

定量評価に資する植物影響の整理—(案)【修正版】

1. 背景・目的

光化学オキシダントは、環境基準の設定以降に多くの科学的知見が蓄積している状況であることに加え、植物による二酸化炭素吸収を阻害することから、気候変動という観点からもその影響が懸念されているガス状大気汚染物質である。このような背景を受け、令和 4 年 1 月の中央環境審議会 大気・騒音振動部会において、「気候変動対策・大気環境改善のための光化学オキシダント総合対策について〈光化学オキシダント対策ワーキングプラン〉」を提示し、光化学オキシダントの健康影響に係る環境基準の再評価と植物影響を勘案した環境基準の検討を視野に入れ、知見の取りまとめを推進していく方針を示した。

環境省では、この方針等を踏まえ、大気環境改善等の検討に必要な基礎資料を得ることを目的に、学識経験者からなる光化学オキシダント植物影響評価検討会を水・大気環境局で令和 4 年 3 月より開催し、光化学オキシダントの植物影響に関する評価を検討してきた。具体的には、これまでに、第 2 回光化学オキシダント植物影響評価検討会 資料 3 「光化学オキシダントの植物影響に係る検討の範囲について」に基づき、光化学オキシダントの植物影響に係る環境基準の設定に資する事項を整理・検討するため、農作物や樹木等を中心に、国内に生息する植物種を対象に実施された科学的知見を幅広く整理対象とし、国内知見がない場合には、参考として海外知見を整理してきた。また、植物種によらず共通すると思われる光化学オキシダントの植物影響の発現メカニズムに関する研究は国内外を区別せずに整理してきた。第 5 回光化学オキシダント植物影響評価検討会（令和 5 年 9 月開催）までの検討の結果、この整理がある程度進んだことから、第 1 回光化学オキシダント植物影響評価検討会 資料 3 「検討の進め方について（案）」に示したとおり、これらの整理結果を踏まえ、環境基準の設定にあたり定量評価が可能と考えられる植物影響に関する検討を行うこととした。上記背景を踏まえ、光化学オキシダント植物影響作業会合では、これまでに収集・整理してきた知見に基づき、環境基準の設定にあたり定量評価が可能と考えられる植物影響に関する検討を行った。

2. 環境基準の設定にあたり定量評価が可能と考えられる植物影響の考え方

これまでに収集・整理してきた知見に基づき、**光化学オキシダント** 定量評価に資する研究は、以下の条件がすべて該当する研究であると考えた。

表 1 定量評価に資する研究の条件（案）

- | |
|---|
| <p>A：日本の植物への光化学オキシダント¹、オゾン、PANによる影響を調査した研究</p> <p>B：環境条件が制御可能な実験室研究（<i>in vitro</i> 試験は除く）、又は日本の野外環境下で行った研究</p> <p>C：植物影響が定量的に評価されている研究</p> <p>D：光化学オキシダントの曝露濃度もしくは曝露量が報告されている研究</p> |
|---|

¹ ここでいう「光化学オキシダント」は「光化学オキシダント（オゾン又は PAN）」を指す。以降、特別な記載が無い限り本資料中の「光化学オキシダント」は同様に読み替えるものとする。

