

植物の大気環境浄化機能に関する研究

Studies on the Role of Vegetation as a Sink of Air Pollutants

昭和57～58年度 特別研究報告

Research Report in 1982-1983

戸塚 績・近藤矩朗・相賀一郎 編著

Edited by Tsumugu TOTSUKA, Noriaki KONDO and Ichiro AIGA

環境庁 国立公害研究所

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

国立公害研究所研究報告 第82号

植物の大気環境浄化機能に関する研究
昭和57~58年度 特別研究報告

正 誤 表

頁	行	誤	正
viii	14	KKANO	KONDO
3	下5	材物	植物
	下2	$1.41\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$1.41\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$
14	14	$\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$	$\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$
16	下9	上原,	上原
17	表1 No.5	var. subripinnata	var. subtripinnata
	No.7	ailanthiolia Carr.	sieboldiana Blume
	No.27	tauchii Koidz.	tauschii Koidz.
18	No.72	grandiflora L.	grandiflora L.
	No.96	thunbergii sieb.	thunbergii Sieb.
20	2	var.urantiacus Makino	var.aurantiacus Makino
21	8	すべて	大半は
27	付属資料16	Brtura	Betula
	下13	Schottky var.sieholdii	Schotty var.sieboldii
28	下19	Prunus sargrntii	Prunus sargentii
	下16	Paulownia tomenrosa	Paulownia tomentosa
61	図4 説明	トウモロコシの	トウモロコシ(斜線部)の
	Fig.4 caption	maize plants	maize(hatched area)plants
63	11	生育時間	生育期間
65	11	(198涙)	(198i)
124	Key words	Plant Community	Plant community
126	Fig.1 caption	A:plane figur	A:plane figure
131	図6 右軸	$\mu\text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$\text{m mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$
	3	件い	件い
134	Fig.10 caption	$\Delta\text{O}_3/\text{I O}_3$	$\Delta\text{O}_3/\text{IO}_3$
136	21、23	大政讓次	大政謙次

頁	行	誤	正
155	Fig.4 caption	flanks	flasks
157	下1	Abelesら(1971)が	Abelesら(1971)の
159	下1	seedings	seedlings
160	9	cotylodons	cotyledons
161	20	Selvendron	Selvendran
162	Fig.1 caption	1 days indcate	1 day indicate
164	表1説明	19間 1 days	1日間 1 day
166	13	Caractrization	Characterization
	15	cytokinin	cytokinins
173	Key words	Ineole	Indole
175	6	ミルポアフィルター	ミリポアフィルター
177	4	Takeuchiら(1984)	Takeuchiら(1985)
178	Running head	近藤短郎	近藤矩郎
187	脚注	Ibaraki	Tsukuba, Ibaraki
188	2	Paseolus	Phaseolus
206	下7	減少は観察されな	現象は観察されな
215	4	Barrettt	Barrett

序

一般に植物は大気汚染に感受性が高く被害を受けやすく、極端な場合には枯死する場合さえもある。

当研究所では1976年以降特別研究として「陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究」(1976~1978)と「複合大気汚染環境の植物影響に関する研究」(1979~1981)を実施して汚染物質の植物体内への取り込みの機構、体内での変化などについて多くの基礎的な知見を得た。

植物は大気汚染物質を吸収し、体内で無毒化する能力をもち、いわゆる大気浄化機能を持っている。近頃は森林浴などと称して森の中の空気が清浄で人の健康によいとさえ言われている。これは科学的には厳密ではないが、緑地の環境改善への効果は広く認められてきている。

しかしながら、都市や工場地帯などにおける緑地造成について植生やその環境保全作用に関する基礎的な知識は十分ではない。

そこで当研究所では1982年以来特別研究として「植物の大気浄化機能に関する研究」を実施して汚染物質の吸収能力や解毒作用を個体別に研究したほか、植物群落についても自然環境シミュレータを使用して研究を進めてきた。この特別研究は現在もなお進行中であるが、今までに得た結果をまとめて中間報告として発表する次第である。

近頃は地球的規模の環境問題についても森林の喪失や砂漠化などについて多くの危ぐがある。また、大気中の二酸化炭素の増大の傾向から将来、温室効果によって気象状態が大きく変化することが指摘されている。これらについてはなお研究の必要があるが、本特別研究もこのような問題に対する第一歩となるものである。この研究に関連して研究所ではいろいろな装置や手法を開発したが、それらの装置や実験の方法については既に今までの報告にまとめられているのでこの報告には含めなかった。

上に述べたようにこの研究はなお進行中であるが、その成果が国土の緑化計画など環境改善に役立つと同時に、群落としての植物機能を取上げた研究としてこの方面の研究者にも広く注目されることを希望する次第である。

最後に、いつもながらこの研究には所外の方々の御協力を賜わっている。厚く感謝する次第である。

1985年3月

国立公害研究所

所長 近藤次郎

目 次

I 研究の目的と成果の概要	1
戸塚 績	
II 植物の大気汚染質吸収能に関する研究	
1. 大気浄化植物の検索—広葉樹種における葉面拡散抵抗特性の種間差異—	13
藤沼康実・町田 孝・岡野邦夫・名取俊樹・戸塚績	
2. 植物群落による汚染ガス吸収能の評価のための基礎的研究 —SO ₂ 暴露中のイタドリ葉の気孔開度に及ぼす光強度の影響—	29
名取俊樹・戸塚 績	
3. 植物による大気汚染ガスの収着—植物葉と種々の物質の SO ₂ 収着の比較—	39
安保文彰・大政謙次・相賀一郎	
4. デジタル画像処理による気孔反応の評価	43
大政謙次・尾上守夫	
5. 植物による大気 NO ₂ 吸収量推定のための ¹⁵ N 希釈法	53
岡野邦夫・福沢時秀・田崎忠良・戸塚 績	
6. ヒマワリ葉による ¹⁵ NO ₂ の吸収・代謝及び体内移動と葉齢の関係	67
岡野邦夫・高崎 博・戸塚 績	
III 植生の大気汚染質吸収に関する研究	
1. 自然環境シミュレータ内の植物群落の微気象—速度成層装置の効果—	79
大政謙次・松本 茂・相賀一郎	
2. 土壤環境制御装置における水分分布制御法の理論的考察	87
原 道宏	
3. 植物群落によるオゾンの吸収	123
古川昭雄・佐々木美緒子・森田茂廣	
4. 分光反射特性に基づく植物群落のクロロフィル量及び葉面積指数の遠隔計測 に関する基礎研究	137
青木正敏・戸塚 績	
5. 数種の土壌におけるエチレン分解能力	149
沢田信一・戸塚 績	

IV 植物の大気汚染質の解毒機能に関する研究

1. 亜硫酸イオンの細胞生長に及ぼす作用…………… 159
竹内裕一・斎藤 真・近藤矩朗・滝本道明・菅原 淳
2. オゾン抵抗性と活性酸素毒性防御物質…………… 167
田中 浄・須田好子・近藤矩朗・菅原 淳

V 植生の大気汚染質抵抗性に関する研究

1. 植物葉のアブサイシン酸及びオーキシシン含有量に及ぼす SO₂暴露の影響 …… 173
近藤矩朗・鈴木 隆
2. オゾンガス暴露による高等植物葉の脂質変動…………… 179
榊 剛・近藤矩朗
3. 植物葉中の炭水化物の簡易測定法と二酸化窒素とオゾン暴露がインゲン葉中
の炭水化物量に及ぼす影響…………… 187
伊藤 治・戸塚 績
4. ヒマワリ葉の水分状態に及ぼすオゾンの影響…………… 201
古川昭雄・養原 茂・田崎忠良

VI 植生の成立過程に関する研究

1. アカマツ林伐採跡地における植生の成立過程に関する研究…………… 213
可知直毅・戸塚 績・安岡善文・鈴木啓祐

CONTENTS

I	Outlines of the Research Project "Studies on the Role of Vegetation as a Sink of Air Pollutants"	1
	Tsumugu TOTSUKA	
II	Capacity of Air Pollution Uptake by Plants	
	1. Screening of air-filtering plants —Interspecific difference in characteristics of leaf diffusive resistance among broad-leaved tree species—	13
	Yasumi FUJINUMA, Takashi MACHIDA, Kunio OKANO, Toshiki NATORI and Tsumugu TOTSUKA	
	2. Studies on evaluations of absorption capacity of air pollutants by plant population —Effects of light intensity on stomatal resistance of <i>Polygonum cuspidatum</i> during SO ₂ fumigation—	29
	Toshiki NATORI and Tsumugu TOTSUKA	
	3. Gaseous pollutant sorption by plants —The comparison between SO ₂ sorptions of plant leaf and several matters—	39
	Fumiaki ABO, Kenji OMASA and Ichiro AIGA	
	4. Measurement of stomatal aperture by digital image processing	43
	Kenji OMASA and Morio ONOE	
	5. ¹⁵ N dilution method for estimating the absorption of atmospheric NO ₂ by plants	53
	Kunio OKANO, Tokihide FUKUZAWA, Tadayoshi TAZAKI and Tsumugu TOTSUKA	
	6. Absorption, detoxification and translocation of ¹⁵ NO ₂ by sunflower leaves with special reference to leaf age	67
	Kunio OKANO, Hiroshi TAKASAKI and Tsumugu TOTSUKA	
III	Capacity of Air Pollution Uptake by Plant Communities	
	1. Canopy-microclimate in the plant environment simulator —Effects of velocity profile system—	79
	Kenji OMASA, Shigeru MATSUMOTO and Ichiro AIGA	

2 . Discussions on the control method of soil water distribution in environmentally controlled rhizosphere	87
Michihiro HARA	
3 . Uptake of ozone by plant communities	123
Akio FURUKAWA, Mioko SASAKI and Shigehiro MORITA	
4 . An evaluation of chlorophyll content and leaf area index of canopies based on spectral reflection characteristics	137
Masatoshi AOKI and Tsumugu TOTSUKA	
5 . Degradation capacity of atmospheric ethylene in soils taken from various vegetations	149
Shinichi SAWADA and Tsumugu TOTSUKA	
IV Detoxication of Air Pollutants by Plant Cells	
1 . Effect of sulfite ion on cell-expansion growth	159
Yuichi TAKEUCHI, Makoto SAITO, Noriaki KKANO, Michiaki TAKIMOTO and Kiyoshi SUGAHARA	
2 . Ozone tolerance and substances defending against active oxygen toxicity	167
Kiyoshi TANAKA, Yoshiko SUDA, Noriaki KONDO and Kiyoshi SUGAHARA	
V Resistance of Plants to Air Pollutants	
1 . Effect of SO ₂ fumigation on the contents of abscisic acid and indole-3-acetic acid in plant leaves	173
Noriaki KONDO and Takashi SUZUKI	
2 . Lipid changes in higher plant leaves with ozone fumigation	179
Takeshi SAKAKI and Noriaki KONDO	
3 . Simple analysis of carbohydrate in plants and effects of NO ₂ and O ₃ on carbohydrate contents in kidney bean leaves	187
Osamu ITO and Tsumugu TOTSUKA	
4 . Effect of ozone on water balance in sunflower leaves	201
Akio FURUKAWA, Shigeru MINOHARA and Tadayoshi TAZAKI	
VI Regeneration Process of Plant Communities	
1 . Studies on the regeneration process of plant communities following forest cutting	213
Naoki KACHI, Tsumugu TOTSUKA, Yoshifumi YASUOKA and Keisuke SUZUKI	

I

研究の目的と成果の概要

Outlines of the Research Project "Studies on the Role of
Vegetation as a Sink of Air Pollutants"

戸塚 績

Tsumugu TOTSUKA

Abstract

The aim of this project in 1982-85 is to develop a methodology for ameliorating polluted atmospheric environment by vegetations. Gas absorption capacity of plants under various environmental conditions will be investigated in different kinds of plant species. Characteristics of plant species with high capacity of gas absorption as well as high tolerance to air pollutants will be clarified with special reference to the foliar structure and detoxication functions of the plants. Based on the obtained results a technique for selecting usefull plants as a sink of air pollutants will be established. Furthermore, the role of vegetation as an air pollutant remover will be evaluated using simulation model dealing with time trends in species composition, development of biomass and physiological functions of plant canopy, such as absorption of air pollutants and release of oxygen and water vapor.

To progress the above mentioned aims of the research project which was initiated in 1982, following themes have been established:

- 1) Capacity of air pollution uptake by plants
- 2) Capacity of air pollution uptake by *plant communities*
- 3) Detoxication of air pollutants by plant cells
- 4) *Resistance of plants to air pollutants*
- 5) Regeneration process of plant communities
- 6) Evaluation on the role of vegetation as a sink of air pollutants

This interim report includes 18 papers related to the themes 1) to 5), which presented the results obtained in the period 1982-83. The list of publications and titles of oral presentations in connection with the research project are attached in the text.

New techniques and knowledge developed in this project will be useful for planning the plantation of road-side trees and construction of greenbelts for ameliorating the atmospheric environment in industrialized districts.

SO₂の生活環境中における濃度は年々減少し、環境基準を満足する地域が多くなってきた。しかし、NO₂濃度は多くの都市域で横ばいか、あるいは年ごとに上昇する気配さえみせている。また二次汚染物質の光化学オキシダント濃度は都市域ばかりでなく都市郊外においても社会問題となっている。さらに近年の石油エネルギー危機に伴い、石油燃料に比較して各種の大気汚染物質を多量に排出する石炭の使用量を今後、飛躍的に増大させるという政府方針が打ち出されてきた。このため、それらの使い方によっては大気環境が現状より悪化するのではないかと懸念されている。

このような大気汚染の状況をふまえて、各地の産業立地の開発において、緩衝緑地を造成して生活環境の保全を図るべく開発担当者に要請されている。

しかしながら、緑地の大気浄化機能、気候緩和機能等の環境保全機能や、都市部あるいは沿岸部の産業立地にみられるような植生の成立に不適当な環境下における緑地の成立条件に関する基礎的知見が欠如しているのが現状である。そのために地域性を考慮した上で、どの程度の規模でどのような種類組成の緑地を造成すれば生活環境の悪化を防止し、さらに悪化した環境の改善に寄与しうるのか具体的な提言はなされていない。

これまで実施されてきた特別研究によりSO₂、NO₂、O₃などの大気汚染ガスが植物体内に侵入し植物に障害を与えるが、その程度は植物の種類や生育条件及び気象条件によって著しく変動することが明らかになり、植物の種類によっては多量の汚染物質を体内に吸収し、体内での種々の解毒作用により無毒化していることが明らかになってきた。さらに、これらの解毒能力をもつ植物が汚染大気の浄化に貢献していることを示唆する基礎的知見が蓄積されてきた。

そこで、本研究では都市域の複合大気汚染環境における植物の大気浄化機能を明らかにすることを目的として、生物環境部生理生化学研究室、陸生生物生態研究室並びに技術部生物施設管理室の共同研究のもとに下記の分担課題を設定し、昭和57年度より4か年計画で研究が開始された。

- 1) 植物の大気汚染質吸収能に関する研究
- 2) 植生の大気汚染質吸収に関する研究
- 3) 植物の大気汚染質の解毒機能に関する研究
- 4) 植生の大気汚染質抵抗性に関する研究
- 5) 植生の成立過程に関する研究
- 6) 植生の大気浄化能力の総合評価に関する研究

図1に分担課題における主な研究目的と課題間の関連を示す。

本研究では二酸化硫黄、二酸化窒素、オゾン、炭化水素を中心とする複合大気汚染物質に対する植物の吸収能力に関する種間差異を明らかにするとともに植物のガス吸収を支配する影響要因を検討する。一方、植物の汚染ガス抵抗性と植物体における解毒機構との関係を生理生化学的、生態学的な視点で検討し、大気浄化に利用しうる植物の選定基準を明らかにする。さらに、植物集団における大気浄化能力やガス抵抗性と環境条件との関係を解明し、両者の関係を示す数学モ

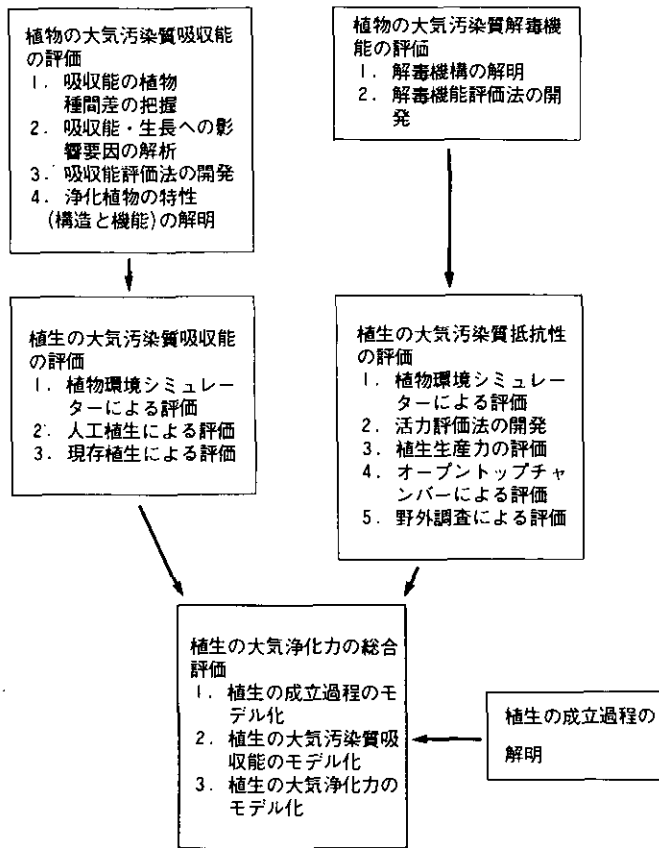


図1 分担課題における研究内容の相互関係
矢印の方向は研究成果の利用と進展の方向を示す。

デルを導入して種々の環境条件下における植生の大気浄化能力及びそれに付随する都市気候緩和機能を評価する。これらの成果が都市部や産業立地における大気環境の浄化を目的とした緑地造成計画に対して有用な知見を提供しうると確信している。

本報告書は4か年計画の前半の2年間に得られた主な成果をまとめたものである。以下に各分担課題ごとに採録された研究成果の概要を述べる。

1 材物の大気汚染質吸収能に関する研究

大気浄化能力の高い植物を検索するための第一段階として、落葉広葉樹78種、常緑広葉樹35種を対象として、植物のガス吸収能力の一指標である葉のガス拡散抵抗の特性をポロメーター法により調査した。調査した全樹種の葉面拡散抵抗値の平均値は $1.41 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ で、最小値は落葉樹のキリ ($0.41 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$)、最大値は常緑樹のアセビ ($4.08 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$) であった。落葉樹、常緑樹それぞれ

の平均値は 1.14 と $2.02 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ であり、両者の間に有意差が認められた。一方、葉表面の拡散抵抗値と気孔密度との間には相関が認められなかった。

各樹種の光要求性と拡散抵抗値との間には負の相関が認められ、広葉樹では陽樹的性質を持つ樹種で拡散抵抗値が小さくなる傾向が認められた。本調査により、大気浄化機能の高いと思われる樹種を検索する簡便法としてポロメーター法が有効であることが判明した。また、調査結果から、葉面拡散抵抗値が小さく(すなわち気孔開度が大きい)、かつ、その値が環境変化に対して影響されにくい樹種として、落葉広葉樹であるコウゾ、エノキ、キリ、ケヤキ、シンジュ、センダンなどが選定された。

植物集団のガス収着量評価のための数学モデルの開発に必要な基礎資料を得ることを目的として、植物のガス吸収を支配する主要因である気孔開度に及ぼす SO_2 長期暴露の影響を SO_2 耐性の高いイタドリについて検討した。イタドリに 0.7 ppm SO_2 を約3週間連続暴露した結果、気孔開度の逆数に相当する気孔拡散抵抗値と光強度との間に対照区の植物と同様に直線関係が成立した。いずれの光強度における気孔開度も SO_2 暴露した植物では対照区の場合より若干低下していた。一方、ヒマワリ葉や種々な物質(塩水、淡水、木材、スレート、土壌)の表面における SO_2 収着速度を測定した結果、ヒマワリ葉の値は試験した物質表面における値と比較して約2倍となっていた。

植物のガス吸収を律速する葉面の気孔開度の経時変化を新たに開発した遠隔操作型の光学顕微鏡システムを用いて計測した結果を、デジタル画像処理法により解析した。その結果、 SO_2 処理した気孔に隣接した気孔では開閉反応に大きなばらつきが見られ、葉面に水滲症状やしおれ現象が発現する前に一時的に気孔開度が増大することが確認された。

植物による二酸化窒素の比較的長期間にわたる吸収量を測定する手法としての ^{15}N 希釈法を、ヒマワリとトウモロコシを用いて検討した結果、本法で得られたガス吸収速度はこれまで報告されている値とほぼ同様な値が得られ、植物による長期間にわたる NO_2 吸収量の測定に ^{15}N 希釈法が最適であることが証明された。

植物体内に取り込まれた NO_2 の挙動を明らかにするために、約 3.0 ppm NO_2 をヒマワリ葉に吸収させた。その結果、老葉になるほど吸収された $\text{NO}_2\text{-N}$ がその葉内でタンパク質に取り込まれる割合は低下し、他部位へ流転する割合が増大した。しかし、生長中の若い葉に吸収された $\text{NO}_2\text{-N}$ はその葉の展開が完了するまで他部位へほとんど流転せず、その葉自身の生長に利用されることが明らかとなった。

2 植生の大气汚染質吸収に関する研究

自然環境シミュレーターを利用してモデル植物群落のガス吸収量を評価するための第一段階として、同装置内の微気象を支配する主要因である気流を速度成層装置を用いて調節する手法の開発をすすめ、乱れの強さやスペクトルにはまだ問題があるが、群落で観察される気流のプロファ

イルを従来の装置に比べて短い吹走距離で作ることができた。

また、植物のガス吸収を左右する土壤水分環境を制御する手法を開発するために、同シミュレーター内で使用される土壤環境制御装置における水分分布の変化を理論的に解析した。

自然環境シミュレーター内にキクとソルガムそれぞれのモデル群落を配置し、オゾン吸収量を種々な環境条件下で測定した。その結果、空気中のオゾン濃度はガス吸収が最も盛んな群落表面で顕著に低下した。群落上の光強度が増大するにつれて、また群落の表面積密度の増加に伴って群落内でのオゾン減衰量は増大した。そのオゾン減衰量は葉面積密度が等しいときでもキク群落の方がソルガム群落の約5倍高かった。その差異は単葉での測定結果から葉面における気孔拡散抵抗の差異によることが判明した。

植物群落のガス吸収量に関する広域調査のためのリモートセンシング手法を開発するために、植物群落表面における分光反射特性と群落の葉面積指数との関係を検討した結果、800nm (NI) と660nm (R) における分光反射率（それぞれ r_{NI} , r_R と略称） r_{NI}/r_R が群落の葉面積指数を推定するのに最も適していることが確認された。

陸上生態系における大気浄化能力を評価する際には、植物体地上部によるガス吸収量のみでなく土壤表面におけるガス吸着量を考慮する必要がある。そこで水田土壤やブナ林、スギ林、ヒバ林から採取した森林土壤によるエチレンの吸着・分解速度を測定した。その結果、新鮮土壤における好気条件下のエチレン吸着分解速度はエチレンの大気中濃度30ppmのとき、ブナ林、スギ林、ヒバ林、水田の各土壤でそれぞれ150, 130, 60, 5nl/g d.w./dであった。この吸着分解速度は大気エチレン濃度の増加に伴って指数関数的に増加した。

3 植物の大気汚染質の解毒機能に関する研究

植物が汚染大気を浄化するためには、気孔により大気汚染質を吸収し続ける必要がある。そのためには汚染ガスあるいは植物体内で二次的に生成した毒物を無毒化し、植物の生理機能を維持しなければならない。植物の汚染ガス解毒機能を解明するためには、植物の生理機能に対する汚染ガスの影響を詳細に検討するとともに、障害に関与する毒物及び毒物の生成蓄積機構を明らかにする必要がある。既に SO_2 による種々の障害には各種の活性酸素分子種が関与していることを明らかにし、 O_3 による可視障害の発現にも活性酸素が関与していることを示した。しかし、 O_3 障害の初期過程については全く明らかにされていなかった。 NO_2 による障害には、亜硝酸イオン (NO_2^-) が関与していることが示唆されたが、その作用機作は明らかでない。本研究では大気汚染ガスの生理機能に対する影響をさらに詳細に検討するとともに、大気汚染物質及び二次生成毒物の無毒化の機構の解明を目指している。次の分担課題の中で述べられるように、植物の O_3 抵抗性とアスコルビン酸含有量との間に相関関係があり、 O_3 解毒機構として生体内還元物質であるアスコルビン酸、還元型グルタチオンによる O_3 あるいは O_3 由来の酸化物質の還元、無毒化が示唆された。

4 植生の大気汚染質抵抗性に関する研究

SO₂の植物影響については光合成や可視障害に関する研究が多く、生長阻害の機作や植物ホルモン等に関する研究は少ない。本研究において、亜硫酸イオンのキュウリ子葉の生長に対する影響を調べ、亜硫酸は細胞壁の代謝に影響を与えることにより生長を阻害する可能性を明らかにした。また、植物の最も基本的なホルモンであるオーキシンの定量法について検討し、SO₂暴露のオーキシン含有量に及ぼす影響について予備実験を行った。

O₃による障害の初期過程として、細胞の膜を構成する脂質の変化に注目して研究を進めた結果、可視障害が見られる前に葉緑体を構成する糖脂質含有量が顕著に減少し、相補的に中性脂質が増大すること、糖脂質の減少と可視障害との間に相関関係があることを見いだした。また、O₃による障害はO₃の酸化力によっており、植物葉内の還元物質、特にアスコルビン酸含有量がO₃抵抗性と密接に関係していることが明らかになった。

植物の汚染ガス抵抗性と植物体内要因との関係を明らかにするための一貫として、二酸化窒素とオゾンの暴露によるインゲンマメ葉中の炭水化物量の変化を測定した。その結果、葉中のグルコースとシュクロース量は二酸化窒素暴露で減少し、オゾン暴露で増大した。一方、単位葉面積当たりの蒸散速度とデンプン量はガス暴露処理によりいずれも減少し、両者の間に比較的良い正の相関が示された。このことはデンプンの蓄積が光合成を介して気孔の開閉と一定の関係にあり、デンプンの蓄積量を光合成活性を表す一指標として利用できる可能性が示唆された。

一方、オゾン暴露によるヒマワリ葉の可視障害と葉の水分状態との関係を調べた結果、可視障害の発現割合と葉の水ポテンシャル、浸透ポテンシャルとの間に高い相関が認められた。

5 植生の成立過程に関する研究

大気環境浄化にかかわる都市周辺域に成立する二次林の成立過程を明らかにするために、筑波学園都市内のアカマツ林を伐採した跡地における植生の再生過程を現地調査した。一方、マルチバンド航空写真を撮影し、植生遷移過程をマルコフ連鎖モデルで解析し、遷移の将来予測のための手法の開発を進めた。

以上の分担課題のほかに、「植生の大気浄化能力の総合評価」のための課題が設定されている。この課題では上記の5課題で得られた成果をもとに都市域に成立する植生の大気浄化能力の経年変化を予測するモデル式を組み立てる予定であり、本研究計画の最終年度において具体的に検討することになっている。

これまで本研究によって得られた成果は本報告書に採録された他に本文の終わりにまとめられているように、印刷発表 19 編、口頭発表 38 編として公表されている。これらの成果は今後本特別研究を進展させて行く上に生かされ、残された研究期間に所期の目的を達成できるよう努力する所存である。また、本報告書の成果が本研究に関連した研究領域で参考資料として活用されれば幸いである。

終わりに当たり、本研究を推進する上で多くの大学関係者、試験研究機関の研究者の方々に客員研究員として研究協力をお願いし、また、有益な御指導、御助言を賜りましたことを深く感謝いたします。

研究組織

A. 研究担当者

1. 生物環境部 部長 菅原 淳
2. 生物環境部生理生化学研究室
近藤矩朗・田中 浄・島崎研一郎・竹内裕一・榑 剛
3. 生物環境部陸生生物生態研究室
戸塚 績・古川昭雄・岡野邦夫・伊藤 治・名取俊樹・可知直毅・清水英幸
4. 技術部生物施設管理室
相賀一郎・大政謙次・安保文彰・藤沼康実・松本 茂・町田 孝
5. 環境情報部情報システム室
安岡善文

B. 客員研究員

1. 岩城英夫 (57年度～)・藤伊正 (57年度～)・及川武久 (57年度～)・内宮博文 (57年度～)
(筑波大学生物科学系)
2. 古藤田一雄 (58年度～) (筑波大学水理実験センター)
3. 大西純一 (57年度) (埼玉大学理学部)
4. 田崎忠良 (58年度)・滝本道明 (57年度～) (東邦大学理学部)
5. 尾上守夫 (59年度) (東京大学工学部)
6. 駒嶺 穆 (58年度) (東京大学理学部；現在、東北大学理学部)
7. 山田晃弘 (57年度～)・庄野邦彦 (57年度～) (東京大学教養学部)
8. 長野敏英 (58年度～) (東京大学農学部；現在東京農業大学)
9. 大森正之 (58年度～) (東京大学海洋研究所)
10. 和田正三 (58年度～) (都立大学理学部)
11. 河野恭広 (57, 58年度)・手塚修文 (57, 58年度)・巽 二郎 (59年度) (名古屋大学農学部)
12. 浅田浩二 (57, 58年度)・高橋正昭 (59年度) (京都大学食糧科学研究所)
13. 鈴木 彰 (58年度～) (千葉大学教育学部)
14. 竹葉 剛 (57年度～) (京都府立大学生活科学部)
15. 鈴木 隆 (58年度～) (山形大学教育学部)
16. 矢吹万寿 (59年度)・原蘭芳信 (59年度) (大阪府立大学農学部)

戸塚 績

17. 青木正敏 (58年度～)・鈴木義則 (59年度) (山口大学農学部)
18. 森田茂廣 (57, 58年度)・三宅 博 (57年度～) (東京農工大学農学部)
19. 橋本 康 (57年度～) (愛媛大学農学部)
20. 原 道宏 (57年度～) (岩手大学農学部)
21. 佐藤 光 (57年度～) (九州大学農学部)
22. 小林善親 (57年度～) (鹿児島大学理学部)
23. 鈴木啓祐 (57年度～) (流通経済大学経済学部；現在，亜細亜大学経済学部)
24. 伊藤 繁 (57年度～) (基礎生物学研究所)
25. 松岡義浩 (57, 58年度) (千葉県農業試験場)
26. 相原敬次 (57年度～) (神奈川県公害センター)
27. 岩月善之助 (57年度～) (服部植物研究所；現在，広島大学理学部)
28. 佐藤秋生 (57年度～) (電力中央研究所生物研究所)
29. 沢田信一 (58年度～) (弘前大学理学部)

発表一覧

A. 印刷発表

1. 青木正敏・戸塚 績・矢吹万寿・王 茂新 (1984)：植生量の推定方法に関する基礎研究。文部省「環境科学」研究報告集B197-R52, 128-138.
2. 藤沼康実 (1984)：「実験植物学」の必要性。関東の農業気象, 7, 16-19.
3. 藤沼康実・相賀一郎 (1984)：光環境試験室の実際と植物の生長反応。昭和59年度電気四学会連合大会論文集(2), 153-156.
4. Ito, O., F. Mitsumori and T. Totsuka (1985)：Effects of NO₂ and O₃ alone or in combination on kidney bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.)：Products of ¹³C₂O₂ assimilation detected by ¹³C nuclear magnetic resonance. J. Exp. Bot., 36, (in press)
5. Kachi, N., Y. Yasuoka, T. Totsuka and K. Suzuki (1985)：A stochastic model for describing revegetation following forest cutting：an application of remote sensing. Proc. 4th International Conference on State-of-Art in Ecological Modeling, Goda, T. (ed.) Elsevier Scientific, Amsterdam, (in press).
6. Natori, T. and T. Totsuka (1984)：An evaluation of high resistance in *Polygonum cuspidatum* to sulfur dioxide (SO₂). Jpn. J. Ecol., 34, 153-159.
7. Okano, K., O. Ito, G. Takeba, A. Shimizu and T. Totsuka (1984)：Alteration of ¹³C-assimilate partitioning in plants of *Phaseolus vulgaris* exposed to ozone. New Phytol., 97, 155-163.
8. Okano, K., T. Fukuzawa, T. Tazaki and T. Totsuka (1985)：Growth responses of plants

- to various concentrations of nitrogen dioxide. Environ. Pollut. (Ser. A), (in press).
9. Omasa, K. and M. Onoe (1984) : Measurement of stomatal aperture by digital image processing. Plant Cell Physiol., **25**, 1379-1388.
 10. 大政謙次・松本 茂・相賀一郎 (1985) : 群落微気象の制御—速度成層装置の効果, 関東の農業気象, **8**, 2-8.
 11. Sakaki, T., J. Ohnishi, N. Kondo and M. Yamada (1985) : Polar and neutral lipid change in spinach leaves with ozone fumigation : Triacylglycerol synthesis from polar lipids. Plant Cell Physiol., **26**(2), (in press).
 12. Sawada, S., K. Nakahata and T. Totsuka (1985) : Fundamental studies on dynamics of ethylene in ecosystem. III. Degradation capacity of atmospheric ethylene in soils taken from various vegetations. Jpn. J. Ecol., **35**, (in press).
 13. Shimazaki, K., K. Nakamachi, N. Kondo and K. Sugahara (1984) : Sulfite inhibition of photosystem II in illuminated spinach leaves. Plant Cell Physiol., **25**, 337-341.
 14. Shimazaki, K., K. Ito, N. Kondo and K. Sugahara (1984) : Reversible inhibition of the photosynthetic water-splitting enzyme system by SO₂-fumigation assayed by chlorophyll fluorescence and EPR signal *in vivo*. Plant Cell Physiol., **25**, 795-803.
 15. 巽 二郎・岡野邦夫・河野恭広 (1983) : 節位を異にする水稻根への窒素と炭素の転流—葉に供与した¹⁵N と¹³C の追跡—, 日作紀, **52**, 220-228.
 16. Takeuchi, Y., M. Saito, N. Kondo and K. Sugahara (1984) : Inhibition of zeatin-induced growth of cucumber cotyledons by sulfite ions. Plant Cell Physiol., **26**, (in press).
 17. 戸塚 績 (1983) : 酸性雨問題について, 産業公害, **19**, 402-410.
 18. 戸塚 績 (1985) : 地球の規模の CO₂濃度の増加と環境変化, 化学と工業, **38**(1), 32-34.
 19. 安岡善文 (1983) : リモートセンシングによる環境監視, 月刊地球, **5**, 668-672.

B. 口頭発表

1. 安部 弘・門田明雄・清水英幸・近藤矩朗・和田正三 : ホウライシダ配偶体の発芽生長に対する SO₂の影響, 日本生物環境調節学会第21回大会, 北九州 (58. 10).
2. 藤沼康実・佐藤 光・大村 武 : 日本在来品種の大気汚染物質に対する感受性について, 日本育種学会第65回講演会, 東京 (59. 4).
3. 藤沼康実・町田 孝・岡野邦夫・名取俊樹・戸塚 績 : 葉面拡散抵抗から見た広葉樹種の特性, 日本生物環境調節学会第22回大会, 鳥取 (59. 10).
4. 藤沼康実・戸塚 績・相賀一郎 : 実験植物の環境順応性の検討—ハツカダイコンの大気汚染ガス感受性に及ぼす水ストレス前歴の影響—, 日本生物環境調節学会第22回大会, 鳥取 (59. 10).

5. 古川昭雄・鄭 華淑：植物の水分バランスに及ぼす O_3 の影響。日本生物環境調節学会第22回大会，鳥取 (59. 10)。
6. Kachi, N., Y. Yasuoka, T. Totsuka, and K. Suzuki : A stochastic model for describing revegetation following forest cutting : an application of remote sensing. 4th International Conference on State-of Art in Ecological Modeling, Tsukuba, (1984, 8).
7. 可知直毅・安岡善文・戸塚 績・鈴木啓祐：遷移確率による植生遷移の解析。日本植物学会第48回大会，京都 (58. 10)。
8. 近藤矩朗： SO_2 による植物の傷害の初期過程について。第25回大気汚染学会，宇部 (59. 11)。
9. 名取俊樹・戸塚 績：葉外 CO_2 濃度変化による葉内 CO_2 濃度変化の定量的考察。第30回日本生態学会，松本 (58. 7)。
10. 名取俊樹・戸塚 績：煙害地における SO_2 汚染の土壌に対する影響。第24回大気汚染学会，四日市 (58. 11)。
11. 名取俊樹・戸塚 績：イタドリの光合成速度および生長速度におよぼす SO_2 長期暴露の影響。第31回日本生態学会，東京 (59. 4)。
12. 名取俊樹・戸塚 績：イタドリとヒマワリの乾物生長におよぼす SO_2 長期暴露の影響。第25回大気汚染学会，宇部 (59. 11)。
13. 仁平純子・竹内裕一・近藤矩朗・手塚修文： NO_2 暴露による植物の硝酸還元活性の変動。日本植物生理学会，金沢 (59. 4)。
14. 岡野邦夫・伊藤 治・清水 明・戸塚 績・竹葉 剛： O_3 と NO_2 の混合ガスに暴露されたインゲンにおける光合成産物の分配パターンの変化。第176回日本作物学会，沖縄 (58. 10)。
15. 岡野邦夫・福沢時秀・田崎忠良・戸塚 績：植物による大気 NO_2 の吸収と生長— ^{15}N 希釈法による評価—。第177回日本作物学会，藤沢 (59. 7)。
16. 岡野邦夫・戸塚 績・福沢時秀・田崎忠良： ^{15}N 希釈法による植物の大気 NO_2 吸収能の推定。第21回理工学における同位元素研究発表会，東京 (59. 7)。
17. 岡野邦夫・福沢時秀・田崎忠良・戸塚 績：ヒマワリの NO_2 吸収能に及ぼす窒素栄養条件の影響。第178回日本作物学会，福岡 (59. 10)。
18. 岡野邦夫・戸塚 績：植物の栄養生長に及ぼす各種濃度の NO_2 の影響。第25回大気汚染学会，宇部 (59. 11)。
19. 岡野邦夫・戸塚 績： ^{15}N 希釈法を利用した植物の大気 NO_2 吸収能の評価。第25回大気汚染学会，宇部 (59. 11)。
20. 大政謙次・松本 茂・相賀一郎：群落微気象の制御—速度成層装置の効果。農業気象学会関東支部会，千葉 (60. 1)。
21. 大政謙次・尾上守夫：植物蛍光の画像計測システム。農業気象学会関東支部会，千葉(60.1)。

22. 榊 剛・山田晃弘・近藤矩朗：オゾン (O₃) ガス接触による高等植物葉の糖脂質および中性脂質含量の変動。日本植物生理学会，金沢 (59. 4)。
23. 榊 剛・近藤矩朗：オゾン (O₃) ガス接触による植物葉脂質含量の変化。第25回大気汚染学会，宇部 (59. 11)。
24. 島崎研一郎・近藤矩朗・菅原 淳：大気汚染物質 (SO₂, O₃, NO₂) のハウレンソウ葉クロロフィル蛍光誘導期現象に及ぼす影響。日本植物生理学会，松山 (58. 4)。
25. 菅原 淳：大気汚染に対する植物の抵抗性と浄化機能。国立公害研究所10周年記念特別研究発表会 (59. 6)
26. 竹内裕一・近藤矩朗・仁平純子・手塚修文：NO₂ガスの硝酸還元酵素に対する影響。日本生物環境調節学会第22回大会，鳥取 (59. 10)。
27. 田中 浄・近藤矩朗：活性化チオールセファロース 4 B によるリブローズ-5-リン酸キナーゼ精製とその性質。日本植物生理学会，松本 (58. 4)。
28. 田中 浄・近藤矩朗：レタス葉緑体リブローズリン酸キナーゼの解離。日本生化学会，福岡 (57. 9)。
29. 田中 浄・小野千里・近藤矩朗：光活性化酵素の膜結合性。日本植物生理学会，松山 (58. 4)。
30. 田中 浄・近藤矩朗：リブローズリン酸キナーゼとチオレドキシンの反応性。日本植物生理学会，金沢 (59. 4)。
31. 田中 浄・近藤矩朗：二酸化硫黄接触時の植物における活性酸素生成。第25回大気汚染学会，宇部 (59. 11)。
32. 巽 二郎・岡野邦夫・河野恭広：節位を異にする水稻根への窒素と炭素の転流—葉に供与した¹⁵N と¹³C の追跡—。第174回日本作物学会，京都 (57. 10)。
33. 巽 二郎・岡野邦夫・河野恭広：小麦成熟葉からの炭素と窒素の転流—単葉への¹³CO₂と¹⁵NH₃ガスの同時供与—。第176回日本作物学会，沖縄 (58. 10)。
34. 戸塚 績：環境科学研究における環境調節装置の役割。日本生物環境調節学会第21回大会，北九州 (58. 10)。
35. 戸塚 績：植物を指標とした大気汚染評価について。産業公害防止協会第12回公害防止推進九州地方大会，北九州 (59. 10)。
36. 戸塚 績：緑地の大気浄化機能。第25回大気汚染学会，宇部 (59. 11)。
37. 安岡善文・可知直毅・鈴木啓祐：リモートセンシングによる植生遷移の解析 (推移行列の抽出)。第22回 SICE 学術講演会，京都 (58. 7)。
38. 安岡善文・可知直毅・鈴木啓祐：植生生態遷移のリモートセンシング—遷移確率行列の算出。日本リモートセンシング学会第3回学術講演会，東京 (58. 12)。

II 植物の大気汚染質吸収能に関する研究

Capacity of Air Pollution Uptake by Plants

II-1

大気浄化植物の検索
—広葉樹種における葉面拡散抵抗特性の種間差異—

Screening of Air-filtering Plants
—Interspecific Difference in Characteristics of Leaf Diffusive
Resistance among Broad-leaved Tree Species—

藤沼康実¹・町田 孝¹・岡野邦夫²・名取俊樹²・戸塚 績²

Yasumi FUJINUMA¹, Takashi MACHIDA¹, Kunio OKANO²,
Toshiki NATORI² and Tsumugu TOTSUKA²

要 旨

大気浄化機能の高い植物を検索するひとつの方法として、植物体のガス吸収能力の指標である葉面拡散抵抗を広葉樹種で計測し、各樹種の特性を記載するとともに、大気浄化機能の高い樹種の検索の可能性を検討した。

野外条件下で広葉樹113種(落葉樹78種, 常緑樹35種)の成熟葉裏面の葉面拡散抵抗と気孔密度を調査した。ポロメータ法で計測した全調査樹種の葉面拡散抵抗値の平均値は $1.41 \text{ s}\cdot\text{cm}^{-1}$ であり、最小値は落葉樹のキリ (*Paulownia tomentosa* Steud.) の $0.41 \text{ s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、最大値は常緑樹のアセビ (*Pieris japonica* D. Don) の $4.08 \text{ s}\cdot\text{cm}^{-1}$ であった。落葉樹種, 常緑樹種それぞれの平均値は 1.14 , $2.02 \text{ s}\cdot\text{cm}^{-1}$ であった。

同時に調査した気孔密度の平均値は 306 mm^{-2} であったが、落葉樹種と常緑樹種との間には有意な差が認められなかった。また、葉裏面の拡散抵抗値と気孔密度との間にはなんらの相関関係も認められなかった。

各樹種の光要求性と拡散抵抗値との間には負の相関が認められ、広葉樹種の葉面拡散抵抗値は、陽樹的性質をもつ樹種で小さくなる傾向があり、それぞれの樹種の生長に対する最適光環境に対応していることが認められた。

また、光環境変化に対する気孔閉鎖の応答性を調べるために、34樹種の成熟葉で10分間暗処理を行い、処理前後の葉裏面の拡散抵抗値を計測した。気孔閉鎖の応答性は樹種によって大きく異なっていたが、葉面拡散抵抗値の大きさとその間に相関関係は認められなかった。

1. 国立公害研究所 技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Engineering Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 国立公害研究所 生物環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

以上のことから、大気浄化機能の高い樹種を簡便に検索する方法としてポロメータ法が有効であり、今回の調査結果から、葉面拡散抵抗値が小さく、かつ、その値が環境変化に対して影響されにくい樹種として、落葉広葉樹であるコウゾ (*Broussonetia kazinoki* Sieb.), エノキ (*Celtis sinensis* Pers. var. *japonica* Nakai), キリ (*Paulownia tomentosa* Steud.), ケヤキ (*Zelkova serrata* Makino), シンジュ (*Ailanthus altissima* Swingle), センダン (*Melia azedarach* L. var. *subtripinnata* Miq.) などが見いだされた。

Abstract

Leaf diffusive resistance and stomatal density of 113 broad-leaved tree species (deciduous 78, evergreen 35) were measured in the field in order to select the tree species suitable for filtering the air pollutants from the atmosphere.

The mean value of leaf diffusive resistance of all species determined by a porometric method was $1.41\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$. The deciduous species showed significantly lower values (mean $1.14\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$) than the evergreen species (mean $2.02\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$). Among tested plants, *Paulownia tomentosa* Steud. gave the lowest value of $0.41\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$, and *Pieris japonica* D. Don gave the highest value of $4.08\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$.

The mean value of stomatal density on the abaxial surface of all species was 306mm^{-2} , and the difference between the deciduous species and the evergreen species was not statistically significant. As a result, there was no significant correlation between the diffusive resistance and the stomatal density.

The deciduous species so-called "sun-plant" gave a lower leaf diffusive resistance, and the evergreen species so-called "shade-plant" gave a higher value. There was a negative correlation between the light requirement and the diffusive resistance among those species.

Stomatal response to light condition was examined among selected 34 species. The degree of stomatal closure induced by the dark treatment for 10 min varied from still 'fully opened' to 'completely closed' among the tree species. But there was no significant correlation between the degree of stomatal closure and the leaf diffusive resistance.

From the present field survey, several deciduous tree species such as *Broussonetia kazinoki* Sieb., *Celtis sinensis* Pers. var. *japonica* Nakai, *Paulownia tomentosa* Steud., *Zelkova serrata* Makino, *Ailanthus altissima* Swingle, *Melia azedarach* L. var. *subtripinnata* Miq. were found to have a lower leaf diffusive resistance and a dull stomatal response to the changes of environmental conditions. The porometric method was demonstrated to be useful for the screening of air-filtering plants in the field.

Key words : Leaf diffusive resistance—Stomatal density—Stomatal response
—Porometric method—Broad-leaved tree.

1 はじめに

近年、人間の生活環境にとって、“緑（植物）”の重要性が叫ばれることが多くなってきた。例えば、大気中の粉塵やガス状大気汚染質を浄化するエアークリファ効果、騒音を和らげる防音効

果、気温上昇の軽減効果などの生活環境を改善する機能を植物が持っていることが認識されつつある。これらの植物の環境改善機能の中で、大気汚染環境の浄化、つまり、ガス状大気汚染質の植物体による吸収を積極的に評価しようとする提言（戸塚，1980）がある。植物の持つ大気汚染環境の浄化機能の評価が本プロジェクト研究の主題であり、その機能を実験的に評価検討することが、さまざまな研究領域から行われている。我々は、その一環として、大気浄化機能の高い植物の検索を行っている。

植物は光合成、呼吸、蒸散等の大気と葉中とのガス交換の大半を葉面に存在する気孔を介して行っている。ガス状大気汚染質の植物体への吸収も、同じく気孔を介して行われている。しかし、ガス状大気汚染質の植物体への吸収に関しての知見は少ない。特に、植物群落を対象とした報告では、Hill (1971) のアルファルファ群落実験が広く知られている程度である。その主な原因は、この吸収量の推定方法として、実際に植物体中に取り込まれたガス状大気汚染質中の元素を直接定量する方法や同位元素を利用する方法などがあるが、それらの実験操作が繁雑かつ困難であることによる。しかし、大政ら (1979) はこのガス状大気汚染質の植物体への吸収速度を気孔を含む葉面での水蒸気拡散速度から推定する方法論を開発し、ガス状大気汚染質の植物体への吸収量が容易に推定できるようになった。この方法により、Furukawa ら (1979) は二十数種の植物を用いて、二酸化硫黄の植物葉への吸収量と葉に発現する可視障害の程度との間には正の一次相関があることを示した。一方、藤沼ら (1981) は十数品種のポプラでガス状大気汚染質による可視障害と吸収量との関係を調べ、吸収量に比べて可視障害の発現程度が極めて小さい品種や頭著な品種があることを発見した。そして、ガス状大気汚染質の吸収量と可視障害の発現程度の関係から、ポプラ品種群を大気汚染環境に対する指標性とガス状大気汚染質の浄化能力の二面から分類することを試みた。

我々は、上述の藤沼ら (1981) の試みを発展させ、下記に示した検索指針を設定し、大気浄化機能の高い植物の検索を試みている。

- (1) 植物葉面のガス吸収能力が大きいこと。
- (2) ガス状大気汚染質による障害や影響を受けにくいこと。
- (3) 環境要因や植物体内の生理的要因の変動によって、葉面のガス吸収能力が影響されにくいこと。
- (4) 大気浄化機能が十分に発揮できるような植栽上の特徴（樹形・草姿、葉面積密度など）を持つこと。

本報告では、都市域や大気汚染地帯の街路樹や公園樹、緑化樹として用いられることが多い広葉樹木の中から、大気浄化機能の高い植物を検索するひとつの方法として、植物体のガス吸収能力の指標である葉面拡散抵抗をポロメータ法によって計測し、それぞれの樹種についてその特徴を記載するとともに、ポロメータ法による大気浄化機能の高い樹種の検索の可能性を検討した。

2 調査方法

茨城県林業試験場（茨城県那珂郡那珂町）の樹木展示圃に植栽されている樹種の中から落葉広葉樹78種、常緑広葉樹35種の計42科113種（付属資料参照）を選び、それらの葉面の気孔密度と水蒸気拡散抵抗を野外条件下で計測した。

2.1 気孔密度の計測

全樹種の成熟葉の表面、裏面の転写標本を SUMP 法によって作成し、得られた標本から主葉脈や支脈を除いた葉身部の顕微鏡写真（1視野 0.25mm²、一部の樹種では1視野 0.02mm²）を撮影し、5標本以上の写真で気孔数を計数した。それらの平均値を1mm²当たりの気孔密度に換算して示した。

2.2 葉面拡散抵抗の計測

葉面拡散抵抗は水蒸気拡散型のポロメータ（LI-1600, LI-COR 社製）で、藤沼ら（1983）の方法に準じて、太陽光が当たる位置の枝に着いたままの成熟葉の裏面で、主葉脈を除いた2cm²の葉身部を用いて計測した（一部の樹種では葉の上面も計測した）。このポロメータ法は計測葉を生育環境とほぼ同じ温・湿度条件に保ったまま計測できるので、計測に対して人為的影響が少ない方法である（Beardsell ら, 1970）。その上、計測葉を損傷することなく、一回の計測が短時間（30～60秒）で行え、野外条件下での計測に適している。調査は昭和58年8月と59年7月の2回行った。いずれの場合も、晴れ又は高曇りの天候時に行い、その上で、コウゾ（*Broussonetia kazinoki* Sieb.）を基準種として設定し、その値がほぼ一定値をとる時間帯（およそ9:00～14:30）に行った。各樹種の値は5枚以上の葉で同様な値が得られた場合に、それらの平均値で示した。また、計測は気孔が最大に開いている状態のもとで行われたと考えられ、今回の調査で得られた葉面拡散抵抗値はそれぞれの樹種の最小値であると言える。

なお、調査した樹種名やそれらの樹種の特性は上原、（1961a, b, c）、飯島・安蒜（1974a, b）、大井（1978）の著書を参考にした。

3 結果と考察

今回調査した全樹種の気孔密度、葉面拡散抵抗の計測結果、及びそれぞれの樹種の特性（常緑・落葉、樹高、光要求性）を表1に示した。以下、それらを項目別に検討した。

3.1 気孔密度の種間差異

調査した全樹種について気孔密度の計測を試みたが、毛茸の存在などにより9種で葉裏面の気孔数が計数できなかつた。それらを除く落葉樹（70種）と常緑樹（34種）それぞれの葉裏面1mm²当たりの気孔密度を7階級に区分し、各階級に該当する樹種数を図1に示した。今回計測した樹

表 1 気孔密度及び葉面拡散抵抗値に関する全調査樹種の特性表

Table 1 The characteristics of broad-leaved tree species based on the stomatal density and the leaf diffusive resistance

No.	Scientific name	Evergreen or Deciduous	Height (m)	Light re- quirement	Stomatal density (mm ⁻²)		Leaf diffusive resistance (abax, s · cm ⁻²)			Notice	
					adaxial	abaxial	July '84	Aug. '83	Mean		
1	<i>Paulownia tomentosa</i> Steud.	D	10-15	+2	53±10	430±20	.43±.03	.37±.06	.40	(adax; 1.91 ± .68)	
2	<i>Zelkova serrata</i> Makino	D	30	+2	0	262	.2	.46 .04	—	.46	
3	<i>Ailanthus altissima</i> Swingle	D	20	+2	0	204	22	.48 .05	—	.48	
4	<i>Broussonetia kazinoki</i> Sieb.	D	2-5	+1	47	7	590	35	.47 .08	.56 .12 .51	
5	<i>Melia azedarach</i> L. var. <i>subripinnata</i> Miq.	D	15-20	+2	0	278	34	.53 .04	.55 .08	.54	
6	<i>Celtis sinensis</i> Pers. var. <i>japonica</i> Nakai	D	15-20	+1	0	497	30	.39 .04	.69 .12	.54	
7	<i>Juglans ailanthifolia</i> Carr.	D	30	+2	0	*		.55 .08	—	.55	
8	<i>Catalpa ovata</i> G. Don	D	10	+2	0	316	28	.47 .07	.65 .14	.56	
9	<i>Juglans regia</i> L. var. <i>orientis</i> Kitamura	D	20	+2	0	240	46	.59 .14	.55 .04	.57	
10	<i>Hibiscus syriacus</i> L.	D	2-5	+1	56	10	272	29	.48 .05	.70 .09 .59	
11	<i>Eucalyptus pulverulenta</i> Sims.	E	30	+2	390	22	400	67	.61 .12	—	.61 (adax; .95 ± .29)
12	<i>Celastrus orbiculatus</i> Thunb.	D	vine	+1	0	218	61	.63 .06	.63 .10	.63	
13	<i>Quercus acutissima</i> Carr.	D	15	+1	0	476	60	.65 .11	.63 .05	.64	
14	<i>Diospyros kaki</i> Thunb.	D	15-20	+2	0	337	25	.61 .07	.73 .35	.67	
15	<i>Prunus persica</i> Batsch	D	3-5	+2	0	243	16	.62 .06	.72 .09	.67	
16	<i>Quercus mongolica</i> Fisher var. <i>grosseserrata</i> Rehd. et Wils.	D	20	0	0	632	30	.67 .04	.83 .21	.70	
17	<i>Corylopsis spicata</i> Sieb. et Zucc.	D	2-3	0	163	15	.74 .01	.70 .05	.72		
18	<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz. var. <i>japonica</i> Nakai	D	1.5-2	+1	0	# 142	62	.65 .08	.80 .19	.72	
19	<i>Prunus itosakura</i> Sieb.	D	20	+2	0	292	15	.66 .05	.78 .14	.72	
20	<i>Sapium sebiferum</i> Roxb.	D	16	+2	44	9	205	15	.60 .10	.85 .05	.72
21	<i>Prunus sargentii</i> Rehd.	D	12	+2	0	288	42	.68 .20	.95 .09	.81	
22	<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	D	30	+2	0	132	19	1.00 .18	.65 .08	.82	
23	<i>Sambucus sieboldiana</i> Blume ex Graebn.	D	2-3	+1	0	190	13	.74 .13	.90 .10	.82	
24	<i>Styrax japonicus</i> Sieb. et Zucc.	D	7-8	+1	0	305	42	.86 .11	.78 .18	.82	
25	<i>Forsythia suspensa</i> Vahl.	D	3	+2	0	323	9	.89 .21	.78 .11	.84	
26	<i>Robinia pseudo-acasia</i> L.	D	25	+2	0	*		1.04 .19	.68 .10	.86	
27	<i>Betula tauchii</i> Koidz.	D	20-25	+3	0	74	18	—	.86 .15	.86	
28	<i>Hamamelis virginiana</i> L.	D	3-5	+1	0	289	21	—	.87 .13	.87	
29	<i>Magnolia stellata</i> Maxim.	D	3	0	0	245	49	.86 .34	.92 .12	.89	
30	<i>Cornus controversa</i> Hemsl.	D	10-15	+2	0	*		.78 .16	1.05 .24	.89	
31	<i>Rhododendron oomurasaki</i> Makino	E	1-2	+2	0	347	35	—	.91 .26	.91	
32	<i>Cercis chinensis</i> Bunge	D	2-3	+2	0	288	14	.85 .07	1.00 .06	.92	
33	<i>Euonymus sieboldianus</i> Blume.	D	5-6	+1	0	261	17	—	.92 .12	.92	
34	<i>Euonymus alatus</i> Sieb.	E	1.5-3	-1	0	149	26	.92 .06	—	.92	
35	<i>Ginkgo biloba</i> L.	D	30	+2	0	109	13	1.03 .23	.84 .06	.93	
36	<i>Lagerstroemia indica</i> L.	D	6-7	+2	0	311	33	.93 .16	—	.93	
37	<i>Stachyurus praecox</i> Sieb. et Zucc.	D	2-3	+2	0	271	33	1.19 .22	.67 .63	.93	
38	<i>Ulmus davidiana</i> Planch. var. <i>japonica</i> Nakai	D	20	+2	0	362	27	.72 .15	1.18 .21	.95	
39	<i>Weigela floribunda</i> K. Koch	D	2	+1	0	246	34	.85 .08	1.07 .19	.96	
40	<i>Firmiana simplex</i> W. F. Wight	D	15	+2	0	818	42	.96 .13	—	.96	
41	<i>Myrica rubra</i> Sieb. et Zucc.	E	15	+2	0	557	79	.98 .09	—	.98	
42	<i>Fagus japonica</i> Maxim.	D	25	+2	0	237	77	.88 .12	1.12 .15	1.00	
43	<i>Prunus yedoensis</i> Matum.	D	10	+2	0	230	28	.73 .08	1.29 .13	1.01	
44	<i>Thea sinensis</i> L.	E	2-3	0	0	209	32	1.01 .20	—	1.01	
45	<i>Lonicera japonica</i> Thunb	E/D	vine	0	0	334	24	—	1.06 .19	1.06	
46	<i>Carpinus tschonoskii</i> Maxim.	D	12	+1	0	224	26	—	1.06 .06	1.06	
47	<i>Kalmia latifolia</i> L.	D	1-3	+1	0	200	20	1.12 .12	—	1.12	
48	<i>Prunus lannesiana</i> Wils.	D	5-10	+2	0	220	35	1.14 .12	1.14 .12	1.14	
49	<i>Maackia amurensis</i> Rupr. et Maxim. var. <i>buengeri</i> C. K. Schn.	D	12	+1	0	*		1.14 .03	1.15 .08	1.14	

(continued)

No.	Scientific name	Evergreen or Deciduous	Height (m)	Light re- quirement	Stomatal density (mm ⁻²)		Leaf diffusive resistance (abax, s · cm ⁻¹)			Notice			
					adaxial	abaxial	July '84	Aug. '83	Mean				
50	<i>Viburnum tomentosum</i> Thunb. var. <i>plicatum</i> Maxim.	D	1-3	+1	0	124 ± 10	1.34 ± .20	.96 ± .05	1.15				
51	<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	D	25-30	+2	0	298	70	1.22	.31	1.08	.27	1.15	
52	<i>Alnus japonica</i> Steud.	D	10-15	+2	0	61	10	1.11	.18	1.22	.24	1.16	
53	<i>Akebia quinata</i> Dence.	D	vine	+1	0	206	18	1.17	.12	1.15	.17	1.16	
54	<i>Alchornea trewioides</i> Muell. Arg.	D	shrub	+2	6 ± 2	276	52	1.20	.29	-	-	1.20	
55	<i>Kadsura japonica</i> Dunal	E	vine	-2	6	3	66	7	1.38	.42	1.03	.11	1.20
56	<i>Rhus chinensis</i> Miller	D	5-6	+2	0	*	1.20	.21	1.20	.15	1.20		
57	<i>Campis chinensis</i> Voss	D	vine	+2	0	202	18	1.02	.15	1.45	.10	1.23	
58	<i>Viburnum awabuki</i> K. Koch	E	10	-2	0	118	16	1.23	.15	-	-	1.23	
59	<i>Ilex serrata</i> Thunb.	D	2-5	+1	0	260	31	1.37	.14	1.16	.13	1.26	
60	<i>Acer saccharinum</i> L.	D	20	+2	0	*	1.34	.32	1.19	.18	1.26		
61	<i>Stauntonia hexaphylla</i> Dence.	E	vine	+1	0	640	68	1.09	.04	1.47	.14	1.26	
62	<i>Rhododendron kaempferi</i> Planch.	D	1-5	+1	0	105	11	1.20	.14	1.35	.22	1.27	
63	<i>Quercus serrata</i> Thunb.	D	15	+1	0	483	62	1.09	.04	1.47	.14	1.28	
64	<i>Prunus mume</i> Sieb. et Zucc.	D	7-10	+2	0	766	103	1.27	.30	1.29	.33	1.28	
65	<i>Solanum glaucophyllum</i> Desf.	E	1-2	+2	130	46	87	18	1.00	.14	1.57	.04	1.28
66	<i>Abelia grandiflora</i> Rehd.	D	0.6-1.5	0	0	260	27	1.51	.23	1.22	.20	1.36	
67	<i>Alnus sieboldiana</i> Matsum.	D	5-6	+2	0	207	17	1.43	.28	1.30	.13	1.36	
68	<i>Ilex rotunda</i> Thunb.	E	10-15	+1	0	242	32	1.22	.08	1.53	.14	1.37	
69	<i>Magnolia kobus</i> DC.	D	10-15	0	0	504	27	-	-	1.41	.07	1.41	
70	<i>Asimina triloba</i> Dunal	D	4-6	+2	0	271	22	1.31	.33	1.58	.24	1.44	
71	<i>Quercus dentata</i> Thunb.	D	15	+2	0	538	22	1.12	.06	1.80	.37	1.46	
72	<i>Magnolia grandiflora</i> L.	E	20	+2	0	248	13	1.28	.11	1.70	.24	1.49	
73	<i>Aesculus turbinata</i> Blume	D	25	-2	0	143	13	1.49	.23	-	-	1.49	
74	<i>Magnolia virginiana</i> L.	E	10	+2	0	288	36	1.46	.05	1.56	.30	1.51	
75	<i>Cydonia sinensis</i> Thouin	D	20	+2	0	291	63	1.52	.39	-	-	1.52	
76	<i>Raphiolepis umbellata</i> Makino var. <i>mertensii</i> Makino	E	1-1.5	-2	0	454	74	-	-	1.54	.12	1.54	
77	<i>Castanea crenata</i> Sieb. et Zucc.	D	10	+3	0	609	40	1.67	.24	1.50	.16	1.58	
78	<i>Wisteria brachybotrys</i> Sieb. et Zucc.	D	vine	0	0	297	27	-	-	1.60	.01	1.60	
79	<i>Clethra barbinervis</i> Sieb. et Zucc.	D	3-5	+1	0	124	24	1.60	.12	-	-	1.60	
80	<i>Castanopsis cuspidata</i> Schottky var. <i>sieboldii</i> Nakai	E	30	-1	0	554	88	1.66	.32	1.59	.26	1.62	
81	<i>Lindera obtusiloba</i> Blume	D	2-6	+1	0	398	49	1.35	.11	1.92	.18	1.63	
82	<i>Quercus myrsinaefolia</i> Blume	E	20	-1	0	775	51	1.38	.18	1.92	.25	1.65	
83	<i>Acer trifidum</i> Hook. et Arn.	D	15	+2	0	# 590	54	1.60	.30	1.87	.17	1.68	
84	<i>Platanus orientalis</i> L.	D	20-30	+2	3	3	267	30	1.85	.42	1.60	.18	1.72
85	<i>Quercus phyllireoides</i> A. Gray	E	15	+1	0	493	26	-	-	1.77	.31	1.77	
86	<i>Lindera umbellata</i> Thunb.	E	1.5-3	-2	0	139	16	1.70	.40	1.98	.10	1.79	
87	<i>Cinnamomum camphora</i> Sieb.	E	40	0	0	292	35	-	-	1.80	.06	1.80	
88	<i>Temstroemia gymnanthera</i> Sprague	E	10-15	-2	0	234	48	1.72	.35	1.90	.39	1.81	
89	<i>Fatsia japonica</i> Dence. et Planch.	E	2.5-3	-3	0	180	20	1.81	.09	-	-	1.81	
90	<i>Vaccinium oldhami</i> Miq.	D	3-6	+2	0	130	25	1.62	.12	2.15	.36	1.88	
91	<i>Syringa vulgaris</i> L.	D	2-6	+1	17	3	236	25	1.88	.25	-	-	1.88
92	<i>Quercus glauca</i> Thunb.	E	10-20	-1	0	667	51	1.76	.24	1.98	.48	1.88	
93	<i>Alnus pendula</i> Matsum.	D	5-6	+2	0	339	39	2.21	.71	1.60	.15	1.90	
94	<i>Acer rubrum</i> L.	D	15	+1	0	519	45	1.63	.24	2.25	.35	1.96	
95	<i>Pasania edulis</i> Makino	E	10	+2	0	*	-	-	1.98	.35	1.98		
96	<i>Machilus thunbergii</i> sieb. et Zucc.	E	20	-1	0	196	13	1.76	.31	2.30	.62	2.03	
97	<i>Photinia glabra</i> Maxim.	E	6-10	+1	0	490	73	2.00	.75	2.38	.54	2.19	
98	<i>Ligustrum lucidum</i> Ait.	E	5-8	-2	0	186	12	2.34	.22	2.15	.19	2.24	
99	<i>Daphniphyllum macropodum</i> Miq.	E	15	-3	0	240	12	22.32	.52	2.33	.23	2.32	
100	<i>Elaeagnus multiflora</i> Thunb. var. <i>gigantea</i> Araki	D	2-4	0	0	# 368	70	2.70	.36	1.96	.17	2.37	
101	<i>Neolitsea sericea</i> Koidz.	E	15	-1	0	*	2.20	.30	2.60	.29	2.40		
102	<i>Hedera rhombea</i> Bean	D	vine	-2	0	65 ± 12	1.92 ± .10	3.05 ± .76	2.48				
103	<i>Ilex latifolia</i> Thunb.	E	15-20	-2	0	187	12	2.72	.24	2.27	.29	2.49	
104	<i>Rhododendron quinquefolium</i> Bisset et Moore	D	4-5	-1	0	116	28	-	-	2.53	.30	2.53	
105	<i>Osmanthus fragrans</i> Lour. var. <i>aurantiacus</i> Makino	E	10	0	0	958	112	-	-	2.89	.29	2.89	
106	<i>Camellia sasanqua</i> Thunb.	E	6-12	-1	0	107	8	2.16	.32	3.88	.75	3.02	

(continued)

No.	Scientific name	Evergreen or Deciduous	Height (m)	Light requirement	Stomatal density (mm ⁻²)		Leaf diffusive resistance (abax, s · cm ⁻¹)			Notice		
					adaxial	abaxial	July '84	Aug. '83	Mean			
107	<i>Styrax obassia</i> Sieb. et Zucc.	D	10	-1	0	*	3.17	.55	2.98	.61	3.07	
108	<i>Aucuba japonica</i> Thunb.	E	2-3	-3	0	157	7	-	3.28	.49	3.28	
109	<i>Camellia japonica</i> L.	E	15	-3	0	396	42	4.05	.66	2.64	.78	3.34
110	<i>Eurya japonica</i> Thunb.	E	5	-1	0	422	27	4.19	.66	3.13	.44	3.66
111	<i>Mahonia japonica</i> DC.	E	1.5-2	-3	0	308	32	3.55	1.22	4.15	.88	3.85
112	<i>Cleyera japonica</i> Thunb.	E	10	-1	0	147	11	4.14	.53	3.62	.36	3.88
113	<i>Pieris japonica</i> D. Don	E	2-10	-2	0	406	32	3.87	.64	4.30	.57	4.08

- 1) Evergreen or deciduous 欄の“E”, “D”はそれぞれ常緑樹, 落葉樹を示した。
- 2) Light requirement (光要求性)は極陽樹(+3)から極陰樹(-3)までの7階級に分類した。
- 3) 気孔数は一視野0.25mm²(#印は0.02mm²)で計数し, 1mm²当たりの気孔密度に換算した。なお, *印は気孔が存在するが, 計数できなかったもの。
- 4) Leaf diffusive resistance (葉面拡散抵抗)は1983年8月と1984年7月の2回計測した。
- 5) Notice 欄中の数値は葉表面の拡散抵抗値を示した。
- 1) “E”, “D” in the “evergreen or deciduous” indicated “evergreen tree” and “deciduous tree” respectively.
- 2) Light requirement was classified into 7 classes from sun plant (+3) to shade plant (-3).
- 3) Numbers of stomata were counted on the 0.25mm² of leaf surface (but “#” : 0.02mm²).
- 4) “*” in the “stomatal density” indicated the trees which have stomata on leaf surface, but could not be counted.
- 5) The leaf diffusive resistance was measured at Aug. '83 and July '84 on the same trees.
- 6) The numerals in the “notice” indicated the leaf diffusive resistance of adaxial surface.

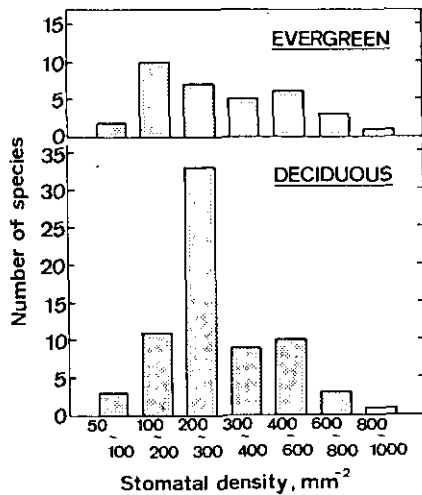


図 1 気孔密度の大きさにより分類した広葉樹種数の分布
調査樹数: 42科104種 (落葉樹70種, 常緑樹木34種)。

Fig. 1 Distribution of broad-leaved tree species based on stomatal density
Measured tree species belonged to 104 species among 42 families (deciduous; 70, evergreen; 34)

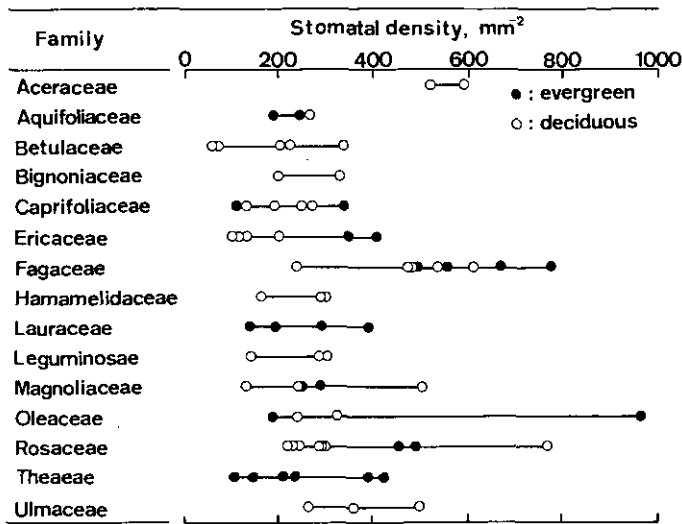


図 2 広葉樹種の気孔密度の科内分布 (○：落葉樹種, ●：常緑樹種)
 Fig. 2 Variations of stomatal density among broad-leaved tree families
 (○: Deciduous tree, ●: Evergreen tree)

種の中で、最小値は落葉樹のハンノキ (*Alnus japonica* Steud.)の 61mm^{-2} 、最大値は常緑樹のキンモクセイ (*Osmanthus fragrans* Lour. var. *urantiacus* Makino)の 958mm^{-2} であり、両者間には約15倍の違いがあった。全調査樹種の平均値と標準偏差は $306 \pm 176\text{mm}^{-2}$ であり、調査樹種の約3/4が $100 \sim 400\text{mm}^{-2}$ の範囲に存在しており、さまざまな植物で計測されている数値 (Monsi, 1944; Meidner & Mansfield, 1968; 星川, 1981)ともほぼ一致していた。そして、落葉樹種と常緑樹種それぞれの平均値と標準偏差は 293 ± 155 ($n=70$), $341 \pm 206\text{mm}^{-2}$ ($n=34$)であった。

また、同一科内での葉裏面の気孔密度の種間差異を調べた(図2)。同一科内に含まれる樹種群の気孔密度はカエデ科 (Aceraceae)、ブナ科 (Fagaceae)などで大きい傾向があったが、他の明確な特徴は認められなかった。

一般に、草本植物では葉の上面にも裏面同様に気孔が分布するが、木本植物では葉の上面に分布するものが少ないと言われている(浜, 1973; Larcher, 1975)。今回の調査でも大半の樹種には葉の上面に気孔が存在せず、7種の落葉樹と3種の常緑樹の計10種に存在していたにすぎなかった。それらの気孔密度は、 $3 \sim 6\text{mm}^{-2}$ と極端に少ないもの：オオバベニガシワ (*Alchornea trewioides* Muell. Arg.), サネカズラ (*Kadsura japonica* Dunal), スズカケノキ (*Platanus orientalis* L.)から、裏面の値に近いもの：マルバユーカリ (*Eucalyptus pulverulenta* Sims.), ルリヤナギ (*Solanum glaucophyllum* Desf.)までであった。

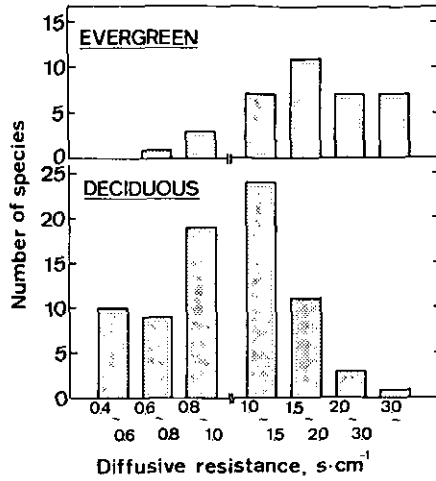


図 3 葉面拡散抵抗値の大きさにより分類した広葉樹種の分布
調査樹数：42科113種（落葉樹78種，常緑樹木35種）。

Fig. 3 Distribution of broad-leaved tree species based on leaf diffusive resistance
Measured tree species belonged to 113 species among 42 families (deciduous; 78, evergreen; 35)

3.2 葉面拡散抵抗の種間差異

調査した全樹種（落葉樹：78種，常葉樹：35種）の葉裏面の拡散抵抗を計測し，その値の大きさを7階級に区分し，各階級に該当する樹種数を図3に示した。今回計測した樹種の中で，最小値は落葉樹のキリ (*Paulownia tomentosa* Steud.) の $0.41s \cdot cm^{-1}$ ，最大値は常緑樹のアセビ (*Pieris japonica* D. Don) の $4.08s \cdot cm^{-1}$ であり，両者間には約10倍の違いがあった。全調査樹種の平均値と標準偏差は $1.41 \pm 0.79s \cdot cm^{-1}$ であり，約2/3のものが $0.8 \sim 2.0s \cdot cm^{-1}$ の範囲に存在していた。 $0.6s \cdot cm^{-1}$ 以下のものは10種あり，それらはすべて落葉樹であった。一方， $3.0s \cdot cm^{-1}$ 以上のものは8種あり，それらはすべて常緑樹であった。そして，落葉樹種，常緑樹種それぞれの平均値と標準偏差は 1.14 ± 0.52 ($n=78$)， $2.02 \pm 0.93s \cdot cm^{-1}$ ($n=35$) となり，両者間ではそれぞれの樹種がとる拡散抵抗値の分布型が異っていた。

また，全調査樹種を科別に分類して，同一科内での葉裏面の拡散抵抗値の種間差異を調べた(図4)。同一科内に含まれる樹種の平均値は，落葉樹種により構成されているもので小さく，常緑樹種によるもので大きくなる傾向があった。そして，同一科内の樹種のとる値の分布範囲はスイカズラ科 (*Caprifoliaceae*)，マンサク科 (*Hamamelidaceae*)，ニレ科 (*Ulmaceae*) などで狭く，ツツジ科 (*Ericaceae*)，モクセイ科 (*Oleaceae*)，バラ科 (*Rosaceae*)，ツバキ科 (*Theaceae*) などで広がっていた。さらに，それらを落葉樹種と常緑樹種に区分して比較すると，ツツジ科 (*Ericaceae*) の最小値であるオオムラサキ (*Rhododendron oomurasaki* Makino) を除くと，同

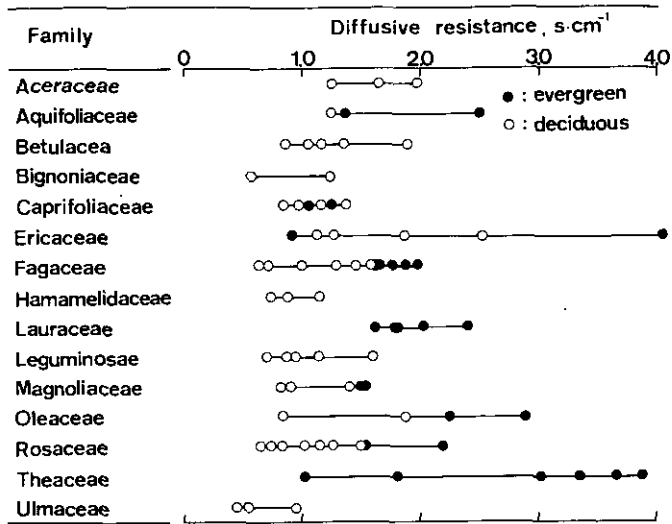


図 4 広葉樹種の葉面拡散抵抗値の科内分布 (○: 落葉樹種, ●: 常緑樹種)
 Fig. 4 Variations of leaf diffusive resistance among broad-leaved tree families (○: Deciduous tree, ●: Evergreen tree)

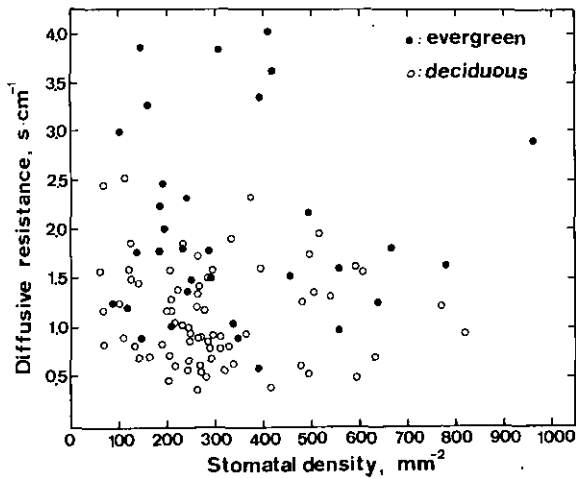


図 5 広葉樹種における葉面拡散抵抗値と気孔密度との関係
 調査樹種: 図1と同じ。

Fig. 5 Relation between leaf diffusive resistance and stomatal density in broad-leaved tree species
 Measured tree species were same as Fig. 1.

