

技術開発した植生リモートセンシング計測手法と研究支援

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-04-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 増田, 健二 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00028126

技術開発した植生リモートセンシング計測手法と研究支援

増田 健二¹

(¹ 静岡大学技術部教育研究支援系)

1. はじめに

大地上でのリモートセンシング計測により、野外の群落レベルで活用可能な太陽光誘起の植物蛍光 (Solar-Induced Fluorescence, SIF) 計測法を開発している。従来は太陽光条件下で蛍光を観測することは難しかったが、太陽光を誘起光源に利用して、冷却式 CCD 分光器を用いてスペクトル計測データを取得し、植生光から白板の反射光スペクトルを差分して蛍光を分離する新たな手法¹⁾を開発した。また、冷却式 CCD カメラと広角レンズを用いた、広域の SIF 強度分布画像を取得する新たな手法²⁾を開発した。

2. 植生リモートセンシング計測手法

本研究では、新しい SIF 算出法として、白板と植生の反射スペクトルをフィッティングさせるスケーリング法を提案する。この方法では、Fig. 1 (a) に示すように、同時計測した白板の反射スペクトルに植物葉の反射率 (0.621) を掛けてスケーリングされた参照スペクトルを作る。この参照スペクトルは、SIF のない波長域 (825 - 850 nm) において実測された植生スペクトルと一致することになる。植生スペクトルからこの参照スペクトルを差し引くことによって、Fig. 1 (b) に示すように、クロロフィル蛍光に相当する SIF スペクトルが算出できる。SIF 強度値としては、水蒸気吸収の影響が小さい 774.5–775.5 nm の範囲で 0.1 nm の波長間隔でカウント値を読み取り、1 nm 当たりの合計値を求めた (Fig. 1 (b) では 932 count ms⁻¹ nm⁻¹)。なお、波長 750 nm より短波長側では植物葉の赤外反射率が低下するため、差分としての SIF スペクトルは得られない。

広域画像計測では、Fig. 2 のように冷却式 CCD カメラに広角レンズ (SIGMA-EX、焦点距離 10mm–20mm) 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、5 枚のフィルター (F550~F850) をスライドさせて画像を取得する。SIF 画像計測に使用するフィルターとしては、Fig. 1 (b) のように、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。

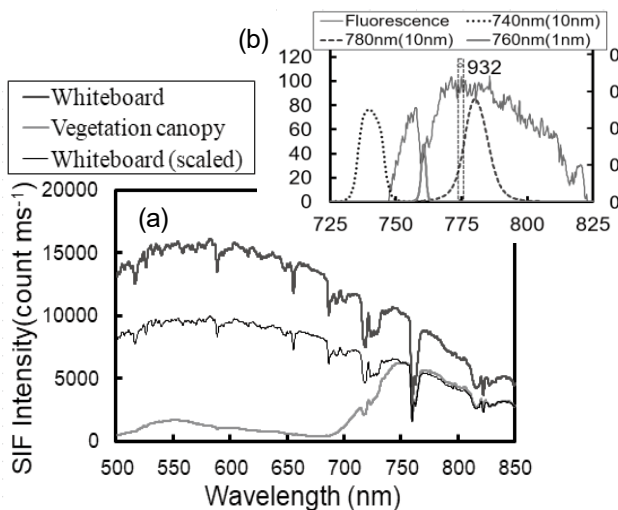


Fig.1 Fluorescence and vegetation index measurement by the filter. F740, and F780 filters used for the Fluorescence measurement.



Fig.2 Fluorescence and vegetation index measurement by the filter.

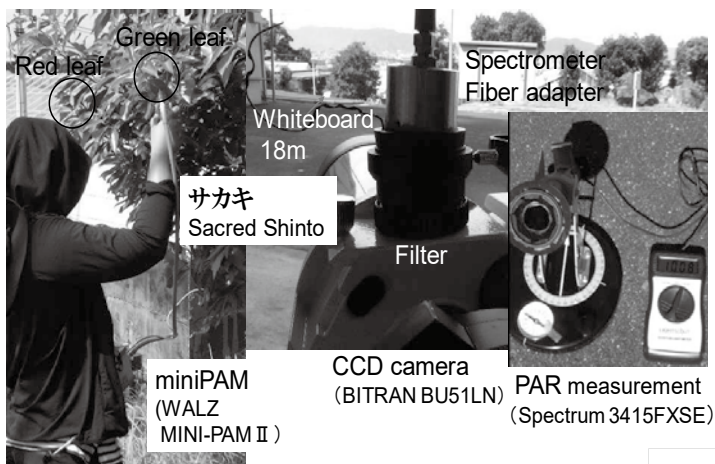


Fig.3 Stand-off measurement of a sacred shinto.

