

作物の大気汚染被害の発生機構に 関する生理的研究

第5報 気孔開度および茎葉組織汁液の 酸化還元電位とオゾン被害との関係

馬場 赳*・寺岡 幸

緒 言

最近オキシダントによる作物の被害の発生は、関東地方では京浜、千葉の東京湾に沿う主都圏周縁地帯から始まり、現在では関東地方平坦部一円に広域化し、暖地でも京阪神地域から岡山等に及ぶ瀬戸内の人口密集地域から、さらにその周縁地帯へと広がっており、農作物に対する被害の拡大が憂慮されている(山添 1973, 福田ら 1973, 岡山農試 1974, 北野ら 1975, 松岡 1976, 農林省農林水産技術会議事務局 1976, 中村 1977)。

したがって、オキシダントによる作物被害ことに研究、調査のおくれている暖地における被害についてその実態の解明と対策の樹立のための研究の進展が期待されている。このような見地から暖地における農作物オキシダント被害の発生原因と機構を基礎的に究明するために生理、生態的研究を行なった。

一般に大気汚染による作物の被害の発生は、出現する汚染物質の濃度と暴露時間によって異なるばかりでなく、作物の生育する環境条件、作物の生育時期、栽培条件、作物の種類、品種等によって異なることが知られている。したがって、オキシダントの80~90%を占めるといわれるオゾンについて、被害の発生とこれら諸点との関係について生理、生態の見地から研究を行なった。

なお著者らは最初亜硫酸ガス被害について研究し、作物の気孔開度および茎葉生体酸化還元電位(茎葉の Eh)が被害発生と密接な関係をもつことを報告した(馬場・酒井 1975, 76a)。したがって本研究では水稲を中心としてオゾンの被害発生に関してこの面から研究を進め、作物のオゾン被害についても気孔開度と茎葉の Eh の両者がオゾン被害の発生と密接な関係にあることを認めたので、その結果を報告する。

本研究に当り有益な助言と援助を頂いた山添文雄、太田保夫、河崎利夫、中村 拓の諸博士に深謝するとともに、実験に協力した酒井慎吾博士および田辺佳代子氏に感謝する。

実 験 方 法

実験は1977年春から1978年2月にわたり、硝子室および温室で行なった。実験材料の

* 現東京農業大学農学部

大部分は、直径 8 cm のビニールポットに容量で 30 % のピートを混じた水田土壌をつめ、これに播種して畑状態の土壤水分（最大容水量に対して 70~80 %）および湛水状態で育てた。一部の材料は既報の方法で水耕培養した（馬場・酒井 1976 a）。

作物の品種は、水稲はおもにヤマビコ、トマトは米寿、インゲンは山城黒三度豆、ダイコンは美濃早生、ダイズは奥原早生、トウモロコシは甲州である。

オゾン処理装置は、実験室に設置した小型の装置で、ガス処理ボックス（22×43×53 cm）、オゾン発生器、空気送込装置、ガス混合装置、オゾン濃度自動調節装置、オゾン濃度自動測定器（マスト社製）、ガス排気装置および実験室外に設置した排気ガス浄化装置である。実験室には強力な排気装置を設置した。

実験は、照度は 2.5~3.0 万ルクス、温度 27~32°C、湿度約 70~80 % である。実験の大部分はオゾン濃度 0.28~0.3 ppm、ガス処理時間は午前 10 時~午後 3 時の 1 時間 30 分~3 時間である。

気孔開度は、iso-butyl alcohol と ethylene glycol の混液を用いる浸潤法を用い、開度は浸潤指数で表わした（馬場・酒井 1975）。気孔開度は最上位の葉から 2, 3 枚目の葉について測定し平均値を求めた。なお開度の測定は、ガス処理前すなわちガス処理直前または処理前日の午前に行なった。

茎葉の組織汁液の生体酸化還元電位（茎葉の Eh）の測定は、生体 1g に純水 8 ml を加え高速破砕器ポリトロンで組織汁液を調製し、その液の Eh 値をポテンシオメーターで測定し、電極挿入 3 分後および 5 分後の測定値の平均値を求めた。測定は 2 点でその平均値を用いた。オゾンによる葉の被害は、3 ポット（6~9 個体）につき頂葉から第 2~4 枚目の葉について全葉面積に対する被害葉面積の % を測定し、その平均値を求めた。なお茎葉の Eh の測定はガス処理直前に行なった。

実 験 結 果

1. 環境条件を異にする場合における気孔開度 および 茎葉生体酸化還元電位とオゾン被害との関係

(1) 日照の影響

オゾンガス処理前の日照の影響をみるために、寒冷紗 1 枚および 2 枚で被覆した弱度遮光区（54 % 遮光）および強度遮光区（81 % 遮光）の別ならびに短期遮光（6 月 9 日~11 日）および長期遮光（6 月 9 日~24 日）の別を設けた。供試材料は 4 月 18 日小型ビニールポットに 3 粒播にして育てた水稲品種ヤマビコである。

オゾン処理は、短期遮光区は 6 月 11 日、長期遮光区は 6 月 24 日の午前 11 時~午後 1 時、O₃ 濃度 0.3 ppm、照度 3 万ルクス、温度 30°C、湿度 70~80 % であった。

馬場・稲田（1955）は、さきに遮光によって茎葉の Eh が高まることを認めたが、本実験でも第 1 表のように遮光程度が大きいほど、また遮光期間が長いほど茎葉の生体 Eh₀ が高くなることを認めた。そして茎葉の Eh₀ (B) および気孔開度（浸潤指数）(A) × (B) の値が大きいほどこれらに平行してオゾン被害葉面積 % が大きくなることが認められた。

第1表 遮光処理の影響(イネ, トマト)

実験 番号	作物	区 別		気孔開度 (浸潤指数) A	茎 葉 Eh _g (mV) B	A × B	オゾン被害 葉 面 積 %
I	水 稲	短 期 遮 光 (6月9~11日)	無 遮 光	0.21	322	67.6	10.6
			弱 度 遮 光	0.22	337	74.1	14.3
			強 度 遮 光	0.23	347	79.8	17.5
II	水 稲	長 期 遮 光 (6月10~24日)	無 遮 光	0.30	365	109.5	9.0
			弱 度 遮 光	0.33	377	124.4	19.3
			強 度 遮 光	0.33	413	136.3	26.7
	トマト	同 上	無 遮 光	3.33	480	159.8	21.0
			弱 度 遮 光	3.40	499	169.7	57.1
			強 度 遮 光	3.50	488	170.8	91.7

4月28日播種して2本立で育てた長期遮光のトマトについてもイネの場合とほぼ同様の傾向がえられた。

(2) 気温の影響

水稲についてオゾンガス処理前の気温とオゾン被害との関係をしらべるために成稲を用いた第I実験と、苗を用いた第II実験を行なった。第I実験では、4月18日播種し、5月20日に1/5,000aポットに3本立にして移植し、以後水耕栽培した成稲を6月21日~7月5日の間20°C, 25°C, 30°Cのファイトロンに留置して温度処理を行なった。各温度処理を行なった水稲につきガス処理を7月5日午後0時~2時、O₃濃度0.3ppmで行なった。照度2.5万ルクス、温度30°C、湿度70~80%。

第II実験では、6月10日小型ビニールポットに播種し4本立にして育てた水稲苗を7月3~5日の間第I実験と同じくファイトロンにポットを留置し、温度処理を行なった。オゾンガス処理は7月6日午後0時~2

第2表 温度の影響(イネ)

実験 番号	処 理 気 温	気孔開度 (浸潤指数) A	茎 葉 Eh _g (mV) B	A × B	オゾン被害 葉 面 積 %
I (成稲)	20°C	0.30	305	91.5	8.2
	25°C	0.35	311	108.9	17.8
	30°C	0.40	329	131.6	26.2
II (苗)	20°C	0.30	266	79.8	4.03
	25°C	0.40	293	117.2	4.67
	30°C	0.43	318	136.7	14.20

時、O₃濃度0.3ppmである。照度2.5万ルクス、温度30°C、湿度70~80%。

馬場・稲田(1955)は水温を高めると茎葉Eh_gが高まることを認めたが、本実験でも水稲苗、成稲のいずれでも第2表のように気温を高めると気孔開度(浸潤指数)(A)、茎葉Eh_g(B)。したがってA×Bが大きくなり、それに平行してオゾン被害葉面積%が著しく増大することが認められた。

(3) 土壤水分の影響

水稲，ダイズ，トマトを用いて，土壤含水量と作物のオゾン被害との関係をしらべるために3つの実験を行なった。

第I実験（水稲）

6月10日小型ビニールポットに播種し10本立にして畑状態（最大容水量に対する土壤含水量70~80%）で育てた苗について，7月8~13日の間1日3回ポットを秤量して土壤含水量を最大容水量に対する%で50，60，80，100%に調節した。なお，別に湛水区も設けた。7月13日朝，気孔開度および茎葉 Eh_0 を測定したあと午後0時~2時30分の間， O_3 濃度0.3ppmのガス処理を行なった。照度2.5万ルクス，温度28°C，湿度75~80%。

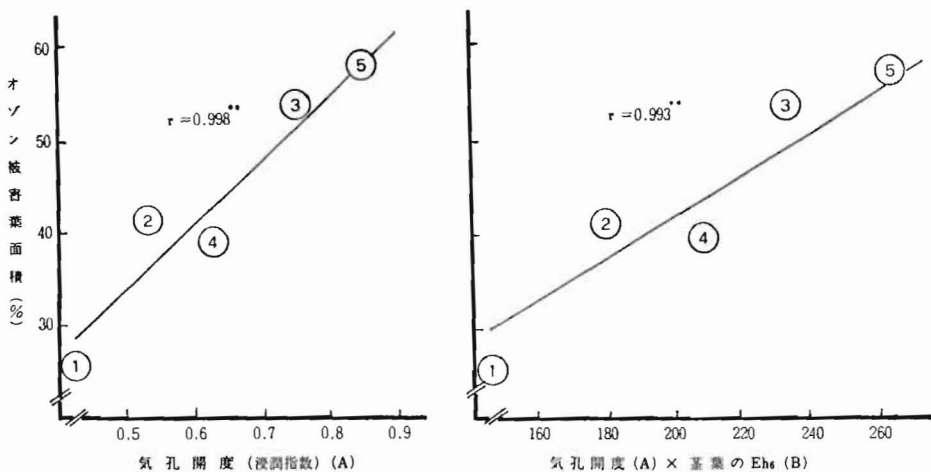
第3表 土壤水分の影響（第I実験イネ）

区番号	土 含 水 量 %	気孔開度 (浸潤指数) A	茎 葉 Eh_0 (mV) B	A × B	オゾン被害葉面積 %
1	50	0.42	352	147.8	25.8
2	60	0.55	327	179.9	41.5
3	80	0.75	311	233.3	53.7
4	100	0.63	333	209.8	39.0
5	湛 水	0.85	313	266.1	58.1

