

植物影響の曝露指標と植物影響を評価するための曝露方法

目次

1
2
3
4
5
6 1. 植物影響のオゾン曝露指標 (Ozone index)2
7 2. オゾンの植物影響の評価方法2
8 2.1. 植物栽培用の環境調節装置の利用3
9 2.2. フィールドチャンバーの利用4
10 2.3. 開放系曝露システム: FACE 型オゾン曝露システム6
11 2.4. オゾン濃度の制御について8
12 3. 参考文献8
13
14

1 1. 植物影響のオゾン曝露指標 (Ozone index)

2 植物に対するオゾンの影響は累積的であり、濃度が高く、曝露期間も長いほどより顕著
3 な影響が発現することが知られている。このため、植物影響のオゾン曝露指標 (Ozone
4 index) としては、対象期間におけるオゾン濃度の積算値である積算曝露量が用いられてき
5 ました。また、欧州の ICP Vegetation¹では、オゾンの植物影響をより正確に評価できる指標と
6 して気孔を介した葉の積算オゾン吸収量 (POD_Y: Phytotoxic Ozone Dose) も用いられて
7 いる(ICP Vegetation, 2017)。

8 植物影響のオゾン曝露指標として用いられている主な積算曝露量としては、以下がある。

- 9 ● SUM06: 閾値である 0.06 ppm を超過したオゾン濃度 (1 時間値) を、指定された期
10 間 (一日の中の時間帯及び季節等) にわたって積算した値。
- 11 ● AOT_x: 閾値 X ppb を超過したオゾン濃度 (1 時間値) の閾値超過分を、指定された
12 期間 (一日の中の時間帯及び季節等) にわたって積算した値。最も広く用いられて
13 いる指標は閾値を 40 ppb に設定した AOT₄₀ である。
- 14 ● W126: 指定された期間 (一日の中の時間帯及び季節等) の間に観測されたオゾン濃
15 度の全ての 1 時間値について、シグモイド型の関数で高濃度のオゾンの重み付けを
16 した重み付けオゾン濃度 (Weighted Concentration, w_c) を積算した値。シグモイド
17 型の重み付け関数は以下の通りである (C はオゾン濃度の 1 時間値 (ppm))。

$$w_c = \frac{C}{1 + 4403e^{-126C}}$$

19 なお、気孔を介した葉の積算オゾン吸収量である POD_Yは以下のように定義される。

- 20 ● $Y \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を閾値として、それ以上の速度で気孔を介して葉に吸収されたオゾ
21 ンを、指定の期間あるいは成長期間にわたって積算した値。

22
23
24 2. オゾンの植物影響の評価方法

25 実験的に植物にオゾンを曝露する目的として、オゾンの植物影響の発現メカニズムの解
26 明やオゾンに対する植物の成長応答や収量応答の定量的評価が挙げられる。さらに、それ
27 らの結果に基づいて、野外で生育する植物に対するオゾンの影響評価やその地理的分布の
28 解明などへの応用も行われてきた。このようにオゾンの植物影響を評価するスケールは、

¹ The International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops (ICP Vegetation): 国連欧州経済委員会が長距離越境大気汚染条約 (LRTAP: Convention on Long-range Transboundary Air Pollution) のもと設置した、自然植生と農作物への大気汚染影響に関する国際協力プログラム。オゾンによる植生へのリスクの定量化や、大気中の重金属、窒素、残留性有機汚染物質の植生への沈着の定量化、生物多様性への影響を含む、気候変動による植生への大気汚染物質 (オゾンや窒素など) の相互作用の影響の研究を実施。

1 遺伝子レベルから個体、生態系のレベルまで幅広く、それぞれの目的に応じたオゾンの曝
2 露方法がある(米倉, 2016; 伊豆田, 2019)。本資料では、オゾンの植物影響を評価するた
3 めの実験で用いられてきたオゾン曝露方法について、日本で採用されてきた方法を中心に概
4 説する。