3. サカキの SIF 強度と ETR (PAM) の比較

2019年9月10日、静岡キャンパスにおいて、農学部の王研究室との共同観測を行った (Fig.3)。ターゲットの樹木は、距離18mのサカキである。緑葉と赤みがかった葉を SIF 強度とパルス変調法 (Pulse Amplitude Modulation ; PAM) による電子伝達速度 (Electron Transport Rate ; ETR) と交互に測定を行い、光合成有効放射 (Photosynthetically Active Radiation : PAR) を測定する。

光化学系IIに含まれるクロロフィルに吸収された光エネルギーは、電子伝達反応(光合成)に使用されない場合、蛍光または熱として放出される (Fig.4)。そのため、蛍光量を測定することにより、そのときの光合成活性を知ることができる。光合成のキャパシティーを超える誘起光を照射すると、電子伝達の量子収率 (吸収された光エネルギーのうち電子伝達に使われる割合) は非常に低くなる。このとき、放出される蛍光は最大蛍光量 F_m (maximum yield of fluorescence) となる。一方、任意の光強度の下で放出される蛍光量を F とすると、このときの電子伝達の量子収率 Φ_{II} は、(1)式で表される。電子伝達の量子収率 Φ_{II} に PAR を掛け、葉の吸収係数 0.84 を乗じ、光化学系IIとIに 1:1 (0.5) で分配されると仮定すると、電子伝達速度 ETR は(2)式で表される。

$$\Phi_{II} = (F_m - F) / F_m \quad (1)$$

$$ETR = \Phi_{II} \times PAR \times 0.84 \times 0.5 \quad (2)$$

Fig.5 (a) は、1日の太陽光の日変化で PAR の変化に追従して SIF 強度も下がっていく。Fig.5 (b) の PAM の場合は、誘起光として LED からパルス光を照射しており、ETR も PAR に追従して変化する。Fig.5 (c) に PAR 強度変化に伴う SIF 強度と PAM による ETR の日変化のグラフを示す。クロロフィル a は、680nm の赤色の光を誘起光として吸収し、740nm にピークのあるクロロフィル蛍光を放出する。ETR は、光合成のキャパシティーの範囲内では PAR の上昇に従って大きくなっていく。光合成のキャパシティーを超える光を照

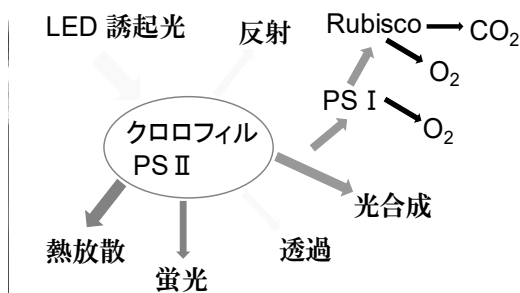


Fig.4 Electron transfer reaction of light energy absorbed by chlorophyll (Photosystem II).

