

ハツカダイコンの乾物生長における低濃度オゾン障害の 発現に対する温度及び光強度の影響

大 橋 毅 小 山 功 伊豆田 猛
(東京農工大学)

1 はじめに

光化学オキシダントの主成分であるオゾン (O_3) は、多くの国々の都市域における主要な大気汚染物質である。近年、作物の生長や収量に対する O_3 の影響が問題となってきた。一般に、比較的高濃度の O_3 に暴露された植物葉には可視被害が生ずる。この可視被害の程度は温度や光のような環境要因によって影響を受けることが報告されている。¹⁾²⁾³⁾ しかし、低濃度 O_3 の乾物生長障害を温度、光条件を変えて検討した報告はない。本研究では、 O_3 感受性が高いハツカダイコンを材料として、⁴⁾ 植物の乾物生長における低濃度 O_3 障害の発現に対する温度及び光強度の影響を生長解析法を用いて調べた。

2 実験方法

ハツカダイコン (*Raphanus sativus* L. cv. Comet) の種子を芽出し処理 (25°C, 48hrs) した後、園芸培土 (クレハ化学) を入れた 300ml のポットに約 5 個播種し、屋外型人工気象室で育成した。播種後 7 日目 (子葉展開期) に 1 ポット当り 2 個体に間引いた。

異なる温度条件での植物生長に対する O_3 の影響を調べるために人工気象室内の温度を 20/13°C、25/18°C 及び 30/23°C (6:00 ~ 18:00/18:00 ~ 6:00) の 3 条件に設定した。相対湿度は 70 ± 10% に制御した。播種後 11 日目に 10 ~ 15 個体をサンプリングし、初期生長とした。播種後 11 日目から 0.10 ± 0.01 ppm の O_3 を 1 日 4 時間 (10:00 ~ 14:00) ずつ 7 日間連続して暴露した。対照区では O_3 暴露をせず、その他の環境条件を同一として育成させた。播種後 11 ~ 17 日の 7 日間、対象区と O_3 暴露区において、遮光しなかった区 (全光条件) と黒寒冷紗によって遮光した区 (遮光率 75%) の 2 種類の光条件区を設定し、異なる光強度下におけるハツカダイコン

の乾物生長に対する O_3 の影響を調べた。 O_3 暴露期間中の各処理区の積算日射量を積算日射計 (サンシステム社) を用いて測定した。 O_3 暴露後 (播種後 18 日目)、各処理区の個体をサンプリングし、速やかに葉面積を測定した。その後、各個体を 80°C で 3 日間乾燥させ、植物器官別の乾重量を測定した。葉面積及び乾重量の測定結果より生長解析を行った。

3 結 果

表 1 に、各温度条件下における個体当たりの葉面積生長と乾物生長に対する O_3 の影響を示した。全光条件では、7 日間 (播種後 11 ~ 17 日目) の積算日射量が 3 種類の温度区の平均で 19.9 kW · h · m⁻² であった。対照区の個体の葉面積及び乾重量は、20/13°C 区及び 30/23°C 区に比べて 25/18°C 区において大きかった。いずれの温度区においても O_3 暴露により葉面積はそれぞれの対照区の値に比べて有意に減少した。特に 25/18°C 区や 30/23°C 区のような高温条件下においては O_3 暴露による葉面積の減少が著しく、それぞれの対照区の値に比べて約 20% 減少した。全光条件下における個体当たりの乾物生長について見ると、25/18°C 区及び 30/23°C における個体当たりの乾重量は、 O_3 暴露によりそれぞれの対照区の値に比べて約 30% 減少した。しかし、20/13°C 区においては個体当たりの乾物生長は O_3 暴露による影響を受けなかった。

遮光条件下では、7 日間 (播種後 11 ~ 17 日目) の積算日射量が 3 種類の温度区の平均で 5.1 kW · h · m⁻² であった。対照区の個体の葉面積及び乾重量は、20/13°C 区及び 25/18°C 区に比べて 30/23°C 区において小さかった。遮光条件下では、20/13°C 区と 25/18°C 区における O_3 暴露後の葉面積はそれぞれの対照区の値と有意な差はなかった。しかし、30/23°C 区では O_3 暴露によって

