高い濃度の O₃ が観測
28 されており、森林衰退への O₃ の関与の可能性が指摘されている。一方で、森林衰退には生育す
29 る土壤や気象条件、他植物との競争、昆虫による食害などの様々な要因が複雑に関連しあうと考
30 えられるため、O₃ 濃度や O₃ 吸収量が高いことだけで、森林衰退に O₃ が関与していると結論付
31 けることはできない。したがって、比較的高い濃度の O₃ が観測されている森林衰退地域の多く
32 においては、O₃ の関与が否定できないものの、明確な因果関係は示されていないのが現状といえ
33 る。

34 PAN の日本国内の植物種を対象とした植物影響に関する研究は極めて限られているが、大気
35 中の PAN は葉に存在する気孔を介して葉内に吸収され、感受性が高い植物種においては葉に可
36 視障害が発現し、成長や光合成などの生理機能の低下が引き起こされることが示されている。ま
37 た、これらの影響は O₃ と比較して低濃度で生じる可能性が示唆されている。

38

- 1 (出典)
2 1章
- 3 Izuta, T., Funada, S., Ohashi, T., Miyake, H. & Totsuka, T. (1991) Effects of low concentrations
4 of ozone on the growth of radish plants under different light intensities. *Environmental*
5 *Sciences*, 1, 21-33.
- 6 Izuta, T., Takahashi, K., Matsumura, H. & Totsuka, T. (1999) Cultivar difference of *Brassica*
7 *campestris* L. in the sensitivity to O₃ based on the dry weight growth. *Journal of Japan*
8 *Society for Atmospheric Environment*, 34, 137-146.
- 9 Izuta, T., Miyake, H. & Totsuka, T. (1993) Evaluation of air-polluted environment based on the
10 growth of radish plants cultivated in small-sized open-top chambers. *Environmental*
11 *Sciences*, 2, 25-37.
- 12 Izuta, T., Ohtsu, G., Miyake, H. & Totsuka, T. (1994) Effects of ozone on dry weight growth, net
13 photosynthetic rate and leaf diffusive conductance in three cultivars of radish plants.
14 *Journal of Japan Society of Air Pollution*, 29, 1-8.
- 15 Izuta, T., Takahashi, S., Aoki, M. & Totsuka, T. (1995) Effects of ozone and ultraviolet-B radiation,
16 alone and in combination, on growth of cucumber plants. *Journal of Japan Society of Air*
17 *Pollution*, 30, 126-136.
- 18 Kobayashi, K., Miller, J.E., Flagler, R.B. & Heck, W.W. (1993) Model analysis of interactive effects
19 of ozone and water stress on the yield of soybean. *Environmental Pollution*, 82, 39-45.
- 20 Nouchi, I., Ito, O., Harazono, Y. & Kobayashi, K. (1991) Effects of chronic ozone exposure on
21 growth, root respiration and nutrient uptake of rice plants. *Environmental Pollution*, 74,
22 149-164.
- 23 Sawada, H. & Kohno, Y. (2009) Differential ozone sensitivity of rice cultivars as indicated by visible
24 injury and grain yield. *Plant Biology*, 11, 70-75.
- 25 Saji, S., Bathula, S., Kubo, A., Tamaoki, M., Aono, M., Sano, T., Tobe, K., Timm, S., Bauwe, H.,
26 Nakajima, N. & Saji, H. (2017) Ozone sensitive *Arabidopsis* mutants with deficiencies in
27 photorespiratory enzymes. *Plant and Cell Physiology*, 58, 914-924.
- 28 Tatsumi, K., Abiko, T., Kinose, Y., Inagaki, S. & Izuta, T. (2019) Effects of ozone on the growth
29 and yield of rice (*Oryza sativa* L.) under different nitrogen fertilization regimes.
30 *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 32103-32113.
- 31 Yonekura, T., Shimada, T., Miwa, M., Arzate, A. & Ogawa, K. (2005b) Impacts of tropospheric
32 ozone on growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agricultural Meteorology*,
33 60, 1045-1048.
