

# 分光画像法によるオゾンストレスに対する植物反応の可視化

宮澤 佳苗・岩崎 宏明・中内 茂樹\*

豊橋技術科学大学情報工学系 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

## Visualization of Plant Response to Ozone Stress by Spectral Imaging

Kanae MIYAZAWA, Hiroaki IWASAKI and Shigeki NAKAUCHI\*

Department of Information and Computer Sciences, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi 441-8580

Ozone on the surface of the earth that has toxicity to plants is increasing worldwide. This paper proposes a method of detecting and visualizing plants' stress before visible damage occurs using spectral imaging technique. Radish plants (*Raphanus sativus* L. cv. Akamaru) were exposed to ozone and sets of spectral images of the leaves were measured. We defined the visible and invisible wavelength bands as RED (670-690 nm) and NIR (780-800 nm) in which plants' condition is expected to be reflected, and analyzed the dynamic change of those bands ( $\Delta$ RED and  $\Delta$ NIR) due to ozone exposure. We found that (1)  $\Delta$ NIR increased before  $\Delta$ RED did. (2)  $\Delta$ NIR approached zero when the exposure to ozone was terminated before visible damage occurred. (3)  $\Delta$ NIR showed remarkable change in parts where visible damage occurred. The proposed method allowed us to detect and visualize the influences of ozone stress in its early stages.

**Key words:** spectral image, visualization, ozone stress, plant response, NIR imaging

### 1. はじめに

光化学スモッグは、1970年に東京都内で約6000人の被害者が出て以来、日本中に知れ渡るようになった大気汚染のひとつである。その後、汚染物質の排出規制や注意報の連絡徹底などにより被害者数は減少し、光化学スモッグは過去の出来事として認識されるようになっていった。ところが、ここ数年、都市部を中心に注意報の発令回数は増加しており、さらに北アメリカやユーラシア大陸の中高緯度地域などで発生した汚染物質が、大陸間を移動し世界中に広がっていることが指摘され、光化学スモッグはいまや地球規模の問題として再び注目されている<sup>1)</sup>。

光化学スモッグの指標として用いられる光化学オキシダントは、工場や車から排出される窒素酸化物や炭化水素などの一次汚染物質に、太陽光の紫外線が照射されることによって光化学反応が起こり生成する二次汚染物質である。光化学オキシダントの主成分であるオゾン ( $O_3$ ) はその酸化力の強さゆえ、人間のみならず動物や植物にも悪影響を与えることが知られている<sup>1)</sup>。なかでも植物は、人間が感じ

ることのない低濃度  $O_3$  でも、成長低下<sup>2-4)</sup>、可視障害<sup>3-7)</sup>、不可視障害<sup>4,5)</sup>といった、いわゆる“ストレス”を受けることが報告されており、植物が自ら移動できないことを考慮するときわめて深刻な問題であるといえる。近年では、都市近郊の山間部や農村地帯の  $O_3$  濃度が、都市部より高くなる現象が報告されており<sup>8)</sup>、樹木の成長低下<sup>4,9)</sup> や農作物への悪影響<sup>6)</sup> といった人間の生活にもかかわる被害が生じている。

植物が  $O_3$  から受けるストレスについては、これまで主として農学の分野で研究されてきた<sup>2-7,9)</sup>。一般的な農学的手法では、 $O_3$  雰囲気中で植物を一定期間育成し、収穫して乾重量、葉面積、可視障害の程度などを調べる。これは農作物の収穫量がどれほど減少するかといった情報が得られる反面、測定のために植物を破壊する必要があることや、可視障害が生じる前にストレスの検出ができないため、農作物の品質管理という観点からは問題がある。すなわち、農作物に可視障害が生じると、収穫量が減少する場合は異なり、たとえ10%の可視障害であっても市場に

\* E-mail: naka@bpel.ics.tut.ac.jp

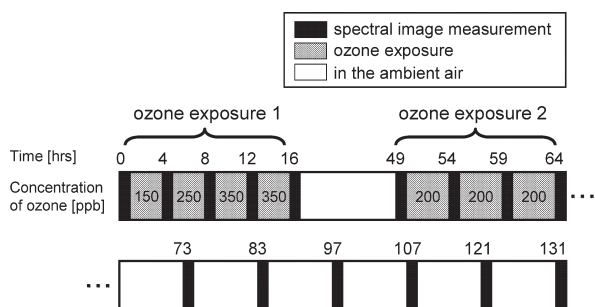


Fig. 1 Experimental procedure. Radish was exposed to ozone twice in laboratory environment and sets of spectral images of the leaves were measured at proper time. After exposure, the plant was set in the ambient air.

