

緑地のオゾン収着機構の実験的検討

—植物と土壌のオゾン収着速度の解析—

大政 謙次*・戸部 和夫**・細見 正明***・
吉田 舞奈***・小林 瑞穂***

摘 要

0.1~0.5 $\mu\text{L L}^{-1}$ のオゾン (O_3) 暴露下での15種の樹木の葉面における O_3 収着速度と蒸散速度、純光合成速度の同時測定を行った。また、芝地や土壌表面等の O_3 収着速度も調べた。

O_3 を暴露した15種のいずれの樹木においても、 O_3 収着速度、蒸散速度および純光合成速度が低下した。このことは、 O_3 暴露に伴って気孔の閉鎖が引き起こされたことを示している。また、0.5 $\mu\text{L L}^{-1}$ の O_3 を6時間暴露した樹木の総 O_3 収着量および O_3 暴露終了時の純光合成速度の減少割合は、いずれも、樹種間で大幅に異なる値をとった。最も大きい O_3 収着量を示したポプラ ($2.57 \text{ kmol m}^{-2}(\text{mol/mol})^{-1}$) は、最も小さい O_3 収着量を示したヤマモモの7倍以上であった。また、サングジュ等では、 O_3 暴露に伴う光合成速度の減少割合が数%程度であったのに対し、ポプラとボトスでは70%程度の減少が見られた。可視障害は、暴露後、ポプラ、ケヤキ、ヤマツツジの3種の植物にのみ現れた。樹木のガス交換速度の測定結果を簡易ガス拡散モデルによって解析したところ、樹木表面での吸着・分解は少なく、樹木による O_3 収着のほとんどは、葉面の気孔を介しての吸収であると推察された。

黒ボク土表面の O_3 収着速度は、土壌含水率の増加とともに低下した。乾燥した黒ボク土表面の単位面積あたりの O_3 収着速度は、最も高い O_3 収着能力を示したポプラの単位葉面積あたりの O_3 収着速度に匹敵するものであった。このことは、緑地の O_3 収着能力を評価するうえで、土壌表面の寄与が無視できないことを示している。

以上の結果から、都市域における公園や宅地等における植被や土壌面は、 O_3 による大気汚染の緩和に重要な役割を果たしていることがわかった。

キーワード：オゾン、ガス収着（吸収+吸着）、大気浄化、土壌、木本植物

1. はじめに

光化学オキシダントは、自動車や工場などから排出される窒素酸化物が炭化水素と光化学的に反応することにより生成される。その主成分であるオゾン (O_3) の濃度は、都市域を中心に、依然として高く、健康や農作物、森林などに様々な影響を及ぼしている¹⁻⁴⁾。

植物は、 O_3 等の汚染ガスを、自らその影響を受け

ながら吸収・吸着（収着）し、大気を浄化していることが知られている⁵⁻¹³⁾。しかし、 O_3 等の汚染ガスは、植物に対し、気孔の閉鎖や生理機能の障害、成長の低下等をもたらす^{1-3,14-16)}、大気浄化能力を低減させる。それゆえ、植物による大気浄化能力を評価するうえで、植物種によって異なる、汚染ガスに対する感受性とガス収着能力の双方を調べるのが重要である。

植物による大気中の O_3 の収着の機構については、

1999年2月12日受付、1999年12月14日受理

* 国立環境研究所、〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-2

(現、東京大学大学院農学生命科学研究科 〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1)

** 国立環境研究所

*** 東京農工大学工学部

大政ら⁷⁾や河内¹⁷⁾, Laisk *et al.*¹⁸⁾が, 人工気象室内での作物の葉と大気との間の O_3 と水蒸気の交換速度のガス拡散モデルによる解析から, 植物葉の O_3 収着が, 主として気孔を介しての吸収であり, O_3 吸収が大気から気孔内腔までの気相でのガス拡散抵抗に律速されるとしている。このことは, 植物体内に入った後, O_3 が非常に速く他の物質に変換(あるいは代謝)されることを意味している。これに対して, Lange *et al.*¹⁹⁾は, 細胞間隙内の O_3 濃度が高く, O_3 の植物体内への進入が, 細胞間隙内濃度にも律速されるとしている。また, Randon *et al.*²⁰⁾や Coe *et al.*²¹⁾, Grant and Richter²²⁾らは, 野外での針葉樹葉の O_3 収着の測定の結果, 気孔を介しての吸収のほか, 葉面クチクラ層での O_3 の吸着(葉表面での光分解を含む)が相当程度寄与しているとしている。このように, O_3 収着の機構については諸説あり, 必ずしも明らかにされているとは言えない。特に, 植物種の違いや測定環境, 測定精度についての検討は不十分である。

一方, 緑地においては, 植物体のみならず, 土壤等の表面も, 汚染ガスを収着し, 大気浄化に寄与していると考えられるが, O_3 についての十分な知見は得られていない。野外での植物群落を対象とした微小気象的観測法などでは, 植物と土壤とを分離した測定は行われていないのが現状で²³⁾, 得られた測定結果を解釈する上で, 植物に加えて, 土壤の O_3 収着の機構についての知見が求められている。

そこで, 緑地による O_3 収着の機構を明らかにし, その能力を評価する目的から, 我が国の公園や宅地, 街路などに植栽されている樹木や観葉植物など木本植物 15 種と芝を併せた合計 16 種の植物の O_3 収着速度と光合成速度への影響を調べた。さらに, 得られた結果について, 拡散モデルによる解析を行った。また, 土壤表面等による O_3 収着速度を土壤の水分状態との関係から検討した。

2. 材料と方法

2.1 実験材料

実験材料として用いた樹木は, 落葉性の広葉樹であるイチョウ (*Ginkgo biloba*), トウカエデ (*Acer buergerianum*), ケヤキ (*Zelkova serrata*), ポプラ (*Populus nigra*), ヤマツツジ (*Rhododendron obtusum*), 常緑性の広葉樹であるマルバユウカリ (*Eucalyptus perriniana*), ヤマモモ (*Myrica rubra*), インドゴムノキ (*Ficus elastica*), サンゴジュ (*Viburnum odoratissimum*), サザンカ (*Camellia sasanqua*), ポトス (*Epipremnum aureum*), キヅタ (*Hedera rhombea*), そして, 常緑性の針葉樹

