

(O-5)

太陽誘起クロロフィル蛍光を利用したスマート農業 のイノベーション

増田 健二（静岡大学 技術部 教育研究支援系）

MASUDA Kenji : Innovations in Smart Agriculture Using Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence

We are working with AgEagle to develop a drone-mounted multispectral camera that can simultaneously measure Solar-Induced Fluorescence (SIF) and Photochemical Reflectance Index (PRI). SIF includes chlorophyll fluorescence (ChlF) and excess energy fluorescence (ExcessF). ChlF can accurately measure photosynthetic activity and can be used to diagnose plant growth conditions related to photosynthetic pathways. ExcessF can measure transpiration with high accuracy and can be used to diagnose water stress related to the heat release pathway.

1. はじめに

本発明は、植物の生育状況の診断に有用な、太陽誘起蛍光（SIF）の画像取得装置に関するものである。従来、広域（圃場レベル）での作物の生育状況（光合成活性）を診断する技術として、反射率から正規化植生指数（NDVI）を求める方法などが使われてきたが、NDVIなどは、反射率から求めるため変化率が小さくなり、生育状況の微妙な変化を見分けることが難しく、生育状況の情報の精度については十分とはいえなかった。クロロフィル蛍光（ChlF）は、光合成活性の診断指標として知られているが、太陽光の反射光と重畳して観測される蛍光強度は微弱（3%未満）であり、反射光と蛍光を識別することは難しく、反射光を除去する方法が課題となっていた。本発明は、上記課題を解決することを目的としている。具体的には、SIFの波長を含まないフィルタ（第1フィルタ）と、SIFの波長を含むフィルタ（第2フィルタ）で得られた画像に対し、それぞれの波長領域の太陽光強度の違いを補正する値を用いて、画像補正した上で差分を取ることで、反射光を除去した精度の高いSIF画像の取得を可能としたものである。広域（圃場レベル）のSIF画像を瞬時に取得できることやNDVIに比べて測定精度が格段に向上することにより、作物の生育状況のモニタリング精度の向上が期待できる。

太陽光の誘起エネルギーは、光化学系IIのクロロフィルに集められ、光化学系Iに送られて光合成を行いChlFが放出される。光合成有効放射強度(PAR)が適切な範囲（ $PAR < 600 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）にある場合には、光合成反応に伴って、二酸化炭素（ CO_2 ）と水から糖などの

有機物と酸素を生成する。その際に ChlF が放出される。一方、強光条件下（ $PAR > 800 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）においては、光合成反応は低下し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放散され、一部は光化学系IIから余剰エネルギーの蛍光（ExcessF）として放出される。ExcessFは、植物の蒸散量を高精度に推定でき、熱放散経路に関連して、渇水ストレスの診断に利用できる。ドローン搭載のSIF対応のマルチスペクトルカメラは、スマート農業の圃場センシングの精度を格段に向上させる。また、カーボンニュートラルの前提である森林による CO_2 吸収量を特定することは、人工衛星（GOSAT等）による全球レベルの森林植生による総一次生産（GPP）の推定や地球温暖化対策を検証する上でも重要となっている。高感度・高精度に広域のSIF画像データを瞬時に取得できるドローン搭載の本マルチスペクトルカメラの能力は、研究分野に留まらず商業的にも大きな利益をもたらす可能性がある。

2. 装置と方法

2.1 ドローン搭載のマルチスペクトルカメラの開発

太陽誘起蛍光(SIF)と光化学反射指数(PRI)を同時に測定できるドローン搭載のマルチスペクトルカメラをAgEagle社と共同で開発している¹⁾。太陽誘起蛍光(SIF)には、クロロフィル蛍光(ChlF)と余剰エネルギーの蛍光(ExcessF)がある。ChlFは、光合成活性を高い精度で測定することができ、光合成経路に関連して、植物の生育状況を診断することができる。ExcessFは、植物の蒸散量を高精度で推定できることから、熱放散経路に

関連して渇水ストレスの診断に利用できる。従来のマルチスペクトルカメラでは、正規化植生指数 (NDVI) とクロロフィル・インデックス・レッドエッジ (CIred-edge) が測定できる。どちらも、生育状況 (光合成活性) を診断する指標となっている。