その結果は，第3表のように土壤含水量80%より含水量が低下するにしたがって気孔開度（浸潤指数）(A)が顕著に低下し，茎葉の Eh_0 (B) が土壤含水量の低下によってやや上昇したにもかかわらず，A × Bは土壤含水量の低下に平行して減少し，それに平行してオゾン被害葉面積%は顕著に減少した。

湛水区は，80%区と略同一の傾向を示したが，100%区は80%区および湛水区より気孔開度が小さく， Eh_0 がやや高かったが，A × Bが減少し，オゾン被害面積%も減少した。

全区を通して第1図のように気孔開度 (A) および気孔開度 (A) × 茎葉 Eh_0 (B) と



第1図 土壤含水量を異にする場合の気孔開度および茎葉の Eh_0 とオゾン被害との関係

(注) ○内の番号 1. 土壤含水量 50% 2. 同 60% 3. 同 80% 4. 同 100% 5. 湛水

オゾン被害葉面積%との間に正の高い相関関係が認められた。

第II実験 (ダイズ)

7月20日小型ビニールポットに播種し、2本立にして適湿(土壤含水量70~80%)で育てたダイズについて7月17~20日の間土壤水分を異にする、75%(適湿)区、100%(飽水)区および湛水区の別を設け、7月20日朝気孔開度(浸潤指数)、莖葉 Eh_0 を測定し、午前11時~午後1時30分、 O_3 濃度0.3 ppm のガス処理を行なった。照度2.5万ルクス、温度28°C、湿度75%。

第4表 土壤水分の影響(ダイズ, トマト)

実験番号	土 壤 含 水 量	気孔開度 (浸潤指数) A	葉 の Eh_0 (mV) B	A × B	オゾン被害 葉 面 積 %
II (ダイズ)	75%	4.78	399	1907	30.7
	100%	1.95	388	757	23.0
	湛 水	1.13	404	457	19.7
III (トマト)	75%	1.90	445	846	25.2
	100%	1.65	468	772	23.9
	湛 水	0.30	458	137	4.0
IV (トマト)	55%	0.31	480	149	3.3
	75%	1.60	459	734	23.8
	100%	1.43	450	644	17.4

その結果は第4表のように、適湿より土壤水分の増加とともに気孔開度(A)が顕著に減少し、莖葉 Eh_0 (B)がやや高くなったにもかかわらずA×Bが低下し、これに平行してオゾン被害葉面積%が減少した。

第III実験 (トマト)

7月15日小型ビニールポットに播種し、2本立にして適湿の土壤水分で育てたトマトについて、8月13~15日の間土壤含水量75%区、100%区および湛水区を設けた。8月15日朝気孔開度(浸潤指数)(A)および葉 Eh_0 (B)を測定したあと午後1~2時、 O_3 濃度0.3 ppm のガス処理を行なった。照度2.5万ルクス、温度28°C、湿度75%。

その結果は第4表のように、75%、100%、湛水の順、すなわち土壤水分が多い順にAおよびA×Bが顕著に低下し、これに平行してオゾン被害葉面積%が顕著に減少した。

第IV実験 (トマト)

9月16日小型ビニールポットに播種し、11月1日より20°Cのフットロンで育てたトマトについて11月21~25日、土壤含水量55%、75%、100%区の別を設け11月25日朝気孔開度(A)と葉の Eh_0 (B)の測定をした後、午後1~2時に O_3 濃度0.3 ppm のガス処理を行なった。照度2.5万ルクス、温度28°C、湿度70%。

その結果は、第4表のように土壤含水量75%(適湿)区が気孔開度(A)が最も大きくてオゾン被害が最大、これより土壤含水量が大きくても小さくても、気孔開度(A)お

よび $A \times B$ が減少し、葉のオゾン被害も減少した。

以上4実験を通じ、供試畑作物では、適湿より土壤含水量が多くても少なくても、気孔開度 (A) が減少し、葉の Eh_0 (B) が概して多少上昇するにもかかわらず $A \times B$ は減少し、これに平行して葉のオゾン被害が少なくなることがわかった。

2. 栽培条件を異にする場合における気孔開度 および 葉の生体酸化還元電位とオゾン被害との関係

(1) 肥料条件の影響

チッソ肥料 3月20日播種し育てた苗を5月5日1/10,000aポットに3本立に移植して湛水状態で栽培した水稲について、チッソ施用量を異にする N_0, N_1, N_2, N_3 区 (硫酸アンモニアをポット当たりそれぞれ, 0, 0.5, 1.0, 2.0g を施用) を設けた。過リン酸石灰 1.0g, 硫酸カリ 0.5g は全区に施用した。

第5表 チッソ施用の影響 (イネ)

6月8日朝、気孔開度および葉身の Eh_0 を測定するとともに午後1~3時に O_3 濃度 0.3 ppm のガス処理を行なった。照度 2.5 万ルクス, 温度 $30^\circ C$, 湿度 80%。

チッソ施用量	気孔開度 (浸潤指数) A	葉身の Eh_0 mV B	$A \times B$	オゾン被害葉面積 %
N_0	0.04	288	11.5	1.0
N_1	0.17	297	50.5	2.3
N_2	0.47	300	141.0	21.0
N_3	0.70	284	198.8	36.2

その結果は第5表のように、チッソ施用量の増加とともに、気孔開度 (A), 気孔開度 \times 葉身 Eh_0 ($A \times B$) が増加し、これと平行して葉のオゾン被害が増加した。

カリ肥料 4月28日播種し、5月20日1/5,000aポットに3本ずつ移植し、標準区 (+K) とカリ無施用 (-K) の区別を設けて水耕培養した水稲について、6月10日朝、気孔開度 (浸潤指数) および葉身の Eh_0 を測定したあと、午前11時30分~午後2時、 O_3 濃度 0.3 ppm のガス処理を行なった。照度 2.5 万ルクス, 温度 $28^\circ C$, 湿度 80%。なお -K 区は +K 区にくらべて草丈が低かったが、下葉にカリ欠乏の徴候である褐色の斑点はみられなかった。

第6表 カリ欠乏の影響 (イネ)

区別	気孔開度 (浸潤指数) A	葉身の Eh_0 mV B	$A \times B$	オゾン被害葉面積 %
+K	0.30	399	119.7	30.8
-K	0.33	384	126.7	49.2

実験の結果は第6表のように -K 区は +K 区にくらべて、気孔開度 (浸潤指数)

A はやや大きく、生体 Eh_0 (B) は幾分低下したが、 $A \times B$ はやや大きかった。葉のオゾン被害葉面積 % も増大した。

チッソ, リン酸, カリの欠乏 5月25日播種して育てた苗を、7月2日1/2,000aポットのふた板にはめこんだ2個のザルに移植し、水耕培養を行なった。

7月25日に標準区, チッソ, リン酸, カリを欠除する区およびチッソ2倍濃度の区を設けた。8月8日と9日の2回、1株ごとに1ℓの容器に移し、朝気孔開度 (浸潤指数)

(A) および葉身の Eh_0 (B) を測定するとともに午前 11 時～午後 2 時の間オゾンガス処理を行なった。 O_3 濃度 0.3 ppm, 照度 2.5 万ルクス, 温度 25°C, 湿度 75 % である。

2 回測定の前平均値をとると, 第 7 表のように, 前記の実験と同じく, チッソの欠乏により気孔開度 (浸潤指数) (A) および気孔開度 (A) × 葉身 Eh_0 (B) が減少し, これに平行してオゾン被害が減少した。

第 7 表 チッソ, リン酸およびカリの影響 (イネ)

日 別	気孔開度 (浸潤指数) A	葉身の Eh_0 mV B	A × B	オゾン被害 葉面積 %
標準(N)	0.94	302	284	2.44
チッソ欠乏 (N→-N)	0.85	308	262	2.19
-P	0.95	272	258	1.73
-K	1.18	270	319	2.56
2 N	1.02	296	302	5.33

リン酸欠乏区では標準区にくらべて葉の Eh_0 (B), A × B 値が減少し, それに平行して葉身のオゾン被害が少なくなった。

カリ欠乏区では, 生体 Eh_0 (B) がやや減少したが, 気孔開度 (A) が増大

したので, A × B が大きくなり, オゾン被害が増大した。 2 N 区では気孔開度 (A) および A × B の増大と平行して葉身のオゾン被害が大きくなった。

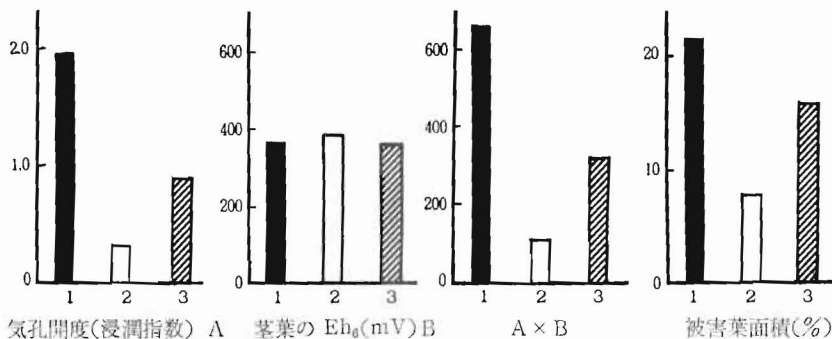
以上チッソの増加およびカリの欠乏では, 概して A × B の値が増加すると葉身のオゾン被害が増大し, チッソ, リン酸の欠乏では A × B の減少に平行して被害が減少した。

(2) 本田における土用干の効果

土壤水分の低下が気孔の開度を低下させてオゾン被害を軽減することがわかったので, 土用干のように水田の落水を行なって土壤の乾燥をはかる処置が被害を軽減するのではないかと考えて実験を行なった。

5 月 25 日 播種して育てた苗を, 7 月 1 日 水田土壤をつめた 1/5,000 a ポットに 3 本ずつ移植した。

試験区は, 標準区 (常時湛水), 7 月 8～20 日土用干区, 土用干後湛水区 (7 月 8～17 日土用干, 7 月 18～20 日湛水) を設けた。 1 区 3 ポット。 なお土用干は稲の葉が昼間高温時に軽微な萎凋を示す程度の土壤の乾燥処理を行なった。



第 2 図 土用干の影響

(注) 1. 標準 (常時湛水) 2. 土用干 (7 月 8—20 日)

3. 土用干 (7 月 8—17 日) 後湛水 (7 月 18—20 日) 7 月 20 日オゾン処理

7月20日朝、気孔開度（浸潤指数）および茎葉の Eh_0 を測定するとともに午後1時～2時30分のオゾンガス処理を行なった。 O_3 濃度 0.3 ppm, 照度 2.5 万ルクス, 温度 30°C, 湿度 80% である。

