

リモートセンシングによる広域の植物蛍光画像計測

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-03-04 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/10.14945/00027081

リモートセンシングによる広域の植物蛍光画像計測

増田 健二

静岡大学 技術部 教育研究第一部門

1. はじめに

森林等の陸域植物の光合成による二酸化炭素の吸収である総一次生産 (Gross Primary Production, GPP) は、陸域生態系の中で最大の炭素フラックスであり、それを正確に評価することは非常に重要である。GPP を広域に推定する手法に、人工衛星から地球の反射光スペクトルを測定する衛星リモートセンシング法がある。近年では、人工衛星 GOSAT 等のフーリエ変換赤外分光光度計(TANSO, FT-IR)の酸素 A バンドのフランホーファー線のスペクトルデータから太陽光誘起のクロロフィル蛍光 (Solar-Induced Fluorescence, SIF) が検出され、SIF と GPP との高い相関が示されたことから地上観測での検証が盛んに行われている。そこで、太陽光を利用して生育場所での広域の群落レベルの SIF を測定するシステムの開発を行なっている^{[1][2]}。

しかしながら、衛星レベルで観測される SIF の情報を理解し、また、高精度の観測技術を開発していくためには、SIF 強度は光合成反応だけでなく、熱放散の効果も受けており、植物が乾燥などのストレスを受けると熱放散へのエネルギー量が高くなるのと同様に SIF 強度も高くなっていく。これまで SIF から光合成速度を推定する研究では、熱放散の効果を加味しないため、推定精度の不確実性が指摘されている。そこで、従来から行われている個葉レベルの Chla 蛍光の研究との比較検証をすることで観測の精度の向上を図っていく。個葉レベルでは、光合成測定器や PAM などによる Chla 蛍光の測定が行われ、光合成反応系の解析に利用されてきた。Chla 蛍光は、植物の葉緑体が、LED 光等により励起されると放出される光であり、その蛍光強度には熱放散の効果を受けなく光合成回路の状態を反映するため、CO₂ 吸收量の指標である光合成速度との相関が見られる。光合成有効放射強度 (Photosynthetically Active Radiation, PAR) が 1000 μmol·m⁻²s⁻¹ で光合成速度 (Chla 蛍光強度) はピークになり、長波長側にいくに従って僅かに減少していく。SIF の場合は PAR の上昇に伴って、SIF 強度も上昇していくため、熱放散の効果を加味した補正が必要となっている。太陽光を利用して、生育場所において植物群落レベルで観測される SIF から光合成速度 (CO₂ 吸收量) を正確に推定するには、様々な植物に対して、個葉レベルの Chla 蛍光強度や光合成速度を同一の植物葉で行う数多くの実証測定が必要となっている。

人工衛星からの SIF データを検証するためには、広域の SIF 画像データを取得する必要があり、太陽光を利用して、生育場所において植物群落レベルで観測できる新たな SIF 広域画像システムの開発を行っている。SIF は植物葉に吸収されたエネルギーがたどる 3 経路 (光合成、熱放散、蛍光) の一つであり、光合成速度を正確に推定するには熱放散のパラメータ

