

オゾンの植物影響を変化させる環境要因

目次

1
2
3
4

5	1. はじめに.....	2
6	2. 気温上昇がオゾンの植物影響に及ぼす作用.....	2
7	3. 土壌乾燥ストレスがオゾンの植物影響に及ぼす作用.....	3
8	4. 土壌への窒素沈着または施肥がオゾンの植物影響に及ぼす作用.....	3
9	5. 二酸化炭素濃度の上昇がオゾンの植物影響に及ぼす作用.....	4
10	6. 酸性雨、酸性霧及び二酸化硫黄がオゾンの植物影響に及ぼす作用.....	6
11	7. まとめ.....	6
12	8. 参考文献.....	13

13
14
15
16
17

18 1. はじめに

19 植物に対するオゾンの影響として、可視障害の発現、光合成能力の低下、成長や収
20 量の低下などがある。「植物に対するオゾンの影響（概説）」（第4回検討会資料1別添
21 2）で述べたように、オゾンは気孔を介して葉内に吸収されて植物に影響を及ぼす一
22 方で、葉内には吸収されたオゾンを解毒する活性酸素消去系が存在する。そのため、
23 オゾンによる影響の程度は、気孔を介したオゾン吸収量と、吸収されたオゾンの葉内
24 における解毒量のバランスによって決まると考えられている（Musselman *et al.*,
25 2006）。このことは、気孔開度や葉内の活性酸素消去系の活性を変化させる環境要因が
26 変動すれば、大気中のオゾン濃度が同じであっても、オゾンの影響の程度が変化する
27 ことを示している。

28 植物に対するオゾンの影響の程度が生育環境の違いによって変化することは、これ
29 まで数多くの実験的研究によって報告されている。例えば、異なる光条件で栽培した
30 ハツカダイコン（*Raphanus sativus*）に対するオゾンの影響を評価した研究では、弱
31 光条件で栽培した個体の成長や光合成にオゾンの影響は認められなかったのに対し、
32 強光条件で栽培した個体ではオゾンによって成長や光合成が低下したことが報告され
33 ている（Izuta *et al.*, 1991）。このようなオゾンの植物影響を変化させる環境要因とし
34 て、光強度の他に、気温上昇、土壌乾燥ストレス、大気から土壌への窒素沈着または施肥、
35 二酸化炭素（CO₂）濃度の上昇、酸性雨、酸性霧及び二酸化硫黄（SO₂）などが報告され
36 ている。本資料では、これらの環境要因がオゾンの影響に及ぼす作用を報告した実験
37 的研究のうち、日本の樹木や作物を供試植物として、主にその成長や光合成影響を評
38 価した研究を整理した。

39

40 2. 気温上昇がオゾンの植物影響に及ぼす作用

41 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
42 響を及ぼす（久米と大政, 2017）。したがって気温の変化は、葉内へのオゾン吸収量や
43 葉内におけるオゾンの解毒能力の変化をもたらすと考えられる。研究数は世界的にも
44 極めて限られているが、植物に対するオゾンの影響を変化させる要因として気温を取
45 り上げた実験的研究が報告されている。

46 表1に、日本の作物の成長に対するオゾンの影響に及ぼす気温上昇の作用を評価し
47 た実験的研究を示した。ハツカダイコンを対象とした研究では、オゾンによる成長低
48 下が気温の上昇によって著しくなることが報告されている（伊豆田ら, 1988）。同様に
49 Izuta *et al.* (1993) と中島ら (2018) は、ハツカダイコンに対するオゾンの影響は、
50 気温が高い条件で発現しやすいことを報告している。イネ（*Oryza sativa*）を対象と
51 した研究では、成長や収量に対する影響は報告されていないが、オゾンによる玄米の
52 外観品質低下（第4回検討会資料1別添1「日本の農作物へのオゾンの影響に係る科

53 学的知見の整理」参照) が気温上昇によって著しくなることが報告されている (澤田
54 ら, 2017)。しかし、このような助長作用は品種によって異なり、オゾンの影響が気温
55 上昇によって変化しない品種もある (澤田ら, 2017)。

56

57 3. 土壤乾燥ストレスがオゾンの植物影響に及ぼす作用

58 一般に、乾燥条件下での植物は、葉からの水分損失を防ぐために気孔を閉鎖する
59 (Larcher, 2003)。そのため、大気湿度の低下や降水量の減少などに伴う土壤の乾燥に
60 よって葉内へのオゾン吸収量が低下すると考えられることから、植物に対するオゾン
61 の影響を変化させる要因として土壤乾燥ストレスを取り上げた実験的研究が報告され
62 ている。

63 表 2 に、日本の樹木及び作物を対象として、その成長や光合成に対するオゾンの影
64 響に及ぼす土壤乾燥ストレスの作用を評価した実験的研究を示した。日本の樹木を対
65 象とした実験的研究として、Yonekura *et al.* (2001a, 2001b, 2004) は、ブナ (*Fagus*
66 *crenata*) を対象とした研究を報告している。それらの研究では、オゾンによるブナの
67 肥大成長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
68 て変化しないことが報告されている。一方で米倉 (2006) は、オゾンによるブナの純
69 光合成速度の低下程度は土壤乾燥ストレスによって緩和されることを報告している。
70 このような緩和・相殺作用は、ダイズ (*Glycine max*) の収量においても報告されてお
71 り (Kobayashi *et al.*, 1993)、海外の研究事例をメタ解析した Feng *et al.* (2008) に
72 おいても、オゾンによるコムギ (*Triticum aestivum*) の収量低下は乾燥ストレスによ
73 って緩和されることが報告されている。しかしながら、コムギやダイズを用いた別の
74 研究では、オゾンの影響は土壤乾燥ストレスで変化しないことが報告されている (米
75 倉ら, 2000; Biswas and Jiang, 2011)。そのため、オゾンの影響に対する土壤乾燥ス
76 トレスの作用は土壤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
77 が考えられる。

