

日本の農作物へのオゾンの影響に係る科学的知見の整理(案)
【修正版】

目次

1.	はじめに.....	2
2.	葉の可視障害	3
3.	成長や収量に及ぼす影響.....	6
3.1.	作物種別の影響	6
3.1.1.	イネ (<i>Oryza sativa</i>)	6
3.1.2.	ダイズ (<i>Glycine max</i>)	12
3.1.3.	オオムギ (<i>Hordeum vulgare</i>)	13
3.1.4.	ラッカセイ (<i>Arachis hypogaea</i>)	13
3.1.5.	バレイショ (ジャガイモ : <i>Solanum tuberosum</i>)	13
3.1.6.	トマト (<i>Solanum lycopersicum</i>)	14
3.1.7.	キュウリ (<i>Cucumis sativus</i>)	14
3.1.8.	コマツナ (<i>Brassica rapa</i> var. <i>perviridis</i>)	15
3.1.9.	ホウレンソウ (<i>Spinacia oleracea</i>)	15
3.1.10.	ハツカダイコン (<i>Raphanus sativus</i> var. <i>sativus</i>)	16
3.1.11.	メロン (<i>Cucumis melo</i>)	17
3.1.12.	果樹	17
3.2.	複数の作物種を調査した研究	18
3.3.	作物種間、品種間、あるいは生育段階別の感受性差	20
3.4.	オゾン影響のリスク評価事例	22
4.	まとめ	22
5.	参考文献.....	23

30 1. はじめに

31 本資料では、日本の農作物（果樹を含む）に対する葉の可視障害、成長や収量に及ぼす
32 オゾンの影響について示した。「オゾン」と「光化学オキシダント」の表記及び濃度単位
33 は、基本的に文献中の表記をそのまま記載した。主な濃度単位の関係は $1 \text{ ppb} = 0.1$
34 $\text{pphm} = 0.001 \text{ ppm}$ である。

35 我が国における光化学オキシダントあるいはオゾン（以下、「オゾン等」）の農作物被害
36 は、1965 年頃より近畿、中国、四国地方でタバコの葉に、原因不明の斑点状の可視障害
37 が確認され始め、1969 年頃には、関東地方から南の地域のタバコの葉に同様の可視障害
38 が発現し、その被害程度とオゾン等の濃度との関係が確認されたのが、日本で最初の報告
39 とされている(黒田ら, 1973; Shinohara *et al.*, 1973; 須山ら, 1973)。その後、農作物
40 へのオゾン等の影響評価に関する調査・研究が数多く行われるようになった。特に、
41 1970 年代から 80 年代において精力的に実施されてきており、その時期の調査研究の変
42 遷については「大気汚染による植物影響研究の変遷と動向：山添(1987)」に示されてい
43 る。また、1980 年代までのオゾン等の農作物などの植物に及ぼす影響評価研究に係る文
44 献については、現在入手可能な研究目録集として、「植物に関する大気汚染研究文献目録
45 集（第 2 集）：大気汚染研究(1974)」、「植物に関する大気汚染研究文献集（第 3 集）：大
46 気汚染研究(1977)」、「植物に関する大気汚染研究文献集（第 4 集）：大気汚染学会誌
47 (1982)」、「植物に関する大気汚染研究文献集（第 5 集）：大気汚染学会誌(1987)」などに、
48 他の大気汚染物質に関する研究文献目録とともに示されている。

49 また、山添(1987)によると、1970 年代の主要な研究として、農林水産技術会議事務局
50 の 1977～1981 年度にわたる 5 か年のプロジェクト研究「光化学オキシダントの農林作
51 物の生育収量に及ぼす影響の解析」や 9 都府県の農業試験場が参画した農林水産省総合助
52 成試験「光化学スモッグによる農作物被害の解析と対策(1983)」が挙げられている。さ
53 らにその後 1990 年代初頭にかけて、1982～1985 年度の「大気汚染物質による農作物の
54 生理・遺伝的影響に関する研究(農林水産技術会議事務局編 1989)」、1986～1990 年度の
55 「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に関する研
56 究(農林水産技術会議事務局編 1993)」などの調査研究が進められてきた。それらの報告
57 書などの研究文献は、現在入手困難なものが多く含まれている。以下、最新の文献を含め
58 実際に入手できた文献に基づき、オゾン等による葉の可視障害や成長・収量の低下につい
59 て取りまとめた。

60 なお、1970～1980 年代の報告の多くは、空気浄化 (FAC: Filtered Air Chamber)
61 試験を用いた研究である。FAC 試験とは、野外のオゾンを活性炭フィルター等で除去し
62 た大気を導入する浄化室と、そのままの大気を導入する非浄化室で植物を育成し、実際の
63 野外におけるオゾンによる植物影響を比較検討する方法である（詳細は「植物影響の曝露
64 指標と植物影響を評価するための曝露方法」に示している）。

65 FAC 試験については、非浄化区のオゾン濃度が明瞭には示されていない研究が多く含
66 まれている。また、オゾンの指標として積算ドースの概念が導入され始めたのは国内では
67 1990 年代後半以降であり、その前は高濃度の出現頻度に着目した研究が多かったことか
68 らも、オゾン濃度やオゾン曝露の表記は研究によって様々である。したがって、FAC 試
69 験についてはオゾン濃度と成長の低下等との定量的な関係性の検討には用いることが難し
70 い研究が多いことに留意が必要である。

72 2. 葉の可視障害

73 農作物が比較的高濃度のオゾンに曝露されると、葉に可視障害が発現することがある。
74 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
75 面）に発現する。オゾンによる可視障害の症状は、農作物の種類によって異なり、例えば
76 ハツカダイコン、ホウレンソウ、タバコ、アサガオなどの草本植物では葉脈間に微小な白
77 色斑点や漂白斑を生ずる一方、イネ科やマメ科の植物では褐色または赤褐色の斑点が生ず
78 る。特に葉物野菜における可視障害の発現は農産物の商品価値を低下させるため経済的損
79 失が大きい。

80 可視障害の発現するオゾン曝露濃度は、作物種によって異なる。広範囲の農作物種を対
81 象とし、可視障害の程度に基づいたオゾン感受性の種間差異を調査した事例としては、寺
82 門と久野(1981)や野内ら(1988)による報告がある。

83 寺門と久野(1981)は、1973～1977 年に 22 科 45 種の農作物及び園芸作物を対象とし
84 た FAC 試験を行い、光化学オキシダントの濃度最高値と可視障害が生じた葉の被害面積
85 割合に基づいて、光化学オキシダント感受性の種間差異を評価した。その結果、光化学オ
86 キシダントの濃度最高値が 10 ppbm 以下で可視障害が発現した感受性の高い農作物はホ
87 ウレンソウやハツカダイコン等、10～15 ppbm で可視障害が発現した感受性が中程度の
88 農作物はイネやキュウリ等、15 ppbm 以上で可視障害が発現した感受性の低い農作物は
89 ニンジンやソバ等であった（表 1）。

90

表 1 光化学オキシダントによる葉の可視障害に対する
感受性の程度別分類（寺門と久野，1981）

感受性の高い植物 （濃度最高値 10 pphm 以下）	感受性中程度の植物 （濃度最高値 10～15 pphm 以下）	感受性の低い植物 （濃度最高値 15～20 pphm）
アサガオ（スカーレット オハラ、チェリオ、テン ショウハマノシラベ、ハ マノナガレ） ペチュニア（ホワイトエ ンサイン） ポプラ タバコ オクラ フダンソウ ホウレンソウ サトイモ サントウサイ ベゴニア（RI） ラッカセイ ハツカダイコン ハコベ インゲン ヒマワリ	ペチュニア（ブルーエン サイン、レッドコロネッ ト） ミツバ ケヤキ イネ ミニチュアトマト キュウリ トマト ムクゲ プラタナス ダリア バレイショ レタス ギシギシ クローバー サラダナ トウモロコシ	ペチュニア（サーモン、 スカーレットエンサイ ン、ローズエンサイン、 グリッターセレクト） ニンジン ソバ ゴマ 西洋タンポポ サルビア パセリ ハキダメギク ヒメムカシヨモギ ノゲシ

野内ら(1988)は、広範囲な農作物や園芸作物を対象とした既存のオゾンの曝露実験の結果を元に、作物の可視障害の発現とオゾン曝露との関係について検討を行った。作物間の相対的なオゾン感受性の高低は、作物に可視障害が発現するオゾンの濃度（C）と曝露時間（t）による評価が一般的であること、また、作物の可視障害の発現や被害の程度は濃度（C）と曝露時間（t）の積であるドース（ $C \times t$ ）が同じでも、高濃度・短時間曝露の方が被害が発生しやすく、また被害の程度が大きくなることから、濃度を 2 乗したドース（ $C^2 \times t$ ）によりオゾン感受性の高低を 4 段階に分類した。その結果、オゾン感受性が高い農作物としてハツカダイコンやホウレンソウ等が、感受性が中程度の農作物としてダイズやイネ等、感受性がやや低い農作物としてカリフラワーやシュンギク等、感受性が低い農作物としてキャベツ等が挙げられた（表 2）。

表 2 可視障害から見た農作物及び園芸作物種間の
相対的なオゾン感受性比較リスト（野内ら, 1988）

非常に感受性 0.10 ppm ² ・h 以下	感受性 0.11～0.30 ppm ² ・h	やや抵抗性 0.31～1.00 ppm ² ・h	非常に抵抗性 1.01 ppm ² ・h 以上
アサガオ タバコ ハツカダイコン ハウレンソウ ダイコン インゲンマメ サトイモ ネギ キュウリ	ダイズ サントウサイ アルファルファ トマト ラッカセイ ペチュニア イネ ニンジン ナス レタス シロナ ミズナ フダンソウ カブ	カリフラワー シュンギク ソラマメ タイサイ ゴボウ ハクサイ アオジソ ピーマン	チコリ コモチカンラン キャベツ グラジオラス ゼラニウム フクシア パンジー

可視障害が発現したオゾン濃度（C）と曝露時間（t）の濃度を2乗したオゾンドース（C²×t）に基づき、オゾンに対する感受性を分級した。実験例の多い作物（アサガオ、ハウレンソウ、ハツカダイコン等）では可視障害の発現の最も小さいオゾンドースを元に分級した。

