

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：82101

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17873

研究課題名（和文）カラマツ林における太陽光誘起クロロフィル蛍光による光合成推定：モデルと観測の融合

研究課題名（英文）Estimation of photosynthetic activity using solar induced chlorophyll fluorescence in a larch forest: Linkage of modeling and observations

研究代表者

両角 友喜 (Morozumi, Tomoki)

国立研究開発法人国立環境研究所・地球システム領域・特別研究員

研究者番号：40866638

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：森林の光合成推定についての蛍光観測と群落3次元放射伝達モデルを組み合わせた解析を実施することで、森林の空間構造と光合成プロセスに基づく遠隔観測手法を確立した。富士山麓カラマツ林の可視近赤外分光から太陽光誘起クロロフィル蛍光SIFを導出した。生育期の林冠における蛍光は晴天時の日中には $1.0 \text{ mW m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 程度検出され、林冠のCO₂フラックスと相関が示された。カラマツ林の個葉測定と毎木調査に基づきモデルを作成しSIF放射方向の特性の評価を行った。さらにSIF蛍光収率をSIFから求めると高い大気飽差がみられる条件で光合成活性の低下に应答した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

森林の二酸化炭素吸収を考える際に、地上観測による正確な評価に加えて、離れた地点について調べるリモートセンシングによる広域評価は欠かせない。本研究では太陽光誘起クロロフィル蛍光という分光シグナルに着目し、その研究例がほとんどない主要樹種であるカラマツ林において変動要因を放射伝達のプロセスに基づき明らかにすることで、より高度な光学衛星データ解析・検証や全球物質循環モデルの進展に寄与する。北半球や国内の寒冷地に広く分布するカラマツ林の炭素吸収機能の検出技術の発展は気候変動の要因と影響解明において重要である。

研究成果の概要（英文）：I conducted studies about the remote detection of photosynthetic activity in the forest with spectroscopy observation and canopy 3-D radiative transfer model, based on spatial structure and physiological processes of the forest. Solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) was retrieved from visible near-infrared spectral data at a larch forest tower. SIF reached $1.0 \text{ mW m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ at noon and correlated to CO₂ flux. The model was built using leaf measurement and tree census data, to assess the multi-angle responses of SIF. The fluorescence yield, calculated from SIF, responded to photosynthetic down-regulation under the dry condition with a high vapor pressure deficit.

研究分野：環境動態解析

キーワード：リモートセンシング 放射伝達モデル 植物生理生態 クロロフィル蛍光 炭素循環 フラウンホーフ
アー線深度法 林冠構造

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 気候変動の将来予測のために、二酸化炭素(CO₂)等の温室効果ガス放出量の推定精度向上は鍵であるが、生態系 CO₂ 吸収量の変動を探る観測手段は限られている。そこで先進的な高分解能分光放射計で得られる太陽光誘起クロロフィル蛍光(SIF)を用いて陸上植物の光合成による生態系 CO₂ 吸収量(総一次生産量 GPP)をリモートセンシングで推定する。高分解能分光放射計で得られるクロロフィル蛍光(SIF)は植物の光合成における光化学系メカニズムを反映している。広大な落葉針葉樹林(カラマツ)生態系の CO₂ 吸収量変動が注目されるが、これまで SIF 地上観測による評価は行われていない。

(2) また、SIF 観測値は林冠構造の影響を受けることが知られ光合成推定に不確実性をもたらす。複数の植物の集合である群落において SIF は葉や樹木の立体的な幾何構造・太陽の位置や光の入射角・反射・透過、視界内の陰葉/陽葉比や光合成有効放射の吸収率など分光物理特性に依存して変動する。そして群落の吸光特性は光合成における光利用効率にも影響を与える。

