

植物による大気汚染物質の収着に関する研究 (II) NO_2 , O_3 あるいは $\text{NO}_2 + \text{O}_3$ 暴露下における 収着について

大政謙次・安保文彰・名取俊樹・戸塚 績
(国立公害研究所)

Studies of Air Pollutant Sorption by Plants.
(II) Sorption under fumigation with NO_2 , O_3 or $\text{NO}_2 + \text{O}_3$

Kenji OMASA, Fumiaki ABO, Toshiki NATORI and Tsumugu TOTSUKA
(National Institute for Environmental Studies,
Yatabe, Ibaraki Pref. 300-21)

1. はじめに

大気汚染物質の収着源としての植物群落の重要性が多くの研究者によって報告されている (Rasmussen *et al.*, 1975; Bennett and Hill, 1975; Unsworth *et al.*, 1976)。植物による汚染物質の収着は、大気中および植物側界面での汚染物質の濃度とその間の物質拡散抵抗によって支配される。植物による汚染物質の収着機構を解明し、収着予測モデルを作成するためには、汚染物質の収着を支配するこれらの因子の検討が必要である。

葉面境界層や気孔等における気相での大気汚染ガスの拡散については、水蒸気や CO_2 の拡散と同様に取り扱得ることが知られている (Monteith, 1973; Bennett *et al.*, 1973; Unsworth *et al.*, 1976)。しかし、植物側の濃度境界条件や界面抵抗等の界面での境界条件に関する報告は少なく不十分である。筆者らは、前報 (大政・安保, 1978) で植物側界面での境界条件に関する問題点を指摘し、 SO_2 の単一ガス暴露の場合における界面での境界条件について検討した。しかし、他の汚染物質について単一あるいは混合ガス暴露の場合の被害発現に至るまでの界面での境界条件を比較検討した報告はみあたらない。そこで、本報では主要な大気汚染物質である NO_2 および O_3 の単一あるいは混合ガス暴露の場合について、植物のガス収着速度と蒸散速度との関係を実

験により求め、さらに簡単なモデルを用いて被害発現に至るまでの界面での境界条件についての解析を試みた。そして、前報 (大政・安保, 1978) で得られた SO_2 についての結果を含めて比較検討した。

2. 材料と方法

材料…実験材料としては、ファイトトロン (昼間: 25°C , 夜間: 20°C , 70% RH, 自然光) で、パーミキュライト、パーライト、ピートモス、小礫を 2:2:1:1 の比でつめたポット (直径 10 cm, 高さ 20 cm) に、播種後 4~6 週間栽培したロシアヒマワリ (1 個体の葉面積: $1500\sim 2500\text{ cm}^2$, 葉数: 15~25 枚) を用いた。

装置…実験には、当研究所に設置されている汚染ガス暴露実験装置を用いた (相賀ら, 1979)。装置内の温湿度の制御精度は、 $\pm 0.5^\circ\text{C}$, $\pm 3\%$ RH であり、 NO_2 および O_3 濃度の制御精度は、設定値に対して、共に $\pm 0.5\%$ 以内であった。また、装置内の平均風速は、 $0.22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、照度は、光源下 1.3 m の位置で、全ランプ点灯時において $40\pm 5\text{ klux}$ であった。 NO_2 および O_3 濃度の測定には、ケミルミネッセンス法の分析計を用いた。

測定方法… NO_2 あるいは O_3 単一ガス暴露の場合の植物によるガス収着速度は、一定濃度のガスを一定流量で装置内に供給し、装置内のガス濃度が十分定常になった後、10 個体のヒマワリを搬入し、その後の装置内のガス濃度変化から計算した。他方、 $\text{NO}_2 + \text{O}_3$ の混合ガス暴露の場合には、一方のガス濃度を一定に制御し、他方のガス

濃度について単一ガス暴露の場合と同様な方法で測定した。その際、装置内での反応によって失われるNO₂、O₃の量を前もって求めておき、収着速度の計算の際に補正した(大政ら, 1979)。蒸散速度は、秤量法により、葉温は、直径0.1 mmの銅-コンスタンタン熱電対により測定した。

実験方法…NO₂、O₃単一あるいはNO₂+O₃混合ガス暴露下の植物葉面での蒸散速度、葉气温差、NO₂収着速度、O₃収着速度等の関係を調べるために、ガス暴露実験を2段階に分けて行った。具体的な実験方法は以下のとおりであった。

