

2種のUV励起光によるラッカセイ生葉のLIFスペクトル変化および蛍光葉内分布

誌名	植物環境工学
ISSN	18802028
著者	嘉数, 祐子 福地, 健一 高橋, 邦夫
巻/号	22巻2号
掲載ページ	p. 100-106
発行年月	2010年6月

2種のUV励起光によるラッカセイ生葉のLIFスペクトル変化および蛍光葉内分布

嘉数 (大野) 祐子・福地健一・高橋邦夫

木更津工業高等専門学校 292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1

Spectral Variations of Laser Induced Fluorescence from Peanut Leaves and Characteristics of Transverse Distribution of Fluorescence in leaves Excited at 325 nm and 375 nm.

Yuko OHNO-KAKAZU, Ken'ichi FUKUCHI and Kunio TAKAHASHI

Kisarazu National College of Technology 2-11-1 Kiyomidai-Higashi, Kisarazu, Chiba, 292-0041, Japan

Abstract

This study clarified UV-B stress, ozone stress and water stress using laser-induced fluorescence (LIF) spectra (325 nm and 375 nm) of the leaves of the peanut (*Arachis hypogaea* L.). The LIF spectral variation characteristics differed between the two wavelengths. At 375 nm, the fluorescence peak ratio of 685 nm to 530 nm (F685/F530) decreased in response to increased UV-B stress, corroborating the findings of our previous study using an Ar⁺ laser (351-364 nm). On the other hand, excitation at 325 nm resulted in a decrease in the F685/F530 under irradiation at 27 kJm⁻² of UV-B, with a gradual increase observed under UV-B irradiation greater than 54 kJm⁻². This increase in the F685/F530 at 325 nm was not observed under ozone and water stress. The transverse distribution of fluorescence in leaves was examined to clarify increments in the F685/F530 under irradiation at 325 nm. The findings suggested that excess UV-B irradiation damaged UV-B-absorbing pigments in the upper epidermis, and also that irradiation at 325 nm was capable of exciting chlorophyll in the palisade tissues. These results show that the use of LIF spectra with different excitation wavelengths in the UV region is effective for accurate diagnoses of stress in plant leaves.

Keywords: *Arachis hypogaea* L., distribution of fluorescence in leaves, laser-induced fluorescence, UV-B stress, UV excitation

緒言

人間の社会活動が活発になるにつれて地球環境の変化が地球規模での問題となっている。オゾン等の大気汚染物質、オゾン層破壊による有害紫外線、硫黄酸化物等による酸性雨などの酸性降下物が増加し、その結果、それらが原因と見られる森林の衰退¹⁾や農作物の減収²⁾などが議論される

ようになった。これらの自然環境の中では農作物をはじめとする植物への影響をいち早く評価し対処することが不可欠であり、そのためにはこれらの影響を的確に評価する為の技術確立が急務となっている。

我々は、紫外レーザーを励起光源としたレーザー誘起蛍光 (Laser-Induced Fluorescence (LIF)) 法を用いて、植物葉から放出される蛍光を測定することで、ultraviolet B (UV-B) 領域の有害紫外線および光化学スモッグの主成分であるオゾン等が植物生葉の活性に及ぼす影響を、非破壊・非接触的な物理手法によって評価できることを明らかにした³⁻⁵⁾。例えば、CWA⁺レーザー (波長 351 nm-364 nm) で植物生葉を励起した実験では生葉の特徴的な蛍光ピーク波長である 685 nm

2009年 7月30日受付

2009年 12月 8日受理

Corresponding author: Ken'ichi Fukuchi

(fukuchi@kisarazu.ac.jp)

(F685) および 530 nm (F530) の蛍光強度比 (F685/F530) が活性評価のよい指標となることが分かっている³⁾。励起光源に紫外レーザーを用いることで、光合成色素であるクロロフィルだけでなく、フェルラ酸、フラボノイド、nicotinamide adenine diphosphate (NADPH) 等の葉内に蓄積した化合物も同時に励起することができるため、本手法は、可視レーザー励起によってクロロフィル蛍光だけを観察する方法に比べ、総合的な植物診断を行う上で多くの情報が得られる利点がある。

