

論文

ペチュニア、インゲンマメ及びハツカダイコンの生長におよぼすPANの影響

大橋 毅 松村 秀幸
(東京農工大学)

要 旨

光化学オキシダント中のPANが植物の生長に与える影響を明らかにすることを目的として、自然光型ファイトトン内で、野外濃度レベルの低濃度PAN (10,30,60ppb) を1日4時間の割合で7日の内3回暴露し、ペチュニア、インゲンマメ及びハツカダイコンの生長反応を生長解析法によって調べた。さらに、PANに暴露された植物の生長低下の原因を探るため、3種植物の中で最もPAN感受性が高かったペチュニアについて、その純光合成速度及びCO₂拡散抵抗をPAN暴露後に数段階の光強度の下で測定した。その結果、ペチュニアやインゲンマメの個体乾重量が30あるいは60ppbのPANによって低下することが明らかになり、その原因が純光合成速度の低下であることが示唆された。さらに、純光合成速度の低下の原因としてPAN暴露による葉内組織におけるCO₂固定能の低下が考えられた。

1 はじめに

パーオキシアセチルナイトレート (PAN) は、オゾン (O₃) に次いで光化学オキシダントとして大気中に多く存在する汚染物質である。O₃は植物の生長・収量を低下させることが報告されている¹⁾²⁾³⁾。しかし、PANの植物生長への影響はほとんど明らかにされていない⁴⁾⁵⁾。

大気中のPANの濃度を測定した例が国内外で報告されている。Lennonmanらは、1968年にロサンゼルスで65.5ppbのPANが出現したことを報告している。一方、我が国では、泉川らが1973年に東京で31.2ppbを観測している。さらに、早福ら⁹⁾は、東京都心の大気中のPANを1976年から9年間にわたって測定し、10ppb以上のPANが毎年出現していることを報告している。

そこで、本研究では、可視障害を指標としたPAN感受性の異なるペチュニア、インゲンマメ及びハツカダイコンの3種の植物に、自然光型のファイトトン内で10、30又は60ppbのPANを暴露し、それらの生長反応を生長解析法によって調べた。さらに、PANに暴露された植物の生長低下の原因を探るため、本研究で用いた植物の中で最もPAN感受性が高かったペチュニアの純光合成速度及び二酸化炭素 (CO₂) に対する拡散抵抗を、PAN暴露後に数段階の光強度の下で測定した。

2 材料と方法

(1) 植物材料

植物材料として、可視障害を指標としたPAN感受性の異なるペチュニア (*Petunia hybrida* vilm. cv. white Champion: 高感受性)、インゲンマメ (*Phaseolus Vulgaris* L. cv. Honkintoki: 中感受性) 及びハツカダイコン (*Raphanus sativus* L. cv. Comet: 抵抗性) の3種を用いた¹⁰⁾¹¹⁾。

インゲンマメとハツカダイコンは、種子を25℃の暗所で2日間芽出した後、園芸培土 (呉羽化学) を入れた300mlのプラスチックポットに播種した。ペチュニアは、芽出しをせずに直接同様の培土に播種した。播種後、各植物は温度25℃/18℃ (日中/夜間)、相対湿度70%に設定した自然光型人工気象室内で生育させた。インゲンマメとハツカダイコンは播種後5日目にポット当たり2個体に、またペチュニアは播種後14日目にポット当たり1個体に間引きした。

(2) 生長実験

インゲンマメとハツカダイコンは播種後11日目に、ペチュニアは播種後31日目にサンプリングし、葉面積を測定後、80℃で2日間乾燥させ、乾重量を測定した。

PANの合成、人工気象室内への導入及びPANの濃度

測定は前報と同様の方法で行った。¹¹⁾

ペチュニアは播種後31日目から、インゲンマメとハツカダイコンは播種後11日目から、7日間を暴露期間として、その期間中に10, 30又は60ppbのPANを、1日あたり4時間(10:00~14:00)、3回(暴露期間中1, 3, 5日目)暴露した。

PAN暴露期間終了日の翌日、各処理区の植物をサンプリングし、葉面積を測定後、80℃で2日間乾燥させ、器官別の乾重量を測定した。PAN暴露期間の初日と終了日の翌日における葉面積と乾重量の測定結果から、PAN暴露期間中7日間における各植物の生長解析を行った。

(3) ガス交換速度の測定

30ppb又は60ppbのPAN暴露期間終了後、ペチュニアの個体をポットごと同化箱(直径25cm, 高さ25cm)内に収容し、純光合成速度と蒸散速度を測定した。ポットは土からの水の蒸発とCO₂の放出を防ぐためビニールで覆った。

