

植物による大気汚染物質の収着に関する研究

(I) SO₂の局所収着と可視障害発現との関係

大政謙次・安保文彰
(国立公害研究所)

Studies of Air Pollutant Sorption by Plants.
(I) Relation between local SO₂ sorption and acute visible leaf injury

Kenji OMASA and Fumiaki ABO

(National Institute for Environmental Studies,
Yatabe, Ibaraki Pref. 300-21)

1. はじめに

植物の大気汚染害発現の程度は、収着量に寄与する重要な因子である濃度やドースに関連づけて議論されることが多い(Thomas and Hill, 1935; Mudd and Kozlowski, 1975; 谷山・有門, 1968; 岩切, 1974)。しかし、葉面境界層、気孔開度、気孔底の界面の性質等も物質移動を支配する重要な因子であり、汚染害発現に寄与すると考えられる。特に、種、エイジ、葉面部位等が異なる場合、これ等の諸因子の違いは顕著であろうと考えられる。それ故、種、エイジ、葉面部位等の差による汚染害発現の違いに関係する生理的諸要因を解析するためには、その前提として、物質移動にかかわるこれ等の諸因子の違いを明らかにしておく必要がある。

葉面境界層や気孔抵抗等に関係する汚染物質の気相での拡散については物質拡散のアナロジーにより、水蒸気やCO₂の拡散と同様に取り扱い得ることが知られている(Monteith, 1973; Bennett, Hill and Gates, 1973; Unsworth, Biscoe and Black, 1976)。植物側の界面の性質と濃度境界条件や界面抵抗等の界面での境界条件については、Hill (1971)やBennett et al.(1973)が水における溶解度との関係を報告している。Spedding (1969)は、界面での境界条件については触れていないが、界面を構成する物質の違いによる汚染物質の収着速度の違いを報告している。植物の界面の性質の違いによ

る収着速度の違いについては、Fowler and Unsworth (1974)の報告がある。しかし、被害発現に至るまでの経時的な植物側の界面での境界条件についての報告はみあたらない。一般に、界面での境界条件は、対象とする物質の界面における溶解度、植物体内での移動、代謝活性、緩衝能等により異なり、実験的検討を必要とする。

この研究は、以上に述べた植物への汚染物質の収着の機構についての問題点を解析し、物質移動にかかわる諸因子と植物の抵抗性との関係を明らかにしようとするものである。本報では、その第一段階として、SO₂暴露に伴う植物の被害発現に至るまでの葉面でのSO₂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の経時的な界面での境界条件について解析を試みた。また、その結果を用いて葉面の局所部位に発現する急性的な可視障害に寄与する因子を検討した。

2. 材料と方法

材料…実験材料としては、大気汚染ガス暴露実験にしばしば用いられるロシアヒマワリ(*Helianthus annuus* L. c. v. Russian Mammoth)を選んだ。材料は、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)に栽培し、播種後4~5週間(1個体の葉面積: 1000~2500 cm², 葉数: 10~20枚)のものを用いた。

装置…実験装置は、当研究所に設置されているガス暴露用グロースキャビネット(有効内容積: 2.3 (W) ×

1.7 (D)×1.9 (H); m³)を用いた(大政・相賀, 1976)。本装置は、光源として陽光ランプを用い、酸化鉄を含む磷酸ガラスフィルターにより約 800 nm 以上の熱線を除去している。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±5 klux であった。装置内の温度、湿度、SO₂ 濃度の制御精度は、それぞれ、±0.5°C、±3% RH、±0.04 vol ppm 以下であり、装置内の平均風速は 0.22 m/s (標準偏差: 0.05 m/s) であった。SO₂ 濃度の測定には、190~230 nm の紫外線で励起し、300~390 nm の蛍光強度を測定する分析計を使用した。

測定方法…SO₂ 収着速度は、一定濃度の SO₂ を一定流量で装置内に供給し、装置内の SO₂ 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 SO₂ 濃度の変化から計算した。この方法は、ヒマワリ搬入時の装置内の状態の乱れが安定するのに 15~30 分程度必要とするが、その後の 10 個体総計での SO₂ 収着速度の経時変化を測定できる。実験の精度を上げるために、供給ガスは、濃度が既知のボンベ詰めものを用い、質量流量計により調節した。また、装置内の冷却除湿コイルによる SO₂ 濃度への影響を除去するために、温湿度の制御は、電気ヒータと加湿器のみで行った。蒸散速度は、0.1 g まで測定可能な上皿電子天秤を用いて測定した。その際、ポットをビニール袋でおおい、土の表面からの蒸発を防いだ。葉温は、直径 0.1 mm の銅-コンスタンタン熱電対を、水平に支持した葉の表面あるいは裏面に接着して測定した。なお、蒸散速度や葉温の測定の際の材料の処理や熱電対の接着方法等は、各々の実験により異なるので、実験方法に詳述する。