33

34 各条件の理由を以下に示した：

35 **A：日本の植物への光化学オキシダント、~~オゾン~~、~~PAN~~による影響を調査した研究**

36 **B：環境条件が制御可能な実験室研究（*in vitro* 試験は除く）、又は日本の野外環境下で行った研究**

37 第2回光化学オキシダント植物影響評価検討会 資料3 「光化学オキシダントの植物影響に係る検討の範囲について」にあるとおり、光化学オキシダントの植物影響に関する研究は、日本のみならず欧米等の諸外国においても行われており、光化学オキシダントの植物影響は植物種や品種によって異なり、植物の生育環境によっても異なることが知られている。例えば、植物は高温・乾燥条件下では蒸散による水分損失を防ぐために気孔を閉じるため、気象条件、特に大気湿度や土壌水分含量などが大きく異なる環境では、同じ大気オゾン濃度でも気孔を介した葉のオゾン吸収量が異なることが考えられる。したがって、生息する植物種や栽培されている作物種、品種、さらにはそれらの生育環境も異なる日本及び諸外国の植物では、光化学オキシダントによる植物影響が異なることが考えられる。そのため、既に光化学オキシダントの植物影響に係る環境基準等を設定している米国や欧州では、基本的にはその国や地域に生息する植物種を対象とした知見に基づき、基準を検討している。したがって、環境基準の設定にあたり定量評価が可能と考えられる植物影響の検討にあたっては、国内に生息する植物種を対象とした研究が望ましいと考えた。また、研究の多くはオープントップチャンバー等の野外での手法が用いられていることから、野外での研究に関しては、日本の野外環境下で行われた研究が望ましいと考えた。一方、環境制御が可能な実験室における研究は、現実環境とは諸条件が異なる *in vitro* を除き、検討対象として含めることとした。

52

53 **C：植物影響が定量的に評価されている研究**

54 **D：光化学オキシダントの曝露濃度もしくは曝露量が報告されている研究**

55 光化学オキシダントの曝露と植物影響の関係を定量的に評価する際には、両者が定量的に評価されていることが必要である。

57 大気汚染の植物影響評価には様々な曝露指標（平均濃度、積算曝露量等）が使われていることから、適切な曝露指標の検討のためにも、曝露指標の種類にかかわらず、その研究が選択した曝露指標に関する情報が十分に記載されている文献を対象とし、曝露情報が不明瞭な研究は検討対象から除外することとした。

60

62 3. 定量評価に資する文献の抽出

63 2の考え方にに基づき、定量評価に資する文献とその整理方法に関する具体的な検討を行うために、文献の抽出を行い、抽出した文献の情報を一覧表に整理した。

65

66 3.1. 抽出 A・B：日本の植物への光化学オキシダント、~~オゾン~~、~~PAN~~による影響を実験室内又は日本の野外環境下で調査した文献の抽出

68 これまでに収集・整理した知見から、日本の植物への光化学オキシダント、~~オゾン~~、~~PAN~~による影響を実験室又は日本の野外環境下で調査した文献を抽出した。

70

○ 除外した研究の例

- 71 ▶ 光化学オキシダント、~~オゾン~~、~~PAN~~の影響を評価していない研究
- 72 ✧ 例：植物の生理学的メカニズムに関する基礎研究、曝露評価のみの研究等
- 73 ▶ 日本以外の植物を対象とした研究
- 74 ✧ 例：米国で栽培されているイネの品種を対象とした研究
- 75 ▶ 海外の野外環境で植物を曝露した研究（日本の野外環境で栽培されていない研究）
- 76 ✧ 例：中国の野外で行われたイネの研究
- 77 ▶ 細胞への曝露を行った *in vitro* 試験
- 78 ○ 総説等に関しては、独自の解析を行っている場合にのみ対象に含めた。

80 3.2. 抽出 C：植物影響が定量的に評価されている文献の抽出

81 上記の整理で抽出した文献を対象として、供試植物の分類、植物種、影響を整理した（表 2）。植物影
 82 響としては、「可視障害」、「成分」、「光合成パラメーター」、「成長・収量」、「その他」に分類した。各分
 83 類に含まれる影響の主な例を表 3 に示した。

84

85

表 2 植物と影響の一覧

項目	記載内容	記載例
植物の分類	農作物／樹木／その他に分類	農作物
植物種	和名（品種名）を記載	イネ（コシヒカリ） ハウレンソウ（24 品種）
影響の分類	「可視障害」、「成分」、「光合成パラメーター」、「成長・収量」、「その他」に分類。各分類に含まれる影響の例は表 3 参照。	光合成パラメーター、成長・収量

