

植物葉によるオゾン, PANの収着(吸収) 速度に関する研究

野 内 勇

1 はじめに

植物は大気汚染物質に暴露されると、葉面に大気汚染物質に対し特徴的な被害症状を生じる。これら特徴的な被害症状は、アサガオのように光化学オキシダントを検知する指標植物として利用されるものもある¹⁾²⁾³⁾。植物を大気汚染物質の指標植物として用いるためには、植物被害と汚染物質の量-反応関係が明らかであることが望ましい。そして、植物の被害程度は大気汚染物質の濃度やドースで議論され、いくつかの数式が提出されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。しかし、植物の被害は環境の濃度やドースで議論されるよりも、正しくは植物葉中に取り込まれる汚染物質の量や速度を用いるべきであろう。SO₂やHFのように植物葉中に蓄積する汚染ガスでは、植物被害をガス吸収量で表わしているものもある⁴⁾⁷⁾。しかし、近年最も被害の大きい光化学オキシダント(オゾンやPANなど)では葉への侵入量を直接測定することは困難である。一方、農業気象学の分野では、群落光合成の研究から、葉のCO₂吸収速度は大気および植物のガス吸収面でのCO₂濃度とその間のガス拡散抵抗によつて支配されていることを解明していた⁸⁾。そして、最近植物による大気汚染浄化機能や汚染ガスの吸収機構に関し、CO₂の吸収と同様な手法を用いて解析した研究が報告されてきている⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

そこで、ここでは、筆者らがすでに報告しているオゾンあるいはPANによる植物被害に関し提出した実験式の理論化および野外での被害に対する実験式の適用化への第一歩として、植物葉によるオゾン, PANの取り込み速度について検討した。なお、ガスと植物葉との反応では、葉内への吸収と葉面への吸着の両者があり、この両者を合わせたものを収着と呼んでいる。ここでは多く収着という語を用いた。

2 材料と方法

(1) 実験植物

実験植物としては、アサガオ(品種スカーレットオハラ)、ベチュニア(品種ホワイトエンサイン)、インゲンマメ(品種銀手亡)を用いた。アサガオはオゾンに、ベチュニアはPANに対し非常に感受性が高い植物である。インゲンマメはオゾン, PANに対してアサガオ、ベチュニアよりそれぞれ感受性はやや劣るが、オゾン, PANの被害がよく発現する植物である。植物は自然光利用の人工気象室(昼間27℃, 夜間22℃, 湿度60-70%)内で生育させた。ベチュニア, アサガオは火山灰土壌、腐葉土、培養土を混合した5,000分の1アワグネルポットに栽培した。インゲンマメはパーミキュライトに播種し、発芽後1ℓの塩ビ製ポットで水耕栽培し、培養液は2日毎に交換した。培養液の組成は表1のとおり

表1 水耕液の組成

成分	濃度 (ppm)	使用した塩類の形態	
NO ₃ -N	39.0	KNO ₃ NH ₄ H ₂ PO ₄ Mg SO ₄ · 7 H ₂ O Ca (NO ₃) ₂ · 4 H ₂ O	
NH ₄ -N	5.6		
P	1.25		
K	47.0		
Ca	3.20		
S	19.2		
Mg	1.44		
Cl	1.77		KCl
B	0.54		H ₃ BO ₃
Mn	0.33		MnSO ₄ · 4 H ₂ O
Zn	0.13	ZnSO ₄ · 7 H ₂ O	
Cu	0.03	CuSO ₄ · 5 H ₂ O	
Mo	0.05	Na ₂ MoO ₄ · 2 H ₂ O	
Fe	1.12	FeSO ₄ · 7 H ₂ O又はEDTA-Fe	

りである。なお実験に供試した植物の生育ステージは、アサガオは播種後30日程度で葉数が15-20枚程度のものであり、ペチュニアは播種後約1カ月後に移植しその後葉数が15-20枚程度に成長したものをを用いた。アサガオ、ペチュニアともこの時期のものは、オゾン、PANにそれぞれ感受性が高い生育ステージのものである。インゲンマメは発芽後4-6日程度の初生葉(子葉)のみのものをを用いた。

