

F A C 利用による光化学オキシダントの 植物被害解析

(光化学オキシダントの指標植物に関する研究 第1報)

寺 門 和 也 ・ 久 野 春 子

Analysis of Photochemical Oxidant Injury to Plants
Using Filtered Air Chamber
(Studies on Indicator Plants for Photochemical Oxidant I)

Kazuya TERAKADO, Haruko KUNO

Summary

In order to investigate photochemical oxidants injury of plants, 99 varieties, 45 species and 22 families were grown in Filtered Air Chamber (F.A.C) and non-Filtered Air Chamber (n-F.A.C). In filtered air, about 90% of the ambient photochemical oxidants were excluded.

1. Photochemical oxidants injury of plants were investigated on 89 varieties, 43 species and 20 families.
2. Symptoms of plant injury were classified according to visible injury into large two group, Ozone type injury and PAN (peroxyacetyl nitrate) type injury. The former was occurred on the upper surface of matured leaves with white and brown necrotic flecks, the latter was occurred on the lower surface of expanded young leaves with the glazing, bronzing or silvering colored necrotic lesions.
3. Sensitive plants of Ozone type injury were occurred to maximum ozone concentrations above 8 ppbm, similarly PAN type injury were occurred to maximum PAN concentrations above 2 ppb in n-F.A.C.

I 緒 言

1970年7月 東京・杉並区の高校生が突然目の痛み・呼吸困難・手足のしびれを訴え、45名の生徒が都内6ヶ所の病院に収容された。そして、その夕方警察、消防、保健所、都公害局等関係者による調査の結果「その原因は光化学スモッグによるものであり、光化学反応で生成されたものはオキシダント以外に硫酸ミスト生成の疑いがある。」との公式見解が発表された。¹⁾

従来、大気汚染と言えば亜硫酸ガスを中心として一酸化炭素、粉じん等固定的な発生源によるものと思われており光化学反応により生成、濃縮される光化学オキシダントのようないわゆる第2次汚染質についての認識はきわめて弱かった。

これら光化学オキシダントについての調査研究は以前

から主にアメリカで進められており、すでに1950年代²⁾にはその基礎的な発生機構が究明されたと言われている。

一方我が国における光化学オキシダントによる植物被害として最初に問題となったのはタバコの生理的斑点病^{3~6)}と言われ、国沢ら⁷⁾の詳細な報告によれば、すでに1965年頃から大阪、岡山、高松地方を中心として香喫味原料主産地に多発し、1967~69年には全国的に発生したとしている。大平ら⁸⁾は1970年の人体被害発生隣接地のケヤキの異状落葉に注目し、沢田ら⁹⁾はツマミナに発生した被害調査から類似被害がネギ、コマツナ、ホウレンソウ等にも見られたと報告し、光化学オキシダントが植物に大きな被害をあたえている事が推測されるようになった。

一方我々がおこなった東京都全域にわたる調査の結果でも被害は予想以上に広域にわたり、種類や地域により

大きく異なる等、複雑な様相を呈しており光化学オキシダントによる各種植物被害の立証が急がれるようになった。同時に被害発生の特徴や光化学オキシダント発生条件（オキシダント濃度最高値、累積値、発生延時間等）と植物被害との関係、そしてこれらの関係が大気汚染に対する有効な指標になり得る事から「大気汚染に対する指標植物群の開発とその実用化」^{9,10}が要請される事となった。

松中¹⁰は大気環境の認識手法として科学性、簡易性等8項目をあげ、指標生物法の利点、欠点を整理している。我々は特に計器測定では感知し、納得し得ないものが生物指標を通してはじめて認識し得る点に期待し、植物被害の大きさ（生長抑制、落葉、枯死、収穫量等）を日常生活の中で誰もが把えられるような視点を重視して検討を進めてきた。ここではそれらの結果を順次報告し、関係各位の御批判、御意見を賜われば幸である。

本文に先立ち、フィルタード・エアーチャンバー（以下FACと略す）建設に当たり千葉県農業試験場公害研究室白鳥孝治氏（前室長）、同松岡義浩氏（現室長）、東京都公害研究所前大気部長大平俊男氏からそれぞれ貴重な示唆と助言を賜わった。また本研究遂行に当り、当场前場長本橋精一氏、同栽培部長芦川孝三郎氏、同副理事研究員鶴島久男氏、同主任研究員飯嶋勉氏、同鈴木熊吉氏より終始適切な指導、援助、協力をいただいた。記して深甚の謝意を表する。

II 材料および方法

1. FACの機能と効果について

大気汚染による植物被害の立証手法としては主な原因物質である汚染質を人工的に暴露させ、その結果と野外における植物被害症状との比較から因果関係を立証する方法—単体汚染質暴露実験法—が最も一般的である。この方法は限定された条件下ではあるが特定の汚染質に対する反応を速やかに把握できる点ですぐれている。そして被害を立証する他に、生理的、生化学的手法等と容易に組み合わせる事ができ実験を効率的に進められる。反面、あらかじめ限定された環境条件下であるため、野外における植物被害との接合性の点で問題がなくもない。

一方野外に最も近い環境条件のもとで、汚染質を除去した大気を導入するガラス室（浄化空気室）と、外の大気をそのまま取り入れるガラス室（非浄化空気室）を設置し、両室で栽培される植物被害の有無、強弱と常時測定されている汚染空気の動向とから被害の因果関係を立証する方法—環境暴露実験法¹⁹—がある。これは野

外の環境条件とほぼ同じであるため野外における植物被害との接合性は高い。さらに長期間にわたる光化学オキシダントによる累積害—例えば生長量、収量にあたえる影響解析等を行なうにすぐれている。しかし暴露実験が汚染空気の動向に左右されているため計画的な実験が進めにくいく。

