

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

Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants
Progress report in 1976-1977

NIES

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

環境庁 国立公害研究所

序

人間の生産活動にともなう工場排煙や自動車の排気ガスなどで大気が汚染され、それにともない人間の健康がおびやかされたり、自然環境が破壊されたりする影響は近年とみに重要な社会問題となってきた。このような大気汚染の状況を評価し、かつそれを予防するためにはいろいろな方法がとりあげられているが、近年、とくに陸上植物を利用する方法が大きな意味をもつものとして注目されるようになってきた。

陸上植物は多くの場合大気を汚染する物質に対して動物よりも敏感で、その植物をとりまく大気環境の状態をその葉の変化などでよく表現してくれる。それは、化学的、物理的な計測がある瞬間の大気の状態を示すものと異なって、長い期間にわたる影響が積分されて現れてくることに特徴があるといえる。さらに、多くの陸上植物はその体内に大気汚染物質を吸収し、これを浄化する働きをしてくれていることも見逃せない重要な事柄である。

大気汚染が植物にあたえる影響の研究は近年になって、いちじるしく進歩し、その重要性が認識されてきた。当研究所においても、大型実験施設の一つとして、大気汚染ガスによる暴露実験を目的とした植物環境制御施設（ファイトトロン）を建設（昭和50年12月完成）し、この施設を用いて昭和51年度から“植物に対する大気汚染の影響ならびに植物による大気汚染環境改善の手法を検討する特別研究”を実施している。

この特別研究において、これまでに得られた研究成果をとりまとめ、この報告書を刊行することとなった。研究開始後未だ日が浅いため十分な成果はえられていないが、今後、関係各位からきたんなき御批判を迎ぎ、研究の進展とともにさらにその内容が充実され、有意義な成果があげられていくことを期待するものである。

国立公害研究所長
佐々学

1978年3月

目 次

序 (佐々 学)

I. 研究体制および研究経過 (戸塚 績)	1
II. 研究成果の概要 (戸塚 績・菅原 淳)	4
III. 報 文	
1. 二酸化イオウに対する植物の抵抗性に関する研究 (1)	15
二酸化イオウ吸収から障害発現への過程における植物の防御機構	
近藤矩朗・菅原 淳	
2. 二酸化イオウに対する植物の抵抗性に関する研究 (2)	17
二酸化イオウ暴露による植物の蒸散変化とアブサイシン酸量との関連について	
近藤矩朗・菅原 淳	
3. 二酸化イオウに対する植物の抵抗性に関する研究 (3)	25
二酸化イオウ暴露による植物細胞液の pH 変化について	
菅原 淳・近藤矩朗・滝本道明	
4. 二酸化イオウに対する植物の抵抗性に関する研究 (4)	29
植物における亜硫酸酸化反応について	
近藤矩朗・菅原 淳	
5. 二酸化イオウの植物影響の作用機序に関する研究 (1)	35
光合成電子伝達反応阻害とクロロフィル分解との関連について	
島崎研一郎・菅原 淳	
6. 二酸化イオウの植物影響の作用機序に関する研究 (2)	47
光合成電子伝達反応の阻害機構および葉緑体反応の指標性について	
島崎研一郎・菅原 淳・岡田光正・滝本道明	
7. ヒマワリ葉の光合成, 気孔開度におよぼす二酸化イオウの影響	57
古川昭雄・戸塚 績	
8. 高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響 (1)	67
NO ₂ 暴露によるヒマワリの乾物生長変化と NO ₂ 吸収について	
戸塚 績・米山忠克・名取俊樹・滝本道明	
9. 高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響 (2)	77
ヒマワリとインゲンマメの乾物生長におよぼす NO ₂ 暴露の影響	
戸塚 績・佐藤秋生・米山忠克・牛島忠広	
10. 高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響 (3)	89
NO ₂ 暴露に対する草本植物の感受性および窒素濃度変化の種間差異	
戸塚 績・米山忠克・名取俊樹・藤沼康実	

11. 高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(4)	95
数種木本植物の生長および植物体窒素濃度におよぼすNO ₂ 暴露の影響 米山忠克・戸塚 績・石塚茂樹・藤沼康実・矢崎仁也	
12. 高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(5)	103
草本植物による ¹⁵ N ₂ Oの吸収, 亜硝酸の蓄積, 亜硝酸還元酵素活性の変化 米山忠克・笹川英夫・戸塚 績・山本幸男	

IV. 予報および短報

1. 二酸化イオウ暴露によるインゲンマメ被害葉の光合成速度の変化 についての予備実験	113
白鳥孝治・森川昌記・高崎 強・戸塚 績	
2. 二酸化イオウ暴露によるヒマワリ葉の可視害徴発現についての観察	119
戸塚 績・荒川市郎・野本宣夫・田崎忠良	
3. 各種植物における葉面光反射スペクトルの測定	127
篠崎光夫・村上仁士・辰己修三・菅原 淳	
4. 二酸化イオウに対するイネの抵抗性についての品種間差異	135
大村 武・佐藤 光・菅原 淳	
5. 都市域の野外条件下における大気汚染質の植物影響に関する予備調査	145
古川昭雄・清水英幸・藤沼康実・戸塚 績	

V. 大気汚染暴露実験施設について

1. 汚染ガスに暴露された植物の生体計測	165
大政謙次・安保文彰・船田 周・相賀一郎	
2. 制御環境下でのヒマワリの生長と環境要因との関係	183
—栄養生長におよぼす温度要因の影響— 藤沼康実・町田 孝・戸塚 績・相賀一郎	
3. 大気汚染ガス暴露のためのグロースキャビネット	193
相賀一郎・大政謙次・安保文彰	
4. 複合汚染実験設備の設計	211
相賀一郎・大政謙次・松本 茂	

Contents

Preface

SASA, M.

- I. Organization of the project and progress in research 1
TOTSUKA, T.
- II. Outlines of the contributions 4
TOTSUKA, T. and SUGAHARA, K.
- III. Original papers
 1. Studies on resistance of plants to sulfur dioxide (1) 15
The possible mechanisms of resistance to sulfur dioxide on the processes from sulfur dioxide uptake to damage in higher plants
KONDO, N. and SUGAHARA, K.
 2. Studies on resistance of plants to sulfur dioxide (2) 17
Changes in transpiration rate of plants with SO₂ fumigation and the participation of abscisic acid
KONDO, N. and SUGAHARA, K.
 3. Studies on resistance of plants to sulfur dioxide (3) 25
Changes in pH of plant cytoplasm with sulfur dioxide fumigation
SUGAHARA, K., KONDO, N. and TAKIMOTO, M.
 4. Studies on resistance of plants to sulfur dioxide (4) 29
Sulfite oxidation reactions in higher plants
KONDO, N. and SUGAHARA, K.
 5. Studies on mechanisms of sulfur dioxide phytotoxicity (1) 35
Effects of sulfur dioxide on photosynthetic electron transport and chlorophyll breakdown in higher plants.
SHIMAZAKI, K. and SUGAHARA, K.
 6. Studies on mechanisms of sulfur dioxide phytotoxicity (2) 47
Mechanisms of inhibition in photosynthetic electron transport systems by sulfur dioxide and application of chloroplast reactions for indicators of sulfur dioxide phytotoxicity
SHIMAZAKI, K., SUGAHARA, K., OKADA, M. and TAKIMOTO, M.
 7. Effect of sulfur dioxide on net photosynthesis and stomatal aperture in sunflower leaves 57
FURUKAWA, A. and TOTSUKA, T.

8. Response of plants to atmospheric NO ₂ fumigation (1) Effects of NO ₂ fumigation on dry weight growth and nitrogen accumulation in sunflower plant	67
TOTSUKA, T., YONEYAMA, T., NATORI, T. and TAKIMOTO, M.	
9. Response of plants to atmospheric NO ₂ fumigation (2) Effects of NO ₂ fumigation on dry matter growth of sunflower and kidney bean plants	77
TOTSUKA, T., SATO, S., YONEYAMA, T. and USHIJIMA, T.	
10. Response of plants to atmospheric NO ₂ fumigation (3) Variations of plant susceptibility and nitrogen accumulation in several species of herbaceous plants fumigated with NO ₂	89
TOTSUKA, T., YONEYAMA, T., NATORI, T. and FUJINUMA, Y.	
11. Response of plants to atmospheric NO ₂ fumigation (4) Changes in dry weight growth and nitrogen content in woody plants fumigated with NO ₂	95
YONEYAMA, T., TOTSUKA, T., ISHIZUKA, S., FUJINUMA, Y. and YAZAKI, Z.	
12. Response of plants to atmospheric NO ₂ fumigation (5) Measurements of ¹⁵ NO ₂ uptake, nitrite accumulation and nitrite reductase activity in herbaceous plants	103
YONEYAMA, T., SASAGAWA, H., TOTSUKA, T. and YAMAMOTO, Y.	

IV. Technical reports and short communications

1. Preliminary investigation in net photosynthesis of kidney bean leaves injured by SO ₂ fumigation	113
SHIRATORI, K., MORIKAWA, M., TAKASAKI, T. and TOTSUKA, T.	
2. Observations of visible leaf injury in sunflower plant fumigated with SO ₂	119
TOTSUKA, T., ARAKAWA, I., NOMOTO, N. and TAZAKI, T.	
3. Measurements of reflectance spectra of leaf in several plants	127
SHINOZAKI, M., MURAKAMI, H., TATSUMI, S. and SUGAHARA, K.	
4. Differences among local rice varieties in resistance to sulfur dioxide	135
OMURA, T., SATO, H. and SUGAHARA, K.	
5. Preliminary studies of air pollution effects on higher plants under field conditions in urban area	145
FURUKAWA, A., SHIMIZU, H., FUJINUMA, Y. and TOTSUKA, T.	

V. Facilities for gas exposure experiments in plants

1. The extraction of physiological information from higher plants fumigated with air pollutants 165
OMASA, K., ABO, F., FUNADA, S. and AIGA, I.
2. Correlation between growth and environmental factors under controlled conditions in sunflower – effects of temperature on vegetative growth – 183
FUJINUMA, Y., MACHIDA, T., TOTSUKA, T.
and AIGA, I.
3. Growth cabinet for air pollutant gas fumigation 193
AIGA, I., OMASA, K. and ABO, F.
4. Design of the fumigation system for multi-component of air pollutant gases 211
AIGA, I., OMASA, K. and MATSUMOTO, S.

I

研究体制および研究経過

戸塚 績 (生物環境部)

人間の生活空間における大気汚染物質の濃度は通常、極く低濃度であるが、その生物への影響については、ほとんど未知の研究分野で、各種大気汚染質に関する生活環境基準設定のためにも、早急に究明されねばならない研究課題である。また、大気環境の悪化はその質的な変化とともに年々広域に拡大されつつあり、適切な環境評価法の確立は焦眉の急である。

従来、自然環境評価のための方法として、植物指標が提案されているが、植物による大気汚染環境評価法については、いまだに数量的評価を可能とする方法が開発されていない。そこで、各種大気汚染質に対する陸上植物の感受性、抵抗性を生理生化学的、ならびに、生態学的観点から解析し、その結果をもとに、大気汚染に係る生活環境許容基準設定のための基礎資料の収集、局所的ならびに広域の大気汚染度を数量的に評価できる植物指標の開発、さらに植物の汚染物質吸収能に関する基礎資料をもとに、エアークリナーとしての植物の環境改善機能を評価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、ならびに技術部生物施設管理室の共同研究のもとに、以下の分担課題を設定した。

1. 大気汚染質に対する植物の抵抗性に関する生理・生化学的研究
2. 大気汚染質に対する植物の抵抗性に関する生態学的研究
3. 植物指標による大気汚染環境の評価法の研究
4. 陸上植物群落による大気汚染環境改善の方法に関する研究
5. 暴露キャビネットにおける大気汚染ガス濃度制御方法および植物生体計測手法の開発に関する研究

本研究プロジェクトの研究対象および研究目的との関連を示したのが図1である。植物個体あるいは群落における大気汚染の影響をうけた結果として発現する現象を生理生態学的な視点から解析し、これをもとに所期の目的を達成することを目ざしている。さらに、生理生化学的研究は個体レベルにおける現象に関する因果関係の本質を解明するとともに、汚染質による植物細胞内における生理作用の微細変化を追求し、それらの知見にもとづく環境指標の確立をめざしている。一方、昭和52年度より本研究計画に参加した技術部では、各種大気汚染物質の単一および混合状態における極低濃度暴露実験のための、汚染質濃度制御および植物生体の非破壊計測法を開発し、上記の研究目的を遂行する上に必要な実験設備の確立を主要な目的としている。

野外における大気汚染は、通常は複数の異った汚染物質が共存した複合汚染である。しかし、植物に対する複合汚染の影響を明らかにするためには、共存する汚染質のそれぞれ単一汚染質による阻害作用を明らかにし、複合汚染質の影響と比較検討する必要がある。また、野外条件下における大気汚染物質の植物影響には、大気汚染質以外の環境要因も関係するので、単純な環境要因の組合せによる室内実験で基礎資料を集め、それらの結果をもとに、野外現象を説明できる数学モデルを開発することが必要であろう。また、数学モデルの適用性を検討するための圃場実験、野外実験も必要となる。

そこで、大気汚染の植物影響に関する研究プロジェクトの第一期計画ともいえる本特別研究では、大気汚染物質のうちの主要な汚染質である二酸化イオウと二酸化窒素を研究対象とし、それぞれの単一汚染ガスの植物影響を検討することから出発した。また、これらの汚染ガス暴露実験に使用される実験施設の性能試験、および、実験植物の制御環境下での生育反応についても検討を試みた。一方、都市域の野外条件下において、植物の種々な生理機能におよぼす複合大気汚染の影響についても予備実験を試みた。

今回は、本研究の第1年度にあたった、昭和51年度の研究成果について主としてまとめたもので、研究の最終目標である、植物による大気汚染環境評価法の確立、環境改善の方策を提言するには、はなはだ不十分である。今後の研究の進展により、所期の目的を達成できるよう努める所存である。これらの研究成果は、将来、陸域生態系におよぼす大気汚染の影響を検討するための基礎資料となり、環境アセスメント手法の確立に寄与しうるものと信じている。

終りにあたり、本研究を推進する上に御協力いただいた多くの大学関係者、試験研究機関の研究者に深く感謝の意を表する次第である。

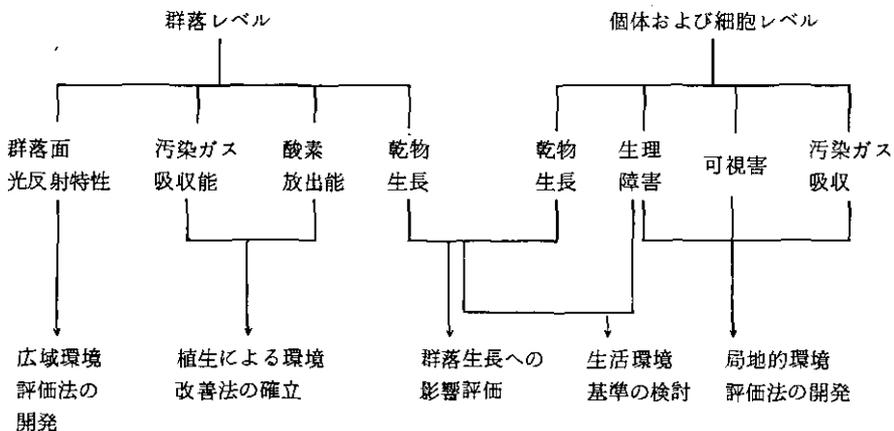


図1 大気汚染物質の植物影響に関する研究対象（上段）
およびそれと研究目標（下段）との関連性

研究組織

1. 研究担当者

1. 生物環境部 生理生化学研究室

菅原 淳・近藤矩朗・島崎研一郎・榊 剛

2. 生物環境部 陸生生物生態研究室

戸塚 績・古川昭雄・米山忠克・名取俊樹・清水英幸

3. 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

2. 研究協力者

1. 船田 周（愛媛大学農学部；790松山市樽味3-5-7）

2. 野本宣夫・荒川市郎（茨城大学理学部（農学部）；310水戸市渡里町）

3. 大村 武・佐藤 光（九州大学農学部；812福岡市東区箱崎6-10-1）

4. 白鳥孝治・森川昌記・高崎 強（千葉県農業試験場 公害研究室；280-02千葉市大膳野町）

5. 篠崎光夫（神奈川県公害センター大気科；254平塚市豊原町2-14）

6. 滝本道明・岡田光正（東邦大学理学部；274千葉県船橋市三山町542）

7. 辰己修三・村上仁士（筑波大学農林学系；300-31茨城県新治郡桜村）

8. 田崎忠良・牛島忠広・佐藤秋生（東京農工大学農学部；183府中市幸町）

9. 矢崎仁也・石塚茂樹（日本大学農獣医学部；154東京都世田谷区下馬3-34-1）

10. 山本幸男・笹川英夫（名古屋大学農学部；464名古屋市千種区不老町）

II

研究成果の概要

戸塚 績・菅原 淳(生物環境部)

本研究プロジェクトの研究目標は、植物に対する大気汚染の影響を明らかにし、農作物や街路樹など、人間生活と密接な関係をもつ植物に対する生活環境基準ともいべき許容基準検討のための基礎資料をうること、大気汚染物質に対する感受性が高等動物に比較して著しく高い植物の特性を利用して、局地的あるいは広域の大気汚染環境の評価法を開発すること、さらに、街路樹や緑地帯のエアフィルターとしての環境改善機能を評価することにある。今回の報告書に採録された報文は、プロジェクト研究を開始した昭和51年度に主としてえられた実験結果にもとづいて、植物個体あるいは細胞レベルにおいて、二酸化イオウや二酸化窒素の影響を、因果論的に追及したものである。研究を開始してからまだ日が浅く、上記の研究目的の一部をも満足させるに足る十分な知見がえられているとはいいがたい。今後の研究の進展により、所期の目的を達成することに努めたい。以下に今回、採録された研究成果と研究目的との関連性について、その概要をまとめた。

A. 環境基準検討のための基礎資料

1. 二酸化イオウの植物影響について

二酸化イオウ(SO₂)暴露による植物の急性障害は、これまで報告されているように、高濃度、短時間暴露処理により主として葉面における漂白斑あるいは褐色斑として発現する。我々も、当初に、これまでの知見の追試を兼ねて、可視障害発現に関与する植物の生育状態の影響を検討した。可視障害の発現は、植物のSO₂抵抗性の強さによるが、ヒマワリやホウレンソウのように感受性の高い植物では、比較的低濃度でも発現しうる。また、生育段階によって著しく異なる。本報告書のIV-2にみられるように、ヒマワリでは同一葉位でも、生育段階の低い個体ほど可視害の発現が顕著である。また、葉位別では、老葉の方が若葉や壮葉に比して顕著である。これまで報告されている知見、例えば光化学オキシダントに対するアサガオの可視障害発現が葉のエイジングによって異なることが認められている*。したがって、葉面の可視障害度を判定基準として、大気汚染の植物影響を検討する場合、植物の発育状態を考慮する必要がある。

植物がSO₂に接触した場合、可視障害が現れる以前に生理生化学的機能が変化することがすでに知られているが、種々の生理生化学的レベルの変動が、環境悪化に対する植物の防御的反応なのか、

* 環境庁大気保全局：昭和50年度光化学大気汚染植物影響調査報告書。昭和51年3月

あるいは可視障害に結びつくものであるかなどの検討はなされていなかった。本研究では、これらの点を明らかにすべく、防御機構および葉緑体反応阻害と可視障害発現との関連について、系統的な解析を進めてきた。

防御機構解析の手段は本報告書のⅢ-1で詳細に述べているように、まず、SO₂の侵入口である気孔での防御反応にはアブサイシン酸が関与しており、葉中アブサイシン酸含量の多い植物は、SO₂に接触するとすばやく気孔を閉じ、SO₂の侵入を防ぎ、強い抵抗性を示すことを明らかにした(Ⅲ-2参照)。

さて、気孔の閉門を通過して細胞液に溶けこんだSO₂はH⁺とHSO₃⁻、SO₃²⁻を生じるが、H⁺のみならず影響は細胞液のpH低下である。これに対して細胞液の緩衝能力がかなり有効に働き、pH低下が阻止されていることがⅢ-3の研究から明らかになった。また同時に生じた亜硫酸イオンは細胞構成成分を変性破壊する毒性を持つが、亜硫酸を低毒性の硫酸イオン(SO₄²⁻)に酸化する亜硫酸酸化反応の活性が植物葉中に存在することを、箱根大湧谷周辺のSO₂濃度の高い環境に生存している数種の植物の葉について調べ、明確にした(Ⅲ-4参照)。この結果、植物がSO₂汚染環境に置かれたならば、この反応が一種の解毒機能として可動し、抵抗性を高めていることが示唆された。

上述のような数段階の防御機構をくぐり抜けて来たSO₂の影響因子である亜硫酸イオンは、細胞質中の光合成反応の場である葉緑体の機能に影響を与える。Ⅲ-5およびⅢ-6の研究では、光合成電子伝達反応の阻害を、それぞれ、光化学系Ⅰと光化学系Ⅱに由来する電子伝達反応とに分けて調べ、後者に属する、水からDPIPに至る経路で、不可逆的な阻害が起こっていることを明らかにした。この光化学系Ⅱでの阻害と、葉のクロロフィル分解との時間的な関連が、今までの報告で明確にされていなかったが、Ⅲ-5の研究により、SO₂によるクロロフィルの分解は、電子伝達反応の阻害よりも時間的に遅れがあることを明確にした。そして分解様式としては、主にブリーチングによるという結果を得た。このような光化学系Ⅱでの不可逆的機能低下をもたらす原因として、葉緑体膜構造の変化が考えられるので、膜構造に強く依存した光リン酸化およびチラコイド膜を介して起こるプロトン勾配の形成への影響を調べた。光リン酸化反応は、光化学系Ⅱの電子伝達と共役した反応のみが阻害され、プロトン勾配の形成は、光化学系Ⅱの電子伝達反応が厳しく阻害された条件下でもほとんど影響を受けなかった。一方、葉緑体のクロロフィルから発せられる蛍光の収率が、電子伝達活性の低下に伴って減少することも認められた。これらの結果を総合すると、SO₂が葉緑体におよぼす影響は、まず、光化学系Ⅱ近傍で、分子レベルでの不可逆的損傷が起こり、これが発端となって、構造変化、機能低下などが誘起され、クロロフィルの分解へとつながって障害発現へと発展することを示していると考えられる。

植物が葉面に可視障害をうけたときの植物の乾物生長(個体重増加)への影響をⅣ-1で検討した。インゲンマメの葉では、可視障害面積率(一枚の葉に占める可視障害部面積の割合)が0~数%でも、植物の乾物生長を支配する光合成機能が正常値の80%に低下する。しかし、障害部面積率

が数%~70%の範囲では、光合成機能はほぼ一定（正常値の70~80%）である。このことは、可視障害が葉にわずかに発現する程度でも、植物の生長が抑制されるが、さらに可視害が顕著（全葉面の半分以上）となっても、その後の植物の生長は、それほど大きな被害を受けないかも知れないことを暗示している。

植物の光合成機能におよぼすSO₂の阻害作用は、葉に可視障害が発現しなくとも、SO₂暴露後ただちに現れる（Ⅲ-7参照）。ヒマワリの壮葉では、人工照明（約40 klux）下で、0.5 ppm SO₂暴露により、光合成機能が正常値の10%低下するのに約60分の暴露時間を要する。しかし、1.0 ppm SO₂ではそれが15分に短縮され、1.5 ppm SO₂では5分となる。このことは、SO₂による光合成阻害効果の増加は直線的でなく、指数関数的であるといえる。Ⅲ-7の図-7の資料をもとに、ヒマワリの光合成速度が10%抑制されるSO₂濃度（C；ppm）とSO₂ドース（Y；ppm×day）との関係を求めた結果、壮葉（図-7の第5葉）では、

$$\log Y = -1.26 \log C + \log 9.6 \times 10^{-3} \text{ となった。}$$

この式に、SO₂の環境基準値C = 0.04 ppmを代入すると、Y = 0.55 (ppm·day)となる。したがって、0.04 ppmのSO₂濃度で連続暴露して、光合成機能を10%低下させるに要する日数は、0.55 ÷ 0.04 = 14日となる。この値は、同一葉を連続光照射のもとで14日間暴露後に光合成活性が10%低下することを意味する。ヒマワリの葉では1枚の葉の寿命が2~3週間あり、しかも、高い光合成機能を維持しうる期間も10~15日間ある。それ故、0.04 ppm SO₂という現在の環境基準濃度でも、ヒマワリと同程度のSO₂感受性をもつ植物の葉は、平均して数%程度の光合成機能の障害をうけることになる。植物の生長には、光合成機能以外に同化産物の分配や新器官形成速度など、多くの生理的要因が関与しているので、光合成機能の数%低下が、ただちに乾物生長の数%低下をもたらすとは限らない。それ故、植物の乾物生長に及ぼす低濃度SO₂の影響を明らかにするには、実際に種々のSO₂濃度のもとで植物を長期間育成し、その結果をもとに、環境基準値に近い極低濃度のSO₂の影響を外そう法で求める以外に方法がないとおもわれる。現在、このような視点でヒマワリの生長実験を継続しているので、次の報告書で再度この問題を考察したい。

2. 二酸化窒素の植物影響について

植物の生長におよぼす二酸化窒素（NO₂）の影響について、ヒマワリを4 ppmと8 ppmのNO₂で2日間処理した結果、葉に可視害が発現した（Ⅲ-8参照）。暴露植物の地上部乾重量は、4 ppm区で無処理植物の値の86%、8 ppm区で80%に低下していた。また、0.1、0.5、1.0 ppmの3段階のNO₂濃度で24日間連続暴露した結果、処理区の葉、茎、根を含めた個体乾重量は、対照区の値のそれぞれ84、83、74%と、1.0 ppm NO₂濃度区で顕著な低下を示した。これらの乾重量の値とNO₂ドース（ppm×day）との間に逆の相関関係が認められた（NO₂ドース20 ppm·dayで20%の乾物生長量の低下）。このことは、低濃度NO₂でも長期間暴露によりNO₂ドースが増大すれば、植物の乾物生長に対して何らかの抑制効果をもっていることを意味している。例えば、NO₂ドース20 ppm·dayはNO₂濃度が0.1

ppmの場合、200日間の連続暴露を意味している。したがって、0.1 ppm NO₂で200日間連続暴露で乾物生長量が20%程度低下する可能性をもっているということである。一方、Ⅲ-9にみられるように、ヒマワリでは、0.1 ppm NO₂、10日間暴露処理により乾物生長が抑制されていたが、暴露10~15日間では、生長率が無処理植物の値より大きくなった。このことはヒマワリでは、NO₂暴露に対して、ある種の適応機能をもっていることを示唆する。それ故、NO₂濃度が極低濃度であれば、植物の種類によっては適応作用により、乾物生長が促進される可能性も考えられる。

植物に対するNO₂の影響は植物の種類によって異なる(Ⅲ-10参照)。例えば、アオジソ、フダンソウ、アサガオ、ハウレンソウ、インゲンマメおよびトウモロコシの6種の草本植物を、1.0 ppm NO₂で14日間連続暴露した。その結果、6種とも個体重の増加が抑制された(対照区の値の73~83%)。しかし、葉面積の増加は、NO₂暴露によりアオジソやアサガオでは阻害をうけたが、インゲンマメやトウモロコシでは促進がみられた。植物個体重の増加が抑制された種では、葉中の(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度が概して高くなる傾向がみられた。

草本植物について、葉身の亜硝酸還元酵素活性とNO₂吸収能との関係を調べた結果(Ⅲ-12参照)、植物のNO₂抵抗性を左右する要因として、葉の亜硝酸還元酵素活性の強さが関与していることが認められた。一方、木本植物では、1 ppm NO₂で2か月間暴露処理した結果によると(Ⅲ-11参照)、個体乾重量の増加を指標として、トウカエデがNO₂暴露により最も被害をうけ、キョウチクトウ、サクラ、イチョウ、スズカケノキ、イタリアポプラなどは被害が軽微であった。カイズカイブキでは葉のわずかな黄変がみられたにすぎなかった。植物体の窒素含量の増加は感受性の高い種で、全窒素およびアンモニア態窒素濃度が比較的高く、逆にカイズカイブキ、クロマツなど、抵抗性のある植物では、両窒素形態ともその濃度が低かった。以上述べたようにNO₂に対する抵抗性は種類によって著しく異なっているので、その抵抗性を支配する諸要因を解明して、NO₂の植物影響を検討する必要がある。

B. 環境評価のための植物指標の開発

大気汚染物質に対する感受性の高い植物を指標として、その葉面に現れる可視障害度から環境を評価する方法がある。しかしながら、現段階では、定量的表現の困難さ、指標植物の感受性の個体差、生育条件による障害度の変動などかなりの問題点が残されている。本研究では、再現性のある定量的表現可能な生理的反応を指標とする方法の開発、および容易に育成可能な、個体差の少ない、高感受性の指標植物の開発について研究を行なった。

1. 二酸化イオウに対する葉緑体反応の指標性について

Ⅲ-5およびⅢ-6の研究からSO₂被暴葉から単離した葉緑体の光合成電子伝達系において、光化学系Ⅱにより駆動される水からDPIPに至る経路が、クロロフィルの分解の起る以前に阻害されることが明らかにされた。この活性の阻害度は、再現性があり、しかも定量的に数値化できることから、この活性の阻害率を指標として各種植物のSO₂に対する感受性を評価した(Ⅲ-6表4)。そ

の結果がSO₂暴露による蒸散量の変化から得られた抵抗性の結果とよく一致しており、更に可視障害の表れていない落花生でも影響を検知することができたので、有効な手法と考えられる。

一方、被害葉から単離した葉緑体のクロロフィルから発せられる蛍光の収率が、電子伝達反応の阻害と併行して減少することが見出された。この蛍光収率の低下も再現性があり、更に測定は簡便なので、この反応を指標として数種植物のSO₂に対する感受性を評価した(Ⅲ-6, 図3)。結果は良好で、一つの評価法として利用できるものと考えられる。

2. 二酸化イオウに対する感受性イネ品種のスクリーニング

指標植物は、汚染物質に対する感受性が高いばかりでなく、栽培が容易なこと、反応性に個体差がなく、再現性に富むことが必須条件である。イネは遺伝的に系統化され栽培も容易なことから、日本在来のイネの品種の中から感受性の高い品種を選択し、その品種から更に突然変異誘起によって、一段と高感受性の指標植物を作成しようとの目的で研究を進めている。今回はその一環として303品種の中から、SO₂に感受性の高い品種を選択する実験を行ない、5品種を選択した。この品種を栽培し、その穂、および種子に対して、化学物質による突然変異誘起処理を行なった。現在、これらの種子から幼苗を育成し、SO₂に高感受性の品種のスクリーニングが行なわれている。今後の研究に期待したい。

3. 植物の汚染ガス吸収能にもとづく環境指標

植物が汚染ガスを体内にとりこむ性質を利用した大気汚染環境評価法が知られている。二酸化イオウについては、我々の生活環境下で記録される大気中SO₂濃度と植物体の葉中イオウ増加量との間に密接な関係のあることがこれまでも報告されている。Ⅲ-8にみられるように、ヒマワリでは、SO₂ドース(μmol × day)が1~1.5 μmol · dayあたりまで、葉中イオウ増加速度(SO₂吸収速度)がSO₂ドースの増加とともにほぼ直線的に増大する。その増加速度は、 6×10^{-5} モルSO₂/d葉面/μmol · dayと計算された。例えば、大気中SO₂濃度を0.05 μmolとすると、ヒマワリのSO₂吸収速度は、 3×10^{-6} モルSO₂/d葉面/dayとなり、0.1 μmol SO₂では、 6×10^{-6} モルSO₂/d葉面/dayとなる。しかし、この吸収速度を維持しうる期間は、0.05 μmol SO₂では20~30日間(1~1.5 μmol · day ÷ 0.05 μmol = 20~30 days)、0.1 μmolでは10~15日間ということになる。実際に野外において植物体イオウ含有量からその場所の大気中SO₂濃度を推定する場合には、次のような手順が必要であろう。すなわち、ある一定のSO₂汚染環境下で、ある特定の植物種の葉中イオウ増加量を暴露期間を変えて測定し、その増加速度を算出する。この値と空気中SO₂濃度との間の比例係数を求める。次にSO₂汚染データの欠落している地点で、同一植物を育成し、その葉中イオウ増加速度を求め、その値を前述の比例係数で割ってその地点のSO₂汚染度を推定する。

植物によるSO₂吸収は大気中SO₂濃度ばかりでなく、植物の生育状態によって変化する。この点に関して現在、実験をすすめているので、今後、葉中イオウを指標とした環境評価法の確立をはかりたい。

植物による二酸化窒素の吸収に関しては、Ⅲ-8で検討している。ヒマワリでは、植物体地上部における全窒素量の増加速度が、 NO_2 ドース $30\mu\text{m}\cdot\text{day}$ あたりまではほぼ直線的に増加する。その値は 7×10^{-5} モル $\text{NO}_2/\text{dm}^2\text{葉面}/\mu\text{m}\cdot\text{day}$ であった。この値はヒマワリの SO_2 吸収速度とほぼ同程度で、植物による汚染ガス吸収では、いずれのガス成分でも、同数の分子が吸収されうることを暗示している。大気中 NO_2 濃度が $0.1\mu\text{m}$ の場合、ヒマワリの NO_2 吸収速度は 0.7×10^{-5} モル $\text{NO}_2/\text{dm}^2/\text{day}$ となり、 $0.5\mu\text{m}\text{NO}_2$ で 3.5×10^{-5} モル $\text{NO}_2/\text{dm}^2/\text{day}$ となる。しかも、この吸収速度が $0.1\mu\text{m}\text{NO}_2$ の場合で300日($30\mu\text{m}\cdot\text{day}\div 0.1\mu\text{m}=300\text{days}$)、 $0.5\mu\text{m}$ の場合に60日間持続する計算になる。したがって、 NO_2 吸収では、 SO_2 吸収の場合より長期間にわたり同様な吸収速度を維持しようといえよう。ヒマワリ以外の植物についてみると、Ⅲ-10に示した資料(表2)より、 $1.0\mu\text{m}\text{NO}_2$ で14日間処理したときの農作物の NO_2 吸収速度を計算した結果、ホウレンソウで $11\text{mg N}/\text{dm}^2\text{葉面}$ 、すなわち $2.6\text{mg NO}_2/\text{dm}^2\text{葉面}/\mu\text{m}\cdot\text{day}$ 、同様にアサガオ(スカーレットオハラ)、トウモロコシでそれぞれ $0.9\text{mg NO}_2/\text{dm}^2/\mu\text{m}\cdot\text{day}$ と $0.3\text{mg NO}_2/\text{dm}^2/\mu\text{m}\cdot\text{day}$ であった。また、木本植物では、 $1\mu\text{m}\text{NO}_2$ で30日間暴露のときの NO_2 吸収速度($\text{mg NO}_2/\text{dm}^2\text{葉面}/\mu\text{m}\cdot\text{day}$)は、サクラで1.9、トウカエデで0.6、アメリカズカケノキで0.2、キョウチクトウで0.05であった(Ⅲ-11, 表1より算出)。これらの結果を比較すると、木本植物の方が草本植物より NO_2 吸収能が低いようである。

しかし、葉からとりこまれた NO_2 は体内で還元されてアンモニアとなり、アミノ酸に同化される。これが窒素栄養分として葉以外の器官に転流して生長に利用され、生長促進をもたらす可能性がある。また、吸収された NO_2 量を算出するのに、植物個体あたりで求めると、植物個体の乾物生長速度を考慮しなければならない。植物の生長速度は大気汚染物質ばかりでなく、気象要因、土壌要因など多くの自然環境要因の影響を受ける。それ故、前述の SO_2 汚染評価法と同じような考え方で植物体の全窒素増加量を算出しても、その値を直接、大気中 NO_2 濃度と対比することには問題がある。この点に関しても今後の検討を要する。

植物体内に吸収された NO_2 が代謝され、特殊な化合物が形成される可能性も考えられる。その化合物を指標とした NO_2 汚染指標の開発も今後の研究課題のひとつである。

C. 広域環境評価法の開発

近年大気汚染による植物影響は広域にわたっており、この調査に、航空機による赤外カラー写真撮影が行なわれ、この写真の解析から、環境汚染を評価しようとする方法が研究されている。しかしながら、この方法はまだ開発途上にあり、多くの問題点が未解決である。本研究では、使用するマルチバンドカメラのフィルターの選択や適切に感光する赤外カラーフィルムの作成などに必要な基礎資料を得ることを当面の目的として、実験室内で、葉面光反射スペクトルの変化に寄与する基本的な要因の解析を試みた(Ⅳ-3参照)。

ヒマワリの SO_2 暴露による急性障害発現に伴って、葉面光反射特性が変化するが、被暴露葉と正常葉との差スペクトルのパターンの経時変化を調べてみると、ある時期ではクロロフィルが、他の時

期ではカロチノイドが、光反射スペクトルを変化させる主役を演じていることが推測できた。自然環境での低濃度SO₂による障害発現のメカニズムが急性障害発現の場合と、基本的には同じであると考えられるので、クロロフィルの反射特性を示す400nmあるいは700nmの反射量とカロチノイドの反射特性を示す530~550nmの反射量との比を、ある時間的間隔を置いて調査したならば、植物の樹種間差なく汚染度を評価することが可能ではないかと推察される。

一方、赤外域の葉面反射スペクトルは、水に由来する反射特性があり、これは葉の色素組成に無関係である。この水の反射特性に変化をあたえる要因は当然葉の含水率であるが、含水率のどの程度の変化が、反射スペクトルの変化として反映されるかの基本的解析を行なった。含水率50%以下になると水の反射特性を示す1,400nmおよび1,900nm付近の反射量が著しく増大したが、50%以上でも少しずつ変化した。葉中クロロフィル含量に由来する670~700nm付近の反射特性の変化とこの水の特性変化との関連から何か新たな知見が得られないだろうか検討中である。

D. 植物の汚染環境改善機能の評価

都市域における街路樹の選定や緑地帯の造成の際に、植物の汚染大気浄化機能を考慮することも、生活環境の保全を考えていく上に重要である。前に述べたように、植物は汚染ガスを体内に吸収し、蓄積する性質がある。緑地帯のように植物が主として集団で生活している場合には、汚染ガスに対する植物の反応は孤立して生活している場合とは著しく異なる。したがって、これまでにえられた植物個体についての知見をそのまま群落にあてはめることには無理があると思われる。現在、群落を対象とした汚染ガス吸収に関する実験を継続しており、次回の報告書で詳細に検討したい。ここでは、植物個体に関する資料から、簡単なモデル計算をした結果にもとづき、植物のエアフィルターとしての機能を評価した。Ⅲ-8に示したように、植物はSO₂暴露の場合でもNO₂の場合でも、ほぼ同数のガス分子を吸収する性質がある。その吸収速度はヒマワリの場合 $6 \sim 7 \times 10^{-5}$ モル/dm²葉面/μm³・dayであった。この値は、0.05 μm³ SO₂ (またはNO₂) の場合、 3×10^{-6} モル/dm²/dayの吸収速度を意味する。この吸収速度が、SO₂暴露の場合20~30日間持続し、NO₂の場合は600日持続する(B. 環境評価法の項参照)。そこで、1個体25dm²の葉面積をもつヒマワリ(250cm²の葉が10枚、最適生育環境下で播種後5週間生育したヒマワリに相当)が、50cm間隔で方形に栽培されていたとすると、1㎡の土地に4個体、すなわち100dm²の葉面積が存在する。大気中のSO₂濃度が0.05 μm³のとき、これらのヒマワリは $3 \times 10^{-6} \times 100$ モルSO₂/day/㎡地面、すなわち、19mg SO₂/day/㎡地面の吸収速度をもっていることになる。19mgのSO₂は、0.05 μm³ SO₂を含む空気が底面積1㎡の柱で約130mの高さまでに含まれるSO₂量に相当する。

植物によるNO₂の吸収については、前節で述べたように、街路樹として利用されているトウカエデは 0.6 mg NO₂/㎡葉面/μm²・day、アメリカズカケノキ 0.2 mg NO₂、キョウチクトウ 0.05 mg NO₂の結果がえられている。ヒマワリによるNO₂吸収を論じたと同様に、NO₂ドースとNO₂吸収能との間の直線関係をこれらの木本植物についても適用できると仮定して、どの程度のNO₂吸収能力を持つかを検討した。空气中NO₂濃度が 0.1 μm²とすると、トウカエデのNO₂吸収能は 0.06 mg NO₂/dd/dayとなり、他の植物でも同様に上記の吸収能の $\frac{1}{10}$ となる。一方、草本植物のヒマワリやハウレンソウではそれぞれトウカエデの値の 7.5 倍と 4.3 倍である。前に述べたように、植物によるNO₂吸収は、その植物の生長速度と密接な関係がある。一般に木本植物は草本植物に比較して、生長速度が遅い。したがって、植物による大気中NO₂の除去方法を考える場合には、草本植物の方が木本植物より有効ではないかと思われる。しかし、1 個体あたりの葉面積は、草本植物に比較して木本植物の方がはるかに多いので、ガス吸収面を考慮すれば、木本植物の有用性が評価されるかも知れない。この点に関しては今後の検討を要する。

以上の他に、大気汚染ガス暴露実験に必要な実験設備の開発を目的とした研究成果が本報告書の V-1~4 に採録されている。特に、二種以上の汚染ガスの混合による複合汚染ガス暴露実験を開始する予定で、そのための実験設備の拡充に必要な基礎資料の収集を進めている。また、生物環境制御施設で使用される、実験材料植物の制御環境下における育成方法が学問的にも確立していない現状である。そこで、実験目的に応じた材料植物の供給を可能とすべく、今回は人工照明下でヒマワリの生長におよぼす生育温度条件の影響を調べ、ヒマワリの生長に対する最適温度域の検討や温度条件による生育制御方法を検討した。

研究発表

(講演)

- (1) 近藤矩朗・菅原 淳：大気汚染ガス暴露による植物の葉中のアブサイシン酸量の変動。日本生物環境調節学会，松江。(51. 10)
- (2) 島崎研一郎・菅原 淳：光合成電子伝達反応におよぼす亜硫酸ガスの影響。日本生物環境調節学会，松江。(51. 10)
- (3) 菅原 淳・近藤矩朗・島崎研一郎：亜硫酸ガスの植物影響に関する生理生化学的研究。国立公害研究所大型研究施設竣工記念講演会およびシンポジウム，筑波。(52. 2)
- (4) 近藤矩朗・菅原 淳：亜硫酸ガス暴露による植物の蒸散変化とアブサイシン酸。日本植物生理学会，大阪。(52. 4)
- (5) 島崎研一郎・菅原 淳：SO₂の葉緑体に及ぼす影響。日本植物生理学会，大阪。(52. 4)
- (6) 島崎研一郎・菅原 淳：SO₂の光合成色素と電子伝達におよぼす影響。日本植物学会，福岡。(52. 10)

- (7) 菅原 淳・近藤矩朗・島崎研一郎：二酸化イオウに対する植物の抵抗性と植物影響の作用機序について。日本生物環境調節学会，筑波。（52. 10）
- (8) 近藤矩朗・菅原 淳：植物のSO₂に対する抵抗性とアブサイシン酸との関連について。大気汚染研究全国協議会大会，福岡。（52. 11）
- (9) 島崎研一郎・菅原 淳：植物のSO₂による可視障害の発現と光合成電子伝達反応の阻害について。大気汚染研究全国協議会大会，福岡。（52. 11）
- (10) 古川昭雄・戸塚 績：高等植物に対する亜硫酸ガスの影響。
1) SO₂による不可視障害の評価法について。日本生物環境調節学会，松江。（51. 10）
- (11) 戸塚 績・古川昭雄：高等植物に対する亜硫酸ガスの影響。
2) ヒマワリの光合成・気孔開度に及ぼす影響。日本生物環境調節学会，松江。（51. 10）
- (12) 古川昭雄・戸塚 績：高等植物の光合成に及ぼす亜硫酸ガスの影響。
1. ヒマワリの光合成速度・気孔開度・吸水速度に及ぼすSO₂の影響——葉位による差異——日本植物学会第41回大会，富山。（51. 10）
- (13) 戸塚 績・古川昭雄：亜硫酸ガスによる植物の不可視障害の評価法について。国立公害研究所大型研究施設竣工記念講演会およびシンポジウム，筑波。（52. 2）
- (14) 戸塚 績・名取俊樹：ヒマワリによるSO₂の吸収蓄積に関する一考察。第24回日本生態学会，広島。（52. 4）
- (15) 戸塚 績・名取俊樹：植物のSO₂吸収速度の測定とそれのSO₂汚染指標への適用について。日本生物環境調節学会，筑波。（52. 10）
- (16) 古川昭雄・戸塚績：ヒマワリ葉の水分収支に対する亜硫酸ガスの影響。日本生物環境調節学会，筑波。（52. 10）
- (17) 戸塚 績・米山忠克・佐藤秋生・牛島忠広：ヒマワリとインゲンマメの乾物生長におよぼすNO₂暴露の影響。日本植物学会第42回大会，福岡。（52. 10）
- (18) 相賀一郎・大政謙次・寺島貞二郎・額田正己：低濃度大気汚染ガス暴露実験用グロースキャビネットの基礎研究
I. 低濃度ガス制御のための諸条件について。日本生物環境調節学会，松江。（51. 10）
- (19) 大政謙次・相賀一郎：低濃度大気汚染ガス暴露実験用グロースキャビネットの基礎研究。
II. 単一ガスの基本的制御方法について。日本生物環境調節学会，松江。（51. 10）
- (20) 大政謙次・相賀一郎：植物実験用グロースキャビネットにおける低濃度大気汚染ガス制御。
I. 低濃度ガス制御のための空調プロセスと基本的ガス制御について。冷凍協会，東京。（51. 11）

- ㉑) 額田正己・唐木 正・相賀一郎・大政謙次：ppb濃度域を対象とした二酸化硫黄，二酸化窒素濃度自動制御装置について．分析化学会大会，奈良．（52． 6）
 - ㉒) 大政謙次・安保文彰：植物による大気汚染物質の収着に関する研究．—SO₂の局所収着速度と可視障害発現との関係—：農業気象学会関東支部会，甲府．（52． 10）
 - ㉓) 大政謙次・安保文彰：SO₂暴露に伴う植物葉面の各部位における障害について．日本生物環境調節学会，筑波．（52． 10）
 - ㉔) 安保文彰・大政謙次・戸塚 績：ヒマワリのSO₂収着機構と収着量の予測について．日本生物環境調節学会，筑波．（52． 10）
 - ㉕) 相賀一郎・大政謙次・松本 茂・額田正己：複合汚染ガス暴露用グロースキャビネットの設計．日本生物環境調節学会，筑波．（52． 10）
 - ㉖) 藤沼康実・町田 孝・戸塚 績・相賀一郎：制御環境におけるヒマワリの生長．—栄養生長期におよぼす温度・光条件の相互影響について—．日本生物環境調節学会，筑波．（52． 10）
- （印 刷）

(1) Noriaki Kondo and Kiyoshi Sugahara

Changes in transpiration rate of SO₂-resistant and -sensitive plants with SO₂ fumigation and the participation of abscisic acid. *Plant & Cell Physiol.* vol. 19, No 3. 1978. in press.

- (2) 戸塚 績・古川昭雄・名取俊樹・小川 潔（1977）：足尾精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，「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」論文集，（門司正三編），104p.，pp. 19-23.

III - 1

二酸化イオウに対する植物の抵抗性に関する研究 (1)

二酸化イオウ吸収から障害発現への過程における植物の防御機構

近藤矩朗¹・菅原 淳¹

Studies on resistance of plants to sulfur dioxide (1)

The possible mechanisms of resistance to sulfur dioxide on the processes from sulfur dioxide uptake to damage in higher plants

Noriaki KONDO¹ and Kiyoshi SUGAHARA¹

大気汚染物質の主要因の一つである二酸化イオウ (SO₂) の植物影響に関して古くから数多くの報告がある。その顕著な可視害徴は葉の白化、壊死等であり、蒸散量の変化、炭酸ガス吸収能の低下、各種酵素の活性変化等の不可視影響もよく知られている(5)。可視障害が現われる前に生理生化学的機能が変化することは知られているが、種々の生理生化学的レベルの変動が可視障害に結びつくものであるか、あるいは環境条件の変動に対する植物の防御的反応であるか等の検討はなされていない。大気汚染による植物被害を軽減したり、抵抗性の強い品種を作ろうとする場合、あるいは植物を大気汚染の指標として利用しようとする場合、いずれも植物の大気汚染に対する反応のメカニズムを明らかにする必要がある。私たちはこのような観点に立ち比較的高濃度の SO₂ 暴露による植物の急性可視障害発現の機構の解明と植物の抵抗性のメカニズムを明らかにすることを目的として研究を行なっている。

SO₂ の取り込みから被害発現に至る概略過程を図1に模式的に示した。気孔を通して取り込まれた SO₂ は細胞質溶液に溶解して H⁺、HSO₃⁻、SO₃²⁻ イオンを生ずる。そのため SO₂ による被害は H⁺ による細胞液の pH 低下によるもの、HSO₃⁻、SO₃²⁻ イオンの直接的影響あるいはこれらイオンによって作られる有毒物質の影響に分けて考えることができる。従って植物の抵抗性を決める要因として① SO₂ の取り込みを支配する気孔の開閉、② H⁺ を中和する細胞液の緩衝能力、③ HSO₃⁻、SO₃²⁻ を酸化して低毒性の SO₄²⁻ に変える解毒機能等を挙げる事ができる。

1. 国立公害研究所 生物環境部

1. Division of Environmental Biology, the National Institute for Environmental Studies,
Yatabe, Ibaraki 300-21

今回は SO_2 に対する植物の抵抗性に関連して、 SO_2 暴露による気孔開度の変化と葉中のアブサイシン酸量との関係、細胞液の pH 変化、亜硫酸イオンを酸化する活性等について得られた結果について報告する。

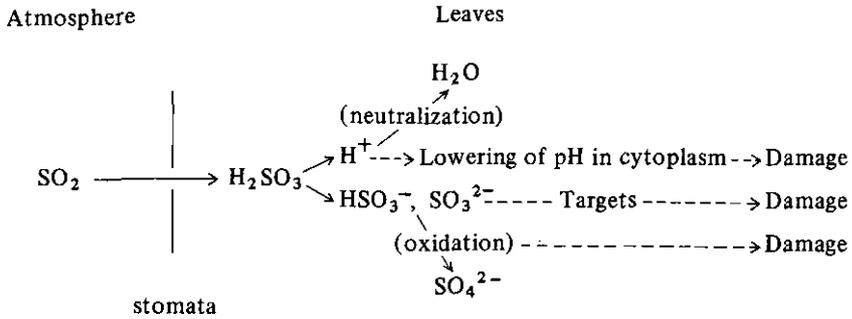


図1 SO_2 取り込みから被害に至る SO_2 植物毒性発現過程における植物の防御機構の概略図

Fig. 1 Flow diagram showing possible mechanisms of resistance to SO_2 on the processes from SO_2 uptake to damage in SO_2 phytotoxicity.

Ⅲ-2

二酸化イオウに対する植物の抵抗性に関する研究(2)

二酸化イオウ暴露による植物の蒸散変化とアブサイシン酸量との関連について

近藤矩朗¹・菅原 淳¹

要 旨

SO₂に対する植物の抵抗性とSO₂暴露に対する気孔の反応性との関連を調べた。同時に気孔の反応にアブサイシン酸が関与していることを検討した。

1. 使用植物中、落花生は最も抵抗性が強く、トマトもかなりの抵抗性を示した。ダイコン、青ジソ、ハウレンソウは感受性が高かった。
2. 落花生やトマトによって取り込まれたSO₂の量は明らかにダイコン、青ジソおよびハウレンソウにより取り込まれる量より少なかった。
3. 落花生やトマトの蒸散速度は、SO₂接触後5分以内で減少しはじめ、20分後に最低レベルに達した。青ジソの蒸散速度は、ガスに接触しても、しばらくは減少せず70分後から減少をはじめた。ダイコンやハウレンソウの場合は、蒸散は20~30分変化せず、その後徐々に減少した。
4. アブサイシン酸の葉中含量は、落花生やトマトで多く、他の3種の植物では、少なかった。ダイコンに外からアブサイシン酸を与えてやると、SO₂接触により直ちに蒸散速度が減少しはじめるようになる。つまり、葉中のアブサイシン酸の量によって、気孔の開閉反応が支配された。

以上の結果から、アブサイシン酸を多く含む植物は、SO₂に接触するとすばやく気孔を閉じSO₂の侵入を防ぎ、強い抵抗性を示すものと思われる。

緒 言

植物は環境条件の変動に対して種々の反応を示すが、これらの反応が植物ホルモンによって支配されていることを示す報告が多数見られる。SO₂の植物影響を考えると、植物体へのガスの侵入の容易さがその感受性を決定する第一の要因となる。ガス侵入の容易さは気孔開度によって決められるが、植物ホルモンの一つであるアブサイシン酸(ABA)は気孔の開閉を支配しているので(1, 3, 4)、植物のSO₂に対する抵抗性は葉中のABA量によって左右されるかも知れない。本研究では気孔開閉を蒸散変化により測定し、SO₂に対する抵抗性と気孔開度の変化およびSO₂暴露による気孔開度の変化と葉中のABA量の関係について調べた。

材料および方法

植物材料：昼25℃、夜20℃、湿度70%のガラス室で生育した鉢植えの青ジソ(*Perilla frutescens* Britt, var. *crispa* Decaisne)(7~8週間)、トマト(*Lycopersicon esculentum* Mill cv.

1. 国立公害研究所 生物環境部

Fukuju No 2)(6~7週間), ダイコン (*Raphanus sativus* L. cv. Minowase)(4~7週間), 落花生 (*Arachis hypogaea* L. cv. Chibahandachi)(10~11週間), および昼20℃, 夜15℃, 湿度70%のガラス室で生育した鉢植えホウレンソウ (*Spinacia oleracea* L. cv. Viroflay)(約5週間)を使用した。

ガス暴露: SO₂暴露は暴露用グロースキャビネットの中で湿度75%, 照度約3万ルクスの条件下で行なった。温度はホウレンソウは20℃, 他の植物は25℃に調節した。植物をキャビネットに移し, 1~2時間前処理した後2.0 ㎖のSO₂に暴露した。

イオウの定量: 2.0 ㎖のSO₂に3時間暴露した後, 葉を切り取り, 70℃で約1週間乾燥した後, 粉末にし蛍光X線分析計(理学電機, D-9c)によりイオウ含有量を測定した。

蒸散量の測定: 鉢植えの植物の鉢と土壌の部分をビニールで覆い植物体以外の部分からの蒸散を防いでグロースキャビネット中で重量計上に置き, 重量の減少速度から蒸散速度を測定した。

ABAの抽出および定量: 植物の葉を切り取り生重量を測定した後, メタノール抽出し, 水を加えて濃縮して, 数回にわたりpHを変えてジクロロメタンにより精製した。薄層クロマトで更に精製して, ECD検出器を用いたガスクロマトグラフ(日立, 163)にて定量した(図1)。

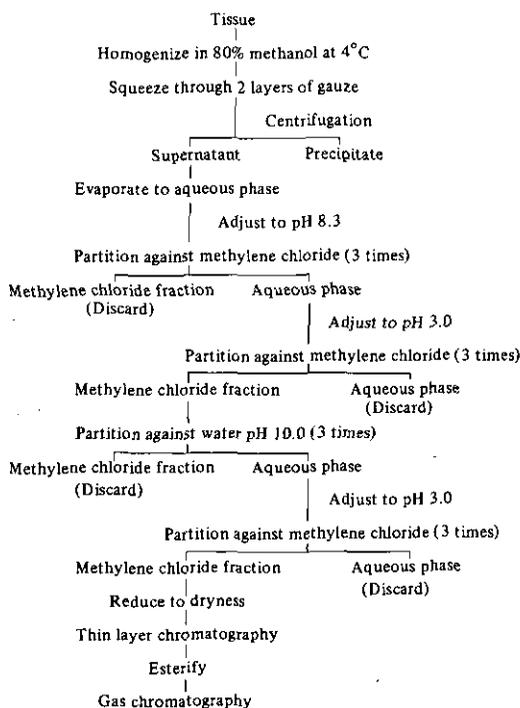


図1 ABA抽出・精製の行程

Fig. 1 Flow diagram showing the procedure for extraction, separation and preparation of ABA samples for gas chromatography.

結果および考察

植物を 2.0 ppm の SO_2 に 6 時間暴露した後、ガスを止めて 18 時間キャビネット内に置き可視害徴を観察した。ダイコン、ホウレンソウでは全面に顕著なクロロシスが現われた。青ジソは 3 時間程度の暴露でしおれてきた。一方トマトは若い葉にのみクロロシスが見られ、他の葉には可視害徴は見られなかった。落花生は全く可視害は認められなかった。3 時間の 2.0 ppm SO_2 暴露による葉中のイオウ含有量の増加を示したのが表 1 で、抵抗性の高い落花生、トマトではイオウ増加量即ち SO_2 の取り込みが少なく、抵抗性の弱いものは SO_2 の取り込みが多いことがわかる。

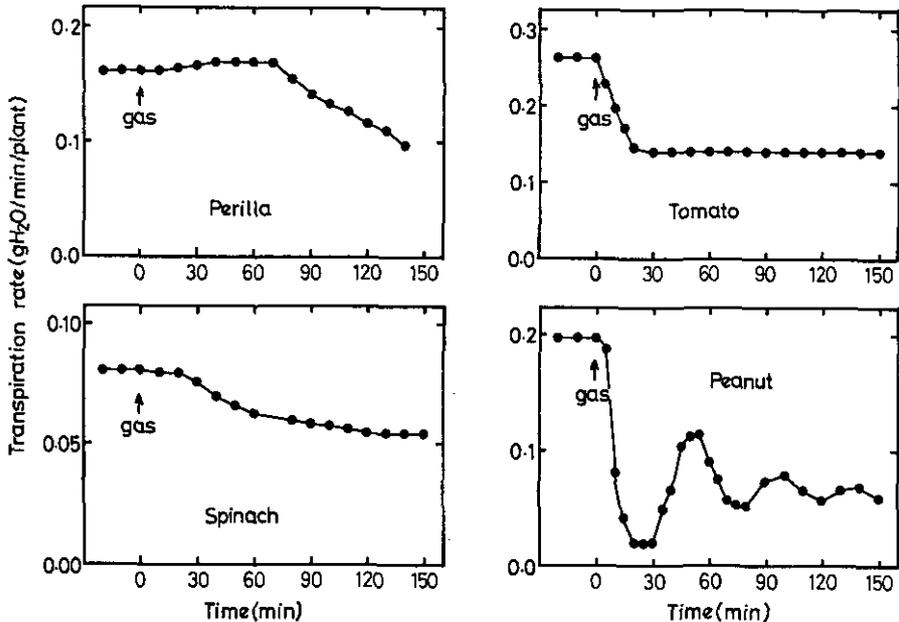


図 2 2.0 ppm SO_2 暴露による蒸散変化 植物を暴露前に 1 ~ 2 時間グロースキャビネット中で条件適応させた。矢印は SO_2 のキャビネット流入時を示す

Fig. 2 Changes in transpiration rate by SO_2 exposure. Test plants were pre-conditioned for 1 to 2 hr in the growth cabinet prior to 2.0 ppm SO_2 fumigation. SO_2 gas was introduced into the cabinet at 0 time indicated by the arrow.

SO_2 暴露後の蒸散量変化を示したのが図 2 および 3 である。青ジソはガスに接触してもしばらくは蒸散量は減少せず、気孔が閉じにくいことがわかる。ホウレンソウもガス接触開始後 20 分ほど蒸散量に変化がなく、その後徐々に蒸散の減少が見られる。ダイコンもほぼ同様のパターンを示す。トマトや落花生ではガス暴露後 5 分以内に気孔が閉じ始め 20 分で最低のレベルに達することがわかる。表 1 の SO_2 の取り込みの結果と併せてみると、ガス接触によって気孔がすばやく閉じるものは SO_2 の取り込みが少なくガスに対する抵抗性が強く、気孔の閉じにくいものは SO_2 の取り込みが多く抵抗性が弱いことがわかる。即ち SO_2 による植物の急性可視障害における抵抗性は SO_2 に対する気孔の開閉反応の速さによって決められることが示唆された。

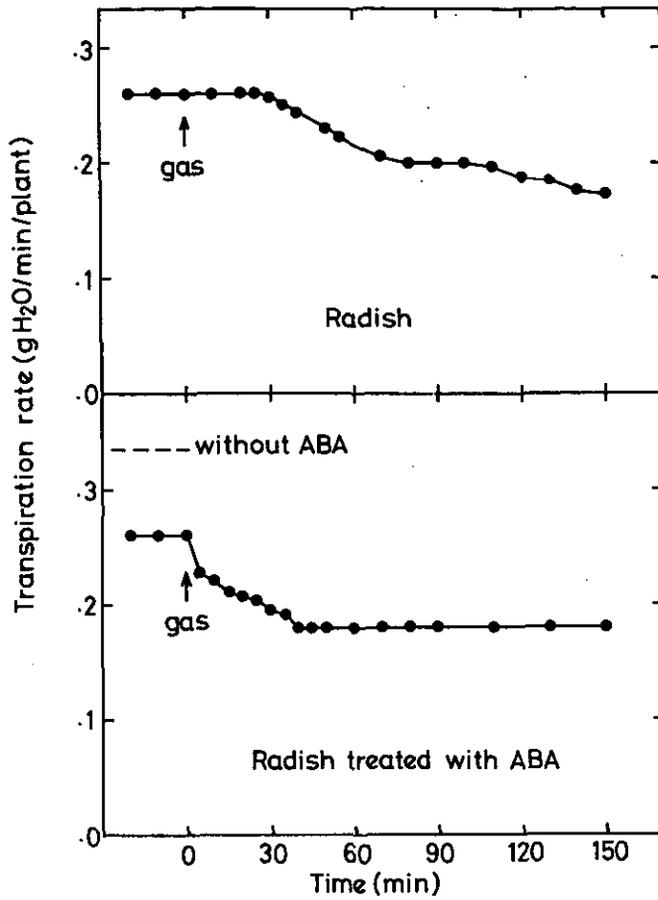


図3 ダイコンのSO₂による蒸散変化に対するABA処理の効果
 Fig. 3 Effect of ABA treatment on the change in transpiration rate of radish by SO₂ exposure. Radish was sprayed or not with 10⁻³M RS-ABA. The radish applied with ABA was held for ca. 3 hr. in the cabinet prior to SO₂ fumigation.

表1 SO₂暴露による葉中イオウ含量の増加
 Table 1 Increase in sulfur content in plant leaves with SO₂ fumigation.

	SO ₂ concentration ^a (ppm)	S content (mg/g dry wt)	Increase in S content (mg/g dry wt/3 hr)
Peanut	0.0	4.87	
	2.0	5.17	0.30
Tomato	0.0	24.48	
	2.0	25.56	1.08
Radish	0.0	10.51	
	2.0	13.07	2.56
Perilla	0.0	3.32	
	2.0	6.46	3.14
Spinach	0.0	5.65	
	2.0	8.06	2.41

^a SO₂ exposure was performed for 3 hr. 暴露時間3時間

それでは、このようなSO₂に対する気孔の反応性の速さを支配しているものは何であるかが問題となる。次に述べる事実に基づいて考えると植物ホルモンの一つである ABA 量が主要因子であろうと考えられる。

即ち、

- ① ABA は気孔開度を減少させるホルモンである (1, 3, 4)。
- ② 炭酸ガス濃度が上昇すると気孔は閉じる(2)が、炭酸ガスによる気孔開度減少には ABA が必要である(6)。
- ③ 亜硫酸イオンは RuDPカルボキシラーゼ(7)、 PEP カルボキシラーゼ(8)等の炭酸固定系の酵素を炭酸ガスと拮抗的に阻害する。

表2 試料植物葉中のABA含量
Table 2 ABA content in leaves of test plants.

	ABA content (ng/g fr. wt)
Peanut	438
Tomato	150
Radish	37
Perilla	31
Spinach	42

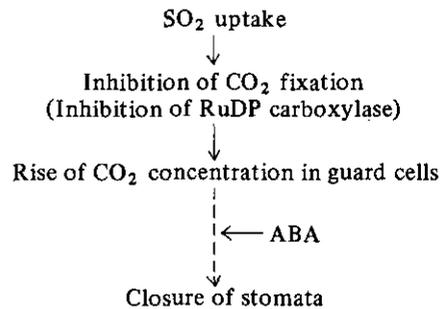


図4 SO₂暴露による気孔閉孔機構と ABA の関与を示す仮説図

Fig. 4 Diagram of hypothesis for stomatal closure by SO₂ exposure and ABA involvement.

植物葉中の ABA 含有量の測定結果を表2に示した。予想された通り落花生、トマトでは ABA 含有量が多く、他の3種の植物では ABA 量が少ないことがわかる。それなら、ABA 量の少ない植物に ABA を与えてやると ABA の多い植物と同様の気孔挙動を示すようになると考えられるので、ダイコンに10⁻³M RS-ABAを噴霧して蒸散のパターンを測定した。図3に結果を示した。ABA を噴霧しないものではハウレンソウと同様のパターンを示す。ABA 噴霧により蒸散量は20%程低下し SO₂を暴露すると直ちに蒸散量の減少が始まりトマトと類似のパターンを示す。また抵抗性も著しく増大した(写真)。この結果は SO₂に対する気孔の反応性の速さを決めているのは ABA であるという上記の仮説を支持している。現在までに得られている知見を総合して気孔開度減少の機序を考えると図4のようになる。SO₂の取り込みにより SO₂と CO₂との RuDPカルボキシラーゼの活性部位に対する拮抗的阻害が起こり、CO₂固定が抑えられて、必然的に孔辺細胞中の CO₂濃度が高まる。CO₂濃度が高い条件下で ABA が気孔閉孔に作用して気孔が閉じる。しかしながら、SO₂の細胞内侵入により、すぐに ABA が作用し得る別の機構が存在する可能性もある。また、ABA の孔辺細胞への作用機作も混んとしている。現在これらの点について研究を行なっている。

引 用 文 献

1. Cumins, W.R., H. Kende and K. Raschke. 1971. Specificity and reversibility of the rapid stomatal response to abscisic acid. *Planta (Berl.)* 99: 347-351
2. Heath, O.V.S. and J. Russel. 1954. An investigation of the light response of wheat stomata with the attempted elimination of control by the mesophyll. Part II. Interactions with carbon dioxide. *J. Exp. Bot.* 5: 269-292
3. Little, C.H.A. and D.C. Ejdtt. 1968. Effect of abscisic acid on budbreak and transpiration in woody species. *Nature (Lond.)* 220: 498-499
4. Mittelheuser, C.J., R.F.M. Van Steveninck. 1969. Stomatal closure and inhibition of transpiration induced by (RS)-abscisic acid. *Nature (Lond.)* 221: 281-282
5. Mudd, J.B. 1975. Sulfur dioxide. In: *Response of Plants to Air Pollution* (ed. Mudd, J.B. and T.T. Kozlowski), pp. 9-22. Academic Press Inc. (Lond.) Ltd.
6. Raschke, K. 1974. Abscisic acid sensitizes stomata to CO₂ in leaves of *Xanthius strumarium* L. In: *Plant Growth Substances*, pp. 1151-1158. Hirokawa Publishing Co. Inc. Tokyo
7. Ziegler, I. 1972. The effect of SO₃²⁻ on the activity of ribulose-1,5-diphosphate carboxylase in isolated spinach chloroplasts. *Planta (Berl.)* 103: 155-163
8. Ziegler, I. 1973. Effect of sulfite on phosphoenolpyruvate carboxylase and malate formation in extracts of *Zea Mays*. *Phytochemistry* 12: 1027-1030

Studies on resistance of plants to sulfur dioxide (2)

Changes in transpiration rate of plants with SO₂ fumigation and the participation of abscisic acid

Noriaki KONDO and Kiyoshi SUGAHARA

Summary

Peanut and tomato plants were resistant to 2.0 ppm SO₂, while radish, perilla and spinach plants were sensitive. The amounts of SO₂ absorbed by peanut and tomato were obviously less than those absorbed by radish, perilla and spinach. Transpiration rates of peanut and tomato began to decrease within 5 min after the commencement of SO₂ fumigation and reached minimum levels, i.e., 10 and 50% of the initial levels, respectively, after 20 min exposure. The rate of perilla did not change for 70 min after initiation of fumigation, then declined. Those of radish and spinach did not change for about 20 and 30 min, then decreased gradually. The content of abscisic acid (ABA) was highest in peanut. The content in tomato was also high, but low in radish, perilla and spinach. Radish supplied with exogenous ABA began to decrease its transpiration rate immediately after SO₂ fumigation and was markedly resistant to SO₂. ABA in leaves may control the rapid stomatal closure following SO₂ fumigation.



Plate I

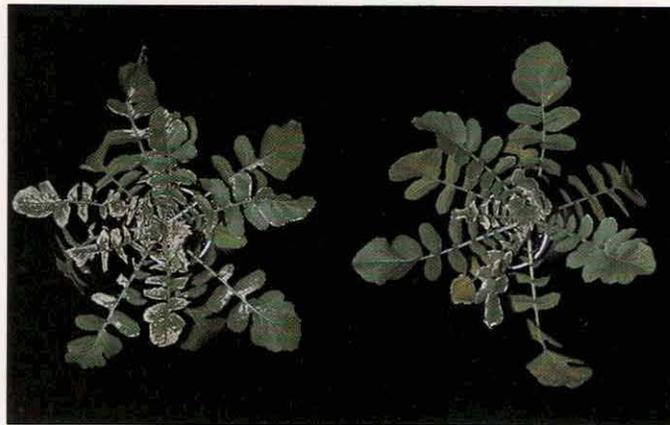


Plate II

2 ppm SO₂, 24時間暴露における ABA 処理の効果

写真 I ホウレンソウ：左，対照；右，10⁻³ M ABA 処理

写真 II ダイコン：左，対照；右，10⁻⁴ M ABA 処理

Effect of ABA-treatment on leaf injuries with SO₂ fumigation at 2.0 ppm for 24 hrs.

Plate I Spinach: Left, control; Right, 10⁻³ M ABA-treated.

Plate II Radish: Left, control; Right, 10⁻⁴ M ABA-treated.