2.2 画像スケーリング法による SIF 画像の取得

図 1 に、SIF の画像を取得するために発明した画像スケーリング法について説明する²⁾。(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。(b)の画像は、SIF 強度のある波長領域の蛍光+赤外反射光の重畳画像である。それぞれの太陽照度の違いを補正する値を(b)の画像に掛けたものから、(a)の画像を差し引くことで、(c)の SIF 強度分布画像を得ることができる。(d)は RGB 画像である。

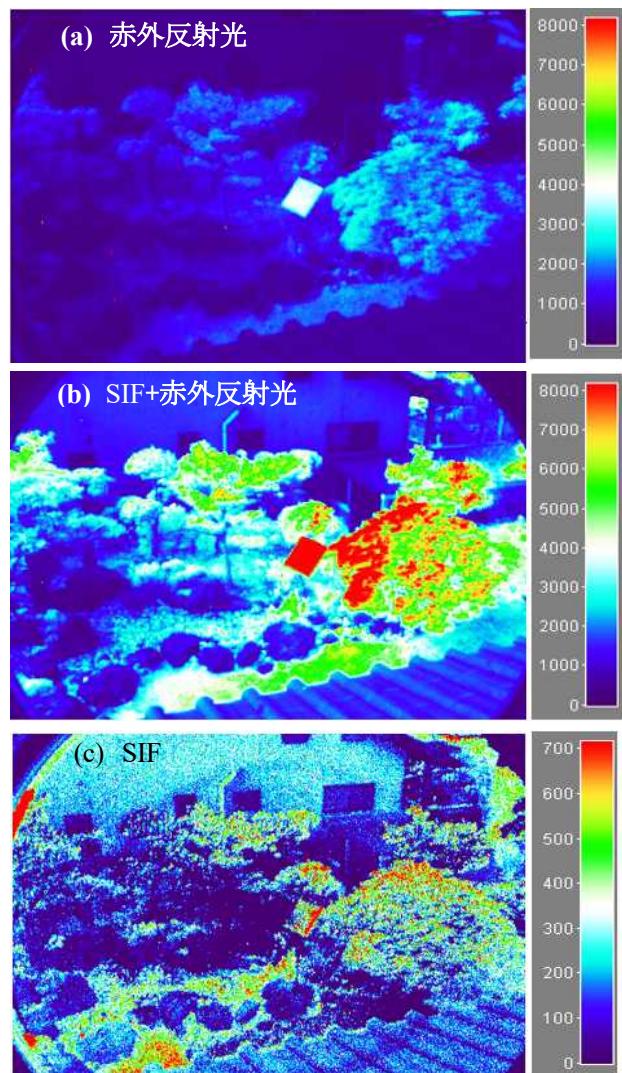


図 1 画像スケーリング法による SIF 画像取得

3. 結果と考察

3.1 太陽誘起クロロフィル蛍光と植生指数の比較

スマート農業の技術開発の一つに、リモートセンシング技術とドローン技術を組み合わせ、生育不良の箇所をモニタリングして、ピンポイントで肥料を散布する可変施肥システム (農林水産省推奨) の普及が広まっている。ドローンに搭載されたマルチスペクトルカメラで作物の生育状態を診断する方法がある。この分析には、NDVI データが用いられている。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することができる。穀物需要の増加やエネルギー価格の上昇に加え、国際的な地政学的リスクも加わり、化学肥料の国際価格が上昇している。この技術は、肥料経費の多額なコストカットに利用できる。太陽誘起蛍光(SIF)と NDVI を比較した (図 2)。NDVI は、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ものに対して、SIF は、強度値の差分から得られるため、変化量が大きく、測定精度が高いことを示している (表 1)。

3.2 余剰エネルギーの蛍光と光化学反射指数の比較

地球温暖化に伴い、世界的な干ばつによる穀物収量の減少やその経済損失額が大きくなっている。従来は、熱画像(IR)カメラにより、植物葉の表面温度を測定する方法が用いられている。その表面温度と気温の関係から蒸散量を算出して、渇水ストレスを診断している。

