

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

2-1903 GOSAT-2 による太陽光誘起クロロフィル蛍光を利用した生態系光合

成量推定の高精度化

令和元年度～令和3年度

High-Precision Estimate of Ecosystem-Level Photosynthesis with Solar-Induced Fluorescence
Detected by Satellite GOSAT-2

〈研究代表機関〉

研究代表機関 北海道大学

〈研究分担機関〉

東北大学

国立研究開発法人 海洋研究開発機構

京都大学

琉球大学

〈研究協力機関〉

国立研究開発法人 国立環境研究所

令和4年5月

目次

I. 成果の概要	・・・・・・・・・・	1
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究目標		
4. 研究開発内容		
5. 研究成果		
5-1. 成果の概要		
5-2. 環境政策等への貢献		
5-3. 研究目標の達成状況		
6. 研究成果の発表状況		
6-1. 査読付き論文		
6-2. 知的財産権		
6-3. その他発表件数		
7. 国際共同研究等の状況		
8. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
II-1 地上観測データベースによる GOSAT-2 の SIF 検証	・・・・・・・・・・	12
(北海道大学、京都大学、琉球大学)		
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-2 光合成・蛍光・反射分光同時測定系を用いた個葉光合成推定モデルの改良	・・・・・・・・・・	27
(東北大学)		
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-3 放射モデル解析に基づく地上・衛星 SIF 観測の標準化	・・・・・・・・・・	41
(国立研究開発法人 海洋研究開発機構)		
要旨		

7. 研究開発目的	
8. 研究目標	
9. 研究開発内容	
10. 結果及び考察	
11. 研究目標の達成状況	
12. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細 57
IV. 英文 Abstract 64

I. 成果の概要

課題名 2-1903 GOSAT-2 による太陽光誘起クロロフィル蛍光を利用した生態系光合成量推定
の高精度化

課題代表者名 加藤 知道 (北海道大学 准教授)

重点課題 主: 【重点課題7】 気候変動への適応策に係る研究・技術開発

行政要請研究テーマ (行政ニーズ) 非該当

研究実施期間 令和元年度～令和3年度

研究経費

108,000 千円 (合計額)

(各年度の内訳: 令和元年度: 36,000 千円、令和2年度: 36,000 千円、令和3年度: 36,000 千円)

研究体制

(サブテーマ1) 地上観測データベースによる GOSAT-2 の SIF 検証 (北海道大学)

(サブテーマ2) 光合成・蛍光・反射分光同時測定系を用いた個葉光合成推定モデルの改良 (東北大学)

(サブテーマ3) 放射モデル解析に基づく地上・衛星 SIF 観測の標準化 (国立研究開発法人 海洋研究開発機構)

研究協力機関

国立研究開発法人 国立環境研究所

本研究のキーワード 衛星リモートセンシング、地上リモートセンシング、高分解能分光放射測定、
個葉光合成モデル、3次元放射伝達モデル、炭素循環

1. はじめに (研究背景等)

陸域生態系は光合成によって大気中の CO₂ を吸収し、温暖化を緩和する役割を担っている。そのため、将来の気候変動の予測精度を向上させるためには、陸域植生の光合成活動の時空間分布を正確にモニタリングし、将来予測モデルのベースライン情報を提供することが必要不可欠である。2018年10月に打ち上げられた我が国の温室効果ガス観測技術衛星 GOSAT-2 (環境省/国立環境研究所/JAXA) は大気 CO₂/CH₄ 濃度とともに、新しい植生リモートセンシング指標である太陽光誘起クロロフィル蛍光 (Solar Induced Fluorescence: SIF) をプロダクトとして提供する。この SIF は、生態系スケールの光合成量 (総一次生産: GPP) と高い相関関係があるとの報告があり、光合成活性の普遍的な指標として、生態系 GPP の推定に生かすことが期待されている。

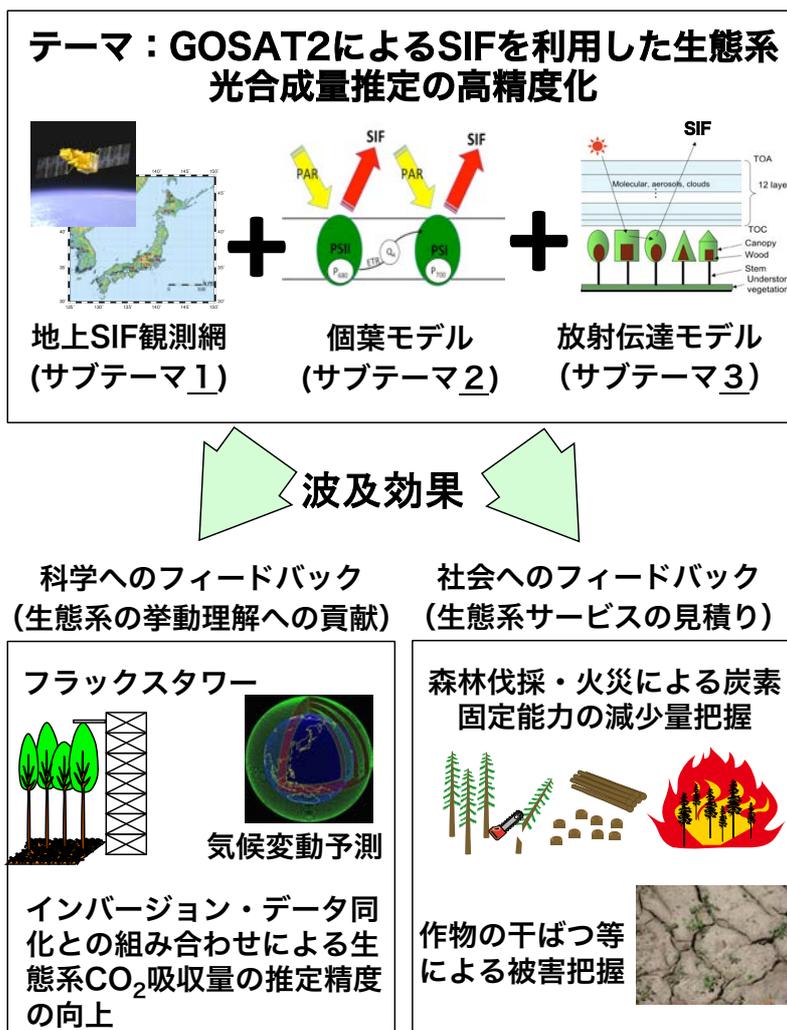


図 0

2. 研究開発目的

これまで GOSAT シリーズは衛星 SIF 観測のさきがけとして大変活躍してきたが、一方で大きな不確実性を含んでいることが予想される。たとえば、GOSAT は一日一回（13 時ごろ）測定したデータの中から、晴天日データのみをコンポジットしてプロダクトを提供しているが、日変化・悪天日のデータは原理上、観測ができない。また、個葉から放出された SIF は隣接している葉・枝・土壤に一部が吸収・散乱されるが、生態系上面から放出された SIF しか観測していない衛星は、生態系下層の SIF を十分に捕捉できていない。そのため、長期間の生態系光合成量の見積もりには、大きな誤差が生じている可能性がある。そこで研究代表者らは、環境研究総合推進費（若手枠 2RF-1601；代表：加藤知道、分担：小林秀樹、2016-2018 年度）で SIF の包括的モデルの開発を進め、落葉広葉林サイト（岐阜県高山市）での検証を進めてきた。しかし、より利用可能性を高めるためには、多様な生態系タイプをカバーする地上 SIF 観測データを整備し、開発したモデルをした SIF 検証体制を強化することが重要との考えに至った。

そこで本研究では、現在個別に整いつつある地上 SIF 観測サイトを集約・拡大するとともに個葉・放射伝達モデルのさらなる改良を行い、様々な生態系タイプにおいて GOSAT-2 からの SIF データを検証・評価することによって、SIF による生態系光合成量の推定精度を向上させること目的とする。

3. 研究目標

全体目標	地上 SIF 観測データベースを構築し、GOSAT-2 の SIF データを検証する基礎を作る。次に個葉光合成推定モデルの改良と、個葉から生態系（衛星）レベルへの SIF による光合成量のスケールアップのための放射伝達モデルの改良を実施し、地上・衛星 SIF 観測データの標準化を行う。
サブテーマ 1	地上観測データベースによる GOSAT-2 の SIF 検証
サブテーマリーダー/所属機関	加藤知道／北海道大学
目標	高分解能分光放射計による既設 4 サイトからのデータ提供と、新規 1 サイト設置による地上 SIF 観測データベースを構築する。また各サイトの SIF 計算とその挙動の比較を行う。さらに中分解能分光放射計による SIF 観測の可能性を検討する。
サブテーマ 2	光合成・蛍光・反射分光同時測定系を用いた個葉光合成推定モデルの改良
サブテーマリーダー/所属機関	彦坂幸毅／東北大学
目標	光合成と蛍光と熱放散へのエネルギー分配が育成条件や種によってどのように異なるかを解析し、蛍光と反射分光から光合成速度を予測する最適な方法を検討する。
サブテーマ 3	放射モデル解析に基づく地上・衛星 SIF 観測の標準化
サブテーマリーダー/所属機関	小林秀樹／海洋研究開発機構
目標	地上・衛星 SIF 観測の標準化と、それに基づく高精度広域光合成マッピングをするため、様々な環境及び観測条件における樹冠レベルの SIF を再現可能な放射伝達モデルをさらに改良する。そして観測データとの比較を通じてモデルの精度を明らかにしつつ、光合成推定のアルゴリズム開発に結びつける。

4. 研究開発内容

課題全体： 衛星や航空機観測などのリモートセンシング観測において、GOSAT 1 号機/2 号機、OCO-2/3、GOME-2、TROPOMI など 2010 年頃から太陽光によって誘起されるクロロフィル蛍光（SIF）の観測データが利用できるようになってきた。しかしながら衛星や地上観測で得られる SIF と同じ太陽天頂角一観測幾何条件で観測したものではない。衛星観測 SIF は観測日時における、太陽天頂角・センサの走査角に依存する。また地上 SIF データは、観測手法が研究プロジェクトによって様々であり、コサインコレクタによる下半球からの分光放射照度測定を計測する方法や狭視野角（視野角 25° 程度）による特定の天頂角・方位角における観測値などがある。そこで、GOSAT-2 による SIF プロダクトの特性を統合的に検証するために、既存の地上 SIF 観測サイト（寒帯-温帯の 4 サイト）のデータベースを構築すると共に、新たな熱帯サイトを立ち上げる（サブテーマ 1）。さらに個葉における SIF の生成・放出を計算する光合成モデルの改良（サブテーマ 2）及び、その個葉から放出された SIF が生態系内外に輸送される過程を計算する 3 次元放射伝達モデルを利用し（サブテーマ 3）、GOSAT-2 の様々な SIF プロダクトを利用した生態系光合成量(Gross Primary Production, GPP)の推定を可能にするための指針（SIF の標準化）を示す。

サブテーマ 1 : 地上観測データベースによる GOSAT-2 の SIF 検証

既存の地上観測 4 サイト（温帯落葉広葉林（岐阜県高山市）・温帯常緑針葉林（滋賀県大津市）・水田（茨城県つくば市真瀬）・亜寒帯常緑針葉林（アラスカ・フェアバンクス））と、さらに亜熱帯照葉樹林（沖縄県国頭村与那）に新規に高分解能分光放射計を設置し、分光放射データをインターネット経由でサーバー（北大）に集結させ、SIF を計算する。その際に観測・データ処理プロトコルの統一的な取り扱いをおこなう。SIF 計算における計算手法の影響や、機器の設置・管理の仕方などを整理し観測プロトコルをまとめる。また、各サイトにおいて渦相関法 GPP および植生指数との関係を調べ、地上観測 SIF による生態系光合成活性の再現性を調べる。さらに、衛星（GOSAT-2 等）による SIF と本研究で求めた地上観測 SIF を比較し、衛星による SIF 観測精度の検証を行う。それによる生態系光合成量の推定精度について、サブテーマ 2・3 と共同で総合的な評価を行う。

サブテーマ 2 : 光合成・蛍光・反射分光同時測定系を用いた個葉光合成推定モデルの改良

人工気象室を用いて、一年草シロザを様々な光・栄養塩・温度環境で育成する。さらに、東北大学の実験圃場にて様々な機能群に属する植物を育成する。これらの植物の葉を光合成・蛍光・反射分光同時測定装置を用いて測定を行い、光合成（光化学反応）と蛍光と熱放散への分配が育成条件や種によってどのように異なるかを解析し、蛍光と反射分光から光合成速度を予測する最適な方法を検討する。人工気象室と実験圃場の測定結果をまとめ、種間差を考慮しつつクロロフィル蛍光から光合成速度を推定するモデルを複数構築し評価する。構築したモデルを適用し、蛍光から光合成速度の変動を予測できるか検証する。

サブテーマ 3 : 放射モデル解析に基づく地上・衛星 SIF 観測の標準化

SIF の観測値は、観測幾何条件によって大きく変化する。そのため、SIF データから生態系光合成量を推定するためには、様々な幾何条件で観測された SIF データを標準化して光合成モデルで利用する必要がある。本サブテーマでは、地上、衛星 SIF データの標準化が実施可能な放射伝達モデル (FLiES-SIF) の開発を行い、様々な SIF 観測値を GPP 計算に利用可能にするための指針 (SIF の標準化) を以下のように決定する。

- ① 観測角度の標準化：放射伝達モデルを用いて地上・衛星を含むすべての観測 SIF を FLiES-SIF のモデル計算によって直下視（天頂角=0°）における単位立体角あたりの分光放射エネルギー（輝度, $\text{mW m}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{str}^{-1}$ ）に補正する。
- ② 地上 SIF 観測値の利用における観測視野角の標準化：地上観測 SIF の観測視野に含まれる観測タワーなどの人工構造物の寄与を除去して①の方法で直下視相当の SIF に変換する。

- ③ 観測 SIF から群落内葉群からの SIF 総量の推定：光合成推定に必要となる植物群落から放射される全蛍光のエネルギーを植生上端で観測される SIF から計算するために放射伝達モデル FLiES-SIF を使用する。

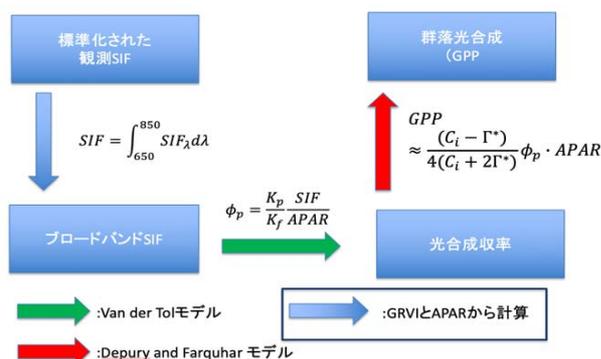


図 3.5 本研究で開発した SIF データを用いた群落光合成推定アルゴリズムの概要。

さらにこの標準化された SIF データを入力値とする新たな GPP 推定アルゴリズムを開発し（図 3.5）、地上サイトで精度検証を行う。そして、GOSAT-2 と TROPOMI のデータを用いて日本周辺で GPP の推定を行う。

5. 研究成果

地上 SIF 観測ネットワークと、データの集約的管理を行う体制の構築を行った。先行研究による既設の 4 サイト（温帯落葉広葉樹林（TKY：岐阜県高山市）、水田（MSE：茨城県つくば市真瀬）、温帯常緑針葉樹林（KEW：桐生）、亜寒帯常緑針葉樹林（PFA：アラスカ・フェアバンクス））に加え、本研究で新規に設置した 1 サイト（亜熱帯常緑広葉樹林（YNF：沖縄県国頭村与那））からの高解像度分光放射データを北海道大学のサーバーに定時転送し、そこから複数地点の SIF を計算し、GOSAT-2 と比較した（図 1.1）。その結果 GOSAT-2 SIF の有効なデータ点数が多い亜寒帯常緑針葉樹林、温帯落葉広葉樹林、水田の 3 サイトでは、月平均 SIF 値の衛星-地上観測の間の相関係数は 0.8 以上となり再現性が高いことを示した（図 1.13）。このように、継続的に多地点で衛星 SIF を検証するシステムを保有することで、地球環境変化の早期発見に貢献することが非常に期待される。さらに本研究グループでは、本研究計画外で設置された 4 サイト（コムギ（HTJ：北海道札幌市羊ヶ丘）、湿地（BBY：北海道美唄市）、温帯落葉針葉樹林（FHK：山梨県富士吉田市）、温帯落葉針葉樹林（TSE：北海道幌延町））のデータについても追加収集しており（図 1.1）、これらのデータベースは、国内外の衛星 SIF 観測研究に役に立てられることが期待される

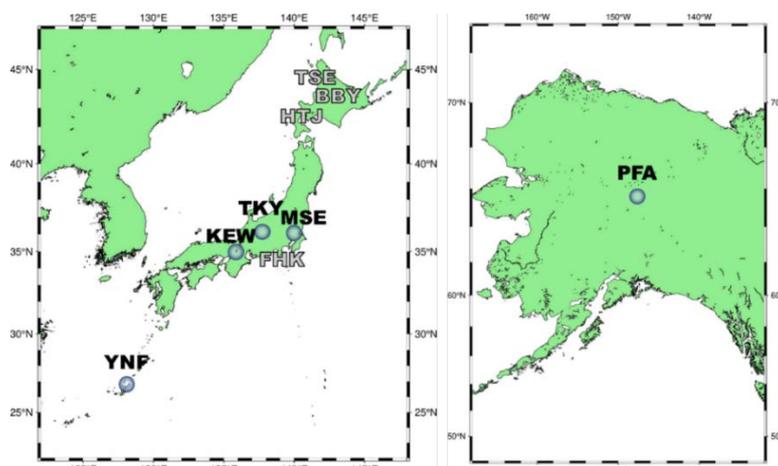


図 1.1 地上 SIF 観測ネットワーク（黒字：本研究設置サイト、白抜き：他研究設置サイト）

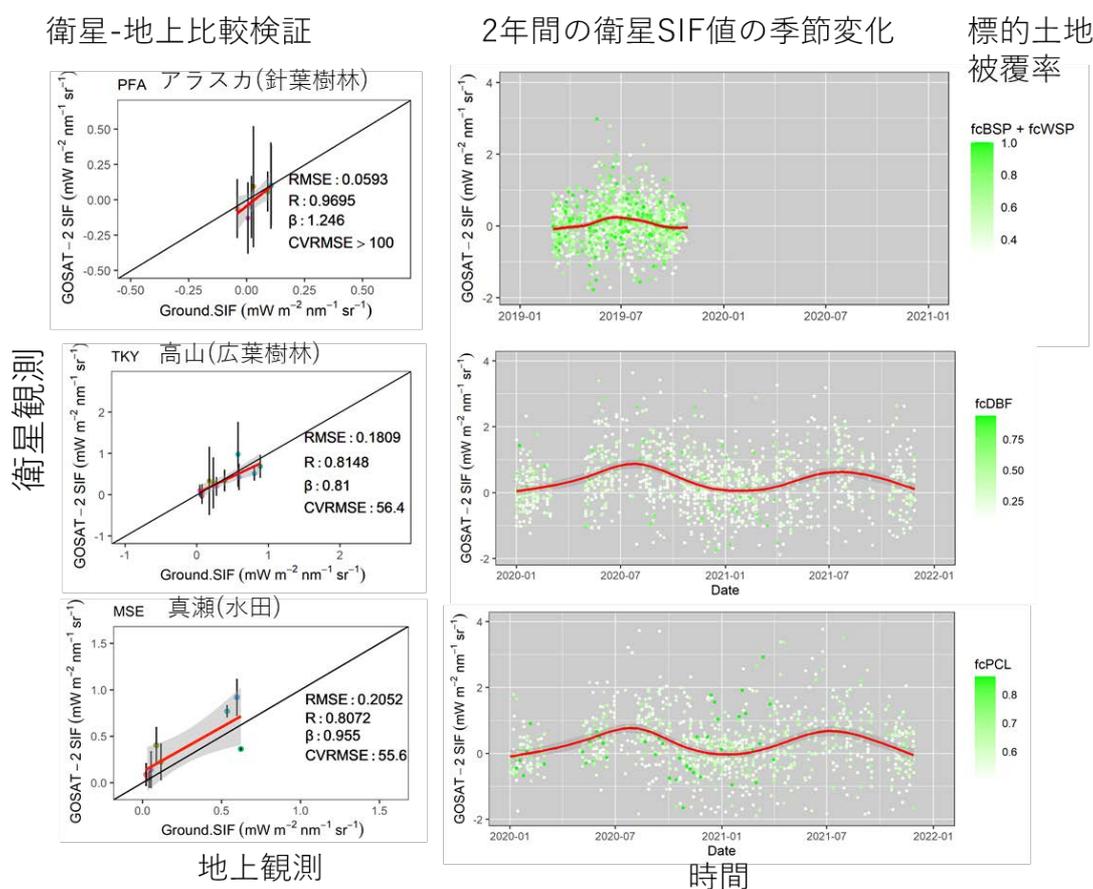


図 1.13 (右)アラスカフェアバンクス、高山、真瀬に相当する地点について観測された GOSAT-2 衛星 SIF プロダクトの 1-2 年分の季節変化とその平滑曲線(赤線)。(左)衛星観測と地上観測の同期サンプルについての月平均 SIF の相関。赤線で線形回帰、灰色は上下誤差範囲について SE を示した。斜めの黒実線は 1:1 を示す。R は相関係数、RMSE は平均二乗偏差、 β は線形回帰の傾き係数、CVRMSE は変動係数を百分率で示した。

新たに開発した GPP アルゴリズムのパラメータ推定やアルゴリズムの検証を、岐阜県高山市にある落葉広葉樹林サイト (36°8' N, 137°25' E, 標高 1420 m) や茨城県つくば市の水田サイトで行った。これらの観測サイトではサブテーマ 1 がサイトレベルで SIF を観測しており、その SIF データを入力データとして利用した。図 3.14 は、本研究のアルゴリズムで推定した GPP とオリジナルの De Pury and Farquhar モデルによる GPP 推定値を比較したものである。フラックス GPP の季節変化 (図 3.14 黒線)

と比較すると De Pury and Farquhar モデルと比較して春先から秋までよく捉えていることが明らかとなった。この結果から提案アルゴリズムは、De Pury and Farquhar モデルを上回る精度で GPP を推定できることがわかった。

さらにサイトレベルでの検討結果を踏まえて提案アルゴリズムによる GPP の日本周辺域での広域推定を試みた。GOSAT-2 及び TROPOMI (GOSAT-GW の模擬データとして利用) の SIF データと、気象衛星ひまわりの日射データや GCOM-C/SGLI の生態系パラメータ (LAI/FAPAR) など用いて GPP を推定した結果が図 3.18 である。日本列島全体で春から夏にかけて光合成量が増加し秋にかけて減少するという季節変化が推定できていることがわかる。しかしながら、GOSAT-2 の陸上での SIF の観測点数は非常に限られており、1° メッシュでまとめても観測データが得られないメッシュが存在するなど、面的かつ高解像度での推定には限界があることが明らかとなった。その一方で、GOSAT-GW 模擬データとして利用した TROPOMI の SIF データで推定した図 3.18 を見ると光合成分布が詳細に推定できていることがわかる。2023 年以降に GOSAT-GW が打ち上げられ、高頻度・高空間分解能の SIF データが提供されるようになれば、空間分布評価に耐えうる解像度の GPP マッピングが実効できる期待される。

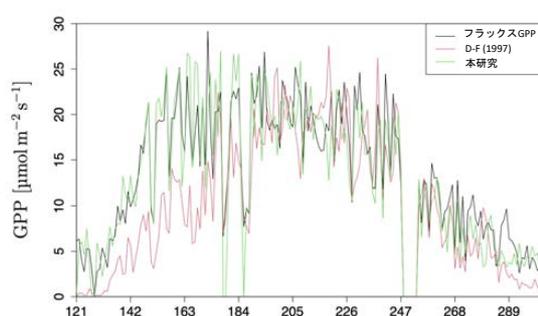


図 3.14 岐阜県高山市の落葉広葉樹林サイトにおける GPP の季節変化の比較。黒：フラックス GPP、赤：De Pury and Farquhar モデル (Depury and Farquhar, 1997)、緑：本研究。RMSE 誤差は、D-F model = 5.56, 本研究 = 3.68

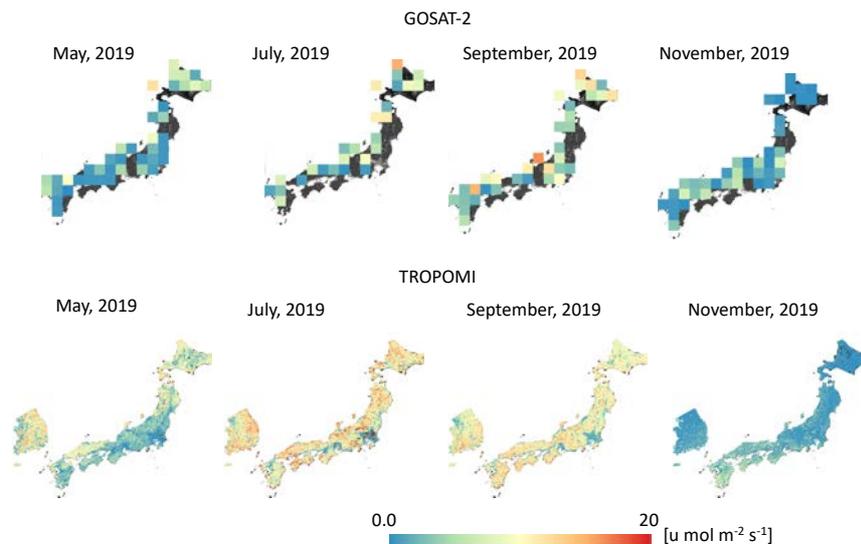


図 3.18 GOSAT-2(上)と TROPOMI (下) の SIF データによる日本周辺の光合成推定マップ(5月、7月、9月、11月の結果を抜粋)。日中 13 時付近の推定値。2019 年 3 月～12 月まで推定結果を月ごとに取りまとめて表示。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

本推進費課題では、GOSAT-2 等の衛星 SIF 観測を利用して、炭素収支の定量化に不可欠な情報である陸上植生の広域光合成推定 (Gross Primary Production, GPP) を行うことが可能な GPP 推定アルゴリズムを提案した。提案手法は、2023 年頃打ち上げが検討されている GOSAT-GW の SIF データにも応用可能であり、GOSAT-GW 計画における GPP の推定プロダクト作成への貢献が期待できる。

5-3. 研究目標の達成状況

課題全体：計画通りの達成があった。

地上 SIF 観測については、本計画範囲の 5 サイト (既設 4 サイト+新規 1 サイト) と、他個別研究による 4 サイトが追加され、合計 9 サイト分の高解像度分光放射計によるデータベースを構築することができた。それにより GOSAT-2 の SIF が、地上 SIF と同じレベルの信号強度や季節変化を測定していることを示し、検証ができる体制を構築することができた。また個葉光合成モデルについては、室内・野外実験によって、さまざまなストレスや植物種類に対応できるようにモデルが改良され、3次元放射伝達モデル FLiES-SIF で利用可能になっている。最後に、これまで開発してきた FLiES-SIF をさらに改良し SIF データから GPP を推定するアルゴリズムを開発し、日本周辺域で適用し 2019 年における GPP 分布推定を GOSAT-2 及び TROPOMI (GOSAT-GW の模擬データ)で行った。さらに温帯落葉広葉樹林と水田サイトにおいて衛星 GOSAT-2 を利用して GPP の季節変化を良く推定することに成功した。以上の結果から、計画通りの達成があったと判断した。

サブテーマ1：計画通りの達成があった。

既設4サイト（温帯落葉広葉樹林（岐阜県高山市）、水田（茨城県つくば市真瀬）、温帯常緑針葉樹林（桐生）、亜寒帯常緑針葉樹林（アラスカ・フェアバンクス））に加え、本課題による新規1サイト（亜熱帯常緑広葉樹林（沖縄県国頭村与那））における地上SIF観測が行われている。また本計画外にも別予算によって4サイト（コムギ（北海道札幌市羊ヶ丘）、湿地（北海道美唄市）、温帯落葉針葉樹林（山梨県富士吉田市）、温帯落葉針葉樹林（北海道幌延町））が設置された。そのため地上SIF観測のプロトコルはおおよそ構築でき、統一的なスペクトル測定・データ処理を通して、比較的均質なSIF観測データが北大サーバーに集積するデータベースの構築が完成した（図1.1）。これにより、多数の生態系タイプにおいてGOSAT等衛星SIFデータとの比較した結果、衛星観測は地上観測と同程度の精度を示していることがわかった（図1.13）。また中分解能分光放射計による温帯落葉広葉樹林（岐阜県高山市）のスペクトルデータから、新たにarea-ratio FLD（aFLD）という計算方法を提案し、高分解能分光放射計によるSIFとの間でスケールアップするアプローチを開発することに成功した（論文業績1）。これにより既存の中分解能分光放射計による過去の長期間にわたるSIFの時間変化の推定が可能になった。以上のことを考慮して、計画通りの達成があったと判断した。