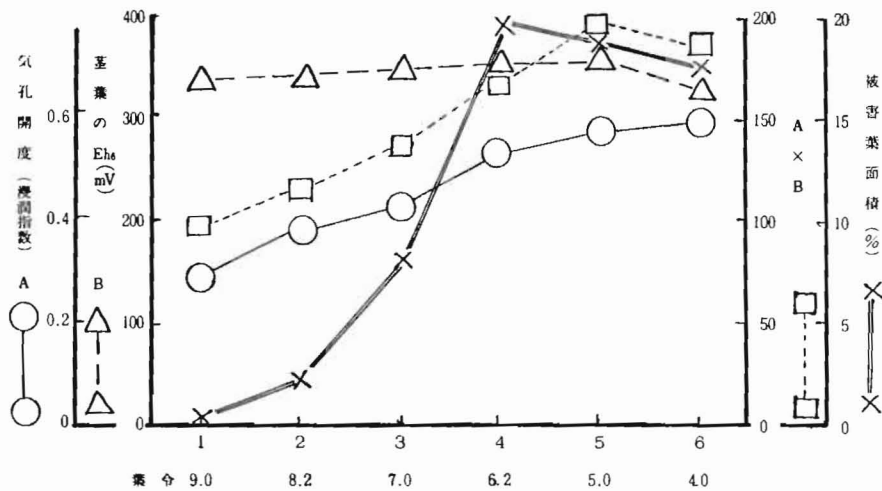
その結果は第2図のように土用干によって気孔開度（浸潤指数）（A）および気孔開度×茎葉 Eh_0 （A×B）が減少するのに平行して葉のオゾン被害は顕著に軽減された。土用干終了後2日間湛水した区では土用干区よりは少ないが、常時湛水区よりも気孔の開度（A）および気孔開度×茎葉の Eh_0 （A×B）が小さく、葉のオゾン被害が少なかった。

3. 作物の生育時期および葉位によるオゾン被害の差異

(1) 水稻の生育時期による差異

4月20日以後10日おきに小型ビニールポットに播種し、8本立にして畑状態で育てた水稻苗の6区について7月2日、気孔開度、茎葉の Eh_0 を測定してから午後1～3時、 O_3 濃度 0.3 ppm, 照度 2.5 万ルクス, 温度 31°C, 湿度 75% のオゾンガス処理を行なった。

その結果は第3図のように、気孔開度（浸潤指数）（A）、茎葉生体 Eh_0 （B）および A×B は葉令5頃が概して最大で、その前後で減少したのに対し、オゾン被害葉面積%は葉令6が最大で、その前後に減少した。

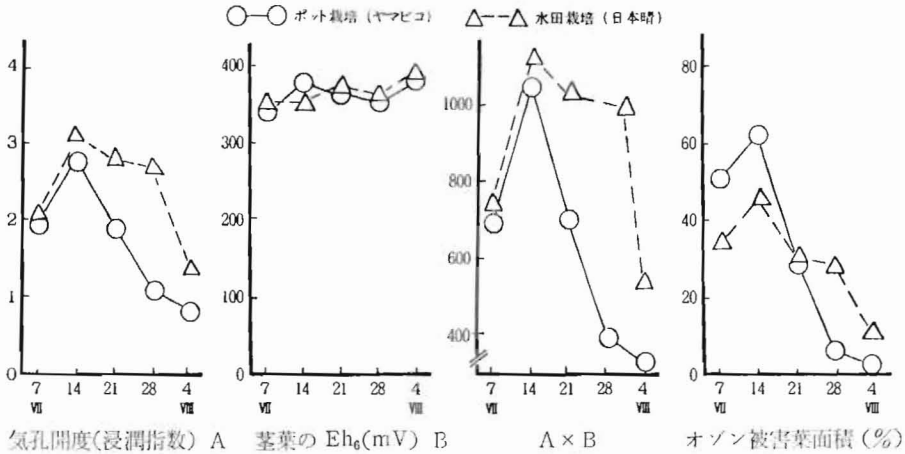


第3図 イネ苗生育時期による気孔開度、茎葉の Eh_0 の変化と葉のオゾン被害との関係

水稻は本田初期にオゾン感受性が高いといわれている（千葉農試 1977 a）。したがって本田移植後の水稻について生育時期による気孔開度、茎葉の Eh_0 およびオゾン被害の差異をつぎの2組の材料について調べた。その1組は6月25日、苗を1/5,000 aポットに3本ずつ移植して栽培した品種ヤマビコであり、ほかの1組は、6月25日水田に移植して栽培した品種日本晴である。この日本晴はオゾンガス処理日の10日前にできるだけ根をいためないように土付きのまま1/5,000 aポットに植えかえたものである。

7月7日以後7日ごとに5回、朝に気孔開度(A)と茎葉のEh₆(B)を測定し、オゾンガス処理は午前11時30分～午後1時30分に行なった。O₃濃度0.3ppm、照度2.5万ルクス、温度30°C、湿度75～80%である。1区2ポット。

その結果は第4図のように、ポット栽培の個体および本田からポットに植えかえた個体

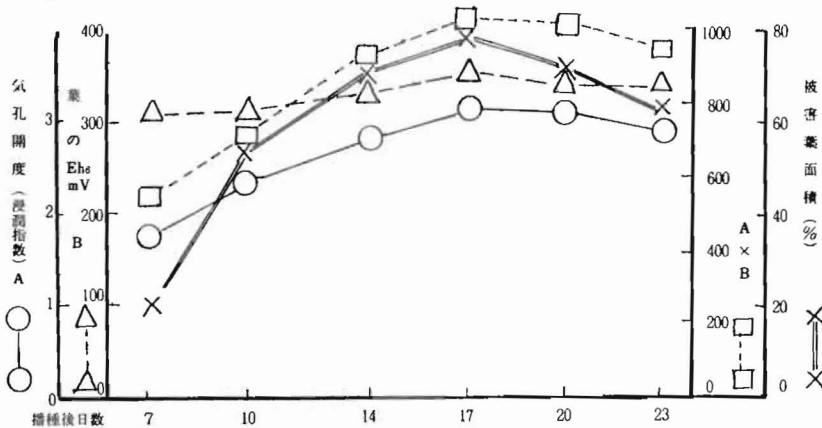


第4図 イネの本田初期における気孔開度、茎葉のEhと葉のオゾン被害との関係
(注) 6月25日移植

のいずれも移植20日あとの7月14日に気孔開度(浸潤指数)(A)および気孔開度×茎葉Eh₆(A×B)の値が最大であった。この時期にオゾン被害葉面積(%)も最大であった。これらの値はその前後の時期に小さく、ことに7月28日以後は非常に小さい値となった。

(2) インゲンの播種後の生育時期による差異

インゲンやワタも播種後の生育時期によってオゾンの感受性がことなるが、これは気孔の開度の変化とは関連づけられないといわれている(Dugger *et al.*, 1962 a, Evance and Ting 1974).



第5図 インゲンの生育時期による気孔開度、葉のEh₆の変化と葉のオゾン被害との関係

したがって20°Cのファイトトロンで10月31日以後3日間隔で7回播種して育てた生育程度の異なるインゲンについて、生育時期による気孔開度、葉の Eh_0 およびオゾンガス被害の差異を比較した。

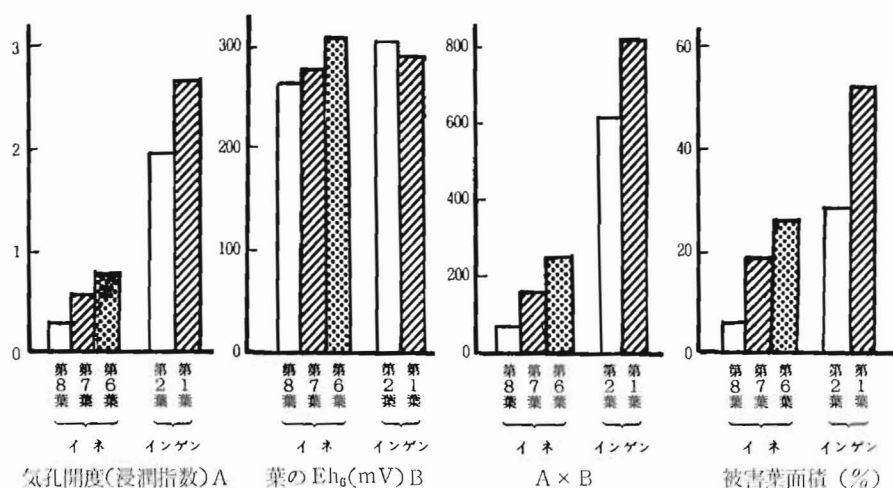
すなわち各区の第1本葉について、11月7日朝に気孔開度(浸潤指数)および葉の Eh_0 を測定するとともに午前11時30分~午後0時30分に、 O_3 濃度0.28ppmのガス処理を行なった。照度2万ルクス、温度25°C、湿度75%である。

その結果は第5図のように、播種後葉のオゾン被害は気孔開度および気孔開度×葉の Eh_0 の増大とある程度平行して増大し、播種後17日頃に最大となり、以後気孔開度、気孔開度×葉の Eh_0 の減少に伴って減じた。

(3) 葉位別の葉のオゾン被害の差異

水稲とインゲンについて葉位を異にする葉の気孔開度、葉の Eh_0 とオゾン被害との関係をしらべた。

水稲は最上位葉から3枚目の葉(展開葉の上から2枚目の葉)がオゾンの被害が最も出やすいといわれている。



第6図 葉位別の葉における気孔開度、 Eh_0 とオゾン被害との関係

(注) イネは6月15日(温室)調、インゲンは3月19日(20°C)調

6月15日第8葉が展開した水稲の個体の第6, 7, 8葉について、朝に気孔開度、茎葉の生体 Eh_0 を測定し、午前11時30分~午後1時30分に O_3 濃度0.3ppmのガス処理を行なった。照度2万ルクス、温度31°C、湿度75%である。

その結果第6図のように気孔開度(A)、葉の Eh_0 (B)、A×Bのいずれも第8, 7, 6の順に大きく、これはオゾン被害葉面積(%)の順とも一致していた。3月19日にしらべたインゲンについても、気孔開度(A)および気孔開度×葉の Eh_0 (A×B)は第1葉が第2葉より大きく、この順序はオゾン被害葉面積(%)の順序とも一致していた(第6図)。

