

近赤外域における植物の画像応答特性解析

寺越 大輔¹ 高橋 文穂² 奈倉 理一³

1. 大学院工学研究科電気電子工学専攻 (terry@ele.kanagawa-it.ac.jp)
2. 電気電子工学科 (fumihot@ele.kanagawa-it.ac.jp)
3. 電気電子工学科 (nagura@ele.kanagawa-it.ac.jp)

The image response characteristics of plants in the near infrared wavelength region

Daisuke TERAOKOSHI Fumiho TAKAHASHI Riichi NAGURA

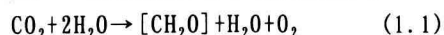
Abstract

The variety of plants exist on the earth. Although the green plants play the important role on the optical reaction (photosynthesis) which gives the terrestrial origin of the oxygen indispensable to the life, it is not well known what optical reactions exist in fact. In this paper, Firstly the response characteristics of the various vegetables is shown. Secondly the chlorophyll fluorescence in the 685nm and 740nm wavelength region which is excited by the Ar blue laser ($\lambda=488\text{nm}$) is shown and the image of the red and near infrared fluorescence is presented as well. Furthermore, the fluorescent characteristics of plants due to the environmental stresses such as the water, NaCl, temperature and pollution gases, is discussed from the standpoint of the global environmental problem.

Keywords chlorophyll, fluorescence, near infrared reflection, laser-induced excitation, environmental stress

1. まえがき

太陽は生物圏における共通のエネルギー源である。このエネルギーの約50%は、紫外から可視・近赤外波長域の300~800nmに存在する。この光を用いて植物は光合成を行っているのである。光合成は、二酸化炭素と水と光により



の反応で、糖と水と酸素分子を生成する反応であるが、現在では、葉緑体のATPとNADPHを用いて、 CO_2 を糖に変える複雑な生化学反応過程であることが判っている。一方、緑色植物の葉緑体に含まれる葉緑素(クロロフィル)は、青色光を吸収して、685nm帯の赤色光及び740nm帯の近赤外光を蛍光として発する事が知られている。この蛍光は、海洋の炭素循環の解析や植物プランクトン

の動態などを解析する為、NASAの地球観測衛星TerraやAquaに搭載されたMODISセンサのバンド14として、植生・海洋観測に利用されている。本稿では、近年問題となっている地球環境問題(地球温暖化、酸性雨、砂漠化など)による冷害や干ばつ・汚染ガスなどの種々の環境ストレスが植物に与える影響を明らかにする目的で、まず、太陽散乱光を用いた植物の光応答特性を取得し、さらに、波長488nm Arレーザ励起による赤色・近赤外蛍光特性の取得実験を行った。さらに、植物の塩水による植物のストレス実験を行った結果について報告をする。

2. 植物の蛍光^[1]

植物に紫外線や可視光を当てると、クロロフィル色素のエネルギー準位に従って、基底状態から、第一および第二励起状態へ遷移する。第一励起状態と第二励起状態は異なる寿命を持つ。第一励起状態から基底状態への移動はエネルギー準位の重なりがないのでかなり速く、熱以外のエネルギー形態、すなわち光量子の放出（蛍光）などに变化する。これが植物の蛍光であり、植物の蛍光は約 685 nm 帯及び 740 nm 帯に発光することが知られている。

3. 植物の吸収スペクトル^[1]

一般的に植物は緑色に見える。これは、植物が緑色の波長域（500 nm～560 nm）を反射しているからである。では、植物はどのような吸収スペクトルを持っているのであろうか。

植物によっても若干異なるが、基本的には図1のような吸収スペクトルを示す。(シナノキ科植物の例)

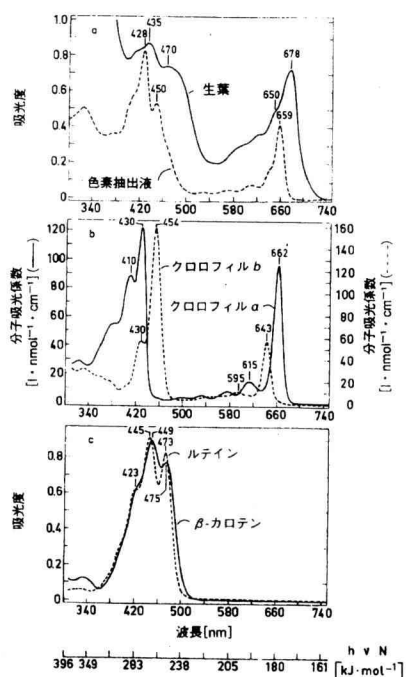


図1 植物の吸収スペクトル

4. 塩ストレス^[1]

NaCl が原因で土壌の塩分濃度が高くなると根の水ポテンシャルが低下する。低下した水ポテンシャルに相当するストレスが生じる。さらに、植物に取り込まれ細胞質に蓄積した NaCl の量に依存して、代謝に特異的な負荷が加わる。NaCl 濃度が増加すると光合成の電子伝達経路が特に影響を受ける。これを塩ストレスという。本実験では、

