リモートセンシングによる広域の 植物蛍光強度分布画像取得の提案

増田 健二

静岡大学 技術部 教育研究第一部門

植生リモートセンシング技術を利用して、樹木群落におけるクロロフィル蛍光量とそれに関連するパラメータを取得 することにより、植物のストレス状態だけでなく葉群の量とその光合成活性の把握をすることが理論的に可能である。そ のために、人為光でなく太陽光の自然条件下において発生する蛍光量の評価技術を確立する。さらに、屋外で長期間にわ たって継続的に蛍光信号を取得できる植生リモートセンシング撮像装置を製作し、樹木群落レベルでの継続的な観測を 実現する。また、太陽光励起による蛍光(SIF)画像計測システムの新たな提案となっており、SIF 計測法を生育条件下レ ベルの光合成活性に関連するクロロフィル蛍光量を定量的に計測し、環境評価技術に生かすことが期待されている。

Key Words: クロロフィル蛍光,太陽光励起蛍光,植生リモートセンシング,群落レベル画像計測

1. はじめに

太陽光により励起された植物から放出されるクロロフィ ル蛍光は植物の光合成活動に直接結び付く情報を提 供しており、とくにストレスの早期検出に結び付くことが 期待されている。屋外において個葉レベルの植物蛍光 を観察する標準的な方法として、パルス変調蛍光法 (pulse amplitude modulated fluorometry)がある。 飽和パ ルス光照射時の蛍光の最大値 Fm とその際の正味の蛍 光強度の増加量 Fv を比較することにより、光合成反応 の量子収率(Q=Fv/Fm)を簡便に評価する方法として広く 用いられている。太陽光照射条件下における受動的な 蛍光観測法として、太陽光スペクトル中の暗線による Fraunhofer Line Discrimination (FLD) 法を用いた植物 蛍光画像測定法があり¹⁾、GOSAT 衛星など高分解能フ ーリエ赤外分光装置を搭載した衛星観測により、地上植 生からの蛍光が観測可能であることが報告されている²⁾。 こうした衛星計測の地上での検証の必要性から、ドロー ン3)や圃場上空に設置したクレーン4をプラットフォーム として用いた植物蛍光計測法が提案されている。

地上において数 10m の距離から群落レベルで樹冠か らの蛍光が観測可能なリモートセンシング装置の開発に ついて述べる。この装置では、光学望遠鏡によって観測 対象を比較的狭い視野角内に限定し、小型 CCD 分光 器によってスペクトルを計測する。また、同じ視野内にお いて光学フィルターにより波長帯域を限定して冷却式 CCD カメラにより撮像し、複数の画像間の演算によって 蛍光強度分布画像を取得する 5.9。開発したスタンドオ フ計測システムを用い、屋外の樹木(クスノキ、ケヤキ)に おいて、数 10m の距離から行った太陽光励起蛍光 (Solar-induced Fluorescence, SIF)の測定結果について 報告する。

2. 植物蛍光観測システム

距離数 10m を隔てて植物葉からの蛍光をリモートセンシング計測する目的で開発した可搬型システムを Fig. 1 に示す。群落レベルの微弱な蛍光を計測する必要があることから、天体望遠鏡(Vixen、口径 95 mm を使用) 及び高感度・高 S/N 比の冷却式 CCD 分光器(Ocean



Fig.1 Stand-off measurement of a camphor tree

Optics QE65 PRO)を使用する。望遠鏡のファインダーに Ipod-touch を取り付け、ターゲットの樹木の樹冠部分を 写し、ピントを合わせる。分光器のファイバーアダプタに 切替て分光スペクトル計測を行う。使用した冷却式 CCD 分光器 (Ocean Optics QE65 PRO) は、高感度・高 S/N 比(S:N=1000:1)で 16 ビット、計測波長範囲は 500~900 nm でのスペクトル計測を行うことができる。