可視障害の発現に対するオゾン感受性は、作物種だけでなく品種間でも異なる。数品種のイネの可視障害に関する調査では、日本晴はややオゾン感受性が高いが、コシヒカリは中庸で、トヨニシキは低感受性であることが報告されている（中村, 1979）。印南と三輪（2014）は、ハウレンソウ 24 品種を対象とし、人工光型環境制御ガス曝露チャンバーで 120 ppb のオゾンを 1 日あたり 5 時間、3 日間曝露する実験を行った結果、ハウレンソウの葉の可視被害の程度には品種間差異が存在したと報告している（図 1）。このような葉の可視障害の程度に基づいた農作物のオゾンや光化学オキシダント感受性の品種間差異に関する報告は、コマツナ（Izuta *et al.*, 1999）、バレイショとラッカセイ（松丸と高崎, 1989）、イネ（Sawada and Kohno, 2009）等においてもなされている。

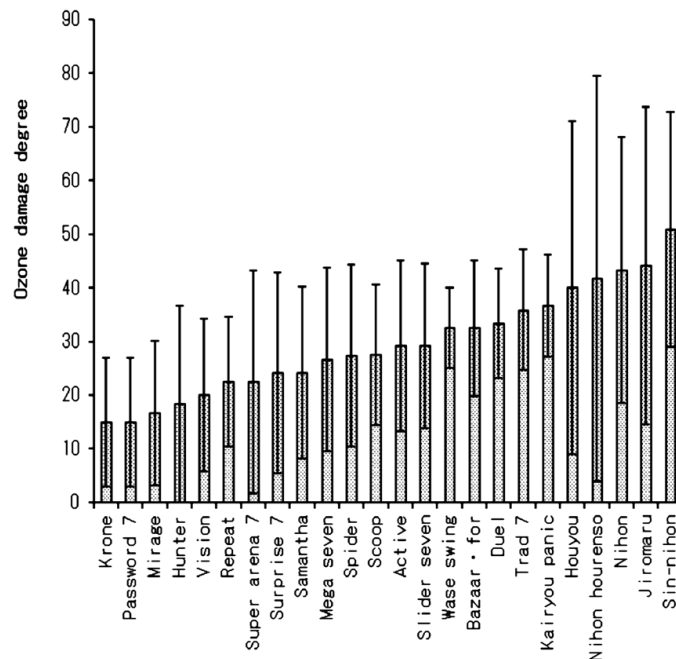


図 1 ホウレンソウ 24 品種における可視障害の品種間差(印南と三輪, 2014)
縦軸は「被害度」であり、可視障害が発現した葉の数から算出した指標（5 回
の実験の平均値と標準偏差）。

こうした農作物の葉の可視障害の発現程度に基づいたオゾン感受性は、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とは必ずしも一致しない。例えば、コマツナの品種であるミスギの個体乾重量や純光合成速度におけるオゾン感受性は他の品種に比べて高いが、葉の可視障害発現に基づいたオゾン感受性は比較的低い(Izuta *et al.*, 1999)。同様の結果はイネ(農業技術研究所, 1985; Sawada and Kohno, 2009)、バレイショ(松丸と高崎, 1991)等においても報告されている。このため、オゾンの感受性評価の際は、可視障害と成長及び収量は別に考える必要がある。

3. 成長や収量に及ぼす影響

3.1. 作物種別の影響

オゾン等が農作物の成長や収量に及ぼす影響について、作物種別に代表的な報告を時系列的に示す。

3.1.1. イネ (*Oryza sativa*)

オゾン等によるイネの収量減少に関する報告はいくつもある。以下に代表的な報告を時系列的に示す。

中村ら(1976, 1979)は、FAC 試験を用いて光化学オキシダントによるイネ 4 品種（コシヒカリ、レイメイ、日本晴、トヨニシキ）の減収影響について検討した。草丈と茎数は

145 日本晴、トヨニシキ、レイメイで、非浄化区において低下し、地上部重と、もみ重は、コ
146 シヒカリ、日本晴、トヨニシキ、レイメイで非浄化区において低かった。また、穂数、登
147 熟歩合（全もみ数に対する登熟したもみ数の割合）、千粒重（子実千粒の重量）は、日本
148 晴、トヨニシキ、レイメイにおいて非浄化区の方が低く、コシヒカリでは明確な差がなか
149 った。もみ重は、浄化区に比べ非浄化区で、コシヒカリは -11.5% 、日本晴は -26.2% 、
150 トヨニシキは -23.5% であった。この時の光化学オキシダントは、浄化区で $70\sim 80\%$ 除
151 去されており、非浄化区の濃度は、 0.05 ppm 超過時間が 765 時間、日平均値は 3.74
152 pphm であった。併せて、生育前期において光化学オキシダントの悪影響が大きいことを
153 指摘している。

154 浅川ら(1981a)は、1976 年に、イネ 8 品種（せとわせ、ハウネンワセ、日本晴、ヤマ
155 ビコ、中生新千本、金南風、はりま、山田錦）を用いた FAC 試験（浄化区は光化学オキ
156 シダントを約 50% 除去）を行った。出穂期以前まで、せとわせ、ハウネンワセ、ヤマビ
157 コの浄化区の草丈が高いが、茎数は全品種で処理区間の差がなかった。成熟期では、全品
158 種で桿長は浄化区で長く、穂長、穂数及び一穂もみ数は差がないが、登熟歩合（ヤマビコ、
159 はりまを除く）や千粒重が非浄化区で低下し、ヤマビコ、はりまを除く大部分の品種で、
160 非浄化区で収量（もみ重）が減少した。早生品種において減収が著しかったが、その原因
161 として、光化学オキシダントの高濃度曝露が幼穂形成～穂ばらみ期（幼穂形成期の終了か
162 ら出穂期までの期間、花粉形成期にもあたる）にあったためであると考察した。なお、非
163 浄化区の収量低下率は、山田錦（ -27.1% ） $>$ ハウネンワセ（ -23.1% ） $>$ せとわせ（ $-$
164 20.7% ） $\geq$ 日本晴（ -18.5% ） $>$ 金南風（ -15.5% ） $>$ 中生新千本（ -2.3% ） $>$ はりま
165 （ $+4.6\%$ ） $>$ ヤマビコ（ $+31.4\%$ ）の順に高かった。

166 浅川ら(1981b)は、1977 年にイネ 2 品種（ハウネンワセ、中生新千本）を用いた FAC
167 試験で、品種間と光化学オキシダントに曝露された生育時期による収量の違いを検討した。
168 両品種とも穂数や一穂もみ数は浄化区と非浄化区で変わらなかったが、千粒重が減少した。
169 精もみ重は、浄化区に比べ非浄化区で、ハウネンワセは -13.6% 、中生新千本は -6.5%
170 であった。また、穂首分化期（幼穂形成期）から出穂期までが光化学オキシダントの影響
171 による減収効果に最も影響があり、特に、穂ばらみ期が重要であると指摘している。なお、
172 このような成育時期での光化学オキシダントによる影響の違いは、ハウネンワセの方のみ
173 で、中生新千本では明瞭でなかった。さらに著者らは、曝露指標についても言及しており、
174 光化学オキシダント濃度（ c 、 pphm 、1 時間平均値）と時間（ T 、9～18 時の 10 時間の
175 測定）の関係として、1 時間毎の c^2 を求めて積算した $c^2 \times T$ を提案している。なお、今回
176 の実験結果では、早生品種のハウネンワセにおける穂ばらみ期の曝露量（ $c^2 \times T$ ）は、
177 5163 （8 月 1 日～8 月 16 日）、中生新千本の曝露量は、 3594 （8 月 16 日～9 月 2 日）で
178 あった。

179 沖野ら(1981)のイネ（品種：日本晴）を用いた FAC 試験の結果によると、草丈は、浄

180 化区と非浄化区で差がないが、茎数・穂数は非浄化区で少なく、穂重の減少により収量
181 (玄米重) は非浄化区で減少した。また、分げつ期の積算光化学オキシダント曝露量
182 ($\text{pphm} \cdot \text{h}$) と浄化・非浄化区の穂数の差に正の相関関係が認められた。この時の光化
183 学オキシダントは、浄化区で 95%以上除去されており、非浄化区の濃度は、24 時間平均
184 で 0.030 ppm であった。

185 松山ら(1983)は、イネ 4 品種 (トヨサト、晴々、トヨニシキ、クサブエ) を対象に、
186 1976 年～1981 年に FAC 試験を実施した結果、非浄化区の収量が減少すること、幼穂形
187 成期が最もオゾンの影響を受けやすく、稔実歩合の低下が主なオゾンによる収量低下の要
188 因として考えられた。この時のオゾンは、野外に対し、浄化区で 95%、非浄化区で 20%
189 除去されていた。

190 真弓と山添(1983)は、イネ (品種：日本晴) を対象に自然光型ガス接触装置 (温室型
191 オゾン曝露チャンバー) によるオゾン曝露試験を実施し、生殖成長・登熟期のオゾンが収
192 量に及ぼす影響を評価した。出穂から 10 日毎に乳熟、糊熟、黄熟とし、それぞれの期間
193 に 0.075 ppm のオゾンを昼夜連続曝露した。その結果、すべての期間でオゾン曝露によ
194 り登熟歩合が低下しているが、出穂期においてオゾンによる低下が著しかった。そのため、
195 更に、出穂開花期にオゾン曝露時間を変えて試験を行った。この試験では、 0.15 ppm の
196 オゾン曝露を 3 つの異なる時間帯、6:30～9:30 区 (開花受精のほとんど行われてない時
197 間)、9:30～12:30 区 (開花受精が最も盛んな時間)、12:30～15:30 区 (開花受精があま
198 り盛んでない時間) に行った。その結果、9:30～12:30 区と 12:30～15:30 区で、玄米
199 重、登熟歩合が低下し、米粒の厚さが減少しており、オゾンによる受精の直接障害 (花粉
200 の発芽や花粉管の伸長への影響) とともに光合成低下に伴う同化産物の減少や転流障害が
201 収量低下につながったのではないかと考察している。