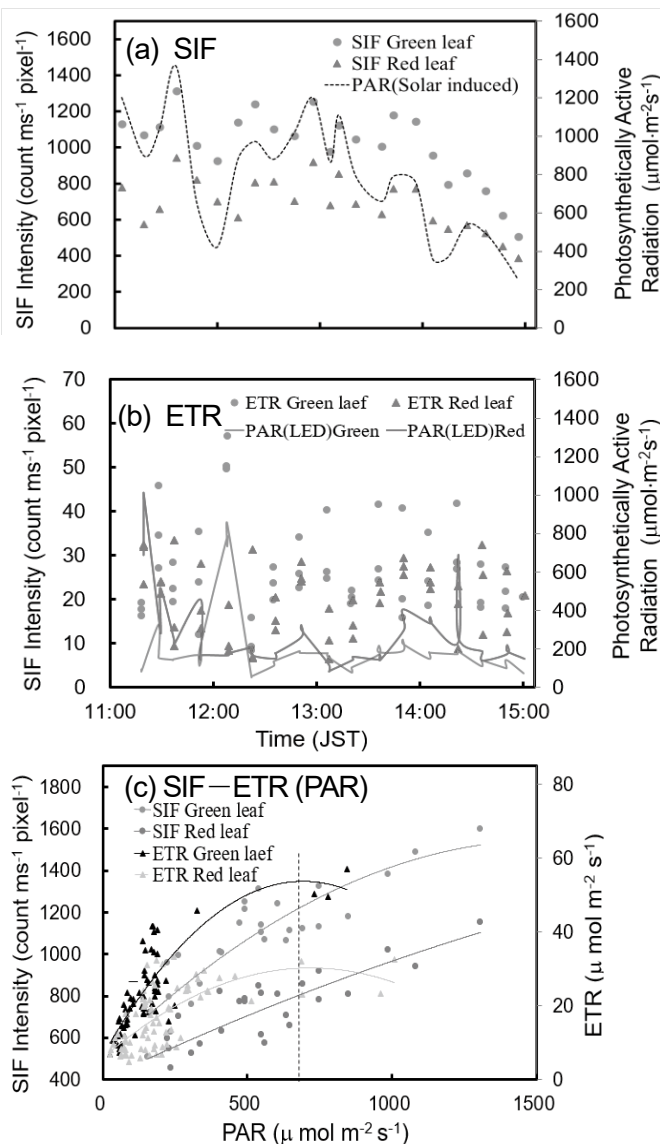


Fig.5 Temporal change of the PAR and (a) SIF intensity, (b) ETR. (c) PAR dependence of SIF intensity and ETR.

射すると、 Φ_{II} は低くなり、PARが $700\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 辺りで飽和する。この飽和値から光合成活性を判断する。SIF強度の場合は、日中の強光条件下において熱放散と同様に余剰エネルギーとしての蛍光が増加していることを示している。このことから光合成活性をSIF強度からも判断することができる。

4. 広域の強度分布画像計測

蛍光強度分布画像は、Fig. 1 (b) に示すように、蛍光強度のある波長領域内のF780フィルターで撮影したFig. 6 (b)の蛍光+反射光の重畳画像から、画像スケール法において蛍光強度が生じない波長領域のF740フィルターで撮影したFig. 6 (a)の近赤外域反射光画像を差し引くこと(F780-F740)により、Fig. 6 (d)の蛍光強度分布画像を取得する。この方法では、距離48mにおいてFig. 6 (c)の広域(幅50.4m×高さ37.9m)の観測画像を取得できる。

2018年9月30日(日)夜間に最大瞬間風速 42m s^{-1} という猛烈な台風24号が浜松市を通過し、静岡大学浜松キャンパスの樹木も大きなダメージを受けた。9月28日の台風通過前(Fig. 7 (a))と10月2日の通過後(Fig. 7 (b))を比べると、距離37mの白板の後方距離48mにあるケヤキは黄緑であった葉が茶色に変色した。Fig. 7 (c)と(d)は台風前後での蛍光画像の比較であり、クスノキ(実線枠)は葉が振り落とされ、枝間隔が広げられたことによる葉密度の低下も起きている。ケヤキ(点線枠)は灰色からほとんどが濃い灰色に変化しており、蛍光強度値の低下が見られる。正規化植生指数($\text{NDVI} = \frac{\text{NIR}(\text{R}850) - \text{Red}(\text{R}650)}{\text{NIR}(\text{R}850) + \text{Red}(\text{R}650)}$)の画像はF650とF850フィルターの画素(1360×1024pixel)強度値を白板の強度値で割った反射率画像から算出する。Fig. 7 (e)と(f)のNDVI画像もケヤキは薄い灰色の部分、灰色になり植生指数の低下が見られる。これは強風によって、茎が折れ葉に養分や水分が供給できなくなり、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 (g)と(h)は、赤外線カメラで樹木(群落)の表面温度を測定した熱画像である。熱放散が活発であれば、群落の表面温度は低くなり、より濃い灰色となる(Fig. 7 (g))。台風通過後(Fig. 7 (h))は、ほとんど濃い灰色の部分はなく、熱放散の低下が見られる。

