

## オゾンの植物影響を変化させる環境要因（案）

## 目次

1		
2		
3		
4		
5		
6	1. はじめに.....	2
7	2. 気温上昇がオゾンの植物影響に及ぼす作用.....	2
8	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
9	4. 土壌窒素負荷または施肥がオゾンの植物影響に及ぼす作用.....	3
10	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
11	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.....	5
12	7. まとめ.....	6
13	8. 参考文献.....	12
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、大気や土壌の水分状態、大気から地表面への窒素沈着や施肥、  
35 大気 CO<sub>2</sub> 濃度、酸性雨、酸性霧及び二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）などが報告されている。本資料  
36 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的研究のうち、  
37 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価した研究を整  
38 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ことから、研究数は世  
44 界的にも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  
45 気温を取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. 土壌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壌の乾燥に  
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壌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 響に及ぼす土壌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、土壌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壌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、オゾンの影響は土壌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壌乾燥ス  
76 トレスの作用は栽培条件によって異なる可能性が考えられる。

77

### 78 4. 土壌窒素負荷または施肥がオゾンの植物影響に及ぼす作用

79 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<sub>x</sub> やアンモニアな  
80 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  
81 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  
82 土壌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  
83 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  
84 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  
85 能性も十分に考えられる。一方、土壌への過剰な窒素沈着は、植物の栄養バランスの  
86 悪化や土壌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  
87 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

88 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  
89 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  
90 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。

91 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  
92 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  
93 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  
94 (*Castanopsis sieboldii*)、カラマツ (*Larix kaempferi*)、アカマツ (*Pinus densiflora*)  
95 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  
96 (Watanabe *et al.*, 2006, 2007, 2008; Yamaguchi *et al.*, 2007)。それらの報告では、  
97 ブナにおいてはオゾンによる成長低下が土壌への窒素負荷によって著しくなるのに対  
98 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緩和されることが  
99 報告されている。一方で、コナラ、スダジイ、アカマツ及びスギにおいては、オゾン  
100 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報告されている。  
101 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樹種によって異な  
102 ると考えられる。一方で、ブナの成長に対するオゾンの悪影響が施肥によって緩和さ  
103 れるということも報告されており (Kinose *et al.*, 2017)、同じ樹種であっても、その  
104 作用は窒素以外の栄養状態や気象条件などによって異なる可能性が考えられる。

105 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  
106 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、  
107 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  
108 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  
109 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。一方、海外の研究事例  
110 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施  
111 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な  
112 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ン  
113 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で  
114 ある。

## 115 116 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

117 植物は、葉の気孔を介して CO<sub>2</sub> を葉内に吸収するが、光合成への CO<sub>2</sub> 供給が十分に  
118 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,  
119 2013)。そのため、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の上昇によって葉内へのオゾン吸収量が減少す  
120 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  
121 CO<sub>2</sub> 濃度を取り上げた実験的研究が報告されている。

122 表 4 に、異なる大気 CO<sub>2</sub> 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

123 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  
124 験的研究としては、Matsumura *et al.* (2005) が、シラカンバ (*Betula platyphylla*  
125 *var. japonica*)、ダケカンバ (*Betula ermanii*)、ブナ、アカマツ及びスギの 5 樹種を  
126 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 CO<sub>2</sub> 濃度環境では、オゾ  
127 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 CO<sub>2</sub> 環境においてはその低  
128 下が認められず、オゾンによる影響の程度が大気 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇によって相殺される  
129 ことが報告されている。同様の相殺作用がグイマツ雑種 F<sub>1</sub> (造林用に開発されたグイ  
130 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  
131 認められている (Koike *et al.*, 2012)。しかしながら、Matsumura *et al.* (2005) の研  
132 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 CO<sub>2</sub> 濃度の  
133 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  
134 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  
135 *et al.*, 2012; Hiraoka *et al.*, 2017)、オゾンの影響に対する高濃度 CO<sub>2</sub> の緩和・相殺  
136 作用には樹種間差異があると考えられる。一方、Kitao *et al.* (2015) と Watanabe *et*  
137 *al.* (2010) は、高濃度 CO<sub>2</sub> 環境で育成したコナラとミズナラ (*Quercus mongolica var.*  
138 *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  
139 うな高濃度 CO<sub>2</sub> 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  
140 応答として生じた葉への乾物分配の増加と、高濃度 CO<sub>2</sub> による葉の光合成促進の相乗  
141 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)。