2. 研究の目的

SIF を用いて CO₂ 吸収量を精密に解析するためには、3次元放射伝達モデルで実際のカラマツ林の空間的な物理的特性を数値再現し、SIF の時空間的な変動特性を明らかにすることが求められる。そこで本研究では富士北麓カラマツ林において、森林タワーの高分解能分光観測による SIF 変動要因の解明、3次元放射伝達モデル SIF シミュレーションによる SIF の林冠構造依存性の解明、観測データとモデルの融合による SIF による光合成量の推定精度向上を目的とする。陸域炭素循環および気候変動の解明へ貢献することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 高分解能分光観測による SIF 変動要因の解明：山梨県富士吉田市富士北麓 Flux サイト(FHK:35.4 度 N, 138.8 度 E)の観測タワーにおいて 2021 年初頭より実測される分光スペクトルデータ(波長分解能 0.4 nm)から SIF を導出する。同サイトの既存の分光放射計(波長分解能 10 nm)および校正光源とのクロスチェック、関連する植生指数をもとめるプログラムを作成する。さらに SIF の日変動、季節性の解析を行う。基本的に受光した太陽光の大きさに依存して SIF が時系列変動を示すことを確かめる。SIF と葉面積の季節変動を解析し、気象要因(気温・相対湿度・雲量・極端イベント・長雨)との比較から長期的な制限要因を明らかにする。

(2) 3次元放射伝達モデルのシミュレーションによる SIF の林冠構造依存性の究明：林分データ、個葉スペクトルなどのデータを観測、共同研究者(国立環境研・海洋研究開発機構)やデータベースから収集し、カラマツ林の放射伝達モデルを構築する。ローパスフィルタ付きリーフクリップによる定常蛍光スペクトルとパルス変調法(PAM)による最大蛍光収率を現地観測し、モデルのパラメータに取り込む。現実に則した 3次元林冠構造のモデルと 1次元的な構造のモデルの比較、幾何配置(林冠遮蔽率・方位・葉分布)と分光変数(同化・非同化組織・地表スペクトル、蛍光シグナル応答関数)の感度分析から林冠構造にともなう検出される SIF の変動要因を明らかにする。

(2) SIF の 3次元放射伝達モデルの作物圃場への応用：北海道大学の共同研究による札幌羊ヶ丘秋まき小麦圃場の SIF 実測と、データ解析、作物列方位を変数にして葉群上端蛍光の角度依存性及び日内変動の時間依存性についての解析を行う。カラマツ林モデルの開発における知見を相互的に利用する。作物の葉角度に関する文献研究に基づき変数チューニングを実施し、蛍光放射量・放射吸収率・群落離避率の実測に対する再現精度を向上させる。

(3) 観測データとモデルの融合による SIF による光合成量の推定精度向上：富士北麓サイトのフラックス観測との相関解析からの単純な経験的モデルと、林冠構造依存性と光合成シグナルを識別する観測・モデル融合による光合成モデル手法を開発することにより CO₂ 吸収量の見積もりを行う。フラックス観測や既往植生指数による見積もりとの比較から、光合成指標としての精度を向上させる。

4. 研究成果

(1) カラマツ林の 32m タワー上部において観測した可視近赤外分光から太陽光誘起クロロフィル蛍光 SIF を導出した。生育期の林冠における蛍光は晴天時の日中には 1.0 mW m⁻² nm⁻¹ sr⁻¹ 程度検出され、林冠の CO₂ フラックスと相関が示されたが、季節変化を含む長期データセットにおいてとくに高い蛍光値の場合に飽和する非線形の応答が確認された。したがって後述のモデルとの組み合わせによる高度な解析が必要であると認識した。さらに 2022 年夏期に観測地周辺で記録的な高温が見られ SIF から求めた蛍光収率の特別値が大気飽差 15 hPa 以上の乾燥条件において森林の CO₂ 吸収量低下にตอบสนองすることを明らかにし、SIF が時間分解能の高い CO₂ 吸収量推定に利用可能であることを示した。

(2) カラマツ林の個葉測定と毎木調査に基づきモデルを作成し放射方向の特性の評価を行った。2022年にはカラマツと林床に優占するシダの個葉蛍光スペクトル 650-800 nm を取得し、そのスペクトル形状はクロロフィル濃度の指標 SPAD およびレッドエッジ波長指標 REP に応答して変化していることを明らかにした。葉の表側と裏側でとくに 740nm 前後の波長側の比率が大きく異なり、葉内の散乱と再吸収のプロセスの寄与が考察された。カラマツとシダの差も確認され、葉の構造に起因すると考察している。

林冠 SIF 日変化における角度依存性について 1D モデルと 3D モデルを作成し出力を比較したところ、3D モデルで蛍光放出の異方向性がより顕著に表れた。また 3D モデルの中で異なる林床葉面積を与えたところ、林床値が低いほど異方向性は強くみられた。