一科内でも落葉樹種より常緑樹種のほうが値が大きくなり、前述の全樹種の平均値を比較した結果と同様に、落葉樹種より常緑樹種のほうが、拡散抵抗値が大きいことが認められた。この結果

は、Körnerら(1979)が高等植物を様々な形態学的、生態学的特徴から分類し、それらの葉面拡散伝導度を比較検討して得た結果とも一致しており、落葉、常緑という樹種の生活型によって、それぞれの樹種がとる拡散抵抗値が異なることが分かった。

数種の樹木では葉の上面の拡散抵抗も計測したが、葉の上面に気孔が存在しない樹種や葉の上面の気孔密度が極端に小さいものは、ポロメータの計測限界以上の大きな値をとった。気孔密度が裏面の値に近いもの(マルバユウカリ、ルリヤナギ)は、拡散抵抗値も小さい値をとった。しかし、葉裏面の拡散抵抗値が $0.6\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以下の樹種には、葉の上面の気孔密度が大きいものは見いだせず、今回調査した樹種の中には、葉の表・裏両面の拡散抵抗値が共に小さい樹種はないと考えられた。

また、Monsi(1944)は30種の植物で気孔密度と蒸散速度との関係を調べ、両者間には相関関係が認められないことを報告している。ここでは、104樹種で葉裏面の気孔密度と拡散抵抗値の両者の関係を調べた(図5)が、気孔密度と拡散抵抗値との間にはなんらの相関関係($r=0.01$)も認められず、葉面でのガス交換現象は気孔密度と無関係であることが分かった。

3.3 樹種の光要求性と葉面拡散抵抗との関係

それぞれの植物種にとって、その種が生育するための最適環境条件が存在する。特に、樹木は植生遷移過程において、その樹種の生存条件が光条件によって決定されている。この本来もっている光要求性の程度と葉面拡散抵抗との関係を調べた。飯島・安蒜(1974a, b)は樹種の光要求性をそれぞれの樹種の生長程度を基準にして、“極陽樹”から“極陰樹”までの7階級に分類して

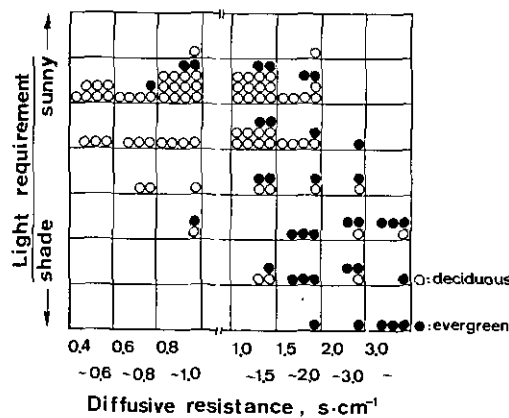


図 6 広葉樹種における葉面拡散抵抗値と光要求性との関係
調査樹種：図3と同じ。

Fig. 6 Relation between leaf diffusive resistance and light requirement in broad-leaved tree species
Measured tree species were the same as Fig. 3.

いる。この分類によると、今回調査した落葉樹種の約90%が“中庸”から“極陽樹”までに該当し、常緑樹種の約70%が“中庸”から“極陰樹”までに該当していた。その上、“極陽樹”に該当するものはすべて落葉樹であり、“極陰樹”はすべて常緑樹であった。この光要求性と拡散抵抗値との関係を図6に示した。拡散抵抗値が $0.6s \cdot cm^{-1}$ 以下のものは“やや陽樹”あるいは“陽樹”に該当し、それらのすべてが落葉樹であった。一方、 $3.0s \cdot cm^{-1}$ 以上のものは“やや陰樹”から“極陰樹”までに該当し、8種中7種が常緑樹であった。また、この光要求性を数値化して(“極陽樹”：+3～“極陰樹”：-3)、拡散抵抗値と光要求性との関係を調べたところ、両者間には負の一次相関($r=0.62$)が認められ、拡散抵抗値は、陽樹的性質を持つもので小さくなる傾向があった。このことから、葉面拡散抵抗値の大きさがそれぞれの樹種の生長に対する最適光環境に対応していることが分かった。

3.4 環境変動による葉面拡散抵抗の変化

今まで、それぞれの樹種がとりうる気孔開度の最大値についてその特性を述べてきたが、植物の大気浄化機能を評価する場合には、それらとともに、環境変化に対する気孔の開閉運動の応答性が重要な意味を持つ。大気と葉面とのガス交換の場である気孔は、光強度、水ストレス、あるいはガス状大気汚染質の存在などの環境要因によって、その開閉運動を制御されている(Burrows & Milthorpe, 1976; Jarvis & Mansfield, 1981)。特に、藤沼ら(1983)は低濃度域のガス状大気汚染質暴露による葉面拡散抵抗値の変化の程度が、ポプラ品種間で大きく異なることを報告している。したがって、気孔開度がこのような環境要因によって影響されにくいことが、大気浄化機能の高い植物としての一つの条件になると考えられる。

ここでは、光条件を変化させて樹木の気孔閉鎖の応答性を調べた。前述の調査樹種の中から34種を無作為に選択し、野外条件下でそれらの樹種の成熟葉を枝に着いたまま10分間暗箱で覆い、処理前後の葉裏面の拡散抵抗値を計測した。暗処理中の光強度は $0 \sim 10 \mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ であった。図7に暗処理前、処理後の拡散抵抗値を示した。モモ(*Prunus persica* Sieb. et Zucc.)、サンゴジュ(*Viburnum awabuki* K.Koch)、サザンカ(*Camellia sasanqua* Thunb.)などでは処理前後の値がほとんど変化していないのに対して、テウチグルミ(*Juglans regia* L. var. *orientis* Kitamura)、ハルニレ(*Ulmus davidiana* Planch. var. *japonica* Nakai)、スダジイ(*Castanopsis cuspidata* Schottky var. *sieboldii* Nakai)などでは処理後の値が処理前の10倍以上にも大きくなり、気孔閉鎖の応答性は樹種によって大きく異なっていた。この調査では、画一的に暗処理をしたため、この時間がそれぞれの樹種で気孔の開閉運動のどの過程に当たるのか不明であり、正確な比較ができていないといえない。しかし、この気孔の開鎖程度と落葉・常緑、光要求性、あるいは処理前の葉面拡散抵抗値の大きさとの間にはいずれも相関関係は認められず、環境変化に対する気孔の開閉運動の応答性はそれぞれの樹種に固有の特性をもっているものと思われる。

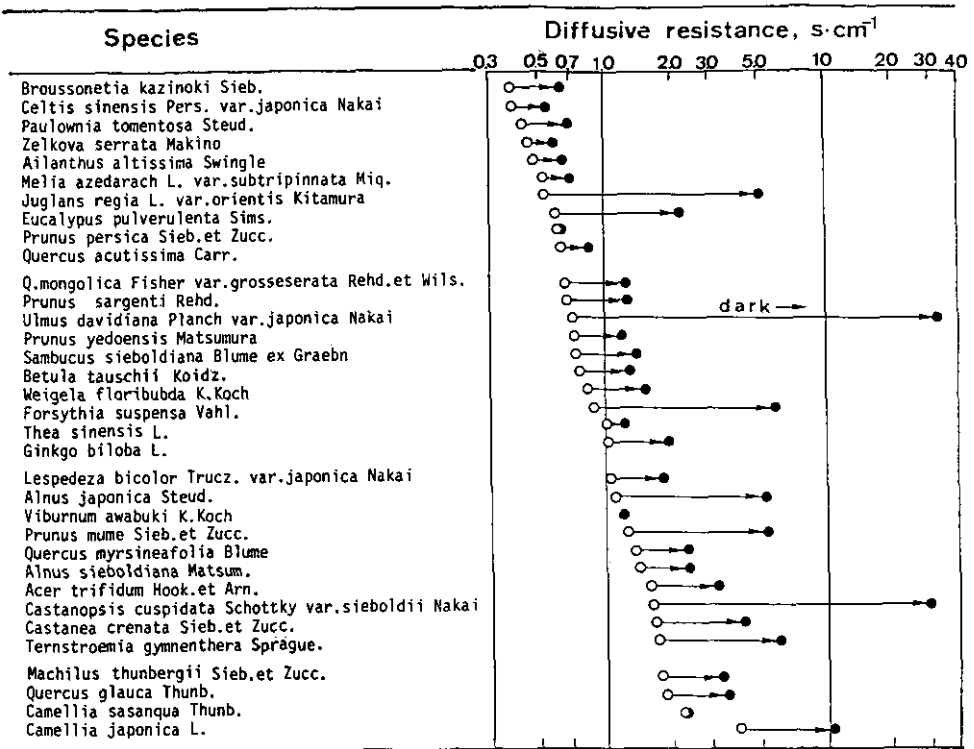


図 7 広葉樹種における暗処理における葉面拡散抵抗値の変化
(○: 処理前, ●: 処理後) 暗処理は10分間行った。

Fig. 7 Changes of leaf diffusive resistance with dark treatment in broad-leaved tree species
(○: Pre-treat, ●: Treated), Dark treatment was done for 10 minutes.

以上、大気浄化植物の検索に関する野外調査結果を報告してきたが、ポロメータ法は数多くの樹木の葉面拡散抵抗を簡便に計測でき、大気浄化機能の高い樹種の検索に有力な手段になり得ることが分かった。また、落葉広葉樹であるコウゾ (*Broussonetia kazinoki* Sieb.), エノキ (*Celtis sinensis* Pers. var. *japonica* Nakai), キリ (*Paulownia tomentosa* Steud.), ケヤキ (*Zelkova serrata* Makino), シンジュ (*Ailanthus altissima* Swingle), センダン (*Melia azedarach* L. var. *subtripinnata* Miq.) など葉面拡散抵抗値が小さく、かつ、その値が環境変化に対して影響されにくい樹種が存在しており、大気浄化機能の高い樹種を検索できる可能性が十分にあることが分かった。

今回の調査結果によれば、落葉樹は常緑樹に比べて葉面拡散抵抗が小さく、ガス吸収速度は大きいと考えられる。しかし、一般に落葉樹はガス状大気汚染質に対する抵抗力が弱く、障害を受けやすい。また、葉の着生期間も常緑樹に比べて短く、冬期には落葉する。したがって、樹木の大气浄化能力を考える際に、それぞれの樹種のガス吸収活性が、どのくらいの期間持続し得るのか、どのような樹形・草姿が大気浄化にとって適しているのかを検討課題として加えなければなら

藤沼康実ら

らない。

終わりに当たり、今回の調査に対して茨城県林業試験場の横堀誠技師をはじめとして、試験場の皆様に大変お世話になり、ここに厚くお礼申し上げます。

引用文献

- Beardsell, M. F., P. G. Jarvis and B. Davidson (1970) : A null-balance diffusion porometer suitable for use with leaves of many shapes. *J. Appl. Ecol.*, **46**, 515-519.
- Burrows, F.J. and F.L. Milthorpe (1976) : Stomatal conductance in the control of gas exchange. *In* : *Water Deficits and Plant Growth. Vol.IV.*, Kozlowski, T.T. (ed.), Academic Press, New-York, 103-152.
- 藤沼康実・戸塚 績・相賀一郎 (1983) : ポプラの気孔開閉におよぼす大気汚染ガスの複合暴露の影響. 日本生物環境調節学会第21回大会講演要旨集, 28-29.
- 藤沼康実・戸塚 績・相賀一郎 (1981) : 大気汚染物質に対する感受性のポプラ品種間差異. 国立公害研究所研究報告, 第28号, 149-159.
- Furukawa, A., O. Isoda, H. Iwaki and T. Totsuka (1979) : Interspecific differences in responses of transpiration to SO₂. *Environ. Control in Biol.*, **17**, 153-159.
- 浜 健夫 (1973) : 気孔. 植物形態学, 10版, コロナ社, 東京, 82-90.
- Hill, A.C. (1971) : Vegetation : a sink for atmospheric pollutants. *J. Air. Pollut. Cont. Assoc.*, **21**, 341-346.
- 星川清親 (1981) : 葉の構造と機能. 光合成II, 宮地重遠編, 朝倉書店, 東京, 5-6.
- 飯島 亮・安蒜俊比古 (1974a) : 庭木と緑化樹1-針葉樹・常葉樹. 誠文堂新光社, 東京, 290p.
- 飯島 亮・安蒜俊比古 (1974b) : 庭木と緑化樹2-落葉高木・低木類. 誠文堂新光社, 東京, 330p.
- Jarvis, P.G. and T.A. Mansfield (1981) : *Stomatal Physiology*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 295p.
- Körner, C., J.A. Scheel and H. Bauer (1979) : Maximum leaf diffusive conductance in vascular plants. *Photosynthetica*, **13** (1), 45-82.
- Larcher, W. (1975) : Regulation of gas exchange by the stomata. *In* : *Physiological Plant Ecology*. Springer-Verlag, Heidelberg, 30-33.
- Meidner, H and T.A. Mansfield (1968) : The occurrence of stomata in the plant kingdom. *In* : *Physiology of stomata*. McGraw-Hill, London, 1-6.
- Monsi, M. (1944) : Untersuchungen über die pflanzliche Transpiration, mit besonderer Berücksichtigung der Stomatären und inneren Regulation. *Jpn. J. Bot.*, **13**, 367-433.
- 大井次三郎 (1978) : 改訂増補新版日本植物誌. 至文堂, 東京, 1584p.
- 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.
- 戸塚 績 (1980) : 植物の大気汚染環境浄化機能. *産業と環境*, **9** (7), 67-71.
- 上原敬二 (1961a) : 樹木大図説I. 有明書房, 東京, 1300p.
- 上原敬二 (1961b) : 樹木大図説II. 有明書房, 東京, 1203p.
- 上原敬二 (1961c) : 樹木大図説III. 有明書房, 東京, 1276p.

付属資料：全調査樹種の学名、英語名及び和名

Appendix: Scientific name, common name and Japanese name of broad-leaved tree species in this report

1) 表中の数値は表1のNo.を示す。

1) The numerls in the table indicate "No." of Table 1.

Family name	Scientific name	Common name	科	名	和	名	No.
Aceraceae	<i>Acer rubrum</i> L.	Red Maple	かえで		アカカエデ		94
	<i>Acer saccharinum</i> L.	Silver Maple			ギンカエデ		60
	<i>Acer trifidum</i> Hook. et Arn.	Trident Maple			トウカエデ		83
Anacardiaceae	<i>Rhus chinensis</i> Miller	Japanese Sumac	うるし		スルデ		56
Annonaceae	<i>Asimina triloba</i> Dunal	Papaw			ポーポーノキ		70
Aquifoliaceae	<i>Ilex latifolia</i> Thunb.				もちのき	タラヨウ	103
	<i>Ilex rotunda</i> Thunb.					クロガネモチ	68
	<i>Ilex serrata</i> Thunb.	Japanese Winter Berry				ウメモドキ	59
Araliaceae	<i>Fatsia japonica</i> Dance. et Planch.	Japanese Aralia	うこぎ		ヤツデ		89
	<i>Hedera rhombea</i> DC.	Japanese Ivy			キヅタ		102
Berberidaceae	<i>Mahonia japonica</i> Bean.	Japanese Mahonia	めぎ		ヒイラギナンテン		111
Betulaceae	<i>Alnus japonica</i> Steud.	Japanese Alder	かぼのき		ハンノキ		52
	<i>Alnus pendula</i> Matsum.				ヒメヤシヤブシ		93
	<i>Alnus sieboldiana</i> Matsum.				オオバヤシヤブシ		67
Bignoniaceae	<i>Brtura tauschii</i> Koidz.	Japanese White Birch			シラカバ		27
	<i>Carpinus tshonoskii</i> Maxim.	Yedo Hornbeam			イスシデ		46
	<i>Campis chinensis</i> Voss	Chinese Trumpet Creeper	のうぜんかずら		ノウゼンガズラ		57
Caprifoliaceae	<i>Catalpa ovata</i> G. Don	Japanese Catalpa			キササゲ		8
	<i>Abelia grandiflora</i> Rehd.	Glossy Abelia	すいかずら		ハナゾノツクバネウツギ		66
Celastraceae	<i>Lonicera japonica</i> Thunb.	Japanese Honeysuckle			スイカズラ		45
	<i>Sambucus sieboldiana</i> Blume ex Graebn	Red-barried Elder			ニワトコ		23
	<i>Viburnum awabuki</i> K. Koch	Japanese Coral Tree			サンゴジュ		58
	<i>Viburnum tomentosum</i> Thunb. var. <i>plicatum</i> Maxim.	Japanese Snowball			オオデマリ		50
	<i>Weigela floribubda</i> K. Koch				ヤブウツギ		39
Clethraceae	<i>Celastrus orbiculatus</i> Thunb.	Oriental Bittersweet	にしきぎ		ツルウメモドキ		12
	<i>Euonymus alatus</i> Sieb.	Winged Spindle Tree			ニシキギ		34
	<i>Euonymus sieboldianus</i> Blume				マユミ		33
Clethraceae	<i>Clethra barbinervis</i> Sieb. et Zucc.		りょうぶ		リョウブ		79
Cornaceae	<i>Aucuba japonica</i> Thunb.	Japanese Aucuba	みずき		アオキ		108
	<i>Cornus controversa</i> Hemsl.	Giant-Dogwood			ミズキ		30
Ebenaceae	<i>Diospyros kaki</i> Thunb.	Japanese Persimmon	かきのき		カキノキ		14
Elaeagnaceae	<i>Elaeagnus multiflora</i> Thunb. var. <i>gigantea</i> Araki	Cherry Elaegnus	ぐみ		ダイオウグミ		100
Ericaceae	<i>Kalmia latifolia</i> L.	Mountain Laurel	つつじ		カルミヤ		47
	<i>Pieris japonica</i> D. Don	Japanese Andromeda			アセビ		113
	<i>Rhododendron kaempferi</i> Planch.	Torch Azalea			ヤマツツジ		62
Euphorbiaceae	<i>Rhododendron oomurasaki</i> Makino				オオムラサキ		31
	<i>Rhododendron quinquefolium</i> Bisset et Moore	Cork Azalea			ゴウツツジ		104
	<i>Vaccinium oldhami</i> Miq.				ナツハゼ		90
	<i>Alchonea trewioides</i> Muell. Arg.		とうだいぐさ		オオバベニガシワ		54
	<i>Daphniphyllum macropodum</i> Miq.				ユズリハ		99
Fagaceae	<i>Sapium sebiferum</i> Roxb.	Chinese Tallw Tree			ナンキンハゼ		20
	<i>Fagus japonica</i> Maxim.	Japanese Beech	ぶな		イヌブナ		42
	<i>Castanea crenata</i> Sieb. et Zucc.	Japanese Chestnut			クリ		77
	<i>Castanopsis cuspidata</i> Schottky var. <i>sieboldii</i> Nakai	Japanese Chinquapin			スグジイ		80
	<i>Pasania edulis</i> Makino				マチバシイ		95
	<i>Quercus acutissima</i> Carr.	Japanese Chestnut Oak			クヌギ		13
	<i>Quercus dentata</i> Thunb.	Daimyo Oak			カシワ		71
	<i>Quercus glauca</i> Thunb.	Ring-cupped Oak			アラカシ		92
	<i>Quercus mongolica</i> Fischer var. <i>grosseserrata</i> Rehd. et Wils.				ミズナラ		16
	<i>Quercus myrsinaefolia</i> Blume	Bamboo-leafed Oak			シラカシ		82
Ginkgoaceae	<i>Quercus phylliraeoides</i> A. Gray	Ubame Oak			ウバメガシ		85
	<i>Quercus serrata</i> Thunb.	Konara Oak			コナラ		63
	<i>Ginkgo viloba</i> L.	Maiden Hair Tree	いちよう		イチヨウ		35
Hamamelidaceae	<i>Corylopsis spicata</i> Sieb. et Zucc.	Spike Winter Hazel	まんさく		トサミズキ		17
	<i>Hamamelis virginiana</i> L.	Witch Hazel			アメリカマンサク		28

藤沼康実ら

(continued)

Family name	Scientific name	Common name	科名	和名	No.
Hamamelidaceae	<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	Sweet Gum	まんさく	モミジバフウ	51
Hippocastanaceae	<i>Aesculus turbinata</i> Blume	Japanese Horse-chestnut	とちのき	トチノキ	73
Juglandaceae	<i>Juglans regia</i> L. var. <i>orientis</i> Kitamura		くるみ	チウチグルミ	9
	<i>Juglans ailanthifolia</i> Carr.	Japanese Walnut		オニグルミ	7
Lardizabalaceae	<i>Akebia quinata</i> Dence.	Akebia	あけび	アケビ	53
	<i>Stauntonia hexaphylla</i> Dence.			ムベ	61
Lauraceae	<i>Cinnamomum camphora</i> Sieb.	Camphor Tree	くすのき	クス	87
	<i>Lindera obtusiloba</i> Blume	Japanese Spice Bush		ダンコウバイ	81
	<i>Lindera umbellata</i> Thunb.	Spice Bush		クロモジ	86
	<i>Neolitsea sericea</i> Koidzumi			シロダモ	101
	<i>Machilus thunbergii</i> Sieb. et Zucc.			タブ	96
Leguminosae	<i>Cercis chinensis</i> Bunge	Chinese Redbud	まめ	ハナズオウ	32
	<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz. var. <i>japonica</i> Nakai			ヤマハギ	18
	<i>Maackia amurensis</i> Rupr. et Maxim. var. <i>buergeri</i> Schneid	Japanese Maackia		イヌエンジュ	49
	<i>Robinia pseudo-acacia</i> L.	Locust		ニセアカシア	26
	<i>Wisteria brachybotrys</i> Sieb. et Zucc.	Japanese Wisteria		ヤマフジ	78
Lythraceae	<i>Lagerstroemia indica</i> L.	Crape Myrtle	みそはぎ	サルスベリ	36
Magnoliaceae	<i>Kadsura japonica</i> Dunal	Scarlet Kadsura	もくれん	サネカズラ	55
	<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	Tulip Tree		ユリノキ	22
	<i>Magnolia grandiflora</i> L.	Laurel Magnolia		タイサンボク	72
	<i>Magnolia kobus</i> DC.	Kobus Magnolia		コブシ	69
	<i>Magnolia stellata</i> Maxim.	Star Magnolia		シザコブシ	29
	<i>Magnolia virginiana</i> L.	Sweet Bay		ヒメタイサンボク	74
Malvaceae	<i>Hibiscus syriacus</i> L.	Rose of Sharon	あおい	ムクゲ	10
Meliaceae	<i>Melia azedarach</i> L. var. <i>subtripinnata</i> Miquel	Japanese Bead Tree	せんだん	セングダン	5
Moraceae	<i>Broussonetia kazinoki</i> Sieb.	Paker Mulberry	くわ	コウゾ	4
Myricaceae	<i>Myrica rubra</i> Sieb. et Zucc.	Bayberry	やまもも	ヤマモモ	41
Myrtaceae	<i>Eucalyptus pulverulenta</i> Sims.	Spiral Eucalyptus	ふともも	マルバユーカリ	11
Oleaceae	<i>Forsythia suspensa</i> Vahl.	Golden Bell Tree	もくせい	レンギョウ	25
	<i>Ligustrum lucidum</i> Ait.	Glossy Privet		トウネズミモチ	98
	<i>Osmanthus fragrans</i> Lour. var. <i>aurantiacus</i> Makino			キンモクセイ	105
	<i>Syringa vulgaris</i> L.	Common Lilac		ムラサキハシドイ	91
Platanaceae	<i>Platanus orientalis</i> L.	Oriental Plane Tree	ナザカケのき	スズカケノキ	84
Rosaceae	<i>Cydonia sinensis</i> Thouin	Chinese Quince	ばら	カリン	75
	<i>Photinia glabra</i> Maxim.	Japanese Photinia		ベニカナメモチ	97
	<i>Prunus itosakura</i> Sieb.			シダレザクラ	19
	<i>Prunus lannesiana</i> Wils.			サトザクラ	48
	<i>Prunus mume</i> Sieb. et Zucc.	Japanese Apricot		ウメ	64
	<i>Prunus persica</i> Sieb. et Zucc.	Peach		モモ	15
	<i>Prunus sargentii</i> Rehd.			オオヤマザクラ	21
	<i>Prunus yedoensis</i> Matsumura	Yoshino Cherry		ソメイヨシノザクラ	43
	<i>Raphiolepis umbellata</i> Makino var. <i>mertensii</i> Makino	Indian Currant		マルバシャリンバイ	76
Schophulariaceae	<i>Paulownia tomentosa</i> Steud.	Royal Paulownia	ごまのはぐき	キリ	1
Simaroubaceae	<i>Ailanthus altissima</i> Swingle	Tree of Heaven	にがき	シンジュ	3
Solanaceae	<i>Solanum glaucophyllum</i> Desf.		なす	ルリヤナギ	65
Stachyuraceae	<i>Stachyurus praecox</i> Sieb. et Zucc.		きおし	キブシ	37
Sterculiaceae	<i>Firmiana simplex</i> W. F. Wight	Chinese Parasol Tree	あおざり	アオギリ	40
Styracaceae	<i>Styrax japonicus</i> Sieb. et Zucc.	Japanese Snowbell	えごのき	エゴノキ	24
	<i>Styrax obassia</i> Sieb. et Zucc.	Fragrant Snowbell		ハクウンボク	107
Theaceae	<i>Camellia japonica</i> L.	Camellia	つばき	ヤブツバキ	109
	<i>Camellia sasanqua</i> Thunb.	Sasanqua Camellia		サザンカ	106
	<i>Cleyera japonica</i> Thunb.			サカキ	112
	<i>Eurya japonica</i> Thunb.	Eurya		ヒサカキ	110
	<i>Ternstroemia gymnanthera</i> Sprague.			モッコク	88
	<i>Thea sinensis</i> L.	Tea Plant		チャノキ	44
Ulmaceae	<i>Celtis sinensis</i> Pers. var. <i>japonica</i> Nakai	Japanese Hackberry	にれ	エノキ	6
	<i>Ulmus davidiana</i> Planch. var. <i>japonica</i> Nakai	Japanese Elm		ハルニレ	38
	<i>Zelkova serrata</i> Makino	Japanese Zelkova		ケヤキ	2

II-2

植物群落による汚染ガス吸収能の評価のための基礎的研究 —SO₂暴露中のイタドリ葉の気孔開度に及ぼす光強度の影響—

Studies on Evaluations of Absorption Capacity of Air Pollutants by Plant Population

—Effects of Light Intensity on Stomatal Resistance of *Polygonum cuspidatum* During SO₂ Fumigation—

名取俊樹¹・戸塚 績¹

Toshiki NATORI¹ and Tsumugu TOTSUKA¹

要 旨

光強度を3段階に変えて、定常一拡散型ポロメータにより、2個体のイタドリ葉の気孔抵抗を葉位別に測定した。この結果、葉位により気孔抵抗はかなり異なっていたが、測定したすべての葉で気孔抵抗と光強度の逆数との間にそれぞれ直線関係が認められた。また、SO₂暴露処理しながら育成したイタドリ (SO₂区) と SO₂処理せず育成したイタドリ (対照区) について、光強度を3段階に変えて個体当たりの蒸散速度を測定した。この値から蒸散速度測定中の葉温、気温、露点温度で補正して個体当たりの葉面拡散抵抗を求めた。その結果、SO₂区の個体当たりの葉面拡散抵抗は対照区のそれに比べて測定したすべての光強度下で大きくなる傾向が認められた。また、測定したすべての個体で葉面拡散抵抗と光強度の逆数との間に、SO₂暴露の有無にかかわらずそれぞれ異なった直線関係が認められた。SO₂区ではこの直線のこう配が対照区に比較して大きくなった。

Abstract

Stomatal resistance at different leaf positions in *P. cuspidatum* was measured by a steady state diffusion porometer under three levels of light intensity. Stomatal resistance was considerably different among leaf positions. However, the positive linear relationships between the stomatal resistance and reciprocals of light intensity were recognized for all leaves tested.

Transpiration rate of whole plant treated with and without SO₂ was measured under

1. 国立公害研究所 生物環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi,
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

three levels of light intensity. Leaf diffusive resistance of whole plant was calculated from the transpiration rate corrected with leaf temperature, air temperature and dew point in air. The obtained results showed that leaf diffusive resistance of whole plants treated with SO_2 was greater than that of control plant under all light conditions tested. The positive linear relationships were recognized between the leaf diffusive resistance of whole plant and reciprocals of light intensity for both the control and SO_2 -treated plants. The slope of the linear line in SO_2 -treated plant was greater than that of control plant.

Key words : Stomatal resistance—Light intensity— SO_2 —*Polygonum cuspidatum*.

1 結 言

植物が汚染ガスを吸収することは古くから認められてきた。また植物群落の汚染ガス吸収については Hill (1971) の研究がよく知られている。しかし、植物群落の汚染ガス吸収能力は種々の環境要因の影響を受けるために、野外においてその能力を評価することは非常に困難である。大政 (1979) は植物群落の汚染ガス吸収の評価手法についてまとめ、さらに安保・相賀 (1984) は数学モデルを用いて、理想的な植物群落による SO_2 、 O_3 、 NO 等の汚染ガス吸収能力の評価を試みた。大政 (1979) によると、大気から葉の内部へ拡散する際のガス拡散過程にはその経路上に幾つかの拡散抵抗を定義しうる。また、安保・相賀 (1984) によるとその拡散抵抗のひとつである群落内にある葉の気孔抵抗は、光、風速、温度、湿度、ガス濃度等の環境要因の影響を受ける。これらの環境要因の中で光要因はその気孔抵抗に影響を与える主な要因のひとつである。

これまで、葉面における気孔開度と光強度との関係については幾つかの報告がある (Gaastra, 1959; 大政, 1979; 安保・相賀, 1984; Warrit ら, 1984)。これらの報告では、気孔開度の指標として気孔抵抗あるいは気孔拡散速度 (気孔抵抗の逆数) のどちらかが用いられている。どちらの指標で表しても気孔抵抗と光強度の関係が直線関係になるという報告が多い。しかし、この直線関係に及ぼす長期 SO_2 暴露の影響については報告がない。

これまでの知見 (戸塚ら, 1977; Natori & Totsuka, 1984) により、硫化鉱製錬所周辺に優占するイタドリは SO_2 暴露により葉内に多量の SO_2 を取り込むが生育障害を受けにくく、極めて SO_2 耐性の高いことが明らかになった。また、名取によりこの地区では1971年8月に月平均 SO_2 濃度が約0.3ppm程度であったと推定され (未発表データ)、さらにより以前にはより高い SO_2 濃度であったろうと想像され得る。そこでこのような高 SO_2 濃度の地域でのイタドリの大気浄化能力を知るために、まず、植物のガス吸収を支配する葉面の気孔抵抗と光強度との関係に及ぼす SO_2 暴露の影響を検討した。

2 材料と方法

実験1: 栃木県足尾地区から採取したイタドリより挿穂を採取し、挿木法により材料植物を育

成した。このイタドリを人工培養土（ピートモス：パーミキュライト：パーライト：小砂利：赤玉土，2：2：1：1：2 v/v）を充てんしたプラスチックポットに1鉢当たり1個体ずつ栽植し、温室（温度：25°C，湿度：70%RH）で育成した。春季に開葉後1—2か月経過した2個体を人工光型グロースキャビネット内（照度約420 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，温，湿度条件は前記温室と同じ）に移し、約1時間放置後、0.5～1時間間隔で光強度を約208，次いで約94 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ と順次変えて葉位別に気孔抵抗をそれぞれの個体について測定した。気孔抵抗は米国ライカー社製の定常一拡散型ポロメータ（モデル，LI-1600型）により測定した。光強度はかんれいしゃにより調節した。かん水は実験開始前に十分行った。

実験2：足尾地区で秋季に採取したイタドリの種子を，上記の温室内（25°C）の明所において水をいれたシャーレ内で発芽させ，イタドリ実生を人工培養土（実験1と同様）を充てんしたプラスチックポットに，1鉢当たり1個体ずつ移植し，1か月間温室で育成した（温度：25°C，湿度：70%R.H.）。その際，毎日かん水をしたが，その内週2回ハイポネックス（1000倍液）をポット当たり約200mlずつ与えた。その後，そのイタドリを2台の自然光型ガス暴露チェンバー内（温湿度条件は前記温室と同様）にそれぞれ5個体ずつ配置し，一方は0.7ppmSO₂を暴露しながら（SO₂区），他方は対照区としてガス暴露をせずに21—24日間育成した。育成期間中の栽培管理は前記と同様に行った。その後，これらの植物を人工光型グロースキャビネット（照度：約400 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，温・湿度条件は前記温室と同様）内に設置されたアクリル製の同化箱内（高さ：40cm，幅：65cm，奥行き30cm）に移し，SO₂区のイタドリは0.7ppmSO₂を暴露しながら，対照区のイタドリは暴露せずに，光強度を3段階（同化箱内で387，211，117 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）に順次変えて蒸散速度，露点温度，気温及び葉温を測定した。光強度の調整は実験1と同様な方法で行った。植物体の蒸散速度はビニール袋で鉢を包んだ個体を上皿天秤（メトラー社，PL3000）に乗せ，その重量の経時変化から求めた。葉温は直径0.1mmのC—C型熱電対4組を葉の裏側に取り付けて測定した。気温は直射光を防ぐためにアルミはくで覆った熱電対を同化箱内に設置して測定した。同化箱内の露点温度は露点計（EG & G社，モデル911）により測定した。同化箱へは毎分15リットルの空気を通気するとともに，同化箱内の空気を2個のロータリーファンにより十分かくはんした。同化箱内のSO₂濃度はサーモエレクトロン社製のパルスけい光型SO₂分析計を用いて制御した。個体当たりの葉面拡散抵抗は個体当たりの蒸散速度から測定時の葉温，気温，露点温度で補正して求めた。実験1及び2とも光強度の測定は，米国ライカー社製の光量子計（モデル：LI-185A）により測定した。

3 結 果

図1に定常一拡散型ポロメータで測定した葉位別の気孔抵抗と光強度の逆数との関係を示した（実験1）。各葉位の気孔抵抗は2個体のそれぞれ同じ葉位で測定した値を平均して算出した。図中には目安として葉位ごとに両者の関係に近似した直線を示した。葉位別気孔抵抗は光強度が420

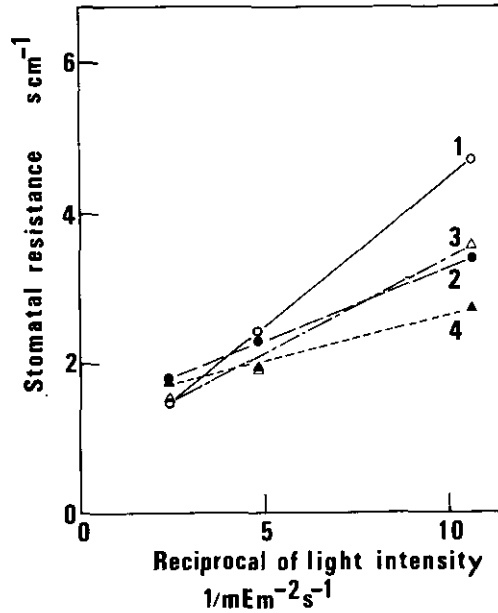


図 1 定常一拡散型ポロメータで測定した葉位別の気孔抵抗と光強度の逆数との関係
記号の違いは葉位が異なることを示す。図中の数字は小さい方が下位の葉を示し、それぞれの直線は目測により測定値に近似させた。

Fig. 1 The relationship between reciprocals of light intensity and stomatal resistance of leaves at different leaf positions measured with a steady state diffusion porometer

The difference in symbols shows the difference in leaf positions. Smaller numeral shows lower leaf position. Straight lines were approximated with the obtained data.

$\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ (横軸の値で2.38) では $1.46\text{--}1.80\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ であり、 $94\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ では $2.74\text{--}4.71\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ の範囲にあった。光強度の減少に伴い気孔抵抗は大きくなった。また、それぞれの光強度下で、気孔抵抗は葉位によりかなり異なり、光強度が弱い場合、下位葉ほど気孔抵抗が大きくなる傾向が認められた。また、光強度の逆数と葉位別の気孔抵抗との間にはそれぞれ直線関係が認められた。

図2に図1の各々の直線の傾きとY軸との交点との関係を示した。傾き及び交点とも葉位により異なるが、概して交点の値の小さいものほど傾きの大きい傾向が認められた。

図3に実験2で個体当たりで求めた葉面拡散抵抗(葉面境界層抵抗+気孔抵抗)と光強度の逆数との関係を示した。光強度が $387\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ (横軸の値で2.6)の場合、個体当たりの葉面拡散抵抗は対照区の2個体で $3.60, 6.69\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ となり、 SO_2 区の3個体で $5.40, 7.53, 9.33\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ であった。また図1と同様、対照区及び SO_2 区とも葉面拡散抵抗は光強度が弱くなるに従い増大した。

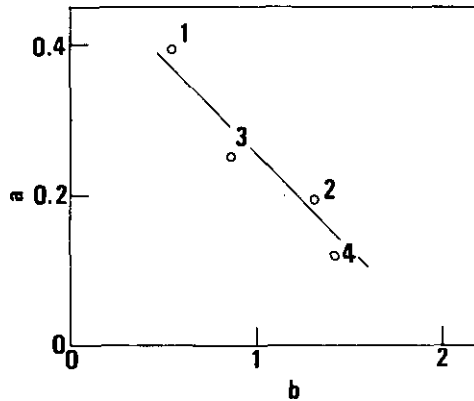


図 2 図 1 の直線から求めた傾きと Y 軸との交点の値との関係
縦軸の a は傾きを表し、横軸の b は Y 軸との交点の値を表す。

Fig. 2 The relation between the slope and intercept of the straight lines in Fig. 1
Symbol a (the axis of ordinate) shows the slope of the straight line, and symbol b (the axis of abscissa) shows the intercept.

が、概して SO_2 区の方が対照区より葉面拡散抵抗の大きくなる傾向が認められた。この傾向は光強度が弱くなるに従い顕著になった。 SO_2 区、対照区のいずれの個体も光強度の逆数と個体当たりの葉面拡散抵抗との間に直線関係が認められた。図 3 のデータをもとにして、それぞれ光強度別に対照区及び SO_2 区について平均した個体当たりの葉面拡散抵抗と光強度の逆数との関係を求めた。図 4 にみられるように SO_2 区、対照区とも光強度の逆数と葉面拡散抵抗の間に直線関係が成立し、そのこう配は対照区のそれに比較して SO_2 区で大きくなっていることが認められた。図 4 のデータをもとにして、対照区及び SO_2 区の葉面拡散速度と光強度との関係を求めた。図 5 にみられるように、それぞれの光強度下で、対照区に比べて SO_2 区の葉面拡散速度は小さくなっていたが、各光強度での対照区と SO_2 区の葉面拡散速度の差はほぼ同じ程度であった。

4 考 察

本報告では気孔開度の指標として葉位別の気孔抵抗 (実験 1) あるいは個体当たりの葉面拡散抵抗 (葉面境界層抵抗 + 気孔抵抗) (実験 2) を用いた。実験 2 の場合、各光強度区で同化箱内の風速が同じであるから葉面境界層抵抗は一定であると考えられ、葉面拡散抵抗の変化は、気孔抵抗の変化であると考えられる。さらに、同化箱内を十分かくはんしていること、光強度の変化に伴い葉面拡散抵抗が顕著に変化していることにより、葉面境界層抵抗の値は小さいと考えられる。図 1 及び 3 に示したように、 SO_2 暴露処理していないイタドリ葉では、光強度の逆数と葉位別の気孔抵抗あるいは個体当たりの葉面拡散抵抗との間に直線関係が認められた。図 1 に示された光強

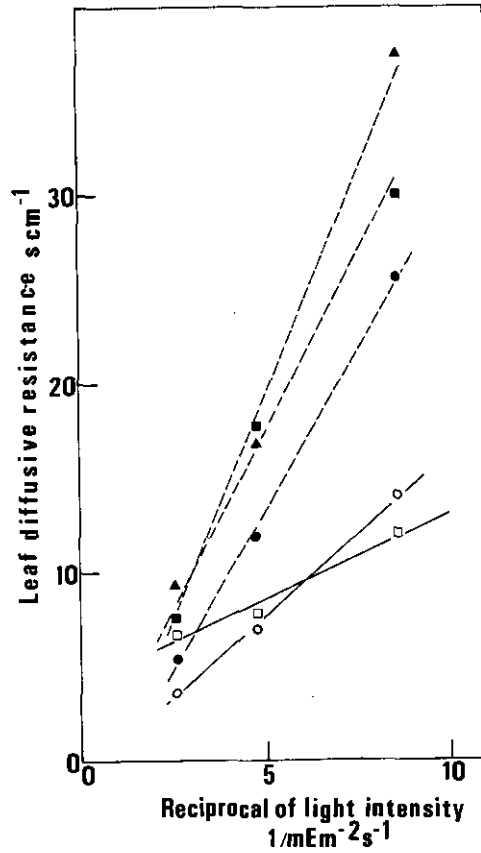


図 3 蒸散速度より求めた個体当たりの葉面拡散抵抗と光強度の逆数との関係に及ぼす SO₂ 暴露の影響

図中の記号の違いは別の個体を表す。また、図中の白抜き記号は対照植物を示し、黒塗りの記号は SO₂ 暴露区の植物を示す。なお、図中のそれぞれの直線は図 1 と同様に目測により測定値に近似させた。

Fig. 3 The effects of SO₂ fumigation on the relationship between leaf diffusive resistance of whole plant and reciprocals of light intensity
The difference in symbols shows the difference in individual plants. Open symbols show the control plants and closed symbols show the SO₂-treated plants. Straight lines in figure were approximated with the obtained data.

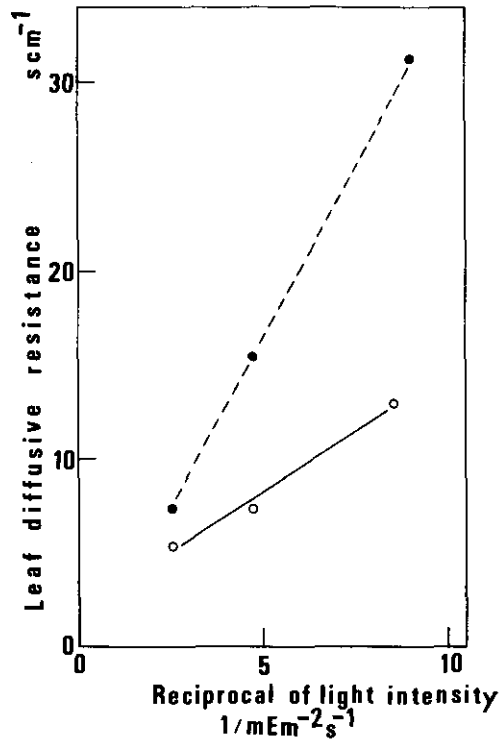


図 4 光強度別に対照区及び SO₂区について平均した個体当たりの葉面拡散抵抗と光強度の逆数との関係
白丸の記号は対照植物を示し、黒丸の記号は SO₂暴露区の植物を示す。

Fig. 4 The relationship between reciprocals of light intensity and mean leaf diffusive resistance of whole plant averaged for control plants and SO₂-treated plants under each condition of light intensity
Open symbols show the control plants and closed symbols show the SO₂-treated plants.

度の逆数と気孔抵抗との間の直線関係を決める直線のこう配及びY軸との交点の値を求めると、こう配として $0.12-0.39s \cdot cm^{-1} \mu Em^{-2}s^{-1}$ が得られた。また、Y軸との交点の値として $0.55-1.41 s \cdot cm^{-1}$ が得られた。図2に示したように、交点の値が大きくなるとこう配が小さくなることが認められた。Gaastra (1959) はかぶらの単葉で、Kanemasuら (1969) は snap bean の単葉で、Warritら (1980) はりんごの葉で気孔抵抗と光強度の逆数の間に直線関係が成り立つことを報告している。SO₂暴露処理していないイタドリ葉の葉位別の気孔抵抗は、光強度が $420 \mu Em^{-2}s^{-1}$ では、 $1.46-1.80s \cdot cm^{-1}$ の範囲であった。一方、図3に示した個体当たりの葉面拡散抵抗は光強度が $387 \mu Em^{-2}s^{-1}$ では、 3.60 と $6.69s \cdot cm^{-1}$ であり、光強度がほぼ等しいにもかかわらず個体当たりの葉面拡散抵抗の方が単葉当たりの気孔抵抗の値に比較して大きい値を示した。個体当たりの葉

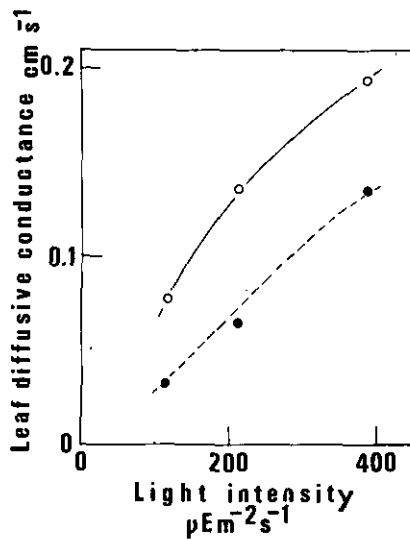


図 5 光強度と葉面拡散速度との関係
 図中の符号は図4と同じ。

Fig. 5 The relationship between light intensity and leaf diffusive conductance
 The symbols in the figure are the same as in Fig. 4.

面拡散抵抗が葉位別に測定した気孔抵抗より大きな値を示した理由として、本実験条件下では個体当たりの葉面拡散抵抗には葉面境界層抵抗が含まれているためか、あるいは葉位別の気孔抵抗測定に使用されなかった幼葉及び他の成葉の気孔抵抗が大きかったかが考えられる。また、個体当たりの蒸散速度測定時において葉の重なりによる相互被陰効果が個体あたりの測定値に影響したとも考えられる。

一方、 SO_2 暴露処理により、個体当たりの葉面拡散抵抗が対照区より大きくなる傾向が認められた(図3及び4)。名取・戸塚(1984)の報告に示された木本植物と同様に、この結果はイタドリでも 0.7ppmSO_2 に3週間程度暴露されると気孔開度が低下することを示している。さらに、 SO_2 暴露処理しても、光強度の逆数と個体当たりの葉面拡散抵抗との間にそれぞれの個体で直線関係の成立することが認められた。また SO_2 区では、この直線のこう配が対照区と比較して大きくなった(図4)。この結果は光強度の減少に伴い、 SO_2 処理によりイタドリの気孔抵抗が対照区のそれに比較してより増加することを示唆している。一方、 SO_2 暴露濃度が同じ場合には SO_2 吸収速度は葉面拡散速度と並行関係にあることが知られている(大政, 1979)。図5にみられるように、 SO_2 暴露時の葉面拡散速度は光強度の減少に伴い、対照区のそれとほぼ同様な減少傾向を示した。

結論として、安保・相賀(1984)の報告した数学モデルを利用してイタドリ群落による SO_2 吸収能を評価する際に、 0.7ppmSO_2 程度の比較的高濃度の長期暴露においてさえ、気孔抵抗と光強

度の逆数との間に直線関係を仮定できることが明らかになった。さらに、この直線のこう配がSO₂暴露処理により対照区と比較して大きくなることが明らかとなった。

引用文献

- 安保文彰・相賀一郎(1984)：植物群落による大気汚染ガス吸収のモデルとシュミレーション。国立公害研究所研究報告，第64号，191-211。
- Gaastra, P. (1959) : Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal resistance. Medded Landbouwhogesh Wageningen, 58, 1-68.
- Hill, A.C. (1971) : Vegetation : A sink for atmospheric pollutants. J. Air Poll. Control Assoc., 21, 341-346.
- Kanemasu, E.T. and C.B. Tanner (1969) : Stomatal diffusion resistance of snap beans.II. Effect of light. Plant Physiol., Lancaster, 44, 1542-1546.
- Landsberg, J.J. and D.R. Buter (1980) : Stomatal responses to humidity : implications for transpiration. Plant, Cell Environ., 3, 29-33.
- Natori, T. and T. Totsuka (1984) : An evaluation of high resistance in *P. cuspidatum* to SO₂. Jpn. J. Ecol., 34, 153-159.
- 名取俊樹・戸塚 績 (1984) : 植物のガス吸収に関する種間差異。国立公害研究所研究報告，第64号，176-190。
- 大政謙次 (1979) : 植物群落の汚染ガス収着機能一現象の解析とそのモデル化一。国立公害研究所研究報告，第10号，367-385。
- Thorpe, M.R., B. Warrit and J.J. Landsberg (1980) : Responses of apple leaf stomata : a model for single leaves and a whole tree. Plant, Cell Environ., 3, 23-27.
- 戸塚 績・古川昭雄・名取俊樹・小川 潔 (1977) : 足尾製錬所の周辺に生育する植物の葉内水溶性硫酸塩量について。文部省特定研究 (植物群落の物質代謝による環境保全に関する基礎的研究)，19-23。
- Warrit, B., J.J. Landsberg and M.R. Thorpe (1980) : Responses of apple leaf stomata to environmental factors. Plant, Cell Environ., 3, 13-22.

II-3

植物による大気汚染ガスの収着 —植物葉と種々の物質のSO₂収着の比較—

Gaseous Pollutant Sorption by Plants —The Comparison Between SO₂ Sorptions of Plant Leaf and Several Matters—

安保文彰¹・大政謙次¹・相賀一郎¹

Fumiaki ABO¹, Kenji OMASA¹ and Ichiro AIGA¹

要 旨

植物の大気浄化への寄与率を評価するために種々の物質（海水、淡水、木材、スレート、土壌、植物）へのSO₂収着速度（収着＝吸収＋吸着）を測定した。その結果、植物（ヒマワリ葉）の単位接触面積当たりのSO₂収着速度は、海水、淡水、スレート、土壌などとはほぼ等しかった（約 $1.0 \times 10^{-9} \text{gSO}_2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{volppm}^{-1}$ ）。植物葉は大気と表裏両面で接触しているので、単位葉面積当たりのSO₂収着速度は、上記の値の2倍、約 $2.0 \times 10^{-9} \text{gSO}_2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{volppm}^{-1}$ である。したがって、植物葉は他の物質と比べてSO₂収着能力が大きいと言えよう。なお、収着能力のうち、葉面への吸着は少なく（約5パーセント以下）、大部分は気孔を介しての吸収であることがわかった。

Abstract

To evaluate the atmospheric purification by plants, SO₂ sorption rates of several matters (sea water, fresh water, wood, roofing slate, soil and plant leaf) were measured. The plant leaf was about twice the SO₂ sorption of the other matters (such as sea water, fresh water, slate and soil). The sorption was almost absorption through stomata and adsorption to the leaf surface was a little (under ca. 5%).

Key words : SO₂ sorption—Plant leaf—Soil—Water.

1 緒 言

植物の大気浄化能力を評価するためには、植物の個体や群落による汚染ガス収着現象を解明し、

1. 国立公害研究所 技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Engineering Division, the National Institute for Environmental Studies. Yatabe-machi, Tsukuba,
Ibaraki 305, Japan.

そのモデルを確立することが必要である。植物による汚染ガス取着に関する研究成果は、国立公害研究所研究報告にまとめられている（大政・安保，1979；大政ら，1979；大政，1979；安保・相賀，1984；名取・戸塚，1984）。植物による汚染ガス取着は気孔を介しての吸収と表面への吸着を合わせたものであるが、吸着に関する研究報告は少なく（Taylorら，1982；Taylor & Tingey，1983），十分な知見は得られていない。

一方、大気中の汚染ガスの土壌、海水、植物等への沈着速度が、多くの研究者により測定されており、これらの測定結果は Sehmel (1980) や大喜多 (1982) によってまとめられている。沈着速度は、ガスフラックス ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) をある高さ（通常は 1 m の高さ）でのガス濃度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) で割った値 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) で表される。測定結果によると植物への沈着速度は水面への沈着速度と並んで大きいほうであるが、測定条件がまちまちで、また、沈着機構も明確にされていないので、これらの測定結果だけから、植物の大気浄化能力や浄化への寄与率を評価することはできない。

本報では、種々の物質——海水、淡水（液体）；木材、スレート（固体）；植物葉、土壌（液体と固体）——へのガス (SO_2) 取着速度を測定し、得られた結果について報告する。また、葉面への吸着についても検討する。

2 材料と方法

材料：実験植物としては、ファイトトロン（25°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 4 : 2 : 4 : 1 の比でつめたポット（直径10cm, 高さ20cm）に播種後 5 週間栽培したヒマワリ (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) を用いた。ヒマワリは比較的ガス取着能力の高い植物である（Taylor & Tingey, 1983）。

装置： SO_2 取着速度は同化箱を人工光ガス暴露用グロースキャビネット内に設置してガス収支法で測定した。同化箱は透明アクリル樹脂製で、大きさは縦30cm×横20cm×高さ 4 cm である。同化箱の内側には、 SO_2 の吸着を放ぐためにテフロンフィルムを張りつけ、同化箱の入口側にはテフロンコーティングしたかくはんファンを取りつけた。 SO_2 濃度の測定には、パルスけい光法の分析計を用いた。光源にはメタルハライドランプとタングステンランプを併用し、熱線カットフィルタで800nm 以上の波長の熱線を除去した。

測定方法： SO_2 は吸着性の強いガスで、実験の履歴は測定精度に影響を及ぼすので、 SO_2 吸着速度は以下に述べる方法で測定した。初めに、同化箱内に測定対象物を置かないブランクの状態、一定濃度の SO_2 を一定流量で供給し、同化箱の出口における SO_2 濃度が十分定常になった時点で SO_2 の供給を止め、濃度が下がってから測定対象物を同化箱内に置いた。こうして、装置の壁面への吸着がなくなっていることや測定装置が正常に作動しているかどうかを確認した後、再び一定濃度の SO_2 を一定流量供給し、同化箱の出口と入口における SO_2 濃度を30分ごとに交互に測定した。 SO_2 吸着速度は、ガス収支法により、入口と出口における SO_2 濃度の差から算出した。

実験は明条件下（40klx, $640\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）と暗条件下で行った。

3 結果と考察

表1に、種々の物質——淡水、海水（液体）；木材、スレート（固体）；ヒマワリ葉、土壌（固体と液体）——によるSO₂収着速度の測定結果を示す。

明条件下（40klx, 640μE・m⁻²・s⁻¹）におけるヒマワリ葉の単位葉面積当たりのSO₂収着速度は、約2.0×10⁻⁹gSO₂・cm⁻²・s⁻¹・volppm⁻¹であった。暗条件下におけるヒマワリ葉の単位葉面積当たりのSO₂収着速度は、0.08×10⁻⁹gSO₂・cm⁻²・s⁻¹・volppm⁻¹以下であった。暗条件下で気孔が完全に閉じてくると仮定して、気孔を介しての吸収は無いと考えても、葉の表面への吸着速度は、単位葉面積当たりで0.08×10⁻⁹gSO₂・cm⁻²・s⁻¹・volppm⁻¹以下であり、明条件下における収着速度の約5%以下であった。

明条件下におけるヒマワリ葉の（1～2 h）のSO₂収着速度は、土壌（湿土）、スレート、淡水、海水と同程度であった。ヒマワリ葉は表と裏の両面が大気と接触するので、単位葉面積当たりの収着速度は単位接触面積当たりの収着速度の2倍になる。したがって、ヒマワリ葉は、土壌（湿土）、スレート、淡水、海水の約2倍の収着能力があるといえる。

明条件下におけるヒマワリのSO₂収着速度が5 h, 10hで低下しているが、これは気孔が閉じたためである。植物の気孔はガス暴露によって閉じる傾向があるし、また、ガス暴露されなくても一般に、日中、長時間経過すると、気孔は閉じる傾向がある。

土壌、木材、スレートのSO₂収着速度が暴露時間の経過とともに減少しているのは、SO₂の蓄積

表 1 種々の物質によるSO₂収着速度
Table 1 SO₂ sorption rate by several matters

	SO ₂ 収着速度 (×10 ⁻⁹ gSO ₂ ・cm ⁻² ・s ⁻¹ ・volppm ⁻¹)			
	暴露時間 (h)			
	1	2	5	10
ヒマワリ葉 ^(a)	0.04 (0.08)	0.03 (0.07)	0.03 (0.06)	0.02 (0.04)
ヒマワリ葉 ^(b)	1.11 (2.22)	1.11 (2.22)	0.85 (1.69)	0.35 (0.70)
ヒマワリ葉 ^(c)	0.92 (1.85)	0.91 (1.82)	0.85 (1.71)	0.67 (1.34)
土 壌 ^(a)	1.04	1.04	0.95	0.94
木 材 ^(a)	0.09	0.08	0.06	0.05
ス レ ー ト ^(a)	1.17	1.09	0.95	0.83
淡 水 ^(a)	0.97	1.02	1.00	1.01
海 水 ^(a)	1.09	1.09	1.07	1.07

(a) dark, 0.5volppm 以下 25°C, 65%RH

(b) light, 0.5volppm 以下

(c) light, 0.1volppm 以下

ヒマワリ葉のカッコ内の数字は、従来の単位葉面積当たりの収着速度の表しかたに従ったもので、カッコの外の数字は単位接触面積当たりの収着速度である。

量が増加するに従って、表面における SO_2 濃度が高くなったためと考えられる。淡水と海水の SO_2 収着速度は暴露時間中ほぼ一定であった。この場合の収着速度は吸収速度と言い換えてもさしつかえないと思われる。吸収された SO_2 は液中で速やかに反応・移動し、気液界面における SO_2 濃度は一定に保たれていると推察される。

淡水と海水の SO_2 収着速度には、わずかに差があった。この差が有意な差だとすれば、pH の差異が原因の一つであると考えられる (Liss, 1971; Milne ら, 1978)。Milne ら (1978) によれば、pH の大きいほうが収着速度は大きい。ちなみに、暴露前の pH は、淡水で 6.0、海水で 8.1 であった。暴露後の pH は、淡水で 6.2、海水で 7.9 であった。

同じ固体でありながら、木材の収着速度とスレートの収着速度には大きな差がある。この原因は、真の接触面積のちがひ、単なる物理吸着と反応を伴う化学吸着のちがひなどが考えられる。

引用文献

- 安保文彰・相賀一郎 (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——1 次元拡散モデルにおける各種要因の影響について——。国立公害研究所研究報告, 第64号, 191-212.
- Liss, P.S. (1971) : Exchange of SO_2 between the atmosphere and natural waters. *Nature*, **233**, 327-329.
- (大喜多敏一 (1982) : 大気保全学 産業図書, p. 189-190. から引用)
- Milne, J. W., D.B. Roberts and D.J. Williams (1979) : The dry deposition of sulphur dioxide-field measurements with a stirred chamber. *Atmos. Environ.*, **13**, 373-379.
- 名取俊樹・戸塚 績 (1984) : 植物のガス吸収に関する種間差異。国立公害研究所研究報告, 第64号, 176-190.
- 大喜多敏一 (1982) : 大気保全学。産業図書, 東京, 254p.
- 大政謙次・安保文彰 (1979) : 植物による大気汚染ガス収着機構の解析 (1) SO_2 の局所収着と可視害発現との関係。国立公害研究所研究報告, 第10号, 211-226.
- 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ガス収着機構の解析 (3) NO_3 , O_3 あるいは $\text{NO}_2 + \text{O}_3$ 暴露下における収着について。国立公害研究所研究報告, 第10号, 245-258.
- 大政謙次 (1979) : 植物群落の汚染ガス収着機能—現象の解析とそのモデル化—。国立公害研究所研究報告, 第10号, 367-386.
- Sehmel, G.A. (1980) : Particle and gas dry deposition : A review. *Atmos. Environ.*, **14**, 983-1011.
- Taylor G.E., Jr, D.T. Tingey and H.C. Ratsh (1982) : Ozone flux in Glycine Max (L.) Merr. : Sites of regulation and relationship of leaf injury. *Oecologia*, **53**, 179-186.
- Taylor G.E., Jr and D.T. Tingey (1983) : Sulfur dioxide flux into leaves of *Geranium Carolinianum* L.. *Plant Physiol.*, **72**, 237-244.

II-4

デジタル画像処理による気孔反応の評価*

Measurement of Stomatal Aperture by Digital Image Processing

大政謙次¹・尾上守夫²

Kenji OMASA¹ and Morio ONOE²

要 旨

気孔反応を評価するためのデジタル画像処理手法を開発した。そして、この手法を汚染ガスに対する気孔反応の評価に適用した。その結果を要約すると、

(1) 気孔の開口面積、長さ、幅を、それぞれ $10\mu\text{m}^2$ 、 $0.3\mu\text{m}$ 、 $0.3\mu\text{m}$ の標準誤差($n=10$)で評価することができた。画質の悪い顕微鏡像においても、この手法は有効であった。

(2) 葉の局所領域において隣接する気孔の SO_2 に対する反応を評価したところ、反応に大きなばらつきがみられた。また、全体として気孔は閉じる傾向を示したが、水滲やしおれの発現の前に、一時的に開く現象が認められた。これらの結果は、汚染ガスに対する気孔反応の機構を解明する際、単に、平均値としての気孔反応を調べるだけでなく、個々の反応にも注目すべきであることを示している。

Abstract

We developed a new digital image processing technique for exactly measuring the degree of stomatal opening, that is, the ratio of the width to the maximum length of a stomatal pore, and the pore area. We applied this technique to evaluate responses to SO_2 of neighboring stomata in a small region of an intact attached leaf, with the following results:

1) The pore region could be exactly extracted even when the original digital image was of poor quality. The standard errors in the evaluation of the pore area, the pore length, and the pore width were $10\mu\text{m}^2$, $0.3\mu\text{m}$ and $0.3\mu\text{m}$, respectively.

2) A wide variety of responses to SO_2 was found among neighboring stomata in a

* この報告は、Plant and Cell Physiology に掲載された論文 Omasa and Onoe (1984) を日本植物生理学会の許可を得て和文として再編集したものである。

1. 国立公害研究所 技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Engineering Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

2. 昭和59年度 国立公害研究所客員研究員 (東京大学生産技術研究所 〒106 東京都港区六本木7-22-1)

Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Roppongi, Tokyo 106, Japan).

small region of an attached leaf. The differences were especially remarkable before water-soaking and wilting. When these began, k_1 showed a local maximum value, and then all the stomata began to close. These results suggest that stomatal responses of intact growing plants to air pollutants should be examined from the standpoint of not only the average movement of many stomata but also the movement of each stoma and that the interrelationship among movements of neighboring stomata should be investigated to clarify the mechanism of stomatal responses to air pollutants.

Key words : Air pollutant—Digital image processing—Stomatal aperture—Stomatal response.

1 緒 言

ディジタル画像処理は、計算機技術の発達に伴って、テレビジョン、リモートセンシング、あるいは医学の分野で広く用いられている (Hounsfield, 1973; Rosenfeld & Kak, 1976; Castleman, 1979; Onoe ら, 1981)。また、最近、植物生理学や生理生態学の分野でも有用な手法として利用され始めた (橋本・丹羽, 1978; 大政ら, 1981; Omasa ら, 1981a, b, 1983a; Hashimoto ら, 1983; Mineyuki ら, 1983; Onoe ら, 1983; Telewski ら, 1983; Mineyuki ら, 1984; Omasa & Aiga, 1985)。

植物の気孔開度を求める最も一般的な方法は、光学顕微鏡あるいは走査型電子顕微鏡で得た気孔の写真を人が定規で測定することである。しかし、この方法は、気孔の輪郭を決めるのに経験と知識を必要とし、測定者によりばらつきが生じる。そして、輪郭が不鮮明な場合には、その誤差が増大する。それゆえ、ディジタル画像処理により、輪郭が不鮮明な場合にも適用できる客観的で定量的な気孔開度の測定法について検討した。そして、この手法を汚染ガスに対する気孔反応の評価に適用した。

2 材料及び方法

材料：実験材料としては、ファイトトロン (25°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 4 : 2 : 4 : 1 の比でつめたポットに播種後 4 ~ 6 週間栽培したヒマワリ (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) を用いた。材料は、実験の前、ガス暴露チャンバ (相賀ら, 1982) に移し、十分慣らした後使用した。気孔の観察は、成熟した葉について行った。

大気汚染ガスに対する気孔反応の観察：気孔の観察は、遠隔操作の光学顕微鏡システム (Omasa ら, 1983b) を用いて行った。この顕微鏡は、生育している植物の気孔を観察するために、高倍率 (対物レンズ 50× + 拡大レンズ 3× + TV 用アダプターレンズ) で広い作動距離 (13 mm) をもつ光学顕微鏡と高感度の SIT カメラを組み合わせたもので、別室から遠隔で、焦点、ステージの移動、カメラの感度を調節できる。また、画像は、別室の高解像度で歪みの小さい TV モ

ニターに最高1,600倍の倍率でディスプレイできる。この顕微鏡をガス暴露チャンバの中に入れ、生育している植物の葉を顕微鏡のステージにセットした。そして、気孔開度が十分定常になった後、 O_3 あるいは SO_2 を暴露し、その後の気孔開度の変化を観察した。記録はモニター上の画像を白黒ネガフィルムで撮影することにより行った。なお、チャンバと葉の周辺の気温及び相対湿度はそれぞれ $25.0^{\circ}C$ 、60%に保った。光強度は、熱線カットフィルタ付のタングステンランプで調節し、約 $600\mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ に保った。

画像処理の手順：図1に輪郭が不鮮明な気孔の開口面積，長さ，幅を求めるための画像処理の手順を示す。この手順について述べると，

- (1) TV モニターを撮影することにより得られたネガフィルムを FSS (flying spot scanner) を用いて、 $256^H \times 256^V$ 8bit のデジタル画像 $f(x, y)$ ($x, y = 0, 1, \dots, N-1$) に変換する。
- (2) 変換後の原点が交換面の中心に来るように $f(x, y)$ のフーリエ変換 $F(u-N/2, v-N/2)$

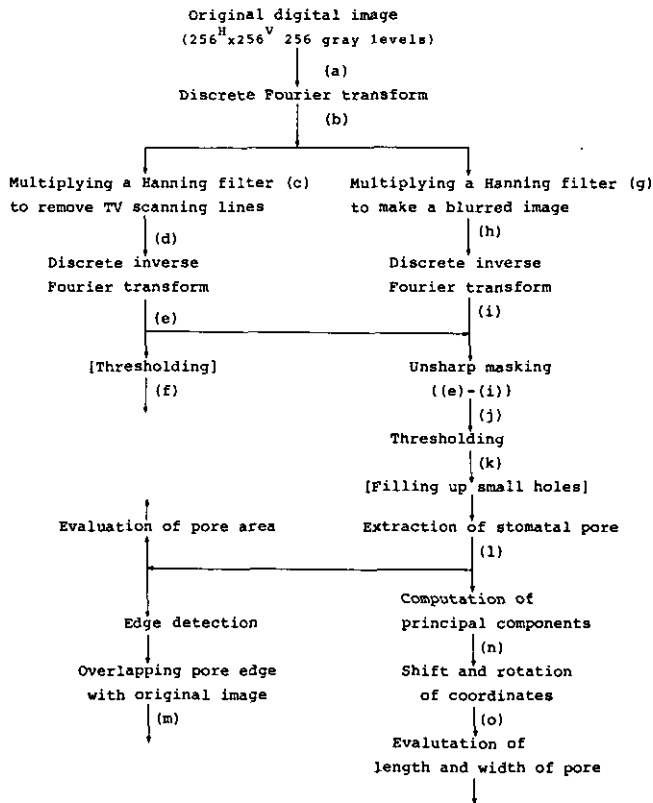


図 1 気孔の開口面積，長さ及び幅を測定するためのデジタル画像処理の手順

Fig. 1 Flow diagram of digital image processing for evaluating width, length and area of a stomatal pore

($u, v = 0, 1, \dots, N-1$) を求める。

$$F(u-N/2, v-N/2) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} (-1)^{x+y} f(x, y) \exp[-j2\pi(ux+vy)/N]$$

(3) $F(u-N/2, v-N/2)$ に 2 種類のハニングのフィルターをかけ、その後、それぞれについて逆フーリエ変換する。これは、 $f(x, y)$ に含まれる TV モニターの走査線を消すのと、unsharp masking 処理のためのぼけ画像を作るための処理である。

ハニングのフィルター $H(u-N/2, v-N/2, f_c)$

$$H(u-N/2, v-N/2, f_c) = \begin{cases} 0 & f_{uv} \geq f_c \\ \frac{1}{2} [1 + \cos(\pi f_{uv}/f_c)] & f_{uv} < f_c \end{cases}$$

ただし、 $f_{uv} = [(u-N/2)^2 + (v-N/2)^2]^{1/2}$

逆フーリエ変換 $g(x', y', f_c)$

$$g(x', y', f_c) = \frac{1}{N} (-1)^{x+y} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} (-1)^{u+v} H(u-N/2, v-N/2, f_c) \\ \times F(u-N/2, v-N/2) \exp[j2\pi(ux+vy)/N]$$

ただし、 $x' = x - N/2, y' = y - N/2$

(4) (3) で得られた二つの画像に対して、鮮明な画像からぼけの画像を引く unsharp masking 処理を施し、気孔の central pore の輪郭を強調した画像を得る。そして、この画像を二値化し、さらに、segmentation により central pore の領域だけを抽出する。二値化のしきい値は、unsharp masking 処理後の画像において零の近傍で一意的に決定される。このようにして得られた pore の領域の面積を求め気孔の開口面積とする。また、pore の領域の主成分を計算し、pore の長さ及び幅を求める。詳細については、文献 (Omasa & Onoe, 1984) を参照されたい。

3 結果及び考察

図 2 に図 1 の処理手順に基づいて得られた一連の結果を示す。デジタル原画像 (a) には、TV モニターの走査線が観察され、これがフーリエ変換像 (b) の特定の周波数成分 ($u \approx 68$) に表れた。これらの成分は、気孔の形の情報を含む低周波成分から容易に分離できた。分離するためのフィルターとして、 $f_c = 60$ のハニングのフィルター (c) を用いた。原画像に、このフィルターをかけた後の結果が (d) であり、その逆フーリエ変換像が (e) である。(e) において TV 走査線が除去されているのがわかる。しかし、この画像を濃度レベルに対して単純に二値化したのでは、気孔の central pore の領域を抽出することはできない (f)。また、微分やラプラシアンにより領域を抽

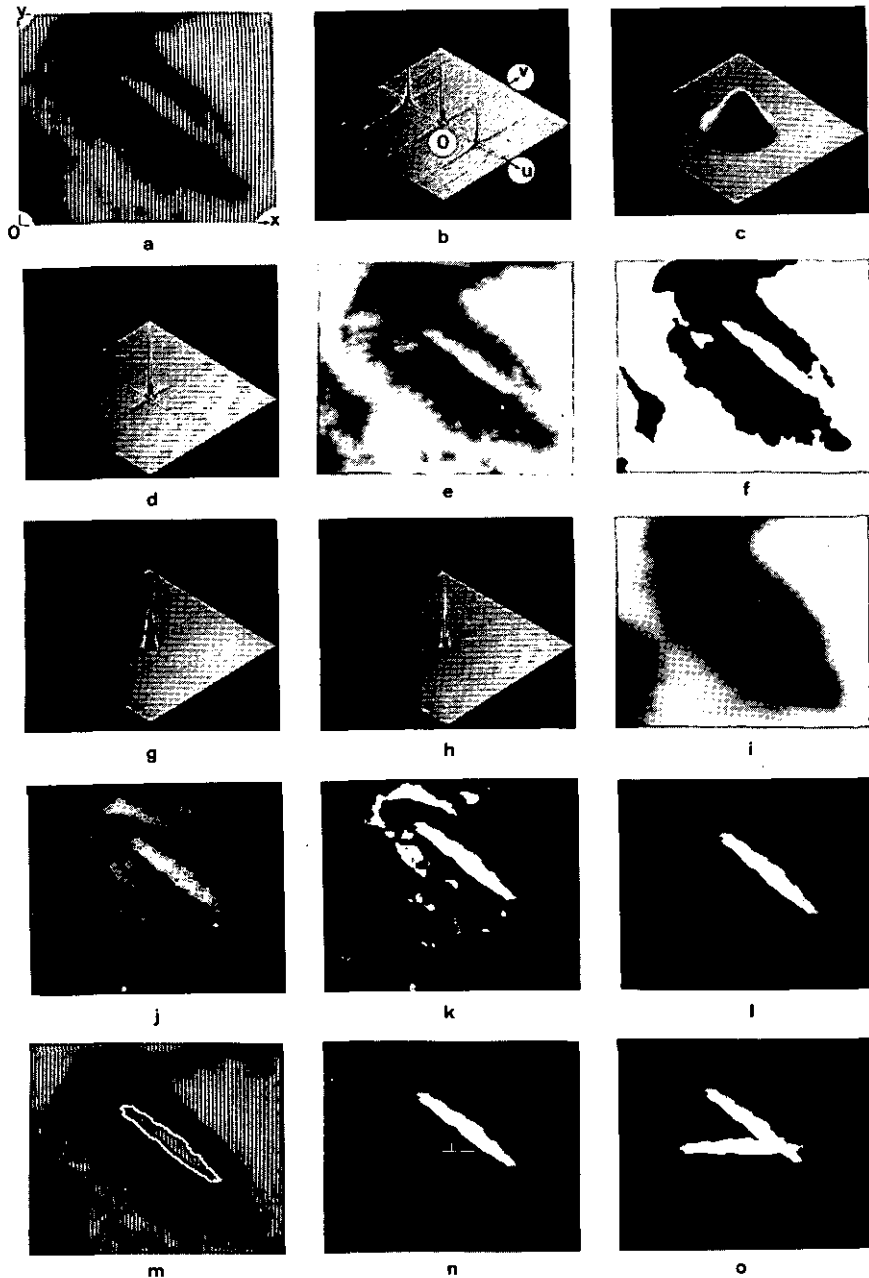


図 2 図1の手順に基づいて得られた気孔開度測定の一連の結果
 (a)~(o)は図1のそれに対応している。座標軸は、(x, y)が(a)に (u, v)が
 (b)に示されている。

Fig. 2 Sequence of digital image processing for evaluating stomatal aperture
 according to the flow diagram of Fig.1
 (a) to (o) correspond to those in Fig. 1. The coordinates are shown in (a) for (x, y)
 and (b) for (u, v).

出する手法があるが、この場合には有効ではない。そこで、TV 走査線を除去した後の画像に unsharp masking 処理を施した。unsharp masking 処理に用いたぼけ画像 (i) は、原画像のフーリエ変換像 (b) に、 $f_c=10$ のハニングのフィルター (g) をかけることにより得られた結果 (h) を逆フーリエ変換した。unsharp masking 後の画像 (j) は、pore の輪郭が強調され、pore とその周辺の細胞のコントラストが増大した。それゆえ、指定された pore の領域を二値化処理により周辺の細胞から容易に分離することができた。(k) は、二値化処理の後の画像で、(l) は、抽出された pore の領域である。原画像に pore の輪郭を重畳表示した結果が(m)である。この結果は、この一連の処理によって正確に pore の領域を抽出できることを示している。気孔開口面積は、抽出された pore の画素を計数することにより求めることができた。また、気孔の長さとは幅は、pore の領域の主成分 (n) に対して座標軸を移動・回転し (o)、直交する二つの主成分に対するヒストグラムを求めることにより得られた。

デジタル原画像の画質は、TV モニターに表示された画像それ自身、フィルムの現像、FSS の状態、その他に依存し、気孔開度の測定精度に影響を与える。それゆえ、同じ気孔開度であるが画質の異なる10枚の原画像と 1 ppm O_3 暴露により得られた画質の異なる連続撮影の画像を用いて、気孔開度の測定精度を検討した。表 1 に同一の気孔開度を持つ10枚の画像の気孔の開口面積、

表 1 気孔の開口面積、長さ、幅の測定精度
Table 1 Accuracy in the evaluation of area, length, and width of a stomatal pore

	Area	Length	Width
Mean value	433 μm^2	34.1 μm	16.4 μm
Standard error	10	0.3	0.3

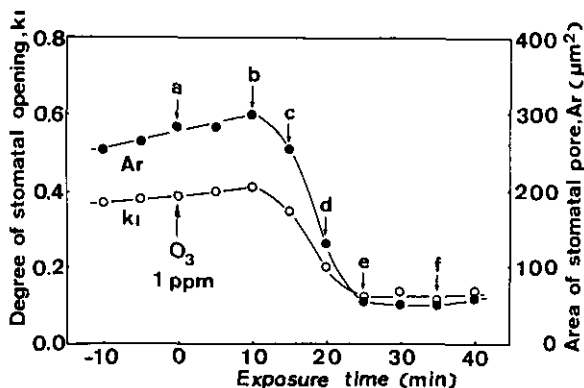


図 3 O_3 暴露期間中の A_r と k_i における変化
Fig. 3 Changes in A_r and k_i of a stoma during O_3 exposure

長さ及び幅を測定したときの標準誤差を示す。開口面積、長さ及び幅の標準誤差は、それぞれ、 $10\mu\text{m}^2$ 、 $0.3\mu\text{m}$ 、 $0.3\mu\text{m}$ であった。図3に O_3 暴露に伴う気孔の開口面積 A_r と開度 k_1 の変化を示す。ここで、開度 k_1 は、十分開いた pore の長さ、すなわち長さの最大長に対する幅の割合で定義した。図3において、 O_3 暴露前から A_r と k_1 は共にゆっくりと増加する傾向にあり、 O_3 暴露後も約10分間はその傾向が続いた。しかし、その後は O_3 の影響のために急速に小さくなり、暴露後約25分で、一定の値に到達した。図4は、図3の(a)～(f)の時刻での原画像に、抽出された pore の輪郭を重ね表示したものである。画質が悪い場合にも、この手法により正確な輪郭の抽出が可能なのことがわかった。

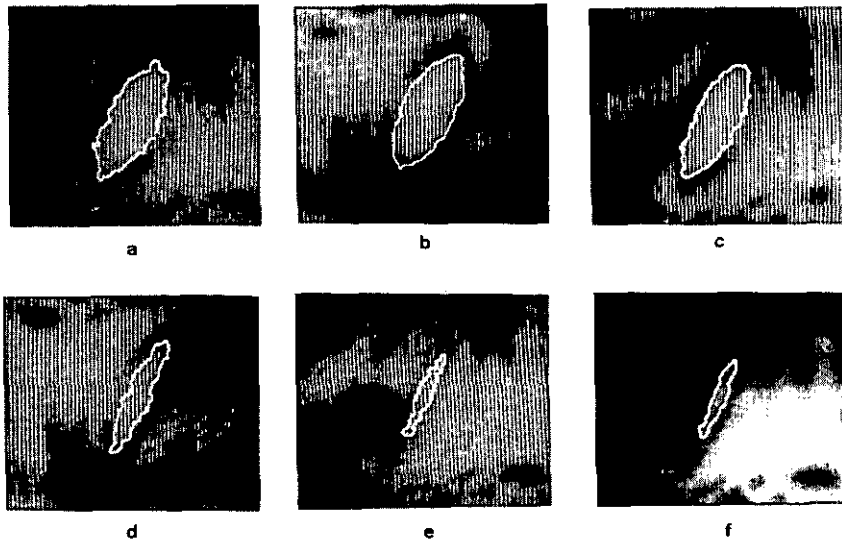


図 4 図3の(a)～(f)の時刻での原画像への抽出された pore の輪郭の重畳表示

Fig. 4 Original digital images overlapped with the pore edge at the time points (a to f) in Fig. 3

次に、生育しているヒマワリ葉の小さな領域(約 $320 \times 320\mu\text{m}^2$)における隣接した気孔の SO_2 に対する反応を検討した。図5に観察した6個の気孔の顕微鏡写真を示す。また、図6に2 ppm (v/v) SO_2 暴露の間のこれらの気孔の開度 k_1 の経時変化を示す。暴露開始後約20分経過するまで、 k_1 はほぼ均一で一定であった。しかし、その後、これらの気孔は全体として閉じる傾向を示したが、水滲やしおれの発現の前に、一時的に開く現象があった。この一時的に気孔が開く現象は、 SO_2 による膜の損傷や浸透圧の変化のために孔辺細胞とその周辺の細胞の間の膨圧のバランスが変化したことが原因であろう (Heath, 1980; Unsworth & Black, 1981)。

大気汚染ガスに対する気孔抵抗やコンダクタンスの変化はポロメーターや熱赤外画像計測シス

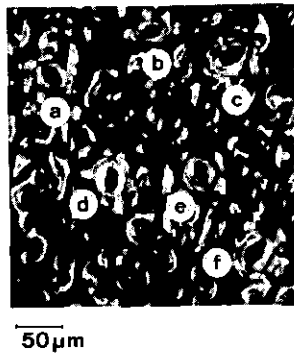


図 5 生育しているヒマワリ葉の小領域の顕微鏡写真
Fig. 5 Microphotograph of a small region of an intact attached leaf

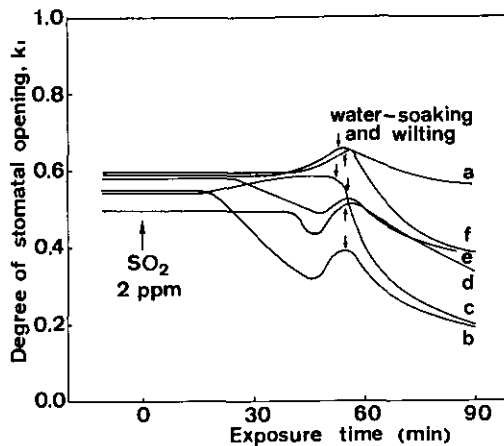


図 6 SO₂暴露期間中の図5の(a)～(f)の気孔の k_1 における変化
小さな矢印(↑又は↓)は水滲やしおれが発現した時点を示す。
Fig. 6 Changes in k_1 of stomata (a to f) in Fig. 5 during SO₂ exposure
Small arrows (↑ or ↓) show when water-soaking and wilting began appear.