142 異なる大気 CO<sub>2</sub> 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  
143 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  
144 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  
145 長に対するオゾンの影響の程度は高濃度 CO<sub>2</sub> によって変化しなかったことを報告し  
146 ている。ただし、オゾンによる葉面積の低下は高濃度 CO<sub>2</sub> によって緩和されることが  
147 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.*  
148 (2008) では、オゾンによるコムギの収量低下は高濃度 CO<sub>2</sub> によって緩和されること  
149 が報告されている。以上のことから、高濃度 CO<sub>2</sub> によってオゾンの影響は緩和・相殺  
150 されるが、その作用は植物種によって異なると考えられる。

151

## 152 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

153 樹木に対するオゾンの影響を変化させる要因として酸性雨、酸性霧及び二酸化硫黄  
154 (SO<sub>2</sub>) を取り上げた実験的研究も報告されている。それらの研究報告によれば、ス  
155 ギ、ウラジロモミ (*Abies homolepis*)、シラカンバ及びケヤキ (*Zelkova serrata*) の  
156 根に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、  
157 ブナ、ケヤキ、ドロノキ (*Populus maximowiczii*) 及びシラビソ (*Abies veitchii*) の

158 オ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  
159 (松村ら, 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  
160 認め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  
161 異がある。また、SO<sub>2</sub>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、  
162 ブ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  
163 低下が SO<sub>2</sub> 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*  
164 *mume*) の葉の乾重量のオゾンによる低下が SO<sub>2</sub> 曝露によって緩和されることも報告  
165 されている (河野, 2001; 松村と河野, 2001; Kohno *et al.*, 1998)。さらにこの SO<sub>2</sub> の  
166 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  
167 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  
168 による個体乾重量の低下が、20 ppb までの SO<sub>2</sub> によって顕著になるが、40 ppb の SO<sub>2</sub>  
169 によって緩和されることも報告されている (Kohno *et al.*, 1998)。

170

## 171 7. まとめ

172 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、CO<sub>2</sub> 濃度上昇、酸性雨、  
173 酸性霧及び SO<sub>2</sub> 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  
174 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  
175 た。それらの研究結果に基づくと、オゾンの植物影響は、気温上昇、酸性雨及び酸性  
176 霧によって顕著になるのに対し、土壌乾燥ストレスや大気 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇によって緩  
177 和・相殺されると考えられる。土壌への窒素負荷や施肥、または SO<sub>2</sub> の作用として、  
178 オゾンの影響が緩和される植物種がある一方で、助長される植物種も報告されている。  
179 本資料で整理したように、植物に対するオゾンの影響の程度は他の環境要因によって  
180 変化し、その変化は環境要因の種類によって異なるが、同一の環境要因の変動であっ  
181 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作用は異なってい  
182 る。

183

184 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 <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> 1.0 × O <sub>3</sub> 1.5 × O <sub>3</sub> 2.0 × O <sub>3</sub> 2.5 × O <sub>3</sub>	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

185

186 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  
187 を評価するための曝露方法」参照)

188

189 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

190

191 CF: 浄化空気 (区)

192



193 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 <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>	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 <sub>3</sub>	20 kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>		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
				1.5 × O <sub>3</sub> 2.0 × O <sub>3</sub>	50 kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>		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 1.0 × O <sub>3</sub> 1.5 × O <sub>3</sub> 2.0 × O <sub>3</sub>	0 kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> 20 kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> 50 kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>	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
	Yamaguchi <i>et al.</i> (2007)	ガラス温室型 OTC	群馬県 前橋市	CF 1.0 × O <sub>3</sub> 1.5 × O <sub>3</sub> 2.0 × O <sub>3</sub>	0 kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> 20 kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> 50 kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>	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
	Watanabe <i>et al.</i> (2008)	ガラス温室型 OTC	群馬県 前橋市	CF 1.0 × O <sub>3</sub> 1.5 × O <sub>3</sub> 2.0 × O <sub>3</sub>	0 kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> 20 kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> 50 kg ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>	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
	Kinose <i>et al.</i> (2017)	グリーン ハウス型OTC	東京都 八王子市	CF 1.0 × O <sub>3</sub> 1.5 × O <sub>3</sub>	無施肥 (NF) HYPONEX 2000倍 (LF) もしくは1000倍 (HF) 希釈溶液添加	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
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 1.0 × O <sub>3</sub> 1.5 × O <sub>3</sub>	無施肥 (NN) 標準施肥量 (60 kg N ha <sup>-1</sup> ) (SN)	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