であるスギ (*Cryptomeria japonica*), ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*), アカマツ (*Pinus densiflora*) の 15 種であった。購入した苗木をポットに植え換え, 一か月以上, 自然光型の制御温室(温度: 25°C; 相対湿度: 70%) 内で十分な給水条件のもとで栽培した。実験に用いた樹木は, 樹齢が 2~5 年, 樹高が 0.2~0.4 m であった。

ガス収着実験に用いた土壤は, ほ場の畑地から採取した表層腐植質黒ボク土(採取場所: 農業環境技術研究所, B 地区 D 1 ほ場)であった。また, 芝地は, 高麗芝 (*Zoysia tenuifolia*) を前記の黒ボク土を詰めたプラスチック製コンテナ(内径 285 mm × 165 mm, 深さ 100 mm) に密に植え, 温室内で一ヶ月以上栽培したものを使用した。実験時の芝の土壤面上の被覆高さは約 70 mm 程度であった。

なお, 樹木および芝地への灌水は, Hyponex の 1000 倍希釈液を用い, 給水と給肥を同時に行った。

2.2 実験装置

Fig. 1 に実験装置の構成図を示す。 O_3 収着速度と純光合成速度の測定は, 植物あるいは土壤を詰めた容器等を, 約 20 L min⁻¹ の流量の空気で換気されたガス暴露箱(8) (透明アクリル製, 内部高さ 80 cm, 内部底面 40 cm × 45 cm) に入れ, 換気空気の暴露箱への入口と出口のガス濃度の差を測定することにより行った。また, 蒸散速度の測定は暴露箱内に設置した電子天秤(9)により行った。

暴露箱は, 温湿度が制御された人工光型キャビネット内(約 25°C, 70% RH) に設置した。そして, 暴露箱内の気温よりも低温に保ったキャビネット内の空気を換気空気として使用し, また, その一部を, シリカゲルを充填した管(1)をバイパスさせることにより, 暴露箱内の温湿度を一定(約 30°C, 65%) に保った。さらに, 暴露箱内の空気は 2 個のファン(10)で攪拌することにより均一に保った。排気は, キャビネット内の O_3 濃度の上昇を避けるためにキャビネット外へ排出した。照明は, キャビネット上面に設置されているメタルハイドランプにより行った。植物体直上部の光合成有効光量子束密度は, 特に断りのない場合には, 約 500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。

実験に用いた O_3 は, 高圧放電式の O_3 発生装置(5)により発生させた数百 $\mu\text{L L}^{-1}$ のものを用い, 換気空気の流路に混入することにより低濃度に希釈した。暴露箱内の O_3 濃度は, 箱の出口の O_3 濃度を紫外線吸光式 O_3 計(13) (Lear Siegler, ML[®] 9810) で測定しながら, 換気空気希釈する前の O_3 発生装置からの高濃度 O_3 の流量を, マスフローコントローラ(6) (制御流量範囲: 0~20 mL min⁻¹) で調節すること

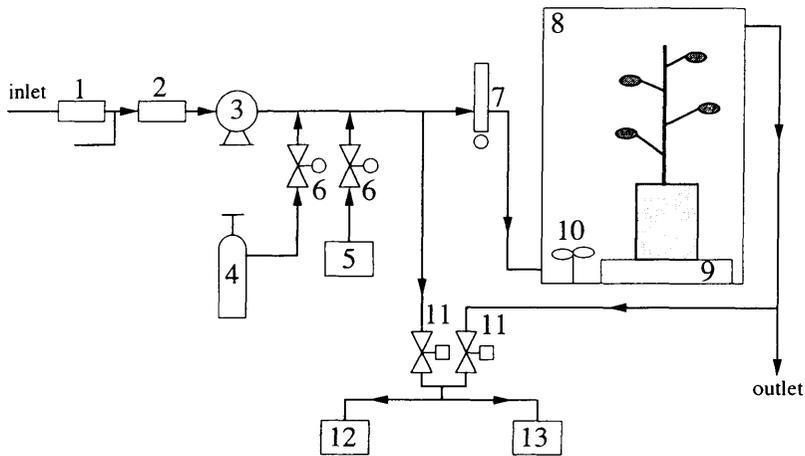


Fig. 1 Schematic diagram of the gas exchange measurement system.

1 : silica-gel column, 2 : soda-lime column, 3 : pump, 4 : CO₂ cylinder, 5 : O₃ generator, 6 : mass flow controller, 7 : flowmeter, 8 : acrylic box, 9 : electrical balance, 10 : mixing fan, 11 : solenoid valve, 12 : CO₂ analyzer, 13 : O₃ analyzer.

により、所定の値に保った。また、ガス暴露箱内のCO₂濃度の調節にあたっては、換気空気取り入れ口付近のCO₂濃度の変動に伴ってガス暴露箱内のCO₂濃度が変動するのを防ぐため、換気空気取り入れ口付近の空気流路にソーダ石灰を充填した容器(2)を取り付け、いったん換気空気中のCO₂の大部分を除去した。その後、この流路の下流部に、ガスポンプ(4)より供給されるCO₂の純ガスを流入させた。そして、このCO₂の純ガスの流量をマスフローコントローラ(6) (制御流量範囲: 0–6.5 mL min⁻¹)で調節することにより、ガス暴露箱内のCO₂濃度を約350–400 μL L⁻¹に維持した。

O₃およびCO₂の濃度測定を行うため、ガス暴露箱の換気空気の流入口および流出口の2箇所から、ガスサンプリング管を通して、空気を、紫外線吸光式O₃計(13)および赤外線吸光式CO₂計(12) (島津, URA-2S)に供給した。ガスサンプリング管の中途には電磁弁(11)を置き、タイマーによってこれら2個の電磁弁を5 min間隔で交互に開閉することによって、5 min毎にこれら2地点のガス濃度を測定した。

2.3 実験方法

2.3.1 樹木のガス交換速度の測定

ガス暴露の前日の夕方、1個体の樹木を実験装置内に搬入し、一夜その環境に慣らした後、実験に用いた。当日は、朝5時から照明を開始し、3~4時間程度経過した後、6時間の間O₃暴露を行った。その間、O₃取着速度と蒸散速度、純光合成速度の経時変化を同時測定した。その際、ポット部分全体をプラスチック製の袋で覆い、土壌やポット表面と暴露