植物による環境ストレスの影響を評価する目的で、塩ストレスを付加した状態での蛍光強度測定を行った。上記の理由で、塩ストレス印加時の蛍光強度は、減少することが予想される。

5. 実験

5.1 植物の分光特性

ここでは、我々が用いた分光器（オーシャン光学社製 USB2000 ファイバマルチチャンネル分光器）で植物がどのような分光特性を持っているかを調査した結果を示す。

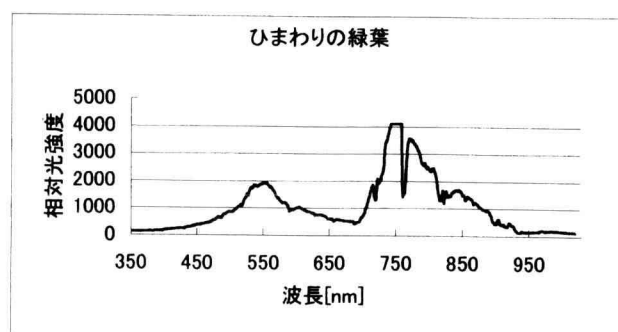


図2 ひまわりの緑葉の分光特性



図3 ひまわりの枯れ葉の分光特性



図4 ひまわりの茎の分光特性

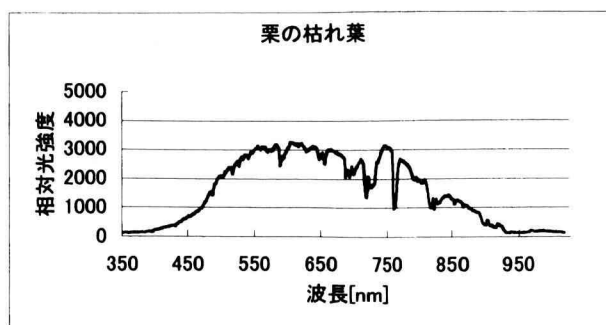


図6 栗の枯れ葉の分光特性

[illegible]

太陽散乱光の大気による吸収 (750 nm~880 nm)

5. 2 植物の蛍光特性

植物の蛍光を観測するために、以下のような方法で実験を行った。試験系は図8に示す。

1. 植物を暗室に30分間放置する。
2. Ar レーザを用いてレーザー光を発振させ、青色レーザー光（波長488nm）を植物の葉にあてる。
3. 植物にあてたレーザー光の反射光を、分光器を用いて分光特性を取得する。

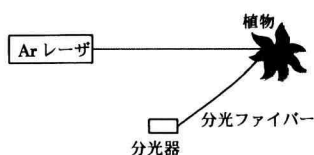


図8 試験系の概念図

上記の条件下で行った結果が、図9である。生葉のクロロフィルが、青色光を吸収し、685nm帯と740nm帯に蛍光を発していることが判る^[3]。レーザーのような極めてエネルギー密度の大きな光に対しても効率よく、蛍光が発せられていることが解る。

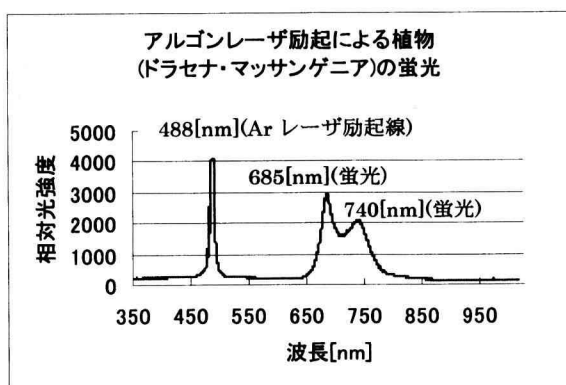


図9 生葉の蛍光特性

次に、以下の条件下で赤色・近赤外蛍光を確認するため、CCD カメラを用いて撮像を行った。試験系を図10に、その結果を図11、図12に示す。

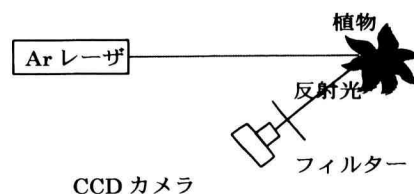


図10 実験の概念図

1. 植物を暗室に30分間放置する。
2. Ar レーザを用いてレーザー光を射出し、レーザー光を植物の葉にあてる。
3. 植物にあてたレーザー光の反射光を、CCD カメラを用いて撮像を行う。