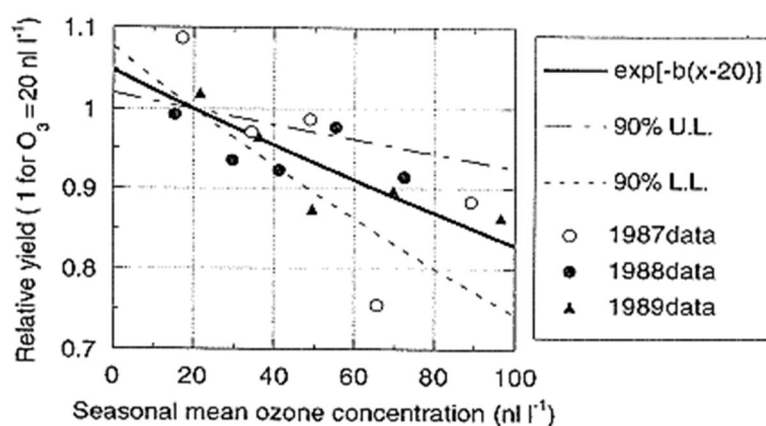
202 農業技術研究所(1985)は、イネ 5 品種 (秋晴、日本晴、クサブエ、ハウネンワセ、関
203 東 53 号) を用いた FAC 試験を行い、光化学オキシダントによる葉の可視影響と収量減少
204 との関係、及び品種間差を検討した。その結果、葉の可視障害程度と収量の減少との関連
205 は無く、葉の可視障害における光化学オキシダント感受性品種と収量低下の光化学オキシ
206 ダント感受性品種が一致しなかった。

207 Nouchi *et al.* (1991)は、イネ (品種：コシヒカリ) に自然光型オゾン曝露チャンバ
208 ーを用いたオゾン曝露試験を行った。栄養成長期から出穂初期の 8 週間において、3 段階
209 のオゾン (浄化、 0.05 、 0.10 ppm) に曝露した。その結果、 0.10 ppm 区において、5
210 週目、6 週目で個体乾重量が 50%減少し、その後、乾重量の減少は徐々に緩和された。ま
211 た、 0.05 ppm 区、 0.10 ppm 区において、地下部／地上部比の低下が認められた。

212 矢島(1993)は、1987 年～1989 年にオープントップチャンバー (OTC) 試験を行った。
213 供試した品種は、1987 年と 1989 年がコシヒカリ、1988 年が日本晴であり、オゾン濃度
214 は、野外の 0.5 倍、1 倍、1.5 倍、2 倍、2.75 倍の 5 段階で実施した。その結果、オゾン

215 曝露量の増加に伴って、イネの収量が減少し、1988 年（日本晴）と 1989 年（コシヒカ
216 リ）の精玄米重の結果を基にオゾン曝露応答関係式（相対収量 $=1.0537-0.0015\times$ 日平
217 均オゾン濃度 ppb）を導き出した。この関係式は、日平均オゾン濃度 10 ppb 増加に伴っ
218 て、収量が 1.5%減少することを意味している。なお、ここでの相対収量は、対象年の野
219 外 1 倍区の収量を 1 としている。

220 Kobayashi *et al.* (1995)では、上記、矢島(1993)と同じ OTC でのオゾン曝露試験の
221 結果より、新たなオゾン曝露応答関係式を検討している（図 2）。オゾン濃度 20 ppb で
222 の収量を 1 とした相対収量、オゾン濃度は、昼 7 時間（9:00～16:00）平均値を用いてい
223 る。本文献では関係式そのものは示されていないが、平均オゾン濃度が 50 ppb で収量は
224 3～10%減少すると推計している。高木と大原(2003)は、本文献 Kobayashi *et al.*
225 (1995)を引用し、オゾン曝露応答関係式を、相対収量減少 $=1-\exp[-0.001822\times$
226 （平均オゾン濃度 ppm -0.02 ）]とした。（オゾン曝露応答関係式を用いたリスク評価に
227 ついては 3.4 を参照。）



228 図 2 イネの収量とオゾン積算曝露量との応答関係
229
230 (Kobayashi *et al.*, 1995)

231
232 米倉ら(2010)では、イネ（品種：コシヒカリ）の生育段階別のオゾン曝露が収量に及
233 ぼす影響の評価、ならびに窒素施肥量やケイ酸肥料の施用によるオゾン感受性の変化を 3
234 か年の OTC によるオゾン曝露試験により検討している。オゾン曝露による収量低下程度
235 は、全期間、栄養成長期（出穂前まで）、移行期（穂ばらみ期～出穂後 10 日（登熟期前））、
236 生殖成長期（出穂以降）の順に大きかったが、単位オゾン曝露指標 AOT40 当たりの収量
237 低下率は栄養成長から生殖成長への移行期のオゾン曝露が一番大きく、次に栄養成長期で
238 あった（図 3）。出穂前後の移行期は、約 20 日程度と期間は短いものの、収量に与える影
239 響は大きいことが明らかとなった。（窒素施肥量等によるオゾン感受性の変化については
240 3.3 を参照。）

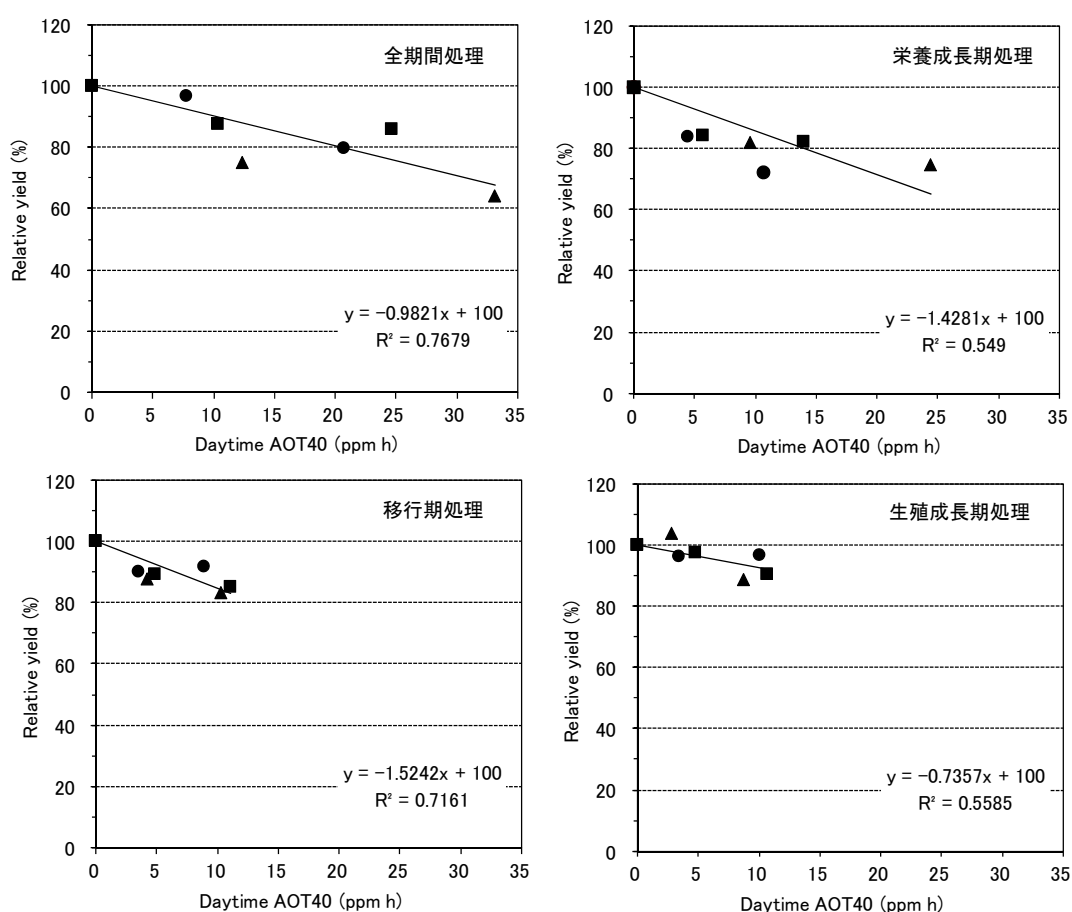


図 3 イネの生育段階別のオゾン曝露が収量に及ぼす影響

(縦軸：空気浄化区の収量を 100 とした時の相対収量率)

Yonekura *et al.* (2005b) は、3 段階のオゾンレベル（浄化、野外、1.5 倍野外）による OTC 試験を日本の品種 9 種：コシヒカリ、キヌヒカリ、朝の光、日本晴、あきたこまち、ひとめぼれ、トヨニシキ、彩のかがやき、サキハタモチ、外国の品種 7 種（産出国）：Lemont（アメリカ）、M401（アメリカ）、Dawn（アメリカ）、IR8（フィリピン）、Boro8（パキスタン）、Te-tep（ベトナム）、WSS-2（ベトナム）について行い、収量に対するオゾンの影響を検討し（図 4）、日本のイネ 9 品種よりオゾン曝露応答関係式として、相対収量 $= -0.67 \times \text{AOT40} + 99.3$ を導出している。さらに、イネの相対収量と AOT40 との関係を基に、我が国のイネの収量に対するクリティカルレベル（エンドポイントは 5% 減収）を検討した結果、この実験で日本のイネ 9 品種のうちオゾン感受性が中庸であったコシヒカリにおいて 100 日間の昼間の AOT40 で 5.4 ppm・h であった。（オゾン曝露応答関係式を用いたリスク評価については 3.4 を参照。）