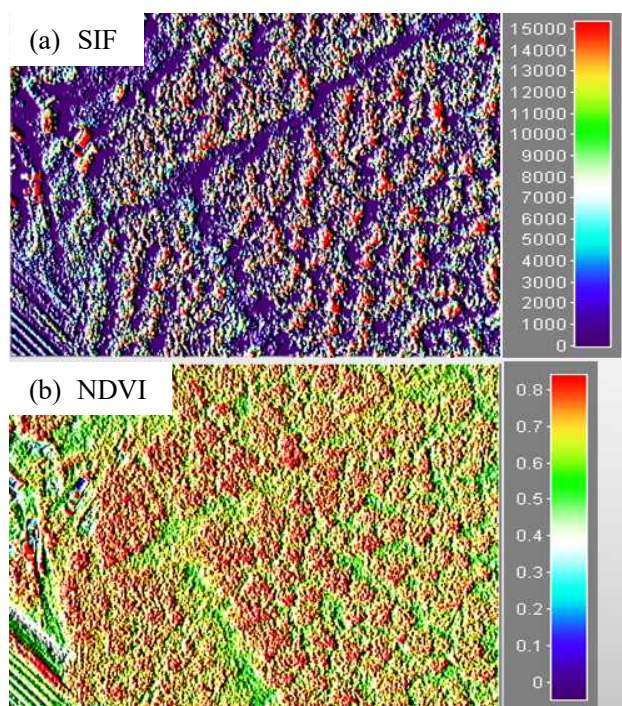


図 2. 太陽誘起蛍光(SIF)と NDVI の比較

表 1. SIF と NDVI の変化率の比較

	低値	高値	変化率
SIF	1000 (紺)	15000 (赤)	15
NDVI	0.5 (緑)	0.8 (赤)	1.6

太陽誘起による余剰エネルギーの蛍光(ExcessF)と IR カメラによる表面温度は、よい相関を示している。マルチスペクトルカメラに、ExcessF 画像を撮影するフィルタを装着することで、IR カメラよりも高い精度で蒸散量を推定することができる。ドローンに搭載したマルチスペクトルカメラを用いた ExcessF の広範囲でのモニタリングが可能となることから、区画(局所)ごとの渇水ストレスのシグナルを高精度に検出でき、干ばつの早期予測に基づき区画ごとに効率的な散水が可能となる。乾燥や強光による渇水ストレスで葉から放射された熱量を示した指標が光化学反射指数(PRI)である。最近では、PRI 画像の作成にはハイパースペクトルカメラを利用しているが、高価であるため農業分野での利用は限られている。そのため、簡便に PRI 画像を取得できるカメラの開発が期待されている。ドローンに搭載されたマルチスペクトルカメラを用いた PRI 画像法の確立により、水ストレスの広範囲でのモニタリングが可能となることから、作物収量へのポジティブな効果が期待される。

図 3 に、高度 150m で森林を撮影して、ExcessF と PRI を比較した。ExcessF は、低値(紺色: 1000 count)から高値(赤色: 16000 count)まで、16 倍の変化量であり、PRI は、低値(水色: 0.04)から高値(赤色: 0.32)まで、8 倍の変化率を示した。熱放射経路に関連する余剰エネルギーの蛍光(ExcessF)と光化学反射指数(PRI)は、高い精度で植物の蒸散量が推定でき、渇水ストレスを診断することができる。

3.3 作物の病害菌による感染の早期発見

日本において、作物の病害の中で最も被害が大きいのは稲のいもち病である。アメリカやヨーロッパなどの主食はパンであり、インドの主食もチャパティーというパンであるので小麦の需要は大変に多い。世界的には、赤かび病は小麦の最も被害の大きい病害の一つである。茎および幼苗にも発生するが、穂に感染する前に早期に発見して、穂を刈り取る耕種的防除や薬剤防除を行う。広大な圃場において、感染が拡大する前にピンポイントで感染を検出する。これまで、ドロー