78

79 4. 土壤への窒素沈着または施肥がオゾンの植物影響に及ぼす作用

80 化石燃料や化学合成肥料の消費によって大気中に放出される NO_x やアンモニアな
81 どの反応性窒素 (Nr) は、直接的または雨などに溶け込んでから間接的に森林や農地
82 へ沈着する (Galloway *et al.*, 2004)。窒素は植物の多量必須元素であることから、その
83 土壤への沈着量の増加は光合成活性の上昇をもたらし、気孔開度の上昇を引き起こす
84 他 (Larcher, 2003)、葉内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
85 いる (Dizengremel *et al.*, 2013)。このような変化は施肥によってももたらされる可
86 能性も十分に考えられる。一方、土壤への過剰な窒素沈着は、植物の栄養バランスの
87 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、光合成や活性酸素

88 消去系の活性を変化させると考えられる（伊豆田, 2020）。このように、大気から土壌
89 への窒素沈着量の増加や施肥は、葉内へのオゾン吸収量や葉内におけるオゾンの解毒
90 能力の変化をもたらすと考えられることから、植物に対するオゾンの影響を変化させ
91 る要因として土壌への窒素負荷や施肥を取り上げた実験的研究が報告されている。

92 表 3 に、異なる土壌への窒素負荷量もしくは施肥量で育成した日本の樹木及び作物
93 の成長や光合成に対するオゾンの影響を評価した実験的研究を示した。日本の森林樹
94 種を対象とした実験的研究として、コナラ (*Quercus serrata*)、ブナ、スダジイ
95 (*Castanopsis sieboldii*)、カラマツ (*Larix kaempferi*)、アカマツ (*Pinus densiflora*)
96 及びスギ (*Cryptomeria japonica*) の 6 樹種を対象とした研究が報告されている
97 (Watanabe *et al.*, 2006, 2007, 2008; Yamaguchi *et al.*, 2007)。それらの報告では、
98 ブナにおいては成長や純光合成速度のオゾンによる低下が土壌への窒素負荷によって
99 著しくなるのに対し、カラマツにおいてはオゾンによる成長低下が窒素負荷によって
100 緩和され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
101 いては、オゾンによる成長低下の程度は土壌への窒素負荷によって変化しないことが
102 報告されている。以上のことから、オゾンの影響に対する土壌への窒素負荷の作用は
103 樹種によって異なると考えられる。一方で、同じ樹種であってもその作用は研究によ
104 って異なっており、ブナを対象とした他の研究では、土壌への窒素負荷によってオゾ
105 ンによる純光合成速度の低下は著しくなるが成長の低下程度は変化しないことや、施
106 肥によってオゾンによる成長低下が緩和されるという報告がある (Kinose *et al.*,
107 2017; Watanabe *et al.*, 2022)。したがって、同じ樹種であっても、その作用は気象条
108 件や窒素以外の栄養状態などによって異なる可能性が考えられる。

109 異なる施肥量で栽培した日本の作物に対するオゾンの影響に関する実験的研究は
110 極めて限られている。Tatsumi *et al.* (2019) は、イネを用いた実験的研究において、
111 窒素施肥を行わなかった栽培条件ではオゾンによるイネの成長や収量の低下が認めら
112 れなかったのに対し、窒素施肥を行った栽培条件ではオゾンによる低下が認められる
113 という、オゾンの影響の施肥による助長作用を報告している。さらに、海外の研究事
114 例を包括的に解析した Broberg *et al.* (2017) の報告によれば、コムギの収量に対する
115 施肥効果はオゾンで低下する、つまり、オゾンによる収量低下は施肥によって顕著に
116 なることが示されている。このように、作物を対象とした研究では施肥によってオゾ
117 ンの影響が顕著になる可能性が高いと考えられるが、研究例が限られているのが現状
118 である。

119 120 5. 二酸化炭素濃度の上昇がオゾンの植物影響に及ぼす作用

121 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
122 になると、水分損失を防ぐために植物は気孔を閉じることが知られている（彦坂と寺島,

123 2013)。そのため、大気中の CO₂ 濃度の上昇によって葉内へのオゾン吸収量が減少す
124 ると考えられることから、植物に対するオゾンの影響を変化させる要因として大気
125 CO₂ 濃度をとり上げた実験的研究が報告されている。

