

土木研究所資料

植物の大気浄化機能に関する調査

昭和60年 9 月

建設省土木研究所
道路部交通環境研究室
緑化研究室

植物の大気浄化機能に関する調査

交通環境研究室 中山 隆
阪井 清志
日名子 信広
緑化研究室 井上 忠佳
田代 順孝

要 旨

近年、緑の存在の重要性が高まっており、道路沿道においても今後増々その重要性が高まることが予想される。植物は、吸着や吸収などによる汚染物質除去能力や拡散作用など、有効な大気汚染低減効果をもつと考えられており、この効果は、道路沿道での自動車排出ガスの対策の一つとして期待されるものである。植物の大気浄化に関しては従来から各分野で多くの研究がなされているものの、実際の交通公害に対処するための緑地帯造成の有効な手がかりとなる成果には至っていない。

本報告は今後の検討に資するため、従来の研究事例を総合的に整理することにより、大気環境と植物の相互関係、大気汚染物質の吸収・希釈機能、群体としての緑地帯の効果についてとりまとめたものである。

キーワード：植物，自動車排出ガス，吸収，浄化機能，大気汚染

植 物 調 査 委 員 会

委 員 長	高 原 栄 重	筑波大学 農林工学科系	教 授
委 員	三 沢 彰	千葉大学 園芸学部環境緑地学科	助 教 授
"	植 田 洋 匡	国立公害研究所 大気環境部大気環境計画研究室	室 長
"	藤 原 喬	電力中央研究所 生物研究所緑地生物部 動植物研究室	室 長
"	納 宏	建設省道路局 道路環境対策室	課 長 補 佐
"	吉 野 尚 治	建設省関東地方建設局 道路部計画調整課	課 長 補 佐
"	藤 田 大 二	建設省土木研究所 道路部	部 長
"	足 立 義 雄	建設省土木研究所 道路部交通環境研究室	室 長
"	阪 井 清 志	建設省土木研究所 道路部交通環境研究室	研 究 員
"	井 上 忠 佳	建設省土木研究所 道路部緑化研究室	室 長
"	田 代 順 孝	建設省土木研究所 道路部緑化研究室	主任研究員
"	松 井 宏 一	道路環境研究所	常 務 理 事
"	東 信	道路環境研究所	常 務 理 事
"	曾 根 英 樹	道路環境研究所	研 究 員
"	村 田 迪 夫	道路環境研究所	研 究 員

まえがき

近年、緑の存在の重要性の認識の高まりのもとに、国や自治体の緑の3倍増計画をはじめとする快適な生活環境づくりのための緑化推進の動きがめざましい。国土の根幹的施設である道路についても、その緑化は今後、増々重要性が高まるものと思われる。このような状況の中で、緑の沿道環境改善に資する効果のうち、特に植物が自動車排ガス改善に資する効果に着目して本調査を行ったものである。

植物の大気浄化効果に関しては、従来から各分野での多くの研究報告がある。その内容は、実際の道路での植栽の有無による汚染質濃度の比較測定、汚染地帯の樹木体内または暴露実験による植物体内の汚染質の量の測定、さらに植物の汚染質吸収のメカニズムを解明するための各種要因の分析などである。しかしながら、これらの個別の研究事例は、実際の交通公害に対処するための緑地帯造成の有効な手がかりとなる成果には至っていないと思われる。そこで本調査は、従来の研究事例を総合的に整理することにより、植物の汚染ガス吸収のおよその能力を把握し、今後の検討のための基礎資料にしようとするものである。

なお、実際の業務は財団法人道路環境研究所に委託し、道路環境研究所では、学識経験者の指導を受けるため、植物調査委員会を構成し研究を進めている。なお、実際の調査は（株）地域計画の青木久宣氏を中心に行っている。

本成果をとりまとめるにあたっては植物調査委員会の委員の方々に大変お世話になった。ここに深く感謝の意を表すものである。

なお、本資料でデータ等を使用させていただいた特に重要な文献について、巻末に一覧表にして示すとともに、図表等を使用させていただいた文献についても一覧表を示している。これらの原著者の方々にも厚く感謝の意を表す。

昭和60年9月

目 次

ま え が き

1. 調査の目的と方法	1
(1) 調査目的及び概要	1
(2) 調査方法	1
(3) 調査項目	1
2. 大気環境と植物の相互関係	3
2.1 植物の構造・機能と大気環境	3
(1) 植物の基本的構造・機能	3
(2) 植物と大気環境	4
2.2 人間の活動により放出される各種ガスの大気中での循環	7
(1) 大気組成	7
(2) 各種ガスの動態	11
(3) 炭素サイクル・窒素サイクル	15
2.3 植物による大気組成の安定化	19
(1) 大気主成分の安定化	19
(2) 微量物質の安定化	23
3. 植物個体の大気汚染質の吸収機能	24
3.1 汚染質吸収のメカニズム・希釈のメカニズム	24
(1) 植物の大気浄化機能	24
(2) 収 着	24
(3) 拡 散 等	26
3.2 汚染質吸収の速度（単位面積あたりの吸収量）、容量、植物種による比較	29
(1) 汚染質吸収の速度	29
(2) 汚染質吸収の容量	48
3.3 吸収作用を支配する植物側の要因及び環境条件との関係	49
3.4 吸収作用と植物被害との関係	54
(1) 汚染ガス投与量と植物被害	54
(2) 汚染質の植物への影響	59

4. 群体としての緑地帯の大気浄化機能	64
4.1 道路植栽，緑地，樹林地を対象とした汚染質濃度実測例	64
4.2 汚染質吸収速度の群体への適用（吸収量の土地面積当りへの換算）	73
4.3 緑地帯の規模と大気浄化効果の関係	75
5. あ と が き	77
ガス状物質の吸収に関する文献リスト	78
参 考 文 献	81

1. 調査の目的と方法

(1) 調査目的

植物の大気浄化機能を定量的に把握し、緑地帯が有する効果について調査するために、大気汚染物質（特にSO_xおよびNO_x）に関する植物の吸収機能について既存文献の収集と整理を行う。収集整理の結果得られた資料を植物の個体としての吸収のメカニズム、その速度、容量等、および群体としての緑地帯が持つ効果の観点からとりまとめる。

(2) 調査方法

関連学会（大気汚染学会、日本林学会など）誌、各種研究機関（国立公害研究所、電力中央研究所など）誌及び海外雑誌（Atmospheric Environment など）等の文献を収集した。得られた文献を整理・分析し、既往の研究成果における植物の大気浄化効果について、上記調査目的に沿って総合的にとりまとめた。

(3) 調査項目

調査項目は以下に示す3項目である。

- ① 大気環境と植物の相互関係について
 - ・植物の構造・機能と大気環境
 - ・人間活動により放出される各種ガスの大気中での循環
（炭素サイクル、窒素サイクルなど）
 - ・植物による大気組成の安定化
- ② 植物個体の大気汚染質の吸収・希釈機能について
 - ・汚染質収着のメカニズム、拡散のメカニズム
 - ・吸収速度（単位面積あたりの吸収量）、容量、植物種による比較
 - ・吸収作用を支配する植物側の要因および環境条件との関係
 - ・吸収作用と植物被害との関係
- ③ 群体としての緑地帯の大気浄化機能について
 - ・道路植栽、緑地、樹林地を対象とした汚染質濃度実測例
 - ・汚染質吸収速度の群体への適用
（吸収量の土地面積当りへの換算）
 - ・緑地帯の規模と大気浄化効果の関係

(4) 用語の説明

ここで植物の大気浄化機能に関する基本的な用語の説明を行う。

吸 収 (absorption)

植物の主に気孔を介して汚染ガスが植物体内にとり込まれること。

吸 着 (adsorption)

植物体表面に汚染ガスが付着すること。この場合汚染ガスの植物体表面への直接付着、および水に溶解または他の粒子に付着しての間接的な付着がある。

収 着 (sorption)

吸収と吸着を合わせたもの。

拡 散 (diffusion)

植物により汚染ガスがひろがり、濃度が低減すること。

希 釈 (dilution)

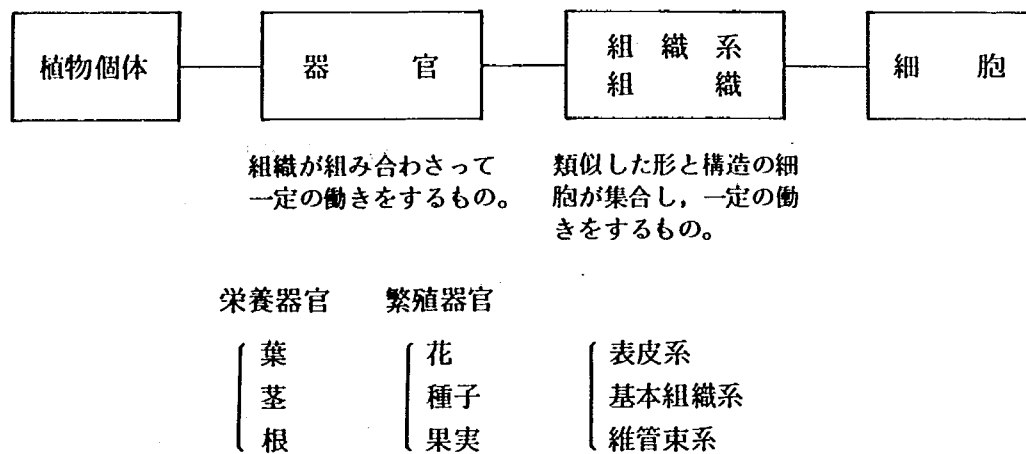
汚染ガスを含んだ空気が拡散により薄まること。

2. 大気環境と植物の相互関係

2.1 植物の構造・機能と大気環境

(1) 植物の基本的構造・機能

植物体は無数の細胞から形成されており，調査の対象となる高等植物（種子植物）の細胞はよく分化発達し，図—2.1に示すような構成となっている。



図—2.1 植物の構成

大気との関係は葉，茎，根の各器官で，図—2.2に示すように光合成，呼吸にともなうガス交換および蒸散がおこなわれている。^{*1)}大気浄化はこの通常のガス交換と同時に汚染質が吸収されることにより生じる。

大気とのガス交換を行う組織には，葉の表皮の変形である気孔と樹皮の変形である皮目とがある。量的には，前者が圧倒的に多くを占め，ガスの交換も大部分が気孔を介して行われる。葉，茎，根の働きの概要を以下に示す。また，図—2.3に各器官の構造を示す。

葉の働き

葉の最も重要な生理作用は，炭水化物の合成であり，この時大気中からCO₂を取り込む。植物体内の水分を体外に発散させる働きもする。また，炭水化物から各種の有機物質を合成して，植物体の生長に関係する。呼吸作用は植物体の各部分で行われるが，葉では特にさかんである。

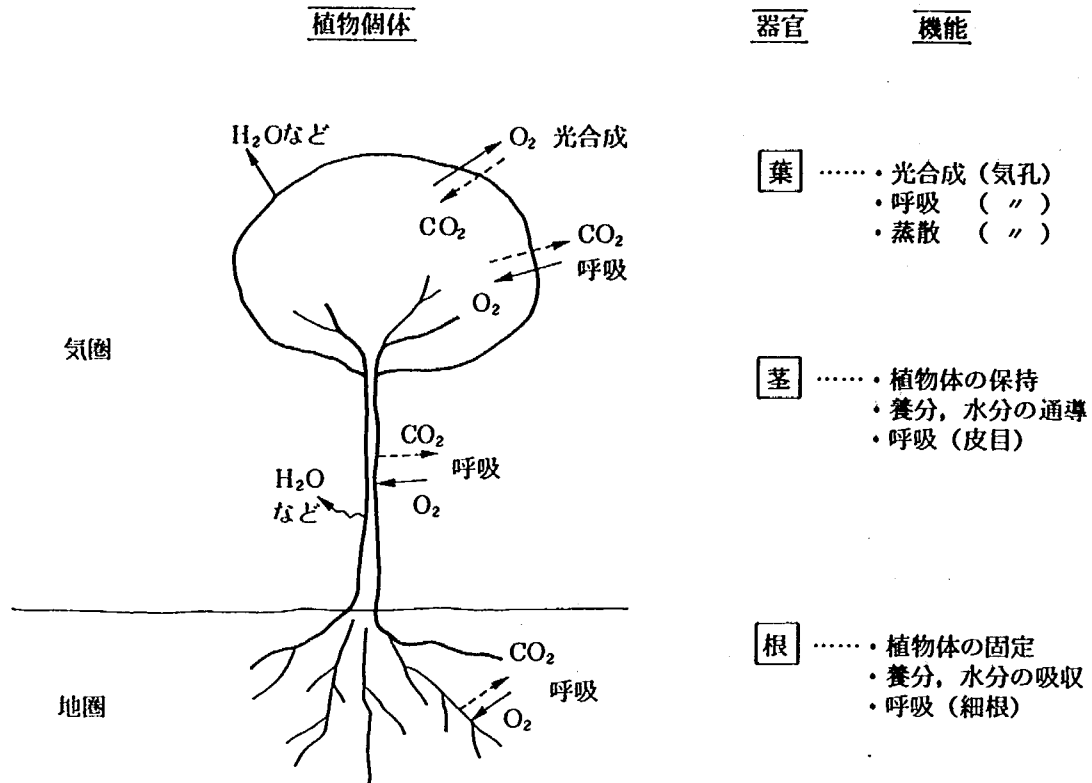
茎の働き

茎は，葉や花を保持するとともに根から吸収された生命維持のための原料物質や葉で生産された有機物質が体内で移動する通路をなしている。

*1) 光合成，呼吸，蒸散については2.1(2)を参照。

根の働き

根は植物体を固定する働きをするとともに、水、無機塩類のような生命を保つための原料物質を土壌中から吸収する。



図一 2.2 植物 (樹木) の器官・機能と構造

(2) 植物と大気環境

植物と大気とのガス交換には、前項で示したように主に葉でおこなわれる光合成、呼吸および蒸散がある。以下にこれらの概要を述べる。

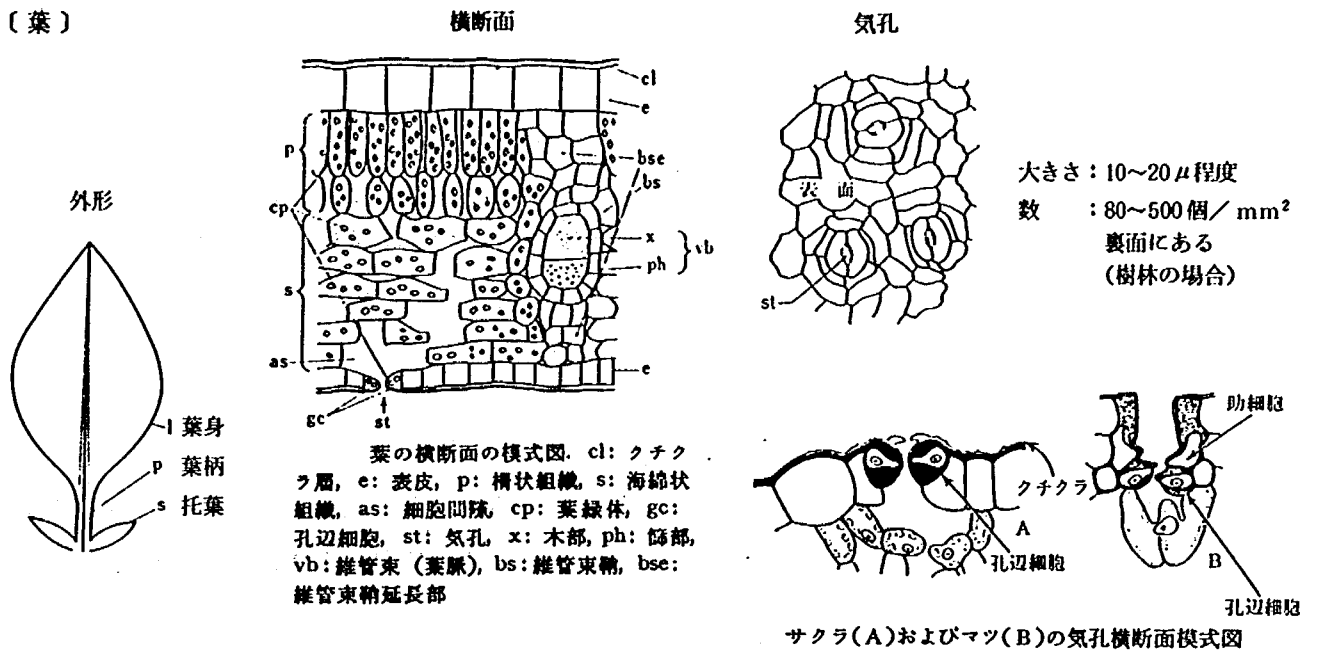
① 光合成

植物は、大気中から葉によって吸収した炭酸ガス (CO_2) と、根によって吸収した水 (H_2O) とから、細胞内の葉緑体中に含まれる葉緑素の助けをかり、日光のエネルギーを利用して糖類、でんぷん等の炭水化物を合成する。これが光合成あるいは炭酸同化といわれている作用である。^{*2)} 炭水化物は (CH_2O) という形で表され、また光合成においては吸収された CO_2 と同容積の O_2 が放出されるから、この過程は(1)式のように表される。

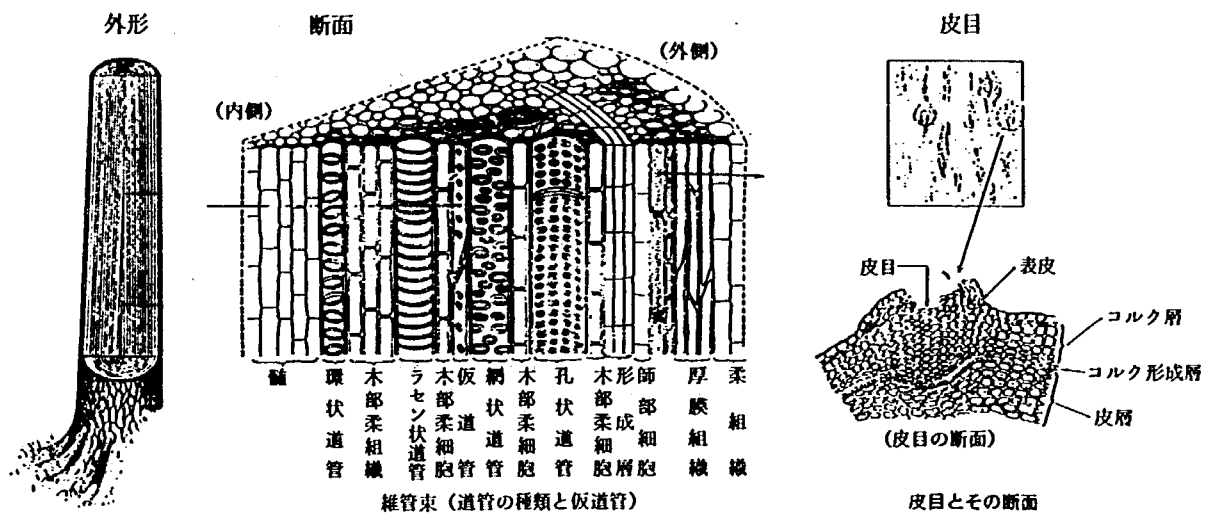
光合成の結果生成された同化生産物 (assimilation products) である炭水化物は高い化学エネルギーを含むから、光合成は太陽のエネルギーを化学エネルギーに変えて植物体中に蓄積する作用で

*2) 欧州では炭素同化作用、あるいは炭酸同化作用 (carbon dioxide assimilation) ということばがよく用いられる。アメリカでは、光合成 (photosynthesis) が一般化している。わが国では光合成の方が多く使われるようになった。

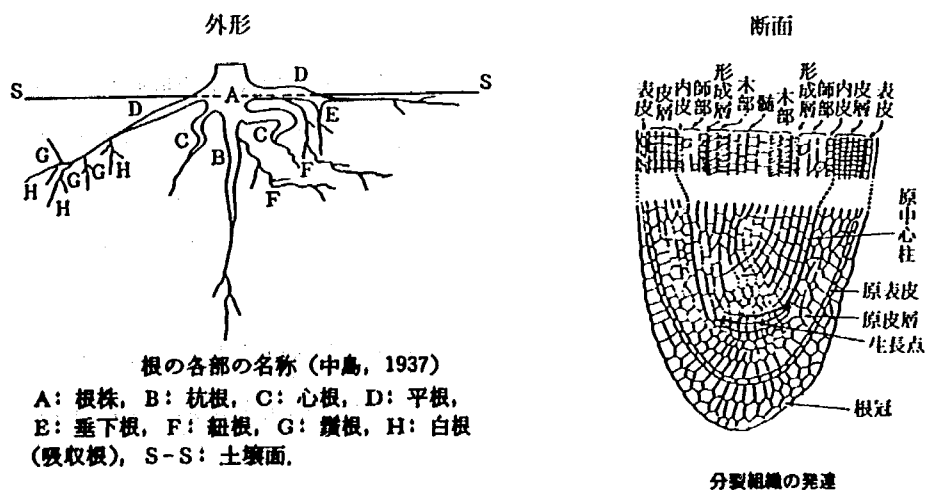
〔葉〕



〔茎〕



〔根〕



図—2.3 植物体各器官の構造 (1), (2), (3)

あるといえる。

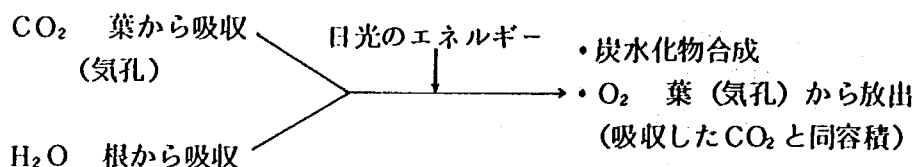


図-2.4 光 合 成 作 用

② 呼吸

呼吸は、葉から吸収した酸素を用いて同化生産物を燃焼し、得られたエネルギーを植物の生命維持のために利用するものである。ここでも吸収された O_2 と同容積の CO_2 が体外に放出される(1式)。

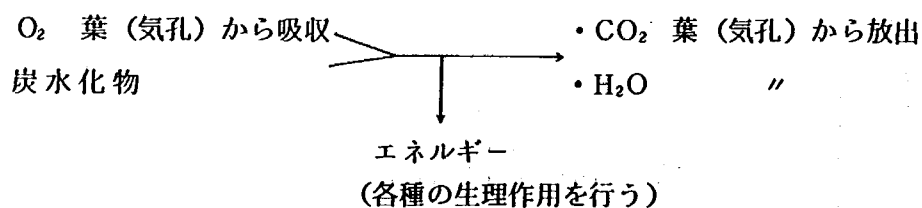
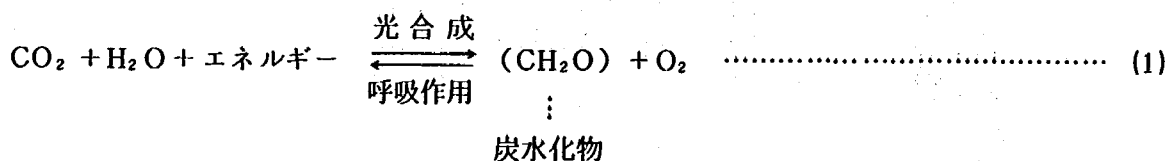


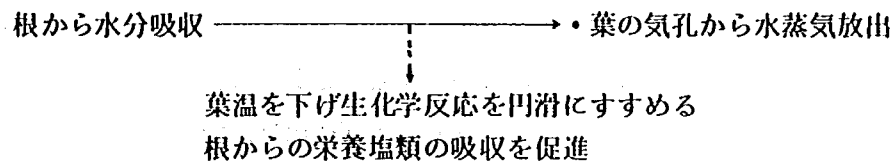
図-2.5 呼 吸 作 用



③ 蒸散

植物体の表面から水分が水蒸気として大気中に排出される現象を蒸散作用 (transpiration) という。蒸散作用の大部分は、葉の気孔を通じて行われ、このような水分の排出を気孔蒸散作用 (stomatal transpiration) という。一部は、クチクラ化した表皮細胞を通して行われ、これをクチクラ蒸散作用 (cuticular transpiration) という。皮目やコルク層を通じての蒸散はこれらに比較すればはるかに少ない。

蒸散は、根から吸収した水を葉の気孔から大気へ水蒸気のかたちで放出するもので、葉温をさげ、葉内の生化学反応が円滑にすすむようにしたり、根系からの栄養塩類の吸収を増加させたりする効果がある。



図—2.6 蒸散作用

2.2 人間の活動により放出される各種ガスの大気中での循環

(1) 大気組成

① 地表付近の大気の組成

現在の地表付近での大気組成は、表—2.1のとおりである。大気は、ほとんどが窒素、酸素、アルゴンおよび二酸化炭素で構成されており、これらの主成分で乾燥大気の容積の99.99%を占めている。この主成分気体の組成比は、地球上の場所や高度（地表から80kmまで）によって変化しないといわれている。これは大気層内での活発な乱流交換によってよく混合されているためである。

表—2.1 地表付近の大気の組成^{4),5)}

成分気体		記 号	容 積 比 (%)	容 積 比 (ppm)	大 気 中 の 全 量* (10 ²⁰ g)	
主成分	窒 素	N ₂	78.09		38.648	
	酸 素	O ₂	20.94		11.841	
	ア ル ゴ ン	Ar	0.93		0.665	
	二酸化炭素	CO ₂	0.033	330	0.0253	現在濃度が増加しつつある
微量物質	ネ オ ン	Ne		18	0.000636	
	ヘ リ ウ ム	He		5.2	0.000037	
	ク リ プ ト ン	Kr		1	0.000146	
	ク セ ノ ン	Xe		0.08	0.000018	
	水 素	H ₂		0.5	0.000002	
	メ タ ン	CH ₄		1.5	0.000043	
	一酸化炭素	CO		0.1		} 汚染大気中では変動する
	亜酸化窒素	N ₂ O		0.25		
* 乾燥空気の全量は 約 51.17×10 ²⁰ g						
水 蒸 気	H ₂ O	0 ~ 4 %			場所により時により大きく変動する	
オ ゾ ン	O ₃		地表面 0 ~ 0.07ppm 20 ~ 30km 0.1 ~ 0.2ppm		汚染大気中では変動する 成層圏オゾン層	