- 34 Yamaguchi, M., Inada, H., Satoh, R., Hoshino, D., Nagasawa, A., Negishi, Y., Sasaki, H., Nouchi,
35 I., Kobayashi, K. & Izuta, T. (2008) Effects of ozone on the growth, yield and leaf gas
36 exchange rates of two Japanese cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agricultural*
37 *Meteorology*, 64, 131-141.

- 1 Yamaguchi, M., Hoshino, D., Inada, H., Akhtar, N., Sumioka, C., Takeda, K. & Izuta, T. (2014)
2 Evaluation of the effects of ozone on yield of Japanese rice (*Oryza sativa* L.) based on
3 stomatal ozone uptake. *Environmental Pollution*, 184, 472-480.
- 4 Yonekura, T., Kihira, A., Shimada, T., Miwa, M., Arzate, A., Izuta, T. & Ogawa, K. (2005a) Impacts
5 of O₃ and CO₂ enrichment on growth of komatsuna (*Brassica campestris*) and radish
6 (*Raphanus sativus*). *Phyton, Annales Rei Botanicae, Horn*, 45, 229-235.
- 7 伊豆田 猛, 船田 周, 大橋 毅, 三宅 博, 戸塚 績. (1988a) 異なる温度条件下におけるハツカダ
8 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.
- 9 伊豆田 猛, 滝川正義, 堀江勝年, 三宅 博, 戸塚 績. (1988b) ハツカダイコンの生長を指標とし
10 た小型オープントップチャンバーによる大気環境の評価. *大気汚染学会誌*, 23, 284-292.
- 11 沖野英男, 今村三郎, 井戸 豊, 田辺仁志. (1981) 光化学オキシダントが水稻の生育収量に及ぼ
12 す影響 フィルタードエアチャンバー法による検討. *愛知県農業総合試験場研究報告*, 13,
13 85-88.
- 14 川方俊和, 矢島正晴. (1993) ダイズの物質生産に及ぼす影響の定量的解析. 農林水産技術会議事
15 務局 (編) 長期・低濃度広域大気汚染が主要農作物に及ぼす影響の解明と評価法の開発
16 に関する研究, 279, pp. 26-31.
- 17 佐藤賢一, 林 雄, 柴 英雄, 長谷川英世. (1983) オゾンの低濃度連続接触が農作物の生育収量に
18 及ぼす影響—カブ、インゲン、ホウレンソウ、水稻—. 群馬県農業総合試験場, 埼玉県農
19 業試験場, 千葉県農業試験場, 東京都農業試験場, 神奈川県農業試験場, 愛知県農業試
20 験場, 大阪府農林技術センター, 兵庫県農業総合センター, 岡山県農業試験場 (編) 光
21 化学スモッグによる農作物被害の解析と対策, pp. 183-186.
- 22 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
23 合影響. *大気環境学会誌*, 52, 59-67.
- 24 ジョーンズ, H.G., 久米 篤, 大政謙次 (監訳) (2017) 植物と微気象 (第3版) 植物生理生態学へ
25 の定量的なアプローチ. 森北出版.
- 26 千葉県農業試験場. (1985) 空気浄化法による畑作物の生育・収量影響の解析. 農林水産技術会議
27 事務局 (編) 光化学オキシダントの農林作物の生育収量に及ぼす影響の解析に関する研
28 究, 164, pp. 148-153.
- 29 寺門和也, 久野春子. (1981) FAC 利用による光化学オキシダントの植物被害解析 (光化学オキシ
30 ダントの指標植物に関する研究 第1報). *東京都農業試験場研究所報告*, 14, 13-25.
- 31 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
32 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
33 会誌*, 53, 186-193.
- 34 中島武彦. (1989) 野菜の生育・収量に及ぼすオゾン及び二酸化窒素ガス接触の影響. 農林水産技
35 術会議事務局 (編) 大気汚染物質による農作物の生理・遺伝的影響に関する研究, 216, pp.
36 116-123.
- 37 中村 拓. (1979) 光化学オキシダントによるイネの被害に関する研究. *農業技術研究所報告*, 24,
38 1-68.

- 1 中村 拓, 太田保夫, 橋本俊一, 沖野英男. (1976) 光化学オキシダントによる稲の被害について :
2 第2報 空気浄化法による生育収量の解析. 日本作物学会紀事, 45, 630-636.