86

87

表 3 各「影響の分類」に含まれる影響の主な例

影響の分類	含まれる影響の主な例
成長・収量	個体乾重量、器官別乾重量（茎、根等）、地上部／地下部の乾重量比、収量
光合成パラメーター	純光合成速度、気孔コンダクタンス、最大カルボキシル化速度
成分	元素含量（鉄、亜鉛、窒素等）、タンパク質、デンプン、アスコルビン酸、グルタチオン、フェノール等の含量、酸化還元酵素の活性、植物ホルモン濃度、作物の品質
可視障害	被害発生率、被害面積率、累積被害面積
その他	落葉数、落葉乾重量、エチレン放出量、カリウム漏出量、森林衰退（画像から判断）、遺伝子解析（転写レベルなど）

88

89 「成長・収量」、「光合成パラメーター」、「成分」、「可視障害」、「その他」に含まれる影響に関して、エン
 90 ドポイントの候補として適切かどうかを検討し、「成長・収量」を候補とした。さらに、「成長・収量」
 91 に関して定量評価が可能かどうかを整理した。光化学オキシダントの成長・収量に対する影響は様々な

92 農作物や樹木で調査研究が行われているが、データが充実しており、複数の研究において比較可能な植
93 物種やエンドポイントを整理することが望ましいと考え、さらなる情報の収集・整理を行った。

94 ○ 農作物

95 ▶ エンドポイント：収量、成長（個体乾重量）

96 ▶ 作物種：イネ、ハツカダイコン、コマツナ

97 ○ 樹木

98 ▶ エンドポイント：個体乾重量、地上部乾重量

99 ▶ 樹種：ブナ、カラマツ、スダジイ、アカマツ、ケヤキ、スギ (Kohno *et al.* (2005)による分類で、
100 感受性が高いとされた樹種で文献数の多いブナ、カラマツ、スダジイ、アカマツ、ケヤキと、
101 感受性は低いものの日本の代表的な針葉樹であるスギ)

102

103 3.3. 抽出D：光化学オキシダントの曝露濃度もしくは曝露量が報告されている研究

104 上記の整理で抽出した文献において、光化学オキシダントの曝露濃度や曝露量が数値として定量的に
105 示されている文献を検討対象とし、明確に示されていない研究は除外した。

106 ○ 曝露期間中の曝露濃度又は曝露量が数値として明記されている文献を対象とした。

107 ▶ 曝露指標の種類（期間中の平均濃度、AOT40等の積算曝露濃度）は問わないこととした。

108 ▶ 曝露期間中の濃度が図示のみの研究は対象から除外した。

109 ○ Filtered air chamber (FAC)を用いた研究は、**野外空気区及び浄化空気区**における光化学オキシダン
110 ト濃度に関する記載の有無を確認し、曝露濃度等の記載がある研究、またはフィルターの除去
111 率の記載がある研究を対象とした。曝露濃度や除去率の記載がない文献は除外した。

112

113 3.4. 一覧表に整理する文献の抽出

114 前述の方法によって、該当する文献を抽出した。さらに、実験手法や結果に関する記載が不十分な文献
115 は対象から除外した。また、イネや樹木に関しては、特殊な曝露期間や実験条件での研究は、研究間での
116 比較が困難であるため、整理対象から除外した。一部、その結果が図のみで示されていた文献もあった
117 が、それらも対象として整理を行った上で、定量的な評価での使用の可否を検討することとした。