4. 水稲のオゾン被害の1日中の時刻による差異

松丸ら(1976)は水稲やラッカセイのオゾン感受性は午前より午後の時刻が大きいこと、

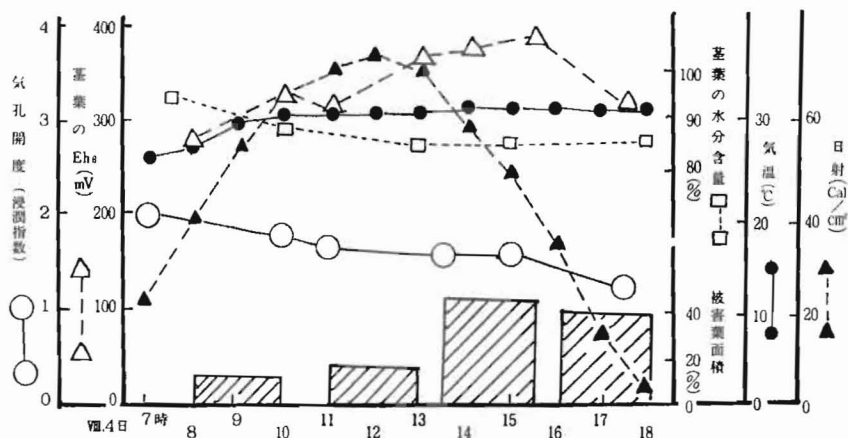
篠原ら(1975 a) はタバコで, Heck, and Dunning (1967) は pint bean でオゾン感受性の日変化を報告している。

したがって, 本実験では水稻を用いて気孔開度, 茎葉 E_h の日変化とオゾン被害との関係をしらべた。

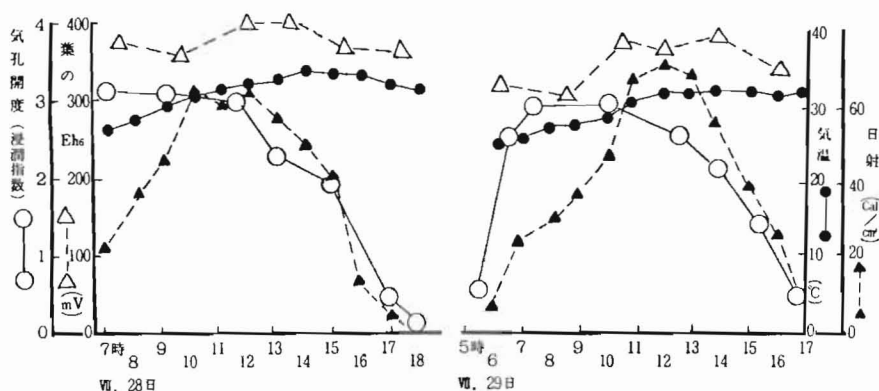
6月30日, 1/5,000 aポットに移植して育てた水稻品種日本晴について快晴高温の8月4日午前7時より午後6時の間に気孔開度(浸潤指数)および葉の E_h の時刻による推移をしらべるとともに, 1日2時間ずつの4回, すなわち午前8時~10時, 午前11時~午後1時, 午後1時30分~3時30分および午後4時~6時にオゾンガス処理を行なった。 O_3 濃度 0.35 ppm, 照度 3.0 万ルクス, 温度 $32^{\circ}C$, 湿度 80% である。日射量および気温の値は当研究所の気象観測施設の測定値である。

その結果は第7図のように, 気孔開度(浸潤指数)は午前7時に最大で, 以後夕刻まで漸減したが, 茎葉の E_h は午前11時頃から午後3時頃の間がその前後の時刻より高い値を示した。イネの茎葉の水分含量は午後減少した。

これら夏季高温多照時の気孔開度および葉の水分含量の日変化は石原ら(1971 a, b,



第7図 気孔開度, 茎葉 E_h , 茎葉の水分含量ならびに気温, 日射の日変化とオゾン被害との関係



第8図 イネの本田期における葉の気孔開度, E_h および気温, 日射の日変化

1974)の結果と軌を一にしている。

このように温度、日照ともに午前10時から午後3時までの間は大差がなく、気孔開度は午後には低下したにもかかわらずオゾン被害は午後著しく増大した。この事実に対しては後に茎葉生体 E_h が高くなったこととの関連が推測されよう。

7月28日～29日の間圃場に栽培された水稲品種日本晴について、気孔開度(浸潤指数)と葉の E_h 値の時刻による変化をしらべた結果、第8図のように気孔は日の出とともに開き、開度は午前7時～10時頃最高となり以後漸減し日没とともに閉鎖するのに対し、葉の E_h は朝は低いのが午前10時～11時頃から増大し、午後2～3時までに高い値が示された。この気孔開度と葉の E_h 値の日変化の傾向はポット栽培の第7図の水稲と傾向が同じであった。

5. 作物および品種間におけるオゾン被害の差異

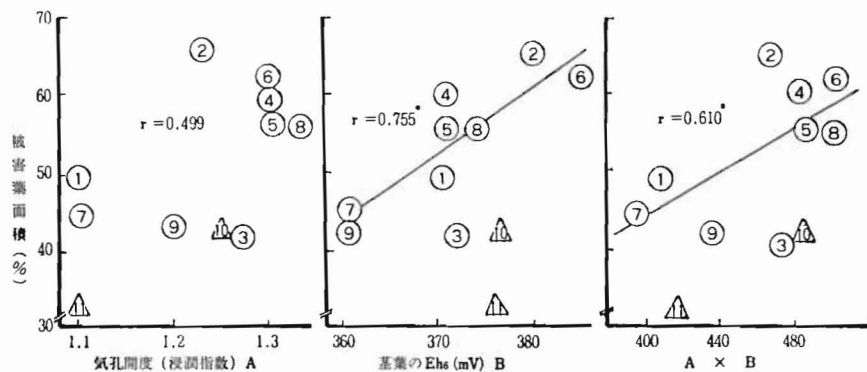
(1) 水稲品種間におけるオゾン被害の差異

水稲品種間における気孔開度(浸潤指数)および茎葉 E_h とオゾン被害との関係を明らかにするために実験を行なった。

6月20日小型ビニールポットに播種し8本立に育てた水稲日本品種9, 印度型品種2について8月1日および8月8日の朝の2回、オゾンガス処理前に気孔開度(浸潤指数)および茎葉 E_h を測定し、午前11時～午後1時30分、 O_3 濃度0.3 ppmのガス処理を行なった。照度3.0万ルクス、温度30°C、湿度70%。

8月1日の材料は畑状態で育てたもの(第9図)、8月8日の材料は湛水状態で育てたものである(第10図)。

第9, 10図から水稲品種間に、オゾン被害に差異があり、日本品種にくらべて供試印度型品種はオゾン被害が少ない。すなわち感受性がごく低いことが認められる。

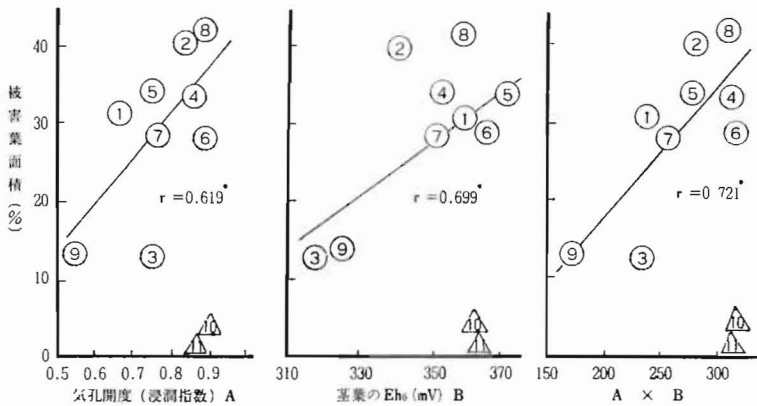


第9図 水稲品種間における気孔開度、茎葉 E_h とオゾン被害との関係(その1)

- (注) 1) 品種 1. 陸羽132号 2. 玉錦 3. 千葉旭 4. 農林22号
 5. ヤマビコ 6. 日本晴 7. 農林37号 8. 金南風
 9. 農林8号 10. 銀粘 11. Te-Tep
 2) ○は日本品種, △は印度型品種
 3) 相関係数は印度型品種を除外した値
 4) 畑状態ポット栽培

日本品種のうちでは、畑栽培のもの、湛水栽培のものを通して玉錦、農林22号、金南風、ヤマビコが被害が大きく、すなわちオゾン感受性が高く、農林37号、千葉旭、農林8号が被害が少ない。すなわち感受性が低いことがわかる。

つぎに気孔開度、茎葉の Eh_0 とオゾン被害との関係を見ると、畑栽培の印度型品種を除いた日本水稲品種間では、茎葉 Eh_0 (B) および気孔開度×茎葉 Eh_0 (A×B) とオゾン被害との間に有意の相関がみとめられた(第9図)。



第10図 水稲品種間における気孔開度、茎葉 Eh_0 とオゾン被害との関係(その2)

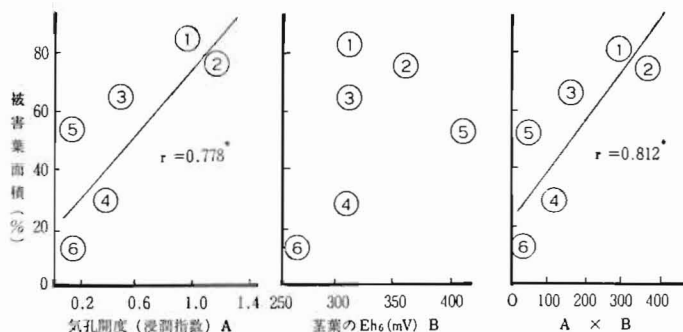
(注) 1) 第9図1)~3)参照 2) 湛水状態ポット栽培 3) 8月8日 O_3 処理

湛水栽培の日本水稲品種間では、気孔開度(A)、茎葉 Eh_0 (B) および A×B とオゾン被害との間に有意の相関が認められた(第10図)。このことは水稲日本品種間では気孔開度、茎葉 Eh_0 の両者がオゾン感受性と密接な関係のあることを示している。供試印度型品種は日本品種とはちがったオゾン抵抗性をもつことが示唆される。

(2) 畑作物間のオゾン感受性の差異

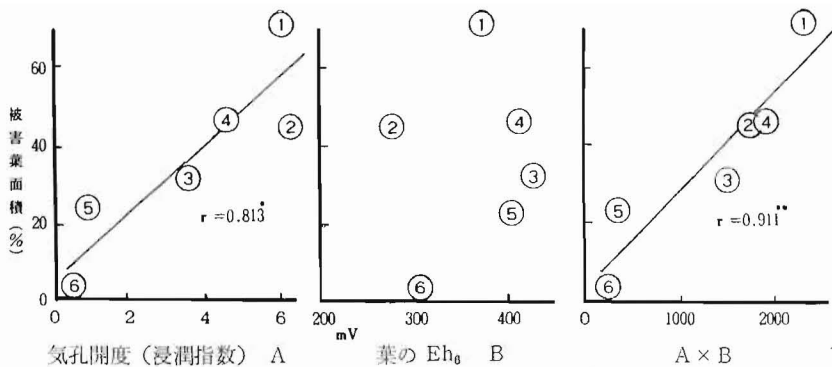
畑作物においては、作物間にオゾン感受性に大きな差異のあることが知られている。したがって、おもに畑作物5種に水稲をまじえて作物間における気孔開度、葉の Eh_0 とオゾン被害との関係をしらべた。実験は2回行ない、第一実験は春季、第二実験は夏に行なった。