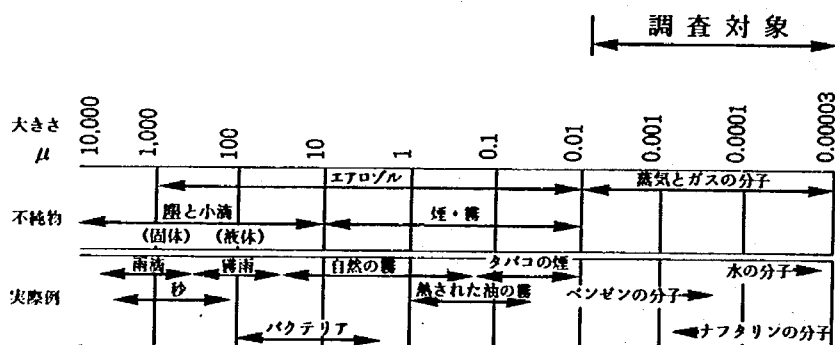
その他の成分は、ネオン、ヘリウム、クセノン、水素などのほか、化石燃料の消費に代表される人間活動により放出される一酸化炭素、亜酸化窒素などがある。これらは主成分に比較してごく微量である。大気重要な成分の一つである水蒸気の組成比は、場所により、時によって著しく異なるが、大気全体として見れば0～4%の間を変動している。

また、これらの気体とともに多種多様なエアロゾルが大気中に浮遊している。なお、本調査では、植物の大気汚染質の吸収能力を明らかにすることを目的としているので、ガス状物質（大きさ0.01 μ以下）が調査対象となる。

・排出汚染物質の種類と大きさ

エアロゾル 0.01 μ以上

ガス状物質 0.01 μ以下



図—2.7 汚染質のタイプと大きさ⁶⁾

② 人間の活動により放出される各種ガス

a. ガスの種類、発生量

人間の活動により放出されるガスは、大部分が化石燃料の消費によるもので、窒素、硫黄、炭素の各酸化物や各種炭化水素が主なものである。表—2.2にその種類と概要、表—2.3に主なガスの発生源の内訳を示す。これによれば、人工源による発生量は $10^6 \sim 10^9$ トン/年オーダーと推定される。ガソリンおよび軽油の燃焼に由来する濃度分は、それぞれ一酸化炭素55.4%、炭化水素38.8%、窒素酸化物21.3%、二酸化硫黄1.3%となっている。

b. 自動車排出ガスの成分

自動車エンジンの多くは、ガソリン等（炭化水素）を燃料としている。エンジン内での燃焼は基本的には次式で表わされる。

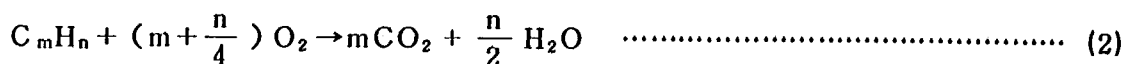


表 一2.2 人間活動により放出される各種ガスの概要⁴⁾

種 類	オゾン O ₃	二酸化炭素 CO ₂	一酸化炭素 CO	二酸化硫黄 SO ₂	硫化水素 H ₂ S	亜酸化窒素 N ₂ O	窒素酸化物 NO _x	硝酸 HNO ₃	アンモニア NH ₃
バックグラウンド濃度	地表付近 : 0.02ppm 成層圏極大濃度 : 3~6ppm	330ppm 増加しつつある	0.10ppm	0.1~1.7ppb	0.2ppb	0.25ppm	1~10ppb		0.2ppb
主な発生源	酸素の光化学反応	工業 石油・石炭の燃料	不完全燃焼 自動車などの排気	工業 火山	沿岸水 排水 水田・腐敗 火山・鉱泉	大気中に広く分布 (O ₂ の光化学反応に関与)	自動車 航空機 工業 土壌中のバクテリア	NO ₂ 酸性雨の原因	燃焼 火山 土壌中のバクテリア
人工源による放出量 (地球上/年)		50×10 ⁶ t	350×10 ⁶ t	149×10 ⁶ t			52.1×10 ⁶ t		—
ガソリン・軽油の燃焼に由来する比率 (%)			199×10 ⁶ t (55.4%)	2×10 ⁶ t (1.3%)			11.1×10 ⁶ t (21.3%)		
滞留時間	対流圏 1~4日 下部成層圏 1~2年	約7年	約半年	数日	数日	4~16年	数日~ 1月以下		数日

種 類	塩 素 Cl ₂	塩化水素 HCl	ハロカーボン クロロフル オロメタン CF ₂ Cl ₂ CFCI ₃ など	炭 化 水 素			含ハロゲン 炭 化 水 素 HHC	フッ化物 HF
				テルペン C ₂ H ₂ ベンゼンなど	メタン CH ₄	エチレン C ₂ H ₄		
バックグラウンド濃度	対流圏 : 0.5~1ppm 成層圏 : 0.1~1ppb	対流圏 : 0.5~1ppb 成層圏 : 0.1~1ppb		1ppb 以下	1.5ppm	3~5ppb		
主な発生源	工業 塩化ビニールなどの燃焼	工業 火山	冷媒 各種 スプレー	自動車 航空機 工業 腐敗			エアコン 冷蔵庫 殺虫剤 整髪用	工業
人工源による放出量 (地球上/年)			3.7×10 ⁶ t	88.0×10 ⁶ t			672×10 ⁶ kg	102.7×10 ⁶ kg
ガソリン・軽油の燃焼に由来する比率 (%)				34.1×10 ⁶ t (38.8%)				
滞留時間			45~68年		2.6~8年			

表一 2.3 人工源の主な排出ガスの発生源の内訳（地球上，年間）⁴⁾

① 地球上の年間CO発生量⁷⁾

発 生 源		発生量 (10 ⁶ トン)
自 動 車	ガソリン車	197
	ディーゼル車	2
飛 行 機		5
船 舶		18
鉄 道		2
他の移動車（建設機械，トラクター等）		26
石炭燃焼		4
工業（石油精製，製鉄所等）		41
塵芥焼却		23
その他（農業廃棄物焼却火災等）		41
人工源合計		(359)
森 林 火 災		11
海中生物（管くらげ類）		3~360
テルペンの反応		60
植物中のクロロフィルの分解		90
合 計		523~880

② 地球上の年間硫黄化合物発生量⁸⁾

発 生 源	発生量 (10 ⁶ トン)
石炭燃焼	102
石油燃焼	
ガソリン・軽油	2
重 油	20
精 製	6
非鉄金属精練	16
工場からのH ₂ S 発生 (SO ₂ 換算)	3
人工源からのSO ₂ 全量	149
海面からのH ₂ S 発生 (SO ₂ 換算)	32
陸地からのH ₂ S 発生 (SO ₂ 換算)	72
海塩粒子として放出されるSO ₄ ²⁻ 中の硫黄 (SO ₂ 換算)	44

③ 地球上の人工源による年間NO_x発生量
(NO₂として計算)⁹⁾

発 生 源	発生量 (10 ⁶ トン)
石 炭	
火力発電所	12.2
工 業	13.7
住宅, 商業	1.0
石 油	
精 製	0.7
ガソリン燃焼	7.5
燈 油 "	1.3
軽 油 "	3.6
重 油 "	9.2
天然ガス	
発電所	0.6
工 業	1.1
住宅, 商業	0.4
塵芥焼却	0.5
木材燃焼	0.3
合 計	52.1

しかし燃料含有物, 空気と燃料の比(空燃比), エンジン構造などから, 排気ガス中には(2)式によって生成する炭酸ガス, 水蒸気以外にも多くの物質を含んでいる。

自動車エンジンからの排出ガスの成分

は, エンジンの種類, 運転条件などによって一定ではない。また, 近年排出ガス浄化対策が行われていて汚染物質排出も改善されている。排出ガスの成分のうち, 窒素, 酸素, 水素, 炭酸ガスおよび水は直接的に大気汚染上は問題が少なく, 一酸化炭素, 炭化水素, 窒素酸化物などが問題となっている。

(2) 各種ガスの動態

① 広域での動態

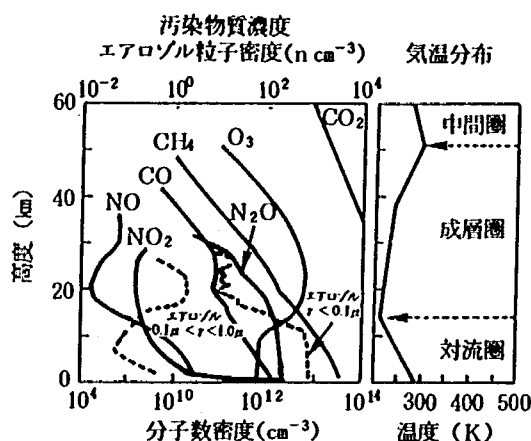
微量成分の大気中での鉛直分布は図—2.8のように示されている。地表から高度およそ11kmから17kmの対流圏では, 地表が日射によって熱せられ, 対流その他の大気の運動が活発に起こり, 地表

④ 地球上の年間炭化水素発生量⁹⁾

発 生 源	発生量 (10 ⁶ トン)
石 炭	
火力発電所	0.2
工業	0.7
住居, 商業	2.0
石 油	
精 製	6.3
ガソリン	34
軽 油	0.1
重 油	0.2
蒸発および移動中の損失	7.8
溶 媒	10
塵芥焼却場	25
木材燃焼	0.7
森林火災	1.2
計	88.0
天然源	
1. メ タ ン	
水田	210
沼沢地	630
熱帯湿地	672
鉱山その他	88
2. テルペン	
針葉樹林	50
広葉樹林, 耕地,	50
ステップ	
有機物の	70
カロチン分解	
合 計	1858.3

から大気中に熱や種々の物質がいろいろな過程を通じて放出され大気中を上方へ運ばれる。

オゾン (O_3) は、対流圏内ではほぼ一定であるが、圏界面上で急増する。二酸化窒素 (NO_2) は地表付近で多く、対流圏の下層で急激に減少する。メタン (CH_4) や一酸化炭素 (CO) は地表近くから上層へ行くにつれて単調に減少している。



図—2.8 微量汚染物質 (分子数密度) の鉛直分布^{4), 10), 11)}

また、大気中に存在するこれらのガスは、海面に溶解したり、地表面に吸着したり、あるいは化学変化によって他の物質に変化する。大気中に留まる時間はガスの種類によって数日から数十年である (表—2.2)。

② 沿道での動態

a. 排出ガスの拡散及び化学変化

自動車から排出された各種のガスは、急速に拡散してゆく (図—2.9 ①)。しかし、窒素酸化物や光化学オキシダントのように、拡散の過程で化学変化するものもある (図—2.9 ②③)。

• $NO \rightarrow NO_2$

自動車のシリンダー内は、ほとんど NO であるが、空気中に放出されると除々に酸化され NO_2 に変化してゆく。

• 光化学オキシダント

NO_2 、炭化水素等が光化学反応により O_3 、アルデヒド等に変化してゆく。

b. 沿道での排出ガス濃度

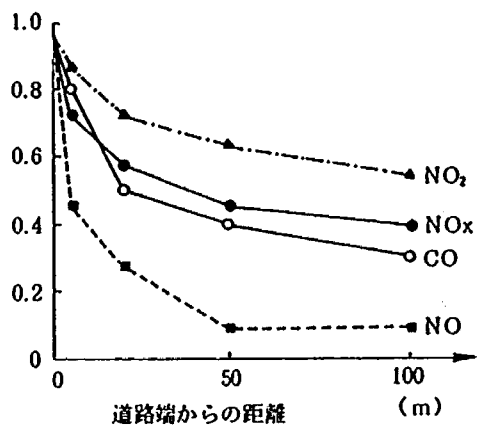
• 交通量と排出ガス濃度

窒素酸化物、一酸化炭素の濃度は、交通量に比例して高くなる。その一例を図—2.9 ④、⑤に示す。

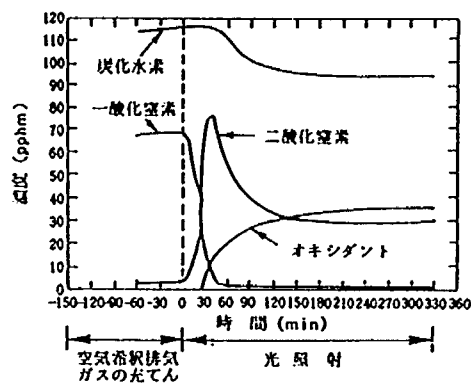
また、自動車排出ガス継続測定局の測定値は以下のとおりである。

- NO_2 年平均値が横ばい、あるいは増加の測定局が 90 兆を占め、環境基準を達成していない局が 80 兆あり、あまり改善されていない。

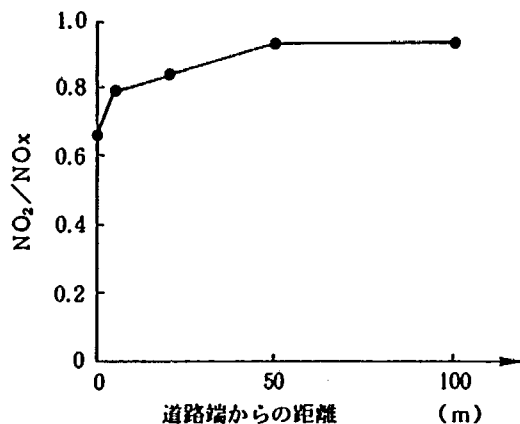
① 自動車排出ガスの拡散性状
(国道6号, 水戸市)



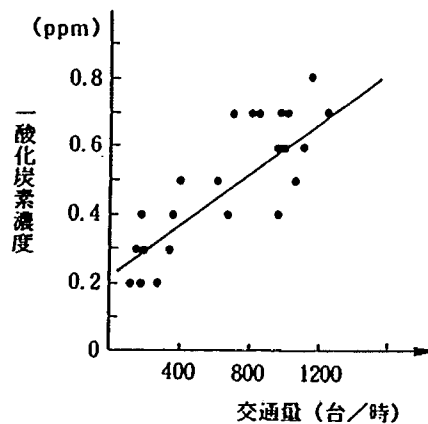
② 光化学反応の経過
スモッグチャンバーによる実験例¹²⁾



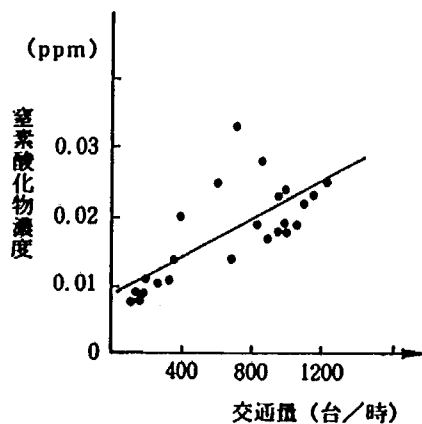
③ NO₂/NO_xの距離による変化
(国道6号, 水戸市)



④ COと交通量との相関
(国道6号, 水戸市)

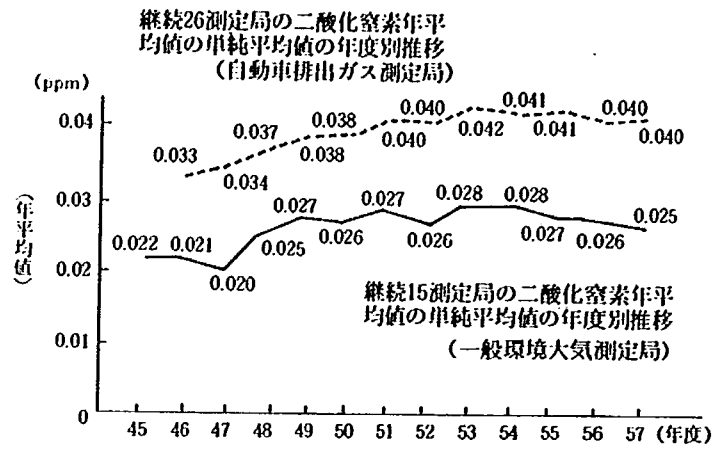


⑤ NO_xと交通量との相関
(国道6号, 水戸市)



図一 2.9 沿道での自動車排出ガス濃度分布
(①, ③~⑥は建設省が実施した道路沿道での大気調査の結果である。)

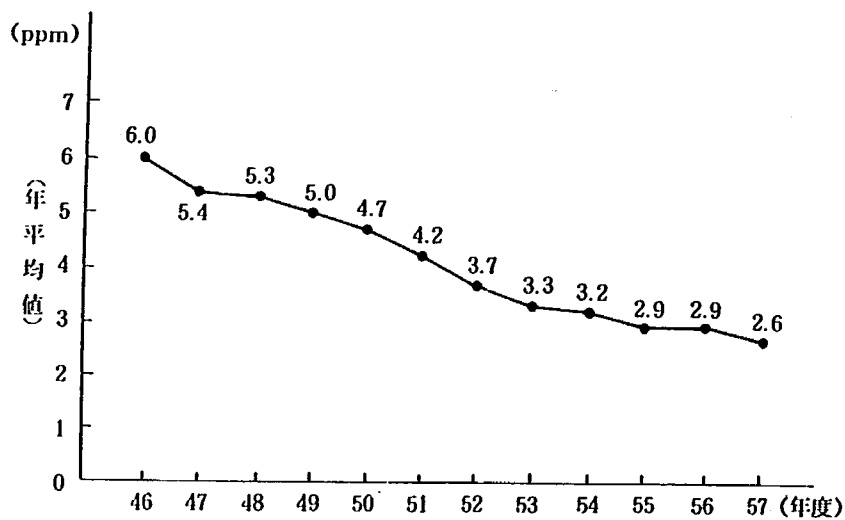
なお、昭和57年度の最高値（日平均値の年間98%値）は、0.077ppmである（横浜）。



(備考) 1. 環境庁調べ
2. ザルツマン係数 = 0.84。

図一 2.10 二酸化窒素年平均値の推移¹³⁾

・CO 全局で減少しており、ほとんど全ての局で環境基準を達成している。



図一 2.11 継続15測定局の一酸化炭素年平均値の単純平均値の年度別推移¹³⁾
(自動車排出ガス測定局)

(3) 炭素サイクル、窒素サイクル

自動車排出ガスの成分であり、また植物体の主要構成元素でもある炭素（C）と窒素（N）の地球上での循環について述べる。

① 炭素サイクル

地球を構成している気圏、地圏、水圏および生物圏内の炭素の分布は永い地史的進化のなかでつくり上げられ、一つの安定状態を維持していた。このような条件下で炭素量の分布をみると表-2.4のようになる。分布の特徴はほとんどすべての炭素が地圏内にあって、他の3圏とくに大気圏と生物圏にある量は極端に少ない。地圏内の炭素もほとんどが炭素塩類として沈殿、堆積しており、地球上の炭素の流れに関与している量は非常に少ない。とくに地球上の生命活動に関係している炭素は、大気圏においては7,000億トンで0.0035%, 生物圏は6,076億トンで0.003%にすぎない。

表-2.4 地球上における炭素量（億 ton）の分布^{(14), (15)}

	大 気 圏	生 物 圏	地 圏	水 圏
分	7,000	陸上植物 6,000	堆積炭酸塩	浅海 5,000
布			200,000,000	深海 345,000*
量		プランクトン・魚 40	化石燃料 100,000	
		陸上動物 36	遺体（陸） 7,000	
			遺体（海） 30,000	
小 計	7,000	6,076	200,137,000	350,000
比率%	0.0035	0.003	99.82	0.177

* Woodwell (1978)は 380×10^6 億 tonの数値を与えている。

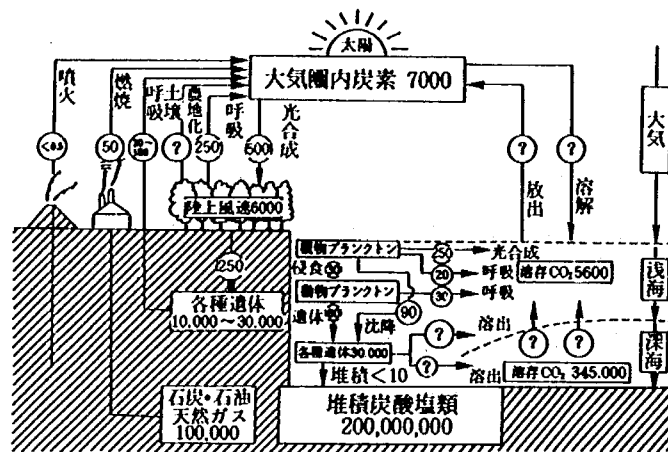
合計 20,050 兆トン

この4圏の間での炭素の流れについては図-2.12に示すものがある。陸上植物は大気中の炭素の14分の1に当たる約500億トンの炭素を光合成によって1年間に大気中より吸収し、その約半分を呼吸によって大気中に放出する。残りの半分は、枯死有機物として土壌に加えられるが、同量が分解して大気中にもどされるので、生態系全体の炭素量は変わらない。

この平衡状態が地球の本来の姿であるが、人類は1年間に約50億トンの炭素を化石燃料の燃焼により大気中に放出している。自動車から排出される炭素も、二酸化炭素（CO₂）のほかに、一酸化炭素（CO）、各種炭化水素（HC）の形でこの中に含まれている。そのため、後述するように大気中の炭酸ガス濃度は近年上昇をつづけている。

② 窒素サイクル

地球を構成している各圏内の窒素の分布については表-2.6に示すものがある。炭素とやや構成が異なるが、やはり地圏内で圧倒的に多く、ついで大気中の窒素ガスとして存在するものが多い。他



図— 2.12 地球上での炭素の分布（四角，億 ton）と流れ（丸，億 ton/年）^{15), 16), 17)}

の2圏には，きわめて少い。

大気では約78%（容積比）を N_2 が占めている。このほか，大気中には各種窒素化合物が含まれ，その主なものは気体状の N_2O ， NO ， NH_3 と，これらがエアロゾル化した NO_3^- ， NH_4^+ である。これら各種成分の大気を介してのサイクルには地表表面に棲息する微生物，降水などが重要な役割を果たすといわれているが，量的なことについてはまだよくわかっていない。

表— 2.5 地球上における窒素量の分布¹⁵⁾

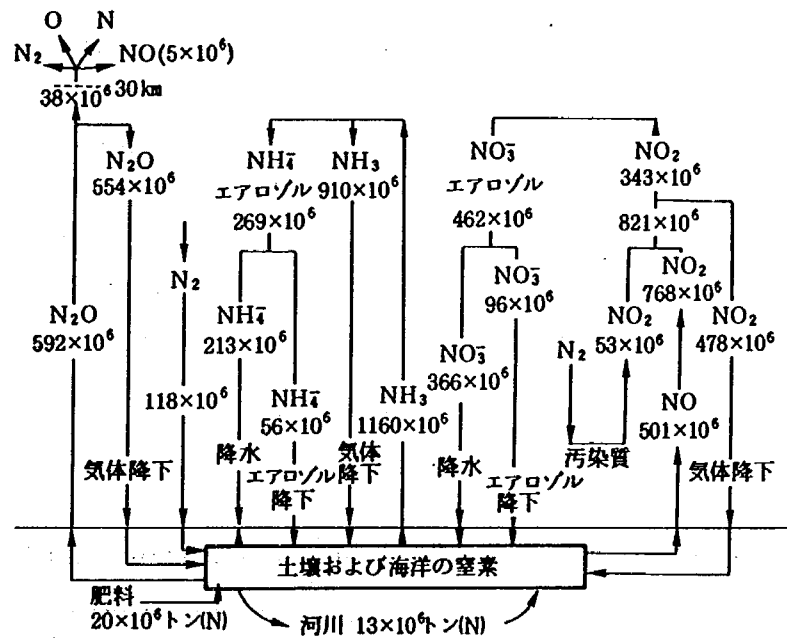
（単位：億トン）

	大 気 圏	生 物 圏	地 圏	水 圏
	38,000,000	植 物 120 陸 動 物 2 植 物 8 海 動 物 1.7 131.7	有機物 7,600 無機態 1,400 堆積物 40,000,000 地殻中 140,000,000 180,009,000	溶 解 200,000 有機物 9,000 無機態 1,000 210,000
小 計	38,000,000			
比率(%)	17.4	6×10^{-6}	82.5	9.6×10^{-2}

合計 21,821兆トン

各種窒素化合物の人工および天然発生源からの年間放出量（トン／年）の推定値については表－2.6 に示すものがある。Robinson ら^{8),9)}が見積ったバックグラウンド濃度、および大気中の全重量（Nとして）を表－2.7 に示す。

次に、Robinson ら^{8),9)}が作成した窒素のサイクルを図－2.13 に示す。三つの独立したサイクル－ N_2O サイクル、 NH_3 サイクル、 NO_x サイクル－と大気窒素の固定、土壌への肥料供給、大陸から河川により海洋に運ばれる窒素よりなっている。



図－2.13 窒素化合物の循環（単位：トン／年）¹⁸⁾

表—2.6 地球上における窒素化合物放出量の推定値¹⁸⁾

化合物	発 生 源	燃料消費量 (トン/年)	放出量推定値 (トン/年)	Nとしての数出 量(トン/年)
NO ₂ (NO _x を含む)	石炭燃焼	3074×10 ⁶	26.9×10 ⁶	8.2×10 ⁶
	石油精製	11317×10 ⁶ (bbl)	0.7×10 ⁶	0.2×10 ⁶
	ガソリン燃焼	379×10 ⁶	7.5×10 ⁶	2.3×10 ⁶
	その他のオイルの燃焼	894×10 ⁶	14.1×10 ⁶	4.3×10 ⁶
	天然ガスの燃焼	20.56×10 ¹² (ft ³)	2.1×10 ⁶	0.6×10 ⁶
	その他の燃焼	1290×10 ⁶	1.6×10 ⁶	0.5×10 ⁶
	合 計		52.9×10 ⁶	16.1×10 ⁶
NH ₃	燃 焼		4.2×10 ⁶	3.5×10 ⁶
NO	微生物活動		501×10 ⁶	234×10 ⁶
NH ₃	微生物活動		1160×10 ⁶	957×10 ⁶
N ₂ O	微生物活動		592×10 ⁶	378×10 ⁶

表—2.7 窒素化合物のバックグラウンド濃度、および大気中の全重量¹⁸⁾

化 合 物	濃 度	大気中の全重量 (Nとして)/t
N ₂ O	0.25 ppm	1500×10 ⁶
NO		
	陸地 (65°N—65°S)	2 ppb
	すべての他の地域	0.2 ppb
NO ₂		
	陸地 (65°N—65°S)	4 ppb
	すべての他の地域	0.5 ppb
NH ₃	6 ppb	30×10 ⁶
NO ₃ ⁻	0.2 μgm ⁻³	0.2×10 ⁶
NH ₄ ⁺	1.0 μgm ⁻³	4.1×10 ⁶