以上の二手法の内、主に後者の方法を取り入れ、不十分な場合には前者を併用させながら実験を進めた。

1) FACの規模および構造

FACの本体は普通のアルミ鉄骨製ガラス室を一部改良したものでその平面図を図1に示した。調査測定室（各種大気汚染質等の自動測定器類収容）をはさんで西側に浄化空気室—Filtered air chamber—東側に非浄化空気室—Non filtered air chamber—を配置した。両室の室内面積は $5\text{m} \times 20\text{m}$ ($5\text{m} \times 5\text{m}$ —2室, $5\text{m} \times 10\text{m}$ —1室 合計 100m^2)である。各室とも南側に外気の吸込口（室内面積 $5 \times 5\text{m} = 25\text{m}^2$ 当り $90\text{cm} \times 180\text{cm}$ の吸込口を2個）を、北側に吹き出し口（同面積当り $90\text{cm} \times 420\text{cm}$ の吹き出し口を1個）を設けた。浄化空気室はその両方に、また非浄化空気室は吹き出し口のみにそれぞれシロッコファン型の送風器を設置した（図2,3）。吸込口、吹き出し口には風量、風流調整用のダンパー（手動）を取りつけ任意に換気量を調整できるようにした。また非浄化空気室の吸込口外側に南風の影響をなくすために風防板を、内側に寒冷紗を取りつけた。

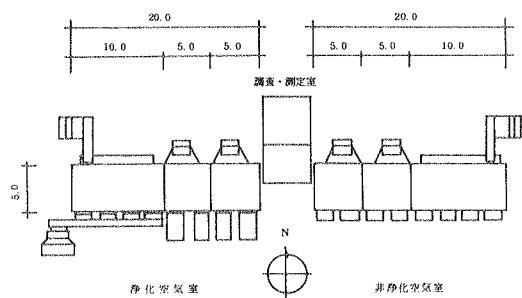


図1. FAC平面図

2) 汚染質の浄化効果

浄化空気室吸込口にはアルミフィルター、フィレドンフィルター、活性炭フィルター、の三種類を取りつけ大気汚染質を除去した。浄化効果を上げるために、浄化風量

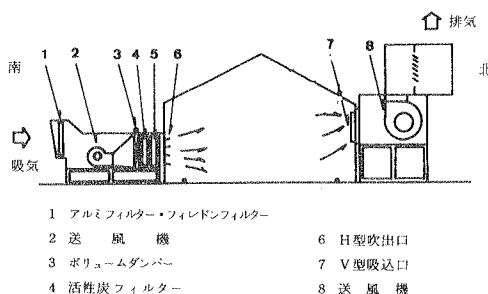


図2. 凈化空気室断面図

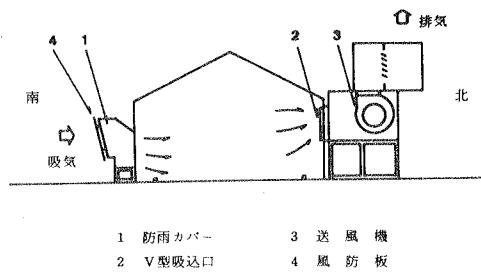


図3. 非浄化空気室断面図

当りのフィルター容積比を考慮し、ひとつの吸込口に、タテ50cm、ヨコ50cm、厚さ2cmのアルミフィルター、フィドレンフィルター各7枚をすえつけた。また活性炭フィルターは同吸込み口当り20kg(6~10メッシュ、室内面積、5m×5m当り40kg)を使用し、孔げき幅1cmの波状型フィルター容器に充填した。

この淨化効果を表1に示した。つまり光化学オキシダントの主成分であるオゾン(O₃)、パーオキシアセチルナイトレート(以下PANと略す)は90%以上の淨化効果を示した。一方二酸化イオウ(SO₂)、二酸化窒素(NO₂)の除去率は50~70%にとどまった。そして一酸化窒素の除去率はさらに低い状況であった。

¹¹⁾ 松岡¹²⁾は水稻に対する二酸化イオウ0.1ppm処理でわざかに光合成阻害が起こるとし、松島等¹³⁾もキンモクセイに対する0.1ppm60時間処理で同じく光合成阻害を認めている。さらに低濃度の影響として谷山¹⁴⁾はハダカムギ・ナタネ・ホソアオゲイトウ等は0.02~0.03ppm処理で光合成阻害が起こるとし植物保護の立場からその限界値を0.02ppmとしている。当場FAC非浄化空気室で記録されたこれまでの最高濃度は0.03ppm前後(特に11~

3月が高くなり、光化学オキシダント発生期には0.01ppm以下)で淨化効果から推計すると、0.02ppm以下となり、淨化室としての条件を十分に満たしていると判断された。また、非浄化空気室も不可視害としての影響が予想されるもののきわめて小さいものと思われる。

一方二酸化窒素による植物影響は二酸化イオウに比べ毒は一般的に低いと言われているが、0.3ppmでトマト¹⁴⁾の生育が抑制されたとする報告もある。いずれにしても淨化空気室の最高濃度はそれの10分の1以下であり、植物影響としては無視されるものと判断した。また非浄化空気室の場合も、最高濃度が0.04ppm以下であり野外も含めて一酸化窒素による影響はきわめて小さいものと思われる。

以上の事から当場のFACを利用した植物被害の立証や解析等を行う場合の主要な対象汚染質はオゾン、PAN等いわゆる光化学オキシダントに限定されるものと判断される。

次に淨化効果の持続性を表2に示した。3月にフィルターの洗浄、交換を行い、半年経過するとO₃の除去率は数%低下する。この除去率は各年の光化学オキシダント

表1. 大気汚染淨化効率(1980.5)

汚染質 区	O ₃			PAN			SO ₂			NO			NO ₂		
	1	2	平均	1	2	平均	1	2	平均	1	2	平均	1	2	平均
非浄化空気室	10.3	9.8	10.1	5.3	4.8	5.1	2.0	—	2.0	2.3	1.8	2.1	4.0	4.3	4.2
浄化空気室	1.1	1.0	1.1	0.4	0.4	0.4	0.7	—	0.7	2.0	1.5	1.8	2.1	2.0	2.1

表2. 汚染質除去効果の経時変化(1978)
pphm

	4月	8月	10月	備考
O ₃	非浄化空気室	13.5	8.8	12.5 ケミルミ法
	浄化空気室	1.7	0.8	1.5
PAN	非浄化空気室	12.4	—	5.4 ECDガス クロマト法
	浄化空気室	2.0	—	1.1
SO ₂	非浄化空気室	3.8	—	3.0 導電率法
	浄化空気室	1.3	—	0.9
NO	非浄化空気室	5.5	—	3.8 ケミルミ法
	浄化空気室	5.2	—	3.3
NO ₂	非浄化空気室	5.3	—	4.0 ケミルミ法
	浄化空気室	2.9	—	1.8