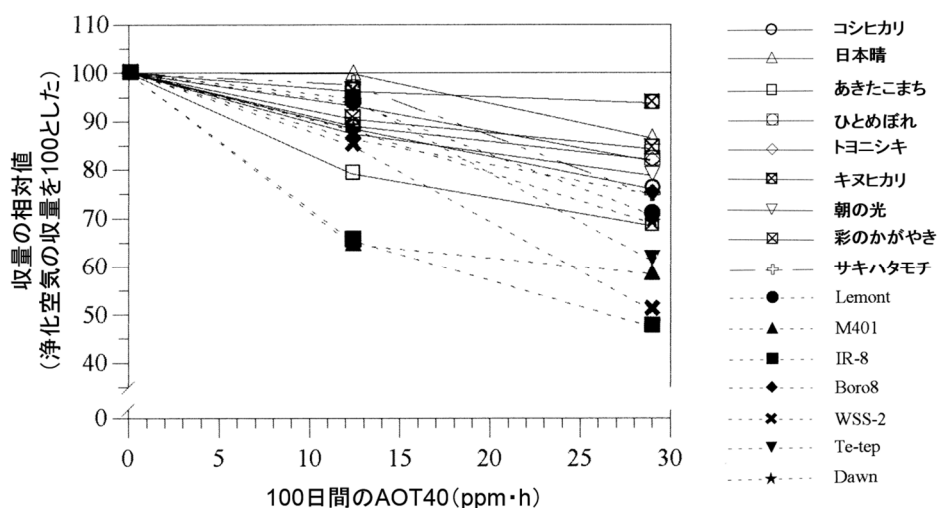


図 4 イネの収量に及ぼすオゾンの影響(Yonekura *et al.*, 2005b)

Yamaguchi *et al.* (2008)は、イネ 2 品種（コシヒカリ、キヌヒカリ）を対象に 3 段階のオゾン曝露（浄化空気、60 ppb もしくは 100 ppb のオゾン曝露（10:00～17:00））の試験をグリーンハウス型 OTC で実施した。その結果、コシヒカリは、浄化に比べ 60 ppb 曝露で 3%、100 ppb 曝露で 23%の収量減少、キヌヒカリで浄化に比べ 60 ppb 曝露で 18%、100 ppb 曝露で 34%の収量減少が認められたが、明瞭な品種間の差異は認められなかった。収量構成要素のうち、個体あたりの穂数、一穂あたりの稃実粒数及び稃実率でオゾン曝露による有意な低下が認められた。また、栄養成長期における個体成長と生殖成長期における穂への乾物分配率がオゾンによって低下していた。

Sawada and Kohno (2009)は、日本とアジアのイネ 21 品種を対象としたオゾン曝露試験をガラス温室型 OTC で実施した。外気の 2 倍のオゾン濃度（24 時間平均値で 57 ppb）により有意な収量低下が生じた品種は「きらら 397」を除き、すべてインディカ型品種であり、「コシヒカリ」などほとんどのジャポニカ型品種は有意な収量の低下を示さず、ジャポニカ型品種はインディカ型品種より収量に対するオゾンの影響が小さい傾向にあることを示した。一方、葉の可視障害の程度と収量の低下は、必ずしも一致しなかった。

Yamaguchi *et al.* (2014)は、イネ（品種：コシヒカリ）を対象に 3 段階のオゾン曝露（浄化空気、野外の 1 倍または 1.5 倍のオゾン濃度）の試験をグリーンハウス型 OTC で実施し、収量に対するオゾン曝露応答関係式を $AOT40$ (ppm・h) と、水蒸気気孔コンダクタンスなどより算出したオゾン吸収量 POD_{10} (mmol m⁻²) に基づいて検討し、相対収量 = $-0.039 \times AOT40 + 0.975$ 、相対収量 = $-0.487 \times POD_{10} + 0.996$ を導出している (図 5)。

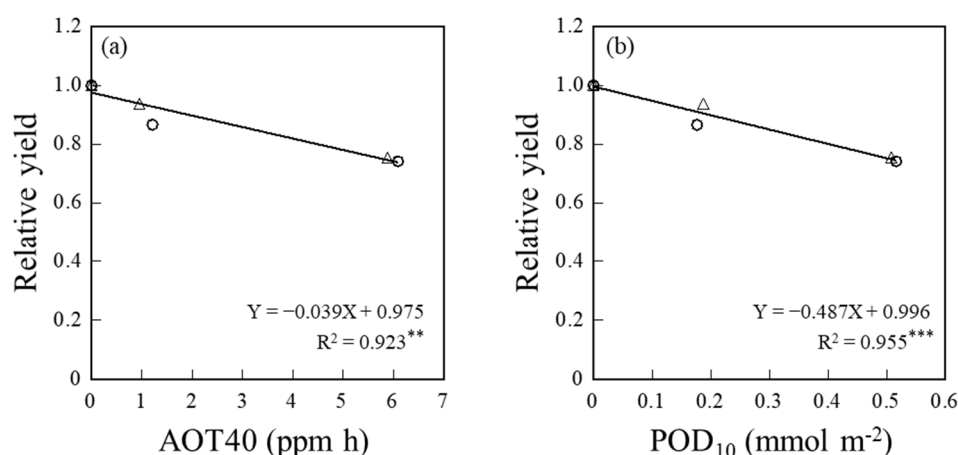


図 5 イネの収量と (a) オゾン曝露量 AOT40 及び (b) オゾン吸収量 (POD₁₀) との関係(Yamaguchi *et al.*, 2014)

澤田ら(2017)は、イネ 17 品種 (コシヒカリ、ひとめぼれ、ヒノヒカリ、あきたこまち、はえぬき、キヌヒカリ、きらら 397、つがるロマン、まっしぐら、夢つくし、にこまる、日本晴、彩のかがやき、ゆめひたち、ゴロピカリ、ササニシキ、里のゆき) について、ガラス温室型 OTC を用い、オゾン濃度上昇が玄米の白未熟粒 (デンプンの詰まりが悪い粒で品質低下の一因となる) 発生に及ぼす影響の品種間差異を検討した。玄米アミロース含有率とオゾン処理による白未熟粒の発生割合との間に有意な負の相関があり、アミロース含有率の低い品種ほどオゾンによる外観品質の低下が生じやすいことを示した。

3.1.2. ダイズ (*Glycine max*)

矢吹ら(1983)は、光化学オキシダントによるダイズの収量影響について検討した。夏蒔きダイズ 12 品種を用いて FAC 試験を行った。なお、試験期間中、非浄化区において光化学オキシダントが 0.08~0.1 ppm に達した日が 3 日間あった。収量に及ぼす影響は、エンレイ、東山 104、112 号、小糸在来、津久井在来が光化学オキシダント高感受性、東山 113、95 号、ナカセンナリが低感受性であった。

川方と矢島(1993)は、ダイズ 2 品種 (オオソデフリ (実施年: 1988 年)、エンレイ (実施年: 1989、1990 年)) を対象とし、5 段階 (0.4 倍、野外 (1 倍)、1.5 倍、2 倍、2.7 倍) のオゾン曝露による収量への影響をフィールドチャンバーを用いた実験で評価した。1988 年のオオソデフリ、1990 年のエンレイで、オゾン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もたらされた。また、3 か年の試験によるオゾン曝露応答関係に基づくと、オゾン濃度 10 ppb 上昇により収量が約 6%減少すると推定した。

米倉ら(2000)は、ダイズ (品種: エンレイ) を対象とし、自然光型ファイトトロンにて昼間 (9:00~17:00) に 60 ppb オゾンを曝露した結果、子実数 (粒数) の低下に伴う収量低下が認められ、浄化区に比べ 10%程度低下した。

307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336

3.1.3.オオムギ (*Hordeum vulgare*)

千葉県農業試験場(1985)は、1980、1981 年度（それぞれ 12 月～5 月）にオオムギ（品種：カシマムギ）を対象とした FAC 試験を行った。その結果、分けつ盛期（茎数増加期）頃から非浄化区において草丈、茎数の低下が認められ、収量（子実重）が減少した。1980 年度の育成期間においては、6 pp_{hm} 以上の光化学オキシダント濃度が観測された時間は 209 時間で、非浄化区での収量低下率は 6.1%、1981 年度では、6 pp_{hm} 以上の時間は 247 時間で収量低下率は 20.3%であった。

3.1.4.ラッカセイ (*Arachis hypogaea*)

千葉県農業試験場(1985)は、1975～1977 年と 1979～1980 年の 5 月～10 月にラッカセイ（品種：千葉半立）を対象とした FAC 試験を行った結果、収量（子実重）が減少した。6 pp_{hm} 以上の光化学オキシダント濃度が観測された時間帯の光化学オキシダント曝露量（SUM06 と同義）と非浄化区における収量低下率は、1975 年ではそれぞれ 660 pp_{hm}・h で 18.2%、1976 年では 1,182 pp_{hm}・h で 16.3%、1977 年では 1,314 pp_{hm}・h で 2.5%、1979 年では 2,518 pp_{hm}・h と 15.5%、1980 年では 1,469 pp_{hm}・h と 14.6%であり、実験年による収量低下程度の違いは光化学オキシダント曝露量の違いのみでは説明できなかった。

3.1.5.バレイショ（ジャガイモ : *Solanum tuberosum*）

松丸と高崎(1991)は、1984 年、1985 年、1987 年にバレイショ 2 品種（ダンシャクイモ、ワセシロ）を対象とした FAC 試験を行い葉の可視障害と収量への影響について調査した。葉の可視障害発現では、ワセシロがダンシャクイモよりも大きく、光化学オキシダントに対し高感受性であるが、収量影響では、ダンシャクイモがワセシロより減収し光化学オキシダントに対し高感受性であることを示し、光化学オキシダントに対する感受性の品種間差異は葉の可視障害と収量への影響で一致しないことを示唆した（表 3）。また、著者らは、収量影響の光化学オキシダントの閾値についても検討し、日平均光化学オキシダント濃度で 0.04 ppm（ダンシャクイモ：0.043 ppm、ワセシロ：0.038 ppm）と推定した。

表 3 バレイショに対する光化学オキシダントの影響（松丸と高崎, 1991 より作成）

年	品種	濃度		可視障害の生じた 葉の数 ³⁾		塊茎の生体重 (kg/a) ⁴⁾		
		平均値 ¹⁾ (ppm)	0.06 ppm 超過時間 ²⁾	浄化区	非浄化区	浄化区	非浄化区	比率 ⁵⁾
1984	ダンシャクイモ	0.050	205	2.1	5.9	229	186	81
	ワセシロ	0.050	205	0	9.2	269	237	88
1985	ダンシャクイモ	0.054	244	0	1.1	195	124	64
	ワセシロ	0.054	244	0.6	2.8	226	183	81
1986	ダンシャクイモ	0.042	61	0	7.5	238	249	105
	ワセシロ	0.042	61	0	5.5	284	272	96