5

6 2.1. 植物栽培用の環境調節装置の利用

7 光や気温といったある環境要因の変化とそれに対する植物の反応の因果関係を実験的に
8 解析するための装置として、植物栽培用の環境調節装置であるグロースキャビネットやフ
9 ァイトトロンがある(相賀ら, 1978; 相賀ら, 1984)。これらはその中の温度や湿度、オゾン
10 などの大気汚染物質の濃度を制御することができるキャビネット式の実験装置で、人工光
11 を利用して光の強さや日長まで制御する人工光型グロースキャビネットと(相賀ら, 1978)
12 (図 1)、ガラス張りの構造で野外に設置することで自然光を利用する自然光型ファイト
13 トロンがある(牛島, 1978) (図 2)。前者は再現性のある環境を得ることができるため、こ
14 れを利用したオゾン曝露によって、植物のオゾン被害の発現メカニズムの解明やオゾン耐性
15 に関わる遺伝子を見出すための遺伝学的スクリーニングなど、分子生物学や生理生化学の
16 分野での研究に用いられることが多い。

17



18

19 図 1 人工光型グロースキャビネット. 左: 国立環境研究所 (茨城県つ
20 くば市), 右: 埼玉県環境科学国際センター (埼玉県加須市).

21



図 2 自然光型ファイトトロン. 左: 国立環境研究所 (茨城県つくば市), 右: 東京農工大学 (東京都府中市).

人工光型グロースキャビネットは、温湿度に加えて光強度や日長が再現可能な反面、電磁スペクトルが太陽光とは異なることや、植物と光源との距離の変化によって植物に届く光強度が変化する(牛島, 1978)。そのため、人工光型グロースキャビネットを用いたオゾン曝露実験で得られた結果を野外で生育する植物に対するオゾンの影響評価に直接適用することは難しい。これに対して自然光型ファイトトロンは、ガラスによる紫外線の吸収がもたらす光質の変化やフレーム等による光量の減衰があるものの、光条件は自然環境に近いいため、本装置を用いたオゾン曝露実験により、植物の成長や光合成に対する長期影響といった個体レベルでのオゾンの影響を評価することができる。そして、ファイトトロン内のオゾン濃度は制御可能であることから、自然光型ファイトトロンを複数台用意し、オゾン濃度のみが異なる環境で植物を栽培し、その成長影響を調べることで、オゾンの積算曝露量や積算吸収量に対する成長応答や収量応答を定量的に評価することができる。

オゾンに対する植物の成長応答の定量的な評価の他に、オゾンなどによる大気汚染が植物に及ぼす影響を評価することを目的として自然光型ファイトトロンを利用する手法として、空気浄化 (FAC: Filtered Air Chamber) 法がある。これは、一对のファイトトロンをある現地に配置し、活性炭フィルターなどによって汚染物質を除去した大気を導入する浄化室と、大気汚染物質を含む外気をそのまま導入する非浄化室を設け、この両室内で植物を育成して比較することで、その現地における大気汚染による植物影響を評価する方法である(相原ら, 1988)。この方法は、原因不明の植物被害を、光化学オキシダントによるものであることを確認する上において、大きな役割を果たしてきた。

2.2. フィールドチャンバーの利用

自然光型ファイトトロンなどの温室は固定設置型であるために、FAC 法が適用できる調査場所やその試験回数が制限される(相原ら, 1988)。また、ファイトトロン内の温度や湿度は厳密に制御されるとはいえ、野外のそれらとはまったく異なることから、植物の生育環境としては不自然な環境である。そこで、野外環境により近い生育環境でオゾンの影響を