テムを用いて検討されている (Unsworth & Black, 1981; Omasa ら, 1981a, b)。特に, 熱赤外面像計測システムによって, 葉の空間的な気孔抵抗の分布の経時変化が計測され, 葉の各々の部位における気孔抵抗の経時変化の違いが認識された(Omasa ら, 1981a, b)。また, 個体あるいは一枚の葉の気孔の動きの指標である蒸散速度の汚染ガスに対する反応は, 植物の種類, 葉令, 生育環境, ガス濃度, その他によって大きく異なる (Kondo & Sugahara, 1978; 大政・安保, 1978;

大政ら, 1979; Furukawa ら, 1979; Unsworth & Black, 1981)。しかし, 気孔抵抗 (1/コンダクタンス) や蒸散速度は, 多くの気孔の平均の動きを示すのであって, 個々の気孔反応を与えることはできない。

この研究において, 初めて, 生育している植物の葉の小領域における隣接した気孔の SO_2 に対する反応が, 大きく異なることを見いだした。この発見は, 汚染ガスに対する植物の気孔反応を解明するために, 多くの気孔の平均の動きを調べるだけでなく, 個々の気孔の動きに関しても十分な検討が必要であることを示している。筆者らが開発した遠隔操作の光学顕微鏡システム (Omasa ら, 1983b) は, 個々の気孔を観察するのに有効であり, ここで述べられたデジタル画像処理技術と組み合わせて, 今後, 有効的に利用されるであろう。

引用文献

- 相賀一郎・大政謙次・松本 茂 (1982) : 環境庁国立公害研究所ファイトトロンとそのエネルギーの供給システム, 空気調和・衛生工学, **56**, 741-751.
- Castleman, K.R. (1979) : Digital Image Processing. Prentice-Hall, New Jersey, 429 p.
- Furukawa, A., O. Isoda, H. Iwaki and T. Totsuka (1979) : Interspecific differences in responses of transpiration to SO_2 . Environ. Control Biol., **17**, 153-159.
- 橋本 康・丹羽 登 (1978) : 植物葉面情報の画像処理, 画像工学コンファレンス, **9**, 51-54.
- Hashimoto, Y., T. Morimoto and S. Funada (1983) : Image processing of plant information in the relation between leaf temperature and stomatal aperture. In: Technological and Methodological Advances in Measurement, Vol. 3. G. Striker, K. Havrilla, J. Solt and T. Kemeny (eds.). North Holland Publ. Co., Amsterdam, 313-320.
- Heath, R.L. (1980) : Initial events in injury to plants by air pollutants. Ann. Rev. Plant Physiol., **31**, 395-431.
- Hounsfield, G.N. (1973) : Computerized transverse axial scanning (Tomography). Brit. J. Radio., **46**, 1016-1022.
- Kondo, N. and K. Sugahara (1978) : Changes in transpiration rate of SO_2 -resistant and-sensitive plants with SO_2 fumigation and the participation of abscisic acid. Plant Cell Physiol., **19**, 365-373.
- Mineyuki, Y., M. Takagi and M. Furuya (1984) : Changes in organelle movement in the nuclear region during the cell cycle of *Adiantum* protonema. Plant Cell Physiol., **25**, 297-308.
- Mineyuki, Y., M. Yamada, M. Takagi, M. Wada and M. Furuya (1983) : A digital image processing technique for the analysis of particle movements: Its application to organelle movements during mitosis in *Adiantum* protonemata. Plant Cell Physiol., **24**, 225-234.
- Omasa, K. and I. Aiga (1985) : Image instrumentation for evaluating the effects of environmental pollution on plants. In: Encyclopedia of Systems and Control. M. Singh (ed.), Pergamon Press, Oxford. (in press)
- Omasa, K., I. Aiga and Y. Hashimoto (1983a) : Image instrumentation for evaluating the effects of air pollutants on plants. In: Technological and Methodological Advances in Measurement, Vol. 3. G. Striker, K. Havrilla, J. Solt and T. Kemeny (eds.), 303-312. North Holland Publ. Co.,

Amsterdam.

- 大政謙次・安保文彰 (1978) : 植物による大気汚染物質の収着に関する研究 (I) SO_2 の局所収着と可視障害発現との関係. 農業気象, **34**, 51-58.
- 大政謙次・安保文彰・相賀一郎・橋本 康 (1981) : 大気汚染環境下の植物の画像計測—熱赤外面像に含まれる生体情報の定量化について—計測自動制御学会論文集, **17**, 657-663.
- 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収着に関する研究 (II) NO_2 , O_3 あるいは $\text{NO}_2 + \text{O}_3$ 暴露下における収着について. 農業気象, **35**, 77-83.
- Omasa, K., Y. Hashimoto and I. Aiga (1981a) : A quantitative analysis of the relationships between SO_2 or NO_2 sorption and their acute effects on plant leaves using image instrumentation. Environ. Control Biol., **19**, 59-67.
- Omasa, K., Y. Hashimoto and I. Aiga (1981b) : A quantitative analysis of the relationships between O_3 sorption and its acute effects on plant leaves using image instrumentation. Environ. Control Biol., **19**, 85-92.
- Omasa, K., Y. Hashimoto and I. Aiga (1983b) : Observation of stomatal movements of intact plants using an image instrumentation system with a light microscope. Plant Cell Physiol., **24**, 281-288.
- Omasa, K., and M. Onoe (1984) : Measurement of stomatal aperture by digital image processing. Plant Cell Physiol., **25**, 1379-1388.
- Onoe, M., J.W. Tsao, H. Yamada, H. Nakamura, J. Kogure, H. Kawamura and M. Yoshimatsu (1983) : Computed tomography for measuring annual rings of a live tree. Proc. IEEE., **71**, 907-908.
- Onoe, M., K. Preston Jr. and A. Rosenfeld (ed.) (1981) : Real-Time/Parallel Computing Image Analysis., Plenum Press, New York.
- Rosenfeld, A. and A.C. Kak (1976) : Digital Picture Processing. Academic Press, New York, 457p.
- Telewski, F.W., A.H. Wakefield and M.J. Jaffe (1983) : Computer-assisted image analysis of tissues of Ethrel-treated *Pinus taeda* seedlings. Plant Physiol., **72**, 177-181.
- Unsworth, M.H. and V.J. Black (1981) : Stomatal responses to pollutants. In : Stomatal Physiology. P.G. Jarvis and T.A. Mansfield (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 187-203.

II-5

植物による大気 NO₂ 吸収量推定のための¹⁵N 希釈法

¹⁵N Dilution Method for Estimating the Absorption of
Atmospheric NO₂ by Plants

岡野邦夫¹・福沢時秀²・田崎忠良³・戸塚 績¹

Kunio OKANO¹, Tokihide FUKUZAWA², Tadayoshi TAZAKI³
and Tsumugu TOTSUKA¹

要 旨

比較的長期間にわたる植物の大気中二酸化窒素(NO₂)の吸収量の推定に、¹⁵N 希釈法を適用した。本法の信頼性を確かめる目的で、NO₂吸収量と暴露濃度及び暴露期間との関係を、ヒマワリとトウモロコシを用いて検討した。

2週間の暴露期間中に個体当たり吸収されたNO₂量は、暴露濃度の上昇に伴って増加した。単位葉面積当たりのNO₂吸収速度は、NO₂濃度が0から1.0ppmへと増加するにつれて、直線的に増大した。このことは、気孔あるいは葉肉拡散抵抗が、少なくとも1.0ppmまでのNO₂を長期間暴露してもほとんど変化しないことを意味している。ヒマワリはトウモロコシの約3倍のNO₂吸収速度を示した。

0.5ppmNO₂への暴露期間が0から3週間へと長くなるにつれて、個体当たりのNO₂吸収量は指数関数的に増加した。これは個体重や葉面積が生長に伴って指数関数的に増加したためと考えられた。NO₂吸収速度は最初の2週間ほぼ一定に保たれたが、その後増大した。これは土壌-根のルートで吸収されたNO₂が加算されたものと推測された。

以上の結果は、¹⁵N 希釈法で得られた値が極めて妥当なものであり、この方法が長期間にわたる植物のNO₂吸収量の測定に使用できることを証明した。

1. 国立公害研究所 生物環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 昭和58年度 国立公害研究所共同研究員 (東邦大学理学部 〒274 千葉県船橋市三山2丁目2番1号)
Research Collaborator of the National Institute for Environmental Studies. (Department of Botany, Faculty of Science, Toho University, Funabashi, Chiba 274, Japan).
3. 昭和58年度 国立公害研究所客員研究員 (東邦大学理学部 〒274 千葉県船橋市三山2丁目2番1号)
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Department of Botany, Faculty of Science, Toho University, Funabashi, Chiba 274, Japan).

Abstract

The ^{15}N dilution method was introduced for the quantitative estimates of nitrogen dioxide (NO_2) absorbed by sunflower and maize plants during a relatively long period. The relationships between the amount of NO_2 absorbed and the concentration of NO_2 and length of exposure were investigated in order to ascertain the reliability of this method.

The total amount of NO_2 -nitrogen absorbed in the plants over two weeks (from 2 to 4 weeks after the sowing) was increased linearly with increasing concentration of NO_2 from 0 to 1.0 ppm. This means that the diffusive resistance at stomata or mesophyll tissues would not be changed by the continuous exposure to NO_2 from 0 to 1.0 ppm for two weeks. The absorption rate in the sunflower plant was about three times greater than that in the maize plant.

The total amount of NO_2 -nitrogen absorbed in the plants which were exposed to 0.5 ppm NO_2 was increased not linearly but exponentially as the exposure time elapsed from 0 to 3 weeks. This might reflect the characteristics of the plant growth, since the plant weight or the leaf area was increased exponentially during the period of gas exposure. The absorption rate was maintained at a constant during the first two weeks, but thereafter significantly elevated probably due to the uptake of NO_2 -nitrogen through soil-root route.

These results demonstrated that the values obtained by the ^{15}N dilution method were quite reasonable and this method was applicable for the quantitative determination of NO_2 absorbed by plants during a long period.

Key words : ^{15}N dilution method—Nitrogen dioxide—Absorption of NO_2 —Sunflower—Maize.

1 緒 言

都市域における大気中の窒素酸化物濃度は、硫黄酸化物濃度が近年顕著に低下しているのとは対照的に横ばい状態が続いている。窒素酸化物の中でも特に二酸化窒素 (NO_2) は、光化学反応によりオキシダントを生成する原因物質として問題になっている汚染質であり、何らかの方法で大気中の濃度を低下させることが望まれている。

近年、大気環境の保全や改善に対する緑地の効果が注目されつつある。植物の葉は気孔から種々のガス状汚染物質を炭酸ガスと同じように吸収するため、植生は大気汚染質の効率の良いシンクと見なされている (Hill, 1971)。したがって、植生を利用して大気中の汚染質濃度をある程度低下させることも可能と考えられる。植物による大気 NO_2 の吸収に関しては、これまで数多くの研究が行われてきた (Hill, 1971 ; Srivastava ら, 1975 ; Rogers ら, 1979 ; Omasa ら, 1979)。これらの研究の大部分は、いわゆるガス交換法を用いて、主として短時間暴露において吸収速度を測定したものであった。しかし、植生の持つ大気浄化能力を定量的に評価するには、吸収速度を積算した値である、長期間にわたる全吸収量を明らかにすることがより重要と考えられるが、測

定法の問題もありそのようなデータは非常に少ない。

最近、マメ科作物の空中N₂固定量の推定に¹⁵N希釈法が広く使われている (Fried & Middelboe, 1977; Rennie ら, 1978)。その原理は、¹⁵N で標識された植物が¹⁵N 濃度の低い大気中の N₂ を固定すれば、その固定量に応じて¹⁵N 濃度が希釈を受け、非固定植物より低くなることにある。Yoneyama ら (1980b)、米山 (1980) は、この方法が植物による大気中の NO₂ 吸収量の推定にも適用できることを示した。我々はこの方法を用いて、比較的長期間にわたる植物の大気 NO₂ 吸収量を定量的に評価し、植物を使った大気浄化の可能性の検討を進めている。本研究ではその第一段階として、¹⁵N 希釈法による推定値の信頼性を確認する目的で、植物による NO₂ 吸収量と暴露濃度及び暴露期間の関係を検討した。

2 材料と方法

実験材料としてヒマワリ (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) とトウモロコシ (*Zea mays* L. cv. Dento) を使用した。1.8 l の人工培土をつめた1/10000 a のポットに3粒ずつの種子を播種し、自然光型ファイトロン温室 (25°C, R. H. 70%) で育成した。人工培土としてはパーミキュライト、ピートモス、パーライト、小砂利を 2 : 2 : 1 : 1 (容量比) に混合したものを、苦土石灰 15g, Magamp K (N : P₂O₅ : K₂O = 6 : 40 : 5, W. R. Grace Co., Tennessee, U. S. A) 5 g を均一に加えた。液肥として Hyponex 1000 倍液をポット当たり 100-200ml ずつ、週 2 回の割合で与えた。かん水は培土が乾燥しないよう適宜行った。播種後 1 週間目に幼植物を間引き、1ポット当たり 1本仕立てとした。播種後 2 週間目に、¹⁵N 標識の硝酸カリウム (5.07 atom%¹⁵N) をポット当たり 0.72g 与えた。投与した¹⁵N が培土中に均一に分布するように、硝酸カリウムは 130ml の水溶液として与えた。またポットからの¹⁵N の漏出を妨ぐため、ポットの下に受け皿を置いた。

実験 1 : ¹⁵N 投与後ポットを 4 群に分け、環境条件 (420 μEs⁻¹m⁻², 明期 14 h, 25°C, R. H. 70%) が同一な 4 基の人工光型ガス暴露キャビネットに搬入した。一群の植物は NO₂ を含まない清浄空気のもとで栽培し (対照区)、他の 3 群は 0.2ppm (μl l⁻¹), 0.5ppm, 1.0ppm の濃度の NO₂ を、それぞれ 2 週間連続暴露した。NO₂ 暴露期間中は、ポット内の N 収支を明確にするために、液肥は全く与えなかった。かん水は必要に応じて行った。NO₂ 暴露開始前と 2 週間の連続暴露の後に、10 個体ずつの植物を採取し、それを 2 個体ずつまとめ 5 反復分の材料を得た。

実験 2 : ¹⁵N 投与後ポットを 2 群に分け、2 基の人工光型ガス暴露キャビネットに移した。一方は 0.5ppm の NO₂ を 3 週間連続暴露し、他方は NO₂ を含まない大気中で栽培した。実験 1 の植物はやや N 欠乏状態を呈したため、実験 2 では 1 週間ごとに 0.72g の非標識の硝酸カリウムを追肥として与えた。NO₂ 暴露開始前及び暴露中の 1 週間ごとに、6 個体ずつの植物を採取した。

サンプリングと¹⁵N の測定 : 採取したヒマワリは葉、莖、根に切り分けた。実験 2 の 3 週目の植物には花芽が認められた。トウモロコシは葉身、葉鞘、稈、根に切り分けた。根は注意深く水洗

いして、培土を取り除いた。葉面積計 (LI-COR, 3100型) で葉面積を測定した後、植物体を 80°C で 3 日間乾燥し、各部位の乾燥重量を求めた。その後、各部位を再びひとまとめにし、粉碎機 (平工製作所, TI-200型) で微粉末化した。Matsumaru ら (1979) は、NO₂ 吸収量に加えて吸収経路や体内での挙動をも明らかにする目的で、部位別に ¹⁵N 濃度を測定している。しかし、¹⁵N 標識の NO₂ を使った実験により、NO₂ の吸収経路や体内での挙動は既に明らかにされている (Kaji ら, 1980; Yoneyama ら, 1980 a c; 岡野ら, 1981; Okano ら, 1983) ので、本実験では個体全体の平均的な ¹⁵N 濃度のみを測定した。

硝酸態窒素を含む全窒素量はガンニングの変法に従い、ケルダール蒸留法 (木内, 1976) で求めた。¹⁵N 濃度は ¹⁵N アナライザー (日本分光, NIA-1 型) を用い、発光分光法 (Muhammad & Kumazawa, 1974) により測定した。

¹⁵N 希釈法: 窒素の安定同位体である ¹⁵N で標識された土壤に生育しているマメ科植物が、¹⁵N 濃度の低い (自然存在比) 大気中の N₂ を固定すれば、その量に比例して植物体中の ¹⁵N 濃度は希釈され、非固定植物より低くなる。大気 N₂ 由来の窒素の割合は次式で表される。

$$\left(1 - \frac{\text{マメ科植物の}^{15}\text{N 濃度}}{\text{土壤窒素の}^{15}\text{N 濃度}}\right) \times 100 \quad (1)$$

土壤窒素中の ¹⁵N 濃度を正確に測定することは非常に難しいが、ふつう対照植物 (非固定植物) の ¹⁵N 濃度は土壤窒素中の ¹⁵N 濃度を反映していると思なすことができる (Rennie ら, 1978)。そこでマメ科植物に固定された窒素量は、もし適当な対照植物が存在すれば、次式で表される。

$$\text{固定窒素量} = \left(1 - \frac{\text{マメ科植物の}^{15}\text{N 濃度}}{\text{対照植物の}^{15}\text{N 濃度}}\right) \times \text{マメ科植物中の全窒素量} \quad (2)$$

その場合、同一栽培条件であれば、マメ科植物と対照植物で、土壤中の窒素と ¹⁵N で標識された肥料中の窒素が、その存在量に応じた割合で吸収されるか、もしくは両者が完全に混合され区別がつかないことが前提となっている (Fried & Middelboe, 1977; 米山, 1980)。Yoneyama ら (1980 a), 米山 (1980) 及び Matsumaru ら (1981) は (2) 式を (3) 式のように変え、¹⁵N 希釈法の原理が植物による大気 NO₂ 吸収量の推定にも適用できることを示した。

$$\begin{aligned} \text{大気 NO}_2 \text{由来の窒素量} &= \left(1 - \frac{\text{NO}_2 \text{暴露植物中の}^{15}\text{N 濃度}}{\text{非暴露植物中の}^{15}\text{N 濃度}}\right) \\ &\times \text{NO}_2 \text{暴露植物中の全窒素量} \quad (3) \end{aligned}$$

3 結 果

実験 1 では、NO₂ 吸収量と暴露濃度の関係を検討した。この実験では同時に、種々の濃度の NO₂

表 1 種々の濃度の NO₂ に 2 週間暴露されたヒマワリとトウモロコシの全窒素量と¹⁵N 濃度Table 1 Total nitrogen contents and ¹⁵N abundance in sunflower and maize plants which were exposed to various concentrations of NO₂ for two weeks

Concentration of NO ₂	Sunflower		Maize	
	T-N mg	¹⁵ N atom% excess	T-N mg	¹⁵ N atom% excess
Control	218	1.68	188	1.56
0.2ppm	232	1.50	195	1.54
0.5ppm	275	1.36	217	1.43
1.0ppm	317	1.19	224	1.36

Values are the mean of 5 replications from 10 plants.

に対する植物の生長反応も調べた (Okano ら, 1985)。2 週間の 0.2ppm NO₂ 連続暴露はヒマワリの生長をやや促進したが、0.5ppm 以上では生長を抑制した。特に根と茎の乾重量低下が著しかったが、葉の生長はほとんど影響を受けず、可視害も認められなかった。トウモロコシの生長は、いずれの濃度の NO₂ によってもほとんど変化しなかった。

表 1 に種々の濃度の NO₂ に 2 週間連続暴露されたヒマワリとトウモロコシの全窒素量と¹⁵N 濃度を示す。両植物とも NO₂ 濃度が高まるにつれて、個体全体中の¹⁵N 濃度は低下してゆき、全窒素量は増加した。これは植物が大気中から NO₂ を吸収し、その吸収量に応じて植物組織中の¹⁵N 濃度が希釈を受けたことを示している。

次に、2 週間の暴露期間中に吸収された NO₂ 由来の窒素量と暴露濃度の関係を表 2 に示す。NO₂ 起源の窒素量は (3) 式を使って求めた。一方、比較のために、従来から行われている差し引き法 (Rennie ら, 1978; Matsumaru ら, 1979) によっても求めた。この方法は、NO₂ 暴露植物と非暴露植物の全窒素量の差 (表 1 参照) から求めるものである。NO₂ 濃度が 0.2ppm から 1.0ppm へと上昇するに伴って、個体当たりの NO₂ 吸収量は直線的に増加した。ヒマワリは同一生育時期のトウモロコシより多くの NO₂ を吸収した。例えば 1.0ppm NO₂ の場合、ヒマワリは 2 週間で 93 mg の NO₂ 由来の窒素を吸収したが、トウモロコシは 29mg しか吸収しなかった。これを暴露期間中に増加した全窒素量に占める割合で表すと、ヒマワリで 31.5%、トウモロコシで 14.8% であった。この割合も暴露濃度に比例していた。差し引き法で求めたヒマワリの NO₂ 吸収量は、¹⁵N 希釈法による値と比較的であった。しかしトウモロコシでは、差し引き法は¹⁵N 希釈法より大きな値を示した。

様々な濃度の NO₂ 暴露により、特にヒマワリの生長は大きく影響された。表 2 で示した個体当たりの NO₂ 吸収量は、その植物の大きさ、特に葉面積に大きく左右されると考えられた。そこ

表 2 ^{15}N 希釈法及び差し引き法によって推定されたヒマワリとトウモロコシの2週間の NO_2 吸収量

Table 2 Amount of NO_2 -nitrogen absorbed over two weeks in sunflower and maize plants estimated by the ^{15}N dilution and the difference methods

Species	NO_2 ppm	NO_2 -nitrogen (mg plant ⁻¹)		Contribution(%) to T-N (by ^{15}N)
		^{15}N dilution*	Difference	
Sunflower	0.2	12.2± 4.7	14	5.8
	0.5	52.2±15.0	57	20.6
	1.0	93.0±16.2	99	31.5
Maize	0.2	3.7± 4.1	7	2.3
	0.5	18.2± 3.4	29	9.8
	1.0	28.5± 3.8	36	14.8

* Values are the mean of 5 replications from 10 plants ± S. D.

で、単位葉面積当たりの NO_2 吸収速度と暴露濃度の関係を求めた(図1)。暴露開始前の葉面積と2週間の暴露終了後の葉面積を、単純に加算して2分したものを平均葉面積として計算を行った。両植物の NO_2 吸収速度は、 NO_2 濃度が 0 ppm から1.0ppm の範囲で増加するに従って直線的に増大した。このことは気孔拡散抵抗や葉肉拡散抵抗が、少なくとも1.0ppm までの NO_2 を長期間暴露してもほとんど変化しないことを示している。単位葉面積当たりの NO_2 吸収速度で比較すると、ヒマワリはトウモロコシの約3倍ほど大きい値を示した。これは米山ら(1978)や Matsumaruら(1979)の得た値と一致している。

実験2では、 NO_2 吸収量と暴露期間の関係を検討した(図2)。植物体中に吸収された NO_2 由来の窒素量は、 ^{15}N 濃度と全窒素量から実験1と同様に(3)式を用いて計算した。両植物とも、個体当たりの NO_2 吸収量は、0.5ppm NO_2 の暴露期間が長くなるにつれて、直線的ではなく指数関数的に増加した。これは、この時期における植物の生長特性が反映されたものと考えられた。すなわち、実験期間中に両植物の乾重量及び葉面積(図省略)は、指数関数的な生長を示した(図3)。

生育時期別にみた単位葉面積当たりの NO_2 吸収速度の変化を図4に示す。 NO_2 暴露開始後2週目までは、 NO_2 吸収速度はほぼ一定の値を示した。ヒマワリは約0.55mg Ndm⁻²d⁻¹の吸収速度を示し、トウモロコシはその1/3の値であった。この値は実験1で得られた値とよく一致していた(図1参照)。ところが、両植物とも2週目から3週目にかけて、 NO_2 吸収速度が有意に高まった。

4 考 察

植物による大気汚染質の吸収量及び吸収速度を明らかにすることには、いくつかの重要な意義がある。第一に、植物の被害度と汚染質吸収量の関係を知ることができる。汚染質吸収に関する

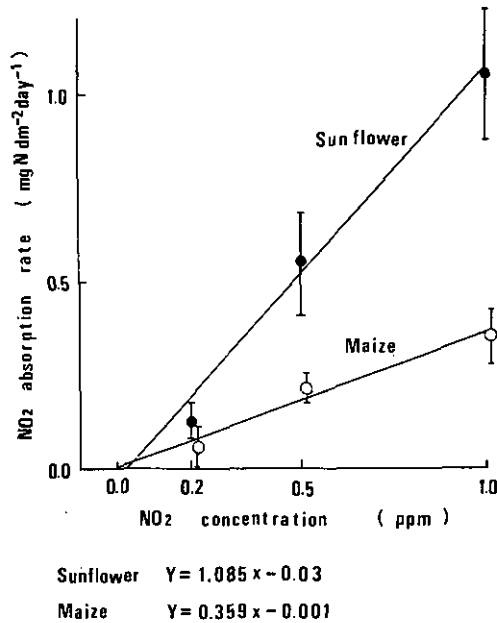


図 1 ヒマワリとトウモロコシの単位葉面積当たりの NO₂吸収速度と暴露濃度の関係
各記号は 5 反復の平均値と標準偏差を示す。吸収速度は次式から計算した：

$$\text{NO}_2\text{吸収速度} = \frac{\text{吸収された NO}_2\text{窒素量}}{\frac{\text{暴露前の L.A.} + \text{暴露後の L.A.}}{2}} \div 14$$

Fig. 1 Relationship between the NO₂ absorption rate per unit leaf area and the concentration of NO₂ exposed in sunflower and maize plants.
Each symbol indicates the mean of five replicates \pm standard deviation. The rate was calculated by the following equation :

$$\text{absorption rate} = \frac{\text{absorbed NO}_2\text{-nitrogen}}{\frac{\text{initial L. A.} + \text{final L. A.}}{2}} \div 14$$

研究はこの目的で行われたものが多い。第二に、ある種の汚染質（例えば NO₂, SO₂）は大気汚染物質としてだけでなく、大気から供給される肥料として作用する場合があります（藤原, 1973；Troiano & Leone, 1977；Yoneyama ら, 1980 b；Okano ら, 1985），その肥料効果の評価には吸収量に関するデータが欠かせない。第三に、本研究の目的でもある植物の大気浄化機能の評価には汚染質の吸収量を知ることが不可欠である。植物による NO₂の吸収量あるいは吸収速度の推定には、その目的に応じて以下に記すような様々な手法が使われてきた。

- 1) ガス交換法：植物体をチェンバーに入れ、NO₂を含む空気を通し、入口と出口の NO₂濃度

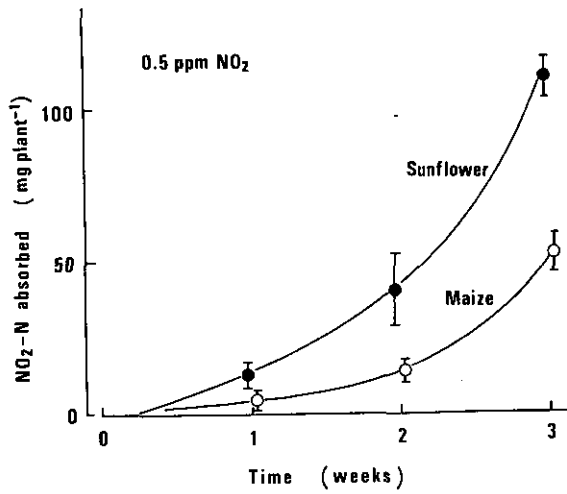


図 2 ヒマワリとトウモロコシの個体当たり NO₂吸収量と NO₂ (0.5ppm) 暴露期間との関係

各記号は 6 個体の平均値と標準偏差を示す。

Fig. 2 Relationship between the amount of NO₂-nitrogen absorbed by sunflower and maize plants and the duration of exposure to 0.5ppm NO₂

Each symbol indicates the mean of six plants ± standard deviation.

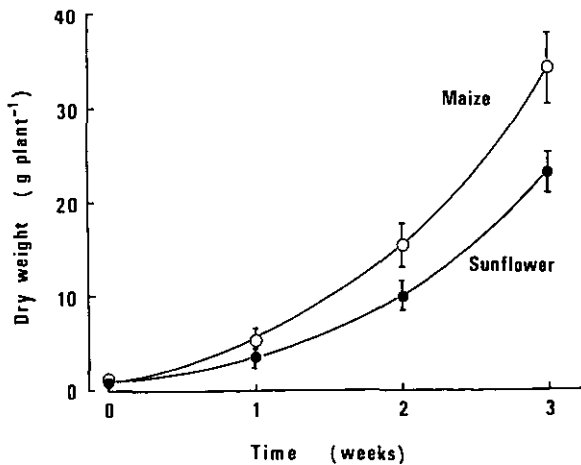


図 3 NO₂暴露期間中のヒマワリとトウモロコシの生長曲線

Fig. 3 Growth curves of sunflower and maize plants during the period of NO₂ exposure

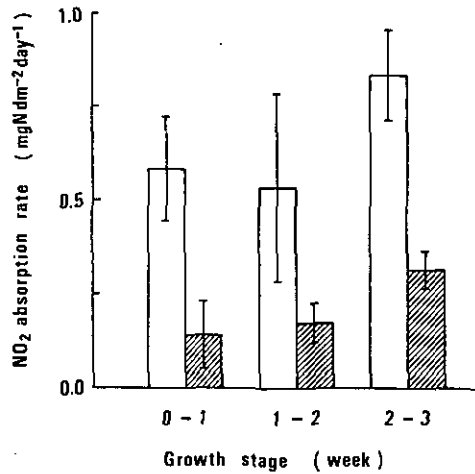


図 4 0.5ppm NO₂を連続暴露されたヒマワリとトウモロコシの育成時期別に見た NO₂吸収速度の変化

吸収速度の計算は図1と同様に行った。図中の縦線は標準偏差を示す。

Fig. 4 Changes in NO₂ absorption rate at different growth stages of sunflower and maize plants which were continuously exposed to 0.5ppm NO₂

The absorption rate was calculated by the equation shown in Fig. 1. Vertical bar in the figure indicates the standard deviation.

差と通気量から求める (Hill, 1971; Srivastavaら, 1975; Rogersら, 1979; Omasaら, 1979)。

2) ¹⁵NO₂法: ¹⁵Nで標識したNO₂を暴露し, 植物体中に取り込まれた¹⁵N量を測定する(米山ら, 1978; Kajiら, 1980; 岡野ら, 1985)。

3) 差し引き法 (戸塚ら, 1978; Matsumaruら, 1979)。

4) ¹⁵N希釈法 (Matsumaruら, 1979, 1981; Yoneyamaら, 1980b; 米山, 1980)。

5) 空気力学的方法: 群落上部の大気中に生ずる垂直方向の汚染質濃度差と風速, あるいは熱収支から求める (Murphyら, 1977; Fowler, 1978; いずれもSO₂について)。

これらの方法のうち1), 2)及び5)は, ある限られた時間内における植物全体あるいは1枚の葉のNO₂吸収速度を求めるものであり, 主として前述の第一の目的を持った研究において使われた。一方, 植物による大気汚染質の吸収能の定量的評価には, 長期間にわたる全吸収量に関するデータが不可欠であるが, これに適した方法として3)差し引き法と, 本研究でも用いた4)¹⁵N希釈法がある。差し引き法の最大の問題点は, NO₂由来のNと土壌(あるいは培地)由来のNを植物体内で区別ができないことにある。通常, 低濃度NO₂でも長期間暴露されることにより, 植物の生長が抑制されることが多く, 特に根の生長低下が著しい(戸塚ら, 1978; Okanoら, 1985)。それは必然的に土壌からのN吸収の低下をまねくと考えられ, 差し引き法によるNO₂吸収量の推定

表 3 NO₂暴露期間中に土壌中から吸収された窒素量

Table 3 Amount of nitrogen taken up by the root* from soil during the period of NO₂ exposure

Concentration of NO ₂	Sunflower (mgN plant ⁻¹)	Maize (mgN plant ⁻¹)
Control	196±5	157±9
0.2ppm	198±2	160±9
0.5ppm	200±2	168±4
1.0ppm	203±4	165±8

* N taken up by the root = Total N increased - N derived from NO₂

値は、¹⁵N 希釈法と比較して過小評価となることが多い (Matsumaru ら, 1979)。

本研究でも実験 1 において、種々の濃度の NO₂ に 2 週間暴露したヒマワリとトウモロコシの NO₂ 吸収量を ¹⁵N 希釈法と差し引き法で比較した (表 2)。その結果、予想に反して、ヒマワリでは二つの方法による推定値は良く一致した。この理由は、各処理区の植物がほぼ同量の N を土壌中から吸収したためと考えられる (表 3)。すなわち、実験 1 では 2 週間の NO₂ 暴露期間中に追肥を行わなかったため N 欠乏状態となり、ポット中の可給態 N は実験期間中に吸収され尽くしたと考えられる。そのため、ヒマワリの根の生長は 0.5ppm 以上の NO₂ 暴露で顕著に抑制された (Okano ら, 1985) にもかかわらず、各処理区間で土壌からの N 吸収量に差が生じなかったものと思われる。その後の研究で、十分に施肥した土壌に生育したヒマワリを使って同様な実験を行った結果、差し引き法で推定した NO₂ 吸収量は ¹⁵N 希釈法に比べ小さな値を示した (岡野ら, 未発表)。トウモロコシの場合、差し引き法は ¹⁵N 希釈法よりやや大きな値を示した。このことは、NO₂ 暴露により土壌中からの N 吸収がやや促進されたことを意味する。Matsumaru ら (1979) も同様な結果を得ているが、その理由は明らかでない。

植物の NO₂ 吸収速度と暴露濃度及び暴露期間との関係については、ガス交換法を用いて検討したいくつかの報告がある。Hill (1971) はアルファルファ群落を使って、数多くの汚染物質について暴露濃度と吸収速度の関係を調べた。その結果、気孔閉鎖を引き起こす O₃ と Cl₂ を除けば、NO₂, SO₂, HF, PAN 等の汚染質の吸収速度は、10-15pphm 以下の濃度では、暴露濃度の増加に伴い直線的に増加してゆくことを見いだした。Rogers ら (1979) も 3 種類の植物を材料として、単位濃度当たりの NO₂ 吸収速度が、0-58pphm の範囲では変化しないことを報告している。Srivastava ら (1975) はインゲンマメを使った実験で、NO₂ 吸収速度の経時変化を検討し、3.0ppm 以上の濃度の NO₂ では、暴露時間が長びくにつれて NO₂ 吸収速度も徐々に低下してゆくが、それ以下の濃度では NO₂ 吸収速度も蒸散速度もあまり経時変化を示さないことを明らかにしている。

これらはいずれも数時間のNO₂暴露実験の結果であるが、より長時間暴露の場合にも同様な結果が得られている。例えば名取ら(1981)は、3種類の草本植物に0.2ppmのNO₂を1-2か月間連続暴露しても、NO₂吸着速度や蒸散速度は非暴露植物と比較して差がないことを報告している。ヒマワリ及びトウモロコシを使って得られた実験1の結果は、少なくとも1.0ppmまでのNO₂濃度ならば、かなり長期間連続暴露されても気孔抵抗や葉肉抵抗は変化せず、葉面積当たりのNO₂吸収速度は暴露濃度に伴って直線的に増大することを明らかにした(図1)。このように本実験の結果は、従来の報告から予測された結果と良く一致した。このことは逆に、¹⁵N希釈法によるNO₂吸収量の推定値が極めて妥当な値であることを証明している。

実験2では、0.5ppm NO₂への暴露期間が長くなるにつれて、個体当たりのNO₂吸収量は直線的でなく指数関数的に増加した(図2)。これは実験期間中に生じた個体あるいは葉面積の生長パターン(図3)が反映されたものと解釈される。しかし、生育時間別に単位葉面積当たりのNO₂吸収速度を比較したところ、暴露開始後2週目まではヒマワリ、トウモロコシともほぼ一定の吸収速度を示したが、2週目から3週目にかけては両植物とも吸収速度が高まった(図4)。葉齢や葉位により汚染質吸収速度は異なる(河内, 1980; 岡野ら, 1985)ことから、生育時期によっても吸収速度が異なることは十分考えられる。しかし両植物とも同時期に吸収速度が高まっていることは、植物側の生理的要因よりも何らかの外的要因の関与が大きい可能性を示している。おそらく、ポット中の土壤にいったん吸着されたNO₂由来のNが、その時期に植物に吸収され、大気中から葉面を通して直接吸収されたNO₂量に加算されたものと推測される。Yoneyamaら(1980 a, c)は¹⁵N標識のNO₂を土壤のみに暴露する実験を行い、NO₂の一部分は大気→土壤→根の経路で吸収されることを確認した。そして土壤経由のNO₂-N量は、短時間暴露の実験ではほとんど問題にならない量であるが、長期暴露の場合には無視できない量となることを報告している。植物が吸収するNO₂の中で、土壤経由で吸収されるNO₂がどれ程の割合を占めているのか、に関しては不明な部分が多い。また、この値は土壤の種類や水分量によっても変化すると考えられ、今後の検討課題のひとつである。

最後に、本実験で用いたヒマワリとトウモロコシの大気NO₂浄化能を試算してみた(表4)。表2より以下の直線回帰式が得られた。

$$\text{ヒマワリ} \quad Y=96.29X-1.58$$

$$\text{トウモロコシ} \quad Y=29.80X-0.08$$

(Y: 個体当たりのNO₂吸収量 (mgN), X: NO₂濃度 (ppm))

大気中のNO₂濃度として、環境基準の上限値である0.06ppmを用いた。その結果、この実験で用いたヒマワリは2週間で4.2mgのNO₂-Nを吸収し、それは期間中に増加した全窒素量の2.1%を占めること、NO₂に換算すれば13.8mgとなり、これは112m³の大気中に含まれるNO₂量に相当すること、またヒマワリは同じ生育日数のトウモロコシの約3倍のNO₂吸収能を持っていること等

表 4 ヒマワリとトウモロコシの大気 NO₂ (0.06ppm*) 浄化能Table 4 Capacity of the sunflower and maize plants for removing NO₂ at 0.06ppm* from the atmosphere

	Nitrogen** (mg plant ⁻¹ 2w ⁻¹)	Contribution to total-N (%)	NO ₂ (mg plant ⁻¹ 2w ⁻¹)	Air volume (m ³)
Sunflower	4.2	2.1	13.8	112
Maize	1.7	1.0	5.6	45

* Upper limit value of the air quality standard in Japan.

** The values were estimated by the regression equations (see text) obtained from the data in Table 2.

* NO₂環境基準 (0.04-0.06ppm) の上限値。

** 表2のデータから得られた回帰式(本文参照)を用いて計算した。

が明らかとなった。

植物の NO₂吸収量と暴露濃度及び暴露期間の関係を検討した本実験の結果は、¹⁵N 希釈法による NO₂吸収量の推定値が信頼できるものであることを明瞭に証明した。この方法は同位体希釈法として一般化できるので、他の汚染質についても適当な同位体が存在すれば、それが放射性であれ非放射性であれ、同様な方法で吸収量を推定できる。例えば Olsen (1957) や Bromfield (1972) は、硫黄 (S) の放射性同位体である ³⁵S を使って SO₂起源以外の S を標識して区別することにより、植物の SO₂吸収量を測定している。

引用文献

- Bromfield, A. R. (1972): Absorption of atmospheric sulfur by mustard (*Sinapis alba*) grown in a glasshouse. *J. Agric. Sci. (Camb.)*, **78**, 343-344.
- Fowler, D. (1978): Dry deposition of SO₂ on agricultural crops. *Atmos. Environ.*, **12**, 369-373.
- Fried, M. and V. Middelboe (1977): Measurement of amount of nitrogen fixed by a legume crop. *Plant and Soil*, **47**, 713-715.
- 藤原 喬 (1973): 窒素酸化物の植物に及ぼす影響について。公害と対策, **9**, 253-257.
- Hill, A. C. (1971): Vegetation: A sink for atmospheric pollutants. *J. Air Pollut. Cont. Assoc.*, **21**, 341-346.
- Kaji, M., T. Yoneyama, T. Totsuka and H. Iwaki (1980): Absorption of atmospheric NO₂ by plants and soils. (VI) Transformation of NO₂ absorbed in the leaves and transfer of the nitrogen through the plants. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud.*, No. 11, 51-58.
- 木内和美 (1966): 全窒素, 栄養診断のための栽培植物分析測定法。作物分析法委員会編, 養賢堂, 東京, 63-69.
- 河内 宏 (1980): 植物葉によるオゾン吸収と被害発現の関係—とくに葉位によるオゾン感受性の差異とオゾン吸収速度の関連について。大気汚染学会誌, **15**, 389-393.

- Matsumaru, T., T. Yoneyama, T. Totsuka and K. Shiratori (1979) : Absorption of atmospheric NO₂ by plants and soils. (I) Quantitative estimation of absorbed NO₂ in plants by ¹⁵N method. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **25**, 255-265.
- Matsumaru, T., T. Yoneyama, T. Totsuka and Y. Matsuoka (1981) : Absorption of atmospheric nitrogen dioxide by rice, wheat, and barley plants : Estimation by the ¹⁵N-dilution method. *Soil. Sci. Plant Nutr.*, **27**, 255-261.
- Muhammad, S. and K. Kumazawa (1974) : Assimilation and transport of nitrogen in rice. I. ¹⁵N-labelled ammonium nitrogen. *Plant Cell Physiol.*, **15**, 747-758.
- Murphy, C. E., Jr, T. R. Sinclair and K. R. Knoerr (1977) : An assesment of the use of forests as sinks for the removal of stmospheric sulphur dioxide. *J. Environ. Qual.*, **6**, 388-396.
- 名取俊樹・大政謙次・安保文彰・戸塚 績 (1981) : 植物の NO₂吸収速度を支配する植物側の要因に対する NO₂の暴露期間および暴露時の光条件の影響。国立公害研究所研究報告, 第28号, 123-132.
- 岡野邦夫・米山忠克・戸塚 績 (1981) : 植物葉に吸収された NO₂窒素の移動と光合成産物の転流に及ぼす NO₂暴露の影響。国立公害研究所研究報告, 第28号, 111-121.
- Okano, K., J. Tatsumi, T. Yoneyama, Y. Kono and T. Totsuka (1983) : Investigation on the carbon and nitrogen transfer from a terminal leaf to the root system of rice plant by a double tracer method with ¹³C and ¹⁵N. *Jpn. J. Crop Sci.*, **52**, 331-341.
- 岡野邦夫・高崎 博・戸塚 績 (1985) : ヒマワリ葉による¹⁵NO₂の吸収・代謝及び体内移動と葉齢の関係。国立公害研究所研究報告, 第82号, 67-77.
- Okano, K., T. Fukuzawa, T. Tazaki and T. Totsuka (1985) : Growth responses of plants to various concentrations of nitrogen dioxide. *Environ. Pollut. (Ser. A)*, (in press)
- Olsen, R. A. (1957) : Absorption of sulfur dioxide from the atmosphere by cotton plants. *Soil Sci.*, **84**, 107-111.
- 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吸着に関する研究 (II) NO₂, O₃あるいは NO₂+O₃暴露下における収着について。農業気象, **35**, 77-83.
- Rennie, R. J., D. A. Rennie and M. Fried (1978) : Concepts of ¹⁵N usage in dinitrogen fixation studies. *In* : *Isotopes in Biological Dinitrogen Fixation*, IAEA, Vienna, 107-133.
- Rogers, H. H., H. E. Jeffries and A. M. Witherspoon (1979) : Measuring air pollutant uptake by plants ; Nitrogen dioxide. *J. Environ. Qual.*, **8**, 551-557.
- Srivastava, H. S., P. A. Jolliffe and V. C. Runeckles (1975) : Inhibition of gas exchange in bean leaves by NO₂. *Can. J. Bot.*, **53**, 466-474.
- Troiano, J. J. and I. A. Leone (1977) : Changes in growth rate and nitrogen content of tomato plants after exposure to NO₂. *Phytopathol.*, **67**, 1130-1133.
- 戸塚 績・米山忠克・名取俊樹・滝本道明 (1978) : 高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(1) NO₂暴露によるヒマワリの乾物生長変化と NO₂の吸収について。国立公害研究所研究報告, 第2号, 67-76.
- 米山忠克・笹川英夫・戸塚 績・山本幸男 (1978) : 高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(5) 草本植物による¹⁵NO₂の吸収, 亜硝酸の蓄積, 亜硝酸還元酵素活性の変化。国立公害研究所研究報告, 第2号, 103-111.
- Yoneyama, T., A. Hashimoto and T. Totsuka (1980a) : Absorption of atmospheric NO₂ by plants and soils. (IV) Two routes of nitrogen uptake by plants from atmospheric NO₂ : Direct incorporation into aerial parts and uptake by roots after absorption into the soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **26**, 1-7.

岡野邦夫ら

Yoneyama, T., T. Totsuka, H. Hayakawa and J. Yazaki (1980b) : Absorption of atmospheric NO_2 by plants and soils. (V) Day and night NO_2 -fumigation effect on the plant growth and estimation of the amount of NO_2 -nitrogen absorbed by plants. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud., No. 11, 31-50.

Yoneyama, T., T. Yasuda, J. Yazaki and T. Totsuka (1980c) : Absorption of atmospheric NO_2 by plants and soils. (VII) NO_2 absorption by plants : re-evaluation of the air-soil-root route. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud., No.11, 59-67.

米山忠克 (1980) : 大気中窒素の植物による固定— ^{15}N 希釈法をめぐって—。化学と生物, 18, 293-295.

II-6

ヒマワリ葉による $^{15}\text{NO}_2$ の吸収・代謝及び体内移動と葉齢の関係

Absorption, Detoxification and Translocation of $^{15}\text{NO}_2$ by Sunflower Leaves with Special Reference to Leaf Age

岡野邦夫¹・高崎 博²・戸塚 績¹

Kunio OKANO¹, Hiroshi TAKASAKI² and Tsumugu TOTSUKA¹

要 旨

3段階(若葉,成熟葉,老葉)に葉齢の異なるヒマワリの第10葉(子葉を0として)に, $^{15}\text{NO}_2$ を約3.0ppmの濃度で75~90分間暴露し,葉による NO_2 の吸収・代謝及びその後の挙動が葉齢によりどう異なるのかを調べた。

NO_2 吸収速度は若葉ほど大であった。これは葉齢の進んだ葉ほどガス拡散抵抗が大きくなり, NO_2 の代謝・解毒能も低いためと考えられた。老葉になるほど吸収された $\text{NO}_2\text{-N}$ がタンパク質に取り込まれる割合は低下し,逆に葉を“素通り”して他部位へ転流してゆく割合が増大した。生長中の若い葉に吸収された $\text{NO}_2\text{-N}$ は,その葉の展開が完了するまではほとんど他部位へ転流せず,その葉自身の生長に使われた。葉から流出した $\text{NO}_2\text{-N}$ は,その時点で生長の盛んな部位へいったん移行し,その後再転流を続け,最終的には子実集中した。

Abstract

The 10th leaf of sunflower plant at three different leaf ages were exposed to ^{15}N -labelled nitrogen dioxide (NO_2) at around 3.0 ppm for 75 to 90 min, and absorption, detoxification and translocation of NO_2 by the leaves were investigated with reference to leaf age.

NO_2 absorption rate, which was calculated from the amount of ^{15}N recovered from the whole plant, was the greatest for the younger expanding leaf, followed by the

-
1. 国立公害研究所 生物環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
 2. 昭和55年度 国立公害研究所共同研究員(日本大学農獣医学部 〒154 東京都世田谷区下馬3-34-1)
Research Collaborator of the National Institute for Environmental Studies.
(Department of Agricultural Chemistry, Nihon University, Setagaya, Tokyo 154, Japan).

mature leaves and the older ones. This might be due to the larger leaf gas diffusion resistance and the lower detoxicating ability of the aged leaves. Most of NO_2 -nitrogen absorbed by the younger expanding leaf was retained within the leaf and utilized for the protein synthesis until the leaf expansion was completed. In the mature leaves and the older ones, NO_2 -nitrogen absorbed was also incorporated into protein fraction, but some nitrogen was directly exported from the leaves. The proportion of direct flow was greater in the older leaf than the mature leaf. NO_2 -nitrogen incorporated into leaf protein was hydrolyzed later and exported from the leaves. NO_2 -nitrogen exported from the fed leaves was translocated to the actively growing organs such as new leaves and root, and then retranslocated to the flower.

Key words : Nitrogen dioxide—Absorption—Detoxification—Translocation—Leaf age—Sunflower.

1 緒 言

植物が気孔を通して汚染質を吸収し、効率よく汚染大気を浄化するためには、吸収した汚染質を体内代謝により速やかに無毒化する必要がある。都市型大気汚染の代表的物質である二酸化窒素 (NO_2) の植物体内における解毒過程やその後の挙動は、ここ数年の ^{15}N 標識の NO_2 を利用した研究により、かなりの部分が明らかになってきた。高濃度の NO_2 は葉中に亜硝酸を蓄積させ、植物葉に可視障害を引き起こす (加藤ら, 1975; Yoneyama ら, 1979)。しかし低濃度の NO_2 は、関連する酵素活性が高ければ光の存在下で速やかに還元され、アミノ酸やタンパク質に取り込まれ無毒化される (Yoneyama & Sasakawa, 1979; Rogers & Compbell, 1979)。タンパク質に取り込まれた NO_2 由来の窒素 (N) は、その後加水分解されてアミノ酸となり、光合成産物とともに篩管を通して新葉や新根などの生長中の部位へ移動する (Yoneyama ら, 1980; 岡野ら, 1981; Okano ら, 1983)。 NO_2 に由来する N の植物体内におけるこのような挙動は、吸収された NO_2 が植物に有毒な汚染質としてだけでなく、場合によっては肥料としての N 源にもなり得る (Okano ら, 1985) ことを示している。

植物の葉はその葉位又は葉齢によって大気汚染質に対する感受性が異なっている。PAN のみは例外的である (Nouchi ら, 1984) が、 NO_2 を含む大部分の汚染質に対して、伸長中の若い葉は抵抗性が高く、展開を完了した成熟葉や老葉は影響を受けやすい (Menser ら, 1963; 河内, 1980, Tanaka & Sugahara, 1980; Furukawa & Totsuka, 1983; Okano ら, 1984)。したがって、 NO_2 の代謝・解毒機能にも葉位や葉齢による違いが存在すると考えられる。本研究では、 ^{15}N 標識の NO_2 を用いて、 NO_2 の吸収・代謝及びその後の体内での挙動が葉齢によりどう異なるのかをヒマワリを材料として検討した。

2 材料と方法

実験材料としてヒマワリ (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) を用いた。種子は

ベンレート1000倍液に30分間浸漬して滅菌し、流水で約12時間洗滌した。1.8 lの人工培土を詰め、1/10000 aのポットに3粒ずつの種子を播種し、自然光型ファイトトロン温室(25°C, R. H.70%)で育成した。人工培土としてはパーミキュライト、ピートモス、パーライト、小砂利を2:2:1:1(容量比)に混合したものを用い、それに苦土石灰15g, Magamp K 5 gを均一に加えた。液肥として Hyponex1000倍液をポット当たり100-200ml ずつ週2回与えた。かん水は必要に応じて行った。播種後1週間目に幼植物を間引き、1ポット当たり1個体仕立てとした。

$^{15}\text{NO}_2$ の暴露： $^{15}\text{NO}_2$ の暴露実験は合計3回行った。第10葉(子葉から10枚目の葉)を用い、図1に示す3段階の葉齢を選び、約3 ppmの $^{15}\text{NO}_2$ を75-90分間暴露した。(1)若葉：播種後26日目の第10葉。展開中の葉で葉面積は最大値の約1/3。(2)成熟葉：播種後32日目の第10葉、展開完了直後の葉で、葉位別にみると上位葉に相当する。(3)老葉：播種後56日目の第10葉。展開完了後24日経過した葉で、葉位別にみれば下位葉に当たる。

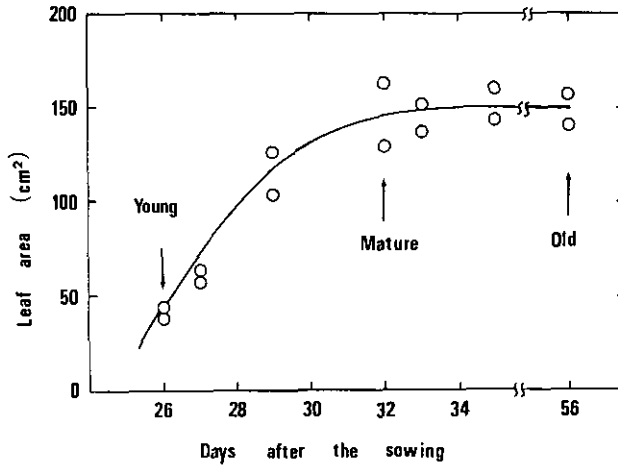


図 1 ヒマワリ第10葉の葉面積の生長
Young, MatureそしてOldは3段階の葉齢を示す。詳細は本文を参照。

Fig. 1 Changes in leaf area of the 10th leaf of sunflower plant
Young, mature and old indicate three different leaf ages. For details, see text.

各葉齢期の実験ごとに、均一な大きさの植物を12個体ずつ選び、実験開始の2時間前に人工光型グロースキャビネット(420 $\mu\text{Es}^{-1}\text{m}^{-2}$, 25°C, R. H.70%)内に搬入した。 $^{15}\text{NO}_2$ の暴露には、このキャビネット内に設置した、縦130cm×横50cm×高さ30cmの透明アクリル樹脂製の同化箱を用いた。箱の側面にあけた直径2 cmの穴から12個体の植物の各1枚の葉を差し込み、葉柄部をウレタン樹脂で包み密閉した。この同化箱内に、米山ら(1978)の方法により K^{15}NO_3 (99.7 atom% ^{15}N)から作成した $^{15}\text{NO}_2$ ガスを、注射器で少しずつ注入した。同化箱内の空気は、内部に

設置された3台のファンにより絶えずかくはんされた。箱内の $^{15}\text{NO}_2$ 濃度は化学発光式 NO_x 分析計(紀本電子 Model 258)で1分ごとにモニターしながら所定濃度に制御した。各葉齢期の実験における平均 $^{15}\text{NO}_2$ 濃度と暴露時間は表1に示されている。若葉暴露実験の2, 3個体を除けば、葉面可視害は認められなかった。

サンプリングと ^{15}N 分析： $^{15}\text{NO}_2$ 暴露終了後直ちに2個体の植物を採取し、残りの植物は前記の自然光型ファイトトン温室へ戻した。そして1日, 3日, 7日, 28日後に、それぞれ2個体ずつ採取した。植物体は $^{15}\text{NO}_2$ 暴露葉, 花, 上位葉(暴露葉より上位の葉), 下位茎, 下位葉(暴露葉より下位の葉), そして根に切り分けた。暴露葉は葉面積計(ライカー社, LI-3100)を用いて葉面積を測定した後, 80%熱エタノール中に浸した。その後ホモゲナイザーで磨砕し, 濾紙(東洋, NO.5)でろ過し, エタノール可溶画分と不溶画分に分画した。根は注意深く水洗いして培土を取り除いた。切り分けた各部位は80°Cで3日間乾燥させ, 秤量後, 粉碎機(平工製作所, TI-200)で粉末化し, 分析試料とした。

試料中の全N量はガンニングの変法に従いサリチル硫酸で分解し, ケルダール蒸留法(木内, 1976)で求めた。 ^{15}N 濃度は ^{15}N アナライザー(日本分光, NIA-1)を用い, 発光分光法(Muhammad & Kumazawa, 1974)により測定した。

表 1 3段階に葉齢の異なるヒマワリ第10葉の NO_2 吸収速度

Table 1 NO_2 uptake rate of the 10th leaf of sunflower plant at three different leaf ages

Leaf age ^a	Leaf area (cm ²)	Mean NO_2 conc (ppm)	Fumigation period (min)	^{15}N recovered ($\mu\text{g plant}^{-1}$)	NO_2 uptake rate ($\mu\text{g}^{15}\text{N dm}^{-2}\text{h}^{-1}3.0\text{ ppm}^{-1}$)
Young	42.0	3.0	90	312±114	496±181
Mature	162.6	2.9	75	641±191	324± 75
Old	146.9	2.7	75	371±101	225± 57

a See Fig. 1.

3 結 果

ヒマワリ第10葉の若葉, 成熟葉及び老葉齢期における, 単位葉面積当たりの NO_2 吸収速度を表1に示した。いったん植物に吸収された NO_2 窒素の植物体からの損失はほとんどない(Yoneyamaら, 1980; Okanoら, 1983)ので, NO_2 吸収速度は各サンプリング時の個体全体から回収された ^{15}N 量の平均値をもとに計算した。各葉齢期の実験において, NO_2 の暴露濃度及び暴露期間は少しずつ異なっていた。本実験のような暴露条件ではヒマワリ葉の気孔閉鎖は起こらないと考えられる(大政ら, 1979)。そこで, 葉の NO_2 吸収量は NO_2 ドース(濃度×時間)に比例すると仮定し, NO_2 濃度3.0ppm, 暴露時間60分に換算して, 吸収速度を比較した。個体間にはかなりの変動がみられたが, NO_2 吸収速度は葉齢の若い葉ほど大きい傾向が認められた。

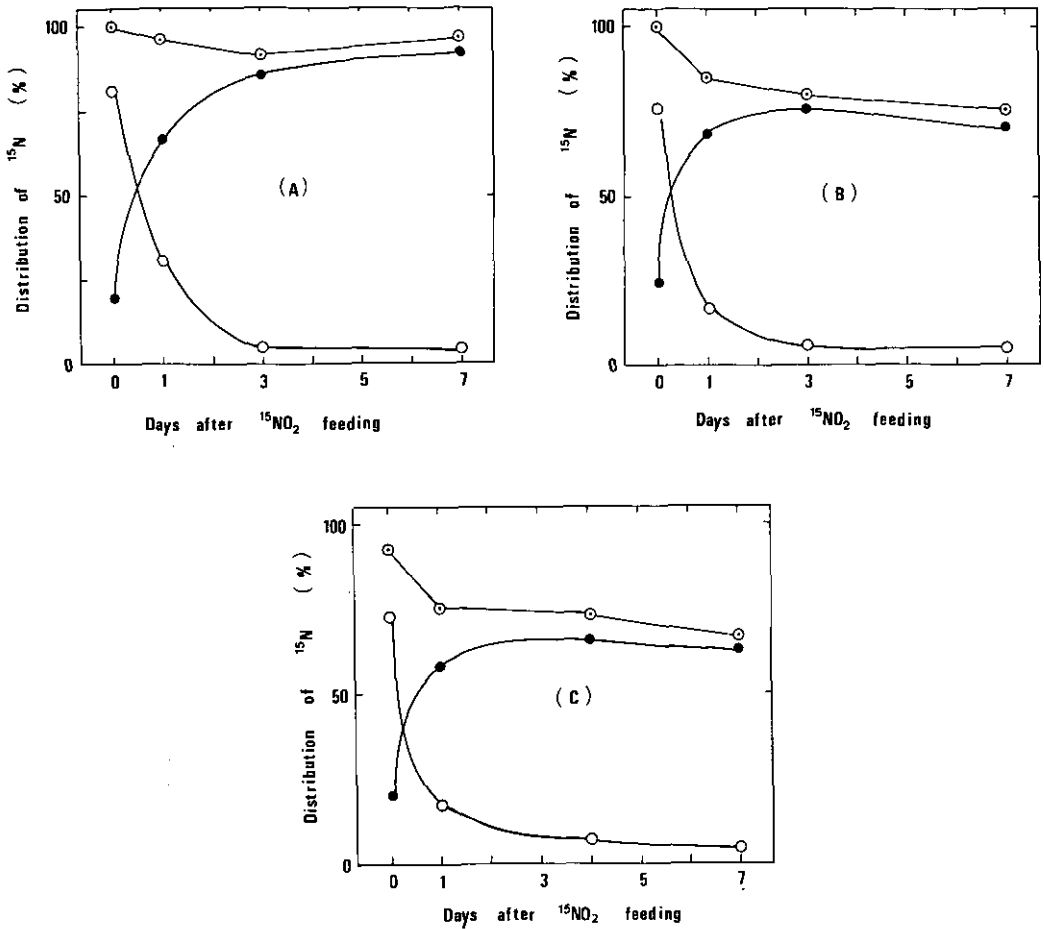


図 2 $^{15}\text{NO}_2$ 暴露葉からの ^{15}N の流出(●—●)と、エタノール可溶画分(○—○)と不溶画分(●—●)への ^{15}N の分布割合
(A): 若葉, (B): 成熟葉, (C): 老葉。

Fig. 2 Export of ^{15}N from the $^{15}\text{NO}_2$ -fed leaf (●—●) and percentage distribution of ^{15}N in ethanol soluble (○—○) and insoluble (●—●) fraction of the fed leaf
(A): young leaf, (B): mature leaf and (C): old leaf.

各葉齢期の葉に吸収された $^{15}\text{NO}_2$ の、80%エタノール可溶画分と不溶画分への分布割合と、暴露葉からの ^{15}N の転流の様子を図2に示した。いずれの葉齢期においても、エタノール可溶画分(無機態窒素、アミノ酸、アミド)に取り込まれた ^{15}N は、その大部分が1日以内に不溶画分(タンパク質、核酸)に移り、葉齢による大きな違いは認められなかった。暴露葉からの ^{15}N の転流をみると、若葉に吸収された ^{15}N は大部分がその葉に保持されており、暴露後7日経過しても約7%が他

部位へ転流したのみであった。また不溶画分の¹⁵Nの割合は7日目まで増加を続けた。一方、成熟葉や老葉に吸収された¹⁵Nは比較的速やかに暴露葉から転流し、7日目には成熟葉で約25%、老葉で約33%の¹⁵Nが他部位へ転流した。そして不溶画分の¹⁵Nは、暴露後3日から7日の間に減少し始めた。これらの葉からの¹⁵Nの転流は最初の1日に急速に起こり、以後不溶画分中の¹⁵Nの減少傾向とほぼ一致した、緩やかな転流が続いた。また葉齢の進んだ葉ほど不溶画分への¹⁵Nの分配割合が少なく、他部位へ転流する割合が大きかった。

表2に植物体各部位の¹⁵N濃度の変化を示した。¹⁵NO₂暴露直後には、いずれの葉齢期の葉でもエタノール可溶画分の¹⁵N濃度が非常に高く、1日目から3日目にかけて急激に低下した。不溶画分の¹⁵N濃度をみると、若葉や成熟葉では1日目をピークとして以後低下した。しかし老葉では1日目から7日目まで、¹⁵N濃度はほとんど変化しなかった。その他の部位の¹⁵N濃度をみると、若葉実験では暴露葉以外の部位では、ごく低濃度の¹⁵Nしか検出できなかった。成熟葉、老葉実験では、上位茎、花、上位葉、下位茎、根に¹⁵Nが認められた。いずれの葉齢期の実験においても下位葉にはほとんど¹⁵Nは検出されなかった。

図3に¹⁵NO₂暴露後7日目の植物体各部位における¹⁵Nの分布割合を示した。若葉実験では、下位茎、上位葉及び上位茎にわずかに転流したのみで、吸収された¹⁵Nの93%は暴露葉中にとどまっていた。成熟葉実験では、上位葉への転流割合が約18%と最も多く、下位葉を除く他の部位へもわずかずつ移行し、暴露葉中には75%が残った。老葉実験では花への転流割合が26%と最も多く、

表 2 3段階に葉齢の異なるヒマワリの第10葉から¹⁵N標識のNO₂を与えた個体各部位における¹⁵N濃度(atom % excess)

Table 2 ¹⁵N content (atom % excess) in each component parts of sunflower plants fed with ¹⁵N-labelled NO₂ from the 10th leaf at three different leaf ages^a

Plant part	Young ^a				Mature				Old			
	0 ^b	1	3	7	0	1	3	7	0	1	3	7
Flower							0.16	0.10	0.01	0.02	0.04	0.05
Upper leaves	0.01	0.00	0.04	0.01	0.00	0.08	0.06	0.07	0.00	0.02	0.01	0.00
Upper stems				0.01	0.00	0.13	0.10	0.05	0.00	0.09	0.05	0.05
Fed leaf Sol ^c	18.31	7.61	1.21	0.84	16.65	5.83	1.67	1.36	14.92	6.08	3.45	1.06
Insol ^c	0.82	2.52	1.94	1.65	0.58	2.27	2.16	1.72	0.45	2.22	2.45	2.39
Lower stems	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.08	0.09	0.05	0.00	0.04	0.02	0.03
Lower leaves	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Root	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.00	0.02	0.01	0.02

a See Fig. 1.

b Days after ¹⁵NO₂ feeding.

c 80% ethanol soluble and insoluble fraction.

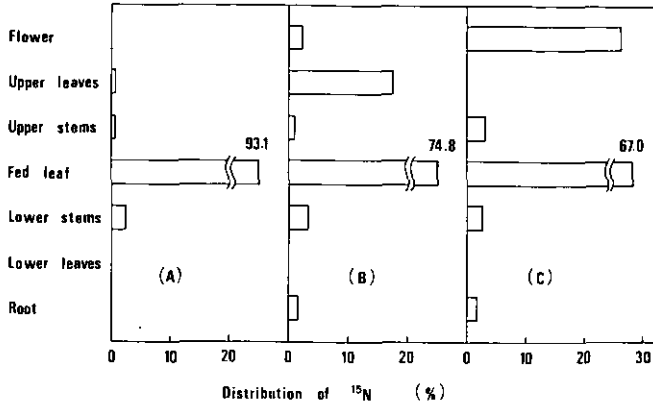


図 3 $^{15}\text{NO}_2$ 暴露後7日目のヒマワリ各部位における ^{15}N の分布(%)
 $^{15}\text{NO}_2$ は若葉(A), 成熟葉(B)及び老葉(C)期の第10葉に与えた。

Fig. 3 Distribution of ^{15}N in various parts of sunflower plant at 7 days after $^{15}\text{NO}_2$ feeding
 $^{15}\text{NO}_2$ was supplied to the 10th leaf at young (A), mature (B) and old (C) leaf ages.

上・下位茎及び根へもわずかずつ ^{15}N が移行した。しかし、既に生長を完了した上・下位葉へはほとんど転流せず、暴露葉中には吸収された ^{15}N の67%が残存した。このような ^{15}N の体内分布パターンは、暴露後の日数が経過するにつれて変化した。

表3に $^{15}\text{NO}_2$ 暴露後28日目の植物体各部位における ^{15}N の分布割合を示した。若葉実験では、吸

表 3 $^{15}\text{NO}_2$ 暴露後28日目のヒマワリ各部位における ^{15}N の分布(%)

Table 3 Distribution (%) of ^{15}N in each component parts of sunflower plants at 28 days after $^{15}\text{NO}_2$ feeding

Plant part	Leaf age ^a		
	Young	Mature	Old
Flower	24.5	29.0	58.1
Upper leaves	2.0	28.3	0.0
Upper stems	0.7	3.3	3.2
Fed leaf Sol ^b	4.4	3.3	2.0
Insol ^b	54.0	32.4	33.0
Lower stems	5.4	3.2	3.2
Lower leaves	7.0	0.6	0.3
Root	2.2	0.2	0.4

a $^{15}\text{NO}_2$ was supplied to the 10th leaf at three different leaf ages.

b See Table 2.

収された ^{15}N の42%が暴露葉から転流し、その多くは子実に移行した。成熟葉実験では、64%の ^{15}N が暴露葉から転流し、子実及び上位葉にそれぞれ29%、28%が分布した。老葉実験では、28日間に65%の ^{15}N が暴露葉から転流し、その大部分が子実に集中した。

4 考 察

4.1 葉齢による NO_2 吸収速度の違い

個体全体から回収された ^{15}N 量をもとに計算した、単位葉面積当たりの NO_2 吸収速度は葉齢の若い葉ほど大きかった。 NO_2 吸収速度に差をもたらす要因として、葉のガス拡散抵抗、 NO_2 に対する気孔の反応性、 NO_2 の代謝・解毒能力などの違いが考えられる。河内(1980)はタバコの葉の O_3 吸収速度を葉位別に比較し、上・中位葉間には明らかな差がみられないが、下位葉ではガス拡散抵抗が大となるため、吸収速度がかなり小さくなることを見いだした。また水稻やトウモロコシでも同様に下位葉ほどガス拡散抵抗が大きいことを示した。一般に葉齢の若い葉は上位葉に、葉齢の進んだ葉は下位葉にそれぞれ相当する。したがって本実験で用いたヒマワリの場合も、おそらく老葉ほどガス拡散抵抗が大きく、気孔が閉じぎみであり、それが NO_2 吸収速度の低さの一因であったと考えられる。 NO_2 に対する気孔の反応性に関しては、ヒマワリでは3.0ppm NO_2 を1~2時間暴露しても気孔閉鎖は生じない(大政ら, 1979)ので、ここでは考慮する必要はないものと思われる。暴露葉中のエタノール可溶画分と不溶画分への ^{15}N の分布割合を NO_2 の代謝・解毒能力の一つの指標として比較したところ、葉齢による明らかな差は認められなかった。そこで、各画分の ^{15}N 濃度(atom% excess)を比較してみた(表4)。ここでも表1の NO_2 吸収速度の計算方法と同様に、表2に示されている値を NO_2 濃度3.0ppm、暴露時間60分に換算して比較を行った。エタノール可溶画分の ^{15}N 濃度は葉齢による差異が明らかでなかったが、不溶画分の ^{15}N 濃度は葉齢の若い葉ほど明らかに高かった。すなわち、葉齢が若いほど可溶画分から不溶画分への ^{15}N の取り込み活性が高く、 NO_2 の代謝が速やかに行われたことがうかがわれる。葉齢による NO_2 の代謝・解毒能の違いをより明確にするには、別のアプローチ、すなわち NO_2 を還元する過

表 4 $^{15}\text{NO}_2$ 暴露終了直後における暴露葉の80%エタノール可溶画分と不溶画分中の ^{15}N 濃度(atom% excess)

Table 4 ^{15}N content (atom % excess) in 80% ethanol soluble and insoluble fraction of the fed leaf immediately after the termination of $^{15}\text{NO}_2$ feeding

Leaf age	Fraction		
	Sol	Insol	Total
Young	12.77	0.55	2.40
Mature	14.20	0.48	1.80
Old	13.48	0.41	1.75

Values are normalized at the NO_2 concentration of 3.0 ppm and the feeding period of 60 min.

程で関与する酵素の活性を調べることも必要であろう。

4.2 暴露葉からの ^{15}N の転流と葉齢

植物葉中のNは絶えず合成と分解を繰り返す動的平衡状態にあり、根から吸収され葉のタンパク質に取り込まれたNも、その後加水分解を受け、アミノ酸などの形態で生長部位へ再転流をしてゆく (Yoneyama & Sano, 1978; Kato & Kitada, 1979)。そして、根から直接送られるNに比べてはるかに複雑な組成を持つこの再転流Nは、新器官の形成に重要な意味を持つと考えられている。植物葉に NO_2 として吸収されたNも基本的には同様な挙動を示す (Okanoら, 1983)。ヒマワリ成熟葉からの $^{15}\text{NO}_2\text{-N}$ の流出には、暴露直後の急速な流出と、その後のタンパク質中の ^{15}N の減少と並行した緩慢な流出の二つの phase が存在することを我々は既に報告した (Yoneyamaら, 1980; 岡野ら, 1981)。そして、前者はアミノ酸に同化された $\text{NO}_2\text{-N}$ の一部が短時間のうちに他部位へ移動したものであり、後者は葉のタンパク質の代謝回転と関係していると考えた。このことは成熟葉内外でのNの流れをモデル化してシミュレーションを行った結果からも裏付けられている (Yoneyama & Takeba, 1984)。

本実験の成熟葉や老葉においても同様に、葉からの $^{15}\text{NO}_2\text{-N}$ の流出には二つの phase が認められた。また老葉になるほど葉のタンパク質に取り込まれる $^{15}\text{NO}_2\text{-N}$ の割合は低下し、逆に葉を“素通り”してゆくNの割合が増大することが明らかとなった。一方、葉面積が最大時の約1/3しかなく、急速に生長しつつある若葉に吸収された $^{15}\text{NO}_2\text{-N}$ は、葉面積が最大に達する暴露後7日目までその葉からほとんど流出せず、またその間にエタノール可溶画分中の ^{15}N 量は増加を続けた。これは若葉に吸収された $^{15}\text{NO}_2\text{-N}$ の大部分がその葉自身の生長に使われたことを示している。しかし、この $^{15}\text{NO}_2\text{-N}$ もさらに葉齢が進み、葉が老化過程に入ると加水分解され、葉から流出を始めた。

暴露葉から流出した ^{15}N はまず上下の茎に見いだされ、その後その時点で生長が盛んな部位へ転流した。すなわち、成熟葉実験では上位葉、花芽、根に ^{15}N が移行し、老葉実験では花や根に ^{15}N が転流した。しかし、既に生長を完了した葉には ^{15}N はほとんど移行しなかった。これらの $^{15}\text{NO}_2$ 由来のNは、葉齢が進行するにつれてさらに再転流を続け、最終的には大部分が子実集中した。以上のように、 NO_2 に由来するNであっても、葉に吸収・同化された後は、通常のNと全く同様の体内挙動をするといえる。

引用文献

- Furukawa, A. and T. Totsuka (1983) : Effect of SO_2 on photosynthesis in sunflower leaves : age-dependent inhibition. *Environ. Control in Biol.*, **21**, 43-49.
 Kato, Y. and S. Kitada (1979) : Studies on nitrogen metabolism of soybean plants. IV. The dynamic

- aspect of leaf nitrogen and its relation to protein turnover. Jpn. J. Crop Sci., **48**, 229-242.
- 加藤俊博・橘 昌司・位田藤久太郎(1974)：被覆下における有毒ガスによる作物の障害に関する研究II。亜硝酸ガスによる作物の障害の機作について。生物環境調節, **12**, 103-107.
- 木内和美 (1976)：全窒素, 栄養診断のための栽培植物分析測定法。作物分析法委員会編, 養賢堂, 東京, 63-69.
- 河内 宏 (1980)：植物葉によるオゾン吸収と被害発現の関係—とくに葉位によるオゾン感受性の差異とオゾン吸収速度の関連について。大気汚染学会誌, **15**, 389-393.
- Menser, H. A., H. E. Heggstad and O. E. Street (1963)：Response of plants to air pollutants. II. Effects of ozone concentration and leaf maturity on injury to *Nicotiana tabacum*. Phytopathol., **53**, 1304-1308.
- Muhammad, S. and K. Kumazawa (1974)：Assimilation and transport of nitrogen in rice. 1. ^{15}N -labelled ammonium nitrogen. Plant Cell Physiol., **15**, 747-758.
- Nouchi, I., H. Mayumi and F. Yamazoe (1984)：Foliar injury response of petunia and kidney bean to simultaneous and alternate exposures to ozone and PAN. Atmos. Environ., **18**, 453-460.
- 岡野邦夫・米山忠克・戸塚 績 (1981)：植物葉に吸収された NO_2 窒素の移動と光合成産物の転流に及ぼす NO_2 暴露の影響。国立公害研究所研究報告, 第28号, 111-121.
- Okano, K., J. Tatsumi, T. Yoneyama, Y. Kono and T. Totsuka (1983)：Investigation on the carbon and nitrogen transfer from a terminal leaf to the root system of rice plant by a double tracer method with ^{13}C and ^{15}N . Jpn. J. Crop Sci., **52**, 331-341.
- Okano, K., O. Ito, G. Takeba, A. Shimizu and T. Totsuka (1984)：Alteration of ^{13}C -assimilate partitioning in plants of *Phaseolus vulgaris* exposed to ozone. New Phytol., **97**, 155-163.
- Okano, K., T. Fukuzawa, T. Tazaki and T. Totsuka (1985)：Growth responses of plants to various concentrations of nitrogen dioxide. Environ. Pollut. (Ser. A), (in press).
- 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収着に関する研究 (II) NO_2 , O_3 あるいは $\text{NO}_2 + \text{O}_3$ 暴露下における収着について。農業気象, **35**, 77-83.
- Rogers, H. H. and J. C. Campbell (1979)：Nitrogen-15 dioxide uptake and incorporation by *Phaseolus vulgaris* (L.). Science, **206**, 333-335.
- Tanaka, K. and K. Sugahara (1980)：Role of superoxide dismutase in defense against SO_2 toxicity and an increase in superoxide dismutase activity with SO_2 fumigation. Plant Cell Physiol., **21**, 601-611.
- Yoneyama, T. and C. Sano (1978)：Nitrogen nutrition and growth of rice plant. II. Considerations concerning the dynamics of nitrogen in rice seedlings. Soil Sci. Plant Nutr., **24**, 191-198.
- 米山忠克・笹川英夫・戸塚 績・山本幸男 (1978)：高等植物の生長に及ぼす二酸化窒素の影響 (5) 草本植物による $^{15}\text{NO}_2$ の吸収, 亜硝酸の蓄積, 亜硝酸還元酵素活性の変化。国立公害研究所研究報告, 第2号, 103-111.
- Yoneyama, T. and H. Sasakawa (1979)：Transformation of atmospheric NO_2 absorbed in spinach leaves. Plant Cell Physiol., **20**, 263-266.
- Yoneyama, T., H. Sasakawa, S. Ishizuka and T. Totsuka (1979)：Absorption of atmospheric NO_2 by plants and soils. (II) Nitrite accumulation, nitrite reductase activity and diurnal change of NO_2 absorption in leaves. Soil Sci. Plant Nutr., **25**, 267-275.
- Yoneyama, T., K. Arai and T. Totsuka (1980)：Transfer of nitrogen and carbon from a mature leaf— $^{15}\text{NO}_2$ and $^{13}\text{CO}_2$ feeding studies—. Plant Cell Physiol., **21**, 1367-1381.

Yoneyama, T. and G. Takeba (1984) : Compartment analysis of nitrogen flows through mature leaves. *Plant Cell Physiol.*, **25**, 39-48.

III 植物の大気汚染質吸収に関する研究

Capacity of Air Pollution Uptake by Plant
Communities

III-1

自然環境シミュレーター内の植物群落の微気象 ——速度成層装置の効果——

Canopy-Microclimate in the Plant Environment Simulator —Effects of Velocity Profile System—

大政謙次¹・松本 茂¹・相賀一郎¹

Kenji OMASA¹, Shigeru MATSUMOTO¹ and Ichiro AIGA¹

要 旨

自然環境シミュレーターを用いた群落微気象の調節の第一段階として、微気象を支配する主要な要因である気流を速度成層装置により調節することを試みた。その結果は、以下のものであった。

1) 群落の平衡状態に達した風速のプロファイルは、一般のグロースチャンバーに比べて、主流の方向を変えることなく短い吹走距離で作ることができた。

2) 群落内外の乱れ強度の平均のプロファイルは、ほ場で観測される一般的な傾向と一致していた。しかし、乱れ強度の値は、ほ場での値に比べて若干小さかった。

3) 気流のパワースペクトル密度関数についてみると、ほ場での観測結果において $-5/3$ 乗則に従うと解釈されている約0.5Hz以上の周波数帯で、10Hz程度までパワースペクトル密度の減少が認められなかった。

Abstract

As a first step of canopy-microclimate control for a plant environment simulator, we attempted to adjust air flow, a major environment simulator, we attempted to adjust air flow, a major factor controlling the microclimate, using a velocity profile system installed in the simulator. The results are as follows.

1) Fetch to balancing velocity profile on/in the canopy for the simulator was shorter than that for the common chamber. The balance for the simulator was made without the change of wind direction.