ト発生程度や粉じん等によるフィルターの目づまり等で、多少の変化は見られる。しかし植物被害に関するオゾン、PANの除去率はシーズン中常に90%以上を維持している事が明らかとなった。

3) 室内温度条件等について

FAC室内環境条件の設定目標を最大限、野外に近づけるようにし、特に夏季高温時の温度上昇を防ぐため、当初は冷熱システムが考えられたが露点通過時のオキシダント破壊が予想されたため換気量の調節による方法が取られた。¹⁵⁾ 室内空気の換気回数を毎分6回とし、室内中央部の風速を毎秒0.5mとした時の夏季高温時室内外の気温差は表3のようになった。

室内風の流れは図2.3にあるようにやや下から斜め上に向って流れる事になる。したがって室内各地点の風速は地上からの高さにより多少異なるようになる。その結果、外気温との差は地上から高くなる程大きくなる傾向となるが地上から150cmの外気温との差は最高3℃

表3. FAC室内外の温度比較 (1980.8)

時刻 区 半旬	12			13			14			15		
	净 化 区	野 外 区	非 净 化 区									
8月1	24.9	23.6	24.7	25.5	24.3	25.5	26.0	25.1	26.1	25.6	24.8	25.6
2	29.7	28.0	30.0	29.2	27.5	29.6	29.2	29.1	29.8	28.6	27.8	29.0
3	36.9	35.4	36.8	36.4	34.7	36.7	34.9	34.4	35.5	34.2	33.1	34.6
4	29.4	28.3	29.2	29.4	28.0	28.8	29.2	27.7	28.6	27.7	26.6	27.3
5	29.9	28.5	29.4	29.7	28.5	29.2	28.5	27.5	28.1	27.9	27.3	28.1
6	27.2	26.2	26.7	27.5	26.4	26.9	27.5	26.7	27.1	27.6	26.6	27.0
平均	29.67	28.33	29.47	29.62	28.23	29.45	29.22	28.42	29.20	28.60	27.71	28.60
t*	0.0851			0.0764			0.0090			0		
n	10			10			10			10		

* t : 浄化・非浄化空気室間のt検定、いずれも有意差なし。

** 各時刻の瞬間値平均値。地上から60cmで測定。

にとどまった。我々が取りあつかう植物の生活空間としては地上から 100cm 前後のものが多く温度管理上ほぼ満足されるものと判断された。

また両室間の温度差は整流板、風量調整用ダンパーの調節と非浄化空気の吸込み口に取りつけられた風防板、寒冷紗の効果も見られ両室間差は全く認められない。

室内の日照条件は 3mm の板ガラスにより野外との差が生じている。洗浄 2 ヶ月後の室内外照度を比較すると表 4 のようになった。約 20% の低下が見られ植物の生育は野外に比べ徒長傾向を強く見せている。

非浄化空気室、野外間のオゾン濃度差を表 5 に示した。高濃度、低濃度にかかわらずほとんど差は見られず、吸込み口通過によるオゾンの破壊は見られず当初の目標は達せられている。

表 4 FAC 室内外照度比較 (1975.5)
(K lux)

	1	2	3	4	平均
FAC 室内	5.3	5.7	5.5	3.8	5.0.8 (82.8)
野外	6.3	7.0	6.7	4.5	6.1.3 (100)

() 内は野外に対する比率

表 5 非浄化空気室、野外の O₃ 濃度 * (1980)
pphm

	1	2	3	4	平均
非浄化空気室	9.9	9.7	3.7	4.5	6.95
野外	10.1	9.7	3.6	4.5	7.02

* ケミルミ法にて測定

表 6 非浄化空気室、野外のイネ O₃ 被害比較 *
(1979.7)

株	1	2	3	4	5	6	平均
非浄化空気室	3	4	3	4	5	4	3.8
野外	3	3	3	4	4	5	3.7

* 調査は当試験の調査法に準じ各株の茎当たりの被害度累積値とした。

4) 野外、非浄化空気室における植物の生育と被害

比較

野外、非浄化空気室間に生じた日照条件、温度条件の差異が植物の生育、光化学オキシダント被害の発現にあたえる影響について検討したところ表 6、7 のようになつた。

7 月上旬のイネは分けつ期に入り、野外における光化学オキシダント被害が目立つ時期である。しかし、1~2 回の被害では分けつが進むにつれ目立たなくなる。非浄化空気室のイネは、葉身長、草丈とも野外に比べ大きくなり全体的に徒長傾向を見せるが被害にはほとんど差は見られない。しかし、日照不足等が長期にわたるため収量にあたえる影響は見られる。(未発表)

一方アサガオを見ると 7 月 10 日両室ともほぼ同葉数であったものが 20 日後の 7 月 30 日には野外で 1.6 倍に葉数が増加するのに対し、非浄化空気室では 2.3 倍に、40 日後の 8 月 20 日には野外 3.1 倍、非浄化空気室 3.6 倍となりいずれも高い有意な差が生じている。また両区の個体間のバラツキを見るために、展葉数の変異系数を見ると、野外ではほぼ 20~23 を前後しているが、非浄化空気室では 7 月 10 日には 36.3 と大きなバラツキが見られたが、序々に小さくなり、8 月 20 日には 15.6 と当初の半分以下になった。そのため全期間を通じた両室の

表 7 野外・非浄化空気室アサガオの
葉数・被害の比較 (1974)

調査日	全葉数		被害指数		備考
	野外	非浄化	野外	非浄化	
7.10	\bar{x}	15.0	15.8	5.88	24.10
	C V	21.1	36.3		
7.30	t	0.6803		5.6483*** n=9	
	\bar{x}	24.2 (161)	36.0 (228)	1.86	3.99
8.20	C V	23.7	19.6		
	t	6.4247***		0.9375 n=9	
	\bar{x}	47.8 (317)	57.6 (365)	5.72	13.44
	C V	21.8	15.6		
	t	3.1795**		1.6907 n=8	