サブテーマ2：計画通りの達成があった。

クロロフィル蛍光とPRIから高精度で光合成速度を予測する手法を確立することが本サブテーマの目標であった。まず、光阻害を受けた葉では蛍光のみで光合成速度を予測するとエラーが生じる可能性があることを示し、我々が提案するモデルが先行モデルに対して優位にあることを明らかにした。次に、異なる条件で育成した葉や異なる種の葉でこのモデルを利用するためには、色素組成や観測角度の違いを補正する必要があるが、その方法を確立した。この補正法を利用すれば、様々な葉でこのモデルが有用であることが明らかとなった（論文業績3, 4, 5, 6, 7）。モデルはサブテーマ3で用いられるFLiES-SIFに実装可能なところまで確認している。目標は達成されたと考える。

サブテーマ3：計画通りの達成があった。

GOSATシリーズやTROPOMIなどの衛星SIFデータをサブテーマ1と共同で収集し、時空間分布の予備解析を行った。さらに放射伝達モデルの解析用の地上データの収集を岐阜県・高山市の落葉広葉樹サイトを中心に収集した。また、SIFデータの標準化やGPP推定を行うための必須となる放射伝達モデルFLiES-SIFの改良を行いモデルの感度解析の結果を取りまとめた論文として発表した（論文業績2、知的財産権1）。本サブテーマで開発した放射モデルFLiES-SIFの感度解析の結果を踏まえて、SIFデータをFLiES-SIFのモデル解析によって直下視データに変換する方法を提案した（SIFデータの標準化、図3.5）。さらに個葉のクロロフィル蛍光モデルと群落光合成モデルを結合し半経験的なパラメータで衛星・地上観測SIFとモデル内で必要となる蛍光の関係つけて、SIFデータからGPPを推定するアルゴリズムを開発した。開発したGPPアルゴリズムを日本周辺域で適用し2019年におけるGPP分布推定をGOSAT-2及びTROPOMI（GOSAT-GWの模擬データ）で行った（図3.18）。以上、当初の目標はおおよそ計画通り達成できたと考えているが、開発アルゴリズムのテストサイトとして、国内2箇所（岐阜県高山の落葉広葉樹サイトと茨城県つくば市の水田サイト、図3.14）での検討にとどまったこと、また当初アジア全域での推定を目標にしていたGPPの推定では、SIF以外の衛星プロダクトのデータ量が極めて大きく、データ処理に時間がかかったことから、日本地域に限定して解析を行ったことなどがある。今回開発したアルゴリズムは、国内だけではなく全球に

適用できるものである。今後は、アジアから全球スケールでの GPP 推定へと研究を展開させていく予定である。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

7件

<主な査読付き論文>

- 1) Nakashima N., Kato T., Morozumi T., Tsujimoto K., Akitsu T.K., Nasahara K.N., Murayama S., Muraoka H. and Noda H.M., 2021: Area-ratio Fraunhofer line depth (aFLD) method approach to estimate solar-induced chlorophyll fluorescence in low spectral resolution spectra in a cool-temperate deciduous broadleaf forest. *Journal of Plant Research*, 134, 713-728. <https://doi.org/10.1007/s10265-021-01322-3> (IF=2.629)
- 2) Sakai Y, Kobayashi H, Kato T, 2020: FLiES-SIF version 1.0: three-dimensional radiative transfer model for estimating solar induced fluorescence, *Geoscientific Model Development* 13 (9), 4041-4066 (IF=6.135)
- 3) Hikosaka K (2021) Photosynthesis, chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index in photoinhibited leaves. *Functional Plant Biology*, 48:815-826. 10.1071/FP20365 (IF=3.10)
- 4) Tsujimoto K, Hikosaka K (2021) Estimating leaf photosynthesis of C₃ plants grown under different environments from pigment index, photochemical reflectance index, and chlorophyll fluorescence. *Photosynthesis Research*, 148: 33-46. 10.1007/s11120-021-00833-3 (IF=3.573)
- 5) Hikosaka K, Tsujimoto K (2021) Linking remote sensing parameters to CO₂ assimilation rates at a leaf scale. *Journal of Plant Research*, 134:695-711. 10.1007/s10265-021-01313-4 (IF=2.629)
- 6) Kohzuma K, Tamaki M, Hikosaka K (2021) Corrected photochemical reflectance index (PRI) is an effective tool for detecting environmental stresses in agricultural crops under light conditions. *Journal of Plant Research*, 134:683-694. 10.1007/s10265-021-01316-1 (IF=2.629)
- 7) Kohzuma K, Sonoike K, Hikosaka K (2021) Imaging, screening and remote sensing of photosynthetic activity and stress responses. *Journal of Plant Research*, 134:649-651. <https://doi.org/10.1007/s10265-021-01324-1> (IF=2.629)

6-2. 知的財産権

- 1) Kobayashi, Hideki, & Sakai, Yuma. (2019, December 20). FLiES-SIF version 1.0 (Version Version 1.0). Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.3584099>. (CC BY 4.0)
*開発コードのパブリックライセンス取得し Zenodo で公開中

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
----------------	----

その他誌上発表（査読なし）	0件
口頭発表（学会等）	36件
「国民との科学・技術対話」の実施	5件
マスコミ等への公表・報道等	0件
本研究に関連する受賞	2件

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究者略歴

研究代表者

加藤 知道

筑波大学大学院生物科学研究科博士課程修了、博士（理学）、現在、北海道大学・農学
研究院・准教授

研究分担者

1) 小杉 緑子

京都大学農学研究科博士課程修了、博士（農学）、現在、京都大学・農学研究
科・教授

2) 中路 達郎

東京農工大学連合農学研究科博士課程修了、博士（農学）、現在、北海道大
学・北方生物圏フィールド科学センター・准教授

3) 松本 一穂

名古屋大学農学系研究科博士課程単位取得退学、博士（農学）、現在、琉球大
学・農学部・准教授

4) 彦坂 幸毅

東京大学理学系研究科博士課程修了、博士（理学）、現在、東北大学・生命科
学研究科・教授

5) 小林 秀樹

東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了、博士（工学）、現在、国
立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門・北極環境変動総合研究セン
ター・北極化学物質循環研究グループ・グループリーダー代理

II. 成果の詳細

II-1 地上観測データベースによる GOSAT-2 の SIF 検証

北海道大学 加藤 知道
 中路 達郎
 京都大学 小杉 緑子
 琉球大学 松本 一穂

[要旨]

GOSAT 等の人工衛星による SIF 観測はこれからも継続されていくが、その精度や代表性の検証のための地上 SIF 観測は地点数・生態系タイプ・データ量共に非常に限りがあり、衛星 SIF の生態系光合成量推定への利用可能性が妨げられている。そこで本サブテーマでは、すでに別予算で設置されている 4 サイト（温帯落葉広葉樹林（岐阜県高山市）、水田（茨城県つくば市真瀬）、温帯常緑針葉樹林（桐生）、亜寒帯常緑針葉樹林（アラスカ・フェアバンクス））に加え、本課題による新規 1 サイト（亜熱帯常緑広葉樹林（沖縄県国頭村与那））からの高解像度分光放射データを利用して SIF を計測し、それらと GOSAT 等の人工衛星 SIF 観測データと比較検証する。その際に、本計画外で設置されていた 4 サイト（コムギ（北海道札幌市羊ヶ丘）、湿地（北海道美唄市）、温帯落葉針葉樹林（山梨県富士吉田市）、若齢温帯落葉針葉樹林（北海道幌延町））のデータも適宜利用した。その結果、温帯落葉広葉樹林および水田では比較的大きな季節変化が見られ、6 月と 8 月に極大、梅雨期に低下する特徴がみられた。若齢温帯落葉針葉樹林と亜寒帯常緑針葉樹林は本データセット内でも高緯度に位置しており、夏期の極大からの秋の低下のタイミングが 8 月下旬でほかのサイトよりも早かった。高層湿原である美唄は初夏に水位が高く草本植物主体であることなどもあり極大のタイミングが森林に比べて 8 月中盤とやや遅かった。一方で、温帯常緑針葉樹林と亜熱帯常緑広葉樹林では冬期間において低下するも落葉樹林に比べて比較的高い検出値を維持していた。そして GOSAT-2 L2 FTS-2 SWIR SIF 観測値の取得を行い、利用可能なデータ点数が多い亜寒帯常緑針葉樹林、温帯落葉広葉樹林、水田の 3 サイトでは、月平均 SIF 値の衛星-地上観測の間の相関係数は 0.8 以上となり再現性が高いことを示した。一方で SIF 絶対値の小さい亜寒帯常緑針葉樹林では相対誤差が 100% 以上となった。またその他にも、温帯落葉広葉樹林では群落内において鉛直方向に多層の上下方向の SIF 放出を計測し、林冠上部、林冠下部、林床における SIF 放出季節変化の違いについて明らかにした。コムギ畑においてはサブテーマ 3 で開発されている 3 次元放射伝達モデル FLiES-SIF を利用して、条列方位に起因する日中の SIF 放出低下について、SIF 地上観測の再現を行った。

長期的な観測データがすでに蓄積されている中解像度分光スペクトル（植物季節ネットワーク）を利用し、SIF を間接的に推定するアプローチを開発することを目指す。そのために、温帯落葉広葉樹林（岐阜県高山市）において新しい検出方法（aFLD 法（area-ratio Fraunhofer Line Depth））を提案し、高解像度分光放射データによる SIF との間で、絶対値のスケーリングも行って、2008-2018 年までの 11 年間の SIF 推定値の検証を行った。その結果、衛星 GOME-2 から得られた解析 SIF データ（GOSIF-SIF）との間では高い相関関係（ $r^2=0.96$ ）が見られた。また、11 年分の日平均、月平均、年平均 SIF と渦相関法によって求められた GPP の間には、高い一貫性が見られ、aFLD 法を用いたアプローチが有効であることがわかった。

1. 研究開発目的

GOSAT 等の人工衛星による SIF 観測はこれからも継続されていくが、その精度や代表性の検証のための地上 SIF 観測は地点数・生態系タイプ・データ量共に非常に限りがあり、衛星 SIF の生態系光合成量推定への利用可能性が妨げられている。そこで本サブテーマでは、すでに別予算で設置されている 4 サイト

ト（温帯落葉広葉樹林（岐阜県高山市）、水田（茨城県つくば市真瀬）、温帯常緑針葉樹林（桐生）、亜寒帯常緑針葉樹林（アラスカ・フェアバンクス））に加え、本課題による新規1サイト（亜熱帯常緑広葉樹林（沖縄県国頭村与那））からの高解像度分光放射データを利用してSIFを計測し、それらとGOSAT等の人工衛星SIF観測データと比較検証する。その際に、本計画外で設置されていた4サイト（コムギ（北海道札幌市羊ヶ丘）、湿地（北海道美唄市）、温帯落葉針葉樹林（山梨県富士吉田市）、温帯落葉針葉樹林（北海道幌延町））のデータも適宜利用する。また、長期的な観測データがすでに蓄積されている中解像度分光スペクトルを利用し、SIFを間接的に推定するアプローチを開発することを目指す。そのために、温帯落葉広葉樹林（岐阜県高山市）において新しいSIF検出方法を提案し、高解像度分光放射データによるSIFとの間で代表性の検証を行う。

2. 研究目標

高分解能分光放射計による既設4サイトからのデータ提供と、新規1サイト設置による地上SIF観測データベースを構築する。また各サイトのSIF計算とその挙動の比較を行う。さらに中分解能分光放射計によるSIF観測の可能性を検討する。

3. 研究開発内容

3.1 高分解能分光放射計による地上観測網の構築

3.1.1 観測地および観測対象

2019年度までに実施している高山、真瀬、アラスカのフェアバンクス、桐生における高分解能分光放射計によるSIF観測を行った。さらに与那亜熱帯サイトの地上観測システムを設置し19年末より継続的に観測した。ここに5サイトの諸元をまとめる（表1.1）。

表 1.1 地上観測5サイトの諸元

サイト名	Id	緯度・経度	植生タイプ	主要種類/群落高(m)	タワー管理主体
フェアバンクス	PFA	65° N, 147° W	亜寒帯常緑針葉樹林	クロトウヒ/3m	JAMSTEC・IARC
桐生	KEW	34° N, 136° E	温帯常緑針葉樹林	ヒノキ/18m	京都大学
高山	TKY	36° N, 137° E	温帯落葉広葉樹林	ミズナラ, ダケカンバ/14m	岐阜大・産総研
真瀬	MSE	36° N, 140° E	水田	イネ/0.6m	農研機構
与那	YNF	26° N, 128° E	亜熱帯常緑広葉樹	イタジイ, ヒメツバキ/10m	琉球大学

高山（TKY）、真瀬（MSE）、与那（YNA）は本プロジェクトの北大チームが、アラスカ・フェアバンクス（PFA）は本プロジェクトのJAMSTECが、桐生（KEW）は協力研究機関である国立環境研究所が実施した。また、本プロジェクトの直接管轄ではないが本メンバーを主体として運用している観測サイト（サブサイト）として羊ヶ丘畑作地（HTJ）、美唄湿原（BBY）、天塩森林（TSE）、富士北麓森林（FHK）においても同様の設備を利用してSIF地上観測を行った。図1.1に、これらすべての地上観測網の位置を示す。

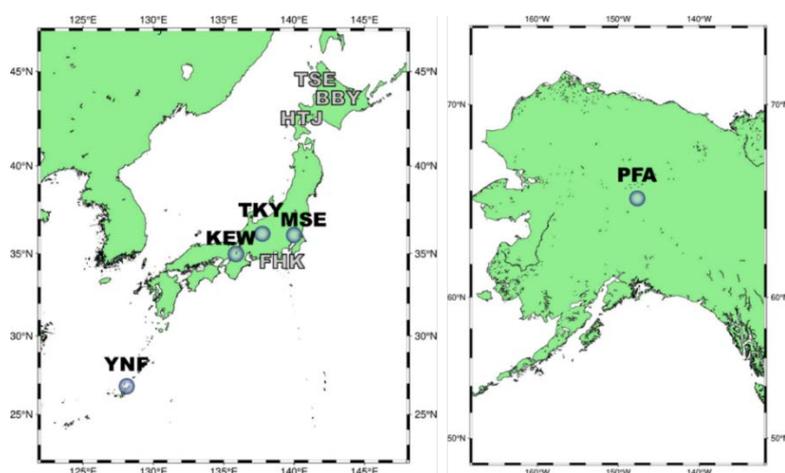


図 1.1 地上 SIF 観測ネットワーク（黒字：本研究設置サイト、白抜き：他研究設置サイト）

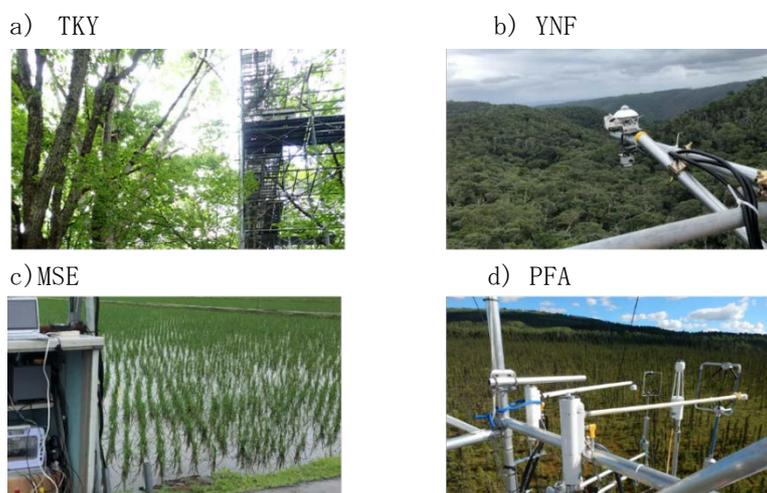


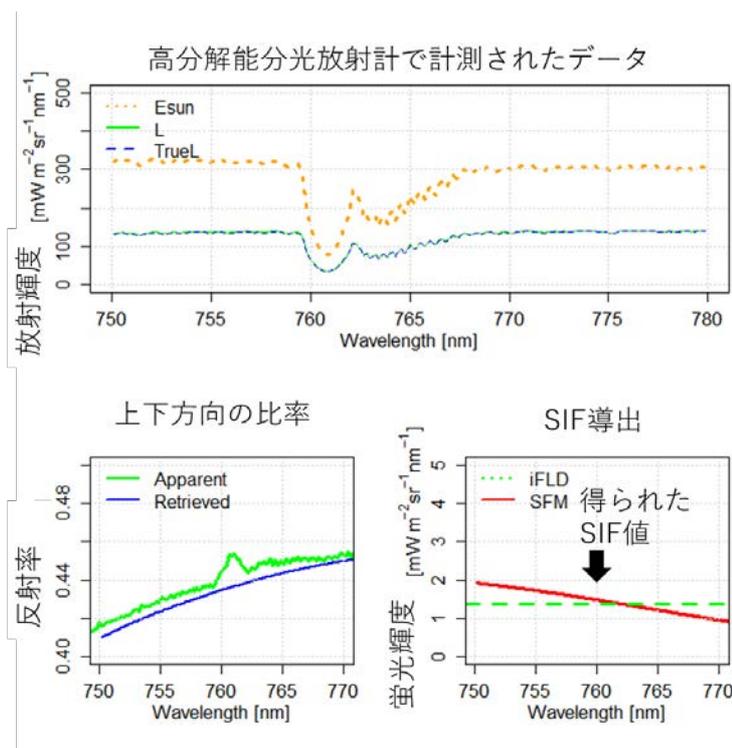
図 1.2 各サイトの風景

3.1.2 SIF 計算方法（FLD 法と SFM）

地上において SIF 検出のためには、 O_2 -A 吸収帯(760nm)および O_2 -B 吸収帯(680nm)周辺の高い波長分解能(全幅半値 1.0 nm 以下)の太陽光・群落反射光スペクトルを必要とする。例えば O_2 -A 吸収帯(760nm)周辺の入射・反射スペクトルは、凹状に窪んだ井戸のような形状になる(図 1.3)。この上向き放射輝度(L)には、下向き放射輝度(E_{sun})に反射率(Lの井戸の深さを、 E_{sun} の井戸の深さで割ったもの)をかけたものと、蛍光 SIF が含まれる。この SIF 成分と反射率を波長方向に一定と仮定し、線形回帰によって SIF 成分を求める方法を

フラウンホーファー線深度法 (Fraunhofer Line Depth :FLD) と言う。一方で、原理的に正しい方法として、スペクトルフィッティング法 (Spectral Fitting Method: SFM) がある。これは SIF 成分には特有の2つの上向きピークを持つスペクトル形状を、Esun と L についてはガウス曲線スペクトル形状を想定した、それらの非線形関数をパラメータ最適化することで SIF を推定する。

図 1.3 O₂-A 吸収帯(760nm)周辺の植生からの上向き放射輝度(L)と太陽光の放射輝度(Esun)のスペクトル、反射率 (左下) と検出された SIF (右下) .



3.1.3 観測機器仕様

観測は現状いくつかの機器を組み合わせで行われる。センサー、光スイッチ (光ファイバーチャンネル切替器)、下向き受光部、およびそれらを繋ぐ光ファイバーケーブルからなる (図 1.4)。分光放射計は HR4000 と QEpro (ともに Ocean Insight 社, 米国) を利用し、半値幅(FWHM)は 0.12 または 0.2 (HR4000) および 0.34 nm (QEpro) で測定を行った。同時に Flame-S (Ocean Insight 社) を用いて可視近赤外広領域分光放射を測定することで観測安定性を評価した。チャンネル切替は TTL-s シャッタ既製品を組み合わせ自作し、もしくは LEONI および PSJ 社 (ドイツ) 製特注品を利用した。タワー上部に設置する受光部は光ファイバー 600 μ m 径 SMA コネクタによる 25° 視野角測定 (bfw) およびコサイン拡散板 (CC-3; Ocean Insight 社) による半球視野角測定 (CC) の 2 種を設け、耐候性保護としてガラスドーム (外枠: Hukseflux 社, オランダ、接続部成形: オプトシリウス社、東京) を使用した。観測において機器を取り付ける建造物はフラックスタワーおよび樹冠観測タワーを利用した。



図 1.4 高分解能分光放射計を含む観測機器 (基盤部分)。実際の運用は蓋を閉じ、かつロッカーまたは建造物等に配置し測定環境を一定に保つ。

制御には Windows (Microsoft 社, 米国) ノートパソコンを利用し、Octave (GNU)、OceanView および OmniDriver (ともに Ocean Insight 社) をインストールした。Octave のプログラムから光スイッチとセンサーを操作し、一定間隔の観測制御を行った。与那・真瀬については無線インターネット回線を、高山については有線インターネット回線を利用して、北海道大学内のサーバーにデータを夜間にアップロードした。他の協力サイトは観測後にまとめてデータを共有した。高山 (TKY) は 2019 年 5 月と 10 月、2020 年 6 月、2021 年 7 月の定期メンテナンスの他、2019 年 7 月、8 月に機器故障のため臨時作業を行った。真瀬 (MSE) は 2019 年 5 月、2020 年 4 月、2021 年 3 月の定期メンテナンスの他、2020 年 1 月、10 月

に機材の交換に伴う臨時作業を行った。与那(YNA)は2019年11月の新規設置作業の他、2020年2月、2021年4月、2022年3月にメンテナンスを行った。

表 1.2 地上観測5サイトの機器、設定およびSIFの計算方法

サイト	分光放射計	半値幅/範囲(nm)	チャンネル切替器	下向き視野角	SIF 計算法
フェアバンク ス (2018-)	HR4000	0.2 /470-900	光スイッチ (LEONI)	狭幅 (Bfw)∠45°	FLD
桐生 (2018-)	HR4000	0.12 /650-806	光スイッチ (LEONI)	Bfw∠45°	FLD
高山 (2018-)	QEpro (HR4000※)	0.34 /650-806	光スイッチ (LEONI/PSJ)	半球(CC), Bfw∠45°	SFM
真瀬 (2018-)	QEpro	0.34 /650-806	光スイッチ (LEONI)	CC, Bfw∠45°	SFM
与那 (2019-)	QEpro	0.34 /650-806	電磁シャッタ	CC, Bfw∠45°	SFM

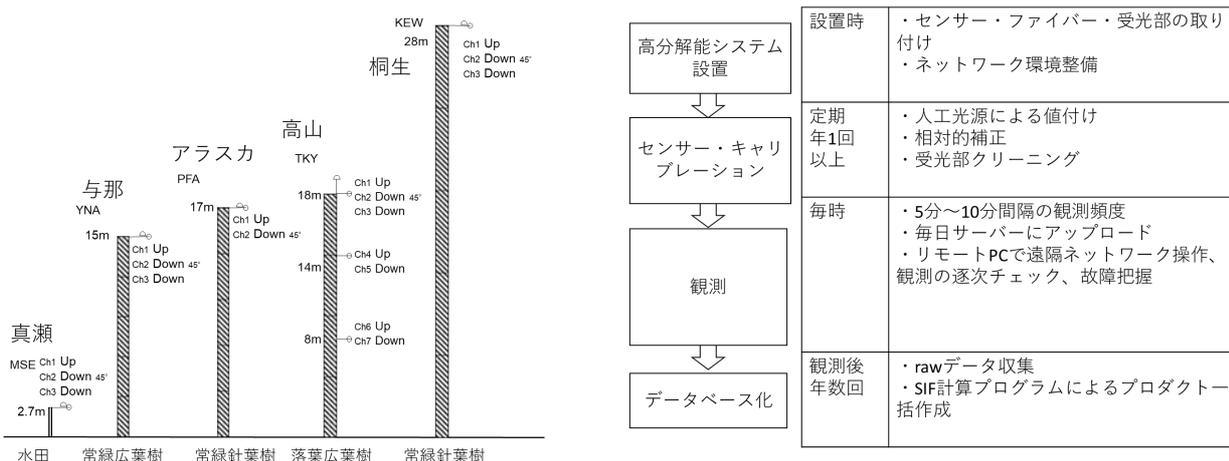


図 1.5 5サイトの観測タワーサイズ比較 (左) と SIF 観測体制の流れ (右) . 各サイトのタワー上受光部の地上高は、桐生:28m、高山:18m,14m,8m の3層、アラスカ:17m、与那 15m、真瀬:2.7m である。

3.1.4 GOSAT-2 衛星 SIF と地上観測との比較検証のための条件設定

本プロジェクトの地上観測における地点数および生態系タイプ(土地被覆カテゴリ)の数は地域規模で SIF の放出量を評価するにはまばらである。そのため GOSAT-2 衛星と地上との観測を直接比較することは難しい。そこで GOSAT-2 衛星と地上におけるそれぞれの観測特性の違いを考慮し、理論的に類似した観測条件になるように条件設定を行った。GOSAT-2(プロダクト: FTS-2 SWIR L2 Chlorophyll Fluorescence)では主に関東中部地方から近畿東部(N34-39,E135-141)の範囲について、直径約 10km の視野内に標的となる生態系タイプが過半数含まれる点を抽出したデータセットを作成した。土地被覆は JAXA HRLULC v21.11(空間解像度約 10m)および UAF-SNAP Land Cover v0.4 (解像度 1000m)公開データを利用した。同様にアラスカは観測サイトに類似する気候条件の内陸部(N62-67.5, W135-158)の範囲について抽出した。今回の報告では衛星視野内に小面積含まれている標的以外の土地被覆の寄与は無視できると仮定した。

地上観測では、鉛直下向き半球 CC と斜め向き狭幅 Bfw の 2 種類の視野を比較することで SIF 放出の観測角依存性を評価し、この変換比率を求めることで定常的な衛星観測視野角に相当する近似的な SIF を推定した。地上において 5-10 分間隔で連続観測された SIF 値は 30 分値や 1 時間値などに平滑化することで比較的安定した代表値を得やすい。しかし衛星から求められる SIF 検出値は不連続なばかりでなく比較的大きな観測誤差によるノイズが含まれているため一点の値のみを代表値とすることはできない。そのためこの衛星と地上のデータセットにおける同期サンプルのみを月平均することで比較検証した。なお群落構造に起因する SIF 観測値の解釈はサブテーマ 3 の放射伝達モデル解析にゆずる。

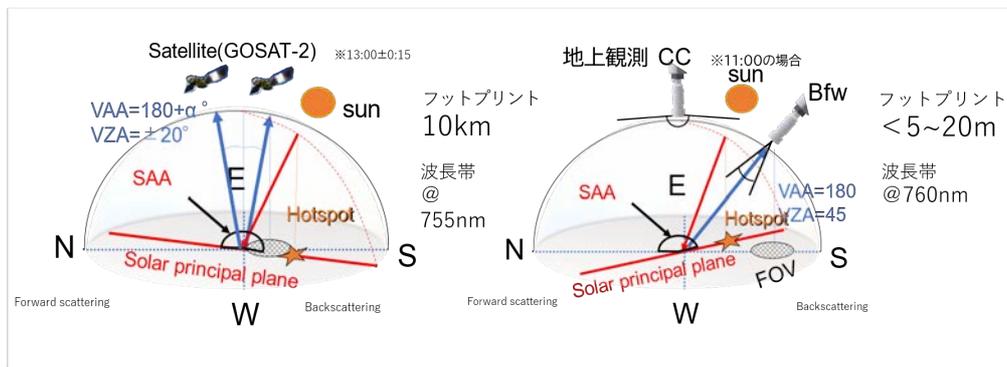


図 1.6 GOSAT-2 衛星観測と本プロジェクト地上観測による視野の違い

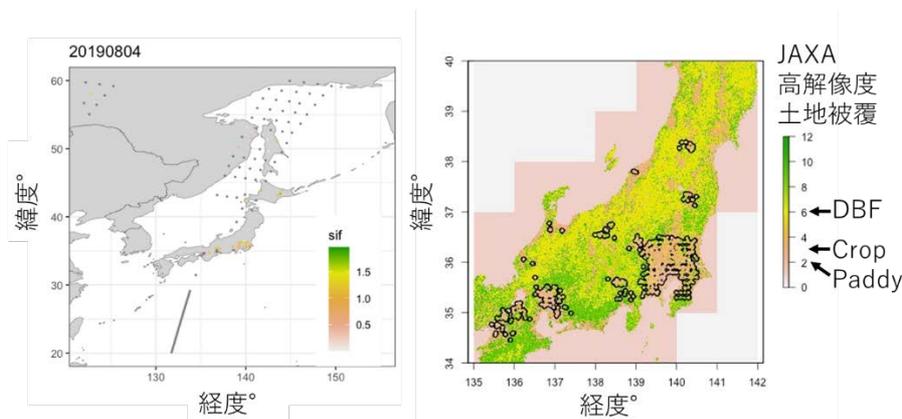


図 1.7 GOSAT-2 衛星 SIF プロダクト 2019 年 8 月 4 日のスナップショット (左図)。各点の色は黄-緑に近いほど高い SIF 値を表す。2020 年サンプリング地点(黒丸)と土地被覆の対応 (右図)。JAXA 高解像度土地利用土地被覆図(約 10m メッシュ)を利用した。地図中において落葉広葉樹林(DBF)は黄色、農地(Crop/Paddy)は薄紅色で示した。

3.2 中分解能分光放射計による地上 SIF 観測の可能性の検討

3.2.1 本調査の背景と目的

GOSAT シリーズによる衛星観測 SIF の検証のためには、高精度な地上観測 SIF による値の直接的な比較と同時に、広域および長期にわたる地上観測による SIF 変動の検証が重要である。世界的に SIF の地上観測ではもっぱら高分解能分光放射計である QE Pro を使用した SIF の検知に焦点が当てられている。しかし QE Pro はもともと室内使用を目的としており野外の過酷な環境下での観測は仕様想定外であるため、SIF の地上観測には多大な維持労力がかかっている。そのコスト負担がまた SIF の長期観測データの取得を困難としている。