生葉内に含まれる各色素(クロロフィル、フェルラ酸、フラボノイド、NADPH等)からのLIFスペクトル分布は、それぞれ光学吸収の波長特性が異なるので⁶⁾、励起波長によって変化することが知られている⁷⁾。また、水分、温度、紫外線、大気汚染ガスなどの環境要因が植物のストレス原因となるが、植物は個々のストレス要因に対して特異的な反応を示す場合がある⁸⁾。その為、様々な励起波長をもつレーザー光源を用いて蛍光スペクトル変化を測定することで、個々のストレスに対応した、各種色素からの特徴的なシグナルが得られるものと期待できる。例えば Philpot 等⁹⁾は、水分ストレス(乾燥によるストレス)を与えた大豆を 537 nm で励起した場合、570 nm および 600 nm 付近の蛍光強度が特異的に増加することを報告している。

そこで、本研究ではこれまでの活性評価に使用した波長に近い 375 nm で発振するダイオードレーザーと、より短い 325 nm で発振する He-Cd レーザーの 2 波長の UV 励起によって、UV-B ストレス、オゾンストレスおよび水分ストレスを荷負したラッカセイ生葉における蛍光スペクトルの変化を測定し、活性評価およびストレス因子の識別による植物生育診断の新技术法として有効性を検討した。

材料および方法

1. 測定装置の概要

LIF 測定装置の概略図を Fig. 1 に示す。励起光源には、波長 325 nm で CW 発振する He-Cd レーザー (IK3301R-G-S, 金門電気製) および波長 375 nm で CW 発振するダイオードレーザー (LDM375. 10. CW, オーテックス製) を用いた。それぞれのレーザー光に含まれる僅かな可視成分 (400 ~ 800 nm) は、微弱な蛍光測定のため、可視光をカットする紫外透過フィルター (UV-D35) を用いて除去した¹⁰⁾。レーザーの強度は、紫外透過フィルター直後において、He-Cd レーザーが 12 mW、ダイオードレーザーが 6.5 mW、ビームの直径は各レーザーともに 1.0 mm ($1/e^2$) であった。

光検出部は光ファイバー集光光学系をもつマルチチャンネル分光測光システム (PMA-50, 浜松ホトニクス製) に、電子冷却裏面入射型冷却 CCD (波長感度領域 200 nm ~

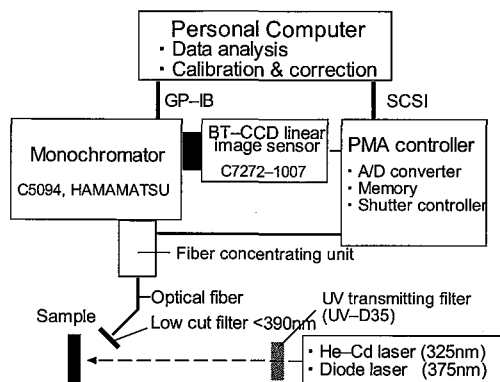


Fig. 1 A block diagram of the LIF (laser-induced fluorescence) measurement system based on the multi-channel spectral analyzer (PMA-50) with a back-thinned-CCD linear image sensor. Excitation light sources are a He-Cd laser (325 nm) and a diode laser (375 nm).

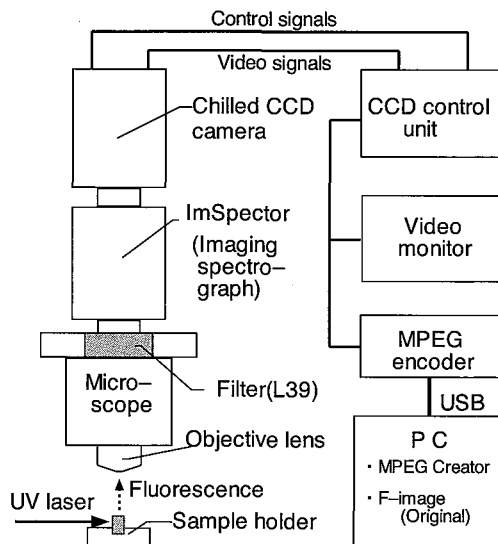


Fig. 2 Structure of the ISA system.

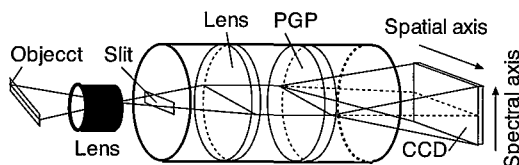


Fig. 3 Structure of ImSpector.

1100 nm, 1024 ch, 冷却温度 -15°C) の検出器を取り付けた。光学系の測定制御部は、PMA コントロールユニット (16

bit AD 変換, 1024 ch × 256 メモリ) とパーソナルコンピュータ (PX010, TOSHIBA 製) で構成した. 本分光システム (プレーズ波長 500 nm, 格子数 150 本/mm のグレーティング) の波長分解能は 400 ~ 800 nm の範囲で 0.47 nm/ch である. また, システムの波長感度校正は, 標準光源 (ハロゲンランプ: LA-150UX, 林時計工業製) で行った. LIF スペクトル測定時のスリット幅は 25 μm に固定し, 励起光の供試葉に対する照射時間は 500 ms とした.