(2) 測定装置

ガス取着速度、蒸散速度測定用の植物チャンパーは、チャンパーの両側面(各20w×8本)および前面(40w×5本)に蛍光灯、上面に陽光ランプ(400w×4本)の光源をもつアクリル製の円筒型チャンパーを自然光型の人工気象室内に設置して用いた。陽光ランプに対しては、酸化鉄を含むリン酸ガラスフィルターにより約800nm以上の熱線を除去した。陽光ランプと蛍光灯による照度(植物高上)は、18,000ルクスであり、日中(9:30-14:30)は、上面および背面からの太陽の散乱光により、晴れた日で5,000~8,000ルクスの光が加った。なお、実験は天頂角の低い冬期(11月~3月)のよく晴れた日のみ行い、日中(9:30-14:30)の5時間以内で行った。

チャンパー内の温度の制御は人工気象室内の温度を調節することによつて間接的に行い、通気空気は屋外の空気を活性炭フィルターでろ過した。チャンパー内はテフロンコーティングしたステンレスプロペラで攪拌し、風速は1~2.5m/sの間で変化させた。

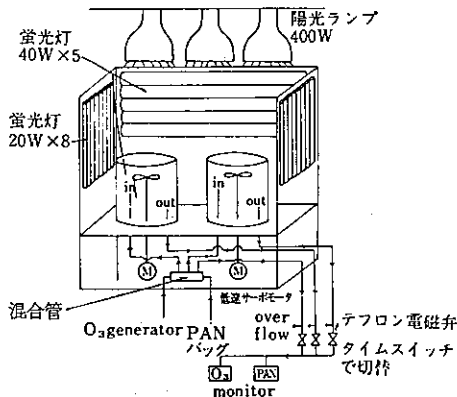


図1 ガス吸収、蒸散速度測定チャンパー

オゾン発生器は6wの紫外線ランプ2本を用いた。オゾン濃度の調節は、ランプの点灯本数とランプ電圧の調節で行った。PANは合成した高濃度PAN(1,000~2,000ppm)を希釈し、1,200ℓのテドラーバッグにつめ、4ℓ/minのダイヤフラムポンプでガス混合管内に送気した。なお、オゾン、PANガスの流入、流出経路を図1に示す。暴露ガスは混合管から、ガス入口濃度測定用、植物チャンパー、コントロールチャンパーの三方に分けられ、さらに、テフロン製ニードルバルブで植物チャンパー、コントロールチャンパーの通気量を同一に調節した。植物への通気量は6ℓ/m~10ℓ/mの範囲内で植物の種類、葉面積により変化させた。オゾン濃度は化学発光法のオゾン計(紀本電子Model 803A)で、PANはプロセス付ECDガスクロマトグラフィー(柳本製作所Model GPI-10A)を用いた。なお、入口濃度、植物チャンパー出口、コントロールチャンパー出口の3つのテフロン製電磁弁を自動切換タイマーで5分毎に切換えて濃度を測定した。オゾン計、PAN測定機も人工気象室内に設置し、チャンパーから測定機までのテフロンパイプの長さを3m以内とした。

(3) 測定方法

ア ガス取着速度

オゾン、PANのガス取着速度は、チャンパーの入口と出口の濃度差より求めた。計算式は、ガス濃度のppm単位をg/m³の単位に(1)式により変換し、植物葉の表裏両面でガス取着がおこるとして、(2)式によつて求めた。

$$A = \frac{C \times \text{ガスの分子量}}{\text{温度} (^{\circ}\text{K}) \text{におけるガス1モルの体積} (\text{cm}^3)} \quad (1)$$

$$Q = \frac{f}{2S} \left\{ (A_{in} - \text{植物の} A_{out}) - (A_{in} - \text{コントロールの} A_{out}) \right\} \quad (2)$$