葉温は、銅-コンスタンタン熱電対を主茎に着生する下位から第10番目の葉裏面にテープで接着して測定した。植物の葉温を25±1℃に、同化箱に入る空気の相対湿度を45±5%に制御し、ガス交換速度を測定した。同化箱

に入れる空気は活性炭フィルターを通し、10ℓ・min⁻¹の流量に調節した。同化箱内の空気を直径50mmのファンで攪拌した。なお、同化箱に入る空気のCO₂濃度は360±20ppmであった。光-光合成曲線を作成するために、ガス交換測定時の同化箱内の葉面における光強度を7段階に変化させた。光源として陽光ランプ(400W)1灯と白熱灯(500W)5灯を使用し、同化箱上に設置した流水フィルターによって熱線を吸収させた。植物を入れた同化箱と植物を入れない同化箱のCO₂濃度を赤外線ガス分析装置(堀場製作所 H31082-01)で、また気温と相対湿度を温度湿度計(エース研究所 YH-33R)を用いて測定し、この二つの同化箱のCO₂濃度差及び湿度差から純光合成速度及び蒸散速度をそれぞれ算出した。ガス交換速度測定終了後、速やかに葉面積を測定した。蒸散速度と葉温の測定結果よりCO₂に対する拡散抵抗(葉面境界層抵抗+気孔抵抗)及び葉肉抵抗をGaastra¹²⁾の方法によって算出した。本研究では、同化箱への通気量及び同化箱内の空気の攪拌が十分であるため、CO₂の葉面境界層抵抗は小さく、したがって葉内へのCO₂拡散はほぼ気孔抵抗の変化に依存すると考えた。

表1 個体葉面積及び個体乾重量に及ぼすPANの影響

		ペチュニア		インゲンマメ		ハツカダイコン	
		個体葉面積 (cm ²)	個体乾重量 (mg)	個体葉面積 (cm ²)	個体乾重量 (mg)	個体葉面積 (cm ²)	個体乾重量 (mg)
10ppb	Control	278.6	1105	239.5	1220	98.2	339
	PAN	272.3	1073	235.1	1319 *	106.2	384 **
	P/C(%)	98	97	98	108	108	113
30ppb	Control	212.0	775	325.5	1617	129.0	501
	PAN	130.3 ***	472 ***	248.2 ***	1503	119.4	570 *
	P/C(%)	61	61	76	93	93	114
60ppb	Control	282.8	1162	321.2	1521	126.0	423
	PAN	126.8 ***	610 ***	253.4 ***	1299 *	120.5	434
	P/C(%)	45	53	79	85	96	103

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.

Control: 対照区、PAN: PAN暴露区、P/C: 対照区に対するPAN暴露区の相対値

各値は10~15個体の平均値。PAN暴露期間中の積算日射量: 8.0±0.5MJ・m⁻²・day⁻¹

PAN暴露期間初日の値(個体葉面積-TLA, cm²; 個体乾重量-TDW, mg):

10ppb/ペチュニア: TLA-64.24, TDW-212.1. インゲンマメ: TLA-81.63, TDW-495.9
ハツカダイコン: TLA-17.47, TDW-55.7

30ppb/ペチュニア: TLA-59.20, TDW-168.4. インゲンマメ: TLA-118.86, TDW-665.5
ハツカダイコン: TLA-40.77, TDW-136.3

60ppb/ペチュニア: TLA-77.69, TDW-296.3. インゲンマメ: TLA-116.74, TDW-682.3
ハツカダイコン: TLA-51.31, TDW-172.6

3 結 果

表1に各処理区の個体葉面積及び個体乾重量におよぼすPANの影響を示した。ペチュニアの葉面積及び個体乾重量は30及び60ppbのPAN暴露によって減少した。インゲンマメの葉面積は30ppbのPAN暴露によって減少し、さらに60ppbのPAN暴露によって葉面積及び個体乾重量が減少した。一方、ハツカダイコンの個体乾重量は10及び30ppbのPAN暴露によってむしろ増加した。

表2に各植物の生長パラメーターにおよぼすPAN暴露の影響を示した。ペチュニアの個体乾物生長の相対生長率(RGR)と純同化率(NAR)は、30及び60ppbのPAN暴露によって低下した。同様に、インゲンマメのRGRとNARは60ppbのPAN暴露によって低下した。これに対して、ハツカダイコンのRGRとNARは10及び30ppbのPAN暴露によって増加した。なお、いずれの植物においても葉面積比(LAR)におよぼすPANの影響はRGRとNARの場合に比べて小さかった。

