

森林による CO₂ 吸収量計測のためのクロロフィル蛍光センサーの開発

北海道大学 大学院農学研究院 連携研究部門 准教授 加藤 知道

1. はじめに

森林等の自然生態系においても、温室効果ガス CO₂ の吸収源である光合成速度を把握する手法の開発が求められる。また北海道で展開しているような大規模農業では、ICT（情報技術）を利用した作業の効率化をするために、作物生育状況をリアルタイムに把握することが非常に重要である。

光合成は利用されなかった太陽光エネルギーの一部（～3%）をクロロフィル（葉緑素）蛍光として放出する（図1）。クロロフィル蛍光には光合成機能に関する情報が含まれているが、これまでは個葉での光合成ストレス診断に用いられるのみであった。しかし最近、生態系レベルの大きなスケールで、クロロフィル蛍光と生態系光合成量との相関が大変高いことがわかってきている（Kato et al, in prep. など）。特に NASA のグループが、人工衛星 GOSAT(JAXA)による太陽光誘起クロロフィル蛍光 (Solar-Induced Fluorescence: SIF) 測定を世界に先駆けて進めており（図2: Frankenberg et al., 2011, GRL）、この SIF を普遍的な指標として、作物での光合成量推定に生かすことが非常に期待されており、欧州宇宙機関(ESA)では SIF 観測を主目的とした衛星(FLEX)の打ち上げが 2022 年以降にすでに計画されている。

一方で、従来の分光放射計、光ファイバ、光ファイバ用スイッチを利用する方法では、高精度だが高価で（二百万円以上）あるため多点での観測が困難であった。また SIF 計算に必要な波長も観測されており、結果としてデータ容量が大きくなるために、保存・解析に大変な労力がかかるという問題があった。

そこで本研究では、中程度の精度を持つ安価かつデータ処理の容易な分光センサーを開発し、専門家以外にも普及可能な計測センサーの確立を目的とする。

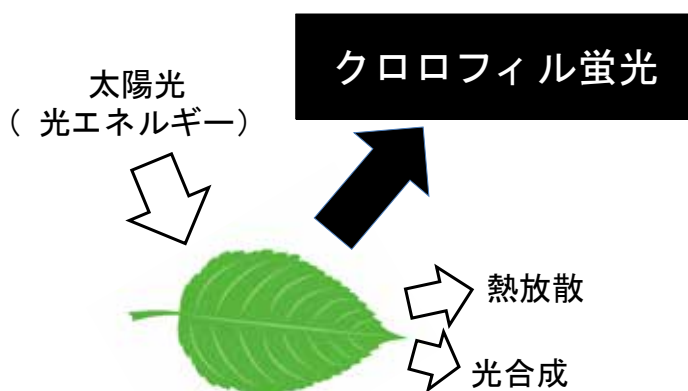


図1 個葉のクロロフィル蛍光放射

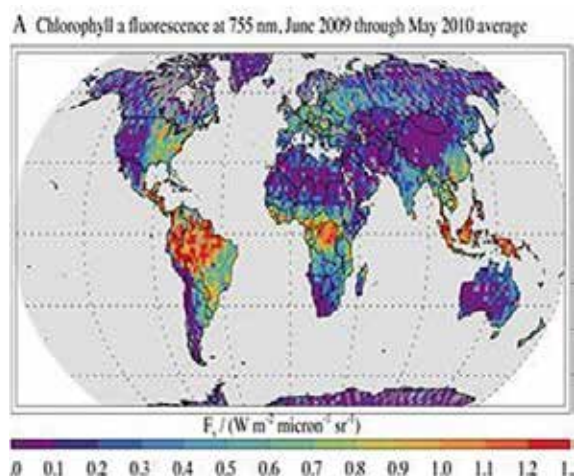


図2 衛星 GOSAT によって観測された SIF の分布(Frankenberg et al., 2011, GRL) 生態系光合成量と分布が非常に近い

2. センサーの開発

I. SIF の計算方法

SIF の計算には、下向きの太陽光と上向きの生態系からの反射光の二つの光における 760nm 付近（酸素吸収帯 O₂-A の中心波長）と 750nm 付近（酸素吸収帯でない場所）の計 4 つのエネルギー値が必要である。観測された 750、760nm 付近の放射照度から、Fraunhofer Line Depth 法 (Maier et al., 2003, ASA Special Publication) を利用し、次のように SIF を計算する。

$$\text{SIF} = (L_{760} \cdot E_{760} / E_{750} * L_{750}) / (1 - E_{760} / E_{750}) \quad \text{式 (1)}$$