広域画像測定では、Fig.2のように冷却式 CCD カメラ に広角レンズ(焦点距離 10mm)を直接取り付け、半値 幅 10 nm のフィルターによる広域強度分布画像を取得 する。広角レンズの前にフィルターアダプタを取り付け、 Fig. 3(a)フィルターをスライドさせて画像測定を行う。この 広角レンズを用いた方法では、広域(幅 50.4m×奥行 37.9m)の観測画像が取得できる。使用するフィルターと しては、Fig. 3(b)で蛍光強度のない波長領域の中心波 長 740 nm、半値幅 10 nm のフィルター(以降、F740)と 蛍光強度のある波長領域内の F780 の2 枚のフィルター を用いる。具体的には F740 フィルターで撮影した近赤 外域反射光画像を F780 フィルターで撮影した蛍光・反 射光の重畳画像から差し引くこと (F780-F740) により 蛍光強度分布画像を取得する。

次に植生指数画像測定では、近赤外領域の反射率 (IR:F850)、可視領域の赤の反射率(R:F650))のフィル ターを利用して、植生指数(NDVI=(IR-R)/(IR+R), の画 像を取得する。



Fig.2 Wide-angle lens for the CCD camera



Fig.3 Fluorescence and vegetation index measurement by the filter. (a) Band-pass filter, (b) F740, and F780 filters used for the Fluorescence measurement, and (c) F550, F650, and F850 filters used for vegetation index.

Wavelength (nm)

500 550 600 650 700 750 800

850

3. 広域の強度分布画像取得の提案

2018 年 9 月 28 日、10 月 2 日、静岡大学浜松キャン パスの樹木において、15~50 m の距離から太陽光励起 による植物強度分布画像計測を行った。

新しい蛍光算出法として、同時計測した白板の反射 スペクトルにクスノキの反射率を掛けて模擬反射スペクト ルを作り、実測された植生スペクトルと蛍光のない波長 域で一致するようにスケーリングを行い、植生スペクトル から模擬反射スペクトルを差し引くことによって、蛍光ス ペクトルを算出する方法を提案する。すなわち、Fig. 4(a) に示したように、蛍光スペクトルの影響が無視できる波長 820~850 nm において植物葉の白板に対する反射率係 数を算出する(この例では係数の値は 0.638 となる)。植 物葉の実測スペクトルから、この係数値を乗じた白板ス ペクトルを差し引くと、Fig. 4(b)のようにクロロフィル蛍光 に相当するスペクトルが得られる。その後、クロロフィル 吸収と水蒸気吸収の影響の小さい775 nm においてスペ クトル強度を読み取り、蛍光強度の指標とする。なお、波 長 750 nm より短波長側では植物葉の赤外反射率の低 下と水蒸気の吸収によって、差分として蛍光スペクトルを 得ることはできない。

Fig.5 に、静岡大学浜松キャンパスで取得した広角レ ンズを用いた観測画像を示す。Fig. 5(a), (b)は、それぞ れ F740, F780 により積分時間 100 ms で撮影した近赤外 画像であり、Fig. 5 (d) は、同時に撮像した白板との差分 から求めた蛍光強度画像である。フィルター透過率およ



Fig. 4 Proposed method based on relative reflectance



Fig. 5 Fluorescence images. (a) near-infrared reflection observed with F740, (b) reflection and fluorescence intensity observed with F780,(c)gray-scale representation of fluorescence intensity, F, with the area positions of each soybean row (rectangles) and (d) fluorescence intensity, F, in the color-coded scale. For (c) and (d), the equation F=K*F790-F750 is used to calculate F, where K is a correction factor for the filter transmission and wavelength dependence of solar intensity.



Fig. 6 Vegetation index images. (a) Visible image taken with the F650 filter, (b) near-infrared image taken with F850, (c) reflection observed with F650, (d) reflection intensity observed with F850,(e)gray-scale representation of vegetation index intensity, and (f) vegetation index intensity, in the color-coded scale. For (e) and (f), the equation NDVI.