2.3 植物による大気組成の安定化

植物は大気とのガス交換を行うことによって大気組成を一定に保つ効果をもつ。以下に大気の主成分と微量成分にわけてその概要について述べる。

(1) 大気主成分の安定化

a 大気中の炭酸ガスの増加

地球上に生命が出現してから非常に長い年代を経過した現在では、大気中の CO_2 は植物の光合成によってたえず消費される一方、植物、微生物、動物などの呼吸、分解などによって補給され、 CO_2 の消費と生産が均衡を保ってきた。しかし、近年炭酸ガス濃度がしだいに高まり（図-2.14下）、それが地球の気温を高めるおそれがあるといわれている。

炭酸ガス増加の原因としては、①太古の植物が CO_2 を長期間にわたって同化固定した有機物に由来する化石燃料を、近代産業は短期間に酸化分解して、 CO_2 として放出していること（図-2.14上）、②炭酸ガスの消費者である森林が近年、大規模に伐採され、1900年には、陸地面積に対する森林面積比は1/3であったのが1980年には1/5に減少し（図-2.15）、特にそれが生産力の高い熱帯地方（図-2.16）での減少が著しかったことが上げられている。そのため、現在の植物の同化能力では、放出される CO_2 を完全にとりこんで同化することができないと考えられている。

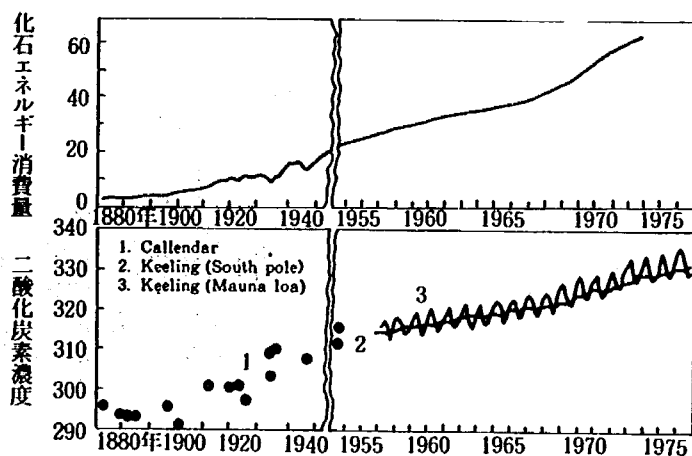


図-2.14 過去100年間における地面付近の二酸化炭素濃度(ppm)と世界化石燃料消費量($10^{12} \text{ kW hr}^{-1}$)の傾向的变化^{(19), (20)}

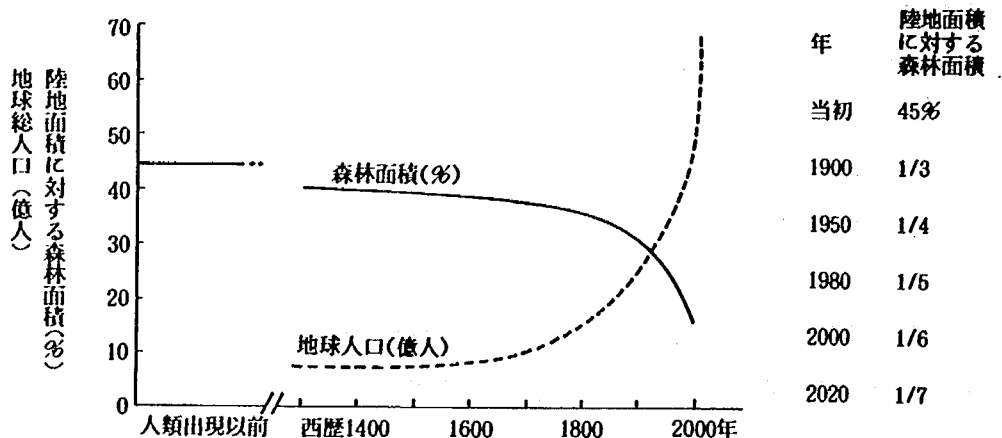
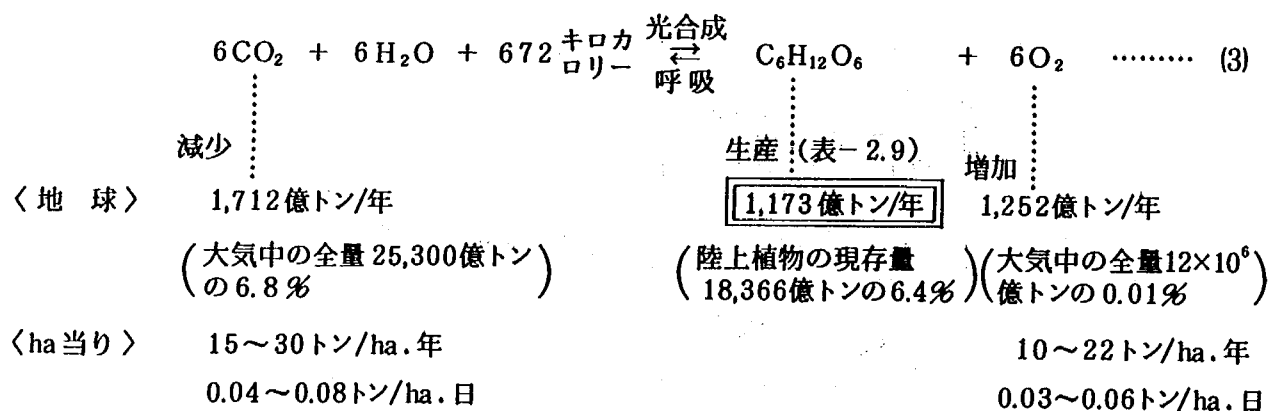


図- 2.15 森林面積と地球総人口の変化(西暦2000年の地球, 1980よりえがく)²¹⁾

b 森林の効果

地球上の陸上植物の純生産量1,173億トン/年(表- 2.9)からCO₂の消費量を求めると1,712億トン/年となり, これは大気中のCO₂全量の6.8%に相当する。また, 日本のいくつかのタイプの森林の単位面積当りの吸収炭酸ガス量は15~30トン/ha・年と試算されている(図- 2.17)。この関係を以下に示す。



以上のように植物が有機炭素化合物として固定したCO₂に見合うだけの量は, 動植物の呼吸および遺体の分解によってふたたび大気中に還元されているから, 収支だけを考えれば, 増加するCO₂の軽減には役立たない。

しかし, 数十年ないし百年程度のスケールで大気中のCO₂濃度の変化を考えると, 植物の光合成は以下のような意味をもってくる。

植物に固定された有機炭素が大気中にもどるまでには, 相当な時間がかかる。樹木のような寿命

の長い植物の材となった同化物は、何十年から百年以上もそのまま存在しつづける（表-2.8）。したがって、植生は大気中の増加するCO₂を固定することによって、一時的ではあるが有効なブレイキとしてはたらくと考えられる。しかもその抑制力は、CO₂の濃度が高まるほど強くなるという特性をもつ。²²⁾

表-2.8 極相林における土壌有機炭素の分解（無機化）速度²²⁾

森 林 型	気 候 帯	年平均 気 温 (°C)	分解常数 μ (1/年)	年分解率 $1 - e^{-\mu}$	半 減 期 $0.693/\mu$ (年)	95% 分 解 期 $3/\mu$ (年)
熱帯多雨林 (南タイ)	熱 帯	27.2	0.252	0.22	2.8	11.9
常緑照葉樹林 (奈良春日山)	暖温帯	13.7	0.0497	0.049	13.9	60.3
常緑針葉樹林 (大台原山頂)	亜寒帯	5.6	0.0193	0.020	35.9	155.4

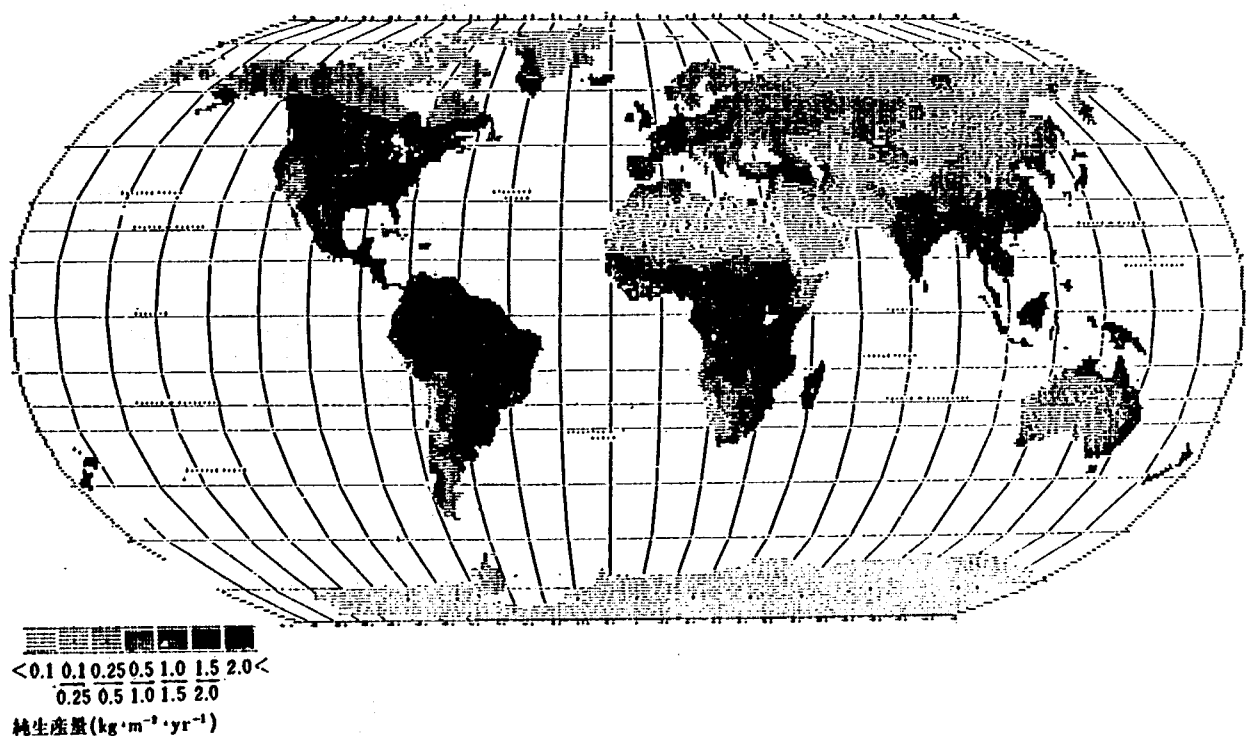


図-2.16 陸地の純一次生産力の地理的分布(Miami モデルによる推定値)²³⁾

表- 2.9 地球上の各生態系の一次生産力と現存量²⁴⁾

生 態 系	面 積 (億 ha)	一 次 生 産		現 存 量 (乾物億トン) (億トン/年)	O ₂ 生産量*** (億トン/年)
		平均生産力*	生 産 量**		
熱 帯 多 雨 林	17.0	21.9	373.3	7,644.4	373.3
熱 帯 季 節 林	7.5	16.0	120.0	2,500.0	120.0
温 帯 常 緑 林	5.0	12.9	64.4	1,755.5	64.4
温 帯 落 葉 林	7.0	12.1	84.4	2,111.1	84.4
北 方 森 林	12.0	8.0	95.6	2,400.0	95.6
高・低木林地	8.5	7.1	60.0	488.9	60.0
サ バ ン ナ	15.0	9.0	135.6	600.0	135.6
温 帯 草 地	9.0	6.4	57.6	140.0	57.6
ツンドラ・山岳・草地	8.0	1.4	11.1	51.1	11.1
砂 漠・半砂漠	18.0	0.9	15.6	131.1	15.6
岩地・砂地・氷地	24.0	0.03	0.7	4.4	0.7
耕 地	14.0	6.5	91.1	140.0	91.1
沼 沢・湿地	2.0	30.0	60.0	300.0	60.0
湖・河川	2.0	4.5	8.9	0.4	8.9
小 計	149.0	7.9	1,173.3	18,366.7	1,173.3
大 洋	332.0	1.3	415.6	10.0	415.6
湧 昇 流 海 域	0.4	5.5	2.2	0.09	2.2
大 陸 棚	26.6	3.6	95.6	2.7	95.6
藻 場・海 浜	0.6	26.0	15.6	12.0	15.6
河 口 部	1.4	15.9	22.2	14.0	22.2
小 計	361.0	1.5	551.1	38.7	551.1
総 計	510.0	3.4	1,724.4	18,400.0	1,724.4

* 乾物トン/ha・年, ** 乾物億トン/年, *** 一次生産量より推定。

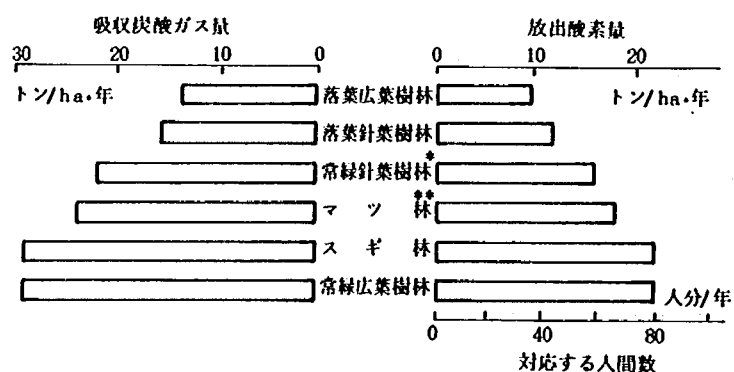


図- 2.17 森林(よく茂った場合)の炭酸ガスと酸素の収支²⁵⁾

* マツ林・スギ林以外, ** ハイマツ林は除く 右下の目盛りは, それぞれの森林が人間何人分の呼吸量をまかなえるかを示す。

(2) 微量成分の安定化

大気中に放出された微量の汚染ガスの一部は、そのまま滞留するものと、大気圏外へ除去されるものがある。汚染物が大気中より除去されるには、次の機構が働いている。①土壌面、水面あるいは地表にある植物や構造物への収着、②雲や霧に捕捉され、次いで雨や雪に捕捉されることによる地上への落下 (rainout)、③雨や雪が落下の途中直接の捕集 (washout)、さらに間接的ではあるが④化学反応などによる除去されやすい形 (あるいはその逆の場合もある) への変化。

これらによる除去速度は、ガス状物質の場合には、ガスの降水粒子に対する溶解度、吸着率、水、土壌その他の物体表面への吸着、吸収率、さらに変換率などの物理化学的性質によって決定される。²⁶⁾

各種の物体のうち、植物群落の大気汚染ガスの除去効果の重要性が多く研究者により報告されている。

Meetham^{27), 28)}によれば、英国において発生するSO₂の14%が雨に溶解したり粒子として収着し、22%が海に流され、残りの64%が植物や土壌等の地表面と反応して除去され、その半減期は9時間よりも小さいと推定されている。植物、土壌、海水、その他への種々の汚染ガスの収着速度に関する報告を比較すれば植物のガス収着速度は、SO₂、NO₂、O₃、HF、Cl₂、PAN等の汚染ガスにおいて、土壌、海水、その他の物質へのガス収着速度に比べて大きいとか同等レベルである。それゆえ、植物群落は地表面において最も汚染ガスを収着する能力を有するものの一つと考えられる。我が国においても森林、耕地を含めた植物被覆地の占める割合は国土の約85%であり、都市域等で発生し拡散した汚染大気の浄化に十分寄与していると考えられる。²⁹⁾

表-2.10はガスの収着速度の測定結果をまとめたものである。データの多くは土壌、海水、植物への収着の測定結果である。SO₂の収着速度でみると、植物は都市構造物などよりも高く、水面と同程度の値となっている。

表-2.10 植物と他の物質の収着速度²⁶⁾

		単位 (cm/s)		
		SO ₂	O ₃	PAN
植	物	0.1 ~ 2.5	0.47 ~ 1.7	0.14 ~ 0.75
土	壌	0.02 ~ 0.87	0.38 ~ 1.6	0.21 ~ 0.30
水	面	0.16 ~ 4.0	0.04	0.2 以上
雪	面	0.16 ~ 1.6		
都 市 構 築 物		0.2 ~ 0.3		
セ メ ン ト		1.6 ~ 2.5		
し っ く い		0.9 ~ 1.8		
ア ス フ ァ ル ト		0.04		

3. 植物個体の大気汚染質の吸収機能

3.1 汚染質吸収のメカニズム、希釈のメカニズム

(1) 植物の大気浄化機能

道路周辺での植物の汚染ガス浄化機能は、収着と拡散等に分けて考えられる。収着 (sorption) は吸収 (absorption) と吸着 (adsorption) にわけられ、大気中の汚染質の量を減らす効果がある。拡散 (diffusion) については半障壁物としての植物により、汚染質が広がり、汚染質濃度を薄める効果はあるが全体の総量は減少しない。

本調査では図-3.2のうち、①気孔等による汚染ガスの吸収を主な調査の対象としている。

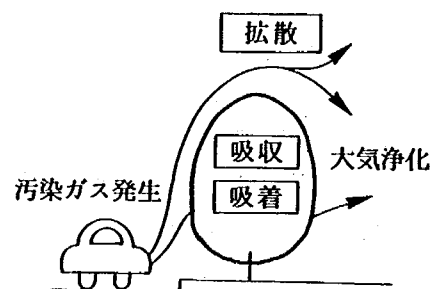


図- 3.1 沿道での植物の汚染ガス浄化機能

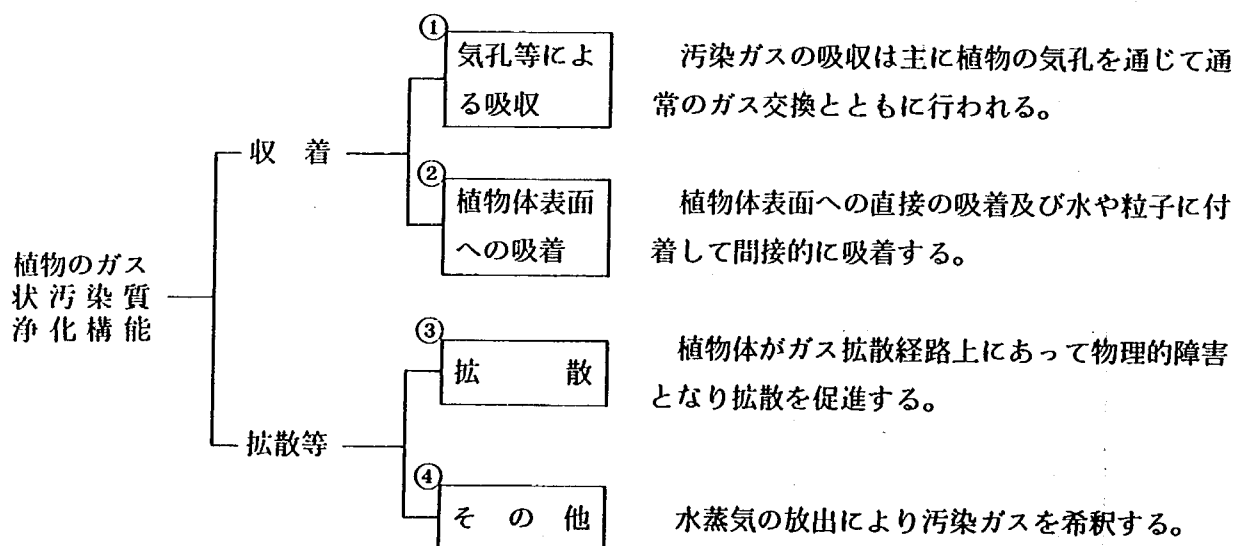


図- 3.2 植物の大気浄化機能

(2) 収着

① 気孔等による吸収

植物が主に気孔を通じて、光合成、呼吸、蒸散にともなうガス (CO_2 , O_2 , H_2O) の大気との交換と同時に汚染質を吸収するもので、他の方法では除去できない特有の効果である。大気中の汚染

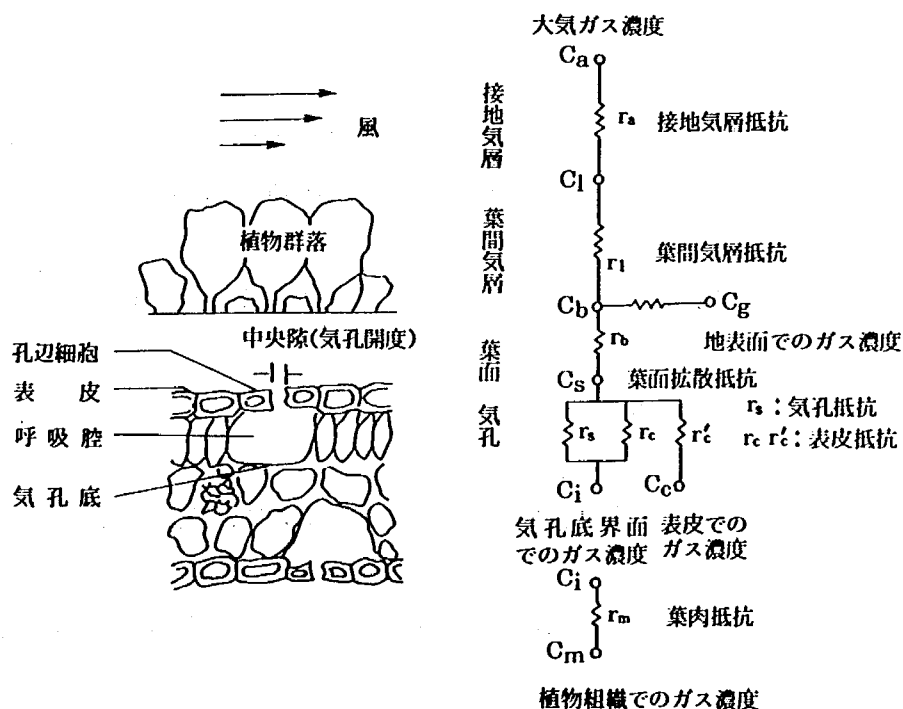
質が植物葉に吸収される過程は次のように説明されている。

水蒸気、 CO_2 、汚染ガス等の大気から植物葉へのあるいはその逆のフラックス^{*3)}は、葉内組織と大気との間のガス濃度差と拡散抵抗により支配される。

$$\text{フラックス} = \text{ガス濃度差} / \text{拡散抵抗}$$

自然環境下では、接地気層から地表面に至る過程に群落が存在し、各々のガスは、群落内葉間気層－葉面境界層－気孔（表皮）－気孔底－組織の経路を経てガス交換されるが、ガスの流れの方向は、ガスの種類や状態により異なる。図－3.3に、これらの経路を経て行われるガス拡散に関する抵抗モデルを示す。この抵抗モデルにおいて、植物組織におけるガスの代謝あるいは移動等の生理現象は、気孔底の界面のガス濃度で代表される。植物組織に至るまでのモデルを考えるならば、葉肉抵抗を付加してもよい。大気から気孔底界面に至る拡散抵抗は、水蒸気、 CO_2 、汚染ガス等のガスの種類にかかわらず、気相でのガス拡散のアナロジーに基づいて取り扱うことができるが、経路上の各過程の特性により異なる。

植物群落による汚染ガスの収着量を予測するモデルを開発するためには、各過程における拡散抵抗と気孔底界面のガス濃度の定量的な特性を把握する必要がある。



図－3.3 植物群落のガス拡散抵抗モデル²⁹⁾

*3) フラックス (flux) とは、ある面を通して単位時間に通過する物理量（放射量，運動量，熱量，水蒸気量など）をいう。

② 植物体表面への吸着

汚染ガスは植物体表面へ直接吸着したり、他の物体に付着溶解して間接的に吸着する。

a 直接的吸着

汚染ガスが葉の表面や幹、枝の表皮に直接吸着することであるがその程度はよくわかっていない。

b 間接的吸着

汚染ガスが植物体表面の水や他の粒子に付着して間接的に吸着することである。

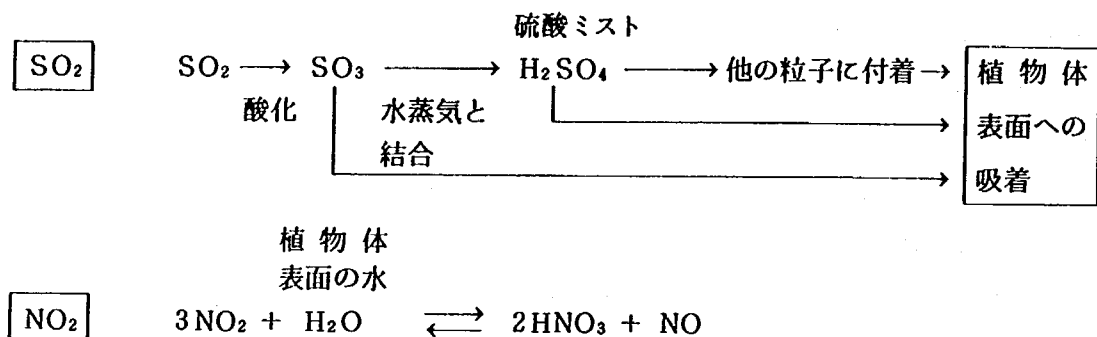


図- 3.4 SO_2 , NO_2 の植物体表面への吸着例

(3) 拡散等

① 拡散

植物は複雑な形態を有しているため、汚染ガスの拡散経路上に植物がある場合の拡散性状は必ずしも明らかとはなっていない。汚染ガスが気流に乗って移動するため、現象としては樹林の防風効果に準じて考えられる。

拡散実験の結果、樹林モデルによる拡散現象は次の3つの領域に分けて説明されている(図- 3.5)³⁰⁾。

I. 林の前での上昇流による移流効果

II. 林の内部および上面での乱れによる拡散効果

III. 林の後での下降流による移流効果ならびに強い乱れによる拡散効果

Iの領域では林の密度が大きくなると上昇流が顕著になり、拡散のようすは大きく変化する。すなわち、林の入口の流れの状態は以後の拡散状態を決定する初期条件的な役割を果たし極めて重要である。

IIの領域では林の内部および上面で乱れが大きく、特にZの負の方向へのフラックスが増大する。

IIIの領域では強い乱れによってZおよびY方向のフラックスは共に増大するがZ方向に関しては下降流の移流効果のため、見かけ上Zの正の方向には拡散がおさえられたようになり、逆に、Y方向にはさらに拡散されるようになる。