194

195 CF: 浄化空気(区)、OTC: オープントップチャンバー

196

197 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 CO<sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> の作用
				オゾン	CO <sub>2</sub> 濃度				
高濃度CO <sub>2</sub> (樹木)	Matsumura <i>et al.</i> (2005)	ガラス温室型	群馬県 前橋市	CF	野外濃度CO <sub>2</sub> (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
				1.5 × O <sub>3</sub>	(CF, 1.0 ×, 1.5 × O <sub>3</sub> ) 1.5 × CO <sub>2</sub> (544 ppm) (1.0 ×, 1.5 × O <sub>3</sub> )		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
							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 <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> (6h/日, 3日/週)	< 10 ppb 100 ppb	350 ppm CO <sub>2</sub> 700 ppm CO <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 600 ppm CO <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub> (370～380 ppm) 600 ppm CO <sub>2</sub>	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 maximoxicziana</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 <sub>3</sub>	野外濃度CO <sub>2</sub> (377～409 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 <sub>2</sub> 区ではオゾンによっ て個体乾重量が増加
2.0 × O <sub>3</sub>				550 ppm CO <sub>2</sub> (546～531 ppm)	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 <sub>3</sub> 2.0 × O <sub>3</sub>	野外濃度CO <sub>2</sub> (377～378 ppm) 550 ppm CO <sub>2</sub> (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
高濃度CO <sub>2</sub> (作物)	Yonekura <i>et al.</i> (2005)	人工気象室 (25°C/18°C)		< 5 ppb	380 ppm CO <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub>		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

199 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 CO<sub>2</sub> 増加実験  
200 (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  
201 の曝露方法」参照)  
202

203

204 8. 参考文献

205 Biswas, D.K. & Jiang, G.M. (2011) Differential drought-induced modulation of  
206 ozone tolerance in winter wheat species. *Journal of Experimental Botany*,  
207 62, 4153-4162.

208 Broberg, M.C., Uddling, J., Mills, G. & Pleijel, H. (2017) Fertilizer efficiency in  
209 wheat is reduced by ozone pollution. *Science of The Total Environment*,  
210 607-608, 876-880.

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

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

220 Galloway, J.N., Dentener, F.J., Capone, D.G., Boyer, E.W., Howarth, R.W.,  
221 Seitzinger, S.P., Asner, G.P., Cleveland, C.C., Green, P.A., Holland, E.A.,  
222 Karl, D.M., Michaels, A.F., Porter, J.H., Townsend, A.R. & Vöosmarty, C.J.  
223 (2004) Nitrogen cycles: Past, present, and future. *Biogeochemistry*, 70,  
224 153-226.

225 Hiraoka, Y., Iki, T., Nose, M., Tobita, H., Yazaki, K., Watanabe, A., Fujisawa, Y. &  
226 Kitao, M. (2017) Species characteristics and intraspecific variation in  
227 growth and photosynthesis of *Cryptomeria japonica* under elevated O<sub>3</sub> and  
228 CO<sub>2</sub>. *Tree Physiology*, 37, 733-743.

229 Hoshika, Y., Watanabe, M., Inada, N. & Koike, T. (2012) Growth and leaf gas  
230 exchange in three birch species exposed to elevated ozone and CO<sub>2</sub> in  
231 summer. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223, 5017-5025.

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

235 Izuta, T., Miyake, H. & Totsuka, T. (1993) Evaluation of air-polluted environment  
236 based on the growth of radish plants cultivated in small-sized open-top

237 chambers. *Environmental Sciences*, 2, 25-37.

238 Kinose, Y., Fukamachi, Y., Okabe, S., Hiroshima, H., Watanabe, M. & Izuta, T.  
239 (2017) Nutrient supply to soil offsets the ozone-induced growth reduction  
240 in *Fagus crenata* seedlings. *Trees*, 31, 259-272.

241 Kitao, M., Komatsu, M., Yazaki, K., Kitaoka, S. & Tobita, H. (2015) Growth  
242 overcompensation against O<sub>3</sub> exposure in two Japanese oak species,  
243 *Quercus mongolica* var. *crispula* and *Quercus serrata*, grown under  
244 elevated CO<sub>2</sub>. *Environmental Pollution*, 206, 133-141.