118 最終的には、以下の条件に沿った文献を抽出し、一覧表に整理した。

119

120 ○ 農作物

121 ▶ エンドポイント：収量、成長（個体乾重量）

122 ▶ 作物種：イネ、ハツカダイコン、コマツナ

123 ▶ 以下文献は、複数研究間での比較が困難であることから除外した：

124 ☆ 実験手法や結果について記載が不十分な文献

125 ☆ イネに関しては、栄養成長期のみ等の一部期間のみの曝露を行っているものは除く（初期
126 から収穫まで曝露しているものを対象とする）

127 ▶ 曝露応答関数のみが報告されている文献は一覧表の作成対象から除外するが、記録を残してお
128 き、必要に応じて追加する。

129 ○ 樹木

- 130 ▶ エンドポイント：個体乾重量、地上部乾重量
- 131 ▶ 樹種：ブナ、カラマツ、スダジイ、アカマツ、ケヤキ、スギ (Kohno *et al.* (2005) による分類
- 132 で、感受性が高く文献数の多い樹種と日本の代表的な針葉樹であるスギ)
- 133 ▶ 複数研究間での比較が困難である研究は除外した：
- 134 ☆ 実験手法や結果に関する記載が不十分な文献
- 135 ☆ 曝露を秋から開始している研究 (研究の大半は植物の成長期である春～夏から曝露を開始
- 136 しており、比較や結果の解釈が難しいため)
- 137 ☆ 人工光による研究 (大半は自然光条件下による研究であるため)
- 138 ▶ 曝露応答関数のみが報告されている文献は一覧表の作成対象から除外するが、記録を残してお
- 139 き、必要に応じて追加する。

140

141 4. 一覧表への整理

142 農作物に関しては、イネ 18 報、コマツナ 2 報、ハツカダイコン 10 報の文献を抽出した。樹木に関し

143 ては、アカマツ 6 報、カラマツ 7 報、ケヤキ 4 報、スギ 8 報、スダジイ 2 報、ブナ 11 報の文献を抽出し

144 た。

145 抽出した文献を対象として、表 4 に示した項目の内容を表形式で整理した (資料 2 - 3 別添参照)。

146

147

表 4 「一覧表」の整理項目

大項目	小項目	記入内容
被験植物	植物種	植物種名を記入
	品種名	品種名があれば記入 (例：コシヒカリ)
	苗木/成木 (樹木のみ)	樹木の樹齢を記入 (例：○年生)
曝露条件	試験地	試験地を市町村レベルで記入 (例：○○県××市)
	オゾン曝露装置	次から選択： (1) 人工気象室、(2) 自然光型ファイトトロン、(3) ガラス温室型 OTC、(4) グリーンハウス型 OTC、(5) OTC、(6) FACE、(7) その他：概要を記入
	曝露濃度制御方法	次から選択： (1) 一定濃度曝露 (2) 浄化空気と野外空気 (3) 浄化空気と野外空気と野外濃度+一定濃度オゾン添加 (4) 野外空気と野外濃度+一定濃度オゾン添加 (5) 浄化空気と野外空気と野外濃度比例追従型オゾン曝露 (6) 野外空気と野外濃度比例追従型オゾン曝露
	曝露水準	曝露水準の構成を記入 (例：CF、 $1.0 \times O_3$ 、 $1.5 \times O_3$)
	曝露処理期間	曝露を行った時間や時間帯、曝露を行った期間の日付と日数を

大項目	小項目	記入内容
		記入 (例：○年○月○日～○年○月○日 (○日間))
	植物の成長段階における曝露期間 (コマツナ、ハツカダイコンのみ)	コマツナ、ハツカダイコンについて、播種何日後の期間での曝露かを記入。
	曝露評価指標	曝露評価のために用いた指標を記入。対象とする時間や日射量、時期等が指定されている場合には () 内に記入。文献において、曝露応答関数の導出に用いられた指標があれば下線で表記。 (例：24 時間平均濃度、 <u>日中 AOT40 (9:00～17:00)</u> 、POD ₁₀)
実験方法	実験の繰り返し (チャンバー反復)	実験の繰り返し回数を記入する。繰り返しが無い場合には「なし」と記入。 (例 3 チャンバー反復)
	実験 (チャンバー) あたりの個体数	実験あたりの個体数を記入する。反復がある場合には、1 回の試験あたりの個体数とする。 (例 1： 1 個体/ポット、5 ポット/チャンバー 例 2： 3 株/ポット、3 ポット/チャンバー)
	ポット実験か否か	ポット実験か否かについて記入
	Water trap もしくは PSA の有無	Water Trap もしくは酸素濃縮装置 (PSA) のどちらかがあれば「あり」、両方ともなければ「なし」を記入。
影響	成長・収量に関するエンドポイントの概要	成長・収量に関して調査したエンドポイントの概要を記入。結果が図示のみされているエンドポイントは [] 内に示した。
	独自の曝露応答関数の有無	独自の曝露応答関数を導出している場合に「有 (エンドポイント)」、導出していない場合は「なし」を記入。 (例：有 (収量))
	成長・収量に関する定量的記載の有無	成長・収量に関するエンドポイントの結果が数値として表等に記載があるかを記入。 図のみの場合には、「図のみ」と記入。
	その他観察したエンドポイントの分類	成長・収量以外に調査したエンドポイントがあればその分類 (可視障害、成分、光合成パラメーター、その他)、なければ「なし」を記入。
その他実験条件に関する記載	栽培環境条件の記録の有無	次の条件について記載がある場合に「気温」等と記入： 気温、相対湿度、施肥量、光強度
	供試土壌の種類	供試土壌の種類を記入 (例：黒ボク土)
	他の環境要因との	他の環境要因の影響について調査している場合にその環境要因

