

植物群落の太陽光誘起蛍光による光合成測定

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2022-03-01 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/10.14945/00028636

植物群落の太陽光誘起蛍光による光合成測定

増田健二

静岡大学技術部教育研究支援系

1. 太陽光誘起蛍光 (SIF)

これまで、太陽光誘起蛍光 (Solar-Induced Fluorescence, SIF) による光合成測定システムの開発を進めてきた。日中、太陽光強度が適切な範囲にある場合には、光合成反応に伴ってクロロフィル *a* (Chl*a*) 蛍光が放出され、SIF として観測される。一方、強光条件下では、クロロフィルに過剰に吸収された誘起エネルギーは、光合成速度が飽和状態となり、余剰エネルギーとしてほとんどは熱として放散される。また、ごく一部が蛍光の形で放出される。

Fig. 1 に PAR 変化に伴うナスの SIF スペクトルを示す。太陽光を室内に取り込み、PAR が 160 (ND8, 1/8), 点線 ⇒ 321 (ND4, 1/4), 二重線⇒642 (ND2, 1/2), 破線⇒1284 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (no-filter), 実線の順で ND フィルタを換えて測定する。PAR が 642 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ までは F755 (754.5-755.4nm) にピークのある Chl*a* 蛍光が検出される。PAR が 1284 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ になると、光合成は低下し F755 にピークのある Chl*a* 蛍光は小さくなり、F775 にピークのある余剰エネルギーとしての蛍光が検出される。

2. ダイズの品種別の SIF 強度の測定

2016 年 9 月 2 日に京都大学農学研究科の圃場において、ダイズの品種別の SIF 強度の分光スペクトル計測を行った (Fig. 2)。列ごとに異なった品種のダイズが植えられている。5 列目に白板を設置する。天体望遠鏡を水平移動させて、白板とダイズの樹冠を列順に(赤○枠)分光スペクトル計測する。Fig. 3 (a) に示すように、細線(青線)の白板の反射スペクトルにダイズの反射率を掛けて、蛍光強度のない破線枠の 815nm より長波長側をフィッティングしてスケーリングしたのが点線である。実線(赤線)はダイズの反射光+蛍光の重畳スペクトルであり、実線から点線を差し引くことによって、SIF スペクトルが検出できる (Fig. 3(b))。Fig. 3(a) の白板のスケーリングの差分から取得した SIF が Fig. 3(b) の破線(No. 22) である。光合成有効放射 (Photosynthetic Active Radiation, PAR) が 550 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 位までは、Chl*a* 蛍光(破線・二重線)が検出される。クロロフィルの吸収の影響を受け、ピーク波長は 750nm 辺りとなり、730nm の短波長側では差分としての蛍光強度はマイナスになる。Fig. 3 (c) では列(No.) ごとのダイズの Chl*a* 蛍光の F750Peak と SIF Area (725-815nm) を比較

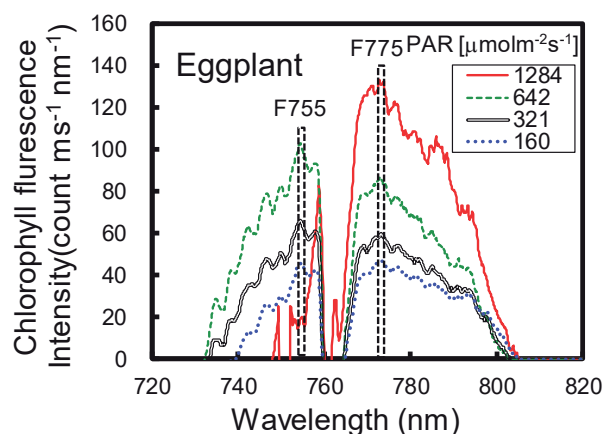


Fig.1 Two type of solar-induced fluorescence.