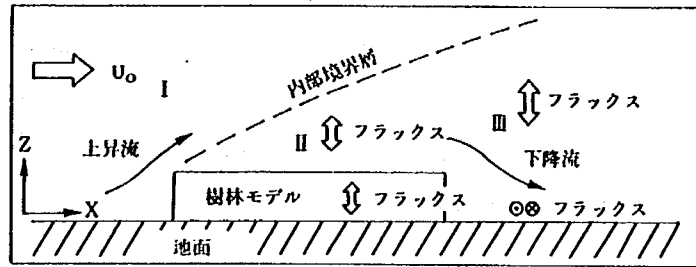


図- 3.5 (1) 樹林による汚染物の拡散³⁰⁾

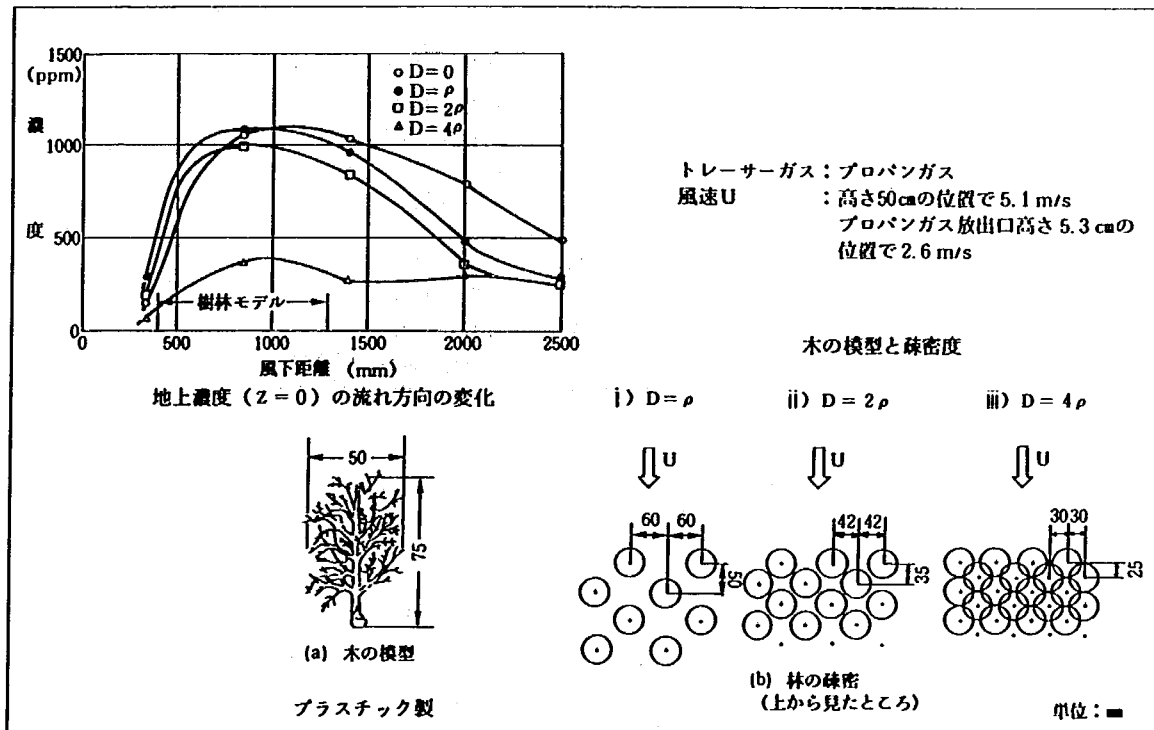


図- 3.5 (2) 模型樹林による地上濃度の変化³⁰⁾

② その他

a 水蒸気の放出

植物は大気中へ水蒸気を放出しており、汚染質を含む大気をその分だけ希釈する。水蒸気の放出は主に気孔からおこなわれるが、その他葉表面からの放出（クチクラ蒸散）や、他の植物体表面からもおこなわれている。

森林の蒸散量は雨量単位では260～1,230 mm/年というデータがあり（表- 3.1）、これを1日、1 ha 当りになおすと7.1～34 t/日・ha となる。また、蒸散速度は、湿度、光、風などによ

って律速され、気孔の開度に影響されていることが多い。

蒸散速度の季節変化は図- 3.6 のようであり、落葉樹の方が常緑樹のものより変化が大きい。

樹木ごとの蒸散量は表- 3.2 のようであり、最大蒸散量（気孔蒸散量+クチクラ蒸散量）は430 ~1,410mg H₂O/dm²hr 10 mm^{*4)} である。この最大蒸散量については種や生態系による差が大きい、クチクラ蒸散については差がきわめて大きい。また、葉の表面積が拡大しているほど蒸散面を拡大しているため蒸散量が多い。

表- 3.1 森林の蒸散量³¹⁾

種 名	蒸 散 量 (mm・year ⁻¹)	備 考
スギ	260 ~ 500	芝本 (1951)
	392 ~ 495	柴田 (1955)
	1,230	佐藤 (1958)
	555 ~ 1,000	中村 (1964)
ヒノキ	193 ~ 294	芝本 (1951)
	233 ~ 452	柴田 (1955)
	970	佐藤 (1958)
	283	東京都水源林 (1973)
アカマツ	633 ~ 1,242	柴田 (1955)
	860	佐藤 (1958)
クロマツ	880 ~ 1,026	門田 (1962)
カラマツ	280	東京都水源林 (1971)

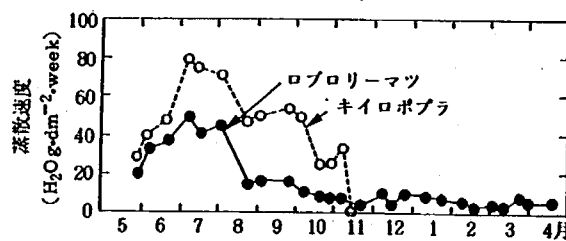


図- 3.6 二種の幼樹木の蒸散速度の季節変化³²⁾

*4) mm: 飽差の単位。飽差とは実際の水蒸気圧と同温における飽和水蒸気圧との差。飽差が大きいほど蒸発の可能性は大きい。

表- 3.2 植物の蒸散量の比較^{33), 34)}

種 名	測定月日	A : 最大蒸散量 (mg H ₂ O dm ⁻² hr ⁻¹ 10 mm ⁻¹)	B : クチクラ蒸散量	A / B	表面発育度 (cm ² g ⁻¹)
ヤ ツ デ	8-17	678	120	5.7	23
ト ベ ラ	8-28	618	48	12.9	32
ゲッケイジュ	9-13	925	60	15.4	43
マ サ キ	8-23	1,050	84	12.5	31
ムクノキ	9-12	858	144	6.0	63
ニワトコ	8-17	1,020	180	5.7	39
ミ ズ キ	6-21	738	240	3.1	54
ク ワ	8-06	1,410	280	5.0	60
カ ヤ	8-27	888	120	7.4	22
クロマツ	7-06	430	7	61.5	—
ヨ シ	9-11	1,150	180	6.4	53
コ ム ギ	3-10	1,405	420	3.4	49
ソラマメ	5-03	1,240	600	2.5	22
ツユクサ	6-14	1,280	360	3.6	52
ミズキンバイ	7-23	1,700	1,200	1.4	69
ベンケイソウ	8-28	690	36	19.20	9

3.2 汚染質吸収の速度 (単位面積あたりの吸収量), 容量, 植物種による比較

(1) 汚染質吸収の速度

植物の汚染質吸収速度は暴露するガスの種類や濃度によって左右されることが知られている。既往の実験結果から、二酸化硫黄ガスと二酸化窒素ガスの吸収速度を処理濃度との関係でプロットしたものが図- 3.7 ~ 3.11 であり、使用したデータを表- 3.5 ~ 3.8 に示している。温度、湿度、光などのほか、暴露時間など測定条件が異なるものを同一の図上に現わしたため、厳密な吸収速度の検討としては問題があるが、多くのデータがあり、これにより植物の一応の吸収速度を知る目安にはなる。なお、グラフ中には光合成速度から推定される SO₂, NO₂ の吸収速度も合わせて示した。

- SO₂, NO₂ を通じて光合成速度の範囲におさまるものが多いが、中にはそれを上まわる速度を示すものがある。
- SO₂ と NO₂ の汚染質間の吸収速度を比較すると、サンプル数が大きく異なるため明確ではないが概ね同程度である。このことは、Hill, A. C. (文献 3), 安保ら³⁵⁾ の報告とも一致している。
- 植物の生活形のちがいと吸収速度の関係には以下の傾向が認められる。

草本植物 > 落葉広葉樹 > 常緑広葉樹 > 針葉樹

- 草本植物はサンプルが少ないが低濃度域、高濃度域ともに速度が速い。
- 落葉広葉樹は全般的に速度が速いが、セイヨイナシ、セイヨウリンゴのような果樹は速度が遅い (SO₂ 0.8 ppm 97h で全て落葉)。
- 常緑広葉樹は光合成速度の範囲内とそれを上まわるところに分散している。

- 針葉樹は大部分が光合成速度の範囲内にあるが、イチョウ、スギなどは低濃度域で速度が速い。
- 低濃度域（0.1 ppm 以下）では実験例は少ないが、木本植物のSO₂吸収速度は光合成速度とほぼ対応している。NO₂の実験例はないので不明である。草本植物については、SO₂、NO₂ともC₄植物であるトウモロコシでは光合成速度からの推定値よりやや低め、アルファルファではやや高めにでている。アルファルファはSO₂に対して最も感受性の高い植物として知られており、NO₂に対してもそれに準ずる性質を有するためと考えられる。

以上を総合すると、植物の汚染質吸収速度は基本的には光合成速度に対応する（ガス濃度に比例する）と考えられる。ただし、植物の種類や汚染ガスの種類などにより若干のちがいが生じる。表-3.3に汚染濃度1 ppmの場合の吸収速度の実験値及び光合成速度からの推定値を参考に示す。

表-3.3 植物の生活型ごとの吸収速度（ガス濃度1 ppmの場合）

ガス	単 位	生 活 型	ガス濃度 ppm	吸 収 速 度*5)	
				実 験 値	光合成速度からの推定値
SO ₂	葉面積あたり mg SO ₂ /dm ² ・h	木 本 植 物	1.0	0.044 ~ 0.208	0.013 ~ 0.088
		草 本 植 物			0.088 ~ 0.353
	葉乾重あたり mg SO ₂ /d w g・h	木 本 植 物	0.8 ~ 0.9	0.003 ~ 0.173	0.011 ~ 0.09 0.012 ~ 0.1
		草 本 植 物			0.132 ~ 0.617
NO ₂	葉面積あたり mg NO ₂ /dm ² ・h	木 本 植 物	1.0	0.004 ~ 0.16	0.01 ~ 0.063
		草 本 植 物	1.0	0.025 ~ 0.217	0.063 ~ 0.253
	葉乾重あたり mg NO ₂ /d w g・h	木 本 植 物	1.0	0.009 ~ 0.036	0.01 ~ 0.079
		草 本 植 物	1.0	0.241	0.095 ~ 0.444

*5) 実験値については図-3.7 ~ 3.10より読み取った値を、光合成速度からの推定値については、表-3.4の光合成速度（CO₂吸収速度）からCO₂吸収速度とガス吸収速度が等しいと仮定し、濃度比を用いて換算した値を使用した。なお、図-3.7 ~ 3.11の各図の右側に示した光合成速度から推定されるSO₂、NO₂吸収速度の範囲も同様の手法で求めた。

表-3.4 各種陸上植物の光合成能力^{*)}

	光 合 成 速 度	
	mg CO ₂ ・葉面積 dm ⁻² ・時 ⁻¹	mg CO ₂ ・葉乾重 g ⁻¹ ・時 ⁻¹
草本植物		
C ₄ 植物 ^{*)}	50～80	60～140
農作物	20～40	30～60
陽生植物	20～50	30～80
陰生植物	4～20	10～30
砂ばく植物	4～12	2～8
多肉植物		
CAM植物(光)	3～20	0.3～2
(暗固定)	10～15	1～1.5
木本植物		
落葉広葉樹 陽 葉	10～20	15～25
陰 葉	5～10	
常緑広葉樹 陽 葉	8～20	10～25
陰 葉	3～6	
硬 葉 樹	5～15	3～10
常緑針葉樹	4～15	3～18

*6) C₄植物：光合成の生化学的過程がC₄ジカルボン酸サイクルの反応系によって行われている植物。暖地型のイネ科の牧草，熱帯原産の特定の植物でこれまでに数百種が確認されている。C₄植物は他の植物（C₃植物）に比べて光合成能力が高い。

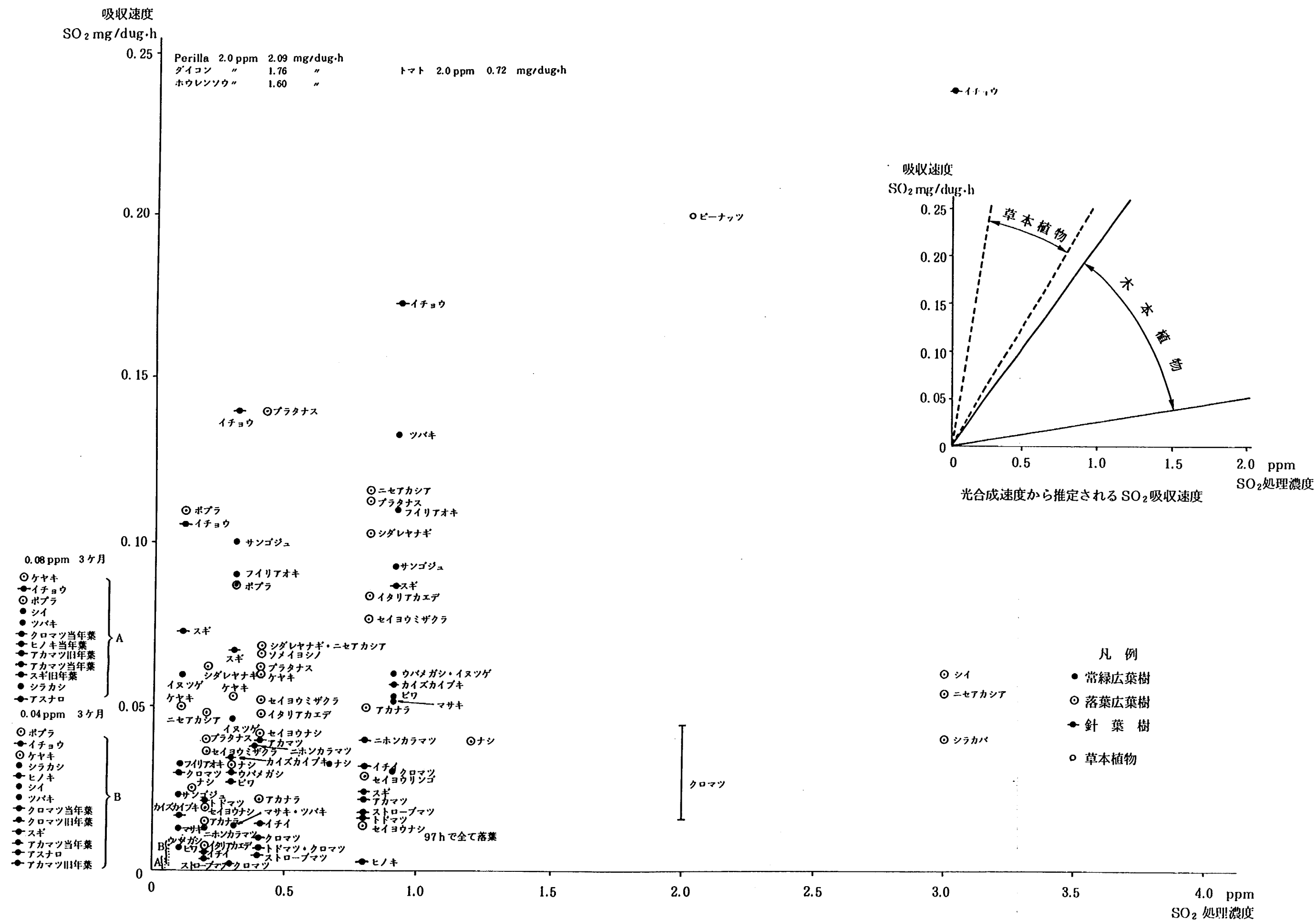


図-3.8 SO₂ 吸収速度 その2 葉乾重あたり

吸収速度
NO₂mg/dm²・h

0.8

0.7

0.6

0.5

0.4

0.3

0.2

0.1

0

0

0.5

1.0

1.5

2.0

2.5

3.0

3.5

4.0 ppm

NO₂ 処理濃度

○ アルファルファ

○ ホウレンソウ

○ サクラ

○ アサガオ

○ トウカエデ

○ ヒマワリ・トウモロコシ

○ プラタナス

○ キュウチクトウ

吸収速度
NO₂ mg/dm²・h

0.8

0.7

0.6

0.5

0.4

0.3

0.2

0.1

0

0

0.5

1.0

1.5

2.0 ppm

光合成速度から推定される NO₂ 吸収速度 NO₂ 処理濃度

Bush-Bean

凡 例

● 常緑広葉樹

○ 落葉広葉樹

● 針 葉 樹

○ 草本植物

図- 3.9 NO₂ 吸収速度 その1 葉面積あたり

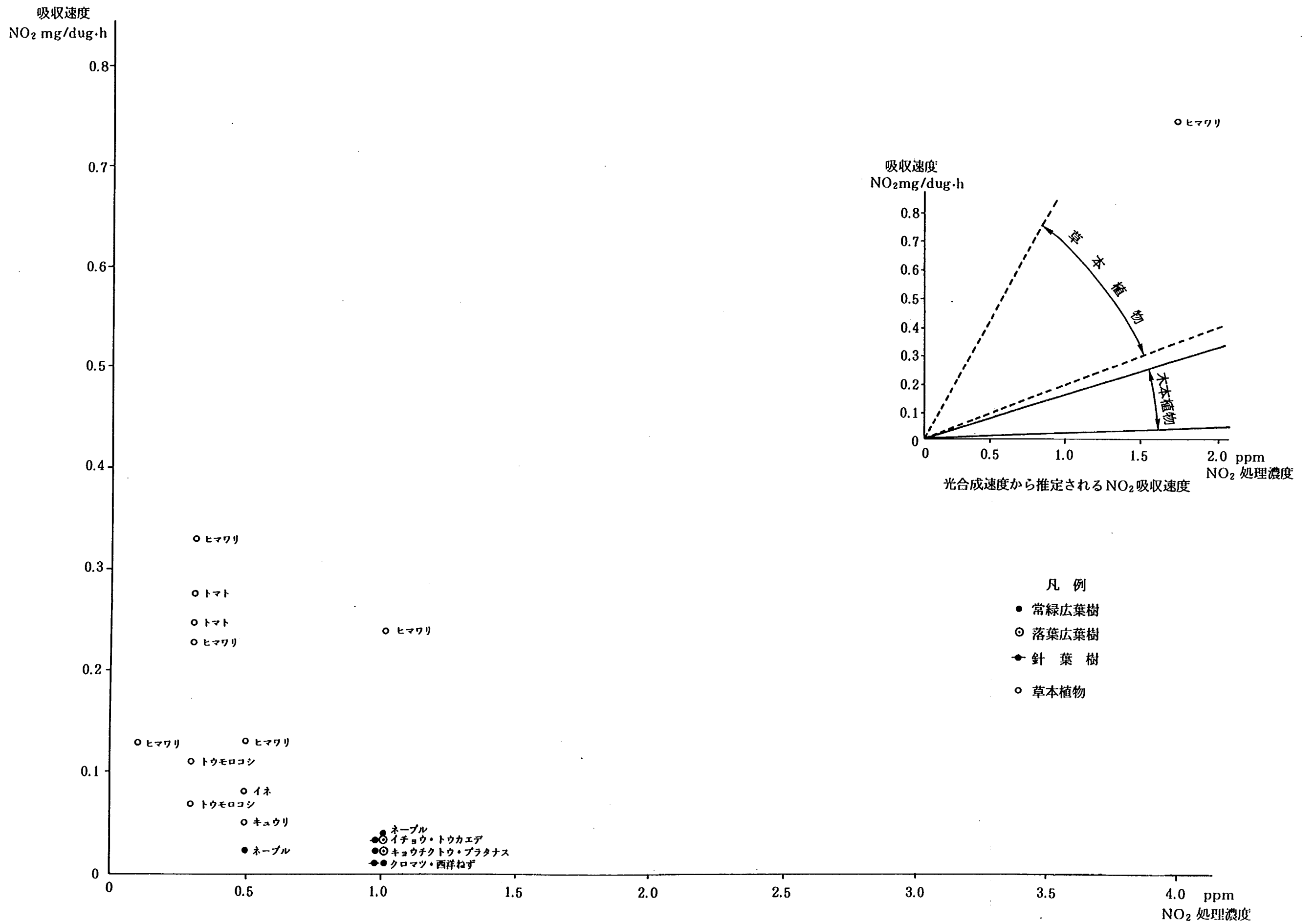


図-- 3.10 NO₂ 吸収速度 その2 葉乾重あたり

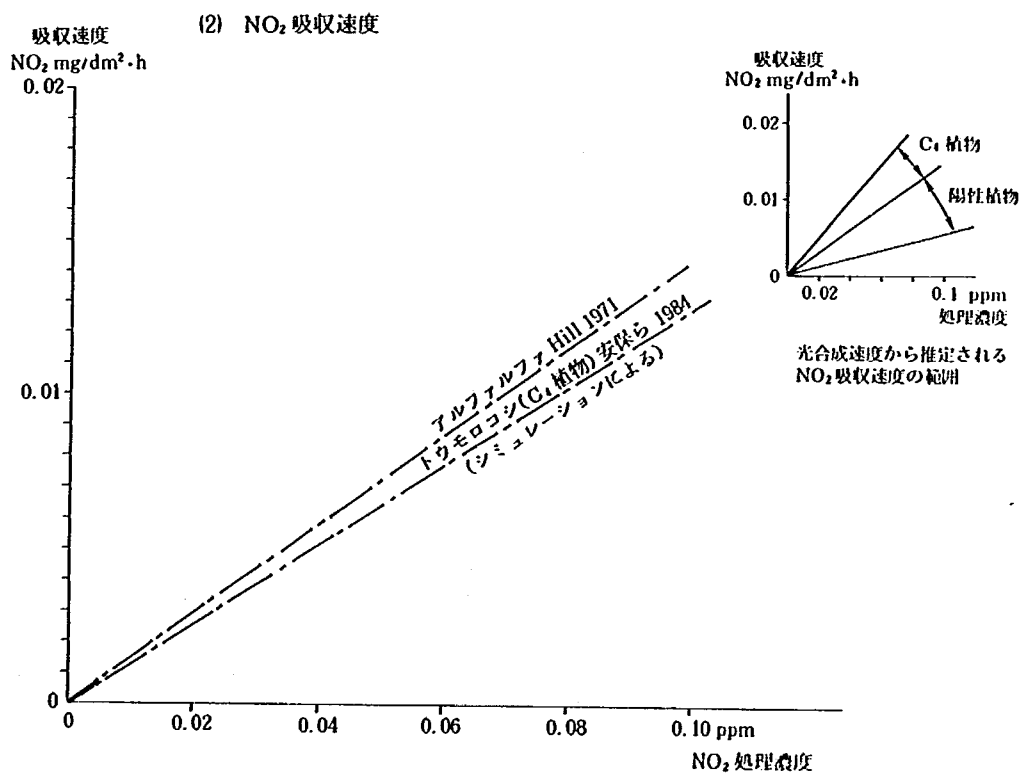
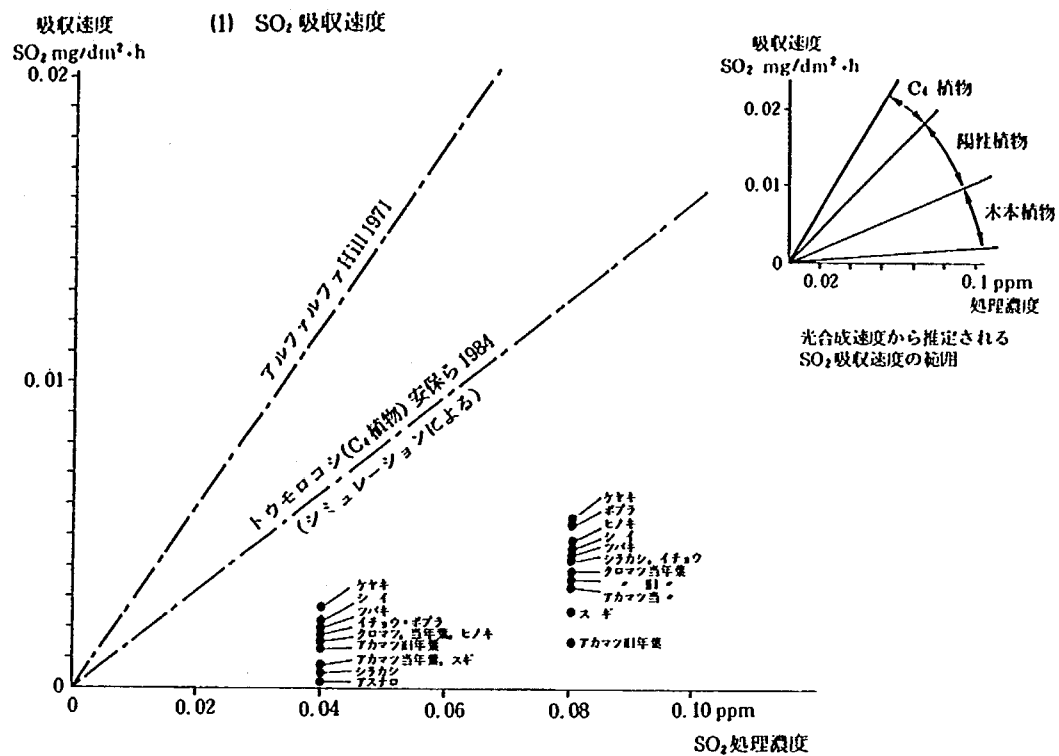


図- 3.11 低濃度域での SO_2 , NO_2 吸収速度の例 (文献 16)