び太陽光照度の違いを補正するため、白板強度比 K(=F740/F780=867.3/755.8= 1.148)を求め、F780 画像 データのカウント値にこの K をかけた数値から 740 のカウ ント値を差し引く(F=K*F780-F740)ことにより蛍光強度 値 F を取得した。空や影の部分からの強度は 0 に近く、 日向の部分で蛍光強度が大きいことが確認できる。

Fig. 6(a) は、F650 フィルターにより積分時間 200 ms で撮影した可視領域反射光画像である。Fig. 6(b) は、 F850 フィルターにより積分時間 200 ms で撮影した近赤 外領域反射光画像である。一方 Fig. 6 (c), (d) は、同時 に撮像した白板の強度比で割ることによって求めた反射 率画像である。Fig. 6 (c) は、F650 の可視領域反射率 (R:F650) 画像であり、Fig. 6 (d) は、F850 の近赤外領域 反射率(IR:F850) 画像である。植生指数画像測定では、 近赤外領域の反射率(IR:F850)、可視領域の赤の反射 率(R:F650)のフィルターを利用して、植生指数 NDVI=(IR-R)/(IR+R)の画像を取得する。Fig. 6 (e)はグ レースケール表示であり、Fig. 6 (f) は、こうして得られた NDVI をカラースケール表示したものである。

2018年9月30日(日)猛烈な台風24号が浜松市(最 大瞬間風速42m)を通過し、大木(ヒマラヤスギ)も多数 倒され、ターゲットの樹木も大きなダメージを受けた。台 風通過前(9/28)の Fig.7(a) と通過後(10/2) Fig7(b)を比 べるとターゲットの白板(37m)の後方(48m)のクスノキ (左)とケヤキ(右)では、特にケヤキは黄緑だった葉が 一夜にして茶色に変色している。台風前後の蛍光、植 生指数(NDVI)の分布画像を比較してみた。

Fig.7(c)と(d)の蛍光強度分布画像をみると、クスノキは、 150 count・ms⁻¹・pixel⁻¹の赤色が密集していたところが点 在しており、葉が振り落とされたことによる葉密度の低下、 ケヤキは赤色・黄色の部分がなくなり、青色がほとんどに なりクロロフィルの含有量の低下に由来すると考えられる。 Fig.7(e)と(f)の植生指数分布画像についても、ケヤキは NDVIが0.7→0.4に低下しており、すべての樹木におい て、植生指数の低下が見られる。

謝辞

本研究は、千葉大学環境リモートセンシング研究 センターの共同利用研究の一貫として行った。また、 平成 26~28 年度科学研究費助成基金・基盤研究 C (課題番号:26340003)の助成を受けた。





Fig. 7 Typhoon damage comparison fluorescence, vegetation index and IR camera

参考文献

- 1) L. Guanter, et al. J. GEOPHYSICAL RESEARCH. (2010), 115.
- C. Frankenberg, *et al.*: Geophys. Res. Lett. (2010), 38, L03801, doi:10.1029/2010GL 045896.
- 3) P. J. Zarco-Tejada, *et al.*: Remote Sensing of Environment (2012), 117, 322-337.
- F. Daumard, *et al.* IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. (2010), 48, 3358-3368.
- 5) K. Masuda , H. Saito, Y. Mabuchi, N. Manago, H. Kuze : IGARSS IEEE International, (2014), 2993-2996, DOI:10.1109/IGARSS.2014.6947106
- 6) K. Kuriyama (Masuda), N. Manago, H. Saito, H. Kuze, International Symposium Remote Sensing 2015, A8(Oral), paper #34, National Cheng Kung University, Taiwan. April 22-24, 2015
- 7) K. Kuriyama (Masuda), N. Manago, H. Kuze, K. Homma, K. Muramatsu, K. Yoshimura, Y. Kominami, International Symposium Remote Sensing 2016, Jeju Island, Korea. 22-24 April 2016
- 8) 栗山(増田)健二, 眞子直弘, 田中佑, 白岩立彦, 久 世宏明, 日本リモートセンシング学会 第 64 回(平成 30 年度春季)学術講演会論文集, 東京大学柏キャン パス A-11, DVD.
- 9) 栗山(増田)健二, 眞子直弘, 久世宏明 日本リモー トセンシング学会 第 65 回(平成 30 年度秋季)学術 講演会論文集, サンポート高松 B-1, DVD.