III - 3

二酸化イオウに対する植物の抵抗性に関する研究 (3)

二酸化イオウ暴露による植物細胞液の pH 変化について

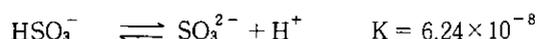
菅原 淳¹・近藤矩朗¹・滝本道明²

要 旨

SO₂を暴露したハウレンソウの葉の細胞液の pH を、暴露時間に対して経時的に測定した。細胞液の pH は、1.0 ppm あるいは 2.0 ppm SO₂濃度で約 1 時間前後の暴露で 0.2 程度低下したが、その後徐々に回復する傾向がみられた。これらの結果は、細胞液にはかなりの緩衝能力があることを示し、植物細胞には、低下した pH を回復させる反応が存在する可能性を示唆した。

緒 言

植物に取り込まれた SO₂は、細胞液中で HSO₃⁻、SO₃²⁻ になり H⁺を生ずる。



SO₂の毒性は HSO₃⁻、SO₃²⁻ イオンによるものと、H⁺による酸性影響に分けて考えることができる。酸性影響については、クロロフィルの分解(フェオフィチン化)(3)や細胞内諸酵素の活性低下(1)などが報告されているが、前報の SO₂の取り込み実験より、かなりの量の SO₂が植物体に取り込まれることが示されており、かなりの H⁺も生じるはずである。H⁺に対する抵抗性は細胞質の緩衝能力に依存する。そこで SO₂暴露によるハウレンソウの細胞液の pH 変化を経時的に調べた。また、細胞液中に溶けた SO₂のイオン形態とその量的比率、あるいは他の化合物への変換と、その化合物の存在の有無等に探りを入れるために、細胞液の pH 滴定曲線をも併せて測定した。

材料および方法

昼 20℃、夜 15℃、湿度 70% の温室で、4 ~ 7 週間栽培したハウレンソウ (Viroflay) を用いた。SO₂暴露は暴露用グロースキャビネットで照射下 (約 30,000 ルックス) で行ない、所定の濃度に所定の時間暴露した後、生重量 10g の葉片を採取し、これに 30 ml の蒸留水を加えて磨砕し、ガーゼでろ過し、ろ液を 10,000 × g で遠心分離して上清をとり、蒸留水で 5 倍に希釈して測定試料とした。

pH 滴定曲線はデンマークラジオメータ社の自動滴定記録装置 (RTS 622 型) を用い、0.01N

1. 国立公害研究所 生物環境部
2. 東邦大学 理学部

の NaOH で滴定して得た。

結果および考察

1.0 ppm および 2.0 ppm の濃度の SO₂ に暴露したホウレンソウの細胞液の pH 変化を、暴露時間に対して経時的に調べた結果を表 1 に示している。前報の実験から、ホウレンソウを 2.0 ppm SO₂ に 3 時間暴露すると、乾燥重量 1 g 当たり 4.82mg の SO₂ が取り込まれたことになる。また、ホウレンソウの乾燥重量と生重量の比が約 0.087 であるので、生重量 1 g 当たりに換算すると 0.419 mg SO₂ になり、ほぼ 6.5×10^{-3} M の濃度になる。pH 6.4 程度では溶けた SO₂ は大部分 HSO₃⁻ イオンになっており ($[\text{SO}_3^{2-}] / [\text{HSO}_3^-] \approx 0.16$)、従って、生じる H⁺ の濃度は、 7.7×10^{-3} M 程度であるが、表 1 に示されるように 1.0 ppm, 2.0 ppm いずれの場合でも pH 低下は 0.1 ~ 0.2 であり、明らかに細胞質の強い緩衝効果を示している。また SO₂ 濃度 1.0 ppm, 2.0 ppm いずれの場合でも比較的短時間 (0.5 ~ 1.5 時間) で最低値を示し、その後再び増大する傾向がある。SO₂ 暴露により気孔は幾分閉じるようであるが (前報)、それでもかなりの量の SO₂ が吸収されているはずであり、この結果は植物が SO₂ 暴露に対して pH 値を回復しようとする反応を持っていることを示すものと思われる。報告されている遊離アミノ酸量の増加、アミノ酸組成の変化(1)、HSO₃⁻、SO₃²⁻ イオンの酸化還元反応(2)等がこの pH 値の回復に寄与しているかも知れない。

細胞液の pH 滴定曲線のパターンから、SO₂ が細胞液中に溶けて HSO₃⁻ になっていることはみとめられたが、イオン形態の量的比率や、新たな他化合物の出現などは検知できなかった。

気孔から取り込まれた SO₂ は気孔内の湿面に吸着し、イオン化して細胞質に移動すると思われるが、液体中でのイオンの拡散係数は気体の拡散係数と比較すると極めて小さいので、取り込まれた SO₂ のかなりの部分は気孔内湿面、孔辺細胞に局在していると思われる。従ってその近傍の pH はかなり低下しているかも知れない。今回の実験で調べたような、平均的 pH 変化だけで、H⁺ の影響を論じようとするのは、危険であるかも知れない。

表 1 SO₂ 暴露による細胞液の pH 変化
Table 1 Changes in pH of cytoplasm with SO₂ fumigation.

Fumigation time (hr)	pH value of cytoplasm	
	1.0 ppm SO ₂	2.0 ppm SO ₂
0	6.37	6.39
0.5	6.26	6.18
1.5	6.16	6.23
3	6.21	6.28
24	6.27	6.25

引 用 文 献

1. Mudd, J.B. 1975. Sulfur dioxide. In: Response of Plants to Air Pollution (ed. by Mudd J.B. and T.T. Kozlowski), pp. 9-22. Academic Press Inc. (Lond.) Ltd.
2. Puckett, K.J., E. Niebaer, W.P. Flora and D.H.S. Richardson. 1973. Sulfur dioxide: Its effects on photosynthetic ^{14}C fixation in lichens and suggested mechanisms of phytotoxicity. *New Phytol.* 72: 141-154
3. Rao, D.N. and F. LeBlanc. 1965. Effects of SO_2 on the lichen algae with special reference to chlorophyll. *Bryologist* 69: 69-75

Studies on resistance of plants to sulfur dioxide (3)
Changes in pH of plant cytoplasm with sulfur dioxide fumigation

Kiyoshi SUGAHARA¹, Noriaki KONDO¹
and Michiaki TAKIMOTO²

Summary

Changes in pH of spinach cytoplasm were measured during SO₂ fumigation.

The pH value of the cytoplasm was lowered about 0.2 with fumigation of 1.0 ppm SO₂ for 1.5 hr or 2.0 ppm SO₂ for 0.5 hr, respectively. The lowered pH tended toward recovery gradually during further fumigation.

These results show that the cytoplasm has a buffering capacity appreciably and suggest that (a) possible reaction(s) would be present to recover the lowered pH value in plant cells.

-
1. Division of Environmental Biology, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe, Ibaraki 300-21
 2. Faculty of Science, Toho University, Funabashi, Chiba 274

III-4

二氧化硫に対する植物の抵抗性に関する研究(4)

植物における亜硫酸酸化反応について

近藤矩朗¹・菅原 淳¹

要 旨

1. SO_2 濃度の高い箱根大湧谷に生育する、 SO_2 に対して抵抗性の強い植物4種と、ファイトトン温室で栽培した3種の実験植物の亜硫酸酸化活性を調べ、大湧谷の3種の植物に高い酸化活性の存在を認めた。
2. 高い活性を示したアセビの抽出液について蛋白分解酵素プロナーゼ処理を行なったが、活性の低下はみとめられなかった。
3. アセビの抽出液の活性は、 95°C 10分の熱処理によっても失活しなかった。
4. この抽出液を緩衝液に対して透析すると、亜硫酸酸化活性は透析内液にはなく外液で検知された。

以上の結果から植物葉中に認められる亜硫酸酸化反応を触媒する物質は、酵素蛋白でなく、低分子化合物である可能性が示唆された。

結 言

植物体に取り込まれた SO_2 は水に溶けると HSO_3^- 、 SO_3^{2-} イオンになる。溶けた SO_2 の大部分は酸化されて SO_4^{2-} イオンとして存在するが、一部は還元されてアミノ酸、タンパク質に取り込まれたり、 H_2S として放出される。 HSO_3^- 、 SO_3^{2-} イオンが直接還元されるのか SO_4^{2-} に酸化されてから還元されるのかといった点についてはまだ十分に解明されていない。他に HSO_3^- または SO_3^{2-} がアルデヒド、ケトン、オレフィン、ジスルフィド等と反応することが知られている(7)が、植物体内でこのような反応が現実にはどの程度起こり得るかといった点で生物学的意味は疑問視されており、今後、更に検討が必要であろう。

SO_4^{2-} イオンは HSO_3^- 、 SO_3^{2-} イオンと比較して植物に対して極めて毒性が小さく(8)、上記の酸化反応は SO_2 の無毒化機構の一つと考えることができる。動物では HSO_3^- 、 SO_3^{2-} イオンの酸化酵素の存在が知られ(1~6)、動物の SO_2 に対する抵抗性と深い関係があることが報告されている(4)。植物でもミトコンドリアに HSO_3^- 、 SO_3^{2-} イオンを SO_4^{2-} に酸化する活性が存在するという報告があるが(9、10)、この活性を示すものの本体については知られていない。本研究では植物の SO_2 に対する抵抗性においても上記の酸化活性は大きな意味を持つと考え、植物の亜硫酸酸化活性について若干の検討を行なったので、得られた予備的実験結果を報告する。

1. 国立公害研究所 生物環境部

材料および方法

1976年8月30日に箱根大湧谷において採取したアセビ (*Pieris japonica* D. Don), リョウブ (*Clethra barbinervis* Sieb. et Zucc.), ノリウツギ (*Hydrangea paniculata* Sieb.), サラサドウダン (*Enkianthus campanulatus* Nichols.) および環境を制御したガラス温室において栽培したトマト, ホウレンソウ, ヒマワリ (*Helianthus annuus* L. var. Russian Mammoth) を実験材料として用いた。葉を切り取り9倍量の緩衝液 (0.1M K-リン酸緩衝液, pH 7.8) を加えて磨碎し, ガーゼでこし, 遠心分離して得られる上清を試料として用いた。亜硫酸の酸化活性の測定はチトクロームCの還元 (A₅₅₀の増加) により行なった。反応混液は次の組成からなる: 0.1 M トリス緩衝液 (pH 8.5), 0.1 mM EDTA, 40 μM チトクロームC, 10 μM 亜硫酸, 試料。

結果および考察

地中からガスが噴出している箱根大湧谷では, 大気中のSO₂濃度も通常の濃度よりかなり高い。このような環境下で生残っている植物4種, アセビ, リョウブ, ノリウツギ, サラサドウダンと, 温室で栽培した植物3種, トマト, ホウレンソウ, ヒマワリについて, 葉の抽出液の亜硫酸酸化反応の活性を調べた。結果を表1に示す。アセビ, ノリウツギ, サラサドウダンの活性が極めて高いことがわかった。従って, 亜硫酸酸化活性がSO₂に対する抵抗性を決める一要因である可能性が支持された。リョウブの活性は低い, チトクロームCと共役しない亜硫酸酸化活性を有するかどうかは今後の課題である。

表1 数種植物の亜硫酸酸化活性
表中の植物の種類は上から; アセビ,
リョウブ, ノリウツギ, サラサドウ
ダン, トマト, ホウレンソウ, ヒマ
ワリ

Table 1 Activity of sulfite oxidation in several plants.

	Activity of SO ₃ ²⁻ oxidation (10 ³ ΔA ₅₅₀ /min/mg fr. wt),
<i>Pieris japonica</i> D. Don	36.0
<i>Clethra barbinervis</i> Sieb. et Zucc.	1.0
<i>Hydrangea paniculata</i> Sieb.	12.0
<i>Enkianthus campanulatus</i> Nichols.	11.5
<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill cv. Fukuju No.2	1.5
<i>Spinacia oleracea</i> L. cv. Viroflay	1.1
<i>Helianthus annuus</i> L. cv. Russian Mammoth	1.4

次にこの亜硫酸イオンの酸化はどのようなメカニズムによるのか、酵素反応によるのか、非酵素的反応によるのか等を明らかにするため、いくつかの予備的実験を行なった。表2は、高い亜硫酸酸化活性を示したアセビの葉の抽出液について、蛋白分解酵素プロナーゼ処理をした結果である。

表2 アセビの抽出液のプロナーゼ処理
Table 2 Pronase treatment of extract from *Pieris japonica*.

	Activity of sulfite oxidation ($10^3 \Delta A_{550}/\text{min}/\text{mg fr. wt}$)
Extract	37
Extract + pronase	35
Pronase	0

プロナーゼ0.05%, 37°C, 2時間の処理で、ほとんど活性は低下していない。次いで、この抽出液を熱処理, 95°C, 10分行った結果を表3に示す。熱処理によっても全く失活していない。これらのことから、活性を示す物質は、蛋白質ではないことが考えられる。

表3 アセビの抽出液の熱処理
Table 3 Heat treatment of extract from *Pieris japonica*.

	Activity of sulfite oxidation ($10^3 \Delta A_{550}/\text{min}/\text{mg fr. wt}$)
Extract	57
Heat-treated Extract (95°C, 10 min)	57

この抽出液を低調緩衝液に対して一夜透析した場合、亜硫酸酸化活性は透析外液に移った。つまりかなりの低分子化合物であることが示唆された(表4)。植物のミトコンドリアの亜硫酸酸化反応は、一部は非酵素的反応であることが報告されている(10)。また種々の金属が亜硫酸イオンの酸化を触媒することも知られており(9, 11)、植物の葉中の亜硫酸酸化反応も非酵素的反応である可能性が濃くなってきた。この反応を触媒する本体を究明することが今後の研究課題であり、現在植物体重金属組成、および抽出液中に含まれる物質の分析を行なっている。

表4 アセビの抽出液の透析

Table 4. Dialysis of extract from *Pieris japonica*.

	Activity of sulfite oxidation ($10^3 \Delta A_{550}/\text{min}/\text{mg fr. wt}$)
Extract	28
Outer solution after dialysis (K-phosphate buffer)	20
Inner solution after dialysis (Dialysate)	0
Dialysate + outer solution	24

Extract was dialyzed against 5 mM potassium phosphate buffer (pH 7.8) overnight.

透析は5mMK-リン酸緩衝液(pH7.8)に対して一夜行なった。

引 用 文 献

1. Cohen, H.J. and I. Fridovich. 1971. Hepatic sulfite oxidase. Purification and properties. *J. Biol. Chem.* 246: 359-366
2. Cohen, H.J. and I. Fridovich. 1971. Hepatic sulfite oxidase. The nature and function of the heme prosthetic groups. *J. Biol. Chem.* 246: 367-373
3. Cohen, H.J. and I. Fridovich. 1971. Hepatic sulfite oxidase. Functional role for molybdenum. *J. Biol. Chem.* 246: 374-382
4. Cohen, H.J., R.T. Drew, J.L. Johnson and K.V. Rajagopalan. 1973. Molecular basis of the biological function of molybdenum. The relationship between sulfite oxidase and the acute toxicity of bisulfite and SO_2 . *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* 70: 3655-3659
5. Ito, A. 1971. Hepatic sulfite oxidase identified as cytochrome b_5 -like pigment extractable from mitochondria by hypotonic treatment. *J. Biochem.* 70: 1061-1064
6. Kessler, D.L. and K.V. Rajagopalan. 1972. Purification and properties of sulfite oxidase from chicken liver. *J. Biol. Chem.* 247: 6566-6573
7. Lehman, J. and A.A. Benson. 1964. The plant sulfolipid. IX. Sulfosugar synthesis from methyl hexoseendides. *J. Amer. Chem. Soc.* 86: 4469-4472
8. Silvius, J.E., M. Ingle and C.H. Baer. 1975. Sulfur dioxide inhibition of photosynthesis in isolated spinach chloroplasts. *Plant Physiol.* 56: 434-437
9. Tager, J.M. and N. Rautanen. 1955. Sulfite oxidation by a plant mitochondrial system. Preliminary observations. *Biochim. Biophys. Acta* 18: 111-121
10. Tager, J.M. and N. Rautanen. 1956. Sulfite oxidation by a plant mitochondrial system. Enzymic and non-enzymic oxidation. *Physiol. Plant.* 9: 665-673
11. Yang, S.F. 1970. Sulfoxide formation from methionine or its sulfide analogs during aerobic oxidation of sulfite. *Biochemistry* 9: 5008-5014

Studies on resistance of plants to sulfur dioxide (4) Sulfite oxidation reactions in higher plants

Noriaki KONDO and Kiyoshi SUGAHARA

Summary

1. Sulfite oxidation activity was examined about four species of SO₂-resistant plants collected from Hakone-Owakudani, where SO₂ concentration in atmosphere was much higher than usual, and three species of laboratory plants grown in environment-controlled greenhouses.
The high activity of sulfite oxidation was obtained from three species of SO₂-resistant plants.
2. Pronase treatment of the leaf extract from *Pieris japonica* that has the highest activity of sulfite oxidation, did not cause to decrease the activity.
3. Heat treatment, 95°C for 10 min, also did not affect on the sulfite oxidation activity of leaf extract from *Pieris japonica*.
4. After dialyzing the leaf extract against a dilute buffer solution overnight, the sulfite oxidation activity was detected only in the buffer solution.
From these results, it is possible to suggest that the entity, catalyzes the sulfite oxidation in leaves, is dialyzable, low molecular and non-proteinous substance.

III - 5

二酸化イオウの植物影響の作用機序に関する研究 (1)

光合成電子伝達反応阻害とクロロフィル分解との関連について

島崎研一郎¹・菅原 淳¹

要 旨

環境要因およびガス濃度を精密に制御したガスキャビネットを用いて、ハウレンソウおよびレタスの植物体をSO₂に暴露し、それらの葉から葉緑体を単離して光合成電子伝達反応活性を測定し、同時に一定葉面積中のクロロフィル含量を測定して、SO₂の影響を解析した。

光合成電子伝達系において、水からジクロロフェノールインドフェノールに至る経路の電子伝達は、葉中のクロロフィルの有意な減少が生じなくても阻害された。電子伝達反応が著しく阻害された単離葉緑体でも、その吸収スペクトルはわずかな変化しか認められなかった。被暴露葉から得られた80%アセトン抽出液の吸収スペクトルの解析から、クロロフィルのブリーチングが起こっていることが示された。以上の結果から、SO₂によるクロロフィルの分解は、電子伝達反応の阻害より時間的な遅れがあり、その過程は主にブリーチングによると考えられる。

緒 言

二酸化イオウ (SO₂) は、工業地域の植物に被害をもたらす大気汚染の主要因として研究されて来ており (3, 5), そのSO₂の主たるターゲットは光合成の過程であることは良く知られて来ている (16, 9, 10)。

可視障害を伴わずに、SO₂暴露によって、植物葉の光合成の炭酸固定速度が減少することが報告されており (4, 13, 15), 更にこの減少はSO₂を除去することにより正常に回復することも見出されている (14)。この場合のSO₂による可逆的阻害は、RuDPカルボキシラーゼの活性部位に対する、SO₂とCO₂の拮抗的阻害として説明されている (19)。

一方、このような可逆的阻害ではなくて、不可逆的な損傷もSO₂は誘起する。クロロシスやネクロシス等のいわゆる可視障害は、葉内で生じた不可逆的な分子レベルでの損傷が発端となり、構造変化、機能低下などが誘起され、クロロフィルの分解につながり、障害発現へと発展するものと思われる。

クロロフィルの分解過程については、いくつかの報告があり、分解してフェオフィチンになるとするもの (12) と不可逆的な酸化過程によるもの (11) という考え方があ

り。しかしながら、これまでの研究で、SO₂による光合成色素の破壊機構は、ほとんど生理機能の変

1. 国立公害研究所 生物環境部

化と関連づけて検討されていない。これらの色素は葉緑体のチラコイド膜に局在しており、吸収された光のエネルギーは色素分子間を移動して光化学系 I および II の反応中心に伝達され、電子伝達反応を経て、化学的エネルギーに変換される。したがって、SO₂によりこの膜の機能に不可逆的な損傷が起こり、光合成反応の阻害と色素の破壊をもたらすと考えられる。本研究においては、色素の破壊が、電子伝達反応阻害に先行するか、あるいは併行するのかに注目して実験を行ない、同時にクロロフィル分解の過程についても解析を行った。

材料と方法

植物材料

植物の種子を 0.1% の hydromercurichlorophenol に 1 時間浸し、24 時間水洗後、播種した。ホウレンソウ (*Spinacia oleracea* L. cv. Viroflay. および New Asia) とレタス (*Lactuca sativa* L. var. Romaine) を、パーミキュライト、ピートモス、パールライトおよび細れきを 2 : 2 : 1 : 1 (容積比) の比率で含むポットで、昼 20°C、夜 15°C、湿度 70% の温室で生育させた。植物は 4 ~ 7 週間後に実験に用いた。

ガス暴露

温室で生育させた植物を、20°C、湿度 75% のグロースキャビネットに入れ、25,000 ~ 35,000 ルックスの照射下で、1 時間条件適応させる。次いで、グロースキャビネットと同じ条件に設定した、任意の SO₂ 濃度に調節したガスキャビネットにすばやく移し、適当な時間 SO₂ に暴露させた。SO₂ は、マスフローコントローラーを用いて清浄空気と混合し、ガスキャビネットに毎秒 0.02 m の風速で流入した。ガス室の 2 定点でガスを採取し、SO₂ 分析計で常時濃度をモニターした。この条件下では硫酸ミストは検出されなかった。

葉緑体の単離

所定の濃度の SO₂ に所定の時間暴露した植物葉を、直ちに 0.4 M 蔗糖、0.02 M NaCl を含んだ氷冷の 0.05 M トリシン-NaOH 緩衝液 (pH 7.5) 中でホモジナイザーで破碎し、4 層のガーゼで濾過する。濾液を 200 × G 5 分間冷却遠心分離して、細胞破片を除去後、この上清を更に 1,500 G 7 分間遠心分離して葉緑体を沈澱させる。この葉緑体を同じ緩衝液にケンダクして実験に使用した。

光合成反応の測定

単離葉緑体によるジクロロフェノールインドフェノール (DPIP) の光還元は、日立二波長自記分光光度計を用いて、590 nm の吸収の減少により測定した。光電子増倍管の前に、迷光を除くためにコーニングフィルター 9782 を取付け、励起光は、300 W のプロジェクターランプの前に赤色カットオフフィルターを挿入し、620 nm 以上の光を使用した。試料を四面透明セルに入れ、測定光と 90 度の角度で励起光を照射した。反応混液は 4 ml で次の組成からなっている：12.5 mM トリシン-NaOH 緩衝液 (pH 7.5)、100 mM 蔗糖、5 mM NaCl、50 μM DPIP、および、クロロフィル 20 μg 相当の単離葉緑体。

クロロフィルの定量

葉片 ($\phi=10\text{mm}$) をリーフパンチで打ち抜き、80%の氷冷アセトンを加えてガラスホモジナイザーで磨碎し、クロロフィルを抽出した。定量は Mackinney の方法(6)によった。

吸収スペクトルの測定

単離葉緑体のケンダク液および80%アセトン抽出液の吸収スペクトルは、日立二波長自記分光光度計を用いて測定した。

結 果

SO₂による光合成電子伝達反応の阻害

図1は、ハウレンソウ単離葉緑体による DPPIP 光還元の時経変化を示したものである。2.0 ppm

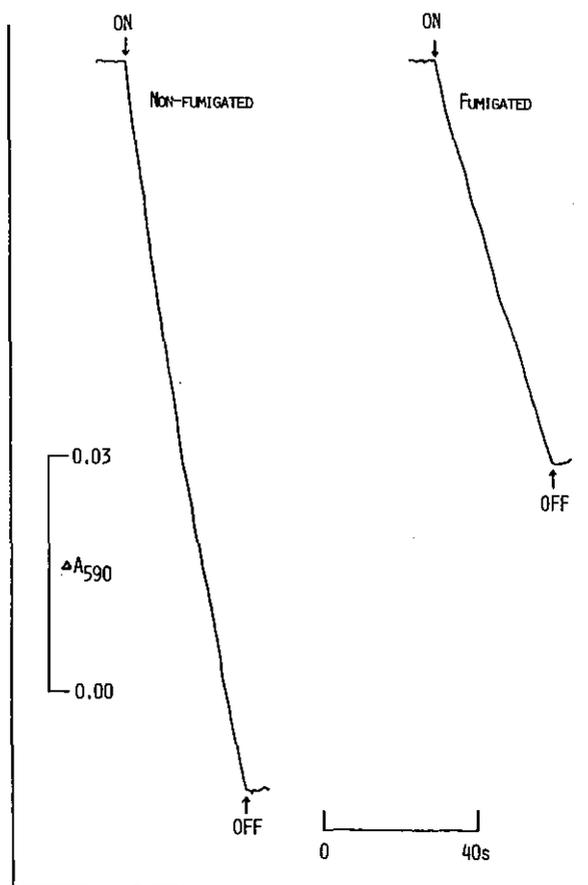


図1 SO₂被暴葉および対照葉から単離した葉緑体による DPPIP 光還元の時経変化

Fig. 1 Time courses of DPPIP photoreduction by spinach chloroplasts isolated from SO₂-fumigated and non-fumigated leaves. Fumigation was performed for 5 h at 2.0 ppm. Absorbance change of DPPIP was recorded at 590 nm.

SO₂に5時間暴露した葉より単離した葉緑体の DPIP 光還元速度は、暴露しない葉からの葉緑体の速度と比べて大きく低下している。1.0 および 2.0 ppm の SO₂ 濃度で暴露した場合の DPIP 光還元の活性低下を経時的に調べたのが図2である。高濃度（2.0 ppm）の方が活性低下が短時間で起こるが、ある程度時間を経ると活性低下がゆるやかになる。濃度を変えて一定時間（24時間）ガス暴露を行なうと、濃度が高くなるに従って活性の低下が著しい（図3）。

若し、この SO₂ による電子伝達反応の阻害が、細胞に侵入し可溶化した SO₂ の存在によって起こるならば、葉緑体を低調液で破裂させ、可溶化した SO₂ を取り除けば、この阻害は回復する筈である。そこで、不活性化された葉緑体を氷冷の 5 mM リン酸緩衝液（pH 7.2）中で10分間低調処理して破裂させ、遠心分離で集めた葉緑体粒子について DPIP の光還元活性を測定してみた。しかしながら、低下した活性の回復はみられなかった。次いで、2.0 ppm SO₂ 5時間暴露した葉から葉緑体を単離した際に得られる上清に、健全な葉から得られた単離葉緑体をケンダクし、0℃で10分間インキュベートした後、葉緑体の DPIP 光還元活性を測定してみると、阻害は全く起こっていなかった。

これらのことから、葉緑体における電子伝達反応の阻害は、可溶化した SO₂ の存在のためや、葉緑体単離中に起こられるのではなくて、SO₂ 暴露中に *in vivo* で葉緑体内に起こられる不可逆的な損傷によると考えられる。

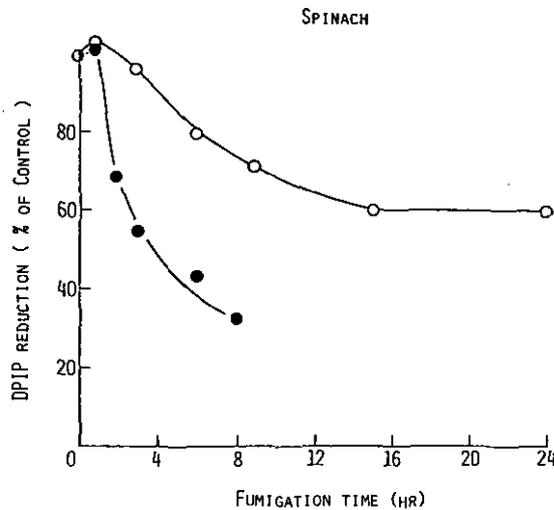


図2 SO₂ 1.0 ppm (○) および 2.0 ppm (●) 暴露によるホウレンソウ葉緑体の DPIP 光還元活性の阻害

Fig. 2 Inhibition of DPIP photoreduction with spinach chloroplasts by SO₂ fumigation at 1.0 ppm (○) and 2.0 ppm (●)

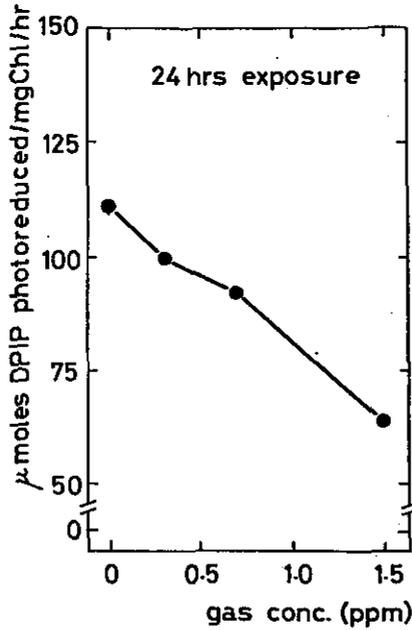


図3 24時間暴露によるSO₂のDPIP光還元活性に対する濃度効果

Fig. 3 Effect of SO₂ concentration on DPIP photoreduction for 24 h exposure.

SO₂暴露による電子伝達反応阻害とクロロフィル分解との関連性

SO₂水溶液（SO₂を水に通気して得られた溶液）に地衣類やマツの葉を浸けた実験で、クロロフィルの分解とCO₂固定能が減少することが報告されている（8, 11）。またSO₂水溶液で葉緑体内膜の損傷を伴った電子伝達反応の阻害が報告されている（7）。しかしながら、SO₂により誘起される電子伝達反応の阻害が、クロロフィルの分解に先行するのか、同時なのかについては明確な報告はない。この点を明らかにするために、同一植物について葉緑体のDPIP光還元の活性と葉中のクロロフィル含量を同時に測定してその関連を調べた。その結果を図4（ホウレンソウ）と図5（レタス）に示す。SO₂濃度2.0 ppm、横軸に接触時間、縦軸にDPIP光還元活性および一定葉面積あたりのクロロフィル含量を、対照に対する百分率で表わしている。ガス接触1時間までは電子伝達反応の活性は変わらないが、2時間後から急激に活性低下が観察される。一方、クロロフィル量の減少は、活性低下が40%程度みられる3時間目においても有意に認められず、活性低下がホウレンソウでは60%、レタスでは90%に及ぶ5時間目でも10~20%の減少しか認められない。すなわち、クロロフィルの分解は光合成電子伝達反応の活性低下より時間的遅れのある現象であり、SO₂の二次的影響により生じていると言える。写真Iは、可視障害の経時的変化を示している。

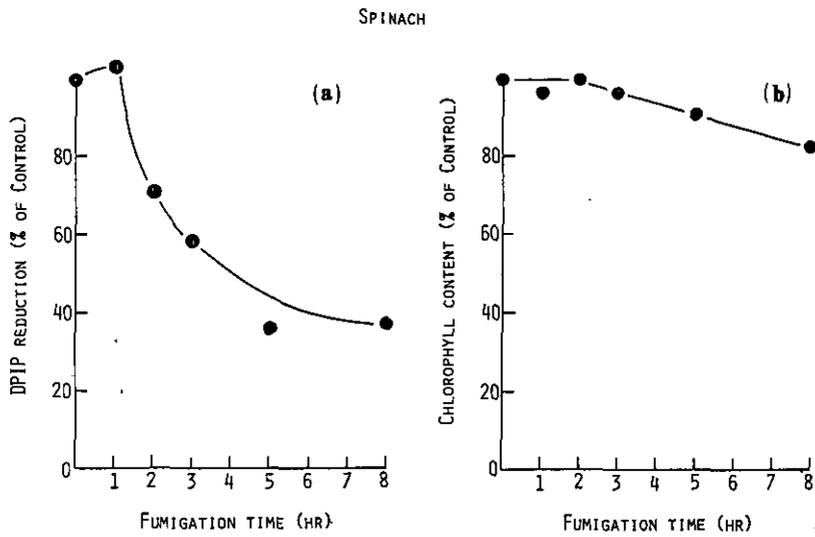


図4 SO₂暴露による電子伝達反応の阻害とクロロフィル分解の関連 (ホウレンソウ)
 (a) 葉緑体のDPIP光還元活性の阻害
 (b) 葉中クロロフィル含量の変化

Fig. 4 Relationship between inhibition of electron transport and chlorophyll breakdown by SO₂ fumigation in spinach leaves. (a) Inhibition of DPIP photoreduction by chloroplasts. (b) Changes in chlorophyll content of leaves.

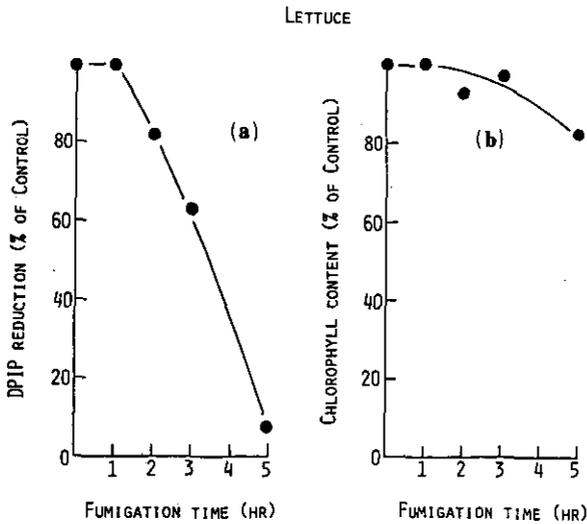


図5 SO₂暴露による電子伝達反応の阻害とクロロフィル分解の関連 (レタス)
 (a) 葉緑体のDPIP光還元活性の阻害
 (b) 葉中クロロフィル含量の変化

Fig. 5 Relationship between inhibition of electron transport and chlorophyll breakdown by SO₂ fumigation in lettuce leaves. (a) Inhibition of DPIP photoreduction by chloroplasts. (b) Changes in chlorophyll content of leaves.

SO₂暴露による葉緑体の吸収スペクトルの変化

図6aは、SO₂を暴露したハウレンソウより単離した葉緑体の吸収スペクトルを、正常な葉緑体の吸収スペクトルと共に示している。両者を比較すると、被暴葉緑体の吸収スペクトルの、クロロフィルの極大に相当する436nmおよび678nmにおいて、わずかに吸光度の減少が見られるだけである。しかしながら、同じ葉緑体の電子伝達活性は50%も阻害されている(表1)。レタスの葉緑体についても(図6b)、クロロフィルbの極大に相当する470nmあたりの吸光度がわずかに増加している位で、大きな変化はみとめられない。しかし同じ葉緑体の電子伝達活性は、対照の40%に減少している。これらの事からも、クロロフィルの分解は、SO₂の植物被害に関して、一次的なものではなく、二次的に起こされる被害であると言える。

SO₂によるクロロフィル分解の様式

地衣類の色素の研究で、Puckettら(11)は、SO₂が色素に3つの異った変化をもたらすことを指摘している。即ち、ブリーチングと、フェオフィチン化とスペクトルのブルーシフトである。我々の実験条件においては、ハウレンソウおよびレタスの両者とも3-5時間のSO₂暴露でクロロフィルの分解が生じた。SO₂5時間暴露した葉の80%アセトン抽出液のスペクトルを見ると(図7a, b), 両者のスペクトルとも、正常葉のスペクトルと比べて、吸収極大のシフトはみられず、また新しい極大の発現もなく、ただ各極大における吸光度の減少(ブリーチング)が観察された。これらの抽出液に塩酸を添加すると、409nm, 473nm, 532nmおよび602nmに吸収極大を持つ、典型的なフェオフィチンの吸収スペクトルが得られた。従って、クロロフィルの分解過程は、主にブリーチングによるものと考えられる。また被暴葉の80%アセトン抽出液の吸収スペクトルでは、クロロフィルbの極大である455nmあたりの極大が表われた。このことは、クロロフィルaやカロチノイドがクロロフィルbよりもSO₂に対して弱く、先に分解することを示している。表2に見られるクロロフィルa, bの値もこの事実を裏付けている。この事は先に報告された結果(8, 11)とよく一致している。

表1 SO₂被暴葉から単離した葉緑体の電子伝達反応速度

Table 1 Rates of electron transport by chloroplasts isolated from SO₂-fumigated leaves.

Plants	SO ₂ concentration (ppm)	Fumigation time (h)	DPIP photoreduction (μmoles reduced/mg chl/h)	Inactivation (%)
Spinach (Viroflay)	0	-	152	0
	2.0	5	79	48
Lettuce	0	-	141	0
	2.0	3	61	57

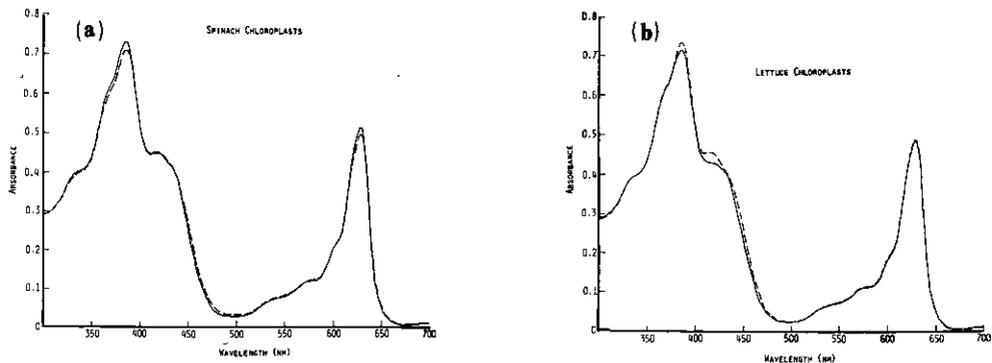


図6 葉緑体の吸収スペクトルに及ぼすSO₂の影響 (-----) 被暴葉から単離した葉緑体の吸収スペクトル (——) 対照葉から単離した葉緑体の吸収スペクトル
 (a)左: ホウレンソウ葉緑体 2.0 ppm SO₂, 5時間暴露
 (b)右: レタス葉緑体 2.0 ppm SO₂, 3時間暴露

Fig. 6 Effect of SO₂ on absorption spectra of chloroplasts isolated from fumigated (-----) and non-fumigated (——) leaves.
 (a) Left: Spinach chloroplasts; fumigation was performed for 5 h at 2.0 ppm.
 (b) Right: Lettuce chloroplasts; fumigation was performed for 3 h at 2.0 ppm.

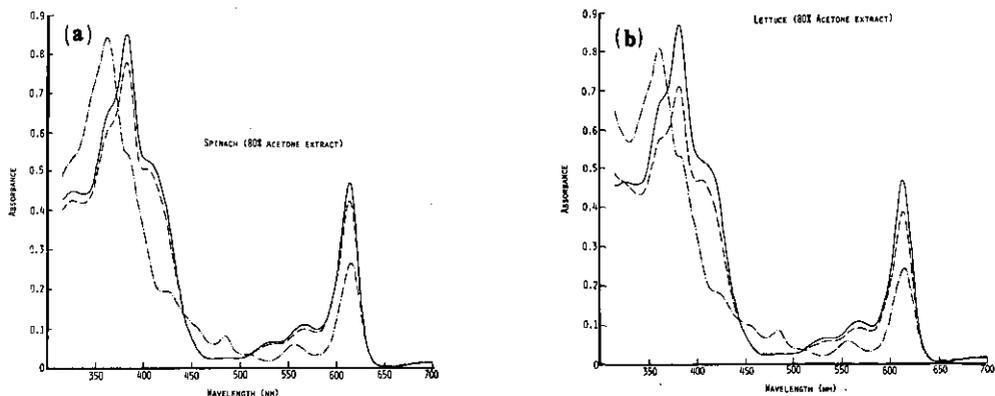


図7 SO₂被暴葉および対照葉の80%アセトン抽出液の吸収スペクトルの変化 (-----) 被暴葉抽出液の吸収スペクトル (——) 対照葉抽出液の吸収スペクトル
 (a)ホウレンソウ (b)レタス 両者とも 2.0 ppm SO₂, 5時間暴露

Fig. 7 Changes in absorption spectra of 80% acetone extracts obtained from fumigated (-----) and non-fumigated (——) leaves. One drop of HCl was added to the extract from fumigated leaves (-----).
 (a) Spinach. (b) Lettuce. Fumigation was performed for 5 h at 2.0 ppm to both plants.

Table 2 Chlorophyll contents in SO₂-fumigated leaves.

Plants	SO ₂ concentration (ppm)	Fumigation time (h)	Chl a + Chl b	Chl a (μg/10 cm ² leaf area)	Chl b	Chl a/Chl b
Spinach (New Asia)	0	—	9.91	7.53	2.38	3.16
	2.0	4	8.19	6.04	2.15	2.81
Lettuce	0	—	5.51	4.48	1.03	4.35
	2.0	5	4.56	3.63	0.93	3.90

考 察

SO₂による光合成活性の阻害やクロロフィルの破壊については、いくつかの報告があるが、これらの研究において、クロロフィルの分解が光合成活性の低下より先行するのがあるいは同時なのかについては、明らかにされていなかった。

本研究においては、SO₂の植物毒性を、被暴葉から単離した葉緑体のDPIP光還元活性と吸収スペクトルおよび葉中のクロロフィル含量を測定することにより解析し、クロロフィルの分解が起こる以前に、*in vivo*で葉緑体の電子伝達系に不可逆的な損傷が起こっていることを明らかにした。そして、クロロフィルの分解は、SO₂の植物毒性の二次的過程であることを示した。

クロロフィルの分解に関しては、SO₂水溶液を用いた研究で、クロロフィルaのフェオフィチンaへの変換が報告されているが(8)、我々の実験では、被暴葉からの80%アセトン抽出液の吸収スペクトルを検討しても、有意的なフェオフィチン化は認められず、クロロフィルのブリーチングのみ観察された。しかし、一旦フェオフィチンになったクロロフィルがすばやくブリーチしていく可能性も残されている。クロロフィルのブリーチングには、ある酸化力が必要であるが、この酸化力が何から由来するか、さらに葉緑体の電子伝達系の不可逆的損傷部位は何処か等について研究を続行しており、その結果は次報に報告する。

引 用 文 献

1. Clayton, R.K. 1966. Physiological processes involving chlorophylls in vivo. In: The Chlorophylls, (Ed. by L.P. Vernon & G.R. Seely), pp. 609-641. Academic Press, New York
2. Coker, P.D. 1967. The effects of SO₂ pollution on bark epiphytes. *Trans. Br. Bryol. Soc.* 5: 341-347
3. Hawksworth, D.L., F. Rose. 1970. Qualitative scale for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. *Nature* 227: 145-148
4. Hill, D.J. 1971. Experimental study of the effects of sulphite on lichens with reference to atmospheric pollution. *New Phytol.* 70: 831-836
5. LeBlanc, F., D.N. Rao and G. Comeau. 1972. The epiphytic vegetation of *Populus balsanifera* and its significance as an air pollution indicator in Sudbury, Ontario. *Can. J. Bot.* 50: 519-528
6. Mackinney, G. 1941. Absorption of light by chlorophyll solutions. *J. Biol. Chem.* 140: 315-322
7. Malhotra, S.S. 1976. Effects of sulphur dioxide on biochemical activity and ultrastructural organization of pine needle chloroplasts. *New Phytol.* 76: 239-245
8. Malhotra, S.S. 1977. Effects of aqueous sulphur dioxide on chlorophyll destruction in *Pinus contorta*. *New Phytol.* 78: 101-109
9. Mudd, J.B. 1975. Sulfur dioxide. In: *Responses of Plants to Air Pollution*, (Ed. by J.B. Mudd & T.T. Kozlowski), pp. 9-22. Academic Press, New York.
10. Nieboer, E., D.H.S. Richardson, K.J. Puckett and F.D. Tomassini. 1976. The Phytotoxicity of sulphur dioxide in relation to measurable responses in lichens. In: *Effects of Air Pollutants on Plants*, (Ed. by T.A. Mansfield), pp. 61-85. Academic Press, New York
11. Puckett, K.J., E. Nieboer, W.P. Flora and D.H.S. Richardson. 1973. Sulphur dioxide: Its effect on photosynthetic ¹⁴C fixation in lichens and suggested mechanisms of phytotoxicity. *New Phytol.* 72: 141-154
12. Rao, D.N., B.F. LeBlanc. 1965. Effects of SO₂ on the lichen alga, with special reference to chlorophyll. *Bryologist* 69: 69-75
13. Showman, R.E. 1972. Residual effects on sulfur dioxide on the net photosynthetic and respiratory rates of lichen thalli and cultured lichen symbionts. *Bryologist* 75: 335-341
14. Sij, J.W., C.A. Swanson. 1974. Short-term kinetic studies on the inhibition of photosynthesis by sulfur dioxide. *J. Environ. Quality* 3:103-107
15. Thomas, M.D. 1951. Gas damage to plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 2: 293
16. Thomas, M.D., R.H. Hendricks and G.R. Hill. 1944. Some chemical reactions of SO₂ after absorption by alfalfa and sugar beets. *Plant Physiol. Lancaster* 19: 212-226
17. Yamashita, K., K. Konishi, M. Itoh and K. Shibata. 1969. Photobleaching of carotenoids related to the electron transport in chloroplasts. *Biochim. Biophys. Acta.* 172: 511-524
18. Yamashita, T., W.L. Butler. 1969. Photooxidation by photosystem II of Tris-washed chloroplasts. *Plant Physiol.* 44: 1342-1346
19. Ziegler, I. 1972. The effect of SO₃²⁻ on the activity of ribulose-1,5-diphosphate carboxylase in isolated spinach chloroplasts. *Planta* 103: 155-163

**Studies on mechanisms of sulfur dioxide phytotoxicity (1)
Effects of sulfur dioxide on photosynthetic electron transport
and chlorophyll breakdown in higher plants**

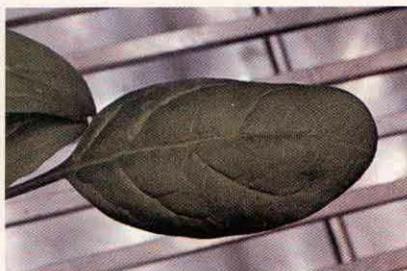
Ken-ichiro SHIMAZAKI and Kiyoshi SUGAHARA

Summary

The effects of sulfur dioxide on photosynthetic electron transport and chlorophyll breakdown in higher plants were investigated under environment-controlled conditions. Electron transport from water to 2, 6-dichlorophenolindophenol in chloroplasts isolated from the SO₂-fumigated leaves was inhibited without producing the significant loss of the chlorophyll in leaves. In isolated chloroplasts, when electron transport was severely inhibited by SO₂ fumigation, absorption spectra of the chloroplasts were only slightly modified. The absorption spectra of the acetone extract from SO₂-fumigated leaves showed that the chlorophyll bleaching occurred. The results indicate that the chlorophyll breakdown was late in time relative to injury of electron transport by fumigating plants with SO₂ and was mainly due to the bleaching.



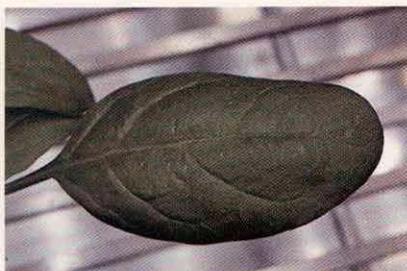
0 hr



1 hr



2 hrs



3 hrs



5 hrs



8 hrs



11 hrs



24 hrs

写真 I 2.0 ppm SO₂ 暴露によるホウレンソウ可視障害の経時的变化

Plate I Changes in visible injuries on a spinach leaf with the time of SO₂ fumigation at 2.0 ppm.

III - 6

二酸化イオウの植物影響の作用機序に関する研究 (2)

光合成電子伝達反応の阻害機構および葉緑体反応の指標性について

島崎研一郎¹・菅原 淳¹・岡田光正²・滝本道明²

要 旨

SO₂被害葉から単離した葉緑体について、光合成電子伝達系の阻害部位および膜構造の損傷について解析を行った。

1. SO₂による電子伝達系の阻害は、光化学系Ⅱの水からDPIPへ至る経路で起こり、光化学系ⅠのDPIP H₂からNADPへ至る経路では、阻害はみとめられなかった。
2. 電子伝達反応に共役して起こる光リン酸化反応は、non-cyclicな光リン酸化反応のみが阻害をうけ、光化学系Ⅰの反応で起こるcyclicな光リン酸化反応は阻害されなかった。

光リン酸化反応の阻害の大きさは、電子伝達活性の低下に対応した。

3. 光化学系Ⅰの反応に共役して起こる、チラコイド膜を介したプロトン勾配の形成は、光化学系Ⅱの電子伝達活性が厳しく阻害された条件でも、ほとんど低下しなかった。

4. 光化学系Ⅱの反応の阻害が先に起こることから、系Ⅱ活性(DPIP光還元活性)の阻害の程度から、いろいろな植物のSO₂に対する感受性を評価した。

調べた結果を感受性の高い順に並べると、ダイコン>レタス>ホウレンソウ>インゲン>落花生の順であった。この結果は、SO₂による蒸散量の変化から得られた抵抗性の結果とよく一致している。

5. 葉緑体の電子伝達活性が低下すると同時に、葉緑体の蛍光収率も低下することが見出され、活性の低下が著しい程、蛍光収率も大きく低下した。

6. この葉緑体の蛍光収率の低下を指標として、数種の植物におよぼすSO₂の影響を調べた。可視障害が著しい植物ほど蛍光収率の低下も著しかったが、測定時に可視障害がみとめられず翌日に出現してくるような場合でも蛍光収率の低下がみとめられた。

以上の結果から、被暴葉の単離葉緑体について、DPIPの光還元活性や蛍光収率の低下を調べることは、SO₂の影響を早期に検知する有効な指標となることを示している。

緒 言

植物が二酸化イオウに触れると、炭酸ガス固定能の低下、生育阻害、障害の強い場合には、クロロシス、ネクロシスがひきおこされることはよく知られた事実であるが(3)、その作用機序については不明の点が多い。クロロシス、ネクロシス等のいわゆる可視障害はクロロフィル分解の結果であ

1. 国立公害研究所 生物環境部
2. 東邦大学 理学部

るが、先の報告で、クロロフィル分解が起こる以前に、*in vivo* で、葉緑体内の電子伝達系に何らかの不可逆的損傷が、生理的レベルで起こっていることが示唆された。SO₂の*in vivo*での毒性発現機構を解明するためには、光合成反応の“場”であり、クロロフィルの局在する葉緑体の機能に及ぼす影響を調べる必要がある。

本研究においては、SO₂に暴露した葉から単離した葉緑体について、電子伝達系の阻害機構を中心に、色々な角度からSO₂の影響を追究した。

さらにその結果を利用して、数種の植物のSO₂に対する感受性を評価したので、あわせて報告する。

材料と方法

植物材料：昼20℃、夜15℃、湿度70%の温室で生育したハウレンソウ（Viroflay）、約4～7週間、昼25℃、夜20℃、湿度70%の温室で生育した、ダイコン（約4～7週間）、落花生（約10～11週間）、トマト、レタス（10～11週間）を使用した。

ガス接触：温室で生育した植物をグロースキャビネットに移し、栽培条件と同一温度（昼間）、湿度75%、光強度30,000Luxの条件下で所定の濃度のガスに接触させた。二酸化イオウ濃度は、グロースキャビネット内の2点で、蛍光法によるパルスアナライザーでモニターした。

葉緑体の単離：植物を所定濃度のガスに接触させ直ちに葉片を0.4M蔗糖、0.02M NaClをふくんだ氷冷の0.05M Tricine-NaOH緩衝液（pH 7.5）中にて、ホモジナイズし、四層のガーゼでろ過し、ろ液を遠心分離して葉緑体を単離した。

光合成活性の測定：単離葉緑体によるDPIPおよびNADP光還元は、分光光度計を用いて590nmの吸収の減少および340nmの吸収の増加によりそれぞれ測定した。葉緑体の蛍光は日立MPF-4型蛍光光度計を用いて、430nmの光で励起し、600～750nmの波長範囲を記録した。

リン酸化の測定は、Avronの方法(2)により、光誘導pH変化はHitachi-Horiba pHメーターにより測定した。

クロロフィルの定量はMackinney(5)の方法によった。

結 果

SO₂の葉緑体反応におよぼす影響

先の報文中で、ガス濃度一定で、植物をSO₂に暴露すると、経時的にDPIP光還元の活性が低下することを示した。さらに、SO₂暴露によるクロロフィルの分解は、電子伝達反応活性の低下に、時間的遅れがあり、SO₂植物毒性の二次的過程であることが明らかにされた。

この電子伝達反応活性の低下の理由として2つの可能性が考えられる。

(1) Wellburn(11)やMalhotra(7)らは、SO₂接触により、葉緑体のラメラ構造に乱れが生じることが報告しているが、このようなチラコイド膜構造の全体的損傷による活性の低下。

(2) チラコイド膜中に組み込まれている、光合成電子伝達鎖上の特定の部位の損傷による活性の低下。

これらのことを調べる目的で、電子伝達反応活性を、光化学系 I と光化学系 II とに分けて測定した。図 1 は多くの研究者によって受け入れられている高等植物の光合成電子伝達経路である(3)。DPIP を電子受容体として用いてきたが、DPIP は A_2 に相当し、水からの電子を受け取ることになり、系 II の活性を測定できる。系 I の活性はジクロロフェニールジメチルウレア (DCMU) で系 II からの電子の流れを止め、 D_1 に相当する還元型 DPIP ($DPIP_H_2$) を加えて、人為的に電子を送り込んでやり、NADP を電子受容体として用いることにより測定できる。全体(系 I および系 II)の電子伝達活性は、NADP を電子受容体として水からの電子の流れを測定すればよい。このような方法で測定した結果が表 1 に示してある。SO₂ 2.0 ppm, 3 時間の暴露で H₂O から NADP へ至る全経路の電子伝達反応が約 30% の阻害を受けている。このとき系 II の活性、H₂O → DPIP が約 30% の阻害を受けるのに対して、系 I の活性、 $DPIP_H_2$ → NADP (+DCMU) はほとんど影響を受けない。この結果から、水を光分解して酸素を発生する系である光化学系 II が、SO₂ により特異的に阻害を受けることがわかる。

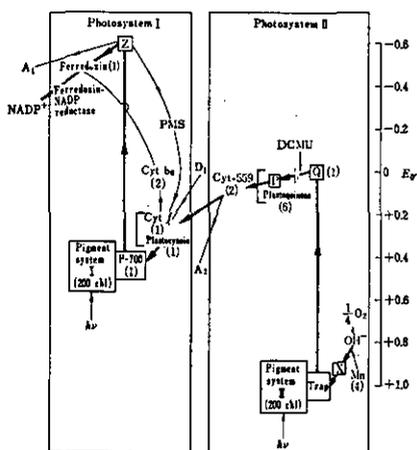


図 1 高等植物における光合成電子伝達経路

Fig. 1 Photosynthetic electron transport systems in higher plants. (after Boardman, N.K., 1968)

表 1 光化学系 I および II における電子伝達反応におよぼす SO₂ の影響
Table 1 Effect of SO₂ on electron transport in photosystems I and II.

Reaction measured	SO ₂ Concentration (ppm)		Inhibition (%)
	0	2.0	
	μmoles acceptor reduced/mg Chl/hr		
H ₂ O → NADP	50.2	35.0	30.3
DPIP _H → NADP (+DCMU)	28.1	30.2	- 7.4
H ₂ O → DPIP	109.6	76.2	30.5

表2 non-cyclicおよびcyclicな光リン酸化反応におよぼすSO₂の影響
 Table 2 Effect of SO₂ on non-cyclic and cyclic photophosphorylations.

Reaction measured	SO ₂ Concentration (ppm)		Inhibition (%)
	0	2.0	
A. Electron transport	μmoles acceptor reduced/mg Chl/hr		
H ₂ O → NADP	46.8	30.2	35.5
B. Photophosphorylation	μmoles ATP formed/mg Chl/hr		
H ₂ O → NADP	118.7	73.3	38.2
PMS (+DCMU)	176.7	177.0	-0.2

光合成電子伝達鎖の光化学系Ⅱが不可逆的損傷を受けることが示されたが、葉緑体膜構造に強く依存した葉緑体反応、例えば光リン酸化反応あるいはチラコイド膜を介して起こるプロトン勾配の形成などが、より大きな損傷を受ける可能性がある。そこでこれら諸反応について調べた。

表2は、光リン酸化反応についての結果である。光リン酸化反応は、水からNADPへ至る電子伝達反応と共役して起こるnon-cyclicなリン酸化と、フェナジンメトサルフェイト(PMS)のようなcofactorを加えた時に、系Ⅰの反応系だけで起こるcyclicな電子の流れに共役する(図1参照)cyclicな光リン酸化があるが、それぞれの活性の測定結果を示している。水からNADPへ至る電子伝達活性が約36%阻害されている試料で、non-cyclicな光リン酸化活性は約38%の阻害をうけるにも拘らず、系Ⅰだけで起こるcyclicな光リン酸化は、全く活性低下がない。この結果は、表1の結果とよく一致している。

さらに系Ⅰの反応に共役して起こる光誘導によるプロトン勾配の形成の結果を表3に示してある。水からNADPに至る電子伝達活性が60%以上阻害された試料で、PMSを加えた条件で、チラコイド膜を介して起こるプロトン勾配の形成の低下はみとめられない。

以上の結果に基づくと、SO₂による葉緑体上の損傷の1つは、光合成電子伝達鎖上の光化学系Ⅱ付近に生じていると結論できる。

表3 チラコイド膜を介してのプロトン勾配形成におよぼすSO₂の影響
 Table 3 Effect of SO₂ on light-induced proton uptake across the thylakoid membranes.

Reaction measured	SO ₂ Concentration (ppm)		Inhibition (%)
	0	2.0	
A. H ⁺ uptake (+PMS)	181.5	neq 169.7	6.5
B. Electron transport	μmoles/mg Chl/hr		
H ₂ O → NADP	41.0	15.4	62.4

葉緑体反応阻害度による植物の対SO₂感受性の評価

SO₂により光合成電子伝達系の光化学系II付近が特異的に阻害されることが明らかになったので、植物のSO₂に対する感受性を早期に検知しようとする場合、この系II活性を測定し指標として用いることができると思われる。

光化学系IIの反応を表わすDPIPの光還元活性を指標として、SO₂ 2.0 ppm、3時間の暴露を数種の植物について行ない、直ちに葉緑体を単離して活性を測定し、その阻害度からSO₂に対する感受性を評価した。その結果は表4に示してある。右の欄には、暴露後の可視障害度を表面光沢化に応じて表現してある。翌日の観察では、ほぼこの光沢化に平行した葉面白化がみられた。落花生の場合には、何ら可視障害はみられなかったが、約20%の活性阻害が起きていることが検知できた。

表4 数種植物におけるSO₂暴露によるDPIP光還元反応の阻害
Table 4 Inhibition of DPIP photoreduction by SO₂ fumigation in several plants.

Species	DPIP photoreduction (μ moles/mg chl/hr)		Inhibition (%)	Visible injury*
	SO ₂ concentration (ppm)			
	0	2.0		
Spinach	122.1	52.7	56.8	+++
Radish	75.7	25.0	67.0	+
Lettuce	100.7	41.0	59.3	++
Kidney bean	87.7	45.9	47.7	++
Peanut	85.4	70.1	17.9	-

* Visible injury was observed as glazing of leaf surface. The grade of visible injury was shown in relative values.

このように、可視障害として表現されない、不可視障害の段階で、検知できることは、この方法の不可視障害判定の指標性を示す。

又、この結果は、蒸散のパターンによる感受性の判定結果とよく一致している。

さらに、電子伝達活性の低下に伴って、葉緑体のクロロフィルの蛍光収率が減少することが見出された。図2は、ハウレンソウの被暴葉から単離した葉緑体についての例である。

SO₂暴露を行なったすべての植物で、葉緑体の蛍光収率の低下がみられた(図3)。可視障害の大きいレタスでは、可視障害の小さいアサガオより蛍光収率の低下が著しい。電子伝達活性の阻害率と蛍光収率低下率との完全な定量関係は得られなかったが、大体の阻害の傾向と定性的な判定には有効なこと、手法が簡便なことなどの点から、不可視障害判定の指標としてこの方法も利用できると思われる。

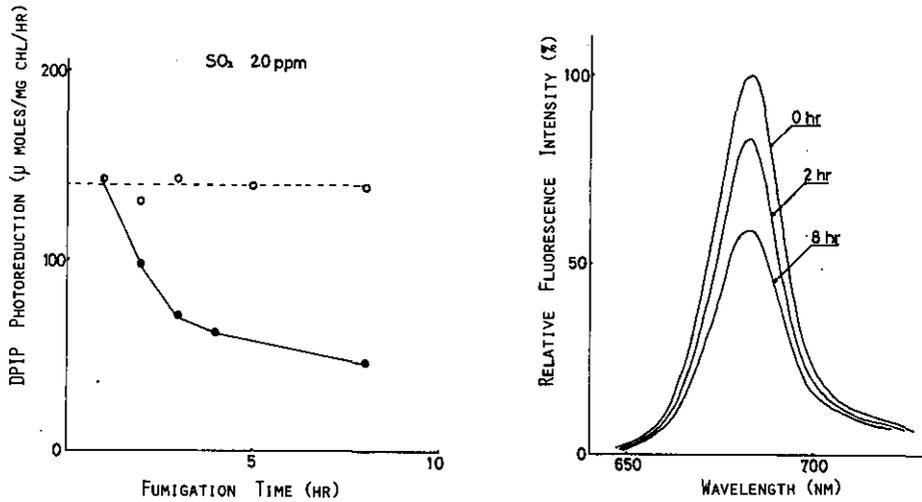


図2 SO₂暴露による電子伝達反応阻害と葉緑体の蛍光収率低下との関連性

Fig. 2 Relationship between inhibition of electron transport and decrease of fluorescence yield in chloroplasts by SO₂ fumigation.

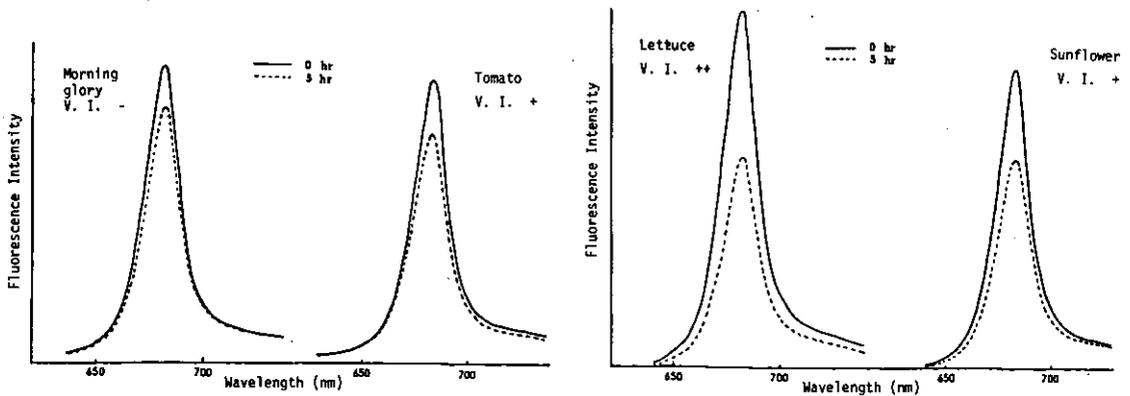


図3 数種植物におけるSO₂暴露による葉緑体蛍光収率の低下
V. I.: 可視障害

Fig. 3 Decrease of chloroplast fluorescence yield by SO₂ fumigation in several plants.
V. I.: Visible injury

考 察

SO₂が植物体内に取り込まれ、細胞液にとけるとHSO₃⁻、SO₃²⁻、H⁺を生ずる。一部は植物体内の反応により酸化されてSO₄²⁻となり、あるものは、内在の物質と反応して別の化合物に変化する。これらのいずれか、又はすべてが毒性を発揮していると考えられるが、これらの化合物を試験管中で葉緑体懸濁液に加え、影響を調べた結果が報告されている。

SO₄²⁻は、電子伝達活性の低下はきたさず、光リン酸化活性を低下させる脱共役作用を示すこと(1)、照射条件で光リン酸化の共役因子であるCF₁と不可逆的に反応してリン酸化活性を低下させる(8)などの報告がある。

このときSO₄²⁻は、cyclicなリン酸化も、non-cyclicなリン酸化と同じように不可逆的の阻害を示していることから、我々の結果とは異なる。従ってSO₄²⁻は、我々の実験条件下でのSO₂障害を引き起こす作用物質であるとは考えにくい。

また、一般にSO₄²⁻はSO₃²⁻、HSO₃⁻にくらべて電子伝達活性に関して阻害効果が低いという報告(9)もある。

Tanakaら(10)は、SO₂接触を行なったOryza中にglyoxylate bisulfiteが生成することを報告しているが、Lüttgeら(5)はglyoxal-Na-bisulfiteの葉組織に対する影響を調べこの物質が膜に直接影響を与え、膜を介してのプロトンの濃度勾配の形成およびATP生成などへの非特異的な阻害を報告している(5)。

一方、SO₂に接触させた葉から得た葉緑体の光合成電子伝達系は光化学反応系IIが特異的に不可逆的の損傷を受けていることが示されたが、我々が示した可視害に至る不可逆的な損傷部位と、阻害物質が存在する状態での葉緑体反応の阻害様式(AsadaらやSilviusらの研究)とは異なるものと思われる。

二酸化イオン接触による電子伝達活性の低下の大きさから数種植物の感受性の評価を行なったが、この方法は、SO₂に対する植物の感受性を数値化できる点に大きな利点がある。作用機作を調べていくなかで、さらに大きな変化をする反応がみつければ、その変化を測ることにより、より低濃度でのSO₂ガス影響を知ることが可能になると思われる。例えば、電子伝達活性が変化をうければ、その最終産物であるNADPHのレベルが大きく変動する可能性がある。植物体内には、NADPHのレベルを一定に保とうとする機構があるので、そのまま解釈することは出来ないがしらべてみる必要があると思われる。

引 用 文 献

1. Asada, K., R. Deura and Z. Kasai. 1968. Effect of sulfate ions on photophosphorylation by spinach chloroplasts. *Plant & Cell Physiol.* 9:143-146
2. Avron, M. 1960. Photophosphorylation by swiss-chard chloroplasts. *Biochim. Biophys. Acta* 40: 257-272
3. Boardman, N.K. 1968. The photochemical systems of photosynthesis. *Advances in Enzymology* 30: 1-79
4. 門田正也編. 1973. 大気汚染植物被害写真集. 日本公衆衛生協会.
5. Lüttge, U., C.B. Osmond, E. Ball, E. Brinckman and G. Kinze. 1972. Bisulfite compounds as metabolic inhibitors: nonspecific effects on membranes. *Plant & Cell Physiol.* 13: 505-514
6. Mackinney, G. 1941. Absorption of light by chlorophyll solutions. *J. Biol. Chem.* 140: 315-322
7. Malhotra, S.S. 1976. Effects of sulfur dioxide on biochemical activity and ultrastructural organization of pine needle chloroplasts. *New Phytol.* 76: 239-245
8. Ryrie, I.J. and A.T. Jagendorf. 1971. Inhibition of photophosphorylation in spinach chloroplasts by inorganic sulfate. *J. Biol. Chem.* 246: 582-588
9. Silvius, J.E., M. Ingle and C.H. Baer. 1975. Sulfur dioxide inhibition of photosynthesis in isolated spinach chloroplasts. *Plant Physiol.* 56: 434-437
10. Tanaka, H., T. Takanashi and M. Yatazawa. 1972. Experimental studies on SO₂ injuries in higher plants. I. Formation of glyoxylatebisulfite in plant leaves exposed to SO₂. *Water, Air and Soil Pollut.* 1: 205-211
11. Wellburn, A.R., O. Majernik and F.A.M. Wellburn. 1972. Effects of SO₂ and NO₂ polluted air upon the ultrastructure of chloroplasts. *Environ. Pollut.* 3: 37-48

Studies on mechanisms of sulfur dioxide phytotoxicity (2)

Mechanisms of inhibition in photosynthetic electron transport systems by sulfur dioxide and application of chloroplast reactions for indicators of sulfur dioxide phytotoxicity

Ken-ichiro SHIMAZAKI¹, Kiyoshi SUGAHARA¹,
Mitsumasa OKADA² and Michiaki TAKIMOTO²

Summary

I. The effects of sulfur dioxide on photosynthetic electron transport and membrane permeability were investigated in chloroplasts isolated from the SO₂-fumigated leaves.

- 1) Electron flow from water to DPIP driven by photosystem II was severely inhibited but electron flow from DPIP to NADP driven by photosystem I was not affected.
- 2) Non-cyclic photophosphorylation coupled to electron flow from H₂O to NADP was inhibited, but PMS-catalyzed cyclic photophosphorylation was not affected. The decrease of non-cyclic ATP formation was comparable to the inactivation of electron flow.
- 3) Light-induced H⁺ uptake across the thylakoid membranes photosensitized by photosystem I was not affected in chloroplasts which was severely suppressed in the activity of photoreducing DPIP.

From these observations, it was concluded that the inhibition occurred in photosystem II but not in energy converting system in chloroplasts isolated from the SO₂-fumigated leaves.

II. The degree of inhibition of electron flow driven by photosystem II (H₂O to DPIP) in chloroplasts isolated from the leaves of several plants after SO₂ fumigation was used as the indicator of plant susceptibility to SO₂.

- 1) On the basis of the depression of electron flow in the chloroplasts, the sensitivity to SO₂ phytotoxicity was examined. The order of plants on high susceptibility was as follows: radish, lettuce, spinach, kidney bean, peanut. The result was consistent with that of plant susceptibility obtained by the mode of stomatal response to SO₂ fumigation in several plants.

1. Division of Environmental Biology, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe, Ibaraki 300-21

2. Faculty of Science, Toho University, Funabashi, Chiba 274

- 2) The decrease of chlorophyll a fluorescence yield accompanied by the inactivation of photosystem II activity was found in chloroplasts isolated from SO₂-fumigated leaves. Based on the observations, fluorescence emitted from chloroplasts was measured and was utilized as the indicator of plant susceptibility to SO₂. The fluorescence decrease was observed in chloroplasts isolated from the leaves which had no visible injuries after SO₂ fumigation.

From these observations, the inhibition of photosystem II activity and the decrease of fluorescence yield caused by SO₂ fumigation could be useful indicators of plant susceptibility to SO₂.