出荷できないため深刻な経済損失が生じること、また可視障害は、施肥などの対策を講じることにより被害を軽減できると予想されること<sup>6)</sup>から、早期発見は重要な課題であるといえる。

一方、分光学的手法を用いた植物のストレス診断が、リモートセンシングの分野を中心に行われている<sup>10-20)</sup>。これは植物の分光分布を測定し、その情報から診断を行うため、非破壊かつ非接触で測定できる利点があり、測定波長を可視領域外まで広げることにより、植物が受けているストレスを可視障害が生じる前に検出できる可能性がある。

これまで行われてきた分光学的手法は、人工衛星や飛行機などを用いて遠隔からフィールド全体を測定するものと、実験室内で個体あるいは個葉を測定するものに大別できる。前者は画像測定が主流であるが、環境の制御ができないことから、分光分布に影響を及ぼす要因が何であるかを特定することが難しい。一方、後者は環境を人工的に制御できるが、現在のところ、葉の一点のみを測定するポイント計測が主流であり、葉の各部位にそれぞれ生じる変化を同時に測定することができない。そのため、葉のどこにいつ生じるかわからない可視・不可視障害の特徴的な変化をダイナミックにとらえることは困難である。

そこで本論文では、(1)  $O_3$  ストレスによる葉の特徴的な変化をダイナミックにとらえること、(2) 植物が受けているストレスを可視障害が生じる前に検出し可視化することの二点を目的として、実験室内で  $O_3$  暴露システムを用いて植物に可視障害が生じるまでストレスを与え、可視から近赤外領域まで個葉の分光画像を随時測定した。得られた分光画像から特に変化の激しかった波長帯を用いて、植物の反応を経時変化として表し、さらに葉全体の反応を可視化した。

## 2. 植物への $O_3$ 暴露と分光画像計測

### 2.1 供試植物と実験方法

実験材料には、 $O_3$  に対する感受性が高く、生育が早く、適度な大きさであることから、 $O_3$  の指標植物としてよく利用されるハツカダイコン (*Raphanus sativus* L. cv. Akamaru)<sup>2,21)</sup> を用いた。生育段階で  $O_3$  ストレスを与えないため、以下の方法で種子から育てた。まず、黒土と赤土を50% ずつ混合した土壌を詰めた 900 ml 容ポットにハツカダイコンの種子をまき、屋外に設置した透明アクリル容器に入れた。容器の中は、 $O_3$  濃度が約 10 ppb 以下になるように  $O_3$  カットフィルター (東京濾器株式会社, オゾンフィルター) を通した外気を常時送り込んだ。灌水は土が乾燥したときに適宜行った。通常、ハツカダイコンは 20 日間程度で成熟するが、気温が低下する 9 月 6 日に播種したため、葉が十分に展開するまで発芽後 38 日間にわたって育成した。このうち 1 個体を暴露用ポット、成長が同程度の 1 個体を対照用ポットとし、この中の代表的な葉を測定に用いた。暴露用ポットには 2 章 2 節に示す方法で  $O_3$  暴露を行った。

Fig. 1 に、 $O_3$  暴露と分光画像計測からなる一連の実験手順を示す。枠外の数字は、実験開始を 0 としたときの分光画像計測を行った時間 (以降、実験開始  $X$  時間後を Time  $X$  と記述する)、枠内の数字は  $O_3$  濃度を示す。 $O_3$  暴露は大別して 2 度行い、それぞれの暴露後はポットを屋外に置き、経過観察した。1 度目と 2 度目の  $O_3$  暴露前 (Time 0, 49) と経過観察時 (Time 73, 97, 121) の分光画像計測 30 分前には、根元に十分な灌水を行った。

### 2.2 $O_3$ 暴露システム

$O_3$  暴露システム (荏原実業株式会社, 型式 OZSD-03UV) の基本構成を Fig. 2 に示す。 $O_3$  発生器に取り込まれた室内空気は、流量計、有機物を除去するための活性炭を通ったのち、紫外線照射により  $O_3$  へと変化する。発生する  $O_3$  の濃度は原料空気の温度により容易に変化するため、紫外線ランプにかける電圧を変圧器で適宜調整することにより安定化をはかる。 $O_3$  発生器から出た気体は、窒素酸化物除去のためのガラス洗浄ビン内の水を通過したのち、透明ガラスチャンバー (デシケーター; 直径 300 mm, 高さ 300 mm) へと送られる。チャンバーを出た気体は  $O_3$  濃度計 (ダイレック株式会社, MODEL 1150) を通り、触媒で酸素に分解されたのち大気中に放出される。暴露用ポットはチャンバーに鉢ごと入れ、 $O_3$  に接触させた。植物は、受ける照度が高いほど  $O_3$  に対する感受性が高まり、被害が大きくなるため<sup>22)</sup>、本実験では、暴露中に蛍光灯 (7200 K) をチャンバー外部から照射した。また、対照用

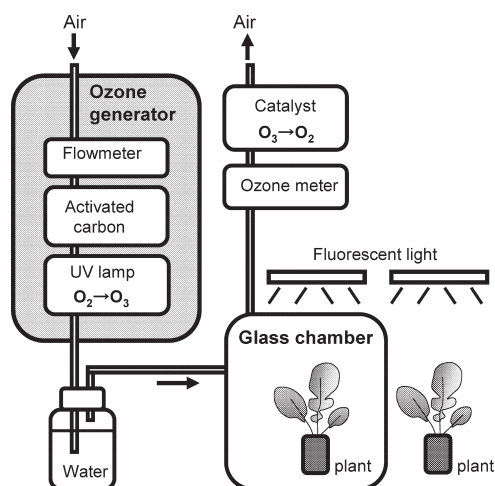


Fig. 2 Ozone exposure system. Ozone was produced in a generator and led into a glass chamber in which the potted plant was set. Both plants, exposed and controlled, were illuminated with fluorescent lights.