実験方法…SO₂ 暴露下の植物の葉面での蒸散速度、SO₂ 収着速度、葉気温差、可視障害発現の程度等の間の関係を調べるために、SO₂ 暴露実験を 3 段階に分けて行った。具体的な実験方法は以下の様であった。

実験 I …SO₂ 暴露下における葉気温差と蒸散速度の経時変化の同時測定 - SO₂ 暴露下における葉気温差と蒸散速度との関係を調べるために葉気温差と蒸散速度の経時変化を同時に測定した。葉気温差は、熱電対を 1 枚の葉の表裏にそれぞれ 6 対ずつ取りつけて測定した。この場合の材料としては、1 個体のヒマワリの第 5, 6 葉位の葉のみを残し、取り付けた 24 対の熱電対の SO₂ 暴露時における葉気温差の変化のパターンが比較的均一なものを選んだ。これは、葉気温差と同時に測定される蒸散速度が 1 個体での値であるので、この値と対比する 1 個体の平均葉気温差に対する各部位の葉気温差の分散を小さくするための処置である。

実験 II …葉面での SO₂ 収着速度と蒸散速度の経時変化の同時測定 - SO₂ 暴露下におけるヒマワリの SO₂ 収

着速度と蒸散速度との関係を調べるために、ヒマワリに 0.2~1.5 vol ppm の濃度の SO₂ を約 5 時間暴露し、10 個体総計での SO₂ 収着速度と蒸散速度の経時変化を同時に測定した。葉温は、SO₂ 暴露前の葉の表面あるいは裏面にランダムに接着測定し、10 個体の平均葉温を計算した。

実験 III …SO₂ 暴露に伴う葉面の各部位の葉温変化の測定と SO₂ 暴露後に発現する可視障害発現の程度の評価 - 葉面の局所部位に発現する急性の可視障害に寄与する因子を検討するために、SO₂ 暴露時における葉面の各部位における葉温の経時変化の測定とその部位に SO₂ 暴露後に発現する可視障害発現の程度の評価を行った。葉温は、ヒマワリ 1 個体を 3 段階の葉位に分け、それぞれの段階を代表する葉位の葉の表面の葉内部に 6 対の熱電対を接着し、測定した。また、障害の程度は、SO₂ を 2 時間暴露した後、20 時間経過した時点での熱電対の接着点を中心とする直径 1 cm の円内において可視障害部分の占める面積の割合を測定し、3 段階に区分した。すなわち、全く可視障害発現がない場合を (-) 記号で表示し、可視障害部分の全面積に占める割合が 0~1/2 の場合を (+), 1/2~1 の場合を (++) と評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 記号

E	: 葉面における純放射	cal/cm ² ·s
S	: 葉面における顕熱伝達	cal/cm ² ·s
L	: 蒸発の潜熱	cal/g
W	: 葉面における蒸散速度	g/cm ² ·s
α_p	: 葉面における短波放射の吸収係数	
E_s	: 葉面における短波放射	cal/cm ² ·s
E_l	: 葉面における長波放射の吸収	cal/cm ² ·s
$2\epsilon\sigma T_l^4$: 葉面からの長波放射	cal/cm ² ·s
ϵ	: 葉面における長波の射出率	
σ	: ステファン・ボルツマンの常数 (1.37×10^{-12})	cal/cm ² ·s·°K ⁴
T_a	: 気 温	°C, °K
T_l	: 葉 温	°C, °K
ΔT	: 葉気温差 ($T_l - T_a$)	°C
h_T	: 葉面における熱伝達係数	cal/cm ² ·s·°C
Q	: 葉面における SO ₂ 収着速度	g/cm ² ·s
k_w	: 飽和蒸気密度 - 飽和蒸気圧変換係数	
	(1.6×10^6)	mmHg·cm ³ /g (35°C)
$X_s(T)$: T °C における飽和蒸気圧	mmHg
φ	: 相対湿度	
$P_{a,s}$: 大気中の SO ₂ 濃度	vol ppm
$P_{l,s}$: 気孔底界面での SO ₂ 濃度	vol ppm

k_s : SO₂ 濃度単位変換係数
(3.95×10^8)
vol ppm · cm³/g (35°C)
 r_{wa} : 水蒸気に関する境界層抵抗
s/cm
 r_{ws} : 水蒸気に関する気孔抵抗 s/cm
 r_{sa} : SO₂に関する境界層抵抗 s/cm
 r_{ss} : SO₂に関する気孔抵抗 s/cm
 r_b : SO₂に関する界面での抵抗
s/cm
 r_a : 葉面における境界層抵抗 s/cm
 α : 風向に対する葉の傾き等を考慮
した係数