蛍光葉内分布の測定には我々が開発した Imaging spectrogram analysis (ISA) 装置⁹⁾を用いた. Fig. 2 に測定装置の概略図を示す. 紫外レーザーを葉断面の上面表皮側へ垂直に照射し, 励起された蛍光を顕微鏡に導き, 接眼部に取り付けたイメージング分光器 (Im Spector V8, Fig. 3) によって多点分光を行い, モノクロチルド CCD カメラ (C5985-02) で分光画像として検出した.

2. 試料調整

ラッカセイ (*Arachis hypogaea* L.) を播種後 45 日間, 温度 24°C, 湿度 60% に制御した人工気象室内で育成した. 人工気象室内では, 植物育成灯による光合成有効光量子束密度 260 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (LI-190SA, LI-COR 製で測定) の光照射を 1 日あたり 12 時間 (7:00 ~ 19:00) 行った. 育成後, 葉緑素計 (SPAD-502, ミノルタ製) を用いて葉のグリーンメータ (GM) 値を計測し, この条件で育成したラッカセイ葉としては平均的な GM 値 42 ~ 48 の葉を供試葉とした.

3. ストレス負荷

3.1 UV-B ストレスの負荷

ラッカセイ生葉に対する UV-B ストレスの負荷は, 気温 25°C, 湿度約 50% の条件で, 280 nm から 320 nm を主波長とする UV-B 蛍光管 (G15T8E, SANKYO 製) からの紫外線照射によって行った. その際, 地表にはほとんど到達しない波長 290 nm 以下の短波長成分は, シャープカットフィルター UV29 (透過限界波長 290 nm) によって取り除いた. まず, 同一ポットの葉の中から GM 値 46 の葉 2 枚と GM 値 48 の葉 2 枚を選び, それら 4 枚の供試葉を株から切り離さない状態で, それぞれが重ならないように光源に対して垂直なるよう設置し, 照射線量率 10 Wm^{-2} (UV-B, SHIMAZU 製で測定) の UV-B を 4 枚同時に 45 分間照射した. その後, 15 分の暗処理を行い, 直後に励起波長 325 nm および励起波長 375 nm によって各供試葉の中央付近 (主葉脈を外した点) における LIF スペクトルを測定した. 10 Wm^{-2} , 45 分間の UV-B 処理は, 照射線量にして 27 kJm^{-2} となるが, これは千葉県における平均日積算 UV-B 照射量 (14 kJm^{-2}) の約 2 倍に相当する¹¹⁾. 一連の操作 (45 分間の UV-B 処理をし 15 分間の暗処理直後に LIF スペクトルを測定) を連続して 8 回繰り返し, 各供試葉に合計 216 kJm^{-2} の UV-B 照射を行っ

た.

3.2 オゾンストレスの負荷

オゾンストレスの負荷は, GM 値が 44 であるラッカセイ生葉 2 枚を供試葉として, 容積 $6.5 \times 10^{-2} \text{m}^3$ のガラス製オゾン暴露チェンバー内で行った. 本測定では, オゾナイザー (ZC-60-MM, SILVER SEIKO 製) で発生させたオゾンを, オゾン暴露チェンバーに誘導し, オゾン濃度を 0.65 ppm \pm 0.01 ppm (AET-030P, EBARA 製で測定) に制御し, 3 時間の暴露を行った. 設定したオゾン暴露濃度 (0.65 ppm) は, 一般的に光化学オキシダント警報が発令されるオキシダント濃度基準値 (0.24 ppm)¹²⁾ の約 3 倍である. オゾン暴露チェンバー内には, 植物育成灯, 加湿器, ファンを設置し, 試料付近の光合成有効光量子束密度, 温度, 相対湿度, 風速をそれぞれ 230 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 25°C \pm 2°C, 60 \pm 5%, 0.15 ms^{-1} に制御した. また, 窒素酸化物は, オゾン発生時に生成される場合があるが, その濃度は, ガス検知管 (18 L, GASTEC 製) の検知限度 (0.01 ppm) 以下であった. オゾン処理終了後, 約 20 分の暗処理を行ってから LIF スペクトルを測定した.