箱内の空気との間でガスや水分の交換が起こるのを防いだ。葉温は、葉の裏面に、熱電対(銅-コンスタンタン、直径0.1 mm)を接触し、測定した。

ガス暴露を終えた樹木は、温室内に戻して1日程度放置した後に葉面の可視障害を観察し、その後速やかに葉面積を葉面積計(Li-Cor, Model 3100)により測定した。その際、アカマツについては、葉の形状が円筒形であるとみなし、葉面積計で得られる葉の投影面積をもとに葉表面積の算定を行った。そして、植物のガス交換速度および蒸散速度は、すべて、葉面積1 m²あたりの値として評価した。

2.3.2 土壌表面等によるガス交換速度の測定

土壌によるO₃取着速度の測定には、水分含量の異なる3種類の土壌を用いた。水分含量の少ない土壌(乾燥土)は、採取した土壌を約80°Cで5日程度乾燥することにより調製した。この乾燥土の体積含水率($100 \times [\text{土壌中水分重量}(\text{kg})] / [\text{土壌容積}(\text{L})]$)は、1.7%であった。また、水分含量の多い土壌(湿润土)は採取した土壌に水分を添加して調製した、体積含水率59.5%のものを用いた。さらに、体積含水率42.0%の採取したままの状態に体積含水率を維持した土壌(中湿土)も実験に用いた。測定に際しては、プラスチック製コンテナ(内径: 285 mm × 165 mm, 深さ100 mm)に、約3.5 kgの土壌を6 mm目のふるいを透過させながら入れた。ついで、このバットを10回卓上に軽く打ちつけて、土壌の充填状態を自然状態に近づけた。

また、芝地を用いた実験では、プラスチック製コンテナ内に詰められた黒ボク土の表面全面に芝が密生しているものを用いた。この芝地の下部の黒ボク土の

水分状態は、おおむね、上記の中湿土と同程度であった。また、水表面による O_3 収着速度の測定においては、約 3 L の水を入れたプラスチック製コンテナを暴露箱内に入れて測定を行った。

土壌、芝地および水面による O_3 収着速度は、表面を凹凸のない平面とみなしたときの表面積 1 m^2 あたりの値として計算した。

2.4 ガス拡散モデルによる解析

2.4.1 記号

W : 葉面における蒸散速度 ($mol\ m^{-2}s^{-1}$)

Q : 葉面における O_3 収着速度 ($mol\ m^{-2}s^{-1}$)

α : 葉面のクチクラ層での O_3 吸着(葉表面での光分解を含む)速度 ($mol\ m^{-2}s^{-1}$)

x_0 : 大気中の水蒸気のマール分率 ($mol\ mol^{-1}$)

x_i : 気孔底界面での水蒸気のマール分率 ($mol\ mol^{-1}$)

c_0 : 大気中の O_3 のマール分率 ($mol\ mol^{-1}$)

c_i : 気孔底界面での O_3 のマール分率 ($mol\ mol^{-1}$)

r : O_3 または水蒸気の葉面拡散抵抗 ($m^2s(mol/mol)\ mol^{-1}$)

r_b : O_3 または水蒸気の葉面境界層抵抗 ($m^2s(mol/mol)\ mol^{-1}$)

r_s : O_3 または水蒸気の気孔拡散抵抗 ($m^2s(mol/mol)\ mol^{-1}$)

D : O_3 または水蒸気の空気中での拡散係数 (m^2s^{-1})

M : O_3 または水蒸気のマール質量

w : $w = W / (x_i - x_0)$ として標準化した蒸散速度 ($mol\ m^{-2}s^{-1}(mol/mol)^{-1}$)

q : $q = Q / c_0$ として標準化した O_3 収着速度 ($mol\ m^{-2}s^{-1}(mol/mol)^{-1}$)

ここで、 r, r_b, r_s, D, M において、上付き文字 W を付記した場合が水蒸気での値、 G を付記した場合が O_3 での値に相当する。

2.4.2 葉面のガス拡散抵抗モデル

葉面における蒸散速度 (W) は、クチクラからの水分の蒸発が気孔を介しての蒸散に比べて十分に小さい²⁴⁾と仮定すれば、簡単なガス拡散抵抗モデルを用いて次式で表される。

$$W = (x_i - x_0) / r^W \quad (1)$$

また、葉面のクチクラ層での O_3 の吸着(葉表面での光分解を含む)が無視できないとすると、葉面での O_3 の収着速度 (Q) は、

$$Q = (c_0 - c_i) / r^G + \alpha \quad (2)$$

で与えられる。

ここで、

$$w = W / (x_i - x_0) \quad (3)$$

$$q = Q / c_0 \quad (4)$$

とおけば、式(1)~(4)より、

$$q = (r^W / r^G) (1 - c_i / c_0) w + \alpha / c_0 \quad (5)$$

が得られる。

なお、 r_b および r_s に関しては、以下の式が成り立つ²⁵⁾。

$$r_b^W / r_b^G = (D^W / D^G)^{-2/3} \quad (6)$$

$$r_s^W / r_s^G = (D^W / D^G)^{-1} \quad (7)$$

ここで、 D^G / D^W は、

$$D^W / D^G = (M^W / M^G)^{-1/2} = 1.634 \quad (8)$$

で近似できるので、この値を式(6)および式(7)に代入すれば、

$$r_b^W / r_b^G = 0.721 \quad (9)$$

$$r_s^W / r_s^G = 0.612 \quad (10)$$

となる。

一方、

$$r = r_b + r_s \quad (11)$$

であるから、 r^W / r^G は、 r_b^W / r_b^G と r_s^W / r_s^G との間の値をとることがわかる。すなわち、

$$0.612 < r^W / r^G < 0.721 \quad (12)$$

が得られる。

2.4.3 実験データの解析

実験データの解析は、 w に対し q をプロットし、その回帰直線の傾きと y 切片の値をもとに、式(5)および式(12)に基づいて、 c_i / c_0 と α の値の検討を行った。ガス濃度と蒸散速度の変化は計算機や記録計等により連続的に記録し、解析にはガス暴露開始から 30 min 毎の値を用いた。