ポットはチャンバーのそばに置き、 $O_3$  濃度以外の環境要因である照射光量や気温に差が生じないように配慮した。両ポット付近の湿度は実験開始時に等しいことを確認した。

### 2.3 分光画像測定システム

Fig. 3 に、分光画像測定システムを示す。植物をチャンバーから出し、暗幕でおおった測定台に鉢ごとのせた。ハロゲンランプ (500 W, 2 個) によって照射された個葉は、レンズ、音響光学フィルター (Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF), 米国 Brimrose 社, CVA100-0.4-1.0), 近赤外冷却 CCD カメラ (浜松ホトニクス社, ORCA-ER-1394 システム), 制御装置, コンピュータからなる分光画像測定システムにより撮像された。AOTF は、機械的な駆動なしに電気的な制御のみで透過光の波長を連続的に変化させることのできる分光フィルターであり、今回使用したモデルは可視から近赤外領域までの 400~1000 nm を一度に走査できる特徴をもつ。本実験では、ランプの特性により光量が十分にとれず S/N 比が悪かった低波長帯を除き、測定範囲 70~114 MHz (約 640~980 nm), 測定間隔 0.5 MHz とした。測定システムの都合上、周波数で制御を行ったので波長間隔が一定ではないため、画像取得後、2 nm 間隔にリサンプリング処理を行った。得られた分光反射率には、近赤外領域において緑色植物に特有のプラトー (plateau) とよばれる特に変化のないなだらかな高反射率帯域がみられたため、長波長側をカットし、波長範囲 650~800 nm のみを用いることにした。また、光源や AOTF 内部の光学系による画像の明暗むらを取り除くため、個葉の分光画像を標準白色板 ( $BaSO_4$ ) の分光画像により正規化した。これにより、画像の各ピクセル値が

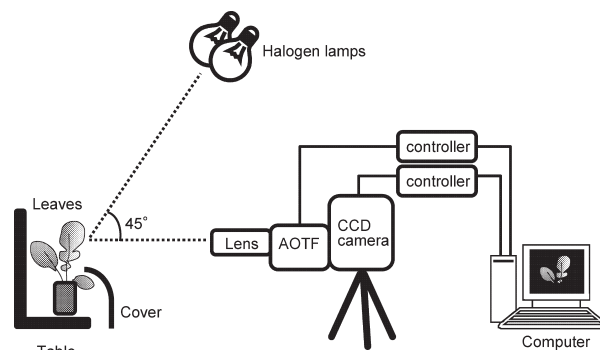


Fig. 3 Spectral imaging system. An intensity image of the leaves illuminated by halogen lamps was taken with a CCD camera through an acousto-optic tunable filter.

分光反射率データに対応する。画像測定時の露光時間は、個葉、標準白色板それぞれ 100 ms, 70 ms であった。分光画像との比較のため、RGB デジタルカメラ (MINOLTA, DIMAGE7) でも葉の撮影を行った。このときの撮影条件は、露光時間 1/45 s,  $F$  値 5.6 とした。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 肉眼で観察した葉の変化

まず、肉眼で観察した所見を、RGB デジタルカメラで撮影した画像を参照しながら述べる。Fig. 4 (A) に暴露用ポット, Fig. 4 (B) に対照用ポットの中の代表的な葉を示す。(A), (B) とも、左から順に Time 0, 16, 54, 59, 131 に撮影したものである。

暴露用ポットの葉は、1 度目 (Time 0-16) の  $O_3$  暴露によって徐々にしおれた状態へと変化した。しかし、肉眼では、 $O_3$  による典型的な可視障害は認められなかった。その後、2 度目の  $O_3$  暴露中 (Time 49-64) の Time 54 に、はじめて肉眼でうっすらと見える変化が生じ、Time 59 では葉脈間の色が白く抜け落ちる典型的な可視障害が生じた。可視障害の部位はその後とも広がり続け、 $O_3$  暴露を止めたあともそれは続いた。実験終了時の Time 131 には、斑点のようにくっきりと白く抜け落ちた。一方、対照用ポットの葉は、一連の実験を通じて特に変化がなかった。両ポットとも、同じポット内の葉には同じ傾向がみられたが、暴露用ポットは葉ごとに障害の差が大きかった。Fig. 4 (A) は、障害の程度が最も大きかった葉である。

### 3.2 分光反射率の変化

肉眼の観察レベルでは、人間の眼で見える波長帯域内の情報しか得ることができないため、可視障害が現れてはじめて植物が  $O_3$  ストレスを受けていることに気づく。それでは近赤外領域まで含む分光レベルではどうか。Fig. 4 (A) の Time 131 に撮影した画像を参考に、1 枚の葉の中