2) The mean profile of turbulence intensity in the simulator was similar to that in the field but the value was small in comparison with that in the field.

1. 国立公害研究所 技術部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Engineering Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba,
Ibaraki 305, Japan.

3) It has been known that the power spectral density function of wind turbulence in the field generally followed to the $-5/3$ power law at frequency above about 0.5 Hz. In the simulator, however, the power spectral density did not decrease until about 10 Hz.

Key words : Canopy—Microclimate—Environment control—Velocity profile.

1 緒 言

ファイトトロンのような生物環境調節施設を用いた研究は、野外での調査や実験だけでは解明できない環境と植物の生育動態やガス交換機能などとの関係を再現性のある実験から明らかにしようとするものであり、特に、植物個体を対象とした生理学や生理生態学の分野の研究に有用である。植物群落を対象とした研究にも利用されているが、群落を特徴づける群落内外の微気象、特に、気流、気温、湿度、ガス濃度などの群落微気象にはまったくといっていいほど注意が払われていなかった。これは、従来の施設が植物群落を対象としたものではなく、植物個体の実験に適するように実験室内全域をある均一な環境条件に保つよう設計されていることに原因している。このため、群落実験とはいうものの、野外での植物群落とは全く質の異なるものであった。

群落内外の微気象は、群落構造により異なり、群落の CO_2 や汚染ガスなどのガス交換能力あるいはその生育動態に大きな影響を与える (Monteith, 1973; 堀江, 1974; 内嶋, 1974; 岩城, 1979; 大政, 1980)。それゆえ、植物群落を対象とした施設では、野外の群落内外の微気象を再現できることが必要となる。

当研究所の自然環境シミュレーターは、世界で初めて野外の群落内外の微気象を再現することを目的とした装置であり、風速、気温、湿度などの成層機能を有している。ここでは、群落微気象の調節の第一段階として、微気象を支配する主要な要因である気流について速度成層装置を用いて調節することを試みた。

2 材料及び方法

材料と配置: 実験材料としては、ファイトトロン (25°C, 70%RH, 自然光) で、播種後 4~6 週間ポット栽培したトウモロコシを用いた。材料は、実験の前、自然環境シミュレーター (相賀ら 1982) の実験室に移し図 1 のように配置した。実験室内は、仕切板で植物群落実験のための室と熱線風速計の校正用風洞を設置する室に分けた。また、熱線風速計のためのトラバース装置が実験室内に装備されているが、室内気流へのこの装置の影響を除くために、装置の主要部分を仕切板で区切った。ポットは主流方向 25 列、横方向 10 列で千鳥状に並べた。

実験環境: 速度成層装置は、0~3 m/s の範囲で高さ方向 20cm ごとに独立して風速を設定することができ、実験目的に応じて任意の風速分布を作ることができる。本実験では、一般のグロースチャンバーを想定して、吹出口から一定風速で吹出した場合と、高さ方向の風速を野外の群落

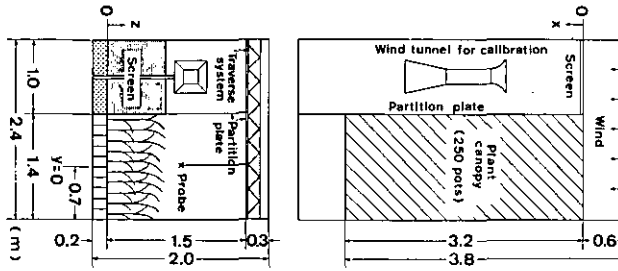
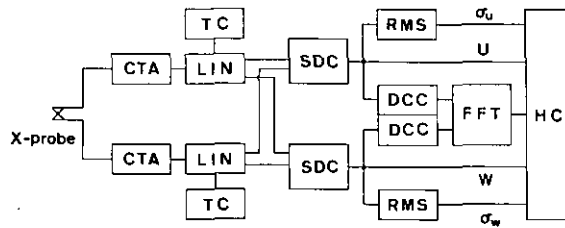


図 1 自然環境シミュレーターの実験室内の配置図

Fig. 1 Layout in growth room of plant environment simulator



CTA: Constant temperature anemometer
 LIN: Linearizer
 TC: Temperature compensator
 SDC: Sum and difference calculator
 RMS: RMS voltmeter
 DCC: DC compensator
 FFT: FFT spectrum analyzer
 HC: Host computer

図 2 熱線風速計と解析システム

Fig. 2 Anemometer and analysis system

を想定して変えた場合について検討した。他の温度、湿度、照度などの環境は、実験期間中植物が病的な状態にならないように、群落上面でそれぞれ25°C、70%RH、30klxに保った。

風速の測定と解析、図2に風速の測定のための熱線風速計 (KANOMAX Model 7220) とその解析システムのブロック線図を示す。熱線風速計のプロープは、5 μ タングステンの上流用 X 形プロープ (Model 0249-T5) を用いた。このプロープと CTA を用いて検出され、リニアライザーを通して校正された風速が、加減演算器で、水平方向 x の成分 U と鉛直方向 y の成分 W に分けられた。 U と W を平均値 \bar{U} 、 \bar{W} と乱れ成分 u 、 w で表すと、それぞれ、 $U = \bar{U} + u$ 、 $W = \bar{W} + w$ となる。平均値 \bar{U} 、 \bar{W} は、加減演算器からの出力を、また、乱れ成分 u 、 w の RMS σ_u 、 σ_w は、RMS ボルトメータからの出力を、ホスト計算機でサンプリングし、積算平均することにより求めた。さらに、乱れ強度 i_u と i_w を、それぞれ、 $i_u = \sigma_u / \bar{U}$ 、 $i_w = \sigma_w / \bar{U}$ により計算した。乱れ成

分 u , w のパワースペクトル密度関数 $S_u(f)$, $S_w(f)$ は、加減演算器からの出力を、直流成分を除くための DC 補償器を通した後、FFT スペクトルアナライザ (KANOMAX Model 3200) で求めた。このアナライザは、A/D 変換された 1 ブロック (12bit 1024 個) のデータの FFT 演算を 44ms で実行することができ、今回行った最高周波数が 100Hz (有効データ数 400) のスペクトル密度関数を求める程度の演算であればリアルタイムで処理される。なお、演算の際、FFT 推定量の漏れの低減のためにハニングのフィルターを用い、また、エリアジングを防ぐために A/D 変換前のアナログ信号に 100Hz で -120dB/oct のローパスフィルターをかけた。さらに、演算結果に瞬時的な変動成分やノイズが入るのを防ぐために、時々刻々得られるパワースペクトル密度関数を積算平均した。

シミュレーター実験室内の気流の空間分布の測定は、熱線風速計のプロープをトラバース装置 (精度 x, y, z 各 0.1mm) に取り付け遠隔操作することにより行った。なお、測定は、 y 方向の群落中心である $y=0$ m で、 x と z の位置を変えて行った。

熱線風速計の校正は、隣接して設置した校正用風洞において、種々の基準風速を与え、ピトー管 (JIS6mm ϕ) の差圧 (動圧) を高精度のマノメーター (MKS バラトロン 310CH, 1 torr 用) で測定して得た値を基準にして行った。

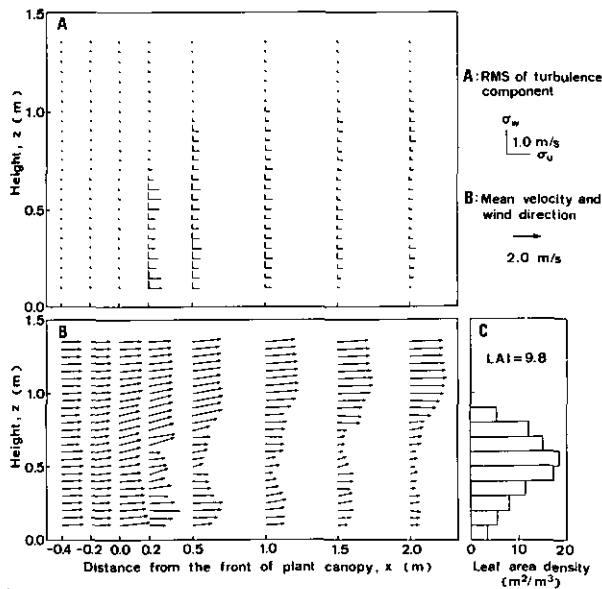


図 3 吹出口から一定風速で吹き出した場合の実験室内の気流状態

Fig. 3 Air flow in the room where wind velocity of blowoff to the room was constant in height

3 結果及び考察

図3に、一般のグロースチャンバーを想定して、(C)に示されたような葉面積密度をもつ群落に、吹出口から一定風速で吹き出した場合の実験室内の気流状態(A, B)を示す。 $x=0.0\text{m}$ で、群落前面に衝突した気流の主流は、植物がない上方の空間へ向かう、他方、群落内に入った気流は、渦を発生しながら次第に減衰してゆく。そして、平均風速や乱れ成分のRMSから判断して、気流が群落に個有の平衡状態に達するのに、最近2.0m程度の吹走距離が必要であることが分かる。平衡状態に達した群落内の平均風速や乱れ成分のRMSは、群落の葉面積密度にかかわらず、高さ方向にほぼ一定の状態であった。

図4に、野外の十分に大きい群落を想定して、吹き出しの高さ方向の風速を変えた場合の実験室内の気流状態(A, B)を示す。この場合、図3にみられたような群落前面に衝突した気流が植物のない上方の空間へ向かうということにはなかった。群落内に入った気流が、渦を発生しながら次第に減衰してゆくという傾向は変わらなかったが、0.5m程度の吹走距離で群落に個有の平衡状態に達した。このように、速度成層装置を持つ自然環境シミュレーターでは、群落の平衡状態に達した風速のプロファイルを、一般のグロースチャンバーに比べて、主流の方向を変えることなく短い吹走距離で作ることができた。なお、 $z=0.6\sim 1.1\text{m}$ で乱れが大きくなるのは、群落上面での境界層の発達と群落の凹凸のために渦が発生することに原因する。また、 $x=1.0\text{m}$ でみられ

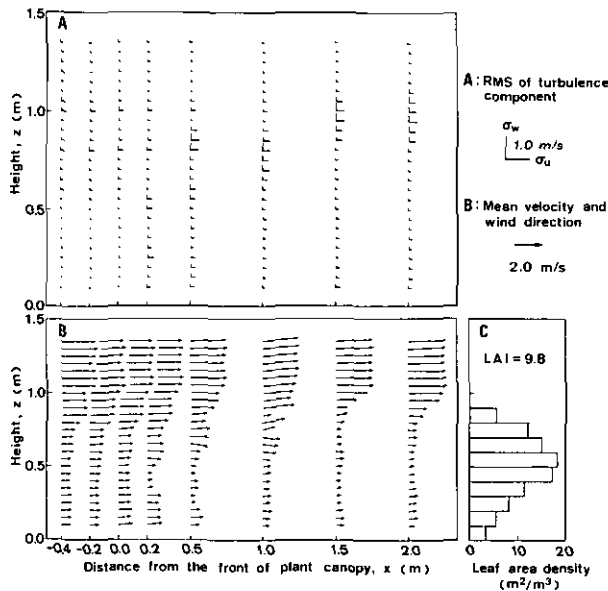


図 4 吹出口から群落の風速プロファイルを与えて吹き出した場合の実験室内の気流状態

Fig. 4 Air flow in the room where wind velocity of blowoff to the room was similar to canopy profile

るような主流の方向の乱れは、測定点が植物体のごく近くであったために生じたものと考えられる。

次に、図4に示した状態における乱れの性質について検討した。図5は、各位置における u 及び w の乱れ強度 i_u , i_w のプロファイルである。位置あるいは高さの違いによって i_u , i_w は大きく変動している。これは、主に、群落内で植物体に衝突して発生した渦をどの位置で測定するかによって依存していると考えられる (Seginer ら, 1976)。しかし、 i_u , i_w のプロファイルを平均値としてみると、 $i_u > i_w$ で、接地気層では比較的小さいが、群落内、特に群落上部で大きい値になるほ場での一般的な傾向 (Inoue & Uchijima, 1979) と一致している。群落内の乱れ強度の平均値は、およそ0.2 (i_u) 及び0.1 (i_w) である。これらの値は、Inoue & Uchijima (1979) がほ場のトウモロコシ群落で観測した値に比べて若干小さい。この傾向は、群落上の接地気層においてもみられる。この原因は、装置の整流した気流の吹き出しにあり、今後、吹き出しの際、気流に適切な乱れを与えることにより改善されよう。

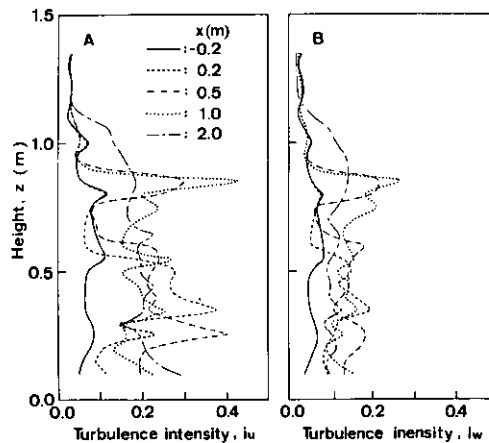


図 5 乱れ強度のプロファイル

Fig. 5 Profile of turbulence intensity

図6は、各位置における u 及び w のパワースペクトル密度関数 $S_u(f)$, $S_w(f)$ である。 $S_u(f)$, $S_w(f)$ 共に、Inoue & Uchijima (1979) や米谷・竹内 (1981) らのほ場の群落での観測結果において $-5/3$ 乗則の慣性小領域に属すると解釈されている約0.5Hz以上の周波数帯で、10Hz程度まで、パワースペクトル密度の減少が認められないという傾向があった。このことは、シミュレーター内にこの周波数帯のパワーを発生する何らかの要因があることを意味しており、乱れ強度が小さいこととあわせて考えると今後、気流の低周波域にパワーをもつ乱れを与えるなどの対策が必要となる。

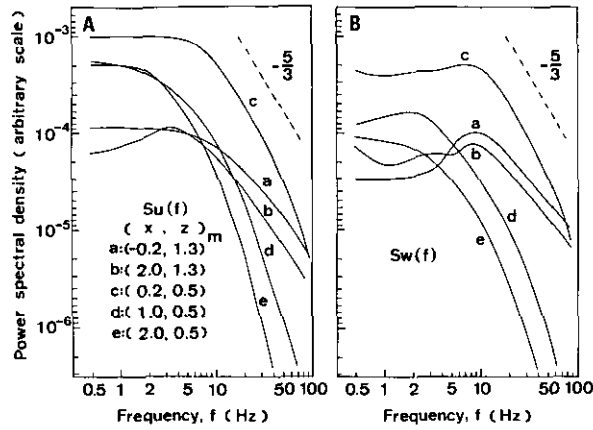


図 6 気流のパワースペクトル密度関数

Fig. 6 Power spectral density function of wind turbulence

群落内外の微気象を調節しようという試みは、世界にも例がなく今後解決してゆかなければならない問題が多い。しかし、植物群落を対象とした実験を、不確定要素の多い野外だけでなく、再現性のとれる実験施設で行いたいというのは研究者の夢であり、その必要性は今後増々大きくなるだろう。

引用文献

- 相賀一郎・大政謙次・松本 茂 (1982)：環境庁国立公害研究所ファイトトロンとそのエネルギーの供給システム。空気調和・衛生工学, 56, 741-751.
- 堀江 武 (1974)：群落微気象。農業気象ハンドブック, 養賢堂, 203-212.
- Inoue, K. and Z. Uchijima (1979)：Experimental study of microstructure of wind turbulence in rice and maize canopies. Bull. Natl. Inst. Agric. Sci., Ser. A 26, 1-88.
- 岩城英夫編 (1979)：群落の機能と生産。朝倉, 283p.
- 米谷俊信・竹内敬二 (1981)：水田上の接地気層における運動量とスカラー量の輸送特性について。農業気象, 37, 1-7.
- Monteith, J.L. (1973)：Principles of Environmental Physics. pp.241. Edward Arnold, London.
- 大政謙次 (1980)：汚染された大気と植物とのあいだのガス交換。環境情報科学, 9(2), 77-80.
- Seginer, I., P.J. Mulhearn, E.F. Bradley and J.J. Finnigan (1976)：Turbulent flow in a model plant canopy. Boundary-Layer Meteorol, 10, 423-453.
- 内嶋善兵衛 (1974)：群落微気象。農業気象ハンドブック, 養賢堂, 213-229.

III-2

土壤環境制御装置における水分分布の制御法に関する理論的考察 Discussions on the Control Method of Soil Water Distribution in Environmentally Controlled Rhizosphere

原 道宏¹

Michihiro HARA¹

要 旨

土壤水分環境は、植物の生育やガス交換を支配する気孔開度などに影響を与える。このため、これらに関する試験研究を行うためには、土壤水分環境を任意の条件に設定することが必要である。長年未解決のままになっている土壤水分分布制御の問題を、既応の実測値を基にして理論的に考察した。主要な結果は、

- (1) 土壤の透水係数が土壤水ポテンシャルの関数であることを考慮すると、根が定常的に吸水しうる速度には根の形態及び土壤水分環境によって定まる上限値が存在する。
- (2) 土壤の水分拡散係数が含水率に関する強い非線形関数であることを考慮し、かんがいによる定流量デッドピート制御を解析すると、操作流量には、土壤の水分拡散特性、及び給水端と注目点の位置関係から定まる限界(上限)が存在する。
- (3) 最高速の限界デッドピート制御によっても、一定の制限時間内に水を補給できる土壤領域の大きさには限界があり、土壤水分制御装置の設計においてはこのことを考慮して給水端の配置密度を定める必要がある。
- (4) FCR法により定流量かんがい中の土壤水分分布に対する近似解析解が得られ、土壤水分分布制御に有用な見通しを与える。FCR法はまた、関数形に対する条件を考慮することにより、かんがい終了後の土壤水分再分布過程における水分分布の近似解析解を得るためにも使用可能である。

Abstract

The soil-moisture environment will affect the stomatal aperture that governs plant growth and gas exchange. In order to investigate these effects, experimental setups in which soil-moisture content (or potential) can be set at arbitrary level are necessary.

1. 昭和57年度-59年度 国立公害研究所客員研究員 (岩手大学農学部 〒020 盛岡市上田3-18-8)
1. Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Faculty of Agriculture, Iwate University, 18-8 Ueda 3-chome, Morioka-shi, Iwate 020, Japan).

Control of moisture distribution in soil has been left open for a long period of time. In the present paper, this has been analysed theoretically based upon measured values already reported. Main results are as follows :

- (1) Steady water-absorption rate for roots has its own upper limit that is determined by the geometrical extent of the roots and soil-moisture environment since the hydraulic conductivity of soil is a strongly nonlinear function of the matric potential of soil water.
- (2) Under the constant flow-rate deadbeat control, the water supplying rate should have its own upper limit that is determined by the soil water diffusion characteristics and the geometrical relationships between the water supplying front and the position where the attention is being paid because the soil water diffusivity is a strongly nonlinear function of soil water content.
- (3) The region of soil which can be covered by the quickest deadbeat control in a limited period of time has its own limit of size. The density of the arranged water-supplying front should be designed considering this constraint.
- (4) Approximate analytical solutions for the distribution of water in soil applied by a constant flow-rate irrigation can be obtained by FCR (Flux Concentration Relation) method. The solutions give useful perspectives to the control of soil-moisture distribution. The FCR is also successfully applicable to obtain approximate analytical solutions for the soil water distribution in the redistribution stage after irrigations.

Key words : Soil water—Irrigation—Redistribution—Flux-concentration relation—Feedback control.

1 緒 言

植物と水の関係は古くから研究されている。それは水が植物の生育にとって不可欠であること、及び水ストレスによって植物が質・量ともに変化するからである。高等植物が水を得るのは根を通じてであることは周知であるが、土壌と根のかかわりとなる、多くの研究にもかかわらず不明の点が多い。

土壌水の水ポテンシャルと根の吸水について研究した例は多いが、過去の研究において土壌水の水ポテンシャル値を完全に制御して実験したものは無い。それは、土壌の含水率を自由に自動制御する技術がまだ確立されていないからである。従来の研究報告において、土壌水分を制御して実験したと書いてあっても、それを言葉どおり受けとめることは危険である。何らかの水分調節はしたかも知れないが、完全な制御になっている保証はない。それは土壌中で水分が動いて均等に行きわたるにはかなりの長期間を要するからであり、また、本当に均等に行きわたったかどうかを非破壊的に検査するのが難しいからである。

したがって、例えばポット栽培であれば総重量を測定することによってポット全体の水量を調節することは何とかできようが、ポット内での水分分布を均一にすることは難しい。

水分分布を均一にしない土壤水分制御というのは、実は何を制御しているのか分からないものである。ある部分が十分湿っており、他の部分が乾いているというのでは、根が置かれている水分環境をどう評価すれば良いのか、困ってしまうからである。

従来から土壤中の水分分布を均一に制御するのは難しいと言われてきた。しかし、本当に不可能なのであろうか。筆者は疑問に思っている。問題は均一さの程度にあると思う。完全な均一というのは望むべくもない。根が水を吸っている状態では不可能に極めて近い。それでは、均一さの程度を高めるためにはどのような手段があるであろうか。このことは工学的に検討可能である。土壤中での水移動に関する従来の土壤物理学も大いに役に立つ。

しかし、この問題を完全に解くにはかなりの困難を乗り越える必要がある。

第1に、土壤中での水移動現象そのものを数学的に解くのは、そう簡単なことではない。差分法で解けるが、計算時間が長くなる上に見通しも悪い。解析解は適用範囲に制約があり、どんな問題にも適用できるわけではない。しかし、もし解析解が得られれば見通しは良く、計算時間も一般に短い。

第2に、土壤自体の不確定さがある。均一に見えても1 m以上離れたら性質が全く異なる、ということはしょっちゅうである。いくら計算ができていても土壤の性質がわからなければ使いようがない。

第3に計測の難しさがある。土壤中の水分分布を非被壤で測るのは、かなり難しい。したがって測定によって水分分布の均一度を測るのも難しい。

第4に植物の根が、じゃまをする。植物の根は水と空気と養分を求めて動く性質があるので、土の中に給水管のような異物を入れると、とんだ反作用を受けかねない。

しかし、多くの地上環境がきめ細かく制御されるようになった今日において、土壤環境は成り行き、というわけにはいかない。

土壤環境にも、水のほか、温度、空気、無機塩類、その他、数多くの要因がある。一つずつ、解決していくよりほかない。

本研究では、土壤中の水分分布をどのようにしたら均一度を高めて制御することができるか、主として、土壤物理学及び制御工学の見地から追究している。研究は未完成であるが、現在までに得られている主要な結果を報告し、批判を得つつ、今後もさらに検討を続けて行きたい。

2 最適土壤含水率の存在

高等植物は、普通、根から水を吸って育つから、土壤中の水分量が少なくなれば生育に支障を来し、さらに水が少なくなればついには凋れ、枯れてしまう。

概念的には、このように低含水率側の土壤水分ポテンシャルは、初期萎凋点及び永久萎凋点として知られている。最近、水ポテンシャルの概念に対する理解が深まるにつれて、従来から言われてきた萎凋点の概念に疑問が持たれ、萎凋点が従来考えられていたように明確な値を持つとは

いえず、逆に言うと、萎凋点という概念すら、その存在が危ぶまれるに至っている。しかし、それにもかかわらず萎凋点という言葉はあいまいながらも、何となくその意味が理解されることから、現在でも、便利に使われている。

厳密な値の存在はともかく、土壌含水率が風乾含水率や炉乾含水率(pF5.5ないし7)では通常の高等植物は生育できないから、正常に正育するためには、風乾含水率以上のところに何らかの下限含水率が存在することは確かである。

逆に、高含水率側となると、土壌水分ポテンシャルからは結論が出ない。土壌空げき率が律速になる。これも、イネやレンコンなどの通気機構を持ち湛水状態でも生育できる植物を除けば、空げき率がゼロでは根が酸素不足を起こして窒息状態になり、正常な正育ができない。したがって、高含水率側にも、イネやレンコンなどを除く高等植物が正常に生育していくためには、飽和以下(空げき率がゼロ以上)のところに、やはり、何らかの上限含水率が存在すると考えられる。

下限にしる上限にしる、そのような限界的な土壌含水率では、通常の高等植物の生育にとって最良とは言えないから、これらの上下の限界値の間に、最適な土壌含水率が存るはずである。

以上は、あくまでも論理的な議論であるが、実際にも成り立つと考えられている。

ところで、それでは、そのような上下限土壌含水率の値及び最適土壌含水率の値はいくつかということになると簡単ではない。

これらの値は、もちろん実験的に求めなければならないが、その実験方法が難しい。例えば、最適土壌含水率を求めようとすれば、土壌含水率を何段階かのレベルに分けて均一な(又は均一に近い)土壌条件を造成し、しかも、その状態を時間的に持続させなければならない。植物が生育していない場合であれば、このような条件は特に難しくはないが、今回は植物の生育実験が目的であるから、そのような仮定は無意味である。

それでは、植物が生育することによって土壌内にどの程度の含水率変化が起こるのであろうか。まずこの点を考察し、それから土壌水分制御のことについて考えてみたい。

3 根の吸水に伴う土壌含水率不均一の発達

水耕栽培であれば、水が循環するので、根の置かれている水環境は比較的均一に保ちやすい。これに対して土耕では、根が張った状態で土壌をかくはんすることはできないから、土壌中での通水により均一化を図らなければならない。問題は土壌中での通水速度の低さである。といの中を流れる水(自由水)と土壌(多孔体)の中を流れる水(毛管水)とでは、通水に際して受ける抵抗の大きさが著しく異なり、後者の方が断然大きい。

植物が生育している土壌の含水率が不均一になる原因は、根による水分吸収に伴う根の近傍における土壌含水率の低下が主要なものである。そのほか、地表面からの蒸発や降雨などによる土壌含水率の変化もあろうが、室内実験であればそれらは回避(あるいは軽減)できるから、ここ

では従的と考える。

根の吸水現象そのものは水耕，土耕にかかわりなく起こるのであるから，問題は吸水により水量が減少した媒体中の部位への水分補給速度である。水耕の場合，この速さは，少なくとも根の極く近傍では音速（25°Cで約1500m/s）以下の任意の速さが可能である。

根が吸水する際の，根の表面における水の移動速度を大まかに見積もってみる。ダイズを例にとってみると，1日のうち12時間吸水し，一株当たり合計1 lの水を根が吸うとする。三角形の時間・吸水速度曲線を仮定すれば最大吸水速度は167ml/hである。1株あたりの根の長さを90m，根の平均直径を0.2mmとする（長野ら，1981）。

この条件において，根の吸水による根表面における水移動速度の日最大値は，

$$\frac{167\text{ml/h}}{(0.2\text{mm}\pi/2)^2 \times 90\text{m}} = 19\text{cm/h}$$

であり，これは水中の音速の約2900万分の1である。根の部位別の吸水速度のばらつきや，日吸水最大速度・根の長さ・根径の個体間変動があるが，それらは数倍（ないし高々数十倍）のオーダー以内であろうから，水耕においては根の近傍における水の補給速度が根の吸水の律速条件になることは無いと考えられる。

土耕の場合には，土壌の通水抵抗を論ずる必要がある。土壌は通水速度にほぼ比例した抵抗を示す。これは，電気回路論におけるオームの法則に似ているが，土壌学の分野ではダルシーの法則と言う。すなわち，土壌中をある速度で水が流れるときは，その速度に比例した水圧がかかる。逆に言うと，土壌中を水が流れるためには，水圧差が必要である。このとき，その土壌中の水の移動速度と水圧勾配の比を透水係数 K といい，次式で定義される。

$$K = -i / (dP/dx) \quad (1)$$

この式において， i は土壌中の水移動速度， P は水圧， x は水の流れに沿った座標を表す。マイナスの符号は，水圧の高いところから水圧の低いところに水が流れる現象から来る。

透水係数の値は土壌の種類によって異なるとともに，土壌含水率の値によっても異なる。土壌が水で飽和しているときの透水係数を飽和透水係数 (K_{sat})，また，不飽和のときのそれを不飽和透水係数という。不飽和透水係数は土壌含水率の関数である。この関数形の例を，図1と図2に再録する（Gardner, 1960；Topp & Miller, 1966）。

図2を見ると，土壌孔げきの水分飽和度 (S) が100%（飽和状態）から減少する（不飽和状態になる）のに伴って透水係数 (K) が指数関数的に減少するのがわかる。なお，この関係 ($K = K(S)$) には湿潤過程と乾燥過程との間に大きなヒステリシスの無いことが知られている。

通水抵抗は透水係数の逆数と定義されるから，土壌の通水抵抗は土壌の水分飽和度の減少に伴って指数関数的に増大する，といえる。

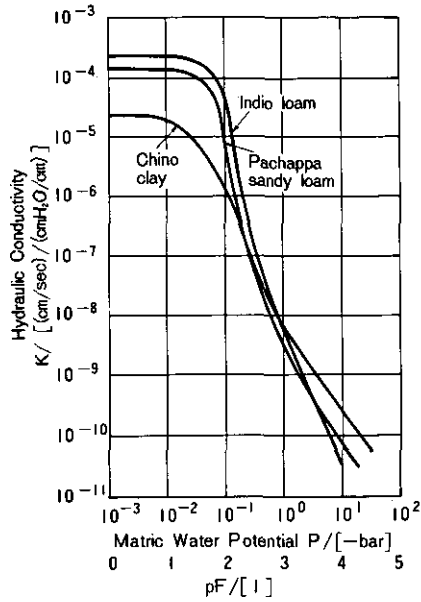


図 1 粒度組成の異なる3種の土壌について、土壌水マトリックポテンシャルの関数としての透水係数 (Gardner, 1960)

Fig. 1 Hydraulic conductivities as functions of soil water matric potential for three type of soils with different texture (Gardner, 1960).

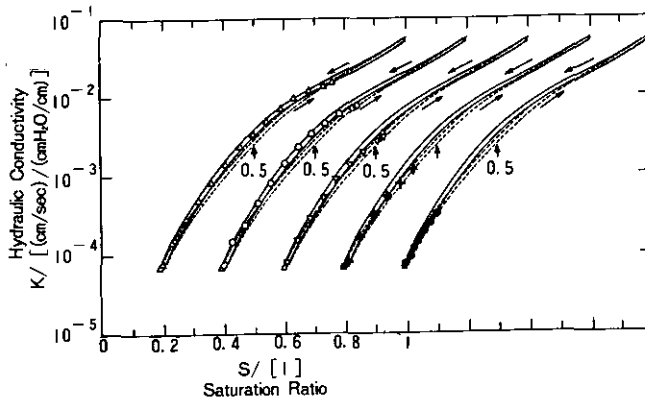


図 2 5種の脱水過程におけるガラス粒団集合体の水分飽和度と透水係数の関係 (Topp & Miller, 1966)

Fig. 2 Relation between saturation ratio and hydraulic conductivity of aggregated glass bead for five different redry loops(Topp & Miller, 1966).

根からの吸水に伴う水圧分布の発達程度を見るために、根からの吸水過程を円柱表面からの吸水過程で近似した統計モデルを考える。そのために、単位土壌体積中に存在する根の長さを l 、根の平均直径を d 、吸水速度を q として、根の表面と土壌中央部とでの水ポテンシャル(マトリックポテンシャル)の差を求めよう。

根の中心から土壌中央部までの平均距離 a は $\pi a^2 l = 1$ から逆算して、 $a = 1/\sqrt{\pi l}$ となる。準定常状態を仮定すれば、吸水速度 q は次のように表される。

$$q = 2\pi K l r \left. \frac{dP}{dr} \right|_{r=r} \quad \left(\frac{d}{2} < r < a \right) \quad (2)$$

dP/dr を $r=d/2$ から a まで定積分することにより、根の表面における水圧と土壌中央部における水圧の差の平均値が得られる。

不飽和透水係数 K は水圧 P の関数であるが、従来、式(2)の積分に際しては一定と仮定されてきた (Gardner, 1964)。

ここでは、 K を P の関数として扱った場合と、 K を土壌内では一定として扱った場合とで、どのように推定結果が異なるかをも含めて考察する。

3.1 K を土壌内では一定と仮定した場合

K が P に関して一定であるとすれば、式(2)は次のように積分される。

$$\Delta P = P_s - P_r = \frac{q}{2\pi K l} \int_{\frac{d}{2}}^a \frac{dr}{r} = \frac{q}{4\pi K l} \ln \frac{4}{\pi d^2 l} \quad (3)$$

前記のグイズ根が仮に $10l$ の容器に収められているとすれば、諸元は次のようになる。

$$l = 90m/10l = 0.9cm^{-2}$$

$$a = 0.59cm$$

$$d^2 l = 3.6 \times 10^{-4}$$

$$\ln(4/(\pi d^2 l)) = 8.17$$

$$q = (167ml/h)/10l = 0.0167h^{-1}$$

透水係数をパラメーターにして、土壌中央部の水圧 P_s と、根の表面における水圧 P_r を示すと、表1のようになる。この表の上の3行はともかく、下の3行はかなり非現実的な値と思われる。本来この式(3)は ΔP の絶対値が小さい場合に適用されるべきであると考えられる。

3.2 K が P の関数であることを考慮した場合

土壌の不飽和透水係数 K は土壌の水圧 (マトリックスポテンシャル) P の関数である。このこ

表 1 透水係数Kが土壌中至る所で一定とした場合、一定速度で吸水中の根の表面における水圧 P_r 、及び、土壌中央部での水圧 P_s の関係
 土壌は図1の Indio loam。根の密度は、 $l = 0.9\text{cm/cm}^3$ 、根の平均直径は、 $d = 0.2\text{mm}$ 、吸水速度は、 $q = 0.0167\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$ 。

Table 1 Effects of the absorption of water by plant roots from soil on matric water potential for the central part of soil (P_s), and for root surface (P_r)

Absorption rate (q) is constant and taken as $q = 1.67 \times 10^{-2} \text{cm}^3 / (\text{cm}^3 \cdot \text{hr})$. Density of roots in length (l) is $l = 0.9\text{cm/cm}^3$, and the mean diameter of roots (d) is $d = 0.2\text{mm}$. Soil is Indio loam in Fig. 1. Soil hydraulic conductivity is taken constant for individual case.

K [(cm/s)/(cmH ₂ O/cm)]	P_s [cmH ₂ O]	P_r [cmH ₂ O]	$P_s - P_r$ [cmH ₂ O]
10^{-4}	-52	-52	0.034
10^{-5}	-123	-123	0.34
10^{-6}	-187	-190	3.4
10^{-7}	-330	-364	34
10^{-8}	-670	-1010	340
10^{-9}	-1960	-5360	3400
10^{-10}	-7400	-41400	34000

とを考慮に入れて式(2)を積分するとどうなるかを検討する。KとPの関数関係をP(あるいはK)の全域にわたって一つの数式で表すと複雑になり過ぎるので、局所的に折れ線近似して解析してみる。KとPの両対数グラフ上で折れ線近似する。すなわち、KとPの関数関係は、区分的に次式で表されるとする。

$$\frac{K}{K_s} = \left(\frac{P}{P_s}\right)^B \tag{4}$$

このとき、式(2)は次のようになる。

$$q = 2\pi K_s \left(\frac{P}{P_s}\right)^B l r \frac{dP}{dr} \tag{2 a}$$

式(2 a)を積分すると、Bが-1に等しいか否かに応じて次のようになる(原, 1984 b)。

$$\left(\frac{P_r}{P_s}\right)^{B+1} = 1 - \frac{(B+1)q}{4\pi K_s P_s l} \ln\left(\frac{4}{\pi d^2 l}\right), \quad (B \neq -1) \tag{5 a}$$

$$\frac{P_r}{P_s} = \left(\frac{4}{\pi d^2 l}\right)^{\frac{-q}{4\pi K_s P_s l}}, \quad (B = -1) \tag{5 b}$$

ここで注目すべきは、 $B < -1$ の場合には、吸水量 q に上限があることである。その上限値 q_{max} を式 (5 a) から求めれば、

$$q_{max} = \frac{4\pi K_s P_s l}{(B+1) \ln\left(\frac{4}{\pi d^2 l}\right)}, \quad (B < -1) \quad (6)$$

図 1 に示した Indio loam について、この B の値を計算してみると、 $K_0 \leq 10^{-4} (\text{cm/s}) / (\text{cmH}_2\text{O} / \text{cm})$ の範囲において、いずれも、 $B < -1$ である (表 2)。この値をもとにして式 (6) を用いて q_{max} を求めたのが表 2 である。 q_{max} の値は、式 (4) を、 $K-P$ 曲線のどの範囲に着目して適用するかによって若干の差がある。表 2 で、その注目幅が 10^0 であるということの意味は、図 1 の $K-P$ 曲線において、 $K=K_s$ から $K=K_s/10^0$ の範囲を式 (4) で当てはめた場合、という意である。

式 (6) は、 q_{max} が土壤因子 $-K_s P_s / (B+1)$ と、植物根の因子 $l / \ln[4 / (\pi d^2 l)]$ 、及び定数 4π の積に完全に分離されるという、興味ある結果である。

q_{max} に対する土壤因子についてみると、表 2 からわかるように、 $-(B+1)$ は K_s の 10 万倍の変化に対して、最大値が 4.5、最小値が 0.73 と、約 6 倍程度にしか変化しない。したがって、土壤因子の中では、積 $K_s P_s$ の影響が大きい。

表 2 土壤の透水係数 K がマトリック水ポテンシャル P の関数であることを考慮したときの吸水量の上限 q_{max} の値
 土壤は図 1 の Indio loam。 K と P の関係は式 (4) によるとする。 B はその指数。根の密度は、 $l = 0.9 \text{cm/cm}^3$ 、根の平均直径は、 $d = 0.2 \text{mm}$ 。

Table 2 The theoretical maximal value of water absorption rate (q_{max}) when soil hydraulic conductivity (K) is a function of matric potential (P) of soil water
 Soil is Indio loam in Fig. 1. The functional relationship between K and P is expressed as eq. (4) with the matric potential (P_s) of soil water which is at the central part of soil and the power (B). Density of roots in length (l) is $l = 0.9 \text{cm/cm}^3$, and the mean diameter of roots (d) is $d = 0.2 \text{mm}$. The value of the power, B , changes according to the fitting range of the $K-P$ curve in Fig. 1, thus tabulated herein.

K_s [(cm/s)/(cmH ₂ O)]	P_s [cmH ₂ O]	The fitting range of K in the $K-P$ curve					
		10		10 ²		10 ³	
		B [1]	q_{max} [h]	B [1]	q_{max} [h]	B [1]	q_{max} [h]
10 ⁻⁴	-52	-2.68	4.30 × 10 ⁻³	-3.60	2.77 × 10 ⁻³	-3.74	2.63 × 10 ⁻³
10 ⁻⁵	-123	-5.50	3.79 × 10 ⁻⁴	-4.67	4.64 × 10 ⁻⁴	-4.08	5.54 × 10 ⁻⁴
10 ⁻⁶	-187	-4.05	8.48 × 10 ⁻⁵	-3.61	9.92 × 10 ⁻⁵	-2.94	1.33 × 10 ⁻⁴
10 ⁻⁷	-330	-3.25	2.03 × 10 ⁻⁵	-2.58	2.88 × 10 ⁻⁵	-2.22	3.74 × 10 ⁻⁵
10 ⁻⁸	-670	-2.15	8.10 × 10 ⁻⁶	-1.92	1.01 × 10 ⁻⁵	—	—
10 ⁻⁹	-1960	-1.73	3.70 × 10 ⁻⁶	—	—	—	—

q_{\max} に対する植物根の因子についてみると、まず、根の体積密度 $\pi d^2 l / 4$ が陽に現れているのが注目される。上記の例について見れば、この値は $2.8 \times 10^{-4} = 1 / 3500$ であるが、この程度の値であれば、根の体積密度が2倍に増えても、 q_{\max} に対する影響は $\ln(3500) / \ln(1750) = 1.093$ と、せいぜい1割増ぐらいにしかならない。すなわち、根の体積密度が増すと q_{\max} の値も大きくはなるが、その割合はごくわずかであることがわかる。これに対して、根の線密度 l の効果は直接的である。すなわち q_{\max} は l に比例する。

以上、植物根の因子をまとめると、根の体積密度が一定な場合は、根の線密度（すなわち、単位土壌体積に占める根の長さ）を増すことにより根の吸水速度上限は高まる、と言える。そして、通常、根の体積密度の変化は、根の吸水速度上限値に対して大きな影響を与えない。

次に、土壌条件と植物根の配置が上記のように定まっている場合に、根が吸水することによって根の近傍の土壌水ポテンシャルがどのように変化するかを見てみる。これは、式(5a)あるいは(5b)によれば良い。これをプロットした一例を、図3に示しておいた(原, 1984b)。このグラフは、横軸が根の吸水速度 q 、たて軸が根の表面におけるマトリック水ポテンシャルで示されている。たて軸に土壌の透水係数 K を対応させると、 $K / [(cm/s) / (cmH_2O/cm)]$ は、たて軸の上端で 10^{-5} 、また下端で 10^{-7} であり、100倍の変化がある。図3を見ると次のことがわかる。まず、根の吸水速度が上限値（横軸の右端）に比べて十分に小さい場合（例えば上限値の30%以下の場合）は根の表面におけるマトリック水ポテンシャルを下げることにより、それに比例した吸水速度が得られる。しかし、根の吸水速度が上限値に近づくと（例えば上限値の70%以上の場合）、一定の吸水速度増加を得るために低下させなければならない根の表面におけるマトリック水ポテンシャルの値は非常に大きくなる。そして、上限値の95%以上の吸水量を得るためには根の表面におけるマトリック水ポテンシャルの低下は極めて大きくななければならない。

上記の結果を要約すると、土耕において、土壌水の $K-P$ 曲線の B 値が -1 より小さい場合には根による吸水速度には上限があり、かつ、この上限に近い吸水速度は達成し難く、70%以下の値が現実的な値である。

4 土壌水分制御の方法

土耕において、根の吸水に伴って根の表面の水ポテンシャルが低下する現象は、土壌の透水特性から考えて不可避である。この水ポテンシャル低下をもし制御しようとするれば、根の分布密度 ($0.5 \sim 10 cm \cdot cm^{-3}$) と同程度の給水端を配置する必要がある、これは技術的に考えて非現実的である。

すなわち、土耕における土壌水分制御は、植物根の極く近傍を除く、いわゆる土壌中央部における土壌水ポテンシャルを制御するにとどまると考えられる。以下は、このような観点からの土壌水分制御である。

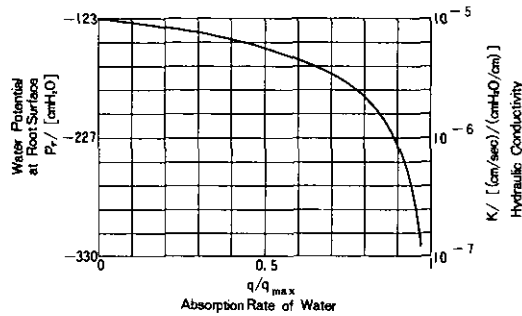


図 3 土壤の透水係数が土壤水マトリックポテンシャルの関数であることを考慮して計算した、根の吸水速度と根の表面における土壤水マトリックポテンシャルの関係

図 1 の Indio loam 中のダイズ根を想定し、次の条件で計算した。土壤中央部での土壤水マトリックポテンシャル $P_s = -123 \text{ cmH}_2\text{O}$ 、透水係数 $K = 10^{-5} \text{ (cm/s)/(cmH}_2\text{O/cm)}$ 。土壤の透水係数は式 (4) で表され、 $B = -4.666$ 。根の平均直径 $d = 0.2 \text{ mm}$ 、線密度 $l = 0.9 \text{ cm/cm}^3$ 。最大吸水速度は式 (6) により、 $q_{\text{max}} = 4.64 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$ 。

Fig. 3 Relation between absorption rate of water by plant roots and matric potential of soil water at root surface calculated taking the functional relation of soil hydraulic conductivity on soil water matric potential into account

Calculation has been carried out as follows for soy bean planted in Indio loam of Fig. 1. Soil water matric potential at central part of soil, $P_s = -123 \text{ cmH}_2\text{O}$, and hydraulic conductivity there, $K_s = 10^{-5} \text{ (cm/s)/(cmH}_2\text{O/cm)}$. Soil hydraulic conductivity is expressed by eq. (4) with $B = -4.666$. Mean diameter of roots, $d = 0.2 \text{ mm}$. Density in length of roots, $l = 0.9 \text{ cm/cm}^3$. Maximal water absorption rate by roots is given by eq. (6) as $q_{\text{max}} = 4.64 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{h})$.

土壤水分制御において目標となるのは、

- ① 土壤含水率を一定値に維持すること、
- ② 土壤含水率の場所的不均一を無くすること、及び
- ③ 一定の時間内にこの事項①、②を達成すること、

の 3 点である。

土壤水分量の加減を操作する手段として現在可能と考えられる手段は、

- Ⓐ 水源から給水すること、及び
- Ⓑ 多孔質材料を介して吸水すること、

の 2 方法である。そのほか、

- Ⓒ 排水口 (又は管) を設けて重力水を排水すること、

もあるが、これ (Ⓒ) はいわば成り行きまかせであり、また、土壤含水率の目標値が大きく、重力水の範囲である場合に生ずることであろうから、ここでは考察を省く。

また、方法⑧は現在のところでは吸水速度を任意に調節する方法が確立されておらず、操作量としてはいまだ不適當である。

このような理由から、水分加減の操作手段としては④の給水だけを考えることにする。

給水操作をプラスの操作、吸水操作をマイナスの操作、何もしないのをゼロの操作とすれば、ここでは、プラスとゼロの操作だけ、すなわち片側操作によるという条件である。

現在の制御理論の多くが両側操作を前提として組み立てられているから、片側操作による制御は特別に考える必要がある。

まず、制御対象の数式表現であるが、均質な土壤中における土壌水の移動現象は次の偏微分方程式で表される。

$$\Delta \cdot (D \Delta \theta) + \frac{\partial K}{\partial Z} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (7)$$

式(7)において、 θ は土壌の体積含水率、 D は土壌の水分拡散係数(θ の関数)、 K は土壌の透水係数(θ の関数)、 t は時間、 Z は鉛直上向きを正とする直線座標である。

$\Delta \theta$ は θ のこう配、 $\Delta \cdot ()$ はわき出しを表す数学記号である。

D が一定で、かつ、重力が無視できる場合(すなわち、 $\partial K / \partial Z = 0$ の場合)は、同型の熱伝導方程式となり、多くの解が知られている(Carlsaw & Jaeger, 1959)。それ以外の場合については、求解が極めて難しくなり、従来、電子計算機の助けを借りた、差分法等の数値計算が主であった。近年になって、数種類の近似解析法が検討され、実用性の認められるものが現れてきた。

まず、最も簡単な、 D が一定、かつ重力を無視しうる場合について、それから、 D が θ の関数である場合へと考察を進める。

4.1 重力の影響が無視でき、土壌水分拡散係数を一定とみなし得る場合

地球表面付近ではどこでも、約980cm/s²の重力加速度が作用しているから、重力の影響が無視できる場合、というのは一見ナンセンスに思われるかも知れない。しかし、重力の影響を無視しうる場合というのは実際ありうる。いわゆる重い土(heavy soil)というのがあるが、土壌の水拘束力が強い場合や、土壌水圧が低く、毛管張力が強く作用する場合がそうである。今の場合、対象とはみなせないが、水が水平方向だけに移動する場合、というのもそうである。また、時間的には、水拡散の極めて初期には、条件のいかに問わず、やはり重力の影響を無視しうる。

土壌水分拡散係数が一定という場合設定も一見無意味に思えるかも知れない。しかし、土壌水分制御が進行していて、土壌中の水分分布が均一に近い状態に保たれている場合であれば、たとえば水分拡散係数が土壌含水率の関数である場合といえども、土壌含水率の値自体に大きな差が無いのであるから、水分拡散係数の値にも大きな差は無いはずである。

ただし、これらの仮定はいずれも土壌水分移動現象に対しては、近似でしかないから、厳密に

は成り立たない。しかし、このような仮定を置くことにより、解析が極めて簡単化されるから、解析の段階のひとつとして検討してみる価値はある。ただし、結果の適用に際しては、設定した仮定を忘れず、慎重でなければならない。

制御対象は無限に広がった均質等方性の土壌とし、はじめ均一な含水率分布を持つものとする。水源の形状は、平面状、直線状又は点状とし、水源から一定距離 L だけ離れた一点に水分センサを置き、その点における含水率を一定値に制御する問題を考える。操作は、前述のように、給水する（給水速度は可変）か、給水を止めるかの、いわゆる片側操作であるから、目標値の設定は初期含水率よりも高い値を選ばなければならない。

上記の仮定のもとでは、支配方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = r^{1-m} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{m-1} D \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (8)$$

この式において、 m は、平面状水源の場合には 1、直線状水源の場合には 2、そして点状水源の場合には 3、の値をそれぞれとるパラメーターである。 $r=0$ に水源があり、 $r=L$ のところに水分センサがあると考えている。

実用的な給水方法として、最も簡単に実施しうる方法のひとつとして、定流量かんがいがある。給水速度が 1（具体的には、例えば、平面状水源では 1 単体体積の水/(単位面積・単位時間)、直線状の水源では、1 単位体積の水/(単位長さ・単位時間)、また点状の水源では、1 単位体積の水/単位時間、の給水速度)で給水した場合、水源から距離 L のところにある水分センサの位置における含水率増分は、次の時間関数により与えられる。

$$h(\tau; L) = h_m(\tau; L) \quad (9)$$

上記の水源区分に対応して、これは次のように具体的に表される。

$$h_1(\tau; L) = (|L|/D) Fo^{\frac{1}{2}} \text{ierfc}\{(4Fo)^{-1/2}\} \quad (9a)$$

$$h_2(\tau; L) = -(1/4\pi D) \text{Ei}(-1/4Fo) \quad (9b)$$

$$h_3(\tau; L) = (1/4\pi DL) \text{erfc}\{(4Fo)^{-1/2}\} \quad (9c)$$

これらの式において、 Fo は $Fo = D\tau L^{-2}$ により定義される無次元時間（フーリエ数、Fourier number）である。右辺の特殊関数はおの次のように定義される。

$$\text{erfc } x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-u^2) du \quad (10)$$

$$\text{ierfc } x = \int_x^{\infty} \text{erfc } v dv \quad (11)$$

$$-Ei(-x) = \int_x^{\infty} e^{-u}/u \, du \quad (12)$$

系が線形であるので解は重ね合わせが許される。

次に、最も速い応答を示すデッドビート制御(deadbeat control)を求める。これは、一定の時間(T)ごとに水分センサにより土壌の含水率を測定することを前提として、毎観測ごとに含水率が目標値に合致している、という制御方法のことである。ただし、観測時刻以外の時刻では含水率がどのような値になっているかは、さしあたり関知しない。

この型の制御は、すべて逆算により実施できる。それは給水の効果が式(9)により表されることを逆に利用するものである。最初の操作量($q(0)$)は水源の形状(m)、目標値の増分(p)、水源から水分センサまでの距離(L)及びサンプリング時間間隔(T)によって決まる。

$$q(0) = \frac{p}{h_m(T; L)} \quad (13)$$

次回の操作量($q(1)$)は次のような逆算により定まる。仮に $q(1) = 0$ 、すなわち、最初の給水終了後は給水を停止したままにして放置したとする。このとき、次のサンプリング時刻($t = 2 \cdot T$)で含水率の増分($y(2 \cdot T)$)がどうなるかである。 $y(2 \cdot T)$ がpより小さければ、 $q(1)$ はプラスにしなければならなかった。 $y(2 \cdot T)$ がpに等しければ問題は無い。 $y(2 \cdot T)$ がpより大きければ、片側操作の制約下では為す術が無い、すなわち制御不能である。

すなわち、制御不能にならないためには、 $q(1) \geq 0$ でなければならない。 $q(1) = 0$ は限界条件(critical condition)である。

限界条件は次のように求まる。

$$h_m(2T; L) = h_m(T; L), \quad 1 \leq m \leq 3 \quad (14)$$

式(9)を用いて、式(14)を解くと、解はサンプリング時間間隔に関するフーリエ数 Fo_T に対する条件、 Fo_{cs} として得られる(Hara & Sugi, 1983)。

$$Fo_{cs} = \begin{cases} 0.9575 & (\text{平面状水源}) \\ 0.4130 & (\text{直線状水源}) \\ 0.2539 & (\text{点状水源}) \end{cases} \quad (15)$$

条件 $q(1) > 0$ は $Fo_T > Fo_{cs}$ に対応する。すなわち、吸水操作を行わないという片側操作のデッドビート制御系が制御不能に陥らないための必要条件は、 Fo_T が式(15)で示される Fo_{cs} より大きいことか又は等しいことであるという結論が導かれた。 $Fo_T = DTL^{-2}$ であるので、例えば、DとLが決まった系ではTを $T_{cs} = Fo_{cs}L^2/D$ 以上にする必要があり、また、DとTが決まった系ではLを

$L_{cs} = \sqrt{DT/F_{ocs}}$ 以下にする必要がある、という結論である。

制御系の D , L 及び T が上記の範囲にあれば以後の操作は決して不能に陥ることなく、すべて順調に運ぶ。すなわち、上記の条件 $F_{OT} \geq F_{ocs}$ は実は制御全体が不能に陥ることのないための必要十分条件であった。

自然環境シミュレータ等における土壤環境制御装置において採用される可能性が最も高いと考えられる点状水源の場合の限界条件 ($F_{OT} = F_{ocs}$) におけるデッドビート制御の経過を、図4に示した (Hara & Sugi, 1983)。操作量は q/DL の値で、最初は78.3, 2回目は0, 3回目は31.1, ……である。被制御量 (センサ位置における土壤含水率増分) は y/p の値で、最初30%オーバーシュートしたのち、以後徐々に振動が減衰し、 $t \geq 6T$ においては実質的に完全に目標値に整定している。なお、定常状態における操作量は $q/DL = 4\pi p = 12.6p$ が見込まれる。

土壤環境制御装置 (チャンバ) では、土壤が有限体積であるので、定常操作量は0になる。有限体積のもとでの制御は鏡像の理を用いることにより解析されるが、今回は割愛する。

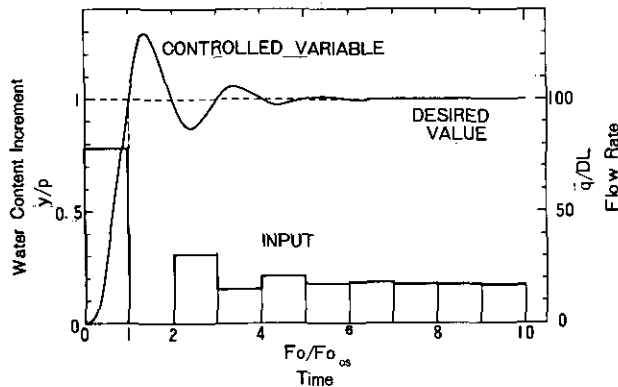


図 4 無重力下におかれた均質・等方性かつ水分拡散係数 D が含水率にかかわらず一定な無限土壤中に1個の点状給水源を置き、時間区分的に流量が一定なかんがいにより、水源からの距離が L の仮想球面における土壤含水率を一定値 p だけ上げるために、臨界条件におけるデッドビート制御法に則りフィードバック制御した結果 (Hara & Sugi, 1983)
横軸の記号は、 Fo (Fourier number) $\equiv Dt/L^2$ 、及び $F_{ocs} = 0.2539$ 。

Fig. 4 The result of feedback control by means of the critical deadbeat control algorithm to raise soil water content at the spherical surface of radius L by the amount of p (Hara & Sugi, 1983)
The controlled system is a homogeneous, isotropic infinite soil mass. Gravitational effect has been neglected. The water diffusivity, D , of the soil was supposed to be constant with respect to water content. A point water source has been set at the centre of the sphere. Water has been released stepwisely with respect to time and no absorption of water to the source has been occurred. Fo (Fourier number) is defined as Dt/L^2 , and $F_{ocs} = 0.2539$.

4.2 土壌水分拡散係数が土壌含水率の関数であることを考慮した場合

実験で求められる土壌水分拡散係数の値は、土壌の種類にもよるが、いずれも非線形性の強い、すなわち、わずかな土壌含水率変化に対して値が何倍も変化するというものが多い。

土壌水分拡散係数を土壌含水率の初等関数として表したものとしては、指数関数及びべき乗関数が典型的であるが、さらに複雑化したものもある。ここでは最も広く受け入れられている指数関数型に対して具体例を示す。

指数関数型やべき乗型を含め、実際に観測される土壌水分拡散係数の関数型に対しては式(7)、(8)とも初等関数の範囲内では解析解を持たない。従来、これに対して差分法(Crank-Nicolson法)などの数値解法により強引に数値解を求めたものが多かった。差分法は非線形系の場合や、複雑な条件設定に対しても精度の高い解が得られるという強味がある反面、計算結果の傾向に対して何らの見通しをも与えない、あるいは、任意の時刻の値を直接得るということはできず、初期時刻から時間刻みを追って行かなければならず一般に計算時間が長くなる、などの欠点がある。ここでは解の見通しを得るのが最大の目的であるので、少々の精度は犠牲にしても、差分法ではなく、何らかの近似解析解が望ましい。

4.2.1 給水過程の解析

一定速度の給水に対しては Philip (1973) が FCR 法 (Flux-Concentration Relation) による近似解法を提案しているのので、ここで、その適用を検討してみる。Philip (1973) の提案は給水時間中の水分分布を求める方法に関するものであるが、給水停止後のいわゆる再分布過程に対しては新たに検討しなければならない。

前節のいずれの水源形状に対しても適用可能であるが、ここでは平面状水源の場合を具体例に選んで解析する。平面状水源の場合に対する方程式は式(8)において $m=1$ とおくことにより得られる。初期含水率を θ_0 、 $r>0$ の方向への給水速度 (一定値) を V_0 とする。給水開始後最初のサンプリング時刻以降はその次の時刻まで給水しないで、位置 $r=L$ における含水率が目標値 θ_s に一致する限界デッドピート制御を考えている。土壌水分拡散係数 $D=D(\theta)$ は次の形とする。

$$D(\theta) = D(\theta_0) \cdot \exp\{\beta(\theta - \theta_0)\} \quad (16)$$

多数の土壌についてこの型の $D(\theta)$ が観測されている。右辺のパラメーター β の値は、風乾含水率 θ_s と飽和含水率 θ_a がわかっている場合には、

$$\beta \cdot (\theta_s - \theta_0) = 8 \quad (17)$$

なる関係が認められるものが多い (Reichardt ら, 1975)。ただし、解析においては式(17)を仮定する必要はない。

Philip (1973) は FCR を次のように定義した。

$$F(\Theta, t) \equiv V(\theta)/V_0 \quad (18)$$

$$\Theta = (\theta - \theta_n) / (\theta_0 - \theta_n) \quad (19)$$

この式において、 $F(\Theta, t)$ は FCR、 $V(\theta)$ は時刻 t のとき含水率が θ であるところでの流速、 θ_0 は水源位置 ($r=0$) での含水率 (時間の関数)、 Θ は規格化された θ の値である。

FCR は、一定速度で給水中には、いずれの時刻においても、 $\Theta=1$ で $F(\Theta, t)=1$ 、 $\Theta=0$ で $F(\Theta, t)=0$ である。線形系 ($D(\theta)$ が一定の系) では FCR は時間に無関係な関数であるが、 $D(\theta)$ が式(16)で表されるような非線形系では時間の関数である。これに対して Philip(1973)は、非線形系に対しても FCR を時間に無関係な関数とするという近似を提案した。

一定速度で給水中の土壤水分分布を求めるためにこの近似を適用してみる。FCR の関数形は、 $\Theta=0$ で $F=0$ 、 $\Theta=1$ で $F=1$ を満たし、線形系に対する厳密解にならって次式を仮定してみる。

$$F(\Theta, t) = \Theta^a, \quad 0 < a < 1 \quad (20)$$

線形系では、積算給水量保存則から、 a の値は (White ら, 1979),

$$a = 2 - 4/\pi = 0.72676 \quad (21)$$

でなければならないが、非線形系においては a の値は必ずしもこの値にならない可能性がある。土壤中での水移動速度 V は、

$$V(\theta, t) = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} \quad (22)$$

で表せるから、式(18), (19), (20)により、

$$-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} = V_0 \left(\frac{\theta - \theta_n}{\theta_0 - \theta_n} \right)^a, \quad 0 < a < 1 \quad (23)$$

が得られる。給水源における土壤含水率 θ_0 は時間の関数であるが、時間を固定すれば θ_0 も固定されるから、式(23)はその時刻における水分分布に関する方程式である。

土壤水分拡散係数によって水分分布が定まることから、土壤含水率に関する変数として、

$$w = \beta \cdot (\theta - \theta_n) \quad (24)$$

を導入する。 θ_0 に対応する w として

$$w_0 = \beta \cdot (\theta_0 - \theta_n) \quad (25)$$

を用いる。このとき、

$$D(w) = D(0) \cdot \exp w \quad (26)$$

$$\beta \cdot V(\theta, t) = -D(w) \partial w / \partial r \quad (27)$$

$$-D(w) \frac{\partial w}{\partial r} = \beta V_0 \left(\frac{w}{w_0}\right)^a, \quad 0 < a < 1 \quad (28)$$

など書き直せる。

式(28)を積分して次式を得る。

$$\beta V_0 r = \int_w^{w_0} \left(\frac{w_0}{w}\right)^a D(w) dw \quad (29)$$

この式は w_0 が知れているとき w に対応する r を求めるのに用いられる。注目すべきは、本来 $r \rightarrow \infty$ に対応する $w \rightarrow 0$ が有限の r に対応していることである。この r を浸潤前線 (wetting front) r_{wf} という。

$$\beta V_0 r_{wf} = \int_0^{w_0} \left(\frac{w_0}{w}\right)^a D(w) dw \quad (30)$$

w_0 と t との関係は質量保存則から次のように導かれる。

$$\begin{aligned} \beta V_0 t &= \int_0^{r_{wf}} w dr = \int_{w_0}^0 w \frac{\partial r}{\partial w} dw = \int_0^{w_0} w \cdot \frac{D(w)}{\beta V_0} \left(\frac{w_0}{w}\right)^a dw \\ (\beta V_0)^2 t &= w_0 \int_0^{w_0} \left(\frac{w}{w_0}\right)^{1-a} D(w) dw \end{aligned} \quad (31)$$

式(30)の右辺を部分積分すれば、

$$\beta V_0 r_{wf} = \frac{w_0}{1-a} \left[D(w_0) - \int_0^{w_0} \left(\frac{w}{w_0}\right)^{1-a} D(w) dw \right]$$

を得るから、これと式(21)とから積分を消去すれば、 r_{wf} と t の関係を得る。

$$(1-a) \beta V_0 r_{wf} + (\beta V_0)^2 t = w_0 D(w_0) \quad (32)$$

以上により給水開始後の任意時刻 t における土壌含水率分布 $w = w(r, t)$ が a をパラメーターとして求まった。非線形系においては果たして a の値が式(21)の値のままが良いのかどうか疑問である。これについては式(29)の解析解を差分法 (Crank—Nicolson 法) による解と比較して、各 w_0 の値について曲線当てはめ法によって最良の a の値を求めた。これを、図5に示した。線型

系 ($w_0 = 0$) における $a = 0.727$ から w_0 が増加するにつれて a の値も増加し、徐々に一定値に近づくように見える。

パラメーター a の値を図 5 に示した値に選ぶと、 w_0 の値は式 (31) から解析的に求めた場合と、差分法により求めた場合とで、差は 0.2% 以内に収まり、非常に高精度が得られる。しかし、図 5 の a の値は差分法から求めたものであり、その値を用いなければならないのでは、せっかくの解析の価値が半減してしまう。そこで、あえて a の値を一定にした場合の w_0 の計算誤差を求めてみた。それを図 6 と図 7 に示す。 a の値は式 (21) すなわち線形系の場合の値に固定した。図 6 は、各時間 t (の対数) における両 w_0 の値を実線 (式 (31)) 及び点 (差分法) によって示したものである。両者はほとんど一致しているように見える。差分法を基準にして両者の差異の割合を示したのが、図 7 である。横軸は w_0 、たて軸は誤差の百分率である。いずれの w_0 においても誤差の符号はプラスであり、これは解析解による w_0 の値の方が差分法によるものよりも大きいことを示している。そして誤差の割合は w_0 が約 1.8 のときに最大で約 1.6% を示す。 w_0 がこれ以外のときには誤差はこれ以下である。以上を要約すると、 a の値を式 (21) の値に固定しても、 w_0 の誤差はたかだか 1.6% ということである。しかも、質量保存則が適用されているから、土壌中の水分分布曲線は

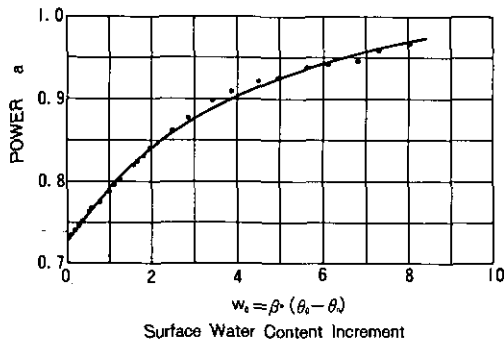


図 5 水分拡散係数が式 (16) で表される土壌に平面状水源から一定流量で給水したときの FCR を式 (20) で最良近似したときの指数 a の値と水源における土壌の含水率 θ_0 の関係
土壌は均質かつ等方性の半無限土壌とし、最初は含水率 θ_0 で均一だったとする。重力の影響は無視した。

Fig. 5 Relation between the value of the power a in eq. (20) and water content θ_0 of the soil at the water source when FCR (Flux-Concentration Relation) is best fitted by eq. (20) for the case that water has been supplied with constant rates from a plane source into soil which water diffusivity is expressed by eq. (16)

Soil is supposed to be homogeneous, isotropic semi-infinite, and the initial water content be θ_0 , constant. Gravitational effect was neglected.

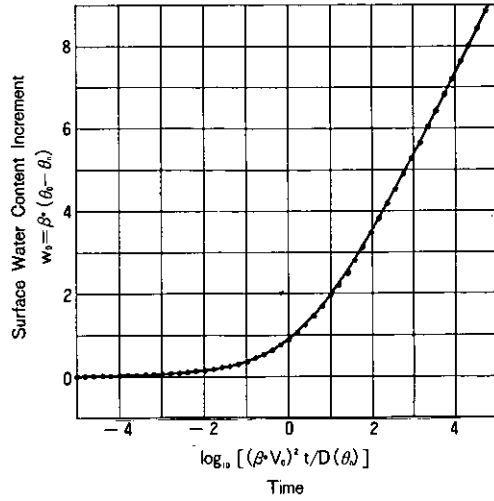


図 6 水分拡散係数 $D(\theta)$ が式(16)で表される土壤に平面状水源から一定流量 V_0 で給水したときの給水時間 t と水源における土壤含水率 θ_0 の関係
土壤は均質かつ等方性の半無限土壤とし、初期含水率は θ_n で均一だったとする。
重力の影響は無視した。図中の点は差分法 (Crank-Nicolson 法) により、また
実線は解析解(31)において指数 a の値を式(21)として求めたものである。

Fig. 6 Relation between the water supplying time, t , and water content, θ_0 , of soil at the water source when water has been released with constant rate, V_0 , from a plane source into soil which water diffusivity $D(\theta)$ is expressed by eq. (31)

Soil is supposed to be homogeneous, isotropic semi-infinite, and the initial water content be θ_n , constant. Gravitational effect was neglected. The dots indicate values obtained numerically by the Crank-Nicolson's finite difference method, and the solid line calculated by eq. (31) with the a value of eq. (21).

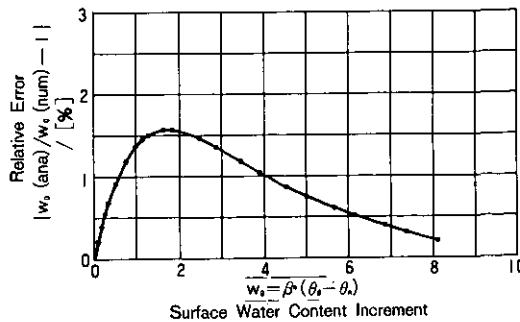


図 7 給水時間 t のときの表面含水率 θ_0 を推定した図 6 の 2 方法の相対差異

Fig. 7 Relative difference between the two estimated values of surface water content, θ_0 , at time, t , in Fig. 6.

解析解と差分解は大差ないと考えられる。その一例を、図8に示す。

図8(a), (b)は差分解, 同(c)は解析解による水分分布である。図8(a)には水源からの距離をパラメーターにして、含水率の時間曲線が示されている。図8の(b)と(c)を比較すれば、両水分分布曲線がかなりよく一致しているのが分かる。よく見比べると、解析解は水源近くで含水率が高く、逆に浸潤前線の進みが遅いことが分かる。浸潤前線付付では両者の時間差は10%近くあり、必ずしも小さいとはいえない。

しかし、解析解は、式(29), (30), (31), (32)などによって、水分分布に対して β , V_0 , w_0 , $D(w_0)$ などのパラメーターがどのように影響するかを一目りょう然に示しており、極めて見通しが良く、精度の多少の悪さには代え難いものがある。これらの式から得られる知見を以下に要約してみる。いずれもパラメーター a の値は固定して考えている。

式(31)から、種々の V_0 , β , $D(0)$, t の組み合わせに対しても、無次元数 $(\beta V_0)^2 t / D(0)$ の値が同じ場合には、同一の w_0 の値が対応することが分かる。例えば、 V_0 を半分にしたら、 t を4倍にすれば同じ w_0 が得られる。

式(29)から、 w_0 が同じ場合、無次元数 $\beta V_0 r / D(0)$ の値が同じならば同じ w の値を与えることが分かる。例えば、 V_0 を半分にしたら、上述のように t を4倍にしたうえで、 r を2倍にすれば同じ w が得られる。

式(29)と(31)とから V_0 を消去すれば、同一の w_0 に対しては、 β や V_0 のいかにかわらず、無次元数 $D(0)t/r^2$ が同じであれば w の値は皆同じであること、すなわち、 w_0 が同じ場合の水分分布は皆相似であることがわかる。

4.2.2 再分布過程の解析

限界給水速度で給水した場合には、最初の給水終了後は次のサンプリング時刻まで給水を休むから、根による吸水を除いては、土壌中の総水分量は変わらず、水分分布の不均一が緩和されるだけの、いわゆる、再分布過程になる。従来、このような再分布過程を解析的に扱った例は無いので、ここではFCR法を拡張して適用できるか否かを検討した(原, 1984a)。

再分布過程の計算は、まず差分法により行う。それから式(18)によりFCRを計算する。この際、 V_0 には給水過程において与えた V_0 の値を用いた。計算結果の一例を、図9に示す。この図には、 t/t_0 をパラメーターとして、差分解から得られた値(点)、及びそれに当てはめられた上に凸の曲線が5本示されている。横軸は式(19)で定義される無次元含水率 Θ 、たて軸は上述のFCR値である。 t_0 は最初の給水期間の長さ、 t は給水開始時からの経過時間である。この例は w_0 (給水終了時における w_0 の値) が2の場合についてのものである。

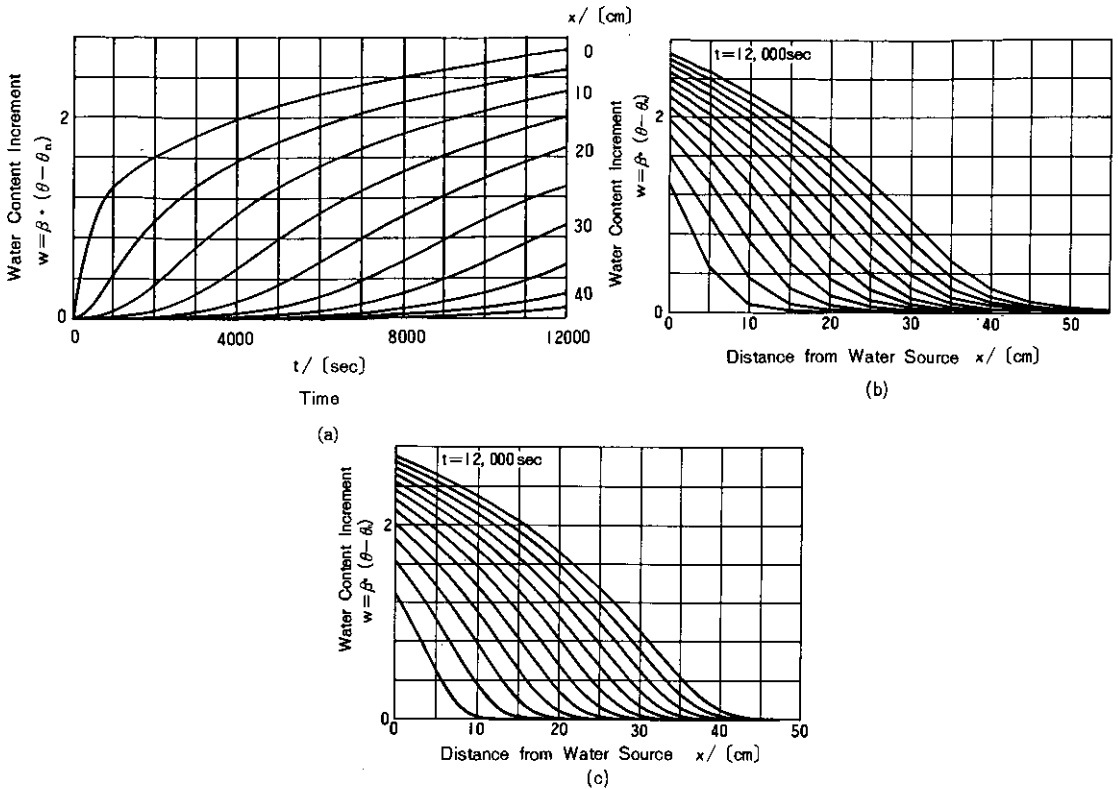


図 8 水分拡散係数が式(16)で表され、均質かつ等方で、重力が無視でき、初期土壌含水率が均一な半無限土壌 ($x \geq 0$) の表面 ($x = 0$) に平面状給水源を置き、一定流量 V_0 を与えた場合の土壌中各点での含水率の時間変化、および土壌中での水分分布の計算値

計算の条件は、 $D(\theta_0) = 10^{-6} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、 $V_0 = 2.628 \times 10^{-6} \text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ 。

- (a) 土壌中各点での含水率の時間変化。差分法 (Crank-Nicolson 法) による。
- (b) 土壌中での水分分布。差分法 (Crank-Nicolson 法) による。
- (c) 土壌中での水分分布。FCR 法 [式(29)] において指数を $a = 2 - 4/\pi$ とした近似解析解。

Fig. 8 Time course and distribution of soil water content, θ , when water is supplied from a plane source at the origin with a constant rate, V_0 , to homogeneous and isotropic semi-infinite soil whose water diffusivity, $D(\theta)$ is expressed by eq. (16). The initial water content, θ_0 , is even. The gravitational effects have been neglected. The calculation conditions are $D(\theta_0) = 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$, and $V_0 = 2.628 \times 10^{-6} \text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$.

- (a) Time course of soil water content for each point obtained by the finite difference (Crank-Nicolson's) method.
- (b) Water content distribution in soil obtained by the finite difference (Crank-Nicolson's) method.
- (c) Water content distribution in soil obtained analytically by eq. (29) with the value of the power, a , of $a = 2 - 4/\pi$.

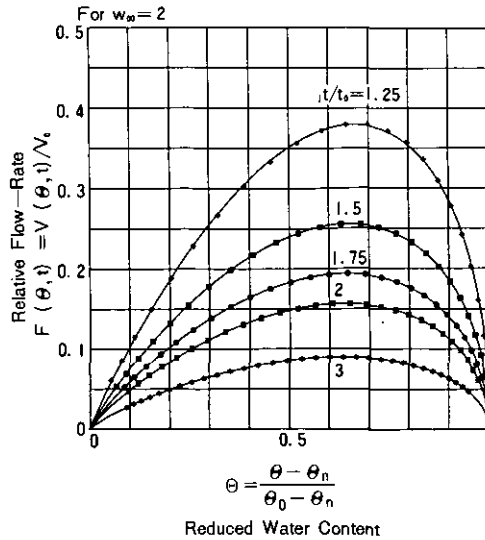


図 9 平面状水源からの定流量かんがいを時間 t_0 の間実施し、表面含水率 θ_0 が式 (25) の w_0 の値を 2 とするようになったとき止めた後の再分布過程における FCR 関数

土壌は均質等方性の半無限土壌とし、重力の影響は無視した。水分拡散係数は式 (16) で表されるものとする。点は差分法 (Crank-Nicolson 法) により求めたもの。実線はそれを式 (33) によって最良近似したもの。

Fig. 9 FCR (Flux-Concentration Relation) for the redistribution of water in soil. Water has been supplied with a constant rate and stopped when the surface water content, θ_0 , reached at a value which made the value of w_0 in eq. (25) two (2).

Soil is homogeneous, isotropic and semi-infinite, and the water diffusivity is expressed by eq. (16).

Gravitational effects have been neglected. The dots are from the finite difference (Crank-Nicolson's) method, and the solid lines are the best fits to the dots by eq. (33).