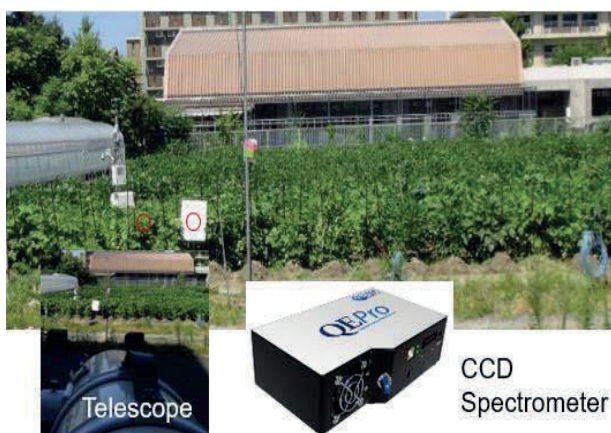


Fig.2 Measurement of SIF intensity by soybean variety.

すると、4列目以降はF750-Peak(●)とSIF-Area(▲)が良い相関を示すことから、Fig. 3(b)の破線・二重線のように光合成反応によるCh1a蛍光が検出されている。8列目(点線)は、PARが754 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であるため光合成反応が低下していることが分かる。2列目(実線)はPARが1718 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ のため、750nmにピークのあるCh1a蛍光は消失して、光合成に使用されない余剰エネルギーとしてのSIFが放出される。

3. クロロフィルa 蛍光強度値と含有量の比較

Fig. 4 (a)のように、LED光をシアンフィルター(600nm~740nmカット)とホットミラー(675nm~カット)を透過させて、620nmより長波長側をカットした光で誘起するとクロロフィルの吸収の影響を受けないF685とF740にピークのある純粋なCh1a蛍光が検出できる。赤く黄く黄緑く緑く濃い緑の順でSPAD値が大きくなる。SPAD値が同じくらいの値に偏らないように40枚の葉を選んで測定する(Fig. 4(b))。緑葉(①, ②)と黄緑葉(③)はF685(684.5-685.4nm)とF740(739.5-740.4nm)にピークがあり、黄色(④)と赤色(⑤)の葉はF740のピークが小さくなる。2つのピーク波長の強度比F740/F685から、Ch1aの含有量を推定する(Fig. 4(c))。Fig. 4 (d)のように、Ch1a含有量(F740/F685)とSPAD値(▲)がよい相関を示した。Ch1a含有量(F740/F685)とF740のピーク値(●)も相関関係がみられる。このことから、F740のピーク値から光合成活性の判断が可能であると考えられる。