3.3 水分ストレスの負荷

水分ストレスの負荷は, 植物育成用の人工気象室内において GM 値 42 のラッカセイの葉柄を切断して乾燥させることで行った. 水分ストレスの度合いは, 切断した葉の質量 (4 枚の小葉と葉柄の一部を含む) を電子天秤 (AB204-S, METTLER TOLEDO 製) で測定することで見積もった. 切断直後, 切断 24 時間後および切断 48 時間後に, それぞれ約 20 分の暗処理を行ってから LIF スペクトルを測定した.

結果および考察

1. UV-B ストレスに対するラッカセイ生葉の LIF スペクトル変化

Fig. 4 にラッカセイ正常葉 (Control) および UV-B 照射線量がそれぞれ 54 kJm^{-2} , 108 kJm^{-2} , 162 kJm^{-2} である場合の LIF スペクトルを示す. 図の上段 (A) は 325 nm 励起, 下段 (B) は 375 nm 励起の結果である. グラフの縦軸は, 各スペクトルの F530 を 1.0 として規格化した.

まず, 325 nm 励起の場合, 波長の短い方から 450 nm 付近 (F450), 530 nm 付近 (F530), 685 nm 付近 (F685) および 740 nm 付近 (F740) に, 特徴的なピークが表れた. F450, F530 付近をピークとするブロードな分布は, 青緑色蛍光 (Blue-green fluorescence) と呼ばれることもあり, フラボノイド, フェノール等の葉内化合物からの蛍光であると考えられている⁶⁾. 一方, 赤色領域に見られる F685 および近赤外領域に見られる F740 はクロロフィル a によるクロロフィル蛍光であり, F685 は光化学反応系 II (PS II) の情報を主に含み,

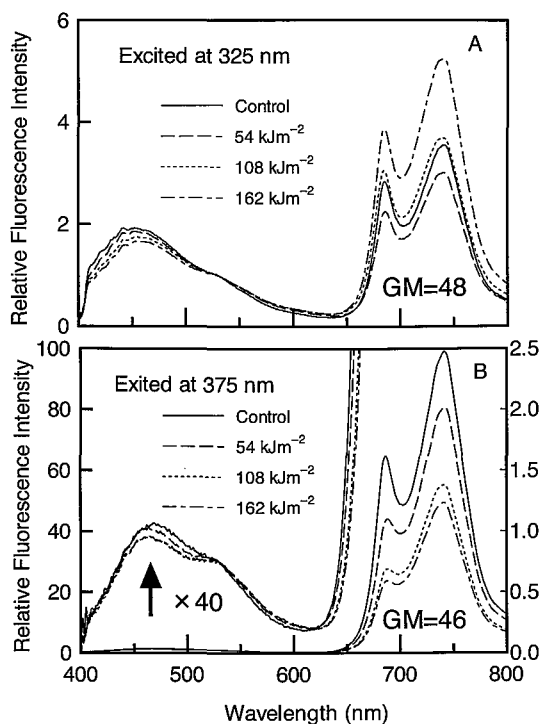


Fig. 4 Typical LIF spectra of peanut (*Arachis hypogaea* L.) leaves subjected to UV-B stress excited at 325 nm (A) and 375 nm (B). Each spectrum was standardized at 530 nm and plotted according to both the left side scale (full-scale 100) and the right side scale (full-scale 2.5).

F740はPS IIの情報の他に光化学反応系I (PS I)の情報を含むと考えられている⁶⁾。

Fig. 4において、正常葉のLIFスペクトルの励起波長による違いを比較してみる。F530を1とした場合のF685の相対強度(グラフ縦軸の値)は375 nm励起では64であるのに対し、325 nm励起では2.8となっている。ところで、抽出されたクロロフィルaの励起スペクトル(一定強度のクロロフィル蛍光を得る為に必要な励起光強度の波長依存)を比較すると375 nmは325 nmの約1.7倍⁶⁾でしかない。したがって、単純に2波長(325 nmおよび375 nm)の励起スペクトルの差(クロロフィルaの吸収帯に遠いか近いか)だけで、正常葉のLIFスペクトルにおける20倍以上異なるF685の相対強度の違いを説明することは困難である。そこで、次に葉の構造とLIFスペクトルの関係を考える。UV領域の短波長光は、葉の表面付近に存在するワックス質で吸収される割合が大きく、クロロフィルを多く含む柵状組織に進入する確率が低くなる⁵⁾。その為、より波長の短い325 nmの励起光は、375 nmの励起光に対して柵状組織に到達する割合が低く、クロロ