III - 7

ヒマワリ葉の光合成、気孔開度におよぼす二酸化イオウの影響

古川昭雄¹・戸塚 績¹

要 旨

ヒマワリ葉の光合成速度に対するSO₂の影響について種々の葉令について調べた。さらに、環境因子の一つである光の強さを変えた条件下において検討した。ヒマワリはファイトトロン内の自然光室において25 ± 0.1 °C (昼温), 20 ± 0.1 °C (夜温), 75 ± 5 %湿度で育成した。播種後5週目のヒマワリを用いて実験を行なった。

SO₂濃度と光合成速度との関係について第2葉と第5葉(子葉を零葉位として)を用いて調べた。SO₂暴露中の光合成速度の相対値を対数にとって経時的に見ると、二つの直線によって表わされた。そこで、光合成阻害の指標として、この二つの直線の勾配を用いた。直線の勾配を光合成阻害係数として表わし、第一の勾配を第一阻害係数、第二の勾配を第二阻害係数とした。

第一阻害係数はいかなるSO₂濃度においても、また、いかなる葉令においても第二阻害係数よりも高かった。第一阻害係数は1.5 ppm SO₂までSO₂濃度が高くなるにつれて高まる傾向にあった。阻害係数と葉位との関係はほぼ直線的であった。葉位が高くなるにつれて、すなわち若令になるにしたがって阻害係数は小さくなり、葉令によってSO₂の影響の度合いが著しく異なることを示した。

光の強さと第一、第二阻害係数との関係についても調べた。第一阻害係数は光が強くなるにしたがって高くなり、光依存性の性格を有していたのに対して、第二阻害係数は光が強くなるにつれて、わずかに増加傾向を示したが、光依存性の性質は見出されなかった。

緒 言

主要な大気汚染質の一つであるSO₂の植物に対する影響に関して古くから数多くの研究がなされてきている。これらの研究についてThomas (10, 11), Mudd (6), Bell and Mudd (2)が要約している。SO₂によって引き起される植物の障害は可視障害と不可視障害とに大別される。可視障害は感受性の高い植物に比較的高濃度のSO₂を暴露した時に発現する。一方、不可視障害は可視障害を伴わない、もしくは可視障害発現以前の光合成速度の低下、ひいては生長の悪化として認められる障害である。可視障害は数多くの植物において観察されるが、その発現の程度は植物の種類によって大きく異なる。我々の研究室において、2.0 ppm SO₂をヒマワリ、ダイコン、ハウレンソウに暴露した結果、可視障害は暴露開始後各々の植物において、3, 4, 6時間後に発現した。さらに可視障害が発現する程度は葉令によっても大きく異なっていた。SO₂による可視障害の発現が葉

1. 国立公害研究所 生物環境部

令によって影響されることはすでに 1930 年代に報告されている (7, 16)。しかし、葉令を異にした葉の光合成速度に対する SO_2 の影響についての報告は非常に少ない。Sij and Swanson (8) はソラマメの光合成に対する SO_2 の影響は葉令が異なっても差がないと報告している。我々は彼らの研究とは独立してヒマワリ葉を用いて SO_2 の光合成に対する影響を葉令を異にした葉について調べ、葉令が SO_2 に起因する障害の主要な制御因子であることを明らかにした。

材料と方法

植物材料：ヒマワリ (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) の種子をウスブルン 1,000 倍液に 30 分間浸漬し、流水にて一晚洗浄後、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 に含んだ鉢 (アール / 10,000) に 3 粒ずつ播種した。播種後一週間してから各鉢の植物体個体数を 1 個体とした。ヒマワリの育成は、夏期 (7 ~ 9 月) に温度 (昼温 $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$; 夜温 $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$)、湿度 ($75 \pm 5\%$) が制御されている自然光温室において行なった。

光合成速度の測定：播種後 5 ~ 6 週目のヒマワリ葉を脱気した蒸留水の中で葉柄から切断し、葉柄を蒸留水を満たした小さなガラス容器に差し、 $17.5 \times 30 \times 2$ cm のアクリル樹脂製の同化箱にセットした。同化箱は人工光ガス暴露室内に 4 個置いた。 SO_2 を暴露する前に、少なくとも一時間は、光合成速度を安定させるため、 25°C 、75% R. H., 36 Klux, 通気速度 10 l/min で前照射した。 SO_2 の光合成に対する影響は、通気している空気を SO_2 を含んだ空気に切り換えることによって調べた。光合成速度は同化箱の入口と出口の CO_2 濃度を赤外線 CO_2 分析計 (島津 URA - 2S) によって測定して求めた。葉令を表わす指標としての葉位は子葉を 0 として下から数えた。

結果と考察

葉令を異にしたヒマワリ葉の光合成速度に対する SO_2 の影響： SO_2 暴露中の第 3 葉と第 6 葉の光合成速度の経時変化を図 1 に示した。 SO_2 の光合成速度に対する影響を評価するのに、研究者によって暴露時間が異なり統一的な結果を得ることが困難である。そこで、我々は時間因子をも含めた SO_2 による光合成障害の評価法を考え、「光合成障害係数」として表現することにした。

図 1 に示した光合成速度の相対値を対数にとってグラフ上にプロットすると二本の直線で表わすことができる (図 2)。それゆえ、各直線は、

$$P_t / P_0 = A e^{-Bt}$$

となる。ここにおいて、 P_0 、 P_t は各々 SO_2 暴露開始直前とある時間 (t) 経過した時の光合成速度である。この直線の勾配は "B" によって示され、 SO_2 による光合成速度の障害率を表わす (12)。この報告において我々は勾配を「光合成障害係数」と表示し、最初の直線の勾配を第一障害係数、第二の直線の勾配を第二障害係数とした。以下に述べる結果はこの光合成障害係数を用いて表示する。実際には、ある一定時間後の光合成障害率による表示と光合成障害係数による表示とは殆ど差がなく障害係数を求めるだけ測定結果の処理を煩雑にする。しかし、ある一定時間後における光

合成速度の相対値もしくは阻害率は、図1および図2からも明らかなように、光合成速度が急激に低下している時の値なのか、もしくは、かなり安定した状態における値なのかを示し得ない。すなわち、経時変化を表わすには、個々の結果を図1に示した方法によって図示する以外に方法がなく、数値による表現はできない。

葉位を異にした葉の光合成速度に対する 0.5, 1.0 ppm SO₂の影響を光合成阻害係数を用いて図3に示した。光合成阻害係数は葉位との間に直線関係を有し、葉位が進む(若くなる)にしたがって阻害係数は小さくなる傾向にあった。いかなる葉位においても、また、いかなるSO₂濃度においても第一阻害係数は第二阻害係数よりも高かった。

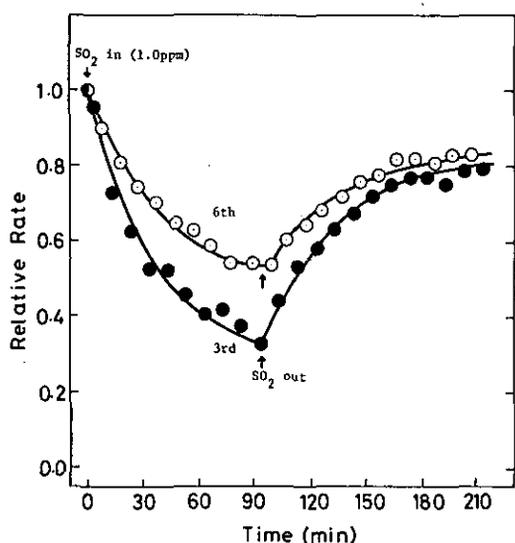


図1 ヒマワリ葉の光合成速度に対するSO₂の影響
1.0 ppm SO₂を第3, 6葉(下から数えて)のヒマワリ葉に暴露して光合成速度の変化を25°C, 36 klux, 75% R. H. 通気速度10 ℓ/minで測定した。

Fig. 1 Effect of 1.0 ppm SO₂ on the rates of net photosynthesis of the 3rd and the 6th leaves of sunflower in the light (36 klux) at 25°C and 75% R.H.

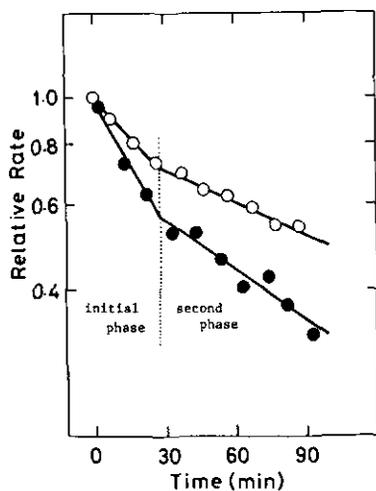


図2 ヒマワリ葉の光合成速度(対数値)に対するSO₂の影響
図1に示した結果を片対数軸座標にプロットした。

Fig. 2 Semilogarithmic plots of the relative rate of net photosynthesis during SO₂ fumigation. Same data as in Fig. 1.

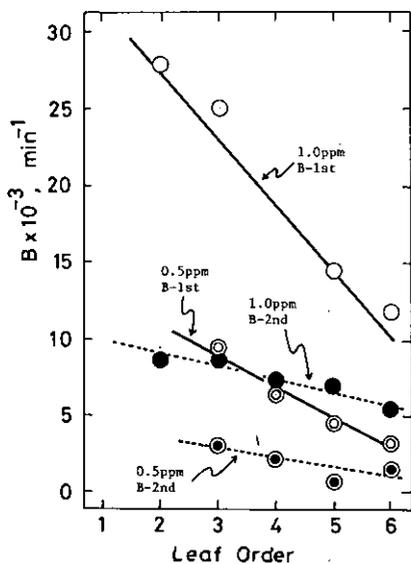


図3 各葉位のヒマワリ葉の光合成速度に対するSO₂の影響

1.0, 0.5 ppm SO₂を各葉位のヒマワリ葉に暴露して、光合成速度阻害係数(B)を計算し求めた。光合成速度阻害係数の求め方は本文中に詳細に記してある。測定条件は図1の時と同様である。

Fig. 3 Relationship between leaf maturity and the 1st (B-1st) and the 2nd (B-2nd) inhibition coefficients of photosynthesis at two SO₂ concentrations (1.0 and 0.5 ppm). The inhibition coefficients of photosynthesis were computed from the equation shown in the text. Experimental conditions were the same as indicated in Fig. 1.

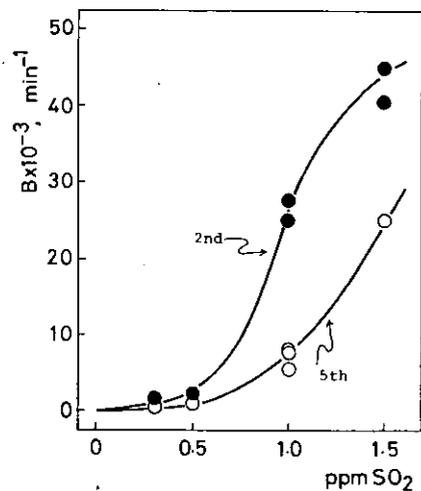


図4 ヒマワリ葉の光合成速度に対する種々のSO₂濃度の影響

第2, 5葉のヒマワリ葉の光合成速度に対するSO₂濃度の影響を光合成速度阻害係数を用いて示した。測定条件は図1の時と同様である。

Fig. 4 Effect of SO₂ concentration on the initial inhibition coefficients (B-1st) of photosynthesis of the 2nd and the 5th leaves of sunflower plants. Experimental conditions were the same as indicated in Fig. 1.

種々のSO₂濃度における第2, 第5葉の光合成速度の変化を光合成阻害係数を用いて示した(図4)。阻害係数はSO₂濃度が高まるにつれて増大した。阻害係数はSO₂濃度がある一定以上の濃度にまで高まると一定になる傾向を示していると思われる。1.0 ppm SO₂における第2葉の阻害係数は第5葉の阻害係数の3倍にも達した。しかし、SO₂濃度の低下にともない葉位による阻害係数の差は小さくなり、0.5 ppm SO₂においては第2葉の阻害係数は第5葉の阻害係数よりも若干大きくなったにすぎない。

大気汚染質は主として気孔を通して植物体内に取り込まれると考えられる。光合成作用に関連して起るCO₂の大気からクロロプラストへの拡散がある。葉が光をうけクロロプラストにおいて光合

成反応をおこしCO₂を固定するとクロロプラストにおけるCO₂濃度は低下し大気との間にCO₂濃度落差が生じる。このCO₂濃度落差に応じてCO₂は大気から気孔、葉肉組織をへてクロロプラストに達する。CO₂の拡散は葉面境界層における拡散抵抗、気孔における拡散抵抗、葉肉組織内を通る時の拡散抵抗等によって律速される。特に、気孔における拡散抵抗は大気からクロロプラストへのCO₂の流れに対して大きく影響する。SO₂の大気からクロロプラストへの拡散についても同様の拡散径路、拡散抵抗が考えられる。すなわち、葉の中へ取り込まれるSO₂の量は気孔の開度に大きく依存し、気孔開度が大きくなるにしたがって取り込み量も大きくなると考えられる。Kondo and Sugahara(3)によれば、アブサイシン酸を処理して気孔を閉じさせた葉にSO₂暴露すると、アブサイシン酸を処理しなかった葉に比較して可視害の発現が弱められるという。Majernik and Mansfield(5)、Unsworthら(4)は、SO₂を処理すると気孔は開くと報告している。しかし、我々が観察した限りにおいては、SO₂処理によって気孔は閉じる。さらに、Sij and Swanson(8)はSO₂処理によって水の取り込み、すなわち気孔開度が減少すると報告している。これらの相反する結果に対してMajernik and Mansfield(4)は相対湿度が高い時(蒸気圧欠差が7 mm Hg以下の時)に気孔は開き、相対湿度が低い時に閉じるとしている。しかし、我々が観察した状態(相対湿度75%)においては気孔は開くことはなかった。この結果の一部を図5に示す。気孔開度はポロメーターによって測定した。ポロメーターによる気孔開度の測定は葉の部位によって大きく異なり、定量的測定値を示すことはできないが、いずれの測定においても常に気孔は閉じた。大政、安保(私信)によれば、若

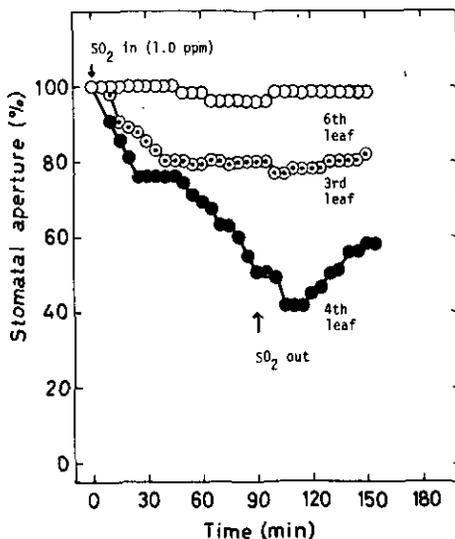


図5 ヒマワリ葉の気孔開度に対するSO₂の影響
1.0 ppm SO₂のヒマワリ葉の気孔開度に対するSO₂の影響を調べた。気孔開度はポロメーターによって測定した。

Fig. 5 Effect of 1.0 ppm SO₂ on the stomatal aperture. The degree of the stomatal opening was measured by a porometer.

若い葉の気孔はSO₂処理によって急激に閉じるが、成熟葉の気孔は閉じにくいという。すなわち、若い葉はSO₂を暴露すると気孔を閉じてSO₂の葉内への侵入を妨げるのに対して成熟葉はSO₂を暴露しても直ぐには閉じないで大量のSO₂が葉内に入るのを許してしまう。若い葉の光合成阻害係数が老葉の阻害係数よりも低い原因として、以上述べた気孔のSO₂に対する反応の違いがあると思われる。

ここにおいては、更に主要な現象に対する説明が必要であろう。すなわち、光合成阻害係数が暴露時間の経過とともに減少するということである。気孔が閉じるまでには多少の時間の遅れが観察された(図5)。また、Sij and Swanson(8)は吸水速度が減少するまでに約15分間の遅れを報告している。SO₂暴露を開始しても気孔は直ぐには閉じず、大量のSO₂が葉内に侵入し、急激に光合成を阻害すると思われる。この推察は光合成速度と気孔開度の相関をプロットすることにより明白に説明でき得る(図6)。SO₂暴露を開始すると気孔開度は変化しないのに光合成速度が急激に低下する。その後、気孔開度の減少と光合成速度の減少は直線関係を有しながら変化する。すなわち、光合成阻害の第一段階においては(図2)、気孔開度の減少による光合成速度の減少ではなく、クロロプラストにおけるCO₂固定がSO₂によって阻害されたことに起因する。光合成阻害係数が経時的に減少するのは気孔がSO₂の作用によって閉じ、SO₂の取り込み速度が減少し、SO₂の影響が減少するためと思われる。第一段階において葉内に取り込まれたSO₂はCO₂の拮抗的作用によって、もしくはミトコンドリアにおけるSO₂の酸化によって無毒化されるものと考えられる。

光合成速度の測定による不可視障害評価の可能性：SO₂濃度と光合成速度が10%阻害されるのに要する時間との関係を図7に示した。

これまでに数多くの研究者によってSO₂の植物生理現象に対する影響について種々の報告がなされてきたが、それらの生理現象を用いて不可視障害を評価できるかどうかについての記述はなされていない。そこで我々は光合成速度を測定することによって環境基準レベルのSO₂濃度の影響を知ることが可能かについて一つの試みを行なった。

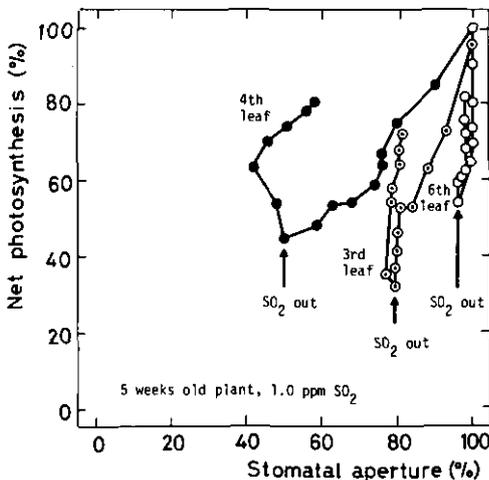


図6 気孔開度と光合成速度の関係
図5に示した気孔開度の変化とその時の光合成速度の変化を図示した。

Fig. 6 Relationship between the relative rates of net photosynthesis and the relative degree of stomatal opening.

生育障害の発現するSO₂濃度(C)と暴露時間(t)とを両対数軸上にプロットすると直線によって示されるという(3)。すなわち、

$$\log t = -a \log C + \log b$$

この関係式を図7に示した結果に適用してSO₂濃度が0.04ppm(環境基準値)の時に光合成速度が10%阻害されるのに要する時間を試算した。その結果は第5葉において14日、第2葉において7日であった。この試算結果は、低濃度SO₂の植物に対する影響を評価するのに光合成に対する影響を調べても殆ど不可能であることを示唆している。それゆえ低濃度SO₂の植物影響を調査するには光合成によって獲得された乾物の蓄積量の測定、すなわち、いわゆる生長解析の手法を用いるのが賢明であろう。

種々の光条件下におけるSO₂の光合成に対する影響：同化箱に減光フィルターをかけて光の強さ

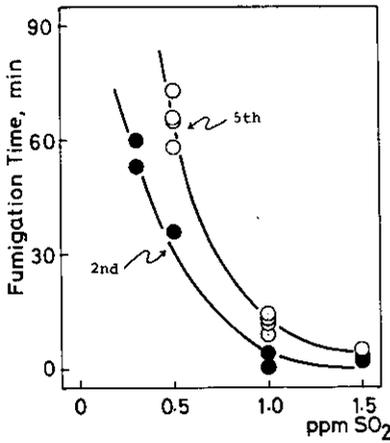


図7 光合成速度が10%阻害されるに要する時間とSO₂濃度の関係
種々のSO₂濃度において光合成速度が10%低下するのに要する時間を求めた。

Fig. 7 Effect of SO₂ concentration on the time required to reduce the rates of net photosynthesis by 10%.

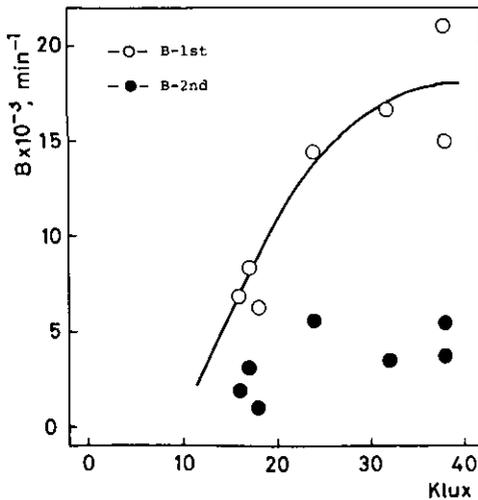


図8 SO₂の光合成速度に対する影響と光の強さとの関係
種々の光条件下において1.0ppmSO₂の光合成速度阻害係数に与える影響を調べた。光の強さ以外の測定条件は図1と同様である。

Fig. 8 Effect of light intensity on the 1st and the 2nd inhibition coefficients of photosynthesis. The inhibition coefficients of photosynthesis were determined by the fumigation of 1.0 ppmSO₂.

を変えて SO_2 の光合成速度に対する影響について調べた(図8)。光合成阻害係数は照射光の強さが強いほど高く、光の強さに対して光-光合成曲線と類似の関係を示した。

光合成阻害係数と光の強さとの関係をより明確にするため光の強さと第一、第二阻害係数の逆数を取り直線回帰した(図9)。第一阻害係数の直線回帰係数は0.81で第二阻害係数のそれは0.54であった。すなわち、 SO_2 によって引き起される光合成阻害の第一段階が光依存性であるのに対して第二段階は光の強さとは独立した事象であると推定される。

第一阻害係数が光依存性であることの原因として気孔開度の光依存性が考えられる。光が強いほど気孔開度は大きく、気孔の拡散抵抗は小さくなり、 SO_2 の植物体内への侵入が容易になる。 SO_2 が大量に植物体内に取り込まれれば必然的に光合成速度の減少は大きくなる。実際にヒマワリ葉の気孔開度は光の強さが約60 Kluxになるまではほぼ直線的に増大する。すなわち、第一阻害係数が光依存性であることは気孔開度が光依存性であるために起る現象として捉えられる。しかし、この推論に対する直接的証明はまだなされていないので、これからの研究課題である。

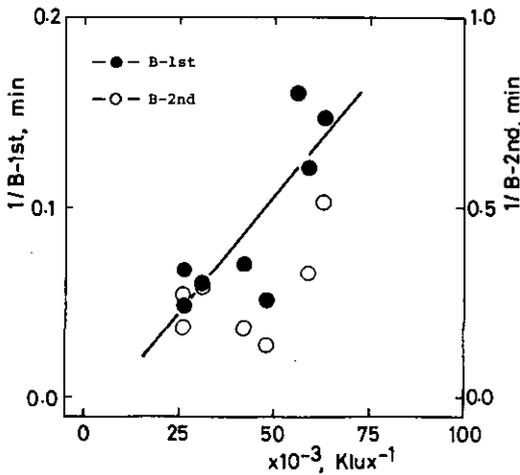


図9 光合成速度阻害係数と光の強さとの関係
図8に示した結果を両軸とも逆数にとり、直線回帰を行なった。

Fig. 9 The data of Fig. 8 are replotted after taking reciprocals.

引用文献

1. Ballantyne, D.J. 1977. Sulfite oxidation by mitochondria from green and etiolated peas. *Phytochemistry* 16: 49-50
2. Bell, J.N.B. and C.H. Mudd. 1976. Sulfur dioxide resistance in plants: A case study of *Lolium perenne*. In *Effects of air pollutants on plants* (ed. by T.A. Mansfield), Cambridge University Press, London. pp. 87-104
3. Kondo, N. and K. Sugahara. 1977. The changes in transpiration rate of SO₂-resistant and -sensitive plants during SO₂ fumigation and the participation of abscisic acid (in preparation).
4. Majernik, O. and T.A. Mansfield. 1970. Direct effect of SO₂ pollution on the degree of opening stomata. *Nature, Lond.* 227: 377-378
5. Majernik, O. and T.A. Mansfield. 1972. Stomatal responses to raised atmospheric CO₂ concentrations during exposure of plants to SO₂ pollution. *Environ. Pollut.* 3: 1-7
6. Mudd, J.B. 1975. Sulfur dioxide. In *Responses of plants to air pollution* (ed. by J.B. Mudd and T.T. Kozłowski), Academic Press, New York. pp. 9-22
7. Setterstrom, C and P.W. Zimmerman. 1939. Factors influencing susceptibility of plants to sulfur dioxide injury. *Contrib. Boyce Thompson Inst.* 10: 155-181
8. Sij, J.W. and C.A. Swanson. 1974. Short-term kinetic studies on the inhibition of photosynthesis by sulfur dioxide. *J. Env. Quality* 3: 103-107
9. Tager, J.M. and N. Ranatnen. 1955. Sulfite oxidation by a plant mitochondrial system. Preliminary observations. *Biochim. Biophys. Acta* 18: 111-121
10. Thomas, M.D. 1951. Gas damage to plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 2: 293-322
11. Thomas, M.D. 1961. Effects of air pollution on plants. In *Air Pollution*, monog. No. 46, World Health Organ., Geneva. pp. 233-378
12. 戸塚 績・門司正三. 1977. 亜硫酸ガス暴露による植物の光合成, 呼吸速度の変化「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」論文集(門司正三編) p. 11~16
13. 戸塚 績・古川昭雄. 1977. 亜硫酸ガスによる植物の不可視障害の評価法について 国立公害研究所大型研究施設竣工記念講演会およびシンポジウム概要集 p. 48~54
14. Unsworth, M.H., P.V. Biscoe and H.R. Pinckney. 1972. Stomatal responses to sulfur dioxide. *Nature, Lond.* 239: 458-459
15. Ziegler, I. 1972. The effect of SO₃²⁻ on the activity of ribulose-1,5-diphosphate carboxylase in isolated spinach chloroplasts. *Planta* 103: 155-163
16. Zimmerman, P.W. and W. Crocker. 1934. Toxicity of air containing sulphur dioxide gas. *Contrib. Boyce Thompson Inst.*, 6: 455-470

Effect of sulfur dioxide on net photosynthesis and stomatal aperture in sunflower leaves

Akio FURUKAWA and Tsumugu TOTSUKA

Summary

The effects of SO_2 on the appearance of visible injury and photosynthesis of leaves of sunflower (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) grown in phytotron greenhouse were examined with respect to leaf maturity. Five weeks old plants were exposed to 2.0 ppm for 6 hrs. and the degree of visible injury was measured to demonstrate leaf age/ SO_2 sensitivity variation. Young leaves were more SO_2 -tolerant than old leaves.

Studies were also conducted to determine the effects of SO_2 concentrations and leaf maturity on inhibition of photosynthesis of sunflower leaves. When the relative rate of photosynthesis was logarithmically plotted against time, the line was separated into two straight lines. To describe the degree of inhibition of photosynthesis, the slopes of these lines (designated as the inhibition coefficients) were calculated. The initial coefficients were always higher than the second ones, and both coefficients were age-dependent. The kinetic mechanisms of inhibition of photosynthesis by SO_2 were discussed.

III-8

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 吸収について

戸塚 績¹・米山忠克¹・名取俊樹¹・滝本道明²

要 旨

高濃度NO₂で短期間暴露および低濃度NO₂で長期間暴露によるヒマワリの乾物生長および植物体窒素含有量の変化を測定し、ヒマワリのNO₂吸収能とNO₂ドースとの関係を検討した。

1) ヒマワリを4 μm と8 μm で2日間暴露した結果、葉に可視障害が発現した。暴露区の植物体の茎葉部乾量は対照区の86~80%に低下した。各器官の全炭素濃度は、8 μm 区で若葉や壮葉において対照区の値より7~17%も高くなり、茎では8%も低下した。各器官の全窒素濃度は、NO₂処理により対照区より高くなった。その差は、NO₂暴露濃度の高い方が顕著であった。特に若い葉の増加は著しかった。暴露区の植物でアンモニア態窒素濃度が概して高くなり、上部の茎では対照区の数倍にまで増加した。(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度はNO₂処理により、いずれの部位でも対照区より高く、1.3~2.3倍に増加していた。

2) ヒマワリを0.1, 0.5, 1.0 μm NO₂で24日間連続暴露した。その結果、植物体乾重量は対照区の83~74%に低下した。各器官の全個体重に占める割合には顕著な変化はみられなかった。また、器官別の全炭素濃度も対照区の値とほぼ同様であった。葉と茎の全窒素濃度はNO₂濃度の高い区ほど高くなっていった。植物個体あたりの全窒素量は0.1, 0.5, 1.0 μm 区でそれぞれ対照区の1.17倍, 1.11倍, 1.47倍となった。

3) NO₂暴露による葉中の全窒素濃度の増加分(対照区の値との差)をNO₂ドース($\mu\text{m} \cdot \text{day}$)に対してプロットした結果、NO₂ドースが15 $\mu\text{m} \cdot \text{day}$ あたりまで、ほぼ直線的に増加し、それ以上のNO₂ドースで飽和する傾向を示した。一方、植物体地上部器官の個体あたり全窒素量のNO₂暴露処理による増加量は、実験したNO₂ドースの範囲(0~24 $\mu\text{m} \cdot \text{day}$)では、NO₂ドースと直線的関係が認められた。この増加量を、単位葉面積、単位NO₂ドースあたりで表示した結果、同一単位で表示したヒマワリのSO₂吸収速度とほぼ類似した値(7×10^{-5} モルNO₂/dm²葉面/ $\mu\text{m} \cdot \text{day}$)を示した。

結 言

植物によるNO₂の吸収については、すでにHill(3)が、アルファルファ群落を用いて暴露チェンバーへの空気の入出口におけるNO₂濃度の変化から測定して、群落のNO₂吸収速度が0.1 μm NO₂まで連続的に増加することを報告している。また、Bennett and Hill(2)もアルファルファ群落によるNO₂吸収を認めている。Srivastava *et al.*(5)は、インゲンマメの第一葉を用いて、エージングを変えて3 μm NO₂で5時間暴露後、照度約22 Kluxのもとで光合成速度とNO₂吸収量を測定し、播種

1. 国立公害研究所 生物環境部

2. 東邦大学 理学部

16日後までNO₂吸収速度がほぼ一定の値(0.3 mgNO₂/dm²/min)を示すことを報告している。また、その際、光合成速度の低下は、対照植物の光合成速度が最大値を示した播種11日後の値で、約26%減を記録している。

植物によるNO₂吸収について、以上に述べたように、低濃度のNO₂による短期間暴露では、植物のNO₂吸収能はかなり高いようである。しかし、長期間連続暴露の場合とは異って、植物の乾物生長がNO₂吸収に影響する。これまで、NO₂の長期連続暴露による植物のNO₂吸収およびその影響に関する報告はほとんどない。

本研究では、ヒマワりに、4 ppmと8 ppmで2日間暴露と、0.1, 0.5, 1.0 ppm NO₂で24日間連続暴露との両実験により、植物の各器官別全窒素および全炭素濃度の変化を測定して、植物の炭酸同化能におよぼすNO₂暴露の影響および、NO₂暴露条件(暴露時間と濃度)と、植物のNO₂吸収能との関係を検討した。

材料と方法

実験 1

4.0 ppmと8.0 ppmという高濃度NO₂の短時間暴露による影響を、ヒマワリ(*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth)について検討した。1万分の1アールのプラスチック製のポットに、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(容量比)に混合した人工土壌をつめ、マグアンプK(N:P₂O₅:K₂O=6:40:5, W. R. Grace Co., Tennessee, U. S. A.)を5g/鉢と苦土石灰15g/鉢を施肥した。この鉢に3粒宛、播種した。播種一週間後に1鉢1個体仕立てとした。この鉢植えの植物を自然光利用の環境制御温室内で、日中25±0.1℃、夜間20±0.1℃、湿度75±5%のもとで育成した。鉢には、毎週 $\frac{1}{1000}$ 倍液のHyponex(N:P₂O₅(可溶性):K₂O(水溶性)=6.5:6:19)の溶液を100~200mlずつ与えた。発芽55日後に、実験植物を人工光型暴露キャビネット(間口1.7m, 奥行2.3m, 高さ2.0m)12台に設置し(本報告書V-3参照)、植物体先端上の照度30~35 Kluxの連続照射、気温25±0.1℃一定、湿度75±5%のもとで、4.0 ppmと8.0 ppmのNO₂濃度で2日間暴露した。同時に対照区として、同様な制御環境条件下で、グロースキャビネットに植物を設置して、2日間放置した。なお、使用した植物個体数は対照区15個体、暴露区は各々8個体であった。

暴露終了後、被暴植物を若葉(先端葉から7~8葉位まで、長径が数cmのものまで)、壮葉(展開の完了直前~直後までの葉、9~10葉位から12~13葉位まで)、老葉(壮葉より下位の着葉、子葉は含まない)、上部の茎(最下位の壮葉がついていた節以上の部分)と下部の茎(上部の茎を切除した残り、地上部のみ)に切断した。サンプルした葉は葉面を水洗せず、自動面積計(林電工製AAM-5型)で測定した。対照区の植物も同様に処理した。採取した植物のサンプルは、90℃、48時間通風乾燥させ、乾重量を測定した。これをウイレー粉砕器で40メッシュ以下の粉末に調整した。粉末試料を85℃、24時間乾燥させ、CNコーダー(柳本製、MT-500型)で全窒素および全炭素

の含有量を測定した。測定は同一試料について3回くり返し、平均値を求めた。また、粉末試料についてアンモニア態窒素濃度および(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度を、試料を熱水抽出処理後、MgOとDevarda合金を用いて、蒸留法で分析した。同一試料について2回測定し、測定値にふれがないことを確かめた。

実験2

0.1～1.0 ppmの低濃度NO₂で比較的長期間の暴露実験をヒマワリについて行った。実験1と同様なポットに播種し、播種後10日間育成した幼植物を、実験1に記載した人工光型暴露キャビネット3台に設置し、30～35 Kluxで14時間明期、10時間暗期、気温25±0.1℃一定、湿度75±5%で、それぞれ0.1 ppm、0.5 ppm、1.0 ppmのNO₂濃度のもとで、24日間連続暴露した。対照区の植物も、同様な制御環境下のグロースキャビネットで育成した。各区とも8個体の植物を使用した。暴露処理終了後、被験植物を葉、莖、根に切断してサンプリングした。採取した葉は葉面を水洗せず、全葉面積を自動面積計で測定した。根については、流水中で根の表面に附着した人工土を注意深くとり除いた。採取した植物サンプルは、90℃、48時間通風乾燥させ、乾重量を測定した。これを実験1と同様に粉末処理し、全窒素と全炭素の含有量を測定した。

結果と考察

実験1

NO₂ 4.0と8.0 ppmで2日間暴露による、植物個体乾物量の変化を表1に示した。個体あたり乾重量は対照区を100として4 ppm、8 ppm区でそれぞれ、86%、80%と低下していた。特に、NO₂処理区では、莖重量の差が顕著であった。なお、両処理区とも2日間暴露により葉面に可視障害が発現した。

表1 ヒマワリの各器官別乾重量および全炭素濃度(乾重あたり%)におよぼす二酸化窒素暴露の影響 対照区15個体、処理区8個体の平均値 NO₂処理: 4 ppm, 8 ppmで2日間暴露

Table 1 Changes in dry weight (g/plant part) and total carbon (% on dry weight basis) in sunflower fumigated with NO₂ at 4 and 8 ppm for 2 days. Mean values in 15 plants of the control and in 8 plants of the fumigated plants.

Plant parts	Plant dry weight			Total carbon		
	Cont.	NO ₂ 4ppm	NO ₂ 8ppm	Cont.	NO ₂ 4ppm	NO ₂ 8ppm
Young leaves	1.65	1.74	1.30	45.0	45.0	52.6
Matured leaves	3.32	3.39	3.35	44.2	44.0	47.4
Old leaves	1.29	1.39	1.35	43.2	42.2	41.4
Young stems	2.15	1.75	1.38	40.2	38.6	37.0
Old stems	6.82	4.81	4.81	40.0	37.8	37.0
Total	15.23	13.04	12.19	41.7	40.9	42.0

一方、各器官別の全炭素濃度では、4 ppm区における葉の値は対照区と大差はなく、茎のそれが対照区の約95%に低下したにとどまっていた。しかし、8 ppm区においては、若い葉や壮葉において、対照区の値より7~17%も高くなったが、茎では対照区の92%に低下していた。このことは、高濃度NO₂による暴露処理により、葉で固定された炭水化物の転流が抑制されて葉の炭素濃度を高め、一方、茎に蓄積されていた同化産物が呼吸作用で消費され、炭水化物が減少するとともに、葉からの同化産物の供給が抑制されて、茎の全炭素濃度が減少したものとみられる。

次に、植物体各器官の全窒素濃度は、表2に示されるようにNO₂処理により、いずれの器官でも対照区に比較して高くなっている。その差は、NO₂の処理濃度の高い方が顕著となっていた。図1にみられるように、葉では若い葉ほど全窒素の蓄積量が高い。老葉ではNO₂濃度が高くなっても全窒素の増加はほとんどみられなかった。同様なことが茎の場合にもみとめられた。アンモニア態窒素濃度は植物体のいずれの部位でもNO₂処理によって概して高くなった（ただし、8 ppm区の老葉は除く）。特に上部の茎では対照区の数倍以上に増加した。

（硝酸態+亜硝酸態）窒素濃度は、植物体のいずれの部位でもNO₂処理により対照区の値より高

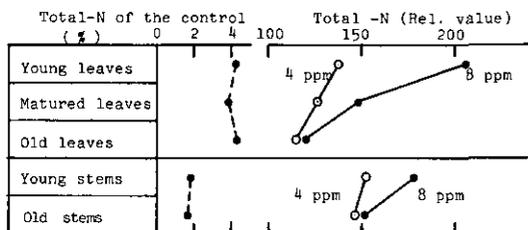


図1 二酸化窒素暴露によるヒマワリの葉および茎の全窒素濃度(乾物重あたり%)の変化。暴露処理区の値(実線)は対照区の値(破線)に対する百分率で示した。

NO₂処理：4 ppmと8 ppmで2日間暴露

Fig. 1 Changes in total nitrogen (% on dry weight basis) of sunflower plants fumigated with NO₂ at 4 and 8 ppm. Total-N (rel. value) indicates percentage of the corresponding value of the control. Broken lines show total-N content (% on dry weight basis) of the control.

表2 二酸化窒素に暴露されたヒマワリの各器官別全窒素濃度(乾重あたり%)、アンモニア態および(硝酸+亜硝酸)態の窒素濃度(乾重あたりppm) NO₂処理：4 ppm, 8 ppmで2日間暴露

Table 2 Content of total and inorganic (ammonia, nitrate + nitrite) nitrogen in sunflower fumigated with NO₂ at 4 and 8 ppm for 2 days in Experiment 1.

Plant part	Total nitrogen (%*)			Ammonia nitrogen (ppm*)			(nitrate+nitrite) nitrogen (ppm*)		
	Cont.	NO ₂ 4ppm	NO ₂ 8ppm	Cont.	NO ₂ 4ppm	NO ₂ 8ppm	Cont.	NO ₂ 4ppm	NO ₂ 8ppm
Young leaves	4.26	5.90	8.79	161	574	353	896	1740	1960
Matured leaves	3.94	4.96	5.81	88	214	391	807	1840	1890
Old leaves	4.34	5.00	5.19	322	441	183	1460	3140	3310
Young stems	1.89	2.88	3.37	132	798	1020	6680	11,100	11,700
Old stems	1.75	2.56	2.64	171	432	410	10,700	13,500	15,000

*Based on the dry weight of plant parts.

く、1.3～2.3倍に増加していた。Scholl(2)は植物に吸収されたNO₂が体内で硝酸塩として蓄積されると報告している。

実験 2

1.0 ppm 以下の低濃度NO₂に24日間暴露処理した結果を表3にまとめた。葉面積生長にはNO₂暴露の影響は認められないが、植物個体乾重量は、0.1, 0.5 ppm では対照区の84%, 83%と、ほぼ類似の減少を示し、1.0 ppm では対照区の74%に低下していた。また、全個体重に占める各器官の重量比は図2にみられるように、根の割合がNO₂暴露によって減少(2～3%)した。また、1.0 ppm 区で葉の割合が若干高まった(2%増)。その他には顕著な変化は認められなかった。しかし、器官別の全炭素濃度はNO₂処理区でも対照区と大差なかった。このことは、実験1にみられたような葉で生産された同化産物の他器官への転流の阻害は、1.0 ppm 程度のNO₂暴露ではおこらないことを意味している。

表3 二酸化窒素に暴露されたヒマワリの個体あたり葉面積、器官別の乾重量、全炭素濃度と全窒素濃度(乾重あたり%) および個体あたり全窒素量(mg N)の変化
NO₂処理: 0.1, 0.5, 1.0 ppmで24日間暴露

Table 3. Changes in leaf area, dry weight, total carbon and total nitrogen in plant parts of sunflower plants fumigated with NO₂ at 0.1, 0.5 and 1.0 ppm for 24 days in Experiment 2. Mean values of eight plants harvested at the end of the fumigation treatment. Numerals in the parentheses indicate percentage of the corresponding values of the control.

		Cont.	NO ₂ fumigated plots		
			0.1ppm	0.5ppm	1.0ppm
Leaf area	(cm ²)	2740	2710	2650	2760
Dry weight	Leaves	10.80	8.83	8.06	8.59
	Stems	16.43	14.55	15.55	12.37
	Roots	5.70	4.20	3.83	3.35
	Total	32.93 (100)	27.58 (84)	27.42 (83)	24.31 (74)
Total carbon (% on dry weight basis)	Leaves	42.8	44.0	44.0	42.7
	Stems	42.2	42.5	43.8	41.7
	Roots	41.9	40.9	43.3	40.6
	Total	42.3	42.7	43.8	41.9
Total nitrogen (%)	Leaves	3.09	4.43	4.44	5.55
	Stems	0.55	0.78	0.70	1.51
	Roots	0.77	1.07	1.33	1.61
	Total	1.42	1.99	1.89	2.83
Total nitrogen (mgN/plant)	Leaves	334	392	358	477
	Stems	90	113	109	187
	Roots	44	45	51	54
	Total	468 (100)	550 (117)	518 (111)	688 (147)

植物体各器官の全窒素濃度は、図3にみられるように、0.1 ppm区で各器官いずれも対照区の140%に増加した。葉、根では、0.5 ppm、1.0 ppmと、NO₂暴露濃度の高いほど全窒素濃度が高かった。茎では1.0 ppm区で対照区の値の2.7倍にまで増加した。一方、植物個体あたりの全窒素量 (mg/plant) では、0.1、0.5、1.0 ppmの各区でそれぞれ対照区の1.17倍、1.11倍、1.47倍に達していた。

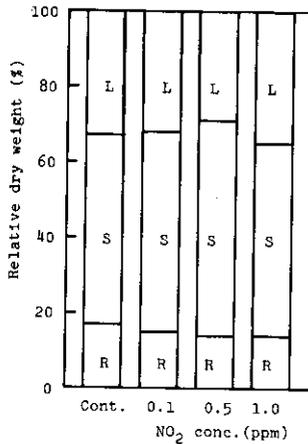


図2 二酸化窒素暴露によるヒマワリの各器官別乾重量の個体重に対する百分率の変化
NO₂処理：0.1、0.5、1.0 ppmで24日間暴露

Fig. 2 Relative dry weight (%) of leaves (L), stems (S) and roots (R) to the total plant dry weight of sunflower plants fumigated with NO₂ at 0.1, 0.5 and 1.0 ppm for 24 days.

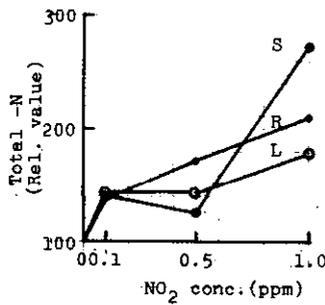


図3 二酸化窒素暴露によるヒマワリの各器官別全窒素濃度(乾重あたり%)の変化
タテ軸は対照区の値に対する百分率を示す。
L:葉, S:茎, R:根

Fig. 3 Changes in total nitrogen content (% on dry weight basis) of leaves (L), stems (S) and roots (R) of sunflower plants fumigated with NO₂ at 0.1, 0.5 and 1.0 ppm for 24 days. Total-N in ordinate is expressed as percentage of the corresponding value of the control.

表4 表1および2よりもとめた実験1におけるヒマワリの葉と茎の個体あたり乾重量、全窒素濃度(乾量あたり%)および全窒素含量

Table 4 Changes in dry weight and total nitrogen in the leaves and stems of sunflower plants fumigated with NO₂ for 2 days.

Plant part	Dry weight (g/plant part)			Nitrogen content (% on dry weight basis)			Total nitrogen (mgN/plant part)		
	Cont.	NO ₂ 4ppm	NO ₂ 8ppm	Cont.	NO ₂ 4ppm	NO ₂ 8ppm	Cont.	NO ₂ 4ppm	NO ₂ 8ppm
Leaves	6.26	6.48	6.00	4.15	5.25	6.17	0.26	0.34	0.37
Stems	8.97	6.56	6.19	1.78	2.59	2.91	0.16	0.17	0.18
Total	15.23	13.04	12.19	2.76	3.91	4.51	0.42	0.51	0.55

次に、実験1と実験2における植物のNO₂吸収能の差異を検討した。まず、実験1の資料(表1)をもとに、葉と茎の乾重量、全窒素濃度を計算し、表4に示す結果をえた。そこで、NO₂暴露の結果によると考えられる葉中の全窒素の増加(対照区と暴露区の値の差)をNO₂ドース(暴露濃度と暴露日数との積; ppm・day)に対してプロットした結果を図4に示した。NO₂ドースが15ppm・day

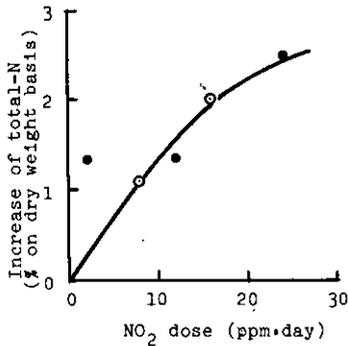


図4 二酸化窒素暴露による葉中全窒素濃度の増加量
 ヨコ軸はNO₂ドース(濃度×暴露日数)を示す。
 ○印は実験1, ●印は実験2の資料による。

Fig. 4 Increase of total nitrogen content of leaves, plotted against NO₂ dose. Data obtained in Experiments 1 (○) and 2 (●).

あたりまで、葉中の全窒素濃度の増加分がほぼ直線的に増大しているといえる(増加速度は0.14% N/ppm・day)。戸塚・名取(6)の報告しているヒマワリ葉のSO₂吸収速度とSO₂ドースとの関係を図5に示す。同図で明らかのように、SO₂暴露の際のヒマワリ葉中のイオウ含有量増加が、SO₂ドース1~1.5 ppm・dayあたりまでしか直線的に増加せず、その後、飽和カーブを示す。この場合のイオウ増加速度が、2 mg S/dm²/ppm・day = 0.5% S/ppm・day(葉重/葉面積比 = 0.4 g/dm², 表3より)である。葉におけるみかけ上の窒素濃度の増加速度だけみると、葉面におけるNO₂分子の吸収速度は1 × 10⁻⁴モルNO₂/g 葉重量/ppm・day, SO₂分子の吸収速度は1.6 × 10⁻⁴モルSO₂/g 葉重量/ppm・dayとなる。しかし、SO₂暴露の場合には、茎や根のイオウ含有量の変化は無視できるほど小さく、葉面から吸収されたSO₂の大部分が葉に蓄積されている。しかし、NO₂暴露の場合には図1に示したように、高濃度NO₂の短期間暴露によっても、茎の全窒素濃度が著しく増大する。また図3にみられるように、低濃度NO₂の長期間暴露によっても、茎や根の全窒素濃度が増大する。このことは、葉から吸収されたNO₂が他の器官へ転流したことを暗示している(ポットの地表面から吸収されたNO₂が経根的に体内に吸収されることも考えられるが、不明である)。そこで実験1と2の結果をもとに、植物体地上部における全窒素のNO₂暴露による増加量を算出して、NO₂ドースとの関係を検討した。表5に実験1と2でえられた個体あたり地上部器官の全窒素量を示す。ここで、NO₂暴露による全窒素量の増加分を求め、NO₂ドースに対してプロットした結果を図6に示した。実験したNO₂ドースの範囲では、植物葉面によるNO₂吸収量がほぼ直線的に増大することが認められる。図5のタテ軸の値には、根の全窒素量は含まれていないが、実験2の結果(表3参照)より明らかのように、1.0 ppm NO₂で24日間暴露しても、対照区との差が10mg N程度の増加で、図6の直線関係に重大な変化を与えるものではないといえる。

表5 実験1と2でえられたヒマワリ地上部器官(葉と茎)の個体あたり全窒素量の増加量(対照区の値との差)とNO₂ドースとの関係

Table 5 Total nitrogen of aerial plant parts (leaves and stems) obtained in Exps. 1 and 2. The difference of the total-N between the fumigated plants and the control is also shown.

	Exp. 1			Exp. 2			
	Cont.	4ppm	8ppm	Cont.	0.1ppm	0.5ppm	1.0ppm
NO ₂ dose (ppm-day)	0	8	16	0	2.4	12.0	24.0
Total-N (mgN/plant)	420	510	550	424	505	467	664
Difference of total-N (mg)	0	90	130	0	81	43	240

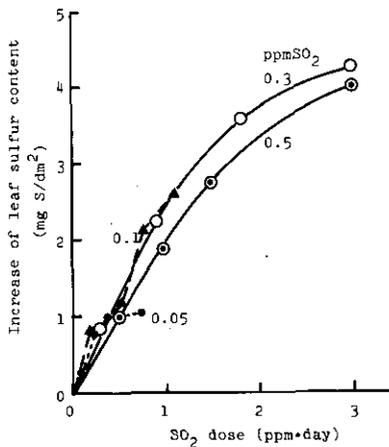


図5 二酸化イオウ暴露によるヒマワリ葉のイオウ含有量の変化
暴露処理時間: 0.05, 0.1, 0.3, 0.5 ppm SO₂, 14/10時間の明(30 klux)/暗期, 気温25°C, 湿度75%, ヨコ軸はSO₂ドース(濃度×暴露日数)を示す。戸塚・名取(1977)による

Fig. 5 Increase of leaf sulfur content of sunflower plants plotted against SO₂ dose. Experimental conditions: 14/10 hrs in light (30 klux)/dark period, 25°C in air temperature and 75% in relative humidity. Data cited from Totsuka and Natori (6).

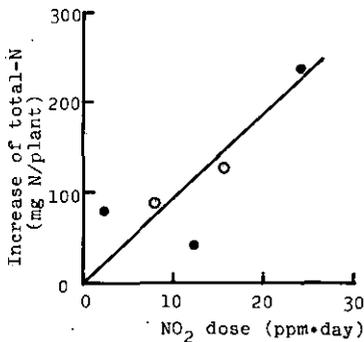


図6 二酸化窒素に暴露されたヒマワリの地上部器官における全窒素含量(対照区との差) ○印は実験1, ●印は実験2の資料による。

Fig. 6 Increase of total nitrogen content in aerial parts of sunflower plants fumigated with NO₂, plotted against NO₂ dose. Data obtained in Experiments 1 (○) and 2 (●).

前に述べた SO₂ 暴露によるヒマワリの SO₂ 吸収能と比較するために、植物 1 個体あたりの窒素増加量を、葉面積 1 dm² あたりに換算した。実験 2 の 1.0 ppm 区 (NO₂ ドース : 24 ppm · day) の植物で、個体あたり全葉面積 27.6 dm² (表 2 参照) で、窒素増加量 (対照植物の値との差) が 688 mg N となる。したがって、 $688 / 27.6 = 24.9 \text{ mg N} / \text{dm}^2 / 24 \text{ ppm} \cdot \text{day} = 1.04 \text{ mg N} / \text{dm}^2 / \text{ppm} \cdot \text{day}$, となり、 7.4×10^{-5} モル NO₂ / dm² / ppm · day となる。この値は先に述べた植物の SO₂ 吸収能 (2 mg S / ppm · day = 6.3×10^{-5} モル SO₂ / dm² / ppm · day) とほぼ等しい値となる。しかし、SO₂ 暴露の場合は、SO₂ の毒作用のためか、SO₂ ドース 1 ~ 1.5 ppm · day あたりから植物の SO₂ 吸収能が頭打ちの傾向を示す (図 5)。NO₂ 暴露の場合は、NO₂ ドースが 30 ppm · day まで NO₂ 吸収能が直線的に増加している (図 6)。したがって、ヒマワリでは SO₂ より NO₂ ガスの方が、多量に吸収されうるのであろう。

謝 辞

本研究にあたり、植物体のサンプリング、および全窒素量、全炭素量の分析について、東邦大学理学部学生の安達信雄君に御協力いただいた。ここに深く感謝の意を表します。

引 用 文 献

1. 相賀一郎・大政謙次. 1977. 植物実験のための大気汚染ガス暴露キャビネットの環境制御. 国立公害研究所大型施設竣工記念講演会およびシンポジウム (昭和52.3) 概要集 p. 39-47
2. Bennett, J.H. and A.C. Hill. 1973. Absorption of gaseous air pollutants by a standardized plant canopy. J. Air Pollut. Control Assoc. 23: 203-206
3. A.C. Hill. 1971. Vegetation. A sink for atmospheric pollutants. J. Air Pollut. Control Assoc. 21: 341-346
4. Scholl, G. 1975. Positive und negative Wirkungen von Stickstoffverbindungen auf Pflanzen im Einwirkungsbereich einer düngemittelfabrik. Staub 35: 201-205
5. Srivastava, H.S., P.A. Jolliffe and V.C. Runneckles. 1975. The effects of environmental conditions on the inhibition of leaf gas exchange by NO₂. Can. J. Bot. 53: 475-482
6. 戸塚 績・名取俊樹. 1977. 植物の SO₂ 吸収速度の測定とそれの SO₂ 汚染指標への適用について. 日本生物環境調節学会第15回大会 (筑波 1977) 講演要旨集 p. 101-106

Response of plants to atmospheric NO₂ fumigation (1) Effects of NO₂ fumigation on dry-weight growth and nitrogen accumulation in sunflower plant

Tsumugu TOTSUKA¹, Tadakatsu YONEYAMA¹,
Toshiki NATORI¹ and Michiaki TAKIMOTO²

Summary

Effects of NO₂ on dry-weight growth and nitrogen content were investigated in sunflower plants under the various conditions. The relationship between NO₂ dose and the rate of nitrogen accumulation in the plant was also discussed.

- (1) NO₂ fumigation at 4 and 8 ppm for 2 days brought about a visible injury in leaves, and the dry weight of the shoots decreased to 86 and 80% of the control respectively. Total carbon content in young and matured leaves of the plants fumigated with 8 ppm NO₂, increased by 7 to 17% of the control, while that in stems decreased by 8%. Total nitrogen content in young leaves and stems increased remarkably by NO₂ fumigation. The concentration of ammonia nitrogen increased in each plant part by NO₂ fumigation; it was several times as much as that of the control. The content of (nitrate+nitrite) nitrogen in the fumigated plants became 1.3 to 3.2 times as much as that of the control.
- (2) NO₂ fumigation at 0.1, 0.5 and 1.0 ppm for 24 days caused the decrease of the plant dry weight by 17 to 26% of the control. Total carbon content and the nitrogen content in leaves and stems increased with increase of NO₂ concentration fumigated. The amount of total nitrogen in the plant fumigated was 1.17, 1.11 and 1.47 times as much as that of the control at 0.1, 0.5 and 1.0 ppm respectively.
- (3) The difference of total nitrogen content of leaves (% on dry weight basis) between the fumigated and the control plant increased linearly with increase of NO₂ dose up to around 15 ppm-day. The increment of total nitrogen amount in aerial part of the fumigated plants showed linear increase along with NO₂ dose in the range examined. In the sunflower leaves, the rate of NO₂ absorption in the present experiment was 7×10^{-5} mol NO₂/dm² leaf area/ppm-day, roughly equal to the rate of SO₂ absorption obtained previously in our laboratory.

1. Division of Environmental Biology, the National Institute for Environmental Studies, Ibaraki 300-21

2. Faculty of Science, University of Tohō, Funabashi, Chiba 274

III-9

高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(2)

ヒマワリとインゲンマメの乾物生長におよぼすNO₂暴露の影響

戸塚 績¹・佐藤秋生²・米山忠克¹・牛島忠広²

要 旨

自然光型ガス暴露チェンバーで栄養生長期のヒマワリとインゲンマメにガス濃度0.1 ppmと1.0 ppmの二酸化窒素(NO₂)を15日間連続暴露した。被暴露植物の乾物生長量、体内窒素含有量を測定して、両植物に対するNO₂暴露の影響の差異を検討した。その結果、両植物において、1.0 ppm 15日間の暴露によって、植物体乾物量は対照区の値より減少した。植物体各器官の全個体重に占める割合のうち、葉の重量が相対的に増加し、生殖器官のそれが減少した。植物体乾重量の相対生長率(RGR)は、1.0 ppm区では両植物とも実験期間を通じて対照区の値より低下したが、0.1 ppm区ではインゲンマメの場合は減少していたが、ヒマワリでは、暴露10~15日間の値では対照区のそれより高くなった。葉の純同化率(NAR)はRGRと同様な変化を示した。植物個体あたり全窒素量は暴露期間を通じて両植物とも対照区のそれより増加した。その増加の程度は、インゲンマメよりヒマワリの方が顕著であった。植物体各器官のアンモニア態窒素量は、NO₂暴露植物で対照区のそれより著しく増加した。両植物ともRGRの低下の割合と葉中のアンモニア態窒素濃度の増加の割合との間に並行関係がみられた。

緒 言

NO₂ガスの植物への影響については、これまで主として高濃度NO₂で短時間暴露による植物の可視的障害の発現を論じた報告が多い。しかし、我々の生活環境下で測定されるような低濃度NO₂の植物影響に関する報告は少ない(2, 4, 7, 8)。

Taylor and Eaton(7)はピントビーンとトマトについて、0.2~0.5 ppm NO₂で22日間暴露し、植物体乾物生長量が低下したことを報告している。ネーブルオレンジについても、0.5~1.0 ppm NO₂で35日間暴露して、落葉率が増加したとの報告もある(8)。しかし、藤原・石川(4)によると、イネでは、0.6 ppm NO₂で51日間暴露した結果、地上部乾物量が対照区のそれより15%も増加したことを認めている。またトマトでも低濃度NO₂暴露により乾物生長の促進が報告されている(9)。NO₂の低濃度長期間暴露の植物影響については、第1報でも論じたように、植物の種類によって、異なるようである。その種間差異の機作については全く不明である。

本報告では、ヒマワリとインゲンマメを用いて、比較的低濃度のNO₂ガスを長期間暴露した時の

1. 国立公害研究所 生物環境部
2. 東京農工大学 農学部

両植物の乾物生長量を測定するとともに、 NO_2 暴露植物の植物体全窒素含有量、アンモニア態窒素および(硝酸態+亜硝酸態)窒素の濃度を測定し、それらの変化と生長速度の変化との関係を検討した。

材料と方法

実験植物として、ロシアヒマワリ (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) とインゲンマメ (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Edogawa) を用いた。第1報で述べた方法にしたがって、1鉢に1株植えとし、日中 25°C 、夜間 20°C 、湿度75%で自然光下で育成した。

播種30日後のヒマワリを、自然光型の暴露チェンバー(有効床面積 $2 \times 2 \text{ m}^2$ 、相対照度50%、小糸工業製S-200特殊型)2台にそれぞれ設置し、 NO_2 濃度をそれぞれに0.1 ppmと1.0 ppmに設定し、日中 25°C 、夜間 20°C 、湿度75%一定のもとで、1月10日~24日の15日間連続暴露実験した。一方、インゲンマメは、播種20日後の植物を、上記の暴露チェンバーに設置して、1月28日~2月12日の15日間連続暴露した。なお、暴露キャビネット内のNOの生成は日中でも NO_2 濃度の10%以内にとどまっていた。両植物とも、暴露開始時と10日後、15日後に各10個体をランダムにサンプリングし、葉、茎、根、花+果実の器官別乾重量と葉面積を第1報(9)の方法にしたがって乾燥試料を粉末処理した。さらに、第1報(9)の方法にしたがって、乾燥試料の全窒素濃度、アンモニア態窒素濃度と(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度を測定した。

結果と考察

1) 生長解析

15日間にわたる NO_2 ガス暴露による、ヒマワリとインゲンマメ両植物の個体あたり乾物重の各サンプリング時における値を、表1および図1に示した。ヒマワリでは、0.1 ppm区の個体重は対照区と大差ないか、あるいは、最終サンプリングでは、やや高くなっている。しかし、1.0 ppm区では、明らかに全暴露期間を通じて、対照区と比較して乾物生長が抑制されていた。また、インゲンマメ

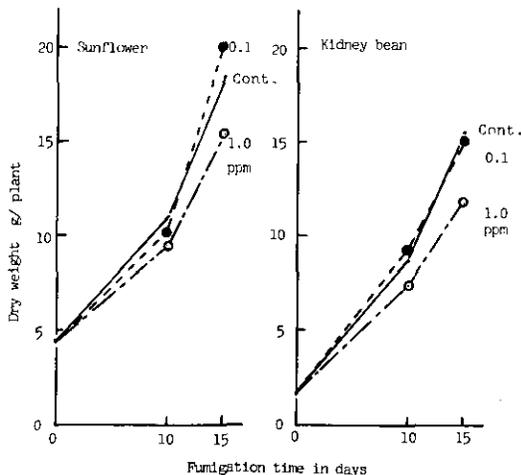


図1 ヒマワリとインゲンマメの個体重増加におよぼす NO_2 暴露の影響
 - - - 対照区, -●- 0.1 ppm NO_2 ,
 -○- 1.0 ppm NO_2

Fig. 1 Changes with time in dry weight of sunflower and kidney bean plants exposed to 0.1 and 1.0 ppm NO_2 .

表1 NO₂暴露処理によるヒマワリとインゲンマメの植物体乾重量と葉面積の生長変化
10個体の平均値 上段がヒマワリの資料

Table 1 Changes in leaf area and plant dry weight of sunflower (upper table) and kidney bean plants fumigated with NO₂. Mean of 10 plants.

Plant part	Fumigation duration (days)						
	0	10			15		
		Cont.	NO ₂ 0.1ppm	NO ₂ 1.0ppm	Cont.	NO ₂ 0.1ppm	NO ₂ 1.0ppm
Sunflower	<u>Leaf area (cm²/plant)</u>						
	816	1650	1560	1400	2070	2390	2140
	<u>Dry weight (g/plant)</u>						
Leaves	1.67	3.60	3.54	3.62	5.06	5.98	5.59
Stems	2.31	6.23	5.60	4.97	10.03	10.69	8.03
Roots	0.53	1.25	1.06	0.93	1.78	2.24	1.49
Flowers					1.63	1.24	0.42
Total	4.51	11.01	10.20	9.53	18.50	20.14	15.53
Kidney bean	<u>Leaf area (cm²/plant)</u>						
	707	2630	2600	1940	3610	3430	2880
	<u>Dry weight (g/plant)</u>						
Leaves	1.05	4.80	5.12	4.38	6.36	6.16	6.63
Stems	0.36	2.64	2.78	2.11	4.30	4.26	3.77
Roots	0.28	1.06	1.06	0.78	1.60	1.78	0.86
Flowers and fruits		0.28	0.27	0.17	3.32	2.88	0.60
Total	1.68	8.78	9.22	7.41	15.58	15.09	11.85

表2 NO₂暴露処理によるヒマワリとインゲンマメの個体乾重量に関する相対生長率(RGR)と純同化率(NAR)の変化

Table 2 RGR and NAR in plants fumigated with NO₂.

RGR or NAR	Fumigation duration (days)					
	Cont.	0 - 10		Cont.	10 - 15	
		NO ₂ 0.1ppm	NO ₂ 1.0ppm		NO ₂ 0.1ppm	NO ₂ 1.0ppm
	<u>Sunflower</u>					
RGR (g/g/day)	0.099	0.091	0.083	0.073	0.097	0.070
NAR (g/cm ² /day)	0.615	0.550	0.516	0.571	0.730	0.492
	<u>Kidney bean</u>					
RGR(g/g/day)	0.150	0.155	0.135	0.064	0.055	0.052
NAR(g/cm ² /day)	0.044	0.047	0.043	0.025	0.022	0.021

では、0.1 ppm区では対照区とあまり差がみられなかったのに対し、1.0 ppm区では顕著な生長抑制がみられた。そこで、葉、茎、根、花+果実の各器官別の個体重に占める割合についてみると(図2参照)、NO₂ガスに接触することによって、ヒマワリ、インゲンマメ両植物ともに、茎および根の割合には変化がほとんど認められないのに対して、葉の割合が増加し、花+果実の割合が減少する傾向がみられた。その傾向は、NO₂濃度が高くなると、一層顕著にあらわれてくることが認められた。

一方、植物体乾物重の測定値をもとに、単位乾物重あたりの乾物増加率をあらわす相対生長率 (relative growth rate, RGR) と、葉の乾物生産能力を表わす一つの指標である純同化率 (net assimilation rate, NAR) を、次式を用いて算出した。

$$RGR = \frac{1}{W} \cdot \frac{dW}{dt} = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}$$

$$NAR = \frac{1}{F} \cdot \frac{dW}{dt} = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \cdot \frac{(\ln F_2 - \ln F_1)}{(F_2 - F_1)}$$

ここで、W_i : 時間 t_i における個体乾物重

F_i : " 個体葉面積

を表わす。

表2および図3に、両植物について RGR と NAR の変化を示した。ヒマワリでは、暴露実験前期のNO₂暴露開始後10日間では、0.1 ppm、1.0 ppmの両区ともに、RGR と NAR が対照区の値より低下していた。しかし、暴露実験後期の暴露開始後10~15日間の値では、1.0 ppm区で、NAR は

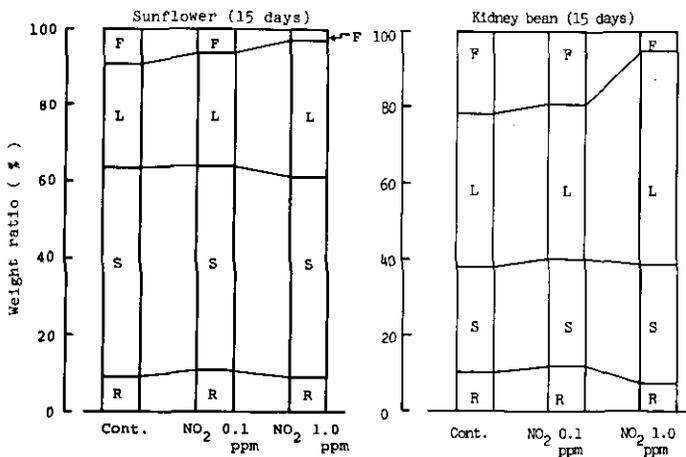


図2 NO₂暴露処理によるヒマワリ(左)とインゲンマメの各器官乾重量の割合の変化 0.1 ppmと1.0 ppm NO₂で15日間処理

Fig. 2 Changes in relative dry weight of plant parts of sunflower and kidney bean plants exposed to 0.1 and 1.0 ppm NO₂ for 15 days.

依然として低いのに、RGR は対照区とあまり差がみられなくなった。しかし、0.1 ppm 区では、RGR、NAR とともに対照区より高くなった。一方、インゲンマメでは、1.0 ppm 区では、RGR、NAR とともに、全期間を通じて対照区より低い。しかし、0.1 ppm 区では暴露実験前期に RGR、NAR とともに対照区より高く、後期に若干低い値を示した。このように、1.0 ppm 程度の NO₂ 濃度では、両植物の乾物生長に対して明らかに阻害的作用をもっているといえる。NO₂ ガスが植物の光合成速度を抑制するという報告 (1, 3, 5, 6) がある。したがって、1.0 ppm 区における両植物の NAR の減少は、NO₂ の光合成に対する阻害的効果と考えられる。しかし、0.1 ppm 程度の比較的低濃度では、対照区とあまり差がみられず、光合成機能に対して NO₂ ガスが何らかの影響を与えているかどうかは明らかでない。最近、低濃度 NO₂ に暴露されたトマトで乾物生長が促進されたとの報告がみられる(10)。

以上の結果から、ヒマワリ、インゲンマメ両植物では、0.1 ppm 程度の比較的低濃度の NO₂ では、個体あたりの乾物生長にはほとんど影響しないようである。むしろ、器官別の生長に関して、花+果実の生長が抑制され、葉の割合が相対的に高くなることから、植物の栄養生長から生殖生長への切替えの時期を遅らすなどの影響を与えているのではないかとおもわれる。特に、0.1 ppm 区のヒマワリでは、暴露実験後期の RGR、NAR の値が、対照区のそれよりかなり高くなったことは、上に述べた同化産物の分配率の変化が、乾物生長を促進させたのかも知れない。

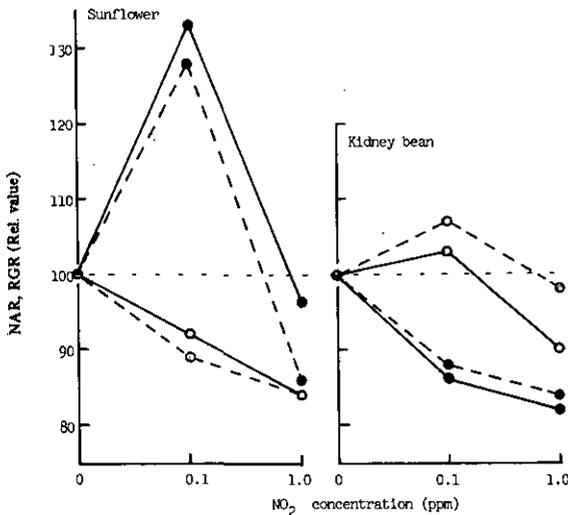


図 3

NO₂ 暴露によるヒマワリとインゲンマメの個体乾重量に関する相対生長率(RGR, 実線)と純同化率(NAR, 破線)の変化。○印は処理10日後までの値、●印は処理10日後から15日後までの期間中の値。タテ軸は対照区の値に対する百分率で示した。

Fig. 3

Effects of NO₂ fumigation on the relative growth rate of plant dry weight (RGR, continuous lines) and net assimilation rate (NAR, broken lines) of sunflower and kidney bean plants. Open circles are for 10 days after starting the treatment, and closed ones are for the period from 10 days to 15 days fumigations. The ordinates are indicated as the relative values (control = 100).

2) 植物体の窒素含有量について

前節で述べた両植物の乾燥試料について、第1報(9)に記載した測定方法にしたがってえられた全窒素濃度、アンモニア態窒素濃度および(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度を表3に示した。植物体各器官の全窒素濃度および植物個体あたり全窒素量を対照区の値に対する相対値で表わし、図4およ

表3 10日間および15日間のNO₂暴露処理されたヒマワリとインゲンマメの各器官別全窒素濃度(乾重あたり%)、アンモニア態窒素と(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度(いずれも、乾量あたりppm)表中かっこ内数字はそれぞれの対照区の値に対する百分率を示す。

Table 3 Changes in total nitrogen, ammonia nitrogen and (nitrate + nitrite) nitrogen in sunflower (upper table) and kidney bean plants fumigated with NO₂. Numerals in the parentheses are indicated as relative values when the value for control is 100.

	Fumigation duration (days)						
	0	10			15		
		Cont.	NO ₂ 0.1ppm	NO ₂ 1.0ppm	Cont.	NO ₂ 0.1ppm	NO ₂ 1.0ppm
Sunflower plant							
Total nitrogen (% on dry weight basis)							
Leaves	5.88	5.55	5.67	6.12	5.06	4.88	6.38
Stems	3.12	2.08	2.61	3.02	1.25	1.07	1.93
Roots	2.53	1.81	2.26	2.74	1.72	1.64	2.49
Flowers					3.66	3.57	4.50
Total	4.70	3.20	3.64	4.17	2.23	2.42	3.65
Ammonia nitrogen (ppm on dry weight basis)							
Leaves	64	29(100)	46(160)	70(240)	48(100)	42(88)	68(142)
Stems	133	30	72	172	34	24	82
Roots	121	73	82	175	48	100	179
Flowers					191	100	125
(Nitrate + Nitrite) nitrogen (ppm)							
Leaves	4090	3000(100)	3270(109)	2760(92)	1550(100)	887(57)	4510(291)
Stems	21,570	11,950	15,990	17,440	6940	4930	13,700
Roots	6240	5020	5060	7320	3780	2440	5870
Flowers					546	420	402
Kidney bean plant							
Total nitrogen (% on dry weight basis)							
Leaves	6.58	4.50	4.30	5.56	3.99	4.24	5.44
Stems	4.03	2.33	1.85	3.22	1.95	2.02	3.24
Roots	4.04	2.97	2.93	3.53	2.77	2.76	3.16
Flowers & fruits		4.14	4.41	5.47	3.06	3.42	4.33
Total	5.65	3.65	3.41	4.70	3.10	3.28	4.52
Ammonia nitrogen (ppm on dry weight basis)							
Leaves	90	153(100)	137(90)	182(119)	125(100)	143(88)	236(189)
Stems	82	135	90	101	93	109	253
Roots	106	116	101	223	237	167	267
Flowers & fruits		167	146	164	86	128	259
(Nitrate + Nitrite) nitrogen (ppm)							
Leaves	9550	2820(100)	2000(71)	2740(98)	3300(100)	2220(67)	3130(95)
Stems	14,110	3840	2880	6300	2910	2350	5370
Roots	9610	2740	2860	6590	3100	2390	6370
Flowers & fruits		1110	770	760	2420	2710	2160

び図5に示した。ヒマワリでは、1.0 ppm区において暴露期間を通じて対照区の値よりかなり高くなっている。しかし、0.1 ppm区では、10日間暴露で茎や根の全窒素濃度が著しく高くなるが、15日間

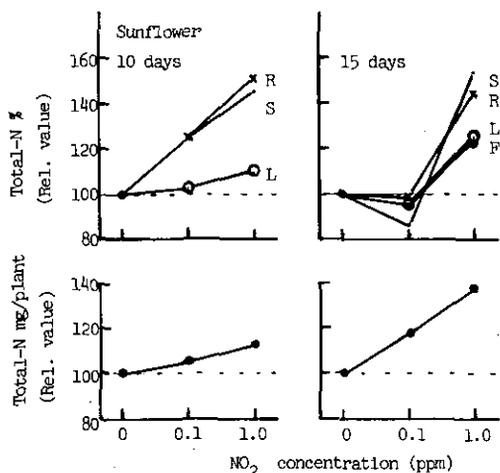


図4 ヒマワリの各器官別の全窒素濃度(乾重あたり%)のNO₂暴露10日間(左側)と15日間の処理による変化。タテ軸は対照区の値に対する百分率で示した。

Fig. 4 Changes in total-N content of sunflower plants fumigated with NO₂ for 10 and 15 days. The ordinates are indicated as relative values (control=100). Plant parts are leaves (L), stems (S), roots (R), flowers and fruits (F) in upper figures and whole plant in lower figures.

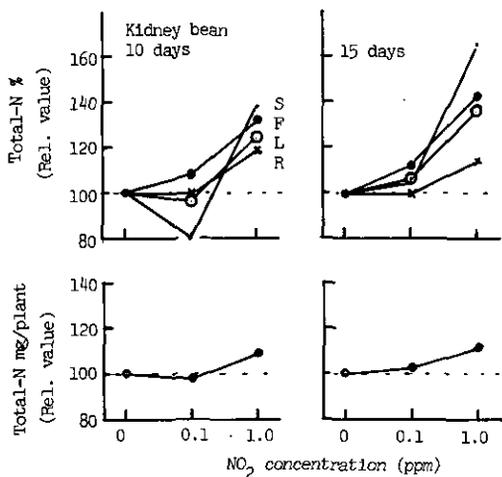


図5 図4と同じ。ただしインゲンマメの場合。

Fig. 5 The same as in Fig. 4, but in kidney bean plants.

