

太陽誘起蛍光のリモートセンシングによる 広域画像技術の開発

増田 健二（静岡大学 技術部 教育研究支援系）

MASUDA Kenji : Remote Sensing of Solar-Induced Fluorescence Development of Wide-Area Imaging Technology

The measurement of solar-induced fluorescence (SIF) in vegetative leaves provides valuable data for understanding plant photosynthetic activity. During the day, when solar radiation intensity is in the appropriate range, it activates photosynthetic reactions, releasing chlorophyll a (Chla) fluorescence, which is observed as SIF. Until now, diagnostic techniques for growth status (photosynthetic activity) have included individual-leaf-level measurements with SPAD meters and NDVI determination from spectral reflectance of the spectrum. As an alternative measurement method, we developed a wide-area image measurement technique using SIF. This invention is expected to enable the instantaneous acquisition of wide-area (community-level) SIF images and to significantly improve measurement accuracy compared to NDVI.

1. はじめに

光合成を担う光合成色素は、光合成の細胞内小器官である葉緑体に存在する。葉緑体にはチラコイド膜があり、その中に多くのクロロフィルやカロテノイドが存在し、タンパク質と結合している。図1に示すように、太陽の誘起エネルギーは光化学系 II (PSII) のクロロフィル a (Chla) に集められ、光化学系 I (PSI) に送られて光合成を行い、二酸化炭素と水から糖などの炭水化物と酸素を生産する。F740 の Chla 蛍光は、光エネルギーによる誘起状態から基底状態へ戻る際に、その差に相当するエネルギーの一部として放出される。Chla 蛍光は 740nm にピークを持ち、光合成活性状態にあるチラコイド膜中の PSI のクロロフィルから放出される。光合成に使われなかったエネルギーのほとんどはカロテノイドで熱として放散され、一部は PSII から余剰エネルギーの蛍光 (F685) として放出される。Chla 蛍光は光合成活性と関連しており、古くから光合成反応系の解析に利用されてきた¹⁾。

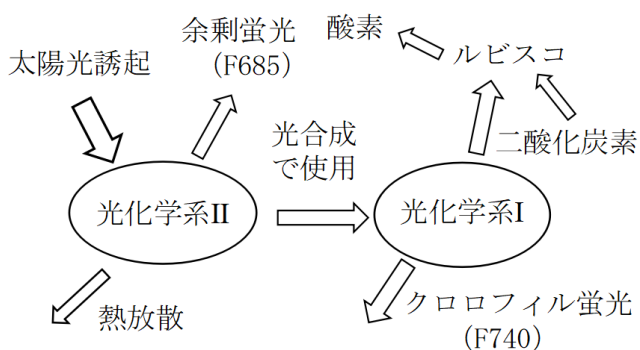


図1 光合成とクロロフィル a 蛍光の模式図

Chla 蛍光のピークは 740 nm であるが、自然太陽光下では、植生のクロロフィル蛍光は近赤外部分の反射光の約 3%程度であるため、蛍光と近赤外反射光を区別することは不可能であった。クロロフィル光合成反応系の解析には、Chla 蛍光を個葉レベルでモニターするパルス変調 (PAM) 法が採用されている。PAM 法では、屋外の日射量に応じて LED パルス光の強度を調整することで、Chla 蛍光を測定する。PAM から得られる光合成の電子伝達速度は、CO₂ を吸収する速度の指標である光合成速度とよい相関を示す。一方、フラウンホーファー線深度 (FLD) 法のアプローチは、地上ベースのリモートセンシング SIF 測定に一般的に使用されている。

我々は、植生蛍光のリモートセンシングにより、樹冠レベルでの CO₂ 吸収量を推定できるイメージングシステムを開発した²⁾。このシステムは、従来の FLD 法を改良したもので、太陽スペクトルが減衰する特定の波長 (酸素 A バンド暗線領域) を用いて、この微弱な蛍光を定量的に測定する。具体的には、天体望遠鏡に冷却 CCD カメラを取り付け、酸素 A バンド暗線に対応する F760 (中心波長 : 760.68nm、半値幅 : 1nm) の狭帯域フィルタを接続し、太陽光誘起蛍光 (Solar-Induced Fluorescence, SIF) 強度分布画像を取得する。新たに開発した酸素 A バンド暗線領域を用いた太陽誘起蛍光 (SIF) イメージング法を用いて、森林総合研究所京都山城観測地点のコナラの樹冠レベルでの SIF 強度分布画像を測定した。また、光合成蒸散システム (Licor 社製、Li-6400) を用いて個葉レベルでの光合成速度 (CO₂ を吸収する速度) を測定し、樹冠レベルの