x : 葉の前縁からの風方向の距離
cm

l : 葉 長 cm

S_c : シュミット数

Re_x : x でのレイノルズ数

D : 相互分子拡散係数 cm²/s

D_s : SO₂と空気との相互分子拡散係数 cm²/s

D_w : 水蒸気と空気との相互分子拡散係数 cm²/s

w' : $W / (X_a(T_l) - \phi X_a(T_a))$ g/cm² · s · mmHg

3.2 SO₂ 暴露下における葉気温差と蒸散速度との関係

Monteith (1973) や Gates and Papian (1971) 等によれば、葉面における熱収支は一般に次式により与えられる。

$$E = S + LW \quad (1)$$

式(1)において純放射 E は

$$E = \alpha_p E_s + E_l - 2\epsilon\sigma T_l^4 \quad (2)$$

長波放射の吸収 E_l は周囲壁面による黒体放射で、その温度が気温 T_a に等しいとすれば、 $2\sigma T_a^4$ となり、さらに葉の射出率を近似的に 1.0 として、次式を得る。

$$E = \alpha_p E_s + 2\sigma(T_a^4 - T_l^4) \approx \alpha_p E_s + 8\sigma(T_a - T_l)T_a^3 \quad (3)$$

顕熱項 S は、

$$S = -2h_T(T_a - T_l) \quad (4)$$

ここで、 $(T_l - T_a) = \Delta T$ として、 ΔT と W との関係を求めると次式を得る。

$$\Delta T = -\{L / (8\sigma T_a^3 + 2h_T)\} W + \alpha_p E_s / (8\sigma T_a^3 + 2h_T) \quad (5)$$

実験装置内において、光環境、気温、風速等を一定に保つとすれば、 ΔT と W との間に線形関係が成立することが推察される。そこで、SO₂ 暴露下において、 ΔT と W との間に線形関係が成立するかどうかを実験により調べた(実験 I)。Fig. 1 に 1~2 vol ppm 程度の濃度の SO₂

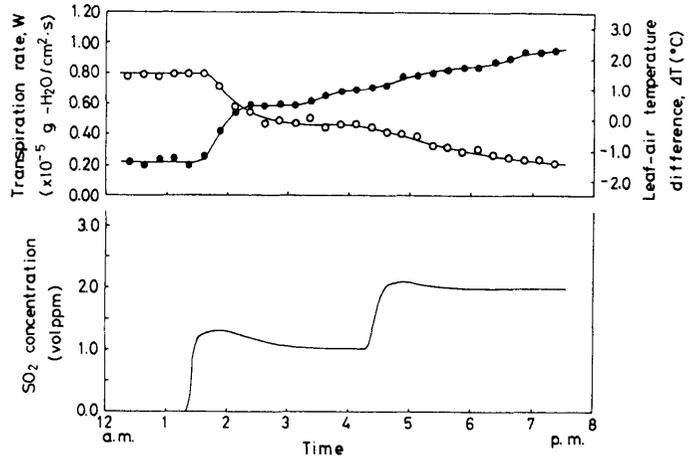


Fig. 1. Time courses of transpiration rate, W (—○—) and leaf-air temperature difference, ΔT (—●—) during SO₂ fumigation. Air temperature, 26°C; humidity, 60% RH; light intensity, 40 klux.

を暴露したときの葉温と蒸散速度の典型的な経時変化の例を示す。SO₂ の暴露時間の経過に伴って蒸散速度が減少し、葉気温差は上昇した。この現象は、種間差、個体差、エイジ、葉面部位等の違いによりばらつきはあるが、SO₂ 濃度が高い程顕著な様である。次に、Fig. 1 に示した測定結果から得られた葉気温差と蒸散速度との関係を Fig. 2 に示す。結果が回帰直線 $\Delta T = -5.8 \times 10^4 W + 3.5$ で表わされることから、SO₂ 暴露下においても式(5)に示した ΔT と W との間に線形関係が成立することが確かめられた。

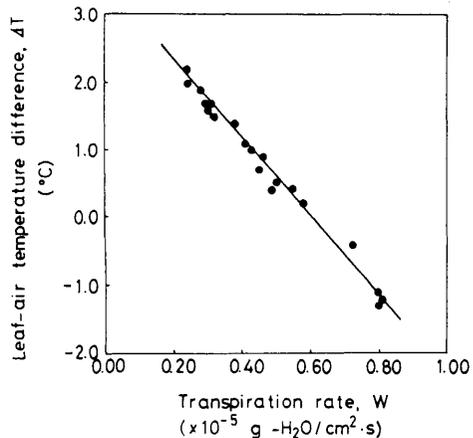


Fig. 2. Relation between transpiration rate, W and leaf-air temperature difference, ΔT . Data were obtained from the results shown in Fig. 1.