ここで、E・L はそれぞれ太陽・生態系上面からの放射照度、750、760 は各波長帯（750、760nm）を示す。

II. センサー仕様

上・下向きの 760・750nm 付近の 4 つのエネルギー値を野外で連続測定するために、(株) 日本環境計測の PAR（光合成有効放射）センサーに利用される全天候型の筐体を利用した（図 3）。ガラスドームの内側に、広角で光を取り込むためのアクリル拡散板を置き、その下部は入射光を平行化するための直径約 2.0mm の空洞が空いている。さらに下部には特定の波長のみを透過させるバンドパスフィルターと、エネルギーを検出するためのシリコン（Si）フォトダイオード（浜松フォトニクス社製）があり、最下部に温度とゲイン制御のための基盤が装着されている。

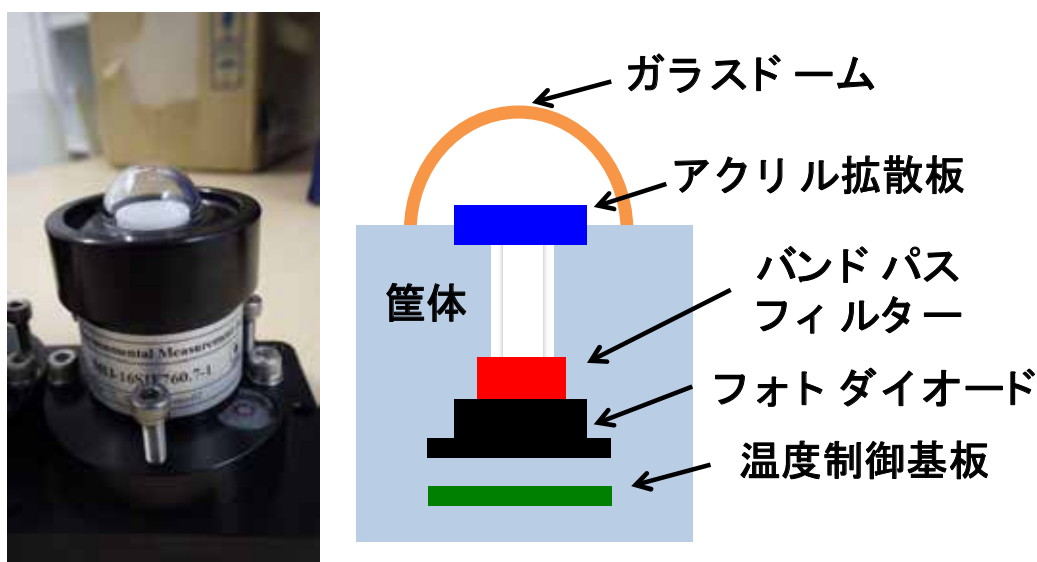


図 3 開発中センサーの外観（左）と内部構造（右）。（株）日本環境計測に特注

760nm 付近のバンドパスフィルターは、中心波長を 760nm 付近にもち、かつより狭い FWHM (Full Width Half Maximum : 全幅半値、狭くなると感度が高くなる) を持つものが望ましいが、一方で狭くしすぎると製品ロットや温度に依存してフィルター感度が大きく変化し、さらにより微弱なエネルギーを安定して増幅しなければならなくなる問題があるために、本研究では中程度の 1.0nm の FWHM を持つ市販フィルターを採用した (表 1)。

表 1 SIF センサーに利用したバンドパスフィルター仕様

	Fraunhofer line (760nm)	Reference (750nm)
Manufacturer	Alluxa	Edmund Optics.
CWL (nm)	760.7	750
FWHM (nm)	1.0	10.0
Coat	Hard	Hard
OD	4	4