- 3 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
4 的感受性比較. 大気汚染学会誌, 23, 355-370.
- 5 松丸恒夫, 高崎 強. (1991) バレイシヨの光化学オキシダントによる被害 第2報 オキシダント
6 がバレイシヨの生育, 収量に及ぼす影響の空気浄化法による解析. 大気汚染学会誌, 26,
7 385-391.
- 8 三重大学.(1985) 果樹の生育・収量に及ぼすオゾン及びエチレンの影響. 農林水産技術会議事務
9 局(編) 光化学オキシダントの農林作物の生育収量に及ぼす影響の解析に関する研究,
10 164, pp.161-167.
- 11 野菜試験場.(1985) トマト・キュウリの生育に及ぼす低濃度オゾン接触の影響. 農林水産技術会
12 議事務局(編) 光化学オキシダントの農林作物の生育収量に及ぼす影響の解析に関する
13 研究, 164, pp. 153-156.
- 14 矢島正晴. (1993) 水稻の物質生産に及ぼす影響の定量的解析. 農林水産技術会議事務局(編) 長
15 期・低濃度広域大気汚染が主要農作物に及ぼす影響の解明と評価法の開発に関する研究,
16 279, pp. 14-19.
- 17 矢吹駿一, 大嶋保夫, 松崎敏英. (1983) 水稻、ラッカセイ、ダイズのオキシダントに対する感受
18 性の品種間差異. 群馬県農業総合試験場, 埼玉県農業試験場, 千葉県農業試験場, 東京都
19 農業試験場, 神奈川県農業試験場, 愛知県農業試験場, 大阪府農林技術センター, 兵庫
20 県農業総合センター, 岡山県農業試験場(編). 光化学スモッグによる農作物被害の解析
21 と対策, pp. 48-52.
- 22 米倉哲志. (2016) 大気環境と植物 一第3講 農作物に対する光化学オキシダント(オゾン)の
23 影響一. 大気環境学会誌, 51, A57-A66.
- 24 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
25 率に対するオゾンと土壤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-
26 50.
- 27
- 28 2章
- 29 Ball, J.T., Woodrow, I.E. & Berry, J.A. (1987) A model predicting stomatal conductance and its
30 contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions.
31 In Progress in Photosynthesis Research, Biggins, J., (ed.) Springer: Dordrecht, pp. 221-
32 224.
- 33 Hoshika, Y., Watanabe, M., Inada, N. & Koike, T. (2012b) Modeling of stomatal conductance for
34 estimating ozone uptake of *Fagus crenata* under experimentally enhanced free-air ozone
35 exposure. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223, 3893-3901.
- 36 Hoshika, Y., Katata, G., Deushi, M., Watanabe, M., Koike, T. & Paoletti, E. (2015) Ozone-induced
37 stomatal sluggishness changes carbon and water balance of temperate deciduous forests.
38 *Scientific Reports*, 5, 9871.

- 1 Kohno, Y., Matsumura, H., Ishii, T. & Izuta, T. (2005) Establishing critical levels of air pollutants
2 for protecting East Asian vegetation — A challenge. In Plant Responses to Air Pollution
3 and Global Change, Omasa, K., Nouchi, I. & De Kok, L. J., (eds.) Springer: Tokyo, pp.
4 243-250.
- 5 Kinose, Y., Azuchi, F., Uehara, Y., Kanomata, T., Kobayashi, A., Yamaguchi, M. & Izuta, T. (2014)
6 Modeling of stomatal conductance to estimate stomatal ozone uptake by *Fagus crenata*,
7 *Quercus serrata*, *Quercus mongolica* var. *crispula* and *Betula platyphylla*. Environmental
8 Pollution, 194, 235-245.
- 9 Kinose, Y., Fukamachi, Y., Okabe, S., Hiroshima, H., Watanabe, M. & Izuta, T. (2017a)
10 Photosynthetic responses to ozone of upper and lower canopy leaves of *Fagus crenata*
11 Blume seedlings grown under different soil nutrient conditions. Environmental Pollution,
12 223, 213-222.