SIF 強度値との比較から CO₂ 吸収量を推定した。

本稿では、クロロフィル a (Chla) 蛍光の強度分布画像を得るために、画像スケージング法における Chla 蛍光強度が存在する波長域と存在しない波長域の画像を取得し、2つの画像の差分から Chla 蛍光に対応する SIF 強度分布画像を取得する³⁾。SIF 分布画像から広域の生育状況 (光合成活性) の診断画像が得られる。従来の正規化植生指数 (NDVI) 法に比べて、測定精度が大幅に向上したことを報告する。SIF 強度分布画像から植物の生育状況を診断する新たな手法を開発し、特許に出願した (2023. 11. 15)。スマート農業の技術開発の一つに、ドローンに搭載したマルチスペクトルカメラで農産物の生育状況を診断する方法がある。市販のマルチスペクトルカメラに SIF 画像を撮影するフィルタを装着することで、NDVI よりも高い精度で生育状況を診断できる。この発明は実用化につながる注目すべき技術開発である。

2. 装置と方法

2.1 ダイズ葉からの LIF スペクトルと太陽放射照度およびフィルタの透過スペクトル

図2は、コナラの葉の蛍光の観測に関わる3種類のスペクトルを示している。破線は CCD 分光器で測定した太陽光スペクトルの例であり、実線は狭帯域干渉フィルタ F760 を装着した場合の透過光強度である。二重線は、実験室でレーザー誘起蛍光 (LIF) 法を用いて得られたダイズ葉のクロロフィル蛍光スペクトルである。この図からわかるように、狭帯域フィルタの透過域は酸素 A バンドのピークの吸収帯にほぼ一致するが、フィルタ帯域の短波長側 (□ 枠) には吸収されない太陽スペクトルの一部が透過している。フィルタ帯域の長波

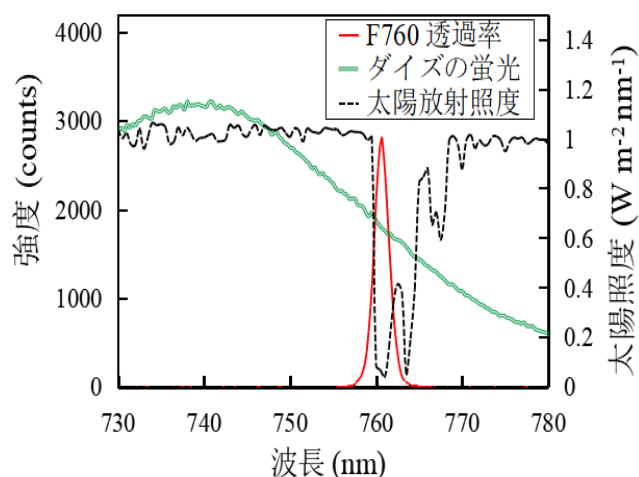


図2 ダイズの葉の蛍光観測に関わる3種類のスペクトル

長側では、酸素 A バンドによる吸収強度はピークに比べて最大約 30% 減少する。レーザー誘起蛍光スペクトルのピークは 740 nm 付近であり 760 nm の酸素 A バンドの強度は蛍光ピーク値 (F740) の約 60% に減少する。

2.2 広域の太陽誘起蛍光強度分布画像の取得方法

図3Aは、口径 200 mm の天体望遠鏡に冷却 CCD カメラを接続し、狭帯域フィルタ F760 を装着して測定した太陽誘起蛍光 (SIF) の強度分布画像である。距離 22 m における対象領域の画像サイズは W290×H218 mm で、CCD カメラの画素数 (1360×1024) で割った値 (解像度) は、0.213 mm pixel⁻¹ である。上記のように狭帯域フィルタの裾野で太陽光の透過が観測されること