注1) \bar{x} : 野外 5 株 非浄化区 6 株の平均値 () 内

は 7 月 10 日に対する比率

2) CV : 変異系数 ($CV = \frac{S}{\bar{x}} \times 100$)

3) t : * * * P < 0.001, ** P < 0.01 他は NS

4) C V の t = 0.2557 (n=4 NS)

変異系数に有意な差は見られない。室内では気象条件の均一性とともに、かん水等の均一な栽培管理により室内での生育が進むにつれ個体間差が小さくなるものと思われる。

両室の被害は個体間バラツキが大きく有意とは言えないと被害指数で見る限り、いずれも差が生じ、非浄化空気室で大きくなる傾向が見られた。

このように植物により非浄化空気室、野外間の差異は各項目により異なる事が予想され、検討する課題によつては一定の配慮が必要と思われる。

5) 大気汚染質の測定方法

(1) オキシダント 中性ヨウ化カリウム反応液による吸光度法(D.K.K社製GX-6形)

(2) オゾン ケミルミネッセンス法(D.K.K社製GLX-11型)

(3) 二酸化イオウ 導電率測定法(D.K.K社製.GRH-3型)

(4) 硝素酸化物 ザルツマン法(D.K.K社製GP-5型)

(5) PAN ECD検出器付ガスクロマトグラフ法(柳本社製 GPH-10A型)

この他ケミルミネッセンス法窒素酸化物測定器(D.K.K社製)ならびに紫外線吸収法オゾン濃度計(DASIBI社製)を併用させた。

尚オキシダント、窒素酸化物測定器の反応液は20日に1度の割合で更新させた。

2. 供試植物および調査法

1) 供試植物

野外調査の結果、疑似症状も含めた植物被害が多数観察された。これらの結果をもとに供試した植物は22科、45種、238品種におよんだ。栽培管理は関係研究室の指導、助言を得ながら慣行どおりとした。

2) 調査法

調査は原則として葉位毎に毎日行ない、被害の更新を把握できるよう被害面積割合を五段階に分け記録した。アサガオ、ペチュニア、ボウズ等7種類の植物について被害と葉令との関係を見るために葉面積の推移等を併せて記録した。

被害度累積値及び被害指数の算出法は次の通りである。

被害度累積値=被害度1×同葉数+被害度2×同葉数+……+被害度5×同葉数

$$\text{被害指数} = \frac{\text{被害度累積値}}{\text{全調査葉数} \times 5} \times 100$$

3) オゾン、PANの単体暴露

同じ植物でも多様な被害症状をあらわすものはオゾン(0.15~0.20 ppm 2~3時間処理), PAN(10 ppb 3~5時間処理)のそれぞれを単体暴露させ被害判定の裏づけとした。

オゾンは放電型オゾン発生器(日本オゾン社製)に活性炭フィルターを通した浄化空気を導入し電圧を調整しながら必要濃度のオゾンを生成させた。

PANの合成は亜硝酸エチルと酸素を径20cm×100cmのガラス製反応器で混合し、40Wブラックライト4本で30~45分照射する。その後ドライアイスアセトンで冷却したトラップを通して濃縮し、不純物を除去するために分離カラムPEG600を通し、熱伝導型ガスクロマトグラフ分析計でPANを確認しながらテフロンバックに採取する。これの赤外吸収スペクトルからPAN濃度を求め、必要濃度に希釈し、暴露実験に供した。

4) 被害部の顕微鏡観察および組織内酵素活性の検討

チオニン染色による光学顕微鏡観察¹⁶⁾を行い被害の細胞組織的な影響を検討し被害判定の裏づけとした。^{17,18)}

また、葉組織内パーオキシダーゼ(PRO), ポリフェノールオキシダーゼ(PPO)活性の光化学オキシダントによる影響について検討した。つまり凍結ミクロトームで得られた切片にPPO活性はベンチジンを、PRO活性は過酸化水素とベンチジンをそれぞれ滴下し10分後に反応を停止させ染色度を比較検討した。

III 結果および考察

1. 被害の立証と感受性の検討

FAC比較栽培ならびに単体暴露実験の結果2回以上同一被害の再現を見たものを表8に示した。つまり光化学オキシダントによる植物被害は20科、43種、144品種で立証された。これらの内東京で栽培される主要農作物が20種類含まれており、光化学オキシダントによる農作物へあたえる影響の大きさをあらわしている。被害症状の特徴はアサガオ、ヒマワリ、ラッカセイ、イネ、トウモロコシ等のように葉の表面に各種の斑点症状をあらわすものと、ペチュニア、ハコベ、フダンソウ、サラダナのように葉の裏面に光沢症状等をあらわすものと/or大別された。

これらの内、各植物、品種の光化学オキシダントに対する感受性の強弱について検討したところ表9のようになつた。つまり各植物間に光化学オキシダントに対する感受性あるいは抵抗性の差異が認められ、7ppm以上の光化