表1 個体当たりの葉面積 (TLA, cm²) 及び乾重量 (TDW, mg) に対する O₃ (0.1 ppm) の影響

CSR (±S. D.) (kW · h · m ⁻²)		20/13°C			25/18°C			30/23°C		
		C	O ₃	O ₃ /C	C	O ₃	O ₃ /C	C	O ₃	O ₃ /C
5.1 (±0.9)	TLA	63.9	67.1	1.05	67.9	71.1	1.05	45.5	35.3**	0.78
	TDW	188	193	1.03	182	181	0.99	140	127	0.91
19.9 (±2.1)	TLA	66.1	58.6*	0.89	116.4	89.4***	0.77	76.7	61.3***	0.80
	TDW	319	311	0.97	446	311***	0.70	346	246***	0.71

対照区の値からの有意差レベル (t-検定): *, P<0.05, **, p<0.01; ***, p<0.001

C: 対照区, O₃: O₃区, CSR: 播種後11日目から17日目までのO₃暴露期間中の積算日射量。各値は、10-15個体の平均値である。播種後11日目の初期値: TLA19.5cm², TDW81mg (20/13°C); TLA21.6cm², TDW 87mg (25/18°C); TLA22.8cm², TDW83mg (30/23°C)。

表2 各器官別の乾物重に対する O₃ (0.1 ppm) の影響

積算日射量 (±S. D.) (kW · h · m ⁻²)	乾物重 (mg)	20/13°C			25/18°C			30/23°C		
		C	O ₃	O ₃ /C	C	O ₃	O ₃ /C	C	O ₃	O ₃ /C
5.1 (±0.9)	葉	106	122*	1.15	104	111	1.07	83	77	0.93
	葉柄+下胚軸	61	59	0.97	54	49	0.91	43	38	0.88
	根	21	14*	0.67	24	21	0.88	14	12	0.86
19.9 (±2.1)	葉	181	166	0.92	227	183***	0.81	199	147***	0.74
	葉柄+下胚軸	103	113	1.10	186	103***	0.55	108	79**	0.73
	根	35	32	0.91	33	25	0.76	40	21***	0.53

対照区の値からの有意差レベル (t-検定): *, P<0.05, **, p<0.01; ***, p<0.001

C: 対照区, O₃: O₃区, 積算日射量: 播種後11日目から17日目までのO₃暴露期間中の積算日射量。各値は、10-15個体の平均値である。播種後11日目の初期値: L-DW 52mg, P+H-DW 17mg, R-DW 12mg (20/13°C); L-DW 55mg, P+H-DW 18mg, R-DW 15mg (25/18°C); L-DW 50mg, P+H-DW 21mg, R-DW 12mg (30/23°C)。

葉面積は対照区の値に比べて22%減少した。また、遮光条件下における個体当たりの乾物生長はいずれの温度区 (20/13°C, 25/18°C, 30/23°C) においても O₃暴露による影響は受けなかった。

表2は、乾物生長に対する O₃の影響を各植物器官別に表示したものである。全光条件下においては、25/18°C区や30/23°C区のような高温条件区において各植物器官の乾物生長が O₃暴露によって有意に減少した。25/18°C区においては、O₃暴露により葉及び葉柄+下胚軸の乾重量が対照区の値に比べて19%及び45%減少した。30/23°C区においては、葉、葉柄+下胚軸及び根の乾重量が対照区の値に比べて26%, 27%及び47%減少した。これに対して、20/13°C区においては、いずれの植物器官の

乾物生長も O₃暴露による影響は受けなかった。

遮光条件下では、20/13°C区において O₃暴露により葉乾重量が対照区の値に比べて15%増加した。しかし、根乾重量は対照区の値に比べて33%減少した。遮光条件下における25/18°C区及び30/23°C区の各植物器官の乾物生長は O₃暴露による影響をほとんど受けなかった。

表3に、各温度条件下において O₃暴露を行った個体の生長解析の結果を示した。個体当たりの乾物生長が O₃暴露によって有意に減少した全光条件について見ると、25/18°C区では個体当たりの乾物生長の相対生長率 (RGR) が O₃によって対照区の値に比べて22%減少した。この時、O₃区の純同化率 (NAR) も対照区の値に比べて26%減少したが、逆に葉面積比 (LAR) は