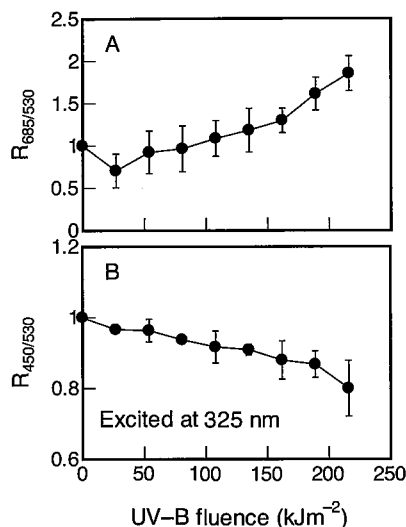


Fig. 5 Changes of spectrum peak ratio into UV-B fluence for 325 nm excitation. Each ratio was standardized as control value 1.0. The vertical bars indicate standard deviation ($n = 4$).

フィル蛍光が小さくなり、相対的に青緑色蛍光が大きく観察されたものと考えられる。

次に、UV-B照射した時のLIFスペクトルの変化について考察する。青緑色蛍光は325 nm励起の場合、F450が僅かではあるが減少する傾向が見られた。375 nm励起の場合でも同様の傾向が見られた。次にクロロフィル蛍光では375 nm励起の場合、F685およびF740の両方がUV-B照射量の増加に伴って徐々に減少する傾向が見られる。一方、325 nm励起の場合、54 kJm⁻²のUV-B照射線量でF685、F740の両方が減少したが、その後UV-B照射線量が増加すると、逆にクロロフィル蛍光が正常葉よりも大きく観察されるようになった。これは375 nmによる励起では見られなかった現象である。

このLIFスペクトル変化の詳細な解析を行う為に、それぞれの励起波長において、UV-B照射線量とLIFスペクトルの各ピークの相対強度比F685/F530およびF450/F530の関係を求めた。その結果をFig. 5(325 nm励起)およびFig. 6(375 nm励起)に示す。グラフの縦軸については、UV-Bストレスの影響を見やすくするために正常葉におけるF685/F530およびF450/F530の値をそれぞれ1.0として規格化し $R_{685/530}$ および $R_{450/530}$ という記号で表している。まず $R_{685/530}$ であるが、325 nm励起(Fig. 5-A)の場合はUV-Bストレス初期(~54 kJm⁻²)でのみ減少するが、それ以降は徐々に増加し、UV-B照射線量216 kJm⁻²では $R_{685/530} = 1.9$ まで増加した。一方375 nm励起(Fig. 6-A)の場合、UV-Bストレス中期(~108 kJm⁻²)までは $R_{685/530}$ の値は直線的に減少

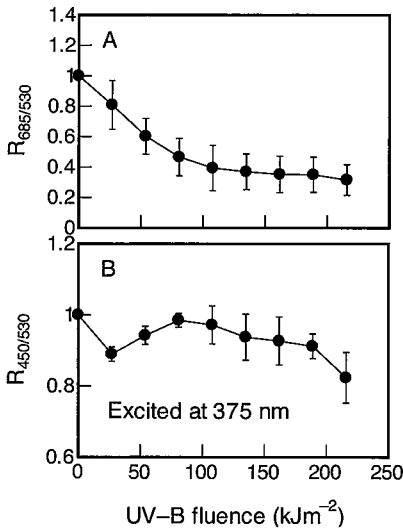


Fig. 6 Same as Fig. 5 but for excited at 375 nm.

し、それ以降 ($108 \text{ kJm}^{-2} \sim$) は減少率が低下して値が一定 ($R_{685/530} \approx 0.35$) となる傾向が見られた。また $R_{450/530}$ では、325 nm 励起 (Fig. 5-B) の場合も 375 nm 励起 (Fig. 6-B) の場合も、共に UV-B 照射に対して減少する傾向が見られた。特に 325 nm 励起の場合、UV-B 照射に対して直線的に $R_{450/530}$ が減少した。

375 nm 励起における $R_{685/530}$ の減少については、CW Ar⁺ レーザー (351 nm ~ 364 nm) 励起による実験³⁾でも同様の結果が示されている。LIF スペクトル変化と並行して測定した、クロロフィル蛍光による誘導期現象を利用した光合成活性度の評価¹³⁾において、 $R_{685/530}$ の減少と光合成活性度の低下に良い相関が見出されている¹⁴⁾。また、Bornman 等は、UV-B 照射により PS II 側に機能障害が生ずることを報告している¹⁵⁾。これらのことから、375 nm 励起における $R_{685/530}$ の減少は、UV-B 照射に伴う光合成機能の低下が原因であると考えられる。