表-3.5 SO₂ 吸収速度 (1) 葉面積あたり

分類	植 物	測 定 条 件	吸 収 速 度		文 献	
			測 定 値	換算値mg SO ₂ ⁽⁶⁾ /dm ² ・h		
木 本 植 物	カ エ デ シ ラ カ バ Sweetgum Fierthorn イ ボ タ ノ キ シ ヤ ク ナ ゲ ト ネ リ コ ア ザ レ ア	① 1 ppm ② 1 h ③ 27 °C ④ 1300 ft - C	0.088mg SO ₂ /dm ² ・h 0.086 " 0.074 " 0.072 " 0.068 " 0.056 " 0.046 " 0.044 "	0.088 0.086 0.074 0.072 0.068 0.056 0.046 0.044	Roberts 1974 (文献6)	
	Diplacus aurantiacus (かん木)	① 0.96 ppm ② 1 h ③ 20 ± 1 °C ④ 1000 uEm ⁻² ・S ⁻¹	0.183 mgSO ₂ /dm ² ・h	0.183	Winner ら 1980 (文献18)	
		① 0.96 ppm ② 4 h ③ 20 ± 1 °C ④ 1000 uEm ⁻² ・S ⁻¹	0.208 "	0.208		
		① 0.96 ppm ② 3 h ③ 20 ± 1 °C ④ 1000 uEm ⁻² ・S ⁻¹	0.139 "	0.139		
		① 1.71 ppm ② 1 h ③ 20 ± 1 °C ④ 1000 uEm ⁻² ・S ⁻¹	0.248 "	0.248		
		① 1.71 ppm ② 4 h ③ 20 ± 1 °C ④	0.230 "	0.230		
		① 1.71 ppm ② 8 h ③ 20 ± 1 °C ④ 1000 uEm ⁻² ・S ⁻¹	0.169 "	0.169		
	草 木 植 物	アルファルファ	① 0.05 ppm ② 1 ~ 2 h ③ 74 ~ 76 °F ④ 40 ~ 45 Klux	85 μℓ SO ₂ /m ² ・min (キャノピー)	0.015 (LAI = 9.5 の場合)	Hill 1971 (文献3)

① 濃度 ② 暴露時間 ③ 温度 ④ 照度 空欄は不明

*6) 測定値をもとに単位を統一した。

表- 3.6 SO₂ 吸収速度 (2) 葉乾重あたり

分類	植 物	測 定 条 件	吸 収 速 度		文 献
			測 定 値	換算値 ^{*6)} mgSO ₂ /dwg·h	
木 本 植 物	ク ロ マ ツ	① 0.2 ppm ② 7日~14日 ③ (12h/日の場合) ④	mgS/dwg·day 0.036 ~ 0.043	0.006 ~ 0.0072	門田 1968 (文献1)
		① 0.4 ppm ② 7日~14日 ③ (12h/日の場合) ④	0.064 "	0.008	
		① 2.0 ppm ② 7日~14日 ③ (12h/日の場合) ④	0.10 ~ 0.27 "	0.0166 ~ 0.045	
	ケ ヤ キ ソ メ イ ヨ シ ノ ア カ マ ツ プ ラ タ ナ ス	① 0.4 ppm ② ③ ④	0.03mgS/dwg·h 0.033 " 0.02 " 0.07 "	0.06 0.066 0.04 0.14	井上 1971 (文献4)
		① 0.8 ppm ② ③ ④	0.011 " 0.012 " 0.0015 "	0.022 0.024 0.003	
		① 3.0 ppm ② ③ ④	0.12 " 0.02 " 0.03 " 0.27 "	0.24 0.04 0.06 0.54	
		① 0.2 ppm ② 145h (6h/日) ③ ④	0.45 S%/dwg·145h 0.35 " 0.29 " 0.26 "	0.062 0.048 0.040 0.036	高安ら 1971 (文献5)
	シ ダ レ ヤ ナ ギ ニ セ ア カ シ ア プ ラ タ ナ ス セ イ ヨ ウ ミ ザ ク ラ イ タ リ ア カ エ デ セ イ ヨ ウ ナ シ ア カ ナ ラ ニ ホ ン カ ラ マ ツ イ チ イ ス ト ロ ー プ マ ツ ト ド マ ツ シ ダ レ ヤ ナ ギ ニ セ ア カ シ ア プ ラ タ ナ ス セ イ ヨ ウ ミ ザ ク ラ イ タ リ ア カ エ デ セ イ ヨ ウ ナ シ ア カ ナ ラ ニ ホ ン カ ラ マ ツ イ チ イ ス ト ロ ー プ マ ツ ト ド マ ツ	① 0.4 ppm ② 145h (6h/日) ③ ④	0.49 " 0.50 " 0.44 " 0.38 "	0.068 0.069 0.061 0.052	
			0.35 " 0.35 " 0.30 " 0.16 " 0.28 " 0.10 " 0.03 " 0.05 "	0.007 0.019 0.015 0.014 0.006 0.004 0.021 0.007	

分類	植 物	測 定 条 件	吸 収 速 度		文 献
			測 定 値	換算値 $\text{mgSO}_2/\text{dwg}\cdot\text{h}$ ^(*)6)	
木 本 植 物	ナ シ (2年生苗)	① 0.15 ppm ② 200h ③ 平年気温(6~9月) ④ 自然光	1.2 mgS/dw 100g·h	0.024	松岡ら 1978 (文献 13)
		① 0.3 ppm ② 100h ③ 平年気温(6~9月) ④ 自然光	1.6 "	0.032	
		① 0.6 ppm ② 50h ③ 平年気温(6~9月) ④ 自然光	1.7 "	0.034	
		① 1.2 ppm ② 25h ③ 平年気温(6~9月) ④ 自然光	2.0 "	0.040	
	アカマツ当年葉	① 0.04 ppm	0.03 S%/d·w	0.00056	青木ら 1979 (文献 16)
	" 旧年葉	② 1080h (12h/日の場合)	0.05 "	0.00096	
	クロマツ当年葉	③ 外気より4~6℃高 い(6~9月温室内)	0.06 "	0.00111	
	" 旧年葉	④ 自然光	—	—	
	ヒノキ当年葉		0.06 "	0.00111	
	スギ旧年葉		0.03 "	0.00056	
	ケヤキ		0.21 "	0.00389	
	ツバキ		0.07 "	0.00130	
	シイ		0.09 "	0.00167	
	シラカシ		0.03 "	0.00056	
	イチョウ		0.19 "	0.00352	
	ボブラ		0.18 "	0.00333	
	アスナロ		0.01 "	0.00019	
	アカマツ当年葉	① 0.08 ppm	0.13 "	0.00241	
	" 旧年葉	② 1080h	0.06 "	0.00111	
	クロマツ当年葉	(12h/日の場合)	0.15 "	0.00278	
	" 旧年葉	③ 外気より4~6℃高 い(6~9月温室内)	0.14 "	0.00259	
	ヒノキ当年葉	④ 自然光	0.19 "	0.00352	
	スギ旧年葉		0.14 "	0.00259	
	ケヤキ		0.45 "	0.00833	
	ツバキ		0.16 "	0.00296	
	シイ		0.19 "	0.00352	
	シラカシ		0.21 "	0.00389	
	イチョウ		0.48 "	0.00889	
	ボブラ		0.59 "	0.01093	
	アスナロ		0.10 "	0.00185	
草 本 植 物	ピーナツ	① 2 ppm	0.30 mgS/dwg·3h	0.2	近藤 1978 (文献 15)
	トマト	② 3h	1.08 "	0.72	
	ダイコン	③ 25℃	2.56 "	1.76	
	Perilla	④ 自然光	3.14 "	2.09	
	ハウレンソウ		2.41 "	1.60	

表-3.7 NO₂ 吸収速度 (1) 葉面積あたり

分類	植 物	測 定 条 件	吸 収 速 度		文 献
			測 定 値	換算値 ^{*6)} mgNO ₂ /dm ² ・h	
木 本 植 物	サ ク ラ	① 1.0 ppm	0.9mgNO ₂ /dm ² ・day	0.16	米山 1978 (文献11)
	ト ウ カ エ デ	② 360h (12h/日の場合)	0.6 "	0.05	
	プ ラ タ ナ ス	③ 25℃	0.2 "	0.017	
	キ ョ ウ チ ク ト ウ	④ 自然光	0.05 "	0.004	
草 本 植 物	アルファルファ	① 0.05 ppm	57 uℓNO ₂ /m ² ・min (キャノピー)	0.117 (LAI=9.5の場合)	Hill 1971 (文献3)
		② 1~2 h			
		③ 74~76°F			
		④ 40~45 K lux			
	Bush Bean	① 3.0 ppm	280~326 ug/dm ² ・h	0.28~0.326	Sirvastova 1975 (文献7)
		②			
	ヒ マ ワ リ ホ ウ レ ン ソ ウ ト ウ モ ロ コ シ ア サ ガ オ	③ 25℃	0.3mgNO ₂ /dm ² ・day	0.025	戸塚 1978 (文献10)
		④ 2×10 ⁵ erg・cm ⁻² ・S ⁻¹			
		① 1.0 ppm			
		② 196h			
		③ 25℃			
		④ 30~35 K lux			

表- 3.8 NO₂ 吸収速度 (2) 葉乾重あたり

分類	植 物	測 定 条 件	吸 収 速 度		文 献
			測 定 値	換算値 ^{*6)} mgNO ₂ /dwg·h	
木 本	キョウチクトウ イ チ ョ ウ 西 洋 ネ ズ ク ロ マ ツ プ ラ タ ナ ス ト ウ カ エ デ	① 1.0 ppm ② 196h ③ 25℃ ④ 30~35K lux	0.29 N%/d w 0.38 " 0.10 " 0.12 " 0.29 " 0.38 "	0.026 0.035 0.009 0.011 0.026 0.035	米山ら 1978 (文献 11)
	ネ ー ブ ル	① 0.5 ppm ② 432h (12h/日の場合) ③ ④ 自然光 ① 1.0 ppm ② 432h (12h/日の場合) ③ ④ 自然光	0.32 " 0.42 "	0.023 0.036	Thompson 1970 (文献 2)
草 本 植 物	ト マ ト ヒ マ ワ リ ト ウ モ ロ コ シ	① 0.3 ppm ② 168h (12h/日の場合) ③ 25℃ ④ 自然光	0.90 mgN/dwg·day 0.83 " 0.25 "	0.246 0.227 0.068	米山ら 1978 (文献 12)
	キ ュ ウ リ イ ネ	① 0.5 ppm ② 72h (12h/日の場合) ③ 25℃ ④ 自然光	0.11 N%/d w 0.17 "	0.050 0.078	山添ら 1978 (文献 14)
	ヒ マ ワ リ	① 0.1 ppm ② 336h (14h/日) ③ 25℃ ④ 30~35K lux	1.34 "	0.131	戸塚ら 1978 (文献 9)
		① 0.5 ppm ② 336h (14h/日) ③ 25℃ ④ 30~35K lux	1.35 "	0.132	
		① 1.0 ppm ② 336h (14h/日) ③ 25℃ ④ 30~35K lux	2.46 "	0.241	
		① 4.0 ppm ② 48h ③ 25℃ ④ 30~35K lux	1.10 "	0.753	
		① 8.0 ppm ② 48h ③ 25℃ ④ 30~35K lux	2.02 "	1.383	
		① 0.3 ppm ② 168h (12h/日の場合) ③ 25℃ ④ 自然光	1.0 mgN/dwg·day 1.2 " 0.4 "	0.274 0.329 0.110	松丸ら 1979 (文献 17)

(2) 汚染質吸収の容量

汚染ガスに暴露された植物は、汚染質を吸収し、体内にはこれらの物質が蓄積されてゆく。蓄積量は、汚染ガスの暴露量（dose = 暴露日数×濃度）の増加とともに増えるが、やがては植物に生理障害をもたらし、限界に達すると考えられる。以下に既存のデータから植物の汚染質吸収の容量を検討する。

① 室内実験による容量（ヒマワリ葉）

葉中硫黄および窒素の増加量と SO_2 、 NO_2 ドースとの関係は、図-3.12、3.13 に示されている。両者ともドースが低いところではガス吸収速度はほぼ直線的に増加するが、ドースが高くなると飽和状態の傾向となる。

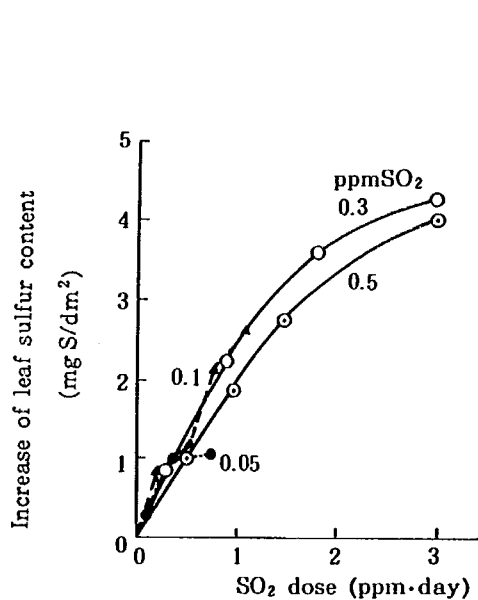


図-3.12 二酸化イオウ暴露によるヒマワリ葉のイオウ含有量の変化

暴露処理時間：0.05, 0.1, 0.3, 0.5 ppm SO_2 、14/10時間の明(30klux) / 暗期、気温25℃、湿度75%、横軸は SO_2 ドース（濃度×暴露日数）を示す。(文献9)

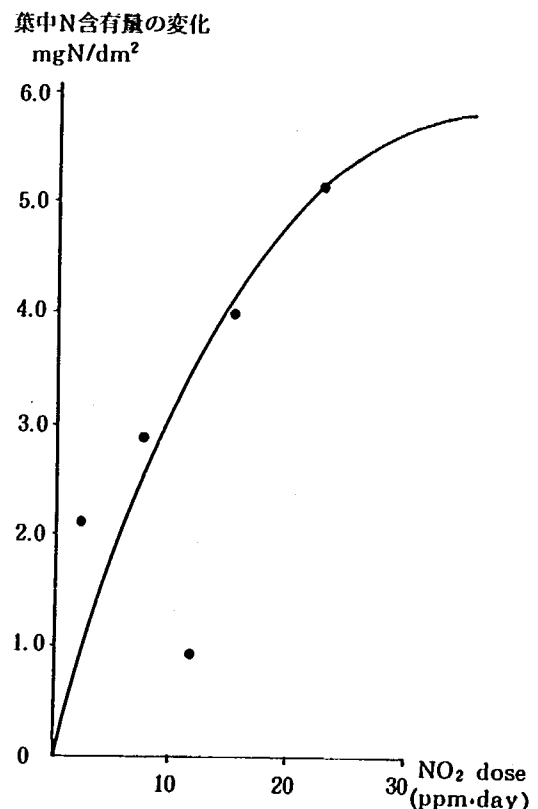


図-3.13 二酸化窒素暴露によるヒマワリ葉の窒素含有量の変化

暴露処理時間 0.1, 0.5, 1.0 ppm で24日間、4, 8 ppm で2日間
(文献9より作成)

SO_2 の場合で3ドースのとき葉中S含量は約4mg/dm²、 NO_2 の場合で30ドースのとき葉中N含量は約6mg/dm²で頭うちに近づいている。表-3.9にこのS、Nの値を SO_2 、 NO_2 の重量、体積に換算したものを参考に示す。葉中のS、Nについては代謝、転流があることが知られており(文献24)、実際の汚染ガスの吸収の容量はこの値以上であると考えられる。

表- 3.9 葉中の飽和に近いS, N含量からのSO₂, NO₂への換算

	葉中含量	吸収ガスの量	吸収ガスの体積 (0℃, 1atm)	汚染ガス濃度0.04 ppmとしたときの 汚染大気の体積(0℃, 1atm)
硫 黄	4mgS/dm ²	8mg SO ₂ /dm ²	2.8ml SO ₂ /dm ²	70m ³ /dm ²
窒 素	6mgN/dm ²	19.71mgNO ₂ /dm ²	9.6ml NO ₂ /dm ²	240m ³ /dm ²

② 野外での実測値より

野外でのSO₂濃度の高い地帯と比較的清浄な地帯における樹木の葉中硫黄含有量の測定例を図- 3.14に示す。SO₂濃度の高い地帯の樹葉は、Sによる障害が発生し、正常値の3.0～11.3倍のSを含有している。被害がみられる樹木のS含有量は、イチョウの7.3mg S/dm²からクロマツの2.3 mg S/dm²までその差がかなり大きい。最大限度として、この程度吸収していることになる。

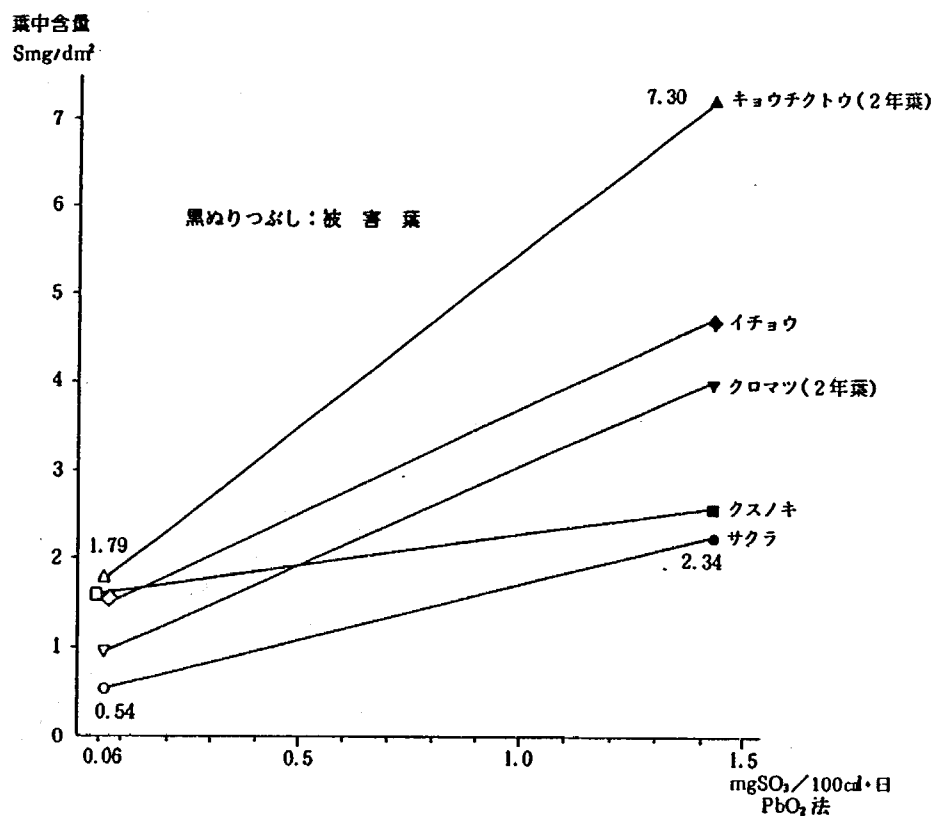


図- 3.14 野外での葉中硫黄含有量
(文献21より作成)

3.3 吸収作用を支配する植物側の要因及び環境条件との関係

植物による大気汚染ガスの吸収の速度を支配する要因は表- 3.10のように考えられている。これによれば、植物側の汚染ガス吸収を支配する要因には、①気孔底界面でのガス濃度、②気孔開度（気孔抵抗）

③外部拡散（葉の周辺の空気層から表皮までのガス拡散抵抗，葉面の毛状体による影響が含まれる。）がある。外界の環境条件にはガス濃度，暴露時間，照度，湿度，植物の栄養条件があり，これらは気孔開度を支配する。また，風速は外部拡散に影響を与える。以下に各項目について概要を述べる。

表- 3.10 植物葉による大気汚染ガス吸収を支配する植物側の要因及びその要因を左右する環境条件との関係 (文献20)

植物葉による大気汚染ガス吸収を支配する植物側の要因	汚染ガス吸収速度に影響を与える環境条件
・気孔底界面でのガス濃度 ・気孔開度（気孔抵抗） ・外部拡散	・汚染ガス濃度 ・汚染ガス暴露時間 ・照度 ・湿度 ・植物の栄養条件 ・風速

矢印は植物葉による汚染ガス吸収速度に影響を与える環境条件が大気汚染ガス吸収を支配する植物側の要因に影響することを示す。

(1) 気孔底界面でのガス濃度

大気から気孔底に到達した汚染ガスは，気孔底から植物体内に吸収される。このとき植物体内では汚染質の代謝や転流が起きるため，連続して汚染ガスを吸収することができる。したがって，気孔底界面におけるガス濃度が低く，外部のガス濃度との差が大きいほどガス吸収速度ははやい。この関係は，図- 3.15のように示されている。この気孔底界面でのガス濃度はガスの種類によって異なり（表- 3.11）， SO_2 ， NO_2 ， O_3 などに関しては被害発現に至るまで植物体内での代謝，転流等の生理機能が十分大きく， NO などでは小さいことが知られている。²⁹⁾

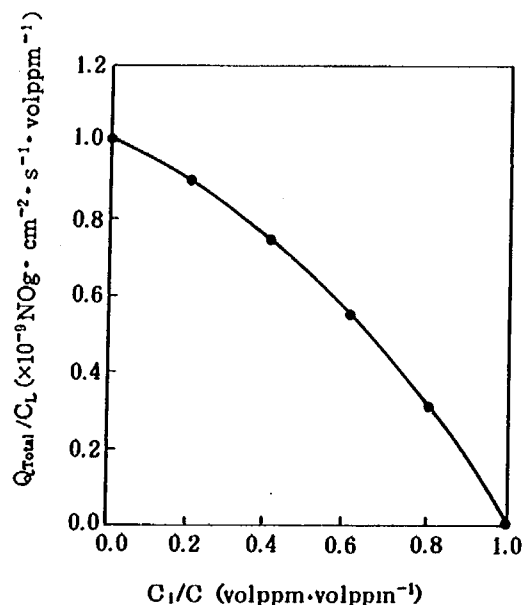


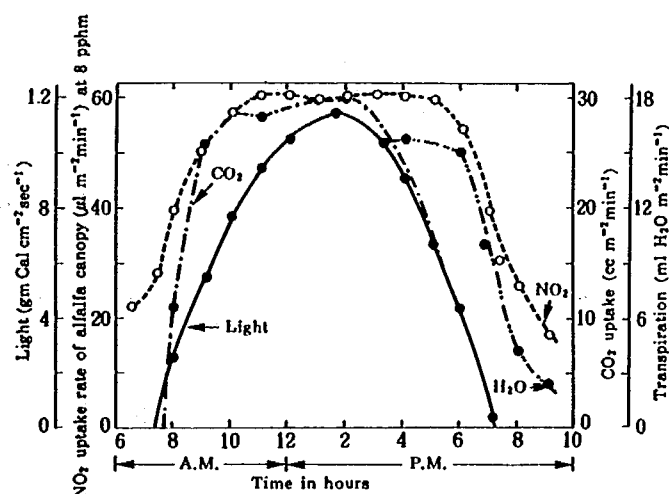
図- 3.15 気孔底界面におけるガス濃度 C_i と群落のガス吸収速度 Q_{total}/C_L の関係³⁵⁾

表-3.11 種々の汚染ガス j の分子量 M , 分子拡散係数の相対値 $k^j (= D^j/D^{H_2O})$, 気孔底界面におけるガス濃度 C_i と葉面積境界層の外側のガス濃度 C との比 C_i/C ³⁵⁾

ガス (j)	M	k^j (D^j/D^{H_2O})	C_i/C
H ₂ O	18	1.000	—
HF	20	0.949	0
CO	28	0.802	0.9 以上
NO	30	0.775	0.9 以上
NO ₂	46	0.625	0
O ₃	48	0.612	0
SO ₂	64	0.530	0
Cl ₂	71	0.504	0
PAN	121	0.294	0

(2) 気孔開度 (気孔抵抗)

気孔開度は植物のガス交換速度を規定する最も重要な要因である。気孔開度に対応して光合成, 呼吸, 蒸散などのガス交換が行われるが, 汚染ガスの吸収も基本的には同じ現象である (図-3.16)。



Diurnal variation in the uptake rate of NO₂ by an oat canopy in sunlight. CO₂ uptake, transpiration, and light intensity are also plotted.