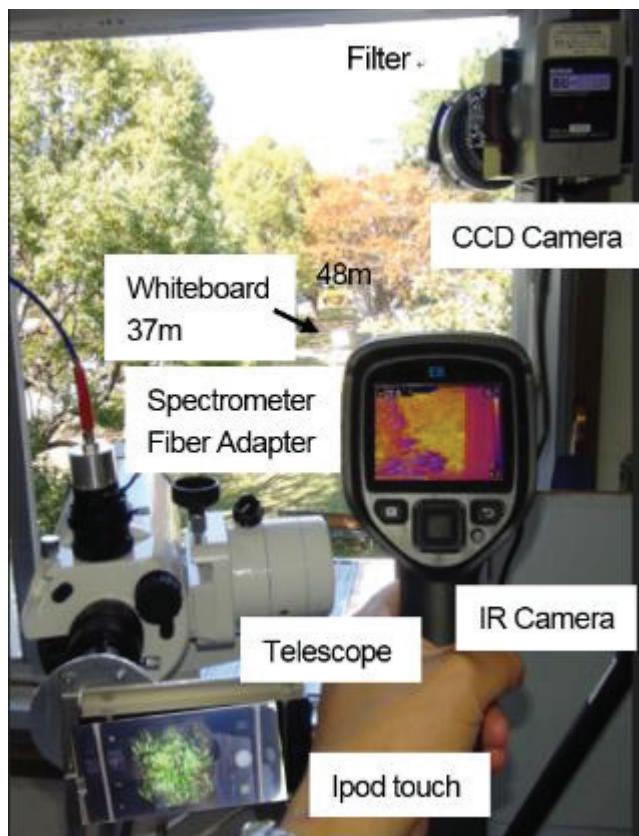


Fig.1 Stand-off measurement of a camphor tree

もリモートセンシング指標から推定する必要がある。従来の SIF 画像計測法^{[1][2]}としては、冷却式 CCD カメラ (BITRAN BU-51L) を天体望遠鏡または望遠レンズに取り付け、中心波長 760.68 nm、半値全幅が 1nm の狭帯域フィルターを用い、酸素 A バンドの太陽光暗線を利用して SIF 強度分布画像を見積もった。広域画像取得のために広角レンズを用いると、この狭帯域フィルターでは干渉縞（暗環）が生じ観測に支障をきたした。SIF と熱放散と関連する分光反射指数の広域画像を同時に測定し、植物葉の光合成速度を推定する新たな画像解析法を開発する。熱放散の効果を加味した、この SIF 広域画像解析法は、GPP の新たな指標として期待されている。

太陽光により誘起された植物から放出されるクロロフィル蛍光 (SIF) は、植物の光合成反応系の解析に直接結び付く情報を提供する。高波長分解能の FTIR を搭載した衛星観測により地上植生からの SIF が観測可能であることが報告され、また、地上計測では UAV や圃場上空に設置したクレーンをプラットフォームとして用いた SIF 計測法が提案されている。

2. 植物蛍光観測システム

従来は太陽光条件下で SIF を観測することは難しかったが、本研究では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、反射光から SIF を分離する新たな手法の提案を行なった^{[3]-[6]}。広域波長帯に放射強度を持つ太陽光では、樹木の全面に強力な誘起光を照射することから、生育場所において、樹冠レベルの SIF の遠隔計測が可能となった。

距離 10m～50m を隔てて植物葉からの SIF 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。植物樹冠と白板のスペクトルを測定するため、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 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 分光器は、高感度・高 S/N 比 (S:N=1000:1) で感度 16bit、計測波長範囲は 500~900 nm でのスペクトル計測ができる。

広域画像計測では、Fig. 2 のように広角レンズ (焦点距離 10mm) を冷却式 CCD カメラ (BITRAN BU-51LN) に直接取り付け、半値幅 10nm のフィルターによる広域強度分布画像を取得する新たな手法となっている^{[7][8]}。広角レンズの前にスライド式のアダプタを取り付けて、画