1 評価する手法としてオープントップチャンバー (OTC) が開発された (図 3) (Heagle *et*
2 *al.*, 1973; 小林, 1999)。OTC は天蓋部が開放された小型のチャンバーで、その下部に設置
3 された送風ファンによってチャンバー内に外気が導入され、上部の開放部に向かって吹き
4 抜ける構造を持つ。そのため、OTC 内の温度や湿度は外気のそれらに連動し、野外環境に
5 より近い生育環境となる。さらに、ファイトトロンと比較して製作費やランニングコスト
6 も安価であり、設置場所の制約も少ない。このように圃場などの野外に設置するタイプの
7 チャンバーはフィールドチャンバーと呼ばれ、OTC はその代表的なチャンバーである。そ
8 して、FAC 法に OTC を用いることで、圃場などの任意の場所において浄化区と非浄化区
9 を設け、オゾンの植物影響を評価することが可能となった(藤沼ら, 1984; 相原ら, 1988)。
10 そして、OTC には様々な改良が加えられながら(藤沼ら, 1984; 相原と武田, 2004; 河野と
11 米倉, 2012)、現地での大気汚染がその場に生育する植物に及ぼす影響を明らかにするため
12 の研究に広く利用されている(伊豆田ら, 1988, 1992, 2006; 武田と相原, 2007; 中島ら,
13 2018)。

14 OTC 内のオゾン濃度は、FAC 法で利用される時のように活性炭フィルター等によって
15 低く抑えることができるだけでなく、送風ファンの近くにオゾンガスを放出することで高
16 くすることも可能である。このようにして、オゾン濃度を変えた時の植物の成長応答や収
17 量応答を定量的に評価することができる。アメリカでは 1980 年から 1987 年に National
18 Crop Loss Assessment Network (NCLAN)、ヨーロッパでは 1986 年から 1991 年に
19 European Open-Top Chamber network (EOTC) のプロジェクトが実施され、コムギやイ
20 ンゲン、ダイズなどの主要な作物を対象に、それらの収量とオゾン濃度もしくはオゾンの
21 積算曝露量との関係が確立され、オゾンのリスク評価に用いられるようになった(小林,
22 1999; 野内, 2001)。

23 日本においても、水田でイネにオゾンを曝露するフィールドチャンバーが開発され、そ
24 れらを利用した曝露実験の結果が、関東地域でのイネの収量に対するオゾンのリスク評価
25 に応用された(Kobayashi *et al.*, 1994; 小林, 1999)。そして、農作物だけでなく、樹木を
26 対象としたトンネル型やグリーンハウス型、ガラス温室型のフィールドチャンバーが開発
27 され(図 4)、オゾンに対する成長応答や収量応答の定量的評価とそれらに基づくクリティ
28 カルレベルの提案やオゾンのリスク評価に用いられている(河野, 2001; Kohno *et al.*,
29 2005; Yonekura *et al.*, 2005; Watanabe *et al.*, 2008, 2010, 2012; 伊豆田, 2016;
30 Yamaguchi *et al.*, 2014, 2018, 2019; Kinose *et al.*, 2020)。

31



図 3 日本で利用されている小型のオープントップチャンバー (OTC) の一部。左: 埼玉県環境科学国際センター (埼玉県加須市), 中央: 長崎大学 (長崎県長崎市), 右: 山梨大学 (山梨県甲府市)。Heagle *et al.* (1973) が開発した OTC は円形の筒型でより大型である。



図 4 グリーンハウス型のフィールドチャンバー (東京農工大学, 東京都八王子市) (左) とガラス温室型のオープントップチャンバー (中央: 電力中央研究所, 群馬県前橋市; 右: 埼玉県環境科学国際センター, 埼玉県加須市)

2.3. 開放系曝露システム: FACE 型オゾン曝露システム

ファイトトロンと比較すれば、OTC などのフィールドチャンバー内の生育環境は野外環境に近いが、いずれのタイプのフィールドチャンバーにおいても、厳密には異なる。例えば、オゾンを含む外気の導入がチャンバー下部からなされる OTC の場合、鉛直方向のオゾン濃度勾配が野外とは逆になる。また、囲いとなるガラスやフィルムによる遮光、降水の遮蔽に伴う土壌含水率の低下、野外のような変動のない一定の風速、結露の減少、気温の上昇とそれに伴う大気飽差の低下といった微気象の違いである (Fuhrer, 1994)。このようなチャンバー内における微気象の変化はチャンバー効果 (Chamber effects) と呼ばれ、葉内へのオゾン吸収量の変化をもたらす可能性があり、チャンバー実験で得られたオゾン濃度もしくは積算曝露量と成長や収量との関係が野外のそれとは異なるという懸念が生じた (Kobayashi, 2015)。同様の懸念が高濃度 CO₂ 曝露実験においても生じており、OTC のような微気象を変化させる要因となる囲いや送風ファンのない状態で高濃度 CO₂ を曝露する開放系大気 CO₂ 増加 (FACE: Free-air CO₂ enrichment) 実験が確立された (Allen *et al.*, 1992)。これは、曝露対象となる植物群落の周囲に CO₂ 放出用のチューブやパイプを設置し、それらの中央部で風向と風速を観測し、コンピューター制御によって風上側のチ