126 表 4 に、異なる大気 CO₂ 濃度環境で育成した日本の樹木及び作物の成長や光合成に
127 対するオゾンの影響を評価した実験的研究を示した。日本の森林樹種を対象とした実
128 験的研究としては、Matsumura *et al.* (2005) が、シラカンバ (*Betula platyphylla*
129 *var. japonica*)、ダケカンバ (*Betula ermanii*)、ブナ、アカマツ及びスギの 5 樹種を
130 対象とした研究を報告している。この研究において、現状の CO₂ 濃度環境では、オゾ
131 ンによってシラカンバの成長が有意に低下するが、高濃度 CO₂ 環境においてはその低
132 下が認められず、オゾンによる影響の程度が大気 CO₂ 濃度の上昇によって相殺される
133 ことが報告されている。同様の相殺作用がグイマツ雑種 F₁ (造林用に開発されたグイ
134 マツ (*Larix gmelinii var. japonica*) とカラマツの交雑種) の幹の肥大成長においても
135 認められている (Koike *et al.*, 2012)。しかしながら、Matsumura *et al.* (2005) の研
136 究において、シラカンバ以外の 4 樹種の成長に対するオゾンの影響は大気 CO₂ 濃度の
137 上昇によって変化しないことも報告されている。また、カバノキ属 3 種 (*Betula*) や
138 スギの複数の品種を対象とした研究においても同様の報告がなされており (Hoshika
139 *et al.*, 2012; Hiraoka *et al.*, 2017)、オゾンの影響に対する高濃度 CO₂ の緩和・相殺
140 作用には樹種間差異があると考えられる。また、同じ樹種であってもその作用は研究
141 によって異なっており、ブナを対象とした他の研究では、高濃度 CO₂ によって純光合
142 成速度のオゾンによる低下や根に対する地上部の乾重量比のオゾンによる増加は緩和
143 されるが、成長の低下程度は変化しないことも報告されている (Watanabe *et al.*,
144 2022; Ariura *et al.*, 2023)。したがって、同じ樹種であっても、その作用は気象条件
145 によって異なる可能性が考えられる。一方、Kitao *et al.* (2015) と Watanabe *et al.*
146 (2010) は、高濃度 CO₂ 環境で育成したコナラとミズナラ (*Quercus mongolica var.*
147 *crispula*) 及びブナの成長がオゾンによって促進されたことを報告している。このよ
148 うな高濃度 CO₂ 環境におけるオゾンによる成長促進は、オゾンによる影響への補償的
149 応答として生じた葉への乾物分配の増加と、高濃度 CO₂ による葉の光合成促進の相乗
150 的な作用によって引き起こされた可能性が指摘されている (Kitao *et al.*, 2015)。な
151 お、Watanabe *et al.* (2022) では、オゾンの影響に対する土壌窒素負荷と高濃度 CO₂
152 の複合的な作用を調査しており、オゾンによるブナの成長低下の程度は両者の複合的
153 な作用によって変化しないことを報告している。

154 異なる大気 CO₂ 濃度環境で栽培した日本の作物に対するオゾンの影響を評価した
155 実験的研究は極めて限られている。Yonekura *et al.* (2005) は、ハツカダイコンとコ
156 マツナ (*Brassica rapa var. perviridis*) を用いた実験的研究において、両作物種の成
157 長に対するオゾンの影響の程度は高濃度 CO₂ によって変化しなかったことを報告し

158 ている。ただし、オゾンによる葉面積の低下は高濃度 CO₂によって緩和されることが
159 両作物種において報告されている。一方、海外の研究事例をメタ解析した Feng *et al.*
160 (2008) では、オゾンによるコムギの収量低下は高濃度 CO₂によって緩和されることが
161 が報告されている。以上のことから、高濃度 CO₂によってオゾンの影響は緩和・相殺
162 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られる。

163

164 6. 酸性雨、酸性霧及び二酸化硫黄がオゾンの植物影響に及ぼす作用

165 1970年代の初頭に北欧の研究者を中心に降雨の酸性化と樹木の成長低下との関係
166 が議論されはじめ、酸性雨の研究が欧米の研究者を中心に本格化するようになった(河
167 野, 2001; Grennfelt *et al.*, 2020)。日本においては、1980年代後半から都市域周辺の
168 スギの衰退現象や山地帯のブナやモミ、亜高山帯の針葉樹林の衰退現象と酸性雨や酸
169 性霧、大気汚染物質との因果関係が指摘されるようになった(河野, 2001)。このよう
170 な背景から、酸性雨、酸性霧もしくは二酸化硫黄(SO₂)が樹木に及ぼす影響を評価す
171 るための実験的研究が数多く行われ、それらを樹木に対するオゾンの影響を変化させ
172 る要因として取り上げた実験的研究も報告された。それらの研究報告によれば、スギ、
173 ウラジロモミ(*Abies homolepis*)、シラカンバ及びケヤキ(*Zelkova serrata*)の根に
174 対する地上部の乾重量比のオゾンによる増加が酸性雨によって顕著になることや、ブ
175 ナ、ケヤキ、ドロノキ(*Populus maximowiczii*)及びシラビソ(*Abies veitchii*)のオ
176 ゾンによる個体乾重量の低下が酸性霧によって顕著になることが報告されている(松
177 村ら, 1998; 河野と松村, 1999; 松村, 2000)。しかしながらそのような助長作用が認め
178 られない樹種も多く、オゾンの影響に及ぼす酸性雨や酸性霧の作用には樹種間差異が
179 ある。また、SO₂がオゾンの影響に及ぼす作用についても同様に樹種間差があり、ブ
180 ナの個体乾重量やヤマザクラ(*Prunus jamasakura*)の根の乾重量のオゾンによる低
181 下がSO₂曝露によって顕著になる一方で、アカマツの個体乾重量やウメ(*Prunus*
182 *mume*)の葉の乾重量のオゾンによる低下がSO₂曝露によって緩和されることも報告
183 されている(河野, 2001; 松村と河野, 2001; Kohno *et al.*, 1998)。さらにこのSO₂の
184 作用は曝露濃度によって異なる樹種があり、ストロブマツ(*Pinus strobus*)、カラ
185 マツ、ウラジロモミ、シラカンバ及びユリノキ(*Liriodendron tulipifera*)のオゾン
186 による個体乾重量の低下が、20 ppbまでのSO₂によって顕著になるが、40 ppbのSO₂
187 によって緩和されることも報告されている(Kohno *et al.*, 1998)。

188

189 7. まとめ

190 本資料では、気温上昇、土壌乾燥ストレス、土壌窒素負荷や施肥、CO₂濃度上昇、酸性雨、
191 酸性霧及びSO₂がオゾンの植物影響に及ぼす作用を報告した実験的研究のうち、日本
192 の樹木や作物を供試植物として、主にその成長や光合成影響を評価した研究を整理し

193 た。その結果、オゾンの植物影響は、気温上昇、酸性雨及び酸性霧によって顕著にな
194 るという報告があったのに対し、土壌乾燥ストレスや大気 CO₂ 濃度の上昇によって緩
195 和・相殺されるという作用が報告されていた。土壌への窒素負荷や施肥、または SO₂
196 の作用としては、オゾン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
197 もあることが報告されていた。このように、植物に対するオゾンの影響の程度は他の
198 環境要因によって変化し、その変化は環境要因の種類によって異なるが、同一の環境
199 要因の変動であっても、その程度や植物種、栽培環境によってオゾンの影響に及ぼす
200 作用は異なっていた。

201

202 表 1. 日本の作物の成長に対するオゾンと気温上昇の作用に関する実験的研究.