実験I…実験装置内植物のガス暴露に伴う蒸散速度と葉气温差の経時変化の同時測定—大気中と気孔底との間の単位水蒸気圧差あたりの蒸散速度 w' を算出する際必要な葉温を蒸散速度 W と気温から推定する近似式を求めるために、O₃暴露下(0.4 volppmで2hr暴露の後、0.8 volppmで3hr暴露)で、植物5個体の蒸散速度と葉气温差の経時変化を同時に測定した。葉气温差は、40対の熱電対を40枚の葉の表面にランダムに接着して測定し、5個体の平均葉温を算出した。

実験II…植物のガス収着速度と蒸散速度の経時変化の同時測定—NO₂、O₃単一あるいは、NO₂+O₃混合ガス暴露下での植物のNO₂あるいはO₃収着速度と蒸散速度との関係を調べるために、NO₂(0.2~6 volppm)、O₃(0.2~0.8 volppm)の単一あるいは混合ガスに植物を約5時間暴露し、10個体あたりのNO₂あるいはO₃収着速度と蒸散速度の経時変化を同時に測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 記号

W : 葉面における蒸散速度	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
T_a : 気温	$^{\circ}\text{C}$
T_l : 葉温	$^{\circ}\text{C}$
ΔT : 葉气温差($T_l - T_a$)	$^{\circ}\text{C}$
Q : 葉面におけるガス収着速度	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
Q^{NO_2} : 葉面におけるNO ₂ 収着速度	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
Q^{O_3} : 葉面におけるO ₃ 収着速度	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
$X_s(T)$: $T^{\circ}\text{C}$ における飽和蒸気圧	mmHg
ϕ : 相対湿度	
$w' = W / \{X_s(T_l) - \phi X_s(T_a)\}$	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mmHg}^{-1}$
P_a : 大気中のガス濃度	volppm
$P_a^{\text{NO}_2}$: 大気中のNO ₂ 濃度	volppm
$P_a^{\text{O}_3}$: 大気中のO ₃ 濃度	volppm
P_l : 気孔底界面でのガス濃度	volppm
$P_l^{\text{NO}_2}$: 気孔底界面でのNO ₂ 濃度	volppm

$P_l^{\text{O}_3}$: 気孔底界面でのO ₃ 濃度	volppm
k_a : 葉面の境界層構造や気孔の数等に関係する比例定数	
k_w : 飽和蒸気密度-飽和蒸気圧変換係数	$(1.05 \times 10^6) \text{ mmHg}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}(30^{\circ}\text{C})$
k_g : ガス濃度単位変換係数 (NO ₂ ; 5.40×10^8 , O ₃ ; 5.18×10^8 , SO ₂ ; 3.88×10^8)	$\text{volppm}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}(30^{\circ}\text{C})$
r_{wa} : 水蒸気拡散に対する境界層抵抗	$\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$
r_{ws} : 水蒸気拡散に対する気孔抵抗	$\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$
r_{ga} : ガス拡散に対する境界層抵抗	$\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$
r_{gs} : ガス拡散に対する気孔抵抗	$\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$
D_w : 水蒸気と空気との相互分子拡散係数	$\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$
D_g : ガスと空気との相互分子拡散係数	$\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$
M_w : 水蒸気の分子量	
M_g : ガスの分子量	

3.2 実験装置内植物の蒸散速度と葉气温差との関係

植物のガス収着機構と蒸散機構を比較検討するためには、ガス収着速度と蒸散速度の他に葉温を同時測定する必要がある。しかし、実験IIのガス収着速度の測定の際、その都度、植物10個体の平均葉温を熱電対により測定することは非常に厄介である。そこで、葉温の推定式を求めることにした。

光環境、気温、風速、植物の設置条件等を一定に保った場合、実験Iにより得られたO₃暴露に伴う装置内植物の蒸散速度 W と葉气温差 ΔT の経時変化の関係はFig. 1で表わされる。O₃暴露時間の経過に伴って、実験装置内植物の W は減少し、 ΔT は上昇する。そして、 W と ΔT と

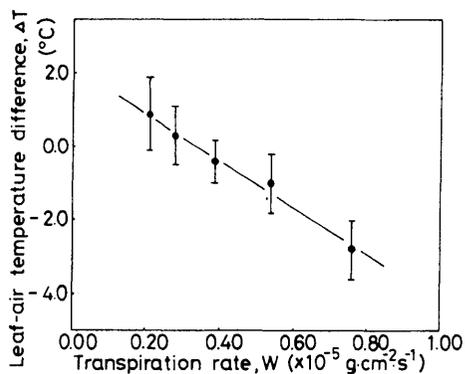


Fig. 1 Relation between transpiration rate (W) and leaf-air temperature difference (ΔT) during O₃ fumigation. Each point is the mean value of data and vertical bars indicate standard deviation of each point. Conditions: air temperature, 30°C; humidity, 60%RH; light intensity, 40 klux.