図 9 に示された 5 本の FCR 曲線を次式で曲線あてはめしてみた。

$$F(\theta, t) = k \cdot \theta^a (1 - \theta)^b \quad (33)$$

図 9 の 5 本の曲線はこの式 (33) を当てはめたものである。5 本の曲線とも、元の FCR 値 (点) によくあてはまっているといえる。このことは、式 (33) は再分布過程における FCR 関数を極めてよく近似するものであることを示している。いくつかの代表的な w_{00} 及び t/t_0 に対する FCR 関数を式 (33) で最良近似した場合のパラメーター a , b , k の値を図 10 に示した。

パラメーター a と b の値はいずれも、 w_{00} 及び t/t_0 の値によって変化するが、平均値、それぞれ

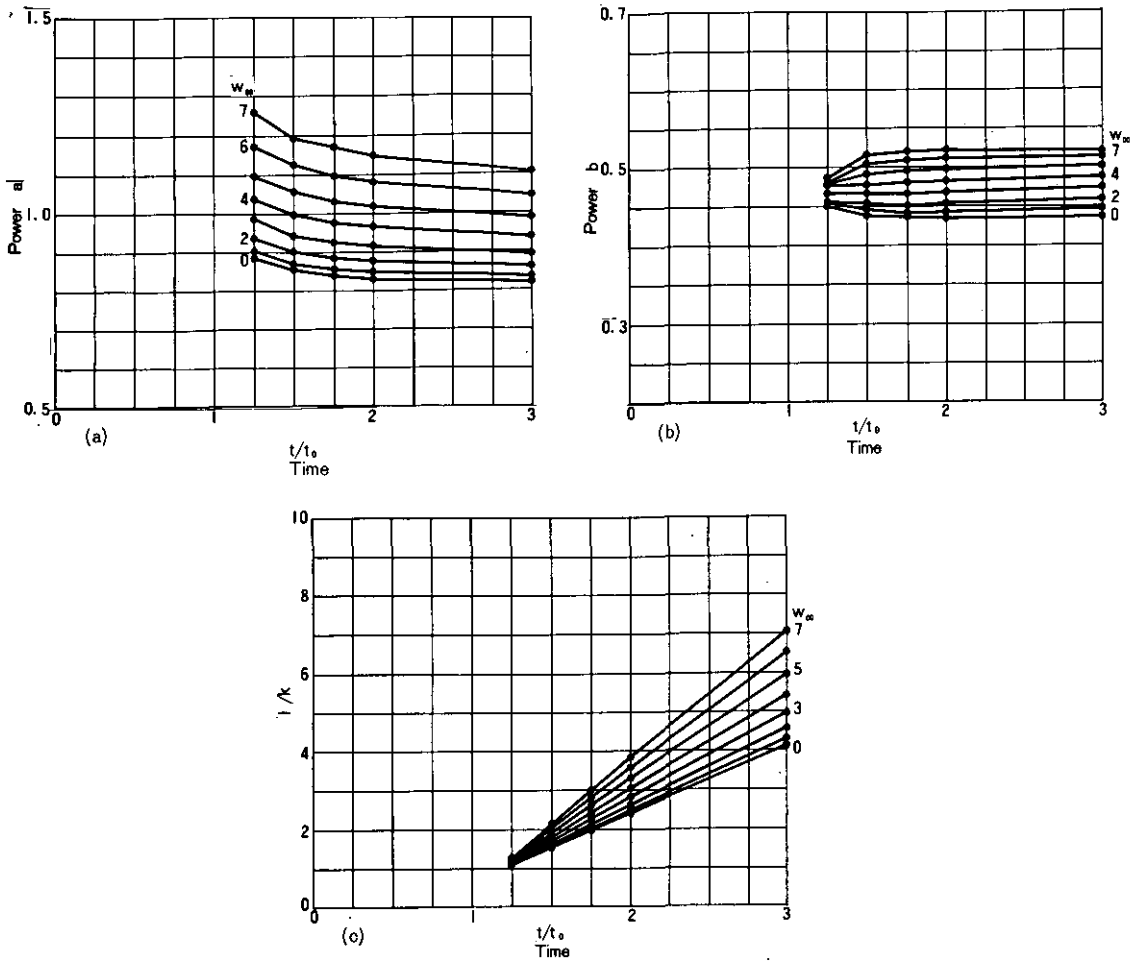


図 10 平面状水源からの定流量かんがいに於いて、かんがいを終了した後の再分布過程における FCR 値を式(33)で最良近似した場合のパラメータ a、b、及び k の値

かんがいは時間 t_0 の間実施し、かんがいを終了時の表面含水率 θ_0 は式(25)の w_0 の値を图中的各 w_{00} の値と等しくするようにしたものとす。

(a) 指数 a の値。 (b) 指数 b の値。 (c) 係数 k の値。

Fig. 10 Values of parameters a, b, and k in eq. (33) that have been best fitted to FCR values for the redistribution stage after constant rate supply of water from a plane source. Water was released for the period of t_0 . When watering has just stopped, surface water content θ_0 was reached to the value that made the variable w_0 in eq. (25) the value of respective w_{00} in the figures.
 (a) Values of the parameter a (b) Values of the parameter b (c) Values of the parameter k

れ、1.0及び0.5のまわりに分布している。また、パラメーター k の値は、 w_{00} の同一値に対しては、 $1/k$ が t/t_0 の1次関数で表されることがわかる。

パラメーター a, b は、 w_{00} 及び t/t_0 による変化が比較的小さいこと、及び解析の実をあげる目的から、一定値(それぞれ、1.0及び0.5)に固定することにする。そのうえで、あらためてFCRを式(33)で曲線あてはめして最良の k の値を求める。結果を、図11に示したが、やはり w_{00} の同一値に対しては、 $1/k$ が t/t_0 の1次関数になる。

このようにして求められた k, a, b の値を用いて再分布過程における土壌中の水分分布を得る。その一例を、図12に示す。この図の(a)が差分解、(b)が解析解によるものである。 t_0 は給水期間の長さであるから、 $t/t_0 = 1$ は給水終了時に、また $t/t_0 = 2$ は次のサンプリング時刻に、それぞれ対応する。これら $t/t_0 = 1$ 及び2の曲線は $x/x_m = 1, w = 2$ で交わっている。すなわち、このかんがいは $w = 2$ を目標値とする限界デッドビート制御の最初の2段階($0 \leq t \leq 2t_0$)を示したもになっている。図12にあるとおり、 w_{00} は3.96であるが、これは、 $w = 2$ を目標値とする場合は、最初の給水終了時には w_0 が3.96になっていなければならないことを示すものである。差分解

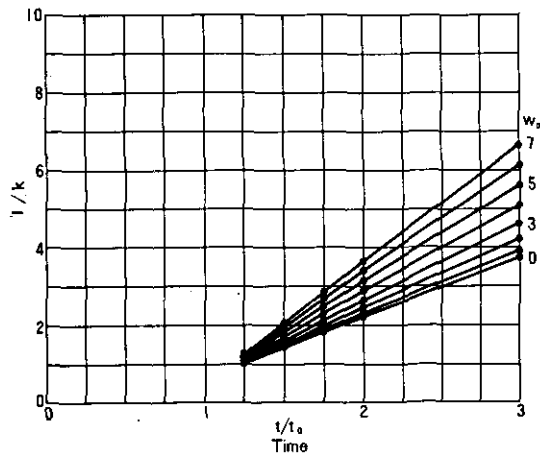


図 11 平面状水源からの定流量かんがいに於いて、かんがいを終了した後の再分布過程における FCR 値を、式(33)において $a = 1, b = 0.5$ として、最良近似した場合のパラメーター k の値

かんがいは時間 t_0 の間実施し、かんがいを終了時の表面含水率 θ_0 は、式(25)の w_0 の値を图中的各 w_{00} の値と等しくするようにしたものとする。

Fig. 11 Values of parameter k in eq. (33) with $a=1$ and $b=0.5$ that has been best fitted to FCR values for the redistribution stage after constant rate supply of water from a plane source

Water was released for the period of t_0 . When watering has just stopped, surface water content θ_0 was reached to the value that gave the variable w_0 of eq. (25) the value of respective w_{00} in the figure.

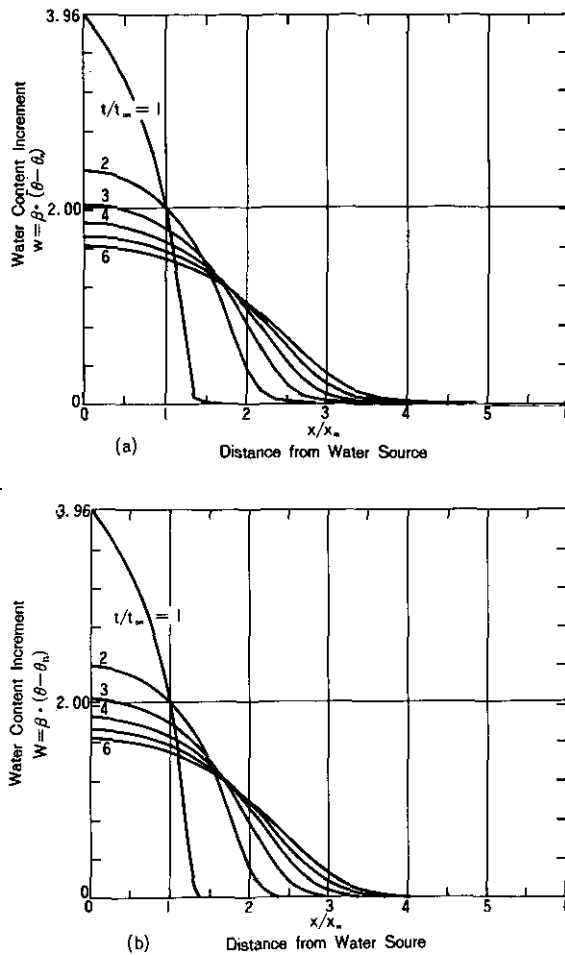


図 12 平面状水源からの定流量かんがいにおいて、かんがい終了時から再分布過程にかけての水分分布の時間変化

かんがいは注目点、 $x = x_m$ 、における含水率 θ が式(24)の w を 2 に等しくするまでの時間 t_0 の間実施した。

- (a) 差分法 (Crank-Nicolson 法) による数値解により求められたもの。
- (b) 式(33)により拡張された FCR 法により解析的に求められたもの。($a = 1$ 、 $b = 0.5$ とし、 k は図11によった)。

Fig.12 Water content distribution in soil after cessation of constant rate irrigation from a plane source

Watering was stopped when the water content θ for the point, $x = x_m$, made the value of the variable w in eq. (24) two (2) at the time, $t = t_0$.

- (a) Obtained numerically by the finite difference method (Crank-Nicolson's method).
- (b) Obtained analytically by the FCR method extended by eq. (33) (Parameters, a and b , were fixed as $a=1$ and $b=0.5$, respectively. The parameter k was from Fig. 11).

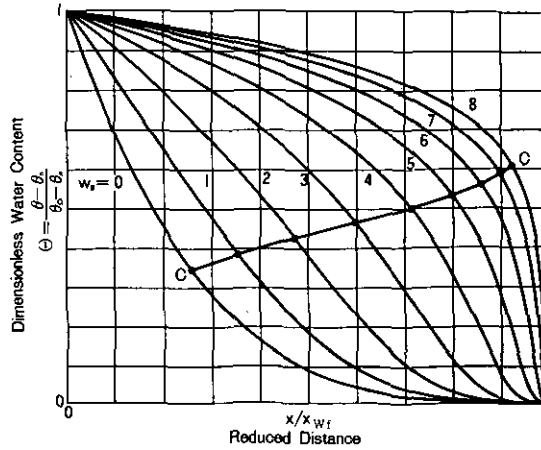


図 13 平面状水源からの定流量かんがいにおいて、地表面含水率 θ_0 から式(25)により求められる w_0 の値が各値 (0 から 8 までの整数) になったときの、土壤中での水分分布、及び、かんがいをそれらの値で打ち切ったとき、それが限界デッドビート制御になる目標値 θ_0 の分布曲線上へのプロット (折線 C-C)

水源からの距離 x は浸潤前線の座標 x_{wf} によって規格化され示されている。

Fig. 13 Water content distribution in soil corresponding to values of w_0 (integers from 0 to 8) calculated with eq. (25) from the value of the surface water content, θ_0 , which was attained by a constant rate irrigation from a plane source

A line C-C composed of connected straight lines shows desired values of θ_0 which are to be attained as critical deadbeat control corresponding to each w_0 value. The distance from the source, x , is reduced by the coordinate value of the wetting front, x_{wf} .

と解析解の合致は良好であるから、計算の容易な解析解を用いて、制御の目標値と最初の給水終了時の w_0 との関係調べてみる。

その結果を図13に示す。この図には、 w_0 が 0 から 8 までの 9 本の曲線と C-C を結ぶ 1 本の折線が示されている。横軸は浸潤前線の位置によって規格化した距離、たて軸は無次元含水率である。まず、最初に述べた 9 本の曲線は各 w_0 に対応する、給水中の土壤水分分布を示している。これは前節の解析解、式(29)、(30)によるものである。折線 C-C は、 w_0 がその値になったときに給水を停止したとして、 $t = 2t_0$ における水分分布曲線と元 ($t = t_0$) の曲線との交点を順次結んだものである。すなわち、 w_{00} と限界デッドビート制御の目標値との関係を示したものである。通常は限界デッドビート制御の目標値を与えて、それに対応する w_{00} の値を知りたいことが多いから、その場合は、この図を逆に使うことになる。例えば、限界デッドビート制御の目標値が 2 である場合は、 w_{00} を 4 にしなければならない、などと分かる。

図13中の折線C-Cを見ると、無次元含水率の値は、 $w_0 = 0$ における0.35から、 $w_0 = 8$ における0.61までの間に分布している。 w_0 が0というのは線形土壌（土壌水分拡散係数が土壌含水率にかかわらず一定の土壌）あるいは、非線形土壌であっても土壌含水率分布が極めて均一に近い状態に対応している。 $w_0 = 8$ というのは、式(17)にも示したように、たいていの土壌において風乾土壌に水が飽和するまで給水するような場合である。土壌水分調整の初めの段階では w_0 が 8 又はそれに近い値をとることもあろうが、定常な土壌水分制御の段階では w_0 の値は 0 に近く、1 の前後になると考えられる。

再分布過程における土壌水分分布に対する以上の解析によって、限界デッドビート制御の最初の2段階（ $0 \leq t \leq 2t_0$ ）を得るまでの方法が明らかになった。

次には、これをフィードバック制御により実施する見地、及び制御に要する時間や水量などの観点から整理してみる。

4.3 フィードバックによる限界デッドビート制御法による土壌水分制御の実施

土壌水分制御は必ずしも限界デッドビート制御法に則って実施しなければならないわけでは、もちろん、ないが、この制御法は一つの明確な規範を示しているので、十分に検討の価値があると考えられる。

自動制御の最も典型的な手法の一つにフィードバック制御がある。ここでは、上述の限界デッドビート制御法による土壌水分制御の最初の2段階（ $0 \leq t \leq 2t_0$ ）を比例要素によるフィードバック制御で行なうとするとどのようにならなければならないか、またその制御時間・給水量などが結果的にどのようなものになるかを検討する。

まず、用語を若干整理する。土壌含水率の初期値を θ_n 、目標値を θ_d で表す。1次元給水であるので、給水源から注目点までの距離を x_m で表す。限界給水速度を V_{oc} 、また最初の給水時間（これがサンプリング時間となる）を t_0 で表す。目標土壌含水率における土壌水分拡散係数は $D(\theta_d)$ である。自動制御用語に偏差 E 及びゲイン G がある。偏差は目標値と現在値の差である。ゲインは、操作量（給水速度）を得るために偏差に乗すべき係数である。ここでは、 $E = \theta_d - \theta_n$ 、 $G = V_{oc} / (\theta_d - \theta_n)$ である。

結果の整理は無次元数で示すのが便利である。ゲインは、 $G \cdot x_m / D(\theta_d)$ で、給水時間は $Fo = D(\theta_d) \cdot t_0 / x_m^2$ で無次元化される。ゲインと給水時間との関係は、 $G \sqrt{t_0 / D(\theta_d)}$ により見れる。初回の総給水量 Q_{oc} は $Q_{oc} = V_{oc} \cdot t_0$ であるが、これは、 $Q_{oc} / [(\theta_d - \theta_n) \cdot x_m]$ によって見るのがよい。 $(\theta_d - \theta_n) \cdot x_m$ は給水源から注目点までの区間における不足水量である。以上の無次元量を $w_d = \beta \cdot (\theta_d - \theta_n)$ に関してプロットしたのが、図14である。

$w_d = 0$ というのは $\beta = 0$ （線形土壌、すなわち、土壌水分拡散係数が含水率によらず一定という仮想的土壌）、または、 $E \rightarrow 0$ の極限の場合であり、4.1項での解析がこれに相当する。ただし、4.1項では $-\infty < x < \infty$ に広がる無限土壌であったのに対して、本項では $0 < x < \infty$ の半無限

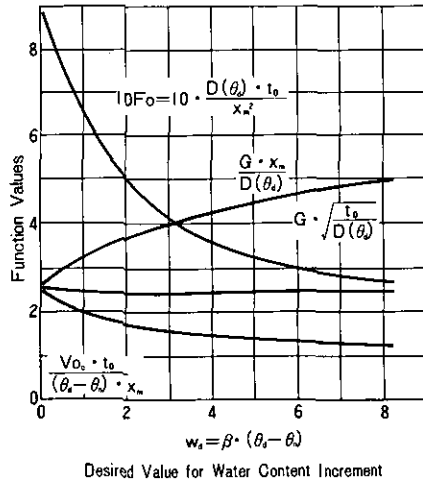


図 14 平面状水源からの定流量かんがい限界デッドビート制御となるとき諸量間の関係

G はフィードバックゲインを表し、 $G = V_{0c} / (\theta_s - \theta_n)$ と定義される。

Fig. 14 Relation among various values when a constant rate irrigation from a plane source is the critical deadbeat control

The variable G is the feedback gain defined as $G = V_{0c} / (\theta_s - \theta_n)$.

土壌を対象としているので、 V_0 は前者の1/2になっている。しかし内容に変化がないのは当然である。風乾土壌に限界給水する場合でも、前述のように w_d は8程度であり、図13から読みとれるように、これに対応する w_d は約5であり、この値が風乾土壌に給水する場合をも含めた w_d の実際的な最大値であろう。植物が生育している土壌では、 w_d はこの最大値よりかなり小さく、ずっと0に近いであろうと予想されるが、図14はこれらこの世の中で起こり得ると考えられる全範囲を網羅している。

図14によって、まず、ゲイン G について見ると、非線形の程度が大きくなる (w_d の値が大きくなる)につれて、同一の $x_m / D(\theta_s)$ に対して、 G を大きくとれることがわかる。これは、非線形性が強いほど給水速度を上げられることを示している。給水時間 t_0 については F_0 を見ると、同一の $D(\theta_s) / x_m^2$ に対しては、 w_d が大きくなるほど t_0 が小さくなるのがわかる。これは、非線形性が高いほど制御に要する時間が短くて済むようになるということである。

ゲインと給水時間の関係を見ると、同一の $D(\theta_s)$ に対しては、 $G \sqrt{t_0}$ は w_d の値にかかわらずほぼ一定である。

しかし、以上の結果をフィードバック制御に生かそうとすると、まずゲインを求めるには、注目点 x_m と目標値 θ_d を決めたのち、測定により初期値 θ_n を求める必要があるほか、土壌水分拡散係

数 $D(\theta_a)$ 及びそのパラメーター β の値を知っている必要がある。 $D(\theta_a)$ と β の値を知るには、あらかじめ当該土壌について予備試験して、式(16)の関数を求めておく必要がある。しかし、同一の土壌を同一の状態に充てんしたつもりでも、式(16)の関数が毎回同じになるとは限らず、常に関数値及びパラメーター値には不確定さがつきまとう。このことは、制御のゲイン及び給水時間を図14を用いて計算で求める際に困難を引き起こす基になる。

土壌の水分拡散特性に関係しない量として、図14に示した $V_{oc} \cdot t_0 / [(\theta_a - \theta_n) \cdot x_m]$ がある。分子の $V_{oc} \cdot t_0$ は初回の総給水量、分母の $(\theta_a - \theta_n) \cdot x_m$ は給水源から注目点までの区間における不足水量を表す。この分母は測定しうる量であるから、この比の値がわかれば初回に供給すべき水の総量がわかる。給水速度と給水時間の個々の値に多少の違いがあっても、総量で違いが無ければ制御結果にはあまり影響なからう。上記の比の値を図14から読むと、 w_d の0から5までの広い範囲にわたって、2.4から1.4までの比較的せまい範囲に収まっている。 w_d が1付近の比較的小さい値であれば、上記の比の値は大雑把に言って2.0程度と考えれば良い。この知見は、土壌の水分特性が未知であるか、又は、不確定である場合には特に有用である。

図14からは様々なことがらが読み取れるが、上記のことがらは土壌環境制御装置において水分分布を制御しようとする場合に有用と考えられるものである。

なお、図14は土壌水分拡散係数の値として、目標値 θ_a における値 $D(\theta_a)$ を採用したものであった。こうする代わりに初期値 θ_n における値 $D(\theta_n)$ を用いることもできた。しかし、そうすると、図14に示された3個の無次元数、 $D \cdot t_0 / x_m^2$ 、 $G \cdot x_m / D$ 、 $G \sqrt{t_0 / D}$ は w_d の変化によって桁がちがいに大きく変化してしまい、図14に比べて非常に見づらくなり、結果も利用しにくくなる。すなわち、上述の有用な知見は、水分拡散係数の値として、 θ_n ではなく θ_a における値 $D(\theta_a)$ を用いたことに由来していることを見逃がしてはならない。

したがって、土壌水分の制御性を論ずる場合には土壌含水率の初期値ではなく、目標値を中心にして考えるのが適切である、ということである。すなわち、土壌の初期状態が例えば風乾状態であり、土壌水分拡散係数が極めて小さいことについては、ほとんど悩む必要がない。その場合には、むしろ w_d が大きくなるから前述のように、操作のゲイン G も大きくでき、給水時間 t_0 を短くできるから、制御の応答は速やかである。むしろ関心を持つべきは土壌含水率の目標値の方である。制御の経過は $D(\theta_a)$ の値に大きく左右されるからである。

次に、この点を中心に、土壌水分制御装置における水分分布の制御性について考察を進める。

4.4 土壌環境制御装置における水分分布の制御性

上述の解析はいずれも無限（又は半無限）の媒体中に1個の給水源がある場合についてのものであったが、水分分布制御の基本的な性質については、有限な大きさのチャンバ内における場合についても論ずることができる。もちろん、最初から対象の有限性を考慮して解析すれば一番望ましいと考えられるが、それは上記の解析の延長上にあるものであり、解析が未だ十分に行われ

ていない。有限場では解析が複雑さを増し、計算時間も非常に長くなると予想される。ここでは、既に得られている上述の解析をもとにして土壤水分制御装置における現象について言及するにとどめる。したがって、今後さらに解析を進めていく余地が残されていることは念頭に置き、その解析への指針が得られれば最上である。

まず、1個の給水源が覆うことのできる範囲について考えてみたい。

前項までの解析によって、給水及びその後の再分布過程のいずれにおいても、実質的に浸潤前線と呼ばれるべきものの存在が明示された。これは、線形型において可能な厳密な解析からは決して出てこないものであるが、実用的には、かえって近似的な解析から生じた浸潤前線の概念は有用である。厳密解と比較してみるとわかるが、線形系では、浸潤前線は、吸水源における含水率増分の0.2%程度のところに相当している。この数値自体は近似のしかたなどで変化するものであり、大きな意味はないが、とにかく、ゼロではない値であることに意味がある。

浸潤前線という言葉の意味するところは、給水した水は給水源から浸潤前線まで到達し、その間では水が増えているが、浸潤前線から先には水が行っておらず、したがってそこでは含水率の増加が認められない、という境界が存在するということである。厳密な意味ではこのことが必ずしも正確とは言えないことは上述したとおりであるが、実用的には意味があろう。

1個の給水源が覆うことのできる範囲を、近似的に、この、浸潤前線の内側（浸潤前線と吸水源の間）と考えることができる。ただし、浸潤前線の位置は給水中はもちろんのこと、再分布過程においても絶えず前進し、位置を変えるから、固定的ではない。しかし、最初の給水終了時における浸潤前線の位置を一応の目安とすることができよう。

最初の給水終了時における浸潤前線の位置 x_{wt} と注目点 x_m との相対的な位置関係は図13に示されている。 x_{wt} は図の右端であり、 x_m は折線 C-C と水分分布曲線の交点によって示される。これと図14の F_0 曲線とから、最初の給水終了時の浸潤前線 x_{wt} を基準長さとするフーリエ数

$$Fo_{wt} \equiv \frac{D(\theta_d) \cdot t_0}{x_{wt}^2} \quad (34)$$

が計算できる。これと w_d の関係はおおよそ次のように表される。

$$Fo_{wt} = \begin{cases} 0.01w_d + 0.06, & 0 \leq w_d \leq 2.3 \\ 0.29 \text{ (一定)}, & w_d > 2.3 \end{cases} \quad (35)$$

すなわち、 Fo_{wt} は w_d の増加とともに直線的に増加し、 w_d が 2.3 以上になると一定になる。 w_d が大きくなるにつれて、図13から分かるように、 x_m と x_{wt} の値が近づくから、 Fo_{wt} は w_d の増加関数になるのである。

しかし、 w_d が小さい場合には浸潤前線の附近にはほとんど水が分布していないから、上記の Fo_{wt} は過小評価されている傾向にある。それゆえ、フーリエ数は 0.29 で一定とした方が実態に合

うと考えられるので、以後はこの値に基づいて論を進める。

上述の考察からわかることは、1個の給水源が覆いうる範囲は有限であり、それはおおよそ、

$$F_0 = \frac{D(\theta_d) \cdot t_0}{x^2} = 0.29 \tag{36}$$

と表せるということである。D(θ_d)は目標含水率 θ_d の値と土壌水分拡散特性から定まる。 t_0 は制御が整定して欲しい時間によって制約を受ける。D(θ_d)と t_0 が定まると、式(36)から領域の大きさ x が決まる。もし制御すべき土壌領域の大きさがこれより大きいときは、何個もの給水源を設けて操作する必要がある。さもないと、給水源のまわりにだけ水が分布してしまつて、それより遠いところには水が行き渡らないことになるからである。

いくつかのD(θ_d)と t_0 の値に対して、式(36)によって x の値を試算してみたのが表3である。平面状水源によって土壌含水率の値を制御する場合、おのおのD(θ_d)、 t_0 の組み合わせに対して、水分が制御される領域は、おおよそ、給水源から表3に示された距離 x の範囲までである。

D(θ_d)の値は、土壌の種類及び含水率の値によって定まる。いくつかの土壌については文献(Reichardtら、1972、など)に報告されているが、それ以外の土壌については土壌ごとに測定しなければならぬ(測定方法についてはKlute、1965、などを参照)。

一例として岩手大学農学部附属滝沢農場の作土(火山灰クロボク土壌)についての測定値(原・赤間、1977)を見ると、pF1.5(マトリックポテンシャル $-0.003\text{MPa} = -0.03\text{bar}$)、pF 2(同 $-0.01\text{MPa} = -0.1\text{bar}$)、pF2.5(同 $-0.03\text{MPa} = -0.3\text{bar}$)、pF 3(同 $-0.1\text{MPa} = -1\text{bar}$)に

表 3 1個の平面状水源が支配しうる領域の大きさ
計算は式(36)による。表には $x/[\text{cm}]$ の値が示されている。

Table 3 The geometrically maximal extent of soil mass that a single plane shaped water-source can control the water content in specified time For calculation, eq. (36) has been used. In the table, values of $x/[\text{cm}]$ are shown. The D (θ_d) is the water diffusivity of soil for the desired soil water content (θ_d).

D (θ_d)	$\frac{t_0}{[\text{hr}]}$				
$[\text{cm}^2/\text{sec}]$	1	2	6	12	24
10^{-5}	0.35	0.50	0.86	1.22	1.72
10^{-4}	1.11	1.58	2.73	3.86	5.46
10^{-3}	3.52	4.98	8.63	12.2	17.3
10^{-2}	11.1	15.8	27.3	38.6	54.6
10^{-1}	35.2	49.8	86.3	122	173
10^0	111	158	273	386	546
10^1	352	498	863	1220	1730

において、 θ は、それぞれ、0.47, 0.34, 0.28, 0.22, また、 $D/[\text{cm}^2\text{s}^{-1}]$ は、それぞれ、約 5×10^{-2} , 7×10^{-3} , 3×10^{-3} , 1×10^{-3} である。

この土壤において、例えば pF2.5 を目標値、 $t_0 = 6 \text{ h}$ とし、平面状水源によって水分制御を実施したとすると、その影響範囲は、

$$\sqrt{\frac{(3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}) \times (6 \text{ h})}{0.29}} = 14.9 \text{ cm}$$

の程度である。これを越える範囲の土壤領域について水分制御する場合には、給水源の個数を増して対応する必要がある。

$D(\theta_0)$ が小さい程、また t_0 が小さい程、式(36)の x は小さくなるから、1個の給水源で制御できる土壤領域の大きさが小さくなり、大領域の土壤水分を制御するために必要な給水源の個数が増加し、それだけ制御の実施がたいへんになる。このように設定条件によっては給水源の個数を多数にする必要があるわけであり、そのような場合、給水源の形状は、平面状よりも、線状又は点状の方が実用性が高いだろう。このような各種形状の給水源についての非線形解析は、なお今後に待たなければならない。

5 結 論

植物根の吸水による土壤含水率低下を補う形の土壤水分分布制御について考察した。得られた結論を以下に整理する。

- (1) 土壤含水率には、植物根の吸水作用と呼吸作用の両観点から考えて、最適値が存在することが論理的に推定される。
- (2) 根の吸水に伴う根の周囲の土壤中でのマトリック水ポテンシャルの低下は、土壤の透水係数が水ポテンシャルの関数であることを考慮すると、このことを考慮しなかった従来の理論値よりも著しく大きくなりうる。
- (3) 土壤の透水係数がマトリック水ポテンシャルの関数、式(4)、であることを考慮して、吸水中の根の表面における平衡水ポテンシャルを求める式(5)を得た。この式は根の平衡吸水速度に関して非線形である。
- (4) 土壤透水係数、式(4)、のパラメーターBの値が-1より小さい(通常の)土壤では平衡吸水速度に数学的に式(6)で示される最大値がある。
- (5) 線形土壤(土壤水分拡散係数が一定の土壤、または土壤中の水分分布が極めて均一な土壤)においては、吸水操作を実施しないいわゆる片側操作の一定給水速度によるデットピート制御系において制御不能に陥らないためには、給水端から注目地点までの距離及び土壤水分拡散係数の値によって定まる、初回給水速度の最大値及び給水時間長の最小値が存在する(式(15))。

- (6) 土壌水分拡散係数が含水率によって変化する一般の土壌（非線形土壌）における水分分布は、FCR法によって、従来知られていた給水過程のみならず、給水停止後の、いわゆる再分布過程においてもかなり精度よく求められることがわかった（式(29)～(33)）。
- (7) 非線形土壌における片側操作、一定給水速度によるデッドビート制御系についても、線形土壌における結果と定性的に類似の結果が得られた。特に、目標含水率における土壌水分拡散係数の値を用いて整理すれば、線形土壌に対して得られた結果に数倍程度以下の係数を乗除することにより非線形土壌についての諸値が得られることがわかった（図14）。特に、初回の総給水量は、半無限土壌体における平面状給水源による制御の場合、土壌水分拡散係数の値にかかわらず、給水端から注目地点までの区間の総不足水量の約2倍で、ほぼ一定であることが分かった。
- (8) 1個の給水源によって土壌水分分布を制御しようとする場合には、制御しうる土壌領域の大きさは、目標含水率における土壌水分拡散係数の値及び希望する整定時間の長さによって定まる。（平面状給水源の場合は式(36)）。したがって、この大きさを越えた領域について土壌水分分布を制御しようとする場合には、その領域の大きさと上記の条件に応じて給水源の個数を増して操作する必要がある。

6 ま と め

高等植物の水分代謝に対して土壌の水分環境がどのように作用するかについては古くから議論があるが、土壌水分の自動測定並びに自動制御が難しく、未だに実験条件の設定すら満足に出来ないでいる。

本報では根の吸水によって発達する土壌中での水ポテンシャルこう配を、従来考慮されていなかった土壌透水系数と水ポテンシャルの関数関係を考慮に入れて解析することにより、従来考えられていた以上に大きな水ポテンシャルこう配が発達し、吸水速度に理論的な最大値が存することを証明した。

土壌水分制御系の解析には、はじめ、土壌水分拡散係数が土壌含水率によらず一定と仮定して、給水のみによるデッドビート制御を考察し、制御不能に陥らないための条件を明らかにした。これには、土壌水分拡散係数の値と制御すべき領域の大きさによって給水速度に最大値があり、給水時間にも最小値があり、これによって制御の速さ、広さが制約されることを示した。

土壌水分拡散係数は、普通、土壌含水率によって大きく変化するものであり、非線形系である。この系の解析は難しく、完成していない。平面状給水源の場合について本報で論じ、線形系と定性的に類似性があることを示した。土壌水分拡散係数の値が小さく、かつ、寸法の大きい土壌環境制御装置において制限時間内に土壌中の水分分布を制御するためには、給水源が1個では不足であり、多数個配置する必要があることを明らかにした。平面状給水源についてはその支配領域の大きさを明らかにしたので、設計に使える。しかし立体的に給水源を配置するには直線状（又

は管状)給水源,あるいは点状(又は球状)給水源の方が便利であろうから,今後さらに検討する余地がある。

このように,土壤環境制御装置において土壤水分分布を制御するためには多数個の給水源を設置し,それを操作する必要がある。操作端を具体的にどのような形状にするのが良いのか,また多数(数十,数百,数千,……)個の給水源をどう操作したらよいか,今後さらに検討していく必要がある。理論的解析のみならず,実験によるその検証も必要である。

本報では,現在までに明らかにされている最新の手法を適用して,土壤中での水分移動現象を解析し,自動制御と結びつけた。理論上の問題としては,上述以外の給水源形状についての解析のほか,土壤水分特性,透水係数,水分拡散係数のヒステリシス,重力の影響の考慮,それに有限体積中の多数個給水源,植物根の吸水パターンなどの考慮など,検討すべき問題が多々残されている。

土壤中の水分環境には含水率と水ポテンシャルの両面があることは従来より指摘されているが,両者とも計測が難しく,制御技術の完成のためには,計測技術の開発も欠かせない。

植物の土壤環境の中で,土壤水分は多数の環境要因の一つに過ぎない。土壤の環境要因は,温度,空気,塩類,など,どれひとつをとっても制御は難題である。今後とも総合して検討していく必要があることは論を待たない。

謝 辞

本研究を進めるに当たり,多数の方々よりの援助及び研究費補助を受けたので謝意を表します。

土壤環境の研究を始めるに当たっては東京農業大学杉二郎名誉教授の導きを得た。その後,岩手大学伊藤實教授から多くの示唆を受けた。静電容量型土壤水分計の開発に当たっては,愛媛大学橋本康教授,東京農工大学船田周教授,静岡大学一条文二郎名誉教授,及び住友電気工業(株)の協力を得た。土壤水分特性の測定及び制御の基礎測定は,岩手大学農学部農業機械学科農業環境制御工学講座の専攻学生(当時),赤田健兒,伊藤光春,赤間博文,加藤修,下澤邦彦,伊藤寛,田子守久,吉田博徳,丹野一治,向井隆司君の研究によった。本研究をまとめるに当たり,環境庁公害研究所技術部相賀一郎室長及び大政謙次研究員には協力及び討論を得た。

FCR法の採用については,筆者が文部省在外研究員(昭和58年度長期甲種)として,昭和58年9月から昭和59年1月まで滞在した米国カリフォルニア大学デービス校の土地・空気・水資源学科の教授D. R. Nielsen博士の示唆・討論を受け,同学科の計算機を用いて計算し,結果については同博士と討論したほか,同学科の教授T. Hsiao博士及び米国農務省塩類研究所(加州リバサイド市)のR. van Genuchten博士との討論があった。

本研究の一部は昭和53年度文部省科学研究費(一般研究B,課題番号248069)によった。

引 用 文 献

- 1) Carslaw, H.S. and J. C. Jaeger (1959): *Conduction of Heat in Solids*. 2nd ed. Oxford.
- 2) Gardner, W.R. (1960): Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci.*, **89**, 63-73.
- 3) Gardner, W.R. (1964): Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agron. J.*, **56**, 41-45.
- 4) 原 道宏 (1984 a): 土壤水分の計測と制御に関する基礎的研究(8)かんがい解析へのFCR法の適用及び限界給水速度の検討. 日本生物環境調節学会第22回大会(鳥取)講演要旨集, 10-11.
- 5) 原 道宏 (1984 b): 未発表.
- 6) 原 道宏・赤間博文(1977): 土壤水分の計測と制御に関する基礎的研究(1)土壤水分系の同定方法. 日本生物環境調節学会第15回大会(筑波)講演要旨集, 7-8.
- 7) Hara, M. and J. Sugi (1983): Optimal control of soil-water system in greenhouses—A theoretical consideration—. *J. of Faculty of Agriculture, Iwate University*, **16** (3), 193-208.
- 8) Klute, A. (1965): Water diffusivity. In Black *et al.* (ed.) *Agronomy series No. 9 "Method of Soil Analysis Part 1"*. Amer. Soc. of Agronomy, Madison, Wisconsin, 262-272.
- 9) 長野敏英・原 道宏・杉 二郎(1981): 植物の水分状態とその制御に関する研究: 根の長さ及び表面積の測定について. 日本生物環境調節学会第19回大会(高知)講演要旨集, 34-35.
- 10) Philip, J.R. (1973): On solving the unsaturated flow equation: 1. The flux-concentration relation. *Soil Sci.*, **16** (5), 328-335.
- 11) Reichardt, K., D. R. Nielsen and J. W. Biggar (1972): Scaling of horizontal infiltration into homogeneous soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **36**, 241-245.
- 12) Topp, G. C. and E. E. Miller (1966): Hysteretic moisture characteristics and hydraulic conductivities for glass-bead media. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **30**, 156-162.
- 13) White, I., D. E. Smiles and K. M. Peroux (1979): Absorption of water by soil: The constant flux boundary condition. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **43**, 659-664.

III-3

植物群落によるオゾンの吸収

Uptake of Ozone by Plant Communities

古川昭雄¹・佐々木美緒子²・森田茂廣³

Akio FURUKAWA¹, Mioko SASAKI² and Shigehiro MORITA³

要 旨

植物群落による大気浄化能力を調べるために、キク (*Chrysanthemum morifolium* R. cv. Hostes) とソルガム (*Sorghum bicolor* M. cv. Sdax) を用いてモデル群落を人工環境調節室 (自然環境シミュレーター: 5.0×2.4×2.0m) に作り、これらの植物群落によるオゾン吸収量を種々の環境条件下で調べた。

植物群落内では、光、温度、風速は著しく減衰した。CO₂濃度、オゾン濃度はガス吸収が最も盛んな群落表面で低下したが、群落内部ではかえって増加した。また、水蒸気密度は群落表面で顕著に高く、群落内に入ると減少した。すなわち、群落表面では光強度が高く、大気と葉との間でのガス交換が活発に行われていることを物語っている。事実、光強度が増すにつれて群落でのCO₂、オゾン減衰量は増大し、水蒸気放出量 (蒸発散量) も増大した。しかし、CO₂減衰量は今回の実験条件下では光飽和しなかったが、オゾン減衰量、蒸散量は光飽和する傾向にあった。また、群落の葉面積密度の増加に伴ってオゾン減衰量、蒸散量は増加した。蒸散量、オゾン減衰量は、葉面積密度が等しいときでも、キク群落の方がソルガム群落の約5倍高く、単葉での測定結果から、その差異が気孔拡散抵抗の大小によっていることが判明した。単位オゾン濃度当たりのオゾン減衰量は蒸散量との間に極めて高い直線関係が見られ ($r^2=0.955$)、植物群落以外でのオゾンの吸着・崩壊も見られなかったことから、オゾンの減衰は、もっぱら植物群落そのものによるものと思われる。さ

1. 国立公害研究所 生物環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 昭和58年度 国立公害研究所共同研究員 (東京農工大学農学部 〒183 府中市幸町3-5-8)
Research Collaborator of the National Institute for Environmental Studies.
(Department of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu 183, Japan).
3. 昭和58年度 国立公害研究所客員研究員 (東京農工大学農学部 〒183 府中市幸町3-5-8)
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies.
(Department of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu 183, Japan).

らに、蒸散量がゼロのときには単位オゾン濃度当たりのオゾン減衰量もゼロとなり、植物群落によるオゾンの減衰は葉面の気孔を介在して植物葉内に吸収されたことによって生じたものと考えられる。

Abstract

Communities of *Chrysanthemum morifolium* R. cv. Hostes and *Sorghum bicolor* M. cv. Sdax were made in the environment controll room (5.0 × 2.4 × 2.0 m, high) to demonstrate the role of plant community as an air filter. The uptake of ozone by two plant communities was investigated under the various environmental conditions.

Profiles of light intensity, air temperature, and wind velocity were determined. Profiles of CO₂, H₂O and O₃ and community structural profile were also given. Profiles of these environmental conditions suggested that the gas exchange was efficient at the surface of plant community due to high light intensity. However, concentrations of CO₂ and O₃ increased in the deeper community layer. The deposition rates of CO₂ and O₃ increased with increasing light intensity. The evapotranspiration from the community was also enhanced by higher light intensity. Though CO₂ depletion was not saturated by high light (250 μE m⁻²s⁻¹), O₃ deposition and evapotranspiration were almost light saturated under the present condition. The deposition of O₃ and evapotranspiration increased with increasing leaf area intensity. Even when the leaf area intensity of *Sorghum* community was equivalent to that of *Chrysanthemum* community, evapotranspiration and O₃ deposition were about 5 times greater in the latter plant community. The lower deposition of O₃ or evapotranspiration in *Sorghum* could be resulted from the higher diffusive resistance of stomata. This suggestion was supported by the result obtained from the measurement of transpiration rate in single leaves of these two plant species. The linear relationship between the deposition amount of O₃ per unit O₃ concentration (treated O₃ concentration) and the amount of water loss from the community could be detected. The linear regression analysis indicates that these two factors had a very high regression coefficient ($r^2=0.955$). Furthermore, when the amount of water loss was zero, the amount of O₃ deposition per unit O₃ concentration was zero. These results suggest that the deposition of O₃ caused by plant community was mainly due to the stomatal absorption of O₃, rather than the decomposition and/or adsorption onto the plant community.

Key words : Plant Community—Ozone uptake—Air filter—Stomata.

1 結 言

化石燃焼によってもたらされる大気汚染が社会問題となってほぼ半世紀が経つ。近年、我が国では環境基準の設定、工場、自動車からの排ガス規制によって大気環境の悪化に歯止めが掛けられ、二酸化硫黄の年平均濃度が1967年をピークに低下して来ているのを始めとして、二酸化窒素濃度も1974年以降はほぼ横ばいである(環境白書, 1983)。しかし、光化学オキシダント濃度は依然として高く、大阪、埼玉などの都市近郊では、1時間値が注意報発令濃度(0.12ppm)を超える

日が年間10日以上にもなる。また、東京湾上空で高濃度のオゾンが検出されたとの報告もある(宇田川ら, 1983)。

大気汚染が植物に与える影響には、葉面に生じる可視障害 (Jacobson & Hill, 1970; Malhotra & Blauel, 1980) や可視障害発現以前に引き起こされる光合成、生長阻害 (Heath, 1980) などの生理障害がある。一方、植物は大気中の汚染物質を気孔を通して葉内に取り込み、エアークリーナーとして大気の浄化に貢献しているとも考えられている (Bennett & Hill, 1973)。Hill (1971) は大型同化箱を用いてアルファルファのモデル群落による種々の大気汚染質の吸収を測定し、植物が大気の浄化に貢献していると報告している。これとは別に、野外に成立している植物群落による大気浄化機能の評価を試みた報告もなされている (Turner ら, 1974; Leuning ら, 1979a, b; Galbally ら, 1979; 荒木ら, 1983)。さらに、一次元拡散モデルに基づいてシミュレーションを行った報告もある (Murphy ら, 1977; 大政, 1979)。しかし、野外条件下では環境要因が複雑に組み合って変化しており、その解析には困難さが常につきまとう。空力法、熱収支法を用いて野外の植物群落によるガス吸収を測定する方法もあるが、それには広大で均一な植物群落が必要である。そこで、我々は、国立公害研究所内に設置された自然環境シミュレーターの中にモデル植物群落を作り、種々の環境条件下で植物群落がどの程度、光化学オキシダントの主成分であるオゾンを吸収し、大気の浄化に貢献しているかの評価を試みた。

2 材料と方法

2.1 植物材料

本報告では、広葉型の植物群落としてキク (*Chrysanthemum morifolium* R. cv. Hostes) を、細葉型の群落としてソルガム (*Sorghum bicolor* M. cv. Sdax) の2種を用いた。植物は直径11 cm、高さ20 cmのプラスチックポットで栽培した。培養土としてピートモス：パーミキュライト：パーライト：小砂利を2：2：1：1 (v/v) に混合したものをを用いた。元肥として Magamp K を1鉢当たり5 g、追肥として Hyponex 1,000 倍液を週2回、Hoagland No. 2 水耕液の微量要素を週1回与えた。キクは、芽挿をした挿穂が活着した後、プラスチックポットに移し、自然光型ファイトトロン温室 (25°C, 70%RH) で約1か月栽培した。栽培期間中は側芽を摘みとり、日長時間が16時間になるように蛍光灯で補光した。ソルガムはプラスチックポットに播種後、約4週間栽培して実験に供した。栽培には前記の培養土3に対しローム土1を加えたものをを用いた。

2.2 チェンバー

チェンバーは5.0×2.4×2.0 m (h) の大きさで (相賀, 1984)、プラスチックポット225個を収容できるようにになっている (図1)。本研究では縦2.2 m、横2 m、個体間の距離を密植条件下で17 cm とし、最高で160個体の植物を配置した。光源はチェンバー上面と側面に設置されている110w の超高出力白色蛍光灯224灯からなっている。

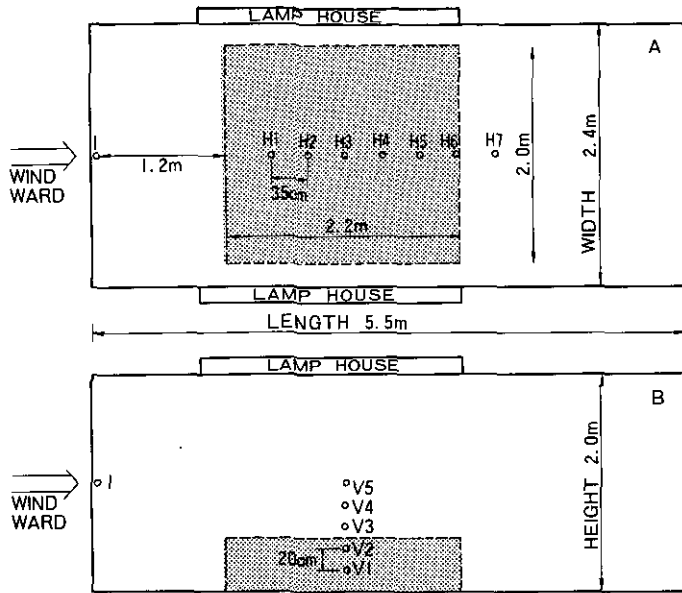


図 1 チャンバー内の測定点の配置 植物群落を設置した区域を■で示した
 Aは平面図。群落の風上側変縁部からH1までは40cm、H1からH7は35cm
 等間隔で配置した。Iは入口の測定点を示す。Bは側面図。V1からV5の高
 さは植物高に応じて変えた。キクではV2=H3、ソルガムではV4=H3で
 ある。

Fig. 1 Diagram showing points for the measurement of environmental factors

Planted area is indicated by ■. A: plane figur. The distance from the edge of windward to H1 was 40cm and the interval from H1 to H7 was 35cm. The point "I" is the measuring point at the inlet. B: side view. Measuring points V1-V5 were changed in corresponding to the plant height. V2=H3 for *Chrysanthemum* and V4=H3 for *Sorghum*.

2.3 測定方法

植物群落の風上側辺縁部の中央から風向と平行に高さ150cmのポールを35cm間隔で立て群落表層部に六つの測定点(H1からH6)と群落外に一つの測定点(H7)を設けた。H1からH7の各測定点の高さは植物の高さに応じて、キクでは床面上40あるいは50cm、ソルガムでは80あるいは90cmとした。また、群落中央部(H3)には垂直に五つの測定点(V1からV5)を設置した。さらに、チェンバー内への空気取入口の壁面付近にも測定点(I)を設けた。各測定点にテフロンチューブ(φ6mm)を配し、5点を1組としてテフロン製ポンプ(榎本マイクロポンプ製、DM-490ST型)5台を用いて各測定点の空気をサンプリングした。各測定点の空気は5台のテフロン製電磁弁(ハルナ製、SV3C A-53T-W1/4T型)によって分けられ、1系統の電磁弁のみが開き、その系

統の空気のみがガス成分測定システムに行くようにタイマーを用いて開閉制御した。電磁弁が開いている系の空気を三つに分け、露点計 (EG&G 製, 911型) で水蒸気密度を、赤外線ガス分析計 (Beckman 製, 865型) で CO_2 濃度を、オゾン分析計 (東京工業製, TUV1100型) で O_3 濃度を同時測定した。配管の内部で結露するのを防ぐために、チェンバー外部のサンプリング・チューブにはガラス繊維製の保温管をまいて加温した。ガス成分測定システム内部にも電熱器とファンを設置して、システム内の温度が 35°C 以上になるようにした。なお、本報告では、測定点 I, H3, V1~V5及び H7における測定値のみを用いて解析し、群落の水平方向での各種環境要因の変動については触れなかった。光強度は Quantum Sensor (LI-COR 製, LI190SB 型) で、気温は $\phi 0.3$ mm 銅-コンスタンタン熱電対で、風速は熱線風速計 (日本化学工業製, 24-2000S 型) で測定した。各センサーの出力は、1分ごとに小型多点データ収録システム (江藤電気製, THERMODAC III型) で記録し、カセット・データ・レコーダー (江藤電気製, EC-3 型) で磁気テープに経時的に収録した。テープに収録した測定値は卓上計算機 (HEWLETT PACKARD 製, HP-85型) で読み取り、5分ごとの平均値を算出してフロッピー・ディスクに再収録した。

2.4 オゾン処理方法

チェンバー内に搬入後の植物へのかん水は、キクでは1日2回、ソルガムでは1日おきに、鉢の下に設置されているとくに培養液 (大塚ハウス1号, 2号水溶液) を満たし、鉢の下部約 5 cm を培養液に約30分浸すことよって行った。チェンバー内に植物を配置してから約1週間後にオゾン処理を開始した。オゾン処理前に1日間、対照区としての各種の測定を実施した。オゾン処理は連続3日間行い、その間毎日10:00からチェンバー内のオゾン濃度を直線的に増加させて11:00に設定濃度にした後15:00までその値を維持し、15:00からはオゾン濃度を直線的に低下させ、16:00に濃度ゼロとした (図2B 参照)。オゾン処理終了後、全個体数のおよそ1/4を、キクでは茎の基部から10cm ごとに、ソルガムでは20cm ごとに層別刈取をして層別の葉面積を測定した。

3 結 果

3.1 各種環境要因の日変動

図2 A, Bに群落中央表層部 (H3; 図1 参照) における各種環境要因の日変動を示した。光強度、風速、気温は極めて安定した値を示し、再現性の高い制御環境要因であった。また、H3では植物群落からの蒸散によってかなりの水蒸気密度の日変動があると思われたが、明期間における変動は予想以上に少なかった。これは、チェンバーに導入する空気湿度を制御していたため植物群落からの蒸散速度が明期間中ほぼ一定であったことを示しているものと思われる。さらに、オゾン濃度の日変化も極めて少なく、設定濃度で処理を行っている11:00~15:00の間は一定であった。一方、 CO_2 濃度の制御は行わなかったため、H3における CO_2 濃度の日変動はかなり大き

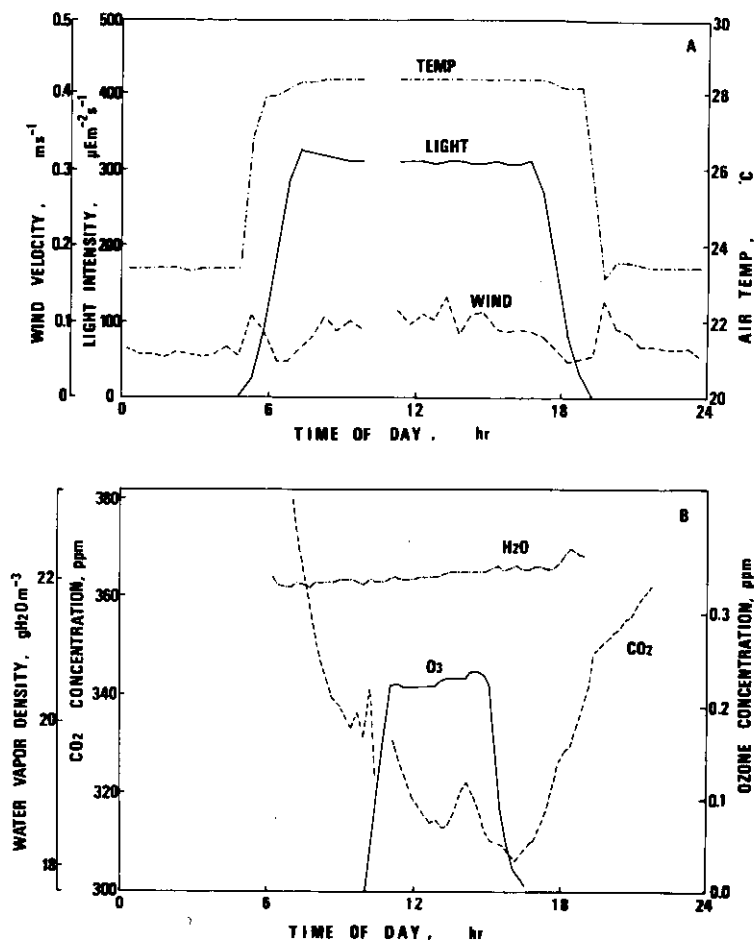


図 2 (A) キク群落表面 (高さ 40cm) の光、風速、気温の日変動 (B) 測定点 V 5 (高さ 100cm) の CO₂濃度、湿度 (水蒸気圧)、O₃の日変動
 Fig. 2 (A) Diurnal variations of light intensity, and air temperature at the surface (40cm in height) of *Chrysanthemum* community. (B) Diurnal variations of CO₂, humidity, and O₃ concentration at the measuring point V5 (100cm in height)

く、暗期には380ppmにもなった。これは、夜間の導入空気中のCO₂濃度の上昇と植物の呼吸作用によるCO₂放出とが加算されたためと思われる。一方、明期には植物群落の光合成作用によってCO₂が吸収され、300ppm近くまで減少した。

3.2 各種環境要因の垂直分布

キク群落における各種環境要因の垂直分布を図3に、ソルガム群落のそれを図4に示した。光

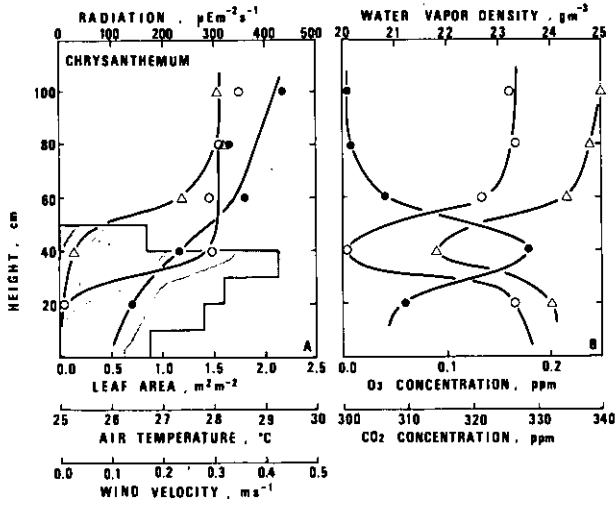


図 3 キク群落における (A) 光 (Δ)、風速 (\circ)、気温 (\bullet) と (B) O_3 (Δ)、 CO_2 (\circ)、水蒸気密度 (\bullet)、葉面積 (■) の垂直分布

Fig. 3 Perpendicular profiles of (A) light intensity (Δ), wind velocity (\circ), and air temperature, and (B) of O_3 (Δ), CO_2 (\circ), water vapor density (\bullet), and leaf area density (■), in *Chrysanthemum* community.

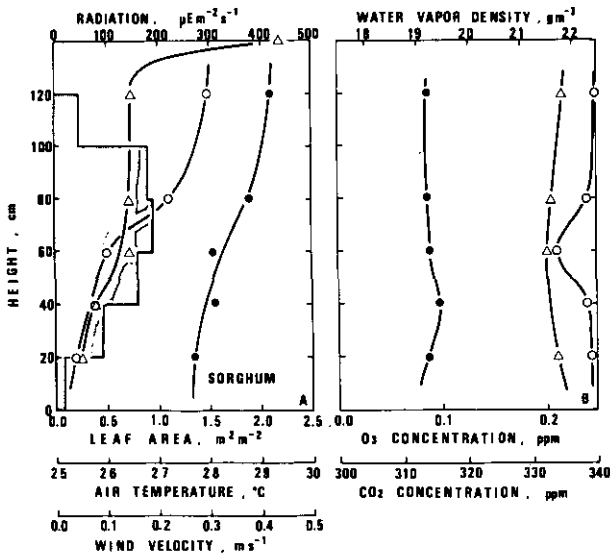


図 4 ソルガム群落における (A) 光 (Δ)、風速 (\circ)、気温 (\bullet) と (B) O_3 (Δ)、 CO_2 (\circ)、水蒸気密度 (\bullet)、葉面積 (■) の垂直分布

Fig. 4 Perpendicular profiles of (A) light intensity (Δ), wind velocity (\circ), and air temperature, and (B) of O_3 (Δ), CO_2 (\circ), water vapor density (\bullet), and leaf area density (■), in *Sorghum* community.

強度は群落表層部での減衰は小さく、群落内に入ると急激に減衰した。減衰割合は広葉型のキク群落で大きく、細葉型のソルガム群落では小さかった。しかし、減衰割合の差は群落型によるばかりではなく、葉面積密度がキク群落のほうがソルガム群落よりも2.7倍高いことにもよるものと思われる。一方、気温の垂直分布はキクでもソルガムでも群落表面で低下し、群落内に入るに従ってさらに低下していく傾向にあった。水蒸気密度は群落表層部で高く、群落内に入るとかえって減少した。キク群落の CO_2 濃度は群落上部で約325ppm あったが、群落表層部では300ppm にまで減少し、群落内部に入るとかえって増加して群落上部の濃度にまで達した。ソルガム群落での CO_2 濃度の垂直分布は群落表層部でわずかに減少するだけであった。キク群落の O_3 濃度の垂直分布は CO_2 の垂直分布と類似して群落表層部における減衰が顕著であった。

3.3 光強度とガス交換速度との関係

チェンバー内の CO_2 濃度は、外気の CO_2 濃度の変動に伴って大きく変化した。そこで群落の風上側の測定点(I)の CO_2 濃度と群落外の測定点(H7)との差 (ΔCO_2) を取り、群落によってどれだけの CO_2 吸収が行われ、環境条件や群落密度によってどれだけ変化するかを調べた。水蒸気密度、オゾン濃度についても、 ΔCO_2 のプロファイルと比較するため、群落風上側の測定点(I)の値と

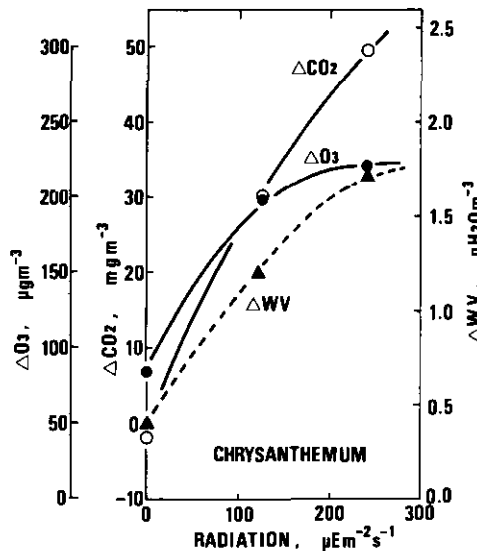


図 5 キク群落のH7における光強度と ΔO_3 、 ΔWV 、 ΔCO_2 の関係
植物高 40cm の時に 0.24ppm O_3 を処理したときの 1 時間の平均値

Fig. 5 Relation between light intensity and ΔO_3 , ΔWV , and ΔCO_2 in *Chrysanthemum* community at the measuring point H7. Each point represents the 1-hr mean value at 40cm in height determined when 0.24ppm O_3 was treated.

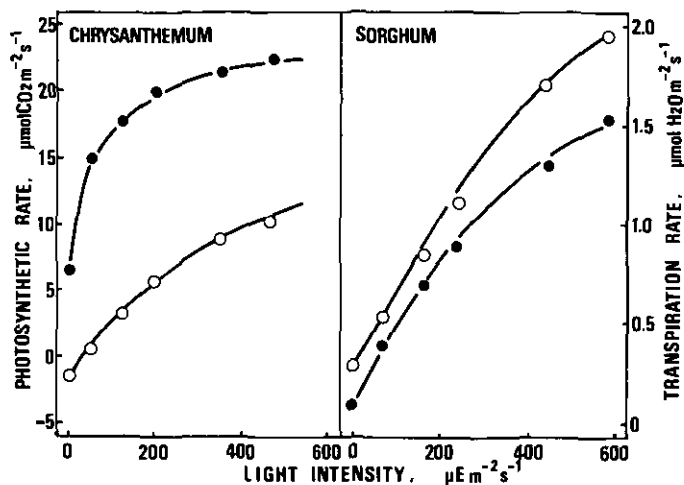


図 6 キク (A)、とソルガム (B) 単葉の光—光合成 (○)、蒸散曲線 (●)
 Fig. 6 Light response of net photosynthesis (○) and transpiration (●) in single leaves of *Chrysanthemum* (A) and *Sorghum* (B)

の差 (ΔWV : 水蒸気密度差, ΔO_3 : オゾン濃度差) を取った。

チェンバー内の明期間における光強度を3段階に変えてオゾン処理を行った結果, ΔCO_2 , ΔO_3 , ΔWV は光強度の増加に伴い増加した (図5)。 ΔCO_2 は光強度の増加に伴い直線的に増加し, この実験条件下では光飽和しなかったが, ΔO_3 及び ΔWV はほぼ光飽和しているようであった。光強度の増加に伴う ΔCO_2 及び ΔWV の変化は, 同化箱法を用いて測定した単葉の光—光合成・蒸散曲線 (図6) と類似しており, 単葉の蒸散速度は $200\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 付近から光飽和を始めるのに対して, 光合成速度は $500\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ でも光飽和に達しなかった。

3.4 オゾン濃度とガス交換速度との関係

キク群落に3日間連続オゾン処理を行っても ΔCO_2 と ΔWV は処理前, 処理中, 処理後の5日間ほぼ一定の値を示し (図7), 可視障害も観察されなかった。すなわち, 今回の実験で用いた実験条件下では, 植物はオゾンによる急性的な生理障害を受けなかったものと思われる。植物体地上部をすべて刈り取った状態で 0.2ppm のオゾンを処理しても, チェンバーの側壁, 培養土表面, 床面における吸着や崩壊によるオゾン濃度の減衰は極めて小さく, 無視できる程度であった。

キク群落の ΔO_3 は, 処理したオゾン濃度が高くなるに従って直線的に増加した (図8)。また, ΔO_3 を群落の風上側の測定点 I におけるオゾン濃度 (IO_3) で割った値 ($\Delta\text{O}_3/\text{IO}_3$) と処理したオゾン濃度との関係についても図8に示した。 $\Delta\text{O}_3/\text{IO}_3$ は処理したオゾン濃度にかかわらず一定であった。 ΔWV も $\Delta\text{O}_3/\text{IO}_3$ と同様に, 処理したオゾン濃度とは関係なく一定であった。

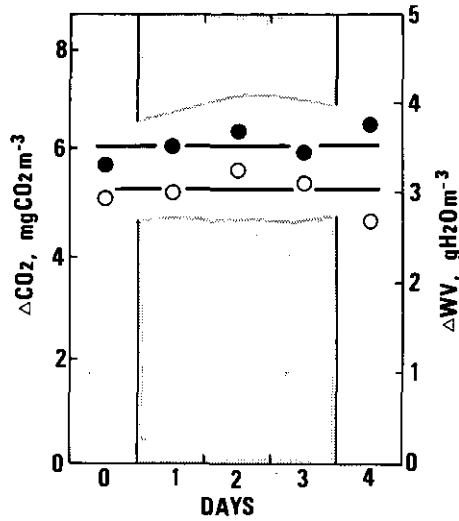


図 7 測定点H3における ΔWV と ΔCO_2 の日変化
 は0.24ppm O_3 を処理した期間を示す。

Fig. 7 Diurnal variations of ΔWV and ΔCO_2 at the measuring point H3
 The hatched area indicates the period of treatment of 0.24ppm O_3 .

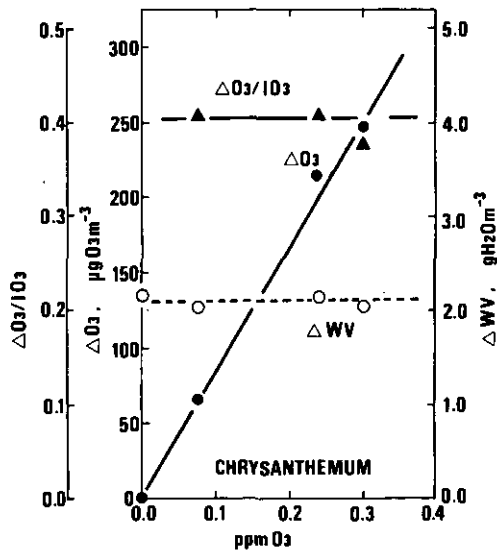


図 8 測定点Iにおけるオゾン濃度 ($I O_3$) とH7における ΔO_3 、 $\Delta O_3 / I O_3$ 、 ΔWV との関係
 Fig. 8 Responses of ΔO_3 , $\Delta O_3 / I O_3$, and ΔWV to ozone concentration ($I O_3$) at the measuring point I

3.5 群落葉面積密度とガス交換速度との関係

植物群落の葉面積密度と群落の風下側測定点 (H7) における $\Delta O_3/IO_3$ と ΔWV の関係を図 9 に示した。キク群落の $\Delta O_3/IO_3$ と ΔWV は葉面積密度が増加するに従って増大する傾向にあった。一方、ソルガム群落の $\Delta O_3/IO_3$ と ΔWV はキク群落と比較して、いずれの葉面積密度においても、非常に小さかった。ソルガム群落の $\Delta O_3/IO_3$ は、葉面積密度が等しいときでも、キク群落のその約1/5にすぎなかった (図 9)。

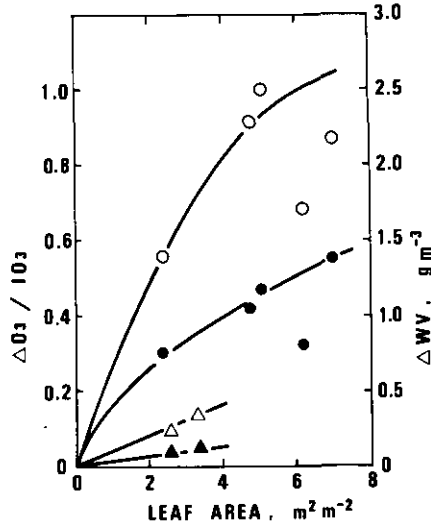


図 9 植物群落の葉面積密度と測定点H7における $\Delta O_3/IO_3$ (○、△) と ΔWV (●、▲) の関係
○、●はキク、△、▲はソルガム。いずれも全光条件で、0.24ppmO₃処理の時。

Fig. 9 $\Delta O_3/IO_3$ (○, △), and ΔWV (●, ▲) at the measuring point H7 as a function of leaf area density

○, ●: *Chrysanthemum*; △, ▲: *Sorghum*. Plants were treated with 0.24ppmO₃ under the full light condition.

3.6 ΔO_3 と ΔWV との関係

これまでの結果から、種々の条件下における ΔO_3 と ΔWV の変動は非常に類似した動向を示した。そこで、種々の条件下でのキクとソルガム群落の $\Delta O_3/IO_3$ と ΔWV の関係を求めた (図 10)。その結果、葉面積密度や植物種が異なる群落、光強度や処理したオゾン濃度が異なる条件下での $\Delta O_3/IO_3$ と ΔWV の関係は、同一の直線に回帰して高い相関関係が得られた ($r^2=0.955$)。その直線関係は：

$$[\Delta O_3/IO_3] = -0.004 + 0.198 [\Delta WV]$$

となった。

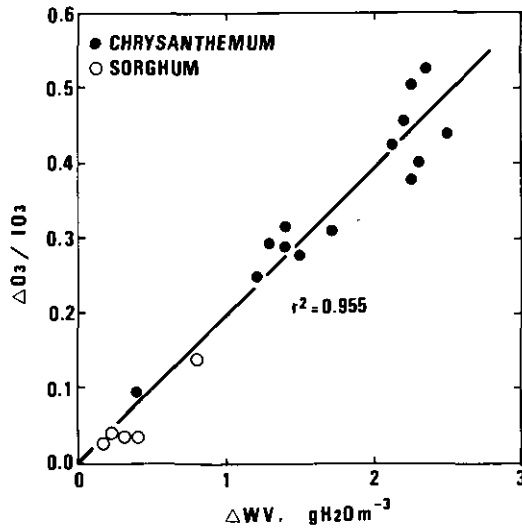


図 10 測定点H7における ΔWV と $\Delta O_3 / I O_3$ の関係

●：キク、○：ソルガム。種々の光、葉面積密度、 O_3 処理のときの全測定値について回帰すると： $[\Delta O_3 / I O_3] = -0.004 + 0.198 [\Delta WV]$ の直線関係が得られた。回帰係数は図の中に示してある。

Fig. 10 Relation between ΔWV and $\Delta O_3 / I O_3$

●: *Chrysanthemum*; ○: *Sorghum*. Individual points are shown for data collected from various experimental conditions (light, leaf area density, and O_3 concentrations). The relation is: $[\Delta O_3 / I O_3] = -0.004 + 0.198 [\Delta WV]$. The regression coefficient is shown in a figure.

4 考 察

一般に、植物個体もしくは植物群落によって生じるオゾン濃度の減衰は、オゾンの葉表面での吸着・崩壊と、気孔を通しての葉内への吸収とが考えられる。一方、蒸散速度は葉面境界層拡散抵抗 (R_a) と気孔拡散抵抗 (R_s) の和に逆比例し、葉面飽差に比例する (Gaastra, 1959)。葉面拡散抵抗は気孔拡散抵抗と比較すると小さく、風速、有効長が一定の場合には一定の値を取ることで、蒸散速度はもっぱら気孔拡散抵抗によって支配されていると言ってよい。本報告で用いた植物群落による水蒸気放出量 (ΔWV) は、それ故、群落を構成している植物個体の気孔開度によって決められているものと思われる。なお、蒸散速度とオゾン収着速度が比例関係にあるということは、単葉 (河内, 1980) や、植物個体 (大政ら, 1979) で、蒸散速度とオゾン収着速度を個別に測定した結果からも明らかにされている。

植物群落地上部をすべて刈り取り、チェンバー内でのオゾン濃度の分布を測定したが、オゾンのチェンバー壁面及び鉢表面での吸着・崩壊はほとんど無視できる程度であった。すなわち、植物群落内外でオゾン濃度に差が生じるのはもっぱら植物群落による吸収・吸着によっていたと言

える。さらに、光強度や処理するオゾン濃度が変わっても、群落を構成する植物種がキクでもソルガムでも、 ΔWV と $\Delta O_3/IO_3$ の関係が一本の直線で表せ、その相関係数が極めて高い ($r^2 = 0.955$) ことから、 ΔO_3 はもっぱら植物群落によるオゾンの吸収・吸着によっていることを示している。さらに、 $\Delta WV = 0$ の時に $\Delta O_3/IO_3 = -0.004$ とほぼゼロになったことから、植物群落によるオゾンの吸着はほとんどなく、 ΔO_3 は気孔を介在しての葉内へのオゾンの吸収によってのみ決められていると言って過言ではないであろう。

ΔO_3 の最高値は、キク群落において処理オゾン濃度の76%にまで達したが、ソルガム群落では極めて低く、同一葉面積密度でキク群落と比較すると、その比は2.40:1であった。この比は単葉の蒸散速度の比2.02:1 ($200\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ における比)と極めて近く(図6)、ソルガム群落のオゾン減衰量が低い理由は、主として気孔拡散抵抗が高いためであると考えられる。

$\Delta O_3/IO_3$ は、葉面積密度が高くなるに従って増加したが、葉面積密度が $4\text{m}^2\text{m}^{-2}$ 以上では増加の割合が小さくなった。(図9)。オゾン吸収面(気孔の数)は葉面積に比例して増加する筈であるが、葉面積密度が高くなると群落下層葉の受光量が低下するので気孔拡散抵抗が高くなり、オゾン吸収速度が低くなるためと思われる。単葉の測定結果からも、光強度が300(群落上部:図3A)から $10\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ (群落内部)に低下すると蒸発散速度が1/2になることから明らかである。しかし、単葉の蒸散速度は光合成速度よりも弱光域で光飽和し、群落で測定した結果においても ΔWV に対する光強度の影響は ΔCO_2 に対するよりも小さかった。すなわち、植物群落によるオゾン吸収は、群落の光合成と比較した場合、光強度が低くてもかなり高いオゾン吸収速度を有することになり、かなり葉面積密度の高い植物群落でも効率よくオゾンを吸収することができることを意味している。

以上の結果は、植物群落は主に気孔を介在してオゾンを取り込むことによって大気中のオゾン濃度を減衰させており、吸着や崩壊による減衰は極めて少ないこと、したがって、その減衰率は葉面積密度や気孔拡散抵抗によって大きく影響されていることが明らかであった。すなわち、群落表面積が高く、かつ、気孔拡散抵抗の低い植物群落ほどオゾン除去効率が高く、そのような植物群落は有効なエアフィルターとなりうることを示唆している。

引用文献

- 相賀一郎・大政謙次・松本 茂(1984): 国立公害研究所ファイトトロン. 国立公害研究所研究報告, 第64号, 291-311.
- 荒木真之・佐々木長義・本木 茂・岡上正夫(1983): オゾン濃度減衰に及ぼす樹林の効果. 林業試験場報告, 321, 51-87.
- Bennett, J.H. and A.C. Hill (1973): Absorption of gaseous pollutants by a standerzided canopy. J. Air Pollut. Cont. Assoc., 23, 203-206.
- Gaastra, P. (1959): Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature

and stomatal diffusion resistances. Meded. Landbouwhoges. Wageningen, **59**, 1-68.

Galbally, I.E., J.A. Garland and M.J.G. Willson (1979) : Sulphur uptake from the atmosphere by forest

Heath, R. L (1980) : Initial events in injury to plants by air pollutants. Ann. Rev. Plant Physiol., **31**, 395-431, and farmland. Nature, **280**, 49-50.

Hill, A.C. (1971) : Vegetation: A sink for atmospheric pollutants. J. Air Pollut. Cont. Assoc., **21**, 341-346.

Jacobson, J.S and A.C. Hill (1970) : Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial atlas. Air pollution Control Association, Pittsburg, 102p.

河内 宏 (1980) : 植物葉によるオゾン吸収と被害発現の関係—特に葉位によるオゾン感受性の差異とオゾン吸収速度の関係について. 大気汚染学会誌, **15**, 389-393.

環境庁 (1983) : 昭和58年度環境白書.

Leuning, R., H.H. Neumann and G.W. Thurtell (1979) : Ozone uptake by corn (*Zea mays* L.) : A general approach. Agric. Meteorol., **20**, 115-136.

Leuning, R., M.H. Unsworth, H.H. Neumann and K.M. King (1979) : Ozone fluxes to tobacco and soil under field conditions. Atmos. Environ., **13**, 1155-1163.

Malhotra, S.S. and R.A. Blauel (1980) : Diagnosis of air pollutant and natural stress symptoms on forest vegetation in western Canada. Northern Forest Research Center, Canadian Forest Service, Edmonton, 84p.

Murphy C.E., Jr., T.R. Sinclair and K.R. Knoerr (1977) : An assessment of use of forests as sink for the removal of atmospheric sulfur dioxide. J. Environ. Qual., **6**, 388-396.

大政讓次 (1979) : 植物群落の汚染ガス収着機能—現象の解析とモデル化—. 国立公害研究所研究報告, 第10号, 367-385.

大政讓次・安保文彰・名取俊樹・戸塚 績 (1979) : 植物による大気汚染物質の収着に関する研究 II NO₂, O₃あるいはNO₂+O₃暴露下における収着について. 農業気象, **35**, 77-83.

戸塚 績 (1980) : 植物の大気汚染環境浄化機能. 産業と環境, **9**, 67-71.

Turner, N.C., P.E., Waggoner and S. Rich (1974) : Removal of ozone from the atmosphere by soil and vegetation. Nature, **250**, 486-489.

宇田川満・早福正孝・伊藤政志・石黒辰吉 (1983) : 東京湾上における大気汚染調査—第1報—: オゾン高濃度汚染現象について. 東京都公害研究所年報, 47-53.

III-4

分光反射特性に基づく植物群落のクロロフィル量
及び葉面積指数の遠隔計測に関する基礎研究

An Evaluation of Chlorophyll Content and Leaf Area Index of
Canopies Based on Spectral Reflection Characteristics

青木正敏¹・戸塚 績²

Masatoshi AOKI¹ and Tsumugu TOTSUKA²

要 旨

植物群落の単位土地面積当たりのクロロフィル量及び葉面積指数を遠隔的に推定するのに都合のよい分光反射特性を明らかにするため、室内に9種類の生きた植物体を使った模型群落を作り、人工光源のもとで簡易な分光反射計を用いて分光反射率の測定を行った。検討した波長は417~800nmの間の7種類の波長である。これらの7種類の波長の分光反射率、それら分光反射率の逆数及び任意の二つの分光反射率の間の比を分光反射特性に選んだ。これら合計56種類の分光反射特性とクロロフィル量及び葉面積指数との関係を相関分析によって調べたところ、 r_{NI}/r_R (r_{NI} 及び r_R はそれぞれ800nm及び660nmにおける分光反射率を示す)がクロロフィル量及び葉面積指数を推定するのに最も適していることが明らかになった。

Abstract

The spectral reflectivities above a forage canopy of plant populations were measured at seven wavelength bands between 417-800 nm under artificial light for determining the most effective spectral reflection characteristics applicable to the remote sensing of total chlorophyll content in a unit land area and leaf area index of a plant community. Model canopies for nine species were established in a laboratory for the measurements. Fifty six kinds of indices, which are seven spectral reflectivities, the reciprocals of them, and the ratios between any two spectral

1. 昭和58-59年度 国立公害研究所客員研究員 (山口大学農学部 〒753 山口市吉田1677)
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Faculty of Agriculture, Yamaguchi University, 1677, Yoshida, Yamaguchi-city, Yamaguchi 753, Japan).
2. 国立公害研究所 生物環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies. Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

reflectivities, were chosen as spectral reflection characteristics. The regression analyses between these spectral reflection characteristics and total chlorophyll content in a unit land area and leaf area index of the model canopies were carried out. The obtained results showed that the most effective spectral reflection characteristics was r_{NI}/r_R , where r_{NI} and r_R are spectral reflectivity at 800nm and 660 nm, respectively.

Key words : Spectral reflectivity—Remote sensing—Leaf area index—Chlorophyll content—Plant population.