暴露後では、対照区と同様な値に低下した。インゲンマメの1.0 ppm区では暴露全期間を通じて、全窒素濃度がヒマワリの場合と同様に、いずれの器官の場合でも対照区の値より高くなっている。また、0.1 ppm区でも対照区と同程度かあるいは若干高くなっている。

一方、植物個体あたり全窒素量は、ヒマワリでは、NO₂暴露10日後あるいは15日後のいずれも、NO₂暴露濃度が高いほど多くなっている。しかし、インゲンマメでは、NO₂暴露区の値が対照区のそれとほとんど差がない。これは、インゲンマメの葉による大気中NO₂の吸収量がヒマワリに比較して少ないことを意味している。

次に植物体各器官別のアンモニア態窒素と(硝酸態+亜硝酸態)窒素の濃度(乾重あたり%)を対照区の値に対する百分率で表示し、両植物について比較検討した。ヒマワリでは(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度は、1.0 ppm区で暴露15日後の値のみ、対照区のそれと比較して顕著な差異を示した。

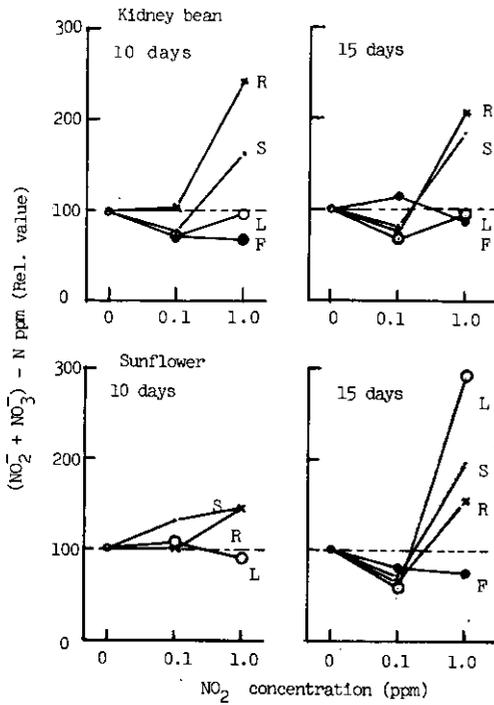


図6 ヒマワリとインゲンマメの各器官別 (硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度(乾重あたりppm)のNO₂処理10日後(左側)と15日後の変化 図中の表示は図4と同じ

Fig. 6 Changes in (NO₂⁻ + NO₃⁻)-N content (ppm on dry weight basis) of sunflower and kidney bean plants. Another indications are the same as in Fig. 4.

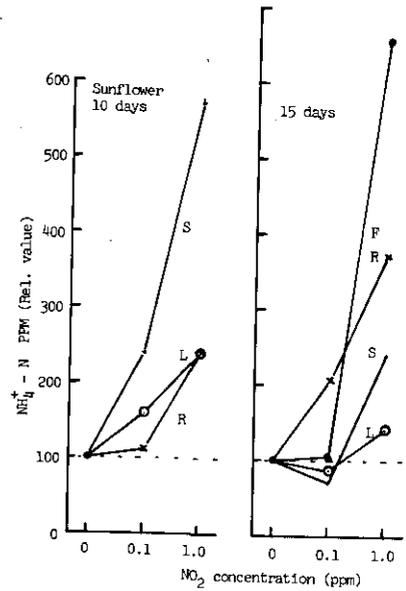


図7 ヒマワリの各器官別 アンモニア態窒素濃度(乾重あたりppm)のNO₂処理10日後(左側)と15日後の変化 図中の表示は図4と同じ

Fig. 7 Changes in NH₄⁺-N content (ppm on dry weight basis) in sunflower plants. Another indications are the same as in Fig. 4.

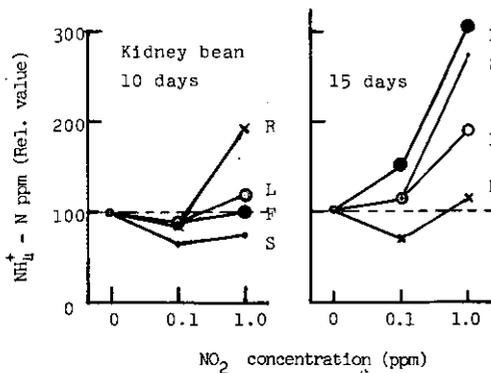


図8 図7と同じ ただしインゲンマメの場合

Fig. 8 The same as in Fig. 7, but in kidney bean plants.

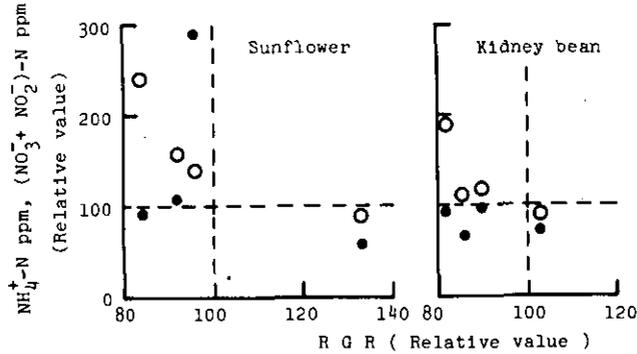


図9 ヒマワリとインゲンマメにおける個体乾重量に関する相対生長率 (RGR) と葉のアンモニア態窒素濃度 (○印) と (硝酸態+亜硝酸態) 窒素濃度 (●印) との関係。Y軸、X軸とも対照区の値に対する百分率で示した。RGR は NO_2 処理後10日間の値と処理10~15日間の値を使用, 窒素濃度は処理10日後と15日後の値を使用

Fig. 9 Relationships between RGR and NH_4^+ -N content (open circles) and $(\text{NO}_2 + \text{NO}_3)$ -N content (closed circles) of leaves in NO_2 fumigated sunflower and kidney bean plants. The values of both axes are relative values when the values for control are 100. Values of nitrogen content obtained at 10 days and 15 days after starting the treatment are plotted against RGR in the fumigation periods of 0-10 days and of 10-15 days, respectively.

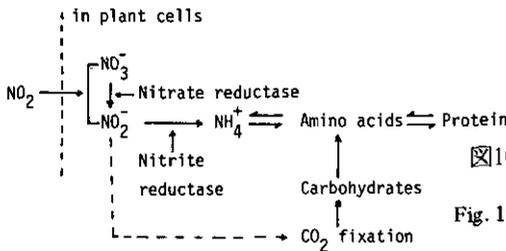


図10 葉に吸収された二酸化窒素の細胞内での変化を示す模式図

Fig. 10 A model showing metabolism of atmospheric NO_2 absorbed by plant leaves.

(図6)。インゲンマメについても、同様な傾向を示している(図6参照)。しかし、アンモニア態窒素濃度は、図7にみられるように、ヒマワリでは0.1 ppm区でも、暴露前期に葉、茎の値が対照区の値よりかなり高くなっている。しかし、暴露後期になると、それらの値は対照区と大差ない。インゲンマメにおける暴露後期のアンモニア態窒素濃度は、0.1 ppm区においても、根を除く他の器官について、対照区より高く、1.0 ppm区では根の値も高くなった(図8)。

暴露開始10日後と15日後にえられた葉中のアンモニア態窒素ならびに(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度の状態と、暴露開始10日までと、10~15日間とにえられたRGRの変化との関係を求めた結果を図9に示した。両植物とも、RGRが対照区のそれより低下すると、著しくアンモニア態窒素濃度が増大する。その傾向はインゲンマメよりヒマワリの方が顕著である。しかし、(硝酸態+亜硝酸態)窒素とRGRとの関係は、アンモニア態窒素の場合より明瞭でなかった。

NO_2 暴露植物でアンモニア態窒素濃度が増加する過程は、図10に示すように、2つの過程が考えられる。1つは葉に吸収された NO_2 の、亜硝酸還元酵素による還元作用でアンモニア態窒素が作られ、それがさらに利用されずに蓄積する場合である。一方、 NO_2 暴露による光合成活性の阻害によ

り炭水化物不足となり、アミノ酸合成が抑制されるために、蛋白質、アミノ酸の分解により生成されるアンモニア態窒素が利用されないで蓄積されるのではないかと推察される。ヒマワリではNO₂暴露により一時的にアンモニア態窒素が蓄積されるが、その後、何らかの生理的適応反応によって乾物生長率が増大したために、アンモニア態窒素濃度が対照区とほぼ同様な値にまで低下したものとおもわれる。一方、インゲンマメでは、葉による大気中NO₂の吸収速度がヒマワリと比較して顕著でないが、0.1 ppm という比較的低濃度のNO₂暴露でも、長期間の暴露によって、乾物生長に対して何らかの害作用があらわれたものとおもわれる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、実験植物の育成、管理について当研究所技術部の藤沼康実技官に御協力いただいた。また、植物体の窒素分析に際して日本大学農獣医学部4年生の石塚茂樹君に御協力いただいた。ここに深く感謝の意を表します。

引 用 文 献

1. Bull, J.N. and T.A. Mansfield. 1974. Photosynthesis in leaves exposed to SO₂ and NO₂. *Nature* 250: 443-444
2. Capron, T.M. and T.A. Mansfield. 1977. Inhibition of growth in tomato by air polluted with nitrogen oxides. *J. Exptl. Bot.* 28: 112-116
3. Hill, A.C. and J.H. Bennett. 1970. Inhibition of apparent photosynthesis by nitrogen oxides. *Atmos. Environ.* 4: 341-348
4. 藤原 喬・石川春彦. 1972. 窒素酸化物の2, 3の植物に及ぼす影響. *大気汚染研究* 7: 234
5. Srivastava, H.S., P.A. Jolliffe and V.O. Runeckles. 1975a. Inhibition of gas exchange in bean leaves by NO₂. *Can. J. Bot.* 53: 466-474
6. Srivastava, H.S., P.A. Jolliffe and V.O. Runeckles. 1975b. The effects of environmental conditions on the inhibition of leaf gas exchange by NO₂. *Can. J. Bot.* 53: 475-482
7. Taylor, O.C. and F.M. Eaton. 1966. Suppression of plant growth by nitrogen dioxide. *Plant Physiol.* 41: 132-135
8. Thompson, C.R., E.G. Hensel, G. Katz and O.C. Taylor. 1970. Effects of continuous exposure of navel oranges to nitrogen dioxide. *Atmos. Environ.* 4: 349-355
9. 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). 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. 国立公害研究所特別研究成果報告R-2. p. 67-76
10. 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

Response of plants to atmospheric NO₂ fumigation (2)
Effects of NO₂ fumigation on dry matter growth of
sunflower and kidney bean plants

Tsumugu TOTSUKA¹, Shusei SATO², Tadakatsu YONEYAMA¹
and Tadahiro USHIJIMA²

Summary

Effects of NO₂ fumigation on the growth of sunflower and kidney bean were investigated in the growth chamber, and the following results were obtained.

- 1 NO₂ fumigation at 1.0 ppm for 15 days brought about the depression of growth in plant dry weight in both plants. However, NO₂ treatment at both 0.1 and 1.0 ppm resulted in the increase of relative weight of leaves and the retardation of growth of reproductive parts.
- 2 NO₂ fumigation at 1.0 ppm caused the decrease of relative growth rate of plant dry weight (RGR) throughout the experiment, while at 0.1 ppm NO₂, the decrease in RGR in kidney bean became distinct at longer duration of fumigation. However, in sunflower plant fumigated at 0.1 ppm RGR was lower than the control during earlier periods of fumigation, and extremely higher during later periods of fumigation. Changes of NAR (net assimilation rate) were as in the case of RGR. This suggests the occurrence of some physiological adaptation in sunflower plant fumigated at 0.1 ppm.
- 3 NO₂ treatment resulted in the increase of total-N content per plant in both plants. The increase in total-N with increase of the NO₂ concentration was more distinct in sunflower than in kidney bean. NO₂ treatment at 1.0 ppm resulted in the remarkable increase of NH⁺-N concentration in each plant organ of both plants. The decrease of RGR was accompanied with the increase of concentration of NH⁺-N in leaves in both plants.

1. Division of Environmental Biology, the National Institute for Environmental Studies, Ibaraki 300-21
2. Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu, Tokyo 183

III-10

高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響 (3)

NO₂ 暴露に対する草本植物の感受性および窒素濃度変化の種間差異

戸塚 績¹・米山忠克¹・名取俊樹¹・藤沼康実²

要 旨

6種の草本植物についてNO₂暴露による植物体窒素濃度および乾物生長量の変化を測定し、植物のNO₂吸収能およびNO₂抵抗性の種間差異を検討した。アオジソ、フダンソウ、アサガオ、ハウレンソウ、インゲンマメおよびトウモロコシの6種を1.0 ppm NO₂に14日間暴露処理した。その結果、処理期間中の植物体乾物重増加量は、6種とも対照区のそれより低下した。植物個体あたり全窒素の増加量が、インゲンマメを除く他の5種では、対照区のそれより高くなっていた。この増加量を単位葉面積あたりで表示すると、ハウレンソウが最も高い値を示した。暴露終了後の葉中のアンモニア態窒素濃度は、フダンソウ、アサガオ、インゲンマメでは対照区と大差なかったが、アオジソ、ハウレンソウ、トウモロコシで若干高くなった。

一方、(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度は、インゲンマメを除く他の5種では、対照区の値より高くなっていた。特にハウレンソウでは顕著であった。NO₂暴露により、植物個体重の増加が抑制された種では、葉中の(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度が概して高くなる傾向がみられた。

緒 言

NO₂に対する植物の抵抗性の種間差異については、主として高濃度NO₂による短期間暴露で発現する植物の可視的障害を判定基準として分類されている(Taylor and Maclean(4), 藤原(1), 松島(2))。しかし、第2報(6)でもみられるように、低濃度NO₂では、かなり長期間の連続暴露によっても、植物に可視的被害は認められず、むしろ、植物の生理障害、不可視障害として、乾物生長の低下となってその影響が発現することが報告されている(Taylor and Eaton(3))。しかし、NO₂による植物の生長障害のメカニズムについては、ほとんど解明されていない。そこで、本研究では、数種の草本植物について、低濃度NO₂の長期連続暴露による植物体窒素濃度の変化および個体あたり体内窒素増加量、蓄積能および乾物生長への影響についての種間差異を検討した。

材料と方法

アオジソ (beefsteak plant, *Perilla frutescens* var. *nankinensis* Britton), フダンソウ (swiss chard, *Beta vulgaris* L. var. *Cicla* L.), アサガオ (morning glory, *Pharbitis nil* Choisy), ホ

1. 国立公害研究所 生物環境部
2. 国立公害研究所 技術部

ウレンソウ (spinach, *Spinacia oleracea* L.), インゲンマメ (kidney bean, *Phaseolus vulgaris* L. var. *humilis* Alef.) およびトウモロコシ (corn, *Zea Mays* L.) の6種類の植物を、第1報(5)の実験1と同様な方法で、自然光を利用した制御温室で日中 25 ± 0.1 °C、夜間 20 ± 1 °C、湿度 75 ± 5 %のもとで育成した。ホウレンソウを除いて1鉢1個体とした。ホウレンソウは5個体1鉢とした。上述の温室内で5週間育成後、被験植物6種を暴露キャビネット(間口1.7 m, 奥行2.3 m, 高さ2 m)に設置し、植物体上面の照度30~35 kluxで14時間明期, 10時間暗期, 気温 25 ± 0.1 °C一定, 湿度 75 ± 5 %, 1.0 ppm NO₂で14日間連続暴露した。対照植物も同様な環境条件下で育成した。各植物とも3鉢づつ暴露処理した。暴露処理終了後、被験植物を葉, 茎, 根および花+果実に分け、葉面積を測定した。サンプリングした植物は乾燥させ、乾重量を測定し、粉末化した。その粉末試料について、全窒素濃度をケールダール法で分析した。また同試料のアンモニア態窒素および(硝酸態+亜硝酸態)窒素を、第1報(5)に記載した方法にしたがって粉末試料より熱水抽出し、MgO と Devarda 合金を用いてケールダール法で定量分析した。この分析を二度繰り返して、測定値にばらつきのないことを確かめた。

結果と考察

一年生草本植物6種について、1.0 ppm NO₂で14日間暴露処理後、葉面積生長、植物体乾重量および、植物体全窒素量を測定した結果を表1にまとめた。NO₂暴露により、葉面積増加がアオジソやアサガオでは阻害をうけたが、インゲンマメやトウモロコシでは促進された。NO₂処理期間中の植物体乾物重増加量が全ての被験植物について、対照区の73~86%程度であった。生殖器官の生長は、アサガオ、インゲンマメでは阻害をうけたが、アオジソでは影響をうけなかった。植物個体あたりの全窒素増加量が、インゲンマメを除く他の5種では、対照区のそれより高くなっていた。この増加が大気中NO₂の植物葉面による吸収に由来すると仮定すれば、14日間の暴露処理で、対照区の植物体全窒素量の10~260%に相当する窒素を葉面から吸収したことになる。表2に、大気中NO₂に由来するとおもわれる、植物体窒素量の増加の種間差異を示した。植物個体あたりでみると、アサガオが6種類の被験植物のうちで最もNO₂吸収能が高いことになる。しかし、大気中NO₂が主として葉面を通じて吸収されるとすれば、植物体のN増加量を単位葉面積あたりで表示する方がのぞましいかも知れない。そこで、単位葉面積あたりの植物体窒素増加量を比較してみると、ホウレンソウがもっともよく大気中NO₂を吸収していることになる(表2参照)。

表3に被験植物の各器官別アンモニア態窒素および(硝酸態+亜硝酸態)窒素の濃度を示した。フダンソウ、アサガオとインゲンマメでは葉中のアンモニア態窒素濃度は、NO₂暴露処理しても対照区の値と大差なかったが、ホウレンソウ、トウモロコシでは若干高くなり、アオジソでは対照区の値の約3倍に増加していた。一方、葉中の(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度は、インゲンマメで対照区の値と同様な値を示した他は、いずれの植物でも対照区の値より高くなった。特にホウレンソウの葉では著しく高くなっていた。

表1 6種の植物の葉面積, 乾物重, 全窒素の増加に対する1圃のNO₂14日間の処理の影響 各植物3個体(但し, ホウレンソウは15個体)を採取した カッコ内の数字は無処理植物の値に対する百分率

Table 1 Increase* in leaf area, dry weight and total nitrogen of six plants when fumigated with 1.0 ppm NO₂ for 14 days. Three plants, except for spinach, in which 15 plants were sampled, were harvested at the end of the treatment. Numerals in the parentheses indicate the percentage of the corresponding values of the control.

Plant name	Plant part	Leaf area (cm ² /plant)		Dry weight (g/part)		Total nitrogen (mg/part)	
		Cont.	NO ₂	Cont.	NO ₂	Cont.	NO ₂
Beefsteak plant	Leaf	355	225	2.01	0.82	49	44
	Stem			0.85	0.81	20	18
	Root			0.84	0.67	24	25
	Flower			0.49	0.83	12	28
	Total			4.19	3.09(74)	105	115(110)
Swiss chard	Leaf	Not determined		1.99	0.71	-22	23
	Stem			2.28	1.42	14	21
	Root			3.23	3.83	40	72
	Total			7.50	5.96(79)	32	116(363)
Spinach	Leaf	2250	1750	6.65	4.60	47	131
	Stem			10.22	8.54	42	114
	Root			1.33	0.82	11	10
	Flower			2.60	1.14	58	30
	Total			20.80	15.10(73)	158	285(180)
Spinach	Leaf	7	10	0.28	0.17	4.0	14.7
	Stem			0.15	0.14	2.3	3.6
	Root			0.10	0.09	1.3	1.3
	Total			0.53	0.40(75)	7.6	19.6(258)
Kidney bean	Leaf	980	1790	3.84	6.29	12	134
	Stem			4.88	6.60	44	58
	Root			2.12	1.60	38	22
	Fruit			9.49	3.20	224	77
	Total			20.33	17.69(85)	318	291(92)
Corn	Leaf	2520	2920	11.89	12.05	19	119
	Stem			30.56	22.97	99	35
	Root			7.21	7.69	11	47
	Total			49.66	42.71(86)	129	201(156)

*The amount of the increase during treatment period is indicated.

表2 1 ppmのNO₂で14日間処理した時のNO₂からの窒素の吸収

Table 2 Nitrogen uptake* from NO₂ in air by plants fumigated with 1.0 ppm NO₂ for 14 days.

Plant name	Nitrogen uptake		
	On whole plant basis (mgN)	On plant dry weight basis** (mgN/g)	On leaf area basis** (μgN/cm ²)
Beefsteak plant	10	2.1	15.6
Swiss chard	84	6.9	—
Morning glory	127	6.2	39.8
Spinach	12	11.0	109
Corn	72	1.2	13.5

*Nitrogen uptake from NO₂ in air was estimated from the difference of nitrogen content between control plant and NO₂ fumigated plant.

**Calculated on the basis of total plant dry weight and leaf area at the final harvest.

表3 1 ppmのNO₂で14日間処理した植物および無処理の植物中のアンモニア態および(硝酸+亜硝酸)態窒素の濃度

Table 3 Concentration of ammonia and (nitrate + nitrite) nitrogen in plants fumigated with 1 ppm NO₂ for 14 days.

Plant name		Ammonia (ppm)*		Nitrate + Nitrite (ppm)*	
		Cont.	NO ₂	Cont.	NO ₂
Beefsteak plant	Leaf	139	392	341	1120
	Stem	735	583	3490	2640
	Root	295	439	3270	3980
	Flower	626	565	1130	726
Swiss chard	Leaf	60	60	22	36
	Stem	34	34	21	32
	Root	54	114	17	32
Morning glory	Leaf	122	123	178	761
	Stem	56	149	656	2140
	Root	23	114	147	1090
Spinach	Leaf	55	78	71	671
	Stem	31	40	67	531
	Root	39	84	48	302
Kidney bean	Leaf	203	183	266	273
	Stem	42	131	29	370
	Root	203	102	981	383
	Fruit	231	114	373	240
Corn	Leaf	40	54	79	109
	Stem	34	21	22	59
	Root	51	96	21	103

*Based on dry weight of plant parts.

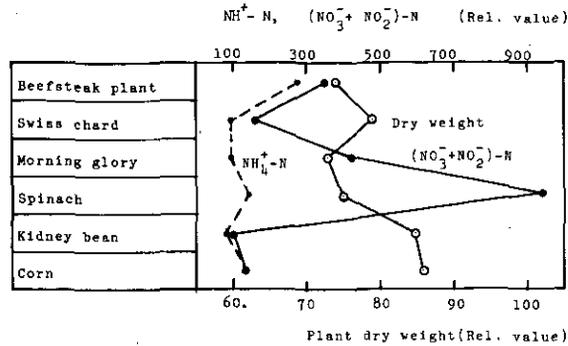


図1 6種類の植物でのアンモニア態窒素、(硝酸+亜硝酸)態窒素の濃度および乾物重の増加に対するNO₂処理の影響 無処理植物の値に対する百分率で示した。

Fig. 1 Changes in concentration (ppm on dry weight basis) of ammonia -N and (nitrate + nitrite) -N and plant dry weight increase in six plant species. These values are indicated as percentage of the corresponding values of the control.

以上の諸結果を総括して図1に6種の植物について、NO₂処理中の植物個体重増加量と暴露終了時の葉中のアンモニア態窒素および(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度との関連を示した。これらの値は、いずれも、対照区の値を100としたときの相対値で示した。いずれの植物でもアンモニア態窒素濃度の増加に比較して、(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度の増加が著しいことが認められた。特にホウレンソウでは、それが顕著であった。また、NO₂暴露による植物個体重増加が比較的抑制された種では、葉中の(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度が概して高くなる傾向が認められた。

謝 辞

本研究にあたり、日本大学農獣医学部4年生の石塚茂樹君に植物体の窒素分析について御協力いただいた。ここに、感謝の意を表します。

引 用 文 献

1. 藤原 喬. 1973. 窒素酸化物の植物におよぼす影響について. 公害と対策 9:253-257
2. 松島二良. 1973. 窒素酸化物の植物におよぼす影響. 大気汚染研究 8:234-242
3. Taylor, O. C. and F. M. Eaton. 1966. Suppression of plant growth by nitrogen dioxide. Plant Physiol. 41:132-135
4. Taylor, O. C. and D. C. Maclean. 1970. Nitrogen oxides and the peroxyacyl nitrate. Recognition of air pollution injury to vegetation: A pictorial atlas (Jacobson J. S. and A. C. Hill ed.) E:1-5 APCA
5. 戸塚 積・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). 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. 国立公害研究所特別研究成果報告R-2. p. 67-76
6. 戸塚 積・佐藤秋生・米山忠克・牛島忠広. 1978. 高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(2). 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. 国立公害研究所特別研究成果報告R-2. p. 77-88

Response of plants to atmospheric NO₂ fumigation (3)
Variations of plant susceptibility and nitrogen accumulation in
several species of herbaceous plants fumigated with NO₂

Tsumugu TOTSUKA, Tadakatsu YONEYAMA, Toshiki NATORI
and Yasumi FUJINUMA*

Summary

Six plant species of beefsteak plant, swiss chard, morning glory, spinach, kidney bean and corn were fumigated with NO₂ at 1.0 ppm for 14 days. The growth (increase of dry-weight during the treatment) was depressed by NO₂ fumigation in all plants. However, the amount of increased total-nitrogen per plant individual was more in all fumigated plants except for kidney bean plant than in non-fumigated plants. The highest activity to absorb NO₂-N per unit leaf area was observed in spinach. The concentration of ammonia nitrogen in leaves at the end of NO₂ treatment was increased in beefsteak plant, spinach and corn, but not in swiss chard, morning glory and kidney bean by NO₂ fumigation. The concentration of (nitrate + nitrite) nitrogen in leaves was also increased in all plants except for kidney bean plant by NO₂ fumigation: its rate was extremely high in spinach. It was observed that the severer the inhibition on dry-weight growth by NO₂ fumigation, the higher the increase of (nitrate + nitrite) nitrogen content in leaves.

III-11

高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(4)

数種木本植物の生長および植物体窒素濃度におよぼすNO₂暴露の影響

米山忠克¹・戸塚 績¹・石塚茂樹²・藤沼康実³・矢崎仁也²

要 旨

街路樹によくつかわれる木本植物、キョウチクトウ、サクラ(ソメイヨシノ)、カイズカイブキ、クロマツ、スズカケノキ、トウカエデ、イタリアポプラに対するNO₂の長期間暴露の影響について調べた。自然光型暴露キャビネット(コイトロンS-200特殊型、相対湿度70%、昼間25℃、夜間20℃)で、夏期、2か月間1ppmのNO₂で連続暴露処理した。乾物重の増加からみると、トウカエデがもっとも被害を受けており、キョウチクトウ、サクラ、イチョウ、スズカケノキ、イタリアポプラでも、生長が阻害された。しかし、カイズカイブキではわずかな葉の黄変以外に顕著な影響がみとめられず、クロマツでは、NO₂処理で生長が促進される傾向がみとめられた。窒素成分からみると、感受性の高い植物は全窒素およびアンモニア態窒素濃度が比較的高く、逆に、カイズカイブキ、クロマツなど高い抵抗性を示すものでは、両窒素形態ともその濃度は低かった。またNO₂暴露は、生長が阻害を受ける時期に植物体の硝酸態窒素濃度を増大させた。

緒 言

前報(4, 5, 6)で数種の草本植物の生長および植物体の窒素成分に対するNO₂の影響について報告した。都市の道路の両側には街路樹として木本植物が植栽される場合が多く、それらは、自動車の排気ガスに接触することになる。本報告では、数種の木本植物に対するNO₂暴露の影響について報告する。

従来、木本植物に対するNO₂暴露の影響については、その重要性にもかかわらず、報告は少ない。Thompsonら(3)は、0.5～1.0ppmのNO₂を35日間または0.0625～0.125ppmあるいは0.25ppmでネーブルオレンジを9か月半処理して、落葉の促進および、収量の減少を認めたと報告している。松島(2)は高濃度(13～15ppm)のNO₂で処理すると、ポプラは1時間で、ナシ、ミツバカイドウ、ブドウ、モモ、ケヤキ、キョウチクトウは2～5時間で、温州ミカン、イチョウは15時間程で可視害をみとめたが、キンモクセイ、ツバキ、フィリアオキ、クロマツ、ヒノキは21時間処理しても可視害を認めなかったと報告している。一般的に、木本植物は草本植物よりもNO₂抵抗性が高いようである。

本報告では、街路樹の環境を考慮して、1ppmのNO₂で、長期間(1～2か月)処理した場合の木本

1. 国立公害研究所 生物環境部
2. 日本大学 農獣医学部
3. 国立公害研究所 技術部

植物の生長および体内の窒素成分におよぼす影響について検討した。

材料と方法

供試植物および NO₂ 処理

実験に供された木本植物は、キョウチクトウ (*oleander, Nerium indicum* Mill), サクラ (ソメイヨシノ) (*cherry tree, Prunus yedoensis* Matsum.), イチョウ (*ginkgo tree, Ginkgo biloba* L.), カイズカイブキ (*juniper, Juniperus chinensis* L.), クロマツ (*black pine, Pinus Thunbergii* Parl.), アメリカスズカケノキ (*plane tree, Plantanus occidentalis* L.), トウカエデ (*trident maple, Acer Buergerianum* Miq.), イタリアポプラ (*poplar, Populus nigra* L.) の8種である。第1報(4)に述べた人工培養土をつめた1万分の1アールのポットで育てられた、樹高が約30~50cmの3~4年生の幼木を用いた。NO₂処理は1圃でおこない、処理期間は、キョウチクトウ、サクラ、イチョウ、カイズカイブキは昭和52年6月14日から1ないし2か月間、クロマツ、スズカケノキ、トウカエデは、同年8月26日から2か月間、ポプラは同年9月19日から2か月間であり、処理開始後、1か月後と2か月後に、無処理の対照植物と共に採取した。2か月の間、1000倍液の Hyponex (N:P₂O₅:K₂O=6.5:6:19) の溶液を毎週1鉢あたり100~200mlずつ与えた。暴露実験には自然光型暴露チェンバー (小糸工業製S-200特殊型、有効床面積2×2m²、相対照度50%) を用い、昼間25℃、夜間20℃、相対湿度70%でなされた。同一処理に対し、植物は4~5個体を使用した。なお、暴露キャビネット内のNOの生成は、日中でもNO₂濃度の10%以内にとどまっていた。

試料の分析

採取された被験植物は、葉 (但し、落葉は含まれない)、幹、根にわけ、通風乾燥機中で90℃で3日間乾燥し、乾燥重を測定した。各試料を粉砕し、その粉末試料について、全窒素含量はケルダール法で、無機態窒素 (アンモニア、硝酸+亜硝酸) は、前報(4)と同様に、熱水抽出後、蒸留法で測定した。

結果と考察

NO₂で2か月間処理された結果、キョウチクトウでは新葉の展開には影響がみられないが、暴露開始1か月後位から下位葉の枯れ上がりがめだつた。イチョウでは、各部位の葉で黄変をみとめた。カイズカイブキも葉の一部が黄変していた。クロマツではNO₂処理の影響はみられなかった。スズカケノキでは処理の後半で日長が短くなり、無処理の植物でも多少黄変したが、処理された植物ではそれが著じるしかつた。ポプラでもわずかに葉部の黄変をみとめた。トウカエデは処理開始直後から落葉がおこり、2か月後では着葉率は最初の30%程度になった。

表1に、植物の各部位別に、その乾物重と標準偏差を示した。個体のばらつきが大きく、4~5本の平均値 \bar{X} に対する標準偏差 (Sd) が比較的大きくなった。1、2か月間のNO₂処理の生長に対

表1 8種類の本木植物の生長に対するNO₂暴露の影響 天然光下で1ppmのNO₂を2か月間暴露した。

Table 1 Effect of NO₂ fumigation on dry-weight growth of several woody plants. Atmospheric NO₂ was fumigated on the plants at 1 ppm for 2 months under sunlight condition. \bar{X} : means of 4-5 plants. Sd: standard deviation.

Plant	Plant part	Dry weight (g.d.w.)						Dry weight increment (g.d.w.)								
		Initial		After 1 month		After 2 months		Initial-1 month			1 month-2 months					
		Cont. (A)	Fumi-gated (B)	$\frac{B}{A} \times 100$	Cont. (C)	Fumi-gated (D)	$\frac{D}{C} \times 100$	Cont. (E)	Fumi-gated (F)	$\frac{F}{E} \times 100$	Cont. (G)	Fumi-gated (H)	$\frac{H}{G} \times 100$			
Oleander	Leaves	\bar{X}	3.05	9.82	9.18	93	19.5	12.3	63	6.77	6.13	91	9.7	3.1	32	
		Sd	0.45	1.39	0.96		2.24	1.12								
	Stems	\bar{X}	1.79	5.92	5.03	85	14.5	10.3	71	4.13	3.24	78	8.6	5.3	62	
		Sd	0.15	0.72	0.53		2.55	1.72								
	Roots	\bar{X}	0.50	4.15	2.68	65	7.85	5.34	67	3.65	2.18	60	3.70	2.66	72	
		Sd	0.04	2.89	0.69		1.19	1.02								
Cherry tree	Leaves	\bar{X}	2.10	4.49	3.34	74				2.39	1.24	52				
		Sd	0.65	0.85	1.57											
	Stems	\bar{X}	20.2	25.1	27.7	110				4.9	7.5	150				
		Sd	6.92	14.7	5.55											
	Roots	\bar{X}	29.6	32.5	39.2	90				2.9	9.6	330				
		Sd	11.8	11.8	7.80											
Ginkgo	Leaves	\bar{X}	1.83	4.64	3.80	82	4.18	3.08	74	2.81	1.97	70	-0.46	-0.72	-	
		Sd	0.80	1.26	0.78		1.78	0.90								
	Stems	\bar{X}	8.06	10.32	8.82	85	9.22	11.1	120	2.26	0.76	34	-1.10	2.24	-	
		Sd	2.80	1.25	0.88		2.60	3.09								
	Roots	\bar{X}	7.43	12.9	9.55	75	12.5	14.1	113	5.42	2.12	39	-0.39	4.54	-	
		Sd	2.81	2.39	1.80		2.85	3.86								
Juniper	Leaves	\bar{X}	14.7	15.8	15.0	94	17.4	18.3	105	1.1	0.3	27	1.6	3.3	210	
		Sd	7.22	6.17	1.25		3.26	5.36								
	Stems	\bar{X}	2.19	2.43	2.79	111	3.48	3.20	92	0.24	0.60	250	1.05	0.41	39	
		Sd	1.70	1.42	0.69		1.07	1.08								
	Black pine	Leaves	\bar{X}	23.4	30.2	33.5	111	32.2	39.9	124	6.8	10.1	150	2.0	6.4	320
			Sd	5.83	9.87	6.50		9.95	10.9							
Stems		\bar{X}	27.2	27.7	37.0	129	31.7	39.4	125	0.6	9.8	2000	4.2	2.4	60	
		Sd	6.71	6.00	8.14		11.5	8.32								
Roots		\bar{X}	29.2	28.1	31.2	111	30.0	34.8	116	-1.1	2.0	-	1.9	3.6	190	
		Sd	8.48	5.22	7.24		7.57	9.37								
Plane tree	Leaves	\bar{X}	4.83	5.23	6.18	112	6.91	6.53	94	0.40	1.35	340	1.68	0.35	21	
		Sd	1.52	2.01	1.87		1.17	1.88								
	Stems	\bar{X}	25.1	26.3	20.2	76	27.8	25.5	92	1.2	-0.49	-	1.5	5.3	350	
		Sd	8.97	7.28	10.3		5.50	5.40								
	Roots	\bar{X}	12.7	20.4	18.8	91	21.9	21.1	97	7.7	6.1	79	1.5	2.3	150	
		Sd	2.02	10.2	7.63		2.98	4.13								
Trident maple	Leaves	\bar{X}	2.64	2.83	1.91	67	3.09	0.76	24	0.19	-0.73	-	0.26	-1.15	-	
		Sd	0.80	1.93	0.83		1.36	0.58								
	Stems	\bar{X}	2.63	2.90	3.96	137	2.72	2.73	101	0.27	1.33	490	-0.18	-1.23	-	
		Sd	0.52	1.16	1.78		0.62	0.71								
	Roots	\bar{X}	1.42	1.88	2.85	152	1.72	1.88	109	0.46	1.43	310	-0.16	0.97	-	
		Sd	1.05	0.87	1.41		0.33	0.59								
Poplar	Leaves	\bar{X}	3.41	7.98	7.73	97	10.1	7.58	74	4.57	4.31	94	2.12	-0.15	-	
		Sd	1.01	1.08	0.99		0.85	1.11								
	Stems	\bar{X}	4.59	9.60	9.48	99	12.0	10.7	89	5.01	4.89	98	2.4	1.2	50	
		Sd	2.21	1.96	2.22		1.71	3.00								
	Roots	\bar{X}	5.12	9.80	7.58	77	24.4	14.2	58	4.68	2.46	53	14.6	6.6	45	
		Sd	1.98	4.19	1.65		12.2	6.99								

する影響をみるため、処理された植物の個体乾重および処理期間中の乾物重増分を、対照植物のそれらに対する百分率で表示し、表1にそのデータを示してある。最初の1か月間の処理では、トウカエデ、サクラ、イチョウの葉の生長が阻害されており、特にトウカエデでは落葉がめだつた。キョウチクトウ、カイズカイブキ、イタリアポプラの葉の生長はわずかしか影響をうけなかった。これに対し、クロマツ、アメリカスズカケノキの葉の生長に対しては、やや促進的傾向を示した。幹や根の生長に対する影響としては、キョウチクトウ、イチョウ、アメリカスズカケノキでNO₂暴露により阻害の傾向を、逆に、クロマツ、トウカエデでは促進の傾向をみとめた。

2か月間の処理により、トウカエデ、キョウチクトウ、イチョウ、イタリアポプラで葉重の減少が大きかった。カイズカイブキ、アメリカスズカケノキの葉ではその影響は大きくなったが、クロマツ葉では明らかに促進的効果を示した。幹および根の影響としては、キョウチクトウ、イタリア

表2 NO₂で処理した植物および無処理の植物の全窒素濃度の変化

Table 2 Content of total nitrogen (% on dry-weight base) in the plants fumigated or not fumigated (Cont.) with NO₂.

Plant	Plant part	Initial	After 1 month			After 2 months		
			Cont. (A)	Fumigated (B)	$\frac{B}{A} \times 100$	Cont. (C)	Fumigated (D)	$\frac{D}{C} \times 100$
Oleander	Leaves	3.26	2.59	2.88	111	2.06	3.13	152
	Stems	1.50	0.96	1.01	105	0.73	0.97	133
	Roots	1.71	1.45	1.66	114	0.84	1.24	148
Cherry tree	Leaves	3.20	2.80	2.79	100			
	Stems	0.38	0.56	0.55	98			
	Roots	1.31	1.23	1.32	107			
Ginkgo	Leaves	2.50	2.17	2.55	118	2.43	2.59	107
	Stems	0.97	1.13	1.18	104	1.26	1.26	100
	Roots	1.20	1.19	1.40	118	1.25	1.21	97
Juniper	Leaves	1.44	1.50	1.60	107	1.61	1.83	114
	Stems	0.76	0.79	0.86	109	0.94	0.90	96
	Roots	1.18	1.16	1.02	88	1.03	1.14	111
Black pine	Leaves	1.18	1.43	1.55	108	1.54	1.78	116
	Stems	0.66	0.74	0.72	97	0.71	0.79	111
	Roots	0.69	0.81	0.79	98	0.79	0.87	110
Plane tree	Leaves	2.96	2.63	2.92	111	2.61	2.73	105
	Stems	0.55	0.68	0.78	115	0.82	0.84	102
	Roots	0.93	0.98	1.08	110	1.14	1.46	128
Trident maple	Leaves	2.76	2.88	3.26	113	2.74	4.54	166
	Stems	1.14	1.36	1.52	112	1.80	1.76	98
	Roots	1.73	2.04	1.99	98	2.49	2.33	94
Poplar	Leaves	3.69	3.67	3.32	90	3.81	3.27	86
	Stems	0.99	1.34	1.52	113	2.33	2.43	104
	Roots	1.55	1.79	1.99	111	2.43	2.75	113

ポプラでは乾物重の生長に阻害的に作用しているのが認められたが、イチョウ、クロマツでは、これらの生長を促進する作用がみとめられた。特にトウカエデでは、葉が黄変し、落葉したにもかかわらず、根の乾物重の増大をみとめた。しかしながらこの傾向は、2か月間のNO₂処理により落葉が著しく、幹および根の乾物重も大幅に減少していた。

以上の結果から、トウカエデ、サクラは、短期間の暴露でも、葉の生長に影響を受けるが、キョウチクトウ、ポプラは、長時間の処理により、その乾物生長に阻害的影響を受ける。また、カイズカイブキ、スズカケノキでは、その乾物生長に対する影響は、明瞭でない。しかし、クロマツでは、この実験で用いられたNO₂濃度(1 ppm)では、むしろ生長が促進される傾向にあったといえよう。

次に植物個体の器官別窒素成分について検討した。表2に、暴露処理された植物の葉、幹、根における全窒素濃度を示した。NO₂処理1か月後の植物について、無処理区のものと比較すると、葉の全窒素濃度は、イチョウ、トウカエデ、キョウチクトウ、スズカケノキでは、NO₂処理区で増加していたが、ポプラではやや減少していた。幹又は根では、キョウチクトウ、イチョウ、スズカケノキで窒素濃度の増加をみとめた。処理2か月後では、特にキョウチクトウで、全部位について対照区の値の1.5倍程に増加していた。トウカエデの葉では、落葉が著しかったが、その窒素濃度は4.5%に増大した。

乾物生長においてNO₂処理が促進的效果を示したクロマツ、あまり影響を受けなかったカイズカイブキは、無処理区でその窒素含量が低く、NO₂処理によっても、2か月間の暴露処理終了時で、1割程度の増加しか認められなかった。これに対し、生長阻害を受けた木本植物では、無処理区でも窒素含量が相対的に高く、処理により増加したもの(キョウチクトウ、トウカエデ)とあまり効果のないもの(サクラ、イチョウ、スズカケノキ)と、ポプラのように、葉部で減少したものがあつた。以上の結果より、実験に用いた木本植物のうちでは、本来、葉の窒素含量の低い植物がNO₂に対して相対的に抵抗性が強いといえよう。

表3には、(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度の変化を示した。大気中NO₂が、葉内細胞に吸収された時、硝酸又は亜硝酸イオンになると考えられている。一方、根から吸収された硝酸も、植物体の各部位に分配される。植物体内では、これらの窒素源によって、アミノ酸、蛋白質が合成され(1)、生長に使われる。故に、硝酸または亜硝酸が還元される過程は、重要な生物活性の指標である。無処理区との比較で、NO₂処理区の葉の(硝酸態+亜硝酸態)窒素濃度の値(表3のB/A、D/C)をみると、サクラ、イチョウ、カイズカイブキ、スズカケノキでは1か月目に、キョウチクトウ、ポプラでは2か月目に増大していた。これらは生長が阻害を受け始めた時期とほぼ一致している。この観察は、前報(6)で調べた草本植物のヒマワリ、インゲンマメの結果と同様である。しかし、トウカエデのように、ごく初期に障害を受けたものでは、無処理区に比べて低い。

表4には、植物体各部位のアンモニア態窒素濃度の変化を示してある。アンモニア態窒素は硝酸、亜硝酸の還元産物であり、アミノ酸の窒素源である。一方、蛋白質、アミノ酸の分解で、過剰になった窒素は最終的にはアンモニアとなる(1)。しかし、高濃度のアンモニアは、植物の生理機能にと

って毒物であり、アミノ態などで過剰な窒素は蓄えられる場合が多い。表4をみると、生長に対する阻害をはげしく受けたトウカエデは、他の植物と比較して、アンモニア態の窒素濃度が高く、比較的抵抗性があったカイズカイブキ、クロマツはその濃度が低かった。しかし、本実験では、NO₂処理による影響には一定の傾向がみとめられなかった。

表3 NO₂で処理した植物および無処理の植物中の硝酸（亜硝酸を含む）態窒素の濃度変化
Table 3 Content of nitrate (including nitrite) nitrogen (ppm) in the plants fumigated and not fumigated (Cont.) with NO₂.

Plant	Plant part	Initial	After 1 month			After 2 months		
			Cont. (A)	Fumigated (B)	$\frac{B}{A} \times 100$	Cont. (C)	Fumigated (D)	$\frac{D}{C} \times 100$
Oleander	Leaves	520	70	61	87	25	51	200
	Stems	1250	600	430	72	22	238	1080
	Roots	2000	810	1360	170	58	380	660
Cherry tree	Leaves	140	87	270	310			
	Stems	136	200	180	90			
	Roots	290	340	670	200			
Ginkgo	Leaves	28	32	73	230	25	37	150
	Stems	18	56	73	130	91	100	110
	Roots	110	180	210	120	125	140	110
Juniper	Leaves	19	24	52	220	19	83	440
	Stems	37	270	300	110	606	680	110
	Roots	260	350	740	210	600	610	100
Black pine	Leaves	17	37	56	150	35	53	150
	Stems	9	26	52	200	34	60	180
	Roots	12	36	84	230	23	35	150
Plane tree	Leaves	38	115	276	240	196	543	280
	Stems	15	67	46	69	44	63	140
	Roots	85	93	214	230	110	155	140
Trident maple	Leaves	88	435	76	17	2114	1388	66
	Stems	494	399	213	53	303	368	120
	Roots	1172	981	760	77	816	884	108
Poplar	Leaves	447	150	270	180	57	288	505
	Stems	324	116	205	180	67	81	120
	Roots	719	529	683	130	254	411	160

表4 NO₂で処理した植物および無処理の植物中のアンモニア態窒素濃度の変化
 Table 4 Content of ammonia nitrogen (ppm) in the plants fumigated or not fumigated (Cont.) with NO₂.

Plant	Plant part	Initial	After 1 month			After 2 months		
			Cont. (A)	Fumigated (B)	$\frac{B}{A} \times 100$	Cont. (C)	Fumigated (D)	$\frac{D}{C} \times 100$
Oleander	Leaves	155	129	123	95	94	197	210
	Stems	73	74	100	140	63	131	210
	Roots	95	101	310	310	32	87	270
Cherry tree	Leaves	74	149	127	85			
	Stems	28	62	139	220			
	Roots	245	280	281	100			
Ginkgo	Leaves	82	127	191	150	186	158	85
	Stems	36	59	117	200	86	65	76
	Roots	40	62	140	230	62	66	110
Juniper	Leaves	56	81	49	60	54	59	110
	Stems	26	24	51	210	46	44	96
	Roots	54	43	57	130	77	61	79
Black pine	Leaves	25	29	95	330	46	103	220
	Stems	24	31	46	150	50	74	150
	Roots	57	57	231	410	49	65	130
Plane tree	Leaves	55	24	74	310	77	134	170
	Stems	39	46	60	130	67	82	120
	Roots	86	80	70	88	115	144	130
Trident maple	Leaves	242	218	379	170	186	605	330
	Stems	132	246	376	150	472	388	82
	Roots	145	374	493	130	630	453	72
Poplar	Leaves	65	84	51	61	114	127	110
	Stems	40	42	390	930	284	181	64
	Roots	105	145	231	160	405	334	82

引用文献

1. Beevers, L. 1976. Nitrogen metabolism in plants. Edward Arnold, London
2. 松島二良. 1973. 窒素酸化物の植物におよぼす影響. 大気汚染研究 8:234-242
3. Thompson, C. R., E. G. Hensel, G. Kats and O. C. Taylor. 1970. Effect of continuous exposure of navel oranges to nitrogen dioxide. Atmos. Environ. 4:349-355
4. 戸塚 積・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吸収について 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. 昭和51/52年度研究報告. 国立公害研究所特別研究成果報告R-2. p.67-76
5. 戸塚 積・佐藤秋生・米山忠克・牛島忠広. 1978. 高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(2). ヒマワリとインゲンマメの乾物生長におよぼすNO₂暴露の影響 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. 国立公害研究所特別研究成果報告R-2. p.77-88
6. 戸塚 積・米山忠克・名取俊樹・藤沼康実. 1978. 高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(3). NO₂暴露に対する草本植物の感受性および植物体窒素濃度変化の種間差異 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. 国立公害研究所特別研究成果報告R-2. p.89-94

Response of plants to atmospheric NO₂ fumigation (4) Changes in dry-weight growth and nitrogen content in woody plants fumigated with NO₂

Tadakatsu YONEYAMA¹, Tsumugu TOTSUKA¹,
Shigeki ISHIZUKA², Yasumi FUZINUMA³ and Zinya YAZAKI²

Summary

Young woody plants (3-4 years old) were fumigated with NO₂ at 1 ppm for 1-2 months, and the effect on dry-weight growth and on nitrogen content (total and inorganic nitrogen) in plant parts were investigated.

Continuous fumigation with NO₂ in the growth cabinet (75% R.H., 25°C in the daytime, 20°C at night) under natural sunlight for 2 months resulted in the depression of growth in trident maple (*Acer buergerianum* Hig.) most severely and in oleander (*Nerium indicum* Mill), cherry tree (*Prunus yedoensis* Matsum.), ginkgo (*Ginkgo biloba* L.), plane tree (*Platanus occidentalis* L.) and poplar (*Populus nigra* L.), but stimulation of growth of black pine (*Pinus thunbergii* Parl.), and it had no effect on the growth of juniper (Kaizukaibuki, *Juniperus chinensis* L.) except for yellowing in small parts of the leaves.

The analytical data on nitrogen content suggest that plants low in total and inorganic nitrogen contents are tolerant to NO₂ fumigation.

-
1. Division of Environmental Biology, the National Institute for Environmental Studies, Ibaraki 300-21
 2. Department of Agricultural Chemistry, Nihon University, Tokyo 154.
 3. Division of Engineering, the National Institute for Environmental Studies, Ibaraki 300-21

III-12

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 $^{15}\text{NO}_2$ の吸収, 亜硝酸の蓄積, 亜硝酸還元酵素活性の変化

米山忠克¹・笹川英夫²・戸塚 績¹・山本幸男²

要 旨

数種の幼植物について、1～4 ppmの NO_2 を暴露した時の葉における NO_2 吸収能力、亜硝酸の蓄積、亜硝酸還元酵素活性を調べた。 ^{15}N トレーサー法によれば、ハウレンソウ、ヒマワリ、トウモロコシでは、ハウレンソウの NO_2 吸収能が最も高く、トウモロコシは低い。葉中の亜硝酸は、ハウレンソウ、トウモロコシでは蓄積されなかったが、ヒマワリ、インゲンで高濃度に蓄積されていた。ハウレンソウでは、亜硝酸還元活性が強く、ヒマワリでは弱かった。ヒマワリでは、 NO_2 暴露時の光がより強くなると、この酵素活性も増大した。

緒 言

前報(2, 3, 4, 6)では、数日間、数週間の NO_2 暴露が植物の生育および窒素成分の変化におよぼす影響について報告した。本報では、さらに短時間の NO_2 暴露による植物体内の生理的状態の変化—特に亜硝酸の集積、亜硝酸還元酵素活性の変動—について検討する。植物に吸収された NO_2 は、細胞液中で、硝酸イオン、亜硝酸イオンになると考えられる。特に後者は低濃度で、光合成、呼吸などに対する阻害作用を示し、亜硝酸イオンの集積は、植物の NO_2 被害の原因となると考えられている(1)。植物体内で生産される亜硝酸は、亜硝酸還元酵素によって、アンモニアに還元され、さらにそれが、グルタミン酸脱水素酵素により、グルタミンまたはグルタミン酸になることにより除去される。故に亜硝酸還元酵素活性は、亜硝酸除去能の指標となりうる。

加藤ら(1)は、阻害実験による測定から、暗中よりも明中で亜硝酸の蓄積が少ないのは、明中で亜硝酸還元酵素活性が高いためだと推論している。Wellburnら(6)の報告によれば、低濃度(0.1 ppm)の NO_2 で3週間処理したトマトでは、有意な亜硝酸還元酵素活性の上昇を認めないという。これ以外に、亜硝酸還元酵素活性を測定した報告はみられず、 NO_2 暴露に対する植物の生理的応答を理解するには、不十分である。本報では、数種の植物について、 NO_2 暴露下での亜硝酸の蓄積、亜硝酸還元酵素活性の変動を調べ、 NO_2 に対する植物の感受性、抵抗性の指標を得ようとした。

低濃度 NO_2 による短時間の暴露実験では、植物による NO_2 の吸収量は、前報(2, 3, 4, 6)のような、無処理植物と処理植物の窒素含量の差としては求めがたい。こういう時には、同位体元

1. 国立公害研究所 生物環境部
2. 名古屋大学 農学部

素による追跡が望ましい。我々は重窒素 (^{15}N) 標識の NO_2 を合成し、それを植物に暴露したところ、短時間で植物葉中で重窒素の蓄積を検出した。これらの方法は、植物体に吸収された NO_2 の挙動に関する生理、生態学的研究に重要であると思われるのであわせて報告する。

材料と方法

植物材料としてロシアヒマワリ (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth), デントコーン (*Zea Mays* L. cv. Dent), ホウレンソウ (ピロフレー) (*Spinacia oleracea* L. cv. Viroflay), インゲンマメ (江戸川) (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Edogawa) を、ウスプルンで消毒したあと、水洗し、適当に湿ったパーミキュライトに播種した。発芽後2~3週間経過したものを供試植物とした。但し、ホウレンソウには、わずかの窒素を含む肥料 (1.8 ℓ のポットあたりマグアンプK 5g, 苦土石灰15g) を施与した。他の植物は水道水のみで、施肥はおこなわなかった。すべての栽培は、自然光下の制御温室 (25 $^{\circ}\text{C}$, 70% RH) でなされた。

実験 1. 植物による $^{15}\text{NO}_2$ の吸収

(1) $^{15}\text{NO}_2$ の発生; ^{15}NO を次の反応式に従って、図1-Aに示した装置で発生させた。

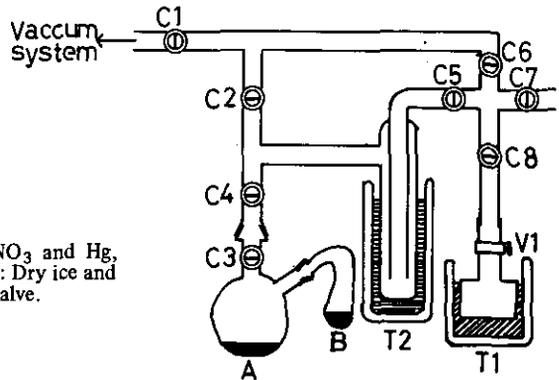
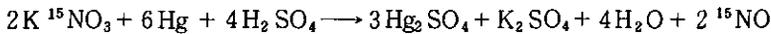


図1-A ^{15}NO 発生システム

Fig. 1-A ^{15}NO evolution system. A: KNO_3 and Hg , B: H_2SO_4 , T1: Liquid nitrogen, T2: Dry ice and trichlene, Ci (i = 1-8): Cock, V1: valve.



即ち真空中で、水銀、硝酸カリ、硫酸の反応により、 ^{15}NO を発生させトラップ T_2 を通りわずかに発生する NO_2 など ^{15}NO 以外のガスを取り除き、トラップ T_1 により冷却されたポンベに ^{15}NO を導入する。バルブ V_1 をとじる。 ^{15}NO を捕捉したポンベを、真空にした装置 (図1-B) にセ

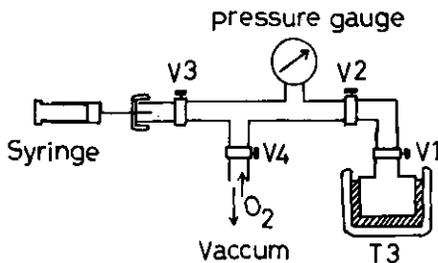
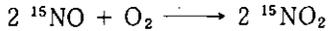


図1-B $^{15}\text{NO}_2$ 発生システム

Fig. 1-B $^{15}\text{NO}_2$ evolution system. Vj (j = 1-4): Valve, T3: Dry ice and trichlene.

ットし、バルブ V_4 を通じて酸素を導入する。これにより次の反応がおこる。



生成された $^{15}\text{NO}_2$ はトラップ T_3 により、ポンペに捕集し、過剰の酸素は、真空ポンプで除く。トラップ T_3 をとり去ると $^{15}\text{NO}_2$ ガスがシステム内に気化する。

(2) 植物への $^{15}\text{NO}_2$ の暴露

図1-Cに示した透明なプラスチック製チェンバー (50×50×140 cm) に植物を入れ、 $^{15}\text{NO}_2$ をガスシリンジで導入する。チェンバー内の NO_2 濃度は、 NO_2 -Analyzerでモニターされる。本実験では、明条件下30℃でヒマワリ、トウモロコシ、ハウレンソウについて、0.5～1.0 ppmの $^{15}\text{NO}_2$ ガスを1.5時間暴露した。

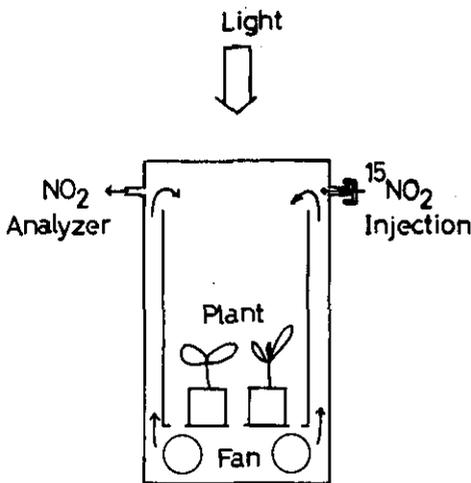


図1-C $^{15}\text{NO}_2$ 暴露の装置

Fig. 1-C A schematic diagram showing $^{15}\text{NO}_2$ fumigation experiment.

(3) 植物中の重窒素 (^{15}N) の検出

$^{15}\text{NO}_2$ 暴露終了後、上位葉を採取し、新鮮重を測り、ただちに100℃で4時間、乾燥した。乾燥重量を測り、乳鉢で粉碎した。全窒素量はケルダール法、 ^{15}N 濃度は、米山、熊沢による発光分光分析法(7)で測定した。

実験2. NO_2 被暴露植物の葉内亜硝酸含量、亜硝酸還元酵素活性の測定

(1) その1; 自然光型ガス暴露チェンバー (コイトロンS-200特殊型, 気温25℃, 湿度70% RH) に、インゲンマメ、トウモロコシ、ヒマワリ、ハウレンソウを設置し、曇天下で1および4 ppmの NO_2 に暴露し、3時間後に葉身を採取し、葉中の亜硝酸濃度を以下の方法で測定した。採取した葉をすばやく水洗した後、新鮮重約1gに冷却した0.1モルのリン酸バッファー10mlを加え、乳鉢中で粉碎した。試料液を遠心分離 (12,000 rpm × 20分) し、上澄液についてGrissの方法で、亜硝酸濃度を測定した。

(2) その2; ヒマワリ、トウモロコシ、ハウレンソウを上述の自然光型ガス暴露チェンバーにセットし、曇天下で4 ppmの NO_2 に暴露し、0, 0.5, 1, 2, 4時間後の亜硝酸含量、お

よび亜硝酸還元酵素 (NiR) 活性を測定した。植物葉中の亜硝酸含有量および亜硝酸還元酵素活性は次の方法により測定された。

亜硝酸還元酵素の粗酵素液の調製：

よく揃った葉を充分水洗し、付着している水をペーパータオルで取り去った後、葉の生重約 1 g に対して 3 倍容の 1 mM EDTA と 1 mM のシステインを含む 0.1 M リン酸緩衝液 (pH 7.5) を加え、乳鉢と乳棒を用い磨砕した。ホモジネートは洋服裏地 (シルクオーガンジ) を用いろ過した。ろ液を 18,000 g で 20 分間遠心し、上澄部をそのまま NiR の粗酵素液とした。抽出の操作はすべて 4°C 以下で行なった。材料の点数が多い場合は、秤量した葉をアルミホイルにくるみ -20°C の冷凍庫で保存した後、抽出操作を行なった。

亜硝酸還元酵素活性の測定：

NiR 活性の測定には、井田らの $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ -メチルピオロゲン法を若干修正して用いた。反応液の組成は以下のとおりである。

0.1 M	トリシン-KOH 緩衝液 (pH 7.5)	1.0 ml
0.005 M	NaNO_2	0.2 ml
0.02 M	メチルピオロゲン	0.1 ml
0.12 M	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ (0.2 M NaHCO_3 中に)	0.2 ml
	酵素液	0.1 ml
	水	0.4 ml
		2.0 ml

水冷した反応混合液に酵素液を入れ、最終容量が 2.0 ml になるように $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ を入れ軽く混合した後、直ちに 30°C の水浴中で 15 分間静置させた。反応終了後急冷し、サーモミキサーを用いて還元型メチルピオロゲンの青色が消失するまで激しく振とうして反応を停止させ、さらにメチルピオロゲンの酸化を確実にするため、20 秒間振とうを続けた。反応液から 0.1 ml をとり出し、1.5 N HCl に溶かした 1% (W/V) スルファニルアミド溶液を 1 ml 加え、よく混合した後、0.02% (W/V) N-(1 ナフチル) エチレンジアミンジヒドロクロリド液 1 ml を加えた。水で 5 ml にし 20 分以上放置した後、比色法 (540 nm) で NO_2^- を定量した。

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ による非酵素的 NO_2^- の消失および粗酵素液中の NO_2^- の影響を排除するため酵素を、沸騰水中で 2 分間煮沸し、酵素活性を停止させたコントロールを必ず各々に設け、コントロールの値と酵素存在下での値の差を酵素による NO_2^- の還元とみなした。

亜硝酸還元酵素活性は、植物 1 g 新鮮重、1 時間当りの NO_2^- 還元量で表示した。

植物中の NO_2^- 含量の定量：

一定量の粗酵素抽出液をとり、NiR 活性の測定の項で示した定量法で NO_2^- 含量を測定した。 NO_2^- 含量は植物 1 g 新鮮重当りの μ モル数で表示した。

(3) その3；特に晴天をえらび、前述の暴露チェンバーを用いてヒマワリについて、NO₂暴露（4 ppm）下での葉内亜硝酸含量、および亜硝酸還元酵素活性の経時変化を追跡した。

結 果

実験1：明条件下で0.5～1.0 ppmの¹⁵NO₂に1.5時間暴露された時、植物体内にとり込まれた、¹⁵NO₂由来の¹⁵Nの量を計算し、表1に示した。これによれば、ホウレンソウが、もっともNO₂の吸収能が高く、ヒマワリがそれにつき、トウモロコシはごくわずかしき吸収していなかった。

表1 ホウレンソウ、ヒマワリ、トウモロコシ葉による¹⁵NO₂-Nの吸収
Table 1 ¹⁵NO₂-N uptake by spinach, sunflower and corn leaves.

Plant	Nitrogen content mg N/g fresh weight	¹⁵ N content*	
		atom % excess ¹⁵ N	μg excess ¹⁵ N/g fresh weight
Spinach	5.12	0.138	7.0
Sunflower	6.98	0.068	4.7
Corn	4.65	0.022	1.0

* Plants were fumigated with ¹⁵N-labelled NO₂ at 0.5-1.0 ppm for 1.5 hrs in the light. Here the numbers were obtained assuming that ¹⁵N of 100 atom % excess was employed.

実験2：曇天の自然光下で0, 1, 4 ppmのNO₂濃度で3時間暴露された場合の植物中の亜硝酸含量について、表2に示した。これによれば、トウモロコシ、ホウレンソウでは、NO₂暴露によって葉で亜硝酸を検出できなかったが、インゲンマメ、ヒマワリでは、あきらかにNO₂暴露により葉に亜硝酸の蓄積が認められた。特に展開を終了したインゲンマメの葉では、4 ppmの処理終了時に葉にしおれがみられ、そこでは高濃度の亜硝酸が蓄積されていた。

曇天の日にヒマワリ、トウモロコシ、ホウレンソウについて4 ppm NO₂に暴露した場合の葉中の亜硝酸含量および、亜硝酸還元酵素活性の経時変化を図2-Aおよび図2-Bに示した。ヒマワリ葉で、NO₂暴露開始30分後、すでに高濃度の亜硝酸の蓄積をみとめた。2時間後をピークとして、低下した。しかし、トウモロコシ、ホウレンソウの葉では、2時間後および4時間後にわずかに認められた程度で、ほとんど蓄積されなかった。図2-Bに示された亜硝酸還元酵素活性の測定値をみると、新鮮重あたりホウレンソウが最も強く、トウモロコシでは暴露時間の経過に従って、活性の増加を認めたが、ホウレンソウ、ヒマワリでは、この処理時間の範囲では、増加を認めなかった。

晴天下で4 ppmのNO₂に暴露されたヒマワリの葉中における亜硝酸含量と、亜硝酸還元酵素活性の経時変化を図3-Aおよび図3-Bに示した。これによれば、亜硝酸はNO₂暴露後ただちに蓄積がみられ、その含量は1時間後にピークに達し、その後の減少は少ない。一方、亜硝酸還元酵素活性は、NO₂暴露開始後から2時間位して増加をはじめ、少なくとも5時間後までは増加した。

表2 NO₂で日中3時間処理された植物の葉中亜硝酸濃度

Table 2 Concentration of nitrite in the plant leaves fumigated with NO₂ for 3 hours in the daytime.

Plant	NO ₂ treatment	Nitrite		Visible damage in leaves*
			μmoles/g fresh weight	
Kidney bean	non treatment		0	—
	1 ppm		0	—
	4 ppm	matured leaves	3.4	wilted
		young leaves	0.10	—
Corn	non treatment		0	—
	1 ppm		0	—
	4 ppm		0	—
Sunflower	non treatment		0	—
	1 ppm		0.018	—
Spinach (fed with fertilizer)	non treatment		0	—
	1 ppm		0	—
	4 ppm		0	—

* —: not observed

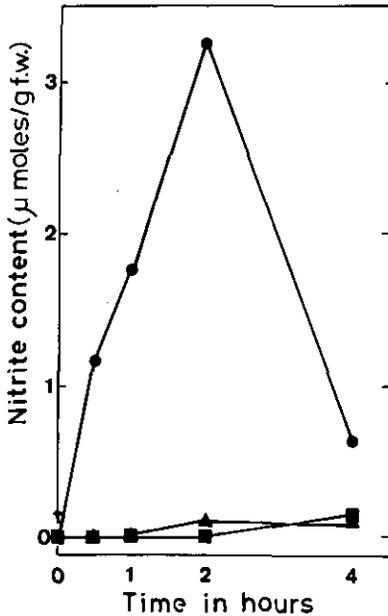


図2-A 曇天の日4時間のNO₂で処理されたヒマワリ、トウモロコシ、ホウレンソウの葉中の亜硝酸濃度の変化

Fig. 2-A Changes in nitrite concentration in the leaves of sunflower (●), corn (▲) and spinach (■) fumigated with NO₂ at 4 ppm on a cloudy day.

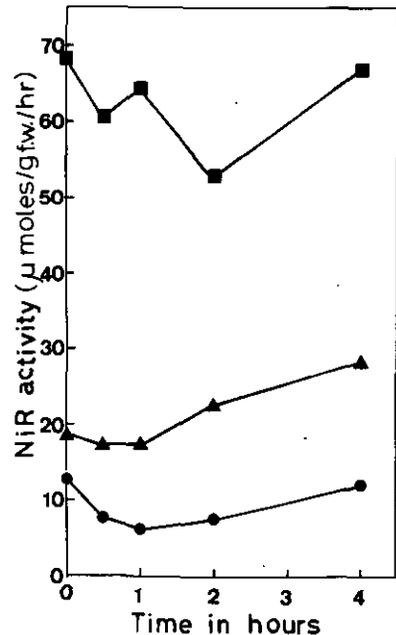


図2-B 図2-Aの植物葉中の亜硝酸還元酵素活性の変化

Fig. 2-b Changes in nitrite reductase activity in the same plants shown in Fig. 2-A.

考 察

同位体 ^{15}N を使った $^{15}\text{NO}_2$ 吸収実験 (表1 参照) では、短時間で植物体中に ^{15}N を認め、この方法が NO_2 吸収をテストするのに有効であることを示した。ここで使われたホウレンソウ、ヒマワリ、トウモロコシのうち、ホウレンソウの NO_2 吸収能が最も高かったが、これは前報(4)の長期 NO_2 暴露実験の結果と一致する。

一方、 NO_2 被暴植物葉中の亜硝酸含量の変化をみてもみると、ホウレンソウ、トウモロコシでは、ほとんどみとめず、ヒマワリ、インゲンマメで多量の蓄積をみとめた (表2, 図2-A)。多量の亜硝酸の蓄積は、可視害をともなった (表2のインゲンマメ)。これらの植物体中の亜硝酸還元酵素活性を測定したところ、ホウレンソウのそれが最も高く、ヒマワリが低かった。ヒマワリでの高濃度の亜硝酸の蓄積は、低い亜硝酸還元酵素活性と関係があるようである。この酵素活性は、より強い光条件下では、図3-Bにみるように、その増大を認めた。本実験ではホウレンソウの生育には、わずかの施肥がなされており、他の植物は種子の栄養のみのもので生育させられた。生育時の施肥の影響については、今後の検討を要する。

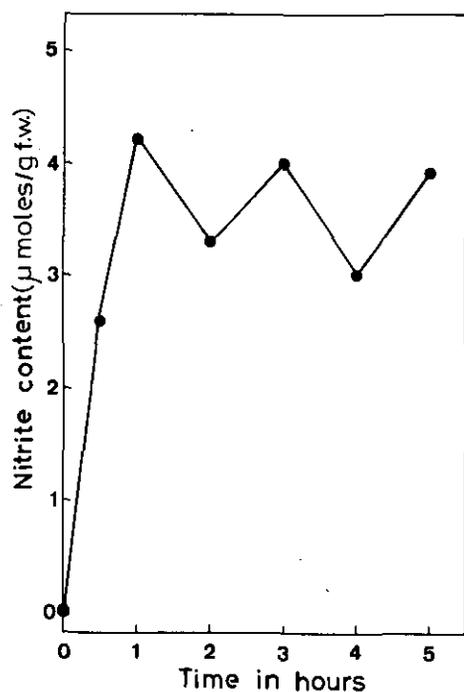


図3-A 晴天の日4 ppmの NO_2 で処理されたヒマワリの葉中の亜硝酸濃度の変化

Fig. 3-A Changes in nitrite concentration in the sunflower leaves fumigated with NO_2 at 4 ppm on a fine day.

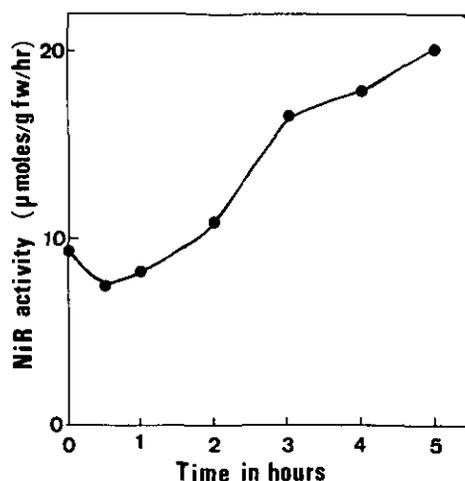


図3-B 図3-Aの植物葉中の亜硝酸還元酵素活性の変化

Fig. 3-B Changes in nitrite reductase activity in the same plant shown in Fig. 3-A.