環境要因	文献	オゾン曝露装置	試験地	処理		処理期間	供試植物	オゾンの影響	オゾンの影響に対する気温上昇などの作用
				オゾン	気温処理等				
気温上昇 (作物)	伊豆田ら (1988)	自然光型 ファイトトロン	東京都 府中市	O ₃ 添加なし 100 ppb (10:00-14:00)	気温条件3処理区 (20°C/13°C, 25°C/18°C, 30°C/23°C (昼/夜)) 光条件2処理区 (全天, 75%遮光)	7日間	ハツカダイコン (<i>Raphanus sativus</i> , 品種: コメット)	各植物器官の乾重量の低下	低温条件よりも高温条件においてオゾンの影響が顕著、遮光条件下では影響なし
	Izuta <i>et al.</i> (1993)	OTC	東京都 府中市	CF NF	1987年6月～1989年6月の 春と夏に17回実施	7日間	ハツカダイコン (<i>Raphanus sativus</i> , 品種: コメット)	個体乾重量の低下	9時の平均気温が20°C以上の実験ではオゾンドースの増加に伴って個体乾重量が低下
	澤田ら (2017)	ガラス温室型 OTC	群馬県 前橋市	CF 0.8 × O ₃ 1.0 × O ₃ 1.5 × O ₃ 2.0 × O ₃ 2.5 × O ₃	外気温 外気温+1.7°C	2008年6月～ 10月 2010年5月～ 9月	イネ (<i>Oryza sativa</i> , 17品種)	玄米外観品質の低下 (白未熟粒割合の増加)	気温上昇でオゾンによる玄米の外観品質低下が顕著、品種によって作用は異なる
	中島ら (2018)	OTC	長崎県 長崎市	CF NF	2015年3月～10月に 9回実施	7日間	ハツカダイコン (<i>Raphanus sativus</i> , 品種: コメット)	個体乾重量及び地下部乾重量の低下	気温や相対湿度が高いと地下部乾重量に対するオゾン害の程度が顕著

203

204 CF: 浄化空気(区)、NF: 非浄化空気(区)、OTC: オープントップチャンバー (OTC については、「植物影響の曝露指標と植物影響
205 を評価するための曝露方法」参照)

206

207 表 2. 日本の樹木及び作物の成長や光合成に対するオゾンと土壤乾燥ストレスの作用に関する実験的研究.

環境要因	文献	オゾン曝露装置	試験地	処理		処理期間	供試植物	オゾンの影響	オゾンの影響に対する乾燥ストレスの作用
				オゾン	乾燥ストレス				
乾燥ストレス (樹木)	Yonekura <i>et al.</i> (2001a)	自然光型 ファイトトロン (20°C/15°C)	東京都 府中市	CF 60 ppb (11:00-18:00)	充分灌水 充分量の70%灌水	1999年5月～ 10月	ブナ (<i>Fagus crenata</i> , 3年生苗)	純光合成速度や個体乾重量 の低下	オゾンの影響を変化させず
	Yonekura <i>et al.</i> (2001b)	自然光型 ファイトトロン (20°C/15°C)	東京都 府中市	CF 60 ppb (11:00-18:00)	充分灌水 充分量の70%灌水	1999年5月～ 10月	ブナ (<i>Fagus crenata</i> , 3年生苗)	純光合成速度や幹の肥大成 長の低下	オゾンの影響を変化させず
	Yonekura <i>et al.</i> (2004)	自然光型 ファイトトロン (20°C/15°C)	東京都 府中市	CF 60 ppb (11:00-18:00)	充分灌水 充分量の70%灌水	1999年5月～ 10月	ブナ (<i>Fagus crenata</i> , 3年生苗)	落葉の早期化と開葉の遅 延、一芽あたりの出葉数低 下	オゾンの影響を変化させず
	米倉 (2006)	自然光型 ファイトトロン (20°C/15°C)	東京都 府中市	CF 60 ppb (11:00-18:00)	充分灌水 充分量の70%灌水	1999年5月～ 2000年10月	ブナ (<i>Fagus crenata</i> , 3年生苗)	純光合成速度や個体乾重量 の低下	純光合成速度の低下を緩和、個 体乾重量については変化させず
乾燥ストレス (作物)	米倉ら (2000)	自然光型 ファイトトロン (25°C/18°C)	東京都 府中市	CF 60 ppb (9:00-17:00)	土壌pF値1.8 (対照区) 土壌pF値2.5 (乾燥ストレス区)	1997年6月～ 9月	ダイズ (<i>Glycine max</i> , 品種: エンレイ)	個体乾重量の低下 (栄養成 長期)、子実収量の低下	オゾンの影響を変化させず

208

209 CF: 浄化空気 (区)

210

211 表 3. 日本の樹木及び作物の成長や光合成に対するオゾンと土壌窒素負荷や施肥の作用に関する実験的研究.