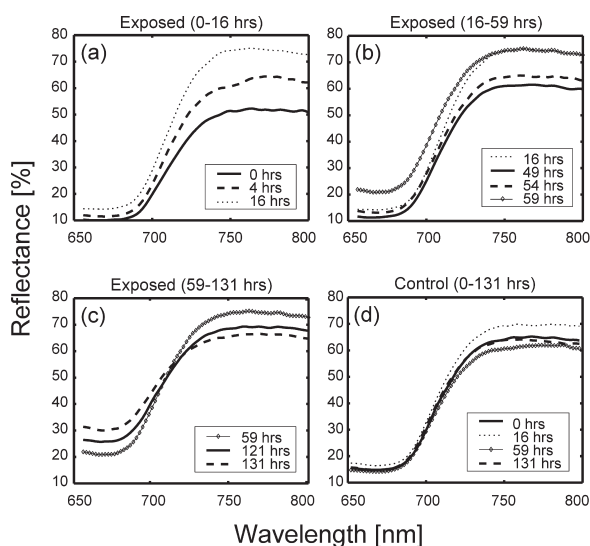


Fig. 5 Spectral distributions of radish leaves (a)-(c) exposed to ozone and (d) controlled. These spectra were measured at Time (a) 0, 4, 16, (b) 16, 49, 54, 59, (c) 59, 121, 131 and (d) 0, 16, 59, 131.

から可視障害が生じた部位の分光反射率を抽出して平均し、同じ部位について  $O_3$  暴露前まで時間をさかのぼって比較した。Fig. 5 (a)~(c) に  $O_3$  暴露用ポットの分光反射率の変化を示す。また、Fig. 5 (d) に、対照用ポットの葉から任意に選択した部位の分光反射率を示す。いずれも赤領域でクロロフィルの吸収による反射率の減少、近赤外領域でプラトーとよばれる高反射率の連続、赤領域から近赤外領域にかけてレッドエッジとよばれる急激な立ち上がり、といった緑色植物の葉にみられる典型的な分光反射率が得られた。次に、 $O_3$  暴露による変化を図ごとに見る。Fig. 5 (a) では、1 度目の  $O_3$  暴露によって近赤外領域の反射率が増すことがわかる。それに比べ、赤領域の変化は小さい。Fig. 5 (b) では、1 度目の  $O_3$  暴露の最後である Time 16 から、2 度目の  $O_3$  暴露の最初である Time 49 まで、近赤外領域の反射率がいったん減少し、Time 54 で再び増加している。ここでも赤領域の変化は小さい。ところが、可視障害がはっきりと発現した Time 59 では、赤領域の反射率が急激に増加した。ひとたび可視障害が生じたのちは、Fig. 5 (c) に示すように、近赤外領域の減少と赤領域の増加が同時に進行した。

これらの変化は、次のように説明できる。まず、近赤外領域の反射率の増加は、 $O_3$  暴露による葉の脱水により引き起こされる<sup>11,18)</sup>。その後、反射率が多少変動しているが、この原因としては、葉の角度や周囲温度など撮影条件の変化、分光反射率を抽出する部位のずれなどの計測アーティファクトによるものと、植物の吸水による脱水からの

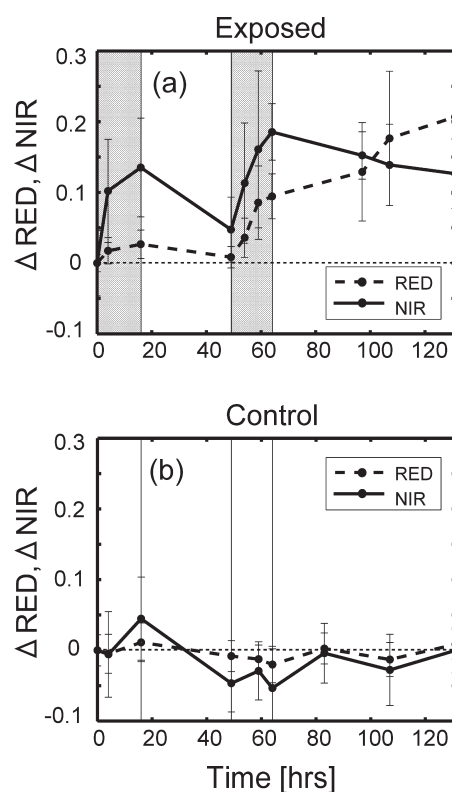


Fig. 6 Dynamic change of  $\Delta$ RED and  $\Delta$ NIR. (a) Exposed to ozone and (b) controlled. During the first exposure (Time 0-16),  $\Delta$ NIR increased more than  $\Delta$ RED. When the exposure was terminated (Time 16-49),  $\Delta$ NIR approached zero. During the second exposure (Time 49-64),  $\Delta$ RED increased remarkably and visible injury occurred at Time 59. After visible injury occurred (Time 59-131),  $\Delta$ RED continued to increase and  $\Delta$ NIR decreased. Control did not show any regular changes.