表8. 被害型別に光化学オキシダント被害が立証された植物

科	種	供試品種	被害型	
			O ₃	PAN
アオイ科 Malvaceae	ムクゲ オクラ	<i>Hibiscus syriacus</i> L. <i>Hibiscus esculentus</i> L.	東京五角他5品種	○ ○
アカザ科 Chenopodiaceae	ホウレンソウ フダンソウ	<i>Spinacia oleracea</i> L. <i>Beta vulgaris</i> L.	禹城他11品種	○ ○ ○
アブラナ科 Cruciferae	コマツナ コカブ	<i>Brassica Rapa</i> L. var. <i>Komatsuna</i> Hara <i>Brassica Rapa</i> L. var. <i>glabra</i> Kitamura	染谷金町	○ ○
	ハツカダイコン	<i>Raphanus Sativus</i> L.		○
イネ科 Cramineae	イネ トウモロコシ メヒシバ	<i>Oryza sativa</i> L. <i>Zea Mays</i> L. <i>Digitaria adscendens</i> Henr	日本晴他7品種 ハニーバンタム他7品種	○ ○ ○ ○
ウリ科 Cucurbitaceae	キュウリ スイカ ヘチマ	<i>Cucumis sativus</i> L. <i>Citrullus Battich</i> Forscal <i>Luffa cylindrica</i> Roem	地這他14品種	○ ○ ○ ○
キク科 Compositae	レタス サラダナ ヒマワリ セイヨウタンポポ ヒメムカシヨモギ	<i>Lactuca Sativa</i> var. <i>capitata</i> L. <i>Lactuca Sativa</i> var. <i>capitata</i> L. <i>Halianthus annus</i> L. <i>Taraxacum officinale</i> Weber <i>Evigeron canadensis</i> L.	Crisp-head Butter-head 8品種	○ ○ ○ ○ ○ ○
ゴマ科 Pedaliaceae	ゴマ	<i>Sesamum indicum</i> L.		○
サトイモ科 Araceae	サトイモ	<i>Colocasis antiquorum</i> Schort var. <i>esculenta</i> Engler	土垂(白芽)	○
ショウカイドウ科 Begoniaceae	ベゴニア	<i>Begonia semperflorens</i> Link et Otto	ウインタークイーン 72号	○
セリ科 Umbelliferae	ニンジン ミツバ パセリ	<i>Daucus Carota</i> L. var. <i>sativa</i> DC <i>Cryptotaenia japonica</i> Hassk <i>Petroselinum sativum</i> Hoffm	MS 3寸他5品種	○ ○ ○ ○
タデ科 Polygonaceae	ソバ ギシギシ イヌタデ	<i>Fagopyrum sagittatum</i> Gilibert <i>Rumex japonica</i> Houttuyn <i>Persicaria longiseta</i> Kitagawa		○ ○ ○ ○
ナス科 Solanaceae	トマト ジャガイモ タバコ ペチュニア	<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill <i>Solanum tuberosum</i> L. <i>Nicotiana Tabacum</i> L. <i>Petunia hybrida</i> Vilm	雷電他25品種 Bel W-3 ホワイトエンサイン他9品種	○ ○ ○ ○ ○
ナデシコ科 Caryophyllaceae	ハコベ	<i>Stellaria neglecta</i> Weihe		○
ニレ科 Ulmaceae	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i> Makino		○
バラ科 Rosaceae	ナシ	<i>Pyrus pyrifolia</i> Nakai var. <i>culta</i> Nakai	甘世紀	○
ヒルガオ科 Convolvulaceae	サツマイモ アサガオ	<i>Ipomea Batatas</i> Lam. var. <i>edulis</i> Makino <i>Pharbitis Nil</i> Choisy	スカーレットオハラ 他4品種	○
マメ科 Leguminosae	ナンキンマメ イングンマメ シロツメクサ ダイズ	<i>Arachis hypogaea</i> <i>Phaseolus vulgaris</i> <i>Trifolium repens</i> L. <i>Glycine Max</i> Merrill	千葉半立 本金時他7品種 エンレイ他2品種	○ ○ ○ ○ ○
モクレン科 Magnoliaceae	ユリノキ	<i>Liriodendron tulipifera</i> L.		○
ヤナギ科 Salicaceae	ポプラ	<i>Populus nigra</i> L. var. <i>italica</i> Muench	I 45/51他3品種	○
ユリ科 Liliaceae	ネギ	<i>Allium fistulosum</i> L.		○

学オキシダント・ドース 260.6 という高濃度・高ドースの光化学オキシダント発生に対して、ヒマワリ、インゲンのように大きな被害を受けるものからペチュニア（ブルーエンサイン）、アサガオ（チェリオ）のように、前者の2~3割にすぎないものまで大きな差が生じている。また同じペチュニア、アサガオ、インゲンでも品種に明らかな差が認められた。このような種類、品種の光化学

オキシダントに対する感受性の差異を利用した植物指標にも大きな効果が期待されると思われる。

これらの結果から1973~77年間にFAC法による被害発生程度の比較検討から主な植物の光化学オキシダントに対する感受性の程度別分類を表10に示した。

今後、被害と濃度最高値・ドースとの関係等、単体暴露による詳細な検討が必要と思われる。

表9 非浄化空気室内各植物の被害発生状況(1975.8.18)

	インゲン		ペチュニア		アサガオ		ヒマワリ	備考
	グリンエース	本金時	ホワイト エンサイン	ブルー エンサイン	スカーレット オハラ	チェリオ		
株 数	3	3	5	4	6	6	2	Ox ^{7pphm}
葉 数	7.3	7.7	30.6	25.0	42.5	50.7	27.5	以上ドース
被害指数*	22.27	17.1	15.5	3.5	13.3	5.8	27.35	260.6

* $F_d = 3.0610 \quad P < 0.5$

表10 光化学オキシダントに対する感受性の程度別分類

感受性の高い植物 (濃度最高値10pphm以下)	感受性中程度の植物 (濃度最高値10~15pphm)	感受性の低い植物 (濃度最高値15~20pphm)
アサガオ(スカーレットオハラ, チェリオ, テンショウ ハマノシラバ, ハマノ ナガレ)	ペチュニア(ブルーエンサイン, レッドコロネット) ミツバ ケヤキ イネ	ペチュニア(サーモン, スカーレ ットエンサイン, ローズエンサ イン, グリッターセレクト) ニンジン ソバ ゴマ 西洋タンボポ
ボウズラ タバコ オクラ フダンソウ ホウレンソウ サトイモ サントウサイ ベコニア(R.I.) ラッカセイ ハツカダイコン ハコベ インゲン ヒマワリ	ミニチュアトマト キュウリ トマト ムクゲ プラタナス ダリア バレイショ レタス ギシギシ クローバー サラダナ トウモロコシ	サルビア パセリ ハキダメギク ヒメムカシヨモギ ノゲシ

2. 被害の特徴と分類

1) 被害発生葉位と葉令との関係

主な植物の被害と葉令の関係について検討したところ図4のようになった。つまり葉の表面に被害を生じるアサガオ、キュウリの被害発現部は展葉速度の差により上からの葉位は異なるが葉面積の拡大との関係では共通した傾向が認められた。

アサガオの葉は開葉後急速に拡大し、12~13日でほぼ最大面積に達する。被害は葉面積の拡大が行なわれている葉位では発生せず拡大が停止した4~5日後に被害をあらわすようになった。キュウリの場合も葉面積の拡大が停止した成熟葉ではじめて被害が発生するが、葉面積拡大停止後被害発生までの期間が7~10日となりアサガオに比べやや長い傾向であった。イネ（葉脈沿いに褐色斑）、トウモロコシ（葉脈沿いに白～黄色斑）、ホウレンソウ（不定形白色斑）も同様な傾向を示した。