3. センサー温度依存性についての検証実験

I. 実験概要

前記のように仕様と測器形状はすでに決定したが、残された最大の問題はフィルター性能が温度によってどの程度変化するかである。この温度依存性は、温度変化によるフィルター素材・コーティング (金属皮膜) の厚みの増減が、入射光の透過・屈折性能を変化させるためであり、もともと仕様に含まれている。この温度依存性は、NDVI 等の従来の植生指標においては、FWHM が 40-60nm という幅の広い感度を持つフィルターで十分であることや、同程度の温度依存性を持つ上・下向きの 2 つのエネルギーの比 (反射率) を用いて影響がキャンセルされるために問題にならなかった。しかし、本研究で開発する SIF センサーは、特に 760nm フィルターの FWHM が 1.0nm と比較的狭いことや、SIF 計算にエネルギーの絶対値を利用するため、温度の影響を強く受けることが予想される。

そこでフィルターの中心波長 (Central Wavelength: CWL) と全幅半値 (FWHM) の温度依存性及び、実際に野外で測定された分光放射データから計算した SIF エネルギーへの影響を調べた。

実験は北海道大学の室温をエアコンで 25°C 前後に調整した実験室内で行われた。発泡スチロールでできた保温箱内で、インラインフィルタホルダ (FHS-UV、Ocean Optics 社) にバンドパスフィルター (760.7-1 OD4 Ultra Narrow Bandpass filter、Item No. 7027、Alluxa 社) を装着した (図 4)。フィルター片面に、人工光源 (HL2000、Ocean Optics 社) からの放射光を光ファイバ (長さ 1m、径 600µm 石英クラッド、ステンレスコート、PTI 社、特注品) によって垂直に導き、反対側の面への透過光を同光ファイバによって分光放射計 (HR4000、Ocean Optics 社) へ送った。分光放射データは専用ソフト (OceanView、Ocean Optics 社) とノートパソコン (TransBook T100TAM、Asus 社) を利用し、1 分間隔で測定した。また、温度を測定するための銅コンスタンタン熱電対 (T 型被覆熱電対 VTF-100M、佐藤商事) をフィルター側面に接着し、データを USB データロガー (T7、

Labjack 社)と専用ソフト (LogM、Labjack 社)とノートパソコン (TransBook T100TAM、Asus 社) を利用し 1 分間隔で測定した。