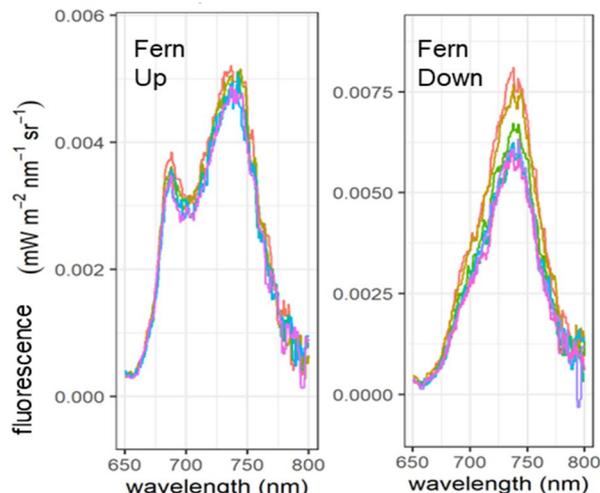


図1 シダ葉の上下面の定常蛍光スペクトル。

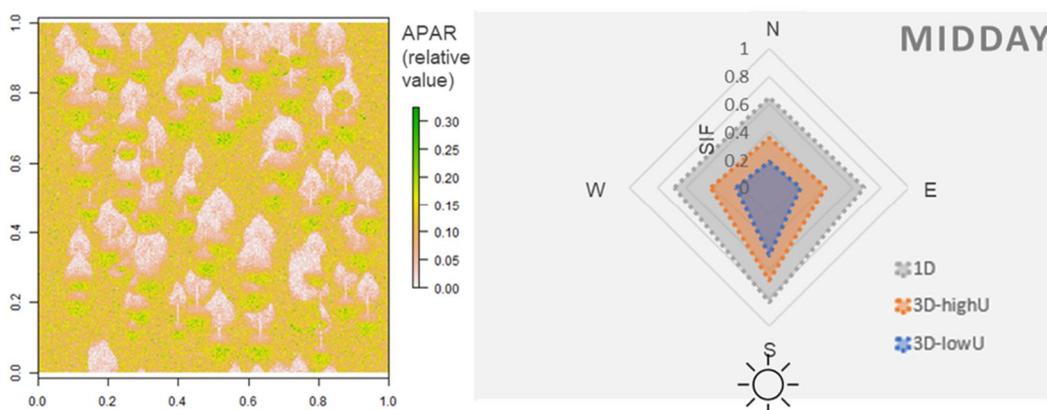


図2 左)3D モデルによる有効放射吸収量分布.南中時に樹幹の被陰領域は北(上)方向に白色で表現される。右)SIF の4方位について斜め 45 度天頂視野角への放射輝度の大きさを示したレーダーチャート図。S 南方向が他より高く、hotspot 効果が表れている。林床が全葉面積の 0.1%を仮定した 3D-LowU モデルは絶対値は小さいが S 方向と他の方向の相対的な差が大きい。

(2) SIF についての 3 次元の群落放射伝達モデルを作物畑に適用し、日変化を再現した。生育中盤の伸長成長後の SIF の日変化は、気温や飽差などのストレス要因とともに太陽方位と作物列の相対角度に依存することが示唆された。モデルでは北西 315° の列方位における SIF 日変化を再現し相関係数 R:0.9 二乗平均平方根誤差 RMSE0.19 を示した。SIF の再現性と放射吸収率 FPAR の再現性の両立が課題であったが、平均 74° の直立葉角度分布を仮定して最適モデルを作成した。列 太陽相対角の SIF 日変化に与える効果は、列間隔と葉のクランピング性にも依存することがモデルで表された。また列 太陽相対角が 0 に近い条件で葉群上端の SIF は低下し、同時に被陰 SIF 寄与率が上昇することも数値化して示した。SIF の日変化や農地における技術開発において本手法の応用が期待される。国際誌に掲載された。