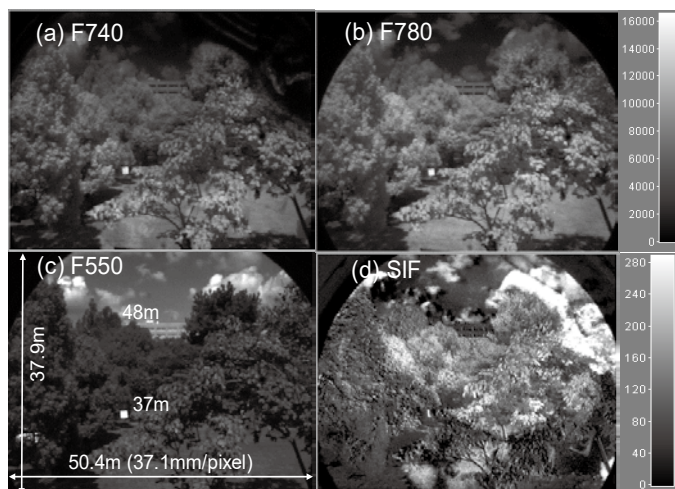


Fig. 6 Images observed with different filters on September 28. (a), (b), and (c) are images for F740, F780, and F550 filters, while (d) shows the resulting SIF distribution.

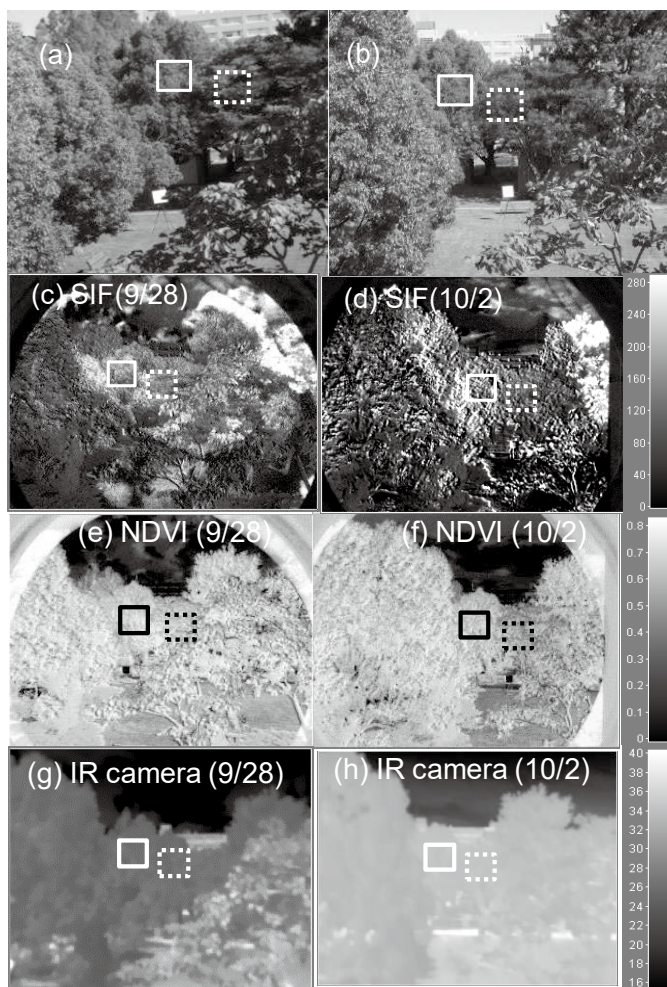


Fig. 7 Observations before and after the passage of a strong typhoon that hit Hamamatsu on September 30, 2018.