の間には線形関係が成立した。この関係はガスの種類には依存しない。この結果を利用して、実験IIにおいて測定された蒸散速度 W から、葉温 T_l を推定するための式を求めると次式を得る。

$$T_l = -6.4 \times 10^5 \cdot W + T_a + 2.2 \quad (1)$$

この方法で正確な葉温の経時変化を推定することは困難であるが、 w' 等を計算するための平均葉温としての概算値は推定できよう。

3.3 植物の NO_2 あるいは O_3 収着速度と蒸散速度との関係

植物の NO_2 および O_3 収着の機構を調べるために、 NO_2 、 O_3 単一あるいは $\text{NO}_2 + \text{O}_3$ 混合ガス暴露下におけるヒマワリのガス収着速度と蒸散速度との関係を実験により調べた(実験II)。Fig. 2~Fig. 5に実験結果より得られたガス収着速度 Q と蒸散速度 W の経時変化の関係を示す。Fig. 2が NO_2 単一ガス暴露(0.2~6 volppm)の場合 NO_2 収着速度 Q^{NO_2} と W との関係、Fig. 3が O_3 単一ガス暴露(0.2~0.8 volppm)の場合の O_3 収着速度 Q^{O_3} と W との関係、Fig. 4が $\text{NO}_2 + \text{O}_3$ 混合ガス暴露(NO_2 : 1~4 volppm, O_3 : 0.2 volppm)の場合の NO_2 収着速度 Q^{NO_2} と W との関係、Fig. 5が $\text{NO}_2 + \text{O}_3$ 混合ガス暴露(NO_2 : 1 volppm, O_3 : 0.2~0.6 volppm)の場合の O_3 収着速度 Q^{O_3} と W との関係を表わす。図中での数字(m_f)1, 2, 3, ...は、ガス暴露経過時間を表わし、暴露経過時間は、 $60 \cdot m_f - 20$ min

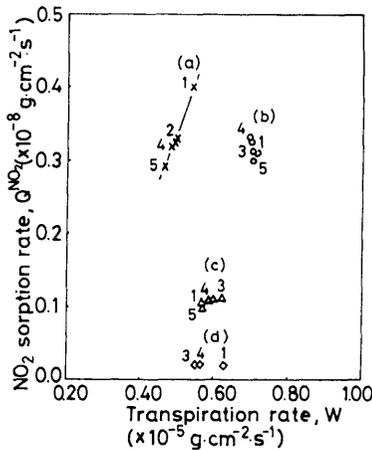


Fig. 2 Relation between NO_2 sorption rate (Q^{NO_2}) and transpiration rate (W) during NO_2 fumigation. The NO_2 concentration is about 6 volppm (a), about 4 volppm (b), about 2 volppm (c) and about 0.2 volppm (d). The fumigation time (min) is calculated from $60 \cdot m_f - 20$, where m_f indicates the number in the figure. Conditions: air temperature, 30°C ; humidity, 55~60%RH; light intensity, 40 klux.

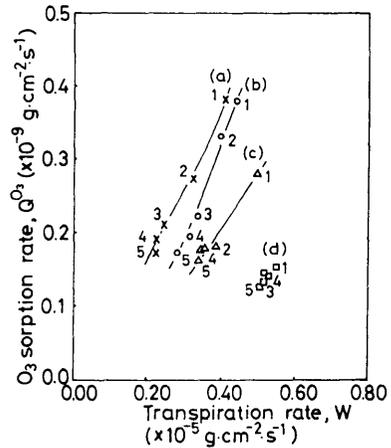


Fig. 3 Relation between O_3 sorption rate (Q^{O_3}) and transpiration rate (W) during O_3 fumigation. The O_3 concentration is about 0.8 volppm (a), about 0.6 volppm (b), about 0.4 volppm (c) and about 0.2 volppm (d). The fumigation time is calculated from the same equation as explained in Fig. 2. Conditions: air temperature, 30°C ; humidity, 60%RH; light intensity, 40 klux.

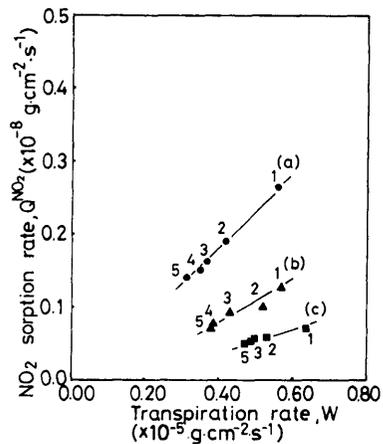


Fig. 4 Relation between NO_2 sorption rate (Q^{NO_2}) and transpiration rate (W) during $\text{NO}_2 + \text{O}_3$ fumigation. The NO_2 concentration is about 4 volppm (a), about 2 volppm (b) and about 1 volppm (c). The O_3 concentration is maintained constant (0.2 volppm). The fumigation time is calculated from the same equation as explained in Fig. 2. Conditions: air temperature, 30°C ; humidity, 55~60%RH; light intensity, 40 klux.