なお、C: ガス濃度 ppm

A, A_{in}, A_{out}: ガス濃度 ppmをg/m³(10⁻⁶g/cm³)の変換値、A_{in}は入口、A_{out}は出口

Q: 葉面におけるガス取着速度 g/cm².s

S: 植物葉面積 cm²

f: 通気空気量 cm³/s

イ 蒸散速度

蒸散速度の測定は、葉面からの水の蒸散量を塩化カルシウムによる吸収法と湿度の測定値から求める2つの方

法を用いた。ペチュニア、インゲンマメでは、水分測定用の塩化カルシウムにより吸収しその重量増加により求めた。アサガオでは静電容量方式の高感度湿度計（バイサラ社HMI-14）を用いた。この際、鉢はビニール袋で覆い、土の表面からの蒸散を防いでおいた。また、アサガオはそのまま1個体を用いると葉面積が大きくなりすぎるため、最も感受性の高い成熟葉7~8枚を残し、他の葉は切除した。切口にシリコングリースを塗布し実験に供した。

蒸散速度は(3)式によつて求めた。なお、湿度測定によつた場合は、相対湿度を絶対湿度に(4)式によつて変換した後、(3)式によつて求めた。

$$W = \frac{f}{2S} (B_{out} - B_{in}) \quad (3)$$

$$B = \frac{217\phi \cdot 1333\chi_s(T)}{100T} \quad (4)$$

なお、W：葉面における蒸散速度 $g/cm^2 \cdot s$

B, B_{in} , B_{out} ：絶対湿度 g/m^3 ,

なお B_s ：飽和における絶対湿度

T：絶対温度 K

$\chi_s(T)$ ： $T^\circ K$ における飽和蒸気圧 mmHg

ϕ ：相対湿度

また、蒸散速度は水蒸気圧の飽差によつて変化するため飽差あたりで表わした。この際、葉温が必要であり、葉温は直径0.1 mmの銅-コンスタンタン熱電対を葉表面にセロテープで接着し、熱電対の熱起電力を直読できる温度計（横河電機デジタル温度計2809）で測定した。飽差あたりの蒸散速度は(5)式によつて求めた。

$$w' = \frac{W}{\chi_s(T_L) - \phi\chi_s(T_a)} \quad (5)$$

w' ： $g/cm^2 \cdot S \cdot mmHg$

$\chi_s(T)$ ： $T^\circ K$ における飽和蒸気圧 mmHg

T_a ：気温

T_L ：葉温

なお、気温はサーミスタ温度計（東亜電波）を用いて測定した。

3 結果および考察

(1) オゾン、PAN濃度と収着速度

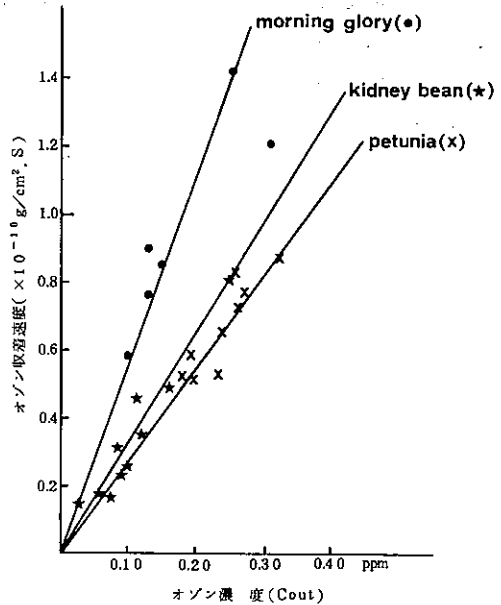


図2 環境オゾン濃度とオゾン収着速度との関係

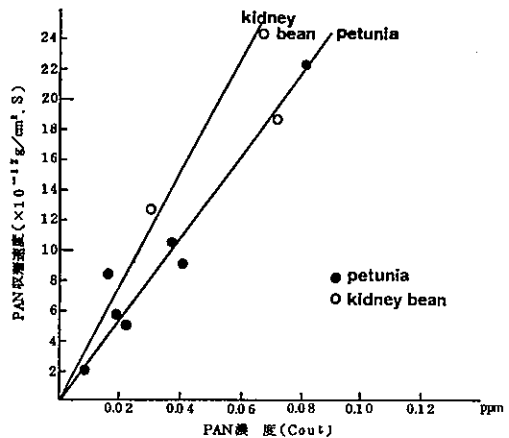


図3 環境PAN濃度とPAN収着速度との関係

オゾンの収着速度はアサガオ、インゲンマメ、ペチュニア、PANの収着速度はペチュニア、インゲンマメについて測定し、オゾンやPAN濃度と葉面でのガス収着速度との関係について検討した。結果を図2、3に示した。オゾンのインゲンマメ、ペチュニア、アサガオにおいて、またPANのインゲンマメ、ペチュニアにおいて環境濃度(Cout)とガス収着速度との間には直線関係が得られた。このことから、植物葉によるガス収着速度は、オゾン濃