3. 結果および考察

3.1 O_3 暴露に伴うポプラの q と w の経時変化

最初に、街路樹や緑化植物としてよく使用されるポプラの O_3 暴露に伴う q および w の経時変化を、光強度や O_3 濃度を変えて調べた。Fig. 2 は、光強度を 0~500 $\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$ まで変化させたとき、Fig. 3 は、ガス濃度を 0.1~0.5 $\mu L\ L^{-1}$ まで変化させたときの例である。これらの図では、暴露後の変化を 1 h 毎に q および w の値としてプロットし、その間を実線で結ぶことにより経時変化を表した。いずれの

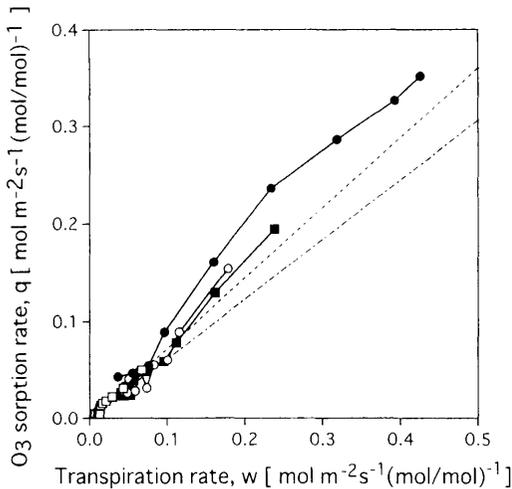


Fig. 2 Changes in transpiration rate (w) and O_3 sorption rate (q) when *Populus nigra* seedlings were exposed to $0.5 \mu\text{L L}^{-1}$ O_3 under different PPFDs (\square : $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, \circ : $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, \blacksquare : $375 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, \bullet : $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Each symbol represents the continuous change in w and q of a test plant at 1-h intervals. The dotted and alternate long and short dash lines respectively represent $q = (r_b^W / r_b^G) w$ and $q = (r_s^W / r_s^G) w$.

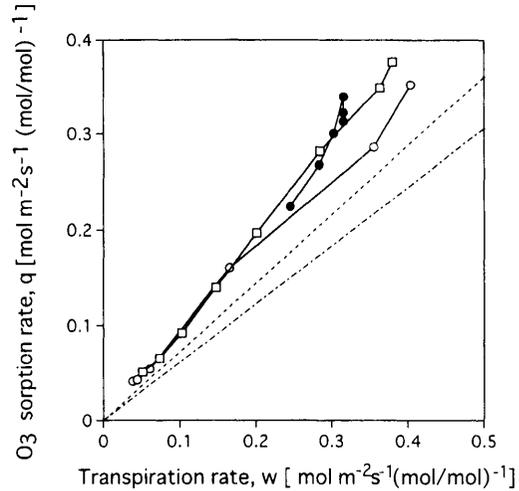


Fig. 3 Changes in transpiration rate (w) and O_3 sorption rate (q) when *Populus nigra* seedlings were exposed to O_3 of different concentrations (\square : $0.1 \mu\text{L L}^{-1}$, \bullet : $0.2 \mu\text{L L}^{-1}$, \circ : $0.5 \mu\text{L L}^{-1}$) under a PPFD of $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Each symbol represents the continuous change in w and q of a test plant at 1-h intervals. The dotted and alternate long and short dash lines respectively represent $q = (r_b^W / r_b^G) w$ and $q = (r_s^W / r_s^G) w$.

実験結果においても、暴露時間の経過とともに、 q および w がともに急激に低下した。これは、 O_3 暴露により、気孔が急激に閉鎖し、それに伴って O_3 の植物体内への吸収も低下したことを示している。また、いずれの場合でも、各点の q/w 比はおおむね一定となり、 q/w 比の光強度や O_3 濃度、暴露時間などに対する依存性は認められなかった。なお、 $0.5 \mu\text{L L}^{-1}$ の O_3 暴露の場合にのみ、暴露後、葉面に可視障害が発現した。しかし、その程度は、光強度が大きい程大きかった。

Fig. 2 および Fig. 3 には、直線 $q = (r_b^W / r_b^G) w$ を点線で、直線 $q = (r_s^W / r_s^G) w$ を一点鎖線で、それぞれ示してある。簡易拡散モデルでの解析は、その精度からみて必ずしも正確な q と w の関係を与えるものではないが、 O_3 の葉における収着機構を推察するには有効である。Fig. 2 および Fig. 3 のポプラにおける実験結果では、多くの測定点がこの直線の上側に分布する傾向がみられたが、 q/w 比が一定で、原点を通るということは、光強度や O_3 濃度の違いにかかわらず、ポプラ葉における O_3 の収着の大部分が蒸散の経路である気孔を介しての吸収であることを強く示唆している。しかし、他の植物においては、気孔からの吸収だけでなく、葉のクチクラ層へ

の吸着や葉表面での光分解²⁰⁻²²⁾が存在する可能性もある。そこで、次項で、多くの樹種について、この点についてのより詳細な検討を行った。

3.2 15種の樹木における q と w との関係

ポプラでの実験の結果を参考に、15種の樹木における q と w との関係を調べた。ポプラに比べて、他の14種の樹木は、蒸散速度が小さく、このため O_3 収着速度も小さいと考えられる。しかし、可視障害が発現する状態までの q と w との関係を短時間の実験で調べたいということもあり、 $0.5 \mu\text{L L}^{-1}$ の O_3 を6h暴露した。実際に野外で観測される $0.1 \mu\text{L L}^{-1}$ 程度の O_3 を可視障害が現れるまで長期間暴露することも考えたが、先のポプラでの実験では、 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{L L}^{-1}$ まで O_3 濃度を変えたにもかかわらず、 q/w 比がほぼ一定であったことから、 $0.5 \mu\text{L L}^{-1}$ という高濃度での実験でも実験結果の普遍性は失われないと判断した。実験結果は、いずれの樹種とも、暴露時間の経過とともに、 O_3 吸収速度、蒸散速度および CO_2 吸収速度の低下がみられた。そこで、暴露開始から30min毎の q と w の値を求め、各樹種毎に記号を変えて q と w の関係として図示した (Fig. 4)。その結果、樹種の違いにかかわらず、ほぼ原点を通る直線上に分布した。この回帰直線を求