回復などが考えられる<sup>18)</sup>。一般に、クロロフィルを含む緑葉は、光合成に要する赤領域の光を吸収し、不要な近赤外領域の光を反射させて葉温が上がらないようにしていると考えられており、可視障害の発現とともに赤領域・近赤外領域の反射率がそれぞれ増加・減少したのは、クロロフィル量の減少が原因と考えられる。このことを、次節で述べるリモートセンシングの分野では、植物の活力または活性度<sup>16)</sup>の低下と一般的に表現している。一方、Fig. 5 (d) に示した対照用ポットの葉から任意に選択した部位の分光反射率は、近赤外領域で多少の変動はあるものの、赤領域の変化は小さい。近赤外領域の反射率が変動する理由は暴露用ポットと同様であり、赤領域の変化が小さいのはクロロフィル量がほとんど変化しないためと考えられる。

### 3.3 NIR と RED の経時変化

Fig. 5 より、 $O_3$  暴露によって個葉の分光反射率は、大きく分けて赤と近赤外の 2 領域で特徴的な変化をすることがわかった。これは、リモートセンシングの分野で、植生

指標を計算するのに用いられる領域に対応する。植生指標とは、衛星データを用いて簡易な計算式で植生の状況を把握することを目的として考案されたものであり、近赤外領域と赤領域の反射率の差をとることで、植物の量や活力を表そうとするものである。たとえば、地球観測衛星 LAND SAT に搭載されている TM (Thematic Mapper) とよばれるセンサーは、7バンドの画像を観測するが、そのうちバンド3 (630~690 nm)、バンド4 (760~900 nm) が植生指標の算出に用いられる。バンド3は緑色植物のクロロフィルが吸収する波長領域であり、植生分析の最も重要なバンドのひとつである。バンド4は植物量 (バイオマス) に対応し、水分の状態も影響する。本研究では、バンド3の中でも波長670~690 nmでの平均分光反射率を RED、バンド4の中でも波長780~800 nmでの平均分光反射率を NIR と定義し、この2つの量を用いて分光特性の特徴的な変化をとらえる。

まず、暴露用ポットの1枚の葉の中で可視障害が生じた部位の平均 RED と平均 NIR を求めた。同じ部位について O<sub>3</sub> 暴露前まで時間をさかのぼり、同様に平均 RED と平均 NIR を求めた。O<sub>3</sub> 暴露前を基準 (ゼロ) とした変化量である  $\Delta$ RED と  $\Delta$ NIR の経時変化を Fig. 6 (a) に示す。横軸は実験開始を0としたときの経過時間、縦軸は  $\Delta$ RED と  $\Delta$ NIR であり、エラーバーは各点での標準偏差、Time 0-16, 49-64 はそれぞれ1回目、2度目の O<sub>3</sub> 暴露を示す。対照用ポットも同様に、1枚の葉から任意に選択した部位より  $\Delta$ RED と  $\Delta$ NIR の経時変化を求め、Fig. 6 (b) に表す。これより以下のことが明らかとなった。

(1) O<sub>3</sub> 暴露によってまず  $\Delta$ NIR が急激に増加する、(2) 可視障害が生じる前に暴露を止めると  $\Delta$ NIR はゼロに近づく、(3) 再び暴露を始めると  $\Delta$ RED が大きく増加し、可視障害が生じる、(4) 可視障害が生じたあとは、暴露を止めても  $\Delta$ RED は増加し続け、 $\Delta$ NIR は減少する、(5) 対照用ポットは、暴露用ポットに比べ変化量は小さく、規則性はない。

以上の結果は、3章2節に述べた分光反射率の変化に対する観察結果と同様の傾向を示しており、 $\Delta$ RED と  $\Delta$ NIR を用いることで、その特徴をより定量的に表すことができた。

### 3.4 可視化

3章3節では、 $\Delta$ RED と  $\Delta$ NIR の経時変化から、従来のポイント計測では困難であった、O<sub>3</sub> が葉に与える影響をダイナミックにとらえることができた。しかしながら、これは暴露用ポットの可視障害が出た部位と、対照用ポットの一部を抜き出したものであり、葉全体にどのような影響

が及んでいるか知ることはできない。そこで、画像全体を  $\Delta$ RED と  $\Delta$ NIR により擬似カラー表示を行うことで、O<sub>3</sub> が葉全体に与える影響を可視化した。

可視化は、すべてのピクセルについて RED と NIR を求め、O<sub>3</sub> 暴露前の画像を基準 (ゼロ) とした差画像、すなわち  $\Delta$ RED および  $\Delta$ NIR 画像を生成し、それに色を付けて表示するのが理想的である。しかし、実際には測定中に葉や茎が成長することなどから、画像ごとに葉の位置が若干ずれるため、差画像の算出は困難である。そこで、以下の方法を用いた。まず、1枚の葉について考える。すべての画像についてピクセルごとに RED と NIR を求める。次に、O<sub>3</sub> 暴露前の画像から葉の部分の RED と NIR を全ピクセル抜き出し、平均 RED と平均 NIR を求める。この平均 RED と平均 NIR を、すべての画像の葉の部分から減ずることで、 $\Delta$ RED および  $\Delta$ NIR 画像とした。これを葉ごとに行い、生育段階や個体差による初期値のばらつきをなくした。