以上の結果から、次のように結論できよう。すなわち、ハウレンソウのように、NO₂吸収能が高いものであっても、亜硝酸還元酵素活性が強ければ、亜硝酸の蓄積をみとめない。しかし、ヒマワリのように亜硝酸還元酵素活性の弱いものでは、葉に亜硝酸が蓄積し、可視害をおこしやすい。一方、トウモロコシのようにNO₂の吸収が少ないため、体内に亜硝酸を蓄積しないものもある。NO₂に対する感受性は、NO₂吸収能の高さと、亜硝酸除去機能の強さによっており、前者が低いか、後者の強い植物種が、抵抗性のあるものといえるかも知れない。

謝 辞

供試植物の栽培に関し、藤沼康実氏（国立公害研究所技術部）、亜硝酸の定量に関して石塚茂樹氏（日本大学農獣医学部）、NO₂発生装置の組立について、村岡研一氏（光興業株式会社）の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

引 用 文 献

1. 加藤俊博・橋 昌司・位田藤久太郎. 1974. 被覆下における有害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
2. 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吸収について 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 昭和51/52年度研究報告. 国立公害研究所特別研究成果報告R-2. pp.67-76
3. 戸塚 績・佐藤秋生・米山忠克・牛島忠広. 1978. 高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(2). ヒマワリとインゲンマメの乾物生長におよぼすNO₂暴露の影響 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. 国立公害研究所特別研究成果報告R-2. pp.77-88
4. 戸塚 績・米山忠克・名取俊樹・藤沼康実. 1978. 高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(3). NO₂暴露に対する草本植物の感受性および植物体窒素濃度変化の種間差異 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. 国立公害研究所特別研究成果報告R-2. pp.89-94
5. Wellburn, A. R., T. M. Capron, H. S. Chan and D. C. Horsman, 1976. Biochemical effects of atmospheric pollutants on plants. In Effects of air pollutants on plants (ed. T. A. Mansfield). Cambridge University Press.
6. 米山忠克・戸塚 績・石塚茂樹・藤沼康実・矢崎仁也. 1978. 高等植物の生長におよぼす二酸化窒素の影響(4). 数種木本植物の生長および植物体窒素濃度におよぼすNO₂暴露の影響 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. 国立公害研究所特別研究成果報告R-2. pp.95-102
7. 米山忠克・熊沢喜久雄. 1974. 発光分析法による乾燥植物体中の重窒素の簡易測定法について. 土肥誌. 45:480-482
8. Zeevaart, N. J. 1974. Induction of nitrate reductase by NO₂. Acta Bot. Neerl. 23:345-346

Response of plants to atmospheric NO₂ fumigation (5)
**Measurements of ¹⁵NO₂ uptake, nitrite accumulation and
nitrite reductase activity in herbaceous plants**

Tadakatsu YONEYAMA¹, Hideo SASAGAWA²,
Tsumugu TOTSUKA¹ and Yukio YAMAMOTO²

Summary

¹⁵N tracer method was found to be very sensitive in the detection of NO₂ uptake in plant leaves. The leaves of spinach seedlings showed higher activity of ¹⁵NO₂ uptake than the leaves of sunflower and corn.

A high concentration of nitrite ions was detected in the leaves of kidney bean and sunflower when fumigated with NO₂ at 4 ppm for 3 hours, but not in the leaves of spinach and corn. The nitrite reductase activity in the leaves of spinach was higher than in corn and sunflower. Light irradiation seems to stimulate the nitrite reductase activity in sunflower leaves fumigated with NO₂ at 4 ppm.

These results indicate a possibility that low activity of NO₂ uptake and/or high activity of nitrite reductase will reduce the accumulation of nitrite and protect from NO₂ damage in plant.

-
1. Division of Environmental Biology, the National Institute for Environmental Studies, Ibaraki 300-21
 2. Department of Agricultural Chemistry, University of Nagoya, Nagoya 464

IV-1

二酸化イオウ暴露によるインゲンマメ被害葉の光合成速度の変化についての予備実験

白鳥孝治¹・森川昌記¹・高崎 強¹・戸塚 績²

要 旨

二酸化イオウ (SO₂) 暴露により発現した植物の可視障害の程度と光合成機能の低下との関係を検討した。播種後20日程度のインゲンマメ (品種：江戸川) に2 ppmのSO₂で暴露処理し、可視障害を発現させた。初生葉の可視障害の程度を画像解析装置を用いて、障害部面積率として求めた。また同一葉の光合成機能の低下の割合を、暴露前後の光合成速度の比較より光合成変化率として求め、両者を比較検討した。光合成機能は可視障害部面積率の増加とともに低下した。両者の関係は直線的でなく、大きく3段階に分けられた。第1段階は、障害部面積率が0～数%の区間で、光合成機能は急激に低下した。第2段階は、障害部面積率が数%～70%の範囲で、光合成機能はほぼ直線的にゆるやかに低下した。第3段階は、障害部面積率70%以上で、光合成機能は再び急激に低下し、終にはまったくその機能を停止した。

緒 言

高濃度の二酸化イオウ (SO₂) に暴露された植物が急性障害をおこし、葉面にクロロシスやネクロシスなどの可視障害の発現することがよく知られている。しかし、SO₂による可視障害の発現状態と、その後の植物生長の変化についてはほとんど研究されていない。本研究では、植物の物質生産を支配する葉の光合成能力が、SO₂暴露による葉面のネクロシス発現によってどのように変化するかを、インゲンマメを用いて検討した。

材料および方法

インゲンマメ (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Edogawa) を1万分の1アールのプラスチック製ポットに、ピートモス、パーミキユライト、パーライト、小砂利を2:2:1:1 (容量比) に混合した人工土壌をつめ、マグアンプK (N:P₂O₅:K₂O=6:40:5, W. R. Grace Co., Tennessee, U. S. A.) を5g/鉢と苦土石灰15g/鉢を施肥した。この鉢に数粒宛、播種した。発芽後、1鉢1個体仕立てとした。この鉢植えの実験植物を、自然光利用の環境制御温室内で、日中25±0.1℃、夜間20±0.1℃、湿度75±5%のもとで20日間育成した。鉢には、1/1000倍液の Hyponex (N:P₂O₅ (可溶性):K₂O (水溶性) = 6.5:6:19) 液に微量要素を添加して、1鉢あたり毎週100～200 ml与えた。

1. 千葉県農業試験場 公害研究室

2. 国立公害研究所 生物環境部

光合成速度および可視障害部面積の測定に、最大光合成速度を維持している期間の比較的長い初生葉を用いた。供試植物の初生葉の光合成速度をSO₂暴露の前日に、図1に示した装置を用いて、気温25℃、照度38 Kluxのもとで測定した。その植物を翌日、SO₂暴露し、葉面の可視障害の進行が停止したとおもわれる暴露処理3日後に、再び光合成速度を測定した。

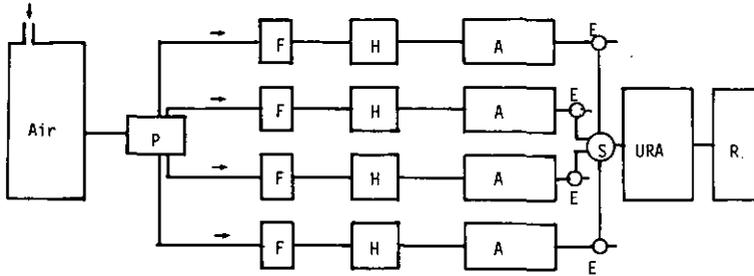


図1 光合成測定装置の構成図

Fig. 1 Schematic diagram of photosynthesis measurement.
 p; air pump, F; flow meter, H; humidifier.
 A; assimilation chamber, E; solenoid valve
 S; gas circuit switch, URA; CO₂ gas analyzer
 R; recorder

被験植物のSO₂暴露処理は、暴露キャビネット(本報告書V-3参照)を用い、気温25℃、湿度75%、照度30~35 Kluxのもとで、2.0 ppm SO₂で行なった。暴露時間は、可視障害の発現状態を変化させるために、実験1では、60、75、90分間の3段階に変えて、各4個体を暴露し、実験2では、85、100、115分間の3段階に変えて、各3個体を暴露した。被験植物は、暴露処理終了後、ただちに前述の自然光型制御温室に移し、3日間育成した。葉面積は、可視障害発現による葉身の変形および葉面積の減少を考慮して、暴露処理前後の光合成測定時の2回おこなった。

暴露処理された初生葉の光合成測定後、ストロボを使用してネガカラーフィルムに写真撮影した。このカラープリントをもとに、画像解析装置(Luzex 450型、日本レギュレーター社製)により、処理葉の全葉面積および可視障害部面積を測定し、全葉面積に対する可視障害部面積の比率(障害部面積率)を算出した。なお、以上の実験は昭和52年2月14日~19日の間に行なった。

結果および考察

1. 可視障害の発生経過

SO₂暴露による可視障害の発現経過は以下のとおりであった。暴露開始後約40分ほどで、第2本葉(最上位完全展開葉)に油浸状斑点が発現し、約50分後には第1本葉にも発現した。暴露開始後約60分には、初生葉の一部にも油浸状斑点が発現し、90分後には、この症状が初生葉のほぼ全面に拡大された。

暴露終了後、自然光型制御温室に移し、可視障害の進行をまった。暴露後の可視障害の進行状況は、実験1と実験2で顕著な差異が認められた。すなわち、実験1では、暴露中に発現した油浸状斑点部は、しだいに健全部分との区別がつきにくくなり、その一部が脱水状態となり、翌日には白色不定形の斑点となった。これに対し、実験2では、暴露中に発現した油浸斑点部分の面積は次第

に拡大し、著しいものは葉脈部を除き全面におよんだ。暴露終了後40分位経過すると、油浸状斑点部分は、次第に脱水状態となり、3時間後には白色化しはじめ、翌日には完全に漂白化した。

以上のごとく、暴露後の可視障害の進行状況に差が認められたため、実験1と2で、暴露時間はほぼ同じでも、障害部面積率に大きな差が生じた。すなわち、表1に示したとおり、実験1では全

表1 SO₂暴露条件の差異とインゲンマメ初生葉における障害部面積率(面積あたり%)の個体差
 実験1: 2.0 ppm SO₂で60, 75, 90分間暴露
 4個体(A, B, C, D)の比較
 実験2: 2.0 ppm SO₂で85, 100, 115分間暴露
 3個体(A, B, C)の比較

Table 1 Visible leaf injury in primary leaves of kidney bean plants fumigated with SO₂ at 2.0 ppm in different fumigation times. Leaf injury (%) in the relative area to the whole leaf area. Numbers of tested plants were 4 in Exp. 1 and 3 in Exp. 2.

Fumigation time (min.)	Exp. 1					Exp. 2				
	A	B	C	D	Mean	Fumigation time (min.)	A	B	C	Mean
60	0	0	0	0	0	85	3	34	69	35
75	0	0	0	0	0	100	89	100	100	96
90	0	10	11	23	11	115	97	100	100	99

般的に可視障害の発現が軽微で、60分、75分暴露区では可視障害が発現せず、90分暴露区で0~20%程度の障害部面積率を示したにとどまった。これに反し、実験2では、可視障害度が実験1に比較して、全般に著しく、85分暴露区でも20~70%の障害部面積率を示し、100分、115分区では、90~100%に達した。

このように、実験1と2で、暴露条件が同じであるにもかかわらず、可視障害発現程度に著しい差が認められた。これは、二酸化イオウ暴露終了後に自然光型制御温室に放置した際の日射条件が異ったためとおもわれる。すなわち、実験1では、1日中降雪が続き、温室内照度がかなり低く経過した。これに対して、実験2では、放置期間中快晴が続き、日射が強かった。山添・真弓(6)は、SO₂による可視障害の発現は、暴露後に受けた日射の強さに左右され、日射が強いほど、可視障害の発現が顕著になることを報告している。本実験の結果もこれをうらずけている。

2. 障害部面積率と光合成阻害率との関係

暴露処理による光合成機能の低下の割合を表示する方法として、暴露前後の光合成速度の変化を、光合成変化率P(%)として表わし、次式により算出した。

$$P = \frac{P_i}{P_o} \times \frac{P_a}{P_b} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

ただし、P_oおよびP_iは、それぞれ暴露区の暴露処理前と処理後の初生葉一枚あたりのみかけの光合成速度(mg CO₂/leaf/hr)、P_aおよびP_bは、P_oおよびP_iの測定時に対照区において測定

されたみかけの光合成速度を示す。対照区の光合成速度が暴露前と暴露後の5日間で約10%低下した。これは葉の老化にともなうものと考えられるので、(1)式においてこれを補正するためにPa/Pb項を考慮した。また、光合成速度を初生葉一枚あたりで表わした理由は、可視障害発現の著しい葉では、葉が変形するなどして葉面積が減少することがあり、このために単位葉面積あたりで表示された光合成速度が計算上で高くなるためである。なお、暴露処理直前の光合成速度(Po)は21~37mg CO₂/dm²葉面/hrであった。

本実験において、葉の暗呼吸は測定しなかった。谷山・有門ら(3, 4)や門田(1)によれば、SO₂により可視障害の発現した植物では、暴露後に呼吸活性の促進が認められている。またTodd(5)やMacdowall(2)によれば、オゾンにより可視障害の発現した植物でも呼吸機能の促進が認められるが、暴露処理後の時間経過とともに減少し、1日以内に対照区の値まで低下している。本実験では、可視障害発現の安定したとおもわれる3日後に光合成速度を測定しており、この時点では、呼吸速度は正常に回復しているものと考えられる。

図2に障害部面積率と光合成変化率との関係を示した。光合成機能は、障害部面積率が増加する

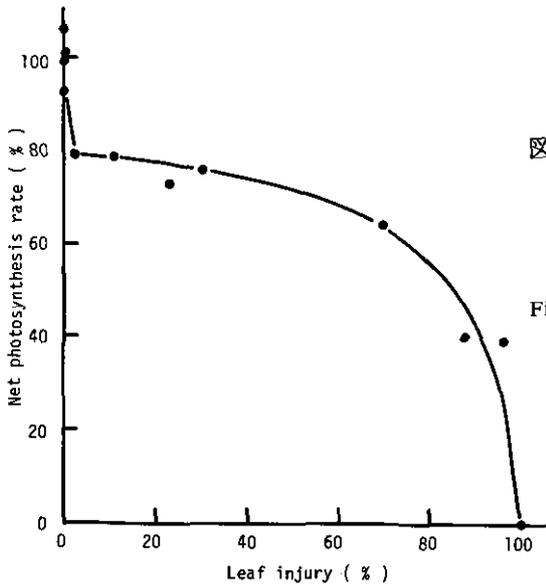


図2 インゲンマメ初生葉における障害部面積率とみかけの光合成速度との関係 縦軸は処理前の値に対する百分率を示す。光合成測定条件：38 klux, 25°C

Fig. 2 Relationship between relative leaf area of visible damage and net photosynthesis rate in primary leaves of kidney bean plants fumigated with SO₂. Photosynthesis measurements at 38 klux and 25°C.

にしたがい低下した。しかし、その低下の過程は直線的でなく、大きく3つの段階に区分されうる。第1段階は障害部面積率が0~数%の範囲で、障害部面積率が低いにもかかわらず、光合成機能は対照区の80%にまで低下した。第2段階は、障害部面積率が数%~約70%の範囲で、光合成機能はほぼ直線的にゆるやかに低下し、障害部面積率70%で光合成速度は60%を示した。第3段階は、障害部面積率が70%以上で、光合成速度は再び急激に低下し、ついには全くその機能を停止した。このような変化が、オゾン(O₃)の場合にも報告されている。すなわち、Todd(5)はインゲンマメ(品種：ピントビーン)の葉で、O₃暴露により発現した葉面の可視被害度(全葉面積に対するネクロ

シス被害部面積の割合)が15~60%のとき光合成速度は20%減、75~100%の可視被害度で77%減という結果を報告している。

以上のごとく、光合成機能は障害部面積率が増加するにしたがい、大きく3つの段階をへて低下した。特に障害部面積率が数%~70%の範囲で光合成速度の減少が顕著でなかった理由として、肉眼では同一にみえる可視障害であっても、障害を与えている度合が異なっていることが考えられる。あるいは、若干の可視障害の発現が光合成活性を支配し、それ以上の障害の進行は光合成に関与しないのかも知れない。この点の解明には、葉肉細胞内における諸変化を生理生化学的に追及する必要があるであろう。

引用文献

1. 門田正也. 1968. 大気汚染物質による植物の生理障害1). SO_2 がアカマツ葉の蒸散, 呼吸に及ぼす生理障害の様相について. 大気汚染研究 2: 219-223
2. Macdowall, F.D.H. 1965. Stages of ozone damage to respiration of tomato leaves. *Can. J. Bot.* 43: 419-427
3. Taniyama, T. and H. Arikado. 1969. Studies on the mechanism of injurious effects of toxic gases on crop plants (4). *Proc. Crop Sci. Soc. Jap.* 38: 593-597
4. Taniyama, T., H. Arikado, Y., Iwata and K. Sawanaka. 1972. Studies on the mechanism of injurious effects of toxic gases on crop plants (10). *Proc. Crop Sci. Soc. Jap.* 41: 120-125
5. Todd, G.W. 1958. Effect of ozone and ozonated 1-hexene on respiration and photosynthesis of leaves. *Plant Physiol.* 33: 416-420
6. 山添文雄・真弓洋一. 1975. 大気汚染複合汚染防止に関する研究(第2報). 農技研肥料化学科資料第180号. pp. 1~24

Preliminary investigation in net photosynthesis rate of kidney bean leaves injured by SO₂ fumigation

Koji SHIRATORI¹, Masaki MORIKAWA¹, Tsuyoshi TAKASAKI¹,
and Tsumugu TOTSUKA²

Summary

Effects of visible injury of leaves on net photosynthetic rate of kidney bean plants fumigated with SO₂ were examined. Twenty-day-old kidney bean plants were fumigated with SO₂ at 2.0 ppm with different fumigation times. The relative areas of visible damage of the primary leaf were measured by densitometric analysis of the coloured photography. The net photosynthesis rate was measured before and after the fumigation treatment to obtain the relative value of the rate. The net photosynthesis was decreased with three distinct steps: The rapid decrease was firstly seen with the increase of leaf injury up to few percentages. The second step indicated gradual decrease of the net photosynthesis rate in the range of few percentages to 70% in the leaf injury. The last step showed the rapid decrease from 60% to zero in the range above 70% in the leaf injury.

-
1. The Chiba-Ken Agricultural Experiment Station, Chiba 280-02
 2. Division of Environmental Biology, the National Institute for Environmental Studies, Ibaraki 300-21

IV-2

二酸化イオウ暴露によるヒマワリ葉の可視害徴発現についての観察

戸塚 績¹・荒川市郎²・野本宣夫³・田崎忠良⁴

要 旨

1. 播種後47日のヒマワリに、1.0 ppm SO₂、27時間暴露および2.0 ppm SO₂、9時間暴露し、壮葉における可視害発現の経時変化を観察した。その結果を写真I、IIに示した。
2. 播種後5週間目のヒマワリに2.0 ppm SO₂で1～4.5時間暴露処理し、葉身の可視被害部の葉面構造の変化を走査型電子顕微鏡で写真撮影した結果を写真III、IVに示した。
3. 生育日数を異にするヒマワリに1.0 ppmと2.0 ppmのSO₂をそれぞれ12時間と6時間暴露処理し、個体のエージ別、葉位別に可視害徴の発現状態を測定した。同一葉位でも、エージの若い個体ほど可視被害の発現状態が顕著であった。また、同一のSO₂ドースでも、SO₂濃度の高いほど、全葉位にわたって可視被害率が增大していた。

緒 言

高濃度の二酸化イオウ(SO₂)に暴露された植物では、急性障害をうけることがよく知られている。その症状は植物の種類によって若干異なり、一年生草本植物、特に広葉型の農作物の葉では、障害をうけた部分に光沢が現われて後、水浸状斑点となり、さらにその部分が白色や褐色に変化する。

しかし、葉面において可視障害の発現状態が、植物の生育した環境条件や植物のエージングによって変化しうるが、これに関して、因果関係を追求した報告はほとんどない。

本試験では、ヒマワリ(*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth)を用いて、SO₂暴露時の葉面における可視障害の発現状態の経時変化や、走査電子顕微鏡により葉面構造の変化を観察した。さらに、可視障害発現の程度が同一個体で葉位別にどのように変化するかを判定した。

試験1. 葉面における可視障害発現の経時変化

1.0 ppmと2.0 ppmのSO₂に暴露されたヒマワリの葉において、可視障害の発現状態の経時変化を観察した。本報告書Ⅲ-8の実験1と同じ方法で、8月5日播種した鉢植えのヒマワリを播種後47日間、自然光型制御温室(気温:日中25℃、夜間20℃、湿度75%)で育成した。この植物を人工光型

1. 国立公害研究所 生物環境部
2. 茨城大学 農学部
3. 茨城大学 理学部
4. 東京農工大学 農学部

暴露キャビネット(本報告書V-3参照)に設置し、子葉から第5葉位目(対生葉は同一葉位とした)あるいは、茎の先端葉から12枚目の壮葉を写真撮影のために支柱に固定して、気温 25 ± 0.1 °C、湿度 75 ± 5 %、照度 $30 \sim 35$ kluxの連続照射のもとで、 $1.0 \mu\text{SO}_2$ に27時間暴露した。その間、8分間隔でネガカラーフィルムに写真撮影した。さらに、播種36日後(8月19日播種)のヒマワリを用いて、子葉から第5葉位目(先端葉から12枚目)の壮葉を対象として、上記と同一環境条件のもとで $2.0 \mu\text{SO}_2$ で9時間暴露処理し、その間、8分間隔でネガカラーフィルムに写真撮影した。

以上の写真記録の結果を写真I、IIに示した。写真Iの $1.0 \mu\text{SO}_2$ 処理の結果では、暴露開始2時間後から葉面の光沢化がはじまり、8時間後あたりから水浸状斑点が葉の一部分に発現しはじめている。さらに、13時間後にはこの症状が葉身の葉柄基部の周辺に広く現われ、17時間後にはその部分の漂白化がはじまった。それ以後はその部分の漂白化が顕著となった他、障害の発現していない部分は正常な葉色が維持されていた。

一方、写真IIの $2.0 \mu\text{SO}_2$ 処理の結果では、暴露開始1時間半後あたりから、葉の先端部に近い葉身部分に水浸状斑点が現われ、4時間後にはその症状が顕著となった。さらに、5時間後から、葉のしおれがはじまるとともに、障害の斑点が葉の全面に現われるとともに、葉のしおれ現象が顕著となっている。

以上のように、 SO_2 濃度が高濃度になると、植物の障害発現が著しく促進されることが認められた。

試験2. SO_2 暴露による被害葉の走査電子顕微鏡による観察

試験1と同様な方法で、ヒマワリを播種後5週間、自然光型制御温室で育成した。この植物を、試験1で使用した暴露キャビネットに設置して、気温 25 °C、湿度 75 %、照度 $30 \sim 35$ kluxの環境条件のもとで、 $2.0 \mu\text{SO}_2$ を1~4.5時間と、暴露時間を変えて処理した。処理後、自然光型制御温室に1日間放置し、葉の可視症状の発現をまった。被害葉の数部位から検鏡用の試料を採取した。

採取した葉片は、ただちにグルタルアルデヒド 2.5 %を含む $\text{pH } 7.2$ のリン酸緩衝液に浸し、冷却した状態で前固定処理を1時間おこなった。その後、リン酸緩衝液で30分間洗浄し、 1 %オスミウム酸で2時間固定し、その後30分間洗浄し、 50 、 75 、 90 、 99 、 100 %のエチルアルコール液に順次浸漬して、試料の脱水をおこなった。その後、酢酸イソアミル液に試料を移し、液化二酸化炭素による臨界点乾燥法により試料を乾燥させた。その試料を試料台にのせて、蒸着を行なった。蒸着は 5.0×10^{-8} Torr以下でおこない、最初にカーボン蒸着し、さらにその上に金蒸着した。走査電子顕微鏡(SEM)は日立製作所製のHHS-2R型を使用した。

以上の方法によってえられた結果を写真III、IVにまとめた。 SO_2 暴露によって形成された葉の褐変部分をSEMで観察した結果、葉の表面の細胞が収縮して、とがったようになり、明らかに正常な部分とは明瞭な差異が認められた。これは、葉の表裏の両面にみられた。さらに、ネクロシスのなほだしい部分では、孔辺細胞も収縮枯死したようになり、形状も正常な部分とは異っていた。

SO₂による、植物被害のメカニズムは、SO₂が気孔より侵入して、海綿状組織の細胞を破壊し、その上部の柵状組織に影響を与える。これらの部分が乾燥状態になって組織はネクロシスを起こし、さらに2～3日経過後に、被害症状が肉眼ではっきり確認できるほどに、組織の崩壊がおこるといわれている。この試験において、被害をうけた葉のネクロシス部分をSEMで観察した結果、表皮が収縮しているのが確認できた。さらに同じ一枚の葉の中でも、ネクロシスを起こしていない部分では、ガス暴露をしていない葉の表面と同様で、変化は見られなかった。クチクラ層でおおわれている表皮は、SO₂ガスが侵入しても直接影響をうけず、海綿状組織、柵状組織が枯死してネクロシスを起こす時になって、ようやく影響をうけ、乾燥収縮したような状態になるものと考えられる。

さらに、葉令の若い葉と古い葉とでは、感受性が異なるといわれているが、本実験のSEMによる観察結果からは、構造的な差異は発見できなかった。気孔の開きぐあいについては明らかな差は発見できなかったが、関係がまったくないとはいえない。さらに気孔の数や分布については、調査していないが、有意な差はないものと考えられる。したがってこれらの葉令による感受性の差異は、葉肉細胞内での生理的な反応のちがいによっておこるのではないかと思われる。

ヒマワリなどの高等植物では、表面がクチクラ層でおおわれているため、SO₂などのガスは直接侵入できず、気孔からのみ侵入するといわれている。このため気孔の開閉機能は、植物が被害をうけるか、うけないかを支配する。この試験では、気孔は開いているものも閉じているものもあり、感受性の差と直接むすびつけるのはむずかしい。また、気孔周辺に感受性の強弱と関係のありそうな組織は見あたらなかった。したがって、SO₂の植物に対する影響の差は、表皮組織の特性よりも葉肉組織の細胞内の諸機能の差異によるものと考えられる。

試験3. SO₂暴露による可視障害発現度の葉位別変化

生育日数を異にするヒマワリに1.0 ppmと2.0 ppmのSO₂をそれぞれ12時間と6時間暴露（SO₂ドース：12ppm・hrs一定）処理して、各エージ別、葉位別に可視害徴の発現状態を測定した。

播種日を52年8月12日より1週間ずつずらして、試験1と同じ方法で自然光型制御温室で、それぞれ、19日、26日、32日、39日、46日間生育させたヒマワリ植物を4～5個体ごと、試験1に述べた暴露キャビネットに設置し、SO₂濃度を1.0 ppmと2.0 ppmに設定して、それぞれ、12時間と6時間暴露処理した。暴露処理間の環境条件は、気温25±0.1℃、湿度75±5%、30～35 kluxの連続照射であった。暴露処理終了後、ただちに暴露キャビネット中のSO₂ガスを除去し、同一環境条件のもとで、24時間放置した。その後各植物の葉を1個体ごとにサンプリングし、一定の光条件のもとでネガカラーフィルムに写真撮影した。そのカラー印画をもとに画像解析装置（日本レギュレーター社製LUZEX-450型）を用いて全葉面積および障害部面積を求め、各葉位別に障害部面積率を算出した。葉位は茎の先端部に近い葉で長径約2cmの葉を第1葉位として算定した。播種46日後のヒマワリに1.0 ppmと2.0 ppm暴露処理した時の葉位別可視障害の発現状態の差異を写真Vに示した。葉面上で白色～褐色に変色した部分を可視障害部として、その面積を測定した。いずれのSO₂

濃度でも、茎の先端部に近い若い葉では、障害の発現は軽微である。しかし、壮葉～老葉では、害徴発現が顕著なことが認められた。壮葉では、比較的、葉身の基部（葉柄の基部）に近いところで被害が大きく、葉の先端部では軽微となっている。

表1と2に各葉位別の障害発現率の平均値および標準偏差の資料をまとめた。葉面における可視障害の発現状態は、同一葉位でも植物個体間のばらつきがかなり大きかった。また、調査個体数が4または5個体と少なかったこともあって、標準偏差値が大きくなっている。2.0 ppm SO₂暴露処理の影響を個体のエージ別に比較した結果を図1に示した。生育日数の短い個体では、若い葉でも障害発現率が高くなっている。このような個体のエージおよび葉位による差異をもたらす要因の解明は今後の課題である。図2に生育日数46日目の個体について、暴露処理時のSO₂濃度の差による変化を示した。同一SO₂ドースでも、SO₂濃度の高い方が、障害発現率が全般的に高くなっている。可視害発現には、SO₂濃度の大小あるいは、単位時間あたりに葉肉細胞内に吸収されるSO₂量の大小と関係があるように思われる。

終りにあたり、走査型電子顕微鏡の操作について、生物環境部水生生物生態研究室の畠山成久博士に御指導いただいた。また、葉面の可視被害率の測定に、東京農工大学の佐藤秋生君に御協力いただいた。ここに深く感謝の意を表します。

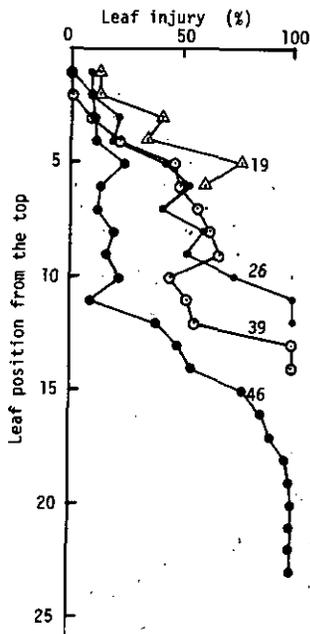


図1 SO₂暴露によるヒマワリ葉の可視障害発現度（各葉位別、面積あたり％）の変化。2.0 ppm SO₂、6時間処理。葉位は茎の先端部近くにある長径約2 cmの葉を第1葉位として算定した。図中の数字は播種後の日数を示す。

Fig. 1 Relative leaf area of visible damage in different leaf positions of sunflower plants fumigated with 2.0 ppm SO₂ for 6 hours. Numerals in the figure indicate the growing periods in days after sowing.

表1 SO₂暴露によるヒマワリ葉の可視障害発現度（各葉位別面積あたり%）の葉位別変化 1.0 ppm SO₂, 12時間処理 播種後19, 26, 32, 39, 46日間育成した植物を使用
 \bar{x} : 平均値(%), σ : 標準偏差

Table 1 Changes in relative leaf area of visible damage in different leaf positions from the top of sunflower plants with different agings. \bar{X} is mean values (%) of 4-5 plants and σ , standard deviation. Exposure to 1.0 ppm SO₂ for 12 hours.

Days after sowing	19		26		32		39		46	
	\bar{X}	σ								
Leaf No. 1	0.2	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1.0	2.1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	31.4	36.6	0	0	0	0	0	0	1.0	2.3
4	30.4	33.7	4.5	9.0	0	0	0.5	1.2	1.8	3.9
5	54.5	33.2	3.1	3.3	0	0	0.6	0.9	2.8	5.6
6	54.8	39.5	11.9	17.0	0.2	0.2	2.2	2.2	11.3	25.2
7	48.6	49.2	21.4	18.9	20.6	30.4	4.8	9.7	13.7	22.5
8	44.6	43.8	13.4	8.2	38.4	30.7	15.5	30.8	9.3	15.3
9			50.3	18.5	26.4	9.2	15.2	21.7	5.3	10.5
10			77.9	13.2	61.7	27.8	15.1	17.8	2.0	2.6
11			60.7	19.7			25.6	9.4	7.7	6.0
12							23.2	20.0	0.6	0.4
13							48.3	34.6	5.1	5.2
14							47.2	35.9	18.3	17.7
15							57.1	26.5	6.2	4.1
16									32.0	18.8
17									39.8	18.2
18									48.7	28.9
19									66.9	13.7
20									79.3	7.3
21									91.1	6.2
22									90.6	11.5
23									93.7	6.2
24										

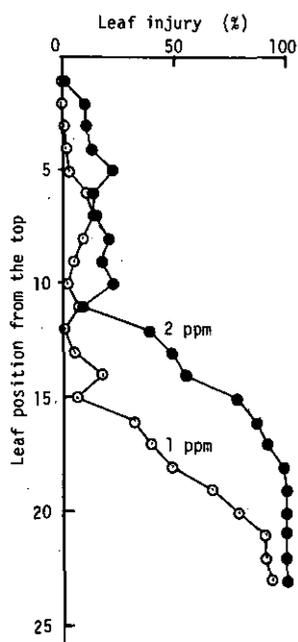


図2 暴露処理の差異による葉位別可視障害発現度（面積あたり%）の変化
 ○印：1.0 ppm SO₂, 12時間処理
 ●印：2.0 ppm SO₂, 6時間処理
 播種後46日間育成した植物を使用

Fig. 2 Difference in appearance of leaf injury in sunflower plants fumigated with 1.0 ppm SO₂ for 12 hours and with 2.0 ppm for 6 hours. Plants grown for 46 days after the sowing.

表2 表1と同じ, ただし2.0 ppm SO₂, 6時間処理の場合

Table 2 The same as in Table 1, but the exposure condition is 2.0 ppm SO₂ for 6 hours.

Days after sowing	19		26		39		46	
Leaf No.	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
1	12.4	12.0	9.9	9.9	0.6	1.1	1.0	2.0
2					0.7	1.2	10.5	12.6
3	40.4	16.0	21.8	13.6	10.0	8.7	10.8	17.9
4	34.3	20.7	19.4	9.2	22.4	17.9	11.9	23.8
5	77.7	16.7	43.8	25.9	47.5	29.7	23.9	41.3
6	60.1	23.7	54.0	32.6	49.7	14.3	14.5	15.2
7			41.9	28.1	56.7	34.4	12.6	12.3
8			61.2	34.3	62.8	27.5	20.2	26.8
9			53.4	37.4	57.7	22.1	17.5	26.1
10			74.6	10.8	45.5	30.7	23.0	38.8
11			100	0	52.9	25.7	9.9	9.2
12			100	0	56.3	23.8	39.3	26.6
13					100	0	48.6	30.7
14					100	0	54.3	30.7
15							77.7	23.0
16							86.3	5.3
17							91.0	5.3
18							98.1	2.3
19							100	0
20							100	0
21							100	0
22							100	0
23							100	0
24							100	0

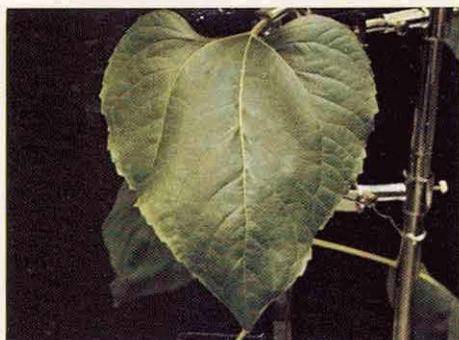
Observations of visible leaf injury in sunflower plant fumigated with SO₂

Tsumugu TOTSUKA¹, Ichiro ARAKAWA², Nobuo NOMOTO³
and Tadayoshi TAZAKI⁴

Summary

1. Sunflower plants grown for 47 days after sowing were fumigated with SO₂ at 1.0 ppm for 27 hours and at 2.0 ppm for 9 hours under controlled conditions of environments, and changes with time of symptoms in visible injury of matured leaves were observed, as shown in Plates I and II.
2. The plants grown for 5 weeks after sowing were fumigated with SO₂ at 2.0 ppm for 1 - 4.5 hours, and changes of morphological patterns at the surfaces of injured portions in the lamina were observed by scanning electron microscope, as shown in Plates III and IV.
3. The plants with different agings were fumigated with SO₂ at 1.0 ppm for 12 hours and at 2.0 ppm for 6 hours, and symptoms of the visible leaf injury were observed in plants with different agings and in different leaf positions. Even in the same leaf position, leaves of the younger plant showed more severe leaf injury than those of the older plant. At the same SO₂ dose of 6.0 ppm·day, the leaf damage in every leaf position was much more severe in plants fumigated with 2.0 ppm SO₂ than those with 1.0 ppm.

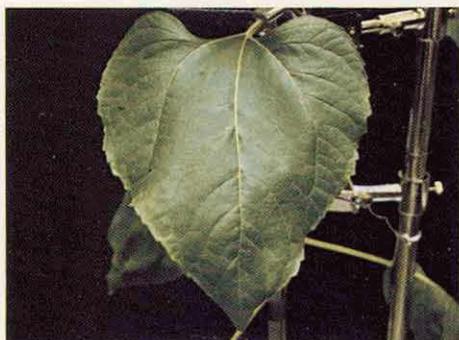
1. Division of Environmental Biology, the National Institute for Environmental Studies, Ibaraki 300-21
2. Faculty of Agriculture, Ibaraki University, Ami, Ibaraki 00-00
3. Faculty of Science, Ibaraki University, Mito 310
4. Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu 183



After 64 min.



426 min.



120 min.



482 min.



330 min.



546 min.

写真 I 1.0 ppm SO₂ 暴露処理によるヒマワリ葉面における可視障害発現状態の経時変化
写真下の数字は暴露開始後の経過時間(分)を示す

Plate I Changes with time of visible leaf injury in sunflower plants fumigated with SO₂ at 1.0 ppm.
Numerals under the pictures show time in minutes after starting the fumigation.



602 min.



783 min.



666 min.



847 min.



727 min.



903 min.

写真I つづき

Plate I Continued . . .



967 min.



1204 min.



1042 min.



1330 min.



1084 min.



1562 min.

写真I つづき

Plate I Continued ...



0 min.



152 min.



96 min.



184 min.



120 min.



216 min.

写真 II 2.0 ppm SO₂ 暴露処理によるヒマワリ葉面における可視障害発現状態の経時変化
左側最上位が暴露開始時（デジタル時計の表示は午後1時30分を示す）

Plate II The same as in Plate I, but in sunflower plants fumigated with SO₂ at 2.0 ppm. Digital timer in the upper most picture at the left side shows the time of starting the fumigation; 1 : 30 pm.



248 min.



336 min.



272 min.



368 min.



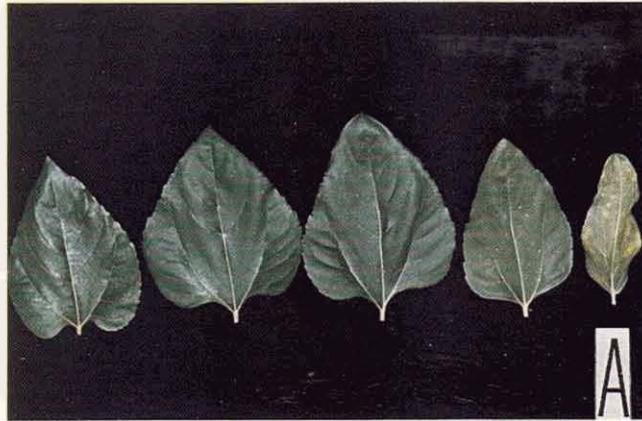
304 min.



456 min.

写真II つづき

Plate II Continued . . .

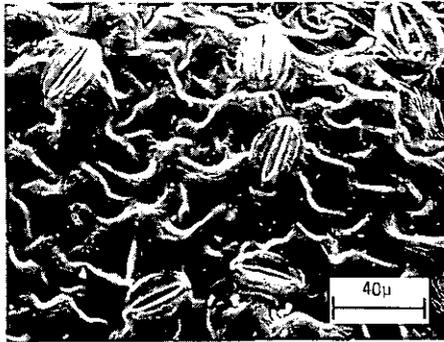


写真Ⅲ 表面構造を走査電子顕微鏡で撮影した播種後5週間目のヒマワリ葉

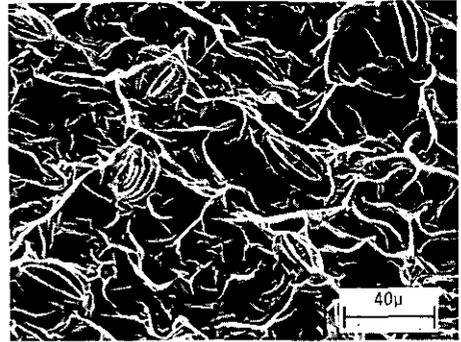
- A 対照用ヒマワリ 葉位（子葉を第1葉位としたときの）：右側から第2，第3，第5，第8，第10葉位
- B 2.0 ppm SO₂ 4.5時間暴露処理したヒマワリ葉の急性障害 葉位はAと同じ

Plate III Sunflower leaves used for examining changes of morphological characteristics of the leaf surface by scanning electron microscopy.

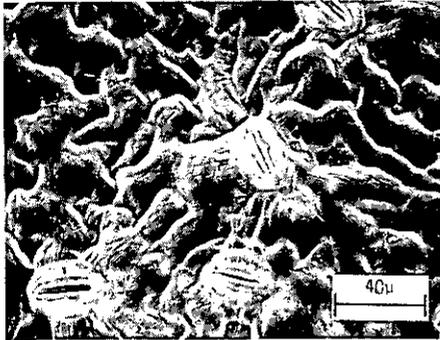
- A Leaves of sunflower plants, 5 weeks after the sowing, used as the control. Leaf number from the cotyledon: 2nd, 3rd, 5th, 8th and 10th leaves from the right side.
- B Acute injury of sunflower leaves fumigated with SO₂ at 2.0 ppm for 4.5 hrs. Leaf number is the same as in A.



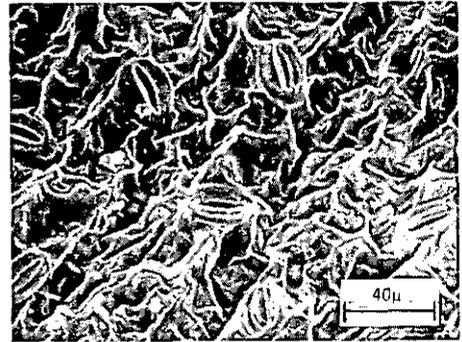
3rd leaf



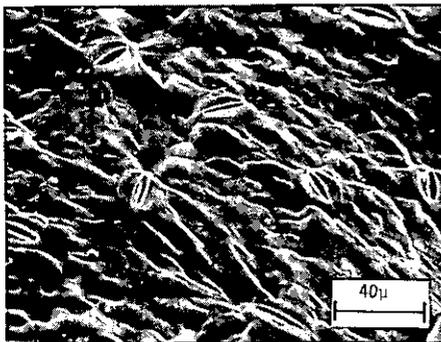
3rd leaf



5th leaf

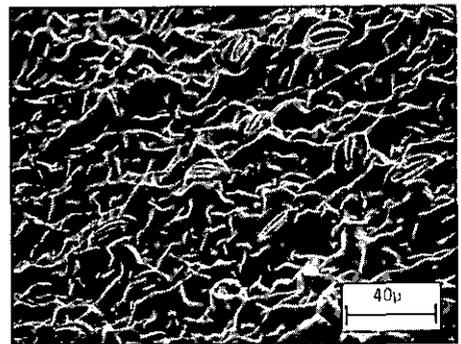


5th leaf



8th leaf

Control leaf



8th leaf

Fumigated leaf

写真IV 写真IIIの対照葉（左側）と被害葉裏面の走査電子顕微鏡写真
2.0 ppm SO₂, 4.5 時間処理

Plate IV View of leaf surface of the control (left) and the fumigated sunflower plants shown in Plate III.
Photographs by scanning electron microscopy. SO₂ fumigation at 2.0 ppm for 4.5 hrs.



1 ppm SO₂ 12 hrs

2 ppm SO₂ 6 hrs

写真V 播種46日後のヒマワリに1.0 ppm SO₂, 12時間暴露(左側)と2.0 ppm SO₂, 6時間暴露処理した時の葉の急性障害 葉位は最上位右端の葉が最も若い葉, 各列の左側の葉ほど古い葉を示す

Plate V Acute injury of 46-day-old sunflower plants fumigated with SO₂ at 1.0 ppm for 12 hrs (left) and at 2.0 ppm for 6 hrs. The youngest leaf is at the right side of the upper most line. Leaves are arranged with the increase of leaf aging from the right to the left in each line.

IV-3

各種植物における葉面光反射スペクトルの測定

篠崎光夫¹・村上仁士²・辰己修三²・菅原 淳³

Measurements of reflectance spectra of leaf in several plants

Mitsuo SHINOZAKI¹, Hitoshi MURAKAMI², Syuzo TATSUMI²
and Kiyoshi SUGAHARA³

緒 言

植物が大気汚染物質に接触すると、葉にさまざまな障害が発現してくるが、この障害発現に伴い、葉面の光反射特性が変化する。この光反射特性の変化の解析から、大気汚染度も評価できるよい方法が得られる可能性がある。また、近年大気汚染による植物影響の広域調査に、赤外航空カラー写真が用いられており、大気汚染物質による赤外域の葉面反射スペクトルの変化の基本的な解析が必要となって来ている。

このような観点から、SO₂暴露による可視域および赤外域での葉面光反射特性の変化の解析を試験的に行なった。

実 験

1) ヒマワリの可視域葉面光反射におよぼすSO₂の影響

温室で栽培した鉢植えのヒマワリを人工光ガス暴露キャビネット（気温25℃、湿度75%）に移し、葉の部分固定して、日本分光製、スペクトロラジオメータ（SSR-1型）で、陽光ランプ（東芝）の葉面反射特性を測定した。

-
1. 神奈川県公害センター 大気科
 2. 筑波大学 農林学系
 3. 国立公害研究所 生物環境部

1. Shonan Branch, Kanagawa Prefectural Environmental Center, Hiratsuka 254
2. Institute of Agriculture and Forestry, the University of Tsukuba, Tsukuba 300-31
3. Division of Environmental Biology, the National Institute for Environmental Studies, Yatabe, Ibaraki 300-21

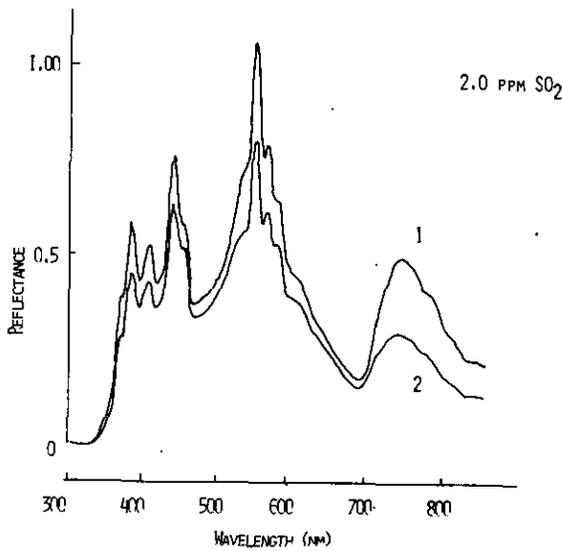


図 1

ヒマワリ正常葉およびSO₂被暴葉における陽光ランプの葉面反射スペクトル

- 1 : 正常葉
- 2 : SO₂被暴葉 (190分, ガス停止後40分)

Fig. 1

Leaf reflectance of light from stanneous halide vapor lamps on the surface of normal and SO₂-fumigated sunflower leaves.

- 1: Normal leaf.
- 2: SO₂-fumigated leaf for 190 min (fumigated for 150 min. and stood for 40 min. after gas off).

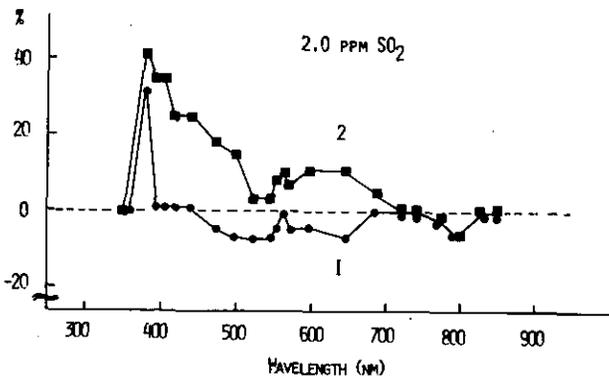


図 2

ヒマワリの葉面光反射の差スペクトル

- 1 : SO₂被暴葉 (30分) - 正常葉
- 2 : SO₂被暴葉 (90分) - 正常葉

Fig. 2

Difference spectra of leaf reflectance of light from stanneous halide vapor lamps on sunflower leaf.

- 1: SO₂-fumigated (30 min) minus normal
- 2: SO₂-fumigated (90 min) minus normal

2.0 ppm SO₂ 暴露による葉面の光反射スペクトルの経時変化を測定し、対照 (0 時間) の場合との差スペクトルを作成した。図 1 は、1 例として、暴露時間 190 分のスペクトルと対照のスペクトルとを示している。暴露により反射が減少しており、両者の差を波長に対してプロットすると、図 3 の 190 分の差スペクトルとなる。この様式で差スペクトルを経時的に求めて表わしたのが図 2 および図 3 である。暴露後 30 分より 380 ~ 400 nm あたりに大きな反射の増加が現われて (図 2)、葉全面に光沢化障害がみられる 2 時間後では、可視光全域にわたって葉面反射の増加が観られた (図 3)。暴露後 2 時間を境として、以後光反射の減少が現われて、光沢化からクロロシスへの進行が起こっていることがわかる。150 分にガスを止め、正常空気中で、ガスキャビネットをバージして更に 40 分放置 (暴露後 190 分) した場合の差スペクトルも測定した。光反射の減少による 120 分後および 190 分後の差スペクトルをみると、前者はクロロフィル、後者はカロチノイドのスペクトルに近似している。このことは、可視障害発現の過程で、クロロフィルとカロチノイドの破壊が暴露後 2 時間以

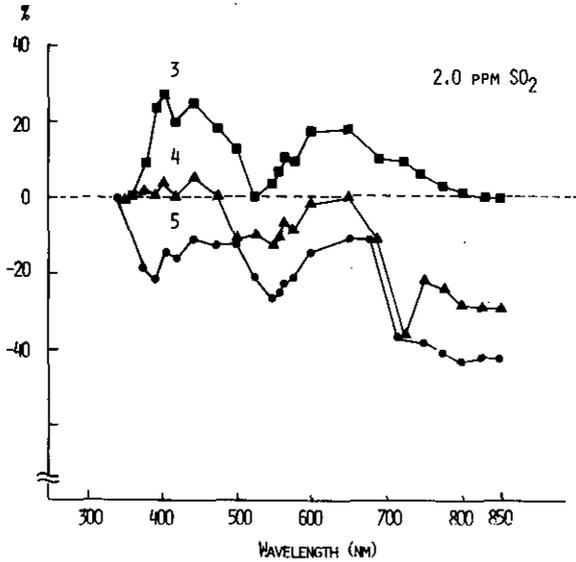


図 3

ヒマワリの葉面光反射の差スペクトル

3 : SO₂被暴葉 (120 分) - 正常葉

4 : SO₂被暴葉 (150 分, ガス停止) - 正常葉

5 : SO₂被暴葉 (190 分, ガス停止後40分) - 正常葉

Fig. 3

Difference spectra of leaf reflectance of light from stanneous halide vapor lamps on sunflower leaf.

3: SO₂-fumigated (120 min) minus normal

4: SO₂-fumigated (150 min) minus normal

5: SO₂-fumigated (150 min gas in and 40 min. gas off) minus normal

後に起こっていることを示すものと思われる。

2) 葉内含水率の低下に伴う葉面赤外反射スペクトルの変化

温室で栽培したハウレンソウ、ダイコンおよび野外で採取したサツキツツジ、アズマネササ等の葉を、キャリアー17DX型自記分光光度計の測定セル室に固定して、葉面反射スペクトルを、可視および赤外域にわたって(400-2,500nm)測定した。SO₂暴露は、人工光ガス暴露キャビネットで光照射下で所定の濃度で所定の時間行なった。葉内含水量の変化に伴う反射スペクトルを測定するため、葉を定温乾燥器中(50℃)または、温風を吹き付けて人為的に乾燥させ、葉重量の変化から含水率を求め、同時に葉面反射スペクトルを測定した。

赤外域のスペクトルには水に由来するピークがいくつかあり、植物がSO₂に被暴した場合に起こる蒸散変化や、葉組織の破壊による水の量的および質的变化によって、特徴的なパターンが表われるのではないかと期待される。従って、SO₂被暴葉のスペクトル測定と同時に、基本的なスペクトル解析として、葉内含水率の低下に伴うスペクトルの変化を調べた。

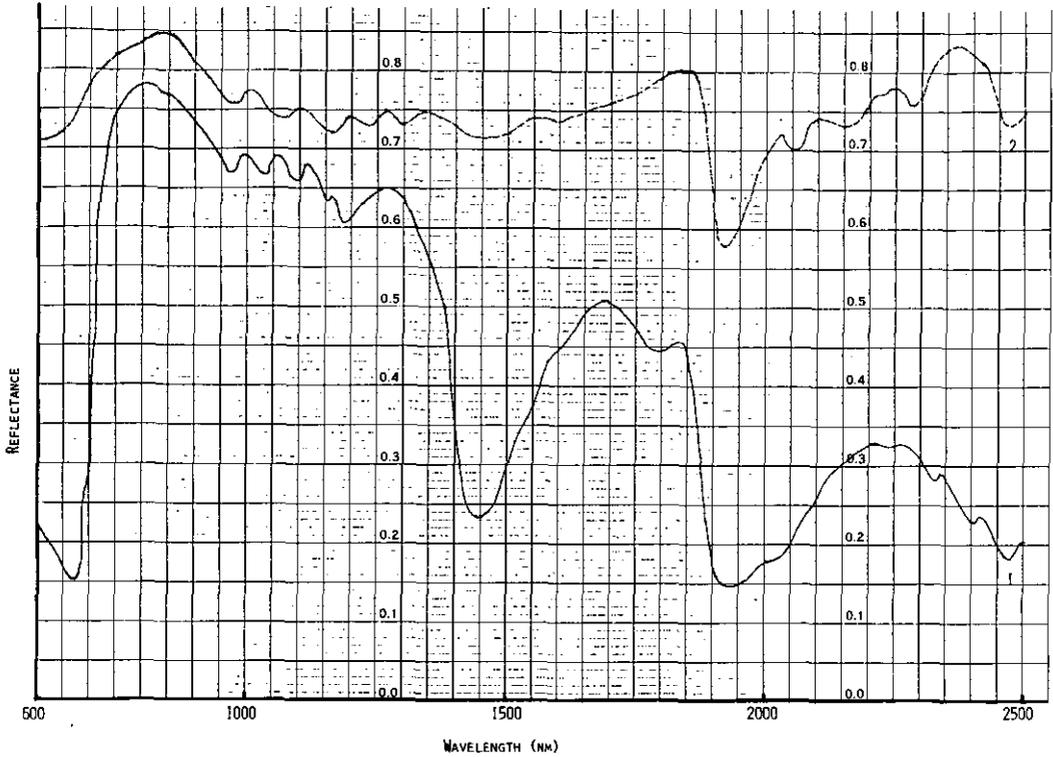


図4
 ホウレンソウ被暴葉の赤外域葉面反射スペクトル
 1: 正常葉
 2: 2.0 ppm SO₂, 5時間暴露後1日放置
 (葉面褐色に変化)

Fig. 4
 Reflectance spectra of SO₂-fumigated spinach leaf in infrared regions.
 1: Normal leaf.
 2: SO₂-fumigated leaf (2.0 ppm for 5 hr and stood for one day; leaf surface changed into brown color).

図4は、ホウレンソウの被暴葉の反射スペクトルである。正常葉に比べて、全体的に、光反射量の増加が見られるが、特徴的なパターン変化はなかった。図5は、ダイコンの正常葉について、人為的に乾燥させた時の含水率に伴うスペクトルの変化を示している。可視域の670nmのクロロフィルに由来する反射量の増加(吸光度の減少)に比較して、水に由来すると考えられる1,400nm附近および1,900nm近傍の吸光度の減少は著しく、10%含水率では、ほとんど反射極小が消失してしまっただ。図6は、サツキツツジの正常葉と自然状態で黄変色および枯死した葉の反射スペクトルである。枯死した葉には、クロロフィルに由来する反射極小も水に由来する反射極小もほとんど消失しているが、黄変色葉では、クロロフィルの存在を示す反射極小は半減している。水の関与する反

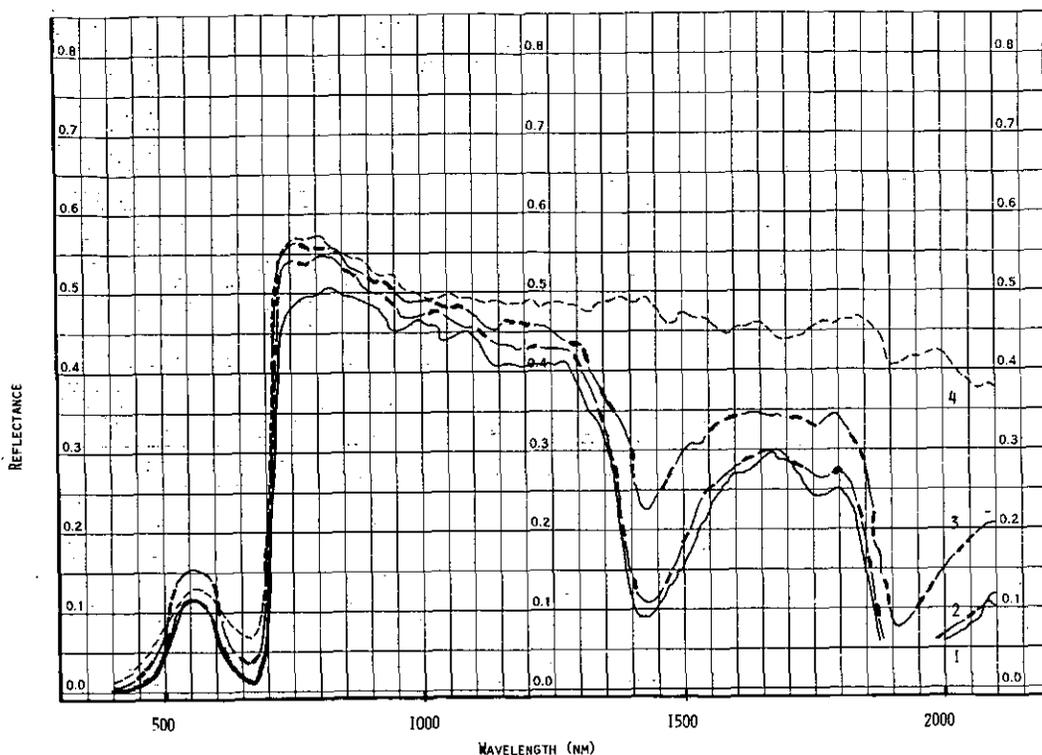


図 5
 ダイコンの葉内含水率の変化に伴う赤外域
 葉面反射スペクトルの変化
 1 : 含水率90% 2 : 含水率50%
 3 : 含水率30% 4 : 含水率10%

Fig. 5
 Changes in reflectance spectra of radish leaf in
 infrared regions with respect to water content
 of the leaf.
 1: Water content, 90%.
 2: Water content, 50%
 3: Water content, 30%
 4: Water content, 10%

射値はそれほど差がない。図7は、アスマネササについて人為的に乾燥した場合と自然に枯死した
 場合との反射スペクトルを示している。かなり荒い乾燥処理にも拘らず、人工乾燥葉のスペクトル
 では、クロロフィルに由来する反射極小は残存するが、水に由来する反射極小はほとんど消失して
 いる。黄変色葉については、図6にみられるスペクトルと同じ結果であった。

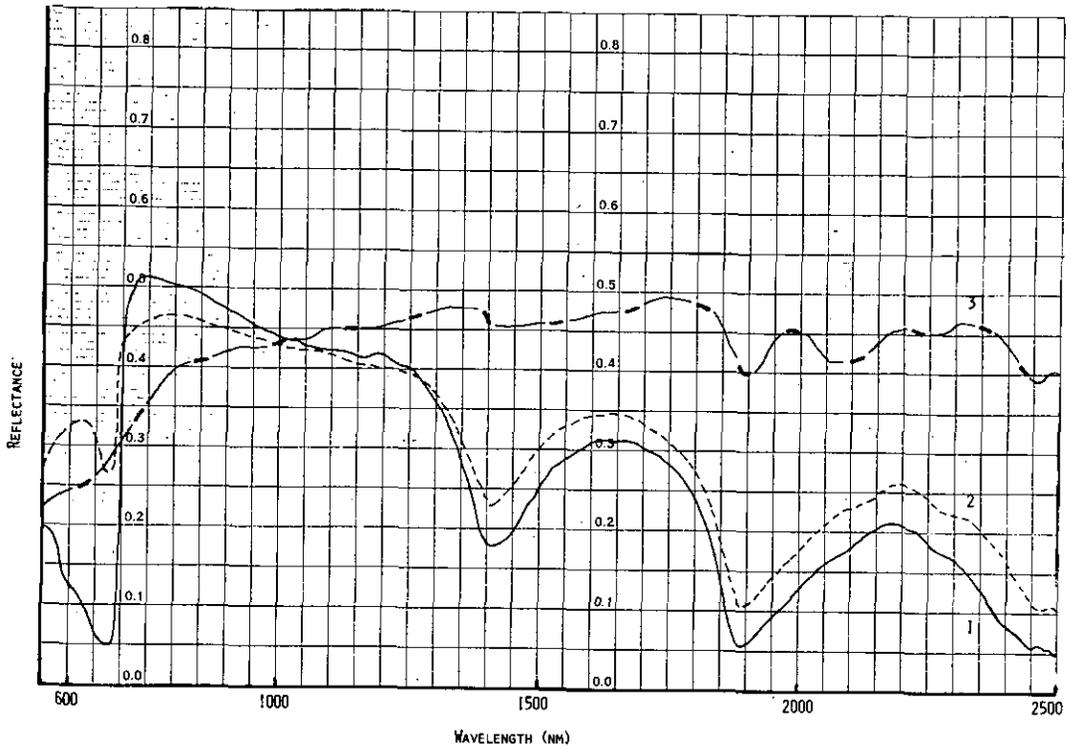


図 6
 サツキツツジの各種葉状段階における赤外域
 反射スペクトル
 1 : 正常葉
 2 : 黄変色葉
 3 : 枯死葉

Fig. 6
 Reflectance spectra of various leaf state of azalea
 in infrared regions.
 1: Normal leaf.
 2: Yellow-colored leaf.
 3: Dead leaf.

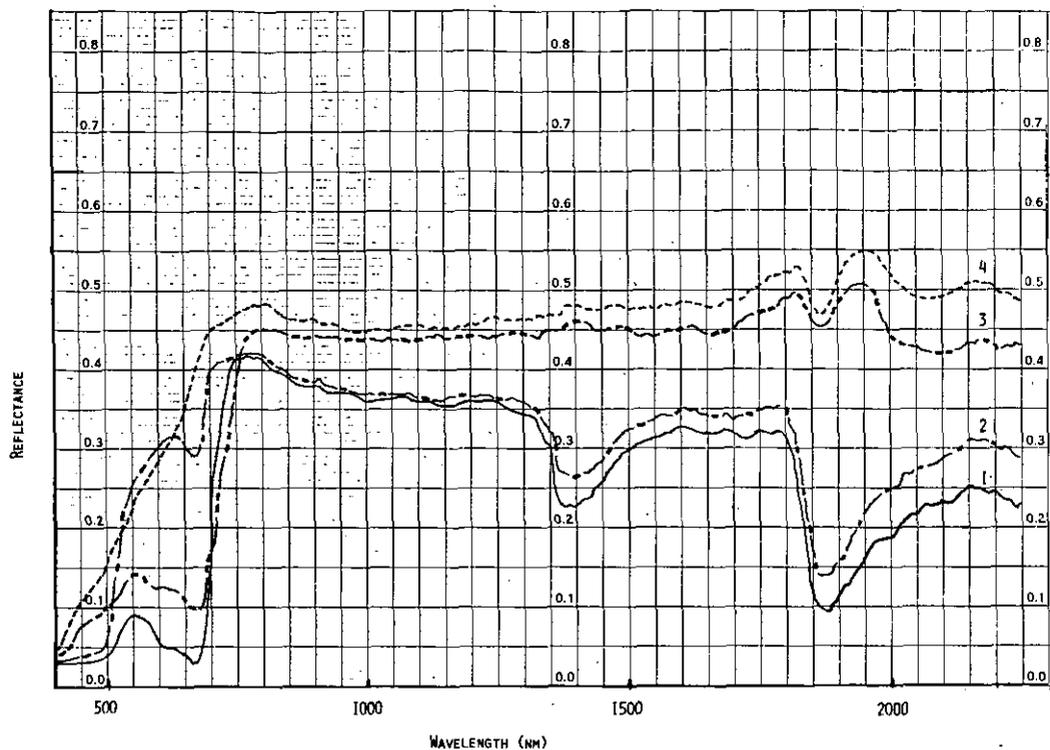


図7

アズマネザサの各種葉状段階における赤外葉面反射スペクトル

- 1 : 正常葉
- 2 : 黄変色葉
- 3 : 人工乾燥葉
- 4 : 自然枯死葉

Fig. 7

Reflectance spectra of various leaf state of dwarf bamboo in infrared regions.

- 1: Normal leaf.
- 2: Yellow-colored leaf.
- 3: Artificially dried leaf.
- 4: Dead leaf.

考 察

可視域および赤外域のいずれの反射スペクトルについても、可視障害あるいは脱水状態がかなり進行した段階ではこれに対応する変化が測定されたが、今後の問題点として可視障害発現以前の影響を検知できるスペクトル特性の変化はないか、あるいは光合成色素と無関係な赤外域のスペクトル変化から、植物種間差を越えた植物影響検知法はないかなど、細部にわたる研究に待つ所が多い。

IV-4

二酸化イオウに対するイネの抵抗性についての品種間差異

大村 武¹・佐藤 光¹・菅原 淳²

要 旨

日本在来稲 303 品種の幼苗を育成し、SO₂に暴露させ、可視障害の発現度合から、抵抗性の高いものと感受性の高いものを選抜した。

北方の品種に感受性の高いものが多く、南方（西日本）の品種には抵抗性の高いものが多かった。

感受性の高い系統として、九大 LO 78, 148, 152, 182, 138, 抵抗性が高い系統として、九大 LO 51, 271, 590, 591, 592, 818, 949, 1034, 1148, 1180, 1181が選抜された。

緒 言

大気汚染評価の一つの手段として植物を指標とする方法がある。この場合用いられる、いわゆる指標植物は、感受性が高いばかりでなく、栽培が容易なこと、反応性に個体差がなく、再現性に富むことが必須条件となる。

イネは日本で古くから栽培されており、遺伝的に純系化され、極めて容易に生育させることができ個体差も少ない。従って、大気汚染物質に対して感受性の高いイネの品種を在来種より選抜したり、あるいは化学物質によって突然変異を誘起し、感受性の高い系統を作り出せば、非常に優れた指標植物となると考えられる。本研究においては、指標植物作成の一環として、日本在来種 303 品種についてSO₂に対する感受性を調べ、数種の高感度の品種を選抜し、突然変異誘起による指標植物作成の母体とするために実験を行なった。

材料および方法

材料：日本在来稲、九州大学 LO 系統、303 品種、その中 103 品種は止葉での気孔数が調査されているもの、を用いた。

方法：1,000 倍希釈の hydromercurichlorophenol 液で種子を 12 時間消毒後、水洗して 30℃の恒温器内で 48 時間催芽処理を行ない、その後パーミキュライトを充したプラスチックバット中に各品種 10 粒ずつ播種した。幼苗の育成は 30-25℃の自然光温室で行ない、肥料として液肥を与えた。

暴露：午前 9 時に灌水を行なった後、午後から温度 20℃湿度 70%、照度 30,000~35,000 ルックス

1. 九州大学 農学部育種学研究室

2. 国立公害研究所 生物環境部

のガス暴露用チャンバーに搬入し、1時間条件適応させた後、所定の濃度のSO₂に所定の時間暴露した。被害の程度は、主として第3葉に現われた障害を肉眼的に判定して行なった。

結果および考察

各品種について、同時に3組の幼苗を生育させ、3回にわたって（Feb. 27, Mar. 2, Mar. 4）異なる条件下で暴露した。従って、各実験間の植物のageには数日間ずつの差がある。

実験1. 2.0 ppm SO₂, 3時間暴露

各品種の3組の幼苗のうち、1組を用いた。

この条件では、強度の可視障害をうけた品種は全体の約18%、可視害が表われなかった品種は約20%であった。在来種を障害の度合に応じて県別にまとめたのが表1である。この分布状態から、

表1 二酸化イオウ感受性および抵抗性のイネ品種の日本における地方分布
Table 1 The local distribution of SO₂-sensitive and -resistant rice varieties in Japan.

Prefectures	Degree of injury with SO ₂ fumigation at 2.0 ppm for 3 hr.			
	-	+	++	+++
Akita	1	61	26	14
Yamagata				1
Fukushima	2	28	21	24
Nagano		9	5	8
Toyama	1			
Fukui	1	2	1	
Shiga	1	2	1	2
Mie	1			
Nara	2	1		
Wakayama	3	2		
Tottori	7	2	3	
Hiroshima	11	2		
Tokushima	3	2		
Kagawa	2			
Kochi	2	2		
Fukuoka	2	1	1	
Nagasaki	3	3	2	4
Oita	5	8		
Kumamoto	4			
Miyazaki	7	3		2
Kagoshima	2			
Total	60	128	60	55

北日本（秋田、福島）の品種に感受性の高いものが多い、西日本の品種に抵抗性の高いものが多いことがわかった（写真、上、参照）。気孔数を止葉で調査している品種（LO 232～1181）について、気孔数と障害度との関連を調べてみたが、気孔数が多いもの程、障害度が大きいということはなく、平均的な気孔数を持つ品種に全般的に障害が表われた。しかしながら、気孔数は本実験で障害が表

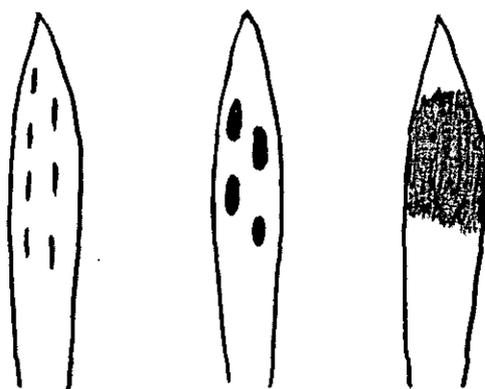
われた、第3および第4葉について調べたのではなく、止葉について調べているので、詳しい検討は今後の研究に待たねばならない。

実験2. 2.0 ppm SO₂, 1.5 時間暴露

実験1より3日間経過した2組目の幼苗について、実験1と同じ濃度2.0 ppmについて暴露時間を短縮して1.5時間行なった。実験1よりも暴露時間を短縮したにも拘らず、可視障害の程度は大となった。しかしながら、系統間の感受性の差異は、実験1とほぼ同じ傾向を示した。障害の程度が大となった原因は、つまびらかでないが、実験1と条件の異なる主な点は、3日間に生育のstageがより進んで、やや徒長気味であったことである。障害も、実験1では主に第3葉にみられたのが、伸長中の第4葉に顕著であった。この暴露条件で障害の表われなかった抵抗性の系統は、LO 51, 271, 590, 591, 592, 818, 949, 1034, 1148, 1180, 1181であった。

実験3. 0.5 ppm SO₂, 7.5 時間暴露

感受性の系統を選抜しやすいように、SO₂の濃度を0.5 ppmに減少し、暴露時間を7.5時間に延長した。4乃至5時間の暴露で、3乃至4の品種に障害が出現した。第4葉に障害が顕著であり、イネの幼苗に関しては、若い未成熟な葉に障害が出やすい傾向が見られた。感受性の系統として、LO 78, 138, 148, 152, 182が選択され、特に152と182が最も感受性が高かった(写真, 下, 参照)。障害の発現様式も特徴的であり差異が見られた(図1)。



Lo 138

Lo 152

Lo 182

図1 0.5 ppm SO₂, 7.5 時間暴露による特徴的な可視障害

Fig. 1 Characteristic visible symptoms with SO₂ fumigation at 0.5 ppm for 7.5 hr.