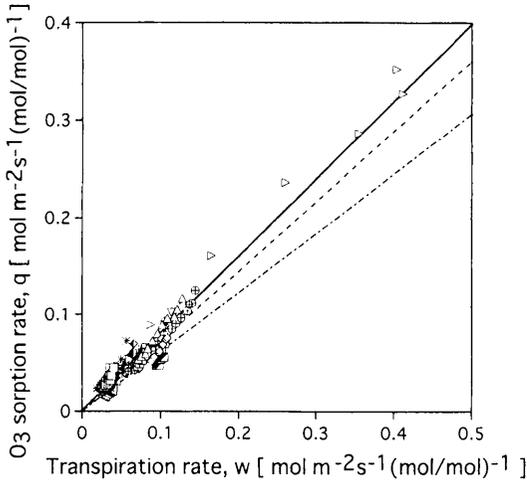


Fig. 4 Relationship between transpiration rate (w) and O_3 sorption rate (q) of 15 woody species exposed to $0.5 \mu\text{L L}^{-1} O_3$ under a PPFD of $500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Each symbol (See Fig. 5) represents the continuous change in w and q of different woody species at 30 min intervals. The dotted and alternate long and short dash lines respectively represent $q = (r_s^W/r_b^G)w$ and $q = (r_s^W/r_s^G)w$.

めると,

$$q = 0.804 w - 0.002 \text{ (相関係数: } 0.972) \quad (11)$$

であり, 図中では実線で示した。また, 直線 $q = (r_b^W/r_b^G)w$ を点線で, 直線 $q = (r_s^W/r_s^G)w$ を一点鎖線で, それぞれ示した。この回帰直線の y 切片の値はほぼゼロであり, その傾きは図中の点線の傾きと比べて 10% 程度大きな値となった。回帰直線の y 切片の値が実質的にゼロであることは, 植物による O_3 吸着が気孔を介しての植物体内への吸収によるものであり, 葉面クチクラ層での吸着や分解は無視できる程度であることを示している。

これまで, 幾つかの研究論文^{7,13,17,18,26,27)}において, ここで用いたのと同様な測定方法で得られたデータを簡易ガス拡散モデルにより解析することにより, O_3 や SO_2 , NO_2 , ホルムアルデヒドなどの汚染ガスについては, $c_i \approx 0$ と近似できるとされている。一方, Rondon *et al.*²⁰⁾, Coe *et al.*²¹⁾ および Grant and Richter²²⁾ らは, 野外での植物葉による O_3 吸着速度の実測値が, 気孔を介してのガス拡散モデルから予測される O_3 吸収速度の最大値 ($c_i = 0$ の場合に相当) に比べ 3 倍程度大きな値をとったと報告している。その理由として, 彼らは, 植物葉による O_3 吸着機構として, 気孔を通しての O_3 吸収に加えて, 葉面クチクラ層表面での吸着や葉表面での O_3 の光分解による消失が大きく寄与していると推察している。そして, Neubert *et al.*²⁸⁾ は, 植物葉の O_3 吸着に関しては, 上述の単純なモデルでは十分には捉えられない側面があると述べている。しかし, Fig. 3 と Fig. 4 で, 光強度が一定のもとで行った実験から得られた回帰直線の y 切片の値がゼロに近い値となったことは, クチクラ層表面での O_3 の光分解による消失は, もしあったにしても相当程度小さいことを示し

めると,

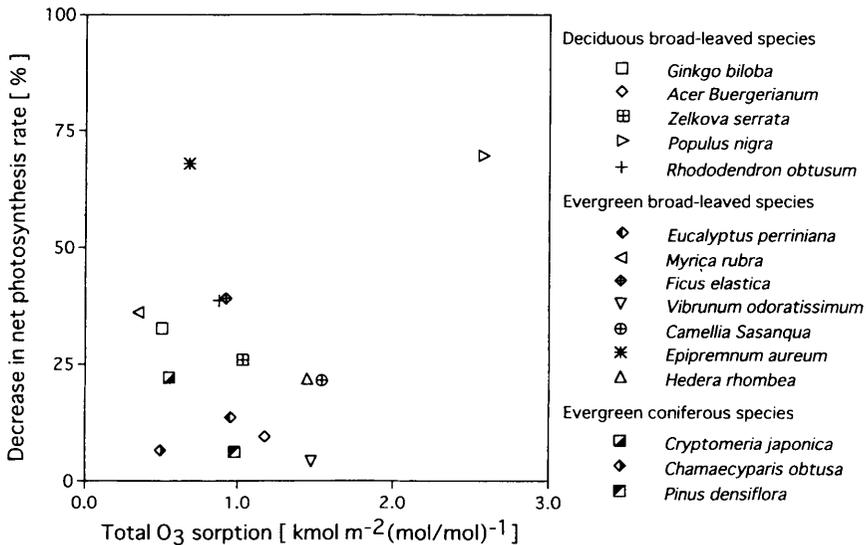


Fig. 5 Interspecific differences in cumulative O_3 sorption and decreases in net photosynthesis rate at the end of 6 h exposure. 15 woody species were exposed to $0.5 \mu\text{L L}^{-1} O_3$ under a PPFD of $500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

ている。実測値から求められた q/w 値が r_b^W/r_b^G 値に比べて大きめの値となったことは、葉表面での O_3 分解等の未知要因が寄与している可能性は捨てきれないが、この実験で得られた q/w 値の r_b^W/r_b^G 値からのずれは、Rondon *et al.*²⁰⁾、Coe *et al.*²¹⁾ および Grant and Richter²²⁾ の報告しているずれと比べてはるかに小さい。

この種の解析法の限界として、ガス暴露箱内の O_3 濃度や温湿度、植物個体内の葉温等の分布むらや変化が簡便なモデル式では補正できず、誤差が生じることが避けられない。また、葉の構造や葉面積の測定の際の誤差、測定装置内での O_3 の分解なども精度に影響を与える。特に野外での測定ではこれらの影響が大きい。樹種毎に q/w 値の相違がみられたことは、こうした誤差要因の反映されたものである可能性もある。