我が国では植物季節観測ネットワーク (Phenology Eyes Network: PEN) が海外を含み 29 か所で長年運用されており、様々な生態系タイプで地上観測データを蓄積している。その中で高山サイト (岐阜県高山市) は 2003 年から運用されており、PEN サイトの中で最も長い稼働を続けている。高山サイト、そして多くの PEN サイトには、中分解能分光放射計として MS-700 (英弘精機社製、波長範囲 300~1150nm、

全幅半値 10nm、波長間隔 3.3nm) が使用されている。MS-700 は分解能が QE Pro ほど高くはないが、頑強で壊れにくく野外での長期観測向けである。また安価にノイズの少ない安定した分光観測を実施することが出来る。この有用性から MS-700 は多くの PEN サイトで使用され、長期運用の実績を持っている。中分解能分光放射計 MS-700 による SIF 検出が可能となれば、GOSAT シリーズから推定される SIF の検証に PEN サイトを用いることができる。このような陸域生態系の長期観測ネットワークを構築している国は他に見当たらず、我が国がこの分野を牽引する強いアドバンテージであると考えられる。

本調査では PEN サイトの一つに含まれる高山サイトを対象とした。高山サイトでは 2003 年から観測が開始され、M700 は放射計自動回転装置 (早坂理工にて製品化、クリマテックにて販売。CHS-AR01) によって、上方と下方からの分光放射を 1 台で計測している。データ取得間隔は過去数回変更されているが、近年では高山は 10 分に 1 回の頻度で上向き放射光を観測している。本調査は中分解能分光放射計 MS-700 による SIF の推定方法を構築することを目的とし、①中分解能分光放射から微細シグナルである SIF を算出する新しい計算手法の提案、②QE Pro による高分解能分光放射観測値との比較、③GOSIF による衛星観測 SIF と MS-700 による地上観測 SIF の比較、を行った。使用データは QE Pro のデータが高山サイトで安定的に整備されはじめた 2019 年を対象とした。

3.2.2 中分解能分光放射計からの SIF の算出方法

SIF 算定には一般的に用いられる 3FLD 法や SFM 法のほかに、低～中分解能分光放射から SIF を推定するための aFLD 法 (area-ratio Fraunhofer Line Depth, Nakashima et al. 2021 *J Plant Research*) を用いる。aFLD 法では吸収帯領域 (図 3.2.1 における左端波長 λ_{left} および右端波長 λ_{right} の間) における反射率と SIF 排出量は一定であると仮定する。観測される生態系反射光は、太陽放射による反射と SIF による増分として表される。

$$\bar{L} = \bar{r}\bar{E}/\pi + \bar{F} \quad (3.2-1)$$

ここで E、L、r、F はそれぞれ太陽放射照度、上向き放射輝度、真の反射率 (SIF による影響を含まない)、およびクロロフィル蛍光である。上線は λ_{left} (=750nm) ~ λ_{right} (=780nm) における平均値を表す。各平均は面積を波長幅で除した値として計算される。したがって、式(3-1-1)は以下のように書きかえることができる。

$$SIF_{\text{aFLD}} = \left(A_2 - \frac{A_1}{B_1} B_2 \right) / (\lambda_{\text{right}} - \lambda_{\text{left}}), \quad (3.2-2)$$

ここで、A と B はそれぞれ λ_{left} ~ λ_{right} 波長帯における太陽放射と上向き放射の定積分である (図 3.2.1)。添え字の 1 と 2 はそれぞれ O₂A バンド吸収帯と観測された分光放射を表している。A₁ と B₁ は観測された分光放射と、 λ_{left} および λ_{right} における点を結ぶ直線で囲まれた面積を示す。A₁/B₁ の比は λ_{left} ~ λ_{right} における平均的な反射率である。aFLD 法のほかに一般的な FLD 法である 3FLD、iFLD を使用した。また高分解能分光放射データには非線形 SFM 法も適用した。計算には日平均した値を用いた。

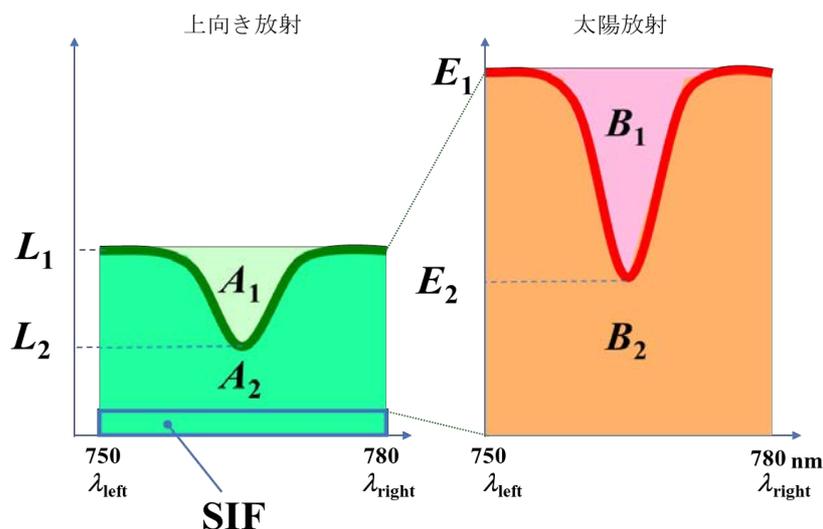


図 1.8 area-ratio Fraunhofer Line Depth (aFLD)法の概要

3.2.3 aFLD 法の検証方法

MS-700 から aFLD 法によって SIF を推定する (以降 SIF_{aFLD_MS} と記載) 手法の頑健性を検証するため、QE Pro 取得の高分解能分光放射スペクトルを中分解能化 (ダウングレード) した放射スペクトルに aFLD 法を適用し (以降 SIF_{aFLD_QE} と記載)、 SIF_{SFM} と比較した。ここで中分解能分光放射スペクトルのうち、MS-700 取得のものを L_{10nm_MS} 、QE Pro から生成したものを L_{10nm_QE} と記載する。QE Pro 取得スペクトルのダウングレードにはガウス分布を仮定した移動平均法を用いた。

3.2.3 aFLD 法の検証方法

中分解能分光放射スペクトルから aFLD 法によって計算された SIF は正確な変動を示すものの、その絶対値は過大評価される傾向にある。そこで信頼性の高い SFM 法による SIF 算出値を用いて絶対値の補正係数 (スケーリング係数) を定める。2019 年に観測された MS-700 による SIF_{aFLD_MS} と QE Pro による SIF_{SFM} を比較してスケーリング係数を決定した。

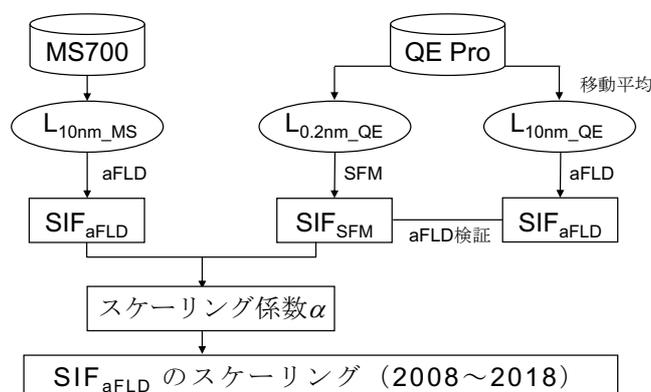


図 1.9 aFLD 法による SIF 推定値算定法のスキーム

3.2.4 衛星観測 SIF

GOSIF は複数の衛星観測データを統合し長期にわたる全球 SIF 推定値を表した (Li and Xiao 2019)。使用されている地球観測衛星には主に OCO-2 (Orbiting Carbon Observation-2)、MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) など高い空間分解能 (0.05° グリッド) を示すものが含まれている。GOSIF による生成 SIF (以降 GOSIF-SIF と記載) および生成 GPP (Gross Primary Production : 総一次生産。以降 GOSIF-GPP と記載) を GOSIF ウェブサイト (<http://globalecology.unh.edu/data/GOSIF.html>) からダウンロードした (接続日 2020/8/1)。GOSIF の全球データから Google Earth Engine の "Code Editor" を使用して高山サイト近辺 (~0.4 km²) のデータポイントを抽出した。抽出したデータポイントは高山サイトの観測タワーやフラックス観測タワー、森林を含んでいた。

4. 結果及び考察

4.1 高分解能分光放射計による地上観測網の構築

4.1.1 地上観測された SIF 季節変動

本プロジェクトの 5 サイトと、関連する SIF 観測サブサイトにおける SIF の時系列変動を示した (図 1.10)。図に示すよう半年~3 年間・複数生態系をカバーしており、異なる特徴を持つ地上 SIF 観測値をデータベースとして集積することができた。これらの観測データから落葉広葉樹 (TKY: Morozumit et al., 査読中) および水田 (MSE : Buareal et al., 査読中) では比較的大きな季節変化が見られ、6 月と 8 月に極大、梅雨期に低下する特徴がみられた。

温帯落葉針葉樹林の天塩と亜寒帯常緑針葉樹林のフェアバンクスは本データセット内でも高緯度に位置しており、夏期の極大からの秋の低下のタイミングが 8 月下旬でほかのサイトよりも早い。高層湿原である美唄は初夏に水位が高く草本植物主体であることなどもあり極大のタイミングが森林に比べて 8 月中盤とやや遅い。一方で、与那や桐生の常緑樹林では冬期間において低下するも落葉樹林に比べて比較的高い検出値を維持していた。与那は本州に比べて台風の通過コースであることなどから晴天が連続せず夏の極大がやや不明瞭であった。またフェアバンクスと桐生は分光計が HR4000 を利用しているほか導出手法が FLD 法を用いていることなどからほかのサイトと直接比較できずばらつきがある。

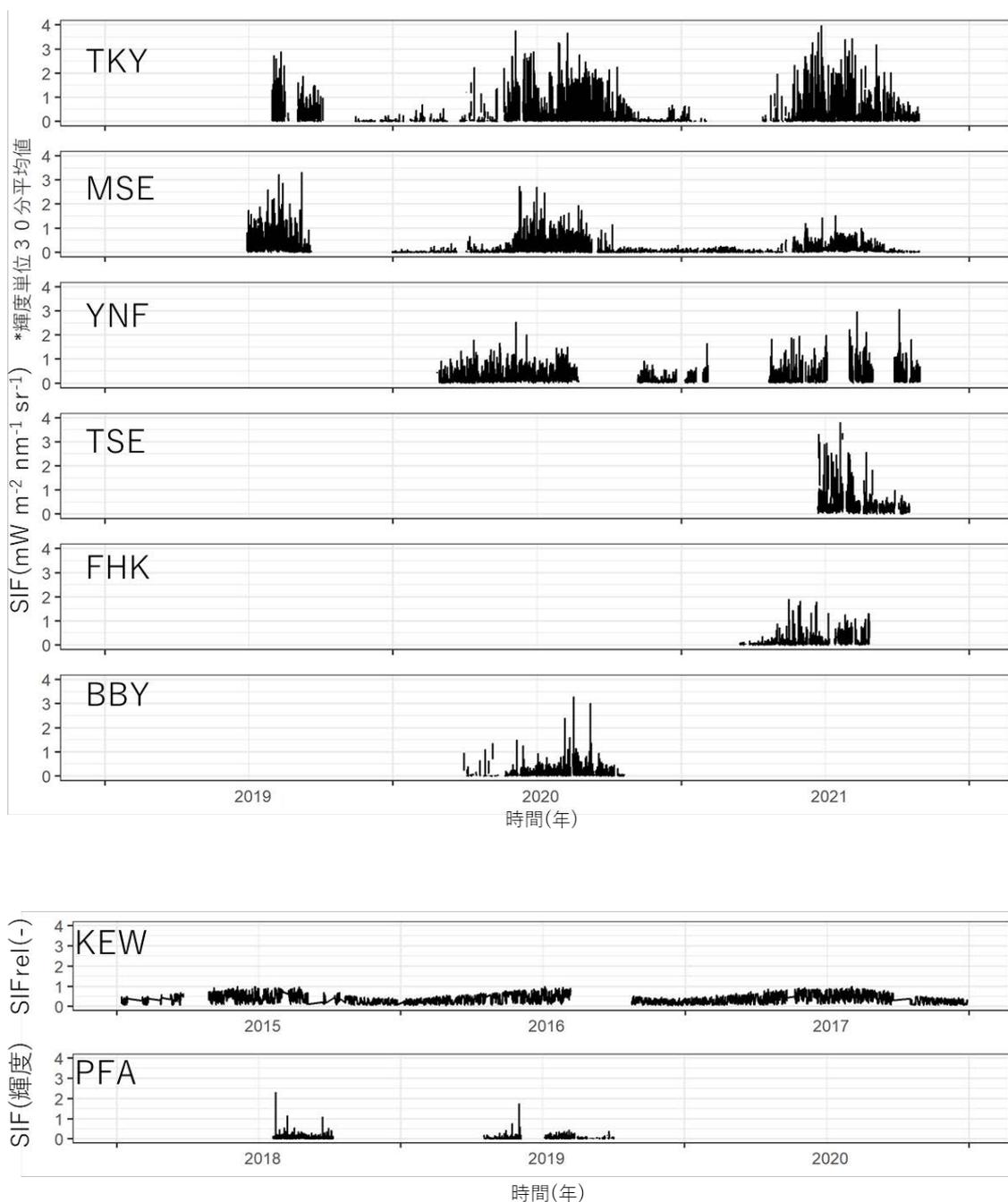


図 1.10 地上観測 SIF データセットにおける 30 分平均値 SIF 時系列変化。上から高山（森林）、真瀬（水田）、与那（森林）、天塩（森林）、富士北麓（森林）、美唄（湿地）、桐生（森林）、フェアバンクス（森林）。下段に示した桐生とフェアバンクスは異なるセンサー・セッティング・SIF 導出手法を使用している。

4.1.2 森林下層植生から放出された SIF の季節変動

日本などの温帯に分布する森林生態系は比較的密な林床をもつ階層構造を有している。そのため森林の上端からの SIF 放出、あるいは光合成量との関係性を議論するうえで、林床 SIF の放出量とその変化を明らかにする必要がある。高山サイトのタワーにおける 8m および 18m の高分解能分光計による SIF 観測値比較では、高木の落葉期(秋)に林冠シグナルが低下し常緑性ササ林床シグナルを下回ることが示された。14m の中間層も加えて 3 段階における季節変動についての解析をまとめて現在国際学術誌に投稿中である(Morozumi et al., 査読中)。このような地上観測でみられる林床での蛍光が、より大き

なスケールの GOSAT-2 衛星観測においてどのような意味を持つのかについて、今後さらなる研究が求められる。

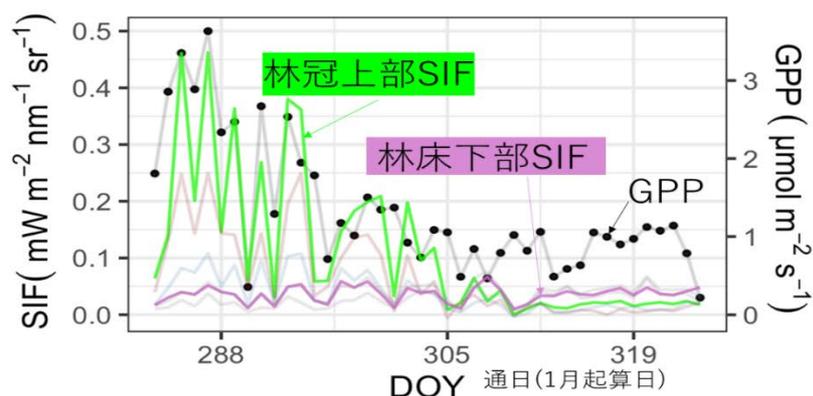


図 1.11 森林生態系観測タワーにおける 8m(林床下部ササ),および 18m(林冠上部)における SIF と生態系総一次生産量 GPP の秋における変化。高木樹種の落葉に伴い林冠優位から林床優位へと森林の光合成機能が変化していることを示唆する実測値が得られた。

4.1.3 群落構造が SIF 日中変動に及ぼす影響

GOSAT-2 衛星では日中時間帯(13:00 前後)の値を検出している。しかし、群落の 3 次元的な構造によって固有なバイアスがかかっている可能性があることが本プロジェクトの研究でわかってきた。サブテーマ 3 の開発している 3 次元放射伝達モデル FLiES-SIF(Sakai et al., 2020, GMD 掲載)を作物畑に適用することで、作物の畝列の方角によって時間帯について斜め視野角の見かけの SIF 放出が 2 割程度低下することをシミュレーションによって再現した(図 1.12)。このモデル検証には本サブテーマ 1 と同様の地上 SIF 観測システムを利用した測定値を検証に利用している。現在国際学術誌に投稿し改訂再投稿中である(Morozumi et al., 査読中)。

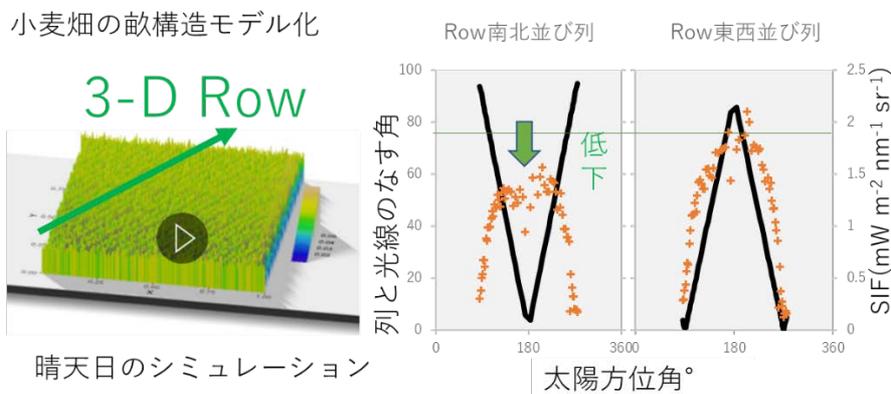


図 1.12 サブテーマ 3 との横断的研究成果である SIF 放射伝達モデル感度分析。南北方向の列は東西方向の列に比べて正午付近(太陽方位角 180 度)の SIF 放出が 2 割程度低く抑えられた。SIF 低下時間帯には陰葉(非直達光受光葉面)からの SIF の寄与が一時的に増加したことがモデルによって予測された。

4.1.4 衛星との比較検証

北海道大学らのチームは環境研究所の協力のもと GOSAT-2 L2 FTS-2 SWIR SIF 観測値の取得を行い、フェアバンクス(PFA)、高山(TKY)、真瀬(MSE)3 サイトに相当する観測値と本サブテーマで得られた地上観測データセットに対して比較解析した。各サイトについての解析結果では相関係数は 0.8 以上となり、また相関の傾きはフェアバンクスで 1.2、高山で 0.81、真瀬で 0.96 となった。平均二乗偏差の変動係数は高山と真瀬で 50%程度に抑えることができたが、アラスカは 100%以上となった。図 1.13 の右には、平均する前の衛星観測データ分布を点で示したが、赤線で示した平滑季節変化にたいしてノ

イズ起因の誤差幅が非常に大きいことがわかる。季節変化を月平均することでノイズによるばらつきを考慮して検証した。高山と真瀬において季節変化は $0-1.0 \text{ mW m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 程度であることから陸上生態系の SIF 放出の変化が衛星においても地上観測と同様に得られると考えられた。一方アラスカにおいてはとくに季節変化が $0-0.3 \text{ mW m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 程度であるため図に示すように誤差の影響が大きい。しかし相関は確認できたことから、サンプル数を十分に得られるならば季節変化は検出しようと考えられる。

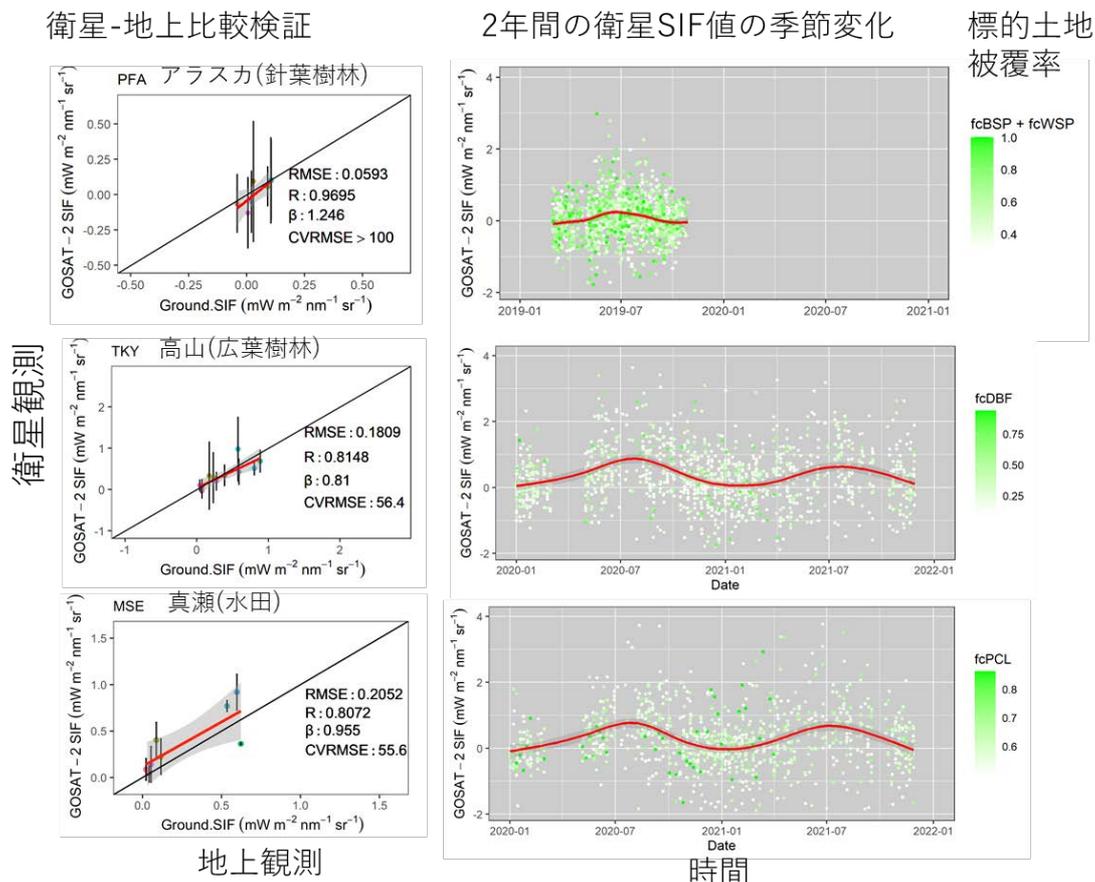


図 1.13 (右)アラスカフェアバンクス、高山、真瀬に相当する地点について観測された GOSAT-2 衛星 SIF プロダクトの 1-2 年分の季節変化とその平滑曲線(赤線)。(左)衛星観測と地上観測の同期サンプルについての月平均 SIF の相関。赤線で線形回帰、灰色は上下誤差範囲について SE を示した。斜めの黒実線は 1:1 を示す。R は相関係数、RMSE は平均二乗偏差、 β は線形回帰の傾き係数、CVRMSE は変動係数を百分率で示した。

4.2 中分解能分光放射計による地上 SIF 観測の可能性の検討

4.2.1 中分解能分光放射計から SIF を算出する新しい計算手法の妥当性

QE Pro 取得放射データを中分解能へダウングレードし aFLD 法を適用した $\text{SIF}_{\text{aFLD_QE}}$ と、同じ QE Pro から SFM 法を適用して算出した SIF_{SFM} の比較を図 1.14(a)に示す。相関係数は 0.86 となり、傾きは 19.77 となった。これは従来の SIF 計算手法である 3FLD 法や iFLD 法による SIF が SIF_{SFM} と比較した場合(それぞれ $r^2=0.88$, $r^2=0.85$)と同程度であった。ただし傾きが 19.77 であることから $\text{SIF}_{\text{aFLD_QE}}$ は 250%ほど SIF_{SFM} を過大評価していた。一方で、MS-700 から aFLD 法を適用して算出した $\text{SIF}_{\text{aFLD_MS}}$ と QE Pro の SIF_{SFM} の散布図を図 1.14 (b)に示す。相関係数は 0.81 と十分に高く、傾きは 17.71 となった。

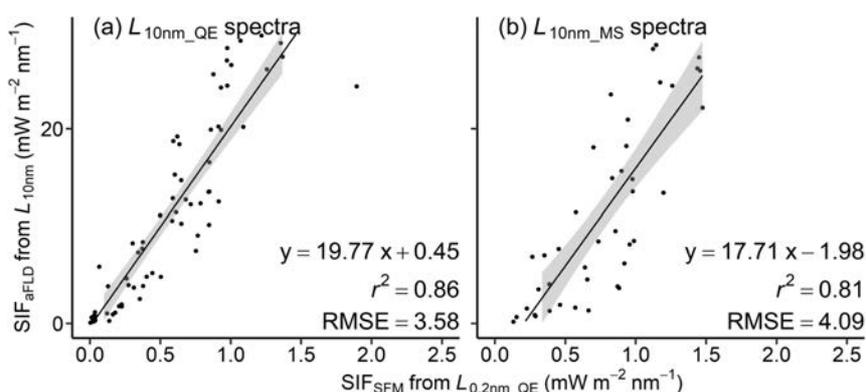


図 1.14 (a) SIF_{aFLD_MS} と SIF_{SFM} による比較および (b) SIF_{aFLD_QE} と SIF_{SFM} による比較

図 1.14 (a)の結果は、異なる算出手法を同じ QE Pro のデータに適用した SIF 同士の比較であり、MS-700 と QE Pro が異なる方向に設置された異なる分光計であるという不確定性を除いている。その場合において、全幅半値が 10nm の中分解能分光放射スペクトル (L_{10nm_QE}) であっても aFLD 法を適用することによって頑健な SIF を検知することが出来ることを示している。SIF の過大評価に関しては中分解能分光放射スペクトルによる O_2A バンドの浅い落ち込みが FLD 法のパラメータに影響を与えていると考えられる。つづいて図 1.14 (b)の結果から、QE Pro とは異なる MS-700 データが取得したスペクトル (L_{10nm_MS}) へ適用した場合においても、aFLD 法は同様に高い頑健性を有することを示した。以上のことから aFLD 法は中分解能分光放射スペクトルから信頼性の高いスケーリング係数を導き出すことが出来るといえる。

4.2.2 SIF と GPP の長期年変動の関係

aFLD 法とスケーリング係数による補正を用いて MS-700 の蓄積した 2008~2018 年の 11 年間にわたる日平均 SIF を算出した。それを用いて SIF と GPP の長期間の関係を図 1.15 に示す。SIF-GPP の関係性は年によって線形性や非線形性の強さが表れた。RMSE は 0.9~1.8 を示しておりどの年においても SIF-GPP の相関は高かった。また全年の葉緑期データ (6~9 月) を用いて SIF-GPP の関係を異なる時間分解能 (日平均、月平均、年平均) から比較した (図 1.16)。時間分解能が低くなるにつれて、SIF-GPP の関係は線形性を強めると同時に相関関係が強化した。SIF-GPP の時間分解能と線形性の関係は先行研究を追認している一方で、林冠スケールでみた時の SIF-GPP は線形的な関係になるという既往報告とは矛盾した。その矛盾の原因として高山サイトの森林鉛直方向の不均質性や林冠のシャドウ効果などが考えられるが、本調査で用いた 11 年間という長期データ量を考慮すると、林冠スケールにおける SIF-GPP の関係について新しい知見を