- 13 Kinose, Y., Fukamachi, Y., Okabe, S., Hiroshima, H., Watanabe, M. & Izuta, T. (2017b) Nutrient
14 supply to soil offsets the ozone-induced growth reduction in *Fagus crenata* seedlings.
15 Trees, 31, 259-272.
- 16 Kitao, M., Komatsu, M., Yazaki, K., Kitaoka, S. & Tobita, H. (2015) Growth overcompensation
17 against O₃ exposure in two Japanese oak species, *Quercus mongolica* var. *crispula* and
18 *Quercus serrata*, grown under elevated CO₂. Environmental Pollution, 206, 133-141.
- 19 Matsumura, H., Mikami, C., Sakai, Y., Murayama, K., Izuta, T., Yonekura, T., Miwa, M. & Kohno,
20 Y. (2005) Impacts of elevated O₃ and/or CO₂ on growth of *Betula platyphylla*, *Betula*
21 *ermanii*, *Fagus crenata*, *Pinus densiflora* and *Cryptomeria japonica* seedlings. Journal of
22 Agricultural Meteorology, 60, 1121-1124.
- 23 Watanabe, M., Yamaguchi, M., Iwasaki, M., Matsuo, N., Naba, J., Tabe, C., Matsumura, H., Kohno,
24 Y. & Izuta, T. (2006) Effects of ozone and/or nitrogen load on the growth of *Larix*
25 *kaempferi*, *Pinus densiflora* and *Cryptomeria japonica* seedlings. Journal of Japan Society
26 for Atmospheric Environment, 41, 320-334.
- 27 Watanabe, M., Yamaguchi, M., Matsumura, H., Kohno, Y. & Izuta, T. (2008) Effects of ozone on
28 the growth and photosynthesis of *Castanopsis sieboldii* seedlings grown under different
29 nitrogen loads. Journal of Agricultural Meteorology, 64, 143-155.
- 30 Watanabe, M., Yamaguchi, M., Tabe, C., Iwasaki, M., Yamashita, R., Funada, R., Fukami, M.,
31 Matsumura, H., Kohno, Y. & Izuta, T. (2007) Influences of nitrogen load on the growth
32 and photosynthetic responses of *Quercus serrata* seedlings to O₃. Trees, 21, 421-432.
- 33 Watanabe, M., Yamaguchi, M., Iwasaki, M., Matsuo, N., Naba, J., Tabe, C., Matsumura, H., Kohno,
34 Y. & Izuta, T. (2006) Effects of ozone and/or nitrogen load on the growth of *Larix*
35 *kaempferi*, *Pinus densiflora* and *Cryptomeria japonica* seedlings. Journal of Japan Society
36 for Atmospheric Environment, 41, 320-334.
- 37 Watanabe, M., Li, J., Matsumoto, M., Aoki, T., Ariura, R., Fuse, T., Zhang, Y., Kinose, Y.,
38 Yamaguchi, M. and Izuta, T. (2022) Growth and photosynthetic responses to ozone of

- 1 Siebold's beech seedlings grown under elevated CO₂ and soil nitrogen supply.
2 Environmental Pollution, 304, 119233.
- 3 Watanabe, M., Umemoto-Yamaguchi, M., Koike, T. & Izuta, T. (2010) Growth and photosynthetic
4 response of *Fagus crenata* seedlings to ozone and/or elevated carbon dioxide. Landscape
5 and Ecological Engineering, 6, 181-190.
- 6 Yamaguchi, M., Watanabe, M., Iwasaki, M., Tabe, C., Matsumura, H., Kohno, Y. & Izuta, T. (2007)
7 Growth and photosynthetic responses of *Fagus crenata* seedlings to O₃ under different
8 nitrogen loads. Trees, 21, 707-718.
- 9 Yamaguchi, M., Watanabe, M., Matsumura, H., Kohno, Y. & Izuta, T. (2011) Experimental studies
10 on the effects of ozone on growth and photosynthetic activity of Japanese forest tree
11 species. Asian Journal of Atmospheric Environment, 5, 65-78.
- 12 Yamaguchi, M., Kinose, Y., Matsumura, H. & Izuta, T. (2019) Evaluation of O₃ effects on
13 cumulative photosynthetic CO₂ uptake in seedlings of four Japanese deciduous broad-
14 leaved forest tree species based on stomatal O₃ uptake. Forests, 10, 556.
