

—研究論文 (技術調査報告)—

オープントップチャンバー法を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環境評価

中島 健太郎, 西 祐理子, 川田 彩香, 山口 真弘*

Assessment of Ambient Air Pollution in Nagasaki City, Japan, Based on Ozone Impacts on Growth of Radish (*Raphanus sativus* L.) using the Open-Top Chamber Method

Kentaro Nakashima, Yuriko Nishi, Sayaka Kawada, Masahiro Yamaguchi*

Faculty of Environmental Science, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki, Nagasaki 852-8521, Japan

* Corresponding author: (E-mail) masah-ya@nagasaki-u.ac.jp

We assessed the ambient air pollution based on the ozone (O_3) impacts on the growth of radish (*Raphanus sativus* L. cv. Comet) using the open-top chamber method in Nagasaki city, which faces transboundary air pollution such as tropospheric O_3 . There were two treatments in the present study: ozone-removal filtered air (FA) and non-filtered air (NF) treatments. A one-week exposure experiment was conducted nine times in Nagasaki University (Nagasaki, Japan) from March to October 2015. The below-ground dry mass of radish grown in the NF treatment was significantly lower than that in FA treatment in the experiments in mid-May, September and October. There was no significant relationship between the mean O_3 concentration and relative value of the root dry mass in the NF treatment to that in the FA treatment. On the other hand, the reduction rate in the below-ground dry mass per unit O_3 concentration became greater with the increasing mean air temperature and relative air humidity. These results indicate that, depending on the climatic conditions, the O_3 concentrations observed in Nagasaki in the spring and autumn were high enough to reduce the growth of O_3 -sensitive plants, such as radish.

Key words : indicator plants, open-top chamber (OTC), ozone, radish, transboundary air pollution

1. はじめに

光化学オキシダント (Ox) の主成分であるオゾンは、自動車や工場から排出される窒素酸化物と非メタン炭化水素が太陽からの紫外線を受けて生成されるガス状の大気汚染物質である (Akimoto et al., 2015)。オゾンは人間の健康だけでなく植物にも悪影響を及ぼすことが知られており、葉に白色や褐色の斑点が生じる可視障害の発現や、葉の光合成能力の低下、生長や収量の低下などが知られている (Emberson et al., 2013; 渡辺ら, 2016; 米倉, 2016)。日本のオゾン濃度は全国的に上昇傾向にあり、その原因として、一酸化窒素 (NO) によるオゾンの分解反応の減少と越境大気汚染の寄与が指摘されている (Akimoto et al., 2015)。越境大気汚染に起因するオゾン濃度の上昇は特に九州などの西日本で顕著であり (Akimoto et al., 2015; Nagashima et al., 2017)、長崎県の福江島における観測では、越境大気汚染の寄与が大きい春季や秋季に比較的高濃度のオゾンが観測されている (Kanaya et al., 2016)。したがって、長崎などの九州北部地域では、春季や秋季に植物に対するオゾンの悪影響が懸念される。

オープントップチャンバー (OTC) を用いた栽培実験は、現場条件の大気汚染による植物影響の評価手法の一つである

(Heagle et al., 1973; 相原・武田, 2004; 河野・米倉, 2012)。OTCとは上部が大気に開放されたチャンバーである。大気汚染物質の暴露実験では、典型的には、野外空気をそのままOTCに通気させる区とフィルターにより対象とする大気汚染物質を除去した空気をOTCに通気させる区の2種類の処理区を設ける。そして、それぞれのチャンバー内で生育させた植物の生長量などを比較することにより、その場所における大気汚染が植物に与える影響を評価する方法である。植物を取り巻く環境条件のうち、大気汚染物質であるオゾンの指標植物の一つとしてハツカダイコン (*Raphanus sativus* L.) がある。ハツカダイコンはオゾンに対する感受性が高く、生長が早く適度な大きさであり (Kostka-Rick and Manning, 1993; Pleijel et al., 1999)、OTC法と組み合わせることによって、オゾンに着目した大気環境評価に用いることができるという報告されている (伊豆田ら, 1988b)。そこで本研究では、OTC法を用い、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を目的とした。