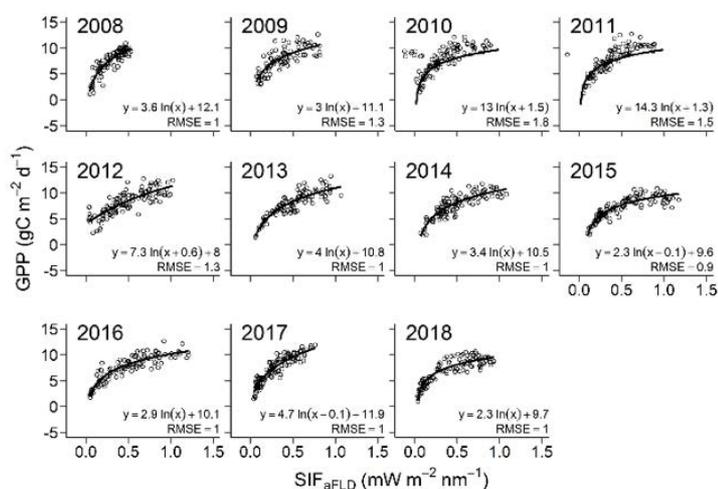


図 1.15 2008~2018 年にわたる SIF-GPP の関係。6 月から 9 月までの葉緑期のデータを使用した。

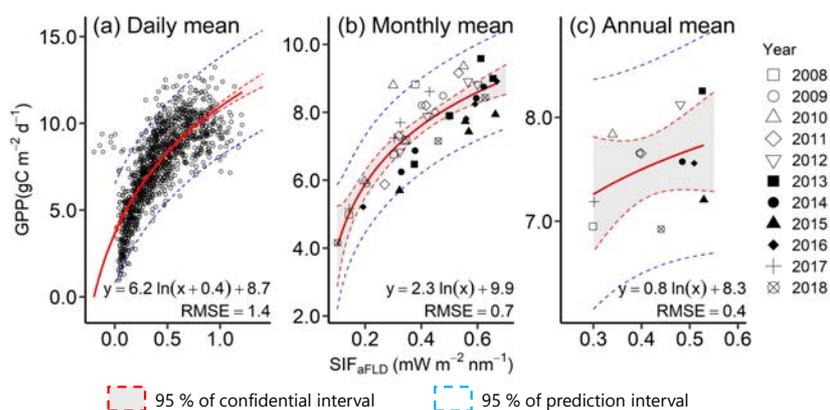


図 1.16 2008～2018 年にわたる SIF-GPP の関係。全年データを異なる平均時間でプロット。

4.2.3 衛星観測 SIF と地上観測 SIF の長期変動の関係

地上観測と衛星観測では異なる空間スケールを持つにもかかわらず、過去 11 年間で月平均した SIF_{aFLD_MS} と GOSIF-SIF は高い相関を示した (図 1.16 (a), $r^2=0.87$)。ただし GOSIF-SIF の振幅は地上観測 SIF よりも過大になる傾向が見られた。地上観測 GPP と GOSIF-GPP の関係を図 1.17(b)に示す。高い相関関係 ($r^2=0.96$) が見られた一方で、ここでも GOSIF-GPP は地上観測された GPP に対し過大評価される傾向があった。さらに図 1.16 で示した SIF-GPP 曲線の近似式を用いて過去 11 年間の SIF から GPP を推定した値を図 1.17(b)に併記する。その結果、推定 GPP と地上観測 GPP はほぼ同値を示すことが分かった。

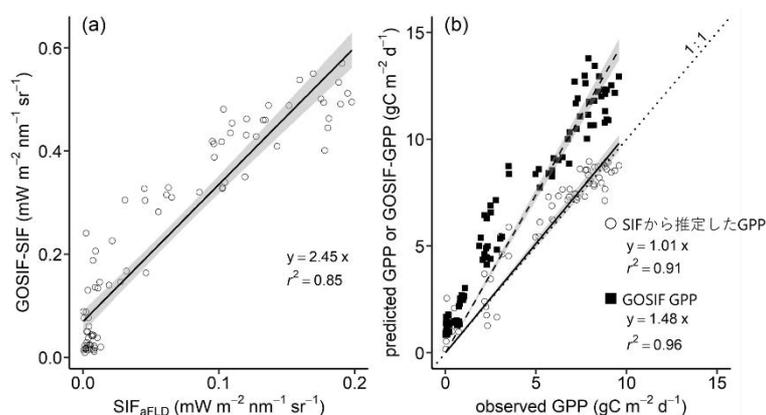


図 1.17 (a) 月平均 GOSIF-SIF と SIF_{aFLD_MS} の関係と (b) 地上観測 GPP と GOSIF-GPP (黒い四角と鎖線) および SIF-GPP 曲線から推定した GPP (中抜き丸とドット線) の関係。用いたデータは 2008～2018 年

GOSIF-SIF は地上観測 SIF の変動を高く追従した一方で、絶対値を 2.5 倍ほど過大評価した (図 4.2.3(a))。その原因として MS-700 の FOV (Field of View: 視野角) は 180° であるのに対し、衛星観測では多くの場合より狭い FOV を採用している点が挙げられる。したがって衛星観測ではより葉緑密度の高い視野を持っており、それが GOSIF-SIF や GOSIF-GPP が地上観測よりも過大評価される傾向になったと考えられる。

また年ごとの GOSIF-SIF と SIF_{aFLD_MS} の関係を比較すると、2008 年から SIF は上昇傾向があることが判明した一方で、2016 年のみ逆の変動傾向を示した (GOSIF-SIF は前年から上昇し、 SIF_{aFLD_MS} は下降した)。この原因としては、高山サイトの林冠と林床では異なる植生が繁茂しており、衛星観測ではそれをとらえられていなかったと考えられる。

このように長期間にわたる地上観測データをもつことによって、衛星観測によるバイアスや検証を行うことが出来るようになる。世界的な SIF 研究では、これまで主にヨーロッパ大陸とアメリカ、東アジアで個別に実施されてきた地上観測を有機的に統合し、衛星観測による全球 SIF 推定値の妥当性を検証しようと試みる動きがある。わが国がもつ PEN サイトは統一された規格で長年観測を続けてきた稀有な地上観測網として、この分野における牽引役を期待されているといえるであろう。本調査はそのための重要なステップとして、中分解能分光放射計による微細な SIF シグナルを検出するという新しい手法を提案した。

5. 研究目標の達成状況

既設 4 サイト（温帯落葉広葉樹林（岐阜県高山市）、水田（茨城県つくば市真瀬）、温帯常緑針葉樹林（桐生）、亜寒帯常緑針葉樹林（アラスカ・フェアバンクス））に加え、本課題による新規 1 サイト（亜熱帯常緑広葉樹林（沖縄県国頭村与那））における地上 SIF 観測が行われている。また本計画外にも別予算によって 4 サイト（コムギ（北海道札幌市羊ヶ丘）、湿地（北海道美唄市）、温帯落葉針葉樹林（山梨県富士吉田市）、温帯落葉針葉樹林（北海道幌延町））が設置された。そのため地上 SIF 観測のプロトコルはおおよそ構築でき、統一的なスペクトル測定・データ処理を通して、比較的均質な SIF 観測データが北大サーバーに集積するデータベースの構築が完成した。これにより、多数の生態系タイプにおいて GOSAT 等衛星 SIF データとの比較した結果、衛星観測は地上観測と同程度の精度を示していることがわかった。また中分解能分光放射計による温帯落葉広葉樹林（岐阜県高山市）のスペクトルデータから、新たに area-ratio FLD (aFLD) という計算方法を提案し、高分解能分光放射計による SIF との間でスケールリングするアプローチを開発することに成功した。これにより既存の中分解能分光放射計による過去の長期間にわたる SIF の時間変化の推定が可能になった。以上のことを考慮して、計画通りの達成があったと判断した。

6. 引用文献

- 1) Nakashima N., Kato T., Morozumi T., Tsujimoto K., Akitsu T.K., Nasahara K.N., Murayama S., Muraoka H. and Noda H.M., 2021: Area-ratio Fraunhofer line depth (aFLD) method approach to estimate solar-induced chlorophyll fluorescence in low spectral resolution spectra in a cool-temperate deciduous broadleaf forest. *Journal of Plant Research*, 134, 713-728. <https://doi.org/10.1007/s10265-021-01322-3>
- 2) Sakai Y, Kobayashi H, Kato T, 2020: FLiES-SIF version 1.0: three-dimensional radiative transfer model for estimating solar induced fluorescence, *Geoscientific Model Development* 13 (9), 4041-4066

II-2 光合成・蛍光・反射分光同時測定系を用いた個葉光合成推定モデルの改良

東北大学 彦坂 幸毅

〔要旨〕

研究開始以前にクロロフィル蛍光と光化学反射指数 (PRI) から光合成速度を高精度で推定するモデルを提案している¹⁾。しかし、このモデルが、異なる環境で生育した葉や異なる種の葉でも適用可能なかは検証されていなかった。特に、PRI は葉の色素組成や光の照射角度によって値が変わる可能性が示唆されていたため、補正方法の確立が必要であると予想された。本研究では、葉レベルの様々な研究を行い、補正方法を確立し、本モデルを実用化可能にすることを旨とした。まず、①強いストレスを受けた葉の光合成・蛍光・PRI の観測を行い、先行モデルでは光障害が起こった葉の光合成速度を過大評価しうること、光障害を受けた葉でも本モデルが有用であることを示した。また、②PRI によって野外環境で植物の水ストレスを検出することが可能であることを示した。次に、③異なる環境で育成した葉の光合成・蛍光・PRI を調べた。PRI が色素組成の影響を受けることを確認し、別の反射指数 (NDVI_{green}) を用いることでその影響を排除し、本モデルによって光合成速度を精度良く予測できることを明らかにした。④さらに、多くの種の葉を材料として PRI の補正が可能な反射指数を探索し、6つの反射指数が利用可能であることと補正式を提案した。⑤PRI の値に角度依存性があることを示し、補正するための式を提案した。⑥10種の植物の葉について異なる季節に光合成・蛍光・PRI の観測を行い、本モデルによって光合成特性を予測可能であることを示した。⑦光合成・蛍光・PRI の関係について先行論文のレビューと数学的検討を行い、三者の関係を整理した。

1. 研究開発目的

クロロフィル蛍光は光合成活性を反映して変化することが知られており、リモートセンシングにおいて光合成活性を検出するツールとして期待されている。一方、クロロフィル蛍光は、光合成系の光化学系 II で生じる熱放散活性の高低にも影響を受けるため、光合成活性と 1 対 1 の関係にあるとは限らない。サブテマリーダー彦坂は、熱放散活性の高低を、リモートセンシングで観測可能な光化学反射指数 (PRI) によって評価できる点に着目し、クロロフィル蛍光と PRI を同時に観測し、様々な環境条件にさらされた葉の光合成速度の変化を高精度で推定できることを示した¹⁾。ただし、この結果は、同一条件で生育されたただ一種の植物の葉について調べたにすぎない。光合成特性や、反射特性に影響を与える葉の色素の組成は、同一種でも生育条件によって変化し、また、同一生育条件でも種によって大きく異なることが知られている。したがって、このモデルの有用性を示すためには、異なる生育条件の葉、異なる種の葉でも光合成活性を推定できるかどうかを検証する必要がある。本研究はこの検証を目的とした。

2. 研究目標

光合成と蛍光と熱放散へのエネルギー分配が育成条件や種によってどのように異なるかを解析し、蛍光と反射分光から光合成速度を予測する最適な方法を検討する。

3. 研究開発内容

あらゆる条件でモデルを適用可能にするため、様々な条件で育成した様々な種の光合成・蛍光・PRI の関係を調べた。葉の色素組成や観測角度が PRI の値に影響することが予想あるいは明らかになったため、その影響を排除する方法を探索した。そのため、以下の研究を行った。

①強いストレスを受けた葉の光合成・蛍光・PRI

光合成速度と蛍光強度の関係は、多くの条件では正の相関となることが経験的に知られており、この相関をそのまま光合成速度の推定に利用している論文もある。しかし、強いストレスがかかり、光化学系Ⅱに損傷を受けた葉では、光合成活性が下がっているにもかかわらずクロロフィル蛍光強度が上がる可能性があることが古くから知られている。このような葉のクロロフィル蛍光を観測すると、誤って光合成速度が高いと判定してしまう可能性がある。本実験では、この危険性が本当にあるか否かを確かめるため、人為的に光化学系Ⅱの損傷を起こした葉で光合成・蛍光・PRIの観測を行った。また、このような葉でも Hikosaka and Noda のモデル¹⁾が有効かを検証した。

②PRI によって植物の水ストレスを検出する

クロロフィル蛍光は優れた指標だが、その検出には、波長的に細い暗線（フラウンホーファー線）を利用するため、波長分解能が高い分光光度計が必要である。そのような観測ができる衛星は限られており、地球上の全ての植生を網羅できているわけではない。一方 PRI は比較的分解能な分光光度計でも検出可能なため、様々な衛星で観測が可能で、情報量が多い。本実験では、PRI のみによって植物の水ストレス状態を検出することが可能かを検証するため、野外のトウモロコシ群落にビニールの覆いを被せて供給水量をコントロールして育成した。群落を2つに分け、片方には水を充分与え（コントロール）、もう片方には水供給を停止した（処理区）。処理後7日目には処理区にも水を与えた。期間中毎日ハイパースペクトルカメラで撮影し、PRI の値がどのように変化するかを調べた。さらに、土壌水分含量、葉のクロロフィル含量、熱放散活性も調べた。

③異なる環境で育成した葉の光合成・蛍光・PRI

同一種であっても、生育条件によって光合成活性や色素組成が変化することが知られている。PRI は熱放散活性だけでなく色素組成に影響を受けることが知られているため、色素組成の違いを排除した上で熱放散活性を評価する必要がある。そこで、反射スペクトルから色素組成の影響を排除するための反射指数を探しだし、補正するという手法を着想した。本実験では一年草シロザを異なる光・栄養条件で育成し、光合成・蛍光・反射スペクトルを同時に観測し、解析を行った。

④異なる種の PRI を補正するための新規反射指数の探索

③の実験により、反射指数を用いることで色素組成が PRI に与える影響を排除できることが明らかとなった。本実験では、多数の種を実験材料とし、色素組成の影響を普遍的に排除できる反射指数を探索した。③の実験では、過去の論文で示された反射指数を用いただけだったが、本実験では、観測したすべての波長の反射率を利用して最適な反射指数を見出すことを目指した。

⑤観測角度の PRI への影響の補正法の確立

太陽・葉・観測者の間の角度が特定の条件になった場合、鏡面反射が起こる。PRI は葉内の色素組成の変換を観測しているが、鏡面反射は葉の表面で反射するため、太陽光スペクトルがほぼそのまま観測者に見えてしまい、観測した PRI の値は葉内の色素組成以外の要素を含んでしまうことになる。鏡面反射を起こしやすい種・起こしにくい種について様々な角度から光の照射を行い、鏡面反射の影響を調べた。データを解析し、鏡面反射の影響を排除する方法を探索した。

⑥異なる種における光合成・蛍光・PRI の季節変化

異なる環境で育成した異なる植物種であっても Hikosaka and Noda のモデルが幅広く利用できるかについて検証するために、野外環境下で栽培した木本種を用いて、季節ごとに光合成・蛍光・反射スペクトルを同時に観測し、解析を行った。また、これまでの実験での蛍光検出で使用していた PAM 法に加えて、光源に太陽光を使用することで、FLD 法（フラウンホーファー線深度法）を使って太陽光励起クロロフィル蛍光（Solar-induced chlorophyll fluorescence: SIF）を算出し、測定した SIF から光合成を推定できるかについて検証した。検証にあたっては、PAM によって測定した電子伝達の量子収率（ ϕ

P) が光合成速度の指標となることから、Hikosaka and Noda (2019) のモデル式に従って、この ΦP を SIF と PRI から推定できるかを検証した。東北大学の実験圃場にて、日本を代表する 10 種の木本植物種の苗木を栽培し、季節とともに変化する光合成速度（本研究では、実効量子収率 ΦP ）を蛍光と反射スペクトルから推定可能かを検証した。

⑦光合成・蛍光・PRI の関係の一般化

本研究の一部及び先行研究の結果を調査し、光合成・蛍光・PRI の関係の総説を著した。

4. 結果及び考察

※当該サブテーマの研究を行った結果及び考察を記載してください。

1) 強いストレスを受けた葉の光合成・蛍光・PRI

葉にリンコマイシンを与え、光照射処理を行うことで人為的に光化学系 II に損傷を受けた葉を作り出した。リンコマイシンは、損傷を受けた光化学系 II の修復を阻害することで葉の光化学系 II 損傷率を増加させる。これは自然界で起こる光阻害に比較的近い。その結果、強いストレスを受けた葉では、予想通り、光合成速度とクロロフィル蛍光の関係が負になり、通常の葉における関係とは逆になることが明らかとなった（図 2.1 左）。測定された蛍光と PRI の値を Hikosaka and Noda (2019) のモデルに適用し、光合成の効率を推定した結果、関係は弱かったものの、ストレスによる光合成速度の低下を予測することができ（図 2.1 右）、モデルには一定の有用性があることが明らかとなった。本結果はすでに論文にまとめ、Functional Plant Biology 誌に掲載された²⁾。

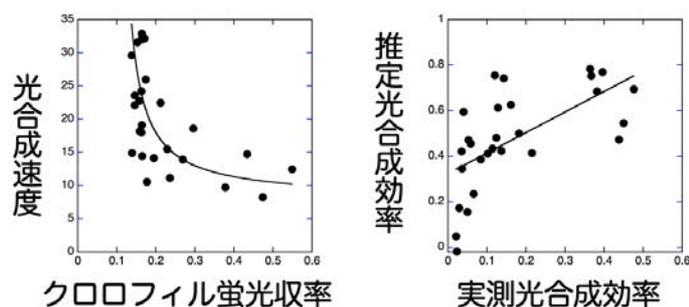


図 2.1 強いストレスを受けた葉の光合成とクロロフィル蛍光の関係（左）と、モデルによって予測された光合成の効率（光化学反応の量子収率）と実測された光合成の効率の関係（右）。Hikosaka (2021) より。

2) PRI によって植物の水ストレスを検出する

水供給を停止した処理区のトウモロコシ群落では、土壌水分含量が低下し（図 2.2b）、熱放散活性が増加した（図 2.2d）。PRI は処理区で大きく低下したが、処理後 7 日目に灌水を再開すると、熱放散活性も PRI も元に戻り、PRI が乾燥ストレスの症状として利用できることが明らかとなった（図 2.2a, d）。本結果はすでに論文にまとめ、Journal of Plant Research 誌に掲載された³⁾。

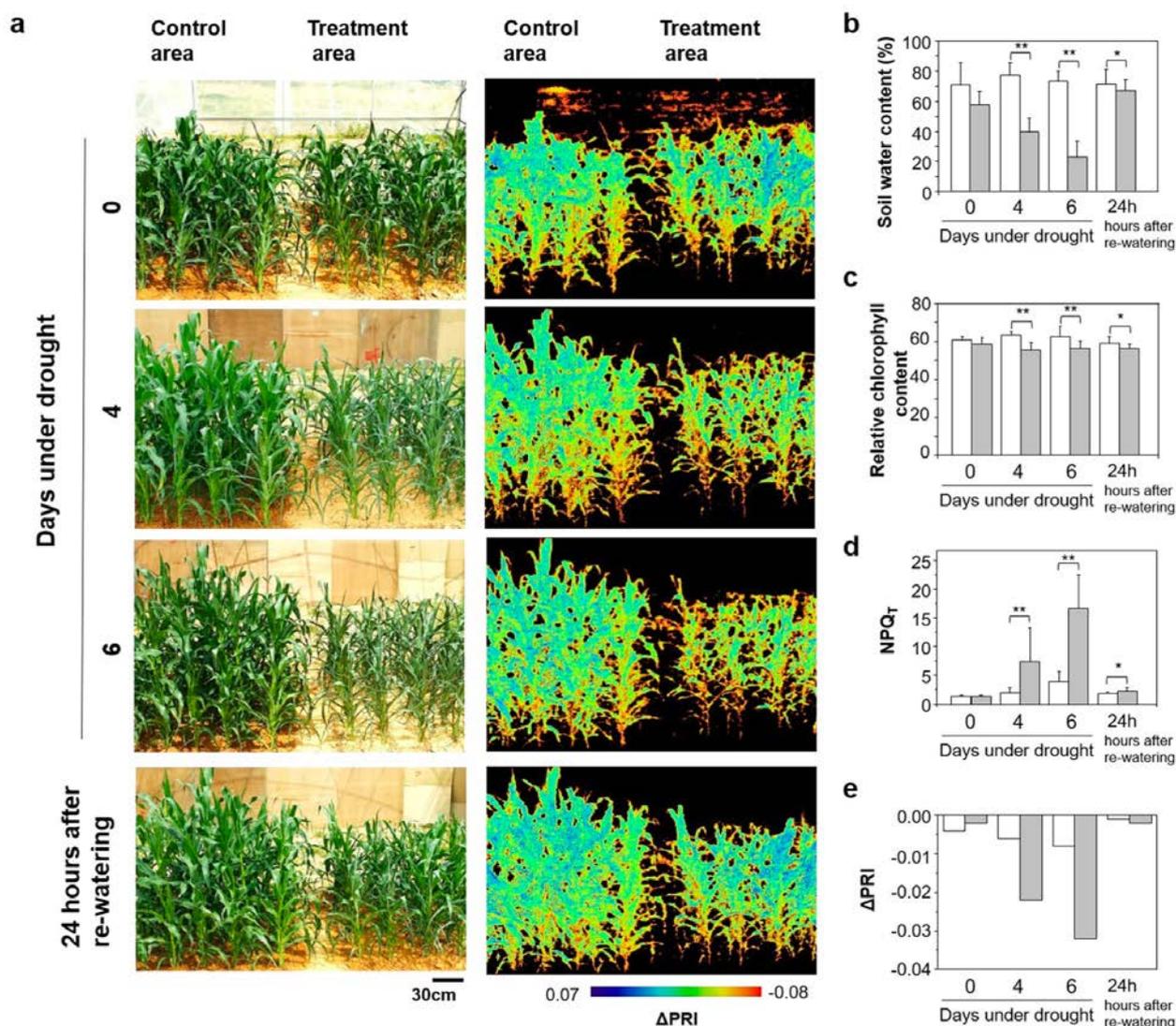


図 2.2 トウモロコシ群落において水ストレスが PRI に与える影響。a) 通常のカメラで撮影した群落（左）とハイパースペクトルカメラで撮影し、 Δ PRI（観測された PRI 値から暗黒下の PRI 値を差し引いた値）の数値を可視化したもの。水供給を遮断してから 0、4、6 日の画像と、7 日めに灌水し、その 24 時間後の画像。b, c, d) 水供給を遮断してから 0、4、6 日と、7 日めに灌水し、その 24 時間後の土壌含水量 (b)、相対クロロフィル含量 (c)、NPQt（熱放散活性の指標）(d)、 Δ PRI の平均値 (e)。Kohzuma et al. (2021) より。

3) 異なる環境で育成した葉の光合成・蛍光・PRI

図 2.3 に光合成、電子伝達の量子収率 (Φ P)、熱放散活性 (NPQ)、蛍光収率 (F_s) の光強度依存性を示す。光-光合成曲線は生育条件によって大きく変わり、最大光合成速度は強光-富栄養生育 (HL-HN) で高く、弱光-富栄養生育 (LL-HN) や強光-貧栄養生育 (HL-LN) では低くなった。弱光での光合成速度は三者間で大きな違いはなかったが、蛍光強度は異なり、光合成と蛍光の関係が生育条件で変わることが示唆された。

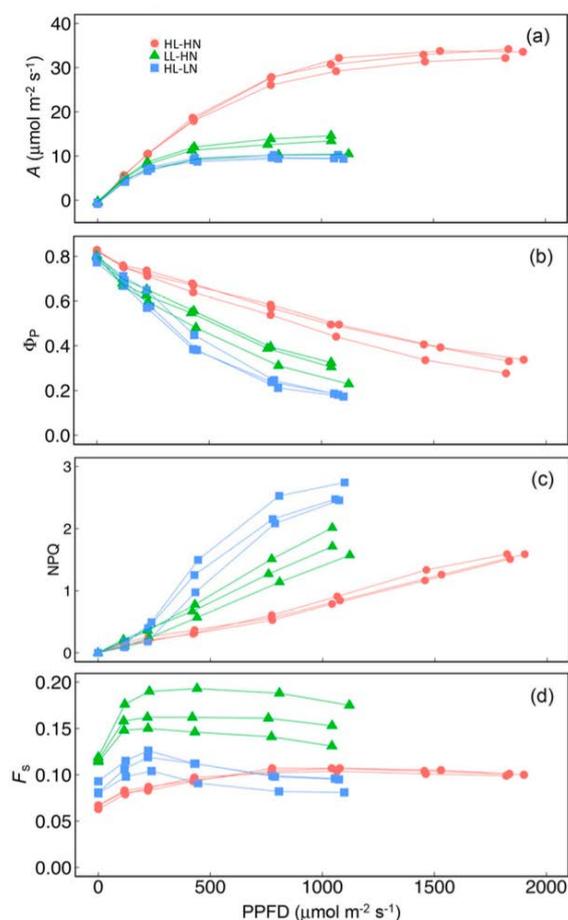


図 2.3 強光-富栄養 (HL-HN)、弱光-富栄養 (LL-HN)、強光-貧栄養 (HL-LN) 条件で育成したシロザ葉の光合成速度 A (a)、光化学反応の量子収率 Φ_P (b)、熱放散活性 NPQ (c)、蛍光収率 F_s (d) の光強度 (PPFD) 依存性。Tsujiyoto and Hikosaka (2021) より。

熱放散 (NPQ) と PRI の関係は生育条件によって若干異なり (図 2.4 左上)、そのため、モデルをそのまま使って推定した光合成速度と実測値の関係は 1:1 から大きくずれた (図 2.4 左下)。反射スペクトルを解析した結果、550nm と 750nm の反射率を利用した $\text{NDVI}_{\text{green}}$ と呼ばれる反射指数と、熱放散活性がゼロのとき (つまり暗黒下) の PRI 値 (PRI_0) との間に強い相関があることがわかり (図 2.5)、 $\text{NDVI}_{\text{green}}$ によって補正した PRI ($\Delta \text{PRI}_{\text{est}}$) と NPQ の間には高い相関が見られた (図 2.4 右上)。この補正した PRI を用いると、光合成速度の推定精度は大きく向上した (図 2.4 右下)。以上から、生育条件が異なる葉でも、補正值を用いることによって高精度で光合成速度を推定できることが明らかになった。本結果はすでに論文にまとめ、Photosynthesis Research 誌に掲載された⁴⁾。

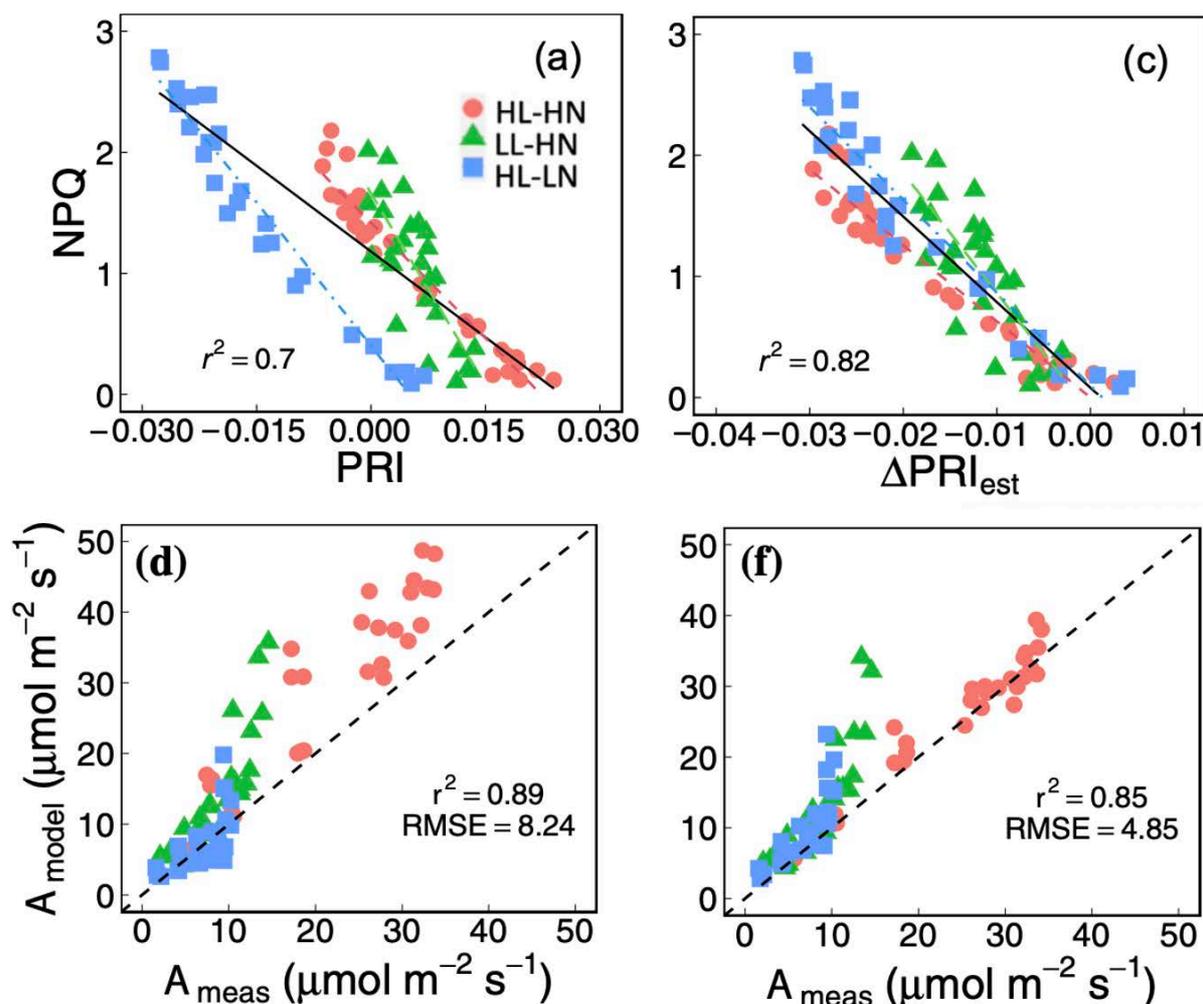


図 2.4 a) 実測した熱放散活性 NPQ と実測した PRI の関係、c) 実測した NPQ と NDVI_{green} を使って推定した ΔPRI_{est} の関係、d) a) で得られた関係を使って予測した光合成速度 A_{model} と実測した光合成速度 A_{meas} の関係、f) c) で得られた関係を使って予測した光合成速度 A_{model} と A_{meas} の関係。