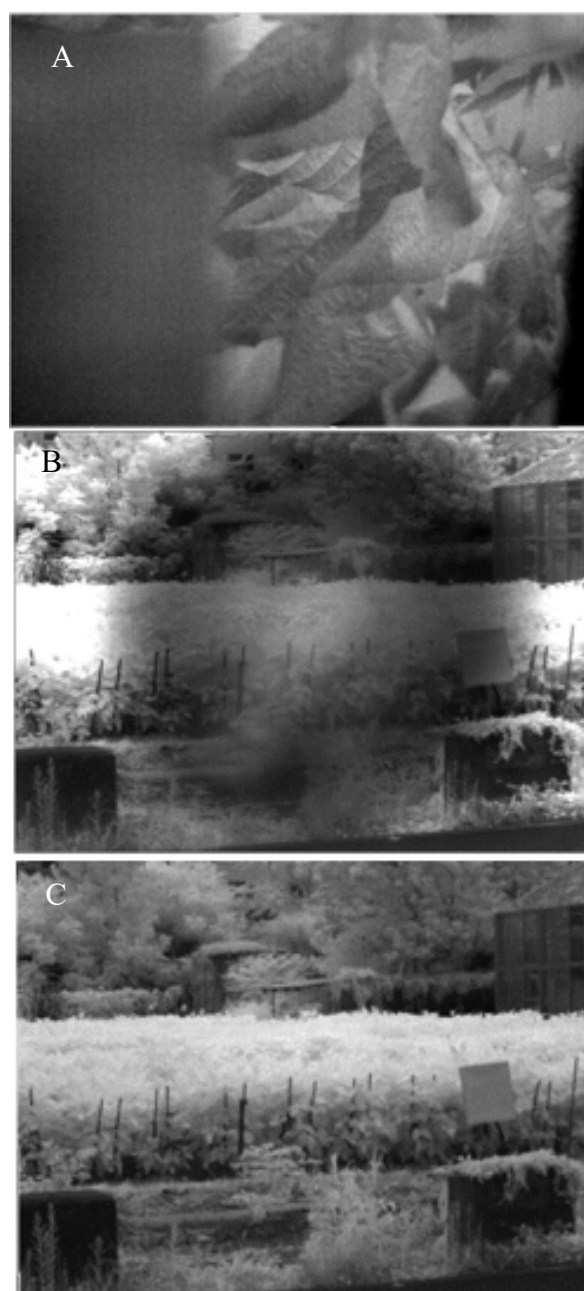


図3 狭帯域フィルタ と広域強度分布画像

を考慮し、白板の反射強度（白枠 110×826 pixel の 1 画素あたりの平均反射強度値）に、分光測定で得られたダイズ葉の赤外反射率（850nm で 0.616）を乗じた。その後、反射強度を画像全体から差し引くことで、ダイズの葉の向きや葉の陰影などの識別ができる蛍光強度分布画像が取得できる。従来の FLD 法の狭帯域フィルタ（F760 フィルタ、半値幅 1nm）を広角レンズに装着して広域画像を取得すると干渉縞（暗環）が発生し、安定した蛍光画像の取得が困難であった（図 3 B）。そこで、干渉縞の影響を受けない半値幅 10 nm のバンドパスフィルタを用いて広域分布画像を取得する（図 3 C）。

2.3 広域画像計測システム

冷却 CCD カメラに広角レンズ（SIGMA-EX、焦点距離 10 mm）を直接取り付け、広角レンズの前にフィルタアダプターを取り付け、5 枚のフィルタをスライドさせて画像を取得する（図 4 A）。SIF 画像測定に使用するフィルタは、蛍光強度のない波長領域用の半値幅 10 nm のフィルタ、蛍光強度のある波長領域用のフィルタ、余剰エネルギー蛍光用のフィルタである。NDVI は、F850 フィルタと F680 フィルタの画像強度値を白板の強度値で割った反射率である。R850 (NIR) と R680 (Red) から式 (1) を用いて NDVI 画像が得られる。可視光画像は F550 フィルタを用いて取得する（図 4 B）。

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} [NIR : 850nm, Red : 680nm] \quad (1)$$