2. 材料と方法

2.1 供試植物

供試植物として、ハツカダイコン (*Raphanus sativus* L.) の

代表的な品種の一つであるコマットを用いた。ハツカダイコンの種子は、タキイ種苗株式会社（京都）から購入した。

2.2 オープントップチャンバー (OTC) とガス処理

本研究で使用したオープントップチャンバー (OTC) は、河野・米倉 (2012) によって開発された、アルミパイプ、アクリル板、塩ビ板および農業用ポリオレフィン系特殊 (農PO) フィルムで構成された箱型のOTCである (外寸: 奥行82.5 cm, 幅60 cm, 高さ120 cm) (Photo 1)。このOTCを長崎大学構内 (長崎県長崎市, 北緯32度47分08秒, 東経129度51分54秒, 標高16 m) に8基設置した。OTCの北側背面には、送風ファン (MRS18 V2-B, オリエンタルモーター株式会社, 東京) と防塵フィルター (フィレドンエアフィルターFS-6200, 日本バイリーン株式会社, 東京) を装着させ、埃を取り除いた空気をOTC内に導入した。OTC内にはスノコを設置することで、ポットの下に水がたまず、OTC内の空気の流れが均一になるようにした。処理区として、オゾン除去フィルター (ハニクルZV, No. 8803ZV, #2813, 308 mm (L) × 240 mm (W) × 20 mm (D), ニチアス株式会社, 東京) を通して野外の空気からオゾンを除去した空気をチャンバー内に導入したO₃ removal-filtered air (FA) 区と、オゾン分解触媒を含まないフィルター (担体ハニクルZV, 8801, #2813, 308 mm (L) × 240 mm (W) × 20 mm (D), ニチアス株式会社, 東京) を通して野外の空気をそのままチャンバー内に導入したNon-filtered air (NF) 区の2処理区を設けた。各処理区4反復として合計8チャンバーを使用した。本チャンバーのFA区におけるオゾン除去率は約50%であった。

2.3 オゾンの植物影響に着目した大気環境評価実験

2015年3月から10月にかけて各1週間の暴露実験を計9回行った (Table 1)。ハツカダイコンの種子をピーカー内で6時間水浸させた後、市販の園芸培土 (花と野菜の土, タキイ種苗株式会社, 京都) を詰めた容積約1.4 Lのポット (φ113 mm × 140 mm, 底穴付き, 株式会社藤原製作所, 東

京) に播種した。播種は、ポットあたり3カ所に行い、1カ所につき2~3個の種子を播いた。播種数日後、子葉の展開が始まった頃に、1カ所につき1個体となるように間引きを行った。その後、長崎大学構内に設置したOTC内に、チャンバーあたり8ポットを配置した。ポットの配置後から処理開始までの期間は、すべてのチャンバーについて、オゾン除去フィルターを通してオゾンを除去した空気をチャンバー内に導入した。配置数日後、本葉の展開が始まった頃に、チャンバーからポットをすべて取り出し、生長が同程度のハツカダイコン1個体を残すように間引きを行い、8ポットずつ8組に振り分けた。その後、各チャンバーをFA区とNF区に分け、NF区に割り当てるチャンバーのフィルターを、オゾン分解触媒を含まないフィルターに交換し、チャンバー内に個体を戻して処理を開始した。このとき、FA区とNF区のチャンバーがそれぞれ隣同士になるようにチャンバーを振り分け、処理区あたり4チャンバー反復を設けた。間引きと処理開始は、処理開始日の午前9時までに終わらせた。生育期間中の灌水は適宜行い、降水日には灌水を行わなかった。本研究で実施した各実験の播種日、処理開始日およびサンプリング日はTable 1に示す。なお、本研究では、3月~5月の実験を春季の実験、6月~8月の実験を夏季の実験、9月と10月の実験を秋季の実験とした。

処理開始後8日目の午前9時に、すべてのポットをチャンバー外に搬出して処理を終え、個体サンプリングを行った (処理期間: 7日間)。サンプリングした個体は、葉と葉柄 (地上部) および下胚軸と根 (地下部) に分別し、それぞれ封筒に入れ、熱風循環式乾燥機 (LC-124, エスベック株式会社, 大阪) を用いて80°Cで5日間以上乾燥させた。その後、電子天秤 (CPA225D, Sartorius, Germany) を用いて乾重量を測定した。

2.4 生育環境の測定

チャンバー内の気温と湿度の測定には温湿度記録計 (TR-72wf, 株式会社ティアンドデイ, 長野) を用い、各チャンバー内の通風空気の気温と湿度を5分毎に記録し、1時間値を求めた。光合成有効光量子束密度 (PPFD) の測定には光量子センサー (LI-190, LI-COR, Lincoln, NE, USA) を用い、チャンバー外でPPFDの測定を行った。オゾン濃度の測定には紫外線吸収式オゾン濃度計 (Ozone Monitor Model 202, 2B Technologies, USA) を用い、チャンバー外でオゾン濃度の測定を行った。30秒に1回、電圧データロガー (VR-71, 株式会社ティアンドデイ, 長野) で記録したオゾン濃度から1時間値を求め、さらに24時間平均値、8時間平均値 (9:00-17:00)、SUM00 (Sum of all hourly average concentration)、SUM06 (Sum of all hourly average concentration above 60 nL L⁻¹) および Daylight AOT40 (Accumulated exposure over a threshold of 40 nL L⁻¹ during daylight hours (日射量 > 50 W m⁻² または PPFD > 230 μmol m⁻² s⁻¹)) を算出した (Kärenlampi and Skärby, 1996; 伊豆田・松村, 1997;



Photo 1 Open-top chambers used in the present study (Nagasaki University, Nagasaki, Japan).