図1にPAN暴露期間終了時におけるペチュニアの光一光合成曲線を示した。30及び60ppbのPAN暴露によって、ペチュニアの純光合成速度は各光強度下において低下した。

図2に60ppbのPAN暴露期間終了時におけるペチュニアのCO₂拡散抵抗を示した。気孔抵抗はいずれの光強度下においてもPAN暴露の影響を受けなかった。これに対して、葉肉抵抗は60ppbのPAN暴露によって210 μmol・m⁻²・s⁻¹以上の光強度下において増加した。

表2 PAN暴露期間中の乾物生長の相対生長率(RGR)、純同化率(NAR)、葉面積比(LAR)に及ぼすPANの影響

		ペチュニア			インゲンマメ			ハツカダイコン		
		RGR	NAR	LAR	RGR	NAR	LAR	RGR	NAR	LAR
10ppb	Control	23.40	0.866	0.271	12.79	0.704	0.183	25.69	0.865	0.298
	PAN	23.07	0.852	0.271	13.92	0.810	0.172	27.54	0.957	0.289
	P/C(%)	99	98	100	109	115	94	107	111	97
30ppb	Control	21.74	0.723	0.302	12.53	0.659	0.192	18.45	0.677	0.274
	PAN	14.64	0.479	0.306	11.45	0.676	0.172	20.35	0.885	0.240
	P/C(%)	67	66	101	91	103	89	110	131	88
60ppb	Control	19.33	0.773	0.252	11.33	0.591	0.193	12.75	0.430	0.298
	PAN	9.81	0.434	0.234	9.02	0.492	0.185	13.07	0.459	0.286
	P/C(%)	51	56	93	80	83	95	103	107	96

Control: 対照区、PAN: PAN暴露区、P/C: 対照区に対するPAN暴露区の相対値
 PAN暴露期間中の積算日射量: 8.0±0.5MJ・m⁻²・day⁻¹
 RGR: %・day⁻¹、NAR: mg・cm⁻²・day⁻¹、LAR: cm²・mg⁻¹。

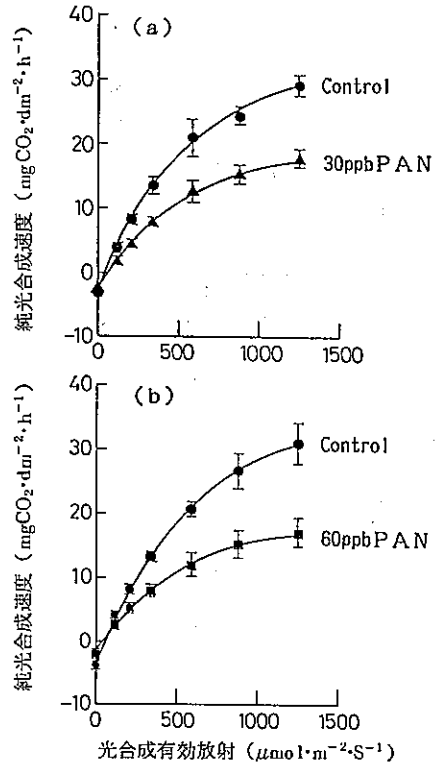


図1 PAN暴露期間終了時におけるペチュニアの光一光合成曲線

(a) 30ppb PAN暴露、(b) 60ppb PAN暴露
 図中のシンボルおよび縦棒は4個体の平均値と標準偏差

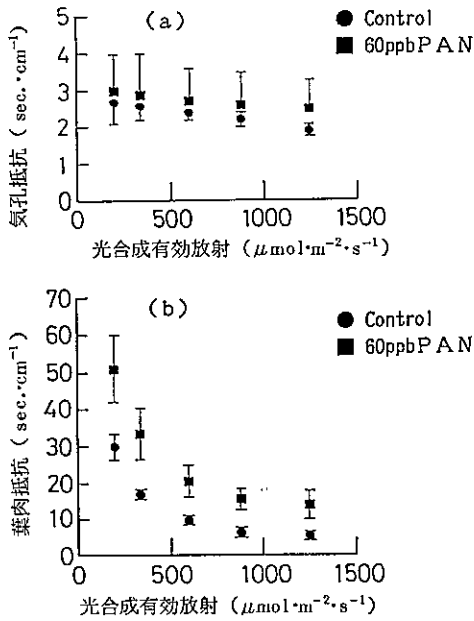


図2 60ppb PAN暴露期間終了時におけるペチュニアのCO₂拡散抵抗
(a) 気孔抵抗, (b) 葉肉抵抗
図中のシンボルおよび縦棒は4個体の平均値と標準偏差