Fig.8(a) は、赤外線カメラを用いて熱画像を取得し、熱放散の日変化を測定した。台風通過前(9/28)、クスノキ(●)ケヤキ(▲)とも表面温度が12時頃までは上昇していくが、それ以降はPARに追従して表面温度が下がって行く。通過後(10/2)の▲のケヤキは12時以降もあまり表面温度が下がらないことから、熱放散が低下していることが分かる。Fig.8(b)のSIF強度も余剰エネルギーとして放出される蛍光強度を検出しているため、1日の太陽光の日変化でPARの変化に追従してSIF強度も変化していく。Fig.8(c)の正規化植生指数NDVIは、PARに追従した変化ではなく、朝の植生が一番高く、徐々に植生が下がって行く。

Fig.9(a)は、PARの上昇に従って熱放散と同様に放出されるSIF強度が高くなることを示している。これは、日中の強光条件下では、熱放散回路の活性化が生じていることが推測できる。また、台風通過後のクスノキ(●)はPARに従ってSIF強度値の上昇する割合が低くなっている。▲のケヤキのダメージが非常に大きいことが分かる。このことから、SIF強度値の上昇率から植生の活性化を判断することは可能であることが分かる。Fig.9(b)は、1日の太陽光のPARの日変化に伴う、樹木(樹冠)の表面温度の変化を示す。台風通過前(9/28)のクスノキ(●)とケヤキ(▲)は、PARの上昇に従って表面温度が高くなっていく。通過後(10/2)のクスノキ(●)とケヤキ(▲)は、ばらついたデータとなっている。

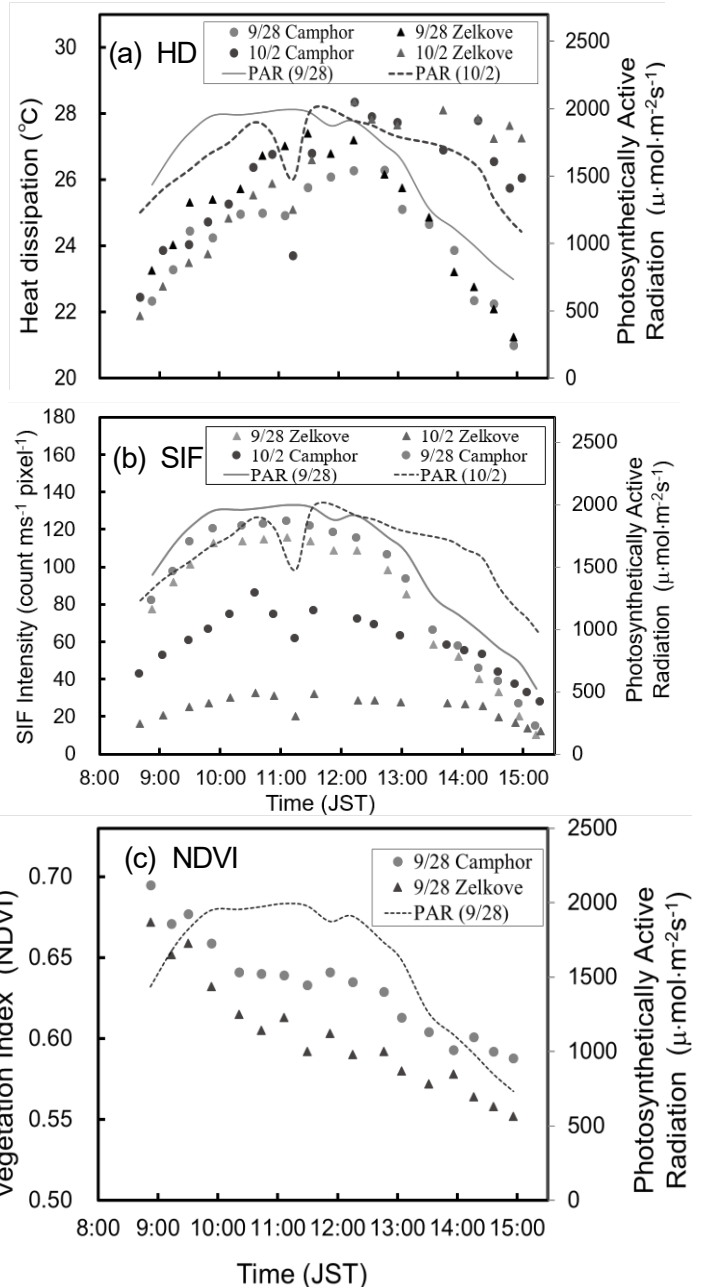


Fig.8 Temporal change of the (a) heat dissipation and (b) SIF intensity, (c) Normalized Difference Vegetation Index.