Table 1 Dates of sowing, beginning of exposure and sampling in 2015.

Exp. No.	Sowing	Beginning	Sampling
1	5 Mar.	23 Mar.	30 Mar.
2	9 Apr.	21 Apr.	28 Apr.
3	30 Apr.	11 May	18 May
4	14 May	22 May	29 May
5	15 Jun.	23 Jun.	30 Jun.
6	9 Jul.	17 Jul.	24 Jul.
7	5 Aug.	13 Aug.	20 Aug.
8	18 Sep.	26 Sep.	3 Oct.
9	5 Oct.	16 Oct.	23 Oct.

Table 2 Seasonal and periodical mean concentration of photochemical oxidants (Ox, ppbv) from March to October measured near the present study site (Kogakura monitoring station, Nagasaki, Japan).

Year	Spring	Summer	Autumn	Mean
	Mar.–May	Jun.–Aug.	Sep.–Oct.	
2003	38 (8)	20 (1)	20 (4)	27
2004	35 (2)	21 (0)	23 (1)	27
2005	38 (2)	13 (0)	11 (1)	22
2006	34 (9)	31 (4)	42 (1)	35
2007	51 (2)	28 (0)	33 (0)	38
2008	50 (0)	29 (0)	35 (0)	38
2009	52 (2)	35 (0)	42 (0)	43
2010	50 (0)	27 (0)	35 (0)	38
2011	45 (2)	22 (0)	30 (0)	33
2012	45 (0)	22 (0)	29 (1)	32
2013	44 (2)	21 (0)	30 (0)	32
2014	45 (2)	27 (0)	35 (0)	36
2015	43 (15)	27 (0)	37 (0)	35

Values in the parentheses indicate the number of daily average concentration which were not available during each period.

Table 3 Air temperature and relative air humidity (RH) inside the open-top chambers (OTCs) and average photosynthetic photon flux density (PPFD) outside the OTCs during exposure period of each experiment.

Exp. No.	Month	Air temperature (°C)			RH (%)		PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
		Daily mean	Daily max. ^a	Daily min. ^b	Daily mean	Daily min. ^b	
1	Mar.	12.8 (0.1)	20.1 (0.3)	6.4 (0.1)	47 (0.6)	21 (0.4)	447
2	Apr.	17.8 (0.1)	27.1 (0.3)	10.7 (0.1)	51 (0.7)	18 (0.4)	538
3	May	21.1 (0.1)	25.9 (0.1)	16.9 (0.1)	74 (0.8)	53 (0.6)	325
4	May	22.2 (0.1)	29.8 (0.1)	16.7 (0.1)	57 (0.7)	33 (0.5)	461
5	Jun.	23.9 (0.1)	28.3 (0.1)	20.8 (0.0)	83 (1.1)	62 (0.7)	270
6	Jul.	27.0 (0.1)	31.4 (0.2)	23.9 (0.0)	78 (1.1)	60 (0.9)	345
7	Aug.	28.1 (0.1)	33.8 (0.3)	24.3 (0.1)	75 (1.0)	49 (0.9)	355
8	Sep.	24.7 (0.1)	30.6 (0.3)	20.3 (0.1)	68 (0.8)	44 (0.6)	332
9	Oct.	21.0 (0.1)	29.2 (0.4)	14.9 (0.1)	65 (0.8)	29 (0.8)	374

Each value of air temperature and relative air humidity shows the mean of eight chambers, and the standard deviation is shown in parentheses. ^a Daily max.: mean daily maximum 1-h value; ^b Daily min.: mean daily minimum 1-h value.

Musselman et al., 2006)。本評価実験を実施した2015年のオゾン濃度がどの程度であったのかを評価するために、長崎県長崎市にある小ヶ倉支所一般環境大気測定局で2003年から2015年に観測されたOx濃度を、長崎県大気環境速報システム(2018)および長崎県環境部環境政策課より譲受し、各年の3月から10月の月平均値および8カ月間の期間平均値を算出した。

2.5 統計解析

地上部乾重量、地下部乾重量および個体乾重量について各チャンバーの平均値を算出し、Welchの*t*検定を用いて、FA区とNF区の4チャンバー反復の平均値の差の有意性を危険率5%で判定した($n=4$)。二変量の関係の解析には相関分析を用い、従属変数と複数の説明変数との相関分析における個々の有意水準はHolmの方法によって調整した。すべての統計解析にはIBM® SPSS® Statistics (Ver. 22, 日本IBM)を用いた。