1 ューブから CO₂ を放出して、群落全体を覆う大気中の CO₂ 濃度を均一に上昇させるとい
2 う施設である。この施設をオゾン曝露に応用し、世界各地において、作物や樹木に対する
3 FACE 型のオゾン曝露システムが構築、利用されており (Morgan *et al.*, 2004; Karnosky *et*
4 *al.*, 2007; Tang *et al.*, 2011)、日本においても樹木を対象とした FACE 型のオゾン曝露シ
5 ステムが稼働している (図 5) (Watanabe *et al.*, 2013; Kobayashi, 2015)。
6



7
8 図 5 FACE 型のオゾン曝露システム. 左: 作物を対象としたシステム
9 (中国江蘇省) (Kobayashi, 2015). 右: 樹木を対象としたシステム
10 (北海道大学, 北海道札幌市).
11

12 FACE 型のオゾン曝露システムではチャンバー効果がなく、その生育環境は野外環境に
13 限りなく近いが、濃度上昇のために添加したオゾンの均一化は、自然状態で生じる乱流と
14 拡散に依存するため、特に風速が弱い時などは、放出口周辺などに高濃度オゾンの気塊が
15 形成され、その周辺の植物の被害が顕著になるというホットスポットの存在が問題視され
16 る。また、オゾン濃度を低下させることができないため、オゾン濃度がすでに植物に悪影
17 響を及ぼすレベルで観測されている地域では対照区の設定に問題が生じる。そして、大規
18 模なオゾン発生装置と高度な制御システムが必要であり、実験計画上必要となる処理区の
19 反復を設けることも考えると、経費や設置場所などの問題が生じ、普及が進まない要因と
20 なっている (U.S. EPA, 2006)。これらの FACE 型のオゾン曝露システムの欠点は OTC の
21 利点で補われており、チャンバー効果という欠点との兼ね合いで、目的に応じて曝露方法
22 を取捨選択する必要がある。なお、U.S. EPA (2006)によれば、チャンバー効果は、オゾン
23 吸収量を変化させる可能性があるが、オゾンに対する植物の応答を本質的に変化させるも
24 のではないとされている。そのため、OTC は引き続きオゾンに対する植物の成長や収量の
25 応答を定量的に評価し、その関数化の発展において有用な手法であると考えられる。しか
26 ししながら、それらの結果を野外での植物に対するオゾンのリスク評価に適切に利用するた
27 めには、OTC 内の気温や光強度、風速などの特徴を記録しておくことが重要である (U.S.