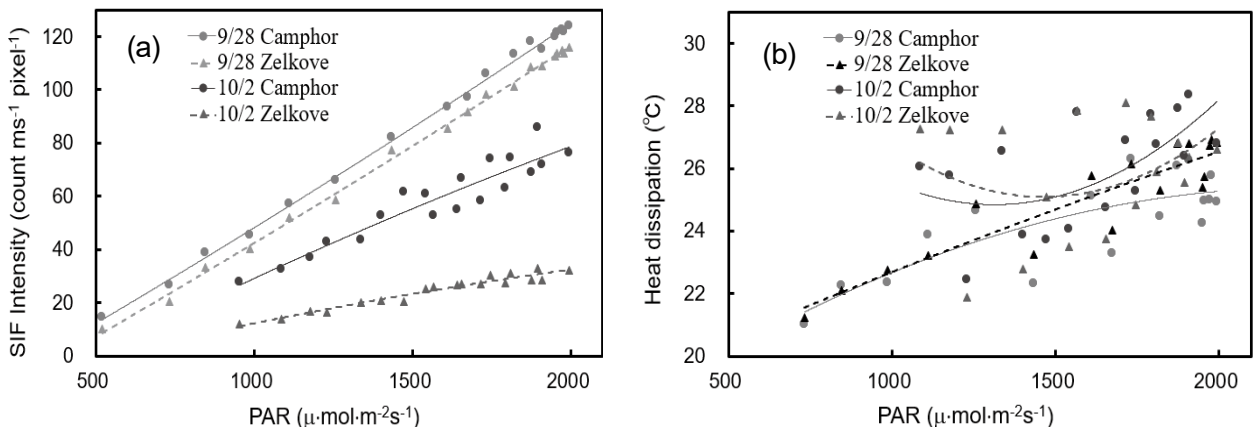
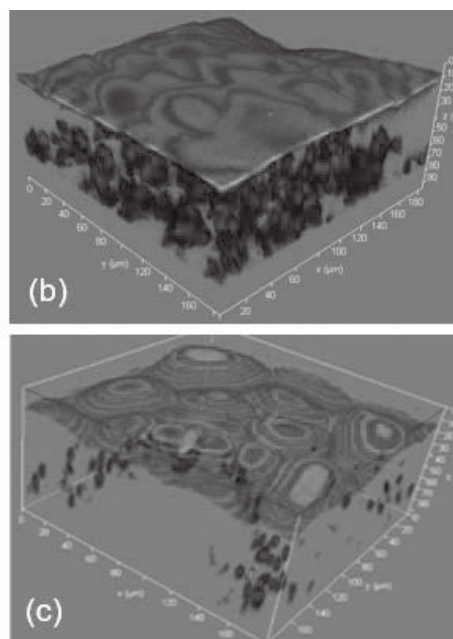


Fig.9 Comparison between (a) SIF intensity and (b) heat dissipation .

5. 実験室における蛍光スペクトル測定

5.1 共焦点蛍光顕微鏡による3次元蛍光画像観察

著者らは、文献³⁾の中で植物葉の蛍光強度とクロロフィル含有量の関係を解析した。サンプルとして、緑葉に白葉の斑入りのポトスを用いた。Fig.10 に共焦点レーザー蛍光顕微鏡 (Leica TCP SP8 工学部川田研) の画像を示す。波長680nmの光で誘起すると緑葉では、クロロフィルが密集しており、白葉では米粒状に点在している。



5.2 LIF 法による植物葉の蛍光スペクトル測定

植物葉の蛍光スペクトルをレーザー励起蛍光法 (Laser-Induced Fluorescence, LIF) により、CCD 分光器 (Ocean Optics QE-65Pro) を用いて測定する (Fig.11)。532nm のグリーンレーザーで誘起すると緑葉では、680nm と 740nm にピークがあるクロロフィル蛍光が測定できる。白葉では、740nm のピークがなくなり、蛍光顕微鏡 (Fig.10 (c)) の測定からクロロフィル含有量が少なくなっていることが分かる。蛍光強度が強いということは、Fig.10(b)からクロロフィル含有量が多くなると、光吸収量も多くなる。このことから、光合成活性が高くなったと判断できる。

Fig. 10 Pothos images: (a) optical image taken with a CCD camera; (b) LIF microscope images for the green part.; (c) LIF microscope images of the nongreen part.