表3 相対成長率 (RGR), 純同化率 (NAR), 及び葉面積比 (LAR) に対する O_3 (0.1 ppm) の影響

CSR ($\pm S, D$) ($kW \cdot h \cdot m^{-2}$)		20/13°C			25/18°C			30/23°C		
		C	O_3	O_3/C	C	O_3	O_3/C	C	O_3	O_3/C
5.1 (± 0.9)	RGR	12.0	12.4	1.03	10.5	10.5	1.00	7.5	6.1	0.81
	NAR	4.1	4.2	1.02	3.4	3.2	0.94	2.5	2.2	0.88
	LAR	292.7	295.2	1.01	308.8	328.1	1.06	300.0	277.3	0.92
19.9 (± 2.1)	RGR	19.6	19.2	0.98	23.4	18.2	0.78	20.4	15.5	0.76
	NAR	8.9	9.3	1.04	9.1	6.7	0.74	8.5	6.0	0.71
	LAR	220.0	206.5	0.94	257.1	271.6	1.06	240.0	258.3	1.08

対照区の値からの有意差レベル (t-検定): *, $P < 0.05$, **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$

C: 対照区, O_3 : O_3 区, CSR: 播種後11日目から17日目までの O_3 暴露期間中における積算日射量,

RGR: $\% \cdot day^{-1}$, NAR: $10^{-4} g \cdot cm^{-2} \cdot day^{-1}$, LAR: $cm^2 \cdot g^{-1}$

6%増加した。同様に、30/23°C区においても、RGRが対照区の値に比べて24%減少した。この時、NARも29%減少したが、逆にLARは8%増加した。これに対して、全光条件下の20/13°C区では各生長パラメーター (RGR, NAR, LAR) における O_3 暴露の影響はほとんど見られなかった。また、遮光条件下では、いずれの温度区においても各生長パラメーター (RGR, NAR, LAR) に対する O_3 暴露の影響は小さかった。

4 考 察

ハツカダイコンの乾物生長における O_3 障害の発現は O_3 暴露時を含む生育期間中の温度条件によって影響を受けた (表1)。すなわち、25/18°C区や30/23°C区のような比較的高温条件下において乾物生長における O_3 障害の程度が大きくなった。これに対して、20/13°C区のような低温条件下においては O_3 暴露による乾物生長の低下が起こらなかった。Adedipe と Ormrod は、ハツカダイコン (品種 Cavalier と Cherry Belle) を20/15°Cと30/25°Cの2種類の温度条件下で生育させ、4葉期において0.25 ppmの O_3 を3時間暴露し乾物生長に対する影響を調べる。その結果、20/15°Cの温度条件でのみ O_3 による乾物生長の低下が起こったことを報告しており、本実験の結果とは異なっている。しかし、彼らの用いた品種は本実験で用いた品種 (Comet) とは異なり、彼らが指摘しているように品種によっても O_3 の影響の程度が異なるため一概には実験結果を比較できない。

生長解析の結果 (表3) より、25/18°C区及び30/23

°C区における O_3 暴露による生長低下は、純同化率 (NAR) の低下が原因であると考えられる。いくつかの植物のNARが O_3 暴露により低下することが報告されている⁶⁾⁷⁾。しかし、これらの報告では O_3 によるNARの低下の原因についてはほとんど考察されていない。NARは、以下の式によって表すことができる⁸⁾。

$$NAR = (p - r) - C / F \cdot rs$$

ただし、p: 単位葉面積当たりの総光合成速度

r: 単位葉面積当たりの呼吸速度

C: 非同化器官の乾重量

F: 個体当たりの葉面積

rs: 非同化器官の単位乾重量当たりの呼吸速度

C/F比を表1と表2から計算すると、全光条件下で25/18°C区の対照で1.88、 O_3 区で1.43となり、同様に30/23°C区では対照区で1.93、 O_3 区で1.63であった。つまり、 O_3 によって乾物生長が有意に減少した場合、 O_3 区のC/F比は対照区のそれよりむしろ小さかった。また、データは示していないが、25/18°C区で生育させたハツカダイコンの非同化器官の単位乾重量当たりの呼吸速度 (rs) は、7日間の O_3 暴露による影響を受けなかった。これらの結果は、 O_3 暴露によるNARの低下は、純光合成速度 (NARの式における $p - r$) の低下が主な原因であることを示唆している。