以上のように不明確な側面はあるものの、 q と w の間にはほぼ原点を通る相関性の高い直線関係が得られた (Fig. 4)。このことは、植物葉による O_3 収着に関しては、基本的には気孔を通しての吸収が最も重要な要因となっていることを示している。

3.3 15種の樹木の O_3 の吸収と光合成の低下との関係

各樹種の O_3 吸収能力と O_3 感受性を比較するために、15種の樹木に対し $0.5 \mu\text{L L}^{-1}$ の O_3 を6h暴露した際の、暴露1h後からの6h後までの5hの間の総 O_3 吸収量と、 O_3 暴露6h後の純光合成速度 (CO_2 吸収速度) を暴露前の純光合成速度と比較した際の減少割合との関係を、各樹種毎に調べた (Fig. 5)。総 O_3 吸収量および O_3 暴露に伴う光合成速度の減少割合のいずれもが、樹種により大きく異なっていた。たとえば、最も大きい O_3 吸収量を示したポプラの O_3 吸収量 ($2.57 \text{ kmol m}^{-2} (\text{mol/mol})^{-1}$) は、 O_3 吸収量が最も小さかったヤマモモの吸収量 ($0.345 \text{ kmol m}^{-2} (\text{mol/mol})^{-1}$) の7倍以上であった。また、サンゴジュ、アカマツ、マルバユウカリでは、 O_3 暴露に伴う光合成速度の減少割合は数%程度であったのに対し、ポプラとポトスでは70%程度の減少がみられた。また、 O_3 吸収量や光合成速度の減少割合と樹種の属性 (広葉樹-針葉樹、常緑樹-落葉樹) の間には、際だった対応関係は認められなかった。なお、 O_3 暴露後に葉面に可視障害が認められたのは、ポプラ、ケヤキおよびヤマツツジの3植物種であった。

一般に、浄化に適した植物は、 O_3 収着量が大きいと同時に障害を受けにくい植物で、この実験からはサンゴジュやトウカエデ、キズタ、サザンカなどがあげられる。浄化能力が大きいという意味では、ポ

プラが適しているが影響も大きいという欠点がある。実際の現場では、樹型が大きい、即ち、総葉面積が広いことが必要で、また、栽培管理も容易なことが求められる。一方、指標に適した植物としては、同じガス濃度に対して影響が大きいポプラやポトスなどが適している。特に、ポプラは街路樹として全国的に数多く植えられており、指標植物としても有用であろう。今後、ここで述べた高濃度、短期暴露実験に加えて、低濃度、長期暴露実験での O_3 収着量と光合成や可視障害への影響を調べることにより、より正確なスクリーニングが可能になろう。

3.4 土壌および芝地による O_3 の収着

Fig. 6 は、 $0.5 \mu\text{L L}^{-1}$ の O_3 を暴露した際の、黒ボク土 (含水率1.7%、42.0%および59.5%; 以下、それぞれ、乾燥、中湿、湿潤と呼ぶ)、芝地、および水面の単位表面積あたりの O_3 収着速度の経時変化である。乾燥した黒ボク土が最も高い O_3 収着速度 (10h後、 $0.276 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} (\text{mol/mol})^{-1}$) を示し、これについて、芝地 (6h後、 $0.154 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} (\text{mol/mol})^{-1}$)、中湿黒ボク土 (10h後、 $0.082 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} (\text{mol/mol})^{-1}$)、湿潤黒ボク土 (10h後、 $0.0838 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} (\text{mol/mol})^{-1}$)、水面 (10h後、 $0.005 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} (\text{mol/mol})^{-1}$) の順に O_3 収着速度が低い値となった。いずれの表面とも、暴露開始後1-2hの間は時間の経過とともに収着速度が低下する傾向が認められた。しかし、その後は表面の特質によって経時的な変化が異なった。

乾燥した黒ボク土の O_3 収着速度は最も大きい値を示したが、時間の経過と共に徐々に低下した。土壌粒子との反応は複雑であるので、厳密な意味で収着速度といえるかどうかはわからないが、乾燥した土壌粒子の表面は多孔質で、空気との接触面積が大きく、物理的あるいは化学的に O_3 が非常に吸着・分解しやすい状態にある。一方、 O_3 暴露開始後3h以降の水の O_3 吸収速度は、ほぼゼロに近い値となり、 O_3 の水に対する親和性はかなり低いことがわかる。このため、土壌間隙に水が十分満たされている湿潤黒ボク土の O_3 収着速度は小さい。湿潤黒ボク土は、実験中の目視観察でも土壌表面は色が変わらず十分に湿った状態に保たれていたが、中湿黒ボク土は、含水率では湿潤黒ボク土と余り変わらないが、目視観察では、実験中、徐々に土壌表面の色が変わり、暴露終了時点では、乾燥した黒ボク土と同じような乾いた色になった。このような土壌表面の乾燥化は、土壌間隙あるいは土壌粒子の表面において、 O_3 に親和性の低い水が占有する面積を減少させ、吸着が大きい乾燥した土壌粒子の面積を増大させる。中湿黒ボク土での暴露開始20h後以降からの O_3 収着速度

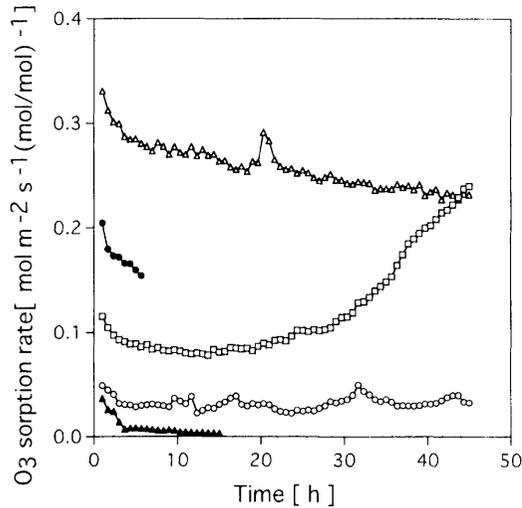


Fig. 6 Changes in O_3 sorption rates of soil surfaces with different water contents (relative water content : 1.7% (Δ), 42.0% (\square) and 59.5% (\circ)), grass cover (\bullet) and liquid water (\blacktriangle).