度およびPAN濃度に比例していることが明らかになった。

(2) ガス収着速度定数

Rogersら¹⁴⁾は葉面におけるガス吸収速度を求めるために、化学反応速度の概念を導入した。すなわち、植物葉と汚染ガスとが反応し、その反応速度が化学反応速度と同じであると仮定し、植物葉面と汚染ガスとの反応は2次反応であるとした。そして、流通攪拌槽型のチャンバーを設計し、ダイズ、トウモロコシのNO₂吸収速度を求めた。ここでは、Rogersらと同様な手法を用いて、オゾン、PANの植物葉による吸収速度を求めてみた。

植物の葉およびチャンパー壁の吸収があり、それぞれ濃度に対して1次であるとする、葉による吸収速度はkpSC、壁による吸収速度はkwCである。なお、kp、kwはそれぞれ植物葉および壁の速度定数である。植物葉および壁のトータル吸収速度定数をkt、トータルの吸収速度をrとすると

$$r = ktC = kpSC + kwC \quad (6)$$

また、流通攪拌槽型チャンパーを用い、植物葉および壁による吸収のある場合の物質収支の式は次のようである。

$$f(C_{in} - C_{out}) - V \cdot r = V \cdot \frac{dC_{out}}{dt} \quad (7)$$

式(6)における濃度Cは葉の周囲の濃度であるが、チャンパー内が均一に攪拌されているため、この濃度は出口の濃度C_{out}に等しい。したがって、(6)(7)式により次式が得られる。

$$f(C_{in} - C_{out}) - V \cdot kt \cdot C_{out} = V \cdot \frac{dC_{out}}{dt} \quad (8)$$

これによりktを求めるが、次の2つの方法による求め方がある。一つはガス濃度の変化量が0となった定常状態に達した場合、(8)式を積分して求める方法である。定

常状態では、 $\frac{dC_{out}}{dt} = 0$ であるため、(8)式により容易にktが求められる。

$$kt = \frac{f(C_{in} - C_{out})}{V C_{out}} \quad (9)$$

一方、(8)式を積分し、 $\int \frac{f}{V} = Q$ とおくと次式を得る。

$$C_{out} = \frac{Q}{Q + kt} C_{in} (1 - e^{-(Q + kt)t}) \quad (10)$$

そして、未知数であるktの決定は、非線型の最小二乗法プログラムを用いてコンピュータで行った。このようにして得られたktにより植物の葉の吸収速度定数kpが求められる。

このようにして得られたktにより植物の吸収速度定数が求められ、PANのベチュニア暴露の結果を図4に示した。このように、計算値と実測値が非常によく一致しており、Rogersらの仮定が受け入れられ、植物葉面とPANとの反応は2次反応であり、ガス濃度に関しては1次であることが知られた。一方、オゾンでは、アサガオ、インゲンマメ、ベチュニアともこの計算値と実測値は立ち上がり部分で大きく、また暴露時間が長くなってくると徐々にずれる傾向にあった。図5に1例を示した。このことは、オゾンでは特に、植物葉面での吸収の他に葉面破壊と壁破壊の2つが大きく、この両者の影響のために計算値が大きすぎると思われる。そのため、オゾンにおける植物葉の吸収速度定数は、定常状態の(9)式を用いて求めた。なお、壁損失のkwはその定常状態時のkwを用いた。このようにして得られた植物の吸収速度定数kpは植物個体によってかなりのバラツキがあるがほぼ次のようであった。すなわち、オゾンではインゲンマメで10~18×10⁻³ dm⁻²・min⁻¹、アサガオで20~25×10⁻³ dm⁻²・min⁻¹、ベチュニアで8~13×10⁻³ dm⁻²・min⁻¹であった。PANではインゲンマメで4~7×10⁻³ dm⁻²・min⁻¹