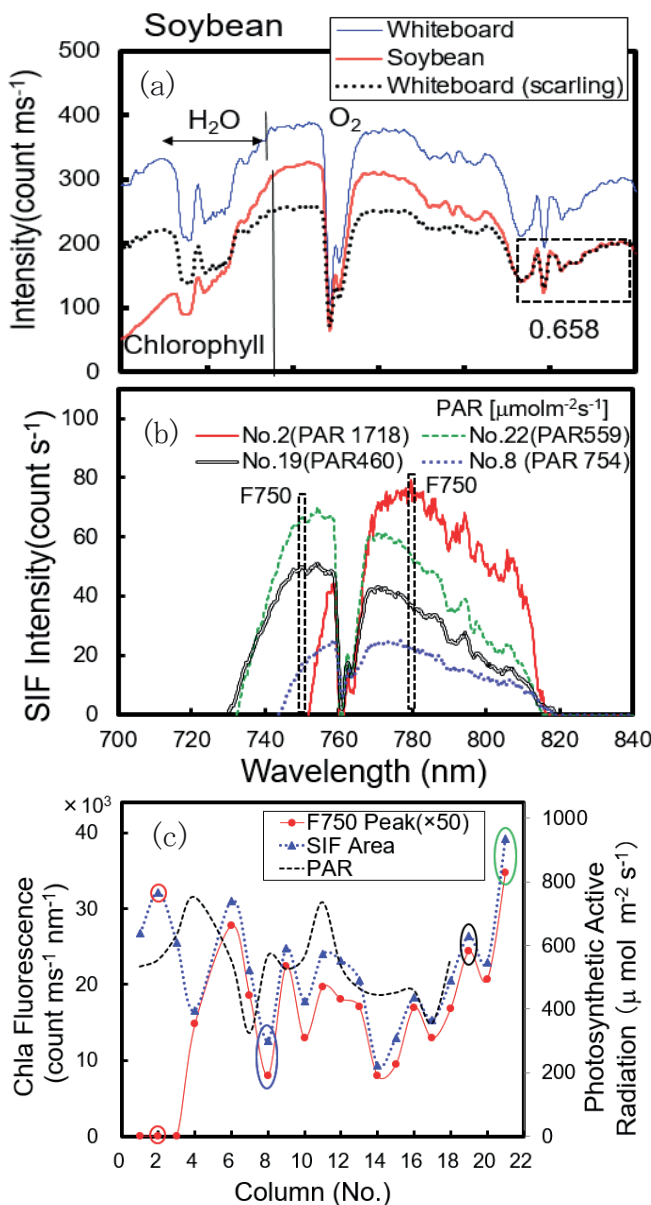


Fig. 3 SIF intensity in the spectral analysis obtained for column 1-21 of soybean.

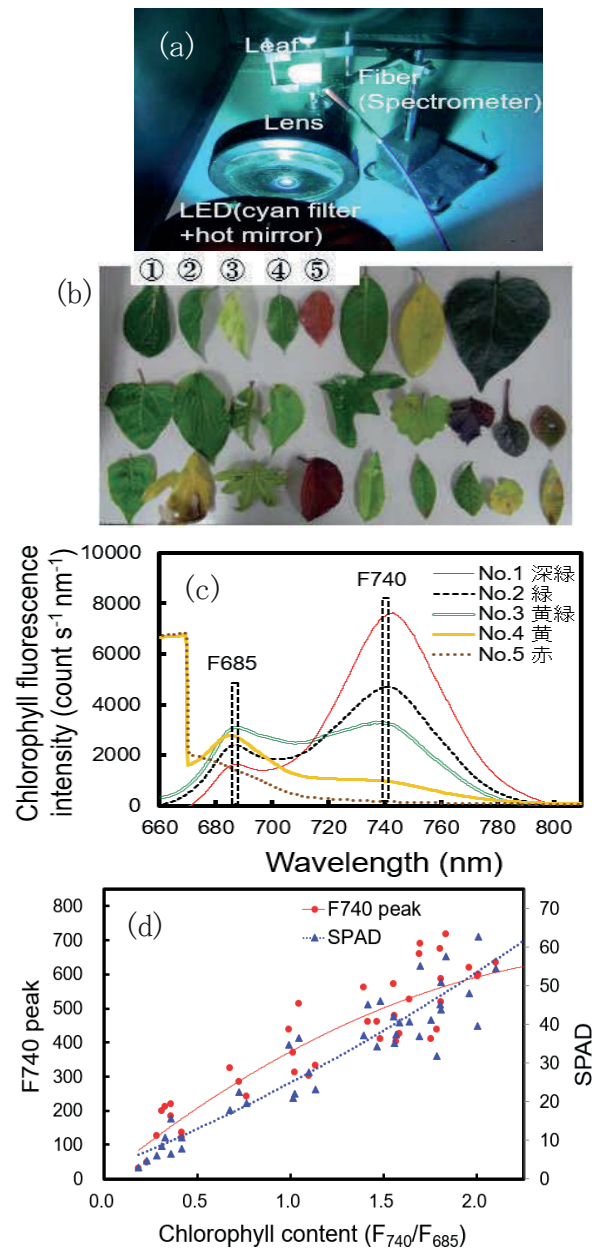


Fig. 4 Comparison of Ch1a fluorescence peak intensity value and content.