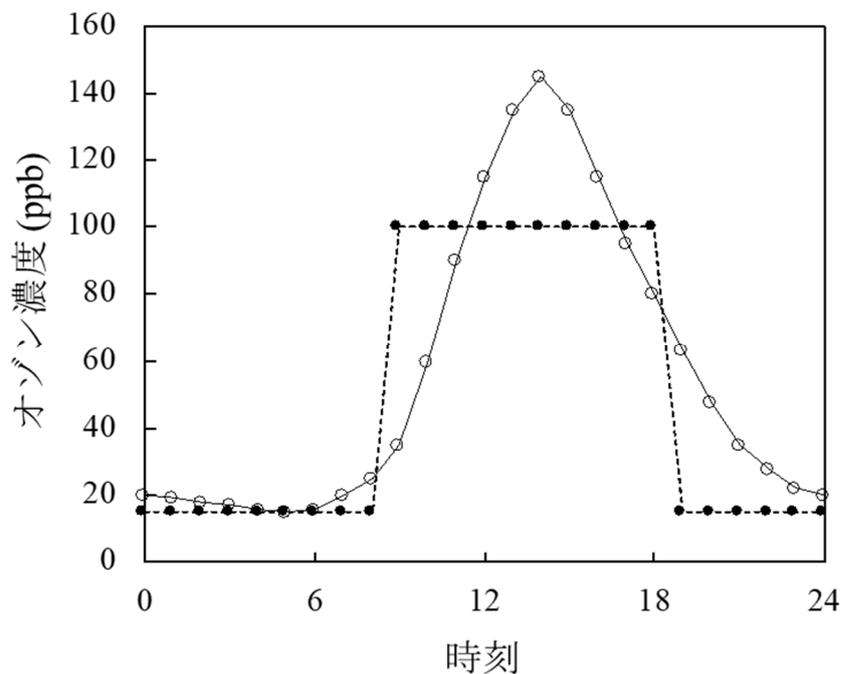
1 EPA, 2006)。

2

3 2.4. オゾン濃度の制御について

4 オゾン濃度を上昇させるために添加するオゾンガスを生成する方法として、無声放電方
5 式が用いられることが多いが、その原料となる気体に空気を用いた場合、副生成物として
6 窒素酸化物が生じる(Brown and Roberts, 1988)。そのため、生成後のガスを水に通す(バ
7 ブリング)ことによって窒素酸化物を取り除くか、もしくは原料となる気体に酸素を用い
8 る必要がある。

9 オゾン濃度の制御において、かつては日中に一定濃度のオゾンを曝露するという、いわ
10 ゆる Square-wave 型のオゾン濃度の日内変動を示す曝露方法が取られていた(図 6)。こ
11 れは植物のオゾン被害の発現メカニズムの解明やオゾン耐性に関わる遺伝子のスクリーニ
12 ングなどにおいては現在においても重要な曝露手法である。しかしながら、このようなオ
13 ゾン濃度の日内変動は極めて不自然である。そのため、野外で生育する植物に対するオゾ
14 ンのリスク評価に利用されるような、オゾンに対する植物の成長応答や収量応答を定量的
15 に評価するための曝露実験においては、野外濃度に比例追随させた濃度のオゾン曝露
16 (野外濃度比例追随制御)することで、可能な限り野外環境に近い濃度変動を伴ったオゾ
17 ンを曝露する手法が主流となっている。