3. 結果

Table 2に、2003年から2015年に長崎市で観測されたOx濃度の春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9月、10月)および3月から10月の期間平均値を示す。2005年までの期間平均濃度は30 ppbv未満で低い値であったが、長崎県で初めてOx注意報が発令された2006年以降、2009年の43 ppbvをピークに、30 ppbv以上の年が続いていた。2011年から2013年は30 ppbv台前半で推移していたが、2014年と2015年は35 ppbvを超えており、2015年の期間平均濃度は2011年以降では比較的高かった。一方、春季の平均濃度は2009年をピークに低下傾向にあり、2015年のそれは、欠測日数が多いものの、近年では最も低かった。これに対して夏季と秋季の平均濃度は期間平均濃度とおおむね同様の経年変化を示し、2015年のそれは2010年以降では比較的高かった。

Table 3に、各実験の暴露期間中におけるOTC内の気温と

相対湿度およびOTC外における平均PPFDを示す。気温は3月に実施した実験1で最も低く、日平均気温が12.8℃であり、気温が最も高かった実験は8月に実施した実験7で、日平均気温が28.1℃であった。相対湿度が最も低かった実験は3月に実施した実験1で日平均値が47%であったが、平均日最低値は4月に実施した実験2で最も低く、18%であった。平均PPFDは4月に実施した実験2で最も高く538 μmol m⁻² s⁻¹であり、最も低かったのは6月に実施した実験5で

270 μmol m⁻² s⁻¹であった。

Table 4 The concentration, sum of all hourly average concentration (SUM00), sum of all hourly average concentration above 60 ppbv (SUM06) and accumulated exposure over a threshold of 40 ppbv during daylight hours (AOT40) of O₃ outside the chambers during exposure period of each experiment.

Exp. No.	Month	Conc. (ppbv)		Dose (ppmv h)		
		24-h	8-h ^a	SUM 00	SUM 06	AOT 40 ^b
1	Mar.	42	51	6.98	0.19	0.68
2	Apr.	58	74	9.81	5.27	2.23
3	May	51	56	8.63	3.51	1.09
4	May	52	65	8.78	3.92	1.66
5	Jun.	36	38	5.96	0.00	0.25
6	Jul.	18	21	2.88	0.00	0.00
7	Aug.	31	42	5.29	0.00	0.43
8	Sep.	39	45	6.61	0.45	0.45
9	Oct.	43	59	7.29	2.39	1.07

^a8-h: 9:00–17:00, ^bDaylight hours: photosynthetic photon flux density > 230 μmol m⁻² s⁻¹ (i.e., global radiation > 50 W m⁻²).

Table 4に各実験の暴露期間中における日平均オゾン濃度、日中8時間平均オゾン濃度、SUM00、SUM06およびDaylight AOT40を示す。日平均オゾン濃度および日中8時間平均オゾン濃度はともに4月に実施した実験2で最も高く、それぞれ58 nL L⁻¹ (ppbv) および74 ppbvであり、それらが最も低かった7月の実験6ではそれぞれ18 ppbvおよび21 ppbvであった。オゾンドースの指標であるSUM00、SUM06およびDaylight AOT40は4月に実施した実験2で最も高く、それぞれ9.81 ppmv h、5.27 ppmv hおよび2.23 ppmv hであり、それらが最も低かった7月の実験6ではそれぞれ2.88 ppmv h、0 ppmv hおよび0 ppmv hであった。

Table 5に、ハツカダイコンの地上部と地下部および個体の乾重量に対するオゾンの影響と、FA区の乾重量を100とした時のNF区におけるその相対値(%)を示す。いずれの実験においても、地上部乾重量に対するオゾンの有意な影響は認められなかった。5月中旬、9月および10月にそれぞれ実施した実験3、8および9においては、オゾンによって地下部乾重量が有意に低下した。また、5月中旬の実験3においては、オゾンによって個体乾重量が有意に低下した。

Fig. 1に各実験期間中の日平均オゾン濃度とFA区の地下部乾重量を100とした時のNF区におけるその相対値(%)の関係を示す。日平均オゾン濃度と地下部乾重量の相対値との間に有意な相関は認められなかった。また、SUM00やSUM06、Daylight AOT40と地下部乾重量の相対値の関係においても有意な相関は認められなかった(データは示さず)。

Fig. 2a-cに単位オゾン濃度あたりの地下部乾重量の変化

Table 5 Effects of O₃ on dry masses of shoot, below-ground and whole-plant of *Raphanus sativus* L.