4. Chl a 蛍光の強度値と PAM (ETR) の比較

2019年9月10日、静岡キャンパスにおいて、SIF 強度とパルス変調法 (Pulse amplitude modulation, PAM) による電子伝達速度 (Electron transfer rate, ETR) の測定を行った (Fig. 5)。ターゲットの樹木は、18m の距離にあるサカキである。緑葉と赤みがかかった葉を SIF と PAM で交互に測定し、その都度 PAR を測る。

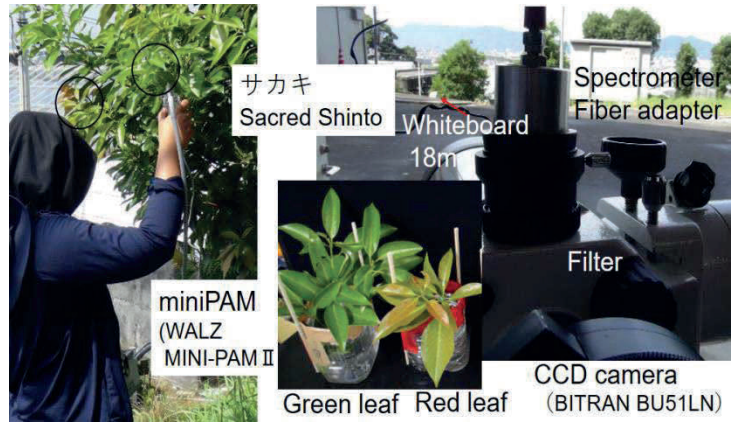


Fig. 5 Measurement of SIF intensity and PAM (ETR) .

Fig. 6 (a) の図は、11時から15時に間に観測された緑と赤の葉の SIF 強度の時間変化である。PAR の変化に伴い、SIF が変化する様子が見られる。

緑または赤の個葉に、PAM 装置でレベルの異なった LED パルス光を照射することにより、最大の蛍光量 (F_m) と任意の強さの光の下で放出される蛍光量 (F) を測定して、式 (1) を用いて電子伝達の量子収率 (Φ_{II}) を求めた。Fig. 6 (b) のように、PAR が上昇すると光合成に使われるエネルギーの割合である電子伝達の量子収率 (Φ_{II}) は低下する。

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

式 (2) のように、 Φ_{II} の値に PAR をかけ、さらに葉の吸収係数 0.84 と、二つの光化学系への分配率 0.5 をかけると、光合成の電子伝達速度 (ETR) が求まる。こうして得られた各 PAR での ETR を結ぶことで、緑葉の ETR (▲) の光飽和曲線が得られる (Fig. 6(c))。この飽和値から光合成活性を評価している。

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

SIF 強度を PAR で割った SIF 収率は、PAR が $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度までは低下していくが、以降は一定となる (Fig. 6(b))。SIF 強度 (●) も ETR と同様に PAR の値が $650 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度で飽和する。この飽和値から光合成活性を判断することができる。PAR が $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を超えると PAR の上昇に伴って、SIF 強度値が増加して行く。これは、余剰エネルギーとしての蛍光 (SIF) を検出している (Fig. 6(c))。

5. コナラの SIF 強度と光合成の日変化

2015年9月12日に森林総合研究所京都山城観測地において、コナラの SIF 強度と光合成の日変化の測定を行った。高さ 10m の檜の上で、光合成蒸散測定器 (LI-COR 社 LI-6400) を設置し