第一実験 水稲(ヤマビコ)は4月10日、トマト、ダイコンは4月15日、インゲン、ダイズ、トウモロコシは4月28日に播種し、小型ビニールポットで育てた。6月4日午前気孔開度、葉の Eh_0 を測定したあとオゾンガス処理を行なった。オゾン濃度 0.3 ppm、



第11図 作物間における気孔開度、葉の Eh_0 とオゾン被害との関係(その1)

(注) 1) 1. インゲン 2. ダイコン 3. トマト 4. ダイズ
5. トウモロコシ 6. イネ



第12図 作物間における気孔開度、葉の Eh_6 とオゾン被害との関係(その2)

(注) 1) 作物名番号は第11図と同じ

ガス処理時間は午前11時30分～午後1時、照度2.5万ルクス、温度28°C、湿度75%。

第二実験 水稲は6月20日、トマト、ダイコンは7月10日、インゲン、ダイズ、トウモロコシは7月15日に播種し、8月8日午前気孔開度、葉の Eh_6 を測定したあとオゾンガス処理を行なった。オゾン濃度0.3 ppm、ガス処理時間午後0時～1時30分、照度2.0万ルクス、温度28°C、湿度75%。

第一、第二実験を通じて葉面被害の大きいものはインゲン、ダイコン、中位のはダイズ、トマト、トウモロコシ、小さいものは水稲であった。作物のオゾン感受性は環境条件、生育時期等によってある程度変ると思われるが、この作物間の被害の差異は既往の研究報告や知見に類似している。

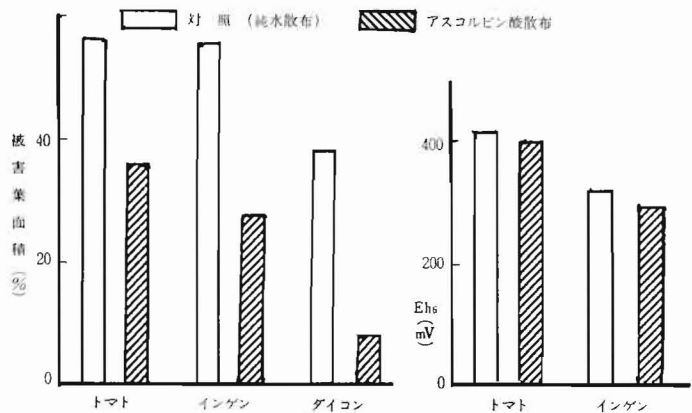
つぎに作物間において、気孔開度(浸潤指数)(A)および気孔開度×葉の Eh_6 (A×B)とオゾン被害との間に有意の相関関係が認められた(第11, 12図)。しかし、水稲品種間の場合と異なり、作物間では葉の Eh_6 とオゾン被害との間には密接な関係は認められなかった。

6. アスコルビン酸とオゾン被害との関係

アスコルビン酸(還元型)は、オキシダント被害を軽減させるといわれている (Freebairn 1960, Siegel 1962,

Dass and Weaver 1968, Hanson *et al.* 1971, 太田ら 1972, 三宅 1973)。またアスコルビン酸は、茎葉の Eh_6 と密接な関係があることが知られている (馬場・稲田 1956)。

したがって、アスコルビン酸の葉面散布が葉のオゾン被害ならびに葉の Eh_6 に及ぼす



第13図 アスコルビン酸の葉面散布が葉の Eh_6 およびオゾン被害におよぼす影響

影響を検討した。

作物は、トマト、ダイコン、インゲンで、トマト、ダイコンは10月2日播種、インゲンは10月15日播種で小型ビニールポットで育てた。

11月20日、0.01 Mのアスコルビン酸ソーダをトマト、インゲン、ダイコンに葉面散布した。対照区には純水を散布した。

その結果は第13図のようにいずれの作物でもアスコルビン酸の葉面散布でオゾン被害が軽減すること、トマト、インゲンについてアスコルビン酸を葉面散布した場合、葉の Eh_0 が低下することがわかった。

考 察

環境条件や栽培条件はオキシダントやオゾンの被害の発生に大きな影響を及ぼす (Rich 1964, Heck 1968, Taylor 1974, Dugger 1974, Ting and Heath 1975, Heath 1975)。したがって本研究では光線 (日射)、温度、土壤水分、肥料成分等とオゾン被害との関係を検討した。

まず日射については、オゾン処理前の短期および長期の遮光は遮光程度の大きいほど被害を増大することを認めたが、この事実は、タバコで遮光や弱光で育つとオゾン感受性がまずという既往の報告と傾向を同じくしている (Ting and Dugger 1968, 篠原・福田 1973, Shinohara *et al.* 1974)。なお、オゾン処理前に連続して24~72時間暗所におくと時間が長いほど感受性が少なくなる (Shinohara *et al.* 1974) が、その理由はわかっていない。

また、オゾン処理前高温で育った水稲は低温で育ったものよりオゾン被害が著しいことを認めたが、これもオゾン処理前の高温、ことに暗期高温でオゾン感受性が増すという既往の報告と傾向を同じくしている (Menser *et al.* 1963 a, Macdowall 1965, Shinohara *et al.* 1973, 篠原ら 1973, 1975 a)。

オゾン処理前での弱光および高温によるオゾン感受性の増大の原因として高温の場合の糖含量の低下をあげているものもあるが (篠原ら 1973)、未だ判然としてはいなかった。

本研究でオゾンガス処理前の遮光によるオゾン被害の増大が莖葉 Eh_0 の上昇と密接な平行関係があることから、生体 Eh_0 の上昇がオゾン被害の増大を導いている一原因ではないかと考えられる。

土壤水分の低下がオゾン被害の発生を少なくすることは、人工灌漑をうけたタバコよりも灌漑をうけないで萎凋したものがかえってオゾン被害が少ないことを経験し、その原因が気孔の閉鎖にあることが指摘された (Walker and Vickery 1961)。

著者ら (1975) も既に土壤水分の低下が気孔開度を小さくして気孔から侵入する亜硫酸ガスを減少させて被害を少なくすることを認めている。本研究でも水稲、畑作物いずれも土壤含水量70~80%で気孔の開度が大きくてオゾン被害が大きいが、これより土壤含水量が低下するにしたがって気孔開度が減少し、オゾン感受性が顕著に低下することが確認された。

Stolzy *et al.* (1961) は土壤中の酸素分圧を下げると、トマトのオゾンの被害が少なく

なることを認めた。これは土壤中の酸素不足で根の機能が衰退し吸水力が減退し、気孔開度が減少するに至るためと推測されるが、実際本研究で適湿より土壤水分が多くなると、気孔開度が顕著に減少しオゾン被害が減少することがわかった。

水稲は勿論、湛水状態では、気孔開度が最も大きくてオゾン被害も最も大きい。土壤含水量 100%、すなわち過湿の土壤含水量では湛水区や適湿 (80%) 区よりオゾン被害が少なかった。稲は過湿の土壤含水量で根の機能が著しく衰退する (渡辺・安尾 1961) ので吸水力の低下に伴って気孔開度が減少し、オゾン被害が低下したものと考えられる。

また、本田初期の土用干による水分ストレスによって気孔の開度が減少し、オゾン被害が軽減されたが、土用干が終って再び湛水した場合にも気孔の開度は完全にはもとにもどらず、常時湛水より気孔開度が小さくてオゾン被害が少なくなった。

このことは、水稲は苗代期および本田期の初期、中期の土用干によって水分ストレスを受けると、生育の後期までも乾性的形態や乾燥適応的生理機能を獲得するようになること (馬場 1978) とも相通ずる現象として注目をひく。同時に土用干が実際の圃場においても水分ストレスの誘因となり、土用干が終った後でも気孔開度の減少をまねきオゾン被害を軽減する可能性が考えられるので、実際の場面を考えて今後さらに検討を必要とする。なお本研究では、水稲は移植後 20 日頃が気孔の開度が最も大きく、オゾン被害も著しいことが認められた。この時期は、一般に移植後オゾン被害が発生し易い時期とも合致している。

本実験で気孔開度の測定に用いた浸潤法はきわめて使用が簡便であるので、実際の場面でも気孔開度とオゾン被害の発生との関係をしらべることによって作物の生育時期などによるオゾン感受性の診断への利用が考えられる。

肥料成分としては、チッソがオゾン感受性に大きな影響をもっている。チッソとオゾン感受性に関しては、チッソがオゾン感受性を高める植物、(Middleton 1957, Brewer *et al.* 1961, 中村・松中 1974, 岡山農試 1977, 千葉農試 1977c) とタバコのようにチッソが少なかったり、植物が老化して肥切れになるとかえって感受性の高まるものがある (Macdowall 1965, 喜田・黒田 1973)。

また、チッソが多いと気孔開度が增大することが知られている (馬場・酒井 1976a, 石原ら 1978)。

本研究から水稲はチッソの施用でオゾン感受性が顕著に増大する作物に属し、その原因が気孔開度の増大にあると考えられる。すなわち、チッソ施用量を減少した場合だけでなく、生育途中からチッソの肥切れを起した場合にも気孔開度が小となり、オゾン感受性が低くなることがわかった。

カリが不足したり欠乏したりするとオゾン被害が増大し (兵庫農試 1977)、多く与えると被害がやや少なくなるといわれる (千葉農試 1977c)。

本研究でも、カリを少なくしたり、欠除したりすると気孔開度がやや大となりオゾン被害が多少増大することが認められた。しかし、カリの影響はチッソにくらべてはるかに小さい。

作物の生育時期や葉令によってオゾン感受性が異なることが知られている。本研究でも水稲は苗代期では 5, 6 葉期が最もオゾン感受性が大きく、その後低下した。本田期においても移植後 20 日頃が最もオゾン被害が大きく、その時期がすぎると急速に感受性が下

がることを認めたが、このことは千葉農試 (1977a) の成績と傾向を同じくしている。本田初期における感受性の増大は、気孔開度の増大と平行していることがわかった。

これは移植後しばらくは植傷みで、気孔開度が減少したのがその後活着して水およびチッソの吸収が次第に増加し、ことにチッソ含量の増大に伴って気孔開度が著しく大きくなり、オゾン感受性が最大となったと考えられる。移植後 20 日の時期は水稲の赤枯病の発生が多くなる時期でもあるが、赤枯病ではこの頃植物体の可溶性チッソが増大し、炭水化物の含量が著しく低下する時期に当ることが知られている (馬場ら 1954, 馬場・田島 1961)。水稲の生育時期によるオゾン被害と体内炭水化物や糖との関係については今後の研究にまたねばならない。