環境要因	文献	オゾン曝露装置	試験地	処理		処理期間	供試植物	オゾンの影響	オゾンの影響に対する土壌窒素負荷もしくは施肥の作用
				オゾン	土壌窒素負荷/施肥				
土壌窒素負荷 /施肥 (樹木)	Watanabe <i>et al.</i> (2006)	ガラス温室型 OTC	群馬県 前橋市	CF	0 kg ha ⁻¹ year ⁻¹	2成長期間 (2004年4月～ 2005年10月)	アカマツ (<i>Pinus densiflora</i> , 2年生苗)	純光合成速度や個体乾重量 の低下	オゾンの影響を変化させず
				1.0 × O ₃	20 kg ha ⁻¹ year ⁻¹				
				1.5 × O ₃	50 kg ha ⁻¹ year ⁻¹				
				2.0 × O ₃			カラマツ (<i>Larix kaempferi</i> , 3年生苗)	純光合成速度や個体乾重量 の低下	個体乾重量の低下を緩和、純光 合成速度の低下については変化 させず
							スギ (<i>Cryptomeria japonica</i> , 2年生苗)	個体乾重量の低下、純光合 成速度に影響なし	オゾンの影響を変化させず
	Watanabe <i>et al.</i> (2007)	ガラス温室型 OTC	群馬県 前橋市	CF	0 kg ha ⁻¹ year ⁻¹	2成長期間 (2004年4月～ 2005年10月)	コナラ (<i>Quercus serrata</i> , 2年生苗)	純光合成速度や個体乾重量 の低下	オゾンの影響を変化させず
			1.0 × O ₃	20 kg ha ⁻¹ year ⁻¹					
			1.5 × O ₃	50 kg ha ⁻¹ year ⁻¹					
				2.0 × O ₃					
	Yamaguchi <i>et al.</i> (2007)	ガラス温室型 OTC	群馬県 前橋市	CF	0 kg ha ⁻¹ year ⁻¹	2成長期間 (2004年4月～ 2005年10月)	ブナ (<i>Fagus crenata</i> , 2年生苗)	純光合成速度や個体乾重量 の低下	オゾンによる低下を顕著にする
			1.0 × O ₃	20 kg ha ⁻¹ year ⁻¹					
			1.5 × O ₃	50 kg ha ⁻¹ year ⁻¹					
				2.0 × O ₃					
	Watanabe <i>et al.</i> (2008)	ガラス温室型 OTC	群馬県 前橋市	CF	0 kg ha ⁻¹ year ⁻¹	2成長期間 (2004年4月～ 2005年10月)	スダジイ (<i>Castanopsis sieboldii</i> , 2年生苗)	純光合成速度や個体乾重量 の低下	オゾンの影響を変化させず
			1.0 × O ₃	20 kg ha ⁻¹ year ⁻¹					
			1.5 × O ₃	50 kg ha ⁻¹ year ⁻¹					
				2.0 × O ₃					
	Kinose <i>et al.</i> (2017)	グリーン ハウス型OTC	東京都 八王子市	CF	無施肥 (NF)	2成長期間 (2014年5月～ 2015年10月)	ブナ (<i>Fagus crenata</i> , 2年生苗)	純光合成速度や個体乾重量 の低下	個体乾重量の低下を緩和、純光 合成速度の低下については変化 させず
			1.0 × O ₃	HYPONEX 2000倍 (LF)					
			1.5 × O ₃	もしくは1000倍 (HF) 希釈溶液添加					
	Watanabe <i>et al.</i> (2022)	自然光型 ファイトトロン (25°C/18°C)	東京都 府中市	5 ppb	0 kg ha ⁻¹ year ⁻¹	2成長期間 (2018年6月～ 2019年9月)	ブナ (<i>Fagus crenata</i> , 2年生苗)	純光合成速度や個体乾重量 の低下、根に対する地上部 の乾重量比の増加	純光合成速度のオゾンによる 低下を助長、個体乾重量や根に 対する地上部乾重量比に対する オゾンの影響は変化させず
			2.0 × O ₃	50 kg ha ⁻¹ year ⁻¹					
				100 kg ha ⁻¹ year ⁻¹ (高濃度CO ₂ との三者複合)					
施肥 (作物)	Tasumi <i>et al.</i> (2019)	グリーン ハウス型OTC	東京都 八王子市	CF	無施肥 (NN)	2017年6月～ 10月	イネ (<i>Oryza sativa</i> L., 品種: コシヒカリ)	個体乾重量や収量の低下	標準施肥処理 (SN) 区でオゾン の影響が発現、無施肥処理 (NN) 区では影響なし
			1.0 × O ₃	標準施肥量					
			1.5 × O ₃	(60 kg N ha ⁻¹) (SN)					

212

213 CF: 浄化空気(区)、OTC: オープントップチャンバー

214

215 表 4. 日本の樹木及び作物の成長や光合成に対するオゾンと高濃度 CO₂ の作用に関する実験的研究.