大項目	小項目	記入内容
	複合処理実験か否か	を記入 (例：CO ₂ 、施肥条件、窒素負荷（2段階）)

148

149 5. PANについて係る成長・収量の定量評価について

150 PANの植物影響は、国内で実施された研究の多くは可視障害に関するものであり、成長・収量に関する文献は1報（ペチュニア、インゲンマメ、ハツカダイコン）のみであった(Izuta *et al.*, 1993)。

152

153 6. オゾン光化学オキシダント²に係る成長・収量の定量評価について

154 一覧表の整理結果を踏まえ、光化学オキシダントの農作物（イネ、コマツナ、ハツカダイコン）の成長・
155 収量に対する影響と樹木（アカマツ、カラマツ、ケヤキ、スギ、スダジイ、ブナ）の成長に対する影響の
156 定量評価が可能と見込まれる植物種や品種とエンドポイント、オゾン曝露評価指標を整理した。

157

158 6.1. 農作物

159 イネ、コマツナ、ハツカダイコンを対象とした文献（それぞれ18報、2報及び10報）より、オゾンの
160 影響の定量評価について、①評価対象となる品種、②成長・収量に関するエンドポイント（評価項目）及
161 び③オゾン曝露評価指標を整理した。

162

163 6.1.1. イネ

164 ① 文献で用いられているイネの品種は、ジャポニカ型うるち米19品種、モチ米1品種、インディカ
165 米10品種であった。ジャポニカ型うるち米では、コシヒカリ13報、日本晴9報、ササニシキ3
166 報、その他の品種は1～2報であった。

167 ② 成長・収量に関するエンドポイントとして、個体乾重量、地上部乾重量、器官別乾重量、葉面積、
168 草丈、茎数、稈長、穂長、穂数、総もみ数、わら重、総もみ重³、総精もみ重（総精玄米重）、一部
169 相対収量のみ表記）、千粒重、一穂精もみ数、稔実率、相対成長速度などが検討されているが、成
170 長の評価項目では個体乾重量が6報、収量の評価項目では総もみ重もしくは総精もみ重（総精玄米
171 重）が15報（一部の文献についてどちらか判断つかなかった）であった。

172 ③ オゾン曝露評価指標として、日中6時間（10:00～16:00）平均濃度（1報）、日中7時間（9:00～
173 16:00もしくは10:00～17:00）平均濃度（4報）、日中8時間（8:00～16:00もしくは9:00～17:00）
174 平均濃度（4報）、日中12時間（6:00～18:00）平均濃度（9報）、24時間平均濃度（8報）、日最高
175 1時間値の平均値（3報）、24時間積算曝露量（積算曝露量=AOT₀=SUM₀である）（3報）、日照
176 時（≒日中12時間6:00～12:00とする）SUM₀（2報）、日中8時間（9:00～17:00）SUM₀（1報）、
177 24時間SUM₀₆（1報）、24時間AOT₄₀（1報）、日照時（≒日中12時間とする）AOT₄₀（5報
178 4）、日中8時間（9:00～17:00）AOT₄₀（1報）、オゾン吸収速度POD₁₀（1報）などが報告されて