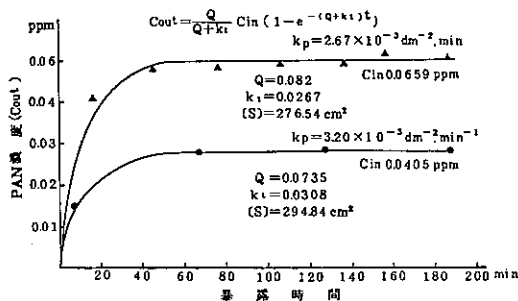


図4 ベチュニア葉によるPANの収着

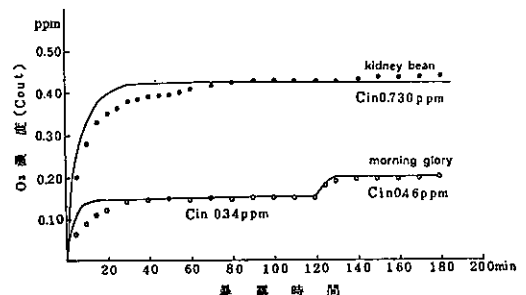


図5 アサガオ、インゲンマメ葉によるオゾンの収着

ベチュニアで $3 \sim 4 \times 10^{-8} \text{ dm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。インゲンマメのオゾンの吸収速度定数は、Rogers らのサイズの NO_2 吸収速度定数の $11.8 \times 10^{-3} \text{ dm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ とほぼ類似した値¹⁴⁾であった。

(3) 蒸散速度と到着速度の関係

インゲンマメとベチュニアでは、塩化カルシウムに $1/6 \text{ min}$ で吸引し水分を捕集したため、蒸散速度の測定の測定時間は30分であった。アサガオでは応答速度の早い(63%応答約1秒)湿度計を用いたため、10分程度での蒸散速度の測定が可能であった。ガス濃度を3段階程度変えたガス到着速度と蒸散速度を経時時間を追って測定したのはオゾンにおけるアサガオだけであり、インゲンマメ、ベチュニアのオゾン及びPAN暴露では濃度を変えていなかった。オゾン暴露によるアサガオのガス到着速度

の関係を図6に、インゲンマメ、ベチュニアの関係を図7に、また、PAN暴露によるインゲンマメとベチュニアのガス到着速度と蒸散速度の関係を図8に示した。なお、図中の添字は暴露開始後の時間(分で表わす)あるいは濃度を変化させた場合ではその後の時間を示している。その結果、可視被害が発現しない低濃度のオゾンおよびPAN暴露では、蒸散速度が時間の経過とともに徐々に増加している傾向が見られているが、蒸散速度とガス到着速度はともに目立った変化は生じなかった。しかし、濃度が高くなると到着速度と蒸散速度がともにすみやかに減少する現象が見られた。このように、植物葉によるガス到着速度と蒸散速度の間には、ほぼ直線関係が認められた。なお、ガス到着速度、蒸散速度の低下が顕著に認められたのは、可視被害として特徴的な症状やネ