Varieties	SO ₂ Fumigation		
	2.0 ppm, 3 hr (12:00-15:00) Feb. 27, 1977	2.0 ppm, 1.5 hr (12:30-14:00) Mar. 2, 1977	0.5 ppm, 7.5 hr (14:30-20:00) Mar. 4, 1977
Lo 1	+++	++++	+
2	+++	++++	- (+)
3	+ (++)	++++	- (+)
4	++	++++	-
5	+	++	+
6	++	++++	-
7	++ (+++)	+++	+
8	++ (+++)	+++	+
9	++ (+)	+++	+
10	+ (++)	++++	-
11	+	+++	-
12	+++	++++	-
13	+++ (++)	++++	+
14	++	+++	-
15	++	++++	-
16	++	++++	-
17	++	++++	-
18	+++	++++	+
19	++ , +++ on leaf edge	++++	+
20	+++	+++	+
21	+++ (+)	++++	-
22	+ (++) on leaf edge	+++	-
23	++	++++	-
24	+	+++	-
25	+ (++)	++++	-
26	++ (+)	++++	-
27	++ (-)	+++	-
28	+	+++	-
29	+	+++	-
30	+	++	-
31	++	++++	-
32	+	++++	-
33	+	++++	-
34	++ (+++)	++++	-
35	+ (-)	+++ ++	-
36	+ (-)	+++	-
37	+	++++	-
38	+++	++++	-
39	+ (++)	+++	-
40	+	++++	-
41	+ -	++++	- (+) on leaf edge
42	+ -	++	- (+)
43	+	+++	- (+)
44	+	+++ ++	- (+)

- : no injury
+ : detectable injury
++ : big injury
+++ : bigger injury
++++ : the biggest injury

() : observed in only 1 or 2 of 10 seedlings
++, +++ : big injuries in half and bigger ones in another half of 10 seedlings.

Varieties	2.0 ppm, 3 hr Feb. 27, 1977		2.0 ppm, 1.5 hr Mar. 2, 1977		0.5 ppm, 7.5 hr Mar. 4, 1977	
Lo 45	++	-	++	+++	-	
46	+		+	++	-	
47	+		+	++	-	
48	+	(++)	+	++	-	(+)
49	+		+		-	
50	+	(++)	+	(++)	-	
51	-		-	+	-	
52	+		++		-	
53	+	(++)	++	+++	-	
54	-	(+)	+++		-	
55	+		++	+++	-	
56	+	(++)	+++		-	
57	+		+		-	
58	+		++++		-	
59	+		+++		-	(+)
60	+	++	++		-	
61	++		++		-	
62	++		++		-	
63	+	(+++)	++	++++	-	
64	+	-	+	++	-	
65	+	-	+	++	-	
66	-	+	+	(+++)	-	
67	+		+++		-	
68	+	++	+++		-	
69	+		+++		-	
70	+		+++		-	
71	++	(-)	+++		-	
72	+++	(-)	++++		-	
73	++		+++		-	(+)
74	+	(++)	++		-	
75	+	(++)	+	++	-	
76	+		++	+	-	
77	+	(-)	+++		+	
78	+	+++	++++		+++	only on 4th leaf
79	+		++++		-	
80	+	++	+++	++	-	
81	+++	(+)	++++		++	
82	+		+++		-	
83	+	-	++++		+	
84	+		+++		-	
85	+		++		-	
86	+	(++)	++		-	
87	-	(+),(+++)	++	+	-	(+)
88	+		+++		-	(+)
89	+	(++)	++++		-	
90	+		+++		-	(+)
91	+	(++)	+++		+	
92	+	++	+++		+	
93	+++	(++)	++++		+	
94	++	(+++)	++++	++	-	
95	++	(+++)	++++		+	
96	++	(+)	++++		+	
97	+++	(+)	++++		-	

Varieties	2.0 ppm, 3 hr Feb. 27, 1977	2.0 ppm, 1.5 hr Mar. 2, 1977	0.5 ppm, 7.5 hr Mar. 4, 1977
Lo 98	+	+++	-
99	+	++++	- (+) on leaf edge
100	+	+ (-),(++)	+
101	+	++++	-
102	+	+++ on leaf edge	-
103	+	++	- (+)
104	+	++ +++	- (+)
105	+	+++ on leaf edge	-
106	+	+++	-
107	+	+++	-
108	+	++++ ++	-
109	++	++++	-
110	++	++++	-
110	+	+++ (+)	-
112	+	+++	- (+)
113	+	+++	- (+)
114	++	++++ only on 4th leaf	- (++)
115	+	++	-
116	+++	+++ +	+
117	+	+++ (+)	- (+)
118	++	+++ +	+
119	+	++	- (+)
120	+	+++ +	-
121	++	++++ (+)	-
122	++	+++ (+)	- (+)
123	-	+++ (+) on leaf edge	-
124	+++	++++	+
125	++++	++++	+
126	++++	++++	+
127	+++	+++	- (+)
128	+++	+++	+
129	+++	++++ ++	++
130	++	+++ +++++	-
131	++	++++	-
132	+	+++	-
133	+	+ ++	+
134	+	+++	++
135	-	+++ (+)	+
136	-	+++ (++)	+
137	+	+	-
138	+++	++++ ++	++
139	+	+++ (++)	-
140	+	++++	+
141	+	+++	-
142	++	+++ +++++	-
143	+	+ +++	-
144	+	+++ (+)	-
145	+	++++	+
146	+	+++ (++)	+
147	++	+++ (++)	+
148	+++	+++	++ (+) only on 4th leaf
149	++	++++	-
150	++	+++	+

Varieties	2.0 ppm, 3 hr Feb. 27, 1977	2.0 ppm, 1.5 hr Mar. 2, 1977	0.5 ppm, 7.5 hr Mar. 4, 1977
Lo 151	+++	+++	+
152	+++	++++	+++
153	+ ++	+++	- (+)
154	++ only on 4th leaf	+++	- (++)
155	+	++	- (+)
156	++	++	-
157	++	++++	-
158	++	+++ ++	- (+)
159	+	++	- (+)
160	+++	++ +++++	- (++)
161	+	+	-
162	+++	++ +++	+
163	+	+	-
164	++	++	-
165	+++	+++	+
166	+++	++++	+
167	+ +++	++ (+++)	-
168	+ +++	+ (++++)	+
169	++ +++	++++	-
170	+ (++)	++	++
171	++	++	- (+)
172	+++	++++	-
173	+++ on 2nd and 4th leaves	++++	-
174	+ ++	+	- +++ on 3rd leaf
175	+	- +	+
176	++ +++	+++	- (+) on leaf edge
177	+++	++++	-
178	+++	++++	-
179	++++	++++	+
180	+++	++++	- (+) on leaf edge
181	+++	++++	-
182	+++	++++	++++
183	+	+	-
184	++	+++	+
185	+++	++++	- (++)
186	+	++++	- (+)
187	+++	++++	- (+)
188	+++ (+)	++++	- (+)
189	+ (+++)	+++	- (+)
190	++++	++++	-
191	+	+ (++) , (-)	- (+)
192	+ (++)	+	- (+)
193	+	+ (++)	+
194	++	++	- (+)
195	+	+ ++	- (+)
196	++ +++	+ ++	- (+)
197	++	+ ++	-
198	+ (+++)	++ +	-
199	+	+	- (+)
200	++	+	-
232	- (+) on 4th leaf	+	-
267	++	++++	-
271	- (+)	- (+)	-

Varieties	2.0 ppm, 3 hr Feb. 27, 1977		2.0 ppm, 1.5 hr Mar. 2, 1977		0.5 ppm, 7.5 hr Mar. 4, 1977	
Lo 274	+		-	(+)	-	
275	+		+	(++)	-	
310	++	-	+++		-	
314	+++	+	++++		-	
317	+		++	(+++)	-	
320	+	+++	++	(++++)	-	
321	+		+++		-	(+)
322	-		+++		+	(++)
361	-	(+)	+		+	
362	-		+	(+++)	-	
364	-		++		-	
365	+		+	(++)	-	
404	+		+	(+++)	-	
405	-		+	(+++)	-	
411	-		+	(+++)	-	
412	-		+		-	
413	+		++		-	(+)
452	-		+	(+), (-)	-	
453	-		+++		-	
457	-	(+)	++		-	
458	+	++	+++		-	
494	-	(+)	++		-	
497	-	(+)	-	++	-	
499	+	(-)	+	++	-	
509	-	++	+	(++)	-	(++)
512	++	-	+		+	
541	-	(+)	+		-	
543	+		+++		-	
544	-		+	-	-	(+) on leaf edge
586	-	+	+		-	
587	-		+++		-	
588	+		++	-	-	
590	-		-	+	-	
591	-	(+)	-	+	-	
592	-	(+)	-	(+)	-	
630	-	(+)	+	++	-	
631	-		-	(++)	-	
634	-	(+)	+		-	
635	-		-	(++)	-	
670	-	(+)	+		-	
672	-	(+)	+	++	-	
674	-	(+)	+		-	
680	-		+		-	
724	-	+	+	(++)	-	
725	-	(+)	+	+++	-	(+)
726	-	+	++	+++	-	
727	+	(++)	+		-	
763	-	(+)	++		-	
765	-	+	+	(++)	-	
770	-	(+)	+	-	-	
772	-		+		-	
775	+		+	++	-	
778	+	(+++)	+++		+	

Varieties	2.0 ppm, 3 hr. Feb. 27, 1977			2.0 ppm, 1.5 hr. Mar. 2, 1977			0.5 ppm, 7.5 hr. Mar. 4, 1977	
Lo 815	++	+		++++			+	
816	+			-	(++)		-	
817	-	(+)		+	(++), (-)		-	(+)
818	-	(+)		-	+		-	
848	-	(+)		+	(-), (++)		-	(+)
858	++	+++		++++			+	
861	-	+	on 4th leaf	-			-	(+)
864	+	+++		++	(+++), (-)		-	
867	+		on 4th leaf	++	(+++), (-)		-	(+)
873	++	+++		+++	(+)		+	
906	-	++		++			-	
907	-	+++		+++			-	(+)
908	+			+			-	
909	-			+	-		-	
910	++			++			-	
912	-	+		-	(++)		-	(+)
943	+			+	(++)		-	(+)
949	+			-	(+)		-	
952	-			++	(-)		-	
953	-	+		+	(++), (-)		-	
954	+	-		+	(+++), (-)		-	
960	+	-		+			-	
992	-	+		+	++		+	
995	-	+		++++			+	
997	-	(+)		+			-	
998	-	(+)		+			-	
1004	-			+			-	
1011	+			++	+++		-	
1034	-			-	(++)		-	
1042	-	(+)	on 4th leaf	++			-	
1044	-			++	+++		-	(+)
1045	-	(+)	on 4th leaf	+			-	(+)
1051	-							
1085	+			+	(+++)		-	(+)
1086	-	(++)	on 4th leaf	+	-		-	
1090	-			-	+		-	(+)
1091	-	(+)		-	+		-	(+)
1092	+			+			-	
1094	-	(++)		+	(++)		-	
1125	-	(+)		+	-		-	
1135	+			+	(++)		-	
1136	++	+++		+++	+		-	
1137	+++	++		++++	+		+	(++)
1142	-			+			-	(+)
1148	-	(++)	on 4th leaf	-	(+)		-	
1180	-	(+)	"	-	(+)		-	
1181	-	(+)	"	-	(+)		-	

Differences among local rice varieties in resistance to sulfur dioxide

Takeshi OMURA¹, Hikaru SATO¹ and Kiyoshi SUGAHARA²

Summary

The effects of SO_2 on the seedlings of rice plants were examined in 303 of local rice varieties in Japan.

SO_2 -sensitive rice varieties were distributed in north part of Japan mainly and SO_2 -resistant ones were distributed in south part of Japan considerably.

The local rice varieties of Lo 78, 148, 152, 182 and 138 were the most susceptible to SO_2 and Lo 51, 271, 590, 591, 592, 818, 949, 1034, 1148, 1180 and 1181 showed the highest resistance to SO_2 .

1. Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812

2. Division of Environmental Biology, the National Institute for Environmental Studies Ibaraki 300-21.



Plate I



Plate II

二酸化イオウ暴露によるイネの可視障害

写真 I 2 ppm SO₂, 3 時間暴露. 左, 北方品種; 右, 南方品種

写真 II 0.5 ppm SO₂, 7.5 時間暴露. LO182 の高感受性がわかる

The difference among rice varieties in leaf injury caused by SO₂ fumigation.

Plate I Fumigation: 2.0 ppm SO₂, 3 hrs. Left, rice varieties in northern part of Japan. Right, rice varieties in southern part of Japan.

Plate II Fumigation: 0.5 ppm, 7.5 hrs. Lo 182 has the highest susceptibility to SO₂.

IV-5

都市域の野外条件下における大気汚染質の植物影響に関する予備調査

古川昭雄¹・清水英幸¹・藤沼康実²・戸塚 績¹

要 旨

1977年7月と9月に東京においてサクラとプラタナスの葉の水ポテンシャル、浸透ポテンシャル、気孔抵抗、葉温、含水量について調べた。また、大気汚染質である二酸化イオウ、窒素酸化物、オキシダントと気温・湿度・日射量を同時に測定した。これらの植物生理要因と各種の環境要因との相関を求めてみたが大気汚染質の濃度と植物生理要因との間には相関は認められなかった。急性障害発現濃度よりも低い大気汚染濃度条件下では短時間の植物生理機能変化を測定しても顕著な影響は観察されないものと思われる。また、サクラとプラタナスとでは環境要因に対する応答性に著しい差が見られた。サクラの気孔は光、温度、水ポテンシャルの変化に対して顕著に反応し、プラタナスよりも環境条件に敏感な性質を有しているものと思われる。

緒 言

野外に生育している植物が大気汚染質の影響をどのように受けているかを知ることは、今後我々が研究を進めていく上に、極めて重要な課題である。実験室において高濃度汚染質を暴露して短時間の影響を知ることは一つの研究方法であり、検討されねばならない研究課題である。また、低濃度汚染質の植物影響について知ることが、社会的要求を考える時、必要欠くべからざることである。低濃度汚染質の植物影響については、生長解析の手法を用いて明らかにする努力を行っており、近々、結果が得られるものと思われる。このような実験室内における研究は実験条件を単純化して解析を容易にする利点がある。しかし、野外において植物がどのような条件に置かれているかを知らなければ、実験室における研究は研究のための研究となり、公害問題を解決するための研究とは異質のものになる。すなわち、自然条件下で植物がどのように生長し、環境条件によってどのように影響されているかを知る必要があり、その得られた情報を実験室内での研究に反映させなければならぬ。この目的に沿って、我々は東京都において調査を行なった。

今回の野外調査は植物の生理作用に対する野外環境、とりわけ大気汚染質の影響に重点をおいて調査を行なったが、当初期待したほど満足できる成果は得られなかった。その理由として、準備が不十分で、不測の事態に対する対応のまずさ、測定に慣れな為が生じた不手際や天候にあまり恵まれなかった事がある。さらに、今回の調査において始めて計測車を使用したため、計測車の不備

1. 国立公害研究所 生物環境部
2. 国立公害研究所 技術部

な点もあって十分に使いこなせなかったことも一因である。

測定地点および材料

調査は7月と9月の2回にわたって行ない、7月の調査は小石川植物園と新宿御苑の2か所において、各々サクラとプラタナスについて行なった。9月の調査は新宿御苑のプラタナスについてのみ行なった。調査年月日、測定項目は次表に示した。

年月日	場 所	測 定 項 目		対 象 樹 種
		環 境 要 因	植 物 要 因	
1977年7月 14, 15日	東京大学理学部 附属小石川植物園	温度, 湿度, 日射量 二酸化イオウ, 窒素酸化物 オキシダント CO ₂ 濃度	水ポテンシャル 浸透ポテンシャル 気孔抵抗, 葉温, 葉含水量	サクラ
7月17, 18, 19, 20日	新宿御苑	同 上	同 上	プラタナス
9月6, 7, 8, 9, 10, 11, 12日	同 上	同 上 (但し, 二酸化イオウ を除く)	同 上	同 上

測定方法

環境要因の測定方法

上の表に掲げた各項目について測定を行なったが、二酸化イオウ、CO₂濃度についての測定結果は記載しなかった。7月の調査で、小石川植物園、新宿御苑において二酸化イオウは検知されなかったため、9月の調査では測定しなかった。二酸化イオウはFPD方式によるBendix社製Model-8300を用いて測定した。大気中の窒素酸化物の測定はケミルミ方式による紀本電子社製のModel-256を用いて行なった。また、オキシダント濃度はBendix社製806型によって測定した。さらに、CO₂濃度は富士電気社製のポータブル型赤外線CO₂分析計(ZAP)によって測定した。

葉温ならびに気温はそれぞれ0.1mmと0.3mmの銅-コンスタンタン熱電対によって測定し、大気湿度は自記式毛髪湿度計によって測定した。日射量は農試電試式日射計によって測定し、30分ないし60分の平均日射量を求めた。

植物要因の測定方法

大気汚染質等の環境要因の植物に対する影響を調べるため、水ポテンシャル、浸透ポテンシャル、気孔抵抗、葉温、葉含水量を経時的に測定し、種々の環境要因との相関を求めた。水ポテンシャルはPressure Chamberを用いて木部の負圧を測定して求めた。葉の水ポテンシャルはPressure Chamberによって求めた木部の負圧に、木部の浸透圧を加えたものであるが、光、温度、水分状態が変化しても木部の浸透圧はほとんど変化せず、多くの植物で0.2~0.6気圧である。すなわち、木部の負圧だけを測定すれば葉の水ポテンシャルの変動を知ることができる。今回の調査ではPressure Chamberで測定した木部の負圧を葉の水ポテンシャルとした。浸透ポテンシャルは凍結、融

解した葉の搾汁の浸透圧を Wescor 社製の Vapor Pressure Osmometer (5100 B型) によって測定し求めた。気孔抵抗は Rambda 社製の Diffusive Resistance Meter (LI-60型) を用いて測定した。葉含水量は単位面積当りの含水量 (生重から乾重を差引いた量) として求めたが、調査期間中の葉含水量の変化はほとんど見られなかったので、測定結果の記載は行なわなかった。

結果および考察

環境要因としての気温・湿度・日射量と植物要因としての水ポテンシャル、浸透ポテンシャル、気孔抵抗、葉一気温差を図1～13に測定日ごとに示した。顕著な日変化を示す植物要因は水ポテンシャル、気孔抵抗、葉一気温差であり、含水量 (図示していない) と浸透ポテンシャルの日変化にはそれほど顕著なもの認められなかった。大気汚染質である窒素酸化物とオキシダントの濃度には大きな日変化は観察されなかったが、オキシダントは日中高く、窒素酸化物は夜間に高くなるような傾向が認められた (図14, 15)。

種々の要因の日変化だけを羅列してもどの要因が植物要因の反応を決定しているのかは明確に把握できないので、要因間の相関を図示して、相関の有無について検討を行なった。

野外条件下では種々の環境要因が複雑に植物に作用し、植物の生理作用も単一条件によって決まるわけではない。大気汚染質の植物影響があったとしても、他の環境要因、例えば光、温度、湿度等によってより大きく影響され、大気汚染質の効果は隠されてしまい、可視的な現象として出てこない。また、野外条件下において対照区をとることはほとんど不可能である。大気汚染質濃度が低い場所での植物生理反応を同一樹種について測定したとしても、土壌環境、光、温度条件が場所によって異なり比較対照とはなり得ない。

気孔抵抗にしても水ポテンシャルにしても窒素酸化物、オキシダントの濃度との間には相関は見られず、気孔の開閉とそれによって生じる水分収支には大気汚染質は影響していないように見られる (図25～28)。気孔抵抗も水ポテンシャルも光、温度によって大きく影響され (図18～24)、大気汚染質による影響が検知できないものと思われる。

野外において大気汚染質の植物影響を知るには、実験室においてより詳細な研究の積み重ねを行なわねば何も言えない。すなわち、第一に、何を測定すれば植物が大気汚染によって被害を受けていることが判明するかを確立すべきであり、第二に、種々の環境要因の影響をどのようにしたら消去できるかを考える必要がある。野外条件下において植物を指標とする可能性はこのような問題を解決して始めて生じるものである。つまり、今回の野外調査において指標性を見出すことは出来なかったが、今後実験室において何をなすべきか、また、どのような方向性を持って研究を推し進めていくべきかについて、莫然とはしているが明らかになったものとする。次回の野外調査においては植物の反応を別な観点から調査する予定である。

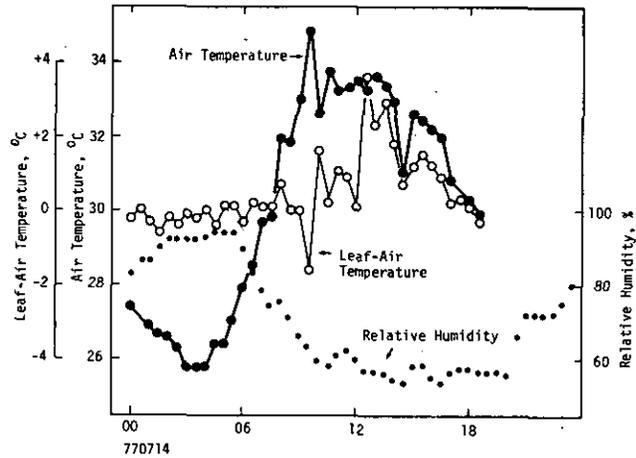
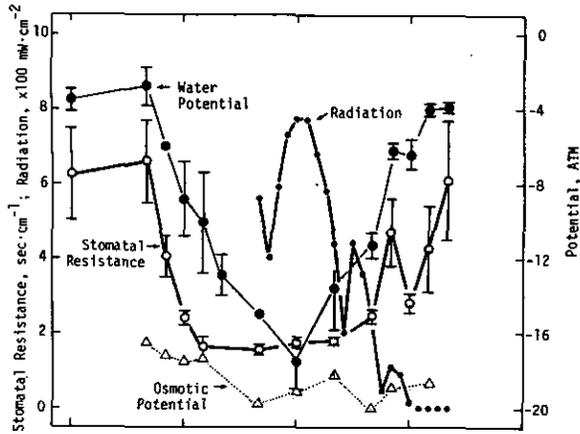


図1

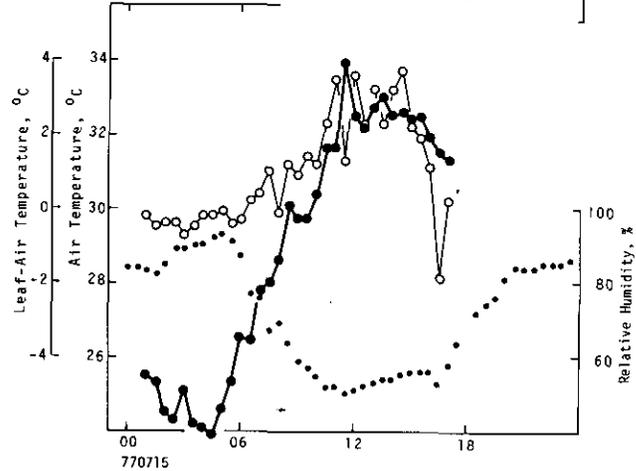
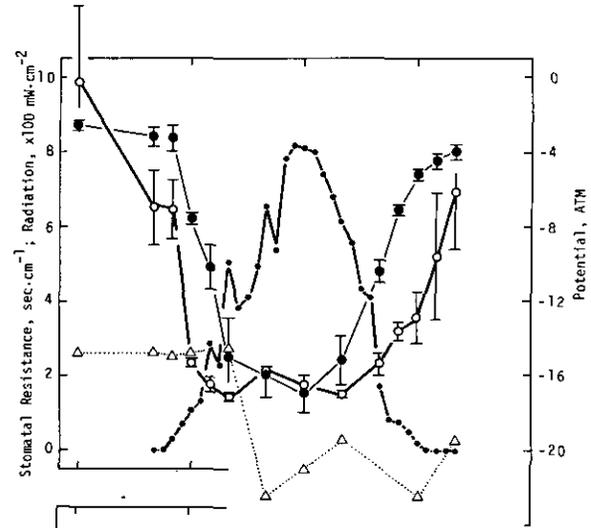


図2

図 1 & 2 サクラ葉の植物生理要因（水ポテンシャル，気孔抵抗，浸透ポテンシャル，葉気温差）と気象要因（気温，湿度，日射量）の日変化。測定は1977年7月14，15日に小石川植物園にて行なった。

Figs. 1 & 2 Diurnal changes of physiological factors of cherry leaves (water potential, stomatal resistance, osmotic potential, and leaf-air temperature difference) and climatic factors (air temperature, relative humidity, and solar radiation) at the Koishikawa Botanical Gardens of the University of Tokyo in Tokyo, on July 14 and 15, 1977. Numerals at the bottom left of the figure indicate the date of the measurements: 770714 means July 14, 1977.

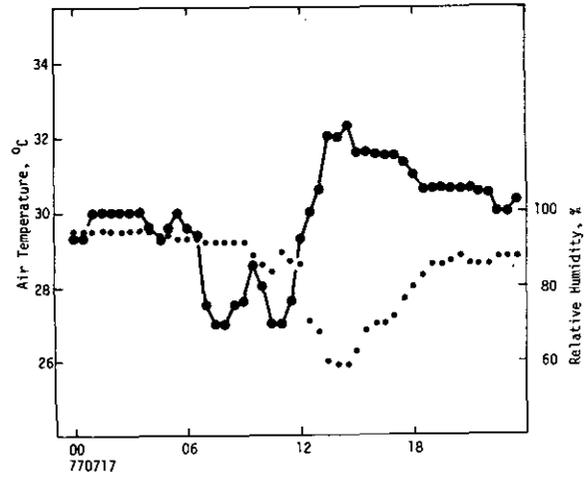
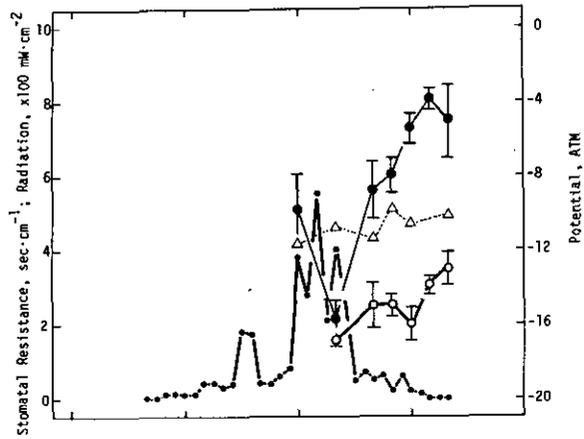


図 3

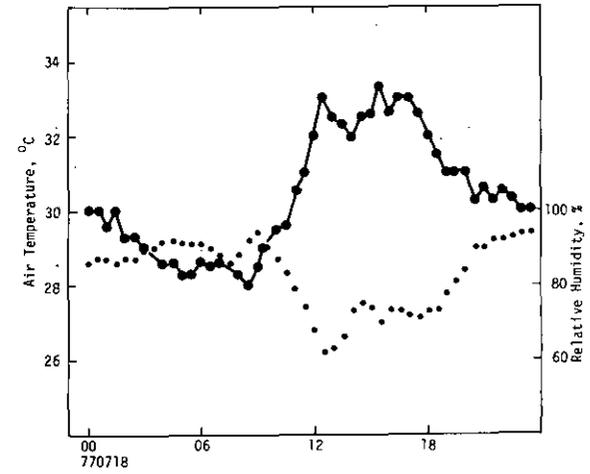
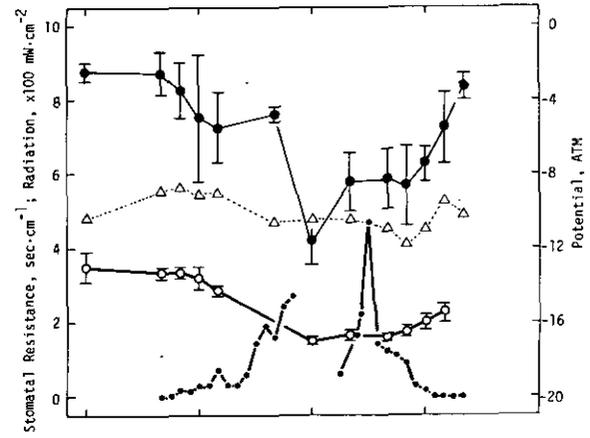
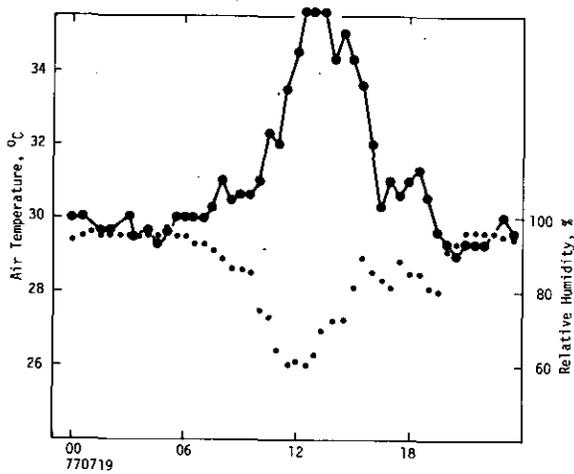
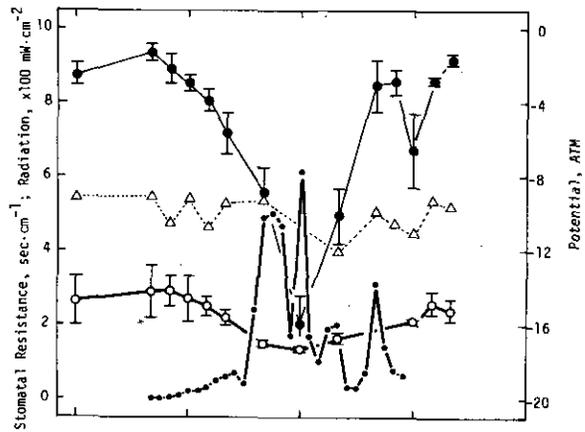
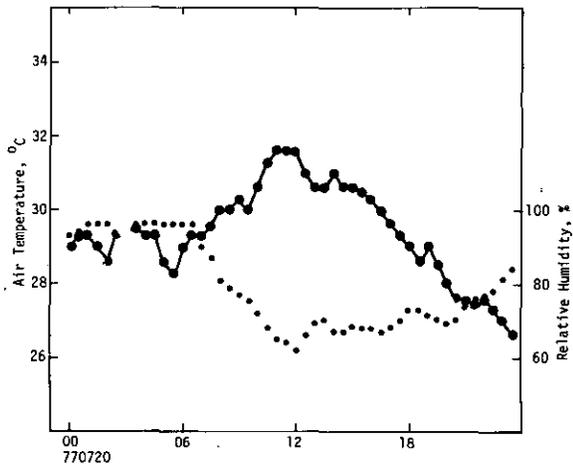
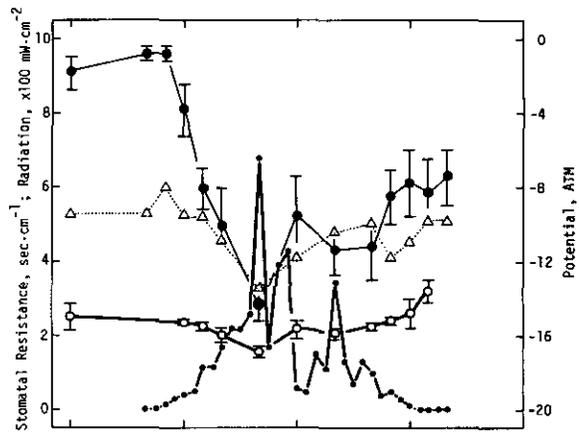


図 4

図 3~6 プラタナス葉の植物生理要因と気象要因の日変化。測定は 1977 年 7 月 17~20 日に新宿御苑にて行なった。
 Figs. 3 to 6 Diurnal changes of physiological factors of plane tree leaves and climatic factors at the Shinjuku National Park in Tokyo on July 17-20, 1977.



⊠ 5



⊠ 6

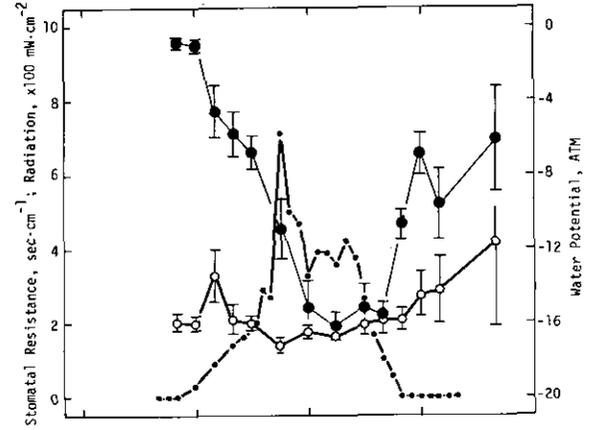
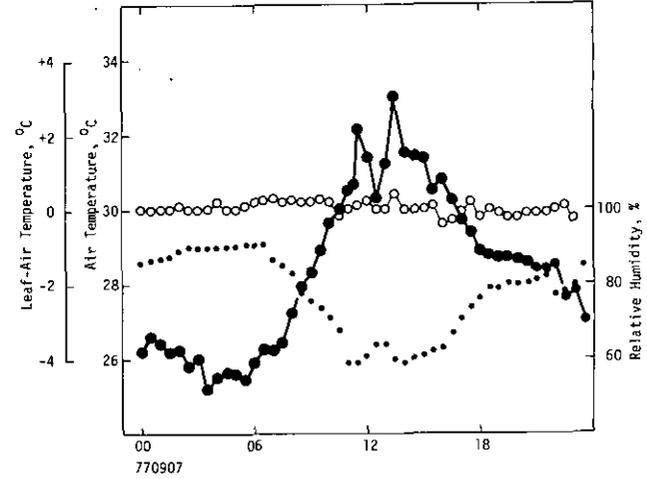
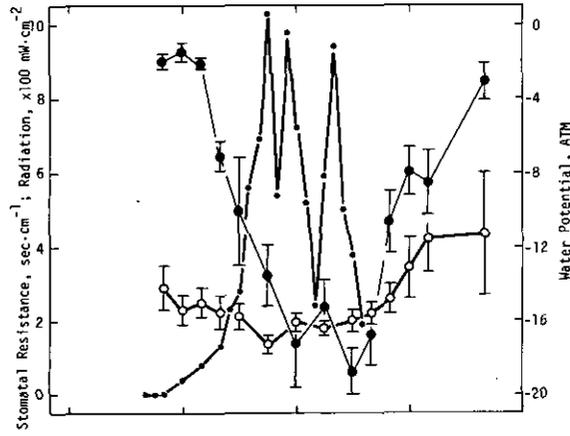
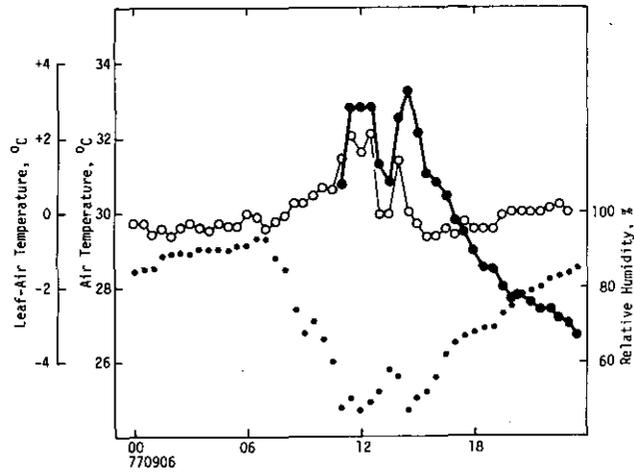
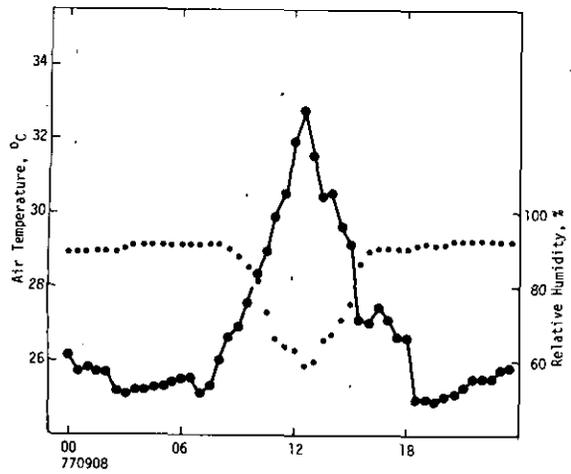
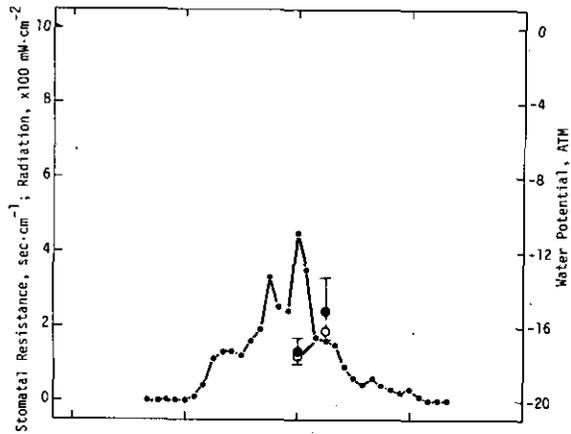


図 7

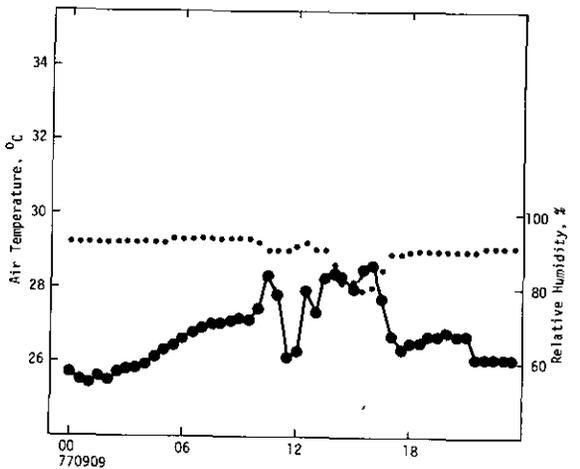
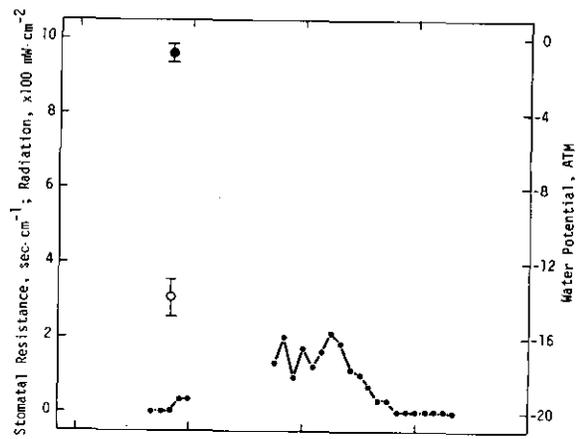
図 8

図 7~13 プラタナス葉の植物生理要因と気象要因の日変化。測定は 1977 年 9 月 7~12 日に新宿御苑にて行なった。

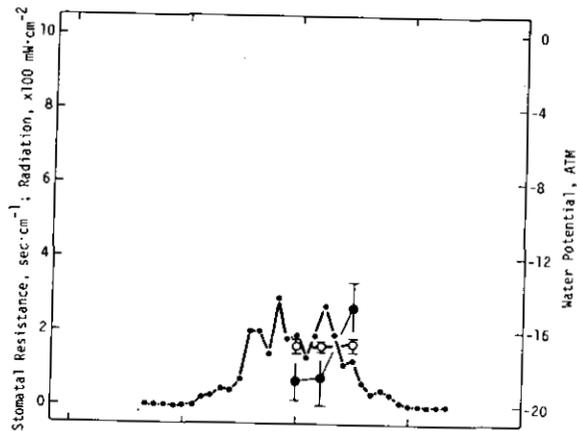
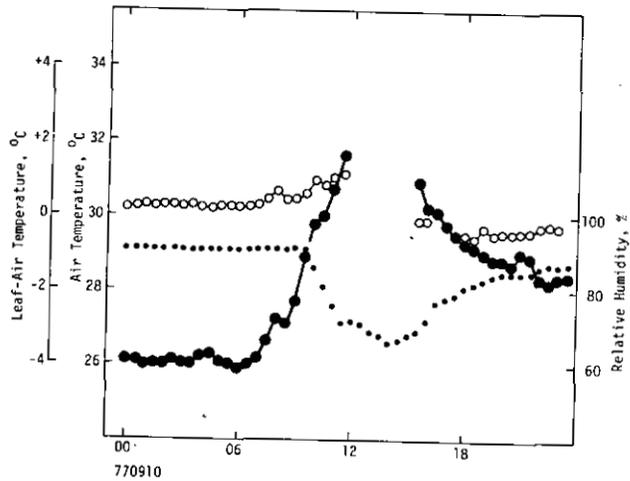
Figs. 7 to 13 Diurnal changes of physiological factors of plane tree leaves and climatic factors at the Shinjuku National Park on September 7-12, 1977.



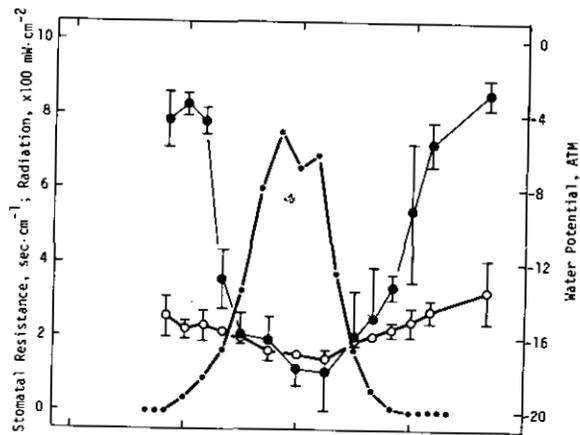
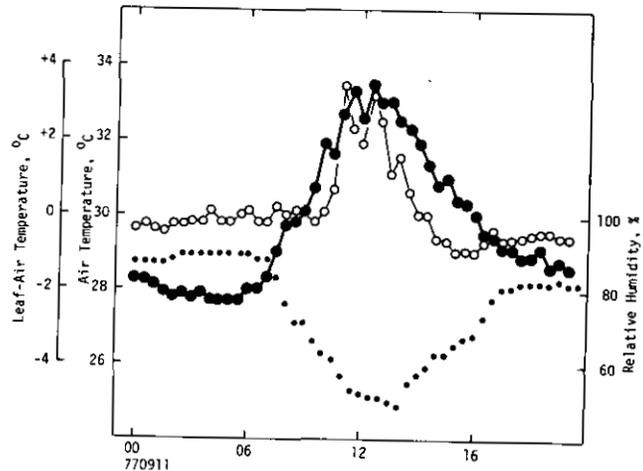
☒ 9



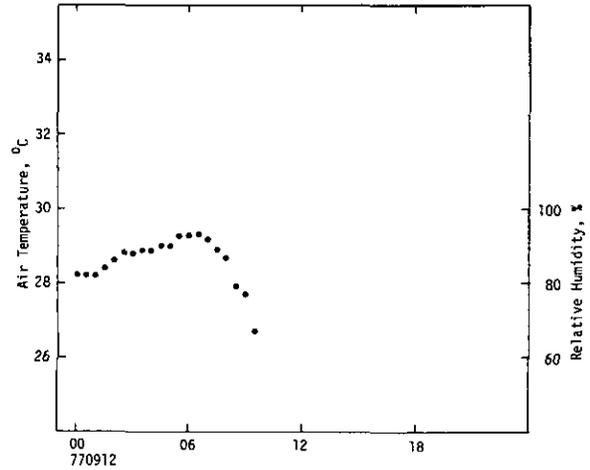
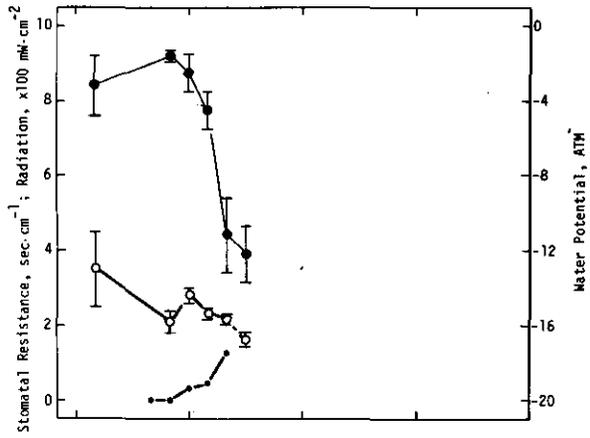
☒ 10



☒11



☒12



☒ 13

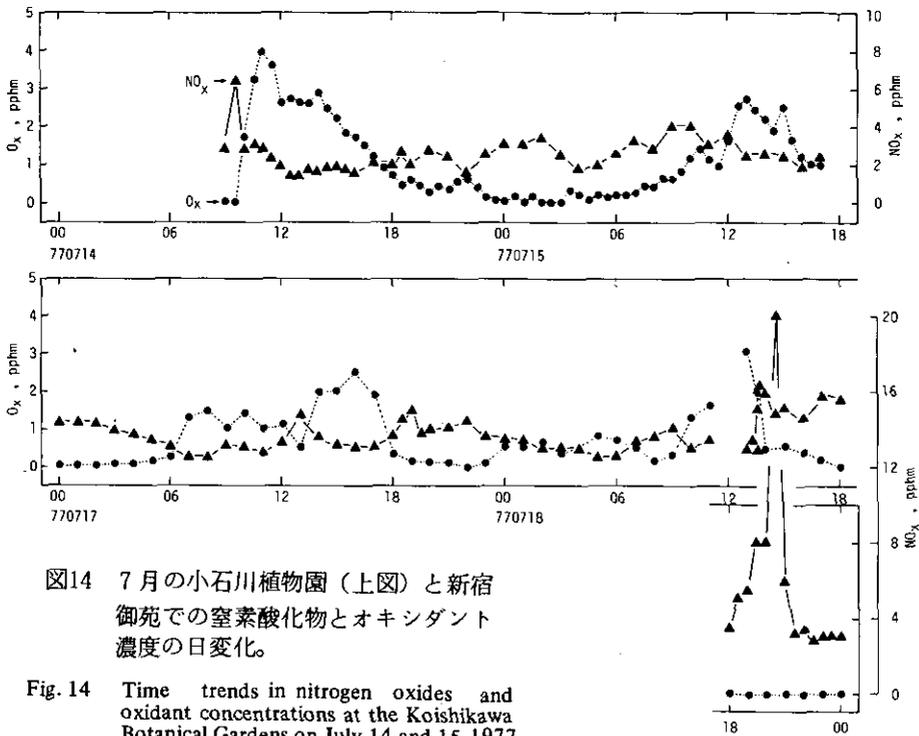


図14 7月の小石川植物園（上図）と新宿御苑での窒素酸化物とオキシダント濃度の日変化。

Fig. 14 Time trends in nitrogen oxides and oxidant concentrations at the Koishikawa Botanical Gardens on July 14 and 15, 1977 (upper) and at the Shinjuku National Park on July 17 and 18, 1977.

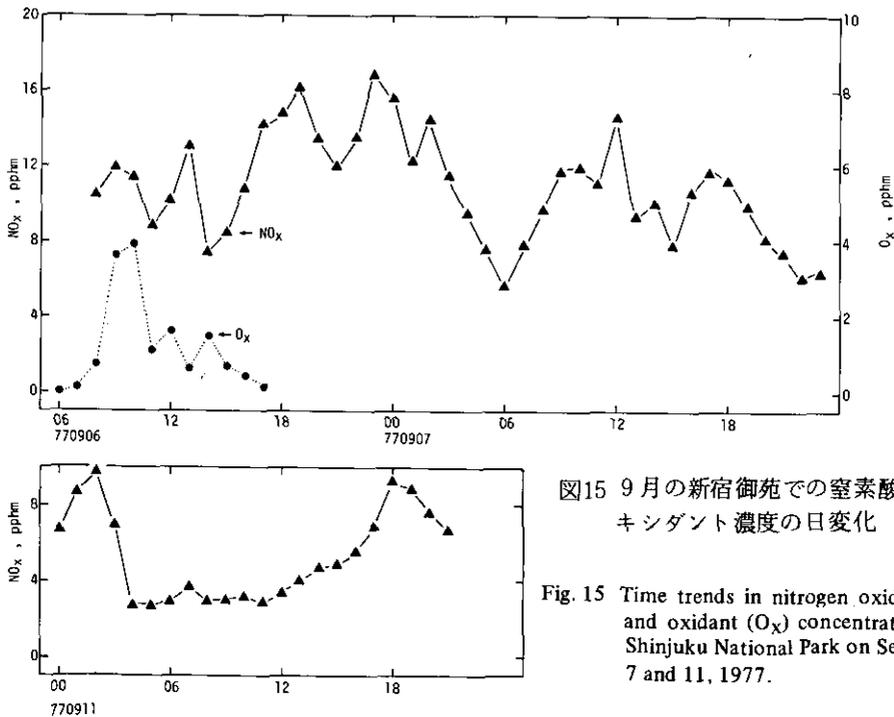


図15 9月の新宿御苑での窒素酸化物とオキシダント濃度の日変化

Fig. 15 Time trends in nitrogen oxides (NO_x) and oxidant (O_x) concentration at the Shinjuku National Park on September 6, 7 and 11, 1977.

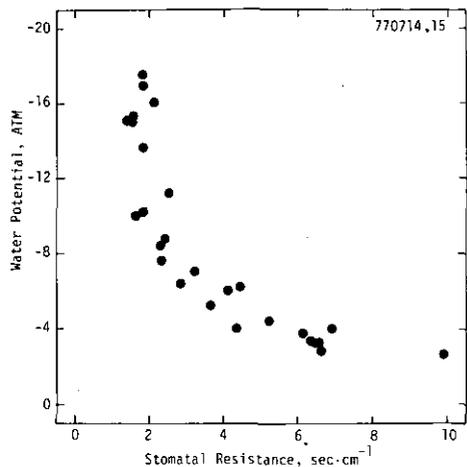


図16 サクラ葉の水ポテンシャルと気孔抵抗との関係。図1, 2の結果より作図。

Fig. 16 Relationship between stomatal resistance and water potential in cherry leaves at the Koishikawa Botanical Gardens on July 14 and 15, 1977. Numerals in the figure indicates the date of the measurements.

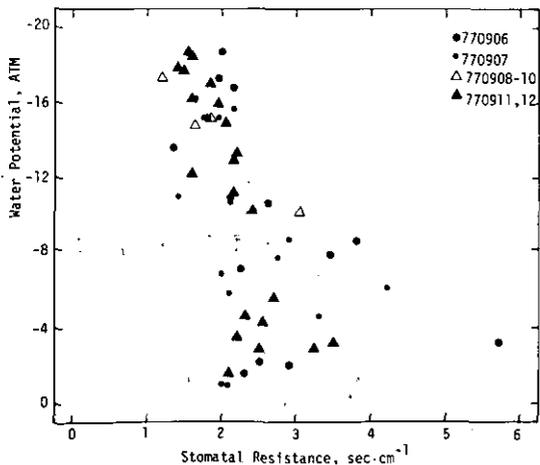
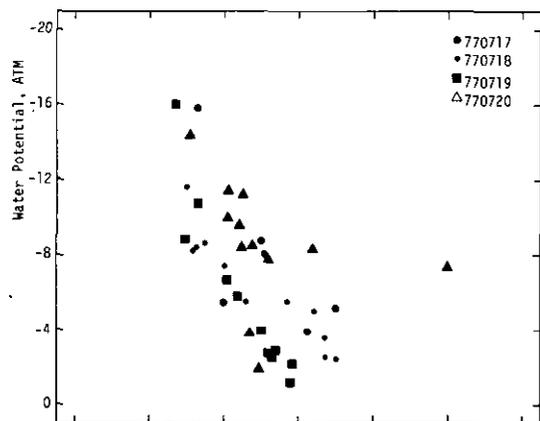


図17 プラタナス葉の水ポテンシャルと気孔抵抗との関係。図3～6の結果より作図。

Fig. 17 Same as Fig. 16 but for plane tree leaves at the Shinjuku National Park on July 17-20, 1977.

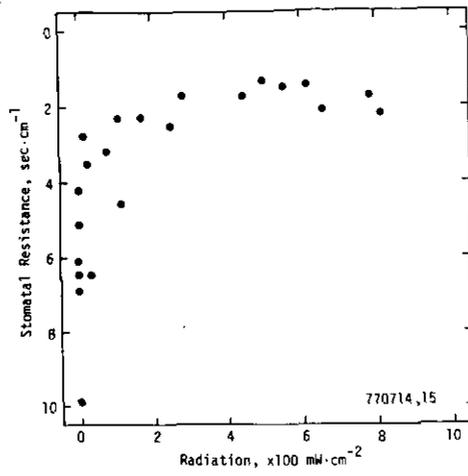


図18 サクラ葉の気孔抵抗に対する日射の影響。図1, 2の結果より作図。

Fig. 18 Stomatal diffusion resistance in cherry leaves as a function of light intensity on July 14 and 15, 1977.

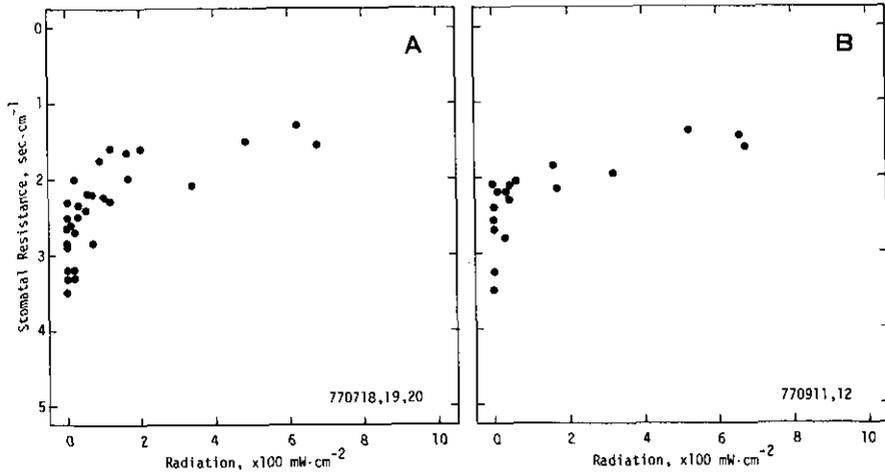


図19 プラタナス葉の気孔抵抗に対する日射の影響。図12, 13の結果より作図。

Fig. 19 Same as Fig. 18 but for plane tree leaves on July 18 and 19 (A) and September 11 and 12 (B), 1977.

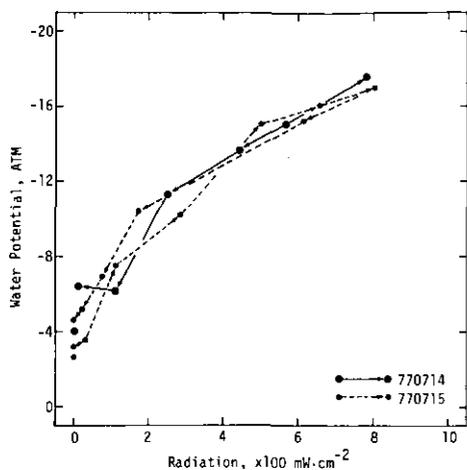


図20 サクラ葉の水ポテンシャルに対する日射の影響。図1, 2の結果より作図。

Fig. 20 Leaf water potential in cherry tree as a function of light intensity on July 14 and 15, 1977. Arrows indicate the daily trend.

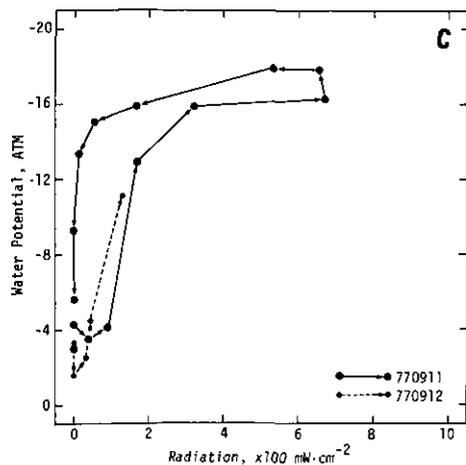
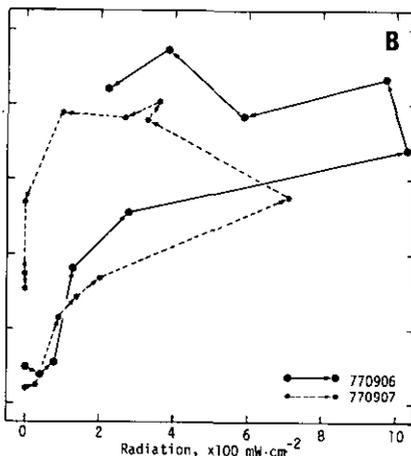
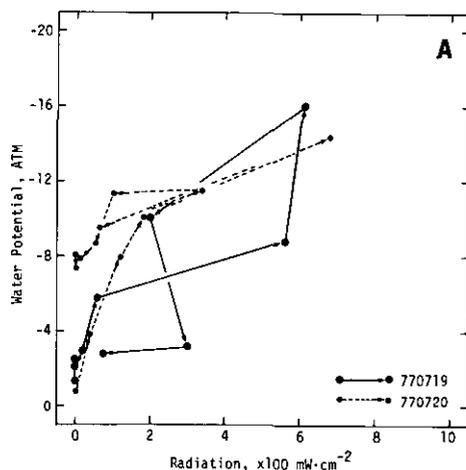


図21 プラタナス葉の水ポテンシャルに対する日射の影響。(A) 図5, 6の結果より, (B) 図7, 8の結果より, (C) 図12, 13の結果より作図。

Fig. 21 Same as Fig. 20 but for plane tree on July 19 and 20 (A), September 6 and 7 (B), and September 11 and 12 (C), 1977.

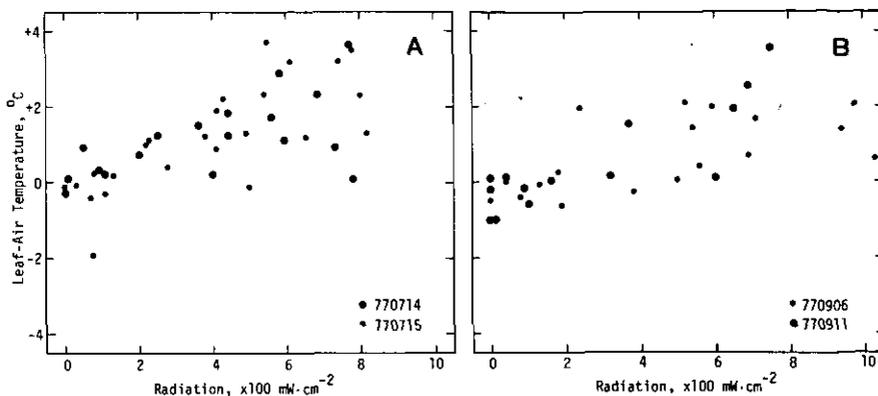


図22 サクラ葉とプラタナス葉の葉気温差に対する日射の影響。(A) 図1, 2の結果より, (B) 図7, 12の結果より作図。

Fig. 22 Leaf-air temperature difference in cherry (A: July 14 and 15) and plane trees (B: Spetember 6 and 11) as a function of light intensity.

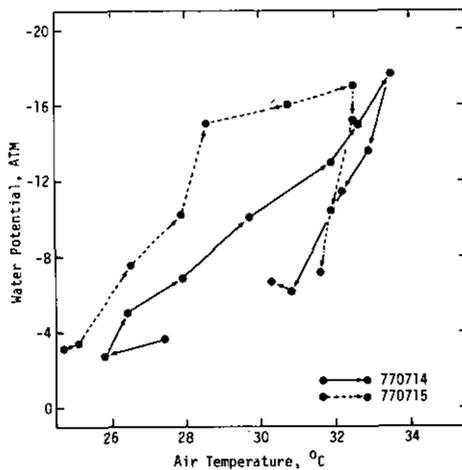


図23 サクラ葉の水ポテンシャルに対する気温の影響。矢印は日変化を示す。図1, 2の結果より作図。

Fig. 23 Leaf water potential in cherry tree as a function of air temperature on July 14 and 15, 1977. Arrows indicate the daily trend.

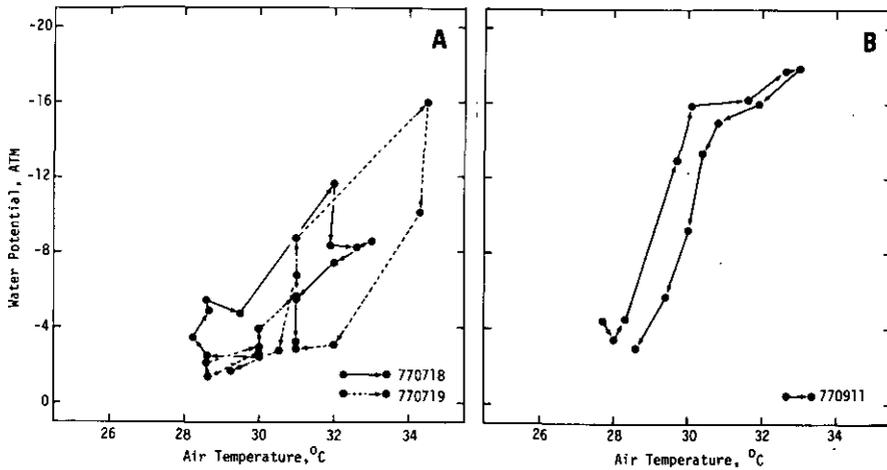


図24 プラタナス葉の水ポテンシャルに対する気温の影響。(A) 図4, 5の結果より, (B) 図12の結果より作図。

Fig. 24 Same as Fig. 23 but for plane tree on July 18 and 19 (A) and September 11 (B).

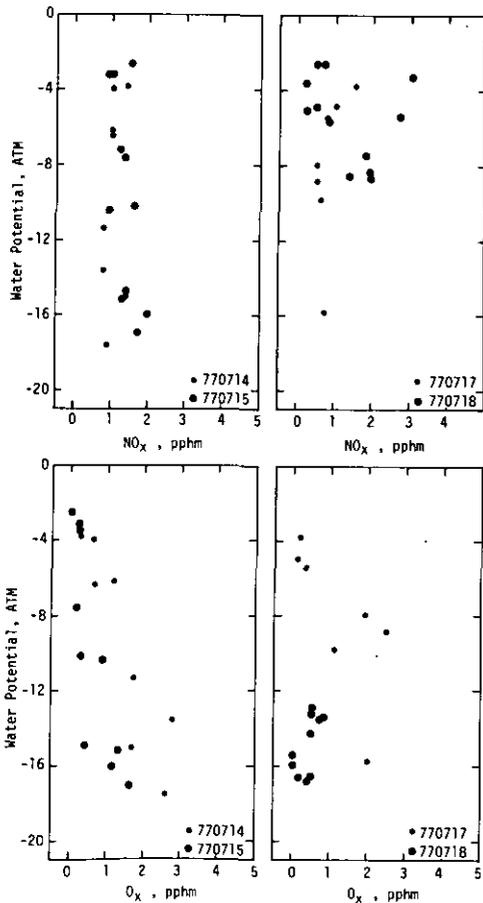


図25 7月のサクラ葉とプラタナス葉の水ポテンシャルに対する窒素酸化物とオキシダントの影響。

Fig. 25 Water potential in cherry and plane tree leaves as a function of nitrogen oxides and oxidant concentrations. Water potential in cherry leaves was measured on July 14 and 15 at the Koishikawa Botanical Gardens and that in plane tree leaves was measured on July 17 and 18 at the Shinjuku National Park.

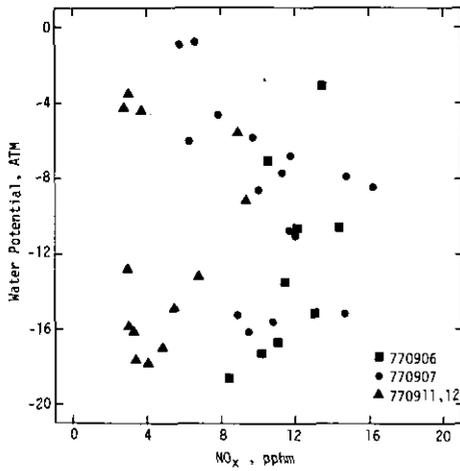


図26 9月のプラタナス葉の水ポテンシャルに対する窒素酸化物とオキシダントの影響。

Fig. 26 Same as Fig. 25 but for plane tree leaves on September 6, 7, and 11 at the Shinjuku National Park.

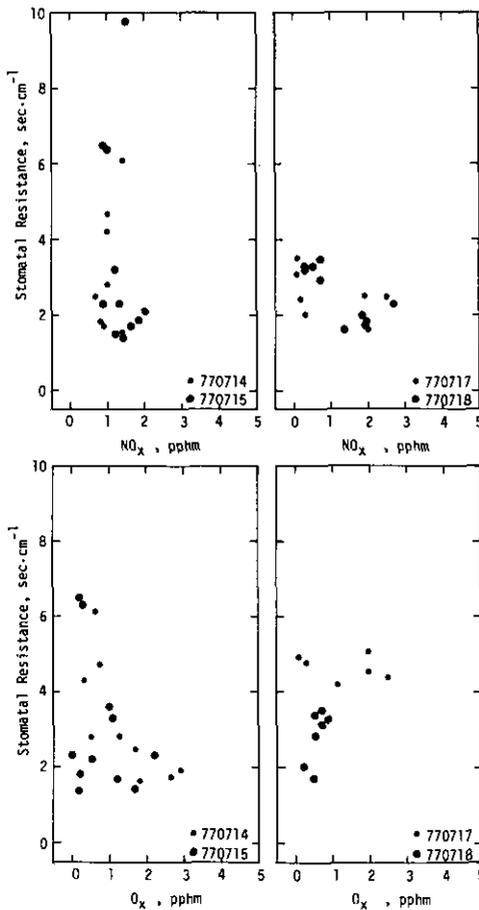


図27 7月のサクラ葉とプラタナス葉の気孔抵抗に対する窒素酸化物とオキシダントの影響。

Fig. 27 Stomatal diffusion resistance in cherry and plane tree leaves as a function of nitrogen oxides and oxidant concentrations. Stomatal diffusion resistance in cherry leaves was measured on July 14 and 15 at the Koishikawa Botanical Gardens and that in plane tree leaves was measured on July 17 and 18 at the Shinjuku National Park.

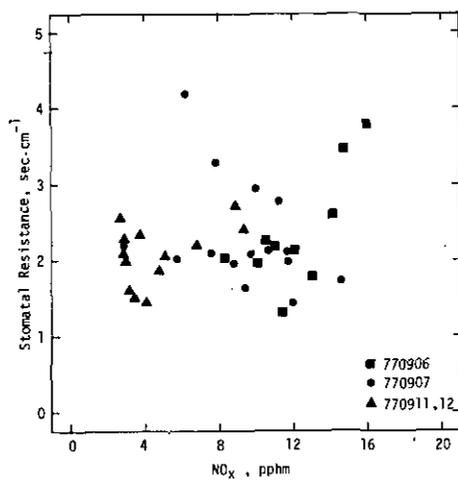


図28 9月のプラタナス葉の気孔抵抗に対する窒素酸化物の影響。

Fig. 28 Same as Fig. 27 but for plane tree leaves: on September 6, 7, 11 and 12 at the Shinjuku National Park.

**Preliminary studies of air pollution effects on higher plants
under field conditions in urban area**

**Akio FURUKAWA, Hideyuki SHIMIZU, Yasumi FUJINUMA*
and Tsumugu TOTSUKA**

Summary

Effects of air pollutants on physiological functions of woody plant leaves were examined under field conditions in Tokyo on July and September, 1977. Diurnal changes of leaf water potential, osmotic potential, stomatal resistance, leaf temperature, and leaf water content in cherry and plane tree leaves were measured. As environmental factors, sulfur dioxide, nitrogen oxides, oxidant, air temperature, relative humidity, and solar radiation were measured. Relationships between physiological functions of the plants and the environmental factors were discussed to clarify the effects of air pollutants on plant functions under field conditions. However, in this research, we could not demonstrate the direct effect of the pollutants on the physiological functions under conditions below the concentrations of the pollutants where no acute injury will take place in the leaves.