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

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

252 Koike, T., Mao, Q., Inada, N., Kawaguchi, K., Hoshika, Y., Kita, K. & Watanabe,  
253 M. (2012) Growth and photosynthetic responses of cuttings of a hybrid  
254 larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* x *L. kaempferi*) to elevated ozone  
255 and/or carbon dioxide. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 6, 104-  
256 110.

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

259 Matsumura, H., Mikami, C., Sakai, Y., Murayama, K., Izuta, T., Yonekura, T., Miwa,  
260 M. & Kohno, Y. (2005) Impacts of elevated O<sub>3</sub> and/or CO<sub>2</sub> on growth of  
261 *Betula platyphylla*, *Betula ermanii*, *Fagus crenata*, *Pinus densiflora* and  
262 *Cryptomeria japonica* seedlings. *Journal of Agricultural Meteorology*, 60,  
263 1121-1124.

264 Musselman, R.C., Lefohn, A.S., Massman, W.J. & Heath, R.L. (2006) A critical  
265 review and analysis of the use of exposure- and flux-based ozone indices  
266 for predicting vegetation effects. *Atmospheric Environment*, 40, 1869-  
267 1888.

268 Tatsumi, K., Abiko, T., Kinose, Y., Inagaki, S. & Izuta, T. (2019) Effects of ozone  
269 on the growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.) under different nitrogen  
270 fertilization regimes. *Environmental Science and Pollution Research*, 26,

271 32103-32113.

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

277 Watanabe, M., Yamaguchi, M., Tabe, C., Iwasaki, M., Yamashita, R., Funada, R.,  
278 Fukami, M., Matsumura, H., Kohno, Y. & Izuta, T. (2007) Influences of  
279 nitrogen load on the growth and photosynthetic responses of *Quercus*  
280 *serrata* seedlings to O<sub>3</sub>. Trees, 21, 421-432.

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

285 Watanabe, M., Umemoto-Yamaguchi, M., Koike, T. & Izuta, T. (2010) Growth and  
286 photosynthetic response of *Fagus crenata* seedlings to ozone and/or  
287 elevated carbon dioxide. Landscape and Ecological Engineering, 6, 181-  
288 190.

289 Yamaguchi, M., Watanabe, M., Iwasaki, M., Tabe, C., Matsumura, H., Kohno, Y. &  
290 Izuta, T. (2007) Growth and photosynthetic responses of *Fagus crenata*  
291 seedlings to O<sub>3</sub> under different nitrogen loads. Trees, 21, 707-718.

292 Yonekura, T., Dokiya, Y., Fukami, M. & Izuta, T. (2001a) Effects of ozone and/or  
293 soil water stress on growth and photosynthesis of *Fagus crenata* seedlings.  
294 Water, Air, & Soil Pollution, 130, 965-970.

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

300 Yonekura, T., Yoshidome, M., Watanabe, M., Honda, Y., Ogiwara, I. & Izuta, T.  
301 (2004) Carry-over effects of ozone and water stress on leaf phenological  
302 characteristics and bud frost hardiness of *Fagus crenata* seedlings. Trees,  
303 18, 581-588.

304 Yonekura, T., Kihira, A., Shimada, T., Miwa, M., Arzate, A., Izuta, T. & Ogawa, K.

- 305 (2005) Impacts of O<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub> enrichment on growth of komatsuna  
306 (*Brassica campestris*) and radish (*Raphanus sativus*). *Phyton, Annales*  
307 *Rei Botanicae, Horn*, 45, 229-235.
- 308 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  
309 と植物, 朝倉書店. pp. 83-90.
- 310 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  
311 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.
- 312 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*  
313 *学会誌*, 36, 47-59.
- 314 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  
315 雨の複合影響. *大気環境学会誌*, 34, 74-85.
- 316 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  
317 昇との複合影響. *大気環境学会誌*, 52, 59-67.
- 318 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  
319 理生態学への定量的なアプローチ. 森北出版.
- 320 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  
321 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  
322 環境評価. *大気環境学会誌*, 53, 186-193.
- 323 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.
- 324 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  
325 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.  
326 *大気環境学会誌*, 33, 16-35.
- 327 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  
328 とオゾンの単独および複合影響. *電力中央研究所報告 U99035*.
- 329 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  
330 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*  
331 *告 U01028*.
- 332 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,  
333 pp. 145-167.
- 334 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  
335 よび発芽率に対するオゾンと土壌水分ストレスの単独および複合影響. *大気*  
336 *環境学会誌*, 35, 36-50.
- 337