3.3 葉面におけるSO₂ 収着速度と蒸散速度との関係

植物へのSO₂ 収着の機構を調べるために、ヒマワリのSO₂ 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.3に材料を0.2~1.5 vol ppmの4段階の濃度(SO₂ 収着速度を装置内の濃度変化から求めている関係で、20%程度の経時的な濃度変化を生じる)のSO₂ に約5時間暴露したときのSO₂ 収着速度Qと蒸散速度Wの経時変化の関係を示す。図中での数字(m_f) 1, 2, 3, …は、SO₂ 暴露時間を表わし、時間は30m_f+15min(m_f=1, 2, 3, …)で計算される。例えば、m_f=5は、暴露開始後2時間45分経過した時点での値であることを示している。Fig.3において、1と1.5 vol ppmの濃度で、暴露時間の経過に伴ってSO₂ 収着速度も蒸散速度も共に減少する現象がみられた。その程度は、1 vol ppmよりも1.5 vol ppmの方が大きかった。また、0.65 vol ppmでも顕著ではないがその傾向がみられた。可視被害として、1と1.5 vol ppmにおいて、ネクロシスやクロロシスの前兆である葉表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。これ等の現象が発現し始めたのは、1.5 vol ppmで暴露開始後約2時間、1 vol ppmで約3時間経過した時点であった。しかし、Fig.3で得られた関係には、測定時におけるSO₂ 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、これ等の影響を除去するためにQ/w'とP_{a,s}との関係として整理し直した。Fig.4にその結果を示す。w'は

$$w' = W / (X_s(T_l) - \varphi X_s(T_a)) \quad (6)$$

より計算されるが、これを求めるには、葉温が必要である。葉温は暴露開始前の値しか測定していないので、経時的な値は、実験(I)で得られたΔTとWとの回帰係数-5.8×10⁵ cm²・s・°C/gを用いて、蒸散速度の変化ΔWから葉温の変化を推定し、測定した暴露開始前の値に加算することにより求めた。式(5)によれば、気温の変化が回帰係数に影響するが、10°C程度の変化の場合、寄与する割合は小さい。この方法で正確な葉温を推定することは困難であるが、w'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。Fig.4によれば葉面における水滲や葉の萎れ等の可視被害にかかわらず、Q/w'とP_{a,s}の間に、近似的にQ/w'≅1.8×10⁻³P_{a,s}の関係が成立することが認められた。この結果より、葉の表面での水滲の状態等の特別な場合を除いて、ヒマワリのSO₂ 収着の主なものは気孔を通しての吸収であると考えられる。そして、SO₂ 収着機構は、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。

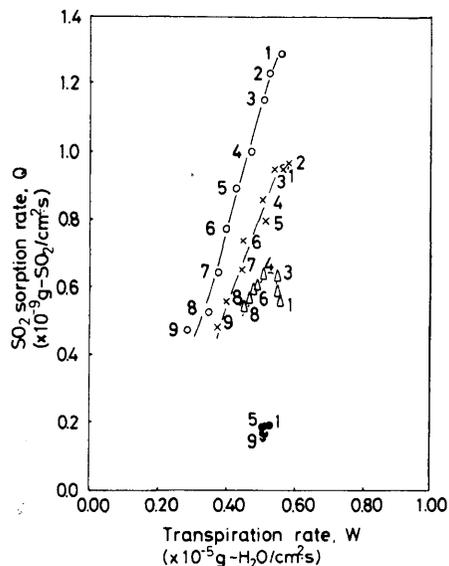


Fig. 3. Relation with time between SO₂ sorption rate, Q and transpiration rate, W for four SO₂ concentrations. —○— denotes SO₂ concentration of about 1.5 volppm, —×— about 1 volppm, —△— about 0.65 volppm, —●— about 0.2 volppm. The fumigation time is calculated by 30m_f+15 min, where m_f indicates a number in the figure. Air temperature, 35-36°C; humidity, 65% RH; light intensity, 20 klux.

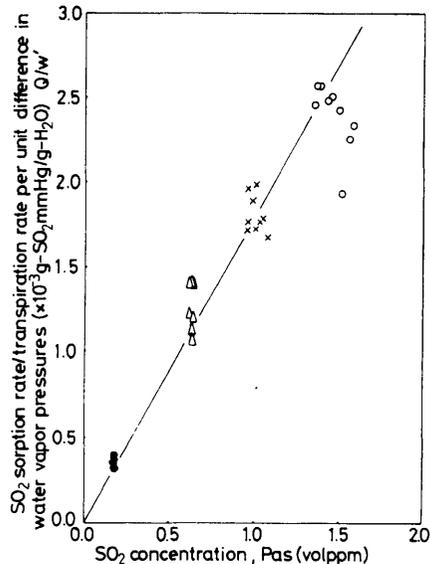


Fig. 4. Relation between SO₂ concentration in the air, P_{a,s} and the ratio of SO₂ sorption rate to transpiration per unit difference in water vapor pressures, Q/w'. Data were obtained from the result shown in Fig. 3.