- 15 Yonekura, T., Dokiya, Y., Fukami, M. & Izuta, T. (2001a) Effects of ozone and/or soil water stress
16 on growth and photosynthesis of *Fagus crenata* seedlings. Water, Air, & Soil Pollution,
17 130, 965-970.
- 18 Yonekura, T., Honda, Y., Oksanen, E., Yoshidome, M., Watanabe, M., Funada, R., Koike, T. &
19 Izuta, T. (2001b) The influences of ozone and soil water stress, singly and in combination,
20 on leaf gas exchange rates, leaf ultrastructural characteristics and annual ring width of
21 *Fagus crenata* seedlings. Journal of Japan Society for Atmospheric Environment, 36, 333-
22 351.
- 23 Yonekura, T., Yoshidome, M., Watanabe, M., Honda, Y., Ogiwara, I. & Izuta, T. (2004) Carry-over
24 effects of ozone and water stress on leaf phenological characteristics and bud frost
25 hardness of *Fagus crenata* seedlings. Trees, 18, 581-588.
- 26 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
27 学会誌, 32, A73-A81.
- 28 河野吉久, 須藤 仁, 石井 孝, 相原敬次, 内山佳美. (2007) 丹沢山地周辺のオゾン濃度の実態と
29 ブナに対する影響. 丹沢大山総合調査団 (編) 丹沢大山総合調査学術報告書, 財団法人平
30 岡環境科学研究所, pp. 383-395.
- 31 河野吉久, 松村秀幸. (1999) スギ, ヒノキ, サワラの生育に及ぼすオゾンと人工酸性雨の複合影
32 響. 大気環境学会誌, 34, 74-85.
- 33 武田麻由子, 相原敬次. (2007) 丹沢山地の大気中オゾンがブナ (*Fagus crenata*) 苗に及ぼす影響.
34 大気環境学会誌, 42, 107-117.
- 35 松村秀幸, 青木 博, 河野吉久, 伊豆田 猛, 戸塚 績. (1996) スギ, ヒノキ, ケヤキ苗の乾物成長
36 とガス交換速度に対するオゾンの影響. 大気環境学会誌, 31, 247-261.
- 37 松村秀幸, 小林卓也, 河野吉久. (1998) スギ, ウラジロモミ, シラカンバ, ケヤキ苗の乾物成長
38 とガス交換速度に対するオゾンと人工酸性雨の単独および複合影響. 大気環境学会誌,
39 33, 16-35.

- 1 松村秀幸. (2000) 9種の針葉樹と5種の落葉広葉樹の生長におよぼす人工酸性ミストとオゾンの
2 単独および複合影響. 電力中央研究所報告 U99035.
- 3 米倉哲志. (2006) 水ストレスと植物. 伊豆田 猛 (編) 植物と環境ストレス, コロナ社, pp. 145-
4 167.
- 5 渡辺 誠, 山口真弘. (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
6 価. 日本生態学会誌, 61, 89-96.
- 7
- 8 3章
- 9 Hoshika, Y., Tatsuda, S., Watanabe, M., Wang, X., Watanabe, Y., Saito, H. & Koike, T. (2013)
10 Effect of ambient ozone at the somma of Lake Mashu on growth and leaf gas exchange in
11 *Betula ermanii* and *Betula platyphylla* var. *japonica*. Environmental and Experimental
12 Botany, 90, 12-16.
- 13 Kohno, Y. (2017) Decline of *Fagus crenata* in the Tanzawa mountains, Japan. In Air Pollution
14 Impacts on Plants in East Asia, Izuta, T., (ed.) Springer: Tokyo, pp. 151-162.
- 15 Kume, A., Fujimoto, M., Mizoue, N., Honoki, H., Nakajima, H. & Ishida, M. (2020) Impact of
16 reduced ozone concentration on the mountain forests of Mt. Tateyama, Japan.