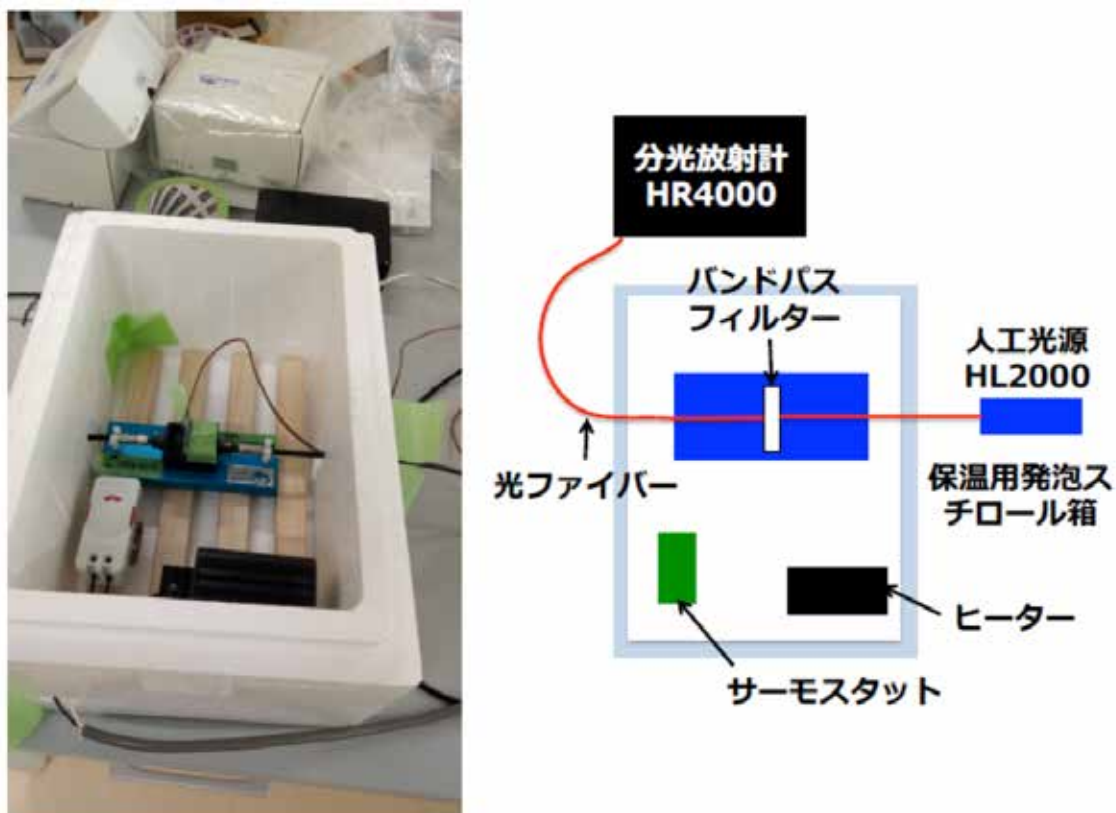


図 4 温度依存性検証実験の写真 (左) と説明 (右)

フィルター温度は、 $+60^{\circ}\text{C}$ から $+1^{\circ}\text{C}$ まで約 3 時間かけて変化させた。はじめにヒーター (制御盤用ヒーターCSK060 シリーズ (樹脂カバー付)、06030.9-00、STEGO 社) によりサーモスタット (AM2-XB1、STEGO 社) を 60°C に設定した状態で、フィルター温度が 60°C 以上になるまで上昇させた。その後、ヒーター電源を切り、室温程度まで温度が下がった後に、保冷剤を保温箱内の空きスペースに 1 パックずつ加えて行き 1°C まで低下させた。

II. 結果と考察

透過率のスペクトルは、フィルター温度によって僅かに長波方向に変化した (図 5)。FWHM は、 $+0.11\text{nm}/10^{\circ}\text{C}$ の割合で大きくなったが、相対的なシフト (傾き: 0.0111nm , 切片: $3.48\text{ nm} / 10^{\circ}\text{C}$) は $+0.3\%/10^{\circ}\text{C}$ と小さかった (図 6)。中心波長 (CWL) は、 $+0.043\text{nm}/10^{\circ}\text{C}$ の割合で長波方向にシフトした (図 7)。これは昇温でフィルターの厚み等が変化するために起こる現象であり、仕様上不可避であると考えられる。