次に、葉面における蒸散速度および SO₂ 収着速度に関する簡単なモデルにより、SO₂ に関する植物体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 SO₂ 収着速度は、気孔が両面にある場合それぞれ次式で近似される。

$$W = 2(X_s(T_l) - \varphi X_s(T_a)) / k_w(r_{wa} + r_{ws}) \quad (7)$$

$$Q = 2(P_{as} - P_{is}) / k_s(r_{sa} + r_{ss} + r_b) \quad (8)$$

式(6), (7), (8)より Q/w' を求めると次式を得る。

$$Q/w' = \{k_w(r_{wa} + r_{ws}) / k_s(r_{sa} + r_{ss} + r_b)\} (P_{as} - P_{is}) \quad (9)$$

式(9)において、SO₂ に関する界面での抵抗 r_b は、界面での SO₂ の吸収が急激な反応吸収と考えられるので $r_b \approx 0$ s/cm と推定される。また、装置内においては、最大風速が 0.4 m/s ($Re = 5.3 \times 10^3$) であることより、葉面境界層は平板における層流境界層と仮定することができ(Parlange, Waggoner and Heichel, 1971; 長谷場, 1975), 葉面における境界層抵抗 r_a は局所および平均の場合についてそれぞれ次式で近似される。

$$r_a = 1 / (\alpha \cdot 0.332 Sc^{1/3} \cdot Re_x^{1/2} D/x) \quad (\text{局所}) \quad (10)$$

$$r_a = 1 / (\alpha \cdot 0.664 Sc^{1/3} \cdot Re_l^{1/2} D/l) \quad (\text{平均}) \quad (11)$$

また、 r_{sa}/r_{wa} , r_{ss}/r_{ws} には次式の関係が成立する(Monteith, 1973)。

$$r_{sa}/r_{wa} = (D_s/D_w)^{-2/3} = 1.53 \quad (12)$$

$$r_{ss}/r_{ws} = (D_s/D_w)^{-1} = 1.89 \quad (13)$$

実測のデータに基づいて境界層抵抗を計算することは、葉数が多い場合、実際にはなかなか厄介である。しかし、式(12), (13)で与えられる r_{sa}/r_{wa} , r_{ss}/r_{ws} を $r_{sa}/r_{wa} = r_{ss}/r_{ws} = k_r$ と仮定するならば、境界層抵抗を計算する必要がなくなり、 $r_b = 0$ として式(9)は簡略化される。

$$Q/w' = (k_w/k_s k_r) (P_{as} - P_{is}) \quad (14)$$

式(14)の $k_w/k_s k_r$ を $k_r = 1.53$ と $k_r = 1.89$ について計算するとそれぞれ、 1.8×10^{-3} mmHg/vol ppm ($k_r = 1.53$), 1.4×10^{-3} mmHg/vol ppm ($k_r = 1.89$) となる。この値は、Fig. 4 で得られた回帰係数 1.8×10^{-3} mmHg/vol ppm とほぼ一致している。式(14)に $k_r = 1.53$, $P_{is} = 0$ vol ppm を代入して計算すると $Q/w' = 1.8 \times 10^{-3} P_{as}$ を得る。 $k_w/k_s k_r$ は、実験の際の温湿度条件により若干変わる様である。Fig. 5 に 32°C, 50% RH と 35.5°C, 65% RH の温湿度条件で得られた Q/w' を比較した結果を示す。35.5°C, 65% RH に比べて、32°C, 50% RH の Q/w' の方が小さい傾向があった。この原因については、 Q/w' そのものの変化、SO₂ 収着速度、温湿度、葉温等の測定あるいは推定誤差、式(5), (6)等の近似モデルの精度等が考えられる。この問題に関する詳細な検討は今後の課題であろう。また、ここで得られた結果は、約 5 時間程度

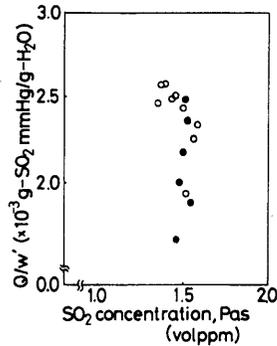


Fig. 5. Influences of air temperature and humidity on Q/w' . ○ denotes data at an air temperature of 35.5°C and a relative humidity of 65%. ● those at an air temperature of 32°C and a relative humidity of 50%.