18

19 図 6 野外における典型的なオゾン濃度の日内変動(白丸, 実線)と
20 Square-wave 型のオゾン濃度の日内変動(黒丸, 破線)。

21

22 3. 参考文献

- 1 Allen, L.H. Jr., Drake, B.G., Rogers, H.H. & Shinn, J.H. (1992) Field techniques for
2 exposure of plants and ecosystems to elevated CO₂ and other trace gasses. *In*
3 *Critical Reviews in Plant Sciences*, 11, 85-119.
- 4 Brown, K.A. & Roberts, T.M. (1988) Effects of ozone on foliar leaching in Norway spruce
5 (*Picea abies* L. Karst): Confounding factors due to NO_x production during
6 ozone generation. *Environmental Pollution*, 55, 55-73.
- 7 Fuhrer, J. (1994) Effects of ozone on managed pasture: I. Effects of open-top chambers
8 on microclimate, ozone flux, and plant growth. *Environmental Pollution*, 86,
9 297-305.
- 10 Heagle, A.S., Body, D.E. & Heck, W.W. (1973) An open-top field chamber to assess the
11 impact of air pollution on plants. *Journal of Environmental Quality*, 2, 365-
12 368.
- 13 ICP Vegetation. (2017) Chapter 3: Mapping critical levels for vegetation. In *Manual on*
14 *methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels*
15 *of air pollution effects, risks and trends. UNECE Convention on Long-range*
16 *Transboundary Air Pollution. <http://icpvegetation.ceh.ac.uk> (accessed*
17 *2022.06.15).*
- 18 Karnosky, D.F., Werner, H., Holopainen, T., Percy, K., Oksanen, T., Oksanen, E., Heerdt,
19 C., Fabian, P., Nagy, J., Heilman, W., Cox, R., Nelson, N. & Matyssek, R. (2007)
20 Free-air exposure systems to scale up ozone research to mature trees. *Plant*
21 *Biology*, 9, 181-190.
- 22 Kinose, Y., Yamaguchi, M., Matsumura, H. & Izuta, T. (2020) Impact assessment of
23 ozone absorbed through stomata on photosynthetic carbon dioxide uptake by
24 Japanese deciduous forest trees: Implications for ozone mitigation policies.
25 *Forests*, 11, 137.
- 26 Kobayashi, K. (2015) FACE-ing the challenges of increasing surface ozone
27 concentration in Asia. *Journal of Agricultural Meteorology*, 71, 161-166.
- 28 Kobayashi, K., Okada, M. & Nouchi, I. (1994) A chamber system for exposing rice
29 (*Oryza sativa* L.) to ozone in a paddy field. *New Phytologist*, 126, 317-325.
- 30 Kohno, Y., Matsumura, H., Ishii, T. & Izuta, T. (2005) Establishing critical levels of air
31 pollutants for protecting East Asian vegetation — A challenge. In *Plant*
32 *Responses to Air Pollution and Global Change*, Omasa, K., Nouchi, I. & De
33 Kok, L. J., (eds.) Springer: Tokyo, pp. 243-250.
- 34 Morgan, P.B., Bernacchi, C.J., Ort, D.R. & Long, S.P. (2004) An *in vivo* analysis of the
35 effect of season-long open-air elevation of ozone to anticipated 2050 levels on

1 photosynthesis in soybean. *Plant Physiology*, 135, 2348-2357.

2 Tang, H., Liu, G., Han, Y., Zhu, J. & Kobayashi, K. (2011) A system for free-air ozone
3 concentration elevation with rice and wheat: Control performance and ozone
4 exposure regime. *Atmospheric Environment*, 45, 6276-6282.

5 U.S. EPA (2006) Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants Vol.
6 III. National Center for Environmental Assessment-RTP Office, Office of Research
7 and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park,
8 NC. EPA 600/R-05/004aF.

9 Watanabe, M., Hoshika, Y., Inada, N., Wang, X., Mao, Q. & Koike, T. (2013)
10 Photosynthetic traits of Siebold's beech and oak saplings grown under free air
11 ozone exposure in northern Japan. *Environmental Pollution*, 174, 50-56.

12 Watanabe, M., Matsuo, N., Yamaguchi, M., Matsumura, H., Kohno, Y. & Izuta, T. (2010)
13 Risk assessment of ozone impact on the carbon absorption of Japanese
14 representative conifers. *European Journal of Forest Research*, 129, 421-430.

15 Watanabe, M., Yamaguchi, M., Matsumura, H., Kohno, Y. & Izuta, T. (2008) Effects of
16 ozone on growth and photosynthesis of *Castanopsis sieboldii* seedlings grown
17 under different nitrogen loads. *Journal of Agricultural Meteorology*, 64, 143-
18 155.

19 Watanabe, M., Yamaguchi, M., Matsumura, H., Kohno, Y. & Izuta, T. (2012) Risk
20 assessment of ozone impact on *Fagus crenata* in Japan: Consideration of
21 atmospheric nitrogen deposition. *European Journal of Forest Research*, 131,
22 475-484.

23 Yamaguchi, M., Hoshino, D., Inada, H., Akhtar, N., Sumioka, C., Takeda, K. & Izuta,
24 T. (2014) Evaluation of the effects of ozone on yield of Japanese rice (*Oryza*
25 *sativa* L.) based on stomatal ozone uptake. *Environmental Pollution*, 184, 472-
26 480.

27 Yamaguchi, M., Kinose, Y., Matsumura, H. & Izuta, T. (2019) Evaluation of O₃ effects
28 on cumulative photosynthetic CO₂ uptake in seedlings of four Japanese
29 deciduous broad-leaved forest tree species based on stomatal O₃ uptake.
30 *Forests*, 10, 556.