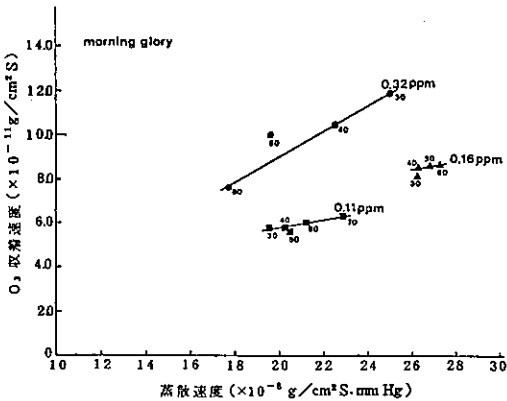


図6 アサガオのオゾン到着速度と蒸散速度の関係

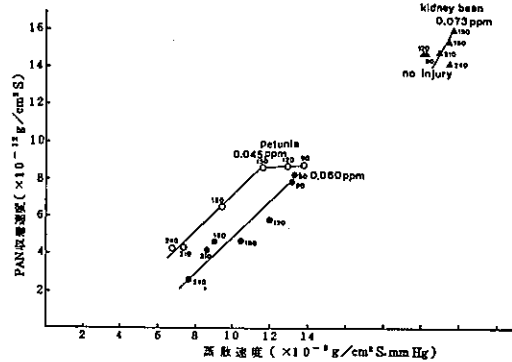


図8 ベチュニア・インゲンマメのPAN到着濃度と蒸散速度の関係

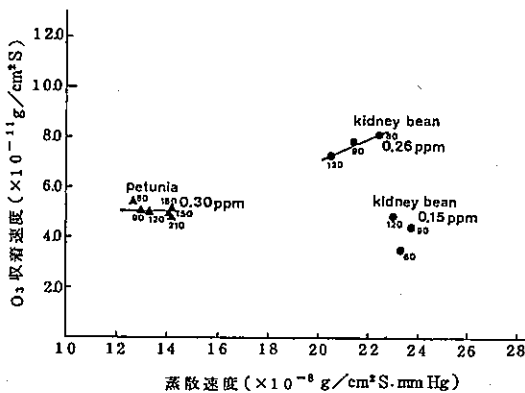


図7 ベチュニア・インゲンマメのオゾン到着速度と蒸散速度の関係

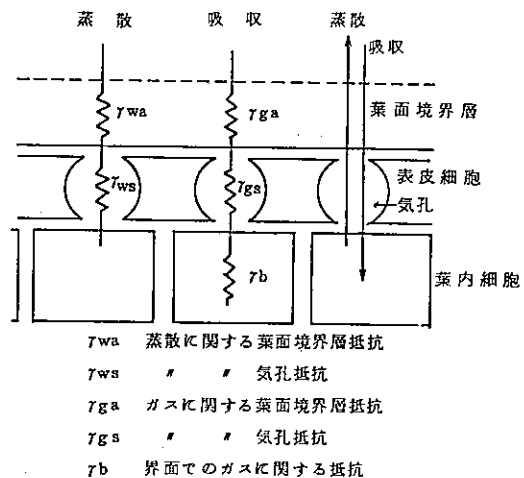


図9 蒸散と吸収の抵抗モデル

クロシスの前兆症状である葉表面の水浸症状(オゾンでもPANでも)が認められる時点であった。

植物葉の蒸散やガス吸収の過程は電気回路と同じように考えるとわかりやすく、図9に葉面境界層抵抗と気孔抵抗に関するモデルを示した。このモデルによれば気孔が両面にある場合、蒸散速度およびガス吸着速度は次式で近似できる。

$$W = \frac{2 \{ \chi_s(T_L) - \phi \chi_s(T_a) \}}{\gamma_{wa} + \gamma_{ws}} \quad (1)$$

$$Q = \frac{2(P_a - P_s)}{\gamma_{ga} + \gamma_{gs} + \gamma_b} \quad (2)$$

- なお、 γ_{wa} : 水蒸気拡散に対する境界層抵抗 $S \cdot cm^{-1}$
- γ_{ws} : 水蒸気拡散に対する気孔抵抗 $S \cdot cm^{-1}$
- γ_{ga} : ガス拡散に対する境界層抵抗 $S \cdot cm^{-1}$
- γ_{gs} : ガス拡散に対する気孔抵抗 $S \cdot cm^{-1}$
- γ_b : ガスに対する界面での抵抗 $S \cdot cm^{-1}$
- P_a : 大気中のガス濃度 g/cm^3
- P_s : 界面でのガス濃度 g/cm^3

ガス吸着速度と蒸散速度との間に直接関係が存在することは、抵抗モデルよりガス吸収面(界面)でのガス反応が非常に早く界面での抵抗が無視でき、葉面境界層抵抗と気孔抵抗に大きく支配されていると推察できる。