の上昇はこのような土壌表面の乾燥化が原因であろう。

中湿土と同程度の含水率の土に植えた芝地では、芝地のほうが高い O_3 収着速度を示した。このことは、植被のない土壌面へ芝を植栽することにより、 O_3 除去能力を増大させることができることを示している。Garland and Penkett²⁹⁾ および Garland and Derwent³⁰⁾ は、草地への O_3 収着速度を測定し、 O_3 沈着速度 (deposition velocity) として、 $0.29\text{--}0.58\text{ cm s}^{-1}$ ($0.12\text{--}0.23\text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}(\text{mol/mol})^{-1}$) の範囲内の測定値を得ている。この値は、この実験で得られた測定値とほぼ同程度の値である。

乾燥した黒ボク土表面の O_3 収着速度は、樹木の中で最も大きい葉面 O_3 収着能力を示したポプラの O_3 収着速度と同程度のものであった。また、中湿黒ボク土表面の O_3 吸収速度は、 O_3 収着速度の低い樹木の葉の O_3 吸収速度と同程度の値となった。野外において、 O_3 濃度が上昇するのは通常晴天の日の日中であり、こうした条件下では土壌は乾燥気味となっているのが普通である。従って、このような状態においては、土壌表面の O_3 収着源としての寄与が無視できない。野外での微気象的な方法による O_3 の収着速度の測定結果は、植物群落に加えて、土壌への収着を含んでおり、解析にあたっては、土壌表面の水分状態の影響を大きく受けることに注意を払う必要がある。

4. まとめ

$0.1\text{--}0.5\ \mu\text{L L}^{-1}$ の O_3 暴露下での 15 種の樹木の葉面における O_3 収着速度と蒸散速度、純光合成速度の同時測定を行った。また、芝地や土壌表面等の O_3 収着速度も調べた。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- O_3 の暴露により、いずれの樹種においても、葉面での蒸散速度の低下が認められた。蒸散速度の低下は、 O_3 暴露に伴って気孔が閉鎖したことを意味しており、このため、 O_3 収着速度と光合成速度も併せて低下した。
 - q (標準化した O_3 吸収速度) と w (標準化した蒸散速度) の関連性を簡易ガス拡散モデルにより解析した。その結果、(i) 樹種や光強度、ガス濃度などの違いにかかわらず、 q と w の関係はほぼ原点を通る回帰直線で表すことができ、(ii) その直線の傾きから推測される O_3 収着速度は、気孔を介してのガス拡散モデルから予測される O_3 吸収速度の最大値 (気孔内腔の O_3 濃度が 0 の場合に相当) よりもやや大きめの値であった。これらのことから、植物葉の O_3 収着機構に関して、葉表面での O_3 分解等の未知要因が寄与している可能性は捨てきれないものの、基本的には気孔を通しての吸収が植物葉の O_3 収着の最も重要な要因となっていることが示された。
 - $0.5\ \mu\text{L L}^{-1}$ の O_3 を暴露した樹木の 5 h の間の総 O_3 収着量および O_3 暴露 6 h 後の純光合成速度の減少割合は、いずれも、樹種間で大幅に異なった値をとった。最も大きい O_3 収着量を示したポプラ ($2.57\text{ kmol m}^{-2}(\text{mol/mol})^{-1}$) は、最も小さい O_3 収着量を示したヤマモモの 7 倍以上であった。また、サンゴジュ等では、 O_3 暴露に伴う光合成速度の減少割合は数%程度であったのに対し、ポプラとボトスでは 70% 程度の減少が見られた。このように樹種によって O_3 吸収能力と O_3 感受性が大幅に異なることは、大気浄化を目的とした樹木の植栽に際しては、樹種の選定が重要であることを示している。
 - 黒ボク土表面の O_3 収着速度は、土壌含水率の増加とともに低下した。乾燥した黒ボク土表面の単位面積あたりの O_3 収着速度は、最も高い O_3 収着能力を示したポプラの単位葉面積あたりの O_3 収着速度に匹敵するものであった。このことは、緑地の O_3 収着能力を評価するうえで、土壌表面の寄与が無視できないことを示している。
- 以上の結果から、都市域における公園や宅地等における植被や土壌面は、 O_3 による大気汚染の緩和に