なお、30ppbの場合も同様の結果であった。

4 考 察

植物の生長・収量におよぼすPANの影響はトマト⁴⁾、ネーブルオレンジについて調べた⁵⁾2報以外に報告はない。これらの報告では、異なる生育ステージあるいは品種でPAN暴露実験を行っているが、乾物生長におけるPAN感受性の種間差異や生長低下の原因についてはほとんど検討されていない。そこで本研究では、可視障害を指標としたPAN感受性の異なるペチュニア、インゲンマメ、ハッカダイコンの3種の植物に10、30又は60ppbのPANを暴露し、それらの生長影響を調べた。その結果、ペチュニアの個体乾重量は30ppb及び60ppb、インゲンマメの個体乾重量は30ppbのPAN暴露によって減少したが、ハッカダイコンではPANによる生長阻害はみられなかった表1。この乾物生長を指標としたペチュニア>インゲンマメ>ハッカダイコンのPAN感受性の順位は、可視

障害を指標としたPAN感受性の順位と一致していた。しかし、ペチュニアでは10ppbのPAN暴露によって可視障害が発現したが、個体乾重量には影響がなかった。この結果は、乾物生長における被害発現の閾値濃度は可視障害におけるものに比べて高いことを示している。

ペチュニアとインゲンマメの個体乾重量がPAN暴露によって減少した場合、純同化率(NAR)もPAN暴露によって低下した表2。この結果は乾物生産効率がPANの暴露によって低下したことを示唆している。¹³⁾NARは以下の式によって表すことができる。

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

ただし、p : 単位葉面積あたりの光合成速度、

r : 単位葉面積あたりの呼吸速度、

C : 非同化器官の乾重量、

F : 個体葉面積、

rs : 非同化器官の単位乾重量あたりの呼吸速度

純同化率(NAR)の一要素であるC/FはPAN暴露による影響をほとんど受けなかった。したがって、PAN暴露によるNAR低下の原因として、純光合成速度(NARの式におけるp-r)の低下が考えられる。

植物の光合成速度におよぼすPANの影響は生長に対する影響同様にほとんど明らかにされていない。^{14) 15)}しかし、野内は、ペチュニア(品種ホワイトエンサイン)に150ppbのPANを、また、インゲンマメ(品種銀手亡)に95ppbのPANをそれぞれ暴露した結果、純光合成速度が暴露前の値に比べて低下したことを報告している。本研究でも、ペチュニア(品種ホワイトチャンピオン)の純光合成速度は30及び60ppbのPAN暴露によって低下した図1。これらの結果は、本研究におけるPAN暴露によるペチュニアの乾物生長の低下は純光合成速度の低下が原因であることを示唆している。

光合成によって生じる大気から葉内へのCO₂の拡散は葉の内外のCO₂濃度の差によって生じ、その過程においては葉面境界層、気孔及び葉肉組織におけるCO₂拡散抵抗によって律速される。¹⁶⁾本研究ではPAN暴露後のペチュニアの葉肉抵抗は対照区に比べて増加したが、CO₂拡散抵抗(葉面境界層抵抗+気孔抵抗)はPAN暴露による影響を受けなかった図2。したがって、PANが植物の純光合成速度を阻害した原因としては気孔閉鎖による葉内へのCO₂の取り込みの阻害ではなく、葉肉組織にお

るCO₂固定能の低下が考えられる。

本研究ではハツカダイコンの乾重量が10ppbあるいは30ppbのPAN暴露によって促進した表1。またこのときNARがPAN暴露によって上昇した表2。これらの結果は植物の乾物生産効率がPANによって上昇したことを示唆している。光化学オキシダントであるO₃が低濃度で、植物の生長を促進することがいくつか報告されている。^{17) 18)}PANが光合成を促進させたという報告はないが、60ppbのO₃をハツカダイコンに暴露した結果、純光合成速度が増加したことをAtkinsonら(1)は報告しており、本研究でも比較的低濃度のPAN暴露によってハツカダイコンの光合成速度が増加したことが考えられる。しかし、O₃あるいはPANが植物の生長や光合成速度を促進させるメカニズムは明らかではなく、今後の課題である。