V-1

汚染ガスに暴露された植物の生体計測

大政謙次¹・安保文彰¹・船田 周²・相賀一郎¹

要 旨

大気汚染物質の植物への影響を解析するために、環境因子が任意に制御可能な環境制御装置と葉面の種々の波長領域における電磁放射を計測するシステムを組み合わせて生体情報を抽出する手法を提案した。そして、そのための計算機制御システムを設計製作した。

さらに、植物生体計測システム設計のための基礎実験をSO₂について行ない次の結果を得た。

(1) 植物の葉面におけるSO₂収着速度:Qは実験により $Q = 1.48 \times 10^{-3} P_{as} w$ で与えられる。これは、植物のSO₂収着速度を予測するモデルを $Q = 2(P_{as} - P_{is}) / (r_{sa} + r_{ss} + r_b)$ としたときの界面の性質: P_{is} , r_b が $P_{is} = 0$, $r_b = 0$ と仮定できることを意味する。

(2) SO₂暴露下においても葉気温差: ΔT と蒸散速度: W との間には $\Delta T = aW + b$ (a : 負の定数, b : 正の定数) の関係が成立した。(1)の関係と合わせて考えると葉温を測定することにより、気孔開閉速度すなわち蒸散速度およびSO₂収着速度を予測することができよう。

(3) SO₂暴露下において、葉面の各々の部位における可視障害発現の程度とその部位における葉温の変化との間に密接な関係が認められた。すなわち、葉温の上昇が遅い部位程、障害の程度が大きくなる傾向があった。これは、葉温の上昇が遅い部位程気孔の閉じる速度が遅く、葉温上昇が速い部位に比べてより多くのSO₂を収着するためと考えられる。

以上の実験結果により、熱赤外放射の帯域が、気孔開閉ひいては物質交換に関する情報を得るのに有効であることが明らかになった。又、局所部位の情報が植物の被害原因の定量的議論に有効であることが確かめられた。今後、植物体内に存在する物質、たとえば植物色素や水等の吸収帯域の利用と合わせて、高等植物の生体計測システムを開発していく予定である。

1. はじめに

生物を対象とする学問の分野では、生体から如何に多くの情報を得るかが学問の出発点となっている。植物個体を対象とする分野もその例外ではない。古くから、各々の目的に応じて固有の技術が開発されてきた。最近のエレクトロニクスや計算機の進歩は、従来の手法に新風を吹きこみつつある。特に、環境制御装置と組み合わせた計測手法の開発は注目に値する(2, 3, 5, 9, 13, 15)。例えば、葉面の種々の波長領域における電磁放射を計測し、得られたマルチスペクトルの画像

1. 国立公害研究所 技術部

2. 愛媛大学 農学部

を解析する手法は、大気汚染物質の植物影響の様子に葉面の各部位により被害の様子が異なるものを対象とする場合有効であると考えられる。環境条件が任意に制御可能な環境制御装置内での計測という利点を最大限に利用すれば、単に対象の巨視的な多重パターン計測に加えて、局所的な正確さに基づく、定性的あるいは定量的解析が可能であると考えられる。現在のところ、この種の解析手法の開発に関する報告は皆無である。

本研究では、以上の考え方に基づいた汚染植物の生体計測手法の開発とそれに付随する環境制御装置の計算機制御システムの開発を目的とする。本報では、その第一歩として主に環境制御装置の計算機制御システムの概要と今後、マルチスペクトルカメラを用いた植物生体計測を行なう上で必要な基礎実験の結果について述べる。

2. 植物生体計測のための環境制御装置

植物生体の反応過程に必要な時間は、おおよそ、生長で 10^6 sec、光合成産物の転流・貯蔵で、 10^3 sec、 CO_2 の固定反応で 10^0 sec、電子伝達反応、光磷酸化反応、ヒル反応で 10^{-3} sec、光合成活性中心の酸化還元で 10^{-9} sec、クロロフィルの光量子吸収で 10^{-15} secのオーダーである。この中で、植物個体を対象とする場合、対象とする時間領域は 10^0 sec以上である。特に、 $10^0 \sim 10^3$ secの領域は、光合成速度や気孔開閉速度の領域であり、汚染ガスによる影響を調べる上で重要である。この領域において使用される環境制御装置は、過渡特性および定常特性共に高精度のものが要求される。そして、植物生体の計測装置を含めて、統一的考え方に基づく一つの解析装置としての機能を有することが必要である。このためには、計算機の機能を充分に利用した制御および計測システムが望まれる。この考え方に基づいた温湿度に関する計算機制御についてはすでに報告されている(6, 7, 8)。しかし、大気汚染ガスを対象とし、空調プロセスとの干渉やガス相互間の干渉等を考慮したシステムは見あたらない。そこで、52年度上半期において、この考え方に基づいた植物実験用ガスキャビネットの計算機制御システムを設計した。

システムは、ガス・空調プロセス、計算機および両者を結ぶためのプロセスコントローラより構成される。図1にガス・空調プロセスの構成図と流体の流れ図を示す。本プロセスの特徴は、(1)換気回数を自動ダンパにより調節可能にしたこと、(2)キャビネット内の温湿度を内部の冷却除湿用熱交換器(C/C2, D/C)を使用する方式あるいは使用しない方式のどちらの方式によっても調節可能にしたことである。例えば、C/C2, D/Cを使用しない場合の冷却除湿操作は、C/C1により行なわれる。そして自動ダンパA-1, A-2は換気回数の調節の他に、キャビネット内に供給する熱量やキャビネット内圧力等の調節のために用いられる。これにより、対象となる汚染ガスに対する熱交換器等の不必要な干渉を避け、又、二次生成物に調節機能を持たせることができよう。

計算機制御においてプロセスコントローラは、ガス・空調プロセスと計算機を結ぶ広い意味でのインターフェイスに相当する。ガス・空調プロセスにおける温湿度、汚染ガス濃度等の検出信号は

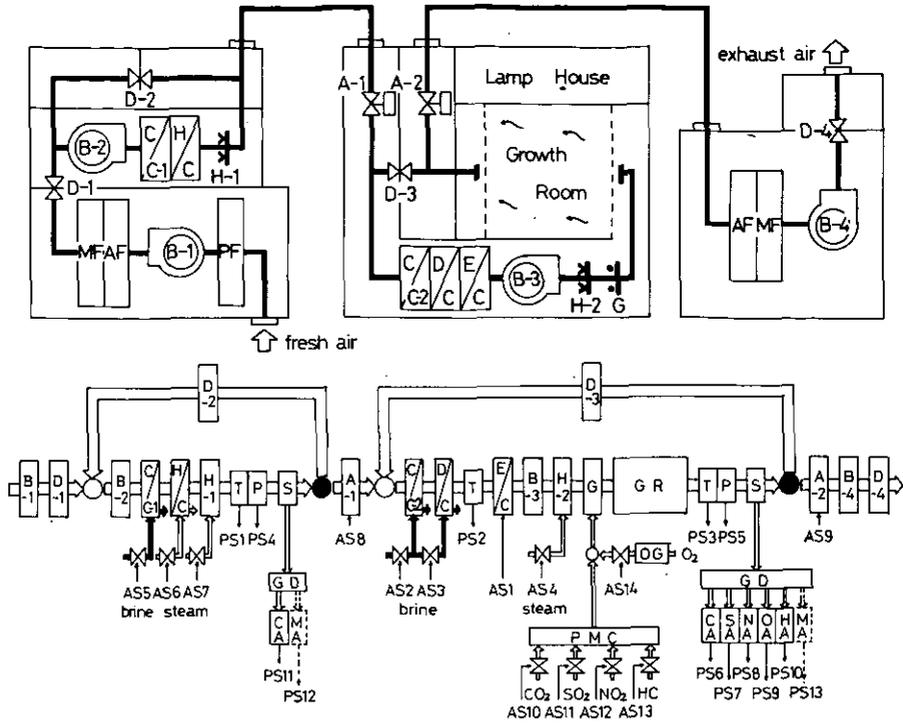


図1 装置と空気の流れを示すシステム図

C/C ; 冷却コイル	T ; 抵抗温度計
H/C ; 加熱コイル	P ; 乾湿球湿度計
D/C ; 除湿コイル	S ; ガスサンプリング
E/C ; 電気加熱コイル	ユニット
H ; 蒸気噴射ユニット	GD ; ガス分配器
G ; ガス噴射ユニット	PMC ; プレミキシング装
PF ; プレフィルタ	置
AF ; 活性炭フィルタ	CA ; 二酸化炭素分析計
MF ; マンガンフィルタ	SA ; 二酸化硫黄分析計
A ; 自動ダンパ	NA ; 二酸化窒素分析計
D ; 手動ダンパ	OA ; オゾン分析計
B ; 送風機	HC ; 炭化水素分析計
GR ; グロースルーム	MA ; モニター用多目的
	分析計
	OG ; オゾン発生器

Fig. 1 Diagram of the process and the air flow

C/C ; cooling coil	T ; resistance thermometer
H/C ; heating coil	P ; psychrometer
D/C ; dehumidifying coil	S ; gas sampling unit
E/C ; electric heating coil	GD ; gas distributor
H ; steam jet unit	PMC ; premixing chamber
G ; gas jet unit	CA ; CO ₂ analyzer
PF ; prefilter	SA ; SO ₂ analyzer
AF ; active carbon filter	NA ; NO ₂ analyzer
MF ; Mn filter	OA ; O ₃ analyzer
A ; automatic damper	HC ; HC analyzer
D ; manual damper	MA ; monitoring analyzer
B ; blower	OG ; O ₃ generator
GR ; growth room	

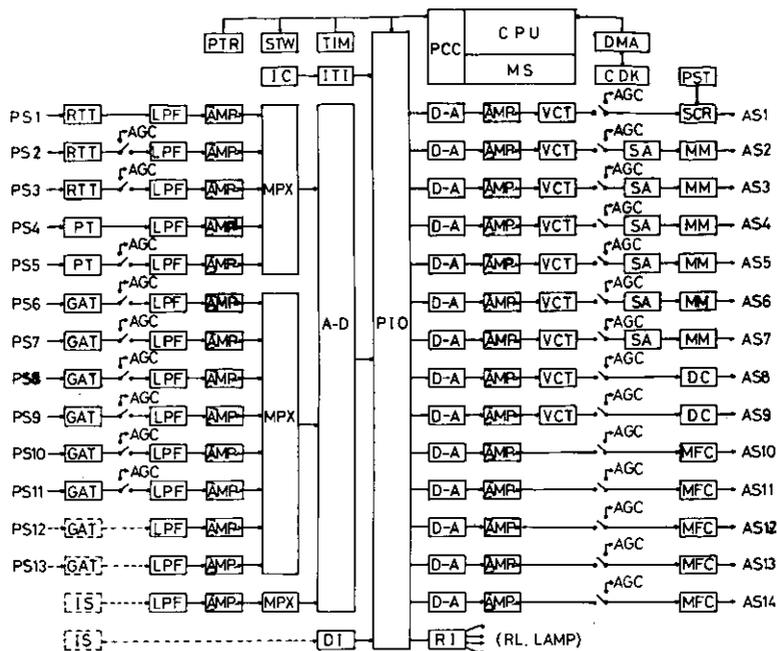


図2 プロセス制御システムおよび信号系統図

- | | |
|--------------------|----------------------|
| CPU ; 中央演算処理装置 | LPF ; ローパスフィルタ |
| MS ; 主記憶装置 | AMP ; 増幅器 |
| PCC ; プログラム制御チャンネル | MPX ; マルチプレクサ |
| PTR ; 紙テープ読取装置 | A-D ; A-D 変換器 |
| STW ; システムタイプライタ | D-A ; D-A 変換器 |
| TIM ; タイマ | RI ; リレーインタフェース |
| DMA ; DMAチャンネル | DI ; デジタル入力インタフェース |
| CDK ; カートリッジディスク装置 | PIO ; プロセス入出力インタフェース |
| IC ; 割込チャンネル | VCT ; 電圧-電流変換器 |
| ITI ; 割込インタフェース | SA ; サーボアクチュエータ |
| RTT ; 抵抗温度変換器 | PST ; パルス信号変換器 |
| PT ; 湿度変換器 | SCR ; SCR電力変換器 |
| GAT ; ガス濃度変換器 | MM ; モジユトルモータ |
| IS ; 計測機器 | DC ; ダンパコントローラ |
| AGC ; アナログコントローラ | MFC ; 質量流量調節計 |

Fig. 2 Diagram of the process control system and the signal flow

- | | |
|--|---|
| CPU ; central processing unit | LPF ; low pass filter |
| MS ; main storage | AMP ; amplifier |
| PCC ; program control channel | MPX ; multiplexer |
| PTR ; photoelectric tape reader | A-D ; A-D converter |
| STW ; system typewriter | D-A ; D-A converter |
| TIM ; timer | RI ; relay interface |
| DMA ; DMA channel | DI ; digital input signal interface |
| CDK ; cartridge disk | PIO ; process input-output signal interface |
| IC ; interruption channel | VCT ; voltage current transmitter |
| ITI ; interruption interface | SCR ; SCR electric manipulator |
| RTT ; resistance thermometer transmitter | MM ; modutrol motor |
| PT ; psychrometer transmitter | DC ; damper controller |
| GAT ; gas analyzer transmitter | MFC ; mass flow controller |
| IS ; instrument system | SA ; servo-actuator |
| AGC ; analog controller | PST ; pulse signal transmitter |

アナログ量であるので、計算機にデータとして入力するには、A-D変換器でデジタル量に変換する必要がある。他方、計算機で演算された操作量の信号は、D-A変換器でアナログ量に変換した後、モジュトルモータ、SCR電力変換器、質量流量計等の操作部へ伝送される必要がある。さらに、システムで伝送される信号の調整と雑音の除去が必要である。以上より、プロセスコントローラの構成は各検出端からの信号の調整、フィルタ、A-D変換器、計算機への入力インターフェイス、出力インターフェイス、D-A変換器、操作信号の調整が主要なものである。プロセスコントローラには、この他に、人工照明のオンオフ制御や割込み処理機能が含まれている。具体的なプロセスコントローラの機器の構成とその信号の流れを図2に示す。本システムにおいては、高精度の制御が目的であるので特に信号伝送における雑音を考慮し、高レベル(0~10V)信号を使用した。そして、アナログローパスフィルタとデジタルフィルタの併用により、伝送におけるノイズを、SN比で60 dB以上におさえることができた。

最後に、以上に述べたシステムの総合的な機能の検討を離散的PID制御により行なった。図3に基本的なPID制御のためのプログラムフローチャートを示す。又、図4にこのプログラムを用いて行なった制御の例を示す。ここで得られた結果は、今後、種々の制御アルゴリズムの開発を行なっていく上で十分満足できるものであった。

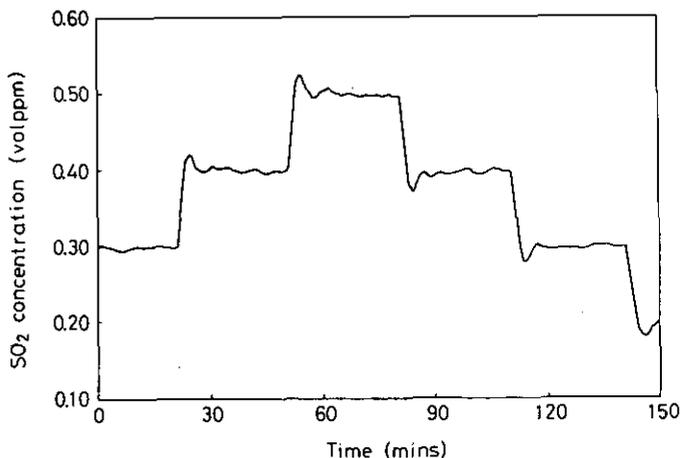
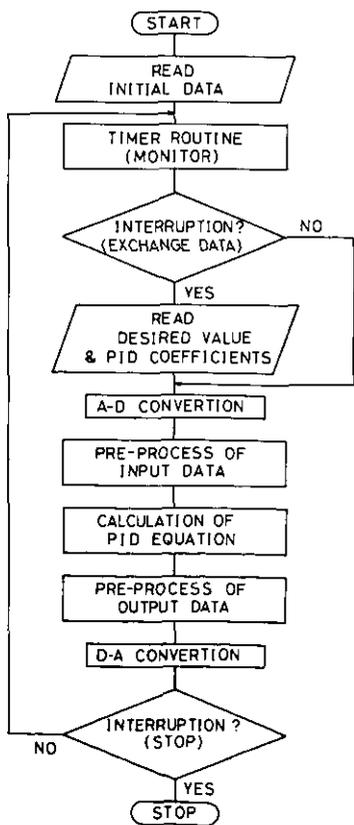


図4 離散的PIDアルゴリズムを用いたSO₂濃度制御例

Fig. 4 An example of SO₂ concentration control by discrete PID algorithm.

図3 離散的PIDアルゴリズムを用いたDDCのフローチャート

Fig. 3 Program flow chart of discrete PID algorithm in DDC.

3. 植物生体情報の抽出

マルチスペクトルの画像に如何なる植物生体情報が含まれているかを予測しておくことは、計測システムの設計のうえで必要なことである。植物体内に存在する物質、たとえば、クロロフィル、カロチノイド、水等の吸収帯域の利用は容易に思いつき、実際に可視障害や脱水症状の評価に有効であろうと推測される。しかし、計測された画像には、物質の吸収帯域から直接得られるこれ等の情報以外に、ある関係を用いて二次的あるいは三次的に得られる情報も含まれている。その中で、気孔の開閉に関する情報は植物の気孔が汚染物質の吸収に果たす役割を考えれば特に重要である(1, 10, 14, 16)。ここでは、人工環境制御装置の実験という特徴を考慮し、葉温を計測することにより、気孔の開閉については汚染物質の吸収速度に関する情報を抽出する手法を提案する。以下に SO_2 を例とした基礎実験の結果について述べる。

3.1 記号

W : 葉面における蒸散速度	P_{as} : 大気中の SO_2 濃度
Q : 葉面における SO_2 収着速度	P_{1s} : 気孔間隙内界面での SO_2 濃度
T_a : 気温	r_{wa} : 水蒸気に関する境界層抵抗
T_1 : 葉温	r_{ws} : 水蒸気に関する気孔抵抗
ΔT : 葉気温差	r_{sa} : SO_2 に関する境界層抵抗
$X_s(T)$: $T^\circ C$ における飽和蒸気圧	r_{ss} : SO_2 に関する気孔抵抗
ϕ : 相対湿度	r_b : SO_2 に関する界面での抵抗
r_a : 葉面における境界層抵抗	P : 葉面における純放射量
α : 風向に対する葉の傾き等を考慮した係数	S : 葉面における顕熱伝達量
l : 葉長	L : 水蒸気潜熱
Sc : シュミット数	P_s : 葉面における短波放射量
Re_x : x でのレイノルズ数	α_p : 葉面における短波放射の吸収係数
D : 相互拡散係数	P_l : 葉面における長波放射の吸収量
D_s : SO_2 と空気との相互拡散係数	$2\epsilon\sigma T_1^4$: 葉面からの射出量
D_w : 水蒸気と空気との相互拡散係数	ϵ : 葉面における射出率
w : $W / (X_s(T_1) - \phi X_s(T_a))$	σ : ステファン・ボルツマンの常数
q : Q / P_{as}	h_T : 葉面における熱伝達係数
$Q_t(t)$: 時点 t における SO_2 の全収着量	

3.2 葉面における物質交換

前述の装置を用いてヒマワリの SO_2 収着速度と蒸散速度との関係を調べた。ここで、ヒマワリの SO_2 収着速度は、一定濃度の SO_2 を装置内に一定流量で供給し、装置内の SO_2 濃度が定常になった後ヒマワリを搬入し、その後の装置内の SO_2 濃度変化から計算した。図5に高濃度の SO_2 (この場合は 1.5 vol ppm) を暴露したときの SO_2 収着速度と蒸散速度の典型的な経時変化の例を示す。暴露時間の経過に伴って SO_2 収着速度: Q も蒸散速度: W も共に減少した。暴露開始後約3時間経過した時点から、 SO_2 の影響で実験植物の葉が萎れ始めた。この測定結果から求めた SO_2 収着速度と蒸散速度との関係を図6に示す。回帰直線が折れ曲った点は、葉が萎れ始めた時点とほぼ一致していた。この様に、植物の萎れの影響はあるが、 SO_2 収着速度と蒸散速度との間に正の相関関係が認められた。この結果より、ヒマワリの SO_2 収着の主なもの気孔を通しての吸収であると考えられる。それ故、 SO_2 に関する収着機構は葉面における蒸散等の物質移動機構¹¹⁾と同様に扱うことができる。

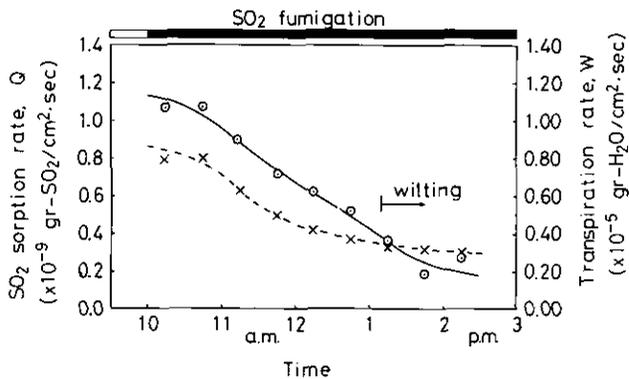


図5 1.5 vol ppm SO_2 暴露下における SO_2 収着速度, Q (—○—) と蒸散速度, W (---x---) の経時変化。気温 32°C 、湿度 $60\% \text{ RH}$ 、照度 20 klux

Fig. 5 Time course of SO_2 sorption rate, Q (—○—) and transpiration rate, W (---x---) during fumigation of about 1.5 vol ppm SO_2 . Air temperature, 32°C ; humidity, $60\% \text{ R.H.}$; light intensity, 20 klux .

図7に葉面の境界層と気孔開度を考慮した蒸散と SO_2 吸収に関する簡単なモデル図を示す。このモデルによれば、気孔が両面にある場合、蒸散速度および SO_2 収着速度はそれぞれ次式で近似される。

$$W = \frac{2\{X_s(T_1) - \varphi X_s(T_a)\}}{\Gamma_{wa} + \Gamma_{ws}} \quad (1)$$

$$Q = \frac{2(P_{as} - P_{ts})}{\Gamma_{sa} + \Gamma_{ss} + \Gamma_b} \quad (2)$$

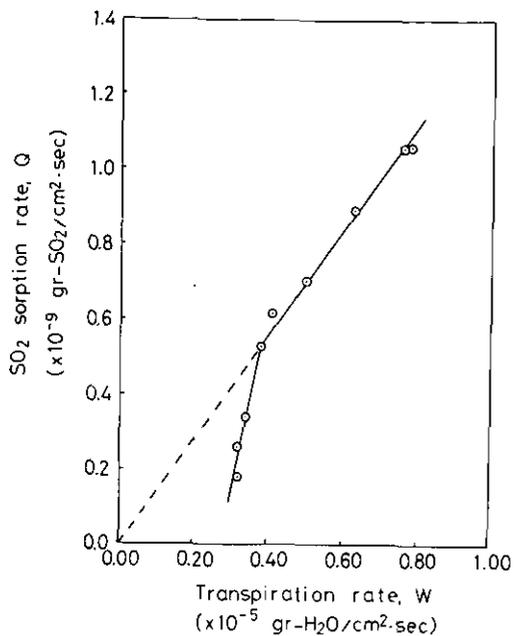


図6 図5の結果から求めたSO₂収着速度, Qと蒸散速度, Wの関係

Fig. 6 Relation between SO₂ sorption rate, Q and transpiration rate, W. Data were obtained from the result shown in Fig. 5.

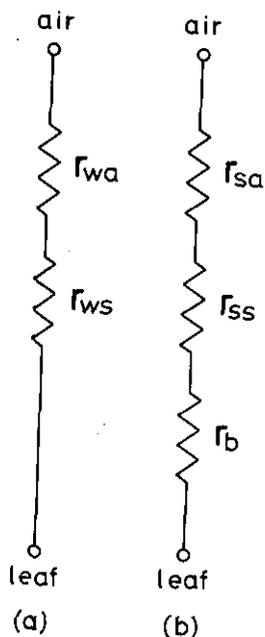


図7 大気-植物葉間のガス交換モデル
(a) 蒸散モデル

r_{wa} : 境界層抵抗

r_{ws} : 気孔抵抗

(b) SO₂収着モデル

r_{sa} : 境界層抵抗

r_{ss} : 気孔抵抗

r_b : 気相・液相間の界面抵抗

Fig. 7 Models for gas exchange between atmosphere and leaf

(a) A model for transpiration.

r_{wa} ; boundary layer resistance

r_{ws} ; stomatal resistance

(b) A model for SO₂ sorption.

r_{sa} ; boundary layer resistance

r_{ss} ; stomatal resistance

r_b ; gas-liquid interfacial resistance

装置内においては、最大風速が40cm/sec ($Re = 5.3 \times 10^3$)であることより、葉面境界層は平板における層流境界層と仮定することができ、葉面における境界層抵抗： r_a は次式で近似される(11, 12)。

$$r_a = 1 / (0.332 \alpha Sc^{1/3} Re, x^{1/2} \frac{D}{x}) \quad (\text{局所}) \quad (3)$$

$$r_a = 1 / (0.664 \alpha Sc^{1/3} Re, l^{1/2} \frac{D}{l}) \quad (\text{平均}) \quad (4)$$

そして、 r_{sa}/r_{wa} , r_{ss}/r_{ws} には次式の関係が成立する。

$$r_{sa}/r_{wa} = (D_s/D_w)^{-2/3} = 1.53 \quad (5)$$

$$r_{ss}/r_{ws} = (D_s/D_w)^{-1} = 1.89 \quad (6)$$

蒸散速度の経時変化を測定するのは比較的容易である。界面の性質 P_{1s} および r_b が前もってわかっているならば、式(1)~(6)の関係を用いて、測定された蒸散速度から SO_2 の収着速度を予測することができよう。それ故、界面の性質を、暴露初期の状態と長期間暴露したときの状態に分けて実験により調べた。図8に種々の濃度状態で暴露初期の状態(暴露開始後2時間経過した時点)での Q と w (w : 水蒸気飽差1mmHg当りの蒸散速度)の関係を示す。回帰直線が原点を通ることから、式(1)と(2)が相似形であると推定される。そこで、 $P_{1s} = 0$, $r_b = 0$ の仮定のもとに、測定した $X_s(T_1)$, $X_s(T_a)$, ϕ , W , P_{as} , $\alpha = 1.25$ 等を式(1)~(6)に代入して Q を計算し、 Q/w と P_{as} との関係を求めると $Q/w = 1.48 \times 10^{-3} P_{as}$ となる。これは図8の実験結果と一致している。以上より、暴露初期の状態においては SO_2 に関する界面の性質は $P_{1s} = 0$, $r_b = 0$ と仮定できる。次に、比較的低濃度の SO_2 を長期間暴露し、界面の性質の変化を調べた。図9に w と q (Q/P_{as})の経時変化の一

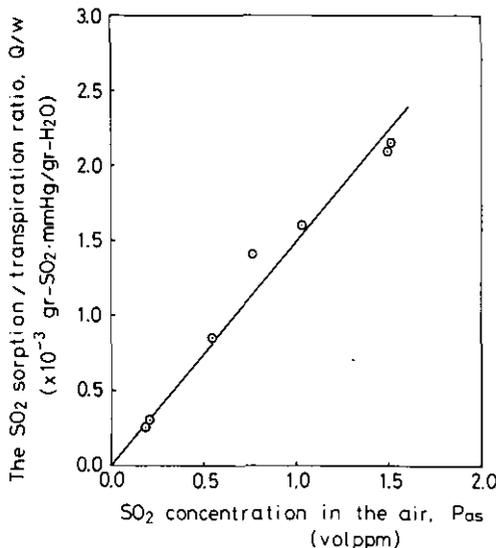


図8 大気中の SO_2 濃度、 P_{as} と SO_2 収着速度/蒸散速度、 Q/w の関係
気温30-32°C, 湿度60% R.H., 照度20 klux

Fig. 8 Relation between SO_2 concentration in the air, P_{as} and the SO_2 sorption/transpiration ratio, Q/w . Air temperature, 30-32°C; humidity, 60% R.H.; light intensity, 20 klux.

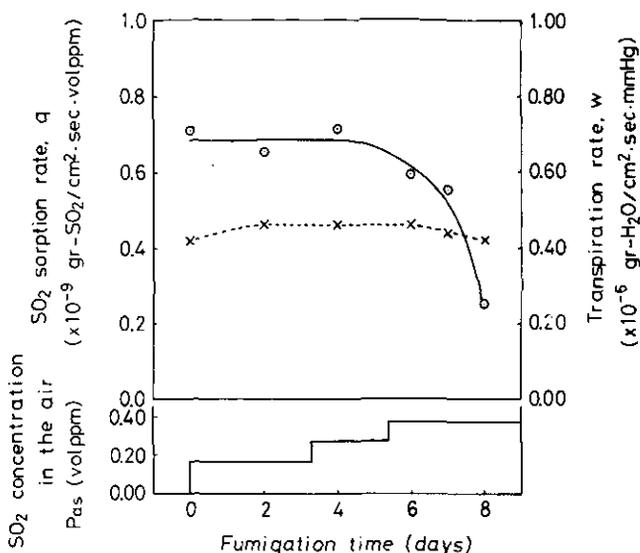


図9 長期間SO₂暴露した場合のSO₂収着速度, q (—○—)と蒸散速度, w (---x---)の経時変化 ($q = Q/P_{as}$, $w = W/(X_s(T_1) - \varphi X_s(T_a))$)
 気温30-38°C, 湿度60% R.H., 照度20 klux
 (6 a.m. - 6 p.m.)

Fig. 9 Time course of SO₂ sorption rate, q (—○—) and transpiration rate, w (---x---) during SO₂ fumigation. Air temperature, 30-38°C; humidity, 60% R.H.; light intensity, 20 klux (6a.m.-6p.m.).
 ($q = Q/P_{as}$, $w = W/(X_s(T_1) - \varphi X_s(T_a))$)

例を示す。ただし、葉面積生長率は全実験期間の平均で1%/day、葉面における可視障害は暴露開始後6日目において発生し始め、8日目において葉面積の約5%であった。実験結果によれば、全実験期間に渡って w はほぼ一定であったにもかかわらず、 q は暴露開始後7日目以後において急激に低下した。この q の低下は可視障害が顕著に現われる時期とほぼ一致していた。図10に図9から求めた q/w とそのときの界面の性質 P_{1s}/P_{as} の経時変化を式(1)~(6)を用いて計算した結果を示す。低濃度長期間暴露において、 q は界面の性質にも影響される。図11に図9で得られた q を積分することにより求めた収着量: $Q_t(t)$ と P_{1s} の関係を示す。 $Q_t < 0.4 \times 10^{-4}$ gr-SO₂/cd においては $P_{1s} = 0$ であった。一般的に界面の性質 P_{1s}/P_{as} は植物体内の緩衝作用等の生理機能に関係し、その値の変化を正確に予測することは不可能であろう。しかし、本実験結果より、可視障害発現が顕著になるまで、比較的長期の暴露期間 ($Q_t < 0.4 \times 10^{-4}$ gr-SO₂/cd) に渡って、実験装置内での実用

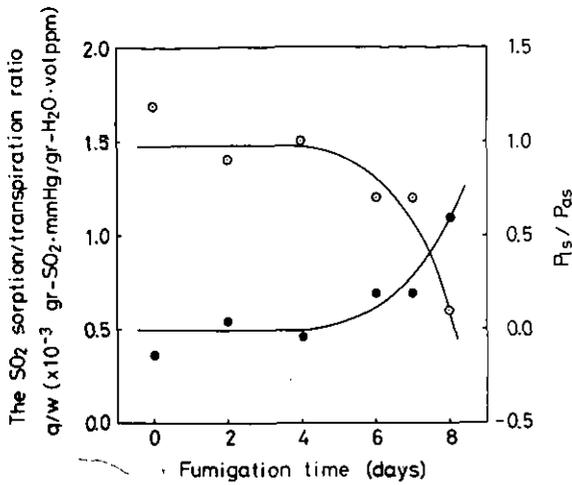


図10 図9の結果から求めた q/w (—○—) と P_{1s}/P_{as} (—●—)の経時変化 P_{1s}/P_{as} は $q/w = 1.48 \times 10^{-3} (1.00 - P_{1s}/P_{as})$ より計算した。
 P_{1s} : 界面における SO_2 濃度
 P_{as} : 大気中の SO_2 濃度

Fig. 10 Time course of the q/w ratio (—○—) and the P_{1s}/P_{as} ratio (—●—). Data were obtained from the result shown in Fig. 9. The P_{1s}/P_{as} ratio was calculated from $q/w = 1.48 \times 10^{-3} (1.00 - P_{1s}/P_{as})$. P_{1s} , SO_2 concentration at gas-liquid interface; P_{as} , SO_2 concentration in the air.

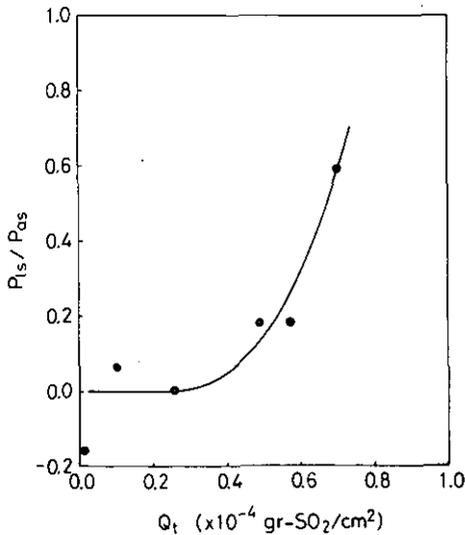


図11 SO_2 吸着速度, Q の積分値, Q_t と P_{1s}/P_{as} の関係
 データは図9, 図10の結果を用いた。

Fig. 11 Relation between Q_t (integral of SO_2 sorption rate, Q) and the P_{1s}/P_{as} ratio. Data were obtained from the results shown in Fig. 9 and Fig. 10.

的な P_{1s} は, $P_{1s} = 0$ と仮定できる。

3.4 葉温測定による気孔開閉に関する情報の抽出

Monteith(11)や Gates(14)等によれば, 葉面における熱収支は一般に次式によって与えられる。

$$P = S + LW \quad (7)$$

式(7)において純放射量 P は

$$P = \alpha_p P_s + P_1 - 2\epsilon\sigma T_1^4 \quad (8)$$

長波放射の吸収量 P_1 は周囲壁面による黒体放射で, その温度が気温: T_a に等しいとすれば, $2\epsilon\sigma T_a^4$ となり, さらに葉の射出率を近似的に1.0として, 次式を得る。

$$\begin{aligned} P &= \alpha_p P_s + 2\sigma(T_a^4 - T_1^4) \\ &\approx \alpha_p P_s + 8\sigma(T_a - T_1)T_a^3 \end{aligned} \quad (9)$$

顕熱項Sは、

$$S = -2h_T(T_a - T_l) \quad (10)$$

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

$$\Delta T = \frac{-L}{8\sigma T_a^3 + 2h_T} W + \frac{\alpha_p P_s}{8\sigma T_a^3 + 2h_T} \quad (11)$$

実験装置内において、光環境、気温、風速等を一定に保つとすれば、 ΔT とWとの間に線形関係が成立することが推察される。SO₂暴露下において、 ΔT とWとの間に線形関係が成立するかどうかを実験により調べた。図12に高濃度のSO₂を暴露したときの葉温と蒸散速度の典型的な経時変化

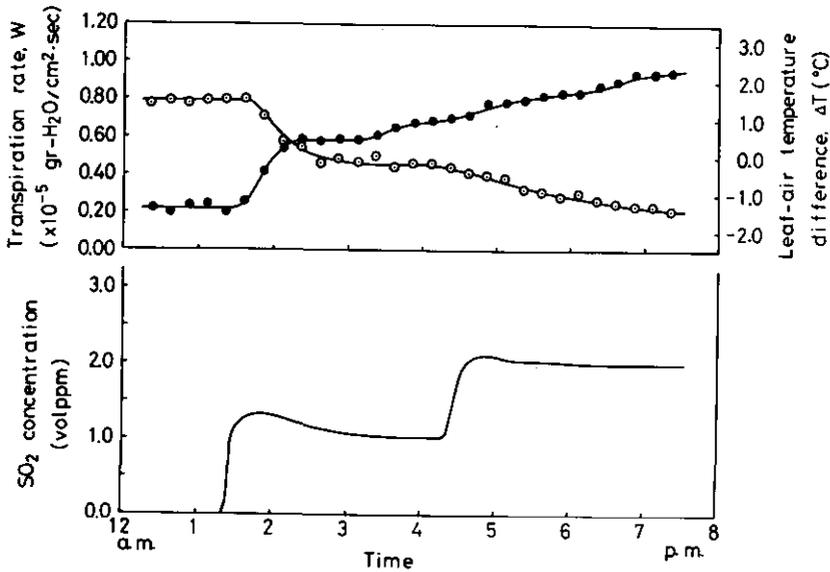


図12 SO₂暴露下における蒸散速度, W (—○—)と葉気温差, ΔT(—●—)の経時変化

Fig. 12 Time course of transpiration rate, W(—○—) and leaf-air temperature difference, ΔT(—●—) during SO₂ fumigation. Air temperature, 26°C; humidity, 60% R.H.; light intensity, 40 klux.

の例を示す。葉温は、熱電対を1枚の葉の表裏にそれぞれ6対ずつ取りつけて測定した。熱電対による測定は葉温の面情報を得るのに必ずしも好ましい方法ではないが、基礎実験ということで、古くから葉温の測定に用いられているこの方法を採用した。この場合の材料としては、1個体のヒマワリの第5、6葉位の葉のみを残し、取り付けた24対の熱電対の葉温変化のパターンが比較的均一なものを選んだ。これは、実験により測定される蒸散速度が一個体での値であるので、この値と対

比する一個体中での葉温の分散を小さくするための処置である。図12に示した測定結果から得られた葉气温差と蒸散速度との関係を図13に示す。SO₂暴露下においても式(1)に示したΔTとWとの間に線形関係が成立することが確かめられた。

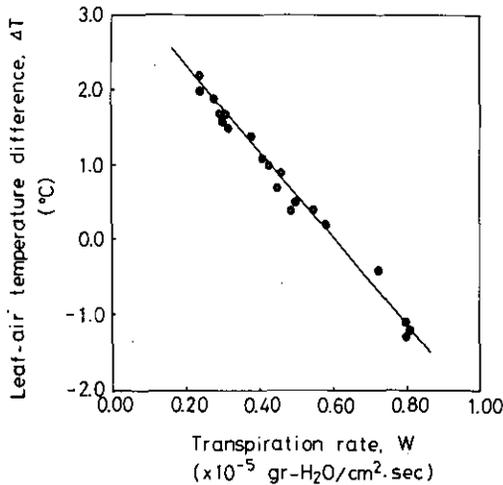


図13 図12の結果から求めた蒸散速度, Wと葉气温差, ΔTの関係

Fig. 13 Relation between transpiration rate, W and leaf-air temperature difference, ΔT. Data were obtained from the result shown in Fig. 12.

葉温と水蒸気に関する気孔抵抗の関係は、式(1)を式(11)に代入することにより得られる。

$$\Delta T = \frac{-L\{X_s(T_l) - \phi X_s(T_a)\}}{(4\sigma T_a^3 + h_T)(r_{wa} + r_{ws})} + \frac{\alpha_p P_s}{8\sigma T_a^3 + 2h_T} \quad (12)$$

実験装置内において、光環境、温湿度、風速等を一定に保つとすれば、ΔTを測定することにより水蒸気に関する気孔抵抗を推定することができる。なお、水蒸気に関する気孔抵抗とSO₂に関する気孔抵抗は、式(6)により相互に変換可能である。上記の関係をを用いて、光環境を変えた場合の気孔開度の変化を調べた。一般に、気孔は、明条件下において開き、暗条件下において閉じることが知られている。図14に光環境を明条件から暗条件にした場合のΔTの測定値を示す。気孔開度の変化の情報は図中の実線によって得られる。葉温や種々の環境要因の測定精度の問題から気孔抵抗の絶対値での議論は今後の課題となろう。

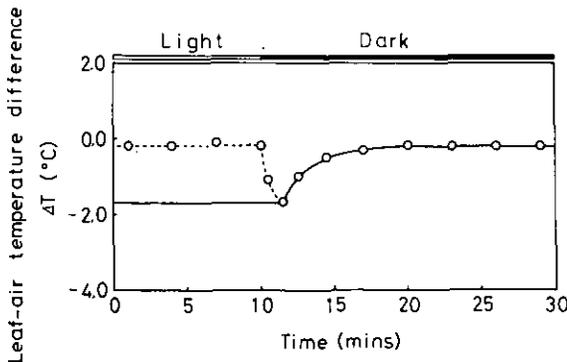


図14 明条件から暗条件に変えた場合の葉气温差, ΔTの経時変化(---○---)と気孔開度の経時変化(—○—) 気温26°C, 湿度60% R. H., 照度40 klux → 0 klux

Fig. 14 Stomatal response (—○—) that was obtained through leaf-air temperature difference (---○---). Air temperature, 26°C; humidity, 60% R.H.; light intensity, 40 klux → 0 klux.

3.4 葉面の局所部位に発現する可視障害における気孔の役割

大気汚染物質に暴露された植物の可視障害発現の状態は、葉位や葉面の部位等により異なることが一般に知られている。しかし、その原因の解析例は皆無に等しい。その主要な理由の一つは、今まで局所的にも正確な面情報に基づいた可視障害の評価や寄与すると予想される因子の定量化がなされていなかったことによると考えられる。そこで、この手法に基づく原因解析の例として、高濃度のSO₂を暴露したときの種々の葉位の葉の各部位に発現する可視障害の原因を局所収着量との関係から検討した。局所収着量は前節で述べた関係を利用し、葉温を測定することにより予測した。葉温の測定は熱電対を用いて行なったが、先にも述べた様に熱電対は局所的にも正確な面情報を得るのに好ましい方法ではない。しかし、得られた結果が本質を逸脱することはないと考えられる。図15に高濃度SO₂を暴露したときの同一葉位で異なった部位における葉気温差の経時変化の典型的

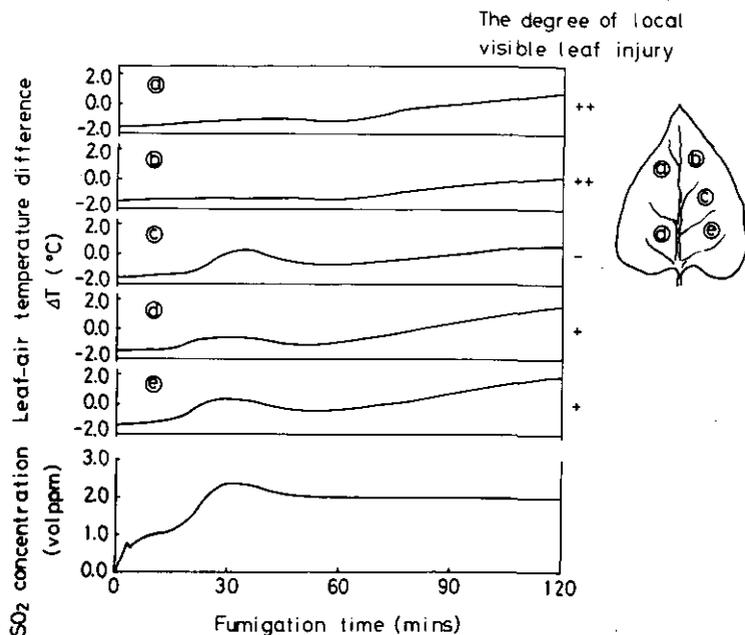


図15

SO₂暴露下における葉気温差、 ΔT の経時変化およびそれぞれの部位における5時間後の可視障害の程度(-, +, ++)

気温26°C, 湿度60% R.H., 照度40klux

可視障害の程度は熱電対の接着点を中心とする直径10mmの円内において可視障害部分の占める面積の割合で示す。

- : 可視障害なし, + : 可視障害の面積の割合は1/2未満,

++ : 可視障害の面積の割合は1/2以上

Fig. 15

Time course of leaf-air temperature difference, ΔT during SO₂ fumigation and the degree of local visible leaf injury (-, +, ++). Air temperature, 26°C; humidity, 60% R.H.; light intensity, 40 klux. The degree of local visible leaf injury was estimated by measuring the ratio of injured leaf area to a unit area (10mm in diameter) where a thermoelectric couple was set. -, the ratio of injured leaf area to a unit area = 0; +, the ratio of injured leaf area to a unit area < 1/2; ++, the ratio of injured leaf area to a unit area \geq 1/2.

例を示す。各々の部位において、SO₂暴露前の葉気温差は-1.3~-1.7℃と比較的均一であったにもかかわらず、暴露時間の経過に伴って不均一になった。そして、葉面の部位の違いにかかわらず、葉温上昇が遅い部位程被害の程度は大きくなった。実験装置内の環境は一定に保たれており、SO₂を暴露しない場合の葉気温差は図16に示す様に一定に保たれる。それ故、各部位における葉気温差の上昇はSO₂暴露の影響で気孔が閉じたことを示唆している。被害の程度と葉温上昇の関係を定量的に議論するために、これ等を数量化した。被害の程度は、SO₂を2時間暴露した後、20時間経過した時点での熱電対の接着点を中心とする直径10mmの円内において可視障害部分の占める面積の割合を測定し、3段階に区分した。すなわち、全く可視障害発現がない場合を(-)記号で表示し、可視障害部分の全面積に占める割合が0~1/2の場合を(+), 1/2~1の場合を(++)で表示した。他方、葉温の時間的変化の数量化は図17に示すモデルによった。図に示された斜線部の全面積

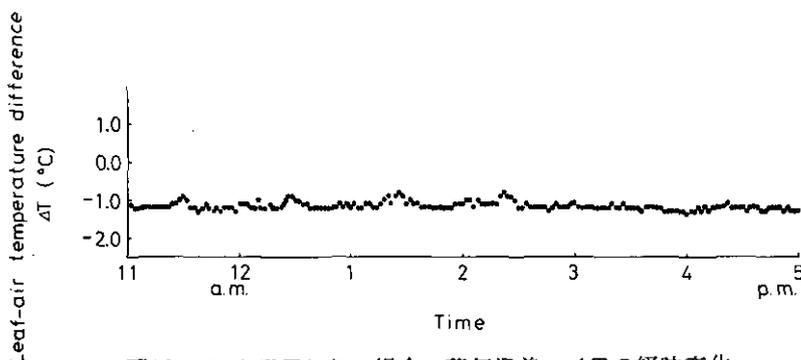


図16 SO₂を暴露しない場合の葉気温差, ΔT の経時変化
 気温26℃, 湿度60% R. H., 照度40 klux

Fig. 16 Time course of leaf-air temperature difference, ΔT in steady state. Air temperature, 26°C; humidity, 60% R.H.; light intensity, 40 klux.

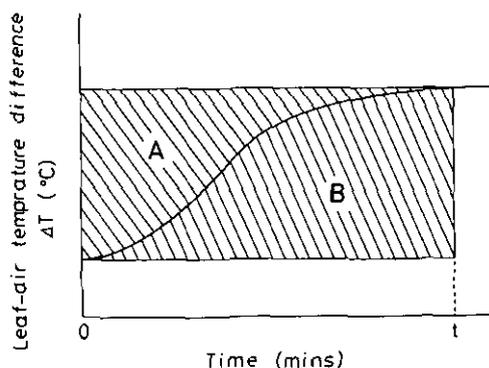


図17 SO₂暴露時における葉気温差, ΔT の経時変化を数量化するためのモデル図
 図中の斜線部分の面積A, Bを測定することによって, ΔT の変化の速さを評価する。 ΔT の変化が速い場合ほど, $A/(A+B)$ の割合は小さい。

Fig. 17 Model figure of response of leaf-air temperature difference, ΔT during SO₂ fumigation. The response of ΔT was indicated by $A/(A+B)$. With fasting the response of ΔT , $A/(A+B)$ became small.

を $(A+B)$ とし、葉気温差を示す曲線によって、さらにAとBに区分した。 $A/(A+B)$ の割合が小さいほど、 SO_2 暴露時における葉温の上昇が速いことを意味する。種々の葉位における $A/(A+B)$ と可視障害発現の割合との関係を図18に示す。同一葉位においては、この数量化モデルを

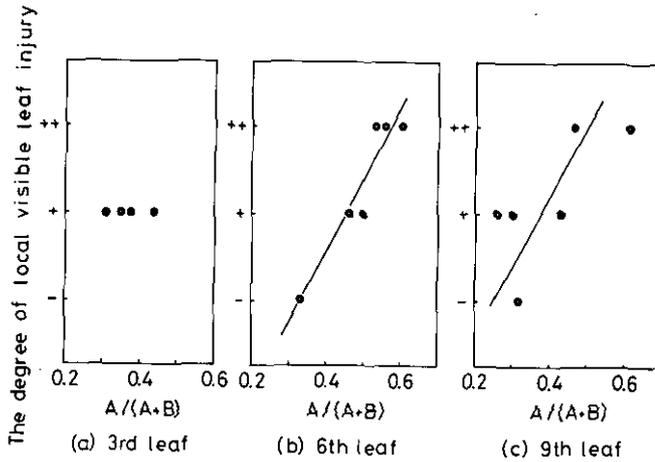


図18 $A/(A+B)$ (葉気温差、 ΔT の変化の速さ)と可視障害の程度との関係
($A/(A+B)$ については図17, 可視障害の程度については図15参照)

Fig. 18 Relation between the $A/(A+B)$ ratio (the index of the response of leaf-air temperature difference. cf. Fig. 17) and the degree of local visible leaf injury (-, +, ++; cf. Fig. 15).

用いた葉温上昇の速さと可視障害の程度との間に密接な関係が認められた。先に得られた、蒸散速度、葉温変化および SO_2 収着速度の関係から、葉温上昇が遅い部位程気孔の閉じる速度が遅く、葉温上昇が速い部位に比べてより多くの SO_2 を収着すると考えられる。そして、葉面の各々の部位における気孔抵抗の変化が各部位における可視障害発現の重要な因子であることを示している。なお、これ等の手法を用いた実用的な解析システムの開発は今後の課題である。

4. おわりに

大気汚染の植物への影響を解析するために、環境因子が任意に制御可能な環境制御装置と組み合わせ、葉面の種々の波長領域における電磁放射を計測する手法を提案し、そのための環境制御装置を設計した。さらに、植物生体計測システムの設計のため、基礎実験により、有効な波長域を決定し、又、この手法が、植物個体レベルでの生理機能や物質交換等に関する情報を抽出する手段として有効であることを示した。

今後、この手法を実用的な計測解析手法として確立していくためには、

- (1) 各々の実験に対応した制御アルゴリズムを開発すること
 - (2) 計測された情報がどのような植物体反応に起因するものであるかをより詳細に解析すること
 - (3) 計測された情報を人間が認識し応用可能な様に処理すること
- が必要であり、これ等を互いに有機的に結びつけた統一的な処理手法の開発が研究課題として提起される。

引用文献

1. Bennett, J.H., A.C. Hill, and D.M. Gates. 1973. A model for gaseous pollutant sorption by leaves. *Journal of the Air Pollution Control Association*. 23: 957-962
2. Eguchi H., and T. Matsui. 1977. Computer control of plant growth by image processing. II. Pattern recognition of growth in on-line system. *Environment Control in Biology* 15: 37-45
3. 船田 周・橋本 康・大政謙次. 1974. 植物反応制御系のプロセスアイデンティフィケーション(I) グロースキャビネットと植物の応答特性. 日本自動制御協会学術講演会招待講演
4. Gates D.M., and L.V.E. Papian. 1971. *Atlas of Energy Budgets of Plant Leaves*. Academic Press.
5. 橋本 康・一條文二郎・佐野真一・為積良郎. 1976. 植物生体情報の電子的測定—高感度インピーダンス計による植物生体内水分の測定. 計測自動制御学会論文集. 12: 440-446
6. 橋本 康・大政謙次・船田 周. 1975. 植物育成用グロースキャビネットにおける空調システムの計測機制御(I). 日本冷凍協会 50: 16-27
7. 橋本 康・大政謙次・船田 周. 1975. 植物育成用グロースキャビネットにおける空調システムの計測機制御(II). 日本冷凍協会 50: 28-36
8. 橋本 康・大政謙次・船田 周. 1976. 植物育成用グロースキャビネットにおける空調システムの計測機制御(V). 日本冷凍協会 51: 10-17
9. Matsui, T., and H. Eguchi. 1976. Computer control of plant growth by image processing. I. Mathematical representation of relation between growth and pattern area taken in photographs of plants. *Environment Control in Biology* 14: 1-7
10. Mudd, J.B. 1975. Sulfur dioxide. In "Responses of Plants to Air Pollution" (Ed. by Mudd, J.B., and T.T. Kozlowski) 9-22, Academic Press.
11. Monteith, J.L., 1973. *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold.
12. Parlange J.Y., P.E. Waggoner, and G.H. Heichel. 1971. Boundary layer resistance and temperature distribution on still and flapping leaves. *Plant Physiology* 48: 437-442
13. Shiraishi, M., Y. Hashimoto and S. Kuraishi. Cyclic variations of stomatal aperture observed under the scanning electron microscope. *Plant and Cell Physiology*, in preparation.
14. Spedding, D.J., 1969. Uptake of sulphur dioxide by barley leaves at low sulphur dioxide concentrations. *Nature* 224: 1229-1231
15. 滝内基弘・橋本 康. 1977. 放射温度計による葉温測定と植物生体情報との関連. 計測自動制御学会論文集 13: 482-488
16. Unsworth, M.H., P.V. Biscoe, and V. Black. 1976. Analysis of gas exchange between plants and polluted atmospheres. In "Effects of Air Pollutions on Plants" (Ed. by Mansfield, T.A.) 5-16, Cambridge University Press.

The Extraction of physiological information from higher plants fumigated with air pollutants

Kenji OMASA¹, Fumiaki ABO¹, Shu FUNADA²
and Ichiro AIGA¹

Summary

In order to investigate the influence of air pollutants on higher plants, it was proposed to extract physiological information containing in the radiation from leaf under controlled environmental conditions. The method requires the system which efficiently links environmental control and measurement of higher plants. Therefore, to begin with, the computer control system was designed and constructed.

On the other hand, fundamental experiments were undertaken to design the measurement system, and the following results were obtained.

- (1) SO₂ sorption rate, Q became $Q = 1.48 \times 10^{-3} P_{as} \cdot w$ from the experiment. When the prediction model was given by $Q = 2(P_{as} - P_{is}) / (r_{sa} + r_{ss} + r_b)$. SO₂ concentration at gas-liquid interface, P_{is} was 0 ppm (in vol.) and interfacial resistance, r_b was 0 sec/cm from the result.
- (2) The relation between leaf-air temperature difference, ΔT and transpiration rate, W during SO₂ fumigation was given by $\Delta T = aW + b$ (a, negative constant; b, positive constant). Thus, leaf temperature may be substituted for transpiration rate and SO₂ sorption rate, and then, leaf temperature may indicate stomatal aperture.
- (3) The degree of local visible leaf injury in a unit leaf area had a good correlation with the changes of local leaf temperature in the area, that is, the degree of leaf injury mostly became great with slowing the rise of leaf temperature. The rise of leaf temperature means the decrease of transpiration rate, i.e., stomatal closure. Accordingly, with slowing the stomatal closure at the position to SO₂ fumigation, local SO₂ sorption may increase, and with increasing local SO₂ sorption, the degree of local leaf injury may become great.

From the results, it was made clear that infrared radiation (thermal radiation) gave the informations about stomatal aperture and gas exchange between leaf and atmosphere, and the information from the local leaf area was useful to discuss quantitatively the cause for leaf injury. The measurement system by using this spectrum and absorption spectra of water and coloring matters in higher plants will be designed.

1. Division of Engineering, the National Institute for Environmental Studies, Ibaraki 300-21

2. Faculty of Agriculture, Ehime University, Matsuyama 790

V-2

制御環境下でのヒマワリの生長と環境要因との関係

— 栄養生長におよぼす温度要因の影響 —

藤沼康実¹・町田 孝¹・戸塚 績²・相賀一郎¹

要 旨

ヒマワリの生長に対する気温の影響を、光強度 0.22 ly/min 明期/暗期(14/10時間)、相対湿度70%に連続的に制御された人工環境下で調べた。乾物生長、伸長生長に対する適温は25~30℃の範囲に存在したが、葉数や生殖器官(花蕾)の分化に対する適温は30~35℃と若干高かった。20/15℃(昼温/夜温)で生育させたヒマワリは生育適温で得られたものに比べ、乾物生長が減少し、葉肉が肥厚化した。一方、35℃一定で生育させたものでは、葉肉が薄く、葉重比も減少した。低温区(20/15℃)の乾物重の相対生長率(RGR)は生育初期段階で著しく低かった。そのことがその後の乾物生長量の低下の原因となった。高温区(35℃)では、低温区に比べ、RGRが生育初期段階で若干高い値を示したが、その後は低い値となった。それは純同化率(NAR)が低いことに帰因した。

1. はじめに

本研究所の植物実験用環境調節施設は、植物に対する大気汚染ガスの影響を解析することを主目的にしている。そこに設置されている大気汚染ガス暴露用グロースキャビネットの工学的特性については、すでに相賀ら(2)、大政ら(7)によって報告されているように、グロースキャビネット内の各種の環境要因や汚染ガス濃度を精密に長期間制御できる能力を持ち、実験結果の再現性、均一性に優れている。

しかし、グロースキャビネットを実験、生育の場として利用する実験材料植物についての吟味はキャビネットについて、工学的な制御方法が確立されているのに比べ、著しく遅れている(3)。特に高等植物を対象とした実験では、そこに供試される植物自体の遺伝的均質性ととも栽培方法や生育条件の選択が、実験結果の信頼性、再現性に著しく影響する。

これまで、実験植物の遺伝的均質性の追及や栽培方法、生育条件等が確立されているものは、農業生産上、重要な位置を占める数種の作物以外にはほとんどない。また、最近、著しく進歩してきた植物実験用環境調節施設において、環境制御特性による植物の生育反応の変化についてもほとんど研究がなされていない。この問題は施設園芸の技術とも密接な関係があり、制御方法に適した育成方法の開発が望まれている(9)。

1. 国立公害研究所 技術部
2. 国立公害研究所 生物環境部

我々は本研究所の植物実験用環境調節施設において、実験目的に応じた材料植物を供給できるように、実験材料植物の育成手法の開発をめざして、さまざまな制御環境下での植物の生育動態を調査している。その一連の実験のうち、今回は人工光型グロースキャビネットを用いて、ヒマワリの生長におよぼす生育温度の影響を主に物質生産の見地から調査し、ヒマワリにおける最適生育温度域の検索や、温度条件による生育制御法を検討した結果を報告する。

2. 材料と方法

2.1 実験材料植物と育成方法

1976年に本研究所で自家採種したロシアヒマワリ (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) を実験材料として用いた。培養土として、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）に混合した人工土壌 1.8 ℓ に Magamp-K 5 g, 苦土石灰 15g を混入し、1/10000 アールのプラスチック製ポットに詰めたものを使用した。1鉢あたり3～4粒の種子を播種し、下記のグロースキャビネットに設置した。発芽後、1鉢1個体仕立てとし、ヒマワリが水ストレスを受けないように適度に給水した。また、Hyponex 1,000倍液を1鉢あたり100～200 ml を3～4日ごとに与えた。ほぼ開花する直前の播種後6週目まで、相互被陰がないように育成した。

2.2 グロースキャビネットと生育条件

ヒマワリの生長実験は本研究所の人工光型グロースキャビネット（小糸工業製）(2) で行なった。光源は陽光ランプ（東芝 400 W）に熱線カットフィルターを装着したもので、生育期間中の平均受光量は 0.22 ly/min, 光合成有効日射量は受光量の 96.6% であった。日長条件は 14 時間明期, 10 時間暗期とした。生育温度は図 1 に示すように、明期/暗期 (°C) が 20/15, 25/20 の変温区と 25/

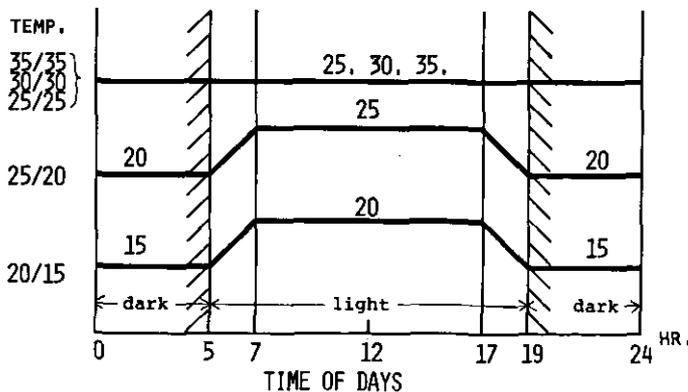


図 1 各温度区におけるグロースキャビネット内の温度制御図

Fig. 1 Diagram showing temperature control in growth cabinet in each experimental plot.

25, 30/30, 35/35の定温区と、合計5種類の温度処理区を設け、設定温度は±0.5℃の範囲で制御した。キャビネット内の湿度は、各区とも相対湿度70±5%の範囲で制御した。

2.3 生長解析

播種後2週目より6週目まで、毎週各区10鉢づつサンプリングし、草丈、葉面積、葉数、各器官別（葉、茎、根、花蕾）の乾燥重量を測定し（子葉、葉柄の重量は茎のそれに加えた）、1個体当りの平均値と標準誤差を求めた。播種時の乾燥種子重量は、種皮を除き、1粒あたり0.084gであった。

3. 結果と考察

3.1 生育温度と生育状況

表1より、各温度区の播種後6週目の生育状況を見ると、今回の実験温度域では、乾物重、草丈は25/25区が最大となったが30/30区とは有意な差は認められず、逆に、葉数、葉面積では30/30区が最大となった。また、低温の20/15区では生育が極度に悪く、全般的に生育が遅れている傾向があった。一方、高温の35/35区では葉数は30/30区に次いで多いが、乾物量、草丈では著しく低い値を示した。葉1枚当りの葉面積を求めると、25/25区が最大となり、20/15区では、小さくな

表1 さまざまな温度条件下で生育させた播種後6週目のヒマワリの生長因子の変化
器官別重量を除いた値は平均±標準誤差を示す（n=10）。
（ ）内の値は個体乾重に対する百分率を示す。

Table 1 Changes in growth characteristics of sunflower grown for 6 weeks after sowing under various temperature conditions. Each value indicates mean ± standard error, except for dry weight of each organ. The mean values are indicated means of 10 plants. Values in parenthesis are percent to total dry weight.

	TEMPERATURE (DAY/NIGHT) °c				
	20/15	25/20	25/25	30/30	35/35
PLANT HEIGHT cm	76.8±12.0	142.5±4.5	175.7±9.2	175.1±14.1	111.8±13.3
NO. OF LEAVES	23.3±3.0	26.6±2.5	31.9±9.2	39.5±6.3	38.0±4.4
LEAF AREA dm ²	26.0±4.5	33.8±1.9	42.1±3.5	49.4±5.6	39.4±5.9
TOTAL D.WT. g	45.8±5.0	67.6±2.6	76.0±8.4	73.2±6.0	44.8±6.8
LEAF D.WT. g (%)	12.4 (27)	15.4 (23)	14.9 (20)	16.4 (22)	14.7 (33)
STEM D.WT. g (%)	24.3 (53)	34.6 (51)	48.0 (63)	39.5 (54)	20.2 (45)
ROOT D.WT. g (%)	9.1 (19)	16.7 (25)	9.1 (12)	11.7 (16)	8.7 (19)
FLOWER D.WT. g (%)	0.1 (0)	0.9 (1)	4.3 (5)	5.6 (8)	1.2 (3)

り、展開葉の拡大生長が25/25区で良かったことを示している。次に、25/25区と30/30区が実験期間中、ほぼ同様な生長をしているので、図2に示すように、20/15区、25/25区、35/35区の3温度区で代表させ、生育段階を通して、生長を追うと、乾物重、草丈では生育過程全域で、25/25区が大きな値を示した。また図3より、葉数、葉面積についても、表1に示す播種後6週目の関係が、生育初期からそのままの状態が続いており、今回の実験期間の範囲では生育温度による生長パターンの経時的変化が認められなかった。

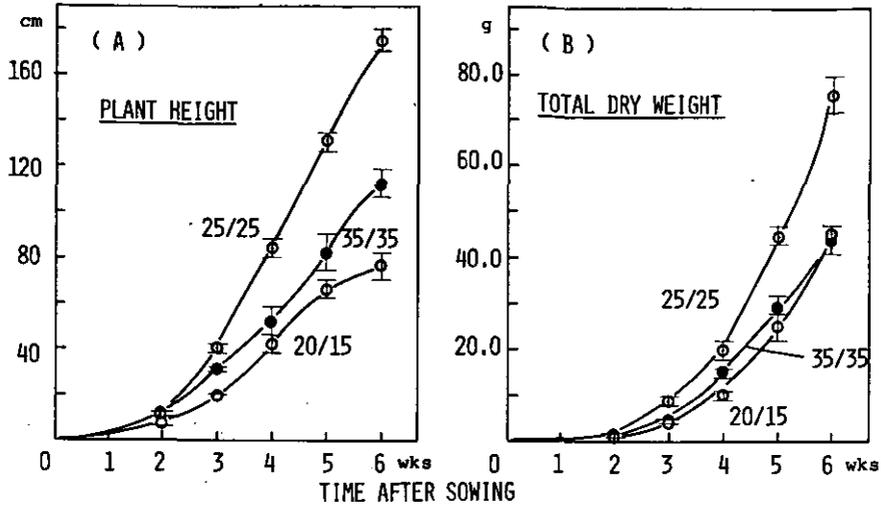


図2 20/15°C (○), 25/25°C (◐) および35/35°C (●) で生育させたヒマワリの個体当りの平均草丈 (A) と平均乾重量 (B) 縦線は平均値の標準誤差の2倍値を示す (n=10)。

Fig. 2 Mean plant height (A) and mean dry weight (B) per plant of sunflower grown at 20/15°C (○), 25/25°C (◐) and 35/35°C (●). Vertical bars indicate 2 × standard error of mean (n=10).

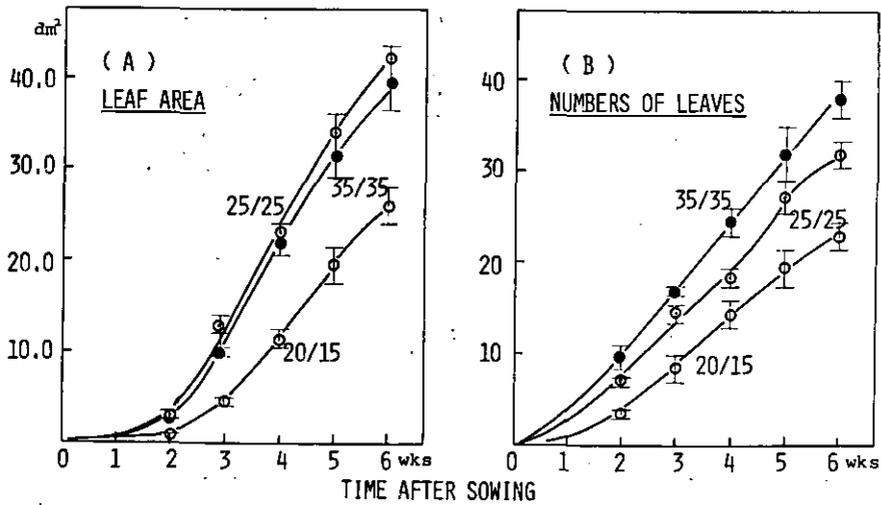


図3 20/15°C (○), 25/25°C (◐) および35/35°C (●) で生育させたヒマワリの個体当りの平均葉面積 (A) と平均開葉数 (B) 縦線は平均値の標準誤差の2倍値を示す (n=10)。

Fig. 3 Mean leaf area (A) and mean numbers of leaves (B) per plant of sunflower grown at 20/15°C (○), 25/25°C (◐) and 35/35°C (●). Vertical bars indicate 2 × standard error of mean (n=10).

従って、葉数や花蕾の発育などの生長の質的な面では、30、35℃のような高温で育成したものが良く、乾物生長のような生長の量的な面では、それらの温度域が、若干低いと考えられる。つまり、光合成の適温が生育適温より一般に高い(6)とされているように、生長として包括される内容によって、それぞれ適温域が別個に存在しているものと思われる。

3.2 生育温度と生長パターンの特性

生育期間中の生長の特性を把握するために各パラメーター相互の関係を調べた。図4の開葉数と草丈との関係より、20/15区は著しく生育が遅れ、播種後6週目の値が25/25区の4週目に相当した。一方、35/35区は葉数では25/25区より勝っているが、草丈は低く、伸長生長が抑制されている。この現象は乾物重についても同様に生じており、低温での乾物生長、伸長生長に対する抑制作用と高温での抑制作用とは、その作用機作が異なっていると思われる。図5より、葉重比(葉重/個

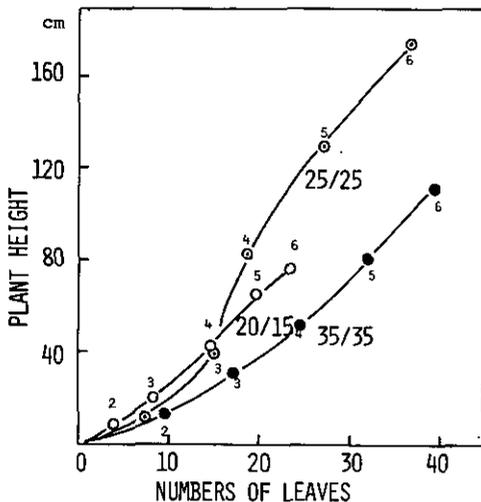


図4 20/15℃ (○), 25/25℃ (◐) および35/35℃ (●) で生育させたヒマワリの草丈と開葉数との関係

Fig. 4 Plant height in relation to numbers of leaves in sunflower grown at 20/15°C (○), 25/25°C (◐) and 35/35°C (●).

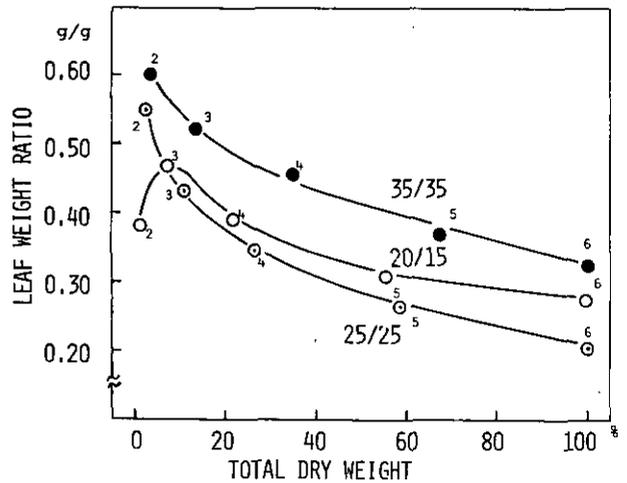


図5 20/15℃ (○), 25/25℃ (◐) および35/35℃ (●) で生育させたヒマワリの個体乾重量と葉重比(葉重/個体重, LWR)との関係
横軸の値は6週目の値を100としたときの個体重量の相対値を示す。

Fig. 5 Leaf Weight Ratio (leaf dry weight/total dry weight) in relation to total dry weight in sunflower grown at 20/15°C (○), 25/25°C (◐) and 35/35°C (●). Values in the abscissa indicate in percent of the total weight of individual to the corresponding value at 6 weeks.

体重, L. W. R.)の生育段階による変化を全乾重との関係で示すと、各温度区とも、生育が進むに従い、L. W. R. が低下した。特に25/25区では6週目の葉乾重が個体重の20%に低下した。20/15区の播種後2週目の値が小さいのは子葉を茎に含めた影響であり、低温区では初期生長において、子葉の同化器官としての働きが大きな割合を占めていることを示している。次に図6より、L. W. R. と葉面積/葉乾重比(S. L. A.)との関係は、生育期間を通して、25/25区が最も葉がうすいこと

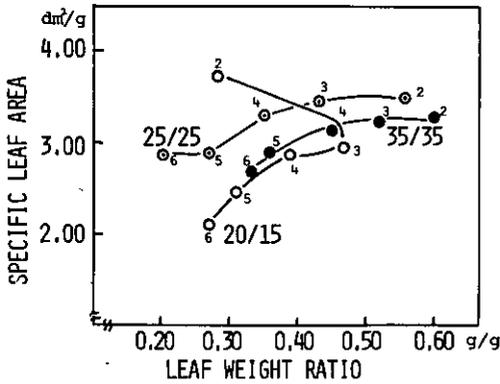


図6 20/15°C (○), 25/25°C (⊙) および35/35°C (●) で生育させたヒマワリの葉重比(葉重/個体重, LWR)と葉面積/葉乾重比(SLA)との関係

Fig. 6 Specific leaf area (leaf area/leaf dry weight) in relation to leaf weight ratio (leaf dry weight/total dry weight) in sunflower grown at 20/15°C (○), 25/25°C (⊙) and 35/35°C (●).

がわかった。逆に20/15区では、図5同様に子葉の影響が生じている2週目の値を除くと、葉が著しく肥厚化していることがわかった。

Peetら(8)によると、低温で育成したインゲンマメでは葉が肥厚化し、同化産物の移動や利用が少ないために、デンプン粒の蓄積が多いと報告している。同様な現象が本実験のヒマワリにも生じていると思われる。すなわち、25/25区では効率の良い物質生産が行なわれ、しかも同化産物の転流がスムーズに行なわれて、総量的に大きく生長しているものと思われる。しかし、35/35区ではS.L.A.も25/25区と同様な値をとり、かつL.W.R.が大きくなっており、形態的には生産性が高い状態にあったと思われる。

3.3 生育段階と乾物生長

各生育段階ごとの相対生長率^{*}(RGR)を表2に示すと、20/15区が初期生育において、著しく低い値であった。これは20/15区と比較的低温条件下で発芽させており、発芽の遅れの影響と思われる。それがその後の生育段階において高いRGRを示しているにもかかわらず、生長量が小さ

表2 さまざまな温度条件下で生育させたヒマワリの相対生長率(RGR)
RGRは単位時間、単位個体重あたりの増加速度を示す。

Table 2 Relative growth rate (R.G.R.) in sunflower grown under various temperature conditions.
RGR indicates the increase rate of dry weight per unit plant weight for a certain time interval.

TIME INTERVAL, weeks	TEMPERATURE (DAY/NIGHT) °c				
	20/15	25/20	25/25	30/30	35/35
0 - 2	0.99	1.39	1.53	1.45	1.32
2 - 4	1.42	1.36	1.22	1.38	1.29
4 - 6	0.74	0.59	0.66	0.60	0.53

(g/g/week)

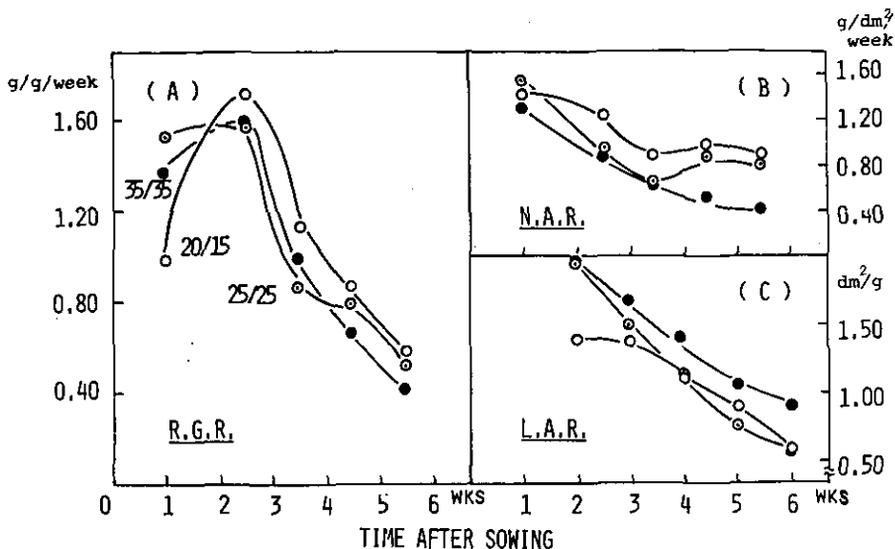


図7 20/15°C (○), 25/25°C (◐) および35/35°C (●) で生育させたヒマワリの相対生長率 (R.G.R.) (A) と純同化率 (N.A.R.) (B) と葉面積比 (L.A.R.) (C)

NAR は単位時間、単位葉面積あたりの個体重の増加速度を示し、LAR は個体乾重あたりの葉面積の比を示す。

Fig. 7 Relative growth rate (R.G.R.) (A), net assimilation rate (N.A.R.) (B) and leaf area ratio (L.A.R.) (C) in sunflower grown at 20/15°C (○), 25/25°C (◐) and 35/35°C (●).