波長の短い 325 nm 励起の場合であるが、UV-B 照射初期での $R_{685/530}$ の減少は、375 nm 励起の場合と同様に光合成機能低下によるものと考えられる。しかしその後の $R_{685/530}$ の増加に関しては、光合成機能低下では説明することができない。

325 nm 励起による $R_{685/530}$ の増加が UV-B 照射による特徴的な変化であるかを調べるため、オゾンストレスおよび水分ストレスによる LIF スペクトルの変化を調べた。

Fig. 7 にラッカセイ正常葉 (Control) およびオゾン暴露葉 (0.65 ppm × 3 時間) の LIF スペクトル (上段 A: 325 nm 励起, 下段 B: 375 nm 励起) を示す。グラフの縦軸は、各ス

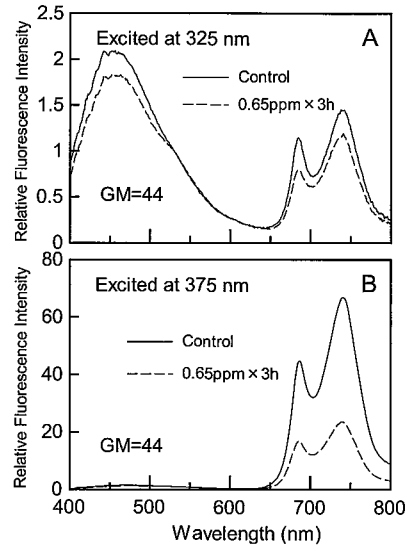


Fig. 7 Typical LIF spectra of peanut (*Arachis hypogaea* L.) leaves subjected to ozone stress excited at 325 nm (A) and 375 nm (B). Each spectrum was standardized at 530 nm.

ペクトルの F530 を 1.0 として規格化した。325 nm 励起、375 nm 励起いずれの場合においても、クロロフィル蛍光は減少し、UV-B 照射時に見られた 325 nm 励起の際のクロロフィル蛍光の増加はみられなかった。我々はラッカセイ生葉に 0.60 ppm のオゾンを一時間以上暴露すると、著しい生育障害が生じることを既に明らかにしている³⁾。したがって、325 nm 励起によるクロロフィル蛍光の増加は、オゾンストレスでは観察されないと判断できる。

また Fig. 8 にラッカセイの乾燥処理により水分ストレスを与えた際の LIF スペクトルの変化 (A: 325 nm 励起, B: 375 nm 励起) を示す。葉柄切断直後 (図中 Control) の 4 枚の小葉および残された葉柄の質量 (総質量) は 701.6 mg (初期値) であった。切断 24 時間後 (図中 after 24 h) の総質量は 397.1 mg (初期値の 56.6%) であったが、目視では大きな変化は認められなかった。一方、切断 48 時間後 (図中 after 48 h) では総質量が 236.3 mg (初期値の 33.76%) となり、葉色は緑色であるものの乾燥により著しく萎縮した状態となった。325 nm 励起、375 nm 励起いずれの場合においても、水分欠乏に対してクロロフィル蛍光は減少し、UV-B ストレス負荷時に見られた 325 nm 励起におけるクロロフィル蛍光の増加は観察されなかった。また、葉柄切断 48 時間後の 325 nm 励起で得られた LIF スペクトルに見られるように、600 nm 付近の蛍光強度が相対的に増加することが水分ストレスの特徴であることが明らかとなった。

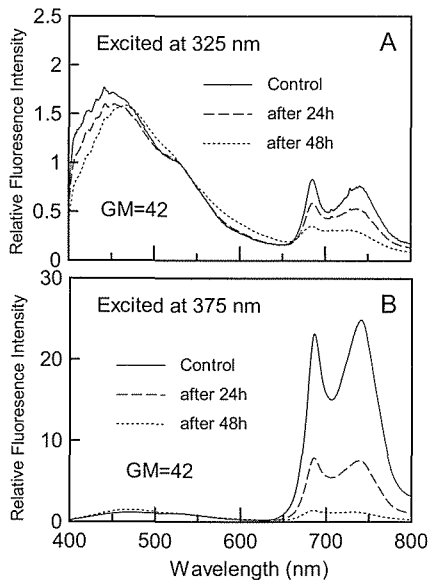


Fig. 8 Same as Fig. 7 but for water stress.