Exp. No.	Month	Treatment	Shoot dry mass (mg)	Below-ground dry mass (mg)	Whole-plant dry mass (mg)
1	Mar.	FA	155±14 n.s.	41±7 n.s.	195±20 n.s.
		NF	143±13 (92.9)	38±5 (92.4)	181±16 (92.8)
2	Apr.	FA	210±16 n.s.	64±5 n.s.	274±20 n.s.
		NF	210±15 (99.7)	62±6 (97.5)	272±18 (99.2)
3	May	FA	344±13 n.s.	276±5*	621±18*
		NF	344±6 (100.0)	238±18 (86.2)	583±12 (93.8)
4	May	FA	188±5 n.s.	95±13 n.s.	283±13 n.s.
		NF	169±17 (89.7)	83±9 (87.5)	252±25 (89.0)
5	Jun.	FA	200±9 n.s.	68±13 n.s.	268±16 n.s.
		NF	179±22 (89.3)	59±6 (86.5)	238±26 (88.6)
6	Jul.	FA	175±15 n.s.	98±12 n.s.	273±18 n.s.
		NF	166±19 (94.9)	88±10 (90.7)	255±28 (93.4)
7	Aug.	FA	197±14 n.s.	124±22 n.s.	321±34 n.s.
		NF	187±11 (94.9)	109±15 (88.0)	296±22 (92.2)
8	Sep.	FA	232±24 n.s.	84±8*	315±27 n.s.
		NF	239±13 (103.3)	69±8 (82.9)	308±12 (97.9)
9	Oct.	FA	383±15 n.s.	254±20*	636±35 n.s.
		NF	353±36 (92.1)	206±26 (81.3)	559±57 (87.8)

Each value shows the mean of four chamber replications±standard deviation. Relative value of NF to FA is shown in parentheses (%). FA: O₃ removal-filtered air; NF: Non-filtered air. Welch's *t*-test: * *p*<0.05, n.s. = not significant.

率と日平均気温、日平均相対湿度および平均PPFDとの関係を示す。日平均気温および日平均相対湿度と単位オゾン濃度あたりの地下部乾重量の変化率との間には有意な負の相関が認められ（それぞれ $p < 0.05$ および $p < 0.033$ ）、気温および相対湿度の上昇に伴って単位オゾン濃度あたりの地下部乾重量のオゾンによる低下が著しくなった。一方、平均PPFDとの間には有意な正の相関が認められ（ $p < 0.016$ ）、平均PPFDの増加に伴って、単位オゾン濃度あたりの地下部乾重量のオゾンによる低下は緩和された。気温と相対湿度またはPPFDおよび相対湿度とPPFDの相関係数はそれぞれ0.816（ $p = 0.007$ ）、 -0.600 （ $p = 0.088$ ）および -0.891 （ $p = 0.001$ ）であった。

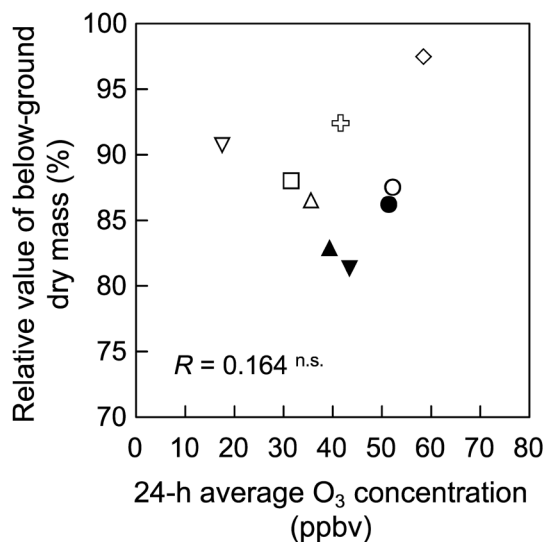


Fig. 1 Relationship between relative value of below-ground dry mass of *Raphanus sativus* L. and the mean 24-h average O_3 concentration during the exposure period. Relative value = $NF/FA \times 100$ (%). \oplus , March; \diamond , April; \bullet and \circ , May; \triangle , June; ∇ , July; \square , August; \blacktriangle , September; \blacktriangledown , October. Solid legend indicates the data with significant reduction by the exposure to O_3 . Statistical significance for R is shown: n.s. = not significant.