の SO₂ 暴露実験に基づくものであり、数週間あるいは数カ月といった長期間暴露状態での SO₂ の収着については言及しなかった。しかし、この問題は、フィールドでの SO₂ 収着量を推定するのに非常に重要であり、今後詳細な検討を必要とするが、手持ちのデータから推察すると、可視障害発現が顕著になるまでは、ここで得られた結果が適用できる様である。

3.4 葉温測定による気孔開閉および SO₂ 収着速度に関する情報の抽出

葉温と水蒸気に関する気孔抵抗との関係は式(7)を式(5)に代入することにより得られる。

$$\Delta T = -L \{X_s(T_l) - \varphi X_s(T_a)\} / \{k_w(4\sigma T_a^3 + h_T)(r_{wa} + r_{ws})\} + \alpha_p E_s / (8\sigma T_a^3 + 2h_T) \quad (15)$$

実験装置内において、光環境、温湿度、風速等を一定に保つとすれば、 ΔT を測定することにより水蒸気に関する気孔抵抗を推定することができる。なお、水蒸気に関する気孔抵抗と SO₂ に関する気孔抵抗は、式(13)により相互に変換可能である。また、先に得られた蒸散機構と SO₂ 収着機構との関係を用いることによって、 ΔT から局所 SO₂ 収着速度を推定することができる。この様な方法は厳密な物質移動論としては問題点もあるが、実用上は差しつかえないと考えられる。

3.5 葉面の局所部位に発現する可視障害における気孔の役割

大気汚染物質に暴露された植物の可視障害発現の状態は、葉位や葉面の部位等により異なることが一般に知られている。しかし、その原因の解析例は皆無に等しい。その主要な理由の一つは、今まで局所的にも正確な面情報に基づいた可視障害の評価や、寄与すると予想される因子の定量化がなされていなかったことによると考えられる。そこで、先に得られた結果を利用して、1~2 vol ppm

程度の高濃度の SO_2 を暴露したときの種々の葉位の葉の各部位に発現する可視障害の原因を局所収着量との関係から定量的に検討した(実験Ⅲ)。局所収着量は、先に述べた関係を利用し、葉温を測定することにより推定した。葉温の測定は熱電対を用いて行ったが、この方法は接触計測であるので、正確な局所情報を得るのに必ずしも好ましい方法ではない。しかし、得られた結果が本質を逸脱することはないと考えられる。Fig.6 に約 2 vol ppm の SO_2 を暴露したときの同一葉位で異なった部位における葉気温差の経時変化の典型的例を示す。各々の部位において、 SO_2 暴露前の葉気温差は $-1.3 \sim -1.7^\circ\text{C}$ と比較的均一であったにもかかわらず、暴露時間の経過に伴って不均一になった。可視障害は、葉表面での水滲現象、葉の萎れ、植物色素の退色、ネクロシスやクロロシスと進行するが、この時点では、障害の兆候はみられなかった。しかし、暴露終了後 20 時間経過した時点では、ネクロシスやクロロシスの段階まで進行しており、これ以上障害の程度は大きくなる。この時点での可視障害発現の程度は、葉面の部位の違いにかかわらず、葉温上昇が遅い部位程大きかった。実験装置内の環境は一定に保たれており、 SO_2 を暴露しない場合の葉気温差(1点での測定値)は Fig.7 に示す様に一定に保たれる。それ故、各部位における葉気温差の上昇は SO_2 暴露の影響で気孔が閉じたことを示唆している。被害の程度と葉温上昇との関係を定量的に議論するために、これ等を数量化した。被害の程度の表現は、実験Ⅲの方法によった。他方、葉温の時間的変化の数量化は Fig.8 に示すモデルによった。図に示された斜線部の全面積を $(A+B)$ とし、葉気温差を示す曲線によって、さらに A と B に区分した。 $A/(A+B)$ の割合が小さい程、 SO_2 暴露時における葉温の上昇が早いことを意味する。1 個体での種々の葉位における $A/(A+B)$ と可視障害発現の割合との関係を Fig.9 に示す。同一葉位においては、この面積比を用いた葉温上昇の早さと可視障害の程度との間に密接な関係が認められた。先に得られた蒸散速度、葉温変化および SO_2 収着速度相互間の関係から、葉温上昇が遅い部位程気孔の閉じる速度が遅く、葉温上昇が