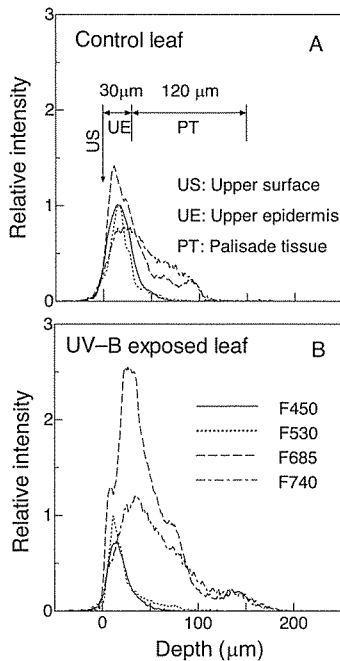


Fig. 9 The distributions of LIF spectra in leaf excited by 325 nm (A: Control UV-B exposed). Each spectrum was standardized at 530 nm. The numerical values above the double-headed arrows show the thickness of each tissue.

以上のLIFスペクトル測定結果から、325 nm励起で見られたUV-Bストレス負荷に対するクロロフィル蛍光の増加は、

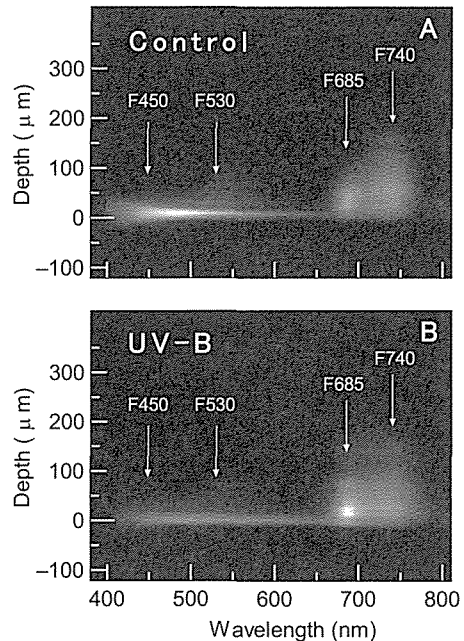


Fig. 10 Spectrograms of the control (A) and the UV-B of 216 kJm^{-2} exposed (B) peanut leaf cross section measured by the ISA system. The vertical axes mean the depth from upper surface.

オゾンストレスおよび水分ストレス負荷では観察されない特徴的な変化であることが判明した。

2. 蛍光葉内分布の測定

325 nm励起で見られたUV-Bストレス負荷に対するクロロフィル蛍光の増加は、単純なる光合成機能の低下では説明できない新しい現象である。

このことについては、先に述べた上面表皮組織（ワックス質）によるUV吸収効果において、UV-Bストレス負荷の増大によって上面表皮組織内のUV吸収色素の機能低下などが生じ柵状組織に到達する励起光の量が増加すれば、クロロフィル蛍光が強くなると考えられる。そこで、この仮定を検証する為に我々が開発したISA装置により、葉内における蛍光分布の測定を行った。Fig. 9およびFig. 10に325 nm励起におけるラッカセイ葉断面の蛍光葉内分布と分光写真を示す。

Fig. 9ではF530のピーク値を1と規格化して示す。正常葉（Fig. 9-A, Fig. 10-A）では、各波長の蛍光が上面表皮付近で強く観察され、柵状組織では僅かにクロロフィル蛍光のみみられるだけである。このことは325 nmの励起光が、上面表皮（upper epidermis (UE)）付近のワックス質で強く吸収され葉の深部まで侵入できず、柵上組織（palisade tissue (PT)）内のクロロフィルをほとんど励起できなかったためと考えられる。

一方、UV-B処理葉（Fig. 9-B, Fig. 10-B）では、上面表皮

において F450 の減少 (ピーク比で正常葉の 0.73 倍) が見られた。また、クロロフィル蛍光は柵上組織内でも非常に強く (ピーク比で正常葉の 1.7 倍) 表われ、そのピーク位置は正常葉と比較して葉の深部側に約 20 μm シフトした。尚、F685 の増加率に対して F450 の減少率が小さいのは、F450 にはフェルラ酸、フラボノイド等の UV-B を吸収しやすく UV-B 照射の影響を大きく受ける色素からの発光の他、NADPH 等の UV-B をあまり吸収せず UV-B 照射の影響を受けにくい色素からの発光が含まれている⁶⁾ ためと考えられる。