ガス吸着速度がガス拡散抵抗によって律速されていることを確かめるため、蒸散および吸着速度での抵抗の逆数である物質移動係数をもって表わしてみた。なお、ガス吸着および蒸散の物質移動係数をそれぞれ K_g, K_w とするとそれぞれ次式で示される。

$$K_g = \frac{f(C_{in} - C_{out})}{S \cdot C_{out}} \quad (3)$$

$$K_w = \frac{f(B_{out} - B_{in})}{S(B_s - B_{out})} \quad (4)$$

オゾン及びPANにおけるインゲンマメ、ベチュニアのガス吸着と蒸散の物質移動係数の関係を図10に示す。なお、図中の2本の直線はオゾン、PANの拡散定数から求めたものである。すなわち、ガス吸着と蒸散の物質移動係数の関係は、ガスと水の相互分子拡散定数で次のように表わすことができるからである。

$$K_g/K_w = D_g/D_w \quad (5)$$

空気中でのオゾンやPANの相互分子拡散定数は知られていないが、相互分子拡散定数を推定する理論式がいくつか提出されており¹⁵⁾、ここでは藤田の式(注1)および

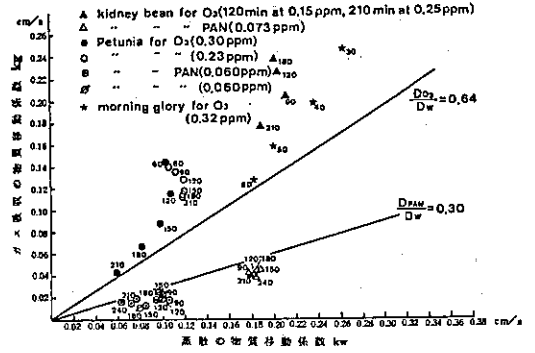


図10 ガス吸収の物質移動係数と蒸散の物質移動係数の関係

Gillilandの式(注2)を用い、オゾンは $0.164 \text{ cm}^2/s$ 、PANは $0.078 \text{ cm}^2/s$ とした。オゾンでは K_g/K_w の関係が D_g/D_w の直線からずれている点が多いが、PANではほぼ一致している。オゾンでの不一致性も多いが、オゾンとPANでグループに類別することができることは、分子拡散によっていると判断してもよいと思われる。この結果オゾンおよびPANのガス吸着は、分子拡散で移動し、ガス拡散抵抗が吸着の律速段階となっていることが明らかとなった。なお、オゾンでの直線より大きくずれている点は、低濃度の時が多く、ガス吸着のうち吸着あるいは葉面破壊の部分が大きく寄与しているためと推察された。

4 まとめ

植物を大気汚染物質の指標植物として利用する場合の基礎となる量-反応関係の数式化や被害発現機構の解明

(注1) 藤田の式

$$D_{12} = \frac{0.0007 T^{1.833}}{\left[\left(\frac{T_c}{P_c} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{T_c}{P_c} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^3} \sqrt{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}} \quad (\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1})$$

D_{12} : 相互分子拡散定数

T_c : 臨界温度 空気 $132.5^\circ K$ オゾン $261.1^\circ K$

P_c : 臨界圧力 空気 37.2 atm オゾン 54.6 atm

M_1, M_2 : 物質1および2の分子量

(注2) Gillilandの式

$$D_{12} = \frac{0.0043 T^{\frac{3}{2}}}{P \left(V_1^{\frac{1}{3}} + V_2^{\frac{1}{3}} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}} \quad (\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1})$$

V : 標準沸点における液体分子容 ($\text{cc} \cdot \text{mol}^{-1}$)

T : 温度 $^\circ K$

には、植物の葉が大気汚染物質を取り込む機構を明らかとすることは重要である。そこで、植物への毒性が特に強いオゾンと PAN の植物葉による吸収機構を検討した。アサガオ、ベチュニア、インゲンマメの葉によるガス吸着速度、蒸散速度は、流通攪拌槽型植物チャンバー（直径45 cm、高さ50 cm のアクリル製円筒型）で入口と出口の濃度差より求め、以下のような知見が得られた。

(1) アサガオ、ベチュニア、インゲンマメ葉によるオゾン、PAN の吸着速度は、環境濃度に比例して取り込まれていた。

(2) Rogers らは、植物によるガス吸収速度式は、2 次反応（植物葉とガス）であると仮定し、吸収されるガスが濃度に関し 1 次であるとして解析した方法を採用して吸収速度定数を求めた。その結果、オゾンではアサガオ $20 \sim 25 \times 10^{-3} \text{ dm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 、インゲンマメ $10 \sim 18 \times 10^{-3} \text{ dm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 、ベチュニア $8 \sim 13 \times 10^{-3} \text{ dm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ であり、PAN ではインゲンマメ $4 \sim 7 \times 10^{-3} \text{ dm}^{-2} \cdot \text{min}$ 、ベチュニア $3 \sim 4 \times 10^{-3} \text{ dm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ であった。