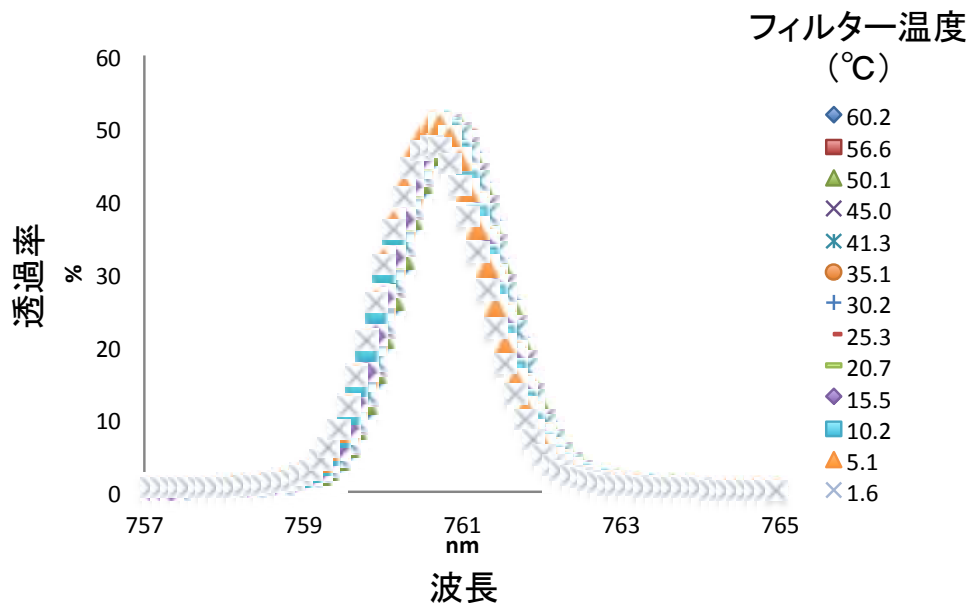


図5 透過率分布とフィルター温度の関係

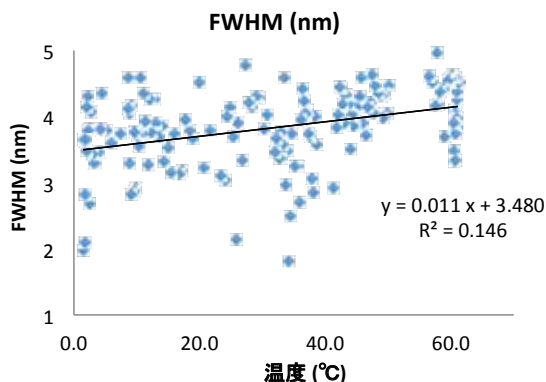


図6 FWHM とフィルター温度の関係

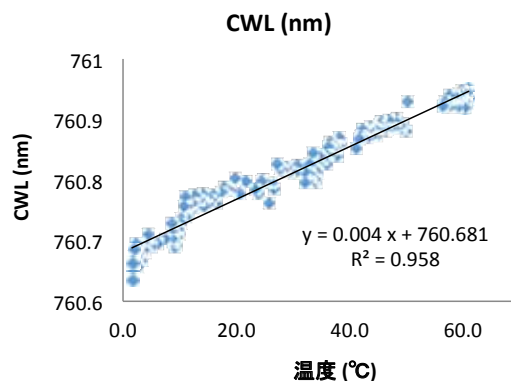


図7 CWL とフィルター温度の関係

これらの温度による変化が、SIF 計測に与える影響を把握するために実際に野外で測定されたスペクトルデータを利用して SIF を計算した。北海道美唄市の湿原において、温度依存性測定に用いられたのと同じ HR4000 分光計で測定されたスペクトルデータ (2017/5/18 12:44) から、式1 を利用し SIF を計算した。

その結果、式1 の L_{760} と E_{760} にあたる 760nm 付近の生態系・太陽からのエネルギーはそれぞれ+2.82%/10°C と+2.33%/10°C の温度依存性を持ち(図8)、SIF は+3.62%/10°C (0°C における計算) の温度依存性を持った(図9)。これは、ヒーターやペルチェ素子を利用した温度補償回路によって温度を例えば±5°C (0-50°C時) に固定可能であれば、±2.0% 以内の誤差に抑えることが可能であり、実用可能な精度を保つことができることを示した。

本実験により温度依存性はそれほど高くないことがわかったため、開発はある程度成功

したと考えられる。しかしながら、野外での簡易テスト実験では、結露問題や温度補償回路の部分において設計段階からのさらなる改良が必要であることが判明したために、2018年度成長期での野外検証は断念し、次項で説明する既存データによる計算実験を行った。

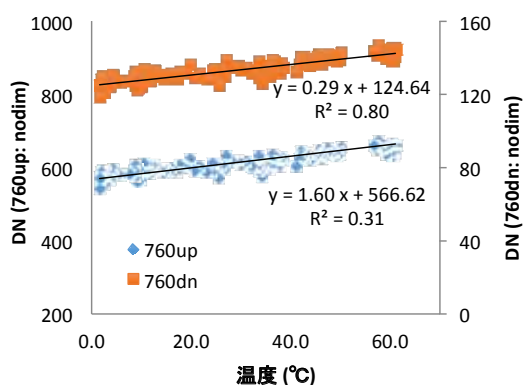


図8 760nm 付近の生態系と太陽エネルギー (760dn と 760up) とフィルター温度 (Temp (°C)) の関係

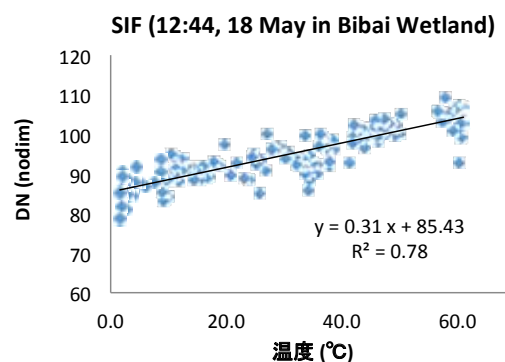


図9 SIF とフィルター温度の関係

4. 野外既存データによる検証実験

植物季節観測ネットワーク (Phenological Eyes Network: PEN, <http://www.phenology.org>) による 2006 年の長期間連続観測された分光放射データを利用し、ミズナラ・ダケカンバが優占する落葉広葉樹林 (TKY; 岐阜県高山市) において、林冠上下・林床上方向の 760nm 付近の O_2-A 吸収帯の SIF を計算し、開発中のセンサーの利用可能性を調べた。