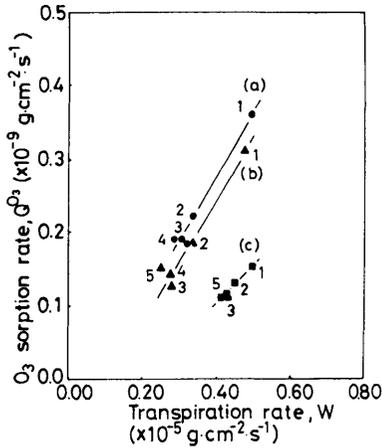


Fig. 5 Relation between O_3 sorption rate (Q^{O_3}) and transpiration rate (W) during $NO_2 + O_3$ fumigation. The O_3 concentration is about 0.6 volppm (a), about 0.45 volppm (b) and about 0.2 volppm (c). The NO_2 concentration is maintained constant (1.0 volppm). The fumigation time is calculated from the same equation as explained in Fig. 2. Conditions: air temperature, 30°C; humidity, 55–60%RH; light intensity, 40 klux.

($m_f = 1, 2, 3, \dots$)で計算される。ここで得られた結果は、測定法に起因する測定時におけるガス濃度変化の影響を含んでいるが、ほぼ一定濃度下での実験値であるといえる。単一あるいは混合ガス暴露下におけるガス収着速度と蒸散速度の経時変化は、汚染ガスの種類や濃度によって程度の差はあるが、暴露時間の経過に伴って減少する傾向が多くの場合に認められた。そして、その程度は、ガス濃度が高い程大きかった。気象条件が一定の場合には、蒸散速度の変化を気孔開度の指標とみなしてよいことから、上述の現象の主要な原因は、汚染ガスによる気孔の閉鎖であると考えられる。各ガス成分について減少傾向が明瞭な場合のガス濃度をあげると、 NO_2 単一ガスの場合で 6 volppm (Fig. 2), O_3 単一ガスの場合で 0.4, 0.6, 0.8 volppm (Fig. 3), $NO_2 + O_3$ の混合ガスの場合で NO_2 ; 1, 2, 4 volppm, O_3 ; 0.2 volppm (Fig. 4), O_3 ; 0.2, 0.45, 0.6 volppm, NO_2 ; 1.0 volppm (Fig. 5)であった。

また、葉面に発現する可視害として、ガスの種類や濃度により程度の差はあるが、ネクロシスの前兆である葉面での水滲現象やその後の葉の萎れ等の現象がみられた。これらの現象が発現し始めたのは、 NO_2 単一ガス 6 volppm で暴露開始後約 4 時間 (Fig. 2), O_3 単一ガス 0.6 volppm で約 4 時間, 0.8 volppm で約 2 時間 (Fig. 3), $NO_2 + O_3$ 混合ガス NO_2 ; 2 volppm, O_3 ; 0.2 volppm で約

3 時間, 4 volppm, 0.2 volppm で約 2 時間 (Fig. 4), 1.0 volppm, 0.6 volppm で約 4 時間 (Fig. 5) 経過した時点であった。また、本報での処理条件の範囲内で上述の濃度域以外においては、約 5 時間の実験期間中可視害発現は認められなかった。以上の結果を比較すると、単一ガス暴露の場合、 NO_2 の 1/10 程度の O_3 濃度で可視害の発現および蒸散速度を気孔閉鎖の指標としてみた場合の気孔の閉鎖が認められた。また、混合ガスの場合には、単一ガスの場合に可視害発現や気孔の閉鎖が認められない濃度域の組み合わせの場合においても、可視害が発現し、気孔が閉じるという“複合汚染効果”が認められた。なお、前報 (大政・安保, 1978) の SO_2 の場合、1 volppm 約 3 時間の時点で可視害が発現し、0.65 volppm で気孔が閉じ始めたことから、可視害発現および気孔の閉鎖に関する NO_2 , O_3 , SO_2 の害作用は、 O_3 が最も強く、 SO_2 , NO_2 の順であることが認められた。しかし、“複合汚染効果”を含めて、可視害発現や気孔閉鎖に関するより詳細な検討は今後の課題である。