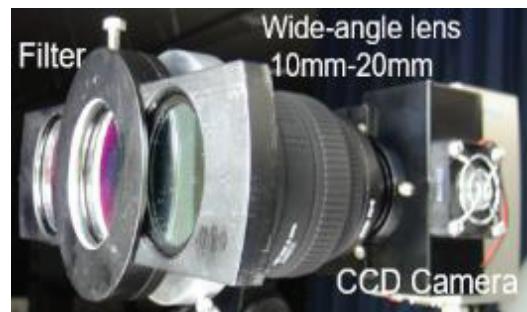


Fig.2 Wide-angle lens for the CCD camera

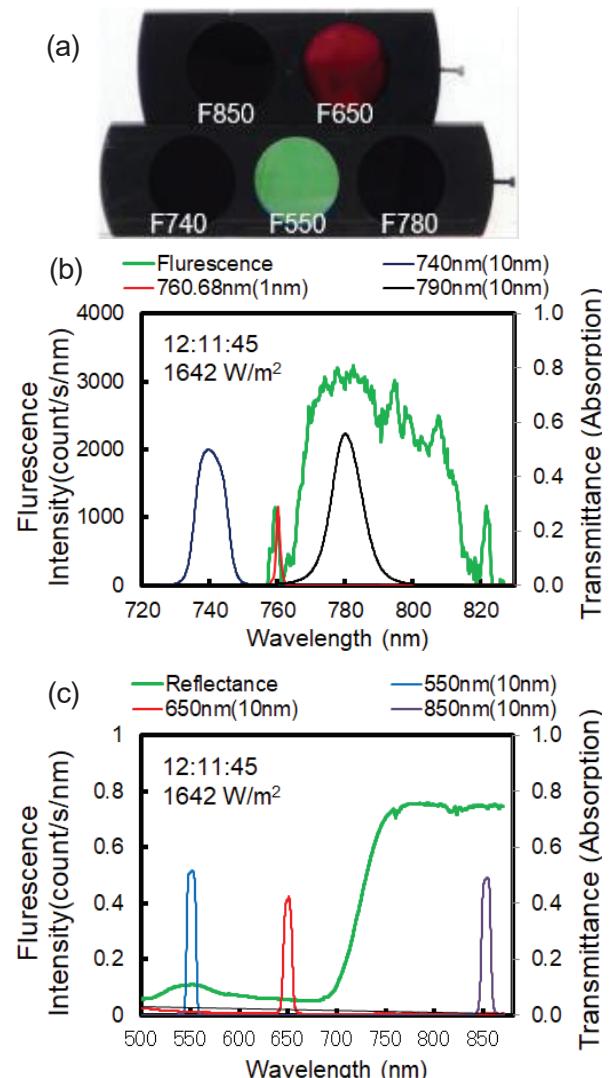


Fig.3 Fluorescence and vegetation index measurement by the filter. (a) Band-pass filter, (b) F740, and F780 filters used for the Fluorescence measurement, and (c) F550, F650, and F850 filters used for vegetation index.

像を取得する。使用するフィルターを Fig.3(a)に示す。Fig. 3(b) で SIF 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 SIF 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 SIF 強度分布画像を取得する。

次に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。

その他、IR カメラ (FLIR TOOLS) を用いて、熱蒸散画像を取得する。

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 の距離から太陽光誘起による SIF などの強度分布画像計測を行った。

Fig.4 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.4(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.4(d) は、同時に撮像した白板との差分から求めた SIF 強度画像である。フィルター透過率および太陽光強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 画像データの強度値にこの K をかけた数値から F740 の強度値を差し引く ($F=K*F780-F740$) ことにより SIF 強度値 F を取得した。空や影の部分からの SIF 強度値は 0 に近くなり、日向の部分で SIF 強度が大きいことが確認できる。

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.5(a) と通過後(10/2) の Fig.5(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) 熱蒸散(IR camera) の強度分布画像を比較した。

Fig.5(c) と(d) の蛍光強度分布画像をみると、クスノキは、 $150 \text{ count} \cdot \text{ms}^{-1} \cdot \text{pixel}^{-1}$ の赤色が密集してい