以上の蛍光葉内分布の測定結果から、上面表皮付近の UV 吸収色素が過剰な UV-B 照射によって UV 吸収機能の低下をおこし、その結果、325 nm の励起光がクロロフィルを多く含む柵状組織まで到達することが可能となり、クロロフィル蛍光が増加したというモデルを考えると、UV-B ストレスに対する LIF スペクトル変化について矛盾無く説明することができる。

摘 要

波長 325 nm と 375 nm の UV レーザーを励起光源として UV-B、オゾンおよび水分ストレスを与えたラッカセイ生葉における LIF スペクトルの測定を行った結果、次の知見を得ることができた。

- ① ラッカセイ生葉を波長の短い 325 nm で励起した場合は、375 nm で励起した場合と比較して相対的に青緑色蛍光が大きく見られた。
- ② UV-B ストレスに対する蛍光強度比 $R_{685/530}$ の変化は、325 nm 励起の場合と 375 nm 励起の場合では異なった変化を示した。375 nm 励起の場合は UV-B ストレス負荷に対して $R_{685/530}$ の値は単調に減少するが、325 nm 励起の場合は 54 kJm^{-2} 以上の UV-B 照射において $R_{685/530}$ の値が増加する傾向が見られた。
- ③ ②で述べた 325 nm 励起における $R_{685/530}$ の増加は、オゾンストレスや水分ストレスでは見られなかった。

以上のことから、325 nm 励起の LIF スペクトル強度比 ($R_{685/530}$) の変化は、UV-B 照射ストレス評価に有効であることが分かった。また 375 nm 励起による LIF スペクトル強度比の低下もこれまで得られてきた活性評価と同等の傾向が見られた。以上の結果から複数の励起波長によって LIF スペクトル変化を測定する手法は、植物の生育診断の精度を向上させるために有効であるといえる。

謝 辞

本研究は (財) 新技術開発財団の植物研究助成により行

われた。同財団の支援に深謝いたします。

引用文献

- 1) 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: 60-77. 2001.
- 2) Olszyk D, Dai Q, Teng P, Leung H, Luo Y, Peng S. UV-B effects on crop: Response of the irrigated rice ecosystem. J. Plant Physiol. 148: 26-34. 1996.
- 3) 福地健一, 高橋邦夫, 立本英機. オゾン暴露および紫外線照射によるラッカセイ本葉の LIF スペクトル変化. 大気環境学会誌. 39: 89-96. 2004.
- 4) 福地健一, 高橋邦夫, 立本英機. UV-B 照射がラッカセイ葉におけるレーザー誘起蛍光の葉内分布に及ぼす影響. レーザー研究. 32: 480-484. 2004.
- 5) Fukuchi K, Takahashi K, Tatsumoto H. Impacts of UV-A irradiation on laser-induced fluorescence spectra in UV-B damaged peanut (*arachis hypogaea* L.) leaves. Environ. Technol. 25: 1233-1240. 2004.
- 6) Cerovic ZG, Samson G, Morales F, Tremblay N, Moya I. Ultraviolet induced fluorescence for plant monitoring: present state and prospects. Agronomie. 19: 543-578. 1999.
- 7) Svanberg S. Fluorescence lidar monitoring of vegetation status. Physica Scripta. T58: 79-85. 1995.
- 8) 佐治 光, 中嶋信美, 久保明弘, 青野光子. 環境ストレスに対する植物の反応—大気汚染ガスに対する反応を例として—. 日本農業学会誌. 21: 347-351. 1996.
- 9) Philpot W, Duggin M, Raba R, Tsai F. Analysis of reflectance and fluorescence spectra for atypical features: fluorescence in the yellow-green. J. Plant Physiol. 148: 567-573. 1996.
- 10) 福地健一, 高橋邦夫. 植物葉の蛍光測定における励起光源としての紫外 LED に対する性能評価. 木更津高専紀要. 40: 53-62. 2007.
- 11) 佐々木政子. 紫外線環境と計測. 香粧会誌. 22: 102-110. 1998.
- 12) 平成 14 年度版環境白書. 環境省編. p110. 2002.
- 13) Lichtenthaler HK. In vivo chlorophyll fluorescence as a tool for stress detection in plants. In: Applications of chlorophyll fluorescence, Lichtenthaler HK (ed.), Kluwer academic publishers, Netherlands, 129-142. 1988.
- 14) Mineuchi K, Takahashi K, Tatsumoto H. Effects of UV-B radiation on laser-induced fluorescence spectra in crop leaves. Environ. Technol. 22: 151-155. 2001.
- 15) Bornman JF. Target sites of UV-B radiation in photosynthesis of higher plants. J. Photochem. Photobiol. B: Biol. 4: 145-158. 1989.