I. 実験概要

岐阜県高山市の落葉広葉樹林 TKY (岐阜大高山試験地; 北緯 36°09′、東経 137°25′) に、中程度分解能を持つ野外全天候型分光放射計 MS700 (英光精機) を組み込んだ半球分光放射計 (HSSR) が林冠上高さ 18m と林床高さ 2m に設置されており、通常は鉛直上向きになっているセンサーを、5 もしくは 10 分おきに回転させて鉛直下向きにし、上下向き両方向の分光放射データを取得している (図 10)。林冠は、ダケカンバ、シラカンバ、ミズナラなどが形成し、林床はクマイザサに覆われている。

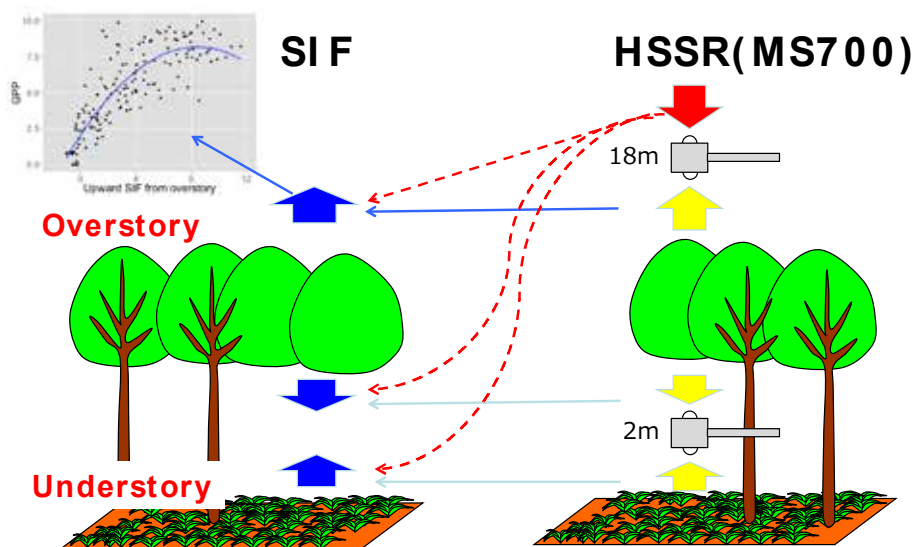


図 10 鉛直上下方向の SIF 推定法

II. SIF 計算法

中程度の観測波長間隔 (3.3 nm) と全幅半値 (10 nm) を持つ HSSR では、O₂-A のフラウンホーファー線の中心波長から観測波長がずれることや、同形式の分光放射にもかかわらず複数機器間の観測波長の差によって 760nm 付近の 2 つの波長の放射照度から計算する通常の 2FLD 法では、サイト間や機器交換前後での計算 SIF の数値が大幅に異なってしまうという器差に起因する問題があった。そこで、O₂-A 帯付近の数十 nm の区間の複数の観測データを利用した area-ratio FLD 法 (aFLD 法, Tsujimoto, Kato et al., 2019, 準備中) を新たに考案し、次のように SIF を計算した。

$$SIF = \frac{A_2 - \frac{A_1}{B_1} B_2}{\lambda_{\text{right}} - \lambda_{\text{left}}}, \quad \text{式 (2)}$$

ここで、A・B はそれぞれ太陽・生態系上面からの放射照度、1、2 はベースラインとスペクトル曲線の間とスペクトル曲線とゼロ線との面積を示す。また λ_{left} と λ_{right} は対象区間の左右端の波長を示し、本研究では 750nm と 780nm をそれぞれ利用した。林冠上の上向きのセンサーが捉える太陽スペクトルと、a.林冠上の下向き、b.林床上向き、c.林床下向きの反射・透過スペクトルを利用して aFLD を適用すると、1.林冠から上向き、2.林冠から下向き、3.林床から上向きの SIF 放射が計算できるとした。

III. 結果と考察

SIFの季節変化(図11)は、他の植生指数NDVI(正規化植生指数)とGRVI(緑色植生指数)と非常に近い動きをしていた(図12)。さらに全く別の方法で測定された生態系光合成量(渦相関法によって測定された総一次生産=CO₂吸収量)と同様の時間変化をしており、植生の光合成活性の変化を表現していると考えられる。またSIFの値の大きさは、林冠上向き、林冠下向き、林床上向きの順で小さくなり(図11)、日射のより強く当たる順番を示唆していると考えられる。