一方、葉の裏面に光沢症状等をあらわしたペチュニア

はアサガオ等とは異り、葉面積の拡大が停止した葉位以下では被害は発生せず、葉面積の拡大が旺盛な上位2~6対目葉位で被害が発生した。また開葉後4日目の2対目葉位の被害は葉の先端に、同6日目の3対目葉位の被害部は葉の先端からやや中ほどに移動し、同10日目の4対目葉位では葉全体に被害を受け、同14日目の5~6対目葉位（葉面積の拡大が停止する直前の葉位）の被害部は葉の基部のみであった。このように未熟葉の中でも葉令の進み具合によって被害部が葉の先端から基部にむけ移動する特徴を示した。

2) 顕微鏡観察から見た被害部の特徴

これら被害の特徴と関連させて主な被害植物の内、まず成熟葉の表面に各種斑点症状をあらわすものの顕微鏡観察結果は次のとおりである。

(1) アサガオ：白色小斑点部分を見ると、柵状組織の細胞が原形質分離をおこし、中央に収縮、変色してチオニンによって染色された。一方海綿状組織の細胞および表皮細胞には異常が見られなかった。

(2) ポプラ：白色小斑点をあらわした被害部は柵状組織の第2層の細胞のみが崩壊していた。褐色斑を呈する被害部は表皮が陥没し、柵状組織の第1、2層の細胞とともに崩壊しチオニンによって強く染色された。

(3) イネ：赤褐色斑のある被害葉表面を見ると気孔周辺部が全体的に褐色に変化していた。また細胞内の葉緑体が減少し一部が褐変していた。

(4) インゲン：褐色斑の被害部では柵状組織の細胞がやや変形し、原形質分離をおこし、チオニンで染色された。海綿状組織、表皮細胞の変化は認められなかった。

(5) ケヤキ：赤色もしくは黄色化した被害葉を見ると表皮、柵状、海綿状各組織の細胞とも変形は見られないが細胞内の葉緑素は明らかに減少していた。

(6) ナシ：下位葉、もしくは落葉した被害葉は主に柵状組織の第1層の細胞が変形し褐変していた。

(7) シロツメクサ：全体的に白色小斑点を生じ1部分赤色化した被害葉は、表皮細胞ならびに柵状組織の細胞が一部変形し、柵状組織の葉緑素が明らかに減少していた。また海綿状組織の異常は見られなかった。

(8) 黒ゴマ：褐色大斑点を生じた被害葉は柵状組織が崩壊、褐変し、チオニンで染色された。

(9) スイカ：褐色斑を生じた被害葉は柵状組織が変形し、チオニンで染色された。

(10) ヘチマ：白色小斑点を生じた被害葉は、柵状、海綿状各組織の変形は見られないが、両組織内の葉緑素は

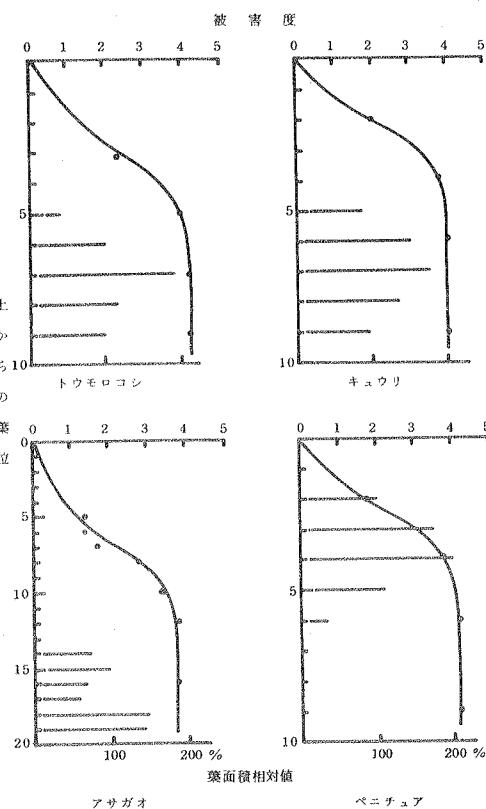


図4. 葉面積の推移と被害程度

ほとんど消失していた。

(1) オクラ：白色あるいは褐色小斑点を生じた被害葉は、部分的に柵状組織の変形をおこし、葉緑素が消失し、チオニンにより染色された。

(2) ミニチュアトマト：褐色不定形斑のある被害葉は柵状組織の細胞が変形し褐変していた。

次に未熟葉、裏面に光沢症状をあらわすものを見ると次のようにになった。

(1) ペチュニア：銀白色あるいは青銅色を生じている被害葉は海綿状組織の細胞が崩壊し、変形した細胞膜のみが残り白色化あるいは褐変していた。また被害部は陥没してチオニンによって染色された。一方柵状組織には何ら変化は見られなかった。

(2) サラダナ：裏面が光沢状の青銅色化している被害葉は、部分的に海綿状組織が変形し、著しい葉緑素の消失が見られ、チオニンで染色された。柵状組織の異常は見られなかった。

(3) ホウレンソウ：葉の裏面が銀白色化している被害葉は表面の表皮細胞と柵状組織に異常は見られないが海綿状組織が崩壊し陥没した。陥没部分はチオニンで染色された。

以上のように成熟葉の表面に各種の斑点症状をあらわすものは、明らかな柵状組織の崩壊が認められたアサガオ、ポプラ、インゲンナシ等と、柵状組織の崩壊は認められないが同組織内の葉緑素の減少が著しく見られたヘチマ、ケヤキ、イネ等の二つに分けられる。

また、未熟葉の裏面に光沢症状等をあらわすものはすべて柵状組織の異常は見られないが海綿状組織が崩壊し、陥没していた。

非浄化空気室に取り入れられた汚染大気の内、可視害の直接的な要因物質は光化学オキシダントである事についてはすでに述べた通りである。この汚染大気の内、光化学オキシダント高濃度時のPAN濃度を見ると表11のようになった。つまり、光化学オキシダントの内2～5%はPANであり残りの大半はオゾンで占められている。したがって光化学オキシダント濃度が高い時にはPAN濃度も高くなり、オキシダントに占める、PANの比率は平均すると3.15%となった。