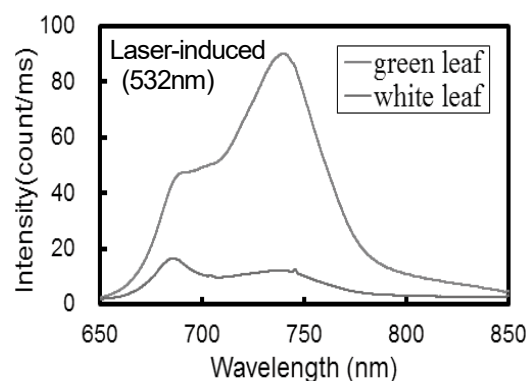


Fig. 11 Spectra of LIF observed for Pothos leaves: LIF (Laser-Induced Fluorescence) with visible laser illumination (532 nm, 27 mW).

6. 研究支援

6.1 イネの観測

静岡キャンパスの農学部富田研究室の田圃において、11月4日~18日の晴天の日にイネの観測を行なった。

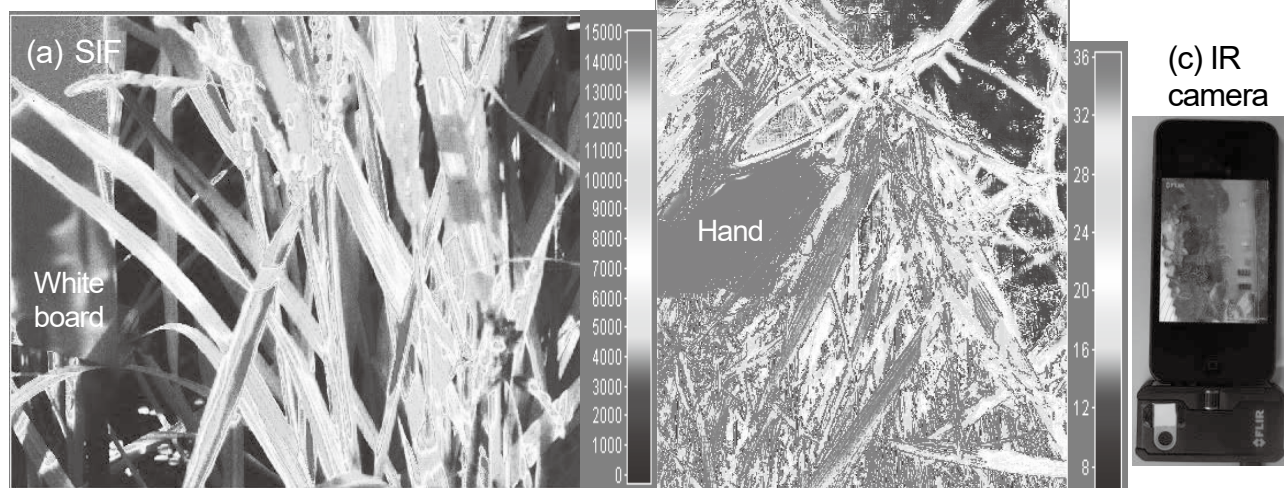


Fig.12 Rice field imagery: (a) SIF intensity (b) Heat dissipation and (c) IR camera (FLIR ONE Pro).