図-3.16 オート麦のCO₂, NO₂吸収量と蒸散量の日変化 (文献3)

気孔の開閉運動 (図-3.17) はあまりにも多様な変化を示すためにこれまでに多くの仮説が提案されたが, いずれも開閉現象の一部を説明しうるにすぎず, 現在でもそのメカニズムの解明は完全ではない。これまでに報告された結果によれば, 直接には孔辺細胞における膨圧変化が開閉運動において

重要な役割を演じているようである。この開閉運動をひき起こす主な条件としては、通常の照度、温度、湿度および植物の栄養条件などのほかに、汚染ガス吸収との関係ではガスの濃度、暴露時間が影響する。

これらの条件と気孔の開閉との関係は、基本的には、表-3.12に示すように考えられる。また図-3.18に汚染ガス濃度、暴露時間、照度、温度のガス吸収速度または気孔開度に与える影響について示す。

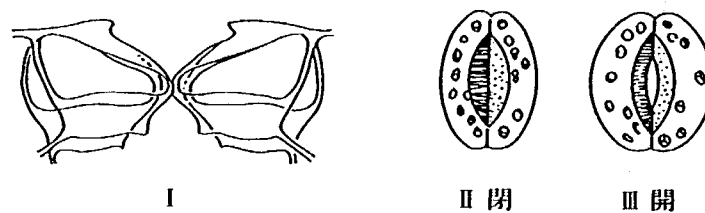


図-3.17 気孔の開閉³⁷⁾

表-3.12 気孔の開閉と条件

	開	閉
汚染ガス濃度	低 ←————→ 高	
汚染ガス暴露時間	短 ←————→ 長	
照 度	明 ←————→ 暗	
温 度	高 ←————→ 低	
湿 度	湿 ←————→ 乾	
植物の栄養条件	良 ←————→ 悪	

(3) 外部拡散

葉の周辺の空気層から表皮にいたるまでのガス拡散抵抗は、風速及び葉の形態により決定される要因である。

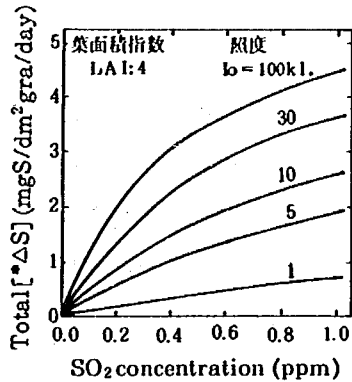
植物側の条件としては、葉面あるいは葉面上の毛状体などの形態、植物個体の形態、さらに群落の形態などが影響を与える。

葉面にある毛状体の密度が高く、しかも長くなれば外部拡散抵抗が大きくなり、ガス吸収速度は小さくなるだろうと推論されている(文献20)が、その他の植物の形態との関係は明らかではない。

風速の影響は、風速が増せば葉の周辺の空気が表皮に到達しやすくなり、汚染ガス吸収速度をはやめる。しかし風が強くなりすぎると葉面からの蒸散を抑制するため気孔が閉じる。そのために汚染ガスの吸収も低下すると推察される。

① 汚染ガス濃度

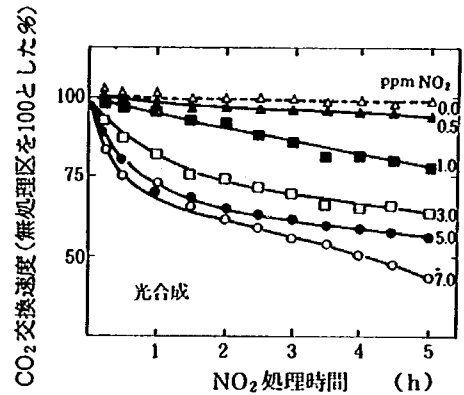
汚染ガス (SO_2) 濃度の増加にともないS吸収速度は増大する。低濃度域ではその関係は直線的であるが、高濃度になるにしたがい吸収速度の増加率は低減する。



ヒマワリ個体群による SO_2 -S 吸収速度と SO_2 濃度³⁸⁾

② 汚染ガス暴露時間

汚染ガス (NO_2) 暴露時間の経過とともに光合成速度は低減する。高濃度の場合にこの傾向は大きく、低濃度の場合の低減はわずかなのである。汚染ガスの吸収は光合成速度に比例するので、これと同様の現象と推察される。

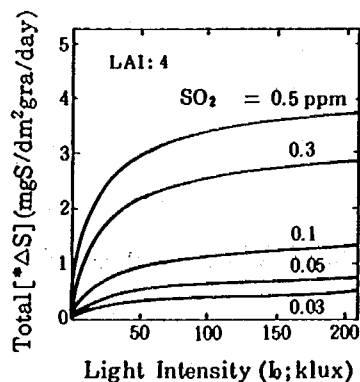


インゲンマメの光合成に及ぼす NO_2 の影響 (文献 7)

③ 照度

照度の増加にともないS吸収速度は増大する。その関係は低照度域では直線であるが、 $I_0 = 40 \text{ klux}$ 程度で飽和すると推察される。

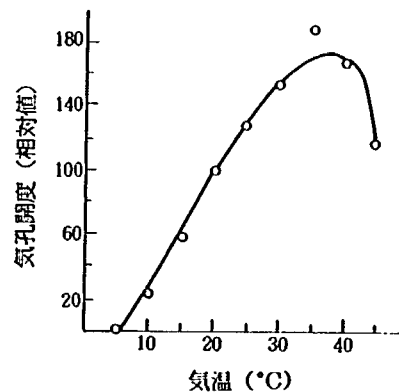
光飽和点は種間差異があり、樹木で20~50 klux程度、草本ではそれより高い。



ヒマワリ個体群による SO_2 -S 吸収速度と個体群上照度³⁸⁾

④ 温度

5~35℃前後までは気温と気孔開度は比例するが、それ以上の気温では飽和しさらに気温が上昇すると気孔は閉じる。汚染ガスの吸収もこの影響を受けると推察される。



気温と気孔開度 (20℃の値に対する%)³⁹⁾
ソラマメの葉, 20 klx, 標準空気中

図-3.18 環境条件の影響

3.4 吸収作用と植物被害との関係

(1) 汚染ガス投与量と植物被害

汚染ガス接触による植物の被害発現は、汚染ガスの投与量（ドース＝ガス濃度×暴露時間）に左右される。しかし、ドースが一定であっても、植物に発現する障害は汚染ガスの濃度によって大きく異なる。

また、生命体である植物に関しては、自身の生理条件や環境条件、植物の種類などによって有害物に対する感受性に大きなひらきがある。

Vogl, M.⁴⁰⁾は、接触時間と空气中SO₂濃度との組み合わせの変化で植物体に生ずる障害の程度を、これまでに報告されたデータをもとに模式図にあらわしている。図-3.19のラインaと座標軸に囲まれた条件下ではなんらの障害も受けないが、それ以外の条件下では外見上には障害が見られないうが、生理的機能の低下という不可視的障害から植物個体の枯死をもたらす可視的障害まで数段階に分けられる障害を受ける。⁴¹⁾

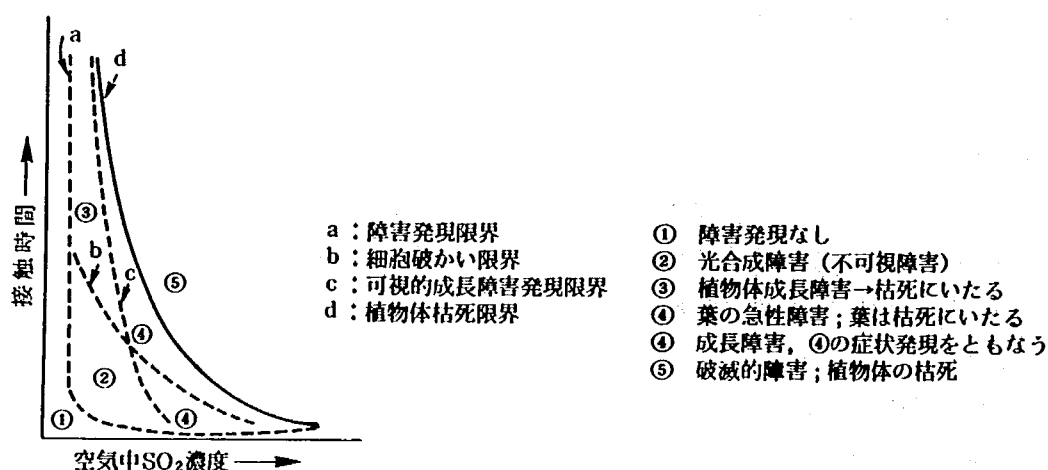


図-3.19 空气中SO₂濃度，接触時間と障害発現との関係⁴⁰⁾

このように障害発現には、ある一定濃度以上の汚染質が、ある一定時間継続する必要がある。処理時間が短ければ障害が発現する汚染質の濃度は必然的に高くなる。障害の発現は汚染質の濃度がある一定濃度以下になると識別できなくなる。このときの汚染質の濃度を閾値として表示すると、汚染質の濃度と処理時間の間にはつぎの関係が成り立つ。

$$(X - X_1) t = k \dots\dots\dots (4)$$

この式において、Xは汚染質の濃度、X₁は閾値、tは障害が発現するのに要する時間、kは定数で閾値のドースを表している。この式は、可視障害ばかりでなく不可視障害にも適用できる。ただし、不可視障害の場合に閾値を求めることは非常に困難で閾値は0と考えられている。⁴²⁾

以下に SO_2 と NO_2 についてガス濃度、暴露時間と植物被害の関係について述べる。

① 二酸化硫黄

SO_2 の被害が発生する濃度と暴露時間は以下のようである。

a 植物発育への障害 (図-3.20)

障害をもたらす限界ドースは低濃度域では $3 \sim 4 \text{ ppm} \cdot \text{day}$ であり、高濃度になるにしたがい小さい値となる。

ガス濃度	暴露時間	dose (ppm·day)
0.01 ppm	1 年間	3.7
0.1	1 ヶ月	3.0
0.2	4 日間	0.8
0.5	8 時間	0.15

b 光合成への影響 (図-3.21)

5 ppm 以上になると短時間のうちに光合成速度に著しい影響を与え、0.5 ppm でも若干光合成速度が低下する。

c 低濃度での生育への影響 (図-3.22)

低濃度の SO_2 (0.04 ppm) の場合、 SO_2 単独ガスではほとんど生育に影響を与えない。ただし、 SO_2 と O_3 の混合ガスでは生育障害が生じる。

以上より、 SO_2 により植物が著しい被害を受けない限界のドースは $3 \sim 4 \text{ ppm} \cdot \text{day}$ 程度であり、この場合、ガス濃度を 0.05 ppm とすると 60～80 日に相当する。

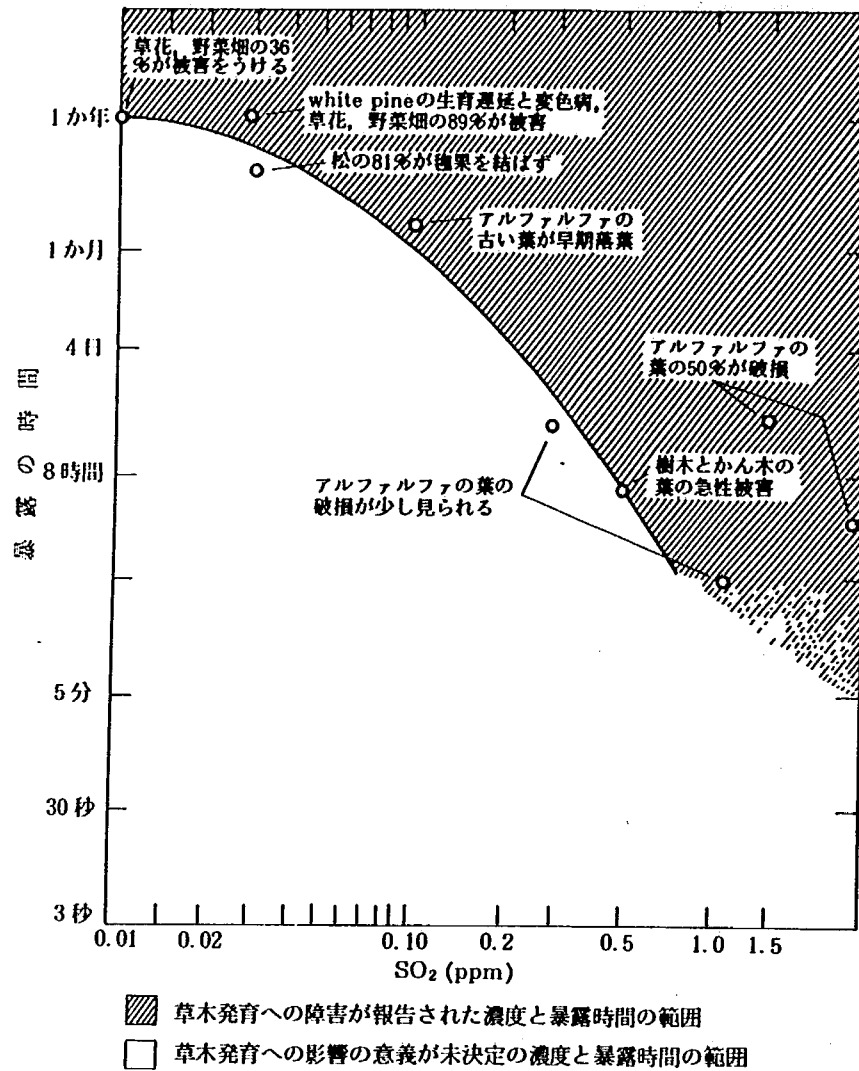


図- 3.20 草木への二酸化硫黄の影響の出現⁴³⁾

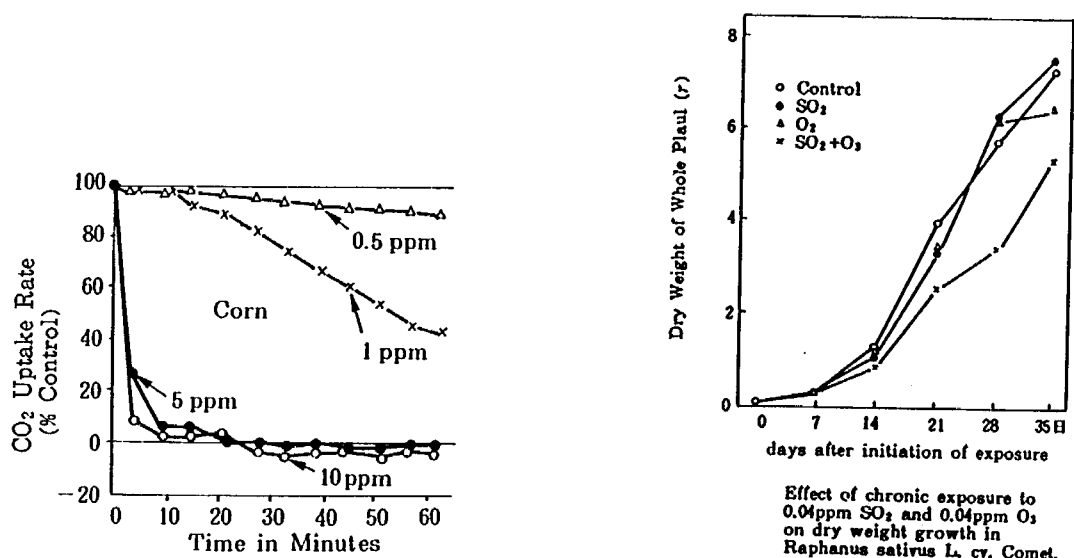


図- 3.21 SO_2 暴露による光合成への影響 (文献 23)

図- 3.22 低濃度ガス暴露による生長への影響⁴⁴⁾

② 二酸化窒素

窒素酸化物による急性障害は、主要な大気汚染質のなかでは弱く、また不可視障害への影響も少ない。現在の汚染状況では野外で煙斑を発現することはほとんどない。

＜NO₂ と SO₂ の比較＞ 同一程度の障害をきたす濃度比¹⁸⁾

	SO ₂ : NO ₂
アルファルファ	1 : 1.5
レタス, ニンジン	1 : 2
タバコ, バラ, グラジオラス	1 : 2.5
タマネギ, ドイツトウモロコシ	1 : 3
ダリア	1 : 3.5
ライラック, イチョウ	1 : 4
カシ	1 : 5

a 急性障害の発現

被害（急性障害）を及ぼす限界のガス濃度と暴露時間は以下のようである。¹⁸⁾

	ガス濃度	暴露時間	dose (ppm・day)
最も弱い種類	15 ppm	30 分	0.3
	2-5	数時間	
アルファルファ	2	1 "	0.08
抵抗性植物	50 ppm	4 "	8.3
(カンキツ類) 50%落葉	100	1 "	4.2

b 各種障害の発生 (図-3.23)

	ガス濃度	暴露時間	dose (ppm・day)
枯死	200	0.1 日	20
葉障害	1	1	1
代謝及び生育影響	0.3	1	0.3

c 光合成への影響 (図-3.24)

0.5～5 ppmの濃度、60分以内の暴露では光合成にほとんど影響がない。

d 低濃度での生育への影響 (表-3.13)

0.1～0.5 ppmの20時間～22時間暴露では何らかの生長障害が認められる。

以上より、NO₂により植物が著しい被害を受けない限界のdoseは2.4～10ppm・day程度であり、この場合、ガス濃度を0.5 ppmとすると48～200日に相当する。

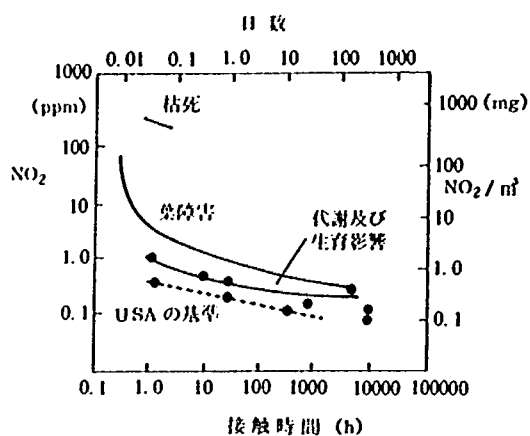


図-3.23 植物影響に対するNO₂の濃度と接触時間の関係⁴⁵⁾

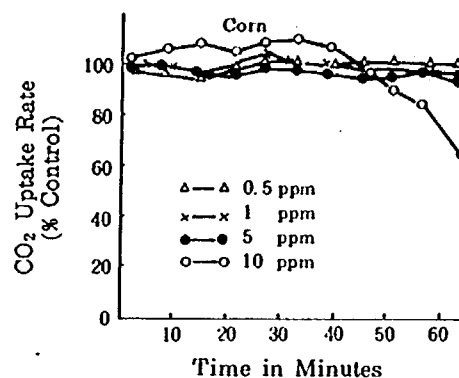


図-3.24 NO₂ 暴露による光合成への影響 (文献23)

表-3.13 50 pphm^{*7)}以下のNO₂ 暴露の植物への阻害的影響の報告例 (文献24)

植 物	NO ₂ 暴 露		影 響
	濃度 (pphm)	期 間 (日)	
ト マ ト	10, 25, 50	20時間 ^{*8)} (0.08, 0.2, 0.4)	光合成活性阻害 { 20時間の1時間平均として 10pphm-9%, 25pphm-31%, 50pphm-32%
ト マ ト	50	10-22(5~11)	生長阻害
ト マ ト	15-26	10-22 (3.3~5.7)	乾燥重量の低下, クロロフィルの増加, 葉の下方への屈曲
ト マ ト	50	19(9.5)	葉面積, 乾燥重量の減少
ト マ ト	25	全 成 育 期 間	22%の収量減
ケンタッキー ブルーグラス	週平均6.8 [月曜日から 金曜日まで 11pphmの 暴露]	56-140 (週103.5時間)	葉面積, 乾燥重量の減少
ヒ マ ワ リ	10	24(2.4)	乾燥重量減少
ネ ー ブ ル	25	35(8.8)	葉量の増加, 結実の減少

* 7) parts per hundred million 1億分の1 (10^{-8})

* 8) ()内はドース

(2) 汚染質の植物への影響

一般に大気汚染物質の植物への影響は、高濃度短時間の影響による急性障害と、比較的低濃度長時間の影響による慢性障害と、さらに低濃度の影響として不可視障害の3種に分けられる。急性障害の場合は一般にその汚染物質特有の症状が発現するので、汚染物質の種類の推定と被害程度の判別が容易である。しかし、慢性障害の場合は葉の黄化（クロロシス）を示すが、この症状は他の原因による障害、たとえば養分欠乏症などでも類似の症状を示すことが多いので、他に傍証がなければ原因の判定は困難である。不可視障害の特徴は、外観上正常であるが生育や収量の低下をきたす現象であり、これを適確に識別することは非常に¹⁸⁾難しい。

○ 急性障害⁴⁶⁾

高濃度短時間の害であり、煙ばん（ガスが原因で発現する病はんという意味）という大小様々なはん点が現われる。このはん点部は細胞の死滅によって起こるものであり、壊死（えし）部とかネクロシス（necrosis）とかいわれる。

(1) 葉脈間壊死（または葉脈間ネクロシス） 二酸化硫黄や二酸化窒素などによって葉の表裏ともに現われる。しかしオゾン⁴⁶⁾は柵状組織に強く作用する傾向があるので、葉の上表面だけに現われやすい。

(2) 葉縁壊死（葉縁ネクロシス） フッ化水素は典型的な葉縁壊死を現わし、やはり葉の表裏ともに発現する。

(3) 葉裏の銀灰色化 PANやアルデヒド類のガスによる急性障害で、たいへん特徴的である。

○ 慢性障害⁴⁶⁾

比較的低濃度で長時間影響を受けた場合の症状である。

特徴 葉が全体に、あるいは葉脈を残して黄化する。一般に植物学上では葉が何らかの異常をきたして黄化することをクロロシス（chlorosis）と呼んでいる。この症状は葉緑素または葉緑体が破壊された場合や、死細胞が葉全体に点在する場合に見られるものである。

○ 不可視障害⁴⁶⁾

非常に低濃度のガスの影響を受けた場合の影響である。

特徴 肉眼的な症状はまったくないが、長期間影響を受けると光合成の低下や呼吸の増大をもたらし、生育や生産が低下する現象である。植物の種類によってこの障害の有無がなお論議されているが、抵抗性がむしろ大きい種類や果樹などの永年作物では明らかに認められる。

① SO₂ の影響

SO₂ の取り込みから被害発現に至る概略の過程は、図-3.25のとおりである。

気孔を通して取り込まれたSO₂ は細胞質溶液に溶解してH⁺、HSO₃⁻、SO₃²⁻ イオンを生じる。SO₂ による被害はH⁺ による細胞液のpH低下によるもの、HSO₃⁻、SO₃²⁻ イオンの直接的影響あるいはこれらイオンによって作られる有害物質の影響によるものである。

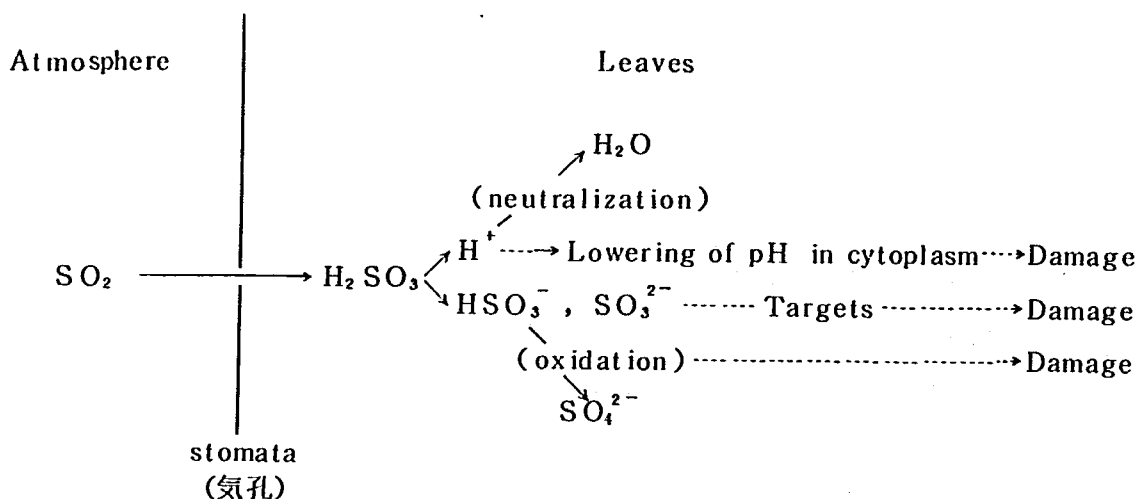


図-3.25 SO₂ 取り込みから被害に至るSO₂植物毒性発現過程⁴⁷⁾

a 急性障害

比較的高い濃度のSO₂ によってひき起こされる急性障害は、ガスに触れて数時間から数日以内に症状が現われる。急性害の症状は主として成熟した葉に現われるが、花器、枝梢、果実を冒すこともある。

葉に現われる症状は葉肉組織が斑点状に壊死するもので、斑点の色、形状は植物の種類によって特有の症状を呈する。

写真1に急性被害の例を示す。

b 慢性障害

樹木にみられる慢性障害は葉の黄化現象が最も多く、黄化現象は葉の機能低下や離層形成につながって、異常落葉や早期落葉をおこす。この現象を毎年繰り返すことによって、樹木は次第に枝梢の生長が衰え、ついには梢端部が枯れて幹から直接短枝を出す異常な発育形態がみられる。そして主枝、主幹の発育まで抑えられて樹種本来の樹冠形状が失われてしまう。二酸化硫黄に弱く、あまりはっきりした落葉現象もみられないマツ、マキ、スギ、モミなどの常緑樹も慢性障害によって樹勢が衰退して樹形が崩れてしまう。

c 不可視障害

低濃度SO₂ による不可視障害では光合成速度が低下する。その場合は、気孔の閉鎖によってCO₂ の吸収を阻害し、したがってH₂Oの蒸散もまた低下する。処理濃度が高い場合には光合

成系自体も阻害されるらしく、 SO_2 が環境中からなくなっても光合成の回復が容易にできない場合もある (図-3.26)。

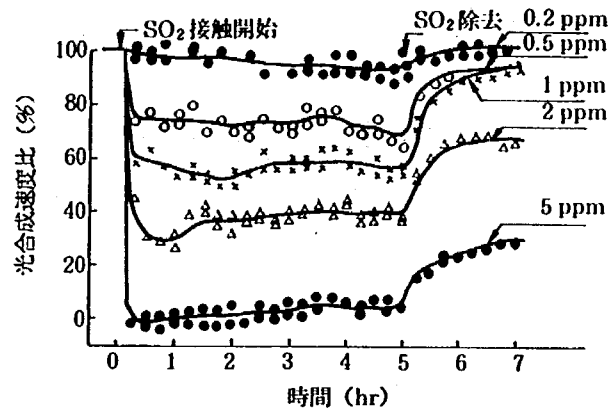


図-3.26 種々の二酸化硫黄濃度条件における光合成速度の変化とガス除去後の推移⁴⁸⁾

② NO_2 の影響

二酸化窒素は比較的毒性が低く、植物への著しい影響はあまりみられない。しかし、高濃度の場合には急性障害が現われることもある。 NO_2 の取り込みから被害に至る概略の過程は図-3.27のとおりである。

気孔を通して取り込まれた NO_2 は、 NO_3^- 、 NO_2^- イオンになり、細胞液の pH の低下、アミノ酸、核酸を変性させ、また、光合成、呼吸を阻害する。

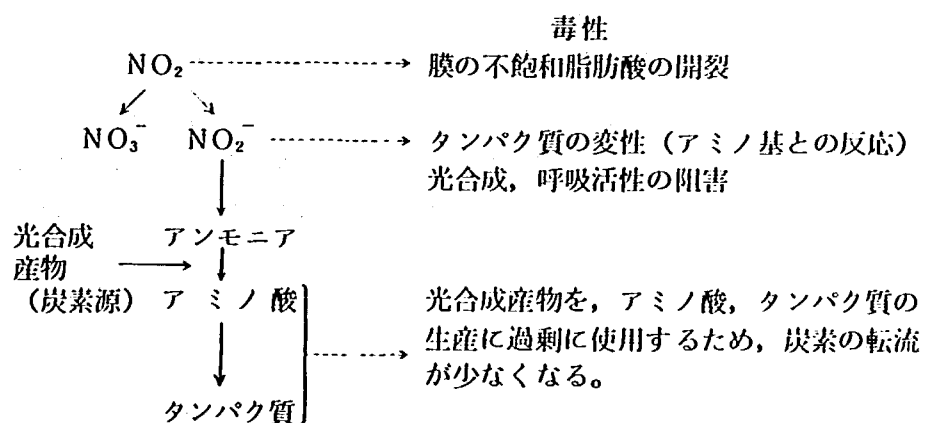


図-3.27 植物における NO_2 毒性発現過程 (文献 24)

a 急性障害

NO_2 による急性障害はきわめて高い濃度において発生する。症状は一般に SO_2 によるもの

と類似しているが、植物の種類により多様である。急性障害は①葉脈間壊死型、②葉縁壊死型、③点状斑点型がある。写真2に急性被害例を示す。

b 慢性障害

樹木にみられる慢性障害は他の汚染物に類似する葉の黄化を示す。

c 不可視障害

NO₂ 濃度 0.5 ppm以下で植物の生理機能や生長に阻害的な影響がみられる。この不可視障害の状態では外見上は障害はみとめられないが、細胞の微細構造にNO₂による特有の変化が認められている。⁴⁹⁾