(3) オゾンおよび PAN のガス吸着速度と蒸散速度に直線関係があった。このことは、ガス吸収はガス拡散抵抗（葉面境界層抵抗と気孔抵抗）に支配され、葉内に取り込まれたガスと葉内物質との反応は非常に速いことが推察された。そこで、ガス吸着の物質移動係数 (K_g) と蒸散の物質移動係数 (K_w) の関係を求めた。この吸着と蒸散の物質移動係数の関係が、理論的に示されるガスと水の分子拡散定数 ($K_g/K_w = D_g/D_w$) で表わすことができ、ガス吸着がガス拡散抵抗で律速されていることが明らかとなった。

本研究を行うにあたり、当研究所の青木一幸、栗田恵子の両氏の懇切な指導と多大な協力を得た。ここに記して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 大気汚染植物被害写真集, 日本公衆衛生協会(1973年)
- 2) 大気汚染による農作物被害症状の標本図譜, 農林水産技術会議事務局監修, 郡馬, 埼玉, 千葉, 東京, 神奈川, 大阪, 兵庫, 和歌山, 岡山の各都府県, (1976年)
- 3) 全国都道府県, 読売新聞社, 1974年~1976年度, アサガオによる光化学スモッグ観察全国調査結果報告書, (1975, 1976, 1977)
- 4) Thomas, M.D. and Hill, G.R.: Absorption of sulfur dioxide by alfalfa and its relation to leaf injury, *Plant Physiology*, **10**, 291-307 (1935)
- 5) Heck, W.W. and Tingey, D.T.: Ozone-Time-concentration model to predict acute foliar injury. In *Proceedings of the Second International Clean Air Congress*, ed. by H.M. Englund and W.T. Beery 249-55. New York, Academic Press.
- 6) Larsen, R. I. and Heck, W.W. An air quality data analysis system for interrelating effects, standards, and needed source reduction; Part 3. Vegetation injury. *J. Air Pollut. Control Ass.*, **26**, 325-333 (1976)
- 7) Adams, D.F., Hendrix, J.W., and Applegate, H. G.: Relationship among exposure periods, foliar burn, and fluorine content of plants exposed to hydrogen fluoride, *Agr. Food Chem.*, **5**, 108-116 (1957)
- 8) Monteith, J.L.: Principles of environmental physics, Edward Arnold, London, (1973)
- 9) Bennett, J.H., Hill, A.C., and Gates, D.M.: A model for gaseous pollutant sorption by leaves. *J. Air Pollut Control Ass.*, **23**, 957-962 (1973)
- 10) 大政謙次・安保文彰: 植物による大気汚染物質の吸着に関する研究(I) SO_2 の局所吸着と可視障害発現との関係, *農業気象*, **34**, 51-58 (1978)
- 11) 大政謙次, 安保文彰, 名取俊樹, 戸塚 稯: 植物による大気汚染物質の吸着に関する研究(II) NO_2 , O_3 あるいは $\text{NO}_2 + \text{O}_3$ 暴露下における吸着について, *農業気象* **35**, 77-83 (1979)
- 12) Nouchi I. and Aoki, K: Morning glory as a photochemical oxidant indicator, *Environ. Pollut.*, **18**, 289-303 (1979)
- 13) 野内勇: オゾン, PAN 濃度および暴露時間と植物被害, *大気汚染研究*, **14**, 489-496 (1979)
- 14) Rogers, H.H., Jeffries, H.E., Stahel, E.P., Heck, W.W., and Witherspoon, A.M.: Measuring air pollutant uptake by plants: A direct kinetic technique, *J. Air Pollut Control Ass.*, **27**, 1192-1197 (1977)
- 15) 佐藤一雄, 物性定数推定法, 丸善 (1975)