31 Yamaguchi, M., Nishi, Y., Kawada, S. & Nakashima, K. (2018) Tropospheric ozone
32 reduces resistance of Japonica rice (*Oryza sativa* L., cv. Koshihikari) to
33 lodging. *Journal of Agricultural Meteorology*, 74, 97-101.

34 Yonekura, T., Shimada, T., Miwa, M., Arzate, A. & Ogawa, K. (2005) Impacts of
35 tropospheric ozone on growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of*

- 1 Agricultural Meteorology, 60, 1045-1048.
- 2 相賀一郎, 大政謙次, 安保文彰. (1978) 大気汚染ガス暴露のためのグローσκャビネット. 国立
3 公害研究所特別研究成果報告, 2, 193-210.
- 4 相賀一郎, 大政謙次, 松本 茂. (1984) 国立公害研究所ファイトロン. 国立公害研究所研究報
5 告, 64, 292-311.
- 6 相原敬次, 大道章一, 矢島 巖, 篠崎光夫, 戸塚 績. (1988) 大気汚染による植物影響評価の
7 ための小型オープントップチャンバー(OTC)について. 神奈川県公害センター研究報告,
8 10, 12-21.
- 9 相原敬次, 武田麻由子. (2004) 可搬型オープントップチャンバー(OTC)の開発. 神奈川県環境
10 科学センター研究報告, 27, 77-81.
- 11 伊豆田 猛. (2006) 植物指標による大気汚染環境の評価. 伊豆田 猛(編)植物と環境ストレス,
12 コロナ社, pp. 24-33.
- 13 伊豆田 猛. (2016) 植物に対するオゾン、酸性降下物およびエアロゾルの影響に関する研
14 究. 大気環境学会誌 51, 85-96.
- 15 伊豆田 猛. (2019) 大気汚染物質の植物影響の評価方法. 大気環境学会(編) 大気環境の事
16 典, 朝倉書店, pp. 120-121.
- 17 伊豆田 猛, 滝川正義, 堀江勝年, 三宅 博, 戸塚 績. (1988) ハツカダイコンの生長を指標とし
18 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.
- 19 伊豆田 猛, 大津 源, 堀江勝年, 三宅 博, 戸塚 績. (1992) オープントップチャンバー法による
20 東京都奥多摩町における大気環境評価. 大気汚染学会誌, 27, 329-335.
- 21 牛島忠広. (1978) 環境植物学の応用. 環境植物学 (田崎忠良 編著), p. 238-262, 朝倉書店.
- 22 河野吉久. (2001) 樹木に及ぼす酸性物質の長期慢性影響に関する研究. 大気環境学会誌,
23 36, 47-59.
- 24 河野吉久, 米倉哲志. (2012) 可搬型小型オープントップチャンバーシステムの開発, 大気環境学
25 会誌, 47, 186-193.
- 26 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, 162-
27 175.
- 28 武田麻由子, 相原敬次. (2007) 丹沢山地の大気中オゾンがブナ(*Fagus crenata*) 苗に及ぼす影響.
29 大気環境学会誌, 42, 107-117.
- 30 中島健太郎, 西 祐理子, 川田彩香, 山口真弘. (2018) オープントップチャンバー法を用いたハツカ
31 ダイコンの生長に対するオゾンの影響を指標とした長崎の大気環境評価. 大気環境学会誌,
32 53, 186-193.
- 33 野内 勇. (2001) 光化学オキシダントによる植物被害. 野内 勇(編) 大気環境変化と植物の反応,
34 養賢堂, pp. 72-112.
- 35 藤沼康実, 古川昭雄, 牛島忠広, 松岡義浩, 佐藤秋生, 戸塚 績. (1984) 大気汚染環境の植物影

- 1 響調査のためのオープントップチェンバー(OTC)法の開発. 国立公害研究所研究報告, 64,
2 229-241.
- 3 米倉哲志.(2016) 大気環境と植物 —第3講 農作物に対する光化学オキシダント(オゾ
4 ン)の影響—. 大気環境学会誌, 51, A57-A66.