SIFの林冠上下方向・林冠林床上向きの各比は、5月の成長初期と10月ごろの成長後期には高く、盛夏期には低かった(図12)。これは個葉の色素濃度や厚みなどの光学的な性質が変化し、SIFの内部の放出量と、個葉・葉群内での散乱・再吸収による消散の季節変化を表現していると考えられる。また、成長期間の積算SIFの林冠と林床の比はAPAR(吸収光合成有効放射)とNPP(純一次生産)における比と同様であった。

以上のことから、本研究で中程度の解像度を持つ分光放射計データから計算されたSIFは、落葉広葉樹林の葉の光合成活性(すなわちCO₂吸収量)の季節変化と鉛直方向の変化と非常に密接に結びついており、開発中のセンサーによって、様々な森林生態系におけるCO₂吸収量推定が容易になる可能性が非常に高いことがわかった。

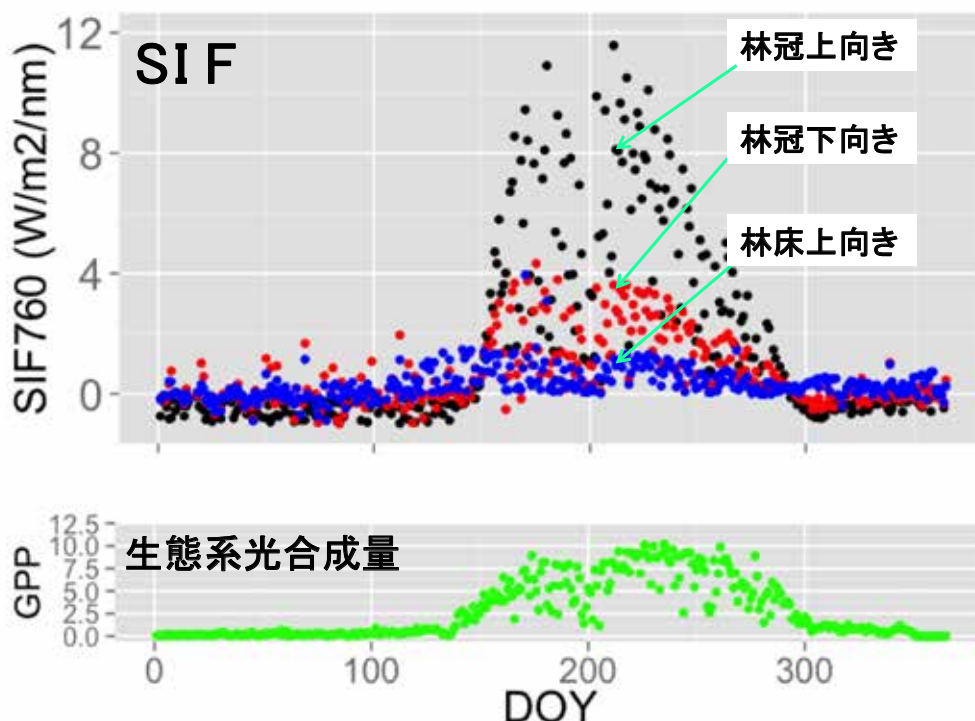


図11 林冠上下、林床上向きのSIF放出と生態系光合成量の季節変化

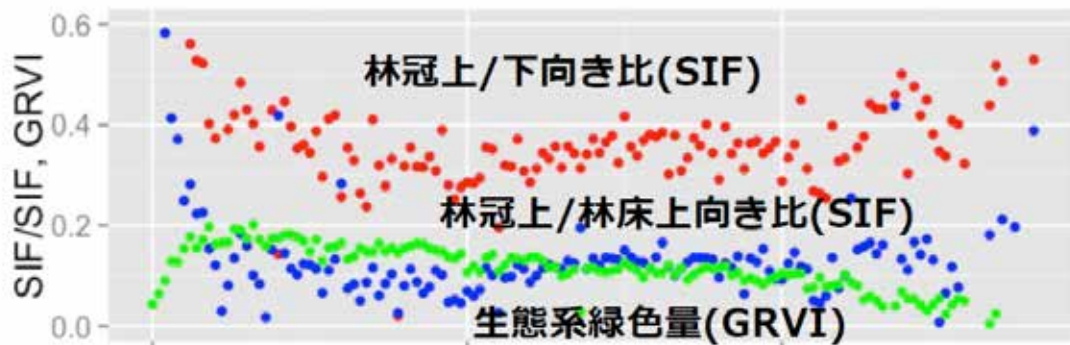


図 12 林冠上下、林床上向きの SIF 放出の比と GRVI の季節変化

5. まとめ

本研究で開発中のセンサーは、その基本形状と機能が決定しながらも、フィルター感度の温度依存性が不明であったために、温度制御回路の設計が進まないという問題があった。しかし今回行った、+1°Cから+60°Cまでの温度変化に対する透過スペクトル測定と美唄湿地のスペクトルデータによるテスト計算によると、フィルター温度 0°Cにおいて SIF は 10°C温度上昇で+3.62% 増加する傾向がわかった。これは、例えば温度補償回路によってフィルター温度を $50 \pm 5^\circ\text{C}$ で固定できれば、比較的小さな誤差 ($\pm 1.53\%$ 以内) に抑えられると考えられる。これにより、センサーの開発がさらに進むであろう。

次のステップでは温度補償回路が稼働した状態（完成品）でのセンサー感度の温度依存性を、室内と野外で検証する必要がある。それにより本センサーの実用可能性を担保し、安価で高精度なセンサーの普及が可能となる。

植物生育状況を調べる方法としての汎用性の高さ：開発する SIF センサーは、植物個体から群落までの様々な空間スケールに利用でき、さらに小型・軽量であるため地上観測タワー・ドローン・トラクター・航空機などの様々な場所に搭載可能な比較的安価な装置であるところに発展性がある。それにより、特に農地では大規模農場における広域・即時的モニタリングに貢献することで、肥培管理・農薬散布における基礎的情報を提供することが可能であり、それによる肥料や農薬の撒きすぎを抑え、農業機械の燃料を削減し、クリーン農業・コストダウンを達成することに大きく貢献することができる。

6. 謝辞

本研究では、公益財団法人 JFE21 世紀財団による助成金によって支援されたことを感謝いたします。また、新しいセンサーの試作に、(株) 日本環境計測の代表取締役・片山博之工学博士に大変ご尽力いただいたことを感謝いたします。

7. 学会発表