Fig. 2~Fig. 5 で得られたガス収着速度 Q と蒸散速度 W との関係には、測定時におけるガス濃度の経時変化や蒸散速度の減少に伴う葉温上昇等の影響を含んでいる。そこで、これらの影響を除去するために Q/w' とガス濃度 P_a との関係として整理し直した。Fig. 6, Fig. 7 にその結果

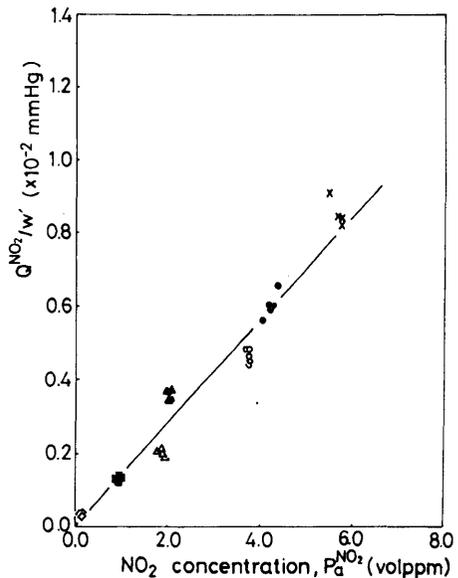


Fig. 6 Relation between NO_2 concentration ($P_a^{NO_2}$) and the ratio of NO_2 sorption rate to transpiration rate divided by the water vapor pressure differences between gas-liquid interface in the leaf and the atmosphere (Q^{NO_2}/w'). Data were obtained from the results shown in Figs. 2 and 4.

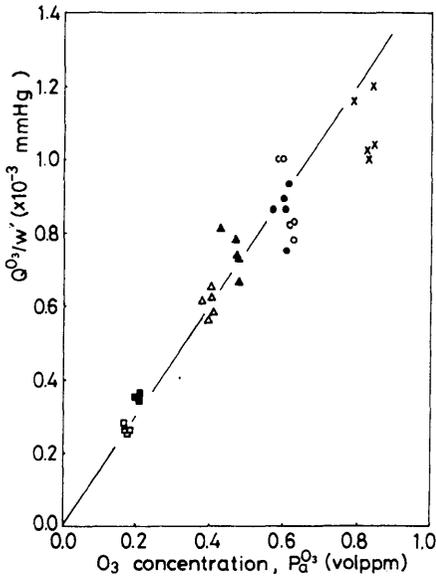


Fig. 7 Relation between O_3 concentration ($P_a^{O_3}$) and the ratio of O_3 sorption rate to transpiration rate divided by the water vapor pressure differences between gas-liquid interface in the leaf and the atmosphere (Q^{O_3}/w'). Data were obtained from the results shown in Figs. 3 and 5.

を示す。Fig. 6は、 NO_2 単一(Fig. 2)あるいは NO_2+O_3 混合ガス暴露(Fig. 4)下における Q^{NO_2}/w' と $P_a^{NO_2}$ との関係、Fig. 7は、 O_3 単一(Fig. 3)あるいは NO_2+O_3 混合ガス暴露(Fig. 5)下における Q^{O_3}/w' と $P_a^{O_3}$ との関係を表わす。 w' は、

$$w' = W / \{X_s(T_l) - \phi \cdot X_s(T_a)\} \quad (2)$$

より計算されるが、これを求めるには、葉温が必要である。葉温は、前述の方法により式(1)を用いて算出した。Fig. 6およびFig. 7によれば、葉面における水蒸気現象や葉の萎れ等の可視害発現や単一あるいは混合ガスの如何

にかかわらず Q/w' と P_a の間に、近似的に、 $Q^{NO_2}/w' \approx 1.4 \times 10^{-3} \cdot P_a^{NO_2}$ 、 $Q^{O_3}/w' \approx 1.5 \times 10^{-3} \cdot P_a^{O_3}$ の関係が成立した。この結果より、ヒマワリの NO_2 あるいは O_3 の収着の機構は、葉面における蒸散機構(Monteith, 1973, 長谷場, 1973)と同様に取り扱うことができよう。