Tsujimoto and Hikosaka (2021) より。

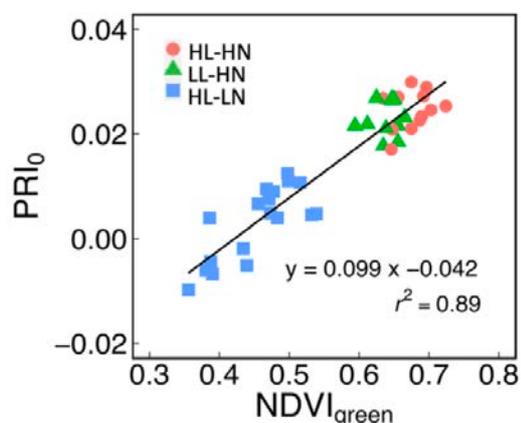


図 2.5 暗黒下で測定した PRI (PRI_0) と $NDVI_{green}$ の関係。Tsujimoto and Hikosaka (2021) より。

4) 異なる種の PRI を補正するための新規反射指数の探索

PRI に対する色素組成の影響の排除は、③の実験で用いた $NDVI_{green}$ のような、熱放散がゼロのときの PRI (PRI_0) と相関がある反射指数を用いることによって可能になる。③の実験では一種 (シロザ) し

か用いていないので、 $NDVI_{green}$ が普遍的に利用できる指数かは不明である。本実験では、草本、落葉樹、常緑樹といった異なる機能群に属する 22 種で共通して PRI_o の違いを補正できる反射指数を探索した。既存の論文で利用された 34 の反射指数に加え、観測した波長を全て利用し、2 波長の比、2 波長を使った反射指数、3 波長を利用した反射指数を総当たりで計算した。計算において用いた反射指数/比の数は 1 億 2 千万を超える。この膨大な数の指数から、 PRI_o と相関が高く、照射光強度の変化によって値が変化しない指数を探索した。その結果、6 種類の指数が選択された (図 2.6)。これらの指数を用いて推定された熱放散活性 (estimated NPQ) は実測した熱放散活性 (measured NPQ) と高い相関を示し、有用性が高いことが明らかとなった。本結果は、現在論文を執筆中である。

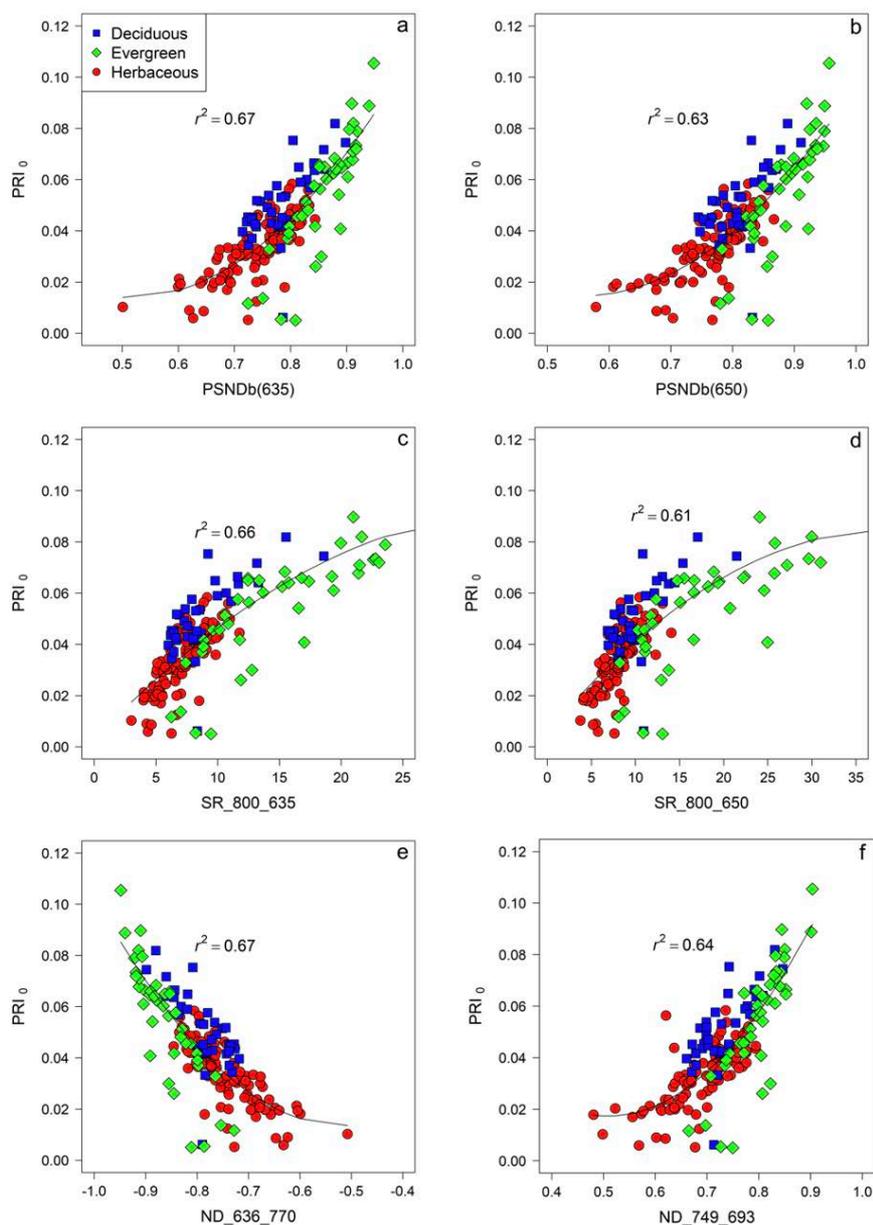


図 2.6 暗黒下で測定した PRI (PRI_o) と選択された 6 つの反射指数の関係。二次曲線で回帰してある。

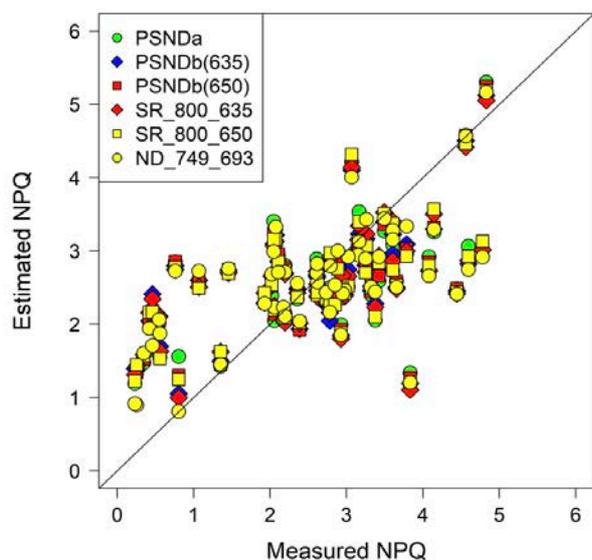


図 2.7 6つの反射指数を用いて推定された熱放散活性 (Estimated NPQ) と実測した NPQ (Measured NPQ) の関係。直線は $Y=X$ 。

5) 観測角度の PRI への影響の補正法の確立

シロダモ、コナラ、シロザ葉各 3 枚を対象に、光源の入射光強度を変化させることによって多方向分光反射測定を行った。入射光強度を一定としたときの PRI の角度依存性を調べたところ、PRI は 3 種すべての葉で観測方向によって変化することがわかった (図 2.8)。特に、葉表面に厚いワックス層を持つシロダモ葉は他の 2 種とは異なり鏡面反射が強く生じる観測角で PRI が大きく低下した。PRI と NPQ を比較したところ、PRI の観測角によるばらつきにより NPQ と PRI の相関は弱くなった (図 2.9; $R^2=0.26$)。

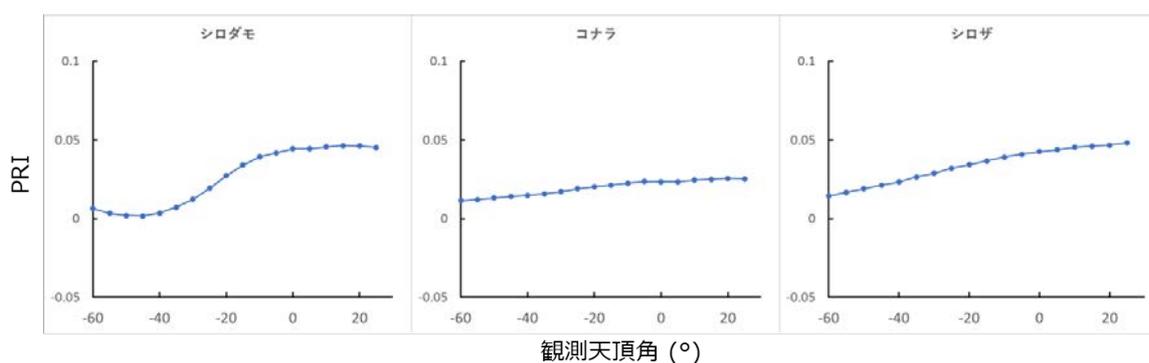


図 2.8. 入射光天頂角が 45° のときの PRI の測定角度依存性。マイナスの角度は測定用光ファイバが光源と反対側にあることを示す

400-800 nm のすべての波長 X , Y の組み合わせで ΣR^2 を計算した結果、PRI で用いられる 500-600 nm の波長帯を除き 3 つの波長領域で ΣR^2 が高くなることがわかった(図 2.10 の白い点線枠)。この中から特に ΣR^2 の高い 3 つの組み合わせを選び、さらにそれらの間で NPQ に対する mPRI の回帰直線の傾きの種間のばらつきが少ない組み合わせを調べたところ、 $(X, Y)=(753, 766)$ が最も傾きのばらつきが少ない波長組み合わせであった。実際に、 $mPRI=(R_{531}-R_{753})/(R_{570}-R_{766})$ として NPQ-mPRI 間の決定係数を求めたところ、 $R^2=0.76$ と元の PRI に比べて NPQ の予測性が大きく増加した(図 2.11)。本結果は今後論文としてまとめる予定である。

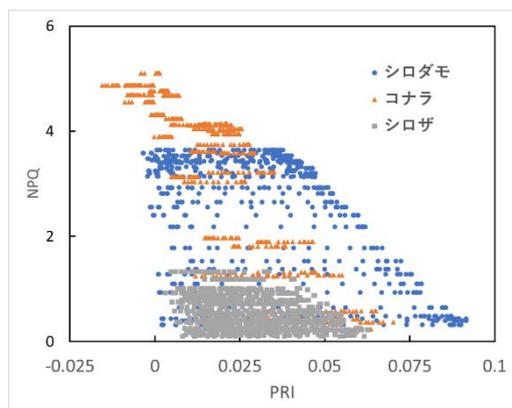


図 2.9. 実測した NPQ と PRI の関係

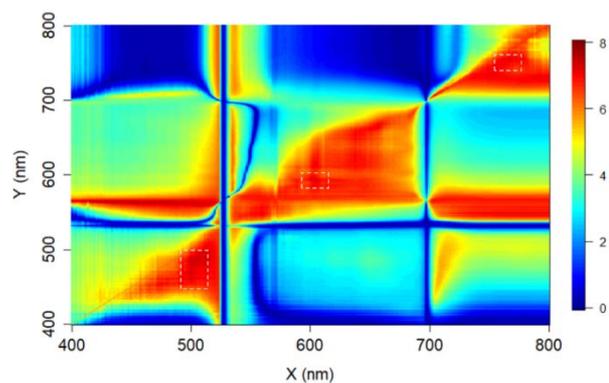


図 2.10. 波長の組み合わせ (X, Y) に対する NPQ と mPRI の積算決定係数 ΣR^2 のヒートマップ

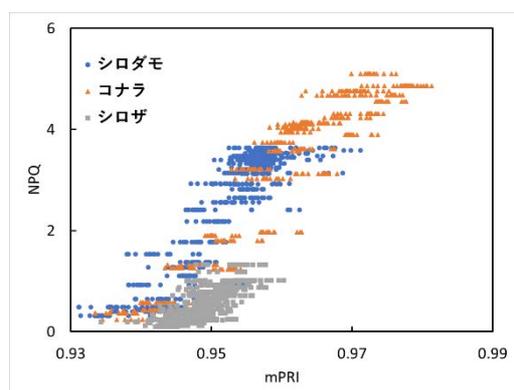


図 2.11. $mPRI=(R_{531}-R_{753})/(R_{570}-R_{766})$ と NPQ の関係

6) 異なる種における光合成・蛍光・PRI の季節変化

最初に蛍光計 (miniPAM)、分光放射計 (MR4000)、光合成速度 (LI6400) を同時に測定できるシステムを作成した (図 2.11)。これまでのシステムでは蛍光を PAM でのみ評価していたが、この太陽光を取り込めるチャンバースystemにより SIF の定量が可能になった。測定にあたっては、観測角度の PRI への影響を考慮し、太陽と葉面が常に垂直 (90 度) になるように調整した。また、本研究の SIF の算出には Spectral Fitting Methods (SFM) を適用し、O2A バンド ($\lambda = 759 - 764\text{nm}$) から算出した。一例として、2020 年 5 月 28 日にモチノキ新葉で観測された太陽光反射分光特性から SIF が観測されていることが確認できた (図 2.12)。



図 2.12 測定システム

Spectral Fitting Methods (SFM):

O2A バンド ($\lambda = 759 - 764\text{nm}$) を利用 ⇒ 分光器 HR4000 ($n = 41$)

(Meroni and Colombo (2006))

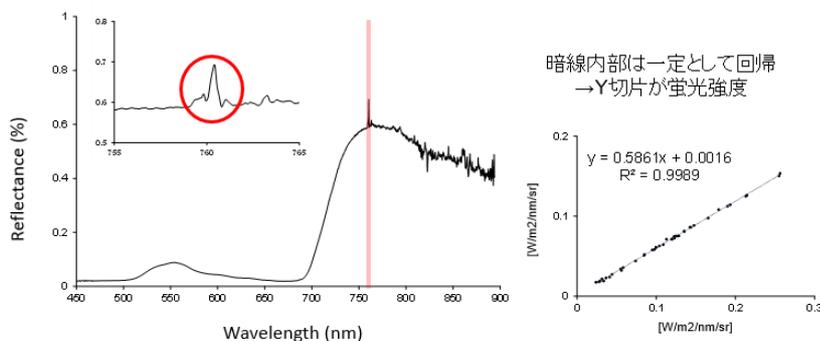


図 2.13 SIF の算出

種間差の一例として、2020 年 5 月に測定した結果を示す (図 2.14)。光合成速度は、常緑樹 ($3 \sim 5\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) と比べて落葉樹 ($7 \sim 11\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) で高い傾向を示した。一方の SIF は、常緑樹のアカガシで約 $5\text{mW m}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{sr}^{-1}$ と他種と比べて高いことを除けば $1.5 \sim 2.5$ の範囲内で安定した値を示した。これら光合成速度と SIF 値の植物種間での違いは、単純に光合成速度が高いから SIF 値が高いというわけではなく、SIF 値から光合成速度を予測するためには他の要因を考慮する必要があることが示された。植物の健康状態 (ストレス) の指標となる暗黒下での電子伝達量子収率 F_v/F_m は、常緑樹 5 種と比べて落葉樹 5 種で低い傾向が認められたが、いずれも 0.75 以上の値を示しており、大きなストレスを受けていないことが示された。熱放散の指標となる NPQ 値は、植物種間で大きくバラついた ($1.5 \sim 9$ の範囲)。

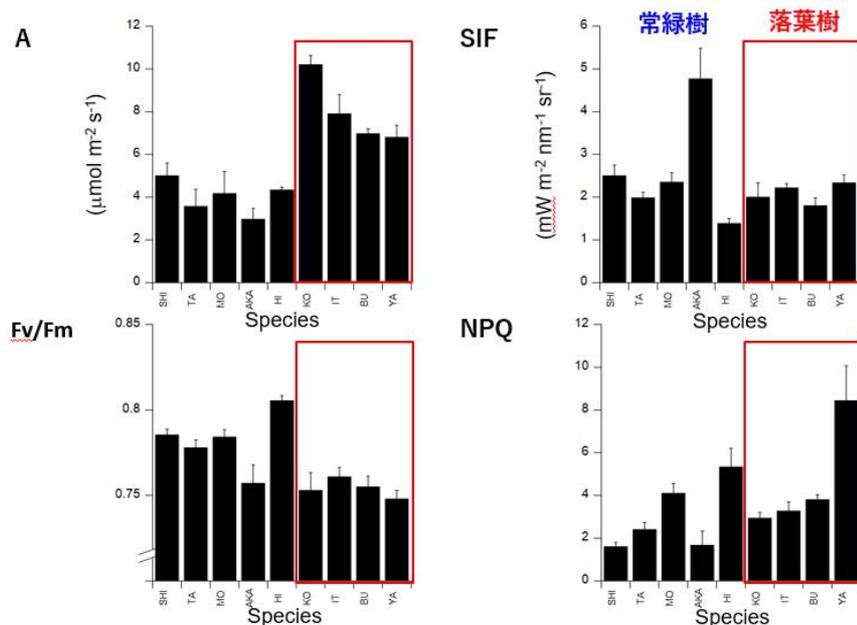


図 2.14 測定パラメータの種間差

SHI：シロダモ、TA：タブノキ、MO：モチノキ、AKA：アカガシ、HI：ヒノキ、KO：コナラ、IT：イタヤカエデ、BU：ブナ、YA：ヤマボウシ

季節変化の一例として、常緑樹シロダモの結果を示す（図 2.15）。光合成速度は、3月で約 $0.5 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ と非常に低く、5月に最大値の $5 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を示した後、8月に約 $3.2 \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 減少した。一方のSIFについても同様の季節変化を示し、3月の約 $1.2 \text{mW m}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{sr}^{-1}$ から5月にかけて上昇し、その後8月にかけて減少する山型の季節変化を示した。植物のストレス指標となるFv/Fmは、3月に約0.4の値を示し、植物の葉がストレスを受けていることが示された。その後5月と8月のFv/Fmは、いずれも0.75以上の値を示しており、大きなストレスを受けていないことが示された。熱放散の指標となるNPQ値は、3月と5月で低く（1.5～2）、8月に約3.5と高い値を示した。

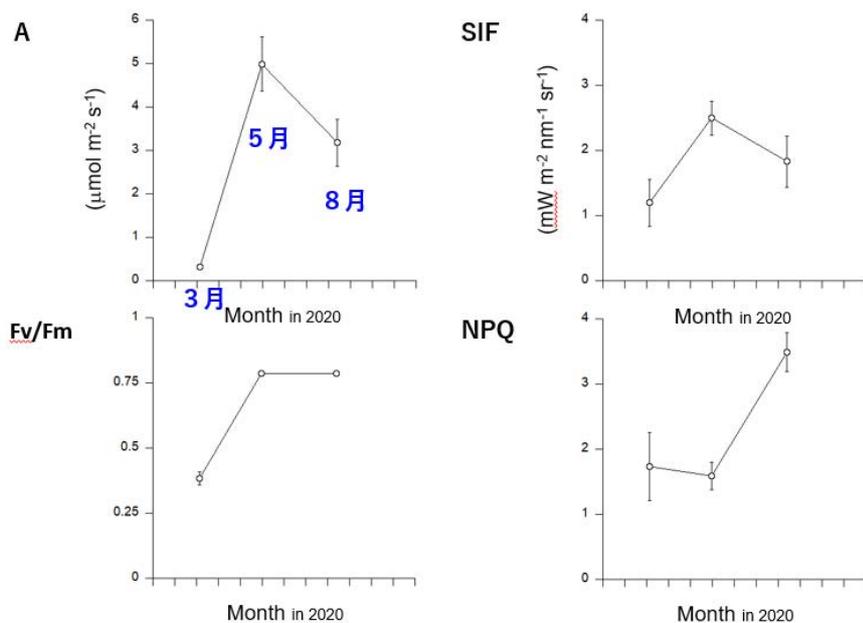


図 2.15 測定パラメータの季節変化（常緑樹シロダモ）

測定した分光データを Hikosaka and Noda (2019) のモデル式 $\Phi_P = 1 + b\Phi_F(1 + NPQ)$ に適用するためには、 Φ_F は SIF/PPFD から、NPQ を PRI から推定できるかを検証する必要がある (Φ_P は光合成電子伝達の量子収率、 Φ_F はクロロフィル蛍光の量子収率、NPQ は熱放散活性)。最初に、PRI から NPQ を予測できるかについて検証するために、PRI 値から PRI₀ 値を差し引いた Δ PRI と NPQ の関係について調べた (図 2.16a)。NPQ と Δ PRI の間には負の相関があり、異なる種・異なる季節の葉でも NPQ を Δ PRI から予測可能であることが示された。次に、SIF を正しく測定しているかを検証するために、PAM 法で測定した蛍光収率 (F_s/F_0) と FLD 法によって得られた蛍光収率 (SIF を受光強度で割った値で代用: SIF/PPFD) の関係を解析した。相関は若干下がったものの有意であり、FLD 法で得られた SIF もある程度信頼できると考えられた。これら Δ PRI と SIF を用いて $1 + b\Phi_F(1 + NPQ)$ を計算した。 Φ_F として SIF/PPFD、NPQ として図 16a に示した回帰式を用いて Δ PRI から計算した NPQ ($NPQ_{\Delta PRI}$) を用いた。実測した Φ_P と比較したところ、両者の間には有意な負の関係があった (図 2.16c)。図 2.16d では、実測した Φ_P (Φ_{PAM}) とモデルで予測した Φ_P (Φ_{FLD}) を比較した。両者の間には高い相関があり、 Δ PRI と SIF から光合成速度を予測可能であることが示唆された。本研究はさらに詳細を詰め、論文として発表する予定である。

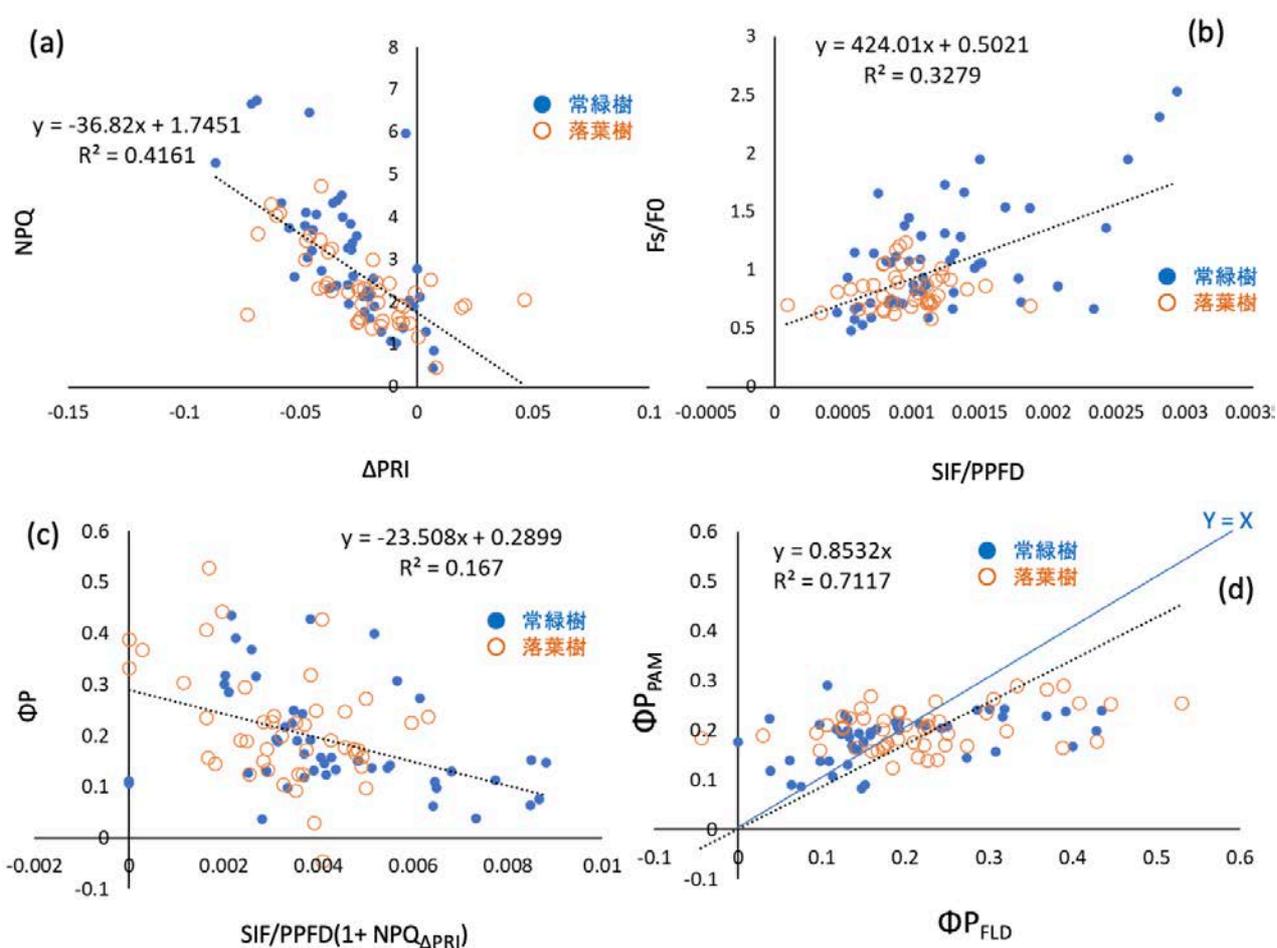


図 2.16. Δ PRI と NPQ の関係

⑦光合成・蛍光・PRI の関係の一般化

光合成速度は電子伝達速度と気孔コンダクタンスの値から推定できる。気孔コンダクタンスは湿度、CO₂ 濃度、光合成速度の影響を受けることが知られており、その関係は Ball モデル、Leuning モデル、Medlyn モデルなどで数式化できる。つまり、これら環境条件の値から計算が可能であり、その多くはリモートセンシングによって得ることができる。

電子伝達速度は、ある仮定をおけばクロロフィル蛍光単独、あるいは熱放散活性単独から計算することができる。クロロフィル蛍光単独から電子伝達速度の量子収率（吸収光量あたりの電子伝達量： Φ_P ）を求めるためには、以下の数式を使う。

$$\Phi_F = \frac{K_F}{K_F + K_D + K_N} (1 - \Phi_P)$$

ここで、 Φ_F は蛍光の量子収率、 K_F 、 K_D 、 K_N はそれぞれ蛍光、恒常的エネルギーロス、熱放散活性の速度定数である。 K_D と K_F は定数であるが、 K_N は条件によって変化する。 Φ_P と Φ_F の関係をモデル化するためには K_N と Φ_P の関係を仮定することが必要で、その仮定として以下の式が用いられる。

$$K_N = \frac{(1+\gamma)x^\delta}{\gamma+x^\delta} K_{Nmax}$$

ここで γ と δ は近似するための定数である。 K_{Nmax} は K_N の最大値で、 x はその光飽和度を表し、以下の式で得られる。

$$x = 1 - \frac{\Phi_P}{\Phi_{Pmax}}$$

この仮定を使えば、熱放散活性 NPQ から Φ_P を推定することができる。

$$\Phi_P = \Phi_{Pmax} \left\{ 1 - \left[\frac{\gamma NPQ}{K_{Nmax} \left(1 + \gamma \frac{NPQ}{K_{Nmax}} \right)} \right]^{\frac{1}{\delta}} \right\}$$

NPQ は PRI と高い相関があるため、PRI から NPQ を推定し、さらに Φ_P や光合成速度を推定することが可能である。

ただし、本サブテーマの①の実験結果は、上記仮定が常に成り立つわけではないことを示している。仮定を置かずに Φ_P を推定するためには、蛍光と熱放散の両方を使う必要がある。

$$\Phi_P = 1 - \frac{\Phi_F(1+NPQ)(K_F+K_D)}{K_F}$$

Φ_F は蛍光、NPQ は PRI から知ることができる。

この総説は Journal of Plant Research 誌に掲載されている⁵⁾。

5. 研究目標の達成状況

クロロフィル蛍光と PRI から高精度で光合成速度を予測する手法を確立することが本サブテーマの目標であった。まず、光阻害を受けた葉では蛍光のみで光合成速度を予測するとエラーが生じる可能性があることを示し、我々が提案するモデルが先行モデルに対して優位にあることを明らかにした。次に、異なる条件で育成した葉や異なる種の葉でこのモデルを利用するためには、色素組成や観測角度の違いを補正する必要があったが、その方法を確立した。この補正法を利用すれば、様々な葉でこのモデルが有用であることが明らかとなった。モデルはサブテーマ 3 で用いられる Files-SIF に実装可能などころまで確認している。目標は達成されたと考える。

6. 引用文献

- 1) Hikosaka K, Noda HM (2019) Modeling leaf CO₂ assimilation and photosystem II photochemistry from chlorophyll fluorescence and the photochemical reflectance index. *Plant, Cell and Environment*, 42:730-739. 10.1111/pce.13461
- 2) Hikosaka K (2021) Photosynthesis, chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index in photoinhibited leaves. *Functional Plant Biology*, 48:815-826. 10.1071/FP20365
- 3) Kohzuma K, Tamaki M, Hikosaka K (2021) Corrected photochemical reflectance index (PRI) is an effective tool for detecting environmental stresses in agricultural crops under light conditions. *Journal of Plant Research*, 134:683-694. 10.1007/s10265-021-01316-1
- 4) Tsujimoto K, Hikosaka K (2021) Estimating leaf photosynthesis of C₃ plants grown under different environments from pigment index, photochemical reflectance index, and chlorophyll fluorescence. *Photosynthesis Research*, 148: 33-46. 10.1007/s11120-021-00833-3
- 5) Hikosaka K, Tsujimoto K (2021) Linking remote sensing parameters to CO₂ assimilation rates at a leaf scale. *Journal of Plant Research*, 134:695-711. 10.1007/s10265-021-01313-4