² ここでいう「光化学オキシダント」は「オゾン及びPANを含む光化学オキシダント全体」の他に「オゾンのみ」を指すものとする。

³ 精もみ重、玄米重、精玄米重等、もみすりの記載があるものは総精もみ重、もみすりの記載がないものは総もみ重と判断した。

⁴ Frei *et al.* (2012a) のAOT₄₀の積算時間は日照時とみなした。

179 いるが、日中 12 時間 (6:00~18:00) 平均濃度が最も多く 9 報、24 時間平均濃度が 8 報、日照時
180 AOT40 が 5 報であった。なお、日中 6、7、8 時間平均濃度を同等と見なせば合計で 9 報であった。

181 以上より、イネの成長・収量に対するオゾンの影響の定量評価に利用可能な文献数は、コシヒカリを対
182 象に収量の評価項目である総もみ重もしくは総精もみ重をエンドポイントとした場合に比較的多く、24
183 時間平均濃度で評価すれば 7 報、日中 6~8 時間平均濃度で評価すれば 5 報、日中 12 時間平均濃度で評
184 価すれば 4 報、日照時 AOT40 で評価すれば 4 報であった。

185

186 6.1.2. コマツナ

187 ① 両文献に共通して用いられていた品種は楽天であった。

188 ② 成長・収量に関するエンドポイントとして、個体乾重量や相対成長速度 (Relative growth rate,
189 RGR) などが検討されているが、両文献に共通した評価項目は個体乾重量であった。

190 ③ オゾン曝露評価指標として、Izuta *et al.* (1999) では曝露時間中の平均濃度、Yonekura *et al.*
191 (2005) では AOT40 が報告されているが、いずれの文献においても一定濃度のオゾンを規定時間
192 曝露しているため、共通したオゾン曝露評価指標の算出が可能である。

193 以上より、コマツナの成長・収量に対するオゾンの影響の定量評価は、2 報の文献を用い、楽天を対象
194 に個体乾重量をエンドポイントとして、平均濃度や AOT40 などのオゾン曝露評価指標を用いて評価可能
195 である。

196

197 6.1.3. ハツカダイコン

198 ① すべての文献に共通して用いられていた品種はコメツト⁵であった。

199 ② 成長・収量に関するエンドポイントとして、個体乾重量、器官別乾重量、相対成長速度などが
200 検討されているが、すべての文献に共通した評価項目は個体乾重量であり、ハツカダイコンの収
201 量となる下胚軸 (地下部) の乾重量を報告した文献は 5 報であった。

202 ③ オゾン曝露評価指標として、日中 8 時間 (8:00~16:00 もしくは 9:00~17:00) の積算曝露量もし
203 くは平均濃度の期間平均値を報告した文献が 6 報で最も多く、次いで AOT40 もしくは 24 時間平
204 均濃度を報告した文献がそれぞれ 2 報であった。これらの指標を報告していない文献 3 報はいず
205 れも一定濃度のオゾンを規定時間曝露しているため、同様のオゾン曝露評価指標の算出が可能で
206 ある。

207 以上より、ハツカダイコンの成長・収量に対するオゾン影響の定量評価に利用可能な文献数は、コメツ
208 トを対象に個体乾重量をエンドポイントとして、日中 8 時間の積算曝露量で評価すれば 10 報、AOT40
209 で評価すれば 5 報であった。エンドポイントを地下部乾重量とした場合では、日中 8 時間の積算曝露量
210 で評価すれば 5 報、AOT40 で評価すれば 3 報であった。

211

212 6.2. 樹木

213 樹木に関しては、情報を整理したアカマツ、カラマツ、ケヤキ、スギ、スダジイ、ブナの 6 樹種のう
214 ち、文献数の多さ等から、ブナ、スギ、アカマツ及びカラマツ属は、オゾンの影響の定量評価が可能と考
215 えられた。ブナ (11 報)、スギ (8 報)、アカマツ (6 報) 及びカラマツ属 (7 報) を対象とした文献 (合