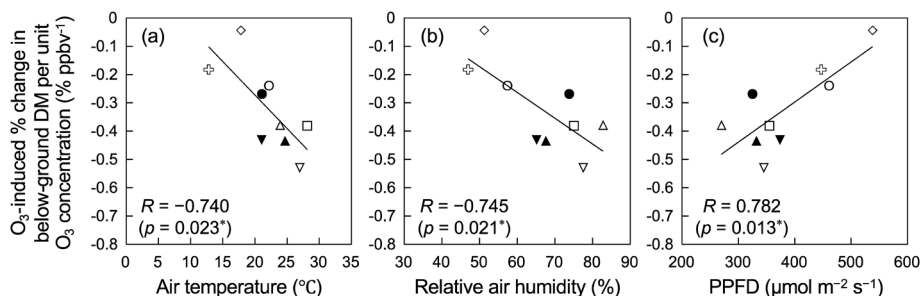


Fig. 2 Relationships of O_3 -induced percent change in below-ground dry mass (DM) of *Raphanus sativus* L. per unit O_3 concentration with (a) average air temperature, (b) average relative air humidity and (c) average photosynthetic photon flux density (PPFD) during the exposure period. \oplus , March; \diamond , April; \bullet and \circ , May; \triangle , June; ∇ , July; \square , August; \blacktriangle , September; \blacktriangledown , October. Solid legend indicates the data with significant reduction by the exposure to O_3 . The solid lines represent the regression lines ($n=9$). Pearson correlation coefficient (R) is shown in figure. Statistical significance for R is adjusted by the Holm's method and is shown: * $p < 0.05$ for (a), $p < 0.033$ for (b) or $p < 0.016$ for (c).

4. 考 察

5月中旬の実験において、ハツカダイコンの個体乾重量がオゾンによって有意に低下した (Table 5)。また、オゾンによる地下部乾重量の有意な低下は5月中旬だけでなく、9月と10月に実施した評価実験においても認められた。地下部に分類した下胚軸は栄養成長期における光合成産物の貯蔵器官であり、その生長は大気汚染などの環境変化の影響を受けやすいことから (Kostka-Rick and Manning, 1993)、本研究では地下部乾重量を生長に対するオゾン影響の指標とした。実験期間中のオゾン濃度は春季に高く、ついで秋季に高く、生長に対するオゾンの有意な影響が認められなかった夏季のそれは最も低かった (Table 4)。したがって、地下部の乾物生長に対するオゾンの影響が時期によって異なっていた原因の1つとして、オゾン濃度の違いが挙げられる。そこで、FA区に対するNF区の地下部乾重量の相対値 (%) を各実験で算出し (Table 5)、オゾン濃度との関係を調べた (Fig. 1)。しかしながら、両者の間に有意な相関は認められず、SUM06やDaylight AOT40などのオゾンドースとの関係においても有意な相関は認められなかった。この結果は、地下部の乾物生長に対するオゾンの影響が時期によって異なった原因は、オゾン濃度の違いだけでは説明できないことを示している。

ハツカダイコンの生長に対するオゾンの害作用の程度は、気温や湿度などの環境条件によって変化することが報告されている (伊豆田ら, 1988a; Izuta et al., 1991, 1993)。そこで、オゾンの害作用の程度を、単位オゾン濃度あたりの地下部乾重量の変化率 (% $ppbv^{-1}$) で評価し、各実験期間中の日平均気温および日平均相対湿度との関係を調べた (Fig. 2a, b)。その結果、平均気温や相対湿度が高いと単位オゾン濃度あたりの地下部乾重量の低下が著しいことが明らかになった。気象条件から考えると、ハツカダイコンの地下部の乾物生長におけるオゾン感受性は実験5、6、7といった夏季にもっとも高くなるが (Fig. 2a, b)、この時期のオゾン濃度が低かったことから (Table 4)、ハツカダイコンの乾物生長のオゾンによる有意な低下は認められなかったと考えられる。

一方、実験1、2のようにオゾン濃度が高かった春季であっても、気温や相対湿度が低い時期ではオゾン感受性が低く、ハツカダイコンの乾物生長のオゾンによる有意な低下は認められなかったと考えられる。これに対して平均気温が20℃を超え、平均相対湿度が60%を超えるような晩春や秋口(実験3、8、9)においてはハツカダイコンのオゾン感受性がやや高くなり、この時期にオゾン濃度が高くなったことから、ハツカダイコンの地下部の乾物生長のオゾンによる有意な低下が認められたと考えられる。これらの結果から、2015年の長崎のオゾン濃度は、気温および相対湿度が高い気象条件では、ハツカダイコンのようにオゾン感受性の高い植物に悪影響を及ぼすレベルであったと考えられる。