可視化は3つのフェーズに分けて行った。フェーズ1は、1度目の O<sub>3</sub> 暴露から2度目の O<sub>3</sub> 暴露を始める前まで (Time 0-49)、フェーズ2は2度目の O<sub>3</sub> 暴露 (Time 49-64)、フェーズ3は2度目の O<sub>3</sub> 暴露後 (Time 64-131) である。Fig. 7 (a)~(c) にはフェーズごとに可視化した O<sub>3</sub> 暴露用ポット画像の一例を、Fig. 8 には同様の手法で可視化した対照用ポットの画像の一例を示す。スケールは、Fig. 7 (a) 上部に示した右側の色 (赤) ほど変化量が大きいことを示す。なお、Fig. 7 (a) と Fig. 8 の Time 0 の画像に見られる黄や赤は、葉の場所ごとの平均 RED と平均 NIR からのずれである。

次に、O<sub>3</sub> 暴露による変化を図ごとに見る。Fig. 7 (a) のフェーズ1では、 $\Delta$ RED がほとんど増えていないにもかかわらず、 $\Delta$ NIR ではすでに Time 4 や Time 16 で葉脈間に変化が生じている (図中矢印部分)。つまり、ヒトの眼で見える波長領域より、見えない波長領域のほうが大きな変化が生じていることを示す。これは前節で示した Fig. 6 (a) と一致する。Fig. 7 (b) のフェーズ2では、可視障害がはっきりと認められた Time 59 の時点でようやく  $\Delta$ RED が大きく増加している (図中矢印部分)。Fig. 7 (c) のフェーズ3では、暴露を止めてもなお可視障害が広がる様子がわかる (図中白丸部分)。なお、Fig. 8 に示す対照用ポットは、どのフェーズにおいてもほとんど変化がなかった。NIR で多少の変動がある理由は、3章2節で述べたように、葉の角度や周囲温度など撮影条件の変化や植物の水分状態の違いなどが考えられる。

ここで注目すべきことは、暴露用ポットのフェーズ2、

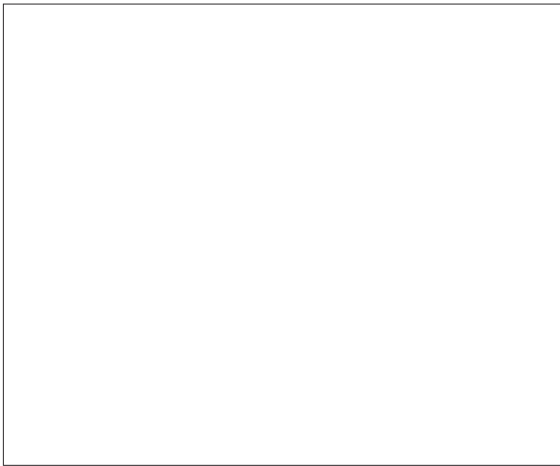


Fig. 4 Photos of radish leaves (A) exposed to ozone and (B) controlled which were taken with an RGB digital camera at Time 0, 16, 54, 59 and 131. Visible injury occurred at Time 59, while the controlled leaves did not show any remarkable changes. Arrows point to visible injured area.

3で可視障害が生じている部位は、フェーズ1の段階です  
 でNIRが大きく変化している周辺であるということ  
 である。肉眼で可視障害がはっきりと確認できるのはTime  
 59であるが、近赤外光を用いれば、Time 4には可視障害  
 が生じる場所が前兆として現れている。つまり、本実験で  
 は、肉眼で認められる55時間前に、可視障害が生じる場  
 所が検出できたといえる。

#### 4. ま と め

O<sub>3</sub> 暴露によって、葉のどの部位にどの程度の障害が生  
 じるか、事前にはわからない。そのため、従来のポイント  
 計測で葉の分光反射率を計測する場合、測定するポイント  
 に必ずしも障害が現れるとは限らず、状態が刻々と変化す  
 る様子をとらえることは困難であった。本研究では、葉全  
 体の分光反射率が同時に測定できる分光画像測定を行い、  
 可視障害が生じた部位を時間をさかのぼって抽出すること  
 で、葉が可視障害へと変化していく様子を可視・不可視の  
 両面からダイナミックにとらえることができた。

可視障害のちに生じる部位は、 $\Delta$ RED に先立ち  $\Delta$ NIR  
 が増加する、すなわち、肉眼で障害が認められない段階で  
 も、すでに  $\Delta$ NIR が増加している傾向があることがわか  
 った。今回は、Time 59 によろやく障害が肉眼で確認され  
 たが、 $\Delta$ NIR ではその55時間前のTime 4にはすでに予兆  
 が出ている。これは、可視障害が生じる前兆として、不可  
 視情報が近赤外領域の反射光に現れていることを示してお  
 り、可視被害の早期発見につながる可能性が示唆された。