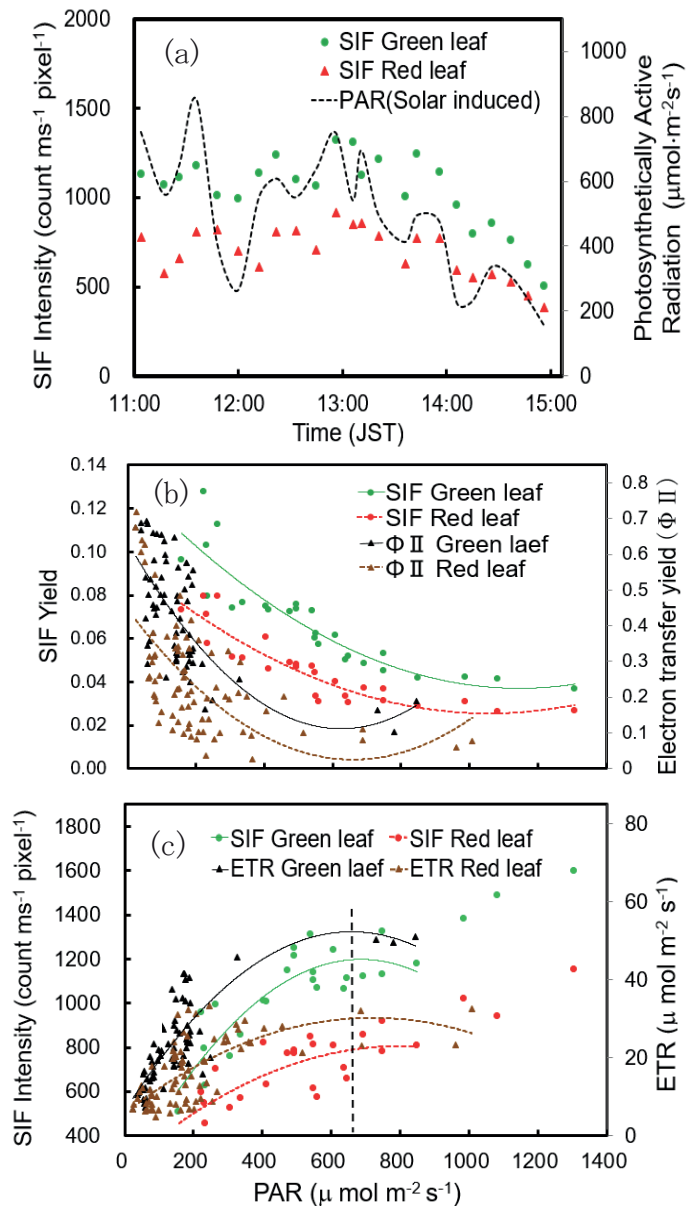


Fig. 6 Comparison of SIF and PAM . (a) Temporal change of the SIF and PAR intensity. (b) Relation of fluorescence yield and PAR. (c) PAR dependence of SIF intensity and ETR.

個葉レベルの光合成測定を行う。30m の CO₂ タワーの上から天体望遠鏡(Vixen、95mm)を用いて、樹木の樹冠レベルの測定を CCD 分光器 (OceanOptics QE65 Pro)によるスペクトル計測と CCD カメラ (BITRAN, BU-51LN) による画像計測を行った (Fig. 7)。

Fig. 8 (a)のように、大気温と PAR の上昇により葉内温度(●)が上昇する。13:00 頃にピークとなり 35°Cを越える高温となり、葉内の乾燥を防ぐため気孔を閉じて Fig. 8 (b)のように、気孔コンダクタンス (Cond, ▲)が 13:00 頃に最も低下している。それに伴い、CO₂を葉内に吸収する速度である光合成速度 (Photo, ●)も低下している。つまり、光合成反応が低下しており、日中の強光条件下においては、光合成のキャパシティをはるかに超える太陽光誘起エネルギーをクロロフィルが吸収すると光合成反応にはほとんど使用しないで、熱または余剰エネルギーとしての蛍光として放出して安定な基底状態に戻る。Fig. 8(c)は、葉内温度が上昇すると細胞間で飽和した水蒸気圧が上昇するので葉内飽和水蒸気圧差 (VPD, ▲)が増大し、蒸散 (熱放散) 速度が大きくなっていくことを示している。Fig. 9に示すように PAR の上昇に伴い、余剰エネルギーとしての SIF 強度 (●)と VPD(▲)はほぼ直線的に上昇している。

6. まとめ

室内において、LED 光(cyan filter+hot mirror 透過光)を用いたクロロフィル a (Chla) 蛍光の測定を行った。太陽誘起蛍光(SIF)には、適切光のもとでの Chla 蛍光と日中の強光条件下での余剰エネルギーとして放出される蛍光がある。

Chla 蛍光の 2 つのピーク波長の強度比 F_{740}/F_{685} から Chla 蛍光含有量を推定する。Chla 含有量 (F_{740}/F_{685}) と F_{740} のピーク値には相関関係が見られることから光合成活性の判断が可能となった。