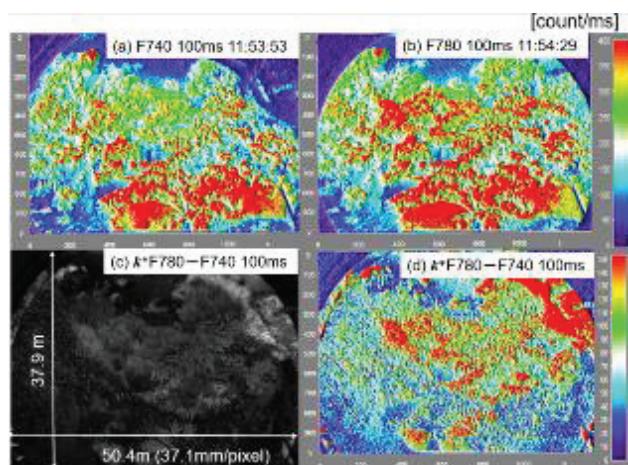


Fig. 4 Fluorescence images. (a) near-infrared reflection observed with F740, (b) reflection and fluorescence intensity observed with F780, (c) gray-scale representation of fluorescence intensity, F , with the area positions of each soybean row (rectangles) and (d) fluorescence intensity, F , in the color-coded 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.

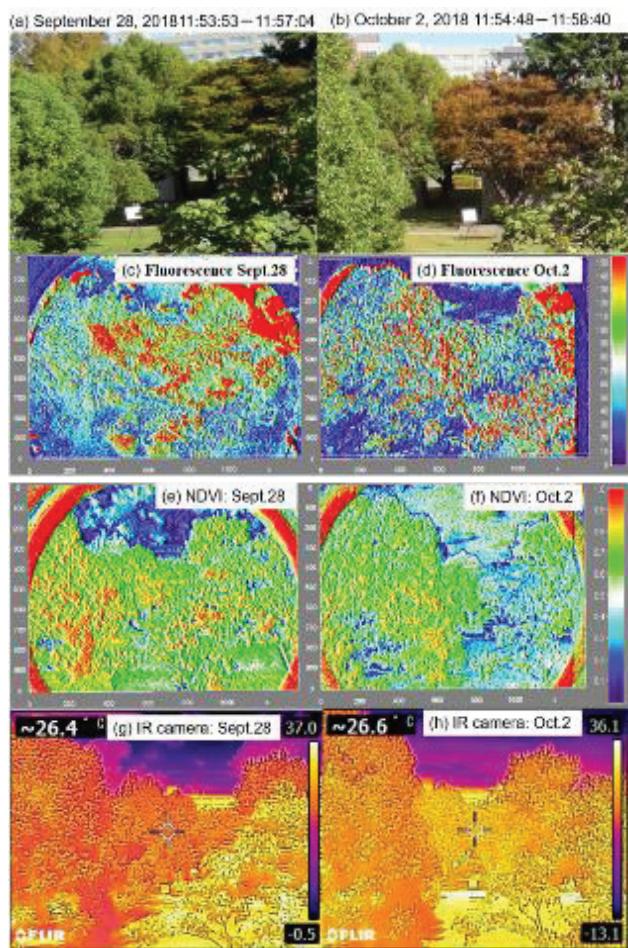


Fig.5 Typhoon damage comparison fluorescence, vegetation index and IR camera

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.5(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→0.3 に低下しており、側面 (20m) のクスノキなど、すべての樹木において、植生指数の低下が見られる。Fig.5(g)と(h)の蒸散分布画像では、両日 (正午) の気象条件 (気温 : 26.2°(9/28)⇒17.3°(10/2)、9°低下) を加味して検討する必要がある。

Fig. 6 に、距離 48 m の 1.クスノキ (●) と 2.ケヤキ (▲) の SIF 強度の日変化を示す。誘起光である PAR (9/28 実線、10/2 点線) の強度変化に伴い、SIF データの結果がよく一致した経時変化を示している。

Fig.7 に SIF 強度と PAR の関係を示す。植物葉に吸収された誘起光 (PAR) のエネルギーは、正常な光合成活動が行われているときも、余剰エネルギーの多くは熱として放出され、限られたエネルギーが蛍光として放出される。Fig.7 は、PAR の強度上昇に伴って、余剰エネルギーとして SIF 強度が大きくなっている関係を示している。台風通過 (9/30) 前後の 9 月 28 日と 10 月 2 日を比べるとクスノキ、ケヤキともに SIF 強度値の低下が見られる。クスノキは、強風で葉が振り落とされたことによる葉密度の低下、ケヤキの葉が黄緑から茶色に変色していることから、茎が折れることにより水分と養分が葉に供給されないことによるクロロフィルの含有量の低下が生じているものと考えられる。