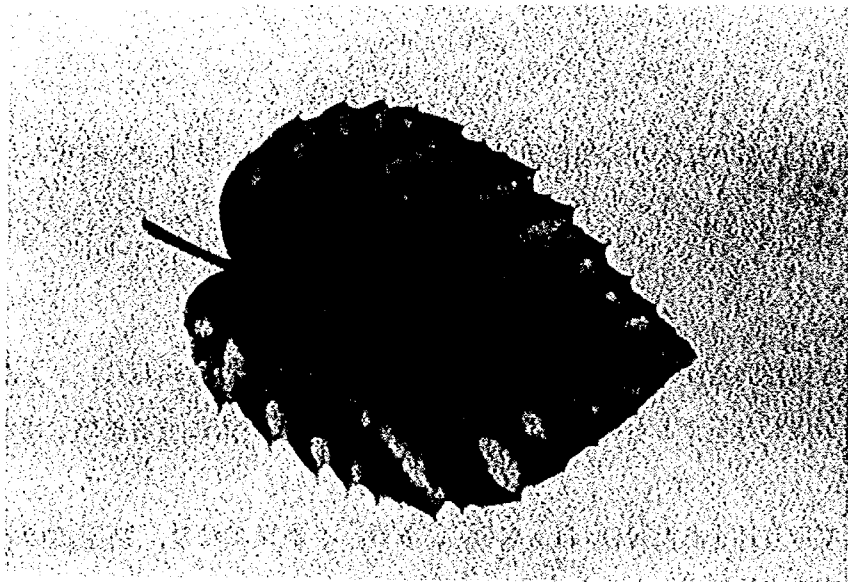


写真1. 二酸化硫黄 ヒュウガミズキ⁴⁶⁾

SO₂ として 0.8 ppm で昼間のみ 5 時間ずつ 9 日間(計45時間)人工接触,
ビニールハウス温度 昼間28±2℃, 夜間20±2℃, 湿度約60%, 農林
省林業試験場浅川実験林にて1971年6月1～10日実験, 1日後撮影

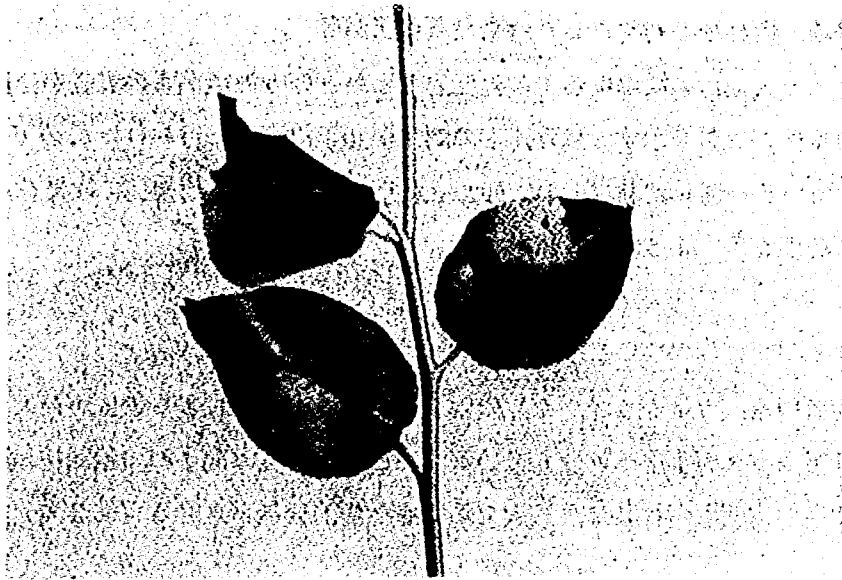


写真2. 二酸化窒素 ナシ⁴⁶⁾

NO₂ として50 ppmで60分間接触させて翌日に撮影したものである。1971年6月，農電研究所にて

4. 群体としての緑地帯の大気浄化機能

4.1 道路植栽，緑地，樹林地を対象とした汚染質濃度実測例

緑地の有無によって大気汚染質濃度がどの程度異なるかという観点からの実測例は比較的少ない。表－4.1に収集した事例の一覧を示す。ほとんどの測定が10年以上前に行われたもので、一部を除いてSO₂を対象としている。風や植栽などの条件がそれぞれ異なるが、緑地帯別に結果をみると以下のようなものである。各事例の概要を表－4.2(1)～(7)に示す。

(1) 道路植栽

枝葉の密な列植樹木（カイヅカイブキ）の効果としては、植栽により濃度が最大1/4と大きく低下する。これは汚染ガスが上空へ拡散しているためと思われる（No.1）。沿道植栽は、ある程度樹高が高く、また枝葉の密度も高ければ、最大で濃度を2割前後低下させる（No.2）。

表－4.1 実測例一覧

植栽類別	番号	測定ガス	測定場所	測定年
道路植栽	No.1	SO ₂	東名高速道路 日本坂トンネル下り線	1972
	No.2	NO, NO ₂ , SO ₂ Dust, SF ₆	名古屋市内道路 3地点	1983
緑地	No.3	SO ₂	明治神宮（内苑）	1972
	No.4	SO ₂	新宿御苑	1972
	No.5	SO ₂ , CO	明治神宮（内苑）	1972
	No.6	SO ₂	緩衝緑地（徳山市）	1974
樹林地	No.7	SO ₂	ヨーロッパアカマツ林	1968

(2) 緑地

大規模な都市の緑地（明治神宮 72 ha，新宿御苑 58 ha）におけるSO₂濃度は、周辺市街地に比べて最大で約0.02 ppm，比率で35～70％低い値を示すことが認められる（No.4，No.5）。ただし、さらに低い値を示す測定例もある（No.3）。

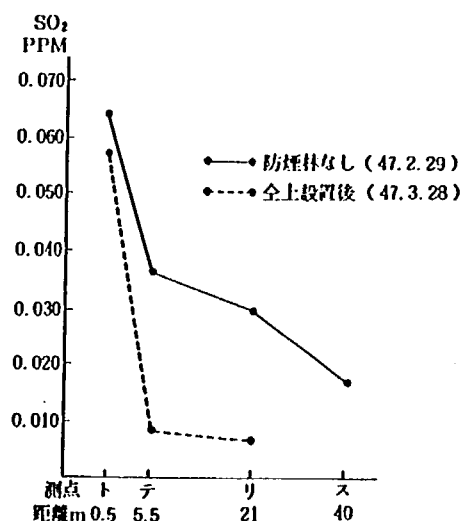
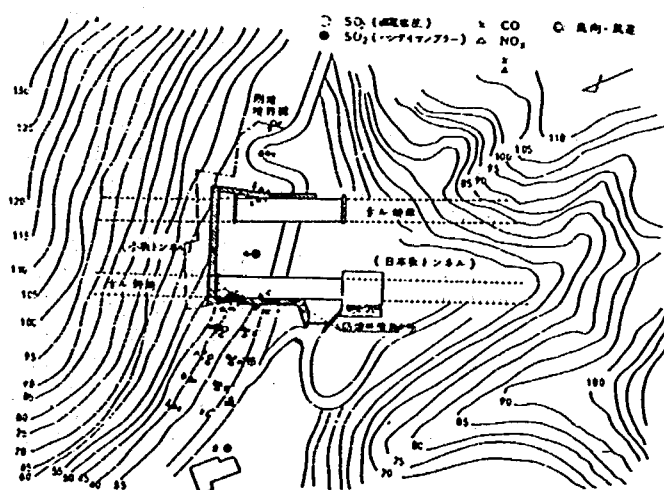
大気汚染防止を主な目的として造成された緩衝緑地の効果は、SO₂濃度を12.3％低減したと推定されている（No.6）。

(3) 樹林地

事例が1例であるが、林内（ヨーロッパアカマツ林）では林外に比べてSO₂濃度が約3割低い。

表-4.2(1) 汚染質濃度実測例

事例番号	No. 1	植栽種別	A. 道路植栽	文献	本多作, 1972 (文献28)
測定年月	植栽なし S 47. 2. 29 植栽あり S 47. 3. 28				
測定場所	静岡県 東名高速道路下り線日本坂トンネル坑口付近 昼(8~19時) 小型車約 1,900~3,100台/h 大型車約 500~800台/h S 37. 3. 28				
植栽	カイヅカイブキ, 1~3列植栽				
測定方法	植栽する前と植栽した後で道路からのSO ₂ 濃度の減衰状態を測定				
測定ガス	SO ₂				
結果の概要	植栽の背後でSO ₂ 濃度は、植栽前に比べて約1/4に低下した。				



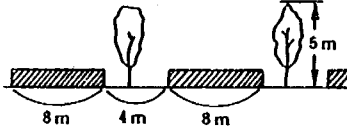
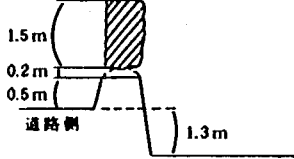
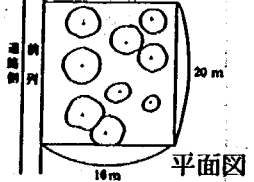
風向・風速及びガス汚染質測定地点

防煙林の設置前ならびに設置後のガス汚染質濃度分析
(下り線 SO₂ ハンディサンブラー法)

表-4.2(2) 汚染質濃度実測例

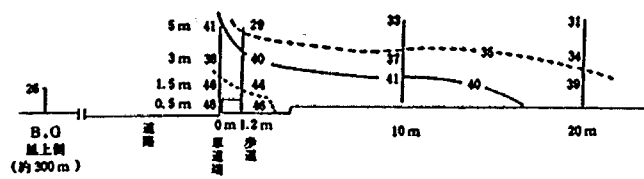
事例番号	No.2	植栽類別	A. 道路植栽	文献	名古屋市公害 対策局 1983(文献31)
測定年月	昭和57.7～昭和58.3				
測定場所	名古屋市内道路 3地点 ・S55年度 昼間の12時間交通量 ① 低木測定 青少年公園線 4車線 約14,000台* 大型車混入率 10% ② 中木 " 志段味田代町線 4車線 約24,000台* " 22% ③ 高木 " 名古屋環状線 6車線 約29,000台* " 23%				
植栽	低木 ツツジの低木連続の道路植栽 中木 カイズカイブキの中木連続植栽, 浄水場の外周部植栽 高木 高木・中木の多層植栽, 公園の植栽				
測定方法	植栽形態の異なる3ヶ所で道路から水平方向, 垂直方向に測点を設定し, ガス濃度の減衰状況を測定				
測定ガス	NO _x (NO, NO ₂), SO ₂ , Dust, SF ₆				
結果の概要	(次ページ)				

調査地点及び植栽の状況

項目	① 長久手 (愛知県長久手町大字長楸)	② 鍋屋上野浄水場 (千種区鍋屋上野町)	③ 土古公園 (港区東土古町)
植樹帯の形態	低木連続植栽	中木連続植栽	高木多重植栽
緑化形式	抑制成長タイプ	グリーンベルトタイプ	環境保全林タイプ
植栽形式	低木列植+高木単純規則形植栽	中木列植	高木+中木+低木の混合 自然形植栽 中木列植
樹木の種類	ツツジ, イチョウ	カイズカイブキ	前列: トベラ 後: ヒイラギ, サングジュ, キョウチクトウ, ヤナギ, ケヤキ, クヌギ, シ ラガシ, ポプラ
繁茂の程度*	密, 見通し全くなし 繁茂度=100%	密, 見通しなし 繁茂度=100%	密, 見通しわずか 繁茂度=95%
その他	低木 高さ 0.8m 奥行 1.2m 高木 高さ 5m  縦断面図	高さ 1.5m 奥行 1.2m 土盛 0.2m 石垣 0.5m  横断面図	前列 高さ 1.5m 奥行 1.5m 後 20m×奥行16m中に 樹高10m前後10本 " 5m 13本 " 3m 11本  平面図

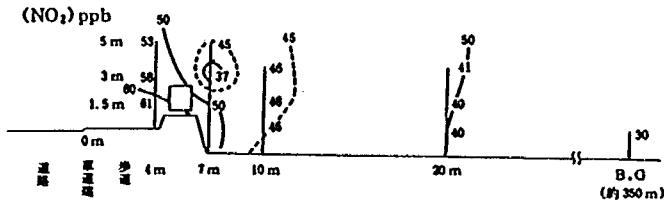
* 目視による判断5%きざみ

(NO₂) ppb

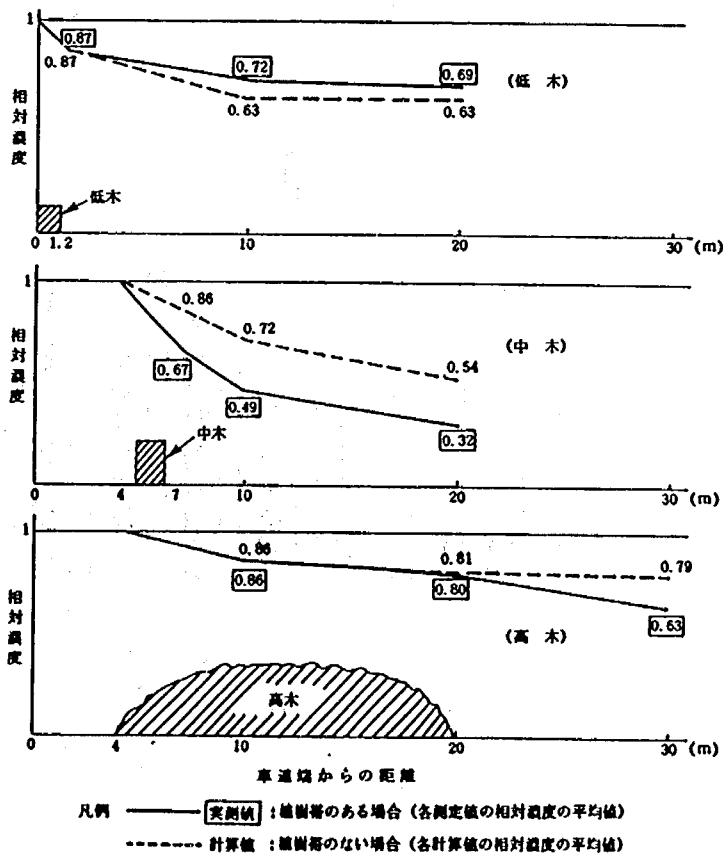
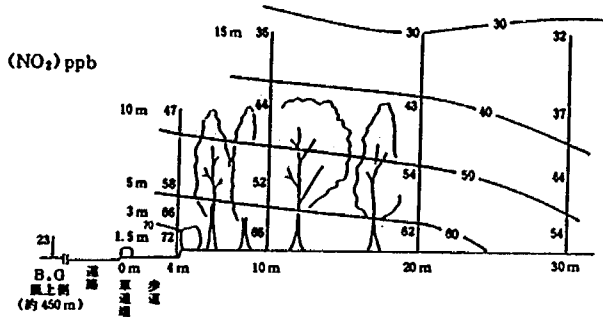


平均濃度分布図 (NO₂実測値)

(NO₂) ppb



(NO₂) ppb



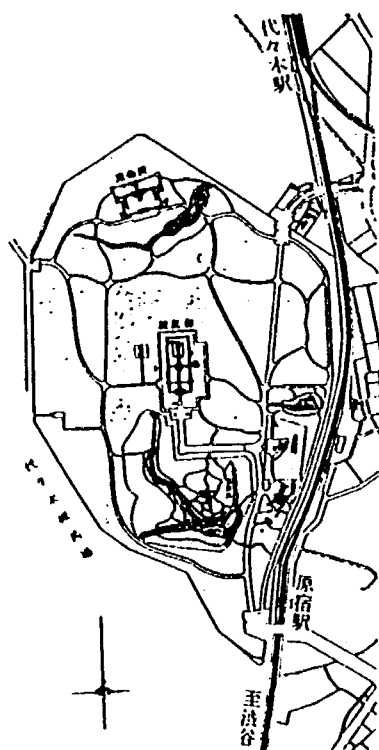
地上 1.5 m, 植樹帯前面に対する相対濃度 (NO₂)

結果の概要

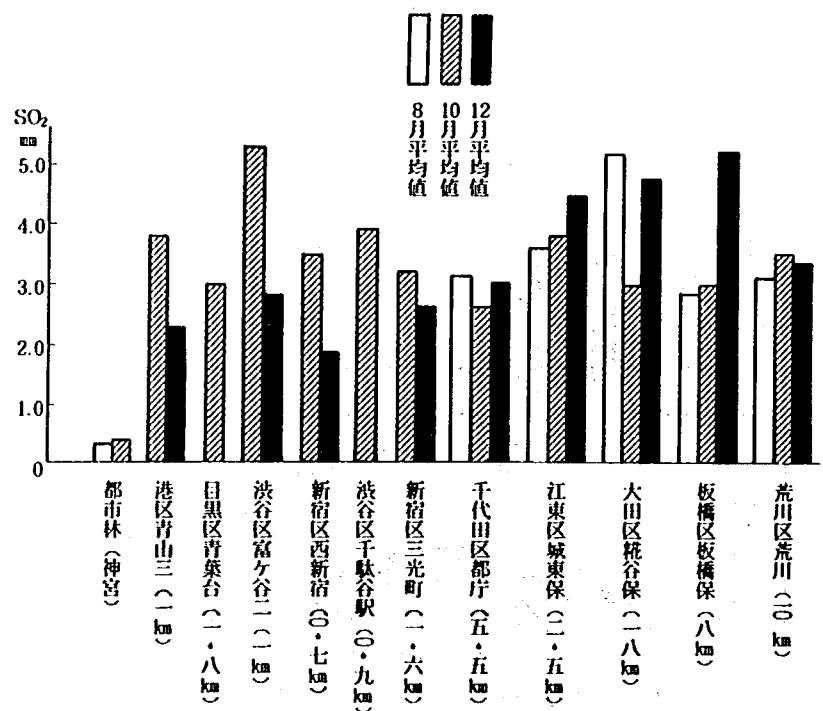
- 植樹帯のない場合に比べての濃度低減効果は、最も大きい地点で「低木」9%、「中木」23%、「高木」16%である。
- 「低木」の効果が大きくでているのは地形条件が異なるためと考えられる。
- 「高木」は比較的疎な植栽であり、枝下があいているため林内ではガスが進入し濃度低下がないと考えられる。30m地点より後方は測定がないため不明である。

表- 4.2 (3) 汚染質濃度実測例

事例番号	No 3	植栽類別	B. 緑地	文献	本多侔, 1972 (文献 27)
測定年月	S 46. 8. 19 ~ 28				
測定場所	東京都 明治神宮 (内苑) 面積 7.2 ha				
植栽	高さ約 25 m の樹林地 構成樹種 モミ, スギ, アカマツ, クロマツ, ヒノキ, スダジイ, カシ類, ケヤキ, クヌギ, コナラなど				
測定方法	明治神宮緑地内の約 30 地点の地上 1.5 m で SO ₂ 濃度を測定。対照地点として市街地 11 地点で SO ₂ 濃度を測定。				
測定ガス	SO ₂				
結果の概要	明治神宮境内で SO ₂ 濃度は, 東京都内各地点に比較して約 6~20% の値となっている。				



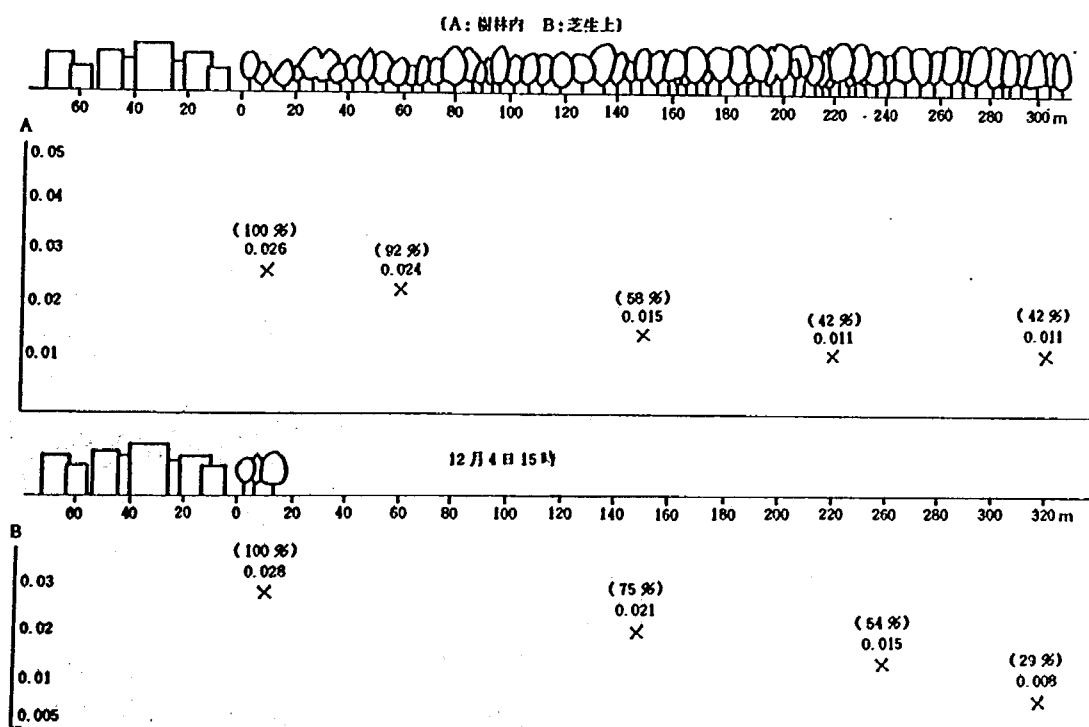
明治神宮 (内苑)



SO₂ 測定結果

表-4.2(4) 汚染質濃度実測例

事例番号	No.4	植栽類別	B. 緑地	文献	(社)日本公園緑地協会 1972 (文献29)
測定年月	S 4 6				
測定場所	東京都 新宿御苑, 面積 58.3 ha				
植栽	常緑, 落葉の高木樹林, 芝地				
測定方法	新宿御苑の数ヶ所の断面上の各地点でのガス濃度を測定				
測定ガス	SO ₂ , CO				
結果の概要	市街地との境界から御苑内部に向かってSO ₂ 濃度は低下する。 御苑の内部は周縁部に比べて0.015~0.02 ppm低い。				



新宿御苑内 SO₂ 濃度分布状況

表-4.2(5) 汚染質濃度実測例

事例番号	No 5	植栽類別	B. 緑地	文献	(社)日本公園緑地協会 1972 (文献 29)
測定年月	S 46. 12. 15 ~ 28				
測定場所	東京都 明治神宮 面積 72 ha				
植栽	高さ 25 m の樹林地 構成樹種 モミ, スギ, アカマツ, クロマツ, ヒノキ, スタジイ, カシ類, ケヤキ, クヌギ, コナラなど				
測定方法	明治神宮 (内苑) の内部数ヶ所と周辺市街地で SO ₂ を測定				
測定ガス	SO ₂				
結果の概要	緑地内部ほど SO ₂ 濃度は低下する。 明治神宮内の SO ₂ 濃度は市街地に比べて 0.02 ppm 低い。				

測定日	地点	市街地からの距離 (風上からの m)				
		市街地	100	200	300	400
12月15日		0.064	0.052	0.027	0.039	0.031
12月16日		0.074	0.058	0.040	0.042	0.040
12月17日		0.099	0.043	0.049	0.047	0.058
12月19日		0.063	0.046	0.039	0.031	0.040
12月21日		0.060	0.045	0.040	0.035	0.038
12月26日		0.071	0.045	0.042	0.040	0.048
12月28日		0.049	0.041	0.034	0.035	0.028
平均		0.059 (100%)	0.047 (80%)	0.038 (64%)	0.038 (64%)	0.04 (68%)
市街地との差			0.012	0.021	0.021	0.019

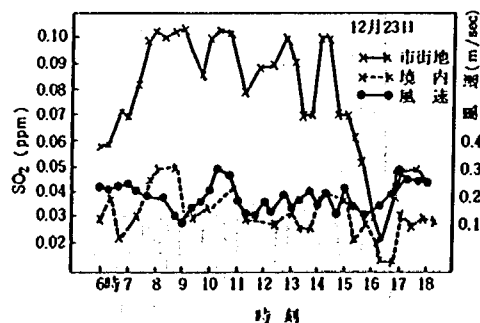
12月23日

市街地 (x)

境内 (x)

風速 (o)

明治神宮内苑 (市街地から約 250mの地点の樹林内) と市街地上との SO₂ 濃度比較



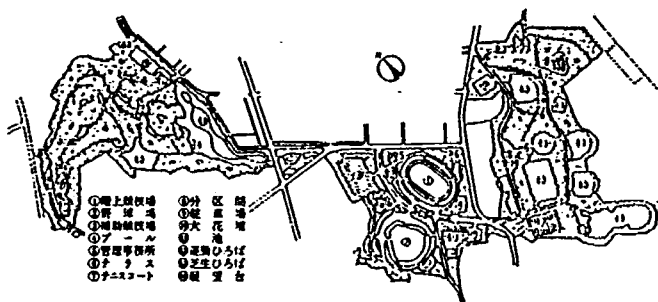
明治神宮内苑 (市街地から約
250mの地点の樹林内) と市
街地上との SO₂ 濃度比較

表-4.2(6) 汚染質濃度実測例

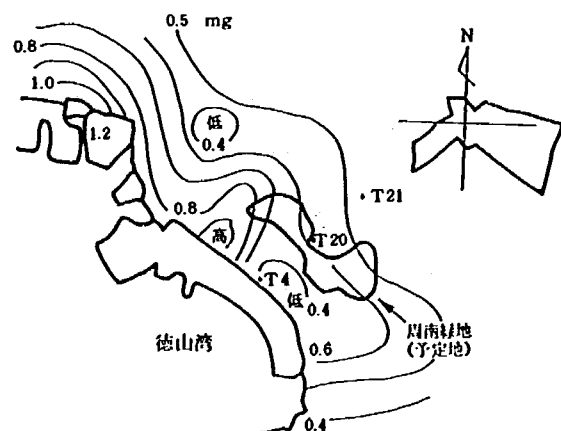
事例番号	No.6	植栽類別	B. 緑地	文献	三好寿秋, 1975 (文献30)
測定年月	緑地造成前 S 45.6 ~ 8月平均 緑地完成後 S 47 夏				
測定場所	山口県徳山市 周南緑地(緩衝緑地), 面積 75.1 ha				
植栽	常緑, 落葉の高木林				
測定方法	緩衝緑地造成前後におけるSO ₂ 濃度分布の比較(全市26ヶ所測定)				
測定ガス	SO ₂				
結果の概要	緩衝緑地によるSO ₂ 濃度の低減効果は緑地背後の地点(T20)で12.3%と推定された。 (T20地点の濃度減少率38.7%のうち26.4%は発生源対策によるものと考えられる。)				