PAM による光合成の電子伝達速度 (ETR) と同様に SIF 強度からも PAR の上昇に伴う飽和曲線が得られ、光合成活性を判断する手法となった。

日中の強光条件下では光合成に使われるエネルギー割合(光合成収率)が低下し、余剰エネルギーとして放出される蛍光がほぼ直線的に上昇している。

(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共同利用研究の一貫として行った。

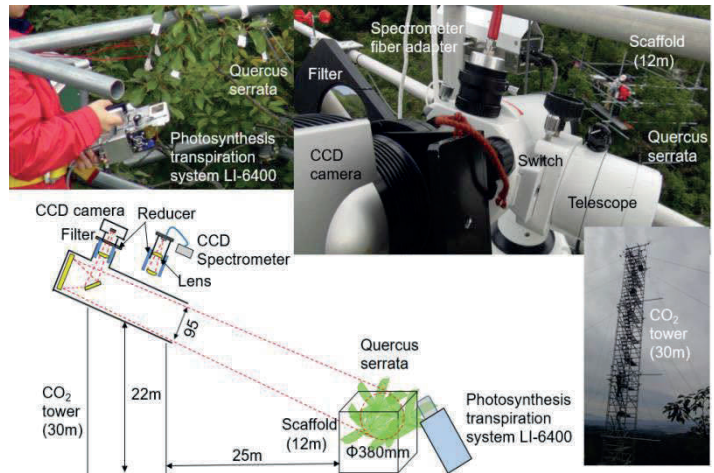


Fig. 7 Stand-off measurement of a forest canopy (8-12 September, 2015).

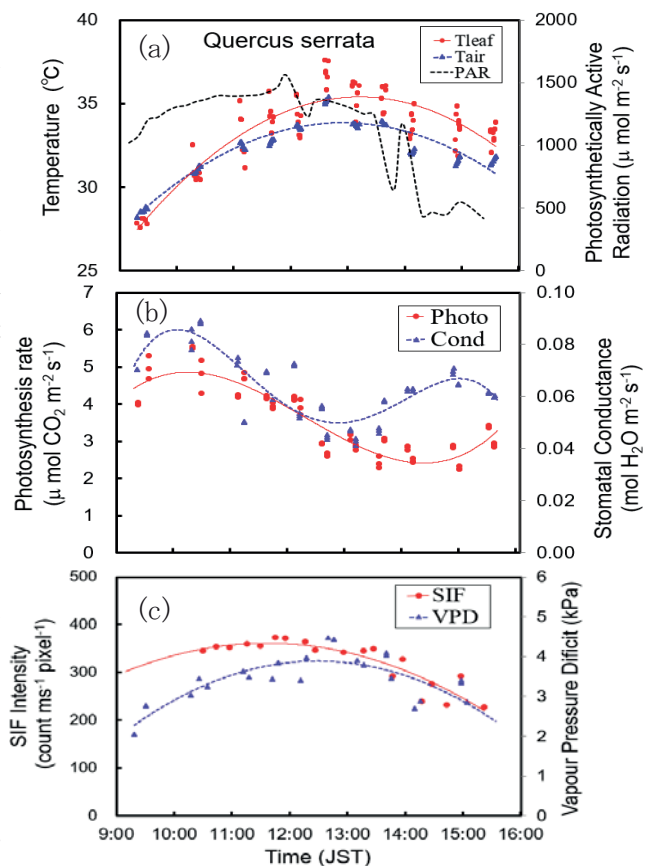


Fig. 8 Temporal change of Photo, Cond, VPD and SIF intensity *Quercus serrata* .

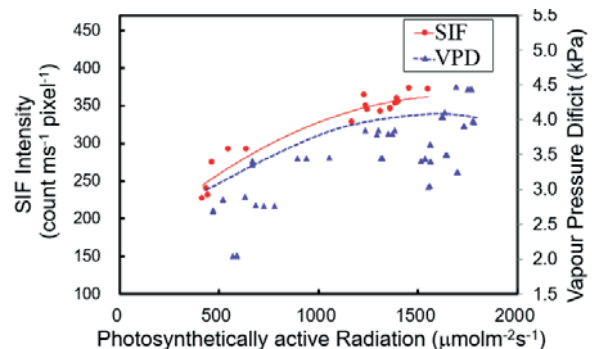


Fig.9 PAR dependence of SIF intensity and VPD.