重要な役割を果たしていることが推察された。

文 献

- 野内 勇 (1988) 光化学オキシダント (オゾンおよびパーオキシアセチルナイトレート) による植物葉被害および被害発現機構. 農業環境技術研究所報告, **5**, 121 pp.
- Yunus, M. and M. Iqbal (eds.) (1996) Plant Responses to Air Pollution. John Wiley & Sons, Chichester, 545 pp.
- Sandermann, H., A.R. Wellburn and R.L. Heath (eds.) (1997) Forest Decline and Ozone. Springer, Berlin, 400 pp.
- 環境庁 (編) (1998) 環境白書—各論—, 平成 10 年度版. 大蔵省印刷局, 19-23.
- Hill, A.C. (1971) Vegetation: A sink for atmospheric pollutants. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **21**, 341-346.
- 大政謙次 (1979) 植物群落の汚染ガス取着機能—現象の解析とそのモデル化—. 国立公害研究所研究報告, **10**, 367-385.
- 大政謙次・安保文彰・名取俊樹・戸塚 績 (1979) 植物による大気汚染物質の取着に関する研究 (II) NO₂, O₃あるいはNO₂+O₃暴露下における取着について. 農業気象, **35**, 77-83.
- Hosker, R.P., Jr. and S.E. Lindberg (1982) Review: Atmospheric deposition and plant assimilation of gases and particles. *Atmos. Environ.*, **16**, 889-910.
- 青木正俊・戸塚 績・鈴木義則・森岡 進 (1987) 緑地の大気汚染浄化能. 国立公害研究所研究報告, **108**, 41-45.
- Okano, K., K. Tobe and A. Furukawa (1990) Foliar uptake of peroxyacetyl nitrate (PAN) by herbaceous species varying in susceptibility to this pollutant. *New Phytol.*, **114**, 139-145.
- 戸塚 績・三宅 博 (1991) 緑地の大気浄化機能. 大気汚染学会誌, **26**, A 71-A 80.
- 大政謙次 (1993) 樹木による排気ガス対策の可能性. 都市緑化の最新技術, 工業技術会, 468-477.
- Kondo, T., K. Hasegawa, R. Uchida, M. Onishi, A. Mizukami and K. Omasa (1996) Absorption of atmospheric formaldehyde by deciduous broad-leaved, evergreen broad-leaved, and coniferous tree species. *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **69**, 3673-3679.
- NIES (1980) Studies on the Effects of Air Pollutants on Plants and Mechanisms of Phytotoxicity. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. Jpn., **11**, 265 pp.
- NIES (1984) Studies on Effects of Air Pollutant Mixtures on Plants. Part 1 and Part 2. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud. Jpn., **65** (Part 1), 263 pp. and **66** (Part 2), 155 pp.
- 16) Omasa, K. (1987) Image instrumentation methods of plant analysis. In: Modern Methods of Plant Analysis. New Ser. Vol. 11. eds. Linskens, H.F. and J.F. Jackson, Springer-Verlag, Berlin, 203-243.
- 17) 河内 宏 (1980) 植物葉におけるオゾン吸収速度と気孔拡散抵抗との関係. 大気汚染学会誌, **15**, 109-117.
- 18) Laisk, A., O. Kull and H. Moldau (1989) Ozone concentration in leaf intercellular air spaces is close to zero. *Plant Physiol.*, **90**, 1163-1167.
- 19) Lange, O. L., U. Heber, E.-D. Schulze and H. Ziegler (1989) Atmospheric pollutants and plant metabolism. In: Forest Decline and Air Pollution. eds. Schulze, E.-D., O.L. Lange and R. Oren, Springer-Verlag, Berlin, 238-273.
- 20) Rondon, A., C. Johansson and L. Grant (1993) Dry deposition of nitrogen dioxide and ozone to coniferous forests. *J. Geophys. Res.*, **98**, 5159-5172.
- 21) Coe, H., W. M. Gallagher, T. W. Choullarton and C. Dore (1995) Canopy scale measurement of stomatal and cuticular O₃ uptake by sitka spruce. *Atmos. Environ.*, **29**, 1413-1423.
- 22) Grant, L. and A. Richter (1995) Dry deposition to pine of sulphur dioxide and ozone at low concentration. *Atmos. Environ.*, **29**, 1677-1683.
- 23) 金 元植・青木正敏・堀江勝年・伊豆田 猛・戸塚 績・塩谷哲夫 (1998) トウモロコシ群落とエンバク群落における二酸化炭素に対するオゾンと二酸化窒素の沈着速度比. 大気環境学会誌, **33**, 36-41.
- 24) Kramer, P. J. and J. S. Boyer (1995) Water Relations of Plants and Soils. Academic Press, San Diego, 201-256.
- 25) Monteith, J.L. (1973) Principles of Environmental Physics. Edward Arnold, London, 134-149.
- 26) 大政謙次・安保文彰 (1978) 植物による大気汚染物質の取着に関する研究 (I) SO₂の局所取着と可視障害発現との関係. 農業気象, **34**, 51-58.
- 27) Black, V. J. and M. H. Unsworth (1979) Resistance analysis of sulfur dioxide fluxes to *Vicia faba*. *Nature*, **282**, 68-69.
- 28) Neubert, A., D. Kley, J. Wildt, H.J. Segschneider and H. Foerstel (1993) Uptake of NO, NO₂ and O₃ by sunflower (*Helianthus annuus* L.) and tobacco plants (*Nicotiana tabacum* L.): dependence on stomatal conductivity. *Atmos. Environ.*, **27A**, 2137-2145.
- 29) Garland, J.A. and S.A. Penkett (1976) Absorption of peroxy acetyl nitrate and ozone by natural surfaces. *Atmos. Environ.*, **10**, 1127-1131.
- 30) Garland, J.A. and R.G. Derwent (1979) Destruction at the ground and the diurnal cycle of concentration of ozone and other gases. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, **105**, 169-183.

Experimental Studies on O₃ Sorption Mechanism of Green Area — Analysis of O₃ Sorption Rates of Plants and Soils —

Kenji OMASA*, Kazuo TOBE**, Masaaki HOSOMI***,
Maina YOSHIDA*** and Mizuho KOBAYASHI***

(*National Institute for Environmental Studies,
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-0053, Japan

Present Address : Department of Biological and Environmental Engineering,
Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo,
1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo 113-8657, Japan

**National Institute for Environmental Studies

***Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology)

Abstract

To study the competence of vegetation cover to ameliorate the atmospheric O₃ pollution, the gas exchange rates of O₃, CO₂ and H₂O of 15 woody species were simultaneously measured under 0.1-0.5 μL L⁻¹ O₃. When the woody species were exposed to O₃, the rates of O₃ sorption, transpiration and photosynthesis were decreased in all the species. The O₃ sorption rate was approximately proportional to transpiration rate, indicating that O₃ is predominantly absorbed through the stomata.

The tested species showed a wide variety in both sensitivity to O₃ and capacity of O₃ sorption when they were exposed to O₃ : the cumulative O₃ sorption was highest (2.57 kmol m⁻²(mol/mol)⁻¹ at 0.5 μL L⁻¹ O₃ exposure during 6 h) in *Populus nigra* and lowest (0.34 kmol m⁻²(mol/mol)⁻¹) in *Myric rubra* ; the degree of decrease in photosynthesis rate ranged from 4.1 % (*Viburnum odoratissimum*) to 70 % (*Populus nigra* and *Epipremnum aureum*) at the end of 6 h exposure. The visible injury was appeared in leaves of *Populus nigra*, *Zelkova serrata* and *Rhododendron obtusum* after the exposure.

The O₃ sorption by soils with different water content, grass cover and liquid water was also investigated under 0.5 μL L⁻¹ O₃. The O₃ sorption rate of dry soils was almost the same as the rate of *Populus nigra*. However, the sorption rate of the soils was decreased with increasing soil water content. O₃ was almost never absorbed by the liquid water surface.

It is concluded that vegetation and soil surface are effective sinks to purify O₃ in polluted atmosphere.

Key Words : Air purification, gas sorption (absorption and adsorption), ozone, soil, woody plants