本研究の結果より、ペチュニアやインゲンマメのような感受性の高い植物が、実際に野外で観察されている程度の濃度のPANによって生長が阻害されることが明らかとなった。また、その生長阻害の原因として純光合成速度の低下の原因として、PAN暴露による葉肉組織におけるCO₂固定能の低下が考えられた。

したがって、今後さらに、多くの植物に対する低濃度PANの影響評価あるいはその被害発現メカニズム解明への研究が必要である。また、PANによって引き起こされる葉の可視障害の程度は、光や温度などの環境要因によって変化することが報告されている。^{19) 20)}環境が刻々と変化する野外において植物のPAN被害の状況を把握するためには、PAN濃度のみならず、これらの環境要因をも考慮に入れる必要がある。さらに大気中のPAN濃度を常時監視できるシステムが我が国のみならず他の国々でも必要であると思われる。

参 考 文 献

- 1) Atkinson, C.J., et al. : The relationship between changes in photosynthesis and growth for radish plants fumigated with SO₂ and O₃, *New Phytol.*, 110, p.173-184(1988).
- 2) Heck, W.W., et al. : A reassessment of crop loss from ozone., *Environ.Sci.Tech.* 17, 572A-581A(1983).
- 3) Reich, P.B., et al. : Effects of ozone and acid rain on white pine (*Pinus strobus*) seedlings grown in five soils. I. net photosynthesis and growth., *Can.J.Bot.*, 65, p.977-987 (1987).
- 4) Temple, P.J. & O.C. Taylor. : Combined effects of peroxyacetyl nitrate and ozone on growth of four tomato cultivars., *J.Environ.Qual.*, 14, p.420-424 (1985).
- 5) Thompson, C.R., & G. Katz : Effects of ambient concentrations of peroxyacetyl nitrate on navel orange trees., *Environ.Sci.Tech.*, 9, p.35-38 (1975).
- 6) Temple, P.J., & O.C. Taylor. : World-wide ambient measurements of peroxyacetyl nitrate (PAN) and implications for plant injury., *Atmos. Environ.*, 17, p.1583-1587 (1983).
- 7) Lonneman, W.A., et al. : PAN and oxidant measurements in ambient atmospheres., *Environ.Sci.Tech.* 10, p.374-380 (1976).
- 8) 泉川碩雄ら：窒素酸化物、炭化水素とPANの関係、東京スモッグ生成機序・植物被害に関する調査研究報告(東京スモッグに関する調査研究第3報)、東京都公害研究所, p.323-334 (1973).
- 9) 早福正孝・宇田川満：9年間のPAN連続測定結果—1976~1985—、東京都環境科学研究所年報1988 p.50-53.
- 10) 野内 勇ら：光化学オキシダントに対する農作物及び園芸作物の相対的感受性比較、大気汚染学会誌, 23, p.335-370 (1988).
- 11) 大橋 毅ら：屋外型人工気象室によるペチュニアのPAN暴露、東京都環境科学研究所年報1989, p.89-91.
- 12) Gaastra, P. : Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature, and stomatal diffusion resistance., *Meded. Landbouwhogeschool Wageningen.*, 59, p.1-68 (1959).
- 13) Iwaki, H. : The influence of density on the dry matter production of *Fagopyrum glomerata*., *Jpn.J. Bot.*, 16, p.210-226 (1958).
- 14) Dugger, W.M., et al. : Effects of peroxyacetyl nitrate on ¹⁴CO₂ fixation by spinach chloroplasts and pinto bean plants., *Plant physiol.*, 38, p.468-472 (1963).

- 15) 野内 勇：植物の光合成及び葉成分へのオゾンとPANの影響，東京都公害研究所年報1983, p.122-138.
- 16) 矢吹萬壽：大気と葉のCO₂交換，植物の動的環境，朝倉書店, p. 5-83 (1985).
- 17) Bennete, J.P., et al. : Apparent stimulations of plant growth by air pollutants., *Can.J. Bot.*, 52, p.35-41 (1974).
- 18) Heagle, A.S., : Effects of ozone on yield of sweet corn., *Phytopathology*, 62, p.683-687 (1972).
- 19) 真弓洋一・山添文男：植物におよぼす光化学大気汚染の影響の解析，農業技術研究所報告B, 35, p.1-71 (1983).
- 20) Taylor, O.C., et al. : Acceptable limits for air pollutant dosage and vegetation effects : Peroxyacetyl nitrate., 67th.Air Pollut.Control Assoc.Annual Meeting, p.74-227 (1974).