II-3 放射モデル解析に基づく地上・衛星 SIF 観測の標準化

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 小林 秀樹
 〈研究協力者〉 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 酒井佑慎

〔要旨〕

グローバル炭素収支評価の不確かさの低減に向けて、衛星や地上観測網のデータの統合的な解析が進められている。近年注目されるクロロフィル蛍光は、植物学の分野では1980年代から光合成活性の指標として用いられてきたが、衛星や航空機観測などのリモートセンシング観測においても、GOSAT 1号機/2号機、OCO-2/-3、GOME-2、TROPOMI など2010年頃から太陽光によって誘起されるクロロフィル蛍光（SIF）の観測データが利用できるようになってきた。サブテーマ3では、地上及び衛星SIFデータの標準化を行うための3次元放射伝達モデル（FLiES-SIF）の開発を行い、個葉の光合成モデル・蛍光モデルと結合してSIFデータによる植生の総光合成量（GPP）を推定する新しいアルゴリズムを開発した。そして開発したアルゴリズムを岐阜県高山市の落葉広葉樹林などに適用し、既存のGPP推定モデルよりも高精度な推定が可能であることが明らかにした。さらに、開発したGPPアルゴリズムを日本周辺域で適用し2019年におけるGPP分布推定をGOSAT-2及びTROPOMI（GOSAT-GWの模擬データ）のSIFデータで行った。本研究ではTROPOMIをGOSAT-GWの模擬データとして活用した。2023年以降にGOSAT-GWが打ち上げられ、高頻度・高空間分解能のSIFデータが提供されるようになれば、空間分布評価に耐える解像度のGPPマッピングが実施できると期待できる。

1. 研究開発目的

グローバル炭素収支評価の不確かさの低減に向けて、衛星や地上観測網の各種データの統合的な解析が進められている。陸域生態系が光合成によって年間に吸収する二酸化炭素量は、毎年の気候変化や温暖化、乾燥化などの長期的な環境変動の影響を受けて変動し、炭素収支の年変動に大きな影響を与える¹⁾²⁾。従来から全球スケールでの光合成量の推定には、衛星データから推定される葉面積指数などの植生物理量や植物の光合成有効放射吸収量を植物分布の現況情報として利用し、モデルで算出する方法が一般的であった。近年注目されるクロロフィル蛍光は、植物学の分野では1980年代から光合成活性の指標として用いられてきたが、衛星や航空機観測などのリモートセンシング観測においても、GOSAT 1号機/2号機、OCO-2/-3、GOME-2、TROPOMI など2010年頃から太陽光によって誘起されるクロロフィル蛍光（SIF）の観測データが利用できるようになってきた³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

森林樹冠上で上向きに射出されるSIFは、森林内における個葉の蛍光エネルギーのうち、樹冠外へ射出したエネルギーの集合である。しかし、例えば、森林群落の下層に存在する葉からの蛍光は、その葉の周辺に存在する他の葉や幹、枝などに衝突する。周辺の葉に衝突した蛍光起源の光子の一部はクロロフィル色素に吸収されて光合成に再利用される。一方で、葉や枝、幹などに衝突した蛍光起源の光子は、それらの媒体で散乱される。この散乱を繰り返す中で、一部の光は樹冠上端から射出される。蛍光エネルギーの波長分布は赤から近赤外領域に分布しており、葉の表面における吸収と散乱光の割合は、葉内のクロロフィルに代表される葉内色素の分光吸収係数に依存するため、蛍光エネルギーは波長によって異なる。このように、樹冠上端で観測される樹冠スケールのクロロフィル蛍光輝度（以下、樹冠SIF）は、森林群落内の個々の葉の蛍光の総和ではなく、上述の複雑な経路をたどって樹冠上端で観測される蛍光輝度の積算値である。そのため、樹冠SIFを計算するためには、森林群落の形状を出来るかぎり正確に表現し、その植生モデル上で放射伝達計算を実施する必要がある。

さらに、サブテーマ1で実施した地上SIFデータの取得や世界各地で観測されているSIFデータは、衛星観測で得られるSIFと同じ太陽天頂角一観測幾何条件で観測したものではない。また衛星観測SIFであってもその観測角は一定ではなく、観測日時における太陽天頂角・センサの走査角に依存する。また地上SIFデータは、観測手法が研究プロジェクトによって様々であり、コサインコレクタによる下半

球からの分光放射照度測定を計測する方法や狭視野角（視野角 25° 程度）による特定の天頂角・方位角における観測値などがある。SIF の観測値は、本研究の成果で示すように、幾何条件によって大きく変化する。そのため、SIF データから生態系光合成量を推定するためには、SIF の観測角依存性を明らかにし、様々な幾何条件で観測された SIF データを標準化して光合成モデルで活用する必要がある。これに加えて、衛星で観測できる SIF の輝度は、近赤外の 760nm 付近の情報に限られる。さらに、これは群落全体から放出される個葉のクロロフィル蛍光の積算値ではなく、全放出量のうち衛星視野で観測されるものだけである。このため、衛星観測 SIF を光合成モデルで活用するためには、衛星で観測される特定波長の SIF の輝度から全波長域のクロロフィル蛍光量を推定するスキームが必要である。

以上を踏まえて、本サブテーマでは、地上、衛星 SIF データの標準化を放射モデルを用いて理論的に行う方法を検討し（SIF の標準化）、個葉の光合成モデル・蛍光モデルと結合して SIF データによる光合成速度の計算を行うモデルを開発する。最後に GOSAT-2 及び TROPOMI を含む複数の衛星データを用いて日本周辺の光合成の分布を推定する。本テーマの遂行では、SIF の三次元放射伝達モデルが必須となるが、このモデルについては、2016-2019 年度に実施した 2RF1601 課題で基本設計が行われたモデル（FLiES-SIF）を元にする。ただし、2RF1601 課題で開発したモデルは林内での吸収光合成有効放射（APAR）計算を簡易的に仮定するなどの影響で、森林下層部の SIF が過大に推定される傾向があったため、モデルの改良を行った上で本研究で活用する。

2. 研究目標

地上・衛星 SIF 観測の標準化と、それに基づく高精度広域光合成マッピングをするため、様々な環境及び観測条件における樹冠レベルの SIF を再現可能な放射伝達モデルをさらに改良し、観測データとの比較を通じてモデルの精度を明らかにしつつ、光合成推定のアルゴリズム開発を結びつける。

3. 研究開発内容

3.1 改良モデル FLiES-SIF version 1.0 の概要

太陽光が Ω_s 方向から入射したときに、衛星観測方向 (Ω_o) に射出される樹冠上端上向き SIF の放射輝度と蛍光収率は、陽葉 (SIF_{sun}) と陰葉 (SIF_{shade}) の寄与に分けて考えることができる。

$$\text{SIF}(\Omega_s, \Omega_o) = \text{SIF}_{\text{sun}}(\Omega_s, \Omega_o) + \text{SIF}_{\text{shade}}(\Omega_s, \Omega_o) \quad (3-1)$$

ここで、SIF_{sun}(Ω_s, Ω_o) 及び SIF_{shade}(Ω_s, Ω_o) には個葉から射出された蛍光が林内で他の葉群への散乱を繰り返した後に樹冠上端から射出される効果（多重散乱成分）も含むものとする。放射伝達計算の開始は、群落内の個葉からの SIF の射出から始めるが、その個葉レベルでの SIF は入射する光の強度やその他の環境条件（葉温、湿度など）によって変動する。ここで既往研究⁷⁾と同様に吸収光合成有効放射（APAR）に対する個葉 SIF 輝度 (SIF_j, mW m⁻² nm⁻¹ sr⁻¹) を蛍光収率 ϕ_f で表すと以下のようになる。

$$\text{SIF}_{\text{leaf}} = \phi_f(\text{APAR}, T, \text{Rh}) \times \text{APAR} \quad (3-2)$$

ここで、T は葉温、Rh は葉面の相対湿度である。FLiES-SIF では、SIF の射出をレイトレースする個葉を乱数で決定する。このレイトレースを 10,000-30,000 回実行することで、景観平均の樹冠 SIF が計算できる。この個葉の SIF 射出について前バージョン（FLiES-SIF version 0.8）では大気散乱光の PAR の林内での減衰を考慮してこなかった。そのため、下層の葉群が過大な光を受けて APAR が過大に見積もられる傾向があり、その結果 SIF の放出を過大評価する傾向にあった。そのため、本研究では、PAR

の大気散乱光が指数関数的に減衰するように、個葉の APAR ($APAR_{leaf}$) の計算を以下の式で行うように改良した。

$$APAR_{leaf} = (1 - \omega_l) PAR_{dif} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp(-\tau) d\Omega \quad (3-3)$$

ただし、この式(4-3-3)には積分式が含まれているため計算コストが大きい。本研究では試行計算を繰り返し、この積分について5方向からのサンプリングによる近似でSIF計算に対して十分な精度が得られることを確認した。そして、このバージョンのモデルをFLiES-SIF version 1.0としてパブリックサーバーZenodoで公開した(Kobayashi and Sakai, 2019)。

開発したモデルを用いて森林構造の違いが樹冠上端で観測される樹冠SIFに与える影響を仮想林分による感度解析で調べた。図3.1に森林構造パラメータの感度解析に使用した仮想林分を示す。この図は1haプロット内の樹木の分布と樹冠の形状を示したものである。樹冠投影図は樹木の位置(x, y)の分布がポアソン分布に従うように⁹⁾の手法で構築した(以下、3次元の森林景観と呼ぶ)。樹木密度は359本 ha⁻¹で樹高は5-35mに分布している。また、FLiES-SIFでは個々の樹木を図3.2のような回転楕円体、円錐、円柱で近似することができるが、今回の計算では回転楕円体を採用した。感度解析では森林構造が樹冠SIFに与える影響を検討するため、個葉の蛍光収率は入射太陽光強度や気温に依存せず0.01で固定パラメータとした。また、シミュレーションは、GOSATやGOME-2、OCO-2などの衛星観測で利用される近赤外域760nmを想定して、様々な観測条件(太陽天頂角、観測角度)で樹冠SIFを計算した。個葉の反射率・透過率については既往研究の値⁹⁾を利用した(図3.3)。また、高山サイトでの比較では現場で測定したLAI、個葉の反射率・透過率測定値、樹冠投影図を使用し、個葉の蛍光収率は現場の気象データとTol et al. (2014)⁷⁾のモデルで計算した。

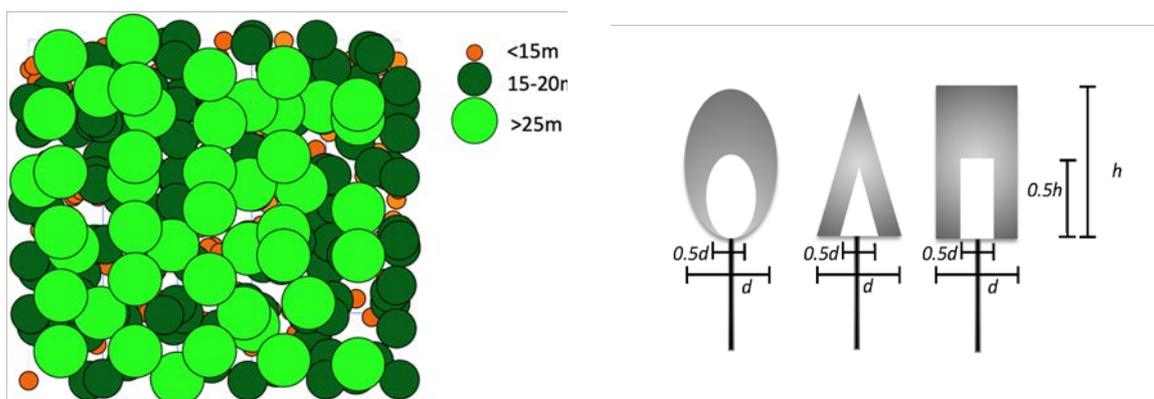


図 3.1 シミュレーションを実施した仮想植生 図 3.2 シミュレーションに用いられる仮想樹

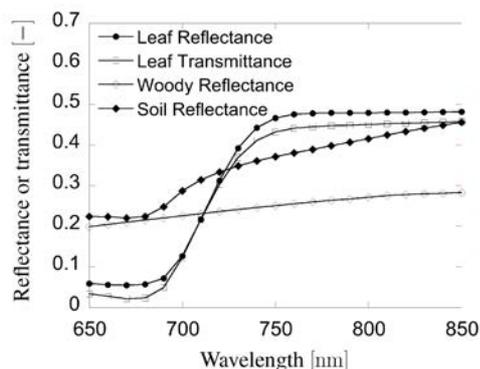


図 3.3 葉、幹、土壌の反射率と葉の透過率のスペクトル分布。

3.3 SIF データの標準化

前節 3.1 で詳述した FLiES-SIF モデルを用いて、様々な方法で観測された衛星・地上 SIF データを以下の標準化手法を提案する。

1) 観測角度の標準化

地上観測 SIF や衛星観測 SIF は太陽天頂角—観測幾何条件で観測したものではない。同じ日時に観測された SIF データであっても、SIF 射出輝度の角度依存性（2 方向性放射）により、観測角度が異なるとその絶対値が変わる（観測角度依存性については 4.1 節の感度解析で詳述）。本研究では、地上・衛星を含むすべての観測 SIF を FLiES-SIF のモデル計算によって直下視（天頂角 = 0° ）における単位立体角あたりの分光放射エネルギー（輝度, $\text{mW m}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{str}^{-1}$ ）に補正して利用する。

2) 地上 SIF 観測値における観測視野角の標準化

地上観測 SIF については、観測手法が研究プロジェクトによって様々であり、コサインコレクタによる下半球からの分光放射照度測定を計測する方法や狭視野角（視野角 25° 程度）による特定の天頂角・方位角における観測値などがある。さらに、コサインコレクタ等を用いて半球 SIF 照度を観測する場合には、森林にセンサを設置する際に利用する観測タワーなどの人工構造物の視野への映り込みを完全に防ぐことは難しい場合もある（図 3.4）。観測タワーの映り込みがある範囲では、蛍光は観測されないため観測タワーの映り込み範囲の大きさに比例して観測 SIF が過小評価されてしまう。そのため、観測タワーが写り込んでいる範囲を除外した実効視野角における SIF に補正する必要がある。

本研究でアルゴリズム開発のターゲットサイトとして利用している岐阜県高山市の落葉広葉樹林の場合、サブテーマ 1 で実施している SIF センサの脇に魚眼カメラ（Phenological Eye Network, 協力者：筑波大学・奈佐原顕郎氏と岐阜大学による管理）が設置しており、そのカメラにおける観測タワーの視野への映り込み範囲は視野角 85° であった。本研究では観測タワーのような人工構造物の映り込みを以下の補正式で調整する。

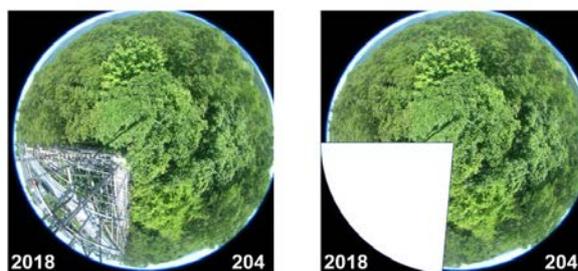


図 3.4. 岐阜県高山サイトにおける SIF 観測における観測タワーの映り込みの様子。この SIF 観測の場合には視野角 85° が観測タワーで覆われていて SIF を観測できていない。

$$SIF_{obs} = \gamma SIF_{act} \quad (3-4)$$

$$\gamma = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} SIF(\theta, \varphi) d\theta d\varphi}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\int_0^{2\pi} SIF(\theta, \varphi) d\varphi - \int_a^b SIF(\theta, \varphi) d\varphi \right) d\theta} \quad (3-5)$$

ここで、 γ は視野角の補正項であり、式(3-5)の分母第二項の方位角方向の積分範囲(a, b)は、観測タワー等の人工構造物の映り込み範囲を示している。この補正を実施することで、人工構造物の影響を除去した上での半球 SIF 照度相当の値に調整することができる。さらに、FLiES-SIF モデルを用いることで、半球 SIF 照度を直下視（天頂角=0°）の SIF 輝度に補正する。この手法は、SIF 観測位置における魚眼写真の取得が必要ではあるが、森林観測サイトなど観測タワーの影響が無視できない場合に SIF データを理論的に補正（標準化）することができる手法である。

3) 観測 SIF から群落内 SIF 総量の推定

観測 SIF は、植生群落内の個葉から放射されるクロロフィル蛍光エネルギー（SIF_{canopy}）のうち、植生上端から観測方向に射出される一部のエネルギーに過ぎない。植物群落から放射される蛍光のエネルギーと植生上端から観測方向に射出される蛍光の比(escape ratio, f_{esc})は従来の研究では植生指数などを利用した簡易式により推定していた（Zeng et al 2019¹⁰など）。しかしながら、これらの手法は、春先の落葉林の展葉開始や秋の落葉時など葉面積指数（LAI）が小さい場合には誤差が大きくなる可能性がある。また、そもそも森林など樹冠形状がより複雑な生態系での適用性については十分に検討されていない。本研究では、開発した FLiES-SIF を用いることにより、①、②の SIF の標準化の実施と同条件で f_{esc} を推定する。この f_{esc} と観測 SIF を利用して植生群落から放射される SIF の総量を計算し、次節で説明する光合成モデルの構築を行う。

3.4 光合成推定アルゴリズムの開発

本研究では、衛星データによる広域推定に適用可能な群落光合成(GPP)推定アルゴリズムを De Pury and Farquhar (1997)¹¹の群落光合成モデルと Tol et al. (2014)⁷のクロロフィル蛍光エネルギー収支モデルをベースとして開発した。推定アルゴリズムの概念図を図 3.5 に示す。観測で得られた SIF

(3.3 節の方針で標準化を行った SIF) は、通常、近赤外域（760nm 付近）で観測された SIF である。光合成モデルで必要とされる SIF は、広帯域で積分したクロロフィル蛍光の総量であるため、クロロフィル蛍光の放射帯域（650nm - 850nm）で波長積分を行い、ブロードバンド SIF (SIF_b) を得る（図 3.5 の青矢印）。このブロードバンド SIF と別途 FLiES-SIF で計算された光合成有効放射の葉群による吸収量(APAR)を用いて光合成の収率を計算し（図 3.5 緑矢印）、その収率をもとに GPP の推定を行う（図 3.5 赤矢印）。

この図 3.5 の GPP 計算フローの青矢印で、現時点で標準化された観測 SIF からブロードバンド SIF (SIF_b) を理論的に計算するのは困難である（その理論的な解明には量子化学・分子生物学でのさらなる基礎検討が必要なため）。そこで半経験的なパラメータ(α)を用いて波長積分を以下の半経験式で計算する。

$$SIF_b = \frac{\alpha}{f_{esc}} SIF_{obs} \quad (3-6)$$

ここで、SIF_{obs} は、標準化された 760nm の観測 SIF データである。 α は SIF_{obs} から SIF_b を計算するための係数である。この係数は、光合成回路の光化学系 I と II の割合やその波長依存性や葉面積指数などの植生の特徴や太陽放射量（太陽天頂角）などに依存する¹³）。 α はフラックスサイトにおいて観測される生態系総光合成量(GPP)を用いて、図 3.5 の赤、緑の矢印を逆に計算して得られた SIF_b と標準化された観測 SIF の比較により算出する。その際に、植生指数 GRVI や APAR との関係を確認して関係式を決定した。

なお、Tol et al. (2014)⁷⁾のクロロフィル蛍光エネルギー収支モデルを用いた光合成推定の拘束条件として、蛍光に加えて熱として散逸されるエネルギーにも制約をつけるモデルがサブテーマ2で開発されている(Hikosaka and Noda, 2018¹⁴⁾, 未発表データ他)。Hikosaka and Noda (2018)¹⁴⁾では、熱放散パラメータ (NPQ) が、植生指数の一つである Photochemical Reflectance Index (PRI) と関係があることからモデル化を試みており、複数の樹種で定式化を試みている。本テーマでもこのモデルの組み込みを検討したものの、広域推定で利用可能な汎用性のある NPQ-PRI の関係式が存在しないこと、また、信頼に足る PRI の広域推定プロダクトが存在しないことなどから、初期的な検討にとどめ、NPQ-PRI 関係の利用については将来の課題とした。

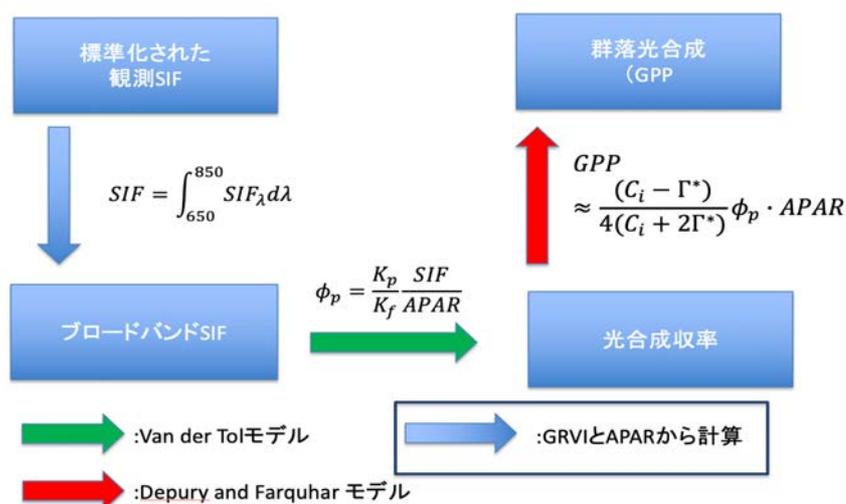


図 3.5 本研究で開発した SIF データを用いた群落光合成推定アルゴリズムの概要。

本モデルのパラメータ推定やアルゴリズムの検証は、岐阜県高山市にある落葉広葉樹林サイト (36°8' N, 137°25' E, 標高 1420 m) で行った。本サイトでは樹高 20m 程度のミズナラ、カンバ等が生育し、林床はササで覆われている。サイトでは、1994 年より産業総合技術研究所のグループ (協力者: 村山昌平氏) が生態系と接地境界層大気のコ₂交換量 (NEE) を計測しており、この NEE から生態系光合成量 (GPP) や生態系呼吸量 (Reco) を計算している。また、光合成有効放射や気温、湿度などの気象要素を計測しており本研究で使用した。さらに森林の毎木データや葉面積指数のデータを岐阜大学の観測チームから入手して使用した (協力者: 岐阜大学・村岡裕之氏、大塚俊之氏、早稲田大学・吉竹晋平氏)。また、生物季節観測用の魚眼写真や分光反射率の計測も実施しており、この分光反射率のデータからサブテーマ1で SIF を定量化している (定量化方法の詳細はサブテーマ1 報告書に記載)。本研究では、アルゴリズムの検証に必要なデータが揃っている 2018 年を解析対象年とした。

3.5 GOSAT-2 及び TROPOMI による日本周辺における GPP マップの作成

3.4 節で概説したアルゴリズムを適用して日本周辺域の植生の光合成の広域推定を行った。衛星 SIF データとして GOSAT-2 と TROPOMI (EU のコペルニクス計画で打ち上げられたセンチネル 5p 衛星搭載センサ) から推定された SIF データを利用した。光合成 TROPOMI の SIF についてはカリフォルニア工科大学の解析バージョンのデータを利用した。図 3.6 は本研究で利用した全球の衛星 SIF データの例 (2019 年 8 月) である。TROPOMI のデータは 2023 年頃打ち上げを予定している GOSAT-GW の模擬データとして使用した。GOSAT-GW はそれまでのフーリエ干渉型から回折格子型の分光センサに移行することにより、観測点数が格段に増えて面的な観測が可能になると考えられることから、本サブテーマで開発した

光合成推定手法により、詳細な光合成の時空間分布の推定が可能になると考えられる。OCO-2 の SIF データについては、予備解析の結果、解析に利用できるだけの十分なデータ数が確保できなかったため、GPP 推定には利用しなかった。

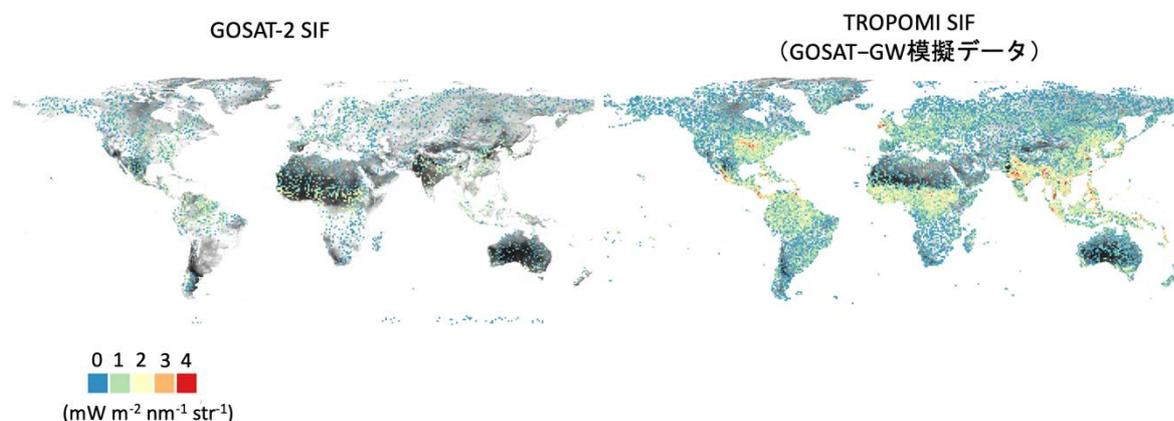


図 3.6 2019 年 8 月の全球 SIF 分布。観測値を 1 ヶ月分取りまとめて $1^\circ \times 1^\circ$ グリッド上で図化。

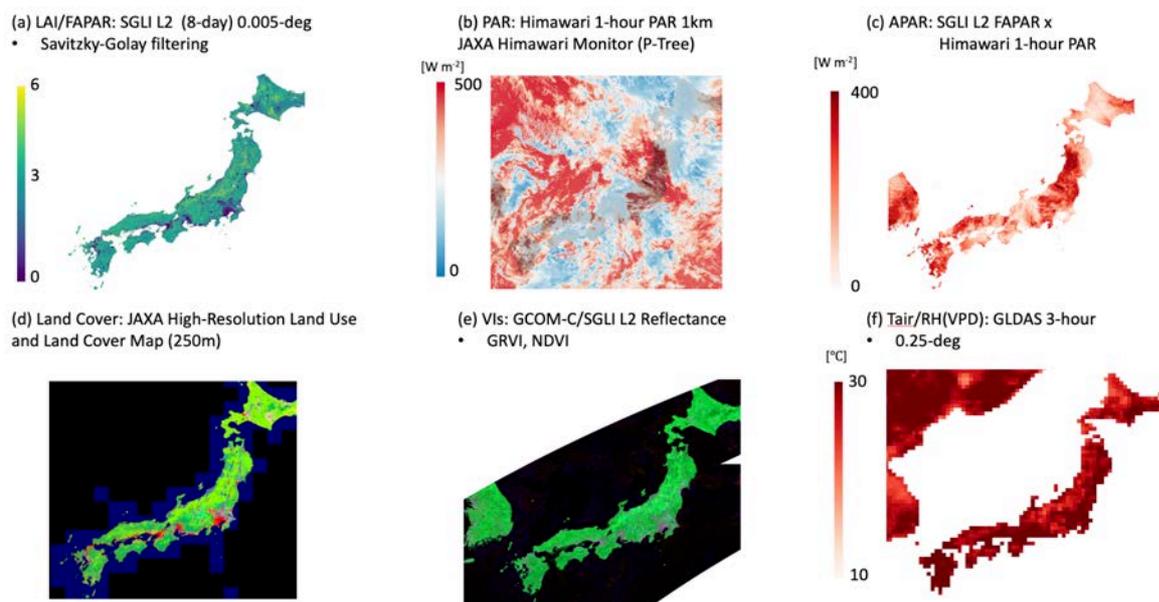


図 3.7 光合成推定に利用した衛星プロダクト（日本周辺）。(a) JAXA GCOM-C/SGLI L2 LAI/FAPAR データ（ノイズ低減のために Savitzky-Golay filter 処理をして時間方向のスムージングを行っている。）、(b) 気象衛星ひまわりによる光合成有効放射 PAR の推定マップ、(c) SGLI の FAPAR データとひまわりの PAR で推定した APAR、(d) 日本における JAXA 高精度土地利用土地被覆図（JAXA 提供）、(e) GCOM-C/SGLI の地表面反射率から推定した植生指数（NDVI など）。(f) Global Land Data Assimilation System (GLDAS) により作成された 3 時間毎の気温、湿度データ