図11は葉の反射光を撮像したもの、図12はフィルター（短波長カットフィルター）を用いて撮像を行った結果である。

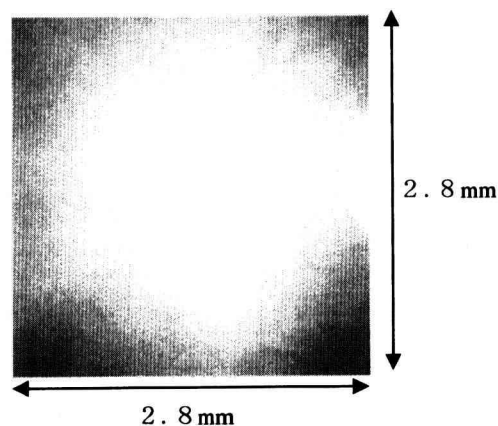


図11 レーザ照射時の植物による反射光

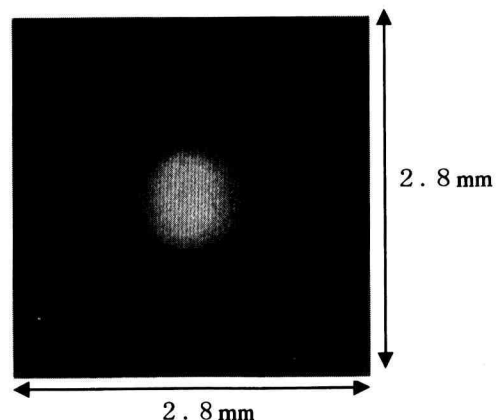


図12 植物の685nm帯蛍光
(蛍光の大きさは約0.87mm)

5. 3 塩ストレスの実験と結果

植物の蛍光が、塩水によりどのような影響を受けるのかを実験的に調べた。実験方法は、以下の通りである。また、結果を図13に示す。

1. 植物に0.1%の食塩水を与える。
2. 植物を暗室に30分間放置する。
3. Ar レーザを用いてレーザー光を発振させ、青色レーザー光 (波長488nm) を植物の葉にあてる。
4. 植物から発せられる蛍光 (短波長カットフィルターにより青色レーザー光をカット) を、光パワーメーターを用いて20分ごとに約3分間計測をした。

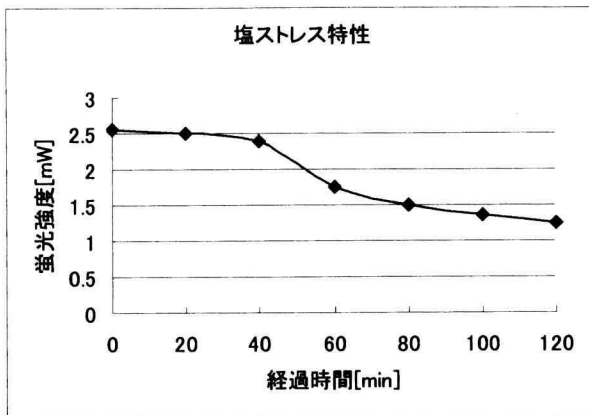


図13 塩水による蛍光強度の変化

5. 4 考察

1) 太陽散乱光による反射特性について

- ・太陽散乱光を光源とした反射スペクトルでは、550nm帯を中心とした緑色反射光と700~800nmに植物細胞による特徴的なレッドシフトと呼ばれる反射がある。
- ・図2~図6では、共通的に690nm帯、760nm帯で酸素分子の吸収に基づく急激な相対光強度の低下が見られる。また、820nm帯等にも強い吸収帯がある。これは大気中の水蒸気による吸収であり、植物に起因するものではない。^[2]

2) レーザ励起蛍光特性について

- ・植物から蛍光が出ているのかどうか判別不能であったため、CCDカメラの前に短波長カットフィルターを置き撮影したところ、赤色光・近赤外光が観測できた。

- ・分光特性と合わせてみると、明らかに685nm帯及び、740nm帯で発光しているのが分かる。これによりこの蛍光は植物からの発光 (蛍光) によるものである事が確認された。

3) 環境ストレス (塩ストレス) について

- ・時間経過と共に、植物の蛍光強度が落ちているのが解る。これは、植物の代謝に特異的な負荷が加わり、光合成の電子伝達経路に影響を受けたためと考えられる。

6. まとめ

植物の分光特性においては、生葉と茎は似たような特性を持っている事がわかる。しかし、生葉と枯れ葉を比較すると、含有水分の相違で明らかに分光特性が異なっているのがわかる。また、植物の蛍光特性においては、植物の赤色・近赤外蛍光を観測することが出来た。塩ストレス実験 (環境ストレス) においては、4. で予想した通り、時間が経過すると共に蛍光強度が低下しているのが確認できた。ただし、現在一種類の植物でしか蛍光特性を計測していないので、今後他の植物においても赤色・近赤外光が観測できる事を確認する。また、塩ストレスについても、0.1%濃度しか行っていないので、塩水の濃度変化についてどのような変化がみられるのかを実験的に評価を行い、さらに、他の環境ストレス (水、温度、汚染ガスなど) と蛍光強度、時間応答の関係などについて明らかにしていきたい。

参考文献

- [1] Hans Mohr and Peter Schopfer (網野真一, 駒嶺穆 訳): 植物生理学 pp.155-156, p534 2002
- [2] Fumiho Takahashi and Kunio Hirao: ABSORPTION SPECTRA OF WATER VAPOR IN THE NEAR INFRARED REGION, ISAS Research Note 72, January 1979
- [3] 高橋邦夫, 峰内健一, 中村時久, 江森康文: レーザ誘起蛍光法による生葉からの蛍光生体情報の抽出に関する基礎研究, 日本リモートセンシング学会誌 Vol.16 No.1 (1996) pp.2-13