苗代期の水稲の生育時期によるオゾン感受性の差異と気孔開度や生体 Eh_0 との関係についてはあまりはっきりした結果がえられなかった。

インゲンの第 1 本葉の感受性については、既往の文献では播種後 10~12 日頃に最も高いといわれているが、本成績では 17 日頃が最も高くなった。これは試験が行なわれたときの温度等の影響が考えられ、生育に伴う感受性の推移に関しては傾向を同じくしているといえよう。

本実験では、播種後のオゾン感受性がある程度気孔開度と生体 Eh_0 が関係がありそうなデータにはなっているが、はっきり断言は差しひかえたい。それはこれまでの報告では播種後の葉の age による感受性の差異は気孔開度よりは糖などの貯蔵養分の多少で説明されているからである。

生育時期による葉のオゾン感受性の差異については、例えば Dugger *et al.* (1962b) は pint bean のオゾン感受性は葉の糖含量が生体 1g 当 4~1 mg のとき最大で、この幅より糖含量が増減すると被害をうけにくくなるという仮説を提示した。

インゲン第 1 本葉は播種後 10 日頃の感受性が最大であるが、この時期が前後の時期より糖含量が低下して 4~1 mg の幅に入り易いからである。この時期より前の播種後 7 日頃は糖含量がこの幅より高く感受性が低い。子葉を切除して第 1 本葉の糖含量を下げれば感受性となる糖含量になり、また、感受性のものでも糖を吸わせて糖含量をあげれば感受性でなくなる。

また、オゾン処理前の暗期を 12 時間以上の 24 時間の暗期にすると糖含量が低下してオゾン被害をうけやすくなるが、さらに 36~72 時間と暗期を延長すると再び被害をうけなくなる。しかし糖を吸わせると糖含量が増加し、被害が発生する幅内の糖含量となり、被害が発生するという。

Lee (1965) は糖含量がちがうタバコの葉を用いて Dugger *et al.* (1962b) と同じような考えで葉の蔗糖が乾物 1g 当 5~14 mg, 還元糖 5~35 mg の幅で感受性であること、また、蔗糖および還元糖含量と気孔の幅の間に密接な関係があり、蔗糖や還元糖を高めると気孔幅 (開度) が減少し被害をうけにくくなるが、さらに糖含量を高めて気孔開度が閉鎖しても被害を防ぐことができなかった。

Ting and Mukerji (1971) はワタが播種後最もオゾンによわいののは、葉の生長の最大期と葉の展開のおわる時期との中間で、この時期は可溶性糖や free amino acid の pool の濃度が最低のときであること、この時に炭水化物やアミノ酸の欠乏で感受性が高まるの

は、このような時期では被害の修復材料の炭水化物やアミノ酸の欠乏でオゾンによる被害の修復ができないからであると考えた。

しかし Tinge *et al.* (1973) は大豆について可溶性糖の最低の時期とオゾン感受性が最大の時期とが一致していないことを指摘し、また、石原ら (1978) も播種後 12 日頃のオゾン感受性が大きい時期と糖含量との関係について、Dugger らとちがった傾向が認められた。また、服田・寺門 (1975) はアサガオの葉位とオゾン被害との関係で、被害をうける最上位の葉は第 15 葉前後でこれより下位葉に被害面積が広がるが、被害をうける葉は葉面積の拡大が止り葉の表面の気孔開度が大きくなる時期で糖含量の低い値を保つ葉位であるという。

以上のように、葉の age と糖含量との間の関係についても結論がえられていないのが現状である。すなわち、糖含量の増加が気孔開度の減少に導く場合もあることは否定できないとしても、Ting and Mukerji (1971) も示唆した糖の気孔に及ぼす影響以外のオゾン被害を直接保護する要因のあることも否定できないであろうし、糖含量が極端に少なくなったとき、被害が発生しなくなる理由も明らかでない。いずれにしてもインゲンの生育時期とオゾン被害と気孔開度と生体 Eh との関係についても現在の知見では肯定も否定もできないように思われ、今後の研究にまつ必要がある。

作物のオゾン被害が 1 日中の時刻によってことなることが知られている。Hull and Went (1952) は朝より午後がオゾン化ヘキシンに対する感受性が大きいこと、Koritz and Went (1953) はオゾン化ヘキシンによる生育阻害は早朝より昼直後の午後が大きいことを指摘し、Heck and Dunning (1967) はインゲン (pint bean) は昼間近くが早朝または午後おそくより、オゾン感受性が大きいことを認めた。篠原ら (1975 a) もタバコについて午前 6 時から 12 時までの数時間がオゾン感受性が大きく、そのあと漸減することを認めた。

水稲については、松丸ら (1976) は午前 8 時から 2 時間くぎり自然光グロスキャビネットではオゾン処理を行ない午前より午後 0 時から 4 時が感受性が大きいことを認めた。

本研究でも高温、強日射の日、戸外で育った水稲について 3 万ルクスのグロスキャビネットでは 2 時間ずつオゾン処理し、気孔開度は午後には減少するのにも、オゾン感受性は午後が高まることを認めた。なお著者は、水稲は夏季高温多照の日の午後に茎葉の Eh₀ の高まることを認めたが (馬場 1958)、本研究でも同様の事実を認め、本田生育の水稲についても高温強日射の日の昼直後の午後には茎葉生体 Eh₀ が上昇することを認めた。したがって水稲のオゾン感受性の午後の増大は、気孔の開度と直接の関係がなく、むしろ午後茎葉生体 Eh₀ が高まることと関連があるのではないかと推測される。

なお篠原ら (1975 a) はタバコの感受性が日変と葉内蔗糖含量なかんづく sucrose 含量との間に高い負の相関を認めている。水稲の場合の感受性と糖含量との関係については今後の研究にまたなければならない。

作物の種間および品種間にオゾン感受性の差異がある。水稲品種間でもオゾン感受性に差異が知られている (中村 1976, 高崎ら 1978)。本研究でも作物間および水稲品種間にオゾン感受性の差異を認めた。

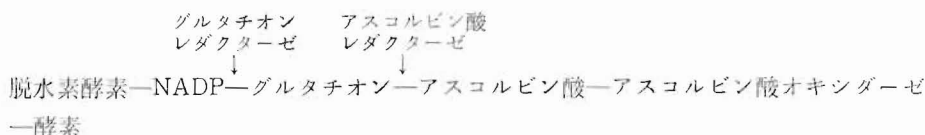
Rich (1964) は、作物のオキシダント抵抗性に関係のある要因として、糖含量、抗酸化

物質, 細胞膜の Suberin 含量, オキシダントに対する気孔の反応などをあげた。気孔の開度とオゾン感受性との関係については, 肯定するもの (Turner *et al.* 1972, 今泉1973, 三宅・宇野 1973) と否定するもの (須山 1973) がある。篠原ら (1975 b) はタバコの品種間では感受性と気孔開度とは必ずしも有意の関係がないが, 感受性と葉の糖含量との間に高い負の相関関係をみとめた。

本研究では水稲日本品種間ではオゾン感受性と気孔開度 (A) および茎葉の生体 Eh_0 (B) および $A \times B$ との間に有意の相関を認めた。また, 作物間でもオゾン感受性と気孔開度, $A \times B$ との間に有意の相関が認められたので, 水稲日本品種間では気孔開度および茎葉生体 Eh_0 とオゾン感受性が密接な関係があると認められ, 作物間でも気孔開度が感受性に関係していると考えられる。

以上の研究から環境条件, 作物品種等を通じてこれまでの知見に加えて生体酸化還元電位がオゾン感受性に関与することがわかった。

著者 (1958) は葉にはアスコルビン酸およびグルタチオンが多量に含まれ, 若干の植物ではつぎのような呼吸系があると考えた。



葉の生体還元電位 (Eh) はアスコルビン酸 および グルタチオンの還元型/酸化型と密接な関係があり, 結局これらの比は上記の呼吸系を通して主に生体 Eh を支配していることを指摘した (馬場 1958)。そして器官別, 日照, 日変化による生体 Eh はアスコルビン酸の還元型/総量の増加する条件で低下し, 無機成分の欠乏および過剰による Eh の低下はアスコルビン酸およびグルタチオンの還元型/総量の両方または一方の増加と関係があると考えた (馬場・稲田 1955, 1956, 馬場 1958)。

アスコルビン酸, グルタチオンとオキシダント, オゾンとの関係については, 古く Freebairn (1960), Freebairn and Taylor (1960), Siegel (1962) はアスコルビン酸を葉面散布すると, その後 72 時間植物体内のアスコルビン酸含量を高め, オキシダント被害が少なくなることを認めた。なお与えたアスコルビン酸の持続性がないことに関連し Freebairn (1963) は根から吸われたアスコルビン酸の 83% は 24 時間で分解されるという。

わが国でもアスコルビン酸, グルタチオンがオキシダント, オゾンの被害を軽減することが認められた (太田ら 1972)。

Menser によると, タバコでオゾン処理前の日長を 22 時間に延長すると, オゾン被害が顕著に減少した。また, オゾン処理前の 14, 42, 66 時間の暗処理は被害を増大したが, この際, 気孔開度とは関係がなかった (Menser *et al.* 1963 a. b)。また, 白熱光による夜の補光は葉のアスコルビン酸を著しく増加してオゾン被害を軽くしたが, 品種のオゾン抵抗性とアスコルビン酸との関係は認められなかった (Menser *et al.* 1964)。同氏らはアスコルビン酸の還元型/総量は求めていない。

著者は生体 Eh_0 の高さの異なる水稲 2 品種の比較で, Eh_0 は, アスコルビン酸の還元型/総量と関係がなく, グルタチオンの還元型/総量の差と関係があることを認めた (馬

場 1958).

前にもふれたように日射の強弱、日変の場合の生体 Eh_0 はおもにアスコルビン酸の還元型／総量の増減によることがわかっている (馬場・稲田 1955, 1956, 馬場 1958), 本研究におけるオゾン処理前の遮光によるオゾン感受性の増大や, オゾン感受性の日変における午後の増大は, アスコルビン酸の還元型／総量の低下によると考えられる.

結局, 日射, 強光, 補光等に伴ってアスコルビン酸 (還元型) が生成蓄積されて Eh_0 を低下し, オゾン感受性を低くし, 遮光, 暗処理等によってアスコルビン酸の酸化に伴って還元型／総量が低下して Eh_0 が高まりオゾン感受性を高めることになったと考えられる.