光合成マップを推定するためには、衛星 SIF データ以外にも植生構造、気象条件に関するデータが必要となる。図 3.7 は提案アルゴリズムで使用するデータの一覧である。本アルゴリズムでは可能な限り衛星観測データのみで推定が行えるように設計した（図 3.7(f) 以外は衛星プロダクト）。なお、光合成計算を行うためには葉温データが必要となる。しかし、葉温を計算するためには、葉の気孔コンダクタンスや葉面での熱収支計算を実施する必要があり、計算量が劇的に増大する。このため、本アルゴリズムではこれらの計算は行わず葉温 = 気温と仮定した。また、同じく気孔コンダクタンスと関係のある気孔内部の CO_2 分圧比は、Dang et al., (1997)¹⁵⁾ の研究をもとに大気飽差との関係で計算した。さらに計算を短縮するために、 f_{esc} は予め FLiES-SIF モデルで計算してルックアップテーブルを作成しておきそのテーブルを参照して計算した。解析年は 2019 年とした。

4. 結果及び考察

4.1 改良 FLiES-SIF モデルによる感度分析

図 3.8 は太陽天頂角 = 20° として衛星観測角度を $0 \sim 70^\circ$ まで変化させたときの、LAI に対する樹冠 SIF の変化を示している。LAI < 10 の領域において樹冠 SIF は LAI が大きくなるとともに多くなる。また、LAI が十分に大きくなると葉量は増えるが、それと共に樹冠内から樹冠外へ放出される前に他の葉で再吸収される確率が高くなるため、樹冠 SIF の LAI に対する感度は低下し LAI の増加に対してほぼ一定となることがわかる。図 3.9 は観測条件（太陽天頂角、観測天頂角）の変化に伴う樹冠 SIF の変化を示している。この図より観測方向と太陽方向が同一の時に樹冠 SIF は最も高くなることがわかる。これは、太陽と同方向から観測した場合に最も多く日向の葉を観測することができるためである。また、観測天頂角が大きくなるにつれて樹冠 SIF は増加する傾向にある。これは、観測角度の増加に比例して観測視野内の樹冠面積が拡大するためである。このように、LAI などの植生パラメータ、太陽天頂角や観測天頂角などの観測条件が複雑に絡み合うことで樹冠 SIF は大きく変動する。そのため、異なる条件で観測される地上や衛星の SIF データを標準化することは、SIF の高次利用のために極めて重要であると言える。

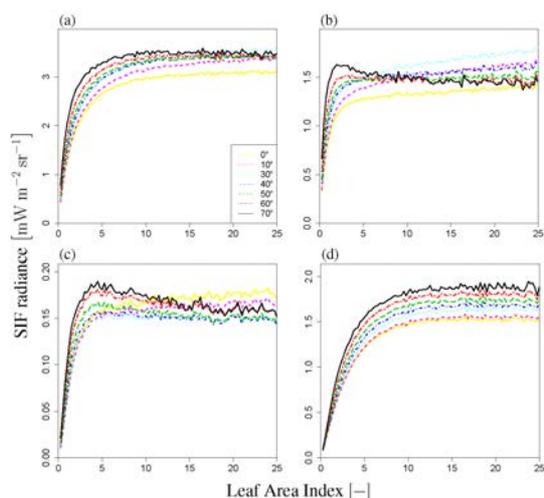


図 3.8 FLiES-SIF シミュレーションの感度分析
(a) 合計の樹冠 SIF。 (b) 日向の葉からの直達成分。 (c) 日陰の葉からの直達成分。 (d) 多重散乱後の観測量

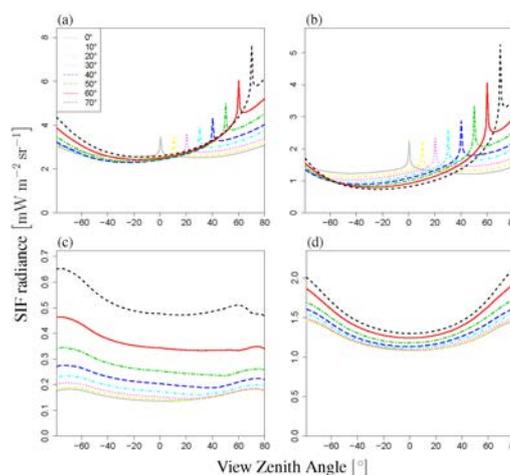


図 3.9 樹冠 SIF に対する各観測天頂角 (VZA) の影響 (太陽天頂角: $\text{SZA} = 20^\circ$, $\text{LAI} = 3.0$)。

4.2 観測サイトにおけるアルゴリズム検証

4.2.1 Escape fraction (f_{esc})の感度解析と季節変化

FLiES-SIFを用いて escape fraction (f_{esc})の計算を行った結果を図 3.10 に示す。この結果から f_{esc} は太陽・観測角度と葉面積指数 (LAI) に大きく依存して変化することがわかる。図 3.10(a)をみると、太陽天頂角の違いにより f_{esc} の観測角度依存性が変化している。また図 3.9 で示した SIF の観測輝度と同じように観測方向が太陽光の入射方向と一致した際に生じるホットスポット (hotspot) が発生していた。観測方向が太陽光の入射方向と一致すると、日向の葉のみからの強い SIF 放射を観測できるため、群落内での SIF の全放射に対する観測 SIF の比である f_{esc} が大きくなる。また、 f_{esc} は LAI にも依存しており、特に LAI が小さい領域では太陽天頂角の違いによって大きく変化する (図 3.10(a))。 f_{esc} は LAI が大きくなるにつれて減少し、LAI < 5 の領域ではほぼ一定となる ($f_{\text{esc}} = 0.36$)。

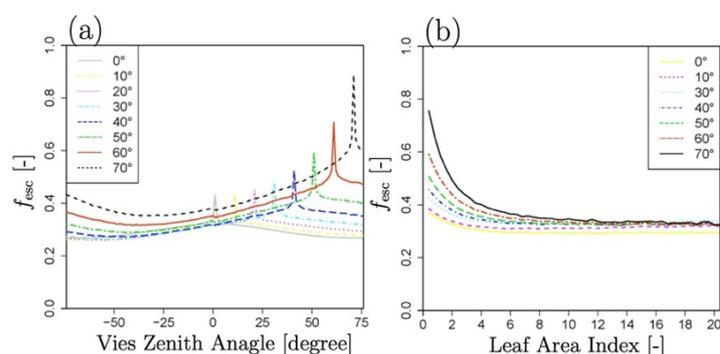


図 3.10 様々な太陽天頂角における Escape ratio (f_{esc})の感度解析結果。(a)太陽天頂角依存性 (太陽天頂角と観測角を含む面上における、いわゆる Principal plane 上での計算結果) (b)

図 3.11(a)は FLiES-SIF で計算した f_{esc} の季節変化を示している。 f_{esc} は春先で大きな値を取るが ($f_{\text{esc}} = 0.35$)、これは、LAI が小さいこと及び太陽天頂角が夏場に比べて大きい (太陽高度が低い) ことに対応している (図 3.10(b)参照)。その後、 f_{esc} は夏にかけて LAI の上昇及び太陽天頂角の減少 (太陽高度が高くなる) とともに次第に低下し、 $f_{\text{esc}} = 0.25$ 程度の値をとった。秋になると (DOY > 300)、 f_{esc} は再び上昇し始めるが、これも LAI と太陽天頂角の変化に起因するものである。図 3.11(b)は、先行研究で提案された簡易的なモデル¹⁰⁾により計算された f_{esc} の季節変化である。この結果を見ると簡易モデルでは、春と秋のように葉が少ない差には増加するべき f_{esc} が減少しており 3.3 節で指摘したように LAI が低い条件での簡易モデルの適用の限界がみられる。

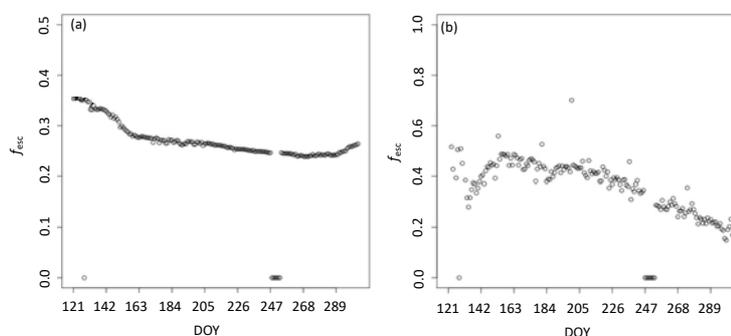


図 3.11 Escape ratio (f_{esc})の季節変化の計算結果。(a) FLiES-SIF による本研究の計算値 (b)Zeng et al. (2019)の推定値

4.2.2 波長積分係数(α)と蛍光収率の関係

図 3.12 は、波長積分係数(α)を蛍光収率 ϕ_f ($=SIF_{obs}/APAR$) の関数としてプロットしたものである。両者は逆比例に近い関係を示していることから、本研究では以下の経験式で回帰した。

$$\alpha = \frac{C_1}{\phi_f} + C_2 \quad (3-7)$$

ここで、 C_1 、 C_2 は回帰係数である。図 3.12(a)は、すべてのデータを1つの回帰式で回帰した結果である。この結果をみると、観測のプロットは回帰式からは最大で±30%程度のばらつきが見られる。3節で説明したように、波長積分係数(α)は葉の形質等の季節変化や日照条件の影響を受けると考えられるため、季節ごと及び日照条件ごとにデータを分類した上で回帰式を作成したものが図 3.10(b)(c)である。図 3.10(b)のように植生指数(GRVI)を用いて展葉期、夏季、秋の生長ステージで回帰式を作成するとそれぞれの季節のデータごとにより精密に回帰式のフィッティングされていることがわかる。図 3.10(c)は生長ステージに加えて日照条件(High/Low)を加えた5つの分類でフィッティングを行った結果である。図 3.10(a-c)の比較結果から、図 3.10(c)の成長ステージと日射条件ごとにフィッティングするパターンで波長積分係数(α)の高精度な推定が行えることが明らかとなった。

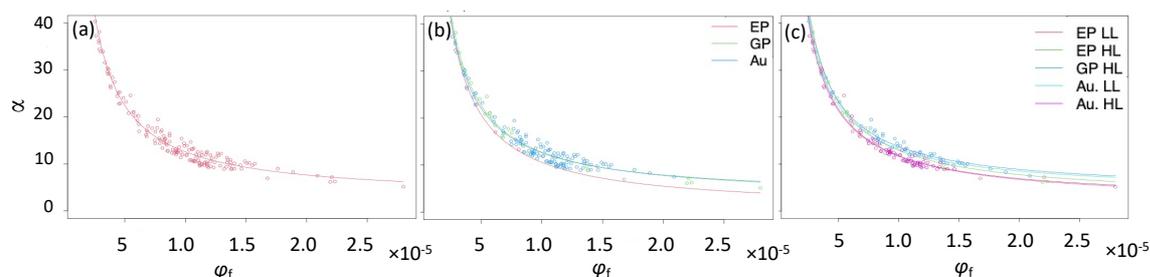


図 3.12 SIF の波長積分係数(α)の蛍光収率($=SIF_{obs}/APAR$)の関係。(a)全データによる回帰、(b)植生指数 GRVI を用いた植生生育ステージ毎(展葉、夏、秋)の回帰、(c)植生指数 GRVI と APAR を用いた植生生育ステージ毎、植生による光合成有効放射の吸収量毎の回帰。

4.2.3 開発アルゴリズムにおける GPP の推定

図 3.13 は、4.2.2 節で示した 3 パターンの回帰結果(図 3.12(a-c))による波長積分係数(α)を用いて推定した GPP の結果である。図 3.13(a)は GPP の季節変化の推定結果をフラックス GPP の季節変化とともに示している。この結果を見ると赤線の Simple regression (図 3.12(a)の回帰モデル)では、DOY140-226 にかけて過大評価であり、秋の DOY247 以降では過小評価である。また、緑線の GRVI による生長ステージ毎の回帰モデル(図 3.12(b))では、赤線に比べて改善は見られるものの、春先 DOY140 前後で過大評価であり、また秋の DOY247 以降では過小評価である。青線の生長ステージと日射条件による回帰モデルでは(図 3.12(c))、フラックス GPP の季節変化を春先から秋までよく捉えていることが明らかとなった。図 3.13(b)はフラックス GPP と推定した GPP の比較プロットである。この図を見ると図 3.12(c)では 1:1 ライン上にデータが収束している。これらの結果から、波長積分係数(α)は誤差に敏感であり、精密な回帰モデルが必要とされることがわかる。波長積分係数(α)が誤差に敏感な理由は、蛍光収率と光合成収率の間の強い非線形性によるものである。(詳細な説明は報告書のスペースの都合上割愛するが、Tol et al. 2014 に詳述されている。)

図 3.14 は、図 3.12(c) の回帰モデルで推定した GPP とオリジナルの De Pury and Farquhar モデルによる GPP 推定値を比較したものである。この結果から今回提案するモデルは、波長積分係数(α)を精密にフィッティングすることにより、De Pury and Farquhar モデルを上回る精度で GPP を推定できる可能性が示唆された。ただし、今回は岐阜県高山の落葉広葉樹サイトにおける限られた年のデータでの比較であり、De Pury and Farquhar モデルとのパフォーマンス比較については今後更に検証が必要である。

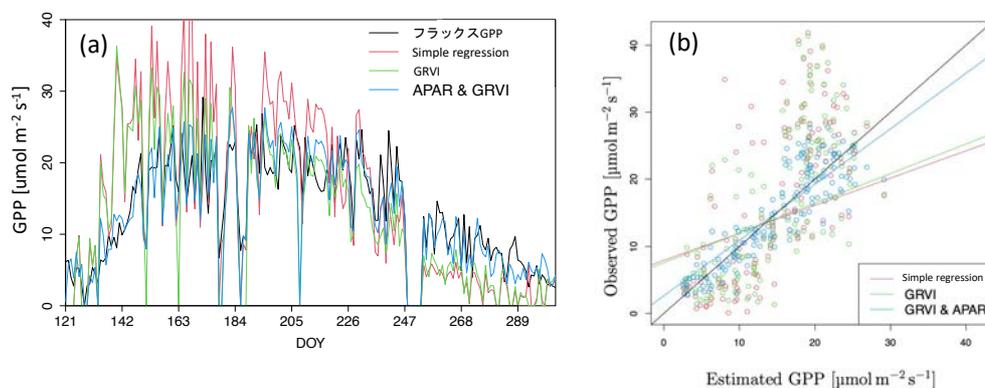


図 3.13 図 3.11 の回帰分析によって得られた波長積分係数(α)を用いた GPP 推定。(a)2018 年の季節変化、(b) フラックス GPP と本研究のアルゴリズムによる推定値の比較。黒：フラックス GPP、赤：全データを用いた回帰、緑：GRVI による生育ステージ毎の回帰、青：GRVI と APAR の大きさごとの回帰

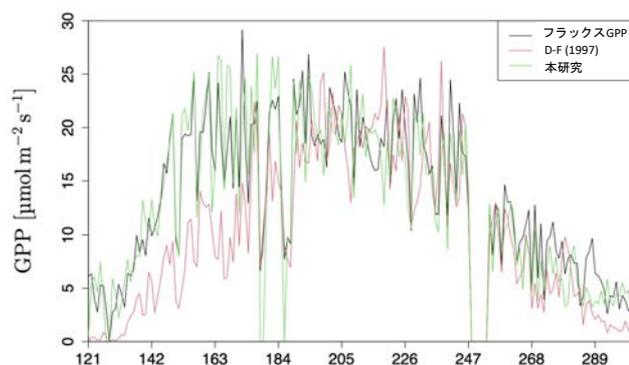


図 3.14 GPP の季節変化の比較。黒：フラックス GPP、赤：De Pury and Farquhar モデル (Depury and Farquhar, 1997)、緑：本研究。RMSE 誤差は、D-F model= 5.56, 本研究=3.68

4.2.4 茨城県つくば市の水田サイトへの開発アルゴリズムの適用

本研究では、アルゴリズム開発のテストのために岐阜県・高山市の落葉広葉樹林に加えて森林とは異なる植物群落として稲（水田サイト）でのモデルの適用性について検討した（茨城県つくば市の間瀬水田サイト）。茨城県つくば市の間瀬水田では、高山サイトと同様に長期の渦相関フラックス観測（研究協力者：農研機構・小野圭介氏ほか）と SIF を定量化できる分光反射率データの観測値が存在する。本研究では、サブテーマ 1 が解析した SIF データを入手して、高山サイトで開発した手法を適用して間瀬

水田での GPP の再現性の検討を行った。図 3.15 は 2019 年における GPP の推定値（地上観測 SIF 及び GOSAT-2 SIF）をフラックス GPP と比較した結果である。また、参考として MODIS の標準プロダクトとして提供されている MOD17 GPP プロダクトも含めて比較を行っている。この結果から、本提案アルゴリズムは、フラックス GPP とよく一致しており、MODIS の標準プロダクトと比較しても良い再現性があることが明らかとなった。

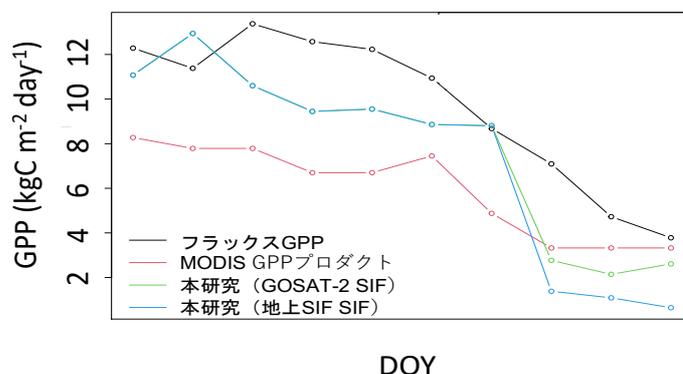


図 3.15 茨城県つくば市周辺の水田地帯のフラックスサイト（間瀬サイト）における比較。黒：フラックス GPP、赤：MODIS GPP プロダクト（MOD17）、緑：本研究（GOSAT-2 データを利用）、青：本研究（サブテーマ 1 より提供された間瀬水田の現場観測 SIF）。GPP の値はすべて日積算値。RMSE 誤差は MOD17 = 4.1, 本研究 (GOSAT-2) = 2.44, 本研究 (地上) = 2.98

4.3 GOSAT-2 データによる広域光合成推定

4.2 節までの検討結果を踏まえて提案アルゴリズムによる GPP の日本周辺域での広域推定を試みた。図 3.16 はルックアップテーブル法で推定した夏季の f_{esc} の分布図である。図 3.10 の感度分析で示したとおり f_{esc} は葉面積指数 (LAI) の小さい都市部などで大きくなる傾向があり（東京、愛知、大阪などでは $f_{esc} \sim 0.4$ 程度）、逆に森林地域では都市部より低めになっている（森林では $f_{esc} \sim 0.3$ 程度）。

この f_{esc} 及び図 3.7 で示した各種衛星プロダクトを光合成モデルに入力して GPP を推定した結果が図 3.17 及び図 3.18 である。図 3.17 の GOSAT-2 の SIF を用いた推定結果をみると日本列島全体で 3 月から 8 月にかけて光合成量が増加し、12 月にかけて減少するという大まかな季節変化が推定できていることがわかる。また、2019 年 6 月を見ると西日本では東日本や北日本よりも光合成量が大きく、梅雨明けが早い地域とそれ以外での光合成活動のコントラストが観察できる。しかしながら、GOSAT-2 の陸上での SIF 観測値は非常に限られた点数であり、 1° メッシュでデータを取りまとめた場合でも、図 3.17 に示すように観測データが得られないメッシュが存在するなど、面的かつ高解像度での推定には限界があることが明らかとなった。

その一方で、TROPOMI の SIF データで推定した図 3.18 を見ると光合成分布が詳細に推定できていることがわかる。TROPOMI の日本周辺の SIF データは GOSAT-2 に比べて 2 桁以上観測数が多い場合があり（観測月による）、 0.05° メッシュ (5km 以下) の空間解像度で GPP 分布を推定できることが明らかとなった。本研究では、TROPOMI を GOSAT-GW の模擬データとして活用した。2023 年以降に GOSAT-GW が打ち上げられ、高頻度・高空間分解能の SIF データが提供されるようになれば、空間分布評価に耐えうる解像度の GPP マッピングが実施できると期待できる。

5. 研究目標の達成状況

本研究の達成状況は以下の通りである。

- ・サブテーマ1と共同でGOSATシリーズやTROPOMIなどの衛星SIFデータを収集し時空間分布の予備解析を行った。予備解析の結果は中間報告書で報告済みである。
- ・放射伝達モデルの解析用の地上データの収集を岐阜県・高山市の落葉広葉樹サイトを中心に収集した。また、SIFデータの標準化やGPP推定を行うための必須となる放射伝達モデルFLiES-SIFの改良を行いモデルの感度解析の結果を取りまとめて論文として発表した(Sakai et al., 2020)。また、開発したモデルのソースコードをオープンソースコードとして公開した(Kobayashi and Sakai, 2019)。
- ・放射モデルFLiES-SIFの感度解析の結果を踏まえて、SIFデータをFLiES-SIFのモデル解析によって直下視データに変換する方法を提案した(SIFデータの標準化)。
- ・個葉のクロロフィル蛍光モデルと群落光合成モデルを結合し半経験的なパラメータで衛星・地上観測SIFとモデル内で必要となる蛍光の関係つけて、SIFデータからGPPを推定するアルゴリズムを開発した。
- ・開発したGPPアルゴリズムを日本周辺域で適用し2019年におけるGPP分布推定をGOSAT-2及びTROPOMI(GOSAT-GWの模擬データ)で行った。

以上、当初の目標はおおよそ達成できたと考える。

しかしながら、下記については今後の課題として残り、さらに検討を進める必要がある。

- ・GPP推定モデルの開発に当初の想定以上の時間がかかったことから、アルゴリズムのテストサイトとして、国内2箇所(岐阜県高山の落葉広葉樹林サイトと茨城県つくば市の水田サイト)での検討にとどまった。今回検討した2サイトでは提案アルゴリズムでGPPが推定できることが確認できたが、アルゴリズムのロバストネスを確認するためにも、今後はさらに多様なサイトでアルゴリズム検証を実施する必要がある。
- ・当初はアジア全域でのGPPの推定まで進めることを目標としていた。しかしながら、GOSAT-2/TROPOMIのSIFデータ以外にも利用する衛星プロダクトのデータ量が極めて大きく、広域推定結果の妥当性の確認を試行錯誤する段階でデータ量を絞る必要性から日本地域に限定して解析を行った。今回開発したアルゴリズムは、国内だけではなく全球に適用できるよう設計されており、今後はデータの入手と合わせてアジア～全球のGPP推定へと展開させていく予定である。

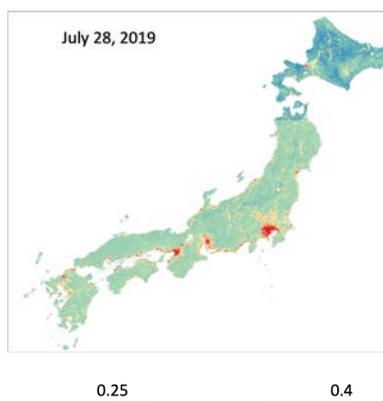


図 3.16 Escape ratio (f_{esc}) の広域推定の例。
2019年7月28日。

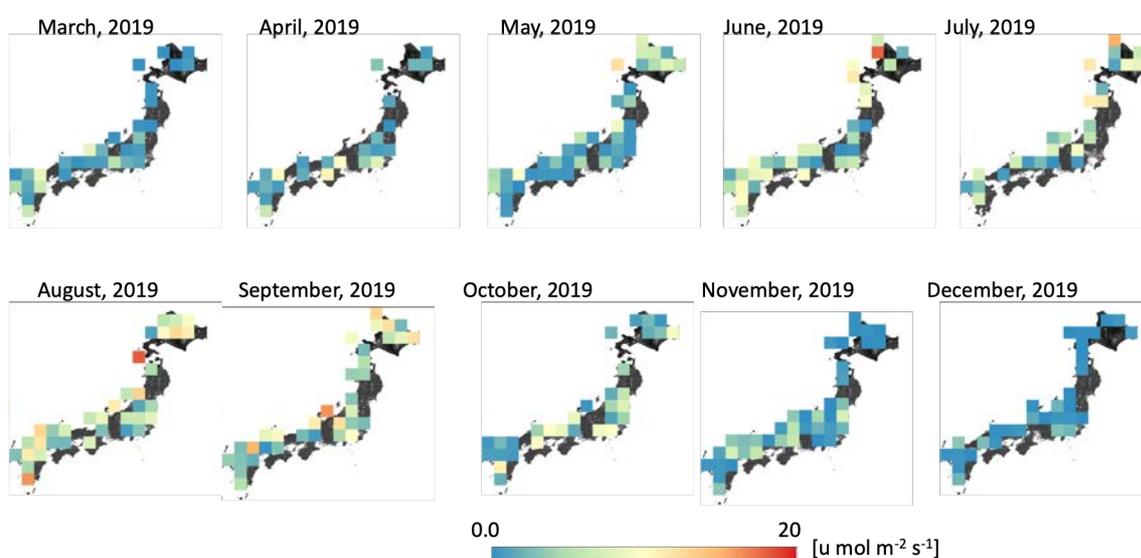


図 3.17 GOSAT-2 の SIF データによる日本周辺の光合成推定マップ。日中 13 時付近の推定値。2019 年 3 月～12 月まで推定結果を月ごとに取りまとめて 1° メッシュで表示。

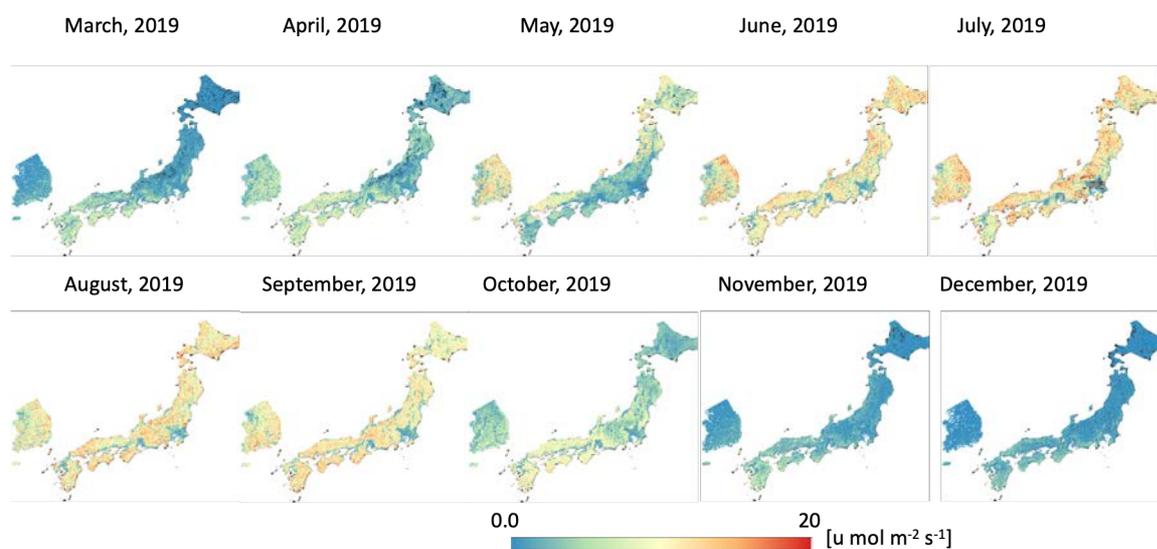


図 3.18 TROPOMI の SIF データによる日本周辺の光合成推定マップ (GOSAT-GW の模擬データとして利用している。)。日中 13 時付近の推定値。2019 年 3 月～12 月まで推定結果を月ごとに取りまとめて 0.05° メッシュで表示。

5. 研究目標の達成状況

GOSAT シリーズや TROPOMI などの衛星 SIF データをサブテーマ 1 と共同で収集し、時空間分布の予備解析を行った。さらに放射伝達モデルの解析用の地上データの収集を岐阜県・高山市の落葉広葉樹サイトを中心に収集した。また、SIF データの標準化や GPP 推定を行うための必須となる放射伝達モデル FLiES-SIF の改良を行いモデルの感度解析の結果を取りまとめて論文として発表した(Sakai et al., 2020)。本サブテーマで開発した放射モデル FLiES-SIF の感度解析の結果を踏まえて、SIF データを FLiES-SIF のモデル解析によって直下視データに変換する方法を提案した (SIF データの標準化)。さらに個葉のクロロフィル蛍光モデルと群落光合成モデルを結合し半経験的なパラメータで衛星・地上観測 SIF とモデル内で必要となる蛍光の関係つけて、SIF データから GPP を推定するアルゴリズムを開発した。開発した GPP アルゴリズムを日本周辺域で適用し 2019 年における GPP 分布推定を GOSAT-2 及び TROPOMI (GOSAT-GW の模擬データ)で行った。以上、当初の目標はおおよそ計画通り達成できたと考えているが、開発アルゴリズムのテストサイトとして、国内 2 箇所 (岐阜県高山の落葉広葉樹林サイトと茨城県つくば市の水田サイト) での検討にとどまったこと、また当初アジア全域での推定を目標にしていた GPP の推定では、SIF 以外の衛星プロダクトのデータ量が極めて大きく、データ処理に時間がかかったことから、日本地域に限定して解析を行ったことなどがある。今回開発したアルゴリズムは、国内だけではなく全球に適用できるものである。今後は、アジアから全球スケールでの GPP 推定へと研究を展開させていく予定である。

6. 引用文献

- 1) Anav, A., Friedlingstein, P., Beer, C., Ciais, P., Harper, A., Jones, C., Murray-Tortarolo, G., Papale, D., Parazoo, N. C., Peylin, P., Piao, S., Sitch, S., Viovy, N., Wiltshire, A., and Zhao, M.: Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: A review, *Review of Geophysics*, 53, 785-818, 2015.
- 2) Teubner, I. E., Forkel, M., Camps-Valls, G., Jung, M., Miralles, D. G., Tramontana, G., van der Schalie, R., Vreugdenhil, M., Möisinger, L., and Dorigo, W. A.: A carbon sink-driven approach to estimate gross primary production from microwave satellite observations, *Remote Sensing of Environment*, 229, 100-113, 2019. Wang, Fei, et al., 2020
- 3) Frankenberg, C., Butz, A., and Toon, G.: Disentangling chlorophyll fluorescence from atmospheric scattering effects in O2A-bandspectra of reflected sun-light, *Geophysical Research Letters*, 38, 2011.
- 4) Li, X., Xiao, J., He, B., Altaf Arain, M., Beringer, J., Desai, A.R., Emmel, C., Hollinger, D. Y., Krasnova, A., Mammarella, I., Noe, S. M., Ortiz, P. S., Ray-Sanchez, A. C., Rocha, A. V., and Varlagin, A.: Solar-induced chlorophyll fluorescence is strongly correlated with terrestrial photosynthesis for a wide variety of biomes: First global analysis based on OCO-2 and flux tower observations, *Global Change Biology*, 24, 3990-4008, 2018.
- 5) Norton, A. J., Rayner, P. J., Koffi, E.N., Scholze, M., Silver, J.D., and Wang, Y.-P.: Estimating global gross primary productivity using chlorophyll fluorescence and a data assimilation system with the BETHY-SCOPE model, *Biogeosciences*, 16, 3069-3093, <https://doi.org/10.5194/bg-16-3069-2019>, 2019.
- 6) Doughty, R., Köhler, P., Frankenberg, C., Magney, T.S., Xiao, X., Qin, Y., Wu, X. and Moore, B., 2019. TROPOMI reveals dry-season increase of solar-induced chlorophyll

- fluorescence in the Amazon forest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(44), pp. 22393-22398.
- 7) van der Tol, C., Vilfan, N., Dauwe, D., Cendrero-Mateo, M. P., and Yang, P.: The scattering and re-absorption of red and near-infrared chlorophyll fluorescence in the models Flus-pect and SCOPE, *Remote Sensing of Environment*, 232, 111292, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111292>, 2019.
 - 8) Yang, W., Kobayashi, H., Chen, X., Nasahara, K. N., Suzuki, R., and Kondoh, A.: Modeling three-dimensional forest structures to drive canopy radiative transfer simulations of bidirectional re-reflectance factor, *Int. J. Digit. Earth*, 11, 981-1000, 2018.
 - 9) Kobayashi, H.: Leaf, woody and background optical data for GCOM-C LAI/FAPAR retrieval, *JAXA GCOM-C RA4*, 102, 2015b.
 - 10) Zeng, Y., Badgley, G., Dechant, B., Ryu, Y., Chen, M. and Berry, J.A., 2019. A practical approach for estimating the escape ratio of near-infrared solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 232, p.111209.
 - 11) De Pury D , Farquhar G. 1997. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant, Cell & Environment*, 20: 537-557.
 - 12) Farquhar, G.D.; Von Caemmerer, S.; Berry, J.A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 1980, 149, 78-90
 - 13) Hikosaka, K. and Noda, H.M., 2019. Modeling leaf CO₂ assimilation and Photosystem II photochemistry from chlorophyll fluorescence and the photochemical reflectance index. *Plant, Cell & Environment*, 42(2), pp.730-739.
 - 14) Van Wittenberghe, S., Alonso, L., Verrelst, J., Moreno, J. and Samson, R., 2015. Bidirectional sun-induced chlorophyll fluorescence emission is influenced by leaf structure and light scattering properties—A bottom-up approach. *Remote Sensing of Environment*, 158, pp.169-179.
 - 15) Dang, Q.-L., Margolis, H. A., Coyea, M. R., Sy, M., and Collatz, G. J.: Regulation of branch-level gas exchange of boreal trees: roles of shoot water potential and vapor pressure difference, *Tree Physiology*, 17, 521-535, 1997.