¹⁾ 4～5月の昼間10時間（8～18時）の光化学オキシダント濃度の平均値

²⁾ 4～5月の総超過時間

³⁾ 収穫日の前日（1984年6月5日、1985年6月4日、1987年6月3日）の被害状況

⁴⁾ 1個当たり31g以上の塊茎について重量を調査

⁵⁾ 非浄化区/浄化区×100

3.1.6. トマト (*Solanum lycopersicum*)

野菜試験場(1985)は、1979年～1980年にトマト（品種：栄寿）を対象とし、低濃度ガス長期間接触装置を用いたオゾン曝露試験を行った。1979年は、オゾン3段階（0、0.05、0.10 ppm）で1日8時間の曝露を28日間実施した結果、オゾンによる個体乾重量の低下が認められ、特に葉の乾重量の低下が認められた。果実重については文献中では考察されていないが、影響は認められなかったと推察される。

中島(1989)は、トマト（品種：ポンテローザ）を対象とし、グロースキャビネットを用いたオゾン曝露試験を行った。0.1 ppmのオゾンを10日間曝露した結果、草丈や茎数などに影響は認められなかったが、地上部重量はオゾン曝露によって12%減少した。

3.1.7. キュウリ (*Cucumis sativus*)

野菜試験場(1985)は、1979年～1981年にキュウリ（品種：ときわ光3号P型）を対象とし、低濃度ガス長期間接触装置を用いたオゾン曝露試験を行った。1979年は、オゾン3段階（0、0.05、0.10 ppm）で1日8時間の曝露を26日間と56日間実施し、1980年は、0、0.05 ppmで同様に26日間曝露した結果、葉身と根の有意な成長抑制が認められた。また、1979年の試験において、キュウリの収量低下が0.05 ppm曝露では認められなかったが、0.10 ppm曝露で認められ、-38%であった。また、キュウリの生育に関するオゾン曝露応答関係式について検討されており、「log 全乾物重 = 3.846 - 0.0116 × 積算オゾン曝露量 (ppm・h)」などが推定されている。

中島(1989)は、キュウリ（品種：立秋）を対象とし、グロースキャビネットを用いたオゾン曝露試験を行った。オゾン濃度0.1 ppmを10日間処理した結果、草丈、茎数などでは、差が認められなかったが、地上部重では、オゾン処理区で22%減少した。

Izuta *et al.* (1995)は、キュウリ（品種：霜知らず地這いキュウリ）を対象に人工光

368 型オゾン曝露チャンバーを用いたオゾン曝露試験を行った。播種後 7～21 日目の 15 日間
369 に、合計 6 回、1 日当たり 6 時間（9:00～15:00）、3 段階のオゾン（0.10、0.15、0.20
370 ppm）を曝露した。その結果、0.15 ppm 以上のオゾン曝露により、葉面積及び乾物成長
371 が低下した。

372

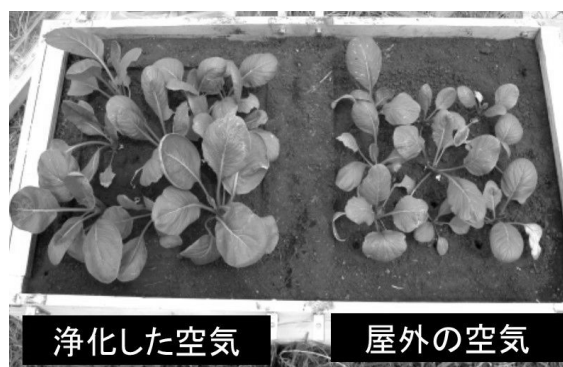
373 3.1.8.コマツナ (*Brassica rapa* var. *perviridis*)

374 Izuta *et al.* (1999)は、コマツナ 10 品種を対象にオゾン曝露試験を行った。播種後 8、
375 10 及び 12 日目に 130 ppb のオゾンを 4 時間（10:00～14:00）人工光型オゾン曝露チ
376 ャンバーにて曝露し、その他の時間は恒温室にて育成した。播種後 15 日目における個体
377 乾重量の低下率に基づいたオゾン感受性は、みすぎ>プララ>新晩生>丸葉>晩生=楽天>ご
378 ぜき晩生>はるみ>夏楽天>さおりの順に高かった。この品種間差異は、オゾン曝露による
379 葉の可視障害の程度、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
380 位オゾン吸収量当たりの純光合成阻害率のオゾン感受性と一致した。

381 Yonekura *et al.* (2005a)は、コマツナ（品種：楽天）を対象に、4 段階のオゾン曝露
382 （浄化、60、90、120 ppb）試験を人工気象室にて実施した。その結果、オゾン濃度上
383 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（ppm・h）と
384 のオゾン曝露応答関係式は、相対成長＝ $-3.3 \times \text{AOT40} + 100$ であった。（オゾン曝露応
385 答関係式を用いたリスク評価については 3.4 を参照。）

386 米倉(2016)は、コマツナ（品種：楽天）を対象に、埼玉県環境科学国際センター（埼
387 玉県加須市）で 2005 年 7 月に OTC 試験を実施した。育成期間中の浄化区のオゾン濃度
388 は 10 ppb 以下で、野外区（非浄化区）の昼間の平均オゾン濃度：52 ppb（最大オゾン濃
389 度：143 ppb）であった。1 か月間の育成をした結果、個体乾重量は野外区で 42%の成長
390 低下が認められた（図 6）。

391



392

393 図 6 コマツナの成長に及ぼすオゾンの影響(米倉, 2016)

394

395 3.1.9.ホウレンソウ (*Spinacia oleracea*)

396 佐藤ら(1983)は、1980 年にホウレンソウ（品種：深緑）を対象とし、グロースキャビ

397 ネットを用いたオゾン曝露試験を行った。処理区は、対照区、0.06 ppm（20 日間曝露）、
398 0.12 ppm（10 日間曝露）の 3 段階である。乾物重量はオゾンにより減少し、0.06 ppm
399（20 日間曝露）、0.12 ppm（10 日間曝露）のいずれも対照区に比べて 40%減となった。

400 401 3.1.10. ハツカダイコン (*Raphanus sativus* var. *sativus*)

402 伊豆田ら(1988a)は、ハツカダイコン（品種：コメット）を自然光型ファイトトロンに
403 て、20/13℃、25/18℃、30/23℃（日中/夜間）の 3 種類の温度条件下で育成しながら、
404 0.10 ppm のオゾンを 1 日 4 時間（10:00～14:00）、7 日間にわたり曝露した結果、育成
405 温度 25/18℃ 区及び 30/23℃ 区の個体当たりの乾物成長が 20%減少した。

406 伊豆田ら(1988b)、ハツカダイコン（品種：コメット）を対象に OTC 試験を実施した。
407 野外（非浄化区）の個体当たりの葉面積（特に、子葉）及び乾重量が浄化区に比べて有意
408 に低下した。葉面積や個体乾重量の相対成長割合と日平均 8 時間（8:00～16:00）オゾン
409 曝露量（ $10^2 \text{ ppb} \cdot \text{h} \cdot \text{day}^{-1}$ ）との関係を検討した結果、それぞれの相対値はオゾン曝露
410 量の増加に伴って直線的に減少し、浄化区の個体乾重量を 100 とした時の相対個体乾重量
411 $= -0.038 \times \text{日平均 8 時間オゾン曝露量} + 106.9$ のオゾン曝露応答関係式を得ている。

412 Izuta *et al.* (1993)は、ハツカダイコン（品種：コメット）を対象に OTC 試験を実施
413 した。3 年間にわたる 17 回の試験の結果、育成期間中の午前 9 時における平均気温が
414 20℃以下の場合、個体乾重量の明瞭なオゾンによる低下は認められなかったが、20℃
415 以上の場合において、オゾン濃度の増加に伴う個体乾重量の低下が認められた。個体乾重
416 量の相対成長割合と日平均 8 時間（8:00～16:00）オゾン曝露量（ $\text{ppb} \cdot \text{h} \cdot \text{day}^{-1}$ ）との
417 関係を検討した結果、浄化区の個体乾重量を 100 とした時の相対個体乾重量 $= -0.029 \times$
418 $\text{日平均 8 時間オゾン曝露量} + 102.1$ のオゾン曝露応答関係式を得ている。

419 Izuta *et al.* (1994)は、ハツカダイコン 3 品種（ユキコマチ、コメット、ホワイトチ
420 エリッシュ）を対象に OTC 試験を実施した。播種 10 日後から 0.15 ppm のオゾンを 4
421 時間（10:00～14:00）、5 日間／週で曝露した。播種 17 日後の個体当たりの乾物成長に
422 基づいたオゾン感受性は、ユキコマチ（浄化区に比べ 44%減少）>コメット（38%減少）
423 >ホワイトチェリッシュ（9%減少）の順に高かった。また、純同化率及び平均純光合成障害
424 率におけるオゾン感受性も同様な傾向が認められた。

425 Yonekura *et al.* (2005a)は、ハツカダイコン（品種：赤丸（コメット））を対象に、
426 4 段階のオゾン曝露（浄化、60、90、120 ppb）試験を人工気象室にて実施した。その
427 結果、オゾン濃度上昇に伴って個体乾重量の低下が認められ、浄化区の個体乾重量を
428 100 とした時の相対成長と AOT40（ $\text{ppm} \cdot \text{h}$ ）とのオゾン曝露応答関係式は、浄化区の
429 個体乾重量を 100 とした時の相対個体乾重量 $= -3.0 \times \text{AOT40} + 100$ であった。（オゾン
430 曝露応答関係式を用いたリスク評価については 3.4 を参照。）

431 中島ら(2018)は、ハツカダイコン（品種：コメット）を対象に OTC 試験を通年で 9 回

432 実施した。地上部乾重量にオゾンの有意な影響は認められなかったが、5 月中旬、9 月及
433 び 10 月に実施した実験において、オゾンによる地下部乾重量の有意な低下が認められた
434 ため、相対地下部乾重量と平均オゾン濃度との関係を調べたが、有意な相関は認められな
435 かった。この原因として、育成下の平均気温や相対湿度がオゾン感受性に影響していると
436 考察している。

437

438 3.1.11. メロン (*Cucumis melo*)