Izuta et al. (1993) は、本研究と同様の大気環境評価実験を東京都府中市で行なった結果、午前9時における気温の期間平均値が20℃を超えた実験では、オゾンドースの増加に伴ってハツカダイコンの生長が低下することを報告している。オゾンの害作用の程度を決める要因の一つとして、葉の気孔を介した積算オゾン吸収量があげられる (Musselman et al., 2006)。伊豆田ら (1988a) は、ハツカダイコンの生育気温が高いと、葉のオゾン吸収速度が高く、オゾン感受性が高くなることを報告している。したがって、本研究で気温の上昇に伴って単位オゾン濃度あたりの地下部乾重量の低下が著しくなった原因として、葉の気孔を介した積算オゾン吸収量の増加が考えられる。また、一般に植物の葉の気孔は乾燥条件では閉鎖することから (Larcher, 2003)、相対湿度の上昇に伴うオゾン感受性の増加も葉の気孔を介したオゾン吸収量の増加で説明できると考えられる。気温と相対湿度の間には有意な正の相関が認められたことから ($p < 0.05$)、いずれの環境要因がオゾン感受性の増加に寄与したかを特定することは難しいが、オゾン吸収量の増加がオゾン感受性の増加をもたらしたと考えられる。一方、気温や相対湿度とは異なり、平均PPFDの増加に伴ってハツカダイコンの地下部乾重量の低下は緩和され、オゾン感受性が低下した(Fig. 2c)。これに対して、異なる光強度で栽培したハツカダイコンの生長に対するオゾンの影響に関する研究では、強光条件で栽培したハツカダイコンのオゾン感受性が高くなることが報告されている (Izuta et al., 1991)。気孔は光によって開孔することから (Larcher, 2003)、積算オゾン吸収量が害作用の程度を決める要因と考えた場合、光強度の増加に伴ってオゾン感受性も高くなることが考えられる。Izuta et al. (1991) が報告した異なる光環境下におけるオゾン暴露実験は、気温と相対湿度が一定の条件で行われていた。本研究では野外に設置したOTC内で実験を行ったため、気温や相対湿度などの生育環境は制御されておらず、実験ごとに生育環境が異なるが、日平均PPFDと平均相対湿度の間に有意な負の相関が認められた。このことは、光強度が高いと気温が上昇し、相対湿度が低下した可能性を示している。したがって本評価実験では、光強度の増加に伴う間接的な相対湿度の低下によって気孔閉鎖が引き起こされ、気孔を介したオゾン吸収量が低下し、ハ

ツカダイコンの乾物生長におけるオゾン感受性が低くなったと考えられる。

5. ま と め

本研究では、越境大気汚染が顕著な長崎において、オゾンへの感受性が高いハツカダイコンの生長を指標としたオープントップチャンバー (OTC) 法により、オゾンの植物影響に着目した大気環境評価実験を2015年3月から10月にかけて行った。オゾン濃度は春季に最も高く、ついで秋季に高かった。そして、2015年5月中旬、9月および10月に実施した評価実験において、ハツカダイコンの地下部乾重量がオゾンによって有意に低下した。さらに、評価実験期間中の平均気温や平均相対湿度が高いと、ハツカダイコンの地下部乾重量のオゾンによる低下が著しいことが明らかになった。これらの結果から、越境大気汚染が顕著な長崎で観測されるオゾンは、気象条件次第では、ハツカダイコンのようなオゾンに弱い植物に悪影響を及ぼすレベルであることが明らかになった。

謝 辞

本研究で使用したオープントップチャンバーの作製に際しまして、電力中央研究所 河野吉久博士ならびに埼玉県環境科学国際センター 米倉哲志博士に多大なるご助言とご協力を賜りました。また、河野吉久博士には、本論文の執筆に際して大変貴重なご意見を賜りました。長崎県環境部環境政策課には長崎県小ヶ倉支所一般環境大気測定局における光化学オキシダント濃度のデータをご提供頂きました。査読委員の方々には本論文の改訂に際しまして大変貴重なご意見を賜りました。ここに感謝の意を表します。