1 まえがき

SO₂, NO₂, O₃などの大気汚染物質及び土壌中の重金属等のさまざまな環境条件の変化によって植物群落のクロロフィル量及び葉面積が変化する。これらは植物群落の生育状態及びCO₂固定能力を示す重要な指標であるため、これらが遠隔的に推定できれば大気汚染及び土壌汚染の植物影響の評価等に対して極めて有効と考えられる。本研究は植物群落のクロロフィル総量及び葉面積指数を推定するのに効果的な分光反射特性を明らかにする基礎資料を得るために行ったものである。

2 実験方法

図1に示すように、41cm×29cmの黒塗りのバット4個(床面積4756cm²)に生花用の剣山を用

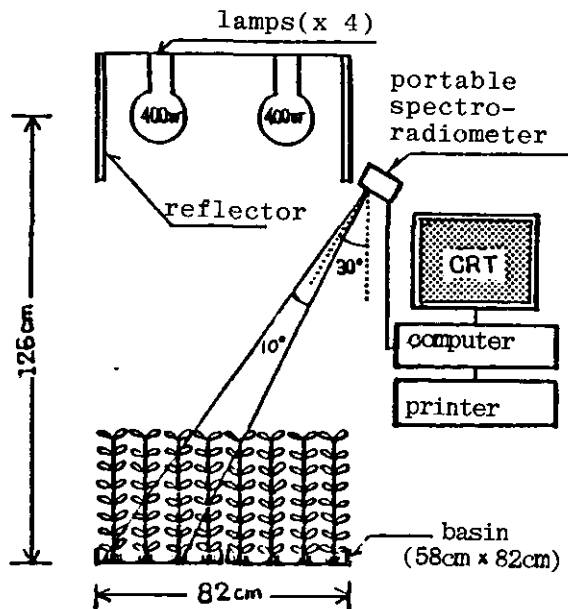


図 1 実験装置の概略

Fig. 1 Schematic diagram of installations of the measurement

いて生きた植物体を一定間隔で固定し、モデル群落を作った。バットには深さ 3 cm まで水道水を注入した。光源には 400W のメタルハライドランプ（東芝(株)、陽光ランプ、DR-400/T）4 個を用いた。シリコンフォトセルを感部とした市販の露出計（セコニック(株)、ビュー・スポットメーター、L-438型）に取り付けられた視感度補正用フィルターを除去し、400~1200nm の範囲の反射光量が測定できるようにした。これに以下の 7 枚の干渉フィルターを取り付け、出力電圧が取り出せる簡易分光反射計に改造した。これを用いてモデル群落の分光反射エネルギーを測定した。測定角度は 30°、視野角は 10°であり、モデル群落の各辺の 4 方向から分光反射エネルギーを測定し、その平均値をもとに以下の解析を行った。群落の分光反射率を求めるために、Mg 粉末を数十回繰り返して燃焼させ、ステンレス板に MgO をくん煙付着させた標準反射板を作った。この標準反射板からの分光反射エネルギーを基準（100%）として群落の分光反射率（%）を求めた。

実験材料として、セイタカアワダチソウ（goldenrod, *Solidago altissima* L.）、キョウチクトウ（oleander, *Nerium indicum* Mill）、カラタネオガタマ（*Midelia fuscata* Blume）、ネズミモチ（Japanese privet, *Ligustrum Japonicum* Thunm.）、クスノキ（camphor tree, *Cinamomum camphora* Sieb.）、ウバメガシ（Japanese holly oak, *Quercus phillyraeoides* A. Gray）、トベラ（tobira, *Pittosporum tobira* Ait.）、ケヤキ（Japanese zelkova, *Zelkova serrata* Makino）及びラッカセイ（peanut plant, *Arachis hypogaea* L.）の 9 種類の植物を用いた。

ラッカセイを除く他の植物については葉のクロロフィル含量がほぼ等しいと考えられる 40~48 個体（30~50cm の長さに切りそろえた）を一つのグループとして供試した。このようなモデル群落の茎又は枝の基部から上部へと約 10cm 間隔で葉を切り取って群落の単位占有面積当たりのクロロフィル量及び葉面積を種々に変化させた。ラッカセイに関しては圃場から茎基部より植物個体を切り取った状態で採取し、葉のクロロフィル含量のほぼ等しいと考えられた 4 個体を実験に供した。

バットには水深が約 3 cm になるように水道水を注入してあり、茎（又は枝）の基部からの水上げは十分で、分光反射率の測定中に葉のしおれが生ずることはほとんどなかった。葉にしおれが認められた個体があったときには、葉のクロロフィル含量がほぼ等しいと考えられた別の個体と交換した。分光反射率の測定終了後、10cm ごとの各葉層別の葉の中から代表的な葉を 20 枚採取し、それら葉のクロロフィル含量を Smith-Benitez 法によって測定した。そのクロロフィル含量の平均値に各葉層別の葉面積を乗じて各葉層別のクロロフィル総量を求めた。単位土地面積当たりの群落のクロロフィル量（これを以後クロロフィル量と略称する）は葉層別のクロロフィル総量を積算して求めた。各葉層別の葉面積は自動面積計で測定した。葉面積指数は葉層別の葉面積を積算することによって求めた。

簡易分光反射計に取り付けた 7 枚の干渉フィルターの透過中心波長は 417nm, 461nm, 550nm, 583nm, 624nm, 660nm 及び 800nm であり、各波長域の分光反射率の記号をそれぞれ rP, rB, rG, rY, rO, rR 及び rNI とした。なお、各干渉フィルターの半値幅は 7~15nm の範囲にあつ

た。

検討した分光反射特性としては7波長域の分光反射率, それらの分光反射率の逆数, 及び任意の二つの分光反射率の間の比(これを以下では比反射率と述べる)を選んだ。分光反射特性は以上のすべての組合せから合計56種となる。この56種類の分光反射特性の中でどれがクロロフィル量あるいは葉面積指数を推定するのに最も都合がよいかを相関分析によって検討した。

3 群落のクロロフィル量の推定

3.1 結果

草型が比較的単純であるセイタカアワダチソウだけについて模型群落の分光反射率とクロロフィル量(Chl)との関係を調べた。図2はセイタカアワダチソウのクロロフィル量と代表的な3種類の波長の分光反射率との関係を示す。分光反射率 r_G , r_Y , r_O 及び r_R の変化幅は小さく, $0 \sim 450 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ のクロロフィル量の変化に対してそれぞれ $3 \sim 9\%$, $3 \sim 7\%$, $2 \sim 7\%$ 及び $2 \sim 5\%$ であり, いずれもクロロフィル量との相関は低く, クロロフィル量の変化に対してほぼ一定値を示した。これに対して, 分光反射率 r_P , r_B , 及び r_{NI} はそれぞれ $5 \sim 21\%$, $5 \sim 31\%$ 及び $6 \sim 24\%$ の変化幅をもち, クロロフィル量の増加に対して指数的に増加する関係を示した。個葉を対象とした Aoki ら(1980)の結果では, $450 \sim 680\text{nm}$ の範囲の葉の分光反射率は葉のクロロフィ

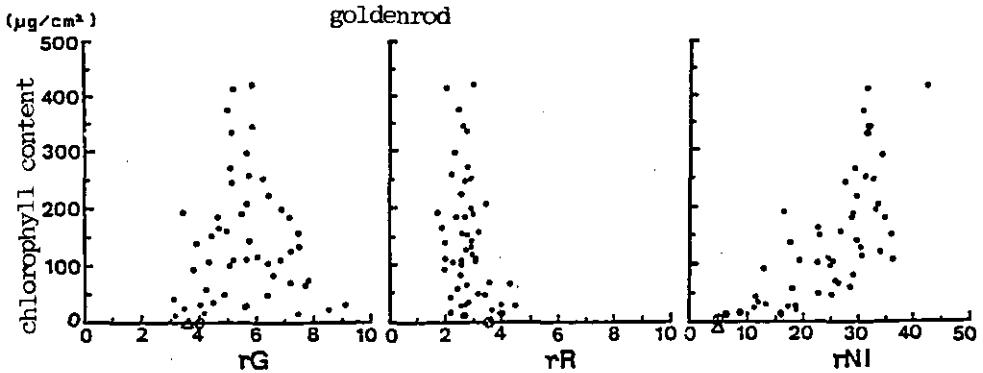


図 2 セイタカアワダチソウモデル群落の分光反射率 (r_G , r_R , r_{NI}) とクロロフィル量との関係

r_G , r_R 及び r_{NI} はそれぞれ 550nm , 660nm 及び 800nm における分光反射率を示す。
 Δ : セイタカアワダチソウの茎+バット+剣山, \circ : バット+剣山

Fig. 2 Relation between spectral reflectivities (r_G , r_R , and r_{NI}) and chlorophyll content of model canopies of goldenrod

r_G , r_R , and r_{NI} are the spectral reflectivity at 550nm , 660nm , and 800nm , respectively.

Δ : stem of goldenrod + basin + frog

\circ : basin + frog

ル含量の増加に対して逆数的に減少する関係を、逆に800nmの分光反射率はわずかに減少する関係を示しているが、本研究の群落を対象とした結果とはかなりの相違点がある。

クロロフィル量の自然対数に対する rP 、 rB 及び rNI の相関係数はそれぞれ0.62、0.65及び0.65であり、ばらつきがかなり大きいのでこれらの比反射率から精度よくクロロフィル量を推定することはできない。七種類のすべての分光反射率の逆数と群落のクロロフィル量との相関を調べたが、相関係数が0.65以上であるものはなかった。42種類の任意の二つの分光反射率の比、すなわち比反射率の中では rNI/rR という比反射率がクロロフィル量と特に高い相関を示し、その関係は指数関数的な関係であった。図3にセイタカアワダチソウに対する両者の関係の一例を示す。

さらに種々検討した結果、クロロフィル量の自然対数を取り、図4に示すような関数形を用いて rNI/rR との関係調べると直線的な関係が得られた。図4の例では相関係数は0.883を示し

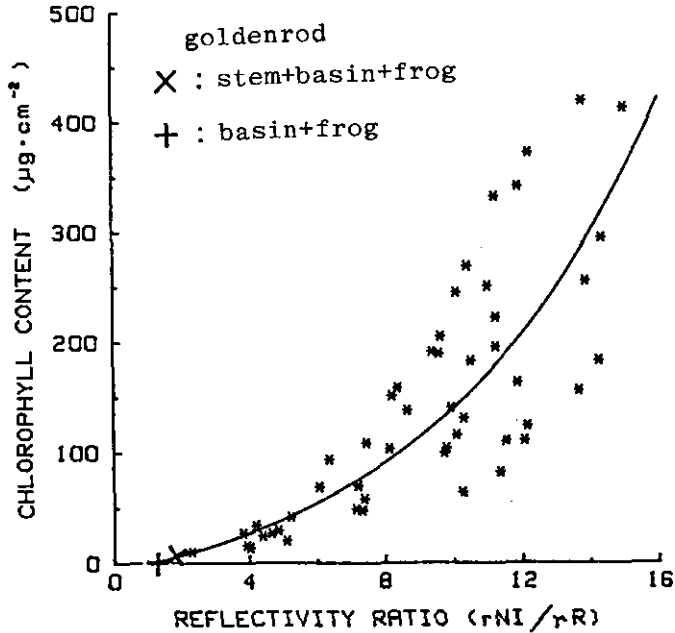


図 3 セイタカアワダチソウモデル群落の比反射率 (rNI/rR) とクロロフィル量との関係

rNI 及び rR はそれぞれ 800nm 及び 660nm における分光反射率を示す。

X: セイタカアワダチソウの茎+バット+剣山

+ : バット+剣山

Fig. 3 Relation between reflectivity ratio (rNI/rR) and chlorophyll content of model canopy of goldendod

rNI and rR are the spectral reflectivity at 800nm and 660nm, respectively.

X: stem of goldenrod + basin+ frog. +: basin + frog

た。なお、図4の中の×印はセイタカアワダチソウの葉をすべて除去し茎だけが剣山につきささっている状態の結果を示し、+印は茎も除去した状態の結果、すなわち床面の反射率比を示すものである。このように葉が全く無い状態の数値もほぼ同一の回帰直線上に並んだ。

ラッカセイのように草型がかなり複雑な植物が含まれる他の8種類の植物群落についても同様に検討したところ、 r_{NI}/r_R という比反射率がクロロフィル量の自然対数値と最もよい直線関係を示し、相関係数(r)は約0.85であった。 r_{NI}/r_R の場合には植物の種類による回帰直線の差が最も小さかった。

表1に示すように、セイタカアワダチソウだけについては、例えば r_{NI}/r_G のように r_{NI}/r_R よりもクロロフィル量との相関がさらに高い分光反射特性があった。しかし、 r_{NI}/r_G では植物の種類による差が大きかったため、8種類の植物に対しては相関が低かった。これに対して r_{NI}/r_R の比反射率では植物の種類による差が小さかったため、8種類の植物の場合に対してもセイタカアワダチソウだけの場合と大差のない相関係数を示した。図5には8種類の植物に対する r_{NI}/r_R

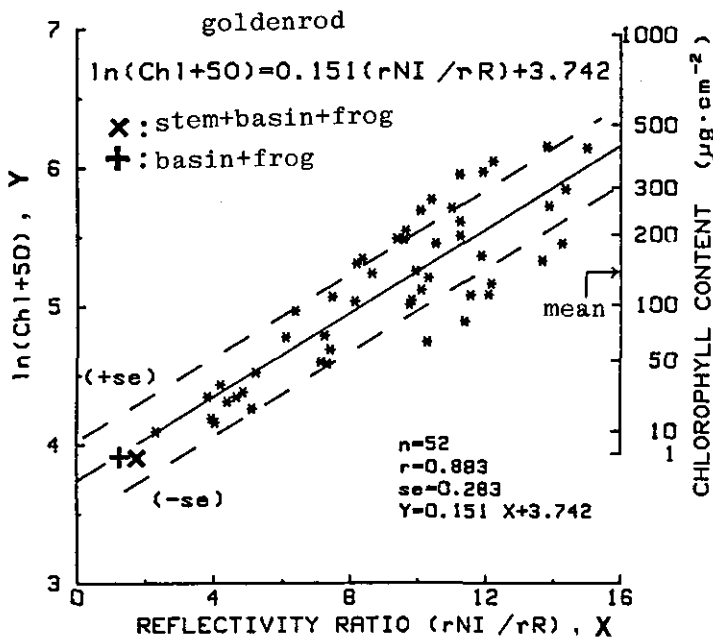


図 4 セイタカアワダチソウモデル群落の比反射率(r_{NI}/r_R)とクロロフィル量(Chl)との関係

n は標本数、 r は r_{NI}/r_R と $\ln(Chl+50)$ との間の相関係数、 se は標準推定誤差を示す。他の記号は図3におけると同じ。

Fig. 4 Relation between reflectivity ratio (r_{NI} / r_R) and chlorophyll content (Chl) for model canopy of goldenrod

n is the sample size. r is the correlation coefficient between r_{NI} / r_R and $\ln(Chl + 50)$, and se is the standard estimate error. Other symbols are referred to Fig. 3.

表 1 モデル群落の分光反射特性とクロロフィル量 ($\ln(\text{Chl}+50)$) との間の相関係数

n は標本数を示す。rNI, rR, rO, rY 及び rG はそれぞれ 800nm, 660nm, 624nm, 583nm 及び 550nm における分光反射率を示す。

Table 1 Correlation coefficient between spectral reflection characteristics and chlorophyll content ($\ln(\text{Chl}+50)$) of model canopies.

n is the sample size. rNI, rR, rO, rY, and rG are the spectral reflectivity at 880nm, 660nm, 624nm, 583nm, and 550nm, respectively.

spectral reflection characteristics	goldenrod	8 species*	goldenrod + 8 species*
	n=52	n=61	n=111
rNI/rR	0.883	0.847	0.855
rNI/rO	0.905	0.808	0.824
rNI/rY	0.903	0.805	0.802
rNI/rG	0.921	0.777	0.738

* Species are shown in Fig. 5.

とクロロフィル量 (Chl) との関係を示すが、回帰直線はセイタカアワダチソウの場合の回帰直線と大差なかった。さらに rNI/rR では床面だけの場合の値もほぼ回帰直線上に位置したが、他の分光反射特性の場合には回帰直線からのはずれが大きかった。図 6 にセイタカアワダチソウと他の 8 種類の植物の資料及び床面の資料 (図中の×印及び+印) のすべてを示した。rNI/rR ではクロロフィル量の自然対数との関係に種類間の差が少なく、最も高い相関が認められた。この比反射率でクロロフィル量を推定するときの推定標準誤差 (se) はクロロフィル量の平均値付近では平均値の 3~4 割に相当した。

3.2 考 察

個葉に関しては rNI/rG の比反射率を用いると時期及び植物の種類に関係なく葉のクロロフィル量を高い精度 ($r=0.95$) で推定が可能であると Aoki ら (1984) が報告しているが、本研究の群落状態の場合には rNI/rG よりも rNI/rR の方がクロロフィル量を推定するのに適当であるという知見を得た。この結果の違いは、前述したように、一枚の葉を対象とした場合 (Aoki ら, 1980) と葉が重なり合った群落状態の場合 (図 2 参照) との分光反射スペクトルの差異に起因するものと考えられる。群落のクロロフィル量の推定に関する研究報告はまだ見当たらない。今回の実験のような散乱光条件下において、rNI/rR という比反射率を用いることにより植物の種類及び葉群の構造に関係なく、さらに床面、すなわち地面の差異による影響も少なく群落のクロロフィル量を推定できることは意義深い。

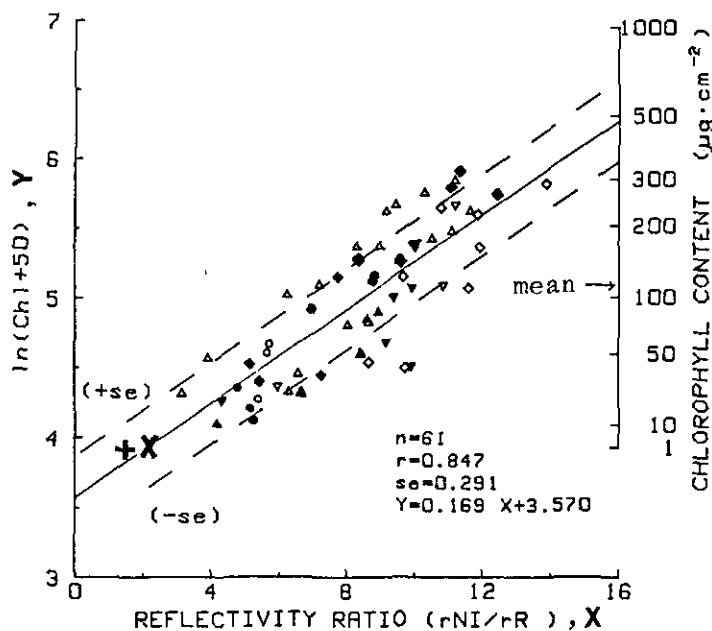


図 5 各種植物のモデル群落の比反射率 (rNI/rR) とクロロフィル量 (Chl) との関係 (8種の植物)

○: ケヤキ ●: ラッカセイ △: キョウチクトウ ▲: カラタネオガタマ
 ▽: ウバメガシ ▼: トベラ ◇: ネズミモチ ◆: クスノキ ×: セイタカアワダ
 チソウの茎+バット+剣山 +: バット+剣山
 他の記号は図3及び図4におけると同じ。

Fig. 5 Relation between reflectivity ratio (rNI / rR) and chlorophyll content (Chl) for model canopies of eight species of plant

○: Japanese zelkova ●: peanut plant △: oleander ▲: *Midelia fuscata* Blume
 ▽: Japanese holly oak ▼: tobira ◇: Japanese privet ◆: camphor tree
 ×: stem of goldenrod + basin + frog +: basin + frog
 Other symbols are referred to Fig. 3 and Fig. 4.

4 葉面積指数の推定

4.1 結果

9種類すべての植物及び床面の測定資料のすべてについて7種類の分光反射率と葉面積指数 (LAI) との関係調べるとクロロフィル量の場合とほとんど同様な関係が認められ、相関係数が0.66以上を示した分光反射率はなかった。同様に分光反射率の逆数の中にも0.66以上の相関を示すものはなかった。比反射率の中には相関係数が0.8以上を示すものは多かったが、そのうち rNI/rR は9種類の植物及び床面の測定資料についてLAIの自然対数と最も高い相関を示し ($r =$

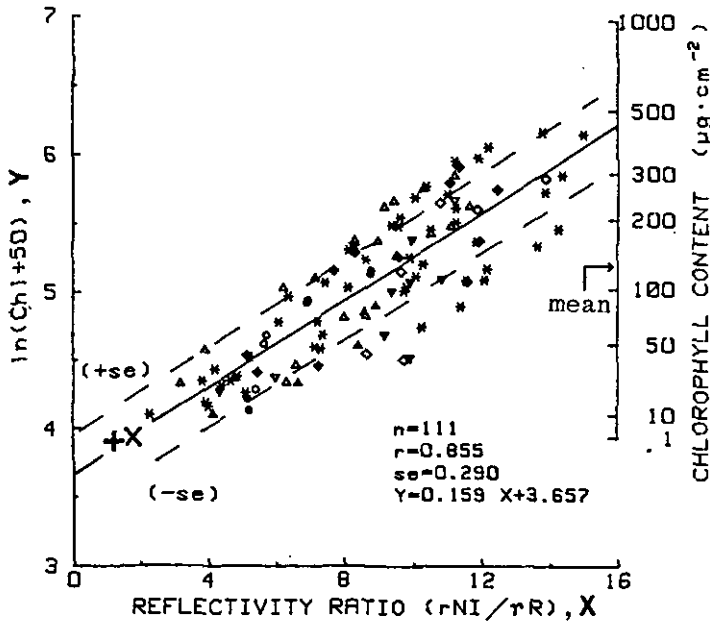


図 6 各種植物のモデル群落の比反射率 (r_{NI}/r_R) とクロロフィル量 (Chl) との関係 (9種の植物)
 *はセイタカアワダチソウ群落を示す。他の記号は図3, 図4におけると同じ。

Fig. 6 Relation between reflectivity ratio (r_{NI} / r_R) and chlorophyll content (Chl) for model canopies of nine species of plant
 * shows the canopy of goldenrod. Other symbols are referred to Fig. 3 and Fig. 4.

0.85), 回帰の直線性もよく, 植物の種類による回帰直線の差は最も小さかった。この比反射率で LAI を推定するときの標準推定誤差 (se) はすべての群落の LAI の平均値付近では LAI の約 1 に相当し, この値はその平均値の 3~4 割に相当した (図 7)。

セイタカアワダチソウだけに関しては, 例えば r_{NI}/r_O , r_{NI}/r_Y , r_{NI}/r_G の比反射率も LAI の自然対数とかなり高い相関 ($r=0.91\sim 0.92$) を示したが, これらの比反射率では植物の種類の違いによる回帰直線の差異が大きかったため, 9種類の植物すべての資料をひとまとめにして相関を求めると相関係数が著しく小さく ($r=0.75$) になった。

4.2 考 察

植物群落の分光反射スペクトルに基づく LAI 推定に関しては Leamer ら (1978, 1980) 及び Aase & Siddoway (1980) の研究報告がある。それらではマルチスペクトルスキャナー (MSS) データの各バンドごとのデータを演算した複雑な指標が用いられている。MSS データが分光反射率でなく分光反射エネルギーなので, 異なった時期あるいは異なった地域の MSS データから

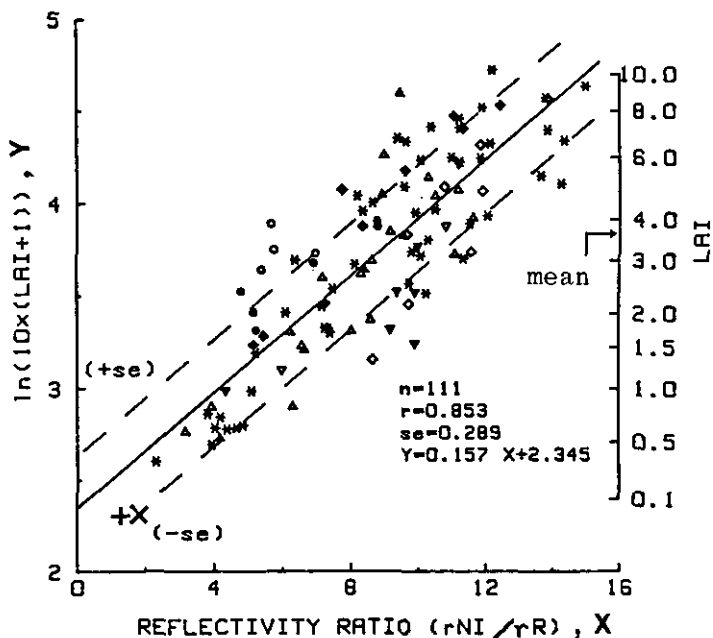


図 7 各種植物のモデル群落の比反射率 (rNI/rR) と葉面積指数 (LAI) との関係
 r は比反射率 (rNI/rR) と $\ln(LAI+1)$ との間の相関係数を示す。他の記号は
 図3, 図4におけると同じ。

Fig. 7 Relation between reflectivity ratio (rNI / rR) and leaf area index (LAI) for
 model canopies of nine species
 r shows the correlation coefficient between rNI / rR and $\ln(LAI + 1)$. Other
 symbols are referred to Fig. 3 and Fig. 4.

得られたそれら指標の値の相互比較はできないという欠点がある。これに対して、 rNI/rR の比反射率は800nm と660nm における分光反射エネルギーの比とそれら二つの波長域の太陽光の分光エネルギーの比とから容易に求められる可能性があるため、異なったMSSデータ間の比較が可能とも考えられる。したがって種々の時期及び地域におけるLAIを比較するのに好都合であろう。

5 あとがき

植物群落の単位土地面積当たりのクロロフィル量及び葉面積指数が比反射率 rNI/rR によって推定できることが明らかになった。しかし、誤差が大きいため満足できるものとは言えない。この原因は葉の鏡面反射による誤差 (稲村ら, 1984) に基づくとも考えられる。簡易分光反射計に偏光フィルターを取り付けるなどして葉の鏡面反射の影響を取り除けばさらに推定精度が高まるのではないかと予想される。

リモートセンシングが実際に適用される野外においては太陽高度，日陰の影響等による分光反射率の変化などの種々の要因が加わる。したがって条件が単純化される本実験の場合と異なり，野外での実際のリモートセンシング技術に適用するためにはさらに多くの検討が必要である。

引用文献

- Aase, J.K. and F.H. Siddoway (1980) : Determining winter wheat stand densities using spectral reflectance measurements. *Agronomy J.*, **72**, 149-152.
- Aoki, M., K. Yabuki and T. Totsuka (1980) : Remote sensing of physiological functions of plants by infrared color aerial photography (I). Relations between leaf reflectivity ratio, bi-band ratio and photosynthetic function of leaves in several woody plants. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud.*, No. 11, 225-237.
- Aoki, M., K. Yabuki and T. Totsuka (1984) : An evaluation of chlorophyll content of leaves based on the spectral reflectivity in several plants. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud.*, No.66, 125-131.
- 稲村 実・豊田弘道・藤村貞夫(1984) : 水質の定量的遠隔計測における表面反射光の影響とその除去. *日本リモートセンシング学会誌*, **14** (1), 39-50.
- Leamer, R.W., J.R. Noriega and C.L. Wiegard (1978) : Seasonal changes in reflectance of two wheat cultivars. *Agronomy J.*, **70**, 113-118.
- Leamer, R.W., J.R. Noriega and A.H. Gerbermann (1980) : Reflectance of wheat cultivars as related to physiological growth stage. *Agronomy J.*, **72**, 1029-1032.

III-5

数種の土壌におけるエチレン分解能力*

Degradation Capacity of Atmospheric Ethylene in Soils Taken
from Various Vegetations

沢田信一¹・戸塚 績²

Shinichi SAWADA¹ and Tsumugu TOTSUKA²

要 旨

水田及び3種の異なった森林から採取した新鮮土壌における好気条件下のエチレン分解速度は、エチレンの大気中濃度の増加に伴って指数関数的に増加した。しかし、風乾土壌による分解速度は、同じ新鮮土壌による値の1/10以下であった。

大気中のエチレン濃度30ppmにおいては、ブナ林、スギ林、ヒバ林そして水田から採取した土壌のエチレン分解速度は、それぞれ150, 130, 60そして5 nl/g d·w·/dであった。

土壌中の有機態の窒素及び炭素含量の多いほど、新鮮土壌のエチレン分解能力は高まった。また、土壌含水量50~100%の新鮮土壌のエチレン分解能力は、含水量150~200%の場合の約2倍の値を示した。

スギ林内の土壌表面にポリプロピレン製容器をかぶせ、土壌表面近くの大気中エチレンの土壌内への拡散について調べた。この容器内のエチレン減少速度は、エチレン濃度の増加につれて、ほぼ指数関数的に高まった。初期のエチレン濃度100ppmでは、土壌表面積当たりの減少速度は $2.2 \times 10^3 \text{ nl/cm}^2/\text{h}$ であった。

Abstract

Degradation rates of ethylene (C_2H_4) under aerobic conditions for fresh soils taken from four different vegetations of *Fagus crenata*, *Cryptomeria japonica* and *Thujaopsis dolabrata* forests and the paddy field showed logarithmic increases with the increase in

* 本研究の一部は日本生態学会誌 (第35巻, 1985年) に発表される。

1. 昭和58-59年度 国立公害研究所客員研究員 (弘前大学理学部 〒036 青森県弘前市文京町3)
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Faculty of Science, Hirosaki University, Hirosaki 036 Japan).
2. 国立公害研究所 生物環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

atmospheric C_2H_4 concentration up to approximately 100 ppm. At the atmospheric concentration of 30 ppm C_2H_4 , the rates in the fresh soils were 150, 130, 60 and 5 n/g d. w./d, respectively. The degradation rates in the air-dried same soils were generally one-tenth lower than those of the fresh soils. A linear correlation was observed between the C_2H_4 degradation rates of the fresh soils and both amounts of organic carbon and organic nitrogen in the soils. The rates determined under the soil moisture range from 50 to 100% (on a dry weight basis) were approximately two times higher than those under the range from 150 to 200 %. The decrease in atmospheric C_2H_4 concentration in the container installed on a soil surface was examined in the *Cryptomeria japonica* plantation. The decrease rates increased almost linearly with increase of atmospheric C_2H_4 concentrations in the container. The rate determined under atmospheric C_2H_4 concentrations of 100 ppm was $2.2 \times 10^3 \text{ n/cm}^2 \text{ soil surface/h}$.

Key words : Degradation capacity—Ethylene—Soils—Vegetations.

1 緒 言

植物によって生産され、体外に放出される炭化水素の一つにエチレンがある。この炭化水素は植物自身の生長及び発育に対して、ホルモンとして作用する物質である。Abeles (1973) は植物に対するエチレン暴露実験の数多くのデータを検討した結果、植物の生理的な過程に対するエチレンの作用のしきい値は、一般に0.01ppm程度の濃度であると述べている。

土壌においても、土壌微生物によってエチレンが生産される。Ilag & Curtis (1968) は、222種の土壌微生物の中で25%がエチレン生産をすると報告している。そして、嫌気条件が土壌微生物によるエチレン生産に適していることが一般に認められている (Primrose, 1979)。また、嫌気条件下で生産されたエチレンが植物の生長に十分影響を及ぼす濃度に達することがある (Smith & Restall, 1971)。

一方、Abelesら (1971) の研究以来、好気条件では土壌微生物がエチレンを除去することが明らかになった。この土壌微生物によるエチレン除去が分解によるものであるという直接の証拠は、エチレン酸化能力を持った微生物の単離によって証明された (Primrose, 1979)。

しかし土壌表面に堆積したリター層は好気条件下では、エチレンを放出する (Lindbergら, 1979)。

化石燃料の不完全燃焼、エチレン工業プラント、そして農業廃棄物あるいは植生の燃焼等によって、大気中のエチレン濃度は、地域的に増加しつつあるという報告がある (Abeles, 1973)。さらに、これらの人為的なエチレン放出が活発な地域の周辺では、その汚染大気中のエチレンが作物及び植生に対して、被害を与える濃度に達することがあるという (Abeles, 1973)。

Abelesら (1971) と Smithら (1973) は、汚染大気中のエチレンの土壌による除去能力に関し注目した数少ない研究者である。

本報告では、種々の異なった植生から採取した土壌による、広範囲のエチレン濃度における、その除去能力についてのべるとともに、地表面に接した大気中の広範囲のエチレン分圧における土壌層へのエチレンの拡散についての調査結果も合わせて報告する。

2 材料及び方法

青森県下に存在する代表的な3種の森林及び水田から土壌を採取した。これらの土壌の性質を表1に示す。リター層を除いた土壌面から10~20cmの深さで土壌を採集した。大きな植物遺体を除いた後に、新鮮土壌を4mmの篩に通した。風乾土壌を用いた実験においては、日蔭で一週間風乾させた土壌を用いた。

土壌のpHは、土壌にその2.5倍(重量当たり)の蒸留水を加えて、ガラス電極で測定した。土壌中の有機態の炭素と窒素含量はCNコーダー(MT-500, 柳本製作所)で定量した。

新鮮土壌の場合には約6.7g d.w., 風乾土壌においては、20g d.w.を容積200mlのエーレンマイヤーフラスコに入れた。風乾土壌の場合には、インキュベーションの前に土壌含水量が乾重の50%になるように蒸留水を加えた。フラスコの口を黒ゴム栓で封じ、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の暗所に置いた。実験に先だって、これらのゴム栓によるエチレンの吸収あるいは拡散について調べた結果、24時間当たりのフラスコに注入したエチレンの減少量は初期濃度の3%以内であった。そこで、土壌を入れてないフラスコを対照区として、ゴム栓によるエチレンの吸収あるいは拡散量を補正した。

3~5日間インキュベーションを行った後に、フラスコ内の空気を0.01ppm(V/V)以下の一定量のエチレンを含んだ空気完全に置換した。そして、純窒素で希釈したエチレンを注射器でゴム栓を通じてフラスコ内に注入した。フラスコ内のエチレン濃度が0.01, 0.1, 1.0, 10そして100ppmになるように、エチレン注入量は決められた。

フラスコ内のエチレン濃度の変化を調べるため、一定時間ごとにフラスコ内の空気を注射器で採取し、その空気中のエチレン濃度をガスクロマトグラフで定量した。このときの空気採取量は、

表 1 青森県における4種類の植生から採集した土壌の性質

Table 1 Soil pH, contents (on a soil dry weight basis) of organic carbon (C), organic nitrogen (N) and water contents of soils collected from different vegetations in Aomori Prefecture

Vegetations	Soil characters			
	pH	C(%)	N(%)	Water content (%)
<i>Thujaopsis dolabrata</i>	4.5	5.2	0.36	64
<i>Fagus crenata</i>	4.7	11.9	0.66	127
<i>Cryptomeria japonica</i>	5.7	8.1	0.56	64
Paddy field	4.8	1.5	0.11	46

フラスコ内のエチレン濃度によって、0.2あるいは2.0mlとした。2 mlの空気を採取した場合には同量の純窒素をただちにフラスコに注入し、フラスコ内の大気圧を調節した。これらの空気あるいはガス類のフラスコへの注入あるいは、フラスコからの採取には Pressure Lock 注射器 (Precision Sampling Corporation, Baton Range, U. S. A.) を用いた。

野外条件下で地表面に接した大気中エチレンの土壌層への拡散量を測定する目的で、図1に示すように、直径 152mm、高さ120mm のポリプロピレン製の容器をスギ林地のリターを取り除いた地表面に設置した。そして、容器の側壁を35mm ほど土壌に埋めた。そして側壁の周囲の土壌を十分に固めた。現地での実験に先だつてふたをしたこの容器のエチレン吸着性について調べた結果、1時間当たりのエチレン吸着量は、容器に注入したエチレン量の0.1%以下であった。容器内のエチレン濃度が100ppm になるように、容器上面に取り付けたゴム栓を過ぎて注射器でエチレンを容器内に注入した。一定時間ごとに注射器で容器内の空気を採取し、これをただちに実験室に持ち帰り、エチレン量を定量した。

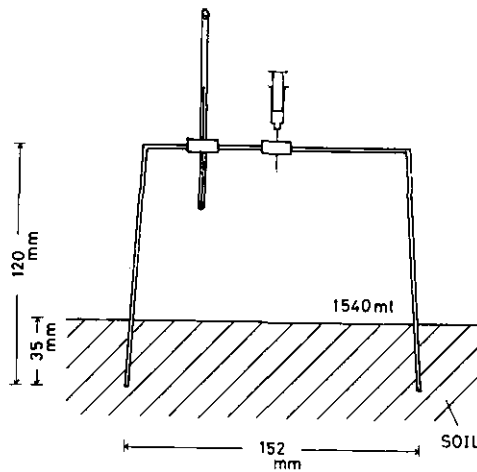


図 1 地表面に接した大気中エチレン濃度の減少速度の測定に用いた装置の模式図

Fig. 1 Experimental design for determination of the decrease in C_2H_4 concentration in atmosphere on the soil surface

3 エチレンの定量

エチレンの定量は、FID 付きの高感度ガスクロマトグラフシステムで行った (Sawada, 1982)。このシステムを用いることによって、大気中に微量に含まれるエチレンを直接定量することが可能であった。

4 結 果

4.1 数種の植生から採取した土壌によるエチレン分解能力

4種の異なった植生から採取した新鮮土壌を入れたエーレンマイヤーフラスコ内の大気中のエチレン濃度の時間的变化を図2に示す。フラスコ内のエチレンの初期濃度が10及び100ppmの場合には、エチレンを注入した直後にその濃度は一時的に減少し、次に上昇し、その後は連続的に減少した。0.01~1 ppmの範囲の初期濃度のエチレンを含むフラスコにおいては、水田土壌を入れたフラスコ以外では、エチレン濃度は連続的に減少を続けた。

新鮮土壌によるエチレン分解速度と対数で示したエチレン濃度との関係を図3に示す。4種類の土壌のエチレン分解速度は、いずれも気相のエチレン濃度の増加に伴って高まった。気相中のエチレン濃度が0.1~100ppmの範囲では、ブナ林とスギ林の間では分解速度はほぼ一致した。ヒバ林の土壌のエチレン分解速度は前者の2種類の土壌で得られた値の約1/2であったが、水田土壌の分解速度は前者の2種類の土壌の場合の1/10以下であった。また図3は、同じ4種類の植生から採取した風乾土壌によるエチレン分解速度とエチレン濃度との関係を示している。3種類の森

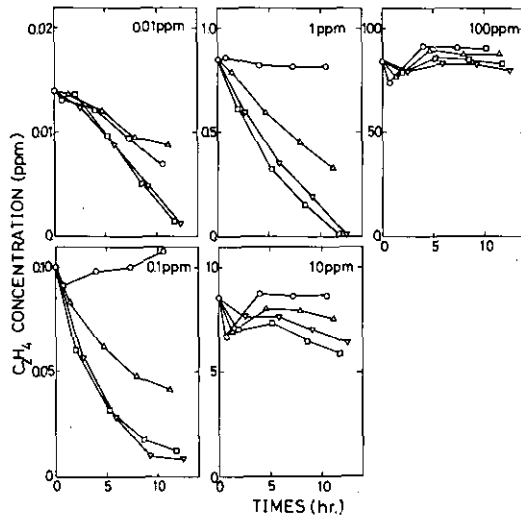


図 2 異なった植生から採取した新鮮土壌の入ったフラスコ内のエチレン濃度の経時的变化と初期エチレン濃度との関係
水田土壌 (—○—), ヒバ林土壌 (—△—), ブナ林土壌 (—□—), スギ林土壌 (—▽—)。

Fig. 2 Time courses of decrease in C_2H_4 concentration in Erlenmyer flasks containing fresh soils from various vegetations which were enclosed by different initial concentrations of C_2H_4

Open circles, fresh soils of the paddy fields; Open triangles, those of the *Thujopsis dolabrata* forest; Open squares, those of *Faquis crenata* forest; Inverted open triangles, those of the *Cryptomeria japonica* plantation.

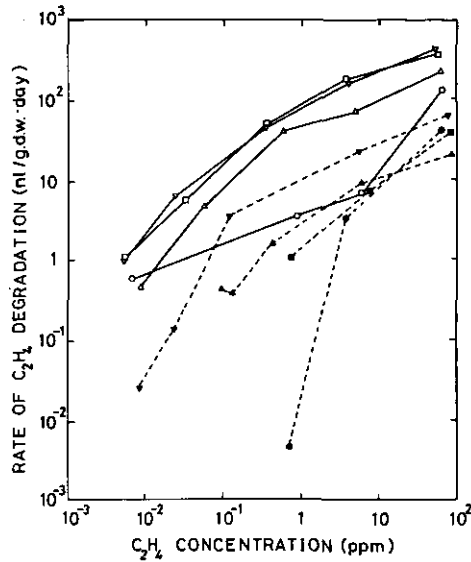


図 3 異なった植生から採取した土壤によるエチレン分解速度とエチレン濃度との関係

エチレン分解速度は、図2の各直線のごう配から求めた。実線及び点線は、それぞれ新鮮土壤及び風乾土壤によるエチレン分解速度を示す。記号は図2に同じ。

Fig. 3 Relationships between C_2H_4 degradation rates in fresh and air-dried soils taken from various vegetations and C_2H_4 concentrations in air. The degradation rates were calculated from each slope of lines shown in Fig. 2. Open symbols in the figure are the same as those in Fig. 2. Closed symbols show the rates of the air-dried soils taken from the same vegetations.

林の風乾土壤の分解速度はそれぞれの新鮮土壤の分解速度の1/10以下であった。

図4に土壤含水量が50~200%になるように加水したスギ林の風乾土壤のエチレン分解速度を示す。土壤含水量が50~100%の範囲での分解速度は含水量が150~200%の範囲での分解速度の約2倍であった。

図5に各植生から採取した土壤の有機態の炭素及び窒素含量とエチレン分解速度との関係を示す。分解速度は両者の含量の増加に伴って増加した。

4.2 地表面に接した大気中のエチレン濃度の減少速度

図6にスギ林の地表面に接した大気中のエチレン濃度の経時的变化を示す。対数目盛りで示したエチレン濃度は、時間とともにほぼ直線的に低下した。実験期間中の容器内及び地表面から10 cmの深さにおける地温は、それぞれ21.3~21.8°C及び20.7~20.8°Cの範囲にあった。また、エチレン濃度の減少速度の対数值と気相中のエチレン濃度の対数值との間にほぼ直線関係が認められた。

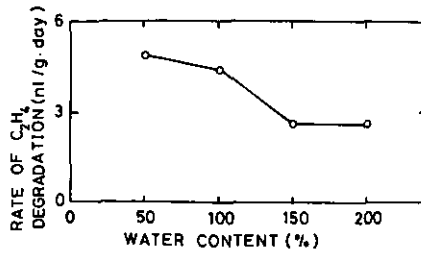


図 4 スギ林から採取した風乾土壌のエチレン分解速度と乾重当たりの土壌含水量との関係
分解速度の測定は 1 ppm のエチレンを含む気相中で行った。

Fig. 4 Relationship between C₂H₄ degradation rates in air-dried soils taken from the *Cryptomeria japonica* plantation and soil water contents on a dry weight basis

The determination of the rates was carried out in the flasks containing 1 ppm C₂H₄.

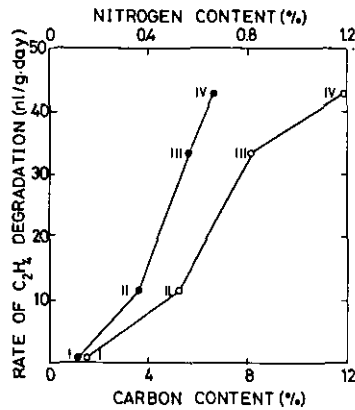


図 5 異なった植生から採取した新鮮土壌のエチレン分解速度と有機態の炭素及び窒素含量との関係
分解速度の測定は 1 ppm のエチレンを含む気相中で行った。エチレン分解速度と有機態の炭素及び窒素含量の関係はそれぞれ (—○—) 及び (—●—) で示す。水田土壌, I; ヒバ林土壌, II; スギ林土壌, III; ブナ林土壌, IV。

Fig. 5 Relationships between C₂H₄ degradation rates and both amounts of organic carbon and organic nitrogen in fresh soils taken from various vegetations

The degradation rates at C₂H₄ concentration of 1 ppm in the air were obtained from the data in fresh soils shown in Fig. 3. Closed circles show the relationships between the rates and nitrogen contents and open circles, those between the rates and carbon contents. I, soil of the paddy field; II, those of the *Thujopsis dolabrata* forest; III, those of the *Cryptomeria japonica* plantation; IV, those of the *Fagus crenata* forest.

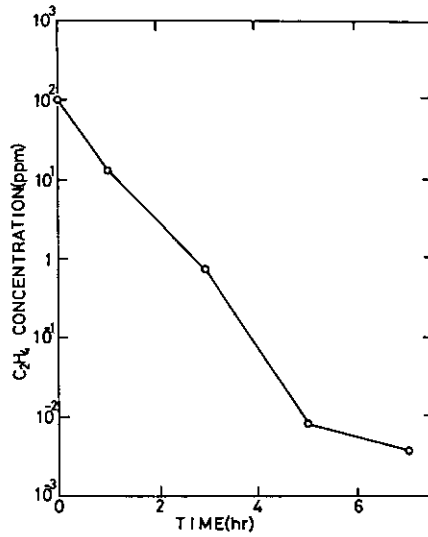


図 6 スギ植林地の地表面に接した大気中のエチレン濃度の経時的変化
エチレン濃度の測定のための装置は図 1 に示す。

Fig. 6 Time course of the change in C₂H₄ concentration in atmosphere in the container installed on the surface of the *Cryptomeria japonica* plantation
The experimental design for determining C₂H₄ concentration is indicated in Fig. 1, and is explained in the text.

5 考 察

気相中のエチレン濃度が0.01~100ppmの範囲で増加するのに従って、4種類の異なる植生から採取したすべての新鮮土壌の好気条件下でのエチレン分解速度は指数関数的に高まった(図3)。これに対して、あらかじめ風乾しておいた同一土壌の分解速度は新鮮土壌の分解速度の1/10以下であった。Cornforth (1975) は土壌の風乾処理はエチレン分解能力を低め、また土壌を風乾状態で長時間保存することは、分解能力を低下させる可能性があるとして報告している。気相中のエチレン濃度30ppmでのブナ林、スギ林、ヒバ林そして水田の新鮮土壌のエチレン分解速度はそれぞれ、150, 130, 60及び5 nl/g d. w./dであった。これらの分解速度の範囲は、既に報告されている新鮮土壌の分解速度の範囲(6~314nl/g/d)とほぼ一致した(Abelesら, 1971; Cornforth, 1975; Yoshida & Suzuki, 1975; de Bont, 1977a, b)。

異なる植生から採取した土壌にもかかわらず、土壌中の有機態の炭素及び窒素含量の増加に伴って、エチレン分解速度は高まった(図5)。この土壌におけるエチレン分解は土壌微生物によるエチレンの酸化であることが知られている(Primrose, 1979)。したがって、これら二つの結果は、土壌有機物含量の増加が土壌微生物によるエチレン分解能力を高めることを示唆している。

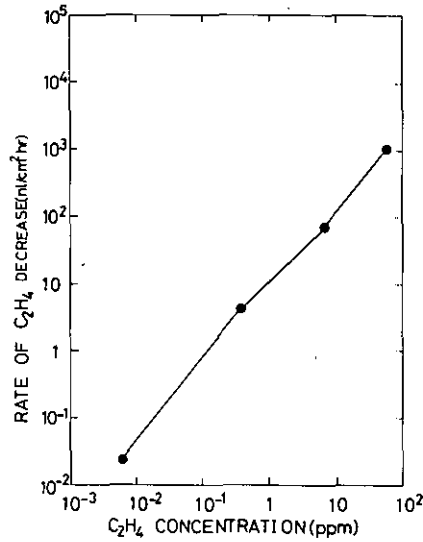


図 7 スギ林地の地表面に接した大気中のエチレン濃度の減少速度とエチレン濃度との関係
エチレン濃度の減少速度は図 6 に示した直線のこう配から求めた。

Fig. 7 Relationship between rates of decrease in C₂H₄ concentration in atmosphere in the container installed on the soil surface of the *Cryptomeria japonica* plantation and atmospheric C₂H₄ concentration
The rate of decrease in C₂H₄ concentration was obtained from the slope of straight line for a given time shown in Fig. 6.

この点に関して Cornforth (1975) は、土壌におけるエチレン分解能力は二酸化炭素生産能力と関係があることから、土壌のエチレン分解能力と土壌微生物活性との間には相関関係があると報告している。

自然界においては、地表面に達した大気中のエチレンは土壌層に拡散して行くと考えられる。そこで、我々はスギ植林地において、地表面から土壌層へのエチレン拡散による、その大気中濃度の減少速度について実験を行った。地表面における、大気中のエチレン濃度の減少速度は大きく、また、大気中のエチレン分圧に依存していた(図 7)。この減少速度は、土壌層における好気的なエチレン分解能力と下層への拡散に依存していたと考えられる。スギ林の土壌含水量は64%であったことから、地表面に近い土壌層は十分に好気条件であったと考えられる。また、土壌に埋められた容器側壁の周囲の土壌は十分に固められていたので、容器に注入したエチレンのこの土壌層を通じての大気への拡散量はわずかであり、むしろ、土壌下層へ拡散し、そこで分解されたと考えられる。

Abeles ら (1971) が測定値をもとに計算したエチレン分解速度は、30ppm のエチレンを含む空

気の入ったプラスチック内におかれた土壌で291~314nl/g d.w./dであった。この結果から彼らは、米国における主要な大気汚染源の一つである自動車排気ガス中のエチレン量の1/2は土壌微生物による分解によって除去される可能性があるとして述べている。これに対して、Smithら(1973)は100ppmのエチレンを含む気相中で加水した風乾土壌によるエチレン分解速度が、Abelesらが得た分解速度に比べて非常に低く、3.1~21.7nl/g/dであったことから、Abelesらの考えた可能性は期待できないであろうと述べている。多くの生態系の地表面には一般にリターが堆積しており、大気中のエチレン分圧が低い場合には、このリターによるエチレンの生産が認められる(Lindbergら, 1979)。Abelesら(1971)及びSmithら(1973)はこの点を考慮していない。

人為的に汚染された大気中のエチレンの土壌微生物による浄化の可能性は重要な研究課題であるが、まだ、その可能性は明らかでない。この可能性を明らかにするためには、地表面における大気中エチレン分圧と、リターの堆積してない土壌へのその拡散過程について研究を進めることが必要と考えられる。

引用文献

- Abeles, F. B., L. E. Craker, L. E. Forrence and G. R. Leather (1971) : Fate of air pollutants: removal of ethylene, sulfur dioxide, and nitrogen dioxide by soil. *Science*, **173**, 914-916.
- Abeles, F. B. (1973) : Ethylene in Plant Biology. Academic Press, New York, 309p.
- Cornforth, I. S. (1975) : The persistence of ethylene in aerobic soils. *Plant and Soil*, **42**, 85-96.
- de Bont, J. A. M. (1976a) : Bacterial degradation of ethylene and the acetylene reduction test. *Can. J. Microbiol.*, **22**, 1060-1062.
- de Bont, J. A. M. (1976b) : Oxidation of ethylene by soil bacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, **42**, 59-71.
- Ilag, L. and R. W. Curtis (1968) : Production of ethylene by fungi. *Science*, **159**, 1357-1358.
- Lindberg, T., U. Granhall and B. Berg (1979) : Ethylene formation in some coniferous forest soils. *Biochem.*, **11**, 637-643.
- Primrose, S. B. (1979) : A review. Ethylene and agriculture: the role of the microbe. *J. Applied Bacteriol.*, **46**, 1-25.
- Sawada, S. (1982) : Direct application of a highly sensitive gas chromatograph system to analysis of ethylene in natural atmosphere. *Jap. J. Ecol.*, **32**, 441-444.
- Smith, K. A. and S. W. F. Restall (1971) : The occurrence of ethylene in anaerobic soil. *J. Soil Sci.*, **22**, 430-443.
- Smith, K. A., J. M. Bremner and M. A. Tabatabai (1973) : Sorption of gaseous atmospheric pollutants by soils. *Soil Sci.*, **116**, 313-319.
- Yoshida, T. and M. Suzuki (1975) : Formation and degradation of ethylene in submerged rice soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **21**, 129-135.

IV 植物の大気汚染質の解毒機能に関する研究
Detoxication of Air Pollutants by Plant Cells

IV-1

亜硫酸イオンの細胞生長に及ぼす作用

Effect of Sulfite Ion on Cell-Expansion Growth

竹内裕一¹・斎藤 真²・近藤矩朗¹・滝本道明³・菅原 淳¹

Yuichi TAKEUCHI¹, Makoto SAITO², Noriaki KONDO¹,
Michiaki TAKIMOTO³ and Kiyoshi SUGAHARA¹

要 旨

暗所で生育させたキュウリ (*Cucumis sativus* L.) の芽生えより切取った子葉の生長に対する亜硫酸イオンの影響について検討した。子葉を光照射下におくと生重量の増加が見られ、この生長は50 μ Mのゼアチンによって約2倍に促進された。培養液中に亜硫酸イオンを加えると、ゼアチンによって促進された子葉の生長は阻害された。培養液中の亜硫酸イオンは酸化され硫酸イオンとなり、亜硫酸イオン濃度は減少し、24-48時間後には培地中に亜硫酸イオンは少量しか見いだせなかった。この生長過程において、子葉の乾燥重量はほぼ一定であることから、ゼアチンと亜硫酸イオンによる生長の変化は、水の吸収量の変化によるものであることが示された。

ゼアチン処理により、子葉の細胞の浸透圧は減少し、亜硫酸イオンは浸透圧を増加させた。一方、細胞壁の非セルロース性多糖類の構成糖であるアラビノース (Ara)、キシロース (Xyl)、ガラクトース (Gal) の相対的割合が生長に伴って減少し、亜硫酸イオンはその減少を阻害することが明らかになった。このことから、亜硫酸イオンは細胞壁の代謝系に作用し、その構造を変化させて、生長阻害を引き起こす可能性が示唆された。

Abstract

The effects of sulfite ions on cell-expansion growth of cotyledons excised from dark-grown seedlings of cucumber (*Cucumis sativus* L.) were examined. With 50 μ M

1. 国立公害研究所 生物環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 昭和57年度 国立公害研究所共同研究員 (東邦大学理学部 〒274 千葉県船橋市三山2-2-1)
Research Collaborator of the National Institute for Environmental Studies. (Faculty of Science, Toho University, Funabashi, Chiba 274, Japan).
3. 昭和57-59年度 国立公害研究所客員研究員 (東邦大学理学部 〒274 千葉県船橋市三山2-2-1)
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Faculty of Science, Toho University, Funabashi, Chiba 274, Japan).

zeatin, the growth rate of cotyledons in white light was about twice that of control. Addition of sulfite ions in the growth medium inhibited the zeatin-induced growth of cotyledons. Sulfite ions in the medium were oxidized and their concentration fell with the advance of culture. After 24-48 h of culture, only trace amount of sulfite ions was present in the medium. Dry weight of cotyledons remained almost constant during 3 days of growth, irrespective of zeatin and sulfite ion treatments, indicating that changes in the growth rate of cotyledons by zeatin and sulfite ions were caused by changes in water absorption rates of cotyledon cells.

Zeatin treatment decreased the osmotic pressure in cell sap of cotyledons, while sulfite increased the pressure. The relative contents of non-cellulosic constituents of cell walls (arabinose, xylose, galactose) fell with the advance of culture, and sulfite ions repressed this decrease, indicating inhibition of expansion growth in cucumber cotyledons by sulfite ions was the result of altering the cell wall structure by changing cell wall metabolism.

Key words : Cell wall—Cucumber cotyledon—Expansion growth—Osmotic potential—Sulfite ion—Zeatin.

1. 緒 言

亜硫酸ガス、オゾンを始めとする各種の大気汚染物質は、植物体の生長に影響を与えることが知られている (Bell & Chlough, 1973 ; Shimizu ら, 1980, 1981)。その原因として、大気汚染物質による光合成阻害、同化産物の転流の阻害などが考えられている。Shimizu ら (1980, 1981) は、亜硫酸ガス、オゾンによる生長阻害は、光合成器官である葉の生長よりも、茎や根などの生長に顕著に見られることを示し、同化産物の茎や根への転流が阻害されていると報告した。一般的に、植物の生長には、細胞分裂による細胞数の増加と、吸水による細胞の容積の増大という二つの要因があるが、特に高等植物では、後者の要因が植物体の大きさに多大な影響を与えると考えられる。しかし、細胞の容積増大に対する大気汚染物質の影響に関する詳細な研究はなされておらず、大気汚染物質の生長阻害機構については、いまだに明らかになっていない点が多い。

植物細胞の細胞生長は、細胞の外側よりも内側の水ポテンシャルが低いことによる吸水のためであると考えられる。細胞の水ポテンシャルは、主に細胞の浸透圧と細胞壁の力学的性質によりコントロールされており、そのため細胞生長に及ぼす各種要因の影響を検討する際には、細胞の浸透圧に及ぼす影響と細胞壁の構造に対する影響とを併せて考える必要がある。暗所で発芽・生育させたキュウりの子葉を明所で培養すると、緑化の進行とともに生重量の増加が見られる。この過程は、植物ホルモンの一種であるサイトカイニン類により促進されることが知られている (Narain & Laloraya, 1974)。そこで、本研究において亜硫酸ガスの細胞生長に及ぼす影響を検討する目的で、キュウリ子葉の実験系を用いて、亜硫酸イオンが子葉の生長、細胞の浸透圧並びに細胞壁の構造にどのような影響を与えるかを検討した。

2 材料及び方法

植物材料：実験には、1976年9月に埼玉原種育成会より購入し、4°Cで保存しておいたキュウリ (*Cucumis sativus* L., 夏崎落3号) の種子を用いた。種子は、一昼夜、流水中で吸水させた後、水で湿らせたペーパータオルの上に播種し、暗黒下、25°Cで5日間発芽、生育させた。芽生えの中で、高さ10cm程度のもを選び、その子葉を切り取り培養に用いた。培養液は、20mM 塩化カリウム、1 mM EDTA を含む20mM のリン酸カリウム緩衝液 (pH6.0) を使用した。切り取った子葉10枚を、9 cm シャーレ中の 3 ml の培養液で湿らせたろ紙の上に移し、パラフィルムで密封後、25°C、白色蛍光灯下 ($100\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$) で培養した。培地にゼアチンを添加する場合は、あらかじめゼアチンのエタノール溶液でろ紙を湿らせ、室温下でエタノールを蒸発させた。ゼアチンを含まない対照区では、エタノールでろ紙に同様の処理を行った。子葉を亜硫酸で処理する場合は、培養1日目の子葉を、亜硫酸ナトリウムを含む培地上に移し、更に2日間前記の条件で培養した。対照区の子葉も同様に、亜硫酸ナトリウムを含まない培地上に移し、更に培養した。培養の各時期において子葉の生重量を測定し、生長の指標とした。また、各時期の子葉を凍結乾燥し、その重量を測定し乾燥重量とした。

培地中の亜硫酸イオン並びに硫酸イオン濃度の測定：培地中の亜硫酸並びに硫酸イオン濃度は、イオンクロマトグラフ (Dionex 社、モデル10) を用いて測定した。陰イオン分離カラム (No30170) を用い、3 mM 炭酸水素ナトリウム、2.4mM 炭酸ナトリウム溶液で溶出した。

浸透圧の測定：浸透圧は、子葉を細かく刻んで、2枚のスライドガラスの間で圧搾し、その圧搾液について浸透圧計 (Wescor 社、モデル5100B) を用いて測定した。

細胞壁画分の調製：Selvendron (1975) の方法に準じた。子葉10枚を、液体窒素で凍結後、乳鉢と乳棒で破碎し、更に500mM のリン酸カリウム緩衝液 (pH7.0) 中、テフロンホモジナイザーで磨砕した。磨砕液を4°C、2000×g で10分間遠心して得られた沈でんを、500mM のリン酸カリウム緩衝液 (pH7.0) で2回、続いて水で2回洗浄した。沈でんをフェノール：酢酸：水混液 (2 : 2 : 1, w/v/v) で処理し、更に水で洗浄し細胞壁画分とした。細胞壁画分に混在しているデンプンは、Takeuchi & Komamine (1980) の方法により、 α -アミラーゼ処理を行い除去した。

細胞壁構成中性糖の組成の分析：細胞壁画分を、72%硫酸で20°C、4時間加水分解を行い、更に水で3%硫酸になるように希釈した後、100°Cで2時間加水分解した。加水分解物を、陰イオン交換樹脂にかけ得られた中性糖画分に内部標準として、ミオーイノシトール (Ino) を加えた。Albersheim ら (1976) の方法により、還元後アセチル化し、得られたアルジトールアセテートをガスクロマトグラフィーにより分析した。分析条件は、Takeuchi & Komamine (1982) に準じた。各々の糖は、その保持時間によって同定し、内部標準 Ino のガスクロマトグラム上の面積に対する各々の糖の面積比から定量を行った。

3 結 果

キュウリの子葉を各種濃度のゼアチンを含む培地上で3日間培養したところ、 $10\mu\text{M}$ 以上のゼアチン濃度において、顕著な生長促進が認められた。対照区に比べて約2倍の生長促進が見られた $50\mu\text{M}$ のゼアチン濃度を以下の実験に用いた。ゼアチン存在下における、各種濃度の亜硫酸ナトリウムの生長に対する影響を検討したところ、 10mM 以上の亜硫酸ナトリウム濃度において顕著な生長阻害が見られた。またこの時、子葉の周辺部にクロロフィルの分解による脱色が観察された。

ゼアチン並びに 20mM の亜硫酸ナトリウム存在下、及び非存在下における生重量、乾燥重量の経時変化を図1に示す。ゼアチンの非存在下では、亜硫酸ナトリウムは子葉の生長に対し顕著な影響を示さなかったが、ゼアチンの存在下では、ゼアチンによって促進された生重量の増加は、亜硫酸ナトリウムにより阻害されることが明らかになった(図1-a)。これに対し、乾燥重量は培養期間を通してほぼ一定であり、ゼアチン並びに亜硫酸ナトリウム処理による顕著な影響は見られなかった(図1-b)。

このゼアチンによって促進される子葉の生長を阻害する亜硫酸ナトリウムの効果が、亜硫酸イオンによるものかナトリウムイオンによるものかを明らかにするために、子葉をゼアチンを含む

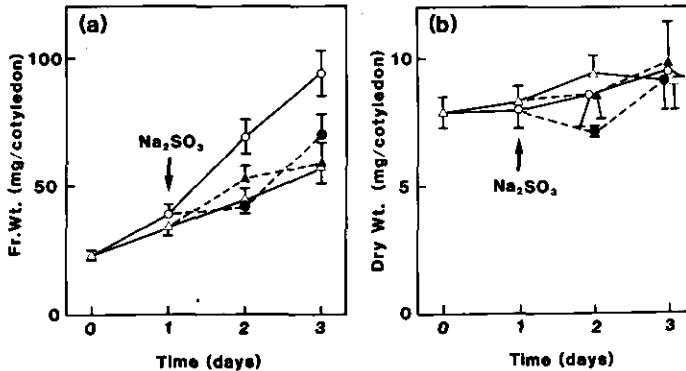


図 1 子葉の培養に伴う生重量 (a) と乾燥重量 (b) の変化
 子葉を $50\mu\text{M}$ のゼアチン存在下 (○) ないしは非存在下 (△) で1日間培養し、 20mM の Na_2SO_3 を含む培地 (●, ▲) 及び含まない培地 (○, △) 上に移し、更に2日間培養した。それぞれの値は、10枚の子葉の平均±標準偏差。

Fig. 1 Changes in fresh weight (a) and dry weight (b) of cotyledons during culture

Cotyledons were incubated with (○) or without (△) $50\mu\text{M}$ zeatin for 1 days, and then transferred onto the medium containing 20mM (●, ▲) or 0mM (○, △) Na_2SO_3 and followed by 2 days incubation. Each value is the average of ten cotyledons and bars indicate standard deviations.

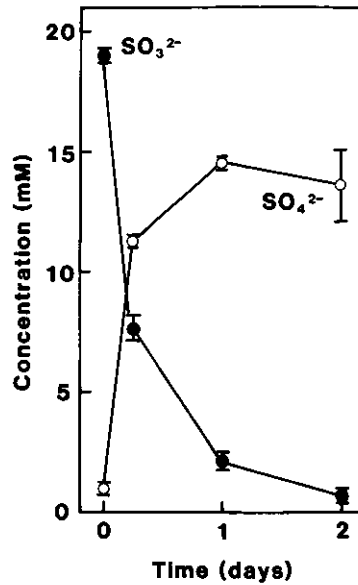


図 2 培地中の亜硫酸イオンと硫酸イオン濃度の変化
それぞれの値は、三つの試料の平均±標準偏差。

Fig. 2 Changes in the concentrations of sulfite and sulfate ions in the incubation medium

Each value is the average of three samples and bars indicate standard deviations.

培地上で1日間培養した後、20mMの亜硫酸ナトリウム・亜硫酸カリウム及び硫酸ナトリウムを含む培地上で更に2日間培養し、生長を比較した。硫酸ナトリウムを与えた系では、子葉の生長阻害は見られなかったが、亜硫酸カリウムでは、亜硫酸ナトリウムと同程度の生長阻害が認められた。

培地中の亜硫酸イオン濃度は、処理後6時間後で、処理直後の約1/3まで、48時間後には1/20以下にまで減少した(図2)。この亜硫酸イオン濃度の減少に伴い、培地中の硫酸イオンの量の増加が見られ、処理後24~48時間では、約15mMになった。

培養3日目、亜硫酸処理2日目の子葉の浸透圧を表1に示す。ゼアチン存在下で培養した子葉の浸透圧の方が、非存在下のものより低い値を示し、また亜硫酸処理をした子葉の浸透圧の方が、処理をしていない子葉の浸透圧より高い値を示した。

図3に、細胞壁構成中性糖の組成に対するゼアチンと亜硫酸イオンの影響を検討した結果を示す。構成糖としては、グルコース(Glc)の量が多く、ほかにアラビノース(Ara)、キシロース(Xyl)、マンノース(Man)、ガラクトース(Gal)が同定された。GlcとManは子葉の生長に伴って相対的割合が増加したが、Ara、Xyl、Galは生長とともにその割合が減少する傾向が見られ

表 1 培養3日目の子葉の浸透圧に対するゼアチンと亜硫酸ナトリウムの影響
子葉を 50 μ M のゼアチン存在下ないしは非存在下で 1 9 日間培養し, 20 mM の Na_2SO_3 を含む培地または含まない培地上に移し更に 2 日間培養した。

Table 1 Effect of zeatin and sulfite ions on the osmotic pressures of the cotyledons cultured for 3 days

Cotyledons were incubated with or without 50 μ M zeatin for 1 days, and then transferred onto the medium containing 20 mM or 0 mM Na_2SO_3 , and followed by 2 days incubation.

	Osmotic pressure (mOs/Kg)	
	-Zeatin	+Zeatin
- Na_2SO_3	400 \pm 17	312 \pm 25
+ Na_2SO_3	478 \pm 28	397 \pm 20

Each value is the average of three samples \pm standard deviation.

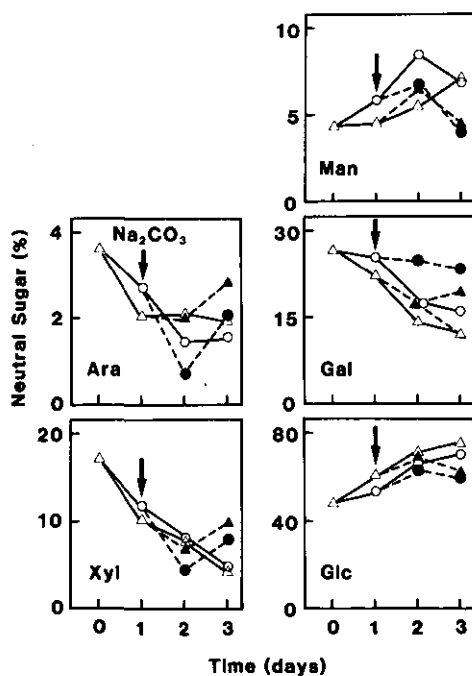


図 3 細胞壁中性糖組成の培養に伴う変化
図中の記号は図 1 と同じ。

Fig. 3 Changes in the neutral sugar compositions of cell walls with the advance of culture
Symbols are the same as in Fig. 1.

た。亜硫酸処理は、生長に伴った Gal の減少を抑制し、培養 3 日目の Ara, Xyl の割合を、対照区に比べ高める傾向が見られた。

4 考 察

キュウリ子葉の生長は、植物ホルモンの一種であるサイトカイニン類によって促進されることが知られている (Narain & Laloraya, 1974)。本実験においても、天然サイトカイニンの一種であるゼアチン $10\mu\text{M}$ 以上で、子葉の生長の促進が観察された。一方、このゼアチンによって促進される生長は、 10mM 以上の亜硫酸ナトリウムの存在によって著しく阻害された。また、この阻害は、ゼアチン非存在下よりも存在下でより顕著であった (図 1-a)。亜硫酸カリウムによっても同様に生長が阻害されたが、硫酸ナトリウムでは生長阻害は見られなかったことから、亜硫酸ナトリウムによる生長阻害は、ナトリウムイオンによるものではなく、亜硫酸イオンによることが明らかになった。亜硫酸ナトリウム処理後 2 日目では、培地中の亜硫酸イオンのほとんどは酸化され硫酸イオンに変わり、亜硫酸イオンの濃度は極めて低くなることから (図 2)、この亜硫酸処理は一過的なものであると考えられる。

ハツカダイコンの子葉の生長は、キュウリ同様、ゼアチンによって促進されるが、その生長過程を通じ、細胞数の顕著な増加は見られないことが知られている (Letham, 1971; Bewli & Witham, 1976)。本実験におけるキュウリの子葉の生長過程において、子葉の乾燥重量は、ゼアチン処理あるいは亜硫酸ナトリウム処理にかかわらず、培養期間を通じてほぼ一定であった (図 1-b)。これらのことから、ゼアチンで促進され、亜硫酸イオンで阻害されるキュウリ子葉の生長は、細胞分裂による細胞数の増加や光合成による物質生産によるものではなく、細胞の吸水によるものであると考えられる。

一般的に植物細胞において、原形質は絶えず吸水し自身の容積を増す傾向にあり、一方細胞壁は原形質の膨圧に対抗して、細胞の大きさを規制する役割を果たしている。このことから、ゼアチン又は亜硫酸イオンによる子葉の生長変化は、上記の原形質の浸透圧、あるいは細胞壁の力学的性質が変化することによって引き起こされると考えられる。

子葉の圧搾液の浸透圧について検討した結果、ゼアチン存在下の子葉の浸透圧のほうが、非存在下のもより低い値を示し、一方、亜硫酸イオン処理をした子葉の浸透圧の方が、無処理のものより高い値を示した (表 1)。このことから、子葉のゼアチンによる生長促進は、浸透圧の増大による吸水力の増加によるものではなく、また亜硫酸イオンによる生長阻害は、浸透圧の減少による吸水力の低下によるものではないことが示唆された。

ハツカダイコンやキュウリの子葉において、その生長に伴い細胞壁の伸長性が増大し、サイトカイニン類がその増大を促進することが示唆されている (Thomas ら, 1981)。そこで、本実験において、キュウリ子葉の細胞壁構成中性糖組成に対するゼアチン及び亜硫酸イオンの影響を検討した。その結果、生長に伴って、非セルロース多糖類の構成糖である Ara, Xyl, Gal の相対的割

合が減少し、亜硫酸イオンはその減少を阻害することが明らかになった(図3)。一般的に、双子葉植物においては、生長に伴って細胞壁中のGalの割合が減少することが知られている(Takeuchi & Komamine, 1978; Nishitani & Masuda, 1979)。このこと、及び本実験の結果から、亜硫酸イオンによるキュウリ子葉の生長阻害機構として、亜硫酸イオンが細胞壁の代謝系に作用し、細胞壁の力学的性質を変化させ、その結果として、生長の阻害を引き起こす可能性が考えられる。

本研究は、Plant Cell Physiol に掲載予定である。

引用文献

- Albersheim, P., D. J. Nevins, P. D. English and A. Karr (1967) : A method for the analysis of sugars in plant cell-wall polysaccharides by gas-liquid chromatography. Carbohydr. Res., 5, 340-345.
- Bell, J. N. B. and W. S. Clough (1973) : Depression of yield in ryegrass exposed to sulphur dioxide. Nature, 241, 47-49.
- Bewli, I. S. and F. H. Witham (1976) : Characterization of the kinetin-induced water uptake by detached radish cotyledons. Bot. Gaz., 137, 58-64.
- Letham, D. S. (1971) : Regulation of cell division in plant tissues. XII A cytokinin bioassay using excised radish cotyledons. Physiol. Plant., 25, 391-396.
- Narain, A. and M. M. Laloraya (1974) : Cucumber cotyledon expansion as a bioassay for cytokinins. Z. Pflanzenphysiol., 71, 313-322.
- Nishitani, K. and Y. Masuda (1979) : Growth and cell wall changes in azuki bean epicotyls. I. Changes in wall polysaccharides during intact growth. Plant Cell Physiol., 20, 63-74.
- Selvendran, R. R. (1975) : Analysis of cell wall material from plant tissue: extraction and purification. Phytochemistry, 14, 1011-1017.
- Shimizu, H., A. Furukawa and T. Totsuka (1980) : Effects of low concentration of SO₂ on the growth of sunflower plants. Environ. Control Biol., 18, 39-47.
- Shimizu, H., S. Motohashi, H. Iwaki, A. Furukawa and T. Totsuka (1981) : Effects of chronic exposure to ozone on the growth of sunflower plants. Environ. Control Biol., 19, 137-147.
- Takeuchi, Y. and A. Komamine (1978) : Changes in the composition of cell wall polysaccharides of suspension-cultured *Vinca rosea* cells during culture. Physiol. Plant., 42, 21-28.
- Takeuchi, Y. and A. Komamine (1980) : Turnover of cell wall polysaccharides of a *Vinca rosea* suspension culture. I. Synthesis and degradation of cell wall components. Physiol. Plant., 48, 271-277.
- Takeuchi, Y. and A. Komamine (1982) : Glucans in the cell walls regenerated from *Vinca rosea* protoplasts. Plant Cell Physiol., 22, 1585-1594.
- Thomas, J., C. W. Ross, C. J. Chastain, N. Koomanoff, J. E. Hendriz and E. von Volkenburgh (1981) : Cytokinin-induced wall extensibility in excised cotyledons of radish and cucumber. Plant Physiol., 68, 107-110.

IV-2

オゾン抵抗性と活性酸素毒性防御物質

Ozone Tolerance and Substances Defensing against Active Oxygen Toxicity

田中 浄¹・須田好子²・近藤矩朗¹・菅原 淳¹

Kiyoshi TANAKA¹, Yoshiko SUDA², Noriaki KONDO¹
and Kiyoshi SUGAHARA¹

要 旨

植物の大気汚染ガス抵抗性と葉内活性酸素毒性防御物質（アスコルビン酸、グルタチオン、スーパーオキシドジスムターゼ、グルタチオン還元酵素など）の関係について調べた。植物体内の活性酸素を増加させることが知られているメチルビオロゲンを低濃度で処理されたホウレンソウにおいてアスコルビン酸が増加した。アスコルビン酸の増加したホウレンソウは0.3ppm オゾンに対して対照よりも強抵抗性を示した。オゾンに対して強抵抗性ホウレンソウの東湖は弱抵抗性のキングオブデンマークに比べて3倍のアスコルビン酸を含んでいた。ヒマワリ、インゲン、トウモロコシはオゾン接触時、ガス吸収量に差がないにもかかわらず、光合成を指標にした抵抗性はヒマワリ、インゲン、トウモロコシの順であり、アスコルビン酸、グルタチオン含量もこの順と一致した。オゾン接触時、葉内グルタチオン、アスコルビン酸は酸化型に移行し、二酸化硫黄接触時は比較的後期になって両者とも酸化型に移行した。二酸化窒素接触時はアスコルビン酸の変動は見られず、総グルタチオン量の増加が認められた。以上の結果はオゾン抵抗性に葉内還元物質（アスコルビン酸、グルタチオン）が関連している可能性を示している。

Abstract

The relationship between plant tolerance to air pollutants and substances defensing against active oxygen toxicity was investigated. In spinach leaves which were treated with methyl viologen, ascorbate increased, while superoxide dismutase and glutathione contents did not change so much. The spinach treated with methyl viologen showed higher tolerance to ozone fumigation than the non-treated one did. When the effect of

1. 国立公害研究所 生物環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 昭和59年度 国立公害研究所共同研究員（東邦大学理学部 〒274 千葉県船橋市三山2-2-1）
Research Collaborator of the National Institute for Environmental Studies. (Faculty of Science, Toho University, Funabashi, Chiba 274, Japan).

ozone on the photosynthesis of three plant species (sunflower, kidney bean and maize) was investigated, the order of ozone tolerance was sunflower, kidney bean and maize, respectively. Then, good correlation for ascorbate and glutathione contents and ozone tolerance was found in these plant species. In two cultivars of spinach, the Toko had three times more ascorbate than the King of Denmark and the former showed higher tolerance than the latter did. These results suggest that ascorbate may relate with the physiological detoxification of ozone.

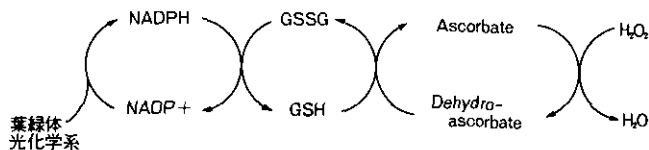
Key words : Active oxygen—Ascorbate—Glutathione—Methyl viologen—Ozone—Spinach—Superoxide dismutase.