NAR indicates the increase rate of dry weight per unit leaf area for a certain time interval and LAR, the ratio of leaf area to dry weight of plant individual.

くなった原因と思われる。生長量の大きかった25/25区、30/30区ではいずれも、初期生育においてRGRが高く、これが積分量としての生長に大きく寄与している。このRGRは同化効率と同化器官と量によって影響されるもので、純同化率^{**}(NAR)と葉面積比^{***}(LAR)の積として表わすことができる。図7にみられるように、20/15区ではNARは大きな値を示すが、LARが小さくなっており、図6からも、葉の肥厚化が乾物生長を大きく抑制していることが推測できる。また35/35区ではLARは大きく、前述のように形態的には生産性が高い状態にあるが、NARが小さく、維持呼吸による生産物の消費が生長量を抑制しているものと思われる。

以上のことから、長期に亙る物質生産ではその過程における物質分配の仕方によって、最終的に大きな差をもたらす(5)ので、生産物の各器官への分配が生長に対して大きな影響を与える。県(1)は物質生産に対する温度の影響として、低温では同化器官への分配率によって強く規制され、ある限

* RGR : 単位時間、単位個体重あたりの個体重増加量

** NAR : 単位時間、単位葉面積あたりの個体重の増加量

*** LAR : 葉面積/個体重

度以上の温度では同化器官への分配率が高まっているにもかかわらず、物質収支の悪化によって物質生産が減少すると報告している。本実験におけるヒマワリでも同様な現象が生じ、生育温度によって物質生産量が変化したものと思われる。

また、Hellmersら(4)はトウヒの一種で夜温の高温が乾物生長、伸長生長を大きく促進することを報告しており、今回の実験でも、25/20区より25/25区の方が乾物、伸長の両生長が良く、呼吸による生産物の消費と生長のためのエネルギーの供給という、呼吸作用における両面の効果を再考する必要がある。

4. おわりに

今回の実験は環境調節施設における実験材料植物の生育制御法の確立のために行なったものである。その結果、生育適温域がその生育状態を示すパラメーターによってそれぞれ異なり、温度による生育反応も、その生育段階、生育条件によって異なっていることが明らかになった。

従来、生物を実験材料とする研究の中でも特に、植物を材料とする研究では、同じ研究目的を持ちながら、各研究者によって「材料と方法」がそれぞれ異なっている場合が多く、実験結果がスペシャルケースとして取扱われ、どの程度一般性を持っているのか吟味されない傾向にあった。そのためにも実験における「材料と方法」の定格化が急がれている。このような状態を解決する手掛りとして、この実験を位置づけたい。

引用文献

1. 梶 和一. 1971. 温度と物質生産. 作物の光合成と物質生産. (戸菊義次監修) 養賢堂. pp. 267~272
2. 相賀一郎・大政謙次・寺島貞二郎・額田正己. 1976. 低濃度大気汚染ガス暴露実験用グロースキャビネットの基礎研究 I. 低濃度ガスの制御のための諸条件について. 第14回日本生物環境調節学会講演要旨. p. 53
3. Downs, R. J., H. Hellmers. 1975. Controlled environments as research tools. *Environment and The Experimental Control of Plant Growth*. Academic Press. pp. 2-3.
4. Hellmers, H., M. K. Genthe and F. Ronco. 1970. Temperature affects growth and development of Engelmann Spruce. *Forest Science* 16: 447~452
5. 門司正三. 1968. 植物の生産力. *化学と生物* 6: 130~139
6. 村田吉男. 1972. 葉におけるCO₂交換. 物質の変換と輸送 (古谷・宮地・玖村編) 朝倉書店 pp. 247~248
7. 大政謙次・相賀一郎. 1976. 低濃度大気汚染ガス暴露実験用グロースキャビネットの基礎研究 II. 単一ガスの基本的制御方法について. 第14回日本生物環境調節学会講演要旨 p. 54
8. Peet, M. M., J. L. Ozbun and D. H. Wallace. 1977. Physiological and anatomical effects of growth temperature on *Phaseolus vulgaris* L. cultivars. *J. exp. Bot.* 28: 57-69.
9. 山本 正. 1972. 人工制御下における作物の温度反応. *バイオテック*. 3: 870~875

Correlation between growth and environmental factors under controlled conditions in sunflower — effects of temperature on vegetative growth

Yasumi FUJINUMA, Takashi MACHIDA,
Tsumugu TOTSUKA* and Ichiro AIGA

Summary

Effects of changes in air temperature on the growth of sunflower plant were examined under continuously controlled conditions of light intensity at 0.22 ly/min, light and dark periods of 14/10 hrs and relative humidity of 70%. An optimum temperature for the increase of dry matter and plant height was between 25–30°C, but for the increase of leaf number and the differentiation of reproductive organs it was more higher as 30–35°C. The plants grown at a temperature of 20/15°C in the light and dark periods showed the decrease of dry matter growth and the increase in thickness of the lamina in comparison with those obtained at an optimum temperature. On the other hand, when the plant grew at constant temperature of 35°C, the thickness of the lamina and the ratio of leaf dry weight to total dry weight of the plants were decreased.

The relative growth rate in dry weight (RGR) in low temperature plot (20/15°C) was extremely low at the early stages of the growth, which resulted in the retardation of successive growth in dry weight. In high temperature plot (35°C), the RGR proceeded with relatively low values since two weeks after sowing, in comparison with those in low temperature plot. In the former plot whose RGR was low, the net assimilation rate (NAR) was also low.

V-3

大気汚染ガス暴露のためのグロースキャビネット

相賀一郎・大政謙次・安保文彰

要 旨

1. 高等植物への低濃度大気汚染ガスの影響を調べるために当研究所にグロースキャビネットが設置された。この装置は、光、温度、湿度、二酸化イオウ濃度、二酸化窒素濃度等の環境因子を調節することができる。
2. 植物への単一成分の大気汚染ガスの影響を調べる場合、光化学反応等により発生する生成物が解析を複雑にする。この装置の特徴は、この生成物を換気により除去することである。すなわち、換気回数を0～380 times/hrとした。たとえば、二酸化窒素を一定濃度に制御した場合、光化学反応により一酸化窒素が生成する。しかし、この換気装置により生成した一酸化窒素を除去することができた。
3. ガス濃度を高精度に制御する場合の外乱として、空調系の影響が考えられる。そこで、二酸化イオウを例にとり、空調系のガス系への影響を調べた。二酸化イオウに対する外乱要素として、冷却除湿コイル、キャビネット内表面の吸着、キャビネット内温湿度が特に重要であることが明らかになった。
4. 上記のデータに基づいて、温湿度および二酸化イオウ濃度制御の問題点が指摘された。

1. はじめに

植物生育の諸反応および植物群落変遷に対する環境諸要因の影響を解析する有効な道具として、環境調節装置がWent(1950)により開発されて以来20数年を経過した。この間、制御対象となる環境要因は、目的に応じて追加され、現在では、光、大気、土壌等の植物を取り巻く環境の諸要因に及んでいる(4)。最近、大気汚染による植物影響を調べるために大気汚染ガスも制御対象に加えられ(3, 5)、複合状態で、かつ低濃度域での高精度制御という点から新たな問題を生じている。

昭和51年に当研究所において植物実験用環境調節施設が完成し、その中に環境基準値前後の濃度の二酸化イオウおよび二酸化窒素の単成分ガスの植物影響実験のための環境制御装置が設置された。この装置は環境基準値設定の資料収集に必要な研究設備として期待されており、現在、本報告書の特別研究を实行するために有効な道具として利用されている。しかし、極低濃度域での植物実験においては、技術的に問題になる点も多く、植物実験に並行して装置の研究を進め、得られた結果を資料として利用者に提供している。

2. 装置の概要

2.1 光源

実験の再現性を得るためには太陽光を利用することが出来ないので人工光源を選択する必要がある。その場合、光合成および光形態形成について集積された作用スペクトルの知見は必ずしも光源選択の根拠にならない。植物生育の指標が明確でなく、また個々の生理現象に対して得られた作用スペクトルを集約化させるには栄養生長期から生殖生長期の生理現象についての作用スペクトルの知見が不足しているからである。

現在市販されているランプのうちキセノンランプおよび特殊なメタルハライドランプのスペクトルは可視光線域で太陽光のスペクトルに近似している。ここではハロゲン化錫の発光スペクトルを利用したメタルハライドランプを用いた。赤外線部分は植物生育に不必要であり、植物温度を異常に上昇させる原因となる。これを防止するために酸化鉄を含む磷酸ガラスを熱線カットフィルターとして用いた。図1にフィルターの分光透過率曲線、フィルターの有無による光源のスペクトルを

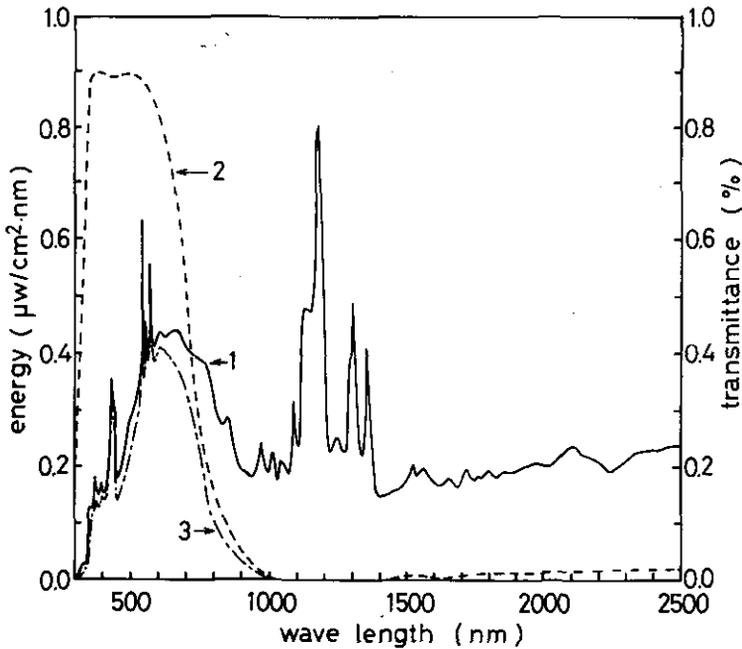


図1 光源のスペクトル特性

1. ハロゲン化錫封入ランプ（東芝陽光ランプ）の特性
2. 赤外線カットオフフィルタの特性
3. グロースルーム

Fig. 1 Spectral characteristics of light.

1. characteristic of stannous halide vapor lamps (Toshiba-Yoko Lamp.)
2. characteristic of cut off filter for infrared spectrum.
3. characteristic in growth room.

示した。フィルターにより赤外線は大部分除去された。植物を対象にした場合の光量測定方法も現在確立されていない。ここでは可視光線域での照度、エネルギーおよび光子数についてキャビネット内部各点について測定した結果を表1に示した。

表1 グロースルーム内の照明特性

Table 1 Characteristics of lighting condition in the growth room.

Distance from light source m	Illuminance	Irradiance	Photon numbers
	Klux	W/m ²	IS/m ² ·sec
0.7	50±8	—	—
1.3	40±5	160	630
1.6	38±5	—	—

2.2 空調システム

植物の汚染ガスによる影響や生理的諸反応に対する作用機作について調べようとする場合、対象とするガス以外の二次生成物の影響を除く必要がある。本装置の特徴は、装置内で発生する二次生成物を換気により系外に除去することを考慮したことである。図2に装置の概観、図3に構成図を示す。この装置は、新鮮空気処理装置、植物暴露実験室であるグロースキャビネット及び排気処理装置で構成されている。換気用の新鮮空気は外気を新鮮空気処理装置内の活性炭及びマンガンフィルタを通して取り入れる。換気回数：FはD₁～D₄のダンパにより0～380 times/hrまで可変である。ここで、換気回数とは、新鮮空気取り入れ量を有効室内容積（7.5 m³）で除した値であり、換気回数380 times/hrとは、キャビネット内での全流量を新鮮空気でもまかなうことを意味し、0 times/hrとは、全く新鮮空気を取り入れず380 times/hrに相当する全流量を循環空気のみでもまかなうことを意味する。この換気装置を用いて二酸化窒素の濃度制御を例にとり二次生成物の除去効果を調べた。先に述べた様に本装置は光源として陽光ランプを用いている。それ故、点灯時には、キャビネット内大気中の二酸化窒素は光分解により一酸化窒素と酸素原子に変わる(1)。従来の植物育成用の環境調節装置の換気は、装置内の炭酸ガス濃度を基準として4～10 times/hr程度に設計されている。この様な換気回数だと、例えば0.3 vol ppmの二酸化窒素濃度に制御した場合、約12%の一酸化窒素の蓄積がみられる。そこで、二酸化窒素濃度を一定に制御し、換気回数を種々に変えてキャビネット内で発生する二次生成物である一酸化窒素の除去効果を調べた。図4に結果の一例を示す。縦軸はキャビネット内の制御された二酸化窒素（0.3 vol ppm）に対する一酸化窒素の比率（%）、横軸は換気回数（times/hr）である。比率が12%以下の場合、一酸化窒素発生量：Qを一定値とした完全混合モデルを用いたシミュレーション値とよく一致した。一般の二次生成物についても、その反応生成過程(2)と物質輸送の基本的性質より同様のパターンが得られるものと予想される。

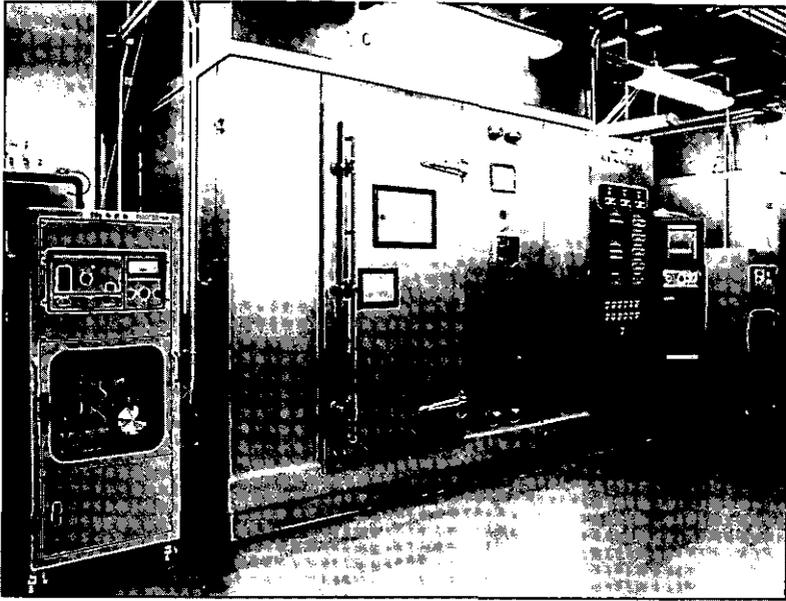


図2 グロースキャビネットの外観
Fig.2 General view of growth cabinets.

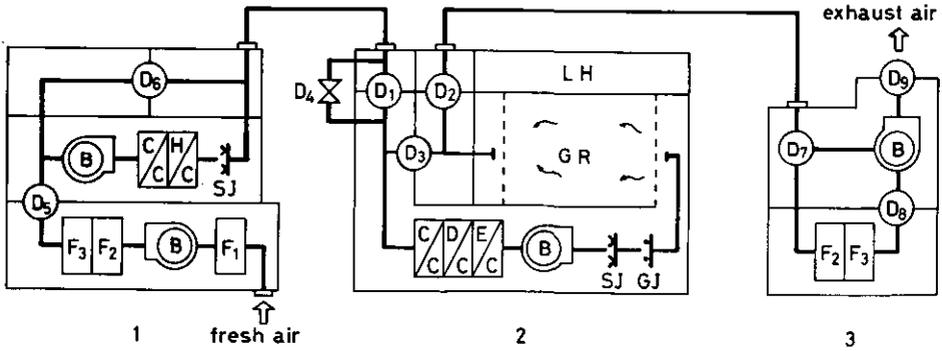


図3 装置と空気の流れを示すシステム図

1. 新鮮空気処理装置
2. グロースキャビネット
3. 排気処理装置

C/C ; 冷却コイル

H/C ; 加熱コイル

D/C ; 除湿コイル

E/C ; 電気加熱コイル

SJ ; 蒸気噴射ユニット

GJ ; ガス噴射ユニット

LH ; ランプ・ハウス

GR ; グロースルーム

F₁ ; プレフィルタ

F₂ ; 活性炭フィルタ

F₃ ; マンガンフィルタ

D ; ダンパ

B ; 送風機

Fig. 3 Diagram of the process and the air flow.

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 1. fresh air processing apparatus | |
| 2. growth cabinet | |
| 3. exhaust air processing apparatus | |
| C/C ; cooling coil | GR ; growth room |
| H/C ; heating coil | F ₁ ; prefilter |
| D/C ; dehumidifying coil | F ₂ ; active carbon filter |
| E/C ; electric heating coil | F ₃ ; Mn filter |
| SJ ; steam jet unit | D ; damper |
| GJ ; gas jet unit | B ; blower |
| LH ; lamp house | |

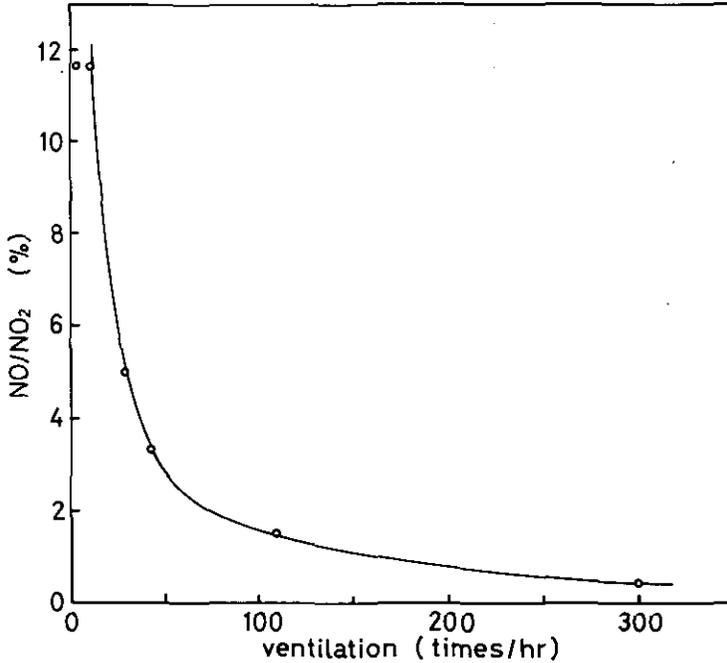


図4 換気によるNOガスの除去 NO₂ガスは0.3 vol ppmの濃度に制御される

○ : 実測
— : シミュレーション

Fig. 4 Exhaust of NO by ventilation. NO₂ was controlled at the concentration of 0.3 volppm. Q = 0.467 volppm/hr

○ ; experiment
— ; simulation

この様な多換気の装置では外気の変化に伴って空調負荷が大きく変化するので、それに対応した空調機が必要である。本装置では、新鮮空気空調負荷に対処するものと装置内の温湿度を高精度に制御する空調機に分かれる。図5に空調システムのブロック線図を示す。すなわち、外気をフィルターを通して取り入れた後、新鮮空気処理装置内の空調機で、外気の変化に伴う空調負荷分だけを操作し、さらに、循環してきた空気と混合し、キャビネット内の冷却及び除湿コイルで一旦冷却除湿ベースを作り、最終的に、外乱や目標値変化に対して追従性の良い電気ヒーターと蒸気加湿によ

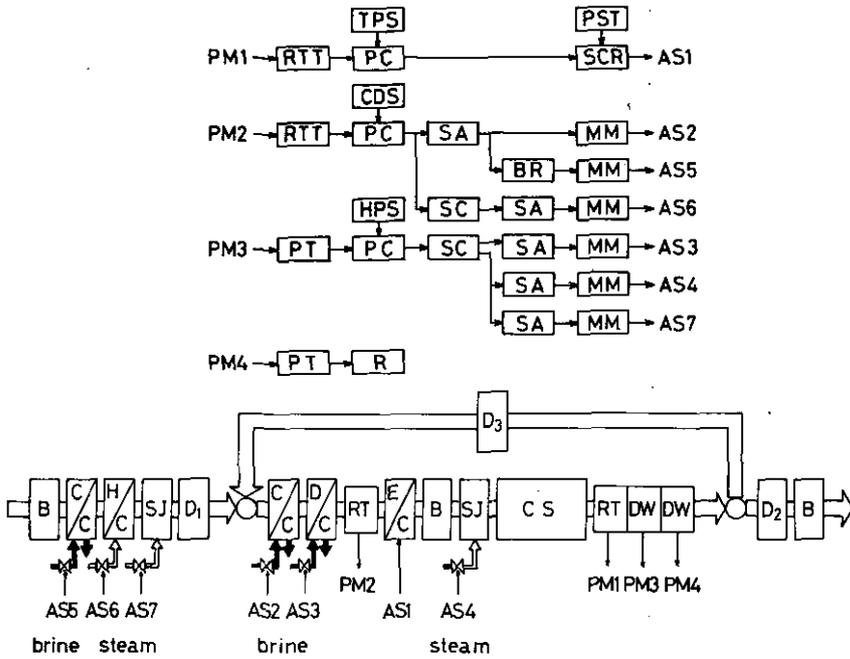


図5 空調システムのブロック線図

- | | |
|---------------|-------------------|
| C/C ; 冷却コイル | TPS ; 温度プログラム設定器 |
| H/C ; 加熱コイル | HPS ; 湿度プログラム設定器 |
| D/C ; 除湿コイル | CDS ; 冷却除湿ベースの設定器 |
| E/C ; 電気加熱コイル | PC ; PID調節計 |
| SJ ; 蒸気噴射ユニット | SC ; 信号変換器 |
| CS ; 制御対象 | BR ; バランシングリレー |
| D ; ダンパ | SA ; サーボアクチュエータ |
| B ; 送風機 | PST ; パルス信号変換器 |
| RT ; 抵抗温度計 | SCR ; SCR電力変換器 |
| DW ; 乾湿球湿度計 | MM ; モジユトロールモータ |
| RTT ; 抵抗温度変換器 | |
| PT ; 湿度変換器 | |
| R ; 記録計 | |

Fig. 5 Block diagram of the air conditioning system.

- | | |
|--|--|
| C/C ; cooling coil | TPS ; program set station for temperature |
| H/C ; heating coil | HPS ; program set station for humidity |
| D/C ; dehumidifying coil | CDS ; set station for cooling and dehumidifying base |
| E/C ; electric heating coil | PC ; PID controller |
| SJ ; steam jet unit | SC ; signal converter |
| CS ; controlled system | BR ; balancing relay |
| D ; damper | SA ; servo-actuator |
| B ; blower | PST ; pulse signal transmitter |
| RT ; resistance thermometer | SCR ; SCR electric manipulator |
| DW ; psychrometer | MM ; modutrol motor |
| RTT ; resistance thermometer transmitter | |
| PT ; psychrometer transmitter | |
| R ; recorder | |

る加熱加湿操作で制御するシステムである。空調機の容量は、新鮮空気処理装置内の加熱コイル：45,900 Kcal/hr, 加湿用ノズル：80.5 Kg/hr, 冷却コイル：41,100 Kcal/hr であり、キャビネット本体の加温電気ヒーター：11,800 Kcal/hr, 加湿ノズル：4 Kg/hr, 冷却コイル：5,440 Kcal/hr, 除湿コイル：7,560 Kcal/hr である。これ等のエネルギーは、当研究所では、他の設備及び一般空調を含めて中央集中供給方式を取っており、能力的には十分供給できる様になっている。図6に人工光キャビネット系へのエネルギー及びガス供給の系統図を示す。人工光キャビネット内は、ガスキャビネット6台、クリーンキャビネット3台の計9台ある。そして、それぞれのキャビネットに、冷水（5℃）は冷却能力：400 USRT/hr のターボ式冷凍機から、ブライン（0℃）は冷却能力：125 USRT/hr × 3 基のブラインチラーから、蒸気（一次圧 7 kg/cm²）は容量10t/hr のボイラーからそれぞれ供給される。又、二酸化イオウ、二酸化窒素及び窒素等のガスは、通常、0.47 m³ × 120 kg/cm³ のカードルを一単位として、任意の濃度のものが供給される。そして、末端であるガスキャビネットにおいて、冷水はランプハウスの冷却に、ブラインはキャビネット内の冷却及び除湿に、蒸気は 2 kg/cm² に減圧されて加熱に、さらに 0.5 kg/cm² に減圧されて加湿にそれぞれ使用される。以上の空調制御システムを用いてキャビネット内の温湿度を高精度に制御する場合特

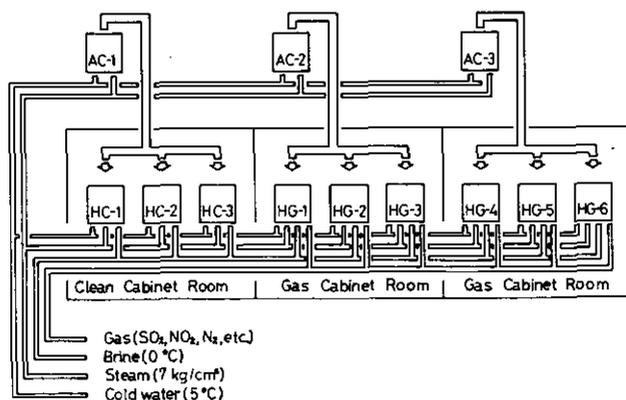


図6 グロースキャビネット及び室のエネルギーとガス供給システム
 HC ; クリーンキャビネット
 HG ; ガスキャビネット
 AC ; 空調機

Fig. 6 Energy and gas supply system for growth cabinets and rooms.
 HC ; clean cabinet
 HG ; gas cabinet
 AC ; air conditioning process

に問題となるのは、熱交換器における熱交換あるいは物質交換の効率の変化である。表2に空調負荷が最も大きく変化する換気回数：380 times/hr の場合における各温湿度状態での空調機の操作状態を示す。単位は、制御動作信号のフル出力に対する百分率であり、AS 1～7 は図5のブロック線図の各々の操作端に相当する。35°C, 80% RH, と15°C, 72% RHを比較すると各々の操作端における操作量は大きく変化しており、当然、単位制御動作信号当りの操作量も変化する。このため、これ等の信号と操作量の間調整が必要である。本システムにおいては、アナログPID調節計のパラメータ調整によりこれを行なうことができる。図7に35°C, 75% RHの状態におけるPID

表2 キャビネット内の種々の温湿度におけるAS1～AS7の制御動作信号の特性

Table 2 Characteristics of actuating signals of AS1-AS7 in the case of various temperature and humidity conditions in the cabinet.

	35°C			25°C			15°C	
	50%RH	65%RH	80%RH	60%RH	65%RH	80%RH	72%RH	80%RH
AS1	89	87	76	82	76	68	66	60
AS2	0	40	50	45	50	40	60	60
AS3	52	33	8	100	65	25	100	55
AS4	48	67	92	0	35	75	0	45
AS5	0	40	50	45	50	40	60	60
AS6	100	60	50	55	50	60	40	40
AS7	48	67	92	0	35	75	0	45

(unit: %)

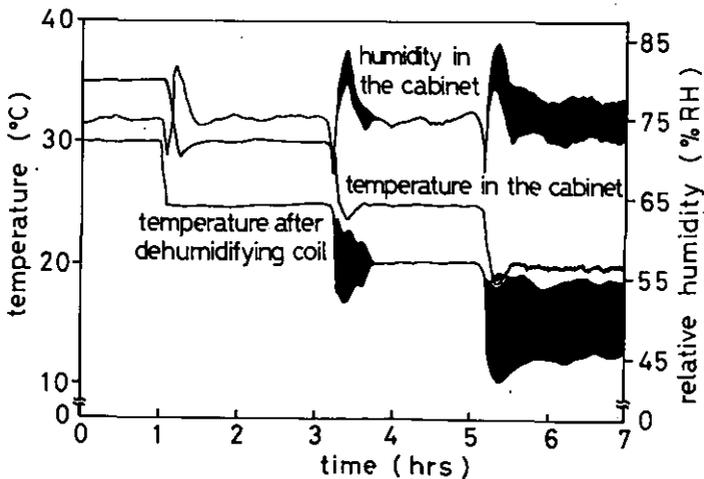


図7 35°C, 75% RHでの最適なPIDパラメータを用いた温度35→20°Cのプログラム制御

Fig. 7 Program control of temperature from 35°C to 20°C by using optimum PID parameters at 35°C, 75% RH.

の最適パラメータを用いて35℃から20℃までプログラム制御した場合の例を示す。この結果からわかる様に、空調負荷が大きく変化する本システムでは、各々の温湿度状態によって最適パラメータは異なり、各状態でそれを共用することはできない。図8に温湿度の全領域を比較的良くカバーするパラメータを用いた時の制御の例を示す。この場合、温度で±0.5℃、湿度で±3%RH程度の制御は可能である。しかし、これ等のパラメータにしても、換気回数あるいは季節の変化等によって変化し、その都度調整が必要である。現在、これ等の調整は、手動で随時行なっているが、将来、空調機の特長、換気回数、外気の変化等を総合的に判断し、任意の設定条件に応じた最適パラメータを自動調整するシステムが望まれる。

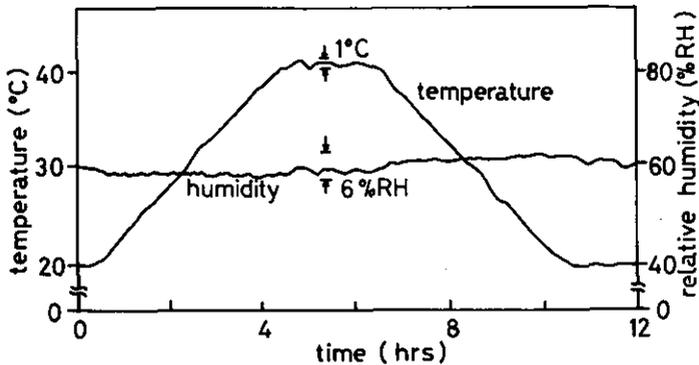


図8 温湿度の全領域で最適なPIDパラメータを用いた制御例

Fig. 8 An example of temperature and humidity control by using optimum PID parameters to control all over the range.

2.3 低濃度単一ガス制御システム

低濃度ガスを高精度に自動制御する場合、検出部として用いるガス分析計を信頼性・応答性・検出感度の面から検討する必要がある。表3に運転実績より求めたガス分析計の性能表を示す。測定原理は二酸化窒素がケミルミネッセンス法、二酸化イオウが190~230nmの紫外線で励起し300~390nmの蛍光強度を測定する方法である。図9にガス濃度制御システムのブロック線図を示す。

表3 NO₂及びSO₂分析計の特性

Table 3 Characteristics of NO₂ and SO₂ gas analyzer.

		NO ₂	SO ₂
Range	volppm	0.05-10.0	0.1-10.0
Noise	volppb	2	4
Zero drift	%/day-span	± 0.5	± 1.0
Span drift	%/day-span	± 1.0	± 1.0
Rise time	mins	2.0	3.5

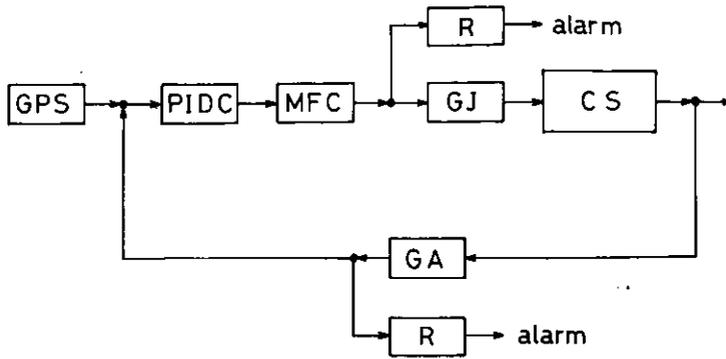


図9 ガス濃度制御システムのブロック線図

CS ; 制御対象
 GPS ; ガス濃度プログラム設定器
 PIDC ; PID調節計
 MFC ; 質量流量調節計
 R ; 記録計
 GJ ; ガス噴射ユニット
 GA ; ガス分析計

Fig. 9 Block diagram of the gas concentration control system.

CS ; controlled system R ; recorder
 GPS ; program set station for gas concentration GJ ; gas jet unit
 PIDC ; PID controller GA ; gas analyzer
 MFC ; mass flow controller

表4 定常状態におけるNO₂及びSO₂濃度制御

Table 4 NO₂ and SO₂ concentration control in steady-state condition.

	NO ₂			SO ₂		
(1) times/hr	10-380			10-380		
(2) volppm	0.05	0.3	1.0	0.05	0.3	1.0
(3) volppm	300,500	1300	4000	300,500	1800,3000	6000
(4) volppb	± 1.6	± 3.5	± 6.6	± 3.2	± 13.0	± 35.5
(4)/(2) %	± 3.2	± 1.2	± 0.7	± 6.4	± 4.3	± 3.6

(1) ventilation (2) desired value (3) manipulated gas concentration (4) maximum error

カードルより供給された任意濃度のガスが、PID調節計の指示に従って質量流量調節装置により調節操作される。表4にこのシステムを用いた種々の濃度における定常状態での制御結果を示す。又、図10にガス濃度をプログラム制御した時の例を示す。(a)が二酸化窒素、(b)が二酸化イオウの結果である。ここで、温湿度は、一定の状態に制御されている。又、カードルより供給される操作ガスの濃度は、設定値及びキャビネット内ガスの分布の均一性を考慮した稀釈率により決定される。本システムでは、一点での制御偏差と濃度分布の釣り合いを考慮して、キャビネット内のガス濃度と原料ガス濃度の比である稀釈率を1/10,000以下とした。以上の結果より、温湿度が一定の状態に

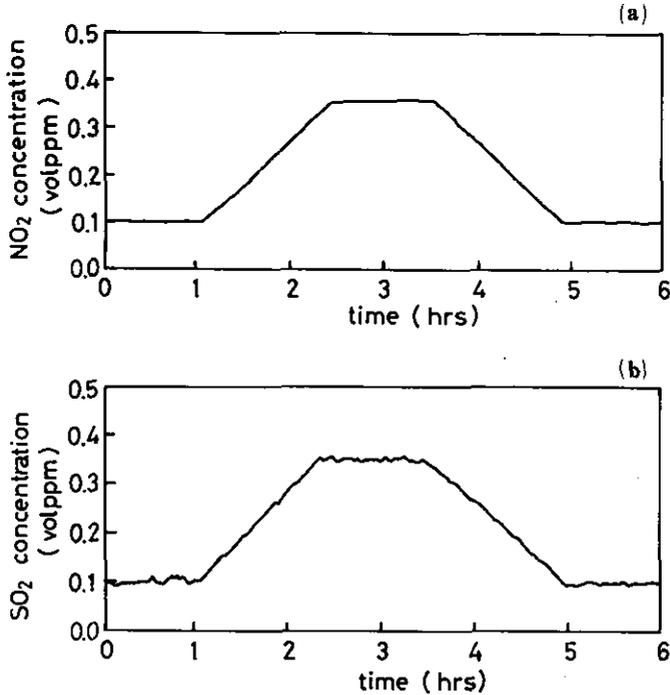


図10 ガス濃度のプログラム制御
 (a) NO₂濃度の場合
 (b) SO₂濃度の場合

Fig. 10 Program control of gas concentration
 (a) control of NO₂ concentration
 (b) control of SO₂ concentration

においては、0.05 volppm の低濃度域においても設定濃度に対して二酸化窒素で ±3.2%、二酸化イオウで ±6.4% の範囲内での制御が可能である。設定値が低濃度になるに伴って制御偏差が大きくなるのは、分析計のノイズ、空調プロセスの干渉等が主な原因と考えられる。

3. ガス濃度制御に及ぼす空調系の影響

キャビネット内ガスに対する空調系の外乱としての干渉特性を把握することは、低濃度ガスを高精度に制御する場合、特に重要である。例えば、二酸化イオウのように水に対する溶解度が大きく吸着性のあるガスは、空調系が関与する種々の影響を受ける。ここでは、二酸化イオウを一定量操作し空調系を種々の状態に変えその影響を調べた結果について述べる。

水分が多量に存在するキャビネット内大気あるいは冷却除湿コイル表面では、二酸化イオウが水分子と結合し硫酸ミスト等の二次生成物が生じるのではないかと懸念される。そこで、換気回数を約30 times/hr の比較的小さい状態で、硫酸ミスト等の二次生成物の発生量を調べた。図11は冷

却除湿操作による影響を除く目的で電気ヒータと加湿器のみで温湿度を制御し、キャビネット内大気中の二酸化イオウ濃度と湿度との関係を求めたものである。縦軸が二酸化イオウ濃度、横軸が湿度であり、蛍光法：Aと溶液導電率：Bの分析値を併記した。高湿の状態では一定量操作したにもかかわらず分析値は急激に低下する。しかし、通常の使用範囲である50~80%RHの状態では湿度に関係なくガス濃度は一定に保たれ、操作量と換気回数の測定値から完全混合モデルを用いて計算した値との差は10%以内である。これは、換気回数等の測定誤差の範囲内である。これより、50~80%RHでは、冷却除湿操作をしなかった場合の湿度変化によるキャビネット内大気中の硫酸ミスト等の二次生成物の発生は問題にならない程度であると考えられる。高湿の状態における二酸化イオウの消失はキャビネット内表面あるいは分析計の配管に結露する水への溶解が大きな原因であると考えられ、高温高湿の状態で特に顕著である。尚、蛍光法と溶液導電率法の分析値の比、すなわちB/A比は湿度に関係なく一定に保たれる。B/A=1とならないのは分析計の校正方法の違いによるものである。次に冷却除湿操作を加えた通常の運転方法で温湿度を制御した場合の影響を調

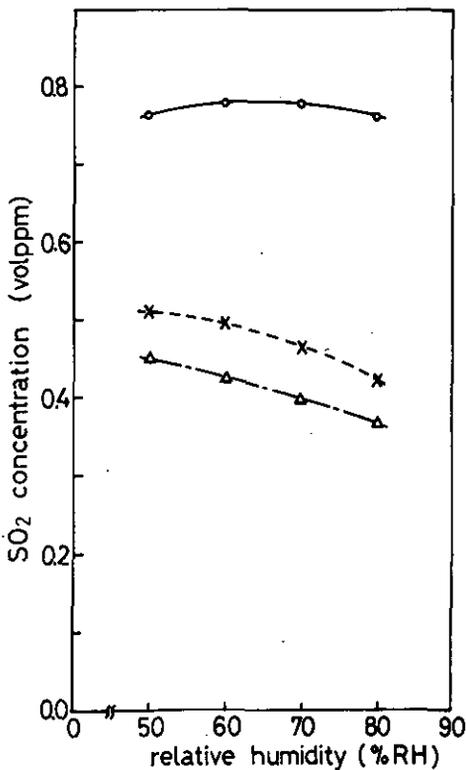


図11 SO₂濃度と湿度との関係 SO₂は一定流量操作され、そして、SO₂濃度はサーモエレクトロン(A)とDKK(B)の分析計により測定される。

Fig. 11 Relationship between SO₂ concentration and relative humidity. SO₂ was manipulated at the constant flow rate, and SO₂ concentration was measured by using Thermo Electron gas analyzer (A) and DKK gas analyzer (B).

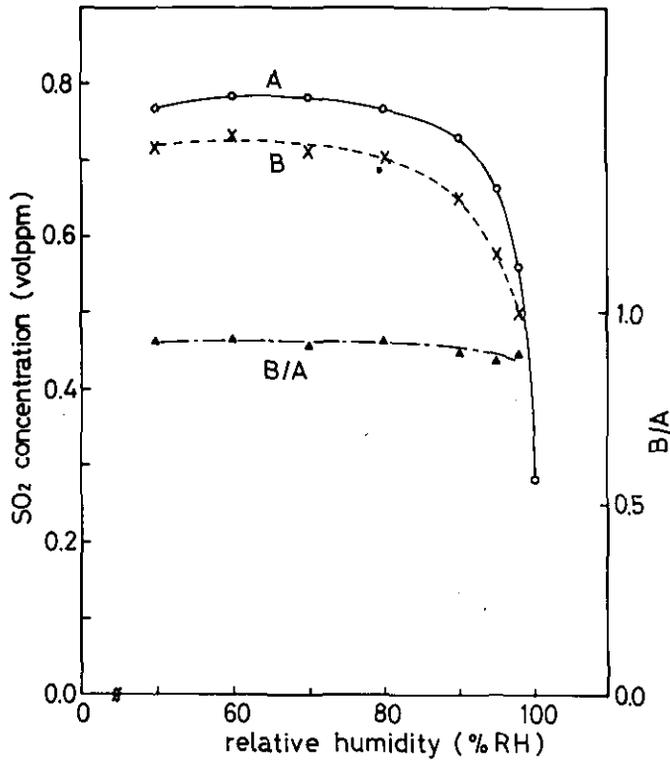


図12 冷却コイルを操作した場合と操作しなかった場合のガス濃度の特性
 SO_2 は一定流量操作される。
 —○— ; 30°C, 加熱器と加湿器を用いた場合
 ---x--- ; 30°C, ---△--- ; 20°C, 加熱器, 加湿器, 冷却コイルを用いた場合

Fig. 12 Characteristics of gas concentration regulated with and without cooling coil. SO_2 was manipulated at the constant flow rate.
 —○— ; 30°C, with heater and humidifier
 ---x--- ; 30°C, ---△--- ; 20°C, with heater, humidifier and cooling coil

べた。図12に、ガスを一定流量操作した状態での冷却除湿操作の有無によるガス濃度を示す。冷却除湿操作を加えたことにより、キャビネット内大気中の二酸化イオウの約半分が消失した。図13に、30°C, 60% RH の状態で除湿量を種々変化させて十分定常になった後、排出された水に含まれる硫酸イオウの量を硫酸バリウムの定量を行なう比濁法を用いて定量した結果を示す。比較のために、ガスを操作しない場合の排水に含まれる硫酸イオウの量も併記した。これを単位時間当りの排水に含まれる硫酸イオウに換算し：C, 他方、冷却除湿操作を加えることにより生じる二酸化イオウの単位時間当りの消失量をガス濃度の低下から計算し：D, 両者の比C/Dを示したのが図14である。ここで、ガス濃度は蛍光法の値を使用した。これより冷却除湿操作を加えたことにより消失した二酸化イオウは、冷却除湿コイル表面へ吸収吸着され、その多くは除湿された水と共に外部へ排出されることが判明した。又、ここには提示していないが FPD と蛍光法による測定値が一致したことも合わせて考えると、キャビネット内に多量の硫酸ミストは発生していないと考えられる。

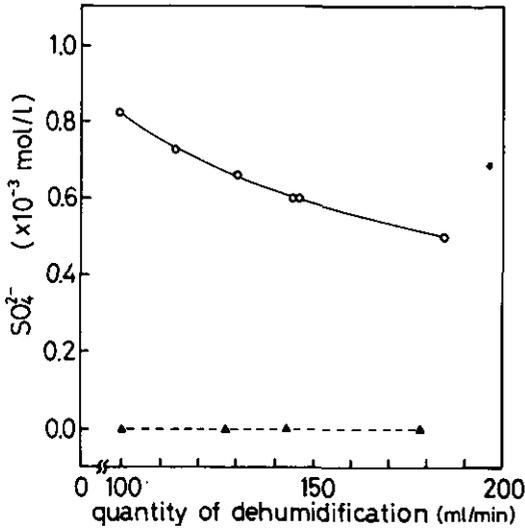


図13 除湿された水に含まれる SO_4^{2-} 濃度
 —○—; SO_2 を操作した場合
 ---△---; SO_2 を操作しなかった場合

Fig. 13 SO_4^{2-} concentration in dehumidified water.
 —○—; in the case where SO_2 was manipulated
 ---△---; in the case where SO_2 was not manipulated

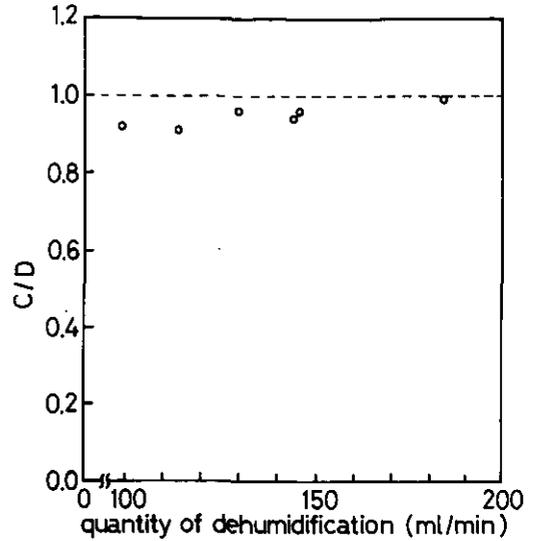


図14 除湿された水に含まれる SO_4^{2-} (C) とキャビネット内大気中で消失する SO_2 (D) の関係

Fig. 14 Relationship between SO_4^{2-} in dehumidified water (C) and SO_2 disappeared from atmosphere in the cabinet (D).

次に、以上に述べた現象が外乱として作用する場合の典型的な例について述べる。図15に、冷却エネルギー源であるエチレングリコールのブライン温度のハンチングが冷却除湿コイルを通してキャビネット内大気中の二酸化イオウ濃度に与える影響を示す。図16にコイル表面温度が1℃ハンチングした状態において、種々のコイル表面温度におけるキャビネット内大気中のガス濃度のハンチングの割合を示す。縦軸は、ガス濃度のハンチング幅をそのときのガス濃度で除した比率(%)、横軸はコイル表面温度である。この結果は、二酸化イオウ濃度に対するコイル表面温度の影響が表面温度が低い程顕著であることを示している。この種の外乱は、コイル表面温度のハンチング幅を小さくすれば減少する。それ故、二酸化イオウの様な水に対する溶解度の大きいガスは、コイル表面温度を精度よく制御することが、ガス制御の高精度化に直接結びつくことが判明した。

最後に、キャビネット内表面(コイル表面を含む)へのガスの吸着が制御に及ぼす影響について述べる。図17はキャビネット内表面へのガスの吸着の影響を示したチャートである。ガスを切って

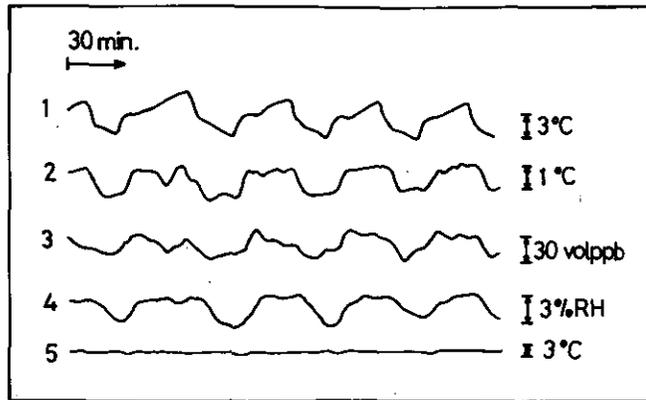


図15 キャビネット内SO₂濃度に対するブライントank内温度の影響

1. ブライントank内温度
2. 冷却除湿コイル表面の温度
3. キャビネット内のSO₂濃度
4. キャビネット内の湿度
5. キャビネット内の温度

Fig. 15 Effects of temperature in the brine tank on SO₂ concentration in the cabinet.

1. temperature in the brine tank
2. temperature on cooling and dehumidifying coil surface
3. SO₂ concentration in the cabinet
4. humidity in the cabinet
5. temperature in the cabinet

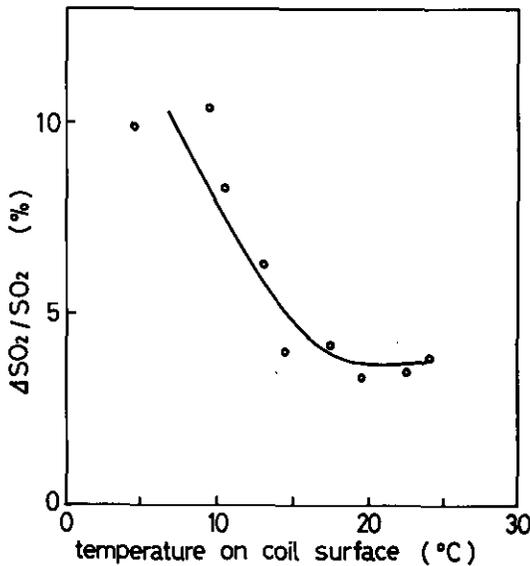


図16 SO₂濃度のハンチングに対するコイル表面温度の影響。ここで、コイル表面温度のハンチングは1°Cである。

Fig. 16 Effects of coil surface temperature on the hunching ratio of SO₂ concentration, where the hunching of temperature on coil surface was 1°C.

から10日後あるいは7時間後に再びガスを一定量操作し、キャビネット内ガス濃度の応答を調べた。

完全混合モデルを用いたシミュレーションによれば、キャビネット内にまったく吸着がなければガス濃度はステップで立上がるので、この遅れの原因はキャビネット内表面への吸着と考えられる。

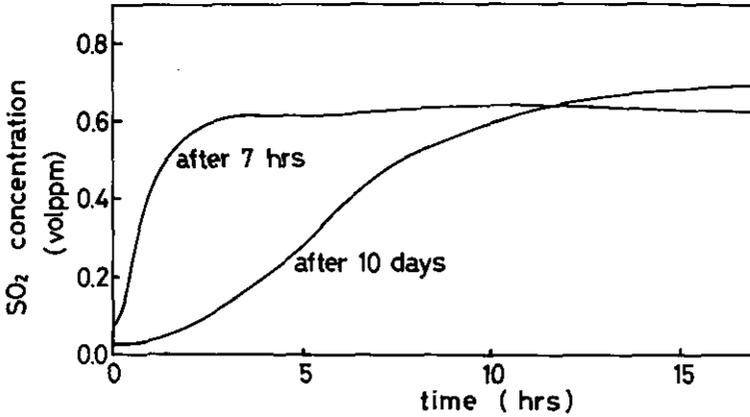


図17 キャビネット内のSO₂濃度のステップ応答 SO₂はガスを切つてから7時間あるいは10日後に一定流量操作される。

Fig. 17 Step response of SO₂ concentration in the cabinet. SO₂ was manipulated at the constant flow rate after 7 hrs or 10 days from gas off.

図18はこの応答の典型的パターンである。ここで、縦軸は整定値に対する割合である。一定量操作したにもかかわらず、ガス濃度はオーバーシュートする。又、この吸着量は、温度の変化の影響を顕著に受ける。図19に温度をステップ応答させたときの二酸化イオウの濃度変化を示す。ガスを一定量操作しているので、吸着量が変化しなければ、ガス濃度は一定に保たれるはずである。しかし、ガス濃度はキャビネット内の温度変化に依存して急激に変化する。これは、温度変化に伴ってキャビネット内表面での吸着の平衡が一時的に破れることにより生じると考えられる。尚、これ等の現象は昇温したサンプルの温度変化には全く影響されない。この様な急激に変化する外乱に対しては、

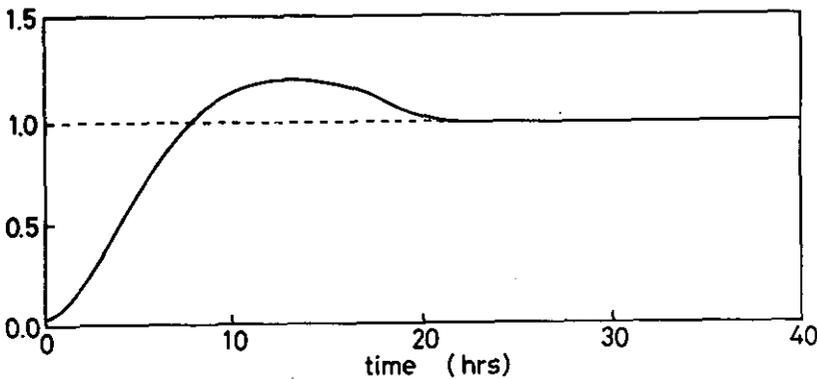


図18 図17における典型的パターン

Fig. 18 The typical pattern in Fig. 17.

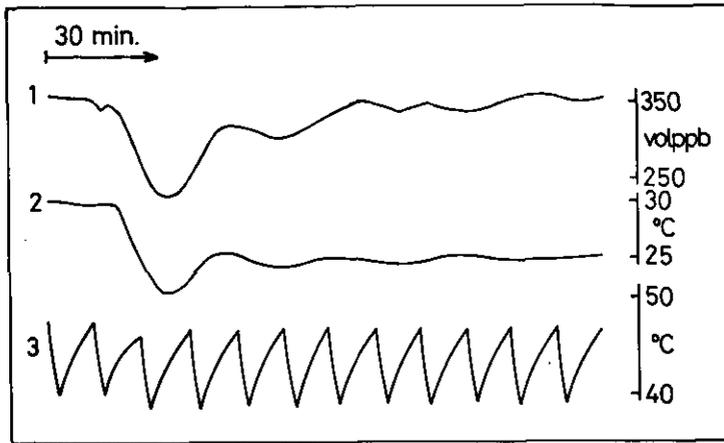


図19 SO₂濃度に対するキャビネット内の温度の影響 SO₂は一定流量操作される。
 1. キャビネット内のSO₂濃度
 2. キャビネット内の温度
 3. ガス分析計に取り込まれる空気温度

Fig. 19 Effect of temperature in the cabinet on SO₂ concentration.
 1. SO₂ concentration in the cabinet
 2. temperature in the cabinet
 3. temperature of the air conducted into gas analyzer

単なるアナログPID調節計では、その本質的に持つ遅れのために高精度の制御性を得ることは困難である。今後、吸着の特性を十分把握した上で、計算機を用いて予測制御を含めた制御アルゴリズムの検討が必要である。

4. 結 び

低濃度ガスの高精度の制御は、装置内でのガスの特性を十分把握した上で初めてなされたものである。本報では、安定性と二次生成物の問題を考慮し製作したグロースキャビネットの制御の特性と空調系の影響を大きく受ける二酸化イオウのキャビネット内での特性について報告した。今後、これ等のデータをもとにして、高精度と経済性の両面から装置の改良及び制御方法の開発を行なう予定である。

引 用 文 献

1. Butcher, S. S., and R. J. Charlson著, 荒木峻訳. 1975. 大気汚染の化学. 東京化学同人 106-107
2. 近藤次郎編. 1975. 大気汚染. コロナ社
3. Lockyer, D. R., D. W. Cowling and L. H. P. Jones. 1976. A system for exposing plants to atmospheres containing low concentrations of Experimental Botany 27:397-409
4. 日本生物環境調節学会編. 1973. 生物環境調節ハンドブック. 東京大学出版会.
5. 高橋一隆・斉藤伸行. 1973. 計算機制御による環境試験室. 日本冷凍協会. 48:31-37

Growth cabinet for air pollutants gas fumigation

Ichiro AIGA, Kenji OMASA and Fumiaki ABO

Summary

1. For the purpose to investigate the influence of low concentration of air pollutants on higher plants, growth cabinets were constructed. Environmental factors of light, temperature, humidity, SO_2 concentration and NO_2 concentration were controlled in the cabinet.
2. To examine strictly influence of an air pollutant on plants, products that were formed by photochemical reaction or others were removed with increasing ventilation times. The ventilation times were varied from 0 to 380 times/hr. For example, in atmospheric environment maintained at constant NO_2 concentration, NO was produced photochemically. But the NO was able to remove by the ventilation system.
3. Influence of the air conditioning system on SO_2 concentration was examined. Effects of cooling and dehumidifying coil, temperature, humidity and adsorption characteristics on the surface in the cabinet were proved respectively.
4. From the above, problems on temperature, humidity, and SO_2 concentration controls were pointed out.

V-4

複合汚染実験設備の設計

相賀一郎¹・大政謙次¹・松本 茂¹

Design of the Fumigation System for Multi-Components of Air Pollutant Gases

Ichiro AIGA, Kenji OMASA and Shigeru MATSUMOTO

要 旨

ワーキンググループの基本仕様にもとづき植物実験棟既設ガス暴露実験設備に附加する複合汚染実験設備を設計した。供給ガスの設備容量の基礎資料を得るためにオゾンの反応、消滅に関する予備実験を行なった。空調系によるキャビネット内オゾンの消滅は10%以内であり、キャビネット内温湿度のオゾン濃度におよぼす影響は8%以内であった。オゾンと二酸化窒素、エチレンの3成分複合時はそれぞれ単成分時に0.75 vol μ m, 2.0 vol μ m, 2.0 vol μ mの設定値を維持するに必要なガス量を供給し混合した場合、換気回数が12times/hではオゾン濃度が36% (0.27 vol μ m), 二酸化窒素は18% (0.36 vol μ m) それぞれ反応により減少した。最後に設計した複合ガス暴露実験設備のシステム構成を示した。

1. 複合汚染実験設備の必要性

複合汚染実験設備ワーキンググループは、植物実験棟の既設ガス暴露実験設備に複合ガス実験設備を附加する目的で昭和52年2月に発足した。構成委員は奥田典夫大気環境部長を委員長に、生物環境部、大気環境部、技術部を中心とした関係者で組織された。委員会では複合汚染実験設備に関する原則および仕様のあらましを次のように決定した。

複合大気汚染の研究は、光化学オキシダント生成過程等の化学的研究が進んでいるにもかかわらず、その植物影響に関する研究は未だ十分とはいえない(1, 2)。これは一方で植物の内包する複雑さからくる問題と、他方では実験手段を提供する装置に制約されているためである。植物に対する複合影響は、大気中の化学反応による二次生成物の植物影響と植物体内で起る複合影響の両者が関係しているが、これらを解析するための複合汚染ガス暴露実験装置に要求される基本的性能は次のようになる。(1)汚染物質のそれぞれの単体ガスとしての影響を明確にしたうえで複合影響効果を解析できる装置であること。(2)実験は低濃度実験が主体となるので、装置は高精度長期安定であること。(3)植物におよぼす温湿度、光、風速および二酸化炭素等の影響も同時に解析できる装置であること。また暴露ガスは二酸化イオウ、二酸化窒素、オゾン、炭化水素、二酸化炭素の5種類を大気汚染レベルの低濃度域で同時に制御する装置とする。炭化水素は植物にホルモン作用をもつエチレンと、植物にはほとんど活性をもたないが二酸化イオウ、二酸化窒素等との複合時における光化学

1. 国立公害研究所 技術部

Division of Engineering, the National Institute for Environmental Studies
Ibaraki 300-21

反応特性が明らかにされているプロピレンの2種類とした。基本仕様を表1に示す。

表1 ガス制御系の制御濃度範囲および制御精度

Table 1 Control range and accuracy of gases control system.

Control gas	Control range (volppm)	Control accuracy (%/FS)
SO ₂	0.05 ~ 2.0	± 3
NO ₂	0.05 ~ 2.0	± 3
O ₃	0.01 ~ 1.0	± 5
C ₂ H ₄ or C ₃ H ₆	0.2 ~ 2.0	± 3
CO ₂	110% of atmospheric concentration ~ 10,000	± 3

ここでは上記の原則にもとづき必要な設計資料を得るために実施した予備実験の結果とそれにもとづいて設計したシステムの構成について報告する。

2. キャビネット内でのオゾンの反応, 消滅

複合ガスシステムを設計する場合, 特にオゾンの関与する反応の知見を得ることが必要である。オゾンは反応性に富み器壁との接触等で分解し易いことが知られているが, 低濃度域において空調系が関与する分解, 消滅に関する報告は皆無に等しい。また空調系が関与し水分を含む空気中のオゾンと二酸化窒素, 炭化水素等の反応量も不明の部分が多い。そこでシステムの設計にあたりガス暴露グローブキャビネットを使用して予備実験を行なった。

空調系のオゾンに対する影響は一定濃度のオゾン在一定流量でキャビネットに供給し, 空調条件を種々変化させ定常になった状態でのオゾン濃度を測定し消滅量を計算した。オゾン濃度に対するキャビネット内温度の影響を図1に, 湿度の影響を図2に, リターンエア中のオゾン濃度を表2に示す。この結果温度20~30℃, 湿度50~70% R.H. の範囲においてオゾン濃度の変化は8%以内であり, 除湿コイル等で消滅するオゾンの量も10%以内であった。

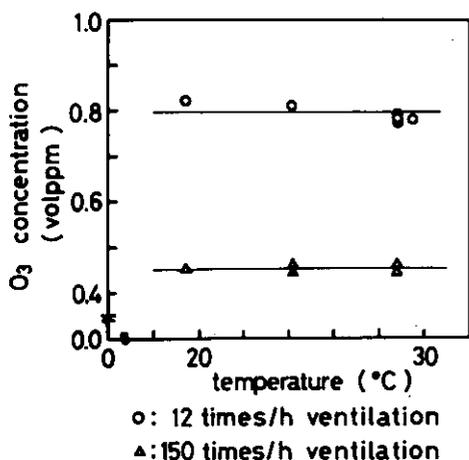


図1 O₃ガス濃度に対する温度の影響
湿度: 50~60% R.H.

Fig. 1 Effect of temperature on O₃ gas concentration. humidity; 50~60% R.H.

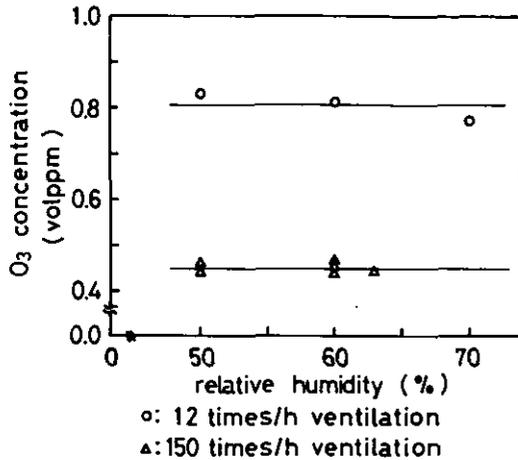


図2 O₃ガス濃度に対する水分の影響
温度：19~30℃

Fig. 2. Effect of moisture on O₃ gas concentration. temperature ; 19~30℃

表2 リターンエア中のO₃濃度の計算値および実測値
温度；25℃
湿度；60% R.H.

Table 2 Calculated and actual O₃ concentration in the return air.
temperature ; 25°C
humidity ; 60% R.H.

A (m ³ /h)	B (volppm)	C (volppm)	D (volppm)
1500	0.46	0.21	0.24
120	0.81	0.78	0.74
120	0.54	0.52	0.48

A ; ventilation
B ; O₃ concentration in the growth room
C ; calculated O₃ concentration in the return air
D ; actual O₃ concentration in the return air
C=B·(2800-A)/2800

オゾンを含む複合ガス系の反応量は、光の照射下で一定濃度のオゾン、二酸化イオウ、二酸化窒素、エチレンを一定流量で供給しそれぞれの単成分時の濃度と複合状態での濃度を測定した。オゾン、二酸化窒素、エチレンの組合せによる実験例を図3に示す。最も濃度変化が大きかったのはオゾン、二酸化窒素、エチレンの3成分複合時で、単成分時にそれぞれ0.75 volppm、2.0 volppm、2.0 volppmの濃度となるようガス流量を操作し混合した場合で、オゾン濃度は36% (0.27 volppm)、二酸化窒素濃度は18% (0.36 volppm) 減少した。過渡時の立上り特性は90%応答で20分以内であった。反応生成物を系外へ排除するため換気回数を150 times/hとした場合には、オゾン、二酸化窒素、エチレン系での濃度変化は検出できなかった。オゾンと二酸化イオウの複合状態の実験例を図4に示す。既に二酸化イオウが冷却除湿コイルの影響を受けることが報告されているが、図4の結果はオゾン

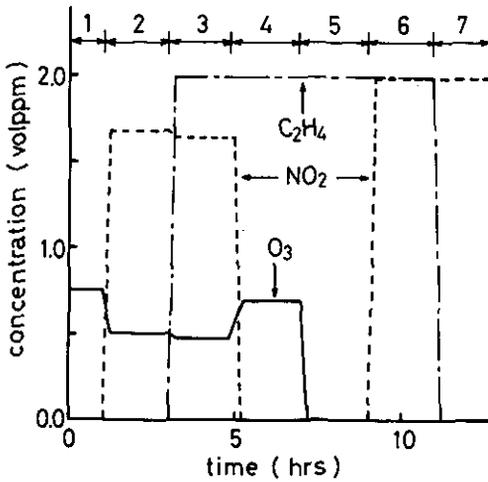


図3 一定流量で操作されたそれぞれのガス成分のあいだの干渉
 1 ; O_3
 2 ; $O_3 + NO_2$
 3 ; $O_3 + NO_2 + C_2H_4$
 4 ; $O_3 + C_2H_4$
 5 ; C_2H_4
 6 ; $NO_2 + C_2H_4$
 7 ; NO_2
 換気回数 ; 12 times/h

Fig. 3 Interference among mutual gases components manipulated at a constant flow rate.
 1 ; O_3
 2 ; $O_3 + NO_2$
 3 ; $O_3 + NO_2 + C_2H_4$
 4 ; $O_3 + C_2H_4$
 5 ; C_2H_4
 6 ; $NO_2 + C_2H_4$
 7 ; NO_2
 ventilation time ; 12 times/h

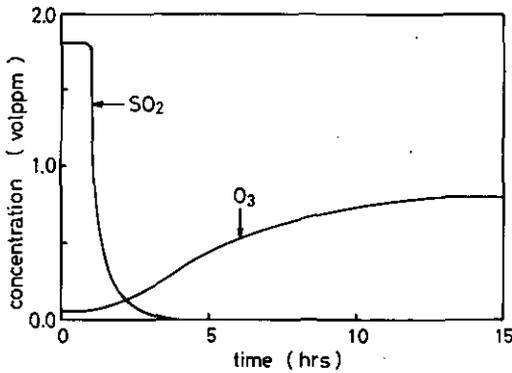


図4 一定流量で操作された O_3 ガスの濃度に対する SO_2 ガスの影響
 換気回数 ; 12 times/h

Fig. 4 Effect of SO_2 gas on concentration of O_3 gas manipulated at a constant flow rate.
 ventilation time ; 12 times/h

を制御する場合二酸化イオウが大きな外乱を与えることを示唆している。

3. システム構成

予備実験の結果にもとづき設計した複合ガスシステムのブロックダイアグラムを図5に示す。取入外気は前処理された後ダンパ D_1 からキャビネットに入るが、ダンパ D_1 、 D_2 、 D_3 を操作して換気回数を変えることにより系内の二次生成物濃度を変えることができる。オゾンは酸素を原料とし無声放電により発生させるが発生濃度を安定させるため放電管内圧力と供給電圧を安定化させた。高精度で長期間安定な状態を維持するために制御は質量流量調節計 (MFC) を操作部として用いたアナログ PID 制御方式とした。ガス吹出ノズルはオゾンとその他のガスを分離し、ノズルの前に混合器を設置した。低濃度のキャビネット内ガス濃度の分析には瞬時値が出力される大気モニター用分析計を使用し PID コントローラへのフィードバック信号とした。エチレン、プロピレンを選択的かつ連続的に分析する分析計は無いので炭化水素の分析には全炭化水素分析計を使用し

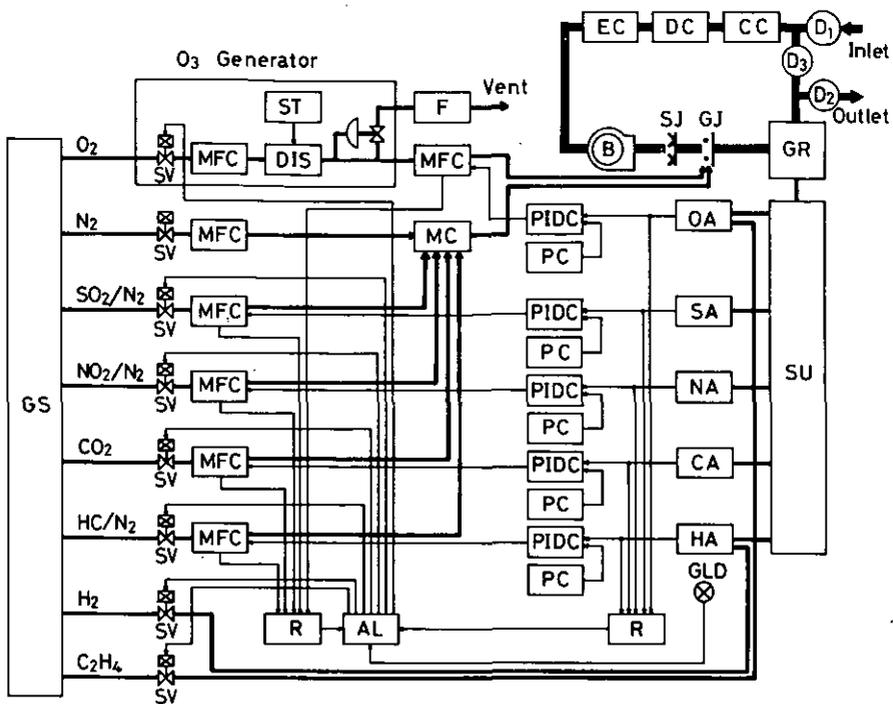


図5 ガス制御系のブロック図

GS	; ガス貯蔵所	GJ	; ガス噴射ユニット
SV	; 電磁弁	GR	; グロウルーム
MFC	; 質量流量調節計	SU	; ガスサンプリングユニット
ST	; 安定化電源	OA	; O ₃ 分析計
DIS	; 放電管	SA	; SO ₂ 分析計
F	; 活性炭フィルター	NA	; NO ₂ 分析計
MC	; プレキシング装置	CA	; CO ₂ 分析計
D ₁₋₃	; ダンパ	HA	; 炭化水素分析計
CC	; 冷却コイル	PIDC	; アナログPIDコントローラ
DC	; 除湿コイル	PC	; プログラムコントローラ
EC	; 電気加熱コイル	R	; 記録計
B	; 送風機	GLD	; 可燃性ガス漏えい検知器
SJ	; 蒸気噴射ユニット	AL	; 警報器

Fig. 5 Block diagram of gases control system.

GS	; gases storage	GJ	; gas jet unit
SV	; solenoid valve	GR	; growth room
MFC	; mass flow controller	SU	; gas sampling unit
ST	; stabilized power supply	OA	; O ₃ gas analyzer
DIS	; discharge tube	SA	; SO ₂ gas analyzer
F	; active carbon filter	NA	; NO ₂ gas analyzer
MC	; pre-mixing chamber	CA	; CO ₂ gas analyzer
D ₁₋₃	; damper	HA	; hydrocarbon gas analyzer
CC	; cooling coil	PIDC	; analog PID controller
DC	; dehumidifying coil	PC	; program controller
EC	; electric heating coil	R	; recorder
B	; blower	GLD	; gas leak detector
SJ	; steam jet unit	AL	; alarm device

た。濃度制御は定値制御とプログラム制御を選択できるようにした。

本システムは水素、エチレンを使用しており、これらのガス漏れによる事故を未然に防止するため可燃性ガス漏えい検知警報装置を設置しガス漏れが発生した場合水素、エチレンを自動的に遮断するようにした。各機器の異常時対策としてガス濃度およびガス流量の上下限警報とインターロック回路を組込んだ。

複合汚染実験設備は昭和53年3月に完成し、植物特研に供用の予定である。今後はキャビネット内複合ガスの反応特性を明確にしたうえで、より精度の高い制御方式を開発することが残されている。

引 用 文 献

1. 近藤次郎編、1975. 大気汚染研究—現象の解析とモデル化—、コロナ社
2. 日本公衆衛生協会、1977. 大気汚染の植物影響に関する調査報告書

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

**Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants
Progress report in 1976 – 1977**

**REPORT OF SPECIAL RESEARCH PROJECT
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES**

No. 2

国立公害研究所特別研究成果報告第 2 号

(R-2-78)

昭和53年 3 月24日発行

編集・発行 国立公害研究所
茨城県筑波郡谷田部町大字館野

印刷 株式会社 イセブ印刷
茨城県筑波郡筑波町北条31

Published by the National Institute for Environmental Studies
Tsukuba, Yatabe, Ibaraki 300-21, Japan.
March, 1978