439 中島(1989)は、メロン (品種：パール) を対象とし、グロースキャビネットを用いた
440 オゾン曝露試験を行った。オゾン濃度 0.1 ppm を 10 日間処理した結果、草丈、茎数など
441 では差が認められなかったが、地上部重では、オゾン処理区で 11.4%減少した。

442

443 3.1.12. 果樹

444 三重大学(1985)は、ウンシュウミカン (*Citrus unshiu* (品種：林系)) の果実の肥大
445 や落果等にオゾンが及ぼす影響について検討した。オゾン曝露は、次の 4 つの時期に自然光
446 型オゾン曝露チャンバーを用い行った。①5 月下旬の開花後、生理的落果が発生する期間
447 である 6 月中下旬に 0、0.1、0.2 ppm のオゾンを 1 日 3 時間、1 週間にわたり曝露、②
448 生理的落果期の終わり頃である 6 月下旬～7 月上旬に 0、0.12、0.25 ppm のオゾンを 1
449 日 6 時間、9 日にわたり曝露、③生理的落果が終わり、結実が安定する 7 月下旬に 0、
450 0.1、0.3 ppm のオゾン 1 日 6 時間、4 日にわたり曝露、④さらに③よりも遅い 8 月中
451 旬より 0、0.15、0.4 ppm を 1 日 4 時間、20 日にわたり曝露した。その結果、①と②
452 のオゾン曝露試験においてオゾン曝露により落果率が高くなる傾向がみられたが③と④の
453 オゾン曝露試験では、落果率にオゾンの影響は認められなかった。著者らは、開花後まも
454 ない時期は低濃度、短時間のオゾン曝露でも落果率が高くなり、果実の生育が進むとオゾ
455 ン曝露の影響は小さくなると考察している。

456 三重大学(1985)は、モモ (*Prunus persica* (品種：大久保)) の果実の肥大や落果等
457 にオゾンが及ぼす影響についても検討した。5 月中旬より 0、0.07、0.15 ppm のオゾンを
458 1 日 3 時間、15 日にわたり曝露した。果実の落果率はオゾン濃度の増加に伴い高くなっ
459 たが、落葉数や果実肥大率には影響がほとんど認められなかった。果実の肥大は、葉果比
460 に依存することが大きく、落果数と落葉数の違いにより高濃度オゾン曝露ほど葉果比が高
461 くなり、オゾンによる落果率の増大によるマイナス影響と葉果比の増大によるプラス影響
462 が相殺したため果実肥大率にオゾン影響が認められなかったと考察している。

463 川瀬ら(1989)は、ナシ (*Pyrus pyrifolia* var. *culta*) の受精にオゾンが及ぼす影響
464 を検討した。ナシ (品種：長十郎) の花粉に 0.2、0.4 ppm のオゾンを 1 時間人工気象室
465 で曝露したところ発芽率が低下した。また、オゾンが受精に及ぼす影響を評価するために、
466 ナシ (品種：長十郎) に受粉する際に 0.2、0.4 ppm のオゾンを人工気象室で曝露したと

ころ、受粉直後のオゾン曝露により結実率の低下傾向が認められたが受精への影響は大きくないとしている。さらに、5 品種のナシ（長十郎、二十世紀、幸水、豊水、菊水）を対象としたオゾン曝露による収量構成要因（一果重、落果率）に対する影響を検討した。この試験の曝露は人工気象室で行い、オゾン曝露濃度は 0.4 ppm で、曝露期間は 4 時間である。長十郎では、全ての項目で、オゾン曝露の影響は見られなかったが、二十世紀、幸水は落果率以外の項目で減少影響が認められ、特に、幸水のオゾン感受性が高いと考えられた。

大村ら(1989)は、ナシ 8 品種の花粉へのオゾンの影響を検討した。開花直前に採取した花粉に 0.2 ppm のオゾンを曝露したところ、花粉の発芽率への影響があり、その品種間差も認められた。オゾンによる発芽率の低下は、二十世紀、菊水で大きく、早玉、新水、晩三吉、慈梨が中庸で、長十郎、豊水は阻害が少なかった。

478

479 3.2. 複数の作物種を調査した研究

前述した山添(1987)によると、1970 年代の主要な研究として、①「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(農林水産技術会議事務局, 1985)」や②「光化学スモッグによる農作物被害の解析と対策(群馬県農業試験場ら, 1983)」が挙げられており、それらにおいてオゾン影響のリスクを検討している。

①の農林水産技術会議事務局(1985)においてはオゾン影響のリスクについて下記のように取りまとめられている。

1) イネについては、0.04 ppm オゾンの日中全生育期間接触で必ずしも収量への有意な差を生ずるとは限らないが 0.05 ppm 曝露で有意差がみられる場合が多い。また、汚染の影響を受けやすいのは登熟期であって、光化学オキシダント濃度の日最高値が 0.06 ppm 以上の時間数、日数またはドース（濃度と時間数の積）と減収率との間に高い相関がみられる。特に出穂後で 0.06~0.08 ppm のドースと減収率との相関が高い。

2) オカボ（陸稻）、オオムギ、ビールムギ、コムギ、ソルガム、ソバ、ダイズ、ラッカセイなどの一般畑作物については、オゾン濃度 0.04 ppm ではまれに生育抑制などの不可障害を生ずる程度で、一般にはほとんど影響がみられず、0.06 ppm 以上で生育抑制や収量低下をもたらす場合が多くなる。

3) 野菜については、一般にオゾンに対する感受性が高く、トマト、キュウリでオゾン濃度 0.05 ppm 接触により乾物生産の低下をもたらす。また、光化学オキシダント濃度の日最高値が 0.05 ppm を超えると、ハツカダイコン、ホウレンソウ、インゲンマメなどでは収量への影響が有意に現れやすくなる。

また、①、②の研究データ並びに既往の研究成果から、光化学オキシダントによる農林作物被害の判定条件に関する資料「光化学オキシダントによる農林作物被害の判定条件に関する資料：農林水産技術会議事務局連絡調整課(1982)」がとりまとめられ、収集され

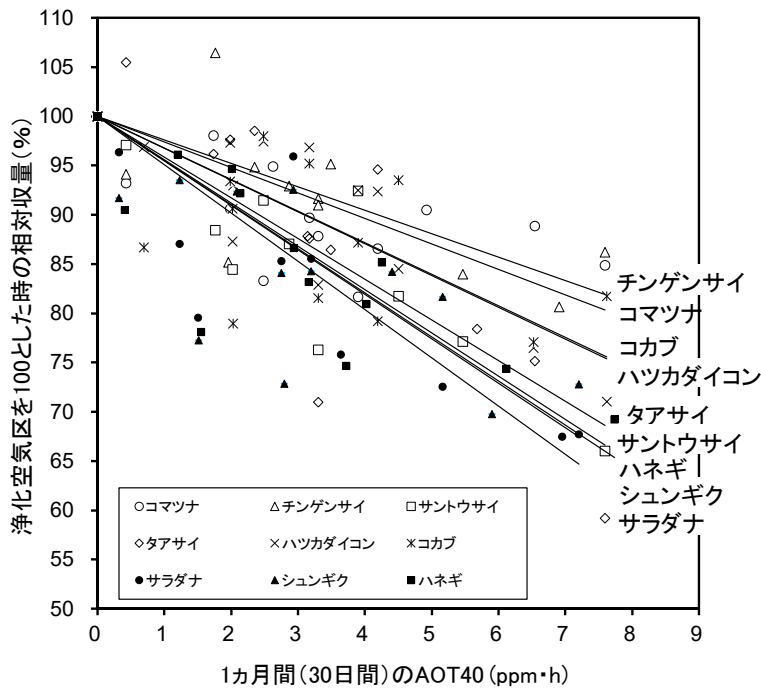
502 た結果を総合的に判断し、光化学オキシダント（オゾン）による農作物被害の限界濃度に
503 関して下記の提言がなされている。

504 1) 農林作物の生育収量に有意な被害を及ぼす光化学オキシダントの限界濃度は、感受
505 性の高い作物（例えばイネ、トマト、ダイズ、インゲンマメなど）を主体に考えるとき、
506 1 時間値として 0.05 ppm 前後にあるものと判断される。

507 2) また、ガス曝露量、すなわち、ガス濃度の積算量（pphm・h）を考える場合には、
508 1 時間値 5 または 6 pphm 以上の曝露量で示すのが適当と思われる。このオゾン曝露量の限
509 界値については、作物、品種等によって異なり、なお検討を要するが、100 前後又は数
510 10 pphm・h 程度の値が汚染による障害の発生する目安と考えられる。

511 米倉ら(2007)は、比較的短期間（1～2 ヶ月）で収穫する近郊野菜のコマツナ、チンゲ
512 ンサイ、サントウサイ、タアサイ、ハツカダイコン、コカブ、サラダナ、シュンギク、ハ
513 ネギを、埼玉県環境科学国際センター内にあるオゾン濃度を 3 段階に設定可能な外気オゾ
514 ン濃度比例追従型の OTC 内で複数回にわたって育成した。それぞれの農作物において、
515 30 日間の平均積算値に換算した AOT40 と、浄化空気区の収量を 100 とした時の各オゾ
516 ン処理区の収量の相対値（相対収量）との関係について検討した。各農作物について
517 AOT40 と相対収量との直線回帰式を求め、オゾンのクリティカルレベル（収量が－5%時
518 における AOT40 値）を検討した結果、30 日間の AOT40 値で、1.2（サラダナ）～2.1
519 （チンゲンサイ） ppm・h であった（図 7）。

520



521

522 図 7 10 種の農作物における AOT40 と相対収量との関係(米倉ら, 2007)

523

524 3.3. 作物種間、品種間、あるいは生育段階別の感受性差

525 成長や収量低下に対するオゾン感受性については、作物種によって異なることがこれま
526 での様々な研究により明らかになっている。

527 野内ら(1988)は、農事試験場(1985)を取りまとめて、オゾンに対する成長・収量の作
528 物種間の相対的な感受性の比較をしている(表4)。農事試験場(1985)では、0.04、0.06
529 及び0.10 ppmのオゾンを主要な畑作物に、生育期間別あるいは全生育期間の曝露実験を
530 行ない、作物の成長・収量に対するオゾン被害発現の限界値を求めた。オカボ(原著では
531 陸稲)、ダイズ、ラッカセイ、ソバは、0.06 ppm以下で成長や収量に影響があり、一方
532 で、トウモロコシ、オオムギ(六条大麦)、ビールムギ(二条大麦)は0.06 ppmを超え
533 た濃度で成長や収量に影響があった。