本稿では暴露用・対照用ポットともに代表的な葉の結果

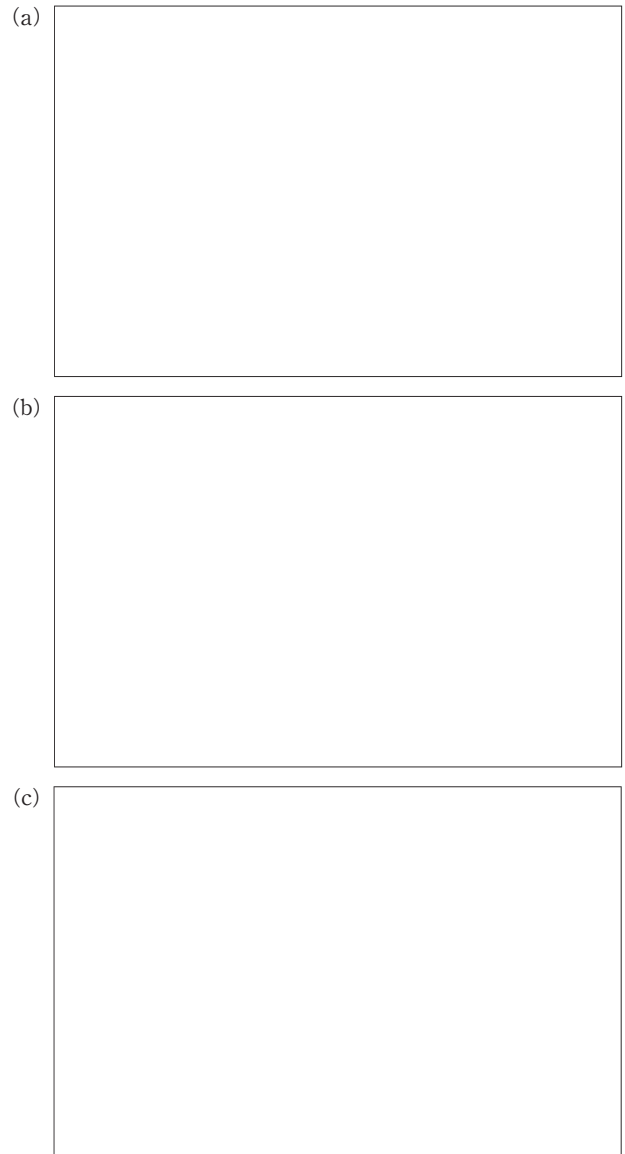


Fig. 7 Pseudo colored images of leaves exposed to ozone. (a) Phase 1, (b) Phase 2, (c) Phase 3. At Time 59,  $\Delta$ RED changed at the area where visible injury occurred. At Time 4, however,  $\Delta$ NIR already showed remarkable change at almost the same area.

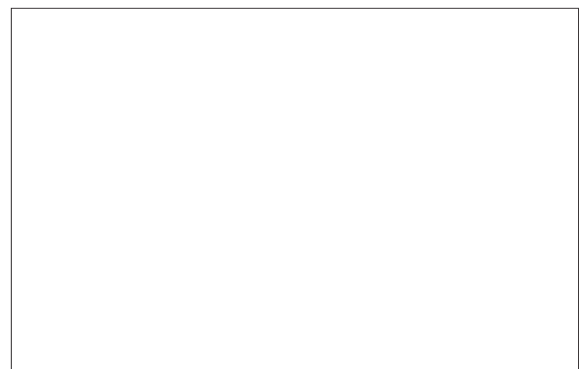


Fig. 8 Pseudo colored images of leaves in a controlled condition (Phase 1-3). Control did not show any remarkable changes.

のみを示したが、同個体の別の葉や、別の個体においても、Fig. 6のような傾向がみられることを確認した。O<sub>3</sub>に対する植物の感受性は、植物の種類や品種、生育条件、成長段階、暴露時の環境など多くの要因に左右されるため、本実験から一概に何時間前に可視障害を検出できると結論することは難しいものの、NIRの増加とその回復の程度が可視障害の発生の有無にかかわっていることを示唆することができた。実際、植物が自然界においてO<sub>3</sub>暴露を受けるとき、可視障害が生じる前に暴露から解放されると、そのまま障害が生じない場合と、数日後に生じる場合とに分かれる。障害が生じない場合も、再び暴露されると障害が生じやすい。本実験では、間歇的に2度の暴露を行うことにより、可視障害が生じる前と後にそれぞれ暴露から解放し経過観察を行ったが、条件が変われば障害発生時刻も変わると予想される。また、O<sub>3</sub>濃度も重要なパラメーターのひとつである。今回は、濃度を安定させるため紫外線ランプに与える電圧を適宜調整したが、実際には一定濃度で暴露し続けることは困難であった。ドース（O<sub>3</sub>濃度と暴露時間との積）を指標に用いるなどの工夫が必要である。今後は、個体数を増やし条件を変化させて、データを蓄積することにより現象をより一般化することが必要であり、将来的には *in situ* での可視障害早期発見の実現が期待される。