本研究は、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) および平成 25 年度~31 年度の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費の助成を受けた。

参考文献

- [1] C. Frankenberg, et al.,: Geophys. Res. Lett., 38, L03801 , doi:10.1029/2010.GL 045896.
- [2] K. Masuda , H. Saito, Y. Mabuchi, N. Manago, H. Kuze, : IGARSS IEEE International, paper 2368, Quebec City, Canada : 13-18 July 2014. DOI:10.1109/IGARSS.2014.6947106
- [3] K. Kuriyama(Masuda) , N. Manago, H. Saito, H. Kuze : International Symposium Remote Sensing A8-34, National Cheng Kung University, Taiwan. April 22-24, 2015.
- [4] 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
- [5] 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, 5 月 17 日~18 日、2018 年。
- [6] 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, 11 月 27 日~28 日、2018 年。
- [7] 栗山 (増田) 健二、眞子直弘、王権、久世宏明、日本リモートセンシング学会、第 67 回 (令和元年度秋季) 学術講演会論文集、岐阜商工会議所 B-9, DVD, 11 月 29 日~30 日、2019 年。
- [8] K. Masuda, N. Manago, H. Kuze, : IGARSS IEEE International, THP1.pp.9, Yokohama, July 28-August 2 , 2019.

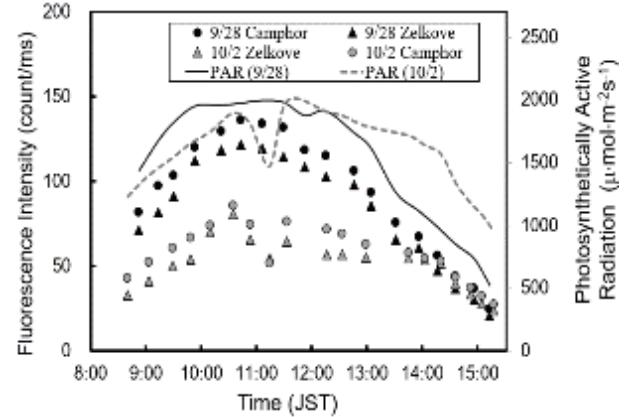


Fig.6 Temporal change of the SIF and PAR intensity

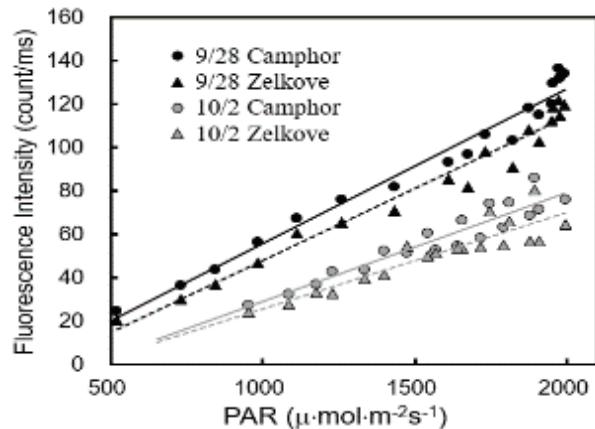


Fig.7 Correlation between Fluorescence intensity and PAR .
28 日と 10 月 2 日を比べるとクスノキ、ケヤキともに SIF 強度値の低下が見られる。クスノキは、強風で葉が振り落とされたことによる葉密度の低下、ケヤキの葉が黄緑から茶色に変色していることから、茎が折れることにより水分と養分が葉に供給されないことによるクロロフィルの含有量の低下が生じているものと考えられる。