17 Environmental Pollution, 267, 115407.
- 18 Kume, A., Nagafuchi, O., Akune, S., Nakatani, N., Chiwa, M. & Tetsuka, K. (2010) Environmental
19 factors influencing the load of long-range transported air pollutants on *Pinus amamiana*
20 in Yakushima Island, Japan. Ecological Research, 25, 233-243.
- 21 Kume, A., Numata, S., Watanabe, K., Honoki, H., Nakajima, H. & Ishida, M. (2009) Influence of
22 air pollution on the mountain forests along the Tateyama–Kurobe Alpine route. Ecological
23 Research, 24, 821-830.
- 24 Nakano, T., Yokoo, Y., Okumura, M., Jean, S.-R. & Satake, K. (2012) Evaluation of the impacts of
25 marine salts and Asian dust on the forested Yakushima Island ecosystem, a world natural
26 heritage site in Japan. Water, Air, & Soil Pollution, 223, 5575-5597.
- 27 Suto, H., Hattori, Y., Tanaka, N. & Kohno, Y. (2008) Effects of strong wind and ozone on localized
28 tree decline in the Tanzawa mountains of Japan. Asian Journal of Atmospheric
29 Environment, 2, 81-89.
- 30 Sakata, M. (1996) Evaluation of possible causes for the decline of Japanese cedar (*Cryptomeria*
31 *japonica*) based on elemental composition and $\delta^{13}\text{C}$ of needles. Environmental Science &
32 Technology, 30, 2376-2381.
- 33 Takahashi, M., Feng, Z., Mikhailova, T.A., Kalugina, O.V., Shergina, O.V., Afanasieva, L.V., Heng,
34 R.K.J., Majid, N.M.A. & Sase, H. (2020) Air pollution monitoring and tree and forest
35 decline in East Asia: A review. Science of The Total Environment, 742, 140288.
- 36 Yamaguchi, T., Watanabe, M., Noguchi, I. & Koike, T. (2017) Tree decline at the somma of Lake
37 Mashu in northern Japan. In *Air Pollution Impacts on Plants in East Asia*, Izuta, T., (ed.)
38 Springer: Tokyo, pp. 135-150.
- 39 伊豆田 猛. (2001) 森林衰退. 野内 勇 (編) 大気環境変化と植物の反応, 養賢堂, pp. 168-208.

- 1 伊豆田 猛, 小川和雄. (2004) 森林衰退の現状と取り組み (III) 奥日光前白根山周辺のダケカンバ
2 衰退と奥秩父亜高山帯のシラビソ立ち枯れ. 大気環境学会誌, 39, A65-A77.
- 3 伊豆田 猛. (2006) 植物と環境ストレス. コロナ社, p. 232
- 4 神奈川県自然環境保全センター. (2017) 丹沢ブナ林再生指針.
- 5 久米篤, 渡辺幸一, 永淵修, 朴木英治. (2011) 広域大気汚染の現状と森林生態系への影響: 屋久
6 島と立山の事例. 日本生態学会誌, 61, 97-106.
- 7 齋藤正彦, 若松伸司, 相原敬次. (2013) 丹沢山地における樹木のオゾン取込み量の推定. 大気環
8 境学会誌, 48, 251-259.
- 9 佐久間 彬, 渡辺 誠, 若松 歩, 川井田東吾, 小池孝良. (2013) 摩周湖外輪山における森林衰退と
10 土壌要因. 北方森林研究, 61, 105-106.
- 11 須田隆一, 宇都宮あきら, 大石興弘, 浜村研吾, 石橋龍吾, 杉泰 昭, 山崎正敏, 緒方 健, 清水英
12 幸. (1992) 宝満山モミ自然林の衰退に関する調査. 環境と測定技術, 19, 49-58.
- 13 高橋啓二, 梨本 真. (1993) 酸性雨等によるスギ衰退の原因を考察する/酸性降下物・オキシダ
14 ント説. 資源環境対策, 29, 145-154.
- 15 武田麻由子, 相原敬次. (2007) 丹沢山地の大気中オゾンがブナ (*Fagus crenata*) 苗に及ぼす影響.
16 大気環境学会誌, 42, 107-117.
- 17 谷川東子, 高橋正通, 野口享太郎, 重永英年, 長倉淳子, 酒井寿夫, 石塚和裕, 赤間亮夫. (2009)
18 奥日光の森林衰退地域の樹木生葉と土壌の養分特性-他の亜高山地域との比較から-.