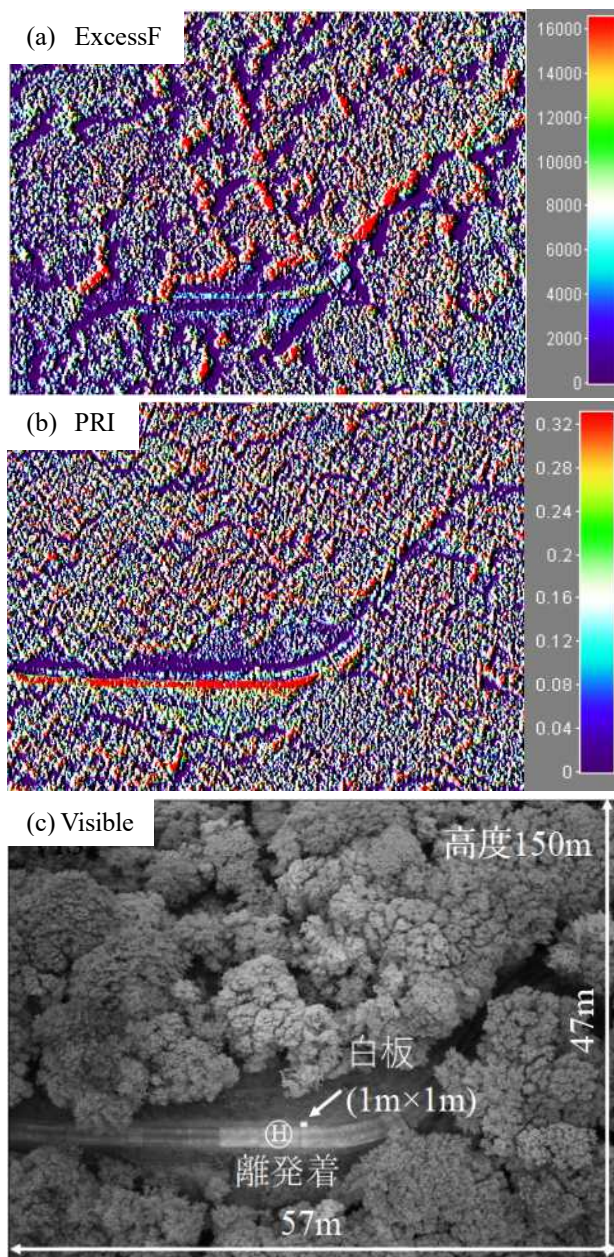


図 3. 余剰エネルギーの蛍光(ExcessF)と PRI の比較

ン搭載のマルチスペクトルカメラで作物の生育状態を診断する方法がある。この分析には、正規化植生指数(NDVI)データが用いられている。しかし、NDVI は測定精度が低いため、病害に感染したばかりの穂の微妙な生育状況の変化を検出することができなかった。マルチスペクトルカメラに、ChIF 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とから、病害の感染の早期発見が可能になることが期待される。

4. おわりに

太陽誘起蛍光(SIF)には、クロロフィル蛍光(ChIF)と余剰エネルギーの蛍光(ExcessF)の 2 種類があり、ChIF

は、光合成経路に関連して、植物の生育状況（光合成活性）を高精度に診断できる。ドローンに搭載した SIF 対応のマルチスペクトルカメラは、スマート農業の圃場センシングの精度を格段に向上させる。ChlF は、光合成速度（CO₂ を吸収する速度）に換算することができる。カーボンニュートラルの前提である森林による CO₂ の吸収量の特定への応用が期待される。

ExcessF は、熱放散経路に関連して、植物の蒸散量の推定から渇水ストレスの診断に利用できる。森林は成長過程において、光合成により二酸化炭素(CO₂)の吸収と固定を行い、温暖化抑制効果を担っている。猛暑により渇水ストレスが続くと森林の光合成は低下し、CO₂ の吸収量が低下することから樹木の生長が遅れる可能性がある。

参考文献

- 1) 増田健二, 飯尾淳弘, 田中秀英, 谷瑞木, サイモン イェーツ:「太陽誘起クロロフィル蛍光を利用したマルチスペクトルカメラの開発」第 77 回日本リモートセンシング学会、学術講演論文 (2024 年 11 月)
- 2) 増田健二:「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」学術リポジトリ技術報告 29 31-34 (2024.3) URL <http://hdl.handle.net/10297/0002000240>

謝辞

本研究は、静岡大学と AgEagle 社との共同研究（代表：農学部 飯尾淳弘准教授）の一環として行なった。

また、農学部附属南アルプスフィールド(中川根町)において、開発したマルチスペクトルカメラをドローンに搭載して観測をしてくださった飯尾研究室の田中秀英さん(M2)に感謝致します。

日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究 C（課題番号・JP263440003）および千葉大学環境リモートセンシング研究センター・共同研究プログラムの助成を受けた。

特許情報

[A] 特願 2023-194129（出願日 5.11.15）「クロロフィル蛍光画像取得装置」

発明者 増田健二、特許出願人 静岡大学

[B] 国際出願 PCT/JP2024/037745（出願日 2024.10.23）
「クロロフィル蛍光画像取得装置」

発明者 増田健二、特許出願人 静岡大学