3.4 収着モデルによる解析

葉面における蒸散速度およびガス収着速度に関する簡単なモデルにより、 NO_2 あるいは O_3 に関する植物側界面での境界条件について検討した。葉面における蒸散速度およびガス収着速度は、それぞれ次式で近似される(大政・安保, 1978)。

$$W = k_a \cdot \{X_s(T_l) - \phi \cdot X_s(T_a)\} / \{k_w \cdot (r_{wa} + r_{ws})\} \quad (3)$$

$$Q = k_a \cdot (P_a - P_l) / \{k_g \cdot (r_{ga} + r_{gs})\} \quad (4)$$

ただし、

$$r_{ga}/r_{wa} = (D_g/D_w)^{-2/3} \quad (5)$$

$$r_{gs}/r_{ws} = (D_g/D_w)^{-1} \quad (6)$$

空気中での NO_2 や O_3 等の相互分子拡散係数は、Lennard-Jonesの分子モデルを用いたHirschfelderらの理論式(Hirschfelder et al., 1954)によってよく表わされることが知られている。しかし、ここでは便宜的に D_g/D_w を次式により近似した。

$$D_g/D_w = (M_g/M_w)^{-1/2} \quad (7)$$

式(7)は、簡便的な式ではあるが、空気中での種々のガス成分についての相互分子拡散係数(化学工学会編, 1971; 内田, 1972)から求めた値と比較的によく一致する。

実験結果との比較を容易にするために、 $r_{ga}/r_{wa} = r_{gs}/r_{ws} = k_r$ と仮定し、式(2)~(4)より Q/w' を求めると次式を得る。

$$Q/w' = (k_w/k_g \cdot k_r) \cdot (P_a - P_l) \quad (8)$$

式(8)の $k_w/k_g \cdot k_r$ を NO_2 、 O_3 および SO_2 について計算した結果をTable 1に示す。Table 1には比較のためFig. 6, Fig. 7および前報(大政・安保, 1978)で得られた NO_2 、 O_3 、 SO_2 に関する Q/w' と P_a の比例定数を付記した。

Table 1 Comparison between the values of $k_w/k_g \cdot k_r$ which were calculated from equation (8) and the coefficients of Q/w' and P_a which were obtained by experiment. The values of $k_w/k_g \cdot k_r$ for NO_2 , O_3 and SO_2 were calculated by assuming $r_{ga}/r_{wa} = r_{gs}/r_{ws} = k_r$. The coefficients of Q/w' and P_a for NO_2 and O_3 were obtained from the data in Figs. 6 and 7 and the coefficient for SO_2 was obtained from literature data (10).

	r_{ga}/r_{wa}	r_{gs}/r_{ws}	$k_w/k_g \cdot k_r$		$Q/w' \cdot P_a$ (experiment)
			$k_r = r_{ga}/r_{wa}$	$k_r = r_{gs}/r_{ws}$	
			mmHg · volppm ⁻¹	mmHg · volppm ⁻¹	mmHg · volppm ⁻¹
NO_2	1.37	1.60	1.42×10^{-3}	1.22×10^{-3}	1.4×10^{-3}
O_3	1.39	1.64	1.46×10^{-3}	1.24×10^{-3}	1.5×10^{-3}
SO_2	1.53	1.89	1.77×10^{-3}	1.43×10^{-3}	1.8×10^{-3}

NO₂, O₃およびSO₂共に計算された $k_w/k_g \cdot k_r$ と実験により求められた比例定数はほぼ一致している。

以上の結果は、主要な大気汚染ガスであるNO₂およびO₃についての植物側界面での境界条件が、可視害発現や単一あるいは混合ガス暴露の如何にかかわらず、SO₂の場合と同様 $P_1^{NO_2} \approx 0$ volppm, $P_1^{O_3} \approx 0$ volppm と仮定でき、NO₂およびO₃のガス収着速度が、境界層抵抗や気孔抵抗等の気相での拡散に関する因子に支配されることを示している。Rich *et al.* (1970)も、O₃暴露下で暗条件から明条件にした場合の豆の葉のO₃収着速度と水蒸気拡散に関する気孔抵抗を測定し、気孔抵抗がO₃収着を支配する主要な因子であることを報告している。Hill (1971)は、アルファルファ群落を用いた種々の単一汚染ガスの1~2 hr程度の暴露実験の結果をもとに、種々の汚染ガスの水に対する溶解度とガス収着速度を比較し、概して、溶解度の大きいガスの方が、ガス収着速度も大きいことを報告している。Hillの実験結果は、気孔抵抗を測定していないので、一概に比較できないが、NO₂とO₃の収着速度は同程度とみなせる。Bennett *et al.* (1973)は、植物側界面での境界条件の設定に気液平衡に関するHenryの法則を適用したガス収着予測モデルを提案し、ガス収着における溶解度やそれに関連しての溶解濃度の重要性を報告している。しかし、単に、汚染ガスの水に対する溶解度で、植物によるガス収着の機構を説明することはできない。例えば、水に対する溶解度が比較的大きいSO₂についてみると、前報(大政・安保, 1978)より、ヒマワリは、1.5 volppm, 5時間の暴露で約 1.4×10^{-5} g·cm⁻²のSO₂を収着する。実験に用いたヒマワリ葉の生重量(約0.03 g·cm⁻²)が、すべて水であると仮定し、水に対する溶解度の気液平衡(Landolt-Börnstein, 1962)から、界面でのSO₂濃度を計算すると、おおよそ 1.5×10^3 volppmを得る。この値は、暴露濃度1.5 volppmに比べて非常に高い値である。O₃あるいはNO₂の場合には、溶解度(NO₂の場合は分解能力)がSO₂に比べて小さいことから、計算により求められる界面でのガス濃度は、SO₂の場合よりもさらに高い値になる。以上のことは、植物側界面での境界条件、すなわち、溶液濃度を支配する主要な要因が、水に対する溶解度ではなく、植物体内の代謝、移動、その他溶液濃度を下げる機能であることを示唆している。しかし、Hill (1971)の結果から推察するに、溶解度は、直接あるいは間接的に、溶液濃度を下げる機能に関係している。何れにせよ、先に得られた実験結果は、水滲あるいは萎れ程度の可視害発現に至るまで、これらの溶液濃度を下げる機能が、植物側界面での境界条件 P_1 をおおよそ0 volppmに下げるに十分な能力を有していることを示している。