19 環境科学会誌, 22, 401-414.
- 20 谷本丈夫, 劉 岩, 里道知佳, 大久保達弘, 二瓶幸志. (1996) 奥日光・足尾・赤城山地における森
21 林衰退と立地環境. 森林立地, 38, 1-12.
- 22 田村俊樹, 米倉哲志, 中路達郎, 清水英幸, 馮延文, 伊豆田 猛. (2002) 前白根山周辺におけるダ
23 ケカンバの生育状況, 葉内成分および生育土壌に関する調査. 大気環境学会誌, 37, 320-
24 330.
- 25 戸塚 績, 青木正敏, 伊豆田 猛, 堀江勝年, 志摩 克. (1997a) 檜洞丸山頂における南斜面ブナ衰
26 退地と北斜面ブナ健全地の気象条件比較. 財団法人神奈川県公園協会, 丹沢大山自然環
27 境総合調査団企画委員会 (編) 丹沢大山自然環境総合調査報告書, 神奈川県環境部, pp.
28 89-92.
- 29 戸塚 績, 青木正敏, 伊豆田 猛, 堀江勝年, 志摩 克 (1997b) 南斜面南斜面ブナ衰退地と北斜面
30 ブナ健全地の大気汚染濃度および土壌の比較. 財団法人神奈川県公園協会, 丹沢大山自
31 然環境総合調査団企画委員会 (編) 丹沢大山自然環境総合調査報告書, 神奈川県環境部,
32 pp. 93-96.
- 33 戸塚 績, 青木正敏, 伊豆田 猛, 堀江勝年, 志摩 克 (1997c) ブナ衰退地と健全地の葉の生理特
34 性、葉の特徴および葉内元素濃度比較とブナ衰退原因について. 財団法人神奈川県公園
35 協会, 丹沢大山自然環境総合調査団企画委員会 (編) 丹沢大山自然環境総合調査報告書,
36 神奈川県環境部, pp. 99-102.
- 37 畠山史郎, 村野健太郎. (1996) 奥日光前白根山における高濃度オゾンの観測. 大気環境学会誌,
38 31, 106-110.
- 39 畠山史郎. (1999) 奥日光地方における森林衰退と酸性降下物・酸化性大気汚染物質.

- 1 松本陽介, 丸山 温, 森川 靖. (1992a) スギの水分生理特性と関東平野における近年の気象変動
2 -樹木の衰退現象に関連して-. 森林立地, 34, 2-13.
- 3 松本陽介, 丸山 温, 森川 靖, 井上徹雄. (1992b) 人工酸性雨 (霧) およびオゾンがスギに及ぼす
4 影響と近年の汚染状況の変動-樹木の衰退現象に関連して-. 森林立地, 34, 85-97.
- 5
- 6 4 章
- 7 Izuta, T., Matsumura, H., Ohashi, T., Miyake, H. & Totsuka, T. (1993) Effects of peroxyacetyl
8 nitrate on the growth of petunia, kidney bean and radish plants. Environmental Sciences,
9 2, 63-75.
- 10 Okano, K., Tobe, K. & Furukawa, A. (1990) Foliar uptake of peroxyacetyl nitrate (PAN) by
11 herbaceous species varying in susceptibility to this pollutant. New Phytologist, 114, 139-
12 145.
- 13 Temple, P.J. & Taylor, O.C. (1985) Combined effects of peroxyacetyl nitrate and ozone on growth
14 of four tomato cultivars. Journal of Environmental Quality, 14, 420-424.
- 15 寺門和也, 久野春子. (1984) PAN 発生動向とペチュニアの被害. 東京都農業試験場研究報告, 17,
16 1-11.
- 17 野内 勇. (1979) オゾン, PAN の濃度および暴露時間と植物被害. 大気汚染学会誌, 14, 489-496.
- 18 野内 勇, 大橋 毅, 早福正孝. (1984) 東京都内における環境大気 PAN 濃度とその指標植物とし
19 てのペチュニアの葉被害. 大気汚染学会誌, 19, 392-402.