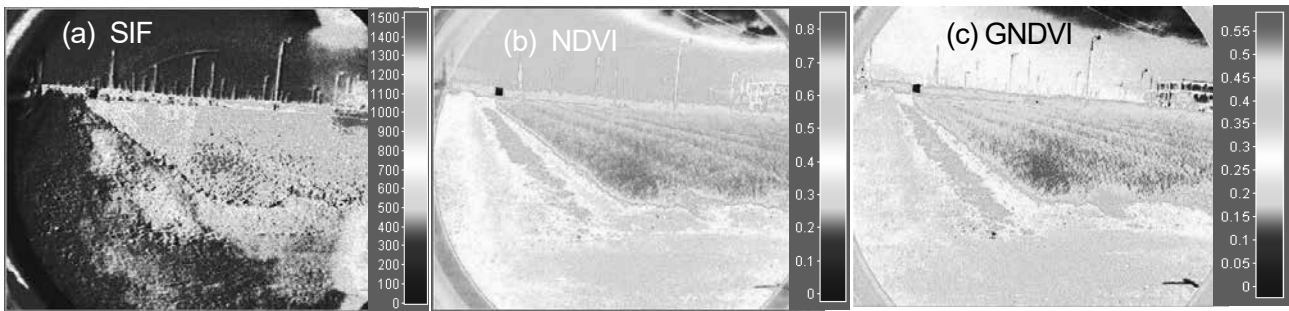


Fig.13 Japanese tea field imagery: (a) SIF intensity (b) NDVI (c) GNDVI .

農学部の富田教授は、「多様な遺伝子型を持つイネの環境応答」の研究をしている。そこで、SIF 強度と熱放射画像の測定を行った。気候変動に対する植物の頑健性の光合成反応系に関連して、焦点距離 300mm の望遠レンズを CCD カメラに取り付け、F760 の狭帯域の干渉フィルターにより SIF 微細画像 (Fig.12(a)) を取得し、クロロフィル含有量と光合成活性を評価する。また、熱放射が活発な植物ほど、葉の表面温度は低くなるため、スマホ (iphone, ipad) 接続型の赤外線カメラ (FLIR ONE Pro, 1080×1440pixel) を用いて熱画像を取得し、温暖化緩和能力の判断に利用する (Fig.12(b))。

6.2 茶の観測

農業研究機構・金谷茶業研究拠点において茶畑の観測 (2020.11.19) を行なった。農学部の笠井准教授から、「私の開発した技術でナガチャコガネの早期発見ができないか」という相談があった。ナガチャコガネの幼虫が茶の根を食い荒らす被害が頻発している。被害が発覚するのは、新茶の 5 月頃でそのころには幼虫も大きくなっていて農薬で駆除するのは難しく、手遅れとなっている。そのため、植生リモートセンシング技術を用いて、被害の兆しを早期に発見し、幼虫の小さい頃に駆除する必要がある。

焦点距離 10mm の広角レンズを用いたリモートセンシング計測では、縦 30m 横 40m の広域画像が取得できる。Fig.13 (a) の SIF 画像からはクロロフィル含有量と光合成活性が評価できる。Fig.13 (b) の NDVI 画像からは赤色 (680nm) の吸収率から植生指数が判断できる。Fig.13 (c) の GNDVI は緑葉素計であり、葉の緑色を定量化できる。ImageJ という解析ソフトを用いれば局所的な数値を求めることができる。

7. まとめ

パルス変調法 (PAM) による光合成の電子伝達速度 (ETR) 測定データと比較することで SIF 強度から光合成活性を判断する手法を提案した。

従来は太陽光条件下で蛍光を観測することは難しかったが、太陽光を誘起光源に利用して、冷却式 CCD 分光器を用いて SIF スペクトル計測データを取得し、植生光スペクトルから白板の反射光に植生の反射率から差分して蛍光を分離する新たな手法を提案した。

広角レンズを冷却式 CCD カメラに直接取り付け、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複数の画像間の演算によって広域の蛍光強度分布画像を取得する新たな手法を提案した。

農学部の王研究室、富田研究室、笠井研究室の研究支援を行なった。

引用文献

- [1] Kenji Masuda , N. Manago, H. Kuze, Remote Sensing of vegetation canopy fluorescence with wide-area image acquisition. IGARSS IEEE International, THP1.p.9, Yokohama, July 28-August 2, 2019
- [2] Kuriyama (Masuda) Kenji., Manago, N., Saito, H., Kuze, H., 2015: Optical remote sensing of vegetation fluorescence on the canopy level under insolation, International Symposium Remote Sensing (ISRS 2015), A8(Oral), paper #34, National Cheng Kung University , Taiwan, April 22-24, 2015.
- [3] Kenji Masuda , H. Saito , Y. Mabuchi , N. Manago, Hiroaki Kuze, : Stand-off measurement of solar-radiation induced vegetation fluorescence using oxygen A-band, IGARSS IEEE International, ,2014, 2993-2996, DOI:10.1109/IGARSS.2014.6947106.