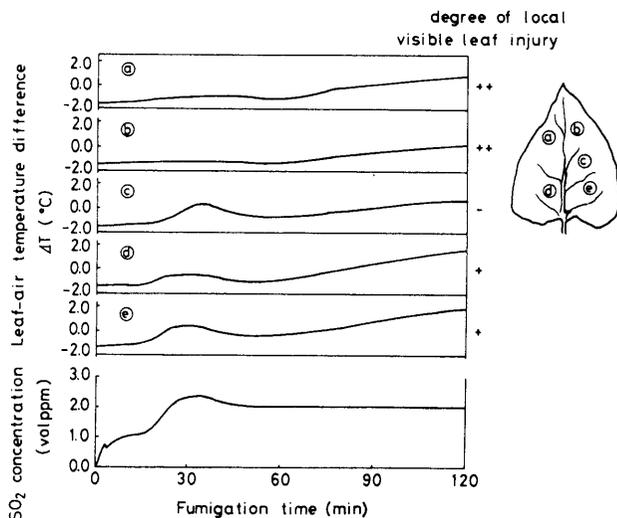


Fig. 6. Time courses of leaf-air temperature difference, ΔT during SO_2 fumigation and the degree of local visible leaf injury (—, +, ++) after fumigation under an air temperature of 26°C , a relative humidity of 60% and a light intensity of 40 klux. The degree of local visible leaf injury was estimated by measuring the ratio of injured leaf area in a circular area (10 mm in diameter) where a thermo-couple was set. — denotes the ratio of injured leaf area being 0, + the ratio being less than 1/2, ++ the ratio being greater than 1/2.

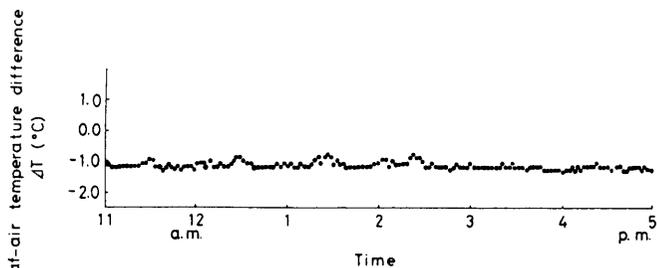


Fig. 7. Time course of leaf-air temperature difference with no SO_2 fumigation, ΔT . Air temperature, 26°C ; humidity, 60% RH; light intensity, 40 klux.

早い部位に比べてより多くの SO_2 を収着すると考えられる。そして、葉面の各々の部位における気孔抵抗の変化が各部位における可視障害発現の重要な因子であることを示している。

以上の人工環境下で得られた結論は、実際のフィールドにおいて現われる一見複雑にみえる現象も、間接的にせよ収着量を示す尺度を導入することにより、整理される部分がかかり残されていることを示唆している。今後、

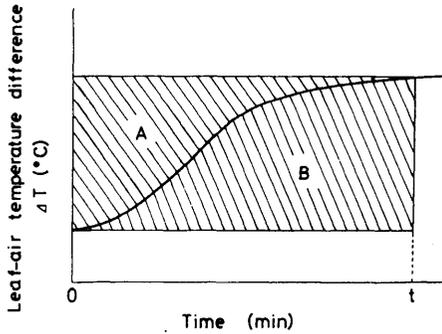


Fig. 8. Schematic representation of the response of leaf-air temperature difference, ΔT , during SO_2 fumigation. The degree of response is indicated by the ratio of areas $A/(A+B)$. $A/(A+B)$ becomes small for a fast response.

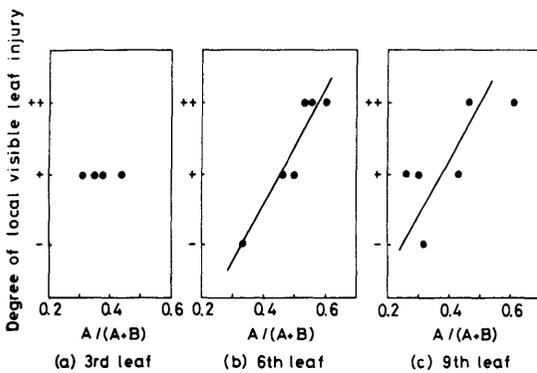


Fig. 9. Relation between $A/(A+B)$ ratio, an index of the response of leaf-air temperature difference, and degree of local visible leaf injury (-, +, ++).

個体レベルでの生理的諸要因の解析の前提条件として、これらの収着機構にかかわる現象が明らかにされることが望まれる。

4. 要 約

SO_2 の植物への収着の機構と SO_2 に対する植物の抵抗性との関係を明らかにするために、葉面の各部位により異なる可視障害発現を取りあげ、制御された環境下で実験を行い、解析した。得られた結果は次の様に要約される。

(1) SO_2 暴露に伴う植物の被害発現に至るまでの Q/w' と P_{as} との間には、 $Q/w' \approx 1.8 \times 10^{-3} P_{as}$ の関係が成立する。これは、モデル $Q/w' = (k_w/k_s k_r)(P_{as} - P_{ls})$ において $k_r = 1.53$, $P_{ls} = 0$ vol ppm として計算した値と一致する。

(2) 光、温湿度、風速等を一定に保った実験装置内で、

SO_2 暴露下における葉気温差 ΔT と蒸散速度 W との間に線形関係が成立した。そして、その回帰係数は、 $-5.8 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ s} \cdot ^\circ\text{C}/\text{g}$ であった。(1) で得られた関係と合わせて考えると葉温を測定することにより、蒸散速度すなわち気孔開閉の程度が推定され、更に SO_2 収着速度を推定することができる。