534

535 表4 作物の成長・収量や可視障害のオゾン被害発現限界の推定値
536 (pphm)(野内ら, 1988)

作物名	生育初期	生育中期	登熟期		可視被害 発現濃度
			乾物生産	収量	
陸稲(農林12号)	<6	<6	6~10	<6	<6
ソルガム(NK129)	6~10	>10	>10	>10	>10
ダイズ(フジミジロ)	4~6	<6	6~10	<6	4~6
ダイズ(エンレイ)	4~6	4~6	>6	4~6	>6
ラッカセイ(白油7-3)	<6	— ^{a)}	—	—	>10
ラッカセイ(千葉半立)	4~6	—	4~6	4~6	4~6
ラッカセイ(タチマサリ)	—	—	4~6	4~6	4~6
トウモロコシ(交7号)	>6	—	—	—	>6
コムギ(農林61号)	—	—	>10	>10	>10
オオムギ(関取)	—	—	>10	6~10	>10
ビールムギ(アズマゴールデン)	—	—	>10	6~10	>10
ソバ(信濃1号)	<6	<6	—	—	<6

537 0.04 ppm、0.06 ppm および 0.10 ppm の低濃度オゾンを主要な畑作物の生育初期、生
538 育中期あるいは登熟期に長時間曝露し、生育時期別のオゾンによる作物の成長、収量被害
539 発現の限界値を示した。

540 a: 限界値の推定不能

541

542 米倉ら(2007)は、先に図7に示したように、10種の農作物におけるAOT40と相対収
543 量との関係について調べ、収量低下に対するオゾン感受性は、サラダナ>シュンギク≧ハ
544 ネギ≧サントウサイ>タアサイ>ハツカダイコン≧コカブ>コマツナ>チンゲンサイの順
545 に高かったと報告している。

546 また、小林(1999)は、イネ(品種: コシヒカリ)やトウモロコシに比べワタ、春コム
547 ギやダイズは収量に対するオゾン感受性が高く収量が低下しやすいと報告している(図
548 8)。なお、この比較において、イネ以外の作物種は、欧米の品種の結果を用いている。

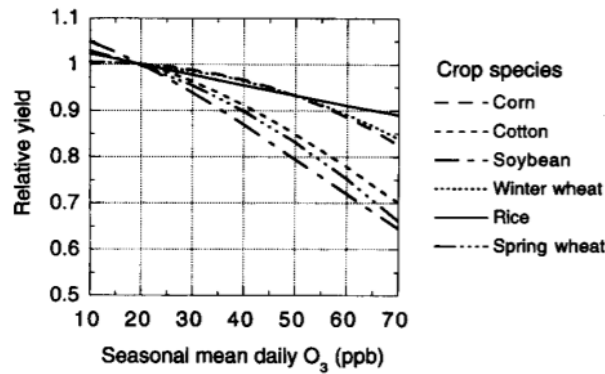


図 8 様々な作物の相対収量と日平均オゾン濃度との関係 (小林, 1999)

作物種間の感受性差のみならず、品種間においても感受性差があることが知られている。特にイネについては様々な報告がなされており、例えば、早生品種において光化学オキシダント感受性が高い傾向にあること(浅川ら, 1981a, b)、また、先に図 4 に示したように、日本の品種と外国の品種を比べると、日本の品種においてオゾンによる収量低下が比較的に少なく、低オゾン感受性であること(Yonekura *et al.*, 2005b)が示されている。Sawada and Kohno (2009)は、ジャポニカ型品種の収量に対するオゾンの影響がインディカ型品種より小さい傾向にあることを示した。アミロース含有率の低い品種ほどオゾンによる外観品質の低下が生じやすいことも示されている(澤田ら, 2017)。こうした品種間の感受性差異については、コマツナにおける個体乾重量の低下(Izuta *et al.*, 1999)やハツカダイコンにおける乾物成長の減少(Izuta *et al.*, 1994)においてもみられている。

生育段階によるオゾン等の感受性の違いも指摘されており、いくつかの研究において(浅川ら, 1981b; 米倉ら, 2010)、特に出穂時期がオゾンの影響による減収効果が最も大きい時期であることが報告されている。また、松山ら(1983)は、稔実歩合の低下が主なオゾンによる収量低下の要因と考えられるとしている。

さらに米倉ら(2010)では、窒素施肥量が多いとオゾン曝露の有無にかかわらず収量は増加し、窒素施肥量が少ないとオゾン感受性は高い(オゾンによる収量低下の割合が高まる)が、ある程度以上の窒素施肥量があればオゾン感受性はほとんど変わらなくなることや、ケイ酸肥料の施用による収量に対するオゾン影響の軽減効果(オゾン感受性の変化)はなかったことを指摘している。

Tatsumi *et al.* (2019)は、イネ(品種: コシヒカリ)を対象に異なる2段階の窒素施肥条件(無施肥と 6g 窒素/10a)下で3段階のオゾン曝露(浄化空気、野外の1倍または1.5倍のオゾン濃度)を行う試験をグリーンハウス型 OTC で実施し、成長や収量に対する影響を検討した。収穫時の葉、茎、根、及び個体乾重量に対するオゾンの影響は、無施肥区では認められず、施肥区において1.5倍のオゾン濃度区で低下が認められたことによる、オゾンと窒素施肥の有意な相互作用効果があった。一方、収量に対するオゾンの影

577 響は、無施肥区では認められず、施肥区においてオゾンの増加に伴う収量低下が認められ
578 た。

579

580 3.4. オゾン影響のリスク評価事例

581 個々の実験から導出したオゾン曝露応答関係式を常時監視測定局で測定されたオゾン濃
582 度と組み合わせることで、現状の大気中オゾン濃度によるイネの減収率を推計した研究が
583 ある。なお、これらの推計の多くはイネの栽培地域等の土地利用の分布を考慮した上での
584 推計ではないことに留意する必要がある。

585 小林(1999)は、オゾンの影響を組み込んだ水稻生育モデルより 1981～1985 年の 5 年
586 間の平均減収率を評価した結果、関東の水稻の最大減収程度は 5～10%変動し、5 年間の
587 最大減収率の平均は 7%であった。また、埼玉県中央から関東平野の中心部にかけて減収
588 率が最も高く、茨城県や千葉県の太平洋沿岸地域は減収率が低かった。高木と大原
589 (2003)は、Kobayashi *et al.* (1995)の提案した成長期間の昼 7 時間 (9:00～16:00)
590 の平均値を曝露指標としたオゾン曝露応答関係式を用い評価した結果、1996 年の関東地
591 方のイネの減収率は 3.6%と推定した。中西ら(2009)は、Kobayashi *et al.* (1995)と仁
592 紫ら(1985)のデータを元に AOT30 を曝露指標としたオゾン曝露応答関係式を導出し評価
593 した結果、2002 年の関東地方の平均減収率は 9.22%と推定した。Yonekura *et al.*
594 (2005b)は、AOT40 を曝露指標としたオゾン曝露応答関係式を用いて 1990～2000 年の
595 関東地方のイネの平均減収率を 5～10%と推定した。

596 Feng *et al.* (2022)は、中国、日本、韓国のイネ、コムギ、トウモロコシの収量に対す
597 るオゾン影響を AOT40 と相対収量との関係に基づいて検討した（日本については、イネ
598 とコムギのみ）。その結果、日本における現状レベル（2015～2017 年）のオゾンによっ
599 て、清浄空気と比べ、イネの収量は 15.8%、コムギの収量は 5.1%程度の減収していると
600 推定した。なお、本報告で用いられているイネやコムギの品種は、日本、中国、インドの
601 品種が含まれている。

602 イネ以外には、Yonekura *et al.* (2005a)がコマツナとハツカダイコンについて評価を
603 行っている。Yonekura *et al.* (2005a)は、AOT40 を曝露指標としたオゾン曝露応答関
604 係式を用い、1990～2000 年の関東地方のコマツナとハツカダイコンの成長低下率を評価
605 した結果、その低下率は約 5～10%と推定した。（オゾン曝露応答関係式は、3.1.8 と
606 3.1.10 を参照。）

607

608 4. まとめ

609 我が国における農作物の成長や収量などにオゾンが及ぼす影響に係る文献を取りまとめ
610 た。多岐にわたる農作物についてオゾンの影響の検討がなされており、それらによると、
611 オゾンは農作物の成長や収量などに対して悪影響を及ぼす点は明白である。さらに、オゾ

ンに対する感受性（影響の受けやすさ）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られている。また、イネなどの比較的長期的にオゾン曝露される作目においては、生育段階によってオゾン感受性が変化することが十分に予想される。

615

616 5. 参考文献

617 Feng, Z., Xu, Y., Kobayashi, K., Dai, L., Zhang, T., Agathokleous, E.,
618 Calatayud, V., Paoletti, E., Mukherjee, A., Agrawal, M., Park, R.J.,
619 Oak, Y.J. & Yue, X. (2022) Ozone pollution threatens the production
620 of major staple crops in East Asia. *Nature Food*, 3, 47-56.

621 Izuta, T., Miyake, H. & Totsuka, T. (1993) Evaluation of air-polluted
622 environment based on the growth of radish plants cultivated in small-
623 sized open-top chambers. *Environmental Sciences*, 2, 25-37.

624 Izuta, T., Ohtsu, G., Miyake, H. & Totsuka, T. (1994) Effects of ozone on dry
625 weight growth, net photosynthetic rate and leaf diffusive conductance
626 in three cultivars of radish plants. *Journal of Japan Society of Air
627 Pollution*, 29, 1-8.

628 Izuta, T., Takahashi, K., Matsumura, H. & Totsuka, T. (1999) Cultivar
629 difference of *Brassica campestris* L. in the sensitivity to O₃ based on
630 the dry weight growth. *Journal of Japan Society for Atmospheric
631 Environment*, 34, 137-146.