⁵ Yonekura *et al.* (2005) で用いられた品種「赤丸」は「コメツト」と同品種である。

216 計 24 報) より、オゾンの影響の定量評価のために、①成長に関するエンドポイント (評価項目) と②オ
217 ゾン曝露評価指標を各樹種で整理した。

218

219

220 6.2.1. ブナ

221 ① 成長に関するエンドポイントとして、個体乾重量、地上部乾重量、器官別乾重量、葉面積、樹高、幹
222 直径、葉数などが検討されているが、成長の評価項目では個体乾重量がすべての文献 (11 報) で報告
223 されていた。

224 ② オゾン曝露評価指標として、24 時間平均濃度 (7 報)、日中 12 時間 (6:00~18:00) 平均濃度 (6 報)、
225 日照時平均濃度 (2 報)、日最高 1 時間値の平均値 (4 報)、24 時間 AOT40 (2 報)、日照時⁶AOT40
226 (8 報)、24 時間積算曝露量 (積算曝露量=AOT0=SUM0 である) (4 報) などが報告されている。

227 以上より、ブナの成長に対するオゾン影響の定量評価に利用可能な文献数は、個体乾重量をエンドポ
228 イントとして、日照時 AOT40 で評価した場合に最も多く 8 報であり、24 時間平均濃度で評価した場合
229 には 7 報、日中 12 時間 (6:00~18:00) 平均濃度と日照時平均濃度を同等とみなして評価した場合には
230 合計で 8 報であった。

231

232 6.2.2. スギ

233 ① 成長に関するエンドポイントとして、個体乾重量、地上部乾重量、器官別乾重量、樹高、幹直径な
234 どが検討されているが、成長の評価項目では個体乾重量がすべての文献 (8 報) で報告されていた。

235 ② オゾン曝露評価指標として、24 時間平均濃度 (6 報)、日中 12 時間 (6:00~18:00) 平均濃度 (5
236 報)、日中 10 時間平均濃度 (7:00~17:00) (1 報)、日最高 1 時間値の平均値 (5 報)、24 時間 AOT40
237 (1 報)、日照時 AOT40 (3 報⁷)、24 時間積算曝露量 (4 報)、日中 12 時間 (6:00~18:00) 積算曝
238 露量 (3 報)、日照時積算曝露量 (1 報) などが報告されている。

239 以上より、スギの成長に対するオゾン影響の定量評価に利用可能な文献数は、個体乾重量をエンドポ
240 イントとして、24 時間平均濃度で評価した場合に最も多く 6 報であり、日中 12 時間 (6:00~18:00) 平均
241 濃度と日中 10 時間 (7:00~17:00) 平均濃度を同程度とみなして評価した場合にも合計で 6 報であった。

242 その他に、日最高 1 時間値の平均値では 5 報、24 時間積算曝露量では 4 報、日中 12 時間 (6:00~18:00)
243 積算曝露量と日照時積算曝露量を同程度とみなした場合は合計で 4 報であった。

244

245 6.2.3. アカマツ

246 ① 成長に関するエンドポイントとして、個体乾重量、地上部乾重量、器官別乾重量、樹高、幹直径な
247 どが検討されているが、成長の評価項目では個体乾重量がすべての文献 (6 報) で報告されていた。

248 ② オゾン曝露評価指標として、24 時間平均濃度 (3 報)、日中 12 時間 (6:00~18:00) 平均濃度 (3
249 報)、7~8 時間平均濃度 (一定濃度のオゾン曝露を行っている 11:00~18:00 もしくは 9:00~17:00
250 の平均濃度、それ以外の時間帯は浄化空気。一定濃度のオゾンを規定時間曝露しているため、他の
251 オゾン曝露評価指標の算出が可能。) (2 報)、日最高 1 時間値の平均値 (3 報)、24 時間 AOT40 (1