環境要因	文献	オゾン曝露装置	試験地	処理		処理期間	供試植物	オゾンの影響	オゾンの影響に対する高濃度 CO ₂ の作用
				オゾン	CO ₂ 濃度				
高濃度 CO ₂ (樹木)	Matsumura <i>et al.</i> (2005)	ガラス温室型 OTC	群馬県 前橋市	CF	野外濃度 CO ₂ (377 ppm)	2成長期間 (2002年7月～ 2003年10月)	シラカンバ (<i>Betula platyphylla</i> , 2年生苗)	個体乾重量の低下	個体乾重量の低下を相殺
				1.0 × O ₃	(CF, 1.0 ×, 1.5 × O ₃) 1.5 × CO ₂ (544 ppm) (1.0 ×, 1.5 × O ₃)		ダケカンバ (<i>Betula ermanii</i> , 3年生苗)	個体乾重量に影響なし	オゾンの影響を変化させず
				1.5 × O ₃			ブナ (<i>Fagus crenata</i> , 4年生苗)	個体乾重量の低下	オゾンの影響を変化させず
							アカマツ (<i>Pinus densiflora</i> , 2年生苗)	個体乾重量の低下	オゾンの影響を変化させず
							スギ (<i>Cryptomeria japonica</i> , 2年生苗)	個体乾重量に影響なし	オゾンの影響を変化させず
Watanabe <i>et al.</i> (2010)	人工気象室 (22°C/16°C)	日長: 15時間 PPFD: 600 μmol m ⁻² s ⁻¹ (6h/日, 3日/週)	< 10 ppb 100 ppb	350 ppm CO ₂ 700 ppm CO ₂	1995年5月～ 10月	ブナ (<i>Fagus crenata</i> , 2年生苗)	純光合成速度の低下、個体 乾重量に影響なし	高濃度 CO ₂ 区ではオゾンによっ て個体乾重量が増加	
Koike <i>et al.</i> (2012)	OTC	北海道 札幌市	CF 60 ppb	野外濃度 CO ₂ 600 ppm CO ₂	7月～10月	カラマツ (<i>Larix kaempferi</i> , 2年生苗)	純光合成速度や幹の肥大成 長、個体乾重量に影響なし	オゾンの影響を変化させず	
						グイマツ (<i>Larix gmelinii var. japonica</i> , 2年生苗)	純光合成速度や幹の肥大成 長、個体乾重量に影響なし	オゾンの影響を変化させず	
						グイマツ雑種 F1 (<i>L. gmelinii var. japonica</i> × <i>L. kaempferi</i> , 3年生苗)	幹の肥大成長の低下、純光 合成速度と個体乾重量に影 響なし	幹の肥大成長低下を相殺、その 他のオゾンの影響については変 化させず	
Hoshika <i>et al.</i> (2012)	OTC	北海道 札幌市	CF 60 ppb	野外濃度 CO ₂ (370～380 ppm) 600 ppm CO ₂	2010年7月 ～10月	ダケカンバ (<i>Betula ermanii</i> , 2年生苗)	純光合成速度や個体乾重量 に影響なし	オゾンの影響を変化させず	
						ウダイカンバ (<i>Betula maximoxiziana</i> , 2年生苗)	純光合成速度や個体乾重量 に影響なし	オゾンの影響を変化させず	
						シラカンバ (<i>Betula platyphylla</i>)	純光合成速度や個体乾重量 に影響なし	オゾンの影響を変化させず	
Kitao <i>et al.</i> (2015)	FACE	茨城県 つくば市	1.0 × O ₃ 2.0 × O ₃	野外濃度 CO ₂ (377～409 ppm) 550 ppm CO ₂ (546～531 ppm)	2成長期間 (2012年4月～ 2013年11月)	ミズナラ (<i>Quercus mongolica</i> Fisch. ex Ledeb. var. <i>crispula</i> , 1年生苗)	純光合成速度の低下、個体 乾重量に影響なし	高濃度 CO ₂ 区ではオゾンによっ て個体乾重量が増加	
						コナラ (<i>Quercus serrata Murray</i> , 1年生苗)	純光合成速度の低下、個体 乾重量の増加	オゾンの影響を変化させず	
Hiraoka <i>et al.</i> (2017)	FACE	茨城県 つくば市	1.0 × O ₃ 2.0 × O ₃	野外濃度 CO ₂ (377～378 ppm) 550 ppm CO ₂ (546～562 ppm)	2成長期間 (2011年5月～ 2012年11月)	スギ (<i>Cryptomeria japonica</i> , 12品種, 挿木苗)	純光合成速度や個体乾重量 に影響なし	オゾンの影響を変化させず	

216

217

218

219

(次ページに続く)

220 表 4. 日本の樹木及び作物の成長や光合成に対するオゾンと高濃度 CO₂ の作用に関する実験的研究 (続き).

環境要因	文献	オゾン曝露装置	試験地	処理		処理期間	供試植物	オゾンの影響	オゾンの影響に対する高濃度 CO ₂ の作用
				オゾン	CO ₂ 濃度				
	Watanabe <i>et al.</i> (2022)	自然光型 ファイトトロン (25°C/18°C)	東京都 府中市	5 ppb	野外濃度 CO ₂ (399~406 ppm)	2成長期間 (2018年6月~ 2019年9月)	ブナ (<i>Fagus crenata</i> , 2年生苗)	純光合成速度や個体乾重量 の低下、根に対する地上部 の乾重量比の増加	オゾンによる純光合成速度の低 下や根に対する地上部の乾重量 比の増加を緩和、個体乾重量に 対するオゾンの影響は変化させ ず
2.0 × O ₃				700 ppm CO ₂ (685~692 ppm) (土壌窒素負荷との三者複合)					
	Ariura <i>et al.</i> (2023)	自然光型 ファイトトロン (25°C/18°C)	東京都 府中市	5 ppb 2.0 × O ₃	野外濃度 CO ₂ (399~406 ppm) 700 ppm CO ₂ (685~692 ppm)	2成長期間 (2018年6月~ 2019年9月)	ブナ (<i>Fagus crenata</i> , 2年生苗)	純光合成速度の低下	オゾンによる純光合成速度の低 下を緩和
高濃度 CO ₂ (作物)	Yonekura <i>et al.</i> (2005)	人工気象室 (25°C/18°C)		< 5 ppb	380 ppm CO ₂	30日間	コマツナ (<i>Brassica campestris</i> , 品種: 楽天)	葉面積や個体乾重量、収量 の低下	葉面積の低下を緩和、その他の オゾンの影響については変化さ せず
				60 ppb, 90 ppb, 120 ppb (10:00-15:00)	760 ppm CO ₂		ハツカダイコン (<i>Raphanus sativus</i> , 品種: 赤丸)	葉面積や個体乾重量、収量 の低下	葉面積の低下を緩和、その他の オゾンの影響については変化さ せず