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) Nakashima N., Kato T., Morozumi T., Tsujimoto K., Akitsu T.K., Nasahara K.N., Murayama S., Muraoka H. and Noda H.M., 2021: Area-ratio Fraunhofer line depth (aFLD) method approach to estimate solar-induced chlorophyll fluorescence in low spectral resolution spectra in a cool-temperate deciduous broadleaf forest. *Journal of Plant Research*, 134, 713-728. <https://doi.org/10.1007/s10265-021-01322-3> (IF=2.629)
- 2) Sakai Y, Kobayashi H, Kato T, 2020: FLiES-SIF version 1.0: three-dimensional radiative transfer model for estimating solar induced fluorescence, *Geoscientific Model Development* 13 (9), 4041-4066 (IF=6.135)

【サブテーマ2】

- 1) Hikosaka K (2021) Photosynthesis, chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index in photoinhibited leaves. *Functional Plant Biology*, 48:815-826. 10.1071/FP20365 (IF=3.10)
- 2) Tsujimoto K, Hikosaka K (2021) Estimating leaf photosynthesis of C₃ plants grown under different environments from pigment index, photochemical reflectance index, and chlorophyll fluorescence. *Photosynthesis Research*, 148: 33-46. 10.1007/s11120-021-00833-3 (IF=3.573)
- 3) Hikosaka K, Tsujimoto K (2021) Linking remote sensing parameters to CO₂ assimilation rates at a leaf scale. *Journal of Plant Research*, 134:695-711. 10.1007/s10265-021-01313-4 (IF=2.629)
- 4) Kohzuma K, Tamaki M, Hikosaka K (2021) Corrected photochemical reflectance index (PRI) is an effective tool for detecting environmental stresses in agricultural crops under light conditions. *Journal of Plant Research*, 134:683-694. 10.1007/s10265-021-01316-1 (IF=2.629)
- 5) Kohzuma K, Sonoike K, Hikosaka K (2021) Imaging, screening and remote sensing of photosynthetic activity and stress responses. *Journal of Plant Research*, 134:649-651. <https://doi.org/10.1007/s10265-021-01324-1> (IF=2.629)

【サブテーマ3】

- 1) Sakai Y, Kobayashi H, Kato T, 2020: FLiES-SIF version 1.0: three-dimensional radiative transfer model for estimating solar induced fluorescence, *Geoscientific Model Development* 13 (9), 4041-4066 (IF=6.135)

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表 (学会等)

【サブテーマ1】

- 1) 両角友喜, 加藤智道, 野田響, 高橋善幸, 富士カラムツ林における林冠太陽光誘起クロロフィル蛍光の算出手法と雲量による影響. 日本生態学会第69回全国大会, オンライン, 2022年3月
- 2) Tomoki Morozumi, Tomomichi Kato, Kanokrat Buareal, Naohisa Nakashima, Yuma Sakai, Hideki Kobayashi, Kenlo Nasahara, Tomoko Akitsu, Shohei Murayama, Hibiki Noda, Hiroyuki Muraoka, Total and top-to-bottom emissions of solar-induced chlorophyll fluorescence in the canopy of a cool temperate deciduous broad-leaved forest in Takayama, Japan. Asia Flux Conference, On-line, 2021年12月
- 3) Tomoki Morozumi, Tomomichi Kato, Kanokrat Buareal, Naohisa Nakashima, Yuma Sakai, Hideki Kobayashi, Kenlo Nasahara, Tomoko Akitsu, Shohei Murayama, Hibiki Noda, Hiroyuki Muraoka, Seasonal variation in Solar Induced chlorophyll Fluorescence from canopy-top, middle and bottom layers as a potential proxy of gross primary productivity in a canopy of cool-temperate deciduous broadleaf forest in Takayama, Japan. American Geophysical Union Fall Meeting 2021, On-line, 2021年12月
- 4) Tomoki Morozumi, Tomomichi Kato, Naohisa Nakashima, Buareal Kanokrat, Kitpanuwat Tanatarakeree, Hideki Kobayashi, Yuma Sakai, Katsuto Tsujimoto, Hibiki M. Noda, Yoshiyuki Takahashi, Kentaro Takagi, Takashi Hirano, Masahito Ueyama, Keisuke Ono, Kazuho Matsumoto, Tomoko Kawaguchi, Akitsu, Kenlo Nishida Nasahara, Shohei Murayama, Hiroyuki Muraoka, Ground based observation of solar induced chlorophyll fluorescence using a fine resolution spectrometer across multiple sites in cool temperate to sub-tropical ecosystems, Japan. iLeaps-Japan meeting, 2021年12月
- 5) Tomoki Morozumi, Tomomichi Kato, Katsuto Tsujimoto, Kanokrat Buareal, Naohisa Nakashima, Yuma Sakai, Hideki Kobayashi, Kenlo N Nasahara, Tomoko Akitsu, Shohei Murayama, Hibiki M Noda, Hiroyuki Muraoka, Seasonal variation in Solar Induced chlorophyll Fluorescence detected by multi-vertical layer spectroscopy in a canopy of cool-temperate deciduous broadleaf forest in Takayama, Gifu. 日本地球惑星科学連合大会, 2021年6月
- 6) Naohisa Nakashima, Tomomich Kato, Tomoki Morozumi, Katsuto Tsujimoto, Tomoko K. Akitsu, Kenlo N. Nasahara, Shohei Murayama, Hiroyuki Muraoka, Hibiki M. Noda, Retrieving solar-induced chlorophyll fluorescence from multilayers in a deciduous forest with low resolution field-measured spectra over the past decade, AGU Fall Meeting 2021, On-line, 2021年12月15日
- 7) 両角友喜, 加藤知道, 小林秀樹, 酒井佑慎, 辻本克人, 中島直久, ビュワイール・カノクラット, 烏蘭, 二宮秀輝, 水野ゆかり, コムギ窒素施肥処理区における群落条構造とクロロフィル濃度から受ける光合成指標 SIF への影響. 日本農業気象学会全国大会, オンライン, 2021年3月
- 8) Hideki Kobayashi, Yuma Sakai, Tomomichi Kato, Simulation of sun-induced chlorophyll fluorescence in spatially heterogeneous plant canopies, International Symposium on Agricultural Meteorology 2021, March 2021, On-line
- 9) Naohisa Nakashima, Tomoki Morozumi, Tomomich Kato, Katsuto Tsujimoto, Tomoko Kawaguchi Akitsu, Kenlo Nishida Nasahara, Hiroyuki Muraoka, Detection of solar-induced fluorescence from lower resolution field-measured spectra over the past

- decade in deciduous forest in Japan, AGU Fall Meeting 2020, On-line, 2020年12月1日
- 10) Tomoki Morozumi, Tomomichi Kato, Hideki Kobayashi, Yuma Sakai, Kanokrat Buareal, Katsuo Tsujimoto, Lan Wu, Hideki Ninomiya and Yukari Mizuno, Assessing the effect of nitrogen addition treatment on Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence on winter wheat in Japan: Field-based detection and radiative modelling, AGU Fall Meeting 2020 2020年12月19日
 - 11) Kitpanuwat Tanatarakeree, Tomomichi Kato, Tomoki Morozumi, Naohisa Nakashima, Kanokrat Buareal, Lan Wu, Masahito Ueyama, Takashi Hirano and Hideki Ninomiya, Continuous Ground Measurement of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence and Its Link to Ecosystem-Level Photosynthesis in Wetland by High Resolution Spectrometer, AGU Fall Meeting 2020 2020年12月19日
 - 12) Naohisa Nakashima, Tomoki Morozumi, Tomomichi Kato, Katsuo Tsujimoto, Tomoko Akitsu, Kenlo Nishida Nasahara and Hiroyuki Muraoka, Detection of solar-induced fluorescence from lower resolution field-measured spectra over the past decade in deciduous broad-leaf forest in Japan, AGU Fall Meeting 2020 2020年12月19日
 - 13) Kanokrat Buareal, Tomoki Morozumi, Tomomichi Kato, Naohisa Nakashima and Keisuke Ono, Ground-based observation on Solar-induced chlorophyll fluorescence in rice ecosystem with high-spectral resolutions, AGU Fall Meeting 2020 2020年12月19日
 - 14) Naohisa Nakashima, Tomoki Morozumi, Kanokrat Buareal, Tomomichi Kato, Katsuo Tsujimoto, Tomoko Akitsu, Kenlo Nasahara, Keisuke Ono, Hiroyuki Muraoka, Challenging the detection of solar-induced fluorescence from lower resolution field-measured spectrum in Japan, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, On-line, 2020年7月14日
 - 15) Tomoki Morozumi, Kanokrat Buareal, Katsuo Tsujimoto, Lan Wu, Hideki Ninomiya, Yukari Mizuno, Tomomichi Kato, Field-based detection of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence for remote-sensing of the photosynthetic activity in winter wheat with Nitrogen addition treatments in Hokkaido, Japan Geoscience Union JpGU - AGU Joint Meeting 2020 2020年7月14日
 - 16) Yuma Sakai, Hideki Kobayashi, Tomomichi Kato, Katsuo Tsujimoto, Kenro Nishida-Nasahara, Tomoko Akitsu, Syohei Murayama, Hibiki Noda, Hiroyuki Muraoka, Toshiyuki Ohtsuka, Sinpei Yoshitake, Kouki Hikosaka. Validation of simulated SIF and GPP by the 3D radiative transfer model FLiES-SIF: A case study in a cool temperate deciduous forest. AGU Fall meeting 2019
 - 17) 加藤知道, 太陽光誘起クロロフィル蛍光による生態系光合成量推定 - CO₂ 吸収量を宇宙から測る日本農業気象学会北海道支部大会 (招待講演), 2019
 - 18) 両角友喜, 加藤知道, 辻本克斗, ブアリーール・カノクラット, 酒井佑慎, 小林秀樹, 奈佐原顕郎, 秋津智子・村山昌平, 野田響, 村岡裕由本州中部冷温帯林における太陽光誘起クロロフィル蛍光観測の手法検討および日中・季節変動日本農業気象学会北海道支部大会, 2019
 - 19) Tomoki Morozumi, Tomomichi Kato, Katsuo Tsujimoto, Kanokrat Buareal, Yuma Sakai, Hideki Kobayashi, Kenlo Nishida Nasahara, Tomoko Akitsu, Shohei Murayama, Hibiki Noda, Hiroyuki Muraoka, The temporal variation of Solar Induced Fluorescence detected by the canopy spectroscopy in cool-temperate broad leaf deciduous forest in central Japan, Asiaflux 2019-20th Anniversary, 2019
 - 20) Kanokrat Buareal, Tomomichi Kato, Tomoki Morozumi, Keisuke Ono, Ground based measurement of solar-induced chlorophyll fluorescence dynamics in rice paddy field ecosystem Asiaflux 2019-20th Anniversary, 2019

- 21) Kanokrat Buareal, Tomomichi Kato, Keisuke Ono, Ground-based Measurement of Solar-induced Chlorophyll Fluorescence with High-resolution Spectrum in Paddy Field Ecosystem, 15th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space, 2019
- 22) Kanokrat Buareal, Tomomichi Kato, Keisuke Ono, Solar induced chlorophyll fluorescence for detecting ecosystem photosynthetic activity by high-resolution spectrum measurement in a paddy field in Japan, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 2019

【サブテーマ 2】

- 1) 辻本 克斗, 彦坂 幸毅 クロロフィル蛍光と分光反射指数を用いて異なる光合成能力の葉の光合成速度を推定する 日本植物学会第 83 回大会 2019 年 9 月 15-17 日 仙台
- 2) Kouki Hikosaka The relationship between photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence: an overview The 83rd Annual Meeting of the Botanical Society of Japan 15-17 September, 2019, Sendai
- 3) Siyu Chen, Yoshiko Kosugi, Tatsuro Nakaji, Hibiki Noda, Kenlo Nishida Nasahara, Kouki Hikosaka Long-term observation of the photochemical reflectance index (PRI) and light-use efficiency (LUE) in a temperate Japanese cypress forest at Kiryu Japan. Asiaflux 2019 高山 2019/9/29-10/05
- 4) 彦坂幸毅 光阻害葉における光合成速度・クロロフィル蛍光・光化学反射指数の関係 東北植物学会第 9 回大会 2019 年 12 月 14・15 日 カレッジプラザ (秋田)
- 5) 中村 由紀子, 辻本 克斗, 小川 哲, 野田 響, 彦坂 幸毅 PRI (光化学反射指数) と NPQ の関係の種間差 とその補正法の検討 第 67 回日本生態学会大会 2020 年 3 月 7 日 名城大学 名古屋
- 6) 中村 由紀子, 小川 哲, 辻本 克斗, 彦坂 幸毅 ハイパースペクトルカメラで解析した植物群落の光化学反射指数 (PRI) と葉群光合成速度の関係 日本植物学会第 84 回大会 2020 年 9 月 19 日 オンライン
- 7) 小川 哲, 中村 由紀子, 辻本 克斗, 彦坂 幸毅 ハイパースペクトルカメラで解析した植物群落内の個葉の光環境と光化学反射指数 (PRI) の関係 日本植物学会第 84 回大会 2020 年 9 月 20 日 オンライン
- 8) 辻本 克斗, 中村 由紀子, 小川 哲, 彦坂 幸毅 分光観測によって得られたクロロフィル蛍光, 光化学反射指数 (PRI), 群落光合成速度の関係 日本植物学会第 84 回大会 2020 年 9 月 19-21 日 オンライン
- 9) 彦坂幸毅 光阻害が起こった葉における光合成・クロロフィル蛍光・光化学反射指数 (PRI) 日本植物学会第 84 回大会 2020 年 9 月 19-21 日 オンライン
- 10) 彦坂幸毅 リモセンで光合成 アストロバイオロジーセンター (ABC) シンポジウム 2020 2020 年 12 月 21 日 オンライン (招待講演)
- 11) Siyu CHE, Yoshiko KOSUGI, Linjie JIAO, Tatsuro NAKAJI, Hibiki NODA, Kouki HIKOSAKA, Kenlo Nishida NASAHARA Winter leaf reddening phenomenon: the long-term track of PRI and phenology changes in a temperate Japanese cypress forest at Kiryu Japan 第 68 回日本生態学会大会 2021 年 3 月 17-21 日 オンライン
- 12) 清野 友規, 野田 響, 熊谷 朝臣, 押尾 晴樹, 吉田 幸生, 松永 恒雄, 彦坂 幸毅 衛星観測クロロフィル蛍光と PRI を用いたモンゴルでの草原・森林の乾燥応答の識別 第 68 回日本生態学会大会 2021 年 3 月 17-21 日
- 13) 青野葉介, 野田響, 彦坂幸毅 衛星リモートセンシングにより検出された日本のブナ林の過去 21 年間の春期晩霜害 第 68 回日本生態学会大会 2021 年 3 月 17-21 日 オンライン

- 14) 彦坂幸毅, 辻本克斗 リモートセンシングパラメータと葉光合成速度の関係 第 68 回日本生態学会大会 2021 年 3 月 17-21 日 オンライン
- 15) 青野葉介, 野田響, 彦坂幸毅 衛星リモートセンシング時系列データからみた日本のブナ林の晩霜害頻度の変化 東北植物学会 2021 年 12 月 10 日 福島
- 16) 青野葉介, 野田響, 彦坂幸毅 衛星リモートセンシングの時系列データから霜害を判定する手法 第 69 回日本生態学会大会 2022 年 3 月 3 月 14-19 日 オンライン

【サブテーマ 3】

- 1) Tomoki Morozumi, Tomomichi Kato, Kanokrat Buareal, Naohisa Nakashima, Yuma Sakai, Hideki Kobayashi, Kenlo Nasahara, Tomoko Akitsu, Shohei Murayama, Hibiki Noda, Hiroyuki Muraoka, Total and top-to-bottom emissions of solar-induced chlorophyll fluorescence in the canopy of a cool temperate deciduous broad-leaved forest in Takayama, Japan. Asia Flux Conference, On-line, 2021 年 12 月
- 2) Tomoki Morozumi, Tomomichi Kato, Kanokrat Buareal, Naohisa Nakashima, Yuma Sakai, Hideki Kobayashi, Kenlo Nasahara, Tomoko Akitsu, Shohei Murayama, Hibiki Noda, Hiroyuki Muraoka, Seasonal variation in Solar Induced chlorophyll Fluorescence from canopy-top, middle and bottom layers as a potential proxy of gross primary productivity in a canopy of cool-temperate deciduous broadleaf forest in Takayama, Japan. American Geophysical Union Fall Meeting 2021, On-line, 2021 年 12 月
- 3) Tomoki Morozumi, Tomomichi Kato, Naohisa Nakashima, Buareal Kanokrat, Kitpanuwat Tanatarakeree, Hideki Kobayashi, Yuma Sakai, Katsuto Tsujimoto, Hibiki M. Noda, Yoshiyuki Takahashi, Kentaro Takagi, Takashi Hirano, Masahito Ueyama, Keisuke Ono, Kazuho Matsumoto, Tomoko Kawaguchi, Akitsu, Kenlo Nishida Nasahara, Shohei Murayama, Hiroyuki Muraoka, Ground based observation of solar induced chlorophyll fluorescence using a fine resolution spectrometer across multiple sites in cool temperate to sub-tropical ecosystems, Japan. iLeaps-Japan meeting, 2021 年 12 月
- 4) Tomoki Morozumi, Tomomichi Kato, Katsuto Tsujimoto, Kanokrat Buareal, Naohisa Nakashima, Yuma Sakai, Hideki Kobayashi, Kenlo N Nasahara, Tomoko Akitsu, Shohei Murayama, Hibiki M Noda, Hiroyuki Muraoka, Seasonal variation in Solar Induced chlorophyll Fluorescence detected by multi-vertical layer spectroscopy in a canopy of cool-temperate deciduous broadleaf forest in Takayama, Gifu. 日本地球惑星科学連合大会, 2021 年 6 月
- 5) 両角友喜, 加藤知道, 小林秀樹, 酒井佑禎, 辻本克人, 中島直久, ビュワイール・カノクラット, 烏蘭, 二宮秀輝, 水野ゆかり, コムギ窒素施肥処理区における群落条構造とクロロフィル濃度から受ける光合成指標 SIF への影響. 日本農業気象学会全国大会, オンライン, 2021 年 3 月
- 6) Hideki Kobayashi, Yuma Sakai, Tomomichi Kato, Simulation of sun-induced chlorophyll fluorescence in spatially heterogeneous plant canopies, International Symposium on Agricultural Meteorology 2021, March 2021, On-line
- 7) Tomoki Morozumi, Tomomichi Kato, Hideki Kobayashi, Yuma Sakai, Kanokrat Buareal, Katsuo Tsujimoto, Lan Wu, Hideki Ninomiya and Yukari Mizuno, Assessing the effect of nitrogen addition treatment on Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence on winter wheat in Japan: Field-based detection and radiative modelling, AGU Fall Meeting 2020 2020 年 12 月 19 日
- 8) Yuma Sakai, Hideki Kobayashi, Tomomichi Kato, Kastuto Tshujimoto, Kenro Nishida-Nasahara, Tomoko Akitsu, Syohei Murayama, Hibiki Noda, Hiroyuki Muraoka, Toshiyuki

Ohtsuka, Sinphei Yoshitake, Kouki Hikosaka. Validation of simulated SIF and GPP by the 3D radiative transfer model FLiES-SIF: A case study in a cool temperate deciduous forest. AGU Fall meeting 2019

- 9) 両角友喜, 加藤知道, 辻本克斗, プアリアル・カノクラット, 酒井佑慎, 小林秀樹, 奈佐原顕郎, 秋津智子・村山昌平, 野田響, 村岡裕由本州中部冷温帯林における太陽光誘起クロロフィル蛍光観測の手法検討および日中・季節変動日本農業気象学会北海道支部大会, 2019
- 10) Tomoki Morozumi, Tomomichi Kato, Katsuto Tsujimoto, Kanokrat Buareal, Yuma Sakai, Hideki Kobayashi, Kenlo Nishida Nasahara, Tomoko Akitsu, Shohei Murayama, Hibiki Noda, Hiroyuki Muraoka, The temporal variation of Solar Induced Fluorescence detected by the canopy spectroscopy in cool-temperate broad leaf deciduous forest in central Japan, Asiaflux 2019-20th Anniversary, 2019

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) 札幌市立藻岩高校向けオープンキャンパス「環境教育講座：植物のCO₂吸収量を測ろう」（加藤知道、令和元年9月6日、参加者約10名）にて成果紹介
- 2) 日本農業気象学会北海道支部大会一般講演会「太陽光誘起クロロフィル蛍光による生態系光合成量推定- CO₂吸収量を宇宙から測る-」（加藤知道、令和元年12月4日、聴講者約80名）
- 3) 北海道立札幌北高校における特別授業「プロフェッショナル講座. 研究者（理系）「理系あるある」」（加藤知道、令和元年12月6日、聴講者約40名）
- 4) COP26 サイドイベントにおける招待講演「Collaboration between university and regions - Climate & Cities Conference by International Universities Climate Alliance (IUCA) 「Measurement and modeling of carbon uptake by land ecosystem」」（加藤知道、令和3年12月6日、聴講者約60名）

【サブテーマ2】

- 1) 公益財団法人大隅基礎科学創成財団の創発セミナー 「光合成のリモートセンシング」（彦坂幸毅） 令和4年2月17日 聴講者約70名

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

(4) マスコミ等への公表・報道等>

特に記載すべき事項はない。

(5) 本研究費の研究成果による受賞

令和2年度コニカミノルタ画像科学奨励賞 両角友喜 作物畑におけるSIF放射伝達モデリングによる光合成遠隔推定 公益財団法人 コニカミノルタ科学技術振興財団 2021年3月

優秀ポスター発表賞 青野葉介・野田響・彦坂幸毅「衛星リモートセンシング時系列データからみた日本のブナ林の晩霜害頻度の変化」 東北植物学会 2021年12月10日

IV. 英文 Abstract

**High-Precision Estimate of Ecosystem-Level Photosynthesis with Solar-Induced
Fluorescence Detected by Satellite GOSAT-2**

Principal Investigator: Tomomichi KATO

Institution: Hokkaido University, Sapporo City, Hokkaido, JAPAN

Tel: +81-11-706-4942

E-mail: tkato@cen.agr.hokudai.ac.jp

Cooperated by: Graduate School of Life Sciences, Tohoku University

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Graduate School of Agriculture, Kyoto University

Faculty of Agriculture, Ryukyus University

[Abstract]

Key Words: Satellite remote-sensing, Ground remote-sensing, High resolution spectral measurement, Single leaf photosynthesis model, 3D radiative transfer model, Carbon cycle

The solar-induced fluorescence (SIF) has been recognized as a desirable proxy of ecosystem-level photosynthesis in large scale and for more accurate detection of carbon uptake by land ecosystem. The Greenhouse gases Observing Satellite (GOSAT) -2 has been recording the SIF at global scale for many years, however, the lack of ground-based validation data reduces its value for accurate detection of terrestrial carbon sequestration with simultaneous use of the computer simulation model of SIF and photosynthesis.

Multiple ground sites for SIF observation have been established over Japan and Alaska, as main sites: Temperate Deciduous Broad leaf forest (Takayama, Gifu), Rice paddy (Tsukuba, Ibaraki), Boreal Evergreen Needle leaf forest (Fairbanks, Alaska), Temperate Evergreen Needle leaf forest (Kiryu, Shiga), Subtropical Evergreen Broad leaf forest (Yona, Okinawa), and as co-operative sites: Wheat field (Histujigaoka, Hokkaido), Bog (Bibai, Hokkaido), Deciduous Needle leaf forest (Fujinomiya, Yamanashi) and Young Deciduous Needle leaf forest (Teshio, Hokkaido). The high resolution spectrum were automatically uploaded onto the data server in Hokkaido University, and processed to retrieve the SIF by spectral fitting method. The monthly averaged GOSAT-2 SIF showed the similar seasonality to the ground observation at Takayama, Tsukuba, Alaska, where the available SIF data were the most, indicating the high accuracy in SIF detection by GOSAT-2.

The combined model of both single-leaf scale SIF/photosynthesis and 3 dimensional radiative transfer processes, named as Forest Light Environmental Simulator (FLiES)-SIF, which represents the 3 dimensional structures of SIF and photosynthesis in forest stand, has been developed from the our previous project (2RF-1601). The single-leaf scale behavior on the relationship between SIF and photosynthesis has been examined by laboratory and field experiments, and the site scale validation conducted in broad leaf deciduous forest in Takayama city and rice paddy in Tsukuba city, Japan, represented well the seasonal and seasonal trends in both SIF and Gross Primary Production (GPP) as similar as observed at an eddy flux tower. Finally, the FLiES-SIF constrained by satellite TROPOMI SIF (NASA, as a delegation of next generation satellite GOSAT-GW) produced the spatial SIF map over Japan at very high resolution of $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ grid system, while the one by GOSAT-2

produced at low resolution of $1.0^\circ \times 1.0^\circ$, which makes us expect the potential use of SIF product from GOSAT-GW for better estimating the terrestrial ecosystem uptake of atmospheric carbon dioxide via photosynthesis, which could lead to accurate estimation on future climate change.