多くの研究者によって、純光合成速度に対する O_3 の影響が報告されている⁹⁾。しかし、従来の研究では一定の環境条件下における O_3 の影響を調べたのみであるため、異なる環境条件下における純光合成速度に対する O_3 の影響はほとんど明らかにされていない。伊豆田ら¹⁰⁾

は、ハツカダイコンの純光合成速度における O_3 障害の程度は $20^{\circ}C$ に比べて $25^{\circ}C$ 及び $30^{\circ}C$ のような比較的高温条件下において大きくなることを報告している。この原因として高温条件下において葉の O_3 吸収速度が大きくなることのみならず単位 O_3 吸収量当たりの純光合成阻害の程度が温度によって異なり、それが比較的高温条件下で大きくなることを報告している。したがって、ハツカダイコンの乾物生長における低濃度 O_3 の影響が温度によって異なる原因としては、 O_3 による純光合成阻害の程度が生育温度によって異なることが考えられる。

本実験において、 O_3 暴露期間中の光強度は、ハツカダイコンの乾物成長における O_3 障害の程度に影響を与えることが示された(表1)。すなわち、遮光条件下では全光条件下に比べて乾物生長における O_3 障害の程度が小さくなった。この原因としては、純光合成における O_3 障害の程度が O_3 暴露中及び暴露後の光強度によって異なることが考えられる。この点に関しては、さらに詳細な研究を行う必要があると考えられる。

本実験の結果より、植物の乾物生長における O_3 障害の発現は温度や光のような環境要因によって影響を受けることが明らかになった。このため、植物の生長における O_3 の影響を評価する場合は O_3 濃度のみならず、他の環境要因をも考慮する必要があると考えられる。

本研究を行うにあたり、多大な御助力を賜った東京農工大学・農学部・環境保護学科・大気環境学研究室の方々、特に松村秀幸氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Heck, W.W., Dunning, J.A. : The effects of ozone on tobacco and pinto bean as conditioned by several ecological factors, J. Air Pollut. Control Assoc., 17 (2), 112-114 (1967).
- 2) Dunning J.A., Heck, W.W. : Response of bean and tobacco to ozone. Effect of light intensity temperature and relative humidity, J. Air Pollut. Control Assoc., 27 (9), 882-886 (1977).
- 3) Heck, W.W. et al. : Interactions of environmental factors on the sensitivity of plants to air pollution, J. Air Pollut. Control Assoc., 15 (11), 511-515 (1965).
- 4) Tingey, D.T. et al. : Effects of low concentration of ozone and sulfur dioxide on foliage, growth and yield of radish, J. Amer. Soc. Hort. Sci., 96 (3), 369-371 (1971).
- 5) Adedipe, N.O., Ormrod, D.P. : Ozone-induced growth suppression in radish plants in relation to pre- and post-fumigation temperatures, Z. Pflanzenphysiol., 71, 281-287 (1974).
- 6) Oshima, R.J., Braegelmann, P.K., Flagler, R.B., Teso, R.R. : The effects of ozone on the growth, yield, and partitioning of dry matter in cotton, J. Environ. Qual., 8 (4), 474-479 (1979).
- 7) Horsman, D.C. et al. : Growth responses of *Dactylis glomerata*, *Lolium perenne* and *Phalaris aquatica* to chronic ozone exposure, Aust. J. Plant Physiol., 7, 511-517 (1980).
- 8) Iwaki, H. : The influence of density on the dry matter production of *Fagopyrum esculentum*, Jpn. J. Bot., 16 (2), 210-226 (1958).
- 9) Reich, P.B. et al. : Response of soybean to low concentrations of ozone : I. Reductions in leaf and whole plant net photosynthesis and chlorophyll content, J. Environ. Qual., 15 (1), 31-36 (1986).
- 10) 伊豆田 猛ら : 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, 第23巻 第4号, (1988).