4. 要 約

主要な大気汚染物質であるNO₂およびO₃の単一あるいは混合ガス暴露下における植物のNO₂およびO₃収着の機構を調べるために、制御された環境下でヒマワリを用いてガス暴露実験を行ない、ガス収着速度、蒸散速度、葉温等の経時変化を測定した。そして、簡単なモデルによりガス収着の機構についての解析を行なった。得られた結果は次の様に要約される。

(1) NO₂, O₃単一あるいはNO₂+O₃混合ガス暴露により、気孔の閉鎖および葉面に可視害の発現する現象がみられた。これらの現象発現の程度は、ガス濃度が高い程顕著であり、また、暴露ガスの組成により異なっていた。NO₂およびO₃単一ガス暴露の場合について、これらの現象が発現し始める濃度を比較すると、NO₂濃度の方が、O₃濃度よりも10倍程度高かった。また、NO₂+O₃混合ガス暴露の場合には、単一ガス暴露でこれらの現象が認められない低濃度域において現象が生じるという“複合汚染効果”が認められた。なお、SO₂を含めた可視害発現および気孔閉鎖に関するNO₂, O₃, およびSO₂の害作用の程度は、O₃>SO₂>NO₂であった。

(2) NO₂およびO₃の単一あるいは混合ガス暴露に伴う Q/w' と P_a との間には、 $Q^{NO_2}/w' \approx 1.4 \times 10^{-3} \cdot P_a^{NO_2}$, $Q^{O_3}/w' \approx 1.5 \times 10^{-3} \cdot P_a^{O_3}$ の関係が成立した。この関係は、植物の被害発現や暴露ガスの組成に影響されなかった。また、この関係は、モデル $Q/w' = (k_w/k_g \cdot k_r) \cdot (P_a - P_1)$ において、 $P_1 = 0$ volppmとして得られる式にほぼ一致した。以上により、NO₂およびO₃についての植物側界面での境界条件としてのガス濃度は、0 volppmと仮定でき、NO₂およびO₃のガス収着速度が、境界層抵抗や気孔抵抗等の気相での拡散に関与する因子に支配されることが明らかになった。

終わりに、本研究にあたって貴重な助言をたまわった、当研究所技術部の相賀一郎室長、生物環境部の古川昭雄博士、また、装置の維持管理および材料植物の栽培に携わっている技術部の関係諸氏に心からの謝意を表す。

引用文献

- 1) 相賀一郎・大政謙次・小林雄一, 1979: 国立公害研究所植物実験用環境調節施設・最新空調設備・空調方式事例集(経営開発センタ編)印刷中。
- 2) Bennett, J. H., Hill, A. C. and Gates, D. M., 1973: A model for gaseous pollutant sorption by leaves. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 23, 957-962.
- 3) Bennett, J. H. and Hill, A. C., 1975: Interactions of air pollutants with canopies of