1 緒 言

植物の大気汚染ガスに対する抵抗性の強弱は (i) 汚染ガス侵入口である気孔閉鎖の鋭敏さ, (ii) 侵入したガスの生理化学的な解毒能力, (iii) ガス毒性に対する植物体自身が備える膜構造などの組織化学的な強度に依存すると思われる。ここでは (ii) の生理化学的な解毒における活性酸素毒性防御物質 (アスコルビン酸, グルタチオン, スーパーオキシドジスムターゼ等) の役割について述べる。

これまでの私達の研究室及び諸内外の研究者によって, 二酸化硫黄, オゾンの植物影響において, スーパーオキシドラジカル, 過酸化水素, 一重項酸素などの活性酸素毒性が無視できないということが明らかになってきた (Lee & Bennett, 1982; Peiser & Yang, 1979; Sakaki ら, 1983; Shimazaki ら, 1980; Tanaka & Sugahara, 1980; Tanaka ら, 1982b)。二酸化窒素においてもその主な攻撃部位が葉緑体膜であり, 葉緑体膜の破壊は活性酸素の大量生成につながるということから少なくとも植物と二酸化窒素の接触後期には活性酸素毒性が発現する可能性がある。

さて, 植物体内に生じた活性酸素はスーパーオキシドジスムターゼやカタラーゼなどの酵素やアスコルビン酸, グルタチオンなどの葉緑体において高濃度で存在する酸化還元物質で解毒されている (Asada ら, 1977)。アスコルビン酸, グルタチオンは一度, 酸化されてもグルタチオン還元酵素, デヒドロアスコルビン酸還元酵素, アスコルビン酸パーオキシターゼの酵素系で次のような反応を介して速やかに還元される。しかし, この系に強い酸化作用をもった大気汚染ガスが葉内に侵入したときにこれら酸化還元物質がどのような挙動を示し, 植物の大気汚染ガスの解毒作用とどのように関連しているのかは興味ある問題である。ここでは植物の大気汚染ガス (主にオゾン) 抵抗性と活性酸素毒性防御物質の関係について予備的に検討した結果について述べる。



2 材料及び方法

実験材料としてホーレンソウ、ヒマワリ、インゲン、トウモロコシを使用した。植物材料の育成は当研究所の藤沼ら（1979）が記した方法に従った。ホウレンソウと大気汚染ガスの接触は温度20°C、湿度70%で、その他の植物は温度25°C、湿度70%でガス接触を行った。メチルビオロゲンの植物影響は水耕及び鉢植えホウレンソウを用いて調べた。水耕ホウレンソウは播取後14日目の幼植物を0.1%Hyponex と0.5%Hoagland No. 2 溶液、示した濃度のメチルビオロゲン中で育てた。水耕液は週に一度取りかえた。鉢植えホウレンソウの場合、播取後14日目の幼植物に週に1回示した濃度のメチルビオロゲンを一鉢につき100ml 供与した。何れの方法においても播取後40日目のホウレンソウを実験材料とした。

活性酸素防御系酵素は前に報告した方法（Tanakaら、1982a）で測定した。葉中アスコルビン酸、グルタチオンの測定は1.5×4 cmの葉片（2～3枚）を5%メタリン酸で磨砕、抽出することにより行った。アスコルビン酸の定量はOkamura（1980）の比色法及びFoyerら（1983）のアスコルビン酸酸化酵素による酵素法で、グルタチオンの定量はグルタチオン還元酵素を用いるLaw（1983）らの方法に従った。葉中アスコルビン酸及びグルタチオンは5%トリクロル酢酸や5%過塩素酸で抽出した場合は非常に不安定であった。メタリン酸中では安定であるが、中性付近のpHでは自動酸化が起こるので中性pH付近の操作はできるだけ短時間に終わらせた。

3 結果及び考察

メチルビオロゲンは元来、除草剤として使用されてきたが、この試薬は生体内に取り込まれると容易に還元され、 $MV^- + O_2 \rightarrow MV + O_2^-$ という反応でスーパーオキシドラジカル（ O_2^- ）を生成する。このラジカルが植物の枯死をもたらす。メチルビオロゲンを低濃度で大腸菌（Hassan & Fridovich, 1977）、タバコのカルス（Furusawa, 1984）に投与したときはこれらのラジカルの毒性の防御のために解毒酵素であるスーパーオキシドジスムターゼが誘導合成される。ここでは高等植物への低濃度メチルビオロゲンの影響を水耕及び土耕ホウレンソウについて調べた（表1）。水耕ホウレンソウ、鉢植えホウレンソウ何れの場合も、アスコルビン酸含量の増大が顕著であった。スーパーオキシドジスムターゼについては水耕法の場合にのみ増加が認められた。水耕法で20nMメチルビオロゲン処理ホウレンソウは枯死した。鉢植えホウレンソウの20 μ Mメチルビオロゲン処理ホウレンソウは対照に比べて0.3ppmオゾンと接触させたとき、可視害発現の程度が低いことを確認した。この結果はメチルビオロゲンによる活性酸素防御系物質の変動（アスコルビン酸の上昇）がオゾン抵抗性を高めたことを示している。

次にホウレンソウにおいてオゾンに対して強抵抗性をもつ東湖と弱抵抗性のキングオブデンマークの2品種の活性酸素防御物質を定量したところ、アスコルビン酸含量に大きな差が認められた（表2）。この2品種のオゾン抵抗性を調べたとき、気孔開度はほとんど差がなかったのでこの抵抗力の差は生理的解毒能力によると思われ、アスコルビン酸である可能性が高い。

表 1 ホウレンソウ葉における活性酸素毒性防御物質含量へのメチルビオロゲンの影響

Table 1 Effects of methyl viologen on the contents of substances defending against active oxygen toxicity in spinach leaves

	Methyl viologen	Superoxide dismutase (unit cm ⁻²)	Total glutathione (μg cm ⁻²)	Ascorbate (nmol cm ⁻²)
Water culture	0 nM	1.3	1.8	124.2
	2	2.7	2.1	271.6
	20	—	—	—
Soil-culture	0 nM	1.5	2.2	132
	2	1.7	2.1	143
	20	1.6	1.8	268

表 2 ホウレンソウ 2 品種における活性酸素毒性防御物質含量

Table 2 Contents of substances defending against active oxygen toxicity in two spinach cultivars

Spinach cultivar	Ascorbate (nmol cm ⁻²)	Total glutathione (μg cm ⁻²)	Superoxide dismutase (unit cm ⁻²)
Toko	358.2	40.1	0.71
King of Denmark	121.3	45.5	1.10

古川らはヒマワリ、インゲン、トウモロコシのオゾン抵抗性を光合成速度を指標にして調べたとき、上記順序になることを示した(未発表データ)。このとき、オゾン吸収量に差がなかったため彼らはこの抵抗性の差は生理的解毒能力の差によると予想した。これらの植物について活性酸素防御物質を定量したとき、アスコルビン酸の量が上記の順序になることが明らかになった(表3)。グルタチオンに関してもこの順序になることから、葉緑体の還元物質の量がオゾン抵抗性と密接な関係があるのかも知れない。

さて、先にも述べたように、大気汚染ガスに接触した植物体内には活性酸素が多量に生成し、植物体内の還元物質、例えばアスコルビン酸、グルタチオンが変動する可能性をもつ。また二酸化窒素に接触した植物はアミノ酸を増加させるのでシステイン、グリシン、グルタミン酸から成るトリペプチドであるグルタチオンが増加する可能性もある。表4はオゾン、二酸化窒素、二酸化硫黄接触時のホウレンソウにおけるアスコルビン酸、グルタチオンの変動を示している。オゾン接触でアスコルビン酸は顕著に減少し、二酸化硫黄ではかなり後期になって減少する。二酸化窒素ではアスコルビン酸はほとんど変化せず、総グルタチオン量が顕著に増大した。グルタチオンもオゾンにより酸化型に移行し、二酸化硫黄ではかなり後期に酸化が進む。オゾン接触時、アスコルビン酸、グルタチオンの酸化が進むことは逆に言えば、この二つの葉緑体還元物質はオゾ

表 3 3 種植物における活性酸素毒性防御物質含量とオゾン抵抗性
Table 3 Contents of substances defending against active oxygen toxicity in three plant species

Plant species	Ascorbate (nmol cm ⁻²)	Total glutathione (μg cm ⁻²)	Superoxide dismutase (unit cm ⁻²)	Order of ozone tolerance
Sunflower <i>Helianthus annuus</i> L. cv. Russian Mammoth	196	1.81	1.9	1
Kidney bean <i>Phaseolus vulgaris</i> L. cv. Shin-edogawa	163	1.52	2.3	2
Corn <i>Zea mays</i> L. cv. Yellow dent-corn	65.1	1.40	0.8	3

表 4 ホウレンソウ葉中のアスコルビン酸とグルタチオンへの大気汚染物質の影響

Table 4 Effects of air pollutathione on ascorbate and glutathione in spinach leaves

Fumigation time (h)	0.3ppm O ₃			4.0ppm NO ₂			1.0ppm SO ₂			control		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
0	126	1.41	0.32	119	1.39	0.23	149	1.43	0.34	134	1.39	0.41
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	140	1.41	0.51
4	67	1.41	0.40	133	1.52	0.39	143	1.48	0.42	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	105	1.32	0.29
8	30	1.13	0.62	153	1.91	0.53	129	1.40	0.39	—	—	—
20	42	0.92	0.71	146	3.23	0.71	78	1.28	0.55	146	1.40	0.32

a : Ascorbate nmol cm⁻²
b : GSH μg cm⁻²
c : GSSG μg cm⁻²

ンの解毒に関連していることを予測させる。また、この実験から、大気汚染ガスに接触した植物体内のアスコルビン酸、グルタチオンを定量することにより、汚染ガスの種類を同定できるかも知れない。

以上のようにオゾン抵抗性と葉緑体還元物質（特にアスコルビン酸）の関係を調べてきたが、このような実験をする場合、抵抗性の指標を何にするかが重要な問題のように思われる。今までのように可視被害でみると植物体自身の構造が堅固であると植物の生存に必須な生理過程の損傷に気が付かない。大気汚染ガスの種類に応じて鋭敏に反応する植物の生理現象（例えば光合成）と解毒物質の関係をガス吸収量を念頭に入れつつ、解析すれば植物の大気汚染ガスの解毒機構をより深く知ることができるかも知れない。

引用文献

- Asada, K., M. Takahashi, K. Tanaka and Y. Nakano (1977) : Formation of active oxygen and its fate in chloroplasts. In : Biochemical and Medical Aspects of Active Oxygen., Hayaishi, O. and K. Asada (eds.), Japan Scientific Press, Tokyo, 171-181.
- Foyer, C., J. Rowell and D. Walker (1983) : Measurement of the ascorbate content of spinach leaf protoplasts and chloroplasts during illumination. *Planta*, **157**, 239-244.
- 藤沼康実・町田 孝・相賀一郎 (1979) : 国立公害研究所植物実験施設における実験材料植物の育成方法について. 国立公害研究所特別研究報告, 第10号, 387-395.
- Furusawa, I., K. Tanaka, P. Thanutong, A. Mizuguchi, M. Yazaki and K. Asada (1984) : Paraquat resistant tobacco calluses with enhanced superoxide dismutase activity. *Plant Cell Physiol.*, **25**, 1247-1254.
- Hassan, H. M. and I. Fridovich (1977) : Regulation of the synthesis of superoxide dismutase in *Escherichia coli* Induction by methyl viologen. *J. Biol. Chem.*, **252**, 7667-7672.
- Law, M. E., S. A. Charles and B. Halliwell (1983) : Glutathione and ascorbic acid in spinach (*Spinacia oleracea*) chloroplasts. The effect of hydrogen peroxide and of paraquat. *Biochem. J.* **210**, 899-903.
- Lee, E. H. and J. H. Bennett (1982) : Superoxide dismutase A possible protective enzyme against ozone injury in snap beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Physiol.*, **69**, 1444-1449.
- Okamura, M. (1980) : An improved method for determination of L-ascorbic acid and L-dehydroascorbic acid in blood plasma. *Clin. Chim. Acta*, **103**, 259-268.
- Peiser, G. D. and S. F. Yang (1979) : Ethylene and ethane production from sulfur dioxide-injured plants. *Plant Physiol.*, **61**, 142-145.
- Sakaki, T., N. Kondo and K. Sugahara (1983) : Breakdown of photosynthetic pigments and lipids in spinach leaves with ozone fumigation : Role of active oxygens. *Physiol. Plant.*, **59**, 28-34.
- Shimazaki, K., T. Sakaki, N. Kondo and K. Sugahara (1980) : Active oxygen participation in chlorophyll destruction and lipid peroxidation in SO₂-fumigated leaves of spinach. *Plant Cell Physiol.* **21**, 1193-1204.
- Tanaka, K. and K. Sugahara (1980) : Role of superoxide dismutase in defense against SO₂ toxicity and an increase in superoxide dismutase activity with SO₂ fumigation. *Plant Cell Physiol.*, **21**, 601-611.
- Tanaka, K., N. Kondo and K. Sugahara (1982a) : Accumulation of hydrogen peroxide in chloroplasts of SO₂-fumigated spinach leaves. *Plant Cell Physiol.*, **23**, 999-1007.
- Tanaka, K., T. Otsubo and N. Kondo (1982b) : Participation of hydrogen peroxide in the inactivation of Calvin-Cycle SH enzymes in SO₂-fumigated spinach leaves. *Plant Cell Physiol.*, **23**, 1009-1018.

V 植生の大気汚染質抵抗性に関する研究

Resistance of Plants to Air Pollutants

V-1

植物葉のアブサイシン酸及びオーキシン含有量に及ぼす SO₂ 暴露の影響

Effect of SO₂ Fumigation on the Contents of Abscisic Acid
and Indole-3-acetic Acid in Plant Leaves

近藤矩朗¹・鈴木 隆²

Noriaki KONDO¹ and Takashi SUZUKI²

要 旨

SO₂ガスのアブサイシン酸 (ABA) 及びインドール-3-酢酸 (IAA) 含有量に及ぼす影響をそれぞれガスクロマトグラフ、高速液体クロマトグラフを用いて調べた。2 ppm SO₂ の3時間暴露によりトマト葉の ABA 含有量は変化しなかったが、ダイコン葉の ABA 含有量は約半分に減少した。この間に、ダイコン葉細胞液の浸透圧は増大した。次に、高速液体クロマトグラフを用いた IAA の簡便な精製・定量法を検討し、予備実験を行った。ソラマメ葉、ダイコン葉の IAA 含有量は 2 ppm SO₂ 暴露により増加する傾向を示した。これらの結果に基づき、SO₂ による ABA 含有量低下の機作について考察した。

Abstract

Effect of SO₂ fumigation on the contents of abscisic acid (ABA) and indole-3-acetic acid (IAA) in plant leaves was examined using a gas chromatograph and a high performance liquid chromatography system, respectively. The 3-h fumigation with 2 ppm SO₂ reduced the ABA content in radish leaves to about the half of the content in unfumigated leaves but had no effect on the content in tomato leaves. The method of purification and measurement of IAA was examined using a high performance liquid chromatography system. A preliminary experiment showed the reduction of IAA content in plant leaves due to SO₂ fumigation. The mechanism of ABA decrease in leaves caused by SO₂ fumigation was discussed.

Key words : Abscisic acid—High performance liquid chromatography—Indole-3-acetic acid—Osmotic pressure—SO₂—Stomata.

1. 国立公害研究所 生物環境部 〒305茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 昭和58-59年度 国立公害研究所客員研究員 (山形大学教育学部 〒990 山形市小白川町)
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Faculty of Education, Yamagata University, Kojirakawa-cho, Yamagata 990, Japan).

1 緒 言

植物を SO₂ ガスにさらすと、植物ホルモンの一種であるアブサイシン酸 (ABA) を多量に含む植物は直ちに気孔を閉ざし、ABA 含有量の少ない植物は時間の経過とともに徐々に気孔を閉ざすことを明らかにした (Kondo & Sugahara, 1978; Kondo ら, 1980)。SO₂ ガス暴露により植物葉が脱水症状を示すのはよく知られており、また水ストレスにより ABA が多量に合成されることもよく知られた事実である (Walton, 1980)。したがって、SO₂ 暴露により ABA 含有量が増加し、その結果、気孔が閉じる可能性がある。一方、植物ホルモンであるオーキシシン、インドール-3-酢酸 (IAA)、が CO₂ や ABA の気孔閉鎖作用を軽減する方向で気孔の開度を支配していることも明らかになってきており (Pemadasa, 1982; Snaith & Mansfield, 1982)、SO₂ 暴露の影響と IAA 含有量との関係についても検討する必要がある。本研究では SO₂ ガスの ABA 含有量に対する影響について調べるとともに、植物葉中の IAA 含有量を高速液体クロマトグラフを用いて簡便に測定する方法を検討し、IAA 含有量について予備的実験を行った。

2 材料及び方法

植物材料: トマト (*Lycopersicon esculentum* Mill cv. Fukuju No. 2)、ダイコン (*Raphanus sativus* L. cv. Minowase)、ソラマメ (*Vicia faba* L. cv. Otafuku) は既報 (Kondo & Sugahara, 1978; Kondo ら, 1980) と同様に温湿度を制御した自然光ガラス室にて栽培した。

SO₂ 暴露: 植物をガス暴露の 2 時間前にガス暴露用グロースチャンパーに移し、2 時間光照射下に置いたのち、SO₂ ガスをチャンパー内に導入し、2.0ppm になるように制御した。対照として同様のチャンパーに植物体を移し、同じ時間ガス暴露せずに光照射下に置いた。

ABA の抽出と定量: 植物葉中の ABA 含有量は既報 (Kondo ら, 1980) と同様に 20mg/l のブチルヒドロキシトルエンを含む氷冷のメタノール:酢酸エチル:酢酸 (50:50:1) にて抽出し、ECD 付きガスクロマトグラフにより定量を行った。表 1 の値は 2 あるいは 3 試料の平均値であ

表 1 SO₂ 暴露の植物葉の ABA 含有量と細胞液浸透圧に及ぼす影響

Table 1 Effects of SO₂ fumigation on ABA content and osmotic pressure of cell sap in plant leaves

	ABA content (ng / g fr. wt.)		Osmotic pressure (mOs / Kg)	
	-SO ₂	+SO ₂ ^a	-SO ₂	+SO ₂ ^a
Tomato	279 ± 26	335 ± 113	328 ± 16	332 ± 11
Radish	47 ± 14	23 ± 3	188 ± 3	272 ± 23

^aSO₂ fumigation at 2.0 ppm for 3 - 3.5 h.

Each Value is mean ± SD of three samples.

^aSO₂ 暴露は 2 ppm で 3-3.5 時間行った。

各値は 3 試料の平均値 ± SD である

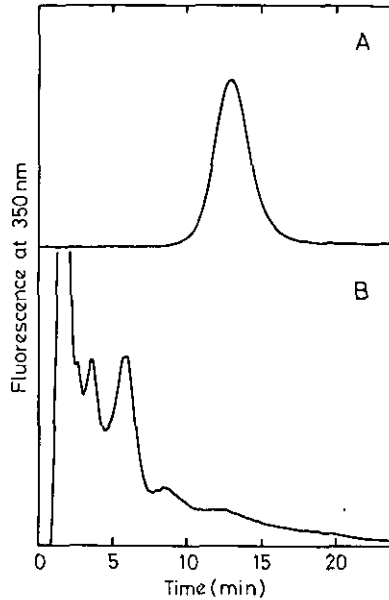


図 1 前処理カラム (Shodex M - 614) による IAA の溶出プロファイル
A, 10^{-5} M IAA, $10\mu\text{l}$; B, ソラマメ抽出物, $40\mu\text{l}$ (生重量 0.4g 相当)

Fig. 1 Elution profile of IAA by precolumn (Shodex M - 614).
A, 10^{-5} M IAA, $10\mu\text{l}$; B. broad bean extract, $40\mu\text{l}$ (equivalent to 0.4 g fr. wt.).

る。

浸透圧の測定: トマト, ダイコンの葉を採取し, 圧力を加えて細胞液をしぼり出した。圧搾液の浸透圧は浸透圧計 (Wescor 社, モデル5100B) により測定した。

IAA の抽出と定量: 植物体から約 5 g 葉を切り取り, 氷冷の80%メタノール中にて磨砕した。磨砕液は遠心後, 上清をろ紙にてろ過し40°Cで減圧濃縮した後, 塩酸で pH2.5にし, ジクロルメタンに酸性物質を移した。ジクロルメタン層を濃縮乾固し, 少量の蒸留水に溶かしてミルポアフィルター (Millex-HA) でろ過し IAA 試料とした。

IAA 試料の部分精製及び定量は高速液体クロマトグラフ用ポンプ2台 (島津, LC-5 A) とけい光検出器 (島津, RF-530) を用いて行った。部分精製は Shodex M-614 (4.0mm ϕ ×5 cm) を前処理カラムとし, 0.1M K-リン酸緩衝液 pH2.0を用いて流速0.8ml/minで行った。図1に 10^{-5} M IAA $10\mu\text{l}$ とソラマメ抽出液の生重量0.4g相当の前処理カラムの溶出プロファイルを示す。IAA は約12分にピークを示した。8分目で移動相の流路を切り換え, 前処理カラムと分析カラム (Zorbax ODS, 4.6mm ϕ ×15cm) の流路をつなぎ, 0.1M K-リン酸緩衝液 pH7.0, 0.7ml/min により前処理カラムより IAA を追い出し分析カラムに導入した。1分後に再び流路を切り換えて

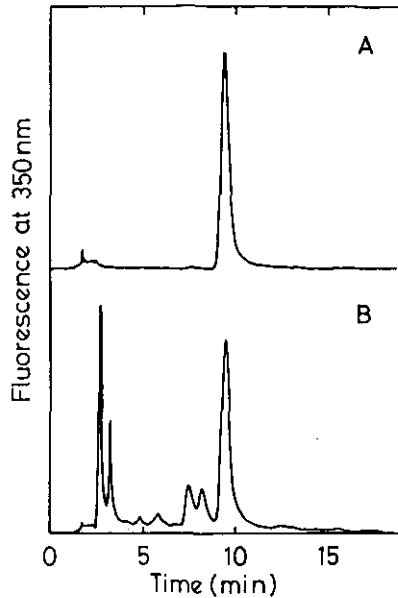


図 2 分析カラム (Zorbax ODS) による IAA の溶出プロファイル
A, 10^{-6} M IAA, $10\mu\text{l}$; B, ソラマメ抽出物, $40\mu\text{l}$ (生重量 0.4g 相当)

Fig. 2 Elution profile of IAA by analytical column (Zorbax ODS).
A, 10^{-6} M IAA, $10\mu\text{l}$; B, broad bean extract, $40\mu\text{l}$ (equivalent to 0.4 g fr. wt.).

分析カラムと前処理カラムの流路を離し、pH7.0の上記移動相により分離・分析を行った。この間、前処理カラムはアセトニトリル：0.1M K-リン酸緩衝液 pH2.0 (1 : 1) を用いて洗い、更に pH2.0の上記緩衝液を流して次の分析に備えた。図2に 10^{-6} M IAA $10\mu\text{l}$ とソラマメ抽出液の生重量0.4g相当の場合の分析例を示す。IAAは保持時間約9分に単一ピークとして現れた。IAAのピークの高さと量の関係を図3に示す。IAA量とピークの高さは直線関係にあり、IAA量はピークの高さにより求めることとした。

3 結果及び考察

2 ppm SO_2 に3~3.5時間暴露したトマトとダイコンの葉のABA含有量と細胞圧搾液の浸透圧を表1に示した。トマトではABA含有量も浸透圧も変化せず、ダイコンではABA含有量は約半分に減少し、浸透圧は増大した。トマトは SO_2 暴露により気孔が閉じやすいため、 SO_2 吸収量が少なく影響が出なかったと推測される。ダイコンは SO_2 に感受性が高く可視害を生じるが、この暴露時間内には乾燥化は認められず、葉の生重量と乾燥重量の比も変化しなかった(データは示していない)。一般に植物が乾燥し水ポテンシャルが低下するとABA含有量が増加することが知

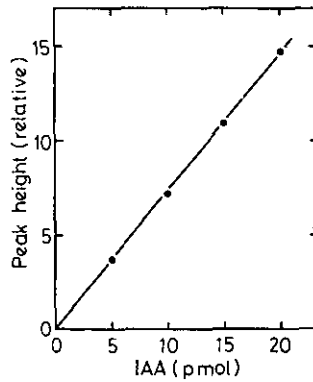


図 3 IAA 量とピーク高との関係

Fig. 3 Relationship between amount of IAA and peak height

られている。水ポテンシャルは浸透ポテンシャルと圧ポテンシャルから成っており、ABA 含有量の増加は圧ポテンシャルの低下によって引き起こされること (Pierce & Raschke, 1980), 圧ポテンシャルが上昇すると ABA 含有量が低下すること (Pierce & Raschke, 1981) が示されている。Takeuchi ら (1984) は亜硫酸イオンがキュウリの子葉のゼアチンによる生長を阻害することを見いだし、浸透圧の上昇、細胞壁代謝の変化を示した (本報告書の竹内らの報文を参照されたい)。したがって、本研究における ABA 含有量の低下は細胞壁の力学的性質の変化による圧ポテンシャルの上昇によるものと考えることができる。

一方、SO₂暴露によりエタン及びエチレンの生成が促進されることが知られている (Peiser & Yang, 1979; Bressan ら, 1979)。また、エチレンは ABA 含有量を低下させることも報告されている (Zeevaart, 1983)。ダイコン葉の ABA 含有量の低下はエチレンの増加によるのかも知れない。SO₂によるエタン生成は脂質の過酸化反応の結果であると思われるが、エチレン生成促進の機作は明らかでない。IAA がエチレン生成を促進することはよく知られている。そこで、SO₂暴露の IAA 含有量に及ぼす影響を調べ、結果を表 2 に示した。2 ppm SO₂に 3~4 時間暴露したと

表 2 SO₂暴露の植物葉の IAA 含有量に及ぼす影響

Table 2 Effect of SO₂ fumigation on IAA content in plant leaves

	IAA (ng / g fr.wt.) ^a	
	-SO ₂	+SO ₂
Broad bean	2.86±0.44	4.34±1.84
Radish	2.47±0.76	3.60±1.38

^aMean ± SD.

SO₂ fumigation was performed at 2.0 ppm for 3-4 h.

^a平均値±SD.

SO₂暴露は 2 ppm で 3-4 時間行われた。

ころ、ソラマメ、ダイコンいずれも有意差は認められなかったが、わずかに IAA 含有量が増加していた。この点に関しては更に詳細な検討が必要である。

SO₂暴露開始後徐々に気孔が閉じる現象については、植物ホルモンの ABA, IAA 含有量の変化では説明ができなかった。おそらく亜硫酸イオンの気孔閉鎖作用 (Zelitch & Walker, 1964; Kondo ら, 1984) によるものと思われるが、更に検討が必要であろう。

引用文献

- Bressan, R. A., L. LeCurieux, L. G. Wilson and P. Fillner (1979) : Emission of ethylene and ethane by leaf tissue exposed to injurious concentrations of sulfur dioxide or bisulfite ion. *Plant Physiol.*, **63**, 924-930.
- Kondo, N., I. Maruta and K. Sugahara (1980) : Effects of sulfite and pH on abscisic acid-dependent transpiration and on stomatal opening. *Plant Cell Physiol.*, **21**, 817-828.
- Kondo, N., I. Maruta and K. Sugahara (1984) : Effect of sulfite on stomatal aperture size in *Vicia* epidermal peels. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud., Jpn.*, No. 65, 9-19.
- Kondo, N. and K. Sugahara (1978) : Changes in transpiration rate of SO₂-resistant and -sensitive plants with SO₂ fumigation and the participation of abscisic acid. *Plant Cell Physiol.*, **19**, 365-373.
- Peiser, G. D. and S. F. Yang (1979) : Ethylene and ethane production from sulfur dioxide-injured plants. *Plant Physiol.*, **63**, 142-145.
- Pemadasa, M. A. (1982) : Differential abaxial and adaxial stomatal responses to indole-3-acetic acid in *Commelina communis* L. *New Phytol.*, **90**, 209-219.
- Pierce, M. and K. Raschke (1980) : Correlation between loss of turgor and accumulation of abscisic acid in detached leaves. *Planta*, **148**, 174-182.
- Pierce, M. and K. Raschke (1981) : Synthesis and metabolism of abscisic acid in detached leaves of *Phaseolus vulgaris* L. after loss and recovery of turgor. *Planta*, **153**, 156-165.
- Snaith, P. J. and T. A. Mansfield (1982) : Control of the CO₂ responses of stomata by indol-3-ylacetic acid and abscisic acid. *J. Exp. Bot.*, **33**, 360-365.
- Takeuchi, Y., M. Saito, N. Kondo and K. Sugahara (1985) : Inhibition of zeatin-induced growth of cucumber cotyledons by sulfite ions. *Plant Cell Physiol.*, **26**, 123-130.
- Walton, D. C. (1980) : Biochemistry and physiology of abscisic acid. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **31**, 453-489.
- Zeevaart, J. A. D. (1983) : Metabolism of abscisic acid and its regulation in *Xanthium* leaves during and after water stress. *Plant Physiol.*, **71**, 477-481.
- Zelitch, I. and D. A. Walker (1964) : The role of glycollic acid metabolism in opening of leaf stomata. *Plant Physiol.*, **39**, 856-862.

V-2

オゾンガス暴露による高等植物葉の脂質変動

Lipid Changes in Higher Plant Leaves with Ozone Fumigation

榎 剛¹・近藤矩朗¹

Takeshi SAKAKI¹ and Noriaki KONDO¹

要 旨

ホウレンソウを0.5ppmのオゾン(O₃)に連続的に暴露すると、葉の全脂肪酸及びクロロフィル含量は8時間まで変化せず、以後激しく分解しはじめた。全脂肪酸の組成比も8時間までは一定であり、その後多価不飽和脂肪酸であるヘキサデカトリエン酸と α -リノレン酸が低下しはじめた。過酸化脂質の指標となるマロンジアルデヒドは8時間以降急激に増加した。

葉内の極性脂質含量はO₃暴露後8時間までに大きく変動し、特に葉緑体膜脂質のモノガラクトシル ジアシルグリセロール(MGDG)、ジガラクトシル ジアシルグリセロール(DGDG)、及び主に葉緑体以外の膜に存在するフォスファチジルコリン含量が著しく低下した。一方フォスファチジン酸は8時間までに4倍以上に増加した。このような膜脂質の変化は、葉細胞の膜系の著しい崩壊を示唆している。O₃に感受性の異なる数種の植物をO₃に暴露したところ、MGDG、DGDG含量の低下が著しいホウレンソウ、インゲン、ダイコンでは、暴露後の光照射によってクロロフィルが大きく分解するが、MGDG、DGDG含量低下が小さいレタス、タバコ、ソラマメでは、光照射によるクロロフィル分解は極めて小さかった。

Abstract

When spinach plants were continuously fumigated with 0.5 ppm ozone (O₃), content of total fatty acid and chlorophyll in leaves remained unchanged during the initial 8 h of fumigation, thereafter started to decrease rapidly. The composition of total fatty acids was constant during 8 h, then hexadecatrienoic acid and α -linolenic acid, major polyunsaturated fatty acids, began to decrease. Malondialdehyde, an indicator of lipid peroxidation, started to increase strongly after 8 h of O₃ fumigation.

Content of several polar lipids in leaves was changed within the initial 8 h of O₃ fumigation. Monogalactosyl diacylglycerol (MGDG) and digalactosyl diacylglycerol

1. 国立公害研究所 生物環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi,
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.

(DGDG), specific to chloroplast membranes, and phosphatidylcholine, mainly present in extrachloroplast membranes, decreased markedly. Content of phosphatidic acid increased more than 4 times during 8 h of fumigation. The change in the content of foliar polar lipids by O_3 fumigation suggests the disintegration of intracellular membranes in leaf cells. When spinach, kidney bean and radish plants were fumigated with O_3 , MGDG and DGDG contents in the leaves were remarkably reduced by 6-h O_3 fumigation and chlorophyll in the leaves was destroyed severely by a subsequent 20-h illumination of the plants after O_3 fumigation. On the other hand, when lettuce, tobacco and broad bean plants were fumigated with O_3 , MGDG and DGDG contents were little reduced during 6 h and also chlorophyll was almost retained by post-illumination.

Key words : Chlorophyll—Malondialdehyde—Ozone—Polar lipid change—*Spinacia oleracea*.

1 緒 言

大気汚染ガスの主成分の一つであるオゾン (O_3) は、植物に様々な傷害を与えることが知られている。植物を O_3 に暴露すると最終的にクロロシス、ネクロシスなどの可視傷害が葉面に現れ枯死するが、それ以前に葉の細胞内で様々な生理的変動や微細構造の変化が生じているものと考えられる。電子顕微鏡観察の結果から、 O_3 暴露初期に葉肉細胞内のいくつかのオルガネラ膜が構造変化を起こすことが報告されている (遠山, 1975; Miyake ら, 1984)。私たちは、 O_3 暴露によってクロロフィル分解などの可視傷害が発現する前に、葉緑体のチラコイド膜が著しい損傷を受けていることを示した (Sakaki ら, 1983)。

O_3 は酸化力が強く膜脂質分子内の不飽和脂肪酸を破壊することが知られている。更に、 O_3 は緑葉の脂質代謝系を阻害することが報告されている (Mudd ら, 1971a, b)。これらの事実は、 O_3 暴露によって葉内の膜系の脂質が何らかの影響を受ける可能性を示している。

本研究では、 O_3 暴露が葉内の不飽和脂肪酸にどのような影響を与えるか、また葉肉細胞の膜系の主要な脂質成分であるグリセロ脂質にどのような影響を与えるかを明らかにすることを目的に実験を行った。

2 材料及び方法

植物材料：ホウレンソウ (*Spinacia oleracea* L. cv. New Asia), ソラマメ (*Vicia faba* L. cv. Otafuku) 及びレタス (*Lactuca sativa* L. var. Romaine) は温度昼 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、夜 $15 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度 $70 \pm 5\%$ の自然光ガラス室でそれぞれ5—7、6及び6週間育生したものをを用いた。タバコ (*Nicotiana tabacum* L. cv. Xanthi nc), トウモロコシ (*Zea mays* L. cv. Yellow Dentcorn), ダイコン (*Raphanus sativus* L. cv. Minowase) 及びインゲン (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Shin-edogawa) は温度 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度 $70 \pm 5\%$ に制御した自然光ガラス室でそれぞれ6、3、4及び3週間育生したものをを用いた。

ガス暴露：自然光ガラス室で栽培した植物を午前中に人工光ガス暴露グロースキャビネット (230×190×170cm) に移し、温度 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ (タバコ、トウモロコシ、ダイコン及びインゲンの場合は $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$)、湿度 $75 \pm 3\%$ 、光強度約 $500 \mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ の下で1.5—2時間前処理してから O_3 を導入した。キャビネット内のガス濃度は $0.5 \pm 0.02 \text{ppm}$ (v/v) に保たれた。その他の暴露条件は既示した (Sakakiら, 1983)。 O_3 によるクロロフィル分解の実験 (表4) では、 O_3 暴露後 O_3 の供給を停止し、グロースキャビネット内で更に20時間光照射を続けた。

脂質の抽出及び定量：ガス暴露後葉面からリーフディスク (直径15mm) を打ち抜き、10分間スチーム処理をして脂質分解酵素を失活させた。総脂質の抽出は Bligh & Dyer (1959) の方法に従い、リーフディスクをクロロホルム/メタノール/水 (1 : 2 : 0.8, v/v) 中で磨砕し、ろ過した後クロロホルム/水 (1 : 1, v/v) を加え2層に分配させた。下層のクロロホルム層を分取し、濃縮してから少量のクロロホルム (抗酸化剤として0.05% (w/v) のブチルヒドロキソトルエンを含む) に溶かし総脂質画分を得た。極性脂質は $10 \times 10 \text{cm}^2$ のシリカゲルプレート (5626, Merck) を用い、2次元薄層クロマトグラフィー (TLC) によって分離した。展開溶媒として1次元目はクロロホルム/メタノール/水 (65 : 25 : 4, v/v)、2次元目はクロロホルム/メタノール/アンモニア水/イソプロピルアミン (65 : 35 : 5 : 0.5, v/v) を用いた (Allen & Good, 1971)。あらかじめ標準脂質を展開することにより、あるいは各脂質に特異的な発色試薬 (Kates, 1972) を噴霧することにより、各脂質の展開される位置を決定した。試料展開後80%アセトンに溶かしたプリムリン (0.01%, w/v) を噴霧し、分離した極性脂質の位置を紫外線ランプを用いて定めた。プレート上の各極性脂質をかき取り、内部標準物質としてペンタデカン酸を加え、5%塩酸 (w/v) を含むメタノール中で 80°C 、2時間メチル化を行い、生成した脂肪酸メチルエステルをn-ヘキサンで抽出した。また TLC を行う前の総脂質を同様にメチル化し、葉中の総脂肪酸メチルエステルを得た。脂肪酸メチルエステルは、Thermon-1000 (和光) のガラスカラム ($3 \text{ mm} \times 2 \text{ m}$) により FID 付きガスクロマトグラフ (163, 日立) を用いて分離した。キャリアガスは 50 ml min^{-1} の窒素、オーブンの温度は 190°C とした。分離した各脂肪酸メチルエステルのピーク面積と内部標準物質のピーク面積との比から各脂肪酸の含量を定量し、得られた総脂肪酸含量から脂質含量を求めた。

クロロフィルの定量： O_3 暴露葉から打ち抜いたリーフディスクを氷冷の80%アセトン中で磨砕して色素を抽出し、Arnon (1949) の方法に従ってクロロフィル a と b を分光的に定量した。

過酸化脂質の測定：葉中のマロンジアルデヒド (MDA) を Heath & Packer (1968) の方法に従って定量し、過酸化脂質の指標とした。3 ml のリーフディスク磨砕液と 5 ml の 0.5% (w/v) チオバルビツール酸を含む20% (w/v) トリクロロ酢酸を混合し、沸騰水溶液中で30分間反応させた。遠心して得られた上清の532nm と600nm の吸光度の差から MDA 含量を定量した。

3 結 果

表1に0.5ppm O₃暴露によるハウレンソウ葉の全脂肪酸, MDA及びクロロフィル含量の変化を示す。葉中のクロロフィル含量は暴露後8時間までは変動せず以後分解しはじめた。MDAは8時間まで徐々に増加し以後急激に増加した。これらの変動は既に報告した結果(Sakakiら, 1983)と一致する。MDAの増加は過酸化反応による不飽和脂肪酸の破壊を示唆するが, 葉中の全脂肪酸量は暴露後8時間以降から激しく分解しはじめた(表1)。表2に葉の全脂質画分中に含まれる主要な脂肪酸であるパルミチン酸(16:0), 3-*trans*-ヘキサデセン酸(16:1), ヘキサデカトリエン酸(16:3), ステアリン酸(18:0), オレイン酸(18:1), リノール酸(18:2)及び α -リノレン酸(18:3)の組成比の変動を示す。O₃暴露後8時間以降のMDAの増加, 全脂肪酸含量の低下に応じて, 多価不飽和脂肪酸である18:3及び16:3の組成比が低下した。一方8時間目までは, MDAの若干の増加にもかかわらず, 全脂肪酸量(表1)及びその組成比(表2)は変化しなかった。

O₃暴露による葉中の主要な極性脂質の変化を表3に示す。葉肉細胞の葉緑体膜に局在する糖脂質:モノガラクトシル ジアシルグリセロール(MGDG)及びジガラクトシル ジアシルグリセロール(DGDG)含量は, 8時間までに大きく減少しそれぞれ初期値の34及び61%に低下した。フォスファチジルコリン(PC)は4時間目以降減少しはじめ, 8時間までに53%に低下した。一方フォスファチジン酸(PA)は暴露後から増加しはじめ, 8時間で4倍以上に達した。他の極性脂質であるフォスファチジルグリセロール(PG), フォスファチジルエタノールアミン(PE), フォ

表 1 ホウレンソウ葉の全脂肪酸, MDA 及びクロロフィル含量に及ぼすO₃暴露の影響

Table 1 Effect of ozone fumigation on the content of total fatty acids, MDA and chlorophyll in spinach leaves

	Ozone fumigation (h)		
	0	8	15
Total fatty acids ^a (nmol cm ⁻²)	475.5	481.3	357.8
MDA ^b (nmol cm ⁻²)	0.45±0.04	0.60±0.06	2.36±0.20
Chlorophyll <i>a</i> + <i>b</i> ^b (μ g cm ⁻²)	46.6±3.2	46.3±2.4	35.5±1.0

全脂肪酸含量は, 葉から抽出した全脂質中の16:0, 16:1, 16:3, 18:0, 18:1, 18:2及び18:3の和を示している。

a: 2個のサンプルの平均値。

b: 3個のサンプルの平均値±標準偏差

The content of total fatty acids represents the sum of 16:0, 16:1, 16:3, 18:0, 18:1, 18:2 and 18:3 in the total leaf lipid extract.

^aAverage of two samples,

^bAverage of three samples±SD.

表 2 O₃暴露によるホウレンソウ葉の全脂質の脂肪酸組成変化
Table 2 Changes in fatty acid composition of total lipids from spinach leaves fumigated with 0.5 ppm ozone

Expt.	Ozone fumigation (h)	Fatty acid composition (mol %)						
		16:0	16:1	16:3	18:0	18:1	18:2	18:3
1.	0	13.8	4.6	11.2	0.6	6.8	9.0	54.1
	15	16.7	4.1	8.7	0.6	7.0	11.5	51.5
2.	0	15.0	3.4	10.4	0.7	5.9	8.7	56.0
	4	14.2	3.4	10.2	0.7	6.4	8.9	56.2
	8	14.7	3.5	10.3	0.7	6.5	9.1	55.2

各値は2個のサンプルの平均値である。
Values are the average of two samples.

表 3 O₃に暴露されたホウレンソウ葉の極性脂質含量の変化
Table 3 Changes in polar lipid content in ozone-fumigated spinach leaves

Ozone fumigation (h)	Polar lipid content (nmol cm ⁻²)							
	MGDG	DGDG	PC	PG	SQDG	PE	PI	PA
0	93.2	50.3	26.4	20.3	13.0	11.4	6.1	2.6
4	73.5	44.2	26.0	21.2	11.6	12.6	5.8	5.6
8	31.7	30.9	14.1	16.7	11.8	8.1	5.4	11.3

各値は2個のサンプルの平均値である。
Values are the average of two samples.

スファチジルイノシトール (PI) 及びスルホキノボシルジアシルグリセロール (SQDG) も若干減少した。

以上の結果から、O₃暴露によって不飽和脂肪酸やクロロフィルの破壊が始まる前に葉肉細胞の内膜系を構成するグリセロ脂質、特に葉緑体膜の主要な脂質である MGDG, DGDG が大きく減少することが明らかになった。このことは、O₃暴露後8時間以内にこれらの脂質が構成する葉緑体の膜系が著しく崩壊していることを示唆している。

表4はO₃に感受性の異なる数種の植物をO₃に暴露し、MGDG, DGDG及びクロロフィル含量の変化を調べた結果である。O₃に抵抗性の高いレタス、タバコ、ソラマメでは、0.5ppm O₃、6時間の暴露によってMGDG, DGDG含量はそれほど低下しないが、感受性の高いホウレンソウ、インゲン、ダイコンでは同期内にMGDG, DGDGが著しく減少した。クロロフィル含量は6時間目ではどの植物種でも変動は見られないが、ガス暴露直後から20時間光照射することによって、感受性の高い植物種では大きく減少した。

表 4 O₃に対する感受性の異なる数種の植物の MGDG, DGDG 及びクロロフィル含量に及ぼす O₃ 暴露の影響

Table 4 Effect of ozone fumigation on the content of MGDG, DGDG and chlorophyll in sensitive and resistant plants to ozone

Species		Lipid content (nmol cm ⁻²)		Chlorophyll content (μg cm ⁻²)
		MGDG	DGDG	
Lettuce	None	60.3	44.9	29.2
	Ozone	53.7	38.2	27.8 (25.7)
Tobacco	None	79.5	52.5	40.7
	Ozone	60.3	31.8	38.9 (36.8)
Broad bean	None	93.9	78.8	50.2
	Ozone	67.8	59.2	48.7 (46.5)
Corn	None	63.4	41.5	—
	Ozone	43.4	37.5	—
Radish	None	76.0	40.1	41.7
	Ozone	47.1	28.4	41.7 (28.3)
Kidney bean	None	62.6	33.8	30.4
	Ozone	25.5	21.2	31.4 (16.3)
Spinach	None	81.0	51.3	44.2
	Ozone	31.6	30.2	46.3 (17.7)

各植物は 0.5ppm の O₃ に 6 時間暴露された。
 括弧内の値は、植物を O₃ に暴露した後 20 時間グロースキャビネット内で照射したときのクロロフィル含量 (μg cm⁻²) である。
 Plants were fumigated with 0.5 ppm ozone for 6 h.
 Each number in parenthesis is the content of chlorophyll (μg cm⁻²) in leaves illuminated for 20 h in the growth cabinet immediately after ozone fumigation.

4 考 察

O₃ が緑葉の細胞に与える傷害として、膜脂質分子内の不飽和脂肪酸の酸化が指摘されている。O₃ 暴露によって可視傷害の発現した葉 (Tomlinson & Rich, 1970; Sakaki ら, 1983) や、高濃度の O₃ を緑藻 (Frederick & Heath, 1975) や葉から単離したオルガネラ (Mudd ら, 1971a, b; Pauls & Thompson, 1980) にばっ気したとき、MDA が蓄積したり、不飽和脂肪酸が減少することが報告されている。前報において、私たちはハウレンソウを O₃ に暴露したときの色素破壊、MDA 蓄積の経時変化を調べ、O₃ による傷害が少なくとも二つの相に分けられることを示した (榊・近藤, 1981; Sakaki ら, 1983)。MDA は O₃ 暴露後約 8 時間目から始まる 2 番目の相で顕著に増加し、光によって生成する活性酸素が関与していることも明らかにした。本実験の結果から、MDA の蓄積が葉中の脂肪酸の破壊と対応していることが示された (表 1)。特に多価不飽和脂肪酸である 18:3, 16:3 が大きく低下しており、O₃ 暴露の結果生じた活性酸素によって不飽和脂肪酸の過酸化分解が引き起こされることが裏付けられた。一方、私たちは O₃ 暴露開始後 8 時間ま

での間に葉肉細胞の膜系、特に葉緑体のチラコイド膜が著しく損傷を受けていることを指摘したが (Sakaki ら, 1983), それがどのような機構、あるいは成分の変化に依存しているのかは明らかでなかった。

表3に示したように、 O_3 暴露後8時間までの間に葉内の膜系を構成する主要な極性脂質含量が大きく変動していた。MGDG, DGDG は葉緑体の包膜及びチラコイド膜に局在し、これらの膜系を構成する極性脂質の70%以上を占めている (Lichtenthaler & Park, 1972)。これらの脂質が暴露後8時間までに著しく減少することは、 O_3 暴露初期に葉緑体の膜系が激しく崩壊していることを意味している。Miyake ら (1984) は、ホウレンソウを用い本実験と同一の条件で O_3 暴露を行い、暴露後8時間までの間にチラコイド膜の膨潤、葉緑体の変形が起きていることを電子顕微鏡を用いて明らかにした。おそらくは葉緑体膜脂質の減少が、電子顕微鏡によって観察された構造変化の主要な原因の一つになっているのであろう。ガラクトリパーゼ処理によってチラコイド膜のMGDG, DGDGを消化させると、チラコイド膜が膨潤するという報告 (Shaw ら, 1976) もこの考えを裏付けている。PG, SQDGも葉緑体に局在する極性脂質であるが、8時間までに大きな低下は見られなかった(表3)。このことは O_3 暴露によって葉緑体膜脂質が、不飽和脂肪酸残渣の過酸化分解などのような非特異的反応によって減少しているのではないことを示唆している。

O_3 による種々の膜脂質の変動は、膜系の変形、崩壊を始めとし、様々な生理的变化の原因になっているものと思われる。クロロフィル分子やクロロフィルタンパク複合体は葉緑体のチラコイド膜に組み込まれて安定化しているが、 O_3 暴露によってチラコイド膜が崩壊した結果不安定になり、光などによって容易に酸化分解されると考えられる (Sakaki ら, 1983)。表4に示したように、 O_3 暴露によって葉緑体膜脂質の大きく減少した植物種ほど、以後の光照射によってクロロフィルが大きく分解されていた (MGDGの減少率とクロロフィルの分解率は、相関係数0.92の直線関係にあった)。このことは、MGDG, DGDGの減少が引き続いて起こるクロロフィル分解の一つの要因になっていることを示唆している。PCやPEの減少も、おそらく細胞膜や他のオルガネラ膜の機能に重大な影響を与えているものと思われる。

O_3 暴露により、8時間までに葉中のいくつかの極性脂質が大きく減少したが(表3)、全脂肪酸含量(表1)及び組成比(表2)は一定に保たれていた。このことは減少した脂質の脂肪酸残渣が、分解されずに無傷のまま他の脂質に移行していることを示唆している。 O_3 暴露によって中性脂質画分中の脂肪酸含量が顕著に増加しており(結果は示さない)、減少した極性脂質脂肪酸残渣のかなりの部分が、中性脂質へ変わっているものと思われる。 O_3 暴露による膜脂質の代謝変化とその機構は今後の課題である。

本研究の一部は Plant Cell Physiol. に掲載の予定である。

引用文献

- Allen, C. F. and P. Good (1971) : Acyl lipids in photosynthetic systems. *Methods Enzymol.*, **23**, 523-547.
- Arnon, D. I. (1949) : Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.*, **24**, 1-15.
- Bligh, E. G. and W. J. Dyer (1959) : A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can. J. Biochem. Physiol.*, **37**, 911-917.
- Frederick, P. E. and R. L. Heath (1975) : Ozone-induced fatty acid and viability changes in *Chlorella*. *Plant Physiol.*, **55**, 15-19.
- Heath, R. L. and L. Packer (1968) : Photoperoxidation in isolated chloroplasts I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Arch. Biochem. Biophys.*, **125**, 189-198.
- Kates, M. (1972) : *Techniques of Lipidology*, North-Holland Publishing Co., 301p.
- Lichtenthaler, H. K. and R. B. Park (1963) : Chemical composition of chloroplast lamellae from spinach. *Nature*, **198**, 1070-1072.
- Miyake, H., A. Furukawa, T. Totsuka and E. Maeda (1984) : Differential effects of ozone and sulphur dioxide on the fine structure of spinach leaf cells. *New Phytol.*, **96**, 215-228.
- Mudd, J. B., T. T. McManus and A. Ongun (1971a) : Inhibition of lipid metabolism in chloroplasts by ozone. *In* : Proceedings of the Second International Clean Air Congress., Englund, H. M. and W. T. Beery. (eds.), Academic Press, New York, 256-260.
- Mudd, J. B., T. T. McManus, A. Ongun and T. E. McCulloch (1971b) : Inhibition of glycolipid biosynthesis in chloroplasts by ozone and sulfhydryl reagents. *Plant Physiol.*, **48**, 335-339.
- Pauls, K. P. and J. E. Thompson (1980) : *In vitro* simulation of senescence-related membrane damage by ozone-induced lipid peroxidation. *Nature*, **283**, 504-506.
- 榑 剛・近藤矩朗 (1981) : オゾン暴露によるハウレンソウ葉の光合成色素の分解について。国立公害研究所研究報告, 第28号, 31-37.
- Sakaki, T., N. Kondo and K. Sugahara (1983) : Breakdown of photosynthetic pigments and lipids in spinach leaves with ozone fumigation : Role of active oxygens. *Physiol. Plant.*, **59**, 28-34.
- Shaw, A. B., M. M. Anderson and R. E. McCarty (1976) : Role of galactolipids in spinach chloroplast lamellar membranes II. Effects of galactolipid depletion on phosphorylation and electron flow. *Plant Physiol.*, **57**, 724-729.
- Tomlinson, H. and S. Rich (1970) : Lipid peroxidation, a result of injury in bean leaves exposed to ozone. *Phytopathology*, **60**, 1531-1532.
- 遠山 益 (1975) : 葉緑体の微細構造にあたる光化学オキシダントの影響。細胞, **7**, 519-530.

V-3

植物葉中の炭水化物の簡易測定法と二酸化窒素とオゾン暴露が
インゲン葉中の炭水化物量に及ぼす影響

Simple Analysis of Carbohydrate in Plants and Effects of NO₂
and O₃ on Carbohydrate Contents in Kidney Bean Leaves

伊藤 治¹・戸塚 績¹

Osamu ITO¹ and Tsumugu TOTSUKA¹

要 旨

二酸化窒素とオゾン暴露が蒸散速度と植物体内の主要な炭水化物であるグルコース、シュクロース、デンプン量にどのような影響を及ぼすかを調べ、気孔の開閉と関係する光合成とこれら炭水化物の挙動との関連を明らかにすることを目的として実験が試みられた。

まず糖分析計を用いての3種の炭水化物の簡便な分析法の確立を行った。新鮮植物葉を約10倍量の熱水で抽出し、上澄をグルコース、シュクロース分析用とした。残査に0.5NのKOHを加え、超音波処理した後、室温で30分振とうし、上澄をデンプン分析用とした。各抽出液の25 μ lを糖分析計に注入することにより、1分以内に値を得ることができた。デンプン測定の場合には、サンプルの前にアミログルコシダーゼを注入する必要がある。この方法により得られた値をガスクロマトグラフ法で得られた値と比較したところ良い相関が得られた。

二酸化窒素とオゾン暴露は播種後12日目のインゲン (*Phaseolus vulgaris* L. Shin-edogawa) に3.0と0.6ppmの濃度で行われた。二酸化窒素暴露は、葉中のグルコースとシュクロースの量を減少させた。これは二酸化窒素の同化のための炭素骨格の素材として、これらの糖が用いられたためと思われる。一方オゾン暴露はグルコース、シュクロースの量を増大させた。単位葉面積当たりの蒸散速度とデンプン量は二酸化窒素やオゾンに暴露した場合いずれも減少し、両者の間には比較的良い正の相関が得られた。このことはデンプンの蓄積が光合成を介して気孔の開閉と一定の関係にあり、デンプンの蓄積量を光合成活性を表す一指標として用いることができる可能性を示唆している。

1 国立公害研究所 生物環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi,
Ibaraki 305, Japan.

Abstract

Effects of NO_2 and O_3 on carbohydrate contents in kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L. Shin-edogawa) were investigated in relation to stomatal response with the simple analytical method using a sugar analyzer.

Glucose and sucrose were extracted with hot distilled water (ca. 10 times volume, v/w, of fresh materials). Potassium hydroxide (0.5N) was added into the residues, sonicated and shaken for 30 min to extract starch. An aliquot of extracts (25 μl) was injected to the sugar analyzer where H_2O_2 electrode was installed. Glucose oxidase and/or invertase immobilized in the membrane degraded sugars to produce H_2O_2 which was detected by the electrode. In case of starch analysis, amyloglucosidase was injected to the analyzer prior to the samples. The values obtained by this method were well correlated with those by gas chromatography.

Kidney bean plants 12 days old from germination were exposed to NO_2 and O_3 at 3.0 and 0.6 ppm, respectively. The exposure to NO_2 decreased glucose, sucrose and starch contents in the first trifoliate leaves which were at the expanding stage. The decreases of glucose and sucrose may result from the consumption for the synthesis of amino acids into which NO_2 is assimilated. The content of glucose and sucrose was increased by O_3 exposure and became twice as much as the control 9.5 hr after the start of exposure. Starch content was significantly lower in O_3 treatment than in the control. Transpiration rate went up with time and began to decline 3 to 4 hr before light-off in the control, while in NO_2 treatment it stayed almost constant and rapidly slowed down in O_3 treatment. Starch content and transpiration rate were relatively well correlated in both treatments. This suggests that starch accumulation should reflect photosynthetic carbon assimilation which may be related with the transpiration and can be used as an indicator for photosynthetic activity in the plants stressed by NO_2 and O_3 .

Key words : NO_2 — O_3 —*Phaseolus vulgaris* L. —Glucose—Sucrose—Starch
—Transpiration.

1 緒 言

二酸化窒素とオゾンの植物に対する影響は、 CO_2 が気孔を通過して葉緑体内で同化されるまでの過程(古川; 1984), それに生長及び可視障害(戸塚, 1984)などの観点から種々の植物について詳しく調べられているが, 吸収された CO_2 の同化, 同化産物の転流分配という CO_2 の吸収と生長との間に介在する過程についての知見は極めて少ない。同化された CO_2 はほとんどの植物で転流形態であるシュクロースと一時的貯蔵形態であるデンプンとに変換される。それ故シュクロースとデンプンは光合成速度によって影響を受け, 生長に対して影響を与える仲介的役割を果していると考えられる。これらの物質に対する影響は, オゾンについては比較的多く研究されているが, 二酸化窒素に関しては皆無と言ってよい。

0.2ppmのオゾンに4日間暴露されたインゲン初生葉では, シュクロースの量は対照区よりも

増加するが、 $^{13}\text{CO}_2$ のシュクロースへの取り込みは10分間の暴露では認められなかった (Ito ら, 1985b)。レモン幼苗や菜豆では、オゾン暴露によりデンプン量が減少した (Dugger ら, 1966, 石塚ら, 1977)。これらのことからオゾン暴露はシュクロースの新規合成は抑えるが、デンプンの分解を促進し、シュクロース含量を高めると推測される。しかし Hanson & Stewart (1970) は、暗所下でのデンプンの減少速度を調べたところオゾン処理区の方が無処理区よりも遅いという結果を得ている。このようにオゾン暴露に関してもシュクロース、デンプンに対する影響について一致した見解が得られていないのが現状であり、またオゾンの影響を光合成とこれらの物質との関連で捕えるような研究はなされていない。

従来グルコース、シュクロース、デンプンなどの植物体内に存在する主要な炭水化物はガス又は液体クロマトグラフにより定量されている (瀬野ら, 1976) が、測定に時間がかかるため、多数の試料の分析には不向きであった。特に前者の場合は揮発性にするための誘導化という手順が入るため、操作も煩雑である。今回使用した糖分析計は、医学、食品化学方面においては血液、尿又は種々の食品中に存在するこれらの物質の定量のために既に汎用化している分析機器である。サッカラーゼやグルコースオキシターゼを固定化した膜を過酸化水素電極に貼りつけ、酵素反応の結果生成する過酸化水素を電極により測定するという極めて単純な原理なため、分析にも手間がかからず、1試料1分以内という短い時間で測定が可能である。

本研究はこの分析計の特徴を生かして、植物葉中に存在するグルコース、シュクロース、デンプンの簡便な分析法を確立すること、並びに二酸化窒素とオゾン暴露の影響をこれらの物質と気孔の開閉との関係で捕え、光合成と炭水化物量の変動との関連を明らかにすることを目的として行われた。

2 分析方法の確立

2.1 実験方法

植物材料としては播種後4週間位のヒマワリ (*Helianthus annuus* L. Russian Mammoth) 成熟葉を用いた。新鮮葉の場合には、葉を幅5 mm位に細断し、均一になるように良く混ぜた試料から3—5 gを採量した。乾燥葉の場合には、80°Cで3日間乾燥後乳鉢で粉碎した。

グルコース、シュクロースの抽出には、通常新鮮又は乾燥植物試料に30mlの熱水又は80%熱エタノールを加え、Polytron PT10/35型 (Kinematica) で摩砕し、15,000rpm, 30分間で遠心分離した。熱水抽出の場合には上澄をそのまま50mlに定容し、エタノール抽出の場合には、エバポレーターで乾固させ、遠心分離により水に不溶性のクロロフィルを除去した後に50mlに定容した。必要な場合には、摩砕液に超音波処理 (A350G型, Yamabishi Electric Co. Ltd) を行った。測定は抽出液25 μ lを糖分析計 (YSI model 27) に導入して行った。

糖分析計と他の機器との比較のために、播種後14—17日目のインゲンマメの初生葉、第1本葉、根の80%エタノール抽出液のTMS誘導体をガスクロマトグラフアナライザー (島津製作所製ガ

スクロマトグラフ GX-5 A) で分析した。内径 5 mm, 長さ 2 m のガラス製カラムに Silicon OV-17 2% on chromosorb W (AW-DMSC 60/80 mesh) を充てんした。ガスの条件は, キャリアーガスとして窒素ガスを 60 ml/min, 分析用に水素ガスを 45 ml/min, 空気を 0.9 l/min の速度で流した。検知器には水素炎イオン化ディテクターを使用した。

デンプンの抽出は, 過塩素酸を使った常法 (吉野, 1976), Mason (1980) による KOH を用いた方法とを試みた。可溶性糖抽出残査に 15 ml の 0.5 N KOH を加え, 3 分間超音波処理をした後, 30 分間室温にて振とうした。遠心分離により残査を除いた後, 上澄の pH を氷酢酸により中性付近に合わせ, 25 ml に定容した。測定の際には, 25 μ l のデンプン抽出液の導入に先立ち, アミログルコシターゼが分析計のセル内に加えられた。測定はすべて 5 連で行われその平均値と標準偏差を表示した。

2.2 結果と考察

まず従来からの糖分析のための一般的な方法であるガスクロマトグラフ法と糖分析計の比較を行った。図 1 に示されるように前者は後者よりも若干低い値を示したが, 19 サンプルの測定の結果, 両者の間に高い相関が得られた。この結果から糖分析計は従来法と同様に, 糖分析のために使用できることが確認された。

植物体中の可溶性物質の抽出には通常 80% エタノールが使用されるが, 多量のアルコールの存在は酵素反応に支障をきたし指示値を狂わせる。このためエタノールをエバポレーターにより除去する操作をせねばならない。操作の簡略化のためには熱水で抽出しそのまま測定に持ち込める

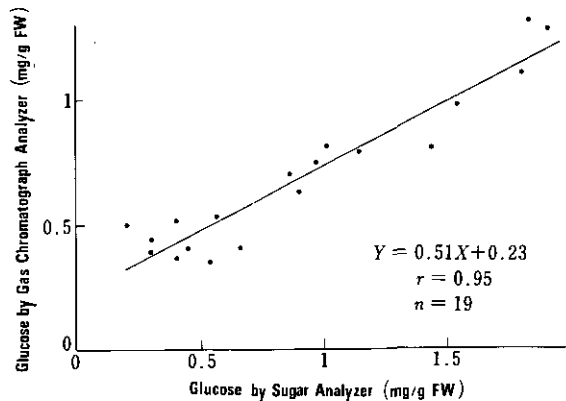


図 1 糖分析計とガスクロマトグラフアナライザーによって測定されたインゲンの葉と根中のグルコース量の比較

Fig. 1 Amounts of glucose in kidney bean leaves and roots determined with sugar analyzer and gas chromatograph analyzer

のが最も望ましい。そこで熱水と80%エタノールを溶媒として使用した場合の、グルコースとシュクロースの抽出効率を比較してみた。表1に示されるように両者の間で全く差が認められなかったので、以後簡便な熱水抽出法を採用することにした。

糖の抽出には、常法として同じ溶媒で抽出を数回繰り返すことが行われているが、この結果液量の増大、糖濃度の低下が引き起こされ、検出限界以下になってしまう場合には濃縮操作を行う必要が生じてくる。なるべく少ない抽出回数で最大の抽出効率を得られることが望ましい。そこで30mlの熱水で1, 3, 5回の抽出を行い、グルコース、シュクロース量の比較を行った。表2に示されるように、3者の間に有意な差は認められなかったので1回の抽出でもほぼ完全な抽出が行われることが明らかになった。

次に抽出溶媒である熱水の容量の差異が、抽出効率に与える影響を検討した。分析計の検出限界が1 mg/dlであるため、なるべく少ない容量の抽出溶媒で最大の抽出効率を得られることが望ましい。表3に示されるように、新鮮植物試料重に対して約10, 20, 40倍の容量の熱水にて抽出を行ったが、いずれの場合にも有意な差は認められなかった。以後抽出は30mlの熱水で行うこととした。

糖の分析のためには、試料保存の便利さからしばしば乾燥粉末試料が用いられるが、この場合の抽出効率を新鮮試料の場合と比較し、また抽出効率の向上を意図して、摩砕液の超音波処理をも試みた。乾燥試料の場合には新鮮なもの比べて、グルコースで約半分、シュクロースで約2/3

表 1 熱水と80%エタノールによって新鮮ヒマワリ葉から抽出されるグルコースとシュクロース量の差異

Table 1 Amounts of glucose and sucrose extracted from fresh sunflower leaves with hot water and 80% ethanol

Solvent	Glucose	Sucrose
	mg/g FW	mg/g FW
Hot water	1.45 + .18	5.23 + .47
80% Ethanol	1.39 + .07	4.93 + .21

表 2 熱水による抽出回数が新鮮ヒマワリ葉からのグルコースとシュクロースの抽出効率に及ぼす影響

Table 2 Amounts of glucose and sucrose extracted from fresh sunflower leaves with hot water at 1, 3 and 5 times

Times	Glucose	Sucrose
	mg/g FW	mg/g FW
1	1.62 + .43	8.72 + 1.24
3	1.58 + .12	8.88 + .51
5	1.62 + .21	9.37 + 1.14

表 3 熱水量が新鮮ヒマワリ葉からのグルコースとシュクロースの抽出効率に及ぼす影響

Table 3 Amounts of glucose and sucrose extracted from fresh sunflower leaves with different volume of hot water

Volume of hot water(ml)	Glucose mg/g FW	Sucrose mg/g FW
30	1.45+ .18	5.23+ .47
60	1.37+ .04	4.89+ .22
120	1.36+ .11	4.76+ .28

表 4 試料の乾燥と超音波処理がヒマワリ葉からのグルコースとシュクロースの抽出効率に及ぼす影響

Table 4 Effect of dryness and sonication of samples on amounts of glucose and sucrose extracted from sunflower leaves

Sample	Sonication	Glucose mg/g FW	Sucrose mg/g FW
Fresh	-	.55+ .07	2.51+ .21
	+	.47+ .04	2.14+ .26
Dried	-	.25+ .04	1.45+ .07
	+	.22+ .03	1.39+ .06

表 5 アミログルコシダーゼの添加が新鮮ヒマワリ葉熱水抽出溶液のグルコース量に及ぼす影響

Table 5 Effect of amyloglucosidase on glucose content in hot water extract of fresh sunflower leaves

Enzyme	Glucose mg/g FW
-	3.70+ .41
+	3.80+ .20

程度の量しか抽出されてこなかった(表4)。超音波処理は期待に反して抽出効率を若干下げる傾向が認められた。これは超音波によりグルコース、シュクロースの分解が促進された結果かもしれない。

次にデンプンについて、まず熱水抽出によつてはデンプンは可溶化されていないことを確認した。熱水抽出溶液中のグルコース量を測定する際に、試料導入前に分析計のセル内にデンプン分解酵素であるアミログルコシダーゼを添加してみた。表5に示されるように無添加区との間に有意な差は認められなかった。このことからデンプンは熱水抽出液中には可溶化してきていないことが明らかになった。

デンプンの可溶化のためには、グルコース、シュクロースを抽出した後の残査を、水酸化カリウム又は過塩素酸で処理する方法を試みた。抽出されてくるグルコース、シュクロースは全く同様な方法で行ったので両者の間に差はないが(表6)、デンプンについて前者の方が2.5倍程度多いデンプンを可溶化させた。従来デンプン量の推定には普通、デンプン抽出液を酸性下、100°C、2時間で加水分解し生成されるグルコースを測定するという方法が採られている。表6の右端のカラムに示されるように、この方法によると、酵素で選択的にデンプンを分解した場合に比べ高い値が得られた。これは抽出液中に含まれる他のグルコース含有多糖類が加水分解されるためと

表 6 0.5N 水酸化カリウムと 4.6N 過塩素酸による新鮮ヒマワリ葉からのデンプンの抽出
Table 6 Amount of starch extracted from fresh sunflower leaves with 0.5N KOH and 4.6N HClO₄

Solvent	Glucose	Sucrose	Starch	Glucose hydrolyzate of starch
	mg/g FW	mg/g FW	mg/g FW	mg/g FW
0.5N KOH	1.24+ .06	5.48+ .26	2.51+ .25	7.76+ .71
4.6N HClO ₄	1.20+ .05	5.66+ .12	.97+ .05	4.36+ .27

推測される。

以上の結果から、糖分析計による植物体中のグルコース、シュクロース、デンプンの3種の糖類の簡易測定法として次のような手順が考えられた。1)新鮮植物試料に約10倍量の熱水を加え摩砕する。2)遠心分離後上澄を定容し、その25 μ lを分析計に導入し、グルコース、シュクロース量を測定する。3)残査に0.5N KOHを加え、超音波処理、30分間振とう後に遠心分離し上澄のpHを氷酢酸にて中性付近に合わせる。4)アミログルコシダーゼを分析計のセル内に添加した後、試料を導入しデンプン量を測定する。

この操作手順によるならば面倒な濃縮、除タンパクといった操作が無く、極めて簡単な抽出操作だけで測定に持ち込める。測定には糖分析計を用いるため、1点1分以内で値を得ることができる。

3 二酸化窒素とオゾン暴露の影響

3.1 実験方法

実験材料としては播種後12日目のインゲン (*Phaseolus vulgaris* L. Shin-edogawa) を用いた。栽培方法は Ito ら (1985 a) に従った。植物は全期間、温度25°C、湿度70% R.H., 光強度25klx に保たれたグロースキャビネット内で生育させられた。日長は14時間明期・10時間暗期で、早朝5

時に点灯し、夕方7時に消灯するように設定された。播種後12日目の午前9時30分より、3.0ppmの二酸化窒素と0.6ppmのオゾンによる単一ガス暴露が開始され、消灯直前までの9.5時間続けられた。この間一定時間ごとに3個体の第一本葉の蒸散速度をポロメーター(LI-1600, LI-COR社製)で測定した後、直ちに採取し-20°Cで冷凍保存した。グルコース、シュクロース、デンプンの定量は、前章の分析方法の確立で述べた方法に従った。

3.2 結 果

図2と図3に二酸化窒素とオゾン暴露が蒸散速度・グルコース・シュクロース・デンプン量に及ぼす影響を示した。まず対照区の時間的推移をみると、二酸化窒素とオゾン暴露実験において

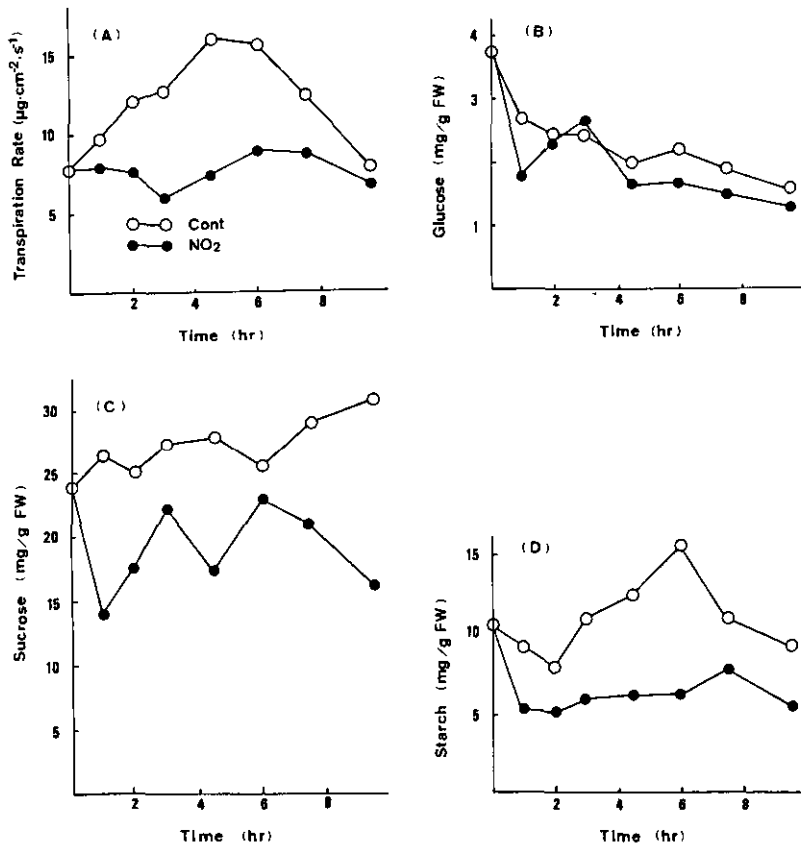


図 2 二酸化窒素暴露がインゲン第一本葉の蒸散速度 (A), グルコース (B), シュクロース (C), デンプン (D) 量に及ぼす影響

Fig. 2 Effect of NO₂ exposure (3.0ppm, 9.5hr) on transpiration rate (A), glucose (B), sucrose (C), starch (D) contents in the first trifoliolate leaves of kidney bean plants

若干の違いは認められるが、蒸散速度は消灯前3-4時間位から低下する傾向があった。グルコース量は時間の経過に伴い減少傾向にあった。シュクロース量はほぼ一定に保たれていた。デンプン量に関しては、オゾン暴露実験で各サンプリング点ごとのバラツキが大きく、一般的傾向は捕え難いが、時間経過に伴い増加し、消灯前には減少するようにみえる。

次に二酸化窒素の影響をみると、蒸散速度は対照区で時間とともに増大するのに対し、処理区ではほぼ一定の値で推移した。グルコース量は測定値に多少変動がみられるが全般的に処理区が対照区を下回った。シュクロース及びデンプン量は処理区が対照区よりも常に低く推移した。

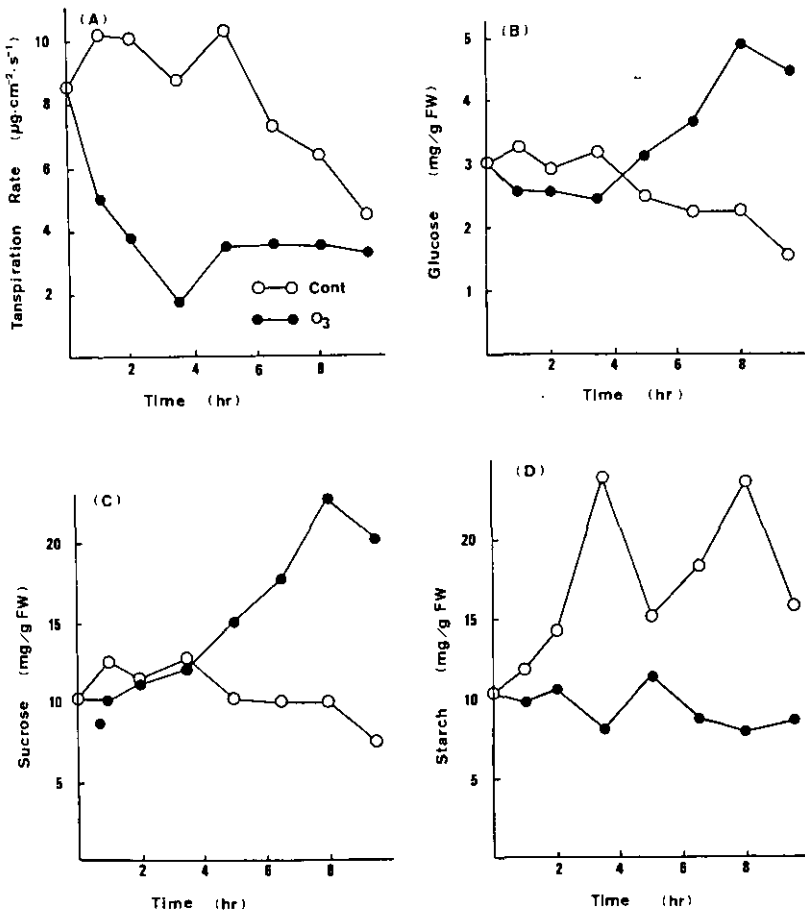


図 3 オゾン暴露がインゲン第一本葉の蒸散速度 (A), グルコース (B), シュクロース (C), デンプン (D) 量に及ぼす影響

Fig. 3 Effect of O₃ exposure (0.6 ppm, 9.5hr) on transpiration rate (A), glucose (B), sucrose (C), starch (D) contents in the first trifoliolate leaves of kidney bean plants

オゾン暴露の影響は二酸化窒素のそれと異なっていた。蒸散速度は暴露開始直後から減少しはじめ、3時間半後には最も低い値となり、その後僅かながら回復する傾向が認められた。グルコース・シュクロース量は暴露開始後3時間半位までは対照区とほぼ同じレベルに保たれていたが、その後増加し開始後9時間半経つと対照区の2倍を越える値となった。処理区のデンプン量は明らかに対照区よりも低い値を示した。

図4にグルコース量とシュクロース量との間の相関関係を二酸化窒素とオゾン暴露実験について示した。前者の場合には相関係数が0.53と低かったが、両者において正の相関が認められた。特に後者では0.94と高い相関が得られた。このことはインゲン葉中のグルコースの主な部分がシュクロースの前駆体として存在し、両者が同じ様な挙動を示唆している。

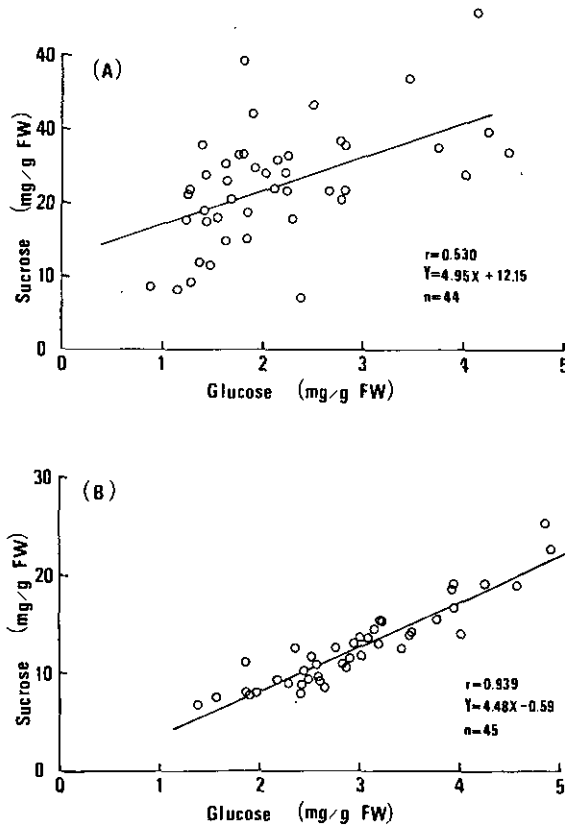


図 4 二酸化窒素 (A) とオゾン (B) 暴露実験におけるグルコース量とシュクロース量との関係

Fig. 4 Relationship between glucose and sucrose contents in the first trifoliate leaves of kidney bean plants exposed to NO_2 (A) and O_3 (B) at 3.0 and 0.6 ppm, respectively.

図5に蒸散速度とデンプン量との間の関係を示した。二酸化窒素暴露、オゾン暴露それぞれにおいて、相関係数は0.71、0.52とあまり高くはないが正の相関が認められた。このことは気孔の開閉度合、ひいては光合成速度と関係するパラメーターである蒸散速度が、光合成の結果その最終産物として蓄積するデンプン量との間に何らかの関係があることを示唆している。

3.3 考 察

同化されたCO₂の一部(Kerrら(1984)は大豆を用いて20—40%、筆者(未発表)は本実験と同じ条件で育てられたインゲンの第一本葉で25%と算出している)は葉緑体内でデンプンとなり顆粒状で蓄積し、その他は三単糖リン酸の形で細胞質に放出されてシュクロースとなり、Sink葉では体内成分に再構成され、Source葉では他の器官へ転流される(Geiger & Giaquinta, 1982)。葉

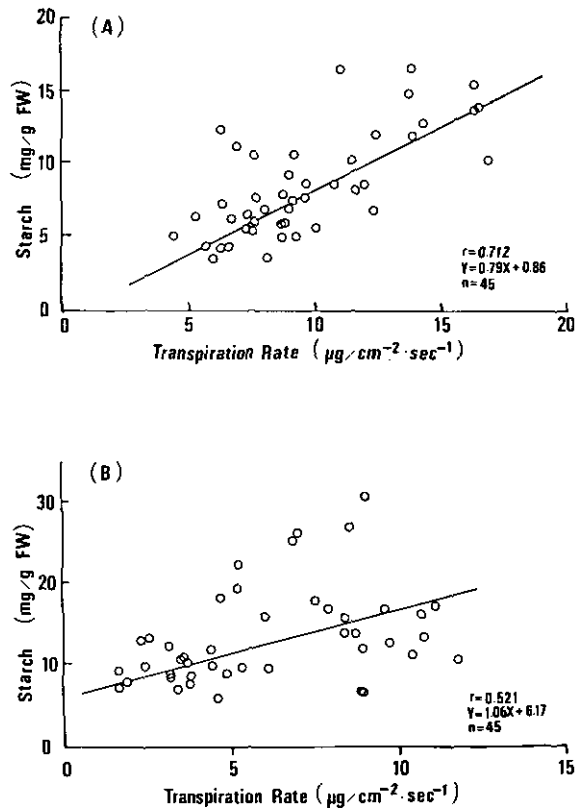


図 5 二酸化窒素 (A) とオゾン (B) 暴露実験における蒸散速度とデンプン量との関係

Fig. 5 Relationship between transpiration rate and starch content in the first trifoliate leaves of kidney bean plants exposed to NO₂(A) and O₃(B) at 3.0 and 0.6 ppm, respectively.

緑体内に蓄積したデンプンは葉肉拡散抵抗を高め(Nafziger, Koller, 1976), 光合成速度を低下させる (Mauney ら, 1979, Azcon-Bieto, 1983) という報告がある。一方 Chatterton & Silvius (1979), Potter & Breen (1980) は日長を変化させてデンプン含量を増加させても, 光合成速度が低下しないことから, デンプンの蓄積が光合成を律速している因子ではないと結論している。本実験においては光合成速度の測定はなされなかったが, それと関連があると思われる蒸散速度がデンプン量と正の相関を示したこと (図5) は, 後者の見解を支持していると考えられる。またこのことはデンプン量の蓄積速度から二酸化窒素やオゾンによる光合成速度の阻害を推定できる可能性を示唆している。特にデンプン量というのは累積的影響の結果であるので, 光合成速度のような瞬時値では検知できないような低い濃度の大气汚染物質の影響評価に有効な指標となり得るのではないかとと思われる。

オゾン暴露によってグルコース・シュクロース量が顕著に増加した (図2 B, C)。オゾンは気孔を閉じさせるが, 完全に閉じるまでには至らせない (図2 A) ので, オゾン暴露下においてもある程度の光合成がなされているものと推察される。オゾンによるグルコース・シュクロースの増大に関しては次の二通りの解釈が可能である; 1) デンプン合成が阻害された結果, 同化された CO_2 が可溶性のグルコース・シュクロースの形で蓄積した, 2) デンプンの分解が促進され, その産物として蓄積した。光照射下ではデンプンの分解は起きない (Kruger ら, 1983) という結果や, 暗所下でのデンプンの減少速度はオゾン暴露区よりも対照区の方が速かった (Hanson & Stewart, 1970) という結果は 1) の可能性を支持しているように思われる。しかしシュクロースの新規合成はオゾン暴露により強く抑えられる (Ito ら, 1985 b) ということを考慮すると 2) の可能性もいまだ否定できない。このことに関しては, アイソトープを使ったパルス実験並びにデンプンの合成・分解にかかわる酵素活性の測定等により更に詳しく調べる必要がある。二酸化窒素暴露によっては, グルコース・シュクロース量は対照区よりも低く推移した (図2 B, C)。二酸化窒素は速やかに吸収同化されてアミノ酸に組み込まれる (Ito ら, 1984)。このためにはアミノ酸の炭素骨格となる有機酸が必要となる。この有機酸を供給するのにグルコース・シュクロースが原料として用いられるため, その量が低下するのではないかと考えられる。

引用文献

- Azcon-Bieto, J. (1983) : Inhibition of photosynthesis by carbohydrates in wheat leaves. *Plant Physiol.*, **73**, 681-686.
- Chatterton, N. J. and J. E. Silvius (1979) : Photosynthate partitioning into starch in soybean leaves. I. Effects of photoperiod versus photosynthetic period duration. *Plant Physiol.*, **64**, 749-753.
- Dugger, W. M. Jr., J. Koukol and R. L. Palmer (1966) : Physiological and biochemical effects of atmospheric oxidants on plants. *J. Air Pollu. Cont. Assoc.* **16**, 467-471.
- 古川昭雄 (1984) : 種々の大气汚染質による高等植物の光合成阻害. 国立公害研究所研究報告, 第64号,

131-139.