(3) カラマツ林の 3 次元モデル計算結果を用いてルックアップテーブルによる観測幾何補正計算のプログラムを作成した。本研究では、32m タワーの南面の半球視野受光部と、北面の 25° 視野角受光部を持つが、とくに半球測定データの日変動は南中時の後方散乱成分がタワー構造により遮蔽されることから、群落代表値を求めるにあたり観測幾何補正を適用することで CO₂ 吸収速度の推定に適切なスケールが得られた。さらに(1)で記載した高温時の SIF および CO₂ 吸収速度の減少について、光合成生理モデルを基に温度依存性を組み合わせたモデルを適用して林冠 SIF のストレス下における再現性を検証している。

本研究によりユーラシア北東を代表する落葉針葉樹林(カラマツ林)のをはじめとした物質循環機能や気候変動の影響についての SIF による広域評価研究を進展させるための基礎的な知見を獲得することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Morozumi Tomoki, Kato Tomomichi, Kobayashi Hideki, Sakai Yuma, Tsujimoto Katsuto, Nakashima Naohisa, Buareal Kanokrat, Lan Wu, Ninomiya Hideki	4. 巻 339
2. 論文標題 Row orientation influences the diurnal cycle of solar-induced chlorophyll fluorescence emission from wheat canopy, as demonstrated by radiative transfer modeling	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 109576 ~ 109576
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.agrformet.2023.109576	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 両角友喜, 加藤知道, 野田響, 高橋善幸
2. 発表標題 中部日本富士北麓落葉針葉樹林冠上におけるサブナノ分光計測を用いた太陽光誘起クロロフィル蛍光の評価
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2022年大会 (JpGU2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Morozumi T., Noda H., Kato T., Kobayashi H., Sakai Y., Takahashi Y.
2. 発表標題 A modeling study for forest structure effect on Solar-Induced chlorophyll Fluorescence in a relatively sparse canopy of the temperate larch forest in Mt. Fuji, Japan
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Morozumi T., Noda H., Takahashi Y., Kato T.
2. 発表標題 Red and far-red solar-induced chlorophyll fluorescence responding to air temperature, humidity, and leaf growth in a Japanese larch forest site on a spring-summer transition
3. 学会等名 AsiaFlux 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Morozumi T., Noda H., Kato T., Kobayashi H., Takahashi Y., Matsumoto K.
2. 発表標題 Full-spectral observation of leaf-level chlorophyll fluorescence to bridge the gap between tower and satellite observed solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in a temperate deciduous forest and a subtropical evergreen forest in Japan
3. 学会等名 The iLEAPS OzFlux Joint Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 両角友喜, 加藤知道, 野田響, 高橋善幸
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第69回日本生態学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Morozumi T., Kato T., Nakashima N., Kanokrat B., Tanatarakeree K., Kobayashi H., Sakai Y., Tsujimoto K., Noda H., Takahashi Y., Takagi K., Hirano T., Ueyama M., Ono K., Matsumoto K., Akitsu T.K., Nasahara K.N., Murayama S., Muraoka H.
2. 発表標題 Ground based observation of solar induced chlorophyll fluorescence using a fine resolution spectrometer across multiple sites in cool temperate to sub-tropical ecosystems, Japan
3. 学会等名 iLEAPS-Japan 研究集会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 両角友喜, 野田響, 加藤知道, 小林秀樹, 酒井佑禎, 高橋善幸
2. 発表標題 カラムツ林の総一次生産量推定における林冠上端の太陽光誘起クロロフィル蛍光SIFの構造のおよび植物生理学的効果
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2023年大会 (JpGU2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoki Morozumi, Hibiki Noda, Tomomichi Kato, Hideki Kobayashi, Yuma Sakai, Yoshiyuki Takahashi
2. 発表標題 Detection of midday depression with canopy-level solar-induced chlorophyll fluorescence and gross primary productivity: impact of heat extreme events in a deciduous needle-leaved forest
3. 学会等名 AGU23 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 両角友喜, 野田響, 小林秀樹, 加藤知道
2. 発表標題 森林・農地における太陽光誘起クロロフィル蛍光(SIF)観測とモデリングの進展
3. 学会等名 日本農業気象学会2024 年全国大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	加藤 知道 (Kato Tomomichi)		
研究協力者	野田 響 (Noda Hibiki)		
研究協力者	小林 秀樹 (Kobayashi Hideki)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	酒井 佑禎 (Sakai Yuma)		
研究協力者	高橋 善幸 (Takahashi Yoshiyuki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関