221

222 CF: 浄化空気 (区)、PPFD: 光合成有効光量子束密度、OTC: オープントップチャンバー、FACE: 開放系大気 CO₂ 増加実験

223 (FACE) の曝露装置を応用したオゾン曝露システム (FACE については、「植物影響の曝露指標と植物影響を評価するため

224 の曝露方法」参照)

225

226

227 8. 参考文献

228 Ariura, R., Matsumoto, M., Li, J., Fuse, T., Aoki, T., Zhang, Y., Kinose, Y.,
229 Yamaguchi, M., Izuta, T. & Watanabe, M. (2023) Effects of elevated ozone
230 and carbon dioxide on the dynamic photosynthesis of *Fagus crenata*
231 seedlings under variable light conditions. *Science of The Total*
232 *Environment*, 891, 164398.

233 Biswas, D.K. & Jiang, G.M. (2011) Differential drought-induced modulation of
234 ozone tolerance in winter wheat species. *Journal of Experimental Botany*,
235 62, 4153-4162.

236 Broberg, M.C., Uddling, J., Mills, G. & Pleijel, H. (2017) Fertilizer efficiency in
237 wheat is reduced by ozone pollution. *Science of The Total Environment*,
238 607-608, 876-880.

239 Dizengremel, P., Jolivet, Y., Tuzet, A., Ranieri, A. & Le Thiec, D. (2013) Integrative
240 leaf-level phytotoxic ozone dose assessment for forest risk modelling. In
241 *Climate Change, Air Pollution and Global Challenges Understanding and*
242 *Perspectives from Forest Research*, Matyssek, R., Clarke, N., Cudlin, P.,
243 Mikkelsen, T. N., Tuovinen, J.-P., Wieser, G. & Paoletti, E., (eds.) Elsevier:
244 Vol. 13, pp. 267-288.

245 Feng, Z., Kobayashi, K. & Ainsworth, E.A. (2008) Impact of elevated ozone
246 concentration on growth, physiology, and yield of wheat (*Triticum*
247 *aestivum* L.): a meta-analysis. *Global Change Biology*, 14, 2696-2708.

248 Galloway, J.N., Dentener, F.J., Capone, D.G., Boyer, E.W., Howarth, R.W.,
249 Seitzinger, S.P., Asner, G.P., Cleveland, C.C., Green, P.A., Holland, E.A.,
250 Karl, D.M., Michaels, A.F., Porter, J.H., Townsend, A.R. & Vöosmarty, C.J.
251 (2004) Nitrogen cycles: Past, present, and future. *Biogeochemistry*, 70,
252 153-226.

253 Grennfelt, P., Engleryd, A., Forsius, M., Hov, Ø., Rodhe, H., & Cowling, E. (2020)
254 Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science
255 and policy. *Ambio*, 49, 849-864.

256 Hiraoka, Y., Iki, T., Nose, M., Tobita, H., Yazaki, K., Watanabe, A., Fujisawa, Y. &
257 Kitao, M. (2017) Species characteristics and intraspecific variation in
258 growth and photosynthesis of *Cryptomeria japonica* under elevated O₃ and
259 CO₂. *Tree Physiology*, 37, 733-743.

260 Hoshika, Y., Watanabe, M., Inada, N. & Koike, T. (2012) Growth and leaf gas
261 exchange in three birch species exposed to elevated ozone and CO₂ in
262 summer. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223, 5017-5025.

263 Izuta, T., Funada, S., Ohashi, T., Miyake, H. & Totsuka, T. (1991) Effects of low
264 concentrations of ozone on the growth of radish plants under different
265 light intensities. *Environmental Sciences*, 1, 21-33.

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

269 Kinose, Y., Fukamachi, Y., Okabe, S., Hiroshima, H., Watanabe, M. & Izuta, T.
270 (2017) Nutrient supply to soil offsets the ozone-induced growth reduction
271 in *Fagus crenata* seedlings. *Trees*, 31, 259-272.

272 Kitao, M., Komatsu, M., Yazaki, K., Kitaoka, S. & Tobita, H. (2015) Growth
273 overcompensation against O₃ exposure in two Japanese oak species,
274 *Quercus mongolica* var. *crispula* and *Quercus serrata*, grown under
275 elevated CO₂. *Environmental Pollution*, 206, 133-141.

276 Kobayashi, K., Miller, J.E., Flagler, R.B. & Heck, W.W. (1993) Model analysis of
277 interactive effects of ozone and water stress on the yield of soybean.
278 *Environmental Pollution*, 82, 39-45.

279 Kohno, Y., Matsumura, H. & Kobayashi, T. (1998) Differential sensitivity of trees
280 to simulated acid rain or ozone in combination with sulfur dioxide. In *Acid*
281 *Deposition and Ecosystem Sensitivity in East Asia*, Bashkin, V. & Park,
282 S.-U., (eds.) Nova Science Publishers: Commack, N.Y., pp. 143-188.

283 Koike, T., Mao, Q., Inada, N., Kawaguchi, K., Hoshika, Y., Kita, K. & Watanabe,
284 M. (2012) Growth and photosynthetic responses of cuttings of a hybrid
285 larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* x *L. kaempferi*) to elevated ozone
286 and/or carbon dioxide. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 6, 104-
287 110.

288 Larcher, W. (2003) *Physiological Plant Ecology*. Fourth ed.; Springer: Berlin,
289 Heidelberg.

290 Matsumura, H., Mikami, C., Sakai, Y., Murayama, K., Izuta, T., Yonekura, T., Miwa,
291 M. & Kohno, Y. (2005) Impacts of elevated O₃ and/or CO₂ on growth of
292 *Betula platyphylla*, *Betula ermanii*, *Fagus crenata*, *Pinus densiflora* and
293 *Cryptomeria japonica* seedlings. *Journal of Agricultural Meteorology*, 60,

294 1121-1124.