(3) SO_2 暴露下において、葉面の各部位における可視障害発現の程度とその部位における葉温の変化との間に密接な関係が認められた。すなわち、葉温の上昇が遅い部位程、被害の程度が大きくなる傾向があった。これは、葉温上昇が遅い部位程気孔の閉じる速度が遅く、葉温上昇が早い部位に比べてより多くの SO_2 を収着するためと考えられる。

終りに、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、生物環境部の戸塚積室長、古川昭雄博士、近藤矩朗博士、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) 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.
- 2) Fowler, D. and Unsworth, M. H., 1974: Dry deposition of sulphur dioxide on wheat, *Nature*, **249**, 389-390.
- 3) Gates, D. M. and Papiian, L. V. E., 1971: *Atlas of energy budgets of plant leaves*, Academic Press, New York, 3-16.
- 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) 長谷場徹也, 1975: 風に揺れる葉形湿面からの水蒸気輸送, *農業気象*, **31**, 135-143.
- 6) Hill, A. C., 1971: Vegetation, a sink for atmospheric pollutants, *Journal of the Air Pollution Control Association*, **21**, 341-346.
- 7) 岩切 敏, 1974: 大気汚染害, *農業気象ハンドブック*, 633-656.
- 8) Monteith, J. L., 1973: *Principles of environmental physics*, Edward Arnold, London, 134-189.
- 9) Mudd, J. B. and Kozlowski, T. T., 1975: *Responses of Plants to air pollution*, Academic Press, New York, 11-13.
- 10) 大政謙次・相賀一郎, 1976: 植物実験用グロースキャビネットにおける低濃度大気汚染ガス制御(I) 低濃度ガス制御のための空調プロセスと基本的ガス制御について, *冷凍協会学術講演会講演論文集*, 27-30.
- 11) Parlange, J. Y., Waggoner, P. E. and Heichel, G. H., 1971: Boundary layer resistance and

- temperature distribution on still and flapping leaves, *Plant Physiology*, **48**, 437-442.
- 12) Spedding, D. J., 1969: Uptake of sulphur dioxide by barley leaves at low sulphur dioxide concentrations, *Nature*, **224**, 1229-1231.
- 13) 谷山鉄郎・有門博樹, 1968: 作物のガス障害に関する研究 第1報 数種の作物の亜硫酸ガスによる障害程度とガス濃度との関係, 日本作物学会紀事, **37**, 366-371.
- 14) Thomas, M. D. and Hill, Jr., G. R., 1935: Absorption of sulphur dioxide by alfalfa and its relation to leaf injury, *Plant Physiology*, **10**, 291-307.
- 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 the relation between the gaseous pollutant sorption into the leaves and the power of resistance to the air pollution, the local SO₂ sorption into the leaf in relation to the degree of acute visible leaf injury was examined in an environmental control chamber. The results were obtained as follows.

(1) An equation for the relation between Q/w' and P_{as} was obtained as $Q/w' \simeq 1.8 \times 10^{-3} P_{as}$, where w' was transpiration rate per unit difference in water vapor pressures at leaf and in the air, Q was SO₂ sorption rate and P_{as} was atmospheric SO₂ concentration. The result agrees with the equation which is obtained by a model, $Q/w' = (k_w/k_s k_r) (P_{as} - P_{ls})$ with $P_{ls} = 0$ volppm and $k_r = 1.53$, where P_{ls} is SO₂ concentration at gas-liquid interface in leaf, k_r is the ratio of SO₂ diffusive resistance to water vapor diffusive resistance, k_w is a constant, 1.06×10^6 mmHg·cm³/g, and k_s is a constant, 3.95×10^8 volppm·cm³/g.

(2) Relation between leaf-air temperature and transpiration rate was obtained as a linear equation during SO₂ fumigation in the chamber, in which light intensity, air temperature, humidity, wind velocity and SO₂ concentration were kept at constants, and the regression coefficient was -5.8×10^5 cm²·s·°C/g. According to the results, the local transpiration rate which indicates the stomatal aperture is able to be estimated by measuring leaf temperature, and the SO₂ sorption rate can be estimated from obtained diffusive resistances.

(3) The degree of visible injury in a local area of the leaf to SO₂ fumigation had a correlation with the local changes of leaf temperature, that is, the slower the rise of leaf temperature in a local area was, the greater the degree of injury in the local area was. According to the results of (1) and (2), the rise of leaf temperature means a decrease of transpiration rate, stomatal closure and a decrease of SO₂ sorption rate. Therefore, the major cause of differences in the degree of visible injury seems to be the differences in SO₂ sorption rate at different sites in the leaf.