本研究を進めるにあたり、埼玉大学大学院理工学研究科・豊岡了教授、埼玉県環境科学国際センター・小川和雄博士、三輪誠博士、米倉哲志博士には、O<sub>3</sub>暴露装置からO<sub>3</sub>の植物影響まで、ご助言やお力添えをいただきました。また、豊橋技術科学大学客員教授・臼井支朗教授には、研究全般にわたりアドバイスをいただきました。心よりお礼申し上げます。

## 文 献

- 1) H. Akimoto: "Global air quality and pollution," *Science*, **302** (2003) 1716-1719.
- 2) T. Izuta, H. Miyake and T. Totsuka: "Evaluation of air-polluted environment based on the growth of radish plants cultivated in small-sized open-top chambers," *Environ. Sci.*, **2** (1993) 25-37.
- 3) T. Izuta, K. Takahashi, H. Matsumura and T. Totsuka: "Cultivar difference of *Brassica campestris* L. in the sensitivity to O<sub>3</sub> based on the dry weight growth," *J. Jpn. Soc. Atmos. Environ.*, **34** (1999) 137-146.
- 4) 伊豆田猛, 松村秀幸, 河野吉久, 清水英幸: "樹木に対するオゾンの影響に関する実験的研究", *大気環境学会誌*, **36** (2001) 60-77.
- 5) T. Yonekura, Y. Honda, E. Oksanen, M. Yoshidome, M.

- Watanabe, R. Funada, T. Koike and T. Izuta: "The influences of ozone and soil water stress, singly and in combination, on leaf gas exchange rates, leaf ultrastructural characteristics and annual ring width of *Fagus crenata* seedlings," *J. Jpn. Soc. Atmos. Environ.*, **36** (2001) 333-351.
- 6) I. Nouchi: "Agricultural countermeasures for avoiding crop injury from ozone in Japan," *J. Agric. Meteorol.*, **59** (2003) 59-67.
- 7) 野内 勇: 大気環境変化と植物の反応 (養賢堂, 2001) pp. 72-96.
- 8) J. W. Gregg, C. G. Jones and T. E. Dawson: "Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City," *Nature*, **424** (2003) 183-187.
- 9) T. Izuta, M. Umemoto, K. Horie, M. Aoki and T. Totsuka: "Effects of ambient levels of ozone on growth, gas exchange rates and chlorophyll contents of *Fagus crenata* seedlings," *J. Jpn. Soc. Atmos. Environ.*, **31** (1996) 95-105.
- 10) V. C. Runeckles and H. M. Resh: "The assessment of chronic ozone injury to leaves by reflectance spectrophotometry," *Atmos. Environ.*, **9** (1975) 447-452.
- 11) H. W. Gausman, D. E. Escobar, R. R. Rodriguez, C. E. Thomas and R. L. Bowen: "Ozone damage detection in Cantaloupe plants," *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, **44** (1978) 481-485.
- 12) W. E. Westman and C. V. Price: "Spectral changes in conifers subjected to air pollution and water stress: experimental studies," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **26** (1988) 11-21.
- 13) W. D. Bowman: "The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves," *Remote Sensing Environ.*, **30** (1989) 249-255.
- 14) I. Filella and J. Peñuelas: "The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass, and hydric status," *Int. J. Remote Sensing*, **15** (1994) 1459-1470.
- 15) J. Peñuelas, I. Filella, S. Elvira and R. Inclán: "Reflectance assessment of summer ozone fumigated Mediterranean white pine seedlings," *Environ. Exp. Bot.*, **35** (1995) 299-307.
- 16) J. Peñuelas and I. Filella: "Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status," *Trends Plant Sci.*, **3** (1998) 151-156.
- 17) 本郷千春, 小林達明, 有田ゆり子: "分光反射率からみた樹木の水分ストレス反応", *写真測量とリモートセンシング*, **37** (1998) 43-50.
- 18) 西田顕郎, 小杉緑子, 大手信人: "樹木単葉の分光反射率と光合成速度および水分欠乏との関係", *日本リモートセンシング学会誌*, **20** (2000) 6-16.
- 19) A. A. Gitelson, Y. Gritz and M. N. Merzlyak: "Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves," *J. Plant Physiol.*, **160** (2003) 271-282.
- 20) S. Aario, H. Kauppinen, O. Silvén and K. Viilo: "Imaging spectrography of greenhouse plants for vitality estimation," *Proc. 3rd International Conference on Computer Vision Systems (ICVS 03), International Workshop on Spectral Imaging* (Graz, Austria, April 1-3, 2003) pp. 49-55.
- 21) 野内 勇: 大気環境変化と植物の反応 (養賢堂, 2001) p. 135.
- 22) 若松伸司, 篠崎光夫: 広域大気汚染—そのメカニズムから植物への影響まで— (裳華房, 2001) pp. 89-90.