Yuma Sakai, Tomomichi Kato, Katsuto Tsujimoto, Hideki Kobayashi, Kenlo Nishida

Nasahara, Tomoko Akitsu, Shohei Murayama, Hibiki Noda, Hiroyuki Muraoka, Constructing the simulation model to estimate the SIF using remote sensing data, American Geophysical Union 2018 Fall Meeting, 12 December 2018, Walter E. Washington Convention Center, Washington DC, USA

Tomomichi Kato, Hideki Kobayashi, Yuma Sakai, Hibiki Noda, Tatsuya Miyauchi, Kenlo Nishida Nasahara, Tomoko Akitsu, Shohei Murayama, Hiroyuki Muraoka, Bottom-up and top-down approach investigations on solar induced fluorescence for estimating the photosynthesis at ecosystem scale by both ground-based measurement and modeling (Invited), American Geophysical Union 2018 Fall Meeting, 10 December 2018, Walter E. Washington Convention Center, Washington DC, USA

加藤 知道, 水野 一樹, Relationship in anomalous changes in solar-induced chlorophyll fluorescence to the environmental factors for last 10 years, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 幕張メッセ, 千葉市, 2018 年 5 月 24 日

酒井 佑禎, 加藤 知道, 辻本 克斗, 小林 秀樹, 奈佐原 顕郎, 秋津 朋子, 村山 昌平, 野田 響, 村岡 裕由, The simulation model of energy partition in leaf scale to estimate GPP from SIF, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 幕張メッセ, 千葉市, 2018 年 5 月 24 日

酒井 佑禎, 加藤 知道, 辻本 克斗, 小林 秀樹, 奈佐原 顕郎, 秋津 朋子, 村山 昌平, 野田 響, 村岡 裕由, 太陽光誘発クロロフィル蛍光から見る個葉での光合成量, 第 65 回日本生態学会大会, 札幌コンベンションセンター, 札幌市, 2018 年 3 月 16 日