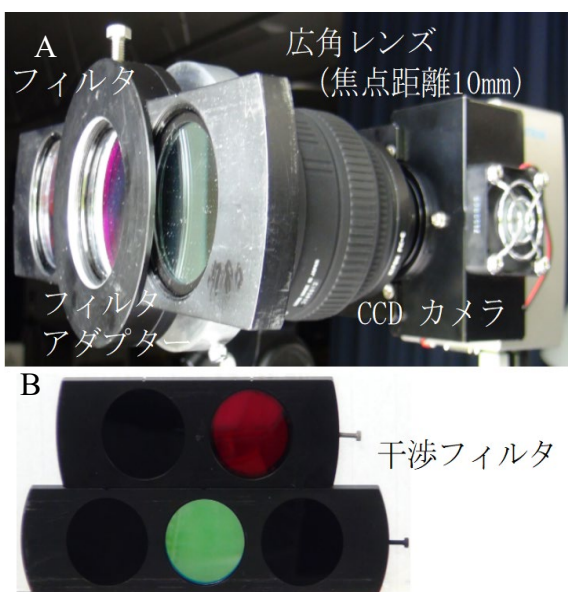


図 4 広域画像計測システム

3. 結果と考察

3.1 画像スケールリング法による SIF 画像取得方法

SIF の画像を取得するために新たに考案した画像スケールリング法について述べる。図 5 A の画像は、SIF 強度のない波長領域の赤外反射光画像である。図 5 B の画像は、SIF 強度がある波長領域における SIF+赤外反射光の重畳画像である。白板強度比は、赤外反射光画像（図 5 A）の白板からの反射強度を重畳画像（図 5 B）の反射強度で除した値である。白板強度比は、フィルタの透過波長帯域による太陽光の放射強度の違いを補正した値である。この白色板強度比 K に重畳画像（図 5 B）を乗算し、赤外反射光画像（図 5 A）を減算することにより、図 5 C に示す SIF 強度分布画像を得ることができる。図 5 D は RGB 画像である。

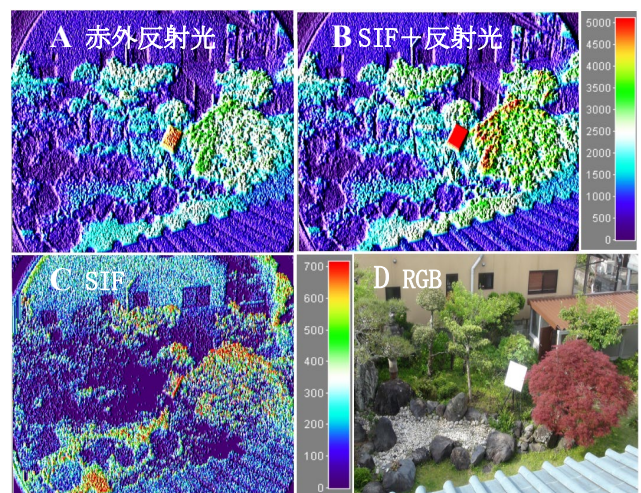


図 5 画像スケールリング法による SIF 画像の取得方法

3.2 太陽光が適切光条件下と強光条件下での SIF と NDVI 画像の比較

適切光条件 (PAR: 542 mol m⁻² s⁻¹) と強光条件 (PAR: 1356 mol m⁻² s⁻¹) の下で SIF と NDVI 画像を比較した。適切光条件下では、図 6 A の SIF 強度は、太陽光が垂直に降り注ぎ PAR が最も高い中央右の樹冠の白枠の 700 counts ms⁻¹ pixel⁻¹ の高値から、PAR が最も低い樹木の裾野の黄枠の 100 counts ms⁻¹ pixel⁻¹ の低値まで、7 倍の変化を示した。図 6 E は、NDVI が樹冠の赤枠で 0.65、樹木の裾野の黒枠で 0.5 と、1.3 倍変化を示している。これは、NDVI が反射率から得られるため、変化率が小さく測定精度が低いのにに対し、Ch1a 蛍光は強度差から得られるため、変化率が大きく測定精度が高いことを示している。強光条件下では、図 6 B の SIF の強度はほぼゼロ（紺色）であり、図 6 D の余剰エネルギーの蛍光強度が増加していることが分かる。図 6 F の正規化植生指数 (NDVI) も減少している。

適切光 (PAR:542 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 強光 (PAR:1356 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