著者は水稻の生体 Eh_0 は水温の上昇によって高まることを認め (馬場・稲田 1955), Menser *et al.* (1963a) もタバコでオゾン処理前の2週間気温を 5°C 高くした場合および処理前, 夜温を 5°C 上げた場合にもオゾン被害を増大することを認めた. 本研究でも気温の上昇に伴って Eh_0 が高まりオゾン被害を多くすることを認めた. また太田・中山 (1972) はアスコルビン酸 (還元型) を水稻葉に散布すると高温に強くなることを報告している.

結局, 高温によってアスコルビン酸の還元型／総量が低下して, Eh_0 を高め, しばしば生育に悪影響を及ぼし, また, オゾン感受性を高くするものと考えられる.

既報の研究 (馬場・酒井 1976a) および本研究で土壌含水量が低下すると生体 Eh_0 がやや高まることを認めたが, これも気孔の開度が著しく低下し, 蒸散量の減少に伴って植物体温が上昇することが関係しているのではないかと考えられる. しかし土壌含水量に伴ってオゾン感受性が顕著に低下するのは, 気孔の閉鎖によるオゾンの侵入の減少の影響が植物体の含水量の低下に伴う体温の上昇による Eh_0 の増大の影響よりも遙かに大きいからであろう.

また, 水稻は夏季高温多照時, 1日の午後に, オゾン感受性が高まるのも, 午後には植物体の含水量の低下, 体温の上昇に伴って, アスコルビン酸の還元型／総量の低下, 生体 Eh_0 の上昇をもたらすことが関与しているのではないかと思われる.

作物の生育時期によるオゾン感受性に関しては, 三宅・宇野 (1972b) は播種後60日頃の心止期がその前後の時期よりオゾン感受性が高いが, この時期は還元型グルタチオン／総グルタチオンが最も低い時期であるという.

しかし本研究では, 前述のように生育時期によるオゾン感受性の差異について Eh_0 とオゾン感受性の間に明瞭な関係はみられなかった.

以上のように本研究等から植物のオゾン感受性に関係のある事項として気孔開度, 糖含量, 生体 Eh_0 , アスコルビン酸およびグルタチオンの還元型／総量などがあげられるが, これら要因は単独で, あるいは相互に関連をもって作物や品種感受性に影響を及ぼすのではないかと考えられる. したがってそれぞれの要因が感受性と相関を示したり, また示さなかったりして問題を複雑にしているのではないかと考えられる.

本研究で明らかにされた作物のオゾン被害の発生原因と機構は決して暖地に特有のものではない. したがって暖地という環境下において起るオキシダントやオゾンの被害の特異性に関しては, さらに今後の研究にまたなければならない.

摘 要

環境条件、栽培条件、作物の生育時期および作物、品種を異にする場合について、作物のオゾン被害の差異とそのオゾン被害に関与する要因、ことに気孔開度（浸潤指数）および茎葉組織汁液の酸化還元電位（茎葉 Eh_0 ）との関係について研究した。

オゾンガス処理は小型ポットに養成した材料を小型測定ボックスに収容し、 O_3 濃度 0.3 ppm, 温度 28~30°C, 日射 2~3 万ルクス, 湿度 70~80%位で行なった。

1) 水稲のオゾン被害は、ガス処理前の遮光処理および高温処理により増大し、オゾン被害とガス処理前の気孔開度（浸潤指数）×茎葉組織汁液の酸化還元電位（茎葉 Eh_0 ）との間に密接な関係が認められた。

2) 水稲および若干の畑作物のオゾン被害は、土壤含水量 80~70%で最も大きく、これより土壤含水量の低下とともに減少し、オゾン被害と気孔開度および気孔開度×茎葉 Eh_0 の減少との間に密接な関係がみとめられた。

畑作物（ダイズ、トマト）のオゾン被害は、土壤含水量が適温（土壤含水量 70%）より多い場合（土壤含水量 100%）および湛水した場合にも吸水阻害による気孔開度の減少に伴って減少した。水稲は土壤含水量 100%では湛水や土壤含水量 80%より気孔開度が低下し、オゾン被害が減少した。

3) 湛水栽培の水稲のオゾン被害は、土用干による土壤の乾燥処理による気孔開度および気孔開度×茎葉 Eh_0 の低下に伴って減少した。土用干後に短期間湛水した場合にも、気孔開度が土用干以前までは回復しないで気孔開度×茎葉 Eh_0 が小さくオゾン被害が軽減された。

4) 水稲のオゾン被害は、播種後増加し苗代期では第 6 葉期が最も被害が大きく、以後再び減少した。気孔開度×茎葉 Eh_0 もオゾン被害と略同じ推移を示したが、両者の最大の時期は完全には一致しなかった。

5) 本田初期の水稲のオゾン被害は移植後、気孔開度および気孔開度×茎葉 Eh_0 の増大と平行して増加し、移植後 20 日頃最大となった。その後は気孔開度、気孔開度×茎葉 Eh_0 の減少と平行して顕著に減少した。

6) インゲンの第 1 本葉のオゾン被害は、発芽後気孔開度、気孔開度×葉 Eh_0 の増加とある程度平行して増大し、播種後 17 日頃最大となり、以後気孔開度、気孔開度×葉 Eh_0 の減少に伴って減少した。

7) 水稲のオゾン被害は 1 日中の時刻によって異なり午前より昼直後の午後が大きい。この現象は、気孔の開度とは関係がなく、茎葉 Eh_0 が昼直後の午後の時刻に高くなることに関連づけられる。

8) イネおよびインゲンの葉位による葉のオゾン被害の差異は、気孔開度および茎葉 Eh_0 の差異に関係づけられる。

9) 水稲品種にオゾン被害の差異があり、日本品種間において気孔開度、茎葉 Eh_0 および気孔開度×茎葉 Eh_0 とオゾン被害との間に有意の相関関係が認められた。

10) 供試畑作物間においても、気孔開度、気孔開度×葉 Eh_0 とオゾン被害の間に有意の相関が認められた。

11) ダイコン, トマト, インゲンに対するアスコルビン酸ソーダ(還元型)の葉面散布によって葉の Eh_6 が低下し, オゾン被害が減少した.

12) 茎葉 Eh_6 はアスコルビン酸およびグルタチオンの還元型/(還元型+酸化型)によっておもに支配され, その高低は作物のオゾン被害の差異をもたらしていると推測される.

13) 以上から作物のオゾン感受性には気孔開度および茎葉生体酸化還元電位の一方または両方が影響を及ぼし, 被害の発生の差異をもたらすと考えられる.

文 献

- 馬場 赴・高橋保夫・岩田岩保, 1954. 水稻の赤枯病に関する栄養生理的研究 I. 水温および加里と澱粉の施用が赤枯病の発生に及ぼす影響. 日作紀 22: 111-112.
- 馬場 赴・稲田勝美, 1955. 水稻の組織汁液の酸化還元電位について, その2. 日照及び水温が酸化還元電位に及ぼす影響. その3. 酸化還元電位の生育時期による変化. その4. 水稻葉の酸化還元電位の品種間差異. 日作紀 23: 186-191.
- 馬場 赴・稲田勝美, 1956. 水稻の組織汁液の酸化還元電位について, その5. アスコルビン酸及びグルタチオンと酸化還元電位との関係. 日作紀 25: 75-77.
- 馬場 赴, 1958. 水稻の胡麻葉枯病及び秋落の発生機構に関する栄養生理的研究. 農技報 D 7: 1-157.
- 馬場 赴・田島公一, 1961. 水稻の赤枯病に関する栄養生理的研究 VII. クロロシスを伴う赤枯病の発生機構. 日作紀 29: 326-328.
- 馬場 赴・酒井慎吾, 1975. 作物の大気汚染被害の発生機構に関する生理的研究. 第1報 土壌水分が作物の亜硫酸ガス被害に及ぼす影響. 農学研究 55: 87-96.
- 馬場 赴・酒井慎吾, 1976 a. 作物の大気汚染被害の発生機構に関する生理的研究. 第2報 栄養条件および土壌還元が作物の亜硫酸ガス被害に及ぼす影響. 農学研究 55: 189-198.
- 馬場 赴・酒井慎吾, 1976 b. 作物の大気汚染被害の発生機構に関する生理的研究. 第3報 亜硫酸ガス処理による大麦・小麦葉からのエチレンの発生について. 農学研究 55: 199-203.
- 馬場 赴, 1978. 作物におけるエチレンの生理生態的研究 II. 水分ストレスが水稻の生育, 生理に及ぼす影響ならびにそのエチレンとの関係. 農学研究 57: 73-86.
- 千葉農試, 1977 a. 水稻のオキシダント可視被害発現程度におよぼす生育時期の影響. 農林省総会助成試験成果(光化学スモッグによる農産物可視被害に関する研究): 147-150.
- 千葉農試, 1977 b. 作物のオキシダント可視被害程度の時刻別変化. 農林省総合助成試験成果(光化学スモッグによる農産物可視被害に関する研究): 198-201.
- 千葉農試, 1977 c. 水稻などのオキシダント可視被害程度に及ぼす施肥の影響. 農林省総合助成試験成果(光化学スモッグによる農産物可視被害に関する研究): 214-216.
- Brewer, R. F. and Guillement, F. B. 1961. Influence of N-P-K fertilization on incidence and severity of oxidant injury to mangels and spinach. Soil Sci. 92: 298-301.
- Dass, H. C. and Weaver, G. M. 1968. Modification of ozone damage of *Phaseolus vulgaris* by antioxidants, thiol and sulfhydryl reagents. Can. J. Plant Sci. 48: 569-574.
- Dugger, W. M., Taylor, O. C., Gariff, E. and Thompson, C. R. 1962 a. Stomatal action in plants as related to damage from phytochemical oxidants. Plant Physiol. 37:

- Dugger, W. M., Taylor, O. C., Cardiff, E. and Thompson, C. R. 1962 b. Relationship between carbohydrate content and susceptibility of pint bean plants to ozone damage. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 81 : 304-315.
- Dugger, W. M. 1974. Air pollution effects on plant growth. ACS Symp. Series (edited by Gould R. F.): 3. Amer. Chem. Soc., Washington D. C. USA.
- Evance, C. S. and Ting, I. P. 1974. Ozone sensibility of leaves: Relationship to leaf water content, gas transfer resistance and anatomical characteristics. *Amer. J. Bot.* 61 : 592-597.
- Freebairn, H. T. and Taylor, O. C. 1960. Prevention of plant damage from air borne oxidizing agents. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 76 : 693-699.
- Freebairn, H. T. 1960. The prevention of air pollution damage to plants by the use of vitamin C sprays. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 10 : 314-317.
- Freebairn, H. T. 1963. Uptake and movement of 1-C¹⁴ ascorbic acid in bean plants. *Physiol. Plant.* 16 : 517-522.
- 服田春子・寺門和也. 1975. オキシダントによるアサガオとその指標性について. 第2報 オキシダントによるアサガオの被害葉位との関係. *大気汚染研究* : 729-733.
- 福田三千夫・篠原俊清・黒田昭太郎 他. 1973. タバコの生理的斑点病に関する研究. *岡山たばこ試報* 33 : 15-54.
- Hanson, G. P., Thorne, L. and Jativa, C. P. 1971. Ozone tolerance of petunia leaves as related to their ascorbic acid concentration. *Second Int. Clean Air Congress* (edited by Englund, H. M. and Berry, W. T.): 261-266, Academic Press, New York.
- Heath, R. L. 1975. Response of plants to air pollution-ozone. *Response of plants to air pollution* (edited by Mudd B. and Kozłowski T. T.): 23-55. Academic Press, New York.
- Heck, W. W. and Dunning, J. A. 1967. The effects of ozone on tobacco and pint bean as conditioned by several ecological factors. *J. Air. Pollut. Contr. Assoc.* 17 : 112-114.
- Heck, W. W. 1968. Factors influencing expression of oxidant damage to plant. *Ann. Rev. Phytopathol.* 16 : 165-189.
- Hull, H. M. and Went, F. W. 1952. Life processes of plant as affected by air pollution. *Proc. Natl. Air Pollut. Symp.* 2 : 122-128. Pasadena, Calif.
- 兵庫農試. 1977. 農産物のオゾン感受性に及ぼす土壌無機成分の影響. *農林省総合助成試験成果 (光化学スモッグによる農産物可視被害に関する研究)* : 222-226.
- 今泉誠子. 1973. タバコの葉のオゾン障害と気孔との関係について. *秦野たばこ試験場報告* 73 : 17-22.
- 石原 邦・石田康幸・小倉忠治. 1971 a. 水稲葉における気孔の開閉と環境条件との関係. 第2報 気孔開度の日変化について. *日作紀* 40 : 497-504.
- 石原 邦・石田康幸・小倉忠治. 1971 b. 水稲葉における気孔の開閉と環境条件との関係. 第3報 異なった葉位の相違について. *日作紀* 40 : 505-512.
- 石原 邦・石田康幸・小倉忠治. 1974. 水稲葉身の葉面積当含水量の日変化について. *日作紀* 43 : 77-82.

- 石原 邦・江原宏昭・平沢 正・小倉忠治. 1978. 水稻葉における気孔の開閉と環境条件との関係. 第7報 葉身のチッソ濃度と気孔開度との関係. 日作紀 47: 664-673.
- 石塚潤爾・浅川征男・河内 宏. 1978. 光化学オキシダントによる被害機構の解明—菜豆初生葉の葉齢ともなうオゾン感受性の変動について. 農技研作業科昭和52年度試験研究成績の概要: 89-93.
- 喜田村俊明・黒田昭太郎. 1973. タバコの生理斑点病に関する研究. 第8報 斑点(タイプ II, III)発生葉の化学成分について. 岡山たばこ試報告 33: 63-70.
- 北野 溥・篠原俊清・山本義忠・木村敏雄・北之園陽徳・福田三千夫. 1975. タバコの生理的斑点病に関する研究. 第13報 中国地方のタバコ産地におけるオキシダント大気汚染調査. 岡山たばこ試報告 35: 23-34.
- Koritz, H. G. and Went, F. W. 1953. The physiological action of smog on plants. I. Initial growth and transpiration studies. *Plant Physiol.* 28: 50-62.
- Lee, T. T. 1965. Sugar content and stomatal width as related to ozone injury in tobacco leaves. *Can. J. Bot.* 43: 677-685.
- Macdowall, F. D. H. 1965. Predisposition of tobacco to ozone damage. *Can. J. Plant Sci.* 45: 1-12.
- 松丸恒夫・森川昌記・白鳥孝治. 1976. 作物のオゾン可視被害発現に及ぼす曝露時刻の影響. 大気汚染研究 11 (第17回大気汚染研究全国協議会大会号): 203.
- 松岡義治. 1976. 主都圏域における植物の光化学大気汚染被害. 大気汚染研究 11: 57-65.
- Menser H. A., Heggsted, H. E. and Street U. E. 1963 a. Response of plants to air pollutants I. Effects of ozone on tobacco plants preconditioned by light and temperature. *Plant Physiol.* 38: 605-609.
- Menser, H. A., Heggsted, H. E. and Street, O. E. 1963 b. Response of plant to air pollutants II. Effects of ozone concentration and leaf maturity on injury to *Nicotiana tabacum*. *Phytopathol.* 53: 1304-1308.
- Menser, H. A. 1964. Response of plant to air pollutants. III. Relation between ascorbic acid levels and ozone susceptibility of light preconditioned tobacco plants. *Plant Physiol.* 39: 564-567.
- Middleton, J. T. 1957. Response of plants to air pollution. *J. Air. Pollut. Control Assoc.* 6: 7-9.
- 三宅嘉之・宇野良男. 1972 a. タバコの生理的斑点障害に関する研究(第2報). 宇都宮たばこ試報告 11: 7-13.
- 三宅嘉之・宇野良男. 1972 b. タバコの生理的斑点障害に関する研究(第3報). タバコ体内のグルタチオン濃度とオゾンによる生理障害発生度との関連性について. 宇都宮たばこ試報告 11: 15-22.
- 三宅嘉之. 1973. タバコの生理的斑点障害に関する研究(第5報). オゾン感受性と葉中アスコルビン酸, グルタチオン含量との関係. 宇都宮たばこ試報告 12: 55-60.
- 三宅嘉之・宇野良男. 1973. タバコの生理的斑点障害に関する研究(第6報). Bel W₃ のオゾンによる生理障害と気孔との関連. 宇都宮たばこ試報告 12: 61-66.
- 中村 拓・松中昭一. 1974. 大気汚染にたいする指標植物の利用. (1) 光化学オキシダントに対するアサガオの感受性とその変動要因. 日作紀 43: 517-522.
- 中村 拓. 1976. 光化学オキシダントによる稲の被害について. 第4報 可視障害発生程度の品種

- 間差異. 日作紀 45(別号2): 125-126.
- 中村 拓. 1977. 光化学オキシダントが農産物の生育収量に及ぼす影響. 農業技術 32: 539-543.
- 農林省農林水産技術会議事務局. 1976. 大気汚染による農産物被害症状の標本図譜. 92頁.
- 岡山農試. 1974. 農作物大気汚染被害写真集. 第1集 野菜のオキシダント被害. 35頁.
- 岡山農試. 1977. 三要素施肥条件とオゾン被害との関係. 農林省総合助成試験結果(光化学スモッグによる農産物の可視被害に関する研究): 227-231.
- 太田保夫・渋川三郎・神野麻平. 1972. 光化学スモッグによる作物被害と数種薬剤の効果. 大気汚染研究 7: 185.
- 太田保夫・中山正義. 1972. 温度障害の化学療法. 植物の化学調節 7: 37-45.
- Rich, S. 1964. Ozone damage to plants. Ann. Rev. Phytopathol. 2: 253-266.
- Siegel S. M. 1962. Protection of plants against air borne oxidants: Cucumber seedlings or extreme ozone levels. Plant Physiol. 37: 261-266.
- 篠原俊清・福田三千代. 1973. タバコの生理的斑点病に関する研究. (第4報) 生理的斑点病(タイプⅡ, Ⅲ)の発生と耕種原因との関係について. 岡山たばこ試報告 33: 25-36.
- 篠原俊清・黒田昭太郎・喜田村俊明・国沢健一. 1973. タバコの生理的斑点病に関する研究. (第6報) 病斑(タイプⅡ, Ⅲ)の発生に及ぼす温度の影響. 岡山たばこ試報告 33: 51-54.
- Shinohara, T., Yamamoto, Y., Kitano, H. and Fukuda, H. 1973. Effect of temperature on ozone injury to tobacco. Proc. Crop Sci. Soc. Japan 42: 418-421.
- Shinohara, T., Yamamoto, Y., Kitano, H. and Fukuda, M. 1974. Interaction of light and ozone injury in tobacco. Proc. Crop. Sci. Soc. Japan: 433-438.
- 篠原俊清・山本義忠・北野 溥・福田三千夫. 1975 a. タバコの生理的斑点病に関する研究. (第12報) タバコのオゾン感受性におよぼす環境条件の影響. 岡山たばこ試報告 35: 3-21.
- 篠原俊清・山本義忠・北野 溥. 1975 b. タバコの生理的斑点病に関する研究. (第16報) オゾン感受性の品種間差異. 岡山たばこ試報告 35: 51-58.
- Stolzy, L. H., Taylor, O. C. Letey, J. and Szuzkiewicz. 1961. Influence of soil oxygen diffusion rates on susceptibility of tomato plants to air born oxidants. Soil Sci. 91: 151-155.
- 須山 勇・黒田昭太郎・篠原俊清・木村敏雄・正田充慶・三宅嘉之・栗原 恒. 1973. タバコの生理的斑点病に関する研究. (第7報) 感受性の品種間差異について. 岡山たばこ試報告 33: 55-62.
- 高崎 強・松岡義治・秋浜友也. 1978. 水稻における光化学オキシダント感受性の品種間差異. 日作紀 47(別号2): 149-150.
- Taylor O. C. 1974. Air pollution effects influenced by plant-environmental interaction. Air pollution effects on plant. ACS Symp. Series: 1-7. Amer. Chem. Soc., Washington D. C. USA.
- Ting, I. P. and Dugger, W. M. Jr. 1968. Factors affecting ozone sensitivity and susceptibility of cotton plants. J. Air Pollut. Control Assoc. 18: 810-813.
- Ting, I. P. and Mukerji, S. K. 1971. Leaf ontogeny as a factor in susceptibility to ozone: amino acid and carbohydrate changes during expansion. Amer. J. Bot. 58: 497-504.
- Ting, I. P. and Heath, R. L. 1975. Response of plants to air pollutant oxidants. Adv. Agron. 27: 89-121.

- Tingey, D. T., Fites, R. C. and Wickliff, C. 1973. Foliar sensitivity of soybeans to ozone as related to several leaf parameters. *Environ. Pollut.* 4 : 183-192.
- Walker, E. K. and Vickery, L. S. 1961. Influence of sprinkler irrigation on the incidence of weather fleck. *Can. J. Plant Sci.* 41 : 281-287.
- Turner, H. C., Rich, S. and Tomlinson, H. 1972. Stomatal conductance, fleck injury, and growth of tobacco cultivars varying in ozone tolerance. *Phytopathol.* 62 : 63-67.
- 渡辺敏夫・安尾正元. 1961. 陸稲の萎黄症状に関する研究. 関東東山農試報告 18 : 34-65.
- 山添文雄. 1973. 大気汚染による農林公害. 農及園 48 : 133-138.