⁶ 日中 12 時間 (6:00~18:00) も対象とする。

⁷ Hiraoka *et al.* (2017) の AOT40 の積算時間について日照時 AOT40 とみなした。

252 報)、日照時 AOT40 (2 報)、24 時間積算曝露量 (2 報) などが報告されている。

253 以上より、アカマツの成長に対するオゾン影響の定量評価に利用可能な文献数は、個体乾重量をエンド
254 ポイントとして、24 時間平均濃度で評価した場合に最も多く 3 報であり、日照時 AOT40 で評価した場
255 合には 2 報であったが、7~8 時間平均濃度を用いて AOT40 を算出して評価した場合には合計で 4 報で
256 あった。

257

258 6.2.4. カラマツ属

259 ① 成長に関するエンドポイントとして、個体乾重量、地上部乾重量、器官別乾重量、樹高、幹直径な
260 どが検討されているが、成長の評価項目では個体乾重量がすべての文献 (7 報) で報告されていた。

261 ② オゾン曝露評価指標として、24 時間平均濃度 (3 報)、日中 12 時間 (6:00~18:00) 平均濃度 (4
262 報)、7 時間平均濃度 (一定濃度のオゾン曝露を行っている 10:00~17:00 の平均濃度、それ以外の
263 時間帯は野外濃度。一定濃度のオゾンを経験しているため、同様のオゾン曝露評価指標の
264 算出が可能。) (1 報)、日最高 1 時間値の平均値 (3 報)、24 時間 AOT40 (1 報)、日照時 AOT40
265 (2 報)、日中 12 時間 (6:00~18:00) AOT40 (2 報⁸)、24 時間積算曝露量 (2 報) などが報告さ
266 れている。

267 以上より、カラマツ属の成長に対するオゾン影響の定量評価に利用可能な文献数は、個体乾重量をエン
268 ドポイントとして、日中 12 時間 (6:00~18:00) 平均濃度で評価した場合に最も多く 4 報であり、日照
269 時 AOT40 と日中 12 時間 AOT40 を同等とみなして評価した場合には合計で 4 報、24 時間平均濃度で評
270 価した場合には 3 報であった。

271

272 7. 参考文献

273 Frei, M., Kohno, Y., Tietze, S., Jekle, M., Hussein, M.A., Becker, T. & Becker, K. (2012a) The response
274 of rice grain quality to ozone exposure during growth depends on ozone level and genotype.
275 *Environmental Pollution*, 163, 199-206.

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

279 Izuta, T., Matsumura, H., Ohashi, T., Miyake, H. & Totsuka, T. (1993) Effects of peroxyacetyl nitrate
280 on the growth of petunia, kidney bean and radish plants. *Environmental Sciences*, 2, 63-75.

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

284 Kohno, Y., Matsumura, H., Ishii, T. & Izuta, T. (2005) Establishing critical levels of air pollutants for
285 protecting East Asian vegetation — A challenge. In *Plant Responses to Air Pollution and*
286 *Global Change*, Omasa, K., Nouchi, I. & De Kok, L. J., (eds.) Springer: Tokyo, pp. 243-250.

287 Sugai, T., Kam, D.G., Agathokleous, E., Watanabe, M., Kita, K. & Koike, T. (2018) Growth and

⁸ Sugai *et al.* (2018) 及び Sugai *et al.* (2019) の AOT40 の積算時間は日中 12 時間 (6:00~18:00) と
みなした。

- 288 photosynthetic response of two larches exposed to O₃ mixing ratios ranging from
289 preindustrial to near future. *Photosynthetica*, 56, 901-910.
- 290 Sugai, T., Watanabe, T., Kita, K. & Koike, T. (2019) Nitrogen loading increases the ozone sensitivity
291 of larch seedlings with higher sensitivity to nitrogen loading. *Science of The Total*
292 *Environment*, 663, 587-595.
- 293 Yonekura, T., Kihira, A., Shimada, T., Miwa, M., Arzate, A., Izuta, T. & Ogawa, K. (2005) Impacts of
294 O₃ and CO₂ enrichment on growth of komatsuna (*Brassica campestris*) and radish (*Raphanus*
295 *sativus*). *Phyton, Annales Rei Botanicae, Horn*, 45, 229-235.