引用文献

- 相原敬次, 武田麻由子: 可搬型オープントップチャンバー (OTC) の開発, *神奈川県環境科学センター研究報告*, **27**, 77-81 (2004).
- Akimoto, H., Mori, Y., Sasaki, K., Nakanishi, H., Ohizumi, T., Itano, Y.: Analysis of monitoring data of ground-level ozone in Japan for long-term trend during 1990-2010: Causes of temporal and spatial variation, *Atmos. Environ.*, **102**, 302-310 (2015).
- Emberson, L. D., Kitwiroon, N., Beevers, S., B ker, P., Cinderby, S.: Scorched earth: How will changes in the strength of the vegetation sink to ozone deposition affect human health and ecosystems? *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 6741-6755 (2013).
- Heagle, A. S., Body, D. E., Heck, W. W.: An open-top field chamber to assess the impact of air pollution on plants, *J. Environ. Qual.*, **2**, 365-368 (1973).
- 伊豆田 猛, 船田 周, 大橋 毅, 三宅 博, 戸塚 績: 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 (1988a).
- Izuta, T., Funada, S., Ohashi, T., Miyake, H., Totsuka, T.: Effects of low concentrations of ozone on the growth of radish plants under different light intensities, *Environ. Sci.*, **1**, 21-33 (1991).
- 伊豆田 猛, 松村秀幸: 植物保護のための対流圏オゾンのクリティカルレベル, 大気環境学会誌, **32**, A73-81 (1997).
- Izuta, T., Miyake, H., Totsuka, T.: Evaluation of air-polluted environment based on the growth of radish plants cultivated in small-sized open-top chambers, *Environ. Sci.*, **2**, 25-37 (1993).
- 伊豆田 猛, 滝川正義, 堀江勝年, 三宅 博, 戸塚 績: 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 (1988b).
- Kanaya, Y., Tanimoto, H., Yokouchi, Y., Taketani, F., Komazaki, Y., Irie, H., Takashima, H., Pan, X., Nozoe, S., Inomata, S.: Diagnosis of photochemical ozone production rates and limiting factors in continental outflow air masses reaching Fukue island, Japan: Ozone-control implications, *Aerosol Air Qual. Res.*, **16**, 430-441 (2016).
- Kärenlampi, L., Skärby, L. (eds.): UN-ECE Workshop Report: Critical Levels for Ozone in Europe: Testing and Finalizing the Concepts, University of Kuopio, Finland (1996).
- 河野吉久, 米倉哲志: 可搬型小型オープントップチャンバーシステムの開発, 大気環境学会誌, **47**, 186-193 (2012).
- Kostka-Rick, R., Manning, W. J.: Radish (*Raphanus sativus* L.): A model for studying plant responses to air pollutants and other environmental stresses, *Environ. Pollut.*, **82**, 107-138 (1993).
- Larcher, W.: The exchange of carbon dioxide and oxygen Physiological Plant Ecology, 4th ed, Larcher, W. ed., pp. 91-100, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (2003).
- Musselman, R. C., Lefohn, A. S., Massman, W. J., Heath, R. L.: A critical review and analysis of the use of exposure- and flux-based ozone indices for predicting vegetation effects, *Atmos. Environ.*, **40**, 1869-1888 (2006).
- 長崎県大気環境速報システム (Air Environment Early Warning System in Nagasaki) (2018), <http://nagasaki-taiki.aa0.netvolante.jp/> (2018. 4. 24アクセス)
- Nagashima, T., Sudo, K., Akimoto, H., Kurokawa, J., Ohara, T.: Long-term change in the source contribution to surface ozone over Japan, *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 8231-8246 (2017).
- Pleijel, H., Norberg, P. A., Selldén, G., Skärby, L.: Tropospheric ozone decreases biomass production in radish plants (*Raphanus sativus*) grown in rural south-west Sweden, *Environ. Pollut.*, **106**, 143-147 (1999).
- 渡辺 誠, 山口真弘, 伊豆田 猛: 大気環境と植物—第4講 樹木に対するオゾンの影響—, 大気環境学会誌, **51**, A67-A75 (2016).
- 米倉哲志: 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 (オゾン) の影響—, 大気環境学会誌, **51**, A57-66 (2016).

(受講日2018. 2. 21) (掲載日2018. 5. 25)

オープントップチャンバー法を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環境評価

中島 健太郎, 西 祐理子, 川田 彩香, 山口 真弘*

長崎大学環境科学部: 852-8521 長崎県長崎市文教町1-14

オゾンなどによる越境大気汚染が顕著な長崎において、オゾンへの感受性が高いとされるハツカダイコンの生長を指標とし、オープントップチャンバー (OTC) 法を用いてオゾンの植物影響に着目した大気環境評価実験を行った。長崎大学構内 (長崎県長崎市) に OTC を設置し、オゾン除去空気区と野外空気区 (大気中のオゾンを除去しない区) の 2 処理区を設けた。1.4 L ボットで生育したハツカダイコンの本葉展開開始時に処理を開始し、1 週間後にサンプリングを行って葉と葉柄 (地上部) および下胚軸と根 (地下部) の乾重量を測定した。この大気環境評価実験を 2015 年 3 月から 10 月にかけて計 9 回行った。いずれの実験においても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 月および 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。そこで、地下部乾重量のオゾンによる変化率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かった。一方、単位オゾン濃度あたりの地下部乾重量の変化率と各実験期間中の平均気温および平均相対湿度との間に有意な負の相関が認められ ($p < 0.05$ および $p < 0.033$)、気温や相対湿度が高いとハツカダイコンに対するオゾンの悪影響が発現しやすいことが示された。以上の結果から、越境大気汚染が顕著な長崎で観測されるオゾンは、気象条件次第では、ハツカダイコンのようなオゾン感受性の高い植物に悪影響を及ぼすことが明らかになった。