295 Musselman, R.C., Lefohn, A.S., Massman, W.J. & Heath, R.L. (2006) A critical
296 review and analysis of the use of exposure- and flux-based ozone indices
297 for predicting vegetation effects. *Atmospheric Environment*, 40, 1869-
298 1888.

299 Tatsumi, K., Abiko, T., Kinose, Y., Inagaki, S. & Izuta, T. (2019) Effects of ozone
300 on the growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.) under different nitrogen
301 fertilization regimes. *Environmental Science and Pollution Research*, 26,
302 32103-32113.

303 Watanabe, M., Li, J., Matsumoto, M., Aoki, T., Ariura, R., Fuse, T., Zhang, Y.,
304 Kinose, Y., Yamaguchi, M. and Izuta, T. (2022) Growth and photosynthetic
305 responses to ozone of Siebold's beech seedlings grown under elevated CO₂
306 and soil nitrogen supply. *Environmental Pollution*, 304, 119233.

307 Watanabe, M., Yamaguchi, M., Iwasaki, M., Matsuo, N., Naba, J., Tabe, C.,
308 Matsumura, H., Kohno, Y. & Izuta, T. (2006) Effects of ozone and/or
309 nitrogen load on the growth of *Larix kaempferi*, *Pinus densiflora* and
310 *Cryptomeria japonica* seedlings. *Journal of Japan Society for Atmospheric*
311 *Environment*, 41, 320-334.

312 Watanabe, M., Yamaguchi, M., Tabe, C., Iwasaki, M., Yamashita, R., Funada, R.,
313 Fukami, M., Matsumura, H., Kohno, Y. & Izuta, T. (2007) Influences of
314 nitrogen load on the growth and photosynthetic responses of *Quercus*
315 *serrata* seedlings to O₃. *Trees*, 21, 421-432.

316 Watanabe, M., Yamaguchi, M., Matsumura, H., Kohno, Y. & Izuta, T. (2008) Effects
317 of ozone on the growth and photosynthesis of *Castanopsis sieboldii*
318 seedlings grown under different nitrogen loads. *Journal of Agricultural*
319 *Meteorology*, 64, 143-155.

320 Watanabe, M., Umemoto-Yamaguchi, M., Koike, T. & Izuta, T. (2010) Growth and
321 photosynthetic response of *Fagus crenata* seedlings to ozone and/or
322 elevated carbon dioxide. *Landscape and Ecological Engineering*, 6, 181-
323 190.

324 Yamaguchi, M., Watanabe, M., Iwasaki, M., Tabe, C., Matsumura, H., Kohno, Y. &
325 Izuta, T. (2007) Growth and photosynthetic responses of *Fagus crenata*
326 seedlings to O₃ under different nitrogen loads. *Trees*, 21, 707-718.

327 Yonekura, T., Dokiya, Y., Fukami, M. & Izuta, T. (2001a) Effects of ozone and/or

328 soil water stress on growth and photosynthesis of *Fagus crenata* seedlings.
329 Water, Air, & Soil Pollution, 130, 965-970.

330 Yonekura, T., Honda, Y., Oksanen, E., Yoshidome, M., Watanabe, M., Funada, R.,
331 Koike, T. & Izuta, T. (2001b) The influences of ozone and soil water stress,
332 singly and in combination, on leaf gas exchange rates, leaf ultrastructural
333 characteristics and annual ring width of *Fagus crenata* seedlings. Journal
334 of Japan Society for Atmospheric Environment, 36, 333-351.

335 Yonekura, T., Yoshidome, M., Watanabe, M., Honda, Y., Ogiwara, I. & Izuta, T.
336 (2004) Carry-over effects of ozone and water stress on leaf phenological
337 characteristics and bud frost hardiness of *Fagus crenata* seedlings. Trees,
338 18, 581-588.

339 Yonekura, T., Kihira, A., Shimada, T., Miwa, M., Arzate, A., Izuta, T. & Ogawa, K.
340 (2005) Impacts of O₃ and CO₂ enrichment on growth of komatsuna
341 (*Brassica campestris*) and radish (*Raphanus sativus*). Phytol. Annales
342 Rei Botanicae, Horn, 45, 229-235.

343 伊豆田 猛. (2020) 樹木に対する土壌への窒素負荷の影響. 伊豆田 猛 (編) 大気環境
344 と植物, 朝倉書店. pp. 83-90.

345 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
346 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.

347 河野吉久. (2001) 樹木に及ぼす酸性物質の長期慢性影響評価に関する研究. 大気環境
348 学会誌, 36, 47-59.

349 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
350 雨の複合影響. 大気環境学会誌, 34, 74-85.

351 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
352 昇との複合影響. 大気環境学会誌, 52, 59-67.

353 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
354 理生態学への定量的なアプローチ. 森北出版.

355 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
356 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
357 環境評価. 大気環境学会誌, 53, 186-193.

358 彦坂幸毅, 寺島一郎. (2013) 植物と二酸化炭素. 化学と生物, 51, 250-256.

359 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
360 乾物成長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.
361 大気環境学会誌, 33, 16-35.

- 362 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
363 とオゾンの単独および複合影響. 電力中央研究所報告 U99035.
- 364 松村秀幸, 河野吉久. (2001) ウメ, ヤマザクラ, コナラ, スダジイおよびヒノキの生
365 育におよぼす二酸化硫黄とオゾンの単独および複合影響. 電力中央研究所報
366 告 U01028.
- 367 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,
368 pp. 145-167.
- 369 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
370 よび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
371 環境学会誌, 35, 36-50.
- 372