- vegetation. In *Responses of plants to air pollution* (ed. by J.B. Mudd and T.T. Kozlowski). Academic Press, New York, 273-306.
- 4) 長谷場徹也, 1973: 植物の蒸散に関する農業気象的研究. 愛媛大学農学部紀要, **18**, 1-141.
 - 5) Hill, A. C., 1971: Vegetation: A sink for atmospheric pollutants. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **21**, 341-346.
 - 6) Hirschfelder, J. O., Curtiss, C. F. and Bird, R. B., 1954: *Molecular theory of gases and liquids*. John Wiley & Sons, New York.
 - 7) 化学工学協会編, 1971: 物性定数 8. 丸善, 229-230.
 - 8) Landolt-Börnstein, 1962: *Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik*, 6 Auflage, II Band, 2 Teil, Bandteil b, Lösungsgleichgewichte I. Springer-Verlag, Berlin, 1-26.
 - 9) Monteith, J. L., 1973: *Principles of environmental physics*. Edward Arnold, London, 134-189.
 - 10) 大政謙次・安保文彰, 1978: 植物による大気汚染物質の収着に関する研究(I) SO₂の局所収着と可視害発現との関係. 農業気象, **34**, 51-58.
 - 11) 大政謙次・安保文彰・相賀一郎, 1979: 環境制御装置内植物のNO₂およびO₃収着速度の同時測定法について. 農業気象, **35**, 31-40.
 - 12) Rasmussen, K. H., Taheri, M. and Kabel, R. L., 1975: Global emissions and natural processes for removal of gaseous pollutants. *Water, Air and Soil Pollution*, **4**, 33-64.
 - 13) Rich, S., Waggoner, P. E. and Tomlinson, H., 1970: Ozone uptake by bean leaves. *Science*, **169**, 79-80.
 - 14) 内田秀雄, 1972: 湿り空気と冷却塔. 裳華房, 73.
 - 15) Unsworth, M. H., Biscoe, P. V. and Black, V., 1976: Analysis of gas exchange between plants and polluted atmospheres. In *Effects of air pollutants on plants* (ed. by T. A. Mansfield). Cambridge University Press, London, 5-16.

Summary

In order to investigate NO₂ and O₃ sorption by plants during exposure to NO₂, O₃ and NO₂ + O₃ which are the principal gaseous pollutants, sunflower plants were fumigated with the pollutants in an environmental control chamber. The time courses of sorption rate, transpiration rate and leaf temperature were measured during fumigation, and the sorption processes were discussed by the use of a simplified model. The results obtained are as follows.

(1) The stomatal closure and the appearance of visible leaf injury by fumigation with a single gas (NO₂ or O₃) and a mixed gas (NO₂ + O₃) were observed. The degrees of the appearance of these phenomena were related to the gas concentration, and the degree of injury increased with increasing gas concentration. The degree of injury is also related to the kind of pollutant. In the case of fumigation with NO₂ or O₃, the NO₂ concentration at which the phenomena began to appear was about ten times higher than that for O₃. In the case of fumigation with NO₂ + O₃, the phenomena appeared at the concentrations of NO₂ and O₃ below which the phenomena did not appear during exposure to a single gas (NO₂ or O₃). The results obtained here may indicate one of the synergistic effects of air pollutions. The degree of injury for NO₂ and O₃ on the stomatal closure and the appearance of leaf injury, was distinctly in the order of O₃ > SO₂ > NO₂.

(2) The relations between Q/w' and P_a during fumigation with a single (NO₂ or O₃) or a mixed gas (NO₂ + O₃) were expressed by equations of $Q^{NO_2}/w' \simeq 1.4 \times 10^{-3} \cdot P_a^{NO_2}$, and $Q^{O_3}/w' \simeq 1.5 \times 10^{-3} \cdot P_a^{O_3}$, where Q^{NO_2} and Q^{O_3} are sorption rates of NO₂ and O₃, w' transpiration rate divided by the water vapor pressure differences between gas-liquid interface in the leaf and the atmosphere, and $P_a^{NO_2}$ and $P_a^{O_3}$ gas concentration of NO₂ and O₃ in the atmosphere. These relations were independent of the gas components used for fumigation and the appearance of visible leaf injury. These empirical equations corresponded to those which were derived by using a simplified model, $Q/w' = (k_w/k_g \cdot k_r) \cdot (P_a - P_l)$ at $P_l = 0$ volppm, where P_l is gas concentration at gas-liquid interface in the leaf, k_r the ratio of gas diffusive resistance to that for water vapor, k_w a constant; 1.05×10^6 mmHg·cm³·g⁻¹, and k_g a constant; 5.40×10^8 (NO₂) or 5.18×10^8 (O₃) volppm·cm³·g⁻¹. The calculated values of $k_w/k_g \cdot k_r$ were coincident with the coefficients of Q/w' and P_a . From the results mentioned above, it was concluded that the NO₂ and O₃ concentrations at the gas-liquid interface in the leaf are considered to be zero, and the NO₂ and O₃ sorption rates can be explained by factors such as boundary layer and stomatal resistances, which are related to gaseous diffusion.