- Geiger, D. R. and R. T. Giaquinta (1982) : Translocation of photosynthate. In Photosynthesis : Development, Carbon Metabolism and Plant Productivity Vol II. Academic Press Inc., 345-386.
- Hanson, G. P. and Stewart, W. S. (1970) : Photochemical oxidants : Effects on starch hydrolysis in leaves. *Science*, **168**, 1223-1224.
- Ito, O., K. Okano and T. Totsuka (1984) : Effects of NO₂ and O₃ alone or in combination on kidney bean plants. II. Amino acid pool size and composition. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud.*, No. 66, 15-25.
- Ito, O., K. Okano, M. Kuroiwa and T. Totsuka (1985a) : Effects of NO₂ and O₃ alone or in combination on kidney bean plants: Growth, partitioning of assimilates and root activities. *J. Exp. Bot.*, (in press).
- Ito, O., F. Mitsumori and T. Totsuka (1985b) : Effects of NO₂ and O₃ alone or in combination on kidney bean plant (*Phaseolus vulgaris* L.): Products of ¹³CO₂ assimilation detected by ¹³C nuclear magnetic resonance. *J. Exp. Bot.*, (in press).
- Kerr, P. S., S. C. Huber and D. W. Israel (1984) : Effect of N-source on soybean leaf sucrose phosphate synthase, starch formation and whole plant growth. *Plant Physiol.*, **75**, 483-488.
- Kruger, N. J., P. V. Bulpin and T. ap Rees (1983) : The extent of starch degradation in the light in pea leaves. *Planta*, **157**, 271-273.
- Mauney, J. R., G. Guina, K. E. Fry and J. D. Hesketh (1979) : Correlation of photosynthetic carbon dioxide uptake and carbohydrate accumulation in cotton, soybean, sunflower, and sorghum. *Photosynthetica*, **13**, 260-266.
- Mason, M. (1980) : An immobilized enzyme system for starch analysis : In the 65th Annual Meeting of the A. A. C. C.
- Nafziger, E. D. and H. R. Koller (1976) : Influence of leaf starch concentration on CO₂ assimilation in soybean. *Plant Physiol.*, **57**, 560-563.
- Potter, J. R. and P. J. Breen (1980) : Maintenance of high photosynthetic rates during the accumulation of high leaf starch levels in sunflower and soybean. *Plant Physiol.*, **66**, 528-531.
- 瀬野信子・阿武喜美子・木幡 陽・船越高雄・山科郁男 (1976) : 糖質の化学 下. 生化学実験講座 4, 日本生化学会編, 東京化学同人, 283-352.
- 戸塚 績 (1984) : 植物の生長に及ぼす大気汚染ガスの影響. 国立公害研究所研究報告, 第64号, 99-119.
- 吉野 実 (1976) : 炭水化物の分別定量法・栄養診断のための栽培植物分析法, 養賢堂, 328-335.

V-4

ヒマワリ葉の水分状態に及ぼすオゾンの影響

Effect of Ozone on Water Balance in Sunflower Leaves

古川昭雄¹・蓑原 茂²・田崎忠良³

Akio FURUKAWA¹, Shigeru MINOHARA² and Tadayoshi TAZAKI³

要 旨

ヒマワリ (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) にオゾン処理して葉の含水量、水ポテンシャル、浸透ポテンシャル、ターガーポテンシャルを測定し、植物の水分状態に対するオゾンの影響を経時的に調べた。さらに、オゾン処理によって引き起こされる可視害の発現割合が葉齢の進行に伴ってどのように変化し、そのときの水分状態がどのような影響を受けるのかについて調べた。

葉の含水量は時間の経過とともに、オゾン処理葉でも無処理葉でも減少し、両者の間には有意な差は見られなかった。水ポテンシャルと浸透ポテンシャルはオゾン処理開始後30分で無処理葉の各ポテンシャル値よりも有意に減少したが、それ以後は両者の間に差はなくなった。

オゾン処理による可視害の発現割合は葉齢の進行とともに増大し、開葉後15日目で最大となり、その後は減少した。一方、ヒマワリ葉の水分状態はオゾン処理によっても殆ど影響を受けず、かなり葉齢が進んでも顕著なオゾンの影響は観察されなかった。しかし、葉齢の進行とともに蒸散速度の減少割合は大きくなった。さらに、可視害の発現割合と水ポテンシャル、浸透ポテンシャルの間には高い相関関係が見られた。

Abstract

The experiment was conducted to determine how ozone influenced the water conditions of sunflower leaves (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth). Water

1. 国立公害研究所 生物環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 昭和58年度 国立公害研究所共同研究員 (東邦大学理学部 〒274 千葉県船橋市三山2丁目2番1号)
Research Collaborator of the National Institute for Environmental Studies. (Department of Science, University of Toho, Funabashi, Chiba 274, Japan).
3. 昭和58年度 国立公害研究所客員研究員 (東邦大学理学部 〒274 千葉県船橋市三山2丁目2番1号)
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Department of Science, University of Toho, Funabashi, Chiba 274, Japan).

conditions measured in the present experiment were relative water content, water potential, osmotic potential, turgor potential, and transpiration rate. The effects of ozone on water conditions were given in relation to the duration of exposure and leaf age.

Leaf water content decreased with time in O_3 -treated and non-treated leaves, but no effect of O_3 could be detected. Water and osmotic potentials were reduced significantly only when the exposure was performed for 30 min, but after this period no significant effect of O_3 on these two potentials could be detected.

The degree of foliar necrosis induced by O_3 increased with leaf age. The maximum foliar necrosis was obtained in 15 days (counted from foliar anthesis) old leaves. However, no significant effect of O_3 on water conditions in sunflower leaves could be detected at any developmental stage (from 8 to 24 days) of leaves. Despite of these non-sensitive water conditions to O_3 , the reduced amount of transpiration rate increased with leaf age. Furthermore, there appeared a significant correlation between the degree of foliar necrosis and leaf water and osmotic potentials. The results are discussed in relation to the age-dependent difference in O_3 sensitivity.

Key words : Sunflower— Water balance—Ozone—Water potential—Leaf age.

1 結 言

オゾン感受性の高い植物にオゾンを処理すると葉面に可視害が発現するが、その発現機構については依然として不明な点が多い。オゾンを処理すると最初に葉の表面に白色の斑点が生じ、その斑点は徐々に白化し、遂には枯死に至る。可視害の発現程度は、植物の種や品種によって異なるだけでなく、葉位や葉齢によって異なることが知られている (Dugger & Ting, 1968; 藤沼ら, 1981; 河内, 1980; 佐藤, 1981)。二酸化硫黄や二酸化窒素によって生じる可視害の程度は、葉内に吸収された汚染物質の量によって決まるが (Omasa ら, 1981a), オゾン処理によって引き起こされる可視害の発現程度はオゾン吸収量に依存しないと言われている (Omasa ら, 1981b)。一方、オゾン感受性の異なるスイートコーン二品種を比較すると、水ストレスに対する感受性の高い品種の方がオゾン感受性が高く、オゾン処理による可視害の発現は、オゾン処理によって引き起こされる水ストレスによるとの報告がなされている (Harris & Heath, 1981)。そこで、本実験では、オゾン処理によってヒマワリ葉の水分状態がどのような経時変化を示すかを測定した。さらに、葉齢の進行に伴い、オゾン処理による可視害程度の変化と水分状態の変化とがどのような関係にあるかを調べた。

2 材料と方法

2.1 植物材料

ヒマワリ (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) の種子をベンレート1000倍溶液に30分間浸し、流水で一晩洗浄後、鉢(直径11cm, 高さ20cm)に3粒ずつ播種した。培養土はピー

トモス：パーミキュライト：パーライト：小砂利（2：2：1：1，v/v）から成っている。播種後1週間してから各鉢の個体を間引いて一番生長の良いもの一個体にした。植物の栽培は $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度 $70 \pm 5\%$ のファイトロン温室において行った。かん水は朝夕2回、施肥はハイポネックス1000倍液を週2回、かん水の代わりに行った。葉位は、子葉を第一葉として数え、第三位葉を実験材料として用いた。また、葉令は葉の長さが1 cm以上、2 cm以下になった日を開葉日（0日）として開葉後日数で示した。一回のオゾン処理に用いる植物はすべて同じ開葉後日数のものを用い、処理の前日に第三位葉を残し、それより下位の葉は切り取り、第三位葉の基部から上は茎ごと取り除き、人工光型ガス暴露室に移して十分にかん水後、一晚放置し、翌日オゾン処理を行った。

実験1：オゾン処理による水分状態の経時変化

28個体の植物を人工光型ガス暴露室に搬入し、4個体を蒸散速度の測定に用い、残り24個体を8グループに分け、経時的に1グループ（6枚）の葉の生重量、水ポテンシャル、葉面積、浸透ポテンシャル、乾燥重量の順に測定した。サンプリングから葉面積を測定するまでは、できるだけ迅速に行い、測定中に水分状態が変化しないようにした。測定終了後、蒸散速度を測定した個体はファイトロン温室に戻し、可視害の発現を観察するための材料とした。

実験2：葉齢と可視害発現、水分状態との関係

各葉齢でのオゾン処理には8個体を用いて、そのうちの4個体でオゾン処理中の蒸散速度を測定した。オゾン処理後、この4個体分の1枚の葉について、実験1と同様の行程で水分状態を測定した。残りの4個体はオゾン処理後、ファイトロン温室に戻し、可視害の発現程度の判定に供した。

2.2 実験方法

オゾン処理：オゾン処理は人工光型ガス暴露室にて行い、照度 $400 \mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ （5:00～19:00）、温度 25°C 、湿度70%の条件下で行った。オゾンの発生は静空放電によって行い、発生させたオゾンをマスフロー・コントローラーを用いて人工光型ガス暴露室内への供給量を調節することによってオゾン濃度の制御を行った。オゾン処理は、実験1においては、0.4ppmで4時間（11:30～15:30）、実験2では、0.3ppmで4時間（11:00～15:00）行った。

水分状態：葉を葉柄を付けて切除し、直ちに生重量を測定し、水ポテンシャルをプレッシャーチェンバーを用いて測定した。その後、直ちに葉面積を測定し、ビニール袋に密封して冷凍した。浸透ポテンシャルは、この冷凍した葉を室温にて融解した後に搾汁液を採取し、Wescor社製のVapor Pressure Osmometerを用いて測定した。ターガーポテンシャルは、水ポテンシャルと浸透ポテンシャルの差から計算によって求めた。搾汁液を採取した葉は、 80°C で24時間乾燥し、デシケーター内で放冷後、乾燥重量を測定した。蒸散速度は重量法で測定した。鉢の表面からの水分の蒸発を防ぐために、鉢をポリ袋で包んだ。

可視害：オゾン処理した植物をファイトトロン温室に戻し、処理2日後に葉の表面の写真を撮影した。すべての実験が終了した後、すべての写真をまとめて観察し、可視害の程度を目視判定した。これは、日によって可視害の判定基準が変わるのを避けるためである。

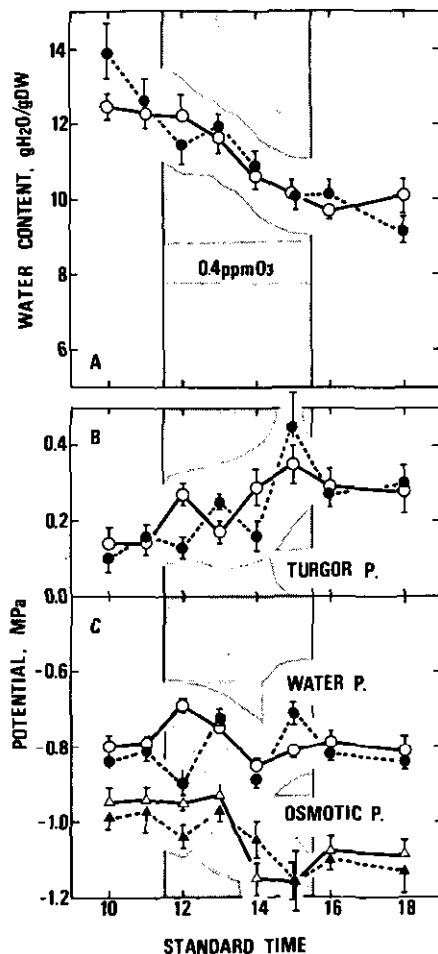


図 1 O₃処理による (A) 葉の含水量, (C) 水ポテンシャル (○, ●), 浸透ポテンシャル (△, ▲), (B) ターガーポテンシャルの経時変化
ヒマワリの第三位葉を4時間0.4ppm O₃処理した時の経時変化。オゾン処理の時間帯を■で示した。(○, △): 無処理葉; (●, ▲): 処理葉; n = 6 (±s.e.)

Fig. 1 The effect of ozone on (A) leaf water content, (C) water potential (○, ●), osmotic potential (△, ▲), and (B) turgor potential in sunflower leaves.

The time when ozone treatment was performed is indicated by ■. (○, △): Non-treated control; (●, ▲): Ozone-treated; n = 6 (±s.e.)

3 結 果

3.1 オゾン処理による水分状態の経時変化

図1にオゾン処理前2時間、処理中4時間及び処理後3時間の葉の含水量、水ポテンシャル、浸透ポテンシャル及びターガーポテンシャルの経時変化を示した。処理したオゾン濃度は0.4ppmで、処理は11:30に開始した。

葉の含水量はオゾン进行处理してもしなくても時間の経過とともに減少し(図1A)、オゾン処理葉と無処理葉の間には有意な差は認められなかった。

オゾン処理葉の水ポテンシャル、浸透ポテンシャル、ターガーポテンシャルは、処理前は無処理葉とは有意な差が認められなかったが、処理開始30分後にいずれのポテンシャル値も有意に低下した($P=0.05$)。しかし、処理開始1時間後からは、オゾン処理葉のどのポテンシャル値も無処理葉のそれと同様の変動を示し、両者の間に有意な差は認められなかった。

無処理葉の蒸散速度は測定開始1時間後には一定となり、その後の測定期間中(7時間)は変化しなかった(図2)。一方、オゾン処理葉の蒸散速度は処理開始とともに急激に低下し、処理1時間後には処理前の70%となり、その後オゾン処理を継続してもほぼ一定の値を示し、それ以上の低下は見られなかった。また、オゾン処理を停止しても蒸散速度の回復は、処理停止後2.5時間の間では見られなかった。

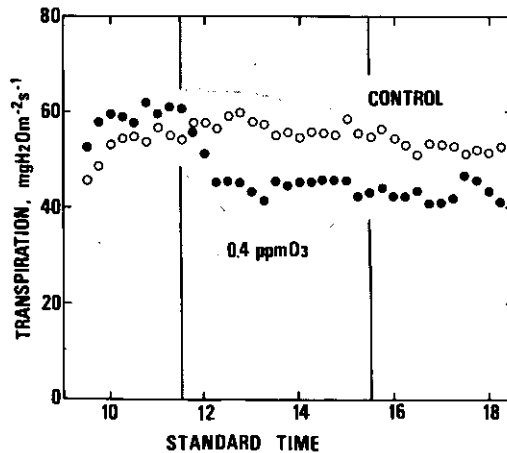


図 2 ヒマワリ葉の蒸散速度に対する O_3 の影響
蒸散速度は重量法で測定した。各測定値は4個体の平均。オゾン処理は0.4ppmで4時間行った。オゾン処理の時間帯を■で示した。
(○)：無処理葉；(●)：処理葉

Fig. 2 The effect of ozone on transpiration rate in sunflower leaves.
Each point was the mean of four determinations. The concentration of ozone was 0.4ppm and treatment was performed for 4 hrs. The time when ozone treatment was performed is indicated by ■. (○) : Non-treated control; (●) : Ozone-treated.

3.2 葉齢の進行に伴うオゾン処理による可視障害発現及び水分状態の変化

葉齢の進行に伴う可視害及び水分状態の変化を開葉後7日から25日までの葉を用いて測定した(図3)。オゾン処理は0.3ppmで4時間行った。可視害発現程度は開葉後8日から11日までほぼ一定で、15日目で最大となり、その後は減少した。

図4にオゾン処理による含水量、水ポテンシャル、浸透ポテンシャル、ターガーポテンシャル

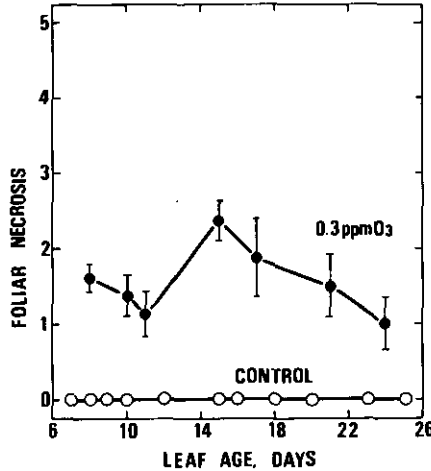


図 3 O₃処理による可視害の発現と葉齢の関係

ヒマワリの第3位葉を0.3ppm O₃に4時間処理し、2日間温室で放置後写真を撮り、可視害の評価を行った。(○)：無処理葉；(●)：処理葉

Fig. 3 The relationship between foliar necrosis induced by ozone and leaf age
Sunflower leaves of the 3rd order were treated with 0.3ppm ozone for 4hrs, then plants were transferred into the phytotron greenhouse and the foliar necrosis was determined 2 days after. (○) : Non-treated control; (●) : Ozone-treated.

の変化と葉齢との関係を示した。

葉齢の進行に伴う無処理葉の含水量の変化はあまりなく、ほぼ一定であった。また、オゾン処理葉と無処理葉との間には差がなく、オゾン処理によって含水量が変化する減少は観察されなかった。

葉齢の進行に伴う水ポテンシャルの変化は複雑であったが、開葉後10日目までは無処理葉に比べてオゾン処理葉の方が水ポテンシャルは低かったが、その後は処理葉の水ポテンシャルの方が無処理葉よりも高くなった。しかし、無処理葉とオゾン処理葉の水ポテンシャルの間にはいずれの葉齢においても有意な差は見られなかった。

葉齢の進行に伴う浸透ポテンシャルの変化は複雑な動きを見せ、可視害が最大となる開葉後15

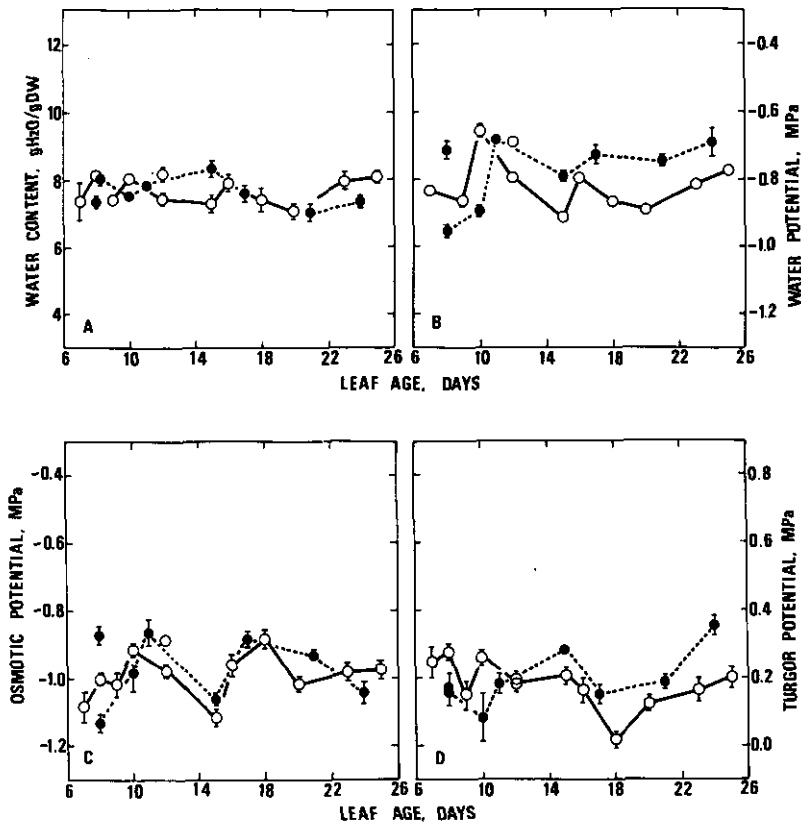


図 4 O_3 処理による (A) 葉の含水量, (B) 水ポテンシャル, (C) 浸透ポテンシャル, (D) ターガーポテンシャルの変化と葉齢の関係
(○, △): 無処理葉; (●, ▲): 処理葉; $n = 4$ (\pm s.e.)

Fig. 4 The relationship between (A) leaf water content, (B) water potential, (C) osmotic potential, and (D) turgor potential and leaf age.
(○) : Non-treated control; (●) : Ozone-treated. $n = 4$ (\pm s.e.)

日目で著しく低い値となったが、その前後の葉齢においては高かった。無処理葉とオゾン処理葉の浸透ポテンシャルの間には有意な差がなく、葉齢の進行に伴う変化も極めて類似しており、浸透ポテンシャルに対するオゾン処理の影響は見られなかった。

無処理葉のターガーポテンシャルは開葉後18日目で最低となり、0 MPaに近い値を示し、その後上昇した。オゾン処理葉のターガーポテンシャルは開葉後11日目までは無処理葉よりも低く、その後は高くなった。しかし、水ポテンシャル、浸透ポテンシャルの場合と同様に、オゾン処理によるターガーポテンシャルの有意の減少もしくは増加は見られなかった。

各葉齢段階における蒸散速度に対するオゾンの影響を図5に示した。図に示した蒸散速度はオ

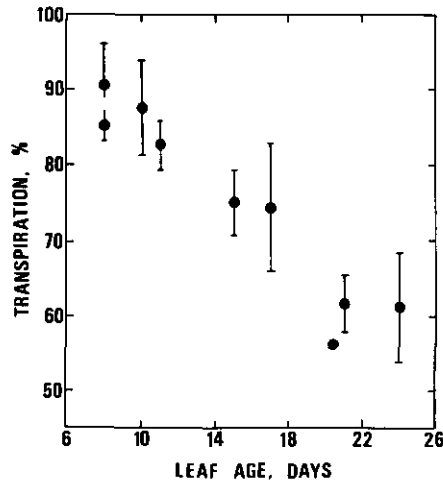


図 5 O_3 処理による蒸散速度の変化と葉齢の関係
蒸散速度は $0.3\text{ppm}O_3$ 処理前と処理 4 時間後の比率で示した。 $n = 4 (\pm \text{s.e.})$

Fig. 5 The relationship between the relative rate of transpiration and leaf age.

The transpiration rate was shown as the ratio of the rate before treatment of 0.3ppm ozone and the rate obtained after 4hr treatment. $n=4 (\pm \text{s.e.})$

ゾン処理前の蒸散速度を100としたときの処理 4 時間後の蒸散速度の相対値である。オゾン処理によって蒸散速度は葉齢の進行に伴い開葉後20日目まで直線的に低下した。

3.3 オゾン処理による可視障害発現程度と葉の水分状態との関係

オゾン処理による葉の水分状態の変化は前述のように、蒸散速度の阻害率が葉齢の進行とともに直線的に増大すること以外には、顕著な変化は観察されなかった。そこで、オゾン処理によって生じた各葉齢段階の可視障害発現程度と水ポテンシャル、浸透ポテンシャル、ターガーポテンシャルによって表される水分状態の測定値との関係について検討した(図6)。 0.3ppm オゾン処理葉の水ポテンシャル及び浸透ポテンシャルと可視障害発現程度との間には、それぞれ高い相関があり(各々、 $r^2=0.698, 0.862$)、ポテンシャル値が低いほど可視害が大きいという関係が認められた。しかし、ターガーポテンシャルと可視害発現程度の間には有意な相関は認められなかった($r^2=0.009$)。オゾン処理による可視害発現程度と含水量との関係については図示しなかったが、両者の間には相関関係は認められなかった($r^2=0.025$)。

0.3ppm オゾン 4 時間処理中の葉の積算オゾン吸収量を蒸散速度から大政ら(1979)の式を用いて求め、可視害発現程度との関係を図7に示した。図からも明らかのように、両者の間には相関が認められず($r^2=0.004$)、可視害発現程度が葉のオゾン吸収量によってのみ決められるのではな

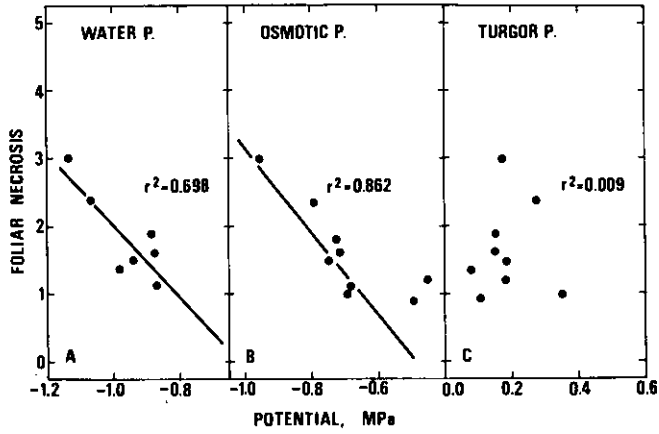


図 6 O₃処理による可視害の発現割合と (A) 水ポテンシャル, (B) 浸透ポテンシャル, (C) ターガーポテンシャルの関係
 オゾン処理は 0.3ppm で 4 時間行った。可視害発現割合と各ポテンシャル値との相関係数を図中に示した。

Fig. 6 The relationship between (A) leaf water content, (B) water potential, (C) osmotic potential, and (D) turgor potential and the degree of foliar necrosis.

The treatment of ozone was performed for 4hrs and the concentration of ozone was 0.3ppm. The linear regression coefficient is shown in each figure.

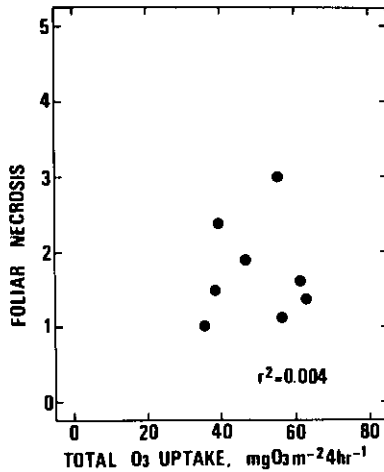


図 7 O₃処理による可視害の発現割合と積算オゾン吸収量との関係
 オゾン処理は 0.3ppm で 4 時間行った。可視害発現割合と積算オゾン吸収量との相関係数を図中に示した。

Fig. 7 The relationship between the integrated ozone uptake rate and the degree of foliar necrosis.

The treatment of ozone was performed for 4hrs and the concentration of ozone was 0.3ppm. The linear regression coefficient is shown in the figure.

いことが確かめられた。

4. 考 察

Omasa ら (1981b) は、ヒマワリ葉にオゾン処理して葉温分布と可視害分布を比較して、それらが一致しないことから可視害の程度は葉内に吸収したオゾン量によっているのではないとしている。また、本実験においても、葉一枚のオゾン吸収量と可視害の発現割合との間には相関が見られなかった (図 7) ことから、葉齢の進行に伴う可視害発現割合の変化がオゾン吸収量に依存しているのではなく、葉の構造的、生理的要因に依存していることを示している (Dugger ら, 1962; Dugger ら, 1963)。さらに、これまでに発表されている報告は、葉齢の進行に伴う可視害発現程度とこれら諸要因の変動を詳細に検討する必要性を示唆している (Dugger & Ting, 1968; 藤沼ら, 1981; 河内, 1980; 佐藤ら, 1981)。

オゾン処理によって種々の生理学的現象が変化するという報告がなされている (Heath, 1980)。そのなかで最も顕著なものは、オゾン処理によって細胞膜の透過性の増大 (Evans & Ting, 1973) と葉の含水量が経時的に減少する (Evans & Ting, 1974) ことであろう。細胞膜の透過性の増大は、細胞内水分を細胞外へ流出させることを促進し、細胞内の水分状態に影響を及ぼし、生理的機能を低下させる。細胞内水分状態の変化は浸透ポテンシャル、水ポテンシャルの変化となって表れ、葉の水分状態が悪化し、萎凋による可視害の発現、もしくは枯死となって肉眼的に観察されるようになるものと思われる。つまり、オゾンに対する感受性は、葉の水ストレスに対する感受性と類似している可能性が考えられる。この可能性は Harris & Heath (1980) によって報告されている。しかし、葉齢が進行するにつれてオゾン処理による蒸散速度の阻害率は増大したが、水ポテンシャル、含水量は変化しなかった。通常の状態では、気孔が閉鎖して蒸散速度が減少すると、水ポテンシャルは増加するはずである。すなわち、オゾン処理によって蒸散速度が減少するにもかかわらず、水ポテンシャルが変化しないのは、葉への給水も減少しているためと考えられる。この推論は、オゾン処理中の水分状態の経時変化 (図 1, 2) からもある程度の説明が可能と思われる。オゾン処理開始から 1 時間の間、蒸散速度は急激に減少し、その後は気孔が閉じて蒸散速度は安定し始める。この時間帯における水ポテンシャル、浸透ポテンシャル、ターガーポテンシャルは、無処理葉に比べて有意に低下している。また、蒸散速度が低下し、それ以上の低下が見られなくなると、いずれのポテンシャルも無処理葉との間に有意な差は見られなくなっている。すなわち、気孔が完全に閉鎖する前は、オゾン処理によって葉内の水分状態がアンバランスになり、水ポテンシャル、浸透ポテンシャルが低下するものと考えられ、その後、気孔の閉鎖にともない外見上は安定した水分状態になるものと思われる。また、水ポテンシャル、浸透ポテンシャルは、それぞれ可視害の程度との間に高い相関があり、可視害の発現がポテンシャル値を低下させていることを示していると思われる。佐藤ら (1981) は、インゲン品種間におけるオゾン感受性の差異と葉内糖含量との間に高い相関関係があると報告しているが、彼らはまた、

オゾン処理前の浸透ポテンシャルが低い品種ほど可視害程度が大きくなるとしている。すなわち、水ポテンシャル及び浸透ポテンシャルが可視害発現程度を決める要因の一つになっている可能性がある。しかし、別の実験結果から、水ポテンシャル、浸透ポテンシャルは可視害が発現して始めて低下することが分かっており、これらのポテンシャル値と可視害発現割合との間に高い相関関係があるからといって、オゾン感受性の種間差を決めているとは考え難い。現時点では、オゾン感受性の種間差を決めている要因は、ほとんど全くと言ってよいほど分かっておらず、今後の主要な研究課題の一つと思われる。

引用文献

- Dugger, W. M., O. C. Taylor and C. R. Thompson (1962) : Relationship between carbohydrate content and susceptibility of pinto bean plants to ozone damage. Proc. Am. Soc. Hortic. Sci., **81**, 304-315.
- Dugger, W. M., O. C. Taylor, C. R. Thompson and E. Cardiff (1963) : The effect of light on predisposing plants to ozone and PAN damage. J. Air Pollut. Cont. Assoc., **9**, 423-428.
- Dugger, W. M. and I. P. Ting (1968) : Factors affecting ozone sensitivity and susceptibility of cotton plants. J. Air Pollut. Cont. Assoc., **12**, 810-813.
- Evans, L. S. and I. P. Ting (1973) : Ozone-induced membrane permeability changes. Am. J. Bot., **60**, 155-162.
- Evans, L. S. and I. P. Ting (1974) : Ozone sensitivity of leaves : Relationship to leaf water content, gas transfer resistance, and anatomical characteristics. Amer. J. Bot., **61**, 592-597.
- 藤沼康実・戸塚 績・相賀一郎(1981) : 大気汚染物質に対する感受性のポプラ品種間差異, 国立公害研究所研究報告, 第28号, 149-159
- Harris, M. J. and R. L. Heath (1981) : Ozone sensitivity in sweet corn (*Zea mays* L.) plants : A possible relationship to water balance. Plant Physiol., **68**, 885-890.
- 河内 宏(1980) : 植物葉によるオゾン吸収と被害発現の関係—とくに葉位によるオゾン感受性の差異とオゾン吸収量の関連について, 大気汚染学会誌, **15**, 389-393.
- 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ガス収着機構の解析(3) NO₂, O₃, あるいは NO₂+O₃暴露下における収着について, 国立公害研究所研究報告, 第10号, 245-258.
- Omasa, K., Y. Hashimoto and I. Aiga (1981a) : A quantitative analysis of the relationships between SO₂ or NO₂ sorption and their acute effects on plant leaves using image instrumentation. Environ. Control Biol., **19**, 59-67.
- Omasa, K., Y. Hashimoto and I. Aiga (1981b) : A quantitative analysis of the relationships between O₃ sorption and its acute effects on plant leaves using image instrumentation. Environ. Control Biol., **19**, 85-92.
- 佐藤秋生・梅沢 武・金子恵子(1981) : インゲン品種間における高濃度オゾン感受性差異と葉内成分との関係, 電力中央研究所・研究報告, 480022.

VI 植生の成立過程に関する研究
Regeneration Process of Plant Communities

VI-1

アカマツ林伐採跡地における植生の成立過程に関する研究
Studies on the Regeneration Process of Plant Communities
Following Forest Cutting

可知直毅¹・戸塚 績¹・安岡善文²・鈴木啓祐³

Naoki KACHI¹, Tsumugu TOTSUKA¹, Yosifumi YASUOKA²
and Keisuke SUZUKI³

要 旨

大気環境浄化にかかわる都市周辺域に成立する二次林の成立過程を明らかにするために、筑波研究学園都市内のアカマツ林を伐採した跡地における植生の再生過程を調査した。伐採後毎年夏期に調査区のマルチバンド航空写真を撮影し、得られた画像データによって調査地を裸地・アズマネザサ優占区・陽樹(ヌルデ)優占区の3類型に分類した。これら3類型の相対優占度の経年変化を類型間の推移確率に基づくマルコフ連鎖モデルによって解析した。このモデルはある年から翌年にかけての類型間の推移過程を確率的に表現したものである。

アカマツ林の伐採によってできた裸地は、放置後2年でアズマネザサ又は陽樹が優占する植生によって完全に覆われた。モデルの解析からこの植生の再生過程は類型間の推移確率が年ごとに変動する非定常マルコフ過程であることが示された。この結果は裸地に初めに侵入する植物の空間パターンや植生の類型組成がその後の再生過程に大きく影響することを示唆する。

Abstract

A regeneration process of plant communities following disturbance of a pine forest

1. 国立公害研究所 生物環境部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番 2
Environmental Biology Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
2. 国立公害研究所 環境情報部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16番 2
Environmental Information Division, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
3. 昭和58-59年度 国立公害研究所客員研究員(亜細亜大学経済学部 〒180 東京都武蔵野市境5丁目24-15)
Visiting Fellow of the National Institute for Environmental Studies. (Department of Economics, Asia University, Sakai, Musashino, Tokyo 180, Japan).

in Tsukuba region in Japan has been studied. Bare ground was established by clear-cutting a red pine plantation (*Pinus densiflora*). Multi-spectral aerial photographs were taken in every summer to describe natural regeneration of plant communities starting from bare soil. Based on image processing of the photographic data, year to year changes in patterns of regenerating plant communities were analyzed by a Markovian model. The model represents a point-to-point replacement process from one year to the next among different plant communities. We found that following clear-cutting of a red pine plantation, bare soil was rapidly revegetated by plant communities dominated by ground bamboo and a sun tree. We have also found that the point-to-point replacement process was a non-stationary Markovian process. This result suggests that patterns and processes of invasion of pioneer plants into the bare soil at the initial stage would primarily affect the following revegetation process.

Key words: Forest disturbance—Markov model—*Pinus densiflora*—Plant succession—Remote sensing—Revegetation—Stochastic model.

1 緒 言

大気環境浄化に寄与する植物は、主として人間活動の活発な都市及びその周辺域に成立する植生である。これらの植生は都市中心部では主に街路樹・公園及び庭園緑地によって構成されているのに対して、都市周辺域ではクリ・コナラ・マツ等を優占種とする二次林が中心となる。街路樹や公園緑地は、造園学及び都市工学的な造成管理技術によって成立し維持されているのに対して、二次林は本来その地域の経済活動、特に農業と結びついて成立したものであり、二次林のもつ環境保全機能に関連してその成立過程や管理技術が問題とされることは過去にはほとんどなかった。

北関東地方の霞ヶ浦周辺の林地の約65%は、アカマツ (*Pinus densiflora*) の二次林及び植林地である(堀内, 1978)。これらの植林地は、落葉や下枝を燃料や堆肥に利用するために地域住民によって維持管理されてきたが、液化プロパンガスや化学肥料の普及に伴ってマツ林の利用価値が低下し、その多くが放置されたり工場用地・ゴルフ場・宅地などの造成のために伐採されたりして様々な攪乱を受けてきた。さらに、北関東地方のアカマツ林は最近の数年間にマツノザイセンチュウによるいわゆるマツ枯れの被害を受け、場所によってはほとんど壊滅に近い状態になっている(岸, 1980)。現在この地方でのアカマツ林の直接的な経済価値は以前ほど高くはないが、大気環境の浄化をはじめその環境保全や環境改善に果たす役割は小さくないものと想像される。

植物群落は伐採などのかく乱を受けてもその後そうしたかく乱が継続しなければ植生の再生が起こり、その後再生した植生の組成変化(植生遷移)が見られる(Golley, 1977及びConnell & Slatyer, 1977の総説を参照)。普通、こうした植生遷移は数種の植物種で代表される一連の遷移途中相の植物群落の時間的な置き換わりとして表現される。しかし、一様な気候及び土壌条件から植生遷移が出發した場合でも、複数の遷移途中相の植物群落がしばしば同時に観察される。この

ときこれらの植物群落は互いに空間的なモザイク構造あるいはパッチ構造をとり、植生遷移はこうしたモザイク構造の時間的変化としてとらえることができる。もしこうした植生パターンを航空写真や衛星写真から読み取ることができれば、植生遷移の研究にリモートセンシング技術の応用が期待できる (Barrett & Curtis, 1974; Norwine & Greeger, 1983)。こうした技術のひとつは、数値化した画像データ処理のための計算機利用に関するものである (Yasuoka & Miyazaki, 1980)。

一方、植生遷移をマルコフ過程として表現する試みが何人かの研究者によってなされてきた (Usher, 1966, 1979; Horn, 1975a; Waggoner & Stephens, 1970; Pedenら, 1973; Horn, 1980の総説を見よ)。マルコフ過程とはある時点の状態がそれ以前のある時点の状態に依存して確率的に決まるような過程をいう。これらの研究では個体レベル (Horn, 1975a) から群集レベル (Shugartら, 1973) までの様々なスケールでの置換過程を扱っている。

この研究の目的は、大気環境浄化にかかわる都市周辺域に成立する二次林の成立過程を明らかにするために、(1)アカマツ林を伐採した後の植生の再生過程をリモートセンシングによって記載し、(2)その過程を、計算機を用いた画像処理に基づいたマルコフ連鎖モデルによって解析することである。

2 材料及び方法

2.1 調査地

調査地として筑波研究学園都市にある国立公害研究所別荘地ほ場内のアカマツ植林地を選んだ。アカマツは15—25年生で樹高6—10m、栽植密度約0.9個体 m^{-2} であった。林床植生は、アズマネザサ (*Arundinaria chino*)・ネムノキ (*Albizia julibrissin*)・フジ (*Wistaria floribunda*) が優占していた。土壌は火山灰由来の排水性のよい関東ローム土である。年平均気温は14.3°C、月平均気温は8月の27.0°Cから1月の2.4°Cまで変動し、年間降水量は約1,100mmである (山口・藤沼, 1984)。

2.2 実験区の設定

1977年秋に調査地のアカマツ林を伐採し、ブルドーザで整地して約0.2haの裸地を造成した。1977年の冬期間中実験区に出現した植物を全て地上部から抜き取り裸地の状態に保った。植生の自然再生を起こさせるために1978年の春から実験区を放置した。

2.3 マルチバンド航空写真の撮影

1978年から1983年にかけて毎年夏期に実験区のマルチバンド航空写真を、高度300—450mからマルチバンドカメラ (PS MK-1) によって撮影した。撮影年月日は、それぞれ1978年8月15日、1979年8月16日、1980年8月9日、1981年8月24日、1982年9月1日、1983年8月8日であっ

た。航空写真は、日陰の影響を最小に抑えるため、晴天日の11:00から13:00の間に行った。また10~12枚の白板(50×50cm)を標定点として実験区の周辺においた。撮影したスペクトルバンドは、青(B, 400~480nm)、緑(G, 480~600nm)、赤(R, 600~730nm)、近赤外(730~800nm)である。またモニター用のナチュラルカラー写真を同時に撮影した。

2.4 データ解析

(i) 画像データの入力。マルチスペクトル画像をドラムスキャナーによって量子化しデジタル画像として計算機に入力した。画像サイズは512×512で1画素の地上部での分解能は約40×40cmであった。さらに、各画素の色調を256レベルに量子化した。

(ii) 画像の重ね合わせ。マルチスペクトル写真は、年ごとに異なった高度と角度から撮影されたので、実験区の各地点での植生の再生過程を解析するためには、これらの画像を同一尺度の座標上で重ね合わせなければならない。ここでは、次に示すアフィン変換によって幾何学的に個々の画像を計算機の中で重ね合わせた。

$$x' = ax + by + c$$

$$y' = dx + ey + f$$

ここで、 x' 、 y' は変換後の座標、 x 、 y はもとの座標、 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f は座標変換のための変換係数である。変換係数の値は、各画像に写し込まれた8~10個の標定点の座標に基づいて決定した。

(iii) 植生分類。こうして得られた実験区の画像を多重域値法によって三つの類型に分類した。すなわち、裸地(類型1)、アズマネザサ優占区(類型2)、陽樹(ヌルデ)優占区(類型3)である。分類には、B・R・IRの三つのスペクトルバンドの画像を用いた。ナチュラルカラー写真と地上調査の結果に基づいて、個々の画像ごとにいくつかの色調の域値を標本区域の色調値を参考にして試行錯誤的に決定した。これらの域値を組み合わせて実験区を8~12の類型に分け、次にそれらを三つの類型に統合した。ただし、色調の標準化は行わなかったため、色調の域値は年度ごとに異なっている。

ここで行った植生分類は航空写真によっているため、最上層を覆っている植物群落が問題とされ下層植生は考慮されていない。実際にはアズマネザサは陽樹優占区の下層植生の優占種のひとつであった。

3 結果

3.1 植生の経年変化

図1(a)と(b)は、それぞれ1978年と1983年のナチュラルカラー航空写真である。1978年には、実験区の25%がアズマネザサの優占する貧弱な植生によって覆われ、残りの75%は、裸地であつ



図 1 実験区の実験開始直後 [1978年 8月15日 (a)] と5年後 [1983年 8月 8日 (b)] のナチュラルカラー航空写真

Fig. 1 Aerial views of an experimental site at the start of the experiment [August 15, 1978 (a)] and after 5 years [August 8, 1983 (b)].

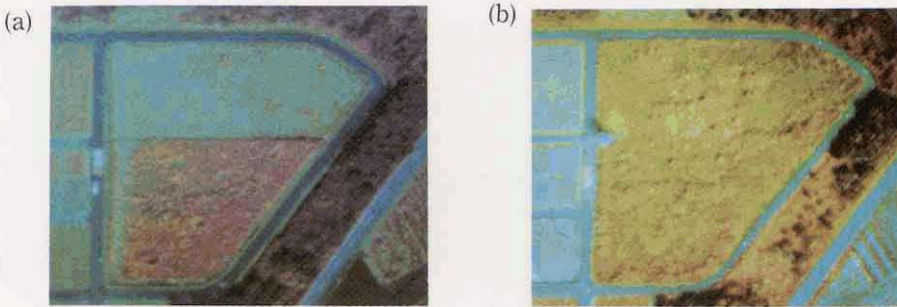


図 2 実験区のマルチバンド航空写真(B、R、I Rバンドの画像を重ね合わせたもの) (a): 1978年; (b): 1983年.

Fig. 2 Multispectral photographs obtained by overlaying images of B, R, and IR bands. (a): 1978; (b): 1983.



図 3 実験区の植生の分類結果とその経年変化

Fig. 3 Yearly changes in patterns of vegetation in the experimental site. Classification was based on image processing of multispectral aerial photographs.

たのに対して、1983年には、実験区はアズマネザサ、又はヌルデが優占する植生によって完全に覆われた。このアズマネザサの大部分は1977年の実験区の造成時にブルドーザによってちぎられて埋められた茎から再生したものであった。一方、ヌルデなどの陽樹は実験区の外から種子によって侵入したものであった。アズマネザサ優占区その他の構成種はキハギ (*Lespedeza buergeri*)・メドハギ (*Lespedeza cuneata*)・アカマツ (*Pinus densiflora*)・ネムノキ (*Albizia julibrissin*)などで、陽樹優占区の構成種はヌルデ (*Rhus javanica*)・タラノキ (*Arallia elata*)・ススキ (*Miscanthus sinensis*)・セイタカアワダチソウ (*Solidago altissima*)・アズマネザサ (*Arundinaria chino*)などであった。1978年と1979年において裸地に分類された場所には、実際には上に挙げた植物の芽生えや稚樹がかなりの数認められたが、それらは小さいうえに密度が低かったために写真画像では検出できなかった。すなわち、1978年に陽樹優占区は画像上では認められなかったが、その構成種は既に実験区に侵入していた。

図2(a)と(b)は、それぞれ1978年と1983年に得られたB, R, IRバンドのマルチスペクトル画像を重ね合わせたものである。図3は、植生分類の結果で、1978年から1983年の三つの類型パターンを経年変化を示している。これら三つのタイプの相対優占度の経年変化を実験区全体に占める面積の百分率で示したものが図4である。裸地(類型1)には急速にアズマネザサあるいは陽樹が優占する植生が再生し、1980年には裸地が認められなくなった。初めアズマネザサ優占区(類型2)が急速に増加したが、1980年以降次第に減少した。陽樹優占区(類型3)は1978年には認められなかったが、1979年以降次第にその優占度を高めていった。

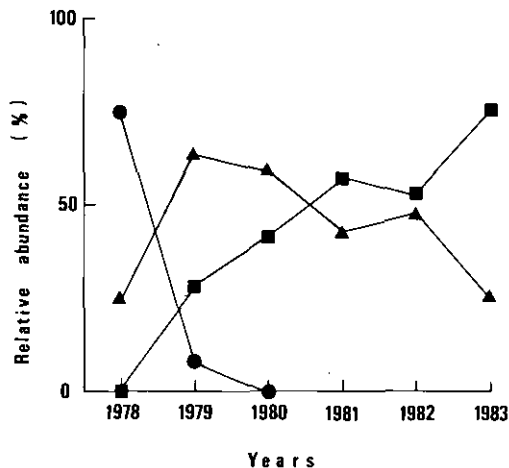


図 4 実験区における裸地(●)、アズマネザサ優占区(▲)、陽樹優占区(■)の相対優占度(%)の経年変化

Fig. 4 Yearly changes in relative abundance of three categories of vegetation in the experimental site. ●: Bare soil; ▲: Bamboo community; ■: Sun-tree community.

可知直致ら

3.2 植生の推移確率

図3に示された実験区の種類画像は、三つの類型に分類された約12,000個の小区画(画素)によって構成されているが、今この画素を単位とする類型間の年推移を行列 N で表現する。

$$N = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{pmatrix}$$

ここで n_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) は、 t 年から $t+1$ 年に類型 i から類型 j に変化した画素数である。分類された画像データに基づき1978年から1983年における5年間の毎年の推移行列を計算した。

$$N_{78,80} = \begin{pmatrix} 1123 & 6688 & 2661 \\ 32 & 2303 & 1250 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad N_{79,80} = \begin{pmatrix} 0 & 673 & 482 \\ 0 & 6223 & 2827 \\ 0 & 1405 & 2531 \end{pmatrix}$$

$$N_{80,81} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5058 & 3245 \\ 0 & 1019 & 4835 \end{pmatrix} \quad N_{81,82} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4476 & 1596 \\ 0 & 2281 & 5779 \end{pmatrix}$$

$$N_{82,83} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3158 & 3599 \\ 0 & 432 & 6941 \end{pmatrix}$$

ただし、 $N_{t,t+1}$ は1900+ t 年から1900+ $t+1$ 年の3類型間の推移を表す行列である。これらの行列の行合計は t 年に各類型に分類された画素数を表す。画素数の全合計が年ごとにわずかず異なるのは、画像処理によってどの類型にも分類されない画素が少数存在したためである。

これらの行列から類型間の推移確率を計算し、推移確率行列 P を得た。

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix}$$

ここで p_{ij} は、画素が t 年から $t+1$ 年に類型 i 型から類型 j に推移する確率で、次の式に従って計算した。

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_{i1} + n_{i2} + n_{i3}}$$

この定義から明らかなように推移確率行列 P の行合計は 1.0 になる。以下に $P_{t,t+1}$ の計算結果を示す。

$$P_{78,79} = \begin{pmatrix} 0.11 & 0.64 & 0.25 \\ 0.01 & 0.64 & 0.35 \\ - & - & - \end{pmatrix} \quad P_{79,80} = \begin{pmatrix} 0.00 & 0.58 & 0.42 \\ 0.00 & 0.69 & 0.31 \\ 0.00 & 0.36 & 0.64 \end{pmatrix}$$

$$P_{80,81} = \begin{pmatrix} - & - & - \\ 0.00 & 0.61 & 0.39 \\ 0.00 & 0.17 & 0.83 \end{pmatrix} \quad P_{81,82} = \begin{pmatrix} - & - & - \\ 0.00 & 0.74 & 0.26 \\ 0.00 & 0.28 & 0.72 \end{pmatrix}$$

$$P_{82,83} = \begin{pmatrix} - & - & - \\ 0.00 & 0.47 & 0.53 \\ 0.00 & 0.06 & 0.94 \end{pmatrix}$$

ここで「-」はその行の類型の画素数が 0 となって推移確率の計算ができなかったことを示す。

$P_{78,79}$ 及び $P_{79,80}$ から明らかなように、裸地 (類型 1) はそれ自身に置き換わることはほとんどなく、アズマネザサ優占区 (類型 2) や陽樹優占区 (類型 3) に高い確率で推移した。また、一般に類型 1 から類型 2 に推移する確率は、類型 1 から類型 3 に推移する確率より高かった。これは、アズマネザサのちぎれた地下茎からの高い再生力を反映したものである。一方、類型 2 と類型 3 に関してはそれぞれ相互に置き換わる確率よりも自分自身に推移する (すなわち変化しない) 確率の方が高かった。

1980 年以降は類型 1 が消滅したので、類型 2 の相対優占度の減少は類型 2 から類型 3 へ推移した画素数が類型 3 から類型 2 へ推移した画素数より多かったことを意味する。ある類型 i から他の類型 j に推移する画素数は、もとの類型 i に属する画素数とその画素が類型 j に置き換わる推移確率の積であるので、 $p_{i1} = 0$ ($i = 1, 2, 3$) の条件では類型 2 の相対優占度は次の関係が満たされたときに起こる。

$$c_2 p_{2,3} > c_3 p_{3,2}$$

ここで c_i は類型 i の相対優占度、 $p_{i,j}$ は類型 i から類型 j に推移する確率である。1980 年から 1981 年にかけては、 $c_2 > c_3$ かつ $p_{2,3} > p_{3,2}$ であったために上の条件が満足されて類型 2 の相対優占度が減少した。一方、1982 年から 1983 年にかけては $c_2 < c_3$ であったにもかかわらず $p_{2,3} > p_{3,2}$ であることの効果が大きかったために類型 2 はやはり減少した。

可知直毅ら

3.3 マルコフ連鎖モデル

ここで、 t 年における三つの類型の相対優占度をベクトル

$$C_t = [c_{1t} \quad c_{2t} \quad c_{3t}]$$

で表す。ただし、 c_{it} ($i=1, 2, 3$)は t 年における類型 i の相対優占度である。この時 $t+1$ 年における類型の相対優占度 C_{t+1} は C_t と推移確率行列 $P_{t,t+1}$ の積によって表現できる。

$$C_{t+1} = C_t P_{t,t+1}$$

さらに、もし推移確率行列 P が年ごとに変化しなければ、各類型の相対優占度の経年変化は定常マルコフ連鎖モデルによって記述できる。

$$C_{t+x} = C_t (P_{t,t+1})^x$$

ここで x は t 年からの年数である。またこのモデルに従って植生の推移（遷移）が進行すると類型組成はある定常値に収束することが知られている。この収束値は初期の類型組成とは無関係に推移確率行列の要素の値のみによって決まる。

表1は、三つの類型の相対優占度の経年変化の実測値とマルコフ連鎖モデルによる予測値を比較したものである。マルコフモデルによる計算は、四つの推移確率行列 $P_{79,80} \cdot P_{80,81} \cdot P_{81,82} \cdot P_{82,83}$ とそれぞれに対応する四つの初期条件に基づいて行った。例えば、 $P_{79,80}$ に基づく計算では1980年の類型組成の観測値を初期条件とした。

1982年以前のデータに基づいたマルコフモデルによると、類型の相対優占度は初期条件からあまり大きく変化しないで推移すると予測された。一方、 $P_{82,83}$ と C_{83} に基づくマルコフモデルでは、今後類型3が次第に増加しそれに伴って類型2が減少することが予測された。すべての場合に類型の相対優占度は初期年度から3年目で定常値に十分近い値にまで収束した。

これらのマルコフモデルでは推移確率 $p_{2,1}, p_{3,1}$ がともに0であり、しかも初期条件での類型1の相対優占度も0であったので、実際の計算は、四つの推移確率 $p_{22}, p_{23}, p_{32}, p_{33}$ と類型2と類型3の初期相対優占度 c_{2t}, c_{3t} を用いて行った。この場合、 $p_{22} + p_{23} = 1.0$ かつ $p_{32} + p_{33} = 1.0$ であるので定常状態での類型2と3の相対優占度は p_{23} と p_{32} のみによって次のように表される。

$$c'_2 / c'_3 = p_{32} / p_{23}$$

ここで c'_i は類型 i の定常状態での相対優占度である。定常状態の予測値は推移確率 p_{32} と p_{23} の年変動に伴って変動した(表1)。 $P_{82,83}$ では1982年以前と比較して p_{32} の値が p_{23} の値より際だって小さかったため、予測された定常値も類型3に大きく偏った。

4 考 察

我々の行った野外実験では、北関東筑波地方のアカマツ林が伐採された跡地での植生の再生は比較的速やかで、かく乱の結果できた裸地は放置後2年以内に完全に植被に覆われることが示された。筑波地方の台地は主に関東ローム土壌であるが、再生した植物の定着と生長にとって比較的肥沃度の高い土壌といえる(大場ら, 1976)。一方、西日本の瀬戸内海沿岸におけるアカマツ林の山火跡地の植生回復の速度は、土壌が貧栄養で保水力の低い砂質土壌であるためにずっと遅いことが報告されている(中越ら, 1983; 中根ら, 1983; 中越ら, 1984)。

我々のモデルは、植生が攪乱を受けた後、数年間の植生の再生過程の記載をするものであって、数十年あるいは数百年にわたる植生の変化を予測することは生物学的に無理がある。それは、このモデルでは2種類の植生区(アズマネザサ優占区と陽樹優占区)のみを考慮に入れているためである。これらの植物群落は、筑波地方の二次遷移の初期段階に典型的にみられるものであり、遷移がより進んだ段階ではおそらくシラカシ(*Quercus myrsinaefolia*)やアラカシ(*Quercus glauca*)といった耐陰性の強い照葉樹が優占する植物群落に置き換わっていくものと想像される。一般に、アズマネザサやヌルデなどの陽樹はこうした極相林には優占種として存在しない(赤津・堀内, 1971)。

表1にみられるようにマルコフモデルによって予測された類型組成の経年変化は、必ずしも実測値に近いものとはならなかった。この結果は、推移確率行列の要素が定数ではなく、年とともに変動したために、植生の再生過程が定常マルコフモデルで十分に表現できなかったことを意味

表 1 3類型(裸地、アズマネザサ優占区、陽樹優占区)の相対優占度(%)の経年変化の観測値とマルコフモデルによる予測値との比較

Table 1 Comparisons of observed and predicted values by a markov model for relative abundance (%) of the three categories (bare soil, bamboo-dominated community, sun tree-dominated community)

年	観測値	マルコフモデルによる予測値 ($\hat{P}_{t,t+1}$ による)			
1978	(74, 25, 0)				
1979	(8, 64, 28)	$P_{79,80}$			
1980	(0, 59, 41)	(0, 59, 41)	$P_{80,81}$		
1981	(0, 43, 57)	(0, 55, 45)	(0, 43, 57)	$P_{81,82}$	
1982	(0, 48, 52)	(0, 54, 46)	(0, 36, 64)	(0, 48, 52)	$P_{82,83}$
1983	(0, 25, 75)	(0, 54, 46)	(0, 33, 67)	(0, 50, 50)	(0, 25, 75)
1984	(0, 54, 46)	(0, 54, 46)	(0, 31, 69)	(0, 51, 49)	(0, 16, 84)
1985	(0, 54, 46)	(0, 54, 46)	(0, 31, 69)	(0, 51, 49)	(0, 13, 87)
1986	(0, 54, 46)	(0, 54, 46)	(0, 31, 69)	(0, 52, 48)	(0, 11, 89)
定常値		(0, 54, 46)	(0, 30, 70)	(0, 52, 48)	(0, 10, 90)

可知直毅ら

する。一般に、各類型の推移確率はその類型が存在する場所に依存している場合は、推移確率行列は必ずしも一定にならず類型組成も定常値に収束しないことが知られている (Horn, 1975b)。この場所依存性に関して、我々の場合には少なくとも二つの理由が考えられる。第一の理由として、一つの画素が占める地上部での面積は個々の植物個体が占める面積よりも小さく、また観測の間隔が1年とアズマネザサや陽樹の寿命に比べて短いため、画素数の変化は植物個体の置き換わりよりもむしろ植物個体の生長を反映していた点が考えられる。実際アズマネザサや陽樹優占区として分類された画素は、互いに集合していわゆるパッチ構造をしており、特に陽樹優占区では陽樹の生長に伴ってこのパッチが拡大していく様子が観察された(図3)。この場合、画素間の推移確率はパッチの周辺部と中心部で異なってくる。陽樹はアズマネザサの上に覆いかぶさるようにして生長するので、アズマネザサ優占区と陽樹優占区の境界では前者から後者に推移する確率は、実験区全体の平均値より高かったと考えられる。第二の理由としては、一度アズマネザサに覆われた場所では陽樹の芽生えが定着する確率が低いことが考えられる。こうした場所ではアズマネザサのリターによって地表が覆われるために、陽樹の芽生えに対する水の供給が低下したり根の伸張が物理的に抑制されたりするためである。そのためアズマネザサ優占区の中心部はその周辺部に比べて陽樹が侵入しにくい環境になっており、アズマネザサ優占区と陽樹優占区間の推移確率はアズマネザサのパッチ内の場所に依存していたと考えられる。

アズマネザサと陽樹の幼個体が裸地に同時に定着した場合は、アズマネザサが初めの1—2年間その高い再生力のために陽樹を圧倒して優占し、その後陽樹がアズマネザサ群落を覆うように生長してその相対優占度を高めるであろう。ただし、陽樹がアズマネザサ群落をどの程度圧倒するかは、初期段階における両者の相対割合と空間分布状態が大きく影響するものと考えられる。実際、1978年に裸地であった場所が1983年に陽樹優占区になった割合は0.61で同じ期間にアズマネザサ優占区が陽樹優占区になった割合0.39よりも大きかった。裸地に最初にどの種が侵入してその先取権を得るかという問題は、先取権を得た種によってその後の植生遷移が抑えられるという現象と関連して Connel & Slatyer (1977) によって論じられている。

謝 辞

この研究テーマに対して有益な示唆と励ましをいただいた当研究所の近藤次郎所長に感謝致します。また、この論文の草稿に対して助言していただいた古川昭雄主任研究員に感謝致します。野外調査では、技術部の山口武則は場係長はじめ実験場のスタッフのお世話になりました。マルコフモデルに関する計算機による作業では、芙蓉情報センター総合研究所の蒲耕二、藤原史之の両氏のお世話になりました。

引用文献

- 赤津一郎・堀内孝雄 (1971) : 鹿島地方における潜在自然植生. 茨城林試研報, 6, 23.
- Barrett, E. C. and L. F. Curtis (eds.) (1974) : Environmental Remote Sensing: Applications and Achievements, Edward Arnold, London, 309p.
- Connell, J. H. and R. O. Slatyer (1977) : Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *American Naturalist*, 111, 1119-1144.
- Golley, F. B. (ed.) (1977) : Ecological Succession, Benchmark Papers in Ecology, Vol. 5, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. Pennsylvania, 373p.
- 堀内孝雄 (1978) : 霞ヶ浦周辺の林域とその変遷. 霞ヶ浦とその周辺の自然と人間活動. 佐伯敏郎編, 環境科学研究報告集, B 3-R12-1, 27-35
- Horn, H. S. (1975a) : Forest succession. *Scientific American*, 232, 90-98.
- Horn, H. S. (1975b) : Markovian properties of forest succession. *In: Ecology and Evolution of Communities*, Cody, M. L. and J. M. Diamond (eds.), Harvard University Press, Cambridge, Mass., 196-211.
- Horn, H. S. (1981) : Succession. *In: Theoretical Ecology*, R. May (ed.), 2nd ed., Blackwell, Oxford, 253-271.
- 岸 洋一 (1980) : 茨城県におけるマツノザイセンチュウによるマツ枯損と防除に関する研究. 茨城林試研報, 11, 1-83.
- 中越信和・根平邦人・中根周歩 (1983) : アカマツ林の山火跡地における植生回復. IV. 初期段階の埋土種子. 広島大学総合科学部紀要IV, 8, 87-110.
- 中越信和・知念民雄・堀 信行・根平邦人 (1984) : アカマツ林山火跡地における植生回復. IV. 地形の影響. 広島大学総合科学部紀要IV, 9, 41-65.
- 中根周歩・根平邦人・中越信和・高松修治 (1983) : アカマツ林山火跡地における植生回復. V. 播種 (主に牧草類) の影響について. 広島大学総合科学部紀要IV, 8, 111-126.
- Norwine, J and D. H. Greeger (1983) : Vegetation classification based on advanced very high resolution radiometer (AVHRR) satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 13, 303-314.
- 大羽 裕・永塚鎮男・富川昭男 (1976) : 農林技術センター用地の土壌の現況. 筑波の環境研究, 1, 44-48.
- Peden, L. M., J. S. Williams and W. E. Frayer (1973) : A markov model for stand projection. *Forest Science*, 19, 303-314.
- Shugart, H. H. Jr., T. R. Crow and J. M. Hett (1973) : Forest succession models: a rationale and methodology for modeling forest succession over large regions. *Forest Science*, 19, 203-212.
- Usher, M. B. (1966) : A matrix approach to the management of renewable resources with special reference to selection forests. *J. Appl. Ecol.*, 3, 355-367.
- Usher, M. B. (1979) : Markovian approaches to ecological succession. *J. Animal Ecol.*, 48, 413-426.
- 山口武則・藤沼康実 (1984) : 国立公害研究所実験圃場の土壌及び気象に関する調査資料集. 国立公害研究所研究資料, 第26号, 84p.
- Yasuoka, Y. and T. Miyazaki (1980) : IPSEN—an interactive image processing system for environmental analysis and evaluation. *Proc. of 5th International Conference on Pattern Recognition*, 745-749.
- Waggoner, P. E. and G. R. Stephens (1970) : Transition probabilities for a forest. *Nature*, 255, 1160-1161.

国立公害研究所特別研究成果報告

- 第 1 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究——霞ヶ浦を対象域として——昭和51年度。(1977)
第 2 号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究——昭和51, 52年度 研究報告。(1978)

(改 称)

国立公害研究所研究報告

- ※ 第 3 号 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)
(日本産ユスリカ科 *Chironomus* 属9種の成虫, サナギ, 幼虫の形態の比較)
- 第 4 号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究——昭和52年度 中間報告。(1978)
- 第 5 号 芳香族炭化水素-窒素酸化物系の光酸化反応機構と光酸化二次生成物の培養細胞に及ぼす影響に関する研究——昭和51, 52年度 研究報告。(1978)
- 第 6 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅱ)——霞ヶ浦を中心として。——昭和53年度。(1979)
- ※ 第 7 号 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)
(日本産ユスリカ科20種の成虫, サナギ, 幼虫の形態学的研究)
- ※ 第 8 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究——昭和52, 53年度 研究報告。(1979)
- 第 9 号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究——昭和53年度 中間報告。(1979)
- 第 10 号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究——昭和51~53年度 特別研究報告。(1979)
- 第 11 号 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)
(大気汚染物質の植物影響およびその植物毒性の機構に関する研究)
- 第 12 号 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)
(コンピュータ制御装置を利用したフレイムおよび誘導結合プラズマ分光法による多元素同時分析)
- 第 13 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)
Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
(多摩川に発生するユスリカの研究
— 第1報 その一支流に見出されたユスリカ各種の分布と下水による汚染度との関係 —
— 第2報 その一支流に見出された Chironominae 亜科の20種について —)
- 第 14 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壤生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究——昭和53, 54年度 特別研究報告。(1980)
- ※ 第 15 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究——昭和54年度 特別研究報告。(1980)
- 第 16 号 計測車レーザーレーダーによる大気汚染遠隔計測。(1980)
- ※ 第 17 号 流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果——臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究——昭和53, 54年度 特別研究報告。(1980)

- 第 18 号 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)
(環境標準試料「リョウブ」の調製, 分析および保証値)
- ※ 第 19 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅲ) — 霞ヶ浦(西浦)の湖流 — 昭和53, 54年度.
(1981)
- 第 20 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅳ) — 霞ヶ浦流域の地形, 気象水文特性およびその湖
水環境に及ぼす影響 — 昭和53, 54年度. (1981)
- 第 21 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅴ) — 霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価 —
昭和53, 54年度. (1981)
- 第 22 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅵ) — 霞ヶ浦の生態系の構造と生物現存量 — 昭和53,
54年度. (1981)
- 第 23 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅶ) — 湖沼の富栄養化状態指標に関する基礎的研究 —
昭和53, 54年度. (1981)
- 第 24 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅷ) — 富栄養化が湖利用に及ぼす影響の定量化に関す
る研究 — 昭和53, 54年度. (1981)
- 第 25 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅸ) — [*Microcystis*] (藍藻類)の増殖特性 — 昭和53,
54年度. (1981)
- 第 26 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(X) — 藻類培養試験法によるAGPの測定 — 昭和53,
54年度. (1981)
- 第 27 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(XI) — 研究総括 — 昭和53, 54年度. (1981)
- 第 28 号 複合大気汚染の植物影響に関する研究 — 昭和54, 55年度 特別研究報告. (1981)
- 第 29 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1981)
Part 3. Species of the subfamily Orthocladiinae recorded at the summer survey and their distri-
bution in relation to the pollution with sewage waters.
Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.
(多摩川に発生するユスリカ類の研究
— 第3報 夏期の調査で見出されたエリユスリカ亜科 Orthocladiinae 各種の記載と, その分
布の下水汚染度との関係について —
— 第4報 南浅川の冬期の調査で見出された各種の分布と記載 —)
- ※ 第 30 号 海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究 — 昭和54, 55年度 特別研究報
告. (1982)
- 第 31 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和55年度
特別研究報告. (1981)
- 第 32 号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究 — 環境大気中における
光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究1) — 昭和54年度 特別研究報告. (1982)
- 第 33 号 臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究 — 大気運動と大気拡散過程のシミュレーション
— 昭和55年度 特別研究報告. (1982)
- 第 34 号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究 — 昭和55年度 特別研究報告. (1982)
- 第 35 号 環境面よりみた地域交通体系の評価に関する総合解析研究. (1982)
- 第 36 号 環境試料による汚染の長期モニタリング手法に関する研究 — 昭和55, 56年度 特別研究報告.
(1982)
- 第 37 号 環境施策のシステム分析支援技術の開発に関する研究. (1982)
- 第 38 号 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material. (1982)
(環境標準試料「池底質」の調製, 分析及び保証値)
- 第 39 号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究 — 昭和56年度 特別研究報告. (1982)

- 第 40 号 大気汚染物質の単一及び複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和56年度 特別研究報告。(1983)
- 第 41 号 土壤環境の遠隔計測と評価に関する統計学的研究。(1983)
- ※ 第 42 号 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究。(1983)
- ※ 第 43 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1983)
 Part 5. An observation on the distribution of Chironominae along the main stream in June with description of 15 new species.
 Part 6. Description of species of the subfamily Orthocladiinae recovered from the main stream in the June survey.
 Part 7. Additional species collected in winter from the main stream.
 (多摩川に発生するユスリカ類の研究
 — 第 5 報 本流に発生するユスリカ類の分布に関する 6 月の調査成績とユスリカ亜科に属する 15 新種等の記録 —
 — 第 6 報 多摩本流より 6 月に採集されたエリユスリカ亜科の各種について —
 — 第 7 報 多摩本流より 3 月に採集されたユスリカ科の各種について —)
- 第 44 号 スモッグチャンパーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究 — 環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究 2) — 昭和54年度 特別研究中間報告。(1983)
- 第 45 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壤生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 — 昭和53~55年度 特別研究報告。(1983)
- 第 46 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壤生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 — 昭和54, 55年度 特別研究報告 第 1 分冊。(1983)
- 第 47 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壤生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 — 昭和54, 55年度 特別研究報告 第 2 分冊。(1983)
- 第 48 号 水質観測点の適正配置に関するシステム解析。(1983)
- 第 49 号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究 — 昭和57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 50 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (I) — 霞ヶ浦の流入負荷量の算定と評価 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 51 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (II) — 霞ヶ浦の物質循環とそれを支配する因子 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 52 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (III) — 霞ヶ浦高浜入における隔離水界を利用した富栄養化防止手法の研究 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 53 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (IV) — 霞ヶ浦の魚類及び甲かく類現存量の季節変化と富栄養化 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 54 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (V) — 霞ヶ浦の富栄養化現象のモデル化 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 55 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (VI) — 富栄養化防止対策 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 56 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (VII) — 湯ノ湖における富栄養化とその防止対策 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 57 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (VIII) — 総括報告 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 58 号 環境試料による汚染の長期的モニタリング手法に関する研究 — 昭和55~57年度 特別研究総合報告。(1984)

- 第 59 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究—光化学スモッグチャンバーによるオゾン生成機構の研究—大気における有機化合物の光酸化反応機構の研究—昭和55~57年度 特別研究報告(第1分冊)。(1984)
- 第 60 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究—光化学エアロゾル生成機構の研究—昭和55~57年度 特別研究報告(第2分冊)。(1984)
- 第 61 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究—環境大気における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究1)—昭和55~57年度 特別研究報告(第3分冊)。(1984)
- 第 62 号 有害汚染物質による水界生態系のかく乱と回復過程に関する研究—昭和56~58年度 特別研究中間報告。(1984)
- 第 63 号 海域における富栄養化と赤潮の発生病機に関する基礎的研究—昭和56年度 特別研究報告。(1984)
- 第 64 号 複合大気汚染の植物影響に関する研究—昭和54~56年度 特別研究総合報告。(1984)
- 第 65 号 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Part 1. (1984)
(複合大気汚染の植物に及ぼす影響—第1分冊)
- 第 66 号 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Part 2. (1984)
(複合大気汚染の植物に及ぼす影響—第2分冊)
- 第 67 号 環境中の有害物質による人の慢性影響に関する基礎的研究—昭和54~56年度 特別研究総合報告。(1984)
- 第 68 号 汚泥の土壌還元とその環境影響に関する研究—昭和56~57年度 特別研究総合報告。(1984)
- 第 69 号 中禅寺湖の富栄養化現象に関する基礎的研究。(1984)
- 第 70 号 Studies on chironomid midges in lakes of the Nikko National Park (1984)
Part I. Ecological studies on chironomids in lakes of the Nikko National Park.
Part II. Taxonomical and morphological studies on the chironomid species collected from lakes in the Nikko National Park.
(日光国立公園の湖沼のユスリカに関する研究
—第1部 日光国立公園の湖のユスリカの生態学的研究—
—第2部 日光国立公園の湖沼に生息するユスリカ類の分類学的, 形態学的研究—)
- ※第 71 号 リモートセンシングによる残雪及び雪田植生の分布解析。(1984)
- 第 72 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究. 環境大気における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究2)—昭和55~57年度 特別研究報告(第4分冊)。(1985)
- 第 73 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究—昭和55~57年度 特別研究総合報告。(1985)
- 第 74 号 都市域及びその周辺の自然環境に係る環境指標の開発に関する研究. 環境指標—その考え方と作成方法—昭和59年度 特別研究報告。(1984)
- 第 75 号 Limnological and environmental studies of elements in the sediment of Lake Biwa. (1985)
(琵琶湖底泥中の元素に関する陸水学及び環境化学的研究)
- 第 76 号 Study on the behavior of monoterpenes in the atmosphere. (1985)
(大気中モノテルペンの挙動に関する研究)
- 第 77 号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究—昭和58年度 特別研究報告。(1985)
- 第 78 号 生活環境保全に果たす生活者の役割の解明。(1985)
- 第 79 号 Studies on the method for long term environmental monitoring—Research report 1980-1982. (1985)
(環境汚染の長期的モニタリング手法に関する研究)

- 第 80 号 海域における赤潮発生のモデル化に関する研究 — 昭和57—58年度 特別研究報告. (1985)
- 第 81 号 環境影響評価制度の政策効果に関する研究 — 地方公共団体の制度運用を中心として. (1985)
- 第 82 号 植物の大気環境浄化機能に関する研究 — 昭和57/58年度 特別研究報告. (1985)
- 第 83 号 Studies on chironomid midges of some lakes in Japan. (1985)
(日本の湖に発生するユスリカ類の研究)

※ 残部なし

Report of Special Research Project the National Institute for Environmental Studies

- No. 1* Man activity and aquatic environment – with special references to Lake Kasumigaura – Progress report in 1976. (1977)
- No. 2* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants – Progress report in 1976-1977. (1978)

[Starting with Report No. 3, the new title for NIES Reports was changed to:]

Research Report from the National Institute for Environmental Studies

- ※ No. 3 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)
- No. 4* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1977. (1978)
- No. 5* Studies on the photooxidation products of the alkylbenzene-nitrogen oxides system, and on their effects on Cultured Cells – Research report in 1976-1977. (1978)
- No. 6* Man activity and aquatic environment – with special references to Lake Kasumigaura – Progress report in 1977-1978. (1979)
- ※ No. 7 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)
- ※ No. 8* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1977-1978. (1979)
- No. 9* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1978. (1979)
- No.10* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants – Progress report in 1976-1978. (1979)
- No.11 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)
- No.12 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)
- No.13 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)
- Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
- Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
- No.14* Studies on the effects of organic wastes on the soil ecosystem – Progress report in 1978-1979. (1980)
- ※ No.15* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1977-1978. (1980)
- No.16* Remote measurement of air pollution by a mobile laser radar. (1980)
- ※ No.17* Influence of buoyancy on fluid motions and transport processes – Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region – Progress report in 1978-1979. (1980)
- No.18 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)
- ※ No.19* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Lake current of Kasumigaura (Nishiura) – 1978-1979. (1981)
- No.20* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Geomorphological and hydrometeorological characteristics of Kasumigaura watershed as related to the lake environment – 1978-1979. (1981)

- No.21* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Variation of pollutant load by influent rivers to Lake Kasumigaura – 1978-1979. (1981)
- No.22* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Structure of ecosystem and standing crops in Lake Kasumigaura – 1978-1979. (1981)
- No.23* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Applicability of trophic state indices for lakes – 1978-1979. (1981)
- No.24* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Quantitative analysis of eutrophication effects on main utilization of lake water resources – 1978-1979. (1981)
- No.25* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Growth characteristics of Blue-Green Algae, *Mycrocystis* – 1978-1979. (1981)
- No.26* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Determination of algal growth potential by algal assay procedure – 1978-1979. (1981)
- No.27* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Summary of researches – 1978-1979. (1981)
- No.28* Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Progress report in 1979-1980. (1981)
- No.29 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1981)
 Part 3. Species of the subfamily Orthoclaadiinae recorded at the summer survey and their distribution in relation to the pollution with sewage waters.
 Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.
- ※ No.30* Eutrophication and red tides in the coastal marine environment – Progress report in 1979-1980. (1982)
- No.31* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1980. (1981)
- No.32* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1979 – Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 1). (1982)
- No.33* Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region – Simulation of atmospheric motions and diffusion processes – Progress report in 1980. (1982)
- No.34* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution – Research report in 1980. (1982)
- No.35* Comprehensive evaluation of environmental impacts of road and traffic. (1982)
- No.36* Studies on the method for long term environmental monitoring – Progress report in 1980-1981. (1982)
- No.37* Study on supporting technology for systems analysis of environmental policy – The evaluation laboratory of Man-environment Systems. (1982)
- No.38 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material. (1982)
- No.39* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution – Research report in 1981. (1983)
- No.40* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1981. (1983)
- No.41* Statistical studies on methods of measurement and evaluation of chemical condition of soil. (1983)
- ※ No.42* Experimental studies on the physical properties of mud and the characteristics of mud transportation. (1983)
- ※ No.43 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1983)

- Part 5. An observation on the distribution of Chironominae along the main stream in June, with description of 15 new species.
- Part 6. Description of species of the subfamily Orthoclaadiinae recovered from the main stream in the June survey.
- Part 7. Additional species collected in winter from the main stream.
- No.44* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1979 – Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 2). (1983)
- No.45* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem – Outlines of special research project – 1978-1980. (1983)
- No.46* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem – Research report in 1979-1980, Part 1. (1983)
- No.47* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem – Research report in 1979-1980, Part 2. (1983)
- No.48* Study on optimal allocation of water quality monitoring points. (1983)
- No.49* The development and evaluation of remote measurement method for environmental pollution – Research report in 1982. (1984)
- No.50* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Estimation of input loading of Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.51* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – The function of the ecosystem and the importance of sediment in national cycle in Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.52* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Enclosure experiments for restoration of highly eutrophic shallow Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.53* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Seasonal changes of the biomass of fishes and crustacea in Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.54* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Modeling the eutrophication of Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.55* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Measures for eutrophication control. – 1980-1982. (1984)
- No.56* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Eutrophication in Lake Yunoko. – 1980-1982. (1984)
- No.57* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Summary of researches. – 1980-1982. (1984)
- No.58* Studies on the method for long term environmental monitoring – Outlines of special research project in 1980-1982. (1984)
- No.59* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen-sulfur oxides system – Photochemical ozone formation studied by the evacuable smog chamber – Atmospheric photooxidation mechanisms of selected organic compounds – Research report in 1980-1982, Part 1. (1984)
- No.60* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen-sulfur oxides system – Formation mechanisms of photochemical aerosol – Research report in 1980-1982, Part 2. (1984)
- No.61* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen-sulfur oxides system – Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 1) – Research report in 1980-1982, Part 3. (1984)
- No.62* Effects of toxic substances on aquatic ecosystems – Progress report in 1980-1983. (1984)

- No.63* Eutrophication and red tides in the coastal marine environment – Progress report in 1981. (1984)
- No.64* Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Final report in 1979-1981. (1984)
- No.65 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Part 1. (1984)
- No.66 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Part 2. (1984)
- No.67* Studies on unfavourable effects on human body regarding to several toxic materials in the environment, using epidemiological and analytical techniques – Project research report in 1979-1981. (1984)
- No.68* Studies on the environmental effects of the application of sewage sludge to soil – Research report in 1981-1982. (1984)
- No.69* Fundamental studies on the eutrophication of Lake Chuzenji – Basic research report. (1984)
- No.70 Studies on chironomid midges in lakes of the Nikko National Park – Part I. Ecological studies on chironomids in lakes of the Nikko National Park. – Part II. Taxonomical and morphological studies on the chironomid species collected from lakes in the Nikko National Park. (1984)
- ※ No.71* Analysis on distributions of remnant snowpack and snow patch vegetation by remote sensing. (1984)
- No.72* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system—Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere. —Research report in 1980-1982. (1985)
- No.73* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides-sulfur oxides system—Final report in 1980-1982. (1985)
- No.74* A comprehensive study on the development of indices system for urban and suburban environmental quality. Environmental indices-basic notion formation—Research report 1984. (1984)
- No.75 Limnological and environmental studies of elements in the sediment of Lake Biwa. (1985)
- No.76 Study on the behavior of monoterpenes in the atmosphere. (1985)
- No.77* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution. (1985)
- No.78* Study on citizens' role in conserving the living environment. (1985)
- No.79 Studies on the method for long term environmental monitoring—Research report 1980-1982. (1985)
- No.80* Modeling of red tide blooms in the coastal sea—Research report 1982-1983. (1985)
- No.81* A study on effects of implementing environmental impact assessment procedure—With particular reference to implementation by local governments. (1985)
- No.82* Studies on the role of vegetation as a sink of air pollutants—Research report in 1982-1983. (1985)
- No.83 Studies on chironomid midges of some lakes in Japan. (1985)

* in Japanese

※ out of stock

RESEARCH REPORT FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN
No. 82

国立公害研究所研究報告 第82号
(R-82-'85)

昭和60年3月30日発行

編集 国立公害研究所編集委員会
発行 環境庁 国立公害研究所
茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2

印刷 勝美印刷株式会社
文京区小石川1-3-7

Published by the National Institute for Environmental Studies
Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan
March 1985