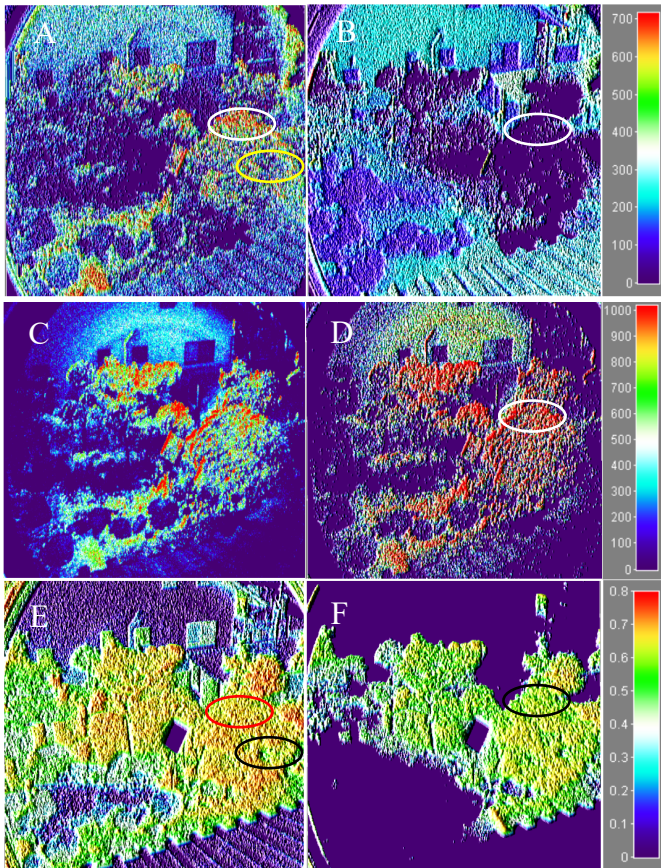


図6 適切光条件下と強光条件下での SIF と NDVI 画像の比較

4. おわりに

スマート農業の技術開発のひとつに、ドローンに搭載したマルチスペクトルカメラで農産物の生育状況(光合成活性)を診断する方法がある。生育状況の分析にはNDVIデータが用いられる。F850フィルタとF680フィルタを用いることで、NDVI画像が得られる。そして、このシステムをドローンに搭載することで、上空から広域画像を撮影することができる。

本発明は、太陽誘起蛍光(SIF)強度分布画像から植物の生育状態を診断する新しい方法を有する。図6 AのChla 蛍光(SIF)強度分布画像の樹冠部分(700 count pixel^{-1})と裾野部分(100 count pixel^{-1})の変化量は、NDVIの変化率1.3倍に対して7倍と大きく、生育状況(光合成活動)を高精度に診断できることを示している。つまり市販のマルチスペクトルカメラに重畳フィルタを装着して広域のSIF画像を撮影することで、精度の高い生育状況(光合成活性)の診断が可能となる。

イネなどの直立作物を測定する場合には、上空から撮影するよりも三脚固定型の本方法で斜め上方向から測定の方が生育状況を高精度に診断できる。ドローンなどの垂直(真上)方向からのデータを同じマルチス

ペクトルカメラを用いて、斜め上方向から測定することによって補正することができる。

5. 今後の展望

森林などの植生は、陸上生態系における炭素フラックスの最大の吸収源であるため、その吸収量を正確に評価することは極めて重要である。カーボンニュートラル吸収の前提となる森林植生による世界のCO₂吸収量(総一次生産量、GPP)の推定は、GOSAT衛星やその他の衛星によって確立されつつある。

この共同研究では、森林の樹冠レベルで太陽誘起クロロフィル蛍光(SIF)の強度分布を画像化し、観察するスタンドオフシステムを開発している。そして、光合成蒸散システム(Licor, Li-6400)を用いて、個葉レベルでの光合成速度(CO₂吸収速度)を測定し、樹冠レベルでのSIF強度値との比較から光合成速度に換算する。この方法により、単位面積当たりのCO₂吸収量が推定できる。衛星データの検証のために、本発明の広域のSIF強度分布画像を取得するリモートセンシング技術を活用していく。

謝辞

本研究の初期段階は、日本学術振興会科学研究費基盤研究(C)(助成番号JP26340003)の支援を受けた。また、千葉大学環境リモートセンシング研究センターの共同研究プログラムによる資金援助に感謝する。

参考文献

- 1) 増田健二、竹本裕之(2023) LED誘起蛍光法による植物葉とミドリムシの光合成活性の測定 技術報告(静岡大学技術部) 第28号: 33-38
<https://doi.org/10.14945/00029524>
- 2) Masuda K, Saito H, Mabuchi Y, Manago N, Kuze H (2014) Stand-off measurement of solar-radiation induced vegetation fluorescence using oxygen A-band. *IGARSS IEEE International: Quebec*, 13-18 2993-2996
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947106>
- 3) 増田健二(2021) 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 技術報告(静岡大学技術部) 第26号: 21-26
<https://doi.org/10.14945/00028126>