4年間のSO₂濃度の推移と減少率
全市平均と緑地周辺 PbO₂ 法

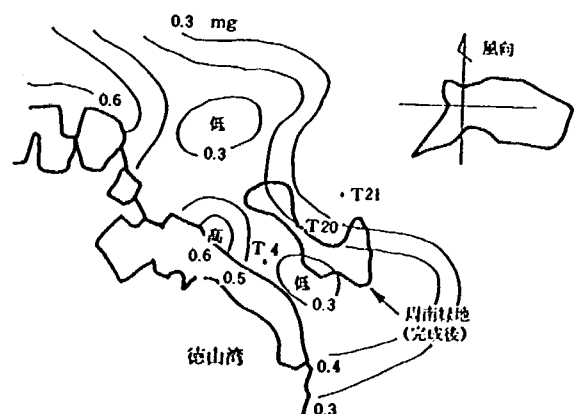
	全市 26ヶ所	T4 遠石	T20 周陽	T21 長宗
工場群から北東	...	0.3 km	1.2	2.0
緑地から北東	...	... km	0.1	1.0
海拔+地上高	...	6+13m	17+13	60+3
45年度	0.49mg	0.46	0.60	0.40
46 "	0.44	0.39	0.50	0.34
47 "	0.37	0.33	0.36	0.32
48 "	0.31	0.29	0.31	0.31
減少率	26.4 %	26.6	38.7	16.8



周南緑地平面図



緑地造成前のSO₂濃度分布 45年夏(6~8月)



完成後のSO₂濃度分布 47年夏(6~8月)

表-4.2(7) 汚染質濃度実測例

事例番号	No7	植栽類別	C. 植林地	文献	Lampadius, F. 1968. (門田正也 1971より再利用)(文献26)
測定年月	不 明				
測定場所	不 明				
植 栽	ヨーロッパアカマツ林				
測定方法	アカマツ林内外でのSO ₂ 濃度測定				
測定ガス	SO ₂				
結果の概要	林内でのSO ₂ 低減効果は平均7%, 風が弱い時は効果が大きく27%である。ただし、風が強い時は効果は認められない。				

SO₂ 濃度の低減効果

単位mg SO₂/m², ()内は%

	内	外
平 均	0.28 (93.3)	0.30 (100)
風 が 弱 い 時	0.60 (73.2)	0.82 (100)
風 が 強 い 時	内外の濃度差なし	

4.2 汚染質吸収速度の群体への適用（吸収量の土地面積当りへの換算）

植物群落の土地面積当りの汚染質吸収速度を試算した例としては表－4.3のものがある。いずれもチャンバー実験による単位葉量当りの吸収速度をもとに植物個体または群落の葉量（葉面積指数）を用いて土地面積当りの吸収速度を推定したものである。

樹木についてはスギ、マツの常緑針葉樹について、草本植物についてはアルファルファとヒマワリの2種についての試算例がある。扱われているガスの種類はSO₂が多く、NO₂は一部のみである。

試算されている値をガス濃度 0.05 ppm，群落の面積 1 ha，吸収時間 1 時間当りに統一したものを表－4.3の換算値の欄に示す。これをまとめたものが表－4.4左欄である。木本植物のSO₂吸収速度は4.7～28.6 g / ha・hrである。値に幅があるのは使用されている実験データの値のちがいの他に採用されている植物の葉面積指数も影響している。草本植物では、SO₂の吸収速度は71.4～144.2 g / ha・hr，NO₂は57.1～67.6 g / ha・hrである。それぞれの値の幅は、アルファルファとヒマワリの葉面積のちがいが大きく響いている。ガスの種類によるちがいはSO₂の方がNO₂よりも吸収速度がはやい（ただし、分子量はSO₂は64，NO₂は46）。

一方、光合成速度から群落の吸収速度を別途推定した値を表－4.4右欄に示す。チャンバー実験の値から算出された既往の試算例とオーダー的にはよく一致する。数値のちがいは実験条件や葉面積指数の採用値などが影響しているものと思われる。

表 - 4.3 群体の吸収速度の試算例

	試 算 条 件 と 試 算 値				換 算 値 ^{*9)} (ガス濃度 0.05ppm)	出 典
	試算根拠データの測定条件 (チャンバー実験)	測定された吸収速度	土地面積への 換算値(葉量)	試算値 (土地面積当り)		
スギ林	スギの 鉢植苗 SO ₂ 0.8 ppm 8 h/日(井上1970)	0.3 %/葉乾重・月	スギ林の葉量 20 ton/ha	0.8 ppm 0.06 ton SO ₂ /ha・月	15.6 gSO ₂ /ha・hr	坂上ら 1970 (文献32)
クロマツ林 (杜令林)	クロマツ の 苗 SO ₂ 0.2 ppm 7h/日(3月…14日間 6月…7日間 (門田 1968))	0.004 %/葉乾重・day	クロマツ杜令林の 葉量 1 kg/m ²	0.2 ppm 80mg SO ₂ /m ² ・day	28.6 gSO ₂ /ha・hr	門田 1971 (文献33)
アカマツ林	アカマツ の 苗 SO ₂ 0.8 ppm 6 h/日 (井上 1970)	1.38 × 10 ⁻² SO ₂ mg / g・ppm・hr (0.8 ppmのとき0.011) (mg/g・hrより算出)	マツ林の葉量 6.8 ± 1.8 ton/ha	0.5 ppm 4.7 gSO ₂ /ha・hr	4.7 gSO ₂ /ha・hr	三沢 1979 (文献34)
アルファル ファ群落	アルファ ルファ SO ₂ 0.5 ppm	85 μl/min・m ² (キャノピー)	アルファルファの 葉面積 8~11m ² /m ² 土地	830 lb/mi ² ・hr (1lb(ポンド) = 450 g 1mi ² (平方マイル) = 259ha)	144.2 gSO ₂ /ha・hr	Hill 1971 (文献3)
"	アルファ ルファ NO ₂ 0.06 ppm	68 μl/min・m ² (キャノピー)	"	560 lb/mi ² ・day (12hr)	67.6 gNO ₂ /ha・hr	
ヒマワリ 集 団	ヒマワリ SO ₂ 0.2, 0.65, 1.0, 1.5 ppm (大政ら 1978)	0.32 mg SO ₂ / 100 cm ² 葉面・hr・ ppm SO ₂	ヒマワリの葉面積 4	0.05 ppm 100mg SO ₂ /m ² ・day (14 hr)	71.4 gSO ₂ /ha・hr	戸塚 1980.7 (文献35)
"	ヒマワリ NO ₂ 0.2, 4 ppm (大政ら 1979)	0.30 mg SO ₂ / 100 cm ² 葉面・hr・ ppm NO ₂	"	0.05 ppm 80 mg NO ₂ /m ² ・day (14 hr)	57.1 gNO ₂ /ha・hr	

*9) 各試算値をもとに単位を統一した。

表- 4.4 植物群落の土地面積当りの吸収速度の試算

(ガス濃度を 0.05 ppm とした場合)

	既 往 の 試 算 例	光 合 成 速 度 か ら の 推 定 値
木本植物群落 (針葉樹)	4.7 ~ 28.6 g SO ₂ /ha・hr (スギ林, クロマツ林, アカマツ林)	3.2 ~ 28.1 g SO ₂ /ha・hr (光合成速度 4 ~ 15 mg CO ₂ /dm ² ・hr 表-3.4) (葉面積指数 3.5 ~ 8.5 ha/ha 表-4.5)
草本植物群落	71.4 ~ 144.2 g SO ₂ /ha・hr 57.1 ~ 67.6 g NO ₂ /ha・hr (アルファルファ, ヒマワリ)	17.6 ~ 121.0 g NO ₂ /ha・hr 12.6 ~ 86.9 g NO ₂ /ha・hr (光合成速度 20 ~ 50 mg CO ₂ /dm ² ・hr 表-3.4) (葉面積指数 4 ~ 11 ha/ha 表-4.5)

表- 4.5 わが国での森林タイプごとの閉鎖林の葉量²⁵⁾

森 林 タ イ プ	葉 乾 重	葉面積 (片面)	資 料 数
落 葉 広 葉 樹 林	トン/ha 2.9 ± 1.5	ha/ha 3 ~ 6	林分 97
落葉針葉樹林 (カラマツ)	2.9 ± 1.0	2.5 ~ 4.5	26
マ ツ 林*	6.8 ± 1.8	(3.5 ~ 6)	59
常 緑 広 葉 樹 林	8.6 ± 2.6	5.5 ~ 9	44
常 緑 針 葉 樹 林**	16.0 ± 4.5	5 ~ 10	47
ス ギ 林***	19.4 ± 4.9	4.5 ~ 8.5	96

* ハイマツを除く ** マツ林・スギ林以外 *** 緑軸を含む緑色部。

4.3 緑地帯の規模と大気浄化効果の関係

緑地帯の規模と大気浄化効果との関係を示すデータは、きわめて少ない。道路植栽と都内の大規模な緑地で測定された例を以下に示す。

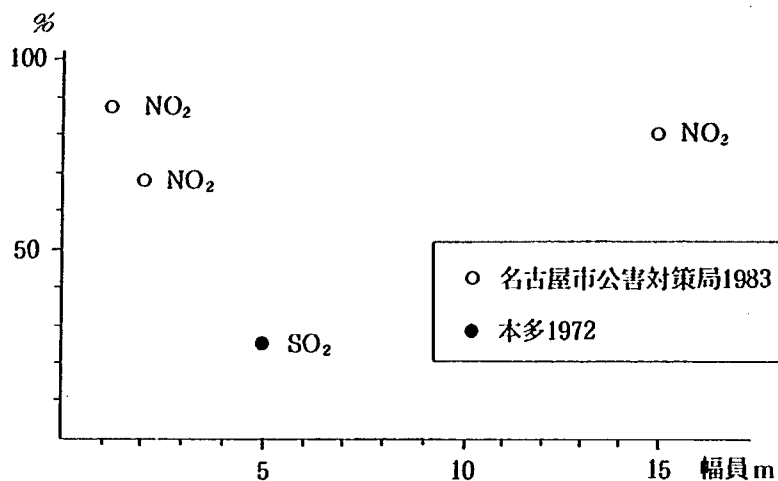
(1) 道路植栽の幅員と効果

図- 4.1 は、各道路植栽の背後で最も効果の大きい値を図示したもので、一部を除き幅員の増加と効果の増大の関係がみられる。しかし、幅員と効果の関係をみるためには、これらのデータからは明確なことは言えず、測定条件を統一した上での植栽幅員のちがいによる測定データ等が必要である。

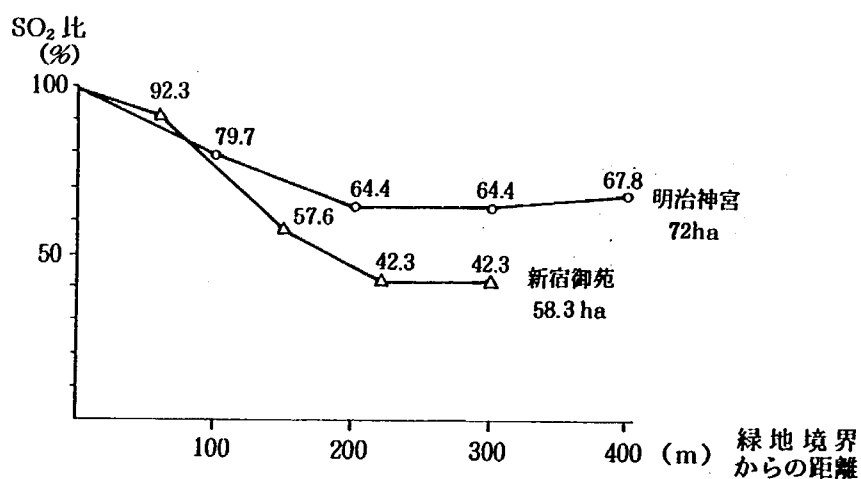
(2) 大規模緑地の効果

図- 4.2 は、大規模な緑地の市街地との境界から内部に向かって SO₂ 濃度が低減していくことが

示されており、約 200m 以遠は定常となる。林縁から 300m 入った地点での相対値を比較すると緑地面積 72 ha の場合に 64.4 %，同じく 58.3 ha の場合に 42.3 %でこの程度の緑地規模の差では効果にちがいはでない。規模の異なる緑地の値との比較が必要である。



図－ 4.1 道路植栽の幅員と効果（文献 31，28）



図－ 4.2 緑地境界からの距離と濃度比（文献 27）

5. あとがき

本調査により、大気環境と植物の相互関係、植物個体の大気汚染質の吸収機能および群体としての緑地帯の大気浄化機能に関して基本的な知見が明らかになった。植物の汚染ガス吸収能力に関しては、

- ① 植物の汚染ガス吸収速度は概ね光合成速度に比例していることが予想される。ただし、データによっては必ずしもあてはまらない場合がある。
- ② 植物の汚染ガス吸収の容量は、吸収の上限が硫黄の場合には約 4 mgS/dm^2 葉面積、窒素の場合には約 6 mg/dm^2 葉面積であり、野外の実測値からみてもこの程度と思われる。ただし、研究例が少ないこと、植物の種類によって大きな差があることなど今後究明する必要がある。
- ③ 野外の沿道植栽により汚染ガス濃度は低減し、その程度は2割前後である。ただし、測定事例が少なく植栽条件との関係は不明である。

などの点が明らかになり、道路植栽の排出ガス浄化能力を定量的に把握するためには、

- ① 植物の汚染ガス吸収速度に関する既往の実験の多くは比較的高濃度域で行われ、しかも SO_2 を用いたものが多い。汚染ガスの濃度や種類によって吸収の特性に違いがあるので、実際の汚染濃度に近い低濃度で NO_x 又はそれに代わるガスを用いた実験データが必要となる。また、材料については造園木、草木を用いたものが少ない。
- ② 植物の汚染ガスの吸収容量については、沿道植栽での実測データがない。ただし、窒素は植物に吸収されたあと転流があるので測定は検討を要する。
- ③ 野外での道路植栽の有無による汚染ガス濃度の変化を示すデータはきわめて少なく、植栽の幅・密度・樹種との関係を分析するうえでのデータが不足している。

などの点でデータ、情報が不足していることがわかった。

これらの件に関しては、ガスチャンバーを利用した植物体暴露実験や緑地帯を有する道路沿道での NO_x 等大気環境調査などにより今後明らかにしていく予定である。

ガス状物質の吸収に関する文献リスト

吸収速度に関するもの

1	門田正也	1968	林帯による大気汚染軽減効果	空気清浄	6 (1)	24-28
2	Thompson, C. R. et al.	1970	Effects of continuous exposure of navel oranges to nitrogen dioxide.	Atmospheric Environment	4	349-355
3	Hill, A. C.	1971, 6	Vegetation: A Sink for Atmospheric Pollutants	Journal of the air pollution Control Association	21	341-346
4	井上敏雄	1971, 9	森林の汚染空気浄化能	保健保全林, 林業試験場報告	239	18-20
5	高安 稔ら	1972, 4	樹木のSO ₂ に対する抵抗性の判定と葉中S含有量	第83回日本林学会大会講演集		229-232
6	Roberts, Bruce R.	1974	Foliar Sorption of Atmospheric Sulphur Dioxide by Woody Plants	Environmental Pollution	7	133-140
7	Srivastava, H. S. et al.	1975	The effects of environmental conditions on the inhibition of leaf gas exchange by NO ₂	Canadian Journal of Botany	53	475-482
8	松島二良ら	1977	造園樹木類の二酸化硫黄の吸収, 可視障害, 生育ならびに光合成間の関係	三重大学環境科学研究紀要	2	95-105
9	戸塚 績ら	1978, 3	高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(1) NO ₂ 暴露によるヒマワリの乾物生長変化とNO ₂ 吸収について	国立公害研究所報告	R-2	67-76
10	戸塚 績ら	1978, 3	高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(3) NO ₂ 暴露に対する草本植物の感受性および窒素濃度変化の種間差異	国立公害研究所報告	R-2	89-94
11	米山忠克ら	1978, 3	高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(4) 数種木本植物の生長および植物体窒素濃度におよぼすNO ₂ 暴露の影響	国立公害研究所報告	R-2	95-102
12	米山忠克ら	1978	植物による二酸化窒素の吸収とその体内での変化	第19回大気汚染学会講演要旨集		350
13	松岡義浩ら	1978	大気中の二酸化硫黄と植物葉中に集積する硫黄との関係	千葉県農業試験場研究報告	19	109-113
14	山添文雄ら	1978	大気複合汚染防止に関する研究 第5報	農技研肥料化学科資料	209	1-33

- | | | | | | | |
|----------|--------------------------|----------|--|--|--------|---------|
| 15 | Kondo, N et al. | 1978 | Changes in transpiration rate of SO ₂ resistant and sensitive plants with SO ₂ fumigation and the participation of abscisic acid | Plant and Cell Physiology | 19 | 365-373 |
| 16 | 青木正則ら | 1979. 1 | 数種樹木の障害発現と硫黄蓄積におよぼす低濃度 SO ₂ 接触の影響 | 電力中央研究所報告 | 477008 | 1-12 |
| 17 | Matsumaru, T. et al. | 1979 | Absorption of atmospheric NO ₂ by plants and soils (1) Quantitative estimation of absorbed NO ₂ in plants by 15N method | Sci. Plant Nutr. | 25 | 255-265 |
| 18 | Winner, W. E. et al. | 1980 | Ecology of SO ₂ Resistance : I. Effects of Fumigations on Gas Exchange of Deciduous and Evergreen Shrubs | Oecologia | 44 | 290-295 |
| 19 | Hosker, R. P. Jr. et al. | 1982 | Atmospheric Deposition and Plant Assimilation of Gases and Particles | Atmospheric Environment | 16 (5) | 889-910 |
| 20 | 名取俊樹ら | 1984. 3 | 2. 植物のガス吸収に関する種間差異 V. 植物による大気汚染ガスの吸収について | 国立公害研究所報告 | 64 | 176-190 |
| 容量に関するもの | | | | | | |
| 21 | 水野 昭ら | 1973 | 大気中の硫黄酸化物濃度と樹木の葉中 S 含量について | 日本林学会中部支部研究論文集 | 21 | 115-121 |
| 22 | Malcolm, D. C. et al. | 1977 | The sulphur : Nitrogen ratio of conifer foliage in relation to atmospheric pollution with sulphur dioxide | Plant and Soil | 4 | 89-102 |
| 被害に関するもの | | | | | | |
| 23 | Taniyama, T. | 1979 | Studies on Injurious Effect of Air Pollutants on Crop Plants 14. Effects of Air Pollutants on Apparent Photosynthesis of Rice and Corn Plants | Report of the Environmental Science, Mie Univ. | 4 | 77-82 |
| 24 | 米山忠克 | 1979. 12 | 高等植物による大気二酸化窒素 (NO ₂) の吸収と代謝 | 国立公害研究所報告 | R-10 | 343-350 |

25	藤原 喬ら	1983, 10	低濃度複合大気汚染の植物に及ぼす影響に関する研究 I. ハツカダイコン, インゲンの生長に及ぼす SO ₂ と O ₃ の影響 (再引用)	電力中央研究所報告	482003	1-17
26	Lampadius, F.	1968		Wiss. Z. Tuch Univ. Dresden	17	503
27	本 多 作	1972	緑地の大気浄化機能の計量化とその評価に関する研究	昭和47年度日本造園学会春季 大会研究発表要旨		45-48
28	本 多 作	1972	防煙林の効果に関する調査研究報告書：日本道路公団 (再引用)			
29	(社)日本公園緑地協会	1972, 3	公園緑地等公害防止効果および水島地域における緑化に 関する調査報告書			27-39 85-99
30	三好寿秋	1975	緑地の大気汚染緩衝効果の一事例	山口産業医学年報	20	
31	名古屋市公害対策局	1983, 7	環境施設帯等による自動車排出ガス・騒音の低減効果の 検討結果中間報告			1-59
吸収速度の試算例						
32	坂上幸雄ら	1970	森林による大気浄化効果	林業試験場報告 73号		2-3
33	門田正也	1971	大気汚染と樹木 都市林の造成	大気汚染研究	6 (1)	31-38
34	三沢 彰ら	1979, 5	樹林の大気浄化機能に関する研究 その粉塵吸収量とガ ス状汚染質の吸収量について	昭和54年度日本造園学会春季 大会研究発表要旨		23
35	戸塚 績	1980, 7	植物の大気汚染環境浄化機能	産業と環境	9 (7)	67-71

参 考 文 献

- 1) 原 襄, 1974 : 植物の形態, 180.
- 2) 佐藤 大七郎ら, 1978 : 樹木, 28. 36.
- 3) 沼野井 春雄, 1966 : 生物の研究, 60. 183.
- 4) 磯野 謙治編, 1979 : 大気汚染物質の動態, 2.
- 5) Glückauf, E., 1951 : The composition of atmospheric air. *Compendium of Meteorology*, Americ. Meteorol. Soc., 1-10.
- 6) G.O. ロビネッティ, 三澤 彰ら訳, 1978 : 図説 生活環境と緑の機能, 50.
- 7) Jaffe, L.S., 1973 : Carbon monoxide in the biosphere. Sources, distribution and concentrations. *J. Geophys. Res.*, 78, 5293.
- 8) Robinson, E. et. al., 1969 : Sources, abundance and fate of gaseous atmospheric pollutants (Supplement). Stanford Res. Inst., Project PR-6755, Supple. Rep.
- 9) Robinson, E. et. al., 1968 : Sources, abundance and fate of gaseous atmospheric pollutants. Stanford Res. Inst., Project PR-6755, Final Rep.
- 10) 等松 隆夫ら, 1977 : 将来型ロケットとそのミッションの検討 (II), 大気環境遠隔探査. 未来工学研究所
- 11) 川村 清, 1971 : 対流圏の汚染. 気象研究ノート, No 107, 46-63.
- 12) 金安 公造ら, 1976 : 新版 交通公害, 9.
- 13) 環境庁編 : 環境白書. 昭和59年版. 165, 170.
- 14) 門司 正三, 1979 : 大気環境の変化と植物
- 15) 依田 恭二, 1971 : 森林の生態学, 248-263.
- 16) 依田 恭二, 1977 : 森と人間の文化史, 116-128.
- 17) Woodwell, G.M., 1978 : The carbon dioxide question. *Scientific American*, 238, 34-43.
- 18) 日本化学会編, 1977 : 窒素酸化物, 69, 70.
- 19) Callendar, G.S., 1958 : On the amount of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus*, 10, 243-248.
- 20) Keeling and Bacastow, 1977 : Impact of industrial gases on climate. *Energy and Climate*, Natl. Acad. Sciences, Washington, D.C., 72-95.
- 21) 只木 良也, 1984 : 森と人間の文化史
- 22) 吉良 竜夫, 1971 : 生態学から見た自然, 1-295.
- 23) Lieth, H., 1973 : *Human Ecol.*, 1, 303-332.
- 24) Whittaker, R.H. and Likens, G.E., 1973 : Carbon in the biota. *Carbon and the*

- Biosphere, Woodwell and Pecaneds, 281-302 (Woodwell, 1978より)
- 25) 只木 良也, 1971: 森の生態, 1-199.
 - 26) 大喜多 敏一, 1982: 大気保全学, 194, 195.
 - 27) Meetham, A.R., 1950: Natural removal of pollution from the atmosphere. Quart. J. Roy. Met. Soc. 76, 359-371.
 - 28) Meetham, A.R., 1954: Natural removal of atmospheric pollution during fog. Quart. J. Roy. Met. Soc. 80, 96-101.
 - 29) 大政 謙二, 1979: 植物群落の汚染ガス収着機能, 国立公害研究所研究報告 第10号, 368.
 - 30) 沢田 照夫ら, 1979: 樹林による排ガスの拡散. 航空公害 Vol. 6. No 2, 33-49.
 - 31) 森川 靖, 1978: 環境植物学, 132-136.
 - 32) Kramer, P. J. and Kozlowski, T. T., 1960: "Physiology of Trees", McGraw-Hill.
 - 33) Monsi, M. 1944: Jap. Jour. Bot., 13, 367.
 - 34) 田崎 忠良, 1952: 繊維学報, 1, III, 30.
 - 35) 安保 文彰ら, 1984: 植物群落による大気汚染ガス吸収のモデルとシミュレーション. 国立公害研究所研究報告 第64号, 191-212.
 - 36) Larcher, W., 1975: Physiological plant ecology, p.252. Springer, Berlin.
 - 37) 田口 亮平, 1984: 植物生理学大要, 115.
 - 38) 清水 英幸ら, 1979: ヒマワリ個体群によるSO₂吸収量の推定, 国立公害研究所研究報告 第10号, 139-158.
 - 39) Slaftelt, M.G., 1962: Physiol. Plant., 15, 772.
 - 40) Vogl, M. et. al., 1965: Biol. Zentr., 84, 763.
 - 41) 戸塚 績ら, 1973: 植物の生産過程, 36-37.
 - 42) 古川 昭雄, 1978: 環境植物学, 88-104.
 - 43) USA, 1967: 米国連邦政府公衆衛生部 (U. S. P. H. S) の大気汚染本部, 植物に対する二酸化硫黄の影響に関する資料
 - 44) 藤原 喬ら, 1983: 低濃度複合大気汚染の植物に及ぼす影響に関する研究, I ハッカダイコン, インゲンの生長に及ぼすSO₂とO₂の影響, 電力中央研究所報告 482003, 1-17.
 - 45) Maclean, D. C., 1975: Stickstoffoxide als phytotoxische luftverunreinigungen. Staub.
 - 46) (財) 日本公衆衛生協会, 1973: 大気汚染植物被害写真集, 100, 143.
 - 47) 近藤 知郎・菅原 淳, 1978: 二酸化イオウに対する植物の抵抗性に関する研究(1), 国立公害研究所特別研究成果報告, 15-16.
 - 48) 松岡 義浩, 1978: 水稻の二酸化硫黄障害とその機作に関する研究, 千葉県農試特別報告 第7号, 23.
 - 49) 松島 二良, 1979: 窒素酸化物, 331-348.

植物の大気浄化機能に関する
調査

ISSN 0386-5878
土研資料 第 2256 号
昭和60年 9 月(1985年)

中山 隆 阪井清志 日名子信広
井上忠佳 田代順孝

要 旨

植物は吸着や吸収などによる汚染物質除去能力や拡散作用など有効な大気汚染低減効果を持つと考えられており、この効果は道路沿道での自動車排出ガスの対策の一つとして期待されるものである。本報告は、今後の検討に資するため、従来の研究事例を総合的に整理することにより、大気環境と植物の相互関係、大気汚染物質の吸収、希釈機能、群体としての緑地帯の効果についてとりまとめたものである。

キーワード 植物, 自動車排出ガス, 吸収, 浄化機能, 大気汚染

郵便はがき

40
円切
手
を
は
っ
て
下
さ
い

3 0 5 - □ □

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地
建設省土木研究所
交通環境研究室 御中

No. 013



土木研究所資料第 2256 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印