632 Izuta, T., Takahashi, S., Aoki, M. & Totsuka, T. (1995) Effects of ozone and
633 ultraviolet-B radiation, alone and in combination, on growth of
634 cucumber plants. *Journal of Japan Society of Air Pollution*, 30, 126-
635 136.

636 Kobayashi, K., Okada, M. & Nouchi, I. (1995) Effects of ozone on dry matter
637 partitioning and yield of Japanese cultivars of rice (*Oryza sativa* L.).
638 *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 53, 109-122.

639 Nouchi, I., Ito, O., Harazono, Y. & Kobayashi, K. (1991) Effects of chronic
640 ozone exposure on growth, root respiration and nutrient uptake of
641 rice plants. *Environmental Pollution*, 74, 149-164.

642 Sawada, H. & Kohno, Y. (2009) Differential ozone sensitivity of rice cultivars
643 as indicated by visible injury and grain yield. *Plant Biology*, 11, 70-
644 75.

645 Shinohara, T., Yamamoto, Y., Kitano, H. & Fukuda, M. (1973) The relation
646 between ozone treatment and the injury in tobacco. *Japanese Journal*

of Crop Science, 42, 412-417.

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. Environmental Science and Pollution Research, 26, 32103-32113.

Yamaguchi, M., Hoshino, D., Inada, H., Akhtar, N., Sumioka, C., Takeda, K. & Izuta, T. (2014) Evaluation of the effects of ozone on yield of Japanese rice (*Oryza sativa* L.) based on stomatal ozone uptake. Environmental Pollution, 184, 472-480.

Yamaguchi, M., Inada, H., Satoh, R., Hoshino, D., Nagasawa, A., Negishi, Y., Sasaki, H., Nouchi, I., Kobayashi, K. & Izuta, T. (2008) Effects of ozone on the growth, yield and leaf gas exchange rates of two Japanese cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). Journal of Agricultural Meteorology, 64, 131-141.

Yonekura, T., Kihira, A., Shimada, T., Miwa, M., Arzate, A., Izuta, T. & Ogawa, K. (2005a) Impacts of O₃ and CO₂ enrichment on growth of komatsuna (*Brassica campestris*) and radish (*Raphanus sativus*). Phytion, Annales Rei Botanicae, Horn, 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.). Journal of Agricultural Meteorology, 60, 1045-1048.

浅川富美雪, 田中平義, 日下昭二. (1981a) 大気の浄化が水稻の生育収量に及ぼす効果 : 光化学オキシダント等の大気汚染が水稻の生育収量に及ぼす影響 (第 1 報) . 日本土壌肥科学雑誌, 52, 201-206.

浅川富美雪, 田中平義, 日下昭二. (1981b) 光化学オキシダントが水稻早晩品種の生育収量に及ぼす生育時期別の影響の差 : 光化学オキシダント等の大気汚染が水稻の生育収量に及ぼす影響 (第 2 報) . 日本土壌肥科学雑誌, 52, 289-296.

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.

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.

印南ゆかり, 三輪 誠. (2014) 葉に発現する可視被害の程度に基づいたハウレンソウのオゾン感受性評価. 大気環境学会誌, 49, 1-7.

大村三男, 松田長生, 森口卓哉, 小崎 格, 秋浜友也. (1989) 果樹の花粉に及ぼす影響. 農林

682 水産技術会議事務局（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. 145-149.
 683
 684 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
 685 及ぼす影響 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
 686 究報告, 13, 85-88.
 687 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
 688 会議事務局（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
 689 評価法の開発に関する研究, 279, pp. 26-31.
 690 川瀬信三, 岡本美知, 長門寿男, 松丸恒夫. (1989) 数種の汚染物質のガス暴露がナシの受
 691 精に及ぼす影響. 農林水産技術会議事務局（編）大気汚染物質による農作物の生
 692 理・遺伝的影響に関する研究, 216, pp. 132-136.
 693 黒田昭太郎, 篠原俊清, 東瀬士郎, 矢野文雄, 木村俊雄. (1973) タバコの生理的斑点病に関
 694 する研究 第3報 生理的斑点病（タイプ II, III）発生の実態調査. 岡山たばこ試
 695 験場報告, 33, 15-24.
 696 群馬県農業試験場, 埼玉県農業試験場, 千葉県農業試験場, 東京都農業試験場, 神奈川県農
 697 業試験場, 愛知県農業試験場, 大阪府農林技術センター, 兵庫県農業総合センター,
 698 岡山県農業試験場（編）(1983) 光化学スモッグによる農作物被害の解析と対策.
 699 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,
 700 162-175.
 701 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
 702 量に及ぼす影響—カブ、インゲン、ホウレンソウ、水稻—. 群馬県農業総合試験
 703 場, 埼玉県農業試験場, 千葉県農業試験場, 東京都農業試験場, 神奈川県農業試験
 704 場, 愛知県農業試験場, 大阪府農林技術センター, 兵庫県農業総合センター, 岡山
 705 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と対策, pp. 183-
 706 186.
 707 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
 708 との複合影響. 大気環境学会誌, 52, 59-67.
 709 須山 勇, 黒田昭太郎, 篠原俊清, 木村敏雄, 正田充慶, 三宅嘉之, 栗原 恒. (1973) タバコ
 710 の生理的斑点病に関する研究 第7報 感受性の品種間差異について. 岡山たばこ
 711 試験場報告, 33, 55-62.
 712 大気汚染研究協会植物影響調査研究分科会. (1982) 植物に関する大気汚染研究文献集
 713 （第4集）. 大気汚染学会誌, 17, S1-S37.
 714 大気汚染研究協会植物影響調査研究分科会. (1987) 植物に関する大気汚染研究文献集
 715 （第5集）. 大気汚染学会誌, 22, 159-198.
 716 大気汚染研究全国協議会植物影響調査研究分科会. (1977) 植物に関する大気汚染研究文

717 献集（第3集）．大気汚染研究, 11, 413-444.
 718 大気汚染研究全国協議会第7小委員会. (1974) 植物に関する大気汚染研究文献目録集（第
 719 2集）．大気汚染研究, 9, 21-37.
 720 高木健作, 大原利眞. (2003) 関東地域におけるオゾンによる植物影響評価—ダメージ関数
 721 を用いたインパクト推計—. 大気環境学会誌, 38, 205-216.
 722 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
 723 術会議事務局（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
 724 析に関する研究, 164, pp. 148-153.
 725 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
 726 学オキシ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
 727 告, 14, 13-25.
 728 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
 729 水産技術会議事務局（編）大気汚染物質による農作物の生理・遺伝的影響に関す
 730 る研究, 216, pp. 116-123.
 731 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
 732 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.
 733 大気環境学会誌, 53, 186-193.
 734 中西準子, 篠崎裕哉, 井上和也. (2009) 詳細リスク評価書シリーズ 24 オゾン—光化学オ
 735 キシダント—, 丸善.
 736 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
 737 告, 24, 1-68.
 738 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
 739 いて：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-
 740 636.
 741 仁紫宏保, 阿江教治, 脇本賢三. (1985) 低濃度オゾンの長期間接触による水稻への影響.
 742 中国農業試験場報告, E22, 55-69.
 743 農業技術研究所. (1985) 空気浄化法によるイネ品種間差の検討. 農林水産技術会議事務局
 744 （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
 745 究, 164, pp. 8-10.
 746 農事試験場. (1985) オゾンによる畑作物の生育・収量被害発現の限界濃度. 農林水産技術
 747 会議事務局（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
 748 に関する研究, 164, pp. 140-148.
 749 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
 750 相対的感受性比較. 大気汚染学会誌, 23, 355-370.
 751 農林水産技術会議事務局（編）（1985）光化学オキシダントの農林作物の生育収量に及ぼ

752 す影響の解析に関する研究, 164.

753 農林水産技術会議事務局連絡調整課. (1982) 光化学オキシダントによる農林作物被害の
754 判定条件に関する資料, pp. 1-53.

755 松丸恒夫, 高崎 強. (1989) 光化学オキシダントに対する指標植物としての農作物感受性
756 品種の選定. 大気汚染学会誌, 24, 287-289.

757 松丸恒夫, 高崎 強. (1991) バレイショの光化学オキシダントによる被害 第2報 オキシダ
758 ントがバレイショの生育, 収量に及ぼす影響の空気浄化法による解析. 大気汚染
759 学会誌, 26, 385-391.

760 松山基一, 斎尾健二, 木村良仁. (1983) 大気汚染が水稻の生育収量に及ぼす影響について.
761 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, 東京都農業試験場,
762 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, 兵庫県農業総
763 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と
764 対策, pp. 206-211.

765 真弓洋一, 山添文雄 (1983) 植物に及ぼす光化学大気汚染の影響の解析. 農業技術研究所
766 報告. B, 土壤肥料, 35, 1-71.

767 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
768 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
769 関する研究, 164, pp. 161-167.

770 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
771 技術会議事務局 (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
772 解析に関する研究, 164, pp. 153-156.

773 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
774 (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
775 発に関する研究, 279, pp. 14-19.

776 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
777 る感受性の品種間差異. 群馬県農業総合試験場, 埼玉県農業試験場, 千葉県農業
778 試験場, 東京都農業試験場, 神奈川県農業試験場, 愛知県農業試験場, 大阪府農林
779 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). 光化学スモッ
780 グによる農作物被害の解析と対策, pp. 48-52.

781 山添文雄. (1987) 大気汚染による植物影響研究の変遷と動向. 大気汚染学会誌, 22, 199-
782 210.

783 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
784 ゾン) の影響一. 大気環境学会誌, 51, A57-A66.

785 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
786 発芽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

- 787 誌, 35, 36-50.
- 788 米倉哲志, 篠原慎弥, 伊豆田 猛, 三輪 誠, 小川和雄. (2007) 都市近郊農作物の収量に対す
789 るオゾンのクリティカルレベルの評価. 第 48 回大気環境学会年会.
- 790 米倉哲志, 嶋田知英, 三輪 誠. (2010) 気温とオゾン濃度上昇が水稻の生産性におよぼす複
791 合影響評価と適応方策に関する研究. (2) 水稻の生育時期別オゾン感受性の評
792 価に関する研究. 平成 22 年度環境研究総合推進費終了成果報告書(A-0806(2)).
793 環境省地球環境局総務課研究調査室.