したがってFAC法による植物被害は、オゾンとPANの影響を同時に受ける事になる。

ところで、これまで述べてきたように被害を大別すると成熟葉・裏面に各種の斑点症状をあらわすタイプと、未熟葉・裏面に光沢症状等をあらわすタイプに分けられ

た。これらに関連してHillら(1961)¹⁷⁾はオゾンによる被害は成熟葉の柵状組織の崩壊、褐変化が先行するとし、Thomsonら(1965)²⁰⁾Bobrovら(1952, 1956)^{23, 24)}はPANの場合は明らかにオゾンとは異り、未熟葉・海綿状組織の崩壊が先行するとしている。飯嶋ら¹⁸⁾沢田ら²⁵⁾野内ら²⁶⁾も東京で発生している植物被害の顕微鏡観察の結果大部分がこれらと一致していたとしている。

このように当場FACにより確認された被害は前者をオゾンによる被害—オゾン型、後者をPANによる被害—PAN型の二つに大別されよう。

3. 組織内酵素活性の変化

オキシダント被害葉のパーオキシダーゼ(PO)ならびにポリフェノールオキシダーゼ(PPO)の変化について検討したところ次のようになつた。

1) パーオキシダーゼ活性

(1) ポプラ：オゾンに感受性のない未熟葉は浄化・非浄化空気室とも同等の染色程度であったが、浄化空気室の成熟葉は未熟葉に比べ活性が弱くなるのに対し、非浄化空気室の被害葉(白色小斑点)では特に崩壊した柵状組織の周辺で活性が強くなる傾向を示した。

(2) ナシ：明らかにオゾン被害を最初に受けた第1層目の柵状組織で活性が強まる傾向を見せた。

(3) インゲン：非浄化空気室の被害葉は全体的に活性が強まる傾向を見せた。

(4) アサガオ：浄化、非浄化空気室とも、感受性のない未熟葉は同等の染色程度であったが浄化空気室の成熟葉は柵状・海綿状両組織ともほとんど染色されず活性は弱いが、非浄化空気室の被害葉では両組織とも強く染色されPO活性の高まりが認められた。

(5) イネ：両室の上位葉、下位葉とも強く染色され差は見られなかった。

2) ポリフェノール活性

ケヤキだけが非浄化空気室の被害葉でやや強く染色されたが、その他の植物では明らかな差は見られなかった。

以上のようにポプラ、アサガオ、インゲン、ナシのオゾン型被害葉では明らかなパーオキシダーゼ活性が高くなる傾向を見せたが、ポリフェノール活性の変化はほとんど認められなかった。

4. 被害の発生と光化学オキシダント濃度高値

1973～1977年間のオゾン型被害としてアサガオ(スカーレットオハラ)、PAN型被害としてペチュニア(ホワイトエンサン)のFAC内における被害発生回数を月別に見ると表12のようになつた。また同被害

表11 高濃度オキシダント発生時におけるPAN濃度(1973~76)

発生月日	オキシダント最高濃度 pphm	PAN最高濃度 ppb	PAN/O _x × 100
1973 9.2.0	1.0.9	6.4.5	5.9
	1.0.4	6.0.0	4.8
	1.0.2.0	3.0.0	2.6
	1.1.3.0	3.3.0	2.2
1974 4.2.7	1.3.3	2.9.2	2.2
	5.1.7	4.7.7	2.3
	5.1.8	8.4.3	3.1
	5.1.9	3.6.6	2.3
	5.2.9	3.0.1	2.0
	6.2.5	6.2.0	3.7
	7.9	5.0.9	3.9
	8.3	3.3.3	2.9
	8.2.2	3.8.9	2.6
	7.9	4.7.7	4.0
1975 7.1.5	1.6.0	5.1.2	3.2
	8.2.7	5.0.5	2.7
	8.2.8	4.9.1	2.5
	8.2.9	5.4.6	2.9
	9.4	3.9.6	2.4
	9.1.3	5.4.0	2.8
	9.1.9	3.6.1	2.4
	4.2.1	3.7.1	4.1
	4.2.7	4.5.9	4.4
	5.1.0	3.2.3	2.4
1976 7.8	1.2.6	5.7.7	4.6
	7.2.1	6.8.6	4.1
	8.1.1	4.7.2	4.3
	1.2.5	4.9.1	3.9
	平 均	1.4.9.9	3.1.5

表 12. 被害観察回数(1973~1977)

		4月	5	6	7	8	9	10	11	合計
年 1973	アサガオ	—	—	—	—	6	2	0	0	8
	ペチュニア	—	—	—	—	6	5	2	1	14
1974	アサガオ	—	—	0	4	11	2	0	0	17
	ペチュニア	4	10	11	4	9	2	0	1	41
1975	アサガオ	—	—	0	7	14	3	0	0	24
	ペチュニア	—	—	2	8	13	5	0	0	28
1976	アサガオ	—	—	0	3	2	0	0	0	5
	ペチュニア	0	2	2	4	2	0	0	0	10
1977	アサガオ	—	—	0	9	6	0	0	0	15
	ペチュニア	1	0	1	7	1	1	2	0	13
合計		アサガオ	—	—	0	23	39	7	0	69
		ペチュニア	5	12	16	23	31	13	4	106

発生時の濃度最高値の中で最も低い濃度最高値で被害発生が見られた時の光化学オキシダント発生状況を年別に見ると表 13 のようになった。

アサガオはオゾンに感受性をあらわす成熟葉の出現する7月上旬より被害を受けるようになり、8月に最高の被害発生回数となった。そしてオゾン濃度最高値が8 ppmになった時必ず被害を受ける結果となった。²⁸⁾

Heggestad²⁸⁾はオゾンに最も弱い植物としてトマト、タバコ、インゲン、ホウレンソウ等をあげ、0.10 ppm × 2時間もしくは0.08 ppm × 4時間で被害が発生したとしている。当場の非浄化空気室で今回供試した植物の内、最も被害を受けやすいアサガオ、ハツカダイコン、インゲン等はほぼ同程度のオゾン発生条件で被害を受けていた事が明らかとなった。

一方、ペチュニアの初発被害は4月上一中旬に見られ11月まで継続して観察された。また年間を通じてPAN濃度最高値が2 ppb以上になると被害の発生が見られた。Taylor²⁹⁾はPANに最も感受性をあらわす植物としてピントビーン、ハコベ、ダリア、ペチュニア、トマト等をあげ14 ppb × 4時間のPAN発生条件で被害が発生したとしている。

泉川ら²⁹⁾は東京の光化学オキシダント濃度に占めるPAN濃度の割合について検討し、都心部で約10%，周辺住宅地域（都心部より西へ15 km）で約5%，郊外（都心部より西へ50 km）で約3%となり地域により異なる事を明らかにしている。

表 13 被害をもたらした日最高値の内各年の最も低いOx濃度最高値

供試 年 度 植物	アサガオ Ox ppm	ペチュニア PAN ppb	備 考
1973	8.3	2.20	1~8月欠測
1974	8.8	1.20	
1975	7.4	2.36	4~6月欠測
1976	8.5	2.60	
1977	8.1	2.60	
平均	8.2	2.19	

当場のFAC - 非浄化空気室で1973年以来測定した結果では、表 11 でも明らかのように高濃度オキシダント発生時では平均すると3.15%となった。そしてこの間最高濃度で10 ppb以上を記録したのは4回にすぎなかった。しかしPAN型被害は同期間延106回観察され、その被害程度も予想以上に大きい傾向を見せた。また当場、温室内で栽培されているペチュニアの初発被害は毎年4月上一中旬に発生したが、その時のPAN濃度最高値はせいぜい2~3 ppbにすぎなかった。このように当場、FAC実験で被害が立証され、また周辺の野外もしくは温室等で観察されたペチュニア等のPAN型被害はカリフォルニア州等に比べ、かなり低濃度で大きな被害をもたらすという特徴を示した。

以上のようにオゾン型被害はその大半が7~8月に集

中するのに対し、PAN型被害は4～11月と8ヶ月にわたり長期間の観察が可能であった。したがってオゾン型被害の比較的少い時期（対象植物が気温や日長条件等で生育適期でない時期）にはPAN型被害をあらわす植物の利用や生育適期等を考慮した植物の組み合せの検討そしてオゾン、PANの被害発生限界値の詳細な検討により指標植物としての効果も一層高められる事がほぼ明らかとなつた。

IV 摘 要

1. FACを用いて光化学オキシダントによる植物被害について検討した。
2. 被害は20科、43種、144品種で立証された。
3. 被害症状はオゾン型被害、PAN型被害に大別された。前者は成熟葉、表面に白もしくは褐色状斑点を、後者は未熟葉、裏面に光沢状、青銅色もしくは銀白色症状をあらわした。
4. オゾン感受性植物であるアサガオはオゾン最高濃度が8pphmを記録した時に、PAN感受性植物であるペチュニアは、PAN最高濃度が2ppbを記録した時に、それぞれ被害を生じた。

引 用 文 献

- 1) 大平俊男(1971) 東京光化学スモッグに関する調査研究 第1報 11～24
- 2) 松島二良(1972) 光化学反応による大気汚染 日本公衆衛生協会 171～181
- 3) 国沢健一・須山勇(1970) 葉たばこ研究 第53号 57～60
- 4) 黒田昭太郎・篠原俊清・喜田村俊明。(1970) 同同 67～78
- 5) " " " 東瀬士郎・矢野文雄・木村敏雄(1973) 岡山たばこ試験結果第33号 15～24
- 6) 宇野良男・三宅嘉之・松沼富三・垣江竜雄・菊地祥夫・渡辺明(1975) 同 35号 35～45
- 7) 大平俊男・沢田正・森賀生・古明地哲人・野内勇(1971) 東京スモッグに関する調査研究 第1報 288～300
- 8) 沢田正・古明地哲人・野内勇・小口邦子・大平俊男(1972) 大気汚染研究 7 232。
- 9) 松島二良(1979) 環境科学 B-30-S2-2 11～17
- 10) 松中昭一(1975) 指標生物 講談社 33～35
- 11) 松岡義浩(1978) 千葉県農試特別報告 第7号 18～32
- 12) 松島二良・佐光重広(1977) 三重大学環境科学研究紀要 第2号 95～105
- 13) 谷山鉄郎(1978) 科学 48(3) 169～175
- 14) Taylor,O.C. and F.M. Eaton(1966) *Plant Physiol.* 41 132～135
- 15) 松岡義浩・高崎強・森川昌紀・白鳥孝二・大道貞男(1973) 大気汚染研究 第8巻 第3号 539
- 16) Craig R. Hibben(1969) *phytopathology* 59 1423～1428
- 17) Hill, A.C., M.R. Pack, M. Treshow, R.J. Downs and L.G. Transtrum (1961) *phytopathology* 51 356～363
- 18) 飯嶋勉・菅田重雄・本橋精一(1974) 東京スモッグに関する調査研究 第3報 634～639
- 19) Taylor,O.C. (1958) *Agron. J.* 50 556～558
- 20) " and E.R. Stephens, E.F. Darleg, and E.A. Cardiff (1960) *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 75, 435～444
- 22) Thomson, W.W., W.M. Dugger, and R.L. Palmer(1965) *Botan. Gaz.*, 126 66～72
- 23) Bobrov, Ruth A. (1952) *Phytopathology*, 42 558～563
- 24) " (1956) *phytopathology* 46 696～698
- 25) 野内勇・飯島勉・大平俊男,(1975) 大気汚染研究 9 535～543
- 26) " 大平俊男・沢田正; 小口邦子・古明地哲人(1973) 大気汚染研究。8 113～119
- 27) 泉川碩雄・伊藤富夫・舟島正直・庄野富雄・横田久司・早福正孝・中野欣嗣・朝来野国彦・大平俊男(1974) 東京スモッグに関する調査研究 第3報 323～334
- 28) Heggstad, H.E. (1969) *Jour. Air Pollution Cont. Assoc.* 19 (6) 424～426
- 29) Taylor, O. C. (1969) *Jour. Air Pollution Cont. Assoc.* 19 (5) 347～351